

後藤尚久 「円形平面アンテナ(RLSA)の発明および実用化」

GOTO Naohisa “Invention and practical uses of circular-plane radial line slot antenna (RLSA)”

略 歴；

1935 年 6 月 8 日生

1959 年 東京工業大学理工学部卒業

1964 年 東京工業大学大学院博士課程修了

1964 年 東京工業大学助手

1966 年 東京工業大学 教員養成所助教授

1968 年 千葉大学助教授

1975 年 東京工業大学助教授

1980 年 東京工業大学教授

1996 年 拓殖大学教授

1986 年 電子通信学会調査理事

1987-88 年 A・P 研委員長

1989 年 電子情報通信学会副会長

1992 年 ISAP（アンテナ伝播国際会議）実行委員長

現 在： 東京工業大学名誉教授，拓殖大学名誉教授

表 彰 な ど；

1989 年 手島工業教育資金団発明賞

1991 年 IEEE Fellow，郵政大臣表彰・電波功績賞

1993 年 電子情報通信学会業績賞，志田林三郎賞

1995 年 東京都科学技術功労表彰

1996 年 井上春成賞

1997 年 電子情報通信学会名誉員

2000 年 紫綬褒章

2011 年 瑞宝中綬章



1. 衛星放送受信（図 1）とはやぶさ 2（図 2）への応用

衛星放送が始められた当時はパラボラアンテナが利用されていたが、雪の日はアンテナの下側に溜ま

図 1

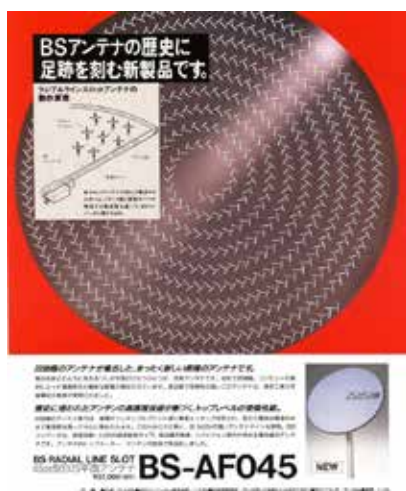


図 2



るため受信できなくなる。受信方向が上向くからである。図 1 に示すように平面アンテナならば、雪は

平面上に一様に積もるため受信できるのである。

この円形平面アンテナ(RLSA)が威力を発揮するのが、図 2 に示すはやぶさ 2 に利用される場合である。RLSA の短所の周波数帯域幅が狭いため、受信と送信の 2 個のアンテナを用いている。図に示す四角形の太陽電池の方向から分るように、地球から見ると目的とする衛星は太陽と近い方向にある。

このため地球との通信にパラボラアンテナを用いると、その焦点には地球からのマイクロ波の他に太陽光線も焦点の近傍に集まってしまう。宇宙空間で動作中の機器に高温は禁物だそうだから、RLSA の重要性を示す事実である。なお、円偏波を放射する素子であるハの字型スロットに与える重みは下記の論文に示した。これは私の研究室で広川君の修士論文の一部を報告したものである。

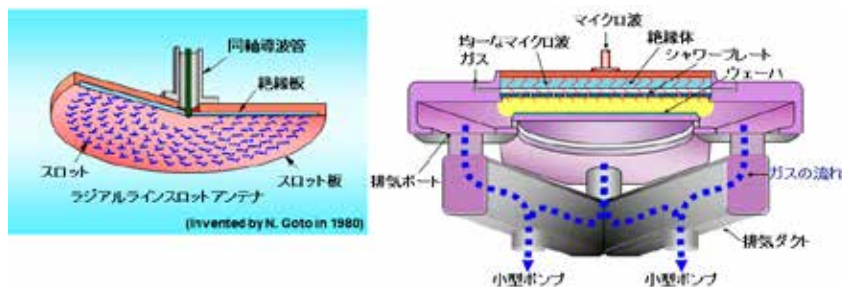
J. Hirokawa, M. Ando, N. Goto , “Analysis of slot coupling in a radial line slot antenna for DBS,” IEE Proc., vol. 137, Pt. H, No. 5. Oct. 1990

2. 同心円 RLSA.の半導体製造装置への応用

金属膜のついた絶縁体(基板という)を用い、金属膜を除去(エッチング)して細い線路の電気回路を作るのが半導体製造装置である。真空中でエッチングするが、空間にマイクロ波によって生じるプラズマがあると真空中より低温でエッチングでき故障率が少なく好都合という。

以上のことは基板が小さいときは分っていたが、直径 300mm の基板では不可能だったそうである。それはプラズマに照射するマイクロ波の電力の偏差は、直径 300mm の基板の全面にわたって 7 %以内という。これを東工大の後輩である東北大の大見教授にきいたとき、これは実用不可能と思った。それはマイクロ波アンテナの放射電力をアンテナ全面上で一様にするなど不可能だからである。

図 3



ところがマイクロ波の電力を（図の真空でない同軸線路のある上側で）火花が出るまで上げると実験結果は成功したという。これはマイクロ波によるプラズマの発生の非線形現象によると考えられる。すなわち左側の図から分るように、円偏波を放射するハの字型スロットが軸対称に配列されている。一様な風船を破裂するまで膨らませると完全な球になるのと似ている。

3. 交流ダイポールが放射する電磁波とその電気力線

交流ダイポールが z 軸上の原点にある場合を図 4 に示した。時間 t に対しては交流で変化する電荷 q が微小な間隔 l にあるのが交流ダイポールであり、このダイポールが放射する電界を極座標で表すと次のようになる。

$$(1) \quad E_r = \frac{ql \cos \theta}{2\pi \epsilon r^3} (1 + jkr) e^{-jkr}, \quad E_\theta = \frac{ql \sin \theta}{4\pi \epsilon r^3} \{1 + jkr + (jkr)^2\} e^{-jkr}$$

これは交流理論の結果で、私の「なっとくする演習・電磁気学(221 ページ)」や熊谷先生の「電磁気学基礎論(318 ページ)」にあるため、ここでの導出は省略する。

図 4

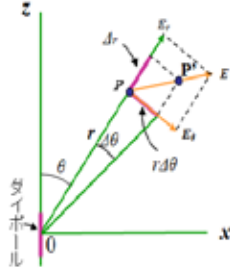
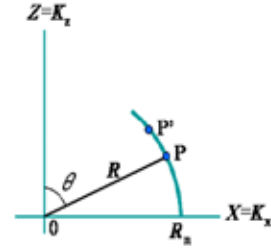


図 5



式(1)を時間 t の関数となる瞬時値に変換するには、交流理論の結果と $\exp(j\omega t)$ の積の実部をとればよいことが知られている。結果は次のようになる。

$$(2) \quad \begin{aligned} E_r(R, T) &= \text{Re}(E_r e^{j\omega t}) = 2(A \cos q) \left\{ \cos(R - T) / R^3 + \sin(R - T) / R^2 \right\} \\ E_q(R, T) &= \text{Re}(E_q e^{j\omega t}) = (A \sin q) \left\{ \cos(R - T) / R^3 + \sin(R - T) / R^2 - \cos(R - T) / R \right\} \\ R &= kr, T = \omega t, A = q |k^3 / 4\pi e \end{aligned}$$

この式の 3 段目から分るように、図 4 の距離 r と時間 t は図 5 では R と T になる。図 5 の R と T の単位は、 180° を π ラジアンとする角度の単位になり、図 5 の θ の単位も同じラジアンとする。

図 4 と図 5 から $R = kr$ を利用して次の式が得られる。

$$(3) \quad \frac{Dr}{rDq} = \frac{E_r}{E_q} = \frac{DR}{RDq} \quad \textcircled{R} \quad \frac{1}{R} \times \frac{dR}{dq} = \frac{E_r}{E_q} \quad \backslash \quad \frac{1}{R} \times dR = \frac{E_r}{E_q} \times dq, \quad \frac{dR}{R} \times \frac{E_q(R, T)}{E_r(R, T)} = dq$$

第 1 式左辺の r は長さを表す図 4 の座標だが、第 2 式右辺の R と θ はともにラジアンを単位とする角度を表す。式(3)の第 4 式右辺の電界の極座標成分の分母と分子を、逆転して左辺に移したのが式(3)の右端に示す結論の式である。

この左辺の分子分母に式(2)の $\{ \}$ 内を代入したのが式(4)の第 1 式の左辺であり、その分子を整理したのが右辺である。式(3)の右端の式に式(2)の $\{ \}$ 以外を代入したのが式(4)の第 2 式の右辺である。

$$(4) \quad \frac{1}{R} \times \frac{R \sin(R - T) + (1 - R^2) \cos(R - T)}{R \sin(R - T) + \cos(R - T)} dR = \frac{dR}{R} - \frac{R \cos(R - T) dR}{R \sin(R - T) + \cos(R - T)} = \frac{2 \cos q}{\sin q} \times dq$$

この右辺第 2 項の分母を新しい変数 u と置き、これを R で微分すると式(5)が得られる。

$$(5) \quad u = R \sin(R - T) + \cos(R - T), \quad \frac{du}{dR} = R \cos(R - T) \quad \backslash \quad du = R \cos(R - T) dR$$

式(4)の第 2 式右辺には式(2)の θ の成分も示した。これは式(3)の第 4 式から分るように、電界成分の分母分子が逆転する前のためである。

式(5)の u に続いて次に示す変数 S を用いると式(4)の第 2 式は次のように表すことができる。

$$\frac{dR}{R} - \frac{du}{u} = \frac{2 dS}{S} \quad \text{Q} \quad S = \sin q, \quad \frac{dS}{dq} = \cos q, \quad dS = \cos q \times dq$$

第 1 式の左辺と右辺の積分は、 a を積分定数として次のようになる。

$$\int \frac{dR}{R} - \int \frac{du}{u} = \int \frac{2 dS}{S} \quad \text{Q} \quad \log a + \log R - \log u, \quad 2 \log S = \log S^2$$

両辺を積分して等しいと置いた次の結果は、図 4 に示す z 軸上の原点にある微小ダイポールが放射す

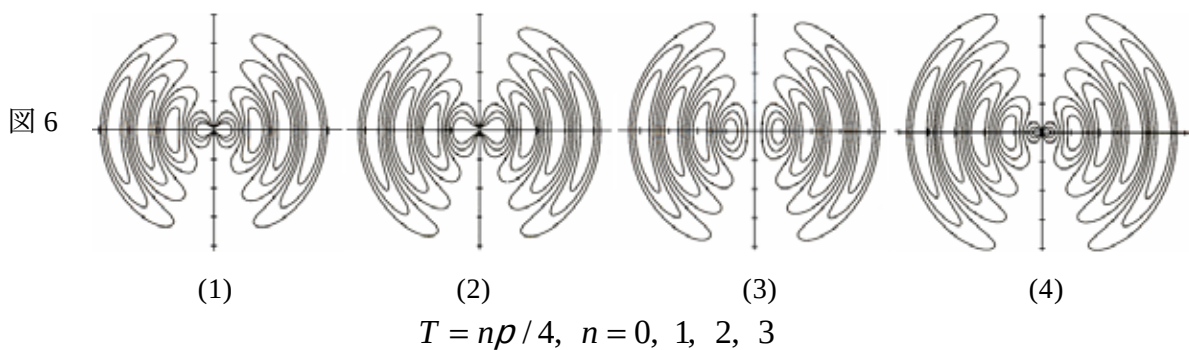
る電磁波の電気力線を決めるのである。

$$\log a + \log R - \log u = \log S^2 \quad \backslash \quad aR/u = S^2$$

この第 2 式の左辺に式(5)の u を、右辺に上の S を代入したのが次の式(6)である。図 4 のダイポールが放射する電磁波の電気力線の形をラジアン単位をもつ角度で表したのである。

$$(6) \quad \frac{aR}{R \sin(R - T) + \cos(R - T)} = \sin^2 q$$

これが図 4 に示す座標の原点に置いた z 軸方向の微小ダイポールが、左右の x 軸方向に放射する電磁波を表す電気力線を図 6 に示した。電気力線は面積密度がその位置の電界強度に比例するが、画き方は複雑なため 拙著「なっとくする 演習・電磁気学」講談社、222－227 ページ”で説明した。



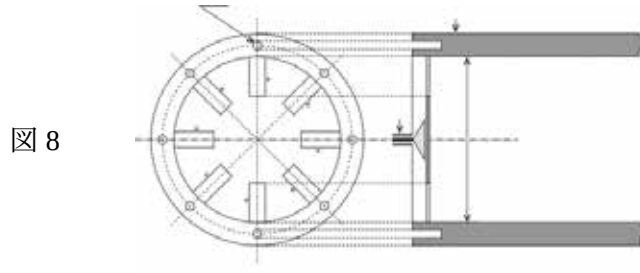
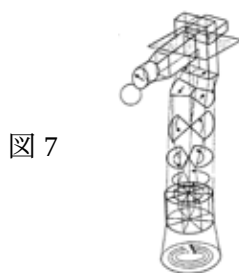
電気力線を書く方法は簡単ではないが先の私の文献を参照されたい
(図 6 の n は左からの順序)

4. RLSA の液化天然ガス(LNG)の液面計への応用

家庭で利用するガスはパイプで送られ、ガスの量は体積で測られている。ガスを運搬するときは圧力をかけて液体の LNG としてボンベの中に入れるが、LNG の量はボンベの重さの増加量がその量に等しい。大量の LNG を船舶で運搬するにはボンベの重さは測定不能だから液面計が必須になる。

実際には、温度を -170° 位に冷却した LNG として、厚さ約 1m の断熱材で囲まれた直径 40m 位の球に入れて船舶によって運搬しているという。大きい 4 個の球を乗せた船舶を見かけることがある。

これは東工大定年後に、液面計の製作会社の社長が拓殖大学のある高尾にきたときの話である。「大岡山の安藤先生にお願いしていたが回答がないので」といって図 7 を示したのである。図 7 の左上ある矢印のついた小さい円は、入力する円筒導波管の基本モード(TE₁₁ モード)を表している。



この基本モードの一部を拡大したのが右上に反対方向の矢印のついた大きい円で、断面が横長の方

導波管の2次モードに似ている。この長方形導波管の断面で中心を点として、左右の導体板を扇状に広げると図7の底面に示すように円形導波管の TE_{01} モードになる。光ファイバを注目する以前のNTTは周波数60GHzの伝送損失が小さい円形導波管を研究したのは知られている。

図7の機能を1個のRLSAで実現したのが図8である。左側が平面図で右側が側面図だが、幅の広いスロットを用いるのは、液面計は中心周波数が10GHzで帯域幅は9.5GHz～10.5GHzのFMレーダのためである。周波数帯域幅10%内で反射損は-10dB以下と小さい。この範囲で周波数をスキャンして送信波と液体による反射波の積が大きくなる位置が液体の表面になる。

図8右側の側面図の左端の細い縦線はRLSAのアース板を、その右側の太い縦線はスロット板表している。このスロット板が図8左側の平面図だが、これを模型的に示したのが図9である。板上の矢印のついた黒い線はRLSA内にできる磁力線を表している。図8の側面図に示すようにRLSAは同軸線路で中心を給電するから、図9左側のように磁力線がスロットと直角ではスロットを励振できない。

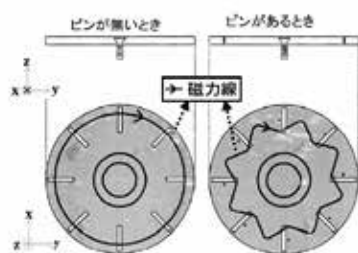


図9

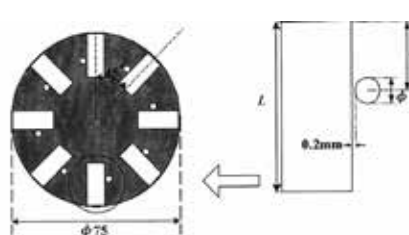


図10

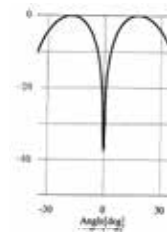


図11

そこで考えたのが図9右側に示すようにスロットの横に導体ピンを刺して磁力線のスロット方向成分を作る方法である。スロットは放射方向を向いているが、この方向の磁力線の成分を作ればスロットを励振できるからである。図8左側のように導波管に TE_{01} モードを励振するには、各スロットは円の中心から放射方向に向ける必要がある。

図10のスロット横の白い・印は細い導体線の断面を表している。この導体線で単純にラジアル線路を短絡しても、スロットの長さとも導体線の太さと位置を調整することで、10%という広い周波数帯域幅内で-10dBの反射損が実現できたのである。

5. RLSA 液面計の特長

図11は図10左側のスロット板をRLSAアンテナとして上を向けたときの指向性である。横軸は一目盛りが 30° 、縦軸は-10dBである。この事実は図8に示す導波管の管軸方向、すなわち液面方向に電磁波を放射しないことを意味する。

これまでのように基本モード(TE_{11})を利用すると、船舶の底からの反射の対策と“じょうご”のようなテーパ導波管が必要であった。波長30mm(周波数10GHz)の基本モードに用いる導波管の直径は20mm位であり、液面計に用いる導波管の直径は約80mmのためである。

テーパ導波管と船底の電波散乱を必要としない TE_{01} モードを利用するRLSA液面計は有利であり、図8の発明後は、 TE_{11} モードの液面計はすべて TE_{01} モードになったという。図8の導波管に取り付ける前のRLSA液面計は、メーカーによると現在967台を出荷したそうである。(2021-3-29)

文献[11] 後藤「なっとくする 演習・電磁気学」講談社