

3. 風計測ライダの研究開発

井之口浜木 (航空宇宙技術研究所)

Research and Development of Wind Measurement LIDAR

Hamaki Inokuchi (NAL)

Key Words: LASER, Onboard Sensor, Doppler LIDAR, Wind Measurement

Abstract

The wind turbulence becomes one of the main factors of aircraft accidents. If pilots can know the wind turbulence beforehand in flight, avoiding it or reducing damage is possible. In order to predict the wind turbulence, the LIDAR (Light Detection And Ranging) is suitable as a remote sensor. A ground test equipment of the wind measurement LIDAR is under development in National Aerospace Laboratory of Japan. The acquired data by the equipment is going to be utilized for development of a practical type onboard LIDAR. The specification of the ground test equipment and examination result for practical application are explained in this paper.

1. はじめに

飛行中の乱気流や突風などの風擾乱は、航空機事故の主要因の一つとなっている。風擾乱に関係した事故を防ぐためには、予め機体前方の風を把握し、危険な領域を回避したり機体や乗員乗客への影響を低減させる方策を採ることが最も直接的である。具体的にはパイロットへの警告により飛行経路を変更する、乗員乗客にシートベルトを装着することを勧告する、機体の飛行制御システムに風情報を提供することにより機体運動を低減させることなどが考えられ、いずれの場合でも機体前方の風が実時間で測定できるリモートセンサが必要である。現状では風計測リモートセンサとしてマイクロ波を利用したドップラーレーダが開発されており、一部の機体に既に搭載されているが、晴天時に機能しないなどの欠点があり、風擾乱の検知能力は十分でない。航空宇宙技術研究所では、航空機に搭載する風計測リモートセンサに関して、平成11年度から検討を開始して、現在までに以下の結論を得ている¹⁾。

- 1) レーザ光を利用したライダ (LIDAR : Light Detection And Ranging) が適している。
- 2) ライダ方式はヘテロダイン方式が適している。
- 3) レーザ波長は $1.5\mu\text{m}$ 帯が適している。

これらの結果を基に平成 13 年度に風計測ライダ地上試験装置が完成する予定で、この装置

を用いて地上でデータを取得した後に、実際に実験用航空機に搭載して実用化のための実地データを蓄積する。本地上試験装置は実用型よりも小出力であるが、方式やレーザ波長などは同一とし、実践的なデータを取得することを目的としている。

なお、地上試験装置は昨年度から製作中であり、まだ試験データが取得できないため、今回はその製作仕様および実用化のための検討結果について報告する。

2. 風計測ライダの原理

風計測ライダとは、飛行中の機体から前方の大気中にパルス状のレーザ光を放射し、大気中に浮遊するエアロゾルによるレーザの散乱光を受信して、ドップラーシフト量を測定することにより、風速を求める装置である。レーザ光は光路上のあらゆる点で散乱するため、放射および受信の時間差から測定点を算出する。ドップ

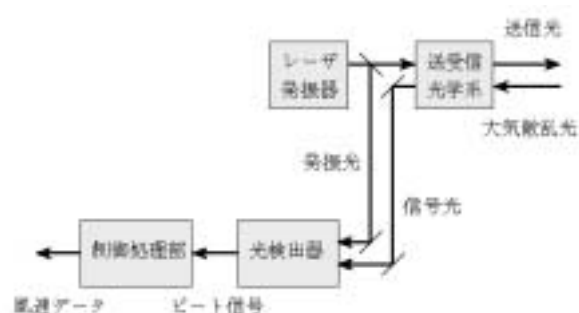


図1 ヘテロダイン方式

ラーシフト量を測定する方法として、航空機搭載用としてはヘテロダイン方式が最も適していると考えられる。ヘテロダイン方式では、図 1 に示すように装置からレーザー光を放射して、その大気散乱光を受信する。大気散乱光は、ドップラーシフトにより波長が変化するために、装置内部の発振光と受信した信号光との間には波長のずれが生ずる。この波長のずれによるビート信号から風速を求める方法である。

3. 風計測ライダ地上試験装置

風計測ライダ地上試験装置は、本体部、送受信望遠鏡、計算機で構成されている。本体部は注入同期レーザー、出力レーザー、ライダ駆動部、光検出器からなり、送受信望遠鏡はフレキシブルな光ファイバで本体部に接続される。計算機は本体部の制御と信号処理用のための汎用計算機である。本体部および送受信望遠鏡の仕様を表 1 および表 2 に示す。

表 1 本体部仕様

外寸	400 × 400 × 400mm
重量	20kg 以下
消費電力	280W 以下
レーザー波長	1.5 μm 帯
レーザー出力	平均 1W
パルス繰返し数	50kHz
パルス幅	1 μs
測定繰返し周波数	50Hz (増減可)

表 2 送受信望遠鏡仕様

口径	60mm
ファイバケーブル長	10m
外寸	120 × 120 × 400mm
重量	4kg 以下

本地上試験装置は、図 2 に示すようなオフラインで風を算出する装置で、コストダウンのために完全な搭載仕様とはしなかったが、試験的に実験用航空機に搭載して、実際に飛行中の風を測定することができる。目標とする性能は 3km 遠方の軸方向気流成分が 1m/s の精度で測定できることで、同種の試作器が平均出力 0.5W で 2.5km のレンジであることから類推して十分実現性があると考えられる。ただし、本装置ではパルス繰返し数を 50kHz としたことで、光が往復する時間を 20 μs 以下としなければならないので、3km 以上遠方の風を測定することはできない。

レーザーの方式としては、ファイバアンプ方式を採用した。ファイバアンプ方式は従来高出力

化が困難であったが、最近になって可能となったため、採用することにした。この方式は低エネルギー多パルスとなるため、サンプリング間隔を小さく出来るうえ、電流変動が少ないので電磁ノイズの発生が少ない。光学系の接続にも光ファイバを利用することにより、送受信望遠鏡をレーザー発振部から分離することが出来るので、システムの搭載性が格段に向上する。レーザー波長を 1.5 μm 帯としたことにより、眼球に対する危険性については殆ど考慮する必要がない²⁾。

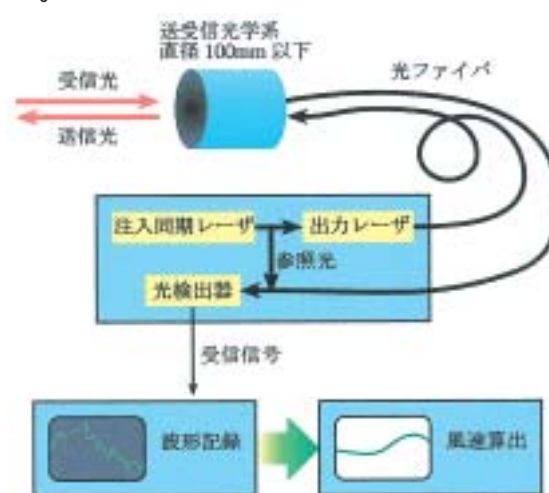


図 2 風計測ライダ地上試験装置概要

4. 搭載型風計測ライダ実用化の検討³⁾

現在進めている風計測ライダの研究開発は、当面はセンサの開発に限定される。しかしながら、実際の飛行安全に役立たせるためには、風情報の利用方式を確立する必要がある。これらの具体的仕様に関しては、実用型センサの開発時に決定すればよいことであるが、より実用的な装置を開発するために、センサの開発と並行して検討を開始した。

従来の風擾乱警告システムは、異常時のみ警告を発する方式のため、警告が唐突で信頼性を確認する余裕がない。このため常時気流状況を表示して、警告を発する前に予測が出来るようにした方が実用性が高いと考えられる。このときに気流を 3次元で表現すると画面表示が複雑になり操縦者の負担が増加するため、上下風および前後風が機体に及ぼす影響を考慮して、両者を上下風に換算して表示する方式を検討した。風擾乱の程度は、乱流強度および平均風を分離して、より多くの情報を操縦者に提供する。

図 3 は、レーザー光を円錐状に走査させることにより、気流成分を 3次元方向に分解する手法

を示す図である。ヘテロダイン方式の風計測ライダでは、レーザ光の放射方向の気流成分を計測するので、機体軸前後方向、横方向、上下方向に分解するためにレーザ光を円錐状に走査させる。θ が十分に小さいか、気流の殆どが前後方向成分であるとする、気流の前後方向成分は以下の式で求めることができる。

$$U + u = (R/N) \cos \theta$$

横方向成分は、図 4 に示す通り以下の式で表される。

$$V + v = \{U + u - R \cos(\theta) \} \tan(\theta)$$

同様に上下方向成分は以下の式の通りである。

$$W + w = \{U + u - R \cos(\theta) \} \tan(\theta)$$

ただし、

U : 対気速度の前後方向成分

V : 対気速度の横方向成分

W : 対気速度の上下方向成分

u : 風擾乱の前後方向成分

v : 風擾乱の横方向成分

w : 風擾乱の上下方向成分

R : レーザ光放射方向の計測速度

θ : レーザ光の偏向角

φ : レーザ光のバンク角

N : 計測回数

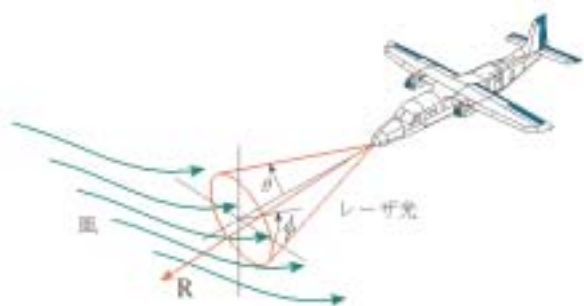


図 3 気流の三次元成分算出方式

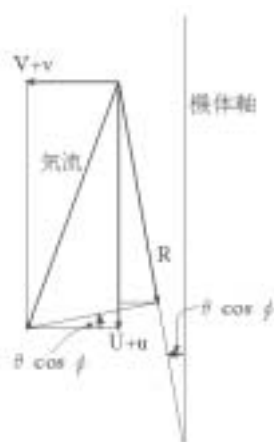


図 4 気流の三次元成分算出のための定義

次に、3次元の気流情報を2次元に簡易化するために、前後風が揚力に及ぼす影響を同様な影響を引き起こす上下風に換算する。一般に揚力(L)は、以下の式で求められる。

$$L = (1/2) U^2 C_L S$$

この状態で前後風(u)を受けた場合の揚力(L')は、以下の式で求められる。

$$L' = (1/2) (U + u)^2 C_L S$$

同じく上下風(w)を受けた場合の揚力(L'')は、以下の通りである。

$$L'' = (1/2) v^2 C_L (1 + d) S$$

ただし、

$$d = \tan^2(\alpha)$$

である。両者の揚力変化が同一であるとし、C_Lを各航空機毎に固有の定数で近似すると、以下の式で前後風を上下風に換算することができる。

$$w = \tan[\{(1 + (u/U)^2) C_L\}^{-1/2}] U$$

このとき、主翼迎角(α)を以下のように対気速度(v)の関数として表すことにより、主翼迎角を計測する必要がなくなる。

$$\alpha = 2F / v^2 C_L S$$

ただし、

L : 揚力

L' : 前後風(u)を受けた場合の揚力

L'' : 上下風(w)を受けた場合の揚力

ρ : 空気密度

U : 対気速度

u : 前後風

w : 上下風

C_L : 揚力係数

S : 主翼面積

α : 主翼迎角

C_L : 揚力傾斜

d : 迎角変化

F : 機体重量

風擾乱を乱流強度および平均風に分解して表現する方式としては、まず乱流強度(G)を以下の式で定義する。

$$G = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$$

ただし、G は一定時間内の変動量を表す。

乱流強度は、一例として以下のような基準で表示して利用する。

- ・シートベルトを装着していなければ、事故が生ずる可能性がある乱流強度 : 赤
 - ・機体が激しく揺れるが、揺れが直接事故につながる可能性のない乱流強度 : 黄
 - ・上記以外の乱流強度 : 緑
- 一方、平均風は以下の式で定義する。

$$\mu = u/N$$

$$mv = v/N$$

$$mw = w/N$$

ただし、

μ ：風擾乱の前後方向成分平均値

mv ：風擾乱の横方向成分平均値

mw ：風擾乱の上下方向成分平均値

Nは計測回数で、ウインドシアを認識するためには1秒程度の平均を取るようなNを設定する必要があると予想され、最終的には実験により決定されるべき数値である。



図5 風擾乱モニタ表示例

図5は、操縦者に風擾乱を認識させるためのモニタ表示の例を示す。数字は風擾乱の計測領域に達するまでの秒数を示し、本例では計測領域を5分割して表示している。縞状の部分は平均風に比例した速度で移動し、下からの風の場合縞は上に移動し、右からの風の場合は左に移動する。前後風は前述した方法により、上下風に換算する。縞の色は乱流強度の程度を表す。

一方、操縦席内の計器類を現在以上に複雑化させないという点では、音声による警告も有効であると考えられる。音声の場合には、非常時のみの警告となるため、警告が唐突となる可能性がある上、誤報の判定が困難であるが、非常時以外でもパイロットの要求に応じて応答するシステムであれば、これらの欠点は緩和される。

5. 研究開発計画

航空機搭載風計測ライダは、現在表3のような計画で研究開発を進めている。平成11年度に実施した机上検討による実現性調査で、実現の可能性が高いことが確認されたため、平成12年度から試作を開始した。まず平成12年度から13年度にかけて地上試験装置を製作する。平成14年度には、汎用の測定器や計算機を活用して、

オフラインで地上での風を計測する。同時に本装置を実験用航空機に搭載する工事を行う。平成15年度には搭載飛行試験を行うとともに実時間処理部を追加して、風がオンラインで計測できるようにする。平成16年度には、オンラインで飛行中に前方の風を測ることにより、実地データを蓄積する。そしてその結果を基に実用型の仕様を検討する。

表3 風計測ライダ研究開発計画

平成11年度	実現性調査 基本仕様検討
平成12年度	詳細仕様検討 地上試験装置製作
平成13年度	地上試験装置製作 実用化検討
平成14年度	風計測地上試験 実験用航空機搭載工事
平成15年度	搭載飛行試験（オフライン風計測） 実時間処理部追加
平成16年度	搭載飛行試験（オンライン風計測） 高出力実用型の仕様検討

6. おわりに

現在製作中の風計測ライダ地上試験装置は、基礎的な物理実験を行うためではなく、実用化に直結したデータを取得するために開発している。本装置はコストダウンのために比較的小出力としたが、高々度ではエアロゾルの絶対量が減少するので、高レンジを確保するためには相当な出力が必要となることが予想される。今回採用したファイバンプ方式は他の方式と比較して圧倒的に搭載性が優れている反面、高出力化は困難とされている。しかしながら、ファイバンプは近年発達の著しい光通信に有効なデバイスであり、急速な改良や価格低下が期待できるために敢えて選択した。今後は地上試験装置を使って十分な実地データを蓄積し、実用化を目指すことが重要である。

参考文献

- 1) 井之口浜木；航空機搭載型風計測センサの研究開発について、第38回飛行機シンポジウム講演集（2000）
- 2) 日本工業規格 JIS C6802
- 3) 井之口浜木；風擾乱予知システム、特許出願 2001-204466（2001）