

# ターミナルレーダ管制シミュレータの開発と管制指示方法に関する基礎的分析

## Development of a Terminal Radar Approach Control Simulator and Fundamental Analysis of Air Traffic Control

屋井研究室 05M30290 高田 潤一郎 (TAKADA, Junichiro)

Keywords : 航空管制, ターミナルレーダ管制, シミュレータ, 着陸順序付け, 安全間隔

Keywords: Air traffic Control, Terminal Radar Control, Simulator, Sequencing, Spacing

### 1. 本研究の背景と目的

首都圏空港では慢性的な容量不足が問題となっている。現在、羽田空港再拡張、成田空港延伸事業が計画・進行中であるが、需要の堅調な伸び等により容量拡大後、再び不足することも十分考えられる。さらに首都圏のみならず、福岡、那覇などの一部の地方空港でも需給が逼迫した状況となっており、ハード面の整備による容量拡大と併せて、既存ストックの有効活用策、つまり航空管制から見た容量拡大方法の検討を行なう必要がある。既存ストックの有効活用策に関する研究として、その多くは滑走路の運用方式の変更による容量拡大施策であり、山田ら<sup>1)</sup>は機材サイズ別の滑走路運用を行なうことで滑走路処理容量が増加する可能性をシミュレーション分析により定量的に評価している。しかし滑走路運用方式の変更にはアプローチエリアでそのための対処が必要であり、提案した運用方式の実行可能性については疑問が残る。アプローチエリアでの航空交通流に着目したものととしてLucioら<sup>2)</sup>は効率的な離着陸を行なうために戦略的な順序付けを達成するためのscheduling modelを構築している。しかし到着航空機群が予め与えられており、遅れ時間や管制官のワークロードも考慮されていない。空港容量を総合的に判断するためには複数航空機の位置関係、飛行方位、高度、速度を大局的に見ながら各航空機に指示を出しているターミナルレーダ管制状況を考慮した上で評価していく必要がある。

しかし、航空管制に関するデータが公開されておらず、データの制約が非常に大きいという問題が航空管制にはある。上記のような研究は幾つか行なわれているが、全体数としてはまだまだ少なく、また広い視点から議論することが出来ない状況を作り出している一要因であると考えられる。

以上のような問題意識に基づき、本研究ではまず管制官の思考や管制指示がどのように行なわれているのか分析を行なうためのツールとして実際のターミナルレーダ管制業務を模擬可能なターミナルレーダ管制シミュレータの開発を行なった。さらに開発したシミュレータを用いて、管制官または管制経験者の方を対象にした簡易な実験を行ない、管制指示内容、指示時の航空機位置情報等を取得した。取得データを解析することでシステムの検証及び、管制指示方法や思考方法について基礎的分析を行なった。

本研究の対象範囲と位置づけを図1に示す。ターミナルレーダ管制シミュレータは管制業務の理解や計画、施策検討に活用可能なコミュニケーションツール、また管制官をAI化し総合的に容量を算定するシミュレータとして活用可能であることを前提に開発した。

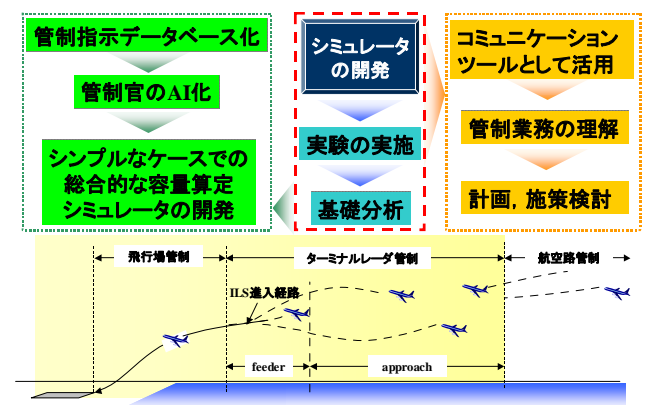


図 1 本研究の対象範囲と位置づけ

### 2. ターミナルレーダ管制

#### 2.1 ターミナルレーダ管制業務

航空路管制よりハンドオフされ進入管制区へ入域した計

器飛行方式による航空機に対して、レーダーを用いて各航空機の位置情報、飛行方位、高度、速度を識別し、到着航空機の着陸順序付け、高度処理と併せて安全に着陸するための速度調整、飛行方位指示による安全間隔の設定(以下レーダベクター)を行ない、さらにタワー管制にハンドオフするために到着航空機を誘導し同一高度で一列に配列する一連の業務を指す。

混雑空港では航空路管制よりハンドオフされた航空機の到着順序付けを行ない、レーダベクターにより適当な間隔を設定しフィーダー管制へハンドオフを行なうアプローチ管制と、安全間隔を調整し到着機を一列に配列しタワー管制にハンドオフするフィーダー管制に分離されており 3~4 名の管制官が業務にあっている。

上記に示したターミナルレーダ管制業務は、管制官に即時の判断や誘導技術が問われるセクションである。

## 2.2 既存データによる管制交信時間分析

表1, 図2はLive ATC.net<sup>3)</sup>で公開されているJFK空港ターミナルレーダ管制の 54 回分の音声による管制交信データの集計結果である。交信全体には平均 8 秒強を要しており、標準偏差が 3 秒強であることから指示内容の組み合わせや進入許可の有無によって管制交信時間が異なると考えられる。管制指示内容の割合は方位指示が最も多く、ターミナルレーダ管制業務においてレーダベクターが最も重要な要素であることが窺える。また管制官は一度に複数機に対して管制指示を行なうことが出来ず、平均交信時間が 8 秒強であることから 1 分間で 7 回程度の指示を出すことが限界であると考えられる。

しかし実際に管制官は空港周辺に進入してくる複数航空機の位置情報、飛行方位、高度、速度等を大局的に見ながら各航空機に対して指示を出しているため、管制指示方法を分析するためには指示内容やその割合、管制交信時間のみではなく、指示時の航空機の位置情報を同時に分析する必要がある。

表 1 管制指示時間 (sec)

	平均	標準偏差
交信時間	8.45	3.32
指示時間	4.77	1.91
空白時間	0.75	0.75
応答時間	2.94	1.50

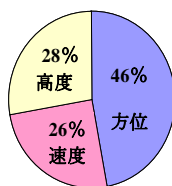


図 2 管制指示割合

## 3. ターミナルレーダ管制シミュレータの開発

### 3.1 基本コンセプトとアルゴリズムフロー

2.1 で述べたターミナルレーダ管制業務を模擬可能なシステムとすることを基本コンセプトとする。図 3 にアルゴリズムフローを示す。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。

機材、発生間隔は目的に応じて設定可能としており、平均、標準偏差を設定し正規分布に従いランダム発生させることを基本としているが、航空機発生シナリオを作成し同一条件にて実験を行なうことも可能な設定としている。

尚、本研究で開発したシミュレータは管制官一人への実験を前提としているため、前述のようなアプローチ、フィーダー管制の区別はないものとする。

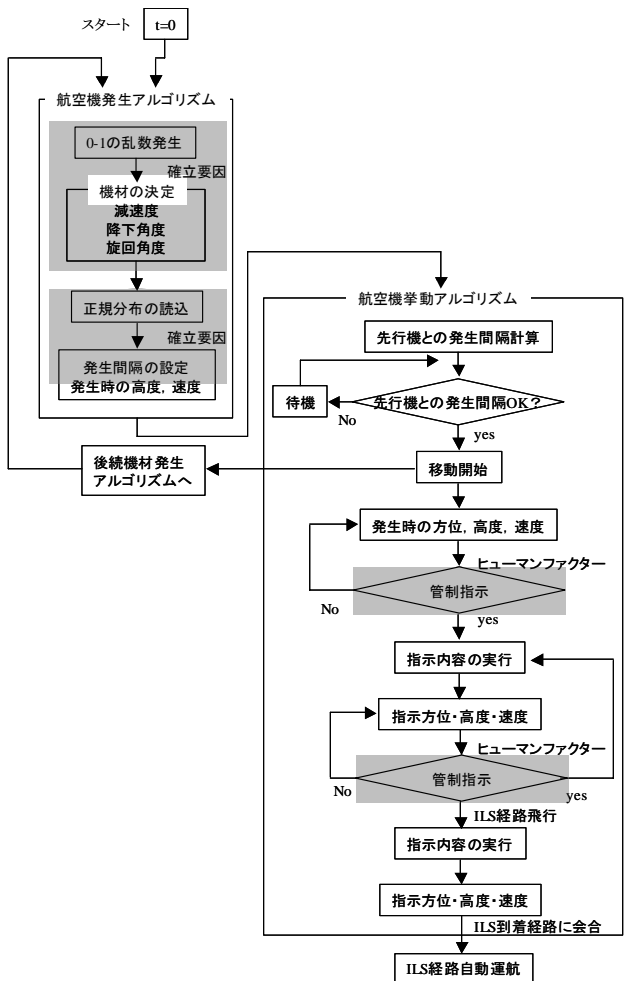


図 3 航空機発生・移動アルゴリズム

### 3.2 各航空機性能設定

各航空機の性能設定は航空保安大学校で使用している訓練シミュレータの機材別性能データの提供を受け、さらに実際の航空機挙動に関して管制経験者にヒアリングを行なった上で表 2 に示す各性能を設定した。また最終進入開始点以降はエアラインの方から提供を受けたデータを基に昨年度までに開発したシミュレータ<sup>5)</sup>を簡略化したものと統合し、滑走路端からの距離に応じて設定されている制限速度となるよう各航空機の減速度を設定している。

表 2 機材別性能データ, 機材別最終進入速度

機材	各航空機別性能設定			最終進入以降各地点速度設定			
	旋回角度	降下角度	減速度	9.1NM	5NM	3NM	0NM
B747	1.25(deg/sec)	300(ft/mile)	1(kt/sec)	180kt	160kt	146kt	146kt
B767	1.25(deg/sec)	320(ft/mile)	1(kt/sec)	180kt	160kt	134kt	134kt
B737	1.25(deg/sec)	300(ft/mile)	1(kt/sec)	180kt	160kt	127kt	127kt

(NM=1852m, kt=NM/hour)

### 3.3 システム実行画面

図 4 にシミュレータ実行画面を示す。北を上方, 8 ピクセルを1NM として南北 90NM, 東西 70NM を対象範囲とした進入管制区をモニター上に再現した。各 Fix, 経路, 滑走路は東京羽田空港を参考に設定した。図 4 中の(1)は ILS 進入経路, (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。

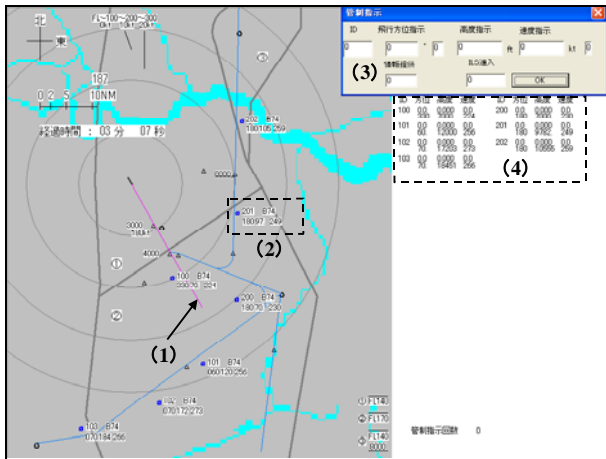


図 4 シミュレータ実行画面

### 3.4 進入方式と航空法規定による設定

進入方式は ILS 進入方式とする。ILS 進入経路会合後は ILS 進入経路に乗り, 標準的な減速度, 降下角度にて最終進入開始地点までに速度 180kt, 高度 3000ft まで自動誘導される設定としている。但し, 自動誘導間に上記の速度,

高度を達成可能な状態まで管制した上で ILS 進入許可を行なうことを前提とする。

また高度 10000ft に達した時点で速度が 250kt 以上の場合は航空法規定により自動的に水平飛行に移り 250kt 以下まで自動的に減速し, その後指示高度まで降下する設定としている。

### 3.5 ヒューマンインターフェースを用いた指示方法

シミュレーション実行中にキーボードを押すと管制指示ダイアログ(図 4 中(3))がモニター右上に出現する。テンキー, Tab キーを用いてダイアログ内に指示対象航空機 ID, 各指示内容を入力し指示を実行(Enter)するとダイアログが閉じられ管制指示が航空機に伝達される設定となっている。指示実行 5 秒後から表 2 の各航空機性能設定に則り挙動が変化し始める。図 5 は ID201 の航空機に対して方位 300 度, 高度 4000ft, 速度 210kt, ILS 進入経路会合後自動運航の指示例である。

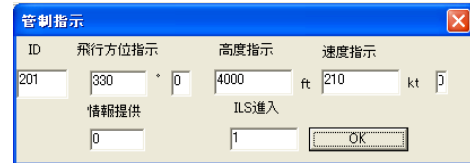


図 5 管制指示ダイアログ

### 3.6 システム出力データ

シミュレーション実行中は 10 秒に 1 回, 各航空機位置情報, 飛行方位, 高度, 速度データを記録している。また管制指示時には各指示内容と指示時の上記と同様の各航空機位置, 飛行情報を記録する。一例として図 6 に取得データより作成した管制指示と対応した航空機挙動, 高度, 速度推移を示す。

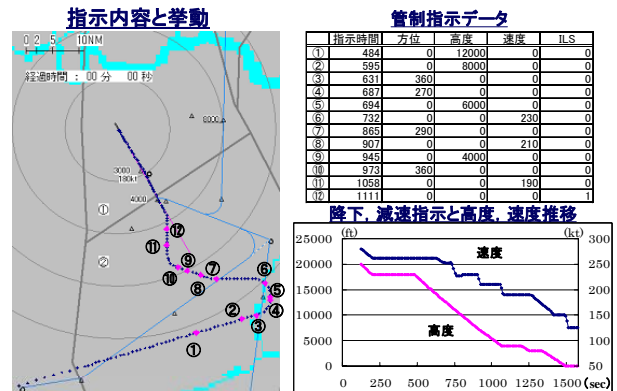


図 6 取得データ一例

## 4. 管制指示方法に関する基礎的分析

### 4.1 プレ実験の概要

プレ実験の目的は、開発したシステムの改良点を明らかにすること。今後、本格的に行なう実験の実験方法、実験条件の検討を行なうこと。管制指示データを取得することである。

プレ実験条件・方法は管制官役、パイロット役の2名で行ない、管制官役の音声による指示を、パイロット役が入力する方法を取った。発生航空機数は最大管制機数が7機程度となるような航空機発生シナリオを作成し適宜修正を加えて実験を実施した。また1名による実験で混雑時と同様のワークロードを再現する方法として、最終進入セパレーションを通常よりも長い10NMと設定し、レーダベクターの機会が増加するようにした。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、また最終進入開始点で速度180kt、高度3000ftまで処理し、誘導することを条件とし、5名の方にご協力いただき60分程度の実験を実施した。

### 4.2 指示回数と指示内容

図7, 8, 9に各実験にて取得した指示回数と指示内容, 1機当たりの平均指示回数, 合計指示回数と10分当たりの指示回数示す。AからEの五実験を実施し括弧内は30分当たりの発生航空機数を示しおり、C, D, Eは同一発生航空機シナリオを用いている。

図7よりターミナルレーダ管制業務において方位指示によるレーダベクターが非常に重要な要素であるということがわかる。一方、Dの被験者のみ方位指示より高度指示が多くなっていることがわかる。これはターミナルレーダ管制における管制方法は大きく二つに分けることができ、レーダベクターを多用し航空機間の水平セパレーションを常に満たそうと管制する方法と、各航空機に1000ftの高度差を設定し、あるポイントに航空機を集中させ、その後、効率よく降下させ安全間隔を設定しILS進入経路に乗せる方法があると言われている。双方に一長一短があり、前者では安全性は常に担保されている一方で、一度開いてしまったセパレーションを短縮することは困難で、セパレーションのロスに繋がりがかねない。後者はセパレーションの調整が利く一方で、高度差の設定を誤ると大事故に繋がる危険性がある。

Dの被験者は降下指示が方位指示よりも多く、降下指示

内容も1000ft~3000ft程度の幅で行なっており、連続する降下指示については必ず1000ftの間隔をあけて実行していたため、まず高度差1000ftのvertical separationを達成し、その後レーダベクターにて間隔付けとILSまでの誘導を行なっていることが窺える。

また図8より航空路管制からハンドオフされた航空機に対して約8回程度の指示を行ない、ILS進入許可を行なっていることもわかる。

図9と図8との比較から管制指示には個人差があり、一度に複数項目まとめて実行するケースと個別に実行するケースで指示回数に差異があることがわかる。また管制機数が増加すると指示回数が増加するという相関関係にある傾向があること考えることができる。

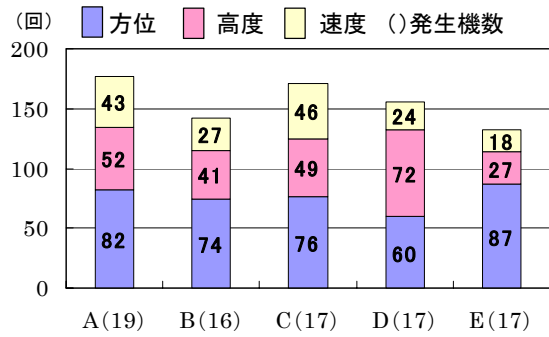


図7 管制指示回数

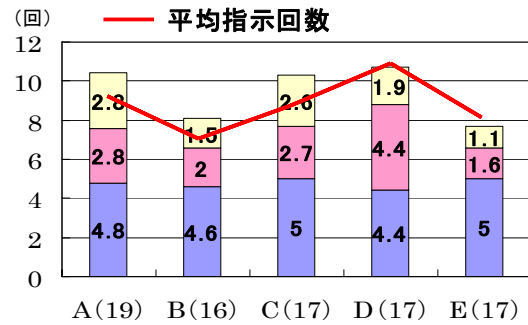


図8 1機に対する管制指示内容と平均回数

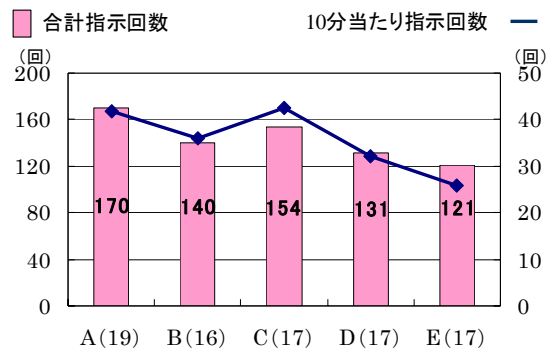


図9 合計指示回数と10分当たり指示回数

### 4.3 到着航空機の誘導方法, 間隔付け

図 10 は各実験で取得したデータより作成した航跡図である。航跡図より誘導方法に個人差があることがわかる。いずれのケースにおいても空域が混雑してくると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Aに関しては大目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なわず, ILS進入経路端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進入端に至るまでの十分な距離を残しており, ILS進入端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 11 はC, Eの方位指示を行なった際の当該航空機の位置と傾度の関係を示している。上記の内容を裏付けるようにCはEと比較して指示航空機の位置が分散している一方, EはILS進入端付近で非常に多くの方位指示が行なわれているという結果となっている。以下ではCに着目した分析結果について述べる。

図 12 は方位指示が行なわれた時間から 100 秒前までの航空機トレイルを示している。尚ここで着目した方位指示は, 安全間隔の調整ではなく, 管制官の決定した順序で到着させるための誘導としての意味合いを汲み取ることの出来るものとする。

まず図 12 中の1からは水色の航空機に対してILS進入経路方向に方位指示を行なっていることがわかり, この指示内容から, 紺色の先行機に続き到着させるという意図を窺うことができる。2, 3, 4 に関しても同様に設定した順序にて到着させるための方位指示であるということが窺える。一方 5, 6 では北から進入してきた航空機に対して東側への方位指示を行なっていることがわかる。さらに 7 で北から進入し東側へベクターさせた航空機に対してILS進入経路方向に方位指示を行なっていることがわかる。

以上よりCの場合, 到着させる航空機間に, 適当な間隔を設定するまでは東側にレーダベクターさせ, ILS進入経路端での誘導が複雑になることを避けている様子を窺うことができる。間隔が設定されるとILS進入経路に向け変針し, その後間隔付けを意図した方位指示, またILS進入経路に滑らかに会合することを意図した方位指示が行なわれていることがわかる。

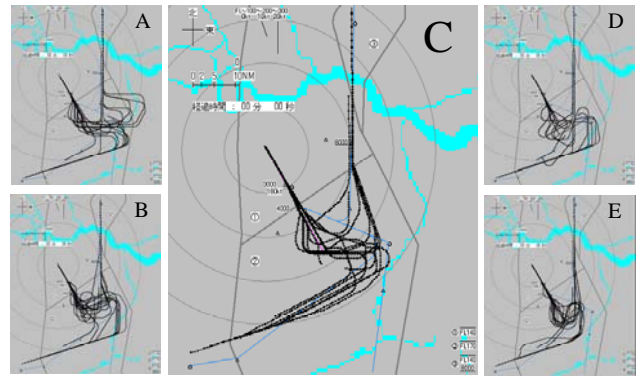


図 10 各実験航跡図

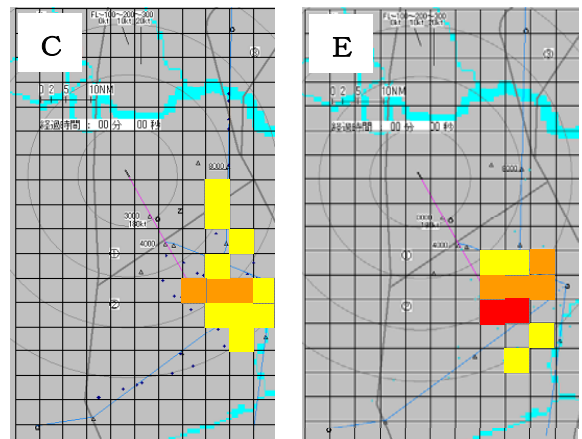


図 11 方位指示位置

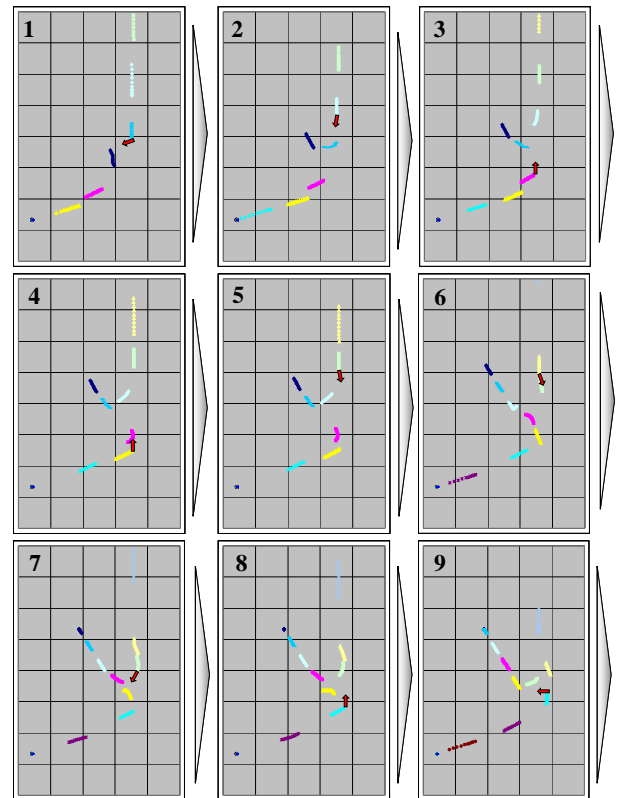


図 12 方位指示とトレイル

#### 4.4 到着航空機の順序付け

図 13 は経過時間と基準点までの距離を示した時空間図である。4.1 でも述べたが FCFS を前提としているため、発生した順序で到着していることがわかる。しかし基準点までの距離が大幅に逆転しているにも関わらず、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。図 14 には距離が逆転している 300 秒から 1000 秒までの②、③機の航跡図を示している。図 14 より距離、高度ともに③機を先に到着させたほうが効率的であると考えら得るが FCFS で設定した順序で到着させようと③機を東側にレーダベクターし順序を入れ替えていることがわかる。つまり意図的な順序の入れ替えを行なっていると考えられる。

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、後方乱気流間隔の短縮を期待することができる。

今後、本格的な実験を実施し詳細まで分析していく必要があるが、プレ実験にて戦略的な運用の可能性を窺うことができたと考えられる。

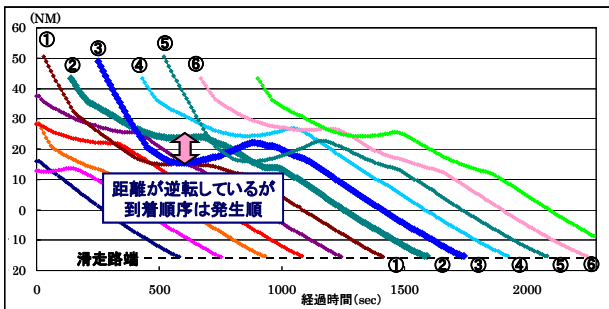


図 13 到着航空機時空間図

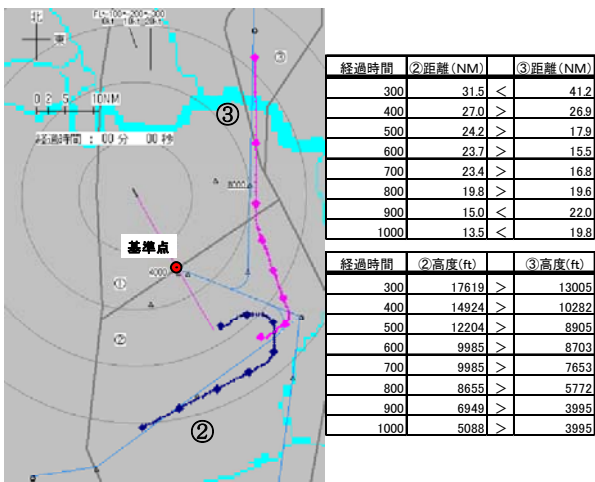


図 14 ②、③機航跡図と基準点までの距離、高度

#### 4.5 シミュレータの再現性と実験条件・方法の考察

シミュレータの再現性を向上させるため改善点を以下に示す。角加速度は現状では定数として与えているが、高度、速度の関数で設定していくことも検討していく。また航空機の飛行状況を示すデータブロックに関しては、管制官側から自由に移動できるように改善していく必要がある。

実験条件・方法としては、最終進入のセパレーションを長めの 10NM と設定したことで、混雑時と同様のワークロードを再現することができ、単独で混雑時を実験可能な条件を設定することができた。また指示入力方法を簡略化し管制官の方が直接入力する方法も検討していく。

また簡略化した部分については明確に示し、理解していただいたうえで実験を行なうことで、取得データの再現性が向上すると考えられるため、実験条件の説明には注意を払う必要がある。

### 5. 結論と今後の課題

本研究では管制指示内容、指示時の各航空機位置情報取得を目的とし、ターミナルレーダ管制業務を模擬可能なシミュレータを開発した。またプレ実験より、シミュレータの改善点を明らかにし、実験条件・方法に関する知見を得た。また管制指示方法に関する基礎的分析を行なった。

今後は、本研究で得られた結果を参考に実験条件の検討、システムの更新を行ない、本格的なターミナルレーダ管制実験データを取得し、到着航空機の着陸順序付けや着陸安全間隔の設定のためのベクター方式に関して、周辺航空機との位置関係・滑走路までの距離・到着予定時間・機材サイズなどの要因が管制指示方法や思考方法にどのように影響しているか定量的に分析することが課題としてあげられる。

#### <参考文献>

- 1) 山田直樹: 空港管制とエアラインの行動からみた空港容量拡大に関する研究, 屋井研究室, 平成 17 年度, 修士論文
- 2) Lucio Bianco, Paolo Dell' Olmo, Stefano Giordani: Coordination of Traffic Flows in the TMA, New Concepts and Methods in Air Traffic Management, pp95-pp124, 2001
- 3) LiveATC.net : <http://www.liveatc.net/feedindex.php?type=class-b>
- 4) 計器進入方式・出発方式及び最低気象条件の設定基準, 航空路等設定基準, 航空保安施設設置基準: 鳳文書林出版
- 5) 平松健志: 航空管制・騒音を考慮した空港容量算定方式に関する研究, 屋井研究室, 平成 16 年度, 修士論文