

レーザレーダにおける乱気流検出アルゴリズム

A Wake Vortex Detection Algorithm using Laser Radar

酒巻 洋
Hiroshi Sakamaki

若山 俊夫
Toshio Wakayama

柳澤 隆行
Takayuki Yanagisawa

平野 嘉仁
Yoshihito Hirano

三菱電機株式会社
Mitsubishi Electric Corporation

abstract: A wake vortex, which consists of two spiral air currents generated with the flight of an airplane, may threaten the safety of following aircraft. If such turbulence is detectable, separation between aircrafts can be reduced, so that the traffic capacity of airport can be safely increased. Authors have been developing wake vortex detection system focused on the wind velocity measurement capability of laser radar. In this paper, we show the principle of wake vortex observation and overview of wake vortex detection algorithm.

1 まえがき

後方乱気流は、航空機の飛行に伴って両翼端を中心に発生する2つの渦状の乱気流であり、後続機の安全性を脅かすことが知られている [1, 2]。一方、近年航空機利用者の増加に伴い、各空港では航空機離陸着数を増加することが求められている。現行の航空機離陸間隔は、この後方乱気流が消失するのに十分と考えられる時間で決められている。そこで、後方乱気流を検知できれば、安全性を確保したまま、離陸間隔を短縮させることにより、空港の交通容量を増加させることができる。

レーザレーダは、降水粒子をターゲットとする気象ドップラーレーダとは異なり、エアロゾルをターゲットとするため、晴天時の風速も観測することができる。また、ビーム幅が極めて狭いため、低仰角の観測でもグラウンドクラッタの影響を受けず、かつ、空間を高分解能に観測することができる。そのため、気象観測や空港・航空機周辺の乱流計測等に有効なセンサとして期待されている。

著者らは、レーザレーダを用いた後方乱気流検出装置、および、乱気流検出アルゴリズムの開発を進めている [3]–[6]。本稿では、乱気流観測の原理および検出アルゴリズムについて説明する。

2 光波レーダを用いた後方乱気流観測の原理

Fig.1 に、レーザレーダによる乱気流観測方法の概念図を示す。後方乱気流は、航空機が通過した後、航空機が得る揚力の反作用として生じる下降流によって、両翼端を中心として形成される互いに逆向きの2つの渦である。すなわち、後方乱気流の特徴は、飛行経路と垂直な断面（以下、観測断面と呼ぶ）内に現れることになる。そこで、Fig.1 のように、レーザレーダによって航空機通過後の観測断面内を横方向からビーム走査し、そのドップラー速度分布を収集する。

レーザレーダによって直接的に観測されるのは、視線方向のドップラー速度である。Fig.2 に、乱気流観測時の視線方向ドップラー速度の概念図を示す。同図において、ビームは航空機通過位置よりも上方、すなわち渦の上方

を観測しており、レーザレーダから遠ざかる方向のドップラー速度を正、逆を負とし、背景風成分は0としている。この場合は、2つの渦の構造により、手前側（レーザレーダに近い側）では正のドップラー速度成分が、奥側（レーザレーダから遠い側）では負のドップラー速度成分が観測される。同様に、航空機通過位置よりも下方、すなわち渦の下方を観測した場合は、手前側に負のドップラー速度成分、奥に正のドップラー速度成分が現れる。

このように、鉛直断面のドップラー速度分布を観測すると、航空機通過位置を中心として、正と負のドップラー速度成分が対照的に観測されることになり、この対称性によって後方乱気流を特徴付けることができる。

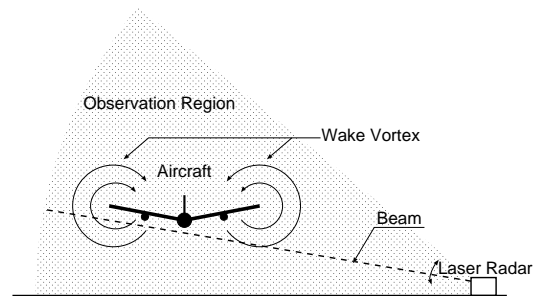


Fig.1 Schematic diagram of the observation method.

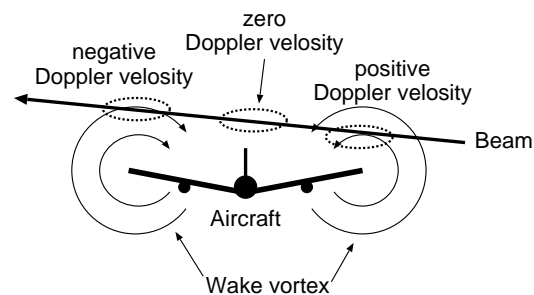


Fig.2 Schematic diagram of observed Doppler velocity.

3 乱気流検出アルゴリズム

後方乱気流のドップラー速度分布が対称性を有することから、本節ではテンプレートマッチングを用いた検出の自動化を考える。

Fig.3 に、後方乱気流テンプレートの例を示す。テンプレートマッチング処理により、正のドップラー速度成分とテンプレートの正の係数が、負のドップラー速度成分と負の係数とが掛け合わさったとき、すなわち、2つの渦の中心位置においてマッチング値はピークとなり、乱気流中心位置を検出することができる。また、乱気流中心以外の場所では、ドップラー速度値とテンプレート係数との積算値が相殺され、マッチング値は積み上がらない。ただし、実際の後方乱気流は時間とともに降下し、更に渦間隔が広がる性質があることが報告されている [2, 5]。そこで、Fig.3 のテンプレートでは、パラメータ k により渦間隔の時間変化に対応させている。

Fig.4 に、信号受信から乱気流位置検出までの信号処理の流れを示す。信号処理器に入力された受信信号を FFT(Fast Fourier Transform) 処理することにより、フーリエ成分を得る。各周波数毎にフーリエ成分の絶対値の 2 乗を算出して得られるパワースペクトルは、大気ランダム性により、そのままでは大きな揺らぎをもつことから、通常はパワースペクトルをインコヒーレント積分することにより、揺らぎを抑え、大気エコーのスペクトルピークを検出しやすくする。インコヒーレント積分後に、パワースペクトルからピーク値を検出し、その周囲の周波数範囲のデータを用いて、モーメント法によりエコー強度、ドップラー速度、速度幅を算出する。スクリーニング処理は、ドップラー速度誤検出による不要応答を除去するものである。最後に、(距離)-(仰角)の極座標で得られるこのドップラー速度データを(距離)-(高度)の直交座標に変換した後に、各空間点毎にテンプレートマッチング処理を行い、中心位置を推定する。

Fig.5 に、B747 型機と同じ諸元(重量・翼端幅等)で渦モデルを作成し、ドップラー速度分布を算出したものに本アルゴリズムを適用した結果を示す。距離 3000m、高度 80m の位置に 1 つの卓越したピークが現れており、良好な結果が得られている。

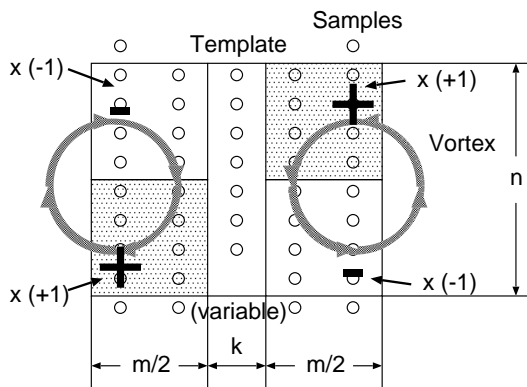


Fig.3 Template specialized for wake vortex.

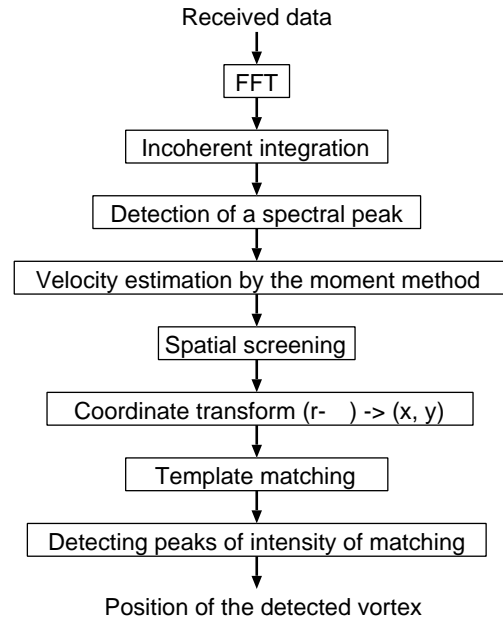


Fig.4 Flow diagram of the signal processing.

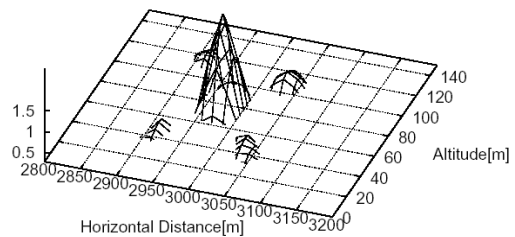


Fig.5 Simulation results of wake vortex detection.

4 むすび

本稿では、レーザレーダを用いた後方乱気流検出アルゴリズムの概要について説明した。現在は、実際に開発したレーザレーダを用いて後方乱気流を観測してデータを蓄積し [6]、実データによる評価およびアルゴリズムの洗練化を図っている。

参考文献

- [1] M. R. Brashears, J. N. Hallock and N. A. Logan, "Analysis of Predicted Aircraft Wake Vortex Transport and Comparison with Experiment," AIAA Paper, No. 74-506, pp. 1-14, 1974.
- [2] A. Corjon and T. Poinso, "A model to define aircraft separations due to wake encounter," AIAA Applied Aerodynamics Conference, vol. 13, no. 1, pp. 117-124, 1995.
- [3] 大森, 桐本, "テンプレートマッチングを用いた航空機の後方乱気流の検出," 信学技報 SANE99-9, pp. 1-8, 1999.
- [4] 浅香, 柳澤, 平野, 若山, 藤坂, 大鋸, 森脇, "風速計測用光波レーダの開発," 信学技報 SANE2000-39, pp. 15-20, 2000.
- [5] 若山, 酒巻, 藤坂, 大鋸, "乱気流の時間変化を考慮したテンプレートマッチングによる後方乱気流検出," 信学技報 SANE2001-35, pp. 19-26, 2001.
- [6] 酒巻, 若山, 岡村, 柳澤, 浅香, 平野, 大鋸, 加来, "光波レーダを用いた航空機後方乱気流の観測," 信学技報 SANE2002-84, pp. 47-51, 2003.