

21. ADS環境下での縦方向衝突危険度の一検討

電子航法開発部 ※長岡 栄 天井 治 住谷 美登里

1. まえがき

北太平洋（NOPAC）の洋上航空路は、1998年4月に、従来の複合間隔ルートから横間隔50NMの平行ルートへと変更された。そして、2000年2月には垂直間隔が2,000ftから1,000ftに短縮された。現在、縦間隔（同一経路上で同一高度を飛行する航空機相互間の前後方向の最小間隔）基準は時間で10分（Mach Number Technique使用時）となっている。

近年、自動従属監視（ADS）や管制官パイロット間データリンク通信（CPDLC）による管制が試行されている。この本運用に際しては縦間隔の短縮が期待されている。そこで、航法性能要件（RNP）10の航空機に対し縦間隔を50NMに短縮した場合の安全性を検討するため、縦方向衝突危険度を推定してみた。本報告では、その方法と検討結果について報告する。

2. 衝突危険度モデル

2.1 モデルの考え方

洋上航空路では管制の介入の度合いが少ないためReichの衝突危険度モデル⁽¹⁾がその空域の衝突危険度の推定に用いられてきた。衝突危険度は、与えられた間隔を喪失して、単位飛行時間内に、起こる空中衝突事故件数の期待値で定義される。このモデルでは航空機を直方体とみなし、これらが三次元空間内で重なるときを衝突とみなしている。衝突には一対の航空機の位置関係が前後（縦）、左右（横）、上下（垂直）の三つの場合がある。

縦間隔の喪失による衝突危険度モデルは幾つか提案され、幾つかの空域での評価例が報告され

ている⁽²⁾⁻⁽⁸⁾。そのうち、ADS環境下のモデルとしてはKarppinen & Andersonによるモデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾がある。このモデルのパラメータの幾つかは当該空域で使用される通信・航法・監視の性能に依存する。このため、危険度の評価には空域の特性を考慮した解析が必要である。このモデルによる計算は複雑で、諸パラメータの分布が明示的な関数でない場合は数値計算に頼らざるを得ない。そこで、筆者らは計算を容易にするため、利用可能なデータに基づき、分布のモデル化を行い、衝突危険度を解析的に計算可能とする式を導出した。

2.2 ADS監視下のモデル

図1のように同一経路で同一フライトレベル（FL）を割り当てられた一対の航空機が前後方向で衝突する場合を考える。ここでは航空機対はADSを使用して管制されるものとする。ADSでは、指示機上にADS位置通報に基づく航空機の推定位置が一定時間毎に表示される。位置通報は T_r 時間毎にあるものとする。

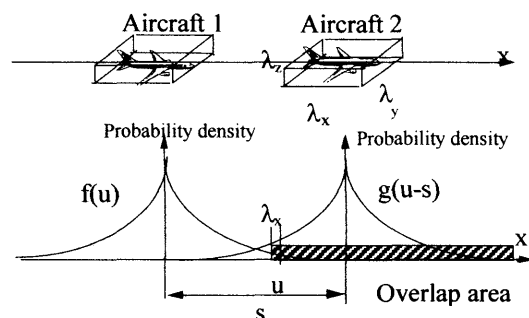


図1 衝突モデルと縦方向の重なり概念

図2に同一経路・FL上を飛行する航空機対の位置関係を示す。指示器上には、 T_r 時間毎に得ら

れる予測位置と通報位置とから外挿した航跡が、一定時間間隔で表示される。ADS 位置通報があった時刻 $t=0$ で、航空機対の間隔が S_0 であったものが、次の通報の時点 $t=T_r$ で管制間隔の喪失に気づき回避指示を出す。これがパイロットに伝わり航空機が回避動作を開始するまでに要する時間（遅延時間）を τ とする。そこで、 $t=0$ で最小間隔基準以上でありながら $t=T_r + \tau$ ($\equiv T$) で衝突が起こる場合、即ち、期間 $[0, T]$ に起こり得る空中衝突を考察する。

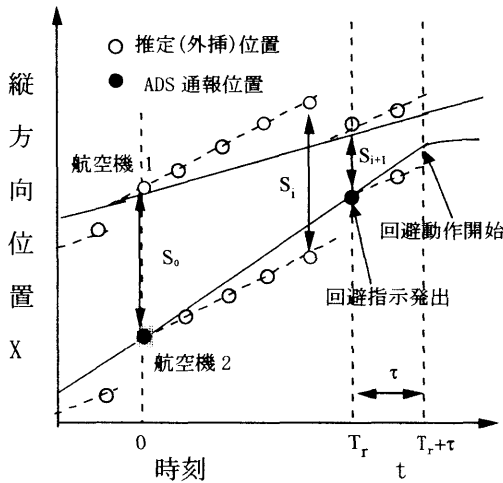


図2 ADSによる間隔のモデル(位置通報の前後で指示機上の航空機間隔が S_i から S_{i+1} に変化する)

2. 3 衝突危険度の数学モデル

Karppinen ら⁽⁵⁾のモデルでは、縦方向衝突危険度 N_{ax} は次式で与えられる。

$$N_{ax} = \Pi_x P_y(0) P_z(0) \left[\frac{|\bar{x}|}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right] \quad (1)$$

ここで Π_x は、ある航空機が同一経路・FL上の他機と縦方向で重畳する時間の割合で、次式で与えられる。

$$\Pi_x \approx \frac{4\lambda_x}{S_m} \int_0^\infty w(s) U(s) ds \quad (2)$$

ここで記号は次のとおりである。

S_m : 縦間隔基準

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: 航空機の全長, 全幅, 全高

$|\bar{x}|, |\bar{y}|, |\bar{z}|$: 縦方向, 横方向, 垂直方向の平均
相対速度

$w(s)$: 同一 FL 上のある航空機対の公称の間隔が s である確率の密度関数

T_r : ADS 位置通報の時間間隔 (通報周期)

τ : 遅延時間

$U(s)$: 初期公称間隔 $S_0=s$ のとき、時刻 $t=0$ と $t=T$ ($\equiv T_r + \tau$) の間に縦方向の重なりが生じる確率

$P_y(0)$: 横方向重畳確率 (同一経路で同一 FL を割り当てられた航空機対が横方向で重なる確率)

$P_z(0)$: 垂直重畳確率 (同一経路で同一 FL 上の航空機対が垂直方向で重なる確率)

文献(5)では $U(s)$ を次の形で与えている。

$$U(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_x(v) F(s + vT) dv \quad (3)$$

ここで、 $\phi_x(v)$ は縦方向相対速度の確率密度関数で $F(a)$ は二機間の公称の縦間隔が a のとき航空機対の真の縦間隔が航空機の全長 λ_x 以下になる確率である。

図1に縦方向の重なるの概念を示す。このとき、 $F(a)$ は次式で与えられる。

$$F(a) = \int_{a-\lambda_x}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) g(u-x) du dx \quad (4)$$

ここに、 $f(u)$ は位置通報があった航空機の (縦) 方向の航法誤差の確率密度関数、 $g(u)$ は先行機の位置誤差の確率密度関数である。

この位置誤差は航法誤差と ADS 位置の外挿による位置推定誤差の和なので、その確率密度関数は次のようになる。

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \epsilon(u-x) du \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon(u)$ は外挿による位置推定誤差の確率密度関数である。なお、すべての航空機に対して $f(u)$ は同一とする。先行機と後続機が逆の状態でも同様に考えられる。

3. 各種分布のモデル

3.1 航法誤差の分布

慣性航法システムの実測誤差分布⁽⁹⁾は縦方向の

航法誤差は正規分布 (Gaussian) ではなく、両側指数 (Double Exponential : DE) 分布のように裾部がもっと長いことが示唆されている。そこで縦方向の航法誤差の確率密度関数として次の両側指数分布を仮定する。

$$f(x) = (2\lambda)^{-1} \exp(-|x|/\lambda) \quad (6)$$

ここで λ は正定数のパラメータである。

北太平洋の洋上空域では航法性能要件 (RNP: Required Navigation Performance) 10が指定されている。RNP10は全飛行時間の95%で航法誤差が[-10, 10] NMにあることを意味する。これを満たすDE分布の形状パラメータは $\lambda=3.34$ (=10/2.996)NMとなる。

3.2 ADSの位置誤差

2000年11月から約1ヶ月間の北太平洋ルートで収集した実データに基づき、ADSの予測位置と実位置との偏差(縦方向成分)の分布を調べた。その結果、 $T_r=16$ 分の場合で、 $g(x)$ は大まかには次のDE分布で近似できることがわかった⁽¹⁴⁾。

$$\varepsilon(x) = (2\gamma)^{-1} \exp(-|x-m|/\gamma) \quad (7)$$

ここで、 m はバイアス誤差である。2510の標本で、 $m=-1.50$ NM, $\gamma=1.52$ NMであった。

(6)式の $f(x)$ と(7)式の $\varepsilon(x)$ を用いて、 $\lambda \neq \gamma$ のとき、(5)式の $g(x)$ は次式で表される。

$$g(x) = \frac{\lambda \exp(-|x+m|/\lambda) - \gamma \exp(-|x+m|/\gamma)}{2(\lambda^2 - \gamma^2)} \quad (8)$$

これらの式を(4)式に代入して計算すると次式を得る。

$$F(a) = \begin{cases} \frac{\lambda^2 (\frac{u}{2\lambda} + 1 - \frac{\gamma^2}{\lambda^2 - \gamma^2}) e^{-\frac{u}{\lambda}} + \frac{\gamma^4}{\lambda^2 - \gamma^2} e^{-\frac{u}{\gamma}}}{2(\lambda^2 - \gamma^2)} & \text{for } u(\equiv a + m - \lambda_x) \geq 0 \\ 1 - \frac{\lambda^2 (\frac{-u}{2\lambda} + 1 - \frac{\gamma^2}{\lambda^2 - \gamma^2}) e^{\frac{u}{\lambda}} + \frac{\gamma^4}{\lambda^2 - \gamma^2} e^{\frac{u}{\gamma}}}{2(\lambda^2 - \gamma^2)} & \text{for } u(\equiv a + m - \lambda_x) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

3.3 縦方向相対速度の分布

図3はAnderson氏より提供されたデータから著者らが作成した、同一速度を指定した航空機対の相対速度の分布である。相対速度は一時間以内にある位置通報点を同一FLで飛行した航空機対の位置通報に基づき算出した。併せて、これに最尤推定法で当てはめた次のDE分布モデルによる相対度数の計算値を示した。

$$\phi_x(v) = (2k)^{-1} \exp(-|v|/k) \quad (10)$$

ここで、 k は形状パラメータ(>0)である。図2では $k=7.16$ knotsである。

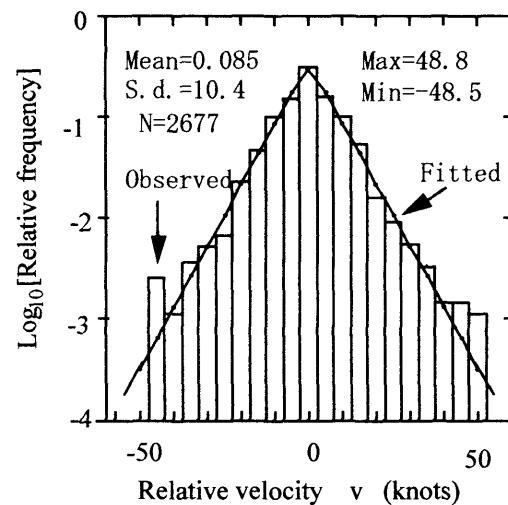


図3 相対速度の実測相対度数とモデルによるその理論値。区間幅=5 knots。

3.4 U(s)の分布

$U(s)$ は時刻 $t=0$ で航空機間の公称間隔(位置通報に基づく)が s のとき、 $t=T(=T_r + \tau)$ までに縦方向で重なる確率である。(9)式と(10)式を(3)式に代入すると $s \geq \lambda_x$ の領域に対して次式を得る。

$$U(s) = \frac{\exp(-\frac{s+m-\lambda_x}{kT})}{2} (1 - A_1 A_2 - A_3) + \frac{\exp(-\frac{s+m-\lambda_x}{\lambda})}{2} A_1 (\frac{s+m-\lambda_x}{2\lambda} + A_2) + \frac{\exp(-\frac{s+m-\lambda_x}{\gamma})}{2} A_3 \quad (11)$$

ただし、係数は次のとおりである。

$$A_1 = \lambda^4 / [(\lambda^2 - \gamma^2)(\lambda^2 - k^2 T^2)] \quad (12)$$

$$A_2 = 1 - \frac{\gamma^2}{\lambda^2 - \gamma^2} - \frac{k^2 T^2}{\lambda^2 - k^2 T^2} \quad (13)$$

$$A_3 = \gamma^6 / [(\lambda^2 - \gamma^2)^2 (\gamma^2 - k^2 T^2)] \quad (14)$$

3.5 w(s)の分布

ここで、w(s)は t=0 における航空機間の距離 (縦) 間隔分布の確率密度関数である。南太平洋空域の安全性評価の計算では w(s) に一様分布を仮定している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、交通量の多い北太平洋の R220 (図4) ではモデルとして適当ではない。

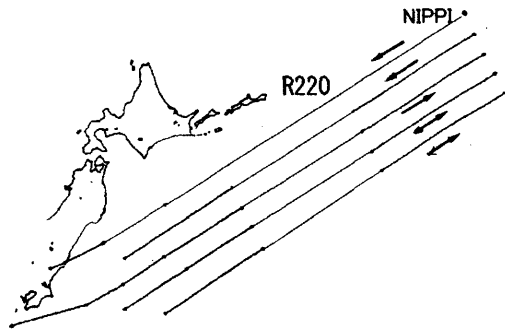


図4 NOPACルートの概要

図5に、西行き便が集中する R220 における、2000年3月のデータに基づく、w(s)の実測分布⁽¹³⁾を示す。これは区間幅 10NM の相対度数分布である。この分布は R220 における同一経路・FL を飛行した連続する航空機対について、二つの位置通報点における通過時刻と所要時間から、航空機間の距離 s (=X_i と書く) を算出した。ここで、X_i が位置通報点間の距離 (約 340NM に相当) 以上のデータは衝突に関与しないとして集計から除外した。実測分布のモデルとして、次の打ち切り型指数分布モデルを仮定する。

$$w(s) = \begin{cases} \frac{1}{\mu(1-e^{-L/\mu})} e^{-(s-S_{\min})/\mu} & \text{for } S_{\min} \leq s \leq S_{\min} + L \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad \dots (15)$$

ここで、S_{min}, L, および μ (>0) はモデル・パラメータである。なお、S_{min}=S_mとした。

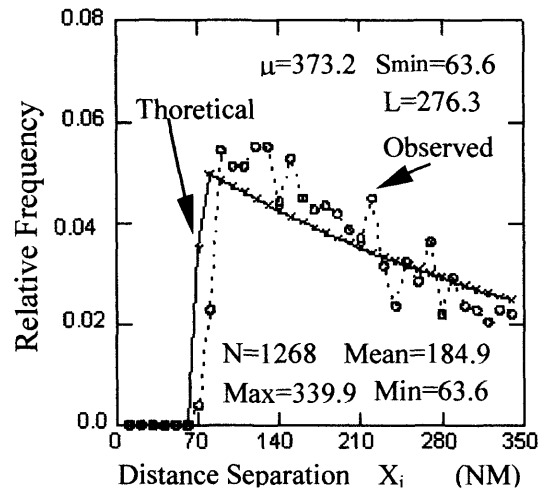


図5 距離 (縦) 間隔 X_i (w(s)の s の実現値) の実測相対度数とモデルによるその理論値⁽¹³⁾。区間幅=10NM。Nは標本数。N以外の数の単位はNM。

図5には、最尤推定法で当てはめたモデル・パラメータの推定値とモデルによる相対度数の計算値を示した。この分布は最小縦 (時間) 間隔が 10 分の下での分布で、縦間隔を 50NM にしたときの分布ではない。そこで、S_{min}=50NM のときの分布が必要なので、シミュレーションにより推定した。

まず、2000年3月~2001年2月の1年分の飛行計画情報を参照し、R220の位置通報点 NIPPI の通過時刻を用いて、50NMの縦間隔を満たす限り特定の高度 (FL360) を割り当てた。FL360に入らないときは設定した優先度に応じた高度を与えた。こうして 28884 個の距離間隔データを作成した。

図6は衝突に関与しうる 330NM 以下の距離間隔データ 21866 個 (75.7%) の相対度数分布である。なお、このシミュレーション⁽¹⁵⁾では、次の位置通報点での間隔は考慮していない。このため、S_m=50NM 近傍の頻度が高まり、図5の場合の約2倍になっている。図6には併せて最尤推定法による当てはめ結果を示した。このモデル・パラメータ値を計算に使用した。

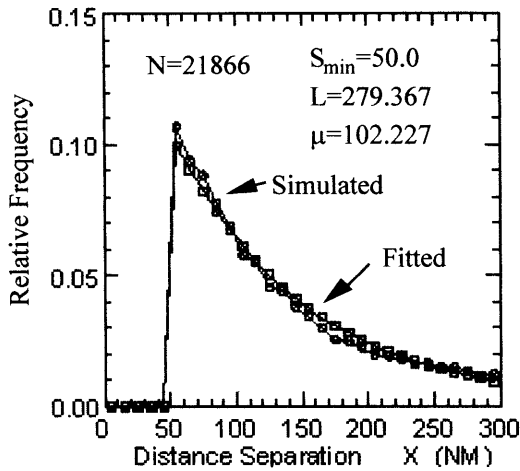


図6 シミュレーションによる距離間隔分布. 区間幅=10NM, Nは標本数. S_{min}, L, μ の単位はNM.

3.6 縦方向の重畳確率 Π_x の成分

以上の仮定の下で, (2)式の Π_x 中の積分項は次のように表せる.

$$Q(T) = \int_0^{\infty} w(s)U(s)ds = \int_{S_{min}}^{S_{min}+L} w(s)U(s)ds \quad (16)$$

これに(11)式と(15)式を代入して計算すると次式を得る.

$$Q(T) = B_1(1 - A_1A_2 - A_3)\exp\left(-\frac{Z}{kT}\right) + A_3B_2\exp\left(-\frac{Z}{\gamma}\right) + B_3A_1\left(\frac{Z}{2\lambda} + B_4 + A_2\right)\exp\left(-\frac{Z}{\lambda}\right) \quad (17)$$

ただし

$$Z = S_m + m - \lambda_x \quad (18)$$

$$B_1 = \frac{kT(1 - \exp(-(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{kT})L))}{2(\mu + kT)(1 - \exp(-L/\mu))} \quad (19)$$

$$B_2 = \frac{\gamma(1 - \exp(-(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\gamma})L))}{2(\mu + \gamma)(1 - \exp(-L/\mu))} \quad (20)$$

$$B_3 = \frac{\lambda(1 - \exp(-(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\lambda})L))}{2(\mu + \lambda)(1 - \exp(-L/\mu))} \quad (21)$$

$$B_4 = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu}{\mu + \lambda} - \frac{L \exp(-(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\lambda})L)}{\lambda(1 - \exp(-(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\lambda})L))} \right] \quad (22)$$

である.

4. パラメータ値

4.1 航空機のパラメータ

航空機の寸法は NOPAC ルートでの実測値⁽¹⁰⁾に基づき, $\lambda_x=0.036$ NM, $\lambda_y=0.032$ NM, $\lambda_z=0.010$ NM とした. 平均相対速力は文献⁽⁷⁾に従い, $|\bar{x}|=35$ knots, $|\bar{y}|=20$ knots, $|\bar{z}|=1.5$ knots とした.

4.2 重畳確率

$P_y(0)$ は横方向の航法誤差分布から推定できる. 航法誤差がDE分布に従う時, RNP値をRとすると

$$P_y(0) \approx 3\lambda_y / (2R) \quad (23)$$

で近似できる. ここでは, RNP10での値 $P_y(0)=0.0048$ と, 大きめな推定値として, R220での実測分布に基づき⁽¹¹⁾, $P_y(0)=0.02$ ($\lambda_y=0.032$ NM に対し)の双方を用いる. なお, $P_y(0)=0.02$ はDE分布でRNP2.4程度に相当する.

同様に $P_z(0)$ は測高レーダによる相対垂直距離(航空機対の飛行高度の差)の実測分布⁽¹²⁾に基づく $P_z(0)=0.41$ ($\lambda_z=0.010$ NM に対し)を用いた.

4.3 モデル・パラメータ

RNP10で $\lambda=3.34$ NM とした. ADSの位置推定誤差は通報時間間隔 T_r [hour]に比例し, 次式に従うものとする.

$$m = -1.50(60/16)T_r \quad [\text{NM}] \quad (24)$$

$$\gamma = 1.52(60/16)T_r \quad [\text{NM}] \quad (25)$$

$\phi_x(v)$ の形状パラメータは $k=7.16$ knots とし, $w(s)$ のパラメータ, L, μ, S_{min} は図6の値とした.

$S_{min}=S_m=50$ NM である. なお, $w(s)$ の計算では除外したデータの頻度も考慮して図6の頻度に 0.757 を乗じた値を使用した((16)式で $w(s)$ の代わりに $0.757 \cdot w(s)$ を使用).

4.4 T_r と τ

T_r は現行のADSでは約16分だが, これは可変であるので変数として計算した. τ については使用するシステムについての詳細な検討が必要なので, 本稿では4分と9分⁽⁷⁾で試算した.

5. 計算結果

縦方向の衝突危険度 N_{ax} を $S_m=50$ NM について,

数式ソフトMATHCADを用いて計算した例を図7に示す。図中の破線は国際民間航空機関（ICAO）で用いている最大許容危険度（目標安全度(TLS)）である。この値は 5×10^{-9} [accidents/flight hour]である。図では、 $T_r=16$ 分の状態で、 τ が9分以下のとき、 N_{ax} は目標安全度を満たしている。

なお、(2)式の $w(s)$ の分布は最も交通量の多いR220での値に基づいており、 N_{ax} を大きめに見積もることになる。また、今回は、簡単のために、 Π_x の近似式(式(2))を用いたが、分母の S_m は本来は $|\bar{x}|T_r$ である。この近似は、 N_{ax} を小さく見積もる可能性があるが、近似精度は不明である。従って、今後、この近似精度を検討する必要がある。相対速度などのパラメータは文献(7)の値を用いたが、厳密な安全性評価を行うには、 $|\bar{x}|$ の推定値を求め、詳しく検討する必要があると考える。

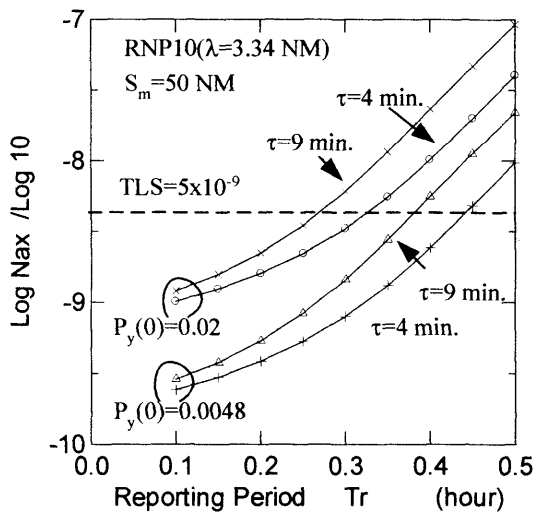


図7 衝突危険度の計算結果

6. むすび

ADS使用時の縦方向衝突危険度を評価するための数学モデルを用い、特定の分布を仮定した場合に危険度を計算するための定式化を行った。この結果、複雑な積分の数値計算をすることなく解析的に衝突危険度が計算できるようになった。

計算例として北太平洋の洋上航空路を想定し、RNP10の航法精度を有する航空機に対し、ADSを用いた監視により、50NMの縦間隔基準を用いた場合の衝突危険度を推定してみた。その結果、ここで想定した条件の下で、ADSの通報周期16分、 τ が4分程度ならば 5×10^{-9} [accidents/flight hour]

を満たすことがわかった。

今後の課題として、 $|\bar{x}|$ の推定方法とこれを用いた N_{ax} の計算、TLSを満たすための τ の要件、30NM縦間隔の適用可能性の検討などがある。

[謝辞] 南太平洋での相対速度データをご提供戴いたオーストラリア航空サービスのDr. Andersonに謝意を表す。ADSや飛行計画情報データの収集にご協力いただいた国土交通省航空局の関係各位に感謝する。

参考文献

- (1) Reich, P.G., Analysis of Long-Range Air Traffic Systems-Separation Standards I, II& III, Journal of the Institute of Navigation, Vol.19, Nos.1, 2, &3,1966
- (2) The Summary of Discussions of the 5th Meeting of the NAT SPG, Montreal, Dec., 1968
- (3) Brooker, P. and Lloyd, D.E., Collision Risk and Longitudinal Separation Standards for North Atlantic Air Traffic, CAA, DORA Communications 7801, London, Jan. 1978
- (4) Livingston, D., Analysis and Recommendations of the Potential for the Reduction of Longitudinal Separation in Pacific Ocean Environments, DOT/FAA/CT-TN85/39, Jan., 1986
- (5) Karppinen, N. and Anderson, D.,A., General Methodology Relating Navigation Performance to Longitudinal Distance Separation, ICAO RGCSP-WG/A-WP/9, Seattle, Sept., 1993
- (6) Anderson, D. and Karppinen, N., A Collision Risk Analysis Relating Navigational Performance to Initial ADS Longitudinal Separation Minima, ICAO RGCSP-WG/A-WP/10, Shizuoka, Sept., 1994
- (7) Manual on Airspace Planning Methodology for Determination of Separation Minima, Appendix 5, ICAO Doc 9689-AN/953, 1998
- (8) Thomas,M.D., A Longitudinal Collision Risk Model for the NAT, ICAO RGCSP-WG/WHL/9-IP/3, Montreal, Nov., 1999
- (9) Nagaoka, S., Analyses of Position Error Distributions of Inertial Navigation Systems, ICAO RGCSP-WG/A-WP/12, London, Sept., 1992
- (10) Amai, O. and Nagaoka, S., Recent Collision Risk Model Parameters of the North Pacific Routes, ICAO RGCSP-WG/A-WP/15, St. Petersburg, 17-28 May, 1999
- (11) Amai, O. and Nagaoka, S., Estimation of the Lateral Collision Risk of the North Pacific Routes, Proc. of the 54th annual meeting, Institute of Navigation, pp.639-646, June, 1998
- (12) Nagaoka, S., Amai, O. & Takahashi, M., A Safety Assessment Trial of an Oceanic Air Route System in the North Pacific, 9th World Congress of Int'l Association of Institutes of Navigation, Amsterdam, Nov., 1997
- (13) 長岡・天井, “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講演論文集, p.291, 2000年9月
- (14) Kodo,T., Nagaoka, S. and Amai, O., Analysis of Prediction Errors of an ADS, ICAO SASP-WG/WHL/1-WP/33, Canberra, May, 2002
- (15) Nagaoka, S., Sumiya, M. and Amai, O., Modeling the Distribution of Distance Separation between the Successive Aircraft on a NOPAC Route, ICAO SASP-WG/WHL/1-WP/32, Canberra, May, 2002