

FDTD法を用いた誘電体レンズ装荷導波管

スロットアレーアンテナの整合

佐藤 郁弥*・伊藤 桂一・宮田 克正

Matching of Waveguide Slot Array Antenna with Dielectric Lenses by FDTD method

Ikuya SATO*, Keiichi ITOH and Katsumasa MIYATA

(平成24年12月12日受理)

Recently, some research papers about waveguide slot array antenna with dielectric lenses are announced. We made a study on impedance matching of a waveguide slot array antenna with dielectric lenses by the FDTD method. The voltage standing wave ratio (VSWR) of a prototype 22-slot waveguide antenna terminated by a non-reflective termination at the antenna end was initially 2.033. However, when a matching was properly done, the VSWR was found to reduce down to 1.04. Therefore, the impedance matching of a waveguide slot array antenna with dielectric lenses can be examined and simulated by the FDTD method.

1. 序論

導波管の壁面にスロット穴を開けてスロットからの漏れを放射素子として利用したアンテナを導波管スロットアンテナと呼ぶ。導波管に複数のスロットを設けてアレー化した場合は導波管スロットアレーアンテナと呼ばれる。導波管スロットアレーアンテナは主にレーダなどの大規模システムと利用されることが多いが、近年、ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) などの小型アンテナとしての用途も注目されている^[1]。

また、小型で高効率なアンテナを開発することを目的に、スロット開口面に小型球形の誘電体レンズを装荷した場合について研究報告がされている^[2]^[3]。レンズアンテナは重く、かさばることが問題であるが、提案している誘電体レンズであれば小型軽量であり、可搬性に優れる。また、小型でも十分な収束性があることが既に報告されている^[2]。ただし、同アンテナの高性能化のためには導波管内の定在波比が小さいこと、すなわち反射が入力側において小さいことが要求される。

導波管内ではスロット穴からの反射が必ず発生す

るため、入射波と重なり定在波が発生する。このため反射波を打ち消すために整合をとる必要がある。整合を行う方法としては、導波管内にビスを挿入して反射を抑制する方法がある^[4]。

従来方法では実験を中心に適切なビス挿入位置について研究がなされてきた^[5]。しかし、スロット数が多い場合は挿入するビスの本数も増えるため、試作および測定に係る労力は少なくない。そこで本研究では電磁界解析手法の一つであるFDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いて誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナの整合を取ることがを試みた^[6]。FDTD法を用いて数値的に解析することができれば、ビス挿入位置などのパラメータを容易に変更することができ、アンテナ設計の効率化が期待される。

本研究では最初にFDTD法による計算結果の妥当性について検討する。1スロットの場合についてアンテナのモデリングを行い、計算結果と測定結果の比較を行った。次に22スロットの誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナを対象にして数値解析的にビス挿入位置、深さ、個数の各ビス挿入パラメータの探索を行う。最終的には電圧定在波比 (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) をアンテナ入力側で1.1以下とすることが目標である。

* 秋田高専卒業生 (現: 株式会社エヌ・ティ・ティ エムイー)

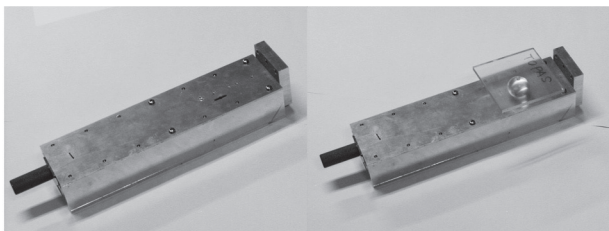
2. 誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナ

2.1 誘電体レンズと導波管スロットアンテナ

図2.1に試作した1スロットの誘電体レンズ装荷導波管スロットアンテナの概観を示す。導波管スロットアンテナはアルミニウム材を切削してWRJ-10規格(22.9mm×10.2mm)の導波路を設け、その上に厚さ1.5mmのアルミニウム材でふたをしている。誘電体レンズの材料はポリスチレンであり、直径は20mm、比誘電率は2.2である。スロットおよび誘電体レンズの寸法と形状を図2.2に示す。本研究ではスロットに誘電体レンズを装荷するため、スロット形状が小判型になっておらず、スロット中央部に直径3mmの穴が空いている。なお、スロットの導波管中心からのオフセット量は7.5mmで固定とした。

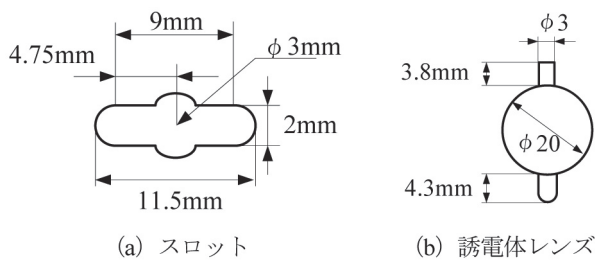
同アンテナをアレー化した場合、図2.3に示すように各スロットを配置する。すなわち、スロットは千鳥状に配置し、スロットオフセット量は導波管中央から7.5mm、スロット間隔は15mmとした。

本研究において対象周波数は12GHzである。こ



(a)誘電体レンズ非装荷時 (b)誘電体レンズ装荷時

図2.1 導波管スロットアンテナ



(a) スロット (b) 誘電体レンズ

図2.2 スロットおよび誘電体レンズの寸法と形状

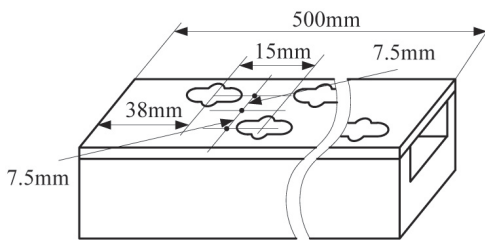


図2.3 導波管スロットアレーアンテナ

の時の波長は25mmとなり、提案している誘電体レンズの直径は波長より小さい。また、導波管内の波長は約30mmとなり、スロット間隔はグレーティングローブを抑制するために管内波長の半分に設定されている^[4]。

2.2 FDTD解析モデル

FDTD法のセルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.5\text{mm}$ としている。また、時間ステップ Δt はCourantの安定条件を満たす必要がある^[7]。今回はセルサイズより $\Delta t = 9.623 \times 10^{-13}\text{s}$ とし、定常状態となる3,000ステップまで計算した。

本研究の解析対象である導波管はほとんどが金属壁で構成されるため、電界の接線成分を0とすることにより容易にモデリングすることができる。しかし、FDTD法ではセルの形状は立方体であるため、球形の誘電体レンズは階段状に近似してモデリングを行った。

図2.4に22スロット導波管スロットアレーアンテナの解析モデルの全体図を示す。励振源としてTE₁₀モードの電界 E_z を給電部から与えている。磁界を与えていないため電界は導波管の長さ方向に対して正負の両方向に伝搬するが、給電部から終端方向に進む成分と、逆方向に進んで給電部から $\lambda_g/4$ 離れた金属板で反射した成分が同相となり合成されたものが入射波となる。導波管の終端にはPMLを用いており、終端からの反射はないものとしている。

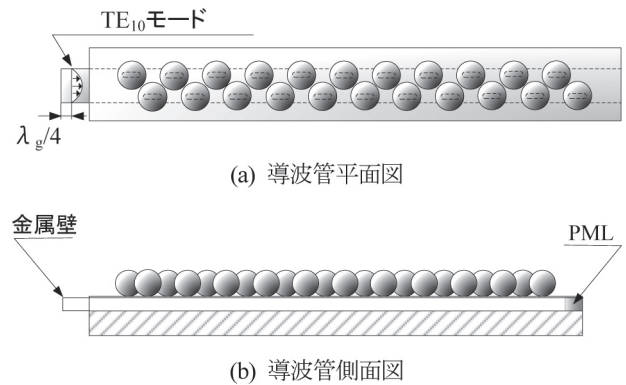


図2.4 導波管の全体図

2.3 ビスによる整合

アンテナ内に進行波を入射し、反射が起きると、進行波と合成されて定在波となる。導波管内に定在波が発生したときの様子を図2.5に示す。定在波の大きさを表すために電圧定在波比 S が用いられ、(1)式を用いて求められる。

$$S = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (1)$$

ここで V_{\max} , V_{\min} は定在波の最大値と最小値である。電圧定在波比が大きいとアンテナの効率は著しく低下する。そこで、反射波を打ち消し、定在波を抑制することが必要となる。本研究では反射波を打ち消すために図2.6に示すビスを挿入してインピーダンス整合をとることを試みた。

本研究では図2.6(a) に示すビスを導波管の天板(導波管上部広壁面)に挿入することで反射を抑制している。図2.6(b) にビス挿入時の導波管の天板とビスの様子を示す。天板の厚さが1.5mmである

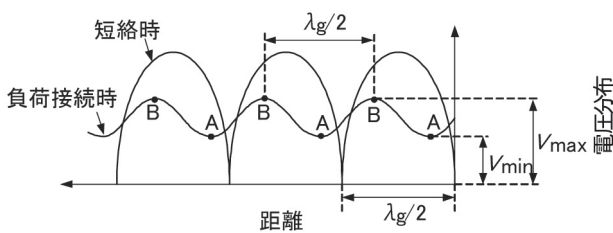


図2.5 導波管内の定在波の様子

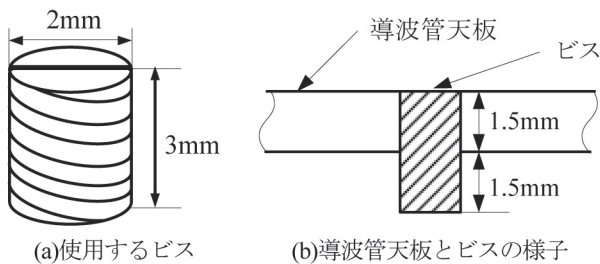
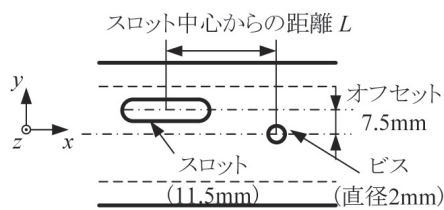
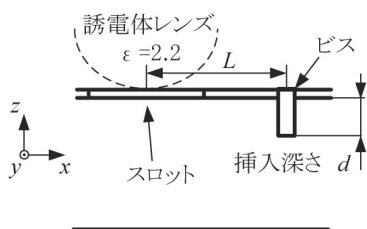


図2.6 ビスの概念図



(a) 平面図



(b) 側面図

図2.7 ビスの挿入モデル

のでビスの長さが3.0mmであれば、導波路内には1.5mmのビスが挿入されることになる。

整合を取るためにはビスをどこに、どれくらい挿入するかが重要となる。本研究ではビス挿入パラメータとして、図2.7に示すスロット中心からの距離 L と挿入深さ d をパラメータとして計算を行った。

3. 解析モデルの妥当性の検証

3.1 電圧定在波比の測定

電圧定在波比の測定方法について説明する。図3.1に定在波測定系の概略図を示す。測定を行う前に波数チャートと呼ばれるチャートを作成する必要がある。波数チャートを作成するために、まず、定在波測定器の終端に短絡板を設け短絡する。このとき図2.5の短絡時のような定在波が発生し、電圧分布が0になる点が $\lambda_g/2$ ごとに現れる。この点の距離を定在波測定器を用いて測定周波数ごとに測定し、縦軸を波数、横軸を定在波測定器の目盛として図3.2のような波数チャートを描く。波数チャートが得られれば、反射特性をアドミタンスチャートに描くことができる。

アドミタンスチャートは作成した波数チャートから読み取った波数と、VSWRメータから読み取った定在波比を用いて作成する。アドミタンスチャートを用いることで、負荷の基準点でのアドミタンス

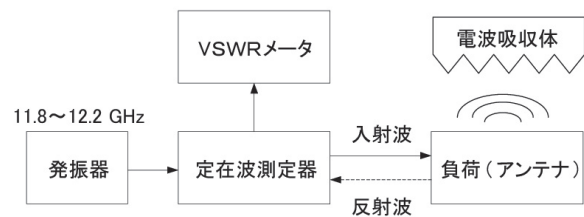


図3.1 定在波測定系の概略図

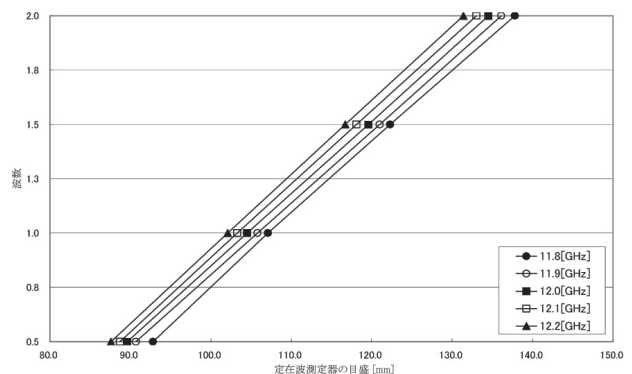


図3.2 波数チャート

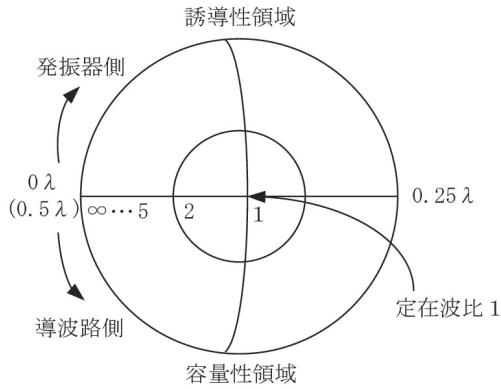


図3.3 アドミタンスチャートの例

がわかる。図3.3に示すようにアドミタンスチャートの上側の領域は誘導性を示し、下側の領域は容量性を示している。導波管に挿入されたビスは容量性ポストとして機能することが知られているため^[4]、アンテナのアドミタンスが誘導性になる位置を求め、その点にビスを挿入することで整合が達成でき、反射を抑制することができる。

3.2 測定結果と計算結果の比較

次に測定結果と解析結果の比較を行う。ここでは1スロットの場合について検討を行った。はじめに3.1節で述べた方法を用いてビス挿入パラメータを決定した。次にFDTD法を用いて数値計算を行い、測定結果との比較を行った。

表3.1より測定結果と計算結果を比較してみると、計算結果は測定結果よりも大きくなるが、その差は最大でも0.052であり、条件の違いによる傾向は一致していることが分かる。以上の結果より、FDTD法を用いた効果的なビス挿入パラメータの導出は可能であると考えられる。

表3.1 解析結果と測定結果の定在波比の比較 ($f=12\text{GHz}$)

条件	測定結果	解析結果
スロットのみ(非整合時)	1.110	1.132
誘電体レンズ装荷(非整合時)	1.059	1.065
誘電体レンズ装荷+ビス挿入時(整合時)	1.010	1.062

4. FDTD法による誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナの整合

4.1 スロットアレーアンテナの整合

誘電体レンズ装荷スロットアレーアンテナの整合について検討する。挿入するビスは各スロットの近傍に計22個挿入する。図2.7に示す L, d をパラメータ

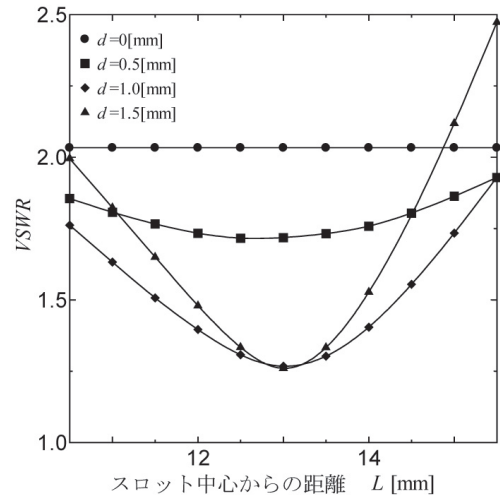


図4.1 L, d をパラメータとしたVSWRの計算結果

タとして計算を行った結果を図4.1に示す。図よりビス非挿入時 ($d=0\text{mm}$) の定在波比が2.033であるのに対してビス挿入時では $L=13.0\text{mm}$ 、 $d=1.0\text{mm}$ の条件で定在波比が1.268、また、 $L=13.0\text{mm}$ 、 $d=1.5\text{mm}$ の条件でも1.261となり、電圧定在波比が低減されていることが確認できた。

$d=2.0\text{mm}$ の条件でビスを挿入すると、ビス非挿入時よりも定在波比が大きくなることから、効果的な深さは $d=1.0\sim 1.5\text{mm}$ であることが考えられる。しかし、ビス挿入によって反射波が抑制されたもののまだ定在波比が大きいため、次節では更にビスを追加挿入して反射抑制を試みる。

4.2 ビスの追加挿入の効果

22個のビスを挿入した状態から、更にビスを追加挿入し反射を抑制することを試みた。追加するビスの個数はできるだけ少なく、効果が大きいことが望ましい。

まずは追加ビスの効果について検討する。アンテナの任意の位置において、図4.2に示すように既に挿入されているビスとビスの間の中心付近で追加ビスの挿入位置 a を変えて計算を行った。図4.3に示すように、前のビスより $\lambda_g/4$ 離れたところに追加挿入したとき、すなわち、ちょうど中間に挿入した時

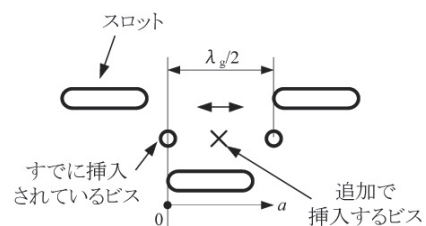


図4.2 追加挿入するビスの位置

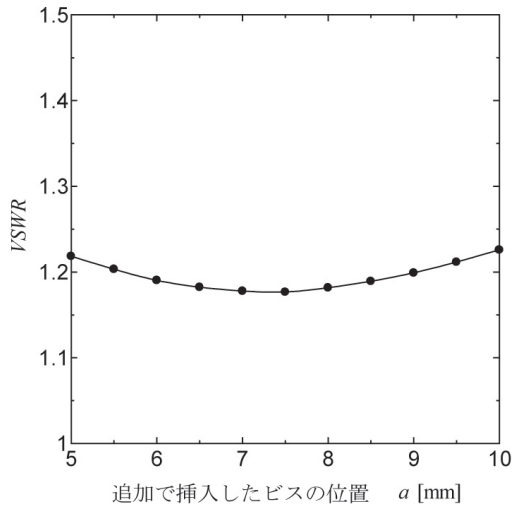


図4.3 追加挿入するビスの位置とVSWRの関係

に定在波比が最も低減されていることがわかる。これより、追加挿入したビスの効果を確認することができた。

次に、アンテナのどこにビスを追加挿入すればよいか検討した。以下の3つの条件において、それぞれビスを1個挿入した時の電圧定在波比の計算結果を表4.1にまとめる。挿入位置は前述のように最初に挿入したビスの間である。

- (a) 1スロット目と2スロット目の間（導波管給電側）
- (b) 11スロット目と12スロット目の間（同中央）
- (c) 21スロット目と22スロット目の間（同終端側）

なお、ビスの深さは $d=1.0\text{mm}$ と 1.5mm の2通りについて解析を行い、追加挿入するビスと既に挿入されているビスは全て同じ長さとした。

表4.1 ビス追加挿入時のVSWRの計算結果

挿入条件	ビス挿入深さ	
	$d=1.0\text{mm}$	$d=1.5\text{mm}$
1スロット目と2スロット目の間	1.313	1.171
11スロット目と12スロット目の間	1.294	1.181
21スロット目と22スロット目の間	1.260	1.259
ビス追加挿入なし	1.268	1.261
ビス非挿入	2.033	

表4.1より、 $d=1.0\text{mm}$ の場合はむしろ反射が大きくなり、 $d=1.5\text{mm}$ の場合は追加挿入したビスの効果が見られた。そして、導波管給電側にビスを追加挿入すると効果的であることが分かる。そこで $d=1.5\text{mm}$ で固定とし、図4.4の条件において追加挿入したビスの効果的な挿入位置を再探索した。

このときの計算結果を図4.5に示す。横軸はビス

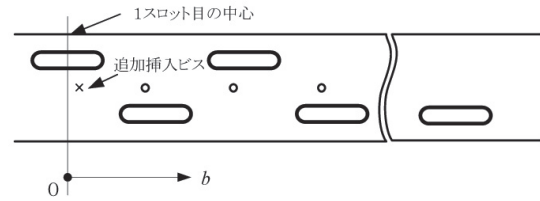


図4.4 追加挿入するビスのイメージ

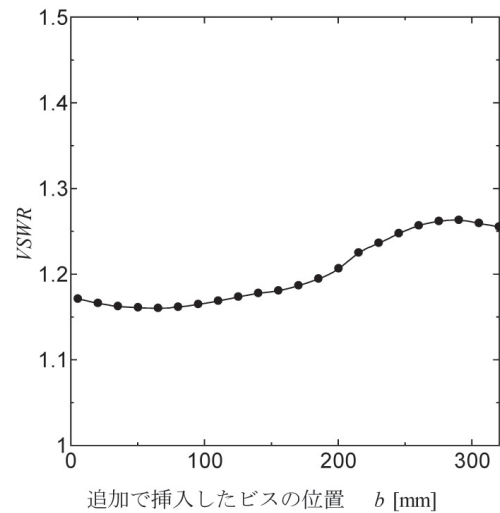


図4.5 ビス追加挿入時の位置とVSWR

を追加挿入した位置 b を示しており、基準は給電側から見て1スロット目の中心である。図4.5より、65.5mmの位置にビスを追加挿入したときに定在波比がもっとも小さくなり1.160となることがわかる。

4.3 追加ビスの本数の検討

4.2節ではビスを追加挿入して計23個のビスを挿入することによって定在波比を低減させることができた。そこで追加挿入するビスの数を増やせばもっと電圧定在波比を低減する効果が得られるのではないかと考え、 $\lambda_g/2$ 間隔でずらしながら最大4個までビスを追加挿入し、電圧定在波比の計算を行った。計算条件を図4.6に、計算結果を表4.2に示す。

表4.2より追加挿入するビスの数を増やしていくと2~4個挿入した場合、電圧定在波比は1.1以下となり、目標値以下まで反射波を抑制することができた。また、3個ビスを挿入したときに電圧定在波比

表4.2 ビス追加挿入時のビス個数とVSWRの関係

追加挿入するビスの数[個]	ビス総数[個]	定在波比
1	23	1.160
2	24	1.077
3	25	1.041
4	26	1.097

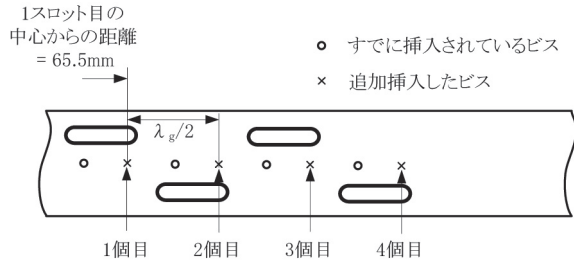


図4.6 ビス追加挿入時のイメージ

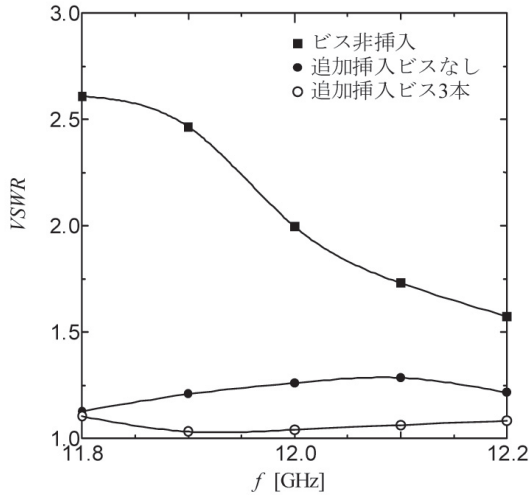


図4.7 VSWRの周波数特性

は最も小さくなった。

追加ビスを3本挿入した時の電圧定在波比の周波数特性を図4.7に示す。図に示すようにビス非挿入時に比べ、挿入時には反射が抑制され、定在波比が低減していることを確認した。特に、ビスを3個追加挿入した場合は、電圧定在波比が低減しているだけでなく、周波数によるばらつきも抑えられており、計算した周波数帯域にわたって整合状態になっていることを確認した。

4.4 終端短絡時の整合

これまでは導波管終端を無反射終端として検討してきた。4.1～4.3節で述べてきたビス挿入パラメータの決定方法と同様の手順により導波管終端を短絡した場合のアンテナの整合について検討した。このように導波管終端を短絡した場合、共振アレーアンテナまたは定在波励振アレーアンテナと呼ばれ、導波管を無反射終端した場合は非共振アレーアンテナまたは進行波励振アレーアンテナと呼ばれる^[8]。

結果は表4.3に示すように追加ビスを5個挿入して計27個のビスを挿入したときに電圧定在波比は最小となった。ただし、4.3節の結果と比べると電圧

表4.3 終端短絡時のビス個数とVSWRの関係

挿入条件	ビス総数[個]	定在波比
ビスなし	0	2.081
各スロットに挿入	22	1.569
追加挿入ビス1個	23	1.465
追加挿入ビス2個	24	1.382
追加挿入ビス3個	25	1.323
追加挿入ビス4個	26	1.286
追加挿入ビス5個	27	1.279
追加挿入ビス6個	28	1.290
追加挿入ビス7個	29	1.319
追加挿入ビス8個	30	1.356

定在波比は大きく、終端からの反射の影響を除去しきれていない様子がうかがえる。しかし、追加ビスを含めてビスを挿入することにより、終端短絡の条件下でも一定の反射波抑制効果があることを確認した。

5. 結論

本研究では、誘電体レンズ装荷導波管スロットアレーアンテナの定在波比をできるだけ小さくするために、FDTD法を用いて数値解析的にビスの挿入位置および深さの探索を行った。FDTD法を用いてアンテナのモデル化ができれば、寸法などのパラメータを容易に変更することができ、アンテナ設計の効率化が期待される。

測定結果との比較により、FDTD法のモデリングは妥当であり、ビス挿入パラメータの探索は可能であることを示した。そして、22スロット導波管スロットアレーアンテナの各スロット近傍にビスを挿入し、さらにビスを追加挿入することにより電圧定在波比を低減することができた。計算結果より、終端条件が短絡時では反射を打ち消すことは難しいが、無反射終端においては目標としていた1.1以下の電圧定在波比を達成することができた。以上の結果より、FDTD法によるアンテナの整合方法について述べ、その有用性について示すことができた。

今後の課題は、計算結果と測定結果がずれる原因について検討すること、使用する周波数領域に渡って整合を取る方法について検討することが挙げられる。

参考文献

- [1] K. Sakakibara, J. Hirokawa, M. Ando, N. Goto, "Periodic boundary condition for evaluation of external mutual couplings in a slotted waveguide array," IEICE Trans. Communications, Vol.E79-B, No.8, pp.1156-1196, 1996.
- [2] 伊藤桂一, 宮田克正, 五十嵐一, "球形誘電体レンズ装荷による導波管スロットアンテナの放射特性改善", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-B, No.7, pp.1185-1192, 2009.
- [3] 伊藤桂一, 渡部雄太, 山崎博之, 宮田克正, "誘電体装荷導波管スロットアンテナの放射特性", 平成19年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 19, p.20, 2007.
- [4] 松田豊稔, 宮田克正, 南部幸久, "電波工学", コロナ社, 2008.
- [5] 伊藤桂一, 渡部雄太, 山崎博之, 宮田克正, "誘電体装荷スロットアレーアンテナの整合", 平成18年度電気関係学会東北支部連合大会, 2B5, p.61, 2006.
- [6] 佐藤郁弥, 伊藤桂一, 宮田克正, "電体レンズ装荷導波管スロットアンテナの整合に関するFDTD解析", 平成21年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 91, 2009.
- [7] 宇野 亨, "FDTD法による電磁界およびアンテナ解析", コロナ社, 1998.
- [8] J. L. Volakis, *Antenna engineering handbook*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.