

コヒーレントドップラーライダーによる風計測

Wind measurements by coherent Doppler lidar

水谷耕平¹、板部敏和¹、石井昌憲¹、青木哲郎¹、篠野雅彦²、浅井和弘³、佐藤篤³

K.Mizutani¹, T.Itabe¹, S.Ishii¹, T.Aoki¹, M.Sasano², K.Asai³, A.Sato³

¹情報通信研究機構, ²海上技術安全研究所, ³東北工業大学

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²National Maritime Research Institute,

³Tohoku Institute of Technology

Global wind measurements by a space-borne Doppler lidar are expected to bring big progress in numerical weather prediction and the studies on climate change. We have been conducting studies on the lasers for the space-borne coherent Doppler lidar to observe wind and aerosol profiles. The development of the algorithm for the wind profiling is carried out through ground based and airborne experiments. We are also making studies on the space-borne Doppler lidar systems for demonstration of the global wind profiling.

1. はじめに

アイセーフなレーザを使った衛星搭載ライダーは受動的なセンサーでは観測できない各種の大気パラメーターの直接的な高度分布観測を可能にする。エアロゾルや雲の分布, 各種分子の高度分布, 湿度分布等である。気象要素の中でとりわけ不足しているのは, 風の高度分布であり, その観測にはドップラーライダー観測が有望だと考えられている。衛星搭載ドップラーライダーはグローバルに対流圏の風の高度分布測定を可能にする観測装置であると考えられており, その開発に対する要望は強い[1]。風観測衛星の定常運用を目指し, ドップラーライダーのための基礎技術の研究開発, 衛星搭載ドップラーライダーの技術及び有用性実証をするための宇宙実証衛星の研究開発が急務である。我々は目に安全な波長である $2\ \mu\text{m}$ で発振する LD 励起固体レーザを使った対流圏大気風観測用の衛星搭載コヒーレントドップラーライダー (CDL) に関する研究を進めている。また, コヒーレントドップラーライダーによる実際の風分布の地上観測と航空機観測を通じ風分布計測のアルゴリズム開発を行っている。

2. ドップラーライダー用アイセーフレーザ

衛星搭載ライダーではレーザビームを地球に向けるためビームがアイセーフである必要がある。 $1.4\ \mu\text{m}$ より長い波長は目に対する安全性が高く, 衛星搭載に適している。我々は将来の衛星搭載ライダーに適したレーザとして $2\ \mu\text{m}$ で発振する LD 励起固体レーザの研究開発を行ってきた。LD 励起固体レーザを使ったコヒーレントドップラーライダーはそのコンパクトさと効率の高さから, 航空機搭載, 車載システムさらには衛星搭載に適している。コヒーレントドップラーライダーではマスターレーザによる注入同期で発振波長を単モード化されたパルスレーザを発信し, エアロゾルに後方散乱されドップラー偏移した反射光と局発レーザ (マスターレーザと兼ねることもある) を検出器上で混合する。信号のうち低周波のビート信号を増幅して記録し, 周波数解析によりドップラー偏移を求め, オフセット成分を引いて風速を求める。また, 信号強度からはエアロゾル分布を求める事ができる。

$2\ \mu\text{m}$ 用のレーザには Er, Tm, Ho などの希土類をドープした結晶が使用される。我々は以前から Tm:YAG を使

い連続発振、パルス発振のレーザの研究を行ってきた[2],[3]。衛星搭載では高効率化と高出力化が必要となるため、更なる高性能化を目指して、新しい $12\mu\text{m}$ レーザ用結晶の基本的動作特性の研究を進めている。特に Tm と Ho をドープした結晶は高出力が得られることから重要である。試験用レーザ発振器を使って取得したレーザロッドの発振特性で見ると、 LuLF と GdVO をホスト結晶とするロッドが効率のよいことがわかる。また、比較的良好に研究されている YLF は閾値が低いいためレーザ発振をしやすい。

3. 衛星搭載ドップラーライダー

我々は宇宙実証の候補として国際宇宙ステーション(ISS)の日本の実験棟(JEM)曝露部(EF)搭載コヒーレントドップラーライダー(JEM/CDL)を検討してきた。旧地球観測委員会のコヒーレント・ドップラー・ライダーサブグループにおいて、JEM/CDLによって観測される風について水平分解能 100km でベクトル風の観測精度 $2\text{-}3\text{m/s}$ が要求された[1]。視線方向の風成分は大気中のエアロゾルからの反射光をヘテロダイン検波して観測され、水平ベクトル風は斜め前方、斜め後方の2方向の視線速度

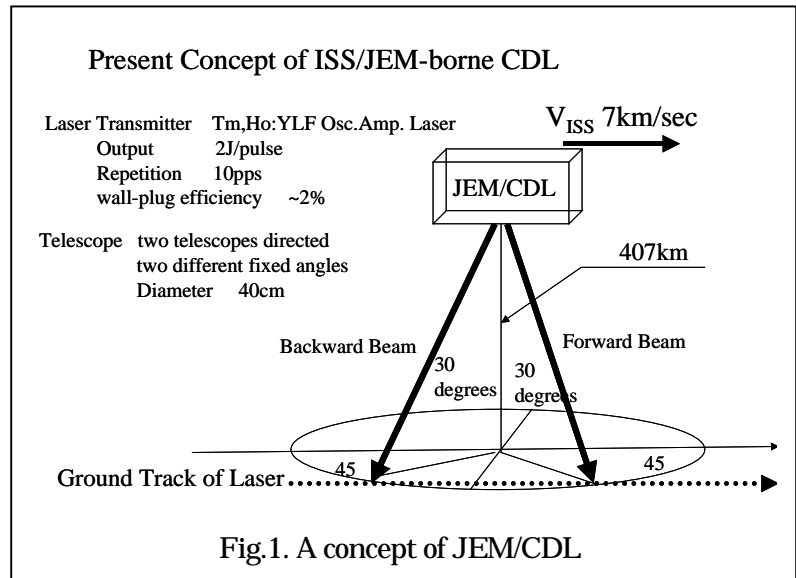


Fig.1. A concept of JEM/CDL

の合成により得られる。つまり、風ベクトルを得るには2方向から風速測定を行える機構が必要である。そのため2つの固定した40cm望遠鏡により斜め前方と斜め後方を観測することを考えた。また、全固体レーザとしての Tm,Ho:YLF レーザ($\lambda:2.06\mu\text{m}$)で2J出力10Hz繰り返しものを候補として検討し、後段で記述するように小型モデルの試作実験も進めている。Fig.1にはJEM/CDLの概念図を示した。10Hzで前後交互にレーザを打つ時、各70ショットが水平距離 100km に対応し、その平均から予測される風速誤差は科学計画の要求を満たすと考えている。

標準曝露部標準ペイロードのリソース制限は、重量が 500kg 、電力は 3kW である[4]。検討したモデルでは重量は 470kg 、電力は 1489W でありこれらの制限内に納まった。しかし、JEM全体での電力がわずかに 5.4kW しかないため、電力消費量を減らす事は重要である。レーザの高効率化は消費電力と排熱の双方にとって重要であり、そのための高効率レーザロッドおよびサブスケールレーザ実験などの実験検討を進めている。JEM/CDLのモデルではレーザロッドの冷却装置の熱を液冷系に逃がしているが、これを放射冷却で代用できると 500W もの電力削減になる。フリーフライヤーによる実証、或いは将来の定常観測衛星では放射冷却が使えるし、JEM/CDLモデルでも放射冷却の有効利用の検討が必要である。また、出力が小さい場合の観測シミュレーションを行った結果、レーザ出力が 500mJ でもかなりの領域で 2m/s より良い観測精度が得られると予想された。

我々は衛星搭載モデルに適用できるように、 Tm,Ho:YLF レーザロッドを使う伝導冷却LD励起固体レーザで 500mJ の出力を得ることを目標にサブスケールレーザの開発を行っている。試作したのは発振器と2段の増幅器からなるレーザ装置である。発振器は側面励起方式で共振器は一方向に光が進行するように組まれている。また、この発振器にはドップラーライダーで必要になる単一モード化のための種レーザが導入できるようになっている[5]。初段アンプは端面励起方式で4パスアンプを行う。後段アンプは側面励起方式で現在は2パスアンプになっている[6]。このサブスケールレーザはFig.2のように1台の光学ベンチに組み込まれてい

る。このレーザで全体を 1 Hz で動かしたときにパルスで 400 mJ の出力が得られている。このとき、後段アンプの励起は 10 Hz で行っており、熱的には 10 Hz・400 mJ でのオペレーションがほぼ証明された。また、アンプ同士の結合部分での問題で 500 mJ まで出力を上げられていないが、これも調整により解決するめどが立っている。

10 Hz、500 mJ のパルス発振レーザの衛星モデルを考えてみると、このレベルの出力でもかなりの領域で必要な観測精度が実現できる見込みがある。小型衛星等のフリーフライヤーで 10 Hz、500 mJ あるいはもっと小さな 200 mJ 程度の出力のレーザを搭載するモデルも考える

価値がある。200 mJ 程度の出力のレーザを搭載した衛星により、地上反射、境界層、雲だけを観測するコヒーレントドップラーライダーを上げるのも技術実証としたは一つの選択肢である。出力に関しては、レーザロッドを Tm,Ho:LuLF に入れ替える等の選択肢によりもっと効率的な発振が可能になるかもしれない。

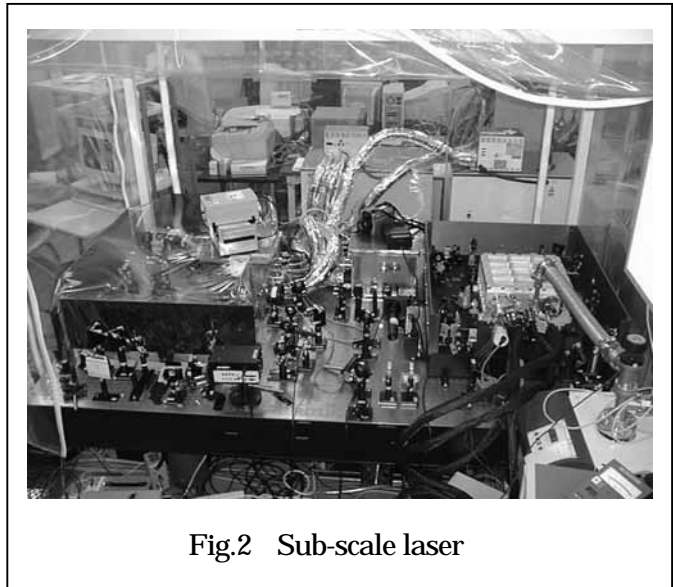


Fig.2 Sub-scale laser

4. 地上及び航空機観測

2 μmレーザを使い航空機から直下の風のプロファイルを測定するための航空機搭載ドップラーライダーの開発を進めている。この装置を使いコヒーレントドップラーライダーによるドップラーシフト抽出アルゴリズム、航空機の姿勢・速度を補償するアルゴリズム等の風速分布測定アルゴリズムを航空機実験を行いながら研究する。ドップラーライダーの送受信器はジェット機の胴体右下部に設けたポッドの中に入れられ、機体内部の制御装置からコントロールする。シリコンウェッジを回転する事によりレーザビームは真下から 20° の角度の円錐上を動く事ができる。使われているレーザは繰り返し 100 Hz で発振波長 2.01 μm の Tm:YAGレーザであり、パルスあたりのエネルギーは 6 mJ である。

この航空機搭載ドップラーライダーをポッドから取り外し地上におき、上に向け対流圏の風を測定する事ができる。

この場合観測方向は天頂から 20 度の方向となり、スキャナーを回転させて観測方向を選ぶ。最近ではさらに半球のどこでも見れる 2 軸スキャナーも導入した。Fig.3 には 1 ショット分のデータを高度ごとに分け、そのデータを高速フーリエ変換して求めたエネルギー密度スペクトルの高度による変化を示した。風の視線方向成分が高度と共に変わっている様子が示されている。しかし、高度 600m あたりまでは、送信器内部で

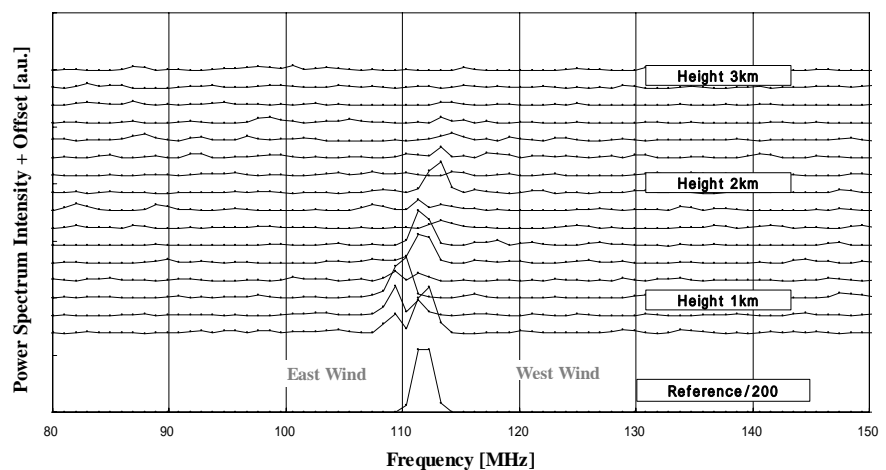


Fig.3 Spectral densities of 1 shot return

の反射光の影響を受けた 0 m/s に相当する成分が見えており、観測高度の下限はその影響によって決まっている。実際の観測ではスキャナーを回転・止まって測定（約 1000 ショット）・回転を繰り返し複数方位での測定を繰り返して数分で風ベクトルの高度分布を計測する。

5. まとめ

衛星搭載コヒーレントドップラーライダーは風の鉛直構造をグローバルに1-2m/sの精度で観測できる可能性があり、現在の風データの分布不足と精度不足を解消する観測手段として期待されている。また、ドップラーライダーで得られる風データはドップラーシフトから直接測定される独立な観測量であり、これを使って他の観測データの検証や較正に使われる可能性もある。さらに、コヒーレントドップラーライダーで使われる2 μ mレーザの波長域にはCO₂とH₂Oの吸収線があることから、これらのラインを使い差分吸収ライダーとしての使い方にも興味もたれている。特にCO₂に関しては1ppmの測定精度が社会的に要求されており、それが2 μ mコヒーレントライダー技術で実現できるかどうか検討を進めていく必要がある。

我々はJEM/CDLとしてJEM 曝露部に搭載可能で科学計画の要求に適合するモデルを検討してきた。宇宙搭載2 μ mレーザのスマートモデルになる伝導冷却型のLD 励起固体サブスケールレーザにより10Hz、500mJのパルス発振のめどもついてきた。今後も高効率化や軽量化等の要素技術の確立を進めていくとともに、500mJ 或いは200mJ 出力のレーザを積んだフリーフライヤーでの実証実験等の他の選択肢も考えていきたい。

参考文献

- 1 岩崎 他, "宇宙ステーション搭載コヒーレントドップラーライダーの風観測に関する科学計画書", 地球観測委員会/CDL-SG、地球科学技術推進機構, 1999.
- 2 A.Sato, K.Asai, T.Itabe, "Double-pass-pumped Tm:YAG laser with a simple cavity configuration", Applied Optics, Vol.27, No.27, pp.6395-6400, 1998.
- 3 佐藤, 相墨, 浅井, 板部, "フラッシュランプ励起Cr,Tm(,Ho):YAGレーザーのノーマル及びQスイッチ・パルス発振特性", レーザー研究, Vol.25, No.1, pp.45-49, 1997.
- 4 "JEM曝露部利用の手引き", 宇宙開発事業団, JBX-96154A, 1998.
- 5 H.Fukuoka, M.Kadoya, K.Asaba, K.Asai, K.Mizutani, T.Itabe "Injection Seeded Hm,Ho:YLF Laser", SPIE Vol.4153, pp.455-462, 2000.
- 6 M.W.Phillips, S.W.Henderson, M.Poling, R.M.Huffaker, "Coherent LIDAR development for Doppler wind measurement from the International Space Station" SPIE Vol.4153, pp.376-384, 2000.