

16.

同調可能CO₂レーザーによる光ヘテロダイン検波を用いた
大気汚染計測

Measurement of air-pollution by optical heterodyne
detection using tunable CO₂ laser

齋藤成文, 藤井陽一, 四方進, 山下純一郎
S. Saito, Y. Fujii, S. Shikata, J. Yamashita

東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, University of Tokyo

1. はじめに

CO₂レーザーを用いた赤外光のインコヒーレント光ヘテロダイン検波, 及びその大気汚染測定への応用については最近いくつかの報告がなされているが(1)~(3), それらは理論的な検討, 実測値との比較等の点でまだ完全なものとはなっていない。我々は, 発振線が選択可能なCO₂レーザーをローカル光として用いたインコヒーレント光ヘテロダイン検波によって, 黒体の温度測定, 気体による吸収測定を行うとともに, 受信光学系についても若干の検討を行ったのでここに報告する。

2. インコヒーレント光のヘテロダイン検波

ヘテロダイン検波では, ローカル光が充分強い, 言わゆる量子雑音限界においては S/N 比は

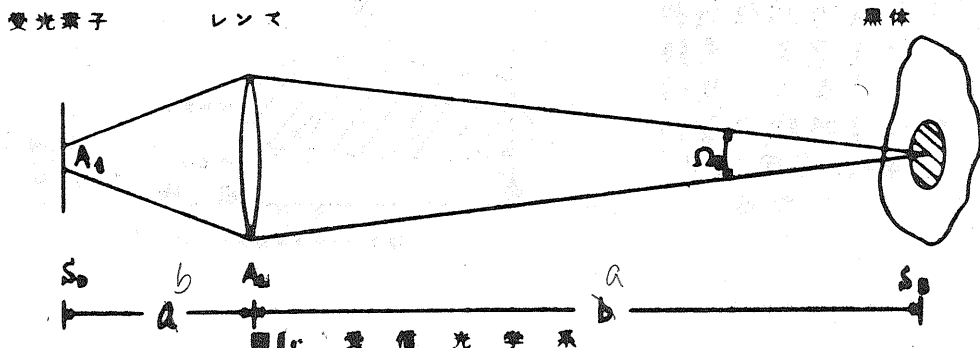
$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P_0 \sqrt{B\tau}}{2h\nu B} \quad (1)$$

となる。但し, $\eta, P_0, B, \tau, h, \nu$ はそれぞれ, 受信素子量子効率, 信号光電力, 受信帯域幅, 積分時間, プランクの定数, 光の周波数を表わす。インコヒーレント光源として温度 T の黒体を考えると, プランクの公式より, 単位面積から単位立体角中に, 単位周波数幅当りに放射されるエネルギー P_h は

$$P_h = \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1} \times \frac{2}{\pi^2} \quad (2)$$

である。図1. のような光学系について P_0 を求める。
理想的な光学系ではスポットサイズ A_0 は

$$A_0 \approx \frac{f^2 \lambda^2}{A_L} \quad (3)$$



で与えられる。受光素子上に黒体の像が結ばれているとき、信号光はこの A_0 内ではコヒーレント、各 A_0 内ではインコヒーレントと考えることができる。ヘテロゲイン受信は S_0/A_0 個のモードで受信される。各モードでのヘテロゲイン信号電流が時間的に正規分布をしているとすると電力は分散に対応し、独立な正規分布の和の正規分布の分散は各正規分布の分散の和であるから、受光素子の出力は各モードの和となる。レンズから黒体を見たときの単一モードの受信立体角 Ω_R' は

$$\Omega_R' = \frac{A_0}{b^2} \quad (4)$$

であり、受信開口は A_L である。従って、全モードを考えたときの受信機の受信開口 S_R と受信立体角 Ω_R の積は

$$\begin{aligned} S_R \Omega_R &= \frac{S_0}{A_0} A_L \cdot \Omega_R' \\ &= A_L \cdot \frac{S_0}{a^2 M^2} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。但し、 M はレンズの倍率 ($= b/a$) である。つまり、 S_0 として受光レンズの面積、 Ω_R として受光素子一杯に写る黒体を見込む立体角をとればよい。このとき、

$$S_R \Omega_R = S_B \Omega_B$$

であるから (2) 式等より

$$P_0 = \frac{h \nu B}{\exp(h\nu/kT) - 1} \cdot \frac{S_R \Omega_R}{\lambda^2} \quad (6)$$

となる。

3. 汚染気体のリモートセンシング

インコヒーレント光源と受信機の間に汚染気体が存在すると吸収が生じ、ローカル光波長を変化させてその割合を測定することにより、汚染気体の種類と濃度を知ることが出来る。濃度は距離に対する積分値しか求まらないが光源がインコヒーレントなものでよく、太陽、地球、建築物、気体自身とい、たものが利用できるのので比較的簡単な装置で済む、といった特長を持つ。

汚染気体の吸収係数を α 、分圧を p 、光路長を l とすると、受信信号光 P_0 は吸収のないときの値 P_{00} を用いて (7) 式のようになる。

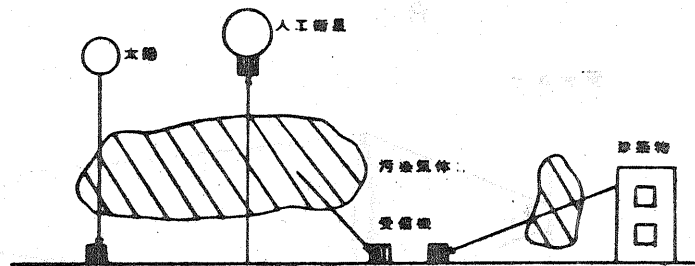


図2. 大気汚染測定システム

$$P_A = P_{A0} \times \exp(-\alpha P l) \quad (7)$$

また、ヘテロダイン受信機の最小検知電力変化は(1)より

$$\Delta P_{min} = NEP = \frac{2 h \nu B}{\eta \sqrt{B \tau}} \quad (8)$$

$P l = X$ とおいて最小検出感度 ΔX_{min} は

$$\Delta X_{min} = \Delta P_{min} / \left[\frac{\partial P_A}{\partial X} \right] dX = d_0 X_0$$

$$= \frac{\exp(h\nu/kT) - 1}{\alpha \exp(-d_0 X_0) \eta \sqrt{B \tau}} \cdot \frac{\lambda^2}{S_R \Omega_R} \quad (9)$$

となる。但し、 $d_0 X_0$ は水蒸気等大気吸収による実効的な値である。10 μ m 付近に吸収のある気体の最小検出濃度を表1.に示す。

物質 熱源	SO ₂	O ₃	NH ₃	C ₂ H ₄	SF ₆	CCl ₂ F ₂
太陽 (5800K)	8.6 $\times 10^{-3}$	1.4 $\times 10^{-2}$	2.1 $\times 10^{-4}$	1.6 $\times 10^{-4}$	7.4 $\times 10^{-6}$	6.7 $\times 10^{-5}$
地球 (300K)	3.0	4.9	7.2 $\times 10^{-2}$	5.4 $\times 10^{-2}$	2.6 $\times 10^{-3}$	2.3 $\times 10^{-3}$

但し、 $l = 10 \mu\text{m}$, $d_0 X_0 = 2.5$, $\eta = 0.1$, $B = 50 \text{ MHz}$
 $\tau = 1 \text{ sec}$, $S_R \Omega_R = \lambda^2$ 単位: ppm

表1. 最小検出濃度

4. 実験装置と実験結果

図3. に実験装置のブロック図を示す。受信帯域幅 B は HgCdTe フォトダイオード (SAT1130) の応答時間で決まり、約 50 MHz である。ローカル光用 CO₂ レーザー (SYLVANIA 950) はグルーピングにより約 30 本の発振線が選択でき、スペクトラムアナライザでモニターする。インコヒーレント光源としてはグローバ

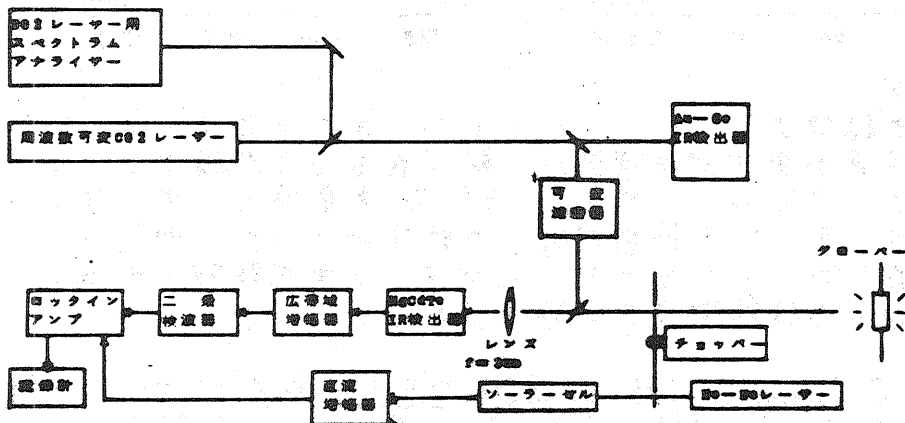


図3. CO₂レーザー-インコヒーレント光ヘテロダイン受信システム

を用い、その温度変化に対するインコヒーレントヘテロゲイン受信電力の測定値を図4.に示す。実線は(6)より求めた計算値であるが、実測値の方が10数dB小さくなっている。この原因として、レンズの収差、信号光、ローカル光の波面のずれ、筈が考えられる。

グローバーの直前にセル($\phi=3$ cm, 長さ5 cm)を置き、吸収気体として SF_6 , フレオン(C_2F_2)を入れ CO_2 レーザ各発振線ごとのヘテロゲイン検波で吸収測定を行った。レーザ光を直接透過させて測定した吸収係数との比較を図5.に示す。この二つの結果は非常によくあっていることがわかる。

図4. 温度変化の測定

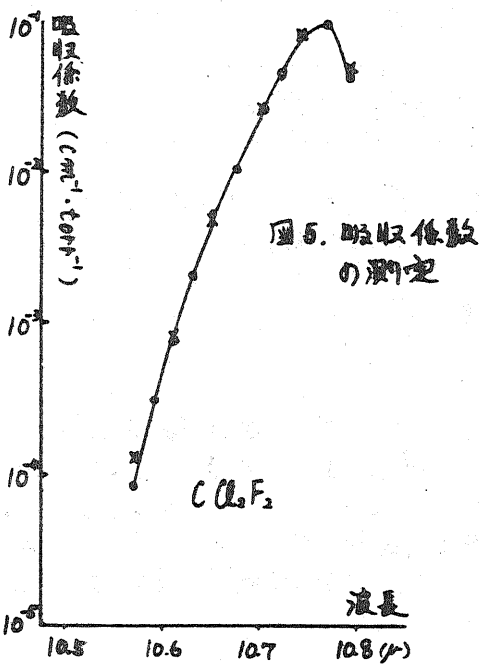
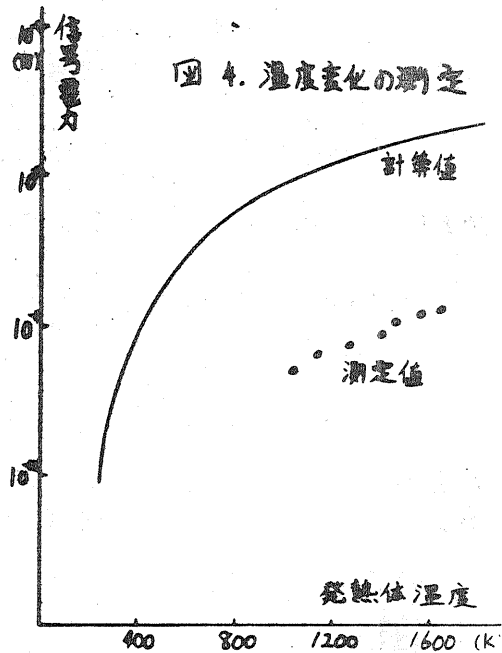
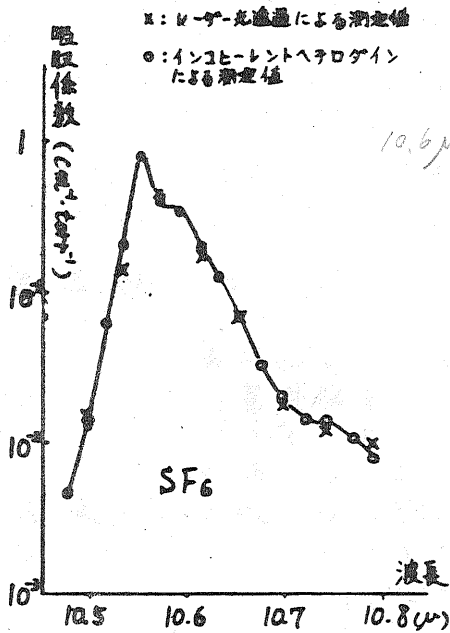


図5. 吸収係数の測定



5. おまわり

以上の結果より、インコヒーレント光ヘテロゲイン検波方式による大気汚染の測定が原理的に可能であることが確かめられた。ローカル光として CO レーザ、 PbS_nTe 半導体レーザ等を用いることにより、広い波長範囲で種々の物質についての測定が可能となる。現在、ローカル光をチョップする二重同期検出方式を用いて室温黒体からの放射測定を実験中である。

(1) B. J. Peyton	IEEE J. QE	<u>QE11</u>	No.8 (1975)	569-574
(2) R. T. Menzies	Opto-electronics	<u>4</u>	(1972)	179-186
(3) R. T. Menzies	Appl. Phys. Lett.	<u>22</u>	(1973)	592-593