

我が国からの国際線出発機と 上空通過機のコンフリクト分析

木下 隼斗¹・平田 輝満²

¹学生非会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科人間環境システム専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:kinoshita.h.ad@m.titech.ac.jp

²正会員 茨城大学 工学部都市システム工学科
(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

E-mail:hirata-t@mx.ibaraki.ac.jp

アジア地域の急激な経済成長を背景に、国際航空旅客輸送量は今後も増加することが予想されている。特に、アジア地域から北米方面に向かう航空機は日本上空を通過していくため、日本を離陸した国際線は本来の希望高度を上空通過機によって先取されてしまっている可能性がある。本研究の目的は、現在および将来の太平洋上空域における、日本発機と上空通過機とのコンフリクト状況を明らかにすることである。実際の運航状況に沿ったデータを用いてコンフリクト分析のためのモンテカルロシミュレーションを開発することにより、将来想定される様々なケースにおけるコンフリクト状況と、それに伴う燃料消費量やCO₂排出量について検証した。さらに、滑走路容量を考える際の空域容量の重要性についても言及し、上空通過機とのコンフリクトが、地上の容量にどのような影響を与えるのかについても伏せて検証した。

Key Words : air traffic control, oceanic airspace operation, conflict, optimal flight level, delay

1. はじめに

近年、アジア地域の急激な経済成長などを背景に、世界の航空旅客輸送量は年々増加している。特に、ICAO（国際民間航空機関）の国際航空旅客輸送量予測によると、アジア太平洋横断路線においては、2005年の9670億人キロから、2025年には2兆9800億人キロまで成長するとされている¹⁾。さらに、日本が担当する太平洋上管制区では、日本と北米、ハワイ、南太平洋の国々を結ぶ路線以外にも、我が国上空を通過し東南・東アジア各国と北米、ハワイ、南太平洋間を航行する航空機（以下、上空通過機）が数多く飛行しているため、航空旅客輸送量の増加に伴い上空通過機数も増加することが見込まれている²⁾。運航者は、通常その日の運航機材や気象予報、経済性、乗客のサービスレベル等様々な情報から飛行ルート上の巡航最適高度を設定している。しかし、日本を離陸する航空機（以下、日本発機）は地理的制約上、上空通過機によって最適高度を先取されてしまっている可能性があり、今後上空通過機数が増加していくにつれ、その頻度は増していくことが考えられる（以下、上空通過機問題）。上空での航空機間間隔はあらかじめ決められているため、仮に航空機間間隔が保てない（以下、コ

ンフリクト）と判断された場合は、希望高度以外の高度帯への変更、もしくは出発遅延を要求される場合もある。希望高度での飛行が実現できない場合、燃費悪化はもちろん、燃料消費に伴うCO₂の排出量も増加する。また、最適高度取得のため出発遅延が要求された場合、過度な燃料消費は避けられるものの、定時性が守られないことになる。現在首都圏空港のさらなる容量拡大が検討されているが、地上滑走路容量を増やしても上記のような洋上空域の容量制約により出発機の処理機数が思うように拡大できない可能性もある。

また、航空旅客輸送量の増加に伴う環境問題については世界的に関心が高まっており、ICAOの総会では、航空部門による排出量に関する市場ベース対策（MBM）制度を検討している。このような制度の中で上記のような地理的要因も考慮すべきか今後検討が必要であると考ええる。

以上より本研究では、前述した背景を踏まえた基礎的研究として、上空通過機と日本発機の飛行データを収集し、未だ明らかにされていない上空通過機と日本発機の飛行高度差異やばらつき等の実態を調査する。さらに、それらのデータや時刻表を基にモンテカルロ・シミュレーションから、現状においてコンフリクトがどの程度発

生しているのかを明らかにする。最終的には、使用機材や交通量の変更等を行い、今後、コンフリクト状況の悪化に伴って起こり得る問題点を提起する。

2. 既存研究の整理

平林ら²⁾は、CPDLCメッセージを分析することにより、パイロットからの高度変更リクエストにどの程度応じられているかを明らかにしているが、上空通過機問題には直接触れていない。また住谷ら³⁾は、NOPACルートでの到着間隔分布について調査しているが、エンルートでの調査は行っておらず、コンフリクトや上空通過機問題にも言及していない。Jennifer L. Murdoch ら⁴⁾は、新たな管制方式基準（ITP）の実行可能性について研究を行っているが、高度取得率向上策の検討が主な目的であり、上空通過機問題についての研究は行っていない。

3. 日本における航空管制の実態調査

航空機は、日本と世界を結ぶ主要公共交通機関として、国内、国外の空港間を毎日複雑に入り乱れて飛行している。日本における空港取扱い機数は、1992年に約160万機であったものが2012年には約290万機まで増加しており⁵⁾、観光やビジネスの重要な移動手段として今後も増加することが予想される。音速に近い速度で飛行する航空機をパイロットのみで操縦することは現実的に不可能であり、実際には、航空管制官がレーダーなどで航空機の位置を把握し、方向やスピード、高度などを指示しながら航空機を誘導することで安全運航を実現している。

(1) 日本における航空管制の実態

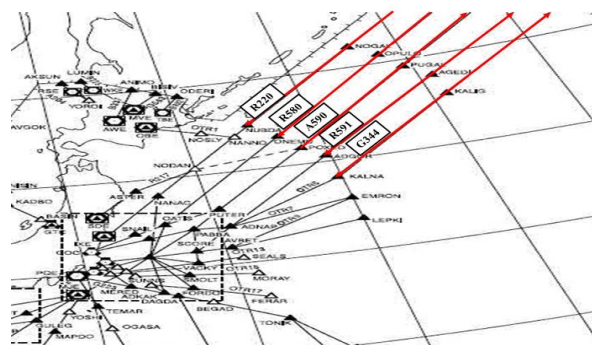
世界の空は、ICAOによって設定された航空管制や搜索救難を担当するいくつもの空域に分けられており、この空域のことをFIRと呼ぶ。FIRは領空及び公海上空を含んだ空域で領空主権よりも航空交通の円滑で安全な流れを考慮して設定されており、その名称には国名だけでなく飛行情報業務を担当するセンターの名称がつけられている。

日本が担当する空域は福岡FIRと名称がつけられており、領土に比べて非常に広大な空域が設定されているのが特徴的である（図－1）。

福岡FIRはさらに5つの空域に分けられており、それぞれ札幌航空交通管制部、東京航空交通管制部、福岡航空交通管制部、那覇航空交通管制部、そして航空交通管理センターに分担されている。札幌、東京、福岡および那



図－1.福岡FIR⁵⁾



図－2.NOPAC経路

覇航空交通管制部ではそれぞれ管轄する空域において航空路監視レーダーを用いた管制業務を行っている。一方、監視レーダー覆域外の洋上管制区については、航空交通管理センターが担当することになっている。

各航空交通管制部の所轄空域は、さらにセクターと呼ばれる空域に細分化されている。通常1つのセクターにつき2人の管制官が配置され、レーダー管制席、レーダー調整席に分かれて管制業務を行う。繁忙時間帯等にはマルチ支援席も使用する。

(2) 洋上経路について

日本から北米に向けて洋上を飛行する航空機は、主に固定経路であるNOPAC経路や、「日」単位でその日の気象データおよび運航効率等を考慮して複雑に設定される可変経路であるPACOTSおよびUPRを使用している。最近では、より効率的な飛行を可能にするDARPといった方式も試験的に実施されている。

a) NOPAC経路

図－2に日本付近のNOPAC経路を示す。これらは5本の固定経路で構成されており、北からR220、R580、A590、R591、G344と呼ばれる名前が付けられている。この内、北から2本（R220、R580）は西行き専用の経路となっており、A590から南の3本（A590、R591、G344）は東行きの経路として用いられる。ただし、R591とG344に関しては両方向で利用することもできる。

b) PACOTS経路

PACOTSと呼ばれる可変経路はNOPAC経路の南側に設定され、その日の気象状況（主に偏西風の影響）を勘定

して都市間毎に最も効率の良い経路となるように毎日設定・公示される。

c) UPR経路

PACOTSは24時間先の気象予報を基に設定されるため、実際に飛行する時点で最適な経路であるとは限らない。そこで導入されたのがUPR方式とよばれる洋上可変経路である。UPR方式では、運航者がPACOTS等の経路に束縛されることなく、出発時点での離陸重量や気象状況、使用機材等に応じた燃料効率を最大限に高める最適な経路を個別に選択することができる。2008年8月から日本ーハワイ間で試行運用されている。

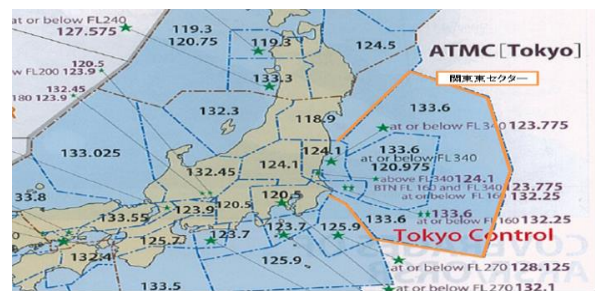
d) DARP経路

DARP方式とは、飛行中により効率的な経路への変更を管制官に要求できる方式のことである。UPR方式では出発時点で飛行経路を決定するため、出発時点と飛行中では気象条件が異なることもあり必ずしも最適経路であるとは言えなかった。DARP方式ではリアルタイムの気象状況を基にした経路選択が可能のため、より効率的な飛行が可能となる。2012年4月から日本ーハワイ間で試行運用されている。

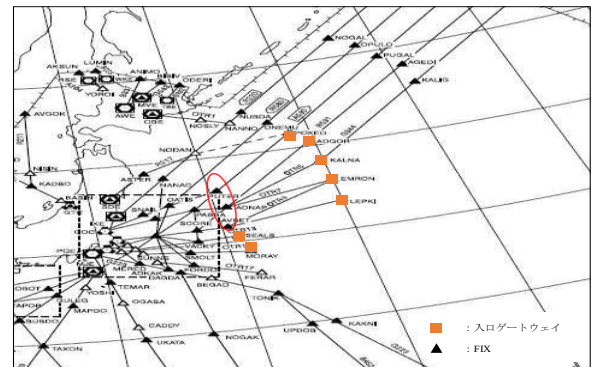
(3) 関東東セクターにおける航空管制の実態調査

東京航空交通管制部が担当するセクターは全部で22あり、他の航空交通管制部と比べて最も交通量が多い。2012年実績の取り扱い機数は約121万機であり、1日平均では約33000機となる。東京航空交通管制部の所轄空域は大きく、北地域、西地域、東地域に分けられている。関東東セクターは、北地域7セクターの中の1つであり（図－3）、この空域は、成田を離陸した航空機のみならず、仁川や北京、上海、シンガポール等、アジア圏内から北米方面に向かう航空機の通過空域となっている。

関東東セクターでは、セクター内を飛行する航空機の管制業務だけでなく、出発機に対する高度取得について決定する業務も行っている。関東東セクターを担当する管制官は、上空通過機と成田を離陸した航空機とのバッティングを避けるため、上空通過機が関東東セクターに進入する際の時刻や高度をフライトプラン等から予想し、成田を離陸する航空機の出発時間調整や高度指示を行う。したがって、仮に希望高度での飛行が不可能と判断された場合は、飛行高度の変更、もしくは出発遅延を要求されることもある。一旦関東東セクターで飛行高度分布が形成されてしまうと、再び上昇できるタイミングが訪れるまで洋上空域もその高度分布を維持したまま飛行することになるため、希望高度以外を飛行することによる損失は多大である。従って、関東東セクターは上空通過機問題を解決する重要な航空交通流管理を行っているセクターである。



図－3. 関東東セクター⑥



図－4. 入口ゲートウェイとFIX

(4) 本研究対象の空域

洋上空域には、NOPACやPACOTSといった洋上経路の入口にあたるポイント（以下、入口ゲートウェイ）が存在し、洋上経路を飛行する航空機は必ず入口ゲートウェイを通過することになる。さらにその手前にも通過ポイント（以下、FIX）がいくつか設定されており、関東東セクター内にも多くのFIXが存在する（図－4）。関東東セクターを担当する管制官は、飛行中、もしくは離陸前の航空機がFIXを通過する予定時刻を基に高度割り当てや出発遅延等を行っており、中でもPUTER、ADNAP、AVBETは洋上経路へ向かう航空機が頻繁に通過するFIXである。

本研究では、PUTER、ADNAP、AVBET付近3地点をコンフリクトポイント（CP）として設定し、CP通過時の高度を用いて実態分析およびコンフリクト分析を行う。

4. 上空通過機問題の実態分析

(1) 実態分析の概要

近年、航空交通量増加に伴って上空通過機数も増加しており、上空通過機問題は見過ごすことのできない問題となっている、もしくは将来的に問題となる可能性がある。そもそも上空通過機問題とは、日本発機が計画していた飛行高度を上空通過機によって先取されてしまう問題のことを指し、希望高度での飛行が許可されない場合は、希望高度よりも低い高度をリクエストし直すか、希望高度を取得できる時刻まで出発遅延を行う必要がある。

そこで本章では、上空通過機と日本発機の飛行高度差異を検証し、未だ明らかにされていない上空通過機問題の実態を把握することを目的とする。

(2) 使用データの説明

a) 航空便軌跡データについて

航空機の運航状況を把握するツールとして「航空便軌跡データ（以下、Flight Aware）」がある。これは、アメリカに拠点を置く会社が提供している「航空交通情報を網羅した航空機追跡サービス」のことであり、世界中のリスナーが受信したADS-Bデータ（航空機自身がGPS情報等を基にした位置情報等を周囲に発信しているデータ）を集計して一般公開しており誰でも無料で閲覧することができる。航空機の機体番号、または航空会社名および航空便番号を入力し検索をかけると、その便の離着陸空港や出発、到着時刻、さらには飛行ルートといった情報を、過去4か月まで遡って無料で閲覧することができる（図－5）。データの表示方法は、ADS-Bデータを受信できる範囲ではADS-Bデータを基に、それ以外では各都市の管制センターから得た情報を基に画面上に反映させている。ただしADS-Bデータを受信できる範囲ではADS-B搭載機のみ表示されるため、入手できるデータは国際線の場合8割程度の機数分である。

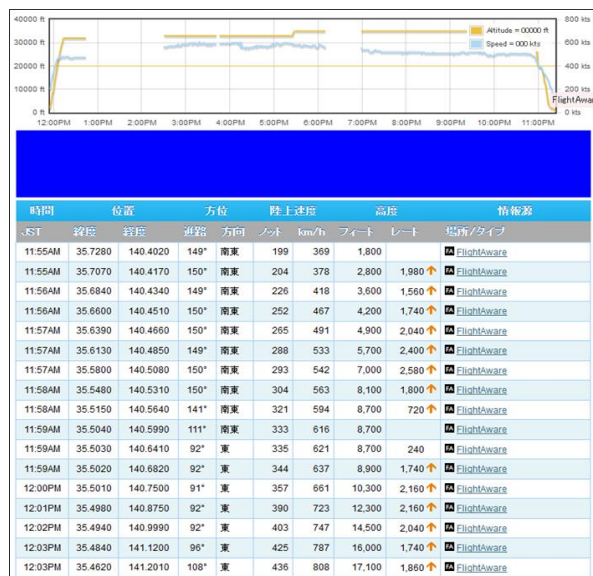
b) 仮想二次監視レーダーの説明

仮想二次監視レーダー（以下、SBS-3）とは、イギリスのKinetic社が開発、製造している受信機であり（図－6）、航空機が発信している1090MHzのSSR（二次監視レーダー）信号（Mode-S・ADS-B・ADS-R・TIS-B）を受信解析し、航空機の様々な情報を画面上に表示することができる。

c) 仮想二次監視レーダーを用いた航空便軌跡データの検証

Flight Awareには、離陸から着陸までの機体情報が全てデータログとして保存されており、かつ世界中の航空便軌跡データを過去4か月まで遡って収集することができる。従って、研究を行う際に用いるツールとしては非常に有用性がある。よって、SBS-3を用いて自ら収集したデータとFlight Awareを用いて収集したデータの照合を行い、Flight Awareに表示される情報の信頼性を検証する。

さらにFlight Awareの信頼性を確かめるため、SBS-3とFlight Awareで収集した高度データを用いてF検定およびt検定を行った。分析結果を表－1に示す。サンプリングレートの差があるので多少の誤差はあるが、分析を行った結果、分散、平均ともに有意な差は認められなかった。よって、SBS-3とFlight Awareの高度データに差はないといえるため、本研究においてFlight Awareを用いることは妥当であるとする。



図－5. Flight Aware⁷⁾



図－6. SBS-3

表－1. データ検証結果

	SBS-3	Flight Aware
観測数	51	51
平均値(ft)	32327.94	32345.10
分散	7096666	7217325
F値	0.9832811	
t値	-0.03238490	

表－2. 分析結果

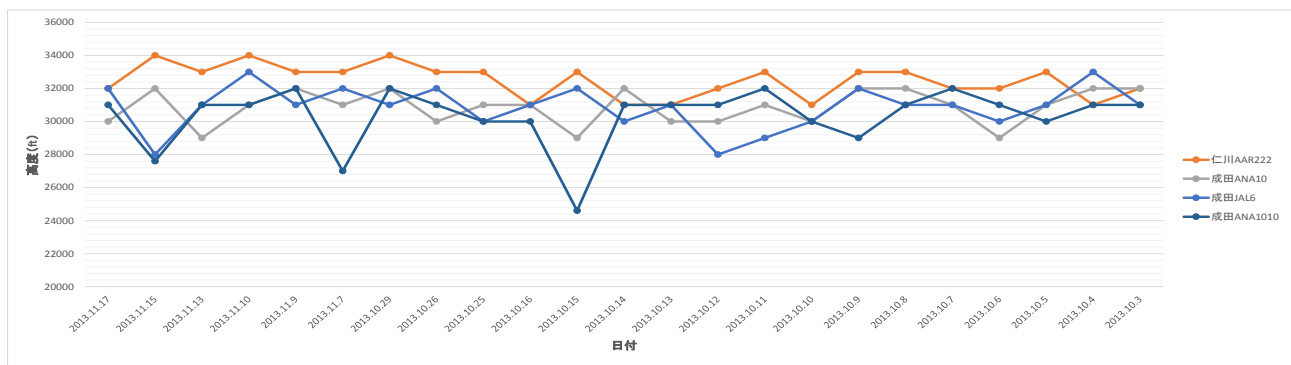
JFK行き	AAR222	ANA10	ANA1010	JAL6
機種	B777-300ER	B777-300ER	B777-300ER	B777-300ER
離陸空港	仁川	成田	成田	成田
観測日数	23	23	23	23
平均高度(ft)	32478	30870	30573	30870
分散	988142.3	1118577	1692554	1754940
F値	0.88	0.88	0.58	0.56
t値		5.3*	5.5*	4.7*

(*: 1%有意)

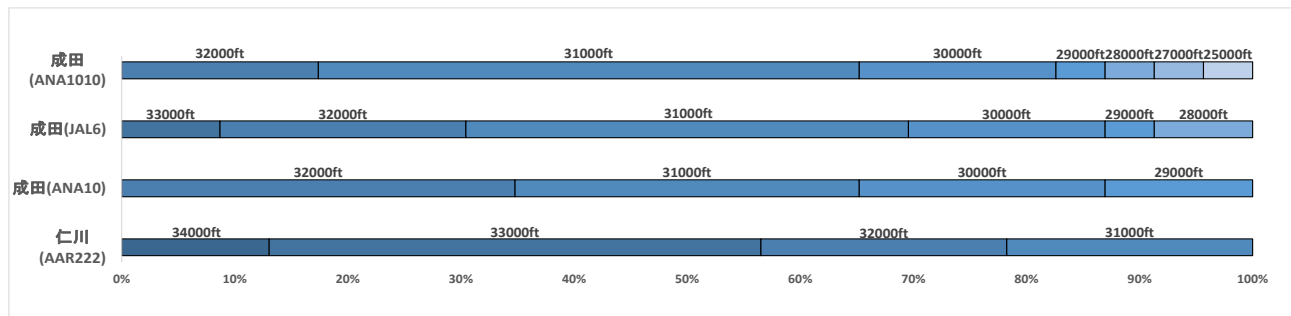
(3) 同方向・同機材の分析

航空機の重量や飛行性能によって最適飛行高度は変化するため、日本発機と上空通過機の飛行高度差異を純粋に検証するためには、使用機材や行き先（飛行距離に応じて搭載燃料重量が変化）の影響をコントロールする必要がある。従って離着陸空港を予め設定した上で、到着空港が同じ、かつ使用機材も同じ上空通過機と日本発機の飛行高度について分析を行う。

ジョン・F・ケネディ国際空港行きの便について高度分析を行った結果を表－2に示す。使用機材は全てボーイング777型機であり、対象とできた便数は、上空通過



図－7.各便における全観測日の飛行高度



図－8.各便の飛行高度帯割合

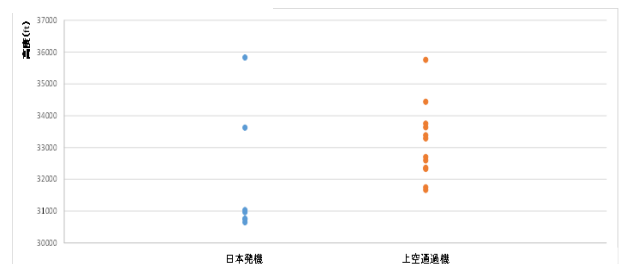
機、日本発機合わせて4機である（AAR222便のみ上空通過機）。

平均高度をそれぞれ算出した結果、上空通過機であるAAR222は約32000ft、日本発機は約31000ftを飛行しており、日本発機が上空通過機よりも低高度を飛行していることが分かる。また分散については、上空通過機よりも日本発機の方が大きい値となっている。F検定を行った結果、上空通過機と日本発機の分散については有意な差が認められなかったが、t検定を行った結果、高度平均1%有意の差を認めることができた。目的地、使用機材が同じであれば同じ地点での希望高度も同じになるはずであるため、対象とした地点では日本発機の方が上空通過機よりも低高度を飛行していることになる。

全観測日における日本発機と上空通過機の飛行高度を表したグラフを図－7に示す。さらに各便が飛行していた高度帯の割合を表したグラフを図－8に示す。

図－7を見てみると、ほとんどの日で上空通過機が最も高高度を飛行していることが分かる。さらに日本発機は上空通過機に比べ飛行高度のばらつきが大きく、毎日同じ高度帯を飛行できていない。従って日本発機は、上空通過機とのコンフリクトを回避するため、管制官からの高度指示を受けて計画していた飛行高度を変更していた可能性が高い。

次に図－8を見てみると、上空通過機と日本発機の使用高度帯が明らかに異なっていることが分かる。上空通過機は全ての日において31000ft以上を飛行しており、33000ft以上を飛行した日だけでも全体の半分以上を占め



図－9.平均飛行高度分布比較

る。対して日本発機の3機は、33000ft以上の高度帯はほとんど飛行しておらず、逆に低高度帯を飛行していた日が目立つ。日本発機のグラフはどの機も概ね同じような傾向を示しており、CPにおける上空通過機と日本発機の使用高度帯が異なっていることが示唆される。

(4) 同時時間帯の分析

同方向・同機材の実態調査に加え、同時時間帯での実態調査を行う。同方向・同機材の分析の際は、各々の航空機が飛行していた時間帯が同じではないため、周囲の混雑度の違いによって飛行高度に違いが出ていた可能性もある。従って、同時時間帯にCPを通過する航空機の飛行高度を分析することによって、周囲の混雑具合が飛行高度に与える影響をほぼ無視することができる。高度データを収集した便は、午前11時から午後1時の間にCPを通過する便であり、日本発機が7便、上空通過機が12便である。ただし、使用している機材および方面は統一していない。各便の平均高度を上空通過機と日本発機に分けてグラフに表わしたものを図－9に示す。グラフをみて

みると、明らかに日本発機の高度分布が上空通過機に比べ低く、ほとんどの日本発機が32000ft以下を飛行していることが分かった。なお、日本発機の高度分布の中で2機（JAL8とCAL5148）のみ比較的高高度を飛行している便が確認できるが、JAL8は使用機種がB787-8と最新機種を使用しており、機種の特性が高高度を飛行する要因になったと考えられる。また、CAL5148については離陸空港が関西国際空港であったため、関東東セクターに入る前に十分高度を上げることができたものと思われる。

5. モンテカルロ・シミュレーションを用いたコンフリクト分析

(1) シミュレーション開発と分析方法

シミュレーション開発とコンフリクト分析の手順を図-10に示す。今回開発したシミュレーションでは、関東東セクターを担当する管制官が行う高度指示や出発遅延を再現し、発生するコンフリクト回数や、変更後の高度および遅延時間を算出することができる。シミュレーション内の変数である、各航空機の出発空港からCPまでの所要時間、通過CP緯度、飛行高度は全て乱数として出力され、これら3つの情報を高度調整、出発時刻調整アルゴリズムに組み込むことで、関東東セクター内で行われる高度調整や出発遅延を再現する。

各シナリオにおいて100回のシミュレーション結果を平均してコンフリクト状況を分析する。コンフリクトか否かは、仮に離陸した場合上空のCPで前後間隔が15分以上を満たすことができるかにより判断を行い（図-11）、満たせないと判断された場合は希望高度の変更、もしくは出発遅延でコンフリクトを回避する。日本発機についてはCP到着時刻が早いものから順次コンフリクトを計算し承認していくものとする。例えば高度変更でコンフリクトを回避する場合、仮に上空通過機および先行して飛行している日本発機との縦間隔が確保できないと判断された際は、当初の希望高度-1000ftの高度を再度リクエストし直し、新たな高度帯でもう一度コンフリクトを判断していくアルゴリズムとなっている。

a) 出発ダイヤの設定

コンフリクト分析をするにあたって、本シミュレーションでは予め離着陸空港を設定している。出発空港は、アジア域内の主要空港である成田、羽田、関空、仁川、台湾、香港、上海、広州、北京の計9空港を選定。また到着空港は、アンカレッジ、アトランタ、ボストン、ワシントン、JFK、シカゴオヘア、ロサンゼルス、トロント、ダラス、バンクーバー、サンフランシスコ、カルガリー、サンノゼ、サンディエゴの計14空港を選定してい

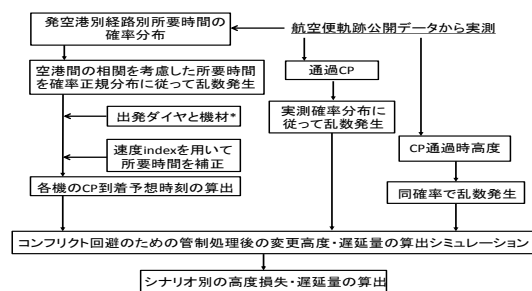


図-10.コンフリクト分析フロー図

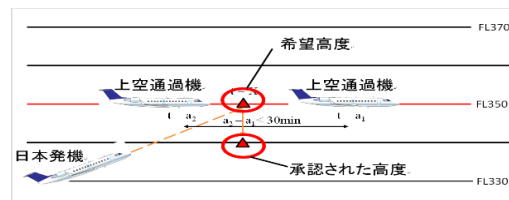


図-11.コンフリクト回避の例（高度変更で対処する場合。上空通過機間へ投入不可と判断された場合別の高度帯に変更）

	ICN	TPE	HKG	PVG	PEK	CAN	NRT	HND	KIX
平均	1.765432	2.767901	3.683333	2.244444	2.764198	3.67284	0.600725	0.600725	1.236232
標準偏差	0.072343	0.158176	0.1223	0.098384	0.089	0.121963	0.00197	0.00197	0.002587
独立発生(平均0, 標準偏差1)									
	0.135125	0.657612	0.413841	-0.38103	0.601665	-0.60575	-0.72561	-0.68443	0.331832
相関発生(平均0, 標準偏差1)									
	0.135125	0.671485	0.758894	0.406944	0.615583	0.284838	-0.70972	0.369167	2.108404
相関発生									
	1.775207	2.874114	3.776146	2.284481	2.818984	3.707579	0.599327	0.601452	1.241686

図-12. 相関を考慮した所要時間乱数を発生させるまでの過程

表-3. 各空港からCPまでの所要時間

出発空港	仁川	台湾	香港	上海	北京	広州	成田	羽田	関空
収集対象機名	AAR202	CAL5254	CPA806	UAL888	UAL888	CSN329	ANA10	ANA10	CAL5148
目的地	ロサンゼルス	アンカレッジ	シカゴオヘア	サンフランシスコ	サンフランシスコ	バンクーバー	JFK	JFK	アンカレッジ
使用機材	B747-400	B747-400	B777-300	B747-400	B747-400	B777-300	B777-300	B777-300	B747-400
サンプル数	27	27	27	27	27	27	23	23	23
平均所要時間(h)	1.765432099	2.767901235	3.683333333	2.244444444	2.764197531	3.672839506	0.600724638	0.600724638	1.236231884
標準偏差	0.072342857	0.158176435	0.122399898	0.098384385	0.089000108	0.121962947	0.001969516	0.001969516	0.002586978

表-4. 各空港からCPまでの所要時間相関係数

空港からCPまでの所要時間相関	仁川国際空港	台湾桃園国際空港	香港国際空港	上海浦東国際空港	北京首都国際空港	広州白雲国際空港
仁川国際空港	1					
台湾桃園国際空港	0.190073857	1				
香港国際空港	0.368829742	0.746125052	1			
上海浦東国際空港	0.589823294	0.713070363	0.808891479	1		
北京首都国際空港	0.60849142	0.422180334	0.340594003	0.515709866	1	
広州白雲国際空港	0.578487618	0.778896882	0.71052902	0.80875191	0.623504553	1

る。各空港の出発ダイヤはOAG時刻表を基本に設定し、実際には運行されているにもかかわらずOAG時刻表に記載されていない便のデータがあった場合は、各空港のホームページからデータを取得し、適宜OAG時刻表データに組み込んでいます。

b) 所要時間の設定

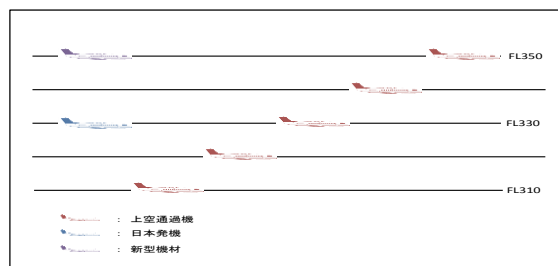
編集を終えたOAG時刻表上の出発時刻にCPまでの所要時間を乱数として加えることで、各航空機がCPに到着する時刻を算出する。経路別の所要時間は前章で活用した実測データから出発空港別に確率分布を求めた。ここで、近接空港間ほど経路特性（気象状況や混雑状況等）が共通することが考えられ、実際の観測においても有意な相関が見られたため、それら相関が見られた、仁川、台湾、香港、上海、北京、広州を出発空港とする上空通過機がCPまで要した時間については、観測された相関を有する正規乱数として各所要時間を算出して（図-12、表-3、4）。

c) CP通過時の飛行高度設定

CP通過時の飛行高度について示したものを図－13に示す。CP通過時に飛行する高度は、実態調査の結果等を踏まえた上で、上空通過機については35000ft（FL350）から31000ft（FL310）を1000ftおきに同確率で飛行するものとしてOAG時刻表上に飛行高度を乱数として出力させる。一方日本発機については、毎回33000ft（FL330）を飛行計画上の希望高度としてリクエストしていると仮定する。ただし、新型の機材（B787）の場合は離陸直後の上昇能力が高いため、観測データを参考に、上空通過機および日本発機ともに常に35000ft（FL350）を希望高度として設定しOAG時刻表上に出力させている。

d) タキシング時間の設定

タキシング時間は、混雑している空港では長く、逆に空いている空港では短くなる傾向がある。従って、OAGの出発時刻とFlightAware上の離陸時刻から各空港におけるタキシング時間（ここでは、スポットアウトから離陸の時間を指す）を収集し、所要時間同様正規分布に従うと仮定し、平均、標準偏差を考慮した乱数で発生させる。ただし、タキシング時間については互いの空港間における相関は考慮しないものとする。



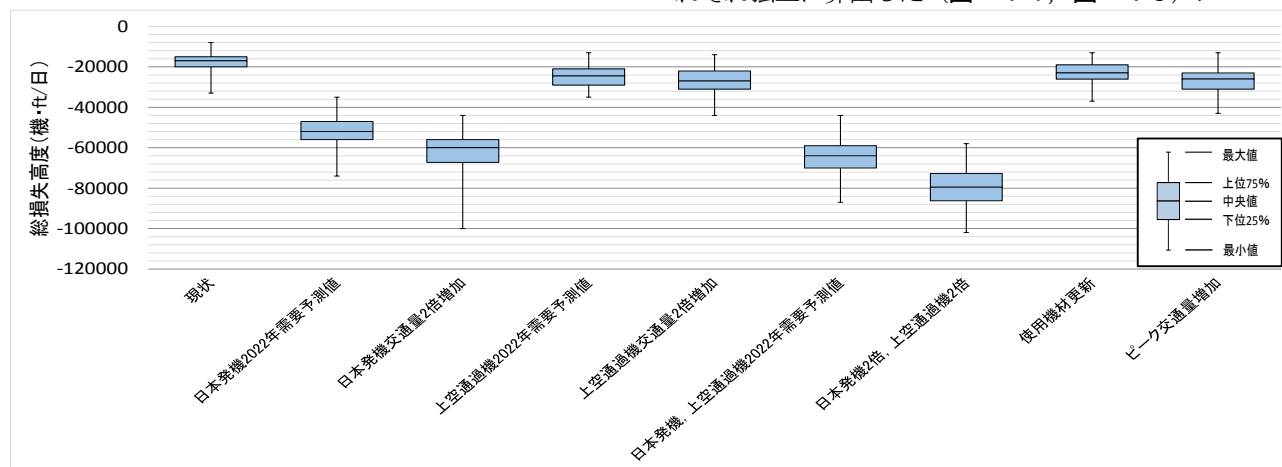
図－13. CP通過時の飛行高度概略図

e) 通過CP緯度の設定

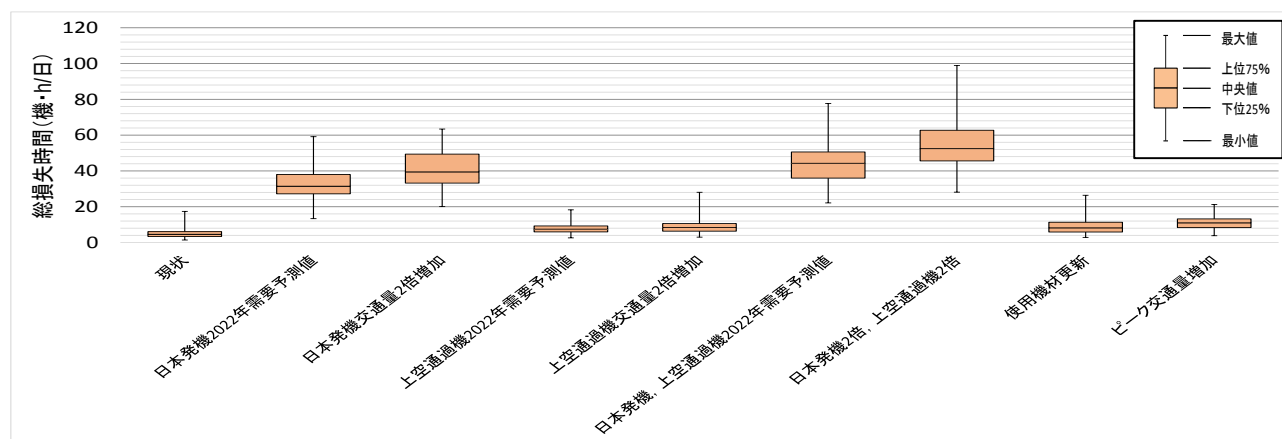
シミュレーション対象空域に設定しているCPは、北緯36度から38度まで1度刻みで分布している。仮にCP通過予想時刻が同じでかつ飛行高度が同じであっても、CPの緯度が異なっていればコンフリクトとはみなさないため、通過CP緯度の設定は非常に重要である。通過するCPの緯度は主に到着空港の位置によって決まるため、通過CP緯度の割合を到着空港毎に考慮した上で、OAG時刻表上に乱数として出力させている。

(2) 上空通過機の需要増の影響

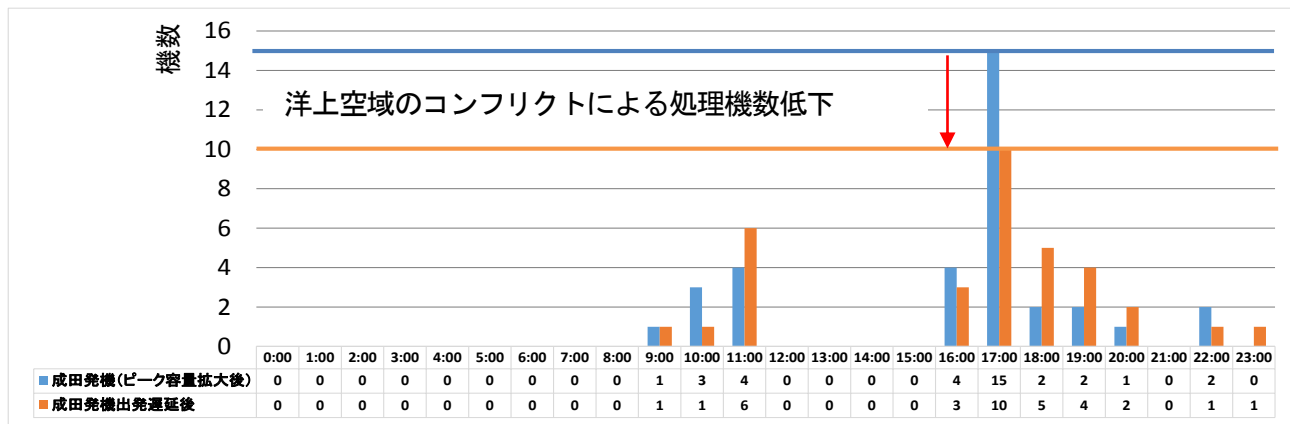
シミュレーションを用いてコンフリクト分析を行い、得られた結果から予め設定した各シナリオにおける日本発機の総損失高度（機・ft）と総損失時間（機・h）をそれぞれ独立に算出した（図－14、図－15）。



図－14. 各シナリオにおける総損失高度



図－15. 各シナリオにおける総損失時間



図ー1 6.コンフリクトによる処理機数低下の例

つまり、コンフリクト回避の方法として高度変更のみ（総損失高度を計算）、もしくは出発遅延のみ（総損失時間を計算）の2種類を仮定してシミュレーションを実施した。実際はエアラインごとのリクエストや管制官の判断により両者の組み合わせとなっているが、本研究ではまず簡易な方法としてどちらか一方のみのコンフリクト回避手法を実施することを仮定した。それぞれ、本来希望する高度、離陸時刻からの差異を示す指標であり、各シナリオにおいてどの程度コンフリクトの影響を受けていたのかをみることができる。上空通過機交通量を現状の2倍に増加させた場合、現在比で総損失高度は1.6倍増加することが確認された。これは一機あたりに換算すると、本来の希望高度よりも660ft下を飛行している計算となり、この損失高度が太平洋上空域で継続する可能性も考慮すると大きな問題であると考えられる。また、総損失時間については、現在比で1.8倍増加することが確認された。同様に一機あたりに換算すると、平均12分の遅延が発生している計算となり、定刻を重要視する航空会社にとっても大きな遅延であることが伺える。

次に、交通量は変化させることなく日本発機の使用機材を新型機材に更新した場合、現在比で総損失高度は1.5倍、総損失時間は1.8倍増加した。新型機材の場合、上昇能力が高いため初期の飛行高度が従来の機材と比べ高くなる傾向がある。したがって、上空通過機とのコンフリクトを起こす可能性のある高度帯が増えたことにより、総損失高度および総損失時間が増加したと考えられる。なお、ここで紹介した各シナリオと現状の損失量についてはTukeyの多重比較による平均値の差の検定を行い統計的に有意な差があることを確かめている。

(3) 日本発機の需要増の影響と成田の時間容量拡大に対する洋上空域容量制約の影響

日本発機交通量を現状の2倍に増加させた場合、現在比で総損失高度は3.5倍、総損失時間は8.7倍増加するこ

表ー5.移動前後の出発時刻

便名	現在の時刻表上出発時刻	移動後の出発時刻
UA804	16:20	17:20
AC2	16:20	17:20
DL172	15:10	17:10
DL284	15:25	17:25
DL208	15:55	16:55
DL296	15:55	16:55
AC4	17:50	16:50
UA33	18:00	17:00
UA882	18:05	17:05
JL18	18:05	17:05
UA852	18:10	17:10

とが確認されている。ここで、日本発機については単一の希望高度を仮定しているため、前節の上空通過機の需要増の影響より過敏な反応を示している。この結果から、日本出発機の増加によって、特に遅延時間が急激に長くなることが分かり、今後の空港容量（滑走路容量）拡大を考える際に問題となる可能性がある。従って本節では、シミュレーションを行うにあたって想定した、成田国際空港における出発ピーク時間帯容量の拡大について、出発遅延の観点からさらに考察を進める。このケースにおいてはピーク時間帯周辺に離陸する航空機離陸時刻をピーク時間方向にずらすことで、仮に成田国際空港の容量が拡大した場合、要望が多い時間帯に離陸機が集中した場合を想定している。人気時間帯を17時と仮定し、成田国際空港における1日の発着枠配分状況参考にした上で、17時周辺の時間帯に離陸する航空機の離陸時刻を表ー5に倣って移動させる。

上空通過機とのコンフリクトをすべて出発遅延のみで回避した場合、上空通過機とのコンフリクトと判断された場合は当然離陸時刻を遅らせる必要がある。成田国際空港の容量を拡大したケースにおいてシミュレーションを用いて遅延時間を算出し、遅延時間考慮した上でもう一度出発機数を時間軸に沿って表したものを図ー1 6に示す。

グラフを見てみると、滑走路容量増加により本来の希

望出発時刻で離陸できるようになる、つまりピーク時間帯により集中していた出発機数が、洋上空域の容量制約による出発遅延の影響でそれ以降の時間帯に分散しているのがわかる。このシミュレーションでは、希望高度での飛行が不可能と判断された場合はすべて出発遅延で対処するようにプログラムされているため、現実的にはこれほど処理機数が低下することはないと考える。しかしながら、空港の容量拡大を考える際には、滑走路容量だけでなく空域の容量も合わせて考える必要があることを示唆する結果であるといえる。

(4) CO₂排出量に着目した基礎的考察

日本発機は上空通過機とのコンフリクトを避けるため、高度変更もしくは出発遅延によってコンフリクトを回避している。特に高度変更をリクエストした際、北米路線の場合は長距離を飛行することになるため、仮に途中希望高度に上昇するタイミングを逃してしまうと、長時間にわたって希望高度以外の高度帯を飛行することになる。

運航者は、経済性も加味した上で巡航高度を設定しているため、希望高度での飛行が実現できない場合は、燃料消費の増加やそれに伴うCO₂排出量の増加も考えられる。環境問題についてはEU-ETS等を例として世界的に関心が高まっており、経済性や効率性だけでなく、環境面からも上空通過機問題について考察する必要があると考える。

検証するシナリオは、現状交通量の場合、上空通過機交通量1.8倍の場合、2倍の場合の計3ケースとし、日本発機は表-6に示す前提条件に従って飛行するものとする。飛行高度による燃料消費量は、EUROCONTROL（欧州航空航法安全機構）のBase of Aircraft Data（BADA）を使用して算出し、出発から到着まで継続して損失高度分だけ低高度を飛ぶことを仮定した。

分析より得た各シナリオにおける総損失高度を基に総損失燃料量を算出した結果を表-7に示す。また、飛行高度別の燃料消費量からCO₂排出量を算出した結果を表-8に示す。

その結果、現状交通量の場合、総損失消費燃料中央値は36.72（機・t/日）となることがわかった。さらに上空通過機交通量を2倍まで増加させた場合、総損失消費燃料中央値は58.32（機・t/日）まで増加しており、現状の約1.6倍である。

さらに表-8をみると、結果、高度33000ftを飛行する場合、CO₂排出量は268（t-CO₂）であるのに対し、高度28000ftで飛行した場合、CO₂排出量は297（t-CO₂）に増加した。これは、高度33000ftで飛行した場合と比較して約1.1倍の値である。以上のことから、希望高度での飛行が実現できない場合は、燃料消費の増加やそれに伴う

表-6.前提条件

運航都市ペア	成田—ニューヨーク
所要時間	12時間
巡航速度	マッハ0.83
総重量	237600kg
使用機材	B777-300
希望巡航高度	33000ft

表-7.総損失消費燃料

	総損失消費燃料最小値(機・t/日)	総損失消費燃料中央値(機・t/日)	総損失消費燃料最大値(機・t/日)
現状	17.28	36.72	71.28
上空通過機交通量1.8倍増加	28.08	52.92	75.6
上空通過機交通量2倍増加	30.24	58.32	95.04

表-8.飛行高度別消費燃料のCO₂換算

	燃料消費量(kg/s)	消費燃料CO ₂ 換算(t-CO ₂)
高度33000ft	2.03	268*
高度30000ft	2.15	284*
高度28000ft	2.25	297*

*：燃料密度0.8kg/Lで計算

CO₂排出量の増加が実際に起こり得ることが明らかになり、今後環境面からも上空通過機問題を考えていく必要があることが示唆された。

6. 結論

上空通過機と日本発機の飛行高度を分析することにより、上空通過機問題の実態を分析した。また、シミュレーション結果から、希望高度を飛行できないことによる燃料消費量およびCO₂排出量の増加を定量的に示し、同時に空域容量の逼迫により、滑走路容量が計画通りに拡大できない可能性があることも示唆した。今後の課題として、希望高度の設定方法の改善、コンフリクト回避方法の精査、洋上空域全体における飛行高度変化の考慮等が挙げられる。

参考文献

- 1) ICAO, 世界の航空旅客輸送量予測, Out look for Air Transport to the year 2025, 2005
- 2) 平林博子, 洋上管制の傾向分析及び PBN 導入効果に関する考察, 電子航法研究所研究発表会講演集, pp.91-96, 2012.
- 3) 住谷美登里, 長岡栄, 天井治, 航空交通流の時間的特性に基づく到着間隔分布モデル, 電子航法研究所報告, No99,2002
- 4) Jennifer L. Murdoch, Enhanced Oceanic Operations Human-In-The-Loop In-Trail Procedure Validation Simulation Study, NASA, 2008
- 5) 日本航空機操縦士協会, Aeronautical Information Manual Japan, pp.0-5, 2011
- 6) 日本航空機操縦士協会, Aeronautical Information Manual Japan, pp.0-6, 2011
- 7) Flight Aware, <http://ja.flightaware.com>
- 8) 国土交通省交通政策審議会航空分科会第9回基本政策部会配布資料, <https://www.mlit.go.jp/common/001013530.pdf>

(???)受付

SIMULATION ANALYSIS OF CONFLICT BETWEEN INTERNATIONAL DEPARTURE FLIGHTS FROM JAPAN AND OVERFLIGHTS

Hayato KINOSHITA and Terumitsu HIRATA

The purpose of this study is to examine the actual and future situation of the operational conflicts between international flights from Japan and overflights at the pacific oceanic airspace. The Monte Carlo simulation model based on the actual operational characteristics of the flights from Asian region to US is developed to analyze the operational conflicts at the entry fixes to the pacific oceanic airspace. From the simulation analysis where the several traffic condition scenarios are assumed, the probability and the degree of the operational conflicts at the target airspace can be obtained. Also the effects of the capacity expansion measures of the oceanic air routes and the region wide air traffic management measures in Asia are evaluated. The major evaluation indexes are the flight level (closer altitude to the requested optimal one), the delay of the flights and environmental impacts (Fuel and CO₂ emission). The results from this study can be one of the important materials to design more efficient and fair air traffic control and management in the oceanic airspace in the future.