

Readout

HORIBA Technical Reports

August 2025 No. **60**

特集 HORIBA のデジタルトランスフォーメーション (DX)

巻頭言 製品志向からソリューション志向への挑戦 中村 博司

特別寄稿 AI の歴史と発展 これからの社会と文明 甘利 俊一

デジタル化で築く“研究室の未来”：日本の強みを世界へ 一杉 太郎

**HORIBA**

<https://www.horiba.com/jp/publications/readout/>



特集 HORIBAのデジタル トランスフォーメーション (DX)

巻頭言

4 製品志向からソリューション志向への挑戦

中村 博司

特別寄稿

6 AIの歴史と発展 これからの社会と文明

甘利 俊一

12 デジタル化で築く“研究室の未来”：日本の強みを世界へ

一杉 太郎

総説

20 HORIBAの“はかる”技術とDX

勝田 敏広

特集論文

25 分析機器の自動化の現状と今後の展望：プラグ&プレイの実現にむけて

ラボラトリ自動化を推進するための通信規格化と業界連携の重要性

上野 楠夫, 石隈 徹

30 The Interaction between “Artificial Intelligence” and “the Safety and Security of Cyber Physical Systems” AI化するクルマにおけるサイバーリスクと安全対策の動向

Paul WOODERSON, Dr. David WARD, 中西 秀樹

36 The Evolving STARS Ecosystem: from Automotive Development to Material, Bio and Healthcare 進化するSTARSエコシステム：自動車開発からMaterial, Bio Healthcare領域へ

James FOWLER, 小山 聡

エネルギー・環境

42 Real Driving Emission排出ガス規制対応に向けたEmpirical Digital Twinの構築と適用

田畑 邦夫, Dr. Phil ROBERTS, Dr. Luke BATES, Steve WHELAN

50 自動車試験における画像解析技術の活用と効率化事例

小松陽二, Rohit Shiv PRASAD, 横田 将史, 道北 俊行

62 燃料電池における生産プロセス最適化探索のための自動実験装置の紹介

吉村 紗矢香, 秋山 久, 西貝 大樹, 舘野 宏志



■表紙写真

撮影：写真家 松井秀雄氏
(二科会写真部 会員)

蓮の開花の知らせを受けて、人里近くの蓮池を訪れました。スズメ達が蓮の葉と花ピラの上で戯れている姿が、まるで幼子達が友と語っている様にも見えて、微笑ましく感じました。

67 PM2.5自動成分分析装置PX-375を用いた大気環境DXの実践例

山口 佳津紀

74 Beyond Monitoring: HORIBA's Digital Approach to Water Quality and Environmental Solutions
水環境問題解決に向けた、HORIBAの水質計測技術とデータサイエンスを統合したDXソリューション

Steve WHELAN, Dr. Luke BATES, James FOWLER, Dr. Brijesh SHARMA, 井上 健太郎, 伊東 裕一

バイオ・ヘルスケア

82 HORIBA MEDISIDE LINKAGE next
～スマートメンテナンスで医療現場を革新～

作田 尋路, 西森 正志

89 データインテグリティ対応ソフトウェアHORIBA PLATINALINK
～製薬業界における分析装置のデータ完全性を担うプラットフォームの開発～

舟田 知弘

94 マラリア撲滅に向けた取り組み：血液検査データの機械学習によるマラリア スクリーニング機能の開発
中谷 仁

先端材料・半導体

100 鉄鋼業界における微量元素分析の自動化と技術的進化
～EMIA（炭素・硫黄）およびEMGA（酸素・窒素・水素）シリーズの役割と展望～

朴 商云

107 リモートモニタリングによるサービスソリューション

橋本 健太

112 ガウス混合回帰モデルを用いたPI（比例積分制御）パラメータの最適化
～圧力式マスフローコントローラ（MFC）D700への適用～

上田 喬之, 樋口 世治, 瀧尻 興太郎, 林 大介

トピックス

118 令和7年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞を受賞

120 第75回 自動車技術会賞「技術開発賞」を受賞

121 第14回 HORIBA Group IP World Cup Gold Award受賞IPの紹介

124 HORIBA World-Wide Network

製品志向から ソリューション志向への挑戦



中村 博司

NAKAMURA Hiroshi

株式会社堀場製作所

シニアコーポレートオフィサー(常務執行役員)

開発本部 本部長

博士(工学)

Senior Corporate Officer

Chief Technology Officer

HORIBA, Ltd.

Ph.D.

中村 博司

HORIBAは、中長期経営計画MLMAP2028における成長戦略の一環として、「製品販売からソリューション販売への移行を加速し、オートメーションやデータマネジメントを中心としたソリューションを通じてビジネスを拡大すること」を掲げています。製造・開発設備のデジタルトランスフォーメーション(DX)は、オートメーションによる省人化だけでなく、データ駆動型のAIを活用した材料開発(マテリアル・インフォマティクス)として多くの産業での活用が進んでいます。一方で、分析・計測機器のDX化やオートメーション化は、まだ十分に進展しているとは言えず、我々にとっては大きなビジネスチャンスが存在すると言えます。HORIBAは、自動車産業向けのDXやオートメーション化に長年取り組んでおり、その歴史を振り返ると、大きく分けて3つの世代があったと考えられます。

第一世代は、業務プロセスの自動化を目的としたオートメーションです。HORIBAは1950年代に排ガス測定機器開発・製造を開始しましたが、その後、世界中で排ガス規制が施行され、試験手順や結果の演算が年々複雑化し、人の手で全てを適切に行うことが困難になってきました。HORIBAは1970年代に米国のInter Automation社を買収し、自動車排ガス試験の自動化に応じて、複数の測定機器を一元管理し、各国の要求に応じたフォーマットで試験結果を出力できるソフトウェアであるTest Automation Systemの提供を開始しました。これは、ある意味でHORIBAにとって外部に向けたデジタル・トランスフォーメーション(DX)の始まりとも言えます。

第二世代は、1990年代。ビッグデータ解析とデータサイエンスによる業務手順の効率化です。この時代は、自動車の機能がほぼ全て電子制御されるようになり、制御パラメーターの数が飛躍的に増加しました。その結果、実験現場ではパラメータの最適化のため実験量が指数関数的に増加し、効率化が求められるようになりました。HORIBAは2000年に英国においてRicardo社およびShenck社との合弁会社SRH社を設立し、Ricardo社が持つエンジン開発における実験計画法DOEの技術をAutomationプラットフォームに統合しました。これにより、効率的な実験計画と統計的解析を通じて実験工数の最適化を提案することが可能となりました。

第三世代は、2000年代。バーチャル化やデジタルツインによる業務革新です。自動車産業ではハイブリッド技術が進展し、エンジンやモーターに加え、バッテリーや燃料電池などの構成要素が増え、システムが複雑化しました。従来の開発手法を用いると、構成要素の増加に伴い評価や調整にかかる時間が増大しました。HORIBAは2005年にSchenck DTS部門を買収し、特に米国ミシガン州Troyのチームからエンジン、バッテリー、駆動系をバーチャル化する技術を習得しました。この技術により、仮想モデルと実際の試験対象を組み合わせることで、物理的な試験対象が揃っていない状況でも評価が可能となりました。バーチャル化は業務手順そのものを変革し、開発業務をフロントロードし、開発期間を劇的に短縮する提案を実現しました。当時は「デジタルツイン」という用語は存在しませんでした。この仮想モデルはその先駆けであると言えます。

このような自動車開発における長年の経験を活かし、オートメーションによる業務プロセスの自動化、データサイエンスを用いた業務手順の効率化、さらにはバーチャル化やデジタルツイン技術を他のフィールドに応用することで、製品販売からソリューション販売への大きな転換が可能になると考えます。「エネルギー・環境フィールド」、「バイオ・ヘルスケアフィールド」、「先端材料・半導体フィールド」の、我々が注力する分野における先端材料開発、データマネジメントは、ますます競争が激化しており、マテリアルインフォマティクスを活用した開発や製造プロセスの革新が求められ続けるでしょう。これらの領域において、分析・計測技術だけでなく、開発・生産業務の自動化や効率化、業務プロセスの革新をソリューションとして提供し、先端材料開発の加速をサポートし、それぞれのフィールドにおける社会的課題の解決に貢献していきたいと考えています。

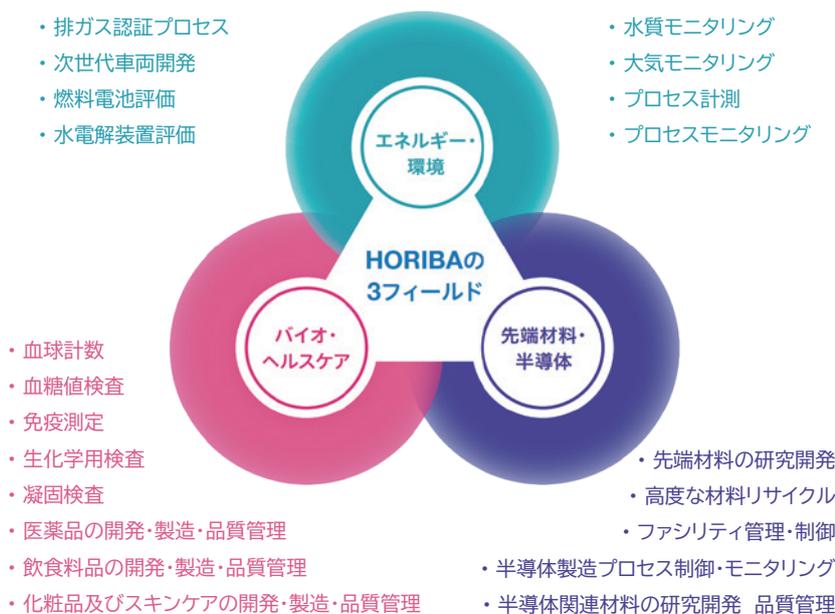


Figure 1 HORIBA's three challenging fields

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

AIの歴史と発展 これからの社会と文明

History and Development of AI, Future Society and Civilization

甘利 俊一

AMARI Shunichi

理化学研究所名誉研究員
帝京大学先端総合研究機構 学術顧問 特任教授
東京大学名誉教授
博士(工学)

Honorary Researcher, RIKEN (Institute of Physical and Chemical Research)
Academic Advisor, Institute for Advanced Study, Teikyo University Specially Appointed Professor
Professor Emeritus, The University of Tokyo
Doctor of Engineering



はじめに

2024年度のノーベル物理学賞は、AIの発展に尽くしたとしてHinton教授とHopfield教授に与えられた。物理学は「物の理」を探究する学問であるが、これが「事の理」ともいべきAIに与えられたことに人々は驚いた。AIは現在も急速度で発展中の技術であり、その社会への影響は大きく、ノーベル賞委員会はこれをいち早く認識して先取りしたのである。正に快挙であった。いま、我々は自身の脳に依拠する自然知能と、人工知能の二つの知能システムを有している。本稿では、この二つの知能の発展の歴史をたどり、両者を比較しながら、AIの影響とそのもたらすこれからの社会、そして文明に思いを馳せたい。

The 2024 Nobel Prize in Physics was awarded to Professor Geoffrey Hinton of the University of Toronto, and to Professor John Hopfield of Princeton University, for their contributions to the development of artificial intelligence. Physics is traditionally the study of the “principle of matter,” so many were surprised that the Nobel Prize was awarded for work associated with AI, which deals more with the “principle of phenomena.” AI is a rapidly developing technology with a significant impact on society, and the Nobel Committee demonstrated foresight in recognizing this trend. It was truly a historic achievement. Today, we possess two types of intelligence: natural intelligence based on the human brain, and artificial intelligence. In this article, I would like to explore the history of both forms of intelligence, compare them, and reflect on how AI is influencing our society and civilization.

AI発展の歴史— 第一次ブーム

AIの歴史をここでかいつまんで述べよう。1950年代後半、コンピュータが普及しだして、研究者が自由に使えるようになった。コンピュータはチューリング機械即ち万能機械であり、数値計算だけでなく論理計算を含む万能性を有する。これを用いれば、人間の知的機能をコンピュータ上に実現できるのではないかという期待が高まった。こうしてアメリカのDartmouthでAIの会議が開催され、McCarthyの呼びかけで、Shannon, von Neumann, Simonなどを含む著名の学者が一か月にわたって議論を重ねた。記号と論理を駆使して、プログラムによりコンピュータ上で知能を実現しようとする機運が盛り上がった。

一方、人間の知的機能は神経回路網が担うが、これは幼児期に始まり学習によって高度化し、完成に至る。いや、学習による進歩は生涯にわたって続く。したがって、神経回路のようなモデルをコンピュータ上に作り、これに学習を施すことによって万能な知的機能が実現できるはずだという考えが現れた。これを提唱したのが認知科学者 Frank Rosenblatt で、この装置をパーセプトロン*と呼ぶ。今日のAIの成功はパーセプトロンを高度に発展させたものに他ならない。

この二つの流れは当時熱狂的に迎えられた。これを第一次AIブームと呼ぶ。しかし、当時のコンピュータの能力では知的機能を実現するにはほど遠く、当初期待された成果は得られず。10年もすれば熱狂は覚めてしまう。そしてAI研究の冬の時代が訪れる。熱狂が再び訪れるのは、1980年代であり、20年の年月を要した。

*パーセプトロンとは人間の脳の神経回路を模したアルゴリズム。複数の入力を受け取り、重み付けして、1つの信号を出力するもの。

AI冬の時代と日本

翻って日本ではどうであったろう。脳の仕組みを研究するのが脳科学の中心課題であるが脳は複雑極まりなく、これを知的機能に結び付けるのは極めて大変である。脳を構成するニューロンやその結合に関するシナプスなどについて、個別の知見は積み重ねられたものの、これが情報、まして知的機能に結び付くにはほど遠い。

そこで情報科学の観点から理論モデルを作り、神経回路網でどのような情報処理が可能か、その基本原理を探ろうという研究が起こる。神経モデルの研究である。日本では、この分野の研究が、生理学研究と手を携えて進んでいった。これには、東大の伊藤正男教授など、先を予見する優れた指導者がいた。

欧米での冬の時代であるが、1960、70年代の日本には、研究予算は初めから少なく、冬の時代だからといってこれ以上予算の削減のしようがない。だから、欧米と違って冬の時代などはなくて、研究者は自分が興味を持ち、大事だと思える研究に没頭できたのである。かくして、この時代に世界に先行する研究が日本で生まれた。

私は多層神経回路網であるパーセプトロンの学習に興味を持った。当時のパーセプトロンでは、多層回路網の最終層のみが学習し、中間層のニューロンは学習しない。もちろん、中間層も学習すべきなのだが、当時はMcCulloch-Pittsニューロンと呼ぶ0、1の2値を取るものを基本として使っていたため、うまい学習法が見つからなかった。

これを克服すべく、私は学習の基本となる確率的勾配降下学習法を1967年に発表し、中間層も学習できるようにした。(Figure 1)これはアナログ型のニューロンモデルを採用したからできたことである。同じ考えが欧米で出るのはそれより20年近く遅れて、第2次ブーム最中のRumelhart, Hintonらの誤差伝搬法を待たなければならなかった。私は、当時やっと導入されたコンピュータを用いて、そのシミュレーションも行い、これがうまく働くことを示した。線形分離可能でない2群のパターンクラスの識別に成功したのである。わたしは、これが世界で最初の深層学習のシミュレーション例であると思っている。

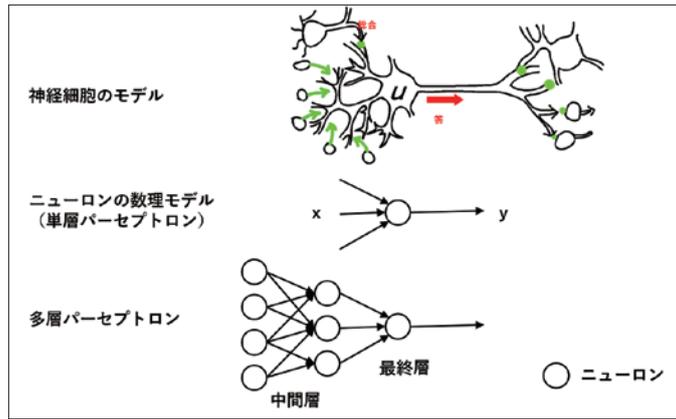


Figure 1 Neural circuit models, mathematical models of neurons (single-layer perceptron), and multilayer perceptions.

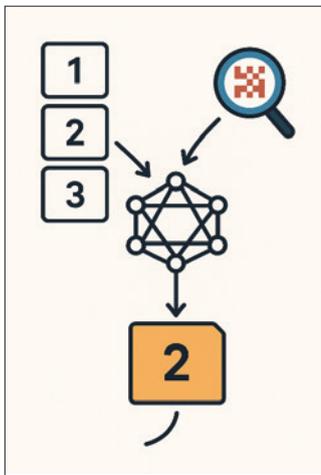


Figure 2 Associative memory model

これを基に、脳のモデルである神経回路網の持つ可能性に魅せられて、連想記憶のモデルを1972年に発表した。(Figure 2)人間の記憶は、コンピュータの記憶とは違う。コンピュータ上では、記憶事項に番地が振られ、事項が正確に書き込まれる。読み出しは番地を手掛かりに行えばよい。しかし人間記憶はもっとあいまいなものである。その仕組みは未だに明らかではないが、関連する情報を基に記憶事項を想起する。記憶事項がそのままの形で正確に記録されているのではなくて、いろいろな事項が関連しながら、思い出す時の鍵パターンとなって、記憶事項を想起する。これは記憶事項を鍵から作り出す作業とでもいうべきであろう。

私は単純な神経モデルにいくつかの記憶事項を貯え、それらが関連する鍵パターンから呼び出され作り出される仕組みを提案した。これは、固定したいくつかのパターンを想起する場合と、時系列のパターンが与えられ、一つのパターンから次々の事項を想起する場合の時系列記憶を含んでいた。驚いたことに、それから10年遅れて、Hopfieldが連想記憶のモデルを発表し、ランダムなパターンを使って記憶容量の問題を論じた。これは素晴らしい研究であるが、そのモデルは私が提唱したものと全く同じ(いや、時系列の想起を含む私の方が一般的)であった。

二つの例を挙げたが、その他に統計神経力学や自己組織化理論なども研究した。この時代の研究は日本では私のものだけではない。中野馨は私に先駆けて連想記憶モデルを提唱しているし、福島邦彦は1978年に、多層神経回路網の畳み込みの仕組みを発表し、これをネオコグニトロンと名付けている。これは今の深層学習でも使われている基礎技術である。

第二次ニューロブーム

1980年代に入り、ニューロモデルの冬の時代は終わりを告げる。その前に、記号と論理のAIが、これまでの知的機能実現の壮大な夢を切り替えて、専門家の持つ膨大な知識をコンピュータに実装し、こういう時にはこうするという専門家の知識を規則として蓄えて、これを基に推論するという、地道ではあるが堅実で実用的なものに切り替えたことがある。これは一定の成果を収めた。

しかし、記号と論理によるAI研究と歩調を合わせてきた認知科学は、これには飽き足らなかった。彼らは方針を大転換し、人間の知能はニューロン上に分散して蓄えられた情報を基に、並列の計算で実現するとし、これをコネクショニズムと呼んだ。このため神経回路モデルの研究に力を注ぎ、折から台頭した物理学者のニューロ研究への参

加やハードウェアの研究などが、従来のニューロモデルの研究と一体となって、大ブームを巻き起こした。

1986年に第一回の神経回路の国際会議が開かれたときに、日本は隠れた先進国であり、私と福島邦彦は招待講演を行った。次いで神経回路網国際学会が結成され、私たちはその創立理事に名を連ねる。後に私は会長に推挙された。しかし大方の期待もむなしく、当時のコンピュータでは、知的機能を実現する有用な成果は生み出せなかった。もちろん、この間に多くの成果がさらに蓄積されはした。しかし1990年代に入り再び冬の時代が訪れた。

第三次AIブーム

冬の時代といえども基礎技術は絶え間なく進歩する。この間、コンピュータの進歩は驚くほどの高度な域に達し、データベースも整備された。2010年代に入ってこれが爆発する。まずは画像認識のコンテストである。ここに深層学習神経回路網が参入し、規則をプログラムとして与える伝統的な方式に対して、学習による方式が圧倒的な性能の差で勝利した。さらに進んで、深層学習の能力は人間の識別能力をも上回るようになる。

それだけではない、AIは囲碁の世界に進出し、あっという間に人間を凌駕する性能を示すに至った。今は囲碁のプロがコンピュータAIを使って勉強に励む時代になった。ここでは深層学習と共に、強化学習と呼ぶ技術が使われている。これは手順を追って局面を一つずつ動かして、最適な結果を得ようとする技術である。囲碁の開発者たちはたんぱく質の立体構造を分子式から予測するのにこの技術を使用し、 α -フォールドと呼ぶ素晴らしい技術を開発し、ノーベル化学賞を受賞した。しかもこの技術は無償で公開され、製薬業界、材料化学業界を始め多くの産業で大変役に立っている。

画像処理だけではない。文章は記号の時系列である。このような時系列の言語情報を処理する大規模言語モデル(LLM)が登場する。これは文章で与えた質問に対して的確に回答してくれるし、異なる言語間の翻訳もこなす。指示に従ってコンピュータプログラムさえも作成する。新技術はこれに留まらない。画像生成などで、プロンプトと呼ぶこちらからの要求に応じて、白色雑音を基にそれを加工して素晴らしい画像を生成する新技術が登場している。(Figure 3)

AI技術の素晴らしい発展

AI技術はいまや驚くべき勢いで発展していて、その性能は日夜進展している。ChatGPTなどの生成AIを使用する人は今や加速度的に増え、学生、研究者はもとより、あらゆる職場に浸透して便利に使われている。

これらの技術の基礎に、かつて日本で提唱された確率的勾配降下法、連想記憶モデル、多層回路の畳み込み技術が使われているが、それらは今や各段に高度化している。ノーベル賞は、その源流に遡るのではなく、1980年代以降の技術に絞りAIの現代の発展に直接に寄与したとして、HintonとHopfieldに与えられた。これはそれなりに尤もであり、日本には、このアイデアを技術として実現し、新しい産業を創るような発想がなく、その実行力もなかった。

AIは今驚くほど大規模化して物量を誇っているが、その消費電力だけでも馬鹿にならない。AIセンターには発電所が必要なほどになってきている。

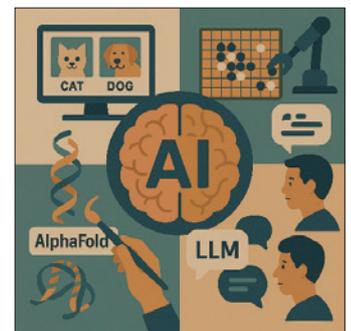


Figure 3 The third wave of AI

AIは今も絶え間なく恐るべき速度で発展している。この勢いを止めることはできない。これは間違いなく社会を変革する。いま、情報系大企業が、なりふり構わず覇権を賭けてAIを推進しているし、国家もこれを大規模に後押ししている。規模では日本はとて追いつけない。では日本の出番はないかという、そんなことはない。今は大規模化が先行し、それに見合う理論が遅れている。もし、AIがここまでの成功を取めた仕組みとその原理が理論で解明されれば、ここまで大規模にしなくても同じような性能のものが実現するはずである。これは省電力で動き、個別生産現場の末端に容易に配置できる。こうした理論や技術は日本のお家芸のはずである。

AIと人間の知能

ChatGPTやDeep Seekなど、多くの大手が発表している大規模言語モデルを使用すると、その性能の素晴らしさに驚嘆する。もちろん、あら探しをすれば、ハルシネーション(幻覚)を引き起こすことも容易である。でも、これらと対話してみると、違和感がなくたいへん便利である。これは人間の知能とどう違うのだろうか。

人間の知能は永い進化の歴史を経て形成された。我々は意識を持ち論理的に推論している。しかし日常会話などでは、言葉が先に出てきて、後からあんなことを言ったか気づくことも多い。必要に応じて自分の発言を後から吟味し、修正することもある。

いやもっと広く、我々は心を持っている。心は喜怒哀楽などを含み、意識もその一部である。我々は心の命ずるままに行動するといつてよい。人間は社会生活を送る。共同作業をするときに、自分のしようとしていることを他者に伝えられれば、便利である。しかしそのためには自分の意図を自分で知らなければならない。これが意識の起源である。また、喜びや悲しみは他人の共感を誘い、社会の構成員としての一体感を強める。

こうした機能をAIが自動的に持つことはないが、人間が植え付けることはできるかもしれない。意識でいえば、AIが今自分が回答しようとしていることを知っていて、その回答に何か違和感を感じれば、ほかの情報を利用して再考することになる。今のAIにはこれではできないが、自分の回答を答える前にこれを吟味し、必要ならば再吟味し精密化することならできるだろう。

もっと広く、人間の持つ喜びや悲しみはどうであろう。AI搭載のロボットは人間と接するとき、人間は心を持ちその動きに応じて行動することを知らなければならない。これを知って、人間の心の動きを予測し、それに自分で喜んだり悲しんだりすることは容易にできる。人間はすぐに感情移入するから、これをもってロボットが自分を理解したとを感じる。これで目的は達成であるが、実はロボットは喜んだり悲しんだりはしていない。冷徹な計算に基づいて行動し、喜んだり悲しんだりする振りをするだけである。喜んでうつつを抜かしたり、悲しみに暮れて仕事に手がつかないなどの馬鹿なことはしない。ロボットは合理的である。心などない方が良いのである。

AIと脳科学

AIは脳科学から数多くのヒントを得て、情報処理の原理的な仕組みを技術の力で実現した。その流れは今後も絶え間なく続き、今後も途絶えることはないだろう。一方、成功したAIは、逆に脳の仕組みの解明に示唆を与える。例えば、学習済みのうまく働く深層回路の構造とそのときの情報の表現を調べ、そこから脳の深層回路における情報の表現についてのヒントを得ることである。さらに進んで大規模言語モデルにおける連想作用を、人の思考のモデルとして研究を進めることも考えられる。

人の思考は柔軟で複雑である。その第一段階では、大規模言語モデルと似たようなことが行われているのかもしれない。しかし人はさらに進む。知的好奇心がこれを牽引する。古来人間は天体の運行を観測し、その不可思議な動きと共に規則性をも知り、これで暦を作った。さらに、日食や月食の予測もできた。これはAIにとっても容易であろう。しかし、Keplerに至って、惑星が太陽の周りを楕円軌道で回っていることを見出した。素晴らしい認識である。

しかし人はこの段階で満足しなかった。Newtonは、何故惑星が太陽の周りを楕円軌道で回るのかを追及し、そのために質量、力、万有引力、速度、加速度などの新しい概念を導入してその間の関係を調べ、ニュートン力学を構成した。世紀の大発見である。いまのAIがこのような飛躍をすることは難しい。

ただ、このような飛躍的な思考は、人間ならば誰にでもできるかと言えばそうではない。一世紀に一人の天才だけが成し遂げる。だがこれが文化として社会に定着し、万人に受け入れられてきた。

AI時代の社会、文明

AIは大変便利である。これを便利に使いこなす術を各人が会得しなければいけない。しかし、使いこなしている心算でいてこれに頼りすぎ、AIを鵜呑みにして自分の思考力を減退させてしまう危険がある。仮に未来社会においてAIが生産の大部分を担い、人間はベーシックインカムを貰い、楽に暮らす社会が現れたとしよう。これで良いのであろうか。こんな社会はとんでもない誤りで、これは人類の自己家畜化に他ならない。

人は仕事が好きであり、これに生きがいを感じる。また遊びも好きである。こうした探求心や好奇心が人類の進化の原動力となり、今に至る技術文明を築きあげた。将来も人間は働くことを選ばずにはいられない。いや、仕事と遊びが一体となって、これに意欲的に取り組む社会が来るはずである。仕事＝遊びとは、たとえばアマチュアサイエンティスト、アマチュア芸術家、アマチュア農芸家、何でもよい。しかし、このような社会に至るまでの道は険しい。

AIの悪用と文明の崩壊

AIはこれから小型化し、産業のあらゆる場面に現れるだろう。しかし、そのもたらす悪しき副作用はすさまじいものがあるであろう。今もこれは軍事技術として使用され、人を殺している。また、AIの悪用も数限りなく現れている。一方、このままでは貧富の格差が限りなく増大する。こうした困難を乗り越えて、新しい社会を築かなければならない。

過去、文明がいくつも栄え、滅んできた。文明は脆弱である。今の文明も危機に瀕していると言わなければなるまい。我々の素晴らしい文明は、まさに進化が起こした宇宙の奇跡である。我々はこれを滅ぼしてはならない。

デジタル化で築く“研究室の未来”：日本の強みを世界へ

Digitalizing the Laboratories: Bringing Japan's Strengths to the World

一杉 太郎

HITOSUGI Taro

東京大学 大学院理学系研究科 化学専攻 教授
東京科学大学 物質理工学院 応用化学系 特任教授
博士(工学)

Professor, Department of Chemistry, Graduate of Science, The University of Tokyo
Specially-appointed Professor, School of Materials and Chemical Technology, Institute of Science Tokyo
Doctor of Engineering



マテリアル研究やライフサイエンス研究における、実験室のデジタル化が急速に発展している。機械学習やロボット技術を活用した自動・自律実験システムの開発が進められており、これにより研究の効率化と新たな発見が望まれる。特に、日本の理化学機器企業やロボット産業の強みを活かし、世界に貢献することが期待されている。研究者と企業が協力し、共通のビジョンを持ってデジタル化を推進することが重要であり、新しい研究スタイルや新材料の創出が可能となる。そして、データの共有、標準化の推進、人材育成などが今後の課題である。

The digitization of laboratories in materials and life science research is rapidly developing. The emergence of automatic and autonomous experiment systems utilizing machine learning and robot technology is expected to improve research efficiency and lead to new discoveries. In particular, the strengths of Japan's scientific instrument companies and robotics industry can be leveraged to contribute to the world. It is important for researchers and companies to cooperate and promote digitization with a common vision, which will enable the creation of new research styles and new materials. Furthermore, data sharing, promotion of standardization, and human resource development are future issues.

はじめに

近年、マテリアル研究(化学、材料、物性研究)やライフサイエンス研究において、機械学習およびロボット技術を活用した手法が世界的に急速に発展している^{[1]-[3]}。これにより、膨大な実験データの収集・解析が可能となり、迅速な発見や、人間には困難な実験への挑戦が可能となっている。研究者が創造性を発揮できる研究環境の構築を進めるとともに、研究人材不足や次世代への技術継承の課題を解決することが強く望まれている。

英国、カナダ、米国、中国、韓国等では、巨額の投資により自動・自律実験技術が発展し、生成AIを活用した材料設計も活発化している。MicrosoftやGoogleも研究に参画し、非常に研究が進展してきた^{[4]-[6]}。2024年のノーベル物理学賞、化学賞は共に機械学習に関係した研究に授与され、Google関連企業の研究者が化学賞を受賞したことは記憶に新しい。

本稿ではマテリアル分野の研究に焦点をあて、機械学習とロボットが実験室で活躍する研究環境について考察する。

マテリアル研究を加速し、環境問題、気候変動、サーキュラエコノミーへ速やかに対応するためには、これらデジタル技術の積極的な導入と活用が必須である。ここで議論する内容はライフサイエンス分野へ適用できる部分もある。最初にデジタル化の動機について述べ、その後、今後の展開について議論する。最後に分析計測機器産業(あるいは理化学機器企業)への期待を述べる。このデジタル化を加速するためには、これら企業と研究者がwin-winになることが重要である。科学の発展に貢献するために何をすべきか考えたい。

実験室デジタル化の動機

最終的な姿について、ビジョンを共有したい。現在のゴールは基盤モデルにデータ・知識が統合され、自在に活用できる知識基盤を構築することである(**Figure 1**)。このビジョンを身近な例で説明する。

現在、生成AIを用いて調査やアイデア出しをすることが可能である。興味があることを対話形式で調査可能であり、非常に高い生産性を私自身が実感する。すでに、ChatGPT

やGemini等、生成AI技術は研究者にとって不可欠になっている。これにマテリアルやライフサイエンスなどの詳細なドメイン知識が加われば、より精緻な回答が可能となり、マテリアルやライフサイエンスの諸問題に適用されていくだろう。そのためには、インターネット上に存在しない独自データをも基盤モデルに統合する必要がある。それにより、他者が得られない知識基盤からの回答が得られる。すなわち、研究者オリジナルな調査結果やアイデアを得ることができる。研究者はこの知識基盤を活用し、研究を進めるという姿である。この「独自データをいかに生成するか」、という点でデジタル化(機械学習とロボットを活用した自動・自律実験システム)が鍵となる。その実験システムは人間の勘・コツ・経験と組み合わせられ、人間にしかできない実験と共生するというビジョンである。

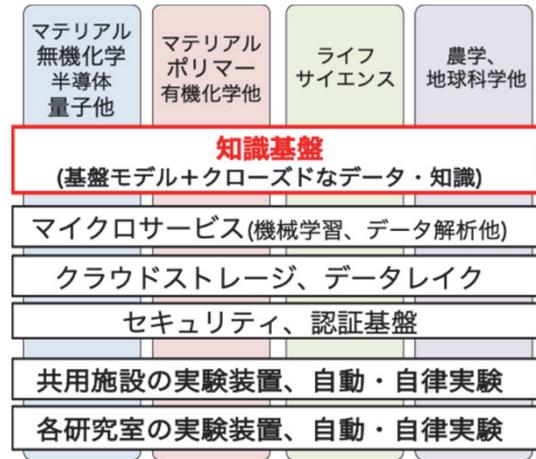


Figure 1 Future Vision: Integrating Data into the Knowledge Baselight-duty-chassis-testing/

デジタル化の必要性は、知識基盤の構築だけではない。ここでは二つの観点から議論する (Figure 2)。一つ目が研究費を有効活用するという観点である。自然科学に関わる研究において、どの研究機関、どの国も研究費を大きく二つに分けると、人とモノへの投資となる (Figure 2左)。人への投資とは、研究者・技術職員・事務職員の雇用や、国際交流のための経費、研修費や出張費、論文出版費や情報のオープン・クローズ戦略に関わる費用が該当する。モノへの投資は実験装置代やそのメンテナンス費用、光熱費や場所代、建物の維持費としよう。

このような論理であれば当然、モノにかけられる費用が少なくなる。モノにかけられる費用を抑えつつ研究成果を最大化するためには、実験装置共用促進や稼働率の向上が急務である。実験装置共用については、すでに日本では政府主導で事業が進められている。汎用実験装置を各研究者が保有するのではなく、共用(シェアリング)するという考え方である。私自身も共用の効果を実感することがあり、研究費に加え、実験スペースの有効活用と装置稼働率の向上が進むと実感している。

日本の現状を考えると、今、人への投資を増やさねばならない。研究者や技術職員の待遇改善、国際交流の促進、技術職員が研究者と伴走する体制作り等を進めなければ、自然科学[マテリアル(化学・材料研究)やライフサイエンス]に人材が集まらないことを危惧する。これはすでに起きている。情報産業の賃金は高く、優秀な人材はそちらの方を志向し、人材の偏りが生じ始めていると認識している。特に日本においては、大学における人気が高い学科や専攻を見れば明らかである。大学入試においては倍率や偏差値として数字に如実に現れる。自然科学研究の発展のために、人にますます投資して研究環境を整備し、成果創出につなげなければならない。

その実験装置の稼働率向上が二つ目の論点である (Figure 2右)。稼働率向上は、経営の視点(ROI: Return on Investment)から対応が急務である。1週間には168時間しかない。勤務時間は平日5日間×8時間で40時間である。すなわち、人間の活動時間は1週間の1/4程度である。もしこの時間、実験装置もフルに活用したとしても、一週間の3/4は装置を利用していないことになる。実際には、40時間フル稼働している実験装置は少ないので、装置の休眠時間は一週間の3/4以上である。我々の実験室を見ても、これは真であり、投資効率が低いことを実感する。したがって装置の稼働率を高める必要がある。

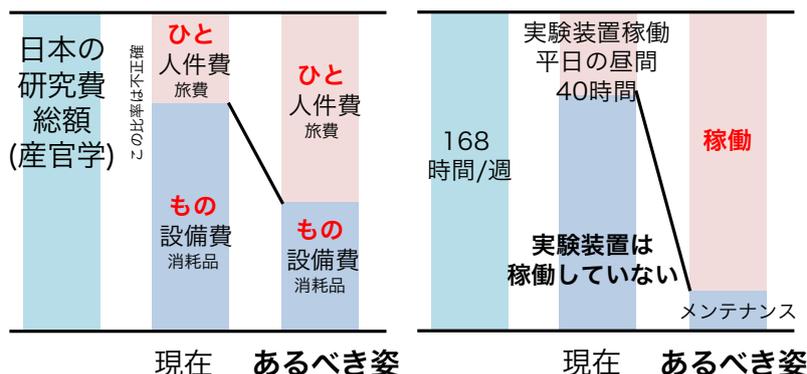


Figure 2 Allocation of research funds and time

以上より、自動・自律実験は装置稼働率を高めるためにも必須である。その装置を共用すれば、さらに装置稼働率を高められる。また、現在、人口減少への対応や働き方改革が急務である。自動・自律実験は、実質的な研究時間の増加とフレキシブルな働き方も実現する。そして、データを活用して新発想を得るためのツールとなり、研究者の創造性を最大限に発揮させる。

ここで重要な問題提議がある。装置稼働率が高まり、共用が進むと、理化学機器の出荷数は減るのではないか？という疑問である。つまり、理化学機器企業としての経済合理性はどう考えるかという点である。それについて、最終章で議論したい。ただ、これは杞憂であり、販売台数も売り上げも増えると考えている。

筆者の具体的な取り組み

筆者らは自動・自律実験システムの開発を進めてきた^{[7]-[9]}。モジュール化された実験機器を接続し、機械学習とロボット技術を最大限活用した自動・自律実験システムを構築・実証した(Figure 3)^{[10],[11]}。

合成装置(スパッタ成膜装置)と各種計測・分析装置(X線回折, ラマン分光, 紫外可視分光, 走査型電子顕微鏡, 電気特性評価等)を接続し、得られるデータを自動的に解析する。(株)堀場製作所, 日本電子(株), (株)リガク, (株)島津製作所, (株)デンソーウェーブ, (株)パスカル等, 多くの企業の協力を得た。2023年には「JASIS 2023」にてシステム詳細を公開した^[12]。

本システムでは、異なる実験機器から出力されるデータ形式を統一している。2024年5月にJIS規格に登録されたMaiML形式^[13]で出力し、クラウドにデータを保管した。さらにクラウド上での簡易な解析を実現している。現在、東京大学のMDX(データ活用社会創成プラットフォーム)にデータを保管している。そのデータを解析してバイズ最適化を用いた自律実験も実証した。

世界における自動・自律実験システムの開発を背景として、我々は日本ファインセラミックス協会(JFCA)と日本分析器工業会(JAIMA)と共にデジタルラボラトリー研究会^{[14],[15]}を立ち上げた。民間企業40社以上が参画しており、現在も加入企業が増加中である。研究会では最新技術動向の情報交換や見学会, 勉強会を開催している。

さらに、そのメンバー企業のうち、材料や分析機器メーカーを含む8社と協働ラボを本郷キャンパスに設置した^[16]。本プロジェクトは、研究を自動化・自律化するためのデジタル技術(機械学習とロボット技術)を開発し、新材料の創出スピードを飛躍的に高めることを目指している。特に、セラミックス材料や粉体を原料とする材料の合成・焼成・特性評価・分析の全自動化と自律化は、現時点で世界的に前例がなく、技術的課題も多い。したがってチャレンジである。

日本の強みの活用

日本政府, 研究者, 企業が取り組むべき課題と展望に入る前に、日本の強みを整理する。海外勢が巨大投資を続ける中、日本の強みを最大限活用すれば、世界に貢献することが可能と考える。日本の強みをまとめる。

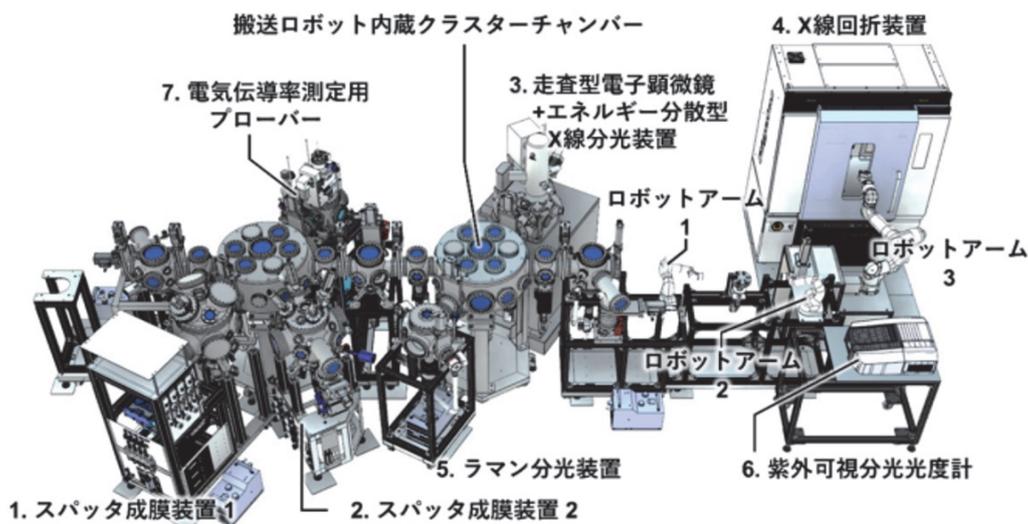


Figure 3 A synthesis system (sputter deposition system) and various measurement and analysis devices [X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, UV-visible spectroscopy, scanning electron microscope, energy dispersive X-ray spectroscopy] are connected. The shape of the sample holder and the communication protocol when each module is connected are available on the Internet.

強い理化学機器企業

マテリアル分野では、日本の理化学機器企業は存在感がある。測定精度や分解能、ソフトウェアの使いやすさ、きめ細かい対応、対応までのスピードの速さに加え、データ利活用の容易さや機械学習を活用した計測等を強みとすれば、データ駆動科学を活用した新たな研究の進め方について、世界を先導することが可能である。理化学機器企業が強いと、研究の小回りが効いて迅速に実験対応できる上、最先端の実験機器が使える。理化学機器企業の協力なくして研究で勝てる気がしない。理化学機器企業は、デジタル化に強い企業として、世界で確固たるブランドイメージを築くことができるだろう。

強いロボット産業

世界の産業用ロボットの約半分は日本製である^[17]。その知見を最大限活用することが考えられる。ロボットシステムインテグレーターも国内に多数あり、ロボットの活用技術も日本に揃っている。

マテリアルに関わる勤・コツ・経験

マテリアル分野の研究者層は厚く、そのドメイン知識を最大限活用することが極めて重要である。マテリアル関連産業も強い。

活発な産学連携

マテリアル分野では、他国に比べて産学連携がより進んでいる。

今後、取り組むべき課題と展望

以上のような自動・自律実験システムを活用した研究開発の加速について、政府のマテリアル革新力強化戦略^[18]に、「スマートラボラトリ化(AI, IoT, ロボット技術等を駆使した、自律的な研究手法の開発と実装化)の推進」が明記されており、政府も後押しする予定である。これは2026年よりはじまる第7期科学技術・イノベーション基本計画の骨子となる戦略である。

自動・自律実験システムを活用したデータ駆動科学^[19]を推進するために、産学官の連携が重要である。今後取り組むべきことをまとめる。

自動化・自律化実験の適用範囲の拡大：モジュール化と標準化

自動・自律実験システムを「誰でも構築できて使える状況(民主化)」にすることが重要である。そのためには各種実験モジュールを準備し、それを自在に組み合わせて研究を行うための環境整備が必須である。各モジュールがPlug and Playで自動実験システムを構築できるよう、世界と協

調して標準化(装置接続法、試料ホルダや試料サイズ、通信プロトコル等)を進める必要がある。日本が主導して世界と共に国際標準や規格を策定することにより、グローバル市場での競争力を大きく高めることができる。モジュール化はコストダウンにもつながる。理化学機器企業の協力が不可欠である。

臨機応変に実験状況に対応するロボットの開発と活用

実際の研究環境においては、人間の複雑な動作や複雑な実験フロー、多様な形状・種類の試料を取り扱う必要がある。さらに、実験の状況変化にリアルタイムで臨機応変に対応することが重要である(「匠の技」と定義)。これらが、工場の製造現場と研究現場の異なる点である。加えて、ロボットによる自動・自律実験を実装するためには、言語化されていない「匠の技」をデジタル化するシステム開発や、人間の視覚や言語に基づいたロボット制御技術が必要である。そのため、研究者の経験や勘と、ロボットによる「匠の技」を融合させた新しい研究手法を構築する必要がある。これは**ロボット技術としても最先端の技術**である。理化学機器にも、ロボットが作業しやすいような設計が要求される。

人材育成の強化

実験家・理論家としての専門知識を有しながら、情報科学やロボティクスなどのデジタル技術も自在に使いこなす、「マテリアル×情報科学×ロボティクス人材」の育成が急務である^[20]。マテリアル研究者に対して機械学習やロボティクスの基礎知識を提供し、自動・自律化に関する課題設定と解決策立案能力を涵養することが望まれる。

大学に加え、企業での人材育成も急務である。学会や業界団体が主導して研修やカリキュラム開発を進め、協調領域としての人材育成が望まれる。

データのデジタル化と共有の促進

実験データやシミュレーションデータをデジタル形式で記録して一元管理することにより、データの利活用性を高められる。データフォーマットの標準化を進めるとともに、クラウド技術を活用して異なる研究機関や企業とのデータ連携をスムーズに実現することが望まれる。

研究成果の信頼性と再現性を高めるには、データ管理の統一基準が必須である。データのオープン化やガイドラインの明確化を進め、研究コミュニティ全体の知見を集合させることにより、新たな発見や価値創造を加速できる。

システム化技術の開発 標準化と国際的連携の強化

誰でも自動・自律実験システムを構築して利用しやすくする、つまり自動・自律実験の民主化には、柔軟性と拡張性に優れたマイクロサービスアーキテクチャが不可欠である。マイクロサービスはインターネット関連では標準的なアーキテクチャであり、モジュール化と疎結合(構成要素間の依存性が小さい結合)がキーワードである。各モジュールを指揮するオーケストレーションソフトウェアを中心としたレイヤー構造とする(Figure 4)。これにより、実験装置や機械学習アルゴリズムなどが連携し、実験計画に基づいて自動的・自律的に実験を進めることが可能になる。実験データは統一形式でデータレイクに保管され、解析マイクロサービスと連携して活用される。

マイクロサービスを実現する際には、API(Application Programming Interface)を整備し、国際的に連携しつつ、オープンに進めることが重要である。日本から積極的に規格の提案・策定や実証に関与して行くことが望まれる。そのためにも、海外の研究ネットワークとの協力体制を強化し、グローバルな視点での研究開発を推進することが重要である。そのために、次に記す拠点が必要となる。

大規模研究資金の長期的投資：拠点形成と国際的なパートナーシップの構築

海外の大規模プロジェクトと対等に議論し、意見交換するためには、十分な研究資金を確保して拠点を形成することが必須である。その拠点は、装置共用を進める部門と、様々な自動・自律実験システムを産学連携で構築してドメインの研究を進める部門からなることが考えられる。

前者は、「共用施設」として自活することが重要である。材料メーカーが安定ユーザーとして利用し、高い稼働率を維持する。そして、技術職員を中心とした運営とし、技術職員が実験装置にかかりっきりになるのではなく、自動・自律システムにルーチンワークは任せ、技術職員は依頼者と向き合う。このような施設は経営感覚を持ったマネジメントにより運営され、黒字化することが期待される。装置更新については、国からの支援は必要であろう。

そして、後者のドメイン研究部門では、マテリアル研究者、ロボット研究者、情報学者、マテリアルズインフォマティクスの研究者が「一つ屋根の下」に集い、研究開発を進める拠点であることが望ましい。“世界の頭脳循環”に入るためにも、世界に対してvisibleとなる必要がある。この拠点は、新しい研究開発方法の開拓を進め、新ドメイン知識を創出することがミッションとなる。デジタル化のノウハウとデータが蓄積した拠点である。その際、理化学機器企業の技術力を高める方向性で技術開発することが望ましい。つまり、理化学機器企業が新しい取り組みをする際にテスト場ともなる。この拠点が「研究開発の進め方」に変革をもたらす原動力となることが期待される。

そのような拠点は、データ共有や標準化促進の役割を持ち、人材育成やデジタル化技術の相談窓口になることも期待される。先進的な研究機関との共同研究や技術交流を通じて最新の知見をいち早く取り入れ、日本独自の強みを海外へ発信する拠点が必要である。

この拠点の実現に向けて、政府や産業界、学术界が連携して長期的ビジョンに基づいた投資を行うことが不可欠である。研究環境のデジタル化は今後ますます進むのは確実であり、持続的な研究開発基盤を築き、新技術の社会実装を

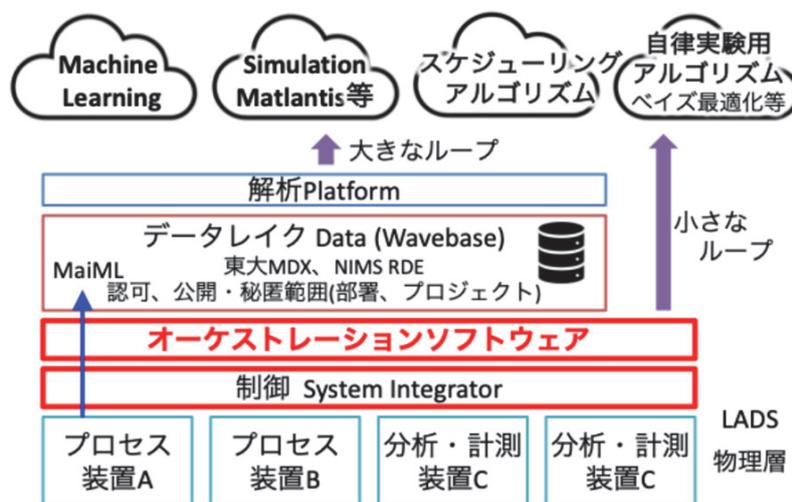


Figure 4 Layered structure of the system. It is a collection of microservices. Below the orchestration software is the physical layer.

加速することが急務である。デジタル化が遅れると、若手研究者が再び「竹槍で戦う」状況になることを強く危惧している。

今、半導体業界では、TSMCが世界的な共有基盤になっていると言って良い。世界から依頼されてものづくりを行い、そこでノウハウとデータが蓄積し、さらにプロセスに関する予測精度が上がり、ものづくりにフィードバックされる (Figure 5)。世界はTSMCに頼らざるをえないほどの拠点となった。このようなモデルが半導体以外に広がるのは時間の問題だろう。日本が勝てるドメインに集中する拠点形成が強く望まれる。

理化学機器企業としてのチャンスと期待

スマートフォンやインターネット等、デジタル化の本質はシェアリングと言われる。たしかにそれら技術で自動車や自転車のシェアリングも進んでいる。また、中古物品の売買も広い意味でもシェアリングといえよう。実験装置もこの大きな流れに乗って、すでに述べたような装置共用が進むと、実験装置ビジネスの市場規模が大幅に拡大することは望めないように見える。また、自動化・自律化は始まったばかりで、その開発コストに見合う販売台数をいまずぐには見込めない。このような中、どのようにして研究者と理化学機器企業がwin-winの関係になれば良いのだろうか。いくつか考察を進める。

1. 共用が進むのは、幅広い実験のうちのほんの一部である。したがって、販売台数が減るというインパクトは限定的である。装置自身が自動になって使いやすくなるので、多くの人が活用できるようになる。コストダウンが進めば販売台数が増えると考えられる。

2. 新たな市場を創り出す。スタンドアローンの装置ではなく、プロセス装置との融合という形で分析・計測装置の販売台数は増えると考えられる。研究者はなるべく多くのデータを取得したい。特に、物質合成プロセス中や装置の状態について精密にデータを取得し、最適化やメカニズム解明(プロセスインフォマティクス)を進めたい。したがって、オペランド分析計測(その場観察)に価値がある。そこに市場拡大のチャンスがある。

3. 単なるモノ売りからの脱却。本来、研究者は“装置”が欲しいのではなく、それから出る“データ”が欲しい。データを出力するという点に価値がある。メンテナンスと含めて、データ数に応じた課金が考えられる。

4. システム化で利益をあげる。今後、ラボシステムインテグレータが極めて重要になってくるだろう。研究者の要望を聞き、実験システムやデータ処理システム全体を構築するビジネスである。そのシステムの維持と運用もビジネスとなる。例えば堀場製作所はエンジンの排気ガス評価についてすでにラボシステムインテグレータになっている^{[21],[22]}。その技術はまさに多くの実験室の構築に活用できる。これは従来の「自動システムのインテグレータ」には実現できないビジネスである。ドメインの知識が必須だからである。分析計測機器企業がしっかりとドメイン知識を得ることにより、ラボシステムインテグレータになることが期待される。



Figure 5 Building a research infrastructure that the world can rely on

5. ハイエンド機と汎用機のバランスが常に必要である。汎用機であってもユーザーに選ばれる仕掛けが必要である。ハードウェアの販売だけにとどまらず、ソフトウェア、サービスを含めたエコシステムの構築が一般的な手法である。アップルやNVIDIAのビジネスモデルが参考となる。また、ライセンスも含めた多角的な収益構造が重要である。

6. 人間フレンドリーからロボットフレンドリーにした設計が重要になる。人間が実験をしないと考えると、全く新しい実験が考えられる。新たな実験ワークフローの実現には、理化学機器企業の協力が必須である。人間の置き換えは単なるdigitizationにすぎない。真のデジタル化は実験自体の変革であり、ワークフローの変革である。これが本当のdigitalizationでありdigital transformationである。これは全く新しい市場となる。

筆者としては日本の理化学機器企業が世界のデジタル化を牽引し、世界中のラボシステムインテグレーションを担い、世界に貢献することを願っている。そのためには、研究者と理化学機器企業が同じビジョンを共有し、win-winとなる関係を築くことが必須である。そして、理化学機器メーカー、材料メーカー、ロボットメーカー、学界、政府が一体となってデジタル化を進めることが重要である。日本は産学連携が活発である。その枠組みに協調領域として多くの企業の連携を望む。

おわりに

筆者が世界を見渡すと、ハードウェアの面では日本にはアドバンテージがあると考えている。それもひとえに、理化学機器企業のおかげである。今後、知能化した自動実験モジュールを構築するためには、実験プロセス(ドメイン知識)を詳細に理解することが必須である。実験プロセスについて深く知っているからこそ、本当に役立つ実験モジュールを作ることができる。つまり、理化学機器企業は計測に詳しいのは当然として、ユーザーのドメイン(マテリアルやライフサイエンス、農業や地球科学、宇宙などの分野)にもっと踏み入り、研究者の勘・コツ・経験も踏まえた実験機器・理化学機器の開発が求められる。それができず、スタンドアローンの汎用機に頼るビジネスであれば、廉価な実験機器にポジションをいずれとられてしまう。いつの世も、やはり常に人間の創意工夫が主役である。理化学機器開発にも研究者・技術者のオリジナリティを組み込んだ製品開発、およびシステム開発が望まれる。

最後に、この研究開発の進め方の意義を述べたい。新たな研究スタイルは単に効率化向上を目指すだけではない。膨大な量のデータをもとに俯瞰的な視野を獲得し、全く新しい実験ワークフローを生み出すことにより、新たな学理の構築や新物質の発見を可能とすることが期待される(Figure 6)。新たな発想を得ることこそが真の狙いである。理化学機器企業の力が必要である。研究者と共にぜひ前に進めましょう！



Figure 6 Bird's-eye views open up new directions and reveal new areas to explore.

謝辞

本稿を準備するのにあたり、様々な議論をしてくださった皆様に御礼申し上げます。また、宮脇直也さんには原稿の整理、レファレンスの確認等で大変お世話になりました。

参考文献

- [1] N. Ishizuki, R. Shimizu, and T. Hitosugi, "Autonomous experimental systems in materials science," *STAM Methods*, 3, 2197519 (2023).
- [2] M. Abolhasani and E. Kumacheva, "The rise of self-driving labs in chemical and materials sciences," *Nature Synthesis* 2, 483–492 (2023).
- [3] G. Tom, S. P. Schmid, S. G. Baird, Y. Cao, K. Darvish, H. Hao, S. Lo, S. Pablo-Garcia, E. M. Rajaonson, M. Skreta, N. Yoshikawa, S. Corapi, G. D. Akkoc, F. Strieth-Kalthoff, M. Seifrid, and A. Aspuru-Guzik, "Self-Driving Laboratories for Chemistry and Materials Science," *Chem. Rev.*, 2024, 124, 9633–9732 (2024).
- [4] A. Merchant, S. Batzner, S. S. Schoenholz, M. Aykol, G. Cheon, and E. D. Cubuk, "Scaling deep learning for materials discovery," *Nature*, 624, 80–85 (2023).
- [5] H. Yang et al., "MatterSim: A Deep Learning Atomistic Model Across Elements, Temperatures and Pressures," *arXiv*: 2405.04967 (2024).
- [6] C. Zeni et al., "A generative model for inorganic materials design," *Nature* 639, 624–632 (2025).
- [7] R. Shimizu, S. Kobayashi, Y. Watanabe, Y. Ando, and T. Hitosugi, "Autonomous materials synthesis by machine learning and robotics," *APL Mater.*, 8, 111110 (2020).
- [8] 東京工業大学, "自律的に物質探索を進めるロボットシステムを開発—物質・材料研究開発の進め方について革新を起こす—," 東工大ニュース (2020).
<https://www.titech.ac.jp/news/2020/048276>
- [9] S. Kobayashi, R. Shimizu, Y. Ando, T. Hitosugi, "Autonomous exploration of an unexpected electrode material for lithium batteries," *ACS Materials Lett.* 5, 2711–2717 (2023).
- [10] K. Nishio, A. Aiba, K. Takihara, Y. Suzuki, R. Nakayama, S. Kobayashi, A. Abe, H. Baba, S. Katagiri, K. Omoto, K. Ito, R. Shimizu, and T. Hitosugi, "A digital laboratory with a modular measurement system and standardized data format," *Digital Discovery* (2025).
- [11] 東京大学, "欲しい物質を自動的・自律的に合成する—デジタル技術と自動化・自律化で切り拓く化学・材料研究の新時代—," 東京大学 大学院 理学系研究科・理学部 Press Releases (2025).
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/10741/>
- [12] 東京工業大学, "データ・ロボット駆動科学を推進するデジタルラボラトリーの開発—新しい研究開発の進め方で世界をリードする—," 一杉研究室ホームページ (2023).
https://solid-state-chemistry.jp/pdf/JASIS_2023_press-release.pdf
- [13] 日本分析機器工業会 (JAIMA) と経済産業省が策定した共通データ形式。Measurement, Analysis, Instrument Markup Languageの略。共通のフォーマットを使用することにより、複数の異なる機器からのデータの変換を容易とし、データの統合と利活用を推進する。2024年5月にJIS公示された (JIS規格番号 K0200)。
- [14] 日本ファインセラミックス協会, "デジタルラボ (仮称) 研究会の発足について," (2023).
<https://www.jfca-net.or.jp/contents/view/4672>
- [15] デジタルラボラトリー研究会のホームページ
<https://digital-laboratory.jp/>
- [16] 東京大学, "欲しい物質を自動的・自律的に合成する—デジタル技術と自動化・自律化で切り拓く化学・材料研究の新時代—," 東京大学 大学院 理学系研究科・理学部 Press Releases (2025)
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/10741/>
- [17] International Federation of Robotics, "World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas," IFR Press Room (2023).
<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>
- [18] マテリアル・イノベーションを創出するポテンシャルである「マテリアル革新力」を強化するための政府戦略を、AI、バイオ、量子技術、環境に続く重要戦略の一つとして、産学関係者の共通のビジョンの下で策定された。
<https://www8.cao.go.jp/cstp/material/material.html>
- [19] 機械学習を活用し、大量の実験データから潜在的なパターンや傾向を見だし、新材料開拓と革新的プロセス開発を進める。従来の研究手法では得られにくい知見を引き出し、材料特性を最大化する。新しいアイデアを人間が着想するための方法論を開拓していく。
- [20] 一杉太郎編, "マテリアル×機械学習×ロボット (現代化学増刊 48)," 東京化学同人, (2024).
- [21] 日経サイエンス 2024年12月号2ページ
- [22] 株式会社堀場製作所, "「好奇心」武器に新たな領域へ—脱縦割り・異分野融合でタッグ組む," HORIBA Talk (2025)
<https://www.horiba.com/jpn/company/about-horiba/horiba-talk/omoshiro-okashiku-science/>

HORIBAの“はかる”技術とDX

HORIBA's “Analytical and Measurement” Technologies and Digital Transformation (DX)

勝田 敏広

KATSUDA Toshihiro

DX (Digital Transformation)の起源は、2004年にスウェーデンのウメオ大学のエリック・ストルターマン教授が「情報技術の浸透が、人々の生活をあらゆる面でより良い方向に変化させること」と定義した概念が始まりと言われている。世の中で使われているDXの定義は複数あるが、大きくはデジタル技術を手段として活用することで、ビジネスモデルや業務プロセスを根本的に変革し、業務効率化や生産性向上、新たな価値創造などを実現することと言える。HORIBAは、分析・計測技術を用いてDX実現に不可欠なデータを生み出すだけでなく、IoTやAIといった進化するデジタル技術を活用し、様々なDXソリューションを生み出しており、本稿ではその概要を述べる。

The origin of “Digital Transformation (DX)” is said that Professor Erik Stolterman of Umeå University in Sweden defined the concept as “The digital transformation can be understood as the changes that the digital technology causes or influences in all aspects of human life” in 2004. Although the definition of Digital Transformation commonly used is not fully consistent, it can be said that the improvement of operational efficiency and productivity, creating new value, and so on are realized by fundamentally transforming business models and business processes with utilizing digital technology as a tool. HORIBA provides not only generating essential data for Digital Transformation, but also creating various solutions for customer’s Digital Transformation utilizing digital technologies such as IoT and AI. This article describes overview of these solutions.

はじめに

HORIBAのはかる技術は、電気化学を使用したpHメーターに始まり、赤外線やX線などを用いた様々な分析・計測技術を蓄積しながら、液体、気体、固体へと分析対象を拡大してきた。現在では「赤外線計測」、「流体制御」、「粒子計測」、「分光分析」、「液体計測」というコア技術を有し、それらを組み合わせて様々な分析・計測機器を生み出している。コア技術を用いた機器の開発だけでなく、お客様のご要望に柔軟に対応するサンプルハンドリングやオートメーション、データマネジメントやデータサイエンスなどの技術を活かし、お客様の業務効率化や生産性向上、新たな価値創造に貢献するHORIBA独自の「ほんまもん」のDXソリューションを創出・提供している (Figure 1)。

多様な顧客ニーズと技術を有機的に結合して創出する
HORIBAの「ほんまもん」のソリューション



Figure 1 HORIBA's "HONMAMON"* solutions
https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Company/Investor_Relations/IR_Library/HORIBA_Report/20250514_HR_jp.pdf

*HORIBA webサイト。“ほんまもん”って、どういうこと？ | HORIBA Our Future[オンライン]。2024年
<https://www.horiba.com/our-future/ja/honmamon/>

お客様とともに歩んできたHORIBAのDXソリューション

HORIBAのDXソリューションは、DXという言葉がなかった1970年代にまで遡る。HORIBAが自動車排ガス測定装置「MEXA」の初号機を販売したのは1964年だが、その後、排ガス規制が始まる中で細かなワークフローや試験手順が示され、人の手で正しい手順で計測するのは困難になってきたため、現場からも自動化が要求されるようになった。このようなニーズに対応するため、1970年代には排ガス計測機器だけでなく、様々な業務プロセスを自動化するソフトウェアも組み合わせたトータルソリューションを提供するようになり、これがHORIBAとしてのDXソリューションの第一世代と言える (Figure 2)。



Figure 2 Light-Duty Chassis Testing
<https://www.horiba.com/jpn/automotive/applications/emissions-performance-and-durability/exhaust-emissions/light-duty-chassis-testing/>



Figure 3 Total Automation of Elemental Analyzers for Carbon and Sulfur
<https://www.horiba.com/jpn/technology/automation/>

また自動車向けの排ガス以外の計測事業でも、分析作業の自動化・省人化には40年以上の実績があり、例えば鉄鋼中の微量元素分析アプリケーションでは、作業の安全性を高めたい、作業にかかる手間や工数を減らしたい、人的要因による精度への影響をなくしたいといったニーズに応えるべく、分析前処理や前後作業工程を含めた分析の自動化や、生産ライン等へのオンライン分析を導入して省力化を実現してきた(Figure 3)。

このようにHORIBAでは、システムインテグレーションやオートメーションの技術も活用しながら、現在で言えばDXと呼べるようなソリューションを、長年お客様とともに取り組んできました。

デジタル技術の発展と多様なDXソリューション

2000年以降になると、情報技術やIoT、AIといったデジタル技術の発展に合わせ、新たなご提案として多様なリモートソリューションを生み出してきた。装置のネットワーク化やIoT、クラウドの活用により、医用機器向けの総合保守サービス支援システム「HORIBA MEDISIDE LINKAGE」(Figure 4)および、水質監視装置向けのクラウド型メンテナンスサービス「HORIBA AQUA LINKAGE」を立ち上げ、リモート監視による装置の安定稼働のみならず、現場の業務負荷軽減や課題解決の迅速化、働き方改革などに貢献してきた。



Figure 4 Total picture of [HORIBA MEDISIDE LINKAGE] system
<https://edit.prd.horiba.biz/jpn/medical/news/news-press-release/detail/news/8/2023/horiba-mediside-linkage-next/>



Figure 5 Remote support [AOP Connects]
<https://www.horiba.com/jpn/service/solution/service-product/remote-support/>

また、HORIBA製品の保守点検サービスを包括的に提案する「AOP (All in One Plan)」に、専門エンジニアによるリモートでの装置状態監視を追加した「AOP Connects」(Figure 5)や、お客様のリモートワークを可能とする装置へのセキュアなリモートアクセス、専門の弊社分析エンジニアとリモートで繋いでの分析相談、リモートメンテナンスなど、お客様のご要望に沿った各種プランを通じて、様々な業務効率化サービスを提供している。

MLMAP2028開発戦略におけるHORIBAのDXソリューション

HORIBAは現在、中長期経営計画「MLMAP2028」を進めており、注力する3つのフィールドである「エネルギー・環境」、「バイオ・ヘルスケア」、「先端材料・半導体」において、「ほんまもん」のソリューションによる社会課題解決を目指している。MLMAP2028における開発戦略として3本の柱を掲げており、その一つ目は、お客様に寄り添った迅速な製品開発で新規ビジネス拡大に貢献すること、二つ目は、製品販売からソリューション販売への転換を促し、オートメーションやデータマネジメントをはじめとするソリューションビジネス拡大に貢献すること、そして、三つ目は、「ほんまもん」の技術を追求することである (Figure 6)。



Figure 6 R&D strategy in Mid-Long Term Management Plan [MLMAP2028]
<https://www.horiba.com/jpn/company/investor-relations/mid-long-term-management-plan/>

特に2つ目の柱であるソリューションビジネスの拡大では、自動車分野で培ってきたラボ・データマネジメントなどのノウハウを活かしたDXソリューションを、材料分析の研究開発といった新たなフィールドへの展開に注力している。

おわりに

DXソリューションの拡大・推進のため、オープンイノベーションを活用したDX人材の育成として、滋賀大学・東京大学・大阪公立大学といったアカデミアとの連携も進めている。HORIBAにはデータサイエンスの専任チームもあるが、分析・計測技術をコアとするHORIBAとしては、物理現象の原理原則に基づいたうえで、自ら手を動かして実験し、実験室でアルゴリズムを開発するという心構えを大切に、日々ソリューションの創出に取り組んでいる。現在ではIoTやAIの活用は当たり前であり、どのように活用するかがビジネスにも大きく影響を与えていると考えている。昨今、ニーズが増加している研究開発における実験の効率化を目指したラボDXや、分光分析におけるスペクトル解析など、HORIBAには多くの可能性があり、多様な分析・計測技術を有するHORIBAだからこそ実現できるお客様のDX拡大に取り組んでいく。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。



勝田 敏広

KATSUDA Toshihiro

株式会社堀場製作所
開発本部
プロセスエンジニアリングセンター
IoT& データアナリティクス部 部長
Department Manager
IoT & Data Analytics Dept.
Process Engineering Center
R&D Division
HORIBA, Ltd.

分析機器の自動化の現状と今後の展望： プラグ&プレイの実現にむけて

Current Status and Future Prospects of Analytical Instrument Automation:
Toward the Realization of Plug & Play

上野 楠夫

UENO Kusuo

石隈 徹

ISHIKUMA Toru

ラボラトリの自動化を進めるには、個々の分析機器単体の自動化だけではなく、前処理や試験条件等、日々変更となる作業への柔軟な対応と、機器間における試料やデータの人手によらない受け渡しが望ましい。その実現のためにまずは装置の通信の共通規格が重要であり、そこを業界全体で協調領域と定め、標準化を推進させる必要がある。JAIMA (日本分析機器工業会) も推進する規格のLADS OPC UAの紹介と、現状について述べる。

To promote laboratory automation, it is desirable not only to automate individual analyzers but also to respond flexibly to daily changing tasks such as pretreatment and test conditions, and to transfer samples and data between instruments without manual operation. This paper introduces LADS OPC UA, a standard promoted by JAIMA (Japan Analytical Instrument Manufacturers Association), and describes its current status.

はじめに

製造業の多くの工場では自動化が進んでいるのに対し、ラボラトリ内の分析機器は多くは単体で利用され、操作・データ処理が一貫したシステムで運用されておらず自動化が進んでいない。また人手による試料の前処理や搬送、種々の測定とデータ収集、解析に多く時間が取られており、研究者も創造的な活動に時間が使えていない。ラボラトリ内の機器の自動化が進まない大きな理由としては二つが考えられる。一つは日々の作業が同一でなく変更があること、もう一つは共通の通信規格が存在しておらず、分析機器の接続には多大な労力がかかることである。将来的にラボラトリ機器に求められるであろうプラグ&プレイを説明し、現在の自動化の状況とJAIMA (日本分析機器工業会) として推進している通信規格のLADS (Laboratory and Analytical Device Standard)^{[1]-[4]}の内容と現在の取り組みについて説明し、業界として取り組むべきことについて述べる。

分析機器の自動化の現状と課題

工場の自動化とラボラトリの自動化の差異

自動化というとまず工場の自動化が想起され、省力化、省人化が進んでいる一方で、ラボラトリの自動化はあまり進んでいない。これは同じ自動化でも工場とラボラトリでは要求項目が変わるためである。まず工場の自動化の目的としては、生産効率の向上であり、スループットや生産コス

ト低減を目指しているため、制御・分析対象や処方・運転条件は生産技術で標準化されていることが多く、対象設備や操作機器も目的に沿って特化されている。そして得られる費用対効果も大きいため投資額も大きい例が多い。一方でラボラトリの自動化では研究者の時間をやることを目的とし、多様な実験を行えるために、手順や条件の変更のしやすさが特に要求される。そのため使用機器は汎用機器を用い、分析対象や条件が固定されないことが一般的である。

このようにラボラトリの自動化を検討する際に、対象が多種多様であると費用が高額で、しかも固定された処理しか行えない案となることが多く、費用対効果を考えると、これまで通り人手で行った方が柔軟に対応できるため自動化を断念する例が多い。

分析機器の自動化のためのプラグ&プレイ

なぜ分析機器の自動化や自動化後の変更コストが高いのだろうか。大きな原因として考えられることが2つあり、一つが分析機器の試料の搬送やメンテナンスを人が行うことを前提として設計されていることが多く、ロボットによる扉の開閉や試料搬送で自動化されにくいこと、もう一つがこれまでのラボラトリの自動化では、各機器が独自の通信規格や結果フォーマットを持ち、自動化をするユーザーやシステムインテグレーターが各機器の仕様を理解したうえで接続しているため、この接続作業に多くのコストがかかっていることが挙げられる。

自動化機能をもつシステムの導入コストを下げ、またシステムの変更も容易にするための貢献策として、各機器を接続すると使用できるプラグ&プレイの仕組みが考えられる。プラグ&プレイは例えば最近ではUSBやネットワークでプリンタを接続したら使用できるように、機器をシステムに接続した際に、自動的に機器の検出と適切な設定を行う仕組みのことである。将来的にラボラトリ機器を接続するだけで、システム側はどのような機器が接続され、それがどのような機能をもつかまで把握できるとユーザーの自動化のコストは大幅に下がる。このように機器が共通の通信規格をもち、どのようなふるまいを行えるかの情報モデルを持つことにより、機器の導入／変更時の設定作業がほとんど不要になり、接続するだけである程度の操作が可能となる“分析機器のプラグ&プレイ”を目指すことも今後の分析機器メーカーの課題と言える。

市場に出始めた自動化ソリューション

近年ラボラトリの自動化を支える技術が急速に進展し、従来人手に頼っていた作業の自動化が現実のものとなりつつある。ここでは、自律実験システム、情報管理ソリューション、ロボットによる繰り返し作業の自動化といった、実用化が始まった代表的な事例を紹介する。

自動自律実験

材料探索の分野では自動自律実験が進んでおり、人間が行っていた作業のほとんどを自動化しロボットに置き換える例もでてきている。またロボットが計量、分注、測定などを行い、それらのデータを集約、解析しベイズ最適化技術などを用いて、次の実験条件を選択し、製造機器や、分析機器の制御を行い、自律的に材料やプロセスの最適条件の探索を進める例などがでてきている。工程や作業の変更には課題が残るが、人間では数か月かかる作業を8日程度で成果を上げる例^[5]などもあり、材料探索の分野では大きな成果を上げている。

Informatics Management

多くの企業よりラボの情報マネジメントシステムとして、LIMS(Laboratory Information Management System)が提供されている。実験室の情報を効率的に管理するためのソフトウェアであり、サンプル管理、データ収集、分析結果の追跡、レポート作成などの機能を提供している。一般的にラボでは古い機器と新しい機器が混在していることが多く、LIMSに接続できない装置の存在や、印刷された保存結果の活用など課題も少なくないが、それらレガシーな機器も統合するためのInformatics Management技術も出始めており、後述の通信規格OPC UAなどの標準の応用などで加速化されると思われる。

ロボットを用いた繰り返し作業の自動化

ロボットによる繰り返し作業の自動化も進んでおり、特定作業においては熟練作業員より優れた実験精度と再現性を得ることができるという報告もある。しかしティーチングとよばれる移動座標の登録、調整が難しいという課題もある。近年では対象物の位置が多少ずれてもカメラでずれ量を検知することにより正しい位置へ搬送する技術もあり、また個々の機器においては基準点から操作点までの相対位置を示すことができれば、ロボットや自動機器は操作点の位置を認識しやすくなる。これらのアプローチで今後更に簡便に自動化が進むことが期待されている。

HORIBAでのロボットを用いた例として、赤外線吸収、熱伝導を用い硫黄、炭素や、水素、窒素、酸素を測定するEMIA/EMGAシリーズでは1980年代より試料をセットするつばの搬送や助燃剤の自動秤量を行う装置を提供している。またレーザーの回折、散乱を用いた粒子径分布測定装置のLA-960では、自動化の例として、サンプリングされた試料瓶をオペレータが設置したのち、自動で試料瓶のIDコードの読み取りや試料瓶の蓋の開閉、ピペットでの添加剤や試料の投入などを実現している。

分析機器の通信規格動向

通信規格の共通化の動向

一般的に市場の広がりに対し規格化が進むが、業界によって進むスピードや到達位置が異なる。たとえば半導体装置の通信規格であるGEM(Generic Equipment Model)300などは国際統一規格となっており、装置メーカーにとっては、どのユーザーに納入する場合でも基本的に同じ仕様での通信が可能となっている。半導体業界の発展への寄与にこの通信規格の統一化による功績は大きいと感じる。

一方でラボの自動化の規格化という面で見ると、各社独自の段階から規格が乱立している段階にあるように思う。これはラボの自動化の中でも、特定の装置や、特定の部分など規格化が進んでいる例はあるが全体を効率化しようという規格は進んでいないのが現状である。その中で通信規格の有力候補としてOPC UA(Open Platform Communications Unified Architecture)、そしてそのOPC UAをベースにラボラトリ用の規格として策定されたLADS(Laboratory and Analytical Devices Standard)を紹介する。

このLADS OPC UAは日本も含めた国際的な標準規格であり、流量計やポンプなど比較的シンプルな機器から、ロボットなど搬送機器、スターラーや分析装置などラボラトリ機器などに共通で使用できる規格となっている。この規格に対応した機器が増えるほどに、ユーザーとしては自動化が身近なものになっていくことが期待されている。

OPC UA

OPC UAは通信規格としての歴史は長く、仕様を策定、維持するOPC UA Foundationには、産業界／製造業やIT業界を中心に現在1000を超えるメンバー会社があり（'25/05時点）、近年IT系企業の加入の増加と、エンドユーザ企業が加入を始めており、そのため製造現場を持つエンドユーザの導入推進およびIT企業によるシステム実現により、OPC UAの普及が加速することを期待されている。またOPC UAはドイツではIndustrie 4.0を支える中核標準として用いられており、シンガポールと中国はOPC UAを国家規格化としている。（シンガポールはSS IEC62541:2019、中国はGB/T 33863）このように様々な業界で通信規格として使用されているOPC UAは前述の機器のプラグ&プレイへの一つの解と考えている。

OPC UAの名前の由来にもなっているOPC (OLE for Process Control)は、当初Microsoft^{®*1}のOLE技術に基づいてプロセス・オートメーションにおけるネットワーク技術として開発されたが、プラットフォームに依存しない形で進化し、OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture)となり現在も様々な業界で発展を続けている。OPC UAは異なるデバイスやシステム間でのデータ交換を容易にするための統一的なフレームワークを提供しており、特徴として以下の4つが挙げられる。

- ・ **プラットフォーム非依存：**
OPC UAは、Windows^{®*1}だけでなく、Linux^{®*2}やその他のオペレーティングシステムでも動作可能
- ・ **セキュアな通信：**
データの機密性、完全性、認証を確保するために、強力なセキュリティ機能が組み込まれている。
- ・ **情報モデル：**
OPC UAは、複雑なデータ構造を扱うためにオブジェクト指向で構築できる柔軟な情報モデルをサポートし、標準化された方法で接続される機器やソフトウェアの機能や情報を表現できる。
- ・ **通信プロトコル：**
TCP/IP, HTTP, WebSocketなどの複数の通信プロトコルをサポートしている。

近年では通信のセキュリティの高さからも注目されており、サイバーセキュリティへの対策として、OPC UAを採用する例も増えている。米国ではコンシューマ向けIoT製品のセキュリティ強化を目的としたU.S. Cyber Trust Markや、EUではデジタル要素を備えた製品のサイバーセキュリティ要件に対する規制であるEU Cyber Resilience Actが施行されようとしている。これらが参照しているサイバーセキュリティの規格のIEC62443-4-2 Componentの技術要件に対し、OPC UAの適合マッピング表があり、CyberResilienceの多くの要件に適合できる。またOPC

UAはドイツにある連邦情報セキュリティ局(BSI)によるセキュリティ評価により、安全性を客観的に高く評価されている。

OPC UAはFigure 1に示すように標準／中立なコミュニケーション・アーキテクチャとしてOPC Foundationが開発、保守を行うOPC UA基本サービスと、OPC UA情報モデルと、OPC UAパートナーによる産業分野特有のコンパニオン情報モデル、ベンダーによる固有の拡張モデルから構成される。このように基本的な通信は共通化し、業種や装置などに特化した部分は別途定義できる柔軟な構造となっている。

LADSとは

LADSは'20年よりドイツの光学／分析／医療機器工業会であるSpectarisを中心に、ユーザー、アプリケーション開発者、デバイスメーカーが集まり、ラボラトリにおけるデジタル変革を推進するために、統一され堅牢で安全な共通インターフェースの提供を目的として開発が開始され'23/12に第一版が発行された通信規格である。OPC UA規格の基本仕様に加え、デバイス管理仕様(10,000-100 Devices)および機械と結果転送仕様(40,001-1 Machinery)および識別や情報取得のための仕様(10,000-110 Asset Management Basic(AMB))を参照し構成されている。

LADS OPC UAのターゲットイメージをFigure 2に示す。このFigureに示されるように、機器を接続するだけでつながるプラグ&プレイや、機器間の相互運用(Interoperability)をめざしている。

LADS OPC UAのユースケースとして、以下の3つが定義されている。

- ・ Basic Automation：遠隔モニター、アラーム信号などの送受信と、遠隔操作
- ・ Orchestration：複数機器を協調動作させるプログラムと、機器から出力されるデータの管理
- ・ Service & Asset Management：予防、故障予測に基づく保守と、個別機器や機器群のリソース管理

*1 米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標

*2 Linus Torvalds氏の日本およびその他の国における登録商標または商標

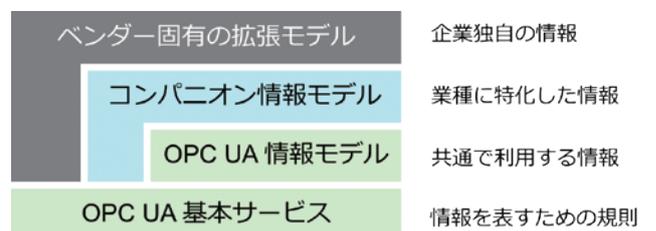


Figure 1 OPC UA base service and model structure.

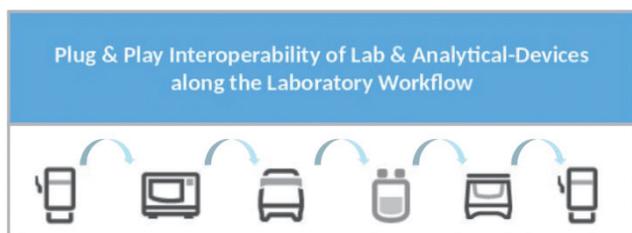


Figure 2 LADS target image

さまざまなラボラトリ機器があり、それらを接続し、機器からの情報取得や機器への指示にLADS OPC UAを使用し、得た結果などはLIMSなど上位アプリケーションで管理、参照されるシステムを想定されている。

各機器のプラグ＆プレイを実現するためにLADS OPC UAは、ラボラトリ機器の機能やできることを表すための標準化された機能ブロックとよばれるものを提供している。またこれらの機能ブロックを組み合わせるためのルールも策定されている。このように機器がそれら標準機能ブロックを決められたルールで組み合わせるため、機器との通信が容易になっている。例えば“Function”と呼ばれる機能ブロックでは、リモート監視と制御のユースケースで重要な役割を果たし、これらのブロックを使用するとリモートクライアントは、センサー、コントローラー、タイマーなど機器がもつ機能を簡単に検索して制御することができる。また、これら“Function”が集まって一つの大きな機能を果たす“Function Unit”も定義でき、それらの単位でのプログラム実行や状態遷移監視が行える。さらにこれらのデータは監査証跡可能なデータとしても保存が可能となる。

自動化のための協調領域と競争領域

現状では各社独自の通信規格で、共通の通信規格が普及していないことが自動化の阻害要因の大きな要因の一つと述べてきた。では通信規格の普及には分析機器メーカーとし

て、どのような取り組みが必要であろうか。

例えば前述のラボラトリの自動化に対し、例えば作業の流れを一般化すると、Figure 3に示すように「計画」→「実験／作業」→「記録」→「解析」と循環する形で表すことができる。ここでこれらの工程間をつなぐための通信の規格が、それぞれの工程で共通化されておらず各社が独自に作成している状況にある。これに対し工程間の通信部分については協調領域として通信規格を推進する必要がある。一方で個社個社が競争力を維持するためには共通部分・標準部分(協調領域)以外の部分に独自の技術による製品差別化を図る必要がある。協調領域を明確に定めることにより、全てをゼロから開発する必要はなくなり、競争領域に開発リソースを集中しやすくなる。

このように協調領域と競争領域を適切に設けることが、業界全体の発展と自社の競争力維持の両立を図る鍵となる。メーカーは「標準化戦略」として連携と競争の見極めを積極的におこなっていくことが求められる^[6]。

その実現のため重要と考えるのが、OPC UAにおける情報モデルや、結果フォーマットを協調領域と捉え、業界全体で共通化・標準化に向けた取り組みを推進することである。情報の構造や意味を共通の形式で定義することで、異なるメーカーの機器間でもシームレスなデータ連携が可能となり、システム全体の統合が容易になる。特に分析機器においては、測定結果や状態情報のフォーマットを標準化することで、製造実行システム(MES)や生産管理システムとの親和性が高まり、自動化の進展に大きく寄与する。一方で、測定アルゴリズムや機器の制御手法など、製品差別化につながる要素については競争領域として維持することで、各社が独自の技術を発展させる余地を残すことができる。このように、共通化と差別化のバランスを適切に取ることが、業界全体の発展と自社の競争力維持の両立を図る鍵となる。



Figure 3 Laboratory works supported by communication standard

おわりに

以上、業界を通じた分析機器の通信規格の統一の現状、課題及び期待について述べた。

ラボラトリーの自動化を阻害する要因として、一つは作業内容の変更に柔軟に対応が必要なこと、もう一つは機器間の共通の通信規格が存在しておらず、接続に多大な労力がかかる課題を挙げ、それらの解決には共通の通信規格の普及とプラグ&プレイの実現が必要となることを述べた。その実現のためには、業界全体として、協調領域と競争領域とを明確に区別し、協調可能な領域では標準化を推進しつつ、競争領域へのリソースの集中が求められる。そのため分析機器メーカーとしては、業界団体や標準化コンソーシアムと連携し、情報モデルの策定やオープンなフォーマットの整備に積極的に関与していくことが求められる。JAIMAとしても、このような協調領域の実現に向け、前述のLADS OPC UAの標準化開発に継続参画し、セミナーや展示会など普及、周知活動も展開していく予定である。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] 上野楠夫, 石隈 徹, Laboratory and Analytical Device Standard (LADS) OPC UAによる機器のプラグ&プレイに向けて, ぶんせき 2024年 第11号
- [2] OPC 30500-1 Laboratory and Analytical Device Standard
- [3] OPC UA規格(OPC UA Foundation)
<https://reference.opcfoundation.org/#>
- [4] 石隈 徹: "Laboratory and Analytical Device Standard" LADS OPC UA最新情報と今後の情報, OPC Day Japan 2023
- [5] "A mobile robotic chemist" Benjamin Burger, Phillip M. Maffettone, Vladimir V. Gusev, Catherine M. Aitchison, Yang Bai, Xiaoyan Wang, Xiaobo Li, Ben M. Alston, Buyi Li, Rob Clowes, Nicola Rankin, Brandon Harris, Reiner Sebastian Sprick & Andrew I. Cooper Nature 583, 237 (2020)
- [6] 中川雅人: "欧州流技術開発" 効率的・合理的な開発アプローチ, 海外投融資 2018年3月号



上野 楠夫

UENO Kusuo

株式会社堀場製作所
先端材料・半導体センター
先端材料ソリューション部 副部長
/一般社団法人 日本分析機器工業会
技術委員会 調査小委員会 主査
Deputy Department Manager,
Material Solution Dept.,
Material & Semiconductor Center
HORIBA, Ltd.



石隈 徹

ISHIKUMA Toru

一般社団法人 日本分析機器工業会
技術委員会 調査小委員会 シニアアドバイザー
Senior Adviser,
Research Subcommittee,
Technical Affairs Committee,
Japan Analytical Instruments Manufacturers'
Association

The Interaction between “Artificial Intelligence” and “the Safety and Security of Cyber Physical Systems” AI化するクルマにおけるサイバーリスクと安全対策の動向

Paul WOODERSON

Dr. David WARD

NAKANISHI Hideki

中西 秀樹

AI is already being used in vehicle infotainment systems such as car navigation. Recently, one of the most frequently encountered uses of AI in vehicles is in driver support (ADAS) and automated driving systems (ADS). This article explores the use of different forms of artificial intelligence (AI) in cyber-physical systems, in particular automotive systems, the potential safety and security risks posed by AI and how these risks are being addressed through emerging regulations, standards and technical solutions. We examine the functional safety implications of AI-based systems and how this is being addressed by the newly published ISO/PAS 8800. We also provide an overview of typical cybersecurity threat scenarios and attack methods that affect AI-based systems and how those can be mitigated. Finally, we review some of the opportunities that AI can offer for improving functional safety and cybersecurity.

クルマのナビゲーションなどの車載インフォテインメントシステムにおいては、AIがすでに活用されている。昨今、運転支援機能や自動運転機能へもその活用幅が広がっている。本稿では、英国に拠点を持つHORIBA MIRAの取り組みとしてサイバーフィジカルシステム、特に自動車システムにおける様々な形態の人工知能(AI)の活用、AIがもたらす潜在的な安全性とセキュリティへのリスク、そしてこれらのリスクが新たな規制、標準、そして技術ソリューションによってどのように対処されているかについて考察する。AIを用いたシステムの機能安全との関係、これが新たに発行されたISO/PAS 8800でどのように明示されているか解説する。また、AIを用いたシステムに影響を与える典型的なサイバーセキュリティの脅威シナリオと攻撃手法の概要、そしてそれらを軽減する方法についても説明する。最後に、機能安全とサイバーセキュリティの向上に繋がるAI活用の可能性をいくつか検証する。

Introduction and Background

Artificial intelligence (AI) is emerging as a key new technology in modern engineering, with applications in many industry sectors, including in cyber-physical systems such as vehicles.

The benefits of AI come from the unique way it operates. For example, instead of using fixed algorithms based on physics or classical statistics, machine learning uses vast sets of training data to teach an algorithm to identify patterns or specific objects. Once trained, machine learning algorithms can spot these patterns with greater speed and accuracy compared to traditional techniques, whether the task is interpreting human speech for voice control

applications or predicting the path of an oncoming vehicle. Compared to traditional software decision-making, AI can accomplish tasks that would otherwise be impractical with the time or computing power available.

Along with the significant opportunities presented by AI, there are a number of risks, including risks to safety and risks of intentional attacks. The complexity of AI-based systems means that there are many different variables to consider, increasing the potential for failures or vulnerabilities.

Uses of artificial intelligence in vehicles

Applications for AI systems in vehicles range from the use of machine learning for object detection in automated driving systems through to battery life predictions in electric vehicles. Even infotainment systems are starting to adopt generative AI technology.

One of the most frequently encountered uses of AI in vehicles is in driver support (ADAS) and automated driving systems (ADS). AI is seen as attractive since it enables mimicking of human behaviour and human decision making rather than following a rigid set of rules as would be found in a system based on algorithmic decision making. AI is therefore frequently used to interpret sensor data and make decisions based on the perceived traffic environment.

However there are many potential uses of AI beyond ADAS and ADS. One particular example is in battery management systems, where AI can be used to help implement more accurate predictions of battery life both in terms of improving the energy efficiency of individual journeys, but also managing the through-life efficiency and longevity of the energy storage system.

Safety and security risks for AI-based systems

Safety risks

The historical position on the use of AI-based systems in safety contexts has been “to not do”. This is due to the non-deterministic behaviour of such systems and the closed box nature of their implementation.

By “non-deterministic” we mean that the output is not fully predictable based on a given set of input conditions;

the same set of input data might give different results on different occasions. For example as a result of updated learning data the system might behave differently on a subsequent occasion.

By “closed box” we mean that the implementation of AI based systems (particularly around learned behaviour) is not amenable to detailed analysis. In traditional functional safety methods a software-based system would be designed at successive levels until so-called “software units” are identified which can be subject to standalone and detailed analysis and testing. Examples of this in traditional systems would be a function (or small number of functions) in a language such as “C” that contains a relatively small number of lines of source code.

From a safety perspective the ultimate goal is to demonstrate “assurance” in a system – that it operates correctly in its given operational context and does not present an unreasonable level of risk to people exposed to its behaviour. Traditional methods need adapting for the complexities and uncertainties associated with AI-based systems so that their benefits can be delivered while managing the additional risks associated with them.

Security risks

AI, and in particular machine learning, introduces a number of security-related risks, with various attack methods threatening different parts of the machine learning implementation. Different types of AI threat and examples of attacks that can realise those threats are shown in Figure 1, which extends the classes of threat defined by the Linux^{®*1} Foundation “Adversarial Robustness Toolbox” project^[1].

Due to the learning aspect of Machine Learning systems, attackers could manipulate the behaviour of the system by

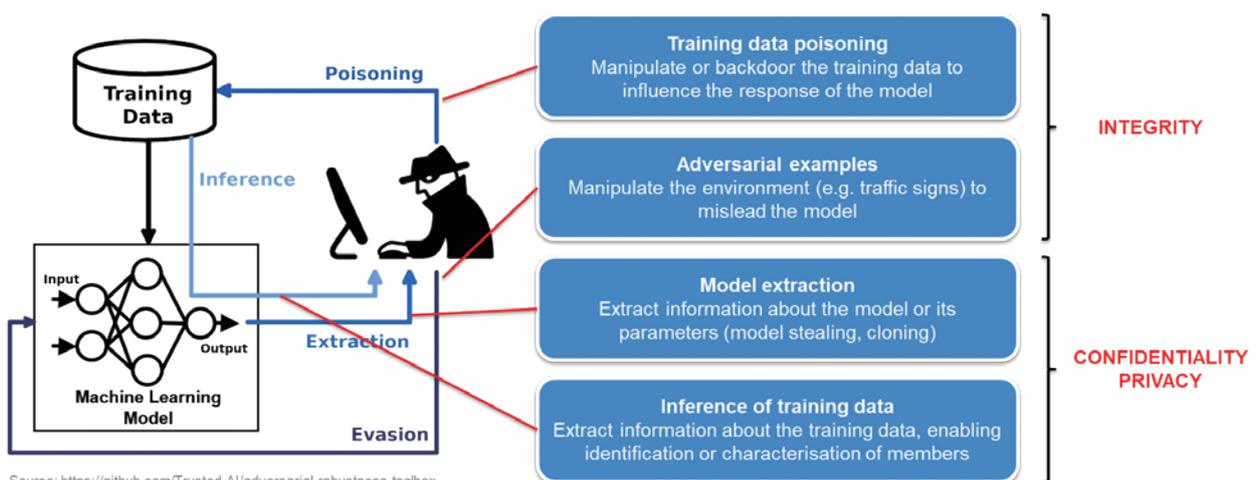


Figure 1 Classes of threat based on the Linux^{®*1} Foundation “Adversarial Robustness Toolbox”.

*1 Registered trademark or trademark of Linus Torvalds in Japan and other countries.

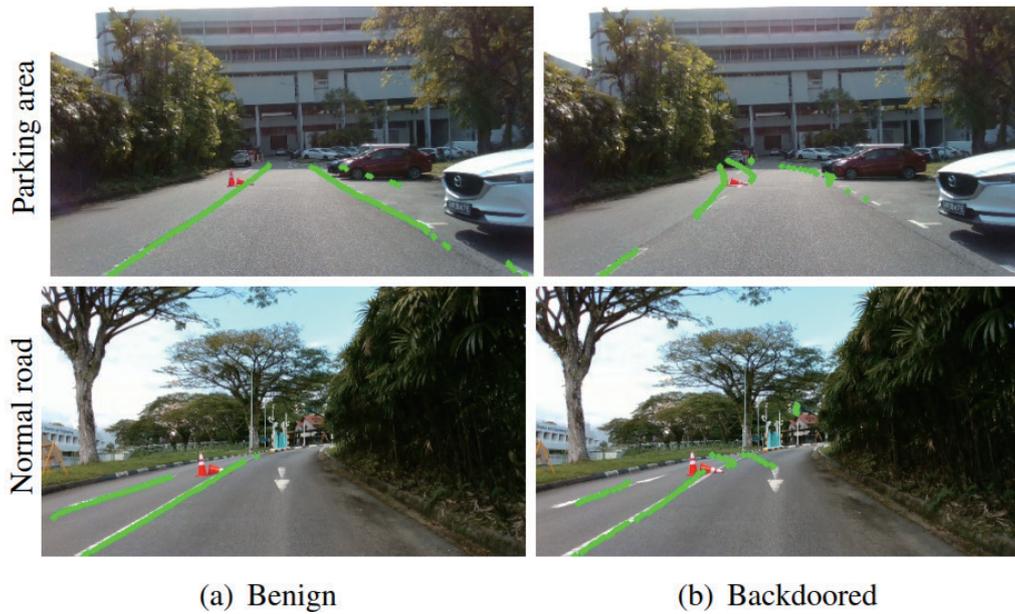


Figure 2 Example of backdoor poisoning attacks (Source: [3])

targeting the training data without needing access to the algorithm itself. These systems are only as reliable as the training data used for the learning process, so removing data or inserting false information into the training data (known as data poisoning) could have a significant impact on the correct behaviour of the algorithm. Research experiments have demonstrated that so-called backdoor poisoning methods could use specific patterns or inputs to bypass normal detection methods^[2]. Recent research has demonstrated the practicality of such attacks in the physical world, specifically targeting lane detection systems^[3], as illustrated in Figure 2. Experiments have shown these attacks to be effective and robust against various defence solutions, posing significant risks to the security and safety of vehicles and passengers.

With varying degrees driver assistance now seen on many new vehicles, attackers no longer need direct access to a vehicle to influence its operation. Various methods of ‘spoofing’ to intentionally mislead the vehicle’s sensors have been demonstrated by researchers, including the class of attacks known as adversarial examples: an example being small stickers placed on road signs by an attacker (as shown in the image below from research by



Figure 3 Example of adversarial examples attack (Source: [4])

Eykolt et al)^[4] which change the way the sign is interpreted by image recognition systems but would be ignored by the human eye(Figure 3).

The value attached to novel and proprietary AI algorithms could make them a particularly lucrative target for intellectual property theft. If a third party can access the AI system – either through a vehicle or by other means, such as an IT system – then they could potentially extract details of the model or its parameters^[5] and use the information to either clone or manipulate the behaviour of the target system.

Table 1 Automotive applicability of machine learning attacks.

Application area	AI-based function	Possible attack
Advanced driver assistance systems (ADAS)	Traffic sign recognition	Adversarial examples
Automated driving systems	Object detection and classification	Adversarial examples, Training data poisoning
EV battery management	Predicting battery health and parameters over lifetime	Training data poisoning, Model extraction
Smart cockpit / user experience	Generative AI infotainment functions, voice assistant	Personal information inference

The applicability of some of these types of attack on automotive Machine Learning systems is summarized in Table 1.

A major challenge is that securing any system is an uneven contest between attackers and defenders. Vehicle manufacturers have a finite amount of time and resources available to identify, analyze and resolve security issues before a new vehicle is signed off for production. In contrast, attackers have unbounded opportunity to attack the vehicle throughout its operational lifetime, and they only need to be successful once to cause major damage. It should also be noted that AI techniques may also be harnessed by attackers to increase their advantage and adapt to evolving cybersecurity controls.

Emerging regulations and standards

General AI regulations and standards

General-purpose AI regulatory frameworks are now emerging, such as the EU AI Act and the US National Artificial Intelligence Initiative Act. For specific industry verticals, such as automotive, it is possible that future requirements for approval of AI-based systems in vehicles may be added to existing automotive-specific type approval processes. Alternatively, it may be left to the industry to follow the general-purpose frameworks.

In addition, a major standardization activity is underway in ISO/IEC to develop a range of AI-related international standards. This activity is mainly under the ISO/IEC/JTC 1/SC 42 sub-committee, although other ISO/IEC committees and the European standards bodies CEN/CENELEC are also developing AI standards. These standards cover a wide range of aspects related to AI, from defining governance frameworks, to specific aspects such as ethical considerations. Two examples of these general AI standards that are also important for the safety and security of AI are:

- ISO/IEC 42001 AI Management Systems – establishes a framework for managing the lifecycle of AI systems, ensuring their ethical, reliable, and secure deployment across industries, including automotive. This standard emphasizes governance and leadership commitment, robust risk management, compliance with legal and ethical standards, and stringent data management practices. It outlines best practices for the design, development, deployment, and continuous improvement of AI systems, promoting transparency, accountability, and stakeholder engagement.
- ISO/IEC 22989 AI concepts and terminology – provides definitions of key concepts and terminology

related to artificial intelligence. This standard aims to establish a common language for discussing AI across various domains and industries, promoting clarity and consistency in communication. By establishing a clear and consistent vocabulary, ISO/IEC 22989 facilitates better communication, a shared understanding of AI technologies, models, and processes, and collaboration among automotive manufacturers, technology developers, regulators, and other stakeholders.

AI security regulations and standards

Standards specifically regarding the interaction between AI and cybersecurity are currently under development, including a CEN/CENELEC standard on “Cybersecurity specifications of AI systems” and ISO/IEC 27090 “Cybersecurity — Artificial Intelligence — Guidance for addressing security threats to artificial intelligence systems”, which is being developed by ISO/IEC/JTC 1/SC 27. At the current time, these standards are in the early stages of development.

Regarding vehicle specific AI security regulation, with the introduction of UN Regulation 155, cybersecurity is already part of the Vehicle Type Approval process in markets such as the EU, Japan and South Korea. There are currently discussions in the UNECE WP.29, which develops vehicle type approval regulations, about possible future regulation of AI-based systems in vehicles, although at the current time the content and timing of any future regulation is unclear.

AI safety standards

As noted previously, the view on use of AI in safety-related systems is moving from “do not” to “how can we?” There is extensive work taking place to develop a framework of standards for AI. As well as the more general framework described above, the following should be noted with particular reference for safety:

- ISO/IEC TR 5469^[6] – this was an initial document prepared in the context of the generic functional safety standard IEC 61508 to provide preliminary information on some of the methods and processes available to incorporate AI elements in safety-related systems,
- ISO/PAS 8800^[7] – this builds on ISO/IEC TR 5469 and specifically addresses the use of AI elements within automotive systems. It has a particular focus on the risk associated with undesired safety-related behaviour at a vehicle level due to output insufficiencies, systematic errors and random hardware errors of AI elements. This document also assumes application in the context of ISO 26262^[8] – it supplements it rather

than replaces it. Therefore a safety-related system should be developed according to ISO 26262. The functional safety design would create an architecture for the system and allocate safety requirements to its elements – if those elements are implemented using AI then ISO/PAS 8800 would then be applied. There are many important aspects of ISO/PAS 8800 but a significant one is the use of AI properties to help define an assurance claim that use of an AI element achieves absence of unreasonable risk.

- ISO/IEC TS 22440 – currently under preparation, this will build on ISO/IEC TR 5469 and incorporate concepts from ISO/PAS 8800 as industries move towards a “state of the art” on how to use AI within safety-related systems.

Opportunities for AI to improve safety and security

AI provides opportunities to address the asymmetry between attackers and defenders. Technologies such as machine learning are well-suited to identifying anomalous behaviour that may be the first warning signs that a system has been tampered with. The ability to efficiently process huge datasets also makes machine learning a powerful tool for monitoring the diverse and unstructured corpus of published information about new threats, attacks and vulnerabilities. For example, techniques like natural language processing can be used to extract intelligence from unstructured, text-based information, filter out irrelevant content and highlight the potential threats. This provides cybersecurity analysts and engineers with actionable information to support decision making during engineering, vulnerability management and incident response activities.

Conclusion and outlook

In this article we have introduced different applications of AI in automotive cyber-physical systems, including driver assistance systems, automated driving and electric vehicle battery management. We explored the safety risks due to the “non-deterministic” and “closed box” nature of AI-based systems and the need for traditional methods of providing assurance to be adapted to address these additional risks. We have similarly outlined security risks of AI-based systems, including poisoning attacks, adversarial examples and model extraction. Finally, we have introduced some key regulations and standards applicable to AI-based cyber-physical systems, including those covering AI in general, as well as standards specifically addressing the safety and security of AI.

Whatever shape future regulations may take, AI will have a major role to play in the automotive industry and in other industry sectors developing and deploying cyber-physical systems. Organisations and individuals will need to be mindful of the potential risks introduced by AI-based systems, and the new methods required to provide assurance that the risks are appropriately managed. However, with sufficient assurance, AI can open up a whole range of exciting new possibilities to enhance the capabilities of future cyber-physical systems.

HORIBA MIRA is at the forefront of the development of methods safety and security assurance, including initiatives to extend these methods to AI-based systems as described in this article. This expertise helps us provide consulting, test and assurance solutions to automotive and other customers, as well as helping to assure future HORIBA products incorporating AI-based systems.

* Editorial note: This content is based on HORIBA’s investigation at the year of issue unless otherwise stated.

References

- [1] Linux Foundation, 'Adversarial Robustness Toolbox', [online] Available at: <https://github.com/Trusted-AI/adversarial-robustness-toolbox>, last accessed 2 May 2025.
- [2] Jagielski, M., Oprea, A., Biggio, B., Liu, C., Nita-Rotaru, C. and Li, B. 2021, 'Manipulating machine learning: Poisoning attacks and countermeasures for regression learning', arXiv preprint, arXiv:1804.00308
- [3] Han, X., Xu, G., Zhou, Y., Yang, X., Li, J. and Zhang, T. 2022, 'Physical backdoor attacks to lane detection systems in autonomous driving', Proceedings of the 30th ACM International Conference on Multimedia (MM '22), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, p. 2957–2968.
- [4] Kevin Eykholt, Ivan Evtimov, Earlene Fernandes, Bo Li, Amir Rahmati, Chaowei Xiao, Atul Prakash, Tadayoshi Kohno, and Dawn Song. 2018. Robust physical-world attacks on deep learning visual classification. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 1625–1634.
- [5] Nightfall AI, 2024. Training Data Extraction Attacks: What is a Training Data Extraction Attack? [online] Available at: <https://www.nightfall.ai/ai-security-101/training-data-extraction-attacks#what-is-a-training-data-extraction-attack>, last accessed 2 May 2025.
- [6] ISO/IEC TR 5469:2024 Artificial intelligence — Functional safety and AI systems, Edition 1, January 2024.
- [7] ISO/PAS 8800:2024 Road vehicles — Safety and artificial intelligence, Edition 1, December 2024.
- [8] ISO 26262:2018 Road vehicles — Functional safety, Edition 2, December 2018.



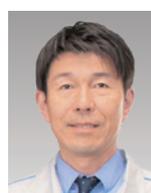
Paul WOODERSON

Chief Engineer – Cybersecurity
Vehicle Resilience,
Cybersecurity and EMR
HORIBA MIRA



Dr. David WARD

Global Head of Functional Safety
Functional Safety
HORIBA MIRA



NAKANISHI Hideki

中西 秀樹
Consultancy & Applied Solutions(CAS) Lead
Group Strategy Division,
Energy & Environment Task Force
HORIBA, Ltd.

The Evolving STARS Ecosystem: from Automotive Development to Material, Bio and Healthcare 進化するSTARSエコシステム：自動車開発からMaterial, Bio Healthcare領域へ

James FOWLER

KOYAMA Satoshi

小山 聡

STARS Automation is a software platform developed to automate testing in automotive development. It has evolved and improved continuously through ongoing enhancements. In recent years, new platforms have been added to the STARS ecosystem. STARS Enterprise provides laboratory-level data management and process automation capabilities beyond the automotive field, while STARS Process functions as a flexible sensor management layer. This article will discuss the history of STARS Automation and the consider the outlook for the STARS ecosystem to underpin business growth across HORIBA.

STARS Automationは、自動車開発における試験の自動化を目的として開発されたソフトウェアオートメーションプラットフォームであり、継続的な強化を通じて進化と改善を続けてきた。近年では、自動車開発以外の領域に対して、STARS Enterpriseが研究室レベルのデータ管理およびプロセス自動化機能を提供、STARS Processが柔軟なセンサーマネジメント層として機能するなど、新たなプラットフォームがSTARSエコシステムに加わった。本稿では、STARS Automationの歴史を振り返るとともに、HORIBA全体の事業成長を支える基盤としてのSTARSエコシステムの将来展望について考察する。

Introduction

In the 1960s, HORIBA's automotive division developed the first MEXA, establishing itself as a global brand in automotive exhaust gas analyzers. By integrating analyzers with peripheral devices such as sample handling systems, HORIBA provided comprehensive exhaust gas measurement systems to meet diverse customer needs.

In the 1980s, to address increasingly complex testing requirements, HORIBA introduced "Test Automation" - an integrated system using computer technology to control automotive test equipment, including analyzers - pioneering digital test automation long before the term Laboratory Digital Transformation (Lab DX) emerged.

HORIBA launched the current test automation platform, STARS, in 2005, which has been continuously enhanced with new features and global support.

This paper outlines the evolution and future development of the STARS platform, including its extended ecosystem - STARS Enterprise and STARS Process - and discusses its application beyond the automotive field as part of

efforts toward realizing Lab DX.

Overview and background

Automobile development has become increasingly complex due to stricter emission regulations, fuel economy standards, and efforts toward carbon neutrality, including the push for electrification.

To meet these demands, modern vehicles integrate more control devices and sensors, increasing the complexity of control system optimization. As a result, automated testing via test automation systems is now essential to maintain or reduce development time. In fact, automation of every aspect of test operations has become the norm.

The STARS ecosystem currently comprises 3 platforms that combine to provide vertical automation solutions ranging from individual sensor management, through test stand automation, up to test enterprise management (Figure 1):

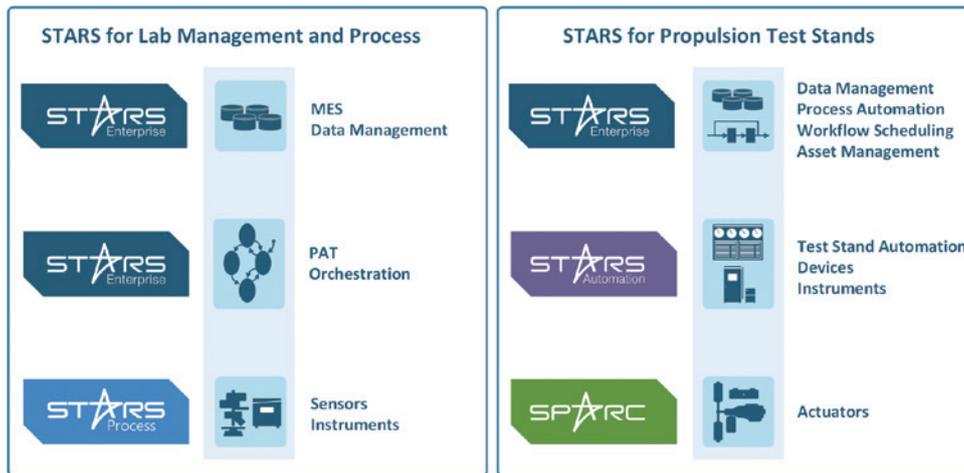


Figure 1 The STARS Platform stack.

STARS Process, the newest member of the STARS family, provides control and data acquisition at the instrument/sensor level.

STARS Automation, the original STARS platform, provides real-time control, automation and data acquisition for test stands. Developed to meet the diverse and demanding requirements of test automation in automotive development worldwide, STARS Automation offers a compelling combination of ease of use and functionality, with a comprehensive application engineering toolset. It is scalable from single test stands to large test labs.

STARS Enterprise provides centralized data management and process automation at the test field level, as well as instrument and process line orchestration. STARS Enterprise provides a framework for managing test requests, test scheduling, device management and centralized data handling, accommodating standard and customized workflows. STARS Enterprise solutions significantly enhance development efficiency.

In 2024, HORIBA launched its current mid-to-long-term plan, MLMAP2028, and reorganized its structure from

five segments into three business field groups to strengthen cross-segment collaboration. One of the three central pillars of the plan is the shift from product-based offerings to integrated solutions. By leveraging system integration and solution expertise developed in the automotive domain, HORIBA aims to expand these capabilities across all business fields to drive sustainable growth.

The STARS ecosystem is a key enabler for this expansion, with many of the solution patterns developed in the automotive domain proving to be equally relevant to non-automotive fields. Practical implementations include Lab DX in scientific laboratories, QC systems for the biopharmaceutical industry, and autonomous experimentation systems. Deployment across diverse sectors is actively underway (Figure 2).

HORIBA's history in automotive test automation

In 1964, HORIBA launched the “MEXA-1,” a three-component exhaust gas analyzer that became a globally recognized brand. In 1972, the company introduced the “CVS-31,” a constant volume sampling system employing

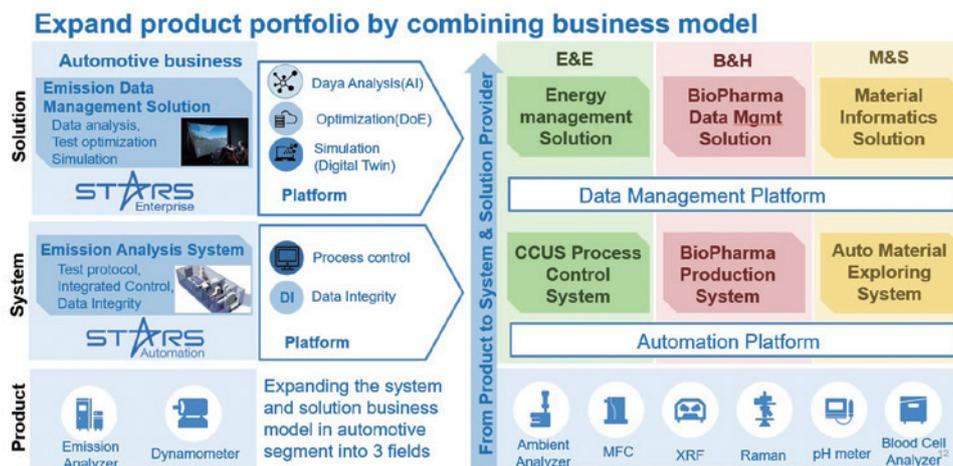


Figure 2 Shift from product-base to system and solution provider.

critical flow venturi (CFV) technology. By combining this system with gas analyzers, HORIBA enabled the measurement of exhaust gas flow rates, thereby meeting the requirements of the new exhaust emission regulations that came into effect in 1973.

In the late 1970s, HORIBA entered the field of exhaust gas test automation through the acquisition of the chassis automation business from InterTestAutomation.

With the rise of personal computing, HORIBA developed the “HERT-100” in 1985, a test automation system for engine development. This was followed by the “HERT-200” for chassis dynamometer testing of complete vehicles. These systems marked one of the origins of HORIBA’s Lab DX approach, integrating analyzers, sampling systems, and dynamometers into comprehensive solutions.

By moving beyond standalone products and offering integrated systems - including hardware and software - HORIBA has addressed diverse customer needs. The system-based approach remains a core strength of its automotive business.

In 2001, HORIBA joined SRH Systems Ltd., a joint venture between Schenk AG and Ricardo PLC, marking the transition from regional to global test automation platform development. This collaboration led to the 2004 release of STARS Engine, the first product based on the STARS Automation platform for engine testing, and from that point STARS Automation has played a central role in HORIBA’s integrated solutions. In 2005, HORIBA acquired the test systems business from Schenck AG, making SRH a subsidiary of HORIBA.

Designed for broad applicability, STARS Automation was soon extended to cater for vehicle, component, and brake

system testing. HORIBA expanded the product lineup with specialized applications such as STARS HDEET for heavy-duty engine emissions, STARS Calibrate for ECU calibration, and STARS VETS for vehicle emissions testing.

To enhance efficiency in multi-test stand environments, HORIBA introduced the STARS Cluster Server, enabling centralized configuration and test result management. Evolving customer needs and software technologies led to the development of STARS Enterprise, a cloud-native platform that supports comprehensive data management and process automation across the test field, serving both engineering and operations teams (Figure 3).

Architecture and technology of the STARS platforms

Test automation systems are characterized by their requirement to perform highly deterministic real-time control and data acquisition tasks. Besides this, they must provide the operator with powerful and intuitive tools to create test routines, observe the execution of tests and work with the test results afterwards. To address the real-time requirement, STARS Automation incorporates a multitasking hard real-time test execution environment, with test execution step and data acquisition rates of up to 5 kHz. Determinism and low latency are achieved through a real-time Windows^{®*1} extender subsystem (RTX), which effectively hives off some of the computer’s resources to support a real-time kernel and scheduler which are isolated from the indeterministic environment of the Windows^{®*1} operating system.

The operator’s workstation environment, which does run in Windows^{®*1}, provides an intuitive, graphically oriented user experience for the configuration of all the artefacts

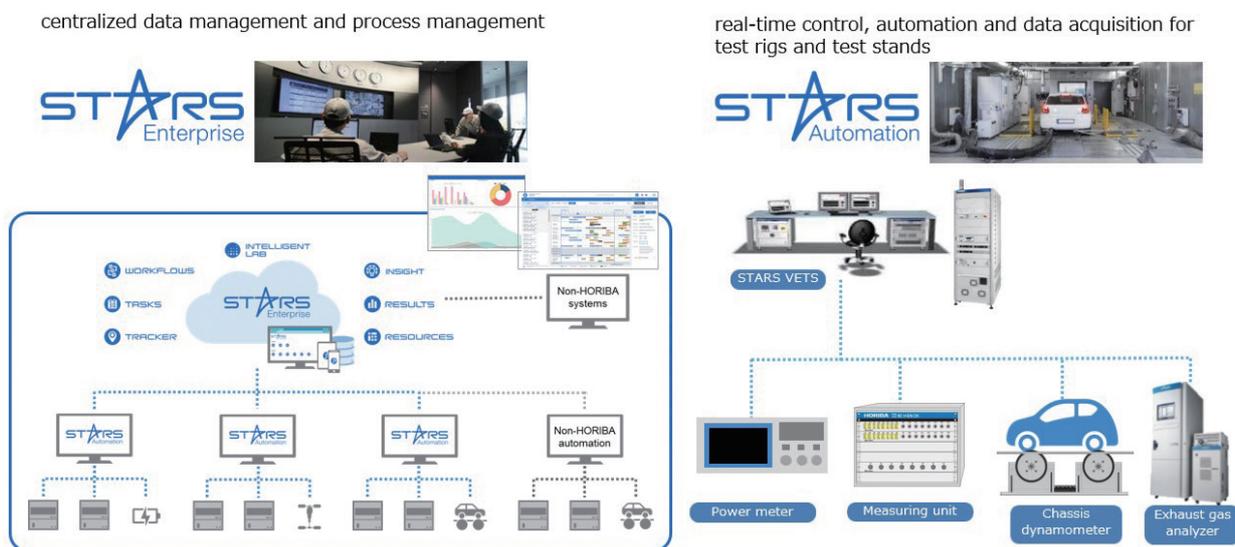


Figure 3 STARS Platform for automotive industry.

that combine to create a test application. Tabbed, launchable work areas and multi-display support provide a productive multitasking workspace in which applications can be configured and results analyzed while simultaneously monitoring test execution. The real-time and workstation elements are deployed side by side on a high-performance Windows^{®*1} PC, providing a convenient single-box package.

STARS Automation provides some tools and interfaces targeting more advanced application developers, leveraged both by HORIBA solutions teams and customer application engineers. For example, the integrated VSTA (Visual Studio Tools for Applications) environment includes a lightweight version of the Microsoft[®] Visual Studio^{®*1} IDE, which can be used to implement new automation features and apps using C# or VB.NET. The integrated driver development kit (DDK) provides a no-code environment for the creation of ASCII protocol device drivers.

The STARS Enterprise platform was created to enhance the operational efficiency, integrity and cost effectiveness of testing organizations. Serving a distributed community of engineering users and test operations staff, critical features include data management integrity, exceptional scalability, ease of deployment and maintenance, and software update with zero downtime. To achieve these objectives, STARS Enterprise employs a cloud-native microservice architecture, with each microservice playing a well-defined, focused role. They are implemented with minimum dependency on other microservices and are designed to be stateless, i.e. to hold no memory within themselves of previous invocations or requests. When deployed in a Kubernetes orchestration environment this stateless quality allows duplicates of any microservice to be started or stopped according to the demands on the deployment, without interruption to service; so-called horizontal scaling.

Underpinning the STARS Enterprise platform is a NoSQL MongoDB database, capable of accommodating both structured and unstructured data. The diversity of needs that STARS enterprise aims to address, along with the constantly evolving structure of the data involved, requires the schema-less concepts of a NoSQL database, which follows a less normalized data model, for this platform. Changes or extensions to the data model can be accommodated at application level, avoiding the need for expensive and time-consuming database remodeling. Structured data, with well-known, consistent relationships between entities and fields, are also accommodated by NoSQL databases, although a less normalized database

design is required compared to that typically employed in an SQL database.

Security by design ensures that STARS Enterprise has strong cybersecurity credentials. Tenancy support implemented in the data service controls who has access to what data, and a granular role-based user management system gives fine control over the functionality assigned to different users.

A STARS Enterprise solution starts out by creating a data model tailored to the needs of the customer. The solution is then created by combining standard platform components with customer specific web apps, mobile apps and services. A typical requirement for a STARS Enterprise solution is that it integrates into the customer's existing ecosystem of data and business systems. STARS Enterprise was designed with this role in mind. The flexible data model and event driven notification support in the platform are key features in this respect.

Data security is enforced through a secure data client design pattern, in which any application (data client) to be connected to STARS Enterprise must first be registered with the relevant STARS Enterprise deployment by an administrator. Through this registration the data client will be granted a secure access token encapsulating its identity and access rights.

Valuable synergies are realized by coupling a STARS Enterprise (SE) deployment to a cluster of STARS Automation (SA) workstations. In this scenario the datasets of the two platforms are transparently synchronized, with designated data resources being automatically uploaded from SA to SE and/or downloaded from SE to SA upon change. For example, in a mechatronic testing laboratory, the end-to-end workflow, starting with an engineering request, through test creation and transmission to the test stand, to results upload and automated analysis, can be fully automated, leading to significant increases in the efficiency of test operations (Figure 4).

Recent years have brought an increasing demand for STARS Enterprise solutions to be provided as a HORIBA operated cloud service, rather than as software to be procured and deployed on premises by the customer. The service model allows customers to focus on their core business with confidence that, through HORIBA's STARS Enterprise platform knowledge and cloud operations expertise, system availability is assured and their data is secure.

STARS Process is the most recent addition to the STARS ecosystem, positioned closest to devices in the STARS

*1 Registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries.

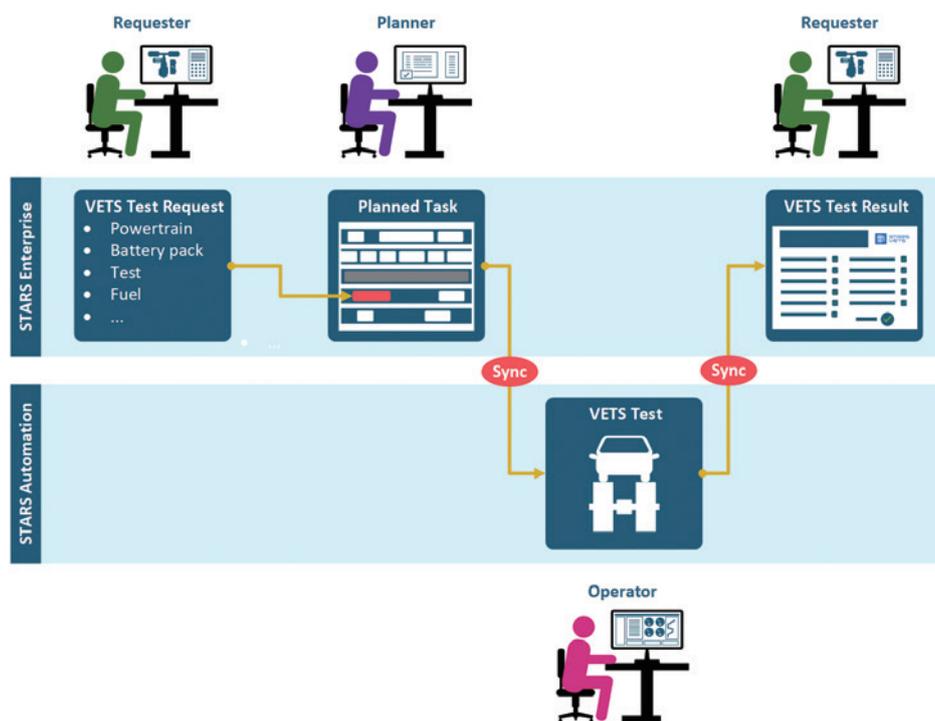


Figure 4 VETS Test Request Solution.

platform stack. Conceived for instrument control and sensor management, and developed in C++/Qt, STARS Process is a lightweight, efficient framework in which to implement smart sensor interface modules and instrument controllers. It is generally deployed on low power consumption hardware targets such as an embedded PC or System-on-a-Chip (SoC).

The architecture of STARS Process features a modular, message-based paradigm, with the platform’s middleware supporting Publication/Subscription or Request/Reply communication patterns. Web and QML based user interfaces are supported for local display/control panels, and standard communications modules accommodate popular communication protocols and connect STARS Process based devices to the STARS Automation and STARS Enterprise platforms.

STARS across all HORIBA business fields

While the roots of the more mature STARS platforms lay in the mobility business field, the opportunity to deploy STARS solutions in other business fields in which HORIBA operates is clear. STARS Enterprise in particular, being a robust, secure and performant cloud-based platform upon which to implement modular solutions, offers huge potential in this respect.

In the Life Sciences field, although having established a world class reputation for its analytical instruments, HORIBA has not yet moved up the software stack to offer solutions for instrument management and coordination.

This situation is changing, as the potential of the STARS Enterprise platform is embraced. In pharmaceutical manufacturing, customers are showing strong interest in device orchestration and Process Analytical Technology (PAT) solutions from HORIBA, taking confidence from HORIBA’s stellar reputation for measurement in general, and for automation and system integration in the mobility sector. ‘Device’ in this context refers to smart sensors, instruments, sample conditioning subsystems, material transport subsystems and the like.

It has been observed that, given its highly deterministic real-time control capabilities, the STARS Automation platform would appear to be an obvious contender for process device orchestration. In fact, the real-time performance requirements in this application area are relatively relaxed and the features of STARS Enterprise - high availability, zero downtime upgrades, boundless scalability, ease of integration with other data systems and cloud readiness - make this HORIBA’s preferred platform for orchestration.

Although the specifics are different, there is a marked similarity between the orchestration features required for pharma process orchestration and, say, materials R&D applications. It is anticipated that the orchestration core that HORIBA is developing for STARS Enterprise will have broad potential across HORIBA’s business fields. Indeed, a solution for managing an industrial coating formulation facility is a good fit to the orchestration capabilities of STARS Enterprise (Figure 5).

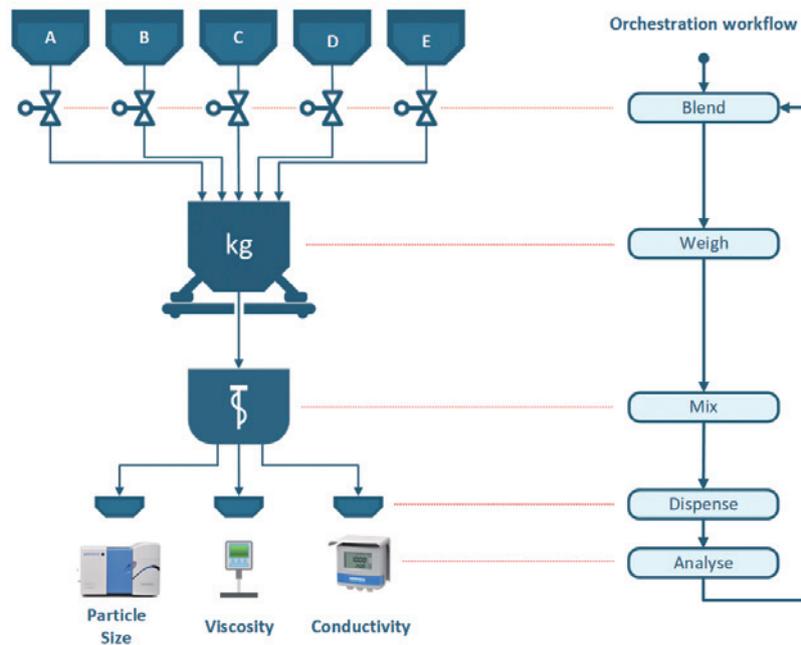


Figure 5 Process orchestration for industrial coating formulation.

In the medical field, STARS Enterprise is being used as the platform to support our next generation biology lab data management solution. The high integrity data management provided by STARS Enterprise, along with its flexible microservice architecture, have facilitated this development. The direction of travel of DX solutions is inexorably towards the cloud and the selection of STARS Enterprise as the underlying platform ensures that the transition from on-premises to cloud-hosted will be a smooth one for this system when the time comes.

Data systems, the purpose of which is to ingress data of different types, act upon those data in an intelligent way to provide business value, and produce actionable outputs, is another area of strong interest and potential for STARS Enterprise based solutions. With the capacity to ingress and store hundreds of thousands of data points per second, and to push these data through analytical pipelines that support advanced machine learning and AI implementations, STARS Enterprise is a good fit here. For example, for the water management industry HORIBA is developing data solutions addressing measurement, data persistence, visualization, and analytics, and offering these end-to-end implementations on a HORIBA hosted solution-as-a-service basis.

Conclusion

The STARS Automation platform, originally conceived and architected more than 2 decades ago through the combined experience of HORIBA, Schenck and Ricardo, has underpinned a consistent growth in the scale and breadth of automation systems in HORIBA. More

recently, with the addition of STARS Enterprise and STARS Process, STARS has evolved into a comprehensive ecosystem, a stack of platforms spanning the application space from sensor management, through test rig automation to enterprise process automation and data management. Forged in the mobility business field, where system integration is a core strength for HORIBA, the STARS platforms have come of age and are now being leveraged across HORIBA’s business fields to power automation and data management at all levels.

* Editorial note: This content is based on HORIBA’s investigation at the year of issue unless otherwise stated.



James FOWLER

Chief Operating Officer
HORIBA Test Automation Ltd.



KOYAMA Satoshi

小山 聡
Chief manager
Process Engineering Center
R&D Division
HORIBA, Ltd.

Real Driving Emission排出ガス規制対応に向けた Empirical Digital Twinの構築と適用

Powertrain Digital Twinning for Real-World Emissions Compliance

田畑 邦夫

TABATA Kunio

Dr. Phil ROBERTS

Dr. Luke BATES

Steve WHELAN

デジタルツイン(Digital Twin)とは、現実世界の物理的な対象(リアル)である製品やシステム、あるいはプロセスを、デジタル空間上で高精度に再現したデジタルなコピーである。これにより各種実験、性能評価、状態監視、保守・整備といった作業において、対象の物理実体と機能的に同等の役割を果たすデジタルモデル(カウンターパート)として機能する。本技術の導入により、現実の開発対象を模擬した「デジタル製品」あるいは「デジタルシステム」に対して、実時間を凌駕する速度でのシミュレーションおよび解析が可能となることから、開発プロセス全体の効率化ならびに開発期間の短縮などが期待されている。実際、排ガス規制に適合するために、自動車OEMではエンジンベンチやシャシベンチで膨大な作業を行っており、これが開発コストの増大と開発期間の長期化につながっている。HORIBAでは、この課題を解決するために、表題の研究において、バーチャルエンジニアリングツールセットを活用し、複数の最新エンジンシステムを対象とする経験的デジタルツイン(Empirical Digital Twin, EDT)の構築を実施してきた。本研究で構築したEDTは、自動車のパワートレインおよび車両の設計開発、性能適合、最適化、さらには認証プロセスにおいて、従来の実環境下での試験手法を補完あるいは部分的に代替し得る技術基盤として機能する可能性を有している。本稿ではHORIBAが構築したEDTの有効性と応用可能性について述べる。

A digital twin is a digital representation of a planned or real physical system, product, or process that functions as its practically identical digital counterpart for tasks such as testing, integration, monitoring, and maintenance. Creating digital twins allows the 'digital system' or 'digital product' to be tested faster-than-real-time improving the overall efficiency and reducing programme's timescales. The HORIBA Intelligent Lab virtual engineering toolset has been used produce Empirical Digital Twins (EDT) of several contemporary Internal Combustion Engine (ICE) propulsion systems. Digital twinning in its current format can supplement real-world testing methods for the development, calibration, optimisation, and certification of powertrains and vehicles. Given the move to ever more stringent pollutant criteria over wider test conditions, which is expected to put additional strain on Original Equipment Manufacturers (OEMs), the HORIBA EDT approach is expected to increase efficiency and reduce time when taking a vehicle or powertrain to market.

キーワード

Digital Twin, Dynamic DoE, DoE, Empirical modelling, Data driven model

はじめに

自動車の排出ガスによる大気汚染が人々の健康や地球温暖化に及ぼす影響に対して国際的な懸念が高まる中、欧州のEuro 7をはじめとする厳格な環境規制の導入が検討されている^{[1],[2]}。

これに伴い、エンジン技術の開発分野では、ますます多様化する試験条件下での性能評価が求められるとともに、排出ガス規制の一層の強化が進んでおり、自動車OEMにとっては技術面・コスト面での負担増加が大きな課題となっている。

こうした複雑化する開発環境に対応するソリューションの一つとして、HORIBAが提唱する経験的デジタルツイン(Empirical Digital Twin, EDT)アプローチ^[3]は、車両およびパワートレインの設計から市場投入までのプロセス全体を効率化し、開発期間の短縮を実現するための有力な技術的基盤として注目されている。

本稿執筆時点(2025年5月)において、欧州で販売される軽車両(乗用車など、3.5トン以下の中・軽量車: Light Duty Vehicle, LDV)は、現行のEuro 6^[4]規制に適合するために、国際調和燃費・排ガス試験方法(Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, WLTP)および実走行排出ガス(Real Driving Emissions, RDE)を受ける必要がある。

WLTPは温度や気圧などが制御された実験室内で実施されるのに対し、RDEは実際の道路走行条件に基づいた試験であり、より多くの不確定要素を含む状況下での評価が求められる。具体的には、都市部・郊外・高速道路における走行比率や運転条件が、Euro 6により詳細に規定されている。このような試験制度の下では、パワートレインおよび排出ガス後処理システムが、定められた路上走行条件下において安定して機能するように設計される必要がある。さらに、将来的に導入が予定されているより厳しい排出基準を見据えると、物理試験のみに依存してあらゆる運転条件を網羅的に検証することは、理論上は可能であっても、実際の開発現場では極めて非効率的かつ困難であり、多くの自動車OEMにとっては実行が現実的でない可能性が高いといえる。

したがって、実車試験が困難な法規制の境界条件付近における道路走行時の性能および排出ガス特性の予測を可能とするシミュレーションツールは、将来的な排出ガス基準への適合を図るうえで極めて重要な技術となる。これに関連して、著者らは、自動車OEMがRDEにおける現実の路上試験では再現が困難な「最悪のケース」を想定した限界条件でのベンチ試験を物理的に実施し、その結果をもとに予測モデルを作成し、シミュレーションと組み合わせることで、RDE試験を補完する手法を提案している(Figure 1)。

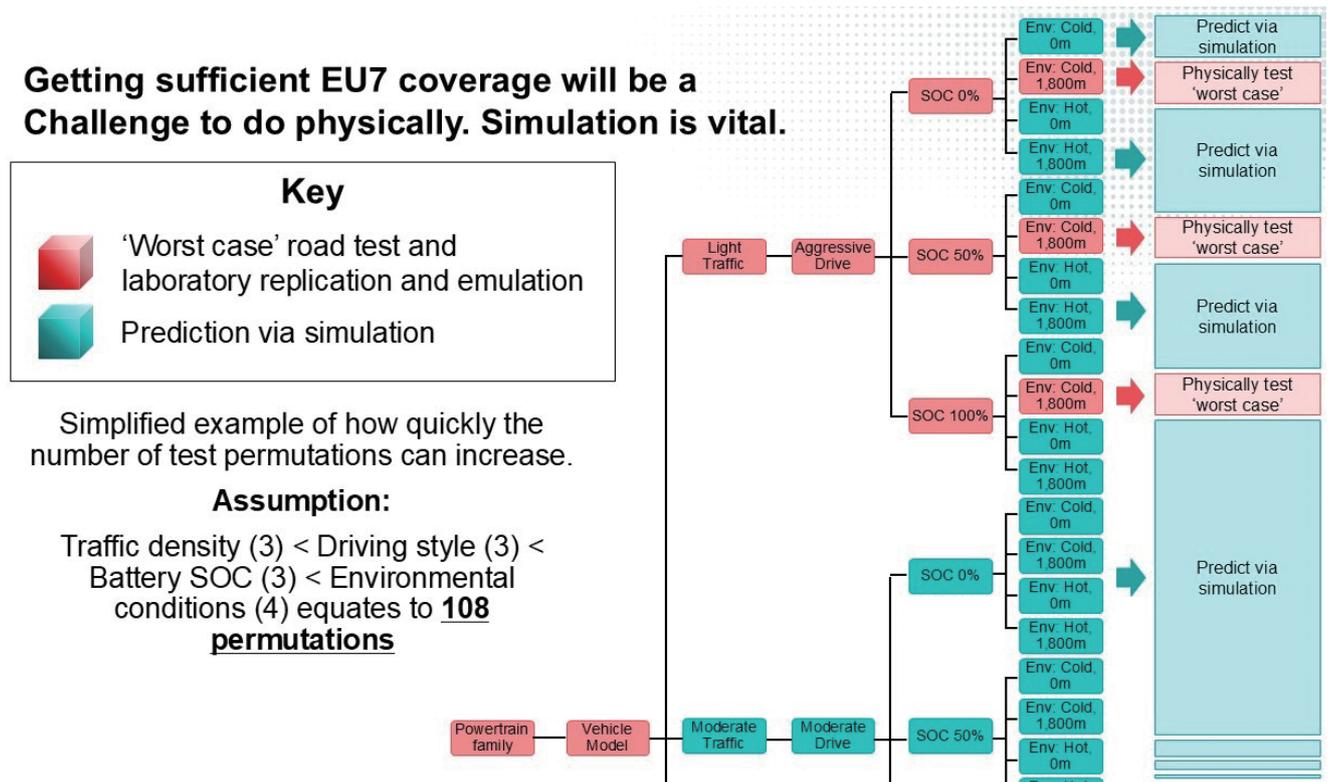


Figure 1 An example for the need for combined physical testing and simulation

本研究では、プラグインハイブリッド車両(PHEV)を対象に、3種類の異なる交通状況、3つの運転スタイル、3つの異なるバッテリー充電状態(SOC)、および4つの環境条件を組み合わせた単一のルートにおいて、同一のパワートレインを複数の車両プラットフォームに搭載する場合のRDE試験を想定した。その結果、必要な物理試験の総数は100を超えることが判明し、これらすべてを満足のいく基準で実施することは、現実的には非常に困難であると考えられる。このため、シミュレーションによる補足的なデータの活用は不可欠となる。

EDT原理一概要

こうした背景を踏まえ、HORIBAは、自動車OEMによる将来の排出ガス規制適合を支援する目的で、デジタルツインを活用したシミュレーションツールを開発した^[5]。ここでいうデジタルツインとは、物理的ユニットを高精度に再現する経験的なモデルに基づくデジタルモデルを指す。HORIBAのツールセットは、社内で独自開発された過渡実験設計、モデリング、予測、最適化の各モジュールから構成されており、過渡実験計画法(Dynamic Design of Experiments, Dynamic DoE)^[6]に類似したアプローチを採用している。

これらのスタンドアロン型モジュールは、次のプロセスに基づいて運用される。

1. 統計的手法を用いて過渡実験計画を作成する。
2. パワートレインまたは車両を用いて、設計された計画に従って過渡実験を実施し、トレーニングデータを取得する。
3. 得られたトレーニングデータを基に、性能および排出ガス特性を予測するモデルを生成する。
4. 生成されたモデルの精度を検証する。
5. 現実世界または合成的に構築された走行条件において、性能および排出挙動を予測する。
6. シミュレーションまたは実環境下での運転条件・車両動作条件を活用し、排出過多・燃費悪化・エネルギー消費増大などの原因となる好ましくないパワートレイン特性(ホットスポット)を特定する。
7. 特定された課題に対し、再適合(リキャリブレーション)を実施する。

これらの7つのプロセスをFigure 2(Figure2-1~2-4)およびFigure 3(Figure3-5~3-7)に示す。

ここでのEDTは、プロセス3で作成された経験的なモデルを、IPG CarMakerTM*1などの仮想車両シミュレーションツールで作成された現実世界のRDE走行サイクルに組み合わせて構築される(プロセス5)。HORIBAのEDTアプローチ

*1 IPG Automotive GmbHの登録商標または商標

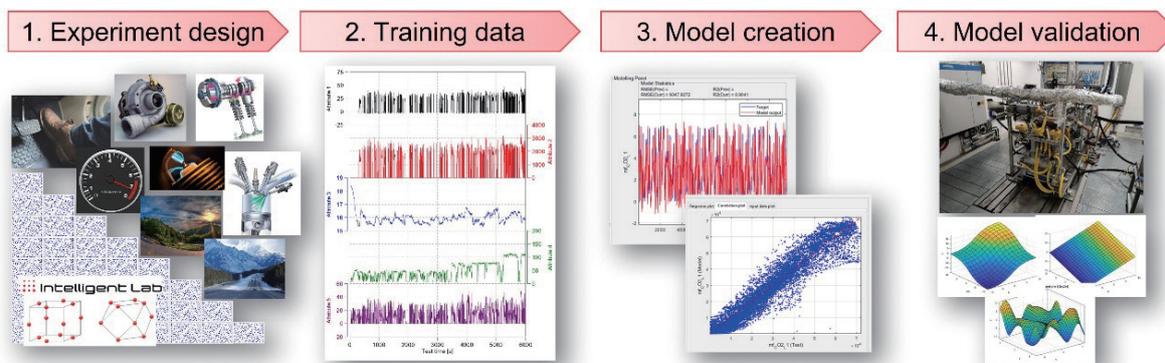


Figure 2 Stages of the HORIBA EDT approach (1) ; experiment design, generation of training data, modelling, and model validation.

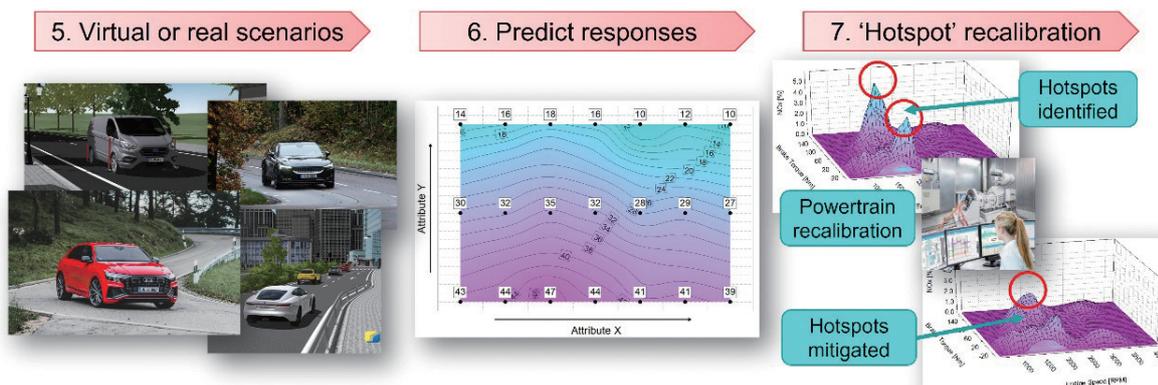


Figure 3 Stages of the EDT approach (2) ; establishing real or virtual scenarios to couple with empirical models, prediction of responses, and 'hotspot' determination.

は過去の類似研究^{[7]-[12]}で行われた準動的テスト手法のいくつかを発展させたもので、経験モデルとシミュレーションと組み合わせた新しいモデリング技術を用いて、より没入感を持たせ、より広範な分野へ拡張できる柔軟性を持たせた。

EDT原理—動的実験(トレーニングデータ取得)

プロセス3の経験的モデルを作成するために、過渡実験設計ツールを用いて、PHEVパワートレインと商用車用パワートレインの双方に対し、それぞれの全動作範囲を網羅するトレーニングサイクルを生成した。

これにより、各種運転条件下での性能および排出挙動を高精度に再現可能なモデルの構築が可能となった。

Figure 4にはパワートレインベンチ上での実験事例を、Figure 5にはシャシベンチ上での実験事例を示す。

モデルの学習に用いるトレーニングデータを取得するために使用した試験サイクルの所要時間は、パワートレインベンチおよびシャシベンチのいずれにおいても約1.5時間であった。パワートレインテストベンチにおけるトレーニングサイクルの入力パラメータとしては、アクセルペダル位置、ブレーキペダル位置、ならびにドライブシャフトの回転速度が用いられた。一方、シャシベンチにおいては、商用車のアクセルペダル操作量と車両速度が入力として使用された。なお、後者の試験では、HORIBA製の自動運転シ

ステム(ADS EVO)を用いてアクセルペダル操作を自動化し、シャシダイナモメータが車速の制御を担っている。

動的実験計画は、定常状態における従来の実験計画法^[13]と同様に、対象物理システム(今回の場合はエンジン)の動作制約内における複数のターゲットポイントで構成される(Figure 2-1)。ただし、動的計画においては、これらのポイントが特定の順序で通過される点が特徴であり、時には短時間の停止を伴いながら、さまざまな順序で複数回再訪されることもある。

定常的な実験計画とは異なり、動的システムにおいては、同一の定常点であっても、その到達経路(すなわちエンジン回転数や負荷の変化パターン)によって挙動が異なる場合がある。このため、測定結果に至るまでの経路情報が重要となり、モデル構築においてもこの点を考慮する必要がある。

システムの動作空間全体を効果的にカバーすることで得られたデータは、実際の運用環境で想定されるあらゆるシナリオに対応した高精度なモデルの構築を可能にする。

今回、必要なトレーニングデータ量を削減し、物理試験の負荷を軽減する目的で、対象となるシステムに固有の動的実験計画を策定した(Figure 2-2)。この実験計画は、対象システムの動的な挙動を正確に捉えると同時に、情報密度の高いデータを生成しながら、システムの動作空間全体を網羅することできる。

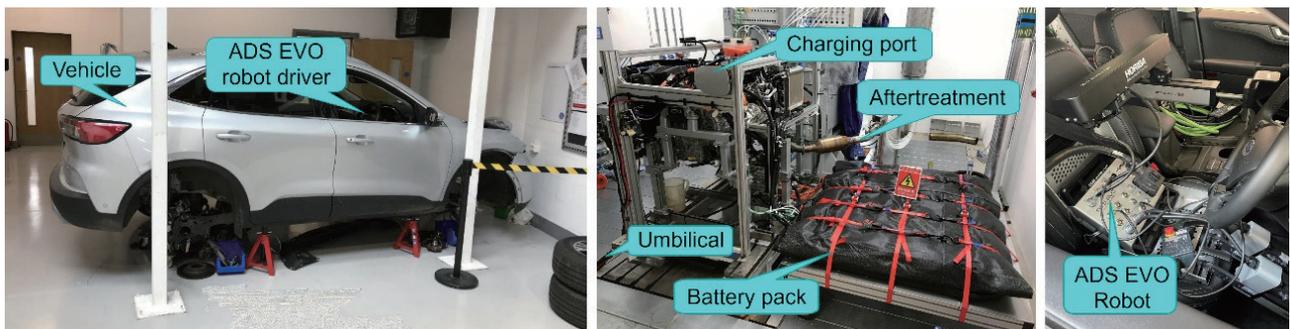


Figure 4 PHEV powertrain tested at HORIBA MIRA in the UK



Figure 5 Vehicle and corresponding diesel engine tested at an OEM in the UK.

これらの実験により取得されたトレーニングデータをもとに、複数の性能および排出ガス特性に関する過渡的な経験モデルを構築した(Figure 2-3)。

EDT原理—モデル作成, 検証, 予測

今回のモデリングには、機械学習手法の一つであるリカレントニューラルネットワーク(Recurrent Neural Network, RNN)^[14]に、長短期記憶(Long Short-Term Memory, LSTM)^[15]構造を組み込んだアプローチを採用している。

RNNを選択した理由は、複数の時間スケールで変化する動的システムに対応可能な柔軟性を備えているためである。一方で、標準的なRNNは長いシーケンスデータを扱う際に、長期依存関係の保持が困難であり、勾配消失の問題が生じやすいという課題がある^[15]。これに対してLSTMは、長期記憶の維持能力を強化し、勾配消失が起きにくい構造を有することでこれらの問題を効果的に緩和する。

LSTMは、セル状態と複数のゲート機構(入力ゲート, 出力ゲート, 忘却ゲート)を持ち、過去の情報を一時的に保存しながら、現在の入力と組み合わせる適切な出力を生成する。これにより、現在のシーケンス内で同様の値が再出現しない場合でも、重要な過去の情報を再利用することが可能となる。保存された値は、あらかじめ学習された条件が満たされた場合に限り、セルから削除される設計となっている。

モデルの学習には、計画された試験中に収集されたトレーニングデータが用いられる。このデータには、モデルの入力変数と、予測対象となる出力変数の両方が含まれており、時系列データとしてアルゴリズムに提供される。トレーニング時には、移動ウィンドウ形式で1ステップずつ進められる形でシーケンスが処理される。

RNNのトレーニングは計算負荷が高く、時間を要する可能性があるが、情報密度の高いトレーニングデータと汎用グラフィックスプロセッサ(General-Purpose computing on Graphics Processing Units, GPGPU)の活用により、大幅な処理時間の短縮が実現されている。例えば、90分間の運転シナリオに対し、10Hzで複数の変数が入力された場合でも、予測処理は数秒で完了し、モデルのトレーニング時間も数分程度に抑えられる。

加えて、すべての生成モデルは、予測結果と実測値を比較することで検証が行われる(Figure 2-4)。HORIBAのEDTツールセットで作成されたモデルの品質例をFigure 6に示しており、ここではいくつかの性能および排出ガス特性において、測定結果と予測結果の差異が視覚的に示されている。

現実世界の運転シナリオを仮想空間上に再現するために、仮想車両シミュレーションソフトウェアであるIPG CarMakerを使用した。また過去の論文^[16]で示した一連の工程に基づき、仮想ドライバーがIPG CarMaker内でプログラムされた複数の仮想RDEサイクルを走行するよう設定した。

この仮想シナリオの大きな利点は、現実時間よりもはるかに高速にシミュレーションを実行できる点にある。これにより、1台の車両に対して数百回のRDEテストを極めて短時間で実施することが可能となる。こうしたシミュレーションにより生成された車両またはパワートレインのデータの一部は、対応するEDTモデルと結合され、現実の試験を大幅に削減しながら、性能および排出特性の大規模な予測が可能となる。IPG CarMakerを活用して生成可能なシナリオの種類については、Figure 7に例を示す。これらの仮想試験により、運転スタイル、交通密度、ルート特性といった要因が、エンジン、パワートレイン、あるいは車両

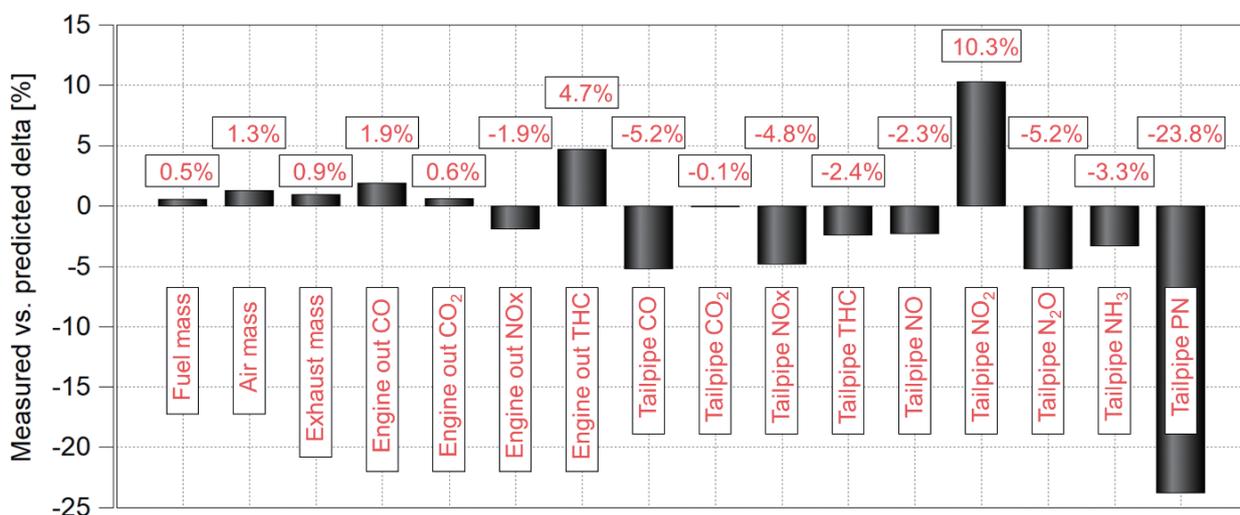


Figure 6 Measured vs. predicted deltas for performance and emissions attributes for a PHEV SUV tested on a powertrain dynamometer.

全体の性能にどのような影響を及ぼすかについて、詳細なデータ分析が可能となる。

さらに、EDTモデルに標高や極端な外気温といった環境因子の影響を組み込むことで、仮想環境における海拔0メートルや非常に高温・低温な地域での走行性能および排出挙動の予測も実現できる。このようなアプローチの一例として、文献^[17]で述べられている研究では、HORIBAの標高シミュレータ (Modular Emission and Driveline Analysis System, MEDAS) を用いて、高度および気温がエンジン性能や排出ガス特性に及ぼす影響をEDTモデルに取り入れている。

EDT原理—Hotspotの特定

Figure 8には、EDTアプローチを用いて、パワートレインや車両の問題となる動作条件、いわゆる「ホットスポット」を特定する手法の一例が示されている。この図は、同一の仮想ルートおよび交通密度を用いた4つのRDEサイクルに

おける排気管からのNO_x排出量の累積予測値を表している。対象車両はSUV型PHEVで、いずれのサイクルでもバッテリーのSOCはゼロに設定されていた。黒線は、海拔0メートル・吸気温度35℃という条件下での穏やかな(実線)およびダイナミックな(破線)運転スタイルを、赤線は、標高1,800メートル・吸気温度35℃という条件下での同様の運転スタイルにおける予測を示している。

Figure中の黒いボックスは、試験開始から10 km以内に累積NO_x排出量が600 mgを超えないことを求めるEU7の質量制限要件を表している。(2021年Euro7議論時の提案であり、2025年時点では排除された。)すべての予測は、暖機後エンジンを用いて収集されたトレーニングデータに基づいて実施された。海拔0メートルでの運転(黒線)では、累積NO_x排出量は約400 mgであり、黒いボックス内に収まっている。また、距離あたりの排出量も60 mg/km未満であり、ガソリンおよびディーゼル両方の議論当時の基準値を満たしている。

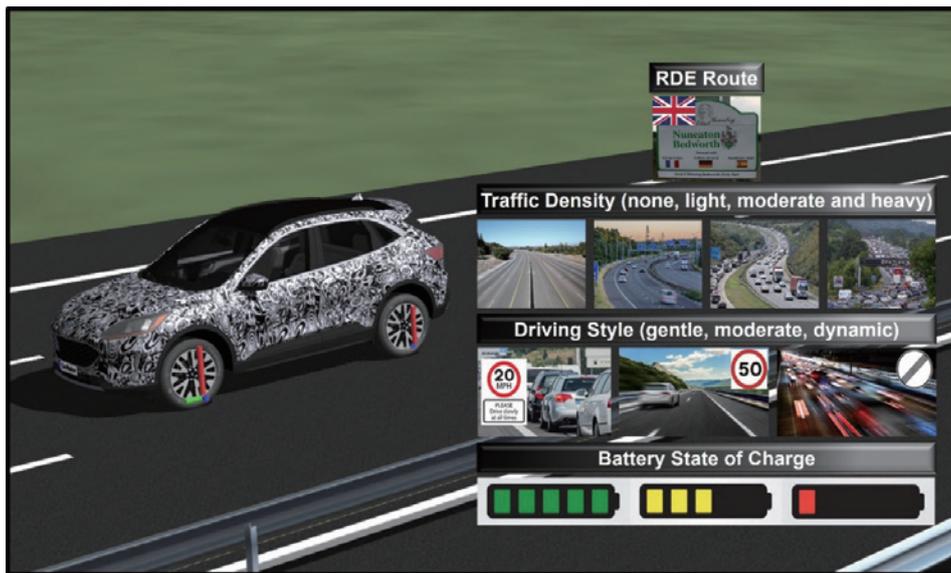


Figure 7 IPG CarMaker scenario definition for the light-duty PHEV SUV.

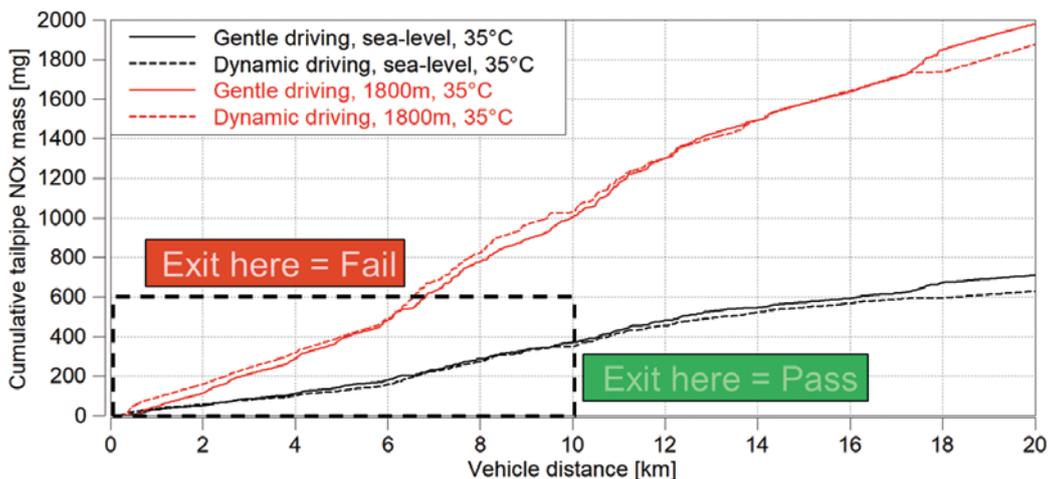


Figure 8 Predicted tailpipe NO_x emissions for the PHEV SUV at sea-level and 1,800m.

一方、標高1,800メートルでの走行予測(赤線)は、試験距離6~7 kmの範囲でNOx排出量が600 mgを超え、質量制限に違反する結果となった。興味深い点として、これらの高地条件における排出結果は、60 mg/km未満にとどまっており、EU6規制に基づけば依然として適合していると解釈される。

Figure 8が示すように、HORIBAのEDT手法により、車両量産前の段階においても問題のあるパワートレイン動作条件を特定することが可能となる。また、これらの予測はすべて暖機後エンジンのデータに基づいているため、コールドスタート条件を考慮すると、海拔0メートルであっても10 km以内に600 mgを超える可能性が高くなる。したがって、コールドスタート条件は、EU6の枠組みでは許容される場合があったとしても、EU7における試験開始後10 km質量制限が導入されると、排出適合の達成において重要な判断要素となる。

より厳格な排出ガス規制の導入を背景に、自動車OEMは製品の適合性をより広範な動作条件で保証するため、シミュレーション活動の強化が求められている。

HORIBAが提案する過渡EDT手法は、さまざまなパワートレイン、エンジン、車両に対して性能および排出特性の予測を行う上で有効に活用可能である。

おわりに

このEDTアプローチを採用することで、自動車OEMは、現実の路上試験では再現が困難または不可能な「ワーストケース」やRDE法規に定められた温度や標高条件の上下限付近や運転特性(RPA, V.a[95]^[4])境界付近の「エッジケース」における製品の信頼性や規制適合性を、実車テストに先駆けて確認することが可能となる。

さらに、今日の自動車開発においてパワートレインの共有が一般化していることから、ひとつのパワートレインを、それが搭載される複数の車両において適切に機能させるためには、意図的な動的サイクル試験が求められる。このような場合、本研究で作成されたEDTモデルは、異なる車両モデルから収集されたデータと統合することで、高い汎用性を発揮する。

初期の検証結果によれば、EDTアプローチを単一の車両に適用することで、認証および検証プロセスに要する期間を少なくとも70%短縮可能であると示唆されている複数車両に共通のパワートレインが導入されるほど、この効果はさらに顕著となる。

本稿で紹介したEDTアプローチは、すでに量産中の確立さ

れたパワートレインにも適用されているが、ハードウェアおよびキャリブレーションの最適化が必要な開発初期の段階においても有効である。たとえば、空気供給システムや排気後処理の選定段階において、EDTを導入することで、必要な試作車の台数を削減できる可能性がある。

現在の研究は、液体化石燃料を用いた従来型および電動パワートレインに焦点を当てているが、本手法は、異なる運転特性や環境条件、積載状態によってエネルギー消費量や航続距離がどのように変動するかを理解するために、カーボンニュートラル代替燃料、燃料電池やバッテリーを動力源とするバッテリー電気自動車(Battery Electric Vehicle, BEV)にも適用可能である。

従来、シャシダイナモメータによるエネルギー消費量および航続距離の評価は複雑で時間のかかる作業であったが、EDTアプローチはその負担を大きく軽減することができる。さらに、この手法の柔軟性は、ツールセットの開発が複数の工学・科学分野にまたがる機能横断的なものであることを意味し、自動車以外のシステムにも幅広く応用可能である。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] Nicole Egerstrom他, Emission reductions and public health benefits from timely Euro 7 standards
- [2] 森川多津子, 2030年における自動車からの大気汚染物質排出量推計 JRJ20241001
- [3] Phil Roberts他, Powertrain Digital Twinning for Real-World Emissions Compliance 2024-01-2602, SAE
- [4] COMMISSION REGULATION (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro6)
- [5] Phil Roberts他, The Prediction of Performance and Emissions for Synthetic Machine Handling Cycles Utilising a Powertrain Empirical Digital Twin 2024-01-4271, SAE
- [6] Karsten ROEPKE, Design of Experiments for Engine Calibration
- [7] Gutjahr, T他, "Advanced Modelling and Optimization for Virtual Calibration of Internal Combustion Engines," NDIA Ground Vehicles Systems Engineering and Technology Symposium, 2017.
- [8] Shishido, T他, "Dynamic Modelling for Gasoline Direct Injection Engines," *Keihin Technical Review*, Volume 6, 2017.
- [9] Le Corre, S.D.他, "Application of Multi-Objective Optimization Techniques for Improved Emission and Fuel Economy over Transient Manoeuvres," *SAE Technical Paper* 2019-01-1177, 2019, DOI:10.4271/2019-01-1177.
- [10] Tulpule, P他, "Model Based Design (MBD) and Hardware In The Loop (HIL) Validation: Curriculum Development," *American Control Conference*, 2017, DOI:10.23919/ACC.2017.7963788.
- [11] Xiaohang 他, "On the application of artificial neural networks for the prediction of NOx emissions from a high-speed direct injection diesel engine," *International Journal of Engine Research*, Volume 22, Issue 6, Pages 1808-1824, 2021, DOI:10.1177/1468087420929768.
- [12] Katreddi, S他, "Trip based modelling of fuel consumption in modern heavy-duty vehicles using artificial intelligence," *Energies* 2021, 14, 85-92, DOI: 10.3390/EN14248592.
- [13] Mohammed Reza Kianifar他, Sequential DoE Framework for Steady State Model Based Calibration 2013-01-0972, SAE
- [14] Ronald J他, A Learning Algorithm for Continually Running Fully Recurrent Neural Networks, *Neural Computation* (Volume: 1, Issue: 2, June 1989)
- [15] Sepp Hochreiter他, Long Short-Term Memory, *Neural Computation* 9(8):1735-1780, 1997
- [16] Phil Roberts他, RDE Plus - A Road to Rig Development Methodology for Whole Vehicle RDE Compliance: Overview 2020-01-0376, SAE
- [17] Phil Roberts他, RDE Plus - Rapid Characterisation of Vehicle and Powertrain Performance and Emissions using Dynamic Design of Experiments, Digital Twin and Virtual Driving Methodologies 2022-01-0580, SAE



田畑 邦夫

TABATA Kunio

株式会社堀場製作所
エネルギー・環境本部
電動モビリティ部 部長
Department Manager
E-Mobility Dept.

Energy & Environment Division, HORIBA, Ltd.



Dr. Phil ROBERTS

Technical Specialist,
Propulsion R&D.
HORIBA MIRA Ltd.



Dr. Luke BATES

Senior Engineer,
Data Driven Innovations,
HORIBA MIRA Ltd.



Steve WHELAN

Global Application Centre Leader,
HORIBA MIRA Ltd.

自動車試験における画像解析技術の活用と効率化事例

Utilization of Image Analysis Technology and Case Studies of Efficiency Improvement in Automotive Testing

小松 陽二

KOMATSU Yoji

Rohit Shiv PRASAD

横田 将史

YOKOTA Masashi

道北 俊行

MICHIKITA Toshiyuki

HORIBAは、自動車試験の効率化を目指し、テストオートメーションシステム「STARS」や自動運転システム「ADS EVO」をはじめとするソリューションを開発してきた。しかしながら、インストルメントパネルの表示等の視覚情報を運転に反映する場合には、人が目で見て試験に関与することが不可欠であった。そこで、インパネ情報を画像解析技術により数値データに変換し、STARSやADS EVOと連携する「車両試験用マシンビジョンシステム」を開発した。本稿では、このシステムの設計思想と構成、柔軟な設定が可能なユーザインタフェース、高速応答の数値OCRモデルについて報告し、試験自動化の応用事例を紹介する。

キーワード

マシンビジョン、画像解析、インストルメントパネル、シャシダイナモメータ試験、試験自動化、OCR

HORIBA has been developing various solutions to improve the efficiency of automotive testing, including the test automation system “STARS” and the automatic driving system “ADS EVO.” However, when visual information, such as instrument panel (IP), needs to be incorporated into driving tests, a human driver had to directly observe the display. To address this, we developed a “Machine Vision System for Vehicle Testing” that converts IP information into numerical values using image analysis technology, which interacts with STARS and ADS EVO. In this report, we describe the design concept and structure of this system, its user interface with flexible configuration options, and the fast response numerical OCR model. We also present case studies of its application in test automation.

Keywords

Machine vision, Image analysis, Instrument panel, Chassis dynamometer testing, Test automation, OCR

1. はじめに

昨今、自動車の電動化・知能化が急速に進むなか、開発スピードの向上と品質の両立が求められており、車両評価の効率化が課題となっている^[1]。HORIBAでは長年にわたり、自動車試験プロセスの効率化を支援するソリューションを提供してきた。例えば、供試体や各種設備・計測機器の状態や信号をテストオートメーションシステム（HORIBA製品名STARS、以下STARS）で一括管理することで、試験の実行・計測・監視を自動で遂行できる仕組みを構築しており、車両評価の効率化に寄与するシステム開発をおこなってきた^[2]。

このようなシステムの中で、完成車評価ベンチにおいてHORIBAが展開している製品のひとつに、ドライバに代わって車両の操作をおこなう自動運転システム（HORIBA製品名ADS EVO、以下ADS EVO）がある^[3]。ADS EVOは、アクセル、ブレーキおよびクラッチペダル、ギアシフトに加えイグニッションボタンやエアコンスイッチなどの各種ボタンの操作を試験者に代わって実施することができる。これらの機能により、車両の認可に必要な排出ガス測定試験モードに則った緻密な走行に加え、耐久試験や電費試験のような長時間運転における試験者負担を軽減できるソリューションとして活用されている。一方で、インストル

メントパネル(以下インパネ)の情報や警告灯といったドライバーが目にする視覚的情報を取得する機能は持っておらず、これらの情報を運転に反映する場合には試験者の関与が不可欠となっていた。このような背景から、「ADS EVOにも目が必要」とあるというニーズが明らかになった。

既存技術の中に「ADS EVOの目」として活用できる技術が存在するかを調査したところ、工場ラインなどの製造現場ではいわゆるFA (Factory Automation) 化が進んでおり、画像解析技術を用いた外観検査や文字認識の導入事例が確認された^[4]。本事例では、所定の位置に既知の形状でつぎつぎに流れる製品に対して、傷の有無や印字の読み取りなどの検査がおこなわれている。自動車試験の領域においては、インパネの単体検査に画像解析技術を用いる例が報告されている^[5]。これらの先行研究例は、本稿で報告する自動車試験のような、1日のうちに複数回インパネ、カメラの位置や検査項目が変わる用途に最適なシステムではない。また、ADS EVOのような、車両を操作するアクチュエータとの連動を前提としたシステム構成とも異なる。

一方で、画像解析の要素技術はすでに一般化が進んでおり、オープンソースやライブラリとしても利用可能な状態にある^{[6]-[8]}。これらの技術を活用することで、自動車試験の用途においても十分な性能を発揮できると考えた。

こうした既存の要素技術を活用して、多様な車両のインパネや検査項目に対して汎用的に運用することができ、かつ人間に近い反応速度で処理をおこなうことで、完成車試験においてADS EVOと組み合わせて動作させることができるアプリケーション「車両試験用マシンビジョンシステム」(以下、マシンビジョンシステム)の試作と概念実証(Proof of Concept, 以下PoC)をおこなった。本稿では、その取り組みについて紹介する。2章で設計の工夫を、3章でマシンビジョンシステム単体の評価を、4章でADS EVOと連携した応用事例を紹介する。5章では試験効率化の効果を考察し、6章でまとめと今後の展開について述べる。

2. マシンビジョンシステムの開発

本章では、ADS EVOと連携したシステムにおいてマシンビジョンシステムに求められる要件を解説し、これを実現する設計の要点であるユーザインタフェース(以下、UI)と数値OCRモデルの両開発について説明する。

2-1 システムの役割と設計の方針

本稿におけるマシンビジョンシステムは、ADS EVOと連携するシステムの要素として使うことを想定しており、本節では、この用途におけるマシンビジョンシステムの役割と設計の方針について述べる。Figure 1に、ADS EVO連動システムの基本構成と各ブロックの機能を示す。ADS

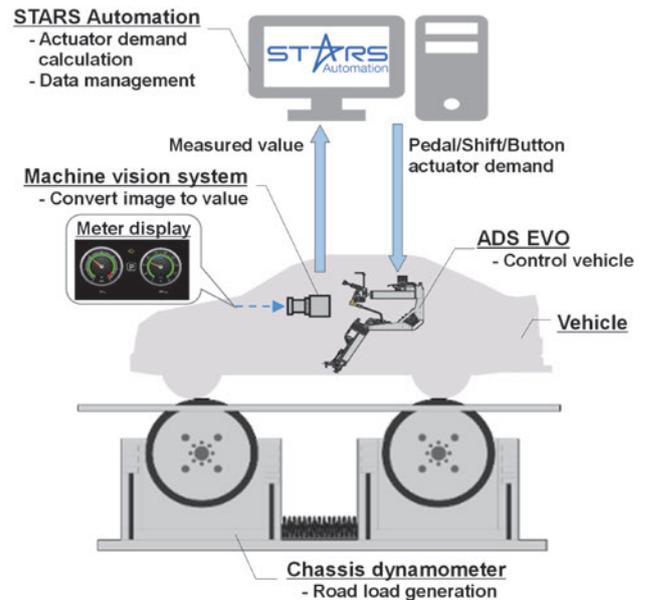


Figure 1 Diagram integrating ADS EVO and machine vision system.

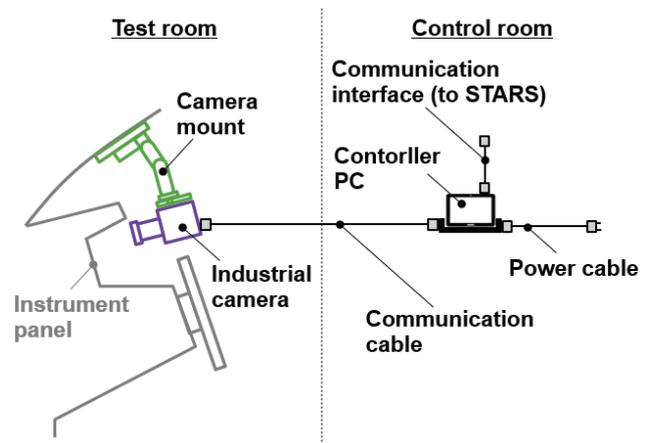


Figure 2 Machine vision system diagram.

EVOは、ドライバーに代わって車両の操作をおこない、シャシダイナモメータは路上走行に相当する負荷を車両に与える。マシンビジョンシステムは車両のインパネを撮像し、その内容を数値データに変換する。STARSは、各ブロックのデータを一括して管理するとともに、シャシダイナモメータやマシンビジョンシステムから受信したデータと所定の運転パターンに応じてADS EVOに操作指令を送る。

Figure 2に、マシンビジョンシステムの基本構成を示す。カメラは、車両の形状に関わらず取り付け可能な汎用のマウントを介してインパネ近くに取り付ける。コントローラは、試験者が操作・監視することができるようモニターが付属したものを計測室側に配置する。カメラが撮像した画像をコントローラが数値に変換し、STARSに送信する。Figure 1で示したように、ADS EVOへの指令内容をSTARSが決定するため、マシンビジョンシステムには細かいシーケンス制御やエラー判定機能などは含まず、画像から読み取った数値データをそのまま出力するように設計した。

つぎに、試験に際し必要な準備作業を説明する。**Figure 3**に準備から計測までの流れを示す。まずカメラを所定の位置に設置した後コントローラのソフトウェアを起動し、コントローラ画面に表示されるカメラの映像を見ながら画角や焦点を調整する。つぎに、車両のインパネに応じて計測方法を定義したファイル(以下、設定ファイル)を作成する。インパネの読み取りにおいて、AIのような自動的な判断に委ねる手法も考えられるが、読み取り結果を説明できないケースがあることを懸念し、試験者の意図通りに設定できることを設計の方針とした。

設定ファイルの作成は、コントローラの画面上のUIを用いておこなう。シャシダイナモメータを用いた自動車試験の例では、1日のうちに複数回、車両を入れ替えるケースがある。そのため、異なる車両に対して柔軟かつ迅速に準備できる必要がある。これを実現するUIについて、2章2節で説明する。

ADS EVOとの連携性を確保するために、カメラから伝送された画像は逐次処理され、即時にSTARSへ送信される。人間の視覚による反応時間は180 ms程度と報告されており^[9]、マシンビジョンシステムの処理時間は100 msを目標とした。処理に用いた要素技術の多くは従来手法を適用しているが、文字の読み取りについては、数値認識に特化した機械学習ベースのモデルを独自に開発することで、読み取り精度と応答性の両立を図った。これについて、2章3節でその概要を説明する。

2-2 ユーザインタフェースの開発

本節では、2章1節で説明した、車両に応じた設定ファイルを作成するUIについて述べる。まず、検査対象である自動車のインパネについて説明する。従来のアナログメータタイプに加え、デジタルメータタイプの普及や電動化・知能化による機能追加などにより、その表示内容は製造者、車

種やそのグレード展開により多種多様である。しかしながら、これらの表示方法の多くは、大きく分けて3つのタイプに分類することができる。1つ目は、車速やエンジン回転数を示す指針タイプである。2つ目は、走行距離や現在時刻のような数値表示タイプである。3つ目は、車両の状態を示すインジケータ、警告灯などの記号表示タイプである。各々の表示タイプに対して開発した読み取りアルゴリズムを、指針タイプの指示値を出力する「サークルメータ認識」、数値表示タイプの表示値を出力する「数値OCR (Optical Character Recognition)」、記号表示タイプの表示有無や色違いを整数値で出力する「パターンマッチング」と呼ぶことにする。これらの3つのアルゴリズムの中から、検査項目の種類に応じて試験者が選択できる仕様とした。

Figure 4に、設定ファイルを作成するUIと、各領域で設定できる内容を示す。領域Aでは、撮像に用いる映像ソースを選択する。設定ファイルの作成において、事前に記録した動画を選択する場合や現在接続されているカメラ番号を指定してその映像を用いる場合に、領域Aで選択作業をおこなう。領域Bには、選択された映像ソース(カメラ映像・動画ファイル)の映像が表示される。この画面を見ながら、カメラの画角や焦点を調整することができる。領域Cでは、車速、オドメータ、警告灯などの検査項目に対して、使用するアルゴリズムをサークルメータ認識、数値OCR、パターンマッチングから選択する。つぎに、検査項目ごとの解析対象の場所を、領域Bで範囲指定する。最後に、各アルゴリズムに固有の項目を設定する。例えば、サークルメータ認識では目盛りの位置と値を設定する。パターンマッチングでは、表示有無を判別するための類似性の判定基準に用いる参照画像を、領域Bで範囲指定する。数値OCRでは、事前に設定した解析対象領域に表示される文字列を自動的に識別することができるため、追加の設定作業は必要ない。領域Dでは、各検査項目ごとの読み取り処理の過程を、処理結果と合わせて確認することができる。この画面を見な

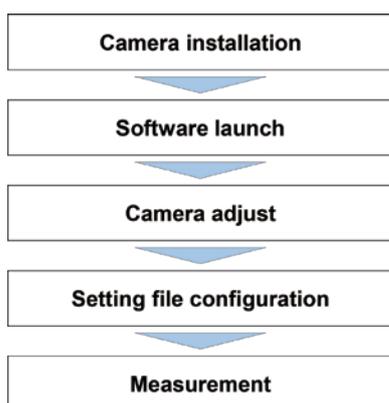


Figure 3 Operational procedure of the machine vision system.

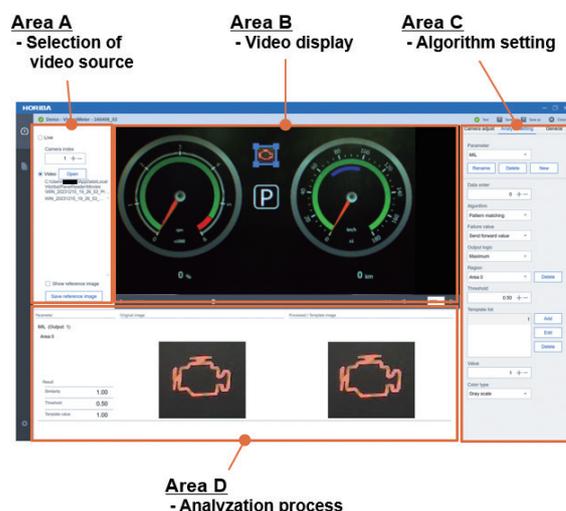


Figure 4 UI display of the setting file configuration.

がら、サークルメータ認識の目盛り位置、パターンマッチングの類似性判定に用いる閾値、数値OCRの領域設定といった、各アルゴリズムに応じた設定項目を調整することができる。

このように、検査項目ごとに使用するアルゴリズムや解析対象領域などの設定作業が必要である一方、適切な設定をおこなうことで試験者の意図通りに動作することを目的とした^[10]。

2-3 数値OCRモデルの開発

本稿におけるマシンビジョンシステムはADS EVOとの連動を想定し、数値OCRにおいても人間と同等の処理速度をねらって開発した。一方で、一般的なOCRライブラリは画像処理と数学的処理を伴う計算を要することで計算負荷が高いと言われており^[11]、実際にオープンソースOCRの1つであるTesseract^[6]を用いて試験的な実装をおこなった結果、読み取り対象が増えるとマシンビジョンシステム全体の処理時間が100 msを大きく超えるケースがみられた。そこで、数値認識に特化した機械学習手法を用いて、高速な数値OCRモデルの開発をおこなった。

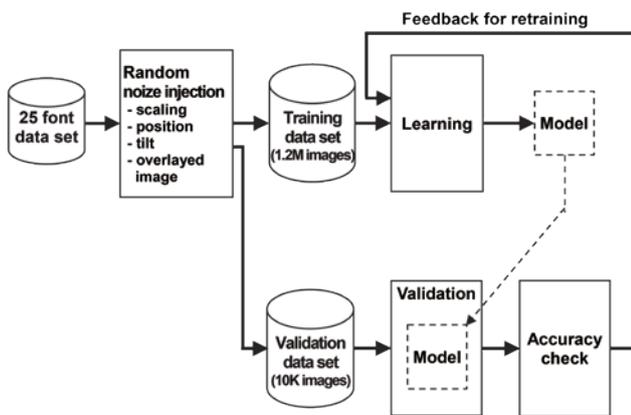


Figure 5 Process flow of model training and validation.

学習には深層学習フレームワークであるPyTorch^{TM*1[12]}を採用した。Figure 5に学習と評価の処理フローを示す。学習データセットの生成に関して、実際の車両のインパネで様々なフォントが使われることを考慮し、25種類のフォントを用いて数値画像を作成した。これに対して、数値部分のサイズ、位置および傾きに外乱を加えた。さらに、実践的な利用環境を考慮しインパネの傷や周囲の景色の映り込みを模擬するために、ランダムな画像のブレンド加工を施した。これを学習器に入力し、出力されたモデルの検証をおこなった。このように、出力根拠や処理過程の把握が難しいライブラリを使うのではなく、学習に用いるフォントや外乱を調整することで、ユーザの用途に合わせてチューニングしたOCRモデルを構築できる学習方法とした。

Figure 6に、使用した学習データの例を示す。このような画像120万枚を用いた学習と、1万枚の画像を用いた検証試験を通して学習を繰り返した結果、読み取り精度は94.4%であった。この検証では、Figure 6に示すような数字の一部が欠けている例も含む画像を対象としていることに留意する必要がある。本モデルの精度の妥当性の検証は、実運用を考慮した条件で実施し、その結果を3章2節で述べる。

最後に、数値OCRモデルの処理速度について述べる。Table 1に、本節で説明したモデルを用いたときの読み取り処理速度を示す。実験には、13th Gen Intel[®] Core^{TM*2} i7-1365U 1.80 GHz 32GB RAMを搭載したラップトップPCを用いた。1桁の数値と5桁の数値を対象としたときの読み取り処理速度を計測した結果、処理速度は30 μs程度と十分速く、両画像の処理速度の差異は5 μsと、数値の桁数が処理速度に与える影響も小さいことが確認できた。以上より、読み取り対象が増えた場合でもシステム全体の処理

*1 The Linux Foundationの登録商標または商標

*2 Intel Corporationの登録商標または商標

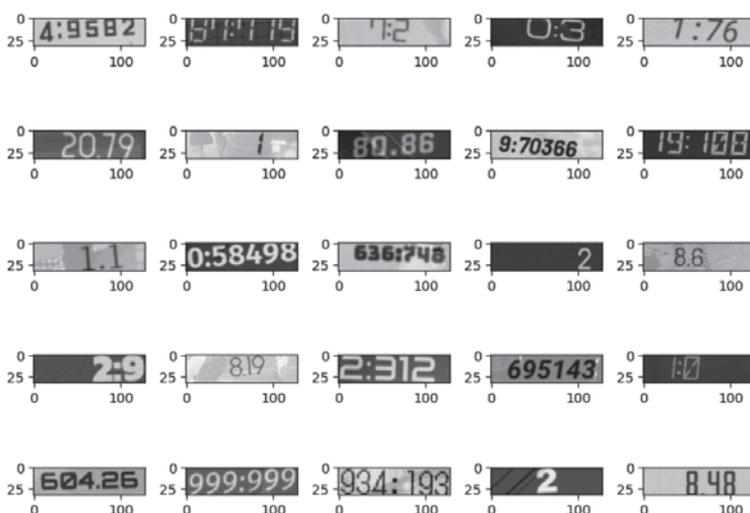


Figure 6 Training and validation data set example.

Table 1 Processing speed performance of the digit-specific OCR model.

Displayed image	Processed time
0	27 μs
29415	32 μs

速度の目標である100 msを達成できると判断し、この数値OCRモデルを本システムに採用した。

3. マシンビジョンシステム単体の評価

本章では、マシンビジョンシステム単体の読み取り精度の評価結果を述べる。3章1節では3つの読み取りアルゴリズムそれぞれについての精度評価の結果を、3章2節では実際の車両で用いられる種々のフォントの文字を用いて数値OCRモデルの追加評価をおこなった結果を報告する。

3-1 読み取り精度評価

本稿におけるマシンビジョンシステムは、対象であるインパネ表示が多様であることにより、読み取り精度の目標値を一様に定めることは容易ではない。そこで読み取り精度の評価方法として、指定の値を出力できる模擬インパネ装置を用いることとし、表示指令値に対する読み取り成功率の目標を99%に設定した。精度評価にあたり、まず各アルゴリズムにおいて読み取り値全体が表示指令値に対して連続的に追従しているかどうかを確認する。つぎに、本システムの処理時間と応答性を考察する。最後に、これらの結果をふまえてアルゴリズムごとに読み取り成功の定義をおこない、読み取り精度を検証する。

Figure 7に評価装置の模式図を示す。コントローラで入力した指令値を表示する模擬インパネを準備し、マシンビジョンシステムで計測をおこない、コントローラの指令値と比較した。模擬インパネには、車速、オドメータ、故障警告灯 (Malfunction Indication Lamp, 以下MIL) を表示し、各検査項目のアルゴリズムにはそれぞれサークルメータ認識、数値OCR、パターンマッチングを適用した。車速の指令値には、国際調和排出ガス・燃費試験方法で定められる世界統一試験サイクル (Worldwide Harmonized Light vehicles Test Cycle, 以下WLTC) の車速を用いた。オドメータについては、本稿で用いた数値OCRの読み取り最大桁数である6桁までの数値の読み取りを検証するために、WLTC1サイクルの時間内に0から999,999まで増加する指令値とした。MIL表示についても、高頻度で点灯・消

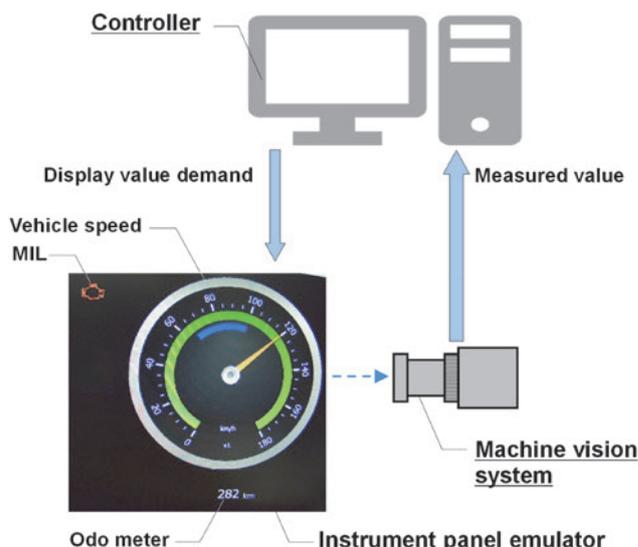


Figure 7 Performance test equipment diagram.

灯を評価するために、5秒おきに消灯、黄色点灯および赤色点灯を繰り返す指示とし、各表示を認識した場合の読み取り値はそれぞれ0、1および2とした。繰り返し再現性の確認のため、このサイクルを3回繰り返した。

Figure 8に、サークルメータ認識を用いた車速の表示指令値と計測値、および両者の相関図を示す。低速域から高速域まで、3回の計測それぞれにおいて、指令値と計測値が同様に推移している。指令値を基準とした回帰直線の傾きは0.983、 R^2 は0.998であり、追従性は良好である。針の計測値は、読み取り画像中の針のエッジ抽出処理や、設定ファイルに入力した目盛り位置から演算し出力している。そのため、針の形状や、設定した目盛り位置と実際の位置との差異から、指令値と計測値との間にわずかな差異が発生したと考えられる。

Figure 9に、数値OCRを用いたオドメータの表示指令値と計測値、および両者の相関図を示す。1桁から6桁まで、指令値と計測値が同様に推移している。指令値を基準とした回帰直線の傾きは1.00、 R^2 は0.999といずれも1に近く高い精度で指令値と計測値は一致しているが、Figure 9(b)に

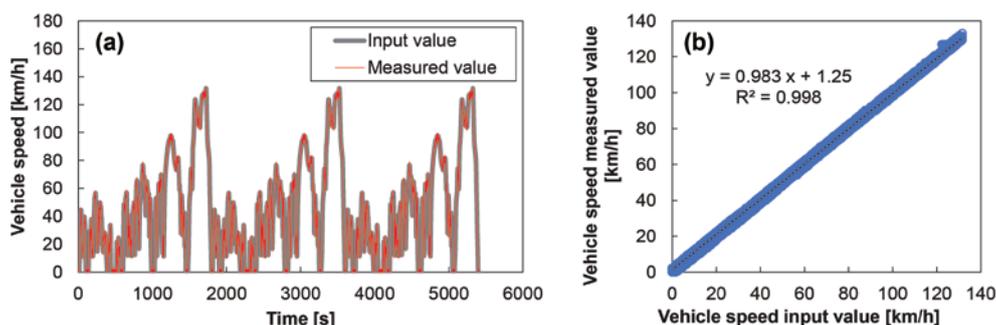


Figure 8 Displayed value vs. recognized value of (a) vehicle speed in time-series comparison and (b) correlation plot.

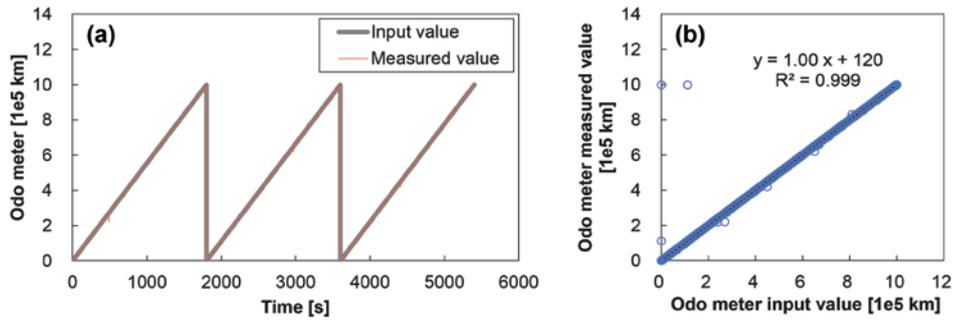


Figure 9 Displayed value vs. recognized value of (a) odo-meter in time-series comparison and (b) correlation plot.

において回帰直線から外れているプロットもわずかに見られる。Figure 9 (b) 中の回帰直線から外れているプロットの要因の1つとして、Table 2に示すような画像変化によるものがある。カメラの撮像においてシャッタースピードをゼロにすることは難しく、Table 2の“Displayed image”列に示す数値変化の途中で、2番目に示すような画像が撮像される場合がある。人間にとっても判定が難しいような画像においては無理に読み取ろうとするのではなく、複数フレームを対象とした異常値の除去処理や、過去の値を用いた補間処理の実装を今後の検討対象とする。

Table 2 Fail case example in value recognition.

Displayed image	Demand value	Measured value	Result
829	829	829	OK
830	830	880	NG
830	830	830	OK

Figure 10に、パターンマッチングを用いたMILの表示指令値と計測値を、変化が分かりやすいように、3回おこなった試験サイクルそれぞれの冒頭部分、中央部分および終了部分の拡大図を示す。MILの消灯(読み取り値0)、黄色点灯(読み取り値1)および赤色点灯(読み取り値2)いずれにおいても指令値と計測値は等しく、正確に読み取ることができている。

つぎに、以上の3つの検査項目の計測時におけるマシンビジョンシステムの処理時間およびシステム全体の応答時間を述べる。Figure 11に、車速、オドメータおよびMILの表示指令値と計測値の時系列変化を拡大して示す。車速について確認した結果、針の検出値が100 ms間隔で更新されており、目標として設定した100 ms以内での処理速度を達成していることが確認できる。オドメータとMILの計測値を確認した結果、段階的に変化する表示指令値に対して、オ

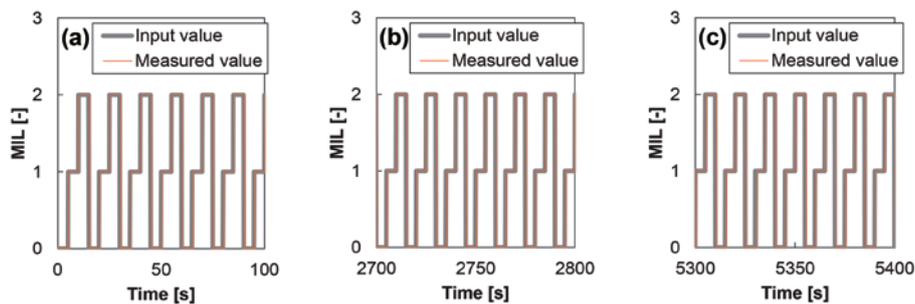


Figure 10 Displayed value vs. recognized value of (a) MIL in 1st cycle, (b) 2nd cycle and (c) 3rd cycle

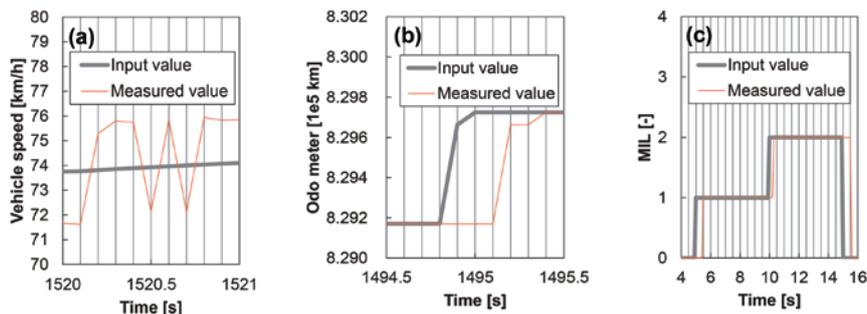


Figure 11 Displayed value vs. recognized value of (a) vehicle speed, (b) odo-meter and (c) MIL in an enlarged time window

ドメータについては300-400 ms程度遅れて、MILについては300-700 ms程度遅れて追従している。ただし、これらの追従遅れ時間(表示指令値の記録から同一の計測値が記録されるまでの時間)には、Figure 7に示したコントローラの表示指令処理や模擬インパネ本体の表示遅延も含まれている。これらを考慮したマシンビジョンシステム単体の応答時間は、別途検証をおこなうこととする。

最後に、読み取り精度の目標値99%に対する考察にあたり、まずアルゴリズムごとに読み取り成功の定義づけをおこなう。車速の読み取りに用いたサークルメータ認識については、前述の通り、読み取り処理や設定ファイルの目盛り設定による一定の誤差を考慮する必要がある。そこで、指令値と計測値との差異が、模擬インパネの1目盛りの半分の2.5 km/h以内であるとき読み取り成功と定義する。オドメータの読み取りに用いた数値OCRと、MILの読み取りに用いたパターンマッチングの評価においては、模擬インパネの表示に関わる遅延を考慮する必要がある。そこで、表示指令値が記録された後、先に述べた追従遅れ時間内に、指令値と同一の計測値が記録された場合を読み取り成功と定義する。以上の定義に則った各アルゴリズムの読み取り精度は、サークルメータ認識では99.8%、数値OCRでは97.7%、パターンマッチングでは99.1%となった。数値OCRについては目標精度に到達していないが、Table 2に示したような読み取りが困難な画像も要因の1つである可能性があり、今後の検証課題とする。

3-2 数値OCRモデルの追加評価

本システムで適用した3つのアルゴリズムのうち、数値OCRでのみ機械学習を使っており、読み取り対象によっては説明がつかない結果を出力する懸念がある。本節では、実際の車両で用いられる種々のフォントの数値画像に対する読み取り検証をおこない、数値OCRモデルのロバスト性を確認した結果を述べる。社内で取得していたインパネ画像のデータから、数値が著しく傾いたり歪んだりしているものや焦点がずれているものを除外し、13車種のインパネ上の数値計50個を対象に読み取り評価をおこなった。Table 3に、読み取り画像、画像が示す数値、マシンビジョンシステムの計測値および判定結果を示す。モデルの読み取り対象はアラビア数字のみであり、小数点(「.」)やコロン(「:」)などの記号は読み取り対象には含んでいない。読み取り対象にこれらの記号が表示されている場合、読み取り結果はアラビア数字部分のみの結果を出力する設計としており、これらの記号がある画像を含む50個全てにおいて狙い通りの読み取り結果であることが確認された。これらの記号を加味した物理値への変換が必要な場合は、マシンビジョンシステムの上位のシステムで変換することを想定している。

Table 3 Evaluation results of the font recognition test from various vehicle instrument panels.

Displayed image	Displayed value	Measured value	Result	Displayed image	Displayed value	Measured value	Result
	28384	28384	OK		164	164	OK
	35.3	353	OK		65	65	OK
	26250	26250	OK		15:48	1548	OK
	289	289	OK		8	8	OK
	76	76	OK		14497	14497	OK
	23	23	OK		467.1	4671	OK
	9:32	932	OK		76	76	OK
	23816	23816	OK		16:07	1607	OK
	678	678	OK		16.0	160	OK
	16:14	1614	OK		049348	49348	OK
	24.7	247	OK		267.2	2672	OK
	21458	21458	OK		68545	68545	OK
	19	19	OK		710	710	OK
	400	400	OK		373.7	3737	OK
	14.0	140	OK		7:59	759	OK
	040599	40599	OK		19.0	190	OK
	16:10	1610	OK		37708	37708	OK
	16	16	OK		16:30	1630	OK
	9348	9348	OK		24	24	OK
	432	432	OK		29.7	297	OK
	6.2	62	OK		34	34	OK
	25	25	OK		27008	27008	OK
	99	99	OK		11:43	1143	OK
	37754	37754	OK		170	170	OK
	53365	53365	OK		23	23	OK

4. 自動運転システム連携アプリケーション

本稿におけるマシンビジョンシステムは、ADS EVOと連携した試験シーケンスに組み込むことをねらって開発した。本章では、HORIBAの研究開発の中でPoCをおこなったADS EVO連携アプリケーションの事例を紹介する。

4-1 ギアシフトインジケータ連動アプリケーション

ADS EVOは、オートマチックトランスミッション車両だけでなく、マニュアルトランスミッション車両のシフト操作にも対応している。一方、一部の車両においてギアシフトインジケータ (Gear Shift Indicator, 以下GSI) と呼ばれるギアシフト支援機能が搭載されている。GSIとは、走行状況に応じて推奨するギアを、インパネ表示を通してドライバーに通知する機能である。国連統一法規UN Regulation No. 154においても、電動車両でGSIを備えた車両についてはその推奨ギア表示に従ってシフト操作をおこなうことが求められており^[13]、正確な燃費・電費・排出ガス測定のためにはGSIに従った走行が不可欠である。ADS EVOのみの使用では、インパネ表示を読み取ることができないため、GSIに則った走行をおこなう場合は試験者が運転操作をしていた。本節では、ADS EVOとマシンビジョンシステムを組み合わせることにより、GSIの表示に応じた自動変速を実現した事例を紹介する。

Figure 12に、試験車両のGSIの操作方法を示す。Dシフトからシフトノブを左に倒すと、前後に動かすことでシフトアップ/ダウンができるシフト位置になる。この状態から、

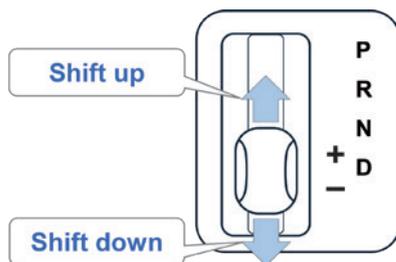


Figure 12 Operational method of GSI shift in the test vehicle.

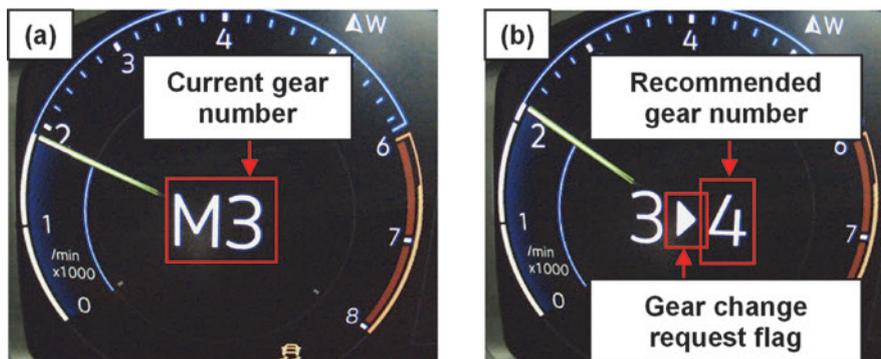


Figure 13 Meter display of (a) current gear and (b) gear number recommendation.

インパネのシフト表示にあわせてADS EVOがシフト操作をおこなう。

Figure 13に、試験車両のインパネ表示を示す。GSIシフトで走行しているとき、Figure 13(a)に示す現在のギア(以下、現在ギア)が表示される。車速をあげていくと、Figure 13(b)に示す、ギア変速を促す記号(以下、ギア変速リクエスト)と推奨ギア(以下、推奨ギア)が表示される。

試験には、2章1節のFigure 1に示すシステムを用いる。マシンビジョンシステムは、インパネ表示の現在ギアとギア変速リクエストをパターンマッチングで、推奨ギアを数値OCRで読み取り、STARSに送信する。STARSはギア変速リクエストを認識すると、推奨ギアに到達するようにシフト操作指令をADS EVOに送信する。

以上の方法により、試験車両の最高ギアである7速に到達するまで加速し、その後減速する走行を実施した。この試験走行において、加速時にはギア変速リクエストが表示されるが、減速時にはギア変速リクエストが表示されず試験車両により自動的にシフトダウン操作がおこなわれた。また、1速から2速へのシフトアップ操作については、ギア変速リクエストがなかなか表示されなかったため、過回転によるエンジン過負荷を懸念し、手動でギア変速をおこなった。Figure 14に、インパネのギア変速表示に応じてADS EVOがシフト操作をおこなった区間(2速から7速のシフトアップ区間)における車速、現在ギア、推奨ギアおよびSTARSが発出したシフト操作指令信号を示す。2速での走行中には「M2▶M4」のギア変速要求が表示されたため、シフト操作は連続して2回おこなわれ推奨ギアである4速にシフトすることができている。この後は、1速ごとにシフトアップするよう推奨ギアが表示され、これに応じて正しくシフト操作が実施されている。また、マシンビジョンシステムによる推奨ギアの認識からSTARSのシフト操作指令までは100 ms以内に瞬時に実行されており、システム全体の応答時間も問題ないと判断する。今後、本システムを用いて、GSI表示に従った法規サイクル運転などの実証を進めていく予定である。

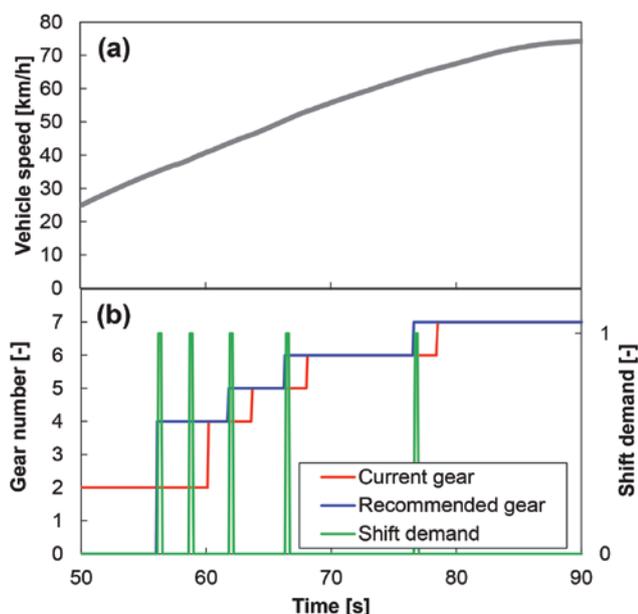


Figure 14 (a) Vehicle speed profile and (b) transition of current gear, recommended gear and shift demand.

4-2 アダプティブクルーズコントロール評価アプリケーション

つぎに、先進運転支援システム (Advanced Driver Assistance System, 以下ADAS) の評価でのマシンビジョンシステム活用事例を紹介する。通常、ADASに関わる評価はテストコースをはじめとする実環境でおこなわれるが、近年では試験室内での評価手法も研究されている^[14]。本節では、ADASの主要機能の1つであるアダプティブクルーズコントロール (Adaptive Cruise Control, 以下ACC) の試験室内評価に、ADS EVOとマシンビジョンシステムを用いた結果を報告する。

ACCは車両の速度を一定に制御するだけでなく、センサーやカメラを用いて先行車を認識することにより、先行車に追従して走行することができる。全車速域追従機能が付いている場合は、一度走行を開始すると停止に至るまで試験車両に対する操作は必要ない。しかし、ACC走行を開始する前には、ACCの機能の有効/無効の切り替え (以下、ACC状態) や、許容する最大車速 (以下、設定車速)、先行車との距離 (以下、設定車間) といった、ACCの動作に関わる条件設定をおこなう必要がある。また、先行車に追従して停止するときや先行車が再発進するときには、ブレーキペダルやステアリング上のボタンに対する所定の操作が要求される。こうした操作はインパネ表示に応じておこなう必要があるが、ADS EVOのみの使用ではインパネ表示を読み取ることができないため、試験者の操作が必要であった。そこで、ADS EVOとマシンビジョンシステムを組み合わせ、走行前のACCの設定操作とACC機能による走行を自動化した事例を紹介する。

Figure 15に、試験車両のインパネ表示を示す。ACC機能を有効にするボタンを押すとACC状態が点灯し、設定車速や設定車間を調整するボタンの操作に応じて設定車速の値や設定車間を示す矢印の位置が変化する。本試験車両では、設定車間を5段階で調整することができる。設定車間が最も短い設定を“Short”、中央の設定を“Middle”、最も長い設定を“Long”と呼び、これらの3つの設定車間を本節で用いることにする。

Figure 16に、試験に用いたシステムの構成を示す。マシンビジョンシステムは、ACC状態と設定車間をパターンマッチングで、設定車速を数値OCRで読み取り、STARSに送信する。STARSは、ACC状態、設定車速および設定車間の現在の読み取り値を常に認識しており、試験者が設定した試験条件 (設定車速、設定車間) に一致するように、所定のボタンの操作指令をADS EVOに送信する。試験車両は外部認

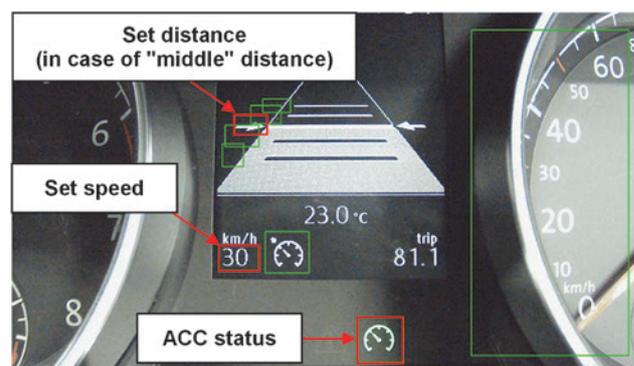


Figure 15 Meter display of ACC status, set speed and set distance.

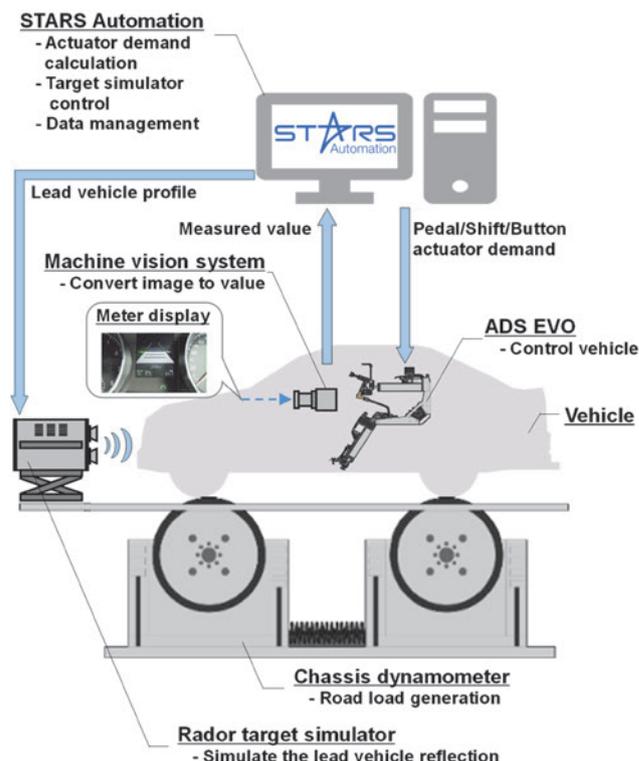


Figure 16 Test system diagram.

識にレーダーセンサーを用いており、先行車の反射波を模擬するためにレーダータラゲットシミュレータを使用した。STARSは、事前に試験者が指定した先行車の走行プロファイルと試験車両の車速から、自車と先行車との相対関係を算出し、これをレーダータラゲットシミュレータに送信する。以上の機能により、マシンビジョンシステムとADS EVOによる動作区間と、車両自身が持つACC機能による走行区間とを組み合わせることで、試験者が設定した条件通りに先行車に追従して走行することができる^[15]。

このシステムを用いて設定車間を変えたときの車速と車間距離を計測した。先行車の走行プロファイルにはWLTCを適用した。ストップ＆ゴーが多くADS EVOの動作頻度の高い市街地モード(Lowフェーズ)における車速と車間距離の時系列変化をFigure 17に示す。いずれの設定車間においても先行車の車速に追従するとともに、走行時と停止時のいずれにおいても設定車間“Long”、“Middle”、“Short”の順に車間距離が短くなっていることが確認できる。設定車間と車間距離の結果が整合していることは、マシンビジョンシステムを活用して調整した設定車間が正しく車両に反映されていることを示しており、本システムの妥当性が確認できたと考える。

5. 効率化の考察

4章で述べたADS EVOとマシンビジョンシステムを組み合わせさせたシステムの導入により、試験者の負荷軽減や省人化に寄与する可能性がある。一方、これらの機器の運用には準備作業が必要であり、これに要する時間も考慮したうえでシステムの導入効果を見極めることが重要である。本章では、ADS EVOとマシンビジョンシステムを用いた走行試験を実施した場合に、試験者自身が運転操作をおこなう場合と比べて捻出できる時間の簡易的な試算をおこなった。この試算では、1回の試験時間をWLTC相当の30分、データの確認や装置・供試体の調整のための試験間隔を30分とし、1日8時間の稼働時間の中で7回の試験を実施するケースを想定した。

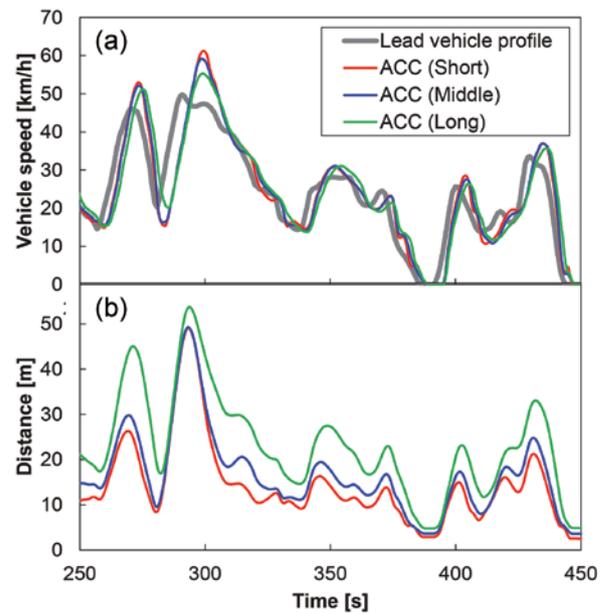


Figure 17 (a) Vehicle speed and (b) inter-vehicle distance at different set distances.

Table 4に、システムの準備や片づけに要する時間を示す。これによると、準備と片づけに必要な時間は合計63分である。このシステムを使用した場合に人的操作を不要とする走行試験時間は計210分であるため、差し引きで147分の作業時間を捻出することができる。これにより、試験者の負荷を軽減したり別業務に時間を振り分けたりするといった生産性向上に寄与すると考える。

Table 4 Classification of pre-test and post-test procedures for automated driving tests.

Main category	Subcategory	Time
Pre-test procedure	ADS EVO installation	8 min
	Camera installation	5 min
	Test run for software configuration	5 min
	Software configuration	5 min
	Vehicle characteristic learning	25 min
Post-test procedure	Disassemble / Removal of test equipment	15 min
Total time of pre-test and Post-test procedure	—	63 min

6. おわりに

本稿では、車両のインパネ表示を画像解析技術により数値データに変換し、自社製の試験システムと連携可能なマシンビジョンシステムについて、以下の内容を報告した。

- ・車両ごとに異なるインパネ表示に対応するため、3つの読み取りアルゴリズムとこれらの設定操作をおこなうUIを開発した。
- ・文字の読み取り対象が増えても高速処理ができることをねらい、数値認識に特化した機械学習モデルを構築した。
- ・3つのアルゴリズムいずれにおいても目標に近い、高い読み取り精度を実現するとともに、目標としていた時間内での処理を達成していることを確認した。
- ・GSIやACC機能の動作に関わるインパネ表示を起点として、ADS EVOと連携した試験が可能であることを示した。
- ・これらのシステムの運用にあたって必要となる準備や片づけ作業を含め、全体として試験効率化につながることを工数の試算により確認した。

以上から、本稿のマシンビジョンシステムが単なる記録装置にとどまらず、自動車試験の効率化に対して有効な要素であることを示した。今後は、本システムの製品化と市場導入を進め、市場からのフィードバックを元に機能や性能の改善を継続していく。具体的には、ぶれやぼけなどの視認性が低下する要因を含む画像の読み取りにおけるロバスト性の向上、異常値の除去や補正機能の開発、アルゴリズムのさらなる拡張や設定支援機能の強化などを進める予定である。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] 経済産業省・国土交通省, モビリティDX戦略, 2024
- [2] 駒田峰之ほか, HORIBAの最新自動車実験棟“E-LAB”, HORIBA Readout, Vol.46, pp.47-50, 2016
- [3] 堀場製作所, ADS EVO製品紹介ページ:
<https://www.horiba.com/int/automotive/products/detail/action/show/Product/ads-evo-1994/>
(2025-05-19)
- [4] 鷺見和彦ほか, マシンビジョン技術の実利用, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol.124, No.3, pp.598-605, 2004
- [5] S.Kalkar, et al., Machine Learning Based Instrument Cluster Inspection Using Camera, *SAE Technical Paper 2022-28-0076*, 2022
- [6] Tesseract OCR, <https://tesseract-ocr.github.io/>, (2025-05-19)
- [7] Hough Line Transform, https://docs.opencv.org/3.4/d9/db0/tutorial_hough_lines.html, (2025-05-19)
- [8] Template Matching,
https://docs.opencv.org/4.x/d4/dc6/tutorial_py_template_matching.html
(2025-05-19)
- [9] A.T.Welford, Introduction: An Historical Background Sketch, *Reaction Times*, pp.1-23, ACADEMIC PRESS, 1980
- [10] 小松陽二ほか, 「供試体表示認識装置, 供試体試験システム, 供試体表示設定装置, 供試体表示認識方法, 及び, 供試体表示認識プログラム」WO2024/204704, 2024年10月3日
- [11] B.Sunghwan, et al., Performance Characterization and Parallelization of Tesseract Optical Character Recognition on Multicore Architectures, *Proceedings of IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*, 2016
- [12] PyTorch, <https://pytorch.org/>, (2025-05-19)
- [13] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), UN Regulation No. 154: Uniform provisions concerning the approval of light duty passenger and commercial vehicles with regards to criteria emissions, emissions of carbon dioxide and fuel consumption and/or the measurement of electric energy consumption and electric range (WLTP), Supplement 1 to the 02 series of amendments, Annex B8, Paragraph 1.5, 2024
- [14] 香月影幸ほか, 自動運転に向けた実車両を使った検証 (VIL) を実現する際の課題と対策, 自動車技術会学術講演会予稿集 (春) 20235045, 2023
- [15] 小松陽二ほか, 「供試体試験システム, 供試体試験方法及び供試体試験プログラム」WO2024/070865, 2024年4月4日



小松 陽二

KOMATSU Yoji

株式会社堀場製作所
エネルギー・環境本部
エネルギー・環境システムセンター
電動モビリティ部
E-Mobility Dept.,
Energy & Environment System Center
Energy & Environment Division,
HORIBA, Ltd.



Rohit Shiv PRASAD

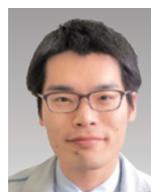
株式会社堀場製作所
エネルギー・環境本部
エネルギー・環境システムセンター
電動モビリティ部
E-Mobility Dept.,
Energy System Center,
Energy & Environment Division,
HORIBA, Ltd.



横田 将史

YOKOTA Masashi

株式会社堀場製作所
エネルギー・環境本部
エネルギー・環境システムセンター
電動モビリティ部
E-Mobility Dept.,
Energy System Center,
Energy & Environment Division,
HORIBA, Ltd.



道北 俊行

MICHIKITA Toshiyuki

株式会社堀場製作所
エネルギー・環境本部
エネルギー・環境システムセンター
電動モビリティ部
E-Mobility Dept.,
Energy System Center,
Energy & Environment Division,
HORIBA, Ltd.

燃料電池における生産プロセス最適化探索のための自動実験装置の紹介

Introduction of Automated Experimental Equipment for Exploration of Production Process Optimization in Fuel Cells

吉村 紗矢香

YOSHIMURA Sayaka

秋山 久

AKIYAMA Hisashi

西貝 大樹

NISHIGAI Hiroki

舘野 宏志

TATENO Hiroshi

カーボンニュートラル社会の実現において、燃料電池は重要な技術である。その性能の研究開発だけでなく、社会に安定供給するための生産プロセス確立もまた非常に重要な技術である。しかしその生産プロセスにおける燃料電池性能向上にかかわるパラメータは膨大であり、社会実装には多大な時間を要する。堀場製作所ではその生産プロセス開発に寄与するために、燃料電池の生産プロセスを模擬した自動実験装置の製作をした。本装置は燃料電池の塗布・乾燥プロセスに焦点を当て設計・製作し、燃料電池のサンプル製作と基礎的な評価を行うことが可能である。ここではその装置について全体コンセプトとそれぞれの機能を紹介する。

Fuel cells are an important technology for the realization of a carbon-neutral society, and not only the research and development of their performance, but also the production process to ensure a stable supply to society is an extremely important technology. However, the parameters involved in the production process are enormous and social implementation requires a great deal of time. In order to contribute to the production process, Horiba has developed an automated experimental device that simulates the fuel cell production process. This apparatus was designed and fabricated with a focus on the fuel cell coating and drying processes, and is capable of fabricating fuel cell samples and performing basic evaluations. Here we introduce the overall concept and functions of the apparatus.

はじめに

研究や開発、製造分野のDX (Digital Transformation) にとって、質の良いデータを取得することは、対象の状態を正確に把握し、データ駆動による判断・管理を実現するために、非常に重要である。堀場製作所には様々な分析計があり、例えばバッテリーのライフサイクルの各プロセスに対し、その状態を把握するための様々なデータを取得することができる (Figure 1)。

また、日本の燃料電池は、世界に技術を先駆しているが、発電効率、耐久性、生産性を両立した最適設計はかならずしも達成できておらず、特に生産技術はその膨大なプロセスパラメータと複雑な物理現象からなるがゆえに、まだ開発の余地がある。研究により開発された高性能な新材料を実社会で活用していくためには、性能を維持しつつも目標コストを達成できるよう、量産プロセスに適応、つまり、プロセスのスケールアップ、スピードアップを図る必要がある。これらのプロセス条件を最適化するために、従来は、カン・コツ・経験に頼って試行錯誤を繰り返したり、膨大

なプロセスパラメータの組み合わせを総当たりで実験を行ったりしており、膨大な費用と時間がかかっている^[1]。

NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) は、産学官が長期的視野を共有して技術開発に取り組むために、燃料電池・水素技術開発ロードマップを策定、公開しており、様々なプロジェクトを推進している。堀場製作所は、2023年度よりNEDOが推進しているプロジェクトの一つである「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた 共通課題解決型産学官連携研究開発事業」に参加した。本プロジェクトの目的は、燃料電池の生産プロセスの開発スピードを飛躍的に向上するために、AIロボットを活用した自動実験/自律探索システムに基づく「プロセスインフォマティクス」の共通基盤を構築することである。東京大学が標準プロセスの開発、金沢大学が標準インクの試作、九州大学が評価方法の開発を担当し、堀場製作所は要素開発を担い、燃料電池触媒層の生産を模擬した自動実験装置を製作した。

● バッテリー開発・製造・再利用におけるトータルソリューションを提供

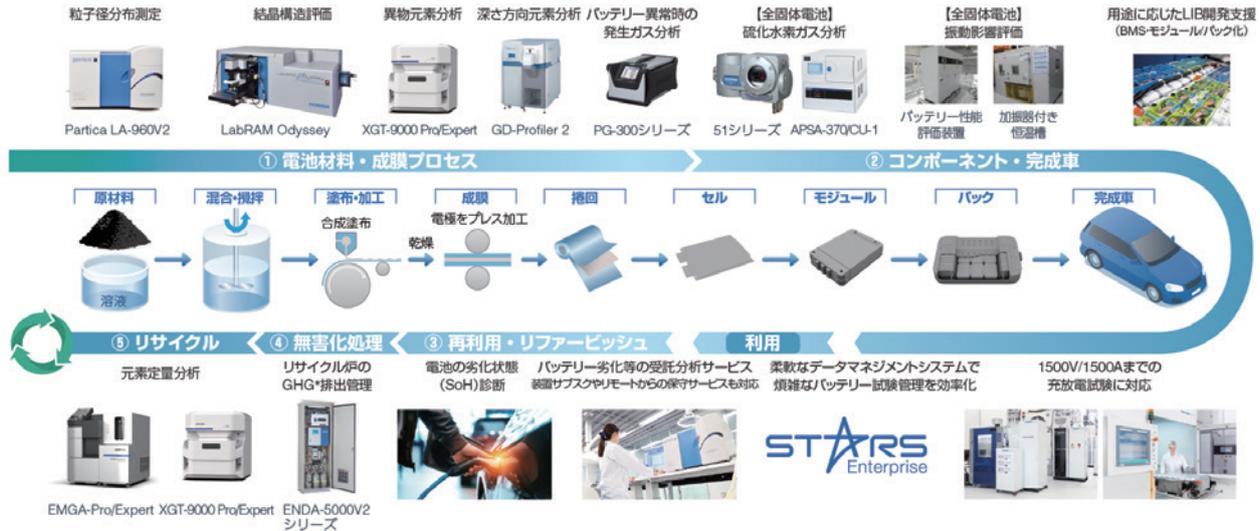


Figure 1 Battery life cycle and related analytical equipment.

プロジェクトにおける装置のコンセプト

今回製作した装置は、より短時間で燃料電池の生産が求められる中で、特に生産時間と性能に寄与する、触媒層のエージングプロセスに焦点を当てている。具体的には「塗布」、「乾燥」の機能搭載と、それに関わる「評価」を自動で行う機能を持つ。またKPIとして「人が行う実験手法に対し自動実験の速度を10倍にする」を掲げている。今後の利活用の段階では社会実装を視野に入れているため、その背景を踏まえて以下に述べる3つ大きな要求機能を設け設計コンセプトとした。

①既存の建屋に導入できるように、エレベータに乗るサイズとする

燃料電池生産メーカーの装置は大量生産を想定しており、何百メートルにもわたる巻シートを送りながらRtoR (Roll to Roll) 方式でシート上に電池材料を塗布していく。またその乾燥プロセスは各社ノウハウがあり温度や風量、時間や流線といったパラメータを、量産プロセス検討時に突き詰めることで歩留まりを抑える様々な工夫がされている。そのため燃料電池生産装置の中でも塗布・乾燥部分だけで10 mを超える装置は少なくなく、その規模の装置を生産プロセスの開発のために導入するのは現実的ではない。今回の装置は小型化を図り、工場に設置されているようなエレベータに乗るサイズとすることで、既設の建屋を改造することなく設置できることを目指した。

②実際の生産ラインへの条件適用を想定、かつ低コストでの運用

実際の生産にスケールアップする際の変化を抑えるために、生産装置の熱風乾燥によるゾーンヒーティングを模擬した多段乾燥炉を採用した。また高価な燃料電池材料の消費を抑えるため、ダイコート式の塗布機構を採用した。

塗布する膜厚条件によるが、インク材料1 mLに対し100枚を目安とし、1 cm²の塗布面積とすることで低コストでの運用を可能としている。

③カスタマイズ性を持たせるために、計測ユニットをモジュール化する

塗布・乾燥装置で燃料電池触媒層のサンプルを製作した後は、性能評価を行う。本装置では評価内容を表面粗さ、画像解析、電気伝導率としたが、データの蓄積により今後の評価の多様性を反映できるように、各計測ユニットをモジュール化している。

装置の紹介

装置全体概要

まずは装置の全体写真をFigure 2に示す。装置は主に製作プロセス、評価プロセスの2つの機能を持ち、サンプルホルダが装置内を移動することで燃料電池用薄膜の製作から評価プロセスを行うことができる。またストッカー装置を別体で用意し108個のサンプルホルダを保管できる構造とし



Figure 2 Automatic testing equipment.

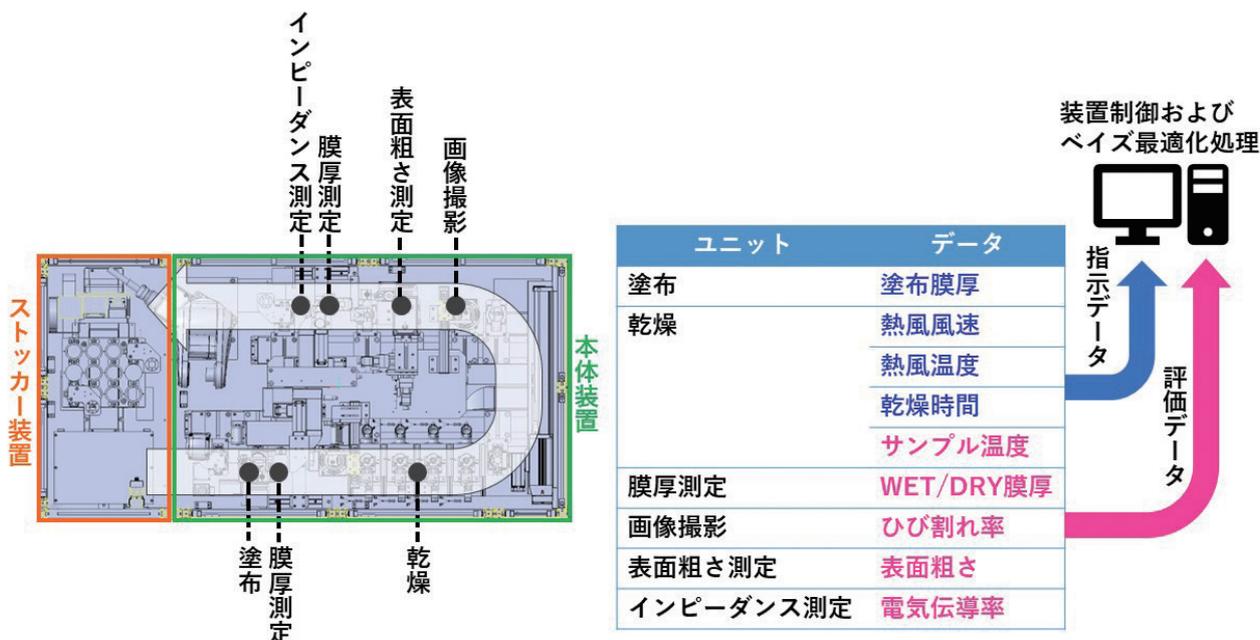


Figure 3 Top view of the equipment and overview of data transfer

ており、サンプルホルダの交換を1度/日実施し24時間体制で稼働させることで約162条件の試験が可能となる。これまでの経験から、人が1日に行う試験は約10条件であるため、人に対する試験速度10倍のKPIを達成している。

また各ユニットで授受可能なデータについて簡易イメージ図をFigure 3に示す。指示データをもとにサンプルの製作を行い、評価プロセスで得た測定データをもとに次の製作プロセスの条件を決定、このプロセスを繰り返す。またその条件は東京大学が製作したバイズ最適化アルゴリズムで決定している。次に各ユニットについて紹介を行う。

サンプルホルダおよび搬送

サンプルの搬送や保管および成膜条件の変更を容易にするために、専用のサンプルホルダを設計した。保持できるシート膜厚は50 μmであり、今回の評価で用いた樹脂シート以外のシート材料にも、近い膜厚であれば保持することが可能である。乾燥炉の熱風に耐えられるようにスーパーエンジニアリングプラスチックの一種であるPPS樹脂(ポリフェニレンサルファイド)を材料に選定している。また装置内部に搬送路とロボットアームを備え、各ユニット間の移動やストッカーへの移動を円滑に行っている。これらの構造により、実際の生産装置で採用されるRtoR方式の装置と比較し、装置の小型化や塗布材料の汎用性を持たせている。

塗布

インクの消費量を抑え、かつ様々な評価に適用可能とするため、技術研究組合FC-Cubicの標準セルと同じ1 cm²という必要最小サイズで塗布を行う。また試験ごとに膜厚条件を設定するため、生産工程と同原理かつ枚葉塗布できる、

プランジャーポンプ駆動によるダイコート方式を採用した。この膜厚条件は50 μm~200 μmの範囲で任意に指定ができる。試験間に発生するスリットダイのインク乾燥という課題に対して、微量のインクを捨て打ちシートに塗布することで、1ロットを通して試験を行うことが可能である (Figure 4)。

膜厚測定

塗布工程の品質は、乾燥前後の膜厚と後述の画像撮影による形状測定によって監視される。膜厚測定については、塗布直後のWET状態の膜厚と、乾燥直後のDRY状態の膜厚を計測することができる。サンプルの特徴から共焦点光学式の変位計を用いており高さ分解能1 μmでの計測が可能である。WET状態の膜厚については、スリットダイの直後に膜厚計を配置し、塗布動作と同期させることで塗布直後の膜厚を計測することが可能である。



Figure 4 Coating test sample.

乾燥

生産ラインを模擬し、それぞれ別の乾燥条件を設定できるように、独立で制御可能な熱風式乾燥炉を4ゾーン設けた (Figure 5)。各乾燥炉では、風速を0~10 m/sec、温度を常温~180度、および乾燥時間を任意に設定することが可能である。この熱風の制御には株式会社堀場エステック社製のマスフローコントローラSEC-E50を使用し、高精度な流量制御を行っている。また乾燥中のサンプルの中心表面温度を、堀場製作所の放射温度計IT-480Fで計測し、サンプルの乾燥の指標としてモニタ出来るようにしている。この放射温度計は本装置向けに測定距離と測定スポット径を専用カスタマイズしており、装置の小型化に寄与している。さらに炉内の複数点をシース熱電対で温度測定し、生産設備にスケールアップするときには炉内の温度条件を比較できるようにしている。

画像撮影および表面粗さ測定

塗工や乾燥条件により、乾燥後のサンプルにひび割れや表面粗さの違いが生じる。塗布領域に対してのひび割れ率を正しくとらえるため、塗布試料の乾燥前後にてテレセントリック光学系および透過光により撮影し、得られた画像から画像処理にて塗布領域内のひび割れ率を測れるようにしている。また、高画素カメラを用いることで画素分解能 $6.9\mu\text{m}/\text{Pixel}$ で10 mm角以上の領域を計測することができる。

表面粗さについては、乾燥後に白色干渉計を用いて1 mm角エリアの表面粗さを、高さ分解能 $1\mu\text{m}$ で計測できる。また、カットオフ周波数を選択することで、カットオフ周波数以下の細かい表面粗さ、カットオフ周波数以上の粗い表面粗さを計測できるようになっており、サンプルの表面性状の指標にできる。

インピーダンス測定

評価の最後として接触式のインピーダンス計測を行っている。小片サンプルの測定を行うため小型のサンプルプローブを採用している。また再現良く計測するために、接触時の圧力が一定になるようにプローブの固定を行っている。

上記各ユニットを経由し、サンプルホルダは最後にストッカーに戻される。得られた情報をもとにベイズ最適化が行われ、次の製作パラメータを決定し、サンプルの製作が開始される。この間、人の介在はなく、指定したパラメータの最適値を導くための自動実験が可能である。

おわりに

本稿では、堀場製作所で製作した、燃料電池の塗布・乾燥の生産プロセスを模擬した自動実験装置を紹介した。この装置により、コンパクトでありながら、燃料電池の生産パラメータと評価パラメータの一貫したデータ制御を行うことが可能となる。塗布・乾燥プロセスは、燃料電池の生産プロセスにおける一部分ではあるが、この装置から得られたデータを用いて、データ主導で生産条件を最適化することが達成できた暁には、プロセスインフォマティクスを用いた省人、省スペースでスピード感のある生産設備の社会実装が実現可能になると考えている。さらにFigure 1で示したような様々な分析計を応用することで、新たな評価項目、例えば塗布前のインク材料の管理や、バッテリーパックの劣化評価など多種にわたるデータの取得や、新たな指標の実装が可能になることから、燃料電池全体のライフサイクルに対し、DXソリューションとして重要な役割を担うことができると考えている。研究における非常に重要なデータを取り扱う分析計メーカーとして、プロセスインフォマティクスの活用や、開発者や研究者が求めるDXソリューションの提案に努めていきたい。



Figure 5 Drying unit

謝辞

本プロジェクトを通して全体の運営や多大なるサポートをくださったNEDOの皆様には厚く御礼申し上げます。また塗布や乾燥の生産設備に関する深い知見や様々なアドバイスをいただいたオールスターFCおよびFC-Cubicの皆様には深く感謝申し上げます。また共同プロジェクトメンバーとして様々なご協力、ご助言をいただいた東京大学、金沢大学、九州大学の皆様には深謝の意を表す。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構), NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ-FCV・HDV用燃料電池ロードマップ(解説書), p187, (2025), https://www.nedo.go.jp/library/battery_hydrogen.html



吉村 紗矢香

YOSHIMURA Sayaka

株式会社堀場製作所
開発本部 オープンイノベーションLab部
サブリーダー
Assistant Section Leader,
Open Innovation Lab Dept.,
R&D Division,
HORIBA, Ltd.



秋山 久

AKIYAMA Hisashi

株式会社堀場製作所
開発本部 オープンイノベーションLab部
Open Innovation Lab Dept.,
R&D Division,
HORIBA, Ltd.



西貝 大樹

NISHIGAI Hiroki

株式会社堀場製作所
開発本部 オープンイノベーションLab部
Open Innovation Lab Dept.,
R&D Division,
HORIBA, Ltd.



館野 宏志

TATENO Hiroshi

株式会社堀場製作所
開発本部 オープンイノベーションLab部 副部長
Deputy Department Manager,
Open Innovation Lab Dept.,
R&D Division,
HORIBA, Ltd.

PM2.5自動成分分析装置PX-375を用いた 大気環境DXの実践例

Using PM2.5 Automatic Component Analyzer PX-375 Practical Examples of Air Quality DX

山口 佳津紀

YAMAGUCHI Kazuki

大気環境の監視は環境保全や健康被害防止の観点から継続的に行われており、主に窒素酸化物やオゾンの監視が中心だったが、近年では粒子状物質(PM)やそこに含まれる重金属による健康影響への関心が高まっている。従来の粒子状物質の成分分析手法は、試料前処理や専門知識を要し、リアルタイム性に課題があった。これに対し、「PX-375」と「Eco-WEB」を活用したモニタリング手法とデータ活用手法を提案する。PX-375は粒子状物質中の含有元素を短時間で連続測定可能であり、Eco-WEBはデータのリアルタイム収集・解析を実現する。これにより迅速かつ効率的な環境監視が可能となり、工業地域や製造業における環境負荷低減に貢献することが期待される。

Monitoring of the atmospheric environment has been conducted continuously from the viewpoints of environmental preservation and health hazard prevention, mainly focusing on monitoring nitrogen oxides and ozone, but recently there has been growing interest in the health effects of particulate matter (PM) and heavy metals contained therein. Conventional methods for analyzing particulate matter components require sample pretreatment and expertise, and have real-time performance issues. We propose a monitoring method that utilizes the PX-375 and Eco-WEB: the PX-375 enables continuous measurement of elements contained in particulate matter in a short time, while Eco-WEB realizes real-time data collection and analysis. The Eco-WEB enables quick and efficient environmental monitoring and is expected to contribute to the reduction of environmental burdens in industrial areas and manufacturing industries.

はじめに

大気環境の監視と管理は、環境保全および健康被害防止の観点から極めて重要であり、これまでも継続的に行われてきた。その重要性は現在も高まり続けており、工業地域においては大気汚染物質の排出が地域住民の健康や周辺環境に与える影響が懸念されており、正確かつ継続的な監視体制の構築が急務である。大気環境の監視にはハイボリュームエアサンプラなどで大気中の粒子状物質 (Particulate Matter, PM) を捕集フィルタ上に採取し、ICPMS/AES (ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry): 誘導結合プラズマ質量分析, ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy): 誘導結合プラズマ発光分光分析) などを用いて含有元素の種類と量を測定している。

しかし、この方法では24時間捕集したサンプルを酸分解や

試料前処理といった多数の工程で処理し、測定には専門的な知識と技術が求められる^[1]。結果としてサンプリング後の分析に時間がかかり、リアルタイムなデータ収集や解析が困難という課題がある。また、得られたデータは24時間捕集した粒子状物質の総量であり、1日のどの時間帯に捕集されたものかを判別することは難しい。

これらの課題を解決するために、「PM2.5自動成分分析装置PX-375」^{[2],[3]} (以下、PX-375) と大気環境監視システム「Eco-WEB」 (以下、Eco-WEB) を活用した大気環境モニタリングの手法を提案した。本手法は、データのリアルタイム収集と自動解析を通じて、迅速かつ効率的な環境監視を実現するものである。

PX-375は、質量濃度分析部と元素濃度分析部を内蔵した装置であり、大気中の粒子状物質をテープ上に捕集し、粒子状物質中の質量および特定元素を、最短30分間隔で連続測

定することが可能である (Figure 1)。これにより粒子状物質に含まれる元素を調べることで、どのような場所から排出されたものであるかを簡単、迅速に推測することが可能となる (Figure 2)。

一方でPX-375は標準で15種類の元素を自動的に連続測定可能であるため、日々膨大なデータが生成される。これらを手作業で解析するには時間と労力を要し、迅速な対応が困難となる。そこで当社ではPX-375のデータを統合的に収集・処理するシステム「Eco-WEB」を開発した。Eco-WEBは複数の計測機器を接続することが可能な計測ネットワークを構築することで環境データの収集及びデータの解析を容易にするためのシステムである (Figure 3)。

このシステムにより、従来困難だったリアルタイムなデータ収集と解析が可能となり、効率的な大気監視が可能となった。

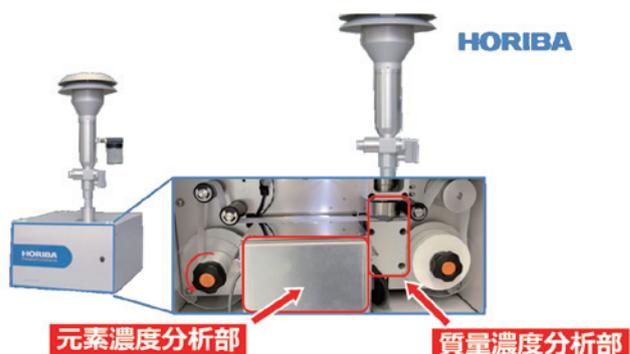


Figure 1 Continuous Particulate Monitor with X-ray Fluorescence PX-375.

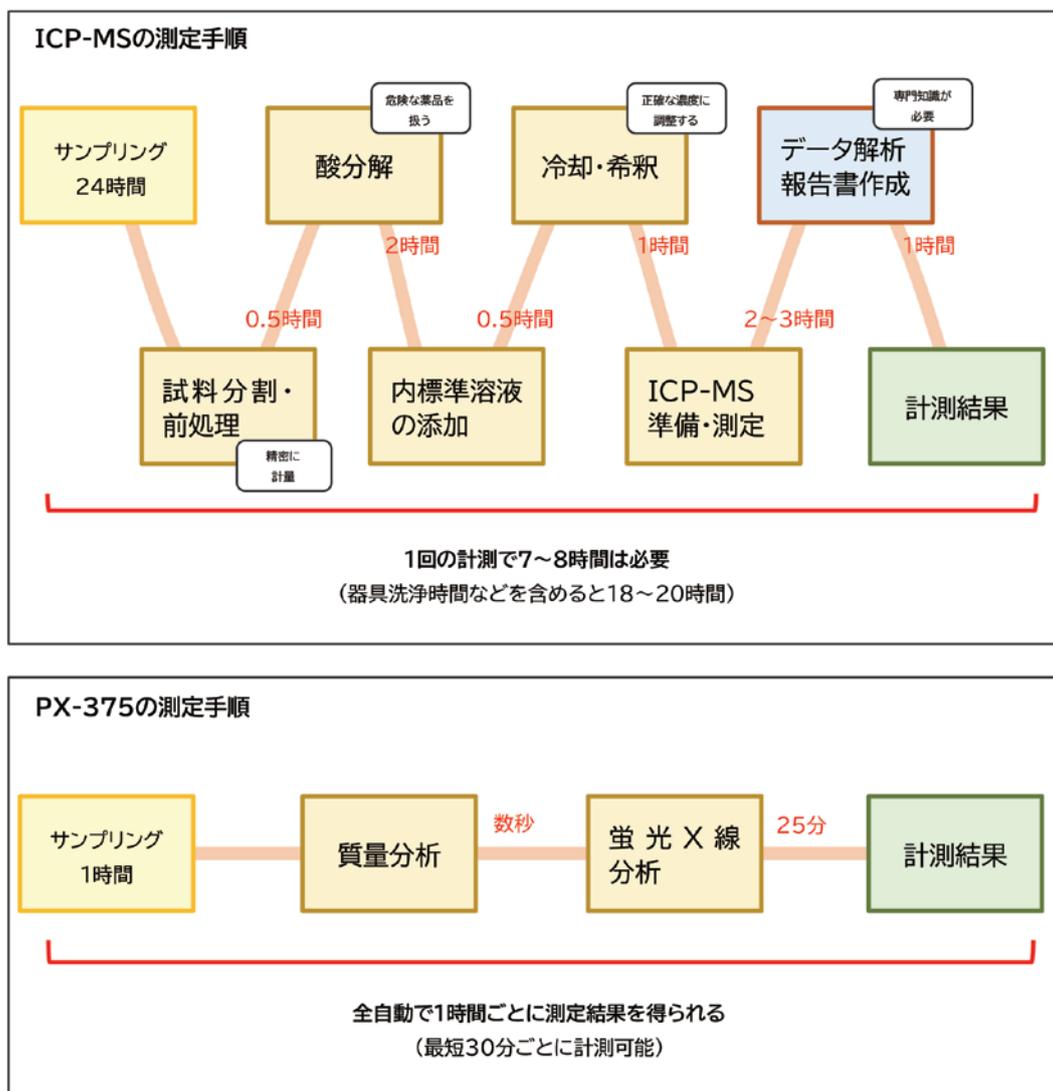


Figure 2 Measurement Procedure Image of ICP-MS and PX-375.

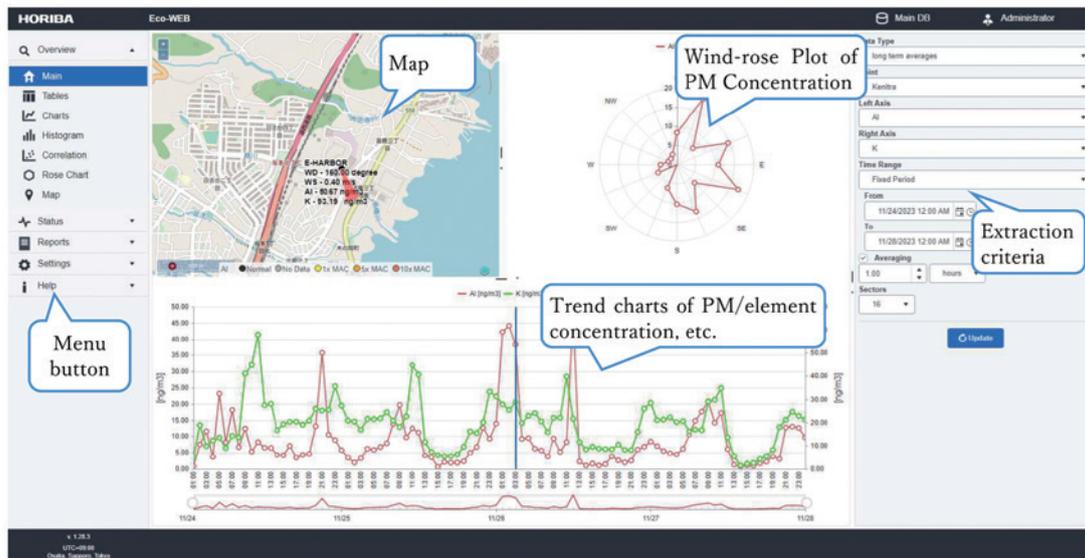


Figure 3 Main Screen of the Air Quality Monitoring System 'Eco-WEB'.

PX-375による粒子状物質の自動成分分析

粒子状物質は大気汚染物質の中でも特に重要であり、その成分把握は排出源の特定や発生メカニズムの解明に直結するため、大気環境対策の立案に不可欠である。大気中の粒子状物質に含まれる元素の解析には従来ICP-MSやICP-AESなどの高感度なICP分析法が用いられてきたが、前処理に危険な薬品を要し、時間とコストがかかるため迅速なトレンド把握には不向きである。

一方、PX-375は蛍光X線分析法(XRF)を採用しており、前処理なしで全自動測定が可能である。標準で15元素(Al, Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb)に対応し、校正により対象元素を追加することもできる(Figure 4)。

XRF法はICP法に比べ感度はやや劣るが、試料を直接分析できる利点があり、質量濃度と同様の時間分解能で元素濃度の連続測定が可能である。PX-375はその信頼性と測定速度から環境省の大気測定局にも導入され、2017年4月以降、全国4地点で4時間ごとに15元素の連続測定が行われている。これにより、従来では困難だった短時間での成分変動や発生状況の把握が可能となった。

民間企業では、PX-375は主に自社工場の製造工程に伴う環境負荷物質の監視目的で導入されており、排出管理や周辺環境への影響評価、環境対策の一環として活用されている。

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
lanthanoid		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
actinoid		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Detectable Elements

- * ○ —Standard parameters, calibrated by standard calibration materials at factory.
- * To measure element concentration, analyzer needs to be calibrated by standard calibration materials.
- * Please contact separately about elements, marked as non-detectable.

Figure 4 Detectable elements of PX-375

PX-375およびEco-WEBの導入事例

PX-375は大気中の粒子状物質を短時間で連続測定する装置であり、Eco-WEBはそのデータをリアルタイムで解析・管理するシステムである。これらを組み合わせることで、排出源の特定や迅速な排出対応を行うことが可能となり、工場環境負荷低減に大きく貢献する（Figure 5）。

ある工場では、工場から排出される化学物質の排出源を特定し、環境負荷を低減することが早急の課題となっていた。先に記述したようにハイボリュームエアサンプラとICP法を用いた測定方法では「24時間平均値」や「年平均値」で評価することを前提としているため、環境負荷物質が検出されてもその物質が24時間のサンプル中のどの時間に排出されたかの判断が困難であった。そのため、リアルタイム性に優れたPX-375を導入し、詳細な監視体制を構築する取り組みが開始された。PX-375を軽トラックに設置した移動式測定局を導入し、工場内の各地点で大気環境を計測することで、排出される元素成分を把握し、排出源を推定できるようになった。

測定の結果、工場内の複数の場所でさまざまな物質が排出されていることが判明し、事前に想定していた排出源に加え、想定外の排出源も確認された。また、工場の製造プロセスと排出物質の関係性を解析することで、特定の大气汚染物質がどの製造プロセスで排出されているのかを高い精度で推定することができた。

ところが、工場が停止中に高濃度の金属元素が検出されることがあった。当初、工場が停止しているため敷地外からの発生が疑われたが、場内作業を確認した結果、燃焼炉停止時に行われた煙突内の清掃作業中に高濃度の金属元素が検出されていることが判明した。燃焼炉が稼働中には稼働していない煙突内のファンがあり、清掃時にこのファンを

回した際に内部に堆積していた金属元素が排出されたことが原因であった。

また、移動式測定局で得られたデータと工場の製造プロセスや風向風速データと組み合わせ、特定の製造プロセスが稼働している時に特定の方向から検出されることを統計的に解析することで、データの信頼性を証明することができた。

この事例を通じて、燃焼炉が停止中でも意外な場所から金属元素が排出される可能性が示され、常時観測の重要性が認識され、固定測定局が導入されることとなった。

一方で、移動式測定局ではUSBメモリでデータ回収をして、表計算ソフトウェアにてデータ解析を行っていたため、運用に手間がかかる課題があった。これらの課題を解決するため、固定測定局の導入と同時に、データ収集と解析処理を自動化するシステム「Eco-WEB」が導入された。Eco-WEBはPX-375が取得したデータ（PMの質量・濃度・含有元素濃度）を自動で収集・整理し、リアルタイムで視覚化する機能を備えている。また、事前に設定されたしきい値を超える濃度が検出された場合には、関係者に自動で警報メールを送信する機能も搭載している。これにより、異常値が発生した際には即座にその要因を把握し対象となる時間帯や検出元素を確認のうえ、関連部署へ連絡して現場の作業内容を確認するという迅速な対応が可能となった。

従来の手作業によるデータ処理では困難であったリアルタイム対応が、PX-375とEco-WEBの連携によって実現された。これにより、排出源の特定や迅速な対策が可能となり工場全体の環境負荷を大幅に低減することに成功した。さらに、常時監視を通じて実施した対策の有効性を継続的に評価し、改善を進める仕組みが確立された。



Figure 5 'Eco-WEB' Air Quality Monitoring System Configuration.

データ解析と発生源推定手法

Eco-WEBは日常的な監視機能と高度なデータ解析機能の両方を備えている。日々の監視においては、元素ごとに濃度のしきい値(警報値)を設定することが可能であり、測定値がこれを超過した際には関係者に対して自動的にメールで警報が送信される。

一方で、発生源の特定を目的とした解析では、蓄積された測定データに対してトレンドチャート、レーダーチャート、相関グラフなどを活用して多角的な分析を行う。たとえば、同じPM濃度であっても含有元素の組成比が異なることがあり、これらの違いや、検出された方位・時間帯・各元素間の相関関係を分析することで、発生源をより精緻に絞り込むことが可能となる。

解析の進め方としては、まず全体的な傾向を把握するためにトレンドチャートを用いて、監視対象元素の濃度が高くなる日時やその変動パターンを確認する。その上で、関係が深い可能性のある元素同士の相関係数を確認し、相関の高い元素群を抽出する。特定の元素が増加する際に同時に増加する傾向を持つ元素が存在する場合、これらは同一の排出源に由来する可能性が高いと考えられる。

PM全体の濃度に注目するだけでは、元素間の関係性に気づけない場合がある。そのため、相関係数や相関グラフを用いて各元素の関連性を把握することが重要である。ただし、相関係数が高くてもデータにばらつきがある場合や外れ値が含まれる場合には、相関が見えにくくなることもある。また、相関は線形に限らず非線形の可能性もあるため、グラフを直接確認しながら判断する必要がある。外れ値を除外することで、より正確な評価が可能となる(Figure 6)。

相関関係から特定の元素と関連の深い元素が明らかになった場合は、それらについてトレンドチャートや相関グラフ

を用いて発生パターンを詳しく分析する。さらに、風向・風速データを活用することで、対象元素の検出方位を特定でき、特定の方向から継続的に高濃度が検出される場合は、排出源がその方向に存在する可能性が高いと推定される。類似した排出源が同一方向に複数ある場合は、元素比(例：Pb/As)を比較することで識別できることがある。自社由来と外部由来では元素比が異なる場合があるため、特定の条件下で計測を行うことで、比率の比較により成分の由来推定が可能となる場合がある。

発生源推定手法としては、PMF法(Positive Matrix Factorization)^[4]やCPF法(Conditional Probability Function)^[5]などが一般的に用いられているが、風向・風速・濃度データを統合的に扱うCBPF法(Conditional Bivariate Probability Function：条件付き二変量確率関数)^[6]を活用することで、発生源の位置と寄与度の理解がより深まる*。

Figure 7はCBPF法で描画したグラフの例だが、風速を放射状軸上に置き、グラフの中心が風速0m/sを表し、外円が最高風速を表す。またグラフ上の色は青→緑→赤の順に観測が多いことを表している。

グラフに表示するデータの絞り込み条件を変えることで、多様な知見が得られると考えられる。たとえば、高濃度のPMのみを抽出して描画した場合、北東方位に赤色のデータが現れると仮定すると、これは北東から高濃度PMが検出され、風速が疑似的に距離を示していることを意味する。このとき実際の地図と照合すれば、その方位に排出源が存在する可能性が高いと推定できる。また、Ni、Cr、Mnなど特定の重金属に条件を変えて描画すれば、それぞれの排出源に関する追加的な知見が得られると期待される。これらの分析を通じて、CBPF法が発生源の特定や寄与度評価に有効であることが示唆される。

*CBPF法は実装に向けて開発中であり、実用化に向けた評価を進めている。

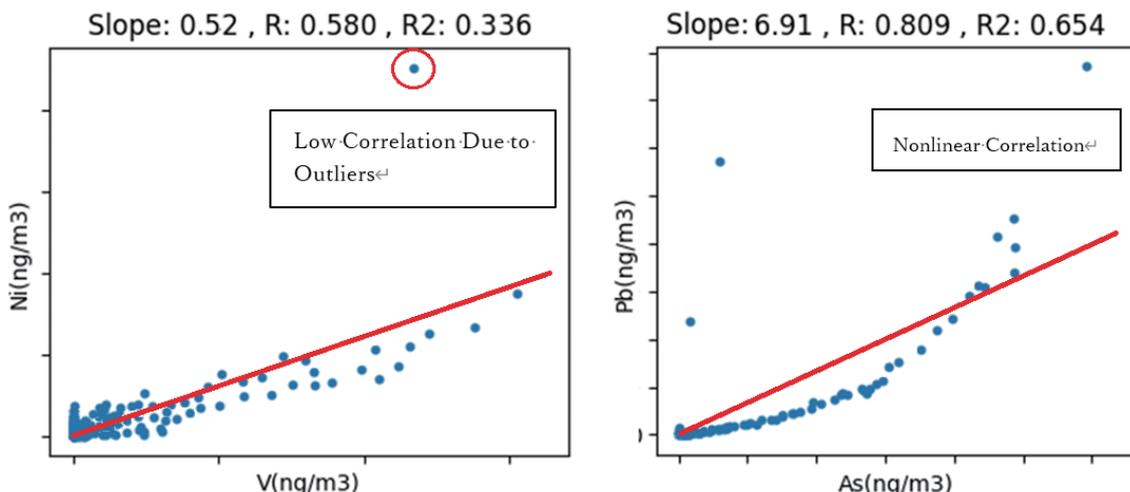


Figure 6 Example of Low Correlation.

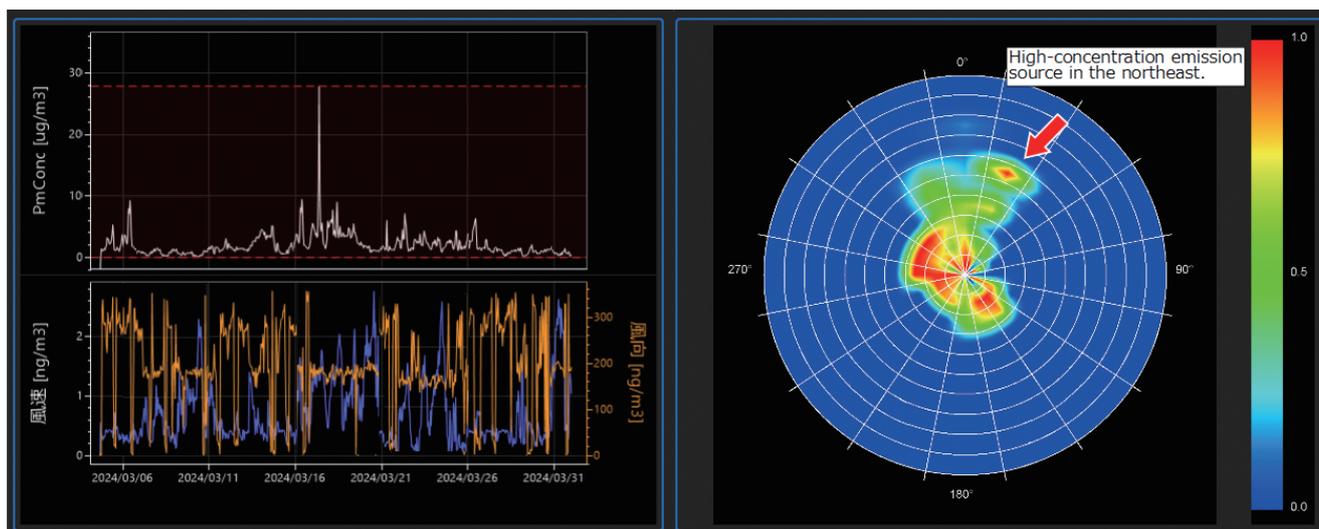


Figure 7 CBPF-Based Distribution of PM Concentration by Wind Direction and Speed.

今後の展望

計測機器から得られたデータを数学的に処理・解析することで、一定の傾向や特徴を把握することは可能である。しかし、得られた結果が全ての現象を説明できるとは限らず、その意味を正しく解釈するためには、データの背景や文脈を理解する力が求められる。

実際の観測データには、特定の方位や時間帯に限って検出される物質もあれば、あらゆる方位から常時検出される物質もあり、それぞれに異なる特徴が存在する。さらに、測定されたデータを解析・解釈するプロセスは依然として自動化が難しく、経験に基づいた判断が必要となることが多いため解析業務の俗人化が進んでいる。加えてデータ解析の知見を持つ技術者の不足も課題となっている。

これらの背景を踏まえ、今後はデータ解析に必要な情報を統合的に扱い、ユーザーが様々な観点からデータを検証・解釈できるシステムの構築が求められる。解析結果を人間が正確に読み解くためには、他の関連情報と組み合わせた可視化や整理が不可欠であり、それらを効果的に支援するプラットフォームの開発が今後の重要な課題であると考えられる。

データ解析は専門家だけが行うものではなく、専門家でもなくても行えるものとしてシステムを進化させていくことを目指している。

おわりに

大気環境モニタリングにおける課題を解決するソリューションとして、PX-375とEco-WEBを活用した新しいモニタリング手法を提案した。これにより、従来の手動プロセスに依存したデータ収集・解析の課題を克服し、リアルタ

イム性と効率性を兼ね備えたモニタリング体制の構築が可能となることを示した。

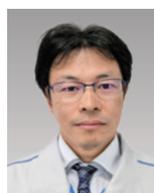
特に、PX-375による粒子状物質の自動成分分析と、Eco-WEBによるデータの統合的な収集・解析機能は、環境保全や健康被害防止において重要な役割を果たすことが期待される。また、これらの技術は、工業地域や製造業における排出ガス管理の効率化にも寄与し、持続可能な社会の実現に向けた一助となる。

今後は、データ解析のさらなる自動化やAIを活用した予測分析の導入などトータルなソリューションを提供できるように努めていきたい。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] 微小粒子状物質の成分分析/大気中微小粒子状物質(PM2.5)成分測定マニュアル-無機元素測定法(環境省ホームページより)
<https://www.env.go.jp/content/900400186.pdf>
(参照日: 2025/6/25)
- [2] 松本絵里佳: “PM2.5自動成分分析装置 PX-375”, *Readout (HORIBA Technical Report)*, 50, p.29-34(2018)
- [3] Xiaoyang YANG, Ph.D, Shijie LIU, Ph.D.: “Study on time variations of elemental composition and source of PM2.5 in Beijing”, *Readout(HORIBA Technical Report)*, 50, p.16-28 (2018)
- [4] Pentti Paatero, Unto Tapper, U.: Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values, *Environmetrics*, 5, p.111-126 (1994)
- [5] Eugene Kim 1, Philip K Hopke, Eric S Edgerton: Source Identification of Atlanta Aerosol by Positive Matrix Factorization, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53, p.731-739(2012)
- [6] Iratxe Uria-Tellaetxe, David C. Carslaw: Conditional bivariate probability function for source identification, *Environmental Modelling & Software*, 59, p.1-9(2014)



山口 佳津紀

YAMAGUCHI Kazuki

株式会社堀場製作所
開発本部 ガス・流体計測開発部
サブリーダー

Assistant Leader

R&D Division

Gas & Fluid Analysis R&D Dept. HORIBA, Ltd.

Beyond Monitoring: HORIBA's Digital Approach to Water Quality and Environmental Solutions

水環境問題解決に向けた、HORIBAの水質計測技術とデータサイエンスを統合したDXソリューション

Steve WHELAN

Dr. Luke BATES

James FOWLER

Dr. Brijesh SHARMA

INOUE Kentaro

井上 健太郎

ITO Yuichi

伊東 裕一

As today's water industry faces challenges such as aging infrastructure and environmental pollution, water quality monitoring is becoming more and more essential to address these issues. To reduce downtime and enable quick decision-making, real-time water monitoring is crucial. Advances in sensor technologies and cloud-based systems have made it possible to continuously collect and remotely monitor data, facilitating rapid decision-making and optimizing operations. As a result, the demand for Data as a Service (DaaS) solutions is increasing, where companies provide and manage water-related data for customers. Especially in the UK, where HORIBA MIRA is located, new laws and regulations are being implemented to address surface water pollution due to aging infrastructure. HORIBA aims to tackle these issues by integrating its water quality measurement technology with HORIBA MIRA's data science and AI, and HORIBA Test Automation's data management platform to provide solutions which goes beyond just water monitoring. In this article, we introduce our initiative to utilize HORIBA's water quality monitoring technologies and digital transformation (DX) solutions to address water-related environmental issues in the UK.

現代の水社会は、環境問題の深刻化だけでなくインフラの老朽化といった課題に直面している。その解決には水質の計測やリアルタイムモニタリングが欠かせない。この点においては、スマートセンサやクラウド技術の進展により、データの継続的な収集と遠隔監視が可能となり、迅速な意思決定や運用の最適化が進んでいる。こうした背景から、水質データを提供・管理する「データ・アズ・ア・サービス(DaaS)」の重要性も高まっている。特にHORIBA MIRA社の位置する英国では、規制が導入されるなど対応が急がれており、掘場アドバンスドテクノの水質センサー技術に、HORIBA MIRAのAIやデータサイエンスと、HORIBA Test Automation社のデータマネージメントプラットフォームを組み合わせることで、モニタリングの先を見据えたソリューションの提供を目指している。本稿では、HORIBAの水質計測技術と、DXソリューションを活用した取り組みについて述べる。

Introduction and Background

With growing human population, increasing urbanization and industrialization, and impacts of climate change, the management of our freshwater resources is an international priority and in some cases a crisis. The delivery of clean and safe drinking water, treatment of wastewater and elimination of pollution in our rivers, lakes and seas are all areas of growing concern which is leading to development and expansion of technology and business.

Today, HORIBA plays a significant part in the control of water quality by producing a wide variety of water quality monitoring instruments. In fact, HORIBA's very first product was a pH meter. HORIBA Advanced Techno (HAT) manufactures a range of water quality measuring instruments, and its main business is sales of these hardware instruments mainly through distributors. However, there is also the consulting sector of the water industry which is significant and is in a state of high growth, driven by new regulations and a national demand to clean up polluted rivers and lakes. The demand for this already

researched in UK^[1]. HORIBA is looking to enter this consulting sector of the global water business. The new Consulting & Applied Solutions (CAS) group and HAT are leading this initiative together, with support from HORIBA Test Automation (HTA).

The CAS team, based at HORIBA MIRA in the UK have established a base, where the team can develop solutions using HAT instruments and data services with HTA software platform STARS Enterprise. A “Field Lab” has been established at a reservoir within the HORIBA MIRA proving ground, where HAT instruments can be integrated, developed, and proven for application to the new surface water regulations.

Why set this up in the UK? Apart from being the main location of HORIBA MIRA, the center of the CAS organization, there will be major changes to the UK water industry within the next 5 years. There is new legislation to control spills of wastewater and monitoring of surface water. In addition, funding is increased to upgrade wastewater network infrastructure and to implement “smart” networks with sensors, telemetry, and AI-driven control systems. The UK water industry regulator OFWAT has approved a total budget of £104 Billion to be spent by UK water companies for infrastructure improvement^[2]. This budget will cover procurement of sensors and smart systems with the objective of eliminating wastewater spillage into rivers and lakes, and improved monitoring.

In this article, our initiative to utilize HORIBA’s water quality monitoring technology and DX solutions to address water environmental issues in UK, is introduced. First, some unique HAT water quality products are introduced briefly and then, there is description about HORIBA MIRA and HTA capabilities and how we are trying to integrate HAT, HORIBA MIRA and HTA capabilities to provide solutions to mitigate water environmental issues is also explained.

HAT Water quality monitoring technologies

Water quality monitoring is vital for protecting human health, preserving ecosystems, and ensuring safe drinking water. It helps detect pollutants, supports regulatory compliance, and guides environmental management. HORIBA Advanced Techno (HAT) specializes in developing water quality sensing equipment for various industries and applications. HAT core technologies are electrochemical and optical measurements and using these core technologies HAT has developed several unique water quality monitoring products. While HAT has a large portfolio of water quality monitoring equipment, in this article some unique and essential products which can also be useful in

improving UK water quality issues are introduced.

Ammonium probe (AM-2000)

While Ion Selective Electrode (ISE) ammonium electrodes tend to drift in the low ranges, HAT unique AM-2000 (Figure 1) ammonium probe based on ISE technology remains stable even at low range below 1 ppm. As more and more wastewater treatment plants (WWTPs) now use ammonium monitoring as an indicator to control aeration rather than dissolved oxygen for better efficiency, HAT AM-2000 can contribute to energy consumption reduction (10 to 30% or further (from HORIBA’s survey)) of WWTPs. Since ammonium is also an important indicator of environmental water (rivers, lakes, etc.) health, this product is suitable for monitoring the surface water and for monitoring the WWTPs.

Ultrasonic Cleaner (UH-16A series)

To reduce the maintenance frequency of the probes, HAT provide unique ultrasonic cleaner (Figure 2, Figure 3). It operates with burst oscillation and sweep function which makes it stain-resistant and enhances cleaning effect and also reduces sensor damage.



Figure 1 Ammonium Probe (AM-2000). https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Process_and_Environmental/Process_Water/Brochures/HC-200NH/HC-200NH_Brochure_English.pdf



Figure 2 Ultrasonic cleaner with ammonium probe.



Figure 3 Effect of ultrasonic cleaning on Ammonium Probe: Without (left) and with (right) cleaner after 60 days. <https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Water/Download/Brochures/HAE-T0257.pdf>

Self-cleaning pH electrode (6122 series)

HAT patented and unique self-cleaning pH glass electrode (Figure 4, Figure 5) uses a UV LED within the electrode and the surface of the glass electrode is coated with a photocatalyst (titanium oxide). The irradiation of UV light activates titanium oxide coating and prevent the adhesion of organic contaminants on the electrode which in result reduces the maintenance frequency and cost.

Multiparameter Water Quality Checker U-50 series

U-50 series can measure 11 parameters simultaneously including pH, ORP, turbidity, dissolved oxygen, and conductivity (Figure 6). One of the features is simultaneous one-point automatic calibration of all the sensors with a single standard solution. The model U-53 of this series has wiper inside the turbidity sensor for automatic cleaning. The main applications of U-50 series are river and lake water quality inspection. One U-50 can simultaneously measure all the basic parameters needed to monitor the river water quality.



Figure 4 Self-cleaning pH electrode.



Figure 5 Without (left) and with (right) self-cleaning function after 3 months.
<https://www.horiba.com/int/water-liquid/products/other/self-cleaning-ph-electrode/>



Figure 6 U-50 series probe (left) and controller (right).
https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/Downloads_Catalog/Catalog_Water_Quality/U-50_brochure_en_HRE1930E.pdf



Figure 7 EL200 connected with multiple probes (Reproduced from HORIBA Readout No. 59, page 83).

Multiparameter Transmitter (EL200)

HORIBA acquired HORIBA Advanced Techno France (HATFR (known as Tethys Instruments before the acquisition)) in 2023. HATFR core technology is UV spectroscopy. One of the featured products of HATFR is multiparameter transmitter EL200 (Figure 7). On the other hand, most of the HAT transmitters are single parameter. With the inclusion of HATFR in our group, we are working on a project to connect HAT sensors to EL200 and connectivity of some of the sensors is already achieved. These type of multiparameter instruments will be critical in UK river water monitoring.

HORIBA MIRA and HORIBA Test Automation (HTA) capabilities and their integration with HAT water quality monitors

Historically, HORIBA MIRA has had no business with the water industry. However, the future needs of the water industry are based on efficient gathering of information-rich data, data processing, data analytics and safe & secure data-science and control systems. All these key future solutions have already been developed and proven in the automotive industry by HORIBA MIRA and HTA. This expertise is what HORIBA's CAS can also bring to the water industry which would separate it from existing consultants in the water industry.

The key areas of technology that HORIBA MIRA brings are:

- Data capture and processing
- Cyber security
- Functional safety
- Simulation, digital twinning & AI

In addition to the areas of technical expertise that HORIBA MIRA automotive experience brings, the HORIBA MIRA site and proving ground provides the ideal proving ground for water quality monitors, services, and analytics. Figure 8 outlines the many and different water systems that are present on HORIBA MIRA’s 800-acre site. The HORIBA MIRA site includes potable water (drinking), wastewater (sewerage), stormwater and surface water. The site also benefits from a long-range wide area network (LoRaWAN™)*1, which can be considered as a long-range outdoor Wi-Fi®*2 system that links sensors to the internet. The site is also covered by 4G and 5G networks.

The HORIBA MIRA site can also be a development hub for the UK water industry. To demonstrate the potential of the site and to demonstrate new prototype water monitoring systems, a “Proof of Concept” (PoC) field-laboratory (Figure 9) has been established at HORIBA MIRA. It is located on the shore of the sites own water reservoir. The reservoir collects rainwater which is used to feed the wet test-tracks for developing vehicle wet-handling and wet-road safety which is why it can also be a proving ground for investigations into the nature of tyre-borne microplastic particles. For the PoC, the reservoir represents natural lake and river water. In the UK, new legislation, known as “Section 82” is forcing all water companies to measure river water quality up and downstream of any wastewater or stormwater discharge points along rivers. The data should be available to public through telemetry.

*1 “LoRaWAN” is a trademark of Semtech Corporation.

*2 Wi-Fi is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

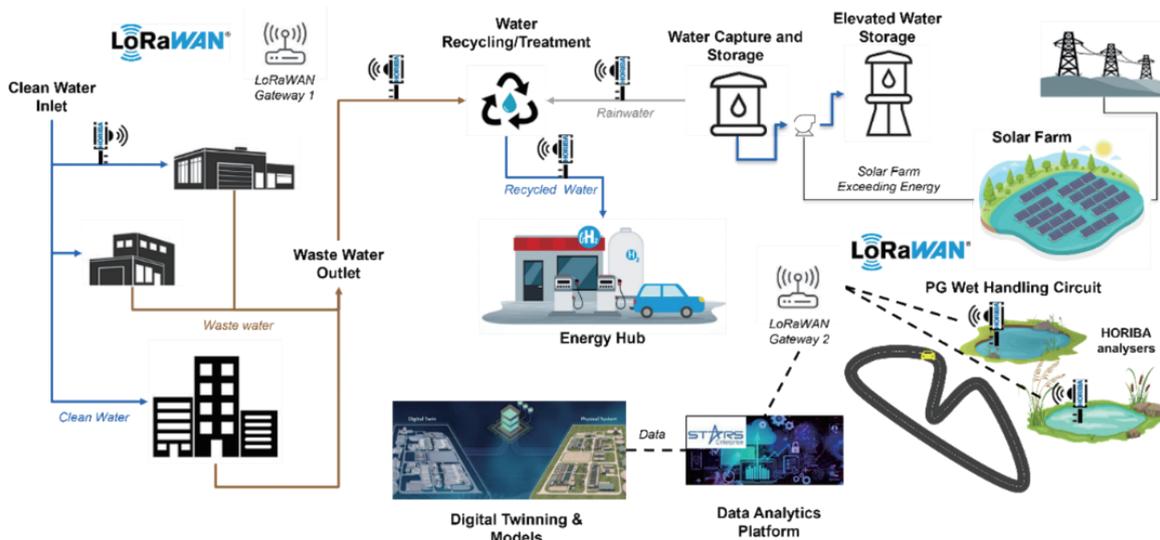


Figure 8 Water systems of the HORIBA MIRA site.



Figure 9 PoC (Proof of Concept) Field lab developed at the HORIBA MIRA site.

HORIBA's STARS Enterprise platform, developed by HORIBA Test Automation (HTA), is ideally placed to meet this need. Originally developed to underpin HORIBA's market-leading position as a provider of test automation and laboratory management systems in the mobility sector, this cloud native data management and process automation platform has transferred readily to the water data management domain, providing a flexible, proven backbone upon which to implement a range of water data solutions (Figure 10).

Capabilities provided by STARS Enterprise include:

- Multiple data ingress options, including HTTPS endpoints and MQTTS client.
- High-capacity storage of structured, unstructured and time series data.
- Scalable, concurrent execution data processing pipelines (analytical services).
- Powerful Grafana based no-code dashboards for visualization.
- Extensibility through the addition of solution specific microservices, web apps and mobile apps.
- Flexible role-based user management, with OIDC support.
- Tenancy-based data siloing.
- Best in class security features.

STARS Enterprise for Water Data Solutions

While the roots of the more mature STARS platforms lay in the mobility business field, the opportunity to deploy STARS solutions in other business fields in which HORIBA operates is clear. STARS Enterprise in particular, being a robust, secure and performant cloud-based platform upon which to implement modular solutions, offers huge potential in this respect.

The containerized microservice architecture of STARS Enterprise supports unlimited horizontal scaling with zero downtime, allowing cost effective deployments to be provisioned for solutions ranging from data management in small scale R&D facilities to regional scale water network monitoring and analytics.

The generic, extensible architecture of the STARS Enterprise platform ensures that whatever shape of data solution is called for, HORIBA will be able to meet the need. Powerful analytics and modelling are accommodated through features such as integrated Python module execution support. Where the services and apps of the core platform cannot address all the requirements of a solution, the platform is easily extended by the additional solution specific microservices and apps. Complex water network modelling, analysis and control solutions can thus be realized on the STARS Enterprise platform.

While STARS Enterprise solutions may be deployed in the customer's IT infrastructure, an increasingly popular option is to take advantage of HORIBA's SaaS capability to obtain a fully HORIBA operated Solution as a Service. With this approach, the customer is free to focus on core business, while HORIBA manages the entirety of creating and operating the data solution. The customer is relieved of operational burden, receiving only the data insights and actionable outputs that bring value to their enterprise.

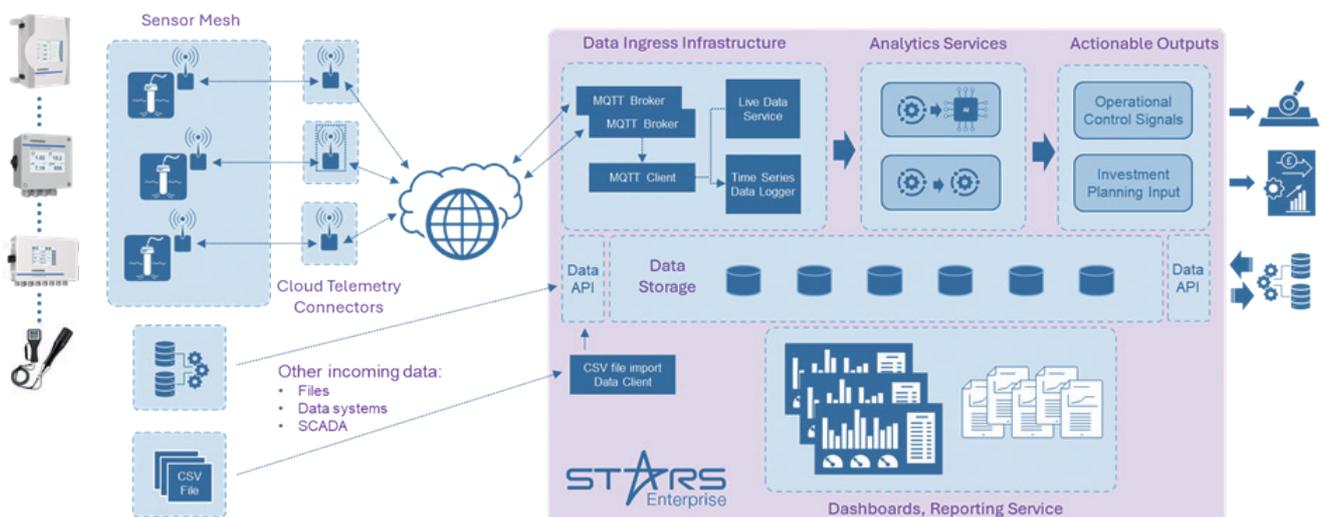


Figure 10 STARS Enterprise Cloud Platform.

HORIBA’s prototype “Section 82 (S.82)” solution showcases STARS Enterprise in the role of a cloud-based data collection and forwarding platform. S.82 of the UK’s Environment Act 2021 requires sewerage undertakers to continuously monitor the quality of the receiving water upstream and downstream of their assets, allow assessment of the impact of discharges from their assets on the receiving watercourse^[3]. In its base implementation, our S.82 solution does just that - collects data from distributed monitoring installations via low power long range telemetry, harmonizes these data and transmits them to the water authorities.

Dashboards and statistics are provided as part of this service to provide visibility of the data (Figure 11). Such dashboards are easily configured without coding and give

the customer instantaneous, real-time information, along with access to historical data reaching back to the very start of the monitoring activity.

With the S.82 base solution as our springboard, we can leverage the flexibility of the STARS Enterprise platform and move on to offer value-add opportunities such as insightful predictive analytics to S.82 customers.

Together, HORIBA MIRA and HTA provide a “rainbow” of new solutions and services (Figure 12) that are desperately needed by an ailing water industry. These new solutions form the business strategy of the new CAS Water consultancy. With hardware from HAT, HORIBA can provide an end-to-end, “one-stop-shop” solution to customers.

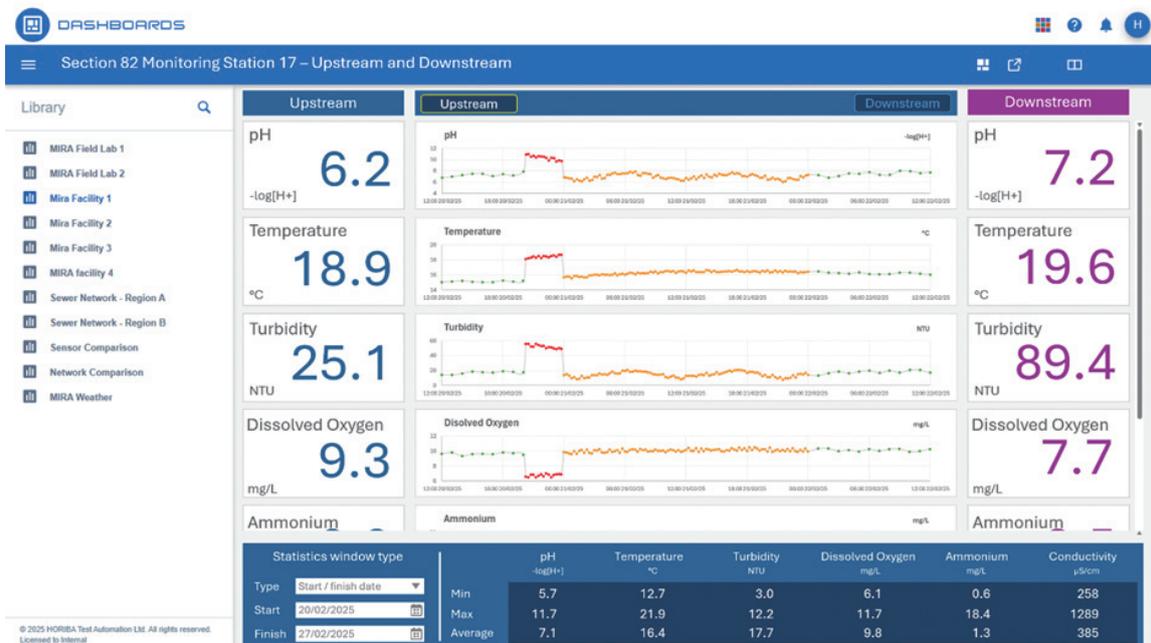


Figure 11 Section 82 Dashboard using STARS Enterprise.

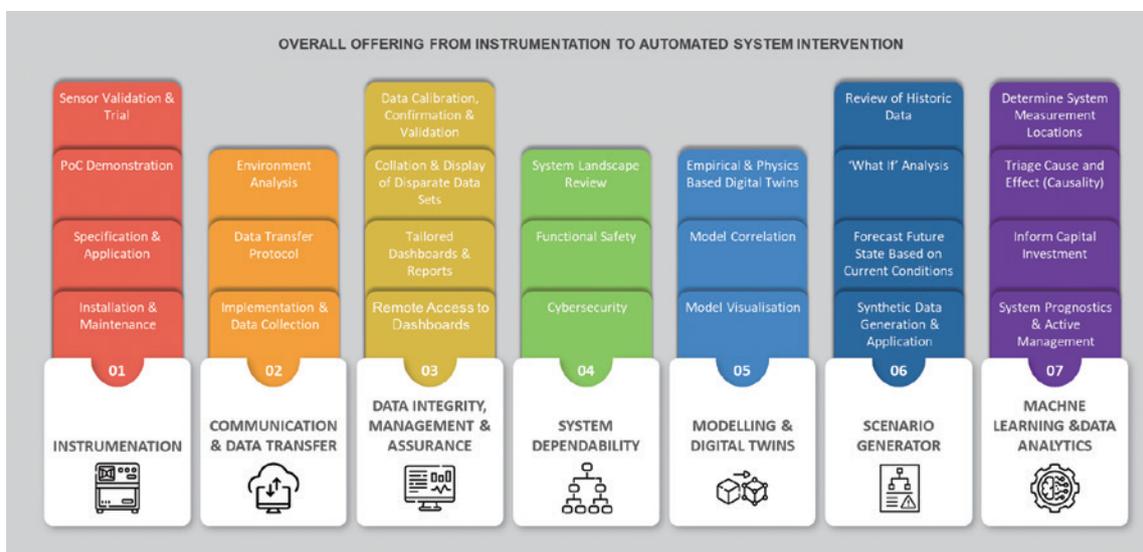


Figure 12 HORIBA one-stop-shop solution idea for water industry: from instrumentation to data analytics.

Vision on adding value to the current capabilities with Data Science

The water industry generates large quantities of data, but it is distributed sparsely across a large and complex system. There is a great need for further instrumentation to better understand and manage water industry systems and the surrounding environment. This increasing data volume and resolution presents opportunities for the application of data science and machine learning. Simply collecting data does little to increase understanding of the issues faced by the water industry, but effective application of the right tools to this data can extract the information it contains, providing useful, valuable, and actionable insights.

Data science and machine learning are powerful tools that can be applied in various contexts within the water industry. These range from broad network applications, through specific subsystem controls and down to the acceleration and enablement of individual measurements and analyses. At the smallest scale core HORIBA technologies, such as spectroscopy methods, can be accelerated through deep learning to provide rapid analyses and to enable the detection and measurement of new and emerging pollutants. This will help to better monitor and understand the scale of pollution and impacts on both the environment and public health. This monitoring will provide new information and enable new regulation of these pollutants. On a larger scale, whole networks of disparate sensors can be consolidated into a single measurement system, providing insights and prediction to tackle serious industry issues. This includes water supply scarcity, storm overflows of sewage into natural water bodies, and more fundamental issues such as the accuracy, validity and reliability of data and measurements in such an expansive system.

The operation of water industry systems is often heavily dependent on weather, influencing both the availability and demand for clean water, and impacting the capacity and efficiency of wastewater treatment. Machine learning based models are lightweight and outperform the simulation times of their physics-based counterparts by multiple orders of magnitude, often while maintaining equal or even improved accuracy due to a reduction in required assumptions and simplifications. This enables a scenario-based approach, which can incorporate variability and uncertainty inherent in weather prediction through a high volume of predicted scenarios. The result is a statistical view of the future system state with enough time in hand to act with increased pertinent information. There are significant implications for environmental impacts, operational efficiency, and functional safety in the water industry and more broadly across all HORIBA's Fields.

Conclusion and outlook

In this article, we described our initiative to utilize our water quality monitoring technology and DX solutions to provide analytical and data solutions to address these issues. Due to decades of under-investment, the UK's old infrastructure is leading to problems such as overflow of the sewage which is polluting every river in the UK. Water companies in UK are now legally obliged to monitor river quality and to complete a full deployment of a new sensor network within the next decade. The root cause of these problems is broken and aging infrastructure. Since rebuilding of the infrastructure is such a vast undertaking, limited by investment and resources, the other, more attractive solutions to tackle these problems are smart sensing and data solutions. The future of the water industry is with lots of data.

These issues are not just true of the UK. Many other nations suffer from the same problems. In Europe, France has similar issues. Notably, the river Seine in Paris was not fit for swimmers in the Paris Olympics, until fine weather limited the spills of wastewater upstream of the city. In India, there is a huge national project to clean up the river Ganges, the vast and holy waterway of the largest population on Earth.

HAT have been developing some unique product for water quality sensing. While these products have excellent measurement performance, they need to be smarter for data solution services. Performing data analytics and solving customers problems can provide a value-added end to end solution. This is where HTA and HORIBA MIRA capabilities can be explored. Together under the new Consulting & Analytical Solutions (CAS) Group, HORIBA can offer consulting and solutions to end-user customers.

This new HORIBA water business is starting out in the UK and focusing on helping to solve the UK water environment issues with new solutions. Once established, the new consulting business model can be expanded to other regions in Europe and globally. With a growing human population, the need for clean and safe water, the safe treatment of wastewater and the protection of the natural environment will continue to grow. Meeting this growing demand for new technology and services to ensure the health and safety of our planet and its inhabitants is a noble path for HORIBA to follow, and a profitable pathway too.

* Editorial note: This content is based on HORIBA's investigation at the year of issue unless otherwise stated.

References

- [1] “Water Framework Directive implementation in England and Wales: new and updated standards to protect the water environment” – UK Government Department for Environment, Food and Rural Affairs – May 2014
- [2] “£104 billion investment plan, investments between 2025 and 2030” – Water UK,
<https://www.water.org.uk/investing-future/pr24>
- [3] “Environment Act 2021” - UK Government -
<https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2021/30/contents>



Steve WHELAN

Global Applications Centre Leader,
HORIBA MIRA Ltd.



Dr. Luke BATES

Senior Data Engineer,
HORIBA MIRA Ltd.



James FOWLER

Chief Operating Officer,
HORIBA Test Automation Ltd.



Dr. Brijesh SHARMA

Business Strategy Office,
Corporate & Business Strategy Division,
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.



INOUE Kentaro

井上 健太郎

Deputy General Manager,
Corporate & Business Strategy Division,
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.



ITO Yuichi

伊東 裕一

Deputy General Manager,
Business Strategy Office,
Corporate & Business Strategy Division,
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.

HORIBA MEDISIDE LINKAGE next

～スマートメンテナンスで医療現場を革新～

HORIBA MEDISIDE LINKAGE next

~Revolutionizing the Medical Field with Smart Maintenance~

作田 尋路

SAKUTA Hiromichi

西森 正志

NISHIMORI Masashi

HORIBA MEDISIDE LINKAGE nextは、HORIBAが提供する医用機器の総合保守サービス支援システムであり、医療機器の稼働監視に加え、医療法に基づく台帳の自動作成や機器の設定変更や洗浄操作等の遠隔操作が可能である。医療現場の業務効率化による負担軽減と働き方改革を支援し、安全で効率的な運用を促進することを目的に開発した。本報では、その全体像と、電子カルテ連携ソフトウェアGATELINKを併用した統合的な医療ソリューションの提供形態およびその有用性について述べる。

キーワード

リモートモニタリング, 予知保全, 台帳, 医療法改正, MEDISIDE, GATELINK

HORIBA MEDISIDE LINKAGE next is a comprehensive maintenance service support system for medical equipment provided by HORIBA. In addition to monitoring the operation of medical equipment, it can automatically create ledgers based on medical laws and remotely change equipment settings and perform cleaning operations. The system was developed to reduce the workload and support work style reforms by improving operational efficiency in the medical field, and to promote safe and efficient operations. This paper describes the overall picture of the system, as well as the form and usefulness of providing an integrated medical solution in combination with the GATELINK electronic medical record integration software.

Keywords

Remote monitoring, Predictive maintenance, Ledgers, Healthcare law reform, MEDISIDE, GATELINK

はじめに

近年、我が国では少子高齢化が進行しており、医療現場では慢性的な人材不足が深刻な問題となっている。特に地方の中小規模医療機関においては、限られた人員で多くの検査業務を実施しなければならない状況が続いている。

近年導入が進んでいるPoint of Care Testing(POCT)^[1]機器も、迅速検査による診療支援の有効性が期待される一方で、その保守管理や精度管理にかかる負担が従来型の臨床検査機器と同様に求められる点が課題となっている。

さらに、医療法^{[2]-[5]}の改正(2018年)により、検査データの品質維持のための臨床検査機器の保守管理および精度管理

を目的として、記録保持が法的義務となったことで、標準作業書及び作業日誌を含む台帳作成が定められた。これにより、検査部門における業務負荷が一段と高まった。加えて、2024年4月には改正労働基準法^{[6]-[8]}が施行されるなど、医療従事者の働き方改革推進により、時間外労働の上限規制が施行され、より一層業務負荷が高まっている。医療DXを中心とした検査業務の省力化・効率化が急務となっている。こうした医療現場の課題解決を目的として、臨床検査機器の状態監視、保守支援、台帳管理、および遠隔操作機能を一体化した新たな支援システム「HORIBA MEDISIDE LINKAGE next(以後はHML nextと表記)」を開発した。

本稿では、その主要機能、適用効果、および今後の展望について詳述する。

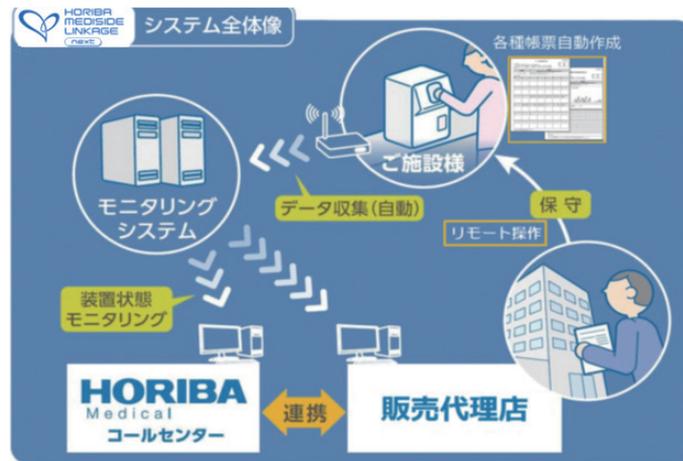


Figure 1 System Overview Diagram.

システム全体像

HML nextのシステムの全体像をFigure 1に示す。施設に設置された弊社の臨床検査機器は、ルーターを介して測定結果、エラーログ等の機器に保存されたデータをモニタリングシステムに送信する。モニタリングシステム内で収集されたデータを分析し、事前登録された施設のメールアドレスに月次で各種台帳を送付する。必要に応じて、弊社のサービス部門から施設への連絡やリモート操作による臨床検査機器の動作を実行することができる。複数種類の臨床検査機器を一つのルーターに繋いで通信することもできる。

HML nextの主要な機能

本章では、臨床検査機器単体管理から、複数拠点・複数臨床検査機器の統合的な遠隔支援を目的としたHML nextの主要機能について述べる。

リアルタイムモニタリングとエラー検出技術

患者の検査結果やログやエラーコード、更には各種センサなどの生データをリアルタイムで取得・解析することで、稼働監視ならびに、臨床検査機器のエラー兆候の早期検知まで行い、迅速な是正対応を支援する独自のモニタリング機能を搭載している。ある期間にある回数以上、エラーが発生した場合にのみメール通知することなどが、各臨床検査機器別に設定することができる。

この機能は、フィールドエンジニアによる事前確認・保守対応の迅速化に有効であり、現地訪問前に稼働状況やエラー履歴を把握することで、訪問回数の削減と初動対応の最適化が図れる。

生データ活用による予知保全

臨床検査機器側で未検出の「潜在エラー」についても、一定の閾値に基づいて、予知保全アラートをサービス担当者に通知できる機構を有する。例えば、微小な吸引圧力低下や温調異常傾向、また消耗部品の劣化兆候を検出する。これにより、臨床検査機器が完全に停止してしまう前に、現場へのメンテナンス訪問が可能となり、医療現場における検査業務への影響を最小限に抑えられる。また、定期保守ではなく臨床検査機器ごとの状態に応じた最適な保守タイミングを提案できるため、無駄な部品交換を減らしつつ、臨床検査機器停止リスクを最小化できる。定期保守と突発障害対応のバランスを最適化することにも繋がる。

この機能は、消耗部品の劣化予測や異常兆候検出による臨床検査機器運用の最適化に寄与し、中小病院や検査センターの業務負荷軽減・保守の効率化にも繋がる。

アッセイ値データのリモート入力機能

使用している臨床検査機器に対して、精度管理測定(以後はQC測定と表記)を実施するにあたって、精度管理物質のLotごとに定めたアッセイ値データをHML next経由でリモート入力できる。アッセイ値とは、臨床検査機器の精度や正確性を確認するために使用されるコントロール血液に対して、製造元があらかじめ定めた基準となる測定値である。従来、臨床検査機器画面からアッセイ値データを手入力する際には、Webサイトにアクセスして、ファイルをダウンロード、USBメモリ等に保存し、臨床検査機器に接続して読み込みする等の操作が必要で、人的エラーのリスクが伴っていたが、最新のアッセイ値データを正確かつ即時にデータ入力できるため、検査業務の信頼性とスピードが大幅に向上する。

また、アッセイ値データをリモートで提供・入力できるシステムを構築することは、QC測定の重要性を現場に周知させるきっかけとしても有効である。これにより、検査精度の維持に対する意識向上と、適切な精度管理の定着を促す効果が期待される。

加えて、特に精度管理の信頼性が求められる施設や、担当者の少ない時間帯における検査体制の安定化にも貢献する。

管理台帳の自動生成

HML nextは、医療施設における臨床検査機器管理業務の省力化と法令対応の両立を実現するため、臨床検査機器の稼働データや保守記録をもとに、各種管理台帳を自動生成・定期送信する機能を搭載している。この機能により、

医療従事者や技術スタッフの記録業務負荷を大幅に軽減し、患者ケア等の本来業務に注力できる環境づくりを支援する。

管理台帳は、以下のような文書で構成されている。

- ・測定作業日誌(Figure 2)
- ・保守管理標準作業日誌
- ・試薬管理記録
- ・精度管理記録

これらは独自の管理台帳テンプレートに基づいて自動的にフォーマット化され、PDF形式で毎月1回(任意設定)自動生成される。施設の管理責任者・保守担当者は、印刷・保管するだけで、法令が要求する管理台帳保管に関わる作業を軽減できる。

2024年07月

④ 測定作業日誌

記入上の注意

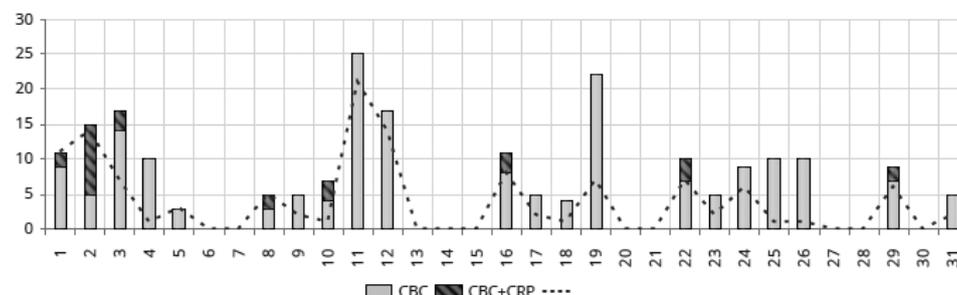
1. 記録する頻度は、検体検査を実施した都度、または週～月単位が望ましい。
2. インフルエンザウイルスキット等の測定キットによる検体検査を実施する場合、キット製造元における医薬品の性能が精度を担保しているため、医療機関においては、異常値(エラー)が発生した場合のみ、その内容を記載すれば良い。

責任者	担当者
-----	-----

検査機器名	検査項目名
YH-330CRP (79109103)	※複数の検査項目を同時に測定する場合には検査項目全てを記載すること WBC,RBC,Hgb,Hct,MCV,MCH,MCHC,RDW,PLT,MPV,PCT,PDW, LYM#,LYM%,MON#,MON%,GRA#,GRA%,CRP

当月の検体測定回数： CBC 187回 CBC+CRP 28回

当月の検体測定・フラグ数



フラグ詳細

日付	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
U	5	12	6	1	3			5	2	1	2	2				8	2	1	2			6	2	6	1	1			6		2
D																															
\$																															
*																															
F																															
C																															
X																															
E																															
B																															
T																															
L1																															
MG		6	2	1								19	12							2		1									
MIC																															
SCH																					3										
SCL																															

特記事項	
------	--

※\$フラグは、検体を3回カウントして、そのうち2回のカウントは再現性が良かったことを示します。
 ※*フラグは、検体を3回カウントして、カウント値が全て異なり、カウント間の再現性が悪かったことを示します。

Figure 2 Measurement Record Log.

特筆すべきは、以下のような現場課題に対する実用的な解決策となっている点である。

法令準拠に必要な「証拠の即時性・整合性」への対応

臨床検査に使用される装置については、厚生労働省が定める「医療法」「臨床検査技師等に関する法律」等(2018年)に基づき、定期的な保守およびその記録保存が義務付けられている。

本機能により、「自動化された記録生成+施設所定フォルダへの印刷・保管」が可能となるため、監査員による抜き打ち訪問においても即座に必要な書類を提示できる。これにより、現場スタッフの心理的負荷や事前準備の手間を大幅に軽減できる。

手作業からの解放と人為的ミスの防止

従来、これらの管理台帳作成は臨床検査機器からのログ出力を手動で転記・整理・印刷するなど、医療従事者自身が実施する必要があり、多忙な中での煩雑な手作業によるミスが生まれる可能性が高い。HML nextでは、台帳出力処理がトリガーおよびスケジュール制御により自動実行されるため、漏れ・転記ミス・形式誤りといったヒューマンエラーを排除できる。また、万一台帳が破損・紛失した場合でも、過去データを即時再出力できる機能を搭載しているため、可搬性と再現性にも優れる。

本来業務(患者ケア)への集中を可能にする環境づくり

管理台帳作成という付帯業務を自動化することで、医師・検査技師・看護師等の医療従事者は、より価値の高い医療行為や患者とのコミュニケーションに時間を割くことが可能になる。特に、小規模施設や夜間帯の少人数体制においては、省力化による人的リソースの最適配分が実現できる点は大きな意義を持つ。

この機能は、法令遵守と管理台帳の一元管理が求められる医療機関において、作業効率の向上および人的ミスの防止に大きく貢献する。特に複数拠点を運営する法人では、拠点ごとの差異なく統一した台帳管理が可能となり、内部監査や外部監査への対応力も向上する。また、日々の業務が多忙な検査技師や事務職員の負荷軽減に寄与し、専門業務への集中を促進する。

臨床検査機器へのリモートアクセス機能

HML nextは、保守作業の効率化と迅速な障害対応を目的として、サービスエンジニアによる臨床検査機器へのリモートアクセス機能を提供している。

本機能の特長および効果を以下に示す。

電話連携を前提とした実運用スタイル

実際の運用では、サービスエンジニアが施設担当者(臨床検査技師など)と電話で連絡を取り、リモートアクセス時に臨床検査機器画面に表示される注意事項を確認後、HML nextからリモート操作を実行する。

例えば、臨床検査機器にアラーム情報が表示されている場合、担当者にアラームコードや状態表示をその場で読み上げてもらい、エンジニアがそれを受けて適切なりモートコマンド(例:ノズル洗浄、リポート、パラメータ変更)を実行する。このように、HML nextは単に臨床検査機器を遠隔制御するだけでなく、現場と保守部門のコミュニケーションを円滑にする補助インフラとしても機能する。

このようなハイブリッド型運用により、誤操作の防止や、現場側の安心感の担保にも繋がる。

遠隔操作による主要作業支援の自動化

HML nextを通じて、保守担当者は以下のような操作を、施設に訪問することなく事業所やサポートセンターから直接実行できる:

- ・ノズル洗浄など、各種コマンドの送信(定期的またはトラブル時の即時対応)
- ・試薬設定の変更・補充情報の確認
- ・装置の動作ログ取得や状態確認
- ・アラーム履歴の遠隔モニタリングとトラブルの事前予測

これらはHORIBA製品との高い親和性を活かし、装置ごとのコマンド仕様を熟知した設計により、誤操作リスクを最小限に抑えながら、確実な制御を可能としている。

本リモートアクセス機能により、遠隔地から各種保守作業を安全かつリアルタイムで実施できる環境が整備され、従来必要とされていた現地訪問の回数と時間を大幅に削減できる。

安全性と操作権限の厳格な管理

臨床検査機器は患者検体を扱うため、誤操作や不正アクセスは重大な医療事故にも繋がりがかねない。そのため、HML nextでは以下のような多層的なセキュリティ対策を講じている:

- ・ユーザー認証と操作権限の階層管理
- ・操作ログの自動保存と改ざん防止機構
- ・リモート接続のワンタイム許可制(施設側承認が必要)

これにより、現場の装置操作を遠隔で補完しつつも、医療現場の安全性とコンプライアンスを担保している。

保守サービスの変革と現場業務へのインパクト

本機能により、緊急時の初動対応を迅速化することが可能である。例えば、試薬詰まりなどの軽微なトラブルであれば、サービスエンジニアが現地に訪問せずとも、即座にHML next経由でノズル洗浄を実行し、数分以内に機器を再稼働可能な状態に戻すことができる。これにより、施設の検査業務の中断を最小限に抑えられ、患者への影響も防止できる。

また、定期保守点検の準備作業をリモートで進めておくことで、現地作業時間を短縮できる。加えて、現地訪問頻度が減ることで、移動にかかる保守コスト低減にも寄与しており、持続可能な医療機器保守体制の構築にも繋がっている。

この機能は、フィールドエンジニアの現地出張を減らすとともに、トラブル対応の迅速化を実現する。特に遠隔地の医療施設や、時間外対応が困難な小規模施設では、リモートでの即時支援により機器のダウンタイムを最小化できる。さらに、技術者の経験差によらず標準化された支援が可能になるため、サービス品質の均一化にも寄与する。

GATELINKとの共用によるメリット

GATELINKの主要機能

GATELINKは、上位システム(電子カルテやLIS)と臨床検査機器の間でデータ連携を担うインターフェースソフトである(Figure 3)。上位システムで入力された患者IDや検査依頼情報(オーダー情報)は、GATELINKを介してリアルタイムに臨床検査機器へ送信される。この仕組みにより、検査依頼から結果取得までのプロセスが自動化され、業務効率が大幅に向上する。

検査依頼情報を手動で臨床検査機器に入力する際には、入力ミスや転記ミスが発生し、検査結果の取り間違いが起こる可能性がある。また、検査データの二重入力や手作業による誤転記が発生することで、作業効率の低下や遅延にも繋がる。特に多忙な診療時間帯には、患者サービスの遅れに繋がり、医療現場の信頼性に悪影響を及ぼす。

GATELINKを導入することで、検査依頼情報や測定結果が上位システムに自動的に連携されるため、臨床検査技師や看護師の作業負担や人的ミスのリスクが低減される。GATELINKは最大10台の臨床検査機器(他社製を含む)と連携し、院内の多様な検査データを柔軟に取り込むことができる。上位システムを介して、患者の診察中にリアルタイムで検査結果を参照できるため、検査準備や診療判断が迅速化し、対応時間の短縮や説明の質向上にも寄与する。

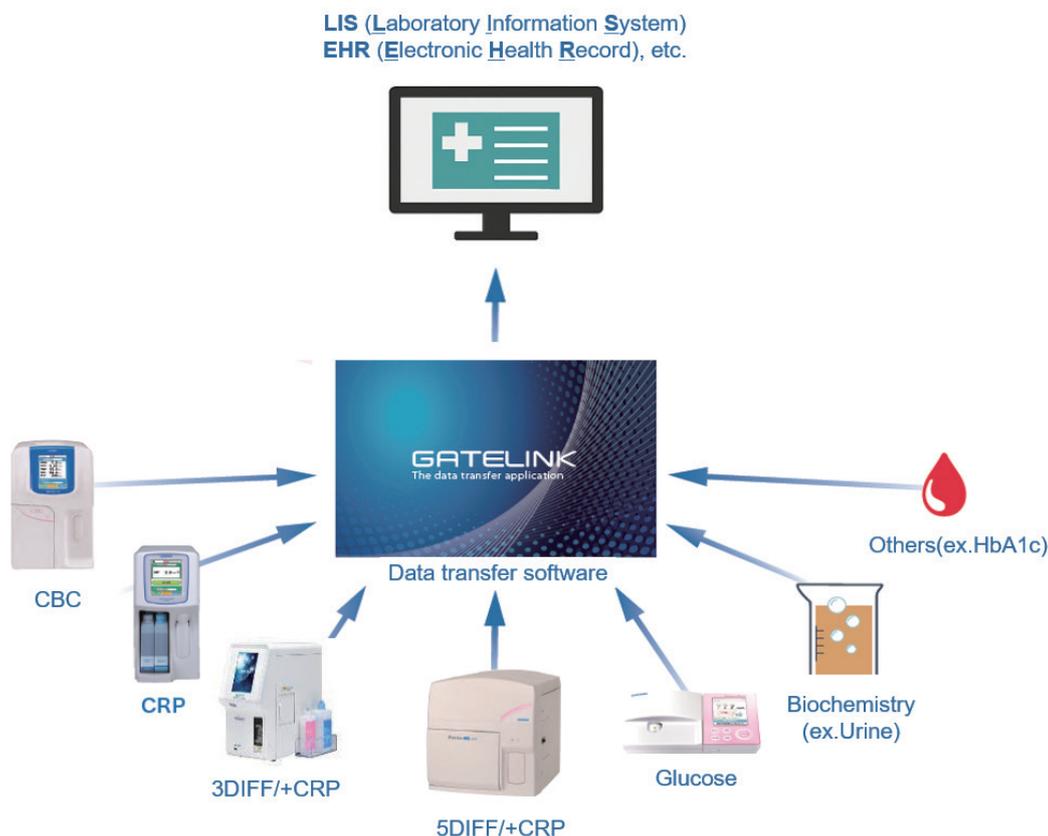


Figure 3 GATELINK connection configuration diagram.

GATELINKとHML nextの融合

将来的にGATELINKとHML nextを融合することで、他社装置も含めて、検査データと患者情報を一元管理およびリモートモニタリングできるようになる。特に中小規模の施設では、限られたリソースで高度な連携環境を構築できる点が大きな利点である。

具体的には、血液、生化学、尿、血液凝固、遺伝子などの臨床検査機器からの検査データをHML next上で統合管理し、リアルタイムに分析できるようになる。全ての接続機器から収集したデータを基に、患者の病状をリアルタイムで把握できれば、タイムリーに適切な治療を行うことで、病状の進行を未然に防ぐことも期待される。こうした複数分野にわたる検査データを統合的に活用することで、医療の質が向上し、より高水準の患者ケアの実現が期待される。

おわりに

本稿ではHML nextを紹介した。臨床検査機器単体の提供にとどまらず、ITを活用した統合的なソリューションとして設計・開発されたものである。これにより、機器の稼働状況監視、予知保全、台帳出力、遠隔操作など、多様な機能を通じて医療現場の業務効率化と法令遵守に資する支援が可能となった。今後は、臨床検査機器および医療情報システムの技術開発を進めつつ、製品販売からソリューション販売への転換を加速し、オートメーションやデータマネジメントをはじめとするソリューションでビジネスを拡大することで、医療機関の運用課題に対する包括的な解決策を提供し、医療従事者が本来の医療行為に専念できる環境づくりへの貢献を目指す。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- 【1】 野村尚之：In Vitro Diagnostics 市場におけるHORIBA Medicalの歴史と今後の展望, *Readout*, No.55, p.93-98, 2021
- 【2】 厚生労働省, 「医療法改正等の経緯と検体検査の精度の確保に係る基準について」
<https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/000911173.pdf>
(2025/04/30参照)
- 【3】 公益社団法人日本医師会, 「医療機関における検体検査業務の精度確保に向けた手引き」
https://jmamdc.med.or.jp/images/tebiki_20181228.pdf
(2025/04/30参照)
- 【4】 厚生労働省, 「医政発0810第1号 平成30年8月10日 都道府県知事各 保健所長 殿」
<https://www.ajhc.or.jp/siryo/20180810-2.pdf>
(2025/04/30参照)
- 【5】 厚生労働省, 「医療機関における検体検査の精度の確保に係る留意事項」
<https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/000911173.pdf>
(2025/07/17参照)
- 【6】 厚生労働省, 「働き方改革関連法について」
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11200000-Roudoukijunkyoku/0000187488.pdf>
(2025/07/17参照)
- 【7】 厚生労働省, 「医師の働き方改革」
<https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/001129457.pdf>
(2025/07/17参照)
- 【8】 厚生労働省, 「労働基準法改正について」
<https://www.mhlw.go.jp/content/11200000/001298245.pdf>
(2025/07/17参照)



作田 尋路

SAKUTA Hiromichi
株式会社堀場製作所
バイオヘルスケア本部
メディカルソリューション部
Medical Solution Dep.
Bio & Healthcare Division
HORIBA, Ltd.



西森 正志

NISHIMORI Masashi
株式会社堀場製作所
バイオヘルスケア本部
メディカルソリューション部
チームリーダー
Team leader
Medical Solution Dep.
Bio & Healthcare Division
HORIBA, Ltd.



データインテグリティ対応ソフトウェアHORIBA PLATINALINK ～製薬業界における分析装置のデータ完全性を担うプラットフォームの開発～

Data Integrity Software HORIBA PLATINALINK

~Development of a platform that ensures data integrity for analytical instruments in the pharmaceutical industry~

舟田 知弘

FUNADA Tomohiro

製薬業界では、測定データの正確さや信頼性が求められ(データインテグリティ)、GMP(医薬品の製造と品質管理に関する基準)への対応が不可欠となっている。そこでHORIBAでは、国際的なデータ管理基準「ALCOA+」に対応し、記録の正確性や保存性、改ざん防止機能などを統合的に提供することでユーザーの負担軽減と信頼性向上を実現する新たなプラットフォーム「HORIBA PLATINALINK (プラチナリンク)」(以下、PLATINALINK)を開発した。本稿では、PLATINALINKの特徴や機能について紹介する。

キーワード

GPM, データインテグリティ, ALCOA, 21CFR Part11, CSV

In the pharmaceutical industry, accuracy and reliability of measurement data (data integrity) are required, and compliance with GMP (Good Manufacturing Practice) is essential. To address this, HORIBA has developed a new platform, HORIBA PLATINALINK (“PLATINALINK”), which complies with the international data management standard “ALCOA+” and integrates functions such as record accuracy, data retention, and tamper resistance. This platform aims to reduce user workload and enhance reliability. This article introduces the features and functions of PLATINALINK.

Keywords

GPM, Data Integrity, ALCOA, 21CFR Part11, CSV

はじめに

GMPは製薬業界に対し、国民の安全を担保するために医薬品などの製造における品質管理と品質保証の基準を定めている。その中でデータインテグリティはデータの完全性、一貫性、正確性を保証することであり、これにより製品のトレーサビリティが維持され、製品の品質、安全性、および有効性を確保するために不可欠な要素となっている。また近年では、製薬業界に限らず、他業界においてもデータ改ざんやデータ偽装などの不適切な行為が社会問題化しており、産業全体においてもデータの信頼性確保が求められるようになってきた。HORIBAでは、これまでに粒度分布測定装置(LAシリーズ)をはじめとする製品群において、個別にデータインテグリティ機能を実装してきたが、製品ごとの対応では設計・開発の非効率性はもとより、製品によって提供する機能にばらつきができ、ユーザーの要求に応えられないケースがあるなど問題が顕在化していた。

こうした課題に対応するため、HORIBAでは、データ管理機能を標準化・統合し、複数の製品にまたがって一貫した機能を提供する共通アプリケーションの開発に取り組んだ(Figure 1)。



Figure 1 Application image of a common platform centered on Data Integrity.

ALCOA+ 原則とPLATINALINKの対応

製薬業界において求められるデータインテグリティは、ALCOA+ と呼ばれる基本原則に基づいて評価される。「ALCOA」の部分はデータインテグリティが満たすべき基本的な5つの要件(帰属性, 判読性, 同時性, 原本性, 正確性)の頭文字で, FDAが1994年に初めて概念を紹介して以来最新のガイダンス「Data Integrity and Compliance With Drug CGMP Questions and Answers Guidance for Industry」^[1]においてもその内容が紹介されている。また, 「+」の部分に関しては, FDAが発表したガイドラインで言及されたALCOA原則よりもさらに包括的な内容(完全性, 一貫性, 永続性, 可用性)が追加され, EMA(欧州医薬品庁)より最新のガイドラインとして2023年に「Guideline on computerised systems and electronic data in clinical trials」^[2]として発表されている。

PLATINALINKは, これらの原則を満たすことを前提に設計・開発されたプラットフォームアプリケーションであり, ユーザーが規制要件に適合したデータ管理を行えるよう支援する。Table 1に, ALCOA+の各原則とそれに対するPLATINALINKの対応を示す。

PLATINALINKは, これらすべての原則に対応した機能群を備えることで, 使用するユーザーが日々の業務においてデータ信頼性を確保し, 監査対応や社内品質保証を容易に行える環境を提供している。

PLATINALINK開発背景と設計思想

ユーザー課題に基づく統一設計

従来, HORIBA製品は製品単位でデータインテグリティ機能を独自に実装し, それぞれのユーザー要求に対応する形で機能拡張を進めてきたが, 製品ごとに仕様が異なるなど標準化できていないことが課題となっていた。

これに加え, HORIBAの中長期経営計画において製薬市場への注力が宣言されており, またXGT-9000などこれまで品質試験室で使用されていた既存製品に関してもデータインテグリティ対応のニーズが高まっていた。

そこで, データインテグリティ対応を製品単位ではなく全社的に統一する必要があると判断し, 製品横断で活用可能なプラットフォームとしてPLATINALINKの開発を開始した。

設計コンセプトとアプリケーション構成

PLATINALINKは以下の思想に基づいて設計されている:

- ・データインテグリティ機能を統一した仕様で提供する
- ・さまざまな分析装置に対応できる導入性を確保する
- ・DX基盤としての将来拡張性・保守性を確保する

アプリケーションの構成として, Webアプリケーションとして提供することで, ネットワーク構成の場合クライアントPCへのインストール不要で, 標準的なWebブラウザを用いてシステムにアクセス可能であるため, 以下の利点が得られる:

Table 1 ALCOA+の各原則とそれに対するPLATINALINKの対応

原則	説明	PLATINALINKにおける対応例
Attributable(帰属性)	誰が, いつ, どのデータを記録・変更・削除したかが明確であること。	監査証跡機能により, ユーザー操作やシステム処理を記録し, 記録者を特定可能。
Legible(判読性)	データが読みやすく, 必要に応じて明確に理解できる形式で記録されていること。	PDFやJPEG, PNGなど標準的なフォーマットファイルの保存・閲覧が可能。
Contemporaneous(同時性)	データが実際の作業と同時に記録されていること。	測定装置とのリアルタイム連携により, 自動的にデータを取得・記録。
Original(原本性)	データは最初に記録された原本(もしくは原本と同等の正確なコピー)であること。	測定結果データの自動保存, 変更不可のログ管理, 暗号化による改ざん防止機能。
Accurate(正確性)	データが誤りなく, 正確で完全であること。	一貫した記録方法と自動バックアップ, データ整合性の検証機能を搭載。
Complete(完全性)	削除や見落としがなく, すべてのデータが記録されていること。	基本的に削除や変更機能は搭載せず, データはすべて保存し, ログとして管理。
Consistent(一貫性)	データが一貫した方法で記録・管理されていること。	複数製品における統一されたデータ記録方式を採用。
Enduring(永続性)	長期的にアクセス可能で保存された状態が維持されていること。	定期的な自動バックアップとログ保存, アカウント制御により長期利用が可能。
Available(可用性)	必要などきに, すぐにデータへアクセス可能であること。	権限に応じたデータ閲覧, 検索機能, Webベースのアクセス性により高い可用性を確保。

- ・ネットワーク上のどこからでもアクセスできるため、管理者の負担軽減と保守性を向上する
- ・異なる分析装置でも同一プラットフォーム (PLATINALINK) とすることにより操作性が統一される
- ・顧客の社内ネットワークを利用したサーバーで運用をすることにより、顧客が定めたセキュリティポリシーと整合性を確保する
- ・複数の分析装置を集約させることでデータの一元管理が可能となる

Figure 2にPLATINALINKの運用例を示す。スタンドアロン構成の場合は分析装置とPLATINALINKを同一PC内にインストールし、運用する。ネットワーク構成の場合は社内ネットワークなど閉じられたネットワーク内にサーバーを設置し、サーバーにPLATINALINKをインストールしてそこに分析装置やネットワーク内の他のPCからアクセスする形で利用する。

現在はスタンドアロンやローカルネットワーク内での運用に限定しているが、社内ネットワーク内での遠隔アクセスや複数製品の一元管理といったWebアプリケーションのメリットを生かした運用が可能である。また、将来的にはクラウド基盤による多拠点連携やデータ利用も見据えた構成になっている。

PLATINALINKの主要機能

ユーザー・権限管理

PLATINALINKでは、共通したユーザー管理とフレキシブルな権限設定が可能であり、役割に応じたアクセスコントロールを実現している。これにより、IT管理者、測定装置オペレーター、承認担当者など、組織内の各担当が必要な操作範囲に限定してアクセス可能となる。

この仕組みにより、GMPなどの規制要件に求められる「誰が何をいつ行ったか」の明確なトレーサビリティを確保するとともに、不正アクセスや操作の抑止にもつながっている。



Figure 2 Example of PLATINALINK configuration.

セキュリティポリシー設定

PLATINALINKでは、GMPおよび各種規制要件への準拠を前提とし、システム全体のセキュリティレベルを維持・強化するためのパスワードポリシー管理機能を実施している。特に、ユーザー認証の厳格化は、データインテグリティを担保する上で重要な要素である。

管理者は以下のようなパラメータを任意に設定でき、組織のセキュリティポリシーに合わせた柔軟な運用が可能である：

- ・最小パスワード文字数の設定 (例：8文字以上)
- ・英大文字・英小文字・数字・記号の複合使用の強制
- ・定期的なパスワード変更の有効化 (例：90日ごと)
- ・過去に使用したパスワードの再利用防止
- ・ログイン失敗回数の上限定とアカウントロック機能
- ・一定期間無操作時の自動ログアウト機能

加えて、ログイン履歴やパスワード変更履歴も監査証跡として記録しており、不正アクセスの兆候を早期に検出するための仕組みを備えている。

これらの機能は、ユーザーの利便性を確保しながらも、システム全体の堅牢性を維持することを目的として設計されており、PLATINALINKが備えるデータ信頼性と一貫性をより確かなものとしている (Figure 3)。

レポート電子署名機能

PLATINALINKには、測定完了後のレポート管理機能を備えており、PDF形式での保存や電子署名付きの記録が可能である。

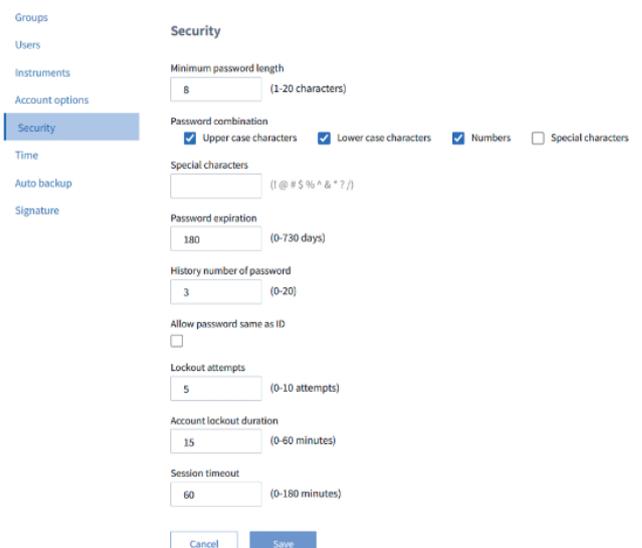


Figure 3 Security policy setting screen.

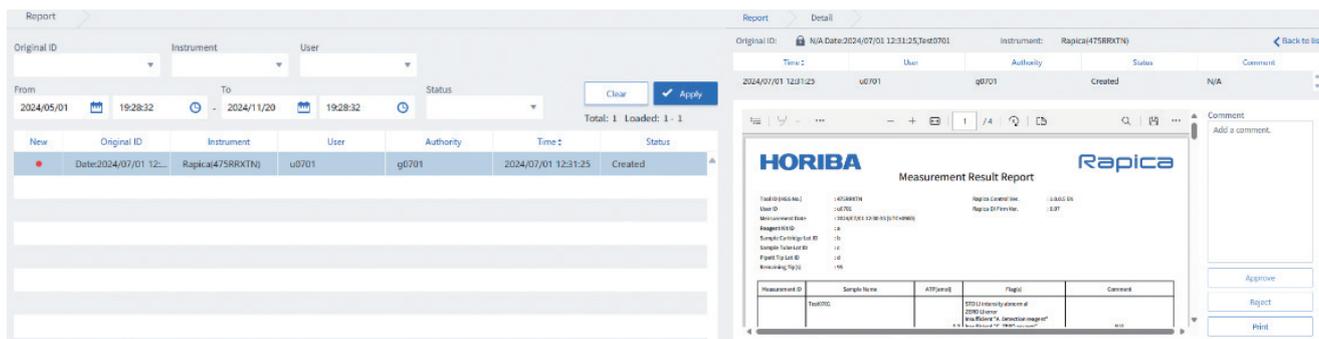


Figure 4 Management screen for report search and display.

このレポートはそのまま監査対応資料として利用可能であり、記録の保存・検索もPLATINALINK上で完結するため、紙への出力・保管を不要とする。結果として、保管スペースや運用コストの削減、記録の改ざん・紛失リスクの低減につながっている (Figure 4)。

監査対応機能

ALCOA+原則に基づき、PLATINALINKには高度な監査証跡機能を組み込んでいる。すべての操作を自動的に記録し、操作履歴の検索・フィルタリング(ユーザー別、日時指定、オペレーション種別など)機能により、監査時の迅速な情報提示が可能である。これにより、日常の運用においても業務プロセスの可視化と改善に活用できる (Figure 5)。

データ管理機能

PLATINALINKは、測定装置から自動的に取得される操作ログや測定データ、分析レポートを集約して保存することで、ユーザーが一元的に管理可能な環境を提供できる。

また自動バックアップなどの機能によってデータの消失リスクを低減し、ALCOA+の「永続性」に対応したデータ保管体制の構築ができる。

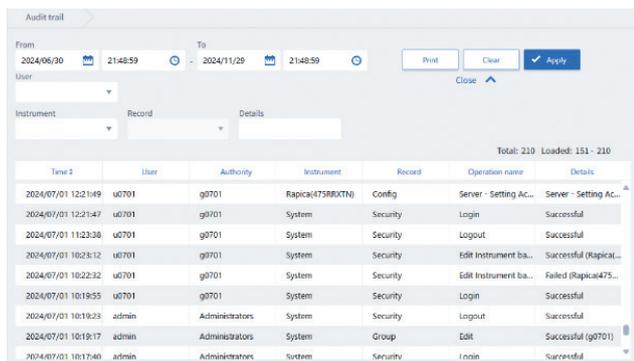


Figure 5 Audit trail list screen.

今後の展望

PLATINALINKは、現時点で複数製品に対応可能な共通プラットフォームとして、製薬現場におけるデータインテグリティ確保と運用効率化を支えているが、その役割は今後さらに広がっていく見通しである。

まずは今後、PLATINALINKと連携する分析装置を増やし、販売台数を伸ばすことでさらに現場の声を取り入れた機能を提供していく。

また、現在はHORIBAのデータインテグリティ対応プラットフォームという位置づけだが、将来的にはWebベースの一元管理システムとして、以下のような拡張が見込まれる：

- ・他社製機器との連携
- ・ユーザー行動分析や異常検出による自動アラート機能の導入
- ・データに対する電子署名など電子記録の対応強化

そして今後は、PLATINALINKの信頼性・拡張性・汎用性を活かし、環境、食品、化学、半導体など、データ信頼性が重要視される他産業分野への展開も視野に入れている。これにより、HORIBAは社会全体における品質と透明性の向上に貢献していく。

おわりに

HORIBAが開発したPLATINALINKは、製薬業界に求められるデータインテグリティと業務効率の両立を実現する共通プラットフォームである。ALCOA+原則に準拠した堅牢な設計により、複数製品にわたって一貫したデータインテグリティ対応機能を提供し、ユーザーの負担軽減と信頼性向上に寄与してきた。

また、社内に立ち上げた製薬市場に対応するためのワーキンググループやユーザーからのフィードバックを通じて、現場課題に即した改善を継続的に進めていきたい。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] FDA (2018)「Data Integrity and Compliance With Drug CGMP Questions and Answers Guidance for Industry」,
〈<https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/data-integrity-and-compliance-drug-cgmp-questions-and-answers>〉
2025年4月29日アクセス
- [2] EMA (2023)「Guideline on computerised systems and electronic data in clinical trials」,
〈https://www.ema.europa.eu/en/documents/regulatory-procedural-guideline/guideline-computerised-systems-and-electronic-data-clinical-trials_en.pdf〉
2025年4月29日アクセス



舟田 知弘

FUNADA Tomohiro

株式会社堀場製作所
開発本部 プロセスエンジニアリングセンター
IoT & データアナリティクス部
IoT & Data Analytics Dept.,
Process Engineering Center,
R&D Division
HORIBA, Ltd.

マラリア撲滅に向けた取り組み：血液検査データの機械学習によるマラリアスクリーニング機能の開発

Efforts to Eliminate Malaria:

Developing a Malaria Screening Capability Using Machine Learning on Blood Test Data

中谷 仁

NAKATANI Hitoshi

現在もマラリアは多くの国で流行している。2023年の感染者数は2億6,300万人、死亡者数は59万7,000人に上っており^[1]、SDGsのターゲットの一つとして、2030年までのマラリア撲滅が掲げられている^[2]。重篤化や感染拡大の防止のためにはマラリア感染の早期発見による早期治療が必要であるが、初期症状が軽度であることが多く、発見が遅れてしまうことがある。もし臨床現場にて一般的に行われる血液検査によって、マラリアのスクリーニング(病気の可能性を示唆する、確定診断ではない検査)が可能になれば、見逃しを減らすことができる。そこで、自動血球計数装置Microsemi LC-667G CRPにおいて、全血球計算(以下CBC)とC反応性蛋白(以下CRP)定量を用いて行うスクリーニング機能を開発した。本稿ではマラリアが血液に及ぼす影響と、データを利用してその傾向を検出する機械学習モデルの開発について述べる。

Malaria remains endemic in many countries. In 2023, it affected 263 million people and caused 597,000 deaths^[1]. The Sustainable Development Goals (SDGs) include malaria elimination by 2030 as one of their key targets^[2]. Early detection and treatment are essential to prevent severe disease progression and further transmission. However, because initial symptoms are often mild, diagnosis may be delayed. To address this, we have developed a screening function—intended to suggest the possibility of disease rather than provide a definitive diagnosis—using complete blood count (CBC) and C-reactive protein (CRP) measurements obtained from the Microsemi LC-667G CRP, an automated hematology analyzer. This paper describes the hematological effects of malaria and the development of a machine learning model to identify malaria-related patterns from CBC and CRP data.

はじめに

マラリアは主に熱帯地域で流行している感染症である。ハマダラカに刺されることでマラリア原虫と呼ばれる単細胞寄生虫が血液を介して肝細胞へ侵入し、破壊する。その後、赤血球へ侵入し増殖、分裂を繰り返した後に赤血球を破壊する。その際に赤血球外に放出され、新たな赤血球に対して同様のサイクルを繰り返す^[3]。人に感染してマラリアを発症するマラリア原虫は5種類あり、中でも熱帯熱マラリア原虫と三日熱マラリア原虫が大きな脅威となっている。熱帯熱マラリア原虫は、アフリカ大陸で最も蔓延し、かつ生命を脅かしているマラリア原虫であり、三日熱マラリア原虫は、アフリカ以外のサハラ以南の国で主要なマラリア原虫である^[4]。症状としては発熱・貧血・脾腫(脾臓が腫れて大きくなる状態)を伴うことが多い^[5]。初期症状は軽

度であることが多く、他の熱疾患と区別することが難しいことがある。治療せずに放置すると、24時間以内に重篤化し、死に至る場合もあるため^[4]、早期発見による早期治療が重要である。

一般的なマラリア診断としては、染色した血液標本の顕微鏡観察や、マラリア原虫由来の抗原・酵素を検出する迅速診断キットによる診断(以下RDT)が行われる^[6]。しかし、比較的軽症な患者の場合や医師の臨床判断の熟練度によっては、診察において感染が疑われず検査されないことによる見過ごしが懸念される。また、最も精度の高い血液標本の顕微鏡観察による診断には多くの時間を要するため、全ての検体を診断することもできない。その課題の解決策として、発熱時に一般的に行われる血液検査のみで、マラリアのスクリーニングを行うことが考えられる^[7]。また、診断

工数や属人性の観点から、血液サンプリング後は自動で処理されるよう、自動血球計数装置においてマラリアの自動スクリーニング機能が搭載されることが望まれる。

自動血球計数装置を用いたマラリア診断の研究としては、CBC及び白血球5分類(好中球, リンパ球, 単球, 好酸球, 好塩基球の5種類, 以下5Diff)を用いて検出することで診断する方法などが報告されている^[7]。HORIBAグループでもCBC及び5Diffを用いたマラリア判定フラグを出力する機能を持った製品を販売している。一方、CBC及び白血球3分類(リンパ球, 単球, 顆粒球の3種類, 以下3Diff)を用いた研究は少ない^[8]。マラリア感染拡大地域では測定コストを抑えることが求められるため、装置価格がリーズナブルなCBC及び3Diffを測定する製品が適している。よって、CBC及び3Diffの測定からマラリアの疑いをフラグとして表示する機能(以下マラリアスクリーニングフラグ)を開発した。

Microsemi LC-667G CRPについて

Microsemi LC-667G CRP (以下LC-667G)は臨床現場で扱える自動血球計数装置である。CBCに加えて3DiffとCRPの計測を行える。コンパクトな筐体とリーズナブルな価格を実現しており、CBCと3Diffの結果は約1分で、CRP測定の結果も合わせる場合は約4分で測定完了する。

LC-667Gでは白血球数(以下WBC)、赤血球数(以下RBC)、ヘマトクリット値(以下Hct)、血小板数(以下PLT)の算出に電気抵抗法を用いている(Figure 1)。電気抵抗法とは生理食塩水に浮遊させた血球をアパーチャと呼ぶ微細孔に定電流を流しながら通過させ、その時に生じる抵抗変化を電圧変化として計測する方法である。血球通過時の電圧変化は血球の容積と比例するために、その電圧パルスから血球数と血球容積が得られる。この電気抵抗法は、粒子サイズの計測において高い精度を持ち、容積も測定できることから、現在も血球計数の標準法となっている。

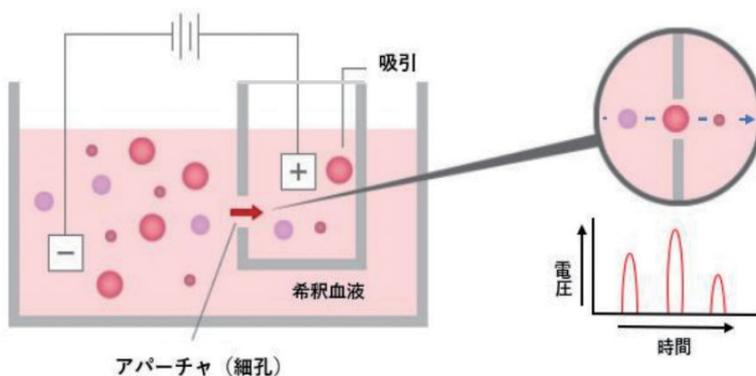


Figure 1 Impedance method

$$V = R \times I$$

波形の山の大きさ
⇒細胞の大きさ

波形の山の数
⇒細胞の数

また、CRP濃度は、ラテックス免疫比濁法を用いて計測している。全血を溶血剤で溶血させた後、安定化液の存在下で抗ヒトC-反応性蛋白抗体感作ラテックス試薬を反応させると、検体中のCRPと試薬中のラテックス粒子は抗原抗体反応を起こし、ラテックス粒子が凝集する。この凝集反応による濁度変化速度を赤色光で計測し、あらかじめ標準血清を基に作成されている多項式検量線から、溶血検体中のCRP濃度を求める。同時に計測したHctから、被検体の血漿中CRP濃度に換算している。

予測因子の検討

マラリア感染の予測因子として、どの測定項目を使用すべきかを検討した。マラリアが血液に与える影響がどのように観測されるかを、データ解析と血液学的観点の両方の視点から検討した。

まず、マラリアスクリーニングフラグを開発するためのデータ収集を行った。インドのクリニックにおいて、LC-667Gを用いた血液検査を2018年から2019年のモンスーン期に実施した。発熱している全ての患者に対して血液検査を行うことにより、CBCと3DiffとCRPの測定結果を収集した。同時に、検体がマラリア陽性及び陰性であるかを判断するため、血液標本の顕微鏡観察による検査とRDTによる検査を行った。

次に、取得したデータに関してマラリア陽性検体の傾向を解析していく。まず一つに、WBCの体積度数分布に表れる異常ピークがある。これは三日熱マラリアの場合に出現しやすい(Figure 2)。このピークは白血球によるものではなく、主にマラリア原虫が凝集したものを検出した結果だと考えられる。一方、熱帯熱マラリアの場合では、このピークが三日熱マラリアの場合よりも小さくなる。これは大きなサイズの熱帯熱マラリア原虫は脾臓に隔離されやすく、末梢血に存在しづらいためである^[8]。

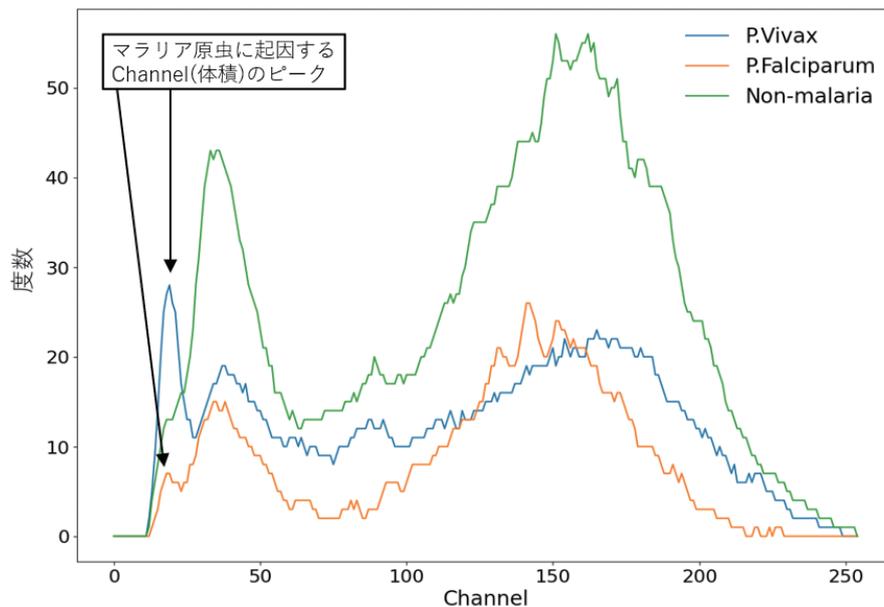


Figure 2 Volume distribution of white blood cells in samples of P. Vivax, P. Falciparum and Non-malaria. The unit of the horizontal axis, Channel, takes values from 0 to 255 that are proportional to the volume of white blood cells.

次にCRP濃度の上昇が確認できた。CRP濃度は炎症のバイオマーカーであり、感染症などで値が上昇することが知られている。マラリアに特異的なマーカーではないが、マラリアの重症度を評価するマーカーとして報告されている^[9]。また、マラリアとデング熱の鑑別にもCRP濃度は有用である。この2つは流行地域の多くが重なっているため鑑別が重要であるが、症状もCBCの測定結果も似た傾向を示すために鑑別が困難である。一方、Figure 3のように、デング熱よりもマラリアの方がCRP濃度は高い傾向にある。これは、デング熱の病原体はデングウイルスであり、ウイルス感染症ではCRP濃度の上昇は軽度であるためである^[10]。

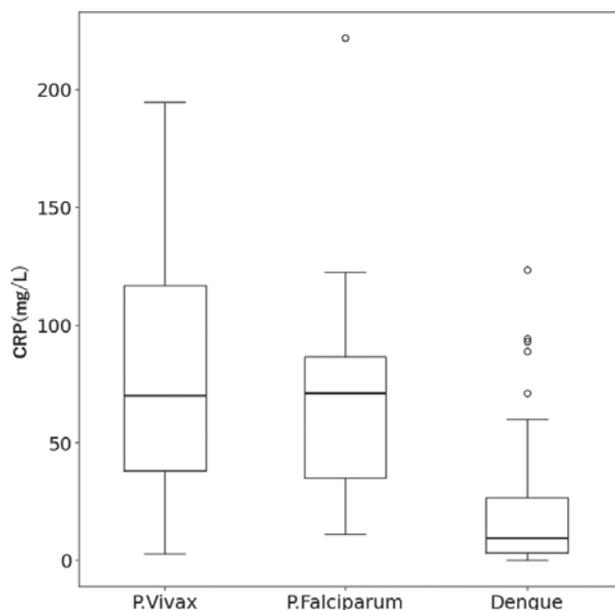


Figure 3 Comparison of CRP concentrations in samples of P. Vivax, P. Falciparum and dengue fever.

また、PLTの減少も確認された。PLTの減少については、様々なメカニズムが関与していると推察される。例えば、脾腫によって脾臓内に通常よりも多くの血小板が蓄えられてしまい末梢血の血小板が少なくなることや、マラリア原虫による赤血球の破壊に伴い、血小板が凝集し大きな一つの血球として数えられることで血小板数が少なく計測されることなどによって起こる^[11]。

CRP及びPLTが他の測定値と比較しマラリア感染に対する鑑別能が高いことを確認するために、Figure 4とTable 1を示す。Figure 4はマラリア陽性と陰性を鑑別する際のROC Curve(Receiver Operating Characteristic Curve)である。ROC Curveとは、各値に対するカットオフ値(陽性及び陰性を判断するための閾値)を変更した場合の“Sensitivity”(陽性検体の内正しく陽性と判断する割合)と“1-Specificity”(陰性検体を間違って陽性と判断する割合)とをプロットしたものである。前者は高い程良く、後者は低い程良いため、グラフが図の左上に向かっていく程良い鑑別能を持った値である。これを定量化したものがAUC(Area Under the Curve)であり、その名の通りグラフの下の面積を表している。Figure 4とTable 1より、各値単体での鑑別能としてはCRP及びPLTが、WBCやMCHC(平均赤血球ヘモグロビン濃度)、RDW(赤血球粒度分布幅)よりも優れていることが分かる。

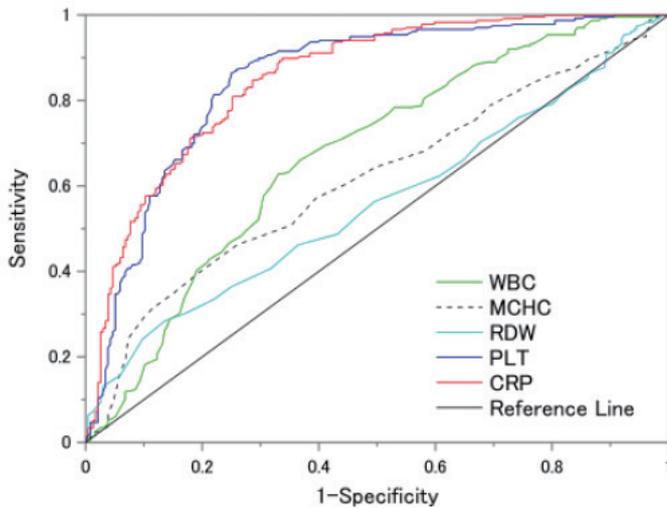


Table 1 Comparison of AUCs for hematological parameters in the malaria diagnosis

	AUC
WBC	0.672
MCHC	0.613
RDW	0.558
PLT	0.849
CRP	0.852

Figure 4 Comparison of ROC Curves for hematological parameters in the malaria diagnosis

モデリング

マラリアスクリーニングフラグを算出する手法の中核には機械学習アルゴリズムにより作成されたマラリアスクリーニングモデル(以下モデル)が用いられている(Figure 5)。この機械学習では、要求を満たすための2つの工夫を行っている。

まず、モデルの解釈可能性・説明可能性が担保できることである。モデルの解釈可能性とは、機械学習によって作成されたモデルが入力からどのようにして出力を導き出したかを説明できるかどうかの程度であり、モデルの説明可能性とは、出力を導出した理由を説明できる程度である。これらが十分でないものは医師が患者に診断理由を説明できないため、臨床現場で採用されないと考えた。今回、機械学習アルゴリズムとしては線形スパースモデリングを採用

しており、この機械学習アルゴリズムで作成されるモデルでは式1のように各入力とそれらに対応する重みとの積和演算により出力を計算しているため、各入力の寄与度が定量化できる解釈可能なモデルである。また、この機械学習アルゴリズムには、入力の中から重要な因子を自動で絞りこみ選択する機能があり、選択された因子のみを使用することでモデルの説明可能性を向上させている。前章で挙げているように、モデルに入力される因子も、マラリアが血液に及ぼす機序を考慮して設計されている。かつ各因子が、マラリア感染の疑い度合いと相関があるため、出力への影響を理解することも容易である。

$$Y = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (1)$$

ここで、 X_i は*i*番目の入力、 W_i は X_i に対する重み、 Y は出力であるマラリア感染の疑い度合いである

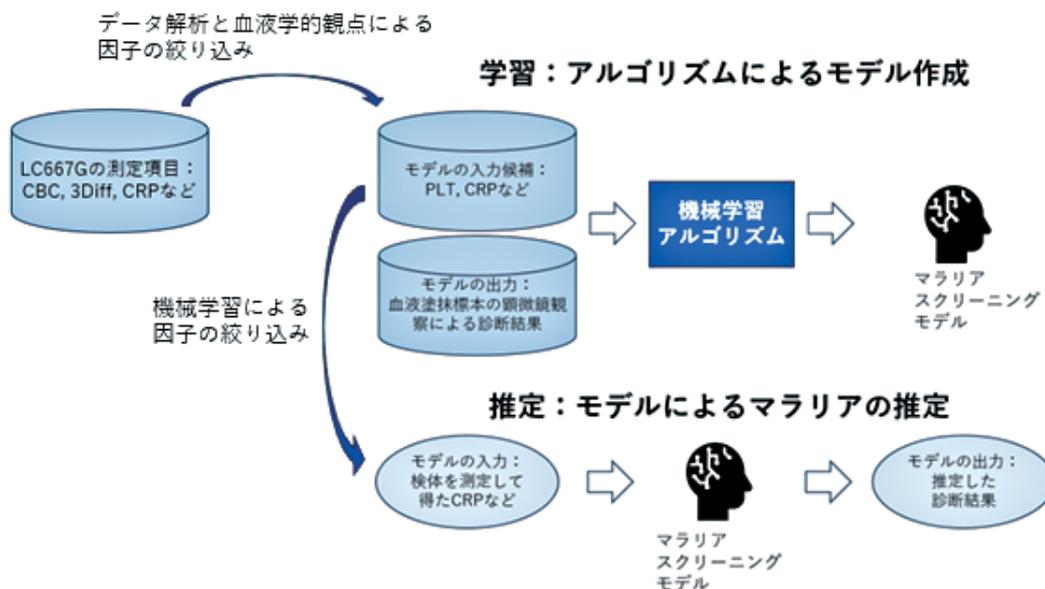


Figure 5 Workflow for the development and application of a machine learning model for malaria screening based on hematological parameters

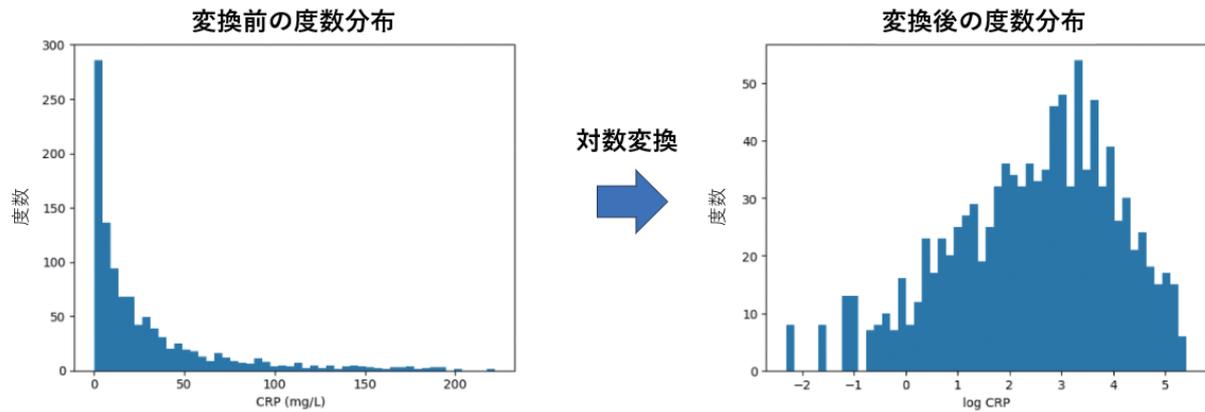


Figure 6 Comparison of CRP value distributions before and after log transformation, showing improved normalization

次に、精度が十分に高いことである。スクリーニングフラグを信頼するためには、マラリア診断のゴールドスタンダードである血液標本の顕微鏡観察での診断との相関が高くなければならないため、以下のような工夫を行っている。今回使用した機械学習アルゴリズムでは、入力された因子が正規分布であることを仮定して動作するため、実際のデータの分布が乖離しているとモデルの精度が落ちる。例えば、CRPは右歪曲分布になっており、対数変換をすることで正規分布に近づけている (Figure 6)。また、マラリアの発症数のピークとなるモンスーン期に採取されたデータとは言え、マラリア陽性の検体数は陰性の検体数と比較して少ない。一般的に機械学習ではデータ数が多い側の出力の傾向を強く学習してしまうため、各データの学習時の重みを変化させて学習の度合いをコントロールしている。また、スクリーニング用途ではSensitivityが高いことが要求されるため、学習方法を調整し、ROC Curveを描画し要求精度を満たす最適な判定閾値を求めている。また、血液の傾向は人種・年齢・性別などが大きく影響するため、モデルが使用される範囲を検討し誤った判断をしまうリスクを低減している。これらにより、モデルの精度を向上させた。

おわりに

CBCと3DiffとCRPによるマラリアスクリーニングフラグを開発した。このフラグに関するモデルには機械学習を用いており、非属人的で高精度かつ説得力のある判断が、自動でできるようになった。省力化により従来よりも多くの患者の対応が可能となり、かつ症状が顕在化していない患者に対してもスクリーニングを実施することでマラリアの早期発見に貢献できる。これからもHORIBAグループは、DX・AI技術を用いた計測・分析を通して世界中の人々の健康維持に貢献していく。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] World Health Organization, "World malaria report 2024"
<https://www.who.int/teams/global-malaria-programme/reports/world-malaria-report-2024>
 (2025/04/20参照)
- [2] 日本SDGs協会 "SDGsについて"
<https://japansdgs.net/about/sdgs/>
 (2025/07/17参照)
- [3] Baer K, Klotz C, Kappe SHI, Schnieder T, Frevert U (2007) Release of Hepatic Plasmodium yoelii Merozoites into the Pulmonary Microvasculature. *PLoS Pathog* 3(11): e171.
<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.0030171>
- [4] World Health Organization "Malaria"
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/malaria>
 (2025/04/20参照)
- [5] マラリアにおける腸内細菌叢と病態の関連性 久枝 一 *Journal of Japanese Biochemical Society* 88(5): 649-653 (2016) 2016 公益社団法人日本生化学会
- [6] MSDマニュアル プロフェッショナル版 "マラリア"
<https://www.msmanuals.com/ja-jp/professional/13-%E6%84%9F%E6%9F%93%E6%80%A7%E7%96%BE%E6%82%A3/%E8%85%B8%E7%AE%A1%E5%A4%96%E5%AF%84%E7%94%9F%E5%8E%9F%E8%99%AB/%E3%83%9E%E3%83%A9%E3%83%AA%E3%82%A2>
 (2025/04/20参照)
- [7] Campuzano-Zuluaga, G., Hänscheid, T., & Grobusch, M. P. (2010). Automated haematology analysis to diagnose malaria. *Malaria journal*, 9, 346.
<https://doi.org/10.1186/1475-2875-9-346>
- [8] Nishimura, J., Dharap, P., & Raimbault, S. (2021). The utility of basic blood counts, WBC histogram and C-reactive protein in detecting malaria. *BMC infectious diseases*, 21(1), 1006.
<https://doi.org/10.1186/s12879-021-06704-5>
- [9] Mu, A. K., Bee, P. C., Lau, Y. L., & Chen, Y. (2014). Identification of protein markers in patients infected with Plasmodium knowlesi, Plasmodium falciparum and Plasmodium vivax. *International journal of molecular sciences*, 15(11), 19952–19961.
<https://doi.org/10.3390/ijms151119952>
- [10] 中西雅樹, 稲葉 亨, 藤田直久. シリーズ: CRP-基礎と臨床応用 1. CRP(C reactive protein; C反応性蛋白). 医療と検査機器・試薬 35: 725-730, 2012.
- [11] Lacerda, M. V., Mourão, M. P., Coelho, H. C., & Santos, J. B. (2011). Thrombocytopenia in malaria: who cares?. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 106 Suppl 1, 52–63.
<https://doi.org/10.1590/s0074-02762011000900007>



中谷 仁

NAKATANI Hitoshi

株式会社堀場製作所
 開発本部 プロセスエンジニアリングセンター
 IoT&データアナリティクス部
 サブリーダー

Assistant Section Leader,
 IoT & Data Analytics Dept.,
 Process Engineering Center,
 R&D Division
 HORIBA, Ltd.

鉄鋼業界における微量元素分析の自動化と技術的進化 ～EMIA (炭素・硫黄) およびEMGA (酸素・窒素・水素) シリーズの役割と展望～

Automation and Technological Evolution of Trace Element Analysis in the Iron and Steel Industry
～The Role and Prospects of the EMIA and EMGA Series～

朴 商云

PARK Sangwoon

鋼材中の炭素・硫黄、酸素・窒素・水素といった微量元素の分析は、機械的特性や耐食性の管理に直結する重要な工程となっている。従来は熟練作業員による手動分析が主流であったが、人的ばらつきの排除、測定精度の安定化、およびスループット向上の観点から、分析装置自体の非属人化や自動化が強く要請されるようになった。掘場製作所のEMIAシリーズ(炭素・硫黄分析装置)およびEMGAシリーズ(酸素・窒素・水素分析装置)は、こうした産業界のニーズに対応する形で進化を遂げてきた。本稿では、EMIAおよびEMGAシリーズの技術的発展と自動化対応の歩みを概観し、鉄鋼業界における分析装置の果たす役割と、将来的な展望について考察する。

The analysis of trace elements such as carbon, sulfur, oxygen, nitrogen, and hydrogen in steel is an important process directly related to the control of mechanical properties and corrosion resistance. In the past, manual analysis by skilled operators was the mainstream, but from the perspective of eliminating human variability, stabilizing measurement accuracy, and improving throughput, there is now a strong demand for de-personalization and automation of the analyzers themselves. Horiba's EMIA series (carbon and sulfur analyzers) and EMGA series (oxygen, nitrogen, and hydrogen analyzers) have evolved in response to these industrial needs. This paper reviews the technological development of the EMIA and EMGA series and their progress toward automation, and discusses the role of analyzers in the steel industry and their future prospects.

はじめに

製造業では、グローバル市場における競争激化やサステナビリティへの対応といった背景から、製品の品質を安定的に維持しつつ、生産性を同時に高める取り組みが重要性を増している。特に鉄鋼業界では、材料特性の高度化や国際的な品質保証基準の導入に伴い、製造プロセス全体におけるトレーサビリティとリアルタイム品質評価の必要性が顕著となっている^[1]。

こうした背景のもと、鋼材中の炭素・硫黄、酸素・窒素・水素といった微量元素の分析は、機械的特性や耐食性の管理に直結する重要な工程となっている。これらの成分は、たとえば靱性や割れ感受性といった性質に顕著な影響を及ぼすことから、ppmレベルでの精密な定量が求められる。従来は熟練作業員による手動分析が主流であったが、人的ばらつきの排除、測定精度の安定化、およびスループット向上の観点から、分析装置自体の操作簡易化や自動化が

強く要請されるようになった^[2]。

掘場製作所のEMIAシリーズ(炭素・硫黄分析装置)およびEMGAシリーズ(酸素・窒素・水素分析装置)は、こうした産業界のニーズに対応する形で進化を遂げてきた^[3]。特に近年では、工場全体のスマート化を目指すIndustry 4.0の潮流の中で、分析装置にもネットワーク連携機能、遠隔操作性、測定条件の自動適応などが求められている^{[4],[5]}。

日本の鉄鋼業界と分析装置の需要

鉄鋼業界における品質要求の高度化

日本の鉄鋼業界は、長年にわたり高品質かつ高信頼性の鋼材を供給し、建設、自動車、機械、造船、エネルギーといった多様な産業の発展を支えてきた。1980年代以降、製品の軽量化・高強度化・耐食性の向上といった機能的要件が高まったことで、鋼材の材料設計は複雑化し、製造工程全体に対してより高度な品質管理が求められるようになった^[6]。

Table 1 Effects of each element on steel materials

元素	鉄鋼に与える影響
炭素 (C)	機械的性質に影響
	硬さに影響
硫黄 (S)	耐食性
	加工性や溶接性を劣化
酸素 (O)	疲労強度
	延性, じん性を低下
窒素 (N)	強度を増加させるが, 延性, じん性を低下
水素 (H)	遅れ破壊
	延性を低下

このような品質要求の高まりの中で特に重要視されているのが、鋼材中の微量成分、すなわち酸素・窒素・水素などの定量管理である。これらの元素は、微量であっても材料の機械的性質に著しい影響を及ぼす。たとえば、酸素は延性・靱性を低下させ、窒素は時効硬化や延性の劣化を引き起こし、水素は遅れ破壊の原因となる^[1]。そのため、製品の信頼性向上および不良率の低減には、ppmオーダーでの精密かつ再現性の高い分析が不可欠である (Table 1)。

さらに、品質保証の国際的な標準化が進む中で、JIS (日本産業規格) に加え、ASTMやISOといった海外規格への準拠が不可欠となりつつある。このような国際的要求に応えるため、分析装置には一層の高精度・高信頼性・高再現性が求められている^[1]。

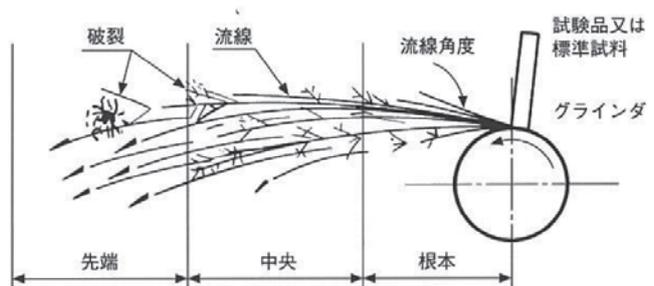


Figure 1 JIS G 0566(1980) Spark test method for steel.*

* 株式会社山本科学工具研究社 火花試験標準片 <https://www.ystl.jp/products/spark/index.html>

微量成分分析の現場ニーズ

従来、鋼材中の化学成分分析は、熟練作業者による手作業に依存していた。特に火花試験などの定性的手法では、作業者の熟練度や手順の違いにより、結果に大きなばらつきや誤差が生じやすかった (Figure 1参照)。このような分析の属人性と作業負荷の高さは、安定した品質保証を図る上で大きな課題となっていた。

こうした課題に対応する形で登場したのが、HORIBAのEMIA, EMGAシリーズである。これらの装置は、化学反応に基づく高感度な測定技術と自動化された操作系を兼ね備えており、人依存の分析から機器依存の高精度・高再現性分析への移行を可能にした。Figure 2は、EMGAを用いた酸素・窒素・水素分析の一例であり、再現性の高い結果が得られていることがわかる。

このような定量分析技術の進展により、鉄鋼業界では品質の安定化と大量生産体制の両立が実現され、分析精度の向上だけでなく、作業工数の削減や安全性の強化といった観点からも、自動化対応が長年にわたって強く求められてきた。

HORIBAが展開するEMIA・EMGAシリーズは、これらのニーズに対応すべく、高感度・高再現性な測定性能により、標準化された定量結果を迅速に取得可能で、様々な自動化機能 (例: るつばの自動排出, オートサンプラー) により夜間無人運転を実現しており、EMIA・EMGAシリーズは、単に高性能な分析装置にとどまらず、「自動化対応型の品質

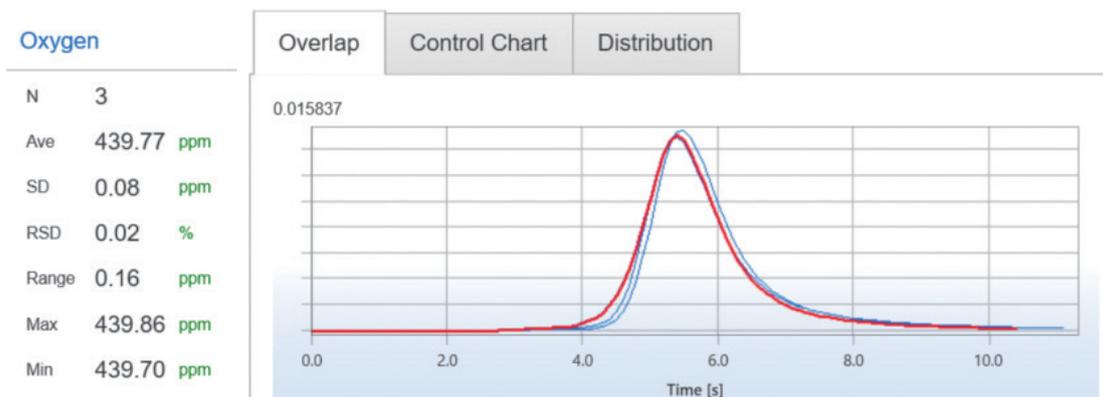


Figure 2 Example of EMGA analysis results.

評価プラットフォーム」として、国内外の鉄鋼業界から高い評価を受けている^{[2],[3]}。

EMIA・EMGAシリーズの技術的進化と自動化対応

分析原理と装置構成の概要

HORIBAが提供するEMIAシリーズおよびEMGAシリーズは、それぞれ鋼材などの無機材料に含まれる微量成分の定量分析に特化した装置である。前者は炭素・硫黄の分析、後者は酸素・窒素・水素の分析に対応しており、いずれも高感度かつ高精度な測定が可能である。

EMIAシリーズは、試料を高温下で燃焼させ、酸化反応で生成されたCO₂およびSO₂ガスを非分散型赤外線吸収法（NDIR）により定量する方式を採用している（Figure 3）。一方、EMGAシリーズでは、試料を不活性ガス中で融解し、発生したCO、N₂、H₂成分を酸化、炭素還元を通して熱伝導度法（TCD）及びNDIRにより検出する（Figure 4）。

両装置の共通構成要素としては、精密に制御された加熱炉（インパルス炉）、ガス流路、ガス精製系、検出ユニットとなっており、加熱炉でサンプルを高温でガス化し、測定可能なガスに変換し、NDIR検出器で測定することで、ガス選択性が非常に優れているNDIR検出器の性質を活かしている。

操作性と自動化機能の進化

初期の分析装置は、前処理やつば交換、検体の投入など、多くの工程を人手で行う必要があり、分析精度やスループットは作業者の熟練度に依存していた。これに対してEMIA・EMGAシリーズは、以下のような技術的進化を経て自動化・効率化を実現してきた^[3]。

- 1) オートサンプラーの搭載による連続測定対応
- 2) 自動つば冷却・排出機構による測定サイクルの短縮
- 3) サンプルID管理システムによる誤差・混入リスクの排除
- 4) 測定条件のレシピ化により、ユーザー間の操作差を排除
- 5) 装置状態モニタリングとエラー通知機能によりダウンタイムを最小化
- 6) 気送管から送られるサンプル分析の全自動化

Figure 5に示すように、1980年代に発売されたEMGA-730は、HORIBAが開発した初の自動化対応分析装置である。当時は、つばのクリーニングを自動で行う機構や、X軸移動に特化したロボットとY-Z軸を空気圧シリンダで駆動する構成を採用していたFigure 6に示すように、自動秤量機構を備えたモデルと、サンプルストッカーを中心にしたモデルの2系統があり、ユーザーの要求に応じた選択が可能であった^[6]。

Figure 7は、当時の自動分析における基本動作フローであ

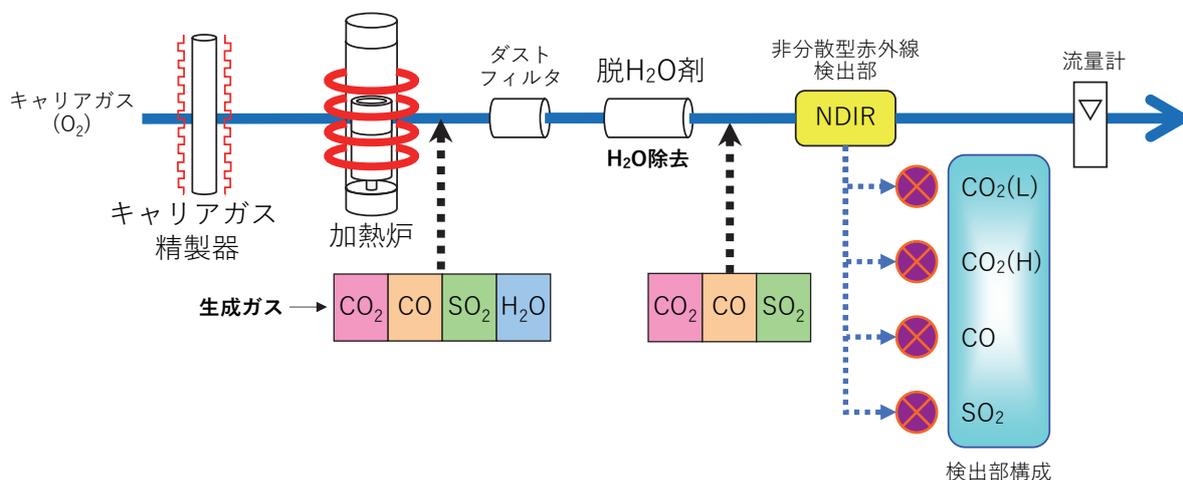


Figure 3 EMIA Measurement Principle.

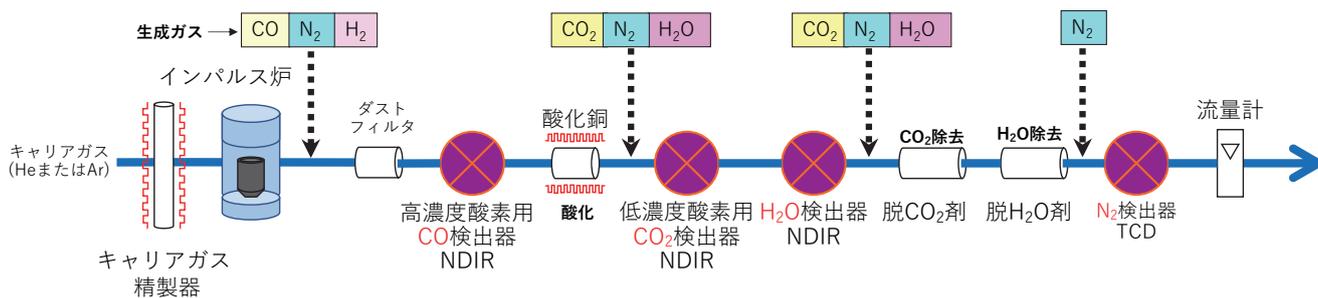


Figure 4 EMGA Measurement Principle.

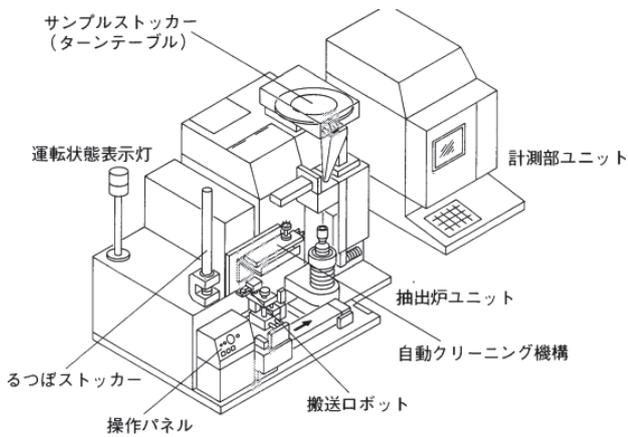


Figure 5 The first automation system, EMGA-730 (top)
System configuration with sample stocker function (bottom).

る。ここでは秤量と投入が主な対象であり、装置そのものの動作とは別に、試料処理にかかる工数をいかに削減するかが、自動化の焦点となっていた。

その後40年を経て、EMIAシリーズはさらなる進化を遂げ、最新の全自動化装置EMIA-2000では、XYZ軸の自由移動を可能とするロボットアームを中核とし、以下のような高度な動作が実現されている (Figure 8)。

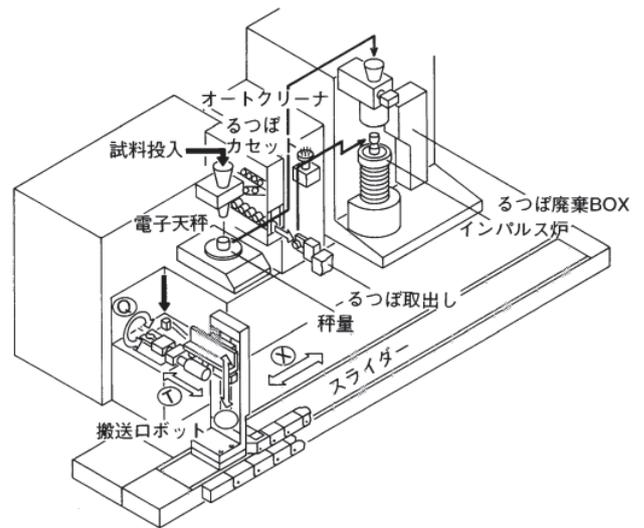


Figure 6 Automated system EMGA-730 with automatic weighing function.

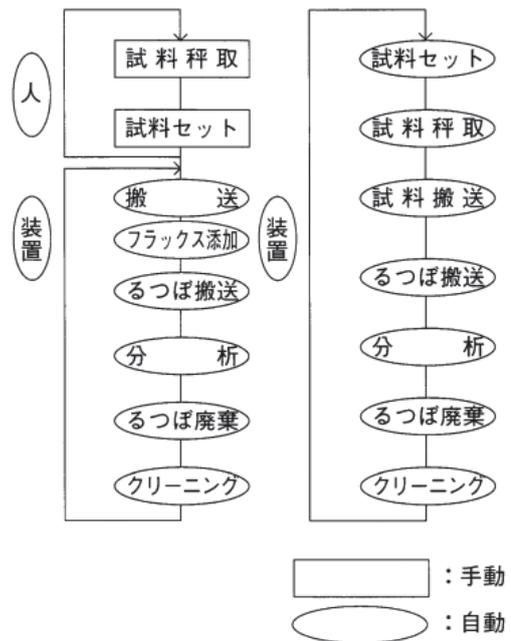


Figure 7 Basic operation of automation equipment.



Figure 8 EMIA-2000 automatic machine (left) and interior (right).

Figure 9に示すように、るつぼは加熱ユニットからロボットアームによって取り出され、所定の位置に搬送される。この動作は、重力搬送とエアシリンダによる微細制御により、高精度な位置決めが行われるように設計されている。

その後、Figure 10に示すように、ロボットは試料と助燃材を正確に投入し、自動秤量を行う。初期の2種類の自動化構成に対し、現行モデルではこれらを1つの統合システムで処理できるようになっている。

最終的に、ロボットは試料を本体装置であるEMIA-Pro/Expertへ投入する(Figure 11, Figure 12)。従来の直線軸移動に依存した設計とは異なり、X-Y-Z軸を自由に制御することで、安全カバーの形状や装置レイアウトに応じた柔軟な対応が可能となっている。

このように、試料セットや秤量といった工程の自動化は、作業者の負荷軽減と作業工数の削減に直結しており、EMIA・EMGAシリーズは市場の自動化ニーズに継続的に対応している。



Figure 9 Crucible set from the baking unit from the crucible.

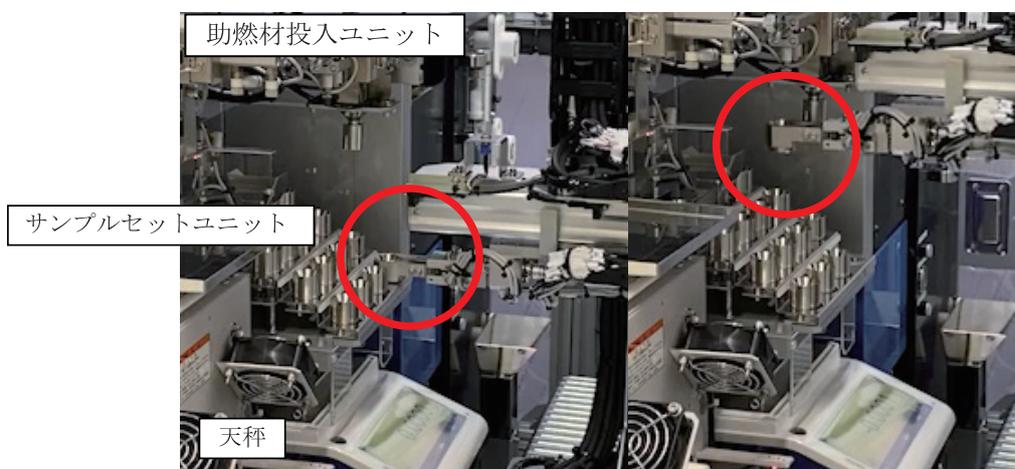


Figure 10 Sample sets, weighing.



Figure 11 Sample set for EMIA - Pro/Expert.



Figure 12 EMIA-Pro/Expert sample set (angle change).

鉄鋼業界における導入事例と評価

EMIA・EMGAシリーズをはじめとする分析装置は、鉄鋼業界において品質保証部門のみならず、製鋼・圧延などの主要な生産工程にも導入されている。とりわけ、製造ラインから採取されたサンプルを迅速に分析し、その結果を炉内条件の調整に即時反映させる運用は、大手鉄鋼メーカーにおいて標準的な実践となっている。このようなリアルタイム連帯型の運用により、次のような運用上のメリットが報告されている。

- 1) 分析から工程への即時フィードバックによる品質変動の抑制
- 2) データの蓄積・可視化によるトレーサビリティの強化
- 3) 測定作業の自動化によるオペレーターの負荷軽減と教育コストの削減

EMIA・EMGAシリーズは、単なる測定機器の枠を超え、生産工程のリアルタイム最適化を支援する知的支援装置(Intelligent Analytical System)として再定義されつつある。鉄鋼業界における導入事例は、装置が「データを得る」存在から「品質と効率の両立を実現するための戦略的ツール」へと進化していることを示している。

自動機の展望

自動化機構の成熟と多機能化

近年、分析装置の自動化技術は、単なる検体処理の省力化を超えて、ユーザーインターフェース、制御アルゴリズム、装置の自律判断機能といった複数領域において大きな進展を見せている。オートサンプラーと搬送装置の連携や、エラーの自己検知・回復機能などが高度化してきており、装置はより“使われる”ものから“共に判断し、提案する”機器へと変貌しつつある。

このような背景のもと、EMIA・EMGAシリーズでは以下のような拡張機能が今後想定される。

- 1) AIを用いた測定条件の自動補正およびエラー予測機能の強化
- 2) 検体情報の読み取り(バーコード・RFID)による測定プロファイルの完全自動切替
- 3) 複数台の分析装置間でのジョブスケジューリング・負荷分散制御の実装
- 4) 動的な測定中断・再開機構と柔軟な再計算モード

自動化がもたらす現場への影響

分析現場における自動化の進展は、作業者の役割を「操作する人」から「監視し最適化する人」へと変えていくことになる。これにより、属人的な運用の削減、教育コストの縮小、そしてトラブル対応の迅速化が期待される。また、複

雑な材料や新素材への対応が進むなかで、試験条件の設定や標準化手順の合理化はますます重要性を増す。

将来的には、測定者が現場に不在でも遠隔からモニタリング・制御が可能な「非接触型運用」や材料のロット差や形状に応じた「リアルタイム条件最適化AI」、他工程からのデータを解析し分析装置が能動的に測定タイミングを提案する「予測駆動型分析」の実現で、作業工数削減から、さらなる“解析”の自動化システムを目指す。

自動分析装置の未来像

今後のEMIA・EMGAシリーズに代表される分析装置は、単なる「高精度測定機」だけではなく、製造と品質の間に立つ「自律的判断支援装置」としての役割を担っていくと考えられる。特にカーボンニュートラルやスマートマテリアル開発といった新たな技術潮流において、分析装置は単独で機能するのではなく、より広範な情報ネットワークの中で自らの役割を発揮することが求められる。さらに、AIや機械学習を用いた、解析の自動化にもパイオニアとして貢献することを目標とする。

このような装置の設計思想には、ユーザー中心、トラブルレス、将来拡張性という三本柱が必要であり、今後もHORIBAの製品開発はこれらを軸に発展していくことが期待される。

おわりに

本稿では、日本の鉄鋼業界における品質保証の高度化と、それに対応する分析装置の技術的進化について、HORIBA製EMIA・EMGAシリーズの自動化システムについてその歴史と近況、その将来について述べた。

微量成分の分析は、鋼材の信頼性確保に直結する極めて重要な工程であり、その自動化と高精度化は、製造現場全体の効率と品質を大きく左右することからEMIA・EMGAシリーズは、単なる分析精度の向上にとどまらず、オートサンプラーや自動排出機構、測定条件のレシピ管理、さらにネットワーク連携やリモート監視といったスマートファクトリー対応機能を取り入れることで、ユーザーの多様なニーズに応えてきた。これにより、分析装置は「検査機器」という位置付けから、「製造プロセスの一部」「経営判断を支える情報装置」へと役割を拡張している。

今後は、Industry 4.0のさらなる進展に加え、AIを活用した自動異常検出や測定条件の最適化、LIMS(検査情報管理システム)やERP(統合基幹業務システム)とのリアルタイム接続など、分析装置に求められる機能はますます高度化していくことが予想される。特に、脱炭素社会の実現やグローバルサプライチェーンの透明性確保といった社会的要

請に対応するためには、信頼性の高いデータを安定的に供給できる分析装置の存在が不可欠である。

HORIBAのEMIA, EMGAシリーズの自動化システムは、長年にわたり蓄積してきた分析技術と装置開発力を背景に、今後も製造業のスマート化と品質革新を支える中核的存在として、世界市場における競争力を高めていくことが期待される。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] 野村総合研究所, “Industry 4.0と日本の製造業の意義”, 2016年
- [2] 経済産業省, “工場システムのサイバー・フィジカルセキュリティガイドライン”, 2023年
- [3] 堀場製作所, “EMGAシリーズ 製品カタログ”, 2022年
- [4] 堀場製作所, “EMIAシリーズ 製品カタログ”, 2022年
- [5] HORIBA Readout No.E45, “Application Technology in Analysis”, 2021年
- [6] HORIBA Readout No.5 酸素・窒素・水素分析装置の自動化ニーズに向けて, 1992



朴商云

PARK Sangwoon

株式会社堀場製作所
開発本部 固体・粉粒体計測開発部
チームリーダー
Section leader,
Solid & Partical Analysis R&D Dept.,
R&D Division
HORIBA, Ltd.

リモートモニタリングによるサービスソリューション Service solutions with remote monitoring

橋本 健太

HASHIMOTO Kenta

堀場テクノサービス (HTS) は全HORIBA製品の保守・修理・メンテナンスを行う企業である。2020年以降の新型コロナウイルスの影響で顧客先への訪問が制限される中、情報技術やIoT、AIといったデジタル技術の発展に合わせて新たなサービス提案としてリモートソリューションを生み出してきた。今後自動化が進んでいく分析システムにおいてリモートソリューションの重要性がさらに高まると考える。本稿ではリモート監視による装置の安定稼働のみならず現場負荷の軽減、課題解決の迅速化についてHTSのサービスの一端を紹介する。

HORIBA TECHNO SERVICE (HTS) is a company that provides maintenance, repair, and servicing of all HORIBA products, and while the new coronavirus after 2020 has restricted visits to customer sites, the company has been creating new service proposals in line with developments in information technology and digital technologies such as IoT and AI. Remote solutions have been created in response to the development of digital technologies such as information technology, IoT, and AI. We believe that remote solutions will become increasingly important for analytical systems that will be increasingly automated in the future. This paper introduces some of the services offered by HTS, which not only ensure stable operation of analyzers through remote monitoring, but also reduce on-site workload and speed up problem solving.

はじめに

分析機器の信頼性向上と性能維持のためには分析機器の性能と機能の向上だけでなく、日常のメンテナンスが欠かせない。特に分析・計測機器は、連続で常時監視を求められる他に、設置環境や測定試料の性状も分析機器にとって過酷な条件の場合が多く、日常のメンテナンスは測定結果の信頼性を担保する上で大きな比重を占める。

堀場テクノサービス (HTS) は、HORIBA製品の保守、修理、メンテナンス業務を行っている立場から、2020年以降の新型コロナウイルスの影響で顧客先への訪問が制限される環境下で、情報技術やIoT、AIといったデジタル技術の発展に合わせて新たなサービスの提案としてリモートソリューションを生み出してきた。本稿では、リモート監視による装置の安定稼働のみならず、現場の業務負荷軽減や課題解決の迅速化、さらにサービスにとって不可欠なエンジニアのスキル向上への取り組みについて紹介する。

堀場テクノサービス会社概要

HTSは、HORIBAの100%出資会社としてサービス部門が分社独立した会社で、2000年3月21日に設立、今年で25年目を迎える。全国各地の主要地域、工業地帯に、活動拠点として2025年現在、27カ所のサービスステーションを設置している。全国サービスステーションは、東日本エリア、中部日本エリア、本社エリア、西日本エリアごとに統括され、各地域におけるHORIBA分析機器のメンテナンスと修理、更にお客様のご要望への対応を行っている。

また2021年2月には、本社・京都サービスステーションの新社屋 (Figure 1) が竣工し、国内外におけるサービス事業の強化と拡大を目的に、分析ラボ「Analytical Solution Plaza (アナリティカル ソリューション プラザ)」を開設するとともに、トレーニング施設や校正施設、お客様からの問い合わせ窓口の一元化を目的としたテクニカルサポートセンターなどあらゆる機能を集約、拡充した^[1]。世界29ヶ国と地域に展開するグループ会社と連携し、お客様の製品の稼働状況から設備の運用サポート、分析技術のコンサル



Figure 1 HORIBA Techno Service Head office.

ティングなどを提供する「Service Lifecycle Management (サービスライフサイクルマネジメント)」の構築を強化、顧客密着、地域密着を重視し、より迅速なサービスを提供するとともにアプリケーション提案やコンサルティングによるソリューションビジネスを目指している。

分析機器の保守メンテナンスとトラブル対応事例

分析や計測の対象となる物質や物性は多種多項目にわたっており、HORIBAには試料性状や測定対象により測定原理が異なる多種類の分析機器が存在する。定性や定量を行うため、分析計は測定対象のさまざまな化学反応や物理反応を利用している。分析機器にトラブルが発生した時、測定原理や製品の構造と特性に基づいて客観的な事実を集めて原因を探ったり、過去のトラブル事例を参考にして原因を特定している。しかし複合的な要因や過去の事例にないトラブルでは、原因究明までに時間がかかることがある。また、現場でないとわからないトラブルも多く、サービスエンジニアが直接現場に出向きさまざまな調査をしなければならぬ場合も多い。結果として現場での不具合原因特定から修理作業完了までに長い時間を要することがあり顧客の満足度を下げることに繋がりがかねない。

また2020年以降の新型コロナウイルスの影響で社会的にテレワーク導入が要請され、顧客先への訪問が制限される中でも、分析機器のトラブルは測定データの欠測となるため、顧客から速やかに正常復帰させるように強く求められた。このため、分析機器の状況を把握するためのデータ収集と、可視化を目的としてリモートモニタリングシステムを開発し、速やかに故障箇所や原因を特定し、効率的な修理対応ができるように努めている。

リモートモニタリングシステムの概要

固体中 炭素・硫黄分析装置EMIAを用いたリモートモニタリングシステム構成の概要をFigure 2に示す。

EMIAの端末PCとGatewayは、RS-232Cによるシリアル通信で接続され、装置本体から受信した信号をキャリア回線からインターネットを経由してサーバーへ送信(アップロード)する。信号はGatewayで暗号化される。

装置からの信号(測定回数、保守シグナル、メンテナンス履歴、アラーム履歴など)を、異常が発生する前の予兆や、異常が発生時の異常値、重要なアラームとしてテクニカルサポートセンター (Figure 3)にて常時モニタリングすることで迅速な顧客サポートを行うことができる。モニタリングしている信号は一方通行で監視されており、顧客装置の分析データは一切取得しない仕組みとなっている。モニタリングした信号値やデータはレポートとして毎月顧客に提出し装置の稼働状況として報告する。

現在、本リモートモニタリングシステムは、固体中 炭素・硫黄分析装置EMIA-Pro/Expert, 固体中 酸素・窒素・水素分析装置EMGA-Pro/Expert, レーザ回折/散乱式粒子径分布測定装置LA-960V2/LA-350に本格的な導入を進めている。これらの装置は、品質保証部門や品質管理部門に多く導入されており、顧客製品の品質管理にとって重要な役割を担っている。分析装置の性能が顧客製品の品質にも大きく関わるため、装置が正常に動作していることが何より重要視されるためである。

また、HORIBA製品の保守点検サービスを包括的に提案する「AOP (All in One Plan)」に、専門エンジニアによるリモートでの装置状態監視を追加した「AOP Connects」

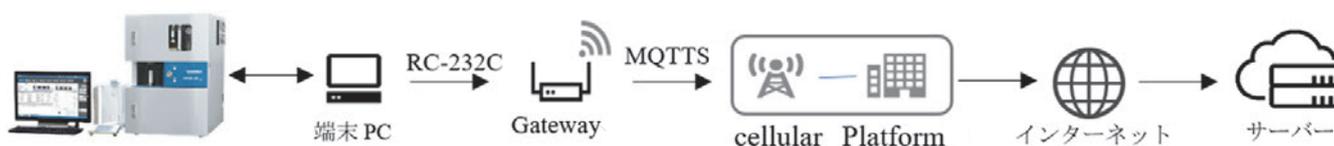


Figure 2 Outline of Remote monitoring system for EMIA.



Figure 3 Technical Support Center.

(Figure 4)などお客様のご要望に沿った各種プランを通じて、様々な業務効率化サービスを提供している。

不具合の事前推定による装置の不具合発生の未然予防

リモートでの装置状態監視では、装置本体から出ている信号値を経時変化で追うことができる。テクニカルサポートセンターの専任エンジニアが日間変動を追っていく中で、正常時であれば下一桁の変動で収まっている状態が、Figure 5の赤枠内で示すように、ある日を境に信号値が変動し始めた。この変動を「異常」として認識したエンジニアが装置ユーザに連絡して顧客の分析測定において異常が検出されていないかを確認した上でメンテナンスを推奨した。

通常メンテナンスでは年次点検は顧客の希望日に合わせて実施しているが、本ケースの場合には顧客の分析測定に影響が出る前の最適なタイミングでメンテナンスサービスを提供することで装置の不具合発生を未然に防ぐことができた。

不具合の事前推定によるダウンタイム削減

通常の修理対応ではエンジニアは電話やメールにより顧客から得た情報や過去の事例を元に不具合や故障部品の特定を行うことが多いが、推定内容と異なるケースが多々発生する。その場合には、再訪問が必要となり追加作業が発生する。

テクニカルサポートセンターの専任エンジニアが検出器の温度アラームを検知して直近の検出器の温度変化を解析した。正常時の検出器温度は $55^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内の変動に収まっていたが、Figure 6の青線グラフで示すように温度変動が大きくなっていることから異常と判断、サーマルコンパウンド(熱伝導グリース)が枯渇している可能性を推定して、現場のエンジニアと連携し事前準備を行った上で顧客訪問したことで最速で修理を完了でき、分析装置のダウンタイム(稼働停止している時間)を低減することができた。

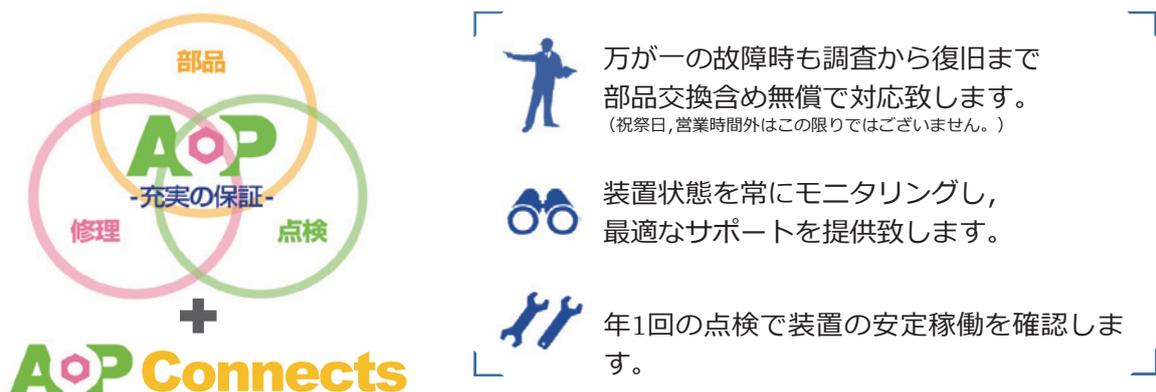


Figure 4 Comprehensive maintenance inspection service with added remote monitoring^[2].

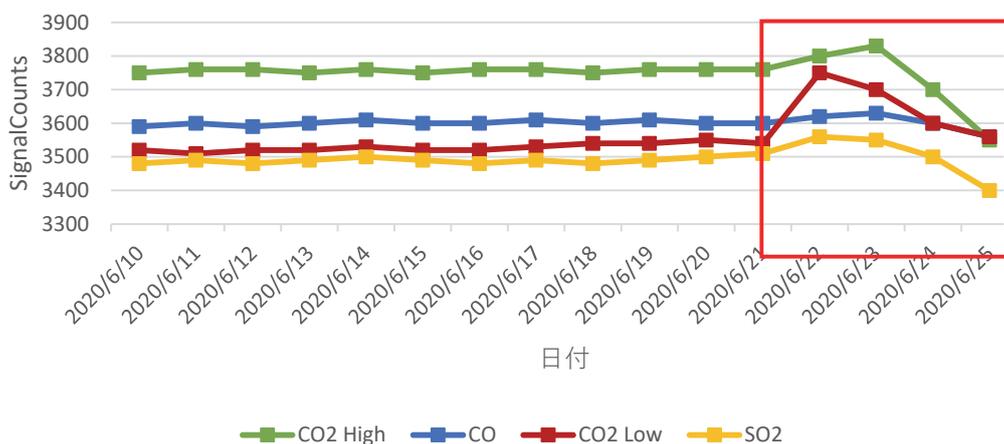


Figure 5 Interday variation of signal counts from instrument.

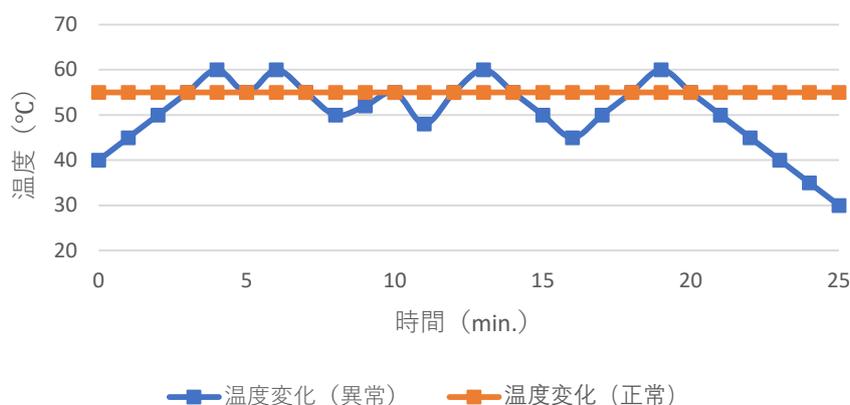


Figure 6 Transition of detector temperature.

遠隔管理による装置設置環境の監視

Figure 7のように、モニタリングにおいて、CO₂ Lowのカウント値が一日の間で何度か上昇する現象が見られた。モニタリング結果からだけでは装置の異常かどうかの判断が難しかったため、テクニカルサポートセンターの専任エンジニアから現場担当のエンジニアにコンタクトを取り、顧客の装置の使用状況を確認したところ、分析室で暖を取るためにストーブを使用されていることが判明した。現場担当のエンジニアにて測定時の状態などを確認し、分析機器の測定値には影響がないことを確認した。モニタリングデータだけで判断できない場合には、現地のエンジニアと連携することで顧客がより安心して分析装置を使用できるサービスを提供している。

地震発生時のリモートモニタリングによる顧客装置の見守り

リモートモニタリングでは装置の稼働状態も把握することができる。HTSではユーザーにより近いサービスステーションから迅速なサービスサポートを提供していることが強み

だが、対応しきれない遠方のユーザーもある。例えば、2022年3月福島県沖で最大震度6強の地震が発生した際には、リモートモニタリング機能を導入した顧客装置の稼働状況をテクニカルサポートセンターで確認し、稼働していない分析装置の顧客に対しては安否と状況確認を行った。幸いにも、分析装置に地震の影響は無く、電話を受け取った顧客からは感謝のお言葉が届いた。このようにリモートモニタリングは単なる装置不具合のサポートに留まらず、顧客へ安心感を与えるサポートソリューションとなっている。

グローバルサポートとサービスエンジニアの育成

HORIBAの計測・分析装置は世界中に販売されており、海外のエンジニアサポートもますます重要となってきている。半導体向けのレティクル/マスク異物検査装置PD-10が中東に納入されたが、現地エンジニアだけでは製品知識や技術的スキルが不足していたため、日本から熟練エンジニアを現地に派遣して装置の立上げを予定していた。しかし国際的な紛争の影響によりその対応が困難となった。そこで現地エンジニアの装置立上げ作業に対して日本からの

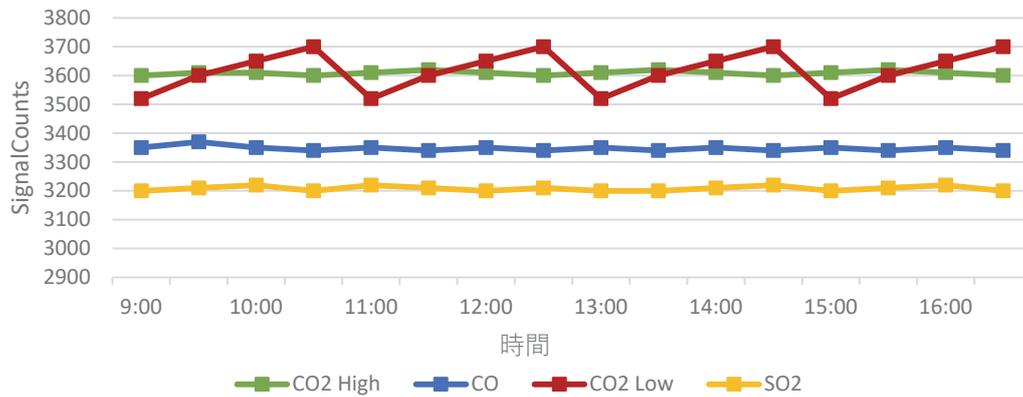


Figure 7 Interday variation of signal counts.

リモートサポートを実施した。装置立上げに際してはカメラの映像を活用してサポートを行い、さらに分析ソフトウェアの操作はTeamViewerTM*1にて遠隔指導を実施した。このように海外サービス対応において現地作業が困難なケースでもリモートという選択肢を活用することで顧客ニーズに応じたサービスとエンジニアのサポートを実現している。

*1 TEAMVIEWER GERMANY GMBHの登録商標または商標

おわりに

以上、HTSがこれまでに顧客に提供してきたリモートモニタリングとその事例、そしてリモートサポートによるエンジニアのスキル向上について述べてきた。現在ではIoTやAIの活用は当たり前になりつつあるが、どのように活用するかがビジネスにも大きく影響を与えていると考えている。昨今、ニーズが増加している企業の製造プロセスの自動化や省人化が進む一方で、装置の安定稼働のニーズ、故障時の緊急対応の要求が高まっている。また高いスキルを要求されるエンジニアの教育は現場でも喫緊の課題となっている。

HTSは顧客により近い立場から、求められるニーズに対応できる新しいソリューションを提供し続けることで顧客満足度の向上を目指している。さらにオンライントレーニング、リモートサポート、ウェビナーやオンラインマニュアルなどを通じて国内外のエンジニアのスキル向上や問題解決能力の向上に努めている。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] 阪口 真以, 堀場テクノサービス“Analytical Solution Plaza”の紹介「はかる」と「わかる」をつなぐHORIBA のサービス, *Readout*, No.56, p.40-45, 2022
- [2] <https://www.horiba.com/jpn/service/solution/service-product/remote-support/>



橋本 健太

HASHIMOTO Kenta

株式会社堀場テクノサービス
グローバル戦略本部 フィールド戦略室
Materials & Semiconductor チーム
チームリーダー

Materials & Semiconductor Team
Field Strategy Office, Global Strategy Division
HORIBA Techno Service, Co., Ltd.

ガウス混合回帰モデルを用いたPI（比例積分制御）パラメータの最適化 ～圧力式マスフローコントローラ（MFC）D700への適用～

PI Parameter Optimization for Pressure-Based MFC (D700) Using Gaussian Mixture Model

上田 喬之

UEDA Takayuki

樋口 世治

HIGUCHI Seiji

瀧尻 興太郎

TAKIJIRI Kotaro

林 大介

HAYASHI Daisuke

半導体産業では膨大な数のマスフローコントローラ(MFC)が使用されており、MFCの効率的な生産方法が求められている。効率的な量産には、設定流量を実現するための比例積分(PI)制御のゲイン調整が本質的である。ゲイン調整は、設定毎の応答波形における応答時間とオーバーシュート量が評価指標を満たすように行われる。本論文で我々は圧力式MFC(D700)の製造に適用可能な、ガウス混合モデル(以下GMM)とその逆解析を用いたPIゲイン調整の簡易な方法を提案する。MFCの標準ユニットにおけるゲインと評価指標の関係はGMMとしてモデル化される。その逆解析では、基準機と試験機の差分が算出される。その差分は単純なシフトで補正できるという前提のもと、試験機の仕様を満たす可能性の高いゲインが探索される。我々はこの手法を7つの試験機に適用した結果、すべての試験機のゲインをわずか数回の反復で調整することができた。

キーワード

半導体, ガウス混合モデル, PI制御, マスフローコントローラ, 製造

A vast number of mass flow controllers (MFCs) are used in semiconductor industry. An efficient production method of MFC is required. The gain tuning of the proportional-integral (PI) control to realize a setting flow rate is essential for efficient mass production. The gains are tuned to meet the specifications required for evaluation indices of response time and overshoot amount in a step response waveform. In this paper, we propose a simple method for the PI gain tuning using the Gaussian Mixture Model (GMM) and the direct inverse analysis applicable to the pressure-based MFCs' production. The relationship between the gains and evaluation indices for a standard unit of the MFC is modeled as the GMM. The direct inverse analysis calculates the difference between the standard and a test unit. Under the assumption that the difference can be compensated by a simple shift, gains likely to meet the specifications for the test unit are searched. We applied the method to seven test units. The result showed that the gains of all the test units were tuned within only a few iterations.

Keywords

Semiconductor, Gaussian mixture mode, PI control, Mass flow controller, Manufacturing

はじめに

半導体製造においては、流体の質量流量を精密に制御するマスフローコントローラ(MFC)が広く用いられている^[1]。半導体製造の全工程は多くの反応過程から構成されるため、各プラントには膨大な数のMFCが必要となる。そのため、MFCの効率的な生産方法の確立が重要となっている。

MFCはバルブの開度を調整することで流体の流量を制御し、設定流量を実現する。圧力センサを基に流量を測定する圧力式MFCは、応答性が高く高精度であるという利点がある。MFCの生産には、その調整のためのアルゴリズムを含む制御設計が非常に重要である。制御アルゴリズムを含む制御設計が非常に重要である。制御アルゴリ

ズムには比例積分(PI)制御や比例積分微分(PID)制御が広く用いられており、設定流量と測定流量の差異を収束させるように、PIゲインやPIDゲインがバルブに印加する電圧を決定する。それらのゲインは設定毎の応答波形から得られる応答時間やオーバーシュート量といった評価指標が要求仕様を満たすように調整される。MFCの生産では、ゲインは個々の個体毎に試行錯誤的に調整されており、効率的な生産方式の確立を阻むボトルネックとなっている。GMMは、複数の変数間の関係をガウス確率密度の重ね合わせで表現するシンプルなモデルである^{[2],[3]}。この適用により、ゲインとその結果として得られる評価指標の関係は単純なモデルで表現できる。さらに、ベイズの定理に基づく逆解析により、得られた指標に対して最も可能性の高いゲインを逆に推定することもできる。しかし、制御対象に実装されている部品は個体毎に特性が異なるため、MFCの単一個体でモデル化された関係をすべての個体に単純に適用することはできない。

本稿で我々は、圧力式MFC(D700)の生産に適用可能なGMMとその逆解析を用いたPIゲイン調整の簡易な方法を提案する。先ず標準機についてPIゲインと評価指標の関係を調べる。次にGMMとその逆解析を用いて、各々の試験機と標準機との差分を算出する。そしてその差分を補正することで、全ての試験機の仕様を満たすようにゲインを調整する。我々はこの方法を定式化した後、量産適用性を確認するために、圧力式MFC数台の調整に適用した。

圧力式MFCの特性

MFCの構造

Figure 1に圧力式ガスMFCの概略図を示す。MFCはピエゾバルブ、2個の圧力センサ、温度センサ、層流素子抵抗体(リストリクタ)、および制御回路から構成される。ガスの入口側および出口側は、それぞれ上流および下流の配管に接続される。入口側から流入したガスは、ピエゾバルブとリストリクタを通過し、出口側から流出される。出力ガスの流量(Q_{out})は次式で算出される。

$$Q_{out} = k(p_1^2 - p_2^2). \tag{1}$$

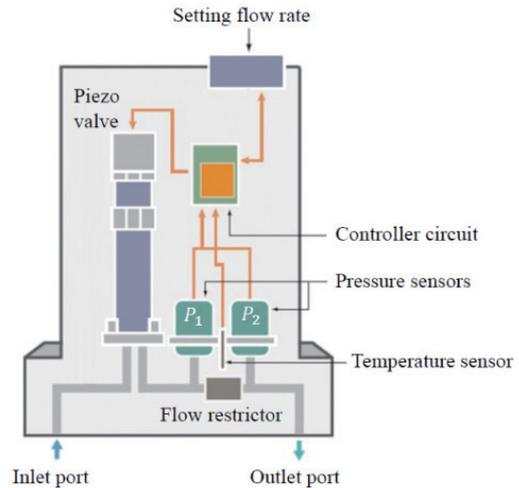


Figure 1 Internal structure of a pressure-based gas MFC.

ここで k は温度影響を加味したリストリクタ定数、 p_1 、 p_2 はそれぞれ圧力センサ P_1 、 P_2 の出力である。

制御回路は、印加電圧によりバルブ開度を調整し、設定流量(Q_{set})を実現する。制御回路に搭載されたPI制御のブロック図をFigure 2に示す。ここで K_p 、 K_I はそれぞれPゲイン、Iゲインを意味する。これらのゲインは、制御対象の特性(ピエゾバルブやリストリクタの特性、センサの遅れなど)に合わせて調整される。さらに、個体差が存在するため、MFC1台毎にゲイン調整が必要となる。

PIゲイン調整の評価指標

本稿では、0→100%FS入力に対するステップ応答において、以下の2つの評価指標に基づいてPIゲインを調整する場合を考える。 (“%FS”は制御フルスケールに対して規格化された流量を意味する)：(i) T_r (ms)： Q_{set} 入力から Q_{out} が Q_{set} の98%に達するまでの時間として定義された応答時間。(ii) Q_{os} (%)： 次のように定義されたオーバーシュート量。

$$Q_{os} = \frac{Q_{peak} - Q_{set}}{Q_{set}} \times 100. \tag{2}$$

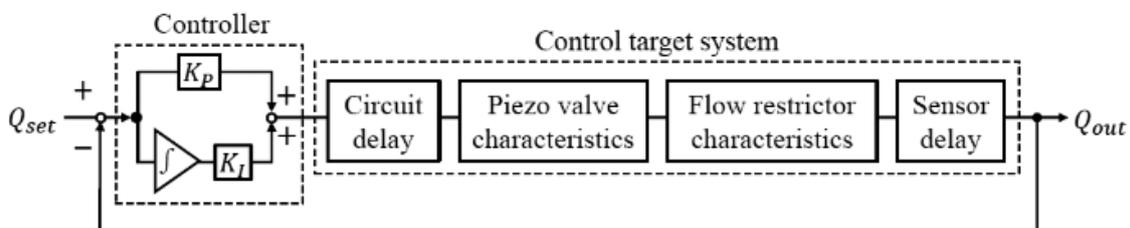


Figure 2 Block diagram of PI control system for the pressure-based MFC.

ここで Q_{peak} は Q_{out} が Q_{set} を超えた後、 Q_{set} との差が最大となる時の流量である(Q_{out} が Q_{set} を超えない場合は $Q_{os}=0$ となる)。ステップ応答の試験時間は200 msに固定されている。仕様では T_r は 85 ± 5 ms, Q_{os} は $0 \pm_{0.55}^{0.50}$ %の範囲内にあることが要求されている。ここで、指標の最適値を $(T_{r0}, Q_{os0}) = (85, 0)$, その許容範囲を $(\Delta T_r, \Delta Q_{os}) = (10, 1.05)$ と表示することとする。

我々は量産されたMFCの中から任意に選んだ標準器について、 (K_p, K_I) と (T_r, Q_{os}) の関係性を調べた。 (K_p, K_I) を $[0.5, 1.5]$ の範囲で0.02刻みに変化させ、合計2,500通りのステップ応答波形とその (T_r, Q_{os}) を取得した。本稿における標準機では、 (T_{r0}, Q_{os0}) に最も近い指標を与えた最適ゲインは $(K_{p0}, K_{I0}) = (0.94, 0.94)$ であった。Figure 3は $(K_p, K_I) = (K_{p0}, K_{I0})$, $(1.50, 0.50)$, および $(0.50, 1.50)$ におけるステップ応答波形を示している。 $(K_p, K_I) = (K_{p0}, K_{I0})$ の場合、 $(T_r, Q_{os}) = (85, -0.046)$ の好ましい波形が得られた。 $(K_p, K_I) = (1.50, 0.50)$ の場合、波形は大きなオーバーシュートを示した。 $(K_p, K_I) = (0.50, 1.50)$ の場合、波形は非常に遅い応答を示した。

このステップ応答を簡単に評価するために、次のような偏差指数 z を定義した。

$$z = \frac{|T_r - T_{r0}|}{\Delta T_r} + \frac{|Q_{os}|}{\Delta Q_{os}} \quad (3)$$

いずれかの指数が確実に仕様を満たすための必要条件は $z \leq 1.02$ であり、両方の指数が確実に仕様を満たすための十分条件は $z \leq 0.50$ である。 $0.50 < z \leq 1.02$ の場合、式(3)の各項のバランスによって仕様が満たされるかどうかが決まる。標準機の $K_p - K_I$ 平面における z の分布は、Figure 4に

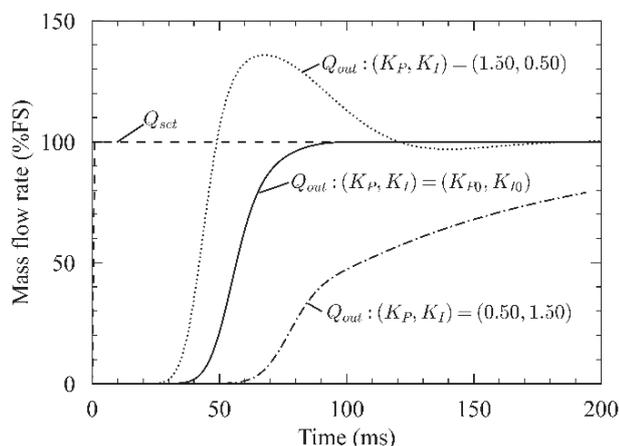


Figure 3 Step response waveforms of standard unit at $(K_p, K_I) = (K_{p0}, K_{I0})$, $(1.50, 0.50)$ and $(0.50, 1.50)$.

必要条件(白破線)および十分条件(白実線)の領域が、 (T_{r0}, Q_{os0}) の位置(赤点)とともに示されている。仕様を満たす可能性の高いPIゲインは、 $K_p \approx K_I$ の周辺にある狭い領域に位置している。この分布は、圧力式のMFC構造の特性を反映している。

PIゲイン調整方法

PIゲイン調整の手順は、標準機の学習と試験機の調整という2つのフェーズに分かれる。定式化にあたって、説明変数と目的変数 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) を次のように定義する。

$$\mathbf{x} = (K_p, K_I), \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = (T_r, Q_{os}). \quad (5)$$

また、 $\mathbf{x}_0 = (K_{p0}, K_{I0})$, $\mathbf{y}_0 = (T_{r0}, Q_{os0})$ とする。

標準機の学習

標準ユニットの2,500個の (\mathbf{x}, \mathbf{y}) データから、確率密度分布はGMMの形式でモデル化される。

$$p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n_G} \pi_i N\left([\mathbf{x}, \mathbf{y}] \mid [\boldsymbol{\mu}_{x,i}, \boldsymbol{\mu}_{y,i}], \begin{bmatrix} \Sigma_{xx,i} & \Sigma_{yx,i} \\ \Sigma_{xy,i} & \Sigma_{yy,i} \end{bmatrix}\right) \quad (6)$$

ここで、 π_i は i 番目のガウス分布の重み、 $\boldsymbol{\mu}_{x,i}$, $\boldsymbol{\mu}_{y,i}$ はそれぞれ \mathbf{x}, \mathbf{y} の平均ベクトル、 $\Sigma_{xx,i}$, $\Sigma_{xy,i}$, $\Sigma_{yx,i}$, $\Sigma_{yy,i}$ はそれぞれ \mathbf{x}, \mathbf{y} の分散共分散行列であり、これらは期待値最大化によって決定される。ガウス分布の個数 n_G は、過学習を起こすことなく二乗誤差を最小化するように決定する。この場合、 $n_G = 10$ とした。

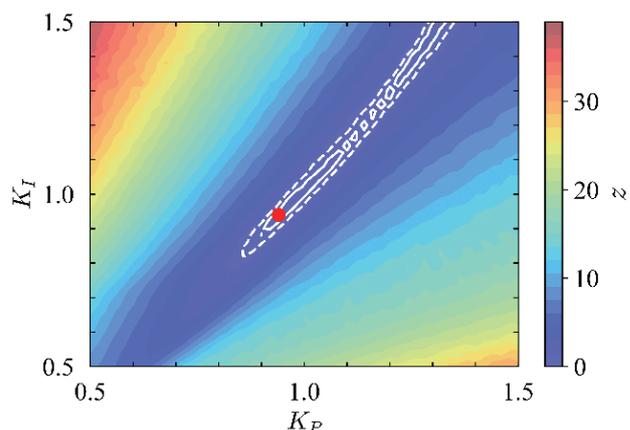


Figure 4 Distribution of the deviation index z for the standard unit (See Eq. (3)).

試験器のPIゲイン調整

初期ゲインを $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ として、各試験機のステップ応答波形を取得する。もし、試験機の $p(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ が標準機のものと同様であれば、結果の \mathbf{y} は即座に仕様を満たすことになる。結果の \mathbf{y} が仕様を満たさない場合、 \mathbf{y} に関するGMMの逆解析が適用され、標準機と同じ \mathbf{y} が得られる予測ゲイン $\hat{\mathbf{x}}(\hat{K}_p, \hat{K}_I)$ が求められる。与えられた \mathbf{y} における \mathbf{x} の確率密度は、次式で計算できる。

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n_G} \omega_{y,i} p(\mathbf{x}|\mathbf{y}, \boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i}), \quad (7)$$

ここで、 $p(\mathbf{x}|\mathbf{y}, \boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i})$ は $\boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i}$ および与えられた \mathbf{y} の下での、式(6)における i 番目のガウス分布における \mathbf{x} の確率密度分布であり、 $\omega_{y,i}$ は次式で計算される重みである。

$$\omega_{y,i} = \frac{\pi_i p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\mu}_{y,i}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i})}{\sum_{j=1}^{n_G} \pi_j p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\mu}_{y,j}, \boldsymbol{\Sigma}_{yy,j})}. \quad (8)$$

与えられた \mathbf{y} における i 番目のガウス分布の \mathbf{x} の平均ベクトルは次のように計算される。

$$\mathbf{m}_i(\mathbf{y}) = \boldsymbol{\mu}_{x,i} + (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}_{y,i}) \boldsymbol{\Sigma}_{yy,i}^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_{yx,i}^{-1}. \quad (9)$$

試験機の z 分布は標準機の分布を \mathbf{x} 方向にシフトさせるだけで近似的に重なるものと仮定すると、新たに定義された \mathbf{x} ,

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}, \quad (10)$$

は試験機に対し、 \mathbf{y}_0 に近い \mathbf{y} を与えることが期待される。ここで、シフトベクトルは

$$\Delta\mathbf{x} = (K_{p0} - \hat{K}_p, K_{I0} - \hat{K}_I), \quad (11)$$

である。新しい \mathbf{x} で再び仕様を満たす \mathbf{y} が得られない場合、反復回数 n が特定の最大値 n_{max} に達しない限り、同じサイクルが繰り返される。この手順のフローチャートを Figure 5 にまとめる。

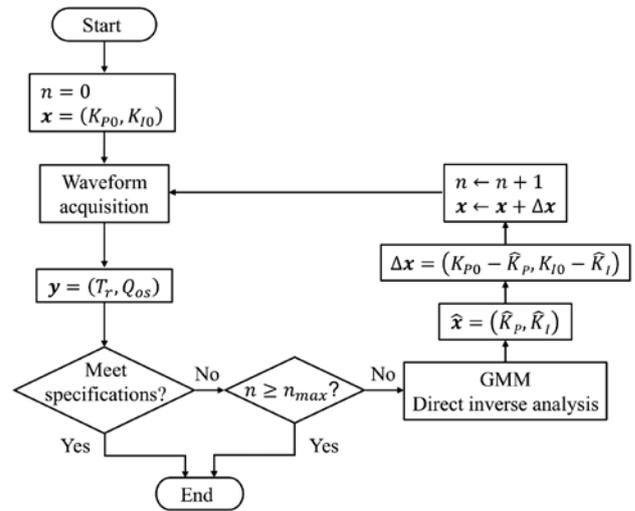


Figure 5 Flow chart of PI tuning for test units.

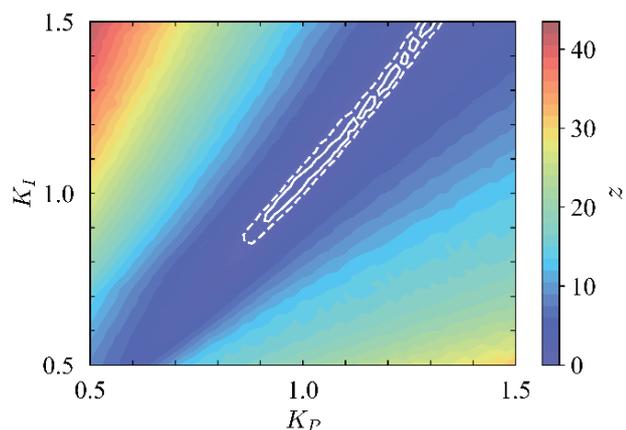
結果

本PIゲイン調整方法を7つの試験機に適用した。結果を Table 1 に示す。本試験では $n_{max} = 10$ と設定していたが、すべての試験機で仕様を満たす評価指標が $n \leq 4$ で得られた。

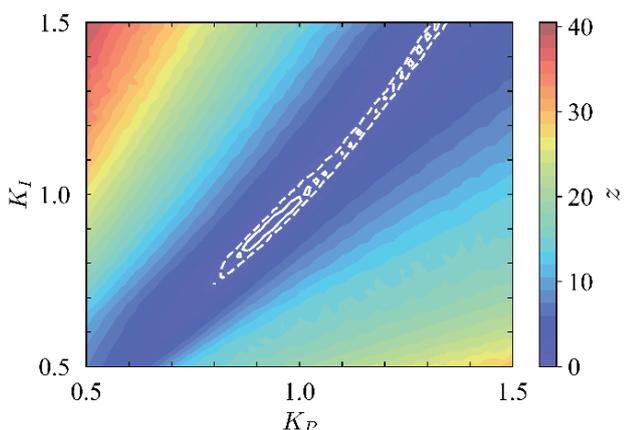
Table 1 Results of PI tuning for test units

Unit no.	(K_p, K_I)	T_r (ms)	Q_{os} (%)	n
1	(0.91, 0.88)	82	0.214	2
2	(0.94, 0.94)	86	-0.061	0
3	(0.97, 0.91)	86	-0.165	1
4	(0.90, 0.86)	84	-0.161	4
5	(0.90, 0.85)	88	-0.228	4
6	(0.93, 0.89)	84	-0.118	1
7	(0.99, 0.98)	84	-0.174	1

必要な反復回数は $n = 0-4$ とユニット毎に異なっていた。この違いを考察するために、反復回数が最小(No. 2)と最大(No. 4)の試験機の z 分布を調べた(Figure 6)。両ユニットとも、 $K_p \approx K_I$ の周辺に必要十分な領域を持つ標準機の分布と類似した分布を示した。したがって、試験機の z 分布は標準機の分布を \mathbf{x} 方向にシフトさせるだけで近似できるという仮定は適切であったことが分かる。(No. 4)の必要十分領域の位置と面積は、(No. 2)の標準の分布と比較して、より異なっていたため、(No. 4)の試験機は(No. 2)よりも多くの反復を必要とした。しかし、その差は逆解析と \mathbf{x} 方向シフトのサイクルを繰り返すことで十分補えるほど小さかった。目標波形を実現する可能性が高いPIゲインが繰り返して設定されるため、少ない反復で目標を達成することができた。



Unit no. 2



Unit no. 4

Figure 6 Comparison of distributions of the deviation index z (See Eq. (3))

おわりに

本稿では圧力式MFCの量産に適用可能なGMMとその逆解析を用いたPIゲイン調整方法を提案した。我々はこの方法を7つの試験機に適用した結果、すべての試験機のゲインをわずかに数回の反復で調整することが出来た。この方法は $K_p - K_I$ 平面上の狭い領域に位置する最適ゲインを効率的に見つけることができるため、制御対象が非常に複雑な圧力式MFCの量産に対して有望な方法である。我々はこの方法により、圧力式MFCの製造プロセスを簡素化し、安定供給に貢献できると確信している。

* 編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] Böer KW, Pohl UW “Semiconductor physics”, Springer, Berlin, 2023.
- [2] N. Shimizu, H. Kaneko “Direct inverse analysis based on Gaussian mixture regression for multiple objective variables in material design”, *Materials and Design*, Vol. 196, 109168, 2020.
- [3] H. Kaneko “True Gaussian mixture regression and genetic algorithm-based optimization with constrains for direct inverse analysis”, *Science and Technology of Advanced Materials: Methods*. Vol. 2, No. 1, pp. 14-22, 2022.



上田 喬之

UEDA Takayuki

株式会社堀場エステック
開発本部 Gas Product開発部
チームリーダー
Section Leader
Gas Product Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.



樋口 世治

HIGUCHI Seiji

株式会社堀場エステック
開発本部 要素技術開発部
Elemental Technology Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.



瀧尻 興太郎

TAKIJIRI Kotaro

株式会社堀場エステック
開発本部 Vapor Product開発部 部長
博士(工学)
Manager
Vapor Product Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.
Ph.D.



林 大介

HAYASHI Daisuke

株式会社堀場エステック
開発本部 要素技術開発部
博士(理学, 工学)
Elemental Technology Development Dept.
Research & Development Division
HORIBA STEC, Co., Ltd.
Ph.D.



令和7年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞を受賞

Receipt of the award for Science and Technology in the 2025 Commendation for Science and Technology by the Minister of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 開発部門

表彰の概要

科学技術分野の文部科学大臣表彰は、「科学技術に関する研究開発、理解増進等において顕著な成果を収めた者について、その功績を讃えることにより、科学技術に携わる者の意欲の向上を図り、もって我が国の科学技術水準の向上に寄与すること」を目的として、文部科学省が実施するものである。この度、株式会社堀場製作所 代表取締役社長 足立 正之、およびシニアコーポレートオフィサー（常務執行役員）・CTO 中村 博司が、令和7年度「科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（開発部門^{※1}）」を受賞した（Figure 5）。

受賞内容

「共存水分補正機能を備えた赤外線ガス分析装置の開発」

従来の赤外線排ガス分析装置（以下、排ガス分析装置）は、自動車等の排ガス濃度を測定する際、排ガスに含まれる水分が測定対象成分に影響を与えるため、濃度を正確に測定することが困難であった。そのため、除湿機構を設けて排ガス中の水分を除去し、排ガス濃度を測定していたが、除湿機構を設けることにより装置が大型化し、また除湿により減少した水分分圧^{※2}の割合だけ補正が必要となるため、測定誤差の要因となっていた。本開発では、排ガス中の水分を除湿せずに、排ガスに含まれる測定対象成分濃度および水分濃度を測定し、水分濃度に基づき、測定対象成分濃度に対して、吸収スペクトルの重なりによる水分干渉影響^{※3}および吸収スペクトルの形状変化による水分共存影響^{※4}の双方を同時に補正することを可能とした。これにより、除湿機構を排除することが可能となり、応答速度の高速化に加え、水分分圧補正が不要となることで測定精度の向上が実現した。さらに、装置の小型化・省電力化を達成し、自動車の限られたスペースへの搭載が可能な排ガス分析装置の開発を実現した。本装置による実路走行時の排ガス試験結果は、従来のラボ内での排ガス試験結果と異なることを発見する契機となり、実路走行時の排ガス測定の重要性を世界に広めることに貢献した。その後、世界各国において実路排ガス規制の導入が加速しており、本技術は環境問題およびエネルギー問題の解決に寄与している。

- ※1 本賞「開発部門」の表彰は、「我が国の社会経済、国民生活の発展向上等に寄与し、実際に利活用されている画期的な研究開発若しくは発明を行った者が対象」
- ※2 排ガスに含まれる水分の圧力
- ※3 干渉ガス（水分）の吸収スペクトルが測定対象ガスの吸収スペクトルと重なるために水分量が測定値に与える影響
- ※4 共存ガス（水分）と測定対象ガスとの相互作用により、測定対象ガスの吸収スペクトルが変化（ブロードニング）するために測定値に与える影響



Figure 1 受賞した開発技術を用いた車載型排ガス計測システム「OBS-ONE」①



Figure 2 受賞した開発技術を用いた車載型排ガス計測システム「OBS-ONE」②



Figure 3 受賞した開発技術を用いたエンジン排ガス測定装置「MEXA-ONE」

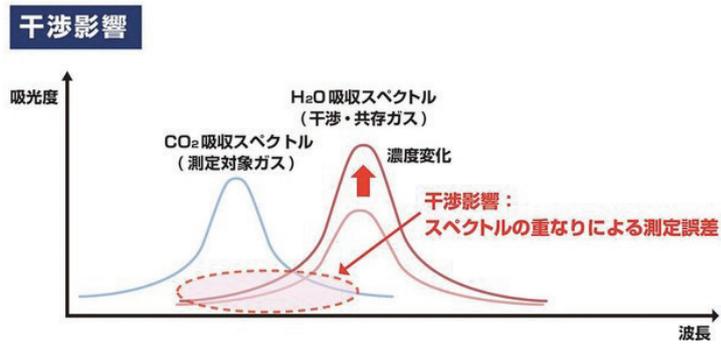


Figure 4 水分干渉影響と水分共存影響についての図

主要特許：特許第3771849号「赤外線ガス分析方法および装置」

主要論文：「Development of a Wet-Based NDIR and its Application to On-Board Emission Measurement System」, SAE 2002-01-0612, 2002年発表



Figure 5 令和7年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 表彰式
左からシニアコーポレートオフィサー(常務執行役員)CTO 中村 博司,
代表取締役社長 足立 正之

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、受賞時点での自社調査に基づいて記載しています。

第75回 自動車技術会賞「技術開発賞」を受賞

The 75th JSAE Award for Technical Development Received

自動車技術会賞 技術開発賞

表彰の概要

自動車技術会賞とは、自動車工学および自動車技術の向上・発展を目的として1951年に創設されたものである。このうち「技術開発賞」は、過去3年間に自動車技術の発展に資する新製品または新技術を開発した個人および共同開発者に贈られるものである。本受賞は、「多様な燃料に対応した車載・ラボ両用の可搬型排ガス計測システムの開発」に対するものであり、環境への配慮のみならず、次世代モビリティ開発に不可欠な技術要素を高水準で備えている点が高く評価されたものである。この度、株式会社堀場製作所の近藤 洋輔、並河 祥司、茂原 治久、瀧内 翔太、原 健児が受賞した(Figure 1)。

受賞内容

受賞した可搬型排ガス計測システム「MEXAcube(メクサキューブ)」(Figure 2)は、2021年に開発されたHORIBA独自の赤外線ガス分析技術「IRLAM™(アールラム)*¹」を搭載したエンジン排ガス測定装置である。本製品は、消費電力を約80%削減*²した環境配慮型の製品であり、高濃度の水分を含む水素やアンモニアなど、カーボンニュートラル燃料の排ガスにも対応することにより、多様化が進む次世代モビリティ開発への貢献が期待されている。また、車載用およびラボ設置用のいずれの用途にも対応可能であり、Euro 7*³をはじめとする次期排ガス規制において新たに測定が求められるアンモニア、亜酸化窒素、ホルムアルデヒドなどを含む9成分を、本製品1台で高精度に測定することが可能である*⁴。さらに、路上走行時の排ガスを測定するRDE*⁵試験における過酷な環境変動にも対応可能な高い信頼性を備えている。

- *1 赤外線レーザー吸収変調法(Infrared Laser Absorption Modulation: IRLAM)を用いた手法。IRLAMは、株式会社堀場製作所の日本およびその他の国における登録商標または商標。
- *2 本装置は、当社従来製品であるエンジン排ガス測定装置「MEXA-ONEシリーズ」(ラボ設置型)との比較に基づくものである。なお、使用方法および条件により、その効果は異なる可能性がある。
- *3 欧州連合(EU)においては、次期自動車排ガス規制の適用が検討されており、2026年に乗用車、2028年に商用車を対象とする予定。
- *4 測定可能な範囲は、使用方法および条件によって変動する可能性がある。
- *5 Real Driving Emissions(実走行時排出ガス)の略称。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、受賞時点での自社調査に基づいて記載しています。



Figure 1 左から自動車技術会会長 中畔 邦雄様、近藤 洋輔、茂原 治久、瀧内 翔太



Figure 2 受賞した可搬型排ガス計測システム「MEXAcube」

第14回 HORIBA Group IP World Cup Gold Award受賞IPの紹介

Award Winners of 2024 HORIBA Group IP World Cup



HORIBAグループで生まれた数々の独創的な技術や知的財産(以下、Intellectual Propertyの略語として「IP」ともいう)が事業の推進力となってきた。技術開発とその成果たる知的財産がHORIBAブランドの本質的な要素であり、HORIBA Group IP World Cup (Figure 1)は、HORIBA Group is One Companyの精神のもと、事業を牽引する技術・知的財産をグループ全体で賞賛し、次なる成長の起爆剤となる技術・知的財産の創出をさらに奨励していくことを趣旨として創設された。

第14回HORIBA Group IP World Cup*では、海外を含むHORIBAグループの開発拠点で選考された20件の応募があり、株式会社堀場アドバンスドテクノの「Chemical Solution Monitoring System based on Sensor Integration Technology」がGold Awardを受賞した。この知的財産は、吸光度・導電率・pHに基づいた多変量解析によって、多成分薬液中の成分濃度を微量であったとしても、前処理なしのインラインで、迅速かつ高精度に測定することを可能とした発明考案であり、今後のHORIBAグループをけん引する技術として以下に紹介する。

* 第14回では、2023年6月1日から2024年5月31日の間に創作、出願、論文発表、特許登録、または外部表彰を受賞したなどの知的財産を対象としている。



Figure 1 HORIBA Group IP World Cup

Chemical Solution Monitoring System based on Sensor Integration Technology

IP：特許出願 特願2023-561498号(発明の名称：成分濃度測定装置，成分濃度測定プログラム，及び，成分濃度測定方法)

受賞者：中原 達也，斧田 拓也，土生 一徳(堀場アドバンスドテクノ／日本)



Figure 2 左から中原 達也，堀場 厚，土生 一徳，斧田 拓也

Gold Award受賞IPの概要

半導体製造プロセスで用いられる薬液は、半導体の微細化に伴って、多成分で構成されるものや微量な成分を含むものなどへ多様化するとともに、複数の項目にわたる厳格な品質管理が必要とされている。とりわけ、ppmレベルの微量成分濃度測定について、高速かつ高精度な測定技術が求められている。

従来の測定手法は液体クロマトグラフや吸光度法が主流であった。しかしながら、液体クロマトグラフは成分を分離する前処理が必要なため測定に時間がかかり、さらに移動相として試薬が必要という課題があった(Figure 3)。吸光度法はインラインで高速応答が可能だが、成分間で吸収スペクトルに重畳があると正確な濃度測定が困難であった(Figure 4)。

本受賞IPは、Figure 5に示した式に基づき、吸光度・導電率・pHを用いた多変量解析によって多成分薬液中のppmレベルの微量成分濃度を算出することを特徴としている(Figure 6)。この測定手法は薬液の分離や試薬の添加といった処理を必要としない。また、導電率やpHは成分同士で異なる傾向を示すことがあるため、これらの異なる原理の測定信号を複合分析することにより、吸収スペクトルが重畳しているような場合であっても、吸光度法のみでは測定が困難な微量成分のインライン測定を可能とした。

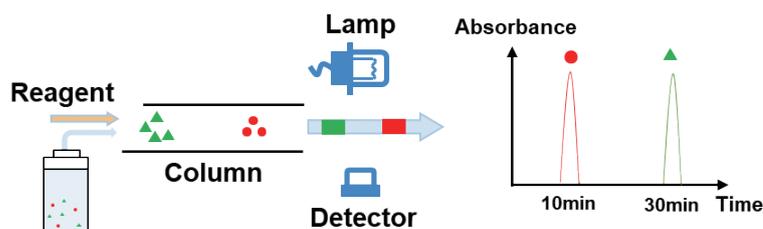


Figure 3 液体クロマトグラフ

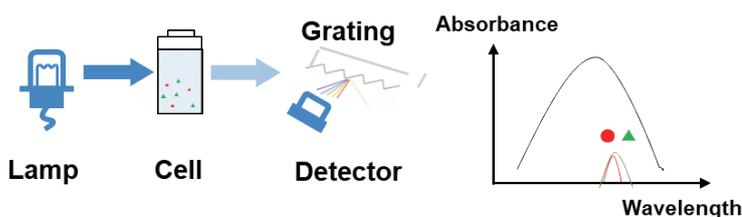


Figure 4 吸光度法

$$\text{Concentration} = (\sum a, b, c) \cdot \left[\begin{matrix} \sum \text{Absorbance} \\ \text{Conductivity} \\ \text{pH} \end{matrix} \right]$$

Figure 5 濃度算出式

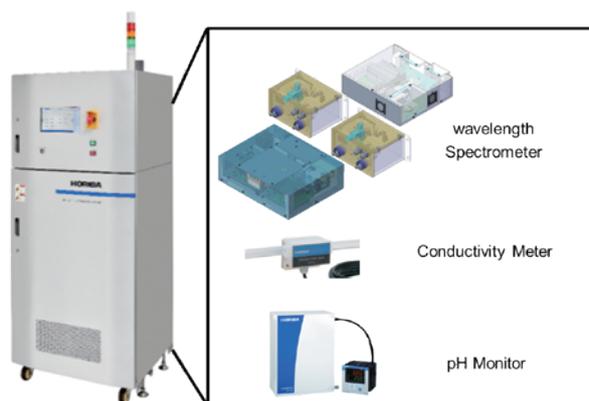


Figure 6 本受賞IPのシステム構成

その他受賞IP

[Silver Award/Silver Award Cooperation Award]

Testing System for xEV Thermal Management System

IP：特許出願 特願2023-535256

(発明の名称：試験システム、試験方法及び試験システム用プログラム記録媒体)

Silver Award受賞者：平井 誠治(堀場製作所／日本)

Silver Award Cooperation Award：Dr. David BRIDGE, Dr. Osoko SHONDA (HORIBA MIRA／イギリス)

概要：車両の熱マネージメントシステムを車両完成前に評価する技術。電動化車両(xEV)は、燃焼エンジンを搭載した車両よりも発生する熱が少ないため、熱を効率的に管理する熱マネージメントシステムの開発が求められる。本受賞IPは、車両のシミュレーションモデルが車両の熱源部品から発生する熱量を演算する。熱エミュレータは、車両空間を模擬したチャンバー内でシミュレーションモデルを用いて演算した熱量を発生させる。試験システムは、この発生させた熱量を用いて、車両完成前に車両の熱マネージメントシステムの性能を評価することができ、電動化車両の開発工程を大幅に短縮することに成功した。

[Bronze Award]

High speed scanning system for confocal microscopy (Qscan 2)

IP：特許 EP3899460

(発明の名称：APPARATUS AND METHOD FOR LIGHT-BEAM SCANNING MICROSPECTROMETRY)

受賞者：Mr. Emmanuel FROIGNEUX (HORIBA FRANCE／フランス)

概要：共焦点顕微鏡の高速スキャンシステムに関連する技術。2次元高速ステアリングミラーと凹面トロイダルミラーと凹面鏡の光学配置が本受賞IPの重要な点である。2次元高速ステアリングミラーがレーザービームの焦点を、凹面トロイダルミラーと凹面鏡の焦点面上で操作する。この高速スキャンシステムでは、2次元高速ステアリングミラーが唯一の可動ミラーであり、ボイス-コイル技術により高速で駆動させることが可能である。このような光学配置により、高速スキャンシステムを実現している。この高速性を利用することにより、HORIBAラマン顕微鏡が、さまざまなアプリケーションで活躍している。



Figure 7 表彰式

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、受賞時点での自社調査に基づいて記載しています。

HORIBA World-Wide Network



Austria

- HORIBA (Austria) GmbH - Tulln

Czech Republic

- HORIBA Czech
Olomouc Factory / Prague Office

France

- HORIBA ABX SAS - Grabels
- HORIBA Advanced Techno France SAS
- HORIBA Europe Research Center - Palaiseau
- HORIBA FRANCE SAS - Lyon
- HORIBA FRANCE SAS, Lille Office / Montpellier Office / Vénissieux Office

Germany

- BeXema GmbH
- HORIBA Europe GmbH - Darmstadt Office / Dresden Office / Flörsheim Brake Test Center / Hannover Office / Korschenbroich Office / Leichlingen Office / Munich Office / Oberursel Office / Potsdam Office / Stuttgart (Neuhausen) Office / Wolfsburg Office

- HORIBA FuelCon GmbH - Barleben
- HORIBA Jobin Yvon GmbH - Oberursel
- HORIBA Tocadero GmbH

Italy

- HORIBA ABX SAS - Italy Branch
- HORIBA ITALIA Srl - Roma
- HORIBA ITALIA SRL - Torino Office

Netherlands

- HORIBA Europe GmbH - Netherland Office

Poland

- HORIBA ABX Sp. z o.o. – Warszawa
- MLU Sp. z o.o.

Portugal

- HORIBA ABX SAS - Portugal Branch

Romania

- HORIBA (Austria) GmbH - Romania Branch

Russia

- HORIBA OOO - Moscow / Zelenograd Office

Spain

- HORIBA ABX SAS - Spain Branch

Sweden

- HORIBA Europe GmbH, Sweden Branch
- (Gothenburg) / (Sodertalje)

Turkey

- HORIBA Europe GmbH - Istanbul Office

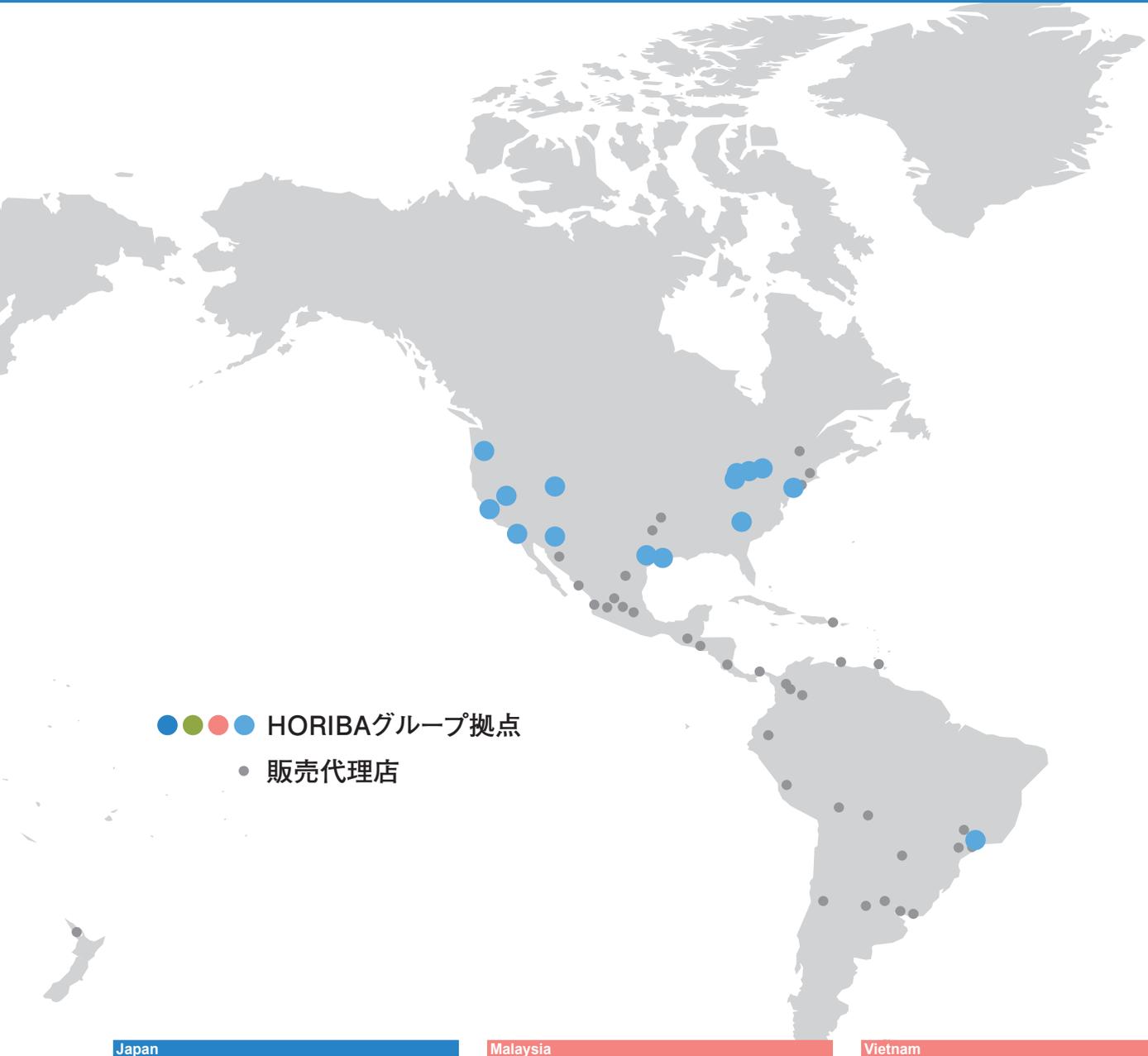
United Kingdom

- HORIBA Jobin Yvon IBH Ltd. - Glasgow
- HORIBA MIRA Limited - Nuneaton / Quatro Park
- HORIBA Test Automation Limited. - Worcester
- HORIBA UK Limited - Northampton

HORIBAグループ拠点の詳細情報は
こちらからご確認いただけます。



<https://www.horiba.com/jpn/contact/worldwide-locations/>



● ● ● ● HORIBAグループ拠点
● 販売代理店

Japan

- ・ HORIBA Ltd.
- ・ HORIBA Advanced Techno
- ・ HORIBA STEC
- ・ HORIBA Techno Service

China

- ・ HORIBA (China) Trading Co. Ltd. - Xi'an / Beijing / Beijing YiZhuang / Chengdu / Guangzhou Office / Shanghai / Shenzhen / Xiamen
- ・ HORIBA INSTRUMENTS (SHANGHAI) CO., LTD - Shanghai
- ・ HORIBA Precision Instruments (Beijing) Co., Ltd.
- ・ HORIBA Technology (Suzhou) Co.,LTD.
- ・ MIRA China Ltd. - Shanghai
- ・ MIRA China Ltd. Xiangyang Workshop

India

- ・ HORIBA India Private Limited - Bangalore Office / Chennai Office / Haridwar Factory / New Delhi / Technical Center / Kolkata Office / Nagpur Factory

Indonesia

- ・ PT HORIBA Indonesia
- ・ PT. HORIBA Indonesia - Tangerang

Malaysia

- ・ HORIBA Malaysia Sdn Bhd

Philippines

- ・ HORIBA Instruments (Singapore) Pte Ltd. - Manila Office

Singapore

- ・ HORIBA Instruments (Singapore) Pte Ltd. -Singapore / West Office

South Korea

- ・ HORIBA KOREA Ltd. - Anyang-Si / Dongtan Office / Ulsan Office
- ・ HORIBA STEC KOREA, Ltd. - Gyeonggi-do

Taiwan

- ・ HORIBA Taiwan, Inc. - Hsinchu
- ・ HORIBA Taiwan, Inc. - Tainan Office

Thailand

- ・ HORIBA (Thailand) Limited - Bangkok

Vietnam

- ・ HORIBA Vietnam Company Ltd. - Hanoi
- ・ HORIBA Vietnam Company Ltd. - Ho Chi Minh

Brazil

- ・ HORIBA Instruments Brasil, Ltda. -São Paulo
- ・ TCA/HORIBA Sistemas de Testes Automotivos Ltda. -São Paulo

Canada

- ・ HORIBA Canada Inc. -Burlington / London Office

USA

- ・ HORIBA Instruments Incorporated -Ann Arbor Office / Austin Office / Canton Office / Fletcher Office / Houston Office / Irvine / Portland Office / Sunnyvale Office / Tempe Office / Troy Office / West Valley City Office
- ・ HORIBA New Jersey Optical Spectroscopy Center
- ・ HORIBA Reno Technology Center

Readout HORIBA Technical Reports August 2025 No.60

発行日 2025年8月29日
発行人 中村 博司
発行元 株式会社堀場製作所
〒601-8510
京都市南区吉祥院宮の東町2
<https://www.horiba.com/jp/publications/readout/>



DTP・製版・印刷・製本 株式会社 写真化学

<Readout編集委員会>
委員長 中村 博司
副委員長 林 奨
編集委員 勝田 敏広, 上野 楠夫, 藪下 広高
編集局 浦上 知佳子, 松田 哲也, 濱上 郁子,
佐竹 博美, 三角 明裕, 岩崎 直基

お問い合わせ先
株式会社堀場製作所
開発本部 R&D プランニングセンター
オープンイノベーション推進室
TEL : 075-313-8121 (代)
E-mail : readout@horiba.co.jp

HORIBA
Explore the future



この印刷物は、E3PAのシルバー基準に適合し
地球環境負荷に配慮した印刷方法にて作成されています
E3PA：環境保護印刷推進協議会
<http://www.e3pa.com>