

「便利で楽しい自動車。でも、快適な環境とも共存したい。」こんな人々の素朴な願いを達成したいと、世界中の科学者・技術者が日夜研究開発に励んでいます。そんな中、ディーゼルエンジンの効率の良さが注目されています。半面、PMの削減もまた重要な課題となっています。そこで、今回、内燃機関の世界的権威である、ミネソタ大学のProf. David B. Kittelsonと同志社大学の千田二郎先生のお二人に、ディーゼルエンジンとPM計測の現状と将来についてお話を伺いました。話題は、直噴ガソリンエンジンや燃料電池など各種のエンジン開発状況、PM計測の課題まで幅広く展開しました。本インタビューは、堀場製作所の足立正之とLes Hillが、本年5月ギリシャで行いました。



千田 二郎先生
同志社大学 教授

Prof. David B. Kittelson
ミネソタ大学 教授

Wishing to achieve the simple goal of creating a convenient, enjoyable automobile that can also coexist with a pleasant natural environment, scientists and engineers around the world are working night and day in various research efforts. One thing that is getting considerable attention in this type of research is the efficient diesel engine. Of course, there is also the important matter of reducing PM, which is said to adversely affect human health. Recently, an interview was held with Prof. David B. Kittelson of Minnesota University and Prof. Jiro Senda of Doshisha University, the world's leading authorities on internal combustion engines, about the current conditions of and future outlook for diesel engines and PM measurement. The interview covered a wide range of topics, from the conditions of various types of engine development, such as direct injection engines and fuel cell engines, to the subject of PM measurement. The interview itself was conducted this past May in Greece by Dr. Masayuki Adachi of and Mr. Les Hill of Horiba Ltd.



David B. Kittelson, Ph. D.

ミネソタ大学 教授

Division Director of the Power and Propulsion.

Co-Director of the Center for Diesel Research.

ディーゼル，直噴式ガソリン，そして燃料電池

ホリバ 自動車用ディーゼルエンジンの将来性をどのようにお考えですか？

Kittelson CO₂の排出が少ないディーゼルエンジンは、グローバルな環境保全のためにも、今後ますます重要になるだろうと希望的に考えています。この点、環境問題を狭い視野からしか捉えていない、とくにアメリカの動きに疑問を感じています。

もちろん、NO_xやPMの削減が大きな課題であることは十分に認識しています。このためには、微粒子のトラップ、低硫黄燃料、酸化触媒などを組み合わせることにより、固体微粒子とナノ・オーダーの揮発性微粒子の両方を同時に解決することができるはずだと考えています。

ホリバ 乗用車を含めて大きさに関係なく、ディーゼルエンジンの見通しは明るいのでしょうか？

Kittelson 地域により多少の差はあります。ヨーロッパでは乗用車のディーゼル化が進んでいますが、アメリカでは燃料の低価格政策の影響により遅れています。ただ、アメリカのエネギー省はスポーツユーティリティカー（日本ではRVとも呼ばれている）へのディーゼルエンジンの導入検討をしており、私もこれを切望しています。

ホリバ 直噴式ガソリンエンジン（DISI）がディーゼルエンジンの最も強力な競争相手になりそうな状況ですが、ここでもNO_xとPMが論点になるのでしょうか？

Kittelson もし、アメリカにDISIが導入されるようになれば、ディーゼルと同じような基準を満たさなければならなくなると思います。成層燃焼型のDISIにPMトラップやその他の排ガス制御技術を搭載するようになると、ガソリンとディーゼル直噴式エンジンとがどんどん近づき、両者はほとんど同じものになってきます。

アメリカでは、これに代わるものとして、可変バルブ機構を持った均質または初期インジェクション方式のDISIが登場し、PMトラップが不要になるでしょう。私は、この方式の可能性は高いと考えています。

これらは、今後10年から15年間の短期的な展望です。一方、長期的には燃料電池が重要になってくだろうと考えています。しかし、これは政治家たちが思っているよりもはるか遠い先のことになるでしょう。

ホリバ 燃料電池車の実用化には多くの課題があるということですか？

Kittelson そうです。たとえば、極端な天候条件下で使う場合です。燃料電池車の推進者たちはこの点を楽観的に考えているようですが、私は納得できません。過酷な天候下では、多量の液体を含むような電気化学的デバイスは不利になります。したがって、地域によっては、今後とも長期間にわたって従来型のエンジンを使い続けることになるでしょう。つまり、寒冷な地域では、ディーゼルエンジンやガソリンエンジンが、トータルエネルギーシステムやコジェネシステム用として使われるでしょう。廃熱を利用できるコジェネシステムは、全エネルギーを効率的に利用でき、非常に重要になってきます。

ホリバ 千田先生は、ディーゼルエンジンやガソリンエンジンの将来をどのように考えておられますか？

千田 それには次の点を考えることが重要です。まず一つ目は出力密度です。ディーゼルとガソリンエンジンは、燃料電池と比べて出力密度がはるかに高く、今後とも継続的に使用する際の重要なポイントになります。次は、エンジンの効率と排ガスのバランスです。ご存知のようにディーゼルエンジンは非常に高い熱効率をもっていますが、反面、排ガスが問題になります。ヨーロッパやアメリカと同様、日本でもディーゼル排ガスに対しても厳しい基準が設けられようとしています。これをクリアしなければなりません。エンジンの改良だけでは限度があります。そこで、燃料の改質、NO_x削減触媒やディーゼル微粒子除去用フィルタ(DPF)などの後処理システムの研究が必要になります。ディーゼルエンジンを組み込んだハイブリッドシステムは、将来最も有力です。と言うのは、ライフサイクルアセスメントの調査結果から、このシステムの可能性が最も高く、水素を車載した燃料電池に匹敵することが知られています。しかし水素の搭載性や供給インフラの問題が残ります。一方、ガソリンやメタノールを燃料として用いる改質式の燃料電池システムは、ディーゼルハイブリッドシステムに比べると改質器の効率や排気の面から、これもまた問題点を多く抱えています。

ドライブの楽しみと環境保全の両立

千田 三番目のポイントは交通システムです。今後、二、三十年以内には、車の共同利用やTDM(Transportation Demand Management)などの新しいタイプの交通システムを考えなければならなくなると思います。たとえば、買い物には電気自動車を、郊外には燃料電池車を使います。燃料電池がカバーできる範囲を超える地域には、効率の優れたガソリンやディーゼルエンジンを搭載したハイブリッドシステムを利用します。もっと長距離の移動には、ヘビー・デューティーのディーゼルエンジンを使用します。



千田 二郎
Jiro Senda Dr. Eng.

同志社大学 教授, 工学博士

エンジンの低公害化のための
新しい噴霧燃焼法の提案研究

このように、ディーゼル、ガソリン、燃料電池、そしてハイブリッドを含めた、エンジン・交通システムの最適化をはからなければならないというのが私の考え方です。さらに、究極的には燃料の最適化と、利用目的の明確化が求められるべきです。

Kittelson 千田先生がおっしゃるエンジン・交通システムの最適化は、気候が異なる地域には違ったタイプの車が必要であるとする私の考え方と関連しています。たとえば、電気自動車がうまく働くような温暖な地域と寒冷な地域とでは、違った種類の車が使われるでしょう。

また、「都会での移動と長距離の移動には異なった種類の車を利用する」という階層化の考え方も全く同感です。階層化は衛星ナビゲーションシステム(GPS)と結べば十分に実現可能で、今後、インテリジェント交通システムはますます重要になると思います。

GPSを備えたハイブリッドカーなら、予測運転が実現可能となり、地形に合わせた最適条件で走行できるようになります。たとえば、坂道に近づいてきたら、排ガスが最小になるようにエンジンが設定されます。このように、おもに過渡運転状態での排出を抑えることが可能となります。

千田 GPSを利用すれば排ガスと燃料消費の最適化がはかれるとお話ですが、その場合、「ドライブの楽しみ」が問題になるのではないのでしょうか。これは一般の人にとっては重要な要素だと思います。

人類は、ガソリンやディーゼルなどの高パワー密度エンジンを使った「ドライブの楽しみ」をすでに経験していますから、今更これを排除することはできません。この点からも、ディーゼルやガソリンエンジンは、今後も生き残るべきだと考えています。

ホリバ 「適切な場所ではドライブを楽しみ、一方で、市街地走行や規制が必要な環境では制限を守る。」私もそんな自動車の賢い使い方には賛成です。

Kittelson 「ドライブの楽しみ」についてですが、ドライブ感覚の点では、「フルハイブリッド」より「マイルドハイブリッド」の方が優れていると思っています。というのは、マイルドハイブリッド車では高い感覚の走行が実現できるのに対し、フルハイブリッド車ではエンジンシステムの挙動とドライバーの要求とが切り離されてしまうからです。私は個人的にはエンジンフィールを楽しみたい方ですので、オートマチック車よりマニュアルミッションの方を好みます。

ホリバ ヨーロッパでは、ディーゼル車に対する一般の認識がこの3年間でどのように変化したかに興味があります。高いトルク感覚が、ディーゼルを高級車だと思わせているのでしょうか？

Kittelson その点が、燃費に対する関心が少ないアメリカでディーゼル乗用車を普及させるポイントだと思えます。「ディーゼル車は高性能で高級だ」と認識されるようになれば、ディーゼル車はもっと売れるでしょう。

目に見える形で論理的な議論を

ホリバ 一方、ディーゼル車の路上での実走行時の排ガス影響(Real World Emission)はいかがでしょうか？

Kittelson これについてもヨーロッパとアメリカとは異なります。建物の汚染や視界の劣化など環境にディーゼルエンジンが関連していることは間違いないでしょうが、健康への影響については依然論議中です。

確かに、PMと健康の間には何らかの関係があるのでしょうか。私は、6都市調査やその他の調査結果そのものを疑ってはいませんが、ディーゼルが直接影響しているか否かについては明確ではありません。先日もパリのようなディーゼル車の多い都市部における呼吸器官疾患率増加の可能性について指摘がありましたが、私は統計的に正しいかどうか疑問を持っています。

99%以上が火花点火式のガソリン車を用いるアメリカで、最近、興味深い報告が出ています。コロラドのNFRAQS調査では、PM発生源の2/3は火花点火式ガソリン車であると指摘しています。路上での実走行や使用中のガソリン車は、ディーゼルよりはるかに問題が大きい可能性があります。

千田 日本ではおもにトラックやバスにディーゼル・エンジンが使われており、とくに都市圏でPMが集中的に排出されています。東京都では、古いトラックやバスにディーゼル・パティキュレート・フィルタ(DPF)を搭載するようにと規制強化が提案されています。新しいディーゼル車はコモンレール噴射システムを採用しているため、PMの大量排出はありませんが、問題は古い型式のディーゼル車です。しかし、後付け型のDPFを使えば解決の可能性があります。

Kittelson 確かに、古い車がディーゼル車のイメージを損なっています。残念ながら、ほとんどの健康調査は古い技術を用いたエンジンを対象に行われたものです。新しい技術を適用した車での調査が必要です。と同時に、PM排出の影響を評価する方法も常に検討しなければなりません。

ホリバ エンジンの改良やDPFの取り付けなどの対策をユーザが受け入れやすいように、政府は税金面で動機づけができるのではないのでしょうか？

千田 東京都では、知事がペットボトルに詰めたPMをテレビで見せることで一般市民に大きな影響を与えました。

Kittelson 問題は目に見えないナノ粒子をどう示すかです。微小粒子がより危険であることを明らかにし、ガソリン車にも焦点をあてなければなりません。人間は目に見えないものには関心を持ちません。

ご存知かと思いますが、Lovelace Inhalation Toxicology Research InstituteのJoe Mauler氏は、いつも微粒子を可視化して示しています。環境基準ぎりぎりいっぱい都会で生活する人の肺に吸入される微粒子の量と、タバコを1日に1箱吸う人のそれとでは2桁ほど違うことが明らかになっています。

千田 最近、ガソリン車から排出される非常に微細なPM成分が注目を集めています。PMはディーゼルエンジンだけから排出されるわけではありません。Kittelson先生のような著名な方が、一般の人々に対しこの点をアピールしていただくことは大変有効だと思います。

Kittelson そうです。科学技術に携る者、私達すべての責任です。理にかなったことを提言することは、偏った問題提起よりもずっと難しいことですが、続けなくてはなりません。人は時折、極端な意見を支持する傾向がありますが、小さくても数多くの力を結集すれば、偏った意見を退けることは可能です。

PM問題解決には多面的な計測・評価が必要

ホリバ 排出規制と測定技術は今後どのように変わっていくのでしょうか？

Kittelson 私は、排出規制に携わっている人たちに、「時間軸に対数を使う」ことを勧めています。ご存知のように排出基準は指数関数的に下がっています。ミネソタでは、一酸化炭素の排ガス規制値と新車認証データはともに減少していますが、大気中の減少率はそれほどではありません。このような傾向は今後も続くでしょう。

この問題は、Real World Emissionや交通形態が大気汚染発生の原因となっている地域との関連へ問題が移行していくでしょう。PMの蓄積と放出が大きな問題になることがわかっています。つまり、エンジンに負担のかからない走行時やアイドリング状態のときにPMが排気管に蓄積され、負担がかかる運転状態になるとPMを放出するのです。最近、ガソリン車についてこれとよく似た現象が観察されています。つまり、車のスピードを上げると大量のナノ粒子が放出され、その後徐々に減少するというものです。

千田 日本ではNO_xには非常に厳しい規制が設けられていますが、PMにはこれまでそれほど厳しい規制はありませんでした。ディーゼルエンジンへの悪いイメージを払拭し他に転用するためには、規制への適合、燃料の研究、既存の排ガス処理装置の開発などが必要になります。

ホリバ 現在、PMは質量で規制されていますが、密度かサイズ、どちらがより重要でしょうか？

Kittelson この点はだれにもわからないと思います。密度がアレルギー疾患や喘息に関連していると指摘する調査があります。また、ねずみのような小動物にいろいろなサイズの粒子を吸い込ませた実験では、表面積がより深く関係するとも報告しています。一方、6都市調査では、呼吸反応に影響するのは $2.5\mu\text{m}$ 以下の非常に細かい微粒子の集まりであると指摘しています。いずれにしても、すぐには明確なことはわからないだろうと思っています。

重要なポイントは、個数と表面積を対象とした計測機器は質量測定より高感度(精度)で、また、今日のクリーンなエンジンを測定する際には、より微量の計測を高い再現性で実現できる可能性があるという点です。 $0.01\text{g}/\text{hp}\cdot\text{h}$ と規定している2007年のアメリカのヘビー・デューティ基準には、フィルタ測定法がそれなりの精度を持つべきことが暗示されています。

EPAでは、PMを確実に捕らえることができる特殊フィルタ、超精密天秤、フィルタ電荷の中性化などハードウェアの改善を検討しています。さらにその上に、非常に慎重な測定が必要になります。規制値が継続的に厳しくなる状況において、私は、質量がPM測定の最も簡単で正確なパラメータだとは考えていません。

凝結型の粒子カウンタ(CNC)は、粒子の個数をカウントするため、無限のダイナミックレンジを持っていると考えられます。しかし、このような高感度測定を行おうとすると、希薄空気のバックグラウンドが問題となってきます。たとえば、PMトラップ通過後のSMPSの測定データを見ると、希釈トンネルのバックグラウンドレベルになっています。

もう一つの問題はトランジェント試験です。PMや NO_x が、どういう過渡状態で発生しているのかを見つけ出すための研究開発が重要になっています。 NO_x は可能ですが、PMはそう簡単ではありません。いくつかの測定器を組み合わせるおもしろい方法もあります。たとえば、Fuchsあるいは動的表面積法と呼ばれる拡散電荷法は、応答速度は約1秒です。CNCもこれと同じ程度の応答速度です。これらを使って表面積と粒子数の比をとれば、平均表面の直径を求めることができます。つまり、粒子サイズ、少なくとも平均サイズがどのように変化しているかをダイナミックに測定することができます。

ホリバ 安定で信頼性の高い計測を実現するための基準物質はいかがでしょうか？

Kittelson PMを質量で測定する理由の一つは標準決めが簡単だからです。現在、粒子数や表面積には標準がありません。PSL(ポリスチレンラテックス)を使おうにも微粒子化する基準も合意もありません。EUのFifth Framework微粒子プログラムで標準について議論してきました。また、CRC 4E-83プログラムでは、測定器の校正に着目し標準規格を設定しました。

ホリバ 今後、燃料面からは何が課題となるでしょうか？

Kittelson 潤滑油の組成です。すすを発生しにくい希薄燃焼でもオイルエアロゾルは発生します。希薄燃焼すると排ガス温度が低くなり、触媒作用が低下します。そこで、微粒子の処理が必要になり、さらにはオイル消費とオイル形成に注目しなければなりません、未だ手がつけられていません。

カリフォルニアで天然ガスに転換されたディーゼル・バスを見るたびに、オイル消費が高くなり、ナノ粒子の排出が問題になるだろうと思います。大手のディーゼルの話では、彼らはエンジンの最適化は行っておらず、オイル消費量も高いことを確認しました。

千田 一方、燃料改質も大変重要な課題だと思います。将来、バイオ・マスから液体燃料を作り出すことができるようになれば、これはとくに重要な課題となります。バイオ・マスを使ったディーゼルは再生が可能なため大変有用です。これを実用化するために、コスト・パフォーマンスの優れた生産システムの研究開発に集中する必要があります。

Kittelson 先日、カリフォルニアを出発するときに、「今後、ミネソタで販売されるディーゼル燃料には、2%のバイオ・ディーゼルが含まれなくてはならない」との法律がミネソタ州議会で可決されるどころだと聞きました。これは、植物から採られたものではなく、マクドナルドなどで使用済みのオイルを原料としています。

ホリバ 直噴ガソリンエンジンからバイオディーゼルまで幅広いお話を通して、我々計測機器メーカーの役割、今後の方向性に関し、多くのご示唆いただきました。ありがとうございました。

(文責 編集部)



【インタビューア】

Les Hill

堀場製作所 エンジン計測企画開発部 部長

足立 正之

堀場製作所 エンジン計測開発部 部長

工学博士