

# 航空交通流モデルについて

— 航空管制, シミュレーション, そしてAI —

仁科 光雄

## 1. はじめに

第二次オイルショック後の1980年代前半は、航空需要の低迷により航空交通量は横這い状態にあった。ところが80年代後半になると、経済の好転と航空輸送の自由化の影響を受けて交通量が増加し始めた。この傾向は国際的なものであり、ICAO（国際民間航空機関）の推定では、今後も航空需要の増加が続き、2010年頃には航空交通量が現在の2倍以上になるとしている。

わが国においても、関西国際空港（泉州沖）の新設、東京国際空港（羽田）の沖合展開、新東京国際空港（成田）の拡張等、一連の空港整備計画が完成する90年代後半には航空交通量の大幅な増大が予想される。そこで、この航空交通をさばく業務、すなわち航空管制にとって、マクロな視点からの交通流の予測と制御が必要になる。

このような問題について、種々のORのアプローチが考えられる。その一例として、シミュレーション言語GPSSによる航空交通流モデルを試作した。また、AIを用いて航空機相互間の接近可能性を事前に除去する方法を検討している。両者を紹介したのち、将来の航空管制の一面に触れる。

## 2. 航空管制

### 2.1 航空管制と情報処理システム

航空機が目的地まで飛ぶ方法に、VFR（有視界飛行方式）とIFR（計器飛行方式）がある。IFRで飛ぶときは、VOR（超短波全方向性無線標識）を結んだ航空路上を飛行し、着陸時にはILS（計器着陸システム）の助けを借りる。定期路線のフライトは、天候にかかわらずほとんどがIFRで飛び、常時管制を受ける。

航空機相互間の衝突を防ぎ、交通の流れをスムーズに

するため、管制官はレーダーで空を監視している。レーダー情報はコンピュータで処理され、航空機の位置に便名と高度がついたものが管制官に示される。

管制を行なうには、航空機の位置とともに各フライトの目的地、経路、希望高度を知る必要がある。これは運航票で示される。飛行計画をファイルしたコンピュータが各管制官に所要の運航票を出力する。

レーダーとコンピュータは管制情報処理システムとしてネットワークを構成している。管制官は、これを用いて、コンフリクト（航空機相互間の距離が規定の管制間隔を切ること）を予測し、その発生を防ぐため、無線電話でパイロットに管制指示を出す。

### 2.2 フローコントロール

わが国の「航空路管制」は、札幌、東京、福岡、那覇の4つの航空交通管制部によって分割して行なっている。各管制部はその空域をまたセクターに分割している。セクターの総数は、国際線の飛ぶ洋上を含め、30近くになる。交通量の多い空港の周辺は「ターミナル管制」を行なっている。その中をさらに分割することもある。離着陸と地上走行は、また「飛行場管制」として別になっている。そこで、たとえば羽田から福岡に至るフライトは、合計13の管制席の間で管制移管を受けながら飛ぶ。

レーダーとコンピュータにより、安全で能率のよい管制ができるようになった。しかし、管制の実行単位は上記のように細分されている。そこで、航空交通全体の流れをよくし、管制の効率をより高めるために、広域的な交通流の予測と制御、すなわちフローコントロールが必要となる。このような問題の研究の一環として離散型シミュレーション言語GPSSを用いて、航空交通流をマクロに表現するモデルを試作した。

## 3. 航空交通流モデル

### 3.1 入力データ

1日のIFR機数、すなわち航空管制の対象となるフライト数は、多いときで2,000に達する。内訳は国内線

にしな みつお

運輸省電子航法研究所 電子航法評価部

〒181 三鷹市新川6-38-1

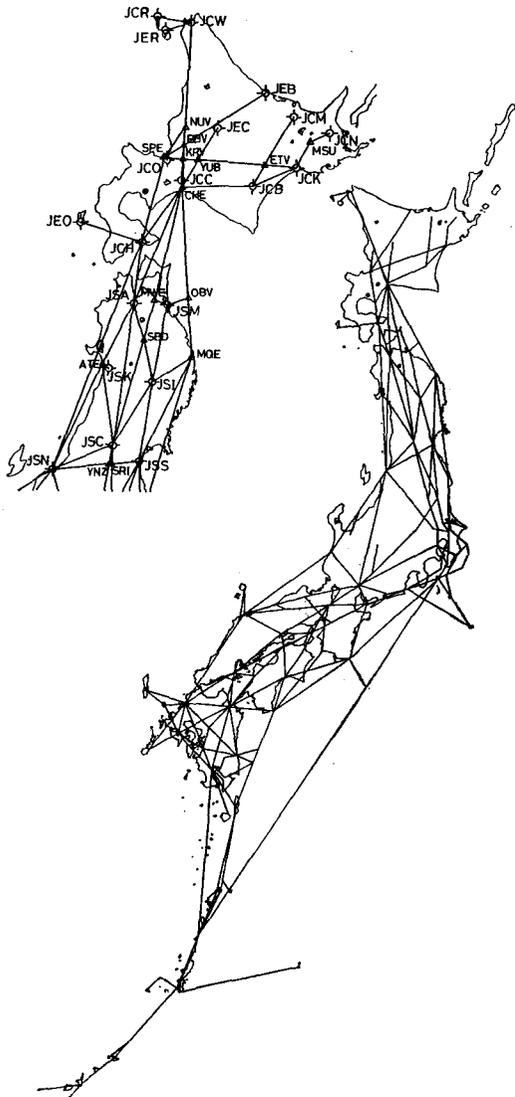


図 1 航空路構成

が1,100, 国内空港発着の国際線が300, 残りは軍用機と日本上空を通過する民間機である。このうち国内線全便をモデルの対象とした。

モデルに入力するデータは、航空時刻表と航空路である。航空時刻表は「JCC TO JTT JAL 500 SR 0820 0950」(千歳発羽田行, 日本航空500便, 機種B-747SR, 8時20分発, 9時50分着)というように、時刻表そのものを入力する。

航空路を与えるために、まずフィックス(定点)を決める。その多くはVORの位置である。フィックスとフィックス, または空港とフィックスを結ぶ線分をセグメ

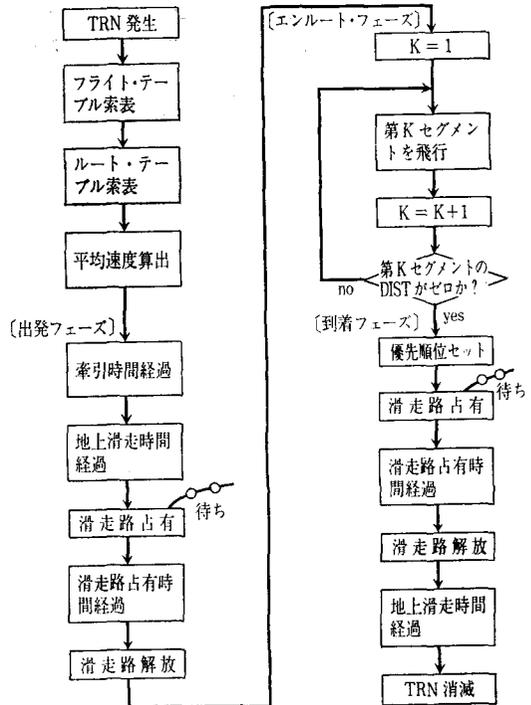


図 2 GPSSモデル

ントとし、その距離(海里で示す)を与える。そこで、ルートを「JCC TO JTT W JCC CHE OBV MQE JSS GOC TLE TYE OBT KZE JTT」(千歳から羽田まで, 西行, 以下セグメントをつないでルートを示す)というように入力する。

平成元年(1989)8月の時刻表とこれに必要な航空路について見ると、空港68, 会社名6, 機種12, フライト1,240(夏で増便), フィックス99, セグメント272, ルート330となる。ルートを重ね合せたものを図1に示す。

### 3.2 GPSSモデル

図2のようなGPSSモデルにより、この入力データから交通流を作り出すことにした。フライトをトランザクション、滑走路をファシリティとし、各空港で生ずる待ちの表現を主題にした。

滑走路のオペレーションを図3に示す。出発機は、牽引、地上滑走、待ち、滑走路占有ののち離陸する。到着機は着陸してから滑走路占有、地上滑走ののち駐機場に

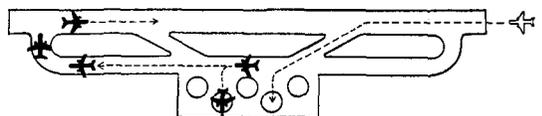


図 3 滑走路オペレーション

入る。それぞれのサービス時間は、機種ごとに確率分布で決める。合計で、出発に3~12分、到着に3~6分である。このうち滑走路占有時間が待ちを生ずる主因である。平均1.5分としている。各空港とも滑走路の使用は先着順とし、出発と到着が同時のときは到着優先とした。

航空路上のフライトの動き（エンルート・フェーズ）は簡略化し、平均速度による飛行にとどめた。

### 3.3 シミュレーションの結果

GPSSは、FACOM-GPSS/X (IBMのV相当) を使用した。図2のモデルの記述に128ブロックを要した。この他、約1,000ステートメントのFORTRANで入力データの処理を行なった。

前記1,240フライト、330ルートの入力データにおいて、FACOM-M360APを使用した場合、1,440クロック（24時間相当）のシミュレーションにCPUタイム20分を要した。

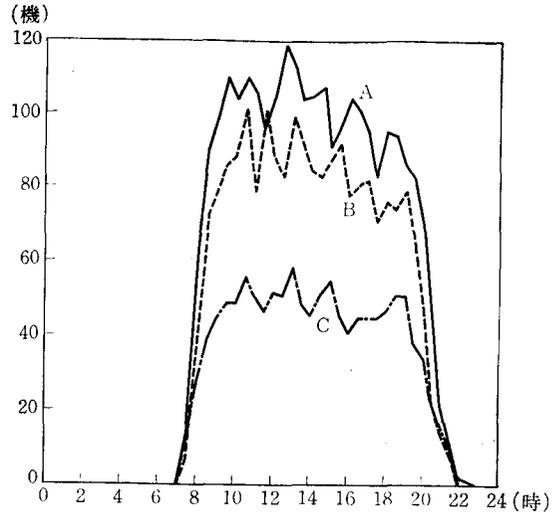
図4は出力の一部で、エンルート全体での滞空機数の変動を30分間隔で見たものである。上記の入力データの他、フライト数が異なる2つの場合を示す。国内線ではピーク時の滞空機数はフライト数の10分の1に当たる。

図5はJTT（羽田）での1時間ごとの平均待ち時間の変動を示す。上記3つの交通量における結果を示す。なお一部プログラムを変更して、平行滑走路により離着陸を分離した場合を加えた。平行滑走路のオペレーションは、先に述べた三大空港の全体計画が完成した場合にはそれぞれの空港で可能となるであろう。

空港の容量や混雑度については種々の表現方法がある。このようなシミュレーションを用いる方法は空港オペレーションの様相を直感的に把握するのに有効であろう。

この交通流モデルに管制の規則・判断を組み込んで、航空管制モデルへの拡張が考えられる。しかし、それはかなり複雑な表現になる。たとえば、到着機を滑走路がちょうど空いたときに着陸させるように旋回待機から離脱させたり、1つのコンフリクトを解くために連鎖的に生ずる他のコンフリクトを解く必要がある。それらはGPSS以外の言語やAIで表現する方がよいかも知れない。その検討をしている。

ここで視点を変えて、航空管制とAIの関係を考える。上記航空交通流モデルの変形になるが、AIにより1つのモデルを構築中なので、その紹介から始める。



A : 1240フライトの場合('89.8国内線時刻表による)  
B : 1014フライトの場合('85.2国内線時刻表による)  
C : 558フライトの場合(国内主要16空港間フライト)

図4 30分間隔で見た滞空機数の変動

## 4. 管制承認作成モデル

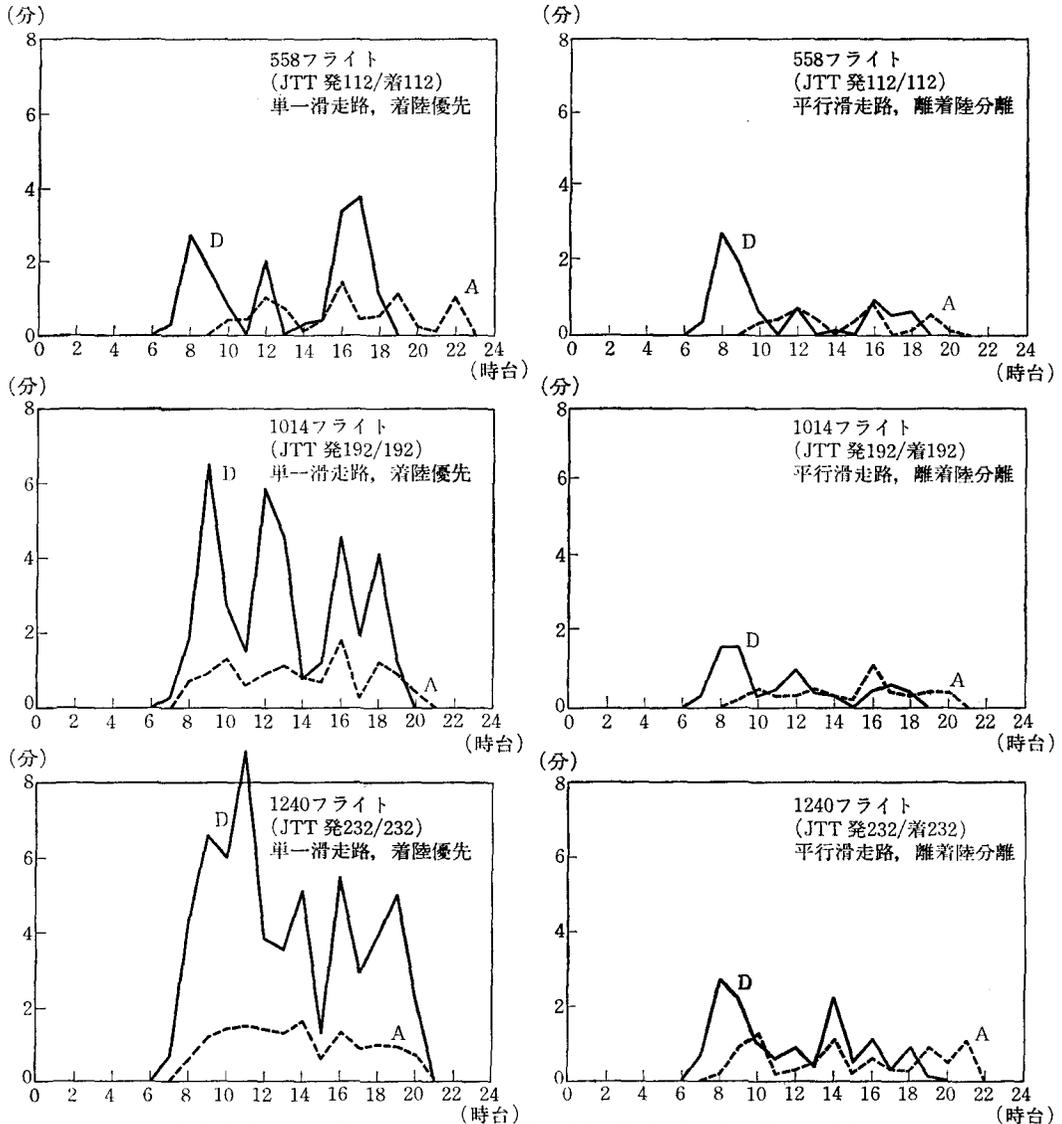
### 4.1 管制承認

航空交通流モデルは時刻表を入力データとした。実際のフライトも時刻表をもとに運航している。ところが、この航空時刻表と鉄道の列車時刻表は性質が異なる。鉄道では、時刻表の背後に列車運行ダイヤグラムがあり、列車の運行を精密に制御している。航空では、時刻表上のフライトはそのままでは管制の対象にならない。フライトの実行に先立って飛行計画の提出が必要である。そして出発準備ができた段階で、管制機関に管制承認を要求する。管制機関は、そのときの空域の状況と他の飛行計画とから、他機との管制間隔を考慮して、高度、出発時刻、経路の承認、すなわち管制承認を出す。フライトは実際の動作を開始した後、次々と管制移管を受けながら、管制間隔を維持するための指示を受ける。

このような航空管制のやり方を、列車制御のやり方に近づけることはできないか。すなわち、航空時刻表からあらかじめ全フライトの管制承認を作成し、これによる運航が可能であれば、管制の効率化と交通量増大の効果が期待できる。この問題にAIが適用できると考え、現在1つのモデルを構築中である。

### 4.2 ESHELLの適用

使用しているAIは、FACOMのエキスパートシス



たとえば、8時台は0800~0900の1時間を示す。Dは出発、Aは到着を示す。

図5 JTTでの1時間ごとの平均待ち時間

テム構築ツールESHELLである。ESHELLでは、静的な知識をフレーム型知識ベースに置く。ここでは知識を階層構造に表現し、階層間での属性の継承を可能とする。推論のための事実、中間結果、結論を一時的に保持するために黒板がある。推論を行なうためのルールはIF~THEN~形式で表現し、それをグループ分けして知識源とする。推論エンジンが知識源を遷移的に起動し、推論を進める。ESHELLの細部はLISPで書く。

管制承認を作り出す対象は国内線全便とする。そこで

交通流モデルの入力データをそのままフレーム型知識ベースに入れる。格納形式はLISPで処理できるようにリストの形にする。

黒板の設計を図6のようにする。「ATC-CLEARANCE」としてレベルを定義すると、推論の過程で、その中に「ATC-CLEARANCE#n」として一連のノードを生成することができる。

図7のようなフライト例を考えて、ノードの設計を図8のようにする。すなわちフライトの動きは、空港においては交通流モデルと同じとし、これを航空路における

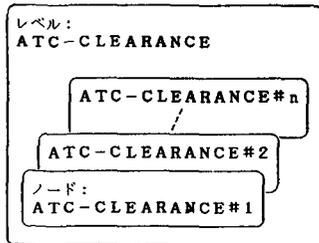


図 6 黒板の設計

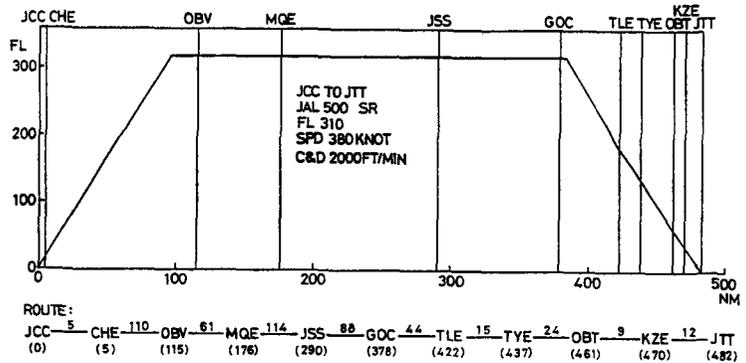


図 7 フライト例

ノード名: ATC-CLEARANCE#101	
アトリビュート名	値
ROUTE	(JCC TO JTT LONG)
AIRLINE	JAL
FLIGHT-NUMBER	500
TYPE	(SR TYPE3)
DEPARTURE-TIME	0820
ARRIVAL-TIME	0950
ALTITUDE	310 *フライト・レベル (×100フィート)
SPEED	380 *ノット (予定飛行時間より地上サービス時間を引いて計算)
TOWING	(0820 0823) *牽引時間3分
TAXIING-BEFORE-TAKE-OFF	(0823 0828) *地上滑走時間5分
RUNWAY-OCCUPANCY-FOR-TAKE-OFF	(0831 0833) *出発待ち3分, 滑走路占有2分
FLIGHT-ON-EACH-SEGMENT	(( (JCC CHE) (0833 0) (0834 20) ) (( (CHE OBV) (0834 20) (0848 310) (0851 310) ) (( (OBV MQE) (0851 310) (0901 310) ) (( (MQE JSS) (0901 310) (0919 310) ) (( (JSS GOC) (0919 310) (0933 310) ) (( (GOC TLE) (0933 310) (0934 310) (0940 180) ) (( (TLE TYE) (0940 180) (0942 140) ) (( (TYE OBT) (0942 140) (0946 60) ) (( (OBT KZE) (0946 60) (0947 40) ) (( (KZE JTT) (0947 40) (0949 0) ))
RUNWAY-OCCUPANCY-FOR-LANDING	(0951 0952) *到着待ち2分, 滑走路占有1分
TAXIING-AFTER-LANDING	(0952 0955) *地上滑走時間3分, 予定より5分遅れでフライト終了

図 8 ノードの設計

高度変化を加えたものとする。ここで、相互に管制間隔を保ち得るようなノードが全便について生成できれば、それが求める管制承認の集合、すなわち解である。

### 4.3 解の探索

解の探索はAIでの典型的な手法であるバックトラッキングにより行なう。そのさい、ノードから次のノードへの選択肢は高度変更と出発延伸の組合せとする。高度は、飛行方向の東西の別、距離、機種で決まる選択可能なフライト・レベルの中から選ぶ。航空路上飛行できる高度は、28,000フィート以下は、1,000フィート間隔、29,000フィート以上は、2,000フィート間隔で、かつ東行西行で別高度になるように定められている。その各々をフライト・レベルという。

出発時刻の延伸は一定時間刻みで一定限度までとする。枝刈りを起こす管制間隔チェックは、当初のモデル

では水平飛行部分に限定し、同一フライト・レベル上での他機との一定距離以内の接近の真偽によるものとする。このような探索を行なうための知識源を設計中である。

## 5. 次世代の管制

上記のような管制承認の作成が可能としても、これによる管制を行なうには、①航法の高精度化、②運航管理の精密化、③乱れへの対応が必要である。

航法の高精度化に関しては、電子航法技術が現在1つの曲り角にあることを述べておこう。高精度の新着陸システムMLS、空地間データ通信の導入、軍用高精度衛星測位システム(米GPS、ソGLONASS)の民間利用、レーダー覆域外の洋上を監視し、通信を改善する航行援助衛星などの技術は、時間を含んだ4次元高精

度航法を可能にするであろう。

航空会社側の運航管理の精密化は、すでに機材・乗員の運用ダイヤ編成用のエキスパートシステムが稼動している。

問題は第3の要件である。航空においては、気象その他の要因により、現実の運航は常にその予定からズレる。精密にそして広域的にスケジュールされた管制においては、この乱れを直し、またスケジュールそのものを修正するため、ここでまたAIの助けが必要になる。これについて、NTTデータ通信社は、前述の管制承認作成モデルを静的エキスパートシステムとしてとらえ、それを包含する航空管制リアルタイム・エキスパートシステムの構想を、図9のように示している。

航空管制は航空需要の増加とともに、運航票と通信のみによる第1世代、レーダーによる第2世代、コンピュータによる第3世代へと進んだ。この間に、情報の収集・処理・表示は機械が行なっても、判断は管制官が行なうというパラダイムが確立した。かつて管制自動化という言葉があったが、今日では使われていない。AIによる第4世代になっても、AIは管制官のアシスタントであり、それが管制官にとって代ることはないであろう。航空管制は不安定な要因を含む複雑で大規模なシステムであり、管制官の柔軟な判断なくしては運営できない。

## 6. おわりに

航空管制、フローコントロール、航空交通流モデル、管制承認作成モデルについて述べた。以下文献紹介をまとめてみたい。

航空の現状と管制については[1]と[2]がある。航空管制ではシミュレーションの方法をリアルタイム（ダイナミックともいう）とファーストタイムに分けている。前者はシミュレーション装置を用い、管制官が参加して行なう管制実験である[3]。後者はORでいうシミュレーションであり、交通流モデルはその一例になる[4]。同じGPSを用い、ターミナルへ流入するフライトの出發規制を論じたものがある[5]。出發規制もフローコントロールの一手法である。航空管制とシミュレーションについて総括した論文がある[6]。

管制承認作成モデルは、1977年のAttwoollの考えにもとづいている[7,8]。この考えは、最近、ICAOのFANS（将来航空航法システム委員会）などでも“conflict-free planning”という表現で提唱されている[9]。

会社側の運航管理の精密化について[10]がある。航法の高精度化と将来の管制について、流動的な部分もあるが、[11]が参考になる。AIと航空管制の関係で衝突防止を扱ったものを最後にあげておこう[12]。

## 参考文献

- [1] 運輸省航空局監修：数字で見る航空（年度版）、航空振興財団、1989。
- [2] 航空交通管制協会編：新航空管制入門、鳳文書林、1979。
- [3] 東福寺則保、上野 徹、吉岡栄治郎、佐藤重雄：航空路管制の解析・評価用シミュレーション装置の試作、電子情報通信学会技術研究報告、宇宙・航行エレクトロニクス SANE87-6、1987、9-16。
- [4] 仁科光雄：離散型シミュレーション言語を用いたマクロな航空交通流モデルについて、電子通信学会技術研究報告、宇宙・航行エレクトロニクス SANE86-42、1986、17-24。
- [5] 村尾 武、本山澄夫、水町守志：交通流管理に関する検討、電子情報通信学会技術研究報告、宇宙・航行エレクトロニクス SANE88-61、1989、35-42。
- [6] 東福寺則保、伊藤藤二：航空管制、第5回研究発表会資料、日本シミュレーション学会、1984、133-138。
- [7] Attwooll, V. W. : Some Mathematical Aspect of Air Traffic Systems, The Journal of Navigation, Vol.3, No.3, 1977 414。
- [8] 仁科光雄：知識情報処理による管制承認の作成について、第21回電子航法研究所研究発表会講演概要、1989、17-20。
- [9] Submitted by EUROCONTROL: Information Paper on the Future ATS System Concept of the EUROCONTROL Organization, WG3/WP1, ICAO Special Committee on Future Air Navigation Systems, 1987。
- [10] 斎藤 亨：ケーススタディ／全日本空輸／航空ダイヤ編成用大規模計画型システムを本稼動、日経AI別冊、1989夏号、40-43。
- [11] 航空電子システム編集委員会編：航空電子システム、日刊工業新聞社、1983。
- [12] 曾根 崇、本山澄夫、浅野正一郎、水町守志：知識情報処理を用いた地上ベース衝突防止システムとその検討、電子通信学会技術研究報告、宇宙・航行エレクトロニクス SANE85-2、1985、9-16。

静的なエキスパートシステムからリアルタイムエキスパートシステムへ

アプローチ

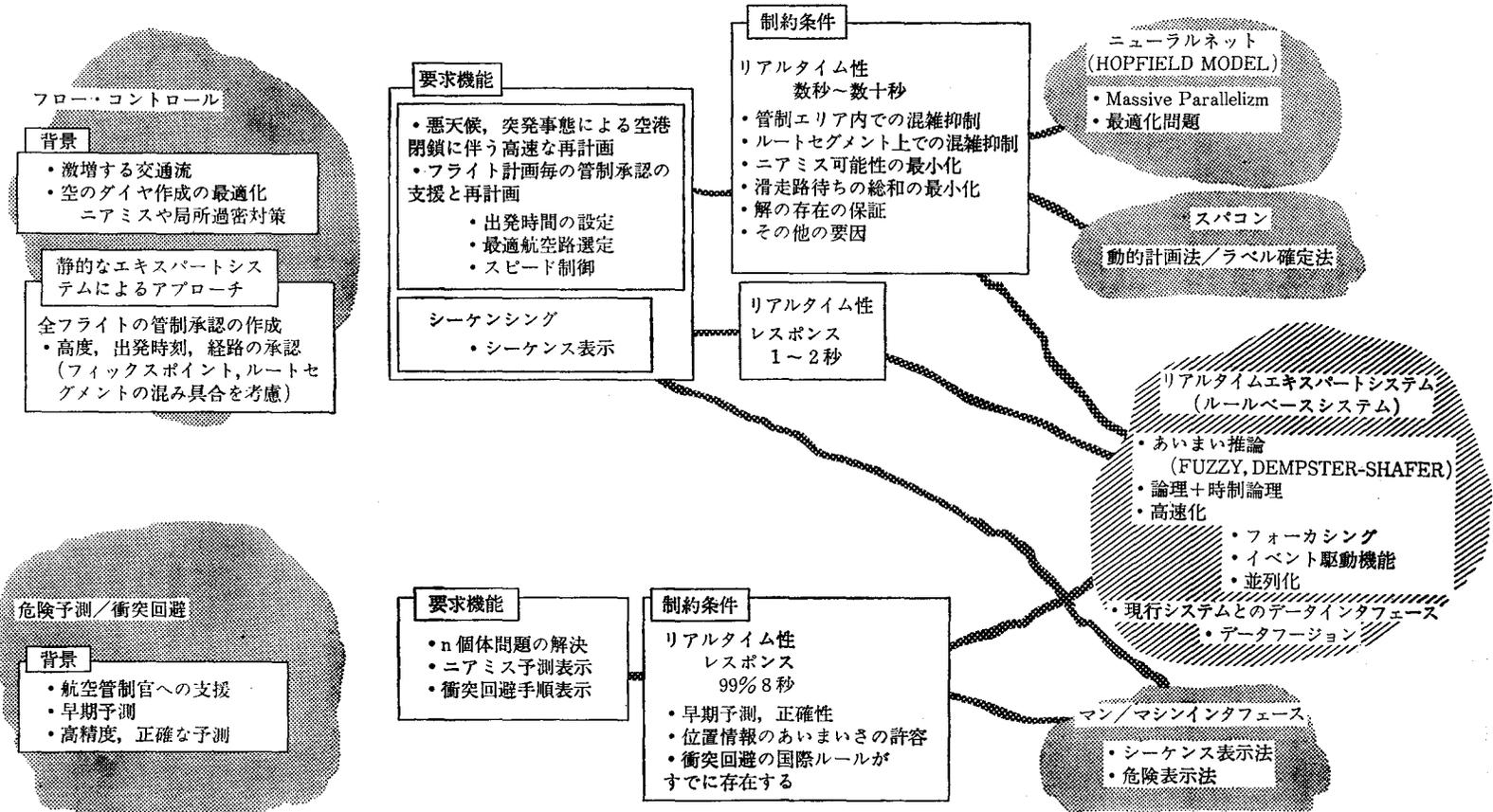


図9 航空管制における知的処理(AI等)の適用可能性 (NTTデータ通信社のご好意により掲載)