

レーザーと土木研究への活用

雪氷チーム

はじめに

1960年にルビーを媒質とするルビーレーザーが発明¹⁾されて以来、実に様々なレーザー光源が開発されています。身近なところではレーザーポインタや光通信がありますが、レーザーは土木分野にも広く利用されている技術です。ここでは、レーザーとは何か、どのような種類があるのか、土木分野の活用例に加えて法的な規制も紹介します。

Q 1：レーザー(laser)とは何ですか

A 1：レーザーは、原子や分子による光の誘導放出を利用して光波を増幅する²⁾、という意味の英語(light amplification by stimulated emission of radiation)の頭字語で表されます。たとえば、外部からエネルギーを与えられて高いエネルギーをもった状態(励起状態)の媒質から発生した光(電磁波)を、2枚の鏡で挟み、光が媒質を通過するたびに光子を誘導して増幅(誘導放出)させると、位相と波長がそろった光が鏡の裏から放出されます(図-1)。この光をレーザーと言いま

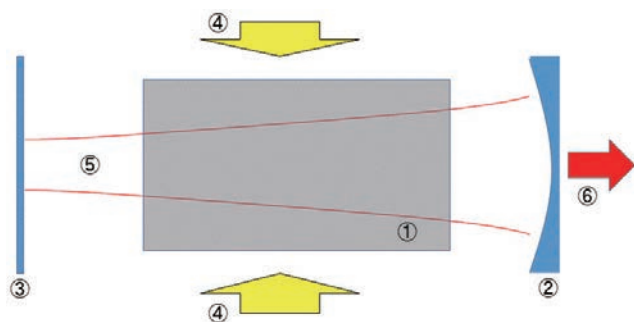


図-1 単純な光共振器の概略図

①レーザー媒質、②反射率が低い凹面鏡、③反射率が高い鏡、④外部エネルギー、⑤共振領域、⑥レーザー光。

す。このため、レーザーは1) 指向性と2) 収束性が良い特徴をもちます。その結果、3) 単位面積当たりの出力の高い光が得られます。

1) 指向性(直進性)

レーザーポインタの光をよく観察してみると、ほぼ一直線に進むように見えます。たとえば、波長0.6マイクロメートル($\mu\text{m}:10^{-6}\text{m}$)で、ビーム径が $\phi 0.2\text{cm}$ のとき、理想的なレーザーでは10m先にはわずか0.3cm、100m先でもわずか3cmしか広がりません²⁾。LED(light emitting diode)が3m遠方でおおよそ270°の広がり角³⁾があることを考えれば、レーザーは指向性に優れていることがわかります。

レーザー光の広がり角(θ)は、波長(λ)とビーム径(d)の関係(式-1)で示されます²⁾。

$$\theta \cong \frac{\lambda}{d} \quad \text{式-1}$$

波長の長いレーザー光の方が、より広がりやすいという性質があることも式-1から知ることができます。

2) 収束性

たとえば顕微鏡の対物レンズにレーザーを通すと、光を一点に集光させることができます。顕微分光法では、直径が $\phi 1\mu\text{m}$ ほどの微粒子の化学組成を知ることも可能です⁴⁾。しかし、空間的な限界もあります。回折限界は、一般的にはレンズの開口数と波長によって決まり、波長よりも小さく集光することはできません。つまり、顕微鏡で言うところ、波長よりも細かい構造を見ることができないという性質があります。他分野では回折限界を超える技術⁵⁾というのもありますので、回折限界とはごく一般的な考え方です。

3) 単位面積当たりの出力(強度)

一般的に光の出力単位は、ワット(W)が用いられますが、指向性が良いので単位面積当たりに照射される光(レーザー)の出力、すなわち強度(W/cm^2)を定量的に知ることができます。

レーザーポインタの出力が1mW(ミリワット、 10^{-3}W)、ビーム径が約 $\phi 0.2\text{cm}$ の場合、レーザー強度は約 $3.2\text{mW}/\text{cm}^2$ になります。遠方でビーム径が約 $\phi 2.0\text{cm}$ のとき、レーザー強度は $0.03\text{mW}/\text{cm}^2$ になります。このように、レーザー強度はビーム径(半

径の二乗)に依存しますので、出力よりも照射される面積を、できる限り正確に知ることの方が重要となります。

Q 2 : レーザーにはどのような波長がありますか

A 2 : レーザーの波長は数ミリメートル(mm : 10^{-3} m)からX線(ピコメートル~ナノメートル, pm~nm : 10^{-12} ~ 10^{-9} m)まであります。たとえば、レーザーポインタに利用される光は可視光であり、波長は約400~700nmです。目に見えない波長のレーザーは、たとえばレーザー距離計などに利用されています。市販品のレーザー距離計には、近赤外(波長 : 0.7 ~ 2.5 μ m)の波長が使われていることが多いようです。網膜の熱的損傷は、可視光から 1.4 μ mの波長領域で生じます⁶⁾。そのため、安全性が求められる場合には、 1.5 μ m以上の光源が利用されることが多いと考えられます。なお、一般的に波長が 1.5 μ m以上の光源はアイセーフ光源などと呼ばれています。ただし、アイセーフ光源も含めて、網膜の最大許容露光量(maximum permissible exposure: MPE)がレーザー強度、波長、パルス幅など、レーザーの仕様で決められています⁷⁾ので、レーザーを利用する際にはその特性を熟知しておく必要があります。

Q 3 : レーザーにはどのような発振方法がありますか

A 3 : レーザーは、波長だけでなく時間的な特徴もあります。連続発振(continuous wave ; CW)のCWレーザーは、連続して光を放出します。パルス発振のパルスレーザーは、時間幅の短いパルスで放出します。パルス幅はミリ秒(10^{-3} 秒)からフェムト秒(10^{-15} 秒)のものまであります。たとえば、ピコ秒(10^{-12} 秒)レーザーの場合、光の速度が約 3×10^8 m/sであることから、1ピコ秒の光パルスの長さは 0.3 mmであり、非常に短い距離のパルス幅で、薄膜の光とも言えます。また、Quasi CW (QCW) レーザーというのもあり、CW発振と同時にパルス発振も可能なレーザーです。

Q 4 : 出力の単位はどのように表記されますか

A 4 : CWレーザーの出力の単位はワット(W)が用いられますが、研究では上述したように単位面積当たりの強度(W/cm^2)を用いることをお勧めします。

パルスレーザーの場合は少し複雑です。パルス幅

(s)、繰り返し周波数(Hz)、パルスエネルギー(J)などのパラメータがあり、平均出力とピーク出力と目的によって表現方法が異なります。パルスレーザーの平均出力(W)は、パルスエネルギー(J)×繰り返し周波数(Hz)であり、ピーク出力(W)は、パルスエネルギー(J)÷パルス幅(s)で表現されます。よって、平均出力は1秒間の出力、ピーク出力は1パルス当たりの出力と言い換えることができます。なお、単位面積当たりのエネルギーの単位としてフルエンス(J/cm^2)が用いられます。

Q 5 : 土木研究にはどのような活用方法がありますか

A 5 : 地球上から月にレーザーを照射して、地球上と月面の正確な距離を計測した研究があります⁸⁾。測距技術としては最も長い距離を観測した一例です。このようにレーザーで距離を計測する技術をライダー(LiDAR)と呼びます。これは、光を検出する測距技術という意味の英語(light detection and ranging)の頭字語です。ライダーの電波を光に置き換えたものである意味から、レーザーライダー(laser radar)と呼ばれることもあります。レーザーによって照射された遠距離にある物質の反射光や散乱光を検出しますので、ライダーは土木分野でも広く利用されている技術です。なお、ライダーは成分分析(CO_2 やエアロゾル濃度計測)も可能な技術ですが、本稿におけるライダーとは、レーザー測距技術のことを指します。

軸を回転させるスキャナの架台と組み合わせてレーザースキャナとして利用すれば、たとえば、樹木高などを明らかにすることを目的とした林業⁹⁾、建設前後に詳細な地形を明らかにすることを目的とした建設業や地盤工学、高速道路の設計、河川や舗装管理だけでなく、通過する車両の種類・台数や速度の検知などへの利用もあります^{10) 11)}。なお、橋梁やトンネルに利用されるコンクリートの内部のヒビなどを検知する技術もあります¹²⁾。

Q 6 : レーザーを使うときの法的な規制はありますか

A 6 : 一部の業者が、使い方を誤ると危険な高出力の製品を低価格で大量に玩具市場に流したため、子供が事故を起こすケースが各地で発生しました。そこで、経済産業省は消費生活用製品安全法の特別特定製品にレーザーポインタ等電池駆動の携帯用レーザー応用装置を追加した省令を2001年に施行しています¹³⁾。

航空機に向かってレーザー光（可視光）を照射する等の行為を規制するための航空法施行規則の一部を改正する省令を、国土交通省航空局が2016年12月に施行しています¹⁴⁾。ただし、研究や観測目的等で利用されるレーザーについては本規制の対象外です。

先に述べたように、レーザーの使用に関する注意事項についてはJIS（Japanese Industrial Standards）の「レーザー製品の安全基準」（JIS C6802）⁷⁾に記載されています。JIS C6802に記載されている内容で利用者として知っておくべきことは、一般的には「レーザービームをのぞき込まない」、これに加えて高出力レーザーについては、「レーザービームや散乱光の目又は皮膚への被ばくを避ける」ことです。

おわりに

レーザーは様々な活用可能性を有しており、近年、土木分野も含めてレーザーが様々なところで利用され始めていますが、安全に利用するためには、以上のようなレーザーの基礎を理解しておく必要があります。

（文責：櫻井 俊光）

参考文献

- 1) T.H. Mainman, Stimulated Optical Radiation in Ruby, *Nature*, 187, 493, 1960.
- 2) 霜田光一、レーザー物理入門、岩波書店、1983.
- 3) 臼田昭司、作ってわかるLED照明活用、ISBN: 978-4-526-06733-4、2011.
- 4) Sakurai et al., A technique for measuring microparticles in polar ice using micro-Raman spectroscopy, *International Journal of Spectroscopy*, 2010, 384956, 2010.
- 5) 永井健治、回折限界を超えた超解像蛍光顕微鏡、*化学*、Vol.69(12)、21-26、2014.
- 6) 石川憲、レーザー製品の安全基準と作業安全、*Oplus E*、Vol.30(9)、940-945、2008.
- 7) JIS C6802、「レーザー製品の安全基準」、日本規格協会、2011.
- 8) P.L. Bender et al., The lunar laser ranging experiment, *Science*, 182, 229-238, 1973.
- 9) 加藤顕 等、簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法、*日緑工誌*、*Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology* 40(1)、136-141、2014.
- 10) J.C. Chang et al., Considerations for effective lidar deployment by transportation agencies, *Journal of the Transportation Research Record*, 2440, 1-8, 2014.
- 11) 染川智弘 等、「レーザー3D計測」特集、*レーザー研究*、44 (5)、300-326、2016.
- 12) 島田義則、レーザー超音波によるコンクリート内部欠陥のリモートセンシング技術、*建設機械*、45(11)、44-47、2009.
- 13) 消費生活用製品安全法特定製品関係の運用及び解釈について、経済産業省、消費生活用製品安全法のページ：http://www.meti.go.jp/policy/consumer/seian/shouan/contents/law_revise_list.htm、2010年12月24日
- 14) レーザー照射や風揚げの規制について、国土交通省航空局、http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk1_000048.html、2016年12月21日