

2-9 長波標準電波の電界強度計算法の開発と測定

2-9 Prediction Method and Proof Measurement of LF Standard Frequency Waves

土屋 茂 今村國康 伊東宏之 前野英生 久保田実 野崎憲朗

TSUCHIYA Shigeru, IMAMURA Kuniyasu, ITO Hiroyuki, MAENO Hideo,
KUBOTA Minoru, and NOZAKI Kenro

要旨

日本国内、及び海外で測定した長波標準電波の電界強度を基にPCベースの電界強度予測法を開発し、国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) の勧告改定に反映した。改訂された予測法は波線法を用いて、大圏距離 16,000 km まで適用可能である。距離特性、日周変化、地表波と空間波との干渉などの測定結果は予測とよい一致を見た。ITU-R の勧告では 60 kHz より低い周波数では導波管法を推奨しているが、40 kHz まで波線法が適用可能であることを示した。遠距離伝搬では高次の電離層反射波によるフェージングが強くなり、また、各種雑音の影響が大きくなるので、高感度で信号分離性能の高い受信システムの開発を進めている。

Numerical method to predict low frequency field strength was developed based on the worldwide measurement of LF standard frequency waves, and was accepted to revise the corresponding description in the recommendation of the International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R). Revised recommendation is suitable to predict the LF field strength up to 16,000 km by means of wave hop method. The measured range variation, diurnal variation, and interference between ground wave and sky waves are fairly agreed with the prediction. The wave hop method is shown to be applicable down to 40 kHz, whereas waveguide method is recommended below 60 kHz in the recommendation. A new sensitive and highly discriminative receiving system is under development for the long distance propagation including higher-order ionospheric reflection modes and many kinds of noise.

[キーワード]

長波, 標準電波, 電界強度, ITU-R 長波電界強度計算法, 波線法
LF, Standard frequency wave, Field strength, ITU-R field strength prediction method,
Wave hop method

1 はじめに

情報通信研究機構 (NICT) では、福島県のおおたかどや山、及び佐賀 / 福岡県境のはがね山の送信所からそれぞれ 40 kHz 及び 60 kHz の長波標準電波 (JJY) を送信している [1][2]。長波帯電波は遠達性、透過性、安定性に優れているため、近來標準電波業務への利用が高まっており、世界各地で送信局の新設計画が進められる傾向にある。それに伴って、共用または隣接周波数間の干渉が増加する可能性が出てきている。外国旅行中に時計

が日本時間になり、時間帯によっては日本時間と米国時間に交互に変わる事例も報告されている。JJY の受信報告は米国西海岸、ヨーロッパ、ニュージーランドなどから寄せられている。

長波は球面大地に沿って伝搬する地表波と、電離圏下部で反射される空間波を合成したものが受信される。中・短波帯に比べ太陽活動、地磁気活動に伴う電離圏変動の影響は少ないが、大規模な太陽活動の影響 [3] や下層大気の変動の影響 [4] をこうむることがある。静穏時の電界強度は国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) の勧告 P. 684-5

「周波数 150 kHz 以下の電界強度予測法」[5]に従って計算されるが、60 kHz より下の周波数では導波管法を、60 kHz より上の周波数では波線法での計算が勧められている。

NICT では 2004 年に JJY 40 kHz と 60 kHz の伝搬状況および受信品質を調査するため、北海道から沖縄にいたる日本各地において、電界強度を測定した[6][7]。測定データの解析には、2 ホップ、約 4,000 km 以下の伝搬距離を対象として開発した近距離長波電界強度予測法を用い、距離特性、日周変化特性に良い一致を見た。また、地表波と空間波の干渉によって生じる MID (Maximum Interference Dip) [8]も反射高度を 69.4 km とすると計算と実測が整合することを示した。

近距離長波電界強度予測法では空間波を反射する電離圏 D 領域の反射高を放物線近似で表すモデルを使い、空間波の通路長の計算式に組み込んだ。また、吸収量は太陽天頂角の関数として記述し、どの季節、時刻でも計算できるようにした。この成果は ITU-R 勧告の改訂に反映された[9][10]。この勧告改訂により、従来 150 kHz 以下の空間波電界強度予測を、主として図表を用いて計算するという、時間と労力がかかり、かつ夜間と夏冬の日中という限られた条件でしか予測できない制限から解放され、PC 上でパラメータを設定すれば、任意の日時の予測ができるようになった。

さらに、10 ホップ、16,000 km まで計算できるアルゴリズムを開発し、検証のために受信システムを日米間、日本-南極間の船上に搭載し、2007 年から 2009 年にかけて長波の遠距離伝搬特性に主眼を置いた測定を行った[11][12]。この成果により、ITU-R の勧告は再度改定された[5][13]。最新の勧告では波線法の章の、従来の図と表を用いた計算法の次に PC ベースの数値計算法が 2 ホップまで、10 ホップまでと順に収録された。

船上観測では日本から米国に接近するにつれ、標準電波 60 kHz が JJY から米国の送信している標準電波 (WWVB) に移行する測定に成功したが[11][12]、遠距離では空電雑音や都市雑音が卓越することがわかり、市販の受信機による測定システムからロックインアンプを用いた高感度、高選択性受信システムの開発が始められている。

本報告では、最初に ITU-R 勧告に採用された長波電界強度計算法を概説する。次に測定システ

ムについて述べ、日本周辺での近距離測定、船上観測による遠距離測定結果を示す。最後に、これまでの測定を基に開発中のロックインアンプ方式高感度受信システムを紹介し、予測法の高度化の方向性について議論する。

2 長波電界強度計算法

現行の ITU-R の勧告[5]は波線法と導波管法を併記し、60 kHz を境に低い周波数では導波管法を、高い周波数では波線法での計算を推奨している。導波管法は地球と電離層を横壁の無い導波管と見立てて、可能なモードを計算する手法であり、地表と電離層間の距離が数波長以下の低い周波数には適しているが、送信点近傍では計算できない。波線法は光線が地表と電離層の間を反射する多くの電波通路 (波線) の合成から受信電界強度を求める方法であり、直感的にわかりやすいが、波動としての広がりやを考慮していない。今回我々の開発した電界強度予測法は、波線法を用いて地表波と最大 10 回反射までの空間波を合成する。

垂直偏波で送信された電波が各反射点で偏波成分が保存されながら伝搬し、地表に置いたループアンテナで受信された時の実効電界強度 E (mV/m) は、10 回反射までの空間波 Es_k と地表波 Eg との合成電界強度で表される。

$$E = Eg + \sum_{K=1}^{10} Es_K \quad (1)$$

空間波と地表波は、それぞれ伝搬距離による位相項を含むが、ベクトル合成により受信電界強度を計算する。 Eg は ITU-R 勧告 P. 368-7[14]で与えられている多くの図表の中から内挿により目的の伝搬距離に対応する電界強度を計算する。大地条件の中から比誘電率 ϵ と導電率 σ の値として、海水 ($\epsilon: 70$, $\sigma: 5$ S/m)、土 ($\epsilon: 22$, $\sigma: 0.003$ S/m) および乾燥大地 ($\epsilon: 7$, $\sigma: 0.0003$ S/m) を選択し、周波数については 40、50、75、100、150、200、300、400、500 kHz から内挿する。

K 回反射の空間波電界強度 Es_k は次式で表される。

$$Es_k = \frac{600\sqrt{Pr} \cos(\Psi_k) \prod_{l=1}^K Rc_{k,l}}{\sum_{l=1}^K Pl_{k,l}} Fc_k Rg_k^{k-1} Ft_k Fr_k \exp\left(-jk \sum_{l=1}^k Pl_{k,l}\right) \quad (2)$$

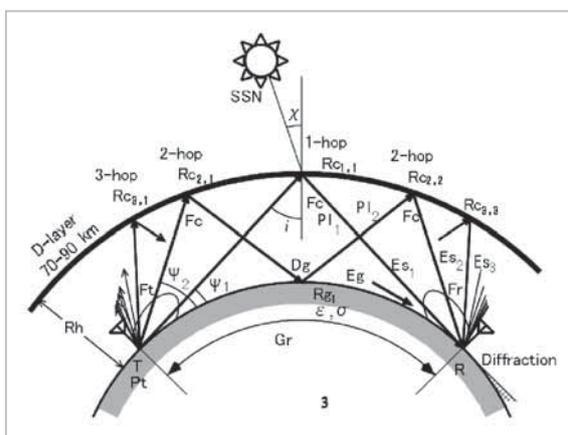


図1 波線法の模式図

ここで j は虚数単位、 k は電波の波数であり、添え字 K と L はホップ数と反射点番号を意味する。反射点は地表や電離層の傾きを考慮せず、単に地表距離を等分割した位置とする。 Pt (kW) は実効放射電力、 Ψ_K は K ホップ波の仰角を表す。大地での反射係数 Rg_k は導電性地表の垂直偏波実効反射係数として計算する[15]。ここで大地の比誘電率、電気伝導度はパラメータとして与える。各電離層反射点で、太陽天頂角 x と電離層入射角 i を算出し、電離層反射係数 Rc_{KL} を算出する。各ホップの伝搬通路長 $\sum_{l=1}^k Pl$ は地表距離と反射高度 R_h が決まれば計算で求められる。 R_h は電離圏下部の電子密度分布によるが、2.1 に述べる放物線分布の D 層の反射高度モデルを導入した。図1に想定している伝搬の模式図を示す。以下、その他のパラメータについて概説する。

2.1 反射高モデル

電離圏の D から E 領域にかけての電子密度分布をパラボラ分布と仮定し、その最高周波数を ITU-R 勧告 P. 1239[16] を用いて計算する。次に分布の下限周波数 f_b を 10 kHz として、層の最小半層厚 y_{min} 、最大半層厚 y_{max} と E 層の最高高度 h_{max} に対してそれぞれ 10 km、30 km、100 km を与えると、夜間の最低反射高度は 90 km ($h_{max} - y_{min}$) に、また昼間の最低反射高度は 70 km ($h_{max} - y_{max}$) になる。

例として、ある地点における反射層の高度分布を h - f (周波数対反射高) 曲線で表すと図2のようになる。図において地方時 0 時から 3 時の間は同

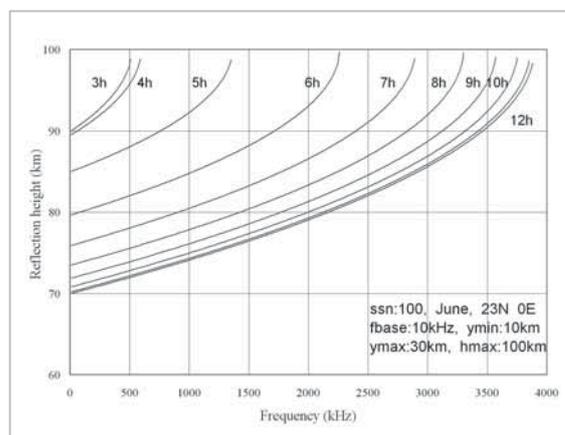


図2 電離層反射高モデル

じとする。

反射高 R_h は次式のように計算される。

$$R_h = h_{max} - y_m \sqrt{1 - \frac{f - f_b}{foE}} \quad (3)$$

ここで

$$y_m = y_{mm} - \frac{(y_{mm} - y_{min})(f_{max} - foE)}{f_{max} - f_{min}} \quad (4)$$

であり、 y_{mm} は

$$y_{mm} = y_{max} - \frac{(y_{max} - y_{min})(fk0 - f_{max})}{(fk0 - f_{min})} \quad (5)$$

から求められる。また、 $fk0$ (太陽天頂角が 0 の時の foE)、 f_{max} (その地点での foE の最大値) と foE (与えられた地方時における値) は文献[16] の第 4 章 foE の予測から計算できる。

2.2 集束係数 Fc_k

球面大地、球面電離層のモデルでは電離層で反射されると集束効果が生じ、地表では発散となる。簡単のために両者が打ち消しあうものとし、空間波では電離層反射 1 回分の集束係数 Fc_k を計算する。従来の ITU-R 勧告では昼間と夜間の 2 つの曲線により与えられていたが、両者を平均して図3のように周波数をパラメータとして与え、24 時間を通じて計算できるようにした。

2.3 アンテナ係数 Ft_k 、 Fr_k

送信と受信アンテナ係数 Ft_k 、 Fr_k は表 1 に示す

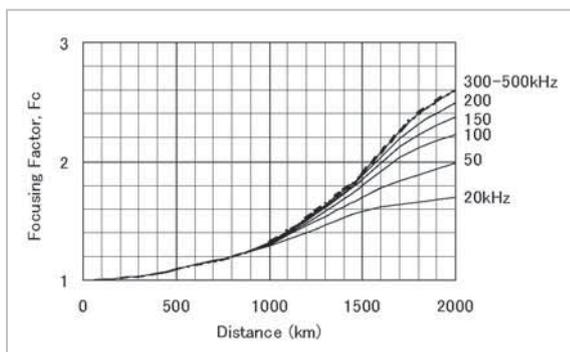


図3 集束係数(文献[5]による)

表1 大地常数

大地条件	比誘電率(ϵ)	導電率(s in S/m)
海水	80	5
平均的な土	15	0.002
乾燥大地	15	0.0005

3つの大地条件に対して文献[5]が与えるアンテナ係数曲線群から、仰角と周波数に関する補間により求める。仰角が負になると回折波となるが、回折損はこの曲線群に含まれる。

2.4 電離層反射係数 R_{CKL}

各反射点での電離層反射係数 R_{CKL} は、図4(a)~(c)に示すように黒点数(SSN)で表した太陽活動度の最小(SSN: 0~25)と中間(SSN: 25~75)、最大(SSN: 75~150)に分けて $f \cos(i)$ の関数として表示した。任意の伝搬条件に対しては、この3図から補間により求める。ここで f は周波数、 i は電離層への入射角である。

3 長波標準電波電界強度の測定

標準電波 40 kHz と 60 kHz の電界強度を各地で計測し、電界強度計算法で予測される値と比較した。60 kHz 標準電波は米国でも送信しており、測定した標準電波局の主要緒元を表2に示す。

長波は距離数百 km までは地表波が卓越し、それ以遠は徐々に電離層反射による空間波に移行する。国内では高々2回反射まで考慮すれば充分であり、以下に述べる国内陸上での測定は2回反射までの計算で考察した。

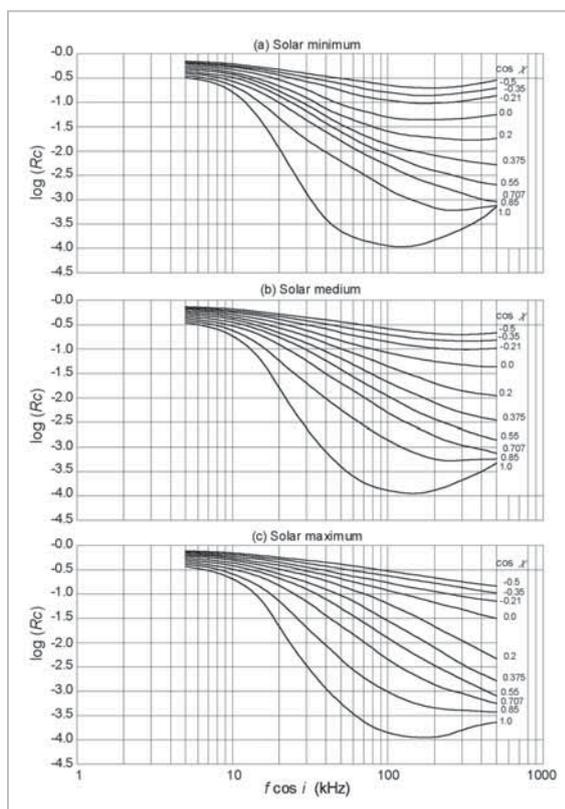


図4 電離層反射係数

太陽天頂角 X をパラメータにした (a) 太陽活動極小期 (SSN: 0~25)、(b) 太陽活動中間期 (SSN: 25~75)、(c) 太陽活動極大期 (SSN: 75~150) の電離層反射係数。横軸の f (kHz) は周波数、 i は電離層入射角であり、曲線は上から $\cos(X) = -0.5, -0.35, -0.21, 0.0, 0.2, 0.375, 0.55, 0.707, 0.85, 1.0$ についてプロットした。(文献[5]による)

表2 長波標準電波送信局主要緒元

局名	JJY	JJY	WWVB
所在地	福島県 おおたかどや山	佐賀/福岡県 はがね山	米国 Colorado 州 Fort Collins
緯度	37°22'21"N	33°27'56"N	40°40'N
経度	140°50'56"E	130°10'32"E	105°03'W
空中線型	支線式頂部傘型	支線式頂部傘型	Top-loaded monopole
空中線高	250 m	200 m	2 × 4 本 122 m
実効放射電力	12.5 kW	25 kW	70 kW
搬送波周波数	40 kHz	60 kHz	60 kHz
電波型式	A1B	A1B	A1B
周波数精度	$\pm 1 \times 10^{-12}$	$\pm 1 \times 10^{-12}$	$\pm 1 \times 10^{-12}$

3.1 国内陸上での電界強度測定

陸上での測定は2004年1月から2月にかけて実施した。測定はループアンテナと電界強度測定器を用いて、送信局から100 km ごとに選定した

地点に滞在して日周変化を測定する固定点測定と、車両の走行中に連続的に測定し、距離変化特性を測定する移動測定を行った。図5に測定点を示す。

測定の結果は文献[6][7][9][12]にまとめられているが、電界強度の距離変化、日周変化、MID[8]の測定値と2回反射まで取り入れた予測値はよい一致を示した。図6に電界強度の距離変化の予測と観測例を示す。

この測定ではそれぞれの送信局から100 kmと200 kmの地点で測定した電界強度からJJYの実効放射電力を40 kHzは12.5 kW、60 kHzは

25 kWとした。本論でもJJYの送信電力にこの値を採用する。

ITU-R 勧告では波線法の適用可能周波数は60 kHzより上を推奨しているが、本測定により40 kHzに対しても十分な精度で適用できることが解かった。また、市販の電波時計が目安としている、自動較正のための電界強度値50 (dB μ V/m)を国内全域で上回ることが確認された。

3.2 船舶による移動測定

3.2.1 測定システム

24時間自動的に電界強度と位相を測定するシステムを構築し、航行する船舶に搭載した[11]。船舶から見た送信局の方向は、航行と共に変化するので、搭載するアンテナは水平面内において無指向性であることが望ましい。そこで3軸直交ループアンテナを新たに開発し、船の実験室に近い手すりに固定した。受信用ループアンテナの水平面内指向性は全方向にわたって ± 0.3 dB以内に収まっていることを確認した。図7に測定システムのブロック図を示す。

電界強度測定器は、40 kHzと60 kHzの周波数ごとにアンテナのX、Y、Z軸について順次約0.1秒ごとに100データをサンプリングし、基準発振器による周波数毎の較正などを加え、1サイクルを約3分で繰り返す。電界強度測定器のバンド幅は200Hzで、感度は約30 μ V/mであった。各軸の100個のデータの内、強い方から10番目の強度(上十分位値、upper decile value)の自乗和の平方根を電界強度の準尖頭値(QP: Quasi peak)と

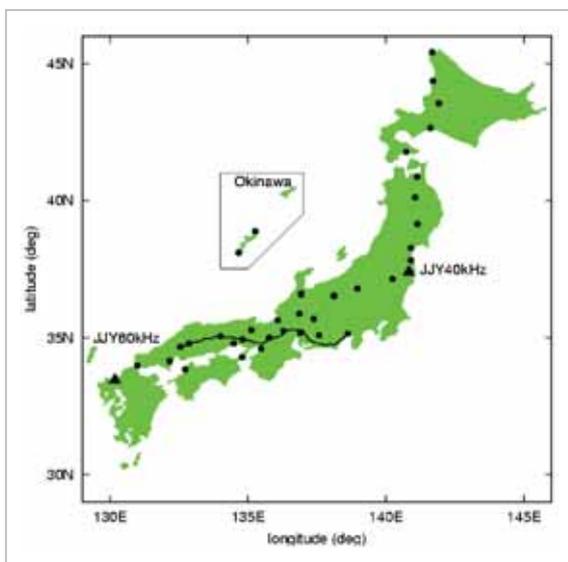


図5 国内での電界強度測定点
固定測定点(●)、移動測定コース(太線)とJJY送信局▲

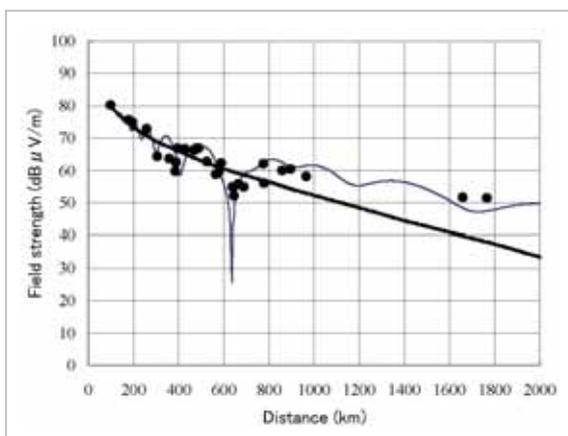


図6 JJY 40 kHz 電界強度の日中での距離変化
(●)は実測値、太線は地表波、細線は2回反射までの合成電界強度の予測値。(文献[12]による)

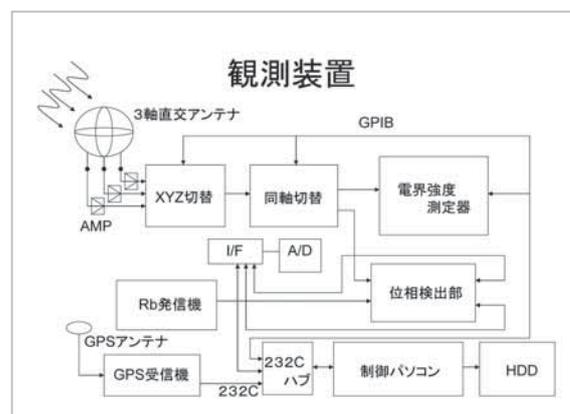


図7 電界強度測定器による船上観測装置ブロック図

した。

本装置を南極観測船「しらせ」に搭載して2006年と2007年の日本を1周する訓練航海、2007年の49次南極観測往復航路、日本郵船(株)のコンテナ船「Argus」に搭載して2007年の東南アジア、北米航路で測定した。図8に船上観測コースを示す。

3.2.2 日本沿岸での測定

日本沿岸では地表波とたかだか2回反射までの合成波が電界強度の主要成分となり、空間波を反射する電離層の変動によるフェージングは日入出没时间以外発生せず、測定した電界強度のQPと中央値(MD: Median)に差はない。図9に2007年の「しらせ」訓練航海で日本沿岸を1周した時の記

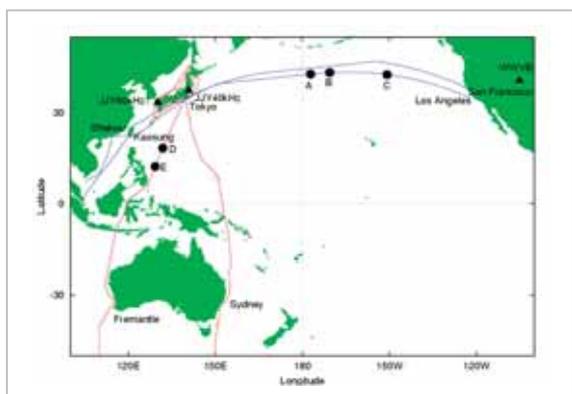


図8 船上移動測定の航路図
赤線: 「しらせ」2006、2007年訓練航海と2007年南極航路
青線: 「Argus」2007年東南アジア、太平洋航路

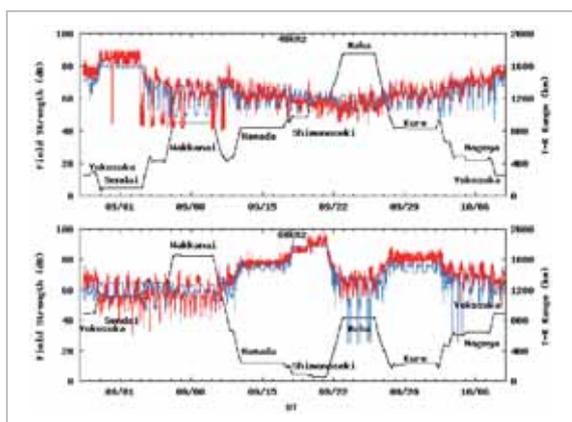


図9 「しらせ」2007年訓練航海での電界強度変化
上段: 40 kHz
下段: 60 kHz
赤線は3分ごとの準尖頭(QP)値、青線は予測値を示す。黒線は送信局からの大圏距離

録を示す。赤線がQP値、青線が2回反射まで計算した予測値、黒線が送信局からの大圏距離を示す。9月3日～7日および10、11日の日中JJY 40 kHzは保守のため停波した。仙台に停泊中の40 kHz、呉に停泊中の60 kHzの測定値は予測値より数dB高く記録されているが、都会に近く停泊したので人工雑音によるものと思われる。前後の航海中(黒線が傾いている部分)や他の停泊地では測定値と予測値が一致している。

3.2.3 遠距離移動測定

2007年5月13日に測定器を搭載した「Argus」が東京大井埠頭を出港し、シンガポールに往復した後、日本の沖合から更に米国西海岸に往復し、6月24日に同埠頭に帰着した。図10に5月31日の日本沖合から大圏に沿って太平洋航路を往復した期間の電界強度を示す。測定値を赤、電界強度計算法による予測値を青の実線で、4時間ごとの空電雑音強度を緑の点で示した。また、JJY送信局からの大圏距離を黒線で示す。

遠距離では受信波はレイレー分布に従って変動すると仮定して、QPから5.2 dBを差し引いてMDに換算し、15計測(約45分)を移動平均して測定値とした。ITU-Rの勧告372[17]は短波帯以下の空電強度を季節と地方別別に24枚の世界分布図で与えている。目的の地点の雑音指数 F_{am} を読み取り、次式により、受信機帯域幅と周波数の補正を施して雑音電界強度を求める。

$$E_n = F_{am} - 155.5 + 20 \log f + 10 \log b \quad (6)$$

ここで E_n (dB μ V/m)はバンド幅 b (Hz)の雑音電界強度中央値であり、 F_{am} は中心周波数 f (kHz)に対する、4時間のタイムブロック中の雑音指数中央値である。太平洋航路での測定は、春から夏の季節にかかっているため、航路上の4時間毎の位置における F_{am} の、春と夏の平均値を取り、測定器に合わせて $b=200$ (Hz)の E_n を算出した。

長波帯標準電波では距離4,000 kmを越えるあたりから信号強度が背景雑音レベルと同程度となる。1時間ごとの呼出符号を聴取して信号の有無を確認することはできるが、多大な労力と聴取技術を必要とする。標準電波は長短はあるが、1秒周期のパルスで振幅変調をかけていることを利用して、自己相関係数による信号判定を導入した。

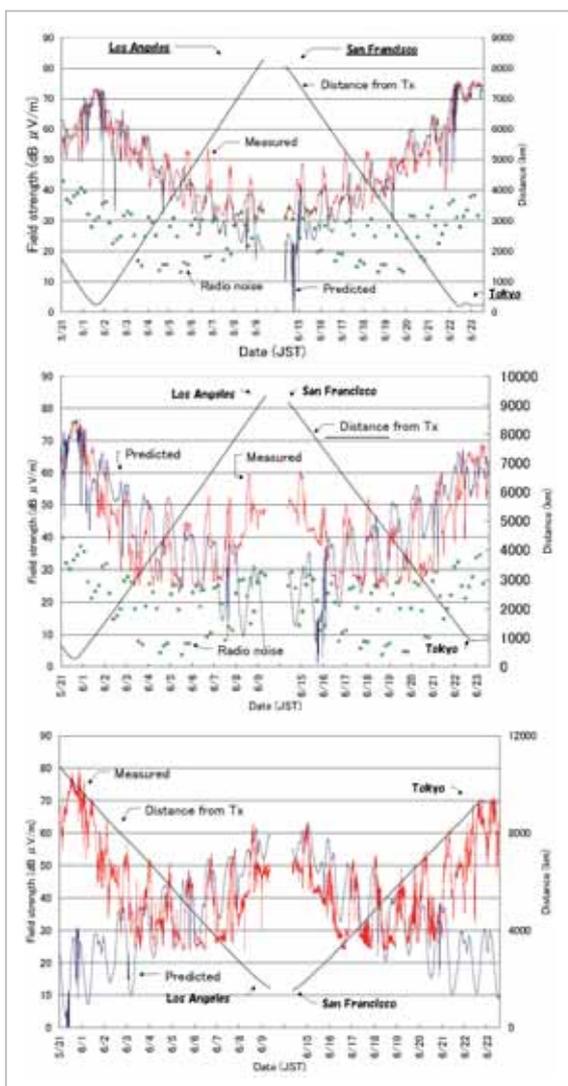


図 10 太平洋航路での電界強度の変化
(上: 40 kHz、中: 60 kHz-JJY、
下: 60 kHz-WWVB)

赤線: 測定値
青線: 計算値
緑点: 空電雑音強度 ([17]による)
(文献 [12]による)

約 0.1 秒でサンプリングしている 100 個の一連の
パルス列の自己相関係数を計算し、秒信号の周期性
が検出されれば標準電波であると判定し、検出
されなければ混信雑音とした。

日本からアメリカ西海岸にいたる太平洋航路で
は、40 kHz の測定値は、送信点から約 4,000 km
まではほぼ予測値と合っているが、それ以遠では
空電雑音レベルに近づき、受信感度の限界となっ
ている。図 8(A) 点に示す 2007 年 6 月 5 日の信号
強度は雑音レベルより十分高く予測値とよく一致

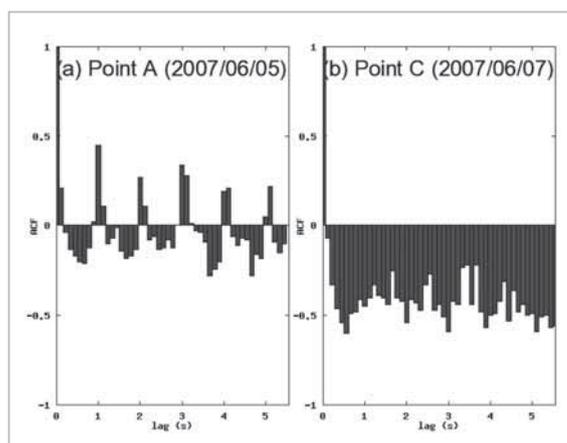


図 11 40 kHz 受信信号強度の自己相関係数

(a) 航路上の A 点 (6 月 5 日)
(b) 航路上の C 点 (6 月 7 日)
(文献 [12]による)

し、自己相関は秒信号の周期性を示している
(図 11(a))。一方 2 日後の図 8(C) 点に示す 6 月 7
日は、背景にある空電雑音の影響を受けて、自己
相関は図 11(b) に示すように、周期性のない負の
値を示している。

40 kHz 波が距離と共に一様に減少したのと対
照的に、60 kHz 波はアリューシャン列島の南方海
上辺りから電界強度は上昇に転ずる。その理由と
して米国は JJY と同じ 60 kHz で標準電波
WWVB を発射しているためと考えられる。
60 kHz 波測定値と WWVB 波の強度予測値とを
コース全体にわたって示すと図 10 下段のようにな
る。JJY 60 kHz と WWVB 60 kHz 波がほぼ同じレ
ベルに達した 6 月 5 日 (図 8(A) 点) の自己相関係
数は全体として周期性の無い様な正の相関係数
を示した。それから 12 時間後の図 8(B) 点では
WWVB 波が強くなり、相関係数に再び秒信号の
周期性が明瞭に現れた。上記により、米国西海岸
に近づくとつれ増加するのは WWVB 波であるこ
とが明らかである。

図 10 中・下段に示すように、60 kHz 波の受信
強度については、太平洋航路全体として測定値と
予測値の間に非常に一致が見られる。

一方、南極航路の「しらせ」は 2007 年 11 月 14
日東京を離れ、11 月 28 日オーストラリア西岸のフ
リーマントル着、12 月 3 日同港を出航して南下し、
南極大陸沿いに昭和基地に向かった。また帰路は
2008 年 2 月 15 日昭和基地を出発し、3 月 20 日～

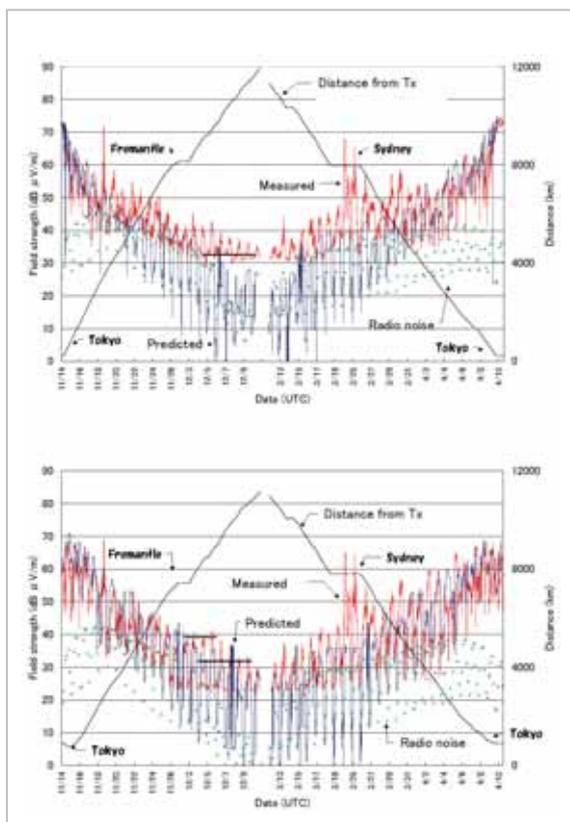


図 12 南極航路における電界強度実測値と予測値との比較

上段：40 kHz
下段：60 kHz
(文献[12]による)

3月26日シドニーに寄港し、4月12日東京に帰着した。オーストラリア以遠は伝搬距離が9,000 kmを超えて信号強度が弱くなるが、数日間はJJY波と確認できた。図12に南極航路の40 kHz(上)と60 kHz(下)の受信電界強度、予測値、空電雑音強度予測値、送信局からの大圏距離の推移を示す。上下図とも、左半分が日本からフリーマントルを経由する往路、右半分がシドニーを経由して日本に戻る復路に当たる。南極航路は太平洋航路ほど大圏路に沿っていないが、時間経過がほぼ伝搬距離に比例する表示になっている。

40 kHzについては、フィリピン東方を南下する2007年11月18日頃から受信レベルが上昇し、雑音性の速い変動を伴って高いレベルでフリーマントルまで推移している。自己相関係数法によると、11月17日(コース上D点)におけるJJY 40 kHz受信強度の自己相関係数には秒信号の周期性が明瞭に現れた。これに対し、11月18日(コース上

E点)は全く周期性のない負の相関係数となり、明らかに雑音性のものであることが分かる。その上、文献[17]で予測される空電雑音が信号レベル近くまで上昇している。したがって11月18日以降フリーマントルまでの受信データの大部分は空電雑音の影響を受けている、と推察される。ただし、11月24日だけは、40 kHz波と60 kHz波ともに信号の周期性が確認された。さらにフリーマントル出港後、最後に60 kHz波が確認されたのは12月6日であり、送受信点間距離は約9,300 kmであった。

復路については、南極からシドニーに向かう航路上の、3月15日から3月17日までの間だけ受信波が60 kHzと確認された。その最遠地点は南緯50度で、送受信点間距離約9,600 kmであった。それ以降はシドニー近傍の都市雑音及びニューギニア近傍の空電雑音の影響を受けて信号は確認できず、赤道を超えた4月2日からはJJY波が受信された。

南極航路全体としては、熱帯性空電雑音の影響を受けたため、特に40 kHz波は往路約2,000 km、復路約4,000 kmまでしか連続した測定値は得られなかった。しかし60 kHz波は往復路とも約8,000 kmにわたって予測値強度とよく一致する信号を受信することができた。また受信点が都市部近傍を通過する際には、40 kHz、60 kHzとも強い人工雑音による受信障害を受けた。

4 高感度受信システムの開発

上述の受信システムは国内陸上での電界強度測定を基に設計されたものであり、遠距離での観測には感度が不足している。また、国内の手動観測では問題にならなかったフェージング、雑音・混信と信号の分離が自動観測では必須となる。太平洋航路、南極航路では自己相関による1秒周期の有無で信号の判定をしたが、混信の中で信号レベルを決定するには測定信号の位相追尾、近隣のスペクトル、受信波の振幅確率分布(APD: Amplitude Probability Distribution)解析のことができることが好ましい。岩間他は標準電波と雑音・混信の判別にAPD、スペクトル解析を使い、東京および周辺での測定では雑音・混信が標準電波より強くなる場合のあることを示した[18]。

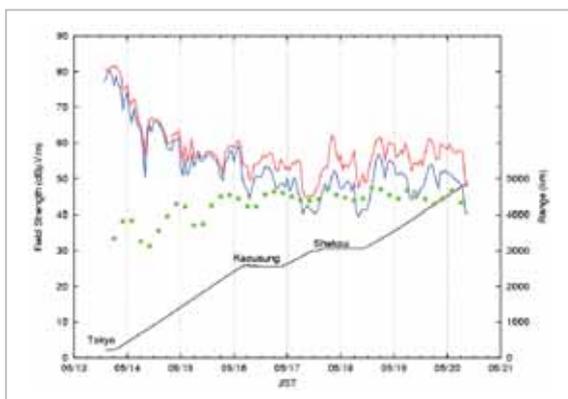


図 13 東南アジア航路往路の 40 kHz 測定値

赤線：1 時間準尖頭 (QP) 値
 青線：1 時間中央 (MD) 値
 緑点：空電雑音レベル
 黒線：送信局からの大圏距離

図 13 に 2007 年の東南アジア航路の東京から高雄(台湾)、蛇口(香港)を経てタイ沖合までの往路の測定データを示す。1 時間分の測定値を使い、準尖頭(QP) 値、中央(MD) 値を算出した。3,000 km 程度を境に QP と MD の差が生じ、フェージングが生じていることを示す。また、寄港地ごとに受信レベルが上昇し、都市雑音の強いことを示唆している。受信感度は 30 dB μ V/m 程度であるが、低緯度では空電雑音レベルが上昇し、遠距離伝搬の解析には信号と雑音の分離能力が不足している。

受信機の感度は帯域幅に依存するが IF 段を極端に狭帯域にすることは技術的に難しい。上記の問題を解決するため、ロックインアンプによる受信システムを開発している。ロックインアンプの時定数を制御して等価的に狭帯域受信を実現している。ロックインアンプ受信機のブロック図を図 14 に示す。アンテナの X、Y 軸各端子に 40 kHz、60 kHz 用のロックインアンプを接続し、連続して測定データをサンプリングする。ロックインアンプの時定数を 10 秒に設定して等価的に 0.2 Hz の帯域幅を実現している。

新旧の受信システムで 2009 年の「しらせ」南極航路出発時に測定した記録を図 15 に示す。「しらせ」は 11 月 10 日 3 時 (UT) に東京晴海埠頭を出港した。JJY 60 kHz の送信は 11 月 10 日の 11 時 30 分～14 時 30 分の間雷雨回避のため止められた。双方の受信システムはほぼ同じ強度変化を示す

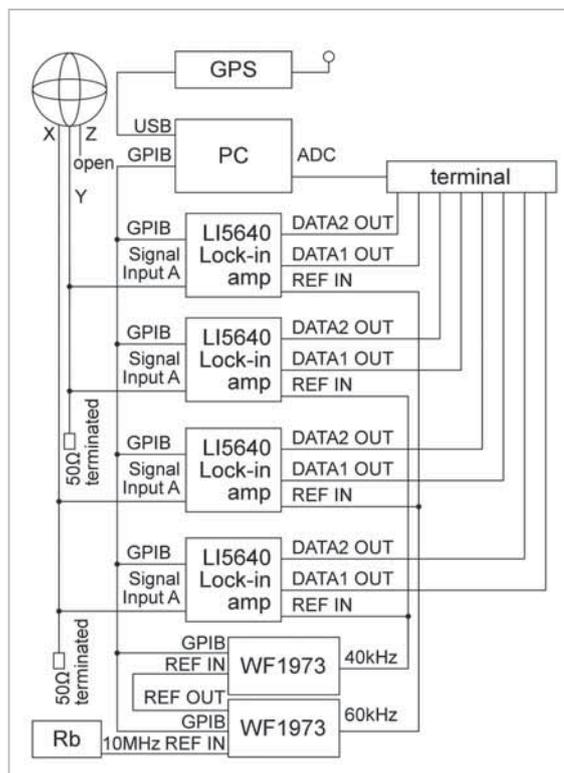


図 14 ロックインアンプを使った受信システム

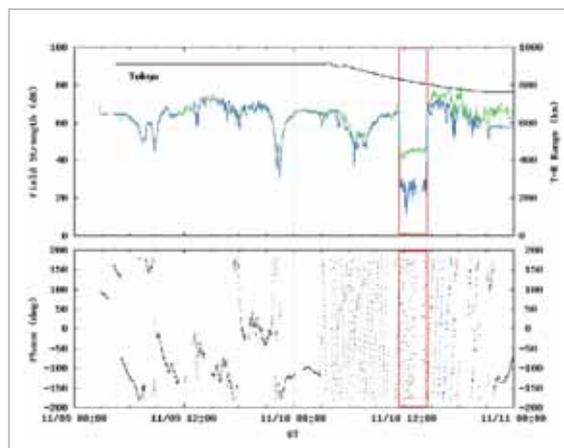


図 15 2009 年 11 月 10 日「しらせ」出港時の JJY 60 kHz 測定記録

上段：黒線は JJY 送信局からの距離 (右目盛り)、緑線は電界強度測定器 (図 7) による受信記録、青線はロックインアンプによる (図 14) 受信記録。
 下段：ロックインアンプで受信した JJY 60 kHz の位相変化。
 赤枠の期間 JJY 60 kHz は停波した。

が、停波期間中に示すようにロックインアンプは電界強度測定器より 15～20 dB 感度が高いことがわかる。晴海埠頭停泊中、下段に示す位相は緩やかな変化を示すが、出港と共に伝搬距離変化に

応じて回転する。停波期間中はロックが外れてランダムな記録となるが、送信再開と共に位相を追尾する。位相変化により標準電波受信の有無が容易に判定できる事を示している。

5 考察

国内から約 8,000 km に及ぶ太平洋と南極航路全般にわたって、60 kHz 波の測定値と予測値は非常に良く一致していることが分かった。一方 40 kHz については、米国西海岸に近づく太平洋航路の後半で測定値は空電雑音により予測値より高めである。また南極航路でも 40 kHz 波は空電雑音の影響を受けて、遠距離まで一貫した測定データを得ることはできなかったが、混信の弱い一部の地域で信号が受信され、予測法は実測結果と良く一致していることが確かめられた。全体として予測法^[5]は妥当であるということが出来るが、16,000 km まで実証するには受信機の高感度化が必須である。開発中のロックインアンプ方式では 10,000 km を超える連続受信が期待される。また、位相追尾、APD 解析による信号判別により、高精度な解析が期待される。

長波電波の遠距離伝搬は、太陽活動、季節、時間、送信諸元など多くの要因に依存するので、予測法の改善のため、今後も種々の送受信条件及び大地条件で実験と伝搬理論の改良を続ける必要がある。これまでの測定では図 4 に示す 3 つの太陽活動の 1 つについて実証したに過ぎず、少なくとも 1 太陽周期分の測定データを蓄積する必要がある。

ITU-R 勧告の予測法は手計算の時代から大幅に改善されたが、追加改訂を繰り返したので、波線法の記述が図表による手計算と 2 ホップまで、10 ホップまでの数値計算法が混在してしまった。内容を整理して書き直す必要がある。PC 化するに際して従来の予測法を踏襲したので、大地導電率は地表波の計算に使う値と、アンテナ係数、空間

波の大地反射波に使う値が異なる。ITU-R 勧告には大地電気伝導率の地図^[19]もあり、これらの値を取り入れれば勧告として一貫したものとなる。地図データをアルゴリズムに組み込めば、現在手入力で伝搬路の代表値を指定する仕様となっている地表の誘電率と導電率を反射点ごとに自動的に入力することができる。昨今の PC は処理能力、記録容量が大きく、地図データをファイル化する障害はない。地表波の計算ソフトウェアも ITU-R から公表されているので、組み込むことが望ましい。

電離層の活動を表すパラメータは従来の慣行にない、太陽黒点数 (SSN) を採用しているが、下部電離圏の電離は太陽からの軟 X 線～紫外線輻射による。この波長の放射強度は黒点数より 2800 MHz の太陽電波強度 (F10.7) が表すのに適している。F10.7 は毎日カナダのペンティクトン観測所の値が NOAA から公表されている。また、NICT でも観測しており、ネットワーク越しに自動取得が可能で、SSN による 3 段階の活動表示より連続的な太陽活動の指数が得られる。下部電離圏のモデリングも精力的に進められており、順次計算アルゴリズムに組み込むと共に、広範囲にわたる測定により検証を進める必要がある。高感度受信機の開発はその一歩となる。

謝辞

長波電界強度の予測アルゴリズムを PC 上で実行し、多回反射波を組み込む仕事は故若井電波研究所元所長のリーダーシップの下に進められた。若井博士には理論と測定全般にわたって指導いただいた。東南アジアおよび太平洋航路での測定では、コンテナ船「Argus」に測定器を搭載し、1 か月以上に及ぶ測定に格別の便宜を提供して頂いた日本郵船株式会社に対し深く感謝の意を表します。また測定装置一式の運搬設置にご協力を頂いた協立電子工業株式会社に深謝いたします。南極航路での観測では 49 次、50 次南極地域観測プロジェクトにより実施された。

参考文献

- 1 栗原則幸, “長波標準電波,” 通総研季報, Vol. 49, Nos. 1/2, pp. 167-173, 2003.
- 2 今村國康, 小竹昇, 土屋茂, 野崎憲朗, “標準電波のシステムと長波電波伝搬,” 信学技報, Vol. A-P2009-220, No. 3, pp. 91-94, 2010.

- 3 大内長七, 藤井周, 若井登, "1972年8月の太陽地球間擾乱現象 15. Loran-C 電波強度と位相変動," 電波研季報, Vol. 19, No. 103, pp. 367-372, 1973.
- 4 石嶺剛, 越前谷喜松, "長波 40 kHz の近距離伝搬特性—冬季異常発生時の特異な特性," 電波研季報, Vol. 29, No. 151, pp. 395-407, 1983.
- 5 Recommendation ITU-R P. 684-5, "Prediction of field strength at frequencies below 150 kHz," ITU, 2009.
- 6 栗原則幸, 大塚敦, 今村國康, 高橋幸雄, 若井登, "冬季における長波標準電波強度の全国マップ," 信学技報, A-P2004-195, pp. 29-34, 2004.
- 7 N. Wakai, N. Kurihara, A. Otsuka, K. Imamura, and Y. Takahashi, "Wintertime survey of LF field strengths in Japan," Radio Sci., Vol. 41, No. 5, RS5S13, pp. 1-7, Sep./Oct. 2006.
- 8 J. S. Belrose, "Low and very low frequency radio wave propagation, in Radio wave Propagation," AGARD Lecture Ser., Vol. 29, pp. 97-115, Advis. Group for Aerosp. Res. And Dev., NATO, Neuilly-sur-Seine, France, 1968.
- 9 若井登, 栗原則幸, 大塚敦, 今村國康, "長中波電界強度計算法," 信学技報, A-P2003-271, pp. 35-40, 2004.
- 10 Recommendation ITU-R P. 684-4, "Prediction of field strength at frequencies below 150 kHz," ITU, 2005.
- 11 土屋茂, 野崎憲朗, 今村國康, 前野英生, 若井登, "アジア・北米航路における長波標準電波の電界強度移動測定," 信学技報, A-P2007-138, pp. 93-98, 2008.
- 12 野崎憲朗, 土屋茂, 今村國康, 前野英生, 長浜則夫, 梅津正道, 若井登, "長波標準電波の伝搬実験と電界強度計算法の開発," 信学論 B, Vol. J92-B, No. 12, pp. 1832-1843, 2009.
- 13 前川泰之, 浜口清, 石井守, 野崎憲朗, 佐藤明雄, "固定系伝搬モデルとダイナミクス," 信学誌, Vol. 93, No. 12, pp. 1015-1019, 2010.
- 14 Recommendation ITU-R P. 368-7, "Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz," ITU, 1992.
- 15 Report ITU-R P. 1008, "Reflection from the surface of the Earth," ITU, 1986.
- 16 Recommendation ITU-R P. 1239, "ITU-R Reference ionospheric characteristics, Annex I Ionospheric characteristics, 4 Prediction of foE," ITU, 2002.
- 17 Recommendation ITU-R P. 372-9, "Radio Noise," ITU, 2007.
- 18 岩間美樹, 篠塚隆, 山中幸雄, "長波帯における電波雑音の標準電波への影響," 電気論 A, Vol. 126, No. 9, pp. 895-901, 2006.
- 19 Recommendation ITU-R P. 832-2, "World Atlas of Ground Conductivities," ITU-R, 1999.



つちや しげる
土屋 茂

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
標準電波、電波伝搬



いまむらくに やす
今村國康

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ研究マネージャー
標準時・周波数標準

いとうひろゆき
伊東宏之

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
原子周波数標準、光周波数標準



まえの ひでお
前野英生

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(工学)
時刻比較



くぼ たみのる
久保田実

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ主任研究員 博士(理学)
超高層大気物理



の ぎきけんろう
野崎憲朗

(財)テレコムエンジニアリングセンター
松戸試験所主任技師
電波科学