

同調可能CO₂レーザを用いたインコヒーレント光 ヘテロダイン検波による大気汚染測定

Air Pollution Measurement by Incoherent Optical Heterodyne Detection Using Tunable CO₂ Laser

齊藤 成文*・藤井 陽一*・山下 純一郎*

Shigefumi SAITO, Yoichi FUJII and Junichiro YAMASHITA

1. はじめに

環境の汚染は、現在解決を迫られている最も大きな問題の一つであるが、その測定技術は歴史が浅く、まだ充分なものとはなっていない。大気汚染計測は、化学的な手法から光を用いたリモートセンシング方式へと技術が変化しつつあるが、これは、大気が極めて流動的であること、等の理由による。

レーザを利用した大気汚染リモートセンシングの方式については、いくつかの提案がなされており、レーザ技術の発達とともに年々そのレベルは実用の域に近づきつつある。その中で、インコヒーレント光ヘテロダイン受信方式によるものは図1-1のように、山や構造物、太

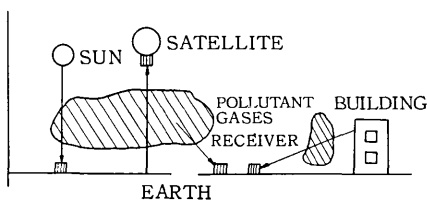


図1-1 インコヒーレント光ヘテロダイン方式による大気汚染リモートセンシング

陽等の自然物体から熱放射されるインコヒーレント光を信号光としてヘテロダイン検波し、受光光のスペクトル等から情報を得る方式であるが、他のレーザレーダ方式に比べて完全に受動的であるために送信用大出力レーザが不要であり、また、簡便である、という特長をもつ。また、放射光を直接検波する方式に対しては、スペクトル分解能が良く、ローカル光を充分強くすることによって信号対雑音比を量子雑音限界まで高めることができる、という利点がある。そこで、インコヒーレント光ヘテロダイン検波は、こうした特徴を生かして、大気汚染計測以外に分光天文学への応用も検討されている。

コヒーレント光を信号光とするヘテロダイン検波については1960年代から実験、並びに理論的検討が行われてきたが、インコヒーレント光ヘテロダインについては研究が始まってからまだ日が浅く、実験データの蓄積及びそれらの理論的検討はまだ充分なものとはなっていない。本研究の目的は、インコヒーレント光ヘテロダインの機

構を、収差、回折といった光学系の特性を考慮に入れて検討し、その結果を大気汚染リモートセンシングシステムに応用することにある。そのため、まずインコヒーレント光ヘテロダイン出力について理論的に検討し、その結果を実験で確認した。次いで、実際にフィールドで使用する受光望遠鏡を用い、同調可能CO₂レーザをローカル光としたヘテロダイン検波系で受光信号光のスペクトルを測定することにより、あらかじめ濃度のわかった複数の吸収成分を持つ汚染気体を分析した。

2. 信号光受光光学系の設計

大気汚染リモートセンシングにおいて遠方の微弱な信号光を受光するための光学系について述べる。

受光光学系は、まず、図2-1に示すような26cm凹面鏡を主鏡とするようなカセグレン式反射望遠鏡で信号光を集光した後、 $f_3=50\text{mm}$ のゲルマニウム凸レンズで受光素子上に光源の像を投影する型式となっている。その等価光学系を図2-2に示す。

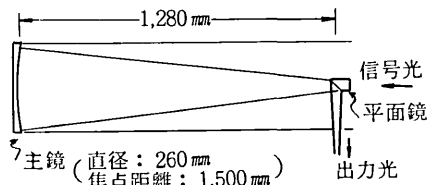


図2-1 受光望遠鏡

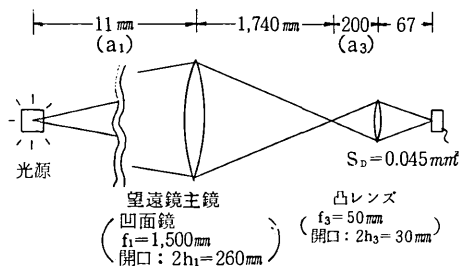


図2-2 信号光受光光学系

受光素子上での像の「ぼけ」 A_p 、位相の相関面積は、光学系が単レンズ系ではないため、簡単には求まらない。しかし、まず収差は主鏡の周辺光線による収差を計算したところ、凸レンズによるものとは比べ充分小さいことがわかったので、凸レンズの球面収差のみを考慮すればよ

* 東京大学生産技術研究所 第3部

い。また、凸レンズの大きさは図4-2に示したように主鏡によるビームを遮らないだけの大きさを持っているので回折としては主鏡によるもののみを計算すればよい。

このようにして計算した結果、像の「ぼけ」面積 A_p と位相の相関面積 A_c は、それぞれ、

$$A_p \approx 1.4 \times 10^{-2} \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$A_c \approx 6.9 \times 10^{-3} \text{ (mm}^2\text{)}$$

となった。

3. 実験系

インコヒーレント光源からの放射光を、同調可能 CO_2 レーザをローカル光としてヘテロダイン検波し、吸収スペクトルを測定することによって汚染気体の代りとして光路の途中に置かれたガスの成分を分析するシステムのブロック図を図3-1に示す。

インコヒーレント光源からの熱放射光は吸収気体セルを通過した後、4で述べた受光望遠鏡で集光され、メカニカル光チョッパー、干渉フィルターを通った後、ハーフミラーで CO_2 レーザによるローカル光と混合され、さらに凸レンズで集束されて HgCdTe フォトダイオード上に投射される。また、ローカルビーム側の凸レンズは図3-2に示すように、ローカル光を有効にフォトダイオード上に入射するためのものである。

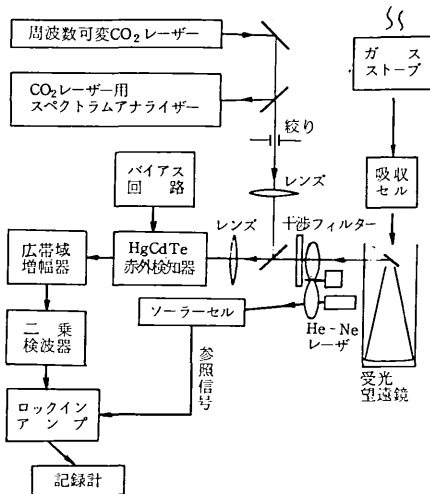


図3-1 システムの構成

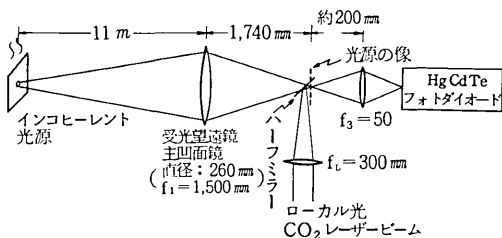


図3-2 光学系主要部の詳細

ローカル光 CO_2 レーザは SYLVANIA - model 950 で CO_2 の $10 \mu\text{m}$ 帯 ($10.1 \mu\text{m} \sim 10.8 \mu\text{m}$) において約30本の発振線が選択可能であり、その発振線は CO_2 レーザ用スペクトラムアナライザーでモニターする。また、ヘテロダインされるのはローカル光の $10 \mu\text{m}$ 帯の赤外光のみであり、それ以外の波長領域の光はショット雑音等の雑音を発生するため、信号光は $10 \mu\text{m}$ 帯域通過干渉フィルターを通した。

赤外線検知器は液体窒素温度 (77°K) で動作する HgCdTe フォトダイオード (SAT PV-1130) を用いた。このフォトダイオードの量子効率 は測定によると、波長依存性を持ち、 $\eta = 0.2 \sim 0.4$ 、応答周波数は 50 MHz 、最大許容入射パワーは 13 mW であるが、出力に非線型性を持つためその補正方法を別の機会に述べる。

増幅器系は、信号電力が弱いため、低雑音、高利得、広帯域なものを採用した。初段増幅器としては、フォトダイオードと同じシールドケースの中に AVANTE K-AP 502 ($B = 500 \text{ MHz}$, $G = 29 \text{ dB}$, $NF = 2.5 \text{ dB}$) を入れ、その出力を AVANTEK-GPD 401 ($B = 400 \text{ MHz}$, $G = 13 \text{ dB}$, $NF = 4.5 \text{ dB}$) を3段カスケードに接続して増幅し、二乗検波素子 (HP-8471A) で二乗検波した後、ロックインアンプ (NF-LI 573) で同期検波され、ペンレコーダに出力が記録される。

被測定気体としては、送変電所で絶縁気体として用いられる SF_6 、冷凍機の冷媒、噴射剤として広く用いられているフロン (フロン12; 分子式 CCl_2F_2)、工業原料として用いられる有毒なアンモニア、の三種を用いた。気体を入れるセルは受光望遠鏡開口をカバーするために大きなものが必要で、窓材料として厚さ 0.05 mm のポリエチレン膜を用いた内径 33 cm 、吸収長 30 cm の金属製円筒を用いた。

4. 実験結果と検討

4-1 光学系のヘテロダイン電力に及ぼす影響

図4-1のような実験系で、絞りによって受光レンズ径を変化させ、インコヒーレント光ヘテロダイン電力を測定した。

測定値を図4-2 ($f_3 = 50 \text{ mm}$)、図4-3 ($f_3 = 100 \text{ mm}$) に示す。

また、先に別に述べる理論⁴⁾で計算したヘテロダイン電力は ii) と iii) のケースに相当するのでその計算値も両図にあわせて記した。

曲線の折れ曲がり点付近で計算値と実測値の間に差が見られるが、これは、ローカル光ビーム (6 mm ϕ) が絞りに寄って一部分を遮られたために素子上に位相の相関面積 A_c が計算値より小さくなったことと、ii) と iii) の過渡的な状態であることに原因があると思われる。この点を除くと、理論⁴⁾の計算は実験結果をほぼ説明できる。

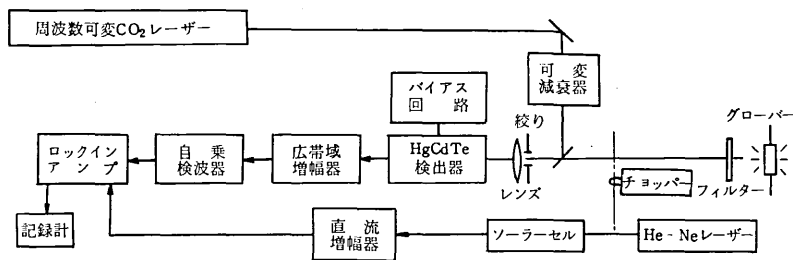


図4-1 光学系がヘテロダイン電力に及ぼす影響の実験系

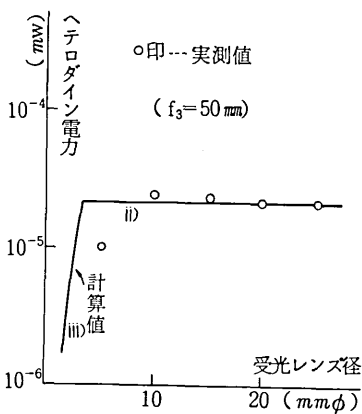


図4-2 受光レンズ径とヘテロダイン電力

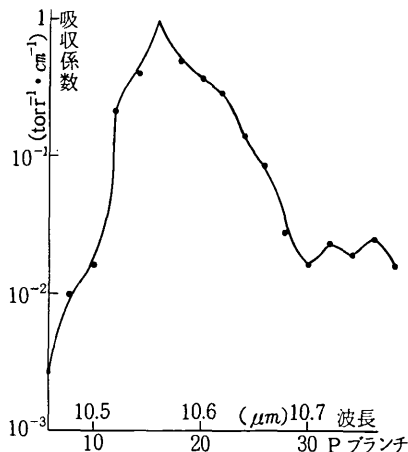


図4-4 SF₆の吸収スペクトル

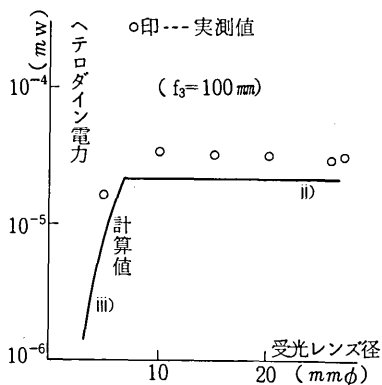


図4-3 受光レンズ径とヘテロダイン電力 (f₃=100mm)

4-2 多成分ガスの分析

SF₆, フレオン, アンモニアの混合気体の吸収スペクトルを図3~1に測定し, 各成分の濃度を分離するには, あらかじめ各気体の標準吸収スペクトルを知っていなければならない. そのため, セル中に各気体を濃度を変えて注入し, 吸収量の変化から各波長の吸収係数を測定した. その結果を図4-4~図4-6に示す. なお, セル

のポリエチレン窓の吸収スペクトルは問題とならないことも確認した.

次にセル中にSF₆, フレオン, アンモニアを順に注入し, それらの吸収スペクトルを測定した. その結果を図4-7に示す. さらに, 最小自乗法で各成分濃度を分析したところ, 各注入濃度と測定濃度の比は図4-8のようになる. また, 予測成分数m=2としたときの各濃度の比は図4-9のようになった.

図4-8に示されているように測定値と計算値はほぼあっている.

また, 干渉誤差は図4-9でフレオン, アンモニア間に見られる.

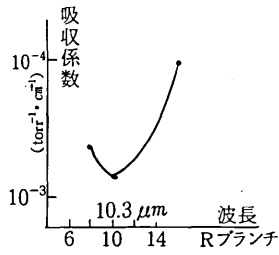
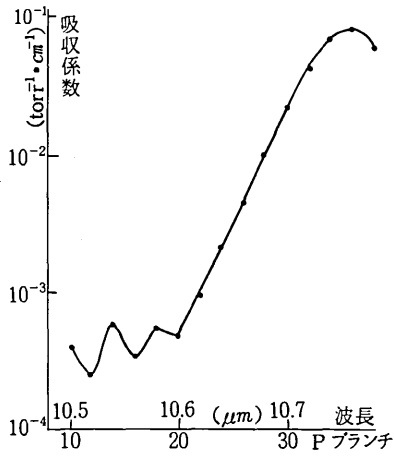


図4-5 フレオンの吸収スペクトル

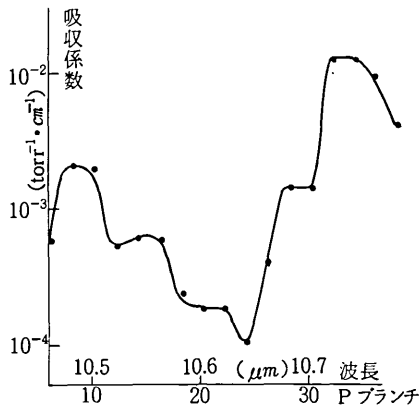


図4-6 アンモニアの吸収スペクトル (Pプランチ)

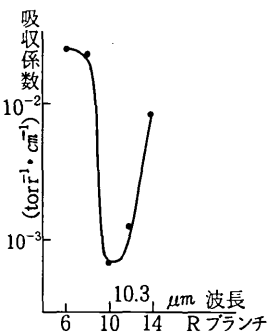


図4-6 アンモニアの吸収スペクトル (Rプランチ)

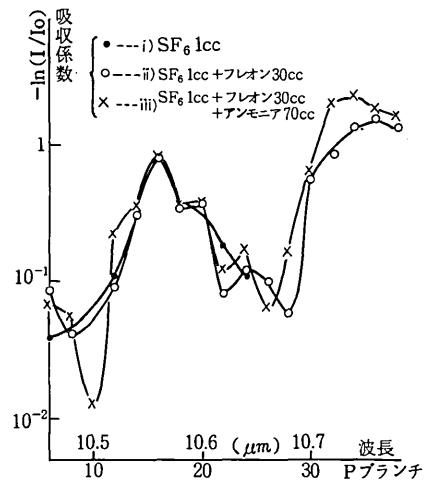


図4-7 混合ガスの吸収スペクトル (Pプランチ)

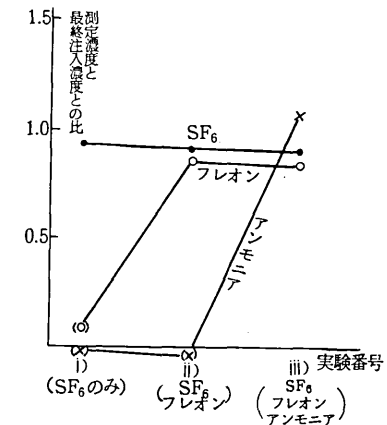
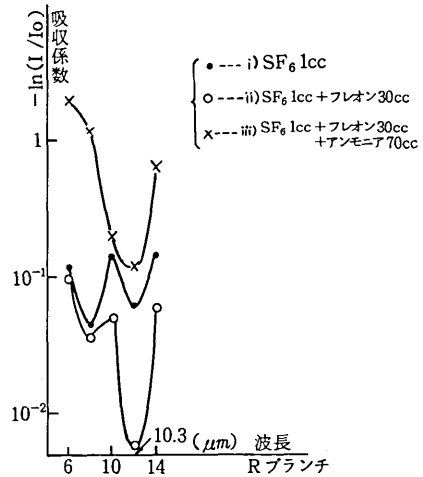


図4-8 測定濃度と計算濃度の比 (m=3)

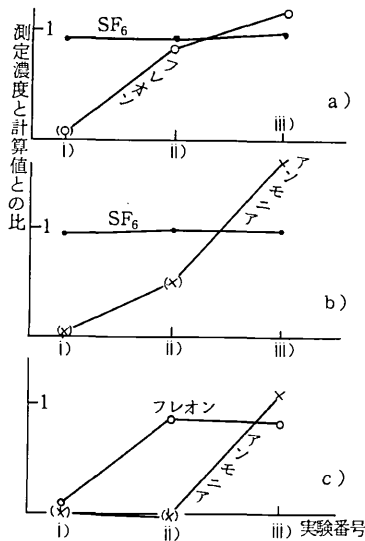


図4-9 測定濃度と計算濃度の比 (m=2)

5. 結 論

信号光がインコヒーレント光である場合のヘテロダイン検波においては、光学系が受光素子上に結ぶ像における光の時間的、空間的相関が問題となり、ヘテロダイン電力についてはローカル光、信号光の入射パワーのみで

なく、収差、回折といった光学系の特性も考慮に入れる必要がある。

赤外線検知器においてヘテロダイン出力と重なり合っ
て発生する雑音電力成分の除去について干渉フィルター
を用いた比較的簡単で精度の良い方法を考案し、採用し
た。

測定系のアース等を改良してS/Nを高め、常温程度
(38°C)の光源からの放射信号光をヘテロダイン検波(B=50 MHz)することができた。

多くの波長でヘテロダイン受信を行なうことにより多
成分気体の吸収スペクトルを測定、分析し、あらかじめ
計算された誤差程度をもって各成分の濃度を知ることが
できた。特に、10m吸収長当り81ppmのアンモニアが10
%程度の誤差で分離測定できたことはシステムの実用化
に期待を持たせるものである。(1977年9月7日受理)

参 考 文 献

- 1) 斎藤, 藤井, 山下; レーザラダシソジウム (1977.1)
- 2) 斎藤, 藤井, 四方; 電子通信学会論文誌 Vol. J 60-C, No 1 (1977.1)
- 3) R. L. Byer; Optical and Quantum Electronics Vol. 7 (1975) 117 p - 147 p

次 号 予 告 (12月号)

退官記念講演

日本における河川工学の近代化の発端を求める..... 井 口 昌 平

研 究 速 報

Propagation of Fatigue Cracks in Electrodeposited Copper Single-Crystal Film..... { 萩生田 善 明
松 永 正 久

Transient Response Analysis of an Elasto-Viscoplastic Beam Subjected to Transverse Impact..... { 都 井 裕
川 井 忠 彦

- Application of a New Beam Bending Element for Elasto-Viscoplastic Analysis -

高分解能超高压電子顕微鏡による金結晶粒界構造の観察..... { 石 田 洋 一
市野瀬 英 喜

超高压電顕 Weak Beam 法による転位バーガスベクトルの決定..... { 石 田 洋 一
石 高 良 和 信 武

無整流子電動機の動時性の伝達関数モデルによる解析..... { 原 島 文 治
内 藤 雄 夫

純鉄の結晶粒界にそった錫とクロムの拡散の粒界構造依存性 - ミクロオートラジオグラフィによる解析 -..... { 石 田 洋 一
斎 藤 秀 雄
森 本 敏 行

総 索 引