

## 19. 北太平洋空域での航空機対の3次元距離分布

電子航法開発部

※住谷 美登里 長岡 栄 天井 治

### 1. まえがき

航空交通管制では、安全を保ちつつ効率よく航空機を運航するため、航空機相互間に管制間隔基準を設けている。近年、日本と北米を結ぶ洋上航空路の北太平洋ルートにおいて、垂直（高さ）方向と横（水平）方向の管制間隔基準が短縮された。現在、洋上空域において、一部の航空機で自動従属監視（ADS: Automatic Dependent Surveillance）が試験的に運用されている。近い将来の ADS の実運用に向けて、縦（進行）方向の管制間隔基準の短縮が検討されている。

ADS で航空機から地上へ位置データ等を送信する方法として、衛星を介する方法と、VHF を使った空対地への通信方法がある。この他に衛星を用いずに航空機間で VHF 通信を使って管制機関までデータをリレーする方式も検討されている<sup>(1)</sup>。この方式では、通信の覆域内に他機が存在することが必須の条件である。そのため、空域内に存在する航空機数の分布、航空機対の距離分布の実態を把握する必要がある。

そこで今回、実測データを基に、日本と北米を結ぶ洋上航空路の北太平洋ルートの特定空域内における航空機数、航空機対の距離を調査したので報告する。

### 2. ADS について

ADS とは、航空機上の航法装置（IRS（慣性基準装置）や GPS）で測定された位置情報を自動的に管制機関に送信して監視をするシステムである。この送信の周期は現在の位置通報間隔（1時間に1回程度）より短くすることができる。また管制機関では、レーダ指示器と同様、航空機のターゲットや便名等が画面に表示される。

位置情報を送信する際に衛星と VHF を利用するが、平成 11 年 3 月時点では衛星を介する通信と VHF での空対地への通信の使用割合は、4 : 1 である。<sup>(2)</sup>

### 3. 調査対象

#### 3. 1 調査空域

北太平洋ルートの東京飛行情報区（FIR : Flight Information Region）空域内の概略を図 1 に示す。北太平洋ルートは 5 本のルートからなる。各ルートは、飛行方向が定められており、北側から R220 と R580 は西行き便（北米から日本方面へ）に、A590 は東行き便（日本方面から北米へ）に、R591、G344 は原則東行き便だが、時間帯によって西行き便となる。

アンカレッジ FIR と東京 FIR 境界線上の位置通報点（FIX）からルート（進行）方向に次の FIX までの 330NM（480knot の速度で約 45 分）、5 本のルート間間隔の 200NM の四角形を調査空域とした。図 1 に斜線で示す。ここで 1NM=1852m、1knot=1(NM/hour)である。

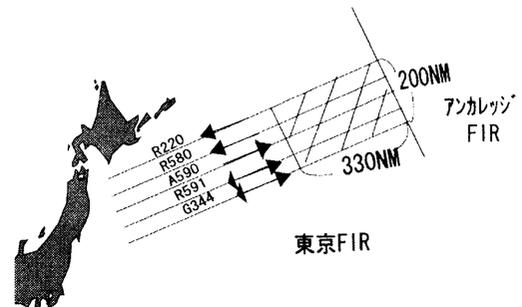


図 1 北太平洋ルート  
(斜線は対象空域、矢印は方向)

#### 3. 2 管制間隔基準

北太平洋ルートの現在の管制間隔基準は、縦（進行）方向は 15 分または 10 分（480knot の速度で約 80NM）、横方向は 50NM、垂直（高さ）方向は RVSM（Reduced Vertical Separation Minimum : 短縮垂直間隔）承認機に対して 1000ft（1ft=0.3048m）である。

#### 3. 3 利用データ

解析に使用したデータは飛行計画情報である。飛行計画情報には、FIX 到着時刻、飛行高度（FL : Flight Level）等航空機が飛行する際に必要な情報が含まれている。時刻の最小量子

化単位は6秒である。

飛行計画情報の FIX 到着時刻は、飛行計画情報処理システムによる通過予測時刻である。パイロットは洋上の航空路の FIX に到着した時に時刻を通報することになっている。この通報時刻と予測時刻を比較して差が3分を越える場合は、パイロットによる通報時刻を基に飛行計画情報の時刻を更新している。そのため今回利用した飛行計画情報の時刻には最大3分の誤差を含んでいる可能性がある。

2000年3月1日から1年間に FL290 以上（高度 29,000ft に相当）を飛行した 62,973 便（西行き 38,268 便、東行き 24,705 便）を調査対象便とした。各ルートの方角別便数を表1に示す。

表1 調査対象便数

	西行き	東行き
R220	28884	
R580	7114	
A590		19713
R591	1775	3135
G344	495	1857
計	38268	24705

#### 4. 航空機数の分布

##### 4.1 時刻と存在機数の関係

調査空域の両端の FIX 到着時刻は調査空域の入域時刻と出域時刻になる。通過するのに約45分かかるので30分ごとに時刻を区切って、その時刻に当該空域内にいる航空機数（以下存在機数と呼ぶ）を調査した。例として、2001年2月26日から3日間の計474便の時刻と存在機数の関係を図2に示す。時刻は日本標準時である。最大22機が存在しているが、1機も存在していない時刻もあり周期性があることがわかった。

##### 4.2 存在機数の頻度分布

1年分のデータに対して各時刻（30分ごと）における存在機数を求めた。そして次式で示す  $P_i$  を求め結果を図3に示す。

$$P_i \equiv \frac{\text{存在機数が } i \text{ である度数}}{\text{調査回数} (= 365 \times 24 \times 2)} \quad (1)$$

$i=0,1,2 \dots$

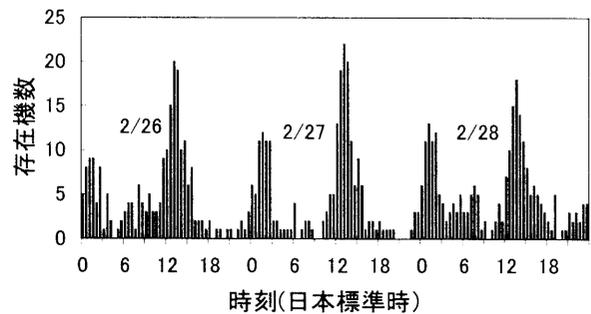


図2 ある3日間の時刻と存在機数の関係

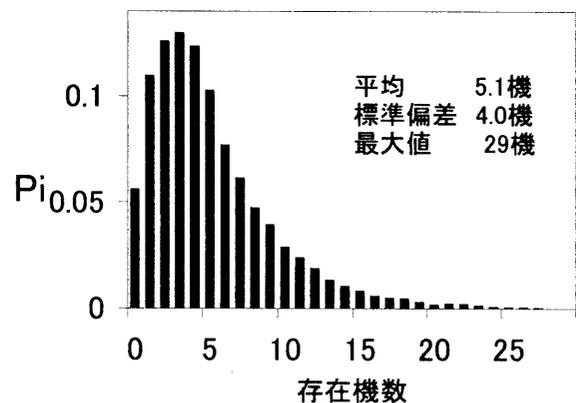


図3 存在機数の頻度分布

調査空域には、平均 5.1 機、最大 29 機存在していることがわかった。また存在機数が 0、つまり調査空域内に全く航空機が存在しない時間が、全体の 5% を占めることがわかった。また調査空域内に全く航空機が存在していない時間の最大値は 12 月 27 日 17:36 から 20:39 の 3 時間 3 分間であった。

##### 4.3 時刻別存在機数

図2より、時刻と存在機数に周期性があることがわかった。そこで両端の FIX 到着時刻から西行きと東行きの方向別に分類して、各時刻における存在機数の平均を調査した。結果を図4に示す。

18時から翌日1時頃までは西行き便より東行き便が多い。全体としては2時頃と13時頃の2回ピークが存在することがわかった。西行き便は平均3.3機、東行き便は平均1.8機あった。

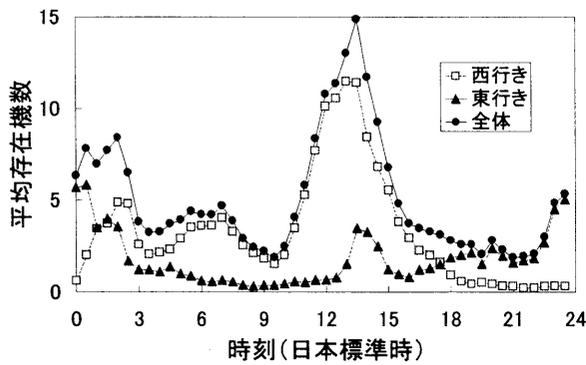


図4 方向別・時刻別の平均存在機数分布

#### 4. 4 時刻別の存在機数の割合

ある時刻において通信覆域内に航空機が2機存在すれば通信はできる。そこで、調査空域において1年間の各時刻の存在機数が0機の場合、1機の場合に分類して次の頻度割合  $Q_i$  を調べ、結果を積み上げ折れ線グラフで図5に示す。

$$Q_i \equiv \frac{\text{存在機数が } i \text{ である度数}}{\text{調査回数 (=365)}} \times 100 \quad (2)$$

$i=0,1$

12時、12時30分、13時30分、14時、14時30分は  $Q_0=Q_1=0$  なので常に2機以上存在している。20時30分、21時は1機以下の割合が50%以上である。

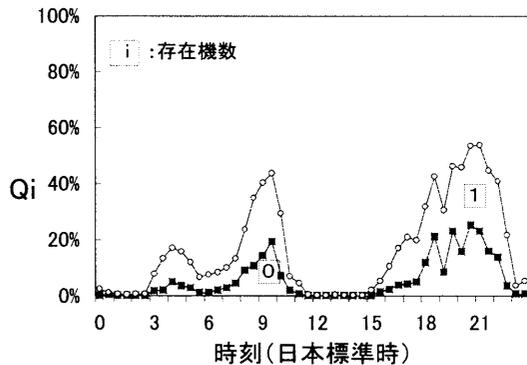


図5 各時刻での存在機数の頻度割合

#### 5. 位置表示

両端の各FIXの位置(緯度、経度)<sup>(3)</sup>と到着時刻から、航空機の推定位置を次の2つの仮定のもとで求めた。

(a) 航空機はFIX間では等速直線運動をする。

(b) 飛行高度は、両端で異なる場合もあるが、空域に入ってきた時点での飛行高度のまま空域内を飛行する。

調査期間の存在機数の最大値は2000年11月28日13:30の29機である。そこでこのときの航空機の位置(2次元)を図6の点で示す。□は、両端のFIX位置を示す。A590を飛行している3機のみ東行きであった。最も南側のG344には1機も飛行していなかった。

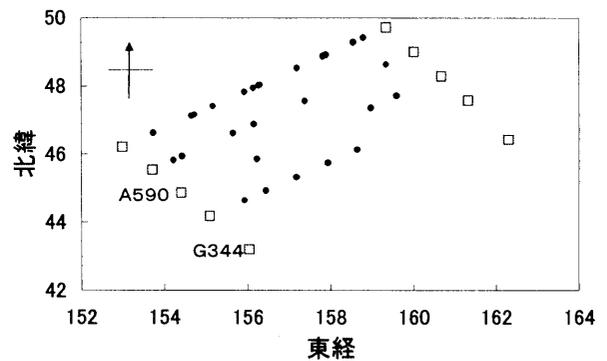


図6 航空機の推定位置 (11月28日13:30)

#### 6. 航空機対の距離

##### 6. 1 楕円体中心直交座標への変換

航空機の位置[緯度  $\phi$ 、経度  $\lambda$ 、高度  $h$  (FL290は、 $29000 \times 0.3048$  m)]を楕円体中心直交座標  $(x,y,z)$  に変換する。<sup>(4)</sup>

$$x = (N(\phi) + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (3)$$

$$y = (N(\phi) + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (4)$$

$$z = (N(\phi) (1 - \epsilon^2) + h) \sin \phi \quad (5)$$

ただし

$$N(\phi) = a / (1 - \epsilon^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \quad (6)$$

$$\epsilon^2 = f(2-f) \quad (7)$$

ここで、 $a$ は準拋楕円体の赤道半径( $a=6,378,137$  m)、 $f$ は扁平率( $f=1/298.257223565$ )である。

##### 6. 2 航空機対の距離

各航空機の位置を(3)式から(7)式を用いてxyz座標へ変換する。航空機jの位置

$(\phi_j, \lambda_j, h_j)$ を $(x_j, y_j, z_j)$ へ、航空機kの位置 $(\phi_k, \lambda_k, h_k)$ を $(x_k, y_k, z_k)$ へ変換し、航空機jと航空機kの距離 $d$ を(8)式で求めた。

$$d = ((x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2 + (z_j - z_k)^2)^{1/2} \quad (8)$$

存在機数が  $n$  機の時、航空機対の組み合わせは

$${}_n C_2 = n(n-1)/2 \quad (n \geq 2) \quad (9)$$

通りとなる。

図6では、29機存在するので航空機対の組み合わせは406通りとなる。各航空機対の距離を(8)式で求めた結果、最大値310.1NM、最小値0.47NMで、平均134.6NMであった。図7に距離の分布(区間幅10NM)を示す。

1年間の各時刻(30分ごと)において調査空域内に2機以上存在する割合は全体の83%であった。このときの各時刻での各航空機対の距離を求めた。その分布を図8に示す。324353対に対して、最小値0.16NM(=1000ft) 最大値

411.8NMで平均134.9NMであった。

横方向の管制間隔50NMの整数倍の距離の相対度数が大きくなっている。また100NMの相対度数が最大になっている。この原因として次の2点が考えられる。1つは横方向の管制間隔50NMの2倍であること、もう1つは縦(進行)方向の距離分布の相対度数が大きい部分は、90NMから130NM付近であること<sup>(5)</sup>による。

### 6. 3 時刻別距離分布

1年間の各時刻(30分ごと)に対する距離分布を求めた。平均値、標準偏差等の統計値は時刻による特性がみられなかった。

### 7. まとめ

北太平洋ルートの特設空域における存在機数の頻度分布と、航空機対の距離を調査した。

その結果、調査空域に全く航空機が存在しない時間が全体の5%あることがわかり、時刻による変動もあることがわかった。また距離分布においては50NMの整数倍付近の相対度数が大きいことがわかった。今後この原因について更に調査したい。またVHFの通信覆域と航空機対の距離との関係も調査したい。

最後にデータ収集にご協力していただいた国土交通省航空局、国土交通省東京航空交通管制部の関係各位に感謝いたします。

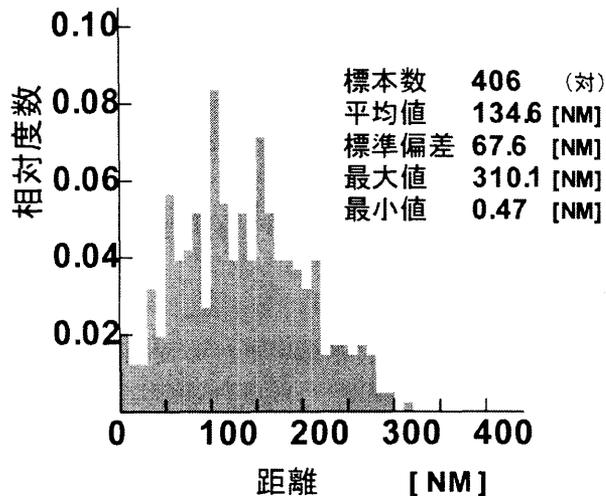


図7 航空機対の距離分布(区間幅10NM)  
(11月28日13:30)

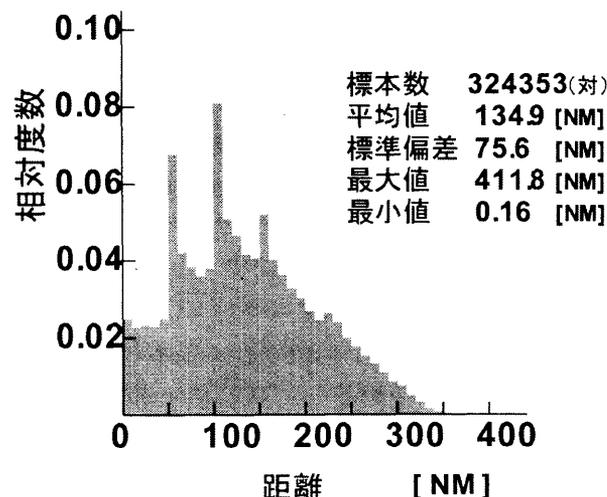


図8 航空機対の距離分布(区間幅10NM)  
(1年間)

### [参考文献]

- (1) 塩見格一：“航空機自動従属監視方式の検討”、日本航海学会論文集、92号、pp.113-119、1995年3月
- (2) 運輸省航空局：“衛星データリンクによる管制運用調査報告書”、平成11年3月
- (3) 国土交通省航空局：航空路誌
- (4) 原田健久：“わかりやすい測量厳密計算法”、鹿島出版社、1992年
- (5) 長岡栄、天井治：“飛行計画データによる洋上航空路における航空機間の距離分布の推定”、2000年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会A-18-4、平成12年9月