

「レーザ・レーダとその周辺技術の進展」

Development of Laser Radar and Their Related Techniques

稲場文男 東北大学電気通信研究所

Humio Inaba Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

1. はじめに

レーザ光の主要な特徴は、強大な出力とすぐれたコヒーレンスの性質を備えていることで、これを利用して遠方の物体や状態の検知をはじめ、距離、方向、大きさ、形状、速度、密度、組成などの諸情報を光学的に遠隔測定する装置がレーザ・レーダ（Laser Radar）である。一部（特に気象学関係）では、ライダー（Light Detection and Ranging）とも呼ばれている¹⁾。

レーザ・レーダの動作原理は、レーダという用語を併用していることから明らかな様に、従来からの電波やマイクロ波領域のレーダ（Radio Detection and Ranging）と共通しており、機能の面でも類似のものが多い。例えば、地上物体の測距や移動物体の速度測定、人工衛星トラッキング、月面測距などがそれであり、従来のレーダ技術の光領域への拡張と見ることが出来る。しかしながら、これらの応用分野においてレーザ・レーダは、その波長がマイクロ波に比べて3～4桁も小さいため、従来のレーダでは実現出来ない様な高い測定精度を実証しており、重要な計測手段となっている。

一方、このような従来のレーダといわば相補的な関係を保つ機能のほかに、それとは本質的に異なった新しい活用分野が幾つか見出されて来た。その一例として、マイクロ波やミリ波では検出不可能な微小な粒子（大気中の原子、分子、イオン、エアロゾル粒子、水滴など）がレーザ光に対して、それぞれに特有の相互作用を通して、大きい散乱断面積を持つ事に着目して開拓された、大気物理現象の観測への応用が挙げられる^{1), 2), 3)}。最近では、さらにこのような機能を発展させて、大気汚染に関するさまざまな情報の実時間・遠隔計測や分析にレーザ・レーダを利用するユニークな応用開発が活発に進められている⁴⁾ことも注目に値しよう。

2. レーザ・レーダの送受信方式

レーザ・レーダにおける送受信系の基本的構成は Fig. 1 に示した様なもので、光領域でのTR（送受）スイッチとして実用に供されるものが未開発のため、通常、送受信望遠鏡を分離して使用する。しかし、超遠距離の物体、例えば月面などの測距には送受信パルス間の時間差が大きいため、一つの望遠鏡を送受兼用する実例もある。

次に現在までにレーザ・レーダに応用されたレーザ発振器とその変調法や動作方式などの特徴をまとめると Table 1 のようになる。Qスイッチ・ルビー・レーザは従来、最も広く用いられて来たが、最近ではNd-ガラスやNd-YAGさらに、それらのジャイアント・パルス光の第2高調波が広く使用される様になった。また、N₂気体レーザや発振波長可変の色素レーザが大気汚染の分析や超高層大気成分の計測などの新しい応用に供せられる様になっている。GaAsなどの半導体ダイ

オード・レーザも小型簡易な点で、地上や海上での測距などに利用されている。なお、気体レーザを中心とする連続発振レーザの応用については後節で別に触れることにする。

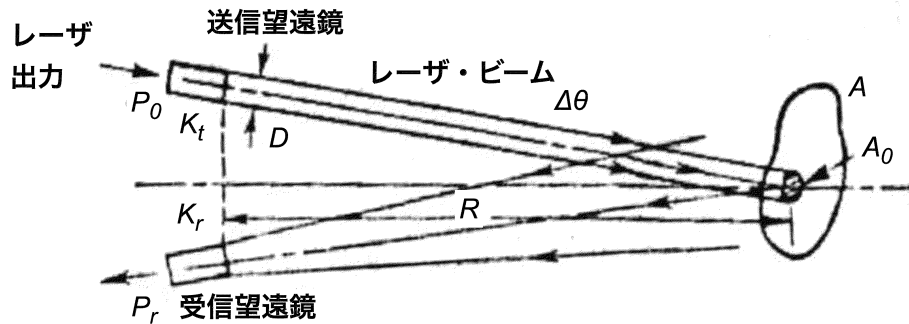


Fig. 1 レーザ・レーダの基本的構成

Table 1 レーザ・レーダに用いられた主要なレーザ発振器とその特性および動作方式

発振形式	レーザ物質	波長	変調方式		動作方式
			ノーマル発振 Q-スイッチ	繰返し周波数 最大	
パルス	ルビー	0.6943 μm	ノーマル発振 Q-スイッチ	繰返し周波数 最大 10~1Hz	パルス・レーダ (一, 二次元)
	Nd ³⁺ -ガラス	1.06	ノーマル発振 Q-スイッチ	最大 10~1Hz	
	Nd ³⁺ -YAG	1.06	Q-スイッチ	最大 5kHz	
	色素	0.36~1.1		最大 100Hz	
	N ₂	0.3371		最大 50Hz	
	GaAs	0.84		最大 10kHz	
	第2高調波(SH)	0.30 ~0.53		最大 100Hz	
連続	He-Ne	0.6328 1.15	AM, FM, PM, Pseudo Random Coding		ドップラ・レーダ レーザ測地装置
	Ar ⁺	0.4880 0.5145	同上		レーザ高度計 レーザ・カメラ
	CO ₂ (N ₂ -He-CO ₂)	10.6	AM, FM, PM		測距装置 ドップラ・レーダ

ここで、レーザ・レーダに応用した場合にレーザ光の諸性質が果たす本質的な役割、または長所をマイクロ波や他の光源の場合と比較すると次の様に分類される；(i) ビームの指向性 $\Delta\theta$ が鋭い事により受信効率が極めて増大する。(ii) 受信視野 Ω_r が小さくできるので、背景光雑音が減少出来、さらに方向分解能が高くなる。(iii) 単色性が優れているために、受信フィルターの波長帯幅 $\Delta\lambda$ を小さく出来て、効率を下げずに背景光雑音を減少出来る。(iv) パルス時間幅 τ が短いので距離測定精度が高くなる。ここで、距離測定精度 ΔR は

$$\Delta R = \frac{c}{2}(\tau + \tau_d) \quad (1)$$

で与えられ、 τ_d は受信系の時間分解能である。(v) 高出力および高速繰返しパルス特性は受信感度向上に寄与している。

次に、受信信号の検出表示法については、大別するとデジタルおよびアナログの二つになる。距離、方位、速度などの測定には時間や周波数のカウンターを用いて数値を表示するデジタル方式が広く用いられている。しかし、多様な大気物理現象の観測や未知物体の探知あるいは監視などには、Aスコープ（距離-強度）^{3), 5)}、Bスコープ（方位-距離-強度）⁶⁾、Cスコープ（仰角-距離-強度）⁶⁾、RHI（距離-高度-強度）⁷⁾、PPI（二次元位置-強度）などのアナログ表示が利用されている。

さらに、レーザ・レーダでは受信光が極めて微弱になる状態を取扱う場合が多く、その際には受信信号をアナログ電流の形より、個々の光電子パルスとして計数する光電子計数方式又は光子計数方式（デジタル方式）⁸⁾が感度上優れており、月面測距や超高層大気観測、大気汚染計測などに不可欠の検出法となっている。

3. 計測用レーザ・レーダ

3a. 測距および探知

地上可搬ないし航空機搭載用のレーザ測距装置の発振器としては、固体レーザからのジャイアント・パルスが通常用いられるが、GaAs半導体ダイオード・レーザのアレイ（Array）を使用して小型化した試みもある⁹⁾。動作は送信光パルスの一部を受けて受信系の計数回路のスタート・パルスとし、次に反射してきた信号パルスをストップ・パルスとして、その時間内のクロック・パルスの計数から距離を直接表示する方式が用いられている。

Table 2 は代表的な測距用レーザ・レーダの主な性能や特徴をまとめたものである。さらに、地形の測定や物体の形状探知等の目的には高速繰返し発振パルス・レーザを用いて高精度の表示方式が可能である。一方、レーザ測距の水中への応用、さらにレーザ光照射による目標物の映像の表示などが、測距ゲートや偏光弁別などの方法を用いて開発されている。その他、レーザ・トランシーバによって車両や航空機の排気ガスを探知したり、車の衝突防止に利用するなどの試みもある。さらに、飛行機の着地の進入路の監視や誘導のためのパルス・レーザ・レーダの方式開発も行われている。

3b. 人工衛星の追尾および月面測距

レーザ・レーダによる人工衛星の追尾、測距は全世界にまたがる Baker-Nunn カメラによる観測網の測定を補って衛星軌道の詳細な情報を得るために1965年に米国で計画されたもので、同時にレーザ光の伝搬特性の研究等も行われている¹⁰⁾。この様な目的でリトロ反射器を備えた人工衛星が米国、フランス、ソ連で今迄に多数打ち上げられた。これまでの実験はルビーのジャイアント・パルスを用いて行われており（Table 3 参照）、ビーム断面積が人工衛星の断面積より大きいため、受信電力は R^4 に逆比例している。実際の受信電力はレーザ・パルスのエネルギーのばらつき、衛星への入射角、ビーム内のエネルギー分布、大気中のゆらぎ、速度光行差などにより変化している¹¹⁾。

Table 2 レーザ測距装置の代表的な性能および特徴

形式	可搬型	可搬型	地上, 航空機搭載型
レーザー波長	6943 Å (ルビー)	8440 Å (GaAs)	5320 Å (Nd-YAG,SH)
ピーク出力	1~2 MW	9 W	~1 MW
パルス幅	~20 ns	100 ns	~25 ns
繰返し周波数	0.1 Hz	330 Hz	100 Hz
送信望遠鏡口径	5 cm	~5 cm	
受信望遠鏡口径	5 cm	14 cm	
検出器	光電子増倍管	同左	同左
最大測距可能距離	10~20 km	~10 km	~16 km
測距精度	±5 m	±5 m	±0.15 m
方位精度	±0.5 mrad		±0.1 mrad

一方、月面からのレーザー光の反射検出は1962年にMITで最初に試みられ、引続きソ連やフランスでも実験が行われた。それらの測距精度は200m程度であった。1970年以来の米国のアポロ計画とソ連の無人探査計画により、月面上に数個の回折限界に近い指向性を有するリトロ反射器が設置され、測距効率および精度が飛躍的に向上するに至った^{12, 13)}。この測定には米国、ソ連、フランス、日本などが参加している。Table 3 は人工衛星追尾および月面測距レーザー・レーダの代表例の特性の比較を示すものである。後者の測定精度は ± 30cm であり、この値はレーザー・パルス幅と光電子増倍管の特性により制限され、最終的には ± 15cm の精度が期待されている。Fig. 2 に月面測距の測定結果の一例として、地球と月の往復の時間間隔の予測値を原点とした場合の、受信光電子パルスのカウント数の時間分布のヒストグラムを示す²⁾。ここでも光電子計数検出法が活用されており、カウント数1の背景光雑音パルス列の中から、信号光パルスが高いカウント数で検出されている。この様な月面の高精度の測距は世界各国で地道な研究が進められており、相対論に基づく重力波の検証などの基礎的な問題への関心と共に、月の力学的挙動や地殻変動などの月および地球物理学上貴重な資料の蓄積が行われつつある。

Table 3 人工衛星追尾および月面測距用レーザ・レーダの特性の概要

用途	人工衛星追尾		月面測距	
	¹⁰⁾	¹¹⁾	¹²⁾	¹³⁾
レーザ波長	6943 Å (ルビー)	同左	同左	同左
ピーク出力	8 MW	20 MW	350 MW	400 MW
パルス幅	60 ns	50 ns	20 ns	18 ns
送信望遠鏡口径	~10 cm	10 cm	300 cm	188 cm
受信望遠鏡口径	150 cm	65 cm	300 cm	188 cm
干渉フィルタ幅	7 Å	1 Å	3 Åおよび0.7 Å	10 Å
最大測距可能距離	3500 km	>1500 km	>4x10 ⁵ km	>4x10 ⁵ km
測距精度	~2 m	±1.5 m	±0.3 m	

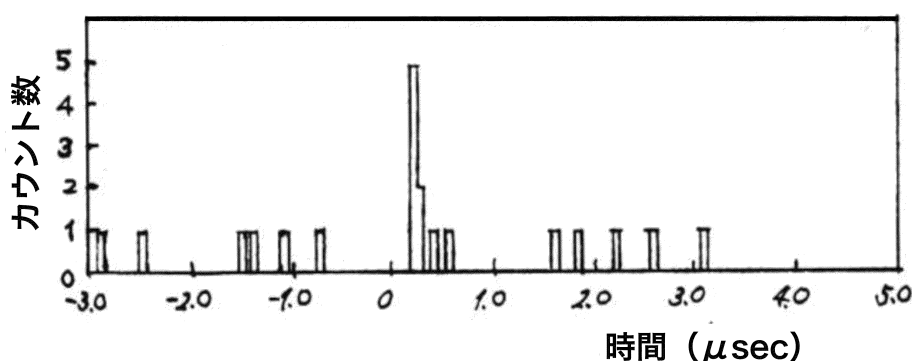


Fig. 2 月面測距における送受信光パルスの時間間隔の測定結果 (レーザ発射数：50ショット，時間原点は予測値)

4. 大気観測用レーザ・レーダ

レーザ光の波長はマイクロ波やミリ波に比べて3~4桁程度小さいので，これらの電波では検出不可能であった大気中に浮遊する微小粒子（浮遊粉塵や汚染粒子よりなるエアロゾルや水滴粒子など）からの散乱効率が極めて大きくなる。Fig. 3は電磁波の波長と，大気中に存在するさまざまな粒子や日常経験するいろいろな粒子の大きさを比較したものである^{3), 4)}。

一般に波長 λ に比べて粒子半径 a が十分小さい領域 ($2\pi a/\lambda \ll 1$) で生じるレーリー散乱に比べて，両者が同程度の領域 ($2\pi a/\lambda \sim 1$) でのミー散乱の散乱断面積は著しく大きくなることが知られている。しかし，このような古典的なミー散乱では得ることが出来ない，大気中の原子や分子の状態についてのさまざまな情報は，レーリー散乱やラマン散乱を通して知ることが可能であり，従来のレーダ技術では及ばなかった新しい領域を開拓しつつある⁴⁾。さらに，原子や分子成分との共鳴的な相互作用（自然放出や吸収）も有用であり，それらの散乱や放出，吸収現象を介して（Table 5 参照）レーザ・レーダは多種多様な大気現象の観測に独自の重要な立場を占めるに至っている。

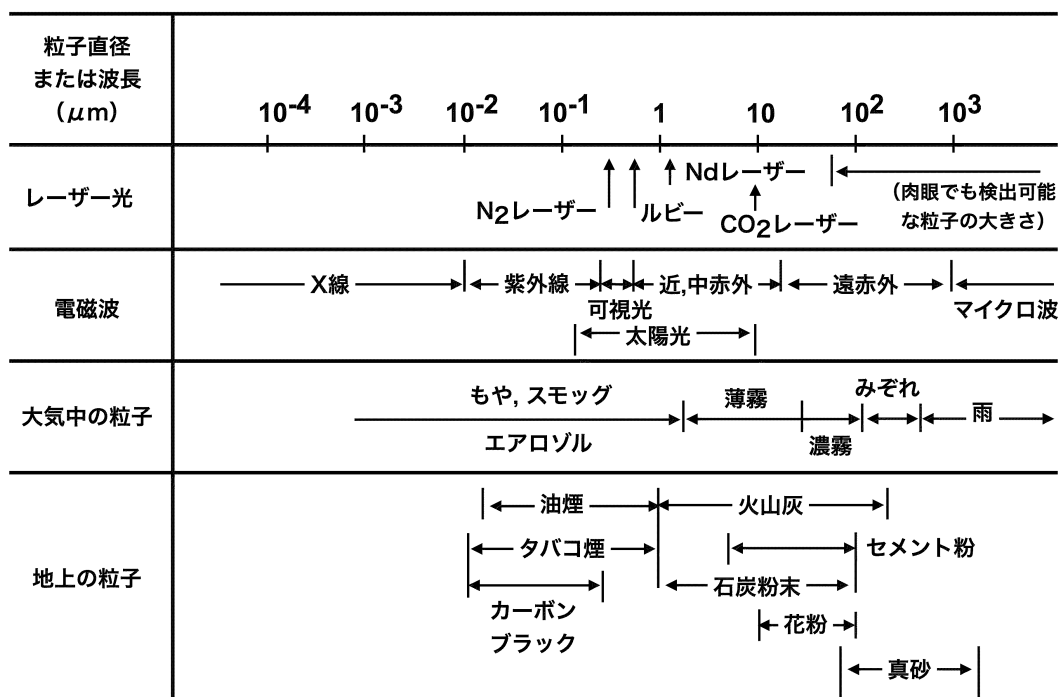


Fig. 3 電磁波の波長と大気中および地上の種々の粒子の大きさの比較

Table 4 に、さまざまな目的に使われる大気観測用レーザ・レーダの主要な特徴を示す。

Table 4 大気観測用レーザ・レーダの代表例の動作および特性

用途	気象現象観測	超高層大気観測	27)	
			大気汚染分子成分観測	28) 超高層Na原子観測
観測対象	エアロゾル, 水滴	エアロゾル, 空気分子	N ₂ , O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , NOなど	Na原子
散乱方式	ミー散乱	ミーおよび レイリー散乱	ラマン散乱	共鳴散乱 (蛍光散乱)
レーザ波長	6943 Å (ルビー)	6943 Å (ルビー)	5320 Å (Nd-YAG, SH)	5896 Å (色素レーザ)
ピーク出力	10 MW	100 MW	1 MW	10 kW
パルス幅	30 ns	10 ns	20 ns	0.4 ns
送信望遠鏡口径	30 cm	50 cm	8 cm	97 cm
受信望遠鏡口径	30 cm	50 cm	50 cm	97 cm
干渉フィルタ幅	4 Å	10 Å	15 Å	10 Å
観測距離	0.2~48 km	30~120 km	0.1~1 km	~120 km
検出表示方式	Aスコープ	光電子計数	光電子計数	光電子計数

4 a. 大気中の粒子成分の観測（ミー散乱の利用）

(i) 気象現象の観測および検出

地上約10km以下の対流圏には、無数のエアロゾル粒子や水滴、氷晶などが浮遊し、種々の気象現象に伴って運動している。米国SRI（スタンフォード研究所）では低高度での快晴大気の観測を行い、エコー波形の不連続な面がほぼ気温逆転層に一致することを見出し、逆転層の立体的検出が可能な事を示した¹⁴⁾。さらに、雲の下端および頂上の高度測定、夜間に肉眼で検出できない雲や霧の観測、雲の生成消滅過程の追跡などを行っており^{1), 5)}、最近では大気中の混合層や温度逆転層の分布などを走行中に実時間で観測出来る測定車の実用化を進めている。

一方、東北大学では我が国で最初にレーザ・レーダを試作し¹⁵⁾、大気中のレーザ・ビームの伝搬特性を調べ、レーザ・レーダによる大気減衰率および視程の定量的測定を行うと共に、煙霧や雲などの粒子密度分布の解析法を明らかにした³⁾。以後、各国でレーザ・レーダによる斜め方向の伝搬特性測定の研究が行われ^{16), 17)}、空港や海上での視程測定に新しい分野が開かれつつある。さらに、晴天乱流の検出についても実験的に研究が行われている¹⁸⁾。また、煙突の有効高の計測や排煙の大気拡散状態の三次元的な測定にも利用されて、大気汚染の複雑な様相の解明に役立つ事が示され¹⁹⁾、レーザ・レーダは局所的な大気の観測手段としてユニークな実用性を発揮しつつある。

(ii) 地球高層および超高層大気の観測

1963年にMITのグループはルビー・レーザ光を用いて地球超高層からの散乱の観測を行い、60~90 km および 110 km~140 km の高度から微弱ではあるがエコーが検出された²⁰⁾。これらの散乱層は流星塵によるエアロゾル層と推定された。その後、スウェーデンやアラスカにおける観測では低い方の層のみが見出されたが、ジャマイカやイギリスでは散乱層は検出されず、散乱層の存在に関して種々の議論が行われた²¹⁾。

高度20~30 kmの高層大気においても、ルビー・レーザ光を用いた散乱光測定によりエアロゾル層が多数観測され²¹⁾、成層圏の底部のトロポポーズの位置の季節的移動もラジオゾンデによる測定とほぼ一致する事が明らかにされている。この様なレーザ・レーダによる地球高層ないし超高層の物理的状態の観測は、従来のサーチライトやロケットを用いた観測に比べて簡便で、しかも有力な手段であるために、世界的規模で広範囲かつ長期にわたり進められている。

4 b. 大気中の原子、分子成分の計測

ミー散乱はいろいろ有用であるが、粒子の大きさが波長と同程度の場合に生じる古典的散乱であり、大気中に混在する原子や分子を選択的に定量測定するためには、ミー散乱以外の光と物質の相互作用を利用するレーザ・レーダ方式に頼らなければならない^{4), 22)}。Table 5はこの様な観点より、レーザ・レーダによる大気中の種々の情報計測のための原理的方式を総括して、分類、比較したものである^{4), 23)}。参考のために古典的なミー散乱の場合を含めて、波長域 0.3~0.4 μm の入射光に対するSO₂分子1個当たりの各相互作用の微分断面積の概略値を示しておく。

(i) ラマン散乱方式

ラマン散乱は、レーザ光の照射によりそれぞれの分子に固有の周波数シフトを伴って別の波長で生じるため、大気中の種々の分子成分のラマン散乱光を分光することにより分子の種類を選別と共に、各分子の密度の測定が可能である。この方式により、大気の主成分であるN₂、O₂、H₂O分子等の観測が地上3km程度の高度まで行われている²⁴⁾。一方、多種類の微量な大気汚染分子を遠隔的に分析測定するレーザ・ラマン・レーダが東北大で提案、実験され^{25), 26)}、距離約1kmで数100ppmの濃度のSO₂、CO₂、NO、CO等の検出に成功し、さらに煙突からの排煙の遠隔・定量分析に実用化された²⁷⁾。

(ii) 共鳴散乱方式

送信レーザー光の波長が物質の固有遷移状態との共鳴に近づくと、相互作用の断面積が著しく増大することは、共鳴効果として知られている (Table 5 参照)。イギリスのRSRSのグループは、1969年にNaのD₁線の波長に高精度で同調させた色素レーザーを用いて、高度90 km 付近の大気中の極めて微量なNa原子層の検出に成功した²⁸⁾。この測定は、振動子強度の大きな原子の共鳴線による蛍光散乱を利用したもので、共鳴散乱方式と呼ばれている。超高層におけるNa以外の他の原子や分子もこの方式で測定が可能と見られている。さらに、共鳴レーリ-散乱を利用すれば大気中の汚染金属蒸気原子の検出や環境濃度測定も十分期待されよう^{4), 22)}。

(iii) その他の方式

この他、大気汚染の計測に実用可能性のある方法として、Table 5 にも示した様に、レーザー光の吸収強度より分子密度分布を求める共鳴吸収方式や共鳴ラマン散乱方式^{4), 23)} などがあり、発振波長可変の色素レーザーや光パラメトリック発振器、赤外ダイオード・レーザー等の利用が考えられている⁴⁾。レーザー・レーダによる大気汚染の測定の方法は従来の化学的なウェット法に比べて、ドライで、実時間・遠隔計測が可能など本質的に優れた特徴を備えており、今後広範な実用化が進むものと予測される。

5. CWレーザー・レーダ

最後に、ドップラ・レーダや探知、地形測定などのために連続発振レーザーを利用するレーダ方式に触れておこう。ドップラ・レーザ・レーダは He-Ne や CO₂ 気体レーザーとヘテロダイン検出法を組合わせたもので、移動物体の速度測定や航空機に搭載して速度を精密に測定する航法装置として実用に供されているものもある。MITでは航空機や車両の速度を0~235マイル/時まで測定出来る装置を開発し²⁹⁾、また検出したスペクトルの形により物体の種類を微細に識別できることも示された。その他、レーザーによる液体流速や回転速度、粒子速度分布の測定などが実験室内で研究されているが、これらをレーダ方式にして遠隔測定を行うことも実用上有用であろう。

一方、レーザー測地装置やレーザー高度計は連続発振レーザー光に多重周波数の変調を加え、送信ビームと受信ビーム間の位相差を検出することにより、物体までの距離または高度を測定するものである³⁰⁾。前者では3~8kmの距離を 1×10^{-6} (あるいは ± 1 mm) の高精度で、また後者では地上300mの高度で約3cmの精度で高度変化が測定出来て、いずれもマイクロ波を利用した場合に比べて1桁近い測定精度の改善が得られている。応用としては飛行機によるさまざまな地形の精密測定や地形図作成をはじめ、多方面にわたっている。

その他、夜間の地上探知用として開発されたレーザー・カメラはHe-Neレーザーを用い、航空機の進行に伴って二次元の映像を記録する方式を用いている。さらにレーザー光によるSidelookingレーダ³¹⁾では、レーダにより得られた地形や物体などの二次元情報をホログラフィ技術を利用して光情報処理を行う事により測定精度の向上を計もので、積極的な開発が進められている。

Table 5 レーザ・レーダによる大気情報計測法の基本的分類と比較

相互作用の分類		波長関係 λ_0 : 入射光 λ_l : 散乱光 (または 放出光)	共鳴効果		相互作用の大きさ (微分断面積: cm^2/str)		大気中での分子、原子との衝突による quenching 効果	実用上の主要な問題点
			off-resonance (レーザー波長の同調不要)	resonance (レーザー波長の同調必要)	off-resonance	resonance		
散乱	Mie ($ak \geq 1$)	$\lambda_0 = \lambda_l$	どんな λ_0 でも生じる	なし	$\sim 10^{-26} \sim 10^{-8}$		なし	粒子密度分布の解析法
	Rayleigh ($ak \ll 1$)	$\lambda_0 = \lambda_l$	生じる	共鳴 Rayleigh 散乱	$\sim 10^{-26}$	$\sim 10^{-23}$	なし	Mie 散乱成分との分離
	Raman ($ak \ll 1$)	$\lambda_0 \neq \lambda_l$	生じる	共鳴 Raman 散乱	$\sim 10^{-29}$	$\sim 10^{-26}$	なし	散乱強度を大きくするために短波長を使用
放出	自然放出	$\lambda_0 = \lambda_l$ (蛍光散乱)	常に共鳴効果を伴う			$\sim 10^{-26}$	影響大	Mie, Rayleigh 散乱成分との分離
		$\lambda_0 \neq \lambda_l$				$\sim 10^{-26}$ (quenched)		広帯域にわたる背景光の除去
吸収		($\lambda_0 = \lambda_l$)	常に共鳴効果を伴う			$\sim 10^{-20}$	あり	距離分解測定法 吸収量の測定精度

6. おわりに

以上、レーザ・レーダについて概説したが、歴史的に見るとレーザの真の新しい工学的応用はレーザ・レーダに始まったと言っても過言ではない。現在の技術と過去30年以上にわたるマイクロ波レーダの発展経過を対比すると、新しい機能や現象追求する初期の段階を経て、実用的な精度とシステムとしての総合的な動作の実現のための着実な研究開発が行われる次の段階へと移行しつつある様に見受けられ、それに伴って各分野で実用価値が認められて来ている。今後、さらにレーザの高出力、高性能化と周波数可変なコヒーレント光源の実用化や周辺技術の進展に伴い、高度化されたレーザ・レーダ・システムの応用が進むものと期待されよう。

文献

- 1) たとえば, R. T. H. Collis, Lidar in "Advance in Geophysics," Vol. 13, 113, Academic Press (New York) (1969); R. T. H. Collis, Lidar, Appl. Optics, 9, 1782-1788 (1970).
- 2) 稲場文男, 小林喬郎, エレクトロニクス 11, 381 (1966).
- 3) 稲場文男, 小林喬郎, 市村勉, 森久光雄, 伊藤弘昌, A-スコープ方式レーザ・レーダの基本的動作特性, 電子通信学会誌 51-B, 417 (1968), および A-スコープ方式レーザ・レーダによる大気伝搬特性の測定とエコー波形の解析 51-B, 425 (1968).
- 4) たとえば, 稲場文男, レーザーによる大気汚染の測定, 応用物理, 40, 1261 (1971).
- 5) C. A. Northland, R. C. Honey and E. Evans, Laser radar for meteorological observations, Review of Scientific Instruments, 37 (4), 393-400 (1966).
- 6) T. Takahashi, K. Goto and Y. Higuchi, An experimental scanning laser radar, IEEE J. Quantum Electronics, QE-5, 328-329 (1969).
- 7) P. M. Hamilton, The application of a pulsed-light rangefinder (lidar) to the study of chimney plumes, Phil. Trans. Roy.Soc. London, A. 265, 153-172 (1969).
- 8) たとえば, 市村勉, 稲場文男, 極微弱光の情報検出法の研究, 応用物理, 39, 913-921 (1970).

- 9) B. S. Goldstein and G. F. Dalrymple, Gallium arsenide injection laser radar, Proc. IEEE, 55, 181-192 (1969).
- 10) P. H. Anderson, C. G. Lehr, L. A. Maestre and G. L. Snyder, "Laser experiments for determining satellite orbits", IEEE J. of Quantum Electronics, vol. QE-2, pp. 215-219, August 1966, doi: 10.1109/JQE.1966.1074029.
- 11) 橋篤志, レーザーによる人工衛星測距, 応用物理, 39, 563-568 (1970): 竹内端夫, 富田弘一郎, 長谷川幸雄, 橋篤志, 山本眞吾, 高辻正基, レーザによる人工衛星測距, 日立評論 52, 343-349 (1970) (1970年4月号pp.45-51) .
- 12) C.O. Alley, R. F. Chang et al., Apollo 11 laser ranging retro-reflector: Initial measurements from the McDonald observatory, Science 167, 368-370 (1970) および Laser ranging retro-reflector: Continuing measurements and expected results, Science 167, 458-460 (1970).
- 13) 村沢健吾, 日本学術振興会 光と電波の境界領域 第130委員会研究会資料, 昭和47年1月
- 14) R. T. H. Collis, F. G. Fernald and M. G. H. Ligda, Laser Radar Echoes from a Stratified Clear Atmosphere, Nature 203, 1274-1275 (1964).
- 15) 稲場文男 他, 昭和40年 物理・応用物理学合同講演会予稿集, 7p-K-5 (1965).
- 16) 内藤恵吾, 田端功, 横田良夫, 電子通信学会アンテナ・伝播研究会資料 AP-69-12 (1969).
- 17) W. Viezee, E. E. Uthe and R. T. H. Collis, Lidar Observations of Airfield Approach Conditions: An Exploratory Study, J. Appl. Meteorol., 8, 274-283 (1969).
- 18) J. D. Lawrence, Jr., M. P. McCormick, H. Melfi and D. P. Woodman, Laser backscatter correlation with turbulent regions of the atmosphere, Appl. Phys. Letters, 12, 72 (1968).
- 19) E. W. Barrett and O. Ben-Dov, Application of the Lidar to Air Pollution Measurements, J. Appl. Meteorol. 6, 500 (1967).
- 20) G. Fiocco and L. D. Smullin, Detection of scattering layers in the atmosphere (60-140 km) by optical radar, Nature, 199, 1275-1276 (1963).
- 21) たとえば, G. S. Kent and R. W. H. Wright, A review of laser radar measurements of atmospheric properties, J. Atmosph. Terr. Phys., 32, 917-947 (1970).
- 22) 稲場文男, 昭和46年電気学会全国大会シンポジウム論文集 "公害防止に関する技術的諸問題", S5-3 (1971); 電子展望, 8, 76 (1971); OHM, 58 (10月号), 83 (1971).
- 23) T. Kobayasi and H. Inaba, Proceedings 11th Symp. Electron, Ion and Laser Beam Technology (Boulder, May 1971), San Francisco Press (1971).
- 24) たとえば, S. H. Melfi, J. K. Lawrence and M. P. McCormick, Observation of Raman scattering by water vapor in the atmosphere, Appl. Phys. Letters, 15, 295-297 (1969).
- 25) H. Inaba and T. Kobayasi, Laser-Raman radar for chemical analysis of polluted air, Nature, 224, 170-172 (1969); T. Kobayasi and H. Inaba, Spectroscopic detection of SO₂ and CO₂ molecules in polluted atmosphere by laser-Raman radar technique, Appl. Phys. Letters, 17, 139 (1970).
- 26) T. Kobayashi and H. Inaba, Laser-Raman radar for air pollution probe, Proc. IEEE, 58, 1568 (1970).
- 27) S. Nakahara, K. Ito, S. Tamura, M. Kamokiyo, H. Inaba and T. Kobayashi, Mobile laser Raman radar for monitoring stack effluent pollutants, IEEE J. Quantum Electronics, QE-7, 325 (1971); Invited paper of 1971 Conf. Laser Eng. and Appl., Washington, D. C., June 1971.

- 28) M. R. Bowman, A. J. Gibson and M. C. W. Sandford, Atmospheric sodium measured by a tuned laser radar, *Nature*, 221, 456-457 (1969); A. J. Gibson and M. C. W. Sandford, The seasonal variation of the night-time sodium layer, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 33, 1675-1684 (1971).
- 29) H. A. Bostik, A carbon dioxide laser radar system, *IEEE J. Quantum Electronics*, QE-3, 232 (1967).
- 30) K. B. Earnshaw and J. C. Owens, A dual wavelength optical distance measuring instrument which corrects for air density, *IEEE J. Quantum Electronics*, QE-3, 544 (1967).
- 31) L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcello and W. E. Vivian, On the application of coherent optical processing techniques to synthetic-aperture radar, *Proc. IEEE*, 54, 1026-1032 (1966).