

## 空港気象ドップラーライダーによる非降水低層 ウィンドシアアの観測

山本 健太郎\*

### 1. はじめに

気象庁は、空港気象ドップラーライダー (LIDAR) を2007年4月に東京国際空港 (羽田空港) に、また2008年4月に成田国際空港 (成田空港) にそれぞれ設置し運用を開始した (第1図)。

LIDARは、空港気象ドップラーレーダー (DRAW) と同様の観測原理で風の観測を行っている。DRAWは電波を用いてその反射・散乱を元に観測を行うのに対し、LIDARは光を使って観測を行う点が特徴である。光を使ったレーダーであることから光波レーダー、あるいは光がレーザーであることからレーザーレーダーとも呼ばれる。

気象庁のLIDARでは、 $2\mu\text{m}$ の赤外光を使用してエアロゾルの動きを観測することにより、半径約10kmの範囲で風の観測を可能としている。これにより非降水時における空港周辺における風の観測を行い、航空機の離着陸に大きな影響を与える低い高度での風向変動である低層ウィンドシアア (LLWS) 等を検出できることが最大の利点である。

しかしながら、LIDARは非降水時のLLWSの検出に非常に有効である一方で、使用するレーザー光 (赤外光) が水粒子中で急速に減衰するため、降水がある場合には観測の範囲が狭くなる特性も持っている。

従来、航空機の離着陸に影響を与えるLLWS等の情報を航空局に提供していたものはDRAWによる検出情報だけであった。しかしながら、DRAWで検出

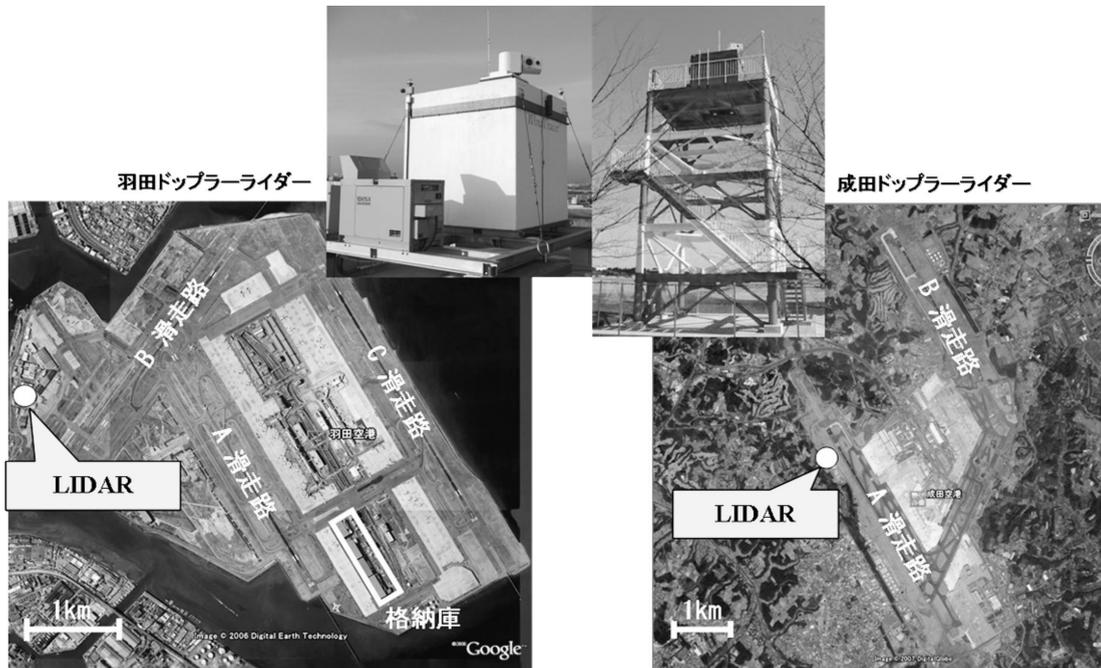
ができるのは降水現象がある場合だけに限られている。実際の航空機からの操縦士報告 (PIREP) において、降水時にLLWSの報告がある割合は全体の3割程度であり、非降水時の割合は7割に達している (東京航空地方気象台 2005)。

現在ではDRAWとLIDARのそれぞれの特性から、降水時にはDRAW、非降水時にはLIDARを主とした観測成果を利用することにより、全天候に対応したLLWSの観測が可能となった。

今回、羽田空港および成田空港に整備したLIDARは、Lockheed Martin Coherent Technologies社製の「Wind Tracer」と呼ばれるLIDARである。同社製のLIDARは、ラスベガスのマッカラン国際空港、ドイツのフランクフルト国際空港、香港の香港国際空港などにも設置され運用が行われている。特に、香港国際空港では2台のLIDARが設置され、観測範囲をそれぞれ空港の北側と南側に分割して観測を行い、これらを用いて世界初のLIDARを利用したLLWS検出システム (LIWAS) が開発され、2005年末より運用されている。このシステムによる過去3年間の運用期間中におけるLLWSの検出率は、PIREPに報告のあったLLWSの出現回数と比較すると全体の76%であり、航空機の安全に大きく寄与しているという報告がなされている (Shun and Chan 2008)。

気象庁においても2008年7月3日05 JSTから、羽田空港および成田空港でDRAWとLIDARの観測成果を一元化することにより航空機の離着陸に影響を与えるLLWSの検出情報を降水現象の有無に関わらず航空局へ常時提供しており、これを元に航空局により作成されるLLWS情報文を通じて航空機へ情報の提供が行われている。また航空気象情報提供装置

\* Kentaro YAMAMOTO, 気象庁観測部観測課航空気象観測室 (現在 観測システム運用室)。



第1図 空港気象ドップラーライダー概観および設置場所 (Google マップ より) (左:羽田空港, 右:成田空港).

(MetAir) を通じて両空港 LIDAR の観測画像を民間航空会社に対し提供している。

本稿では、LIDAR の基本的な原理や特性、羽田及び成田における LIDAR を用いた観測事例を紹介する。

## 2. 基本性能と原理

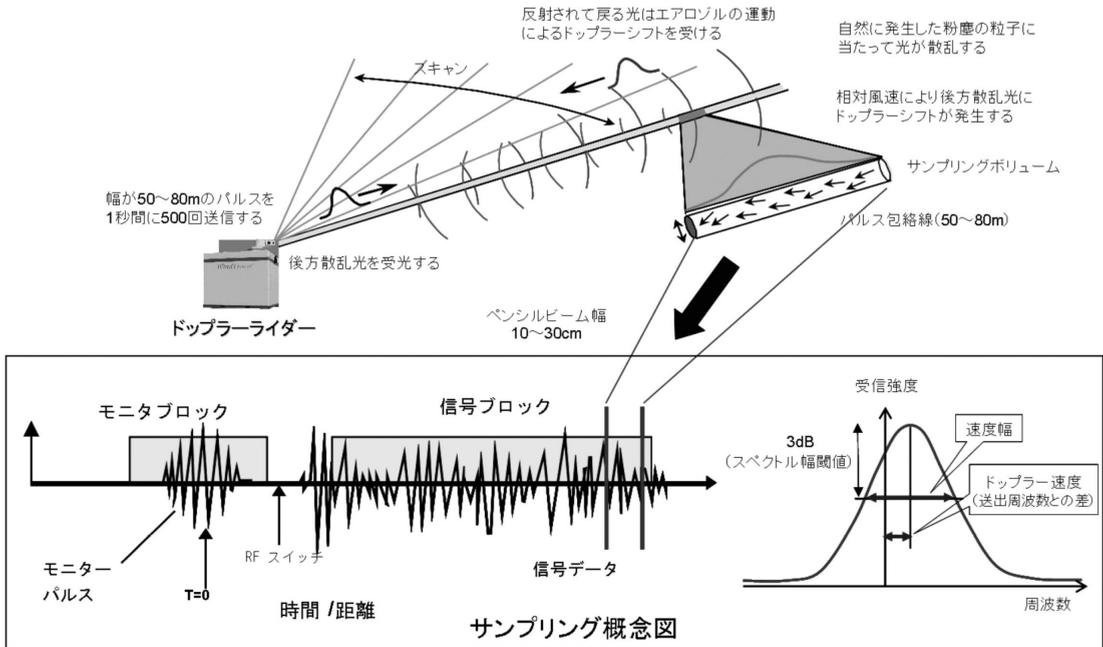
第1表に、LIDAR の基本性能について記載する。

LIDAR の基本的な動作原理は、レーザー光 (赤外光) のパルスが発生させて大気中に放射し、その一部がエアロゾルに反射して戻るまでの時間差から反射したエアロゾルまでの距離の測定を行うというものである。更に元のパルスの周波数と反射光の周波数の偏移 (ドップラーシフト) を測定することができる。このドップラーシフトは、そのエアロゾルが持つ速度のうち、動径方向に近づく、もしくは遠ざかる方向の成分により発生する。この周波数偏移を解析することにより、エアロゾル粒子の持つ速度の動径方向成分を測定することが可能となる。

実際には得られる信号データを特定のサンプル数毎に一つのレンジゲートとして区切り、各ゲート毎にスペクトル解析を行う。ここでスペクトルのピーク値が

第1表 LIDAR の基本性能と送受信機の性能。

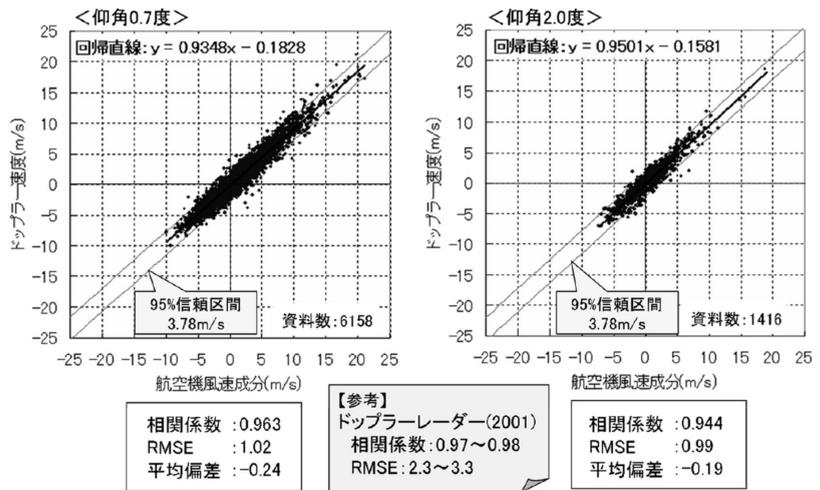
基本性能	
最大観測距離	約10 km
最小観測距離	約400 m
距離分解能	約50~100 m
測風精度	0.5~1 m/s (距離に依存)
観測間隔	約2分 (スキャンシーケンスによる)
観測データ	ドップラー速度 速度幅, SNR 後方散乱
送受信機性能	
レーザー波長	2.0 μm (赤外光)
レーザーパルスエネルギー	2 mJ (標準値)
ビーム開口径	10 cm
ビームサイズ	7.125 cm (1/e <sup>-2</sup> ) 5.1 cm (1/e)
ビーム集束範囲	コリメート
パルス幅	425 nsec
パルス繰り返し周波数	500 Hz
平均出力	1 W
パルスピーク出力	4.8 kW (400 nsec)



第2図 ドップラー速度と速度幅の算出概念図。

得られる所を、各ゲートにおける風速（ドップラー速度）とし、また各ゲートのスペクトルの広がり方から風の乱れ具合を示すスペクトル幅（速度幅）を求めている（第2図）。更に、これらのデータを元にDRAWと同様にシアアラインの検出を行っている（石原 1997）。これらのデータのほか、LIDARではエアロゾルによる後方散乱の大きさを示す後方散乱値（WindTracer独自の無次元値）やS/N比を求めている。

2007年3月～12月に羽田空港のLIDARで得られた風速（ドップラー速度）を航空機自動観測データ



第3図 羽田LIDARのドップラー速度とACARS風速データとの比較（2007年3月～12月）（左：仰角0.7度，右：仰角2.0度）。ACARSデータはLIDARデータと高度が一致しないため、LIDARデータの上下に存在するACARSデータを線形内挿した値を使用した。また、LIDARの風速データはドップラー速度のため、ACARSデータはLIDARの動径成分に変換した。参考値は同手法で行った赤枝（2001）によるDRAWの結果を示す。

（ACARS：全日本空輸・日本航空）と比較したところ、第3図に示すように非常に観測精度が高いことが

わかった。根平均二乗誤差（RMSE）がDRAWでは2.3～3.3 m/s（赤枝 2001）に対してLIDARでは

0.99~1.02 m/s と誤差が半分以下となっている。また、95%信頼区間の上限と下限の幅は平均3.78 m/s であるが、ACARS の風速測定値の95%が4.12 m/s 以下の誤差を有しているとされるため(立平・鈴木1994)、LIDAR と ACARS の差は ACARS データの精度によるところが大きいと考えられる。

### 3. LIDAR による観測方法と観測特性

観測のパターンは、第2表のとおり羽田空港と成田空港では異なったものとしている。

第2表 LIDAR の観測パターン。

	羽田空港	成田空港
1	仰角2.0° (PPI)	仰角1.0° (PPI)
2	仰角0.7° (PPI)	磁方位336° (RHI)
3	仰角0.3° 格納庫下流 (PPI)	仰角45.0° (PPI)
4	仰角0.0° 格納庫下流 (PPI)	仰角3.0° (PPI)
5	南西部 着陸経路 観測	仰角2.0° (PPI)
スキャン時間	合計 1分57秒	合計 2分28秒

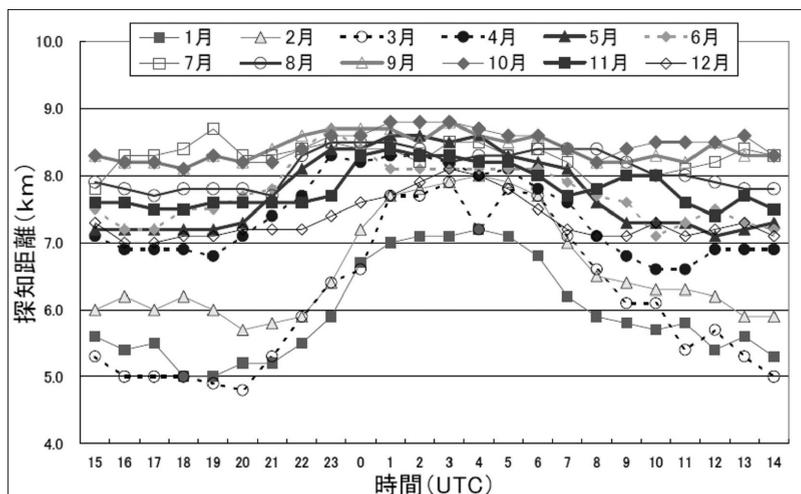
※ PPI：円錐面観測，RHI：鉛直断面観測

羽田空港の LIDAR は空港敷地外の北西部に設置されており、そこから羽田空港で南北に延びる西側滑走路の南端付近において、北東風時に格納庫によって発生する羽田特有の乱流を詳細に観測するパターンが含まれていることが特徴である。

また、成田空港の LIDAR は南北に延びる二つの滑走路のうちの西側滑走路の真横に設置されているため、同滑走路の北側の航空機の着陸経路に沿った断面図を観測していることが特徴である。

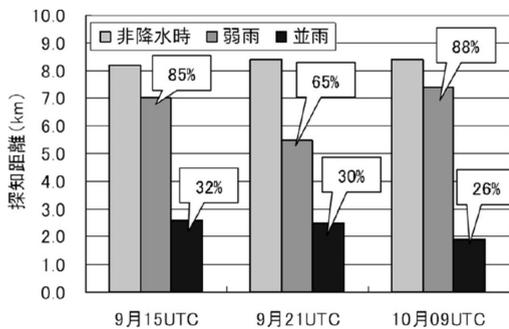
この様なパターンで LIDAR は非降水時の風の観測を行っているが、非降水時であっても大気の状態により観測範囲が大きく変化し常に最大観測距離10 km を観測できるわけではない。

第4図に、非降水時における羽田空港の LIDAR の探知距離の変化について示す。ここで探知距離とは LIDAR が60%の確率で観測が可能な地点までの距離の全方位平均である。これは実際の観測画像を人が見た時に、感覚的に捉える観測距離に近い値を示す。この LIDAR の探知距離は1年を通じて日中に長くなり、夜間や早朝には短くなる傾向が見られる。また月によっては非常に探知距離が短い時期もあることがわかる。この探知距離の変動は大気中のエアロゾルの分布に依存していると考えられ、実際に LIDAR で得られているエアロゾルからの後方散乱値と探知距離は高い正相関を示している。第4図で示した探知距離と観測された後方散乱値(LIDAR から半径6 km 平均)との間の相関係数は、0.96となった。また、この後方散乱値を用いて山本(2008)では視程の計測を行っており、滑走路視距離計(RVR)で計測した視程との相関が0.8~0.9と高くなっている。これらの比較より、LIDAR は大気中のエアロゾル等の分布状況を捉えており、その分布が LIDAR の探知距離に影響している事が伺える。しかしながら、探知距離の変動に直接影響するエアロゾルの種類などは現在のところ分かっていない。

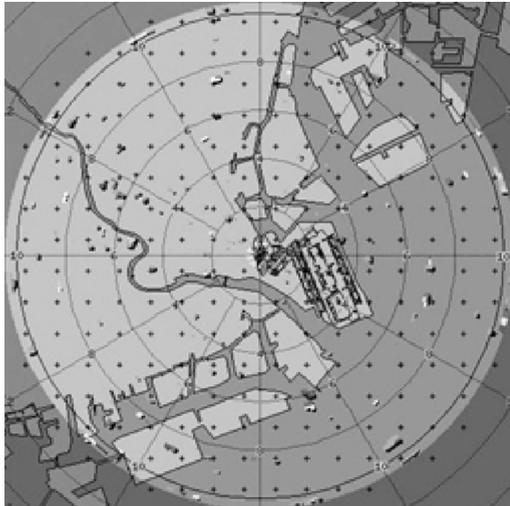


第4図 月毎の探知距離の日変化(羽田 LIDAR, 2007年1月~12月)。

このほか、第5図に示すように降水時には水粒子に



第5図 降水強度別の探知距離の変化(弱雨: 3 mm/h以下, 並雨 3 mm/h~15 mm/h). 図中のパーセンテージは同時刻の非降水時の探知距離との比率を示す. 2007年9月, 10月の羽田LIDARのデータによる.



第6図 羽田LIDARによる霧の観測事例(2007年6月11日2054(UTC)). 霧のため, ほぼ何も観測されていない.

よる赤外光の減衰に伴い探知距離が短くなっており, 降水強度が強くなるにつれて探知距離が短くなる特性を持っている. また同じ大気水象でも, 第6図に示すように霧の場合などには降水時よりも赤外光の減衰が激しく, 全く観測ができない状態となる. これは霧雨の場合にも類似の傾向が見られた.

#### 4. 空港気象ドップラーライダーの観測例

第7図はそれぞれ羽田空港と成田空港において

PIREPよりLLWSの報告がなされた時の観測データである.

##### a) 成田空港におけるシアライン発生事例

第7図aは2008年4月12日にシアラインが北から南に通過した際のドップラー速度の観測データである. 空港の北にはっきりとしたシアラインが捉えられ, その断面構造も捉えることができています. 同時間には, 10 kt (=5.1 ms<sup>-1</sup>)の風速変動をもつウィンドシアアが, 高度1000~300 FT (=300~90 m)で西側滑走路北端への最終進入域に存在しているとのPIREPの報告がなされており, LIDARにより観測されたLLWSと一致していた. また, このシアラインは成田空港の北から南へと通過をしていったが, LIDARではその様子を常に捉え続けることができた. このシアラインの移動速度から, シアラインが空港を通過する際に, 風向変動が発生する時刻を予測することもできた.

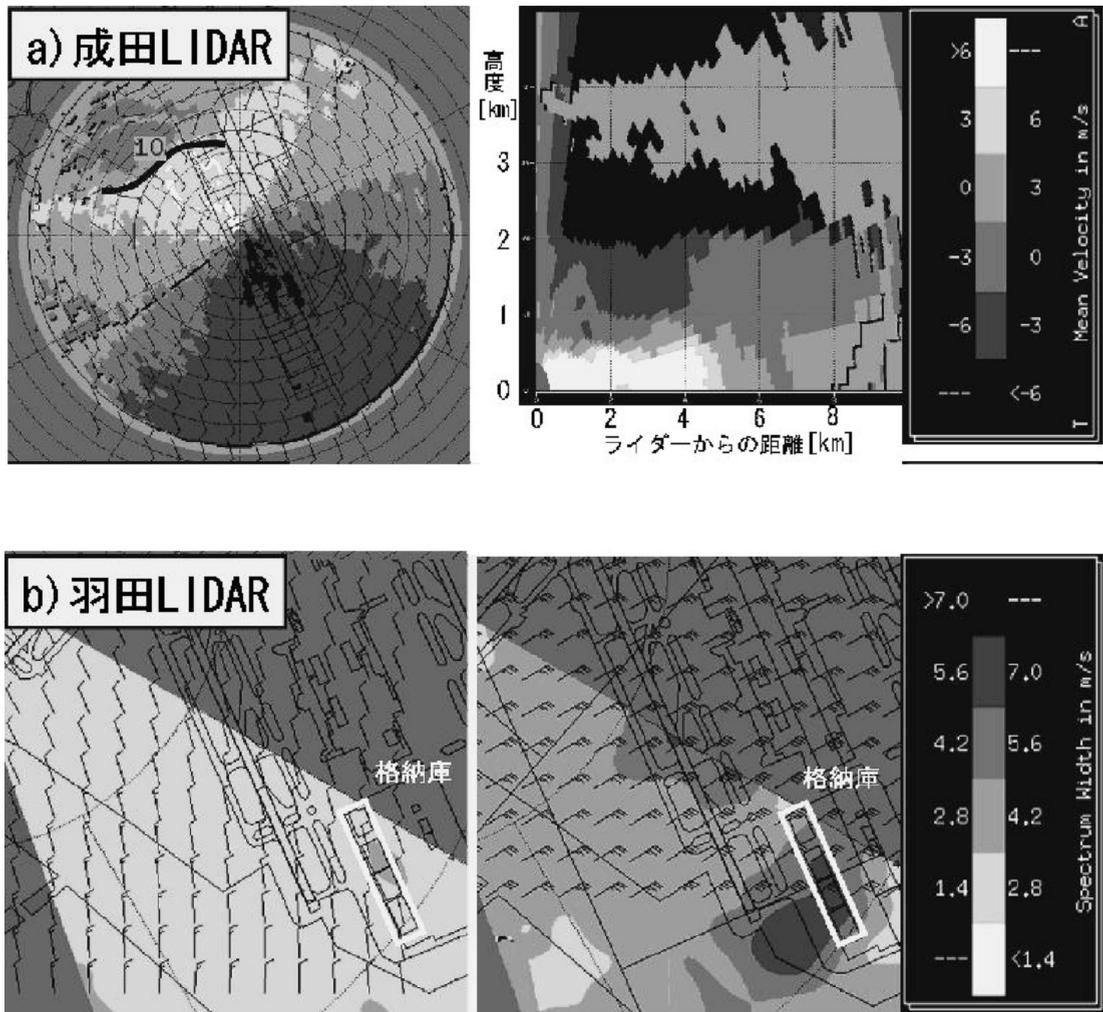
##### b) 羽田空港の格納庫等の影響による乱流

2007年9月5日から6日において台風第9号が接近し, その際に羽田空港ではゴーアラウンド(到着機の進入継続が安全でない判断される場合の着陸のやり直し)が行われたり, LLWSのPIREPが多く報告されたりした. 第7図bの右図は, その時の羽田空港の西側滑走路南端付近を観測した速度幅データの拡大図である. この時, 格納庫の下流において建物の影響と思われる速度幅の値の大きい領域が発生していた. この速度幅の値の大きさは風速に比例しており, 風速の増加と共に速度幅の値も増加する傾向がみられていた.

これらの事例のようにPIREPに報告のあるLLWSのLIDARによる検出事例もある一方で, PIREPでLLWSの報告があってもLIDARでは何もLLWSを検出していない事例もあった. 現時点でのPIREPで報告のあった全LLWSに対するLIDARによる検出の割合は約50%となっており, 同装置で観測を行っている香港国際空港のLIWASの検出率76%と比較すると検出率の向上のための今後の調査・研究が必要となっている.

#### 5. まとめ

LIDARを羽田空港および成田空港に設置し, LLWSの観測を開始した. 現在, その観測結果を元に検出されたLLWS情報はDRAWによる検出結果



第7図 LIDARの観測範囲と観測例 (a) 成田空港, b) 羽田空港). a) 2008年4月12日0509 (UTC) に成田空港で観測されたPPIドップラー速度(左)と方位336°方向RHIドップラー速度(右)の例. 淡色系(+値)がライダーから遠ざかる成分を示し, 濃色系(-値)がライダーに近づく成分を示す. 左図中, 黒いラインがシアアラインを, 数値がライン前後での風速差を示す. b) 羽田空港で観測された通常時のPPI速度幅(左)と, 2007年9月6日09 (UTC)の台風接近時の格納庫下流観測の速度幅の例. 白線枠は格納庫を示し, 濃色は乱流が強いことを示す.

と一元化して航空局へ提供されており, 民間航空会社へも航空情報提供装置 (MetAir) を通じて観測画像の提供が行われている.

提供を行っている LIDAR で観測された風速データは DRAW と比較して非常に精度が高いことがわかった. その観測範囲は, 降水現象によるレーザー光の減衰に伴う探知距離の変化以外にも, 日変化や季節変化及び周辺の環境によるエアロゾル濃度の変化に対応して複雑に変動しており, これに伴い LLWS の検出で

きる領域が変動していることが確認できた. また, LIDAR により観測されたデータはシアアラインや建物による風の影響を捉えており, 従来の風向風速計のみによる風の観測では不可能だったシアアライン位置や乱流の発生場所の捕捉が可能となった.

この LIDAR を DRAW と組み合わせることにより, 降水時・非降水時に関係なく全天候において LLWS の監視ができるようになったことは航空機の安全な運航に対して非常に大きな意義をもつ. しか

し、一方ではまだそのデータの有効的な利用方法については改善の余地も大きく、今後も調査を行っていく必要がある。

#### 略語一覧

ACARS : Aircraft Communications Addressing and Reporting System

DRAW : Doppler Radar for Airport Weather

LIDAR : Light Detection And Ranging

LIWAS : Lidar Wind shear Alerting System

LLWS : Low Level Wind Shear

PIREP : Pilot Report

PPI : Plan Position Indicator

RHI : Range Height Indicator

RVR : Runway Visual Range

#### 参考文献

赤枝健治, 2001: 空港気象ドップラーレーダーによる測風精度と低層ウィンドシアア検出性能. レーダー観測技術資料, (49), 11-12.

石原正仁, 1997: 運用を開始した空港気象ドップラーレーダー (解説編). レーダー観測技術資料, (46), 1-26.

Shun, C. M. and P. W. Chan, 2008: Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear. J. Atmos. Ocean. Technol., **25**, 637-655.

立平良三, 鈴木 修, 1994: 単ドップラーレーダーによる上層風推定の精度. 天気, **41**, 761-764.

東京航空地方気象台, 2005: 無降水時低層ウィンドシアア出現特性の基礎調査 (検討課題4). 平成17年度レーダー技術検討会/空港気象レーダー検討会資料 (東京航空地方気象台), 11.

山本健太郎, 2008: 空港気象ドップラーライダーの後方散乱から求めた MOR. 平成19年度東京管区調査研究会誌, 40.