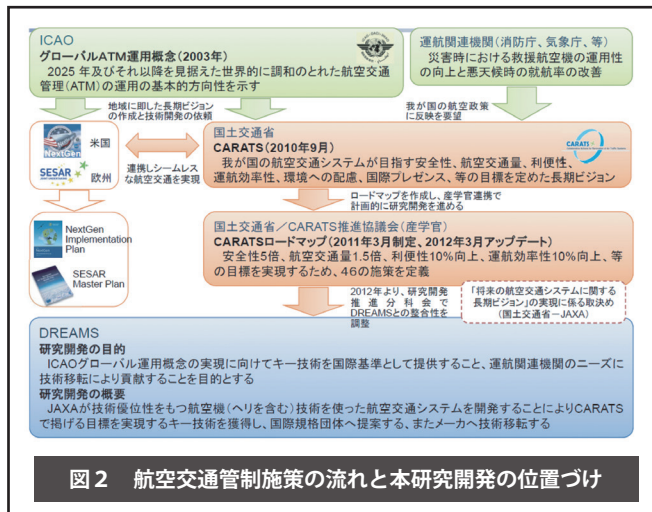


# 次世代運航システム (DREAMS) プロジェクトについて (1)

越岡 康弘\*

## 1. はじめに

経済成長著しいアジア諸国を中心に航空需要が増加し、2030年には世界の航空交通量が現在のおよそ2倍となると予想されている<sup>1)</sup>(図1)。運航数の増加は旅客の利便性向上へとつながるが、他方、事故率の増加、空港の容量不足が懸念される。このような状況を踏まえ、2003年にICAO(International Civil Aviation Organization)より、将来の航空機運用における「グローバルATM(Air Traffic Management)運用概念」が提唱された。これは、2025年以降を見据えた世界的に調和のとれた航空交通管理(ATM)コンセプトやこれを実現するための通信、航法、監視(CNS)技術のあり方について、各国の意見を集約したものであった。この提言を契機として、米国では“NextGen(Next Generation Air Transportation System)”が、欧州では



“SESAR(Single European Sky Air Traffic Management Research Program)”が提案され、我が国でも国土交通省が中心となり、「CARATS(Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)」が開始された。JAXAではDREAMS(Distributed and Revolutionarily Efficient Air-traffic Management System;分散型高効率航空交通管理システム)プロジェクトを立ち上げ、CARATSの施策の中でも目標への貢献度が期待される進入着陸フェーズに係る施策を選択し、それらに関連する技術分野へブレークダウンすることにより5分野の技術として、技術目標を定めて研究開発を行うことで、全体としてCARATSの目標実現に貢献するものである(図2)。

DREAMSプロジェクトでは、航空機の着陸進入フェーズにおける運航に関する課題解決に資する下記4技術(図3)

- ・後方乱気流、低層風擾乱の予測と管制最適化を実現する気象情報技術
- ・騒音暴露予測と経路最適化を実現する低騒音運

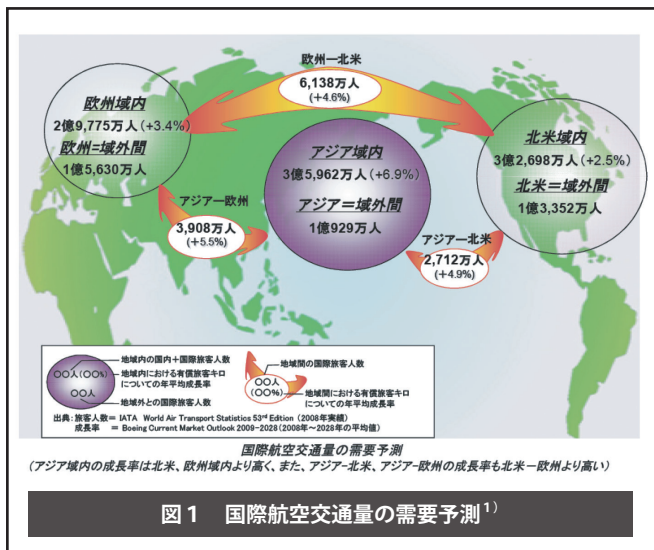


図1 国際航空交通量の需要予測<sup>1)</sup>

\* Yasuhiro KOSHIOKA  
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構  
航空技術部門

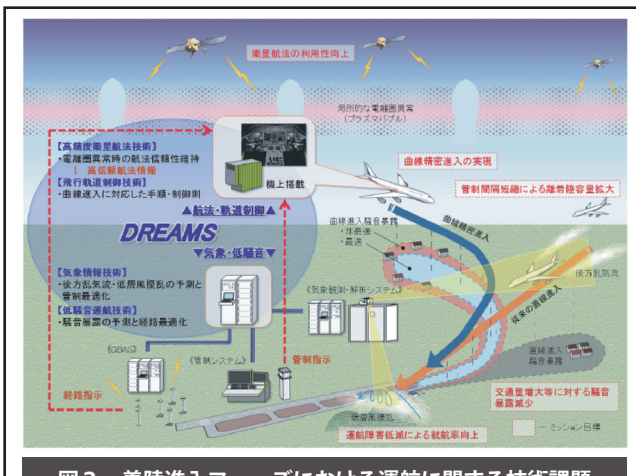


図3 着陸進入フェーズにおける運航に関する技術課題

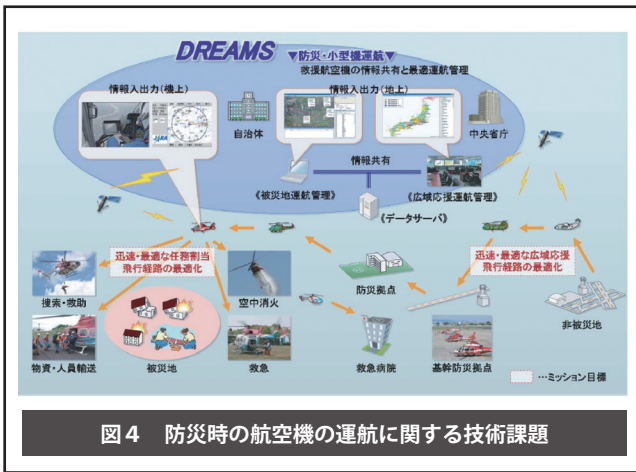


図4 防災時の航空機の運航に関する技術課題

航技術

- 電離圏異常時の航法信頼性を維持する高精度衛星航法技術
  - 曲線進入に対応した経路、手順、制御則を確定する飛行軌道制御技術
- 及び、災害時の航空機の運航に関する下記技術(図4)
- 救援航空機の情報共有と最適運航管理を実現する防災・小型機運航技術
- の5技術課題について研究開発を進めることとした。

DREAMS プロジェクトで開発するものはアルゴリズムであり、その精度、確度、性能等をフィールド試験、飛行試験、シミュレーション等により実証する活動である。また、その成果による社会貢献は、実証されたアルゴリズムを実施機関、メーカー等への技術移転、ライセンス供与を通じて行うことも

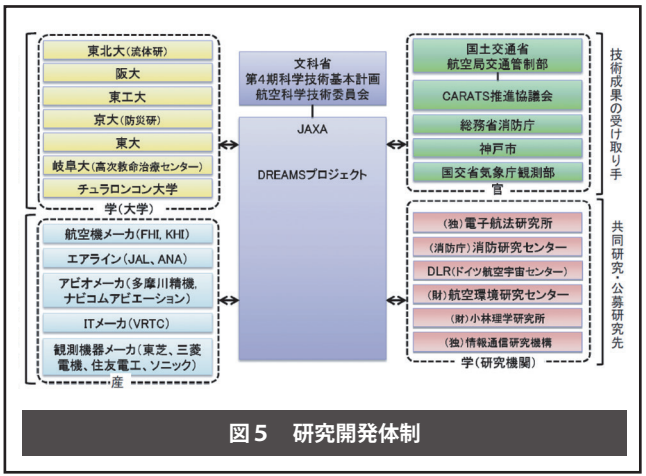


図5 研究開発体制

に、実証されたアルゴリズムの性能、精度等は、国際規格団体等への提案活動を通じて航空機の運航ルール、装備品等の基準策定に資するよう活動する計画とした。このため JAXA では、プロジェクト終了後もその成果のフォローアップ活動を行うための組織を設置し、これを進める計画とした。

図5に研究開発体制を示す。研究開発を進めるにあたり、ご支援をいただいた組織、機関は多岐にわたるが、成果の受け取り手、共同研究/公募研究相手先、技術実証結果の評価者に大別される。成果の受け取り手としては、実施機関である国土交通省航空局、総務省消防庁、地方自治体(消防局)、気象庁、技術移転先であるアビオメカ各社、共同研究/公募研究相手先としては、電子航法研究所をはじめとする研究機関、東北大、阪大等7大学、技術実証結果の評価者としては、主として JAL、ANA 等のエアラインのご支援をいただき、所望の成果を挙げる事ができた。

## 2. 気象情報技術

気象情報技術の研究開発では、1) 後方乱気流に起因する離着陸間隔の短縮に向けた研究、2) 安全性向上や運航障害の発生低減を目的とした低層風擾乱(低高度で発生する風の急変(ウィンドシア)、乱気流等)に関する情報提供技術の研究を実施した。

後方乱気流に起因する離着陸間隔の短縮に向けた研究の背景として、航空交通量の増大に対応するためには、特に交通流が集中する混雑空港の離着



図6 スモークで可視化された後方乱気流 (出典：NASA)

陸容量を増やす必要があり、このためには離着陸間隔の短縮が有効である。離着陸間隔を長く取る要因は、先行機の発生する後方乱気流（航空機後方に生じる一対の強い渦（図6））と後続機が遭遇することを避けるためであり、先行機と後続機の機体規模（重量）に応じ、表1のように設定されている。表中に指定がない組み合わせの場合には3NM（5,556m）が選定されるが、本研究開発では後方乱気流が気象条件により変化することに着目し、3NM以上の間隔を設定している場合において、気象条件に応じて動的に後方乱気流管制間隔を設定する手法について研究を進めるとともに<sup>2~8)</sup>、離着陸順序や複数滑走路間の離着陸割り付けの最適化による後方乱気流管制間隔の影響を低減する手法に関する検討を進めた<sup>6,9,10)</sup>。

気象影響による後方乱気流の挙動の不確かさを定量化するために、その挙動を確率的に表現する予測モデルを開発し<sup>2~4,6)</sup>、さらに予測結果である後方乱気流の各パラメータ（位置、強度）の確率分布の信頼区間として、予測誤差を定量的に出力する

先行機	後続機		
	ヘビー	ミディアム	ライト
ヘビー	4 NM	5 NM	6 NM
ミディアム	なし	なし	5 NM
ライト	なし	なし	なし

ヘビー：重量136トン以上、ミディアム：重量7~136トン、  
ライト：重量7トン未満。

表1 後方乱気流管制間隔（レーダ管制時）

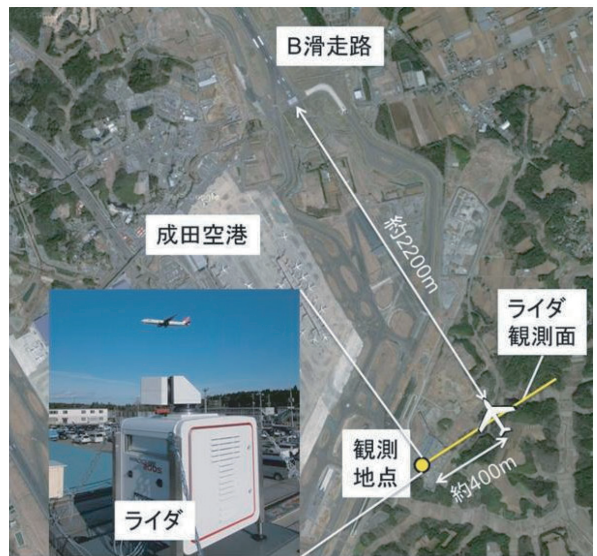
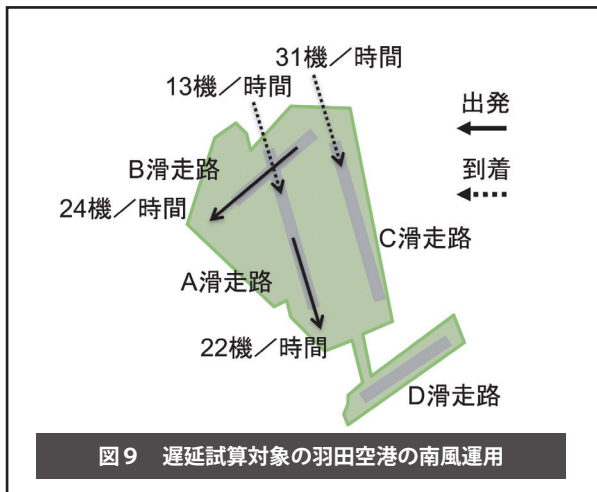
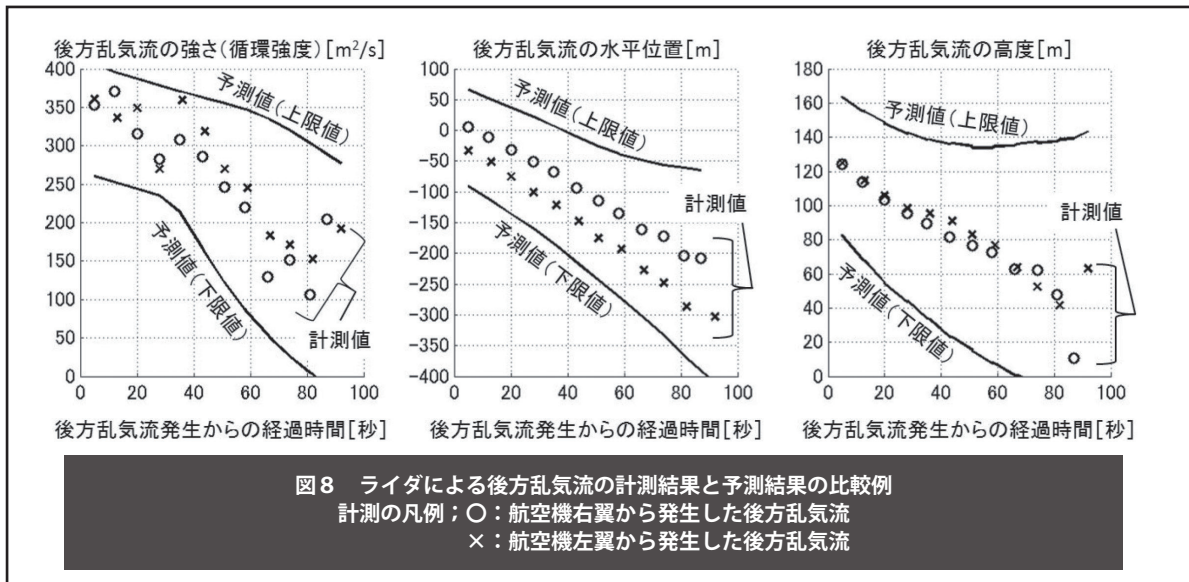


図7 成田空港での後方乱気流計測

機能を付加した。これにより間隔短縮時の遭遇リスクが一定間隔時のそれを超えてしまうことがないよう動的に間隔を設定することを可能とした<sup>4,6)</sup>。

設定した予測モデルによる動的な後方乱気流管制間隔の安全性、導入した際の間隔短縮効果の評価のため、成田空港で後方乱気流の計測を実施した。成田空港B滑走路近傍にライダーを設置し、2013年10月~2014年8月の期間で、計140日、4,189機の離着陸機の後方乱気流を計測した<sup>5,7,8)</sup>（図7）。このうち着陸機3,320機を対象に、提案手法による動的な航空機間隔を算出し、当該間隔における後方乱気流との遭遇の有無を確認した。その結果、3,320機中1,624機（49%）において間隔短縮が可能と算出され、短縮した間隔における後方乱気流の残留は確認されなかった（図8）。これより、本手法による動的間隔設定の安全性を確認するとともに、動的間隔の導入による間隔短縮が十分期待できることが示された。本成果は国際民間航空機関（ICAO）が進める後方乱気流管制間隔の見直し活動を進めるWorking Group（WTWG（Wake Turbulence Working Group））で報告され、規格化への貢献を目指している。

DREAMS プロジェクトでは、離着陸順序や滑走路割り付けの最適化手法と共に、最適化を適用し



ケース	遅延 (従平均)	遅延の低減幅 (現状模擬を基準)
現状模擬	144 秒	—
RECAT US 導入	134 秒	-6.7%
RECAT US 導入と 離着陸順序の最適化	113 秒	-21.3%
RECAT US 導入と 離着陸順序・滑走路割り付け の同時最適化	45 秒	-68.6%

表2 離着陸運用の改善による遅延低減効果の試算

た際の間隔短縮効果を評価可能な空港離着陸容量検討ツールを開発した<sup>6,9,10)</sup>。本ツールでは、複数滑走路の運用における様々な制約条件(滑走路占有時間、レーダ管制間隔、後方乱気流管制間隔、等)を航空機間隔の時間制約としてモデル化し、これらの制約条件を満たした上で、単位時間あたりの離着陸回数の最大化や遅延の最小化を目的関数として離着陸順序や滑走路割り付けを最適化する。これまでの最適化手法としては、多数の制約条件下での実行可能解を比較的短時間で求められる制約プログラミングを使用していたが<sup>9)</sup>、同ツールの最新版では、最適性を重視して混合整数計画法を用い、特に遅延最小化の最適性が向上している<sup>10)</sup>。本ツールの検討例として、羽田空港の南風運用(図9)を対象に、遅延の最小化を目的として、離着陸順序と滑走路割り付けの最適化を実施した結果を表2に示

す。羽田空港の就航機材の構成比率や滑走路ごとの離着陸比率を満たすようランダムに発生させた離着陸を先着順に離着陸させる現状模擬の場合に比べて、離着陸順序の最適化では20%以上、離着陸順序と滑走路割り付けの同時最適化では70%近く遅延が低減されている。他方、米国で導入が進んでいる細分化された後方乱気流管制間隔(RECAT US)<sup>11)</sup>の導入を模擬したケースでは、遅延の低減幅は約7%と小さい。これは、一部の航空機に対する後方乱気流管制間隔が短縮されているものの、4本の滑走路が井桁状に交差し滑走路間の干渉が無視できない同空港では、単純な後方乱気流管制間隔だけの短縮では、離着陸間隔の短縮につながりにくく、離着陸運用の最適化との併用が有効であることを示している。

低層風擾乱に関する情報提供技術の研究の背景として、我が国には離着陸経路上に風擾乱が発生しやすい空港が数多く存在し、航空機事故や着陸復行(着陸のやり直し)の原因となっているという実情があげられる。現状でもドブラーレーダ、ライ

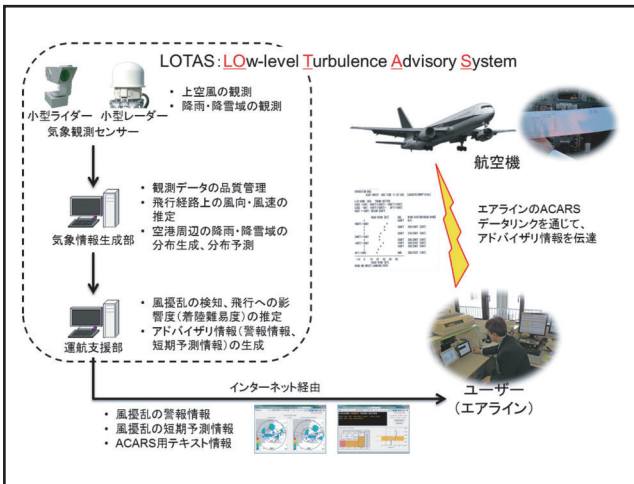


図 10 低層風擾乱アドバイザリシステム (LOTAS) の構成

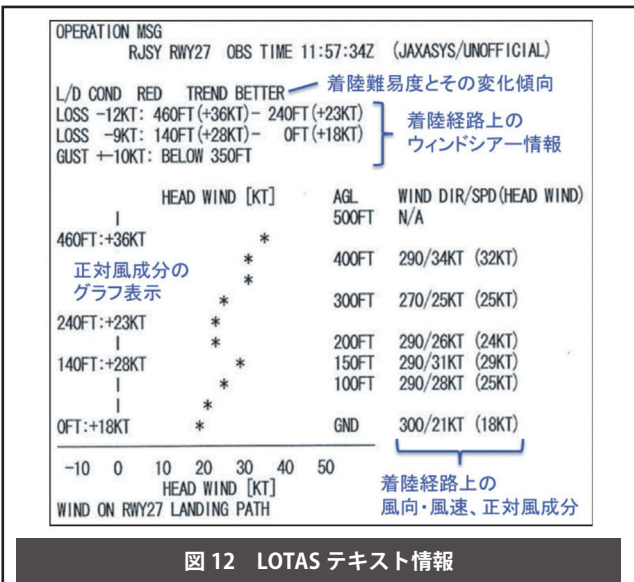


図 12 LOTAS テキスト情報



図 11 LOTAS 風情報画面

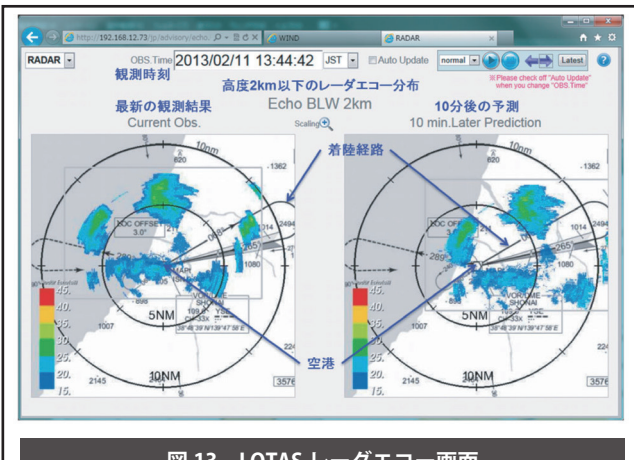


図 13 LOTAS レーダエコー画面

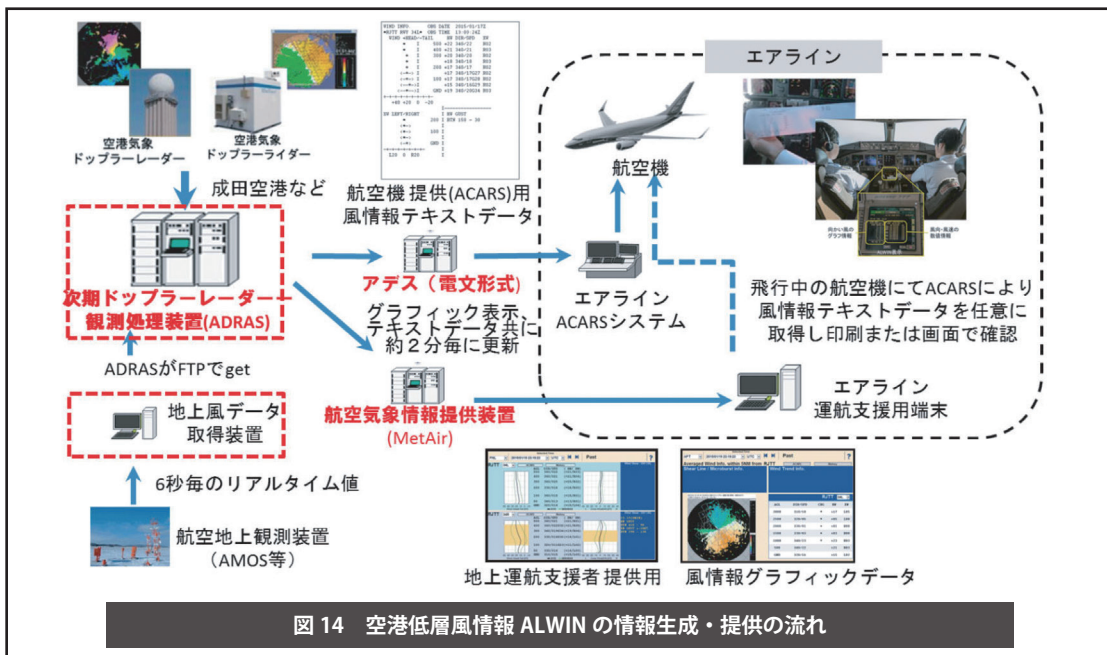
ダが整備された一部の空港では、航空機事故に直結するウィンドシアやマイクロバーストに関する情報が、低層ウィンドシア情報として気象庁より提供されているものの<sup>12)</sup>、着陸復行等の運航障害を招く風擾乱について十分な情報提供がなされているとは言えない。そこでDREAMSプロジェクトでは、事故防止に加え、運航障害の軽減を目的として、着陸可否判断の支援情報を提供する低層風擾乱アドバイザリシステム(Low-level Turbulence Advisory System(以下 LOTAS)) (図 10) の開発を実施した<sup>13,14)</sup>。LOTAS では、着陸可否に影響を与える風擾乱を検知、警報するとともに、短期予測情報により着陸タイミングの判断を支援する目的で、下記の 2 機能を実現した。

①風擾乱警報機能；航空機の飛行特性を考慮して、事故に至らないまでも飛行への影響の大き

い(着陸難度の高い)風擾乱を自動検知して警報する(図 11)。さらにグラフを含む風擾乱の警報情報をテキスト化し(図 12)既存の地对空データリンク(ACARS)による機上への定量的、視覚的情報提供を実現する。

②レーダエコー短期予測機能；風擾乱と関連の高い低高度のレーダエコー(降水域)の動きを短期予測し(10分先)、着陸タイミングの判断を支援する機能を実現する(図 13)。

これらの機能を確認するため、山形県庄内空港に本システムのプロトタイプを展開し、2012年12月下旬～2013年2月上旬の約2カ月にわたり試験運用、評価を実施した<sup>14)</sup>。LOTASの運航支援情報に対するエアラインへのアンケート評価の



結果、90%以上のパイロットから操縦に役立つ、60%の運航支援者から着陸タイミング判断に有効との回答を得ることができた。このアンケート結果から本システムの有効性が確認できたと考える。

LOTAS 開発で培った低層風擾乱情報提供技術は、JAXA と気象庁の共同研究により、気象庁の空港気象ドップラーライダに適用され、空港低層風情報（以下 ALWIN (Airport Low-level Wind Information)）として、羽田、成田の両国際空港で 2017 年 4 月より運用が開始されている<sup>15)</sup>。さらに空港気象ドップラーライダが設置されていない地方空港向けとして、ドップラーソーダ等の安価な風観測リモートセンサによる低層風擾乱アドバイザリシステムの開発が国内センサメーカーと共同で進捗中である。

### 3. 低騒音運航技術

航空機の騒音対策として ICAO では Balanced Approach という概念を採用している<sup>16)</sup>。これは、発生音削減、騒音軽減運航方式、運用制限、土地利用計画・管理の4つ組み合わせ、最も費用対効果の高い施策を講じるというものである。DREAMS 低騒音運航技術では、このうち騒音軽減運航方式に着目し、将来の航空交通量が現状の 1.5 倍に増加した場合でも、騒音伝搬に対する気象影響を考慮して進入経路を最適化することで、現

状と同等の騒音暴露を維持することを目標とし<sup>17)</sup>、低騒音予測モデル構築及びこれに基づく経路最適化を実施し、騒音影響の低減効果を評価した。

変動する気象条件による地上の騒音暴露の変化を考慮して飛行経路を最適化するためには、気象影響を反映した高精度な騒音予測モデルが必要となる。DREAMS プロジェクトで開発した騒音予測モデルでは、地上受音点のオクターブバンド音圧レベルを次に示すように、音源（音響パワレベルと指向性）、距離減衰、気象及び地表面の影響（過剰減衰）、空気吸収減衰<sup>18)</sup>で表すこととし、主に過剰減衰と音源のモデル化を行った。

$$L_p^f(r) = L_w^f + \Delta L_{air}^f - 11 - 20 \log_{10}(r) + \Delta L_{grand\&met}^f + \Delta L_{atm}^f$$

- f ; オクターブバンド中心周波数 [Hz]
- r ; 音源から予測点までの直達距離 [m]
- $L_p^f(r)$  ; 予測点におけるオクターブバンド音圧レベル (瞬時値) [dB]
- $L_w^f$  ; 音源のオクターブバンド音響パワレベル [dB]
- $\Delta L_{air}^f$  ; 音源の指向性に関する補正量 [dB]
- $\Delta L_{grand\&met}^f$  ; 気象条件、地表面性状に関する補正量 [dB]
- $\Delta L_{atm}^f$  ; 空気の音響吸収に関する補正量 [dB]

過剰減衰は、伝搬に対する気象条件と地表面の影響であるが、予測するための手法として、高速で高迎角まで解析可能な GF-PE (Green's Function-Parabolic Equation) 法を採用し、

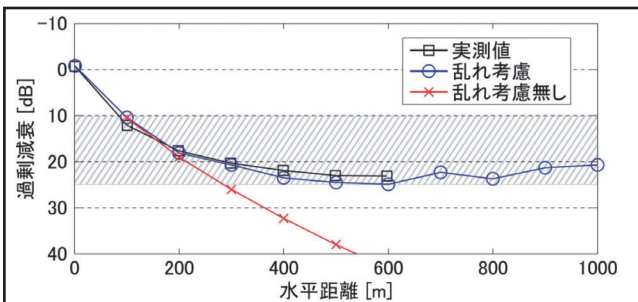


図 15 地対地伝搬における過剰減衰  
(中心周波数 250Hz のオクターブバンド音圧レベル)

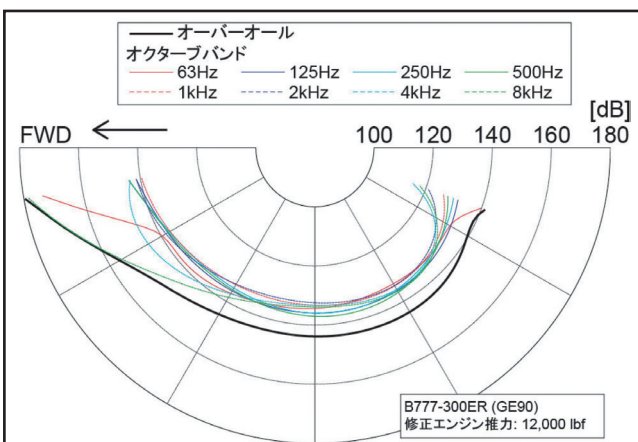


図 16 音源モデル例 (Boeing 777-300ER)

さらに大気乱れを表現するパラメータを導入し、パラメータ値に対する GF-PE 法の解析結果を統計処理することで<sup>19)</sup>、各気象条件における過剰減衰を求めている。図 15 に地対地伝搬における過剰減衰の例を示す。大気の乱れを考慮しない場合には、水平距離約 200 m 以上の伝搬において過剰減衰を過大評価しているが、大気乱れを考慮することにより、実測値と良好一致を示している(図中のハッチングは過剰減衰の上限の経験的な範囲を示す)。また、GF-PE 法など数値解析には高精度な伝搬予測が可能な反面、経路最適化のように繰り返し計算を伴う騒音予測では計算時間が過大となり現実的でない。このため、本プロジェクトでは参照気象条件として、風速、大気安定度、風向と伝搬方向のなす角度等で分類した 273 パターンの相対音速の鉛直プロファイルを設定し、各気象条件に対して予め GF-PE 法により 63Hz ~ 2kHz のオクターブバンドごとの過剰減衰を求めてテーブル化した。軌道最適化計算時には、その瞬間の気象条件に最も近い参照気象条件を選択し、対応する過剰減衰の計

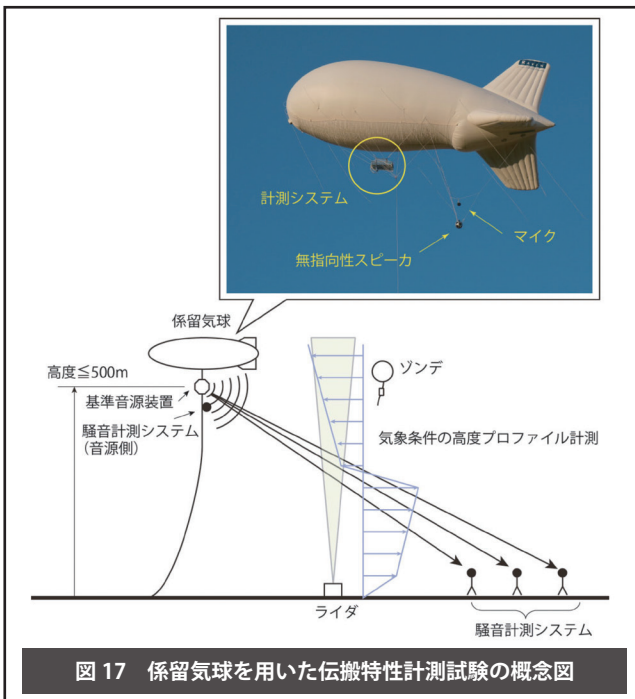


図 17 係留気球を用いた伝搬特性計測試験の概念図

算結果を使用することで、精度と計算速度の両立を図った。

空港周辺の騒音予測に一般的に使われる音源モデルとして、ANP (Aircraft Noise and Performance)<sup>20)</sup>等のデータベースが一般的であるが、本プロジェクトでは周波数別に過剰減衰テーブルを作成していることから、音源モデル<sup>21)</sup>にも正確な周波数特性が必要であったため、実測した進入時の騒音から音源パワレベル、周波数特性および縦の指向特性をモデル化した。図 16 に作成した音源モデルの一例を示す。

本プロジェクトでは、過剰減衰モデルと音源モデルを新規に開発したため、その精度検証を実施する必要があった。そこで、係留気球を用いた伝搬特性試験で過剰減衰モデル単独の精度検証を行い、次に地上の騒音暴露の予測精度を検証するといった、2段階の検証を実施した<sup>22)</sup>(図 17)。図 18 に音源高度 100 m のケースについて、試験時の大気条件から本プロジェクトで開発したモデルによる過剰減衰の予測値を求め、実測値と比較した結果を示す。合計 7,350 個のデータを取得した結果、その予測誤差の平均値は 0.09dB、標準偏差は 1.94dB であった。

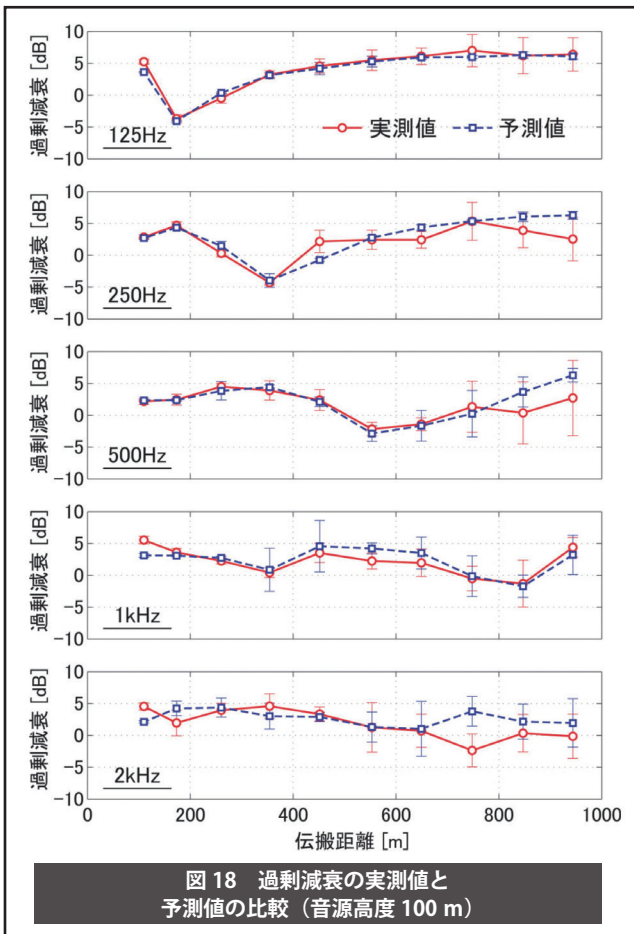


図 18 過剰減衰の実測値と予測値の比較 (音源高度 100 m)

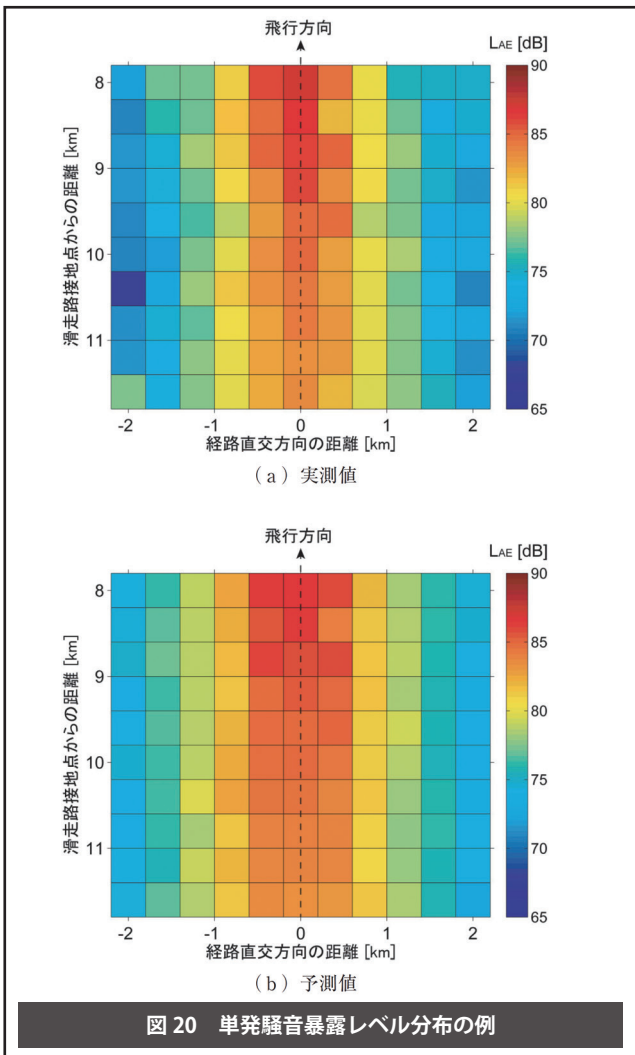


図 20 単発騒音暴露レベル分布の例

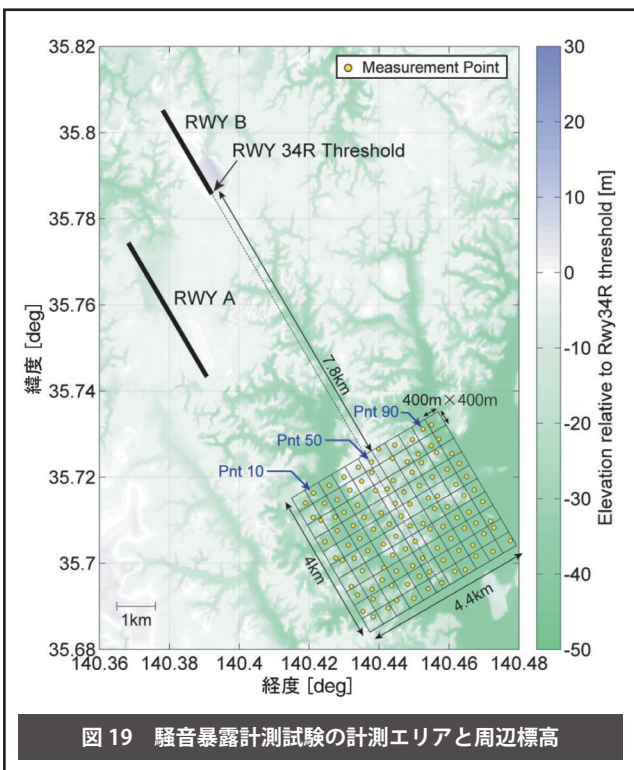


図 19 騒音暴露計測試験の計測エリアと周辺標高

オーバーオールの騒音レベルの検証のため、空港への進入機の単発騒音暴露レベル ( $L_{AE}$ ) を面的に計測した<sup>23)</sup>。対象は成田空港 B 滑走路とし、計測エリアは滑走路端から約 8 ~ 12km 離れた 4 × 4.4km のエリアとし、その中を 400 × 400 の 110 グリッドに分割した。図 19 にエリアの概要を示す。対象機は、Boeing 767-300ER、777-300ER、777-200ER、787-8 の 4 機種とし、様々な気象条件に関するデータ取得のため、2013 年 11 月から 2014 年 7 月の間の各季節に一週間程度の計測を実施した。予測値は、騒音予測モデルで得られたオクターブバンド音圧レベルに A 特性補正値を加算し、すべてのオクターブバンドをエネルギー的に合計し、A 特性音圧レベルの時間履歴を求め、更にエネルギー的な時間積分により単発騒音暴露レベルを算出した。図 20 に単発騒音暴露レベルの実測値と予測値の分布例を示す。四季の試験期間で合



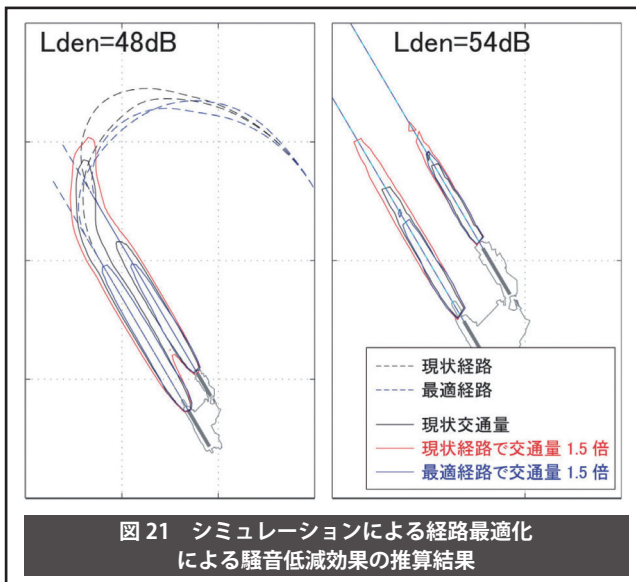


図 21 シミュレーションによる経路最適化による騒音低減効果の推算結果

計 600 便以上の計測を実施し、32,818 データを取得した。

開発、検証した騒音予測モデルを用いて、経路最適化による騒音暴露の低減効果の検証を実施した。図 21 に成田国際空港への進入シミュレーション結果例を示す。破線が飛行経路、実線が騒音レベルの等値線を示しており、飛行経路、等値線ともに現状、現状の 1.5 倍の交通量、現状の 1.5 倍の交通量で最適経路を飛行した場合を色分けして示している。最適経路は GBAS (Ground Based Augmentation System) を前提とした経路設定として、直線と円弧で構成されるようにして求めた。この結果、1.5 倍の交通量でも現状と同等の騒音暴露を実現する目標の達成を確認した。ただし、このシミュレーションは着陸便のみを対象としたものであり、離陸便を含めて設定している環境基準等とは異なる騒音暴露の評価となっており、実際の騒音対策区域との直接の比較はできないことに注意する。

(つづく)

#### 参考文献

- 1) 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン、国土交通省資料、2010。
- 2) 又吉直樹、杉浦正彦：後方乱気流の確率的な挙動予測を用いた後方乱気流管制間隔短縮について、第 49 回飛行機シンポジウム、2011.10。
- 3) 杉浦正彦、又吉直樹：後方乱気流遭遇リスクの確率的評価手法、第 49 回飛行機シンポジウム、2011.10。
- 4) 又吉直樹、気象情報を利用した後方乱気流管制間隔の短縮運用について、第 50 回飛行機シンポジウム、

2012.11。

- 5) 又吉直樹、吉川栄一：離着陸間隔の短縮に向けた後方乱気流観測、日本航空宇宙学会第 45 期年會講演会、2014.4。
- 6) Matayoshi, N.: Dynamic Wake Vortex Separation Combining with Traffic Optimization, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, St. Petersburg, Russia, Sep. 2014.
- 7) Yoshikawa, E. and Matayoshi, N.: Wake Vortex Observation Campaign by Ultra Fast-Scanning Lidar in Narita Airport, Japan, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, St. Petersburg, Russia, Sep. 2014.
- 8) Matayoshi, N. and Yoshikawa, E.: Dynamic Wake Vortex Separation Combining with AMAN/DMAN Concept, AIAA Paper 2015-3397, 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Dallas, U.S.A., June 2015.
- 9) 相原磨世、総 宜史、又吉直樹：数理計画手法を用いた空港離着陸容量検討ツールの開発、第 52 回飛行機シンポジウム、2014.10。
- 10) Matayoshi, N.: Development of Airport Capacity Analysis Tool Considering Advanced Airport Terminal Operations, 2015 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Cairns, Australia, Nov. 2015.
- 11) Federal Aviation Administration (FAA) : Wake Turbulence Recategorization Order JO 7110.659B, March 2015.
- 12) 原 基：航空気象業務の現状と今後の計画について、日本航空宇宙学会第 41 期年會講演会、2010.4。
- 13) 又吉直樹、吉川栄一、飯島朋子、牛尾知雄：低層風擾乱アドバイザリシステムの開発、第 51 回飛行機シンポジウム、2013.11。
- 14) 飯島朋子、又吉直樹、吉川栄一：低層風擾乱アドバイザリシステムの評価、第 51 回飛行機シンポジウム、2013.11。
- 15) 飯島朋子、又吉直樹、山本健太郎、藤田英治：空港低層風情報 ALWIN の開発・評価、第 53 回飛行機シンポジウム、2015.11。
- 16) Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management, ICAO Doc 9829, 2nd Ed. 2008.
- 17) 石井寛一：低騒音運航技術の研究について、第 50 回飛行機シンポジウム、2012.11。
- 18) Acoustics - Attenuation of Sound during Propagation outdoors - Part 1. : Calculation of the absorption of Sound by the Atmosphere, ISO 9613-1, 1993.
- 19) Yokota, T., Makino, K., Matsumoto, T., Yamamoto, K. and Ihii, H.: Database of Correction for Meteorological and Ground Effects Developed for the Aircraft Noise Prediction Model in JAXA's DREAMS Project, Inter-Noise, 2015, Aug. 2015.
- 20) The Aircraft Noise and Performance (ANP) Database, Euro-Control, <http://www.aircraftnoisemodel.org/> (2016/6/14 アクセス)
- 21) Makino, K., Yokota, T., Okubo, T., Matsumoto, T., Yamamoto, K., Kawase, Y., Shinohara, N. and Ishii, H.: Development of the Precise Aircraft Sound Source Model Based on Direction-of-arrival Estimation using Cross-correlation Technique, Inter-Noise, 2013, Sep. 2013.
- 22) Yokota, T., Makino, K., Matsumoto, T., Yamamoto,

- K. and Ishii, H.: Experimental Study of Meteorological and Ground Effects on Outdoor Sound Propagation for Developing Aircraft Noise Prediction Model, Inter-Noise 2014, Nov. 2014.
- 23) Ishii, H., Yokota, T., Makino, K., Shinohara, N., and Sugawara, M.: Verification of an Aircraft Noise Prediction Model Developed for JAXA's DREAMS Project, Inter-Noise 2015, Aug. 2015.