

22. 洋上合流シミュレータについて（2）

管制システム部 ※福田 豊 福島 幸子 井無田 貴 岡 恵 塩見 格一

1. はじめに

洋上空域を飛行する航空機は、原則として特定の航空路を選択し、レーダ空域内より大きな管制間隔で飛行している⁽¹⁾。これは、航空管制機関が航空機の位置を実時間で監視できないこと、パイロットと航空管制官の直接通信ができないこと等による。レーダ空域から洋上空域に出域する航空機には、出域前に洋上空域の管制間隔を確保する。

現在、航空管制官は航空機の位置を示すレーダ画面および飛行計画が記載された運航票を使用して、航空機間に適正な間隔を確保して洋上空域に出域させるための管制承認を判断している。間隔が確保されない状態が予測される場合は、出発前の航空機に対しては、出発待機および高度変更、飛行中の航空機に対しては、主に高度変更を使用し、間隔を確保する。

航空機間に適正な間隔が確保された洋上空域への出域の計画をする業務を支援する機能を検討するために、洋上合流シミュレータを製作した⁽²⁾。その後、航空管制官参加のシミュレーション実験等により、現実的な運用環境に対応するための機能向上を実施した。

本報告では、洋上合流シミュレータの表示および操作機能、問題解決機能を紹介する。

2. 概要

2.1 基本機能

洋上合流シミュレータは、検査点を通る航空機を検索し、航空機間の間隔を検査し、間隔が確保されていない場合は、出発待機、高度変更等の飛行計画の変更案を算出する。検査点は、洋上空域へ出域する地点として、航空機の通過時に必要とする最低時間間隔と共に定義する。図1に検査点の例を示す。航空機の検査点の予測通過時刻、希望通過高度等は、飛行計画に基づいて算出する。

2.2 構成

洋上合流シミュレータは、図2のとおり、通

過計画部、航跡表示部、簡易飛行場部で構成される。



図1 洋上空域への航空路と検査点の例

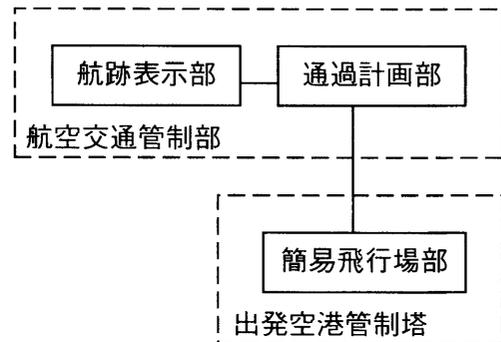


図2 洋上合流シミュレータの構成

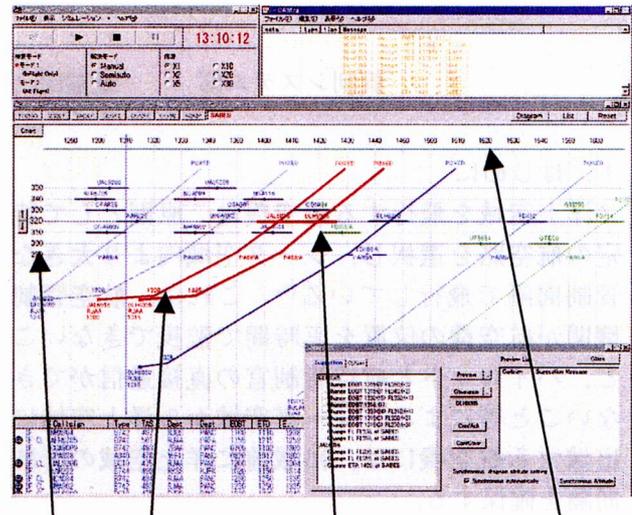
通過計画部および航跡表示部は、航空交通管制部の洋上空域へ出域する航空機を管理する航空管制官の使用を想定する。通過計画部は、航空機の間隔検査、解決案の算出、シミュレータの制御等を表示する。航跡表示部は、航空機の現在および将来位置、飛行経路等を地図上に表示する。

簡易飛行場部は、出発前管制承認を発出する空港の管制塔の航空管制官の使用を想定し、定義された空港の出発機の情報を表示する。自動または手動で出発機に関する管制承認の要求、

離陸等のイベントを通過計画部に送信する。

通常の機器構成としては、通過計画表示部、航跡表示部、簡易飛行場部に各1台のMicrosoft Windows NT 4.0 のパソコンを使用する。これらのパソコンはネットワークで接続され、データおよびイベントが送受信される。航跡表示部と簡易飛行場部は、シミュレーションの目的に対応して、接続状態と非接続状態の選択ができる。画面表示を切り替えて使用することにより、通過計画部、航跡表示部、簡易飛行場部を1台のパソコン上で実行することができる。

ソフトウェアの開発環境としては、Microsoft Visual C++ 6.0 および Microsoft Visual Basic Scripting Edition (VBScript) を使用した。



高度 出発空港の情報 検査点通過情報 時刻

3. 画面表示

検査点の航空機の通過計画をグラフィカルに表示する方法として、これまでは図3に示すダイアグラム・ウィンドウを使用していた。ダイアグラム・ウィンドウでは、以下のような課題があった。

- (a) 検査点の通過時刻が接近した複数の航空機について、画面上での航空機の便名が重なり識別しにくい。
- (b) 航空機の情報表示が便名だけに制限される。
- (c) 表示高度が7フライトレベルであり、より広範囲の高度を同時に表示できない。

これらの課題を解決するために、出発空港に関する情報を省略し、検査点を通る航空機をボックスで表現する画面（ボックスチャート）を製作した。

3.1 ボックスチャート

図4にボックスチャートの画面表示例を示す。横軸に時刻、縦軸に高度を示す。航空機をボックスで表現し、その位置により検査点での高度と通過予定時刻を示す。ボックスの左辺の時刻が通過予定時刻、横幅が後続機との間に確保する最低間隔を示す。

ボックス内の文字情報は、便名、指示されたマックナンバー、型式、希望高度、出発空港を示す。希望高度は、割当高度と異なる場合のみ、出発空港は国内出発機のみに表示する。

図3 ダイアグラム・ウィンドウ

複数の航空機の通過時刻が接近した場合は、相互のボックスが隠れないように高度帯の上下の幅を拡大し、ボックスを上下に並べて表示する。先行機と後続機のボックスに上下の重なりが発生している場合は、定義された間隔が確保されていない状態を示す。

ボックスの色は、航空機の状態を示す。管制承認の要求前の出発機と東京飛行情報区（FIR: Flight Information Region）および那覇FIRに入域前の通過機を緑色、管制承認済の出発機と東京FIRおよび那覇FIRに入域後の通過機を水色、管制承認要求中の出発機を黄色で示す。間隔が欠如している状態の航空機の文字を赤色で示す。

上辺に線があるボックスは隣接FIRから入域する予定の通過機、下辺に線があるボックスは出発機を示す。通過機は東京FIRまたは那覇FIRに入域した時点、出発機は離陸した時点で線を消去する。これはレーダによる監視前後による予測精度の変化を識別するために使用し、線が無いボックスは、予測精度が高いことを示す。

高度の背景色は、その高度に割当てられた航空機の飛行方向等を示す。深緑色(E)は東方向、黄緑色(EW)は東西方向の飛行を示す。

これらのボックスや背景の色は、外部ファイルで定義され、容易に変更することができる。

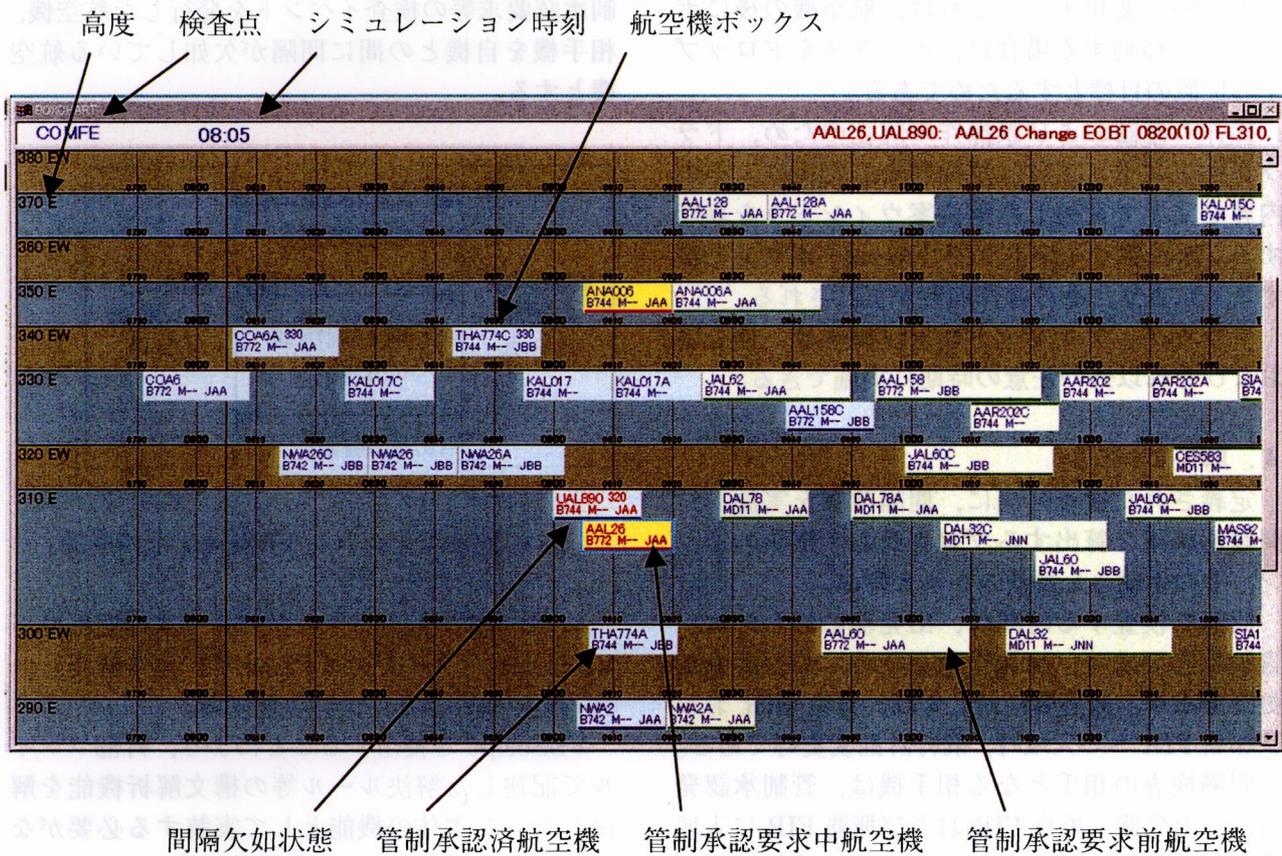


図4 ボックスチャート

3. 2 ドラッグ・アンド・ドロップ操作

ボックスチャートでは航空機をボックス、高度を上下に幅を持つ帯状領域としての面積を持つオブジェクトで表現する。航空機を点、高度を線で表示していたダイアグラム・ウィンドウに比較して、航空機をマウスで選択し、目的の高度に移動させる操作が容易となる。

間隔欠如状態の航空機に対する主な制御方法は、通過時刻変更、高度変更、それらの組み合わせである。これらの制御の割当を航空機ボックスに対するドラッグ・アンド・ドロップ操作で実現できる。画面上のドラッグ・アンド・ドロップ操作は、文字で表示された解決案を選択する方法と比較して、状況認識および操作が容易となる。

ドラッグ・アンド・ドロップの操作例を図5に示す。高度を変更する場合は、航空機のボックスを上下方向にドラッグして、目的の高度でドロップする。通過時刻を変更する場合は、左

右方向にドラッグして、目的の通過時刻でドロップする。航空機のボックスを選択し、ドラッグを開始した時点で、他の航空機のボックスの横幅は、ドラッグ中の航空機を後続機とした場

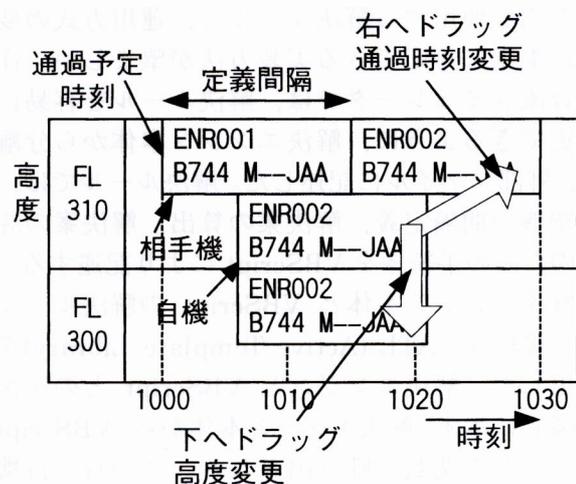


図5 ドラッグ・アンド・ドロップ操作例

合の間隔に変化する。これは、航空機後にボックスを移動する場合に、ボックスをドロップする位置の目標とするためである。

操作の確認および誤操作の防止のため、ドラッグ・アンド・ドロップ操作をした後に、その内容を文字で記述した解決案ウィンドウを表示する。解決案ウィンドウで「Avoid」ボタンを押すことにより、その操作内容が実行される。

ドラッグ・アンド・ドロップ操作は、検査時およびそれ以外の任意の時期に実施できる。

4. 解決エンジン

定義された検査時期に、間隔検査を実施し、問題解決案を算出するプログラムを解決エンジン、その手続きを解決ルールと呼ぶ。

間隔を検査する時期は、出発機に対しては、管制承認要求時、出発空港離陸時、飛行計画変更時であり、通過機に対しては、東京 FIR および那覇 FIR への入域時、飛行計画変更時である。

間隔検査の相手となる相手機は、管制承認発出済の出発機、東京 FIR および那覇 FIR に入域済の通過機とするモード、および、飛行計画が提出されている全航空機とするモードの 2 種類がある。

4. 1 解決ルール

航空機間に必要とされる最低間隔、間隔を確保するための航空機に対する制御方法等の航空交通システムの運用方式は、関連する技術の進歩等に対応して変更される。管制情報処理システム内で使用する解決ルールは、運用方式の変更に柔軟に対応できる実装方法が望ましい。洋上合流シミュレータでは、解決ルールを容易に変更できるように、解決エンジン本体から分離し、外部ファイルに記述した。解決ルールでは、航空機の間隔定義、解決案の算出、解決案の評価のための手続きを VBScript により記述する。

解決エンジン本体と VBScript の解決ルール間の接続は、ATL (Active Template Library) を使用した。解決エンジンと VBScript との連携を図 6 に示す。解決エンジン本体から、VBScript で記述した関数が呼び出される。この時、自機と相手機の情報を VBScript が参照して、処理を実行し、処理結果を返す。ここで、自機を管

制承認要求等の検査イベントを発行した航空機、相手機を自機との間に間隔が欠如している航空機とする。



図 6 解決エンジンと VBScript との連携

VBScript で記述された解決ルールの変更は、VBScript ファイルをエディタ等により修正し、再読み込みすることにより実現する。

VBScript を使用することにより、外部ファイルで記述した解決ルール等の構文解析機能を解決エンジン本体の機能として実装する必要がなくなり、ソフトウェアが簡易化できた。

4. 2 間隔定義

航空機は出発空港の滑走路待ち、検査点までの飛行経路上での関連機との間隔確保のための経路変更等の影響により、当初予測した検査点の通過時刻が変化することがある。検査点での航空機の通過計画を作成し、実行するためには、予測誤差と制御のマージンを考慮した航空機間隔を適正に定義しなければならない。予測誤差は、離陸前、離陸後等の航空機の状態に依存して変化する。また、航空機が検査点に近づくにつれて、予測誤差は小さくなる。

航空機間隔を以下の式で定義する。

$$\begin{aligned} \text{航空機間隔} &= \text{基本間隔} + \text{動的な予備間隔} \\ \text{基本間隔} &= \text{管制間隔基準} + \text{静的な予備間隔} \end{aligned}$$

基本間隔は、洋上経路上での追付きに対応するための静的な予備間隔を含む。基本間隔は、航空機の型式を標準的な飛行速度でグループ分けし、先行機と後続機のグループの組み合わせ毎に 15 分以上 30 分以下の範囲で定義した。

動的な予備間隔は、出発空港が異なる離陸前
の出発機に対して 10 分間とした。航空機が離陸
した時点で、動的な予備間隔を削除する。動的
な予備間隔を変化させることで、予測誤差に対
応し、より柔軟に間隔欠如状態を検出するこ
とができる。

4. 3 解決案の算出

検査で間隔が欠如している状態が検出された
場合は、それを解決するための航空機の制御方
法としての解決案を解決ルールに基づいて算出
し、解決案ウィンドウに表示する。

解決案として、出発機に対しては高度別の待
機時間を算出する。高度別待機時間の算出では、
全ての相手機に対する間隔検査を実施し、時間
遅れ方向に解を探索する。通過機に対しては高
度変更の解決案を算出する。

4. 4 解決案の評価

解決案は、通過時刻と高度の変更とその組み
合わせにより、複数の案が算出される。この中
から望ましい解決案を選択するために解決案の
評価を行う。これは、航空機の希望する飛行計
画からの変更量に基づいて解決案に評価値を設
定し、評価値が高い解決案を選択する方法とす
る。

評価値を求めるために、通過時刻の変更単位
を 1 分、通過高度の変更単位を 10 フライトレ
ベル (FL) とする離散点に対して、重複しない
整数値を割当て関数を定義する。

表 1 に関数値の定義例を示す。これは、時刻
変更より高度変更を優先して選択する方法であ
る。高度の選択範囲は、希望高度+10FL から
希望高度-20FL までの高度とし、それ以外の
高度は選択しない。評価値の最高値を 999 とす
る。選択しない解決案の評価値を 0 とする。こ
の例では、希望高度+10FL での希望通過時刻
の評価値が 998 であり、希望高度での希望時刻
+1 分が 995 である。この表では省略している
が、希望通過時刻+5 分以上も同様に評価値を
定義する。評価値を重複しない値で定義するこ
とにより、最高の評価値となる単独の解決案を
決定することができる。解決ルールでは、これ
を VBScript の関数として定義する。

運用面を考慮した解決案の選択では、航空機
側の意思、関連する航空機の通過時刻や高度の
分布等を反映することが望ましい。航空機側の
意思を反映するためには、航空機側から代替希
望情報を取得し、それに基づいて解決案を算出
することにより実現できる。関連する航空機の
分布を考慮する方法は、今後の課題としたい。

表 1 評価値の定義例

	希望 通過 時刻	+1 分	+2 分	+3 分	+4 分	...
+20FL	0	0	0	0	0	...
+10FL	998	994	990	986	982	...
希望高度	999	995	991	987	983	...
-10FL	997	993	989	985	981	...
-20FL	996	992	988	984	980	...
-30FL	0	0	0	0	0	...

4. 5 マックナンバーテクニックへの対応

マックナンバーテクニックは、前後の航空機
にマックナンバーを指定することにより、管制
間隔を 10 分以下に短縮する手法である。マック
ナンバーテクニックを利用するためには、解決
案ウィンドウの手動制御で先行機と後続機にマ
ック値を指定する。マックナンバーが指定され
た航空機のボックスの横幅は、マックナンバー
用に定義した間隔となり、ボックス内に指定さ
れたマック値が表示される。間隔は、「管制方式
基準」を参考として定義した。

解決案を算出する機能としては、マックナン
バーテクニックには未対応であり、今後の課題
としたい。

4. 6 解決案の実行

操作者が解決案ウィンドウの解決案を選択し、
「Avoid」ボタンを押すことにより、解決案が実
行され、当該航空機の飛行計画が変更される。
また、解決案として表示されていない制御方法
を実行したい場合には、手動制御による任意の
通過時刻および高度の入力が可能である。

これは、ドラッグ・アンド・ドロップ操作に
より解決案ウィンドウが表示された場合も同様
である。

4. 7 解決の保留

洋上合流シミュレータが間隔欠如を検出した時点で航空機の制御を実施することが望ましくない場合への対応のために、間隔欠如状態の警告を操作者が確認して消去する機能を持つ。

これまでは、間隔欠如状態が検出されると、解決案を入力するまでは解決案ウィンドウが消去されない仕様であった。そのため、間隔欠如状態の検出時には、必ず解決を実施しなければならない課題があった。この課題を解決するために本機能を追加した。

解決を保留する場合には、解決案ウィンドウの「Conf Ack」ボタンを押すことにより、解決案ウィンドウが消去され、当該航空機が解決保留状態となる。

5. 今後の課題

洋上合流シミュレータを使用した航空管制官参加のシミュレーション実験等⁽³⁾により確認した主な課題および対応方法を検討する。

- (a) 管制承認要求前の出発機と東京 FIR および那覇 FIR に入域前の通過機を希望する高度上に表示しているため、航空機の集中している時間帯では、複数の航空機が縦に並び、大きな表示領域を必要とする。また、最大表示機数以上の場合、航空機のボックスが隠れる場合がある。これには、管制承認要求前の航空機の別領域への表示や表示の簡易化等の表示領域の圧縮が考えられる。
- (b) 管制承認済と管制承認前の航空機の区別が明確でない。これには、高度帯の最上行に管制承認済の航空機ボックスを表示すること等により、区別を明確にする方法が有効である。
- (c) 航空機をドラッグした時、全ての航空機のボックス長が選択された航空機を後続機とする間隔に変化する。このため、航空機の割当を考えていない区間の航空機のボックスに重なりが発生することがある。これには、高度毎の解決案を示す仮のボックスを表示し、その上にドラッグ・アンド・ドロップする方法が考えられる。
- (d) 航空機の時刻制御では検査点の通過時刻の移動量に基づいて、出発空港の離陸時刻の移動量を計算している。現在の航空管制の運用

では、「RELEASE AFTER [time]」および「CLEARANCE VOID IF NOT OFF THE GROUND BY [time]」により出発機の離陸時刻に制限を与えている。そのため、先行機および後続機を考慮して、このような運用方法に適合する制約条件に変更し表示する機能が有効である。

- (e) 予測誤差のモデルとして、予測通過時刻より後に発生することを想定している。通過機は直行経路の利用により、予測時刻より早くなる可能性がある。予測通過時刻の前後に予測誤差が分布する確率モデルを想定し、それに対応する予備間隔を設定する方法が有効である。
- (f) 希望高度とは異なる高度を割当てた航空機に対して、関連機の状態の変化により、希望高度が利用できるようになった場合の検査は実施していない。このような検査を実施し、情報を提示する機能が有効である。

6. まとめ

航空機に適正な間隔を確保して洋上空域に出域させるための航空管制官の判断を支援する機能を検討するために洋上合流シミュレータを製作し、機能向上を実施した。洋上合流シミュレータの表示および操作機能、間隔確保のための問題解決機能について紹介し、今後の課題について検討した。

謝辞

シミュレーション実験に参加して、ご意見等を頂きました東京航空交通管制部の航空管制官各位に感謝致します。

参考文献

- (1) 国土交通省航空局：“管制方式基準”，平成13年3月改訂
- (2) 福田他：“洋上合流シミュレータについて”第32回電子航法研究所研究発表会講演概要，平成12年6月
- (3) 福島他：“航空交通流による飛行計画時調整の効果の傾向”，第2回電子航法研究所研究発表会講演概要，平成14年6月