

6 高精度光計測技術

6 Optical Sensing Technologies

6-1 コヒーレントドップラーライダーによる風計測

6-1 Wind Profile Measurements by Coherent Doppler Lidar

水谷耕平 板部敏和 石井昌憲 篠野雅彦 青木哲郎
浅井和弘 佐藤 篤

MIZUTANI Kohei, ITABE Toshikazu, ISHII Shoken, SASANO Masahiko, AOKI Tetsuo,
ASAI Kazuhiro, and SATO Atsushi

要旨

アイセーフレーザを使った衛星搭載ドップラーライダーによるグローバルな風分布観測は、天気予報や気候変動モデルの精度の向上に飛躍的な向上をもたらすと期待されている。情報通信研究機構(通信総合研究所)では、衛星搭載コヒーレントドップラーライダーによる風分布計測や、エアロゾル分布計測に必要なレーザの研究開発及び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行い、風分布計測のアルゴリズム開発を行っている。また、宇宙からのグローバルな風分布観測の宇宙実証実験を目指して衛星搭載ドップラーライダーの研究を行っている。

Global wind profiling by a space-borne Doppler lidar with an eye-safe laser is expected to bring big progress in numerical weather prediction and the studies on global climate modeling. NICT (CRL) has been conducting studies on the lasers for the space-borne coherent Doppler lidar to observe wind and aerosol profiles and developing the algorithm for the wind profiling through ground based and airborne wind observations by a coherent Doppler lidar. We are also making studies on systems aimed at a demonstration of the global wind profiling by the space-borne coherent Doppler lidar.

[キーワード]

コヒーレント, ドップラーライダー, アイセーフレーザ, 衛星搭載, 風分布
Coherent, Doppler lidar, Eye-safe laser, Space-borne, Wind profile

1 はじめに

アイセイ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高度分布観測を可能にすると考えられている。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]。しかし、近年有望視されている全固体化レーザを使うドップラーライダーによる風観測はようやく始まったばかりで、これまで宇宙環境で利用されたことはない。将来の風観測衛星の定常運用を目指して、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実証と有用性実証をするための宇宙実証衛星

の研究開発を行う必要がある。我々は衛星搭載ドップラーライダーの宇宙実証を目指し、目に安全な2 μm固体レーザーを使った対流圏大気風観測用コヒーレントドップラーライダー(CDL)の研究を進めている。コヒーレントライダーにより、地球温暖化の評価に影響を及ぼすエアロゾルやCO₂の高度分布の測定の可能性もある。

2 アイセーフ固体レーザーとドップラーライダー

衛星搭載ライダーではビームを地球に向けるため、アイセーフであることが必要である。ことに1.5 μm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。情報通信研究機構(通信総合研究所)と東北工業大学は将来の衛星搭載ライダー用のレーザーとして2 μmで発振する固体レーザーの研究開発を行ってきた。特に、衛星搭載を考えたときにはレーザーはレーザーダイオード(LD)励起の全固体化レーザーであることが望ましい。我々は将来の衛星搭載ドップラーライダーに必要となると考えられる高効率で高出力の全固体化レーザーの研究を行っている。

2 μmの固体レーザーを使ったコヒーレントドップラーライダーの研究開発は1990年代に始まった。そして、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が実現できると期待されている。コヒーレントドップラーライダーでは信号をコヒーレントに検出し、局発とのビート信号の周波数を計測することにより観測対象による周波数のドップラー偏移を高精度に検出する。この場合レーザー光を反射する対象物は大気中のエアロゾル(微粒子)と雲であり、観測領域は主に対流圏である。コヒーレントドップラーライダーでは図1に示したように、種レーザー(マスターレーザー)による注入同期で発振波長を狭帯域化されたパルスレーザーを大気に向けて発信し、エアロゾルで散乱されドップラーシフトを受けた反射光と局発レーザー(マスターレーザーと兼ねることもある)を検出器上で混合する。信号成分のうち低周波のビート信号をIFアンプで増幅してA/D変換しデジタル信号として記録し、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

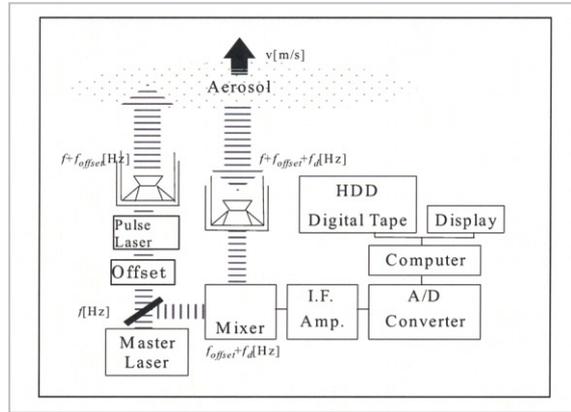


図1 コヒーレントドップラーライダーの測定原理

実際の測定ではパルスレーザーの出力の一部をマスターレーザーの出力と混合して、毎パルスごとに出力レーザーのオフセットも参照信号としてモニターしている。

に直される。波長2 μmでは周波数の偏移1 MHzが風の視線方向成分で1m/sに対応する。また、信号強度からはエアロゾルの分布を求めることができる。

3 2 μm固体レーザー結晶

2 μm用のレーザーには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ー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2 μmレーザー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。表1は試験用レーザー発振器を使って取得したレーザーロッドの発振特性である。

表1 レーザー発振特性の比較

	YLiF ₄ 5%Tm, 0.5%Ho	LuAG 5%Tm, 0.5%Ho	GdVO ₄ 3%Tm, 0.3%Ho	LuLiF ₄ 5%Tm, 0.5%Ho
Threshold energy	116 mJ	151 mJ	151 mJ	132 mJ
Slope efficiency	7.3%	10.8%	12.1%	12.6%
Output energy	15.7 mJ	20.0 mJ	24.1 mJ	26.8 mJ

この表を見ると、LuLiFとGdVOをホスト結晶とするロッドが効率のよいことが分かる。また、比較的よく研究されているYLFは閾値が低く、レーザー発振をしやすいことを示している。

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。図2にシステム (CLR Photonics 社製) を航空機に付けた時と、取り付けてあるポッドのカバーを開けたときの様子を示した。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機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。クサビ状のSiウェッジを回転することによりレーザービームは真下から 20° の角度の円錐上を動かすることができる。使われているレーザーは発振波長 $2.01 \mu\text{m}$ のTm:YAGレーザーで繰り返し 100Hz 、パルス当たりのエネルギーは 6mJ 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、地上に置いて上に向け、対流圏



図2 航空機搭載ドップラーライダー

上の写真はポッドに入れられたところ。
下の写真は工場でカバーをはずしたところ。

の風を測定することができる。図3には地上実験風景を示した。この場合、観測方向は天頂から 20° の方向であり、スキャナーを回転させて観測方向を選ぶ。図4には1ショット分のデータから高度ごとにデータをフーリエ変換し、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。風が高度と共に滑らかに変わっている様子が見て取れる。しかし、一方で高度 600m あたりまでは、送信器内部での反射光の影響を受けた 0 m/s に相当するスペクトルが同時に見えており、観測高度の下限はその影響によって決まっている。実際の観測モードではスキャナーを回転・止まって測定(約 1000 ショット)・回転を繰り返して数分で風ベクトルの高度分布を計測する。図5には 2002 年 9 月に稚内でVHFレーダ、ゾンデと同時観測したときの風速風向データを示してある。三つの装置による風のプロファイルは、この時のドップラーライダーの測定限界である高度 9km あたりまでよく一致している。特に、ゾンデとドップラーライダーの一致は非常によい。これはコヒーレントドップラーライダーによって風の高度分布が良い精度で測定されていることを示している。

図6には 2003 年 8 月 6 日に山形県の清川近郊で測定された風の高度分布の 15 時から 24 時までの変化を示した。コヒーレントドップラーライダーによって連続的に風の分布が観測でき、それによって局地風の解析に役立ることが示された。



図3 地上設置されたドップラーライダー

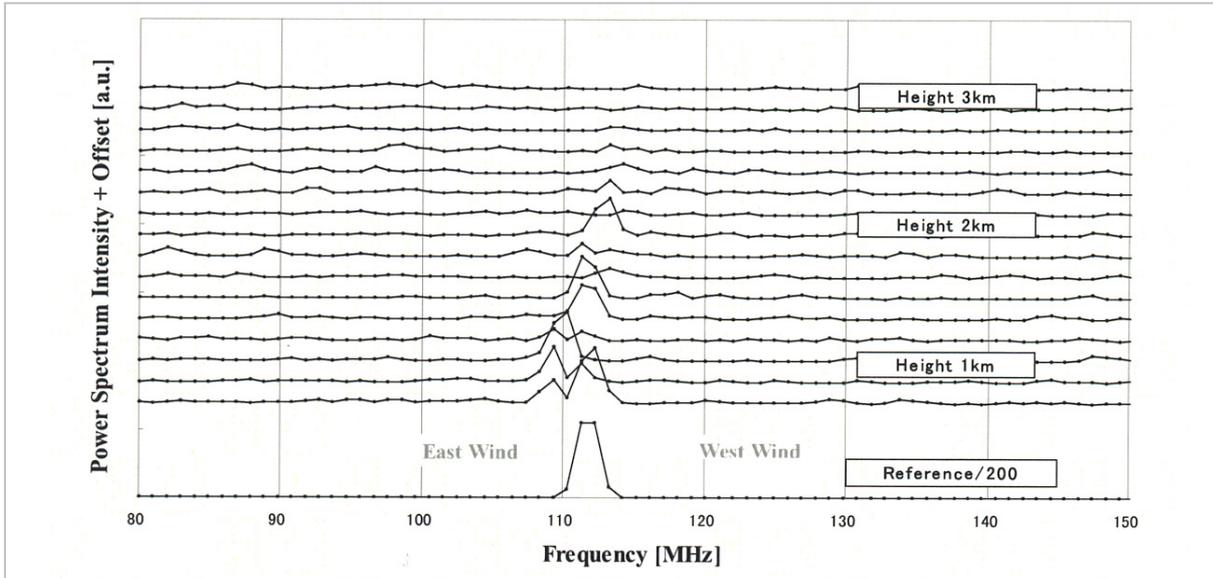


図4 1回のレーザ送信から得られたリターン信号スペクトルの高度分布

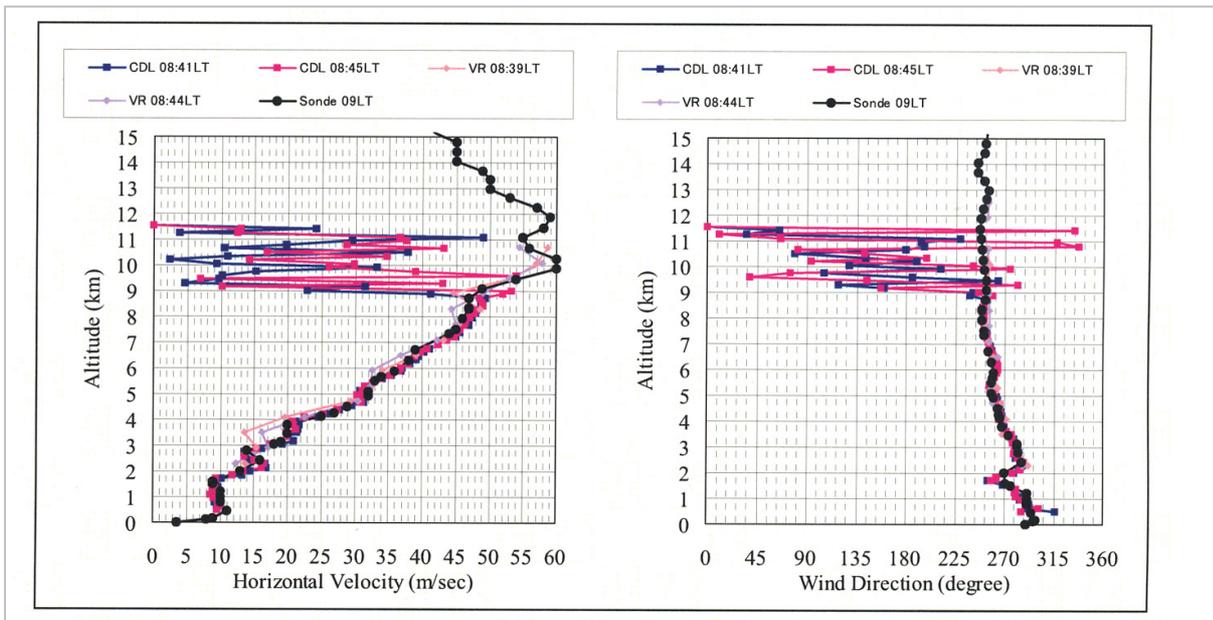


図5 2002年9月4日に稚内で観測された風の高度分布。左が風速、右が風向。

5 衛星搭載ドップラーライダーの研究

5.1 衛星搭載ドップラーライダー

衛星搭載ドップラーライダーの定常観測実現の前に、衛星搭載ドップラーライダーによるグローバルな風の観測の実現性と有用性を実証する必要がある。我々は、宇宙実証の候補の一つとして、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(主査 岩崎俊樹東北大学教授)において、「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」がまとめられた[1]。この中で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2-3m/sが要求された。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

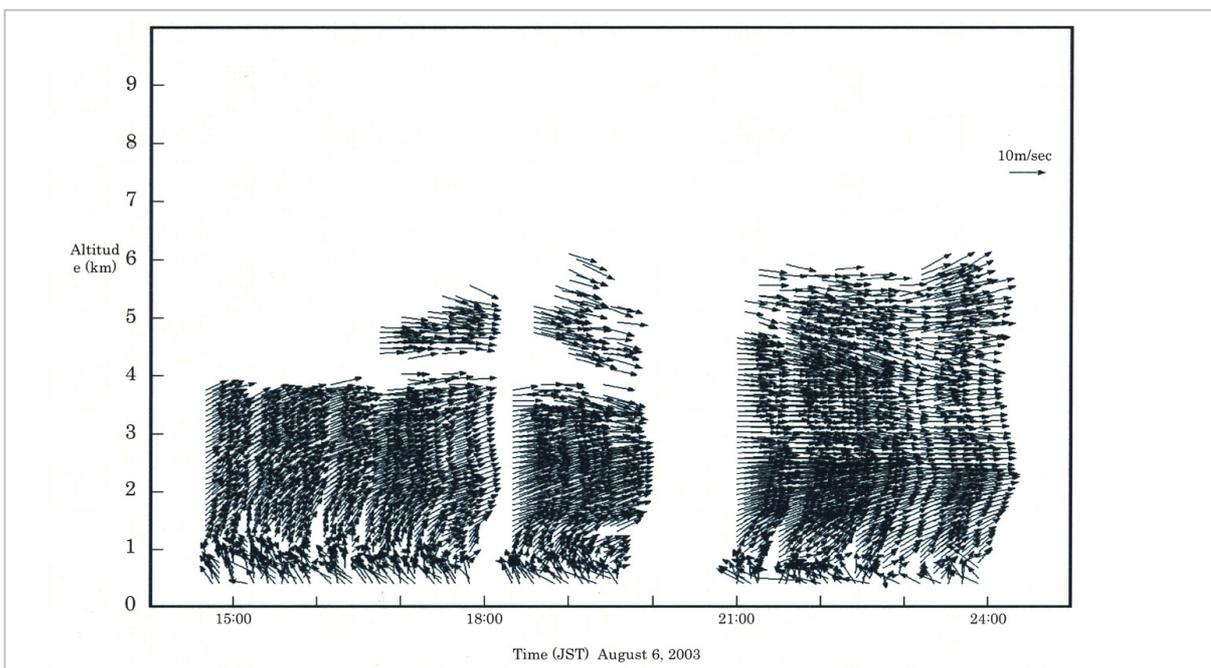


図6 2003年8月6日に山形県の清川での風の連続観測

ある。そのため二つの固定した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、全固体レーザーとして2J出力10Hz繰り返しのTm, Ho:YLFレーザー(λ : 2.06 μ m)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。図7にはJEM暴露部標準ペイロードへの各部品の配置図を示した。10Hzで前後に交互にレーザーを打つ時、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予想している。ただし、測定誤差の予測はエアロゾル分布への依存が大きい。

暴露部標準ペイロードのリソース制限は、重量が500kgで電力は3kWである[4]。検討したモデルでは全質量は470kgで電力は1489Wであり制限内に収まった。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ことは重要である。電力の大部分はレーザーで消費され、その熱はJEMではフロリナートの液冷系に排出することになっている。レーザー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ーロッド及びサブスケールレーザー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ー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、あるいは将来の定常観測衛星では放射冷却が使えることから、JEM/CDLモデルでも放射冷却の有効利用の検討の余地はある。

図8にJEM/CDLの観測精度の頻度分布のシミュレーション結果(G.D.Emmitt at Simpson Weather Associatesとの協力による)を示した。エアロゾル分布が比較的多い場合と、バックグラウンドの(少ない)場合で計算している。エアロゾルの多い場合では80%の地域で1m/sの精度が実現できると予想されている。バックグラウンドの場合でも30%から60%の地域で1m/sの精度が実現でき、雲があることにより観測の精度が上がっている領域の寄与が大きい。また、図8の下二つの図はレーザー出力を500mJにしたときのシミュレーションである。レーザー出力を1/4にした場合でもかなりの確率で2m/sより良い精度が予想されている。したがって、JEM/CDLと違い多くのリソースが利用できないような衛星の場合に、放射冷却の利用とレーザー出力のレベルを下げることにより衛星のリソースへの要求をかなり下げることができると考えられる。

5.2 サブスケールレーザー実験

衛星搭載コヒーレントドップラーライダーの

JEM / Coherent Doppoler Lidar JEM/EF Standard Payload 1.84mx0.95mx0.76m

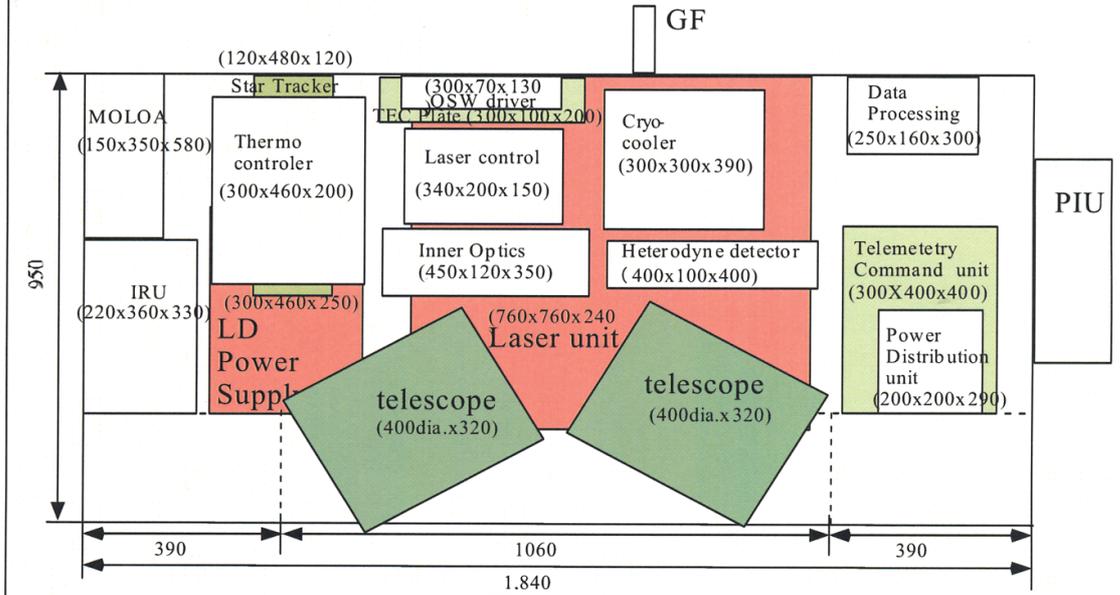


図7 JEM/CDLの標準ペイロードへの装置配置図

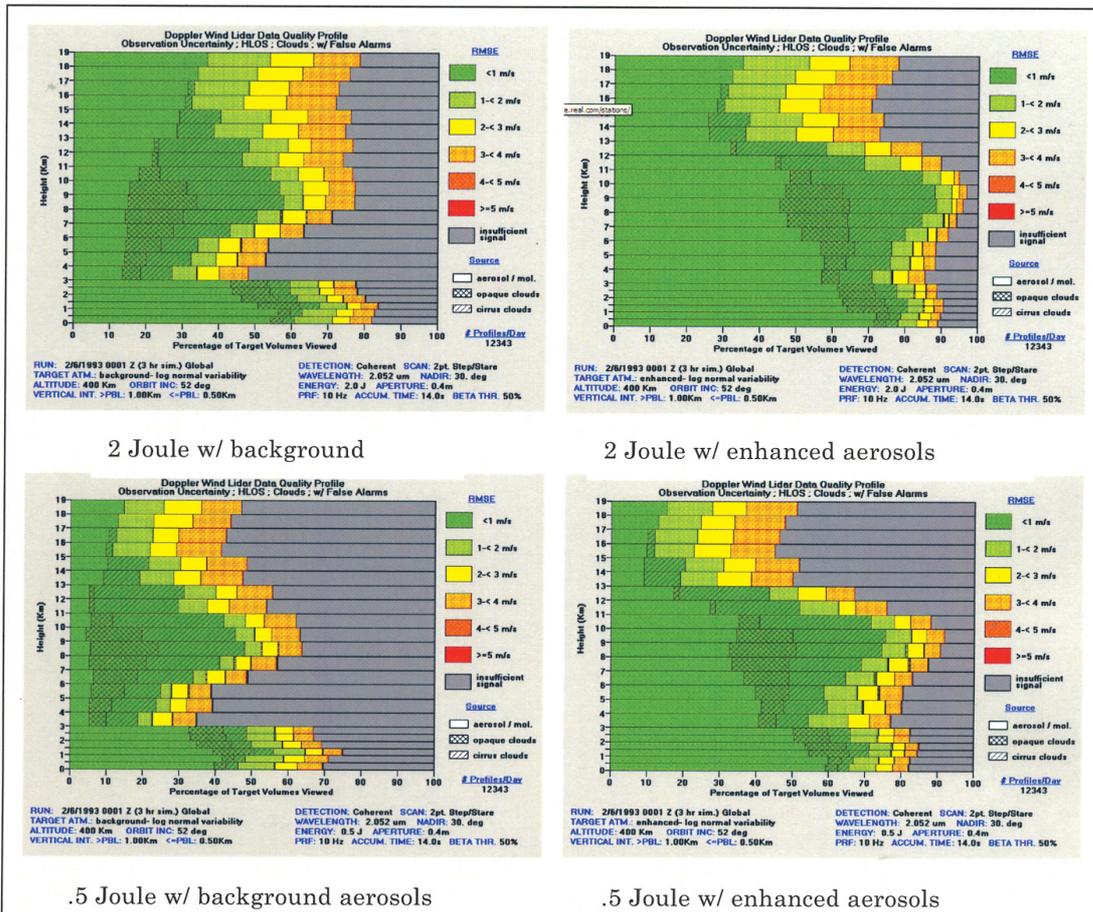


図8 JEM/CDLの観測精度の頻度分布のシミュレーション

実現のために最も重要なコンポーネントは衛星搭載2 μm レーザである。我々はTm, Ho : YLF ロッドを使い、衛星搭載モデルに適用できるような伝導冷却レーザで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。図9はその構成図である。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

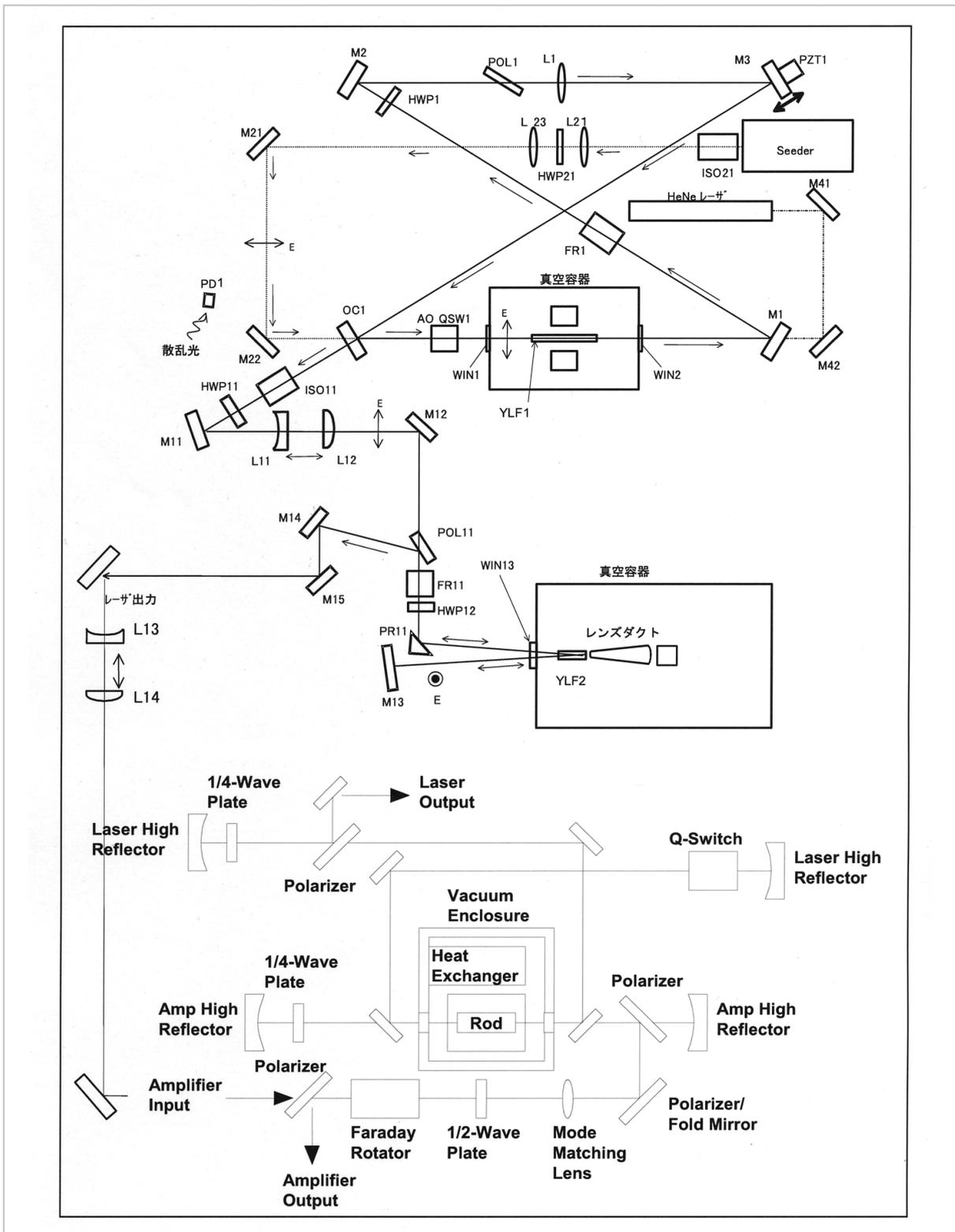


図9 サブスケールレーザの配置図

ライダーで必要になる狭帯域化のための種レーザーが導入できるようになっており、実際にシーディングにより波長の単モード化ができる[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4パスアンプとして設計されているが、実際には2パスで十分であることが分かり、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ーは図10のように1台の光学ベンチに組み立てられて評価が進んでいる。初段アンプの構造上の問題があり、初段アンプを10Hzで十分な出力でオペレーションできていないが、全体を1Hzで動かしたときにパルスで400mJの出力が得られている。このとき、後段アンプの励起は10Hzで行っており、10Hz・400mJ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500mJまで出力を上げられていないが、これも適当な調整により解決するめどが立っている。

サブスケールレーザー実験でほぼ10Hz、500mJのパルス発振のめどがついてきている。衛星モ

デルへの適用を考えた時には、図8で示したように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。今後の衛星計画全体の進み方も考えて、小型衛星等のフリーフライヤーで10Hz、500mJあるいはもっと安全を考慮して200mJ程度の出力のレーザーを搭載するモデルも考える価値がある。技術実証だけであるなら200mJ程度の出力のレーザー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一つの考え方である。出力に関しては、レーザーロッドをTm, Ho : LuLiF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。

6 むすび

衛星搭載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で観測できる可能性があり、現在の風分布データの分布と精度の不



図10 サブスケールレーザー

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観測量であり、このデータを使って他の観測データの検証や校正に使われる可能性もある。しかし、ドップラーライダーは宇宙でいまだ使われたことはなく、宇宙実証実験の必要がある。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の振動回転線があることから、これらのラインの吸収を使い差分吸収ライダーとしての使い方もあり得る。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 レーザのスマールモデルになる伝導冷却型の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。今後も高効率化や重量削減、要素技術の確立を進めていくとともに、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。また、地上や飛行機からの風測定実験を通じた、アルゴリズム開発も同時に進めていく必要がある。

参考文献

- 1 岩崎ほか, “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.



みずな こうへい
水谷耕平

電磁波計測部門ライダーグループリーダー 理学博士
レーザーリモートセンシング



いたべ としかず
板部敏和

基礎先端部門長 理学博士
レーザーリモートセンシング



いし いしほ
石井昌憲

電磁波計測部門ライダーグループ研究員 博士(理学)
レーザーリモートセンシング



たかの かつひこ
篠野雅彦

海上技術安全研究所環境・エネルギー研究領域リモートセンシング研究グループ研究員 博士(理学)
レーザーリモートセンシング



あおき かつお
青木哲郎

総務部研究環境整備室情報システムグループリーダー 理学博士
光によるリモートセンシング



あさい かつひろ
浅井和弘

東北工業大学教授 工学博士
レーザーリモートセンシング



さとう たかのり
佐藤 篤

東北工業大学講師 博士（工学）
レーザー物理