

## 7. 航空交通量と空域設計要件との関係について —その2—

航空交通管理領域 ※岡 恵、蔭山 康太、福田 豊、山本 哲士

### 1. はじめに

航空交通需要の増加に伴い、航空交通量も増加する事が予想されている。これに対処するためには、空域等をより有効に活用することが必要である。特に空港周辺では交通が輻輳するため、効率的に管制を行う必要があり、そのためには、交通量に見合った空域設定が必要である。

空域改編や管制方式の変更は、従来、専門的知識や経験則に基づき行われてきたが、更なる効率向上のために、数量化した指標による客観的な評価を併せて行うことが求められている。

当所では、“空域設定におけるパラメータ”（空域の広さ・形状、経路構成、管制移管時の条件（高度・速度・間隔）等）が、“実運航における条件や目標のパラメータ”（航空交通量、航空機の安全間隔維持のための時間調整量、離着陸回数、飛行時間・飛行距離・飛行高度のプロファイル等）に及ぼす影響を検討してきた<sup>[1-4]</sup>。これらは相互に関連しているため、既知のパラメータから未知のパラメータの要件を推定する事が出来る。

本稿では、要件推定の一例として、モデルケースにおいて条件を仮定し、一部の空域設定パラメータの要件を検討した。

### 2. 滞留時間

着陸滑走路上での衝突を避けるためには、到着機間に適切な安全間隔を設定することが必要である。そのため最終進入に先立ち、メタリング（航空機間の順序付けおよび適切な安全間隔の設定の事）が行われる。現在の航空管制では空域を区切り、分担して管制を行っているため、通常は管制移管点等にメタリング地点を設け、その点で、先行機と後続機の間、特定の時間又は距離を確保する事が条件付けられている。

所要の条件を満たすための一般的なメタリングの手法として、レーダー誘導による飛行距離の調整が行われる（図1）。到着機が集中した場合には、メタリング地点周辺では、順番待ちのための渋滞が発生する。航空機は空中で静

止することが出来ないため、レーダー誘導により飛行距離を調整するための空域が必要となる。到着機の集中度が増大していくと、これに伴い渋滞は更に大きくなり、空域内でレーダー誘導により調整することが出来る飛行距離の限界を超えることになる。

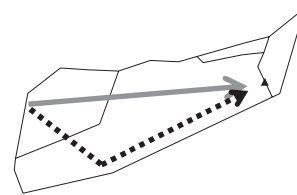


図1. レーダー誘導の一例

（実線：最短距離の飛行

点線：レーダー誘導により時間調整を行う飛行）

レーダー誘導により調整することが出来る飛行距離は、その空域の広さや形状と密接な関係がある。また、飛行距離の調整量は、到着機の集中度やメタリング地点における設定間隔と密接な関係がある。

そこで、メタリング地点において、先行機と後続機との間隔条件を満足するために必要となる最小の調整時間を滞留時間と名付けた（図2）。滞留時間をレーダー誘導で消化する場合、空域の形状・経路構成・管制方式等と密接な関わりがあるため、滞留時間が空域設計のための一つの指標になると考えられる。

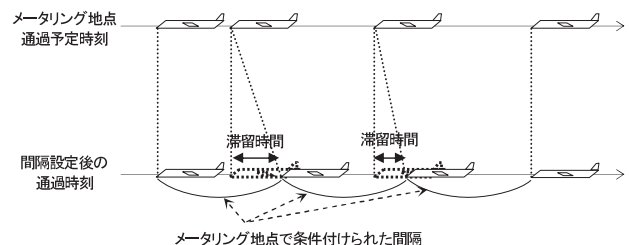


図2. 滞留時間

単位時間当たりの入域交通量が増加すれば、渋滞が生じ、滞留時間も増加する。単位時間当たりの出域交通量が増えれば滞留時間は減少する。空域の広さにより、その空域内で消化できる滞留時間は変化する。この3つのパラメータは相互に関連しており、トレードオフの関係にある。

本稿では、滞留時間に着目した空域設計の一例として、空域構成や、ピーク時における着陸回数、入域する航空交通量等の条件から、入域点の位置、入域間隔等の要件を検討した。図3に推定過程の大まかな流れを示す。

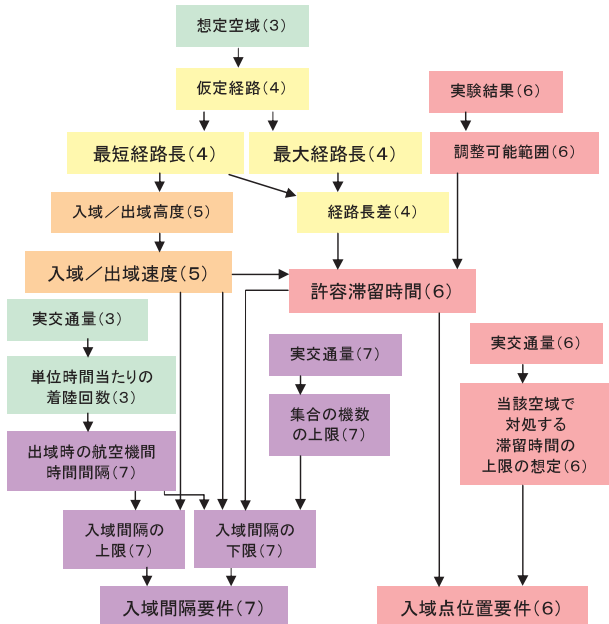


図3. 推定過程の概要（括弧内数字は本稿での項番）

### 3. 前提条件

対象空域は架空の羽田空港ターミナル空域（羽田）およびその周辺空域（C空域）とし、対象交通流を西日本方面からの羽田空港到着機とした（図4）。

C空域へはA,B,Cの3点から入域し、C空域内で合流する事とした。羽田への入域点は位置の違いによる影響を調べるために5点（北緯35°02'20"、東経140°00'00"の点およびその点を基点として、境界線上5NMの間隔で東へ4点）について検討した。点には西から東へ順に1~5までの番号を割り振った。この点をC空域におけるメータリング地点とし、最終進入開始点（FAF: Final Approach Fix）を羽田におけるメータリング地点とした。

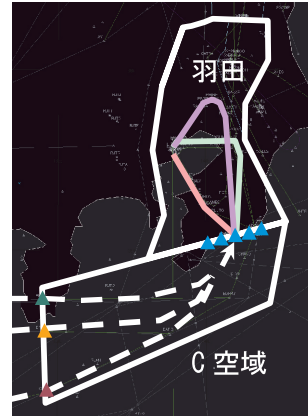
羽田空港への進入経路はRWY22へのILS進入、RWY22へのLDA進入、RWY34LへのILS進入の3種類について検討した。各進入方式におけるFAFの位置および、仮定した通過高度と通過速度（指示対気速度(IAS)）を表1に示す。

現状の羽田空港着陸回数は、ピーク時で33

~35回程度と推定される。今回の検討では、1時間当たり33回の着陸を想定した。

航空機の速度は、実状を考慮し、高度10,000ft以上においては280kt(IAS)、それ以下では250kt(IAS)と仮定した。また、着陸降下時の航空機の降下角は3°とした。

風向風速を高度層毎に仮定した（表2）。FAFにおいては、使用滑走路毎に風向を変えた。



- 白実線-空域境界線
- 紫線-RWY22ILS
- 緑線-RWY22LDA
- 桃線-RWY34LILS
- 青三角-羽田入域点
- 緑三角-C入域点A
- 橙三角- " B
- 赤三角- " C

図4. 対象空域

表1. FAF

進入方式	滑走路端からの距離[NM]	通過高度 [ft]	通過速度 (IAS)[kt]
22ILS	15.4	5,000	180
22LDA	16.9	5,000	180
34ILS	15.5	5,000	180

表2. 風向風速

上限高度[ft]	風向[deg]	風速[kt]
~10,000	230	30
~15,000	230	50
~20,000	250	80
~25,000	240	120
~30,000	240	160
FAF(RWY22)	220	20
FAF(RWY34L)	340	20

### 4. 最短/最大経路の仮定

航空管制において、レーダー誘導による時間調整を行う際には、その空域でどれだけ余分に飛ぶことが出来るか、つまり最短経路と最大経路の差の大きさが時間調整量の大きさとなる。一方で、航空管制においては、秩序ある迅速な交通流を維持促進する必要がある。以上から、最大経路においては、空域をはみ出さず、過度の蛇行をせず、他の交通流を阻害しないという条件の下で、最も長い距離を飛行するような経路を仮定した。また、最短経路においては、無理なく最終進入経路へ合流できるような経路で、

最も短い距離となるものを仮定した。

羽田空域およびC空域において、仮定した最短経路と最大経路を図5に示す。また、それぞれの経路長を図6に示す。羽田経路は入域点からFAFまでの経路長とした。

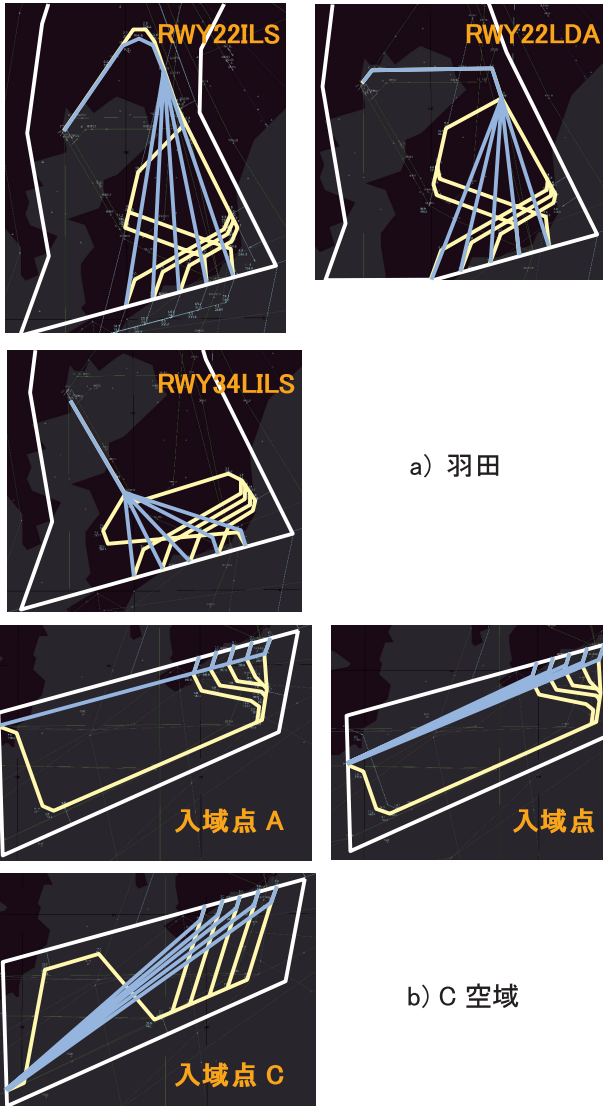


図5. 仮定した最短／最大経路  
(青-最短経路／黄-最大経路)

### 5. 入域／出域速度の推定

FAF、羽田入域点、C空域入域点の通過速度を推定する。

FAFの通過速度は、前提条件（表1,2）より対地速度、約173.7ktとなった<sup>[5]</sup>。

羽田入域点の速度は、入域点の通過高度により異なる。今回の推定では、入域点での高度を進入方式によらず一意に定めると仮定した。その上で、3°の降下角で降下しながら羽田内の

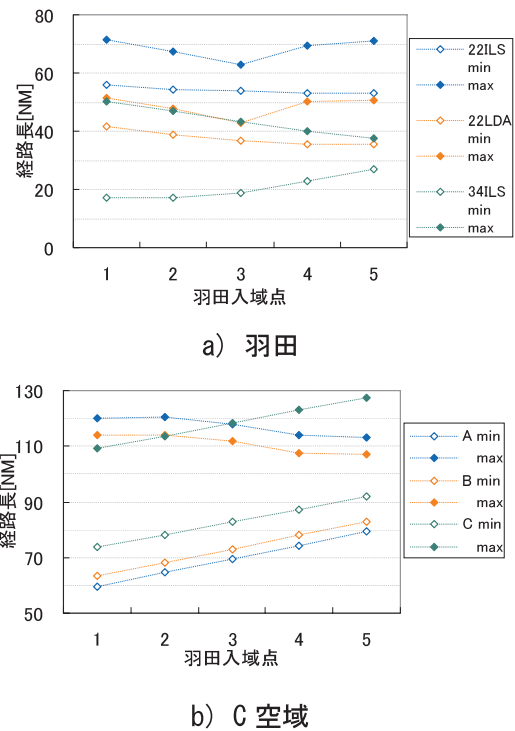


図6. 最短／最大経路 経路長

最短経路を飛行した際の入域点での高度を入域高度と仮定した。その結果、羽田入域点の速度は表3のようになった。高度10,000ftでの減速に要する水平飛行距離は3NMと仮定し、高度層毎の風の影響（表2）も考慮に入れた（航空機の進行方向は入域点毎に一律で計算した）。

表3. 最短経路に基づく羽田入域速度

入域点	仮定した進行方向[度]	入域高度 [ft]	入域対地速度 [kt]
1	20	10,000	348.5
2	20	10,000	348.5
3	20	11,000	370.6
4	360	11,000	359.4
5	340	12,000	349.2

C空域入域速度も入域高度により異なるが、入域高度は各航空機の巡航高度により異なるため、今回の推定では、一律28,000ftと仮定した。この高度は、3°の降下角で降下しながら最短距離を飛行した際の入域高度である。仮定からC空域の入域対地速度は約581.1ktとなった。

### 6. 許容滞留時間の推定

上記、最大経路と最短経路の差が、レーダー誘導による時間調整を行う際の調整幅になる。しかし、実際の管制上は音声通信の混雑等により、最大経路と全く同一の経路を飛行する事は

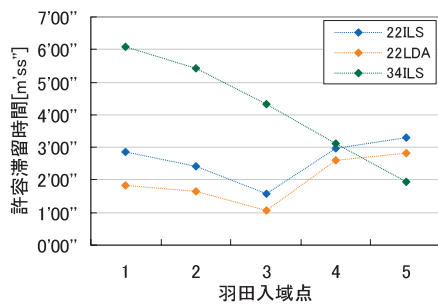
困難であると考えられる。当研究所で行った管制官参加による模擬実験の結果より、今回の推定では経路長差の8割の距離が時間調整として使用できると仮定した。その結果、空域内で調整可能な距離は表4のようになった。

表4. 空域内で調整可能な距離[NM]

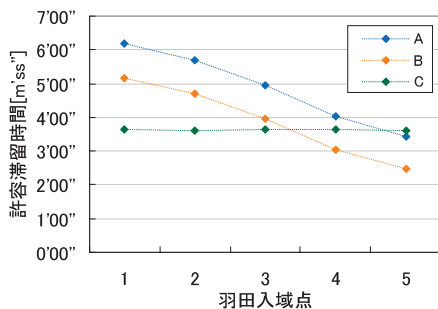
		入域点				
		1	2	3	4	5
羽田	22ILS	12.3	10.5	7.2	13.1	14.4
	22LDA	7.9	7.2	4.8	11.6	12.3
	34ILS	26.5	23.6	19.6	13.8	8.5
C	A	48.6	44.6	38.8	31.6	27.0
	B	40.6	36.8	31.0	23.8	19.3
	C	28.5	28.3	28.6	28.5	28.4

上記調整可能距離を  $D$ 、入域時の対地速度を  $v_i$ 、出域時の対地速度を  $v_o$  とすると、以下の式で許容滞留時間  $RMAT$  (Required Minimum Adjustment Time) を推定した (図7)。

$$RMAT = \frac{D}{(v_i + v_o)/2} \quad (1)$$



a) 羽田



b) C 空域

図7. 許容滞留時間

ここで、滞留時間分布の実状を知るため、無作為に選んだ1日において、実際の羽田空港の到着交通を調べたところ、推定される滞留時間の分布は、6分以下が91%、最大で14分程度であった。滞留の発生しない航空機は全体の21%であった。

C 空域の入域点、羽田入域点、各組合せ毎の許容滞留時間の合計値と、実際の羽田到着機において、その合計値より滞留時間が少なかった航空機の機数の割合を表5に示す。進入方式は気象等により決定されるため、任意に選択する事はできない。そのため、羽田の各入域点の許容滞留時間は全ての進入方式のうち最小の値とした。

実際の空域設定において滞留時間を考慮する際には、当該空域においてレーダー誘導で対処する滞留時間の上限を想定する必要がある。想定した滞留時間の上限が、平均を超えて最大値に近づくにつれ、空域の利用効率は下がる。一方で、その上限を超える滞留時間が割り当てられた航空機については、空中待機や、より手前の空域での時間調整、地上待機等が必要になる。

今回の推定では、レーダー誘導で対処する滞留時間の上限を6分と仮定した。その結果、A点からの入域交通量が多い場合、入域点1~4、B点の場合、入域点1,2、C点の場合、入域点4が、条件に適合する点であると推定される。

表5. 許容滞留時間の合計と航空機の割合

C 空域 入域点	羽田 入域点	許容滞留時間 の合計値 [m:ss"]	合計値より滞留 時間が少なかった 航空機の割合
A	1	8'01"	95.4%
	2	7'21"	93.9%
	3	6'00"	90.6%
	4	6'39"	92.8%
	5	5'24"	87.3%
B	1	7'00"	93.0%
	2	6'21"	92.1%
	3	5'01"	85.8%
	4	5'39"	88.6%
	5	4'25"	81.4%
C	1	5'27"	87.7%
	2	5'16"	86.7%
	3	4'42"	84.0%
	4	6'15"	91.5%
	5	5'34"	88.2%

## 7. 入域距離間隔の推定

### 7.1 FAF 距離間隔の推定

1時間当たり33回の着陸を仮定したことから、航空機間の時間間隔は1分49秒となる。また、先述の通り FAF での対地速度は約173.7ktなので、FAF での航空機間の距離間隔は約5.3NM (=1'49"×173.7kt) となる。

### 7.2 羽田入域距離間隔の推定

まず、入域間隔の上限値を推定する。FAFの距離間隔を5NMと仮定するとFAFでの時間間隔は1分44秒となる。この間隔を満足する入域距離間隔の上限は、先述の入域対地速度（表3）に1'44"を乗じて算出すると、入域点1~5それぞれ、10.1, 10.1, 10.7, 10.4, 10.1 NMとなる。

次に許容滞留時間から、入域間隔の下限値を推定する。

航空機が出域間隔より短い時間で連続して入域すると、滞留時間が累積される。このような航空機の集まりを以後、集合と呼ぶ。

入域距離間隔を  $S$ 、入域時の対地速度を  $v$  とすると、前後機の入域時間間隔は  $S/v$ 、出域時間間隔を  $T$  とすると、 $T - S/v$  が後続機に課せられる滞留時間となる。この滞留時間は集合内で累積されるため、集合内の機数に比例する。しかし、空域内で消化できる滞留時間は限られている。許容滞留時間を  $RMAT$ 、集合の機数を  $N$  とすると次式の関係になる。

$$(N-1)\left(T - \frac{S}{v}\right) \leq RMAT \quad (2)$$

(2) 式、許容滞留時間（図7）、推定速度（表3）より、入域間隔  $S$  と集合の機数  $N$  の関係を図8に示す。

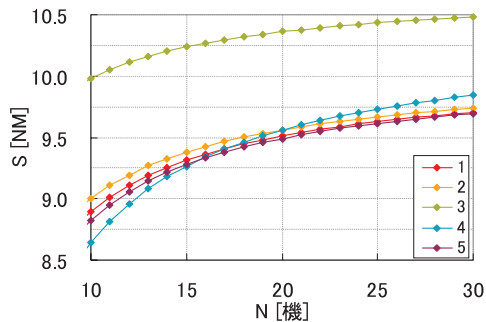


図8. 集合の機数と入域間隔の関係（羽田）

ここで、滞留時間分布を調べた日の、繁忙時間帯における集合の機数を調べたところ、88%は20機以下、最大で30機程度であった。今回の推定では、対処する集合の機数を20機までと仮定した。その結果入域距離間隔の下限は、図8から、入域点1~5においてそれぞれ、9.5, 9.6, 10.4, 9.6, 9.5 NMとなった。

### 7.3 C空域入域距離間隔の推定

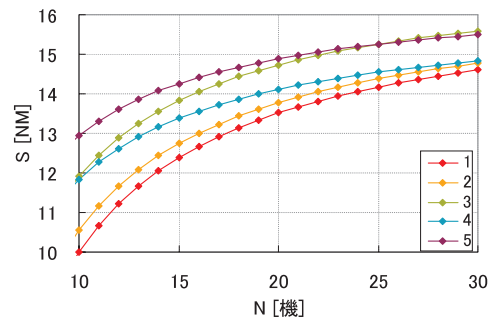
まず、入域間隔の上限値を推定する。仮定し

た羽田入域間隔および、算出したC空域入域間隔（時間・距離）を表6に示す。入域点3における羽田入域間隔は、先述した上限値と下限値の間に整数値がないため、着陸時間間隔である1分49秒から上限値を算出した。距離の算出には推定した入域速度を使用した。

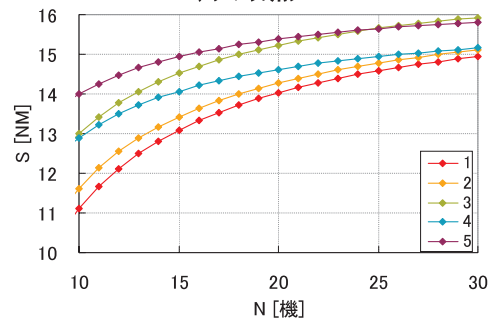
表6. C空域入域間隔（時間・距離（上限））

羽田入域点	羽田入域間隔[NM]	C空域入域間隔	
		時間[m'ss"]	距離(上限)[NM]
1	10	1'43"	16.7
2	10	1'43"	16.7
3	11	1'47"	17.2
4	10	1'40"	16.2
5	10	1'43"	16.6

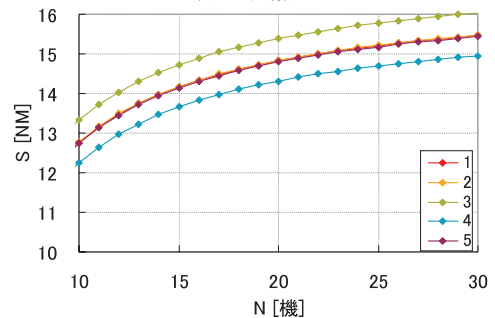
次に許容滞留時間から、入域間隔の下限値を推定する。(2) 式、許容滞留時間（図7）、推定速度より、入域間隔  $S$  と集合の機数  $N$  の関係を図9に示す。



a) 入域点 A



b) 入域点 B



c) 入域点 C

図9. 集合の機数と入域間隔の関係（C空域）

対処する集合の機数を20機と仮定すると、入域間隔の下限は、表7のようになる。今回の推定で得られた結果を表8にまとめる。

表7. C空域入域距離間隔（下限）[NM]

入域点	A	B	C
1	13.5	14.0	14.8
2	13.8	14.3	14.8
3	14.7	15.2	15.4
4	14.1	14.6	14.3
5	14.9	15.4	14.8

表8. モデルケースにおいて推定された値

羽田 入域 点	羽 田				
	想定した 入域高度 [ft]	入域間隔[NM]		許容滞留時間[m'ss"]	
		上限	下限	最小	最大
1	10,000	10.1	9.5	1'49"	6'06"
2	10,000	10.1	9.6	1'39"	5'26"
3	11,000	10.7	10.4	1'04"	4'19"
4	11,000	10.4	9.6	2'37"	3'06"
5	12,000	10.1	9.5	1'57"	3'18"
C空域 入域点 A					
	想定した 入域高度 [ft]	入域間隔[NM]		許容滞留時間（羽田と の合計値）[m'ss"]	
		上限	下限	最小	最大
1	28,000	16.7	13.5	8'01"	12'17"
2		16.7	13.8	7'21"	11'07"
3		17.2	14.7	6'00"	9'16"
4		16.2	14.1	6'39"	7'08"
5		16.6	14.9	5'24"	6'45"
C空域 入域点 B					
	想定した 入域高度 [ft]	入域間隔[NM]		許容滞留時間（羽田と の合計値）[m'ss"]	
		上限	下限	最小	最大
1	28,000	16.7	14.0	7'00"	11'16"
2		16.7	14.3	6'21"	10'07"
3		17.2	15.2	5'01"	8'17"
4		16.2	14.6	5'39"	6'09"
5		16.6	15.4	4'25"	5'46"
C空域 入域点 C					
	想定した 入域高度 [ft]	入域間隔[NM]		許容滞留時間（羽田と の合計値）[m'ss"]	
		上限	下限	最小	最大
1	28,000	16.7	14.8	5'27"	9'44"
2		16.7	14.8	5'16"	9'02"
3		17.2	15.4	4'42"	7'58"
4		16.2	14.3	6'15"	6'45"
5		16.6	14.8	5'34"	6'56"

## 6. まとめ

空域改編や管制方式の変更の際に、交通量と空域設定との整合性を数値的に評価するために、滞留時間等の指標が有効であると考え、滞留時間に着目した空域設計要件の推定の一例を示した。

架空の羽田空港およびその周辺空域を想定し、西日本方面からの到着機について、5つの羽田入域点を仮定しそれぞれに推定を行った。

空域構成、ピーク時における着陸回数、実際の交通流における推定滞留時間等を条件として、羽田、C空域それぞれにおける入域間隔の要件を推定した。また、空域においてレーダー誘導で対処する滞留時間の上限を想定することで、羽田入域点の位置に関する要件を推定した。

今回の推定は、あくまでも1つのモデルケースにおける、様々な仮定の上での値であるが、異なった条件下においても、同様の手順で推定が可能であると考えられる。

今後は、管制官によるばらつきや、実際の交通流の傾向等を推定過程に取り込むことにより、更に実状と合致した要件推定が出来るよう、手法の改善を行いたい。

## 参考文献

- [1] 山本他：「同一滑走路の到着機交通流における着陸回数」、電子航法研究所研究発表会、pp37-40、平成18年6月
- [2] 岡他：「単純な空域モデルにおける交通密度と管制空域デザイン要件」、電子航法研究所研究発表会、pp17-20、平成18年6月
- [3] 山本他：「到着機の運航効率と降下プロファイルに関する一考察」、電子航法研究所研究発表会、pp19-22、平成19年6月
- [4] 岡他：「航空交通量と空域設計要件との関係について」、電子航法研究所研究発表会、pp23-28、平成19年6月
- [5] 翼 醇：「航空力学 航空工学講座6」、日本航空整備協会、p74、昭和53年12月