

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19760565  
 研究課題名（和文） 衛星搭載送信機用マグネトロンの開発研究  
 研究課題名（英文） Research and Development of a Magnetron  
 for a Transmitter of a Satellite  
 研究代表者  
 三谷 友彦 (MITANI TOMOHIKO)  
 京都大学・生存圏研究所・助教  
 研究者番号：60362422

## 研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、電子レンジのマイクロ波加熱源として広く普及されているマグネトロンを衛星搭載送信機のマイクロ波送信管として新規開発することであった。真空環境下での熱的成立性を有するマグネトロンの開発研究、および2次元・3次元電磁界シミュレーションを用いたマグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力の安定化の検討を実施し、マイクロ波出力可変の位相制御マグネトロンの開発に成功した。

## 研究成果の概要（英文）：

The objective of the present study was to develop a magnetron, which is widely used as a microwave source of a microwave oven, for a transmitter of a satellite. I conducted research and development of a magnetron which will be thermally robust over vacuum condition. I investigated both frequency and output stabilization of a magnetron via 2D and 3D electromagnetic simulations. I newly developed a power-variable phase-controlled magnetron.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	540,000	3,840,000

## 研究分野：マイクロ波応用工学

科研費の分科・細目：総合工学・宇宙航空工学

キーワード：宇宙航空工学、マイクロ波送信管、宇宙利用、マグネトロン、熱設計、電磁粒子シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

衛星搭載マイクロ波送信管のほとんどは国内外を問わず進行波管であり、進行波管の高効率化、高出力化、小型・軽量化、長寿命・高信頼性化を目指した研究開発が行われている。一方、マグネトロンは安価・高効率な

マイクロ波電子管であり、電子レンジのマイクロ波加熱源として広く利用されている。

電子レンジのマイクロ波加熱源として広く普及している確立された背景から、マグネトロンに関する国内での学術的研究は応募者の所属する研究グループ以外ではほとんど

ど行われていない。海外ではレーダ等に用いられるパルスマグネトロンの大出力化・立ち上がり時間の短時間化等が研究されている。

このような国内外の現状から、応募者はこれまで SPS 用マグネトロンを目指した周波数スペクトルの狭帯域化、マグネトロンの周波数・位相制御機構の開発を行ってきた。また民生用マグネトロンの高効率化・低雑音化に取り組んできた。

上記の研究成果を踏まえ、かつマグネトロンは進行波管より安価・高効率であることから、衛星搭載送信機用マグネトロンの開発を行い、安価・高効率な衛星搭載用送信管の実現を目指すという研究構想の着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、マグネトロンを衛星搭載送信機のマイクロ波送信管として新規開発することであった。

本研究の全体構想として、(1)真空環境下での熱的成立性を有するマグネトロンの開発研究、および(2)マグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力の安定化、の2つのサブ課題を設定し、それぞれの設定目標を達成することで本研究全体の目標達成を目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 真空環境下での熱的成立性を有するマグネトロンの開発研究

実際にマグネトロンを衛星搭載用とするには、強制空冷を利用している民生用マグネトロンのままでは不可能である。本課題では、伝導・輻射のみの排熱手法を前提とした真空環境下で安定動作するマグネトロンの開発を以下の研究方法により目指した。

#### ①マグネトロンの熱フロー解析および排熱機構の設計検討

本補助金を用いて購入した熱解析ソフトウェアによりマグネトロンから発生する熱の流れを評価した。

#### ②真空環境下におけるマグネトロンの基礎特性測定

所有の真空チャンバを用い、大気環境下や真空環境下でのマグネトロンの基礎特性（温度特性、マイクロ波出力特性、DC-RF（直流-マイクロ波）変換効率特性、周波数特性）の測定を行った。真空環境下におけるマグネトロンの基礎特性測定の様子を図1に示す。

#### ③衛星搭載送信機用マグネトロンとしてのマイクロ波出力可変の位相制御マグネトロンの検討および開発

マグネトロンの発振周波数の安定化に関しては、過去の研究により陽極電流フィードバックによる位相制御マグネトロンの開発、

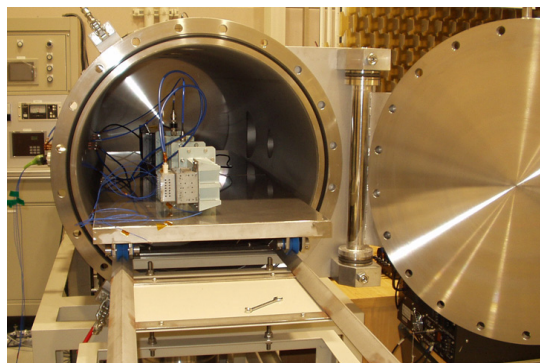


図1 真空環境下におけるマグネトロンの基礎特性測定の様子

あるいはコイルによる磁場制御を付加した位相振幅制御マグネトロンの開発が実施された。しかし位相制御マグネトロンはマイクロ波出力制御ができないという問題点があり、また位相振幅制御マグネトロンは制御設計が複雑であるという問題点があった。

そこで、衛星搭載送信機用マグネトロンとしての新たな発振周波数安定化手法として、マイクロ波出力可変の位相制御マグネトロンの検討および開発を実施した。具体的には、位相制御マグネトロンの基幹技術である注入同期法による周波数同期は従来通り利用し、新たな制御手法としてマグネトロン駆動電源を直接制御しない位相フィードバックループを組み合わせた回路を構築することでマイクロ波出力可変の位相制御マグネトロンを実現する。注入同期法とは、任意の発振源に対して外部信号を注入することにより、発振源の発振周波数が外部信号周波数に同期するという現象を利用した周波数安定化手法である。この注入同期法と位相フィードバックを組み合わせることにより、温度変化に依らず発振周波数が安定化されるとともに、マイクロ波出力の可変調整も可能となる。

#### (2) マグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力の安定化

マグネトロンを衛星搭載用とするには、真空環境下においても安定した発振周波数・マイクロ波出力が得られなければならない。一方、過去の研究からマグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力変化は温度変化に伴う印加磁場変化に依存することが分かっている。そこで、以下の研究方法によりマグネトロンの発振周波数およびマイクロ波出力の安定化を目指した。

#### ①電磁粒子シミュレーションによるマグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力の定量的解析

電磁粒子シミュレーションによるマグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力の解析

を行った。特にマイクロ波出力変化は印加電圧・印加磁界に対する依存度が大きいことから、入力電圧、磁場分布をパラメータとしたシミュレーションを行い、マグネトロン内部の電子挙動の解析を行った。

#### ②注入同期法を3次元マグネトロンシミュレータ内に実現させる手法の検討

新たに開発された3次元マグネトロンシミュレータを用い、注入同期法をシミュレーション内に実現させる手法を検討した。3次元マグネトロンシミュレータ内で注入同期法を実現することで、衛星搭載送信機用マグネトロンとしての有効な外部信号注入方法を検討することができる。また、マグネトロンに対する注入同期現象を計算機空間内で観察できることから、注入同期現象の時間発展に関する物理的考察を行うことができる。

### 4. 研究成果

#### (1) 真空環境下での熱的成立性を有するマグネトロンの開発研究

##### ①マグネトロンの熱フロー解析および排熱機構の設計検討

この研究成果により、マグネトロンの排熱機構において最も重要である陽極円筒での温度分布について検討を行った。マグネトロンを真空環境下で駆動させるために必要な熱設計および評価を行うための準備環境を整えた。

##### ②真空環境下におけるマグネトロンの基礎特性測定

真空チャンバ内でマグネトロンを駆動し、従来の強制空冷によるマグネトロン駆動、強制空冷のない大気圧下でのマグネトロン駆動との比較を行った。その結果、永久磁石温度と直流-マイクロ波変換効率との相関が見られることを突き止めた。

また、真空チャンバ内において、陽極を軸方向に分割したマグネトロンを用いた特性測定実験を実施し、マグネトロン内の電子運動を考察するとともに、マグネトロン内の排熱分布の考察を行った。この実験ではマグネトロンの発振周波数スペクトル測定も同時に行い、マグネトロンの発振周波数が温度と共に変化する結果が得られた。

この実験で明らかとなったマグネトロンの温度変化に対する発振周波数変化は、衛星搭載送信機用として利用する上での重要な問題となるため、発振周波数の安定化に関する検討を行った。

##### ③衛星搭載送信機用マグネトロンとしてのマイクロ波出力可変の位相制御マグネトロンの検討および開発

注入同期法による周波数同期と、移相器制

御によるマグネトロン位相のフィードバック機構を組み合わせることにより、マイクロ波出力可変の位相制御マグネトロンの開発に成功した。これにより、マイクロ波出力制御ができないという従来の位相制御マグネトロンの問題点を克服したとともに、マグネトロンの温度変化に対する周波数安定性、出力安定性の両方がある程度の範囲で補償することも可能となった。

#### (2) マグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力の安定化

##### ①電磁粒子シミュレーションによるマグネトロンの発振周波数・マイクロ波出力の定量解析

過去の研究で開発された2次元マグネトロン電磁粒子シミュレーションを用い、マグ

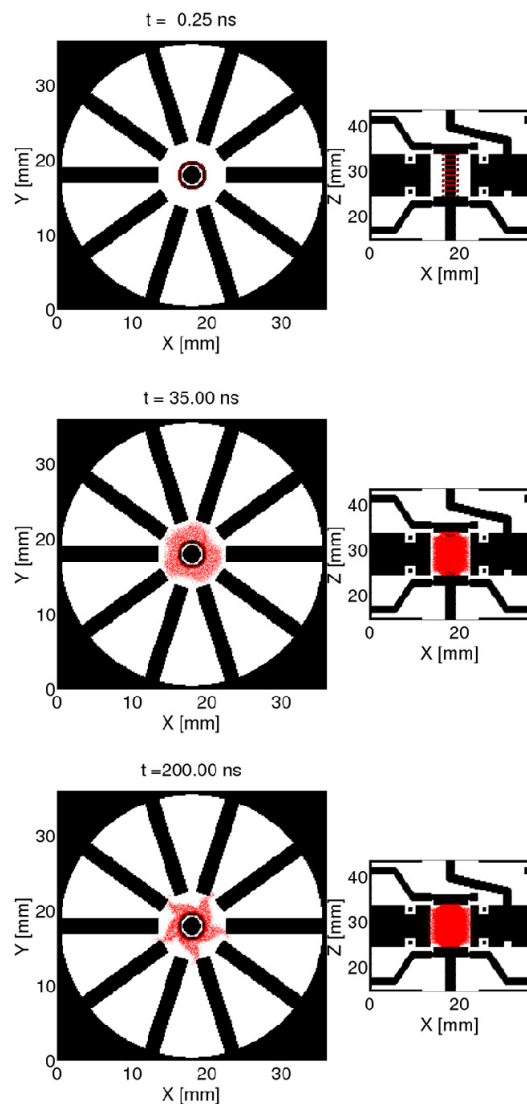


図2 3次元マグネトロンシミュレータによるマグネトロン内部粒子の時間発展

ネトロンの発振周波数、マイクロ波出力の定量評価を試みた。発振周波数スペクトルに関しては、陽極片間のギャップ電圧をモニターすることにより、種々のマグネトロンパラメータ変更によるスペクトル変化を観測できた。

また、3次元マグネトロンシミュレータが新たに開発され、マグネトロンの発振周波数、マイクロ波出力の定量評価が可能となった。具体的には、マグネトロンの形状、入力電圧、磁場強度等を計算機空間内で設定することにより、発振周波数スペクトルやマイクロ波出力の時間経過を定量的に観察することができるようになった。3次元マグネトロンシミュレータによるマグネトロン内部粒子の時間発展の一例を図2に示す。

計算機実験による定量評価により、(1)で実施された実験結果の裏付けが可能になった点、および実際のマグネトロンを試作しなくとも計算機空間内で設計変更することによりマグネトロンの発振効率を定量評価できるようになった点は、マグネトロンの開発を行う上でも非常に重要で成果と言える。

#### ②注入同期法を3次元マグネトロンシミュレータ内に実現させる手法の検討

マグネトロンの出力アンテナ側から強制的にマイクロ波信号を注入することにより、注入同期法を3次元マグネトロンシミュレータ内に実現させることに成功した。これにより、注入同期時のマグネトロン内の電子の振る舞いを定量的に観察できるようになった。

ただし、周波数スペクトルのQ値等の評価値において、実際のマグネトロンとマグネトロンシミュレータとの間には大きな差があるため、マグネトロンシミュレータの精度を上げることが今後の検討課題である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①T. Mitani, N. Shinohara, H. Matsumoto, M. Aiga, N. Kuwahara, and T. Ishii, Experimental Study on Axial Dependence of Anode Current Distribution in an Oven Magnetron, IEEE Transactions on Electron Devices, 査読有, vol. 57, no. 5, 2010, pp. 1167-1172

②三谷友彦、篠原真毅、松本紘、松嶋孝明、パルス駆動型位相制御マグネトロンの開発、電子情報通信学会論文誌・和文(C)、査読有、Vol. J90-C、No. 12、2007、pp. 873-881

③川崎春夫、三谷友彦、篠原真毅、松本紘、マグネトロンの温度環境による性能評価、電子情報通信学会論文誌・和文(C)、査読有、

Vol. J90-C、No. 5、2007、pp. 428-436

[学会発表] (計8件)

①三谷友彦、藤原暉雄、長野賢司、上田英樹、高橋文人、米倉秀明、平野敬寛、山川宏、篠原真毅、橋本弘藏、川崎繁男、安藤真、飛行船実験を通じたマグネトロン送電システムの重量に関する一考察、第12回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、2009/11/14、京都・宇治

②三谷友彦、木村光利、篠原真毅、電力可変型位相制御マグネトロンの研究開発、電子情報通信学会 電子デバイス研究会、2009/10/16、福井

③T. Mitani, H. Kawasaki, N. Shinohara and H. Matsumoto, A Study of Oven Magnetrons toward a Transmitter for Space Applications, Tenth IEEE International Vacuum Electronics Conference, 2009/4/29, Rome・Italy

④H. Usui, Y. Uranishi and T. Mitani, 3D Electromagnetic Particle-In-Cell Simulations of a Magnetron Based on the Realistic Model, Tenth IEEE International Vacuum Electronics Conference, 2009/4/29, Rome・Italy

⑤浦西洋輔、臼井英之、三谷友彦、実用的マグネトロン数値解析シミュレータの開発、電子情報通信学会 2009 総合大会、2009/3/17、愛媛

⑥T. Mitani, N. Shinohara and K. Hashimoto, A Fundamental Study on Spectral Purity of a CW Magnetron for Microwave Power Transmission, The XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science (2008 URSI General Assembly), 2008/8/14, Chicago・USA

⑦T. Mitani, N. Shinohara, H. Matsumoto, M. Aiga, N. Kuwahara and T. Ishii, Experimental Study on Axial Distribution of Anode Current in 2.45GHz Oven Magnetrons, Ninth International Vacuum Electronics Conference, 2008/4/24, Monterey・USA

⑧H. Kawasaki, T. Mitani and N. Shinohara, The DC-RF Conversion Efficiency Change of Magnetron, Eighth International Vacuum Electronics Conference, 2007/5/16, Kitakyusyu・Japan

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]  
学会発表⑥において、2008 URSI Young  
Scientistsを受賞した。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三谷 友彦 (MITANI TOMOHIKO)

京都大学・生存圏研究所・助教

研究者番号：60362422

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者