

11. 出発航空機から発する後方乱気流の観測

航空システム部 ※小松原 健史 加来 信之

1. はじめに

飛行中の航空機の主翼両端からは、後方乱気流と呼ばれる渦状の気流が連続的に発生する。この乱気流に突入すると、大型航空機であっても墜落や機体の破損等の事故の可能性があり非常に危険である。このため、後続する航空機への後方乱気流による危険性を回避するにあたり、空港の運用においては後方乱気流管制方式を定め、それにより、十分に安全な航空機の運航間隔を確保している。一方、空港の処理容量はこれにより大きく制限されることになり、効率的な空港運用の妨げとなっている。表1に示すとおり、特にヘビー機に区分されるB747、B777等の大型機に続く航空機はその制約を強く受ける。

一般に空港の処理能力向上を図るためには、滑走路の増設等が必要であり、そのためには、用地の確保、巨額の建設費用、また長期の建設期間を要する。一方、後方乱気流の挙動を把握することで、管制間隔の短縮を図ることができれば、はるかに安価に空港の処理能力向上に寄与できることが期待できる。

電子航法研究所では後方乱気流検出装置を製作し、後方乱気流の発生、減衰等の挙動を観測・評価を行うことで、航空機の運航の安全を確保しつつ、航空機の出発間隔の短縮を図り、空港の処理容量を向上できる方策を検討してきている。この度、出発航空機の後方乱気流の観測ができたのでこれを報告する。

表1 出発航空機の管制間隔
(レーダーを用いない場合)

先行機	後続機	最低間隔
ヘビー	ALL	2分
ヘビー	ミディアム・ライト (インターセクション・テイクオフ)	3分

2. 後方乱気流の概要

2.1 後方乱気流の危険性について

1. で述べたとおり、実際の運用においては十分な安全マージンを取って運航を行っているため、後方乱気流に起因した重大インシデントは殆ど発生していない。しかしながら、2001年11月ニューヨークにて、J.F.ケネディー空港を出発したエアバスA300型航空機が、先発のボーイングB747型航空機の後方乱気流に遭遇したことに起因して、墜落事故が発生し、搭乗者260名全員と地上住民5名の死者が出ている。(注:米国民国 National Transportation Safety Board (NTSB)の最終報告には、副操縦士が不要な過度の操舵を行ったことによる機体の破損にあると、結論づけられている。) また、国内においても2003年5月に、海上自衛隊岩国基地において、US-1A機がタッチアンドゴーした際の後方乱気流の影響を受け、後から進入したU-36A型航空機が転倒事故を起こし、乗員4名が死亡している。

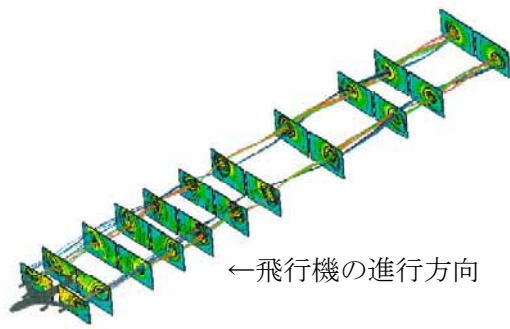
このように、後方乱気流の危険性は非常に高い。肉眼によりその存在を確認することができないため、ひとたび乱気流に遭遇すると大きな事故へとつながる可能性がある。

2.2 後方乱気流について

後方乱気流は、飛行中の航空機の主翼両端より発生する渦状の気流であり、翼端で翼の上下面の圧力差を埋めるため、翼下面より上面へ翼を回って巻き込む流れによって翼端渦が発生する。この渦は、図1の様に進行方向からみて左側の翼からは時計回り、右側の翼からは反時計回りの渦が形成される。渦は各通過地点で形成されることから図2の様に連続した形態で存在することになる。



図1 主翼から発生する翼端渦



出典:Aircraft Wake Vortices-A position paper

図2 後方乱気流のイメージ

3. 後方乱気流の検出

3.1 検出方法

後方乱気流の観測手法は、風速等の大気観測のリモートセンシングに、概ね準ずると考えられるが、その存在箇所が局地的であることや、航空管制支援等の実運用に適応するためには速報性が求められ、かつ、その存在箇所を正確に断定できなくてはならない。さらに、航空機に向けてレーザを発するため、人体に安全であることを付け加えなくてはならない。これらの要件を満たすには、高い角度分解能を持つこと、高速な処理能力、人体に安全なレーザ光である必要がある。そこで、本研究では、上記の要求を満たす表2のスペックを持つレーザレーダ(LIDAR)を製作し観測に用いた。なお、 $1.5\mu\text{m}$ 帯赤外レーザは目に安全な波長帯域内にあるため人体に安全であり、かつ大気透過率が高い特徴がある。図3は当研究所岩沼分室屋上に設置した後方乱気流検出装置の外観であり、図4はレーザ光の送受信部である。

LIDAR は、一般に風速、大気中の温度、大気中の微粒子の成分の観測などに利用されている。空港における後方乱気流の観測には欧米にて着陸機を中心とした実験例があるが、国内で本格的に実施した例は他になく、特に今回の実験計画においては、後方乱気流の観測に必要な分解能を持った LIDAR を利用することで、より高精度な測定が可能となることを期待した。

表2 後方乱気流検出装置のスペック

波長	$1.54\mu\text{m}$
パルスエネルギー	0.25mJ/pulse
繰り返し周波数	4000Hz
パルス幅	$0.2\mu\text{s}$
ビーム径	100mm
スキャナ走査速度	最大 $20^\circ/\text{sec.}$
角度分解能	0.01°
距離分解能	30m
測定レンジ	80レンジ(2.4km)



図3 後方乱気流検出装置外観

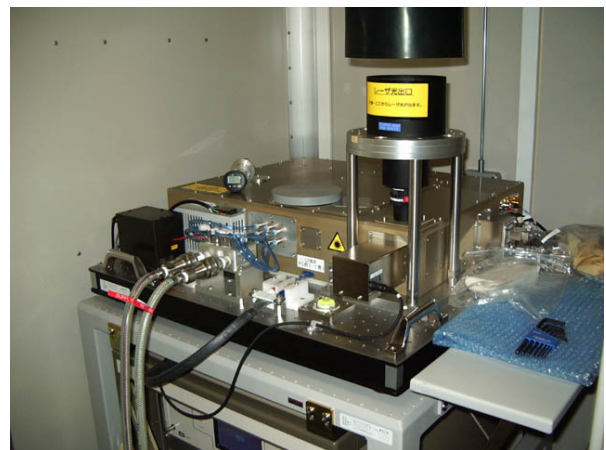


図4 光送受信部

3.2 後方乱気流検出原理

図5は後方乱気流検出原理の概念図を示したものである。動作原理は次のとおりである。光アンプで増幅されたレーザ光(周波数 f_0)はレンズ等の光学系を通過して大気中に放射される。

放射されたレーザー光は大気中のエアロゾルと呼ばれる微粒子に散乱され、散乱光の一部は元の光送受信部に反射してくる。散乱光 f_r はエアロゾルの移動速度のドップラー効果の影響を受け、周波数がシフトする。受光した散乱光は光送受信部の光ミキサで、ドップラー周波数成分 f_d が取り出され、その後、信号処理によりエアロゾルの移動速度 V が求まる。ここで、エアロゾルの移動速度は気流の速度と同じ速度であることから、その空間における気流の速度が求まる。なお、ドップラー速度を求めているため、後方乱気流検出装置から見て、追い風及び向かい風の成分のみが検出可能であり、横風の成分は検出されない。

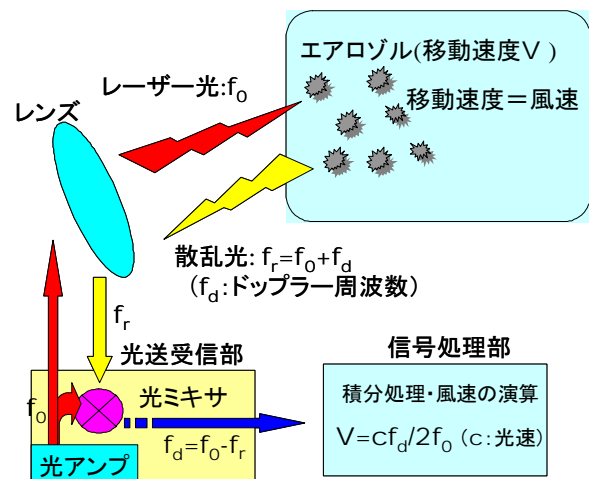


図5 後方乱気流検出装置の概念図

なお、ターゲットまでの距離は反射してくる散乱光の到達時間から求められ、これにより、同時に距離と風速が測定可能である。

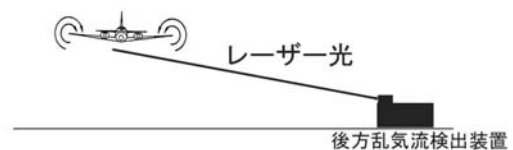
4. 検出実験

4.1 実験環境

後方乱気流の検出は、図6に示す仙台空港に隣接する当研究所岩沼分室屋上に設置した後方乱気流検出装置にて、仙台空港を離陸する航空機を対象に行った。スキャナによりレーザー光を上下に走査させ、走査速度は $1.5^\circ/s$ 、走査範囲は $-1 \sim +10^\circ$ で鉛直断面での乱気流の検出を行った。離陸する航空機までの水平距離は $660m \sim 760m$ 、鉛直方向は航空機通過地点において $0 \sim 100m$ 程度である。なお、観測対象はボーイング B747 とした。



(a)



(b)

図6 実験環境

4.2 実験結果

図7は後方乱気流の観測結果のイメージである。暖色系が図上右から左への気流、寒色系が左から右方向への気流を表す。後方乱気流は航空機の両翼よりそれぞれ逆向きの渦が形成されることから上下に暖色寒色のペアが2組存在することになる。先に述べたとおりドップラー成分の得られる装置から見て追い風及び向かい風成分が観測され、渦の上向き及び下向きの気流は観測されない。よって、追い風成分及び向かい風成分から、図上に示した矢印の向きに渦が形成されていると推測できる。

図8に観測結果を示す。図の中心付近に図7のイメージの様な、上下に暖色寒色のペアが2組存在しており、通過した航空機から後方乱気流が発生していることが確認できる。

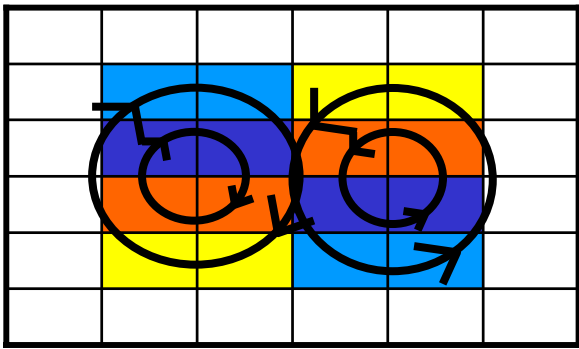


図7 渦のイメージ

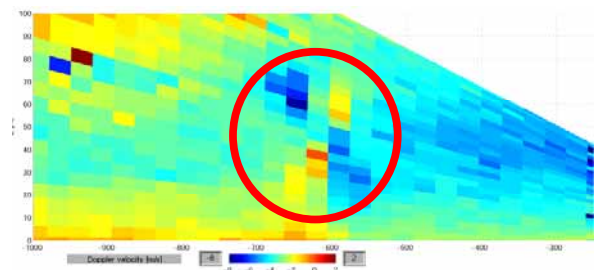
観測結果から、発生した後方乱気流は緩やかに下降しながら徐々に拡散していることがわかる。また、図8(d)より、2つの上下暖寒色のペアは、時間の経過とともにそれぞれ離れていっていることから、これらは1つの渦ではなく、左右の翼から発生したそれぞれ別の渦であることがわかる。

5. まとめ

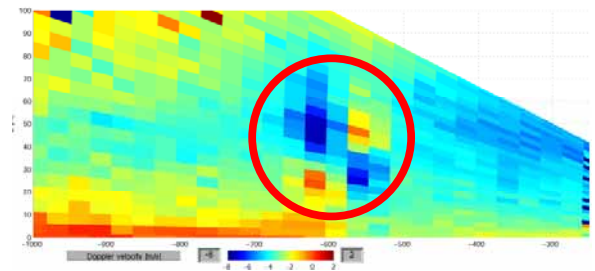
出発航空機から発生した後方乱気流を連続的に捉えることができた。しかしながら、今回の取得データは一例に過ぎず、後方乱気流管制方式による出発間隔の妥当性を検討するためには、風速、気温、湿度等の影響によるファクターを解明していかななくてはならない。そのため、長期的にデータを取得していくことが重要であると考えられる。よって、今後引き続きデータを取得していくとともに、より有効な検出手法、たとえば今回は提示しなかったが気流の速度幅が乱気流の特定に有効であることから、速度と速度幅を融合させた表現方法の検討を進めていくこととしたい。

参考文献

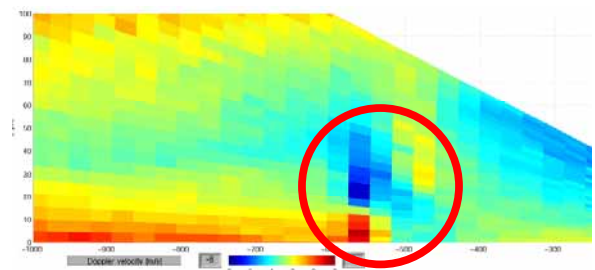
- [1]Thomas Gerz et al., Aircraft Wake Vortices -A position paper-, 2001
- [2]Hubert Combe et al., On-Board Wake Vortex Detection, Wake-Net workshop, 2000
- [3]酒巻他 光波レーダを用いた航空機後方乱気流の観測 電子情報通信学会総合大会, 2003
- [4](社)日本航空技術協会 新航空工学講座1 航空力学, 1999



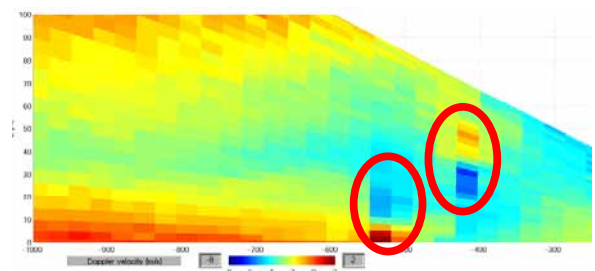
(a)航空機通過直後



(b)航空機通過10秒後



(c)航空機通過30秒後



(d)航空機通過60秒後

図8 後方乱気流観測結果(B747)