

1 3. 継続降下運航が実施可能な時間帯の予測

航空交通管理領域 ※福島 幸子, 平林 博子, 岡 恵, 上島 一彦

1. はじめに

航空機が降下・着陸するときは、エンジンスラストをアイドル（推力最小）の状態連続的に降下することが、燃料節減の面で望ましい。また、より高高度を飛行する方が騒音も低減できる。しかし、他機との安全間隔を確保するために、航空管制ではレーダー誘導や水平飛行を指示する場合もある。消費燃料や騒音を低減するために、世界的に多くの空港で継続降下運航（CDO; Continuous Descent Operation）^[1]が検討・導入されてきている。我が国でも、国土交通省の「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）」では、CDOを3段階にわけて導入する予定である^[2]。まず、関西国際空港（以下、関西空港）ではCDOの試行運用を経て、平成25年3月7日からCDOが正式運用となった。さらに、那覇空港では平成25年9月19日からCDOが試行運用されている（現在は両空港とも第1段階）^[3]。

関西空港では交通量の少ない夜間に3つの地点からターミナル空域に入域する到着機に対して、希望する到着機にはCDOを運用しており、日に0~6機程度、平均すると約1.5機/日の実施がある。

CDOは運航効率が良く、燃料の削減が可能であるが、経路の通過高度や速度について予測が難しく、管制上は不確実性の高い運航である。安全性の理由から、運用時間帯でも承認されない場合がある。また、承認後に中止する場合（Partial CDOという）もあるが、中止するまでCDOで降下できる便益は少なくない。実際、サンフランシスコ空港では、CDOの一種であるTA（Tailored Arrival）が運用されており、Partial TA（TAを途中で中止）でもFull TA（最後までTA可能）の半分程度の便益があることが報告されている^[4]。

CDOの運用拡大は燃料費の削減だけでなく、CO₂の排出削減にも繋がるので、地域的な取り

組みも行われている^[5,6]。また、低高度での飛行が減少するため、騒音が軽減されることも大きな便益である^[7]。

将来、CDOの運用時間および対象経路を拡大するために、地点KARINからの関西空港到着機に着目し、CDOの実施可能性を推定した。これは飛行情報統計データを用いた、エンルート空域に限定した解析であり、2013年1年分のデータを解析した。ターミナル空域内でのCDOの中止については管制間隔の設定が困難となる同空港からの出発機の出発時刻の予測が難しいことから、TODの段階で既に出発済みである通過機との関係に限定して解析を行った。CDOの実施、非承認、中止の原因についてCDO実績データ及びレーダーデータの解析も行ってきたが、飛行計画情報レベルで解析できれば、実時間でのCDO実施の可否の予測に役立つ。

さらに、現在はCDOを運用していない地点SAEKIからの到着機に着目し、CDOが難しい時間帯を推定する。

本稿ではまず関西空港での経路について述べ、エンルート部分の解析方法を述べる。解析結果を報告し、将来のCDO拡大の可能性を推定する。

2. 関西国際空港の到着経路

2.1 エンルート管制

エンルート空域は、航空路監視レーダの届く範囲で、空港周辺のターミナル空域や自衛隊などの空域を除いた空域であり、いくつかの空域に分割して管制を行っている。そこでは安全間隔として水平方向5NM以上、垂直方向1,000ft以上の間隔確保が必要である。また、ターミナル空域への管制移管には一般的に移管地点ごとの移管条件が定められている。

関西ターミナル空域には5つの地点から到着機が入域する。各地点での移管地点と高度を表1に示す。KARINでは高度FL160（FL; フラ

表 1 関西ターミナル空域への入城地点

管制部	セクタ	移管地点	移管高度
東京	近畿西	SAEKI	FL160
	紀伊	EVERT	FL160
	三河	SINGU	FL180
福岡	四国北	RANDY	FL150
	南九州東	KARIN	FL160

（解析対象日の条件，現在は一部変更）

イトレベル，1FL は高度 100feet）で，10NM 以上の間隔を確保して移管する。

この中で，3 つの地点（EVERT，RANDY，KARIN）からの到着機について CDO が運用されている。CDO を実施する場合，移管地点での通過高度が一定とはならない。滑走路までの距離は使用滑走路及び進入方向によって異なる。また，降下開始点（TOD; Top Of Descent）の位置は滑走路までの距離，機体重量や風向・風速により異なる。

CDO を実施したい航空機は降下開始点（TOD; Top Of Descent）の 10 分以上前に管制機関に CDO 実施を要求する。その時，TOD の位置や決められた地点の通過予定時刻などを通知する。そして，管制官は交通状況に応じ承認あるいは却下する。関西空港の場合はいずれの地点からも RW/06 の場合の方が RW/24 の場合よりも到着パスが短い。CDO が実施できた場合の便益は RW/24 の方が大きい。

CDO の実施の条件として，地点の高度や速

表 2 関西空港 CDO の条件（KARIN より）

	条件
運用時間	2300JST (1400UTC) から 0600JST (2100UTC)
滑走路 06L (北風時) : RWY06L CDO Number 1	
IAF と高度条件	BERRY で 4,000ft 以上
STAR	BECKY BRAVO ARRIVAL
滑走路 06R (北風時) : RWY06R CDO Number 1	
IAF と高度条件	ALLAN で 4,000ft 以上
STAR	BECKY ALFA ARRIVAL
滑走路 24 (南風時) : RWY24 CDO Number 1	
IAF と高度条件	MAYAH で 4,000ft 以上
STAR	BECKY DELTA ARRIVAL

度に条件を付ける場合も多い。関西空港について本稿の解析で対象としている KARIN からの到着について，表 2 に代表的な条件を示す³⁾。高度については後述する地点毎の条件もあるが，速度に関する条件はない。

なお，より詳細な高度条件として，「RWY06R CDO Number 1」の条件を後述する図 1 に示す。

2.2 ターミナル空域内の経路と CDO の降下

関西空港で，初期進入地点（IAF; Initial Approach Fix）以降は垂直方向もパスを保つこととし，それ以前の経路の高度では TOD から連続的に降下すること仮定する。

KARIN は関西ターミナル空域の南西方向に位置し，南九州・沖縄，東南アジア方面からの到着機が入城する。KARIN から IAF までの経路は RW/06 の方が RW/24 よりも短くなっている。そのため，KARIN での高度は RW/06 の方が RW/24 よりも低くなる。滑走路方向による差の傾向は地点と経路長に依存する。

SAEKI は関西ターミナル空域の北西方向に位置する。東側である SQUID からは北海道，北陸，方面からの到着機は東側である CHILY を通過し，山陰，韓国方面からの到着機は西側である JEC を通過し，東西交通流は SAEKI で合流し南下するため，東方向は SQUID という地点から，西方向は JEC という地点からの 2 つに分けて解析した。

表 1 の「RWY06R CDO Number 1」の高度プロファイルの例を図 1 に示す。赤線は CDO を行った場合，黒線及び青点線は，通常の降下を行った場合の例である。実際，水平飛行時のパスはレーダ誘導により延伸することがある。

図中，四角で囲った「M750」などの名称は，

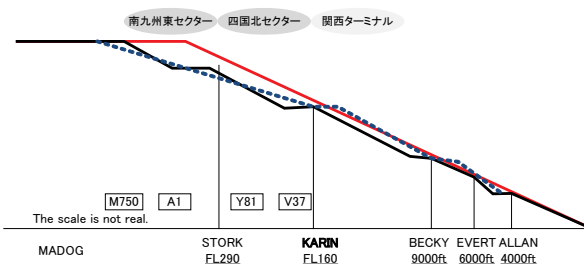


図 1 RWY06R CDO Number 1 の高度プロファイル

到着経路と交差する航空路名で、今回の解析の対象とした航空路である。例えば、一番左の「M750」を FL350 の航空機が飛行していても、FL390 の到着機との間隔は確保されており到着機の TOD は未だ先であるため、到着機は CDO が承認される。しかし、一番右の V37 を FL260 の航空機が通過予定でありかつ、降下中の到着機が FL250~FL270 の間で V37 と交差する可能性があった場合、到着機は CDO は承認されず、FL270 までの降下もしくは V37 通過以前に FL250 まで降下することとなる。到着機の降下率や速度、通過機の速度の誤差を考慮しても CDO は可能であるかといった解析を 4 本の航空路に対して行い、CDO が可能である時間帯の導出を試みた。

航空機の降下率により、TOD の位置は異なる。また、RW の方向によっても KARIN での通過高度は異なる。なお、機種の違いのみでなく、風の強さによっても降下率は変化することから、今回は一般的な降下率が 3 度であることと、西風の影響を受けてもう少し低い降下率であることを考慮して、2.1 度から 2.8 度までの降下率と仮定して、RW/06 の可能性を解析した。

同様に、JEC 経由 SAEKI 通過機については、4 本の航空路、SQUID 経由 SAEKI 通過機については、11 本の航空路の通過機との関係を RW/06 の場合について解析した。

3. 解析方法

3.1 交差航空路の通過機

到着経路と交差する経路の近い地点の通過時刻及び高度を飛行情報管理システムの統計データの通過時刻を参考に、図 2、図 3 のような解析を行った。統計データはある程度の誤差を含むが、実際の運航時も地点の到着予測時間には誤差を含むことが想定されるため、このデータを使用し解析した。解析対象日は 2013 年 1 月 1 日から 12 月 31 日の 1 年間である。

図 2 は、航空路 Route1 を飛行する通過機が到着機と競合するかどうかを予測するための解析である。到着経路と交わる航空路の地点の通過時刻 $T1$ 、 $T2$ から、到着経路と交わる地点の通過時刻 T を線形近似で求め、誤差を付加する ($T \pm \Delta T$)。そして、到着機が P1 を通過して

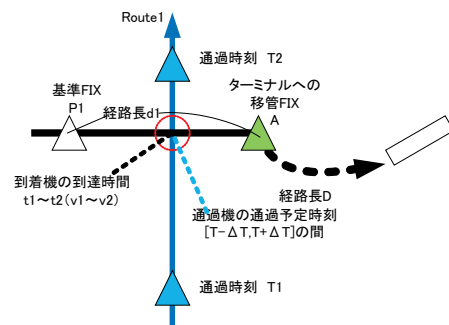


図 2 交差通過機との位置関係

から、交点に到達するまでの飛行時間を求め、その分をスライドする。機種によって速度は異なるので到着機の速度を対地速度で $v1 \sim v2$ の間と仮定し、飛行時間 $t1 \sim t2$ ($t1 > t2$ とする) を得る。($T - \Delta T, T + \Delta T$) の間に P1 を通過する到着機は、Route1 の通過機と時間的に接近する可能性がある。P1 から航空路との交点までの距離が長いほど誤差を多く見込むこととなる。

図 3 の上図では 2 本の航空路との降下の可能性を示す。上図は空港から逆算した経路長と降下角から交差する航空路 Route1 (橙色の面) との交差時刻及び交差高度 (図中、白○) を求めている。赤線は Route1 を飛行する航空機の地点の通過時刻から、到着経路と交わる時刻をパラメータとして安全間隔が保てない時間帯を示す。緑線は Route1 の先にある Route2 との同様の解析である。その次に航空路 Route2 (白面) との交差時刻及び交差高度 (図中、緑○) を求めている。緑線は Route2 を飛行する航空機の地点の通過時刻から、到着経路と交わる時刻をパラメータとして安全間隔が保てない時間帯である。同様に Route2 以降にも交差する航空路との交差を解析する。

3.2 各高度からの降下可能性の推定

図 3 の下のタイル状の図は各時刻、各高度から、交差が想定される全ての航空路 Route1 ~ Route4 を通過できるかどうかを判定する。上図の各 Route の通過高度の部分には赤、前後 1,000ft の部分は黄色としている。

Route1 ~ Route4 までの通過情報を元に、確実に管制間隔がとれるか、想定できる降下率 $\phi 1 \sim \phi 2$ の範囲内で、IAF まで到達できるか計算

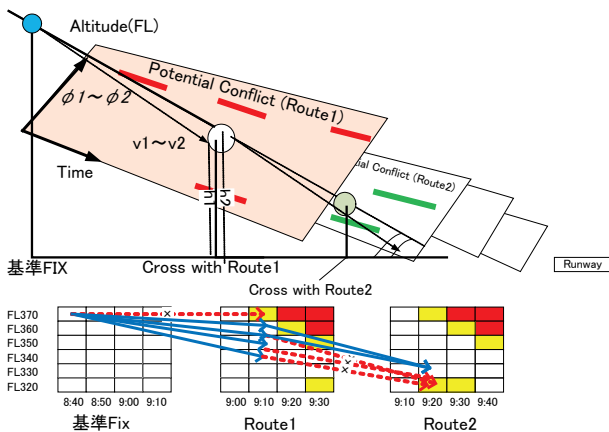


図 3 通過可能時刻の算出例

する。到達できれば「CDO の可能性がある」とし、それ以外は「CDO 不可」と 2 種類に分類する。

例えば、FL370 から Route1 を通過する場合、TOD の手前であることを想定した可能な高度が FL370~FL340 であったとする。しかし、図中 FL370 は黄色であり、水平飛行はできない。そこで、FL360~FL340 が可能となる。次に Route2 を交差する場合には FL330 しか空きがない (Route1 通過時に降下モードとなっているので水平飛行は除く)。このようにして Route4 まで空き高度が繋がり、IAF まで TOD 以降に水平飛行を経ることなく降下していけるかの判断を行う。これらの通過可能性を示すスタイル図を作成した。

4. 解析結果

4.1 KARIN 通過時刻

ある日の通過予測時刻について、図 4、図 5 に示す。各線分は誤差を含めた各航空路の通過

予測時刻である。Route1, Route2, , , と基準 FIX から遠ざかるため、誤差が拡大する。そのため Route 番号が大きくなるほど予測時刻を表す線分は長くなる。実際の到着機が TOD よりも手前の地点として、空港から十分に離れた(この例では 180NM 程度) 基準 FIX を通過した時刻には△を表示した。通過時刻よりも、基準 FIX から降下した場合の予測にスライドしている。そして、その後順次交差する Route1~Route4 に到達する頃に通過機の飛行が予想される時間帯に線を引いた。斜線は交差のどこかで通過機が高度変更を予定していることを示す。

△よりも低高度に通過機の線がなければ、どこから降下を初めてもエンルートでは通過機との交差がないことを示す。△よりも低高度であっても TOD との位置関係により、通過機の交差がないこともある。

実際に関西空港への CDO の要求及びそれに対する承認/非承認のデータがある。図 5 は図 4 とは異なる日のグラフの抜粋であり、KARIN を経由して関西空港に着陸した航空機で、CDO を要求し承認されたものには●、非承認もしくはエンルート空域で中止されたものには×をつけた。

Route1~Route4 は離れているが、CDO を実施しようとする航空機との位置の差を補正しており、△からの下の通過軸との関係を見ればよい。図中①の△ (●付) は CDO を要求し、承認されている。実際①の下には通過機を示す線はない。また、②の△は CDO の要求は行っていないが、要求をすれば承認された可能性が高い。③の△ (×付) は、下に Route3 との交差を示

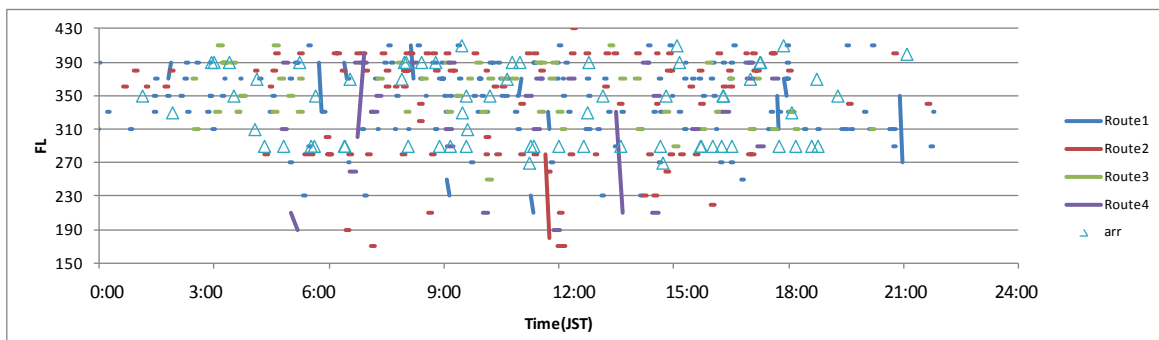


図 4 通過可能時刻の算出例 (RW/06, KARIN)

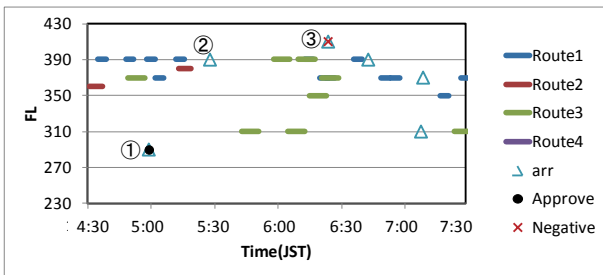


図 5 通過可能時刻の算出例 (RW/06, KARIN)

す線があるため承認されなかったと推測できる。●と×の理由が、図 5 の解析から推測できた。

4.2 SAEKI 通過時刻 (JEC 方面)

ある日の通過予測時刻について図 6 に示す。4 本の航空とは通過高度が高めだが、Route2 は移管高度に近い高度での通過が多い。また、CDO の運用時間帯以外の到着機は少ない。

4.3 SAEKI 通過時刻 (SQUID 方面)

ある日の通過予測時刻について図 7 に示す。10 本の航空路の通過機は図 6 よりも広範囲に分布している。また、図 7 同様に Route9 は移管高度に近い高度での通過が多い。

4.4 通過可能性タイル図

KARIN の通過可能性タイルについて 1 年分を図 8 に示す。色付部分は各高度 (FL010 毎)、各時刻 (10 分毎, JST) に CDO が不可能と推定された日数を示す。赤は 250 日以上, 薄橙は 200 日以上, 黒は 150 日以上, 灰色は 100 日以上である。KARIN については CDO が不可能な日数が 250 日以上の高度・時間帯は無かった。なお、滑走路の方向によってタイルの色は異なり、経路調が長い RW/24 の方が高高度帯の不可能なタイルが多かった^[8]。

5. 考察

SQUID 経由 SAEKI の通過可能性の推定タイルについて 1 年分を図 9 に示す。250 日以上の日はなかった。図 7 より、SQUID からの到着機と交差する通過機が多く飛行しており、ほとんど CDO の可能性がないように見える。タイル図も空きが少なく、空いている時間帯は到着機自体がほとんどいない。しかし、関西空港の CDO 運用時間帯については空きがある。

また、(本稿では図示していないが) JEC 方面からの SAEKI 経由到着機のタイルは 200 日以上の時間帯がなかった。タイミングを探す必

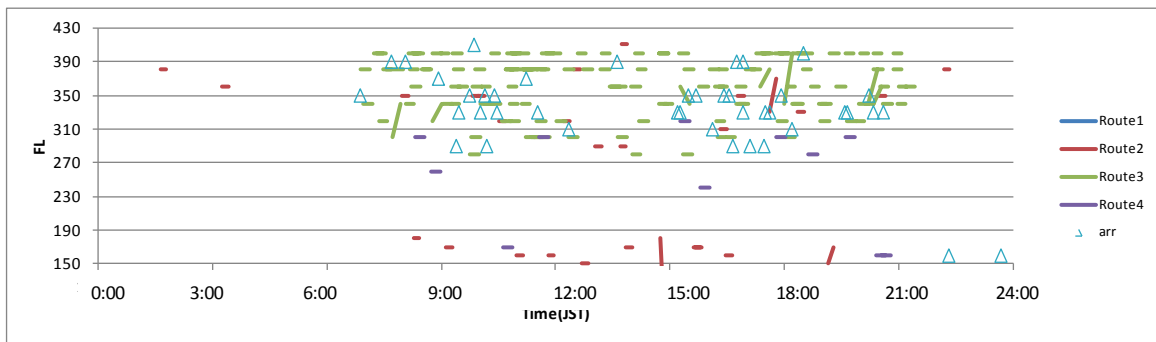


図 6 通過可能時刻の算出例 (RW/06, JEC)

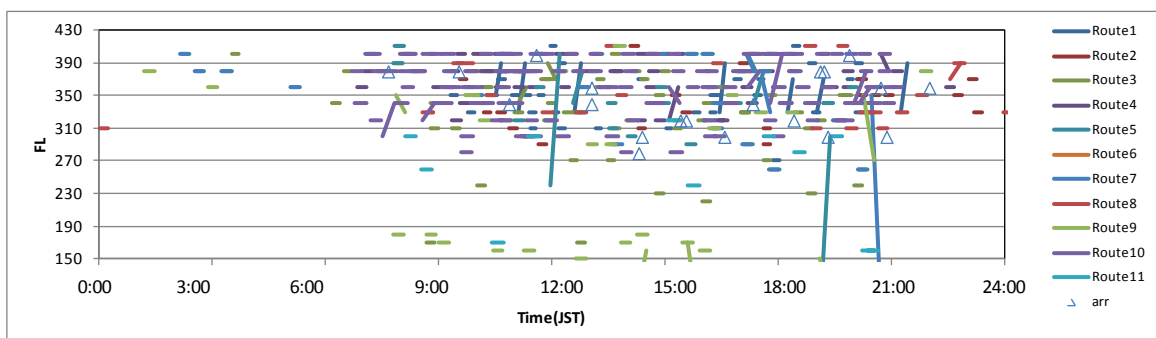


図 7 通過可能時刻の算出例 (RW/06, SQUID)

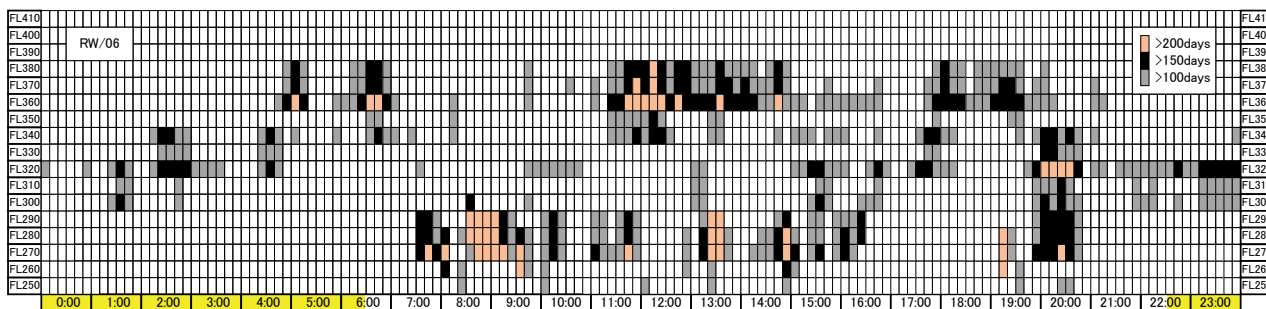


図 8 CDO 実施不可能時刻&高度の推定 (2013 年, RW/06, KARIN)

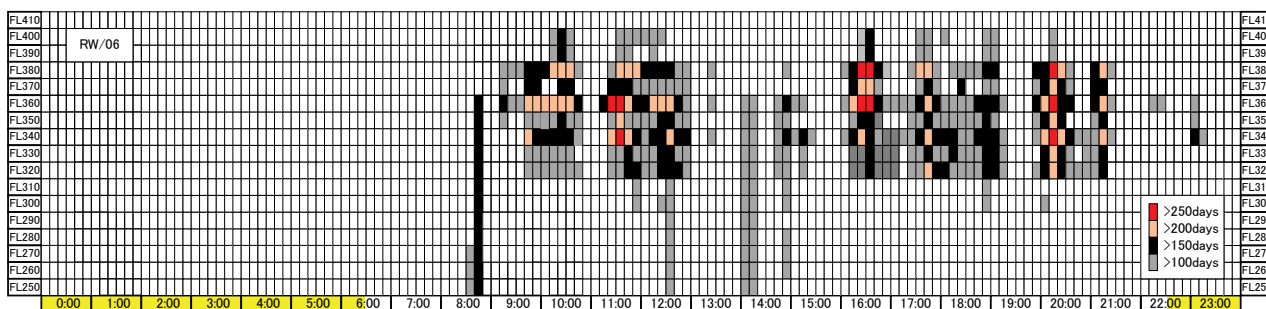


図 9 CDO 実施不可能時刻&高度の推定 (2013 年, RW/06, SQUID)

要があるが CDO 実施の可能性はある。

6. まとめ

関西空港の CDO 運用時間拡大の可能性を推定するために、地点 KARIN からの到着機に着目し、CDO 実施可能時間と高度の推定方法を示し、推定を行った。実際の関西到着機の承認／非承認のデータとの比較でエンルート空域である程度的一致が見られた。

また、現在は CDO を運用していない地点 SAEKI からの到着機にも解析を行った。昼間の時間帯はエンルートでの交通量が多いが、関西空港の CDO 運用時間帯はエンルートの交通量も少なく、CDO 実施の可能性を示した。

一方、CDO のキャンセルはターミナル空域に入ってからもありえる。特に大阪空港や関西空港の出発・到着経路と交差する場合のキャンセル頻度が高い。今回の解析はエンルート空域に限定している。CDO 拡大のためには近隣空港や関西ターミナル空域内からの出発機との関係を今後解析する必要があり、今後の課題としたい。

謝辞

本研究を進めるに当たり、レーダーデータや運用に関するデータをご提供下さった、東京航空交通管制部、福岡航空交通管制部及び関西国際空港の管制官各位、飛行計画データをご提供下さった、航空交通管理センターの管理管制官各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] ICAO, “Continuous Descent Operations (CDO) Manual.”, ICAO Doc 9931, 2010.
- [2] 国土交通省, ”将来の航空交通システムに関する推進協議会: CARATS プログレスレポート 2011-2013.”, (https://www.mlit.go.jp/common/000993373.pdf)
- [3] 国土交通省, “AIP Japan”
- [4] FAA, ”Tailored Arrivals”, IPACG/32, IP/06, May 2010.
- [5] ASPIRE, <http://www.aspire-green.com>
- [6] EC, IRE, http://ec.europa.eu/transport/air/environment/aire_en.htm
- [7] 昨野, ”騒音軽減のための連続降下方式について”, 航空環境研究, No.15 pp.8-11, 2011.
- [8] 福島, 平林, 岡, ”エンルート空域における継続降下運航の可能性についての一検討”, 航空宇宙学会第 45 期年会講演会, 2014 年 4 月.