

4. 航空交通量と空域設計要件との関係について

航空交通管理領域 ※岡 恵、山本 哲士

1. はじめに

現在行われている羽田空港再拡張等に伴い、今後大幅な航空交通量の増加が見込まれている。これに対処するためには、空域等の資源をより有効に活用することが必要である。

空域改編案の作成に際し、これまでは専門的知識や経験則による評価により、空域や経路が設定されてきた。しかし、交通量の増加と共に、これまでの評価に加え、数量化した指標による客観的な評価を行うことが求められてきている。

より実用的な空域の設定を行うためには、各管轄空域の形状や位置・高度範囲、経路構成、隣接管轄空域等との管制移管時の移管間隔・高度・速度等の条件等、様々な要因を考慮し、効率化が図られるよう、交通流等を含めた“設計”を行う必要がある。

本稿では、設計を行う際に主要な要素となる滞留時間の最長値を推定する方法を示し、実験結果との比較を行う。

2. 滞留時間

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。航空路管制においては個々の区切られた空域のことをセクターと呼ぶ。空港の周辺のセクターでは、出域する航空機間に最低限必要な間隔の条件を設けている場合がある。これは、滑走路上で航空機間隔を確保するためである。空域における単位時間当りの出域機数は出域間隔に依存する。^[1] 単位時間当りの出域機数より入域機数の方が多い場合に滞留が発生する。その際の滞留解消に要する必要最低限の時間を、以後“滞留時間”と呼ぶ。滞留時間は主にレーダ誘導による迂回飛行で対処されることから、発生し得る最長滞留時間と空域設計とは密接な関係を持つ。^[2]

航空交通流と入出域条件が決まれば滞留時間が算出できるが^[2]、本稿では航空交通流を特定せず、平均入域間隔や入出域条件等から最長滞留時間の範囲を推定する。

2.1 滞留時間の推定

ある空域において、1本の経路が設定されており、空域内の経路長が D である、また、出域時間間隔が S_0 以上という条件が付いていると仮定する（図1）。この空域に、以下のような飛行を予定する2機の航空機が入域した場合の予測される滞留時間を推定する。

- ・同一の経路を飛行する
- ・同様の速度変化をする
(空域内の平均速度を V とする)

先行機の入域時刻を t_{I0} 、後続機の入域時刻を t_{I1} とすると入域時間間隔 S_I は以下で表される。

$$S_I = t_{I1} - t_{I0} \quad (1)$$

先行機の予測出域時刻を t_{O0} 、後続機の予測出域時刻を t_{O1} とすると、以下ようになる。

$$t_{O0} = t_{I0} + \frac{D}{V}, \quad t_{O1} = t_{I1} + \frac{D}{V} \quad (2)$$

t_{O1} と t_{O0} との差が S_0 より短い場合に滞留が発生する。滞留解消のための調整時間を τ とすると、出域間隔の条件から、以下が成り立つ。

$$(t_{O1} + \tau) - t_{O0} \geq S_0 \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)より

$$\tau \geq S_0 - S_I \quad (4)$$

滞留解消に要する必要最低限の時間を滞留時間と定義すると、予測される滞留時間 T は以下のように表される。

$$T = S_0 - S_I \quad (5)$$

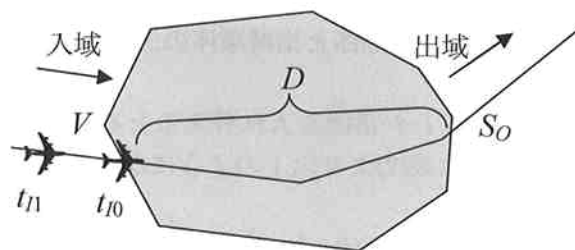


図1. 空域等仮定条件

複数の航空機が出域間隔未満で入域する場合(以後、航空機の集合と呼ぶ)、滞留時間は先頭から順に累積したものとなる。航空機の集合においては、以下のように定義する。

- i) 先頭の航空機を0番目とする
- ii) i 番目に入域する航空機を i 番機と呼ぶ
- iii) 0番機以外は滞留時間が発生する

$N+1$ 機の集合において、 $i-1$ 番機と i 番機の入域間隔を S_{fi} とすると、平均入域間隔 \bar{S}_I は、以下のように表わされる。

$$\bar{S}_I = \frac{\sum_{i=1}^N S_{fi}}{N} \quad (6)$$

また、 i 番機の滞留時間 $T(i)$ は以下のように表わされる。

$$T(i) = iS_O - \sum_{k=1}^i S_{fk} \quad (7)$$

集合内の航空機の滞留時間の中で、最長のものを以後最長滞留時間 T_{MAX} と呼ぶ。(max{(要素)}は要素の中で最大値の意味)

$$T_{MAX} = \max\{T(i)\} \quad (8)$$

2.2 順序の入れ替え

航空機の集合において、入域する順序と出域する順序とを入れ替えた場合(図2)の滞留時間を考察する。

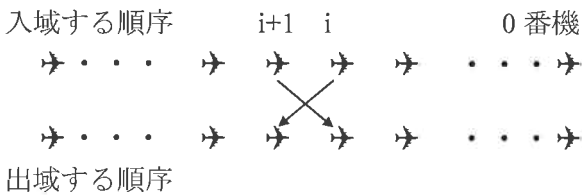


図2. 入域順序と出域順序の入れ替え

i 番機と $i+1$ 番機を入れ替えるとそれぞれの滞留時間は式(7)より以下ようになる。

$$i \text{ 番機 } \quad T_{CHG}(i) = (i+1)S_O - \sum_{k=1}^i S_{fk} \quad (9)$$

$$i+1 \text{ 番機 } \quad T_{CHG}(i+1) = iS_O - \sum_{k=1}^{i+1} S_{fk} \quad (10)$$

式(7)、(9)、(10)、 $S_{fk} \geq 0$, $S_O > 0$ から、

$$iS_O - \sum_{k=1}^{i+1} S_{fk} \leq iS_O - \sum_{k=1}^i S_{fk} < (i+1)S_O - \sum_{k=1}^i S_{fk}$$

$$T_{CHG}(i+1) \leq T(i) < T_{CHG}(i) \quad (11)$$

よって、入域する順序と出域する順序とを入れ替えると最長滞留時間が長くなる可能性がある。この性質をふまえた上で、最短の最長滞留時間を算出するために、以後、順序の入れ替えはないものと仮定し推定を行う。

2.3 最長滞留時間の推定

$N+1$ 機の集合の最長滞留時間を推定する。

2.3.1 全ての航空機が同時に入域する場合

仮定より、入域間隔は全て0なので、最長滞留時間 T_{MAX} は以下のように表わされる。

$$\bar{S}_I = 0 \quad , \quad T_{MAX} = NS_O \quad (12)$$

2.3.2 平均入域間隔 \bar{S}_I が0より大きい場合

最長滞留時間が最長になるのは a)最後の1機を除いて全ての航空機が同時に入域する場合であり、逆に最長滞留時間が最短になるのは b)全航空機が等間隔に入域する場合である。

a) 最長滞留時間が最長になる場合

(初めに N 機同時に入域し、 S_{IN} 後に1機入域する場合(図3))

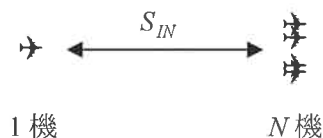


図3. 最長滞留時間が最長になる場合

仮定より、

$$S_{I1} = S_{I2} = \dots = S_{IN-1} = 0 \quad , \quad S_{IN} > 0 \quad (13)$$

式(6),(13)より、平均入域間隔は、

$$\bar{S}_I = \frac{S_{IN}}{N} \quad (14)$$

最長滞留時間 T_{MAX} は、 N 番機が最長滞留時間となる場合 ($\bar{S}_I < S_O/N$) と $N-1$ 番機が最長滞留時間となる場合 ($\bar{S}_I \geq S_O/N$) とで異なり、式(7),(13)より、以下のように表わされる。

$$T_{MAX} = \begin{cases} NS_O - S_{IN} = -N\bar{S}_I + NS_O & (\bar{S}_I < \frac{S_O}{N}) \\ (N-1)S_O & (\bar{S}_I \geq \frac{S_O}{N}) \end{cases} \quad (15)$$

b) 最長滞留時間が最短になる場合
(全航空機が等間隔に入域する場合)

仮定より、平均入域間隔は以下ようになり、最長滞留時間は N 番機の滞留時間となる。

$$S_{I1} = S_{I2} = \dots = S_{IN} = \bar{S}_I \quad (16)$$

$$T_{MAX} = (S_O - \bar{S}_I)N = -N\bar{S}_I + NS_O \quad (17)$$

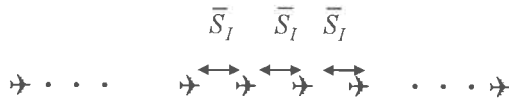


図4. 最長滞留時間が最短になる場合

a), b)より、機数を11機 ($N=10$)、出域間隔を120秒 ($S_O=120$) と仮定した時の、平均入域間隔 \bar{S}_I に対する最長滞留時間 T_{MAX} の最長値と最短値を図5に示す。

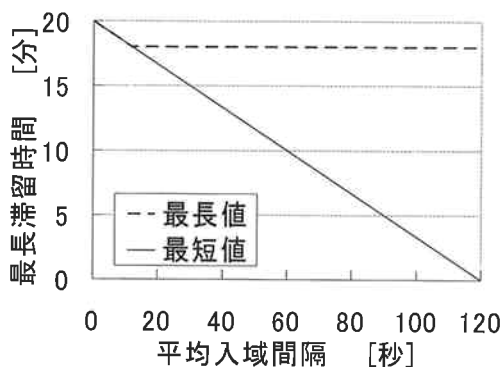


図5. 最長滞留時間の最長値・最短値

入域する交通流の平均入域間隔に対して発生する最長滞留時間は、最短値と最長値の間の値をとる。最短値に近い値となるのか、最長値に近い値となるのかは、集合内の入域間隔のばらつきによる。現実には、航空機同士に安全を担保する最低間隔が確保されているため、入域点が複数ある場合に同時に入域する場合が多い。このことから入域点の個数を、集合内の入域間隔のばらつきの目安と考えた。そこで、次に、入域点の数が M 個の場合の最長滞留時間を推定する。高度間隔を確保して同時に入域する場合も、高度層の数=入域点の数として同様に考えることができる。

2.3.3 入域点の数が M 個の場合

推定の前提として以下のように仮定する (図6)。

- i) 各入域点において航空機の最低入域時間間隔を L とする (最長値を推定するために、入域時間間隔を全て L とする)
- ii) 単純化のため、各入域点から出域点までの距離は等しいものとする
- iii) 同時に入域する航空機の集まりを先頭から0群、1群...と呼ぶ

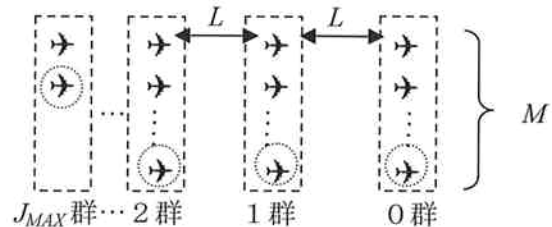


図6. 入域点が M 個の場合

群の番号 J の最大値は以下で表わされる。
(int)は整数部の意味)

$$J_{MAX} = \text{int}\left(\frac{N}{M}\right) \quad (18)$$

$J_{MAX} \times L$ の間に $N+1$ 機が入域することから、平均入域間隔 \bar{S}_I は以下ようになる。

$$\bar{S}_I = \frac{J_{MAX}L}{N} = \frac{\text{int}\left(\frac{N}{M}\right)L}{N} \quad (19)$$

最長滞留時間 T_{MAX} は、a) N 番機の滞留時間、または、b) 0 群から $(J_{MAX}-1)$ 群において、群の中で、最後に出域するものの中のいずれか（図6の○で囲った航空機（群の中では上から順に出域すると仮定）の滞留時間になるが、どの航空機が最長となるかにより値が異なる。

a) N 番機が最長となる場合

式(7)より、

$$T_N = -N\bar{S}_I + NS_O = -\text{int}\left(\frac{N}{M}\right)L + NS_O \quad (20)$$

b) 0 群から $(J_{MAX}-1)$ 群において、群の中で最後に出域するものが最長となる場合

0 群の最長滞留時間は、

$$T_{MAX0} = (M-1)S_O \quad (21)$$

1 群の最長滞留時間は、0 群の繰り越し分と群の中での滞留時間の和なので、

$$T_{MAX1} = MS_O - L + (M-1)S_O \quad (22)$$

同様に 2 群の最長滞留時間は、

$$T_{MAX2} = 2MS_O - 2L + (M-1)S_O \quad (23)$$

式(21),(22),(23)より、 J 群の最長滞留時間は

$$T_{MAXJ} = JMS_O - JL + (M-1)S_O \quad (24)$$

また、 $J+1$ 群の最長滞留時間から J 群の最長滞留時間を引いたものは、式(24)より、

$$T_{MAX(J+1)} - T_{MAXJ} = MS_O - L \quad (25)$$

航空機の集合の定義 iii) から

$$MS_O > L \quad (26)$$

式(25),(26)より

$$T_{MAXJ+1} > T_{MAXJ} \quad (27)$$

つまり、0 群から $(J_{MAX}-1)$ 群の中では、最後の群である $(J_{MAX}-1)$ 群の滞留時間が最長となる。

a), b) より、最長滞留時間 T_{MAX} は、以下のようになる。

$$T_{MAX} = \max \left\{ \begin{array}{l} -\text{int}\left(\frac{N}{M}\right)L + NS_O \\ \left(\text{int}\left(\frac{N}{M}\right) - 1\right)(MS_O - L) + (M-1)S_O \end{array} \right\} \quad (28)$$

$$= \max \left\{ \begin{array}{l} -N\bar{S}_I + NS_O \\ \left(\frac{1}{\text{int}\left(\frac{N}{M}\right)} - 1\right)N\bar{S}_I + \left(\text{int}\left(\frac{N}{M}\right)M - 1\right)S_O \end{array} \right\}$$

機数を 11 機 ($N=10$)、出域間隔を 120 秒 ($S_O=120$)、各入域点における航空機の最低入域間隔を 60 秒 ($L=60$) と仮定した時の、入域点の数 M に対する平均入域間隔 \bar{S}_I および最長滞留時間 T_{MAX} を図7に示す。入域点の数が増えると、最長滞留時間も増加するが、点の個数が6個以上では同じ値となる。これは、機数と点の個数との関係による。

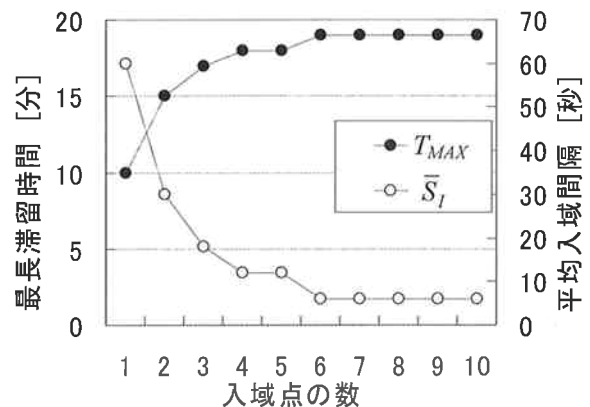


図7. 入域点の数に対する最長滞留時間

次に、入域点の数を変化させた時の平均入域間隔に対する最長滞留時間を図8に示す ($N=10$, $S_O=120$ と仮定)。 $M=1$ のグラフは、入域点数が1つしかないことから、全航空機が間隔 L で入域する事と同じ事になり、図5の最短値と同じ値となる。また、 $M=10$ のグラフは、 $N=M$ となり、始めに N 機同時に入域し、 L 後に1機入域するのと同じ事になり、図5の最長値と同じ値となる。

$M=1$ のグラフは1本の直線で表わされ、それ以外のグラフは2本の直線で表わされる。 $M=2$ から $M=5$ までは、境界値以降も平均入域間隔によって変化するが、 $M=6$ から $M=10$ の

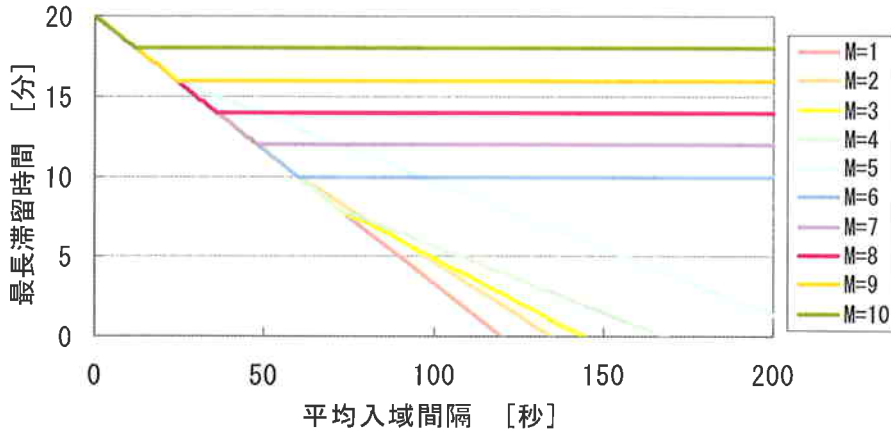


図8. 平均入域間隔に対する最長滞留時間

グラフは、境界値以降定数となる。これは、機数と入域点の個数との関係で、 $M=6$ 以上は、入域間隔 L によらず、初めに入域したもの（0群）の中で、最後の航空機が、最長滞留時間となる事を示している。

3. 実験結果との比較

平成17年11月に、羽田空港到着機を対象とし、管制官参加による、大島周辺空域のリアルタイムシミュレーションを行った。

実験対象とした空域図を図9に、実験で仮定した条件を表1に示す。

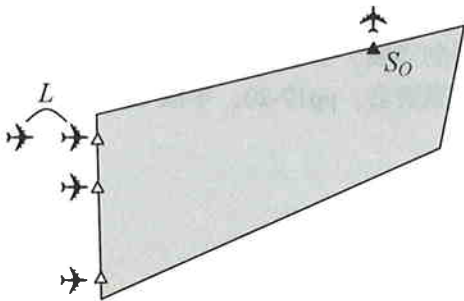


図9. 実験対象空域

表1. 実験の仮定条件

名称	記号	仮定値
入域点の数	M	3点
出域点の数		1点
航空機数	$N+1$	9機
最低入域間隔	L (距離)	10NM 以上
最低出域間隔	S_O (距離)	7NM 以上

3.1 推定値の算出

推定値算出のために、以下のように仮定した。平均出域間隔は管制官のばらつきを考慮した値とした。

- 平均入域対地速度 \bar{V}_I 500kt
- 平均出域対地速度 \bar{V}_O 300kt
- 平均出域間隔 \bar{S}_O (距離) 8NM

これらの仮定から、推定した値を表2に示す。

表2. 推定値

名称	記号	推定方法	推定値
最低入域間隔	L	$\frac{L(\text{距離})}{\bar{V}_I}$	1分12秒
出域間隔	S_O	$\frac{\bar{S}_O(\text{距離})}{\bar{V}_O}$	1分36秒
平均入域間隔	\bar{S}_I	式(19)より	18秒
最長滞留時間	T_{MAX}	式(28)より	10分24秒

3.2 実験結果

実験結果から各航空機の入域時刻を計測し、式(6)で算出したところ、平均入域間隔 \bar{S}_I は34秒であった。試行毎の平均出域間隔 \bar{S}_{OEXP} および、最長滞留時間 T_{MAXEXP} を表3に示す。 \bar{S}_{OEXP} は各航空機の出域点通過時刻を計測し、以下の式で算出した。

$$\bar{S}_{OEXP} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{O_i}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{O_i} - t_{O_{i-1}})}{N} \quad (29)$$

また、 T_{MAXEXP} は、管制官の介入のない、シナリオ通りの結果から、出域点通過時刻 (td_{Oi}) を計測し、実験結果の通過時刻との差を算出した。

$$T_{MAXEXP} = \max\{T_{EXPi}\}$$

$$T_{EXPi} = t_{Oi} - td_{Oi} \quad (30)$$

表3. 実験結果

試行番号	平均出域間隔 \bar{S}_{OEXP}	最長滞留時間 T_{MAXEXP}
1	1分33秒	6分41秒
2	1分25秒	5分12秒
3	1分25秒	5分25秒
4	1分23秒	5分58秒
5	1分51秒	9分18秒
6	1分16秒	4分23秒
7	1分33秒	6分56秒
8	1分46秒	8分40秒

- 最長滞留時間が推定値を越える実験結果はなかった。
- 実験結果の \bar{S}_i を使用して推定すると、 T_{MAX} は8分16秒となり、それを越える実験結果は、2つの試行に見られた。
- T_{MAXEXP} を長くする要因としては、実際に人間が管制を行うことによるばらつきが挙げられる。具体的には、出域間隔が条件とした7NMより長くなること、航空機の入域順序と出域順序が入れ替わること等がある。
- 全試行における出域間隔の平均値は、8.1NMであり、航空機の順序の入れ替えは全試行において発生した。

実験の仮定条件等から推定した値と、実験結果の値を図10に示す。推定値のグラフが実験条件下における最長滞留時間（推定値）のグラフである。 $SI=34$ のグラフが、 \bar{S}_i を34秒とした時の、また、 $SI=18$ のグラフが、 \bar{S}_i を18秒とした時の、最長滞留時間（実験結果）のグラフである。

4. おわりに

空域改編案の評価に際し、客観的指標を用いて数値的な評価を行うため、主要な評価指標と考えられる最長滞留時間の推定方法を示した。

航空機の集合の機数、出域間隔、入域点の数、各入域点における航空機の入域間隔等の条件から、最長滞留時間を推定する。

管制官参加による実験結果との比較を行ったところ、推定値は概ね適合するが、管制介入による出域間隔や出域順序のばらつきにより適合しない可能性もあることがわかった。

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

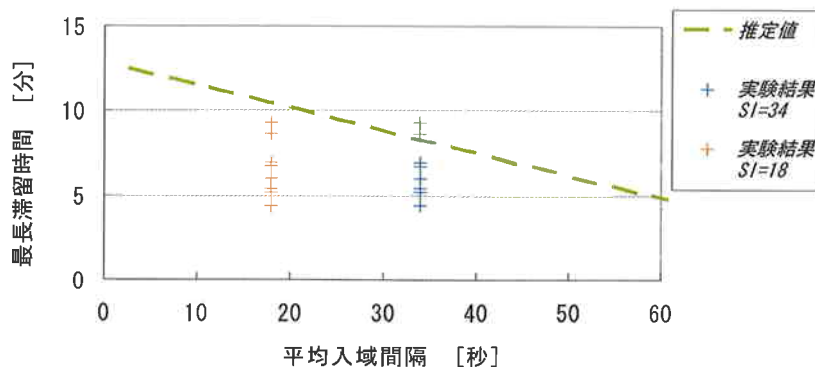


図10. 推定値と実験結果との比較