航法性能要件と平行経路間間隔の関係に関する一考察

長岡 栄*

On the Relationship between the Required Navigation Performance and the Parallel Route Spacing

Sakae NAGAOKA

Abstract

The required navigation performance (RNP) is a new concept which describes the navigation accuracy required for an aircraft when flying within a specified airspace.

This paper first examines the method proposed by Flax et al. for deriving RNP values based on the double double exponential (DDE) distribution in relation to the route spacing. Then the consideration on RNP values for a different error distribution model, i.e., N-DE model (consists of the Gaussian core and the double exponential tail) is made. The results of the calculation based on the method indicate that a possible RNP value for the N-DE model differs considerably from the value obtained using the DDE model. This result suggests that the model selection for the core distribution should be carefully made when determining RNP values for oceanic airspace based on the method.

1. まえがき

国際民間航空機関 (ICAO) では航法性能要件 (Required Navigation Performance : RNP) という概念を作成中である。これは、ある空域内での航空機運航に必要な航法精度を記述するもので、航空機の飛行時間の 95% が満たすべき横方向逸脱量の値 (95% 含有率) で表される。この RNP により特定空域の航法精度を規定すれば、多種多様な搭載航法装置の中から標準とする装置を選定する必要がなくなり、ICAO が国際標準や勧告方式を制定するうえで都合がよい。

実用に際しては、RNP 適用空域における管制間隔や平行経路間の距離 (平行経路間間隔) と RNP 値との関係付けが必要である。この方法としては、Flax ら⁽¹⁾ による提案方法がある。この方法では、まず横方向逸脱量の分布が、ともに両側指数 (DE) 分布に従う中心部と裾部から成ると仮定する。この分布の中心部は主に RNP 値を、裾部は水平重畳確率を決定するが、中心部の分散をある程度以上小さくしても水平重畳確率は殆ど軽減されなくなる。この臨界値をもって RNP 値とするのが彼らの方法である。

彼らは分布モデルに混合型両側指数 (DDE) 分布を用い、洋上空域の RNP 値として ± 20 NM (95% 含有率) を提案した。しかし、分布が DDE でないときは RNP 値は異なると予想されるが、これらについては明らかにされていなかった。そこで、中心部が正規分布で裾部が DE 分布に従う N-DE 分布を用いた場合の RNP 値について検討を試みた。その結果、N-DE 分布では、RNP 値が 20 NM (95% 含有率) よりも大きくなることが判明したので、その検討方法と結果について報告する。

本論文では、まず RNP について説明し、ついで RNP 値の算出方法について触れる。最後に計算結果を示し若干の考察を加える。

* 正会員 運輸省 電子航法研究所 (〒181 三鷹市新川 6-38-1)

2. 航法性能要件

2.1 RNP とは

航法性能要件(以後 RNP と呼ぶ)とは ICAO の将来航空航法システム(FANS)特別委員会^②が提唱し、管制間隔検討パネル(RGCSP)が開発した概念である。これは航空機がある空域を飛行する際、満足すべき航空機の航法精度の要件である。FANS はこれを RNPC(Required Navigation Performance Capability)と呼んでいたが、性能と能力という術語が併用されており不適切なため、最近では RNP と呼ばれている。

2.2 RNP 採用の便益

RNP は国際標準を航空機の搭載航法装置ではなく、その航法性能で規定する考え方である。これにより次の便益が期待される。

- 競合する航法装置の中から ICAO が特定の装置を国際標準として選定する必要がなくなる。(例えば、マイクロ波着陸装置で TRSB(Time Reference Scanning Beam)方式が国際標準に決まるまでに要したような長期にわたる議論が不要になる。)
- ある空域の飛行に際しては、満たすべき RNP タイプの指定だけで、飛行に要する搭載航法装置の指定がいらないため運用上の手続きが簡便になる。

2.3 RNP の定義と適用範囲

RNP は“ある定められた空域内での航空機運航に必要な航法精度の記述”と定義^③されている。この適用範囲等は次のとおりである。

- 水平面内の航法に適用し、航法誤差の最大許容量(95%含有率(時間))により空域を特徴付ける。
- RNP の適用対象は航空路(ルート)や空域などである。
- 出発空港から到着空港まで適用可能である。

2.4 検討中の RNP タイプ

RNP タイプは 95%含有率で表した航法誤差の最大許容量で表す(RNP 1 は±1NM に飛行時間の 95%が含まれる事を意味する)。現時点で考えられているエンルートの RNP タイプ^④は表 1 の 4 種類である。

洋上空域における RNP タイプとしては RNP 20 と RNP 12.6 があるが、前者は Flax らにより提案された。RNP 12.6 については、当初、単に北大西洋の MNPS 空域^⑦における航法誤差の標準偏差($\sigma = 6.3\text{NM}$)の 2 倍(正規分布の場合は $\pm 2\sigma$ の範囲に 95%が含まれる)として提案されたが、たまたま、Flax の方法で求めた RNP 値も同程度の値になることが示された^⑧。

表 1 RGCSP で作られた RNP タイプ

タイプ	RNP 値	備 考
RNP1	±1NM	複数のDME使用時の航法精度に相当
RNP4	±4NM	VOR使用時の航法精度に相当
RNP12.6	±12.6NM	北大西洋のMNPS空域の平行経路間隔(60NM)に相当
RNP20	±20NM	平行経路間隔で120NMの空域に相当

3. RNP と水平重量確率

ここでは、平行経路間隔 S_y と RNP 値を関係付けるために必要な諸量について定式化を試みる。

3.1 RNP 値

いま、航法誤差(横方向逸脱量) y の確率密度関数(pdf)を $f(y)$ として、次の混合型分布を仮定する。

$$f(y) = (1-\alpha)f_c(y|\omega_c) + \alpha f_t(y|\omega_t) \quad (1)$$

ただし、 $f_c(y)$ は中心部(core)、 $f_t(y)$ は裾部(tail)を表す確率密度関数である。中心部は通常の航法誤差に相当し、裾部は何等かの原因による大きな逸脱に相当する。 α ($0 < \alpha < 1$)は裾部の重みである。 ω_c 、 ω_t は分布モデルのパラメータで分散に関係している。

航法誤差の場合、通常 $\omega_t \gg \omega_c > 0$ である。

RNP 値(95%含有率)を R とすると次式が成立する。

図1 平行経路と水平重量確率

図2 水平重量確率と R の変化特性の例

$$0.95 = \int_{-R}^R f(y) dy \quad (2)$$

$$= \int_{-R}^R \{ (1-\alpha)f_c(y) + \alpha f_t(y) \} dy \quad (3)$$

したがって、 R は $R(\omega_c, \omega_t, \alpha)$ という関数であるが、一般に α は 10^{-2} から 10^{-4} のオーダーで十分小さく、しかも $\omega_t \gg \omega_c$ なので、区間「 $-R, R$ 」では第1項が支配的となる。このため、RNP値はほぼ中心部の分布 $f_c(y | \omega_c)$ だけで定まる。

3.2 水平重量確率

いま、図1のように、経路間隔 S_y の平行経路を飛行中の1対の航空機を考える。このとき、 λ_y を航空機の横幅として、航空機対が横 (y 軸) 方向で重なる確率 (水平重量確率) は、次式で与えられる。

$$P_y(S_y) = \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} C(z) dz \quad (4)$$

ただし、 $C(z)$ は次式で与えられる。

$$C(z) = (f * f) \quad (5)$$

ここで、*印は畳み込み積分を意味する。すなわち

$$(f * g) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) g(y+z) dy \quad (6)$$

である。pdfが(1)式の場合、 $C(z)$ は次式で表せる。

$$C(z) = (1-\alpha)^2 (f_c * f_c) + \alpha(1-\alpha) \{ (f_c * f_t) + (f_t * f_c) \} + \alpha^2 (f_t * f_t) \quad (7)$$

通常 $S_y, \omega_c, \omega_t \gg \lambda_y$ なので(4)式は次式で近似される。

$$P_y(S_y) \approx 2\lambda_y C(S_y) \quad (8)$$

4. Flaxらの方法

4.1 RNP値を定めるための考え方

(3)式からわかるように、航法誤差の分布が中心部と裾部とから成ると仮定すると、95%が含まれるRNP値 R は殆ど中心部で定まる。これに対して、航空路システムの衝突危険度は水平重量確率に比例するが、これは航法誤差分布の裾部で殆ど決まる。

図1の平行経路の場合において、 $P_y(S_y)$ は、 $1 \gg \alpha$ かつ $\omega_t, S_y \gg \omega_c$ のとき、(7)式の第1項と第3項は非常に小さく、 $\alpha(1-\alpha)$ を係数とする第2項で殆ど定まる。 ω_c があまり小さくないときは、(7)式の第1項も無視できなくなるのは明らかである。通常、第3項は第2項に比べて非常に小さい。

横軸に R (ほぼ ω_c で定まる) をとり、縦軸を $P_y(S_y)$ の対数で表した $P_y(S_y)$ の形の一例を示すと図2のようになる。 R をどんどん小さくしてゆくと、ある値の近傍から減少が非常にゆるやかになることが予想できる。

$P_y(S_y)$ は殆ど裾部の分布の特性で決まるので、 R の値を必要以上に厳しく (小さく) しても、改善の効果はあまり期待できない。他方、安全性がほぼ不変であれば、航空機側の負担を軽くするためにも、RNP

はできるだけゆるい要件となることが望ましい。

そこで、改善効果と負担とを考慮し、中心部の分布のパラメータ ω_c を減少させた効果が現れるギリギリの限界値を RNP 値としようとするのが Flax⁽¹⁾ らの考え方である。

4.2 Flax らの用いた仮定

洋上空域の最もゆるい RNP 値として、Flax らにより RNP 20 が提案⁽¹⁾された。これは以下の仮定に基づいている。

- i) 航法誤差の *pdf* は、混合型両側指数 (Double Double Exponential : DDE) 分布で、次式で与えられる。

$$f(y) = (1-\alpha)(2\lambda_1)^{-1} \exp(-|y|/\lambda_1) + \alpha(2\lambda_2)^{-1} \exp(-|y|/\lambda_2) \quad (9)$$

ただし、 λ_1 は定数、 $\lambda_2 = 45\text{NM}$ 、 $\alpha = 0.0003$ (または 0.0008) とする。

- ii) 95%含有率を与える RNP 値 R を次式で近似する。

$$R \approx -\lambda_1 / \ln(1-0.95) \quad (10)$$

- iii) 航空機の横幅 $\lambda_y = 0.029\text{NM}$ 。

DDE 分布のパラメータは、北大西洋における航法誤差分布の観測結果を参考にして設定した。ちなみに 1980 年代の 8 年間の観測結果では $\lambda_2 = 46.41\text{NM}$ 、 $\alpha = 0.000316^{(1)}$ である。

5. 計 算

5.1 DDE モデル

航法誤差の *pdf* として (9) 式を仮定すると、(7) 式は次のようになる。

$$\begin{aligned} C(z) = & \{ (1-\alpha)/2\lambda_1 \}^2 (|z| + \lambda_1) \exp(-|z|/\lambda_1) \\ & + \{ \alpha(1-\alpha)/(\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \} \{ \lambda_2 \exp(-|z|/\lambda_2) - \lambda_1 \exp(-|z|/\lambda_1) \} \\ & + (\alpha/2\lambda_2)^2 (|z| + \lambda_2) \exp(-|z|/\lambda_2) \end{aligned} \quad (11)$$

Flax らは R と λ_1 の関係として、(10) 式の近似を用いたが、ここではより現実に計算する。

まず、(9) 式を (2) 式に代入して、RNP 値の条件を求める。 λ_2 は与えられているものとし、 λ_1 を未知変数として、満たすべき方程式は

$$F(\lambda_1) = (1-\alpha) \exp(-R/\lambda_1) + \alpha \exp(-R/\lambda_2) + 0.95 - 1 = 0 \quad (12)$$

となる。これを Newton 法で解く。 λ_2 の項を無視し、初期値として次の λ_1^* を用いる。

$$\lambda_1^* = -R / \ln(1-0.95) \quad (13)$$

解くべき関係式は

$$\lambda_1 = \lambda_1^* - F(\lambda_1) / F'(\lambda_1) \quad (14)$$

である。ただしこの導関数は

$$F'(\lambda_1) = \{ (1-\alpha)R/\lambda_1^2 \} \exp(-R/\lambda_1) \quad (15)$$

で与えられる。(15) 式を λ_1 が十分収束するまで計算して λ_1 の数値解を求めた。この λ_1 を用いて $P_y(S_y)$ を計算して、 R と $P_y(S_y)$ の関係を調べた。

5.2 N-DE モデル

実際の航法誤差の中心部の分布は必ずしも両側指数 (Double Exponential : DE) 分布とは限らない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。空域内を飛行する航空機の型などが一樣な場合など、DE 分布ではなく正規 (Normal : N) 分布でより良く近似できる場合もあり得る⁽⁶⁾。

そこで、航法誤差のモデルとして DDE 分布の中心部を正規分布で置き換えた N-DE 分布を考える。N-DE 分布の *pdf* は

$$f(y) = (1-\alpha)(2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\{-y^2/(2\sigma^2)\} + \alpha(2\lambda)^{-1} \exp(-|y|/\lambda) \quad (16)$$

で与えられる。ここで $0 < \alpha < 1$ 、 $\lambda > \sigma > 0$ である。なお、DDE モデルの場合と比較するため、以後、 $\lambda = \lambda_2$ とする。

(16) 式の畳み込み積分は

$$C(z) = \{ (1-\alpha)^2 / (4\pi\sigma^2)^{1/2} \} \exp(-z^2/4\sigma^2) \\ + \{ \alpha(1-\alpha)/\lambda \} \exp(\sigma^2/2\lambda^2) \{ \phi(k_1) \exp(-z/\lambda) + \phi(k_2) \exp(z/\lambda) \} \\ + (\alpha/2\lambda)^2 (|z| + \lambda) \exp(-|z|/\lambda) \quad (17)$$

ただし

$$\phi(u) = \int_{-\infty}^u (2\pi)^{-1/2} \exp(-t^2/2) dt \quad (18)$$

$$k_1 = (z - \sigma^2/\lambda)/\sigma \quad (19)$$

$$k_2 = -(z + \sigma^2/\lambda)/\sigma \quad (20)$$

である。RNP 値が R のとき、 σ の値は次の方程式を解いて求めた。

$$G(\sigma) = 2(1-\alpha)\phi(R/\sigma) + \alpha\{1 - \exp(-R/\lambda)\} - 0.95 = 0 \quad (21)$$

この導関数は

$$G'(\sigma) = -\{2R(1-\alpha)/\sigma^2\}(2\pi)^{-1/2} \exp(-R^2/2\sigma^2) \quad (22)$$

となる。次式から Newton 法で σ を求める

$$\sigma = \sigma^* - G(\sigma^*)/G'(\sigma^*) \quad (23)$$

なお、初期値として $\sigma^* = R/2$ を使い、一定の精度で収束するまで逐次計算を行った。

6. 計算結果

6.1 DDE モデルによる結果

図 3 に $Py(Sy)$ の計算手順を示す。航法誤差分布のパラメータとして、 $\lambda_2 = 45\text{NM}$ 、 $\alpha = 0.0003$ 、 $\lambda_1 = 0.029\text{NM}$ の場合の $Py(Sy)$ と R の関係を調べた。計算プログラムは BASIC で作成し、パソコンで実行した。表 2 は Flax らが用いた (13) 式による近似値 λ_1^* と Newton 法で求めた現密な λ_1 を示す。結果には約 1~2% 程の差がみられる。表 2

の $Py(Sy)$ の計算には (8) 式の近似式 ($2\lambda_1 C(Sy)$) を用いた。この近似による誤差は相対値で 10^{-5} 以下であった。以後、 $Py(Sy)$ の数値計算にはすべてこの近似式を用いた。

図 4 には DDE モデルに対する R と $Py(Sy)$ との分布を示す。 R を 1NM 毎に変化させて計算した。結果は Flax らの結果と一致した。

6.2 N-DE モデルによる計算結果

図 5 は N-DE モデルの計算結果である。裾部のモデルパラメータは、比較のため、DDE モデルと同じ ($\lambda_2 = 45\text{NM}$ 、 $\alpha = 0.0003$) とし、中心部の分布は正規分布とした。 R は 1NM 毎に変化させた。RNP 値、すなわち、 R と $Py(Sy)$ との関係をプロットした曲線の傾き $dPy(Sy)/dR$ が 0 に近くなる ((7) 式の第 2 項

図 3 計算手順の概要

表2 DDE分布に対する $Py(Sy)$ の計算例
($Sy=60\text{NM}$, $\lambda_1=0.029\text{NM}$, $\lambda_2=45\text{NM}$, $\alpha=0.0003$)

$R[\text{NM}]$	$Sy[\text{NM}]$	$Py(Sy)$	$\lambda_1 [\text{NM}]$	$\lambda_1^* [\text{NM}]$
2.0	60	1.0193E-07	0.668	0.666
4.0	60	1.0200E-07	1.335	1.333
6.0	60	1.0211E-07	2.003	2.000
8.0	60	1.0229E-07	2.670	2.666
10.0	60	1.0373E-07	3.338	3.333
12.0	60	1.2045E-07	4.006	4.000
14.0	60	2.1528E-07	4.673	4.667
16.0	60	5.3678E-07	5.341	5.334
18.0	60	1.3117E-06	6.009	6.001
20.0	60	2.7913E-06	6.676	6.668
22.0	60	5.1888E-06	7.344	7.335
24.0	60	8.6377E-06	8.011	8.003
26.0	60	1.3179E-05	8.679	8.670
28.0	60	1.8769E-05	9.347	9.338
30.0	60	2.5303E-05	10.014	10.005

図 4 DDE モデルの場合の RNP 値と $Py(Sy)$

表3 N-DEモデルについての $P_y(Sy)$ の計算値
($Sy=60$ NM, $\lambda_y=0.029$ NM, $\lambda=\lambda_2=45$ NM, $\alpha=0.0003$)

R[NM]	Sy[NM]	$P_y(Sy)$	σ^* [NM]	σ [NM]
2.0	60	1.0194E-07	1.000	1.019
4.0	60	1.0202E-07	2.000	2.039
6.0	60	1.0215E-07	3.000	3.058
8.0	60	1.0233E-07	4.000	4.077
10.0	60	1.0257E-07	5.000	5.097
12.0	60	1.0286E-07	6.000	6.117
14.0	60	1.0325E-07	7.000	7.137
16.0	60	1.0627E-07	8.000	8.156
18.0	60	1.4471E-07	9.000	9.176
20.0	60	3.8353E-07	10.000	10.196
22.0	60	1.2450E-06	11.000	11.216
24.0	60	3.3827E-06	12.000	12.236
26.0	60	7.4686E-06	13.000	13.257
28.0	60	1.3953E-05	14.000	14.277
30.0	60	2.2943E-05	15.000	15.297

図5 N-DEモデルの場合のRNP値と $P_y(Sy)$

が支配的になる)点の値は図4(DDE分布)のそれと較べて大きいことがわかる。

表3には、 $Sy=60$ NMのときの、 $P_y(Sy)$ 、 λ_1 の計算値を示す。 σ はほぼ σ^* で近似できることがわかる。

6.3 臨界値の決定

R と $P_y(Sy)$ の特性曲線で、どの値をもって中心部の影響が現れる限界とみなすかが問題となる。Flaxは1NMあたりの $P_y(Sy)$ の変化率($=dP_y(Sy)/dR$)が0.01となる点と0.1となる点をもって評価した。この他、中心部と裾部の影響を分ける値として、参考までに、微分係数の変化率($d^2P_y(Sy)/dR^2$)が最大となる点を数値計算[付録1]で求めてみた。経路間間隔 Sy は北大西洋のMNPSで使用されている60NMと洋上空域で最も大きい120NMの二つの場合を想定した。

表4にDDEモデル、N-DEモデルについて数値計算により求めた値とFlaxの示した値を併記した。Flaxらの値は1NM単位で丸めてあるので、結果はDDEモデルの場合と同値のはずである。

6.4 裾部のパラメータの変化の影響

ここでは臨界値として、 $dP_y(Sy)/dR=0.1$ [NM⁻¹]となるとききの R の値(以後、RNP10Pと書く)を用いることにし、分布の裾部のパラメータ(λ_2 と α)を変えた場合の R の臨界値への影響を調べた。 $Sy=120$ NMのとき、 λ_2 と α を変数として、DDEモデルおよびN-DEモデルに対して、RNP10Pの変化を調べたものが図6および図7である。図中の■印が計算した点である。網目は各点を線形関数で平滑化したものである。これらから、調べた領域内では λ_2 、 α のRNP10Pへの影響は概ね小さいことがわかる。なお、図は示さないが、 $Sy=60$ NMの場合もほぼ同様の变化特性が見られた。

7. 考 察

表4にみられるように、仮定した λ_2 、 α に対して最適なRNP値は $dP_y(Sy)/dR=0.1$ となる点でみると、 $Sy=60$ NMでは、N-DE分布の場合はDDE分布の場合(またはFlaxの値)よりも約1.5倍大きな値となっている。 $Sy=120$ NMのときも約1.5倍大きい。これから、裾部のパラメータが同一の場合、中心部の分布にDDEモデルを仮定して求めたRNP値は、N-DEモデルを仮定した場合に較べて、厳しい(小さな)値となることが分かる。

図6 RNP値(RNP10P)と裾部パラメータの関係(DDEモデル)。
(RNP10Pは $dP_y(Sy)/dR=0.1$ となる R の値)

図7 RNP値(RNP10P)と裾部パラメータの関係(N-DEモデル)。
(RNP10Pは $dP_y(Sy)/dR=0.1$ となる R の値)

表 4 の $S_y=120\text{NM}$ における RNP 値を考えると、N-DE 分布の場合の臨界値は 30NM から 35NM で、およそ RNP 30 に相当する。従って、もし、航法誤差の裾部のパラメータが今回仮定した値と同程度で、中心部の分布が N-DE 分布に従うような場合は、DDE 分布に基づいて定められた現在の RNP 20 よりももっとゆるい RNP タイプ (例えば RNP 30) を作成する必要があることになる。

本来は RNP 30 で足りる空域を RNP 20 とした場合、当該空域内を RNP 20 を満たす航空機を飛行させることは、安全性の観点からは問題がない。しかし、RNP 30 の能力しか持たない航空機はその空域を飛行できなくなる。

一般に、必要以上に空域の RNP 値を厳しくすれば、これを満たすために、航空機に新たに搭載航法装置を付加したりする費用がかかる。このため、費用・効率の観点からは一般に得策でない。従って、今後、新しい RNP 値 (タイプ) を設定する際には、対象空域内の航法誤差の分布型について十分検討するとともに、安全性と費用 / 便益効果に配慮した、適切な RNP タイプを設定することが肝要と考える。

8. むすび

本論文では、Flax らが提案した平行経路間隔と航法性能要件 (RNP) の値とを関係付ける方法について再検討するとともに、航法誤差分布の中心部が正規分布に従う場合の RNP 値について考察した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) Flax らと独立に DDE モデルを用いて行った計算結果は彼らの計算結果と一致した。分布の中心部のパラメータ λ_1 を $\lambda_1^* = -R/\ln(1-0.95)$ で近似した影響は非常に小さい。
- (2) N-DE 分布による計算結果では、 $P_y(S_y)$ と RNP 値 R との関係を表す曲線は DDE 分布から求めた形と異なる。このため、RNP 値は DDE モデルから導かれた値よりも大きくなる。

この方法では、典型的な RNP 値は中心部の分布形に依存するため、場合に応じて適切なモデルを選ぶことが肝要と考えられる。

参 考 文 献

- (1) B.Flax and B.Colamosca, "RNP values for oceanic navigation", ICAO RGCSP WG/A-WP/11, London, September, 1992
- (2) Report of the fourth meeting of the special committee on future air navigation systems, ICAO Doc 9524, FANS/4, Montreal, 1988
- (3) Report of the eighth meeting of the review of the general concept of separation panel (RGCSP), ICAO RGCSP/8-WP/45, Montreal, April, 1993
- (4) 天井、長岡: "洋上航空路における横方向逸脱量の解析", 日本航海学会論文集、86、p75-83、1992
- (5) 天井、長岡: "洋上航空路における横方向逸脱量の解析-Ⅱ", 日本航海学会論文集、88、p235-242、1993
- (6) 長岡 栄: "航法誤差の観測分布形についての一考察", 電子情報通信学会技術研究報告 SANE 89-38、1989
- (7) 長岡 栄: "北大西洋空域における最低航法精度基準 (MNPS) とその考え方", 日本航海学会誌 78、p51-57、1983

表 4 中心部の影響が無視できる臨点の評価
 $\lambda_2=45\text{NM}$, $\alpha=0.0003$

Sy (NM)	モデル	R (NM)	
		$dPy(Sy)/dR$ 0.01	$d^2Py(Sy)/dR^2$ 0.1 最大点
60	DDE(Flax)	9	11
	DDE	9.5	11.5
	N-DE	14.9	16.7
120	DDE(Flax)	19	23
	DDE	18.9	23.2
	N-DE	29.8	33.7

[付録 1] $P_y(S_y)$ の変化率の数値計算

いま $P_y(S_y | R) = \Psi(R)$ と書くことにして、次の差分による近似式を用いた。

$$d\Psi/dR \approx \{\Psi(R+\Delta R) - \Psi(R)\}/\Delta R \quad (a-1)$$

$$d^2\Psi/dR^2 \approx \{\Psi(R+2\Delta R) - 2\Psi(R+\Delta R) + \Psi(R)\}/(\Delta R)^2 \quad (a-2)$$

ただし、 $\Delta R < 10^{-5}$ NM とした。

質 疑 応 答

巻島 勉：DDE が良いか N-DE が良いかは、実際に太平洋なり大西洋を飛んでいる航空機について観測すればわかるのではないですか。

長岡 栄：おっしゃるとおりです。どちらがよいかの判定は観測結果にかかっています。北大西洋では長年観測を続けていまして DDE 分布がよく合うとのこと。しかし、航空機の種類が一様な空域では中心部の分布は正規分布に近くなることも考えられますので、今回はその場合について考察したわけです。