

反射板上の無給電直線状素子付きループアンテナの放射特性

Characteristics of a Circular Loop Antenna
with Linear Parasitic Elements above a Plane Reflector

久保田賢二^{*1}, ○大内崇臣^{*1}, 置田正寿^{*1}, 越後宏^{*2}, 清水保定^{*3}, 佐藤利三郎^{*4}
Kenji Kubota^{*1}, ○Takaomi Ouchi^{*1}, Masatoshi Okita^{*1},
Hiroshi Echigo^{*2}, Yasusada Shimizu^{*3}, Risaburo Sato^{*4}

^{*1}岩手大学, ^{*2}東北学院大学, ^{*3}日本電波塔, ^{*4}TAO仙台EMCリサーチセンター
^{*1}Iwate University, ^{*2}Tohoku-Gakuin University,
^{*3}Nippon Television City Corp., ^{*4}Sendai EMC Research Center of TAO.

キーワード: ループアンテナ(loop antenna), 直線状無給電素子(Linear parasitic element),
反射板(plane reflector), 放射指向性図(radiation pattern), TV放送(TV broadcasting)

連絡先: 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学 工学部 電気電子工学科 久保田賢二
Tel./Fax.: 019-621-6385, E-mail: kubota@dragon.elc.iwate-u.ac.jp

1. はじめに

周長が約 1 波長の円形ループアンテナは、ループの軸方向に最大放射方向があり、単一アンテナとして、また配列アンテナとして数多くの研究がなされ、種々の用途に使われている^{1,2)}。

現在、鉄塔側面設置用テレビジョン放送アンテナとして、反射板付き双ループアンテナが広く用いられている³⁾。2 L 双ループアンテナは 2 個のループアンテナの給電部を向き合わせて平行二線で結び、平行二線の中央から給電することにより両ループを同相等振幅で給電できるようにしたものである⁴⁾。ループを含む面に垂直な軸方向に大きな指向性利得を持っていることと、広帯域であることが主な特長である。利得をさらに大きくするために、ループ素子を 4 または 6 個配列

した 4 L および 6 L 双ループアンテナも開発され、実用されている^{3,4)}。ループ素子が多いほど配列方向に長くなり、鉄塔の占有面積が大きくなる。

筆者等は、周長がほぼ 1 波長の円形ループアンテナの給電側とその反対側にループと同一平面内に直線状無給電素子を配列したアンテナについて検討しており、ループの中心と直線状素子との間隔をおよそ 0.6 波長に選ぶと、ループの軸方向の利得を最大にすることができることを前に報告した⁵⁾。本報告では、これに無限大の平面反射板をつけたときの放射特性をモーメント法⁶⁾を用いて計算し、2 L 双ループアンテナの放射特性と比較した結果について述べる。

2. 直線状無給電素子付きループアンテナ

2. 1 解析

図1にアンテナの構造と座標系を示す。本アンテナは、1個の給電円形ループ#_Bと2本の直線状素子#_A、#_Cとからなっている。ループ素子#_Bの半径を b 、直線状無給電素子#_Aおよび#_Cの長さを $2l$ 、ループ素子の中心から直線状無給電素子までの距離を d 、各素子の導体半径はすべて a とする。

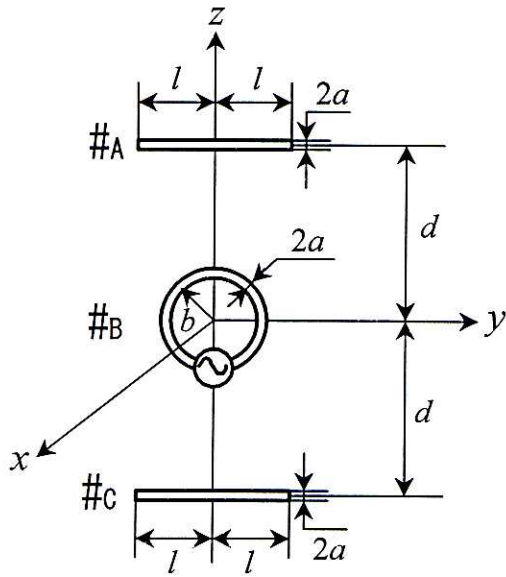


図1 アンテナの構造と座標系

解析はマトリクス法を用いて行った。まず#_Aと#_Cの直線状素子をそれぞれM等分、#_Bのループ素子をN等分する。ここでM、Nは偶数である。各導体それぞれの分割点に供給される電圧マトリクスを $[V]$ 、各導体それぞれの分割点を流れる電流マトリクスを $[I]$ とすると次式の関係が得られる。

$$\begin{bmatrix} [I]_{\#A} \\ [I]_{\#B} \\ [I]_{\#C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]_{\#A,\#A} & [Z]_{\#A,\#B} & [Z]_{\#A,\#C} \\ [Z]_{\#B,\#A} & [Z]_{\#B,\#B} & [Z]_{\#B,\#C} \\ [Z]_{\#C,\#A} & [Z]_{\#C,\#B} & [Z]_{\#C,\#C} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [V]_{\#A} \\ [V]_{\#B} \\ [V]_{\#C} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $[Z]_{\#i,\#j}$ の各マトリクス要素は導体#_iと#_jとの構造によって決まる定数である。給電はループ素子#_Bだけなので、 $[V]_{\#B}$ の中

の給電点に対応するマトリクス要素1つを除いて他の電圧マトリクスの要素は全て0である。上式より $[Z]^{-1}$ が求めれば、それぞれの導体の分割点を流れる電流値を計算することができ、このアンテナの入力インピーダンス、放射特性を求めることができる。

2. 2 数値計算結果

ループの周長 $k_0 b = 1.0$ ($k_0 = 2\pi/\lambda_0$)、導体半径に対するループ周長の関係を表すパラメータ $\Omega = 2\ln(2\pi b/a) = 9.3$ 、直線状素子の長さ $2l = 0.5\lambda_0$ としたときの数値計算結果を次に示す。図2は $d = 0.56\lambda_0$ としたときの入力インピーダンスの周波数特性であり、図3は d の変化に対する特性である。

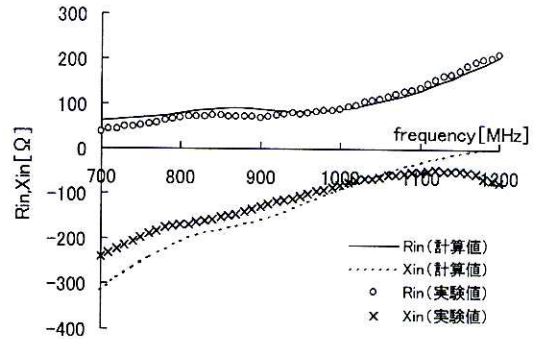


図2 入力インピーダンス

$k_0 b = 1.0$, $2l = 0.5\lambda_0$, $d = 0.56\lambda_0$, $\Omega = 9.3$

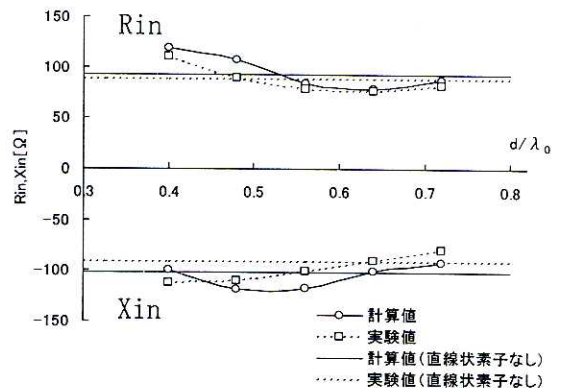


図3 d に対する入力インピーダンス

$k_0 b = 1.0$, $2l = 0.5\lambda_0$, $\Omega = 9.3$

図2、図3の実験値は $2a = 6\text{mm}$ の銅管を用いて $f_0 = 958\text{MHz}$ として行った実験結果である。計算値と実験値はおおむね一致しており、直線状無給電素子をループ素子から離していくにつれて、ループ単独の時の値に近づいていくことが分かる。

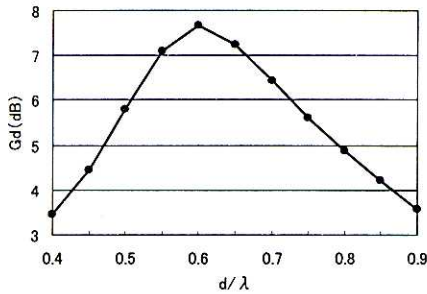


図4 dに対する指向性利得 (計算値)
 $k_0 b = 1.0$, $2l = 0.5\lambda_0$, $\Omega_f = 9.3$

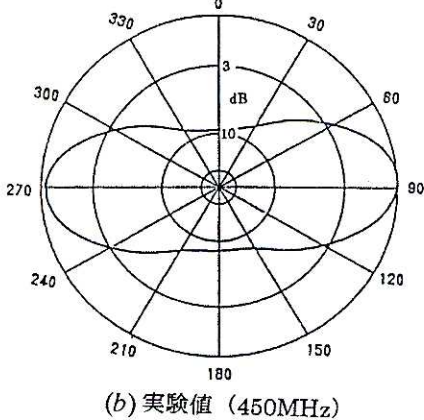
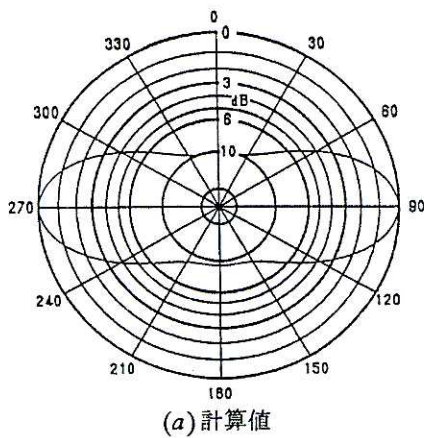


図5 xz 面 E_ϕ 指向性図
 $k_0 b = 1.1$, $2l = 0.6\lambda_0$, $d = 0.6\lambda_0$, $\Omega_f = 11$

図4に、このアンテナの指向性利得 Gd の計算値を示す。 $d = 0.6\lambda_0$ のとき指向性利得が最大となり、約 7.7dB を示している。

図5 (a)、(b)に $k_0 b = 1.1$ 、 $2l = 0.6\lambda_0$ 、 $d = 0.6\lambda_0$ としたときの xz 面内 E_ϕ 指向性の計算値と実験値を示す。両者はよく一致している。

2. 反射板上の直線状無給電素子付き

ループアンテナ

2.1 解析

図6に、アンテナの構造と座標系を示す。このようにループ素子 $\#B$ および直線状無給電素子 $\#A$ 、 $\#C$ の関係は図1と同じとし、素子と平面反射板との間隔を h とする。

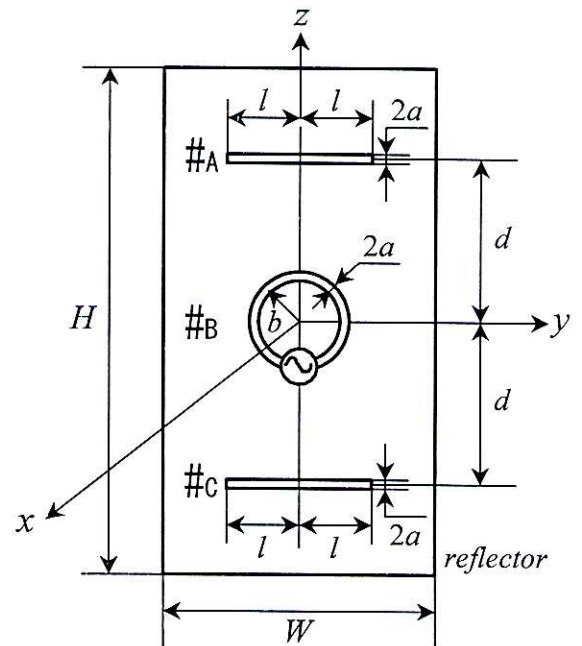


図6 アンテナの構造と座標系

平面反射板上に素子を置くと、反射板の裏側に表側とは電気的に対称な鏡像が生じる。従って、 x 軸方向に間隔 $2h$ 離れた位置に同一の素子が存在すると仮定して解析を行えばよいことになる。ここで鏡像の各素子を $\#_a$ 、 $\#_b$ 、 $\#_c$ とする。直線状素子 $\#A$ と $\#_a$ 、および $\#C$ と $\#_c$ をそれぞれ M 等分、ループ素

子 $\#_B$ と $\#_b$ をそれぞれ N 等分し、マトリクス法を用いて解析を行った。各導体それぞれの分割点に供給される電圧マトリクスを $[V]$ 、各導体それぞれの分割点を流れる電流マトリクスを $[I]$ とすると次式の関係が得られる。

$$\begin{bmatrix} [I]_{\#A} \\ [I]_{\#B} \\ [I]_{\#C} \\ [I]_{\#a} \\ [I]_{\#b} \\ [I]_{\#c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]_{\#A\#A} & [Z]_{\#A\#B} & [Z]_{\#A\#C} & [Z]_{\#A\#a} & [Z]_{\#A\#b} & [Z]_{\#A\#c} \\ [Z]_{\#B\#A} & [Z]_{\#B\#B} & [Z]_{\#B\#C} & [Z]_{\#B\#a} & [Z]_{\#B\#b} & [Z]_{\#B\#c} \\ [Z]_{\#C\#A} & [Z]_{\#C\#B} & [Z]_{\#C\#C} & [Z]_{\#C\#a} & [Z]_{\#C\#b} & [Z]_{\#C\#c} \\ [Z]_{\#a\#A} & [Z]_{\#a\#B} & [Z]_{\#a\#C} & [Z]_{\#a\#a} & [Z]_{\#a\#b} & [Z]_{\#a\#c} \\ [Z]_{\#b\#A} & [Z]_{\#b\#B} & [Z]_{\#b\#C} & [Z]_{\#b\#a} & [Z]_{\#b\#b} & [Z]_{\#b\#c} \\ [Z]_{\#c\#A} & [Z]_{\#c\#B} & [Z]_{\#c\#C} & [Z]_{\#c\#a} & [Z]_{\#c\#b} & [Z]_{\#c\#c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{\#A} \\ [V]_{\#B} \\ [V]_{\#C} \\ [V]_{\#a} \\ [V]_{\#b} \\ [V]_{\#c} \end{bmatrix} \quad \dots(2)$$

ここで、 $[Z]_{\#i,\#j}$ の各マトリクス要素は導体 $\#_i$ と $\#_j$ との構造によって決まる定数である。給電はループ素子 $\#_B$ と $\#_b$ だけなので、 $[V]_{\#B}$ と $[V]_{\#b}$ の中の給電点に対応するマトリクス要素それぞれ1つを除いて他の電圧マトリクスの要素は全て0である。上式よりそれぞれの導体の分割点を流れる電流値を求め、このアンテナの入力インピーダンス、放射特性を求めた。

2. 2 数値計算結果

ループ周長 $k_0b=1.0(k_0=2\pi/\lambda_0)$ 、導体半径に対するループ周長の関係を表すパラメータ $\Omega=2\ln(2\pi b/a)=9.3$ 、 $2l=0.5\lambda_0$ 、 $h=0.25\lambda_0$ としたときの入力インピーダンスを図7、図8に示す。図7は $d=0.56\lambda_0$ としたときの周波数特性であり、図8は d の変化に対する特性である。図7、図8には、反射板の大きさを $W \times H = 1.92\lambda_0 \times 1.92\lambda_0$ 、 $f_0 = 958\text{MHz}$ として行った実験値を併記した。入力インピーダンスは、計算値と実験値とに差異が見られる。数値計算の際に行った近似や、実験の誤差の影響が考えられる。

図9は d に対する指向性利得 G_d の計算値である。 $d=0.7\lambda_0$ のときに指向性利得が最も大きく、約10.4dBを示している。これは図4に示した反射板なしの結果と比べると、約1.9倍の値である。

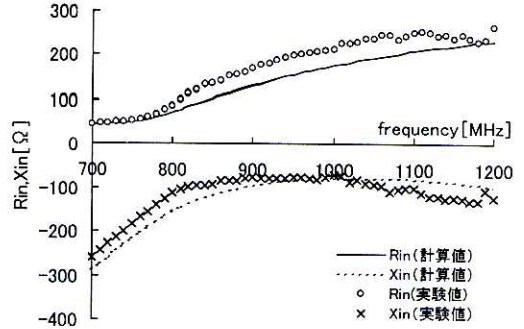


図7 入力インピーダンス

$k_0b=1.0$, $2l=0.5\lambda_0$, $d=0.56\lambda_0$, $h=0.25\lambda_0$, $\Omega=9.3$

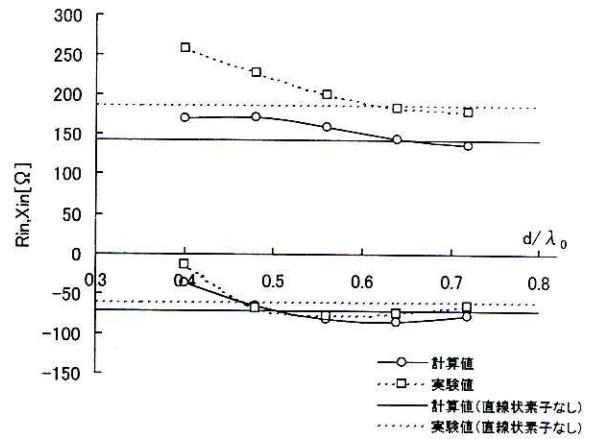


図8 d に対する入力インピーダンス

$k_0b=1.0$, $2l=0.5\lambda_0$, $h=0.25\lambda_0$, $\Omega=9.3$

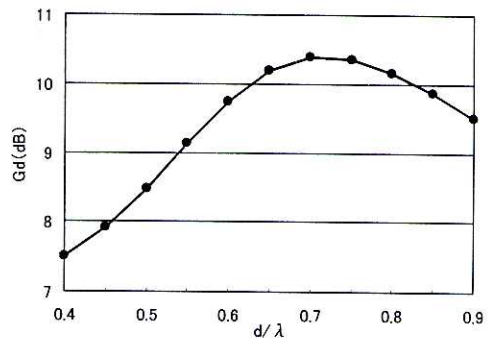


図9 d に対する指向性利得 (計算値)

$k_0b=1.0$, $2l=0.5\lambda_0$, $h=0.25\lambda_0$, $\Omega=9.3$

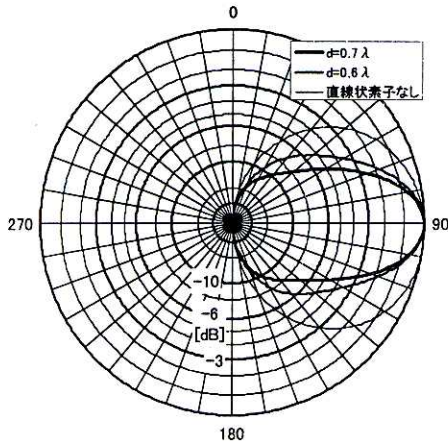
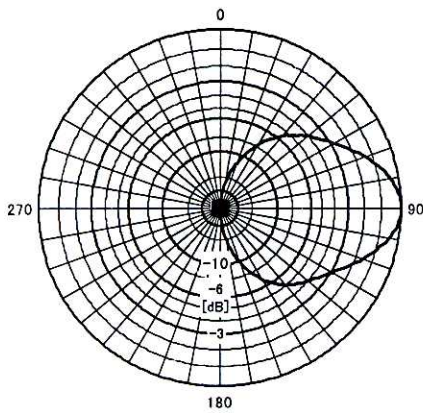
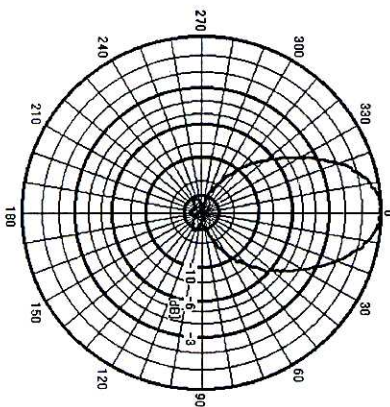


図 10 d に対する zx 面 E_ϕ 指向性図 (計算値)
 $k_0 b = 1.0$, $2l = 0.5\lambda_0$, $h = 0.25\lambda_0$, $\Omega = 9.3$



(a) 計算値



(b) 実験値

図 11 zx 面 E_ϕ 指向性図

$$f_0 = 958 \text{ MHz}$$

$$k_0 b = 1.0, \quad 2l = 0.5\lambda_0, \quad d = 0.56\lambda_0, \quad h = 0.25\lambda_0, \quad \Omega = 9.3$$

図 10 は、直線状無給電素子が無いときと、直線状無給電素子を $d = 0.6\lambda_0, 0.7\lambda_0$ の間隔で付加したときの zx 面内 E_ϕ 指向性を示した図である。このように $d = 0.7\lambda_0$ に近づくにつれて指向性が鋭くなっていることが分かる。また、図 11 は $d = 0.56\lambda_0$ としたときの zx 面内 E_ϕ 指向性図であるが、計算値(a)と実験値(b)とは差異が見られる。これは実験で使用した反射板の大きさが有限 ($W \times H = 0.96\lambda_0 \times 2.88\lambda_0$) であるのに対して、計算では無限大の反射板と仮定しているためであると考えられる。

3. 反射板付き 2L 双ループアンテナ

3.1 解析

比較のために、反射板付き 2L 双ループアンテナの解析を行った。図 12 にアンテナの構造と座標系を示す。

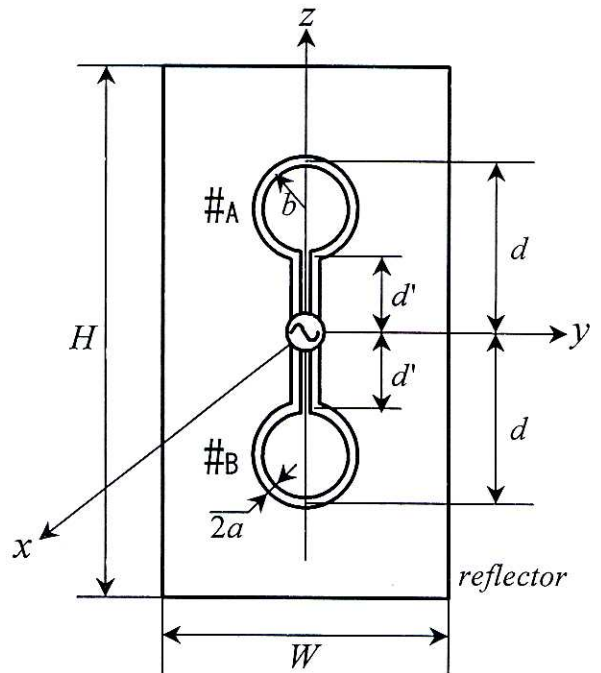


図 12 アンテナの構造と座標系

図のように 2つのループ素子 $\#A$ と $\#B$ の半径を b 、給電点からループ端までの距離を d 、素子と反射板の間隔を h とする。給電線

部分を無視し、給電は各ループの給電部に同相・同一振幅で給電したとして解析を行った。

前節と同様に、鏡像のループ素子をそれぞれ $\#_a$ 、 $\#_b$ として各ループ素子を N 等分すると、次式の関係が得られる。

$$\begin{bmatrix} [I]_{\#A} \\ [I]_{\#B} \\ [I]_{\#a} \\ [I]_{\#b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]_{\#A,\#A} & [Z]_{\#A,\#B} & [Z]_{\#A,\#a} & [Z]_{\#A,\#b} \\ [Z]_{\#B,\#A} & [Z]_{\#B,\#B} & [Z]_{\#B,\#a} & [Z]_{\#B,\#b} \\ [Z]_{\#a,\#A} & [Z]_{\#a,\#B} & [Z]_{\#a,\#a} & [Z]_{\#a,\#b} \\ [Z]_{\#b,\#A} & [Z]_{\#b,\#B} & [Z]_{\#b,\#a} & [Z]_{\#b,\#b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V]_{\#A} \\ [V]_{\#B} \\ [V]_{\#a} \\ [V]_{\#b} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $[Z]_{\#i,\#j}$ の各マトリクス要素は導体 $\#_i$ と $\#_j$ との構造によって決まる定数である。上式よりそれぞれの分割点を流れる電流値を計算し、放射特性を求めた。

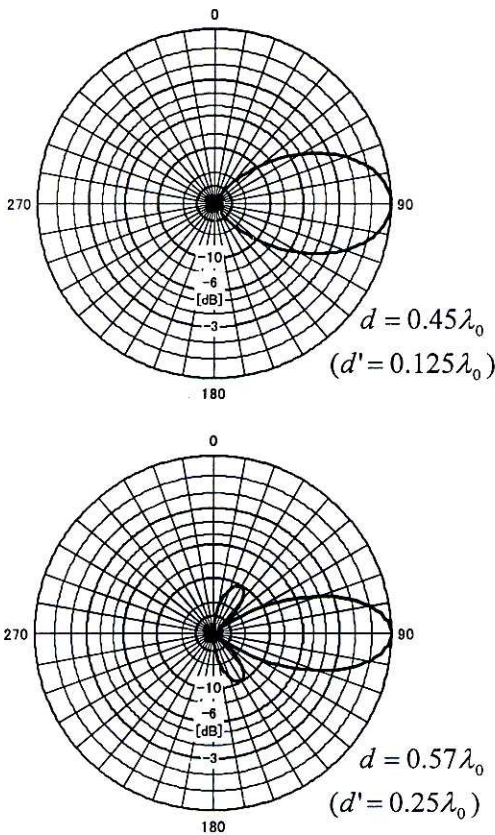


図 13 zx 面 E_ϕ 指向性図 (計算値)

$$k_0 b = 1.0, \quad h = 0.25\lambda_0, \quad \Omega = 9.3, \quad f = f_0$$

3. 2 数値計算結果

図 13 に、 $k_0 b = 1.0$ 、 $\Omega = 2 \ln(2\pi b/a) = 9.3$ 、 $d/\lambda_0 = 0.45, 0.57$ ($d'/\lambda_0 = 0.125, 0.25$)、 $h = 0.25\lambda_0$ 、 $f = f_0$ としたときの zx 面内 E_ϕ 指向性図を示す。 d を大きくすると主ローブは鋭くなるが、サイドローブが大きくなることが分かった。

4. むすび

反射板上の直線状無給電素子付きループアンテナの解析を行った。直線状無給電素子を付加すると、 zx 面の放射指向性が鋭くなるのが計算および実験から確認できた。計算値と実験値とに差異が見られたが、これは実験で使用した反射板が有限であることが主な原因と思われる。今後、2L 双ループアンテナに直線状無給電素子を付加した時の解析を行い、比較を行う予定である。

参考文献

- 1) S. Adachi, Y. Mushitake: Studies of Large Circular Loop Antenna, Sci. Rep. R. I. T. U. Tohoku Univ., Ser. B-2, 9(2), 1957.
- 2) 電子通信学会: アンテナ工学ハンドブック, オーム社, p. 61, (S55. 10. 30)
- 3) テレビ放送アンテナ五十年史出版委員会: テレビ放送アンテナ五十年史 (FM 放送アンテナを含む), テレビ放送アンテナ五十年史出版委員会 (1989. 3. 22)
- 4) 遠藤敬二, 佐藤源貞, 永井淳: アンテナ工学, 総合電子出版社, (1979. 4)
- 5) 久保田他: 信学技報 EMCJ2000-79, MW2000-123 (2000. 10)
- 6) R. F. Harrington: Proc. IEEE, vol. 55. no. 2, pp. 136-149, Feb. 1967.