

Some Idea of Lidar-System Planning

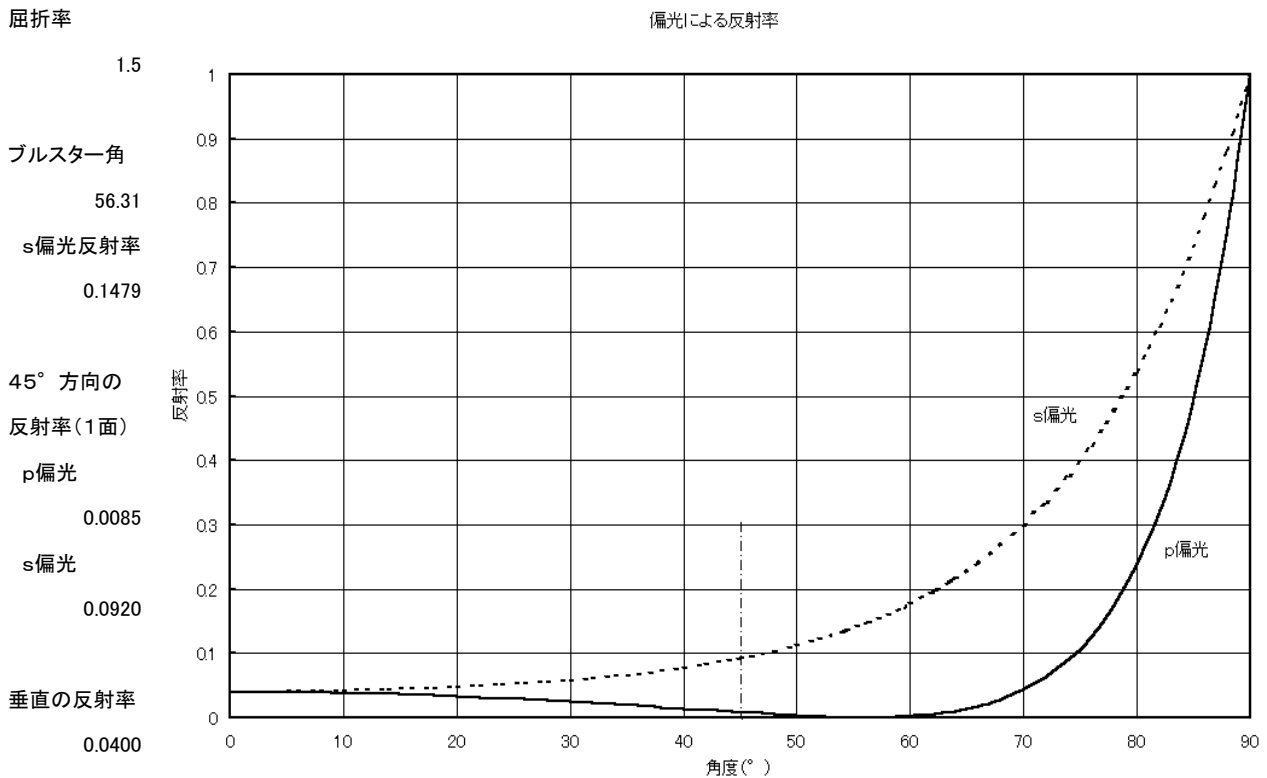
中島一光 ((株) 数理計画) Nakajima Kazumitsu(SUURI-KEIKAKU Co., Ltd)

最新の研究成果を発表される本シンポジウムには相応しくないかもしれないが、かつてライダシステムに関して「宇宙から海洋まで」「微量成分の分析から高精度の測距まで」と多くの領域でシステム検討を行い、また幾つかは「詳細設計から現地調整まで」手がけた経験をそのまま埋もれさせてしまうのは忍びないとの思いから、ほんの僅かの工夫（注意）によりライダシステムを良くすることができると思われる点に関して一端を述べさせて戴く。

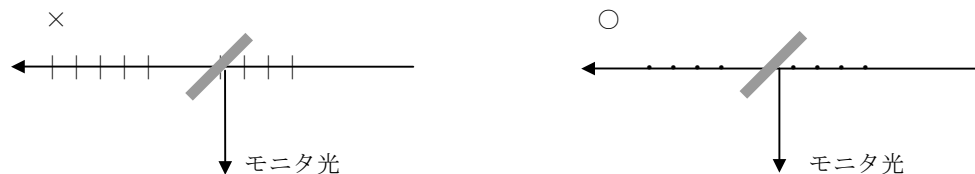
1. エネルギーモニタを行う時の偏光方向

レーザ出力の一部をビームスプリッタ等により取り出し、エネルギーのモニタに使用することがあるが、取り出す偏光方向により差異が生ずるので注意を要する。

入射角と反射率の関係は下図の通りである。



例えば下の左図の場合、ビームスプリッタとして単なるガラス板を用いると、この偏光（p 偏光という）に対しては、ブルスター角が存在しかつそれに近い角度となるので、反射が極めて小さくなる（取出しによるロスが少ない）という利点がある反面、これと垂直な偏光（s 偏光という）成分が僅かに交じったレーザ出力の場合には、この成分の反射は大きくなる（屈折率 1.5 の場合、45 度での反射は p 偏光の反射の 10 倍となる）、即ち約 1 割の s 偏光成分が混入だけで、モニタ出力（反射したレーザ光）は約 2 倍になってしまう。レーザロッドの熱歪み等により異なる偏光成分の発生は十分考えられることであり（1 割も出ることはないであろうが）、実際のレーザ出力は増えていない（むしろ減る場合が考えられる）のにモニタした出力は大幅に増大したようになることがある。従って正確にエネルギーをモニタする必要がある場合は右図のように反射面と垂直な偏光（s 偏光）となるような取り出し方をすべきである。



逆に折り返しミラーの反射率を 99.5% 程度にして、漏れ光を利用する場合には、透過率が大きくなる p 偏光を利用し、仮に s 偏光が一部混入しても計測誤差が小さくなるようにすべきである。



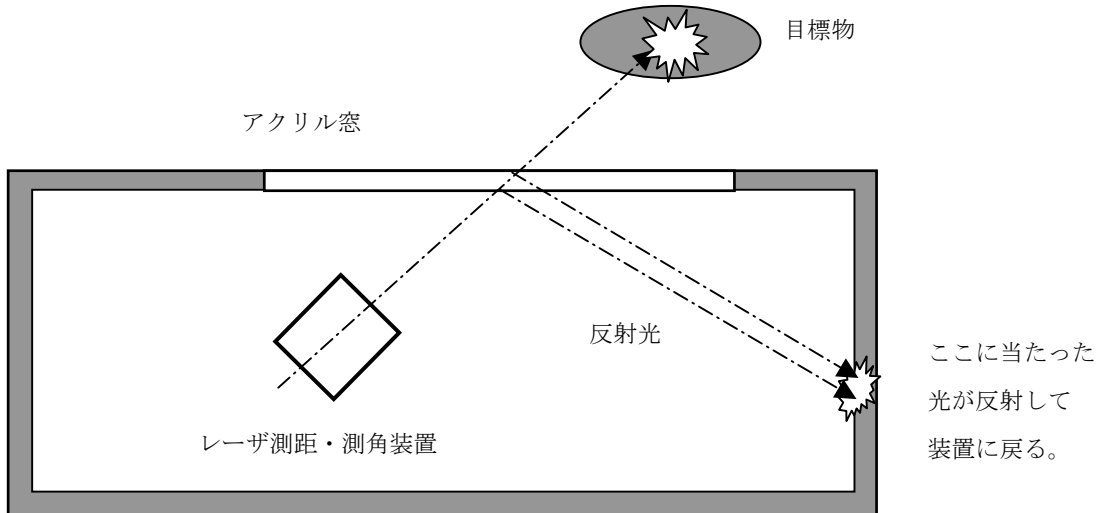
2. 窓を通してのレーザー光発射

レーザー測距・測角装置により目標物の位置を測定する場合、その前方（装置と目標物の間）に窓等の透明体と言えども置かないのが大原則であるが、潮風の激しい地点で長期間観測する必要から「密閉した小屋の亚克力製の窓からレーザーを発射」せねばならぬことがあった。

このようなことを想定せずに設計した装置（窓に対してs偏光となっている）を用いたため、窓への入射角が大きくなるにつれて反射が増大し、この反射光が小屋の内部に当たり拡散反射した光の一部を装置が受光してしまった結果「誤測距」となり、データの誤集計や抜けが生じた。

（垂直に当たった光の反射による誤測距は無いように調整したとしても、垂直入射0.04に対して50度のs偏光での反射は約0.12即ち3倍である。測距の場合往復で効くので自乗した9倍も強いものが戻ってくるため、検知レベルを調整しても誤測距となる）

仮にp偏光としていれば70度付近までは垂直入射よりも反射は小さくなるので、誤測距の可能性は減る。



3. 偏光解消度について

大気中にレーザーを発射し、大気分子やエアロゾルからの散乱光を受光するレーザーレーダにおいて、偏光解消度を計測する手法がある。これは「偏光した光が球状の物質に当たるともとの偏光を維持した状態の光が戻ってくるが、複雑な形状のものに当たると直交する偏光成分が含まれたものが戻ってくる」という原理を利用して、戻り光に含まれる発射した偏光と直交した偏光の割合から対象物の形状（球状からのズレ）を調べるものである。具体的には雲の中の氷（水の結晶）の割合を調べたり、大気中の塵（比較的球状に近い）による散乱光の中に埋もれている花粉（複雑な形状で偏光解消度も大きい）からの散乱光のみを選び分けて花粉の量を計測する試みに利用されている。

光が鏡等で反射される場合、入射面に対して平行か垂直の偏光であれば、その偏光を維持したままの反射光となるが、斜めの偏光の場合は2つの偏光成分に分けて考える必要がありそれぞれの偏光の反射の際の位相変化が異なる関係で、反射光は楕円偏光になってしまう。偏光解消度を調べるレーザーレーダ等で途中に置かれた光路変更用の鏡等が発射した偏光に対し斜めとなるように置かれた場合は、この反射の時点で垂直の偏光成分が発生し、対象物からの散乱による垂直の偏光成分の計測を妨害する。従って偏光解消度計測を目的とする（将来行うかも知れないものを含む）レーザーレーダでは「鏡等は必ず、偏光方向に対して垂直か平行の入射面になるように置く」のが鉄則である。

鏡等については十分に配慮したとしても、受光に反射望遠鏡を使用する際この回転放物面の反射鏡は細かい部分に分けてみるとあらゆる方向に傾いた面の集合であり、偏光に対して垂直か平行との条件を満足出来ない。即ち若干「発射と直交する偏光成分が発生し、計測に影響を与える」ことになる。反射鏡の曲率が小さい（曲率半径が大きい 平面に近い）ものほど影響は小さくなるので、この観点からは焦点距離の長い望遠鏡の方が望ましい。望遠鏡の焦点距離としては同じであっても、副鏡に凸面鏡を使用したカセグレン式の望遠鏡はその分主鏡の曲率が大きく（曲りがきつ

く) になっておりかつ副鏡でも偏光解消がおこる可能性がある。一方副鏡に平面鏡を使用するニュートン式では、主鏡の曲率はカセグレン式に比して小さくかつ副鏡は平面であるので、副鏡の向きを偏光に影響を与えないように合わせれば偏光解消度計測の点では有利である。望遠鏡の選定に関しては、その他の点でのトレードオフの必要もあるので、ニュートン式が有利であると即断する訳には行かないが、トレードオフの際には「偏光解消度計測の際のメリット」も考慮すべき事項の一つとして入れることをお勧めする。

4. 干渉フィルタ

干渉フィルタは一般的に、垂直に光が入射することを前提で作られている。斜めから光が入射した場合、各々の面で反射された光の光路差が変わるので、透過する中心波長がズレる（必ず波長の短い方にシフトする）。詳細は下式による。

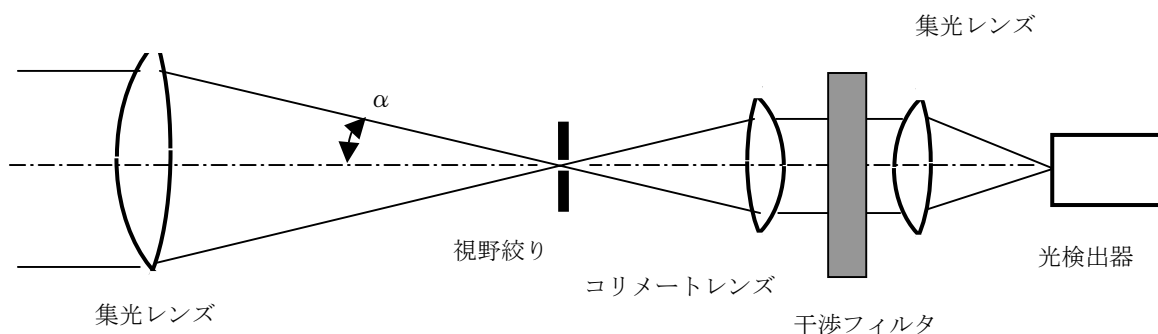
$$\lambda_{\alpha} = \lambda_0 \times \sqrt{1 - \left(\frac{N_e}{N^*}\right)^2 \times \sin^2 \alpha}$$

λ_{α} ; 角度 α で入射時の中心波長 λ_0 ; 垂直入射の時の中心波長 N_e ; 入射側物質の屈折率 (空気の場合 1)

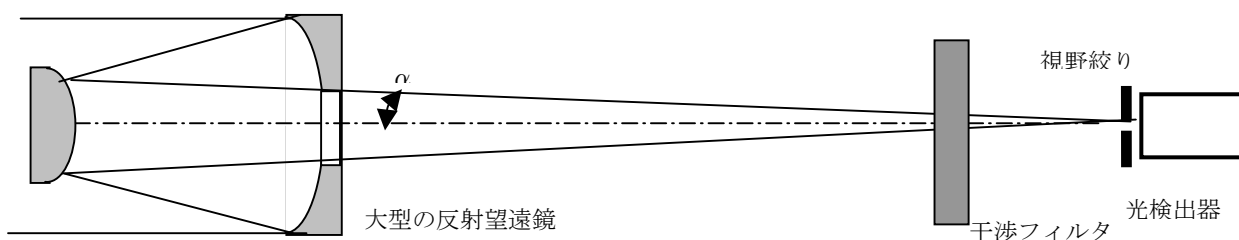
N^* ; フィルタの等価屈折率 (カタログに出ている 例えば 1.45or2.05) α ; 入射角度

干渉フィルタの製作に際して製作誤差を指定する際に、通常の誤差指定のように $\pm 0.0 \text{ nm}$ とするのではなく、 $+\Delta \Delta -0 \text{ nm}$ とすべきである。多少「+ぎみ」に出来上がった場合は傾けて使用することも可能だが「-ぎみ」の場合は使えなくなるからである。

傾いた光が入ると透過波長が変化することから、原則的には下のように平行にしたところに干渉フィルタを入れる。

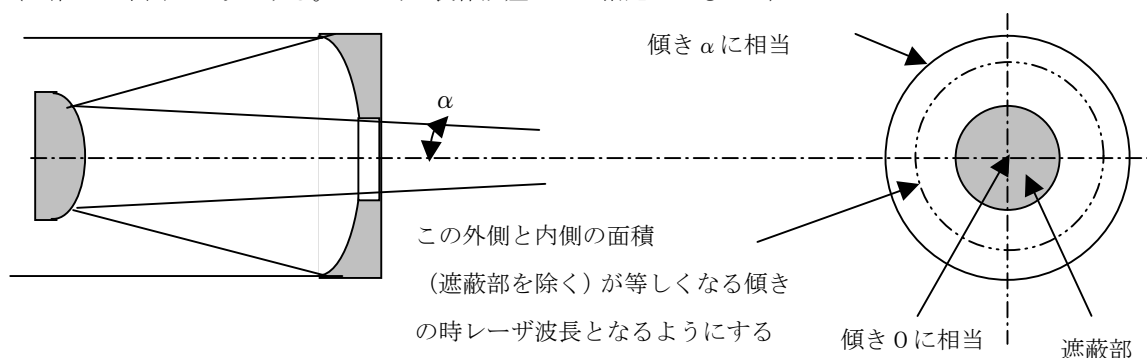


集光レンズの代りに大型の反射望遠鏡等を使用した例では、焦点距離が長く最大の傾き角 α が小さくなり、前式で求めた透過中心波長のズレが干渉フィルタの透過帯域に比して少ない場合もありその時には、コリメートレンズや2つめの集光レンズを省略したシステムを使用することも可能である。(あまり推奨しないがシステム構成上このようにせざるを得ない場合の例である)



この場合干渉フィルタの透過中心波長は、レーザ等の波長に合わせるのではなく、 α のほぼ半分の角度だけ傾けた時にレーザ波長となるようにするとよい。

(正確には下図のようにする。この時は製作誤差は±で指定してもよい)

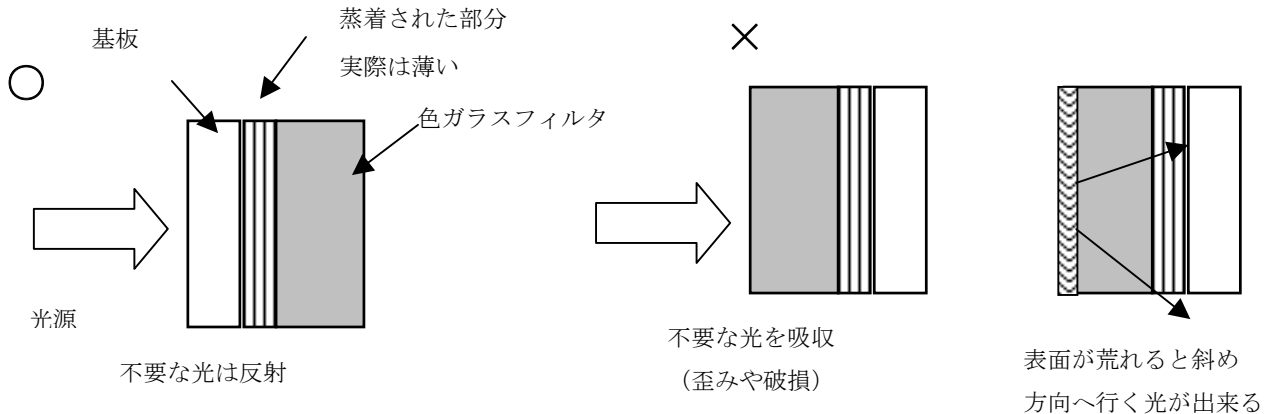


※ 干渉フィルタの置き方の鉄則

干渉フィルタには主なる構成品である多層膜の蒸着された部分の他に、少しは減衰されるもののこれを通り抜けてしまふ整数倍の周波数（波長で言えば整数分の1）の光を遮断するための色ガラスフィルタが用いられている。蒸着された部分と色ガラスフィルタ部分のどちらを光源側とするかは特に関係のないように見えるが以下の理由により大きな影響がある。 **必ず蒸着された部分を光源側に向けること**

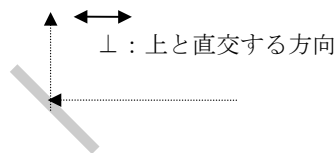
向きが逆だと不要な光を吸収して歪みや破損の原因となるだけでなく、紫外線用に用いられる色ガラスフィルタの中で湿度に弱いものでは表面が荒れた際に光が斜め方向へも行くようになる。

蒸着された部分に光が斜めに入るとは「設定波長の透過率が下がる」他に「目的以外の波長に対しての透過率が増し、不要な光が透過する」ことになる。透過帯域を狭くしたものでは、特に後者の問題は干渉フィルタの性能を大きく損ねることになる。



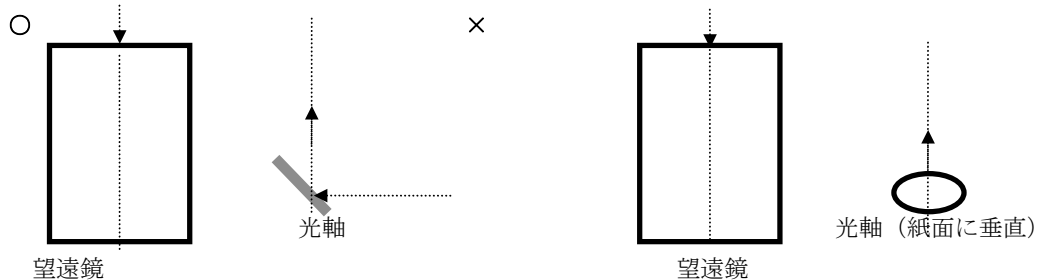
5. 出射（折り返し）ミラーの置き方とアライメントの容易性について

一般にレーザの出射光軸は水平であり、上空観測のライダーの場合、これを折り返しミラーによって垂直方向に曲げるが、この垂直方向に出した光を望遠鏡の光軸と完全に平行に合わせるアライメントに於いて、下図の←→の方向に出射ビームが動くように調整する分には、↑方向は変動しないが、↑方向にビームが傾くように調整しようとする、同時に僅かではあるが←→方向の傾きも変わってしまう。



送受光分離タイプの場合、左図のような配置にして、送光と受光の軸を共に紙と同じ平面に来るように調整（具体的にはミラーを↑方向に傾け、受信信号が最大になるように調整）した後、←→方向に傾けて両軸が平行（この時にはある高さからの受信信号は必ずしも最大ではない）になるように（より上空からの信号が増すように）調整する。

（原理的には、この調整によって軸が↑方向に傾くことはない）逆に右図のような配置にすると、↑方向を調整した後←→方向の調整を行った際に、↑方向も僅かにズレてしまう。同軸タイプのように、←→方向で最大値を得た後に↑方向の調整を行って良いのなら問題は無いが、両軸が平行になるのは必ずしもある高度からの受信信号が最大の所で無いので、↑方向を先に正確に合わせた後でない（受信信号の形を見ながらの）正しい判断が出来ず、何回かの試行錯誤の後にアライメント出来るに過ぎない。



単に検討の段階では大したことはないように思えるが、実際に調整する時になって苦労することになる。配置の関係で左図のような光の向きにするには「ミラーを一枚余分に用いる」ことになる場合があるが、後々の調整のことを考えるならこれをお薦めする。