

平成22年 6月28日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760352  
 研究課題名 (和文) ターミナルレーダー管制シミュレーションの開発と空港容量拡大方法に関する研究  
 研究課題名 (英文) Development of terminal radar air traffic control simulation system and analysis of airport capacity expansion measures  
 研究代表者  
 平田輝満 (HIRATA TERUMITSU)  
 財団法人運輸政策研究機構運輸政策研究所・研究員  
 研究者番号：80450766

## 研究成果の概要 (和文)：

本研究では、欧米における先進的管制運用の実態調査を実施した上で、ターミナルレーダー管制業務を模擬可能なシミュレータの開発を実施し、最終進入までのベクタリングの特徴について実際の管制実験データから考察した。次に、羽田空港再拡張後を対象に滑走路処理容量算定方法について検討を行い、それを活用してターミナル空域における戦略的順序付けによる容量の拡大効果について分析を行った。

## 研究成果の概要 (英文)：

In this study, we surveyed the advanced air traffic control procedures in US and Europe congested airport/airspace. By developing the terminal radar air traffic control simulator, we analyzed the characteristics of sequencing and spacing by the vectoring of arrival traffics for the final approach course. Finally, the impact of strategic sequencing on the runway capacity is analyzed for Haneda airport after the re-expansion.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,800,000円	540,000円	2,340,000
21年度	1,000,000円	300,000円	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000円	840,000円	3,640,000円

研究分野：交通工学・空港計画

科研費の分科・細目：土木工学・土木計画学・交通工学

キーワード：航空管制, 空港容量, ターミナルレーダー管制

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の首都圏における空港発着容量は海外主要空港に比べ未だ低いレベルにある。近

年、管制運用方法の工夫による空港・空域容量の拡大に関する研究が主に欧米で活発になってきており、到着機材の順序付けの柔軟

化による容量拡大効果などが精力的に分析されている。しかしながら、我が国ではこれまで管制問題は専門性やデータ制約から学術的な研究もほとんどやられてこなかった。既存ストックを最大限有効活用するためにも管制運用の工夫、高度化による容量拡大方策の検討を行うことは非常に重要と考えられる。

## 2. 研究の目的

- (1) 欧米における空港容量の基本的な考え方、時間帯別の容量設定や発着スロットの配分方法、先進的な管制運用方法を調査し、我が国への適用性を分析する。
- (2) 羽田空港周辺空域を対象に、ターミナルレーダー管制を模擬可能なシミュレーションを開発し、管制指示方法に関する分析を行う。さらに AI 型のシミュレーションへの拡張を実施する。
- (3) 戦略的な離着陸機の順序付けなどの管制方法の柔軟化による容量拡大効果と遅れ時間への影響の定量分析を行う。

## 3. 研究の方法

- (1) 欧米における空港・空域容量に関する詳細調査

ヒースローやフランクフルト空港などを対象に、滑走路容量を最大化するための離着陸機の順序付けやそれを達成するための空域上での誘導システムの工夫などに焦点をあてて調査、考察を行う。

- (2) ターミナルレーダー管制シミュレーションの開発と管制指示方法に関する分析  
ターミナルレーダー管制業務を模擬可能なシミュレータを開発する。このシミュレータを活用し管制実験を行い、その指示内容と航空機の位置情報を解析することで管制指示方法や思考方法について分析を行う。

- (3) 管制方法の柔軟化による容量拡大効果の定量分析

羽田空港再拡張後の滑走路運用を対象に、統計的手法を基にした複数滑走路間のインタラクションを考慮した滑走路容量算定方法を開発し、機材サイズからみた戦略的順序付けの容量拡大効果の定量的評価を行う。

## 4. 研究成果

- (1) 欧米における空港・空域容量に関する詳細調査

①ヒースローにおける戦略的着陸順序付け  
通常、ホールディング (HLD) は到着空港の混雑時などに緊急避難的に使用するが、ヒースロー空港では滑走路処理容量の最大化を意図して戦略的に HLD を使用している。具体的には、空港の進入管制区内に到着機用の HLD パターンを複数設置し、到着機を一旦すべて HLD させるようにし、さらに多少過剰気

味の到着枠を設定することで、常に空港の最終進入経路直前に進入を待つ航空機がスタンバイするように調整をしている。こうすることで継続的需要 (Continuous Demand) を創出し滑走路使用効率の最大化、容量増加を達成している。さらに、このホールディングを複数地点で設定することで、Bunching による着陸セパレーションの短縮を容易化し容量拡大を図っている。連続する機材のサイズの組み合わせで必要な後方乱気流間隔が異なるため、HLD パターンから航空機を最終進入へ誘導する順序を機材サイズの連続性をみながら柔軟に決定しているのである。つまり、ヘビー機とミディアム機を First Come First Serve で着陸させるのではなく、ヘビー機をある程度まとめて (3 機とか 4 機) 着陸させ、その後ミディアム機を連続させる、といった運用により着陸のスループットを極力上げている。このような柔軟なシーケンシングは遅延がある一定程度を超えた際に実施しており、その際、各 HLD スタックにある航空機の機材バラエティを考慮して滑走路容量を最大化する推奨到着順序を管制官に提供する管制支援システムを活用しているそうである。また、各 HLD スタックは複数層からなっており、2 次元のレーダー画面でみると、同じ HLD スタックに入っている航空機の位置を示すシンボルやデータブロック (コールサインや高度、速度などが記載されたタグ) が重なり合い、識別が難しい。そこで、Vertical Stack List (VSL) と呼ばれる支援システムも活用している。VSL では HLD の各層ごとにどの機材が入っているか示すもので、SSR モード S 情報による選択高度も表示することで、HLD 内の複数機の高度処理を円滑化、安全化している。

フランクフルト空港では近年、次世代航法の 1 つである RNAV (Area Navigation) を活用した Linear HLD (RNAV-STAR (Standard Terminal Approach Route : 標準到着経路) の一部区間) と旧来型の Circular HLD を組み合わせたより柔軟な運用も行っている。Circular HLD では HLD パターンから引き出すタイミング次第で最終進入経路上の到着機間隔のロスが出てしまうが、Linear HLD ではその幾何構造上、管制官の意図した間隔設定及び Bunching が比較的容易に実施可能であると想像される。

### ②フランクフルトの HALS/DTOP

HALS では 2 本の平行滑走路のうち一方の滑走路進入端を内側に移設することで 2 本の最終進入経路に高度差をつけ、大型機からの後方乱気流を回避するというシンプルなシステムである。滑走路端を移設した滑走路の進入経路①は、移設してない滑走路の進入経路②より高度が高くなり、かつ後方乱気流は通常下方後方に向かって広がるため、①上に中・

小型機（短い滑走路でも着陸可能）、②上に大型機を着陸誘導することで、①上の航空機は②上の航空機からの後方乱気流を回避することができる。これにより、後方乱気流間隔として必要な5NMのセパレーション(HeavyにMediumが後続する場合)が必要なくなり、レーダーセパレーションの最低安全間隔2.5NM（我が国では3NM）まで短縮することができる。理想的には15%~30%程度の容量増加が期待できるが、実際の容量拡大効果については、着陸機のシーケンシングの問題や到着ダイヤの濃淡により時間あたり1~2回程度と言われている。しかしながら、HALSにおいては、滑走路運用において以下のような不具合が指摘された。

- ・HALSでは、大型機が連続した場合、南滑走路が使用できないため、効率が落ちる。
- ・北滑走路からの離陸機に離陸許可が出しづらい。

このため、南側滑走路の元々の滑走路端も同時に使用可能とするDTOP（Dual Threshold Operation）が計画・開発された。DTOPでは、南側滑走路の2つの滑走路端（25L, 26L）を同時運用して、あたかも平行滑走路が3本あるかのように運用するのが特徴である。すなわち、南側滑走路に、大型機が着陸する場合は、元々の滑走路25Lを使用し、小型機が着陸する場合には滑走路26Lを使用する。

(2)ターミナルレーダー管制シミュレータの開発と管制指示方法に関する分析

### ①シミュレータ開発コンセプト

ターミナルレーダー管制業務に関して、最も基本となる飛行方位、高度、速度の指示と対応した航空機の動きの再現が可能となるよう、必要最低限の部分を模擬可能なシステムとすることを基本コンセプトとし、モニター上の2次元空間に高度を数値として考慮した3次元シミュレータとする。図1にシミュレータのアルゴリズムフローを示す。航空機の発生間隔については平均と標準偏差によるランダム発生と、実験の目的に合わせた発生シナリオを作成し意図的に発生時間を操作する方法の双方に対応できる設定としている。到着航空機1機1機に対して管制官(外部)から指示を出し(入力)、各航空機は指示に従って飛行し滑走路に着陸する。ILS進入経路会合以降は自動航行する設定であるが、航空機の移動は基本的にシミュレータ上のヒューマンインターフェースを用いて手動で行なうものとする。

### ②システム実行画面

図2にシミュレータ実行画面を示す。画面の更新は実際のレーダー(ARTS)と同様の4秒に1回としている。北をモニター上方、8ピクセルを1NMとして南北90NM、東西70NMを対象範囲とした仮想の進入管制区をモニタ

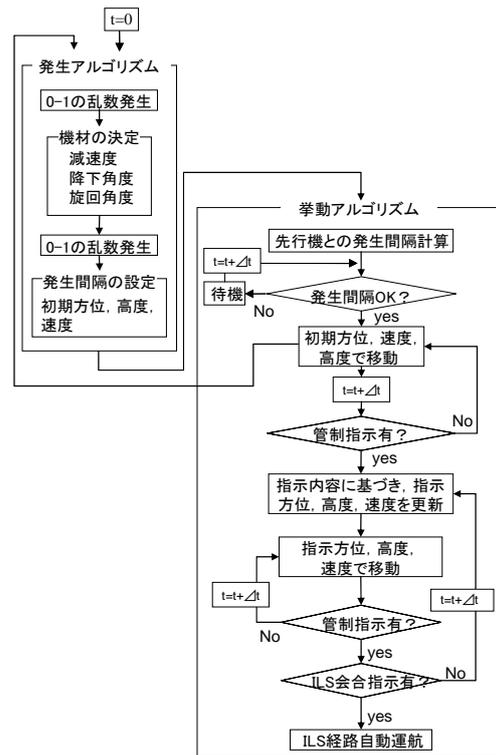


図1 シミュレータアルゴリズム

ー上に再現した。各FIX、標準到着経路、滑走路、各空域設定は東京羽田空港を参考に設定した。図2中の(1)はILS進入経路の延長線、(2)は航空機と飛行状況を示すデータブロック、(3)は管制指示ダイアログ、(4)は各航空機の飛行状況と、どのような管制指示下で飛行しているかを表示している。

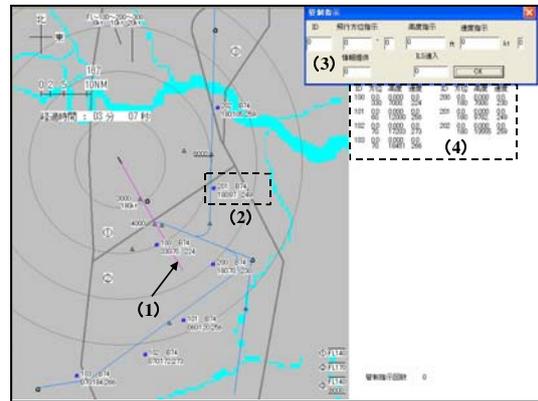


図2 シミュレーション実行画面

### ③ターミナルレーダー管制模擬実験と取得データに関する考察

#### (a)実験の概要

実験条件・方法を以下に示す。

- ・管制官役、パイロット役の2名で行なう。
- ・発生航空機数は最大管制機数が7機程度になるよう作成した発生シナリオを適宜修正し実施した。航空機は北と南からランダムに到着し、管制官役は当該空港の空域バウンダ

リーの内部で到着機の処理を行うよう指示した。

- ・最終進入経路へ会合時の先行機とのセパレーションは通常よりの長めの 10NM を目標として管制することとした。

- ・管制方法は First Come First Serve (FCFS : 先に来た航空機を先に処理する) の管制を前提とした。つまり、到着順序に何か特別な制約をつけず、被験者自身がやり易い順序で到着させた。

(b) 実験結果と考察

図 3 は各実験で取得したデータより作成した被験者別の全管制機の航跡図である。航跡図より誘導方法にも個人差があることがわかる。いずれのケースにおいても進入管制空域内が混雑してくると着陸待ちで先行機が先詰まりをしてくるため、後続機に対して、滑走路から離れた方向である東側にレーダベクターを行なっている様子が分かる。特に被験者 A に対しては他の被験者よりも多くの航空機を発生させたため北から進入してきた航空機に対して大幅なレーダベクターを行なっている様子がわかる。また被験者 B, D, E に関しては北から進入してきた航空機に対してのレーダベクターをあまり行わず、ILS 進入開始点以前で複雑な誘導を行なっている一方、C は北から進入してきた航空機に対してもレーダベクターを行ない、ILS 進入開始点に至るまでの十分な距離を残しており、ILS 進入開始点付近で複雑な誘導を避けている様子を窺うことができる。

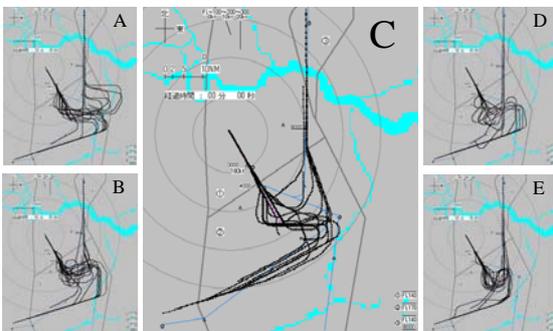


図 3 各実験航跡図

図 4 は被験者 C、図 5 は被験者 E の、各航空機についての経過時間と最終進入開始点からの距離を示した時空間図を示している。これらの図より、進入してきた航空機に対して管制指示を行ない、設定した間隔にて到着、整列させることがターミナル管制の主要な業務であるということを見て取れる。

到着航空機の順序付けに関しては、図 4 の C と図 5 の E を比較すると、C は航空機の発生順（被験者の管制下になった順）通りに最終進入経路に会合させているが、E は一部順序が逆転している。E は途中で最終進入までの

距離が逆転した航空機（(2)と(3)では 300~1000 秒あたり）については一部到着順を変更し距離が近い航空機から順に到着させている様子がわかる。これは前述の通り実験条件を FCFS としたため、基準点までの距離で順序が決定しているものと思われる。一方、C に関しては発生した順序のまま到着させている。C も E と同様、基準点までの距離が逆転している航空機のペアがあるにも関わらず、発生順で到着させるために、再び距離を調整して到着させている様子がわかる。これについては、逆に考えると、FCFS ではなく機材サイズの連続性を考慮して意図的に順序の入れ替えを行なう行為とも捉えることができる。管制指示に関するほんの一例にすぎないが、到着航空機間には機材ごとに定められている後方乱気流間隔を満たす必要があり、上記のような意図的な順序の入れ替えを行なうことが可能であれば、機材の連続性を考慮した戦略的な順序の入れ替えによる、着陸間隔の短縮を期待することができると思われる。

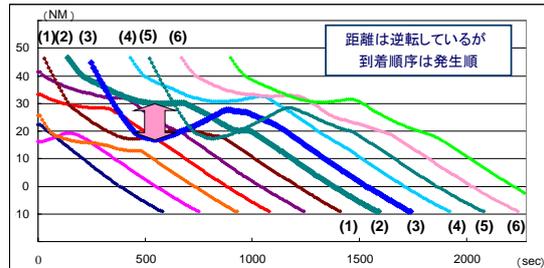


図 4 C の到着航空機時空間図

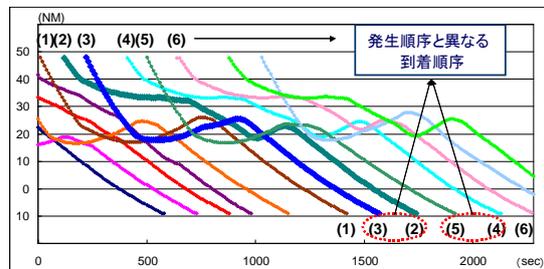


図 5 E の到着航空機時空間図

(3) 羽田再拡張後を対象とした滑走路処理容量算定方式の開発と容量拡大方策

① 容量算定の基本的な考え方と占有時間

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、再拡張後は図 6 に示す通り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、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、あるタイミングで先行機から後続機へ占有権が移る

こととした。

次に、D着陸機（前後はC離陸）を例に処理容量算定のもとになる占有時間の説明をする。D着陸機の占有時間 $T_{CDC}$ 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 $T_{C(H)DC}$ は、先行C離陸機がCD交点を通過後、後続D着陸機が同地点を通過まで2分間の後方乱気流間隔が必要となる。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

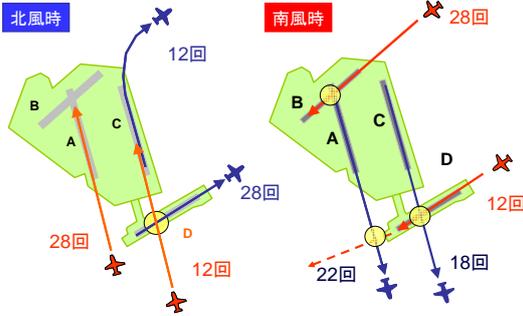


図6 羽田再拡張後の滑走路容量（計画値）

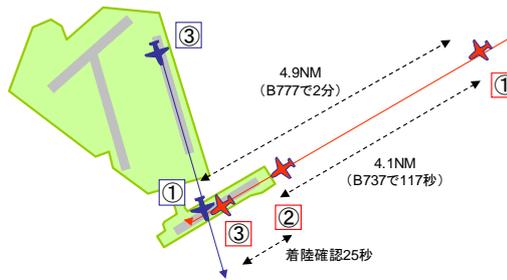


図7 C離陸→D着陸→C離陸の占有時間 $T_{CDC}$ の概要

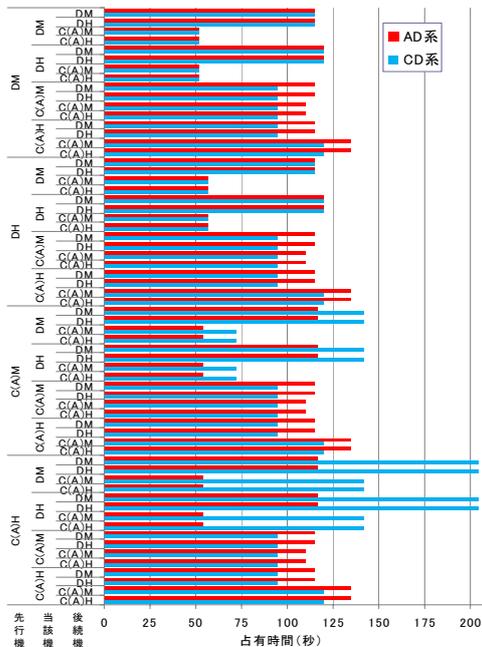


図8 CD系・AD系における全組み合わせの占有時間

7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。このことから、 $T_{C(H)DC}$ の内訳の $T_{C(H)DC1}$ を「4.1NM手前～滑走路進入端」、 $T_{C(H)DC2}$ を「滑走路進入端～着陸確認」とすると、 $T_{C(H)DC1}$ 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）、 $T_{C(H)DC2}$ は25秒（仮定）となり、 $T_{C(H)DC}$ は142秒となる。図8にはAラン-Dラン系も含めた全組み合わせの占有時間を示す。空港全体での容量としては両系を同時に考慮して容量算定が必要であるが、ここではDラン着陸間隔を離陸機の数や種別により変化する最低間隔の最大値で固定して制御することを想定して計算を行った。

### ②戦略的順序付けによる容量拡大

図6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、図8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。

表1 戦略的順序付けによる容量拡大の方策の例

	容量計画値を再現する運用 【容量：40回/時】	機材の戦略的配置 【容量：44回/時】
D着陸機	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）。	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。
A離陸機	D着陸機の間機種を問わず2機ずつ出発。但し、2サイクルは1機のみでよい。	D着陸機の間機種を問わず毎回2機ずつ出発。
C離陸機	D着陸機の間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。	D着陸機の間毎回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）		

まず、A・C離陸はFCFS（HM順序等はランダム）を仮定すると、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。そこで、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し、1 サイクルでは着陸を連続させるといった柔軟な間隔設定を許容すると 40 回/時の容量が達成できる（表 1）。また、そのような戦略的な離着陸順序付けを最大限実施すると最大 44 回/時まで容量拡大が可能となることが分かった（表 1）。

#### (4) 今後の展望

本研究では従来我が国ではあまり焦点の当てられていなかった航空管制からみた空港容量拡大方法について、海外先進事例調査を踏まえつつ、ターミナルレーダー管制を対象にした模擬実験シミュレータの開発と管制指示方法に関する分析、また羽田再拡張後を対象とした戦略的離着陸順序付けによる容量拡大効果について定量的に分析を行った。我が国の現行の管制では戦略的な離着陸の順序付けは基本的に行われていないが、そのことによる滑走路容量拡大効果を定量的に示し、既存ストックの有効活用の重要性が高まる中で、非常に示唆に富む結果を示すことができた。今後は、これら柔軟な管制運用による航空機遅延への影響や環境影響などについても分析が必要と考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

平田輝満：航空交通流管理の現状と空港容量に関する一考察，土木計画学研究・講演集，Vol. 39，2009（査読無）。

平田輝満：ニューヨーク首都圏空域における航空管制の現状と空域再編－我が国首都圏空域における航空管制運用の効率化への示唆－，運輸政策研究，2010（査読あり：登載決定）。

〔学会発表〕（計 1 件）

平田輝満：航空交通流管理の現状と空港容量に関する一考察，第 39 回土木計画学研究発表会，2009 年 6 月 13-14 日，徳島大学。

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 輝満 (HIRATA TERUMITSU)

財団法人運輸政策研究機構運輸政策研究所  
研究員

研究者番号：80450766