

航空管制

中田 紀元

もともと空は公共の自由な航行の場であって、それぞれの経路を快適な高度で、任意の時間に飛行し得る空間であった。したがって航空交通の発生は本質的にランダムであり、交通の形態も多様でかつ日々流動的に変化する性格を持つ。道路交通と航空交通とを比較すれば、その発生がともにランダムであり、また両者とも安全性、秩序ある流れ、および迅速性の確保が重要な要件とされる点が類似している。一方それらの要件を充足する主体が、道路交通では主として運転者自身であるが、航空交通ではそれが地上の航空管制機関によってなされる点が相違している。そのため、航空管制機関は常に空の交通状況の全貌を把握し、交通状況を予測し、交通を安全かつ有効に制御する意思決定をなすことがそのタスクとされる。ランダムに発生する需要を先着優先の原則によって、安全で秩序ある流れに変換するブラックボックスである。その内部には、通信手段、レーダー表示装置、電子計算機等のハードウェアと、意思決定を行なう管制官とから成るマン・マシン・システムである。そのシステム内部の情報の流れは、①交通状況把握のためのデータ収集過程→データにもとづく空間制御の意思決定の過程→③その結果を操縦者に指示する情報出力過程に大別される。航空需要の増加にともない、ブラックボックス内

の負荷が増大する。1930年代の前半、米国で世界最初の航空管制が開始されて以来、飛行計画にもとづく管制の第1世代、レーダーによる第2世代、電子計算機利用による第3世代を経て需要に対応するため、システム内の負荷を軽減し、処理能力の向上を図る研究開発が各国において実施されてきた。ここではそれらの本質的な問題を分析し、内外の研究事例を紹介するとともに、今後わが国において研究を要する問題について検討してみたい。

1. 管制の内部構造

管制の内部の情報の流れは、情報の収集過程と、管制の意思決定過程と、管制の指示等の出力過程とに分けられる。

情報の収集過程では飛行前に提出される飛行計画、無線による位置情報、レーダーにより捕捉される情報、および他の管制機関からの情報がシステムへの入力となる。

一方、出力過程では飛行計画の承認、離陸許可、飛行中の経路や高度の変更指示、空港への進入許可および他機関への連絡情報等が提供される。

入出力の間に介在する意思決定の過程はシステムの中枢部であって、入力された情報が人間の頭脳の中で空のイメージに変換され、交通状況の予測が行なわれ、安全性が点検され、最も効果的な交通の流れを企画する意思決定が行なわれる。そ

なかだ のりもと 運輸省東京航空局管制通信課

の中枢部は通信機器、表示装置、電算機等のハードウェアと、意思決定に当る管制官とにより構成されるマン・マシン・システムである。中枢部にはレーダーを用いないプロシージャル管制形態とレーダー管制形態とがある。プロシージャル管制は飛行計画による管制の基本的形態であって、レーダー覆域外の空域や洋上空域で適用される。この形態では飛行計画により作成された機名、機種、経路、高

度、特定地点通過時間を記入したカードが用いられる。管制官は自分の担当する空域や経路構造を記憶しており、その上にカードを読んで認識した交通状況を描く。これらの変換と合成によって頭脳の中に空のミニチュアを持ち、予測し、判断して安全で円滑な交通の流れを作る。航空機間には一定の安全間隔が確保される。たとえば、上下千呎、左右5呎、前後10分の長方形の羊羹形の空域の中に1機が保護されており、それが重複しないように空域構造の中にはめ込まれ、移動されて行く。飛行計画にもとづくこの管制は交通を予測し、管制計画を策定するためには不可欠な形態であり、管制の基本的なストラテジーを可能にするものである。

レーダー管制形態では表示装置に航空機のシンボル、機名、高度等の情報が電算機により画像表示される。この形態では空のイメージがそのままピクトリアルに描き出されるので、管制官はそれらの負荷から開放される結果、より能動的にキメ細かな判断や指示を与えることが可能となる。ランダムに生起する交通を秩序正しく効率の良い流れに変換するために思考と判断が使われる。なお、レーダーによる航空機の位置捕捉精度が高いため安全間隔も小さく、1機の航空機は直径5呎、上下千呎の缶詰形の空域に保護されるので空域許

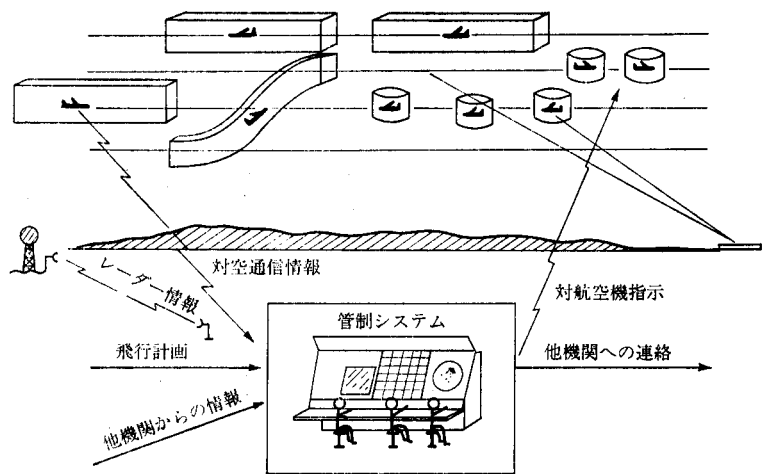


図 1

容量も大幅に改善される。レーダー管制形態では飛行の自由度を大にし、よりタクティカルな管制を可能にする。(図1)

いずれの形態でもシステム内部では2種類の情報処理ループがある。第1は、航空機の情報の入手→交通状況の更新→予測→安全確認→指示の「情報更新ループ」である。第2は、時間認識→必要な措置の検索探査→指示の「時間探査ループ」である。(図2)

情報更新ループは外部からの情報の入力によって起動される。航空機の位置情報やレーダーのアンテナの回転ごとに情報が割込み、そのつどサイクリックにループが循環する。したがってこのループでは管制官は受動的立場にある。一方時間探査ループでは人間が時間の経過を積極的に認識し、処理すべきタスクを先取りする必要がある。したがって管制官はこのループに対しては能動的立場になければならない。交通需要が増加すると、このループはともにサイクルを早めなければならない。しかし人的処理能力には限界があるので入力の前処理が優先し情報処理ループに追われる結果となり、時間探査ループを追うことがむずかしくなる。交通の発生が確率的であるために処理に待行列を生ずるが、時間経過の認識が失われるため、対応の即時性が失われ、遅延を生

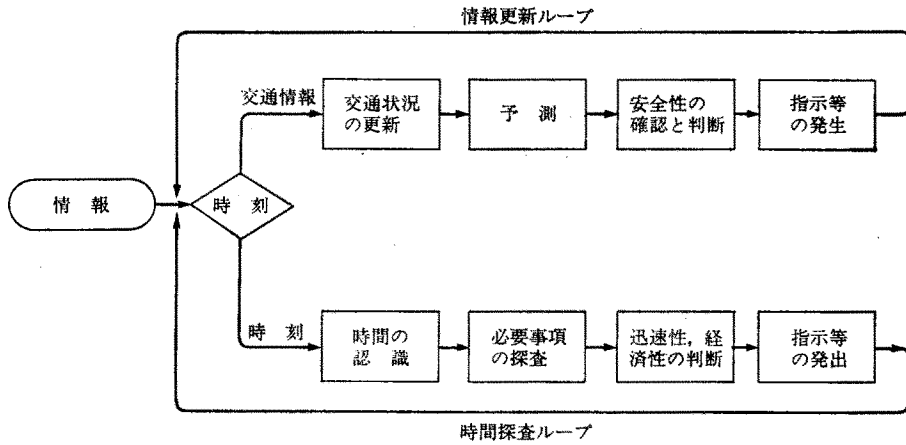


図 2

ずる結果となる。

管制官は一定の空域を分担して受持っている。同時に受持っている機数 N は $N = n \cdot d / T$ で表わされる。 n は単位時間 T 内に発生する機数であり、 d は1機当りの平均受持時間である。発生機数 n が増加に比例して N が増大し、ループの負荷が大となり、受持機数 N に対応しきれなくなる。したがって受持機数 N を一定量に止めるためには d の縮少を図る必要がある。受持時間 d の短縮は分担空域を細分化することにより可能である。しかし分担空域の細分化は、対象航空機に対する負荷を軽減するが、一方隣接する分担者との連絡の負荷を増加させる。細分化がある程度進むと、対航空機と対隣分担者との両者に対する負荷の合計が、かえって増加する分岐点に達する結

果となる。それはもはや交通の需要に対応しきれなくなった限界を示すものであり、システム構造の質的改善を必要とすることを示すものである。(図 3 a)

管制の負荷とは何かについて Bar-Atid Arad は次のように述べる。

第1の負荷は交通の有無にかかわらず管制官が自分の受持空域に着くこと自体の負荷であって Back Ground Load (L_0) と呼ばれる。第2は航空機の増加にともない比例的に増加する定形的負荷であって Routine Load (L_1) と呼ばれる。第3は航空機相互の組合せにより、機数の2次関数で増加する負荷であって Airspace Load (L_2) と呼ばれる。全負荷は $L_T = L_0 + L_1 + L_2$ により表わされる(図 3 b)。管制能力の向上は負荷 L を減少

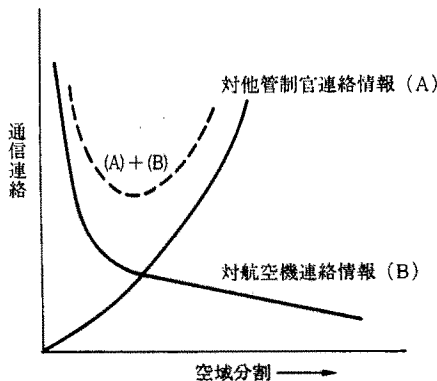


図 3(a)

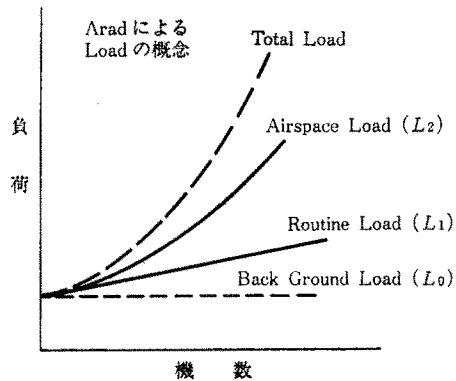


図 3(b)

させることであり、各国において多年にわたり、多面的な負荷分析と研究開発が行なわれてきた。

航空交通の発生およびその形態は鉄道交通と異なり確率的でランダムであり、また意思決定に当る人的能力も画一的ではないので、その処理能力の分析にも各種の分野の参画と手法の開発が行なわれてきた。ハードウェアに関するシステム工学、人間-機械の機能分担に関する人間工学、人的疲労と緊張に関する医学・心理学等々、あらゆる分野からのアプローチを必要とするといっても過言ではないが、確定的な手法と解を得ることはきわめて困難な状況である。

2. 管制能力の分析

航空交通と管制負荷の研究に関する2, 3の事例を紹介し、今後の課題にふれてみる。

Bar-Atid Arad は1964年の論文の始めに、航空機の発生と負荷の関係にビリヤードを比喻している。面積 s を持つビリヤードの卓の上に直径 d を持つ球が n 個置かれている。その球をランダムな方向に弾く。球はそれぞれ v の速度で卓上を移動し衝突する。衝突の確率はその速度 v と球の直径 d に比例し、球の数 n の2乗に比例する。また卓の面積が小さいほど密度が高くなり s に反比例する。航空管制では s が特定の高度の飛行空間であり、 n が航空機数であり、球の直径 d が安全間隔である。その球が触れ合うことを管制では異常間隔という。その球が触れ合うことなく移動させる負荷は、衝突確率が大なるほど大きくなる。その衝突の発生確率を基本としながら、先述の管制の負荷 L_1 , L_2 について次のように定量化を試みている。

機数に比例して増加する Routine Load (L_1) については、

$$L_1 = (N/T) K_A$$

N は単位時間 T (分/時) に発生する機数。

$$K_A = k_1 a + k_2 b + \dots + k_6 f$$

$k_1 \sim k_6$ は飛行形態による重みを表わす係数であ

り、 k_1 は最も標準的な飛行で1.0, k_2 は非標準的飛行で1.1, k_3 は高度変更をともなつて管制移管を行なう場合で k_1 または k_2 に +0.29, k_4 はターミナルに対する移管をともなう場合で +0.43等、6種類に分類して重みづけを行ない、その各々の全体に対する割合 $a \sim f$ を各係数に乗じたものの総和である。

航空機の相互関係によって発生する負荷である Airspace Load (L_2) は次述のビリヤードの原理にもとづいて求められる。

$$L_2 = K_B \cdot \bar{a} \cdot \bar{v} \cdot N^2 / g \cdot S$$

この負荷は異常間隔の発生に比例し、異常間隔の発生は、安全間隔 \bar{a} (哩) および速度 \bar{v} (ノット) ならびに1時間の発生機数 N の2乗に比例する。 S は管制空域の広さ (NM^2) である。 K_B は1件の異常間隔解消に要する負荷であつて、 L_1 の負荷との相対的、統計的値であり、たとえば2.8と推定されている。 g は交通の流れを表わす係数であり、実際の飛行空間はビリヤードの卓のようにランダムな方向に飛行できる平面ではなく、各高度レベルにより、航空路、交叉点、一方通行路等の経路構造の制約があり、また各高度により交通密度および速度の分布が異なるので、その空域の構造上の特性を表わす変数であるが、ここではその詳細は省略する。

Arad は空域構造と航空機の状況から異常間隔の解消に要する負荷を分析し、その負荷を軽減するための空域構造 (Sector Design) の改善について論じたものである。

ボストン大学精神身体医学部の Michel W. Hurst および Robert M. Rose 両氏は1978年の論文でボストンおよびニューヨークのレーダー管制について調査の結果、Arad の方式に修正を試みている。両氏は管制の負荷を、空域構造および交通の流れの質的相違による管制のむづかしさに重点をおいて分析している。出発到着機取扱空域 (セクター)、管制移管セクター (高、低高度)、航空路セクター (高、低高度) の5種類の空域につい

て管制の繁忙度を最低1から最高16までの段階に区分し、特定の観測者に観測記録させ、その結果を空域の質的相違に回帰させることにより負荷を推定し、管制のむずかしさは“Co-ordination”と“Transition”に回帰されるとしている。その結果、管制の負荷はCo-ordinationとTransition（他機関への管制移管）と和(L_1)とAirspace Load (L_2)の総和であるとしている。

$$L_1 = C_1 + T_1$$

C_1 はCo-ordination Loadでセクター内の飛行時間であり、 T_1 は管制移管機数である。

L_2 は基本的にはAradと同じ考えである。

$$L_2 = \bar{a} \cdot \bar{v} \cdot N^2 \cdot g' / S$$

西独のReicheは1971年、管制の困難性と通信により交される情報量(bits量)の関係を分析している。

Philipは1971年、管制の困難度と観測値と通信時間の関係を分析している。

わが国では労働科学研究所により1966年以来、管制の負荷分析、業務分析および疲労度調査が行なわれている。航空路およびターミナル管制機関について交通量および通信時間と眼球運動および心搏数等の生態反応との関係分析、および「Spare Capacity法」による管制能力の解析が行なわれてきた。Spare Capacityによる方法は、管制官にシミュレーターによる模擬管制を行なわせながら、別途、外的なパルスの組合せによる刺戟を皮膚に与え、刺戟の種類により定められた反応を示させ、刺戟→認識→反応の伝達率により管制官の

	OMS	Arad	Kimbel-Ton	OSS	Hurst-Rose	Philip	Laurig	労研
①空域の広さ	○	○			○			
②管制の間隔	○	○			○			
③速度	○	○			○			
④交通密度	○	○	○	○	○		○	○
⑤異常間隔の発生		○	○		○			
⑥交通の特性		○						
⑦空域構造			○		○			
⑧通信量				○	○	○		○
⑨繁忙観測					○	○		
⑩心搏等生態反応							○	○
⑪スベアキャパシティー								○

図4

余裕度を測定する方法である。繁忙度が0に近い場合は伝達率が1に近く、繁忙度が高まるにつれ別途の刺戟に対する反応が不可能になり、伝達率が0に近づく。交通量および通信時間率の増加とともに、失われる余裕度が計測され、現システムによる管制能力の解析について成果を得ている。

この方法はブラックボックスである管制システムの能力を外部から把握しようとするもので、管制負荷の内部を分析する有力な手がかりを得ることができると考えられる。

以上およびその他米連邦航空庁による研究OMS(Office of Management System)およびOSS(Office of Staffing Standard)等により管制負荷の要素として分析されている変数の一覧を図4に示す。

3. 今後の課題

航空需要は引続き上昇をたどると予想されるが、空港の許容量の増大に併せて、空域の許容量の改善が図られなければならない。空港の許容量についてはモデル化が比較的容易であり改善が図

られている。しかし空域の許容量についてはその正体の把握が困難であり手法も確立されていない。空域構造を改善し管制能力の向上を図る手がかりとしてここでもう1度管制業務の特性をレビューし解明の方法についての仮説を考えてみる。

航空管制は、安全性の確保、秩序の確保、経済性の確保の3原則を充足する作業である。

① 安全性の確保の作業は異常間隔の検出と解消によってなされる。その発生確率は空域構造と航空機の発生を変数とする Arad の方法により求められる。またその解消のために管制官はいくつかのパターン化された管制のストラテジーを使用する。

② 秩序の確保は異常間隔がまったく発生しなくても常に必要とされる負荷である。それは「与えられた交通のシチュエーション」を「あるべき交通のシチュエーション」に変換するために生ずる負荷である。その変換が不適切であると危険を生じなくても交通の乱れや遅延を惹起する。この変換のために管制官は交通の状況に応じてパターン化されたストラテジーを使用し秩序ある流れを形成する。

③ 経済性の確保のための負荷は管制官が時間を先取りし、交通状況を予測して最も効果的な管制計画を工夫し、飛行の経済性を確保するため積極的に交通に働きかける負荷である。管制官はそのためいくつかのパターン化されたストラテジーを使用する。

交通形態質的にみれば出発上昇、巡航、下降着陸の3過程に分けられる。したがって交通状況はその3者相互、またはその組合せにより分類される。各分類形態について、前記3者のパターン化されたストラテジーがともなう。それを仮に「タスク」と呼ぶことにする。タスクは具体的には到

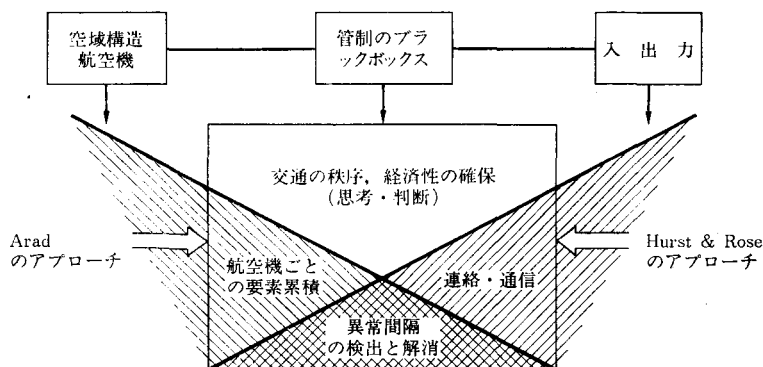


図 5

着機群を滑走路に一定間隔で進入させるための「Spacing」や上昇機相互に高度間隔を設定しながら上昇させる「Step-up-Climb」等々がある。ここで管制の負荷を推定するために、管制の思考過程の実際をみると、管制官は全体の航空機に均等に注意を分散するのではなく、注意を集中すべき一群の航空機の範囲を限定して捕え、そのグループごとにタスクを実行する。最大数機程度のグループに分割し、優先度の高いグループからタスクを実行する queue を作る。それは碁盤の面をいくつかのゾーンに分割し、ゾーンごとに定石を打って詰めを行なう囲碁のストラテジーに似ている。しかし航空では空域が出発ゾーン、進入ゾーン、航空路等、機能的に区分されているので、ゾーンの広がりとは区分は比較的単純化され、あらかじめ定められたものと考えられる。交通需要の発生から、単位時間内にそのゾーンに航空機がどのような密度で何機発生するかを確率的に予測することは可能であり、したがって何個のタスクが発生するかを推定することができる。負荷はそれらのタスクの処理時間の和であり、管制能力はタスクの優先待行列の処理能力であり、処理の遅延がある一定の許容時間を超えた場合をもって負荷の限界であると推定される。

ここで再び Arad と Hurst & Rose のアプローチを考えると、Arad は航空機の1機ごとの負荷のエレメントを累積し、演繹的に全体の負荷を

推定する。一方, Hurst & Rose は総合的に出力された結果 (Co-ordination 等) から帰納的に負荷を推定する。また両者はいずれも異常間隔の発生確率のみを Airspace Load の主な要素としている。両者のアプローチと管制負荷を概念的に図にしてみると, 秩序や経済性の維持に消費される管制システム内部の負荷が必ずしも十分に捕えられていないようにも思われる。(図5)

管制の負荷をもう1度整理してみると, 航空機数に比例して増加する Routine Load (L_1) と, 航空機相互の異常間隔の解消のための Air Space Load (L_2) と, さらに交通の秩序と経済性を確保する別の Airspace Load (L_3) が内在すると思われる。管制のブラックボックス内で発生するそれらの負荷は, ストラテジーの選択や思考過程を含むのできわめて数値化の困難な問題ではあるが, 先に紹介した「Spare Capacity 法」が現在のところ可能な手がかりを与えるものと思われる。

タスクの発生は交通需要から確率的に予測することが可能であり, またシミュレータにより各種のタスクを実現することもまた可能である。タスクの増加につれ, 管制官は他の刺戟に反応し得る

余裕を失い, 持時間のすべてをタスクの処理に費す時間の総和は Space Capacity 法によって捕えることができる。その時間をパターン化されたタスク処理の重みに多元回帰することにより, タスクの処理時間を測ることができ, またタスクを構成する機数とその処理時間との相関を得ることは不可能ではないと推定される。

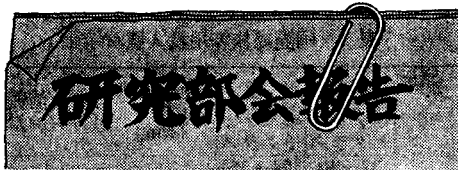
管制の能力向上はタスク処理の負荷をいかに軽減するかという問題であって, タスク処理の負荷分析の結果から, 空域構造の改善, 人間-機械関係の改善を図り, 管制の生産性を向上させることが今後の課題であろう。

参考文献

“The measurement of control load and sector design in the enroute environment” (Bar-Atid Arad, 1964, FAA).

“Objective job difficulty, behavioural response, and sector characteristics in air traffic control centres” (Michael W. Hurst, and Robert M. Rose 1978, *Ergonomics* Vol.21.)

“航空管制作業の Work Load の評価に関する実験的研究”(西岡 昭, 飯田裕康, 井上枝一郎, 1978, 労働科学, 54巻, 12号.)



● 交通問題研究部会 ●

● 第1回 4月23日(水) 18:00~20:00, 場所: 東洋経済ビル, 出席者12名。

第1回目の会合ということで, 参会者の自己紹介を行なった後, 今後採り上げるテーマについて討議した。

交通問題は, 各人が自分の分野に都合良い形で論じられてきた傾向があり, 特性に応じた交通機関分担の考え方については政策的に合意が得られてはおらず, 解明されるべき問題は多い。また社会システム(特に動的な)としての交通問題の捉え方についても研究したい。

以上幅広く交通に関する諸テーマがあげられたが, 逐次採り上げ, 知識を深めていくことにする。

● 政策問題研究部会 ●

4月例会 4月19日(土), 14:00~18:00 出席14名
場所: 防衛庁上大崎寮

(1) 紹介「インターフューチャーズ」(武田薬品 湊晋平)

OECD の2000年への未来研究「INTERFUTURES」の紹介とそのなかで設定している6つのシナリオを検討した。Case A(高度成長), Case C(南北の分裂), Case D(ブロック経済化) は実現の可能性が少なく, Case B₂(緩やかな成長と不均衡の連続)の実現可能性が高いとされているが, 現実のイスラム問題や貿易摩擦ではC, Dも実現のおそれもある。(邦訳は生産性本部から5月出版予定) 討議で今村教授(防大)より未来予測におけるモデル派とシナリオ派の2つの限界について説明があった。

(2) 解説「政策科学」(防衛研修所 福島康人)

新入部員のため政策科学の目的, 例について説明があり春季学会での「部会報告」の反響について報告があった。