

# 数値シミュレーションを用いた羽田空港の格納庫後流中を 飛行する着陸機の安全性の研究

## Numerical Investigation of Hangar Wake Effect on an Aircraft for Safe Landing

- 岩渕 秀, 東北大, 仙台市青葉区片平 2-1-1, shu.iwabuchi.p7@dc.tohoku.ac.jp
- 焼野 藍子, 東北大, 仙台市青葉区片平 2-1-1, aiko.yakeno@tohoku.ac.jp
- 吉村 僚一, 東北大, 仙台市青葉区片平 2-1-1, ryouchi.yoshimura.s2@dc.tohoku.ac.jp
- 大林 茂, 東北大, 仙台市青葉区片平 2-1-1, s.obayashi@tohoku.ac.jp
- 菊地 亮太, DoerReserch, 千葉市中央区中央 2-5-1, kikuchi-ryota@doerresearch.com

Low-level turbulence around airport has been known to cause a serious problem to aircraft operations during take-off and landing. In order to consider the safe airport operations, we conducted a numerical investigation of low-level turbulence and estimation of a landing aircraft safety at Tokyo/Haneda airport in Japan. Hangar wake is found to become severe when wind directions are N to ENE. An aircraft approaching to runway 34L encounters maximum 0.13g normal load of hangar wake at 80 m to 120 m in altitude.

### 1. 序論

近年, 世界の航空需要は著しく拡大しており, 航空機の安全かつ効率的な運用を維持するのは重要な課題である. 特に, “着陸復行” や “ハードランディング” を引き起こす空港周辺で発生する低層風擾乱は, 航空機の安全かつ効率的な運用を阻害する現象であり, 対策が必要である.

世界有数の混雑度を誇る Fig.1 に示す羽田空港は, A 滑走路南端 (RWY34L) の北東部に位置する格納庫群の影響で Hangar Wake と呼ばれる低層風擾乱が発生する. Hangar Wake は北風から東風時に A 滑走路南端付近で発達し, RWY34L にアプローチする着陸機の運航に悪影響を与える事がわかっている. また, 国土交通省は着陸時の RWY34L 使用比率を更に高める運用を計画している<sup>(1)</sup>. 今後の安全かつ効率的な運用の為に, Hangar Wake の詳細を調査する必要があると考える.

羽田空港の Hangar Wake が発生した場合, 着陸続行か着陸復行かなどの危険度判断は, 操縦桿を握る “パイロットの感覚” に委ねられている. つまり, Hangar Wake 中を飛行する際の危険度に定量的評価がなされていないのである. そこで本研究は, CFD で模擬した Hangar Wake 中を飛行する航空機の揺れを数値化し, Hangar Wake の危険度を定量的に評価する.

### 2. 手法

#### 2. 1. Hangar Wake のシミュレーション

Implicit Large Eddy Simulation (ILES) により, 羽田空港の格納庫周りの流体計算を実施した. 格子生成手法は Building Cube Method (BCM) を用いた<sup>(2)</sup>. 基礎方程式は 3 次元非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用いる. 対流項には 3 次精度河村・桑原スキーム, 粘性項には 2 次精度中心差分を, 時間積分に 4 次精度ルンゲクッタ法を用いた<sup>(3)</sup>.

計算領域は, 格納庫を中心に 25.6 km × 25.6 km × 0.8 km ( $x \times y \times z$ ). セル数は 2,265,000, 着陸経路領域の格子幅は 50 m, 最小格子幅は 1.25 m である.

境界条件は,  $\pm x, \pm y$  方向にディリクレ境界条件,  $+z$  方向にノーマン条件,  $-z$  方向にノンスリップ条件とした.

初期場として一様流  $U^\rightarrow = (u \cos \theta, u \sin \theta, 0)$  を  $-x, -y$  面から流して計算した.  $u$  を調整することで風速を,  $\theta$  を調整することで風向を設定することができる. 本計算では,  $u = 15 \text{ m/s}$  に対し, 風向を N, NNE, NE, ENE, E の 5 パターンの計算を実施し

た.

#### 2. 2. 危険度評価

ILES により, 羽田空港の格納庫周りの流体計算を実施した. 航空機の揺れを評価するにあたり RMS normal load を採用した<sup>(4)</sup>. RMS normal load は Bowles らによって提唱された近似式であり, 鉛直風の RMS 値  $\sigma_w$  を用いて以下の様に書き表される.

$$\sigma_{\Delta n} = \sigma_w(x, y) f(z) (\ln l) \frac{V}{Vn(z)} \dots (1)$$

$f(z)$  は機種に従う実機のフライトデータを近似した関数である.  $V$  は真対気速度,  $Vn(z)$  は真対気速度の高度補正関数で  $z$  の 2 次多項式である.  $l$  は乱流スケールで 100 m とした. また, 鉛直風の RMS 値は

$$\sigma_w(x, y) = \left[ \frac{1}{L_x L_y} \int_{x-0.5L_x}^{x+0.5L_x} \int_{y-0.5L_y}^{y+0.5L_y} \{w(x', y') - \bar{w}(x', y')\}^2 dx' dy' \right]^{0.5} \dots (2)$$

である.  $L_x = L_y$  は航空機が 5 秒間に進む水平距離である.

RMS normal load を重力加速度で単位化した指標を使うと乱気流のハザードレベルを評価することができる<sup>(5)</sup>. 具体的には  $\sigma_{\Delta n}$  を重力加速度で単位化した指標を使うと,  $0.1 \text{ g} \leq \sigma_{\Delta n} \leq 0.3 \text{ g}$  を乱気流レベル 1,  $0.3 \text{ g} \leq \sigma_{\Delta n} \leq 0.6 \text{ g}$  を乱気流レベル 2,  $\sigma_{\Delta n} > 0.6 \text{ g}$  を乱気流レベル 3 と評価できる. これは, 実際の事故調査報告を基に作成された指標である. 本研究では, この指標を用いて Hangar Wake の危険度を定量的に評価する. また ILES を利用した乱気流評価は, 実機のデータと ILES による結果を比較・検証した先行研究でもよい結果を得ている<sup>(6)</sup>.

着陸経路は現行制度の降下角 3 度の着陸経路を基に, 滑走路端から南方 2000 m の直線を想定した. また, 比較として, タッチダウンポイントを北方と南方に 500 m ずらした場合の計算も実施した. 従来通りの着陸経路を A, タッチダウンポイントを北方 500 m にずらした着陸経路を B, 南方に 500 m ずらした着陸経路を C とする.

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. Hangar Wake のシミュレーション

ILES による Hangar Wake のシミュレーション可視化の一部を Fig.2, Fig.3 に示す。Fig.2, Fig.3 は風向15 m/s, 風向 NNE のシミュレーション結果を、鉛直風+5 m/sを赤で、鉛直風-5 m/sを青で表したコンター図である。黄緑色は格納庫である。Fig.3 はパイロット視点から眺めた Hangar Wake の様子であり、進行方向正面に Hangar Wake が広がっている様子が分かる。

Fig.4 は、着陸経路上における鉛直風の RMS 値を風向で比較したグラフ、Fig.5 は鉛直風の RMS 値を着陸経路断面で可視化したもので、西南西から眺めた図である。また RMS 値は、200 秒間の鉛直風を計算したものである。Fig.5 の実線は降下角 3 度の着陸経路 A である。暖色ほど鉛直風 RMS 値が大きいことを示す。Fig.4, Fig.5 を見ると、格納庫の高さ（約 40 m）より高い高度に Hangar Wake が発生していることが読み取れる。また、Hangar Wake は滑走路端から南方 500 m 付近と 1700 m 付近の二か所で発達している。ただし、Hangar Wake は東風時には発達していない。

#### 3. 2. 危険度評価

Fig.6 は着陸経路 A における $\sigma_{\Delta n}$ を重力加速度で単位化した指標を風向で比較したものである。滑走路端から南方 600 m, 高度 60 m 付近と 1700 m, 高度 110 m 付近の二か所で航空機の揺れが卓越する傾向があることが分かった。また、滑走路端から南方 600 m, 高度 60 m 付近は低空かつ乱気流レベル 1 相当の揺れが発生する危険な状況ということが読み取れる。

Fig.7 は風向 NNE における着陸経路 A, B, C の $\sigma_{\Delta n}$ 比較結果である。タッチダウンポイントを 500 m ずらすだけでは Hangar Wake を回避できないことがわかる。

Fig.4, Fig.5, Fig.6 を見ると、滑走路端から 1500 m 付近の方が Hangar Wake が発達しているにもかかわらず、航空機の揺れは滑走路端から 500 m 付近でピーク値を迎えており、矛盾しているようにも思える。これは、式(1)の $Vn(z)$ が 60 m 上昇するだけで、およそ 10 倍変わるためである。

### 4. 結論

今回の計算の場合、風向 NNE, NE, ENE の場合に航空機に対して大きく影響を及ぼすことが分かった。また、Hangar Wake 中を飛行する際、航空機は乱気流レベル 1 相当の揺れに遭遇する。これは乗員乗客または機体に何らかの危害を加える重大インシデントが発生しうる状況であり、着陸は困難であると推測できる。

この結果を実際に反映すると、風速 15 m/s 相当、風向 NNE から ENE の場合、管制側が RWY34L の使用中止の指示を出すことで Hangar Wake を回避できる。事前の指示で交通整理し、空の混乱を最小限に抑えることは安全かつ安定な運航に有効であると考えられる。

Hangar Wake 発生時はタッチダウンポイントを変更することも対策になると考えたが、500 m 程度の変更では大きな差が見られなかった。なぜならば、タッチダウンポイントが 500 m 変わっても、各経路の高度差が 20 m 程度しかないためである。Hangar Wake は 100 m スケールの乱気流であるので、1000 m スケールのタッチダウンポイント変更が望ましい。タッチダウンポイント変更は、制動距離を考えると安全対策には有効ではないと考える。経路の変更はもう少し調査が必要である。

ただし本研究は、気象モデル等を取り入れていない単純化された計算である。現実に即していない現象までも再現してしまっている可能性については、留意する必要がある。

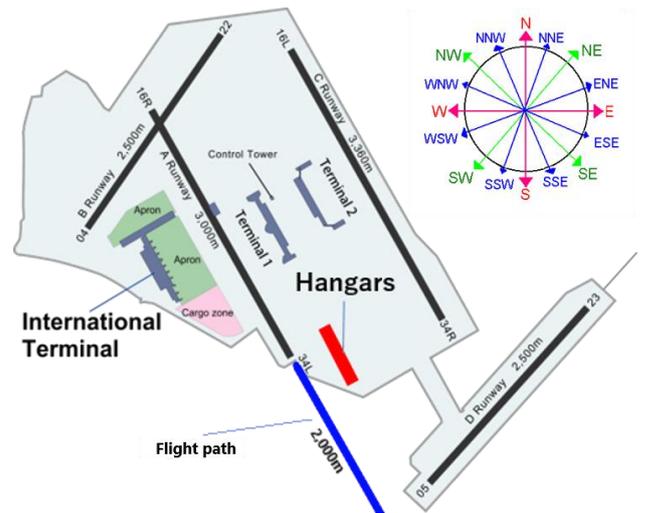


Fig. 1 Haneda airport.



Fig. 2 Vertical wind velocity contour.

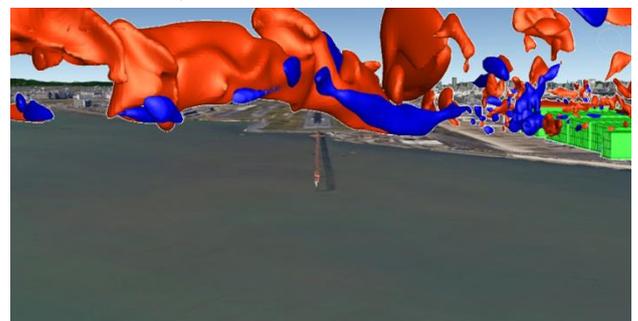


Fig. 3 Vertical wind velocity contour from cockpit view

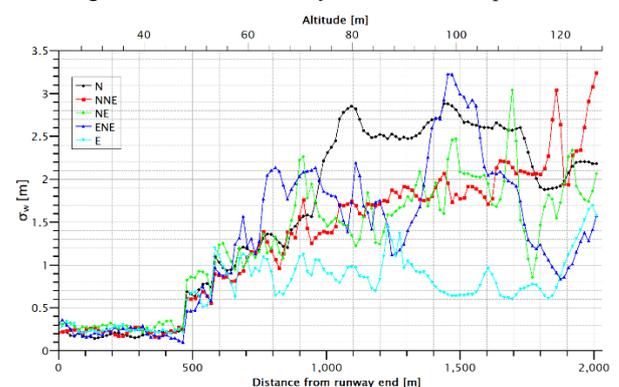


Fig. 4 RMS of vertical wind velocity at the flight path A

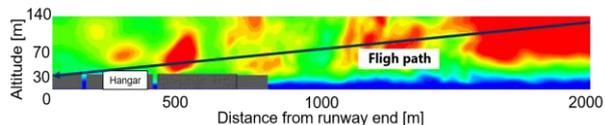


Fig. 5 RMS contour of vertical wind at the flight path cross section .

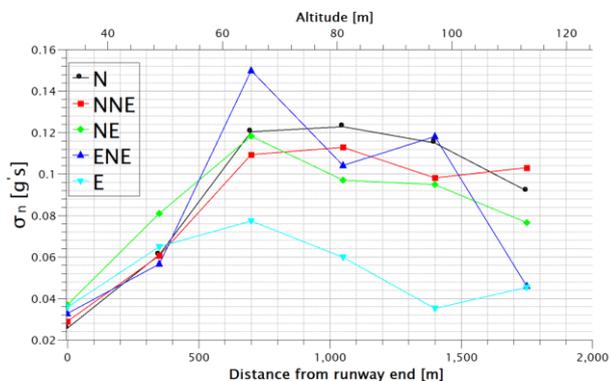


Fig. 6 Relationship between  $\sigma_{\Delta n}$  and wind direction.

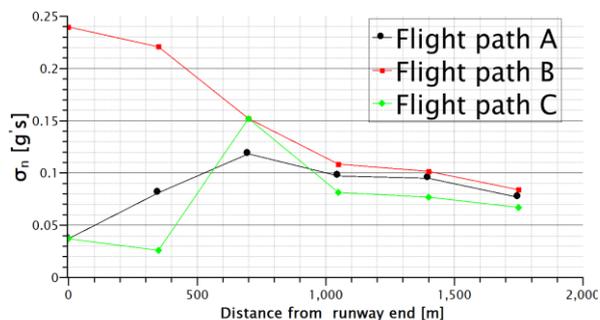


Fig. 7 Comparison of  $\sigma_{\Delta n}$  at the flight path A, B and C.

参考文献

- (1) 国土交通省 航空局, 羽田空港のこれから (2018), v.4.1.
- (2) Nakahashi, K and L.S. Kim., "Building-Cube Method for Large-Scale High Resolution Flow Computations," 42nd AIAA., (2004).
- (3) Kawamura, T. and Kuwahara, K., "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness," 22nd AIAA., (1984).
- (4) Bowles, R.L, Hamilton, D.W and Comman, L., "FY02 TPAWS Radar NASA B757 Flight Campaign Summary," NASA, 20-21 November, (2002).
- (5) Hamilton, D.W. and Proctor, Fred H., "An Aircraft Encounter with Turbulence in the Vicinity of a Thunderstorm," 21st AIAA., (2003).