

24. レーザ・レーダによる大気温度の遠隔測定法

Methods of Remote Measurement of Atmospheric Temperature
by Laser Radar

小林 喬郎 清水 浩 稲場 文男
Takao Kobayasi Hiroshi Shimizu Humio Inaba

東北大学 電気通信研究所

Research Institute of Electrical Communication,
Tohoku University

§ 1 はじめに

地球を取り巻く大気や水などの環境状態の実時間測定手段としてのレーザレーダは、種々のユニークな能力を發揮してきている。¹⁾ さらに、最近長足の進歩をとげつゝある高出力の可変波長レーザを用いて、光と物質の多様な相互作用過程を利用することにより、新しく、かつ優れた機能の実現可能性が残されており、その多方面にわたる実用開発が期待される。

本文は、この様な方向を目指した研究の一つとして、大気中の温度分布を遠隔的に高精度で測定するためのレーザレーダ方式を総合的に検討し、とくに絶対温度を測定するためのレーザラマンレーダ方式についての基礎的検討結果を述べるものである。²⁾

§ 2 大気温度測定法の比較

レーザレーダによる大気温度の遠隔測定法として現在までに提案、または基礎実験の行なわれている方法として、1) 大気分子の振動ラマン散乱光を検出して分子密度の変動から温度変化を求め、間接的に大気温度分布を求める方法³⁾、2) 大気分子の純粋回転ラマン散乱スペクトル強度分布の温度変化を利用する方法^{2, 4)}、3) 大気分子の吸収スペクトル分布の温度変化を、Mie散乱の後方散乱成分を利用して求める Differential Absorptionの方法⁵⁾、4) 大気分子の振動ラマン散乱の Stokes と Anti-Stokes 成分を検出し比較する方法などが挙げられる。いずれの方法も検出感度や測定精度、技術的実現の容易さなどの点で一長一短がある。1)の方法は絶対温度分布の測定ではなく温度変動分布の測定であること、2)では、強力なミレー散乱の雑音光を除去するための高分解能フィルタの開発が必要なこと、3)では距離分解能と温度精度を上げて測定するためには、安定な可変波長レーザとデータ処理法の実

用開発が残されていること、および4)では高温状態のガス温度の測定の場合以外は Anti-Stokes線の断面積が小さいので、感度と精度が低いこと等が指摘される。我々はこの中では2)の方法が絶対温度が求められるために優れていることに着目し、技術的問題点の解決のための基礎的検討を行なった。

§3 回転ラマン測定法の原理とスペクトルの温度係数

本方式の温度測定原理としては、大気分子の純粋回転ラマン散乱スペクトル強度が次式のような温度変化特性をもつことを利用するものである。すなわち、回転量子数Jの準位からの回転ラマン散乱断面積(微分値)は、

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \frac{(2\pi\nu_r)^4}{c^4} \frac{g_J(2J+1)e^{-E_J/kT}}{\sum_J g_J(2J+1)e^{-E_J/kT}} \cdot S_J \quad (1)$$

ただし、

$$E_J = h B_0 J(J+1) - h D_0 J^2(J+1)^2 \quad (2)$$

$$S_J = \left. \begin{aligned} &= \frac{3(J-1) \cdot J}{2(2J-1) \cdot (2J+1)} \frac{7}{45} \gamma^2 \quad (\text{Anti-Stokes: } \Delta J = -2) \\ &= \frac{3(J+1) \cdot (J+2)}{2(2J+3) \cdot (2J+1)} \frac{7}{45} \gamma^2 \quad (\text{Stokes: } \Delta J = +2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

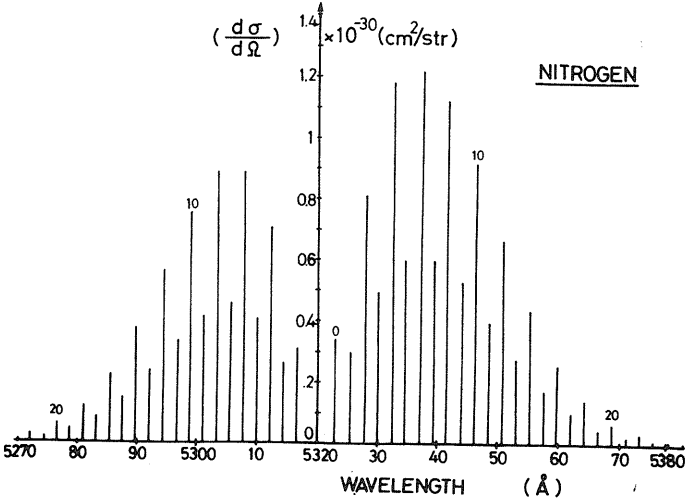


Fig.1 N₂分子の回転ラマン散乱スペクトル (励起波長: 5320 Å)

また、レーザー光周波数をν₀、回転ラマン周波数シフトをν_rとすると散乱光周波数はν_r = ν₀ ± ν_rとなり、E_Jは準位のエネルギー、B₀, D₀は剛体の回転定数、g_Jは核スピン多重度、Tは分子温度、γ²は分極率の非等方性成分である。

Fig. 1 に N₂分子の (dσ/dΩ) のスペクトル分布の計算値を示す。レーザー光として波長5320 ÅのNd-YAGレーザー光の第二高調波を仮定し、γ²の値はStansburyらの測定値⁶⁾を用いた。Table 1はN₂, O₂および空気分子(N₂: 78%, O₂: 21%の分圧を仮定)についてのStokesとAnti-Stokesラマン散乱断面積およびレーリー散乱断面積の総和値を示す。これらの値は

Molecule	(dσ/dΩ) _S	(dσ/dΩ) _{AS}	(dσ/dΩ) _{Rayleigh}
N ₂	1.18 × 10 ⁻²⁹	8.43 × 10 ⁻³⁰	6.30 × 10 ⁻²⁸
O ₂	1.79 × 10 ⁻²⁹	1.34 × 10 ⁻²⁹	5.29 × 10 ⁻²⁸
Air	1.30 × 10 ⁻²⁹	9.39 × 10 ⁻³⁰	6.02 × 10 ⁻²⁸

Table 1. 回転ラマン散乱とレーリー散乱断面の総和値

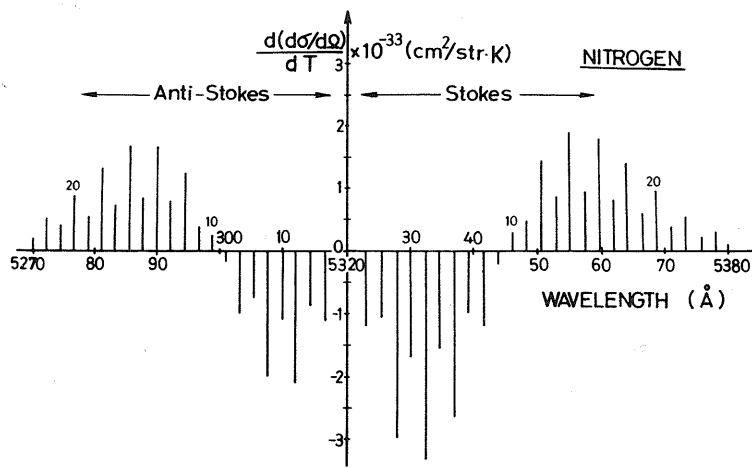


Fig. 2 N₂分子の回転ラマンスペクトルの温度変化率

振動ラマン散乱断面積に比べて2~3桁程度大きいことが特徴である。

つぎに、Fig. 2はN₂分子の回転ラマン散乱断面積の温度変化率 $d(ds/d\Omega)/dT$ のスペクトル分布の計算値を示す。ラマンシフトが小さい波長域では温度変化率が負で、大きい波長域では温度係数が正となる。すなわち、これらの両スペクトル強度を比較することによって温度測定を行なうのが、本測定法の原理である。

Fig. 3は、ガウス形のスペクトル透過関数を持つフィルタ素子の中心波長 λ に対して、透過する回転ラマン散乱の相対的積分強度 $I(\lambda)$ とその温度係数 $dI(\lambda)/dT$ を示す。StokesおよびAnti-Stokesの $I(\lambda)$ はそれぞれ、 $(ds/d\Omega)_S$

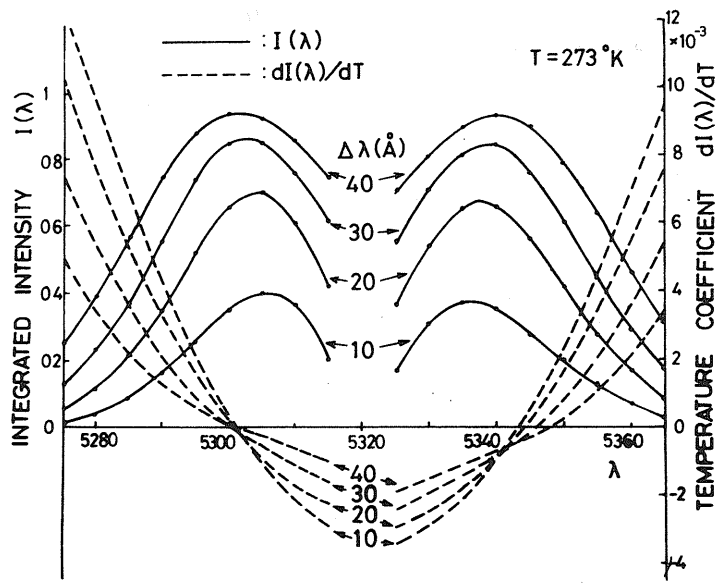


Fig. 3 空気分子の回転ラマン積分強度と温度係数のフィルタ中心波長に対する変化特性

および $(ds/d\Omega)_{AS}$ に対する相対値で、フィルタの半値幅 $\Delta\lambda$ をパラメータに選んである。この結果より、最適な波長 λ_1, λ_2 , および温度係数の差分値が求められる。

§4. レーザレーダ装置と測定精度

Fig. 4は、大気温度測定のためのレーザラマンレーダ装置のブロック図を示す。従来のレーザレーダに比べて信号対雑音比の大きい分光検出法の採用が必要であり、とくに次の事項の実現が重要となる。

- 1) エアロゾルによるミー散乱と大気分子によるレーリー散乱光はスペクトルが極めて近接しており、その強度は全回転ラマン散乱光強度に比して、 $10 \sim 10^5$ 程度大きい。そのため、それらを遮断するためのフィルタ素子として、分子吸収フィルタ (例えば、I₂ フィルタ)、または原子フィルタ (例えば、Na 蒸気フィルタ)

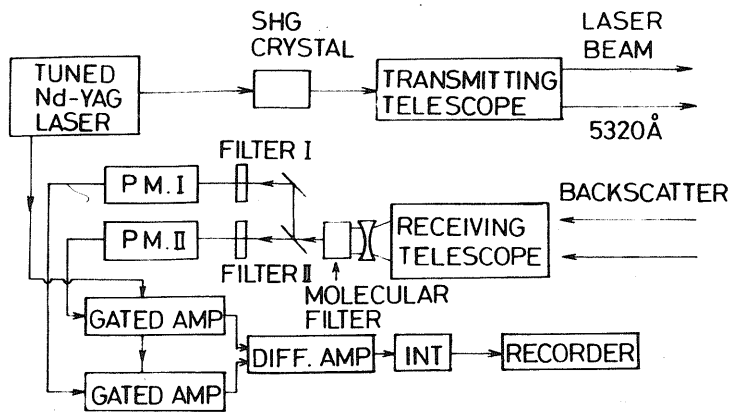


Fig. 4 大気温度測定用レーザラマンレーザの装置構成を使用する。ii) レーザ出力の狭帯域化と原子や分子フィルタの共鳴吸収線へ周波数同調を行ない、安定化する。iii) 二波長 λ_1, λ_2 での散乱光強度を誤差0.3%以下の高精度で信号処理するための回路系を採用すること。

以上の装置構成によって、温度測定精度 $\Delta T = 1^\circ\text{K}$ を得るための測定距離に対する検出時間の関係をFig. 5に示す。実現容易な装置定数として、レーザ平均出力1W, 受信口径50cmを仮定し、距離分解能 L をパラメータとしている。これらの関係は昼間の背景光の強い状態でもほとんど変化せず、実用的に極めて有用であると考えられる。

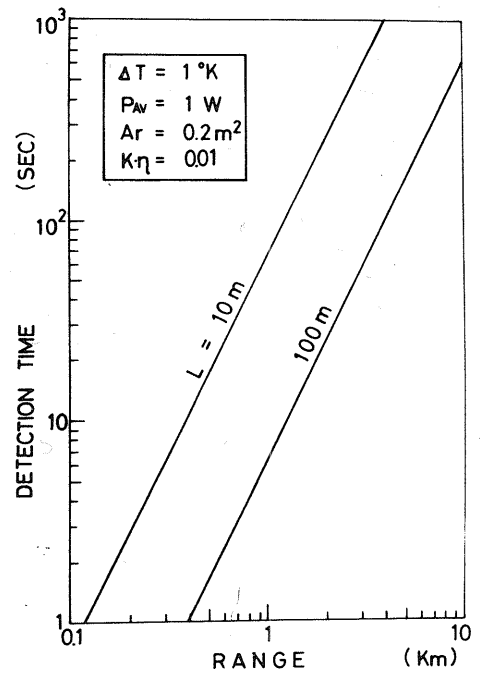


Fig. 5 精度 1°K を得るための測定距離と検出時間の関係

§5 おまじ

以上の解析結果から、回転ラマン散乱を利用する絶対温度測定用レーザラマンレーザは高い測定感度と精度の実現可能性を有していることが示された。今後、これらの特性の実現のためには、さらに安定な可変波長レーザや分光素子、データ処理法などの開発が必要であり、これらの基礎的実験結果も併せて報告したい。

文献

- 1) 小林・稲場; 分光研究, 21, p. 259 (1972).
- 2) 小林・清水・稲場; 昭和48年度電子通信学会全国大会講演論文集, 954 (1973).
- 3) R. G. Strauch, V. E. Derr, and R. E. Cupp; Appl. Opt., 10, p. 2665 (1971).
- 4) J. A. Cooney; J. Appl. Meteor., 9, p. 182 (1970).
- 5) M. Hirono and O. Uchino; Memories of the Faculty of Science, Kyushu Univ., B-4, p. 119 (1972).
- 6) E. J. Stansbury, M. F. Crawford, and H. L. Welsh; Can. J. Phys., 31, p. 954 (1953).