

## 学位論文題名

## Studies on Low Altitude Wind Shear Affecting Aircraft

(航空機に影響を与える低高度ウインドシアに関する研究)

## 学位論文内容の要旨

LAWS (Low Altitude Wind Shear) は、離着陸時の航空機に重大な影響を与える現象であることが知られている。マイクロバースト等、発達した積乱雲に伴って生じる LAWS に関する研究は数多くあるが、山岳などの空港周辺地形と局地的な強風の組み合わせにより形成されると言われる LAWS については、その危険度が過小評価されており、関係する研究も極端に少ない。この研究では、南北方向に開けた北上盆地内に位置する花巻空港を対象とし、当該空港を離着陸する定期航空便パイロットから提出された LAWS 遭遇報告の集計、地上風データの統計的な解析、飛行記録装置 (DFDR : Digital Flight Data Recorder) 記録データの解析、ドップラー・ソーダー (音波レーダー) 観測等を行い、山越え気流に伴う LAWS の特性を明らかにしたものである。

パイロットからの LAWS 遭遇報告および地上風観測データの統計的解析から、この種の LAWS では航空機の進入方向に対して横風となる西寄りの風向であること、および大きな風向変動の存在が危険であることが判明した。また、地上風の乱流特性には空港周辺の地形特性に対応した風向による明瞭な差異が現れており、西寄りの風向の場合には他の風向と比較して著しく乱れの大きな状態にあることが確認された。花巻空港の西側には標高 1000~1500m の奥羽山脈があり、空港上空における西風は山越え気流の特性を持つことが明らかとなった。

離着陸中の航空機が乱流の中で受け得る対気速度変化量の指標として、風向変動による影響も考慮する必要があると考えられ、水平風速の 2 次元的な標準偏差である Wind Shear Index (WSI) を新たに定義し、LAWS との対応について検討した。その結果、地上風統計から、 $WSI \geq 5\text{m/s}$  において約 90% の航空機が強度 Moderate 以上の LAWS に遭遇していることが判明するなど、他の一般的な乱流統計量と比較して WSI の有用性が示された。

Severe LAWS に遭遇した航空機の DFDR データ解析から、LAWS は航空機の飛行性能へ著しく大きな影響を与えていることが明らかになった。DFDR データから計算した風の鉛直プロファイルおよび時間変動特性によると、高度 1000m 以下に存在する乱れの大きな西風の中において、高度 200m 以下の薄い層内で短時間に  $70^\circ$  に達する大きな風向変動が Severe LAWS の直接原因となることが確認された。

また、ドップラー・ソーダー観測結果から、LAWS の形成過程は次の 3 タイプに識別されることが分かった。タイプ I はおろし風前線に伴う LAWS である。境界層上部の西風に含まれる乱流状態 ( $WSI = 3 \sim 5\text{m/s}$ ) がおろし風前線を形成しながら下降し、この前線が地表に達してから数時間にわたり Moderate LAWS が発生した。タイプ II は境界層下部の強い乱流内における LAWS である。強い乱流状態 ( $WSI = 4 \sim 7\text{m/s}$ ) を持つ西風が境界層中・下部に存在し、頻繁に Moderate LAWS が発生する。また、低気圧性のメソスケールの渦が通過したと考えられる断続的な強風核が現れ、この通過前後の 30~60 分以内に Severe LAWS が発生した。タイプ III は持ち上げ気流に伴う LAWS である。境界層中・下

部に存在した暖かい西風が、日没後に形成される斜面冷気流によって強制的に境界層上部まで持ち上げられる。しかし、この持ち上げ気流が発達する時間帯には現時点では航空機の離着陸がないため、LAWS の強度は不明である。特に航空機の離着陸時に問題となる Moderate LAWS あるいは Severe LAWS が発生するタイプ I およびタイプ II の形成には、境界層上部において山越え気流となる西風の存在、強い WSI のピークが上空から下部境界層に下降するプロセス、地表付近における下降流の存在、の 3 要素が重要であることが明らかになった。

単純なモデル計算によりタイプ I およびタイプ II の LAWS を模擬形成し、航空機の対気速度および揚力に与える影響を評価した。その結果、タイプ I では水平風速変動と同じスケールの鉛直流が存在するため、水平風速変動による対気速度の変化傾向に関わらず、鉛直流の方向および大きさによって航空機の揚力変化傾向がほぼ決定される。一方、タイプ II では鉛直流の大きさは水平風速変動より 1 オーダー小さく、航空機の揚力変化傾向はほぼ水平風速の変動に対応している。ただし、同程度の水平風速変動を受けていても低高度における鉛直流の方向および大きさによって揚力増減率が 10% 以上変化し、LAWS 強度の決定に重要な役割を果たしていることが分かった。

ドップラー・ソーダー観測で確認された Severe LAWS について、典型的なマイクロバーストに伴う LAWS との比較を行った。一般に、山越え気流に伴う LAWS は極端に強い地上水平風速が現れないため、航空機運航に対する危険性がマイクロバーストに伴う LAWS に比較して過小評価されている。しかし、今回観測された LAWS の平均像は、風速変化量、風速変化率、風速変化継続時間それぞれについてマイクロバーストに伴う LAWS の平均像とほぼ同様であり、離着陸中の航空機に対して等しく重大な影響を与える強度を持っていることが確認された。

最後に、航空機の安全な離着陸に資するためには、ドップラー・ソーダーや境界層レーダーによる境界層の常時モニターを行い、リアルタイムの風データから Moderate LAWS あるいは Severe LAWS を形成する WSI ピークおよび鉛直流の変化傾向を検知することが有効であると考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 菊 地 勝 弘  
副 査 教 授 金 成 誠 一  
副 査 助 教 授 上 田 博  
副 査 講 師 遊 馬 芳 雄

学 位 論 文 題 名

## Studies on Low Altitude Wind Shear Affecting Aircraft

(航空機に影響を与える低高度ウインドシアに関する研究)

低高度ウインドシア(Low Altitude Wind Shear ; LAWS)は、離着陸時の航空機に重大な影響を与える現象として最近注目されている。本論文は、奥羽山脈と北上高地に挟まれた花巻空港を対象として、パイロットによる LAWS 報告、飛行記録装置(DFDR)のデータ解析、ドップラーソーダー観測等により、空港周辺の LAWS の特性を明らかにしたものである。

本論文は8章から構成されている。第1章は序文であり、LAWS の現状と花巻空港を選定した理由を述べている。第2章では、LAWS が航空機に与える影響を検討し、風速と風向の変動を考慮した Wind Shear Index (WSI)を新たに定義した。

第3章ではパイロットの LAWS 遭遇報告と地上風の解析結果から、滑走路に対して横風となる西風の時に強い LAWS が発生しており、特に、 $WSI \geq 5\text{m/s}$  の時には約 90%の航空機が強度 Moderate 以上の LAWS に遭遇していることが明らかになり、一般的な乱流統計量と比較して WSI の有用性が示された。第4章は総観気象解析から、Severe LAWS 発生時には奥羽山脈からのおろし風が発達する大気状況であることを明らかにした。また、Severe LAWS 発生時には、空港気象データにおろし風の特徴が現れていること、そして、 $WSI=4 \sim 7\text{m/s}$  の乱れの大きな状態であることを指摘した。第5章では、Severe LAWS に遭遇した航空機に搭載されている飛行記録装置(DFDR)のデータを解析し、地上 200m 以下の低高度で短時間に $\pm 70^\circ$ にも達する大きな風向変動のあることを指摘し、これが Severe LAWS の直接原因であることを明らかにした。

第6章では空港敷地内に設置して行ったドップラーソーダー観測から、LAWS の形成過程は、3種に大別されることを明らかにした。すなわち、タイプ I では、おろし風前線に伴う LAWS で、この前線が地表に到達してから数時間にわたり、Moderate LAWS が発生した。タイプ II は境界層下部の強い乱流内の LAWS で、このような状況下では頻繁に Moderate LAWS が、さらに、メソスケールの渦の通過前後には Severe LAWS が発生した。タイプ III は持ち上げ気流に伴う LAWS の発

生である。これらの観測から、Moderate 又は Severe LAWS が発生するタイプ I および II の形成には、境界層上部における西風の存在、強い WSI のピークが下部境界層に下降するプロセス、地表付近における下降流の存在が重要であることが明らかになった。第7章ではモデル計算により、タイプ I および II の LAWS が航空機に対して、どのような影響を与えるかを評価した。更に本研究で観測された Severe LAWS とマイクロバーストによる LAWS とを比較した結果、離着陸中の航空機に対しては、両者はほぼ同等の危険因子を有することが確認された。第8章は結論である。

このように、著者は離着陸時の航空機に影響を与える空港周辺の境界層内での LAWS を、新たに定義した WSI を使って DFDR との記録を対照させ、さらにドップラーソーダーによる観測から、LAWS の構造やその特徴を明らかにした点は、メソ気象学、航空気象学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。