

可同調半導体レーザーによる大気ガスの吸収分光測定と シンチレーション

Absorption spectrometry of atmospheric gas with a tunable diode laser and scintillation

古賀 隆治、香川 直己*、和田 修己、王 明、
平岡 孝之**

Ryuji KOGA, Naoki KAGAWA*, Osami WADA, Ming WANG,
Takayuki HIRAOKA**

岡山大学、*福山大学、** 現:(株)東芝

Okayama University, *Fukuyama University, ** Present:Toshiba Ltd.

Abstract : Atmospheric absorption spectrum can be measured free from the scintillation if the laser frequency is scanned within some milliseconds. A measurement apparatus was build and was applied for the measurement of methane density in the open atmosphere. The DSP architecture and over-sampling technique are utilized to exploit the merit of the quick scanning of the laser frequency.

1. はじめに 一酸化炭素、メタンなど温室効果ガスの濃度の消長が地球温暖化のひとつの鍵である。濃度を測定する方法として、波長が連続的に制御でき、かつその早さも時定数にして数 μ 秒と短い鉛塩半導体レーザーを光源とする吸収分光測定法の開発が行われている。筆者らは、特にこの波長掃引の早さに着目し、約4msでメタンの1本の吸収線を掃引し、屋外の開放大気中の100m程の光路上での吸収スペクトルを観測することを試みた。従来から、2次高調波(2f)分光法による準静的な観測で、大気スペクトルが標準ガスセルのスペクトルと一致しないことが関係者の間で問題とされていたが、この事実が再び確認できた。

2. 測定システム 測定に用いた装置は、筆者らの従来からの研究課程で改良を重ねてきたもので、内部では「M14」の呼称を持つ¹⁾。構成をFig.1に示す。

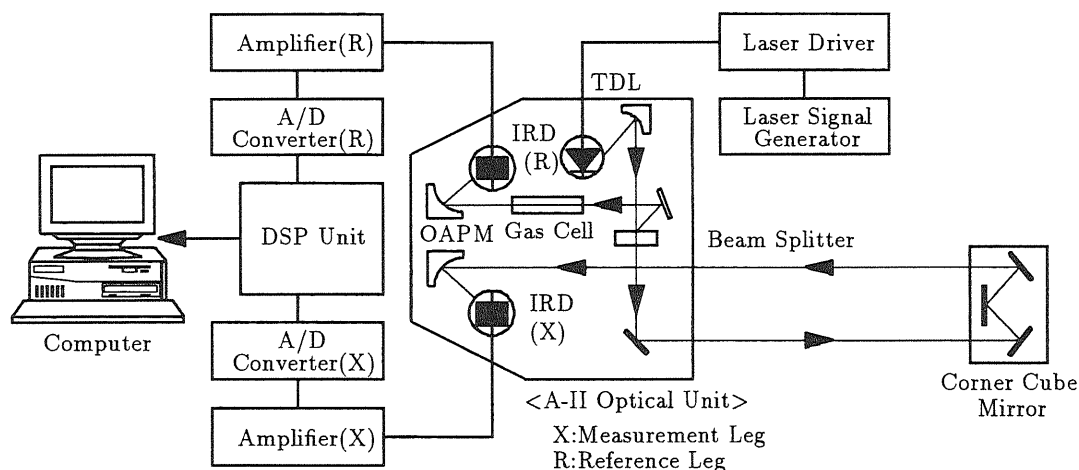


Fig.1 Schematic of M14 system.

[光学系] レーザ素子TDLと赤外線検出器IRDは液体窒素で冷却され、TDLは1mKの精度で温度制御されている。クライオスタットの窓、ビームスプリッタ以外はすべて金コートの表面反射鏡を用いている。これはエタロンフリンジの発生を防ぐために必須である。大気吸収スペクトルと大気圧の標準ガスを充填したセルのスペクトルが同時に測定される複光束システムである。大気中の光路は、直径約70mmの開口を持つコーナーキューブ鏡で折り返されて戻ってくる。

[レーザ駆動と信号処理の方式] 測定するチャンネルは、参照ガスセルについてのものと、大気中光路に対するものとの2チャンネルがあり、同時に測定される。レーザの電流はFig.2のプログラムによって制御され、レーザは32msの周期中4.1msの間だけ発振し、電流値の傾きに従って周波数が掃引される。掃引幅は $0.5\sim 1\text{cm}^{-1}$ である。残りの期間はデジタルシステムによる信号処理に充てられている。

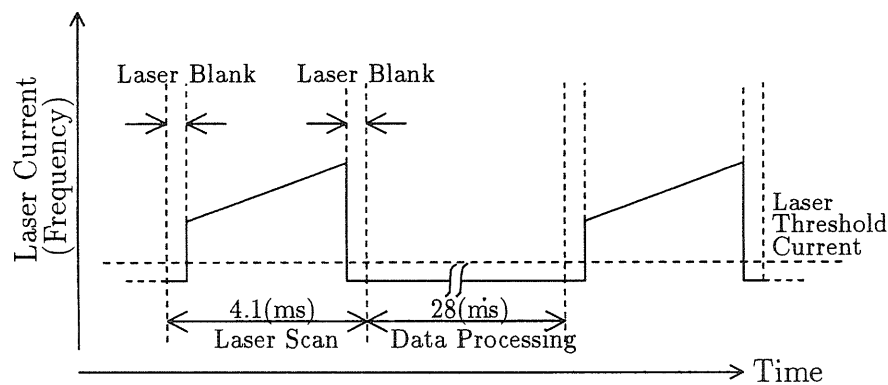


Fig.2 Laser current program.

赤外線の検出にはPVタイプのHgCdTe検出器を用いている。プリアンプ出力は、1MSpsのレートでサンプルされ、8bitデータに変換される。レーザ出射期間4.1msのスペクトルは4096点のデータに変換され、コンピュータを介さず直ちにDSPにより平滑化処理を受ける。データ数は1/16の256点に間引かれ、ビット幅は逆に10bitと量子化誤差は圧縮される。このとき、アナログ回路による帯域制限とは異なり、時間軸上の波形に非対称なひずみは生じない。結果はコンピュータに取り込まれ、レーザ出射前後のゼロレベルを補正した後、対数変換される。得られる量は光路上の光学的厚み（絶対吸収量）のスペクトルである。大気中光路と標準ガスセルの両方について同時に取ったこのスペクトルに対し、随伴スペクトルアルゴリズム²⁾を働かせ、スペクトル干渉を取り除いた上で、ガスセルに封入されたものと同種のガスのカラム濃度が算出される。

このように、単純なサンプリング/デジタル処理を行わず、総合的なサンプリング速度よりはるかに速くサンプリングを行う理由は、IRDから発生する電気信号が、レーザの出力に相当する信号、特にその前・後縁、とその 10^{-2} から 10^{-4} 程度のガス吸収信号が同時に存在し、アナログ回路で実現されるようなIIR特性ではお互いが分離できないことである。このようなオーバーサンプリング処理を行うことにより、非常に広い帯域幅の信号処理をFIR特性を持ったシステムで行い、分離が完全に行える。高速なAD変換器が必要であるという欠点は、デシメーション処理に伴う有効ビット数の上昇により補える。また、回路の設計自由度と再現性が高いことも魅力的である³⁾。

我々のシステムでは、基本サンプリングレートを1MSpsと、比較的遅く取っているがこれを10MSpsあるいは100MSpsと高くすることでいっそうこの効果を高めることが可能である。

3. 実験結果 岡山大学の構内において、往復100mの光路を設定して得たスペクトルの例をFig.3(a)および(b)に示す。

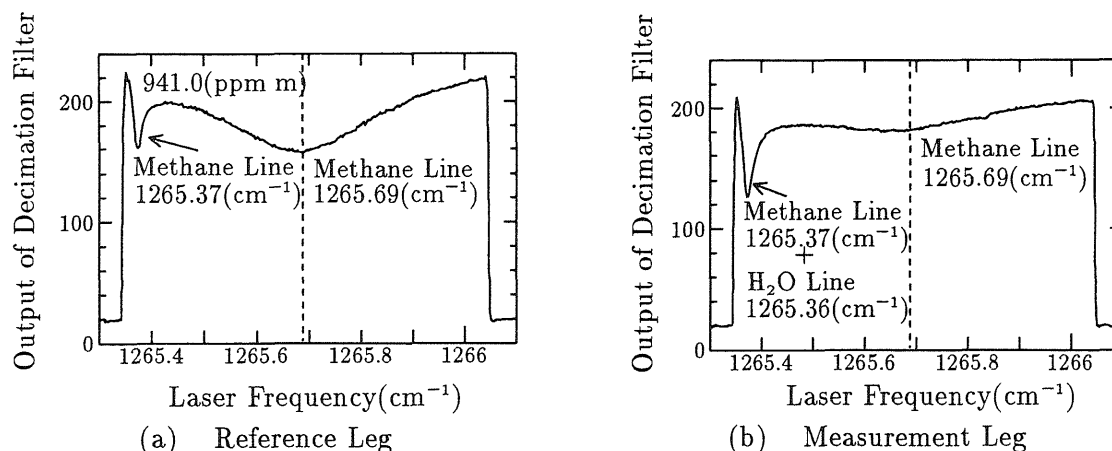


Fig.3 Spectra with 4.1ms scanning period.

前者は、標準メタンガスのスペクトルで、レーザ周波数の立ち上がりパルス前縁付近では急峻なために2本のメタン吸収線のうち左側は右側に比べて幅が狭く見えている。大気スペクトルが(b)であるが、H₂Oの線が重なって見えている。このスペクトルを測定中に観察すると、スペクトルの形状を保ったまま上下に激しく揺れており、大気揺らぎによるシンチレーションの存在と、そのスペクトル特性を実感することができる。このような2枚一組のスペクトル測定を繰り返して得た大気メタンのカラム濃度の経時変化を記録したものがFig.4である。

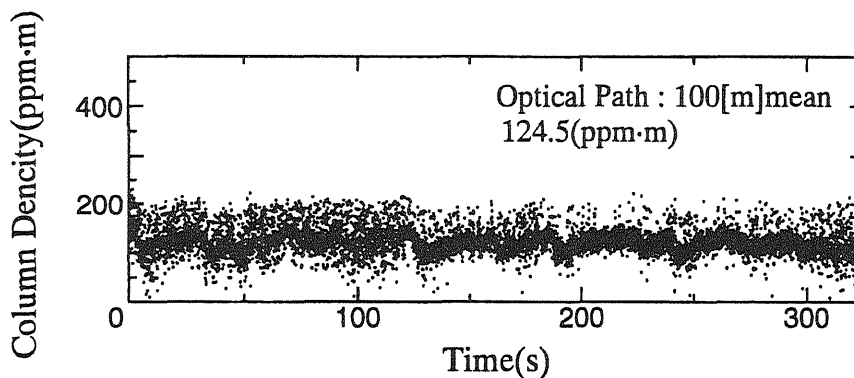


Fig.4 Temporal record of atmospheric methane column-density with 4.1ms scanning period.

メタン濃度の揺らぎには、周波数成分にして0.1Hz以下の成分と、10Hzよりはるかに高い成分とが混在していることが見受けられる。このデータの算出に当たっては、大気揺らぎによる受信光強度揺らぎの成分は随伴スペクトル処理により除去してある。以上の結果に対して、従来通りにゆっくりとレーザ周波数を掃引し、狭い帯域の信号処理を行った場合をシミュレートした結果がFig.5である。

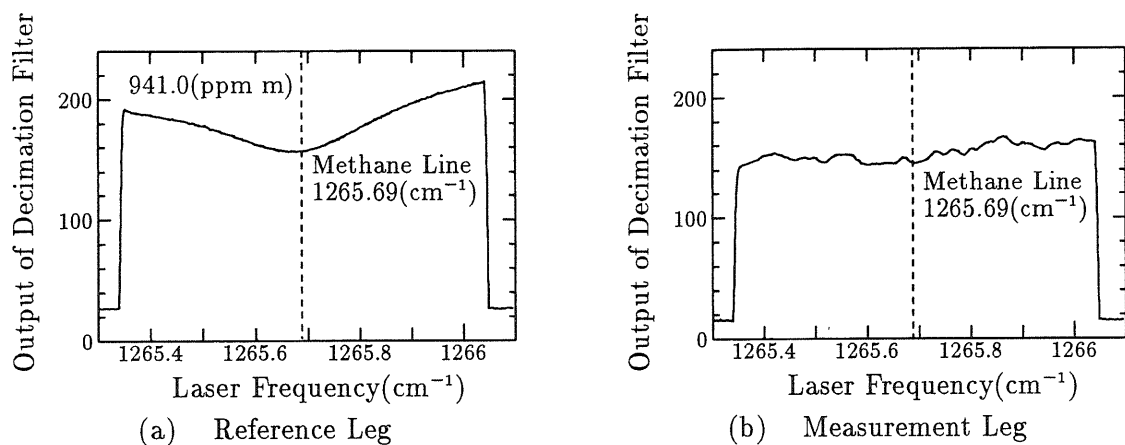


Fig.5 Spectra with 1s scanning period.

大気光路に対するスペクトル(b)は大気揺らぎにより変形し、参照スペクトルとは似ても似つかぬ形となっている。これは、レーザ周波数の掃引時間が大気中のメタンガスのカラム濃度の変化の早さと同程度になったことが主な原因と思われるが、不審な点が多々あり、今後検討せねばならない。この結果からメタンのカラム濃度を算出した結果がFig.6である。

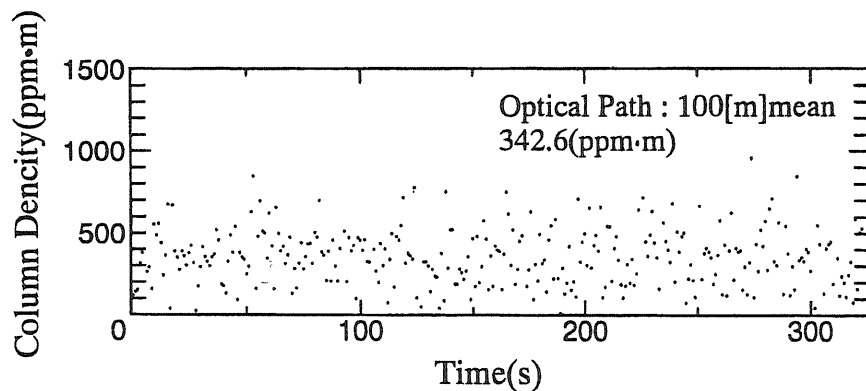


Fig.6 Temporal record of atmospheric methane column-density with 1s scanning period.

先に掲げたFig.4と比べてもほぼ同時に測定したにも拘わらず全く異なる結果となっていることが分かる。

4. まとめ レーザの周波数を、大気揺らぎの特性周波数で決まる時間より短い期間中に掃引することにより、大気揺らぎに影響されないで大気ガスの濃度の時間変化をとらえることを示した。この方式にはデジタル信号処理集積回路 (DSP-IC) の採用が大きく効果を上げた。今後、サンプリング周波数の上昇により更に性能を上げ、大気揺らぎの特性を逆用した新しい計測法を開発できる見込みが立った。

参考文献

- [1] R.Koga *et al.*: Quick scanning spectrometry for atmospheric trace gas monitoring with anti-scintillation performance, SPIE, Vol.2834, p.142(1996, Colorado).
- [2] M.Bouzidi *et al.*: "Adjoint Spectrum I: an Algorithm to Extract Target Spectra Under Spectral Interferences for Use in On-Line Spectrometry", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**,12A, pp.4071-4080 (1992).
- [3] 湯川彰: オーバサンプリング A/D 変換技術, 日経BP社 (1990).