

DGPS 用中波帯夜間電離層伝搬特性——測定と理論値の比較——

八木谷 聡^{†a)} 長野 勇[†] 田畠 敏哉[†] 山形 幸紀[†]
 岩崎 正^{††} 松本 勇^{††}

Nighttime Ionospheric Propagation of MF Radio Waves Used for DGPS
 ——Comparison between Observation and Theory——

Satoshi YAGITANI^{†a)}, Isamu NAGANO[†], Toshiya TABATA[†], Koki YAMAGATA[†],
 Tadashi IWASAKI^{††}, and Isamu MATSUMOTO^{††}

あらまし 現在海上保安庁において船舶の測位システムとして運用されている DGPS においては、GPS の測位誤差を補正するための信号が中波帯電波を利用して送信されている。日没から夜間にかけては、中波帯電波の電離層反射波が存在し、海域によってはそれが DGPS 局からの地上波（直接波）と相互干渉する可能性がある。本論文では海上保安庁所属の測定船「つしま」において単一周波数局の中波帯電波の夜間伝搬特性を実測し、Full Wave 計算による夜間電離層反射波の理論計算との比較を行った。その結果、測定値と理論値とがほぼ一致し、夜間 DGPS 局から数百 km 以上離れると、地上波と電離層反射波の相互干渉が生じる可能性が高いことを確認した。

キーワード 中波, DGPS 信号, 伝搬曲線, 電離層反射, Full Wave 計算法

1. ま え が き

現在、海上を航行する船舶などの測位システムとして、GPS (Global Positioning System) 衛星の測位誤差を補正する DGPS (Differential GPS) が海上保安庁によって運用されている。図 1 に DGPS による測位の概念図を示す。GPS は GPS 衛星からの電波を受信することにより、その受信点の位置を測定するシステムである。GPS 単独による測位では、衛星がもつ誤差や対流圏、電離層での電波伝搬等により測位に誤差が生じる。この誤差を減少させ、測定精度を向上させるために DGPS が運用されている。DGPS では DGPS 基準局で受信した各 GPS 衛星までの距離（擬似距離）と基準局の正確な位置座標との関係から擬似距離の誤差分を計算し、ディファレンシャルデータと

して各 DGPS 局から中波帯電波を利用して送信している。DGPS のユーザは GPS 電波と同時にこの中波を受信して誤差を補正することで、GPS 単独よりも高い測位精度を得ることができる。日本での DGPS 局は沿岸に 27 局あり、288 ~ 321 kHz の周波数が用いられている。

DGPS 局から送信される中波の有効範囲は地上波の到達範囲として DGPS 局から半径約 200 km とされている。現行のシステムでは中波周波数帯における他

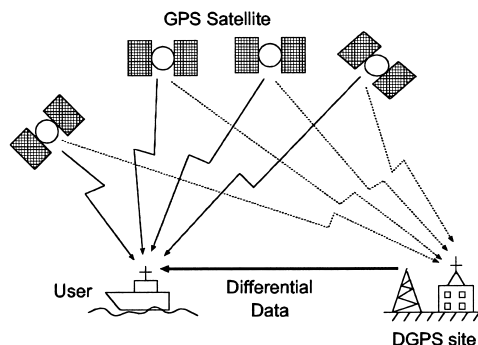


図 1 DGPS による測位
 Fig.1 Differential GPS.

[†] 金沢大学大学院自然科学研究科, 金沢市
 Graduate School of Natural Science and Technology,
 Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi,
 920-8667 Japan

^{††} 海上保安庁海上保安試験研究センター, 立川市
 Coast Guard Research Center, Japan Coast Guard, 1156
 Izumi-cho, Tachikawa-shi, 190-0015 Japan

a) E-mail: yagitani@is.t.kanazawa-u.ac.jp

の業務上の関係から、数百 km 以上離れた DGPS 局間で同一の周波数が使用されている。日中に中波帯電波を大きく減衰させる電離層 D 層が日没から夜間にかけて消滅するため、特に夜間には中波帯電波の電離層反射波（空間波）が遠方まで伝搬するようになる。その結果、海域によっては DGPS 局からの地上波（直接波）と、自局の電離層反射波あるいは同一周波数を用いている別の局からの電離層反射波が相互干渉する可能性が考えられる。

本研究では、夜間の相互干渉を実験的に確認し、理論的な解析を行うことで DGPS の安定な運用並びに今後の周波数利用計画に貢献することを目的としている。

中波の夜間近距離電離層反射波電界強度の予測法としては、ITU-R が勧告した予測法がある [1]。しかし、ITU-R が勧告する予測法は幾何光学理論に若干の観測資料を加味して作られた半実験半理論の伝搬曲線であり、主に近距離（300 km 以下）での陸上における日本の中波放送観測値と一致しない [2]。これに対し、Full Wave 法 [3] を IRI（国際参照電離層）モデル [4] に適用してより厳密な電界強度を理論的に得る予測法がある。こちらの方法では、陸上における中波放送観測値と一致することが示されている [5]。本研究では、DGPS 電波の夜間干渉現象を実験的に確認し、Full Wave 法を用いて理論的な解析を行う。理論的な解析には DGPS に利用されている中波帯（300 kHz 帯）電波の日没-夜間-日出にかかる伝搬特性（夜間伝搬曲線）を Full Wave 計算を用いて数値計算した。電離層のモデルには IRI（国際参照電離層モデル）[4] を用いた。また、直交ループアンテナを製作して海上保安庁の航路標識測定船「つしま」に搭載して 2002 年 11 月に海上測定を行い、DGPS 局の一つである浜田局（305.0 kHz）の電波の夜間伝搬特性を実測した。測定範囲は浜田局から西に 200 km、北東に 600 km の範囲で行った。測定対象局として浜田局を選んだ理由は、他の DGPS 局と使用周波数が重複していない唯一の局であり、他局の影響を受けずに伝搬特性を測定できるためである。また、電界強度の比較のために市販の DGPS 受信機とホイップアンテナによる電界強度測定も同時に行った。

本論文では、「つしま」による海上での測定値と Full Wave 法による中波夜間伝搬曲線とを比較し、夜間干渉の原因が電離層反射波である可能性が高いことを示す。

2. 中波帯電波の伝搬理論

DGPS 局からディファレンシャルデータを送信するために利用されている中波帯電波による受信点での電磁界（伝搬曲線）を求めるための計算手法について述べる。

DGPS 局から送信されている中波帯電波の伝搬モデルとして、図 2 のようなモデルを考える。本研究では、地表距離 1000 km 以下の近距離伝搬を対象としているため、受信点では地上を伝搬してくる地上波と電離層で 1 回反射されて戻ってくる電離層反射波の二つの波が主に観測されると考えられる。

日中は、電離層反射波が D 層の影響により強く減衰されるため、地上波のみ観測されると考えられる。夜間においては D 層が消滅するため、電離層に入射した中波帯電波は主に E 層あるいは F 層で反射され地上に戻ってくる。このため受信点では地上波と電離層反射波が同時に観測されると考えられる。このとき、中波帯電波は電離層に入射すると地球磁場の影響を受け、異常波（X モード）と正常波（O モード）の二つのモードで伝搬する。

DGPS 局からの地上波と電離層反射波の受信点における電界強度（実効値）をそれぞれ E_{grms} 、 E_{rrms} とすると、

$$E_{grms} = \frac{\sqrt{60PG\eta}}{D} \gamma \quad [\text{mV/m}] \quad (1)$$

$$E_{rrms} = \frac{\sqrt{60PG\theta\eta}}{D'} |R| \quad [\text{mV/m}] \quad (2)$$

と表される。ここで、 γ は Bremmer の回折損と海上での損失を考慮した減衰定数 [6] である。 R は Full Wave 計算から求めた電離層での反射係数である。 D [km] は送信点と受信点の水平距離、 D' [km] は電離層反射波

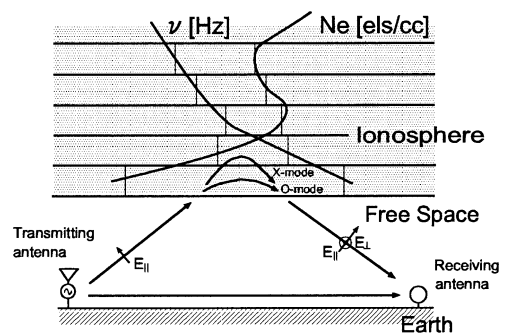


図 2 中波帯電波の伝搬モデル
Fig. 2 MF propagation model.

の通路長である。

DGPS 局の送信出力は $P=75[W]$ ，送信アンテナの放射効率 $\eta=0.085$ とされている。DGPS 局の送信アンテナ（本論文で対象とする浜田局では高さ約 45 m の垂直接地アンテナ）は垂直設置の微小ダイポールと考えられるため、絶対利得は $G=1.5$ とした。また、式 (2) においては、送信アンテナの仰角方向の指向性を加味して計算している。指向性は、微小ダイポールの指向性として

$$G_{\theta} = G \sin \theta \quad (3)$$

を用いている。ここで θ は天頂角である。これらの公称値と式 (1)、式 (2) より、DGPS 局から送信されている中波帯電波の伝搬曲線を計算する。

3. 「つしま」による中波帯電波の海上測定

3.1 測定装置

海上保安庁の航路標識測定船「つしま」での海上測定では、「つしま」に設置されているホイップアンテナによる電界強度測定及び GPS/DGPS 受信機による測位に加えて、今回新たに製作した直交ループアンテナによる測定システムを持ち込み DGPS 信号の磁界強度測定を行った。それぞれの測定システムの詳細は以下のとおりである。

ホイップアンテナによる電界強度測定は、「つしま」に以前から装備されているシステムを利用して測定した。この測定システムを図 3(a) に示す。この測定システムでは、305.0 kHz（浜田局）の電波を 200 Hz の帯域幅で、30 秒ごとに測定した。

GPS/DGPS 受信機による測定もホイップアンテナによる測定同様、「つしま」に以前から装備されているシステムを利用して測定した。この測定システムを図 3(b) に示す。「つしま」では、GPS/DGPS 受信機により最寄りの DGPS 局の信号を受信し、「つしま」の位置情報として緯度と経度も測定している。この緯度と経度のデータより、Full Wave 計算を用いた伝搬曲線を作成するのに必要な浜田局と「つしま」との距離と方位角を計算する [7]。

直交ループアンテナによる磁界強度測定システムは、浜田局を専用に測定するために製作・校正して、「つしま」に持ち込んだものである。図 3(c) に測定システムを示す。その理由は、常設の測定器は経年変化等により誤差が生じている可能性があり、絶対校正した直交ループアンテナと比較する必要があると考えられる

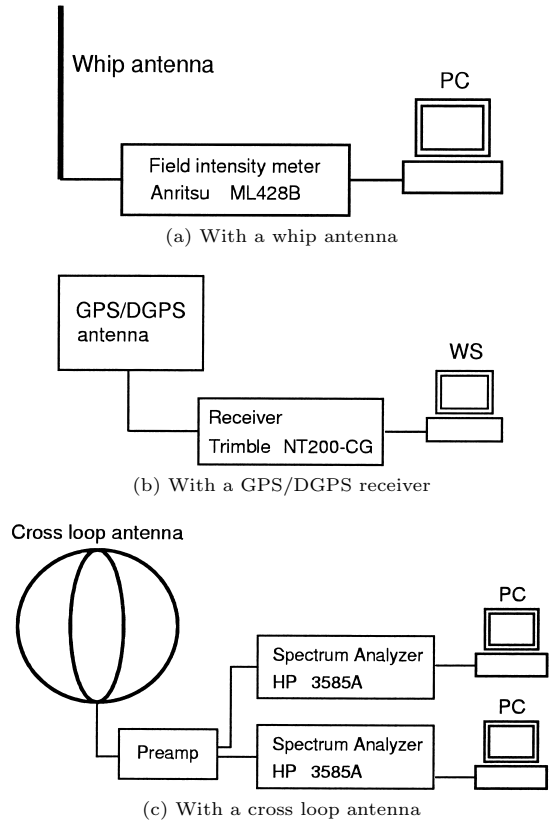


図 3 「つしま」搭載の中波測定システム
Fig. 3 MF measurement system on board “Tsushima.”

ためである。したがって今回「つしま」常設の測定器で測定されたデータは参照データとしてのみ用いた。

直交ループアンテナによる測定では、浜田局（305.0 kHz）からの電波を 2 台のスペクトルアナライザを利用して帯域幅 3 Hz で 3 秒ごとに取り込み測定している。なお、これらのホイップアンテナによる電界強度測定、GPS/DGPS 受信機による測定と直交ループアンテナによる磁界強度測定では、あらかじめ測定時に時計を同期させてある。

3.2 測定航路

「つしま」による海上測定の中波対象局は島根県の浜田局（305.0 kHz）とした。浜田局を対象とした理由は、他の DGPS 局と周波数が重複していない唯一の DGPS 局であり、同一周波数局の干渉を受けずに中波の伝搬特性を正確に測定できるためである。

そこで、夜間海上を移動しながら浜田局の電波を測定することで、DGPS 局で利用されている中波帯

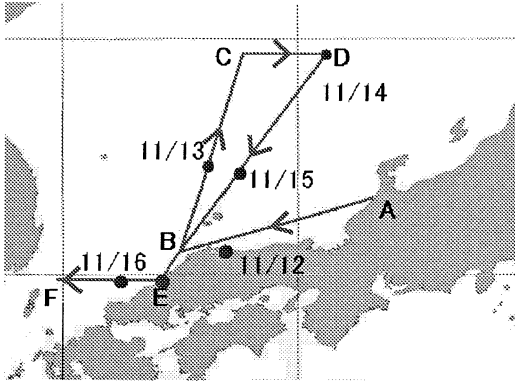


図4 測定航路

Fig. 4 Observation route of "Tsushima."

(300 kHz 帯) 電波の夜間伝搬特性を実測した。この海上測定では「つしま」に乗船し、図4の航路を航海した。2002年11月11日に金沢港(A地点)を出港し、A → B → C → D → B → E → Fのように航行し、2002年11月18日に博多港に入港するまで測定を行った。日中は、図4の地点に停泊していた。浜田局は図4のE地点の位置する。また、船舶の速度は約12knt(約22.2km/h)で海上を航行した。一部、天候が悪く、12kntの速度を出せない区間もあった。

4. 測定結果

4.1 日中での定点観測

中波帯電波の空間波(電離層反射波)は、日中は電離層D層を突き抜ける際に強い減衰を受け、ほとんど受信されない。そのため、日中に定点観測を行うことで空間波の影響の小さい地上波の電界強度のみを測定できる。

11月13日の日中に、図4の11月13日の地点、北緯 $37^{\circ}30'$ 東経 $133^{\circ}24'$ (使用した座標系はWGS-84, 地球形の近似方法はGRS80楕円体)に停泊していたときのDGPS信号の電界強度測定結果を図5に示す。この地点は浜田局から約316kmの地点である。ここで、黒線と灰線はそれぞれホイップアンテナによる測定結果と直交ループアンテナによる測定結果を表す。製作した直交ループアンテナでは磁界強度が測定されるが、電界強度値に変換してある。また、ホイップアンテナによる測定は30秒ごとに、直交ループアンテナによる測定は3秒ごとに行っている。図示していないが、DGPS受信機による測定では、ホ

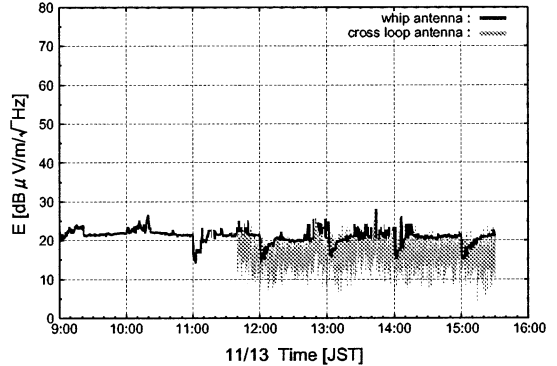


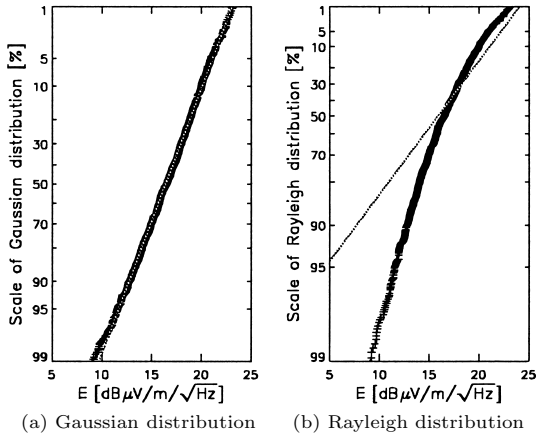
図5 11/13日中停泊時

Fig. 5 DGPS signal intensities observed in the daytime on Nov. 13, 2002.

イップアンテナや直交ループアンテナによる測定よりも電界強度値が低かった。これは、DGPS受信機のアンテナが二つのバーアンテナから構成されており、二つのバーアンテナのうち感度の良い方のアンテナを用いて、電界強度を測定しているためと考えられる。一方、ホイップアンテナによる測定では、直交ループアンテナによる測定よりも電界強度の変動が小さくなっている。これは、ホイップアンテナによる測定では、200Hz帯域幅の平均値検波モードで測定を行ったためであると考えられる。ホイップアンテナによる測定において11:00~15:00の毎正時に電界強度が低くなっているが、これは定時連絡のノイズが測定器に混入したためと考えられる。

次に、直交ループアンテナによる測定で得られた電界強度値の確率分布を調べるために、ガウス分布確率紙とレイリー分布確率紙を作成した。確率紙とは、ある確率分布に従う変量の累積確率をプロットしたときに直線になるように目盛を定めた用紙のことをいい、データがどのような統計分布に従うかを検証するため、あるいは分布のパラメータを決定するために用いられる[8]。また、1波のみの伝搬ではガウス分布を、2波の伝搬ではレイリー分布を示すことが知られている[5]。横軸が電界強度値を、縦軸がその電界強度値より大きい電界強度の累積確率を表しており、50%値が理論値に対応する[5]。11月13日の14:00~15:00に測定された電界強度値のガウス確率紙とレイリー確率紙を図6に示す。ガウス分布をしていることが分かる。

また、この地点での地上波の理論電界強度は、 $14.94[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ となった。海上測定において測定されたデータは変動しているため、ある時間内



(a) Gaussian distribution (b) Rayleigh distribution

図 6 11/13 日中停泊時の確率紙

Fig. 6 Probability analysis of the DGPS signal intensities observed at 316 km from the DGPS station in the daytime.

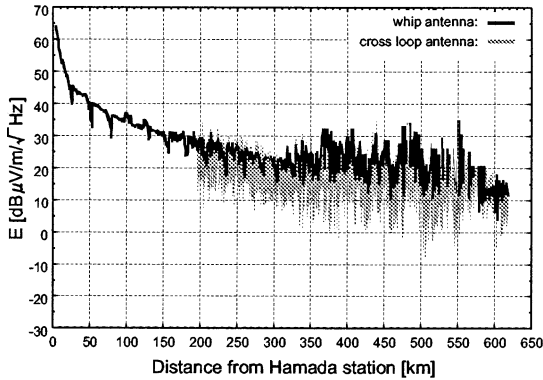


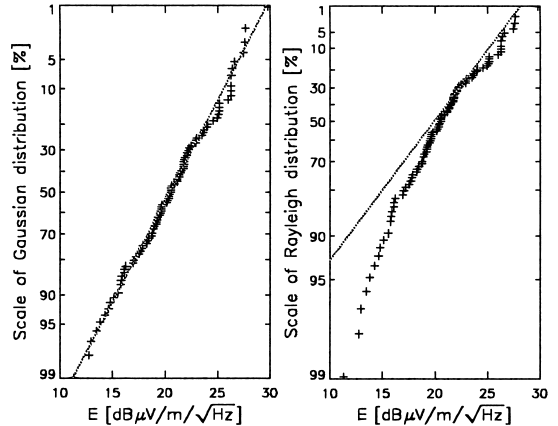
図 7 D-B-E 間移動測定

Fig. 7 DGPS signal intensities observed along the path D-B-E.

の測定値の累積確率 50%を電界強度として採用する。この地点でのガウス分布の時間率 50%値は約 $16.5[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ であり、これは地上波の理論電界強度値とほぼ一致しているといえる。

4.2 D-B-E 間移動測定

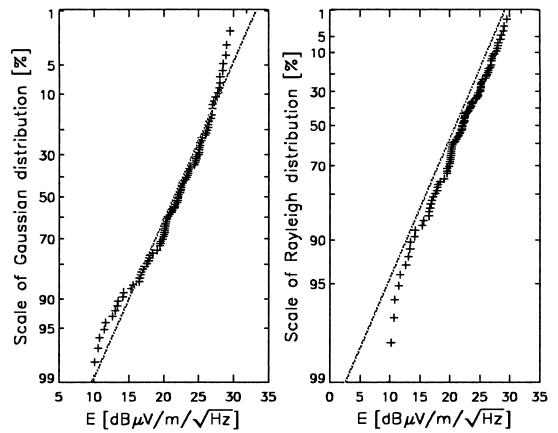
11月14日と15日の夜間に図4のD-B-E間を移動測定した結果を図7に示す。この区間では、D層が消滅している日没後から日出前までの時間帯を2日間に分けて航行することで、夜間電離層反射波の影響を調べた。また、ここでは浜田局から200km以内の距離においては直交ループアンテナによる測定が諸事情によりできなかった。図7より、浜田局から320km程度離れると電界強度値の変動が目に見えて大きくなり、電離層反射波の影響が強くなっていると



(a) Gaussian distribution (b) Rayleigh distribution

図 8 D-B-E 間 350 km 地点の確率紙

Fig. 8 Probability analysis of the DGPS signal intensities observed at 350 km from the DGPS station.



(a) Gaussian distribution (b) Rayleigh distribution

図 9 D-B-E 間 400 km 地点の確率紙

Fig. 9 Probability analysis of the DGPS signal intensities observed at 400 km from the DGPS station.

思われる。そこで、直交ループアンテナによる測定結果を利用して、浜田局から200km, 300km, 350km, 400km, 450km, 500km, 550km, 600kmの各地点前後1kmの電界強度値を用いて、ガウス分布確率紙とレイリー分布確率紙を作成した。このうち350km, 400km及び450kmの結果をそれぞれ図8, 図9及び図10に示す。浜田局から200kmと300kmの各地点の確率紙はガウス分布を示していることから、地上波の伝搬が主体的だと考えられる。図8の浜田局から350kmの地点の確率紙では、ガウス分布を示してい

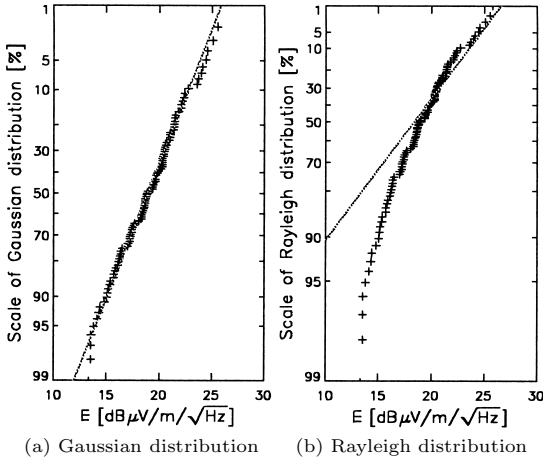


図 10 D-B-E 間 450 km 地点の確率紙

Fig. 10 Probability analysis of the DGPS signal intensities observed at 450 km from the DGPS station.

るがレイリー分布に近づきつつあり、地上波が主体的であるが電離層反射波の影響が現れていることが分かる。また図 9 の浜田局から 400 km の確率紙ではレイリー分布を示していることから、地上波と電離層反射波が同程度の大きさで受信されていると考えられる。

しかし、図 10 にも示すように浜田局から 450 km, 500 km, 600 km の確率紙は再びガウス分布に近い分布を示している。これは、距離が大きくなるに伴い地上波が減衰し、電離層反射波の影響が支配的になるため、再びガウス分布に従うようになるのではないかと考えられる。

また、浜田局から 300 km 程度の地点では、図 5 と図 7 に見られるように、電界強度は日中も夜間も 10~20 dB 程度で変化せず、夜間電離層反射波の影響が小さいことを示している。一方で、図 4 の D 地点（浜田局から 600 km 程度）では日中地上波の電界強度が 0~10 dB であったのに対して、夜間は電離層反射波の影響により、図 7 のように 5~15 dB と大きく観測された。

4.3 E-F 間移動測定

11 月 15 日と 16 日の夜間に図 4 の E-F 間を移動測定した結果を図 11 に示す。この区間では、電界強度の変動幅がほぼ一定であり、浜田局からの距離が 200 km 以内と近いこともあるため、地上波を主に受信していると考えられる。浜田局から 180 km 程度の距離で若干電界強度の変動幅が大きくなっており、わずかに電離層反射波の影響が見られていると考えられる。

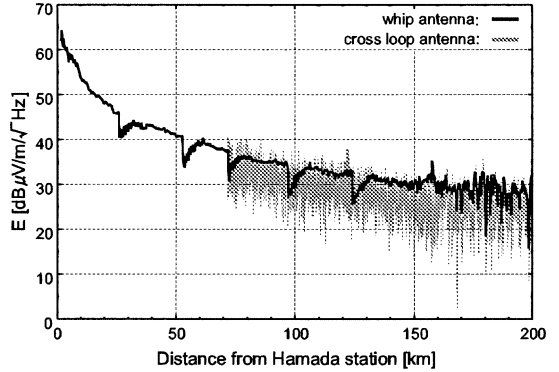


図 11 E-F 間移動測定

Fig. 11 DGPS signal intensities observed along the path E-F.

5. 理論伝搬曲線

次に、IRI-95 の電離層モデル [4] を用いて、浜田局から送信されている 305.0 kHz の電波の夜間電離層反射波の伝搬曲線を数値計算した。その結果を図 12 及び図 13 に示す。これらは「つしま」が航海した区間と同一条件になるように伝搬した場合の伝搬曲線である。なお、Full Wave 計算に用いた IRI モデルの太陽黒点数は 100 個 [9] として計算してある。なお、300 kHz 帯電波の海上伝搬では 100 km 以下の距離においては電界強度は回折損や海上での損失による減衰をほとんど受けないため、ここでは 11 月 16 日の日中に浜田局から約 74 km の海上に停泊していたときの実測値をもとに浜田局の送信出力と放射効率を推定した値を用いて数値計算してある。横軸は浜田局からの距離を表し、縦軸は電界強度を表す。図中の $\parallel E_{\parallel}$ 及び $\parallel E_{\perp}$ の前付、後付添字はそれぞれ入射波、反射波の電界強度の偏波を示し、その偏波が入射面内か、入射面に垂直にあるかによりそれぞれ \parallel, \perp で示している（図 2 参照）。

2. での計算式 (1) と (2) は、信号のエネルギーが単一の周波数（本論文においては 305.0 kHz）に集中しているとして計算されるが、実際の信号のエネルギーは MSK のスペクトルに従って各周波数に分散されている。このことによって測定値と理論伝搬曲線の電界強度に差が生じるため、浜田局から約 137 km の地点である図 4 の 11 月 12 日の の地点で測定した 305.0 kHz 帯の電圧スペクトルの 305.0 kHz から 3 dB 下がる帯域幅 70 Hz を用いて、その単位を測定値と同じく $[dB\mu V/m/\sqrt{Hz}]$ とする。

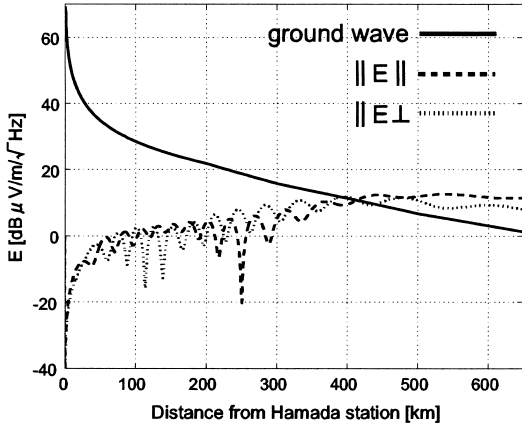


図 12 D-B-E 間理論伝搬曲線

Fig. 12 Theoretical MF propagation curve along the path D-B-E.

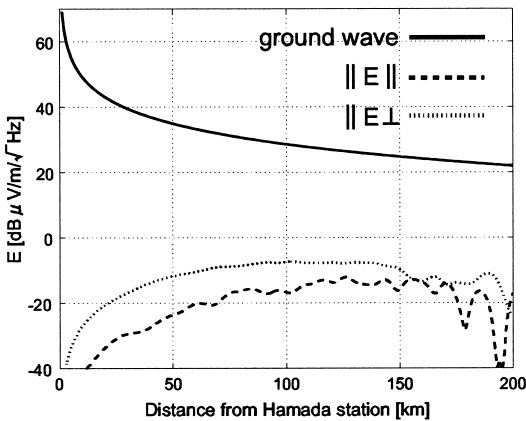


図 13 E-F 間理論伝搬曲線

Fig. 13 Theoretical MF propagation curve along the path E-F.

図 12 (D-B-E: 南西から北東への伝搬) より, 理論伝搬曲線では浜田局から 200 km 程度離れると, 地上波と電離層反射波の強度比が -20 dB 程度になり, 図 7 に見られるように徐々にではあるが電界強度の変動が見られるようになると考えられる. 距離が 320 km 程度になると強度比が -6 dB 程度になり, 図 7 のように電離層反射波の影響で電界強度が目に見えて変動を受け始めると考えられる. しかし, この距離ではまだ地上波の方が大きいため, 図 8 に示されるように, 電界強度の確率紙はガウス分布に近い形を示すことになる. また, DGPS 局から 400 km 程度離れると地上波と電離層反射波の電界強度がちょうど同程度になるため図 9 のように確率紙がレイリー分布を示し, こ

れ以上の距離では電離層反射波の伝搬が主体的になり図 10 のように再びガウス分布に近づくと考えられる. また, 図 12 の夜間伝搬曲線における地上波及び電離層反射波の両方を考慮した電界強度を図 7 の測定値と比較すると, 移動測定における 50% 測定値とほぼ一致している.

一方, 図 13 (E-F: 東から西への伝搬) より, 特に DGPS 局から 200 km 以下の近距離の測定結果である E-F 間の計算結果では, ほとんど電離層反射波の影響を受けないと考えられる. なお, 図 11 の測定値においては 180 km 付近で電界強度の変動がわずかに見られており, 測定時に何らかの理由で電離層反射波が若干大きくなっていただけではないかと思われる. 電界強度に関しては, 図 13 の理論値は図 11 における 50% 測定値とほぼ一致している.

また, 電波の伝搬する角度によって相互干渉が生ずる距離が変動することがこの結果から考えられる. また, 本計算手法では電離層電子密度モデルが受信電界強度を決める重要な因子となっていることと, 電波の伝搬方向による相互干渉の影響の変動を比較するため, 太陽活動最大期と太陽活動最小期の電子密度モデル (IRI-95) を用いて数値計算を行った. 太陽黒点数と太陽活動には正の相関がある [9]. 太陽活動極大期 (黒点数 200) と極小期 (黒点数 10) と海上測定の日時での黒点数 100 の場合において計算を行った結果を図 14 に示す. 円グラフは地図と同様に 0 度が真北, 90 度が東である. 円の中心が 305 kHz 電波の送信点であり, グラフ上の線は地上波に対して電離層反射波の強度比が -6 dB になるときの距離を表している. 東西方向の伝搬では太陽活動の影響を強く受け, 約 400 km から約 150 km へとその距離が変化する. しかし, 南北方向ではほとんど影響を受けないことが分かる.

なお, 本論文で示した「つしま」での測定時は, 浜田局から約 350 km 以上離れると, 時折干渉によると思われる DGPS 信号の受信不良が見られた. 図 12 に見られるように, この距離において, 地上波に対する電離層反射波の強度比は -3 dB 程度であり, この程度以上の干渉レベルになると DGPS 信号の受信データに劣化が生じたものと思われる. しかし, 一般にどの程度の干渉波が存在すると受信データにどの程度の劣化が生じるかに関しては, 干渉レベルだけでなく受信機における DGPS 信号の復調方式等にも依存するため, ここでは定量的に述べることはできない.

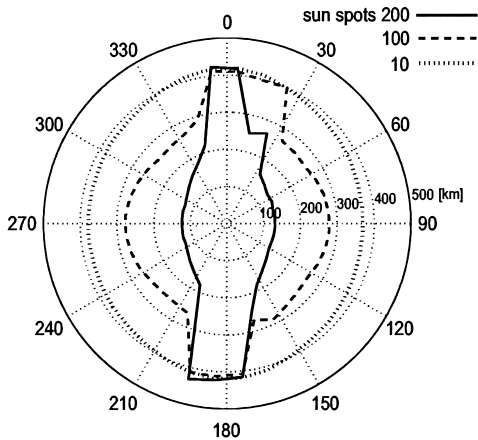


図 14 伝搬方向と太陽活動による相互干渉の変化

Fig. 14 Dependence of the interference between direct and ionosphere-reflected MF waves on the propagation direction and the solar activity.

6. む す び

現在、海上保安庁により運用されている DGPS は、中波帯電波を利用してデータを送信している。特に日没から夜間では電離層 D 層が消滅するため、中波帯電波の電離層反射波が遠方まで伝搬するようになる。その結果、海域によっては DGPS 局からの地上波（直接波）と、自局の電離層反射波あるいは同一周波数を用いている別の局からの電離層反射波が相互干渉する可能性があった。このため、DGPS に利用されている中波帯（300 kHz 帯）電波の夜間伝搬特性を明らかにする必要があった。本論文では、電離層などの不均質媒質中での電磁界の計算に用いられる Full Wave 計算法を用いて、電離層での中波帯電波の反射係数を求め、中波帯電波の夜間伝搬曲線を数値計算した。

また、海上保安庁の航路標識測定船「つしま」での海上測定を行い、DGPS 局に利用されている中波帯電波の夜間伝搬特性を実測した。測定結果からは、浜田局より 320 km 程度離れると電離層反射波の影響で電界強度の変動幅が大きくなるが、地上波が主体的であるため確率密度分布はガウス分布に近い傾向を示すことが分かった。また、400 km の地点では地上波と自局の電離層反射波の電界強度が同程度となり、明らかなレイリー分布を示した。一方、450 km 以上離れると再びガウス分布を示すようになり、これは、地上波よりも電離層反射波が支配的になるためであると考え

られる。この測定結果は、測定と同一条件になるように Full Wave 法を用いて数値計算した夜間伝搬曲線ともほぼ一致すると考えられる。今後の課題としては、現在の夜間伝搬曲線は地上波と電離層 1 回反射波のみ考慮しているので、海面反射波や電離層多重反射波を考慮して夜間伝搬曲線の数値計算を行えばより精度の良い伝搬曲線が得られると思われる。また、今回は理論電界強度の計算に際して通路長を直線近似しているが、地球の球面の効果を含めた ray path 計算法を用いて計算することで伝搬曲線の精度を高められるのではないかと考えられる。

謝辞 本研究は大阪工業大学木村磐根教授のホームページがきっかけとなって開始されたものであり、先生の御厚意に感謝致します。

なお、本研究は総務省周波数資源開発公募研究の研究資金（平成 13～14 年度「DGPS を利用した MF 帯（300 kHz）電波の夜間電離層伝搬の研究」）によって行われたものである。「つしま」による海上測定においては、乗組員の皆様方に大変御世話になったことを御礼申し上げます。

文 献

- [1] Rec. ITU-R P.1147-2, "Prediction of sky-wave field strength at frequencies between about 150 and 1700 kHz," ITU, pp.1-20, 2003.
- [2] M. Mambo, I. Nagano, T. Fukami, and Y. Kagawa, "Comparison of measured and predicted field strengths of medium frequency sky waves over short distances in Japan," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-34, no.10, pp.1214-1222, 1986.
- [3] 長野 勇, 不均質媒質中の電磁波伝播—ロケット・衛星観測による宇宙空間の電波伝播, 朋友出版, Jan. 1997.
- [4] IRI ホームページ, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html>
- [5] 満保正喜, 長野 勇, 深見哲男, 香川幸雄, "太陽黒点最大期における中波夜間近距離電界強度測定," 信学論(B), vol.J67-B, no.11, pp.1286-1293, Nov. 1984.
- [6] H. Bremmer, Terrestrial radio waves theory of propagation, pp.115-116, Elsevier Publishing Company, 1949.
- [7] 飛田幹男, 世界測地系と座標変換, pp.160-163, 日本測量協会, 2002.
- [8] 進士昌明(編著), 無線通信の電波伝搬, pp.268-269, 電子情報通信学会, 1992.
- [9] SIDC (太陽黒点数センター) ホームページ, <http://sidc.oma.be/index.php3>
(平成 15 年 11 月 12 日受付, 16 年 3 月 29 日再受付)



八木谷 聡 (正員)

昭 63 金沢大・工・電気・情報卒。平 2 同大大学院修士課程了。平 5 同博士課程了。同年同大電気・情報助手。現在、同大大学院自然科学研究科助教授。平 9~10 米国ミネソタ大客員研究員(文部省在外研究員)。科学衛星及びコンピュータシミュレーションによる磁気圏プラズマ波動解析の研究, 火星探査機のぞみ搭載用低周波波動観測装置の開発, 低周波電磁波源位置推定の研究に従事。博士(工学)。平 13 産学連携推進いしかわ賞(奨励賞)受賞。地球電磁気・地球惑星圏学会, 米国地球物理学会各会員。



松本 勇

昭 51 海上保安学校灯台科卒。平 11 海上保安庁海上保安試験研究センター。現在, 海上保安庁第五管区海上保安本部交通部に所属。



長野 勇 (正員)

昭 43 金沢大・工・電気卒。昭 45 同大大学院修士課程了。同年同大電気助手。昭 62 同電気・情報教授。現在, 同大大学院自然科学研究科教授, 総合メディア基盤センター長。昭 58~59 米国ジェット推進研究所 NRC 研究員。異方性不均質媒質中の電磁界計算法, VLF 波による D 層電子密度計測法の開発, 衛星搭載用プラズマ波計測装置の開発に従事。工博。昭 62 地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞, 平 12 北國文化賞受賞。電気学会, テレビジョン学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 米国地球物理学会各会員。



田島 敏哉

平 13 金沢大・工・電気・情報卒。平 15 同大大学院博士前期課程了。同年関西電力株式会社入社。在学中, DGPS 用中波帯夜間電離層伝搬の研究に従事。



山形 幸紀

平 14 金沢大・工・電気・情報卒。平 16 同大大学院博士前期課程了。同年株式会社東京放送入社。在学中, DGPS 用中波帯夜間電離層伝搬の研究に従事。



岩崎 正

昭 56 海上保安学校灯台科卒。現在, 海上保安庁海上保安試験研究センターに所属。