

広域航空管制空域の交通容量に関するモデル分析

A Model for Traffic Capacity Analysis of a Terminal Airspace

喜多 秀行*, 信原伸司**, 本間 一***

By Hideyuki KITA, Shinji NOBUHARA and Hajime HONMA

Traffic capacity of an airspace mainly depends on both the minimum separation between aircraft for safe flight and the upper limit of controllers' capability in ATC workload including maintaining the separation. The level of workload in ATC varies in sectors, so that the design of sector configuration gives much influence on the controllers' workload who are in charge of the sectors.

This study proposes a method which gives the optimal division of a terminal airspace into several sectors, by minimizing the maximum workload of the controller in the sector among the airspace. Traffic capacity of the busiest sector becomes the bottleneck of the traffic capacity of the airspace. Therefore, to find the busiest sector in the airspace under the optimal division make possible to compute the traffic capacity of the airspace with applying the previously developed sector capacity estimation model.

The result of the numerical example involves that the traffic capacity determined from the view point of controller's workload tends to be lower than those from the minimum safe separation in ATC under the given conditions.

1. はじめに

航空需要の増加はまず空港の混雑としてあらわれ、これに対処するため、滑走路の増設やターミナルの拡張といった空港の航空機取扱能力の増強策、あるいは新空港の設置といった空港そのものの数を増やす方策がとられる。したがって、多数の航空路を有する大規模なハブエリアなど航空交通の集中する地域では、数多くの航空機が離発着する複数の空港が近接して設置される状況が生じる。

このような地域では、それぞれの空港を利用する航空機が同一の空域を使用するため、航空需要がさらに増加するにつれ、「空港における混雑」に引き続き「空域における混雑」が顕在化してくる。この

キーワード：空域交通容量，セクタ分割，作業負荷

* 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 工修 原子燃料工業(株)熊取インジニアリングサービス部 (〒590-04 大阪府泉南郡熊取町野田)

*** 正会員 (株)原子力インジニアリング開発部 (〒550 大阪市西区土佐堀1-3-7)

ような混雑の存在は空域の交通疎通能力に限界があることを意味している。しかし、空域は空港と異なり増設することができない、それゆえ、ある地域に離発着する航空交通の総量はこの限界値、すなわち「空域の交通容量」により制約される。

交通施設の容量を規定する評価の基準は単一とは限らず、全体としての交通容量はそれぞれの基準ごとに定まる交通容量の最小値として規定される。空域の交通容量は主として、管制間隔から定まる交通容量と管制処理能力から定まる交通容量により規定されると考えられるが、どのような場合にどちらが支配的となるかといった点については、検討の必要性が指摘されているものの¹⁾あまりよくわかっていないのが実状である。これは、交通管制からみた交通容量算定モデル²⁾が主として単一のセクタを対象として行われてきたため、複数のセクタからなる広域的な管制空域の交通容量を直接的に取り扱えないことによる。しかし、複数の空港が近接して立地す

るような航空交通の集中地域では、空域全体の管制処理能力を高めるためのセクタ分割が不可欠である。

そこで本研究では、複数のセクタをもつ空域の交通容量を管制面から算定するための基礎となるセクタ分割モデルを開発する。このモデルを用いて、所与の属性をもつ空域が航空管制の面で処理しうる交通量を把握するとともに、管制間隔から規定される交通容量とも比較して検討を加える。

2. セクタ分割と交通容量

本研究で対象とする空域は、多方向から当該地域へ集中してくる航空機を整理誘導して空港への最終進入経路にのせる、あるいは、空港から出発した航空機を目的地に向かう航空路にのせるための空域であり、航空路管制空域と飛行場管制空域との間で航空機の受渡しをする進入管制空域に相当している。

進入管制空域は飛行場を中心とする半径40NM程度の円筒状の空域であり、複数の空港が存在する場合には進入管制空域が互いに重ならないように設置される。しかし、空港が相互に近接しており、進入管制空域を独立して設置することが困難であったり不効率をもたらす場合にはいくつかの進入管制空域を統合し、一括して航空管制を行うことがある。本研究では、このように複数の空港を内部に含む比較的大きな空域を念頭においている。

このような空域では多くのルートが複雑に分岐・交差しており、航空機はその上を高度や針路を頻繁に変更しながら飛行する。そのため交通量が増加すると極めて多くの管制作業が要求され、空域を分割して複数の管制官により作業を分担することが多い。この分割された個々の管制空域をセクタという。

空域のセクタ分割の数を増やすと個々のセクタ内を同時に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が減少するため、より多くの交通量に対処することが可能となる。しかし、セクタの数をむやみに増やすとセクタそのものの大きさが小さくなってしまい管制作業の遂行が困難となる。加えて、隣接セクタ間での航空機の受け渡し作業（ハンドオフ作業）が増えるため、全体としての処理能力の低下を招く。また、各セクタの管制作業量に大きなばらつきがあると作業量の多いセクタがネックとなり、処理可能な交通量が制約される。

以上より、管制システムの処理能力により規定される管制交通容量がセクタ分割に強く依存しており、交通容量を最大にするためにはそれに即したセクタ分割を行う必要があることが理解される。そこで、以下では管制官の作業負荷に注目し、所与の交通量の下で、作業負荷が最大となるセクタの作業負荷を最小とするセクタ分割を得る方法を提案する。

3. 管制処理能力最大化のためのセクタ分割法

(1) 管制官の作業負荷

管制官にかかる作業負荷は、管制作業の種類や頻度により異なり、通常、1時間当たりに占める作業時間の総和によって表現される。

セクタ分割の観点から、管制作業は、①ハンドオフ作業、②ルーチン作業、③錯綜解消作業、の3種類に分類できる。

ハンドオフ作業は、航空機があるセクタから隣接セクタへと飛行する際に、双方のセクタを担当する管制官の間で航空機の管制を引き継ぐ作業であり、セクタに入る時と出る時にそれぞれ1回ずつ行われる。したがって、セクタ m におけるハンドオフ作業の単位時間当たり発生頻度 E_h^m は単位時間内に当該セクタに進入または離脱する航空機数に比例し、

$$E_h^m = \sum_{i \in I_m} q_i^m \quad (1)$$

となる。ここに、 q_i^m はセクタ m の i 番目のゲート（セクタの境界とルートの交点）の交通量である。

ルーチン作業は、セクタ内を飛行している航空機の同定、高度変更の指示、飛行情報の提供などの作業である。他の航空機の有無に関わらず発生し、発生頻度はセクタ内での飛行距離にほぼ比例すると考えてよい。単位距離当たりのルーチン作業発生頻度を f_r 、ルート j の長さを L_j^m とすると、単位時間当たりの発生頻度 E_r^m は次式で表される。

$$E_r^m = \sum_{j \in J_m} f_r L_j^m \quad (2)$$

錯綜解消作業のうち交差錯綜解消作業は、異なるルート上を飛行しているもののそのまま飛行し続けると両ルートの交差点や合流点で互いに安全間隔が保てなくなる複数の航空機に対して、経路や高度の変更を指示し衝突の危険を解消する作業である。この作業は交差点や合流点で発生し、高度変更

を伴うルートを含むか否かによって負荷が異なる。他方、追い越し錯綜解消作業は、同一ルート上を相前後して飛行する2機の航空機が双方の速度差の故に前後方向の安全間隔が保てなくなるおそれがある場合に、衝突を避けるための飛行調整を行うもので、ルート上の至るところで発生する可能性がある。

交差および追い越しに関する交通錯綜の発生頻度、 E_{cc} 、 E_{co} は各ルートの交通量、飛行速度、ルート長、安全間隔などから推定することができる。本研究では Tuan et al.³⁾ による算定式を用いる。

以上より、セクタ m の作業負荷 $W(m)$ は単位時間当たりでみた各作業に要する時間 t_k の合計値、

$$W(m) = \sum_{i_w} t_{i_w} E_{i_w}^m \quad (3)$$

として表される。ここに添字 i_w は作業の種類を示す。

(2) ネットワーク切断問題としてのセクタ分割

管制セクタは対象空域を三次元的に分割した空間であるが、航空機は基本的にルート上に飛行するため、各管制官が受け持つ飛行ルートネットワークの区間をもって実質的なセクタと見なすことができる。そこで、本研究では、セクタ分割をネットワークの切断問題として取り扱う。以下、流入点、流出点、交差点、分合流点を総称して「ノード」、ノード相互を結ぶルートの区間を「リンク」と呼ぶ。

交通容量を高めるといふ観点から最も効率的なセクタ分割は、各管制官の作業負荷が等しくなるセクタ分割である。しかし、ネットワークは無制限に切断可能ではなく、管制上の必要性から一括して管制すべき空域が存在する。このことを考慮に入れ、また非現実的なセクタ分割をあらかじめ排除して探索を効率よいものとするため、以下の条件を設定した。

①ノードで行われる管制作業は複数のセクタで分担することができない。

②セクタは連続したネットワークからなる。

ハンドオフ作業とルーチン作業の発生頻度が交通量に比例するのに対し、錯綜解消作業の大部分を占める交差錯綜解消作業の発生頻度は交通量の二乗に比例する。交通量の増加に伴い作業負荷はノードに集中するが、①の条件が存在するが故に、リンクの切断位置を変えるだけでは各セクタの作業負荷を均等にできない可能性が出てくる。

②の条件は、リンクの管制が、必ずその両端のノード

の管制を受け持つセクタのいずれか一方ないしは両方で分割して受け持たれることを意味している。したがって、あるノードに接続しているリンクのうち、当該ノードを受け持つセクタに含まれない残りの区間は、自動的にもう一方のノードを受け持つセクタに含まれることになる。

以上より、セクタは、(a)1つ以上のノード、(b)ノード相互を結ぶリンク（ノードを2つ以上含む場合）、(c)当該セクタと隣接セクタを結ぶリンクの一部、の3種類の構成要素から構成されることとなる。

(3) 作業負荷最大となるセクタの探索原理

セクタ分割をシステムティックに行うため、図1に示す以下の2つの概念を導入する。1つは、あるセクタに含まれるノードとこれらのノード相互を直接結ぶリンク（複数のノードが含まれる場合）のみから構成される部分ネットワークであり、以後これを「セクタ核」と呼ぶ。他の一つは、一つないしは複数のセクタ核とそれらを相互に結ぶリンク（セクタ核が複数含まれる場合）のみから構成される部分ネットワークであり、以後「サブエリア」と呼ぶ。

ここで、図2に示す任意の隣接するサブエリアA、Bと両者を直接結ぶリンクの集合 Δ_{AB} 、ならびにA、Bと Δ_{AB} によって構成されるサブエリアCを想定し、サブエリアAに含まれるセクタの管制作業負荷の平

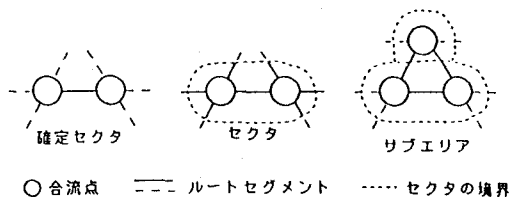


図1 セクタ核とサブエリアの概念図

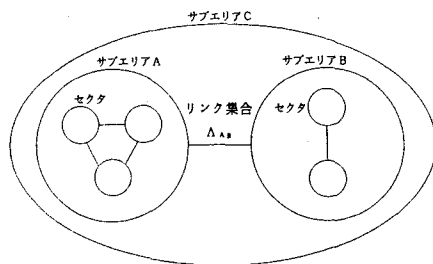


図2 リンク切断による作業負荷の均等化

均値とサブエリアBに含まれるセクタの管制作業負荷の平均値が等しくなるようリンク集合 Λ_{AB} の切断率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)を定めることを考えよう。

サブエリアA, B, Cを構成するセクタの平均作業負荷, $\bar{W}(A)$, $\bar{W}(B)$, $\bar{W}(C)$ は, リンク集合 Λ_{AB} に関する作業負荷を $W(\Lambda_{AB})$, サブエリアA, Bに含まれるセクタ数を n_A , n_B とすると, それぞれ,

$$\bar{W}(A) = \frac{W(A) + \alpha W(\Lambda_{AB})}{n_A} \quad (4)$$

$$\bar{W}(B) = \frac{W(B) + (1-\alpha)W(\Lambda_{AB})}{n_B} \quad (5)$$

$$\bar{W}(C) = \frac{W(A) + W(B) + W(\Lambda_{AB})}{n_A + n_B} \quad (6)$$

で与えられる。リンク集合 Λ_{AB} の作業負荷 $W(\Lambda_{AB})$ を着目している2つのサブエリアA, Bに割り振ることによって作業負荷の均等化を図ることができるか否かは, 以下のように検討すればよい。

$\bar{W}(A) \leq \bar{W}(C)$ かつ $\bar{W}(B) \leq \bar{W}(C)$ の場合は $0 \leq \alpha \leq 1$ となるため, $W(\Lambda_{AB})$ をサブエリアAからみて $\alpha : (1-\alpha)$ の比率に分ける地点で Λ_{AB} を切断し, サブエリアA, Bで管制作業を分担することにより, 両サブエリアの作業負荷を均等化することができる。

一方, $\bar{W}(B) \leq \bar{W}(C) \leq \bar{W}(A)$ の場合は $\alpha < 0$ となり, $W(\Lambda_{AB})$ をすべてサブエリアBで負担してもサブエリアAの作業負荷の方が大きくなるため, 両サブエリア間で作業負荷を均等化することはできない。このとき, サブエリアAがサブエリアCの中でボトルネックを形成する。同様に $\bar{W}(A) \leq \bar{W}(C) \leq \bar{W}(B)$ の場合は $1 < \alpha$ となり, サブエリアBがサブエリアCの中でボトルネックを形成する。

以上の検討を, 2つ以上のセクタを含むすべてのサブエリアについて行うことにより, ボトルネックを形成するサブエリアを見出すことができる。これは, すべてのサブエリア(単一のセクタのみから構成されるものを含む)についてそれぞれ平均作業負荷を計算し, それが最大となるサブエリアを空域全体のボトルネックとなるサブエリアとして抽出すればよいことを意味している。この場合, ボトルネックとなるサブエリアを構成する各セクタの作業負荷は当該サブエリアの平均作業負荷に等しい。

(4) 最適セクタ分割の探索手順

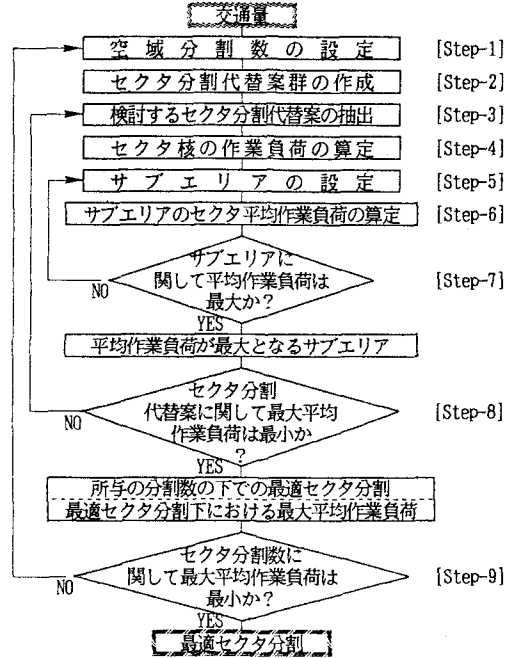


図3 最適セクタ分割の手順

以上より, 図3に示す手順に沿って空域の最適セクタ分割を行うことができる。

[Step-1] 空域の分割数の設定

分割数 K を定める。

[Step-2] セクタ分割代替案の作成

空域に存在する N 個のノードを K 組に分け, 各組に含まれるノード全てが相互に連結されているもののみを抽出してセクタ分割代替案群 S とする。

[Step-3] 検討する代替案の抽出

得られたセクタ分割代替案群 S の中から一つの代替案 s を取り出し, 以下の検討を行う。

[Step-4] セクタ核の作業負荷の算定

ノードの組み合わせのみが与えられている個々のセクタについて, セクタ核の作業負荷 W_c^m ,

$$W_c^m = \sum_{i \in I_m} t_{hi} E_{hi} + \sum_{j \in J_m} (t_{hrj} + t_{oej}) + \sum_{k \in I_m} t_{ck} E_{ck} \quad (7)$$

を計算する。ここに, I_m はセクタ核 m と外部のノードを結ぶリンクの集合, J_m と K_m はそれぞれセクタ核 m 内のリンクとノードの集合である。

[Step-5] サブエリアの設定

一つ以上の連続するセクタ核と, セクタ核が複数含まれる場合はそれらを相互に結ぶリンクのみから, サブエリアを設定する。

[Step-6] サブエリアの平均作業負荷の算定

サブエリア l の平均作業負荷 W_l は,

$$W(l) = \frac{1}{n_l} \left\{ \sum_{m \in M_l} W_C^m + \sum_{j \in J_l} (t_r E_{rj} + t_o E_{oj}) \right\} \quad (8)$$

で与えられる。ここに、 M_l はサブエリア l に含まれるセクタ核の集合、 J_l はセクタ核 $m \in M_l$ を相互に直接結ぶリンクの集合、 n_l はサブエリア l に含まれるセクタ数である。

[Step-7] 平均作業負荷が最大となるサブエリアの探索

セクタ分割代替案 s の下でのすべてのサブエリア L について [Step-5]~[Step-6] を繰り返し、平均作業負荷が最大となるサブエリアを探索する。

[Step-8] 最大平均作業負荷が最小となるセクタ分割の探索

分割数が k_s であるすべてのセクタ分割代替案 s_k に関して [Step-3]~[Step-7] を繰り返し、[Step-7] で得られる平均作業負荷の最大値が最小となるセクタ分割代替案 s_{k^*} とそのときの最大作業負荷 W_{k^*} ,

$$W_{k^*} = \min_{s \in S} \{ \max_{l \in L_s} W(l) \} \quad (9)$$

を求める。

[Step-9] 最適分割数の探索

分割数 K_s を変化させて W_{k^*} が最小となる分割数 K_{k^*} とそのときの最適セクタ分割 s_{k^*} を求める。

4. 数値分析

(1) 設定条件

以上の議論に基づいて空域の交通容量を検討するため、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、20 NM 離れて設置されている2つの空港をそれぞれ中心とする半径40 NM の空域である。ゲートは航空路と接続するものが3つ、空港と接続するものが空港ごとに1つずつ存在し、図4に示すルートにより結ばれている。

交通流は到着機のみからなるものとした。ネットワーク上を流れる交通量のODパターンは常に同じ比率とし(表1)、この比率を保ったまま交通量の総計が変化するものとした。航空機の飛行速度は、全ての航空機に対して一律に 250 kt とした。

管制作業1回当たりに要する作業時間は作業の種類ごとに一定とし、ルーチン作業10秒、ハンドオフ

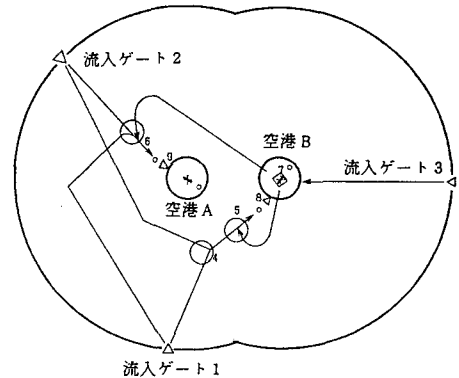


図4 検討対象空域

表1 OD交通量の比率

O \ D	空港A	空港B
流入ゲート1	0.20	0.15
流入ゲート2	0.20	0.15
流入ゲート3	0.10	0.20

作業15秒、交差錯綜解消作業40秒、追越錯綜解消作業10秒とした^{4) 5)}。また、ルーチン作業の発生頻度は1/30(回/km)とした⁶⁾。

(2) 分析方法

以上の設定条件のもとで空域に到着する交通量をパラメトリックに増加させ、先に述べた方法を用いて最適セクタ分割を行った。次いで、得られたセクタ分割から作業負荷が最大となるセクタを選び出し、このセクタの作業負荷が過大なものとなっていないかどうかを、先に提案したセクタの交通容量算定モデル(詳細は文献7)、8)を参照されたい)を用いて調べた。ここでは管制待ちの発生をもって作業負荷が過大であると判断している。このようにして得られる、最適セクタ分割の下でボトルネックとなるセクタに管制待ちが発生しない最大の交通量が、設定条件下における空域の管制交通容量である。

一方、空域内の最も航空機が集中するルート上に管制上最低限確保すべき間隔で密に航空機を並べた場合の交通量が、管制間隔によって規定される交通容量となる。ここでは、進入管制空域における管制間隔の基準⁹⁾である5 NM を用いた。

(3) 分析結果

セクタ数が2から4の場合について、種々の交通量に対する管制処理間隔(ある航空機が管制処理を受けてから次に管制処理を受けるまでの時間)と平均管制要求間隔を計算し、両者の差である平均管制

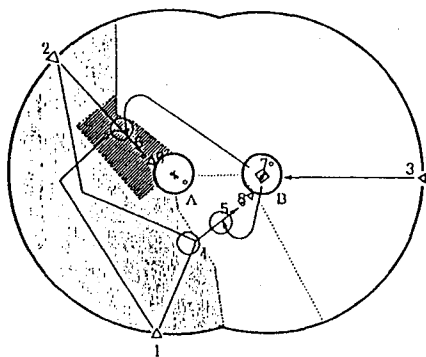


図5 セクタ分割結果の一例

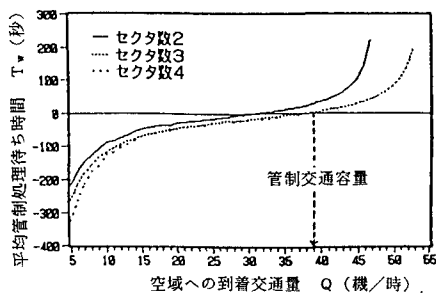


図6 交通量と平均管制処理待ち時間

待ち時間を交通量と対応づけて示したのが図6である。平均管制待ち時間が正の場合は航空機は必要とする時点までに管制処理を受けられないことを意味している⁸⁾。

セクタ分割数が2の場合、一人あたりの管制官が受け持たなければならない航空機数が相対的に多いため、交通量の増加に伴う管制処理間隔の増大が著しい。一方、セクタ分割数が3の場合は、これに比べて増大の程度は緩やかである。しかし、航空機数がある程度以上に増えるとセクタ分割数が3の場合と4の場合の平均管制待ち時間は同じ値となってしまう、セクタ分割数を増やしても管制待ち時間を減らすことはできない。これは、セクタの数を増やすことによって交通容量の増加を図ることに限度があることを示すものと理解できる。また、このとき、合流点を含む特定のセクタが管制上のネックとなっている状況が認められた。

図6より、平均管制待ち時間の許容値を0とした場合、管制処理能力から定まる空域交通容量は39機/時となる。一方、安全飛行間隔から定まる交通容量は100機となり、設定した条件の下では管制交通容量が空域の交通容量を支配する結果となっている。

6. おわりに

本研究では、所与のネットワーク構成の下で、管制官の作業負荷に着目した空域のセクタ分割法を提案した。この方法を仮想空域に適用して数値分析を行った結果、作業負荷が最大となるセクタの作業負荷を最小とするセクタ分割結果が得られ、方法の有効性が確認された。また、①セクタ分割にかかわらず合流点を含む特定のセクタが管制上のネックとなる場合が多い、②セクタ分割数を増やすことによって交通容量の増加を図ることには限界がある、③管制システムの能力が空域の交通容量を規定することがある、といった諸点を確認することもできた。

ただし、上記は限られた想定事例について得られた結果であるため、一般化するためには更に検討を重ねる必要がある。また、試算した管制交通容量は現行の管制システムを前提としたものであり、将来的には変化すると考えるべきものである。さらに、空域の交通容量は、飛行ルートネットワーク構成にも依存している。今後はネットワーク構成をも代替案に含めた空域設計と交通容量の関係を検討することも必要である。

【参考文献】

- 1) 例えば Mensen, H. : The Crisis of European Air Traffic Control, Transp. Res. Circular, No.393, p.33, 1992.
- 2) 例えば Odoni, A.R. and R.W. Simpson : Review and Evaluation of National Airspace Models, US-DOT, FAA-EM-79-12, 1979. または Janic, M. : Terminal Area Capacity Model - A Problem Concerning Air Traffic Controller Workload, Transp. Plannng. and Tech., Vol.13, pp.205-216, 1989.
- 3) Tuan, P.L. et al. : Advanced Productivity Analysis Methods for Air Traffic Control Operations, US-DOT, FAA-RD-76-164, pp.145-152, 1976.
- 4) 運輸省航空局資料に基づく試算値。
- 5) 運輸省航空局資料およびAIPに基づく試算値。
- 6) 前掲 3), P.71.
- 7) 喜多・舟木・大江 : 空港周辺空域の最大交通容量に関する一考察, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.97-104, 1991.
- 8) 信原・本間・喜多 : 管制処理能力からみた航空交通管制セクタの交通容量, 土木学会第47回年講, IV, 1992.
- 9) Nolan, M.S. : Fundamentals of Air Traffic Control, Wadsworth Publishing Co., pp.377-384, 1990.