航行用100kHz帯電波に及ぼす巨大架橋の影響について－II. －横方向橋材の効果－

佐藤 尚登 * ・山下 享子**
世登 順三*** ・岡本 康裕 *

On the Propagation Anomalies of 100kHz Band Hyperbolic Navigation Systems Caused by a Huge Bridge－II.

－The Effects of Transverse Structure－

Naoto SATO, Michiko YAMASHITA,
Junzou SETO and Yasuhiro OKAMOTO

Abstract

We have reported that the main towers of the huge suspension-bridge have been considered macroscopically as a couple of the vertical electric dipoles from analyzing the disturbances of the electric fields caused by Minami-Bisan Seto-Oohashi Bridge.

In this paper, in order to study the effect of the reradiation from the structure of the bridge extending in the horizontal direction, the vertical electric field intensities of Decca Waves were measured near Akashi-Kaikyo Oohashi-Bridge. When two main-towers were built, the disturbances of the field intensities appeared slightly. Secondly, as the hauling ropes were built between two main-towers, the shielding of the electric field was caused under the hauling ropes. Further, the sinusoidal-like variations of the electric field intensities were also seen clearly on the transmitter side of the bridge.

By the theoretical considerations, the static capacitance of the main-tower was about $0.003\mu\text{F}$, and it became about $0.37\mu\text{F}$ after the hauling ropes were built. It will be concluded that the capacitance of the main-tower is increased apparently by the horizontal structure of the bridge such as hauling ropes or main cables, and consequently the main-towers radiate the strong secondary waves.

1. はじめに

陸地付近で無線測位システムを利用して位置決定を行う場合に大型の海洋構造物の影響などを無視することができない状況にある。特に、巨大橋梁等の寸法は100kHz帯の航行用電波の波長と同じ程度かそれ以上であるために、システムに深刻なじょう乱を与えているのではないかと懸念された。そこで、先の論文では南備讃瀬戸大橋を取り上げ、そのじょう乱の程度及びその範囲について報告し、また、じょう乱の原因がすり橋構造の主塔であると予想した考え方を示した⁽¹⁾。しかしながら、じょう乱現象を理論的に説明するためには、さらに多くの測定実験を必要とした。そのため、架橋海域においてデッカ電波を利用した電界・磁界強度の測定を行い、それらの特性を解析することから2次放射波の発生メカニズムの検討を行ってきた。その結果、架橋を巨視的にみると、じょう乱源はすり橋を支える2本の主塔であり、南備讃瀬戸大橋は微小垂直ダイポールアンテナが2本並んでいるアンテナ系とみなすモデルをほぼ確立することができた⁽²⁾。しかし、橋を中心にして橋の両側の0.18波長以内では、電界強度が急増すること、及び $0.5\mu\text{s}$ 以上の大きな

* 正会員 海技大学校 (〒659 芦屋市西蔵町12-24)

** 正会員 名古屋市立保育短期大学 (〒488 尾張旭市平子町北59)

*** 正会員 広島商船高等専門学校 (〒725-02 豊田郡東野町4272-1)

船位誤差が生じることは、2本の主塔による2次波の影響のみでは説明が困難で、架橋の極く近傍では、主塔以外の構造物からの2次波の効果を加えたモデルが必要となった^(2,3)。南備讃瀬戸大橋での測定結果は架橋が完成した後のものであり、主塔と主塔以外の構造物からの2次波の効果を区別して測定することは困難であったが、同時期に、南備讃瀬戸大橋と同種の構造である明石海峡大橋の建設が着手されたことから、工事の進捗に伴ってじょう乱の影響がどの様に現れるかを測定することが可能となった。

南備讃瀬戸大橋において、じょう乱の主発生源は高さ約190mの主塔であるが、同じ構造の明石海峡大橋の高さは約300mにも及ぶ。そのため、明石海峡大橋の主塔によるじょう乱は、南備讃瀬戸大橋のじょう乱に比較して極めて顕著であると予想された。また、南備讃瀬戸大橋では、2次波の磁界強度の測定とその理論的考察から主塔を微小垂直ダイポールアンテナとみなすことができたが、明石海峡大橋の主塔以外の構造物が無い状態において主塔がどのようなアンテナ系に置き換えられるか念のために検証できると考えた。さらに、主塔間を最初に結ぶホーリングロープが架設された場合に、その効果がどの様に現れるかが問題であった。次に、主ケーブルに対して垂直方向に懸垂されるハンガーロープは、垂直偏波であるデッカ電波の到来1次波に励振され易いため、南備讃瀬戸大橋において観測された橋から0.18波長以内での局部的な電界強度の増加にハンガーロープが寄与している可能性が検証できると考えた。

本論文では、明石海峡大橋の2本の主塔が完成した時期から、つり橋の補鋼桁を支える主ケーブルにハンガーロープが架設されるまでの3カ年間に於いて、デッカ電波を利用した4回の実験結果を基に、主塔や主塔以外の各構造物が架設された場合の効果として、じょう乱源の静電容量について検討を行った。また、ホーリングロープ直下付近に起こる電界強度の急減少について、その原因を準静電的な取扱いによる電界遮へいの実験結果から定性的に説明を行った。

2. 実験方法並びに電界強度の測定結果

明石海峡大橋は、全長3,910mのつり橋構造の長大橋であり、本州と淡路島間の明石海峡を跨いで建設されている。図1に、建設途中にある橋の正面図を示す。図2には、明石海峡大橋の位置関係を示すが、矢印(→)は北九州と四国デッカチェーンの各送信局から明石海峡大橋へ到来する電波の方位を、数字は各送信局からの距離を示している。但し、四国デッカチェーンは1993年に廃止されたので、その局の電波を測定したのは初回のみである。

デッカ電波を利用して電界強度を測定する場合、到来波が連続波であることから受信機側でそれぞれのチャンネルのAGC電圧を測定することによって電界強度を容易に求めることができる。しかし、デッカ送信局では、高安定な水晶発振器により送信周波数の安定を図ってはいるが、単一送信局からの絶対位相の測定は困難である。従って、今回は電界強度を測定した。また、明石海峡大橋に至る伝搬路において、北九州デッカチェーンのMaster, Red, Green(以後、M, R, Gと略記する)各局からの伝搬距離は500km前後に及ぶことから、地表波への空間波の混入を避けるために、太陽天頂角30°以

図1 建設中の明石海峡大橋の正面図

図2 デッカチェーンの電波の到来方位・距離と測定場所
(■北九州チェーン局：□四国チェーン局)

内の時間帯に測定を行った。測定時期は、初回は主塔のみが完成した1993年3月15、16日、第2回目はホーリングロープの架設された1994年3月16日、第3回目は主ケーブルが架設された1995年6月1日、第4回目は主ケーブルにハンガーロープが懸けられた1995年8月24日である。測定は、橋の東西数kmに及ぶ広範囲にわたって行った。測定船の位置は、第3回目についてはDifferential GPSとレーダにより求め、それ以外はレーダにより求めた。

実際には図2に示される測定船の航跡（トラック a、b、c）のように、測定船を明石海峡大橋の西方から橋の下を通過して東方へ至るまで、デッキ電波の信号を連続測定した。ところで、明石海峡は航行船舶の輻輳する海域であり、海上交通安全法に定める規制区域である。そのため、測定船の運航は東航に際しては、トラック a に示されるように南航路を走ることになり、西航ではトラック b に示されるように北航路を走ることになる。測定に際して航路を航行する場合には、主塔間を結ぶ橋軸線の中央において橋軸と直角に交差する航路中央上に、可能な限り接近して測定船を走らせた。なお、第3回目においては規制が除外される長さ50m未満の小型FRP（繊維強化プラスチック）製の高速船を利用してトラック c 上において測定を行った。

図3に、デッキチェーン各局に対する電界強度の測定結果を示す。図3(a)は第2回目における北九州チェーンのトラック a での測定結果であり、図3(b)は第1回目の四国チェーンのトラック a での測定結果である。横軸は橋からの距離を、▲印は架橋中央部の真下を示している。縦軸は電界強度の相対値を示している。図3は、デッキ受信機側でのM,R,G各局とPurple局（以後、P局と略記する）のAGC電圧を多ペンレコーダーで直接記録したものである。▲印の位置が記録紙上で少しずつ左右にズレているのは、記録する際にペンどうしが重ならないようにペンの位置が離れて置かれているためである。記録からは、特に注目すべきことがわかる。図3(a)において、▲印に示される橋の直下付近では各局の電界強度が減少している。G局ではスケールオーバーして変化が無いが、橋の直下付近においては急減しているのがわかる。一方、図3(b)においては、図3(a)に示されるような橋の直下付近での電界強度の減少は見られない。図3(b)に示される第1回目の測定においては、2本の主塔のみが海上に直立していたのに対して、図3(a)に示される第2回目の測定ではホーリングロープが主塔間に架設されていた。ここで、図3(a)と図3(b)では測定対称としたデッキチェーンの違いと橋への電波の到来方位にチェーンによる違いがあるが、こうした差異は2次波源を微小垂直ダイポールアンテナとみなす場合に橋の直下付近における急激な電界強度の減少に影響していない。すなわち、デッキシステムにおいてはチェーンが異なっても送信基本周波数に差がほとんど無くほぼ類似しているが、ここでの四国チェーンと北九州チェーンの基本周波数もそれぞれ14.1383kHzと14.2283kHzで僅か90Hzの差であり、ほぼ同一周波数と見なせる。また、橋への電波の到来方位は2次波源に流れる高周波電流の位相にのみ係わるものである^(2,3)。従って、図3(a)と図3(b)の比較から、橋の直下付近における急激な電界強度の減少は、ホーリングロープによる電界の遮へいが一様に起きている結果と見なせる。

電界強度の記録を、もう少し詳しく見ていくと、まず、図3(a)の北九州チェーンのR局において、橋から西方の場所での電界強度の振幅の変化は大きく、約1,000m以遠でもその最大と最小の強度比（以後、定在波比と呼ぶ）は5dB程度にもなっている。同様にM局は、定在波比は3dBであり、P局では定在波比は極めて小さい。なお、G局ではスケールオーバーしてしまっているが、

図3(a) 北九州チェーンの測定結果(トラック a : 1994年3月16日)

図3(b) 四国チェーンの測定結果(トラック a : 1993年3月15日)

図3 デッキ電波の電界強度の測定結果(▲印は架橋中央部)

高い周波数ほど変化の振幅が大きい。図3(b)の四国チェーンのR局では橋の両側において小さな変化がみられ、架橋の東側約1,000m以遠で1.5dB程度になっている。同様に、G局は1.5dBであり、M局では定在波比が極めて小さい。

なお、第3回目の高速船上での実験では、レコーダの紙送りを速くしたことから記録紙が長大となった。そのため掲載できないが、第2回目とはほぼ同様な結果であった。第4回目における実験結果も第2回目とはほぼ同様な結果であった。

3. じょう乱源の静電容量と静電遮へいの実験的説明

3.1 じょう乱源の静電容量

念のために、最初に主塔が微小垂直ダイポールアンテナとみなせることを検討した。明石海峡大橋における第1回目の測定実験において、高さ約300mの2本の主塔は、次の2通りのじょう乱物体と考えられた。主塔を1本の垂直導体と考える場合は、垂直偏波であるデッキカ電波の到来1次電界が垂直導体を励振する。すなわち、微小垂直ダイポールアンテナとみなすことができる。また、主塔は矩形の導体からなる長方形であり、ある種の鳥居型のような形状を持つと考えれば、到来1次磁界が閉回路導体を励振する。すなわち、微小垂直ループアンテナとみなすことができる。ここで、測定船上での受信電界を求めるにあたり、次のように考える。主塔を、とりあえず最初は2次波源アンテナと呼ぶことにする。図4に示すように海面を xy 平面とし、橋軸を y 軸上に一致させたので2本の2次波源アンテナを $A(0, d)$ と $B(0, -d)$ に置き、測定船は $Q(x, y)$ として x の正の方向へ向かって進むものとする。送信局Tは橋から遠距離の所に位置しており、その電波の伝搬方向が正の x 軸となす角を反時計回りに ψ とする。送信局から発射された1次電波は地表波伝搬をしてA、B、Qの地点に到達する。測定船では、到来1次波と2次波源アンテナA、Bから再放射される2次波を受信することになる。

図4の配置において、主塔を微小垂直ループアンテナとみなした場合に、橋軸と直角に交差する航路中央上において測定船 $Q(x, 0)$ が受信する合成電界を求める⁽⁴⁾。その理論式を付録に示す。主塔を微小垂直ループアンテナとみなす場合は、閉回路の導体面は主塔間を結ぶ橋軸線(y)上となるが、この導体面の垂直な方向に対して2次波の電界は零となる。このことは付録に示す式において次のように説明できる。理論式の[ ]の中の第2項において、 $x/\sqrt{d^2+x^2}$ で示される項は導体面の垂直な方向($x=0$)で零となるので、式の[ ]の中の第2項に示される2次波の電界は無くなる。従って、図2に示されるトラックa上において電界強度を測定した場合は、橋軸線上に近づくに従って急激に減少することになる。特に、図3(b)に示される四国チェーンのG局電波は、到来方位($\psi \cong 343^\circ$)が閉回路導体面の方向に近いので到来1次磁界とじょう乱磁界は同方向または逆方向となるために橋軸の両側において電界強度が大きく、橋軸上では最も低い双峰の形が観測されることになる。しかし、図3(b)に示される四国チェーンのG局の結果を見れば、微小垂直ループアンテナを否定することになる。

2本の主塔がそれぞれ単独に直立した場合においても、主塔を微小垂直ダイポールアンテナとみなせることが示された。そこで、図4の配置において測定船を任意の点 $Q(x, y)$ とする時、測定船上では到来1次波と微小垂直ダイポールアンテナA、Bから再放射される2次波を受信することになる。この場合の合成受信電界 E は、既に導出しているので^(2,3)、その結果を示す。

$$E = E_0 e^{-jk_0(x \cos \psi + y \sin \psi)} \left[1 + \frac{Cl^2}{2\pi\epsilon_0} \right. \\ \times \left(\frac{1}{\sqrt{(d-y)^2 + x^2}^3} + \frac{jk_0}{(d-y)^2 + x^2} - \frac{k_0^2}{\sqrt{(d-y)^2 + x^2}} \right) \\ \times e^{-jk_0(\sqrt{(d-y)^2 + x^2} + d \sin \psi - x \cos \psi - y \sin \psi)} \left. \right]$$

図4 計算式における送信局(T)、2次波源(A、B)、受信点(Q)の配置図

$$\begin{aligned}
& + \frac{Cl^2}{2\pi\epsilon_0} \\
& \times \left(\frac{1}{\sqrt{(d+y)^2+x^2}^3} + \frac{jk_0}{(d+y)^2+x^2} - \frac{k_0^2}{\sqrt{(d+y)^2+x^2}} \right) \\
& \times \left[e^{-jk_0(\sqrt{(d+y)^2+x^2}+d\sin\psi-x\cos\psi-y\sin\psi)} \right] \quad (1)
\end{aligned}$$

但し、 ϵ_0 は真空の誘電率、到来1次波電界を E_0 、アンテナの実効長を l 、静電容量を C 、 k_0 は真空中の伝搬定数で $2\pi/\lambda$ である。式(1)の [ ] 中の第2項と第3項が、微小垂直ダイポールアンテナからの2次波の影響、すなわち架橋の主塔によって引き起こされる電界のじょう乱を表しており、それは、静電界、誘導電界そして放射電界でもって示されている。

図3において、架橋の西側の電界強度の変化は、到来1次波と架橋からの2次波の合成波の強度変化を表し、電界定在波パターンを示している。ここで電界定在波比 S (dB)と等価反射係数 γ との関係は次式で示される。

$$S = 20 \log_{10} \left(\frac{1+\gamma}{1-\gamma} \right) \quad (2)$$

図3(a)において、橋から約1,200m以上離れた場所でR局の定在波比は約5dB、M局で3dBであるが、このことは式(2)から等価反射係数 γ がそれぞれ0.28及び0.17程度であることを意味している。同様に、図3(b)におけるR局とG局の定在波比は1.5dBであるから等価反射係数は0.08程度であることがわかる。電界定在波比がわかれば、式(1)から最終的に微小垂直ダイポールアンテナの静電容量 C を求めることができる。しかし、式(1)から直接的に求めることは困難なため近似的に求めることにする。図2に示されるトラックa上を測定船が東航した場合に、航路中央線に可能な限り接近して(約100m離れて)並航したので、ここでは橋軸線の中央において橋軸と直角に交差する航路中央を航行したと考える。また、微小垂直ダイポールアンテナから放射される2次電界のうち放射電界が優勢になる場所に注目する。図3における各局においては橋から約1,200mの地点における放射電界は7割程度である。なお、図2において橋から約1,200mの地点は、橋から見た航路西方の屈曲部の手前付近にあたる。この時、式(1)から放射電界の項は次式で示される。

$$-\frac{Cl^2}{\pi\epsilon_0} \cos(k_0 d \sin\psi) - \frac{k_0^2}{\sqrt{d^2+x^2}} e^{-jk_0(\sqrt{d^2+x^2}-x\cos\psi)} \quad (3)$$

従って、微小垂直ダイポールアンテナから放射される2次電界のうち放射電界が優勢になる場所においては、式(3)の振幅の項と式(2)の等価反射係数 γ との関係は次式で示される。

$$\frac{Cl^2}{\pi\epsilon_0} \cos(k_0 d \sin\psi) - \frac{k_0^2}{\sqrt{d^2+x^2}} = r \quad (4)$$

式(4)から静電容量 C を求めることができる。まず北九州チェーンのR局の静電容量 C を求める。計算にあたっては次の値を用いた。

f : 周波数113kHz ψ : 電波の到来方位角326.4°

l : 実効長で主塔の高さ(290m)の約半分で150m

r : 主塔からの距離1,558m

この結果、R局の電波に対する静電容量として $C \cong 0.37\mu\text{F}$ が得られた。図3(a)のM局についても同様に計算すると、 $0.32\mu\text{F}$ となる。P局については、定在波比が極めて小さいので求められなかった。図3(b)の四国チェーンのR局とG局の電波に対する静電容量としては、それぞれ $0.039\mu\text{F}$ と $0.030\mu\text{F}$ が得られた。M局については、定在波比が極めて小さいので求められなかった。これらの結果から次のことが言える。主塔のみが海面上に直立している場合には、 $0.03\mu\text{F}$ 程度の静電容量を持つ微小垂直ダイポールアンテナであるが、さらに、ホーリングロープが架設された場合は、 $0.3\mu\text{F}$ 程度の大きな静電容量を持つことになり、かつ、比較的広い周波数にわたって共振条件を保ち、じょう乱の影響も大きくなることがわかった。

3.2 静電遮へいの実験的説明

図3(a)に示されるように、ホーリングロープ直下付近において電界強度の急減少が観測されたが、南備讃瀬戸大橋の直下付近においても同様な電界強度の急減少が観測された⁽²⁾。ホーリングロープまたは、橋桁や道路部分などの横方向の橋材が電界遮へいを引き起こすことは、ホーリングロープの架設時における測定結果から検証できたが、この現象を説明するにあたり次のように考える。図5(a)に示すように、橋の横断面

図5(a) ホーリングロープの接地球形導体への置換 図5(b) 橋桁、道路部分の接地球形導体への置換
図5 橋の横断面における橋材の接地球形導体への置換

において見た複数のホーリングロープを直径35mの1本の接地球形導体に置き換える時、接地球形導体の寸法は波長に比べ極めて小さく、静電界の取り扱いに近似して考えると、接地球形導体の静電遮蔽による電界強度の減少と考えられる。また、図5(b)に示すように、橋の横断面において見た橋桁や道路部分を直径35mの1本の接地球形導体に置き換える時も同様に考えられる⁽²⁾。そこで、接地球形導体による静電遮蔽の様相を等電位線描画実験装置⁽⁵⁾を利用して明らかにした。

図6に示されるように、上部導体の電位を+1Vとし、下部導体の電位を-1Vにして中央部を零電位とする。また、下部の導体表面は水で覆う。この時、下部導体上15cmの所に半径5cmの接地球形導体を配置して、一様電界中にある導体球の周辺の電位を測定した。

●印は導体球と下部導体間の電位が-0.99Vになった点を示す。また、他の等電位点を線で結んで示す。図6において、●印の点の領域では接地球形導体による静電遮蔽が起きているので、海面上に接地球形導体による電界遮蔽が起きていると言える。

次に、接地球形導体直下付近で電界が減少する傾向を近似的に説明するにあたり、次のように考える⁽⁶⁾。図7(a)に示されるように、海面上 h と $(h+D)$ の点に、それぞれ半径 a の接地球形導体と点電荷 $(+q)$ があるとすると、水面は等電位面であるから電界は水面に対して垂直である。また、点電荷 $(+q)$ を接地球形導体の上方のある高さの所に置けば、水面上において点電荷 $(+q)$ から近い範囲での電界はほぼ一様電界と考えられる。従って、水面上において接地球形導体の直下付近における垂直電界を求めれば電界遮蔽の傾向が定性的に説明できる。

図7(a)に示されるように、点Pにある電荷 q による接地球形導体の電気映像を点P'とし、電荷 $(-q \cdot a/D)$ とする。また、海面に対する電気映像を点Q、点Q'として、それぞれの点に電荷 $-q$ 、電荷 $(q \cdot a/D)$ を置く。任意の点R(x, y)における電位 V は、点Pにある電荷 q と点Qにある電荷 $-q$ の2つの電荷による電位を V_1 として、点P'にある電荷 $(-q \cdot a/D)$ と点Q'にある電荷 $(q \cdot a/D)$ の2つの電荷による電位を V_2 とすれば、次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + (D+h-y)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + (D+h+y)^2}} \right] \\ &\quad + \frac{\frac{a}{D}q}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{\sqrt{x^2 + (h+\frac{a}{D}-y)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + (h+\frac{a}{D}+y)^2}} \right] \end{aligned}$$

従って、水面上R($x, 0$)における垂直電界強度 $E(x)$ は次式によって与えられる。

図6 等電位線描画実験装置における配置と電位の測定結果

$$\begin{aligned}
 E(x) &= -\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{y=0} \\
 &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{D+h}{(x^2 + (D+h)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{a}{D} \cdot \frac{h + \frac{a^2}{D}}{(x^2 + (h + \frac{a^2}{D})^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

式(5)を用いて、水面上における垂直電界強度 $E(x)$ を計算した結果を図7(b)に示す。計算には次の値を用いた。 $h=73\text{m}$ 、 $a=17.5\text{m}$ 、 $D=140\text{m}$ である。図7bに示されるように、接地球形導体直下付近において電界強度が急減少することがわかる。従って、図3(a)のホーリングロープ直下付近の電界強度の急減少は、静電界的な取扱いで静電遮へいが起きている結果であると定性的に説明できる。

4. むすび

明石海峡において、南備讃瀬戸大橋と同種の構造である明石海峡大橋の建設が着手された。そこで、100kHz帯双曲線航法の電波に対するじょう乱に関して、主塔のみが海上に直立した時期から主ケーブルにハンガーロープが懸けられた時期まで、工事の進捗に伴ってデッカ電波を利用して4回の実験を行った。その結果をまとめると次のようになる。

(1) 高さ約300mの2本の主塔のみが直立した時

(a) 念のために確認したが、主塔は微小垂直ダイポールアンテナとみなすことができる。

(b) 四国チェーンのR局とG局の電界強度の定在波比1.5dB程度を利用して $0.03\mu\text{F}$ 程度の静電容量を持つ微小垂直ダイポールアンテナとみなすことができた。

(2) ホーリングロープが架設された時

(a) ホーリングロープの直下付近で静電遮へいが起こる。

(b) ホーリングロープは、微小垂直ダイポールアンテナとみなした主塔の静電容量を見かけ上約0.3~0.4 μF に増加させる効果があり、そのため主塔は強力な2次波源となっている。

(3) 主ケーブルとハンガーロープが架設された時

ホーリングロープが架設された場合と同様である。

今後の課題として筆者らは、明石海峡大橋を対象に継続した研究を行い、南備讃瀬戸大橋で説明できなかった橋梁直下付近で起こる局所的な電界強度の増大現象を明らかにする考えである。

謝 辞

本研究に関して有益な御指導を頂いた名古屋大学名誉教授佐尾和夫氏に深く感謝いたします。また、練習船広島丸において実験にご協力頂いた乗組員の皆様に深く感謝の意を表します。

図7(a) 計算式における接地球形導体と点電荷の配置図

図7(b) 接地球形導体直下付近の水面上における電界強度

図7 計算式における配置図と静電遮へいによる電界の計算結果

付 録

1. 主塔を微小垂直ループアンテナとみなす場合の合成受信電界の理論式⁽⁴⁾

$$E = E_0 e^{-jk_0 \cdot x \cos \psi} \left[1 + 2\beta \cos(k_0 d \sin \psi) \left(\frac{k_0^2}{\sqrt{d^2 + x^2}} - \frac{jk_0}{d^2 + x^2} \right) \right. \\ \left. \times \frac{x}{\sqrt{d^2 + x^2}} \cdot e^{-jk_0 (\sqrt{d^2 + x^2} - x \cos \psi)} \right]$$

ただし、 $\beta = (\mu_0 N^2 S^2 C \omega^2) / (4\pi)$ 、 S 、 N は微小ループアンテナの面積と巻回数、 μ_0 は真空の透磁率、 C は微小ループアンテナの静電容量、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

参 考 文 献

- (1) 佐藤尚登・宮崎保光・竹中康雄・西 隆昭・田口一夫：「航行用100kHz帯電波に及ぼす巨大架橋の影響について」，日本航海学会論文集，第83号，pp. 49-56(1990)。
- (2) 佐藤尚登・宮崎保光・山下享子・竹中康雄：「デッカ電波の巨大架橋付近におけるじょう乱」信学論(B)，J77-B，No.4，pp. 202-209(1994)。
- (3) 佐藤尚登，宮崎保光，山下享子，竹中康雄：「ロランC電波の巨大架橋付近における位相じょう乱」，信学論(B)，J78-B，No.3，pp.175-182(1995)。
- (4) 舟橋憲治：「詳解無線伝送学」，pp. 23-24，東京電機大学出版局(1984)。
- (5) 「等電位線描画実験装置EE4」，SHIMAZU(1995)。
- (6) 山田直平：「電磁気学」，pp. 112-113，電気学会(1989)。

質 疑 応 答

田口一夫(鹿児島大学名誉教授)：(1)北九州と四国チェーンの電界強度の測定結果を同等に扱いますか。(2)ホーリングロープの垂直の長さを考慮すべきと思うがどうですか。

佐藤尚登：(1)電界強度を求めるにあたり、受信機の信号出力を正確に校正することが必要です。ここでは、あらかじめ標準信号発生器を用いて信号を受信機に入力し、その出力信号に対する電界強度を求めて校正を行っております。従って、測定した値は信頼できます。また、本論文では定在波比から考察を行っており、この観点から測定結果は同じく扱うことができます。

(2)架橋を横断面に見た場合、ホーリングロープ全体の集合した形状を太い1本の球形導体と近似的にみなして考察しておりますが、球形導体とみなし難い垂直方向の長さが長い場合の電界遮へいについては、まだ解いておりません。今後の課題と致します。