

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 赤外線ではかる

July 1993 ■ No.7

ニューマチック赤外検出器

Pneumatic Infrared Detector

青木潤次
Junji AOKI

(Pages 64-71)

株式会社 堀場製作所

ニューマチック赤外検出器

Pneumatic Infrared Detector

青木 潤次
Junji Aoki

【要旨】

ニューマチック検出器は当社において長い歴史を持つ赤外線検出器である。また他の赤外線検出器にはない多くの利点を有していることから、赤外線ガス分析計の広い分野でなくてはならない重要な検出器となっている。本稿では、ニューマチック検出器の動作原理、基本特性、応用例について述べる。

Abstract

HORIBA has a long technical history with pneumatic infrared detectors. Having many features not to be found in other type infrared detectors, this pneumatic infrared detector is applied in a wide variety of laboratory and industrial fields. This paper describes the principle of operation, basic characteristics, and application examples of the pneumatic infrared detector.

1. はじめに

当社における赤外線技術との関わりは、1958年に医学用赤外線ガス分析計GA-1形の販売を開始したことに始まる。1964年から1971年にかけては、現在、当社の主力製品である自動車排ガス測定装置を、続いて大気汚染監視装置、煙道排ガス分析装置など、つぎつぎと赤外線吸収を利用した非分散形赤外線分析計(Non Dispersive Infrared Analyzer: NDIR)を世に送り出してきた。NDIRは、簡単な構造・堅牢性・高い選択性・連続分析が可能などの優れた性能により、ガス分析計の代表として広く用いられている。

これらNDIRの持つ高度な分析能力は、高感度、高選択性を有するニューマチック検出器が重要な役割を担っており、ニューマチック検出器およびその応用技術の進歩に伴い、赤外線分析技術が発展してきたとも言える。ここ数十年来、固体型赤外線検出器を用いた分析計の実用化もあるが、ニューマチック検出器の特長を生かした高性能分析計の需要はますます増大してきている。

2. 検出器の分類

赤外線検出器は検出原理から大別すると熱型と量子型に分類され、それぞれ表1のような特性がある

種類	機構	名称	有効波長域	時定数	温度影響
熱型	抵抗型	サーミスタ ボロメータ	全赤外域	10 ¹ ~10 ⁴ 秒	室温での 使用可
	熱電体型	サーモパイル			
	ニューマチック型	コンデンサマイ クロホン			
		コーレイセル			
焦電型	焦電素子				
量子型	光導電型	PbS	0.7~3.8 μm	10 ⁶ 秒以下	高感度化 には冷却 が必要
		PbSe	0.8~6.6 μm		
		HgCdTe	5~16 μm		
	光導電型	InAs	0.6~3.2 μm		
InSb		0.6~5.6 μm			
光電磁型	InSb	2~7 μm			

表1 赤外線検出器の分類と特性
Classifications and characteristics of infrared detector

2.1 熱型

この型の検出器は赤外線の熱的効果を利用するもので、検出素子の温度上昇によって生じる物理的性質(電気抵抗, 熱起電力, 熱膨張, 焦電効果など)の変化を赤外線量の変化としてとらえる。このため感度は一般的に波長依存性がない。検出器の時定数は検出素子の熱容量および熱伝導により定まり、ミリ秒(ms)程度である。ニューマチック検出器は熱型に属し、封入ガスの圧力変化による膜の変位を電気容量変化として捉える、コンデンサマイクロホン型が多い

2.2 量子型

量子型センサは、赤外線を光量子としてとらえるため、感度が高く、応答速度も速い。ただし、検出素子に用いる半導体の禁制帯幅(バンドギャップ)に近い波長の赤外線には感度が高いが、それ以外の波長に対する感度は低く、波長依存性を有している

量子型は、バンドギャップにより長波長側の検出限界(遮断波長)が決まり、両者の間には(1)式の関係がある。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \quad \dots \dots \quad (1)$$

λ_c : 遮断波長 (μm), E_g : バンドギャップ (eV)

3. ニューマチック検出器の構造と動作原理

当社のニューマチック検出器はNDIRに組み込むことを前提としており、ここではNDIR用検出器の観点から基本構造と動作原理を述べる

3.1 基本構造

NDIRに用いられているコンデンサマイクロホン型ニューマチック検出器の基

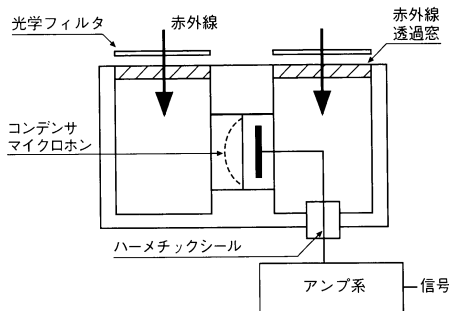


図1 コンデンサマイクロホン型ニューマチック検出器の構造 (複光路形)
Structure of capacitor microphone-type pneumatic detector (complex light path type)

本構造を図1に示す NDIRの吸収セルの構造には、大別すると複光路と単光路の2種類があるが、基本的にニューマチック検出器は2つの圧力室から構成されている。圧力室の中には、赤外活性な測定成分と同種のガスがある分圧で封入されている。一方、両圧力室内の間にはコンデンサマイクロホンを設けているが、その一部分に両室間のガスがゆっくりと通過(スローリーク)できる構造をとっているため、周囲温度変化などの外乱による検出器内の圧力バランスへの悪影響を抑えることができる。

検出器の赤外線透過窓には光学結晶(BaF₂, CaF₂, LiFなど)が用いられ、測定波長域の赤外線を効率よく透過させるとともに、測定に不要な長波長域での赤外線をカットする働きをする。さらに検出器前部の赤外線光路上には、吸収波長が重なり合う成分による干渉影響を低減するため、透過波長帯域を制限する光学フィルタ(多層膜干渉フィルタ)を入れることが多い。

3.2 動作原理

(1)NDIRの測定原理

一般に赤外活性なガス分子は、赤外線の照射を受けると、その分子固有の振動数と同じ振動数の赤外線を吸収する。NDIRはこの吸収エネルギーを測定することにより定量分析を行うものである。

赤外線吸収の程度は、それぞれの成分ガス濃度に応じて変化する。この関係は(2)式のランベルト・ベールの法則により表される。

$$I = I_0 \exp(-\mu c l) \quad \dots \dots (2)$$

I_0 : 入射光強度, c : ガス濃度, μ : ガス固有の吸収係数
 I : 透過光強度, l : ガス層の厚さ

I_0 , μ , l は測定ガス種や装置により決定される定数であるため、透過光強度 I を測定すればセル中で吸収された赤外線の量すなわちガスの濃度がわかることになる。

(2)検出器の動作原理

図2にNDIRガス分析計の構成と動作原理を示す。

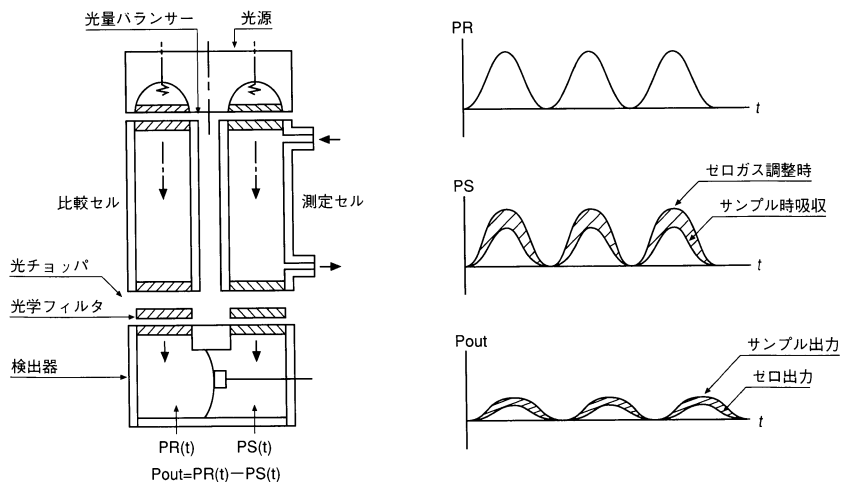


図2 NDIRガス分析計の動作原理図
Principle of operation of NDIR gas analyzer

光源からでた赤外線は測定セルおよび比較セルを通る。測定セル内の測定成分ガスの濃度が変化すると、それに対応した吸収量の変化が起こり、赤外線の検出器に到達するエネルギー量が増える。一方比較セルでは、赤外線を吸収しないガスが封入されているため、常に一定のエネルギーが検出器に送り込まれる。この結果、検出器に入射する2つの赤外線量に差を生じる。この二つの赤外線を回転する光チョップにより断続すると、検出器内の封入ガスが赤外線を吸収することにより膨張し、二つの室を隔てているコンデンサマイクロホンの可動極を振動させ、交流電気信号として取り出すことができる。

ニューマチック検出器が他の赤外線検出器と異なるところは、検出器内に測定成分ガスを適当な分圧で封入している点にある。封入ガスが固有の赤外線を吸収するため、検出器そのものに高い選択性を持たせることができる。この特性が、NDIRが幅広い分野で使われる最大の要因となっている。

4. ニューマチック検出器の基本特性

4.1 感度の周波数特性

ニューマチック検出器の動作過程は、前章で述べたように、受光室の封入ガスが断続的に照射された赤外線により温度上昇する過程と、温度上昇による熱膨張にともなう圧力変化によりコンデンサマイクロホン可動極が振動する二つの過程よりなる。

(1) 封入ガスの赤外線吸収による温度上昇過程

封入ガスの温度上昇過程を図3に示す。封入ガスの熱容量をH、等価熱伝導率をG、光チョップが開いている間に入射する赤外線強度をLとし、ガス温度の上昇を ΔT とすると、検出器の系外へは $G \cdot \Delta T$ の熱が失われることになる。この時生じる検出器の熱的変化の動的な過程は(3)式および(4)式で表される。また図4はニューマチック検出器の温度上昇の周波数特性を示す。赤外線吸収による温度上昇特性は、封入ガスの熱容量Hと等価熱伝導率Gの比により定まる。周波数との関係では、 $\omega = G/H$ より低域では一定となり、高域側では低下していくことがわかる。

$$\eta L = H \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + G \cdot \Delta T \quad \dots \dots (3)$$

ここで $\frac{d}{dt} \rightarrow j\omega$ とすると

$$\left| \frac{\Delta T}{L} \right| = \frac{\eta}{G(1 + (\omega H/G)^2)^{1/2}} \quad \dots \dots (4)$$

(2) コンデンサマイクロホンの周波数特性

図5に受光室の圧力変化を示す。赤外線吸収により受光室内の封入ガスは、温度が ΔT 上昇すると、圧力は ΔP 上昇する。このとき封入ガスは、二つの受光室間の圧力差に応じて、両室間のリーク孔(リーク抵抗 R_L)を通して流量Qでリークする。いま、nを封入ガスの分子数、Rをガス定数とすると、気体の状態方程式よりこの時生じる圧力変化の動的過程は(5)式、(6)式で表される

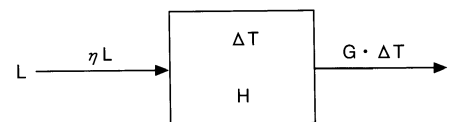


図3 封入ガスの温度上昇過程
Temperature rise process of filler gas

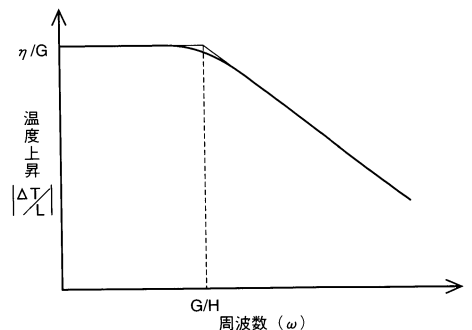


図4 封入ガスの温度上昇の周波数特性
Frequency characteristics of temperature rise of filler gas

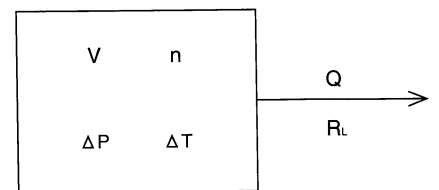


図5 受光室内の圧力変化
Pressure changes in photodetection chamber

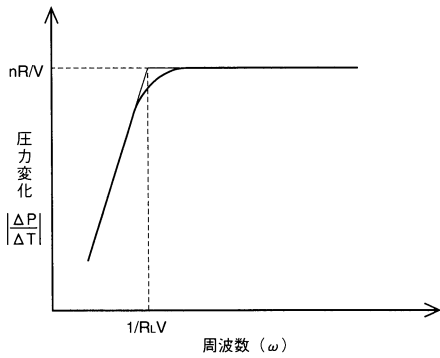


図6 コンデンサマイクロホンの周波数特性
Frequency characteristics of condenser microphone

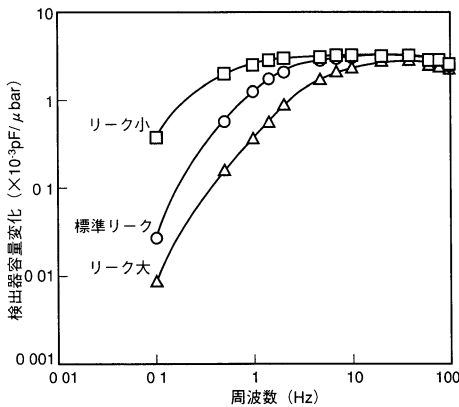


図7 リーク抵抗がコンデンサマイクロホンの周波数特性におよぼす影響
Influence of leak resistance on frequency characteristics of condenser microphone

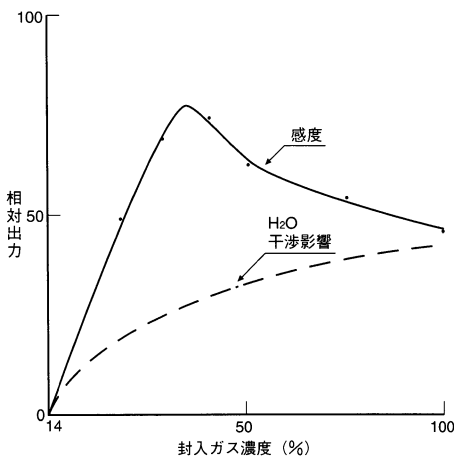


図9 封入ガスの濃度が検出感度と水分干渉に及ぼす影響
Influence of filler gas concentration on detector sensitivity and water interference

$$nR \cdot \Delta T = \Delta P \cdot V + \int Q dt \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで $\int dt \rightarrow \frac{1}{j\omega}$ とすると

$$\left| \frac{\Delta P}{\Delta T} \right| = \frac{1}{(1 + (1/\omega R_L V)^2)^{1/2}} \cdot \frac{nR}{V} \quad \dots\dots\dots(6)$$

図6にコンデンサマイクロホンの周波数特性を示す。

図6に示すように、リーク抵抗 R_L と受光室容積 V によりコンデンサマイクロホンの周波数特性は、高周波数域では一定の出力となり、低周波数域ではリークのために出力が低下することがわかる。

当社の、コンデンサマイクロホンの周波数特性の一例を図7に示す。なおこの測定は、容積一定の圧力室にコンデンサマイクロホンを取り付けて、その圧力室にピストン駆動により圧力変化を生じさせマイクロホンの出力を測定することにより行った。このとき、マイクロホンのリーク抵抗をパラメータとして測定した。この図からも圧力室の容積が一定の時には、コンデンサマイクロホンの低周波数領域の応答性はリーク抵抗により決まることがわかる。

(3)ニューマチック検出器の周波数特性

当社のニューマチック検出器の周波数特性の一例を図8に示す。

本検出器の周波数特性は、コンデンサマイクロホンの特性と、赤外線吸収の特性を重ね合わせたものとなっている。低周波数領域側ではコンデンサマイクロホンのリーク特性のための出力低下が、高域側では赤外線吸収特性からの出力低下がみられる。このように、ニューマチック検出器の周波数特性は、封入ガスの熱容量、等価熱伝導率、および受光室の容積とリーク抵抗などにより決定される。

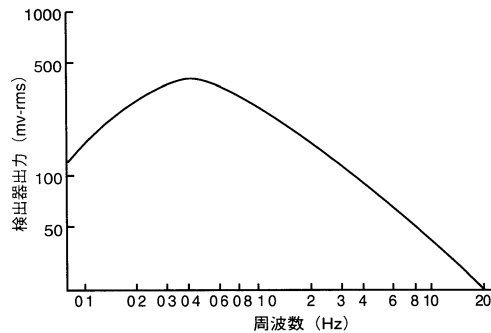


図8 ニューマチック検出器の周波数特性
Frequency characteristics of pneumatic detector

4.2 封入ガス濃度と検出感度

ニューマチック検出器の検出感度は、封入ガス中の赤外線吸収特性、熱伝導率、粘性などによって決まる。とくに封入ガスの濃度は重要であり、検出感度のみならず干渉影響をも左右する場合がある。図9に、封入ガス濃度と検出感度および水分干渉の関係を示す。

4.3 干渉影響

NDIRでは、試料ガス中に目的成分の赤外線吸収スペクトルと重なりあう吸収スペクトルをもつ成分に対しては、干渉影響が現れる場合がある。ニューマチック

検出器を用いても、干渉ガス成分の濃度によっては、測定精度への影響が無視できなくなることがある。このような場合、次に示す方法により干渉影響を取り除いている。

- (1)多層膜干渉フィルタの使用 : 目的成分と干渉成分の吸収スペクトルが重ならない波長領域を多層膜干渉フィルタで選択する。
- (2)ガスフィルタの併用 : 干渉成分ガスを封入したガスフィルタを測定光路中に入れ、干渉成分の吸収スペクトルに相当する波長領域だけを選択的に取り除く。

5. 応用例

当社では、ニューマチック検出器の構造や使用方法の開発・改良をつ常に行い、NDIRによる分析のより一層の高精度化に努めている。以下にいくつかの例を示す。

5.1 補償用検出器による干渉および外乱影響の低減

この方式は図10に示すように2個の検出器を同一光学系に直列に並べて配置する。測定用検出器(MAIN)と補償用検出器(COMP)とから構成され、MAIN側では測定成分(A)と干渉成分(B)の合成信号(A+B)を取り出す。一方、COMP側では(B)を取り出す。これらの信号を増幅し、MAINとCOMPの差を減算器により演算し、目的の測定成分(A)のみの出力を取り出す。

この結果、干渉成分の影響を受けずにきわめて高精度な測定値が得られる。またこの方法によると、振動など外乱影響を取り除くことも可能となり、測定の安定化を一層図ることができる。

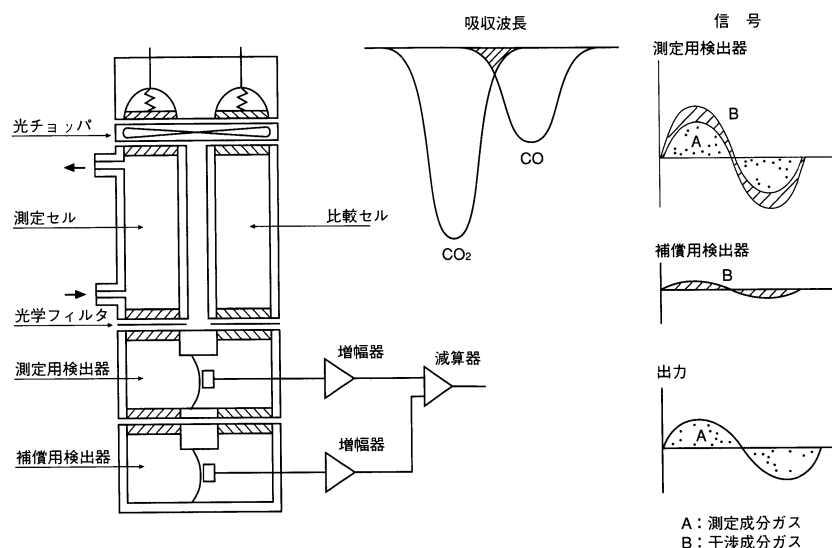


図10 補償用検出器を使ったNDIRガス分析計の動作原理
Principle of operation of NDIR gas analyzer using compensation type detector

5.2 クロスモジュレーション方式

クロスモジュレーション方式の原理を図11に示す。

流体変調方式(サンプルセルに比較ガスと試料ガスを交互に流す)を用いたクロスモジュレーション方式をNDIRに適用することにより、ゼロ点の経時変化がなく(ゼロドリフトフリー)、機械チョッパ方式では必要であった光学調整も不要となった。また複光路形において、2本のセルに交互に試料ガスと基準ガスを流すこ

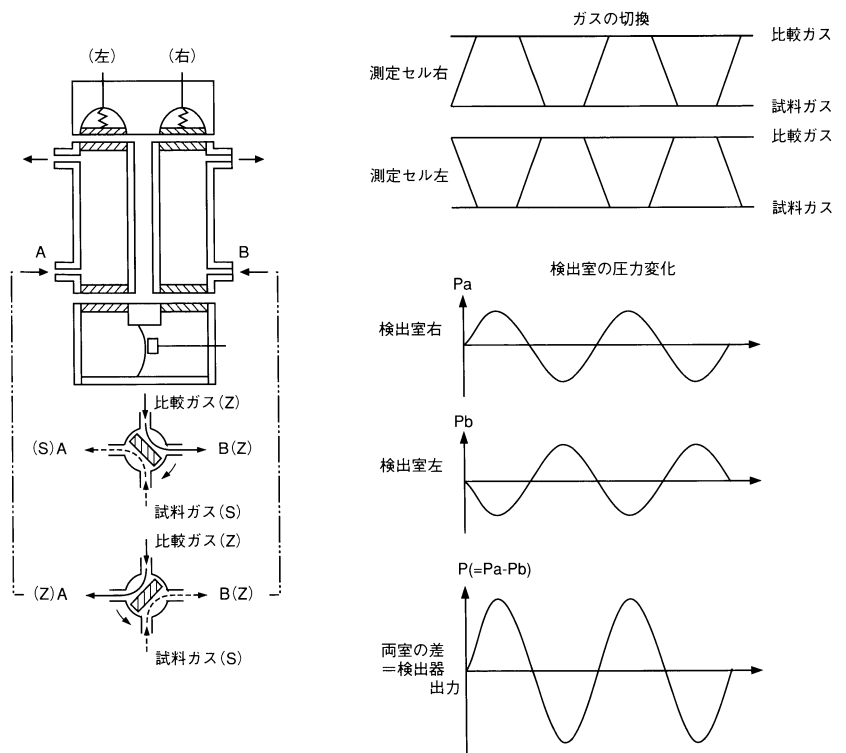


図11 クロスモジュレーション方式のNDIRガス分析計の動作原理
Principle of operation of cross modulation-type NDIR gas analyzer

とで、機械チョッパ方式に比べると約2倍の感度が得られるようになった。さらに比較ガスの工夫により干渉影響をキャンセルすることもでき、測定精度を飛躍的に向上させることができる利点も有している。

5.3 複合検出器

図12に複合検出器の原理図を示す

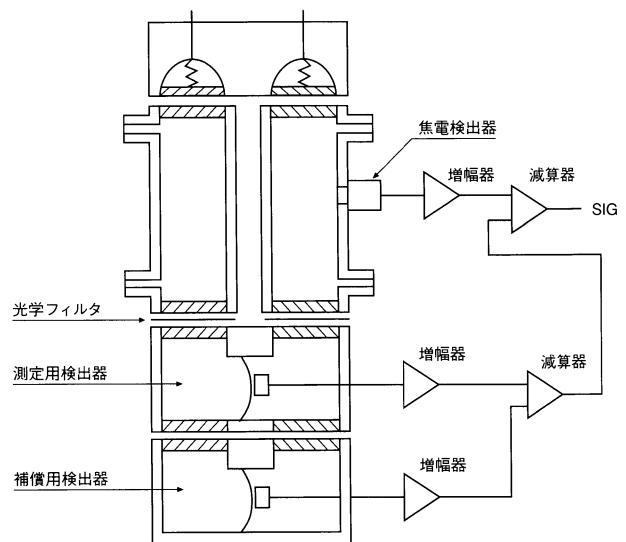


図12 複合検出器を使ったNDIRガス分析計の動作原理
Principle of operation of NDIR gas analyzer using composite detector

煙道排ガス測定など、高濃度のCO₂ガス(最大25%程度)中にある微量のNO(通常10ppm以下)を測定するような場合には、補償用検出器だけではCO₂の干渉影響を完全には取り除くことは困難である。このように測定対象のガス濃度に対して、干渉ガス濃度が2500倍と極端に高い場合の対応として、従来の補償用検出器の使

用に加え，同光学系内に干渉成分であるCO₂濃度のみを測定する焦電検出器を設ける．この焦電検出器の出力を用いて，補償用検出器付ニューマチック検出器との減算を行い，高濃度の干渉ガス中の微量測定成分濃度を安定して測定できるようになった²⁾．図13には，従来の補償用検出器と焦電検出器の付いた複合検出器を用いた干渉影響のデータを示す．

6. おわりに

当社において赤外線分析技術は40年近い歴史を有するが，現在でもその重要性は決して変わっていない．これは，赤外線吸収法の原理的な優位性と，この原理をいかに使いこなせる周辺技術の追求があってこそ，可能であったといえる．このような環境の中で，ニューマチック検出器を始めとする様々な赤外線技術を生み育てている．今後も赤外線吸収法の利点を生し，地球環境問題の解決に貢献できることを願っている．

参考文献

- 1) 今木隆雄，“定点観測用CO₂濃度観測システム”，Readout, No 1, p. 33-39 (1990)
- 2) 佐竹司，他“ガス分析計”，日本国特許公告 平成5年29060



青木 潤次
Junji Aoki

生産技術部 係長
1978年入社
NDIRガス分析計の研究開発に従事

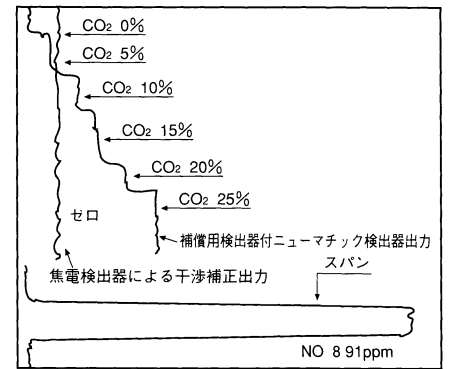


図13 NOガス分析計におけるCO₂ガス干渉影響
Influence of CO₂ gas interference in NO gas analyzer

