

空域からみた東京湾内新規独立滑走路整備の可能性に関する検討*

Feasibility Study on New Independent Runway in Tokyo Bay Using Instrument Flight Procedures Criteria *

清水吾妻介**・平田輝満***・屋井鉄雄****

By Azumanosuke SHIMIZU**・Terumitsu HIRATA***・Tetsuo YAI****

1. はじめに

(1) 研究の背景

我が国の首都圏空港について、2010年の羽田再拡張後も航空需要の伸びが持続すると予測されていることから、首都圏空港が我が国の航空交通のボトルネックになることなく十分に機能することが必要であり、羽田再拡張後における首都圏空港容量拡大の技術的可能性を検討しておくことは重要なことである。羽田再拡張後の将来に首都圏空港容量が不足する可能性に備えた長期的な視点での検討継続の必要性は公に示されている¹⁾。

空港容量を拡大させる選択肢のひとつである滑走路増設について、増設する滑走路が既存滑走路と競合することなく独立に運用できることが理想的である。しかし羽田の再拡張後の井桁の滑走路配置に対して、その近傍に新規滑走路を配置しても、既存の滑走路との運用上の従属性が必ず残り、さらに東京都等の上空低高度の飛行制限を緩和し、騒音負担を受容することが必要となる可能性が高い。逆に、羽田から若干遠方にはなるが、羽田再拡張後の飛行経路および環境制約を前提に、滑走路運用上および空域における飛行経路上、独立に運用可能な滑走路が配置できれば、追加の滑走路1本による最大限の容量拡大が、羽田空港周辺への騒音影響を最小限に抑えながら可能となる。この時の拡大容量が将来的な首都圏空港容量拡大の可能性の見極めにあたって大きな意味を持つとともに、前者の羽田近傍新規滑走路による容量拡大方策に対する比較代替案としても重要と考えられる。

これまでに行われた東京湾内の新規滑走路の設置可能性に関する検討例としては、航空局が実施した首都圏第三空港の設置可能性に関する調査が挙げられ、その結果として、東京湾内の複数の候補地については羽田と空

域的に競合するため、独立な運用は困難であるとの見解が示されている²⁾。この検討は羽田再拡張前の条件で行われたものであり、羽田D滑走路供用後には東京湾上の空域の空きスペースが減少し、湾内独立新滑走路と羽田滑走路との間の空域分離の困難性はさらに増すと考えられる。この首都圏第三空港の公表された検討結果のみから羽田再拡張後の新規独立滑走路整備の技術的可能性について判断することは完全にはできない。また、空域検討時の重要な条件である飛行方式について、近年将来的な新技術を前提とした新たな方式が実用化または検討されており、それらの前提によって飛行経路ごとの空域占有度も変化する。さらに、後述するように、欧米の混雑空域における空域の3次元高度利用も参考にすると、新たな可能性も出てくると考えられる。

(2) 欧米での空域運用の現状と近年の検討

図-1はニューヨーク首都圏エリアにおける飛行経路設定の一例で、北風時のニューアーク空港(EWR)出発とテタボロ空港(TEB)着陸の独立運用経路設定である。EWR出発は離陸後2500ftまで上昇し西方直近のTEB最終進入経路の直上を1000ftの最低垂直間隔を確保して通過している。このような個所は他にも多数存在し、空域を3次元に高度に活用し高密度な経路設定を行っている³⁾。さらに、同エリアでは航空機遅延や環境問題等の抜本的対策として、周辺空域を含めた非常に広域の空域再編を10年にわたる計画の末、現在実施中であり、段階的に空域管制運用の効率化を行っている³⁾。また、ロンドンヒースロー空港の第3滑走路整備計画においても飛行経路設定の観点から滑走路運用方法や処理容量の検討を実施している⁴⁾。このように、従来は滑走路などの地上施設の容量不足問題が主であったが、空域混雑や環境問題等も背景に、出発到着航空路の設定や空域設計に関する問題が相対的に重要性を増し、その検討が世界の多くの空港・空域において進展している。また、本研究の検討では想定に入れていないが、将来的に複数空港が密集しているエリアにおいて他機との競合回避や市街地への騒音影響回避を効率的に行うための先進技術である曲線精密進入や4次元軌道を実現することを目指した研究開発が、我が国を含め世界的に進められており^{5) 6)}、そ

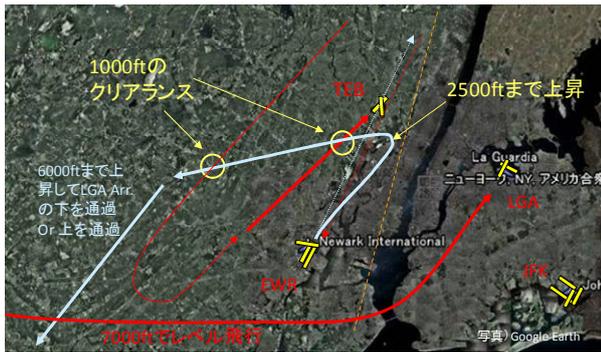
*キーワード：空港計画，航空交通管理，航空管制

**学生員，工修，東京工業大学大学院総合理工学研究科
(横浜市緑区長津田町4259-G3-14, TEL045-924-5675)

***正員，博(工)，運輸政策研究機構運輸政策研究所
(東京都港区虎ノ門3丁目18番19号, TEL03-5470-8415)

****正員，工博，東京工業大学大学院総合理工学研究科
(横浜市緑区長津田町4259-G3-14, TEL045-924-5615)

れら技術革新により空域の有効利用がさらに可能となる。



図－1 NY首都圏エリアにおける飛行経路設定の例

(3) 先行研究と実務上の課題

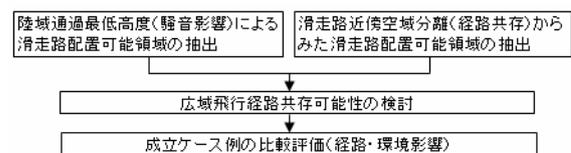
本研究で対象としている空港・空域容量と空域・飛行経路の関係性を扱った先行研究としては、①複数経路の合流を考慮した空域における航空機処理容量の推計方法⁷⁾、②管制官ワークロードからみた空域セクタ構造の評価や容量推計方法⁸⁾、③柔軟な経路設定を可能とする曲線進入や4次元軌道などについて騒音や燃料消費・CO₂からみた実現可能性を分析した研究^{6) 9)}、などがあるが、①においてはあくまで空域における経路を与件として、その経路上の処理容量の算定方法を検討するものであり、②については空域セクタにおいて管制官が処理可能な航空機数を推計しており、滑走路直近まで考慮した空域容量や飛行経路という視点からは検討しておらず、③は先進技術とそれによる経路自体に関するもので、その新経路を既存滑走路・空域・経路といかに共存させるかという点には触れていない。つまり、本研究で対象としている空港計画上の飛行経路設定に対して、複数経路間の独立運用性や環境制約からみた設定可能性に関する研究は見られない。

当然ながら、空港計画実務における新規滑走路整備にあたっては、空域制約を考慮した独立飛行経路の設定可能性について検討を行っているが、検討結果である具体的な滑走路位置と滑走路方位の空域的必然性が明確でない場合が多く、各候補地からずれた場所や異なる滑走路方位での空域的な配置可能性とその条件が不明のまま残ってしまうという欠点が挙げられる。

前述のとおり、これまで航空交通量の拡大に対して滑走路増設や滑走路運用の工夫で対応してきたが、近年、空域混雑や環境意識の高まりから、出発到着経路の設定や空域設計に関する問題が相対的に重要性を増しており、既存の空域使用状況や騒音影響を制約とした場合の追加的飛行経路設定や空域活用可能性に関する検討方法について、より客観的でシステムティックな方法論が必要となってくる。

(4) 研究の目的と構成

以上を背景に、本研究では、羽田再拡張後を対象に東京湾内において新規の独立運用可能な滑走路の設置可能性について明らかにすることを目的とした。そのために、まず陸域への騒音影響および既存の飛行経路を制約とした新規独立滑走路の設置可能性を分析するための方法論の検討と提案を行い、その方法によって実際に東京湾内を対象とした分析を実施した。さらに、分析の結果明らかとなった滑走路配置可能エリアから2種類の滑走路配置とそれに対応した広域の飛行経路設定の代替案について、既存滑走路・経路への影響、騒音と燃料消費(CO₂排出量)といった環境影響から比較評価を行った。図－2に研究のフローを示す。以上のように、本研究では、①これまで研究として扱われることのなかった空港計画上の飛行経路設定について近年重要性を増している空域混雑(複数経路の輻輳)と騒音などの環境影響の視点から客観的に分析する方法論を提案し、②従来から客観的に明らかにされてこなかった羽田近郊の東京湾内における新規滑走路配置の可能性について明らかにした点が研究上の創造性として挙げられる。



図－2 本研究のフロー

2. 飛行方式設定基準の概要と独立経路の定義

(1) 飛行方式設定基準の概要

我が国において定期旅客輸送の航空機は計器飛行方式で運航されており、離陸から着陸までの全ての飛行経路には、地上障害物や空中の他機との間隔を確保するための保護区域が設けられている。これらの飛行経路と保護区域の設定の仕方は国土交通省航空局により「飛行方式設定基準」¹⁰⁾として定められている。同基準は平成18年7月に全面的な改定が行われ、ICAO(国際民間航空機関)による基準であるPANS-OPS(The procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations)に準拠したものとなった。

これらの基準は通常運航を想定しており、エンジントラブルなどの緊急事態に対応した経路や高度については、別途運航者が設定することとなっている。出発、エンルート、到着・進入、空中待機といった飛行フェーズ、使用する航法システム、さらに航空機の種類によって、飛行経路と保護区域の寸法形状は異なったものとなる。

(2) 航法システムと飛行経路保護区域

地上設置型の航行援助無線施設のみを単純に使用する従来の航法では、無線施設から遠くなるほど誤差が増大し、より広い幅の飛行経路保護区域が必要となるが、近年の技術革新により、それら複数の施設や衛星（GPS等）と機上航法装置を組み合わせることで、より高精度で柔軟な航法であるRNAV（Area Navigation）^{補注1}を用いることで、一般に保護区域の幅をより小さくかつ一定にすることが可能となり、さらに航空機の航法性能としてRNP（Required Navigation Performance）値を指定することにより、保護区域をさらに小さくすることが可能となっている¹⁰。例として直線離陸上昇区域の区域幅について、RNAV方式でRNP値に1（航空機実位置が95%の確率で片幅1.0NM（Nautical Mile）の範囲内に収まることを意味する）を指定した場合の保護区域の片幅は2.5NMであるが、RNP0.3では片幅は1.1NMとなる。

(3) 独立運用のための経路分離

二つの飛行経路が競合することなく、互いに独立に運用できるための要件として、各々の飛行経路の飛行方式設定上の保護区域が平面的に重複していないこと、重複している場合には重複部分において高度差1000ft以上の高度分離がなされていることが基準上必要である¹¹。平成18年の飛行方式設定基準全面改訂により、保護区域には、多くの場合、飛行経路の両側に一次区域、その外側に二次区域が設けられるようになった¹⁰ ^{補注2}。管制方式基準では航空機の横間隔（水平分離）として従来は一次区域が重ならないことを条件としていたが、RNAVでRNPを適用した経路の水平分離を行う際には二次区域までを考慮するよう改訂されている。したがって、今回の検討でRNPを用いる場合には一次区域だけでなく二次区域までを検討対象とした。

区域の高度について、ILS進入^{補注3}のグライドスロープのように航空機に対して垂直（高度）方向のガイダンスが与えられる場合には、その地点のノミナル高度（垂直ガイダンス中心の高度）をもってその地点におけるノミナル経路（水平ガイダンス中心線）に垂直な区域全幅の高度とし、垂直ガイダンスがない部分では、飛行方式の一部として指定した高度を当該部分の区域全幅の高度とした（図-3）。このノミナル高度を用いた高度分離の考え方は、現在の基準上に明確に記されたものではなく、飛行方式設定基準の整備が今後続けられていく過程で異なった考え方が採られる可能性も有る。

空港の近傍において、高度指定を行うことで経路を分離し、互いの滑走路の独立運用を可能にしている実例として、我が国では那覇空港と米軍嘉手納基地の進入出発経路の立体交差があり、欧米では例えばサンフランシスコ空港とオークランド空港のILS進入経路の立体交差

がある。

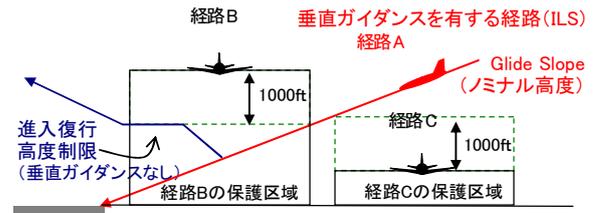


図-3 交差経路での垂直分離の仮定

(4) 高度制限に関する既往の検討における議論と本研究の視点

首都圏第三空港検討会における空域的な検討結果としては、東京湾アクアラインより北側の東京湾のほぼ中央に位置する湾奥案と、羽田南西湾岸に近い川崎沖・横浜沖案については羽田との独立運用が不可能であること、木更津沖の海ほたる案については候補地付近で500ftの低高度制限が必要であること、また全ての湾内配置案について横田空域内での飛行経路設定が必要であることが示されている²。木更津沖案での500ftの高度制限は候補地付近の保護区域重複部分で1000ftの垂直間隔を確保するための措置であると推測されるが、定期大型ジェット旅客機が高度500ftで水平飛行を行うことは実運用上好ましいことではないと思われる。このように高度制限がやむを得ず必要な場合に、どの程度の低高度まで許容するかについては、那覇と嘉手納の競合回避にあたって那覇側が到着機および出発機を海上1000ftで水平飛行させている実運用例がひとつの目安になると考えられる。

本研究では、上記の垂直間隔1000ftを確保し、横田空域も平面的ないし高度的に回避し、しかも陸域への騒音影響まで考慮した上で、羽田と共存する独立運用滑走路を東京湾内に配置することが、位置と条件は限られるであろうが、新しい航法の応用を含めた詳細な空域検討により可能なのではないかと、という視点で実施している。

3. 空域検討に関わる基礎的事項の前提

(1) 新滑走路の規模

新設滑走路の規模は最大で大型ジェット機の発着を想定して滑走路長3000mとし、出来るだけ高い就航率を得るために両側ILS整備とした。

(2) 滑走路方位と位置

滑走路方位をあらかじめ決めておくことはせず、検討の結果として得るものとし、ウインドカバレッジは考慮しない。滑走路位置は、都心からのアクセス性および騒音影響を考慮し、東京湾内に配置することとした。

(3) 航法システムと進入出発方式

羽田の進入出発方式は、再拡張後の運用形態として公

表されている方式を基本とし、必要な場合には現行基準で使用が認められている最新の航法システムを活用することを念頭に、航法精度の最高値を、初期進入でRNP0.3(進入経路保護区域片幅1.1NM)、計器出発方式でRNP1(離陸経路保護区域片幅2.5NM)もしくはRNP0.3(離陸経路保護区域片幅1.1NM)とした。最終進入と中間進入については、運用実績が高く滑走路近傍で区域幅が小さいILS進入とした。仮定した進入出発方式の種別を、表-1に示す。現在の羽田に設定されている出発方式設定勾配(上昇率)の最大値は5.0%であるが、基準上は7.0%まで引き上げることが可能であるので、本検討においては、5.0%~7.0%の上昇勾配を用いることとした。なお、飛行方式を検討するに当たって航空機区分はD(大型ジェット機)とした。航空機区分Dで可能であるように方式設定を行えば、より速度の遅い(より保護区域が小さい)航空機区分A~Cでは充分設定が可能である。

表-1 仮定した進入出発方式

風向 天候		北風時		南風時	
		好天時	悪天時	好天時	悪天時
羽田	到着	A,C滑走路へILS進入	B,D滑走路へLDA進入	B,D滑走路へILS進入	
	出発	C,D滑走路から計器出発	A,C滑走路から計器出発		
新滑走路	到着	ILS進入		ILS進入	
	出発	計器出発		計器出発	

(4) 経路の配置と高度

検討に用いる羽田の進入出発経路は図-4に示す再拡張後の飛行経路配置と高度⁷⁾を原型とし、それに競合回避上の必要に応じて変更を加えることとした。新滑走路の進入出発経路は、可能な限り海域に配置し、陸域では再拡張後の羽田便の陸域通過高度と同程度以上の高度を確保するとした。高度制限が必要な場合には、極端な低高度を制限として課すことを避け、海上の場合1000ft(陸域では2000ft)を高度制限の最低値とした。

(5) 地上障害物

本検討は、空港計画としては初期の段階における概略的検討であり、経路の低高度部分のほとんどは海上にあることから詳細な障害物検討は行わなかった。ただし、顕著な既存構造物(海ほたる、ベイブリッジ等)については考慮した。

(6) 既存空域・飛行経路

東京湾とその周辺には、羽田の他にも空港(飛行場)やヘリポートが存在する。今回の検討では、羽田の再拡張後の進入出発経路と横田空域のみを競合回避の検討対象とし、木更津飛行場を除くその他の既存空港(飛行場)の空域については、配置成立例についてのみ障害の有無の概略確認を行った。

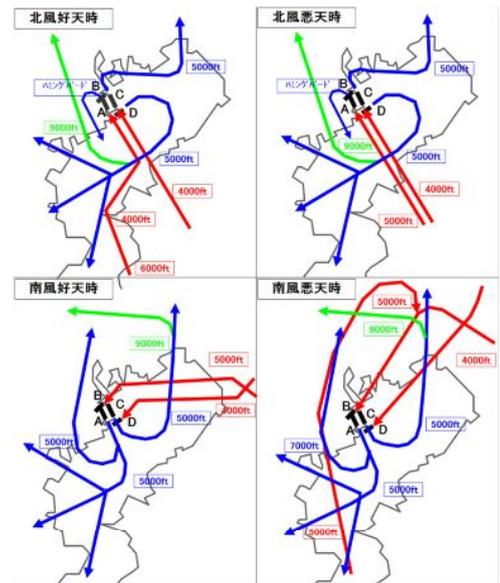


図-4 検討に用いた羽田再拡張後の飛行経路

表-2 空域検討条件のまとめ

滑走路位置	東京湾内
滑走路長	3000m以下
滑走路方位	配置可能な方向(ウィンドカバレッジは考慮せず)
滑走路標高	現羽田と同程度
運用形態	他の滑走路とは独立にIFR運用 風向きによる運用方向は羽田と同一(同期)
飛行経路配置と陸域通過高度	他空港の経路と分離し、可能な限り陸域を回避 陸域最低通過高度は羽田再拡張後と同程度とする
飛行経路間水平分離の考え方	下記垂直間隔が設定できない場合には互いの保護区域が重複しないこと
飛行経路間垂直分離の考え方	互いの保護区域が重複する区間においては双方が高度指定(制限)もしくは垂直ガイダンスに従って飛行することとし、高度差1000ftを設定する。
方式設定上昇勾配	7.0%以下
航法システム精度	最高で、ターミナル:RNP0.3、進入:ILS
地上障害物	制限表面に関して顕著な物件のみ考慮

4. 新規独立滑走路整備の可能性分析の方法論と分析結果

(1) 新規独立滑走路整備の可能性分析の方法論の概要

本章では、新規滑走路整備の可能性について、客観的・網羅的に分析を行う方法論について提案し、東京湾内を対象とした分析結果について述べる。

まず、大きな制約条件として、背景で既述したように、①既存の滑走路と飛行経路(ここでは再拡張後の羽田空港)との競合性、また、②騒音影響(ここでは陸域通過最低高度)の2点を考慮して分析を行う方法を検討した。本研究では東京湾内を対象としているため陸域通過最低高度から騒音影響を分析しているが、その他の飛行制限(住宅密集地上空や軍用空域など)を考慮した際も同様の方法論で分析が可能である。

分析方法は大きく以下の3段階である。

① 騒音影響からみた新規独立滑走路の方位と位置の検

討：初期段階の検討として、東京湾の形状、騒音影響（陸域通過高度）を制約とした場合の新滑走路整備の方位と位置の可能範囲を網羅的に分析・抽出する。

② 初期出発と最終進入区域からみた滑走路配置可能領域の抽出：滑走路直近の出発区域と進入区域のみを考慮して、羽田との独立運用が可能な滑走路配置可能領域を抽出する。

③ 広域飛行経路からみた滑走路配置と飛行方式設定の検討：①と②で得られた抽出領域内で、滑走路から離れた広域を考慮しても経路分離が可能である配置成立例と飛行方式設定の詳細について検討を行う。

以下で、それぞれの分析段階についての詳細と分析結果を述べる。

(2) 騒音影響からみた新規独立滑走路の方位と位置の検討

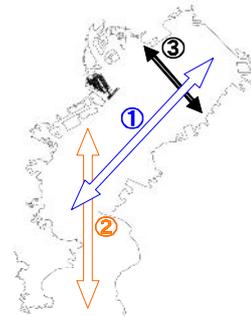
滑走路の両側にILS進入方式を設けることを想定するので、滑走路延長線上にILS進入（中間進入および最終進入）経路として最低でも5.5～6NMの直線区間が必要である。したがって、図-5に示すように、東京湾内においては湾の長手方向である北東-南西（図中の①）、および、東京湾入り口付近においてはその長手方向である南-北（図中の②）に滑走路方位をとる方が経路配置の上で有利である。それ以外の、例えば湾内の北西-南東（図中の③）では湾の中央に滑走路を置いてもILS進入の陸域通過高度が2000ft程度にしかならず、角度を付けてILSのLLZ（ローライザー）コースに会合させることを想定してもさほど改善は望めない。

羽田の進入出発経路との競合を回避する観点から見ると、図中の①は、北風時に木更津から羽田A・C滑走路へ向かうILS進入機および南風時にA・C滑走路からの離陸機の下側の空間を活用するケースである。この場合、A・C滑走路の進入出発区域との平面的な重複をできるだけ少なくしつつ湾内長手方向を利用するため、必然的に新滑走路は羽田D滑走路とほぼ平行な配置となる。一方、図中の②は、羽田の各滑走路における進入出発経路の上を飛び越える形で羽田空港上空付近の空間を活用するケースである。

両側ILS滑走路を配置することが可能な領域を抽出するため、騒音影響回避上の制限として羽田拡張後の千葉市や木更津市上空通過高度である4000ftを陸域最低高度とし、ILS最終進入経路直線部分の長さに国内最短の事例（関空）と同じ3.6NMを想定して、配置可能領域抽出を行った。

抽出過程の説明として、ある滑走路方位と位置についての両側ILS設定可能性判断の例を図-6に示す。同図において、LLZコース会合角に応じて基準上必要な中間進入経路の長さが段階的に異なるため、3度の降下角

を想定した経路高度コンターは不連続な円弧になる。また、基準上、LLZコース会合角は90度以下になるように経路設定をしなくてはならない。4000ft以下のコンターが陸域にかからない経路設定が可能な範囲が両側進入ともに存在すれば、両側ILS進入は可能と判断される。図-6の例では両側進入とも上記条件を満たすコース設定可能範囲（図中の薄緑の範囲）が存在するため、この滑走路は両側ILS進入の設定が可能であると判断される。



- ①：D平行ケース
- ②：羽田上空活用ケース
- ③：有効でないケース

図-5 東京湾上空を有効に活用する滑走路位置と方位

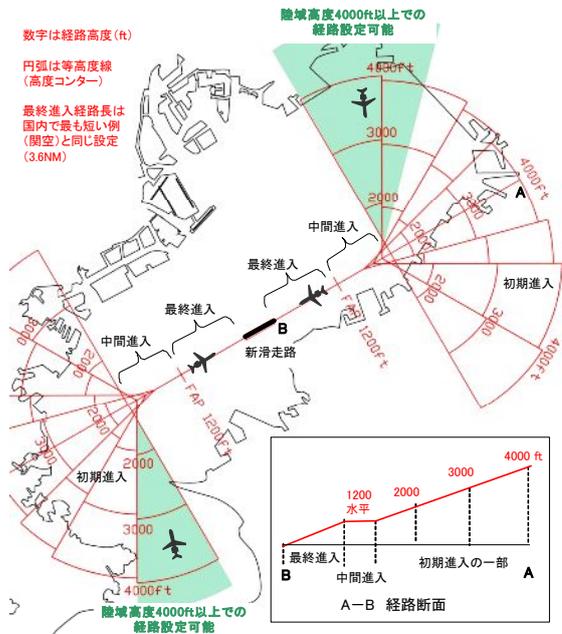


図-6 陸域通過最低高度（騒音影響）からみた両側ILS滑走路配置可能性の判断

この判断を全ての滑走路方位（15度ピッチ）について滑走路位置を湾内全域に移動させて行った結果、図-7に示す滑走路方位別に色分けした領域が抽出された。北を0度とし時計回りを正とした滑走路方位が-90度から-45度までの間は領域解が存在しなかった。

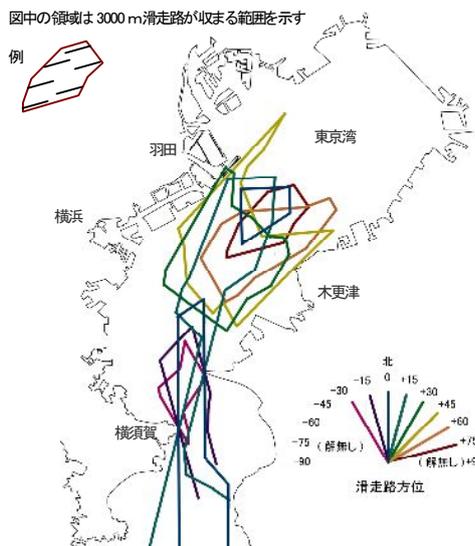


図-7 陸域通過最低高度（騒音影響）からみた両側 ILS滑走路配置可能領域抽出結果

(3) 初期出発と最終進入区域からみた滑走路配置可能領域の抽出

a) D平行ケースの配置可能領域

前節の分析から、騒音影響からみると、大きく分けて2種類、つまり図-5中の①および②の方向で離着陸を行うケースが抽出され、①は羽田のD滑走路と平行する滑走路により羽田のAとC滑走路の離着陸経路の下側の空間を活用するケースであり（以降、「D平行ケース」）、一方、②は、羽田の各滑走路における進入出発経路の上を飛び越える形で羽田空港上空付近の空間を活用するケースである（以降、「羽田上空活用ケース」）。

D平行ケースにおいては、必然的に羽田A・C滑走路へのILS進入経路の直下で、かつ、羽田からできるだけ離れた（すなわち羽田ILS進入経路の高度ができるだけ高い）位置に新滑走路がある状態が、最も上下の経路間のクリアランスが大きい状態となる。この状態を中心にして、保護区域の重複部分で先述の独立運用要件としての垂直分離ができる限界の滑走路位置を抽出した。

図-8に北風運用時の羽田ILS進入と新滑走路ILS進入および進入復行についての検討作業の例を示す。図-8において、新滑走路ILS進入経路は羽田ILS進入経路の下にあり、保護区域の重複を考慮して垂直間隔を確保すべき領域を、新滑走路、羽田A、C滑走路の順に青、赤、オレンジで薄く塗りつぶして表示してある。さらに、羽田ILS進入との垂直間隔について、新滑走路ILS進入のグライドスロープがクリティカルな位置にGSクリティカル、新滑走路進入復行（上限高度制限1000ft）の垂直間隔がクリティカルな位置に復行クリティカルと表示し、各々のノミナルもしくは制限高度を表示している。図-8の例では4つあるクリティカルポイントの全てで1000ft以

上の高度差が確保されており、したがってこの滑走路は、初期出発と最終進入区域からみた滑走路配置が可能であると判断される。

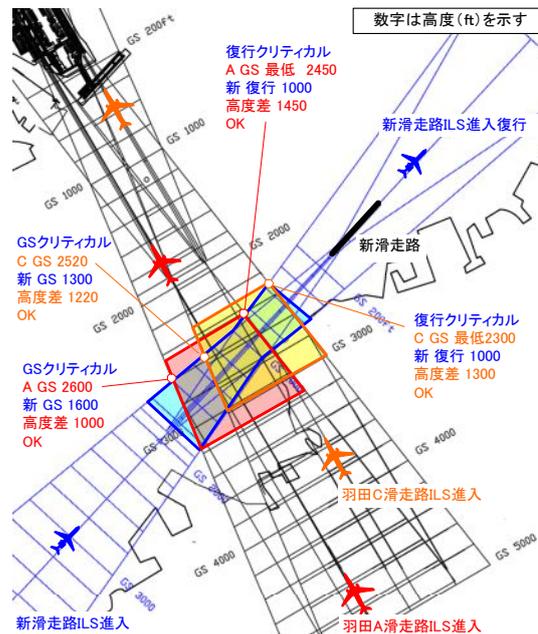


図-8 滑走路近傍空域分離可能性検討例（北風時の羽田 ILS 進入对新滑走路 ILS 進入）

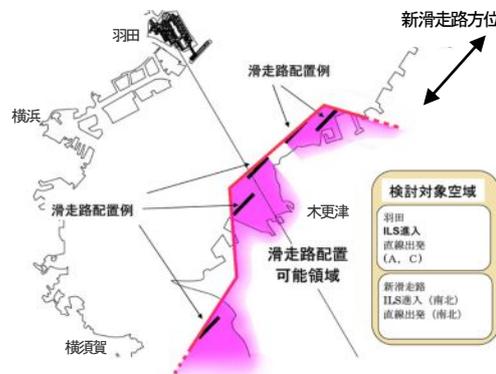


図-9 滑走路近傍空域分離からみたD平行ケース新滑走路配置可能領域

上記の検討を、D滑走路と平行な滑走路方位について、運用方向（南北）と進入・出発の全組合せについて限界位置を求め、それらを重ね合わせるにより得られた新滑走路配置可能領域を図-9に示す。領域が特定の滑走路方位についてのものであることを強調するために、配置可能領域内に滑走路配置例（イメージ）を記入してある。木更津北部にある領域の欠けた部分は、海ほたるの施設を考慮すると制限表面との関係から滑走路を配置できない懸念のある範囲を概略的に示したものである。

b) 羽田上空活用ケースの配置可能領域

羽田上空活用ケースについて、D平行ケースと同様の方法で検討を行い、南風時の羽田のLDA (Localizer Directional Aid) 進入^{補注4)} およびILS進入復行経路との分離も考慮して新滑走路配置可能領域を求めた。例として3種類の滑走路方位について得られた領域を図-10に示す。図中の領域に表示してある滑走路配置例が挿絵的イメージである点は図-9と同じである。

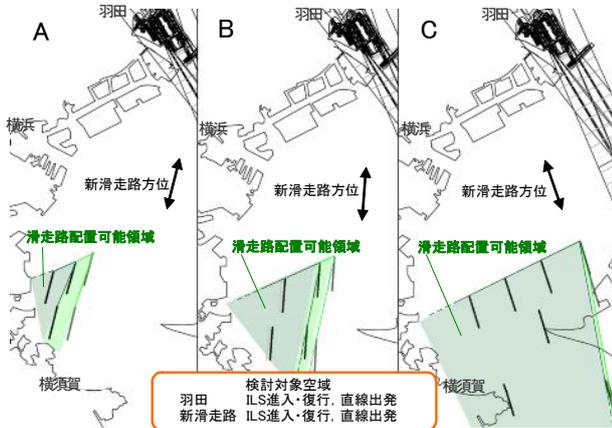


図-10 滑走路近傍空域分離からみた羽田上空活用ケース新滑走路配置可能領域例

c) 領域抽出結果のまとめ

滑走路近傍における初期出発と最終進入区域からみた滑走路配置可能領域の全ケース (全滑走路方位) に対する騒音影響を考慮した絞り込みとして、図-6に示した両側ILS滑走路配置可能領域抽出結果を重ね合わせた結果を図-11および表-3に示す。この結果から、騒音影響および初期出発・最終進入区域の競合性からみた場合、木更津沖では羽田A・C滑走路との離着陸経路との厳

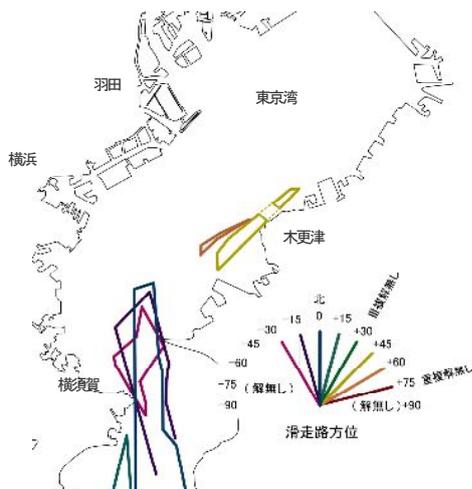


図-11 陸域通過最低高度と滑走路近傍空域分離から得た領域の重ね合わせ結果

しい競合性から設置可能範囲は狭いものの、羽田D滑走路と平行な滑走路によって羽田A・C滑走路との離着陸経

路の直下空域を活用し、新規滑走路整備が可能であること、さらに、都心からやや距離があるものの、観音崎付近にA, C滑走路とほぼ平行な新滑走路で羽田直上空域を活用することで比較的広範囲に新規滑走路が設置可能であることが明らかとなった。

表-3 滑走路近傍配置可能領域抽出結果

配置可能領域 抽出条件	滑走路方位 (真北を0度, 時計回りを正とした角度)										
	-45以下	-30	-15	0	10	15	30	45	60	75	90以上
ア	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
アかつイ	-	○	○	○	○	○	×	×	×	×	-
アかつウ	-	×	×	×	×	×	○	○	○	○	-

ア 両側ILS陸域4000ft以上 ○:領域解あり, ×:領域解なし
 イ 滑走路近傍での進入出発方式競合回避-羽田34ILSの上を通過
 ウ 滑走路近傍での進入出発方式競合回避-羽田34ILSの下を通過

(4) 広域飛行経路からみた滑走路配置と飛行方式設定の検討

a) D平行ケース成立例

本節では、前節で示した2種類のケースについて、比較的高高度までの広域飛行経路を含めた飛行経路設定の可能性について検討を行った。広域飛行経路については前段階の滑走路近傍に比べて空域利用の自由度が高く、成立する飛行経路配置にバリエーションがあるため、ここではその一例を示す。

まず、D平行ケースについて、上記で抽出した領域に置いた新滑走路の経路が、羽田経路との分離や陸域通過高度などの前提条件を満たしながら設定可能かどうかの検討を行った。

D平行ケースの新滑走路を北東向きに離陸した出発機は、羽田のILS進入区域の下を抜けて直線上昇を行い、さらに左旋回しながら湾内を上昇することとなる。この部分には羽田のC・D滑走路からの出発区域が存在するため、RNAV1とRNP1を用いた経路では、これら経路を共存させることは困難であり、RNP0.3の適用によってようやく図-12に示すような形で配置することが可能であることが分かった。

同図中の下線付き数字はその位置に指定する下限高度 (ft) を、上線付き数字は同じく上限高度 (ft) を表す。湾奥北部においては、羽田D出発経路(赤)の上に羽田C出発経路(黄)が、さらにその上に新滑走路出発経路(青)が重なる形となる。進入出発方式に付加した高度制限は、今回想定した上昇勾配最大値7%と標準的な降下角3度で達成可能な位置と高度に設定してある。

図-12の新滑走路位置が北東へずれるに従い、新滑走路出発区域の下に位置する羽田D滑走路出発経路との分離が厳しくなり、D出発機が離陸後に湾内経路の約三分の二にあたる部分(青と赤の区域重複部分)で維持し

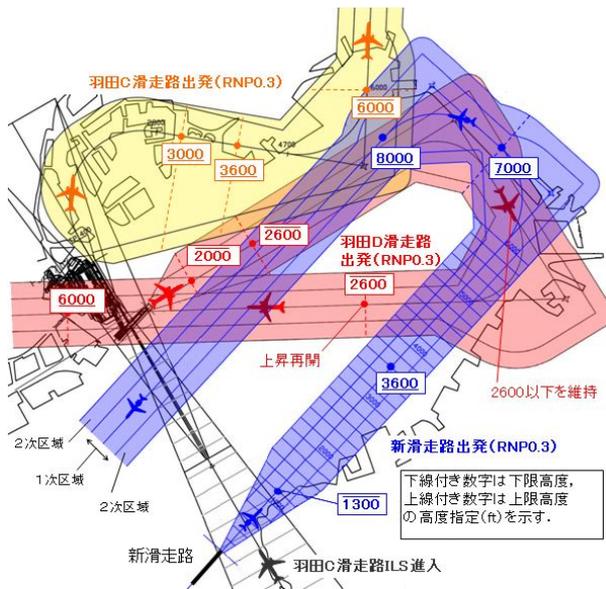


図-12 D平行ケース成立例 (北風時)

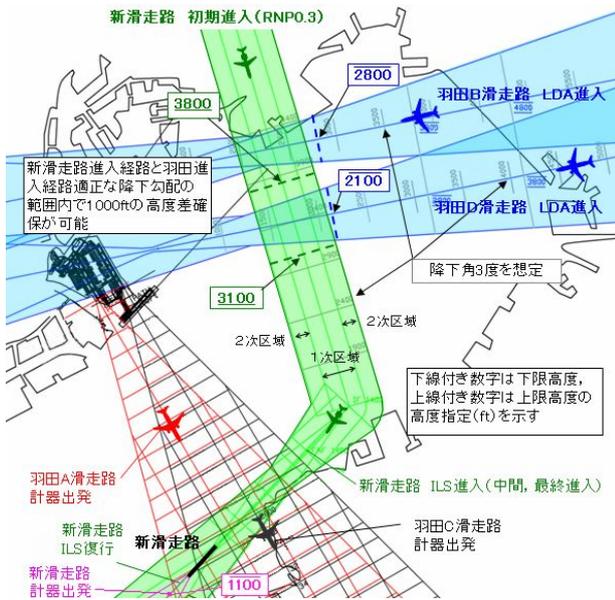


図-13 D平行ケース成立例 (南風好天時)

なくてはならない高度がより低くなる。配置可能領域の實質的な最西端に新滑走路を配置した図-12の場合で、D出発機が離陸後に維持する高度は2600ftである。

南風好天時には、羽田LDA進入が湾の北東部をふさいでいるため、新滑走路ILS進入は湾東端から長い直線状に配置することはできないが、図-13に示すように羽田LDA進入の上を南へ飛び越した後にILSのLLZコースに会合する配置とすることで、新滑走路のILS進入は可能となることが分かった。また、南風悪天時の新滑走路への進入は図-13と同様の経路で可能な他、湾東からの直線的なILS進入も成立する。なお、より広域での経路配置については、滑走路近傍に比べて自由度が高く、図-14に示す以外の経路配置とすることもできる。

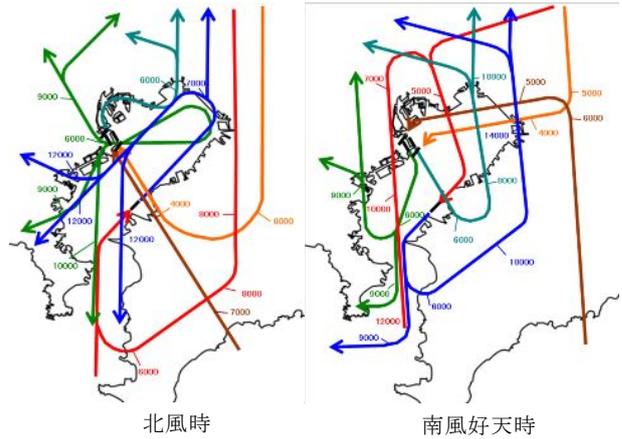


図-14 D平行ケース成立例の広域経路

b) 羽田上空活用ケース成立例

羽田上空活用ケースについても同様に、前節で抽出した領域に新滑走路を置いた場合に、各種条件を満たして独立運用が可能か否かを検討した。前節の図-10に示したCの領域の図から明らかなように、滑走路近傍の直線進入出発経路確保の観点からは海域の中央に滑走路を置くことが理想的であるが、その場合、浦賀水道を閉塞し首都圏への海上交通を遮断してしまうことになり極めて実現性に乏しいことから、海岸に近い位置で新滑走路配置例を検討することとした。図-10に示したCの領域において、進入出発経路の陸域影響がより少ない西側海岸線に配置した例を図-15に示す。南風時 (図-15

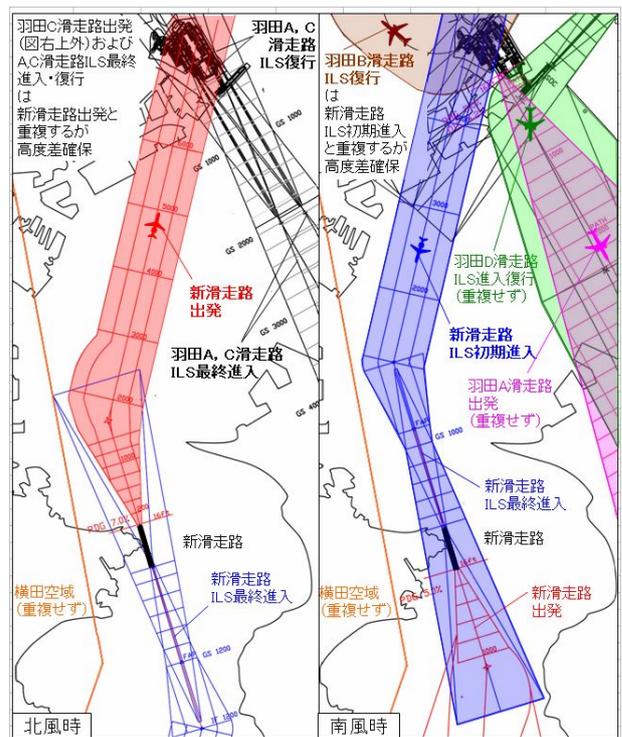


図-15 羽田上空活用ケース成立例

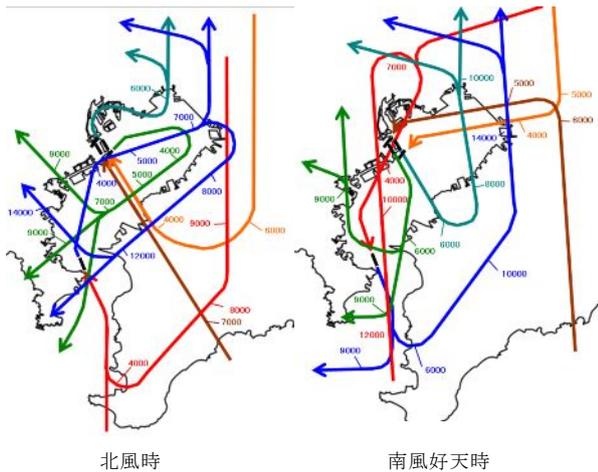


図-16 羽田上空活用ケース成立例の広域経路

右)については、羽田のLDA進入より競合条件が厳しい羽田 ILS 進入を対象に検討を行った。また、広域(ターミナル空域)での飛行経路配置例を図-16 に示す。広域での経路配置は滑走路近傍に比べて自由度が大きく、図示した以外の経路配置も考えられる。

(5) 成立ケースの比較評価

a) 陸域の経路配置と高度

① 到着経路

北風時には、両ケース(図-12, 14左, 15左)とも浦賀水道上空を活用するので、関東以南からの到着経路は陸域を完全に避けることが可能であり、関東以北からの到着機は飛行距離がやや長くなることを許容すれば、陸域通過高度は半ば任意に選択可能である。

南風時には、両ケース(図-13, 14右, 15右)とも都心上空を互いに同様の高度と経路で降下する。図-13 に示すDケース南風の経路配置は必然性が高く、図示した経路と異なる配置は既存経路との分離が出来ず成立しないが、図-15右に示すHケース南風の経路配置は羽田沖へ若干ずらすことが可能である。陸域通過高度は、Dケース(図-13)で東京湾北岸を約4500ft(必然)、Hケース(図-15右)で羽田付近の海岸を通過する場合約4000ft(必然)となり、図には示されていないが羽田沖へ経路をずらす場合には7000ft程度にすることが可能である。なお、南風悪天時には、羽田のLDA進入は使用されずILS進入となり東京湾東端付近の空域に余裕が出るため(図-4の南風悪天時を参照)、Dケースにおいて東京湾東端付近から湾内へダイレクトなILS進入とすることが可能となり、その場合の陸域最低高度は5000ft程度(必然)となる。

以上から、到着経路については、より海上を利用し、より高い陸域通過高度を確保できるという点で、Dケー

スよりもHケースの方が優れている。

② 出発経路

北風時には、図-12に示すDケースの経路配置は必然性が高く、図示した経路と異なる配置は既存経路との分離が出来ず成立しないが、図-15左に示すHケース北風の経路配置は羽田沖へ若干ずらすことが可能である。陸域通過高度は、Dケース(図-12)で東京湾東端を約7000ft(必然)、Hケース(図-15左)で羽田付近の海岸を通過する場合約6000ft(必然)となり、図には示されていないが羽田沖へ経路をずらす場合には10000ft程度にすることが可能である。

南風時には、両ケースとも浦賀水道上空を上昇することから、飛行距離がやや長くなることを許容すれば、陸域通過高度は半ば任意に選択可能である。

以上から、主発経路についても到着経路同様、DケースよりもHケースの方が優れている。

b) 必要な航法精度

Dケースでは、南風時到着と北風出発の経路にRNP0.3が必須である。北風時到着の進入部分についてはRNP1での設定が可能であるが、その後の進入復行にはRNP0.3が必要である。南風時出発はRNP1での設定が可能である。Hケースでは、やや制約が緩く、RNP0.3が必須であるのは南風時到着のみで、羽田の出発区域と横田空域との共存のために必要である。北風時の出発と到着(進入復行考慮)はRNP0.3での設定が望ましいもののRNP1での設定可能性があり、南風時出発はRNP1で充分である。広域経路においては、両ケースの必要航法精度に大きな違いは無いと推測される。

以上から、必要な航法精度がより低いHケースがDケースよりも優れていると言える。

c) 飛行方式に必要な高度制限

Dケースでは、新滑走路の進入(復行含む)と出発には高度制が必要である。北風時には羽田ILS進入区域の下を抜けるまで高度1300ft以下で、また、南風時には羽田離陸上昇区域の下を抜けるまで1100ft以下(羽田出発上昇勾配5.0%の場合であり、7.0%の場合は2000ft以下)で飛行することが必要である。しかし、これらの高度制限は、希に発生する新滑走路進入復行機に対して上限高度以下での水平飛行を短区間強いるだけである。新滑走路出発機は勾配7.0%で上昇してもこれらの高度には到達しないため、出発に対する実質的な影響はないと推測される。この他に下限高度の制限も数箇所に必要であるが、全て想定上昇率で対応可能である。

Hケースでは、滑走路直近での重複はないものの、図-16に示すように北側経路が羽田の出発経路の下に位置するので上限高度制限の必要があるが、Dケースに比

べると緩い制約となっている。また、羽田上空通過にあたっては下限高度制限が数箇所にあるが、全て想定上昇率で対応可能である。

d) 既存空域・飛行経路に与える影響

Dケースでは、北風時において羽田出発機に図-12に示したように上昇が制限される。また、南風好天時には羽田A滑走路への視認進入（Visual Approach）経路は使用できず、Hケースでは、北風時の羽田A滑走路のハミングバード経路（羽田西側を上昇）および南風時の羽田A滑走路への視認進入経路が使用できない。ハミングバード経路への影響を除けば、これらの影響は羽田の処理能力に影響を与えるものではない。

出発機に対する低高度での上昇制限は、燃料消費と操縦士および管制官のワークロードの点から可能な限り避けることが望ましく、羽田出発機が比較的低高度で水平飛行をする必要のあるDケースよりも、そのような制限のないHケースが優れている。

e) CO2排出量

DケースとHケースの空港近傍でのCO2排出量の差は、離陸直後の高度制限により低高度水平飛行を行うDケース北風運用時の羽田D滑走路出発に起因する差が大部分を占めると推測される。なぜならば、その他の上限高度制限および下限高度制限は想定した上昇率もしくは降下率で飛行する途中で概ね到達する高度に設定しており、制限がないのと同様にそのまま上昇もしくは降下を継続できるからである。

両ケースのCO2排出量について簡易な比較を行うために、出発機が無制限に上昇した場合と、Dケース北風運用時の羽田D滑走路出発に必要な高度制限を守って上昇した場合について、大型機777-300（最大離陸重量）一機あたりのCO2排出量の概略算出を行った。

まず、INM（Integrated Noise Model: FAAの航空機騒音予測コンター作成プログラム）の上昇プロファイル計算機能を利用して上記の離陸上昇過程におけるエンジン推力を求めた。図-17において、青線は高度制限無しに上昇した場合（INM標準プロファイル）、赤線はDケース北風運用時の羽田D滑走路出発機に課せられる高度制限を当てはめた場合（INMユーザー設定プロファイル：今回独自にフラップ、速度、高度を設定してINMで推力を算出）を示し、横軸は離陸滑走開始点からの進出距離であり、縦軸は上段では高度、中段では速度、下段ではエンジン一基あたりの推力である。777-300のエンジンGE90の燃料消費率（単位推力単位時間あたりの燃料消費量）として8.3mg/Ns¹³を用い、図-17のエンジン推力と速度からこのプロファイルでの燃料消費量を求めると、離陸滑走開始から10000ftまで上昇する際に消費す

る燃料は1532kg（高度制限無し）、1832kg（高度制限有り）となった^{補註5}。

次に、CO2排出係数を3155 g/kg fuel¹⁴）として上記燃料流量からCO2排出量を求めると、高度制限無しの場合には4835kg、高度制限有りの場合は5779kgとなった。

以上から、CO2排出量に関してはHケースがDケースより優れており、その差は北風運用時の羽田D滑走路出発一回あたり約0.9トンであることが分かった。

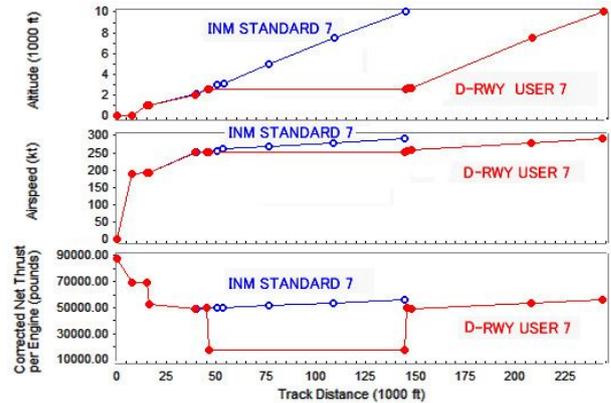


図-17 INM標準とD出発の上昇プロファイル（777-300）

f) 騒音影響

再拡張後の羽田と新独立滑走路が各々の年間容量一杯の運用を行っている場合のWECPNL騒音予測コンターをINMを用いて作成した。容量（発着回数）については運輸政策研究機構の提案⁸）を参考に、羽田については、再拡張後の既存ストック有効活用による容量拡大方策を実施した際の最大発着回数52.9万回/年（うち深夜4.1万回/年）、新独立滑走路については滑走路一本の容量最大値として22.5万回/年（深夜無し）を想定し、風向割合や機材構成等の条件は羽田再拡張時の環境影響評価書⁹）を参考にして設定した。

騒音予測コンター作成結果を図-18に示す。両ケースとも新滑走路による主要なコンターは海上に位置していることが分かる。Dケースでは、北風時の湾内出発経路分離のために羽田Cラン出発経路をHケースの場合よりも北に配置していることと、羽田D出発機が東京湾内で水平飛行した後湾中央から再び上昇を開始し羽田上空から陸域へ入ることの影響で、コンターの陸域侵入が見られるが、侵入が顕著なのは環境基準以下のWECPNL65コンターであり、専ら居住住居の用に供される地域の環境基準であるWECPNL70のコンターについては東京港とその周辺の港湾地域に限られている。Hケースでは陸域へのコンター侵入はほとんどない。

以上から、騒音影響の面でHケースはDケースよりも優れていると言える。

WECPNL 赤色：75（商工業地域等の基準）
 青色：70（住居地域等の基準） 水色：65（参考の値）

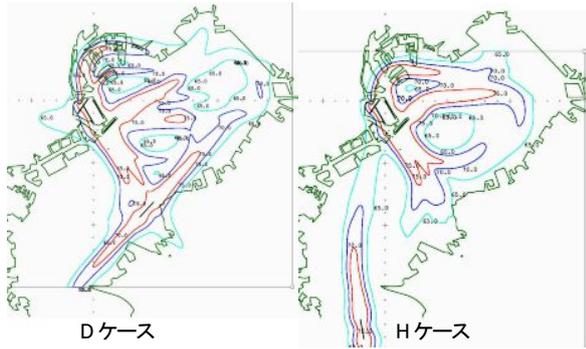


図-18 DケースとHケースのINM騒音予測コンター

g) 比較評価のまとめ

両配置ケースの空域と騒音影響の比較評価の結果、木更津沖よりも観音崎付近の方が、やや優れているとの見解が得られたが、既存空港と離れば空域的競合が減ることは明らかであり、それを客観的数値で確認したとも言える。前提とした都心との近接性の面では、観音崎付近よりも木更津沖の方が利便性が高い。

安全性の評価は行っていないが、今回用いたクリテリアは空域設定および航空管制の基準に基づいているので、一定の安全性は確保できていると考えられる。

表-4 比較評価のまとめ

		D平行配置ケース(Dケース)		羽田上空活用ケース(Hケース)	
		出発	到着	出発	到着
陸域経路最低高度	北風	7000ft	任意	6000~10000ft	任意
	南風	任意	4500ft	任意	4000~7000ft
	評価	両ケースとも4000ft以上を確保できるがHケースの方がやや優れている			
必要な航法精度	北風	RNP0.3必須	RNP1 (復行RNP0.3)	RNP1 (or RNP0.3)	RNP1 (or RNP0.3)
	南風	RNP1	RNP0.3必須	RNP1	RNP0.3必須
	評価	RNP0.3が必須なのはDケースでは出発と到着だが、Hケースでは到着のみであるので、Hケースの方がやや優れている			
特に必要な高度制限	北風	羽田ILSとの重複部分で1300ft以下		羽田付近で4000ft以上	
	南風	羽田出発との重複部分で2000ft以下		羽田付近で4000ft以上	
	評価	DケースよりHケースの方が高度制限が緩く、優れている			
既存空域飛行経路への主な影響	北風	羽田D滑走路出発の湾内上昇2600ft制限、羽田A滑走路ハミングバード不可	羽田A滑走路Visual進入不可	羽田A滑走路ハミングバード不可	羽田A滑走路Visual進入不可
	南風	羽田C滑走路の左旋回出発を直線出発に変更	高度指定の他、変更なし	羽田A滑走路の右旋回出発やや南へ移動	高度指定の他、変更なし
	評価	羽田の経路の若干の移設や使用不可となる既存方式がある点は両ケースとも同様だが、Dケースでは羽田出発機に比較的低高度を維持させる必要があるため、Hケースの方が優れている			
環境への影響	CO2	羽田ILSとの重複部分で1300ft以下		羽田付近で4000ft以上	
	評価	羽田D滑走路出発機からの排出量がより少ない(777-300出発一回あたり約0.9トンの差)という点で、DケースよりHケースが優れている			
	騒音	WECPNL65コンター陸域増加があるが、70WECPNLでは東京港付近を除きほとんどない		騒音コンター陸域増加はほとんどない	
評価	陸域騒音コンターに若干増加があるDケースより、ほとんどないHケースが優れている				

5. おわりに

本研究では、空港・空域計画において、既設の滑走路や飛行経路との競合性と、騒音による環境影響といった2点の制約を考慮して、客観的・網羅的な新滑走路整備の可能性分析の方法論を提案し、その分析結果から、従来曖昧であった羽田近郊の東京湾内における新規滑走路配置の可能性について明らかにし、具体的な配置可能例を対象に、運用上の制約等と騒音・CO2による環境影響について比較評価を行った。

今回の分析により、羽田からの離陸初期段階で比較的低高度での水平飛行制限をつけるなどの条件が必要であるものの、海ほたるから木更津沖周辺にD滑走路と平行な新滑走路を配置するか、もしくは、都心からやや距離があるものの、観音崎付近にA、C滑走路とほぼ平行な新滑走路を配置することが可能であることが明らかとなり、陸域通過最低高度は羽田再拡張後と同じかそれ以上の設定が可能であることも分かった。

また、両配置ケースの比較評価の結果、都心との近接性ではDケースが優れており、その他の評価ではHケースの方が優れていることが分かった。しかしながら、今回は空域条件、特に飛行方式設定を中心に検討を行っているため、制限表面（進入表面や水平表面等）の検証、特に東京・千葉・神奈川といった東京湾沿岸域での騒音影響と騒音軽減方策（小型機の運用など）、港湾航路や海洋環境への影響、水深や海流の違いによる工法や工費の違い、木更津飛行場などの近隣飛行場への影響、また新規滑走路へのアクセス方法などについては具体的に検討していない。整備可能性の検討を進める際には、これらの事項についても具体的な考察と評価が必要となる。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局：交通政策審議会航空分科会答申，2007.
- 2) 国土交通省航空局：首都圏第3空港調査検討会，第6回調査検討会参考資料，2001.
- 3) FAA：New York/New Jersey/Philadelphia metropolitan area airspace redesign - Record of decision, 2007.
- 4) NATS：Heathrow airport runway 3 - Runway 3 study, consultation issue, 2007.
- 5) 長岡栄：ENRIの研究長期ビジョンについて，第46回飛行機シンポジウム講演集 CD-ROM，2008
- 6) 張替正敏：JAXA DREAMS研究計画について，第4.6回飛行機シンポジウム講演集 CD-ROM，2008.
- 7) Janic M. and Tosic V.：Terminal airspace capacity model, Transportation Research, Part A, Vol.16, Issue 4, pp. 253-260, 1982.
- 8) 喜多秀行，信原伸司，本間一：広域管制空域の交通容量に関するモデル分析，土木計画学研究・講演集，No. 15, pp. 603-608, 1992.

- 9) Clarke J. P. : The role of advanced air traffic management in reducing the impact of aircraft noise and enabling aviation growth, Journal of Air Transport Management, Vol.9, pp.161-165, 2003
- 10) 国土交通省航空局：飛行方式設定基準，鳳文書林出版，2008.
- 11) 国土交通省航空局：管制方式基準，鳳文書林出版，2008.
- 12) 国土交通省航空局：羽田再拡張後の飛行ルート（修正案）について，国土交通省HP，2004.
- 13) http://www.stanford.edu/~cantwell/AA283_Course_Material/GE90_Engine_Data.pdf
- 14) Baughcum, S. L., et al: Scheduled civil aircraft emission inventories for 1992: Database development and analysis, NASA Contractor Report 4700, April 1996.
- 15) 運輸政策研究機構：首都圏空港の将来像，2009
- 16) 国土交通省関東地方整備局，東京航空局：東京国際空港再拡張事業に係る環境影響評価書，2006
- 17) King D. and Waitz I. A. : Assessment of the effects of operational procedures and derated thrust on American Airlines B777 emissions from London's Heathrow and Gatwick airports, Report No. PARTNER-COE-2005-001, 2005.

補注

補注1) ILSは精密進入を行うための計器着陸装置であり，ILS進入を行う航空機はローカライザー（Localizer）電波で所定の直線的な進入経路からの水平方向の偏位を，グライドスロープ（Glide Slope）電波で所定の降下経路か

らの垂直方向（高さ）の偏位を，経路中心維持のためのガイダンス情報として得ることができる。

補注2) RNAV (Area navigation:広域航法) とは，従来の無線局準拠型の航法装置や自蔵航法装置に機上コンピューターを組み合わせることにより，無線局を直線的にたどる従来の経路以外に，より柔軟に希望する飛行経路での航空機運航を可能とする航法。

補注3) 一次区域 (Primary area) とは，ノミナル飛行経路を中心に，原則として両側対称的に設けられる区域であり，その中では必要障害物間隔がフルに設定される。二次区域 (Secondary area) とは一次区域の両側に設けられる区域であり，その中では遞減形式の障害物間隔が設定される。

補注4) LDA (Localizer Directional Aid) 進入とは，通常ILSで用いられるローカライザー施設のみを滑走路から離れた場所に設置し，滑走路延長線以外の直線進入経路における水平ガイダンスとして使用する進入方式で，再拡張後の羽田においてBおよびD滑走路への進入（南風好天時）に使用することが計画されている。

補注5) 高度制限無しの場合に上昇開始から 3000ft までに消費する燃料を計算すると 457 kg/機となったが，これを既往研究¹⁷⁾による消費燃料実測値（777-300，離陸後 100ft から 3000ft まで制限無しに上昇）と比較するとほぼ一致しており，計算手法は概ね妥当であると判断される。

空域からみた東京湾内新規独立滑走路整備の可能性に関する検討*

清水吾妻**・平田輝満***・屋井鉄雄****

将来首都圏空港容量が不足する可能性に備えた長期的な視点での検討として，東京湾内において再拡張後の羽田と独立に運用することができる新滑走路整備の可能性について，羽田再拡張後の飛行経路および環境制約を前提に飛行方式設定を中心とした技術的な検討を行った。その結果，羽田からの離陸初期段階で比較的低高度での水平飛行などの条件が必要ではあるものの，海ほたるから木更津沖周辺でD滑走路と平行な新滑走路か，または，都心からやや距離があるものの，観音崎付近でA,C滑走路とほぼ平行な独立新滑走路を配置することが可能であることが分かった。更に可能配置例の必要航法精度や既存経路と環境への影響等について比較評価を行った。

Feasibility Study on New Independent Runway in Tokyo Bay Using Instrument Flight Procedures Criteria *

By Azumanosuke SHIMIZU**・Terumitsu HIRATA***・Tetsuo YAI****

In preparation for a possible lack of airport capacity in Tokyo metropolitan area after the completion of the re-expansion of Haneda airport in 2010, it is regarded significant to obtain an insight about the feasibility of a new independent runway in Tokyo bay. This paper describes the extraction of feasible runway areas and runway directions using instrument flight procedures criteria, subject to the independency of operation from Haneda and to the minimum altitude assumed in consideration for aircraft noise to the land. It shows the existence and characteristics of the feasible cases.
