

## 汚染物質分布の測定

Distribution Measurements of Air Pollutant Gases

浜崎 襄 二\*・藤井 陽 一\*

Jōji HAMASAKI・Yōichi FUJII

## 1. はじめに

先報<sup>1)</sup>のように、レーザ光およびそれを用いたヘテロダイン検波によって、大気汚染の原因となる各種の気体の分布、定量を行う方法をいくつか提案し、それらを実現するための研究を行っている。

本報では、これに引きつづき、光ヘテロダイン法を中心とした、大気汚染物質分布の測定法の研究についてのべる。

2. 同調可能CO<sub>2</sub>レーザを用いたヘテロダイン検波によるスペクトル測定

光ヘテロダイン検波方式は、直接検波方式に比べて、その構成が複雑になるけれども、

a) 特に、赤外域の検出において、直接検出方式よりも感度がよい。

b) 検出帯域巾を十分せまくすることにより、スペクトル分解法を高めることができる。

という2点で、他の方式にはない特徴をもっている。ここで問題にしている、大気中の汚染気体について考えると、この多くの成分が、1~10 $\mu$ mの、いわゆる近赤外波長域に、吸収スペクトルを有しており、また、この波長域では、十分良い直接検波用の検出器がない。

そのような理由で、ヘテロダイン検出方式をとりあげこれと、同調可能のCO<sub>2</sub>レーザとくみあわせることにより、汚染物質の吸収スペクトルの検出を行うシステムを考えた。

また、同調可能レーザは、測定しようとする物質に対して、選択する必要がある。CO<sub>2</sub>レーザの発振可能な9~10 $\mu$ mには、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>などの他、特殊な汚染物質として考えられているNH<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、SF<sub>6</sub>、CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>などがあり、特に、SF<sub>6</sub>、CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>に対しては、その吸収断面積が大きいために、他の方法によるよりも高い感度での測定が可能である。他の重要な汚染物質、たとえばCO、NO<sub>2</sub>等に対しては、レーザを交換することにより、同一原理、同一装置で測定することが可能である。

この近赤外用の同調可能レーザとしては、上述のCO<sub>2</sub>レーザや、NO、COなどの気体レーザで、回折格子の

ような波長選択機構を有するものと、磁界によって、エネルギー準位が変化することを利用したSFRレーザ、化合物の組成を変えることにより発振周波数がある値に設計できるPbカルコゲナイドレーザがある。これらを、上述の目的に応用することを考えると、体積が大きいことと、発振波長が、ブランチの間隔(CO<sub>2</sub>レーザの場合は約50GHz)でとびとびにしか変えられない欠点を除けば、気体レーザがもっと手軽でつかいやすいものであるといえる。

レーザをもちいて、かつ検出にヘテロダイン検波法を用いるやり方に、大別して2とおありある。

第1は、強いレーザ光を大気中に放出して、汚染気体による吸収を受けたのちの光の強さを、ヘテロダイン検波で検出するものである。このときは、ヘテロダイン検波の局部光源として、原レーザから、一定の周波数だけずれたもうひとつのレーザを用意する必要がある。また、レーザが、パルス発振するものを用いれば、2次元的な分布のみならず、奥行方向の距離も分解可能な、3次元的な分布測定も可能である。この方法では、光が比較的強くできるから、大気中のエアロゾルによるミ-散乱のような、弱い散乱による反射をもちいることができ、有利である。また、受信光がつよいことは、必ずしも、ヘテロダイン検波を必要とせず、より簡易な直接検波方式が適しているといえよう。

もうひとつの方式は、通常の熱放射、すたわち。地上では、約300°Kの温度にある地表、建物、大気それ自身や、特別な方向に対しては、約5,800°Kの太陽を、光源として用い、その中から、大気汚染物質の吸収スペクトルをさがしあてる方法である。この方法は、従来、ラジオメトリー(熱放射測定)といわれている測定技術のひとつの応用であり、光源の温度と同様に、特別な吸収スペクトルのある気体を検出しようとするものである。この方法は、一般にいて、受信しようとする光は弱いから、感度は多小落ちるが、送信用の強いレーザを必要とせず、また、反射用に特別のコーナ-レフレクタのようなものも用いてないので、より簡易な測定法であるといえる。

\* 東京大学生産技術研究所 第3部

3. 同調可能CO<sub>2</sub>レーザを用いたヘテロダイン検波による汚染物質分布測定装置の設計

1) ヘテロダイン検波のSN比

可変周波数CO<sub>2</sub>レーザをローカル光に用いたインコヒーレント光ヘテロダイン受信システムのブロック図を図1に示した。

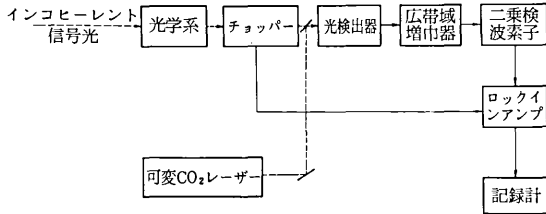


図1 可変周波数CO<sub>2</sub>レーザによるインコヒーレントヘテロダイン受信システム

入力信号光電力をP<sub>s</sub>とするとき、このインコヒーレント光ヘテロダイン受信システムによるSN比は次のように表わされる。

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P_s \sqrt{B\tau}}{2\hbar\omega B(1 + i_{th}^2/i_{sn}^2)} \quad (1)$$

ただし i<sub>th</sub><sup>2</sup> : 二乗平均熱雑音電流

$$\begin{aligned} i_{th}^2 &= i_{an}^2 + i_{an}^2 \\ &= 4k(T_D + T_{IF})B \quad (2) \end{aligned}$$

k : ボルツマン定数

T<sub>D</sub> : 光検出器温度

T<sub>IF</sub> : IF増巾器等価雑音温度

B : 受信バンド巾

Req : 光検出器等価抵抗

$$\begin{aligned} i_{sn}^2 &= \text{乗平均ショット雑音電流} \\ &= 2qI_{DC}B \quad (3) \end{aligned}$$

q : 電気素量

I<sub>DC</sub> : 直流光電流

η : 光検出器量子効率

τ : 積分時間

ħ : プランク定数

ω : 光の周波数

今、ローカル光を強くして、直流光電流I<sub>DC</sub>によるショット雑音が熱雑音に比べて十分大きい状態 (i<sub>th</sub><sup>2</sup> ≪ i<sub>sn</sub><sup>2</sup>)、すなわち量子雑音限界のとき、(1)式のSN比は

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P_s \sqrt{B\tau}}{2\hbar\omega B} \quad (4)$$

と表わすことができる。

次に、入力信号光電力P<sub>s</sub>について考えてみる。発熱体等のインコヒーレント光光源の像が光検出器の受光面上に結ばれているとき、信号光は受光面上においてλ<sup>2</sup>程度の面積においてランダムな位相をもっていると考えられる。そこで、受光面をそれぞれλ<sup>2</sup>程度の微小面積に分けて考えると、その各微小面積 (A<sub>c</sub>) においては、それぞれ1つの周波数モードについてコヒーレントなヘテロダイン受信が行われていると見なすことができ、Ω<sub>c</sub> = λ<sup>2</sup>/A<sub>c</sub>なる受信立体角Ω<sub>c</sub>をもっている。検出器全体についてみた場合の信号電力は、各微小部分の位相が全くランダムで相関が無いので、各部分からの信号電力の総和と考えることができる。結局、受光面全体にわたってヘテロダイン受信されるインコヒーレント信号光電力は、Ω<sub>c</sub>の立体角から受光面面積A<sub>D</sub>に入ってくるバンド巾B内のインコヒーレント光電力ということになり、事実上、受信立体角Ωは光検出器の前に置かれた光学系の受信立体角Ω<sub>D</sub>によって決まってくる。直接検波方式における受立体角と等しくなる。

受信機の受信立体角をΩ<sub>D</sub>、実効開口A<sub>D</sub>とすると、温度T°Kの黒体からのインコヒーレントヘテロダイン信号光電力P<sub>s</sub>は、プランクの法則より、

$$P_s = \frac{2\hbar\omega B}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} \cdot \frac{\Omega_D A_D}{\lambda^2} \quad (5)$$

と表わされるので、(4)式に代入してSN比は、

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta \sqrt{B\tau}}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} \quad (6)$$

となる。

図2に、T = √Bτ, 1,000°Kのときη√Bτに対するSN比をA<sub>D</sub>Ω<sub>D</sub>をパラメータとして示した。

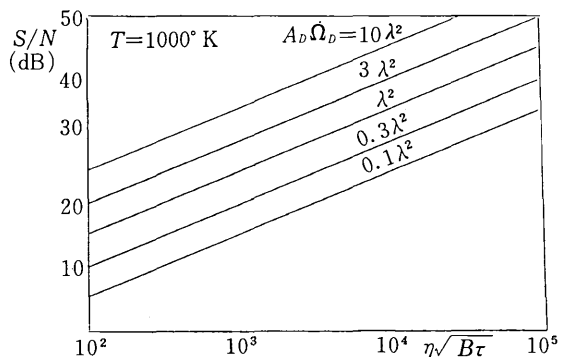


図2 SN比

図3は、A<sub>D</sub>Ω<sub>D</sub> = λ<sup>2</sup>のときのη√Bτに対するSN比をTをパラメータとして示している。

これらの結果からSN比は、光検出器の量子効率η、受信バンド巾B、積分時間τ、有効受光面積A<sub>D</sub>、受信立体角Ω<sub>D</sub>、絶対温度Tが大きければ向上することがわ

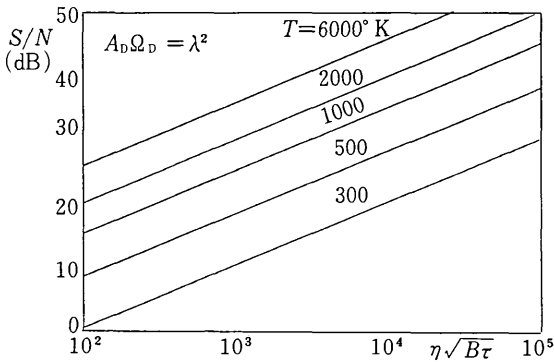


図3 SN比

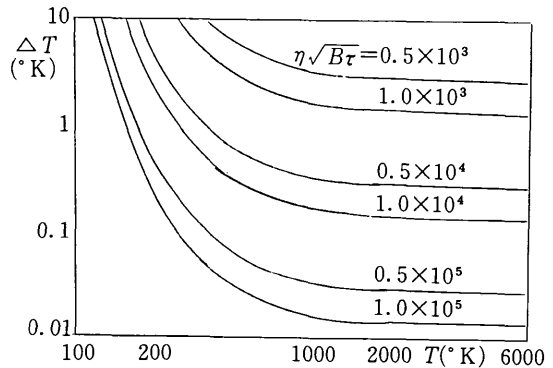


図4 温度分解能

かる。

ii) 温度分布のリモートセンシング及び温度分解能  
 インコヒーレントヘテロダイン受信機は、受信機の視野内にある物体からの熱放射をローカル光の周波数  $\omega_0$  を中心として  $2B$  のスペクトル巾で検出するものであるが、プランクの法則によって物体からの放射電力は、その物体の温度によって変化するので、高感度なインコヒーレントヘテロダイン受信機を用いてその放射電力を測定することによって、遠方物体や大気などの測定物体表面の温度分布情報を非接触、実時間で把握することができる。

インコヒーレントヘテロダイン受信における雑音等価電力 (NEP) は、(4)式より

$$NEP = \frac{2\hbar\omega B}{\eta\sqrt{B\tau}} \dots\dots\dots (7)$$

となり、最小検知可能電力変化  $\Delta P_{min}$  は、

$$\Delta P_{min} = NEP = \frac{2\hbar\omega B}{\eta\sqrt{B\tau}} \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。従って最小検知可能温度変化 (温度分解能)  $\Delta T$  は、(8)式で表わされる電力変化  $\Delta P_{min}$  を生じさせる物体の温度変化  $\Delta T$  として次式から求めることができる。

$$\Delta T = \frac{\Delta P_{min}}{\frac{dP_s}{dT}} \dots\dots\dots (9)$$

(5), (8), (9)式から  $\Delta T$  は、

$$\Delta T = \frac{kT^2 \{ \exp(\hbar\omega/kT) - 1 \}^{-2} \cdot \lambda^2}{\hbar\omega\eta\sqrt{B\tau}\exp(\hbar\omega/kT) A_D\Omega_D} \dots\dots\dots (10)$$

と表わされる。

図4に、 $A_D\Omega_D = \lambda^2$  のときの黒体温度  $T$  に対する温度分解能  $\Delta T$  を  $\eta\sqrt{B\tau}$  をパラメータとして示した。また図5に、同じく  $A_D\Omega_D = \lambda^2$  のときの  $\eta\sqrt{B\tau}$  に対する温度分解能  $\Delta T$  を黒体温度  $T$  をパラメータとして示した。

SN比の向上は、すなわち温度分解能の向上であるからSN比の場合と同じく、 $\eta$ ,  $B$ ,  $\tau$ ,  $A_D$ ,  $\Omega_D$ ,  $T$  が大きいほど温度分解能は良くなる。

例えば、量子効率  $\eta = 100\%$ 、帯域巾  $B = 10\text{GHz}$  の光検出器を用いた積分時間  $\tau = 1\text{sec}$  のインコヒーレントヘテロダイン受信システムによって、 $1,000^\circ\text{K}$  以上の物体に対して約  $0.01^\circ\text{K}$  の温度分解能を得ることができ。現在実用化されている赤外線カメラの温度分解能は、 $0.1 \sim 0.2^\circ\text{K}$  であり、これらに対して1桁性能の向上が可能である。

iii) 汚染ガス等のリモートセンシング

インコヒーレントヘテロダイン受信システムの熱源と受信機の間、汚染ガス等の吸収物質が存在するとき、熱源から放射される光のうち汚染物質の吸収帯に一致する波長帯の光は、その物質の吸収係数の大きさに応じて吸収されて減衰する。汚染物質は、その分子のエネルギー準位からくる特有の吸収帯を赤外域にもっているため、 $\text{CO}_2$  レーザなどの周波数可変な赤外レーザ光をローカル光に用いてインコヒーレントヘテロダイン受信を行ない、その減衰量を測定することによって選択的に汚染物質の濃度を検出することができる。この方法は、太陽などのインコヒーレント光源を必要とする受動的な方法であり、汚染物質を (濃度)  $\times$  (距離) としてしか検出できない欠点はあるが、ヘテロダイン受信を行うため感度が良く、大気中に分散し

た汚染物質の検出が可能である。高出力のレーザを必要とせずコーナリフレクター等を設置する必要が無いために装置の小型化が可能であるといった利点がある。装置を小型化することが可能なため図6に示したように人工衛星や飛行機に搭載し、太陽や地球を熱源と見なして、大気中の汚染物質の検出を行うことができる。

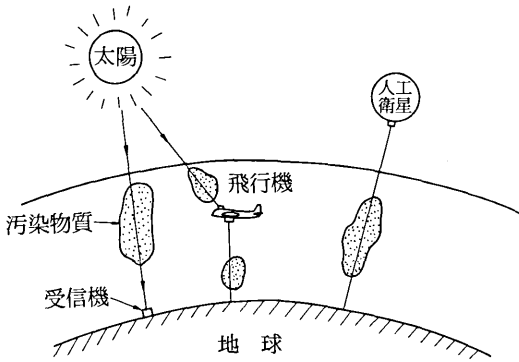


図6 大気汚染の検出システム

CO<sub>2</sub>レーザの発振線は、振動回転準位001-020 (9.4 μ中心)と001-100 (10.6μ中心)内に各20本程度50~60GHzの間隔で存在し、各発振線が約50MHzのドップラー巾の広がりをもっている。このCO<sub>2</sub>レーザの発振線内に吸収をもつ物質としては、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>などの汚染物質とCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oなどがある。またその他にもCO<sub>2</sub>レーザの発振波長内で非常に強い吸収を示す物質として、本実験に用いたSF<sub>6</sub>、CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (フロン-12)がある。

次に、このインコヒーレントヘテロダイン受信システムによる汚染検出の測定感度について求める。

熱源の温度をT°K、汚染物質等の吸収係数をαatm<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>、汚染物質の存在する長さを1cm、汚染物質が均一に存在するとして大気中での分圧をpatmとする。

インコヒーレントヘテロダイン受信における最小検知可能電力変化ΔPminは(8)式で表わされるので、熱源からのインコヒーレント信号電力の汚染物質による減衰で生ずる信号電力変化をΔPsとすると、

$$\Delta P_{min} = \Delta P_s = P_s(1 - e^{-\alpha pl}) \dots\dots\dots(11)$$

から、最小検出感度Xmin(=plmin)atm・cmを求めることができる。ただしPsは、熱源から放射される信号光電力で(5)式で表わされる。(11)式を解いてXminを求めると、

$$X_{min} = -\frac{1}{\alpha} \ln \left\{ 1 - \frac{\exp(h\nu/kT) - 1}{\eta \sqrt{B\tau}} \cdot \frac{\lambda^2}{A_D \Omega_D} \right\} \dots(12)$$

となる。ここにXminは(atm・cm)の単位で表わされており、10<sup>4</sup>をかけることによって、1m吸収長でのppm濃度に換算することができる。(12)式によってSO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>に対する最小検出可能量を計算し、その結果を図7、図8に示した。よこ軸はη√Bτをとり、たて軸には、最小検出可能量をatm・cm及び、1m吸収長にお

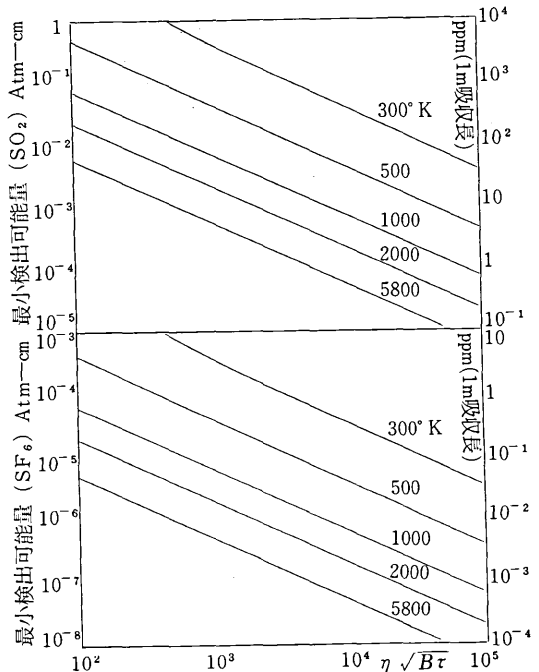


図8 最小検出感度 (SO<sub>2</sub>)

けるppm濃度で示した。パラメータは熱源の温度である。

表1に、図6に示したような大気汚染検出システムで太陽及び地球を熱源と見なしたときの各種汚染物質に対する最小検出可能量をまとめた。実際の応用に際しては、種々の物質による吸収の影響を避けるために、吸収の強い波長と吸収の弱い波長とで測定を行い、そ

表1 太陽及び地球を熱源と考えたときの各種汚染物質に対する検出感度

物質 熱源	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	SF <sub>6</sub>	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	(CO <sub>2</sub> )
大 陽	0.60	1.0	1.5×10 <sup>-2</sup>	1.1×10 <sup>-2</sup>	5.3×10 <sup>-4</sup>	4.9×10 <sup>-3</sup>	1.6×10 <sup>2</sup>
地 球	3.9×10 <sup>3</sup>	6.2×10 <sup>3</sup>	9.9	7.5	0.34	3.2	1.0×10 <sup>5</sup>

の差から汚染ガスの種類と濃度を決定する必要があると思われる。また、厳密には、大気中に含まれるCO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Oからの放射の影響や、地球を熱源と見なす場合には、太陽放射の地表面からの反射の影響も考慮する必要がある。

4. 同調可能CO<sub>2</sub>レーザを用いた光ヘテロダイン受信系による汚染気体計測実験

i) 実験装置

インコヒーレントヘテロダイン受信システムのブロック図は図1に示したが、図9に具体的にシステムの構成を図示した。インコヒーレント光の光源としては、発熱面積が広く、容易に温度を変えられるものとして、炭化ケイ素を高温で焼き固めたグローバーを用いた。端子電圧が24Vで約1,700°Kの高温を得ることができる。ローカル光としては、赤外域のスペクトル分析、吸収測定や電磁回路アナライザへの応用のために、周波数が可変のCO<sub>2</sub>レーザ(SYLVANIA950)を用いた。

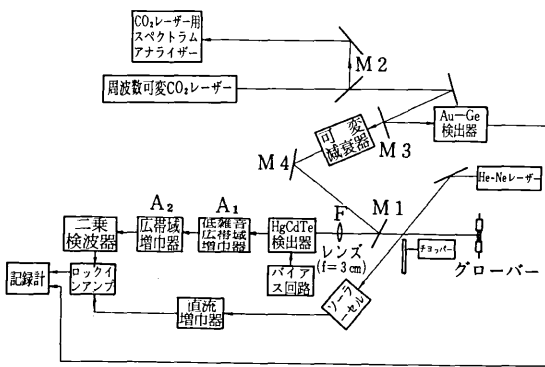


図9 CO<sub>2</sub>レーザインコヒーレントヘテロダイン受信システム

このCO<sub>2</sub>レーザの発振線は最大出力は約6Wである。インコヒーレントヘテロダイン受信ではSN比が $\eta\sqrt{B\tau}$ に比例して向上することから光検出器としては、量子効率が大きく帯域Bの大きなHgCdTeフォトダイオード(SAT1130)を用いた。フォトダイオードから出たIF信号成分は、広帯域増巾器A1(AVANTEK AD-502, 5~500MHz, G=29dB, NF=2.5dB), A2(IWASAKI CA-2, 10KHz~180MHz G=40dB, NF=15dB)によって増巾され、二乗検波素子(YHPクリスタル検波器420A)によって二乗検波されてロックインアンプ(NF LI-573)への入力信号となる。CO<sub>2</sub>レーザの発振波長は、CO<sub>2</sub>レーザ用スペクトラムアナライザ(OPTICAL ENGINEERING 16-A)によって、また発振出力はAu-Ge検出器によってモニターされている。本実験装置では、光検出器の許

容入力光電力に制限がありローカル光電力をあまり強くできないので前述の量子雑音限界にまでは達しない。

ii) 実験結果

a) 発熱体の温度測定

(5)式で表わされる信号光電力の温度Tに対する変化を図10の実線で示した。同じ図中の丸印は、各温度における測定値を示している。この時ローカル光電力は300 $\mu$ W, フォトダイオードは600 $\mu$ Aの逆バイアス状態である。またこの測定値は前述の補正を行なった値である。

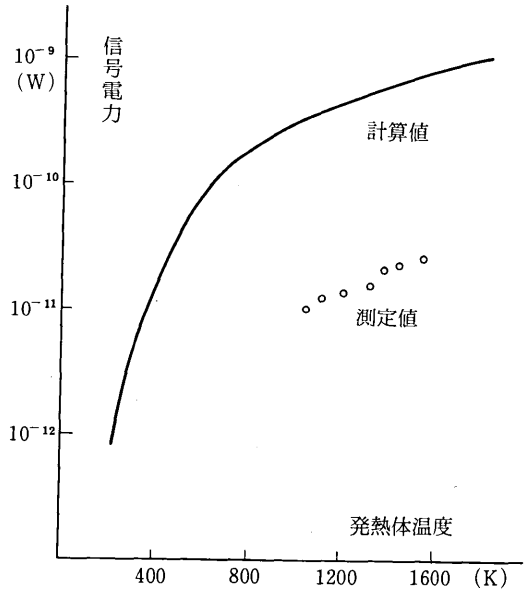


図10 温度変化の測定

ヘテロダイン信号出力のローカル光電力依存性を調べるために、ローカル光電力を変化させてヘテロダイン信号出力を測定した結果を図11に示す。これからヘテロダイン信号出力はローカル光電力の増加とともに

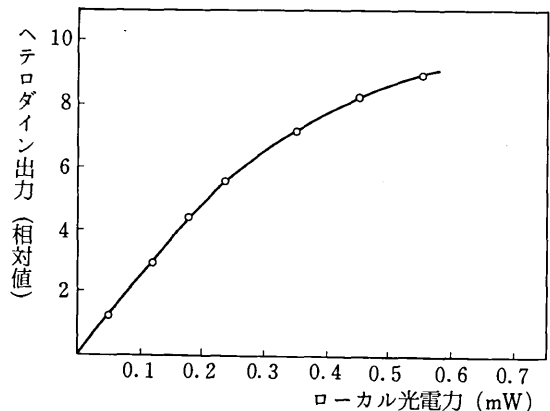


図11 ヘテロダイン出力のローカル光電力依存性

増加していくが、ローカル光電力が0.3mWを越えると直線性が失なわれる。これはフォトダイオードの端子電圧がローカル光電力の増加とともに浅くなって、キャパシタンスが大となってフォトダイオードの帯域巾が狭くなるためであろう。

これらの結果から、ローカル光電力0.3mW、積分時間3sec、 $T=1,470^{\circ}\text{K}$ のときに、SN比は約15dB、温度分解能は約 $15^{\circ}\text{K}$ が得られている。

積分時間を30secにしたときSN比は約20dB、温度分解能は約 $5^{\circ}\text{K}$ に改善されている。SN比及び温度分解能はそれぞれ $\sqrt{B\tau}$ に比例及び反比例するので、この改善度は、ほぼ理論通りである。

ところでローカル光電力0.3mW、 $\tau=3\text{sec}$ 、 $T=1,500^{\circ}\text{K}$ のときのSN比は、及び温度分解能は、それぞれ24dB、 $3^{\circ}\text{K}$ が得られるはずであるが、測定値がこれよりも悪くなった原因として、受信系のシールドが不完全なために外部からひろうテレビ電波などの雑音の影響が考えられる。この影響を考慮してSN比を計算すると約18dBとなり実験結果とほぼ一致する。

b)  $\text{SF}_6$ 、 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ による吸収の測定

前述したように、発熱体とインコヒーレントヘテロダイン受信機との間に、大気中の汚染ガスなどのように赤外線に吸収をもつガスがあるとき、吸収されて減衰した信号電力を測定することによって、そのガスの濃度を求めることができる。この方法で大気汚染のリモートセンシングが可能であることを原理的に確かめるため、発熱体とインコヒーレントヘテロダイン受信機との間に、 $\text{SF}_6$ 又は $\text{CCl}_2\text{F}_2$ の入ったセルを挿入して、 $\text{SF}_6$ と $\text{CCl}_2\text{F}_2$ の吸収率の測定を行った。

また単に $\text{CO}_2$ レーザー光を $\text{SF}_6$ 、 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ の入ったセルを透過させ、その透過率を測定することによって、 $\text{CO}_2$ レーザーの発振波長における吸収率の測定が可能であり、両方法による結果を比較した。

図12に、 $\text{CO}_2$ レーザーの各発振線における、 $\text{SF}_6$ の吸収係数の測定結果をまとめた。図中で丸印は、インコヒーレントヘテロダイン受信による測定結果で、×印は、レーザー光透過による測定結果を示している。

同様に図13は、 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ の吸収係数の測定結果である。

これから、両方法による測定結果は、ほぼ一致することがわかった。

本実験装置による $\text{SF}_6$ 、 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ に対する検出感度は、それぞれ1m吸収長について $\text{SF}_6$ で約0.4ppm(p-16発振線において)、 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ で約4ppm(p-36発振線において)が得られた。理論的には、 $\text{SF}_6$ に対して約0.03ppm、 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ に対しては約0.3ppmの検出感度を得られるはずであり、1桁の違いが生じたのは、前述したように、量子雑音限界に達していないこと、外来雑音の影響があることが原因である。

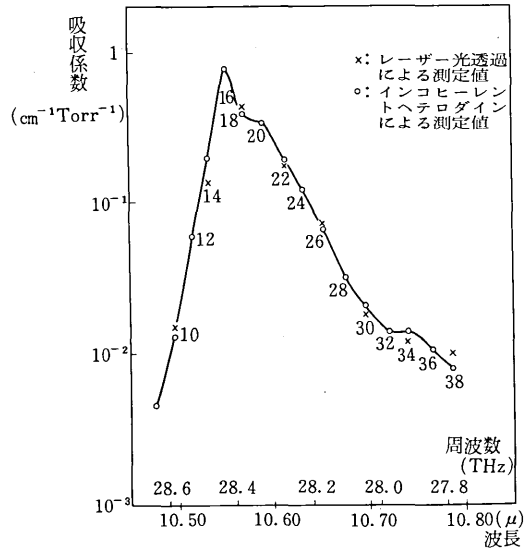


図12  $\text{CO}_2$ レーザーの発振線における $\text{SF}_6$ の吸収係数

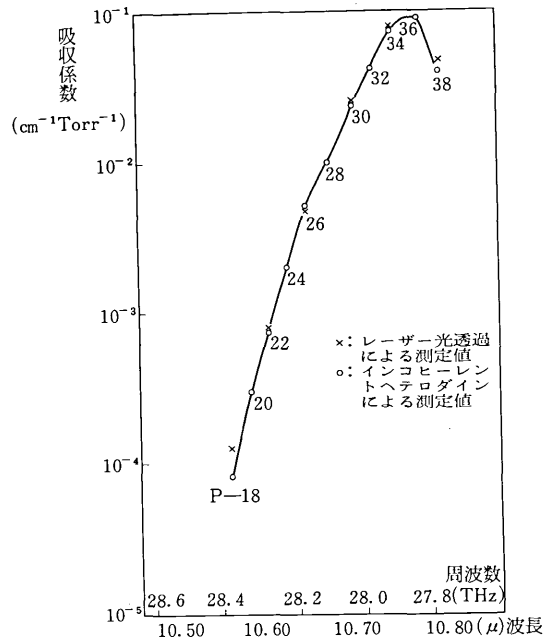


図13  $\text{CO}_2$ レーザーの発振線における $\text{CCl}_2\text{F}_2$ の吸収係数

5. む す び

以上述べたように、同調可能な $\text{CO}_2$ レーザーを使ったヘテロダイン検波によって、実用上十分な程度の制度で、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$ などの大気汚染気体の濃度を測定することができることが確かめられた。この結果をさらに発展させて、汚染気体の分布を測定するシステムを現在設計している。特に、自動的に俯仰、水平角が走

査される形の受光望遠鏡および常に一定の光軸をヘテロダイン検波系に入れる光学系をもった架台部を現在製作しており、それによる吸収測定、同調可能フィルターによる測定の結果についても別の機会に報告したい。

終わりに、日頃御指導をいただく斎藤成文教授、ならびにグループリーダーの尾上教授、関係各位に感謝の意を表したい。  
(1976年1月26日受理)

#### 参考文献

- 1) 藤井 "光ヘテロダイン方式による汚染物質分布の測定" 生産研究; Vol. 27, No. 3; pp. 24~25; 1970. 3
- 2) 藤井 "同調可能CO<sub>2</sub>レーザによる大気汚染物質測定" 臨時事業委員会研究報告; 昭50. 4月
- 3) 四方, 藤井, 斎藤, "同調可能CO<sub>2</sub>レーザを用いたインコヒーレント光のヘテロダイン受信と汚染気体検出への応用" 電子通信学会; 光・量子エレクトロニクス研究専門委資料; OQE75-22; 1975年6月23日光量子研委資料
- 4) 藤井, 正村, "同調可能色素レーザによる大気汚染の実時間計測システム" 電子通信学会; 光・量子エレクトロニクス研究専門委資料; OQE-75-70; 1975年10月20日
- 5) 藤井, 滝本, 正村, "同調可能色素レーザによる吸光分析とその測定誤差" 電気学会全大; 488; 昭50
- 6) 藤井, 林 "画像のスペクトル分析への応用を目的とした音響光学フィルタ" 画像工学コンファレンス, (3-5) 1975年11月
- 7) Y. Fujii and H. Hayashi "Acousto-optic tunable filter with controllable passband" J. A. P.; vol. 46, No. 11; pp. 5046-5048; Nov., 1975.
- 8) S. Shikata, S. Saito and Y. Fujii, "Compensation method of the excess noises of the optical heterodyne receiver for pollution detection," 7th Int'l Laser Radar Conf. Nov. 4, 1975.
- 9) M.C. Teich, "Infrared Heterodyne Detection," Proc. of IEEE, vol. 56, no. 1, Jan, 1968, p37
- 10) H. W. Mocker, "A10.6 $\mu$  Optical Heterodyne Communication System," Applied Optics, vol. 8 No.3, March 1969, p677
- 11) R. H. Dicke, "The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies," Rev. Sci. Instr. Vol. 17, July 1946, p268
- 12) J. H. McElroy, "Infrared Heterodyne Solar Radiometry," Applied Optics, Vol. 11, No. 7, July, 1972, p1619
- 13) H. Melchior et al, "Photodetectors for Optical Communication Systems," Proc of IEEE, vol. 58, No. 10, "October 1970, P1466
- 14) L. K. Anderson, "High-Speed Photodetectors," Proc. of IEEE, vol. 54, No. 10, October 1966
- 15) P. L. Hanst, "Infrared Spectroscopy and Infrared Lasers in Air Pollution Research and Monitoring," Applied Spectroscopy, Vol. 24, No. 2, 1970, p161
- 16) E. D. Hinkley, "High-Resolution Infrared Spectroscopy with a Tunable Diode Laser," A. P. L. Vol. 14, No. 8, April 1969, p237

## 東京大学生産技術研究所報告 刊行予告

第25巻5号

阿高 松男・鈴木 弘

### タンデム圧延の総合特性 (タンデム圧延の加減速特性のシミュレーション)

CHARACTERISTICS OF TANDEM STRIP ROLLING (SIMULATION OF TRANSIENT CHARACTERISTICS DURING ACCELERATING AND DECELERATING PERIOD)

タンデムミルによるストリップ材の圧延作業において、加速・減速期間すなわちシステムとしての過渡期間中には、板厚及び形状の不良が発生するので、製品の歩どまりの低下が避けられない。本研究はこの問題の技術的対策を求めるとの前提となるタンデム圧延の速度変化時の特性を明かにしようとするものである。

すなわち、速度依存因子として、油膜軸受の油膜厚さ、駆動モータの垂下特性、回転部分の慣性の影響を導入し、さらに、冷間圧延の場合にはロールと材料間の摩擦係数の圧延速度による変化、熱間圧延の場合にはスタンド間のルーバの速度制御機能、をも導入して、タンデム圧延作業の総合特性の数式モデルを求めた。

この数式モデルを用いて、速度変化のパターンを種々に変えた場合の肉厚と形状との挙動を明かにし、肉厚と形状との向上をはかるための、速度変化パターンの選び方を提唱している。

(1976年3月下旬)