

最近の技術から

高速掃引による長光路大気ガス分光分析法

古賀 隆治*・和田 修己*・小坂 恵*・M. BOUZIDI*・佐野 博也**

* 岡山大学工学部 〒700 岡山市津島中 3-1-1

** 福山大学工学部 〒729-02 福山市東村町字三蔵 985

1. まえがき

大気温暖化の恐れに因る、大気中 CH_4 の実態についての研究が始まっている¹⁻³⁾。その一部として、100 m を目安とする広がりの中での大気中微量ガス成分濃度を、実時間かつその場で観測できる手段が要求されている。それに対し筆者らは、鉛塩半導体レーザーが、その波長を時定数 $10 \mu\text{s}$ 程度で連続的に変化させることを利用した大気中の微量成分の分光分析法の開発を続けている⁴⁾。これは、低分子量ガスの共鳴吸収スペクトルを 1 m 前後の短光路上で測定し、それと標準ガスの吸収スペクトルとの相関をマイクロプロセッサで計算する方法である。この精度は大気中 CH_4 に対し 10 ppb 程度と、すでに赤外線検出器の雑音で決まる理論精度近くに達している。これに対し、もっと長い光路を用いればさらによい精度が期待できるように思える。たとえば、 CH_4 の代表的な吸収線の吸収係数 $\alpha = 100 \text{ m}^{-1}$ 、ガス濃度 $c = 1.7 \text{ ppm}$ 、および信号処理上都合のよい光に対する減衰量 $\chi = 10^{-2}$ を仮定すると後出の(2)式で定義される光路長 L には 60 m が要求される。しかし大気中を伝播するレーザービームは大気の密度ゆらぎの影響を受け、ビームの伝播経路が変動する。その結果光ビームに対する透過率は時間につれて不規則に変化する。これをシンチレーションという。すなわち陽炎である。その変動の大きさは、光路長 L とともに増大するので、光路長を伸ばしたからといっても精度は単純には向上しない。

2. 大気のシンチレーション

これについては、かなり古くから研究が行なわれておる、数式モデルも十分に検討されている。図1は、その一例であり、開放大気中の長光路を通過した可視光ビームの強度ゆらぎを実測し、モデルにフィッティングしたものである⁵⁾。この結果の特徴を一言で述べると次のようになる。すなわち、ゆらぎのパワースペクトル密度は、光路長に依存するとともに、あるところから高い周波数では急激に減少する。さらに象徴的にいって、大気

を通過する光ビームを短い時間の間に観測するとゆらぎは見えず、たとえば光ビームは曲がっていてもそれはあたかも凍り付いているかの如くに見える。

この現象を利用する方法がここで提案しようとする、高速・繰返し掃引による分光測定法である⁶⁾。

3. 高速繰返しスペクトル測定法

鉛塩半導体レーザー (Pb-TDL) に幅 $10 \mu\text{s}$ 程度のパルス電流を流すとレーザー素子の温度が上昇し、それにつれて発振周波数が、波数約 2 cm^{-1} ほど連続的に増加 (チャープ) する。これを利用したシステムの概念図を図2に示す。レーザーの出力は、一つのパルス出力期間中にも変化するので、これを赤外検出器 IRD #1で、測定しようとするガスの標準スペクトルを IRD #2で、10~100 m の折返し光路を経た信号光強度を IRD #3で検出する。

これらの信号をそれぞれ P_0 , P_R 、および P_X とする。添字 R は reference の意味で、参照ガスセルに関する量、添字 X は、被測定対象である大気光路に関する量であることを示す。

長い光路を通過した後の信号 P_X は、

$$P_X = \eta_X P_0 \cdot \exp(-\chi) \quad (1)$$

$$\chi = \alpha c_X L_X \quad (2)$$

と表わされる。ここで、 $\eta_X = \eta_X(t)$ は、大気のゆらぎを表わす因子である。その変化の速さはレーザーパルスの時間幅と比べると遅くて、スペクトルの一掃引中は、まったく変化しないものと考える。

これら3種類の信号のさらに対数をとったものを、それぞれ v_0 , v_R および v_X とすると次のように表わされる。

$$v_0 = \ln \{P_0(t)/P_N\} \quad (3)$$

$$v_R = \ln \eta_R \{P_0(t)/P_N\} - \alpha(t)c_R L_R \quad (4)$$

$$v_X = \ln \eta_X \{P_0(t)/P_N\} - \alpha(t)c_X L_X + n \quad (5)$$

ただし $\alpha = \alpha(t)$ は対象ガスの吸収係数で、レーザー周波数がチャープすることにより、時刻につれて速く変化する。n は大気ゆらぎよりはるかに高い周波数成分をもつ雑音である。また、 P_N は用いている電子信号処理系に

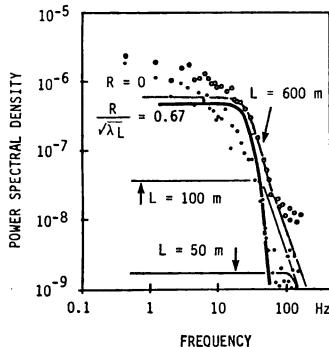
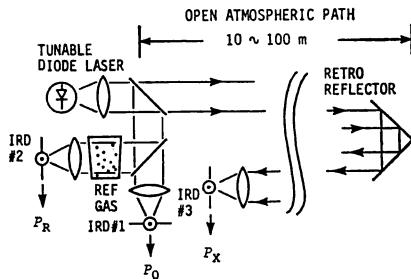
図 1 大気ゆらぎの実験値および理論値⁵⁾

図 2 長光路大気ガス測定システムの概念図

固有の定数である。

以上の3種の信号が得られると、筆者らがかねてより開発してきた随伴スペクトル処理によって大気ガス濃度 c_x を各捕引ごとに知ることができる⁴⁾。この過程で、 η 、 P_0/P_N に関する項は、消去される。この結果、 c_x の値は、大気のゆらぎに無関係となるので、これをさらに累算したものも大気ゆらぎの影響を受けないことになる。

4. ハードウェアによる実現

この原理を実行するためには、10 MHz のバンド幅を有するアナログ信号処理系と、それに見合う速度のディジタル処理系が必要である。筆者らは過去に、自作の実時間ディジタル信号処理装置を用いてこの原理が実用化できることを確認しているが、最近では、超高速 A/D 変換器やデジタルシングナルプロセッサ (DSP) などの大規模集積回路が開発されており、いっそう高性能のものを製作することが容易である。

前記(3)～(5)式の表現ではいわゆるゼロ次の信号を用いているが、このままではレーザー出力の変動のほうが大気ガスの信号に比べて数桁も大きくて電子信号処理系に要求されるダイナミックレンジが過大となり実現不可能となる。二階差分スペクトルを用いるとの問題が解決されることは、すでに CW 駆動方式で経験済みである⁷⁾。

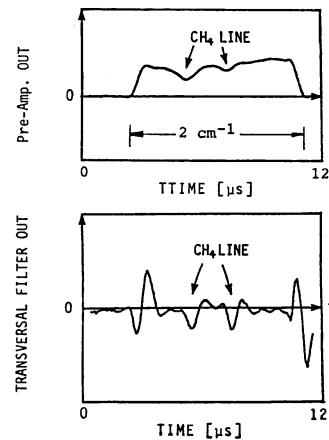


図 3 パルス駆動 Pb-TDL を用いたときの透過光スペクトル(上)とトランスポーサルフィルタを用いて得た二階差分スペクトル(下)
有限整定性のおかげで、レーザーパルスの前後縁に対するメタンガスの吸収線とが分離されている。

しかし、レーザー周波数やチャープを利用したこの方式では、CW 駆動方式のように、高調波法をとれないで、トランスポーサルフィルタを用いて周波数領域ではなく時間領域で直接差分をとる。図 3 に、試作したもの用いて大気メタンのスペクトルの二階差分を得た例を示す。トランスポーサルフィルタの有限時間応答 (FIR) 特性から、メタンスペクトルがレーザーパルスの前後縁の信号の影響を受けていないことが示されている。

5. あとがき

ここで検討している方式が実現できるための条件は第一に鉛塩半導体レーザーの進歩があるとともに、もう一つは、高速に、しかも経済的にディジタル信号を処理できる DSP の普及である。筆者らは、現在、市販のディジタル信号記録装置と、パソコンで駆動される DSP ボードを用いたシステムを試作しその動作の検討を行なっている。

文 献

- 1) 鈴木基之(代表)：文部省科学研究費重点領域研究「人間環境系」研究広報 No. 4, 昭和63年度研究計画概要(1988).
- 2) D. I. Sebacher, et al.: Tellus, 38B (1986) 1.
- 3) A. Holzapfel-Pschorn and W. Seiler: J. Geophys. Res., 91 (1986) 11803.
- 4) 古賀隆治, ほか: 分光研究, 12 (1984) 96.
- 5) A. G. Kjelaas and P. E. Nordal: Appl. Opt., 21 (1982) 2481.
- 6) 古賀隆治, ほか: 第12回レーザセンシングシンポジウム, G11 (1988).
- 7) R. Koga, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 22 (1982) 1883.

(1988年10月15日受理)