

特別講演

「レーザ・レーダとその周辺技術の進展」

Development of Laser Radars 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、強大な出力と与えら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、強度、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。

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、機能の面でも類々のものが多い。例えば、地と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も出来る。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ような高い測定精度と実証しており、重要な計測手段となっている。

一方、この様な従来のレーダと、いかに相補的な関係を保つ機能の他に、それとは本質的に異なった新しい法

用分野が幾つも見出されて来た。その一例として、マイクロ波やシラ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）がレーザー光に対して、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発された大気物理現象の観測への応用が挙げられる。^{リ、2、3} 最近では、さらにこの様な機能と発展させて、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ーレーダと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ことも注目し値しよう。

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 に示した様のもので、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、送受信望遠鏡と分離して使用する。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ホ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・レーダに应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 + Nd-YAG さらに、それらのジェイアント・パルス光のオと高調波が広く使用される様になった。また、 N_2 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。

ここで、レーザ・レーダに应用した場合にレーザ光の諸性質が果たす本質的な役割り。それ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、受信効率の極めて増大する。(ii) 受信視野 Ω_r が小さく（小さいので、背景光雑音の減少も来る）、さらに方位分解能が高くなる。(iii)

単色性が優れているために、受信フィルターの波長帯域幅 $\Delta\lambda$ を小さく出来て、効率も下げずに背景光雑音を減小出来る。(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多く用いられる。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)²⁾、Bスコープ(方位-距離-強度)³⁾、Cスコープ(仰角-距離-強度)⁴⁾、RHI(距離-高度-強度)⁵⁾、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と取扱う場合が多く、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、または光子計数方式(デジタル方式)⁶⁾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

3.2 測距および探知

地上可搬、特に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。⁷⁾ 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。一斉、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、すなわち、距離ゲートや偏光弁別方式の方式を用いて開発されている。その他、レーザ・トランシーバに於い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、測距は全世界にわたる Baker-Mann コー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播特性の研究等も行われている。⁽¹⁾ 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、合計に多数打ち上げられた。これらでの実験は、ルビーのエキサイメ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、速度光行差効果により変化している。⁽²⁾

一斉、月面からのレーザ光の反射検出は、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。これらの測距精度は 200m 程度であった。1970年以後の、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。^{(2), (3)} 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。後者の測距精度は $\pm 30\text{cm}$ であり、この値はレーザパルス幅と

光電子増倍管の特性により制限され、最終的には±5cmの精度が期待されている。Fig. 2に、月面距離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真とした場合の、受信光電子ノルスのカウント数の時間分布のヒストグラムを示す。この光電子計数検出法が活用されており、カウント数の背景光雑音ノルス列の中から、信号光ノ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課題への関心と共に、月の科学的挙動や地殻変動などの月および地球物理学に貴重な資料の蓄積が行われている。

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）や成るエアロゾル、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、大気中に存在する種々の粒子や、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。

一般に、波長λに比べて粒子半径aが十分小さい領域（ $2\pi a/\lambda \ll 1$ ）で生じるレーザ散乱に比べて、両者が同程度の領域（ $2\pi a/\lambda \sim 1$ ）でのミ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、この様な古典的なミ散乱では得ること出来ず、大気中の原子や分子の状態についての正確な情報は、レーザ散乱やラマン散乱を通じて知る事が可能であり、従来のレーザ技術では及ばなかった新しい領域を開拓しつつある。さらに、原子や分子成分の共鳴的な相互作用（自然放出や吸収）も有用であり、これらの散乱や放出、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。

Table 4に、さらなる目的に使用される大気観測用レーザ・レーダの主要な特性を示す。

4.2. 大気中の粒子成分の観測（ミ散乱の利用）

(i) 大気現象の観測 及び検出
地上約10km以下の対流圏には、無数のエアロゾル粒子や

氷滴、氷晶¹⁾が浮遊し、種々の気象現象に伴って運動している。米國 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面がほぼ、気温逆転層に一致する²⁾ことを見出し、逆転層の立体的検出が可能なる³⁾事と示した。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、⁴⁾などを行っており、⁵⁾最近では大気中の混合層と温度逆転層の分布などを実行中に実時間で観測す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・レーダを製作し、⁶⁾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かにした。⁷⁾以後、各所でレーザ・レーダによる斜め方向の伝搬特性測定の研究が行われ^{8), 9)}、空港や海上での視程測定に新しい分野が開かれた。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。¹⁰⁾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¹¹⁾が示され、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 110~140 km の高度から、微¹²⁾ではあるがエコーを検出した。¹³⁾これらの散乱層は流星塵によるエアロソル層と推定された。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。¹⁴⁾

高度 20~30 km の高層大気において、ルビー・レーザ光を用いた散乱光測定によりエアロソル層が多数観測され¹⁵⁾、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テによる測定とほぼ一致する事¹⁶⁾が明かにされている。この様なレーザ・レーダによる地球高層乃至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、しかも有効な手段であるために、世界的規模で広範

用の長期にわたる進められている。

4b. 大気中の原子、分子成分の計測

ミ-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-散乱以外の光と物質の相互作用を利用するレーザ・レーザ方式に頼らなければならぬ。^{(4), (22)} Table 5 はこの様な観点より、レーザ・レーザによる大気中の種々の情報計測のための原理的式を総括して、分類、比較したものである。^{(4), (23)} 参考のために古典的なミ-散乱の場合も含めて、波長域 $0.3 \sim 0.4 \mu m$ の入射光に対する SO_2 分子1個当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の違いと共に、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 N_2 , O_2 , H_2O 分子等の観測が地上 3 km 程度の高度まで行われている。⁽²⁴⁾ 一方、各種類の微量な大気汚染分子と遠隔的に分析測定するレーザ・ラマン・レーザが東北大で提案、実験され、^{(25), (26)} 距離約 1 km で数 100 ppm の濃度の SO_2 , CO , 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 D_1 線の波長に高精度で同調させた色素レーザを用いて、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。超高原における 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、共鳴レーザ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

十分期待される。

(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定める 共鳴吸収方式や 共鳴ラマン散乱方式^{21,22)} などが、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、赤外ダイオド・レーザー等の利用が考えられている。レーザー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、今後広汎な実用化が甚むものと予測される。

5. CW レーザ・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角をつけてみる。

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と組合せたもので、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では航空機や車輪の速度を 0~235 マイル/時 まで測定出来る装置を開発し、また、検出したスポットレの形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。²⁰⁾ 前者では 5~8 km の距離を 1×10^{-6} (あるいは $\pm 1mm$) の高精度で、また後者では地上 300m の高度で約 5cm 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目的、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・カメラはHe-Neレーザを用い、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。さらにレーザ光によるSidelookingレーダ²⁾では、レーザ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ム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図るもので、積極的な開発が進められている。

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無い。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と対比すると、新しい機能や現象追求を重視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る。

文 献

- 1) 参考文献 R. T. H. Collis, Lidar in "Advance in Geophysics", Vol. 13, 113, Academic Press (New York) (1969); Appl. Optics, 9, 1982 (1970)
- 2) 榎場文男, 小林高郎, エレクトロニクス 11, 381 (1966)
- 3) 榎場文男, 小林高郎, 市村勉, 森久光雄, 伊藤弘昌, 電子通信学会論文誌, 51-B, 417 および 425 (1968)
- 4) 参考文献 榎場文男, 応用物理, 40, 1261 (1971)
- 5) C. A. Northend, R. C. Honey and E. Evans, Rev. Sci. Instrum., 37, 393 (1966).
- 6) T. Takahashi, K. Goto and Y. Higuchi, IEEE J. Quantum Electronics, QE-5, 328 (1969).
- 7) P. M. Hamilton, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 265, 153 (1969)
- 8) 参考文献・市村勉, 榎場文男, 応用物理, 39, 913 (1970)
- 9) B. S. Goldstein and G. F. Dalrymple, Proc. IEEE, 55, 181 (1969)
- 10) P. H. Anderson, C. G. Lohr et al., IEEE J. Quantum Electronics, QE-2, 215 (1966)
- 11) 橋本志, 応用物理, 39, 563 (1970); 長谷川幸雄, 橋本志, 山本真吾, 高正王基他, 日立評論, 52, 343 (1970)
- 12) C. O. Alley, R. F. Chang et al., Science, 167, 368 および 485 (1970)
- 13) 村沢博臣, 日本学術振興会光電波の境界領域分科委員会研究会資料, 昭和47年1月
- 14) R. T. H. Collis, F. G. Fernald and M. G. H. Lidg, Nature, 203, 1274 (1964)
- 15) 榎場文男他, 昭和40年物理・応用物理学会合同講演会予稿集, 7p-K-5, (1965)
- 16) 内藤忠吉, 田端功, 横田良夫, 電子通信学会エレクトロニクス伝播研究会資料, AP-69-12 (1969)
- 17) W. Viezee, E. E. Uthe and R. T. H. Collis, J. Appl. Meteorol., 8, 274 (1969)
- 18) J. D. Lawrence, Jr, M. P. McCormick, H. Melfe and D. P. Woodman, Appl. Phys. Letters, 12, 172 (1968)

19) E. W. Barrett and O. Ben-Dov, *J. Appl. Meteorol.*, **6**, 500, (1967)

20) G. Fiocco and L. D. Smallin, *Nature*, **199**, 275 (1963)

21) Feizi, G. S. Kent and R. W. H. Wright, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, **32**, 917 (1970)

22) 稲場文男, 昭和46年電気学会全国大会 3303論文集“公害防止に関する技術的諸問題”, 55-3 (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) Feizi, S. H. Melfi, J. K. Lawrence and M. P. McCormick, *Appl. Phys. Letters*, **15**, 195 (1969)

25) H. Inaba and T. Kobayasi, *Nature*, **224**, 170 (1969); *Appl. Phys. Letters*, **17**, 139 (1970)

26) T. Kobayasi and H. Inaba, *Proc. IEEE*, **58**, 1568 (1970)

27) S. Nakahara, K. Ito, K. Kamekiyo, H. Inaba and T. Kobayasi, *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, *Nature*, **221**, 456 (1969); A. J. Gibson and M. C. W. Sandford, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, **33**, 1675 (1971)

29) H. A. Bostik, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-3**, 232, (1967)

30) K. B. Earnshaw and J. C. Owens, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-3**, 544 (1967)

31) L. T. Cutrona, *Proc. IEEE*, **54**, 1026 (1966)

Fig. 1

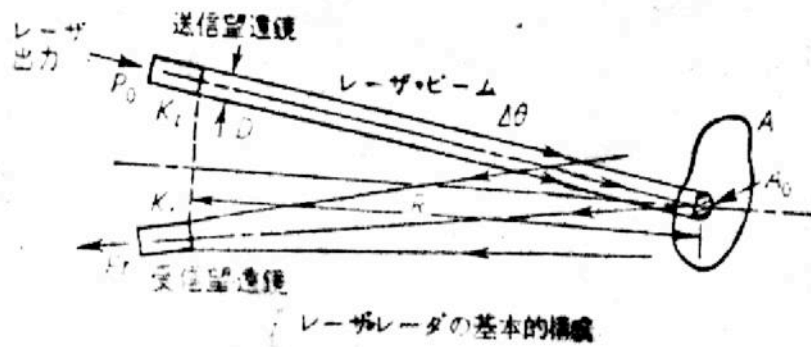
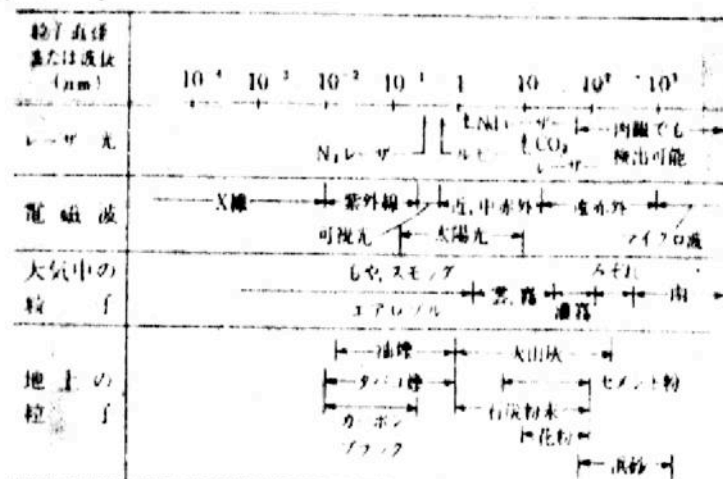


Fig. 2



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
(レーザー発射数: 50ショット, 時間原典は予測値)

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 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	
10 ¹⁰ V ス	ルビー	0.6943 ^{μm}	1-2IL共振 Q-スイッチ	乗波1周波数 最大 10~1Hz	10 ¹⁰ V ス・レーダ (一,二次元)
	Na ³⁺ -ガラス	1.06	1-2IL共振 Q-スイッチ	最大 10~1Hz	
	Na 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 500Hz	
	GaAs	0.84		最大 10 kHz	
	*2高調波(5H)	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 レーザ高度計 レーザカメラ	
	Ar ⁺	0.4880 0.5145	同上		
	CO ₂ (N ₂ -He-CO ₂)	10.6	AM, FM, PM	測距装置 ドップラ・レーダ	

Table 2 レーザ測距装置の代表的な性能
および特徴

形式	可搬形	可搬形	地上航空機搭載形
レーザー波長	6943Å (ルビ-)	8440Å (GaAs)	5320Å (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	4 cm	
検出器	光子増倍管	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

Table 3 人工衛星追尾 および月面測距用 レーザレーザの
特性の概要

用途	人工衛星追尾		月面測距	
レーザー波長	6943Å ¹⁰⁾ (ルビ-)	同左 ¹¹⁾	同左 ¹²⁾	同左 ¹³⁾
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	7Å	1Å	3Å 及び 0.7Å	10Å
最大測距可能距離	3500 km	> 1500 km	> 4 × 10 ⁵ km	4 × 10 ⁵ km
測距精度	~ 2 m	± 1.5 m	± 0.3 m	

Table 4 大気観測用レーザレーザ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	大気汚染分子成分観測 ²⁷⁾	超高層Na原子観測 ²⁸⁾
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-オスワレ-リー散乱	ラマン散乱	共鳴散乱 (蛍光散乱)
レーザ波長	6943 Å (UVB-)	1943 Å (UVB-)	5320 Å (Nd-YAG, SH)	5896 Å (緑レーザ)
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
干渉スルビ幅	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

Table 5 レーザレーザに 83 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_1 : 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 ($ak \gg 1$)	$\lambda_0 = \lambda_1$	どんな λ_0 でも生じる	なし	$\sim 10^{-26} \sim 10^{-8}$	なし	粒子濃度分布の解析法
	Rayleigh ($ak \ll 1$)	$\lambda_0 = \lambda_1$	生じる	共鳴 Rayleigh 散乱	$\sim 10^{-26}$ $\sim 10^{-25}$	なし	Mie 散乱成分との分離
	Raman ($ak \ll 1$)	$\lambda_0 \neq \lambda_1$	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 (蛍光散乱)	$\lambda_0 = \lambda_1$	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 広帯域にわたる背景光の除去
		$\lambda_0 \neq \lambda_1$			(quenched) $\sim 10^{-26}$		
吸収		$\lambda_0 = \lambda_1$	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