ロラン・天測両船位の相対誤差について

和気 博嗣*・樽美 幸雄*

On the Relative Error between Ship's Positions
Obtained by Loran and Celestial Observation

H. Wake and Y. Tarumi

Abstract

Loran and celestial observation are widely used to fix a ship's position on the ocean. The authors have been studying the measurement error from the point of view of the relative error, which is the difference between Loran fix and celestial observation. The questionnaires were sent out to Shipping Companies of Japan.

The correlation was investigated between relative error and other factors with the technique of Multivariate Statistical Analysis. The analyzed results thus obtained is presented.

1. は じ め に

近年、高速船・自動化船が次々に建造され、それに伴って船行援助システムとしての航海衛星の利用やオメガ局の設置など新しい方式が有効に利用されつつある。

しかし一方、従来の天測、ロラン等の navigation aids は海域、天候、その他種々の条件によって、それらを利用するうえで制約は受けるにしても、依然として有力なる航海情報として活用されており、特に大洋中における船位測定の手段としては、天測とロランが現在最も多く利用されているであろう。

われわれはかねてよりロランによる船位を天測による船位と比較することによって、これらの誤差の検討をすすめてきた[1], [2]が、このほど新たに日本の船会社に依頼していたデータを整理・分析することができたのでその結果を報告する。

ロランによる測定船位に生ずる誤差の原因としてはいろいろのものが考えられるが、特に電波の伝搬経路において生ずると考えられる誤差は不安定な要素が多く、これらを定量的に取出すことはむづかしい。さらに天測によるものとロランによるものというように測定方法が異なる二つの船位を比較する場合に注意すべきは資料の客観性、普遍性であり、二つの方法の優劣を断定しようとする場合には現時点では種々の問題があつて無理[3]であろうが、本論文の目的は天測とロランの精度の優劣を論じるものではなく、あくまでも精度的には安定し、割りに古くから理論的にも確立されている天測船位とロラン船位との差（これを相対誤差と呼ぶ）を比較することにより、今回得られたデータをもとにロランAによる測定船位の測定条件による精度の違い等を見出して検討し吟味したものである。

各社に依頼したデータ記入表は各社海務部宛（29社）に合計 2,100 枚を発送し、各船に配布さ

* 神戸商船大学（神戸市東灘区深江南町5丁目1番1号）

れ、そのうち回収されたものは77枚(10社)であつた。(1枚の用紙に10コの測定データが記入できる。)

2. 資料および分析の方法

依頼したデータ記入表の調査項目としては前回[1] とほぼ同様のものであるが、その概要を述べると、

1) 天測に関しては

- a. 測定時刻 b. 測定位置 c. 天体名 d. 水平線の状態 e. 位置の線の要素
f. 船の針路・速力(当時の)

2) ロラン測定に関しては

- a. 測定時刻 b. 測定位置 c. 組局名 d. 地表波・空間波の別
e. テーブルかチャートか f. パルス信号判別の難易 g. 空電の状態

3) その他参考として

- a. 航路 b. 船名および総屯数 c. 測定者の職階 d. 海上経歴年数

などが調査項目として挙げてある。

今回入手したデータは全部で482コあつたがそのうち要件を満たさないものが61コ(天測位置が無記入のもの、ロラン測定ができなかつたものなど)があつたため、結局421コのデータについて整理し、さらに天測の時刻とロラン測定時刻の間隔が1時間以上になるもの、ロラン組局が共通の局をもたないもの及び3σ法により棄却したものを除いて276コの資料について分析を行なつた。

天測船位とロラン船位の相対誤差を計算する場合に、天測位置をロラン測定 of 中央時刻まで当時の船の針路、速力によつて転位をし、そのうえで二点間の距離(相対誤差)を計算した。転位間隔は最高46分、平均4.8分であつた。なおこれら誤差量の計算ならびに各項目別による平均値・分散の計算、船位の確率密度および多変量解析の計算等は全て本学のTOSBAC 3400を使用した。

従来ロラン船位の精度を論ずる場合にはその船位の確率密度が重視されてきており、その意味において前回[1]の報告ではロラン船位と天測船位との相対誤差がロラン船位確率密度と線型で単一な相関をもっているという仮定のもとに単変量解析の方法によつて検討をすすめてきたが、今回はデータ数もかなり多いので多変量解析すなわち重回帰分析の技術[4], [5]を導入し、主として相対誤差 Y をロラン船位確率密度 X_1 と天測船位確率密度 X_2 との二変数で説明する方法を試みた。つまり

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + e \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係における $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ なる偏回帰係数を求めて、相対誤差 Y の回帰方程式を得ようとした。(1)式は形式上あくまで線型の関係式であるが、説明変数 X_1, X_2 のところにそれぞれの平方根、対数値などを代入することにより、多角的な検討を加えてみた。また単に船位の確率密度との相関をみるばかりでなく、 X_1, X_2 にはその他の要素たとえば天測の方法、水平線の状態、パルスや空電の状態などを説明変数として組合せて回帰方程式を求めて検討してみた。ここでロラン組局による船位の確率密度は

$$PDL = k \{ \sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 - \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ただし } k = 0.0724 / (2b)^2$$

$$b = 0.081 \cdot \Delta t$$

φ_1, φ_2 は測者よりみたロラン局の夾角

で計算したものであり[6], 三本以上のロラン位置の線を用いた場合は確率密度の高い二つの組局のものを採用した。一方天測の位置の線による船位の確率密度は,

1) 2本の位置の線の場合

$$PDC = \frac{0.0724}{R_1 \cdot R_2} \sin \theta \dots \dots \dots (3)$$

2) 3本の位置の線の場合

$$PDC = \frac{0.0724}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3} \sqrt{R_3^2 \sin^2 \theta_1 + R_2^2 \sin^2 \theta_2 + R_1^2 \sin^2 \theta_3} \dots \dots \dots (4)$$

ただし θ, θ_i ; 位置の線の交角 ($i=1, 2, 3$)

R_i ; 位置の線の中央誤差 ($i=1, 2, 3$)

の各式により計算したものである。また太陽隔時観測における転位した位置の線の中央誤差 R は

転位前におけるその位置の線の中央誤差 $\dots \dots \dots R_0$

転位のために針路の左右方向に生じた中央誤差 $\dots \dots \dots R_s$

転位のために針路の前後方向に生じた中央誤差 $\dots \dots \dots R_z$

転位に要した時間 (1時間単位) $\dots \dots \dots t$

位置の線と転位針路とのなす角 $\dots \dots \dots \varphi$

として

$$\left. \begin{aligned} R_s &= \sqrt{0.15 t + 0.031 t^2} \cos \varphi \\ R_z &= \sqrt{0.21 t + 0.0081 t^2} \sin \varphi \\ R &= \sqrt{R_0^2 + R_s^2 + R_z^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

により計算した[7]。

3. 分析の結果

3.1 資料全体について

分析を行なった276コ of 全資料についての集合は表1に示すとおりである。そこでまず、この全体の資料について、従来のように相対誤差がロラン船位確率密度と線型で単一な関係にあるとして回帰直線を求めると(6)式のようになる。ただしここで、 Y は相対誤差, X_1 はロラン船位確率密度, r は相関係数, e は誤差項である。

$$\left. \begin{aligned} Y &= 0.055 X_1 + 2.427 \\ r &= 0.012, \quad e = 1.468 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

同様に Y と天測船位確率密度 X_2 の関係を求めると(7)式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} Y &= -0.467 X_2 + 2.744 \\ r &= 0.096, \quad e = 1.462 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

(6)式において相関係数は0.012できわめて小さく、しかも X_1 の係数が正であつてこれは理屈に合わない。(7)式では r の値はやや大きくなるがそれでも相関はきわめて低い。

このような結果から今回試みたものが(8), (9), (10)式に示す二変量線型および二変量非線型の解析である。

表 1

資 料 数 N	相加平均値 M_0	中央 誤 差 R_0	標 準 偏 差 S
276	2.45	0.059	1.463

「二変量線型」

$$\left. \begin{aligned} Y &= -0.029X_1 - 0.473X_2 + 2.763 \\ r &= 0.097, \quad e = 1.464 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

「二変量非線型」

$$\left. \begin{aligned} \text{(例1)} \quad Y &= -0.141\sqrt{X_1} - 0.862\sqrt{X_2} + 3.201 \\ r &= 0.118, \quad e = 1.461 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{(例2)} \quad Y &= -0.061 \log X_1 - 0.373 \log X_2 + 2.142 \\ r &= 0.147, \quad e = 1.455 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、説明変数を X_1 と X_2 の二変量として Y を表わせば(8)式となり、 r は(7)式と大差はないが X_1 も含めてその符号も理屈に合ったものとして説明がつく。また X_1, X_2 に平方根、対数値を入れて相関を求めると(9)式および(10)式のようになり、わずかではあるが r は増加し、 e は減少していく傾向にある。

ここで単に船位の確率密度との相関をみるだけでなく、相対誤差に影響をおよぼすと思われる他の要素すなわち天測の方法、水平線の状態などを説明変数として天測船位確率密度と組合せて相対誤差を説明すると、その相関係数の変化は図1に示すようになった。図1で天測およびロラン船位の確率密度以外の説明変数には、三段階あるいは四段階に分類したものをダミーとして1, 2, 3, 4の値を仮りにつけただけであるから、説明変数として関数形を変える意味はなく、従って水平線の状態、天測の方法などについては全て一次(線型)のものとして計算してある。

この図をみてわかるように、ロラン船位確率密度のみで相対誤差を説明する場合に、関数形を種々変えてみても全体にきわめて低い相関しか得られない。また天測船位確率密度のみで相対誤差を説明するのに比べて、説明変数を増せば相関係数は全体に大きくなる。さらに二つの説明変数の組合せでは、天測船位確率密度とロラン船位確率密度で説明するよりも、天測船位確率密度と水平線の状態を説明変数に使った方がはるかに相関係数としては大きくなっている。これを前述と同様の回帰方程式で表わせば、

$$\left. \begin{aligned} Y &= -0.406 \log X_2 + 0.400 X_3 + 1.338 \\ r &= 0.218, \quad e = 1.436 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

となる。ただし X_3 は水平線の状態を表わすランクづけで、水平線の状態が

- 極良の場合…………… 1
- 良の場合…………… 2
- 可の場合…………… 3
- 不可の場合…………… 4

とおいている。

もう一つ図1からいえることは、船位の確率密度を説明変数とする場合に確率密度の値を一

図1 関数型及び説明変数の組合せによる相関係数の変化

次型としておくよりも、平方根の形あるいは対数の形として変数とする方が相関係数の点からみれば高くなるということである。船位の確率密度を P とすれば、本来 $P=ke^{-x^2}$ という型をとることを考えれば、対数あるいは平方の形をとるのが妥当であるということもできる。

さらに相関係数のより高い、誤差項の小さい回帰方程式を得るためには、説明変数を三つ、四つと増し、最終的には相対誤差に影響を与える要素を全て含んだ方程式を作り出せばよいのであるが、本研究では計算機容量の問題もあつて説明変数は二変量にとどめた。説明変数を増す場合に注意すべきは、説明変数相互間の相関が高いものは、偏回帰係数の有意性が失なわれるので一つにまとめてやる必要がある。その意味で説明変数相互間の相関を求めてみると表2のようになる。

表2 説明変数相互間の相関係数

説明変数	天測船位確率密度 PDC	ロラン船位確率密度 PDL	主局と測点間距離 M-O	船の速力 SPD	測者の海上経歴 CAR	天測の方法 天体別	水平線の良否 水平線	テーブルかチャートか T or C	パルス判別の難易 パルス	空電の状態 空電	地表波か空間波か G or S
P D C											
P D L	0.190										
M — O	0.181	0.517									
S P D	0.122	0.099	0.068								
C A R	0.410	0.200	0.139	0.282							
天 体 別	0.938	0.222	0.204	0.118	0.447						
水 平 線	0.169	0.075	0.044	0.193	0.120	0.206					
T or C	0.152	0.024	0.012	0.203	0.222	0.105	0.050				
パ ル ス	0.247	0.228	0.149	0.112	0.234	0.239	0.056	0.344			
空 電	0.349	0.245	0.213	0.204	0.251	0.337	0.193	0.264	0.672		
G or S	0.345	0.494	0.493	0.056	0.313	0.358	0.013	0.067	0.262	0.284	

表2で右上の空白部は対角線に対して対称な値がはいる転置行列であるから省略した。この表から相互の相関係数が0.5以上のものをひろつてみると、天測船位確率密度と天測の方法の0.938、ロラン船位確率密度と主局一測点間距離の0.517、パルスの判別難易と空電状態の0.672の三組があげられる。これらがお互に強い相関をもつことはうなずけるであろう。従つてこれらをいずれか一つに代表させれば、最終的には説明変数としては8コで、9次元の回帰方程式が得られれば一応満足のいく説明がつくものと考えられる。

3.2 各項目別による分類

ここでは各項目別に分類したものについて相対誤差の平均値、標準偏差および相関係数などを以下の表にまとめた。これらの表で、相関係数について“天測系相関係数”とは、説明変数に天測船位確率密度と水平線の状態を用いた場合の相関係数であり、“ロラン系相関係数”とは、ロラン船位確率密度とパルスの判別難易を説明変数に用いた時の相関係数を意味している。

3.2.1 天測の方法による分類 (表3)

この分類においては、太陽の隔時観測には転位に伴う誤差が介入し、二天体および三天体同時観測では日没前後の電波伝搬の不安定さによるロラン測定側の誤差が考えられるが、相関係

第3表 天測の方法による分類

	資 料 数 N	相加平均値 M_0	中 央 誤 差 R_0	標 準 偏 差 S	天測系相関 r_G	ロラン系相関 r_L
太 陽 隔 時	106	2.67	0.103	0.574	0.256	0.167
二 天 体 同 時	36	1.60	0.095	0.824	0.444	0.180
三 天 体 同 時	134	2.46	0.081	1.386	0.236	0.142

数をみれば全体に天測系の相関が強い。従つて隔時観測は、同時観測に比較して転位の誤差がひびいていると判断できる。資料の数に差があるが、二天体同時観測が三天体同時観測に比べて相対誤差が非常に小さく、天測系の相関も強いが、これはたまたま好条件の、測定者としても確信のある場合のデータが二天体同時観測に集まつたものと思われる。

3.2.2 水平線の状態による分類 (表4)

表4 水平線の状態による分類

	N	M_0	R_0	S	r_G	r_L
極 良	31	1.94	0.141	1.164	0.103	0.034
良	180	2.48	0.074	1.474	0.241	0.060
可	57	2.45	0.130	1.459	0.048	0.172
不 可	8	3.88	0.354	1.484	0.074	0.650

水平線の状態が良い場合には精度の良い天測位置が得られ、相対誤差の中でロランによる誤差が占める割合が大きいと考えられる。表4の相対誤差平均値をみれば、極良、良→不可と増加の傾向にあるが、良の場合から可にかけてこの関係が逆転している。ここで各系の相関を調べてみると、可、不可のランクではロラン系の相関が天測系相関よりも強くなっている。これは水平線の状態による変化よりもロラン測定要因による誤差が大きく影響しているものと思われる。

3.2.3 パルス判別の難易 (表5)

表5 パルス判別の難易による分類

	N	M_0	R_0	S	r_G	r_L
極 易	69	2.43	0.124	1.528	0.209	0.205
易	172	2.39	0.075	1.450	0.235	0.057
難	34	2.85	0.161	1.390	0.336	0.059
極 難	1	—	—	—	—	—

ロラン測定の側からみれば、パルスの判別が易い方が測定の精度はあがると考えられるが、平均値的には必ずしもそのようになっていない。相関係数をとれば全体に天測系の方が強いので、天測の方の要因が強いものと判断できるが、パルスの判別が難かしくなればやはりロラン測定の誤差は増加している。

3.2.4 空電状態による分類 (表6)

この分類は先に述べたように、パルス判別の難易との相関が比較的強いのであるが、全体にロラン系相関が低いこともあり、パルス判別の難易と同様に空電状態の良否がそのまま平均値その

表6 空電状態による分類

	N	M_0	R_0	S	r_G	r_L
極 良	55	2.40	0.132	1.450	0.254	0.131
良	172	2.49	0.076	1.480	0.188	0.047
可	47	2.42	0.144	1.461	0.327	0.197
不 可	2	—	—	—	—	—

他に数値としての傾向は表われていない。これらは測定者の個人的な良否の判定基準の差も含まれていて判断は難しい。

3.2.5 空間波・地表波による分類 (表7)

表7 空間波・地表波による分類

	N	M_0	R_0	S	r_G	r_L
地 表 波	220	2.51	0.068	1.506	0.223	0.156
地・空 混 合	30	2.19	0.130	1.034	0.407	0.351
空 間 波	26	1.98	0.139	1.027	0.147	0.261

この結果では、ロラン測定を行なったうち約80%は地表波を使用しての測定であり、これを空間波使用の場合と同じレベルで比較するのは妥当でないが、今回の結果および前回[1]の結果からいえば、空間波使用の度合いは少なくともそれをうまく利用できさえすれば空間波のみ、あるいは地表波との組合せで、かなり精度のよい測定ができるといえる。

3.2.6 テーブルかチャートか (表8)

表8 テーブルかチャートか

	N	M_0	R_0	S	r_G	r_L
テ ー ブ ル	142	2.50	0.087	1.530	0.308	0.138
チ ャ ー ト	134	2.34	0.076	1.303	0.234	0.142

ロランで船位を出す場合に、測定値からロランテーブルで位置を出したか、ロランチャートを使用したかの別で分類したのが表8であるが、一般にテーブルを使用した方が補間による誤差等が含まれにくく、精度的には良いと思われるのであるが、結果は逆にチャートで位置を出した方が誤差の平均値は小さくなっている。この原因は、他の誤差要因による影響があるためと、もう一つは使用者側からすれば案外チャートを使用する方が表の見間違いが少ない、計算のミスが少ないなどの点から精度的に良いものが得られるとも考えられる。

4. 結 論

以上のように相対誤差の観点から天測船位とロラン船位の誤差を吟味、検討してきたが、前述のように相対誤差は種々の誤差要因からなり、最終的にはそれら誤差要因となるものを全て含んだ回帰方程式を考えていかねばならない。今回は説明変数を二つに限って種々検討してみたが、それらの結果から次のような結論が得られた。

- 1) 全資料276コについては相対誤差の平均値は 2.45 ± 0.059 で標準偏差は1.463であった。
- 2) 船位確率密度の関数型としては相関係数で判断すると、対数の形をとるのが妥当である。

- 3) 二つの説明変数の組合せでは、相対誤差を説明するのに天測船位確率密度と水平線の状態を組合せるのが最も高い相関が得られた。
- 4) ロラン船位確率密度と相対誤差の間の相関は、関数型の如何にかかわらず全体にきわめて低い。
- 5) 各項目別の分類では天測系相関とロラン系相関という考え方を導入して吟味したが、これについても説明変数をさらに充実して検討する必要がある。
- 6) 今回の測定資料のうち、80%が地表波を使用してのデータであり、空間波のデータが少ないので断定はできないが、空間波の使用でも地表波に劣らぬ精度が期待できる。

なお、今回行なった多変量解析の方法は、ロラン天測両船位の相対誤差ばかりでなく、きわめて複雑な誤差要因をかかえているこの種の誤差の解析に対して、一般的に有効であると考ええる。

終りに、資料の依頼に快く応じて下さった各社海務部の皆様、多忙な船務の傍ら測定資料を作成していただいた航海士諸氏ならびに電算機のプログラミングについて有意なるご助言をいただいた本学の下条助教授に対して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 並川能正・樽美幸雄・笠原包道：天測船位とロラン船位について，日本航海学会誌第38号，（昭和42年10月）pp. 93
- [2] 樽美幸雄・和気博嗣：日本ペルシア航路におけるロラン C による船位について，神戸商船大学紀要Ⅱ類第16号（昭和44年3月）pp. 1
- [3] 平岩 節：天測，ロラン船位の選択について，航海第36号（昭和47年3月）pp. 22
- [4] 守谷栄一・井口晴弘：多変量解析とコンピュータプログラム，日刊工業新聞社，（昭和47年1月）pp. 5
- [5] 下条哲司：計算の経済 —そのⅠ サブルーチンSWEEPの例— 神戸商船大学紀要Ⅱ類第19号（昭和47年3月）pp. 59
- [6] 鮫島直人：船位誤差論，天然社，（昭和29年9月）pp. 192, pp. 217
- [7] 樽美幸雄：最適午前観測のための実用図表について，神戸商船大学紀要Ⅱ類第18号（昭和46年3月）pp. 1

〔質問〕

確率密度による両測位方式を比較する方法として，いちいち説明項を考え，各々の相関度を調べられたと解釈しました。確率密度は各位置の線の精度と交角によつて決定されるわけですが，等質化の過程で考慮された内容は，位置の線の精度に影響を及ぼす事項が主で，（勿論，密度の中には交角条件が入っていますが）交角問題が全くふれられなかつたので疑問に思つた。交角つっこみの確率密度であるならば，確率密度計算に用いた交角を示して頂きたいと思います。

（川本 文彦）

〔解答〕

位置の線の交角については，船位の確率密度を計算する場合に式に含まれています。すなわち，本文中の(2)式で $\frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2)$ および (3), (4) 式における θ が位置の線の交角です。各社に依頼したデータ記入表の項目で，測定時刻，測定位置，ロランの組局名，位置の線の要素として天体の計算方位角と当時の船の針路・速力などを記入してもらっているので，それらを使つて一つのデータについて，位置の線の交角を算出し，船位の確率密度を(2), (3), (4)式で計算しました。