

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560489

研究課題名(和文) 高専の実習工場を活用した任意形状アンテナのビームフォーミング手法の開発

研究課題名(英文) Development of beam forming method for arbitrary shape antenna by using Kosen practice workshop

研究代表者

伊藤 桂一 (Itoh, Keiichi)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20290702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では導波管スロットアンテナを対象にして進化型計算手法を利用したアンテナ設計法を確立し、その有用性を示した。加えて、同手法により曲り部を有するアンテナについても解析および設計することが可能であることを示した。また、既存のマイクロ波帯測定システムを利用してミリ波帯における放射パターンの自動計測システムを構築し、ミリ波帯の試作アンテナの評価が可能となった。高専の実習工場および測定環境を活用して、アンテナの設計から試作、評価まで効率よく行うことができるアンテナラボを構築することができた。

研究成果の概要(英文)：In this work, we have established the antenna design method using the evolutionary calculation method about the waveguide slot antenna, and have showed its usefulness. In addition, it is possible to analyze and design the antenna with bend waveguide by the proposed method. Also, by utilizing the existing microwave measurement system, the millimeter-wave band automatic measurement system of the radiation pattern has been constructed. By using the antenna lab which consists of the practice workshop and the measurement environment, the efficiency of the antenna development has been improved greatly.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：導波管スロットアンテナ 進化型計算手法 FDTD法 導波管の整合

## 1. 研究開始当初の背景

導波管スロットアンテナはマイクロ波、ミリ波帯においてレーダーおよび通信用途に広く利用されており、伝送系のロスが少ないために高周波化への対応が容易であることが利点である。また、もう一つの利点としては加工精度が要求されるもののフライス盤などの金属を切削する工作機械さえあれば製作が可能であるため、開発から試作までを学校単位でも行えることである。アンテナを開発する上で試作までスピードとコストは最大の課題となるが、全て学内の設備でまかなうことで効率的かつ迅速なアンテナ開発を行うことができる。

これまで導波管スロットアンテナの放射特性を改善することを目的に、誘電体レンズ装荷型導波管スロットアンテナの開発を行ってきた。誘電体レンズは球形であり、波長より小さく、各スロットに装荷することができる。しかし、レンズ装荷導波管スロットアンテナをアレー化したとき、レンズの寸法や形状、比誘電率などの材料定数を考慮した設計方法の確立が課題であった。

そこで進化型計算手法をアンテナ設計に取り入れることで汎用性が高い設計法を確立したいと考えた。従来型の遺伝的アルゴリズム (GA) よりも少ない個体数であるが高い検索能力を有する microGA と、目的関数の評価のために電磁界解析手法の一つである FDTD (有限差分時間領域) 法を組み合わせたアンテナの最適化設計法について検討してきた。目的関数およびアンテナパラメータの設定を適切に行うことにより、所望の部位の外形形状にフィットした任意形状のアンテナでも設計できるのではないかと考えた。

特に、設置場所が曲面の場合、パッチアンテナなどのプリント基板であれば設置場所に形状をフィットさせることは容易であるが、使用周波数が高い場合には損失が大きくなる。導波管スロットアンテナの高い伝送効率が高周波になるほど利点となるため、ミリ波帯での応用が期待される。しかし、金属で構成されるアンテナを曲げることは容易なことではなく、金属を切削加工して試作することになる。当然ながら、アンテナの形状が複雑になるほど試作は困難となる。

本校実習工場においてマシニングセンタ、NC 旋盤が設備更新され、従来よりも操作性や利便性が格段に向上した。計算により得られた設計データを工作機械用の CAD データに変換することができれば任意の形状での切削加工が可能であり、設計から試作まで効率のよいアンテナ開発を行うことができる。高専ならではの研究教育環境をアンテナラボとして活用することで、曲面を有する導波管でもスロットアンテナとして設計、試作できるのではないかと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究の目標は導波管スロットアンテナを用いた任意形状アンテナのビームフォーミング手法を確立し、設計結果から効率よく試作まで行う開発環境を構築することである。設置場所にフィットして外観、景観を損なうことなく、しかも高周波帯まで通信可能なアンテナの設計・試作を行う。

この目標を達成するために研究期間内に以下について検討する。

(1) 設計パラメータを実数型遺伝子として扱うことで進化型計算手法をアンテナの最適化設計を行う。本研究では進化型計算手法の中でも遺伝子数が少なく済む microGA をアンテナ設計に応用する。本研究では適切なアンテナパラメータの設定、適切な目的関数および拘束条件について検討することでアンテナの進化型設計手法を確立する。

(2) 本研究の目的は、曲面にフィットする導波管スロットアンテナの設計を行うことである。曲面を有する導波管スロットアレーアンテナから、所望の放射パターンを実現するビームフォーミング手法を確立する。

(3) 学内の実習工場のマシニングセンタを活用することで試作スピードは格段に向上する。最適設計された結果から自動的に CAD またはマシニングセンタのデータを生成することで効率のよい試作フローについて検討する。

(4) 導波管スロットアンテナの特徴を活かすためにも高周波への応用を検討する。ミリ波帯において本手法の有効性を検証し、開発したミリ波アンテナの評価をするために必要となるミリ波帯測定環境を構築する。

## 3. 研究の方法

本研究の目標は導波管スロットアンテナを用いた任意形状アンテナのビームフォーミング手法を確立し、設計結果から効率よく試作まで行う開発環境～高専独自のアンテナラボ～を構築することである。

研究当初はマイクロ波帯においてアンテナ設計法の確立と測定環境の整備に重点を置く。将来的にミリ波への応用を考えるとミリ波アンテナの試作および測定環境の構築が必要となる。ミリ波帯測定環境の構築には時間がかかることを考慮して研究初年度から行う。以下に各研究の内容および方法について述べる。

(1) 本研究では進化型計算手法の一つである microGA と電磁界解析の一手法である FDTD 解析を組み合わせるアンテナの進化型設計手法を確立する。microGA は GA の一種であり、比較的少数の個体により交叉を繰り返し、エ

リート個体を保存し続ける手法である。図 1 にアルゴリズムを示す。本研究では FDTD 法は目的関数と拘束条件の評価に用い、アンテナ設計パラメータをそのまま取り扱うことができる実数型遺伝子を採用する。最適設計に必要な適切なアンテナパラメータと拘束条件および目的関数を決定する。

また、同手法をアンテナの整合にも応用し、提案しているレンズ装荷導波管スロットアンテナのインピーダンス整合効率の改善も行う。

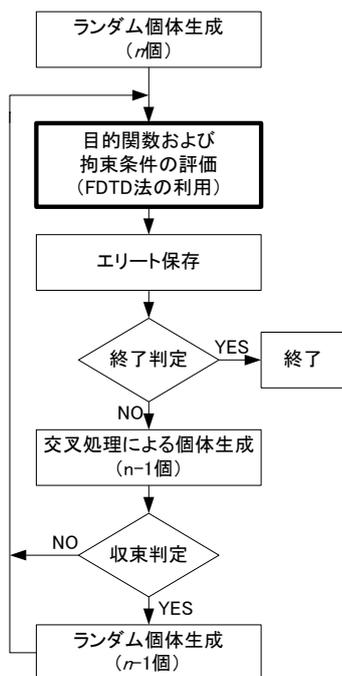


図 1 microGA のアルゴリズム

(2) 導波管スロットアンテナを用いることによりミリ波帯アンテナにも本研究で提案している手法が有効であることを示したいと考えている。試作アンテナの評価のため、ミリ波帯における放射パターンの測定ができるように測定系の構築を行う。最終的には既設の測定環境にミリ波コンポーネントを組み込むことで放射パターンを自動計測できるように整備する。

(3) 従来はアンテナ設計を行っても図面を引く作業と図面から加工のためのプログラミングが必要であった。マシニングセンタによるアンテナ試作を効率よく行うために、本研究では進化型計算手法による設計結果から CAD データへの変換法について検討を行う。

(4) 実際のアンテナではアンテナ開口面がプラスチックなどによって覆われ、保護されている場合がある。アンテナ表面を誘電体でカバーした場合の設計を行うために、本研究では誘電体レンズを装荷した場合の平面アンテナの特性解析を行い、誘電体装荷による効果について検討する。

(5) 最終的には任意形状アンテナの設計が目標であるが、本研究では曲り部を有する導波管スロットアンテナについて解析的に検討し、任意方向へビームが照射するような指向性アンテナの設計方法について検討する。

#### 4. 研究成果

以下に本研究で得られた研究成果をまとめる。

##### (1) 進化型計算手法によるアンテナの設計

図 1 に示した進化型計算手法によるアンテナ設計法を用い、8 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の低サイドローブ設計および放射パターン制御を行った。12 GHz のマイクロ波帯において、サイドローブレベル比-30 dB 以下に設定して設計パラメータを求めた結果、図 2 に示すようにほぼ希望通りの特性が得られることを計算により確認した。また、同手法によりファンビーム特性など放射パターンの制御も可能であることを確認した。

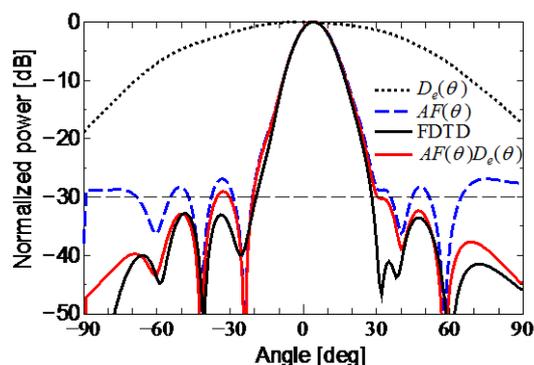


図 2 進化型計算手法による設計結果 (低サイドローブ設計)

また、同手法をアンテナの整合に応用した。導波管スロットアンテナに容量性ポストとなるビスを挿入し、11.8~12.2 GHz 帯域における整合をとることを試みた。最適なビス挿入パラメータを進化型計算手法により求めた結果、図 3 に示すように広い帯域で入力側の電圧定在波比 (VSWR) を低減させることができた。

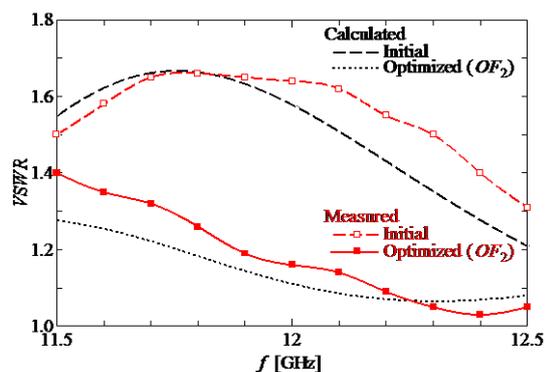


図 3 進化型計算手法による設計結果 (インピーダンス整合)

以上の結果より、進化型計算手法をアンテナ設計に応用し、設計法を確立するとともに、その有用性について明らかにした。

### (2) ミリ波帯測定環境の構築

既設のマイクロ波帯測定環境に 76 GHz のミリ波コンポーネントを組込み、放射パターンの自動計測環境の構築を行った。送信アンテナと受信アンテナを直線的に配置した場合の測定システムの概要を図 4 に示す。受信した信号を中間周波数にダウンコンバートすることにより既存のスペクトラムアナライザで測定できるようにしている。同測定環境による放射パターンの測定結果を図 5 に示す。FDTD 法による計算結果ともほぼ一致しており、問題なく測定できていることを確認した。

現在はミリ波帯コンパクトレンジ環境の実現に向けて研究を進めており、入射波の平面度の評価なども行う予定である。

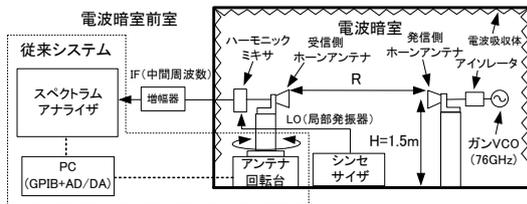


図 4 ミリ波帯測定環境の例

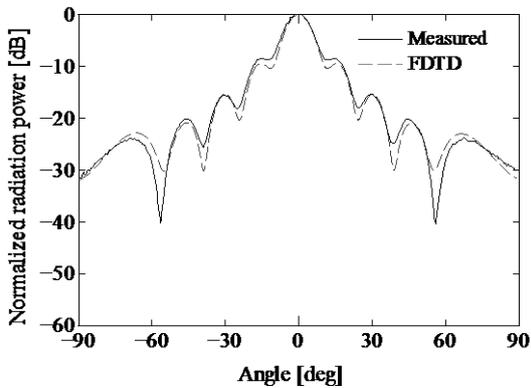


図 5 ミリ波帯放射パターンの測定結果

### (3) アンテナ試作の効率化

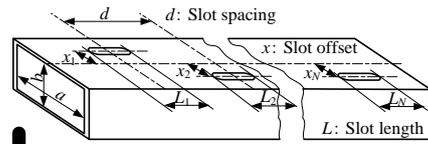
これまで学外に依頼していたアンテナ試作を学校内で試作することにより試作にかかるコストと時間は大幅に簡略化される。さらにアンテナの研究および開発の速度を加速させるために、アンテナの設計から試作までの効率化を試みた。図 6 に示すように得られた設計パラメータからマシニングセンターで加工するための NC プログラムに変換するプログラムを作成し、問題なく試作できることを確認した。

### (4) 誘電体装荷アンテナの特性解析

図 7 のように平面アンテナに誘電体レンズを装荷した場合のレンズの効果について、FDTD 法を用いて解析を行った。レンズ装荷時、

FDTD optimization result (Unit: FDTD cell)

Slot No.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Slot length	16	16	17	17	17	17	16	16
Slot offset	8	13	12	14	14	11	13	10



Input slot parameter file

#### C code program

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
/*****
# Define constants */
/*****
int slotNUM = 8;
double slot[9];
double offset[9];
double slotx = 38;
:
int main(void){
nyuryoku();
save();
:
}
```



Automatic conversion

#### Created NC program

```
%
O0000
G90 G00 G40 G80
G91 G28 G00 Z0.
T212
M06
T212
G00 G90 G54 X38.00 Y-21.45
S2122
M03
G43 H0 Z100.
G98 G81 Z-1.6 R5. F84.9
X54.50 Y-32.45
:
X71.00 Y-21.45
X87.50 Y-32.95
X104.00 Y-19.45
X120.50 Y-34.45
:
```



Manufacturing by machining center

図 6 アンテナ試作フロー

非装荷時ともに設計パラメータを調整して最適化を行い、両者の放射パターンを比較した。結果は図 8 に示すようにレンズ装荷時に約 5 dB 改善することを確認した。設計法および効果については今後発表する予定である。

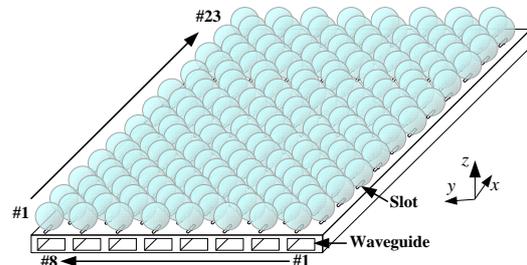


図 7 誘電体レンズ装荷平面アンテナ

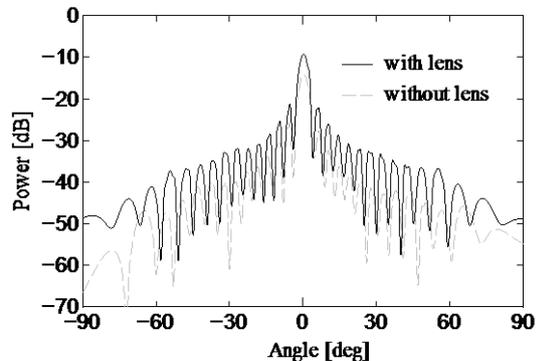


図 8 放射パターンの比較

### (5) 曲り部があるアンテナの解析

図 9 のコンフォーマルアンテナを例に、FDTD 解析および放射パターンの制御につい

て検討した。曲り部は立方体セルにより近似的にモデリングし、波長比 1/50 となるようセルサイズを十分細かくして計算を行った。放射パターン計算例を図 10 に示す。計算結果より、おおむね理論通りの放射パターンが得られることを確認した。

FDTD 法によって求められた主ビームの方向およびサイドローブ比などの計算結果を目的関数として扱うことにより、進化的計算手法による曲り部を有するアンテナの設計が可能であることが分かった。また、目的関数の計算負荷を軽減するために、コンフォーマルアンテナのアレーファクタを利用した指向性合成した結果を目的関数として利用する最適設計について現在研究を進めており、今後発表する予定である。

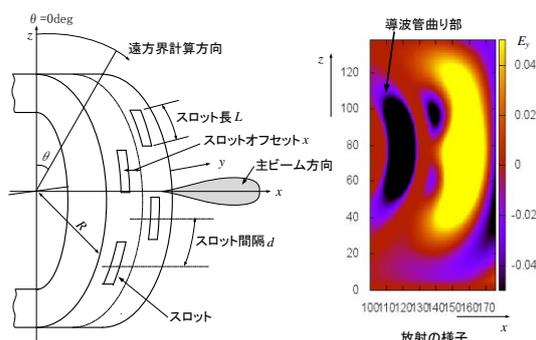


図 9 解析モデルと放射の様子

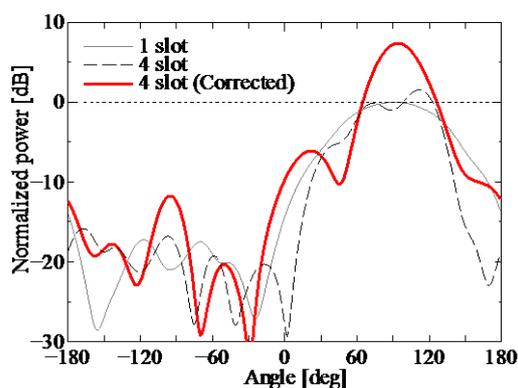


図 10 放射パターンの計算例

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ①伊藤桂一, 小松薫, 宮田克正, 五十嵐一, 電磁界解技術によるアンテナの整合, 日本 AEM 学会誌, 査読有, Vol. 22, No. 3, 2014, pp. 399-404

〔学会発表〕(計 20 件)

- ①伊藤桂一, 宮田克正, 五十嵐一, 曲り部を有するアンテナの解析と設計に関する研究, 第 20 回高専シンポジウム in 函館講演要旨集, P1-22, 2015
- ②Keiichi Itoh, Kento Watanabe, Katsumasa Miyata and Hajime Igarashi, FDTD simulation of waveguide slot array antenna with dielectric lenses, JSST2014

International Conference on Simulation Technology, OS6, pp. 40-41, 2014

- ③松田英昭, 奈良裕亮, 伊藤桂一, 田中将樹, 駒木根隆士, 宮田克正, 秋田高専電波暗室におけるミリ波測定環境の構築, 平成 26 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 84, 2014
- ④伊藤桂一, 宮田克正, 五十嵐一, 導波管スロットアンテナの放射パターン制御について, 平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 93, 2013
- ⑤松田英昭, 伊藤桂一, 鎌田拓海, 宮田克正, 導波管スロットアンテナの製作環境の構築, 平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 94, 2013

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.akita-nct.ac.jp/itok/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 桂一 (ITOH, Keiichi)

秋田工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号：20290702

### (2) 研究協力者

宮田 克正 (MIYATA, Katsumasa)

秋田工業高等専門学校・名誉教授

松田 英昭 (MATSUDA, Hideaki)

秋田工業高等専門学校・技術教育支援センター・技術専門職員

小松 薫 (KOMATSU, Kaoru)

前秋田工業高等専門学校

渡邊 健人 (WATANABE, Kento)

前秋田工業高等専門学校