

# 反射鏡アンテナ用メッシュ面の線間接触状態が電気的特性に及ぼす影響

## Effect on Electrical Characteristics of Contact Condition among Wire Junctions of Mesh Surfaces for Reflector Antennas

花山 英治（職業能力開発総合大学校） 荒木 慎介（三菱電機株式会社）

高野 忠（日本大学）

Eiji Hanayama, Shinsuke Araki, and Tadashi Takano

衛星搭載用反射鏡アンテナの鏡面として、メッシュ面が利用されている。メッシュ面は金属の線を布状に編み合わせたものであり、編み線間の接触状態が、アンテナ反射鏡の反射特性や交差偏波特性に影響を与える。本研究では、メッシュ面の編み線間の接触状態が電気的特性に与える影響を実験的に示す。編み線間の接触状態は、高周波ワニスをを用いて変化させる。

実験の結果、不完全接触状態のメッシュ反射面では、接触状態の場合と異なり、透過損失にメッシュ面の編み方による方向性が現れることを明らかにした。さらに、不完全接触状態のメッシュ面では、交差偏波レベルが増加し、偏波主軸が回転することを示した。これらの特性は、メッシュ面の編み方や編み線の流れる方向に依存することを明らかにした。これらの結果について理論的検討を行い、実験結果の説明付けを行った。

キーワード：メッシュ面、反射鏡アンテナ、透過損失、交差偏波、偏波主軸

### 1. はじめに

メッシュ面は、細い金属線を布状に編み合わせたものである。電磁波に対して金属板と同等のはたらきをするため、反射鏡アンテナの鏡面材料として使用することが可能である。これまで、スペース VLBI 衛星「はるか」の天文観測用展開アンテナ<sup>1)</sup>や技術試験衛星「きく8号」の通信用展開アンテナ<sup>2)</sup>で使用されている。メッシュ面を使用することで、反射鏡の折りたたみが容易となるとともに、アンテナの軽量化が可能であり、収納体積と開口面積の比を大きくすることができることが実証されている。さらにいくつかの衛星でメッシュ面を利用したアンテナを搭載することが計画されている<sup>3)</sup>。また、可搬性、軽量化を目的とし、メッシュ面を利用した反射型アンテナを地上で使用することも考えられている。

これまでの衛星搭載用アンテナの設計においては、メッシュ面の透過損失の影響<sup>4)</sup>や機械的変形の影響<sup>5)</sup>についての考慮がされている。しかし、メッシュ面が偏波に及ぼす影響やメッシュ面を構成する編み線間の接触状態がアンテナの電気的特性に及ぼす影響については考慮されていない。

メッシュ面を利用したアンテナを地上で使用する場合、あるいは人工衛星用として使用する場合であっても試験期間を通し、長期間にわたって空気中に置かれるため、メッシュ面の編み線間の接触状態が酸化などによって変化することが予想される。したがって、メッシュ面

を構成する編み線間の接触状態が、反射鏡面としての電気的特性に与える影響をあらかじめ推定しておくことはアンテナの設計上重要である。

これまでメッシュ面の電気的特性として、透過損失と反射損失の実験的検討<sup>4)</sup>、受動的相互変調 (PIM) の発生<sup>6)</sup>の研究結果が報告されている。また、文献[7]では、メッシュ面の編み線間の接触状態による反射損失の依存性の理論的な検討を行い、モーメント法を適用した数値解析を行っている。しかし、実際のメッシュ面を用いて、編み線間の接触状態がメッシュ面の電気的特性に及ぼす影響について実験的に評価した例はない。

本研究では、メッシュ面を構成する編み線間の接触状態が、メッシュ面の電気的特性に与える影響について実験的な検討を行う。特性の評価は反射波より測定が容易である透過波で行う。したがって、透過損失が大きいことが、反射損失が小さいことに相当し、アンテナの鏡面として用いるには望ましい状態である。メッシュ面を構成している編み線間の接触状態は、高周波ワニスをを用いて変化させる。編み線間の接触状態は、メッシュ面の直流抵抗によって評価を行う。その上で接触状態を変化させる前後の透過損失の入射角依存性を明らかにする。

周波数の有効利用のため、無線通信において直交2偏波を用いる場合、アンテナの交差偏波識別度が大きいことが望ましい<sup>8)</sup>。本研究では、メッシュ面の編み線間の接触状態が、交差偏波特性に与える影響、およびメッシュ面を透過した偏波主軸の回転についても実験的検討を

行う。その上で、メッシュ面の構造とメッシュ面の透過係数とを関連づけた偏波特性の導出方法を提案し、実験結果との比較検討を行う。

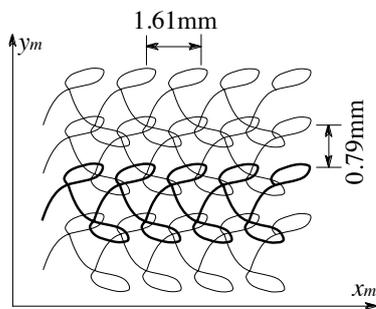
## 2. 実験系の構成

### 2.1 メッシュ面と座標系

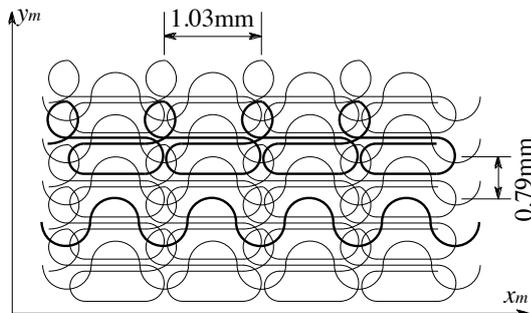
メッシュ面は細い金属線を編み合わせ、布状にしたものである。メッシュ面には、多くの材質や構造のものが存在し、使用目的によって使い分けられる。

本研究で使用するメッシュ面の構造を図1に示す。編み線は線径 30  $\mu\text{m}$  の金めっきモリブデン線である。図1 (a) はトリコット編みメッシュである。編み線は  $y_m$  方向に波打ち、ループで絡みながら  $x_m$  方向に流れている。編み目の周期は 1.61 mm  $\times$  0.79 mm である。図1 (b) は二重インレイ編みメッシュで、ループを構成しない挿入線が存在する。編み線はループと挿入線で絡みながら  $x_m$  方向に流れている。編み目の周期は 1.08 mm  $\times$  0.79 mm である。実験に使用するメッシュ面の寸法はトリコット編み、二重インレイ編み、それぞれの場合で 60 cm  $\times$  60 cm、50 cm  $\times$  60 cm である。

図2 (a) に入射面とメッシュ面との関係を示す。メッシュ面の編み線が流れる方向を  $x_m$  軸、それと面内で直交する方向を  $y_m$  軸とする。電磁波の入射面を  $xz$  平面とし、電磁波が  $+z$  方向から入射角  $\theta$  でメッシュ面に入射する。 $x$  軸と  $x_m$  軸とのなす角を  $\phi$  とする。

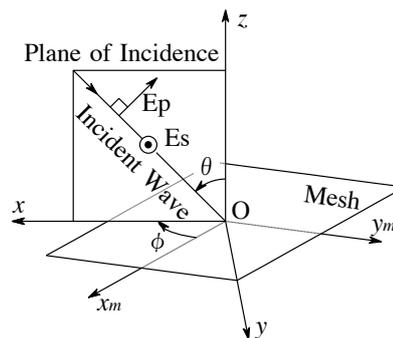


(a) トリコット編みメッシュ

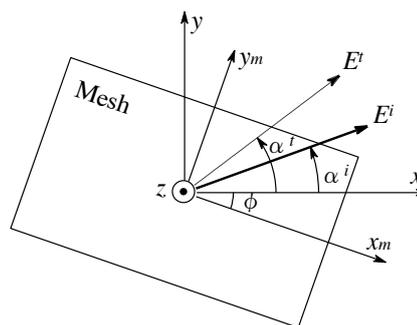


(b) 二重インレイ編みメッシュ

図1 メッシュ面の構造



(a) 入射面とメッシュ面との関係



(b) 偏波とメッシュ面との関係

図2 座標系

入射波の電界ベクトル方向が入射面に、それぞれ平行、あるいは垂直な波をそれぞれ  $E_p$  波、 $E_s$  波と呼ぶ。

図2 (b) に垂直入射時における、偏波とメッシュ面との関係を示す。偏波の基準方向は  $x$  軸に選ぶ。このとき、入射波電界  $E^i$  と透過波電界  $E^t$  の偏波の主軸が  $x$  軸とのなす角を、それぞれ  $\alpha^i$ 、 $\alpha^t$  とする。

### 2.2 透過損失測定系

メッシュ面の透過損失の測定系を図3に示す<sup>4)</sup>。測定周波数は、ここで用いるメッシュ面の使用可能な最高周波数である 22.0 GHz とする。

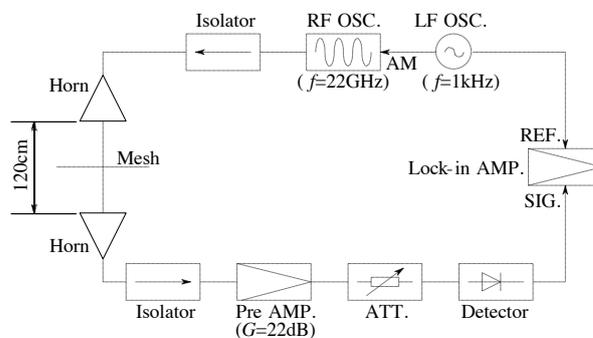


図3 透過損失測定系

交差偏波成分を測定する場合、受信レベルが低いため、受信側アイソレータの直後に利得 22 dB のプリアンプを

挿入する。正偏波成分の測定には、プリアンプは使用しない。プリアンプ挿入時の測定限界値は、メッシュ反射面を挿入しない時の正偏波成分と比べて -70 dB である。測定系の安定性は、正偏波成分測定時で 0.1 dB/h であり、送信アンテナと受信アンテナの軸のずれは、±0.10 度以内である。

正偏波成分の測定は、送受信アンテナを固定、対向させて行う。メッシュ面を透過することによって生じる入射角と透過角の差は、±1.0 度以内であり、これによる正偏波の受信レベルの誤差は、±0.2 dB 以内である。

交差偏波成分の測定は、各メッシュ面のそれぞれの角度  $\phi$  に対して、受信アンテナをアンテナの軸周りに回転させて、受信レベルが最小になるアンテナ軸の回転角度を測定する。

### 2.3 メッシュ面の絶縁加工

メッシュ面を構成する編み線間の電気的接触状態を変化させるために、高周波ワニスで編み線を被覆し、絶縁する加工を行う。メッシュ面をアセトンで洗浄後、アセトンで薄めた高周波ワニス液に浸す。その際、超音波洗浄機を用いてメッシュの編み線の間を高周波ワニスを入り込ませる。その後、液中からメッシュ面を取り出し、十分に乾燥させる。

編み線間の電気的接触状態を定量的に把握するため、高周波ワニスで被覆する絶縁加工前後のメッシュ面の直流抵抗値を測定する。表 1 に絶縁加工する前後のメッシュ面の直流抵抗値を示す。いずれのメッシュに対しても正負の電極間隔は 4 cm であり、電極とメッシュ面との接触面積は 1 mm<sup>2</sup> である。

トリコット編みメッシュ面の抵抗値の測定結果を表 1 (a) に示す。絶縁加工前のメッシュ面では、編み線が流れる方向 ( $x_m$  方向) とそれに垂直な方向 ( $y_m$  方向) の抵抗値は等しい。これに対し、絶縁加工後では  $x_m$  方向の抵抗値は  $y_m$  方向の抵抗値に比べて低くなる。これは、メッシュ面の編み線が  $x_m$  方向に流れているためである。

表 1 (b) に二重インレイ編みメッシュ面の抵抗値の測定結果を示す。二重インレイ編みメッシュでは、編み線が流れる方向に平行な方向 ( $x_m$  方向) と垂直な方向 ( $y_m$  方向) の抵抗値が等しくない。これはループを構成しない線が  $x_m$  方向のみに存在するためと考えられる。加工前後で、 $x_m$  方向と  $y_m$  方向の抵抗値変化の差は、0.01  $\Omega$  である。したがって、トリコット編みメッシュ面と比較して、二重インレイ編みメッシュ面は、不完全な接触点の数が少なく、汚れに対して強いと考えられる。

絶縁加工後、いずれのメッシュ面においても、編み線の流れに垂直な方向 ( $y_m$  方向) の抵抗値は無限大となっていない。これは、編み線の多数の接触点のうち、いくつかの接触点が、極薄い高周波ワニスによる被覆を通して導通しているためと考えられる。しかし、絶縁加工後の  $y_m$  方向の抵抗値の変化が  $x_m$  方向の抵抗値の変化より

も大きいことから、高周波ワニス編み線間に入り込んだ状態になり、不完全な接触状態になっていると考えられる。

絶縁加工前後のメッシュ面の重さを測定したところ、両メッシュ面とも、1 cm<sup>2</sup> 当たりの高周波ワニスの付着量は  $2.0 \times 10^{-3}$  g 以下である。したがって、編み線を覆う高周波ワニスの厚みは 0.1 mm 以下と推定できる。

以後、絶縁加工を施す前後のメッシュ面を、それぞれ接触状態メッシュ面、不完全接触状態メッシュ面と呼ぶ。

表 1 メッシュ面の直流抵抗値  
(a) トリコット編み

	$x_m$ 方向抵抗値 ( $\Omega$ )	$y_m$ 方向抵抗値 ( $\Omega$ )
加工前	0.42	0.42
加工後	1.07	1.38

(b) 二重インレイ編み

	$x_m$ 方向抵抗値 ( $\Omega$ )	$y_m$ 方向抵抗値 ( $\Omega$ )
加工前	0.23	0.31
加工後	0.28	0.37

## 3. 透過特性

### 3.1 測定結果

トリコット編みメッシュ面の透過損失の入射角と偏波依存性の測定結果を図 4 中の点で示す。垂直入射 ( $\theta=0$  度) のとき、接触状態では入射面 ( $x$  軸) と編み線が流れる方向 ( $x_m$  軸) とのなす角  $\phi$  が 0 度の場合と 90 度の場合で、透過損失は等しく、編み方の方向性による差がない。これは各編み線の間で高周波に対して接触が十分に保たれているため異方性がないと思われる。不完全接触状態では、編み方の方向性による差が現れる。入射電界方向と編み線が流れる方向とが平行 (Ep 波,  $\phi=0$  度、および Es 波,  $\phi=90$  度) のとき、接触状態と比較して透過損失が 10.8 dB 減少する。これに対して、入射電界方向と編み線が流れる方向とが垂直 (Ep 波,  $\phi=90$  度、および Es 波,  $\phi=0$  度) のとき、透過損失は 4.4 dB 増加する。

また、図 4 から、入射角  $\theta$  が大きくなると、接触状態によらず、入射電界方向が入射面と平行 (Ep 波)、あるいは垂直 (Es 波) なとき、それぞれ透過損失は減少、あるいは増加する。

二重インレイ編みメッシュ面の透過損失の測定結果を表 2 に示す。測定は垂直入射 (入射角  $\theta=0$  度)、かつ Ep 波で行った。比較のため、図 4 から抜粋した同条件で測定したトリコット編みメッシュ面の透過損失も同表に示す。不完全接触状態の場合、両メッシュ面ともに、入射電界方向と編み線が流れる方向とが平行な場合 ( $\phi=0$  度)、垂直な場合 ( $\phi=90$  度)、接触状態と比較して、それぞれ透過損失は減少、あるいは増加する。

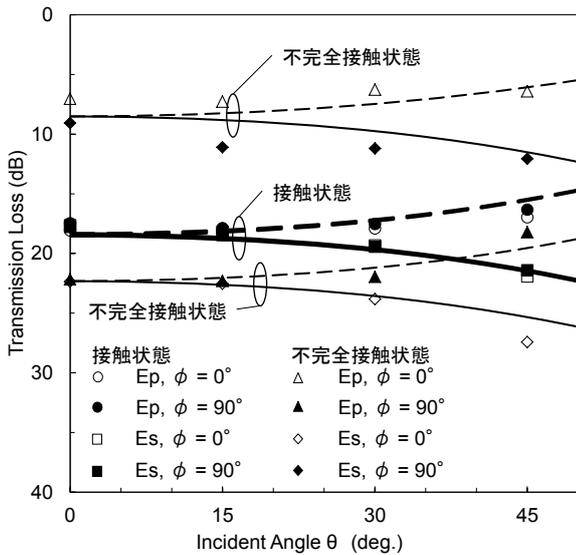


図4 トリコット編みメッシュ面の透過損失の入射角依存性

表2 垂直入射時の透過損失測定結果

(a) 二重インレイ編み

	$\phi=0$ 度	$\phi=90$ 度
接触状態	10.6 dB	10.9 dB
不完全接触状態	9.9 dB	14.0 dB

(b) トリコット編み

	$\phi=0$ 度	$\phi=90$ 度
接触状態	18.1 dB	17.5 dB
不完全接触状態	7.3 dB	21.9 dB

表2に示した両偏波を考えると、接触状態ではトリコット編みメッシュ面の透過損失の方が大きいため、アンテナ鏡面として利用するのに適している。しかし接触状態が不完全になった場合、二重インレイ編みメッシュ面の方が損失量の変化が小さく、汚れに強いことがわかる。

図1に示すメッシュ面の構造をもとに測定結果を解釈する。入射電界方向と編み線が流れる方向 ( $x_m$  方向) とが平行な場合 ( $\phi=0$  度)、トリコット編みメッシュ面で透過損失が減少する原因は、隣りあった編み線間との接触がなくなるために、 $x_m$  方向の短絡路がなくなり、 $y_m$  方向につくられたループによる編み線のインダクタンスが影響すると考えられる。このため、入射波によってメッシュ面に誘起される表面電流が減少し、反射波が減少する。すなわち透過損失が減少する。

二重インレイ編みメッシュ面の透過損失の減少量は、トリコット編みメッシュ面と比べて 10 dB 少ない。これは、二重インレイ編みメッシュ面では、ループを構成しない挿入線が存在するためである。接触状態を不完全に

したときの直流抵抗値の変化量が、二重インレイ編みメッシュ面の方がトリコット編みメッシュ面より小さいことと対応している。

逆に、入射電界方向と編み線が流れる方向 ( $x_m$  方向) とが垂直な場合 ( $\phi=90$  度)、両メッシュ面とも透過損失は増加する。この原因として、以下のことが挙げられる。

- (1) 絶縁加工によってメッシュ面に凹凸が生じ、透過波の一部が散乱されてしまう。
- (2) 高周波ワニスを乾燥させる際、編み線どうしが引っ張られるため、加工後のメッシュ反射面の編み目周期が減少する。実際にメッシュ反射面の面積を測定したところ、トリコット編み、二重インレイ編みメッシュ面で、それぞれ加工前の面積の 0.86 倍、0.92 倍であった。
- (3) 編み線に付着した高周波ワニスの膜によって反射が生じる。
- (4) 絶縁加工に用いた高周波ワニス編み線間に入り込むため、線間の電気容量が増大し、メッシュ面全体における電流分布が変化する。

本実験ではメッシュ面の面精度は 1 mm p-p 以下である。このとき文献[9]より、項目 (1) の影響は 0.3 dB 以下と評価できる。

### 3.2 格子導体モデルによる考察

前節の項目 (2)、(3) について、メッシュ面を単純な構造に置き換えた格子導体モデル<sup>10)</sup>を用いて検討する。図5にメッシュ面の編み目の1周期分の格子導体モデルを示す。 $x_m$  方向、 $y_m$  方向の等価的な編み目周期を  $a$ 、 $b$ 、導体幅を  $w$  とする。透過損失はモーメント法を用いて求める<sup>7)</sup>。メッシュ面のモデル化は導体幅  $w$  を一定にして、等価的な編み目周期  $a$ 、 $b$  を変化させ、垂直入射 ( $\theta=0$  度) における透過損失の計算値が測定結果と一致するようにこれらを決める。線径 30  $\mu\text{m}$  の等価的な導体幅  $w$  は 60  $\mu\text{m}$  である<sup>10)</sup>。

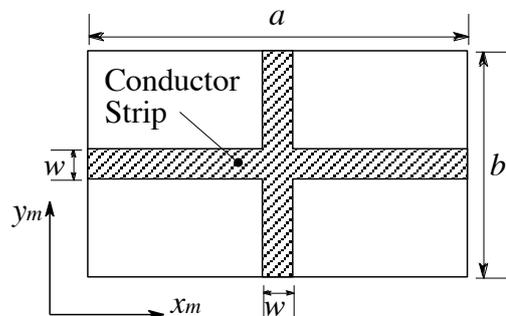


図5 格子導体モデル

不完全接触状態メッシュ面の透過損失も接触状態メッシュ面と同様に、同じモデルでパラメータ  $a$ 、 $b$  を変化させて表すことができる。

表3 メッシュ面の格子導体モデルの寸法

(a) トリコット編み			
	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$w$ ( $\mu\text{m}$ )
接触状態	0.49	0.49	60
不完全接触状態	0.36	1.1	60

(b) 二重インレイ編み			
	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$w$ ( $\mu\text{m}$ )
接触状態	0.88	0.90	60
不完全接触状態	0.67	0.96	60

接触状態と不完全接触状態のトリコット編み、二重インレイ編みメッシュ面に対する格子導体モデルのパラメータを、それぞれ表3 (a)、(b) に示す。両メッシュ面ともに不完全接触状態では、 $a$  は小さくなり、 $b$  は大きくなる。この格子導体モデルをもとに、入射角を変化させて求めたトリコット編みメッシュ面の透過損失を図4中に実線と破線で示す。これらの結果から透過損失の入射角依存性は、よく説明できる。

項目(2)の影響は、表3の接触状態での格子導体モデルの等価的な編み目周期を  $x_m$  方向、 $y_m$  方向とも同じ割合で、縮小して計算した。トリコット編み、二重インレイ編みメッシュ面について、表3に示した編み目周期のそれぞれ0.93倍、0.96倍とした。これに対応して透過損失の増加量は、それぞれ1.0 dB、0.5 dBである。

項目(3)の影響は、絶縁前の格子導体モデルの裏側に誘電体シートを設置したときの透過損失を求め、評価した。誘電体シートは厚さ0.1 mm、その比誘電率は高周波ワニスと等しい3.0である。両方のメッシュ面とも、その影響は0.2 dB以下であった。

以上のことから、図4、表2の結果は格子導体モデルにより、説明することができる。ただし、前節の項目(4)については、定量的な見積もりが困難であるため、本論文では扱わない。

## 4. 交さ偏波特性

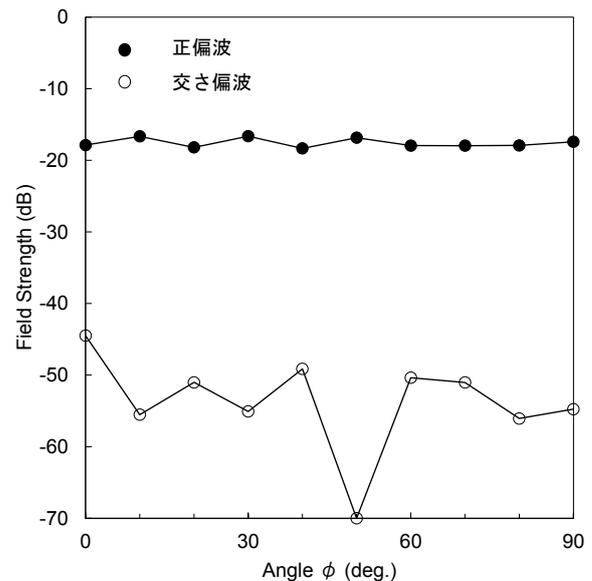
### 4.1 交さ偏波レベル測定結果

メッシュ面を透過した波は、一般にだ円偏波となる。交さ偏波特性の測定では、送受信アンテナの軸回りにメッシュ反射面を回転させ、入射面と編み線が流れる方向( $x_m$ 方向)とのなす角 $\phi$ を変化させる。メッシュ面を透過した波のだ円偏波の主軸方向を正偏波方向とする。測定条件は垂直入射( $\theta=0$ 度)、入射偏波方向 $\alpha'=-1.3$ 度である。

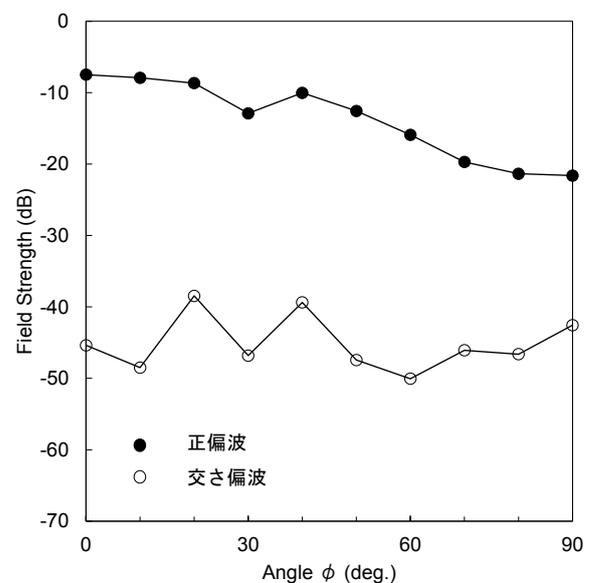
接触状態、および不完全接触状態におけるトリコット編みメッシュ面を透過した波の正偏波レベル、および交さ偏波レベルの測定結果を、それぞれ図6(a)、(b)に示す。接触状態における正偏波レベルは、角度 $\phi$ によらず $\pm 1$  dBの範囲に収まり、ほぼ一定である。不完全接触

状態では、角度 $\phi$ の増加に伴い、-7.5 dBから-21.6 dBの範囲で変化する。

接触状態での交さ偏波レベルは、 $\phi=50$ 度で測定限界値の-70 dB以下であり、それ以外の角度では、 $-50 \pm 6$  dBの範囲に収まる。これに対し、不完全接触状態では、角度 $\phi$ によらず $-44 \pm 6$  dBでほぼ一定値となる。不完全接触状態にすることによって、交さ偏波成分が平均的に6 dB増加する。



(a) 接触状態



(b) 不完全接触状態

図6 トリコット編みメッシュ面の正偏波、および交さ偏波レベル測定結果

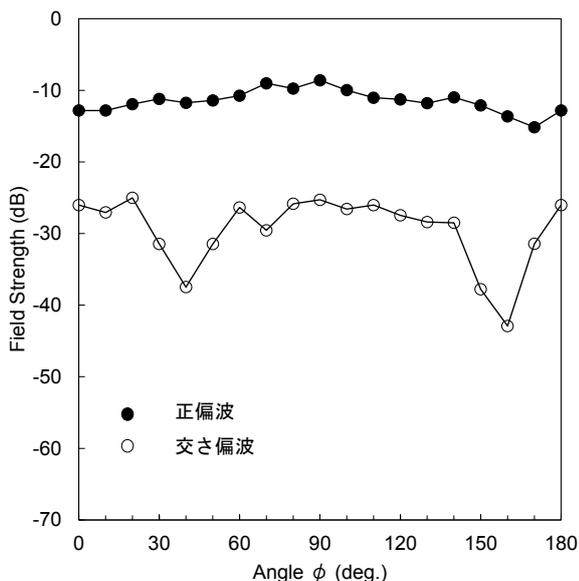


図7 二重インレイ編みメッシュ面の正偏波、および交さ偏波レベル測定結果（接触状態）

比較のため、接触状態における二重インレイ編みメッシュ面の正偏波レベル、交さ偏波レベルの測定結果を図7に示す。入射偏波方向  $\alpha^i = 42.5$  度である。角度  $\phi$  の変化に対して、正偏波レベルは180度、交さ偏波レベルはその半分の周期で変化する。正偏波レベルは  $\phi = 80$  度、 $\phi = 170$  度で、それぞれ最大値-9 dB、最小値-15 dBとなる。これに対して、交さ偏波レベルは  $\phi = 40$  度、および  $\phi = 160$  度で最小となる。これらの角度は、メッシュ面の編み線が流れる方向 ( $x_m$  方向) と入射電界方向がそれぞれ垂直な場合 ( $\phi = 47.5$  度)、および平行な場合 ( $\phi = 137.5$  度) とほぼ一致している。

図6に示したトリコット編みメッシュ面の場合よりも、二重インレイ編みメッシュ面の方が、交さ偏波レベルが低下する角度と編み線の流れる方向との関係が明確である。これは、二重インレイ編みメッシュ面では、編み線の流れが  $x_m$  方向と  $y_m$  方向に明瞭で、かつ対称性があるためと考えられる。

#### 4.2 偏波主軸の回転角度

直交2偏波を用いるアンテナでは、単一偏波に対する交さ偏波レベルが低いことのほかに、両偏波に対する偏波主軸が直交していることが重要である<sup>8)</sup>。

偏波主軸の回転角度は、受信アンテナをアンテナの軸回りに回転させ、受信レベルが最小となるときの角度から、透過波の偏波主軸が入射面 ( $x$  軸) とのなす角  $\alpha^t$  を測定することで求めることができる。

トリコット編みメッシュ面に対する、接触状態、不完全接触状態の入射波に対する透過波の偏波主軸の回転角度  $\Delta\alpha (= \alpha^t - \alpha^i)$  の測定結果を図8に示す。測定条件は垂直入射 ( $\theta = 0$  度)、入射偏波方向  $\alpha^i = -1.3$  度である。

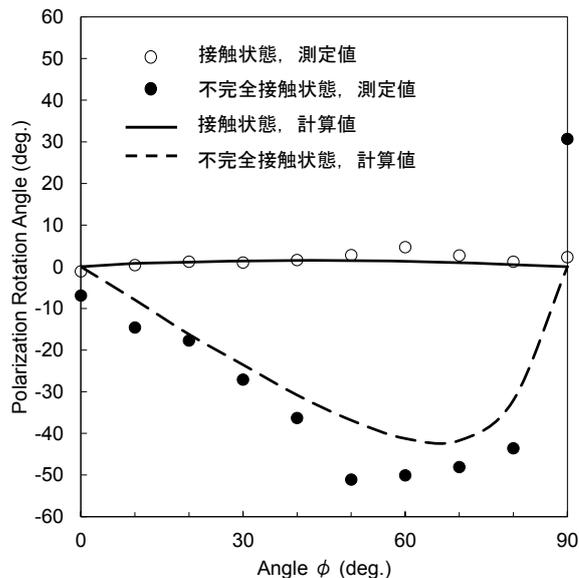


図8 トリコット編みメッシュ面の偏波主軸の回転角度

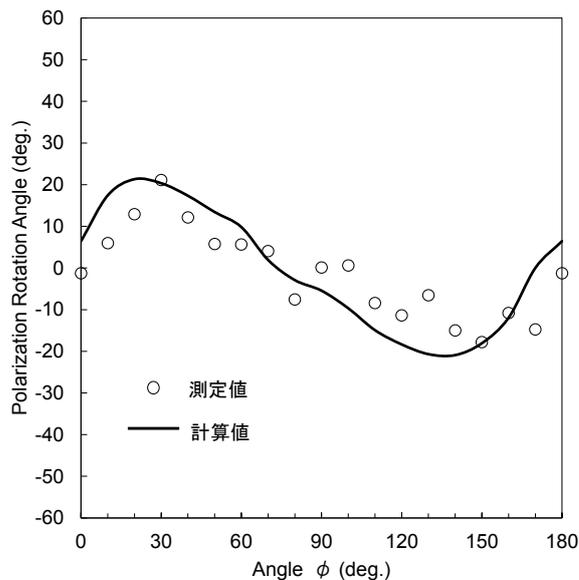


図9 二重インレイ編みメッシュ面の偏波主軸の回転角度（接触状態）

接触状態では、偏波主軸の回転角度  $\Delta\alpha$  はほぼ一定の値となる。これに対し不完全接触状態では、接触状態と比べて、回転角度が大きくなる。接触状態、および不完全接触状態における最大回転角度は、それぞれ5度、および-51度である。

比較のため、接触状態における二重インレイ編みメッシュ面における、偏波主軸の回転角度  $\Delta\alpha$  の測定結果を図9に示す。測定条件は垂直入射 ( $\theta = 0$  度)、入射偏波方向  $\alpha^i = 42.5$  度である。偏波主軸の回転角度は  $\phi$  に対して180度の周期で変化する。 $\phi = 30$  度、および  $\phi = 150$  度付近で、それぞれ最大値22度、および最小値-19度となる。

る。接触状態においても偏波主軸が回転することが判明した。

接触状態、および不完全接触状態におけるトリコット編み、および接触状態の二重インレイ編みメッシュ面ともに、交さ偏波レベルが最小となる角度付近で偏波主軸の回転角度が最大となる。

#### 4.3 偏波特性の考察

偏波特性は媒質の空間的異方性と関連づけられる。ここでは、偏波主軸の回転角度と正偏波レベル、交さ偏波レベルとの関係について考察する。

透過電界の減衰が最小、最大になる角度  $\phi$  を、それぞれ  $\phi_{\min}$ 、 $\phi_{\max}$  とする。このとき、透過電界の  $\phi_{\min}$  方向成分  $E'_{\min}$ 、および  $\phi_{\max}$  方向成分  $E'_{\max}$  は、入射電界の  $\phi_{\min}$  方向成分  $E^i_{\min}$ 、 $\phi_{\max}$  方向成分  $E^i_{\max}$  を用いて、次式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} E'_{\min} \\ E'_{\max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E^i_{\min} \\ E^i_{\max} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで  $T_{11}$ 、 $T_{12}$ 、 $T_{21}$ 、 $T_{22}$  はメッシュ面の透過係数を表し、透過電界の減衰量が最小、または最大となる正偏波レベルと交さ偏波レベルの測定結果から求めることができる。

測定結果より、トリコット編みメッシュ面、二重インレイ編みメッシュ面とも、角度  $\phi_{\min}$  と  $\phi_{\max}$  のなす角は、およそ 90 度である。このとき、透過電界の各成分の大きさは、 $|E'_{\min}|$ 、 $|E'_{\max}|$  は、次式で表される。

$$|E'_{\min}| = \sqrt{(T_{11}E^i_{\min})^2 + (T_{12}E^i_{\max})^2} \quad (2)$$

$$|E'_{\max}| = \sqrt{(T_{21}E^i_{\min})^2 + (T_{22}E^i_{\max})^2} \quad (3)$$

偏波主軸の回転角度  $\Delta\alpha (= \alpha' - \alpha^i)$  は、透過だ円偏波の軸の傾きと入射直線偏波の傾きの関係式より、次式で表すことができる。

$$\Delta\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{2|E'_{\min}||E'_{\max}|\cos\psi}{|E'_{\min}|^2 - |E'_{\max}|^2} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{E^i_{\max}}{E^i_{\min}} \right) \quad (4)$$

ここで  $\psi$  は、透過波の電界成分  $E'_{\min}$  と  $E'_{\max}$  との位相差を表し、 $|E'_{\min}|$ 、 $|E'_{\max}|$ 、および透過電界の交さ偏波成分  $|E'_{\text{cross}}|$  を用いて次式で表される。

$$\psi = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left\{ \frac{\left( |E'_{\min}|^2 + |E'_{\max}|^2 - 2|E'_{\text{cross}}|^2 \right)^2 - |E'_{\min}|^4 - |E'_{\max}|^4}{2|E'_{\min}|^2|E'_{\max}|^2} \right\} \quad (5)$$

式 (5) を用いて、それぞれの角度  $\phi$  に対して、図 6、または図 7 で示される交さ偏波レベルの測定結果から位相差  $\psi$  を求め、式(4)に代入することで、偏波主軸の回転角度を求めることができる。

トリコット編みメッシュ面、および二重インレイ編みメッシュ面に対する、偏波主軸の回転角度を、それぞれ図 8、図 9 中に線で示す。計算値と測定値はほぼ一致している。計算結果からも偏波特性が透過係数の方向性に依存することが示された。

## 5. まとめ

メッシュ面を構成している編み線間の接触状態を、高周波ワニスを用いて変化させた場合の電気的特性の検討を行った。メッシュ面の透過特性と交さ偏波特性について以下のことを明らかにした。

- (1) トリコット編みメッシュ面において、接触状態を不完全にすると、透過損失は入射電界方向が編み線方向と平行な場合と、垂直な場合、接触状態と比べて、それぞれ 10.8 dB 増加、4.4 dB 減少する。
- (2) 二重インレイ編みメッシュ面において、接触状態を不完全にすると、透過損失は入射電界方向が編み線方向と平行な場合と、垂直な場合、接触状態と比べて、それぞれ 0.7 dB 増加、3.1 dB 減少する。
- (3) トリコット編みメッシュ面において、接触状態を不完全にすると、交さ偏波成分レベルが接触状態と比べて 6 dB 増加する。
- (4) 透過損失の実験結果を格子導体モデルを用いて説明することができた。
- (5) トリコット編みメッシュ面において、接触状態を不完全にすると、偏波の回転角度は接触状態に比べて大きくなる。
- (6) 偏波特性は、透過係数の方向性に依存する。
- (7) 角度  $\phi$  による正偏波レベルと交さ偏波レベルの変化から、正偏波、交さ偏波に対するメッシュ面の電気的定数を求める式を導いた。これを用いて偏波の回転角度の実験結果を説明できた。

## 参考文献

1. T. Takano, K. Miura, M. Natori, E. Hanayama, T. Inoue, T. Noguchi, N. Miyahara, and H. Nakaguro: IEEE

- Transactions on Antennas and Propagation, **vol. 52**, no. 1, pp.2-11 (2004).
2. 角田博明、針生健一、川上用一、三好一雄、杉本俊夫：日本航空宇宙学会誌、**vol. 46**、no. 539、pp. 25-31 (1998).
  3. 小澤悟：Space Japan Review、no.80、pp. 1-10 (2012).
  4. 花山英治、荒木慎介、高野忠：電子情報通信学会論文誌 B-II、**vol. J76-B-II**、no. 4、pp. 268-276 (1993).
  5. 栗原謙三、西村純、谷澤一雄：電子情報通信学会論文誌 B-II、**vol. J81-B-II**、no. 11、pp. 1056-1065 (1998).
  6. 織笠光明、佐藤眞一、磯彰夫、杉本俊夫：電子情報通信学会論文誌 B-II、**vol. J75-B-II**、no. 4、pp. 248-251 (1992).
  7. W. A. Imbriale, V. Galindo-Israel, and Y. R. Samii: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **vol. AP-39**, no. 9, pp.1352-1365 (1991).
  8. 高野忠、進士昌明：電子情報通信学会論文誌 B、**vol. J59-B**、no. 6、pp. 341-348 (1976).
  9. J. Ruze: Proceedings of the IEEE, **vol. 54**, no. 4, pp.

633-640 (1966).

10. C. M. Butler: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **vol. AP-30**, no. 7, pp. 755-758 (1982).

(原稿受付 2015/3/18、受理 2015/5/8)

\*花山 英治, 博士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: hanayama@uitek.ac.jp

Eiji Hanayama, The Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035, Japan

\*荒木 慎介

三菱電機株式会社, 〒247-8520 神奈川県鎌倉市上町屋 325 Shinsuke Araki, Mitsubishi Electric Corporation, 325, Kamimachiya Kamakura, Kanagawa 247-8520, Japan

\*高野 忠, 工学博士

日本大学, 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

Tadashi Takano, Nihon University, 7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 274-8501, Japan