

## 13. 航空路の交差点における航空機の衝突危険度

電子航法開発部 ※天井 治 長岡 栄

### 1. まえがき

航空交通管制では、航空交通の安全および効率的運航のために、航空交通管制官（以後、管制官と呼ぶ）が最低限確保すべき航空機間の間隔（管制間隔）の基準を定めている。

平成17年9月に日本の国内の陸上空域において、フライトレベル（FL）290（29,000 ft（1 ft = 0.3048 m）に相当）以上FL410以下の高度で高さ方向の管制間隔（垂直間隔）を現在の2,000 ftから1,000 ftに短縮すること、すなわち短縮垂直間隔（Reduced Vertical Separation Minimum: RVSM）の導入が計画されている。

航空機には最も燃料効率の良い飛行高度（最適高度）が存在する。この短縮により、より効率の良い航空機の運航が可能となる。

この短縮垂直間隔の導入に先立ち、航空機の衝突危険度モデルにより安全性の評価を行った。今回は、2つ以上の航空路の交差点（以後、交差点と呼ぶ）における衝突危険度の推定も併せて行った。交差点におけるこの推定に関しては、欧米豪における推定値の報告はあるが、日本国内の経路における報告はない。そこで、本稿では、交差点における航空機の垂直方向衝突危険度の推定方法と推定結果について報告する。

### 2. 衝突危険度モデル

一般に、短縮垂直間隔の安全性評価においては衝突危険度モデルが使用されている。この衝突危険度モデルは1966年にReich<sup>[1]</sup>により提案されたものをもとにして、国際民間航空機関の管制間隔検討パネル等で改良されたもの<sup>[2]</sup>が用いられている。

衝突危険度モデルでは、簡単化のため、航空機の形状を直方体もしくは円柱と考える。

垂直方向の衝突危険度  $N_{az}$  は、航空路システム内の航空機が単位飛行時間あたりに垂直間隔を喪失して起こる衝突事故件数（1衝突は2事故とみなす）の期待値である。これは航空機

対の位置関係により、同航（航空機対の飛行方向が同じ場合）、反航（航空機対の飛行方向が反対の場合）、交差点の場合が考えられる。

本稿では交差点の場合のみを考える。

### 2. 交差点における衝突危険度の計算方法

ここでは、隣接フライトレベルを飛行する航空機同士がある角度をもってすれ違う場合の衝突危険度を考える。交差点といっても、ルートの合流、分離などの三叉路や十叉路以上の経路の交わりも含む。交差点については文献[3]のモデルに従って占有率（occupancy） $E_z^{cross}(\theta)$  と水平方向重畳確率  $P_h(\theta)$  を計算して交差点における衝突危険度  $N_{az}(cross)$  を計算する。これは(1)式で計算する<sup>[3]</sup>。

$$N_{az}(cross) = P_z(S_z) \sum_{\theta} P_h(\theta) E_z^{cross}(\theta) \left[ \frac{2|\overline{h}(\theta)|}{\pi\lambda_{xy}} + \frac{|\overline{z}|}{2\lambda_z} \right] \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

$P_z(S_z)$ : 同一経路で  $S_z$  離れた隣接フライトレベル（FL）を飛行する航空機対が垂直方向で重なる確率

$P_h(\theta)$ : 交差点角  $\theta$  の交差点で  $S_z$  離れた隣接 FL 上を飛行する航空機対が水平方向で重なる確率

$E_z^{cross}(\theta)$ : 交差点角  $\theta$  の交差点における占有率

$|\overline{h}(\theta)|$ : 交差点角  $\theta$  の交差点を飛行する航空機対に対して水平方向で重畳が起こるときの平均相対水平方向速度

$|\overline{z}|$ : 航空機対の高さ方向の平均相対速度

$\lambda_{xy}$ : 円柱とみなした航空機の直径（航空機の平均長  $\lambda_x$  と平均幅  $\lambda_y$  のうちの大きい方）

$\lambda_z$ : 航空機の平均高

### 2.1 占有率 $E_z^{cross}(\theta)$ の計算方法

飛行計画情報を用いて交差路での近接通過時間を計算することを考える。ここでは一点での重なりを考える代わりに、航空機の周りに半径  $S_h (=5 \text{ NM} (1 \text{ NM} = 1852 \text{ m}))$  の円を想定する。この円内に他機がいるとき、この状態を近接 (proximity) と考える。占有率はこの近接の時間から計算する。

観測時間内に評価対象空域内で起こる交差ルート上の近接時間の総和を  $T_p^z$ 、評価対象空域内の総飛行時間を  $H$  とすると、交差ルートの占有率  $E_z^{cross}(\theta)$  は、次式で計算できる。

$$E_z^{cross}(\theta) = \frac{2T_p^z(\theta)}{H} \quad (2)$$

但し、実際の計算では、異なる場所における近接時間を足し合わせる必要があるので、

$$E_z^{cross}(\theta) = \frac{2\sum_i (t_p^z(\theta))_i}{\sum_j H_j} \quad (3)$$

を計算した。ここで、 $(t_p^z(\theta))_i$  は  $i$  番目の交差角  $\theta$  のルートセグメント対における近接通過時間、 $H_j$  は  $j$  番目のルートセグメントを飛行する航空機の総飛行時間である。

### 2.2 近接時間 (proximity time) $t_p^z(\theta)$ の計算方法

$t_p^z$  は以下のように計算した。

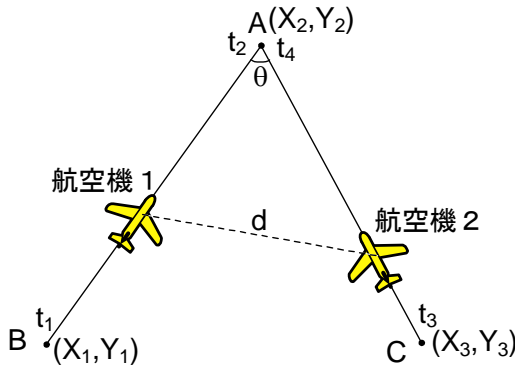


図1 近接時間の計算方法

地点 A, B, C からなる図1に示すルートセグメント対を航空機対が飛行しているとき、航空

機同士の距離  $d$  が 5 NM 以下になる時間を計算する。航空機1の位置は時刻  $t$  を用いて次のように表せる。

$$X_{1t} = X_1 + \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1}(t - t_1) \quad (4)$$

$$Y_{1t} = Y_1 + \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1}(t - t_1)$$

同様に、航空機2の位置は、

$$X_{2t} = X_3 + \frac{X_2 - X_3}{t_4 - t_3}(t - t_3) \quad (5)$$

$$Y_{2t} = Y_3 + \frac{Y_2 - Y_3}{t_4 - t_3}(t - t_3)$$

$d \leq 5 \text{ NM}$  になるのは、

$$\sqrt{(X_{2t} - X_{1t})^2 + (Y_{2t} - Y_{1t})^2} \leq 5 \text{ NM} \quad (6)$$

この方程式を解くと、

$$\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \leq t \leq \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$\dots\dots A \neq 0 \ \& \ B^2 - 4AC \geq 0$$

$$t \leq -\frac{C}{B} \quad \dots\dots A = 0$$

.....(7)

ここで

$$\begin{aligned} A &= [(b_x - a_x)^2 + (b_y - a_y)^2] \\ B &= 2[C_x(b_x - a_x) + C_y(b_y - a_y)] \\ C &= (C_x^2 + C_y^2) - 5^2 \end{aligned} \quad (8)$$

また、

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1}, & a_y &= \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1} \\ b_x &= \frac{X_2 - X_3}{t_4 - t_3}, & b_y &= \frac{Y_2 - Y_3}{t_4 - t_3} \end{aligned} \quad (9)$$

得られた  $t$  の値を  $t_1, t_2, t_3, t_4$  と比較することにより、

$$\begin{aligned} t_p^z(\theta) &= \frac{\sqrt{B^2 - 4AC}}{A} \\ \dots\dots \min(t_1, t_2) &\leq t \leq \max(t_1, t_2) \\ &\& \ \min(t_3, t_4) \leq t \leq \max(t_3, t_4) \end{aligned} \quad (10)$$

などのように、近接通過時間  $t_p^z(\theta)$  を計算する。

## 2.3 $P_h(\theta)$ と $|\dot{h}(\theta)|$ の計算方法

ここでは交差する二本の経路上の航空機の位置分布は同一分布に従うとする。経路方向の位置は、簡単のため平均0、分散 $\sigma_x^2$ の正規分布に従うものとする。横方向（進行方向と直角）の位置は平均0、分散 $\sigma_y^2$ の正規分布に従うものとする。

$P_h(\theta)$  が大きめな推定値となるよう、誤差がないとき航空機対は同時に交差点を通過する場合を考える。このとき、航空機対の二次元相対位置 $(u,v)$ の確率密度関数  $U(u,v)$ は次の二次元正規分布で表せる<sup>[3]</sup>。

$$U(u,v) = \frac{1}{2\pi\sqrt{K_{xx}K_{yy} - K_{xy}^2}} \times \exp\left[-\frac{K_{yy}u^2 - 2K_{xy}uv + K_{xx}v^2}{2(K_{xx}K_{yy} - K_{xy}^2)}\right] \quad (11)$$

ただし

$$K_{xx} = \sigma_x^2(1 + \cos^2 \theta) + \sigma_y^2 \sin^2 \theta \quad (12)$$

$$K_{yy} = \sigma_x^2 \sin^2 \theta + \sigma_y^2(1 + \cos^2 \theta) \quad (13)$$

$$K_{xy} = (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) \sin \theta \cos \theta \quad (14)$$

このとき、水平方向重畳確率  $P_h(\theta)$  は、実際には近接状態のもとでの水平方向重畳確率で、次の条件付確率密度関数で与えられる<sup>[3]</sup>。

$$P_h(\theta) = \frac{U(0,0) \times \pi \lambda_{xy}^2}{\int_{-S_h}^{S_h} \int_{-\sqrt{S_h^2 - u^2}}^{\sqrt{S_h^2 - u^2}} U(u,v) dv du} \quad (15)$$

この(15)式を用いて、各交差経路上の航空機対について、数値計算により水平方向重畳確率を計算した。

計算では、 $\sigma_y$ は、日本の国内経路におけるレーダデータの解析により得た値 0.132 NM<sup>[4]</sup>とした。 $\sigma_x$ は文献[3]に従い、相対距離が $[-S_h, S_h]$ の一様分布の分散 $\frac{S_h^2}{3}$ に等しい分散 $\sigma_{ra} = \frac{S_h^2}{3}$ を有する正規分布に従うものとし、 $\sigma_x^2 = \frac{\sigma_{ra}^2}{2} = \frac{S_h^2}{6}$ とした。なお、 $\lambda_{xy} = \lambda_x = 0.0364$  NM<sup>[6]</sup>、 $S_h = 5$  NMとした。

表1 交差ルートにおける占有率

調査期間	$E_z^{cross}(\theta)$	$T_p^z(\theta)$ [時間]	$H$ [飛行時間]
2003年1月	2.31x10 <sup>-3</sup>	64.50	55,941.6
2003年2月	2.45x10 <sup>-3</sup>	57.42	46,803.6
2003年3月	2.31x10 <sup>-3</sup>	67.13	58,033.7
2003年4月	2.19x10 <sup>-3</sup>	57.92	52,859.4
2003年5月	2.02x10 <sup>-3</sup>	49.83	49,244.9
2003年6月	1.90x10 <sup>-3</sup>	44.71	47,124.6
2003年7月	2.10x10 <sup>-3</sup>	55.96	53,181.1
2003年8月	2.45x10 <sup>-3</sup>	67.80	55,442.2
2003年9月	2.57x10 <sup>-3</sup>	70.73	54,994.6
2003年10月	2.32x10 <sup>-3</sup>	67.81	59,648.8
2003年11月	3.28x10 <sup>-3</sup>	83.02	50,608.2
2003年12月	2.39x10 <sup>-3</sup>	70.51	59,092.0
2004年1月	2.88x10 <sup>-3</sup>	75.88	52,748.7
2004年2月	2.84x10 <sup>-3</sup>	60.40	42,564.3
2004年3月	2.66x10 <sup>-3</sup>	75.93	57,140.1
2004年4月	2.36x10 <sup>-3</sup>	63.24	53,658.7
2004年5月	3.09x10 <sup>-3</sup>	68.39	44,250.2
2004年6月	3.34x10 <sup>-3</sup>	64.68	38,676.4
2004年7月	2.10x10 <sup>-3</sup>	64.35	61,242.3
2004年8月	2.85x10 <sup>-3</sup>	68.36	47,920.3
2004年9月	3.09x10 <sup>-3</sup>	68.26	44,184.3
2004年10月	3.15x10 <sup>-3</sup>	79.95	50,760.4
2004年11月	2.83x10 <sup>-3</sup>	83.64	59,060.9
2004年12月	2.22x10 <sup>-3</sup>	63.98	57,564.2
2005年1月	2.30x10 <sup>-3</sup>	70.61	61,476.2
2005年2月	2.33x10 <sup>-3</sup>	71.16	61,189.8
2005年3月	2.66x10 <sup>-3</sup>	72.26	54,403.1

交差路の各ルートセグメント上の航空機の速度を、おのおの  $V_1$ 、 $V_2$  とすると、この航空機対の相対速度  $V_{rel}$  は次式で与えられる。

$$V_{rel} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \theta} \quad (16)$$

平均相対速度が大きいかほど危険度は大きくなる。このため、 $\theta$  が小さいときに  $V_{rel}$  が大きめの値となるように  $V_1 = V + \Delta V$ 、 $V_2 = V - \Delta V$  の場合を考え、このときの相対速度を平均相対水平方向速度  $|\dot{h}(\theta)|$  とする。これは次式で計算できる。

$$|\dot{h}(\theta)| = \sqrt{2(V^2 + \Delta V^2) - 2(V^2 - \Delta V^2)\cos\theta} \dots\dots\dots(17)$$

実際の計算では  $V=480$  knots、 $\Delta V=40$  knots<sup>[3]</sup>とした。

### 3. 観測対象機と使用データ

計算に際し、次の2つの仮定をした。

- (1) 実際の RVSM 導入時は各 FL の交通量の分布が異なるものと考えられるが、 $S_z$ のみが 1,000 ft になり、2,000 ft 間隔での分布がそのまま 1,000 ft 間隔に移行する。
- (2) 航空機は、短縮垂直間隔の最低航空機システム性能要件 (RVSM MASPS) を満たすものとし、RVSM の手引き書<sup>[4]</sup>の記載値  $P_z(1000) = 1.7 \times 10^{-8}$  を満たす。

以下の条件を満たす航空機対に対し、交差路における占有率  $E_z^{cross}(\theta)$  を計算した。

- ・ 現在、短縮垂直間隔が導入されていない空域を飛行

- ・ FL290 以上 FL410 以下を飛行
- ・ 交差ルートのは角度は、5 度以上 175 度以下（5 度未満のものは同航近接通過頻度として、175 度を越えるものは反航近接通過頻度として計算しているため）
- ・ 航空機同士の高度差が 2,000 ft 以下

2003 年 1 月 1 日から 2005 年 3 月 31 日までの 2 年 3 ヶ月分の飛行計画情報を用いて、交差路における航空機対の占有率  $E_z^{cross}(\theta)$  および垂直方向衝突危険度  $N_{az}(cross)$  を計算した。

### 4. 交差路における占有率の計算結果

表 1 に交差路における一ヶ月毎の占有率  $E_z^{cross}(\theta)$  の計算結果を示した。

表中の近接時間  $T_p^z(\theta)$  は、5 度から 175 度までの全  $t_p^z(\theta)$  の合計値で、 $H$  は観測対象機の総飛行時間である。

表 1 中で最も占有率が高い 2004 年 6 月における交差角を 10 度毎に計算した占有率の計算結果を表 2 に示す。各 10 度の計算には±5 度の

表 2 交差ルートにおける衝突危険度の計算結果

交差角の範囲	$T_p^z(\theta)$ [時間]	$H$ [飛行時間]	$E_z^{cross}(\theta)$	交差角	$P_h(\theta)$	$ \dot{h}(\theta) $ [knots]	$N_{az}(cross)$ [件/飛行時間]
5 度～15 度	20.01	38,676.4	$1.03 \times 10^{-3}$	10 度	$7.976 \times 10^{-4}$	115.551	$2.94 \times 10^{-11}$
15 度～25 度	10.26	38,676.4	$5.31 \times 10^{-4}$	20 度	$4.736 \times 10^{-4}$	184.382	$1.41 \times 10^{-11}$
25 度～35 度	9.81	38,676.4	$5.07 \times 10^{-4}$	30 度	$3.344 \times 10^{-4}$	260.205	$1.33 \times 10^{-11}$
35 度～45 度	5.94	38,676.4	$3.07 \times 10^{-4}$	40 度	$2.621 \times 10^{-4}$	336.835	$8.16 \times 10^{-12}$
45 度～55 度	2.94	38,676.4	$1.52 \times 10^{-4}$	50 度	$2.199 \times 10^{-4}$	412.141	$4.13 \times 10^{-12}$
55 度～65 度	2.67	38,676.4	$1.38 \times 10^{-4}$	60 度	$1.939 \times 10^{-4}$	484.974	$3.89 \times 10^{-12}$
65 度～75 度	1.60	38,676.4	$8.26 \times 10^{-5}$	70 度	$1.780 \times 10^{-4}$	554.519	$2.44 \times 10^{-12}$
75 度～85 度	0.28	38,676.4	$1.44 \times 10^{-5}$	80 度	$1.694 \times 10^{-4}$	620.112	$4.52 \times 10^{-13}$
85 度～95 度	0.49	38,676.4	$2.51 \times 10^{-5}$	90 度	$1.667 \times 10^{-4}$	681.175	$8.52 \times 10^{-13}$
95 度～105 度	0.30	38,676.4	$1.56 \times 10^{-5}$	100 度	$1.694 \times 10^{-4}$	737.198	$5.83 \times 10^{-13}$
105 度～115 度	1.41	38,676.4	$7.31 \times 10^{-5}$	110 度	$1.780 \times 10^{-4}$	787.724	$3.06 \times 10^{-12}$
115 度～125 度	1.00	38,676.4	$5.16 \times 10^{-5}$	120 度	$1.939 \times 10^{-4}$	832.346	$2.49 \times 10^{-12}$
125 度～135 度	1.36	38,676.4	$7.03 \times 10^{-5}$	130 度	$2.199 \times 10^{-4}$	870.712	$4.02 \times 10^{-12}$
135 度～145 度	0.82	38,676.4	$4.22 \times 10^{-5}$	140 度	$2.621 \times 10^{-4}$	902.520	$2.99 \times 10^{-12}$
145 度～155 度	2.44	38,676.4	$1.26 \times 10^{-4}$	150 度	$3.344 \times 10^{-4}$	927.520	$1.17 \times 10^{-11}$
155 度～165 度	1.97	38,676.4	$1.02 \times 10^{-4}$	160 度	$4.736 \times 10^{-4}$	945.518	$1.37 \times 10^{-11}$
165 度～175 度	1.38	38,676.4	$7.16 \times 10^{-5}$	170 度	$7.976 \times 10^{-4}$	956.372	$1.63 \times 10^{-11}$
合計	64.68		$3.34 \times 10^{-3}$				$1.32 \times 10^{-10}$

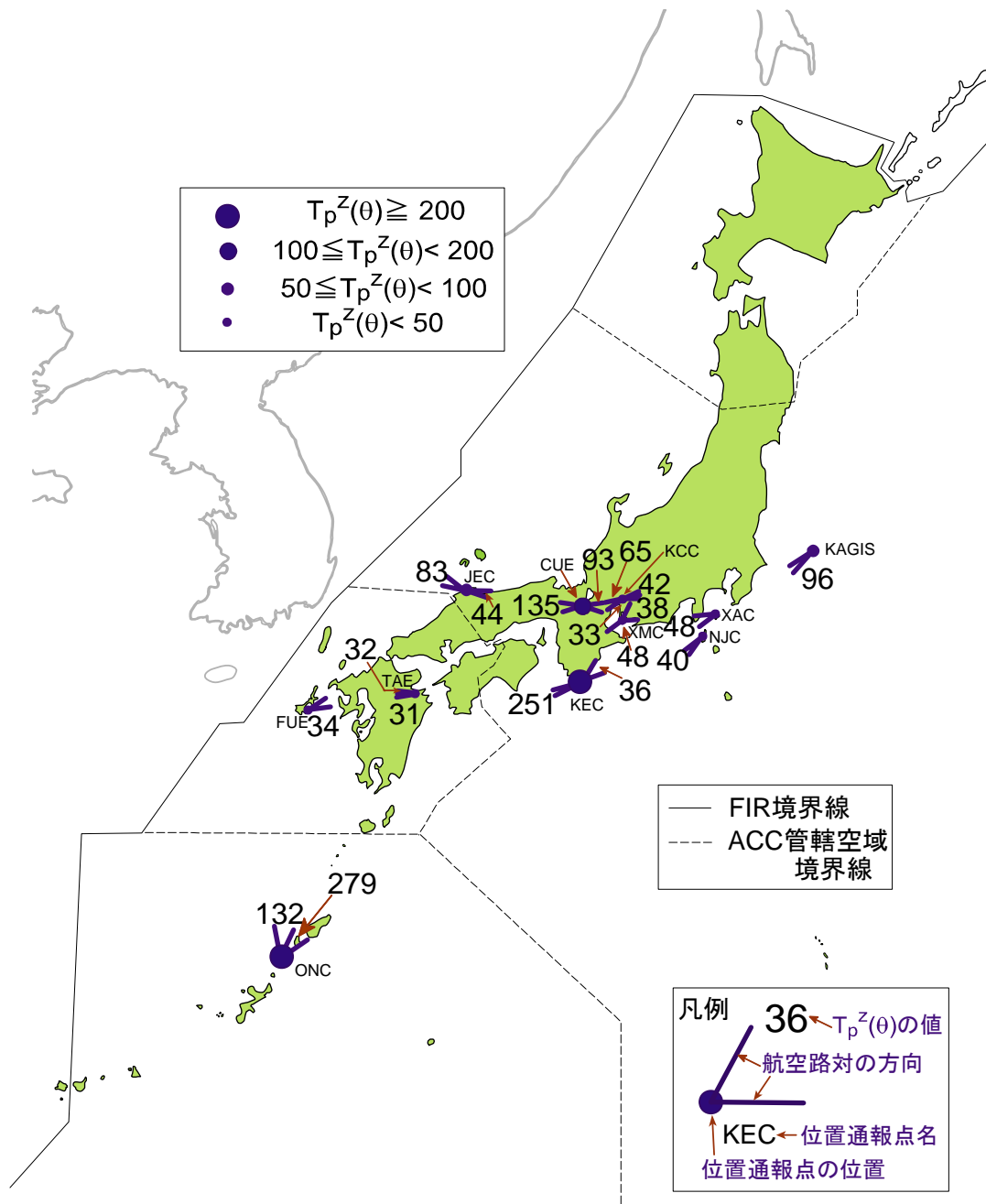


図3 交差路における近接通過時間  $T_p^z(\theta)$  の分布（2004年6月のデータ）  
 図中の数字は  $T_p^z(\theta)$  の値（単位は分）を表し、英字は位置通報点名を表す。  
 ●は当該位置通報点を、太い実線の対は当該ルート対の方向を表す。  
 $T_p^z(\theta)$  が30分以上のもののみを表示した。

範囲の近接時間をすべて足し合わせた。

表2から直角に近い角度（75度から105度まで）における  $T_p^z(\theta)$  は、他の角度に比べて小さいことが分かる。

図2に2004年6月のデータで対象空域内の航空路の交差点における近接時間  $T_p^z(\theta)$  が30分

以上となる位置通報点の分布を示した。図中に記載した数値は、 $T_p^z(\theta)$  を分単位で表したものである。図中には、位置通報点名の他、当該ルート対の方向も示した。

図から、沖永良部（ONC）、串本（KEC）、大津（CUE）などで  $T_p^z(\theta)$  が高い値となることが

分かる。

### 5. 交差路における衝突危険度の推定結果

表2には2.3節の方法で計算した10度毎の  $P_h(\theta)$  と  $|\dot{h}(\theta)|$  とを計算した結果も示してある。併せて2004年6月の値から(1)式で計算した交差路における衝突危険度  $N_{az}(cross)$  の計算結果を示した。ここで、 $S_z$ は1,000ftとし、 $P_z(1000)$ はRVSMの手引き書<sup>[5]</sup>の記載値  $1.7 \times 10^{-8}$ とした。

また、 $|\dot{z}|=1.5$  knots、 $\lambda_{xy} = 0.0364$  NM<sup>[6]</sup>、 $\lambda_z = 0.0101$  NM<sup>[6]</sup>として計算した。

図4には、各月の  $N_{az}(cross)$  を計算した結果の折れ線グラフを示す。 $N_{az}(cross)$  の最も高い値は、2003年11月と2004年6月の  $1.32 \times 10^{-10}$ であった。図中には回帰直線も示した。ゆるやかな増加傾向があるようにも思えるが顕著な傾向はない。

### 6. まとめ

日本国内の陸上空域において短縮垂直間隔の導入が計画されている。その導入に先立ち、衝突危険度を用いた安全性の事前評価を行った。同航、反航、交差路の垂直方向衝突危険度をそれぞれ求めたが、本稿では交差路の衝突危険度  $N_{az}(cross)$  の計算方法と計算結果について述べた。

2年3ヶ月分の飛行計画情報に基づいて交差路における占有率  $E_z^{cross}(\theta)$  の計算を行った。水平重畳確率  $P_h(\theta)$  および平均相対水平方向速度  $|\dot{h}(\theta)|$  も同時に計算し、既存のパラメータと併せて衝突危険度を計算した。月毎に計算を行い、最

も大きな  $N_{az}(cross)$  の値は  $1.32 \times 10^{-10}$ であった。これは、同航と反航を合わせた衝突危険度  $N_{az}(o+s)$  の値の1割程度に相当する。

### 【謝辞】

データ収集の際にご協力頂いた国土交通省 東京航空交通管制部および航空局の関係各位に感謝いたします。

### 【参考文献】

- [1] P.G. Reich, "Analysis of Long Range Air Traffic Systems, Journal of the Institute of Navigation", 19, Nos.1, 2 and 3, 1966
- [2] Report of the Sixth Meeting of RGCSP, ICAO RGCSP-WP/158, chap.5, Montreal, Canada, 1988
- [3] U.S.A., "Development of Collision Risk Model (CRM) for Aircraft-pairs Traveling on Oceanic Crossing-routes at Adjacent Flight Levels with Application to the South China Sea Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM)", ICAO RVSM TF/14-WP/10, Bangkok, May, 2002
- [4] 長岡、天井：国内短縮垂直間隔導入に係る空域安全性基礎評価委託、電子航法研究所 受託研究報告書、2004
- [5] Manual on Implementation of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum between FL290 and FL410 Inclusive, ICAO Doc.9574-AN/934, second edition, 2001
- [6] O. Amai & S. Nagaoka, "Estimating the Average Size of Aircraft for the North Pacific Routes", ICAO RVSM TF/3-IP/12, Honolulu, Hawaii, May, 1999

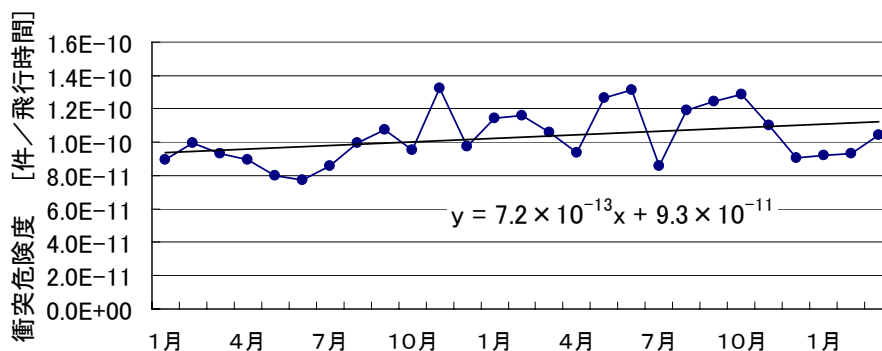


図4 交差路における垂直方向衝突危険度  $N_{az}(cross)$  の月毎の変化 (2003年1月~2005年3月)