

2-4 衛星搭載コヒーレントドップラーライダーの研究

2-4 *Space-borne coherent Doppler lidar*

水谷耕平 板部敏和 石井昌憲 篠野雅彦

青木哲郎 大野裕一 浅井和弘

MIZUTANI Kohei, ITABE Toshikazu, ISHII Shoken, SASANO Masahiko,

AOKI Tetsuo, OHNO Yuichi, and ASAI Kazuhiro

要旨

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気候モデルや天気予報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。本研究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測定の可能性を示す宇宙実証実験を目指している。CRLでは国際宇宙ステーションの日本実験棟曝露部に搭載を想定した衛星搭載ドップラーライダーの研究を進めてきた。また、衛星搭載モデルのシミュレーターになる航空機から大気風を観測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。この装置を地上で運用し地上からの風観測を行い、コヒーレントドップラーライダーによる風観測のアルゴリズム開発も行っている。

Global wind profiling with a space-borne Doppler lidar is expected to bring big progress in the studies on global climate modeling and accurate numerical weather prediction. This research program aims at a demonstration of the coherent Doppler lidar technology in space. CRL has been conducting feasibility study on the coherent Doppler lidar aiming at demonstration onboard the Japanese Experiment module of the International Space Station. We are in parallel developing an airborne coherent Doppler lidar system to measure wind profile under a jet plane for simulation of the Doppler lidar measurement in space. This system is also operated in the ground to develop algorithm of the wind measurements.

[キーワード]

コヒーレント, ドップラーライダー, 衛星搭載, 風
Coherent, Doppler lidar, Space-borne, Wind

1 はじめに

気候予測や天気予報において大気風の分布情報は不可欠である。標準的な風の高度分布測定法である気球(ラジオゾンデ)観測は北半球の先進地域に集中し、海洋上や大陸内部での測定が不足している。地上では固定観測所での観測、海洋上では衛星搭載マイクロ波散乱計により地球表面での風データは得られる。限られた情報であるが航空路では飛行機により風が測られ、雲上端の風は気象衛星の雲画像の時間変化から

得られ、数値予報に利用されている。このように現在利用できる風のデータは限定されており、大気風分布をグローバルに均一に得られる衛星からの大気風計測技術が切望されている[1]。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を測ることのできる唯一の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。しかし、近年有望視されている全固体化レーザー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。実用衛

星による運用に先立ち衛星搭載ドップラーライダーの有用性を実証するためのシステムの開発を行い、宇宙実証を行う必要がある。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 $2\mu\text{m}$ 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。

2 コヒーレントドップラーライダー

2.1 原理

ライダー(LIDAR)とはLight Detection And Rangingの略でありレーダー(Radar: Radio Detection And Ranging)との違いは電波の代わりにレーザー光を送信光源に用いる点である。レーダーであれば測定対象からの反射波の受信はコヒーレント検出なのが普通であるが、ライダー観測では直接検出により、反射波の強度と時間から検出対象の分布を調べることが多い。しかし、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、観測領域は対流圏である。感度が十分にあれば成層圏エアロゾルの存在する高度 30km までが観測領域になり得る。一方、インコヒーレント・ドップラー・ライダーでは高分解能の分光器により分光された光を直接検出する。インコヒーレントドップラーライダーで数 km 以上の高度を観測するときは大気分子によるレイリー散乱光を分光し、エアロゾル量によらず一様な観測を行うことができるが、高い分解能は得にくい。必要な高分解能を達成するにはコヒーレントドップラーライダーが有利なので、我々は衛星搭載ドップラーライダーとしてはコヒーレント方式のドップラーライダーの開発を目指している。

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コントロールされたパルスレーザーを大気中に発射し、エアロゾルの動きに応じて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)

を混合し検出器上で合成する。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、オフセット成分を除去した後に風速に直される。波長 $2\mu\text{m}$ では周波数の偏移 1MHz が風の視線方向成分で 1m/s に対応する。

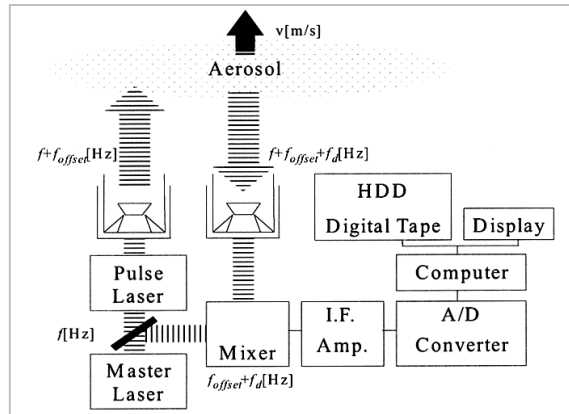


図1 コヒーレントドップラーライダーの測定原理

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。

2.2 経緯

コヒーレントドップラーライダーとしては1980年代に波長 $10\mu\text{m}$ で発振する CO_2 ガスレーザーを使ったシステムが盛んに研究された[2][3]。しかし、電力や重量リソースが大きく衛星搭載センサーとしては見送られた経緯がある。1990年代になって目に安全な $1.5\mu\text{m}$ より長い波長で発振するレーザーダイオード(LD)励起固体レーザー[4]が注目されるようになり情勢が変わってきた。LD励起固体レーザーは装置をコンパクトにパッケージングできリソースも小さいので衛星搭載や航空機搭載をしやすい。現在では発振波長が $1.5\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ にある各種レーザー結晶が使われている。衛星搭載用として現在注目しているのは $2\mu\text{m}$ 帯で発振する Tm,Ho:YLF レーザーで、高出力が達成できる可能性がある。

3 地上及び航空機観測

衛星搭載モデルの検討とともに、衛星搭載モ

デルのシミュレーターになる航空機から大気風を観測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にシステムの概要を示した。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、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。また、衛星搭載実験が行われたときには衛星データ検証実験に使用される。ドップラーライダーの送受信機はジェット機の胴体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くことができる。使われているレーザーは発振波長2.01μmのTm:YAGレーザーである。

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いて上に向け対流圏の風を測定することができる。図3には小金井本所で行った地上実験風景を示した。この場合観測方

向は天頂から20度の方向であり、スキャナーを回転させて観測方向を選ぶ。実際にこの装置によって取得した1ショット分のデータを図4に示す。図4では、参照信号とエアロゾルによる後方散乱から得られる受信信号を示した。受信信号を見ると高度7.2km付近に雲と思われる信号が確認できるが、その他の高度ではノイズのようなビート光による信号が観測されていたことが分かる。図5において図4の高度1.4km付近を拡大した受信信号と、その受信信号をFFT解析した結果を示してある。解析の結果、高度1.4km付近では113.5MHzにピークがあり、参照信号は111.2MHzにピークがあったことから、エアロゾルによるドップラーシフト量は+2.3MHzだったことが分かる。波長2μmの場合、ドップラーシフトが1MHzの時1m/sの速度に相当するので、6.7m/sec(=2.3(m/s)/sin(20°)観)の水平成分を持つ風が計測されていたことになる。

図6には1000ショット平均のスペクトルを示した。風が高度とともに滑らかに変わっている

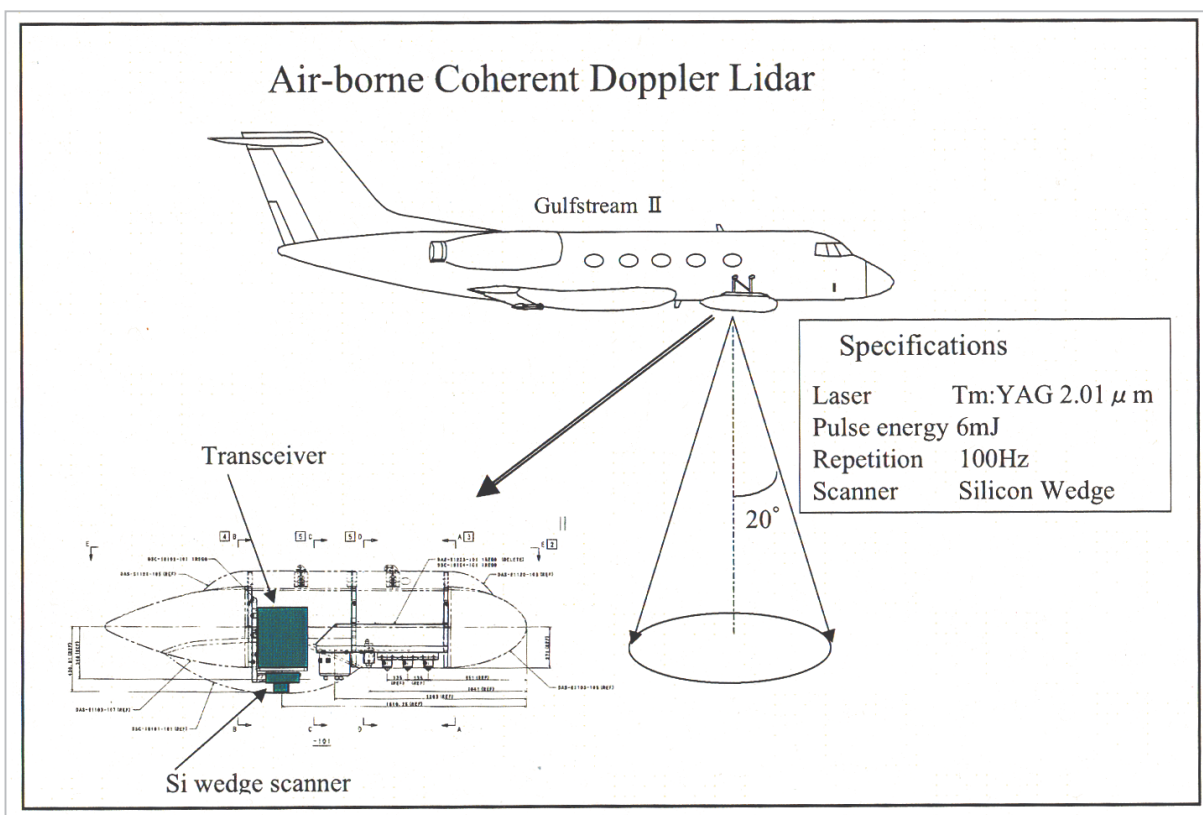


図2 航空機搭載コヒーレントドップラーライダーの概要

送受信器内の10cmφ望遠鏡から出てきたレーザー光はSiウェッジ・スキャナを通過して真下から20°傾いた角度をコニカル・スキャンする。

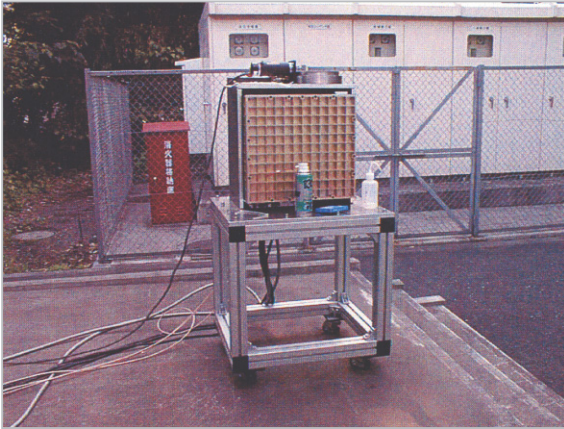


図3 コヒーレントドップラーライダーによる地上での風速分布観測風景

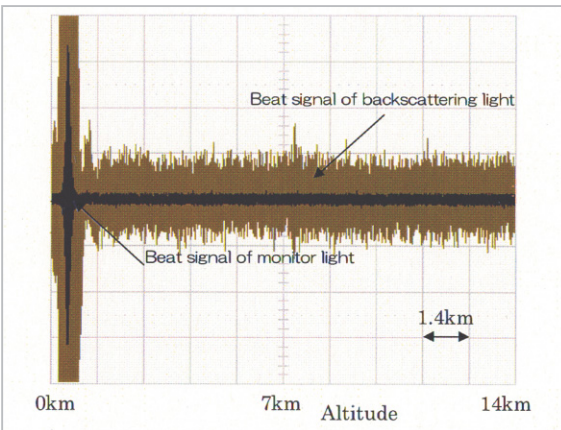


図4 コヒーレントドップラーライダーの受信信号

幅の狭い信号は参照信号で出射光周波数モ
ニタ

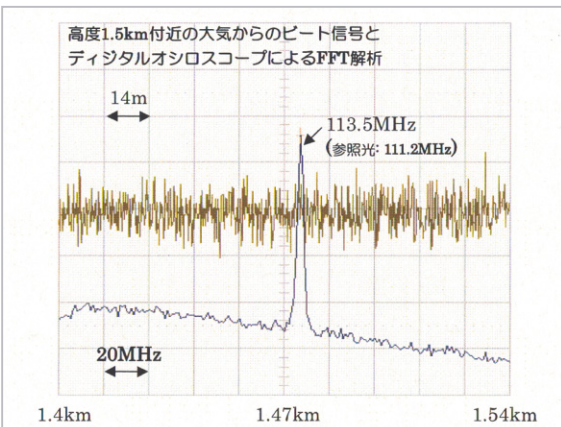


図5 高度 1.5km 付近の受信信号とそのFFTによるスペクトル

様子が見て取れる。図7には小金井で同時にマイクロ波ウィンドプロファイラーで観測された水平風との比較を示した。両装置で観測された高

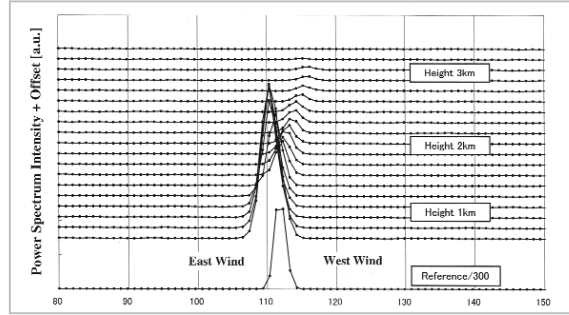


図6 コヒーレントドップラーライダーで観測し高度ごとに平均化された周波数スペクトル

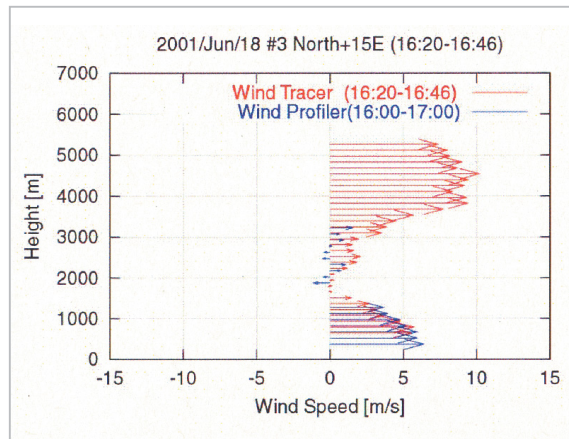


図7 小金井で観測されたコヒーレントドップラーライダー(赤)とマイクロ波ウィンドプロファイラー(青)による水平風の比較例

度3kmまでの水平風は良く一致している。これらの結果はこのコヒーレントドップラーライダー装置により地上から風の高度分布が測定できることを示している。

4 衛星搭載ドップラーライダー

4.1 JEM/CDL

ドップラーライダーはいまだ宇宙環境で利用されたことがなく、衛星搭載ドップラーライダーによるグローバルな風の定常観測の実現性と有用性を実証する必要がある。我々は宇宙実証実験の一つ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。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」が提出された[1]。この報告書の中で、気象の数値予報で使う4次元同化における有効性を考慮して、JEM/CDLによって観測される風の観測精度に対する要求が表1のようにまとめられた。

表1 対流圏風観測の要求精度

	境界層	下部対流圏	上部対流圏
	0-2km	2-6km	6-15km
鉛直解像度	0.5km	1.0km	1.0km
水平解像度	100km	100km	100km
精度(ベクトル風)	2.0m/sec	3.0m/sec	5.0m/sec

対流圏の風観測に対して水平分解能100kmで精度2-3m/sのベクトル風観測精度が要求された。したがって、JEM/CDLの目標はJEMの曝露部標準ペイロードにCDLを搭載し、宇宙から対流圏の水平風ベクトルをグローバルに2-3m/sの精度で測定することである。

視線方向の風速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。したがって、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ている。また、全固体レーザーとして2J出力10Hz繰り返しのものが必要であり、現在はTm,Ho:YLFレーザー($\lambda:2.06\mu\text{m}$)を候補として検討し、小型モデルの試作実験も進めている。JEM搭載モデルではマスターレーザーにより注入同期された発振器と増幅器を2段から5段持つレーザーにより2J出力10Hz繰り返しの性能を引き出すことを考えている。この時レーザーは1250Wの電力を必要とし、エネルギー効率は1.6%になる予定である。

図8にはJEM/CDLの概念図を示した。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。

曝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[5]。現在のモデルでは全質量は470kgで電力は1489Wであり制

限内にある。しかし、JEM全体での電力がわずか5.4kWしかないため、JEM/CDLの運用に関しては他の装置とのスケジュールの調整が必要であり、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の液冷系に逃がさねばならない。その逃がし方も重要な検討課題になっている。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、そのための実験検討を進めていく必要がある。現在の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し、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。

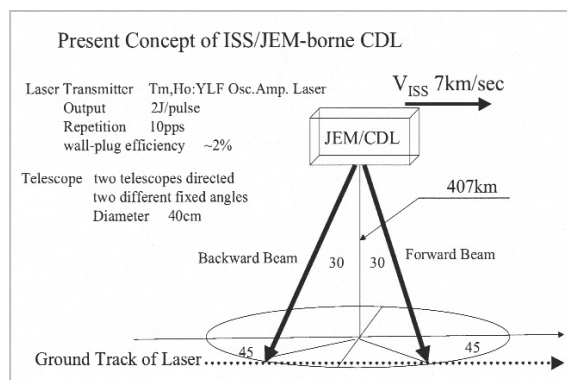


図8 JEM/CDLの概念図

4.2 国際協力

ヨーロッパ宇宙機関(ESA)ではインコヒーレントドップラーライダーにより風の1方向だけを測定するADMミッションが走り始めている[6]。一方、米国NASAでは対流圏の下部をコヒーレントドップラーライダーで、上部をインコヒーレントドップラーライダーシステムが考えられつつある。コヒーレントとインコヒーレントの理論的な性能比較はCRLでも行い、インコヒーレントなシステムで2m/sより良い観測精度を出すのはかなり難しい事が分かってきた[7]。

世界的にはESAのインコヒーレントドップラーライダーに対し、日本のコヒーレントドップラーライダーの実証実験提案がドップラーライダーの有効性の宇宙実証を目指して相補的に出

されていると言える。さらに米国が両方式を含んだ案を新たに考えようとしており、この中のコヒーレントドップラーライダー部分との共同研究が重要になってくる。また、ドイツやフランスにもコヒーレントドップラーライダーの研究グループがあり、これらのグループとも研究協力をしていく必要がある。

5 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足を解消する唯一の観測手段として期待されている。将来極軌道衛星に搭載されて定常的に利用されると気象観測の大きな柱になることも考えられる。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較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、ドップラーライダーが宇宙でオペレーションでき、その観測結果が実際に天気予報や気候モデルの改善に役立つことを実証することが必要である。

現在までCRLでは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。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、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。

また、ドップラーライダー実証システムや更に将来の定常的なドップラーライダー地球観測衛星についてESA、NASAとの役割分担や共同開発も考えながら日本としての貢献を考えていかねばならない。例えば、定常観測のレベルになったときには日本、ESA、NASAが1機ずつドップラーライダーを打ち上げれば観測頻度が増え、より正確な数値予報への寄与が得られる。

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 R.M.Huffaker, T.R.Lawrence, M.J.Post, J.T.Priestley, F.F.Hall, R.A.Richter, and R.J.Keeler, "Feasibility studies for a global wind measuring satellite system (Windsat): analysis of simulated performance", Applied Optics, Vol.23, No.15, pp.2523-2536, 1984.
- 3 R.T.Menzies and R.M.Hardesty, "Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields", Proceedings of the IEEE, Vol.77, No.3, pp.449-462, 1989.
- 4 T.Y.Fan, G.Huber, R.L.Byer, and P.Mitzscherlich, "Continuous-wave operation at 2.1 μ m of a diode-laser-pumped Tm-sensitized Ho:Y3Al5O12 laser at 300K", Optics Letters, Vol.12, pp.678-680, 1987.
- 5 "JEM曝露部利用の手引き", 宇宙開発事業団, JBX-96154A, 1998.
- 6 ESA SP-1234-4, "Report for mission selection; The four candidate earth explorer core missions".
- 7 石井, 水谷, 篠野, 板部, 浅井, "衛星搭載を目的としたインコヒーレントドップラーライダーの風速誤差の検討", 日本リモートセンシング学会誌, 投稿中.

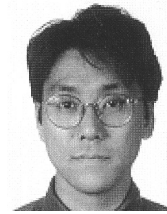


水谷耕平
電磁波計測部門ライダーグループリー
ダー 理学博士
レーザーリモートセンシング

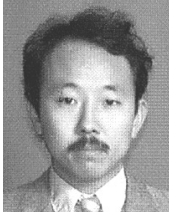
板部敏和
基礎先端部門長 理学博士
レーザーリモートセンシング



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



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



青木哲郎
電磁波計測部門ライダーグループ主任
研究員 理学博士
光によるリモートセンシング

大野裕一
電磁波計測部門雲レーダグループ主任
研究員
気象学、レーザーリモートセンシング



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