

羽田空港再拡張後を対象とした滑走路容量算定方法と容量拡大方策に関する研究*

Runway Capacity Estimation for Haneda Airport with 4th Runway and Capacity Enhancement Measures*

平田輝満**・屋井鉄雄***・清水吾妻介****

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

1. 研究の背景と目的

2010年の再拡張により羽田空港に4本目の滑走路が整備され、段階的にはあるが現在の1.4倍の発着容量に増加することが予定されている。今後のアジアの経済成長や国際的な航空自由化の進展等により今後益々航空需要は増加すると考えられ、さらなる首都圏空港の容量拡大方策の検討が引き続き重要課題である。新規滑走路の整備検討に先立ち、再拡張後の既存ストックの有効活用による容量拡大の可能性についても十分に検討することが必要であり、そのためには空港容量算定方法の検討が必要となる。なぜなら、従来我が国で使用されてきた容量算定方式は単一の滑走路や平行滑走路を対象としたものであり、羽田再拡張後のように滑走路（飛行経路含む）が交差する形態を対象とした算定方式は存在しない。さらに、世界でも珍しい井桁形状の滑走路配置であるため単純な交差滑走路とも運用特性が大きく異なる。筆者らの研究¹⁾で羽田再拡張後を対象にシミュレーションを活用した容量算定を実施した例はあるものの、従来航空局で使用してきた統計的手法に整合した解析的容量算定方法で算定することが一般に理解がしやすく、計算効率や検証、現状との比較等の面でもメリットがある。以上から本研究では、従来の容量算定方法と極力整合をとる形で羽田再拡張後の容量算定方法を開発し、現況（航空局計画値）の再現および、管制運用の柔軟化や一部施設整備による容量拡大方策と拡大効果について分析することを目的とした。

2. 我が国における空港容量算定方式の概要

滑走路3本の現在の羽田空港では、滑走路ごとに離陸と着陸が分離されており、2009年現在の着陸容量は31回/時、離陸容量は32回/時である。つまり、基本的には着陸容量で発着スロット枠の数が決まっている。

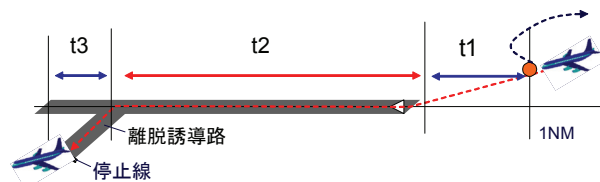


図-1 着陸機処理時間の区間分割 (07年まで)

文献³⁾などによれば、我が国では着陸が連続する場合の滑走路容量は、図-1のように滑走路を3分割して定義されている滑走路占有時間を元に算出されている(2007年に変更:後述)。ただし、滑走路占有時間が120秒未満の場合で、後方乱気流関連管制方式の規程に該当するもの(先行機がヘビー機の場合)については、その値を120秒とするとされている。図-1において、
t1: 滑走路進入端手前1NMの通過時間(着陸復行の指示とそのレスポンスに必要な時間)であり、実測値に安全率を考慮して27秒の定数を設定;

t2: 滑走路進入端から滑走路縁を横切るまでの時間であり、実測時間の平均値57秒に、着陸機の99.5%が着陸可能となるようなバッファ値(2.6σの安全係数)を加えた76秒(実際は便宜上、平均値の1.33倍として計算している);
t3: 滑走路縁から停止線を横切るまでの時間を、実測時間に安全率を加えた15秒の定数を設定している。

以上の3つの時間を合計して現在着陸機1機当たりの滑走路占有時間は118秒となる。以上より、1時間当たりの到着滑走路容量は、「3600秒/118秒≒30.5機/時」となる。なお、2007年9月より、t2とt3の合計時間を1つの確率変数とする新たな考え方で到着容量が31回/時(滑走路占有時間115秒)に増加している²⁾。つまり現在は、滑走路占有時間が、後方乱気流関連管制方式の規程に該当する場合に必要な安全間隔120秒と同程度となったことから、今後の着陸容量増加については最終進入飛行中の安全間隔がボトルネックとなる可能性もあり、滑走路と飛行中の両者の視点から検討する必要があると考えられる(要検討課題)。

離陸が連続する場合の容量は、滑走路を以下のように3分割して考えている。

t1: 後続の離陸機が離陸許可を受け、離陸開始するまでに必要な時間(管制通信とレスポンスにかかる時間を含む)を一律

*キーワード: 空港容量, 容量算定方法, 羽田再拡張

**正員, 博(工), (財)運輸政策研究機構運輸政策研究所
(東京都港区虎の門3-18-19, TEL03-5470-8415)

***正員, 工博, 東京工業大学大学院総合理工学研究科

****学生員, 工修, 東京工業大学大学院総合理工学研究科

として15秒；

t2：離陸滑走を開始して離陸地点又は離陸滑走地点から1800m地点のいずれか遠い方を通過する時間として実測値の平均の35秒（後続離陸機は地上で待機可能であるため容量計算上はバッファは必要なく平均でよい）；

t3：先行出発機が離陸位置から2NMの区間を通過する時間を一律として45秒（これは、先行離陸機がレーダー識別され、かつ、後続離陸機への出発待機解除に必要な距離の飛行を想定した時間）；

となり、1機当たりの滑走路占有時間は「15秒+35秒+45秒=95秒」となる。以上より、羽田空港においては先行機がHeavy機（以後H）の場合は後方乱気流間隔の120秒を採用し、先行機がMedium機（以後M）の場合は上記滑走路占有時間を採用する。現在の羽田空港の機材比率H：M=7：3を考慮すると、現在の1機当たりの平均処理時間は、「 $120 \times 0.7 + (15 + 35 + 45) \times 0.3 = 112.5$ 秒」となる。そのため、羽田空港における1時間当たりの離陸処理能力は「 $3600 \text{秒} / 112.5 \text{秒} = 32 \text{回/時}$ 」となる。

3. 羽田再拡張後の容量算定方法の検討

(1) 再拡張後の滑走路運用と容量（航空局計画）

航空局は、再拡張後の発着容量について、常時同時に3～4本の滑走路を使用して運用を行うこととし、出発・進入経路を東京湾内とすること、輻輳する交通を円滑に処理するため滑走路を方面別に運用すること、First Come First Serve (FCFS：先着順で処理)、滑走路によって使用機材の制限はしないこと等を前提として航空管制官によるリアルタイムシミュレーションを実施し、世界初となる進入方式（同時 LDA：Localizer-Type Directional Aids）の導入等を前提に、40回/時（40.7万回/年）の処理が可能となると結論している（図-2）。

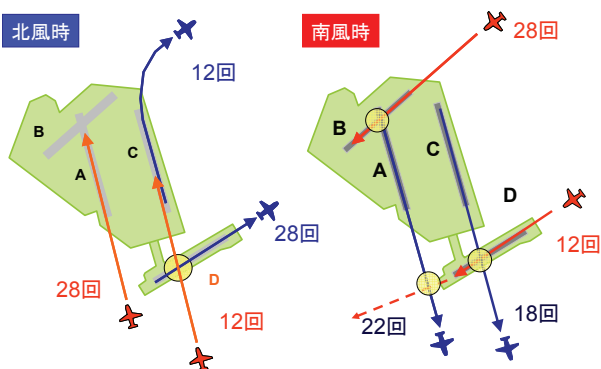


図-2 再拡張後の滑走路運用と容量（航空局計画値）

(2) 容量算定における基本的なスタンスと条件設定

空港容量の算定にあたっては、基本的に国土交通省航空局で使用している既存の容量算出方式に従った。但し、羽田再拡張後は我が国でも初となる井桁の滑走路配

置となり既存の算定方式では対応できない部分があるため、それらについては航空法および関連法規、飛行方式設定基準、管制方式基準などをもとに独自に条件設定を行った。また所要時間や速度等の各パラメータについては既存の容量算定方式と同様バラツキを考慮した安全係数を掛けるか、もしくは今回のデータ制約内で考える最大の安全側の数値を使用する。主要な条件設定について表-1に示す。

表-1 容量算定における基本的な条件設定

【1】 機種	B777（大型）・B767（中型）・B737（小型）の3機種に代表させた。比率は、後方乱気流区分で Heavy：Medium を7：3とした（現状と同じ）。
【2】 飛行速度	<p>【離陸上昇】離陸後しばらくは160kt<羽田離陸容量算出方式を参考></p> <p>【着陸進入】滑走路末端手前9NMで180kt、同5NMで160kt、同3NM以降145kt（大型機）・135kt（中型機）・125kt（小型機）<前2者はAIP、後者はエアライン提供データからの独自設定に基づく></p> <p>【着陸復行】SOC（飛行方式設定基準における Start of Climb：滑走路末端から0.36NM先）から160ktに加速 *速度のバラツキは3機種の違いは表現しているが、個々の機種でのバラツキ（風速の影響等）は考慮していない。</p>
【3】 滑走路占有時間	<p>【単一滑走路の連続離陸・連続着陸】連続離陸は95秒（離陸許可～離陸後45秒）、連続着陸は115秒（滑走路手前1NM～停止線離脱）<羽田容量算出方式></p> <p>【南風時A・C離陸とD着陸】A離陸100秒・C離陸95秒（離陸許可～経路交差点）（詳細後述）</p>
【4】 管制間隔・その他確認時間等	<p>【離陸機相互間の管制間隔】基本的には管制方式基準に従い、①初期レーダー最低間隔として2NM以上（かつ離陸1分後に3NM以上）、②大型機に後続する場合の後方乱気流間隔2分間（滑走路上で離陸上昇経路と着陸進入経路が交差する場合（南風時の先行C離陸と後続D着陸の間））</p> <p>【着陸確認時間】タワー管制官により着陸機が確実に着陸し、復行はしないと判断に要する時間を、滑走路進入端通過後25秒と設定<運航特性等を考慮し独自に設定></p> <p>【離陸機のプラスト影響確認】離陸開始地点後方に着陸滑走機がある場合（南風時のB着陸がある場合のA離陸）に、その影響の確認時間として15秒を設定<運航特性等を考慮し独自に設定></p> <p>【着陸許可発出の限界点】着陸機に対しては滑走路進入端から1NM手前までに着陸許可を発出<羽田容量算定方式></p>

(3) 容量算定の考え方と占有時間（南風時の例）

図-2から分かるように、北風時に比べ南風時の運用が複雑であり、特にA・Cラン離陸機の前方をDラン着陸機（復行機含む）が横切ることが全体の容量のボトルネックとなっている。紙面の都合上、本稿では南風時について詳細に記述する。南風時の運用では3箇所の交錯箇所が存在し、以後それぞれ、Cラン・Dランの交錯箇所をCD交点、同様にAC交点、AB交点と呼ぶ。まず始めに、南風運用時の最重要検討箇所であるCD交点とAD交点を例に管制間隔の基本的な考え方と容量算定の基礎となる「占有時間」の考え方を示し、容量算定の基本的な考え方を述べる。

a) 容量算定の基本的な考え方と占有時間

ここでは複数の滑走路（飛行経路含む）が交錯する場合の容量算定の基本的な考え方を述べる。前述の通り、

現在の羽田空港では離着陸が分離され、さらに基本的に滑走路間で独立に運用が可能である。従って滑走路個々に処理容量を考えればよかったが、再拡張後は複数滑走路が従属運用関係となり、複数滑走路を1つの系として処理容量を考える必要がある。例えば、次節で詳細に述べる「C離陸とD着陸の相互間」に必要な管制間隔は、表-1【4】の離着陸機相互間の管制間隔の2つ（レーダー間隔と後方乱気流間隔）であるが、これら管制間隔を保持することを条件として、CランとDランを1つの系とし、この系をどちらか一方の機のみが使用している（占有している）と考える。つまり、あるタイミングで先行機から後続機へ占有権が移ることとし、本研究ではC離陸機の後のD着陸機への占有権の移行はCD交点で、D着陸機の後のC離陸機へはD着陸の確認時点^{補註1}とした（A離陸とD着陸も同様の考え方）。その他、離陸や着陸が連続する場合には基本的に既存の容量算定方式の考え方と同様である。これら考え方の上で、ある系を使用する連続する3機を仮定し、その真ん中の機（例えば、D着陸機→C離陸機→D着陸機であればC離陸機）について、当該系を占有している時間（福岡空港の総合的調査における「運用間隔」⁴）とほぼ同義であるが、本研究では以降「占有時間」と呼ぶ）を所要時間のバラツキも考慮し算出する（前後の機が変われば同じC離陸機でも占有時間は異なる）。以下で、南風時に考えるべき2つの系、「C離陸とD着陸」系と「A離陸とD着陸」系（以後、CD系、AD系）について離着陸を交互に運用する場合を例に詳細に述べる（「A離陸とB着陸」の従属性はAD系で考慮し、容量算定上、B着陸は独立とした）。

b) C離陸とD着陸間の管制間隔と占有時間の考え方

①C離陸機（前後はD着陸）の占有時間 T_{cd}

C離陸とD着陸を交互に運用することを想定する。連続3機（先行機から $i,j,k=\{A,C,D\}$ とし、A・Cラン離陸機をA・C、Dラン着陸機をDとする）の真ん中の機の占有時間を T_{ijk} とする。C離陸機（交互を想定しているので前後はD着陸）の占有時間 T_{DCD} となり、図-3に示すように、その内訳の T_{DCD1} を「離陸許可～滑走開始」、 T_{DCD2} を「滑走開始～1800m地点」、 T_{DCD3} を「1800m地点～CD交点（距離は2600m）」とする。2章で紹介した離陸連続の場合の所要時間をもとにすると、 T_{DCD1} は15秒、 T_{DCD2} は48秒（後続が着陸機なので 2.6σ を足している）、 T_{DCD3} を32秒（160ktで計算）となり、C離陸機の占有時間 T_{DCD} は95秒となる。ここで、管制運用の精度も考慮し、個々の数字は切上げている。

②D着陸機の占有時間 T_{CD}

D着陸機（前後はC離陸）の占有時間 T_{CD} は先行C離陸機がHの場合とMの場合で異なる。Hの場合の T_{CHDC1} は、先行C離陸機がCD交点を通過後、後続D着陸機が同地点

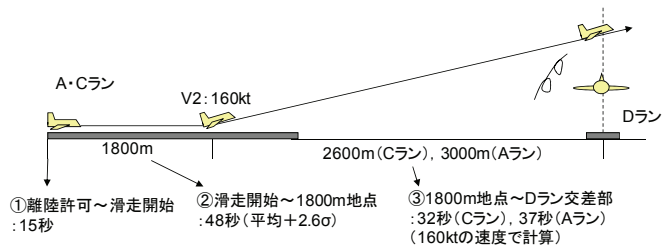


図-3 A・Cラン離陸機の占有時間の概要

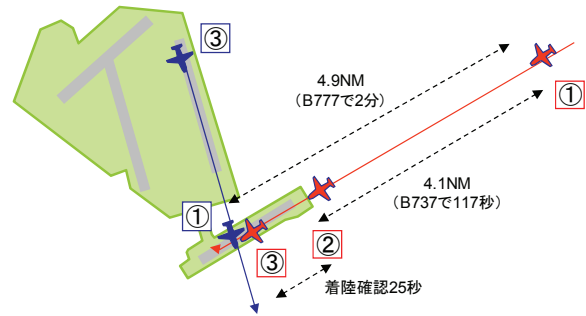


図-4 C離陸→D着陸→C離陸の占有時間 T_{cdc} の概要

を通過まで2分間の後方乱気流間隔が必要となる。管制運用上、C離陸機に離陸許可を出せるD着陸機の到達限界点（滑走路端からの距離）を1つと限定し、全機種で管制間隔を満たすように最も速度の大きなB777を想定して計算すると、図-4の①地点のように先行C離陸機がCD交点通過時にD着陸機は滑走路進入端から4.1NM以遠にいる必要があることになる（表-1【2】の飛行速度をもとに計算）。このことから、 T_{CHDC} の内訳の T_{CHDC1} を「4.1NM手前～滑走路進入端」、 T_{CHDC2} を「滑走路進入端～着陸確認」とすると、 T_{CHDC1} は117秒（所要時間の計算は最も速度の小さなB737で計算：安全側）、 T_{CHDC2} は25秒となり、 T_{CHDC} は142秒となる。

次に、先行C離陸機がMの場合の T_{CMDC} は、管制間隔はレーダー間隔の2NMで決まる。つまりC離陸機とD着陸機が最も接近する地点（両機とCD交点が2等辺三角形となる地点）で2NMが保持されていることを条件^{補註2}とすると、先行C離陸機がCD交点通過時にD着陸機は滑走路進入端から1.6NM以遠にいる必要がある。このことから、 T_{CMDC1} は47秒（B737）、 T_{CMDC2} は25秒となり、 T_{CMDC} は72秒となる。

以上から、仮に、C離陸とD着陸を単純に完全交互運用する場合を考えると、H：M＝7：3を考慮し、離着陸1機の合計2機の処理時間は、

$(T_{DCD} + T_{CHDC}) * 0.7 + (T_{DCD} + T_{CMDC}) * 0.3 = 216$ 秒
となり16.7回/時（離着陸合計約33回/時）の処理容量となる。しかしながら、D着陸機はA離陸機とも従属関係にあることや、D着陸機の実運用における間隔設定などの面から、羽田再拡張後の空港全体での容量算定はより複雑となる。

c) A離陸とD着陸間の管制間隔と占有時間の考え方

①A離陸機前後はD着陸)の占有時間 T_{DAD}

A離陸とD着陸を交互に運用することを想定する。この時に必要な管制間隔は、前述のCD交点と異なり、レーダー間隔のみである。AランとDランの滑走路配置条件では管制方式基準上、後方乱気流間隔は必要がない。C離陸と同様の考え方で、A離陸機の占有時間全体を T_{DA} 、その内訳の T_{DAD1} を「離陸許可～滑走開始」、 T_{DAD2} を「滑走開始～1800m地点」、 T_{DAD3} を「1800m地点～AD交点(距離は3000m)」とし、離陸連続の場合の所要時間をもとに計算すると、 T_{DAD1} は15秒、 T_{DAD2} は48秒、 T_{DAD3} は37秒となり、さらに表-1【4】に示す通り、A離陸機についてはBランへのプラストの影響を考慮し離陸許可前に15秒の確認時間を必要とする(仮定)。以上から、A離陸機の占有時間 T_{DAD} は115秒となる。

②D着陸機の占有時間 T_{ADA}

D着陸機の占有時間 T_{ADA} はCD交点と異なり、先行A離陸機がHの場合とMの場合で同様である。CD交点の場合の先行C離陸機がMの場合と同様の考え方で、レーダー間隔2NMが保持されていることを条件とすると、先行A離陸機がCD交点通過時にD着陸機は滑走路進入端から「0.6NM以遠」にいる必要がある。しかしながら、先行A離陸機がCD交点通過時にD着陸機に着陸許可を发出できるとすると、表-1【4】に示す着陸許可発出の限界点1NMがクリティカルとなるため、上記条件は「1NM以遠」となる。以上から、 T_{ADA1} は29秒、 T_{ADA2} は25秒となり、 T_{ADA} は54秒となる。

d) その他の組み合わせにおける占有時間

上記2つの系(CD系, AD系)における連続する3機のその他の組み合わせにおける占有時間 T_{ijk} については紙面の都合上、詳細は割愛するが、基本的な考え方は同様である。例えば、CD系において「C離陸(H)→C離陸(H)→D着陸」の場合は前述b)①の T_{DCD} と同じであり、「D着陸→C離陸(H)→C離陸(H)」の場合は既存の羽田容量算定方式の離陸が連続する場合と同様後方乱気流間隔の120秒である(2機目がC離陸(M)の場合は95秒:2章参照。AD系ではBランへのプラスト確認15秒がプラスされる)。またD着陸が連続する場合、滑走路を離脱するまで占有することになるので、例えば「D着陸→D着陸→D着陸: T_{DDD} 」では既存の羽田容量算定方式と同様115秒(Mの時)か120秒(Hの時)、「C離陸(H)→D着陸→D着陸 T_{CDD} 」では2機目のD着陸が滑走路離脱前述b)②の T_{CDC1} に滑走路進入端から滑走路(停止線)離脱までの88秒(2章の着陸連続における $t2+t3$)を足した205秒となる。同様にすべての組み合わせについて占有時間を算定した結果を図-5に示す。占有時間への影響の有無を考えず、全機材でHとMを区別

して考えたため、各系での組み合わせは64通りとなる。

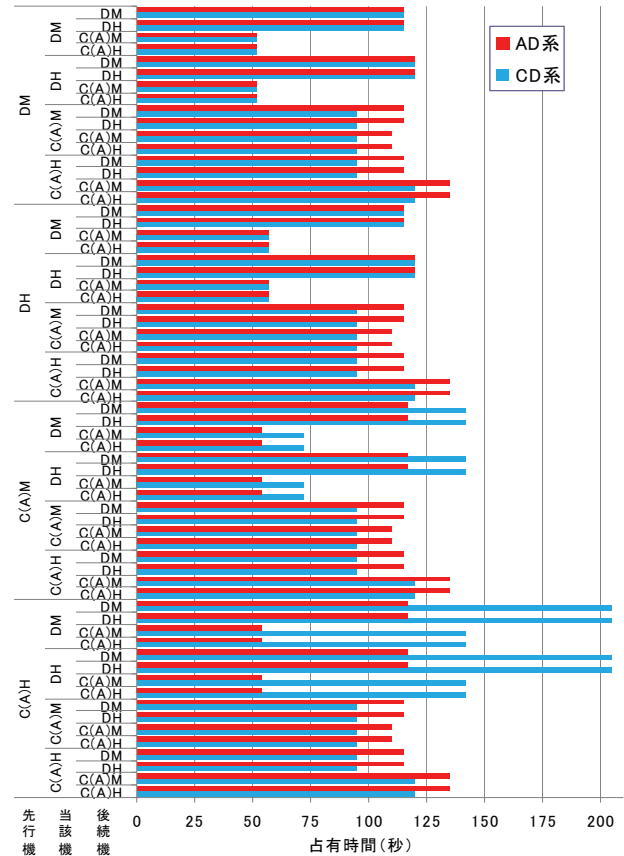


図-5 CD系・AD系における全組み合わせの占有時間

e) CD系とAD系を同時に考慮した容量算定

上記までではCD系とAD系で独立して考えてきた。しかし実際の運用を想定すると、これらを同時に考慮した容量算定が必要となる。両者はDラン着陸機を介して従属運用となる。ここでは、両者に共通しているDラン着陸機の間隔をA・Cラン離陸機が効率よく処理できるように設定することを考えた。つまり、前述の占有時間はCD系とAD系で差があり、例えばDラン着陸機の中に1機の離陸を挟むときに、一方の系の占有時間をもとに間隔設定すると、他方の系が離陸できないことがある。それぞれの占有時間の大きさを考えると一方の系のみ離陸できる間隔設定をすると滑走路処理効率におけるロスが大きいため、両系を考慮した容量算定の前提として、Dラン着陸機の中に挟む離陸機の数も両系で同一とした。残る問題は離着陸順序の仮定である。現状の離着陸分離方式では問題とならないが、前述の占有時間をみても簡単に想像できるように、HMの順序も含めた離着陸順序付けによって容量が大きく異なる。以下で3つの方法による容量算定方法を示す。

① 離着陸順序を完全ランダム

本ケースは離着陸数の比率を与え、その上で離着陸順序を完全にランダムとし、その生起確率と占有時間か

ら容量を確率計算（期待値計算）する方法である。福岡空港の調査⁴⁾でも同様の考え方で計算している。しかしながら、大きく異なる点は、羽田再拡張後の容量算定において前述の仮定（Dラン着陸機の中に挟む離陸機の本数をCD系とAD系の両系で同一とする）を前提とすると、すなわち、Dラン着陸機の中に入る離陸機の本数に応じて、両系それぞれにおけるその離陸機の合計占有時間の大きい方の値を両系で共通の占有時間とし、上記期待値計算をすることになる。詳細については紙面の都合上割愛するが、本方式の利点は離着陸数の比率を変化させることで比較的容易に容量のスライディングスケールを作成可能な点である。また、実際の管制運用から本計算方式を捉えと、前後の航空機の離着陸属性や後方乱気流区分HMの別を常時考えながら、その組み合わせに応じて極めて柔軟に間隔設定を行うことを前提としている。福岡空港の調査ではClose-Parallel滑走路を対象としているので、容量算定時の運用の前提に関して実際の運用上も大きな問題にならないかもしれないが、羽田再拡張後は井桁の滑走路運用のため、そのような完全に柔軟な間隔設定が実際の運用上は困難であるかもしれない。いずれにしても、そもそもスロット数を決めるための容量算定と実際の運用とは切り離して考える部分も存在するので、これらの点についての考え方は今後の課題としたい。

② 離着陸順序を先決（Dラン着陸間隔を可変）

実際の管制運用を想定しながら、離着陸順序をある程度先決して容量計算を行う方法である。そして、C・Aランからの離陸機の本数や種別により、必要なDラン着陸機の最低間隔が異なるが、その本数や種別等に応じて最低の間隔に可変制御することを前提としている。詳細は紙面の都合上割愛する。

③ 離着陸順序を先決（Dラン着陸間隔を固定）

②とほぼ同様であるが、Dラン着陸間隔を想定される最大の最低間隔で極力固定して制御することを想定しており、②よりも容量は低下するが、実際の管制運用とは近い。以後の計算は基本的に本方式をもとに行う。

4. 羽田再拡張後の容量の現況再現と容量拡大方策

前述③の方法を前提に羽田再拡張後の容量の現況再現（航空局計画値の再現）を行う。図-2の南風時計画値をみると分かるように、Dラン着陸12回/時、Cラン離陸22回/時、Aラン離陸18回/時となっており、Dラン着陸間隔の固定を前提とすると、Dラン着陸の間に概ね2機ずつA・Cランから離陸を出せばよいことになる。そこで、上記運用と図-4の占有時間をもとに時間当たりの処理回数の検討を行った。ケースは2通りで、①A・C離陸はFirst Come First Serve（FCFS：HM順序等はランダム）を仮定、②A・C離陸の順序を処理効率の観点から一定程度最適化することを仮定、で算定した。①ケー

スにおける運用と占有時間を図示したものを図-6に示す。Dラン着陸の間にA・Cランから2機ずつHM順をランダムに離陸させるため、固定のD着陸間隔としては占有時間の合計が最大となる組み合わせの「CランからHが2機続く場合」の357秒となる。つまり、1時間あたりでは「離陸→離陸→着陸」の1サイクルが10回入ることになり、この時の処理回数はD着陸が10回、A・C離陸が20回で、独立運用を仮定しているBラン着陸数を航空局の計画値28回とすると、発着回数は最大で38回となり（離着陸同数を仮定）、航空局の計画値40回を再現できない（表-2左欄も参照）。

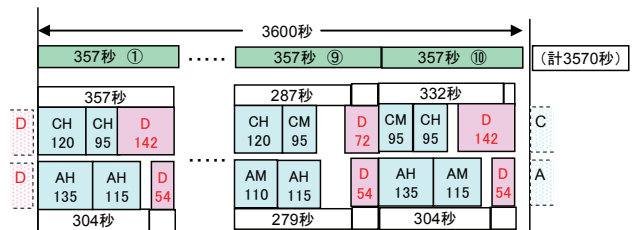


図-6 D着陸間隔固定+FCFSを仮定した際の運用と占有時間のイメージ図

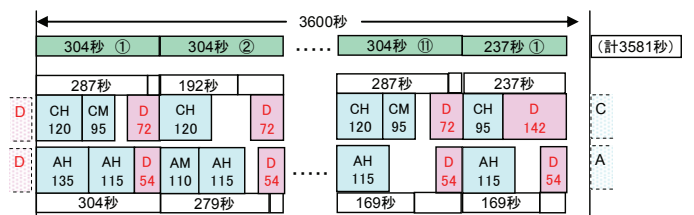


図-7 現況再現のための運用と占有時間のイメージ図

表-2 航空局計画値の再現に必要な運用方法（制約）

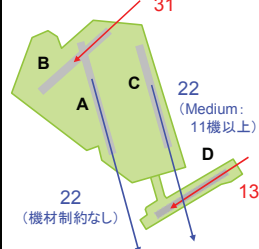
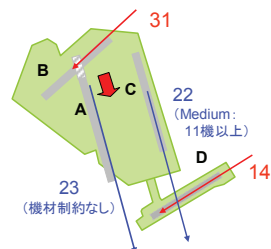
	緩い制約での運用 【容量：最大38回/時】	容量計画値を再現する運用 【容量：40回/時】
D着陸機	約6分の間隔で着陸。	約5分の間隔で着陸。1サイクルは約4分半間隔で着陸させる（A離陸が1機の時）。
A離陸機	D着陸機の間に機種を問わず2機ずつ出発。	D着陸機の間に機種を問わず2機ずつ出発。但し、2サイクルは1機のみでよい。
C離陸機	D着陸機の間に機種を問わず2機ずつ出発。	D着陸機の間にH→Mの順で出発。但し、6サイクルはHが1機のみでよい。またMの半数はCランから出発。
滑走路別発着回数(南風時)		

そこで、図-6をみても分かるようにCランからの2機目の離陸機がHであると後続D着陸の占有時間が大きくなるので、管制サイドでCラン離陸の1機目はH、2機目

はMとするような機材サイズからみた戦略的な管制運用をし、さらに着陸間隔も若干の柔軟な運用を許容することを考えた。図-7にそれら前提をもとにした現況再現のための運用イメージを示す。Cラン離陸機の2機目がMに限定したため、1サイクルの最大合計占有時間はAラン1機目がHの場合の304秒となるが、着陸間隔を完全固定だと11サイクルしか入らず、D着陸が1機不足する。そこで、1時間で1回のみ1離陸機挟みの間隔（237秒）で着陸させることを許容することで12回/時の着陸を達成できる（当然、他にも再現可能な運用方法は多数存在する）。また、Cラン離陸機の順序を常にHM順にすることは管制運用上やダイヤ設定上、必ずしも簡単なことではないが、図-7の運用ではCラン離陸機については1時間12サイクル中6サイクルまでは1機のみでよい。2機目のMが滑走路にスタンバイできていない時などはHを1機のみ離陸させればよいといったバッファーが含まれている。またAラン離陸機については特に制約はないが、2サイクルでは1機のみ離陸でもよい。従って、この運用自体の実現性は低くはないと考えられ、一方で再拡張後に時間40回を達成するためには、現状ではさほど要求されない戦略的な離着陸順序付けが一定程度必要となることが示唆される（表-2右欄も参照）。

続いて、前述の容量算定方法をもとに、再拡張後のストックの有効活用方策として、戦略的な管制運用とAランの南伸による容量拡大効果について検討した。表-3に管制運用方法と容量拡大効果を示す。表中左欄は、前述の現況再現の運用をベースに、現況再現でバッファーとしていた占有時間の枠もすべて完全に離着陸させることを考えたケースである。つまり、Cラン離陸機の2機目は毎サイクルで必ずMを離陸させ（つまり、全体の約85%のMedium機をC滑走路から離陸させる戦略的機材配置を実施）、さらにD着陸機の到着間隔も柔軟に制御するとともに、Bラン着陸機も現在の着陸専用滑走路の場合の最大容量である31回/時を前提とした。この運用を前提とすると44回/時まで計算上容量拡大が可能となる。また、表中右欄は、上記運用に加え、さらにA滑走路の南伸によりA滑走路離陸機のブラストのB滑走路着陸機への影響を緩和した場合（ブラストの影響確認時間の15秒が不要となると仮定）の容量であり、さらに1回/時程度の容量拡大効果が認められる。これら容量の前提となる高度な管制運用は、運航側の戦略的機材配置に対応したダイヤ設定と機材繰り、非FCFSへの理解と協力、またある程度の遅延の許容など様々な課題の解決が必要となる。また、再拡張後は飛行ルートの変換による処理容量低下を避けるために2本の滑走路を方面別に使用することとし、方面別便数のバランスを考慮して各滑走路の便数を配分していることから、この観点からの検討も別途必要となる。

表-3 既存ストックの有効活用による容量拡大方策

	機材の戦略的配置 【容量：44回/時】	Aラン南伸 【容量：45回/時】
D着陸機	約4分半の間隔で着陸。但し、1サイクルは3機連続で着陸させる。	約4分半の間隔で着陸。但し、1サイクルは3機連続で着陸させ、1サイクルはA滑走路離陸機を1機挟む。
A離陸機	D着陸機の間隔に機種を問わず毎回2機ずつ出発。	D着陸機の間隔に機種を問わず毎回2機ずつ出発。但し、1サイクルは1機のみ出発。
C離陸機	D着陸機の間隔に毎回H→Mの順序で出発。また、約85%のM離陸機はCランから離陸させる。	D着陸機の間隔に毎回H→Mの順序で出発。また、約85%のM離陸機はCランから離陸させる。
滑走路別発着回数(南風時)		

5. おわりに

本研究では、羽田再拡張後を対象とした容量算定方法について既存の算定方式と極力整合する形で検討を行い、占有時間の概念をもとに交差する複数滑走路における処理容量の算定方法を提案した。また、提案した容量算定方法により航空局の計画容量の再現のための運用方法および容量拡大方策の検討を行った。従来に比べ再拡張後の滑走路運用は複雑となり、離着陸の順序付け等の運用の仮定により大きく発着容量が変化する。そのため本稿では、結果的に従来型の容量算定（スロット値算定）というよりは、実際の滑走路運用と処理回数そのものも強く意識した容量算定という形になっているかもしれない。いずれにしても、そのような容量算定の前提と実際の管制運用との関係、従来の安全係数（復行確率等を前提）と交差経路における安全性の考え方の相違、航空機速度等のバラツキの考慮など、検討課題は多く残されており、追加的検討が必要である。

補注

補注1) 管制方式基準上、滑走路もしくは飛行経路が交差する場合、「先行到着機が滑走路又は飛行経路の交差部分を通過したとき、後続出発機が使用する滑走路に入る恐れがなくなったときその他着陸して衝突の危険性がなくなったとき」に後続離陸機に離陸許可の発出が可能。
補注2) 管制方式基準上、離着陸機間の最低レーダー間隔2NMは、離陸後1分以内に3NMとなることを条件としているが、この時点で2NMあればその条件は自動的に担保されている（飛行経路は直進を仮定）。

参考文献

- 1) 平松健志, 平田輝満, 屋井鉄雄: 空港容量算定シミュレーションの開発と容量拡大効果に関する研究, 運輸政策研究, Vol.9, No.2, pp.25-37, 2006.
- 2) 屋井鉄雄, 平田輝満, 山田直樹: 飛行場管制からみた空港容量拡大方法に関する研究, 土木学会論文集D, Vol.64, No.1, pp.122-133, 2008.
- 3) 市村修一: 「空港処理容量についての考え方」について, 羽田のスロット問題, 新規航空会社の現状等について [航空の安全及び経済に関する研究会40], (財)航空保安協会, 2000.
- 4) 「福岡空港の総合的な調査」PIレポート(ステップ4)詳細版