

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2013年9月6日(06.09.2013)



(10) 国際公開番号

WO 2013/128745 A1

- (51) 国際特許分類:
H01Q 15/14 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/081294
- (22) 国際出願日: 2012年12月3日(03.12.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2012-044864 2012年2月29日(29.02.2012) JP
- (71) 出願人: 株式会社 エヌ・ティ・ティ・ドコモ (NTT DOCOMO, INC.) [JP/JP]; 〒1006150 東京都千代田区永田町2丁目1番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 丸山 珠美(MARUYAMA, Tamami); 〒1006150 東京都千代田区永田町2丁目1番1号 山王パークタワー 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ 知的財産部内 Tokyo (JP). 小田 恭弘(ODA, Yasuhiro); 〒1006150 東京都千代田区永田町2丁目1番1号 山王パークタワー 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ 知的財産部内 Tokyo (JP). 加山 英俊(KAYAMA, Hidetoshi); 〒1006150 東京都千代田区永田町2丁目1番1号 山王パークタワー 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ 知的財産部内 Tokyo (JP).

トラン ゴクハオ(TRAN, Ngoc Hao); 〒1006150 東京都千代田区永田町2丁目1番1号 山王パークタワー 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ 知的財産部内 Tokyo (JP). 沈 紀▲ユン▼(SHEN, Jiyun); 〒1006150 東京都千代田区永田町2丁目1番1号 山王パークタワー 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ 知的財産部内 Tokyo (JP).

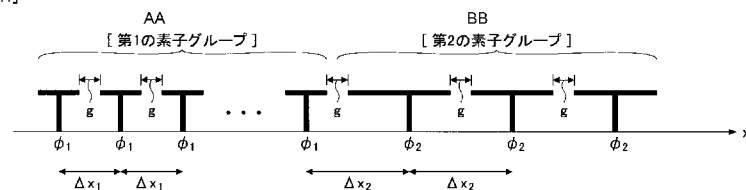
- (74) 代理人: 伊東 忠重, 外(ITO, Tadashige et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目1番1号 丸の内 MY PLAZA (明治安田生命ビル) 16階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,

[続葉有]

(54) Title: REFLECT ARRAY, DESIGN METHOD, AND SYSTEM

(54) 発明の名称: リフレクトアレー、設計方法およびシステム

[図11]



AA First element group
BB Second element group

(57) Abstract: A method for designing a reflect array, which reflects an incident wave in a desired direction and in which multiple elements are disposed on a substrate having a surface that is perpendicular to a predetermined axis, involves repeating the following steps for each of the multiple elements: a step for obtaining, as the function of a design parameter, the reflection phase of the elements when an electric wave enters into and then is reflected by the multiple elements arranged such that the element distance, the patch of the elements or the gap between adjacent elements have the same design parameter; a step for saving the correspondence relationship between the reflection phase and the design parameter to a memory; and a step for determining the design parameter of a specific element on the basis of the correspondence relationship. The function of the design parameter has a range of values that is essentially in a 360° range relative to the predetermined numerical range of the design parameter, is a function in which the reflection phase continuously changes relative to the element distance, and is a continuous function having two resonance points (the element distance that resonates) in which the reflection phase becomes zero (exhibits double resonance characteristics).

(57) 要約:

[続葉有]



MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラ
シア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッ
パ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK,
MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML,
MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

複数の素子が所定の軸に垂直な表面を有する基板に設けられている入射波を所望方向に反射するリフレクトアレーの設計方法は、素子間隔、素子のパッチ又は隣接する素子のパッチ間のギャップの内の何れかの設計パラメータが等しく設定され並べられた複数の素子に電波が入射し反射した場合における素子の反射位相を、設計パラメータの関数として求め、反射位相及び設計パラメータの対応関係をメモリに保存し、特定の素子の設計パラメータを対応関係に従って決定することを、複数の素子各々について反復する。設計パラメータの関数は、設計パラメータの所定の数値範囲に対して、実質的に 360 度の範囲にわたる値域を有し、かつ反射位相が素子間隔に対して、連続的に変化する関数であり、かつ、反射位相がゼロとなる共振点 (共振する素子間隔) が 2 箇所にあられる (二共振特性を示す) 連続な関数である。

明 細 書

発明の名称： リフレクトアレー、設計方法およびシステム

技術分野

[0001] 本発明はリフレクトアレーの設計方法等に関連する。

背景技術

[0002] 電波を受信して反射するリフレクタ又は反射板として、波長と同程度に小さな多数の素子を平面状に配置したリフレクトアレーが知られている。そのようなリフレクトアレーはメタマテリアルとも呼ばれる。個々の素子は電波を反射する任意の構造で形成され、例えばマッシュルーム構造で形成されてもよい。マッシュルーム構造は、地板と地板上に絶縁体を介して設けられるパッチとを少なくとも有し、パッチ及び地板はビアで接続されていてもよい。

[0003] 図1は、リフレクトアレーを構成する複数の素子がx軸方向に並んでいる様子を示す。図示されてはいないがy軸方向にも同様に素子が並んでいる。素子はマッシュルーム構造で形成されている。図示の例では、反射角が θ_r である方向に電波が反射されている。簡明化のため入射波は図示されていない。所望の反射角 θ_r の方向へ適切に電波を反射するためには、個々の素子で反射される電波が適切な反射位相を有する必要がある。図示の例では、4個の素子が互いに90度ずつ異なる位相で電波を反射する。一般的には、N個の素子が隣接する素子と互いに $\Delta\phi$ ずつ反射位相が異なる電波を反射するように設計される。この場合、 $\Delta\phi = (2\pi/\lambda) \cdot \Delta x \cdot \sin(\theta_r)$ である。 λ は電波の波長であり、 Δx は素子間隔である。このようなリフレクトアレーを実現する際、従来技術の一例では、反射位相とパッチサイズとの間に成立する対応関係のデータを事前に取得し、その対応関係に従って個々の素子のパッチサイズが決定されていた。図2は反射位相及びパッチサイズの対応関係を模式的に示す。「所望の位相」に対応する「パッチサイズ」に合わせて素子のパッチの寸法が規定される。

[0004] ところで、リフレクタレーが電波を所望の方向に適切に反射するには、所定数個(図1ではN個)の素子各々の反射位相差の合計($N \times \Delta \phi$)が360度になることが好ましい。しかしながら、図2に示されているように、 ± 180 度付近については実際には実現できない反射位相が存在する。従って ± 180 度に近い反射位相を要する素子を作成することはできず、リフレクタレーによる反射波の特性が所望の特性よりも劣ってしまうおそれがある。実現又は達成できない反射位相を少なくする観点からは、ビアの高さ又は基板の厚みが異なる複数の素子構造を組み合わせて使用することが考えられる(この点については、特許文献1参照)。その場合、組み合わせる素子構造の種類に応じた数の導電層が基板上に多層化される必要があり、製造工程が複雑化し、手間がかかることに加えてコスト高になってしまうことが懸念される。

[0005] また、図2に示すような対応関係を用いて素子のパッチサイズを調整する場合、大きなパッチ間の隙間(ギャップ)は非常に狭くなり、パッチを加工する際の加工精度に起因して、そのような素子を実現できないおそれもある。このような場合もリフレクタレーによる反射波の特性が所望の特性よりも劣ってしまうおそれがある。

[0006] 以上示したように、従来のマッシュルーム構造を用いたリフレクタレーは、マッシュルームの素子間のギャップで決定されるキャパシタンスと、ビアの長さで決まるインダクタンスの値を変えることによって、反射位相の値を変えていた。

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 本発明の課題は、リフレクタレーの反射特性を簡易かつ効果的に改善することが可能なリフレクタレー及び設計方法を提供することである。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明の一実施形態によるリフレクタレーの設計方法は、
複数の素子が所定の軸に垂直な表面を有する基板に設けられている入射波を所望方向に反射するリフレクタレーの設計方法であって、

素子間隔のサイズ、素子のパッチのサイズ又は隣接する素子のパッチ間のギャップのサイズの内の何れかの設計パラメータが等しく設定され並べられた複数の素子に電波が入射し反射した場合における素子の反射位相を、前記設計パラメータの関数として求め、前記反射位相及び前記設計パラメータの対応関係をメモリに保存するステップと、

前記複数の素子の内の特定の素子が、複数の反射位相の内の特定の反射位相で前記入射波を反射するように、該特定の素子の設計パラメータを前記対応関係に従って決定することを、前記複数の素子各々について反復するステップと

を有し、前記設計パラメータの前記関数は、前記設計パラメータの所定の数値範囲に対して、実質的に360度の範囲にわたる値域を有し、かつ反射位相が素子間隔に対して、連続的に変化する関数であり、かつ、反射位相がゼロとなる共振点（共振する素子間隔）が2箇所にあられる（二共振特性を示す）連続な関数である、設計方法である。

発明の効果

[0009] 本発明の一実施形態によれば、リフレクタレーの反射特性を簡易かつ効果的に改善することが可能になる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]リフレクタレーを構成する複数の素子がx軸方向に並んでいる様子を示す図。

[図2]反射位相及びパッチサイズの対応関係を模式的に示す図。

[図3]電波が入射角 θ_i で入射し反射角 θ_r で反射する様子を示す図。

[図4]リフレクタレーの一部分を示す図。

[図5]入射角 θ_i が70度及び30度のそれぞれの場合について反射位相の周波数特性を示す図。

[図6]入射角 $\theta_i=0$ 度の場合における反射位相と素子間隔の関係を示す図。

[図7]入射角 $\theta_i=70$ 度の場合における反射位相と素子間隔の関係を示す図。

[図8]斜めに入射した電波が地板によって反射される様子を示す図。

[図9A]素子間隔を決定する設計手順の一例を示すフローチャート。

[図9B]所望の反射位相と実現される反射位相との間のずれを示す図。

[図9C]素子間隔を決定する設計手順において使用可能な手順を示すフローチャート。

[図9D]素子間隔及びギャップの相互関係を示す図。

[図9E]シミュレーションで使用された素子配列の1列分を示す図。

[図9F]素子間隔及び反射位相の設計例を示す図(改善例)。

[図9G]素子間隔及び反射位相の設計例を示す図(従来例)。

[図9H]改善例及び従来例について電波の散乱断面積を示す図。

[図10]特定の素子が特定の反射位相を実現するように素子間隔が決定されたリフレクタレーの一部を示す図。

[図11]特定の素子グループが特定の反射位相を実現するように個々の素子の素子間隔が決定されたリフレクタレーの一部を示す図。

[図12A]シミュレーションで使用された素子配列の1列分を示す図。

[図12B]入射角及び反射角を示す図。

[図12C]電波の散乱断面積を示す図。

[図12D]入射波及び反射波の位相の等高線を示す図。

[図12E]素子の座標及び反射位相の関係を示す図。

[図12F]素子の座標及び反射位相の関係を示す図。

[図12G]素子の座標及び反射位相の関係を示す図。

[図12H]リフレクタレーを形成する素子配列の平面図。

[図12I]リフレクタレーを形成する素子配列の側面図。

[図12J]複数の素子がセットになっていないリフレクタレーの遠方放射界を示す図。

[図13A]別のシミュレーションで使用された素子配列の1列分を示す図。

[図13B]個々の素子の反射位相及び素子間隔を示す図。

[図13C]xz面に関する電波の散乱断面積を示す図。

[図14A]別のシミュレーションで使用された素子配列の1列分を示す図。

[図14B]個々の素子の反射位相及び素子間隔を示す図。

[図14C]xz面に関する電波の散乱断面積を示す図。

[図15]共通に使用されるパラメータの値を示す図。

[図16A]素子間隔がビア同士の間隔である場合に使用された素子配列の1列分を示す図。

[図16B]素子配列に含まれる18個の素子を素子番号及びビアの位置と共に示す図。

[図16C]個々の素子の具体的なパッチサイズ及び素子間隔を示す図。

[図17A]素子間隔がギャップ同士の間隔である場合に使用された素子配列の1列分を示す図。

[図17B]素子配列に含まれる18個の素子を素子番号及びビアの位置と共に示す図。

[図17C]個々の素子の具体的なパッチサイズ及び素子間隔を示す図。

[図18A]素子間隔がビア間の間隔であるとした場合に使用される素子配列の1列分を示す図。

[図18B]x軸に沿って並ぶ22個の素子を素子番号と共に示す図。

[図18C]ビア間の間隔を素子間隔として使用することを間隔番号と共に示す図。

[図18D]個々の素子のパッチ及び素子間隔の具体的な寸法を示す図。

[図19]素子間隔がギャップ間の間隔であるとした場合に使用される素子配列の1列分及び素子間隔を示す図。

[図20]素子間隔がビア間の間隔であるとした場合の散乱断面積(実線)及びギャップ間の間隔であるとした場合の散乱断面積(破線)を示す図。

[図21]反射位相の周波数特性を示す図。

[図22]制御角が100度である場合の電波の遠方放射界を示す図。

[図23]制御角が0度である場合の電波の遠方放射界を示す図。

[図24]シングルビームのリフレクタレーを用いて電波を反射させる例を示す図。

[図25]マルチビームのリフレクタレーを用いて電波を反射させる例を示す図。

[図26]本発明によるリフレクタレーを示す図。

[図27]本発明によるリフレクタレーを示す図。

[図28]反射波の放射パターンを示す図。

[図29]リフレクタレーの1列分を示す図。

[図30]ビアの長さを変化させた場合の散乱断面積を示す図。

[図31]ビアの長さを変化させた場合の散乱断面積を示す図。

[図32]リフレクタレーの1列分を示す図。

[図33]ギャップを変化させた場合の散乱断面積を示す図。

[図34]素子間隔と反射位相の関係を示す図。

[図35]ギャップと反射位相の関係を示す図。

発明を実施するための形態

[0011] 本発明の一般的な課題は、上述したように、リフレクタレーの反射特性を簡易かつ効果的に改善することが可能なリフレクタレー及び設計方法を提供することである。

[0012] 本発明の第1の具体的な課題は、パッチの配線層が一層である（多層構造にしない）構造で、広い範囲の反射位相（実質的に360度の範囲をカバーできること）を実現することである。

[0013] 本発明の第2の具体的な課題は、リフレクタレーを構成する全ての素子のキャパシタンスを一律に変更可能にすることである。

[0014] 本発明の第3の具体的な課題は、リフレクタレーを構成する全ての素子のインダクタンスを一律に変更可能にすることである。

[0015] 本発明の第4の具体的な課題は、リフレクタレーのキャパシタンス、もしくはインダクタンスを一律に変更することで、リフレクタレーの特性を変化させることである。

[0016] 本発明によれば、マッシュルーム構造を用いたリフレクタレーの設計において、マッシュルームのビアとビアの間に生じるキャパシタンスの値を、

すべての素子において等しい値にしたまま、各素子ごとに位相の異なるリフレクタレーを実現することが可能となる。

[0017] 更に本発明によれば、マッシュルーム構造を用いたリフレクタレーの設計において、マッシュルームの高さを変えることにより、キャパシタンスの値を決定するマッシュルーム素子間の隙間を一定にしたまま、インダクタンス L の値だけを変更することが可能となる。

[0018] 本発明の一実施形態によれば、マッシュルーム素子で構成されるマッシュルームリフレクタレーのキャパシタンス C とインダクタンス L は、全て同じ値であり、反射位相の値は、主に素子間隔で決定される。この実施形態の場合、素子間隔の値を変えることで、反射位相の値が変化するため、従来のような複雑な多層構造にする必要がない。また、全ての素子で同じ高さのビアをもちいるため、ビアの長さを一斉に変化させることで、インダクタンスの値を一斉に変えることが可能となる。また、全ての素子で同じ大きさのギャップを用いるため、パッチの長さを一斉に変化させることで、キャパシタンスの値を一斉に変えることが可能となる。

[0019] 以下、添付図面を参照しながら本発明による実施形態を次の観点から説明する。

- [0020]
1. 好ましい実施形態
 1. 1 斜め入射及び二共振特性
 1. 2 素子グループ
 1. 3 設計手順
 1. 4 シミュレーション結果
 2. 変形例
 2. 1 斜め入射を利用する変形例
 2. 2 二共振特性を利用する変形例
 2. 3 素子間隔を調整する変形例
 2. 4 更なる変形例
 2. 5 更なる変形例

2. 6 更なる変形例

2. 7 更なる変形例

<1. 好ましい実施形態>

従来のマッシュルームリフレクタレーは、隣接する素子のパッチ間のギャップの大きさで決まるキャパシタンスCとビアの長さで決まるインダクタンスLの値を素子ごとに変えている。これにより素子ごとにLC共振する周波数を変えることで、各マッシュルーム素子の反射位相の値を変えていた。このため、キャパシタンスやインダクタンスの変化する範囲を十分にとるために多層構造をとる必要があった。また、各キャパシタンスやインダクタンスの値は素子ごとに変化させる必要があった。このため、リフレクタレーの特性を変化させるために、全ての素子のキャパシタンスやインダクタンスを一斉に同じ値で変化させることは困難であった。これに対して本発明では、反射位相の値は、素子間隔で決定されるため、導電層が一層である構造のリフレクタレーを作成しやすくなる。さらに、全ての素子でギャップが同じ大きさであるため、このギャップの値を変えることで全ての素子のキャパシタンスを同時に変化させることができる。また、ビアの長さを変えることによって、全ての素子のキャパシタンスの値を一定にしたままインダクタンスLの値を一度に変化させることができる。このため、LとCの値を変化させることで制御可能なリフレクタレーの実現が可能となる。

[0021] 以下、好ましい実施形態に従って形成されるリフレクタレーを説明する。リフレクタレーが受信及び反射する電波は、電場の振幅方向が反射面に沿っているTM波であるとする。反射面とは入射波及び反射波を含む平面である。リフレクタレーはマッシュルーム構造で形成された複数の素子を含む。図3に示すように、電波は入射角 θ_i の方向からリフレクタレーに入射し、反射角 θ_r の方向へ反射するものとする。リフレクタレーは多数の素子が基板に設けられている構造を有し、個々の素子は地板とパッチとそれらの間の誘電体基板とを有するマッシュルーム構造で形成され、地板及びパッチはビアを介して接続されている。地板はグランドプレート又は接地面とも言及さ

れる。図4はリフレクタレーの一部を示す。図には4つの素子しか示されていないが、実際には更に多数の素子が存在する。なお、説明の便宜上、本願においてはリフレクタレーを構成する素子の地板に垂直な方向がz軸であるとするが、座標軸の取り方は任意である。

[0022] <<1. 1 斜め入射及び二共振特性>>

図4に示すような構造を有するリフレクタレーにTM波がz軸に対して入射角 θ_i で入射する場合、反射波の反射位相 Γ は次のように表現できる。

[0023] [数1]

$$\Gamma = \frac{\frac{\varepsilon_{zz}^{TM}}{\gamma_{TM}} \coth(\gamma_{TM} t) + \frac{\varepsilon_{zz}^{TM} - \varepsilon_h}{k} \cot(kt) + \frac{\eta_0}{jk_0} Z_g^{-1} - \frac{1}{jk_z}}{\frac{\varepsilon_{zz}^{TM}}{\gamma_{TM}} \coth(\gamma_{TM} t) + \frac{\varepsilon_{zz}^{TM} - \varepsilon_h}{k} \cot(kt) + \frac{\eta_0}{jk_0} Z_g^{-1} + \frac{1}{jk_z}} \quad (\text{数式1})$$

$$\gamma_{TM} = \sqrt{k_p^2 + k_t^2 - k^2} \quad (\text{数式2})$$

ただし、共振周波数 r_f は、

$$r_f = f_p / \sqrt{\varepsilon_r} \quad (\text{数式3})$$

により表現されるものとする。 f_p はプラズマ周波数を示す。 ε_r はパッチ及び地板の間に介在する誘電体基板の比誘電率を示す。プラズマ周波数 f_p はプラズマ波数 k_p と次の関係を満たす。

[0024] $f_p = k_p c / (2\pi) \quad (\text{数式4})$

ただし、 c は光速を示す。プラズマ波数 k_p は素子間隔 Δx と次の関係を満たす。

[0025]

[数2]

$$(k_p \Delta x)^2 = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{\Delta x}{2\pi(dv/2)}\right) + 0.5275} \quad (\text{数式5})$$

ただし、 dv はビアの直径を示す。なお、上記の数式(1)において、 ε_{zz} はビアに沿った金属媒体の実効誘電率を示しており、以下の補足式1で表される(この点については、非特許文献1参照)。 ε_h はマッシュルームを構成する基板の比誘電率を示し、 η_0 は自由空間のインピーダンスを示す。 k_0 は自由空間の波数を示し、 k はマッシュルーム媒体の波数を示しており、以下の補足式2で表される。 k_z は波数ベクトル(波動ベクトル)の z 成分を表しており、以下の補足式3で表される。

[0026] [数3]

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_h \left(1 - \frac{k_p^2}{k^2 - q_z^2} \right) \quad (\text{補足式1})$$

$$k = k_0 \sqrt{\varepsilon_h} \quad (\text{補足式2})$$

$$k_z = \sqrt{k_0^2 - k_t^2} \quad (\text{補足式3})$$

なお、数式1における Z_0 は表面インピーダンスを示し、次式の関係を満たす。

[0027]

[数4]

$$Z_g = -j \frac{\eta_{eff}}{2\alpha} \quad (\text{数式6})$$

ここで、 η_{eff} は以下の補足式4で表される、実効インピーダンスを示し、 α は以下の補足式5で表されるグリッドパラメータである。

[0028] [数5]

$$\eta_{eff} = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0 \epsilon_{eff}} \quad (\text{補足式4})$$

$$\alpha = \frac{k_{eff} \Delta_v}{\pi} \ln \left(\sin^{-1} \left(\frac{\pi g}{2 \Delta_v} \right) \right) \quad (\text{補足式5})$$

先ず、図4に示すようなりフレクトアレーを構成する素子の反射位相の周波数特性を考察する。具体的には、

設計周波数＝11GHz(波長＝27.3mm)、

基板の厚み $t=1\text{mm}$ 、

誘電体の比誘電率 $\epsilon_r=10.2$ 及び

素子間隔 $\Delta x = \Delta y = 2.25\text{mm}$

とした場合、

共振周波数 r_f は、10.5GHzであった。このとき、反射位相がゼロとなる周波数は、このスプリアス共振より低い周波数と高い周波数の2箇所にあられ同相になる。したがって、この二つの反射位相がゼロとなる周波数の間で位相が360度一回転する。これらの数値例は単なる一例に過ぎず、適切な如何な

る数値が使用されてもよい。なお、図4及び以下の説明において、素子間隔は、隣接する素子のビア同士の間隔 Δ_v (Δ_x 又は Δ_y)として定義されてもよいし、別の定義が使用されてもよい。例えば、隣接するパッチ間のギャップの中心から次のギャップの中心までの距離 Δ_p が、素子間隔であると定義されてもよい。

[0029] 図5は、入射角 θ_i が70度及び30度のそれぞれの場合について反射位相の周波数特性を示す。破線は入射角 $\theta_i=30$ 度の場合の理論値を示す。図5-7の説明における「理論値」は上記の(数式1)を用いて算出された値である。反射位相 ϕ の理論値は(数式1)の反射係数 Γ の偏角又は位相角($\phi = \arg(\Gamma)$)として求めることができる。丸印は入射角 $\theta_i=30$ 度の場合について電磁解析ツール(HFSS)により求めた反射位相のシミュレーション値を示す。実線は入射角 $\theta_i=70$ 度の場合の反射位相の理論値を示す。四角印は入射角 $\theta_i=70$ 度の場合について電磁解析ツール(HFSS)により求めた反射位相のシミュレーション値を示す。何れも11GHz付近において共振しているが、反射位相の周波数特性は入射角に依存して異なっていることが分かる。

[0030] 次に、11GHzのTM波を適切な方向へ反射させることを考察する。背景技術において言及したように、リフレクタレーが適切な方向へ電波を反射させるには、所定数個の素子各々の反射位相が0度から360度までの範囲内で適切に設定されていることが好ましい。反射位相の範囲の始点及び終点は任意であり、上記のように0~360度でもよいし、或いは-180~+180度でもよい。

[0031] 一般に、素子の二次元配列を有するリフレクタレーにおいて m 番目の素子グループに属する素子の反射位相 ϕ_m は、次のように表現できる($m=1, \dots, M$)。

[0032]

[数6]

$$\phi_m = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{r}_m \cdot \mathbf{U}_i - \mathbf{r}_m \cdot \mathbf{U}_r) \quad (\text{数式7})$$

$$\phi_m = \frac{r_m 2\pi}{\lambda} (\sin(\theta_i) - \sin(\theta_r)) \quad (\text{数式8})$$

この場合において、素子グループは同じ反射位相を実現する複数の素子を含むが、この点については後述する。ベクトル $\mathbf{r}_m$ は m 番目の素子グループの位置ベクトルであり、大きさは r_m である。 λ は電波の波長を示す。ベクトル $\mathbf{U}_i$ は入射波の進行方向に沿う単位ベクトルを示す。ベクトル $\mathbf{U}_r$ は反射波の進行方向に沿う単位ベクトルを示す。素子グループに属する複数の素子が一列に並んでいる場合、位置ベクトル $\mathbf{r}_m$ は先頭の素子のビアの位置を指してもよいし、複数の素子の中の中心の素子のビアの位置を指していてもよい。例えば同じ素子グループに属する素子が5つ並んでいた場合、位置ベクトルは1番目の素子のビアの位置を指してもよいし、中心の3番目の素子のビアの位置を指していてもよい。

[0033] 図6は入射角 $\theta_i=0$ 度の場合における反射位相と素子間隔の関係を示す。すなわち、図6は入射角 θ_i が0度である場合における反射位相を素子間隔の関数として表現したものである。実線は理論値を示す。四角印は正方形のパッチを使用した場合のシミュレーションによる値を示す。図6に示すグラフにおいては、横軸が素子間隔であることに留意を要する。この点、素子間隔を一定に維持しつつ、反射位相及びパッチサイズの対応関係(例えば、図2)を利用して従来技術と異なる。更に、本実施形態においては、隣接する素子のパッチ同士の間隙(ギャップ)は、リフレクタレー内の任意の素子について共通に設定される。この点、ギャップが場所によって異なっている従来技術

と異なる。すなわち、本実施形態は、素子間隔を一定にしつつパッチサイズを可変にする(ギャップはそれに応じた値に設定される)のではなく、素子間隔を可変にしつつギャップを一定にしている(パッチサイズはそれに応じた値に設定される)。このようにすることで、過剰に狭いギャップを形成しなくてはならなくなる従来の問題を、効果的に回避することができる。更に、反射係数 Γ の理論式である(数式1)においては、(数式2)を考慮すると、素子間隔 Δx が直接的に含まれている。これに対して、パッチサイズ W_x 及び/又は W_y は(数式1)に直接的に含まれてはいない。このため、パッチサイズを調整するよりも、素子間隔を調整した方が、反射係数すなわち反射位相を的確に制御できる。

[0034] しかしながら素子間隔を制御した場合であっても、図6に示されているように、 ± 180 度付近の反射位相を実現することは困難である。この問題を解決するため、本実施形態では、入射角 θ_i が0度より大きい角度をなすようにする。すなわち、入射波が z 軸に対して斜めに入射するようにする。上述したように、反射位相と素子間隔との間に成立する関係は入射角 θ_i に応じて異なるので、入射角 θ_i が0度でない場合、反射位相と素子間隔との間に成立する関係は、もはや図6に示すものではなくなる。

[0035] 図7は入射角 $\theta_i=70$ 度の場合における反射位相と素子間隔の関係を示す。すなわち、図7は、入射角 θ_i が70度である場合における反射位相を素子間隔の関数として表現したものである。「理論値」は上記の(数式1)を用いて算出された値である。三角印は長方形のパッチが使用された場合についてのシミュレーション値を示す。長方形のパッチとは図4において W_x 又は W_y の一方を例えば上記の2.25mmに固定し、他方を可変に設定する場合のパッチである。四角印は正方形のパッチが使用された場合についてのシミュレーション値を示す。丸印は後述のシミュレーションの際に使用された反射位相及び素子間隔の組み合わせを示す。なお、理論値の計算で使用する(数式1)は正方形のパッチが使用されることを前提としている。

[0036] 図7に示されているように、素子間隔が1mmから2.25mmへ増加するにつれて

、反射位相は60度付近から−180度まで徐々に減少している。そして、素子間隔が2.25mmから2.5mmへ増加する場合には、反射位相は+180から−60度付近まで急激に減少し、素子間隔が2.5mmから3.5mmへ増加する場合には、反射位相は−60度付近から−120度付近まで緩やかに減少している。このように、±180度の範囲内の任意の値の反射位相が、何らかの値の素子間隔に対応しているので、少なくとも理論上は全ての反射位相を実現できる。ただし、反射位相は、2.25mmの素子間隔において−180度から+180度へ変化している。一方、図7において、位相がゼロとなる素子間隔が2箇所存在しており、その間、位相は0度から−180度180度から0度と、360度分連続的に変化している。このような形状の特性を「二共振特性」と言及する。したがって、本実施例では、360度分いずれの所望反射位相に対しても、該当する素子間隔を選択することが可能となる。

[0037] 本実施形態では、反射位相及び素子間隔の関係が二共振特性を示すように、(数式1)に含まれている各種のパラメータが選択される。二共振特性を示す反射位相及び素子間隔の関係を活用することで、任意の値の反射位相をもたらす素子を実現できるようになり、リフレクタレーの反射特性を改善することができる。その場合、パッチ同士の間のギャップを一定に保つことができるので、極端に狭いギャップを形成しなくなってしまうこともない。素子の具体的な設計手順については後述する。

[0038] なお、二共振特性を利用する場合、反射位相を素子間隔の関数として表現したグラフだけでなく、反射位相を他のパラメータの関数として表現したグラフが使用されてもよい。そのような他のパラメータの具体例は、個々の素子のパッチサイズや、隣接する素子のパッチ同士の間の隙間(ギャップ)のサイズ等である。

[0039] 更に、二共振について、図21を用いて説明する。上述のとおり、マッシュルーム構造にTM波(電界が入射面と平行であり、ビアと平行な波)が斜めから入射する場合、共振周波数 f_r は、10.5GHzであり、ここで反射位相は−180度から+180度へ(連続的に)変化する。この場合、反射位相が0となる周波数(

反射位相の正負が逆転する周波数)は、図21に示されているように、約8.75GHzと12.05GHzの二箇所に現れている。すなわち、8.75GHzから12.05GHzまで周波数が変化する間に、位相が360度変化している。この反射位相が0となる周波数を上記の r_f とは別にマッシュルーム構造の共振周波数と呼んでおり、正面入射では、約9.5GHzの1箇所で共振するのに対して、斜めTM入射では2箇所で共振するため二共振と呼んでいる。

[0040] <<1. 2 素子グループ>>

入射波がz軸に対して斜めに入射する場合、パッチによる反射だけでなく、地板による反射も考慮する必要がある。

[0041] 図8は入射角 θ_i で斜めに入射した電波が地板によって反射される様子を示す。x軸方向に並んでいる素子の各々に便宜的に $M_0, M_1, \dots, M_N, M_{N+1}$ のラベルが付されている。地板に対するパッチの高さ(すなわち、ビアの長さ)は t であるとする。地板において鏡面反射が起こるとすると、反射波は反射角 θ_i の方向に進む。この場合、リフレクタレーにおいて入射波が入って来る地点と反射波が出て行く地点との間の距離 X_u は、 $X_u = 2 \times t \times \tan \theta_i$ である。この距離 X_u の範囲内にある素子 $M_1, \dots, M_N$ は同じ反射位相を実現するように設計されていることが望ましい。言い換えれば、リフレクタレーを形成する素子を設計する場合、 $X_u = 2 \times t \times \tan \theta_i$ の範囲内に収まる複数の素子が同一の寸法や形状(同じ値の設計パラメータ)を有するように、それら複数の素子を含む素子グループ毎に設計パラメータが決定される。 X_u の長さを有する素子グループに含まれる素子の数は、図示の例では N は $(X_u / \Delta x)$ を超えない最大の整数であるが、 X_u の範囲内に N 個の素子が含まれていることは必須でない。 X_u の範囲内に、 N 個より少ない素子しか含まれていなくてもよい。1つの素子グループの中で複数の素子が同じ値のパラメータで設計されていればよいからである。

[0042] 説明の便宜上、図8はx軸方向しか示していないが、実際にはy軸方向についても同様な議論が成り立つ。従って一般的に言えば、素子グループの各々は、z軸に垂直な少なくとも1つの軸方向に伸びる或るサイズを有し、その或るサイズは、基板の厚みと電波の入射角度の三角比との積の2倍以上の長さであ

る。そのようなリフレクタレーにおいて、複数の素子を含む素子グループが、x軸及びy軸方向に複数個設けられ、個々の素子グループは、少なくとも隣接する素子グループとは異なる反射位相を実現する。

[0043] <<1. 3 設計手順>>

図9Aを参照しながら、リフレクタレーを構成する素子の素子間隔を決定する設計手順を説明する。図9Aには、そのような設計手順の一例を示すフローチャートが示されている。フローはステップS901から始まり、ステップS903に進む。

[0044] ステップS903において、事前に決定する必要があるパラメータ及び事前に決定することが可能なパラメータの値が決定される。例えば、設計周波数、誘電体基板の厚み、誘電体基板の比誘電率、電波の入射角、電波の反射角等のパラメータの値が予め決定される。これらのパラメータに従って、反射位相と素子間隔との間にどのような関係が成り立つかが決まる。説明の便宜上、反射位相と素子間隔の間に成立する関係が二共振特性を示すように、各種のパラメータの値が決定されているものとする。ただし、二共振特性を示すように決定することは必須ではない。何らかのパラメータの組み合わせにより二共振特性が得られるか否かは、例えば上記の(数式1)から算出される反射位相 $\arg(\Gamma)$ が素子間隔 Δx に対してどのように変化するかを調べることで判定できる。

[0045] ステップS905において、所与の入射角で電波が入射して反射する場合の反射位相と素子間隔の間に成立する関係を表すデータが取得される。そのようなデータの具体例は図6及び図7に示すような反射位相と素子間隔との対応関係を示すデータである。このような対応関係のデータは、一例として、(数式1)を用いて理論的に求められてもよい。ただし、その場合、パッチは正方形を前提としていることに留意を要する。あるいは、対応関係のデータは、シミュレーション又は実験により求められてもよい。何れにせよ、ある素子間隔 Δx で素子が多数(理論的には無限個)並んでいるモデル構造に、電波が入射角 θ_i で入射して反射する場合の反射位相が算出又は測定される。様々な素子

間隔について反射位相を求めることで、図6や図7に示すような対応関係のデータを取得することができる。理論式、シミュレーション又は実験の方法の何れが使用されるにせよ、ステップS905において、反射位相が素子間隔の関数として求められ、その関数を表すデータがメモリに記憶される。なお、反射位相が素子間隔の関数であることは本発明において必須ではなく、反射位相を他のパラメータの関数として表現した対応関係のデータがメモリに記憶されてもよい。そのような他のパラメータの具体例は、個々の素子のパッチサイズや、隣接する素子のパッチ同士の間隙(ギャップ)のサイズ等である。

- [0046] ステップS907において、特定の素子の実現しなければならない反射位相が決定される。入射角 θ_i が0度である場合、特定の素子は1つでもよい。しかしながら、入射角 θ_i が0とは異なる角度であった場合、特定の素子グループに属する全ての素子に共通する反射位相が決定される。上述したように、1つの素子グループは、 $2 \times t \times \tan \theta_i$ の範囲内に収まる個数の素子を含む。
- [0047] ステップS909において、特定の素子の実現しなければならない反射位相に対応する素子間隔が、メモリに記憶されている対応関係のデータに従って決定される。ギャップが一定である場合、素子間隔及びギャップから、パッチサイズが導出される。
- [0048] ステップS911において、全ての素子について素子間隔が決定されているか否かが判定され、未だ決定されていなければ、フローはステップS907に戻って残りの素子について、反射位相及び素子間隔が決定される。ステップS911において、全ての素子について素子間隔が決定されている、と判定された場合、フローはステップS913に進み、終了する。
- [0049] このように、特定の素子が適切な特定の反射位相を実現するように、特定の素子の素子間隔を所定の対応関係に従って決定する手順が、複数の素子各々について反復される。すなわち、反射位相を決定し、素子の位置(位置ベクトル)及び素子間隔を決定する手順を反復することで、個々の素子の具体的な設計パラメータが決定される。その結果、例えば図10に示すように素子間隔

及びパッチサイズが決定される。或いは、複数の素子グループ毎に異なる特定の反射位相で入射波を反射するように、特定の素子グループに属する複数の素子に共通する素子間隔を所定の対応関係に従って決定する手順が、複数の素子グループ各々について反復される。このようにして、リフレクタレーを構成する素子の素子間隔が決定される。その結果、例えば図11に示すように素子間隔及びパッチサイズが決定される。

[0050] 上述したように、素子間隔と反射位相の所定の対応関係(例えば、図6や図7等)から所望の反射位相とその反射位相に対応する素子間隔とを順番に決定してゆくことで、反射位相が360度の範囲にわたって徐々に変化する素子配列を作成できる。そのような素子配列を多数並べることで所望の反射特性を有するリフレクタレーを実現することができる。例えば、一列に並んだ11個の素子を用いてそのような素子配列を形成する場合、隣接する2つの素子による反射位相差は約32.73度である。しかしながら、1つの反射位相を決定し、その反射位相に対応する素子間隔を決定しながら、全ての素子について順番に素子間隔を決定した場合、その設計による素子配列の中で実際に実現される反射位相が所望の値でなくなってしまうことが懸念される。なぜなら、反射位相は、素子間隔の境界で決定されるのではなく、隣接する素子のパッチ同士の間(ギャップ)の中央で決定されるからである。図9Bは、1つの反射位相を決定し、その反射位相に対応する素子間隔を決定しながら、11個の素子について順番に素子間隔を決定することで素子配列を作成した場合に、個々の素子で実現される反射位相が、所望の反射位相からどれだけずれているかの差分(度)を示す。素子が所望の反射位相を実現できていた場合、差分は0であるので、理想的には11個の全ての位置又は座標(mm)において差分は0である。しかしながら、図示されているように、個々の素子で実際に実現される反射位相は、理想的な値からずれてしまっている。以下に説明する改善例は、反射位相がパッチ間のギャップの中央で決定されることを考慮して、素子間隔を適切に決定してゆく方法を示す。

[0051] 図9Cは、素子間隔を決定する設計手順において使用可能な改善例によるフ

ローチャートを示す。図示の手順は、図9Aに示す設計手順におけるステップS907、S909及びS911を反復する際に使用可能である。フローはステップS921から始まり、ステップS923に進む。

[0052] ステップS923において、座標の原点0が決定される。原点0は、図9Dに示されているように、第1の素子#1のパッチと第2の素子#2のパッチとの間のギャップ(隙間) g_1 の中央に合わせて設定される。図9Dに示されているように、2以上の値の i について、 i 番目の素子# i と $i+1$ 番目の素子# $i+1$ との間の素子間隔は dv_i であり、パッチ間のギャップは g_i である。 dv_i は図4における Δx 及び Δy に対応し、 g_i は図4における g_x 及び g_y に対応する。

[0053] ステップS925において、原点0に対する初期位相 ϕ_1 が決定される。初期位相は、0度や180度でもよいが、そのような値に限定されず、実施の形態に応じて任意の位相に設定されてよい。

[0054] ステップS927において、ステップS925で決定された初期位相 ϕ_1 を実現するような素子間隔 dv_1 が決定される。図6及び図7等に応示するような反射位相と素子間隔との間の対応関係が事前にメモリに保存されており(図9AのステップS905)、この対応関係を参照することで、初期位相 ϕ_1 を実現するのに必要な素子間隔 dv_1 を決定できる。上述したように、このような反射位相と素子間隔との間の対応関係は、例えば電磁解析ツール(High Frequency Structure Simulator : HFSS)等を用いたシミュレーションにより求められてもよいし、実験により求められてもよい。

[0055] ステップS929において、 i 番目の素子に対する仮の素子間隔(仮素子間隔) dv_{p_i} が、所定の数値範囲の中から選択される。数値範囲は例えば1mm以上6.1mm以下の範囲内であるが、実施の形態はこれに限定されず、適切な如何なる数値範囲が設定されてもよい。 i の初期値は2である。従って、初期位相 ϕ_1 及び第1の素子間隔 dv_1 が決定された後、2番目の仮素子間隔 dv_{p_2} が、1mm以上6.1mmの範囲内で決定される。

[0056] ステップS931において、仮素子間隔 dv_{p_i} が使用される場合のギャップ g_i の中心位置の座標 y_{p_i} が算出される。一般に、ギャップ g_i の中心位置の座標 y_{p_i} は次

式で表現される。

$$[0057] \quad y_{p_i} = dv_1/2 + \dots + dv_{i-1} + dvp_i/2 \quad \dots \quad (Y)$$

ただし、 i は2以上の整数である。例えば、 $i=2$ の場合、 $y_{p_2} = dv_1/2 + dvp_2/2$ となり、 $i=3$ の場合、 $y_{p_3} = dv_1/2 + dv_2 + dvp_3/2$ となる。

[0058] ステップS933において、仮素子間隔 dvp_i が使用される場合にギャップ g_i の中心位置で実現すべき理想的な反射位相 ϕ_i が、次式に従って算出される。

$$[0059] \quad \phi_i = (y_{p_i} \times 2\pi / \lambda) (\sin(\theta_i) - \sin(\theta_r)) \quad \dots \quad (P)$$

数式(P)は上述した数式(8)に対応し、 ϕ_i は原点0に対する位相差である。 θ_i は入射波が z 軸に対してなす偏角を表し、 θ_r は反射波が z 軸に対してなす偏角を表す。 λ は電波の波長を表す(例えば、周波数が11GHzの場合、波長は27.3mmである)。

[0060] ステップS935において、図6及び図7等に示すような反射位相と素子間隔との間の対応関係を参照し、仮素子間隔 dvp_i に対応する反射位相 ϕ_i^{SIM} を求める。

[0061] ステップS937において、数式(P)から求めた理想的な反射位相 ϕ_i と反射位相及び素子間隔の対応関係から求めた実際に実現される反射位相 ϕ_i^{SIM} との差分を算出し、この差分を最も小さくする仮素子間隔 dvp_i が判定される。従って、所定の数値範囲内の仮素子間隔 dvp_i の値についてステップS929-S937の処理が実行され、「 $\phi_i - \phi_i^{SIM}$ 」を最も小さくする仮素子間隔 dvp_i の値が、実際の素子間隔 dv_i 及び反射位相 ϕ_i として最適化される。

[0062] ステップS939において、数式(Y)に基づいて算出した大きさが、設計対象のリフレクタレーの所望のサイズに到達したか否かが判定される。所望のサイズに到達した場合、フローはステップS941に進み、終了する。所望のサイズに到達していなかった場合、フローはステップS943に進む。

[0063] ステップS943において、決定されたばかりの反射位相 ϕ_i が初期位相 ϕ_1 と同一になったか否かが判定される。同一であった場合、 ϕ_1 、 ϕ_2 、... ϕ_i による反射位相差の合計は360度になるので、フローはステップS941に進み、終了する。決定されたばかりの反射位相 ϕ_i が初期位相 ϕ_1 と同一でなかった場合、フローはステップS945に進む。

[0064] ステップS945において、 i の値がインクリメントされ、フローはステップS929に戻る。以後、説明済みの処理が反復される。

[0065] このように改善例によるフローチャートでは、一定の数値範囲内の仮素子間隔(例えば、 $1\text{mm} \leq dvp_i \leq 6.1\text{mm}$)のうち、「 $\phi_i - \phi_i^{\text{SIM}}$ 」を最も小さくする仮素子間隔 dvp_i の値を、実際の素子間隔 dv_i とし、その素子間隔に対応する反射位相 ϕ_i が実現される。このように、隣接する素子間のギャップの中央で反射位相が実現されることを考慮し、個々の素子間隔の最適化($dvp_i \rightarrow dv_i$)を行いながら素子間隔を決定するので、改善例による設計方法は、従来例よりも反射特性に優れたリフレクタレーを実現できる。改善例に関するシミュレーション結果については、図9Eないし図9Hを参照しながら後述する。

[0066] <<1. 4 シミュレーション結果>>

以下、上記の設計手順に従って素子間隔が決定されたリフレクタレーについてのシミュレーション結果を説明する。

[0067] (1)図12Aは、シミュレーションで使用された素子配列の1列分を示す。このような素子配列が y 軸方向にも並んでおり、約 $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ の寸法のリフレクタレーが形成されているものとする。入射波及び反射波は zx 面内にあり、電波はTM波であるとする。すなわち電場の振幅方向は zx 面内にある。具体的には、電波は z 軸に対して入射角 $\theta_i = 70^\circ$ で入射し、反射角 $\theta_r = -30^\circ$ で反射するように、複数の素子の素子間隔等が決定されている。素子はマッシュルーム構造を有する。なお、図12Bに示すように、入射角及び反射角はそれぞれ z 軸を基準とした角度を示すが、角度の正負の方向が逆になっていることに留意を要する。

[0068] 「1. 2 素子グループ」において説明したように、複数の素子を含む素子グループ毎に反射位相及び素子間隔が決定される。3つの素子で1つの素子グループが形成され、図12Aに示す素子配列には6つの素子グループが含まれている。図12Eに示すように、隣接する3つの素子は同じ反射位相を実現するように設計されている(素子3つで1セットが形成される)。

[0069] 図12Cは電波の散乱断面積を示し、入射波、反射波及び鏡面反射波の方向が

参考のために示されている。図示されているように、反射角 $\theta_r = -30$ 度の所望方向に強い反射波が形成されている一方、鏡面反射方向等の不要な方向の電波は抑制されていることが分かる。反射角 θ_r のプラス方向は入射角 θ_i のプラス方向と逆向きなので、反射角 θ_r が -30 度の方向は、入射角 θ_i が $+30$ 度の方向と同じである。

[0070] 図12Dは入射波と反射波の位相の等高線を示す。概して、等高線に直交する矢印方向に電波が進行する。図示されているように、電波は入射角 $\theta_i = 70$ 度で入射し、反射角 $\theta_r = -30$ 度で適切に反射していることが分かる。

[0071] 仮に、x軸方向に並ぶ素子が素子グループを形成せずに設計された場合、例えば素子3つを1セットとして設計しなかった場合を考察する。例えば $\theta = 70$ 度のような斜め入射に対して所望方向 $\theta = -30$ 度に電波が反射するように、個々の素子の設計パラメータが決定される際に、隣接する素子が互いに異なる反射位相を実現するようにする。例えば、図12Fに示すように、10個の素子の位相及び座標(素子間隔)を決定することができる。図示されているように、隣接する素子は互いに異なる反射位相を実現し、かつ素子間隔が異なっている。図12Gは図12Fに示す10個の素子の反射位相と座標の関係を示す。図示されているように、2共振特性が示されており、反射位相は $+180$ 度から -180 度までの範囲を実質的にカバーできている。図12F及び図12Gは10個の素子の場合についての数値例であるが、同様な観点から10個より多い素子を含むリフレクトアレーを設計することもできる。図12Hは、21個の素子がx軸方向に並べられている素子配列の平面図を示し、隣接する素子は互いに異なる反射位相を実現するように設計されている。図12Iは、図12Hに示す素子配列の側面図を示す。図12Jは、図12H及び図12Iに示すような素子配列を有するリフレクトアレーに電波が入射した場合における、反射波の遠方放射界を示す。電波がz軸に対して $\theta = +70$ 度で入射した場合のグラフは実線で示されている。電波がz軸に対して $\theta = -70$ 度で入射した場合のグラフは破線で示されている。何れのグラフも所望方向の $\theta = -30$ 度とは異なる非所望方向 $\theta = 0$ 度に強い反射波を形成していることを示す。これに対して複数の素子を1つのセットとして素子グ

ループを形成して設計した場合は、図12Cに示すように所望方向に強い反射波を形成できる。このように本実施形態によれば、斜め入射の場合に適切な数の素子による素子グループを形成することで、反射位相が+180度から-180度までの範囲を実質的にカバーできるようにし、かつ所望方向に強い反射波を形成するリフレクタレーを実現することができる。

[0072] (2)図13Aは、別のシミュレーションで使用された素子配列の1列分を示す。このような素子配列がy軸方向にも並んでおり、リフレクタレーが形成されているものとする。電波は入射角 $\theta_i=70$ 度で入射し、反射角 $\theta_r=30$ 度で反射するように、素子配列当たり31個の素子(#1-#31)の素子間隔等が決定されている。素子はマッシュルーム構造を有する。「1. 2 素子グループ」において説明したように、複数の素子を含む素子グループ毎に反射位相及び素子間隔が決定される。3つの素子で1つの素子グループが形成され、図13Aに示す素子配列には3つの素子をそれぞれが含む10個の素子グループと1つの素子とが含まれている。

[0073] 図13Bは個々の素子の反射位相及び素子間隔を示す。

[0074] 図13Cはxz面に関する電波の散乱断面積を示す。図示されているように、反射角 $\theta_r=30$ 度の所望方向に強い反射波が形成されている一方、不要な方向の電波は抑制されていることが分かる。

[0075] (3)図14Aは、別のシミュレーションで使用された素子配列の1列分を示す。このような素子配列がy軸方向にも並んでおり、リフレクタレーが形成されているものとする。電波は入射角 $\theta_i=70$ 度で入射し、反射角 $\theta_r=-30$ 度で反射するように、素子配列当たり19個の素子(#1-#19)の素子間隔等が決定されている。素子はマッシュルーム構造を有する。「1. 2 素子グループ」において説明したように、複数の素子を含む素子グループ毎に反射位相及び素子間隔が決定される。3つの素子で1つの素子グループが形成され、図14Aに示す素子配列には3つの素子をそれぞれが含む6個の素子グループと1つの素子とが含まれている。

[0076] 図14Bは個々の素子の反射位相及び素子間隔を示す。

[0077] 図14Cはxz面に関する電波の散乱断面積を示す。図示されているように、反射角 $\theta_r = -30$ 度の所望方向に強い反射波が形成されている一方、不要な方向の電波は抑制されていることが分かる。

[0078] (4)図4に関連して言及したように、素子間隔は隣接する素子のビアの間隔 Δ_v でもよいし、パッチ間のギャップの中心と次のギャップの中心との間の間隔 Δ_p でもよい。しかしながら素子間隔に何れの定義を使用するかによってパッチサイズや素子間隔等の具体的な値は異なる。以下、(4.1)素子間隔がビア同士の間隔 Δ_v である場合の寸法例と、(4.2)素子間隔がギャップ同士の間隔 Δ_p である場合の寸法例とを示す。まず、双方に共通に使用されるパラメータの値は、図15に示されているとおりである。すなわち、誘電体基板の比誘電率、厚み(パッチの高さ又はビアの長さ)及び $\tan \delta$ はそれぞれ10.2、1mm及び0.0023であり、ビアの直径は0.1mmであるとする。

[0079] (4.1)図16Aは、素子間隔がビア同士の間隔 Δ_v である場合に使用された素子配列の1列分を示す。このような素子配列がy軸方向にも並んでおり、リフレクトアレーが形成される。概してx軸方向に伸びる一列の全長は37.86mmであり、y軸方向の長さ(列の幅)は2.25mmである。この1列の素子配列の中に18個の素子が含まれている。

[0080] 図16Bはそれら18個の素子を示す。上段は各素子の素子番号を示し、下段は各素子のパッチをビアの位置と共に示す。個々の素子の具体的なパッチサイズ及び素子間隔は図16Cに示されている。

[0081] (4.2)図17Aは、素子間隔がギャップ同士の間隔 Δ_p である場合に使用された素子配列の1列分を示す。このような素子配列がy軸方向にも並んでおり、リフレクトアレーが形成される。概してx軸方向に伸びる一列の全長は37.86mmであり、y軸方向の長さ(列の幅)は2.25mmである。この1列の素子配列の中に18個の素子が含まれている。

[0082] 図17Bはそれら18個の素子を示す。上段は各素子の素子番号を示し、下段は各素子のパッチをビアの位置と共に示す。個々の素子の具体的なパッチサイズ及び素子間隔は図17Cに示されている。

[0083] (5)図9Bないし図9Dを参照しながら説明したように、隣接する素子間のギャップの中央で反射位相が実現されることを考慮し、個々の素子間隔の最適化($d_{vp_i} \rightarrow d_{v_i}$)を行いながら素子間隔を決定することで、リフレクタレーの反射特性を改善できる。以下、この改善例に関するシミュレーション結果を示す。

[0084] 図9Eはシミュレーションに使用された素子配列の1列分を示し、このような素子配列がx軸及びy軸方向に多数並んでいる。改善例の方法で設計された10個の素子で1列分の素子配列が形成される。10個の素子各々に対する素子間隔及び反射位相は図9Fに示すとおりである。また、比較のため従来例の方法による設計例についてもシミュレーションが行われた。従来例では11個の素子で1列分の素子配列が形成される。なお、「従来例」とは図9Cに示す改善例に先行する技術であり、必ずしも本願出願前に公知であった技術ではない点に留意を要する。シミュレーションで想定されている従来例では、反射位相とその反射位相に対応する素子間隔とを決定する際、素子間隔を最適化することなく素子間隔が決定されている。すなわち、1つの反射位相を決定し、その反射位相に対応する素子間隔を決定することを単に反復することで、従来例による設計がなされている。従って図9Bに示すように、11個の素子各々が実際に実現する反射位相は、意図される反射位相から若干ずれる。

[0085] 図9Hは改善例及び従来例により設計されたリフレクタレーに関する電波の散乱断面積を示す。改善例及び従来例の何れについてもリフレクタレーは入射角が70度($\theta_i = 70$ 度)であり所望方向の反射角が-30度($\theta_r = -30$ 度)であるように設計されている。なお、入射角 θ_i 及び反射角 θ_r は鉛直方向(具体的には、z軸方向)に対する偏角として規定されるが、角度の正の方向が入射角 θ_i 及び反射角 θ_r で逆である点に留意を要する。図示されているように、従来例によるリフレクタレーも改善例によるリフレクタレーも所望方向(-30度)の方向に最も強い反射を形成できている。このように反射波の所望方向と鏡面反射方向とを大きく相違させることができる点で、従来例も改善例も優れている。ただし、鏡面反射方向(-70度)のレベルを比較すると、改善例

は、個々の素子で適切な反射位相を実現できていることに起因して、必ずしも適切な反射位相を実現できていない従来例よりも、不要な鏡面反射波を小さく抑制できている。

[0086] <2. 変形例>

上記の「1. 好ましい実施形態」においては、電波が斜めに入射すること、二共振特性を示すグラフを使用すること及び素子間隔を調整することという3つの特徴が全て使用されていた。しかしながらそれは最良の形態であり、3つの特徴を全て使用することは必須ではない。3つの特徴の内の任意の1つ以上の特徴を使用することが可能である。

[0087] <<2. 1 斜め入射を利用する変形例>>

例えば、電波がz軸に対して0度とは異なる角度で入射した場合において、反射位相及び素子間隔の間の関係は、二共振特性以外の特性を示していてもよい。また、反射位相が素子間隔の関数として表現されることは必須ではなく、反射位相が他のパラメータの関数として表現されてもよい。例えば、反射位相が、個々の素子のパッチサイズの関数として表現されてもよいし、或いは隣接する素子のパッチ同士の間隙(ギャップ)のサイズの関数として表現されてもよい。ただし、実現可能な反射位相の範囲を拡大する観点からは、「1. 好ましい実施形態」のように、反射位相が素子間隔に対して、連続的に変化する関数であり、かつ、反射位相がゼロとなる共振点(共振する素子間隔)が2箇所にあらわれるように(二共振特性を示すように)、設計パラメータを選択することが好ましい。

[0088] 斜め入射に関し、入射角が異なる場合に異なる方向に反射波が放射される特性を活用することで、電波の反射方向を制御するリフレクタレーを得ることができる。一般に、反射波が入射波の鏡面反射方向に対してなす角度を制御角Aとすると、入射角 θ_i 、反射角 θ_r 及び制御角Aの間に次式が成立する。

$$[0089] \quad \theta_r = \arcsin[\sin(\theta_i) + \sin(A)]$$

$\arcsin(\cdot)$ は正弦関数の逆関数 $\sin^{-1}(\cdot)$ である。例えば、入射角 $\theta_i=70$ 度、反射角 $\theta_r=-30$ 度の場合、制御角Aは $70 - (-30) = 100$ 度となる。図22は制御角A

=100度の場合の電波の遠方放射界を示す。図23は制御角 $A=0$ 度の場合の電波の遠方放射界を示す。すなわち、このリフレクタレーの場合、斜めから入射した電波に対する位相で動作する反射波の制御角と、正面波から入射した電波に対する位相で動作する反射波の制御角が異なっている。この例の場合、鏡面反射方向に反射波を形成する場合($A=0$ 度)と鏡面反射方向とは異なる方向に反射波を形成する場合($A=70$ 度)とを1つのリフレクタレーで使い分けることができる。更に、設計パラメータを適切に選択することで、斜めから入射した波に対する反射波と、正面から入射した波に対する反射波を同じ方向にすることも可能である。

[0090] <<2. 2 二共振特性を利用する変形例>>

電波が入射して来る方向が0度であったとしても、反射位相と素子間隔の関係が二共振特性を示す場合があるかもしれない。そのような二共振特性を示すようにするパラメータの組み合わせを意図的に使用することで、反射位相としてとり得る値の範囲を拡大することができる。

[0091] <<2. 3 素子間隔を調整する変形例>>

更に、素子のパッチ同士のギャップを一定に維持しつつ、素子間隔を調整することで反射位相を決定する特徴が、単独で使用されてもよい。すなわち、電波が0度方向から入射し、反射位相と素子間隔の関係が図6に示されるような関係である場合において、パッチ同士のギャップを一定に維持しつつ、素子間隔を調整することは有意義である。例えば、ギャップの値が一定に維持されるので、極端に狭いギャップを形成する必要がなくなり、実現可能な素子を増やすことが可能である。

[0092] 以下、具体的な数値例を示す。素子間隔以外の事前に設定可能なパラメータの値は次の通りであるとする。

[0093] 入射角 $\theta_i = 0$ 度、
所望の反射角 $\theta_r = 40$ 度、
誘電体基板の比誘電率 $\epsilon_r = 10.2$ 、
誘電体基板の厚さ(ビアの長さ) $t = 1\text{mm}$ 、

誘電体基板の $\tan \delta = 0.0023$ 、
パッチ間のギャップ $g = 0.1\text{mm}$ 、
ビアの直径 $d_v = 0.1\text{mm}$ 、及び
電波の周波数 $f = 11\text{GHz}$ (波長 $\lambda = 27.3\text{mm}$)。

[0094] この場合における反射位相と素子間隔の間に成立する関係は、図6に示すようなグラフを示す。上述したように、素子間隔は、ビアとビアの間の距離 Δ_v として定義されてもよいし、ギャップの中心間の距離 Δ_p として定義されてもよい。何れの定義によってもリフレクタレーを設計することは可能であるが、以下に示すように、パフォーマンスは若干異なることがシミュレーションにより判明した。

[0095] 図18Aは、素子間隔がビア間の間隔であるとした場合に使用される素子配列の1列分を示す。このような素子配列がy軸方向にも並んでおり、リフレクタレーが形成される。概してx軸方向に伸びる一列の全長は約43mmであり、y軸方向の長さ(列の幅)は2.25mmである。この1列の素子配列の中に22個の素子が含まれている。

[0096] 図18Bは、x軸に沿って並ぶ22個の素子を示し、個々の素子には便宜的に#1-22のラベルが付されている。図18Cは、図18A及び図18Bに示されている22個の素子に関し、ビア間の間隔が素子間隔であることを示す。素子間隔にも便宜的にNo. 1-22のラベルが付されている。No. 22は左右両端の距離の合計であることを留意を要する。個々の素子のパッチ及び素子間隔の具体的な寸法は図18Dに示されている。

[0097] 図19は、素子間隔がギャップ間の間隔であるとした場合に使用される素子配列の1列分を示す。このような素子配列がy軸方向にも並んでおり、リフレクタレーが形成される。概してx軸方向に伸びる一列の全長は約43mmであり、y軸方向の長さ(列の幅)は2.25mmである。この1列の素子配列の中に22個の素子が含まれている。

[0098] 図20は、素子間隔がビア間の間隔であるとしてリフレクタレーが設計された場合の散乱断面積(実線)と、素子間隔がギャップ間の間隔であるとして

リフレクタレーが設計された場合の散乱断面積(破線)との比較例を示す。素子間隔がビア間の間隔であるとして設計されたリフレクタレーは図18A-Dに示されているものである。素子間隔がギャップ間の間隔であるとして設計されたリフレクタレーは図19に示されているものである。何れの場合もリフレクタレーは42mm×43mm程度の大きさを有するものとした。横軸は極座標系におけるz軸からの偏角 θ を示す。従って反射角 $\theta_r=+40$ 度は、偏角 $\theta=-40$ 度に対応する。何れのグラフも所望の反射角方向である $\theta=-40$ 度において高い値が得られている。従って、素子間隔として何れの定義を使用しても良好な反射特性を得ることができる。何れのグラフも $\theta=-40$ 度付近においてピークを示しているが、実線のグラフのピーク位置の方が、破線のグラフのピーク位置よりも、所望方向 $\theta=-40$ 度に近い。これは、素子間隔がビア間の間隔であるとして設計した方が、優れた反射特性を示していることを意味する。従って、素子間隔は、ビア間の間隔として定義されてもよいし、ギャップ間の間隔として定義されてもよいが、より優れた反射特性を得る観点からはビア間隔を素子間隔として設計することが好ましい。

[0099] 以上示した本発明の構造によれば、マッシュルームを構成する素子と素子の間の隙間(ギャップ)の値を一定としたまま、素子間隔を変えることで素子間の位相を変えるリフレクタレーが実現できる。したがって、本発明の構造によれば、一定値であるギャップを全て一度に変化させれば、リフレクタレーを構成する素子の全てのキャパシタンスを同時に同じ値に変更することが可能となる。また、マッシュルームの高さを全て一度に変化させればリフレクタレーを構成する素子の全てのキャパシタンスを同時に同じ値に変更することが可能となる。マッシュルーム素子は、LC共振回路理論より、インダクタンスL、キャパシタンスCによって共振周波数が決定する。本発明によればそのインダクタンスL、キャパシタンスCを同時に同じ値で変更するリフレクタレーを実現できる。

[0100] 本発明の実施例として素子間隔をパラメータとすると、正面からの入射に対しても、反射位相の範囲を広げられることを次に示す。図34は、比誘電率

ε_r が10.2で、厚さ t が0.4mmのマッシュルーム構造に対する反射位相を示している。図34において、実線は、入射角 $\theta = 0^\circ$ の正面からの入射のときの反射位相を示しており、破線は、入射角 $\theta = 70^\circ$ の斜めからの入射のときの反射位相を示している。斜めからの入射の場合、素子間隔を変化させることで反射位相は0度から0度まで変化するため360度全ての位相を確保できる。また、正面からの入射の場合については、二共振は起こらないが約170度から-170度とほぼ360度の広い範囲の反射位相を確保できることがわかる。すなわち、素子間隔をパラメータとすることによって、従来のマルチレイヤにする手法と同等の広い範囲の反射位相を確保できることがわかる。

[0101] <<2.4 更なる変形例>>

ところで、シングルビームのリフレクタレーを用いた場合、従来の技術では図24に示すように、ある入射波に対して所望方向にビームを向けることはできるが、別の方向からの入射波に対しては、所望方向にビームを向けることができなかった。この問題を解決するため、例えば図25に示すようなマルチビームのリフレクタレーを用いる必要があった。しかしマルチビームにすると一般にビームの数だけ個々の反射（散乱）電力は小さくなるため、十分なレベルを確保できないという問題があった。これはリフレクタレーの制御角 A が一意にきまり、反射角 θ_r は

$$\theta_r = \arcsin[\sin(\theta_i) + \sin(A)]$$

で決まるためである。

[0102] 上述したように、斜めから入射した波に対する位相で動作する反射波の制御角と、正面波から入射した波に対する位相で動作する反射波の制御角が異なるように、リフレクタレーを形成することができる。図22に示すグラフは図12Cと同じグラフであり、図12Aの構造に対して、 $\theta_i = 70$ 度（球面座標表示の $\theta = 70$ 度）の方向から電波を入射させたときの結果である。鏡面反射の方向が、反射角 $\theta_r = 70$ 度（球面座標表示の $\theta = -70$ 度）となるのに対して、電波は反射角 $\theta_r = -30$ 度（球面座標表示の $\theta = 30$ 度）の方向に反射しており、リフレクタレーによる制御角 A は100度と考えられる。これに対して、図2

3に示すグラフは、図12Aと同じ構造に対して、 $\theta = 0$ 度の方向から電波を入射させたときの結果である。鏡面反射の方向が反射角 $\theta_r = 70$ 度（球面座標表示の $\theta = -70$ 度）であった場合とは異なり、電波は反射角 $\theta_r = 0$ 度（球面座標表示の $\theta = 0$ 度）の方向に反射しており、リフレクタレーによる制御角Aは0度と考えられる。すなわち、本発明のリフレクタレーは入射角に応じて、制御角Aを変化させることが可能である。これは、 $\theta = 0$ 度の場合、設計に用いた素子間隔の変化に対する位相の変化がほとんど生じないため、鏡面反射と同じ方向に反射するためであると考えられる。

[0103] 一方、従来のリフレクタレーの場合は、入射角 θ_i を変化させても、制御角Aは一定である。ここで、制御角Aのリフレクタレーの斜め入射 θ_i に対する反射方向 θ_r は、

$$\theta_r = f(A) = \arcsin[\sin(\theta_i) + \sin(A)]$$

のように導出できる（この点については例えば次の文献に記載されている：電子情報通信学会全国大会2011ソサイエティ大会B-1-66”マルチビーム・リフレクタレーの斜め入射に対する反射特性の検討”：丸山珠美、沈 紀▲ユン▼、小田恭弘、トラン ゴクハオ、加山英俊）。

[0104] そこで、電波の入射角が $\theta_i = 70$ 度であった場合の反射角が $\theta_r = 0$ 度となるようにリフレクタレーを設計すると、70度及び0度の異なる二つの方向からリフレクタレーに届いた入射波をどちらも同じ方向へ反射させることが可能となる。これにより、複数の入射方向からの到来波を一つのリフレクタレーで同一の方向に向けることが可能となる。例えば電波の反射方向に端末が存在する場合に、その端末にとってマルチパスリッチな環境を作り、端末のMIMO通信に役立てることが可能になる。すなわち、所望方向に複数の到来方向からのビームを向け、見通しMIMOの容量確保およびエリア改善を行うことが可能になる。

[0105] 上述したように従来は、図24に示すように、シングルビームで鏡面反射方向（点線）に反射させるリフレクタレーと、制御角Aの方向で反射させるリフレクタレーとをパッシブな構造で実現するのは困難であった。このため

従来は図25に示すように、例えばマルチビームにして制御方向と鏡面反射方向の二通りのビームをあらかじめ用意する必要があった（上記文献）。しかし、マルチビームにすると、個々のビームの電力が下がってしまうという問題があった。本発明の実施例によれば、シングルビームでこれを実現しているためこのような問題は生じない。

[0106] 本発明によれば、図21に示すように入射角によって反射位相の値を変化させることができる。このため、正面から入射した波と、斜めから入射した波を別の制御角で反射させ、図26及び図27に示すように同じ方向に放射させることができる。図28は本実施例の放射パターンを示す。二つの異なる入射に対して、同じ方向にメインビームが向いていることがわかる。図29は、図28のリフレクタレーの構造を、1アレー分示したものである。これをX方向Y方向に周期的に並べることによって所望の大きさのリフレクタレーを構成する。

[0107] <<2. 5 更なる変形例>>

上述したように上記の実施形態によれば、リフレクタレーのビアの長さは全て等しいため、この高さを一度に同じ値で変えることができる。マッシュルーム構造のインダクタンス L の値は、ビアの長さ t と透磁率 μ の積で表される：

$$L = \mu t。$$

また、インダクタンス L と共振周波数 f は、次のような関係がある。

[0108] $\omega = 2\pi f = 1/\sqrt{LC}$ 。

従って、各素子のインダクタンス L の値を一斉に大きくすると各素子それぞれの共振周波数は低いほうへずれ、一斉に小さくすると各素子それぞれの共振周波数は高い方にずれる。

[0109] 図30及び図31は、本発明のリフレクタレーにおいてビアの長さ t を0.8ないし1.2mmまで変化させた場合の散乱断面積を表している。上述したように、リフレクタレーを形成する素子同士の間隔はビア同士の間隔 Δ_v としてもよいし、隣接する素子のパッチ間のギャップの中心と次のギャップの中心

との間の間隔 Δ_p としてもよい(図4)。図30は素子間隔がビア同士の間隔であるとして設計されたリフレクタレーについて、ビアの長さ t を0.8mm、1mm及び1.2mmとした場合の散乱断面積を表す。図31は素子間隔がビア同士の間隔であるとして設計されたリフレクタレーについて、ビアの長さ t を0.8mm、1mm及び1.2mmとした場合の散乱断面積を表す。図30及び図31の何れの場合においても、ビアの長さ t を変化させることによって、最大放射方向が変化していることがわかる。すなわち、ビアの長さ t を短くすると、インダクタンス L は小さくなり、このとき共振周波数 ω は、高い方にずれ、このとき最大放射方向の角度は大きくなる。逆に、ビアの長さ t を長くすると、共振周波数 ω は低い方へずれ、このとき最大放射方向の角度は小さくなる。図32は図30及び図31のシミュレーションにおいて想定されたリフレクタレーの1列分を示す。

[0110] 素子間隔を可変にしながら設計するリフレクタレーにおいて、隣接する素子のパッチ同士の間隙であるギャップの大きさを一斉に変化させることによって、最大放射方向を変化させることができる。図33は、図32に示すものと同じ構造で各素子の全てのギャップを0.1mm、0.125mm及び0.15mmのように変化させた場合における放射方向の変化を示している。ギャップの値を一律に変化させることで最大放射方向を変えることがわかる。すなわち、ギャップを小さくすると、キャパシタンスは大きくなり、このとき共振周波数 ω は低い方にずれ最大放射の角度は小さくなる。逆に、ギャップを大きくすると、キャパシタンスは小さくなり、このとき共振周波数 ω は高い方にずれ、最大放射の角度は大きくなることがわかる。

[0111] また、各マッシュルーム素子のビアの高さと、各マッシュルーム素子間の隙間の値を一斉に変化させれば、全てのマッシュルーム素子のインダクタンス L とキャパシタンス C を同じ値で変化させ、共振点をずらすことが可能となる。

[0112] <<2. 6 更なる変形例>>

次にTM斜め入射において、素子間隔を一定にし、ギャップを変化させたときの実施例を示す。図35は、素子間隔を約2.42mmで一定とし、ギャップを

横軸にとったときの反射位相のシミュレーション値を示している。図35からわかるように、+180度から-180度まで360度全ての範囲の位相を確保できることがわかるここで、入射角は70度、電界の向きは入射面に平行としている。

[0113] <<2. 7 更なる変形例>>

入射角 θ_i に対して、鏡面反射の場合は反射角 $\theta_r = \theta_i$ となる。これに対して、リフレクタレーの場合の反射角 θ_r は、上述したように、入射角 θ_i とリフレクタレーによって決まる制御角 A の関数として求められる。従来のリフレクタレーでは、この制御角が入射角 θ_i に応じて変化するという考え方は存在しなかった。これに対して、本発明では、この制御角 A が入射角 θ_i の変数となるため $A(\theta_i)$ となる。このとき、

$$\theta_{rm1} = \arcsin[\sin(\theta_{im1}) + \sin(A(\theta_{im1}))] = \theta_{rm2} = \arcsin[\sin(\theta_{im2}) + \sin(A(\theta_{im2}))]$$

が成立するように、制御角 $A(\theta_{im1})$ と $A(\theta_{im2})$ を構成することで、異なる方向から入射した波を同一の方向に反射させることが可能となる。制御角は、各素子からの位相の差を用いて決定されるが、TM斜め入射の場合、各素子からの位相と位相差は入射角によって変化するためである。

[0114] 以上本発明は特定の実施例を参照しながら説明されてきたが、それらは単なる例示に過ぎず、当業者は様々な変形例、修正例、代替例、置換例等を理解するであろう。例えば、本発明は複数の素子を用いて電波を反射するリフレクタレーに広く適用されてもよい。例えば、本発明による設計方法で形成されたリフレクタレーを用いて、無線通信環境においてマルチパスを意図的に生じさせ、MIMO(Multiple Input Multiple Output)方式の無線通信を促すことを可能にしたMIMO通信システムを得ることも可能である。発明の理解を促すため具体的な数値例を用いて説明がなされたが、特に断りのない限り、それらの数値は単なる一例に過ぎず適切な如何なる値が使用されてもよい。発明の理解を促すため具体的な数式を用いて説明がなされたが、特に断りのない限り、それらの数式は単なる一例に過ぎず適切な如何なる数式が使用されてもよい。実施例又は項目の区分けは本発明に本質的ではなく、2以

上の実施例又は項目に記載された事項が必要に応じて組み合わせて使用されてよいし、ある項目に記載された事項が、別の項目に記載された事項に（矛盾しない限り）適用されてよい。本発明は上記実施例に限定されず、本発明の精神から逸脱することなく、様々な変形例、修正例、代替例、置換例等が本発明に包含される。

[0115] 本国際出願は西暦2012年2月29日に出願した日本国特許出願第2012-44864号に基づく優先権を主張するものであり、その日本国特許出願の全内容を本国際出願に援用する。

符号の説明

[0116] θ_i 入射角

θ_r 反射角

M_j 素子

g ギャップ

先行技術文献

特許文献

[0117] 特許文献1：米国特許出願公開第2011-210906号明細書

非特許文献

[0118] 非特許文献1：IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 57, NO. 11, NOVEMBER 2009"Effects of Spatial Dispersion on Reflection From Mushroom-Type Artificial Impedance Surfaces", Olli Luukkonen, Mario G. Silveirinha, Alexander B. Yakovlev, Senior, Constantin R. Simovski, Igor S. Nefedov, and Sergei A. Tretyakov

請求の範囲

- [請求項1] 複数の素子が所定の軸に垂直な表面を有する基板に設けられている入射波を所望方向に反射するリフレクタレーの設計方法であって、
素子間隔のサイズ、素子のパッチのサイズ又は隣接する素子のパッチ間のギャップのサイズの内の何れかの設計パラメータが等しく設定され並べられた複数の素子に電波が入射し反射した場合における素子の反射位相を、前記設計パラメータの関数として求め、前記反射位相及び前記設計パラメータの対応関係をメモリに保存するステップと、
前記複数の素子の内の特定の素子が、複数の反射位相の内の特定の反射位相で前記入射波を反射するように、該特定の素子の設計パラメータを前記対応関係に従って決定することを、前記複数の素子各々について反復するステップと
を有し、前記設計パラメータの前記関数は、前記設計パラメータの所定の数値範囲に対して、実質的に360度の範囲にわたる値域を有し、かつ反射位相が素子間隔に対して、連続的に変化する関数であり、かつ、反射位相がゼロとなる共振点（共振する素子間隔）が2箇所にあられる（二共振特性を示す）連続な関数である、設計方法。
- [請求項2] 前記複数の素子の各々は、パッチ及び地板を少なくとも有する素子構造を有し、
ある隣接する素子のパッチ間の隙間の長さは、別の隣接する素子のパッチ間の隙間の長さに等しい、請求項1記載の設計方法。
- [請求項3] マッシュルーム構造を用いたリフレクタレーであって、該リフレクタレーにあらかじめ定められた0以外の角度から、入射面に電界が平行となるように入射する波に対して、
マッシュルームのビアとビアの間隔、素子の間隔、ギャップとギャップの間隔、を含むマッシュルームの配列に基づく構造をパラメータとすると、反射位相が、0となる構造が少なくとも二箇所存在し、反射位相の範囲を360度確保できることを特徴とするリフレクタレー

一。

[請求項4] 請求項1又は2に記載の設計方法で設計されたリフレクタレーであって、斜めから入射した波に対する位相で動作する反射波の制御角と、正面波から入射した波に対する位相で動作する反射波の制御角が異なることを特徴とするリフレクタレー。

[請求項5] 請求項3に記載のリフレクタレーであって、斜めから入射した波に対する反射波と、正面から入射した波に対する反射波を同じ方向となることを特徴とするリフレクタレー。

[請求項6] 複数の素子を用いて構成されるリフレクタレーであって、
前記複数の素子の内の k 番目の素子が入射波を反射する場合の反射波の反射位相は、 N 種類の入射角 θ_{in} によって異なる値 ϕ_{kn} をとり ($n=1, \dots, N$)、

当該リフレクタレーに電波が或る入射角 θ_{im} で入射し、前記複数の素子各々が各自の反射位相 ϕ_{km} で前記電波を反射し、当該リフレクタレーによる反射波が反射角 θ_{rm} で反射される場合に、前記入射角 θ_{im} 、前記反射角 θ_{rm} 及び制御角 A_m が所定の関数関係を満たし ($m=1, \dots, N$)、

当該リフレクタレーに電波が或る入射角 θ_{iw} で入射し、前記複数の素子各々が各自の反射位相 ϕ_{kw} で前記電波を反射し、当該リフレクタレーによる反射波が反射角 θ_{rw} で反射される場合に、前記入射角 θ_{iw} 、前記反射角 θ_{rw} 及び制御角 A_w が前記所定の関数関係を満たし ($w=1, \dots, N$)、

前記 A_m と前記 A_w は互いに異なる値をとる、リフレクタレー。

[請求項7] 前記或る入射角 θ_{im} で電波が入射する場合の反射角 θ_{rm} が、前記或る入射角 θ_{iw} で電波が入射する場合の反射角 θ_{rw} と同じ値をとる、ことを特徴とする前記請求項6に記載のリフレクタレー。

[請求項8] 前記所定の関数関係は、電波の入射角を θ_i 、電波の反射角を θ_r 及び制御角を A とした場合に、

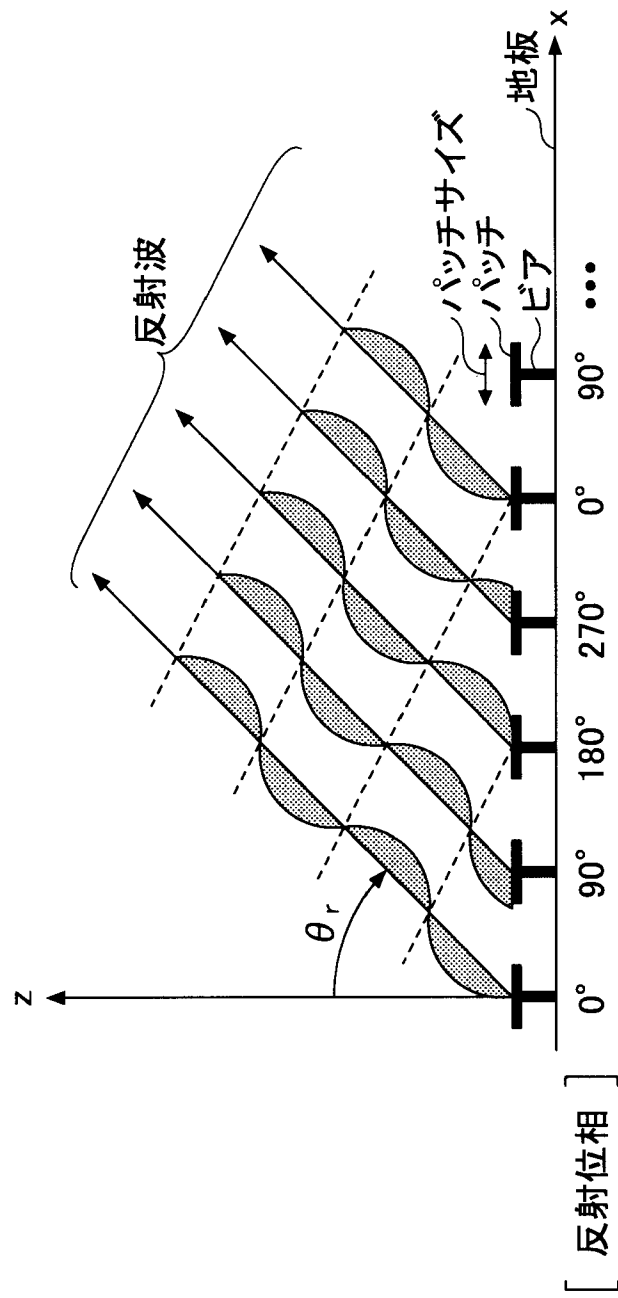
$$\theta_r = \arcsin[\sin(\theta_i) + \sin(A)]$$

により表現される、請求項6又は7に記載のリフレクタレー。

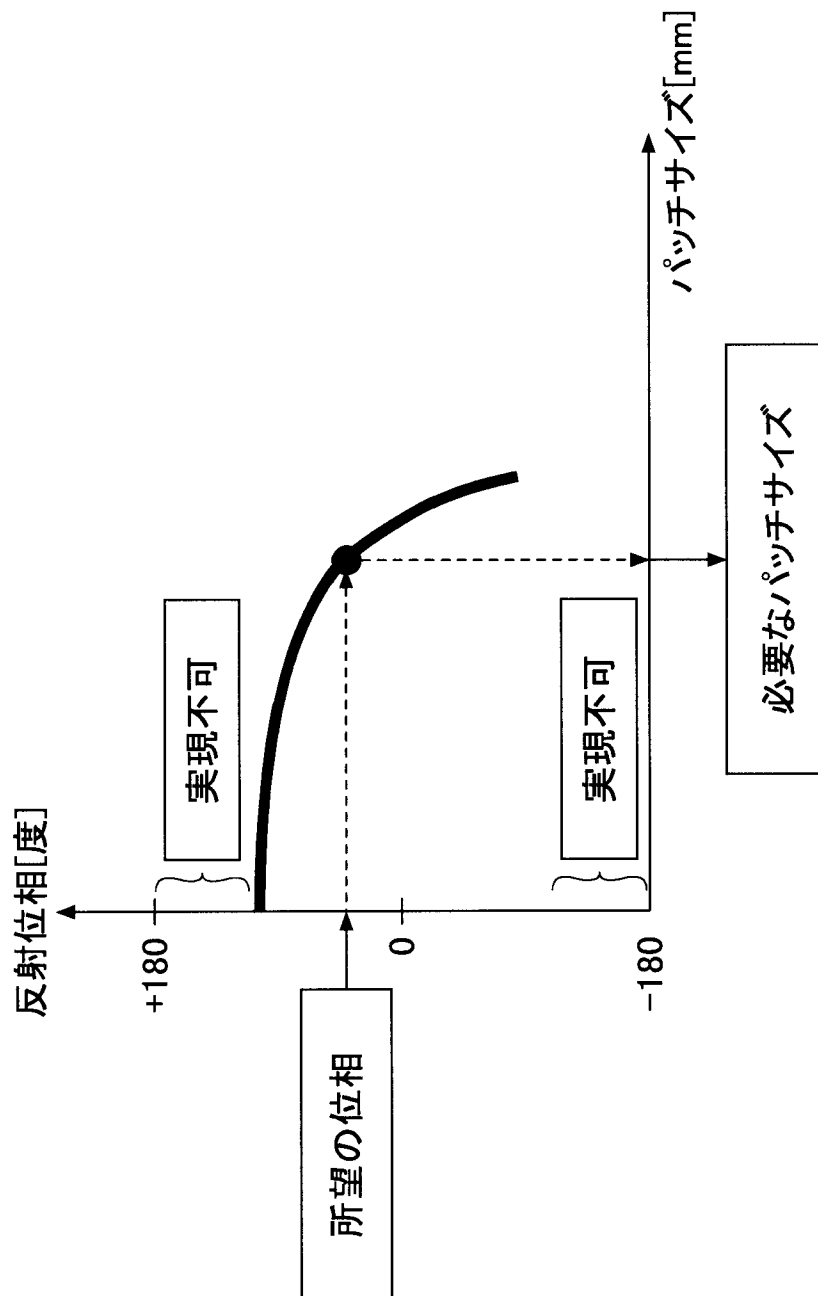
[請求項9] 請求項3ないし7の何れか1項に記載のリフレクタレーを用いて、マルチパスを発生させこれを用いてMIMO方式の通信を行うことを特徴とするMIMO通信システム。

[請求項10] 請求項5又は7に記載のリフレクタレーが、複数の入射方向から到来する複数の電波を同一の方向に反射させ、前記リフレクタレーにより反射した電波を受信する通信端末がマルチパス環境で通信できるようにしたことを特徴とするMIMO通信システム。

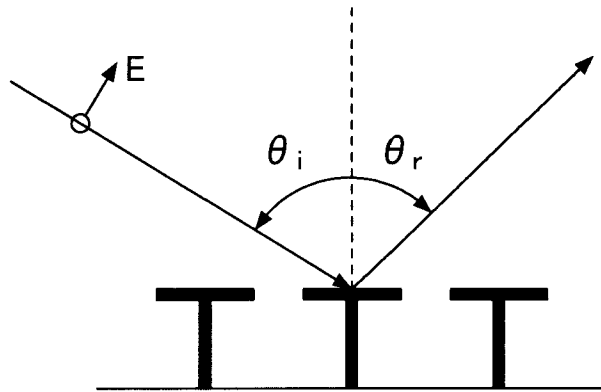
[図1]



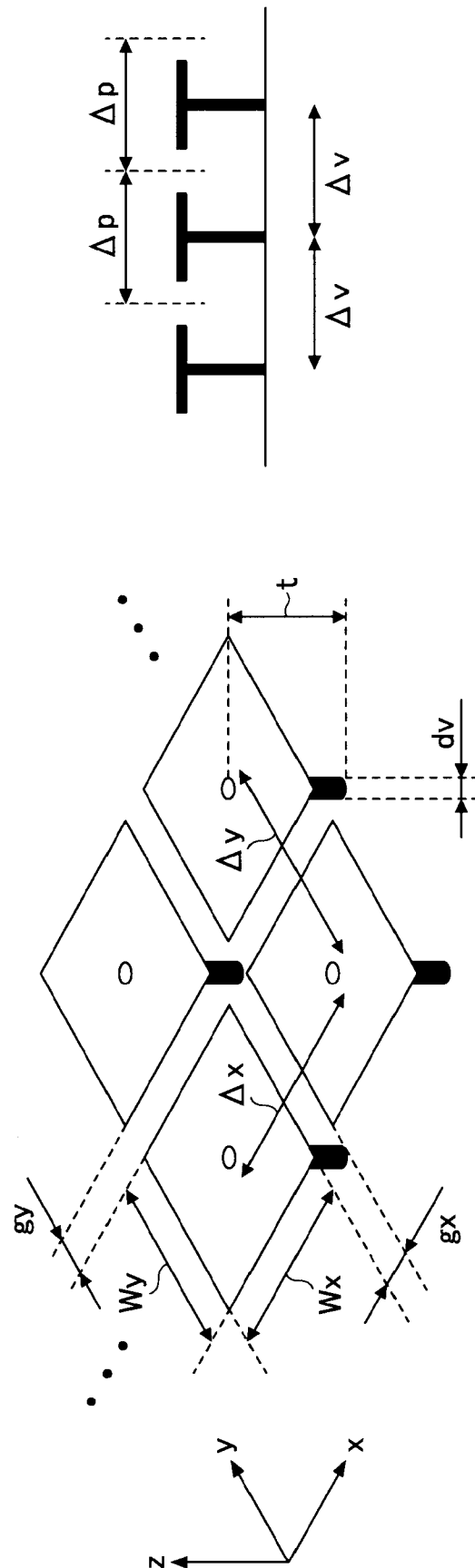
[図2]



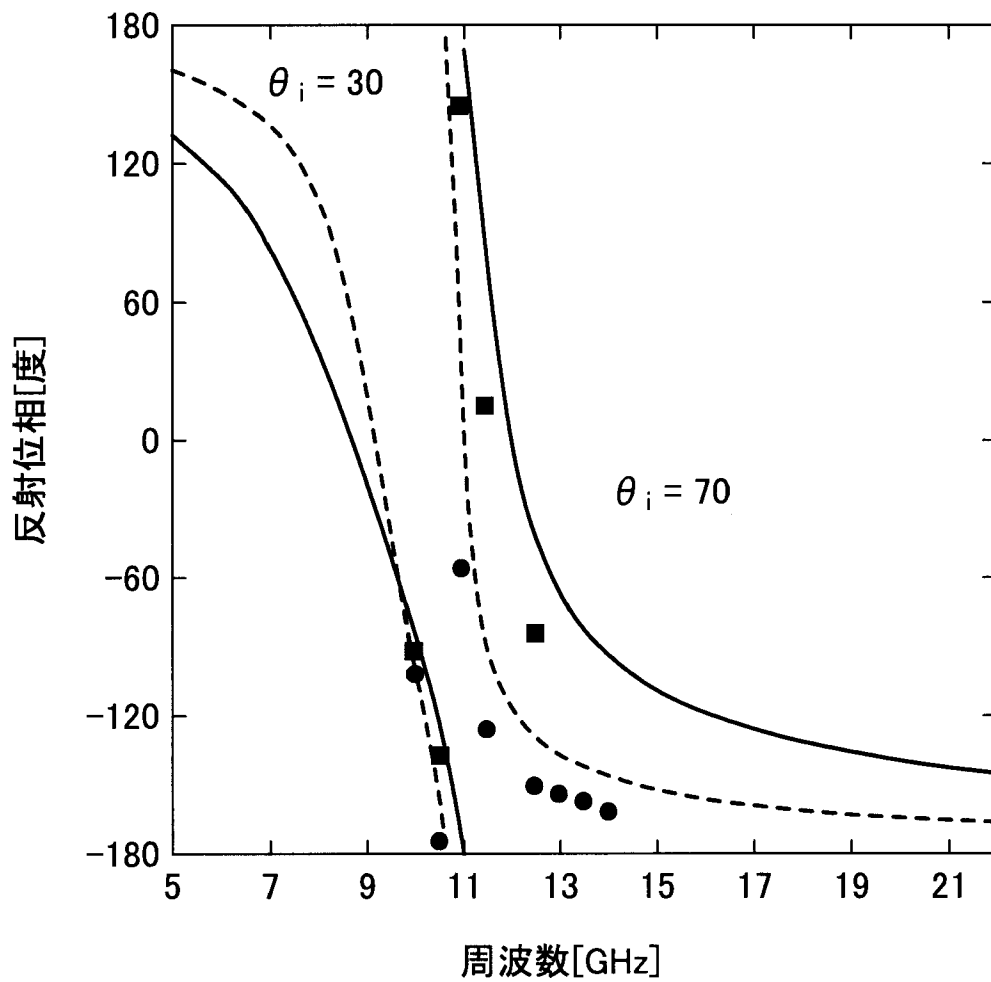
[図3]



[図4]

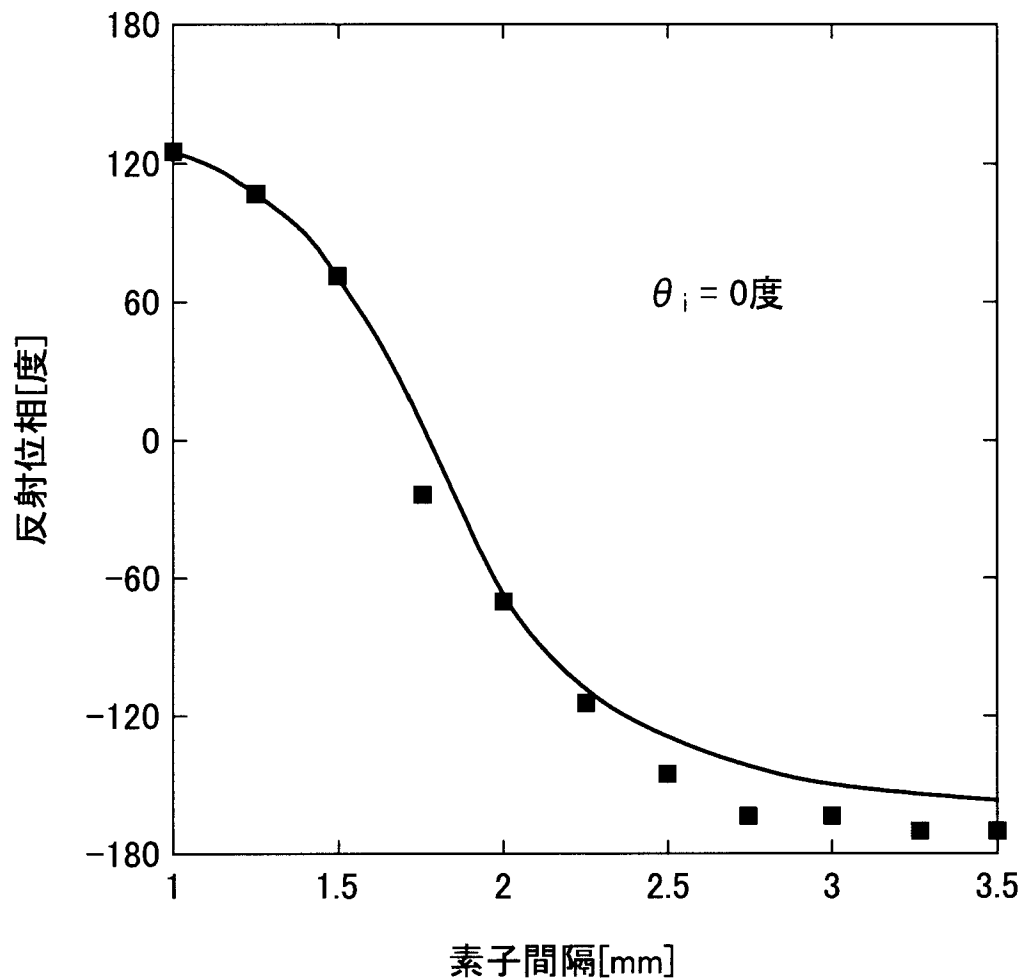


[図5]



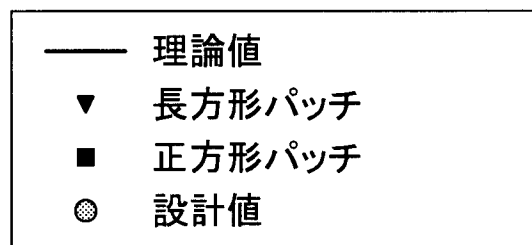
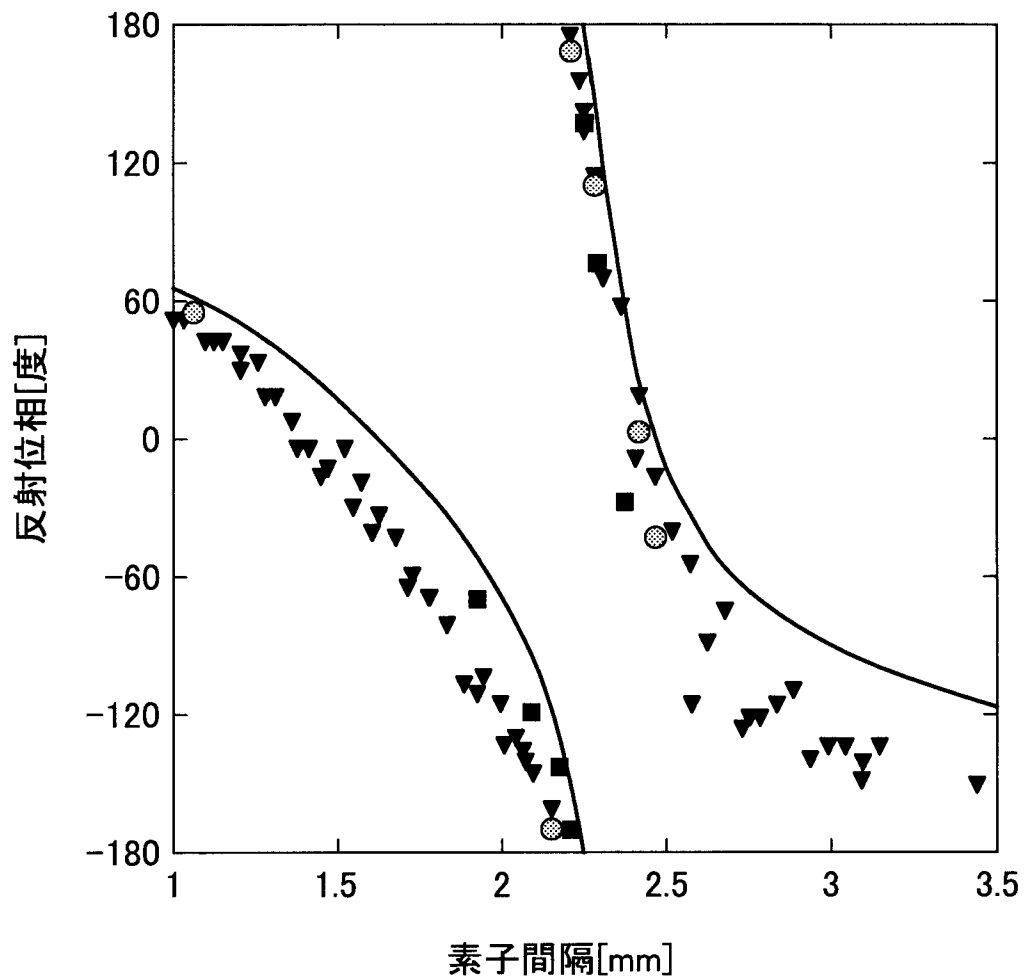
- $\theta_i = 30$ 度の場合の理論値
- $\theta_i = 70$ 度の場合の理論値
- $\theta_i = 30$ 度の場合のHFSSシミュレーションによる値
- $\theta_i = 70$ 度の場合のHFSSシミュレーションによる値

[図6]

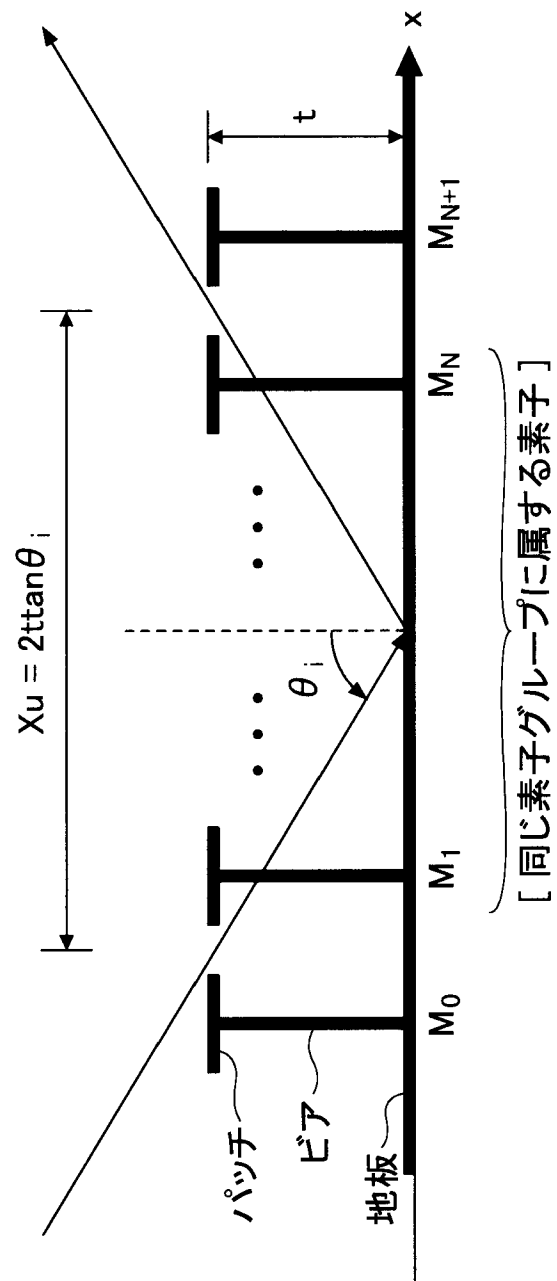


— 理論値
■ 正方形パッチ

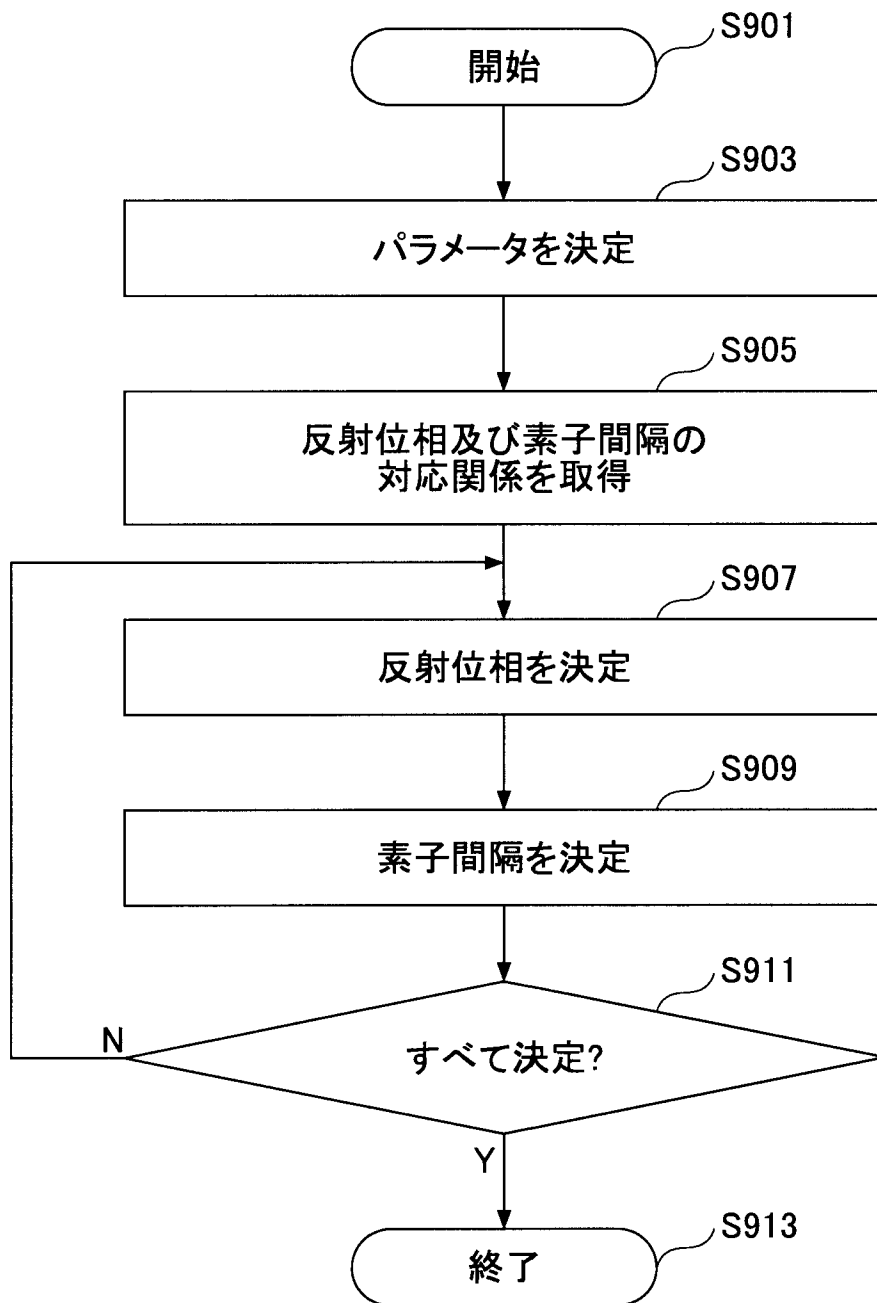
[図7]



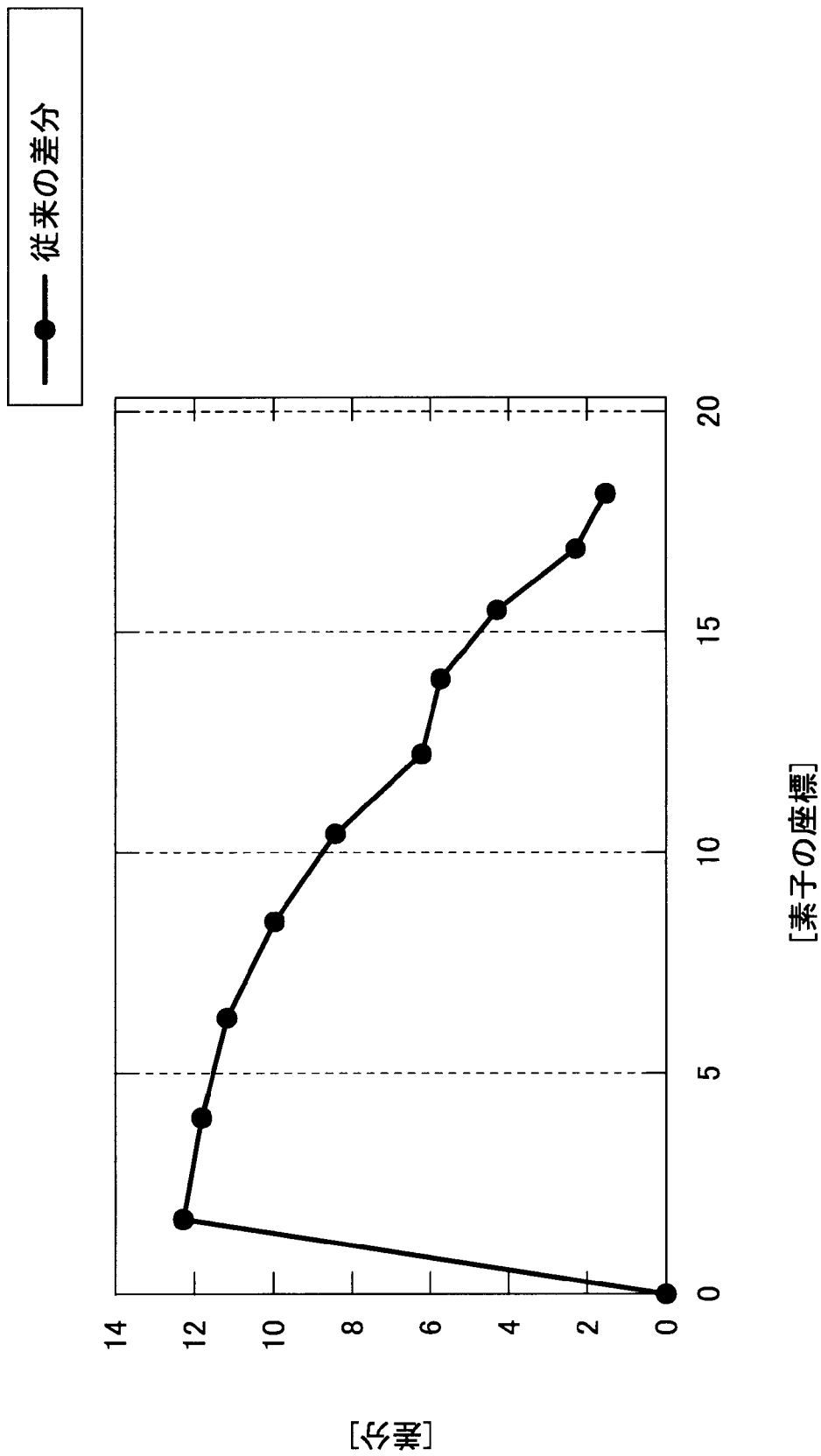
[図8]



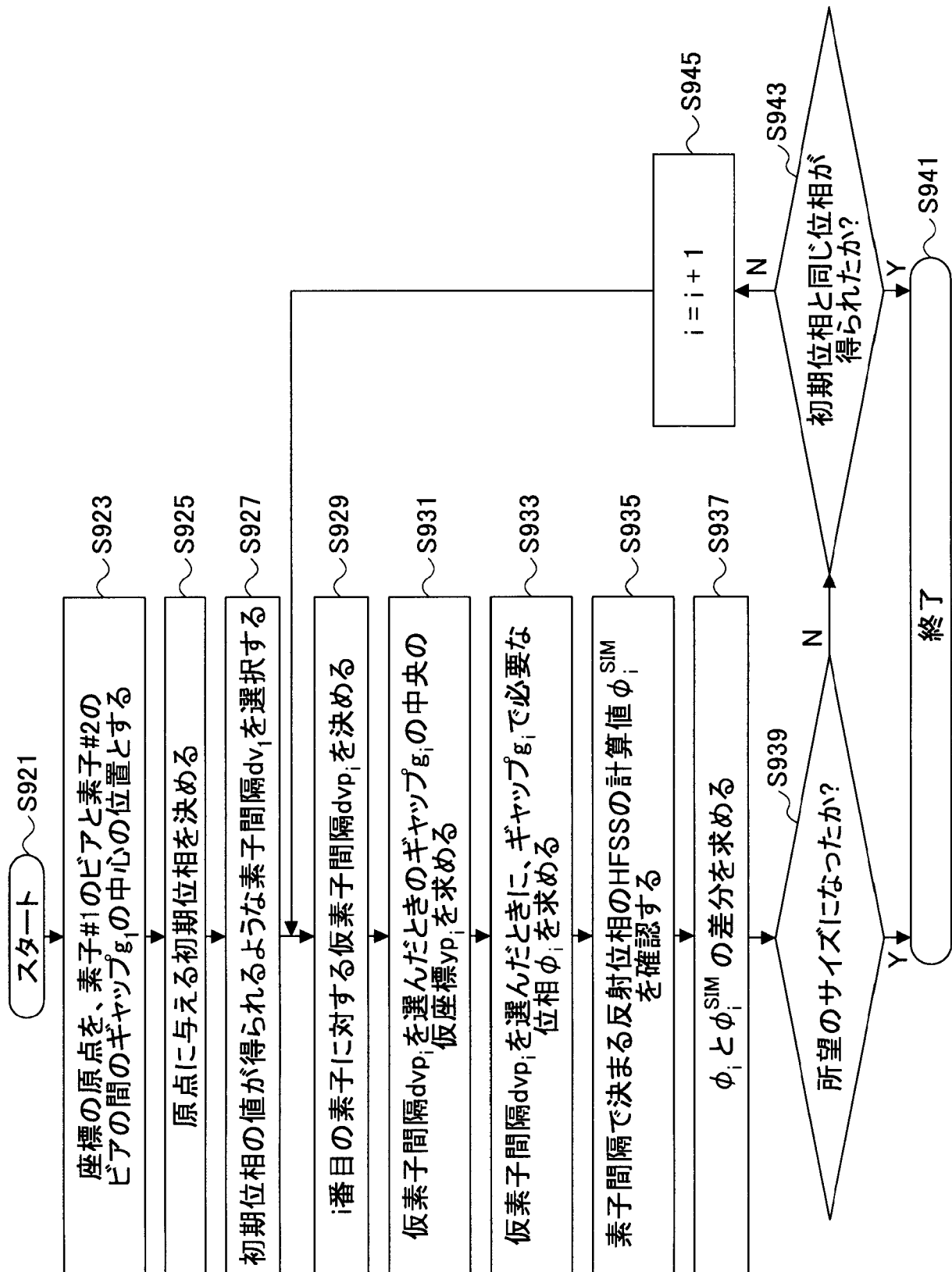
[図9A]



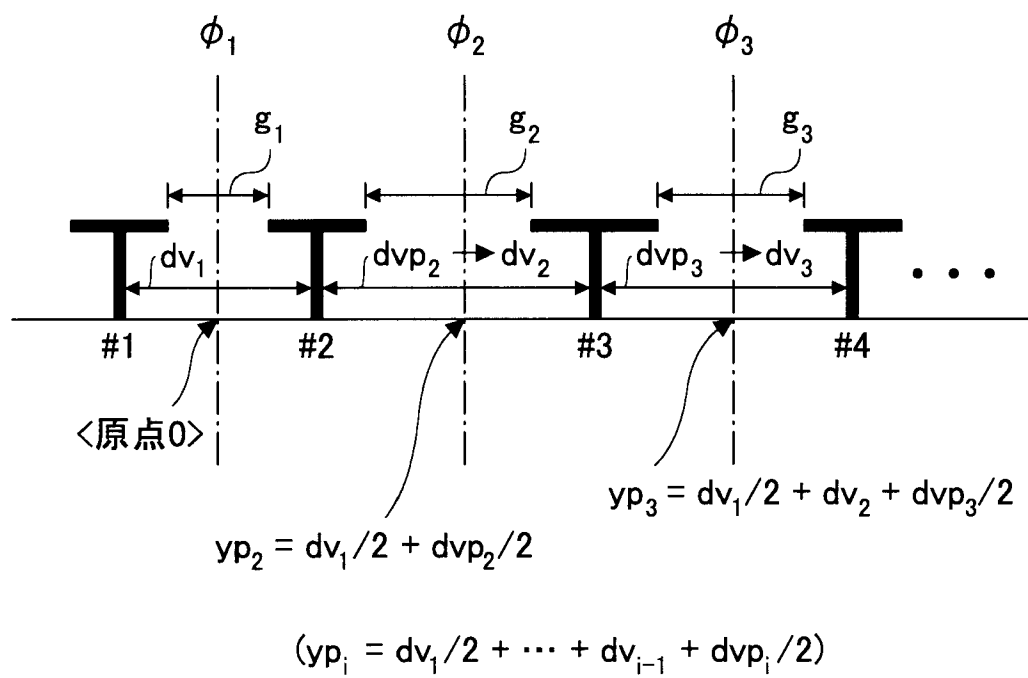
[図9B]



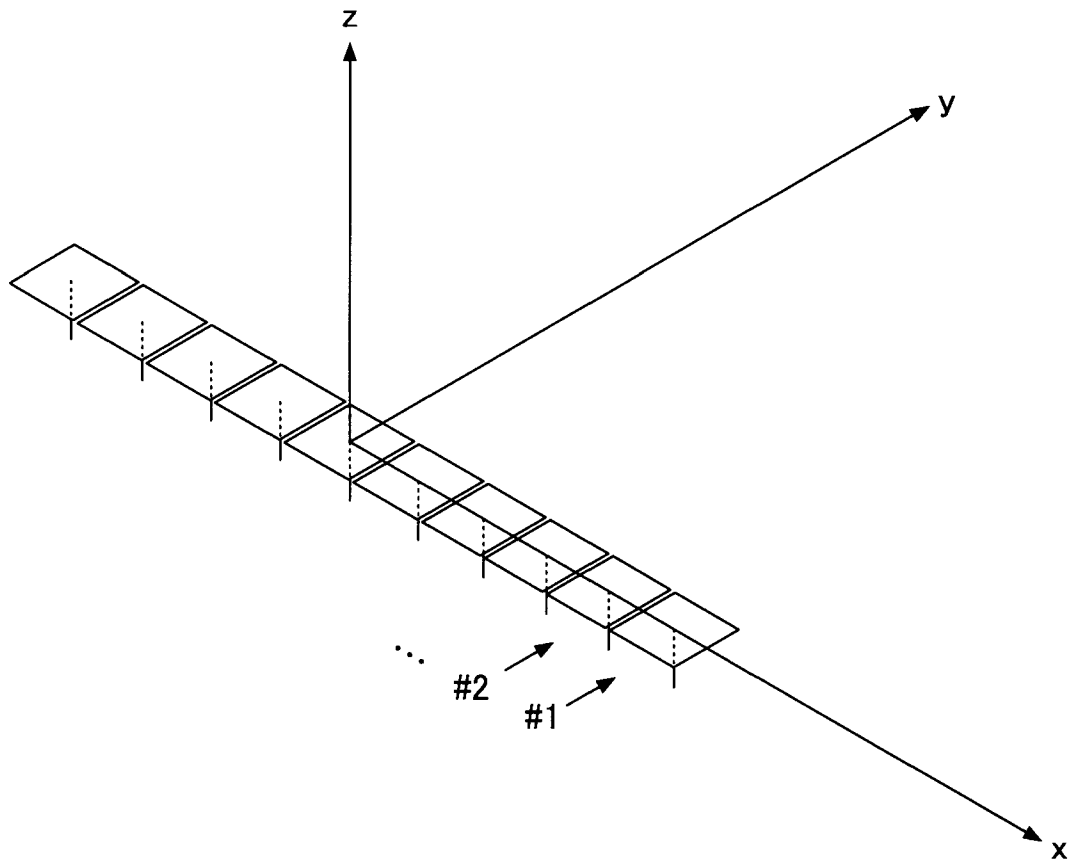
[図9C]



[図9D]



[図9E]



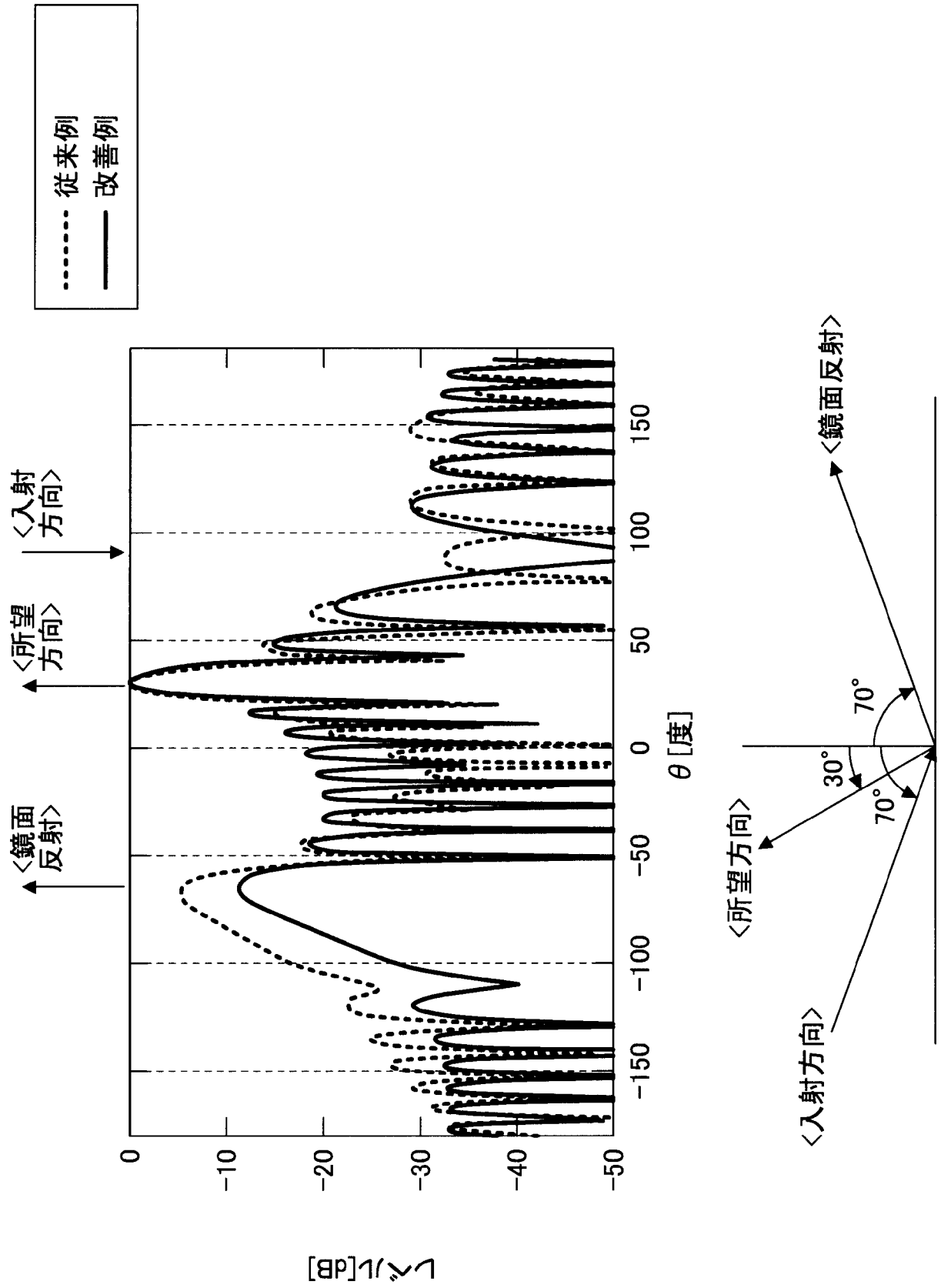
[図9F]

素子番号	選択した 素子間隔 dv_i	選択した素子間隔 dv_i に対応する位相
1	1.04	55.1
2	2.31	87.3
3	2.27	128.4
4	2.20	174.2
5	2.09	-146.2
6	1.93	-108.2
7	2.58	-69.0
8	1.61	-40.4
9	1.45	1.4
10	1.20	29.5

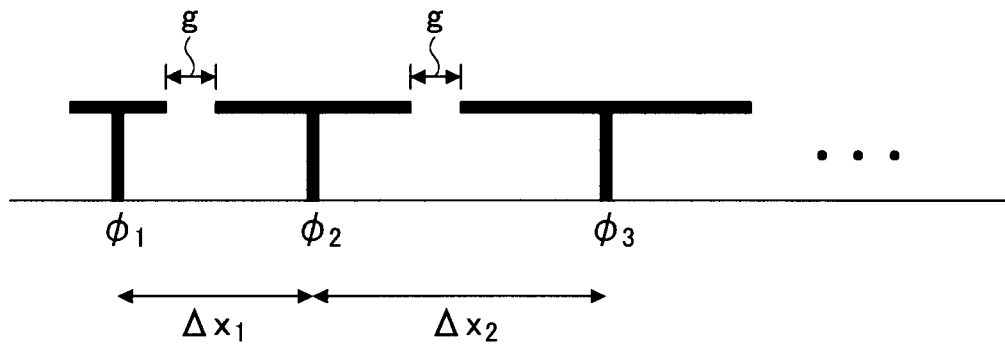
[図9G]

素子番号	dv_i だけで決めたときの 所望位相に対応する素子間隔
1	1.04
2	2.33
3	2.28
4	2.22
5	2.09
6	1.93
7	1.7
8	1.65
9	1.5
10	1.28
11	0.86

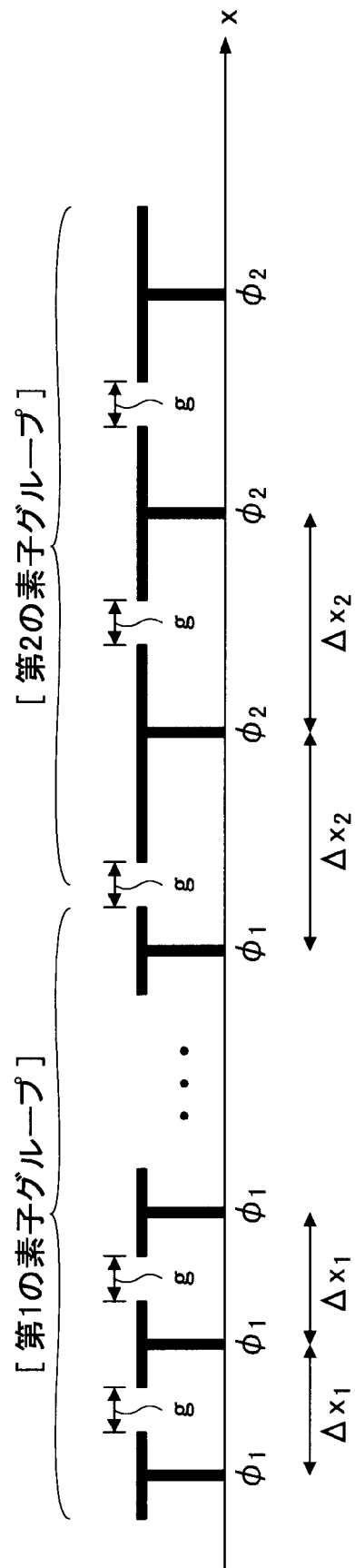
[図9H]



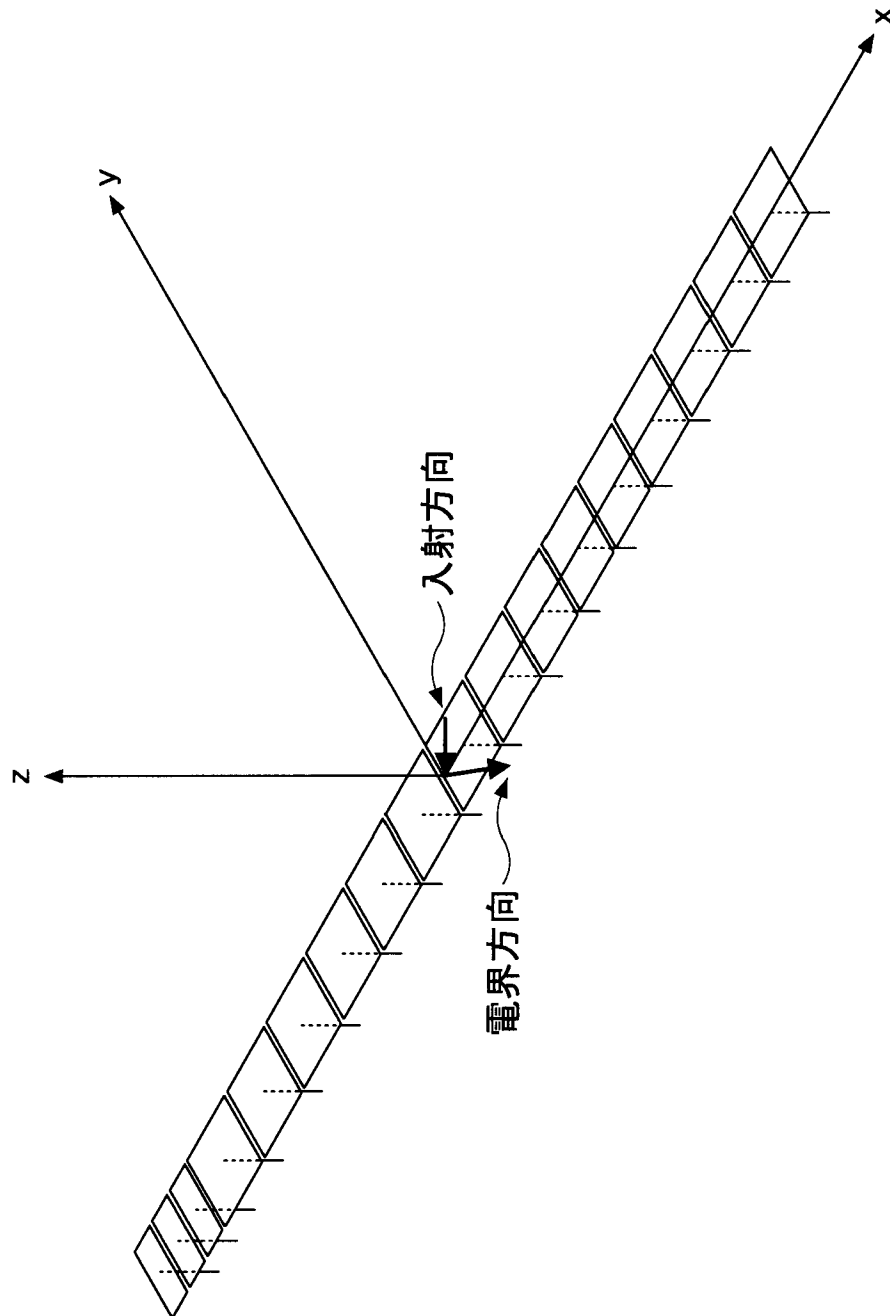
[図10]



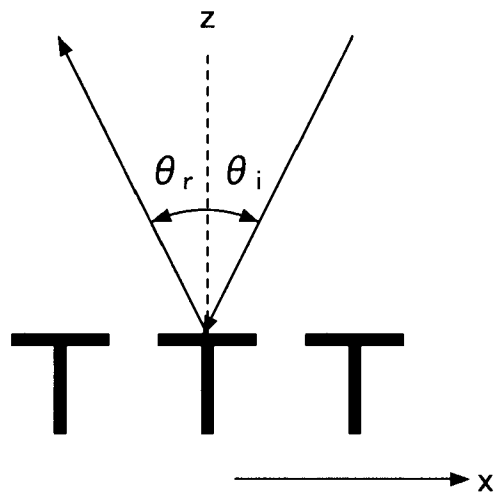
[図11]



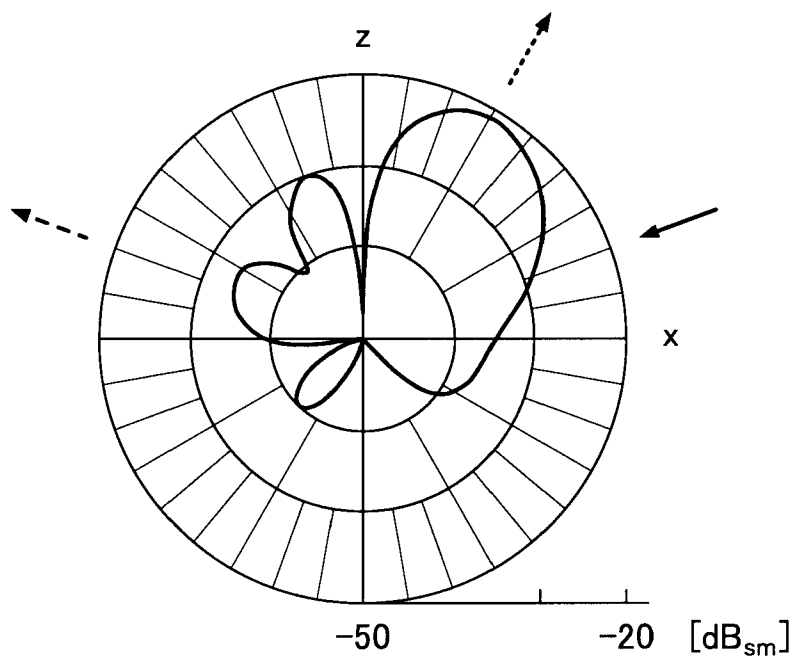
[図12A]



[図12B]

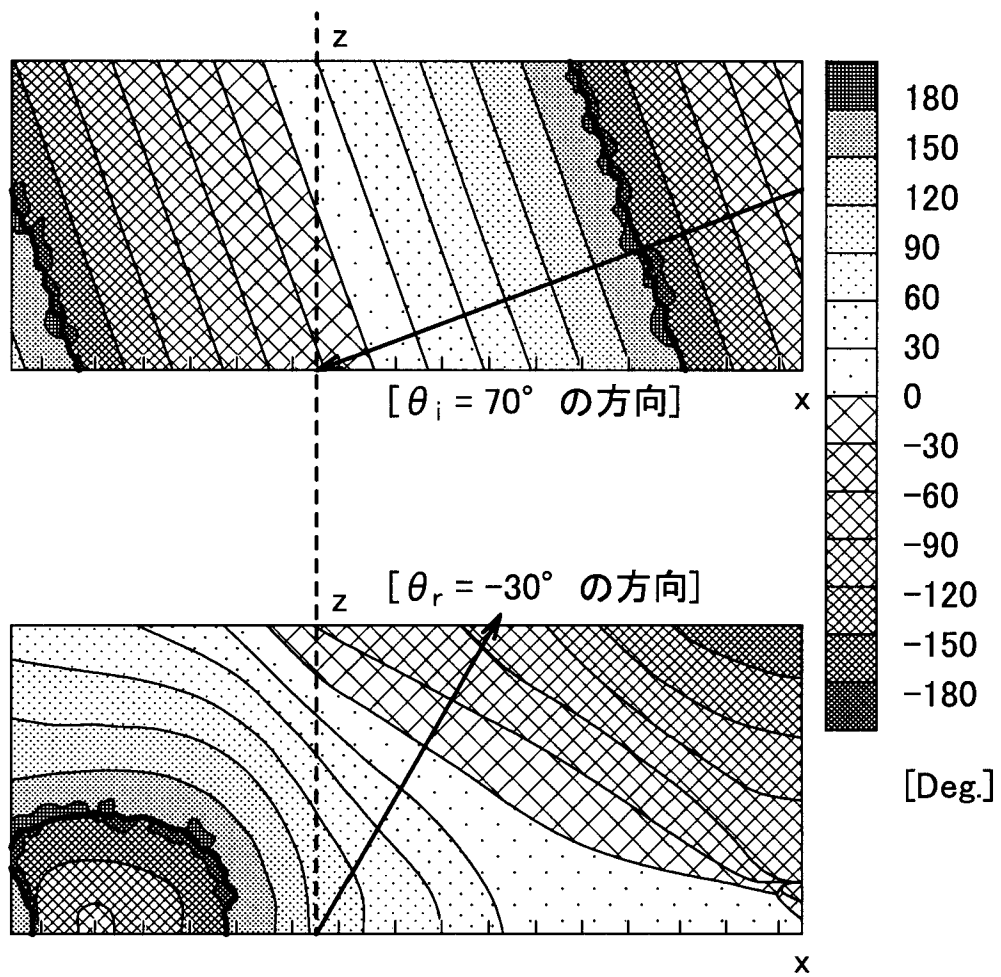


[図12C]

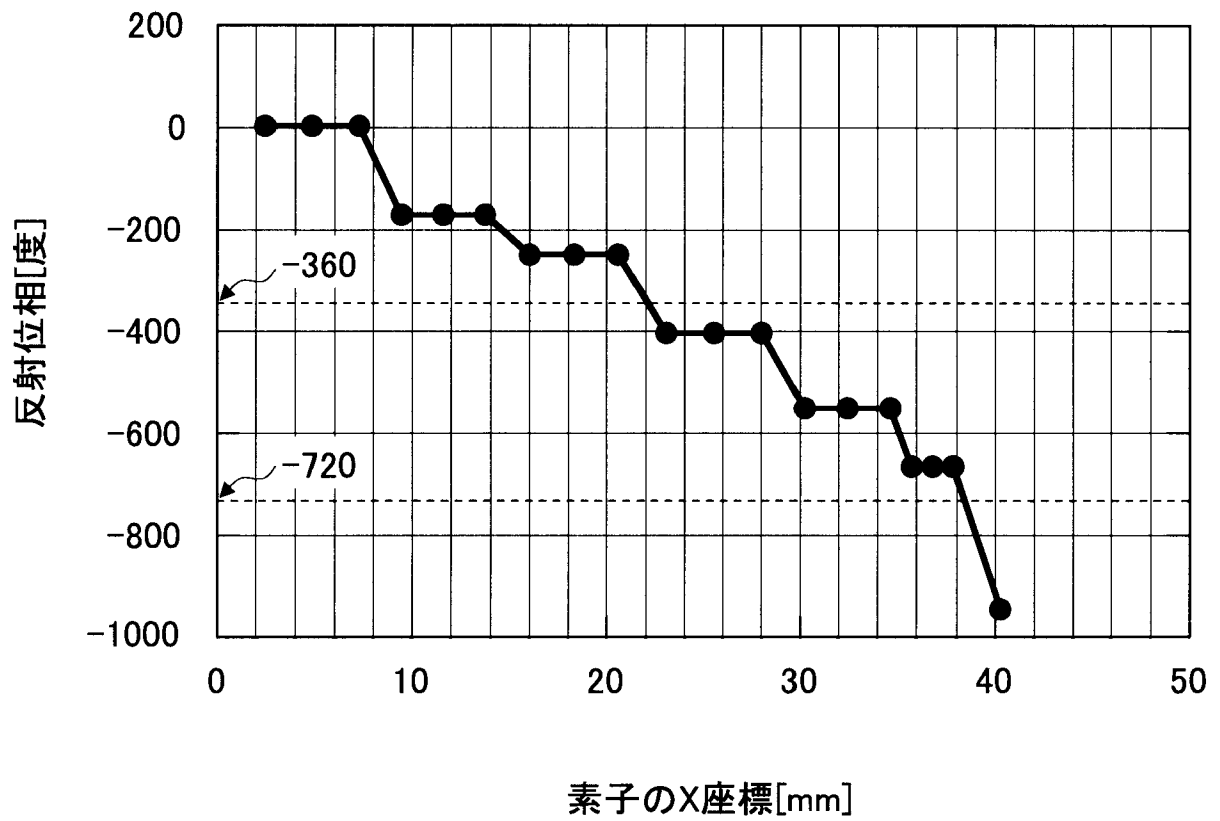


- ← 入射 $\theta = 70^\circ$
- ←····· 反射 $\theta = 30^\circ$
- ←--- 鏡面 $\theta = -70^\circ$

[図12D]



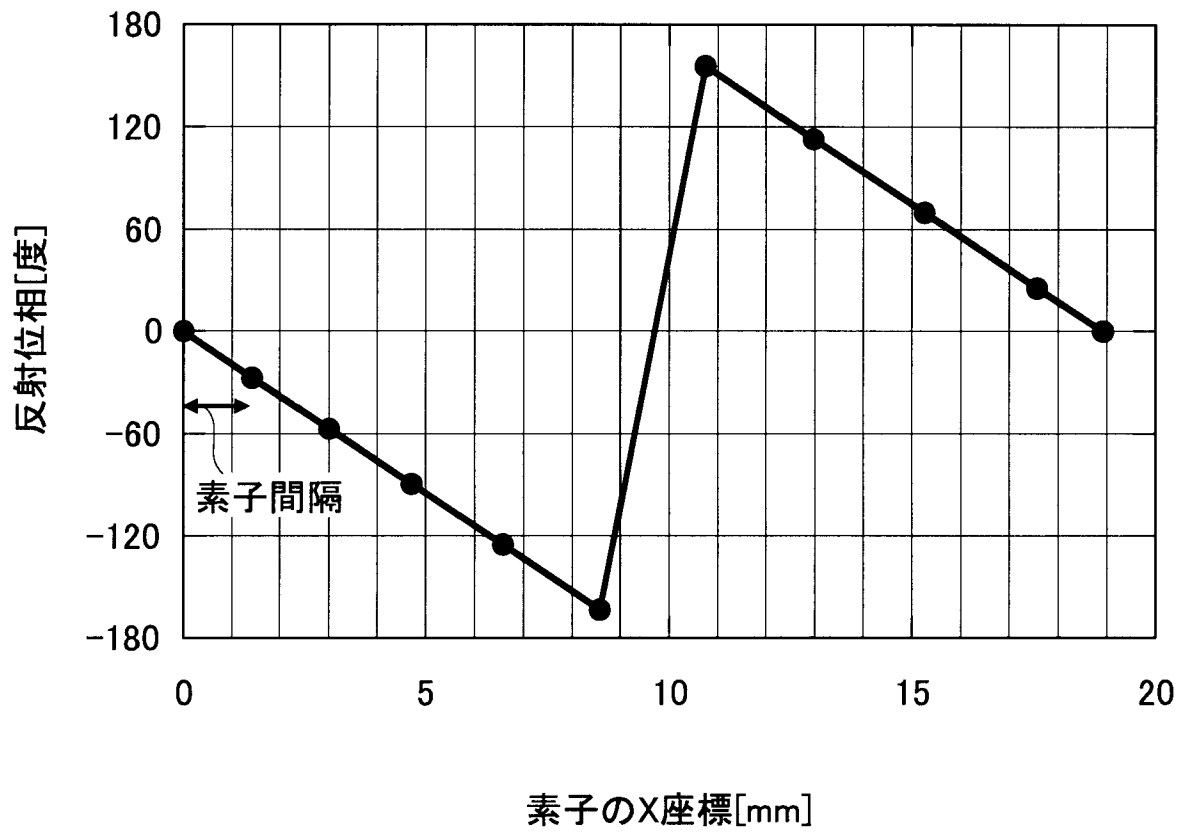
[図12E]



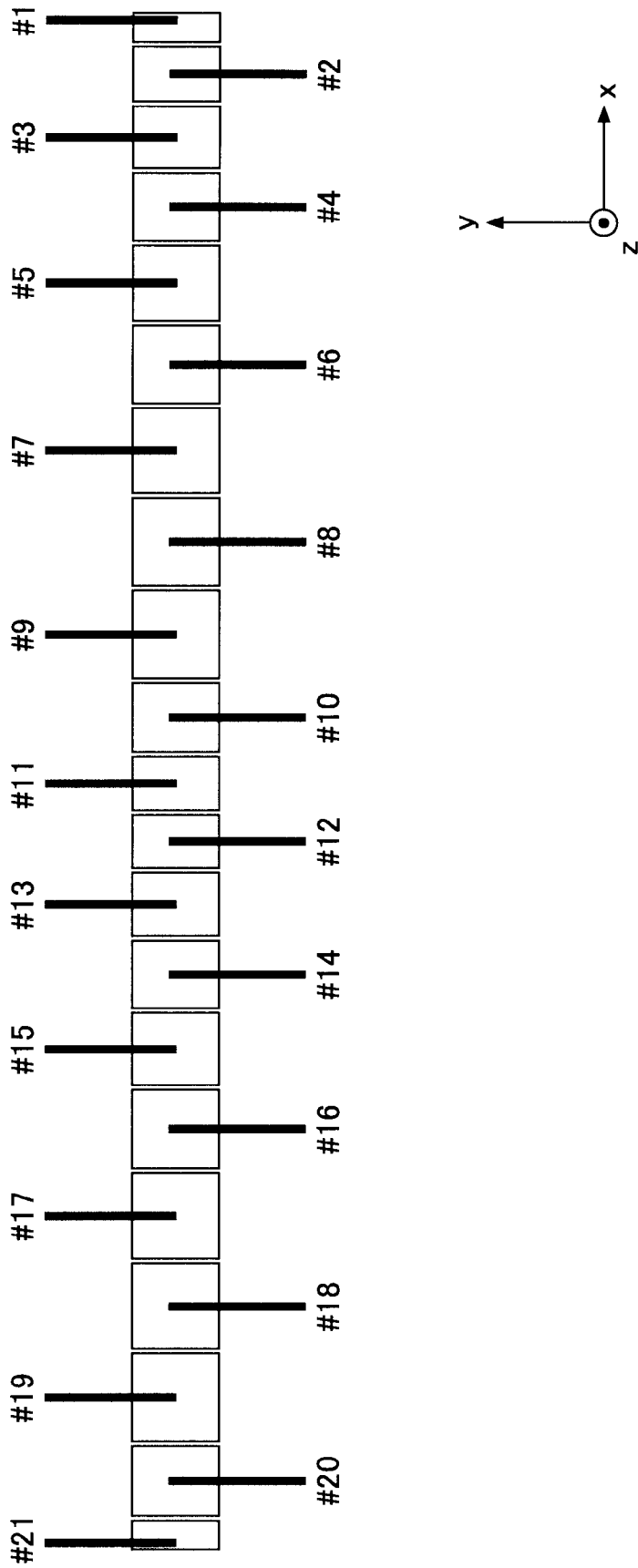
[図12F]

素子番号	所望の位相	ビアのX座標	素子間隔
#1	-27	1.419774927	> 1.5775
#2	-57	2.997302624	> 1.7090
#3	-89.5	4.706290963	> 1.8667
#4	-125	6.573032071	> 2.0113
#5	-163.25	8.584379885	> 2.1560
#6	155.75	10.7403344	> 2.2348
#7	113.25	12.97516531	> 2.2874
#8	69.75	15.26258047	> 2.3137
#9	25.75	17.57628776	> 1.3540
#10	0	18.93033236	

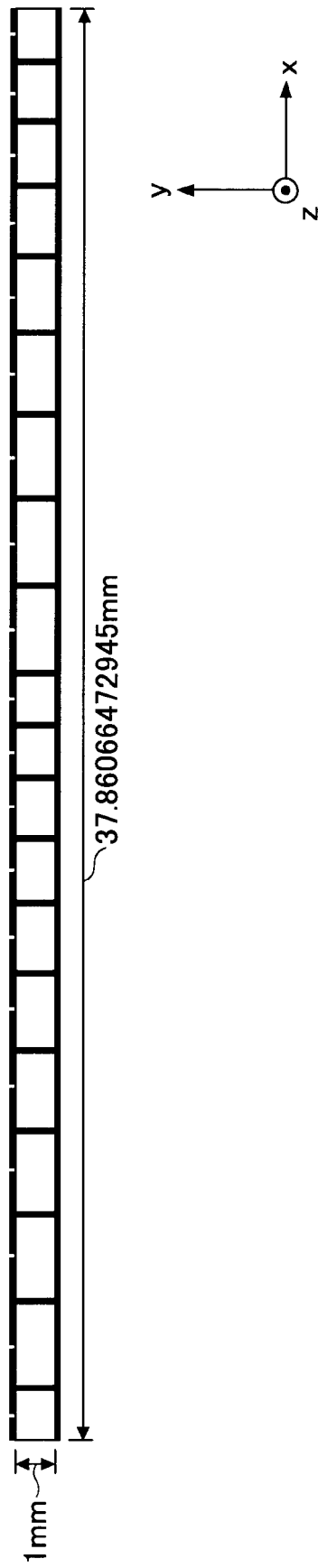
[図12G]



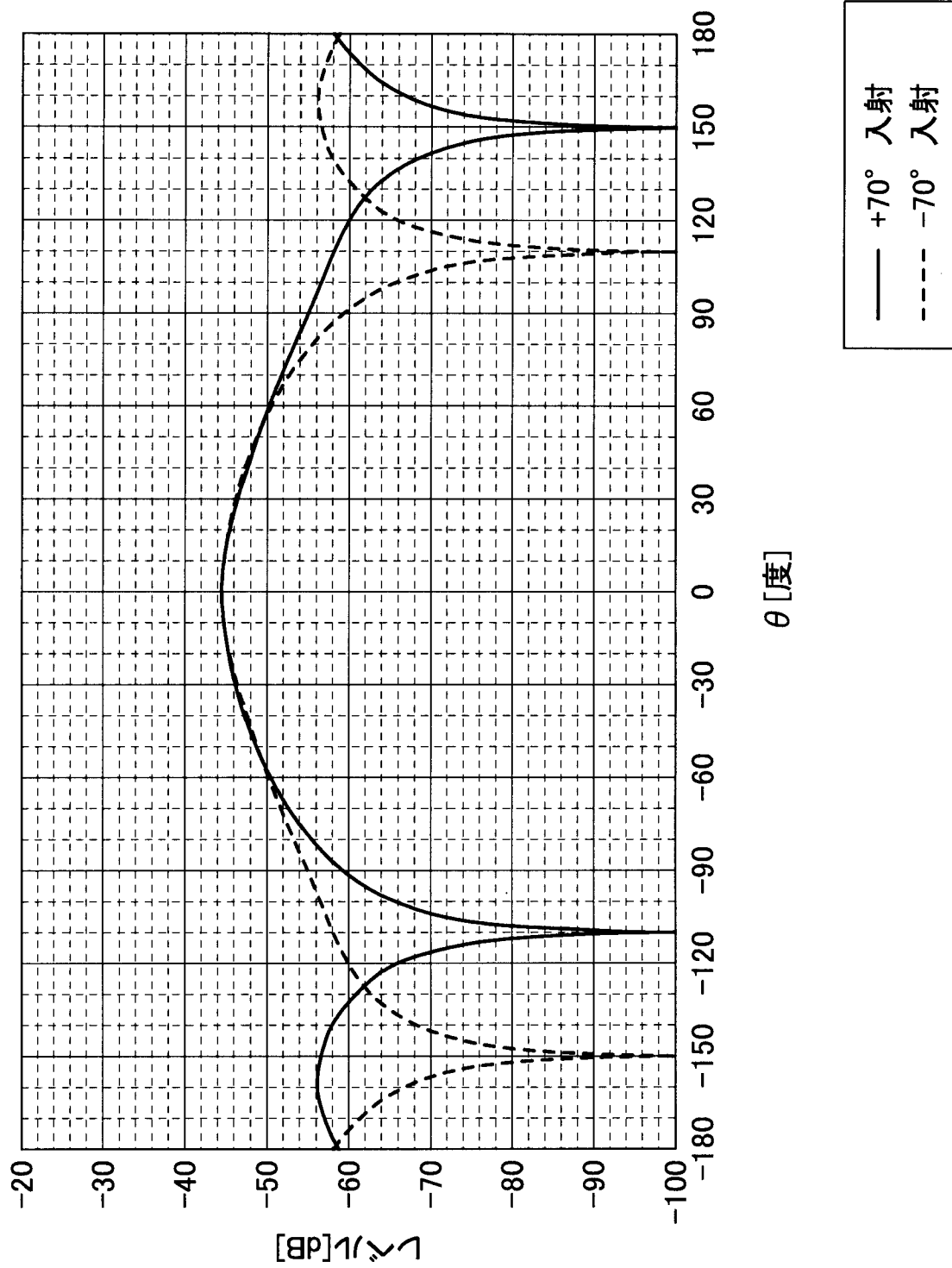
[図12H]



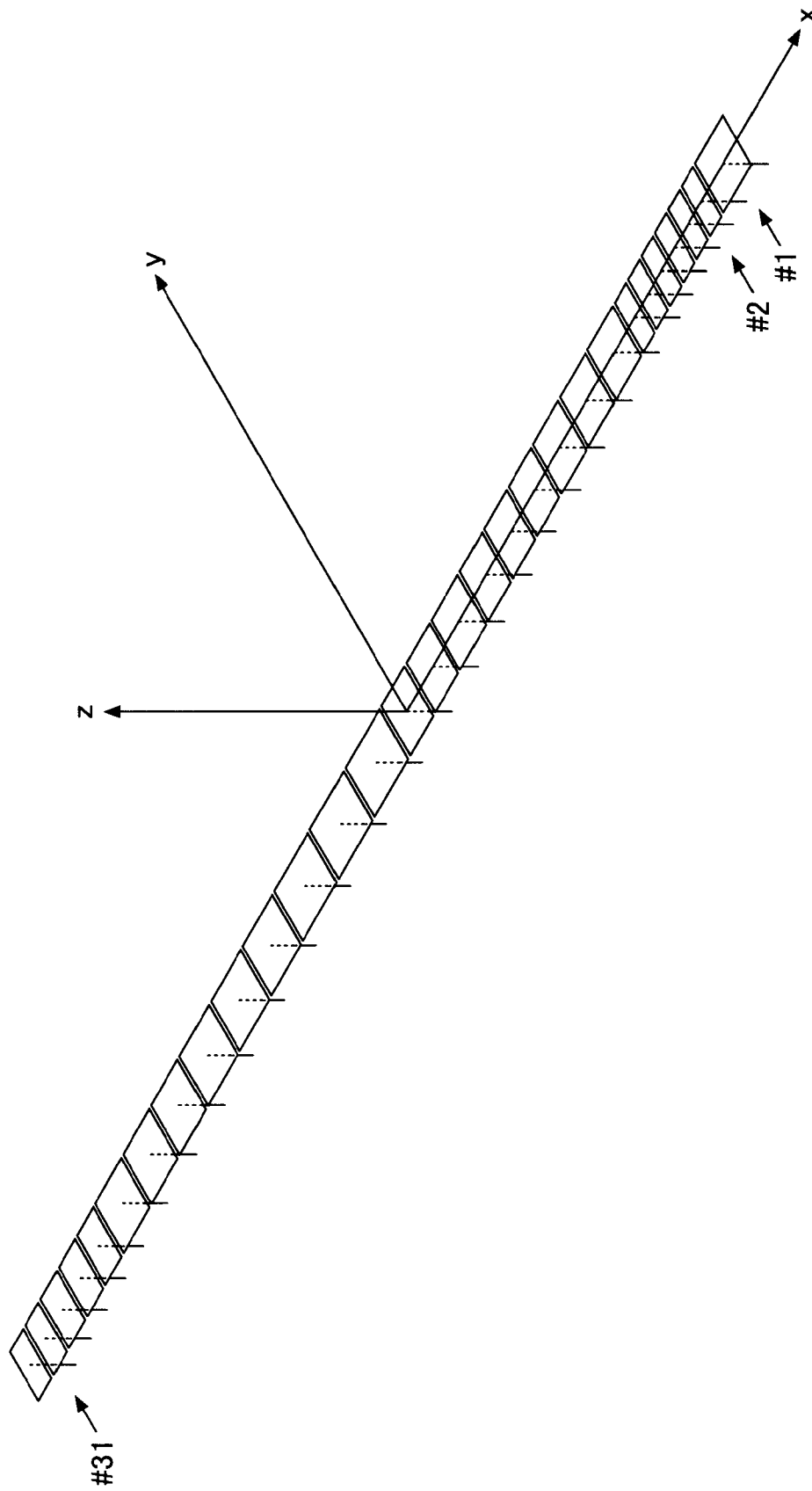
[図12I]



[図12J]



[図13A]

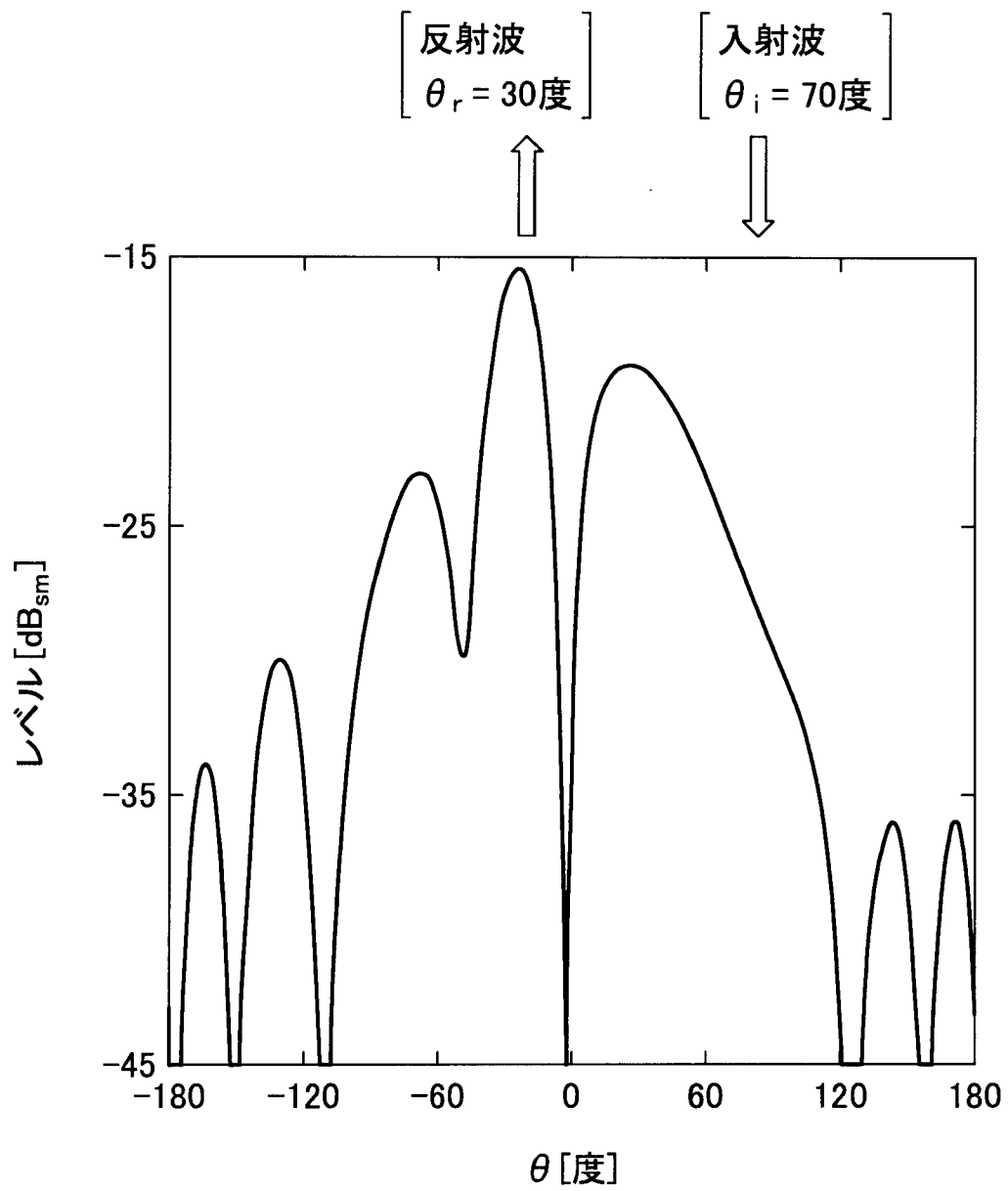


[図13B]

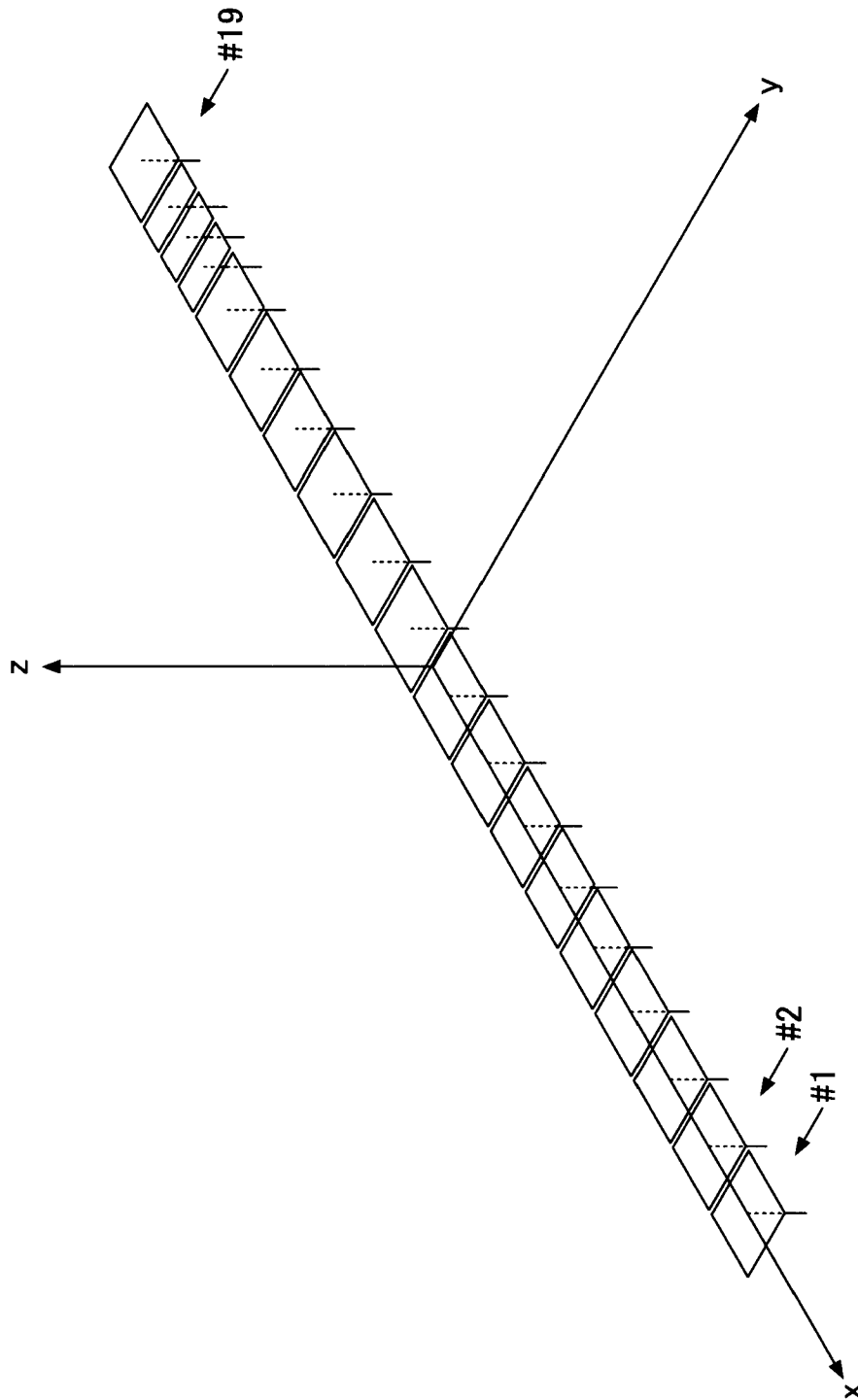
モデルA($\theta_i = 70$ 度, $\theta_r = 30$ 度)

素子番号	反射位相	素子間隔[mm]
#1,#2,#3	-8	1.377
#4,#5,#6	-32.75	1.507
#7,#8,#9	-64.75	2.497
#10,#11,#12	-109.25	2.669
#13,#14,#15	-158.5	3.142
#16,#17,#18	152.25	2.195
#19,#20,#21	113.75	2.238
#221,#23,#24	74.25	2.324
#25,#26,#27	40.75	1.119
#28,#29,#30	20.75	1.205
#31	-60	2.540

[図13C]



[図14A]

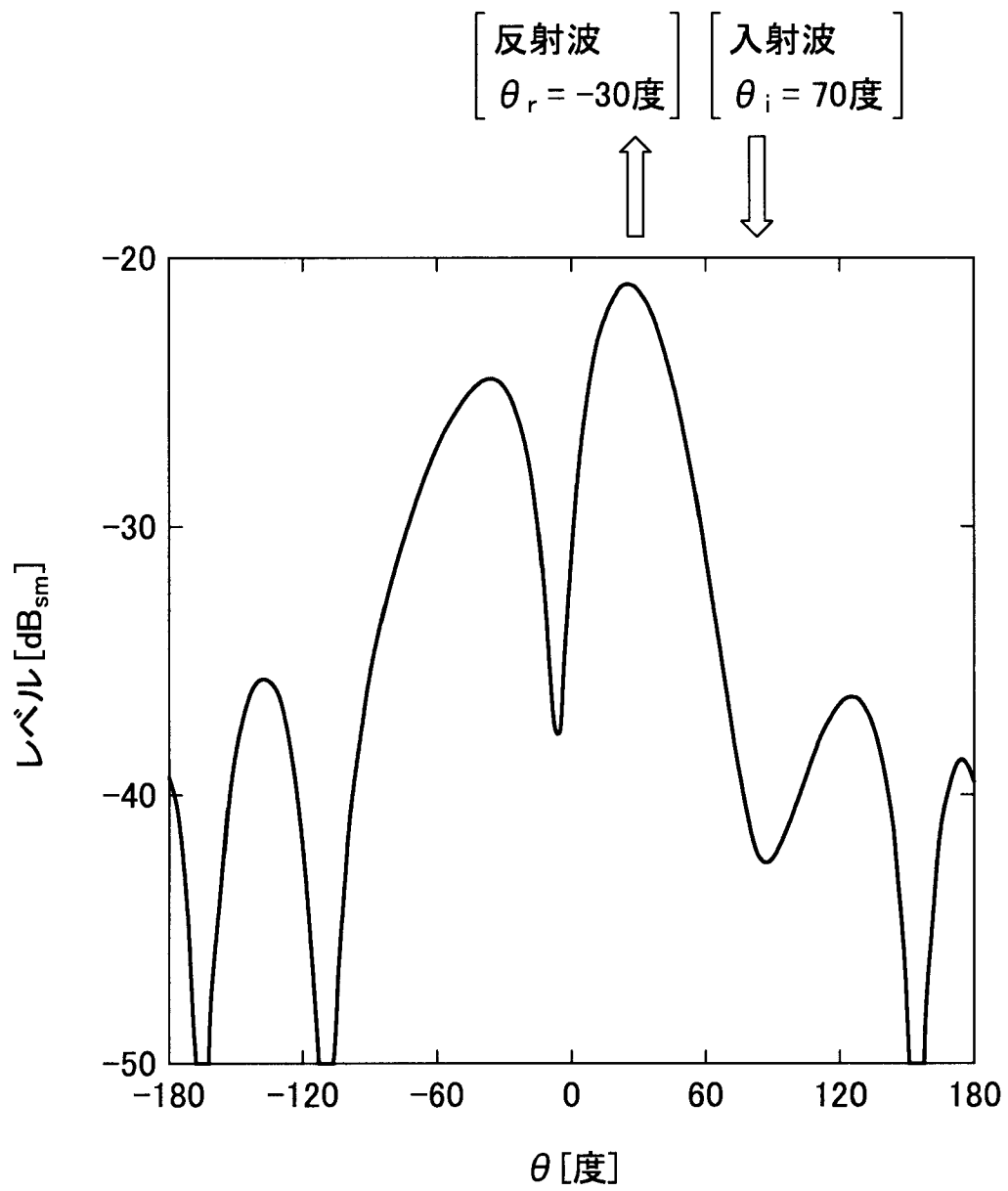


[図14B]

モデルB($\theta_i = 70$ 度, $\theta_r = -30$ 度)

素子番号	反射位相	素子間隔[mm]
#1,#2,#3	-46	2.419
#4,#5,#6	-179	2.156
#7,#8,#9	55.5	2.287
#10,#11,#12	-78.5	2.471
#13,#14,#15	148	2.077
#16,#17,#18	49	1.052
#19	-34	2.261

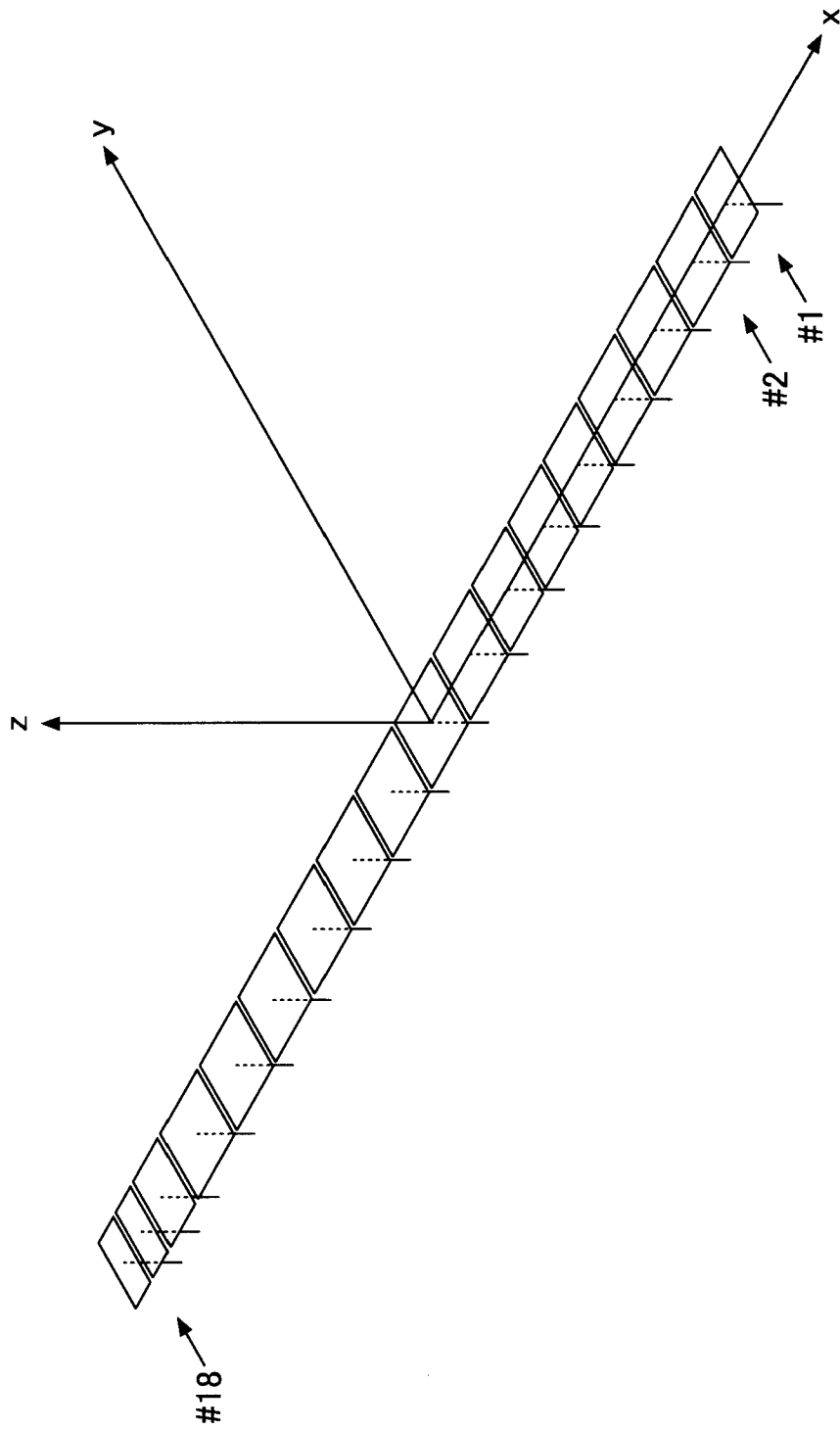
[図14C]



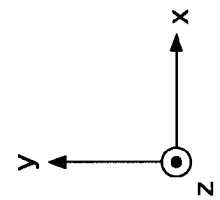
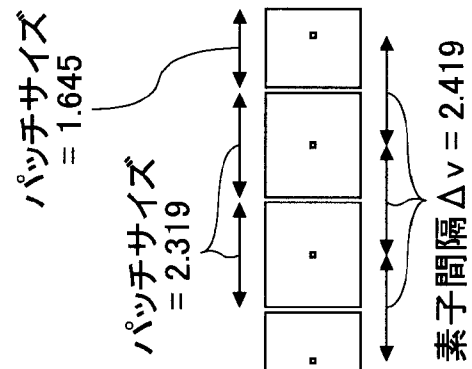
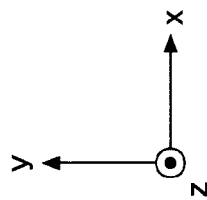
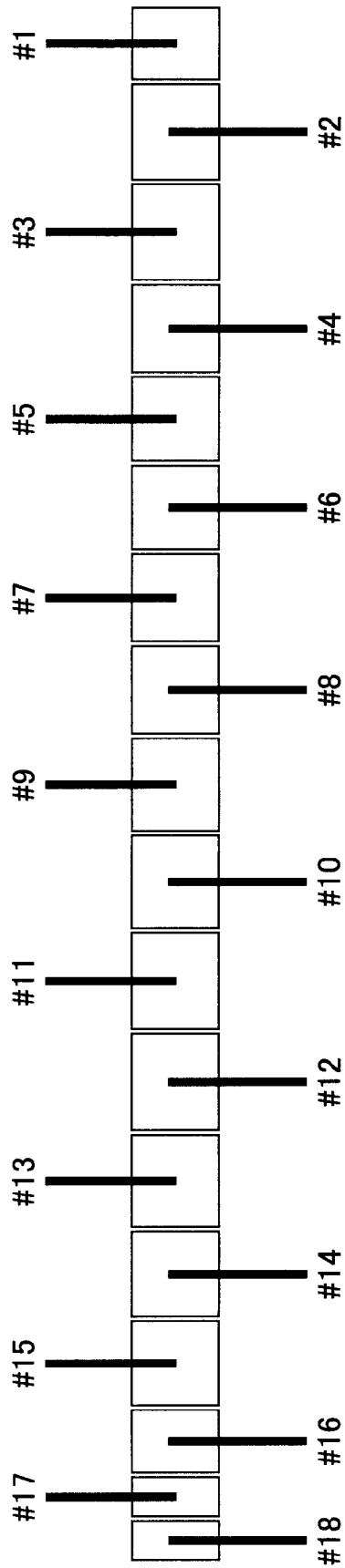
[図15]

比誘電率	10.2
$\tan \delta$	0.0023
基板厚	1mm
ビアの直径	0.1mm
X方向のギャップ	0.10mm

[図16A]



[図16B]



パッチサイズ
= 1.645

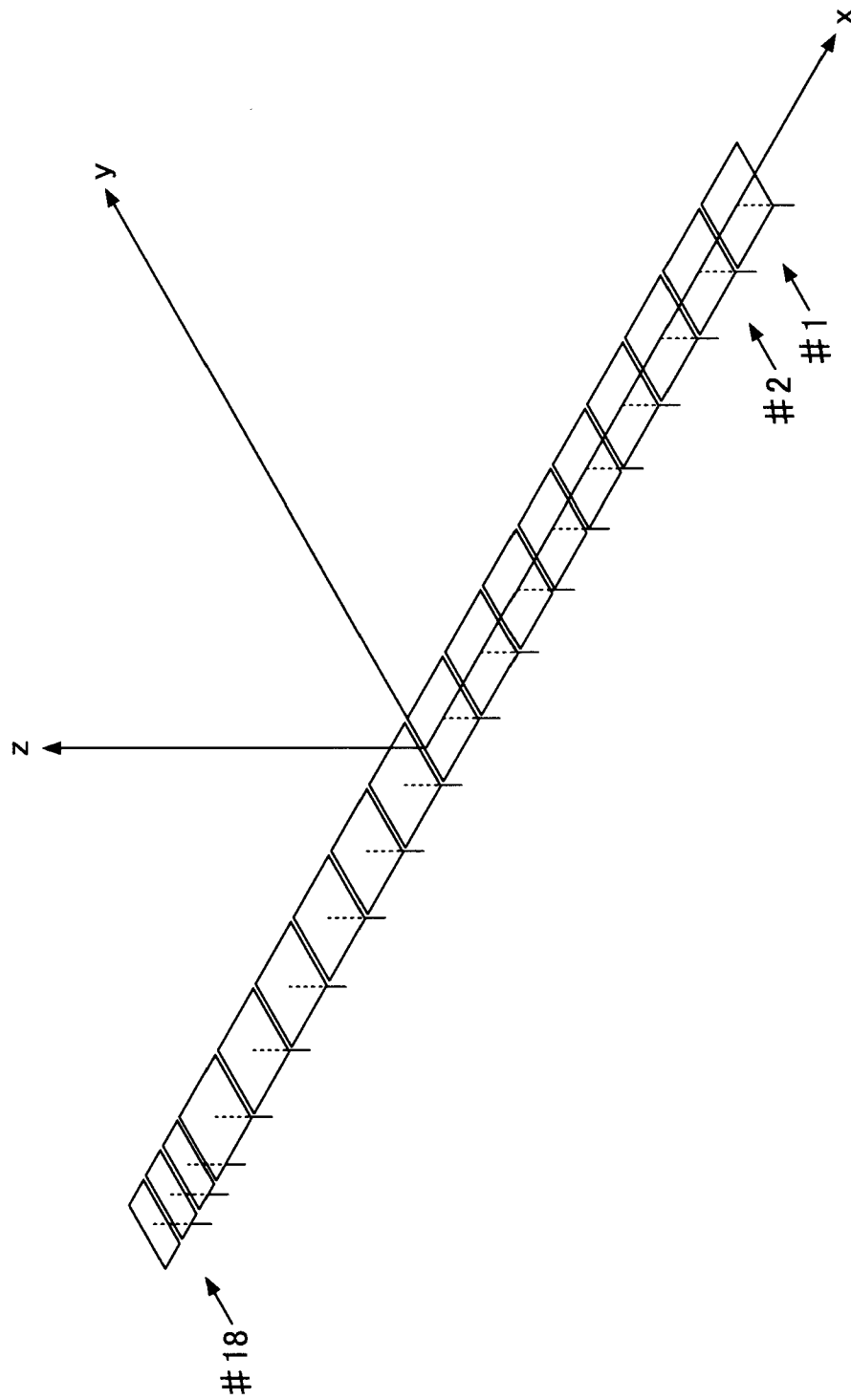
パッチサイズ
= 2.319

素子間隔 $\Delta v = 2.419$

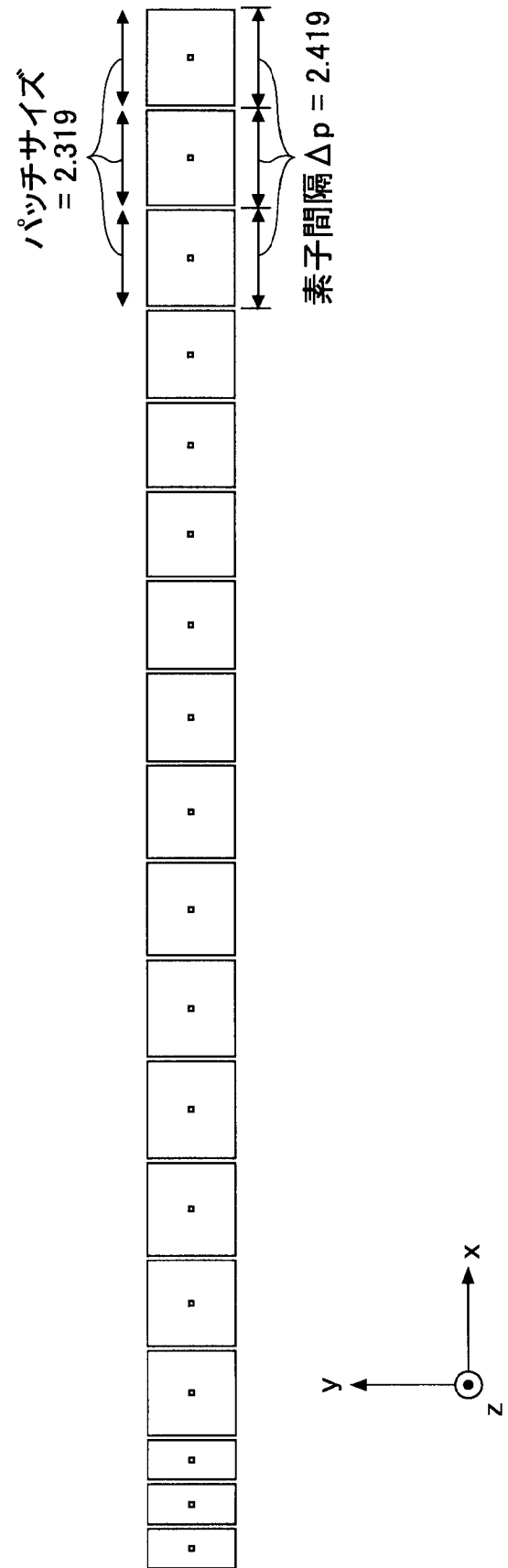
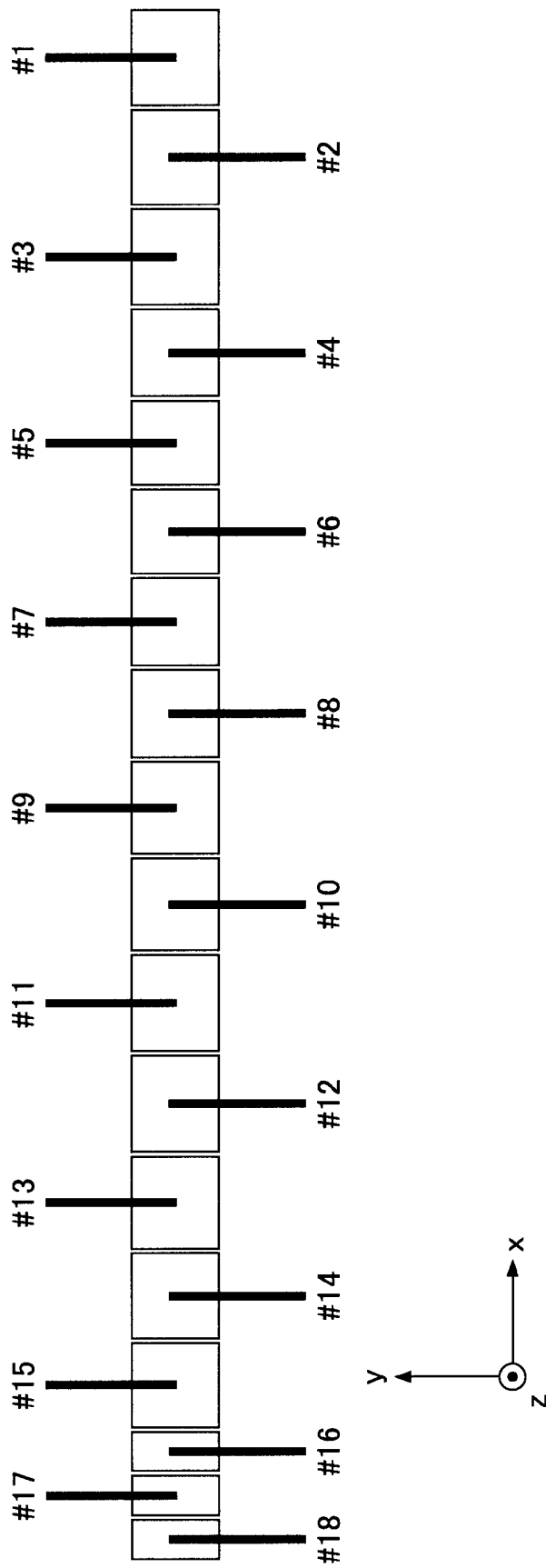
[図16C]

素子番号	パッチサイズ[mm]	素子間隔[mm]
#1	1.64494428635262	2.418875802
#2	2.31887580215933	2.418875802
#3	2.31887580215933	2.418875802
#4	2.18741516073763	2.155954519
#5	2.05595451931592	2.155954519
#6	2.05595451931592	2.155954519
#7	2.12168484002678	2.287415161
#8	2.18741516073763	2.287415161
#9	2.18741516073763	2.287415161
#10	2.27943760973282	2.471460059
#11	2.37146005872801	2.471460059
#12	2.37146005872801	2.471460059
#13	2.24348166186233	2.215503265
#14	2.11550326499666	2.215503265
#15	2.11550326499666	2.215503265
#16	1.54325801777129	1.071012771
#17	0.97101277054591	1.071012771
#18	0.97101277054591	1.071012771

[図17A]



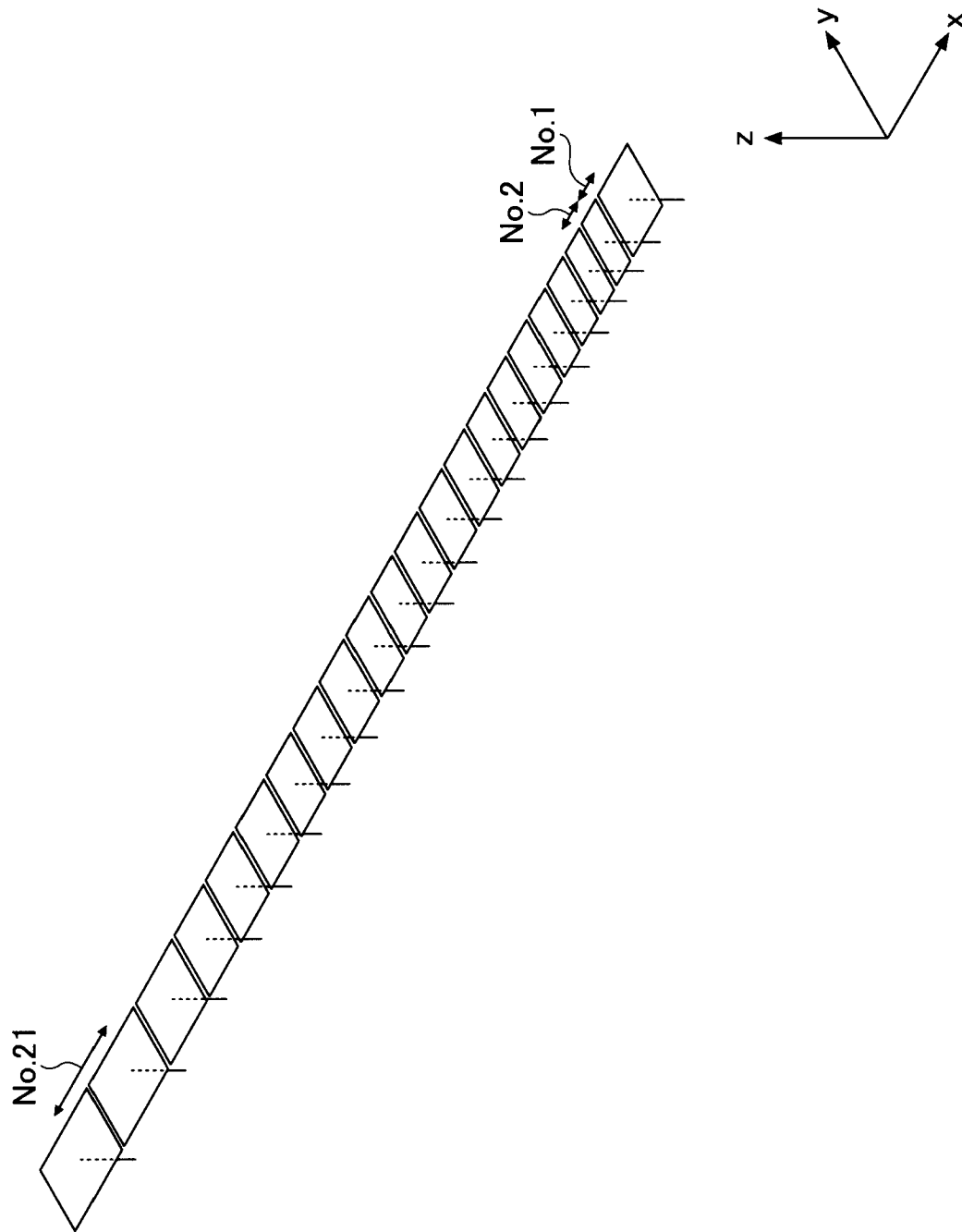
[図17B]



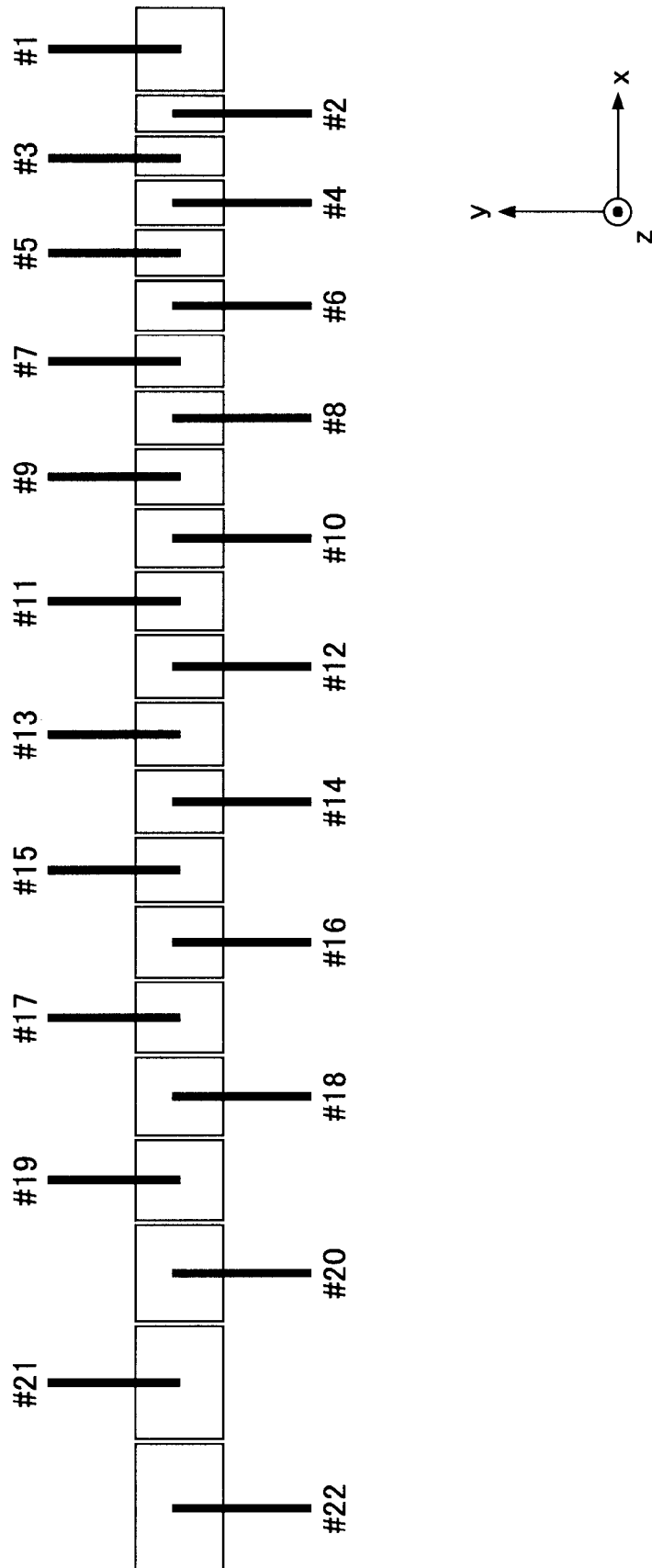
[図17C]

素子番号	パッチサイズ[mm]	素子間隔[mm]
#1	2.31887580215933	2.418875802
#2	2.31887580215933	2.418875802
#3	2.31887580215933	2.418875802
#4	2.05595451931592	2.155954519
#5	2.05595451931592	2.155954519
#6	2.05595451931592	2.155954519
#7	2.18741516073763	2.287415161
#8	2.18741516073763	2.287415161
#9	2.18741516073763	2.287415161
#10	2.37146005872801	2.471460059
#11	2.37146005872801	2.471460059
#12	2.37146005872801	2.471460059
#13	2.11550326499666	2.215503265
#14	2.11550326499666	2.215503265
#15	2.11550326499666	2.215503265
#16	0.97101277054591	1.071012771
#17	0.97101277054591	1.071012771
#18	0.97101277054591	1.071012771

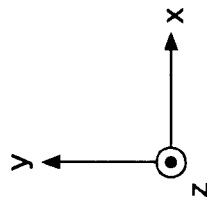
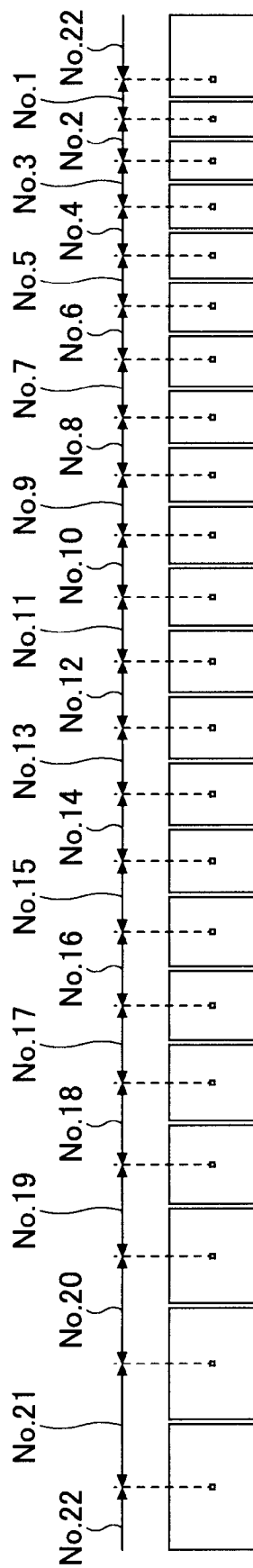
[図18A]



[図18B]



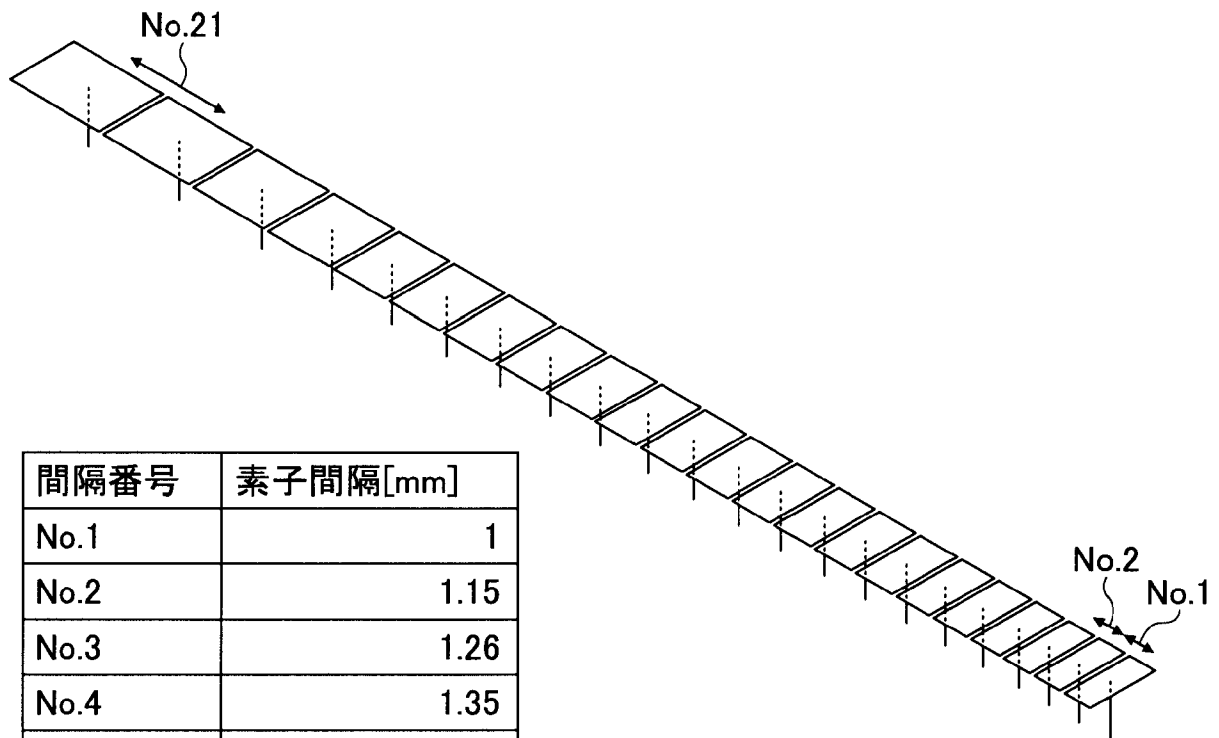
[図18C]



[図18D]

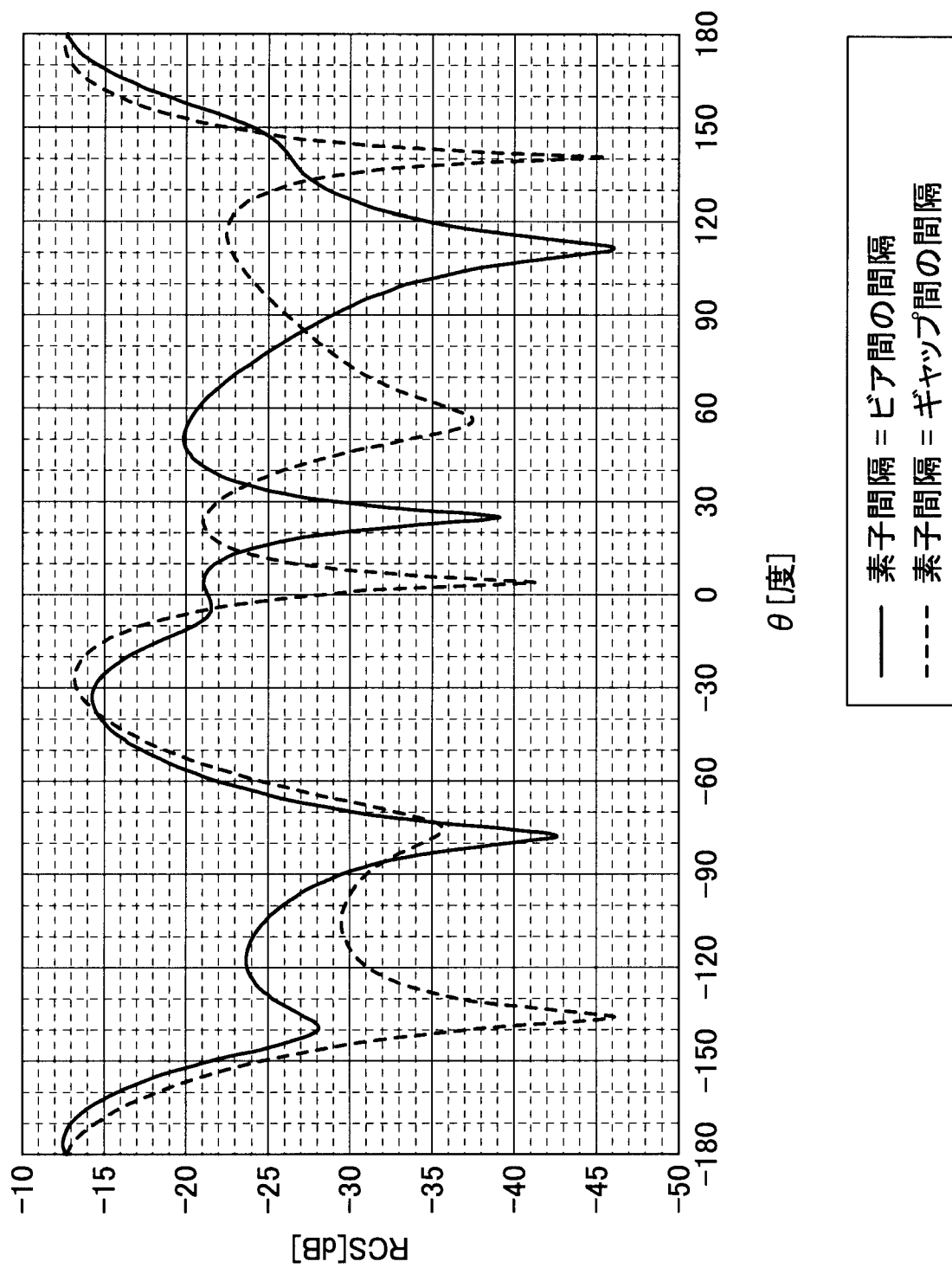
素子番号	パッチサイズ[mm]	間隔番号	素子間隔[mm]
#1	2.21325	No.1	1
#2	0.975	No.2	1.15
#3	1.105	No.3	1.26
#4	1.205	No.4	1.35
#5	1.29	No.5	1.43
#6	1.36	No.6	1.49
#7	1.42125	No.7	1.5525
#8	1.48125	No.8	1.61
#9	1.535	No.9	1.66
#10	1.585	No.10	1.71
#11	1.63	No.11	1.75
#12	1.675	No.12	1.8
#13	1.7	No.13	1.8
#14	1.75	No.14	1.9
#15	1.83	No.15	1.96
#16	1.895	No.16	2.03
#17	1.975	No.17	2.12
#18	2.08	No.18	2.24
#19	2.25	No.19	2.46
#20	2.605	No.20	2.95
#21	3.15	No.21	3.55
#22	3.48825	No.22	3.6265

[図19]

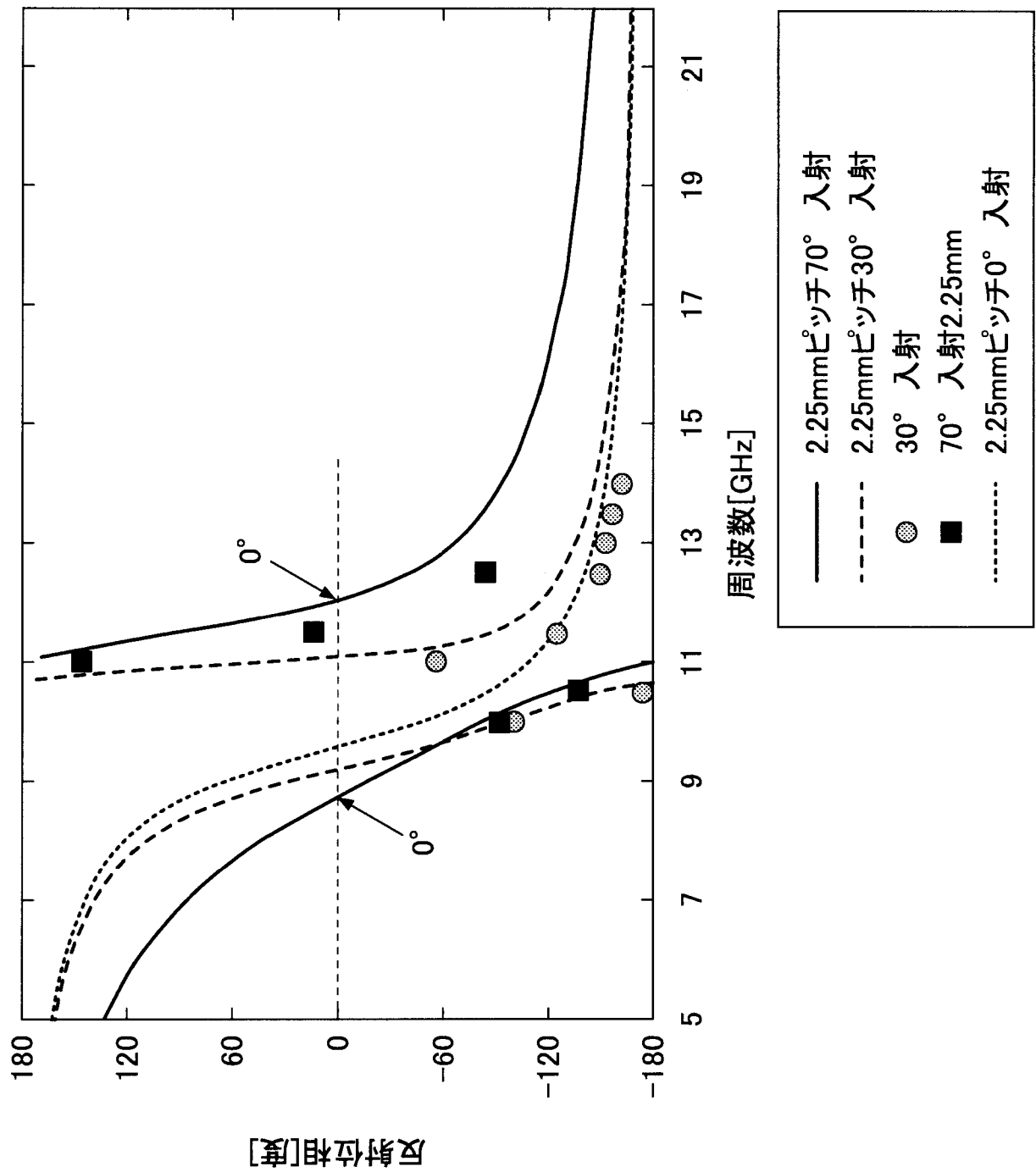


間隔番号	素子間隔[mm]
No.1	1
No.2	1.15
No.3	1.26
No.4	1.35
No.5	1.43
No.6	1.49
No.7	1.5525
No.8	1.61
No.9	1.66
No.10	1.71
No.11	1.75
No.12	1.8
No.13	1.8
No.14	1.9
No.15	1.96
No.16	2.03
No.17	2.12
No.18	2.24
No.19	2.46
No.20	2.95
No.21	3.55
No.22	3.6265

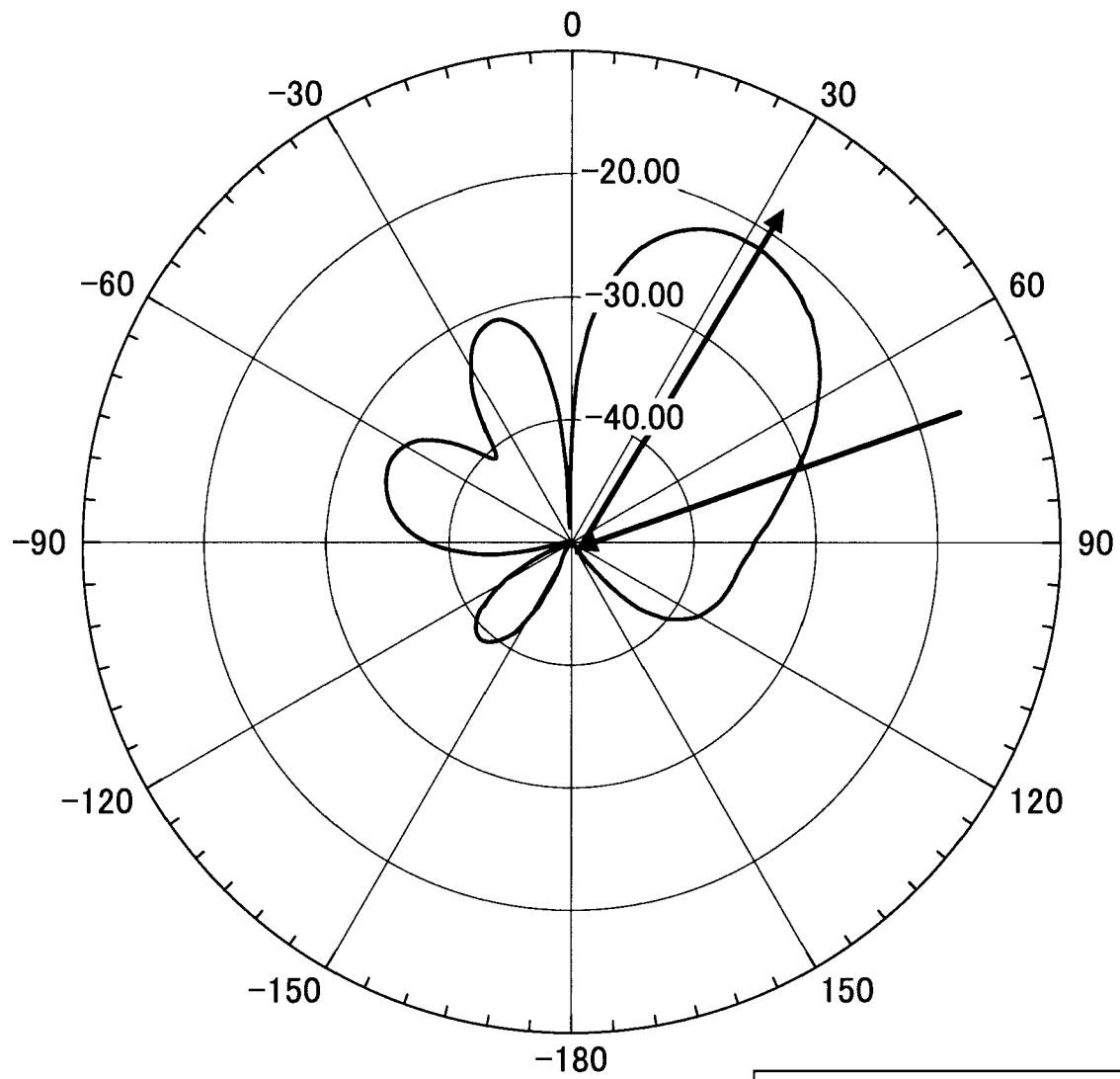
[図20]



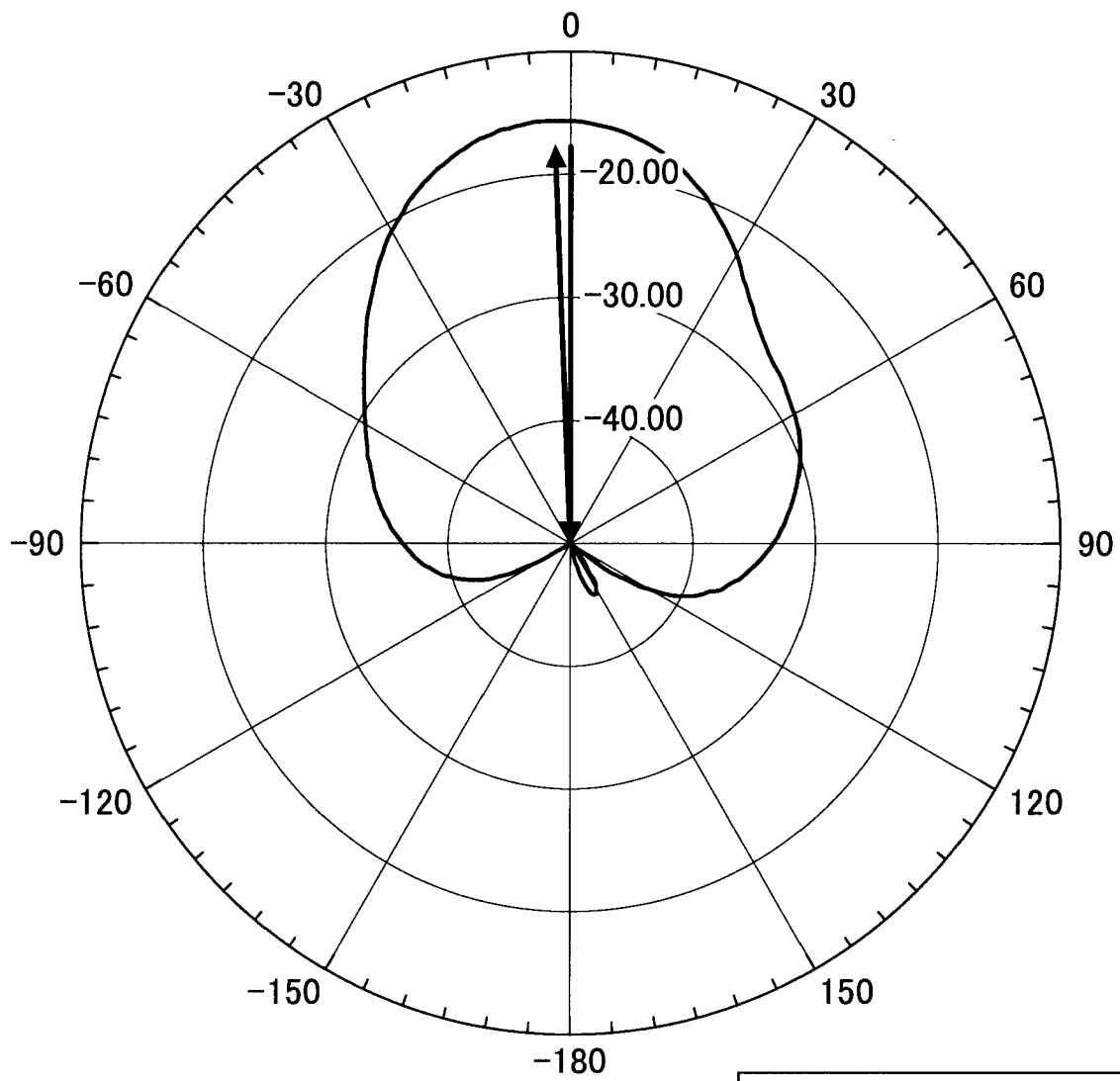
[図21]



[図22]

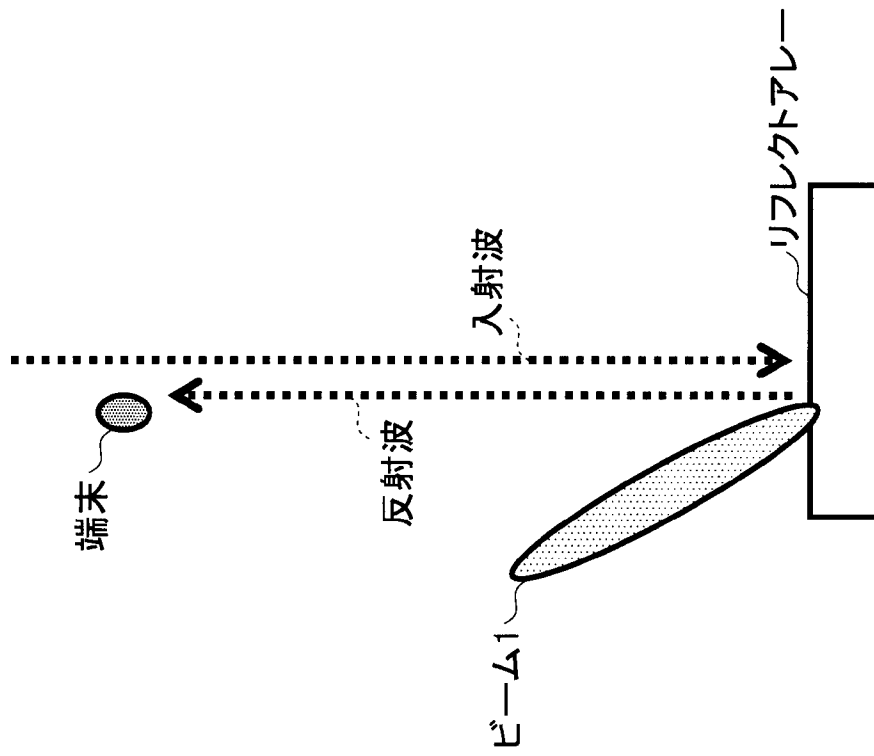


[図23]

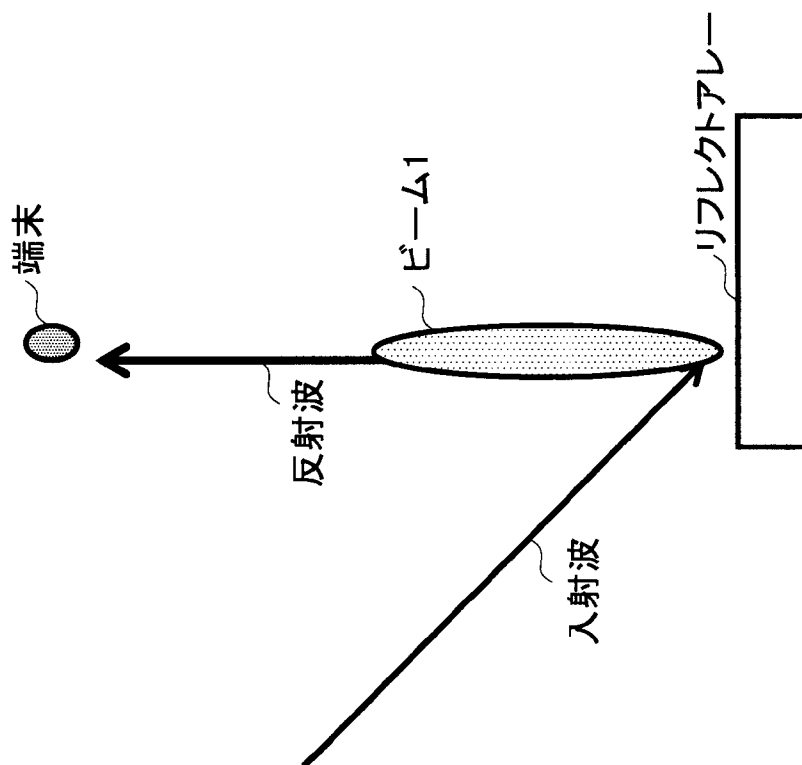


制御角 = 0°
入射角 = 0°
反射ピーク = 2°

[図24]

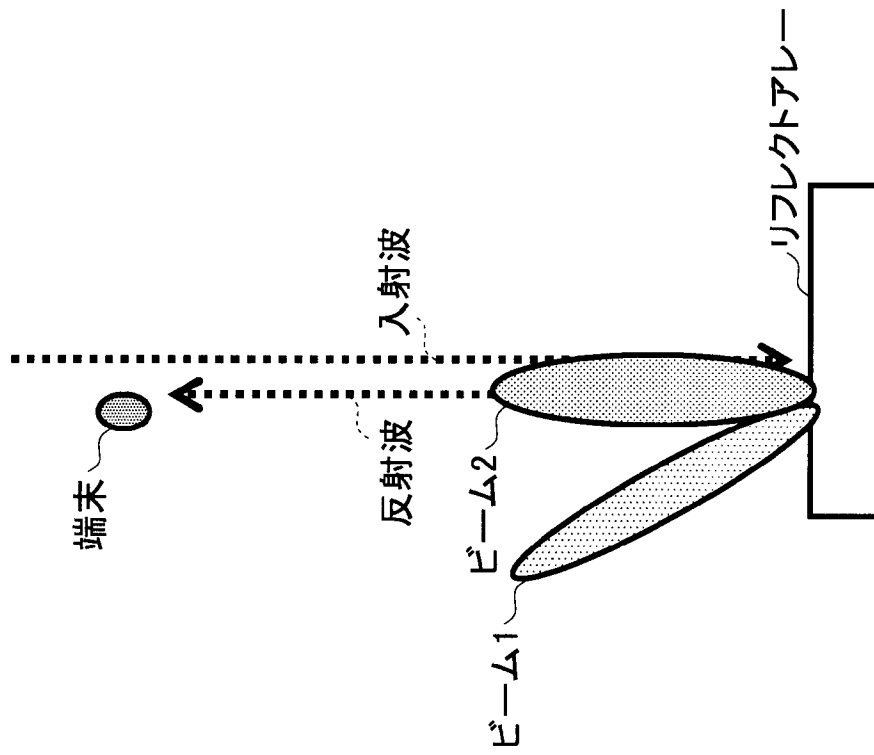


[(b) 正面からの入射を正面に向ける場合]

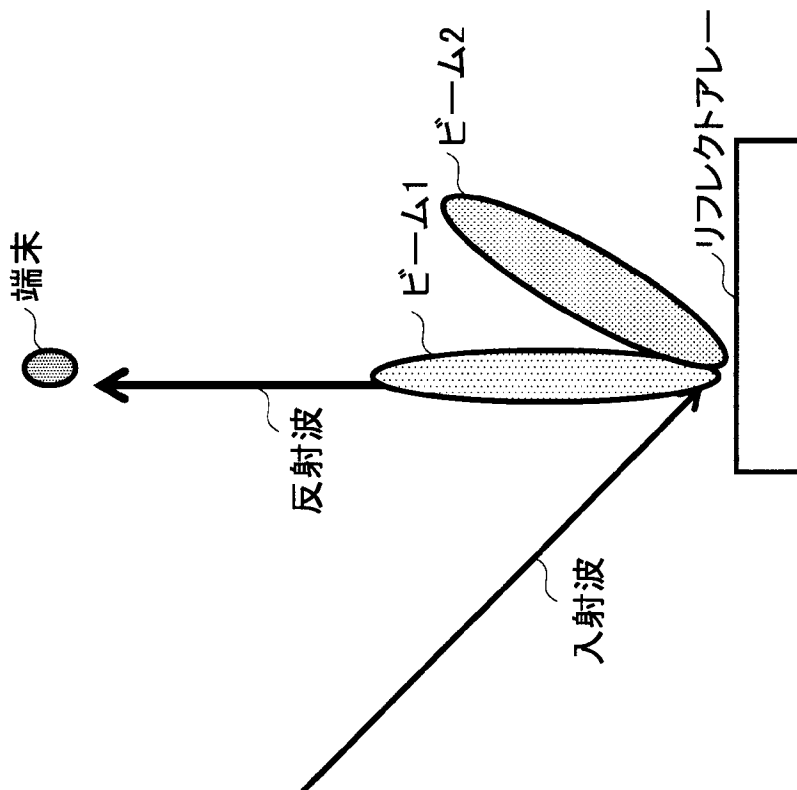


[(a) 斜めからの入射を正面に向ける場合]

[図25]

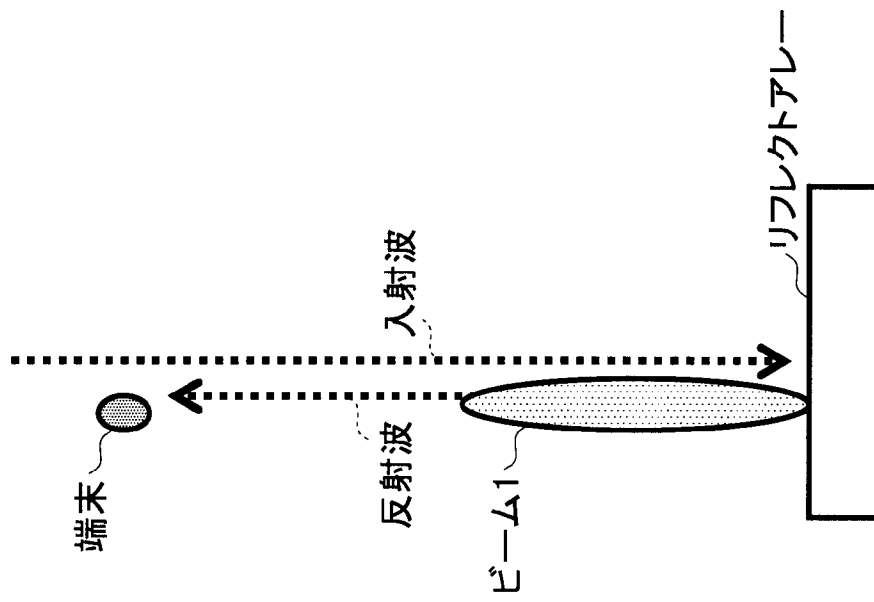


[(b) 正面からの入射を正面に向ける場合]

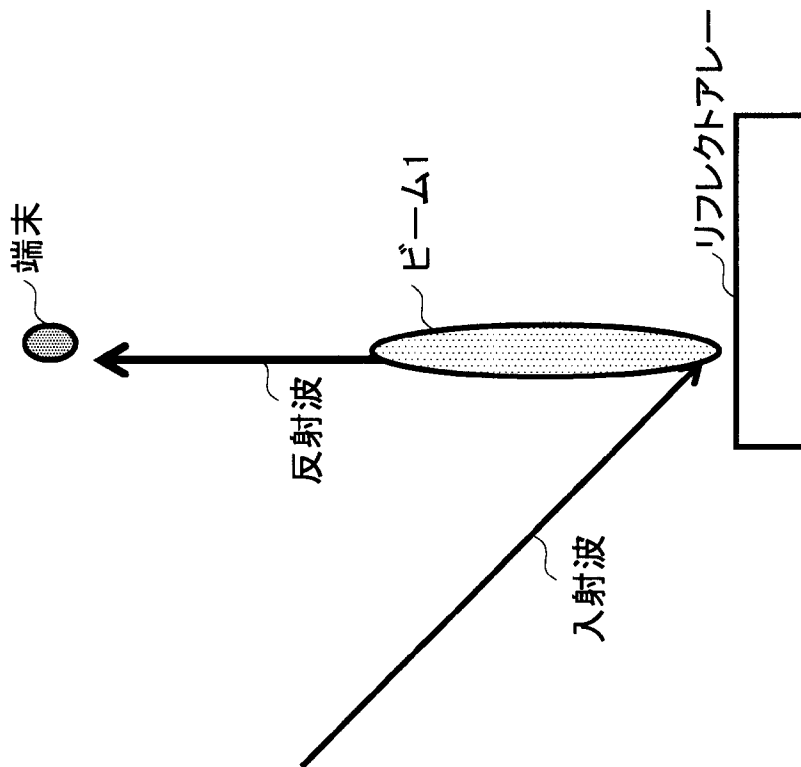


[(a) 斜めからの入射を正面に向ける場合]

[図26]

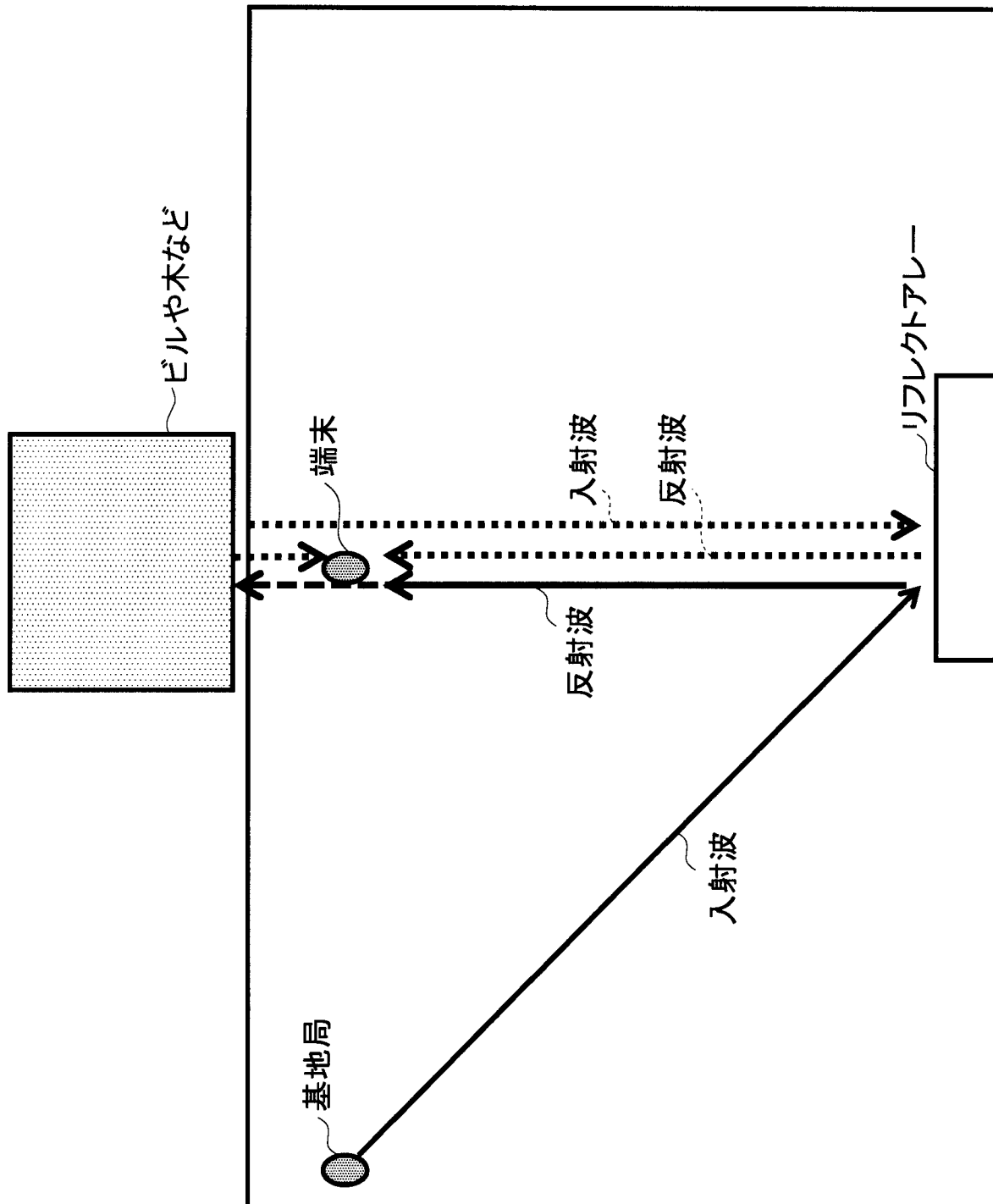


[(b) 正面からの入射を正面に向ける場合]

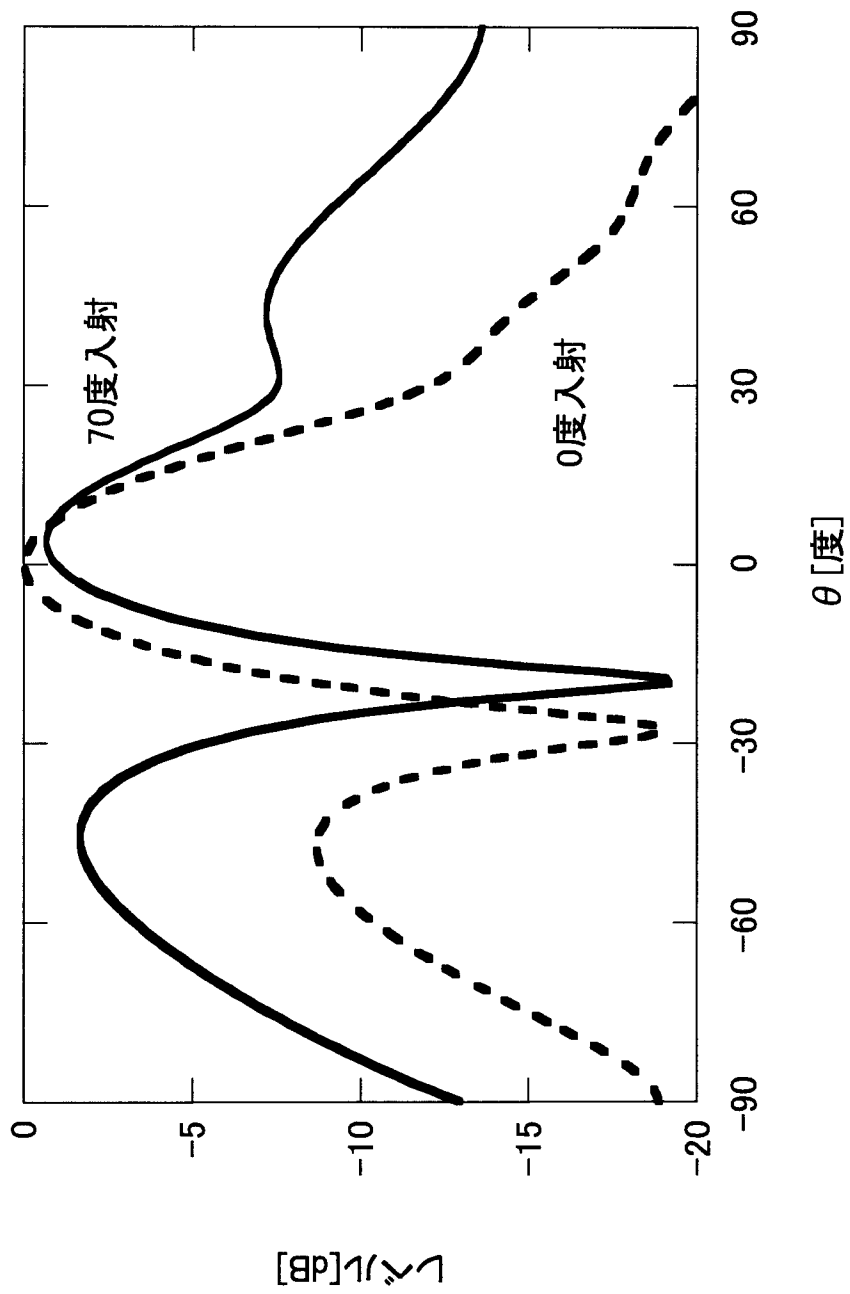


[(a) 斜めからの入射を正面に向ける場合]

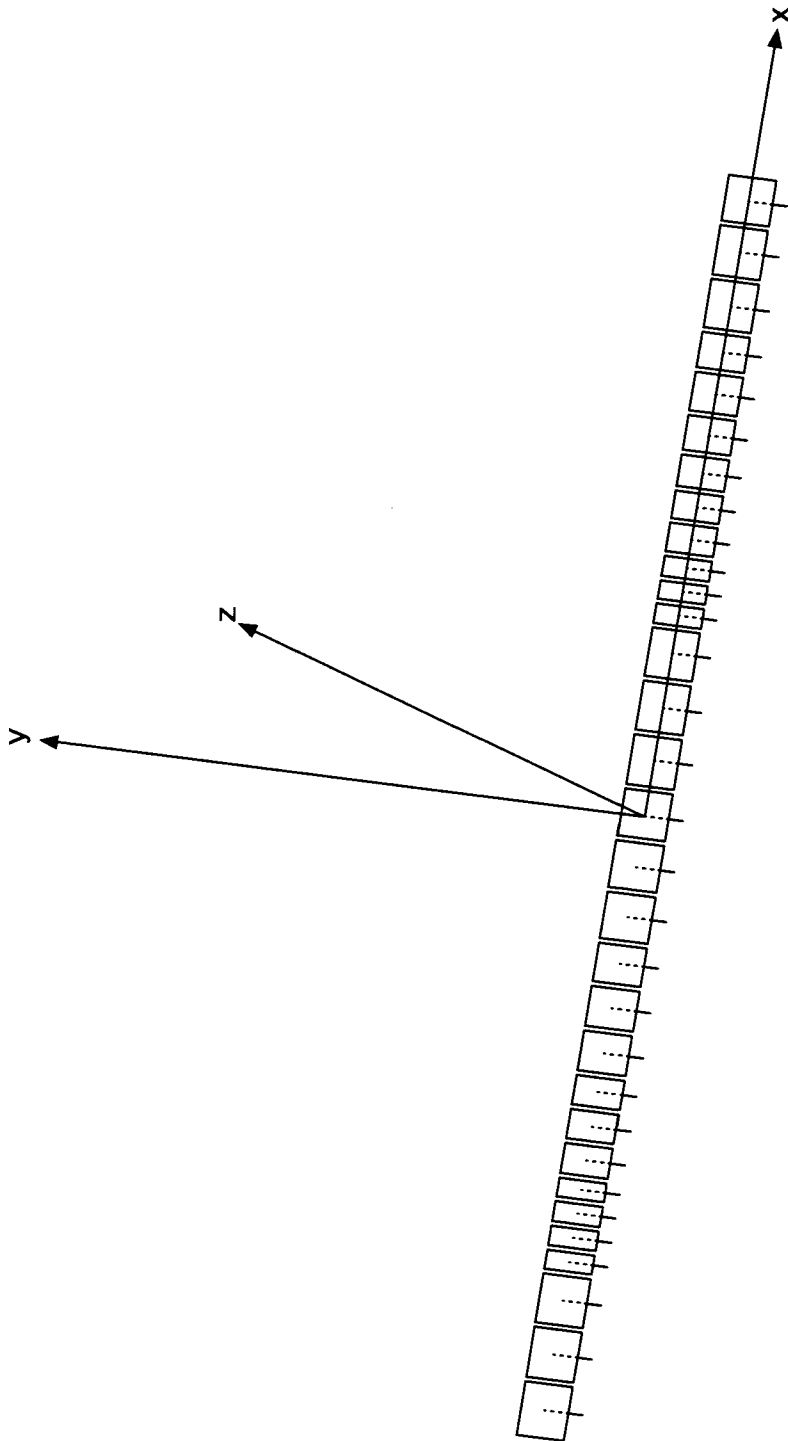
[図27]



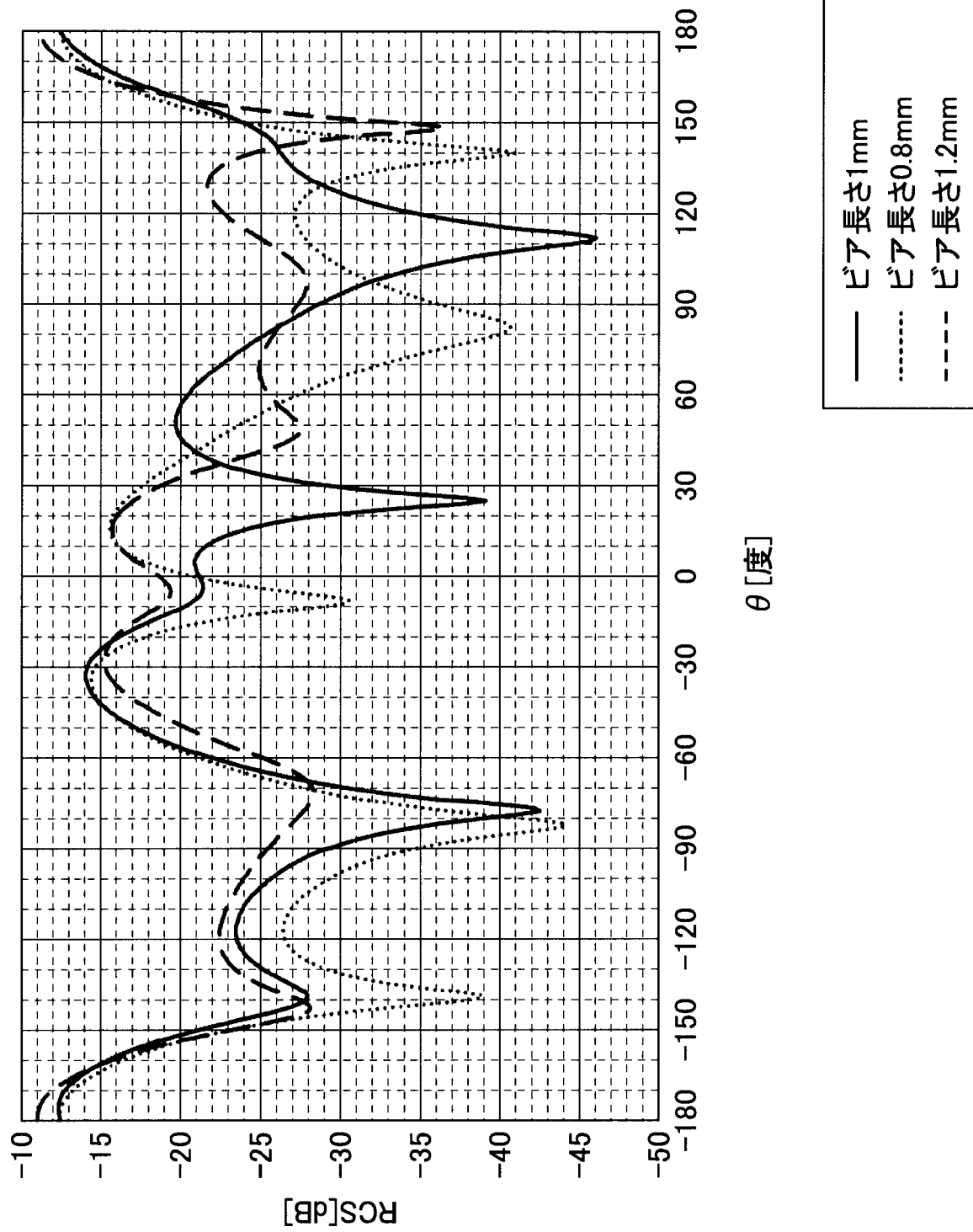
[図28]



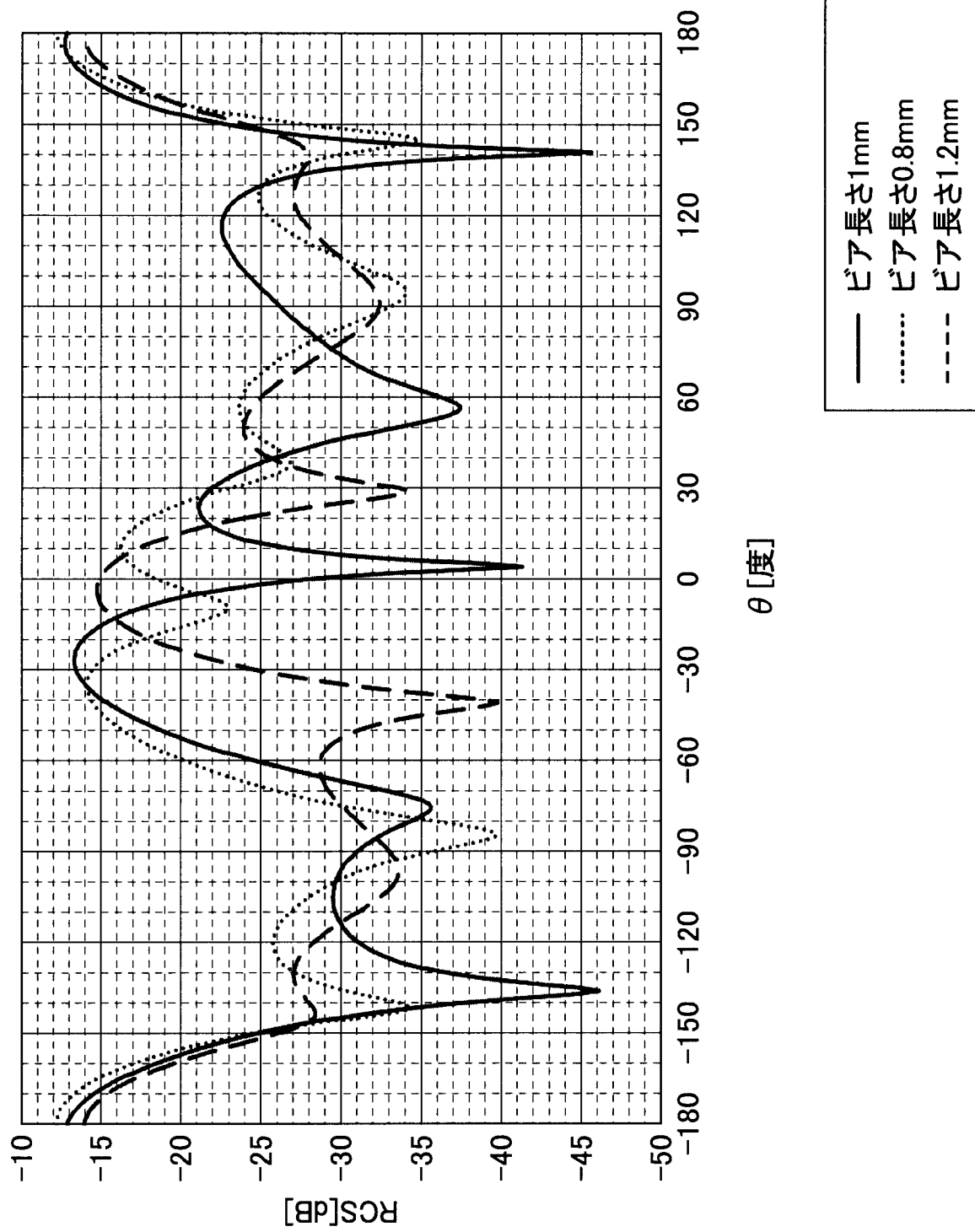
[図29]



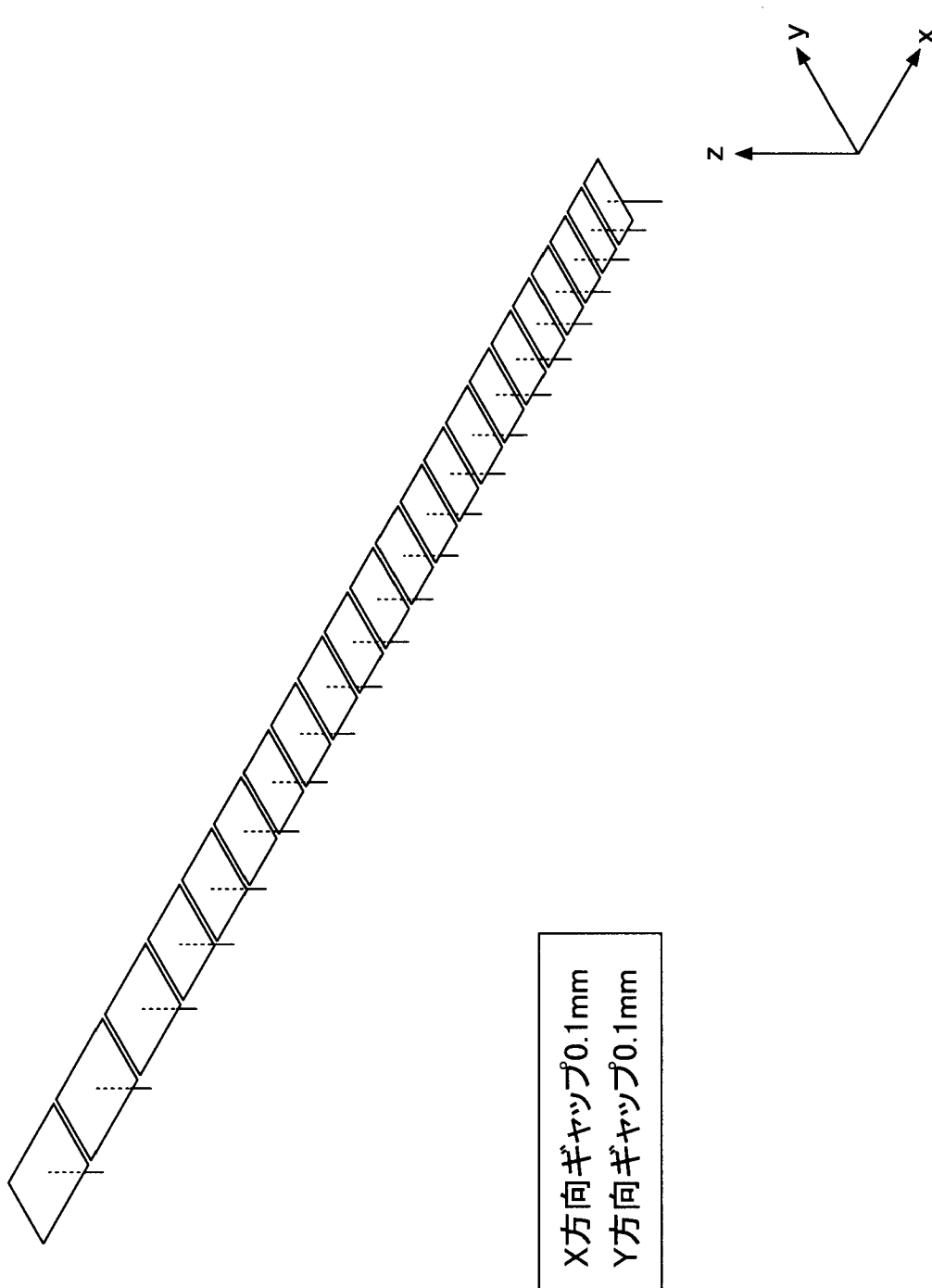
[図30]



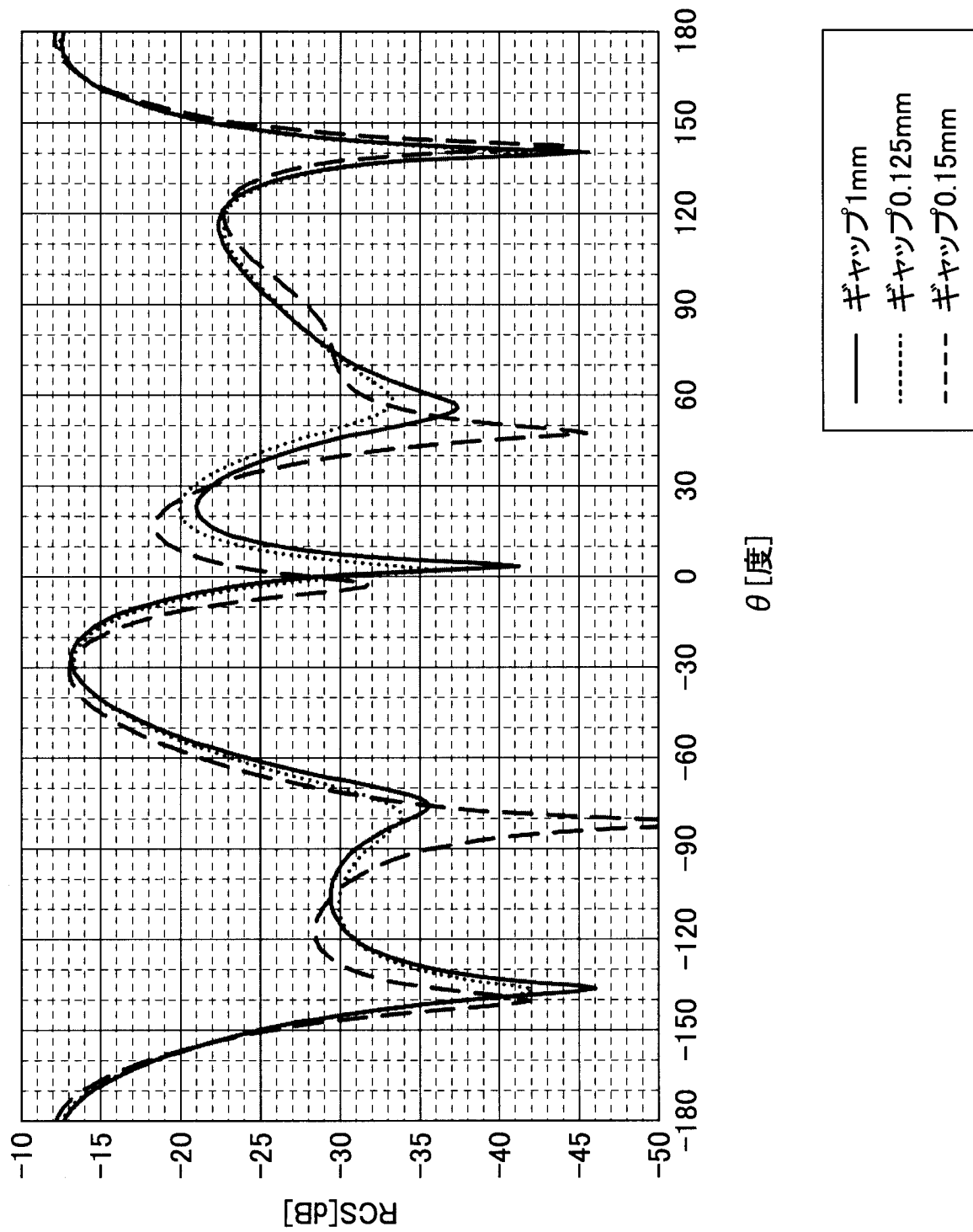
[図31]



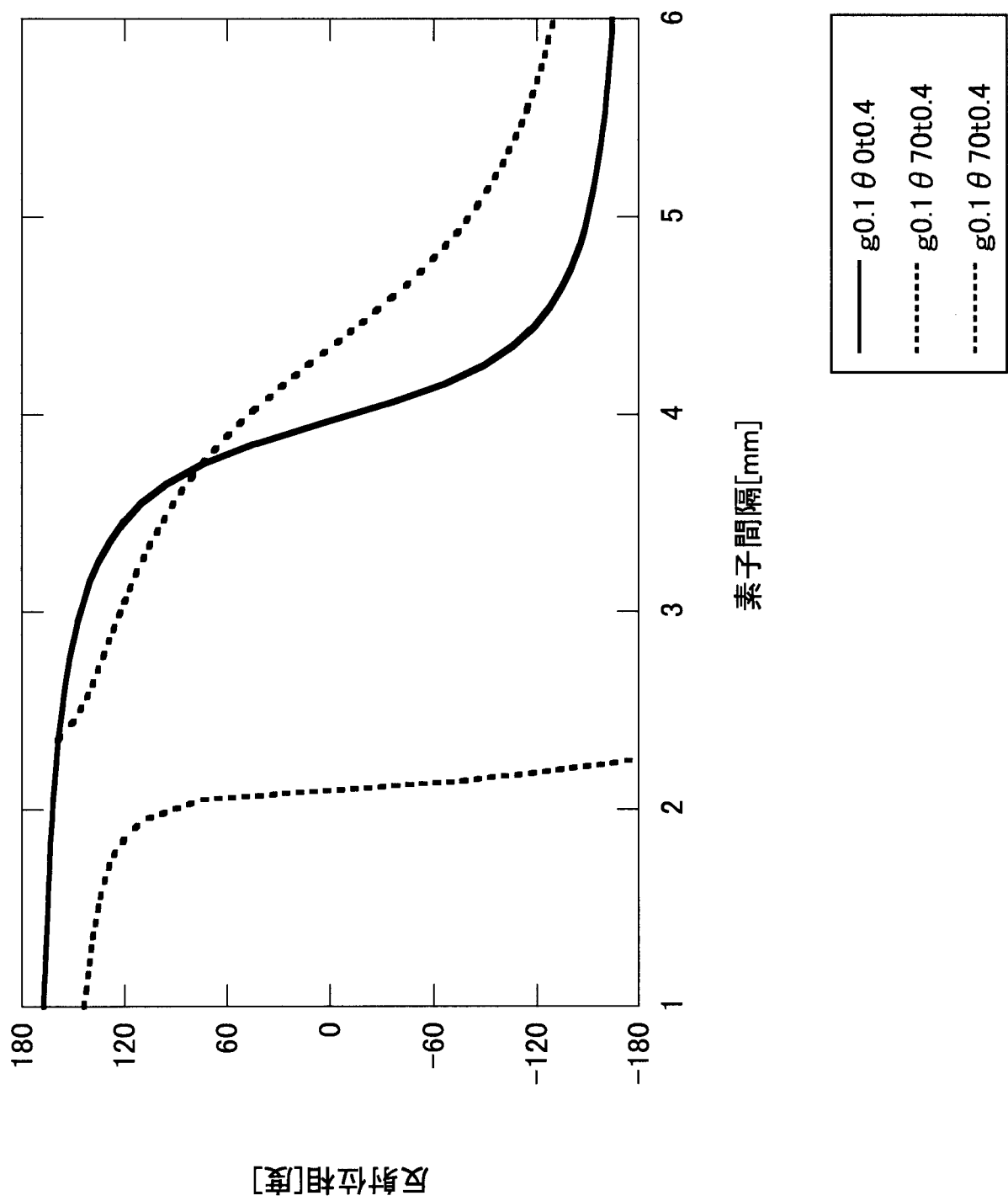
[図32]



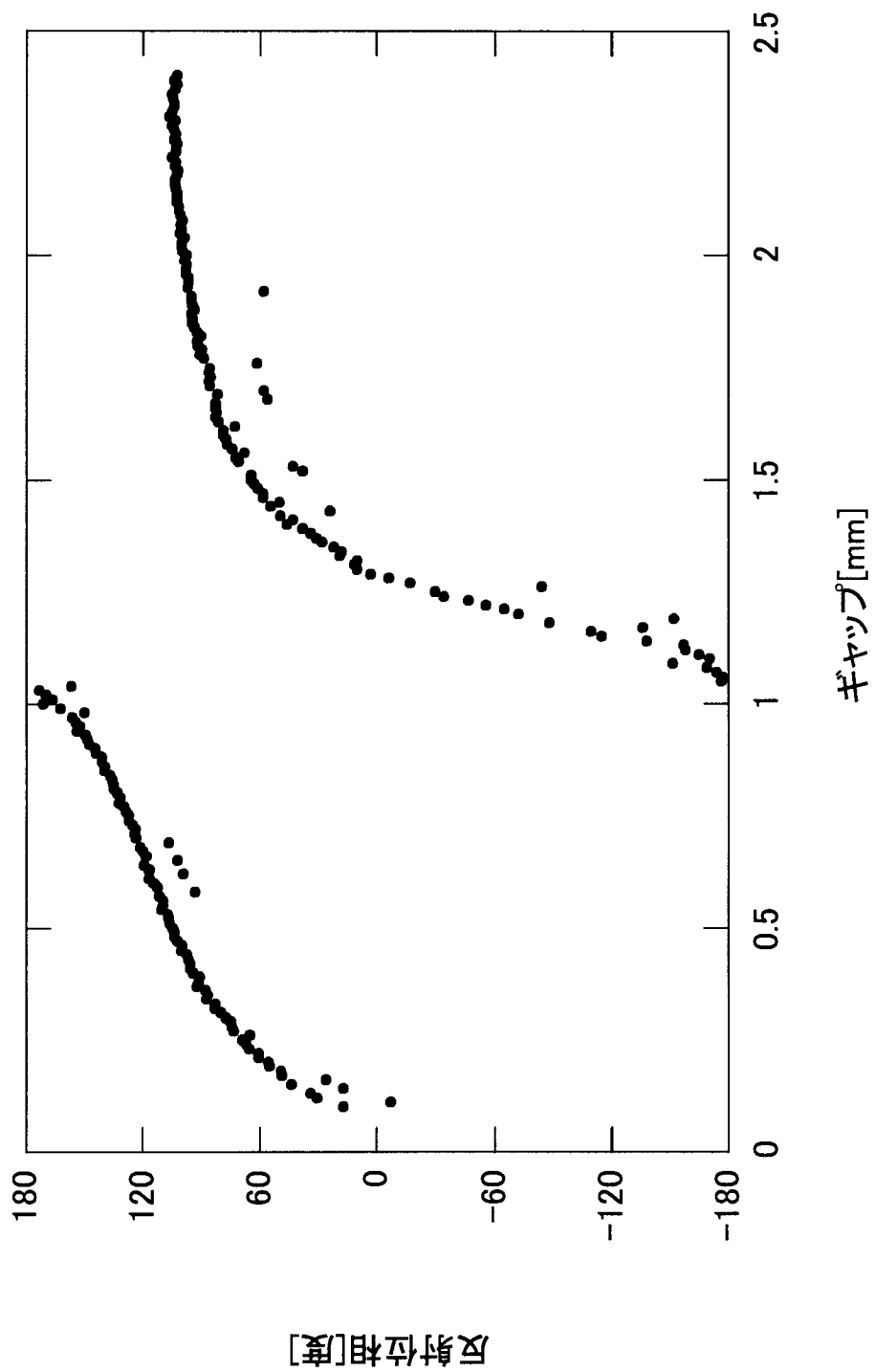
[図33]



[図34]



[図35]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/081294

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01Q15/14 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01Q15/14

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2013

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2013 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2013

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CiNii

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2009-207078 A (Mitsubishi Electric Corp.), 10 September 2009 (10.09.2009), entire text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 2008-147763 A (Mitsubishi Electric Corp.), 26 June 2008 (26.06.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 2011-019021 A (NTT Docomo Inc.), 27 January 2011 (27.01.2011), entire text; all drawings (Family: none)	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
19 February, 2013 (19.02.13)Date of mailing of the international search report
26 February, 2013 (26.02.13)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/081294

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2004-514364 A (HRL Laboratories, L.L.C.), 13 May 2004 (13.05.2004), entire text; all drawings & US 6483481 B1 & GB 2385994 A & WO 2002/041447 A1 & DE 10196911 T & AU 9665601 A & TW 543237 B	1-10
P,A	Tamami MARUYAMA et al., "Design of Mushroom Reflectarray using dual resonance at TM oblique incidence", The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Sogo Taikai Koen Ronbunshu, 2012 Nen_Tsushin (1), 164, 06 March 2012 (06.03.2012), The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 06 March 2012 (06.03.2012)	1-10

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01Q15/14(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01Q15/14

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 3 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 3 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 3 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

CiNii

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2009-207078 A（三菱電機株式会社）2009.09.10, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-10
A	JP 2008-147763 A（三菱電機株式会社）2008.06.26, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-10
A	JP 2011-019021 A（株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ）2011.01.27, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-10

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

1 9 . 0 2 . 2 0 1 3

国際調査報告の発送日

2 6 . 0 2 . 2 0 1 3

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

麻生 哲朗

5 K

4 6 8 4

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 5 5 6

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2004-514364 A (エイチアールエル ラボラトリーズ, エルエル シー) 2004.05.13, 全文, 全図 & US 6483481 B1 & GB 2385994 A & WO 2002/041447 A1 & DE 10196911 T & AU 9665601 A & TW 543237 B	1-10
P, A	丸山珠美, 他 4 名, TM 斜め入射における二共振特性を用いたマッシ ュルーム・リフレクトアレーの設計, 電子情報通信学会総合大会講 演論文集, 2012 年_通信(1), 164, 2012-03-06, 電子情報通信学会, 2012.03.06	1-10