
ポケットブル半導体レーザによる大気汚染気体の 変化姿態の4次元計測に関する研究

Studies on a method for monitoring four-dimensional multiphase
air-pollution dynamics using a portable semi-conductor laser unit

代表研究者 岡山大学工学部教授 佐野 博也
Prof., School of Eng., Okayama Univ. Hiroya SANO

協同研究者 岡山大学工学部助教授 古賀 隆治
Assoc. Prof., School of Eng., Okayama Univ. Ryuji KOGA

岡山大学工学部助手 棚田 嘉博
Instructor, School of Eng., Okayama Univ. Yoshihiro TANADA

岡山大学工学部教務員 小坂 恵
Assistant, School of Eng., Okayama Univ. Megumi KOSAKA

An atmospheric-gas monitoring system was developed as well as its application technologies. Specifications posed on the measuring system were sensitivity, locality, *in situ* and real-time capabilities. The equipment should be small and light for a wide applicabilities.

A derivative absorption spectrometry with a tunable lead-salt diode laser and a short optical path in the open air were employed. Absorption spectra over a specific small spectral width in a mid-infrared region, instead of an absorption on a single absorption line, is involved. This allows a reliable operation to the measuring system. A sensitivity is decided by optical noises which take place as a result of unintended optical cavities formed in the optical system.

Special technologies to suppress optical noises were developed in order to attain high sensitivity even with a short optical path of one meter. A modification of laser-current modulation profile was effective for fine-pitched etalon fringes and a numerical data treatment based on a notion of adjoint spectrum can eliminate an interference from an foreign gas spectra.

An experimental system was build and atmospheric methane was measured for its density both in a laboratory and outdoors. A rapid change which could not be found with any conventional measuring instruments was measured. The sensitivity of the developed system was 0.3 ppm (rms) and a finite settling time of 12 s was demonstrated. The system sizes $0.45 \times 0.45 \times 0.8 \text{ m}^3$ and weighs about 30 kg.

研究目的

汚染気体の発生から、その消滅までの過程はいまだに明らかでない。長時間、あるいは広い空間にわたる大気汚染気体濃度の測定は、すでに実行されてきているが、道路際、工場建屋周辺あるいは室内といった限られた空間の時間経過につれて変動する姿態については、解明が全く進んでいない。その理由は、それに必要な計測手段が存在し

ないという理由によるためである。

このような事態から脱するためには、大気中微量気体に対し、高感度、実時間測定、局所測定、非接触測定の特性を有し、更に携帯可能であり、小型・軽量な形にまとめ得る計測方法を実現し、これを有効に用いて大気中微量ガス成分の空間・時間的变化を追跡する技術の確立が重要である。この両者を追求することが本研究の目的である。

る²⁾。発振波数は、レーザ媒質の波数-利得曲線と、屈折率-幾何学的形状で定まる縦モード条件で決まり、駆動電流を増加させると発振波長はある範囲までは連続的に変化し、それを超えると次の縦モード条件を満足するところへ跳躍 (hop) する。発振波数は一つとは限らず、複数の縦あるいは横モードで同時に発振する場合もある。駆動電流に正弦波状の振幅変調を加えたとき、レーザの発振波数は波数変調 (FM) を受けるが、Fig. 3 は、その周波数特性を測定した結果の一例である。この場合、1次遅れモデルで近似した場合の折れ線周波数は 16 kHz、時定数にして 9 μ s であった。これより高い周波数で駆動電流を変調すると、発振光は振幅変調は受けるが周波数変化の幅は小さくなる。

(2) レーザ導関数分光法の開発(発表論文 10, 11, 13)

白色光源を用い、分光器のスリットを振動させ、これに同期したロック・イン増幅器を使用する、導関数分光法は、大きくてブロードな背景スペクトルに埋れた、小さいが鋭い吸収線を強調して与える方法として重用され、実験的のみならず、解析的な研究^{3), 4)}も行なわれている。分解能を上げ、この識別能力を高めるには、スリット幅を狭くしなければならないが、そうすると白色光源を用いたのでは利用できる光パワーが落ち、貴重な赤外光パワーを利用できなくなるので限界がある。

半導体レーザの出力光のスペクトル幅は 6 MHz という報告⁵⁾もあるように極めて狭く、メタンガスの常温におけるドップラー広がり約 67 MHz、常温常圧における圧力広がり約 0.1 cm^{-1} であるのに比べると完全な線スペクトルと考えても差つかえなく、また、輝度も高いから発生した光パワーの大部分を利用することが可能である。また、理論的解析と実験結果との対応がつけやすい。

筆者らは、鉛塩半導体レーザを光源として導関数分光法を実現する電子回路を開発するとともに、有害なスペクトル雑音の影響を定量的に解析する手段として d -空間の概念に到達した。

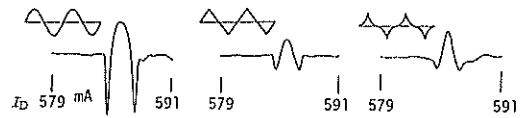


Fig. 4. An experimentally obtained instrumental function of a diode-laser second-derivative spectrometer. The laser-current modulation profiles are sinusoidal, triangular and repeated hyperbolic sinusoidal.

一般に分光装置を用いて得られる見かけのスペクトル $S_a(\nu)$ と真のスペクトル $S(\nu)$ との関係は装置関数⁶⁾ $H(\nu)$ を用いて、

$$S_a(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu - \eta) S(\eta) d\eta \quad (1)$$

と表される。Fig. 4 は実際に、 $H(\eta)$ を実験的に測定した例である。レーザの FM 振幅は約 0.04 cm^{-1} である。試料はメタンガスで常温、圧力は 10 m Torr で吸収線の形状はドップラー限界に近く、半値全幅はおよそ $3 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ であるから式 (1) における $S(\nu)$ は、デルタ関数と考えて差つかえない。したがって、得られた見掛けのスペクトル $S_a(\nu)$ が、すなわち装置関数である。この場合、レーザ電流の変調波形によりこの装置関数の形状が変化する点が重要である。

d -空間とは筆者らが仮りに名付けたものである。通常のスเปクトルは、長さの逆数のディメンジョンを持つ波数の関数として表されるが、これのフーリエ変換は長さのディメンジョンを持つ量 d の関数である。この空間では (1) 式の右辺は $H(\nu)$, $S(\nu)$ のフーリエ変換の積で表され、その分光装置の妨害スペクトルに対する応答は $H(\nu)$ のフーリエ変換により定量的に表される。

(3) Lambert-Beer の法則と随伴スペクトル (発表論文 10, 13)

単色で平行なレーザ光束が、濃度 c のガスを含む大気中を距離 L だけ進むとき、その前後のパワー P_1 および P_T は、Lambert-Beer の法則により⁷⁾ 次式で表される。すなわち、

$$P_T(\nu) = P_1(\nu) e^{-\tau(\nu)} \quad (2)$$

ただし、 ν はレーザ光の波数、 τ は絶対吸収量で

$$\tau(\nu) = cL \cdot \alpha(\nu) \quad (3)$$

で与えられる。 $\alpha(\nu)$ はこのガス種に固有のスペクトルである。分光装置で(3)式の $\tau(\nu)$ を観測する場合には必ず雑音が入り

$$\tau(\nu) = cL \alpha(\nu) + \beta(\nu) + n \quad (4)$$

なる形のほうが適當である。 $\beta(\nu)$ は干渉スペクトル、 n はランダム雑音である。もし、 $S(\nu)$ が正確にわかっているならば、

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} S^*(\nu) \beta(\nu) d\nu = 0 \quad (5)$$

なる性質を持つ別のスペクトル $S^*(\nu)$ により、 ν を ν_1 から ν_2 まで掃引して得たスペクトル $\tau(\nu)$ に対して、

$$cL = \frac{\langle S^*, \tau \rangle}{\langle S^*, S \rangle} \quad (6)$$

なる計算から、計測しようとするガスの濃度・距離積 cL が求まる。ただし、記号 $\langle \rangle$ は式(5)で定義される二つのスペクトル間の内積を意味する。

もし、 $\beta(\nu)$ があらかじめわかっている複数のスペクトルの線形結合であるならば、これらを正規直交化した $U_j, j=1, \dots, J$ を用いて

$$S^* = S - \sum_{j=1}^J \langle S, U_j \rangle U_j \quad (7)$$

により同じ効果が得られる。この S^* を随伴スペクトルと名付けた。

(4) 光学系の開発

開発した光学系の原理を Fig. 5 に示す。レーザを発生した光はビーム・スプリッタにより分けられ、被測定ガスと参照ガスの両者のスペクトルが同時に得られる。参照ガスのスペクトルはそのま

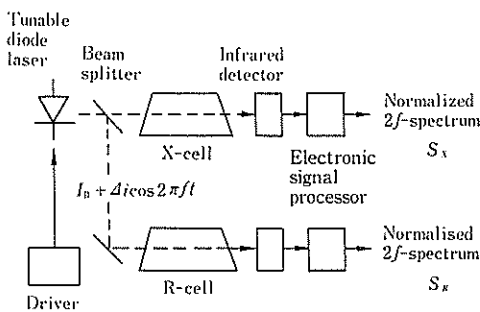


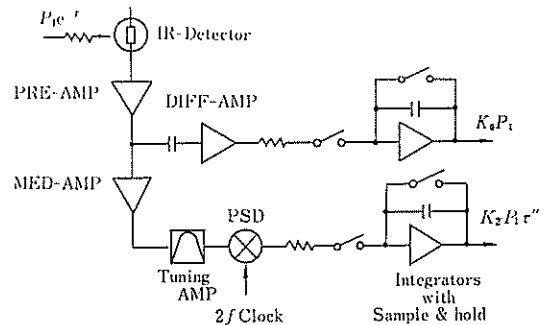
Fig. 5. A schematic diagram of the double beam absorption spectrometry system.

ま(7)式の S として用いられる。このような構成をとることにより、レーザ光の波数のゆらぎ、レーザ電流との対応の長期変動などの影響を極めて小さくすることができる。また、レーザ電流の掃引も一方である必要はなく、飛び越し走査あるいはランダムな走査を用いることも可能である。

(5) 電子回路

レーザ発振の駆動電流に対する応答は極めて早く、また、HgCdTe 光伝導型赤外検出器の応答は実測の結果、約 $2 \mu s$ であった。この赤外検出器は、赤外光の入射による抵抗変化を利用するものであるから、入射光のパワーを知るためにはなんらかの方法でこれを一時的に遮断し、出力から暗電流や背景光による成分を差し引かねばならない。このシステムではレーザ駆動電流を $2 \mu s$ だけ遮断し、そのとき赤外検出器の出力にはパルスが現われ、その波高値は入射光パワーに比例することを利用している。

導関数分光法を実行するために、赤外検出器出力は、ロック・イン増幅器を用いて処理される。システムの制御と信号処理を、オンラインのマイクロプロセッサで行なわせるために、位相検波回路の後を、サンプル・ホールドとクリア機能の付いた純粋な積分器としている。一度データを計算機へ送出した後、この積分回路はただちにクリアされるので、高速な波長掃引を行なっても得ら



P_1 : Incident optical power
 τ : Absolute absorption of target gas
 K_0, K_2 : Coefficient of electronic system

Fig. 6. A schematic block-diagram of the electronic signal processor.

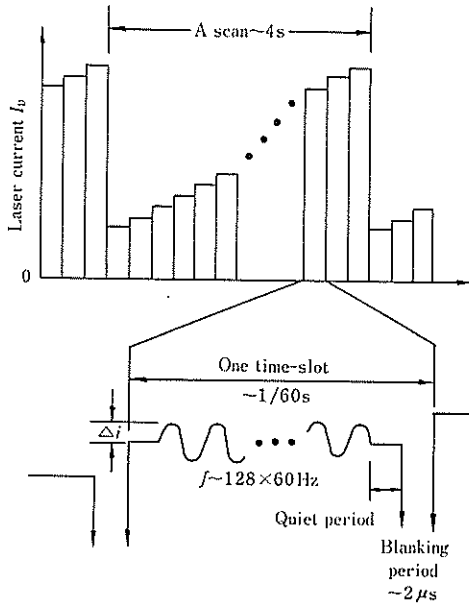


Fig. 7. Laser current program.

れたスペクトルの形状がひずむことはない。

赤外線検出器の出力は前置増幅器を経た後、ロック・イン増幅器と波高検出回路に分けられる。(Fig. 6)

レーザ電流の制御プログラムを Fig. 7 に示す。レーザ電流は、基本的には直流値 I_D と周波数 f 、振幅 Δ の周期波形 i_m の和である。 I_D はレーザ波数の中心値を定め、 i_m は導関数分光法のため

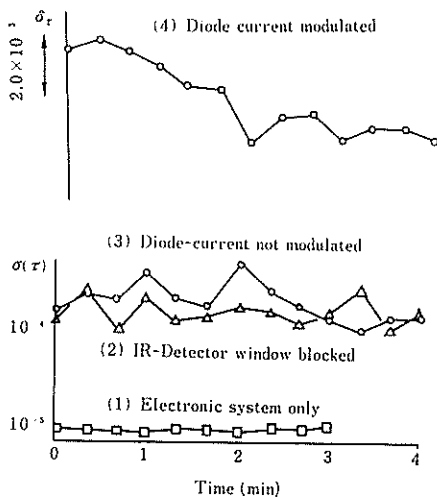


Fig. 8. Noises from various stages of the system.

のものである。

直流値 I_D は商用電源に同期した $1/60$ s の幅を持つ階段状に変化し、スペクトル掃引を行なう。レーザ電流は各段の最後に $2 \mu\text{s}$ だけ遮断される。

(6) 雑音特性 (発表論文 11, 13, 14)

雑音の種類と大きさを知り、ガス濃度測定の際の限界を知るための測定を行なった。Fig. 8 がその結果である。4本の曲線は、それぞれ次の状態での結果である。(1) 赤外線検出器を、これと同じ内部抵抗を持つ金属皮膜抵抗器で置き換えた。この結果は電子装置の内部雑音を示す。(2) 赤外線検出器を接続したがレーザを動作させなかった。(3) レーザに直流電流 I_D を印加したが変調 i_m をかけなかった。これらの結果は、赤外線検出器の内部雑音の大きさを表し、レーザ光の強度についてのゆらぎはこれに比べて小さいことを示す。曲線(4)はレーザ電流に変調をかけた場合で、上の三つと比べると極めて大きなドリフトを示している。これは、レーザ波数に変調を受けたために、レーザから赤外線検出器までに至る光路の光透過率のスペクトルの細い変動が強調されて現われたものである。これを光路雑音と呼ぶことにする。曲線(4)に相当する信号の自己相関係数を計算したものが Fig. 9 である。これからわかるように光路雑音は白色ガウス雑音とは明らかに異なる動特性を持ち、長い時間、積分平均化してもゆらぎの大きさは抑圧されない。また、周期的時間変化も認められる。

本システムではレーザから赤外線検出器に至る光路上に数多くの光学素子が配置されている。す

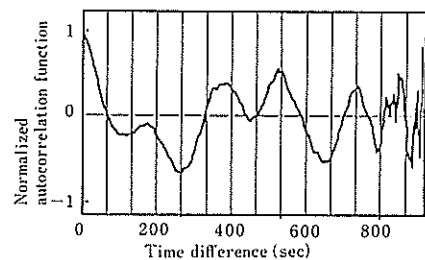


Fig. 9. Autocorrelation function of the optical noise.

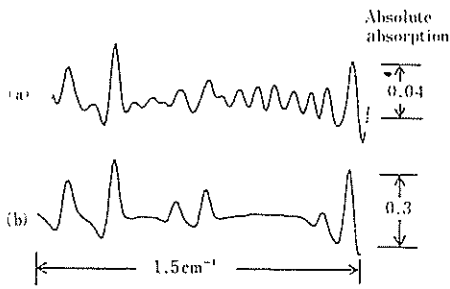


Fig. 10. An etalon-fringe superimposed on a methane spectrum. The fringe comes from a cavity between the laser and the first collimating lens.

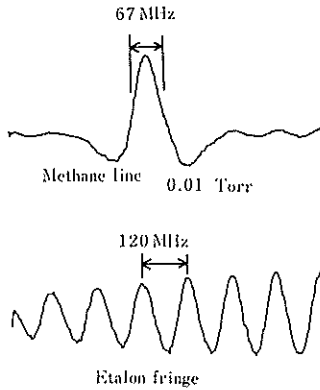


Fig. 11. A fine pitched etalon fringe which arises between the laser and the ir-detector. A Doppler-limited line profile of methane is associated.

すべての光学素子には表面が存在し、その任意の2組は、たとえ Q は小さくとも、光学的キャビティを形成し、これが光路雑音の原因となる。これは分光用のエタロンと同じメカニズムによるものであるから、エタロンフリンジ (EF) と呼ぶ。特に顕著なものは、レーザと最初のコリメート用レンズの間、およびレーザと赤外線検出器の間に発生するものである。Fig. 10 は前者の例を示す。(a) はメタンガスのスペクトルに周期的形状のEFが乗っている。(b) はEFを含まないメタンガスのスペクトルである。Fig. 11 はレーザと赤外線検出器の間に発生したEFで、参考のためにドップラー限界の 10 m Torr メタンの吸収スペクトルを並べてある。

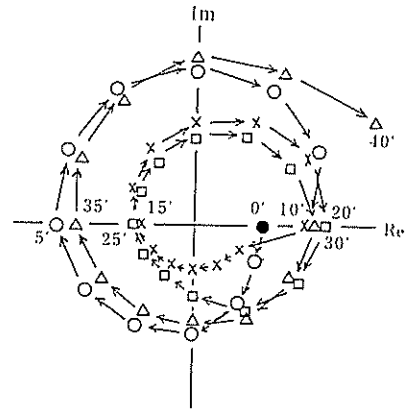


Fig. 12. A temporal trace of a selected mode of the etalon fringe.

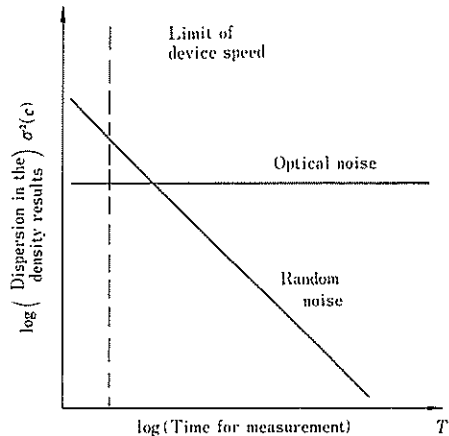


Fig. 13. A conceptual relation between noises and the time for integration.

これらのEFは数多くのモードから成り、一つ一つのモードについては振幅はあまり変化せず、位相のみがゆっくりと変化するような動きをする。実際のEFを1.7秒ごとにとり、それをフーリエ変換し、特定のモードのみを取り出してその振幅と位相を時間の順にプロットしたものがFig 12である。この変化は、レーザを支持するデュワービンの中で液体窒素が気化するに従って液面が下り、中子が熱膨張してレーザが移動すると仮定した計算値と一致する。

以上で述べたように、ランダム雑音は時間 T だけ積分すると \sqrt{T} に反比例して抑圧されるが、

光路雑音は全く抑圧されない。この関係を示すものが Fig. 13 で、これから二つの直線の交点がこのシステムの最適動作時間を与える。実測値を当てはめるとこれは約 4.7 ms であった。

(7) レーザ電流波形の制御によるエタロンフリンジの抑圧 (発表論文 15, 17)

先に (2) で、レーザ電流の変調波形を変えることにより、装置関数の形が変わることを示した。この事実は解析的にも説明がつく。Fig. 14 は正弦波と双曲線正弦波の変調を行なう場合について、装置関数を計算したものである。Fig. 15 はこれらの変調波形を用い、Fig. 11 に示すものと同じエタロンフリンジ (EF) が抑圧される様子を示す。図中には、参考のために大気圧のメタンガスの 1 本の吸収線が重ねてある。この効果は、EF のピッチが変調振幅より小さいほど著しい。

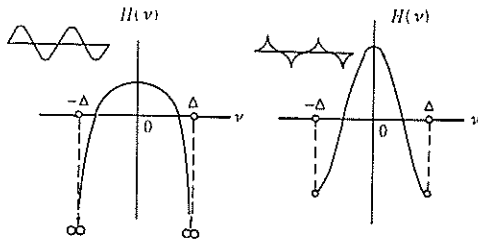


Fig. 14. A theoretically given instrumental function of the second-derivative spectrometry.

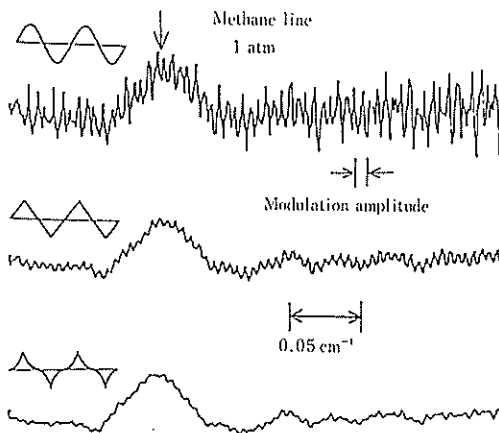


Fig. 15. Effects of the control for the laser-current modulation profile.

Fig. 16 は 3 種類の変調波形について、変調振幅を広げると EF の見掛けの振幅が減少してゆき、その速さは正弦波形よりも双曲線正弦波を用いるときの方が急激であることを示している。

従来、導関数分光法が効果的であることの説明は、事例を述べるのみで統一的な理論展開がなさ

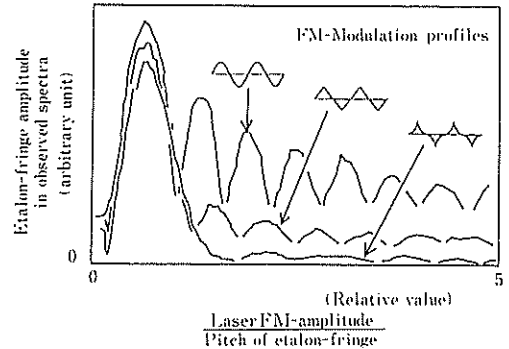
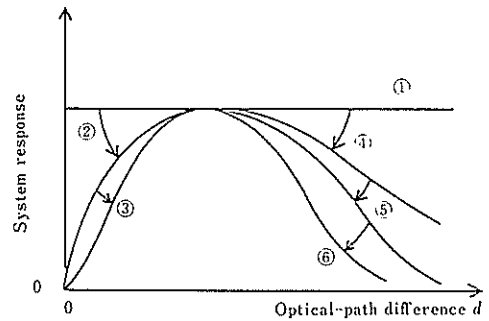
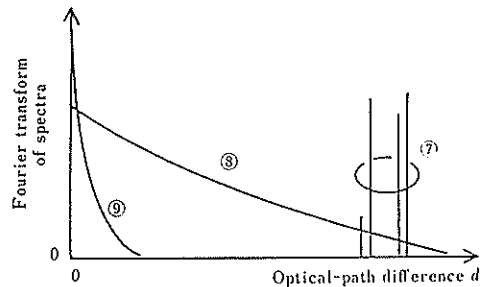


Fig. 16. Change of etalon-fringe suppression as a function of modulation amplitude.



(a) Response spectra in d -space



(b) Target and interfering spectra in d -space

Fig. 17. A conceptual responses of the system and noise spectra in d -space.

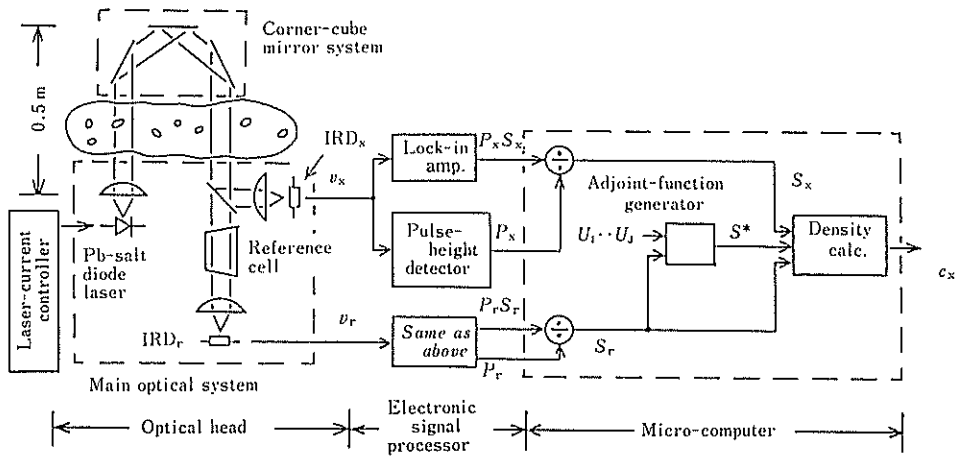


Fig. 18. Block diagram of the system.

れたことはなく、極めて難解であった。これに対し、(2)で説明した d -空間の概念を用いると明りょうな説明が可能になる。Fig. 17 (a) は d -空間における分光測定システムの応答を示し、これは装置関数のフーリエ変換に他ならない。①は無限に細いスリットを持つ、通常の分光器の応答である。

導関数分光法を用いることにより、 $d=0$ あるいは、なだらかな形を持つスペクトルに対しては感度を持たない (②)。また、極めて高 d 値の、あるいは極端に細く変化するスペクトルに対しては一種の平均化作用を有し、感度が下る (④)。この傾向は変調波形を正弦波から、三角波 (⑤)、そして双曲線正弦波 (⑥) と変更するにつれ、いっそう強められる。随伴スペクトルの概念に基づく数値データ処理により、低 d 値の干渉スペクトルを排除する能力はいっそう高められる (③)。干渉スペクトルとして考えられるのは、(b) に示すような EF (⑦) と平坦なスペクトル形状を持つ窓の汚れなど (⑨) である。EF は周期形状を有するから d -空間では線スペクトルとなり、その d 値はキャビティを構成する 2 枚の反射面間の距離に正確に一致する。干渉スペクトル (⑦) と (⑨) の間に十分な間隙が存在し、そこで対象気体のスペクトル (⑧) が十分な振幅を有する時に、上記の二つの干渉スペクトル排除技術が効果を発揮する。

(8) 可搬計測システム (M6 システム) の開発

野外での大気ガスの、その場計測を可能にするために、可搬計測システムを製作した。Fig. 18 はそのブロック図、Fig. 19 は光学系の写真である。このシステムの特徴は、小型・軽量化を計るためにコーナ・キューブ (C. C.) 鏡系を採用したことである。C. C. 鏡系は小さな基板上に設置され、他の光学素子は別基板上に登載されている。二つの基板の間は簡単な棒で接続されている。C. C. 鏡系は、平行光束が入射するとき、常にこれと平行な光束を反射する性質がある。この性質を利用すると、主軸には高い剛性が不要でない。したがって、軽い光学系を作ることが可能で、光束を折り返すことにより小型になる。

このシステムの外形寸法は、 $0.45 \text{ m} \times 0.45 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 、重量約 30 kg である。光路長は 1.25 m である。

2. 大気中メタンガス濃度の測定

2.1 室内実験

M6 システムについて、その性能を調査するための各種の実験を行なった。Fig. 20 は、高濃度の測定を行ない安定性を調査したものである。試料ガスは 958 ppm の較正用ガスを長さ 20 cm のセルにつめたものを用いた。この場合、レーザーはマルチモード発振するものを用いたのでレーザービ

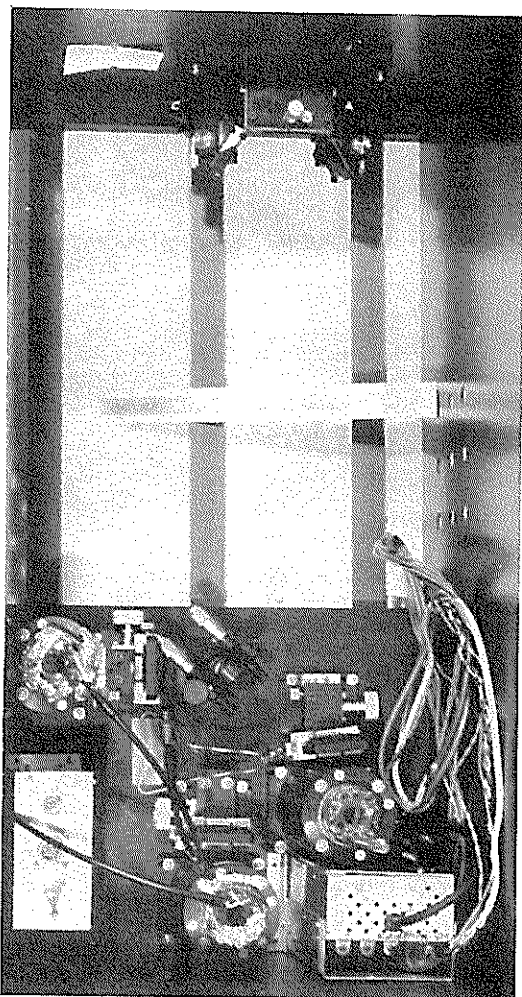


Fig. 19. The optical head.

ームには異なる波数と偏波方向の成分が含まれている。光学系には強誘電体のビームスプリッタを用いているので試料ガス側と参照ガス側でレーザー光のスペクトルが異なり、それがさらに時間の経過につれて変化する。その影響がこの図に残っている。随伴スペクトルによるデータ処理を行わず、フロッピーディスクに残されたスペクトルから、ロック・オン法を模擬した数値実験の結果も併せて示してあるが、数値の安定性に格段の差が見られ、随伴スペクトルの効果が明らかである。

レーザーをシングルモード動作をするものに取り替えたときの結果が Fig. 21 である。当然ながら

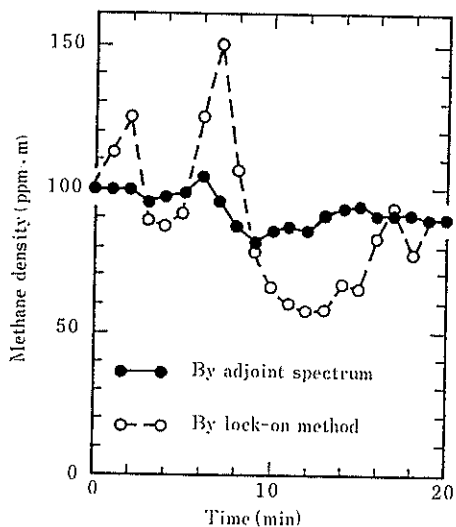


Fig. 20. Temporal trace of methane density. The correlational method shows a better performance than the lock-on method. A multimodal laser is employed.

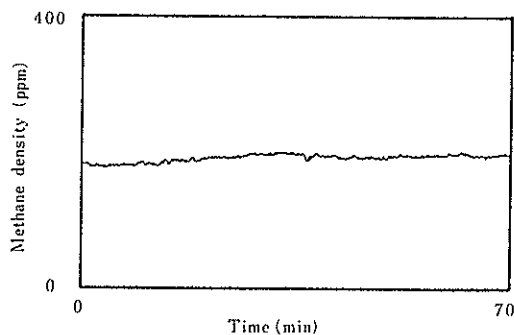


Fig. 21. A temporal trace of methane density with a mono-modal laser.

Fig. 20 に見られる大きな変動はなくなった。このレーザーのマルチモード動作による測定値の変動は、真の濃度に対する係数の変化という形で現れ、低濃度ガスを測定する場合にはあまり問題にならなくなる。

本システムは1スペクトルを256点のデータで表し、1データは1/60sごとに得られる。したがって1スペクトル掃引は4.2sで終了し、残り約2s内にマイクロプロセッサで濃度計算が行なわれる。したがって、ガス濃度がステップ状に変

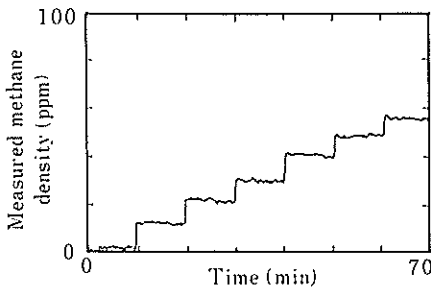


Fig. 22. Step response of the system.

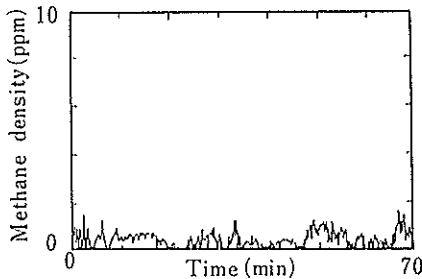


Fig. 23. Atmospheric methane density in a laboratory.

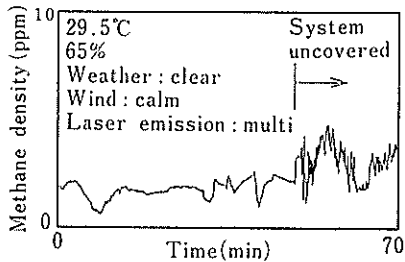


Fig. 24. Outdoor atmospheric methane density.

化した場合でも 1 掃引とばして次の結果は正しい値を示し、整定時間は 12.4 s ということになる。Fig. 22 は、実験結果を示す。光路中にガスセルを置き、小型ポンプで内部の空気が循環するようにしておく。ときどき、注射針で純粋メタンを微量ずつ、素早く注入してこの実験を行なった。Fig. 23 は実験室内での大気中メタンガス濃度を計測した例である。平均値 0.7 ppm, ゆらぎは 1.7 ppm (P-P), 0.3 ppm (rms) の結果が得られている。Fig. 24 は、マルチモードレーザを用

いた例である。大気のゆらぎの影響を避けるために、最初はポリエチレン膜で光学ヘッドを密封し、途中からそれを取り払った。それまでの測定値のゆらぎは、レーザのマルチモード動作と、エタロンフリンジの影響によるものと思われる。ポリエチレン膜を取り去った後に現れた速い変動は、実験室大気中のメタンガス濃度の変化を示している。

2.2 屋外実験

M6 システムは、光学ヘッド、電子信号処理システム、マイクロプロセッサ、電源部が別になっており、その間はケーブルで接続されている。これを大学構内の芝生上に置いて測定を行なった。測定値は激しく変動しており、ときどき負の方向へ振れている。測定の終わりに光学ヘッドをポリエチレン膜で密封した結果も大きく動いていることから、これはレーザのマルチモード動作のためと思われる。

この例にみられる極めて速い大気中のメタンガス濃度のゆらぎは、従来の計測装置ではとても追従できない速さを示している。

3. 研究成果のまとめ

大気中の希薄ガス濃度を、高感度、実時間、局所的、非接触的に計測する装置を開発した。特にメタンガスを対象として各種の計測を行ない、実験的に 0.3 ppm (rms) の精度を持ち、これはエタロンフリンジによって決定されること、レーザとしてはシングルモードレーザが必要であることを知った。また、大気中メタンガスの濃度は、従来のガス計測装置では到底追従できないほど速く変動していることもわかった。

試作したシステムの光学ヘッドの大きさは、 $0.45 \times 0.45 \times 0.8 \text{ m}^3$ で、重量約 30 kg であった。他の部分の大きさ、重量とともにこれらの大きさは、さらに小型・軽量化が可能である。

4. 今後の課題

最初の可搬モデルとして M6 システムを試作したが、応用性を拡大するためにはいっそう、小型・軽量化し、かつ、エタロンフリンジを抑圧して高感度化しなければならない。このためには、光学系に、軸外し凹面鏡、ランダムパターン・ビ

ームスプリッタを採用し、全体を再設計する必要がある。

さらに小型化し、NO, NO₂などの短波長域に吸収帯を持つガス種の測定を可能にするためには、レーザをパルス動作させる必要があり、電子回路の方式からの開発が望まれる。

なおこれらの機器開発と並行し、それぞれの段階に応じた方法で、本研究の最終目標とする大気汚染の変化状態の刻々の状況の追跡を行ない、大気汚染対策のための基本的データの収集が可能であり、時宜に応じた社会的責任を果たすことができると思われる。

文 献

- 1) 権田俊一, 竹内延夫, 植田隆一: 微小ギャップ半導体レーザの開発と今後の課題—大気汚染気体検出システムへの応用—, 電子工業月報, 20, [5] 16-27 (1978).
- 2) 篠原 (富士通研(株)) の測定による.
- 3) D. T. Williams and R. N. Hager Jr.: The Derivative Spectrometer, *Appl. Opt.*, 9, 1579-1605 (1970).
- 4) R. N. Hager and R. C. Anderson: Theory of the Derivative Spectrometer, *J. Optical Soc. America*, 60, 1444-1449 (1970).
- 5) A. S. Pine and K. W. Nill: paper presented at the IX International Quantum Electronics Conference, Paper G2, Amsterdam, The Netherlands, 14-18 (June 1976).
- 6) 吉永 弘 (編): 応用分光学ハンドブック, 朝倉書店 (1973) p. 543.
- 7) 同上, p. 960.

発表論文

- 1) 佐野, 古賀, 棚田, 小野: レーザによる大気汚染検出のための光パルス計測法, 照明学会誌, 61 [3], 159-166 (1977).
- 2) 古賀, 棚田, 佐野: パルス動作レーザによる大気汚染測定のための数値フィルタ, 分光研究, 27, [4] 297-303 (1978).
- 3) H. Sano, R. Koga, Y. Tanada and M. Kosaka: A Notion of Adjoint Spectrum in the Application to Air-Pollution Monitoring, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, 13, 195-207 (1979).
- 4) H. Sano, R. Koga, Y. Tanada and M. Kosaka: A performance Analysis for an Air-Pollution Monitoring Using a Pulsed Dye Laser, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, 13, 195-207 (1979).
- 5) 佐野, 古賀, 棚田, 小倉: パルス動作可同調レー

ザによる大気汚染測定システム, 電子通信学会論文誌, J61-C [11] 743-744 (1978).

- 6) 佐野, 古賀, 棚田, 小坂, 岡田: パルスレーザ光を用いた共鳴吸収法による混在ガスの分析について, 応用物理, 48, [9] 836-841 (1979).
- 7) 古賀, 棚田, 佐野: 可同調レーザによる複合大気汚染の局所的計測法—測定精度の検討—, 計測自動制御学会論文集, 15 [7] 947-952 (1979).
- 8) H. Sano, R. Koga and M. Kosaka: Absorption Spectrum Measurement for Atmospheric Level Nitric Monoxide in γ -0 Band and Its Density Deduction, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, 14, [1], 55-60 (1979).
- 9) 永瀬, 古賀, 小坂, 佐野: 半導体レーザ接合部温度時定数の測定法, J63-C, [5], 317-318 (1980).
- 10) R. Koga, S. Nagase, M. Kosaka and H. Sano: Fast Spectrometry System with Using Tunable Laser Diode, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, 15, [1], 47-60 (1980).
- 11) R. Koga, S. Nagase, M. Kosaka and H. Sano: Accuracy and Etalon Fringe Phenomena in Methane-gas Spectrometry Employing Tunable Diode Lasers, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, 15 [2], 79-92 (1981).
- 12) Y. Tanada and H. Sano: Smoothing of Impulsive Noise by Orthogonal Transform, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, 15, [2] 69-77 (1981).
- 13) H. Sano, R. Koga, M. Kosaka and K. Shinohara: High Sensitivity Short-Path Monitoring of Trace-gases Employing a PbSnTe Tunable Diode Laser, *Jap. J. Appl. Phys.*, 20, [11], 2145-2158 (1981).
- 14) H. Sano, R. Koga, M. Kosaka and K. Shinohara: Utilization of the Tunability of the Lead-Salt Diode Laser for a Fast and Local Measurement of Specific Gas-Density, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, IM-31, [1], 66-69 (1982).
- 15) R. Koga, M. Kosaka and H. Sano: Improvement of Etalon-Fringe Immunity in Diode-Laser Derivative Spectroscopy, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, 16, [1], 21-30 (1982).
- 16) R. Koga, M. Kosaka and H. Sano: A Fast Local Monitoring of Dilute NO by a Tunable Laser, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, IM-31, [2], 91-96 (1982).
- 17) H. Sano, R. Koga and M. Kosaka: Atmospheric Gas Monitor with Lead-Salt Diode Laser, Presented at 11th International Laser Radar Conference, Paper C3, Wisconsin-Madison,

(June 21-25, 1982).

口頭発表

- 1) 古賀, 永瀬, 小坂, 佐野: 可同調半導体レーザー (TDL) によるリアルタイムスペクトロスコープ, 昭和 55 年電気 4 学会中国支部連合大会, 32104 (1980 年 11 月).
- 2) 古賀, 永瀬, 小坂, 佐野: 可同調半導体レーザー (TDL) を用いた大気汚染測定システムとその実測例, 昭和 55 年電気 4 学会中国支部連合大会, 62212 (1980 年 11 月).
- 3) 永瀬, 古賀, 小坂, 佐野: 半導体レーザーの光定在波雑音現象, 電子通信学会技術研究報告, OQE 80-121 (1981 年 1 月).
- 4) 古賀, 永瀬, 小坂, 佐野: 可同調半導体レーザー (TDL) を用いたガス計測システムとその実測例, 電子通信学会技術研究報告, OQE 80-122 (1981 年 1 月).
- 5) 古賀, 永瀬, 小坂, 佐野: 半導体レーザーによる大気中メタンガスの検出, 第 7 回レーザー・レーダシンポジウム, pp. 75-76. (1981 年 2 月).
- 6) 古賀, 小坂, 佐野: 可同調半導体レーザーによるガスの分光計測例, 第 28 回応用物理学関係連合講演会, 1a-G-9, (1981 年 4 月).
- 7) 古賀, 永瀬, 小坂, 佐野: レーザ・ダイオードによる分光計測における光定在波雑音現象, 昭和 56 年度電子通信学会総合全国大会, 922 (1981 年 3 月).
- 8) 佐野, 古賀, 小坂, 篠原: 半導体レーザーによる濃度ガス短時間計測へのアプローチ, 電子通信学会技術研究報告, OQE 81-49 (1981 年 7 月).
- 9) H. Sano, R. Koga, M. Kosaka and Koji Shinohara: Utilization of the Tunability of the Lead-Salt Diode Laser for a Fast and Local Measurement of Specific Gas Density, Electrical and Electronic Measurement and Test Instrument Conference and Exposition, (EEM-TIC '81), 117-121, Ottawa, Canada (September, 22-24, 1981).
- 10) 佐野, 古賀, 小坂, 野田, 篠原: 鉛塩半導体レーザーを用いた高感度・実時間大気ガス分析, 昭和 56 年電気 4 学会中国支部連合大会, 91214 (1981 年 11 月).
- 11) 佐野, 古賀, 小坂, 野田, 篠原: 鉛塩半導体レーザーによる大気中メタンガス分析の精度・速度の検討, 昭和 56 年電気関係学会関西支部連合大会, G 10-20 (1981 年 11 月).
- 12) 佐野, 古賀, 小坂, 野田, 篠原: $7\mu\text{m}$ 帯鉛塩半導体レーザーを用いた短光路実時間大気ガス計測, G 10-21 (1981 年 11 月).
- 13) 佐野, 古賀, 小坂, 篠原: $7\mu\text{m}$ 帯鉛塩半導体レーザーを用いた大気ガス分析装置の開発, 昭和 57 年度電子通信学会総合全国大会, 914 (1982 年 3 月).
- 14) 佐野, 古賀, 小坂: 鉛化合物半導体レーザーを用いた小型・実時間大気ガス分析システム, 昭和 57 年度応用物理学学会全国大会, 4a-G-2 (1982 年 4 月).