

MF 帯/HF 帯地上波伝搬特性の予測と実測

西岡泰弘，小林立範，中西孝行，稲沢良夫，宮下裕章（三菱電機），

高橋智幸（関西大学），藤井智史（琉球大学），花土弘（情報通信研究機構），

日向博文（国土交通省）

1. まえがき

HF 帯以下の電磁波は，地面や海面に沿って見通し外領域まで比較的長い距離を伝搬できることが知られている．この特長を利用し，古くからラジオ放送や海洋レーダなどに使用されている．

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震は大津波を引き起こし，東日本の太平洋沿岸に多大な被害を与えた．この東日本大震災の後，多方面にわたり津波対策の大幅な強化が進められている．

津波の位置を探知する手段の一つとして，海岸付近にアンテナを設置し，HF 帯以下の電波を送受信する津波監視レーダが注目されている．地面の表面波伝搬損失は海面のそれに比べて非常に大きいので，長い探知距離を確保するためにはアンテナを海上に設置するのが望ましい．しかしながら，レーダシステム全体の構築，管理維持，装置の耐環境性などを考えると，海上への設置を実現するのは困難であり，陸上に設置せざるをえない．この場合，アンテナから津波までの表面波伝搬経路は，伝搬方向に表面インピーダンス不連続を有する，いわゆる混合経路（mixed-path）となる．また，津波監視レーダで使用する主たる伝搬モードは，海面に沿って伝搬する表面波であるが，HF 帯では波浪の波高は電波の波長に比べて十分には小さくないため，その伝搬損失への影響は無視できない．従って，津波監視レーダの回線設計の精度を向上させるためには，波浪の影響を考慮した海上伝搬解析技術と，陸海混合経路に対する伝搬損失の予測技術が必要となる．

地上波伝搬特性に関する研究の歴史は Wait のレビュー論文[1]によくまとめられており，1900 年頃から活発になされるようになった．Sommerfeld[2]と Norton[3-4]は地表面を平面，大気の屈折率を一樣と仮定し，簡潔な形で地表波減衰関数を導いている．Watson[5]，Bremmer[6]，Wait[7]らは地表面を球面としてより厳密に解析を行っている．その後，Rotheram がより現実に近い標準大気モデル[8]を考慮した解析結果を発表した[9-11]．

混合経路に対する地上波伝搬特性の解析方法についても多くの研究がなされているが，本研究では，簡便で，実測値とよく対応するとされる Millington の方法[12-14]に着目した．この方法によれば，混合経路を形成する媒質に対し，地面が各媒質で一樣であると仮定したときの伝搬損失距離特性を知れば，それら媒質が混在した経路に対する伝搬損失を簡単な公式によって求めることができる．

一方，1970 年，Barrick は Rice のラフサーフェス理論[15]

と Leontovich のインピーダンス境界条件[16-17]を用い，波浪を有する海水面の実効表面インピーダンスを導出した[18-20]．滑らかな地表面に対する表面インピーダンスを凹凸を考慮した実効表面インピーダンスに置換することにより，波浪の影響を加味した解析が可能となる．

本研究は，上記の地上波伝搬特性解析技術[8-14，18-20]の有効性検証を目的とする．まず，2 章において解析方法の概要を示す．3 章では，陸海混合経路における MF 帯地上波伝搬特性の測定方法，および，実測値と計算値の比較結果を示す．4 章では，HF 帯海上伝搬特性の測定方法，および，実測値と解析値の比較結果を示す．3 章，4 章ともに実測値と計算値の距離減衰特性が良く対応することを示す．

2. 解析方法の概要

2.1 滑らかで均質な地表面に対する解析方法[9-10]

図 1 に解析モデルを示す．大気屈折率 n は高度方向にのみ変化するものとし，地球は半径が r_0 で屈折率が n_e の均質な誘電体球とする．高さ h_a に置かれた垂直微小ダイポールによるヘルツベクトルの垂直成分は，近似的に次式で与えられる．

$$U = \left[\frac{\exp(-i\pi/2)}{2\pi r_0 \sin(D/r_0)} \right]^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} dS \exp(-ikDS) \times g^{(2)}(S, H_a) \left[g^{(1)}(S, H_b) - \frac{dg^{(1)}(S, 0)/dH - ik\Delta g^{(1)}(S, 0)}{dg^{(2)}(S, 0)/dH - ik\Delta g^{(2)}(S, 0)} g^{(2)}(S, H_b) \right] \quad (1)$$

ここで， D は地表面に沿って測った波源から観測点までの距離， k は真空中の波数， h は地表面からの高さ，

$$H = r_0 \ln(r/r_0) = h - h^2/2r_0 + \dots \quad (2)$$

は修正高，

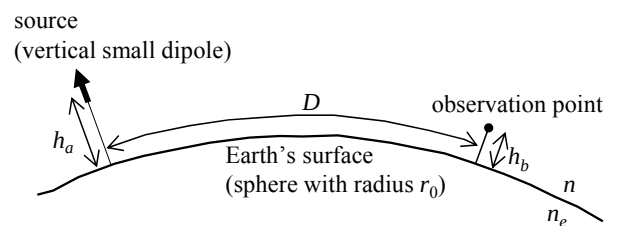


図 1 解析モデル

$$\Delta = \frac{(n_e^2 - 1)^{1/2}}{n_e^2} - \frac{1}{ik} \left(\frac{d}{dh} \ln n \right)_{h=0} \quad (3)$$

は真空中の波動インピーダンスで正規化された地表面の表面インピーダンス、波動関数 $g^{(1)}(S, H)$ および $g^{(2)}(S, H)$ は

$$\frac{d^2}{dH^2} g(S, H) + k^2 \{m^2(H) - S^2\} g(S, H) = 0 \quad (4)$$

の2つの独立な解である。 m は大気の実屈折率であり、大気の実屈折率[6]

$$n_{\text{eff}}^2 = n^2 - \frac{n}{k^2} \frac{d^2}{dh^2} \frac{1}{n} \quad (5)$$

を用いて次式で与えられる。

$$m = n_{\text{eff}}(r/r_0) = n_{\text{eff}} \exp(H/r_0) \quad (6)$$

(1)式において積分路を無限大の半円（複素 S 平面の下平面）で閉じ、留数定理を適用して被積分関数の極の寄与を評価すると、最終的に U は次の留数級数（residue series）で表わされる。

$$U = \left[\frac{8k^3 \pi \exp(-i\pi/2)}{r_0 \sin(D/r_0)} \right]^{1/2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-ikDS_n)}{\partial^2 \ln g^{(2)}(S_n, 0)} \frac{g^{(2)}(S_n, H_a)}{g^{(2)}(S_n, 0)} \frac{g^{(2)}(S_n, H_b)}{g^{(2)}(S_n, 0)} \quad (7)$$

ここで、 S_n は

$$\frac{d}{dH} \ln g^{(2)}(p_0, H) - ik\Delta = 0 \quad (8)$$

の根であり、

$$p_0 = m^2(0) - S^2 = q_0^2 \quad (9)$$

である。

(7)式の級数は波源と観測点の距離が近くなると収束が悪くなるので、近距離に対する計算は以下に示す別の計算式を用いる。

波源と観測点が地表面上にある場合、(1)式は以下となる。

$$U = \left[\frac{2k^3 \exp(-3i\pi/2)}{\pi r_0 \sin(D/r_0)} \right]^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} dS \frac{\exp(-ikDS)}{d \ln g^{(2)}(S, 0) - ik\Delta} \quad (10)$$

上式の積分変数を S から q_0 に変換し、被積分関数の分母を k の負冪級数で展開して第3項で打ち切り、積分を実行すると、最終的に次式を得る。

$$U = \frac{2 \exp(-ikDm(0))}{[Dr_0 \sin(D/r_0)]^{1/2}} \times \left[F_0(u) + f^{(1)} F_1(u) + \left\{ f^{(1)^2} F_2(u) + f^{(2)} F_3(u) \right\} + \left\{ f^{(1)^3} F_4(u) + f^{(1)} f^{(2)} F_5(u) + f^{(3)} F_6(u) \right\} \right] \quad (11)$$

ここで、

$$u = -\exp(-i\pi/4)(kD/2)^{1/2} \Delta \quad (12)$$

$$f^{(i)} = \frac{p_0^{(i)}}{(-ik)^i} \left[\frac{\exp(-i\pi/2)kD}{2} \right]^{(i/2+1)} \quad (13)$$

である。また、

$$F_0(u) = 1 + i\pi^{1/2} u \exp(-u^2) \text{erfc}(-iu) \quad (14)$$

はよく知られた Sommerfeld と Norton の地表波減衰関数[2・4]に対応する。ここで、 $\text{erfc}(\cdot)$ は補誤差関数である。 $F_1(u)$ から $F_6(u)$ は u と $F_0(u)$ を用いて表わされる。 $f^{(1)}$ は大気屈折率高度分布の線形成分の寄与を表し、 $f^{(2)}$ 以上の項は非線形成分の寄与を表す。

2.2 混合経路に対する計算方法[12-14]

Millington の公式は次式で与えられる。

$$E_D = \sum_{k=1}^N E_k(s_k) - \sum_{k=2}^N E_k(s_{k-1}) \quad (15)$$

$$s_k = \sum_{n=1}^k d_n \quad (16)$$

$$E_R = \sum_{k=1}^N E_{N-k+1}(r_k) - \sum_{k=2}^N E_{N-k+1}(r_{k-1}) \quad (17)$$

$$r_k = \sum_{n=1}^k d_{N-n+1} \quad (18)$$

$$E_T = (E_D + E_R)/2 \quad (19)$$

ここで、 N は混合経路を形成する媒質の数、 d は各媒質の経路長、 s_k および r_k ($k=1, 2, \dots, N-1$) はそれぞれ波源および観測点から各媒質境界までの距離、 $s_N = r_N$ は波源と観測点の距離、 E_k は地面が媒質# k で一様とした場合の電界強度、 E_T が求める電界強度である。また、電界の単位は dB である。前節に示した方法で海一様および陸一様それぞれに対する伝搬損失計算結果を上式に代入すれば、陸海混合経路に対する伝搬損失を簡便に求めることができる。

2.3 波浪(凹凸)を有する海面の実効表面インピーダンス [18-20]

波浪のない海水面を x - y 平面としたとき、真空中の波動インピーダンスで規格化された波浪（凹凸）を有する海水面の実効表面インピーダンス $\bar{A}$ は次式のように、波浪の x 方向波数 p と y 方向波数 q を変数とする波数空間での2重無限積分で与えられる。

$$\bar{A} = \Delta + \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(p, q) W(p, q) dp dq \quad (20)$$

ここで、 $W(p, q)$ は波浪の波高スペクトル、

$$F(p, q) = \frac{p^2 + b' \Delta (p^2 + q^2 - k_0 p)}{b' + \Delta (b'^2 + 1)} + \Delta \left(\frac{p^2 - q^2}{2} + k_0 p \right) \quad (21)$$

$$b' = \frac{1}{k_0} \sqrt{k_0^2 - (p + k_0)^2 - q^2} \quad (22)$$

である．前節の滑らかな地表面に対する規格化表面インピーダンス Δ を(20)式の規格化表面インピーダンス $\bar{\Delta}$ に置き換えることにより，波浪の影響を考慮した表面波伝搬特性を解析することができる．

海洋の波高スペクトルモデル $W(p, q)$ については多くの海洋学者により様々なモデルが提案されているが，Barrick はその中の Neumann-Pierson モデルと Phillips モデルの2つのモデルを採用している．前者は波浪の伝搬方向を考慮した方向性モデルであり，後者は波浪の伝搬方向を考慮しない当方性モデルである．Barrick の検討結果によれば，Neumann-Pierson モデルの upwind-downwind direction（波浪の伝搬方向＝電波の伝搬方向）は最大の伝搬損を，同モデルの crosswind direction（波浪の伝搬方向と電波の伝搬方向が直交）は最小の伝搬損を，Phillips モデルは両者の中間程度の（平均的な）伝搬損を与えるとされる．本研究では，海洋の波高スペクトルモデルとして，平均的な伝搬損を与える Phillips モデルを採用することとする．

Phillips の海洋波高スペクトルモデルは次式で与えられる．

$$W(p, q) = \begin{cases} 0 & , \kappa \equiv \sqrt{p^2 + q^2} < g/U^2; \\ 4B/\pi(p^2 + q^2)^2 & , g/U^2 \leq \kappa; \end{cases} \quad (23)$$

ここで， $B \approx 0.005$ ， g は重力加速度 (9.80665 m/sec^2)， U は風速 [m/sec] である．Phillips モデルにおける風速 U と波高標準偏差 σ_h との関係は次式で与えられる．

$$\sigma_h = \left[\frac{1}{2} \frac{BU^4}{g^2} \right]^{1/2} \quad (24)$$

表1にシーステート，風速，および Phillips モデルの波高標準偏差の間の関係を示す．シーステートの定義は文献[18－20]に従っている．また，一例として，図2に風速 $U = 7.7 \text{ m/s}$ のときの Phillips の海洋波高スペクトル特性を示す．

表1 シーステート，風速，および Phillips モデル
波高標準偏差の関係

Sea state	Wind speed [m/s]	Wave-height RMS σ_h [m]
1	2.57	0.03
2	5.14	0.13
3	7.72	0.30
4	10.29	0.54
5	12.86	0.84
6	15.43	1.21

2.4 解析に用いる電気定数と大気屈折率

計算に用いる地表面の電気定数は，ITU 勧告[21]に基づき，陸地の比誘電率を $\epsilon_r=15$ ，導電率を $\sigma=0.001 \text{ S/m}$ (medium dry ground) とし，海水の比誘電率を $\epsilon_r=70$ ，導電率を $\sigma=5 \text{ S/m}$ とする．波源および観測点の高さはともに零とする．また，大気の屈折率分布には ITU 勧告[8]に示されている標準大気モデルを用いる．

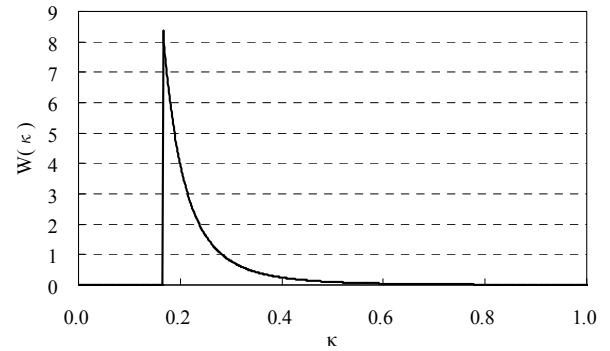


図2 Phillips の海洋波高スペクトル特性の一例
(風速 $U = 7.7 \text{ m/s}$)

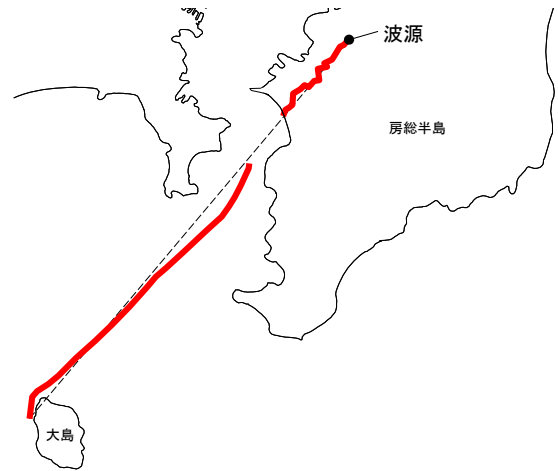


図3 陸海混合測定経路

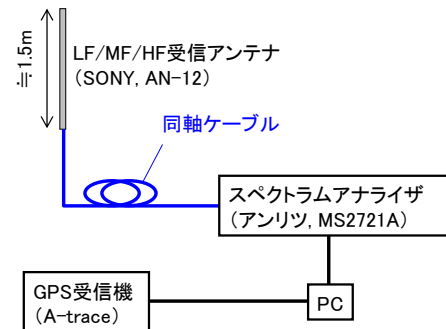


図4 測定に用いた受信機器

$$n(h) = 1 + \delta \exp(-h/h_s) \quad (25)$$

ここで， $\delta = 315 \times 10^{-6}$ ， $h_s = 7.35 \text{ km}$ である．

3. 陸海混合経路における MF 帯伝搬特性

3.1 測定方法

図3に測定地域の地形図と測定経路を示す．波源にはニッポン放送木更津送信所（千葉県木更津市，搬送波周波数 1.242 MHz （波長約 242 m ），送信電力 100 kW ）を選定し

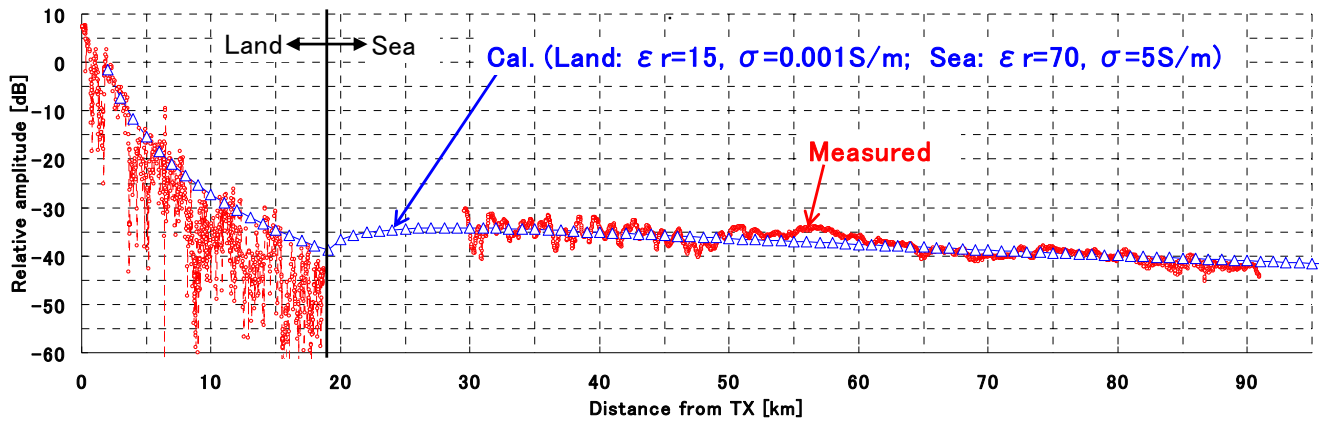


図5 陸海混合経路におけるMF帯伝搬特性の実測値と計算値との比較

た．本送信所には地面に垂直に高さ約 120m の線状アンテナが設置されており，垂直偏波が放射されている．送信所からみて同一方向の陸上および海上の伝搬距離特性を測定するために，送信所と大島元町港を結ぶ直線（図中破線）を基本測定線とした．実際の測定経路を図3に太線で示す．陸上では車で，海上では東京一大島定期連絡船で移動しながら，搬送波周波数の受信電力を測定した．送信所から海岸までの距離は約 19km，送信所から大島元町港までの距離は約 90km である．

図4に測定に用いた受信機器を示す．受信アンテナには SONY 製 AN-12 を用いた．これをスペクトラムアナライザに接続して PC でスペアナを制御し，PC に受信電力と時刻を記録した．また，受信アンテナの近傍に GPS 受信器を設置し，測定位置と時刻を記録した．

3.2 実測値と計算値の比較

図3の測定経路に沿って移動測定を行った結果（○印）と計算結果（△印）の比較を図5に示す．横軸は送信アンテナから測定点までの距離であり，19km 地点が陸と海の境界である．縦軸は相対受信電力測定値（単位 dB）である．受信アンテナ利得あるいは入射電界強度と受信電力との関係を知ることができなかったため，海上における測定値に対応するように計算結果をオフセットしている．このオフセット量は，送信アンテナと受信アンテナの利得(dB)の和に対応する．

図5において，陸上（距離<19km）での受信電力測定値には変動幅の大きいフェージングが認められる．陸上の測定経路は市街地と山地との境界に位置しており，上記フェージングは建物および山による散乱に起因していると考えられる．陸域測定値の包絡線がおおよそその真値を与えると考えれば，電界強度の減衰特性は，測定値と計算値で良く対応している．また，海岸線付近の海側において，よく知られた Recovery effect が生じていることが確認できる．

4. HF 帯海上伝搬特性

4.1 測定方法

和歌山県白浜町にある試験運用中の海洋レーダを送信源に選定した．本レーダの送信アンテナは 3 素子八木宇田アンテナであり，海岸線からおおよそ 90m 内陸の位置に設置されている．送信波の中心周波数は 24.515MHz，送信ピーク電力は 200W，偏波は垂直偏波である．

図6に海上伝搬特性の測定経路を黒太線で示す．小型船舶に受信アンテナを設置し，送信源の近くからおおよそ南西方向に約 55km 離れた位置まで，船で移動しながら受信電力を測定した．測定日は 2013 年 5 月 13 日，測定時間帯は 9 時 40 分から 11 時 45 分である．測定に用いた受信機器は前章と同一である．

4.2 実測値と計算値の比較

海洋レーダからの距離約 55km まで測定を行ったが，距離 40km 以上では測定値がほぼ一定となった．これは受信器の熱雑音による測定限界であり，本測定の有効測定距離はおおよそ 30km までであった．

波浪を考慮した解析に必要な測定時の風速を知るために，測定日の南紀白浜の風速観測データを調べた．測定日の 10 分毎の風速の変化[22]を図7に示す．有効測定距離 0～30km の測定時間帯は 9 時 40 分～10 時 40 分の 1 時間であり，この時間帯の風速平均値を算出すると，2.6 m/sec となる．

風速を 2.6 m/sec とした場合の計算結果と実測値との比較を図8に示す．横軸は，有効測定距離 30km までとしている．また，距離 1km 地点での測定値に対応するように計算結果をオフセットしている．実測値と計算値の差異は 3dB 以下であり，両者の距離減衰特性は良く対応していることが確認できる．

5. むすび

地上波電波伝搬特性解析方法[9-14]の有効性を検証するために，陸海混合経路において MF 帯ラジオ放送波の受信電力距離特性を実測し，理論値と比較した．また，波浪の



図6 HF帯海上伝搬測定経路

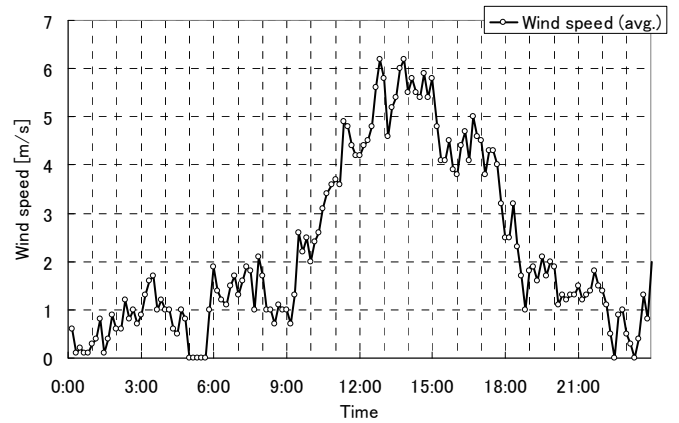


図7 測定日の南紀白浜の風速 (10分毎)

影響を考慮した海上表面波伝搬特性解析技術[18-20]の有効性を検証するために、海岸付近に設置された海洋レーダを送信源としてHF帯(24MHz帯)海上伝搬の受信電力距離特性を実測し、理論値と比較した。実測値と計算値の距離減衰特性は良く対応し、解析技術の有効性を確認することができた。

謝辞

本研究を行うにあたり、研究プロジェクト「東日本大震災を踏まえた観測およびシミュレーションが連携した津波減災技術の開発」およびJSPS科研費「24560525」の一部援助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] J. R. Wait, "The Ancient and Modern History of EM Ground-Wave Propagation," IEEE Antennas Propagat. Mag., vol.40, no.5, pp.7-24, 1998.
- [2] A. N. Sommerfeld, "Propagation of Waves in Wireless Telegraphy," Ann. Phys. (Leipzig), 28, pp. 665-737 (1909); 81, pp. 1135-1153, 1926.
- [3] K. A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere, Part I: Ground-wave propagation from short antennas," Proc. IRE, vol. 24, no. 10, pp. 1367-1387, 1936.
- [4] K. A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere, Part II: The propagation from vertical, horizontal, and loop antennas over a plane earth of finite conductivity," Proc. IRE, vol. 25, no. 9, pp. 1203-1236, 1937.
- [5] G. N. Watson, "The diffraction of radio waves by the earth," Proc. the Royal Society, vol. A95, pp. 83-99, 1918.
- [6] H. Bremmer: Terrestrial radio waves: Theory of propagation, Elsevier Sci. Ltd., 1949.

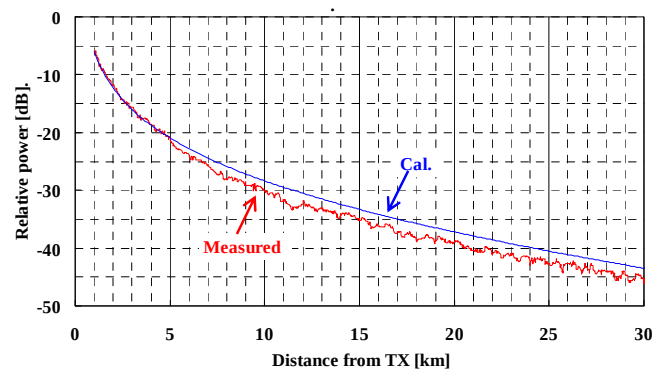


図8 HF帯海上伝搬特性の実測値と計算値との比較

- [7] J. R. Wait, "Radiation from a vertical antenna over a curved stratified ground," J. Res. Natl. Bur. Stand., vol. 56, no. 4, pp. 237-244, 1956.
- [8] Rec. ITU-R P.453-10, "The radio refractive index: its formula and refractivity data," ITU, Geneva, 2012.
- [9] S. Rotheram, "Ground-wave propagation Part 1: Theory for short distances," IEE Proc., vol. 128, Pt. F, no. 5, pp. 275-284, 1981.
- [10] S. Rotheram, "Ground-wave propagation Part 2: Theory for medium and long distances and reference propagation curves," IEE Proc., vol. 128, Pt. F, no. 5, pp. 285-295, 1981.
- [11] Rec. ITU-R P.368-9, "Ground-wave propagation curves for frequencies between 10kHz and 30 MHz," ITU, Geneva, 2007.
- [12] G. Millington, "Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth," Proc. IEE, vol.96, Part III, pp.53-64, 1949.
- [13] G. Millington, "Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth, part 2. experimental evidence and practical implications," Proc. IEE, vol.97, Part III, no.48, pp.209-217, 1950.

- [14] L. Sevgi, "A mixed-path groundwave field-strength prediction virtual tool for digital radio broadcast systems in medium and short wave bands," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol.48, no.4, pp.19-27, 2006.
- [15] S. O. Rice, " Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces," in *Theory of Electromagnetic Waves*, edited by M. Kline, Interscience and Dover, New York, pp. 351-378, 1951.
- [16] M. A. Leontovich, " Approximate Boundary Condition for Electromagnetic Field on the Surface of a Good Conductor," Appendix A of Report entitled "Diffraction, Refraction, and Reflection of Radio Waves," edited by N. A. Logan and P. Blacksmith, Jr., AD 117276, 1957.
- [17] T. B. A. Senior, " Impedance boundary conditions for imperfectly conducting surface," *Appl. Sci. Res.*, Sec. B, vol. 8, no. 1, pp. 418-436, 1960.
- [18] D. E. Barrick, " Theory of ground-wave propagation across a rough sea at dekameter wavelengths," *Res. Rep.*, Battle Memorial Institute, Columbus, Ohio, AD 865-840, 1970.
- [19] D. E. Barrick, " Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 1, The effective surface impedance for a slightly rough highly conducting medium at grazing incidence," *Radio Science*, vol. 6, no. 5, pp. 517-526, 1971.
- [20] D. E. Barrick, " Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 2, Application to HF and VHF propagation above the sea," *Radio Science*, vol. 6, no. 5, pp. 527-533, 1971.
- [21] Rec. ITU-R P.527-3, "Electrical characteristics of the surface of the Earth," ITU, Geneva, 1992.
- [22] 気象庁ホームページ : <http://www.data.jma.go.jp>