

5. ラマン散乱を用いる大気温度の遠隔的測定法の比較検討

清水 浩 竹内 延夫 奥田 典夫

国立公害研究所

はじめに 気温の立体分布を知ることは、温度逆転層の存在が、大気汚染現象と深く結びついていることや、光化学反応過程と気温が密接な関係を持つことなどから、環境公害を研究するうえで非常に重要であり、その測定技術の開発が待たれている。

レーザー・レーダーを用いる気温の遠隔的測定法には大きく分けてラマン散乱を利用する方法と、共鳴吸収を利用する方法とが提案されており、それぞれに利点・欠点を有している。筆者らは、レーザー・レーダーによる大気観測においては複数の大気パラメータの同時測定が有効であるとの立場に立って、大気状態を総合的に観測するためのレーザー・レーダー・システムの開発を行っている。現在のレーザー技術を考慮すると、気象パラメータの測定にはミレー散乱およびラマン散乱利用の測定法に多くの利点が存在すると考えられる。このことから、ラマン散乱を利用する気温測定法について検討をすすめて来たので、その結果を報告する。

2 ラマン散乱を用いる大気温度の遠隔的測定法の原理

現在までに提案されているラマン散乱利用の気温測定法は3種類存在する。その原理を典型的な気体のラマン散乱スペクトルと共に Fig. 1 に示す。第1の方法は

大気圧が一定の条件では気体の状態方程式に基づいて、気温の変化が大気密度の変化に対応することを利用して気温の相対的变化を知ろうとする方法で、密度の変化は N_2 分子の振動-回転ラマン散乱光強度の変化から測定するものである¹⁾。第2の方法は分子の純回転ラマン散乱スペクトルを利用する方法で

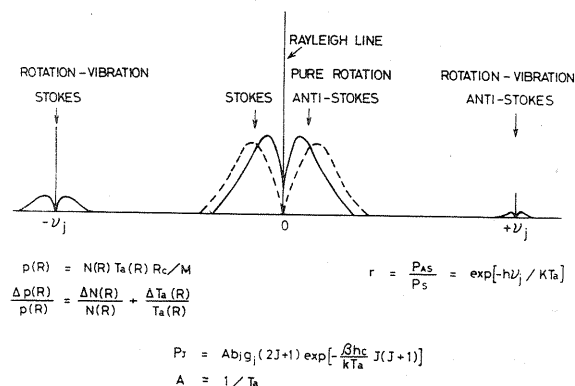


Fig. 1 分子のラマンスペクトルと気温測定の関係

ある。²⁾ 大気を構成する N_2 や O_2 分子の純回転ラマン・スペクトルはレーザ線の両側に数波数の間隔で約 2000cm^{-1} に亘って分布するが、そのスペクトル線の強度分布は温度によって変化する。そこで、純回転ラマン・スペクトルを Fig. 1 に点鎖線で示すような中心波長の異なる2枚の狭帯域フィルタを通して観測し、2つの信号光強度比から回転温度を算出しようとするものである。

さらに、分子の振動ラマン・スペクトルにおけるストークス線と反ストークス線を利用する方法が存在する。³⁾ 振動ラマン線におけるストークス成分と反ストークス成分の強度 P_S および P_{AS} の間には次式が成立する。

$$r = \frac{P_{AS}}{P_S} = e^{-h\nu_j/kT} \quad (1)$$

ここで、 ν_j はストークス・シフトを与える分子の固有振動数である。この式では ν_j が小さく、しかも大気中に占める個数 N (個/ m^3) の多い分子を選ぶ必要があるが、 Nr の値の最も大きい大気中の分子は O_2 であり、常温で r の値は約 6×10^{-4} である。

なお本文では以上の3つの方式をそれぞれストークス法、ローテーションラマン法、アンチ・ストークス法と名付けることにする。

3. ラマン散乱を用いる大気温度の遠隔的測定法の比較

前節に述べた3種類の方法を定量的に比較するために、測定感度を計算した結果を Table 1 に示す。Table 1 では、まず、散乱光強度を比較するため、常温における

	$N(d\sigma/d\Omega)(\text{sr}^{-1}\text{m}^{-1})$	$(d\beta/dT)(\%/^\circ\text{C})$	n
ストークス	0.12×10^{-8}	0.3	18
ローテーション	2.1×10^{-8}	0.3	1
アンチ・ストークス	2.7×10^{-13}	3	780

体積後方散乱係数 $\beta (= N(d\sigma/d\Omega))$ を示してある。ここで $(d\sigma/d\Omega)$ は測定に有効なラマン散乱断面積であり、ローテーションラマン法では全回転ラマン散乱断面積の $1/4$ にとっている。つぎに Table 1. には常温における気温 1°C 当りの信号光強度の変動、即ち β の変動を示してある。

レーザー・レーダーにおける信号の測定値の S/N がショットノイズで制限される場合

1℃の精度で測定するのに必要な信号光量子数は $(d\beta/dT)^2$ となる。これらの値から各測定法において必要とされるレーザー光の強さは Table 1 に示した結果となる。この値は、計算上最も感度の良いローテーションラマン法を1とした場合の各測定法に必要な光強度比である。

Table 1 による計算結果以外に測定技術上の問題を考慮に入れなければならない。まず、ストークス法およびローテーションラマン法では1℃の精度で気温を計るために、0.3%の誤差で測定する必要がある点が挙げられる。現在のレーザーレーダーの技術レベルでレーザーの出力安定性や検出器のダイナミックレンジなどを考慮すると、0.3%の誤差を得ることはかなり困難である。

またストークス法においては測定値に視程の変動が大きく影響する点が挙げられる。さらにローテーションラマン法においては、ラマン線に比べて5桁ないし8桁も強度が大きく、しかも波数、数 10 cm^{-1} の近傍に存在するレイリー線の影響を受けずに測定する技術が現在でも未解決で残されている。

アンチ・ストークス法においては、測定技術上の問題はないが、表1に示す通り、感度が最も悪い。しかし、レーザーレーダーに現在要求されていることは、実用的なデータが得られるシステムである。この点を考慮し、現在一応実用的であるとされている温度誤差 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 距離分解能 100 m 程度の測定の可能性を検討する。

現在筆者らの研究室で開発中および計画中のレーザーレーダーシステムの特性は表2に示す通りである。これらの特性をレーザーレーダー方程式に代入して、距離に対して測定に要する時間を計算すると、図2の結果が得られる。

	SYSTEM 1 (開発中)	SYSTEM 2 (計画中)
レーザー出力 繰返し	20mJ/pulse (532nm) 50PPS	600mJ/pulse (532nm) 50PPS
受信望遠鏡 有効径	30cm	1.5m
PMの量子効率	20%	20%
光学系の効率	10%	10%

Table 2 レーザーレーダーシステムの特性

気温や湿度の様に比較的緩かに変化する大気パラメータは、20分程度が状態が一定と見なせる時間間隔であると言われている。このことから、図2によれば、SYSTEM I については約800m、SYSTEM 2については12km程度が測定限界と考えられ、SYSTEM I を用いても実用的に最小限度のデータは得られようである。

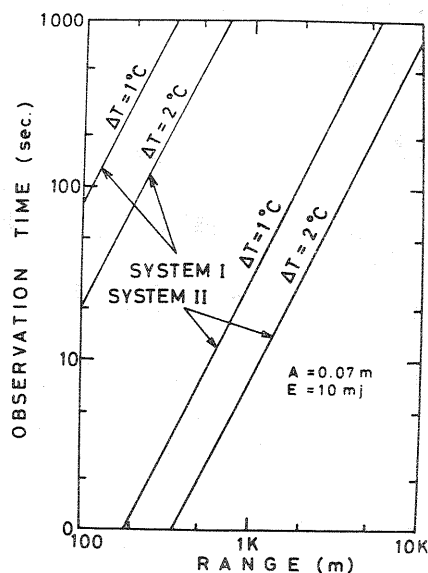


Fig.2 大気温度の距離に対する測定時間

まとめ 前節までの検討の結果、アンチ・ストーブス法は測定感度の点では不足である

が、新たな技術開発を待たずに測定が実現出来るという利点は見逃せず、近い将来における気温測定の方法としては有効であると考えられる。

現在、この観点から、 O_2 のアンチ・ストーブス・ラマン散乱の細かい性質について測定中である。

参考文献 1) R. G. Strauch, V. E. Derr and R. E. Cupp, Appl. Opt. 10, 2665 (1971)

2) J. Cooney, J. Appl. Meteor., 11, 108 (1972).

3) 清水, 小林, 稲場, 気象研究ノート, 116号 71 (1973).