

空港周辺空域の最大交通容量に関する一考察

On the maximum traffic capacity of a terminal airspace

喜多秀行*・舟木正明**・大江一馬***

by Hideyuki Kita, Masaaki Funaki and Kazuma Ooe

In a hub-and-spoke type air transport network, traffic congestion in a hub area is unavoidable because of air route concentration. The purpose of this study is to develop a methodological approach to provide for estimating the traffic capacity of hub airspace. The paper discusses some factors influencing the traffic capacity. A queuing type model is developed to analyze the waiting time of aircrafts in communications in a traffic control area. Numerical considerations are also carried out to grasp the influence of changing conditions to the length of uncontrolled time in ATC. An important result is that the upper limit of ATC is critical more than the safe separation between aircrafts to determine the traffic capacity of a busy airspace.

1. はじめに

航空需要の増加に対処すべく空港整備が急ピッチで進められているが、それにともない、大阪国際空港、関西国際空港に加えて神戸沖空港の構想が出されるなど、わが国でも、多数の航空路が集中する地域では複数の空港が近接して設置される状況が生じ始めている。

航空交通の容量的なボトルネックは、これまで主として滑走路にあると考えられ、滑走路容量に関するキーワード：空港周辺空域、交通容量、航空管制、管制処理能力、タイムシェアリングシステム、許容待ち時間

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科（〒680 鳥取市湖山町南4-101）

** 正会員 島根県経済連企画管理部（〒690 松江市殿町 19-1）

*** 安田信託銀行業務部（〒103 東京都中央区八重洲 1-2-1）

る研究が精力的に進められてきた¹⁾²⁾。そして、このボトルネックを解消するため、離着陸航空機の最適機種配分、高速誘導路の設置、滑走路の延長・増設、さらには空港そのものの数を増やすといった対応がとられている。しかし、複数の空港が近接して設置・運用される場合、それぞれの空港を離発着する航空機が同一の空域を使用するため、全体的な輸送能力が当該空域の交通容量によって規定されてしまう可能性がある。すなわち従来の「空港容量」に加えて、複数の空港を含む「空域容量」の検討が要請されているのである。

空港周辺空域は各方面からの交通が集中するため、一般に航空ルートの密度が高い。したがって、安全飛行間隔から算定される各ルートの交通容量一杯まで交通量が増加すると管制空域内を同時に飛行する航空機の数に極めて多くなり、これらの航空機を安全に飛行させるための管制作業量が管制処理能力を越える恐れがある。これは、管制処理能力が空域の

交通容量の支配的要因となりうることを示唆するものといえる。

そこで、本研究では、空港周辺空域の交通容量を算定するための基礎として、管制空域の交通運用を、管制作業をサービスとみなした一種の待ち行列システムと考えてモデル化し、仮想空域を対象とした数値実験を行うことにより、これまで主として議論されてきた「安全飛行間隔に基づく交通容量」に加えて「管制処理能力に基づく交通容量」を検討する必要があるか否かを検討する。

2. 管制空域のセクタ分割と最大交通容量

本研究でいう空港周辺空域とは、航空路管制空域（水平飛行をしている部分にほぼ相当する）と飛行場管制空域（滑走路への離着陸を管制する）との間を結ぶいわゆる進入管制空域である。この空域では、航空機は管制官の指示によって進路や速度を変更し

ながら降下・上昇を行い、滑走路あるいは航空路へと導かれる。

交通量が少ない空港周辺空域では、一人の管制官が当該空域を飛行する全ての航空機に対する管制を行うが、交通量の多い空域では、空域をセクタと呼ばれるいくつかの部分空域に分割し、複数の管制官がそれぞれのセクタを分担して管制する。その際、空域の分割セクタ数を増やすと個々のセクタ内を飛行する航空機数が減り、管制官一人当たりの管制作業量の総和が減少するため、より大きな交通量に対応することができる。しかし、無限に小さい管制セクタでは一瞬のうちに航空機がセクタを通過してしまうため管制不能となり、またセクタ数をあまり多くすると隣接セクタ間で航空機の受け渡し作業（ハンドオフ移送・継承作業）が増えるため、全体としての処理能力が低下する。これは、「最適セクタ分割」というものの存在を示唆しており、このようなセクタ分割の下で実現する取扱い可能な最大交通量が、本研究でいう「管制処理能力からみた空域の最大交通容量」である。すなわち、ここで用いている「最大」という語は、「最適セクタ分割下における」という意味である。

一方、航空機相互の安全飛行間隔からみた空域の交通容量は、所与の飛行ルート上に前後方向の安全間隔で航空機を配置した場合に得られる交通量であって、飛行ルートのネットワーク形状のみに依存し、セクタ分割とは無関係に定まる。したがって、上下方向と側方の安全飛行間隔が確保される範囲内なるべく密に設定された飛行ルート上に安全飛行間隔で航空機を配置したときの交通量が「安全飛行間隔からみた空域の最大交通容量」であり、「最大」という語は「最密飛行ネットワーク上での」という意

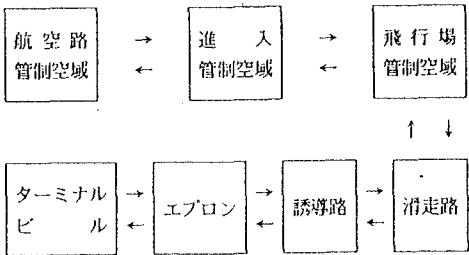


図-1 航空交通システムにおける貨客の流れ

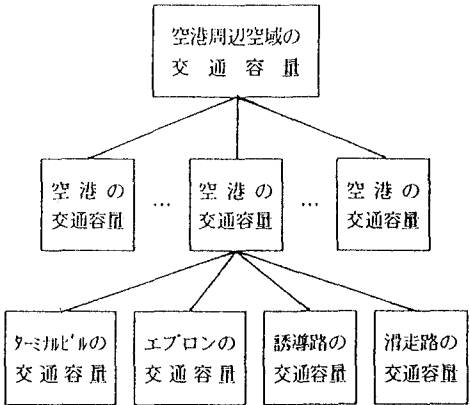


図-2 航空交通システムにおける交通容量の階層構造

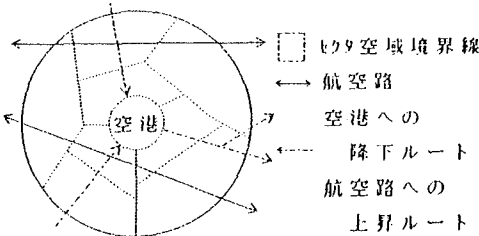


図-3 飛行ルートおよび管制セクタの概念図

味を有している。

以上に述べた2種類の最大交通容量のうち、相対的に小さい方が本研究で検討する「空港周辺空域の最大交通容量」となる。

3. 空域の交通容量算定に関する従来の研究

空港周辺空域の交通容量はこれまでも数多くの研究者によって検討されている。

Britt et.al³⁾は、航空機の最小飛行間隔や危険回避措置といった進入管制空域における航空交通管制のルールをはばすべて組み込んだシミュレーションモデルを開発し、それを用いて空域の交通容量を求めている。また、Heinz⁴⁾は、これらに加え、航空交通管制システムに内在する種々の不確実要素を考慮にいたしたシミュレーションモデルを構築している。一方、Siddiquee⁵⁾は直線部および交差点における周辺他機との安全間隔を確保するという条件下での交通容量を算定する解析モデルを提案しており、Dunlay⁶⁾はこれに確率の概念を導入し、遭遇確率等についても検討を行った。

これら安全飛行間隔に基づく交通容量算定モデルは、飛行ルート上を移動する航空機の単位時間当たり到着率と速度、飛行ルートの長さ、ルート上での最小間隔といったいわば物理的要素のみを考慮しており、交信遅れ時間や管制官の作業負荷などの制約が考慮に入られていないため、空域の安全性を過大に評価する恐れがある。

このような観点から、Hunter and Hsu⁷⁾をはじめ、航空管制における管制官と航空機とのコミュニケーションを模擬するいくつかのシミュレーションモデルが開発された。さらに、管制官の作業負荷に着目したSchmidt⁸⁾、Tuan, Proctor and Couluris⁹⁾などの一連の研究も有用な情報を含んでいる。

しかし、これらの研究の多くは、主として単一の空港をとりまく管制空域を念頭においていたこともあって、所与のネットワークとセクタ分割の下での交通容量を算定するに留まっており、2.で述べたネットワークの最密構成や最適セクタ分割を行ったうえで「最大交通容量」を取り扱うものではなかった。

とはいうものの、本研究で想定しているような、複数の空港を有する高密度な飛行ネットワークを内

包している空域を対象とし、セクタ分割の設定変更をも含んだ形で、管制処理能力からみた容量推定を行おうとする試みがないわけではない。上野・東福寺¹⁰⁾は、管制官をループに入れたマン-マシンタイプのシミュレーションモデルを開発し、管制処理能力と交通容量の関係を検討している。これはある意味では本研究の目指すところに近いものである。しかし、実時間でのシミュレーションモデルであるため、数多くのケースを検討するためには莫大な時間と費用を必要とする。

そこで、本研究では、管制処理能力の観点から最大交通容量を検討するための数理モデルを開発し、検討を進めることとする。ここで開発したモデルは、本研究で、まず最大交通容量が何によって規定されるかを検討するために用いられるが、最終的には、上記のようなシミュレーションモデルで交通容量を詳細に検討をするための準備として、検討に値するセクタ分割やネットワーク構成等に関する計画案を多くの案の中から選別する道具として用いるためのものと考えている。

4. 管制処理待ち時間に着目した容量算定モデル

(1) 管制システムの待ち行列系としての把握

空港周辺空域における航空交通管制の目的は、各地から当該空域に到着し空港への出入り口である飛行場管制空域へと向かう着陸機、ならびに飛行場管制空域から航空路へと向かう離陸機が、安全かつ迅速に飛行できるよう誘導することである。具体的には、各セクタを担当する管制官は、担当セクタに到着する航空機の同定、航空機相互の「順序づけ」と「間隔づけ」、および航空機が必要とする各種飛行支援情報の提供を行う¹¹⁾。

セクタ内の交通量が増加するにつれ、管制官が単位時間当たりに処理すべき管制作業が多くなり、セクタ内の航空機数によっては必要とする管制処理が遅れてしまう可能性がある。この遅れ時間は一種の無管制状態であるため、このような状態が長く続くことは安全上好ましくない。

さて、個々の管制処理作業を航空機に対する管制官のサービスと考えると、管制処理の遅れ時間は交通量の増大によって発生する一種の「サービス待ち」と解釈することができる。通常、管制官は同時に複

数の航空機を管制下においており、各航空機に対してはその時々に必要な応じ管制作業を行っている。各航空機に対するサービスは、原則として管制処理の必要性が生じた時点でみた先着順である。また、その回数は航空機によって異なり、次のセクタまで当初の飛行計画どおり安全に飛行できる航空機に対しては小数回の管制処理でよいが、合流部を通過したり、セクタ内の交通量が多く他機と接近してしまう可能性が高い場合には、より多数回の管制処理を必要とする。

このような特性から、セクタにおける管制官のサービスは、ラウンドロビン・サービス規律を持ったタイムシェアリング型待ち行列系とみなすことができる。

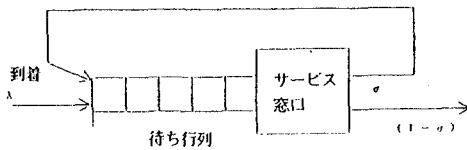


図 - 4 ラウンドロビン型待ち行列系

(2) 管制処理待ち時間

航空機のセクタへの到着は、ルートごとにみるとほぼ一定のスケジュールに従っている。しかし、多くの場合セクタへの到着ルートは複数存在し、到着時間はその日の天候状態や飛行形態によって変わる。そして、各航空機は独立に到着するので、交通容量が問題となるような混雑したセクタにおいては全体としてランダムに到着していると見なしてよい。

個々の航空機に対するサービスは、航空機1機当たりに対するの管制処理回数と1回当たりの管制処理時間により規定される。以下では、実飛行スケジュールに基づく管制訓練の実態観測データ⁽²⁾から、セクタ内で受ける航空機1機当たりの管制処理回数が k である確率 G_k が次式に示す幾何分布、

$$G_k = \sigma^{k-1} (1-\sigma) \quad (1) \\ (0 < \sigma < 1, k=1, 2, \dots)$$

に従うものとする。ここに、 σ は管制処理を受けた航空機が次にまた管制を必要とする確率である。ま

た、1回当たりの管制処理時間は一定値 t であるとする。

以上の条件のもとで、管制処理1回当たりの待ち時間の期待値 W は次式で与えられる⁽³⁾。

$$W = \sum_{k=1}^{\infty} G_k \frac{W_k}{k} \quad (2)$$

ただし、

$$W_k = W_1 + \frac{(k-1)t}{1-\rho} \\ + t \left[\lambda W_1 + \sigma n - \frac{\rho}{1-\rho} \right] \frac{\{1 - (\lambda t + \sigma)^2\}}{(1 - \lambda t - \sigma)}$$

ここに、 λ はセクタへの航空機の平均到着率、 ρ はセクタの利用率であり、

$$\rho = \frac{\lambda t}{1-\sigma} \\ n = \rho + \frac{(1-\rho)\rho^2}{2(1-\rho)}$$

である。

(3) 管制要求時間間隔

上記の管制処理待ち時間を評価するため、セクタ担当管制官が自己の管制下にある航空機から管制処

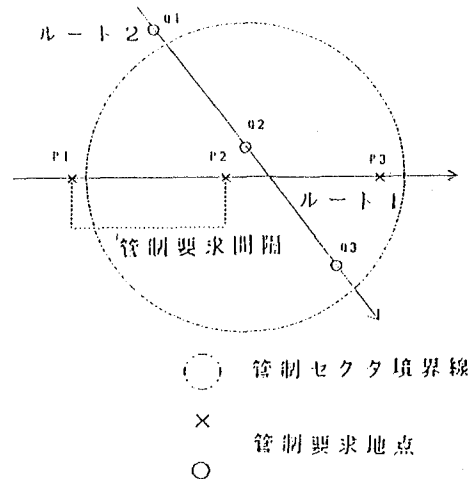


図 - 5 管制要求間隔の概念図

理を要求される平均的な間隔を考えよう。

セクタ内を飛行する航空機に対する管制処理回数は、セクタの大きさと飛行ルートのネットワーク構成 N_o 、および交通量 Q によって変わる。すなわち、一般に、1 機当たりの管制処理回数は、セクタが広がるにつれて、すなわち当該航空機がセクタ内を飛行する距離 L_i が長くなるにつれて増加する。また、ルートが密に集中しかつ交通量が多くなるほど増加する。これは、航空機相互の遭遇頻度が高くなるためである。

航空機がセクタに到着する際、管制官は上流側のセクタ担当管制官から当該航空機を継承し、セクタを出る際には下流側のセクタ担当管制官にこの航空機を移送する（ハンドオフ移送・継承作業）。今、セクタ内を飛行するある航空機が管制処理を受けてから次の管制処理を受けるまでの平均飛行距離 d を、

$$d = d(L_i, N_o, Q) \quad (3)$$

とすると、この航空機に対する平均管制処理回数 k_i は次式で与えられる。

$$k_i = \frac{L_i}{d} + 1 \quad (4)$$

航空機を速度を V とすると、ルート i に沿って飛行している航空機がセクタを通過するのに要する時間は L_i/V であるから、航空機 1 機当たりの平均管制要求間隔 T_o は $L_i/(V \cdot k_i)$ となる。したがって、各ルートへの航空機の単位時間当たり到着数が Q_i であるとし、ルートが I 本設定されているとすると、セクタ担当管制官が、管制下にある航空機から管制処理を要求される時間間隔の平均値である平均管制要求間隔 T_o は以下のようなになる。

$$T_o = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{L_i}{k_i V Q_i}} \quad (5)$$

(4) 許容待ち時間と交通容量

交通量が増えるにつれて管制官が処理すべき作業量は増加し、管制処理を必要とする航空機の待ち時間は長くなる。そして、この待ちが長くなり、航空

機が必要なときに適切な管制を受けることができなくなってくるにつれて、異常接近（ニアミス）などの危険な状況が生じるものと考えられる。

ところで、(2) で求めた管制待ち時間の期待値 W は、航空機が次から次へと間をおくことなく管制処理を要求すると想定した場合の待ち時間である。しかし、実際には、航空機は管制処理を受けた後すぐさま次の管制処理（例えば他機との接近を解消するための指示等）を必要とするわけではない。これが (3) で平均管制要求間隔 T_o なるものを導入した理由である。他機との安全間隔を維持できない状況が生起するといった上記の例でいえば、速度や飛行高度を変更することによって安全間隔を確保しうる時点までにその変更指示を出せば足りる。したがって、必要な管制が受けられないという観点から交通容量を評価する今回のような場合には、管制処理待ち時間 W と平均管制要求間隔 T_o との差である実質的待ち時間 W_s 、

$$W_s = W - T_o \quad (6)$$

に着目する必要がある。

したがって、安全上許容される最大の無管制状態継続時間を許容待ち時間 W_A と呼ぶと、実質的待ち時間 W_s が許容待ち時間 W_A を越えないという条件、

$$W_s \leq W_A \quad (7)$$

の下での最大交通量が、管制処理能力の面からみた空港周辺空域の交通容量となる。

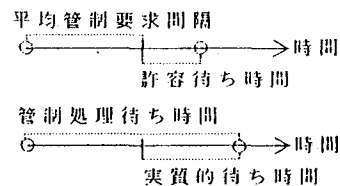


図-6 実質的待ち時間と許容待ち時間

5. 仮想空域を対象とした数値分析

(1) 想定する仮想空域

以上の議論に基づき、管制空域全体でみた場合に、管制処理能力が空域の交通容量を規定する状況が生じるか否かを検討するため、仮想空域を想定し、数値的な検討を行った。想定した空域は、図-7に示

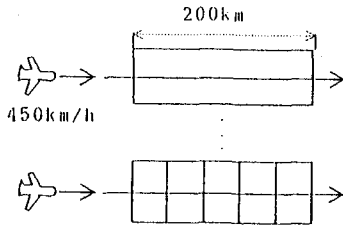


図 - 7 仮想空域とセクタ分割

す長さ 200kmの空域であり、ルートは1本である。この空域を順次等分割してセクタ数を増やしていき、処理可能な交通量を検討する。

(2) 設定条件

航空機の色度は一律に 250ktとした。これは、進入管制空域内の高度 10000ft以下では航空機の色度が 250kt以下に規定されており、この領域内では色度のばらつきがあまり大きくないためである。

単位時間あたり平均管制処理回数 k は、一般に、交通量が増えるにつれて航空機相互の交錯頻度が高くなるため増加する傾向がある。また、交通量の増加にともなう瞬時には解決策を見出しがたい複雑な交錯が多く発生するようになるため、1回あたりの管制処理時間 $T(\text{sec})$ も長くなる傾向にある。これらの間の関係は現段階ではあまり明らかになっていないが、交通量の変化に伴うこのような変動を簡単な形で明示的に考慮するため、本モデルでは以下のように設定することとした。

$$T = \alpha + \beta Q \quad (8)$$

$$k = \frac{L}{d} + 1 \quad (9)$$

$$d = \gamma - \delta Q$$

ここに Q は交通量(機/時)、 L はルート長(km)、 d は管制を必要とする平均飛行距離間隔(km)であり、 α 、 β 、 γ 、 δ はパラメータである。

安全性の指標となる管制指示待ち時間は、先に述べた無管制状態を意味する実質的待ち時間 W_s が生じないことを基本とするが、平均管制要求間隔 T に対する実質的待ち時間 W_s の比 W_R 、

$$W_R = W_s / T. \quad (10)$$

を変化させ、結果に及ぼす影響についても調べてい

表 - 1 設定パラメータ

パラメータ	設定値
α	1 ~ 6
β	1 ~ 10
γ	1 ~ 10
δ	1 ~ 10
W_s/T_c	0.8 ~ 1.2

る。

表 - 1 に、今回検討したこれらのパラメータの値を示す。

(3) 安全飛行間隔に基づく交通容量

現行の安全飛行間隔に基づく交通容量は、以下のようにして算定される。

空港周辺空域では、レーダによる管制が基本であり、測定制度面における限界から、管制間隔の最低基準 D_c は 5 海里 (デジタルモードの場合) とされている¹⁴⁾。したがって、検討対象としているセクタ内のルート上に、この間隔で航空機をぎっしりと並べた時の交通量が最大交通量 (交通容量) となる。すなわち、セクタ内におけるルート i 上を飛行する航空機の色度を V_{ai} とすると、安全飛行間隔に基づく交通容量 C_d は、

$$C_d = \sum_i \frac{V_{ai}}{D_c} \quad (11)$$

により算定される。本検討例では、航空機の色度速度が 250kt (=450km/h)、ルート数が1本であるため、この値は 50 (機/時) となる。

(4) 検討結果

以上のような設定のもとで、数値計算を行った。図 - 8 は、(2) で述べた設定条件の下で(1)の検討対象空域を分割していった際の、管制処理待ち時間からみた交通容量の変化と、安全間隔から規定される交通容量とを比較した結果の一例である。図中の曲線は、検討対象空域を1~5個のセクタに分割した場合の「単位時間あたり交通量」と「管制処理待ち時間」の関係を示している。セクタ数が少ないほど管制官1人が受け持たなければならない航空機の数が多くなるため、交通量の増加に伴う処理待ち時間

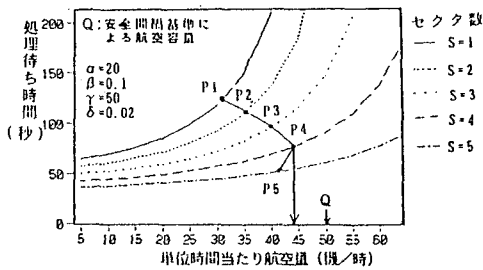


図 - 8 交通容量算定結果の例

の増加の程度が著しい状況が見てとれる。

黒点 P1～P5 は、航空機が管制処理を必要としてから実際に管制を受けるまでの「実質的待ち時間」が安全面での限界を示す「許容待ち時間」に等しくなる点、すなわち管制作業の面から処理することが可能な最大交通量を示しており、これが、所与のセクタ分割の下での管制処理能力からみた空域の交通容量である。この例では、分割セクタ数が増加するにつれて交通容量は増加して行くが、分割セクタ数が4から5になると交通容量が下がっている。これより、本検討例における最適分割セクタ数が4であり、このときの処理可能最大交通量（44機/時）が検討対象空域の「管制処理能力からみた交通容量」であることが理解される。

しかるに、安全飛行間隔に基づく空域の交通容量は、本検討例の場合、(4)で求めたように50(機/時)であった（図中のQ点）。すなわち、本検討例では「管制処理能力からみた交通容量」が「安全飛行間隔に基づく交通容量」を下回り、前者が「空域の最大交通容量」を規定していることがわかる。

このような検討を、表 - 1 に示した各パラメータの組み合わせについて行った結果、「管制処理能力からみた交通容量」の方が「安全飛行間隔に基づく交通容量」より小さいというケースがかなりの数に上った。以上より、検討した範囲内では、安全飛行間隔よりもむしろ管制処理能力が空域の最大容量を規定する要因であることが明らかとなった。

6. おわりに

複数の空港が近接して存在する場合、これらを離発着する航空機が共に使用せざるを得ない空港周辺空域の交通容量が航空交通のボトルネックとなる可

能性がある。これまでは、主として、管制のためのセクタ分割や飛行ルートが与えられた場合の交通容量が議論の対象となっていたが、セクタ分割や飛行ルートの設定は操作可能な変数であるため、これらの変更を念頭においた上で、空域が最大限どの程度の航空交通を通しうるかを検討することが本研究の目的であった。その際、空域を分割して多数の管制官が管制作業を分担すれば全体としての管制処理能力は増加していくため、安全飛行間隔から規定される交通容量が支配的であるとの従来の考え方に対し、再考を加えた。得られた主たる結果は以下のとおりである。

- ① 空域全体の交通容量概念について考察を加え、セクタ分割を明示的に考慮した上で管制処理能力から規定される交通容量と、飛行ルートのネットワーク構成を明示的に考慮した上で安全飛行間隔から規定される交通容量の両者のうち、小さい方が空域の交通容量を規定するとの考え方を示した。
- ② セクタ担当管制官の管制作業をタイムシェアリング型待ち行列系とみなしてモデル化し、所与の条件下での交通量と平均管制処理待ち時間とを関係づけた。
- ③ 上記の結果が安全面から規定される所定の許容待ち時間を上回らない最大の交通量を空域の交通容量と定義し、その算定法を述べた。
- ④ セクタ分割に伴う交通容量の変化を調べたところ、空域のセクタ分割は、個々の管制官が受け持つべき航空機数を減らすすが、同時に、隣接するセクタ相互間におけるハンドオフ移送継承作業をも増加させるため、いたずらにセクタ数を増やしても交通容量は増加しないことが明らかとなった。
- ⑤ 従来の主たる検討項目であった「安全飛行間隔からみた空域の交通容量」と上述の方法で算定した「管制処理能力からみた空域の交通容量」を比較したところ、後者が前者を下回り、空域の最終的な交通容量が管制能力の面から規定される場合が多いことが指摘された。

本研究で用いたモデルには、簡単化のため種々の仮定が導入されている。したがって、その精度面ではなお改善すべき点が少ないが、管制処理能力が空域の最大交通容量にかなり卓越した影響を及ぼすという事実は、以後、交通容量を論じる際に念頭

においておくべきことの一つであると考えらる。

今後は、モデルをさらに実態に即したものとするため、交通量やネットワーク構成と管制処理作業量との関係、および、許容待ち時間の設定法などについて、より実証的に検討する必要がある。また、シミュレーションモデルと比べ精度面では劣るものの計算時間等の面では格段に有利であることを勘案して、本モデルで多数の空域運用代替案から高い交通容量を有するいくつかの代替案を絞り込み、シミュレーションモデルでそれらについて詳細な検討を加えるといった、両者の使い分けについてもさらに整理する必要があると考えている。

なお、航空管制交信データの収集に関しては運輸省航空保安大学校岩沼分校のご協力を得た。また、研究を進めるにあたり、運輸省電子航法研究所の東福寺則保主任研究官、カリフォルニア大学バークレー校交通研究所の G. Gosling 研究員、ペオグラード大学交通工学部の V. Tosic 教授との議論が有益であった。記して感謝の意を表わしたい。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（奨励研究（A））を受けて実施したものであることを付記する。

参考文献

- 1) Poritzky, S.: Near-Term Measures to Enhance Airport Capacity, Proc. of the Symposium on New Technology and the Aviation System, pp. 1-7, Los Angeles, 1988.
- 2) 則武通彦: 空港滑走路の極限容量の推定方法に関する研究, 土木学会論文集, No. 389/IV-8, pp. 47-53, 1988.
- 3) Britt, C.L., Jr., et. al: Development of Simulation Techniques Suitable for the Analysis of Air Traffic Control Situations and Instrumentations, Report NASA-CR-112195, National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C., 1972.
- 4) Heinz, V.M.: Stochastic Simulation of Terminal Area Airspace: User's Manual, Tech. Mem., MIT Flight Transportation Lab., 1976.
- 5) Siddiquee, W.: A Mathematical Model for Predicting the Duration of Potential Conflict Situations at Intersecting Air Routes, Transportation Science, Vol. 8, No. 1, pp. 58-64, 1974.
- 6) Dunlay, W.J. Jr.: Analytical Models of Perceived Air Traffic Control Conflicts, Transportation Science, Vol. 9, No. 2, pp. 149-164, 1975.
- 7) Hunter, J.S. and D.A. Hsu: Applications of the Simulation Model for Air Traffic Control Communications, Report FAA-RD-76-19, US-DOT, Federal Aviation Administration, 1977.
- 8) Schmidt, D.K.: On Modelling ATC Workload and Sector Capacity, Journal of Aircraft, Vol. 13, No. 7, pp. 531-537, 1976.
- 9) Tuan, P.L., H.S. Proctor and G.J. Couluris: Advanced Productivity Analysis Methods for Air Traffic Control Operations, Report FAA-RD-76-164, US-DOT, Federal Aviation Administration, 1976.
- 10) 上野徹・東福寺則保: シミュレーション実験による管制業務の分析, 電子航法研究所研究発表会講演概要集, pp. 75-78, 1987.
- 11) 航空保安管制協会: 航空管制入門, pp. 80-81, 航空保安管制協会, 1988.
- 12) 運輸省航空保安大学校岩沼分校における調査データ, 1988.
- 13) Coffman, E.G., Jr. and P.J. Penning: オペレーティング・システムの理論, 日本コンピュータ協会, pp. 177-244.
- 14) 運輸省航空局監修: 管制方式基準, p. 128, 1988.