

航空安全のための搭載型風計測ライダの開発

Development of airborne coherent Doppler lidar for flight safety

浅香 公雄¹、又吉 直樹¹、亀山 俊平²、古田 匡²、平野 嘉仁²、奥野 善則¹、張替 正敏¹

¹宇宙航空研究開発機構、²三菱電機株式会社

Kimio Asaka¹, Naoki Matayoshi¹, Shumpei Kameyama², Masashi Furuta², Yoshihito Hirano², Yoshinori Okuno¹,
and Masatoshi Harigae¹

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Mitsubishi Electric Corporation

Abstract

A coherent Doppler lidar (CDL) is an attractive wind sensor for flight safety. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is developing an airborne turbulence warning system to detect clear air turbulence for jet transports and researching a remote wind sensing technology for helicopters, especially for the measurement of true airspeed at low airspeeds and detection of small-scale atmospheric turbulence such as is likely to exist in mountainous areas or around high-rise buildings. A 1.5 μ m all-fiber CDL system is proposed as an airborne wind sensor, and has advantages of small size, high reliability, and high installation flexibility. The prototypes of a 1.5 μ m all-fiber CDL were installed in JAXA's research aircraft (Beechcraft65) and helicopter (MuPAL- ϵ). Flights and ground tests were carried out to evaluate their performance. The evaluation results indicate that a 1.5 μ m all-fiber CDL has good potential for these applications.

1. はじめに

現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、航空機の安全を向上するため、搭載型の風計測ライダを用いた2つのシステムの研究開発を行っている。一方は、ジェット気流周辺で発生する乱気流のように雲や降雨を伴わない乱気流（晴天乱気流）を検知する大型商用機向けの航空機搭載型乱気流検知システムである。他方は、ヘリコプタ搭載型乱気流検知システムであり、従来センサでは不可能であった低速域での対気速度の3次元計測と山岳地や高層ビル周辺で遭遇する危険性のある局所的な乱気流の検知を目標とする。

航空機搭載型乱気流検知システムに用いる風計測ライダとして、光通信に用いられる単一波長出力のファイバレーザを基準光源として用いるとともに、近年高出力化がめざましく本質的に高効率を得られやすい光ファイバ増幅器を出力光源に用いたことを特徴とする全光ファイバ型風計測ライダの開発を世界に先駆けて行っている^{1,2)}。本方式では各光学的構成要素を光ファイバで結合することにより、小型で信頼性が高く、かつ装置配置の自由度の高い風計測ライダを得ることができる。この構成のライダは世界的にも注目されてきており、ヨーロッパにおいてはこのための光源開発のプロジェクトが開始されるとともに、仏 ONERA からは対気速度センサとしてのヘリコプタ搭載の研究例が報告されている³⁾。

ここでは、全光ファイバ型風計測ライダを JAXA 所有の実験航空機と実験ヘリコプタに搭載し、航空機搭載型およびヘリコプタ搭載型それぞれの機能・性能評価のために行った試験結果について報告する。

なお、搭載型風計測ライダの開発に関しては、三菱電機（株）と共同研究を行っている。

2. 航空機搭載飛行試験結果

風計測ライダをセンサとする大型商用機向けの乱気流検知システムは巡航高度（30,000～40,000ft）において 5n.m.（9.3km）の検知距離を目標性能としている。これにより、晴天乱気流を遭遇前の 20～40 秒前に検知することが可能となる。

今回、原理確認のために試作した全光ファイバ型風計測ライダの機能モデルを JAXA 所有の実験航空機（Beechcraft65 型）に搭載し飛行試験を行った。実験航空機の外観と機能モデルの搭載状態を Fig. 1 に示す。また、主な仕様を Table 1 に示す。機能モデルは受信信号における飛行中の自機速度によるドップラーシフトを補償することにより信号処理における受信帯域を小さくするスーパーヘテロダイン受信器と、装置内部の偏波変動によるヘテロダイン検波効率の劣化を補償するために送信パルス光の内部反

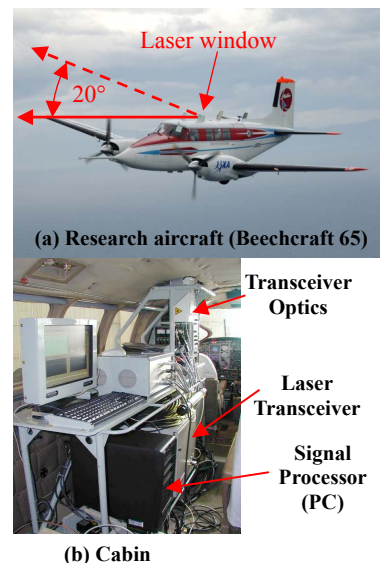


Fig. 1. The lidar system installed on the research aircraft

Table 1. System specification.

Wavelength	1.54 μ m
Laser power (Peak)	10W
Pulse repetition frequency	50kHz
Pulse width	1 μ s
Range resolution	150m
Beam diameter (1/e ²)	50mm

射光を最大とするように受信光の偏波を制御する偏波制御回路を持つことを特長とする。レーザ送受信部と送受光学系の間は約10mの光ファイバでつながれており、両者間の設置精度を気にする必要はない。

2.1 風速測定と検出能

相模湾上空において、数回の飛行試験を行った。機能モデルでは、上空約10,000ftの高度まで風速を測ることができた。Fig. 2に高度(h) 5,000ftで水平定速飛行時に測定した対気速度と検出能の一例を示す。検出能は信号対雑音強度比にインコヒーレント積分数(N)の平方根を乗じたものである。N=2,000の条件において、2km以上の風速測定を確認した。飛行試験において、レーザパーティクルカウンタにより、大気中のエアロゾル密度を同時測定した。Fig. 3に粒径0.3 μ m以上のエアロゾル密度と距離150mのレンジビンの検出能の関係を示す。図より、両者の相関関係が確認できる。直線近似の結果、エアロゾル密度が10倍になると、検出能は9.3dB向上し、ほぼ理論通りの結果が得られている。

2.2 測定精度

次に、実験航空機に搭載された他の速度計との比較結果を示す。Fig. 4にピトー管から求めた真対気速度(TAS)と機能モデルの測定値から求めた機首方向の風速の同時測定結果を示す。高度2,000ftにおいて、対気速度約100kt(52m/s)で水平定速飛行時に測定したものであり、風速値は各センサで測定される対気速度からGPSで測定される対地速度を差し引いて求めた。機能モデルのレンジビン幅が150mであることから、同程度の距離幅の平均値とするためTASは3秒間の平均値とした。同じ位置の風速測定値が同一時間で比較できるように、TASの測定値に対し機能モデルの各レンジビンからの測定値をそれぞれ時間軸方向にシフトしている。風速の時間変化の小さい静穏な風速場を飛行したこともあり、同じ位置に対する機能モデルの各レンジビンからの測定値とTASは非常によく一致している。Fig. 5に、TASと機能モデルの150mレンジビンの測定値との相関を示す。両者の測定値の差の平均値は0.13m/s、標準偏差 σ は0.28m/sである。同様に、実験航空機に搭載される超音波速度計との比較も行ったが、両者の測定値の差の平均値は0.5m/s以下であった²⁾。

2.3 風シア測定

Fig. 6に鉛直風シアの測定結果を示す。図はピトー管から求めたTASと機能モデルの測定値である。高度1,500ftから2,100ftの間で風速がおおよそ-2m/sか

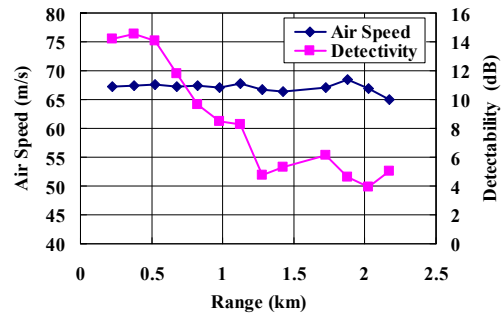


Fig. 2. Measured airspeed and detectability (Level flight, h=5,000ft, N=2,000)

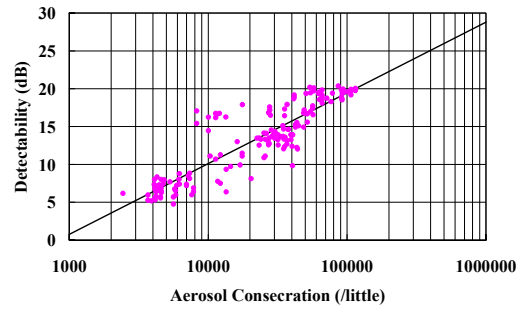


Fig. 3. Correlation between aerosol concentration and lidar system detectability (150m range bin, N=10,000)

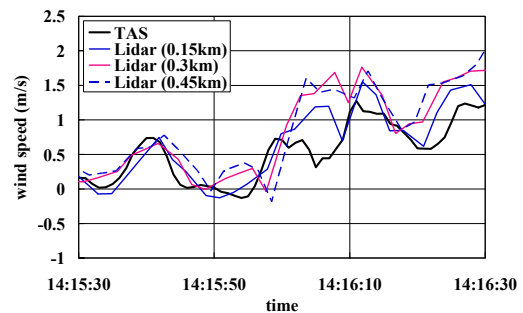


Fig. 4. Comparison between lidar and Pitot tube wind measurements (Level flight, h=2,000ft, N=2,000)

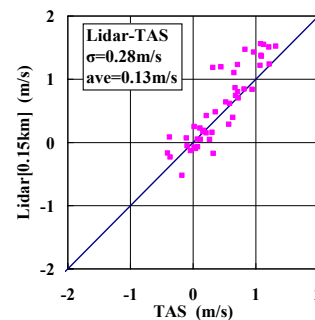


Fig. 5. Correlation of measured wind speed between Pitot tube and lidar system (150m range bin)

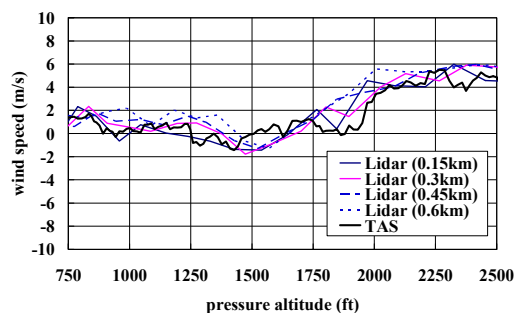


Fig. 6. Vertical windshear measurement results (With distance compensation, N=4,000)

ら 5m/s まで変化する鉛直風シアを観測し、風シアのような風の変異点または乱流現象が測定できることを確認した。

飛行試験の結果、実験航空機に搭載された他の原理による速度計（ピトー管、超音波風速計）との比較から、機能モデルは測定精度 0.5m/s 以下が期待できることを実証した。また、鉛直風シアの測定により乱気流検知への有効性を確認した。

今後は、目標性能実現のため 100W 級高出力光ファイバ増幅器の開発と検出効率の向上を実現するライダ構成の改良を行う予定である。

3. ヘリコプタ搭載機能評価試験結果

ヘリコプタにおけるライダの有用性を実証するとともに、ヘリコプタでの利用に適したライダの仕様を策定するための基礎データの収集を目的として、三菱電機（株）が保有する地上用風計測ライダを JAXA の実験用ヘリコプタ MuPAL-ε に搭載し、飛行中の機能、性能を評価する飛行試験を実施した⁴⁾。Fig. 7 と Fig. 8 に搭載した風計測ライダと搭載状態を示す。前述の機能モデルと同様の構成であるが、信号処理機能が強化されており、計測結果をリアルタイムで処理し外部に出力する能力を持つ。但し地上用に設計されているため、レーザ送受信部の自機速度補償機能および偏波制御機能は省略されている。主な仕様を Table 2 に示す。距離分解能を 30m または 75m に設定することができる。空間的な変動スケールの小さい地形性乱気流を計測するため、試験においては距離分解能の設定は 30m とした。

3.1 対気速度計測

Fig. 9 に対気速度センサとして利用した例で、ホバリングから前後進および左右横進を行った場合の対気速度の計測結果を示す。この試験では Conical Scan（12 秒／回転）によって 3 軸方向の対気速度を求めている。計測中の機体運動の影響を GPS/INS から得られる機体の速度や姿勢のデータを用いて補正することにより、対気速度を精度良く求めることができる。他の速度計では計測が困難な速度 20kt 程度の後進（背風）の状態でもロータや胴体周りの流れの影響を受けずに安定した計測が得られた。

3.2 局所乱気流の計測精度検証（地上試験）

山岳地帯や高層ビル屋上周辺等で発生する局所的な乱気流計測を模擬するため、ヘリコプタのダウンウォッシュを計測する試験を行った。ライダを地上に設置し、レーザの照射方向付近でヘリコプタのホバリングを行う。レーザの照射方向に沿って地上用の超音波風速計を並べ、その計測結果と比較することによってライダの計測精度を検証した。Fig. 10 にレーザ照射方向成分の風速測定結果を示す。ホバリング位置（190m）の前後で風速が概ね -10m/s から +5m/s（符号はライダから遠ざかる方向が+）と急激に変化しているが、ライダによってもこの局所的な風速の変化が計測できることが確認できる。Fig. 11

にホバリング位置前後のレンジビン（#4～#7）の風速スペクトル（1 分間平均値）を示す。スペクトルの広がりにはレンジビン内の風速分布を表している。風速スペクトルの解析から乱流状態の情報を得ることが可能である。以上の結果から、局所的な乱気流の検知をライダにより期待することができる。

3.3 表示方式の研究

乱気流検知システムにおいては、風計測ライダで計測した風速や乱気流の情報をどのようにパイロットに表示し、実際の飛行で役立てるかということも重要な課題である。今回の飛行試験では Fig. 12 に示したようなディスプレイを試作してパイロット評価を実施した。このディスプレイでは機体前方の水平面と鉛直面内の風速分布が表示される。パイロット評価は以下の通りであった。1)対気速度および水平面内の風表示については、現時点での精度、更新レート（1～4Hz）で十分使用が可能である。2)風速の分布を見て瞬時に飛行への影響を判断することはパイロットには困難であり、安全な領域、危険な領域を分かりやすく表示する工夫が必要である。

今後の課題として、乱気流の計測データから飛行への影響を判断するアルゴリズムの研究と表示方式の開発があげられる。

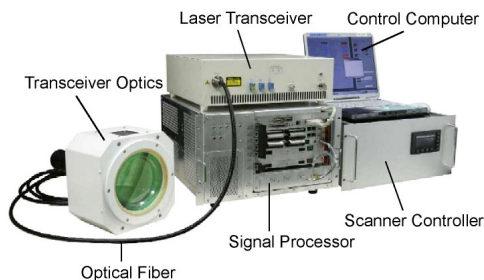


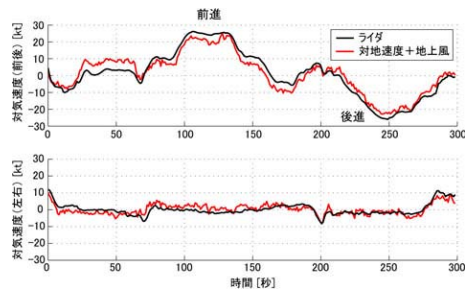
Fig. 7. Melco's 1.5μm CDL system



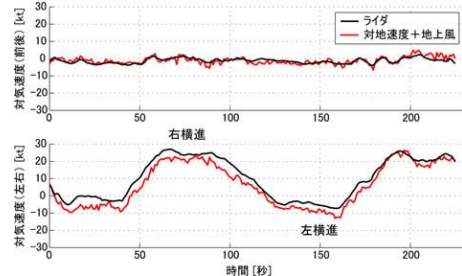
Fig. 8. MuPAL-ε with the lidar system installed

Table 1 Major Specifications of Evaluated Lidar System

Transmitted Beam	Pulsed
Wavelength	1.5μm
Pulse Width	0.2μsec / 0.5μsec
Pulse Repetition Frequency	4kHz
Transmitting Power (average)	≤ 0.01W (Pulse Width 0.2μsec) ≤ 0.02W (Pulse Width 0.5μsec)
Clear Aperture of Optics	100mmφ
Scan Mode	Fix, RHI, Conical
Scan Angle	Max. ±20°



(a) Forward-Backward Flight



(b) Sideways Flight

Fig. 9. Airspeed measurement results

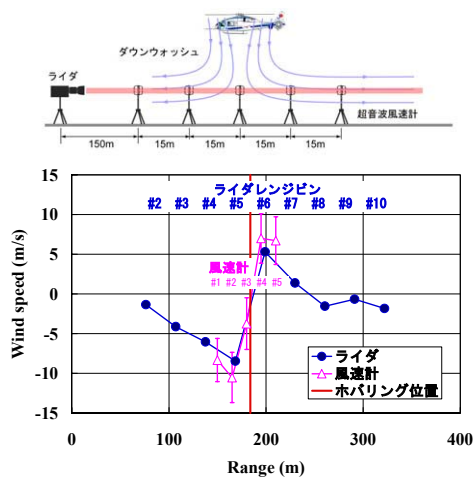


Fig. 10. Downwash measurement results

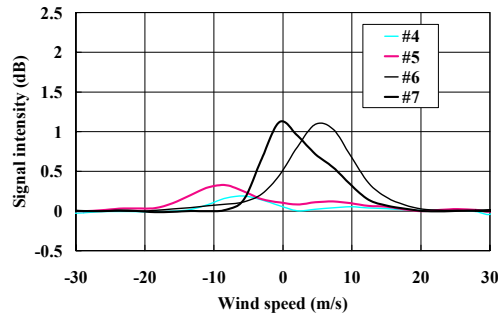


Fig. 11. Averaged signal spectra

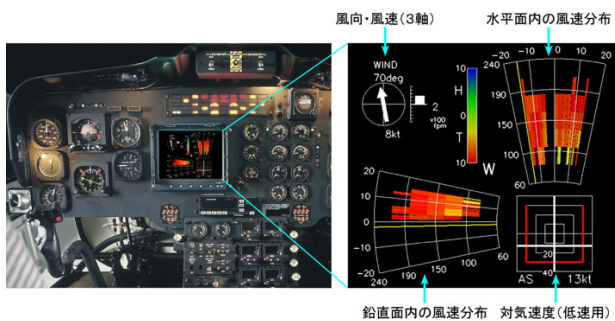


Fig. 12. Real-time display image

4. むすび

現在、JAXA では航空事故を低減し安心・安全な社会の実現に貢献するために、大型商用機向けの航空機搭載型乱気流検知システムとヘリコプタ搭載型乱気流検知システムの研究開発を進めている。ヘリコプタを含む航空機搭載に適した特長を有する全光ファイバ型構成の風計測ライダを JAXA 所有の実験航空機と実験ヘリコプタに搭載し、航空機搭載型およびヘリコプタ搭載型それぞれの機能・性能評価のための試験を行った。

航空機搭載型については、全光ファイバ型風計測ライダの機能モデルを実験航空機に搭載し、高度 5,000ft において前方 2km の風速を遠隔計測し、他の原理による速度計との比較から測定精度 0.5m/s 以下が期待できることを実証した。さらに、鉛直風シアの測定により乱気流検知への有効性を確認した。今後は、大型商用機に搭載可能で、巡航高度において前方 5n.m.先の風を計測できる乱気流検知システムの実用化を目指す。これを実現するには、風計測ライダの高出力化と高効率化が必要であり、100W 級高出力光ファイバ増幅器の開発と検出効率の向上を実現するライダ構成の改良を行う予定である。

ヘリコプタ搭載型では、三菱電機(株) 所有の風計測ライダを搭載した。GPS/INS からの機体情報と組み合わせることによりヘリコプタの対気速度計測に十分な能力を有することを実証した。また、ダウンウォッシュ計測による模擬試験により、局所的な乱気流計測への有効性を確認した。乱気流計測における観測距離の増大 (1~2km) やヘリコプタ搭載の実用化に向けた一層の小型化が課題である。今後は、今回の試験で得られた結果を反映してヘリコプタへの搭載に最適化されたライダの仕様の検討を行い、実用化に向けた研究を進める予定である。

乱気流検知システムとしては、風速測定データから乱気流を抽出し、その飛行への影響度を判定するデータ処理アルゴリズムおよびその結果を明確かつリアルタイムにパイロットへ伝達する表示方式の開発が重要であり、風計測ライダの開発と平行して進めていく予定である。

References

1. K. Asaka, S. Kameyama, T. Ando, T. Yanagisawa, Y. Ooga, K. Hamazu, and Y. Hirano, The Review of Laser Engineering, 29, pp.371-376, 2001 (in Japanese).
2. K. Asaka, S. Kameyama, T. Ando, Y. Hirano, H. Inokuchi, and T. Inagaki, in the Proceeding of JSASS 17th International sessions in 41th Aircraft Symposium, pp. 13-16, 2003.
3. Thales Avionics and ONERA, the 30th European Rotorcraft Forum, Marseilles, France, September 2004.
4. N. Matayoshi, K. Asaka, Y. Okuno, T. Matsuda, M. Furuta, T. Ando, and S. Kameyama, AIAA Paper 2005-6117.