

# 洋上航空路における近接通過頻度の長期的変化

電子航法開発部 天井 治・長岡 栄

## 1. はじめに

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。

レーダの覆域外となる洋上の空域では、短波無線通信による1時間に1回程度のパイロットの位置通報により、管制官は航空機の位置を把握している。このため、レーダ覆域内に比べ10倍以上大きい管制間隔の基準となっている。

日本と北米を結ぶ北太平洋の洋上航空路（北太平洋航空路）では、1998年4月23日までは進行方向の縦間隔は10分または15分、横間隔は100 NM（1 NM=1852 m）、高さ方向の垂直間隔は2000 ft（1 ft=0.3048 m）であった。

著者らは、北太平洋航空路の安全性の評価および航空交通のより効率的な運航を図るための管制間隔基準の短縮可能性を検討している。その成果もあり、北太平洋航空路では、航法装置の性能向上などを背景に、1998年4月23日からRNP（航法性能要件）10承認機に対し50 NM横間隔が適用された。更に2000年2月24日から短縮垂直間隔承認機に対しフライトレベル（FL）410（41,000 ftに相当）以下の高度で1000 ft垂直間隔が適用された。

洋上航空路の安全性評価では、安全性の尺度として数学モデルに基づく衝突危険度がしばしば用いられる。この評価には、航空機の航法性能や交通流の特性を反映するパラメータの実測データによる推定を要する。

近接通過頻度は衝突危険度モデルの重要なパラメータの一つで、航空機同士が進行方向ですれ違う頻度の期待値である。この値はルート構成、飛行便数などにより変わる。この値の推定例は幾つかある<sup>[6],[7],[9]</sup>が、長期間に亘る値の変化の調査報告は見あたらない。そこで、連続した約7年分の飛行計画情報を用いて月毎の横方向および垂直方向の近接通過頻度を計算し、そ

の変化を調べた。本稿では、その方法と結果を述べる。

## 2. 衝突危険度モデル

### 2.1 概念

衝突危険度モデル<sup>[1]</sup>は1966年にReichにより提案され、現在は国際民間航空機関の管制間隔検討パネルで改良されたもの<sup>[2]</sup>が用いられている。

このモデルでは、航空機を直方体と考える。航空機は予め管制機関により割り当てられた経路の中心線上を飛行することが期待されるが、実際には航法誤差や人的ミス等のために割当経路や割当高度から逸脱して飛行する可能性がある。この逸脱により管制間隔を喪失し、たまたま両機（2つの直方体）が三次元的に重なった場合を衝突と考える。衝突危険度モデルでは、縦、横、高さの各方向で重なる確率および頻度をそれぞれ推定し、それらの積として衝突危険度を求める。

### 2.2 計算式

衝突危険度  $N_{ar}$  ( $r=y$  または  $z$ ) は、航空路システム内の航空機が単位飛行時間あたりに横 ( $y$ ) または垂直 ( $z$ ) 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）の期待値であり、次式で計算できる<sup>[2]</sup>。

$$N_{ar} = P_y(S_y)P_z(S_z)[N_x^r(o)K(o) + N_x^r(s)K(s)] \quad (1)$$

記号の意味は次の通りである。

$P_y(S_y)$ : 横方向重畳確率（ $S_y$ だけ離れた経路を同一高度で飛行する航空機対が横方向で重なる確率）

$P_z(S_z)$ : 垂直方向重畳確率（同一経路で $S_z$ だけ離れた隣接高度を飛行する航空機対が垂直方向で重なる確率）

$N_x^r(o/s)$ :  $r$ （横または垂直）方向の反航/同航近接通過頻度

$K(o/s)$ : 航空機の大きさや相対速度に関わる値  
 横間隔喪失による場合は  $S_x=0$ 、垂直間隔喪失による場合は  $S_y=0$  として計算する。

### 3. 近接通過頻度<sup>[3]</sup>

ある航空機が隣接経路上を同一高度で飛行する航空機と進行方向で重なる事象を横方向近接通過と呼ぶ。同様に、同一経路上を隣接高度で飛行する航空機と重なる場合を垂直方向近接通過と呼ぶ。

図1に示すように両機の進行方向が同じ場合を同航近接通過、反対の場合を反航近接通過と呼ぶ。図では横方向の場合を示したが、垂直方向の場合も同様である。本稿では、同航を  $s$ 、反航を  $o$  の文字で表す。

近接通過頻度は単位飛行時間あたりの近接通過機数の期待値である。観測時間内に考察空域内で起こる  $r$  方向の近接通過の回数を  $n_p^r(o/s)$ 、各航空機が考察空域内の通過に要した時間の総和を  $H$  とすると、近接通過頻度  $N_x^r(o/s)$  は次式で求められる。

$$N_x^r(o/s) = \frac{2n_p^r(o/s)}{H} \quad (2)$$

$N_x^r(o/s)$  の単位は [機 / 飛行時間] である。また、1回の近接通過に2機が関与するために2を掛けている。

実際の計算では、経路を幾つかの単位に分割し、分割単位毎に近接通過回数および飛行時間を計算した。そして、次式により全体の  $N_x^r(o/s)$  を求めた。

$$N_x^r(o/s) = \frac{2 \sum_i (n_p^r(o/s))_i}{\sum_i H_i} \quad (3)$$

ここで、 $(n_p^r(o/s))_i$ 、 $H_i$  はそれぞれ分割区間  $i$  における近接通過回数と総飛行時間を表す。

同航と反航の近接通過頻度の衝突危険度への関与の程度をまとめて把握できる量として、等価反航近接通過頻度  $N_x^r(e)$  がある。これは次式で計算できる。

$$N_x^r(e) = N_x^r(o) + \frac{K(s)}{K(o)} N_x^r(s) \quad (4)$$

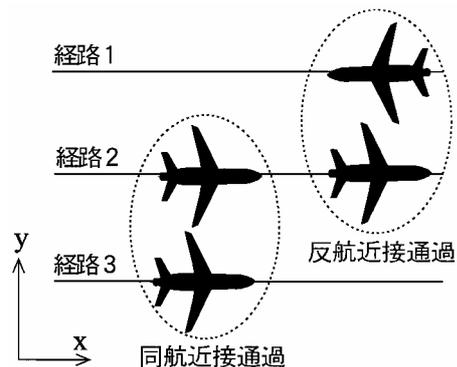


図1 近接通過の2つの形態

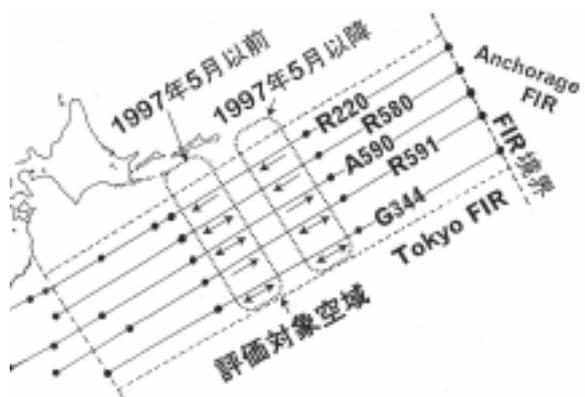


図2 評価対象空域（北太平洋航空路）

本稿では文献[5]を参考にして、 $K(o)$ 、 $K(s)$ の値をそれぞれ 1.017、1.576 として計算した。

以下では 1000 ft 垂直間隔での垂直方向同航近接通過頻度を  $N_x^{z1000}(s)$ 、50 NM 横間隔での横方向反航近接通過頻度を  $N_x^{y50}(o)$  のように表す。

### 4. 対象空域

図2の破線で囲まれた空域を近接通過頻度の計算対象とした。これは、北太平洋航空路における日本の管轄空域（東京 FIR（飛行情報区）内）である。北太平洋航空路は5本の経路（北から R220, R580, A590, R591, G344）で構成される。図中の矢印は飛行方向を示す。これは 1997年5月下旬を境に変更されている。

北太平洋航空路では表1に示すようにルートの構成が変更されている。対象機は、図2に示す空域を高度 FL290 以上 FL410 以下で飛行したすべての航空機とした。尚、1998年4月23日以前の R580 と R591 に対しては、高度 FL280 以上 FL410 以下とした。

表1 北太平洋航空路の管制間隔基準の遷移  
縦間隔はマクナンバー適用時は10分

期間	縦間隔	横間隔	垂直間隔
1998年4月23日以前	15分	100 NM	2000 ft
1998年4月23日から 2000年2月24日まで	15分	50 NM	2000 ft
2000年2月24日以降	15分	50 NM	1000 ft

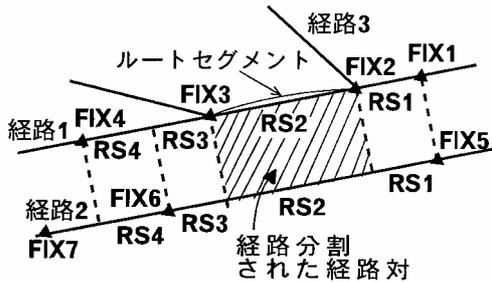


図3 経路対に対する経路分割の概念

## 5. 使用データ

近接通過頻度の計算には、1996年1月1日から2003年1月31日までの7年1ヶ月分の飛行計画情報を使用した。飛行計画情報には、便名、機種名、経路上の各位置通報点（FIXと呼ぶ）の通過時刻、飛行高度等が記載されている。FIXは航空機が上空を通過する際に、管制官に航空機の現在位置を知らせる目的で位置通報（通過時刻、飛行高度等の報告）を行う地点である。尚、FIX通過時刻は実際の通過時刻と最大3分の差異がある場合がある。

## 6. 近接通過頻度の計算方法

横方向の近接通過回数は、図3に示すような2本の経路（経路対）に対して計算する。同一ルート上の隣り合うFIX間の領域をルートセグメント（RS）と呼ぶ。経路の分岐・合流がある場合には、各ルートセグメントの通過機数は必ずしも等しくならない。そこで、図のように経路対を分割し、(3)式で  $N_x^y(o/s)$  を求めた。

垂直方向の場合は、ルートセグメント毎に分割して、同様の計算を行った。

近接通過の有無は、一对の航空機の各FIXの通過時刻をもとに算出した。この際、次のように処理をした。

ルートセグメント端での近接通過は0.5回と計数。

経路変更の際、経路間を飛行中の近接通過は無視。

高度変更時は、直前に通過したFIXで直ちに高度を変更したと見なして計算。

## 7. 平均飛行時間

図4に経路毎の各月の1日の平均飛行時間の変化を示す。近接通過頻度を計算するために求めた月毎の総飛行時間を月の日数で割り、1日の平均飛行時間を求めた。R220がもっとも長く、次いで概ねA590、R580、R591、G344の順となっている。尚、紫色の線はG344の、黒い線はR591の平均飛行時間を表す。R220では9月頃短くなる年がある傾向が窺える。

5本の経路の総計を見ると、月毎の変動も大きい。緩やかな増加傾向が窺える。図中に回帰直線を示した。相関係数は0.69であった。2001年9月から数ヶ月間落ち込んでいるのは、同時多発テロの影響であろうと考える。

尚、ジェット気流の影響か、東行き便の飛行時間は西向きにそれより短くなる傾向が報告されている<sup>[4]</sup>。

## 8. 近接通過頻度の計算結果

### 8.1 垂直方向の近接通過頻度

図5に各月の垂直方向近接通過頻度の計算結果を示す。横軸は月を、縦軸は近接通過頻度を示す。図中には(4)式で計算した  $N_x^r(e)$  の値も示した。

2000年2月24日に垂直間隔基準が2000ftから1000ftに短縮された。2000ftの垂直重畳確率  $P_z(2000)$  は  $P_z(1000)$  に比べて4桁程小さく<sup>[6]</sup>、 $N_x^{z2000}(o)$  は無視でき、垂直間隔基準短縮後の  $N_x^{z2000}(s)$  は  $N_x^{z1000}(s)$  の2倍程度であったため、垂直間隔短縮後の  $N_x^{z2000}(o/s)$  は無視した。

図5で  $N_x^{z2000}(o)$  は1997年5月下旬以降極端に小さくなっているが、これは図2のように各ルートの飛行方向が変更されたためであろう。それ以降の  $N_x^{z2000}(e)$  および  $N_x^{z1000}(e)$  を見る限り、月毎の変動は大きいところで0.02 [機 / 飛行時間] 程である。 $N_x^{z1000}(s)$  の値は0.04 [機 / 飛行時間] 程で顕著な増加や減少の傾向は窺えない。

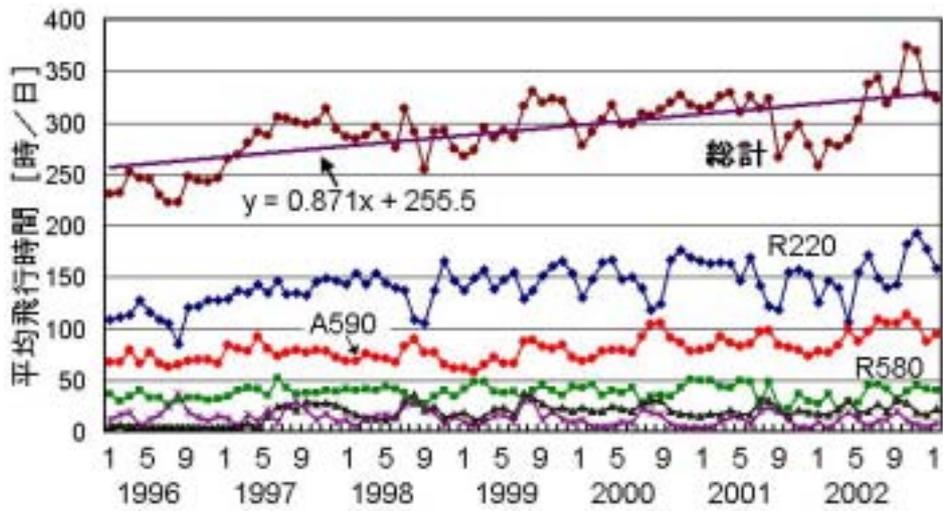


図4 1日の平均飛行時間

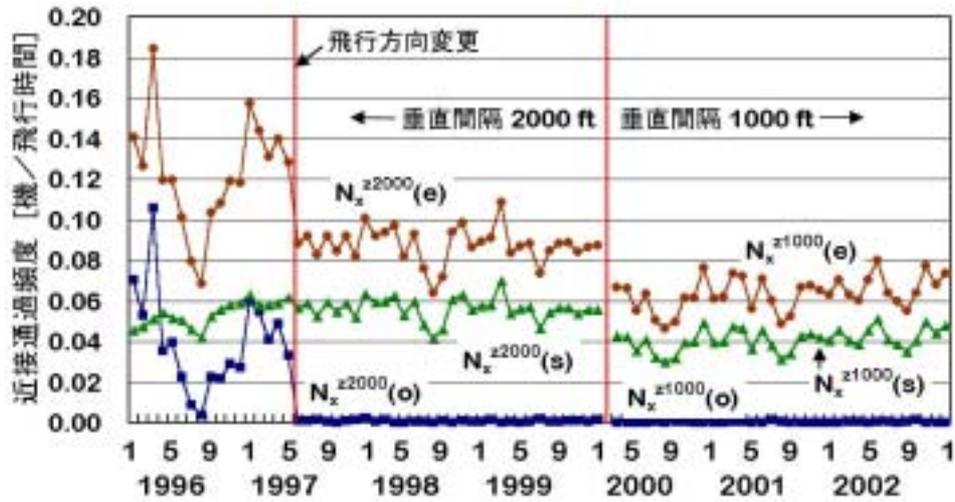


図5 垂直方向近接通過頻度の変化

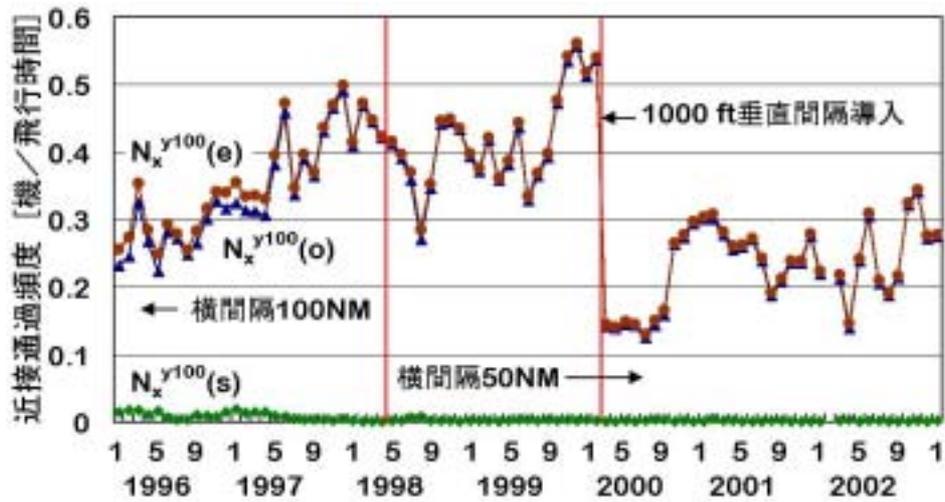


図6 100NM 間隔の横方向近接通過頻度の変化

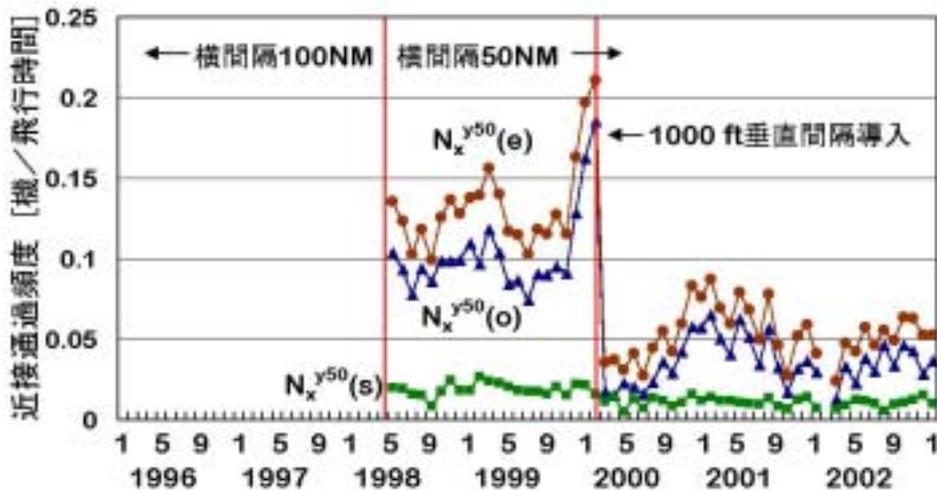


図7 50NM 間隔の横方向近接通過頻度の変化

## 8.2 横方向の近接通過頻度

1998年4月23日に横間隔基準が100NMから50NMに短縮された。横方向の場合は、垂直方向の場合と異なり100NMの横方向重畳確率 $P_y(100)$ は $P_y(50)$ の1/3程度<sup>[7]</sup>でしかないので、横間隔基準短縮以降も $N_x^{y100}(o/s)$ は無視できない。このため、横方向の衝突危険度 $N_{ay}$ は次式のように計算すべきと指摘されている<sup>[5], [18]</sup>。

$$N_{ay} = P_z(0)[P_y(50)\{N_x^{y50}(o)K(o) + N_x^{y50}(s)K(s)\} + P_y(100)\{N_x^{y100}(o)K(o) + N_x^{y100}(s)K(s)\}] \quad (5)$$

図6に100NM間隔の横方向近接通過頻度の計算結果を示した。 $N_x^{y100}(s)$ は $N_x^{y100}(o)$ に比べて一桁から二桁小さな値となっている。 $N_x^{y100}(o)$ は横間隔基準短縮の頃から一時減少するがその後2000年2月までは増加傾向にある。2000年2月の垂直間隔基準短縮の後、2000年9月までは0.15[機/飛行時間]程に減少するが、それ以降0.2~0.3[機/飛行時間]程の値を取っている。月毎の変動が激しく、ある月では0.1[機/飛行時間]程の変化があるが、顕著な増加や減少の傾向は窺えない。

尚、2002年2月の横方向近接通過頻度の値は、この月にFIX位置が同じ名前のまま移動し、煩雑な計算が必要となるため、今回は時間の都合で割愛した。

図7に50NM間隔の横方向近接通過頻度の計算結果を示した。 $N_x^{y50}(s)$ は1998年5月から

2000年2月まで0.02[機/飛行時間]程、2000年3月以降は0.01[機/飛行時間]程で大きな変化はない。 $N_x^{y50}(o)$ は垂直間隔基準短縮の数ヶ月前から急激に増加し、短縮後は短縮前の1/2程の値0.01~0.07[機/飛行時間]で緩やかに変動している。垂直間隔基準短縮後の顕著な増加や減少の傾向は見られない。

$N_x^{y50}(o)$ の短縮前の急激な増加の原因の究明については、今後の課題としたい。

## 8.3 近接通過頻度の統計値

表2に2000年3月から2003年1月までの値を一纏めにした場合の各近接通過頻度の統計値を示す。括弧内は2000年10月~2003年1月を纏めた値を示す。 $N_x^{z1000}(s)$ は平均値に比べ標準偏差が小さく安定していることが分かる。

表2 各近接通過頻度の統計値

(2000年3月~2003年1月)

単位はすべて[機/飛行時間]

	最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差
$N_x^{z1000}(o)$	0	0.0014	0.00029	0.00021	0.0003
$N_x^{z1000}(s)$	0.0300	0.0511	0.0408	0.0407	0.0054
$N_x^{y50}(o)$	0.0130	0.0656	0.0361	0.0343	0.0143
$N_x^{y50}(s)$	0.0052	0.0163	0.0111	0.0112	0.0028
$N_x^{y100}(o)$	0.125 (0.140)	0.342 (0.342)	0.230 (0.253)	0.238 (0.260)	0.061 (0.046)
$N_x^{y100}(s)$	0.0010	0.0052	0.0023	0.0020	0.0010

表3 ルート毎の近接通過頻度の推定値  
(2002年11月のFDPデータによる)

ルート	$N_x^{z1000}(o)$ [機/時]	$N_x^{z1000}(s)$ [機/時]	$N_x^{z1000}(e)$ [機/時]	飛行時間 [時]
R220	0	0.0636	0.0985	5786.32
R580	0	0.0260	0.0403	1344.68
A590	0	0.0431	0.0668	3176.46
R591	0.0035	0.0158	0.0280	569.00
G344	0	0.0100	0.0155	199.85
総計	0.0002	0.0497	0.0772	11076.31
ルート対	$N_x^{y20}(o)$ [機/時]	$N_x^{y20}(s)$ [機/時]	$N_x^{y20}(e)$ [機/時]	飛行時間 [時]
R220-R580	0	0.0171	0.0285	7131.00
R580-A590	0.0916	0	0.0916	4521.14
A590-R591	0.0171	0.0056	0.0258	3745.46
R591-G344	0	0	0	768.85
総計	0.0432	0.0129	0.0632	11076.31
ルート対	$N_x^{y100}(o)$ [機/時]	$N_x^{y100}(s)$ [機/時]	$N_x^{y100}(e)$ [機/時]	飛行時間 [時]
R220-A590	0.4166	0	0.4166	8962.78
R580-R591	0.0073	0.0094	0.0219	1913.68
A590-G344	0.0101	0.0018	0.0129	3376.31
総計	0.3414	0.0022	0.3448	11076.31

#### 8.4 ルート毎の近接通過頻度

表3に、2002年11月のデータによるルートおよびルート対毎の近接通過頻度の推定結果を示した。図5～図7から、この月の値は2000年3月以降の中で、比較的大きな値になっていることが分かる。

R220-A590 に対する  $N_x^{y100}(o)$  は 0.4166 [機/飛行時間] と他に比べ大きな値となっている。これは、西行き便の約 7.5 割が R220 を、東行き便の約 7 割が A590 を飛行している<sup>[10]</sup> ことが原因である。R220、A590 の  $N_x^{z1000}(s)$  からその影響を窺うことができる。

#### 9. まとめ

1996年1月1日から2003年1月31日までの7年1ヶ月分の飛行計画情報を用いて、月毎に横方向および垂直方向の近接通過頻度を計算し、その長期的変化を調べた。その結果、次のことが分かった。

(1) 飛行時間は緩やかな増加傾向がみられた。

- (2) 横方向、垂直方向近接通過頻度とも、2000年3月以降、顕著な増加や減少の傾向は窺えない。
- (3) 2000年3月以降の50NM間隔の横方向反航近接通過頻度は2000年2月以前のその1/2程になった。

#### 謝辞

飛行計画情報の収集にご協力頂いた国土交通省航空局および東京航空交通管制部の各位に感謝致します。

#### 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] 天井治, 長岡栄, “航空路における垂直方向の近接通過頻度の推定”, 日本航海学会論文集, 82, pp.61-68, March 1990
- [4] 住谷, 長岡, 天井, “北太平洋空域内の最接近航空機間の距離の調査”, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2002-36, July 2002
- [5] O. Amai and S. Nagaoka, A Consideration on Lateral Collision Risk for the North Pacific Routes, ICAO RGCSP-WG/A/17-IP/5, Annapolis, USA, Nov. 2000
- [6] 長岡栄, 天井治, “衝突危険度による洋上複合間隔ルートの安全性評価 - I. - NOPACルートの垂直方向の衝突危険度 -”, 日本航海学会論文集, 92, pp.319-327, March 1995
- [7] O. Amai and S. Nagaoka, Estimation of the Lateral Collision Risk of the North Pacific Routes, Proc. of the 54<sup>th</sup> Annual Meeting of the ION, pp.639-646, Denver, USA, June 1998
- [8] B. Flax, Navigational Performance Requirements for the Introduction of 30 nmi Lateral Separation in Oceanic and Remote Airspaces, RGCSP-WG/WHL/9 -WP4, Montreal, Canada, Nov. 1999
- [9] D. A. Livingston et al, Application of Composite Separation to the North Pacific Track System, FAA/CT-TN83/34, June 1984
- [10] 天井治, 長岡栄, “北太平洋航空路の安全性の評価 - ルート構成変更後の近接通過頻度の計算 -”, 電子情報通信学会技術研究報告, SSS99-25, October 1999