

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

伊豆大島周囲におけるロランCの付加的二次係数の推定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮本, 佳則, 柿原, 利治, 宮崎, 唯史, 喜多澤, 彰, 小池, 義夫 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/199

伊豆大島周囲におけるロラン C の付加的二次係数の推定*

宮本佳則*¹・柿原利治*¹・宮崎唯史*²・喜多澤 彰*²・小池義夫*²

ESTIMATION OF ADDITIONAL SECONDARY FACTOR OF LORAN-C AROUND IZU OSHIMA ISLAND

Yoshinori Miyamoto*¹, Toshiharu Kakihara*¹, Tadashi Miyazaki*²,
Akira Kitazawa*² and Yoshio Koike*²

LOP (Line of Position) distortion of LORAN-C (Long Rang Navigation System-C) Northwest Pacific Chain (8930 chain) was investigated around Izu Oshima Island in 1997. The data of each LORAN-C secondary station of W (Okinawa Gesasi), Y (Hokkaido Tokachibuto) and Z (Korea Pohang) were observed by a research ship under her cruising. In LORAN-C nautical chart, the LOPs are derived theoretically assuming the ground wave propagating along the sea surface. But land such as island is contained in the propagation path, secondary factor (SF) or additional SF (ASF) occurs due to the change of earth impedance and this leads to the LOP distortion. ASF is caused for a rugged undulation. Therefore the LOP distortion which is often seen at circumference of island, is influenced by ASF. From a result of observation, ground wave of LORAN-C, which propagates over the island, produced large local error by the complicated topography of Oshima Island. And the LOP error caused by ASF could be estimated clearly. In this paper, ASF observed around Oshima Island and the influence of error for LORAN-C positioning accuracy is discussed.

Key words: LORAN-C, LOP, Secondary factor (SF), Additional SF (ASF), Position accuracy

1. はじめに

ロラン C は、主局と二次局を焦点とする双曲線を利用する電波航法システムである。主局と二次局から受信点までの電波伝搬時間差 (TD: Time Difference) で表された位置の線 (LOP: Line of Position) を 2 本利用して位置を決定する。搬送波には、地表波パルス信号が安定している 100 kHz¹⁾ を使用しているため位置の信頼性や再現性が高く漁船などに広く普及している。ロラン A とオメガが廃止された現在、我が国の保有する唯一の長距離電波航法システムがロラン C である。最近、急速に普及している GPS (Global Positioning System) は、本来アメリカ合衆国の軍事情に開発されたものであり、将来にわたって民間利用が保証されているわけではない。

1994 年 10 月にアメリカ合衆国の管轄であった旧ロラン C 北西太平洋チェーン (9970 チェーン) から、新しい北西太平洋チェーン (8930 チェーン) に移管を完了し運用が開始されている。移管に伴い新しいチェーンは、主局をグアムから新島に移設し、二次局を沖縄の慶佐次 (W 局)、

* Received April 17, 1998.

*¹ Laboratory of Ocean System Engineering, Tokyo University of Fisheries, 5-7, Konan 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan (東京水産大学海洋システム工学講座).

*² Research and Training Vessel Shinyo-maru, Tokyo University of Fisheries, 5-7, Konan 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan (東京水産大学研究練習船神鷹丸).

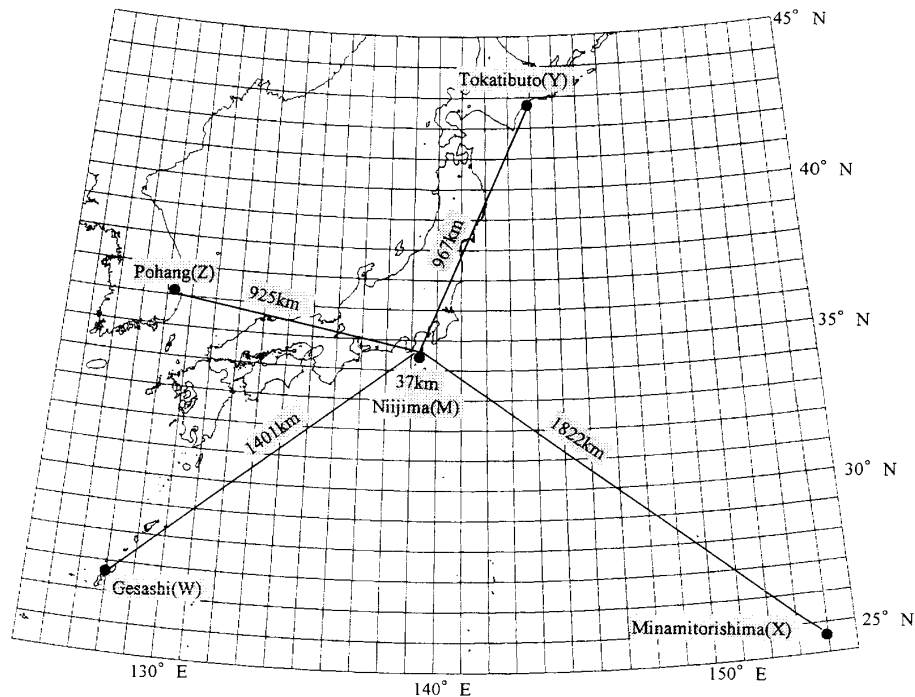


Fig. 1. Master and Secondary Stations disposition of LORAN-C Northwest Pacific Chain (8930 chain), and the ground wave propagating distance between each station and Izu Oshima Island.

南鳥島 (X局), 北海道の十勝太 (Y局) および韓国の浦項 (ポーハン, Z局) に配置する1主局と4二次局で構成される。主局と二次局の配置が大幅に変更されたため, 旧チェーンでの利用者と局間の幾何学的配置が崩れ, さらに利用者に至る地表波伝搬経路上の陸海の分布も異なることとなった。この変更は, 大地導電率の変化として伝搬速度に影響を及ぼし, 海上伝搬を前提に算出されている海図上の時間差 LOP に歪みを生じさせている。したがって, 2本の LOP の交点を位置としているロラン C の測位精度に大きく影響する¹⁾。地表波の導電率による伝搬遅延の影響は, 地質のみ (海上か陸上か) を考える二次係数 SF (Secondary Factor)²⁾, さらに地形によるものは付加的二次係数 ASF (Additional Secondary Factor)^{3), 4)} と呼ばれている。

これまで筆者らは, 局の移設に伴い漁場における測位精度の劣化が漁業者から指摘されている相模湾での測位特性やその精度評価を行った。その結果, 沿岸海域での LOP の歪み現象, 大地導電率の海陸の違いにより生じる SF, および地形による ASF による影響と遅延の回復効果 (Recovery Effect) を実測データから確認した⁵⁾。今回, 伊豆大島周囲で観測を行い, 島が LOP へ与える歪み現象, 特に伝搬経路の起伏による ASF の影響について若干の知見を得たので報告する。

2. 方 法

2.1 観測方法

Fig. 1 に新チェーンの局配置と各局から大島・相模湾に至る地表波伝搬距離と経路の概要を示す。慶佐次 (W局) と南鳥島 (X局) および新島主局 (M局) の大島までの伝搬経路は大部分が海上だけであるが, 十勝太 (Y局) は本州東北の太平洋沿岸を, ポーハン (Z局) は本州の山陰と中部山岳地帯を経由してくる陸海混合の伝搬経路となっている。大島は, 主局から約 37 km と至

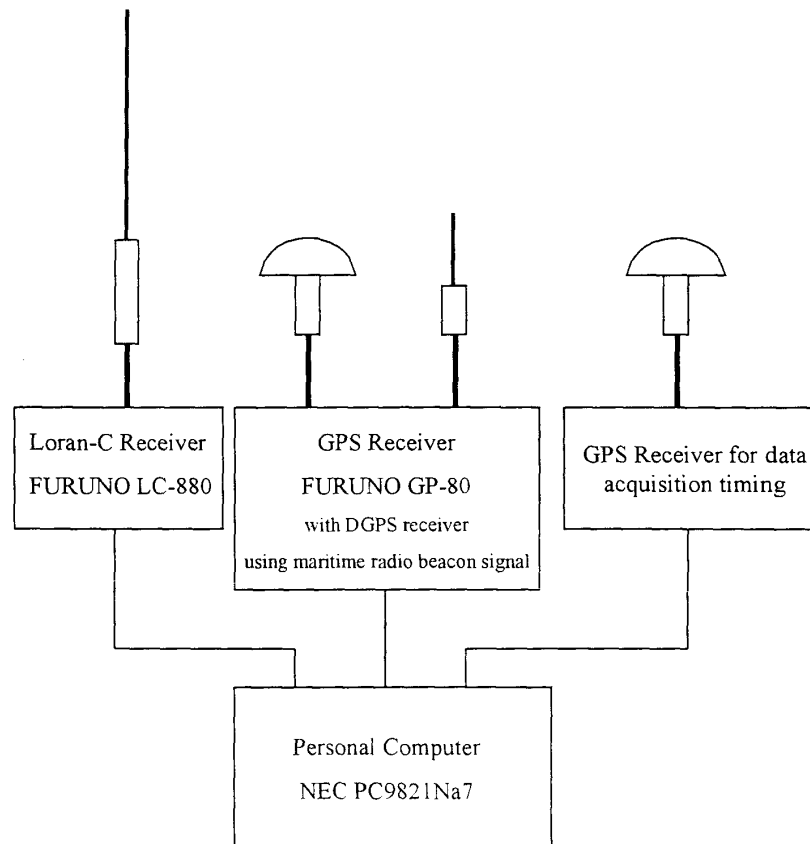


Fig. 2. Schematic diagram showing the observation equipment.

近距離にあるが、一方、X局からは約 1,822 km と離れているため、他の二次局に比べて X 局の受信信号強度の低下が予想される。柿原らの相模湾での観測⁵⁾でも、観測時 X 局の受信信号強度が弱くサイクルスリップを起こしている。本観測でも、観測地点到着前の各二次局の受信信号強度と SN 比を測定したところ、X 局は信号強度、SN 比とも低かった。そのため、X 局を使用しないで、3 つの二次局 (W, Y, Z) を用いて観測を行った。

観測は 1997 年 6 月 22 日、東京水産大学研究練習船青鷹丸 (167 t) を大島周囲を約 10 kt で航走させながら、その間データの連続収録 (データサンプリング間隔 5 秒) を行った。今回使用したロラン C 受信機は、同時に 2 局の LOP 値しか出力できないので、W-Y の組合せで大島を 1 周した後、局の組合せを Y-Z に変えてさらに 1 周した。記録したデータは、W, Y, Z 各局の LOP 値、および 2 局組合せによる緯度、経度の測位データなどである。観測中の天候は曇り時々雨で、海況は 2 で穏やかであった。また、ロラン C の精度評価の基準として、三浦半島の剣崎にある海上保安庁の DGPS 用中波ビーコン局から疑似距離補正信号を受信し、測位精度の高い DGPS 測位^{6~8)} データもロラン C と同時に記録した。使用した DGPS 受信機の測位精度は、東京での 24 時間連続観測の結果、標準偏差で 3.7 m であり、中波ビーコンのサービスエリア内に位置する大島周囲においてもロラン C 評価の基本位置として十分な精度を有していることを確認済みである。ロラン C および DGPS の位置は、いずれも WGS-84 測地系を使用した。Fig. 2 に観測装置のブロック図を示す。

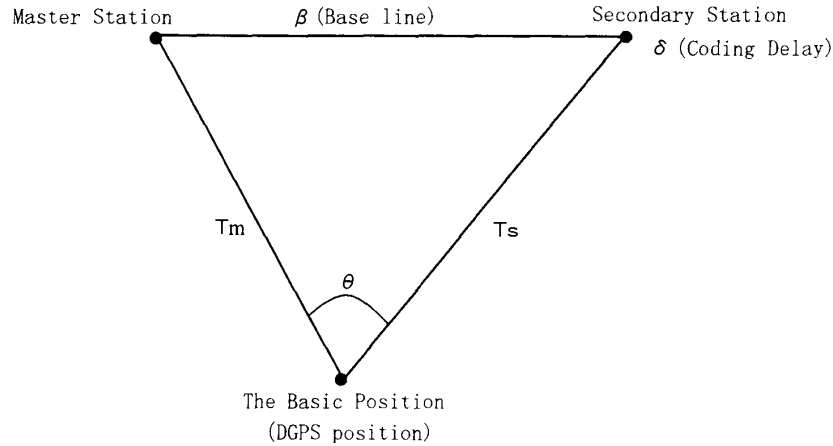


Fig. 3. The relation of geometrical disposition among a basic position calculated the theoretical LOP and Master/Secondary Stations.

2.2 大島伝搬で生じた ASF の推定方法

ロラン C 測位精度を評価するにあたり、青鷹丸で観測された DGPS 測位データを基本位置として、その位置における理論 LOP 値を計算し、理論値と実測されたロラン C の LOP 値との差を求めてこれを LOP の誤差とした（理論 LOP 値の計算については付録 A を参照）。

基本位置（DGPS 測定位置）、主局および二次局の位置、基本位置における理論 LOP 値 (TD_c) の関係を示す（Fig. 3 参照）。式中の各要素は、マイクロセカンド (μs) の時間単位が使用される。

$$TD_c = \beta + \delta + T_s - T_m \quad (1)$$

ここで β は主・二次局間の基線長、 δ はコーディングディレイ、 T_s は二次局・基本位置間の電波伝搬時間、 T_m は主局・基本位置間の電波伝搬時間である。 β と δ は局ごとに精密計測がされた、あるいはあらかじめ定められた値であるので、電波伝搬経路とは無関係に常数として取り扱われる。

観測 LOP 値 (TD_o) は

$$TD_o = \beta + \delta + (T_s + \Delta T_s) - (T_m + \Delta T_m) \quad (2)$$

となる。ロラン C では海上を電波伝搬経路として理論 LOP 値を求めている。したがって、大地導電率が海に比べて低く、しかも起伏のある陸地が存在する場合 TD_o には、海陸混合伝搬により二次局・基本位置間における ΔT_s と、主局・基本位置間における ΔT_m の伝搬時間の遅延誤差を含む。本報では、さらに、これら ΔT_s 、 ΔT_m を、大地導電率の海陸の違いにより生じる二次係数 SF (Secondary Factor) と伝搬経路の起伏による付加的二次係数 ASF (Additional Secondary Factor) に分解して考えた。すなわち、

$$\Delta T_s = \Delta T_s (SF) + \Delta T_s (ASF) \quad (3)$$

$$\Delta T_m = \Delta T_m (SF) + \Delta T_m (ASF) \quad (4)$$

と表される。したがって、実測された LOP 誤差（時間差の誤差） ΔTD_o は、

$$\begin{aligned} \Delta TD_o &= TD_o - TD_c \\ &= \Delta T_s - \Delta T_m \\ &= \Delta T_s (SF) + \Delta T_s (ASF) - (\Delta T_m (SF) + \Delta T_m (ASF)) \\ &= \Delta T_s (SF) - \Delta T_m (SF) + \Delta T_s (ASF) - \Delta T_m (ASF) \end{aligned} \quad (5)$$

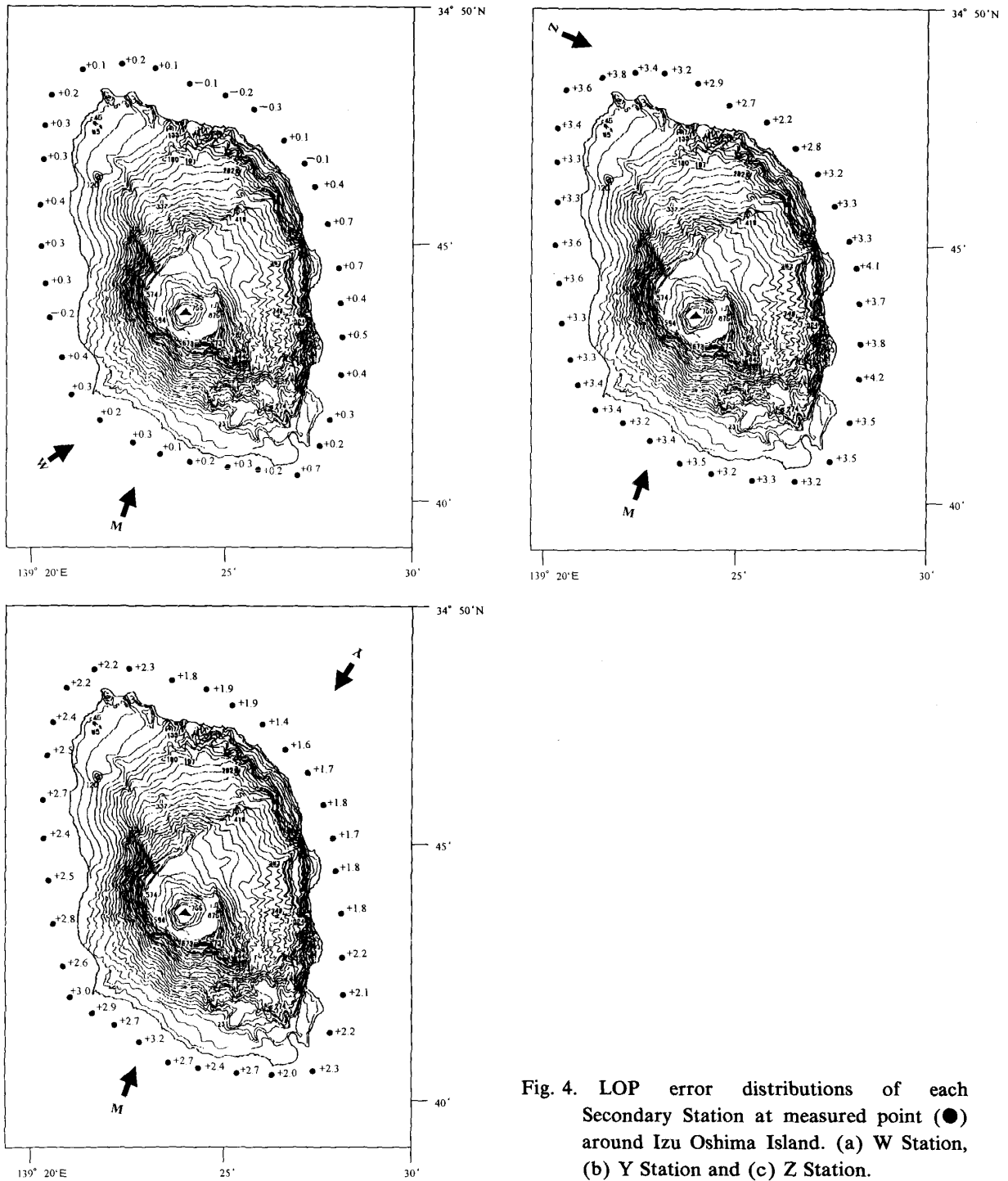


Fig. 4. LOP error distributions of each Secondary Station at measured point (●) around Izu Oshima Island. (a) W Station, (b) Y Station and (c) Z Station.

である。これから、実測時間差誤差 (ΔTD_0) から SF の誤差成分を差し引けば ASF の成分を求めることができる。

今、大島を伝搬する前に大島付近にすでに存在していた LOP 誤差が観測値から推定され、これが除去されたと仮定して、(5) 式の ΔTD_0 を大島伝搬によってのみ生じた誤差と読み替えた場合を考えてみる。大島伝搬では陸上伝搬距離が最大でも 10 km 余りであるから、SF によって生じ

た誤差量が無視すると、(5)式は、

$$\Delta TD_o(\text{oshima}) = \Delta T_s(\text{ASF, oshima}) - \Delta T_m(\text{ASF, oshima}) \quad (6)$$

と、ASFのみが関係する式に単純化できる。例えば $\Delta T_s(\text{ASF, oshima}) = 0$ の観測点、すなわち二次局電波が大島上を伝搬しないところでは、LOP 誤差は $-\Delta T_m(\text{ASF, oshima})$ のみとなり、主局電波の受ける ASF 量を見積もることができる。また、主局電波が大島上を伝搬しないところでは、LOP 誤差は $-\Delta T_s(\text{ASF, oshima})$ のみとなり、二次局電波の受ける ASF 量を見積もることができる。

本論文では、上述のような考えのもとで大島周辺の ASF 量を推定した。

3. 観測結果

Fig. 4(a), (b), (c) にそれぞれ大島周囲での観測点 (図中の●印) における W, Y, Z 各局の LOP 誤差 (μs 単位) の分布を示す。また、図には主・二次局からの電波の大島への進入方向が矢印で示してある。図には代表として 31 点の観測点だけを示した。これは、隣合う近辺の観測値の誤差傾向も同様であったことから、観測された大島周囲の誤差分布傾向が損なわれない範囲まで観測点数を絞って図示したからである。

大島周囲での各局の LOP 誤差は、Fig. 3 で示すように W 局が $-0.3 \sim 0.7 \mu\text{s}$ 、ついで Y 局が $1.4 \sim 3.0 \mu\text{s}$ 、Z 局は $2.2 \sim 4.1 \mu\text{s}$ であった。伝搬経路が海上だけである W 局の LOP 誤差が比較的小さい。しかし、電波伝搬経路に陸上部分を多く含む Y 局 (陸上伝搬距離約 518 km, Fig. 1 参照)、Z 局 (同約 400 km) は大きい LOP 誤差となっている。柿原らの相模湾での観測でも示されているように、陸上に沿って長距離伝搬する地表波が経路上での大地導電率の低下の影響を受け、SF が生じているためである。また、Z 局は主に伊豆半島の天城山系の起伏に富んだ地形に沿って伝搬し生じたと考えられる ASF による誤差が先の SF に加わり、さらに大きな LOP 誤差となっている。ただし、各局とも観測点による誤差の幅が大きく、主・二次局の電波進入方向と大島の地形の関係による影響が顕著である。

この時間差で表わされた LOP 誤差がどの方向へどの程度の距離的な歪みとなるのかを Fig. 5 (a), (b), (c) に示す (LOP 誤差の歪みベクトルへの変換は付録 B 参照)。LOP 歪みの方向は、観測点における LOP の接線方向に対して垂直な方向を示すが、誤差の正負により向きが反転する。よって、観測点付近での LOP 値増加側が正、減少側が負の方向となる。歪みの距離への換算は、観測点、主局、二次局の三者の相対的位置関係と LOP 誤差量で決定される。Fig. 5 (a) の W 局 LOP は、電波が島を通過した後である島の東部側で最大 450 m 程度歪んでいるが、通過前の西部側は歪みが比較的小さい傾向にあり、大島の影響を強く反映している。一方、前述したように長距離の陸上伝搬による SF のため、(b) 図の Y 局の場合は、比較的大きな歪みが生じている。島東側で LOP 歪み量が比較的小さく、逆に西側で大きくなり最大 400 m 程度の歪みを生じ大島の影響も見られる。Z 局 (c) 図では、長距離の陸上伝搬による SF のため、800 m 程度の歪みを全観測点で示している。

時間差で表した LOP 誤差値の絶対値が W 局よりも Y 局が大きいにも関わらず、距離に換算した歪み量ではほぼ同等の値となっている。これは、大島周囲の観測点から、主局と W 局をみた挟み角度が極端に小さくなるため、LOP 誤差が比較的小さくても LOP 歪みが大きくなるためである。また、Z 局のように LOP 誤差には $2 \mu\text{s}$ 程度の変動があるのに、歪み量にさほど影響が出ないのは、観測点が基線および基線延長付近に位置しているために誤差倍率の変化が激しく、大き

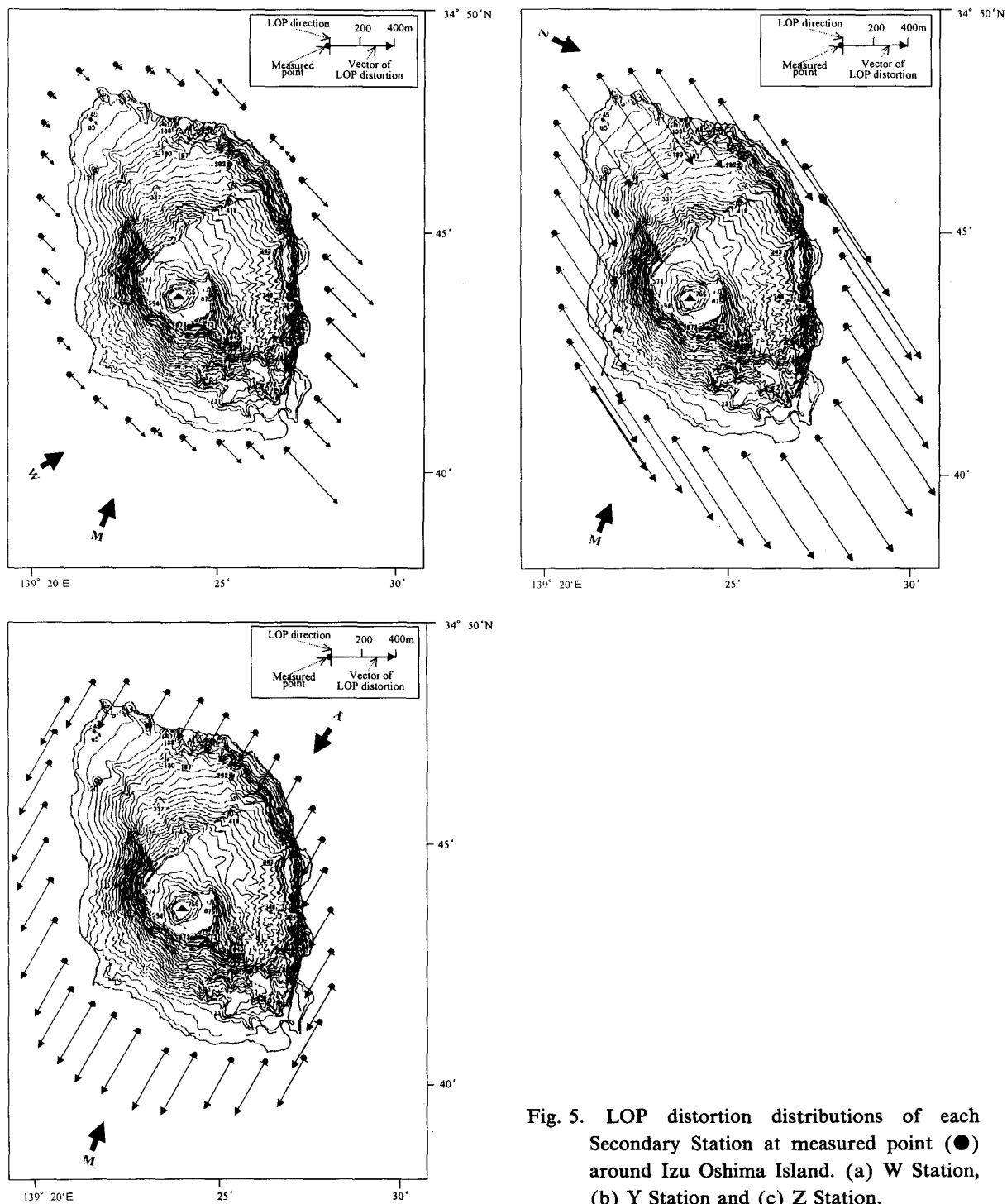


Fig. 5. LOP distortion distributions of each Secondary Station at measured point (●) around Izu Oshima Island. (a) W Station, (b) Y Station and (c) Z Station.

な LOP 誤差でも観測位置により $1\mu\text{s}$ 当たりの歪み量が小さくなることがあるためである。

4. 考 察

4.1 伝搬経路による LOP 誤差の検討

以上の結果からも、主・二次局の電波が大島を通過することにより、大きな LOP 誤差を生じ

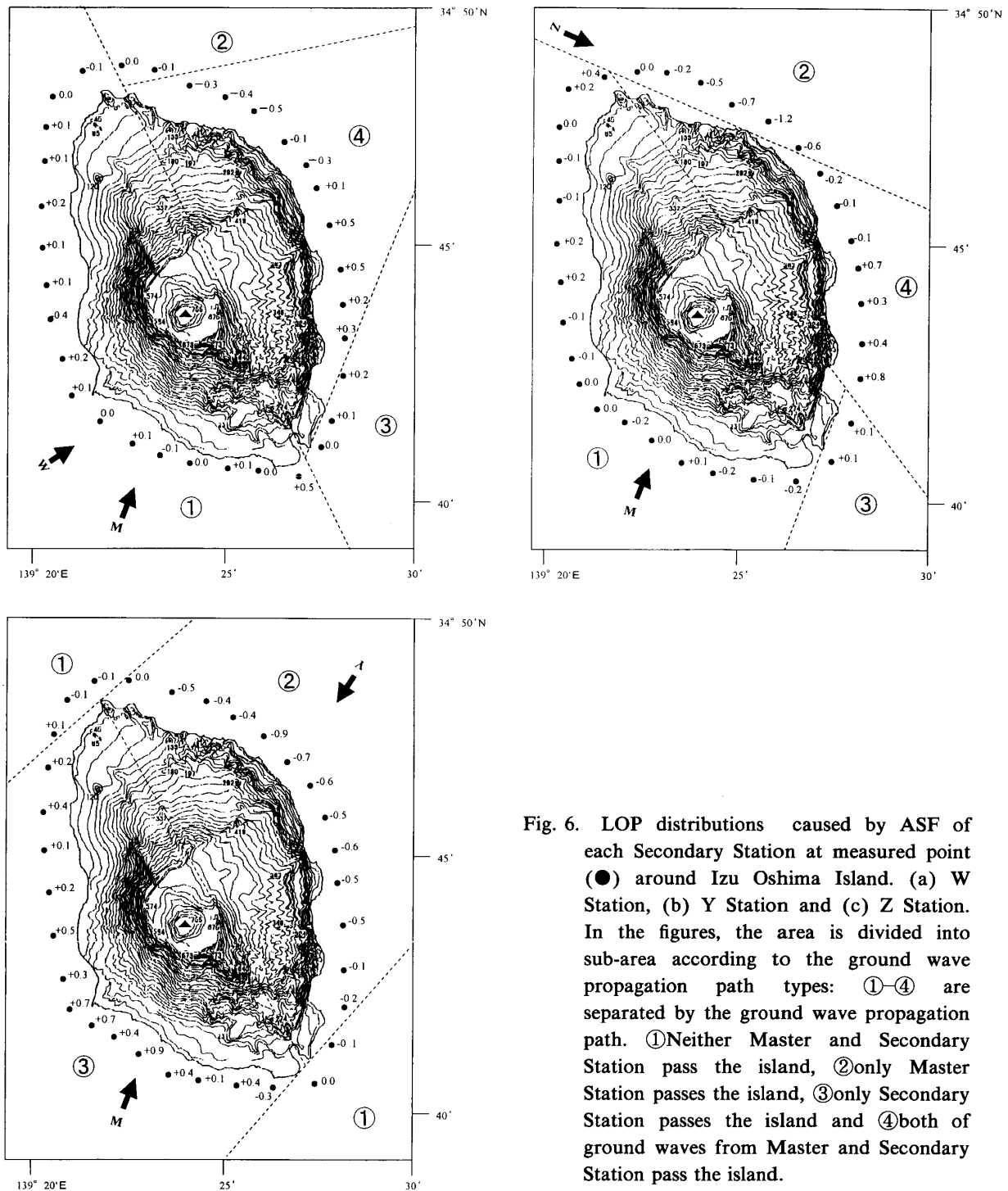


Fig. 6. LOP distributions caused by ASF of each Secondary Station at measured point (●) around Izu Oshima Island. (a) W Station, (b) Y Station and (c) Z Station. In the figures, the area is divided into sub-area according to the ground wave propagation path types: ①-④ are separated by the ground wave propagation path. ①Neither Master and Secondary Station pass the island, ②only Master Station passes the island, ③only Secondary Station passes the island and ④both of ground waves from Master and Secondary Station pass the island.

ることは明らかであるが、より詳細に島の影響を調べるために観測点までの大島通過の伝搬経路を以下の4つに分類して誤差を検討した。

- ①主・二次局両方の電波とも大島を通過しない地域：すなわち、大島通過の影響を受けていない場合
- ②主局の電波のみが大島を通過する地域

③二次局の電波のみが大島を通過する地域

④主局，二次局両方の電波とも大島を通過する地域

各二次局の①地域の LOP 誤差平均は，W局で $0.2 \mu\text{s}$ ，Y局で $2.3 \mu\text{s}$ ，Z局で $3.4 \mu\text{s}$ であった。小野らは陸上伝搬 100 km に対し SF が平均 $0.6 \mu\text{s}$ の割合で増加すると報告¹⁰⁾している。また，柿原らの相模湾における観測結果⁹⁾では，Y局が $0.46 \mu\text{s}/100 \text{ km}$ ，Z局が $0.75 \mu\text{s}/100 \text{ km}$ となっている。本観測結果から計算すると，今回の Y局は， $0.44 \mu\text{s}/100 \text{ km}$ ，Z局は $0.85 \mu\text{s}/100 \text{ km}$ となり，小野らの結果とは若干異なっているが，柿原らの結果とはほぼ同様の値となった。一方，大島通過による陸上伝搬距離は最大約 10 km であるので，これに対する SF を観測結果から試算すると Y局で約 $0.04 \mu\text{s}$ ，Z局で $0.09 \mu\text{s}$ と小さい値となる。このことから，大島のみを通過して生じる伝搬経路上の誤差は SF によるものよりも ASF による影響がほとんどであるとみなせる。

そこで，各二次局の①の平均値を大島の影響を受ける以前に大島付近にすでに存在していた LOP 誤差として，この値を各観測点の LOP 誤差から除き，大島による ASF の影響だけを取り出した結果が Fig. 6 (a), (b), (c) である。同図において破線で区切られた地域の丸数字が上記の分類番号と対応している。ただし，破線はあくまで上記の分類を行うための便宜上引いた線であり，絶対的な境界線ではない。

Fig. 6(b) に示すように，③地域の LOP 誤差の増加分は Y局の電波が大島を通過したことにより短区間の陸上伝搬で生じた ASF による伝搬時間で正の値を示している。一方，②地域の LOP 誤差の減少分は M局の電波が大島を通過したことにより短区間の陸上伝搬で生じた ASF による伝搬時間の遅延であり，(6) 式からも明らかのように負の値を示している。W局および Z局においても②，③の地域に関して，Y局ほどの顕著さではないが，同様の結果が得られた。いずれの場合においても，大島三原山山頂付近を二次局の電波が通過してきた観測点，もしくは主局の電波が大島三原山山頂付近を通過してくる観測点で最も大きな絶対値の ASF 誤差を生じている。

主局と二次局のどちらの電波も大島を通過する Fig. 6(a) および Fig. 6(c) の④地域は，どちらの電波がより大きな ASF による伝搬遅延を生じているかで LOP 誤差が変動している。Fig. 6(a) の④では，W局からの電波が三原山北部の比較的なだらかな斜面を通過していて，M局からの電波が山頂付近を通過する島の北東部の観測点は，M局に大きな ASF の影響が現れ $-0.5 \mu\text{s}$ の負の値となっている。一方，W局の電波が山頂付近を通過し，M局の電波が島の南側を通過する島の南東部の観測点では $0.5 \mu\text{s}$ と正の値を示している。しかし，M・W局とも山頂付近を通過する観測点では $0.1 \mu\text{s}$ の ASF しか観測されず，お互いの ASF が相殺されていることがわかる。

4.2 伝搬経路の地形と ASF の関係

大島周囲で観測された Y局の LOP 誤差を例に取り上げ，島による影響，ASF による伝搬遅延量の分離をし，地形と ASF の関係について検討する。Fig. 7 に Y局の ASF のみによる LOP 誤差を示す。同図上部は大島の地形と通過経路の地域，観測時の概略の航跡（図中破線）を示す。下部のグラフは，観測点 A から時計周りに再び A に戻る，島一周分の ASF の 5 秒間隔の時系列的連続観測データである。Fig. 6 と同様に①地域の LOP 誤差の平均 ($2.3 \mu\text{s}$) を，大島到達までに生じた誤差として，各観測点での LOP 誤差から差し引いてある。同図からも明らかのように，Y局からの電波が三原山山頂を通過する観測点 B (ASF 誤差: $0.9 \mu\text{s}$) と，M局からの電波が三原山山頂を通過する観測点 D (ASF 誤差: $-0.9 \mu\text{s}$) で ASF による影響が最大となっている。③地域の

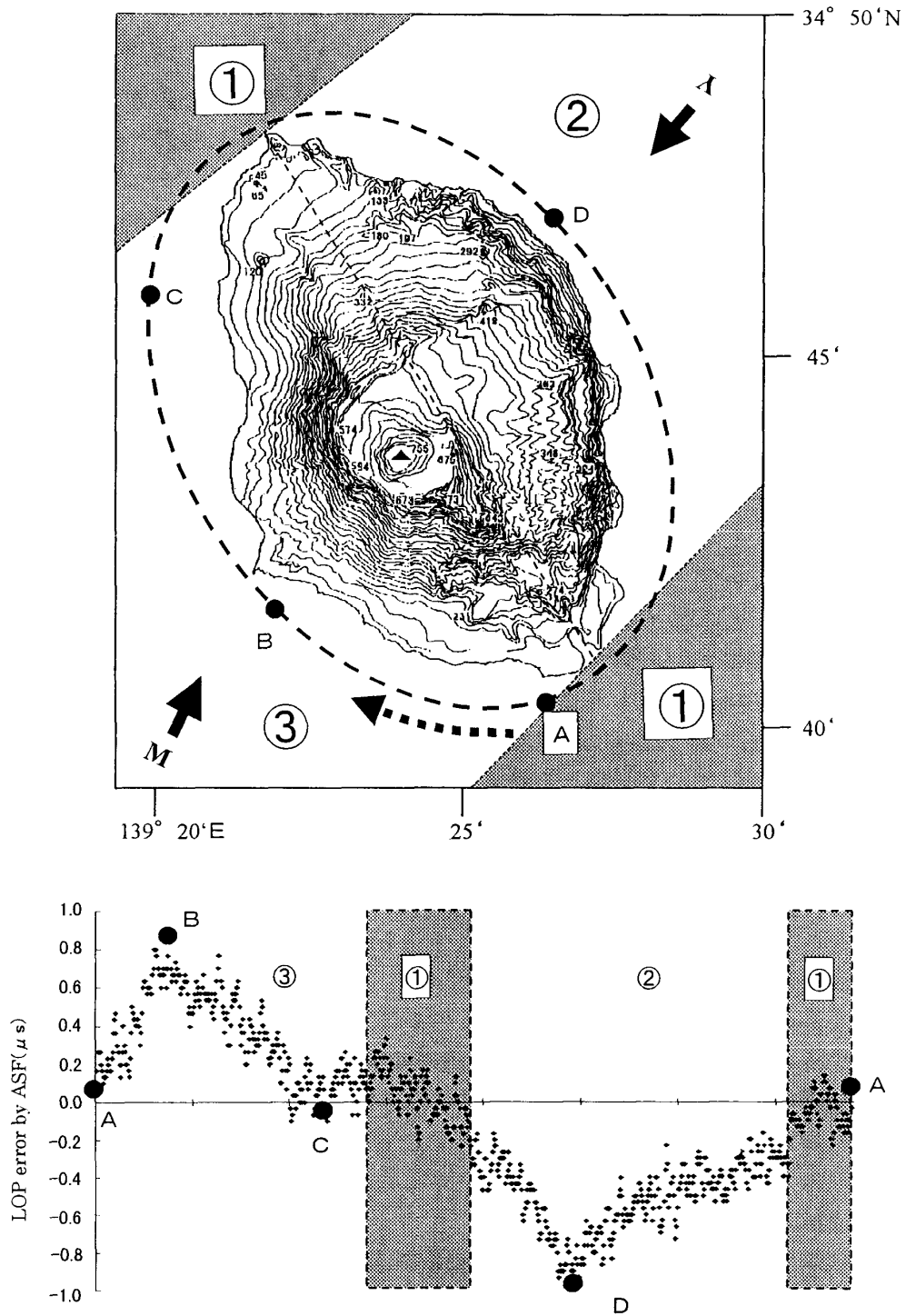


Fig. 7. LOP error variation caused by ASF in Y Secondary Station (lower). Thick broken line shows an outline of the ship track (upper). Divisions ①-③ are the same mean as Fig. 5. Point A is start and finish point, B and D are maximum LOP error point by ASF.

LOP 歪みの変動は、陸上伝搬距離自体は、非常に短いので、Y 局が大島を通過する陸上伝搬距離が原因ではなく、伝搬経路上の島の最大標高にほぼ比例している傾向が見られる。これは、観測点 B から観測点 C にかけての LOP 誤差の減少が、ほぼ大島の山頂伝搬から標高の低い山腹部伝搬に移行する地形を反映していることから裏付けされる。Y 局からの電波が大島を通過することによる ASF による遅延量を仮に、陸上伝搬 100 km に換算すると、最大で $8.89 \mu\text{s}/100 \text{ km}$ となり、先の SF と比較して 20 倍以上の遅延量となった。これからも、ASF による遅延誤差がいかに大きな値となるか判断できる。

今回の観測から、大島周囲では、主局と二次局の電波が観測点に至るまでの伝搬経路による ASF で LOP 誤差が大きく異なることが確認された。

より詳細に沿岸域の現象を解析するには、局からの伝搬時間や位相を直接計測できる科学用ロラン C 受信機などを使用して実験を行い、大地導電率による位相遅れや、陸上から海上へ出たときの位相の回復現象 (Phase Recovery)⁹⁾ を考慮し、海岸線付近の電波伝搬速度変化を Millington-Presey¹⁰⁾ の方法を利用したモデル化を試みるなどの検討が今後必要になってくると考える。

5. おわりに

大島周囲において LOP を実測し、LOP 歪みの定量化を行うとともに、島の影響による ASF が LOP 誤差に及ぼす影響を論議した。主な結果は次のようになる。

- 1) LOP 誤差は、観測点までの主局と 2 次局からの電波が大島を通過する伝搬経路により大きく変化し、その LOP 誤差の変動は、 $+0.9 \mu\text{s}$ から $-1.2 \mu\text{s}$ となった。
- 2) ASF による遅延量は、大島の地形に大きく影響され、主局と 2 次局共に三原山山頂を通過する観測点 (ASF 誤差絶対値: $0.9 \mu\text{s}$) で影響が最大となった。

SF と ASF を分離し、ASF だけが LOP 誤差に与える影響だけを検証した結果、絶対測位精度の向上のためには、LOP 誤差の実測に基づいた LOP 補正值のデータベースの必要性が示唆される。GPS の測位精度向上に用いられている、デифференシャル方式 (2 地点に共通な誤差を相殺するトランスロケーション方式による位置補正方法) は、今回の観測結果のように、島の周辺部など狭い範囲内で歪みベクトルの傾向が大きく変化する場合、有効ではないことが明らかになった。また、出口は¹¹⁾、Johler ら¹²⁾の地形の凸凹をモデル化にすることによる ASF についての検討を行っている。しかし、実測での検討ではないため、ロラン C の精度向上には島岐の影響を十分に研究しなければならないと報告している。このように、地形の凹凸を一概にモデル化することによる ASF による LOP 歪みのシミュレーションは非常に困難を伴うことが予想される。したがって、旧ロラン C チェーンでも試作¹³⁾されたような LOP 補正值データベースの再構築が必要であり、島岐の影響がある地域では、より詳細なデータが必要となる。

しかしながら、絶対精度を問題にしなければ、ロラン C の LOP の安定度の良さ、つまり再現性精度 (Repetition Accuracy) の高さを利用した航法は、漁場への漁船の往復などの操業には適していると考えられる。

最後に、本研究を行うに当たり観測に協力いただいた東京水産大学海洋生産学科航法システム工学研究室の学生諸君に感謝する。また本研究の一部は、文部省科学研究費補助金 (課題番号 08651093) によった。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Yanagawa, S. *et al.* 1981. Accuracy and Repeatability of Ship Position in Fishing Grounds. Transactions of the Tokyo University of Fisheries, **4**: 21-30.
- 2) 佐藤一彦他. 1973. 海洋測量ハンドブック. 東京大学出版会, p. 369.
- 3) Speight, J. J. 1982. DMAHTC Support to National Ocean Survey Loran-Charting. Navigation, Vol. 29, No. 1, pp. 22-39.
- 4) 田口一夫. 昭和 62 年. ロラン C とデッカ電波の伝搬-I. 日本航海学会誌「航海」, **92**: 45-53.
- 5) 柿原利治, 宮本佳則, 武田誠一, 上野公彦, 佐藤 要. 1997. 相模湾で観測されたロラン C の LOP 歪み. 日本水産工学会, **34**(3): 1-8.
- 6) 柿原利治, 武田誠一, 宮本佳則, 野田 明, 峰 雄二. 1995. 基準局・移動局間距離と DGPS 測位精度について. 日本航海学会論文集, **93**: 1-6.
- 7) 柿原利治, 武田誠一, 下川伸也, 佐藤 要. 1995. 実時間 DGPS の測位精度評価. 日本水産工学会, **32**(2): 111-117.
- 8) 宮本佳則, 打田明雄, 柿原利治, 武田誠一. 1997. 長基線による DGPS の測位精度について—Guam での測定結果を中心として—. 日本航海学会論文集, **97**: 1-6.
- 9) Pressey, B. G. 1956. Change of Phase with Distance of a Low-frequency Ground Wave Propagated across a Coast-line. Proceedings I.E.E., Paper No. 2082R, pp. 527-534.
- 10) 電気学会, 1984. 電気磁気学. 東京, オーム社, pp. 116-118.
- 11) 田口一夫. 昭和 52 年. よみがえったロラン C システム—現状と展望—. 昭和 52 年, 日本航海学会誌「航海」, **53**: 37-46.
- 12) Jöhler, J. R. and Berry, L. A. Loran-D phase corrections over inhomogeneous, irregular terrain, EESA Tech. Report IER 59-ITSA56, p. 70.
- 13) 小野房吉, 長森亨二. 昭和 60 年. ロラン C 電波の陸上伝搬効果の評価と補正図. 日本航海学会誌「航海」, **85**: 24-30.

付 録

A. 理論 LOP 値の計算方法

ロラン C は主局と二次局からの測位位置までの電波伝搬時間差 TD (Time Difference: μs) で表された主・二次局を焦点とする双曲線を利用する。ここでは測点の位置が既知として、理論 LOP 値 TD を求める方法を示す。Table 1 に北西太平洋チェーンにおける β, δ などを示す。

地球は回転楕円体であるので、その楕円体上での 2 地点間の距離 (D) は、

$$D = a \cdot d + \Delta \quad (\text{A-1})$$

a : 回転楕円体の長半径 (赤道半径)

d : 大圏距離 (ラジアン)

Δ : d から D への補正量

であり、 Δ はランバートの補正式を用いて計算できる。

$$\begin{aligned} \Delta = & 1/2 \cdot a \cdot f \cdot (3 \sin d - d) \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \Delta \phi / \cos^2 1/2d \\ & - 1/2 \cdot a \cdot f \cdot (3 \sin d + d) \cdot \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \Delta \phi / \sin^2 1/2d \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

ここで、 ϕ は地理緯度である。 ϕ_1, ϕ_2 を地理緯度、 λ_1, λ_2 を地理経度とし、(A-2) 式において、2 地点の位置を $(\phi_1, \lambda_1), (\phi_2, \lambda_2)$ とすれば、

$$\phi = (\phi_1 + \phi_2) / 2 \quad (\text{A-3})$$

$$\Delta \phi = (\phi_2 - \phi_1) \quad (\text{A-4})$$

$$\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (\text{A-5})$$

$$f = (a + b) / a \quad (\text{A-6})$$

b : 回転楕円体の短半径 (極半径)

f : 偏平率

で求まる。

次に電波の伝搬速度は,

$$V = C/n \quad (\text{A-7})$$

V : 仮定伝搬速度

C : 自由空間における光速度

n : 大気屈折率

で表され, 回転楕円体上の 2 地点間伝搬時間 T_0 は,

$$T_0 = D/V \quad (\text{A-8})$$

で求めることができる。しかし, 実際の地表波伝搬においては大地伝導率などの影響を受けて伝搬時間に遅れを生じるので, その遅れ分 ΔT (海上伝搬を仮定した場合の二次係数) を T_0 に補正する必要がある。したがって, 実際の回転楕円体上 2 地点間の電波伝搬時間 T は,

$$T = T_0 + \Delta T \quad (\text{A-9})$$

であり, ΔT は 2 地点間の距離により,

a) $D \geq 160$ km の場合は,

$$\Delta T = 129.04323/T_0 - 0.40758 + 0.00064576813 \cdot T_0 \quad (\text{A-10})$$

b) $D \leq 160$ km の場合は

$$\Delta T = 2.741282/T_0 - 0.011402 + 0.00032774815 \cdot T_0 \quad (\text{A-11})$$

で求めることができる。

よって, 上記の式を用いて T_m と T_s を求め, 主局と 2 次局間の β と δ を (1) 式に代入すれば, TD_c を求めることができる。8930 チェーンの TD_c を計算する場合の常数は,

C : 光速度 (真空中) = 299792.458 km/s

n : 大気屈折率 = 1.000338

V : 仮定伝搬速度 = 299691.1624 km/s

σ : 導電率 (海上 5.0 mhos/m)

ϵ : 誘電率 (海上 80 EUS)

Table 1. LORAN-C Northwest Pacific Chain (8930 chain) Configuration.

Station	Location(WGS84)	β (Base Line Length: μ s)	δ (Coding Delay: μ s)
Nijima(M)	N 34° 24' 11.943"		
	E139° 16' 19.473"		
Gesashi(W)	N 26° 36' 25.038"	4580.86	11000
	E128° 08' 56.920"		
Minamitorishima(X)	N 24° 17' 08.007"	6051.53	30000
	E153° 58' 53.779"		
Tokachibuto(Y)	N 42° 44' 37.214"	3349.53	50000
	E143° 43' 09.757"		
Pohang(Z)	N 36° 11' 05.450"	3085.64	70000
	E129° 20' 27.440"		

a : 長半径 (赤道半径) = 6378.137 km (WGS84)

f : 偏平率 = 1/298.257223563 (WGS84)

である。

B. LOP 誤差の歪みベクトルへの変換

時間差で表わされた LOP 誤差の歪みの距離への換算は、観測点、主局、二次局の 3 者の相対的位置関係と LOP 誤差量で決定される。LOP 誤差 ΔTD_0 (単位: μs) に対する歪み量 Δd (単位: m) は、

$$\Delta d = 150 \times \Delta TD_0 \times \operatorname{cosec}(\theta/2) \quad (\text{B-1})$$

である。ただし θ は、観測点から主局と二次局を見た挟み角度を示す (Fig. 3 参照)。 $\operatorname{cosec}(\theta/2)$ は、双曲線が主局と二次局を結ぶ基線を離れるに従って発散するときの双曲線の間隔が拡大する割合に相当し、誤差倍率とも呼ばれている。(B-1) 式において観測点が基線上 ($\theta=180^\circ$) にあるとき、 Δd は最小値となり、基線延長上 ($\theta=0^\circ$) にあるときは無限大となる。

伊豆大島周囲におけるロラン C の付加的二次係数の推定

宮本佳則・柿原利治・宮崎唯史・喜多澤 彰・小池義夫

ロラン C は、主局と二次局を焦点とする双曲線を利用する電波航法システムである。1994 年 10 月に主局をグアムから新島に移設し、二次局を沖縄の慶佐次 (W 局)、南鳥島 (X 局)、北海道の十勝太 (Y 局) および韓国の浦項 (ポーハン, Z 局) に配置する 1 主局と 4 二次局で構成される新しい北西太平洋チェーン (8930 チェーン) に移管を完了し運用が開始されている。これまで筆者らは、漁業者から局の移設に伴い漁場における測位精度の劣化が指摘されている相模湾での測位特性やその精度評価を行った。今回、特に伝搬経路の起伏による付加的二次係数 ASF (Additional Secondary Factor) の推定を行うため大島周囲において LOP を実測した。その結果、島の影響による ASF は最大 $1 \mu s$ 程度と推定することができた。

キーワード: ロラン C, LOP, 二次係数 (SF), 付加的二次係数 (ASF), 測位精度