

異常ドップラー効果による表面波励起を用いた
弱い相対論的大電力遅波ミリ波源の研究
(課題番号 17340171)

平成 17-19 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (B)) 研究成果報告書

平成 20 年 5 月

研究代表者 小椋 一夫

(新潟大学自然科学系 教授)

目次

1	研究組織	1
2	研究経費	1
3	研究発表	2
3.1	雑誌論文	2
3.2	学会発表	3
4	研究成果	5
4.1	研究の背景	5
4.2	研究の目的	8
4.3	研究成果	13
4.4	まとめ	27
5	添付資料（雑誌論文 1－9）	31

1. 研究組織

研究代表者：小椋 一夫（新潟大学自然科学系 教授）

研究分担者：菅原 晃（新潟大学自然科学系 准教授）

2. 研究経費

交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 17 年度	12,600,000	0	12,600,000
平成 18 年度	1,400,000	0	1,400,000
平成 19 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	14,800,000	240,000	15,040,000

3. 研究発表

3.1 雑誌論文

- 1) “Performance of Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillators”, K. Ogura, K. Komiyama, M. Sakai, D. Yamada, H. Saito and H. Yamazaki, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.125, no.9 (2005) pp.733-738.
- 2) “Nonaxisymmetric Instabilities in Periodically Corrugated Cylindrical Waveguide with Low Magnetic Field”, H. Yamazaki, M. Iwai, Y. Suzuki, H. Takagi, O. Watanabe and K. Ogura, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.125, no.9 (2005) pp.739-743.
- 3) “Numerical Study of Electromagnetic Surface Wave on Corrugated Metal Surface”, O. Watanabe, T. Watanabe, K. Ogura, T. Imai and T. Cho, Plasma and Fusion Research, Vol.1 (2006) pp.025_1-025_2.
- 4) “Slow Cyclotron Instability due to Surface Modulation of Annular Beam”, K. Ogura, H. Yamazaki, Y. Kiuchi and Md. R. Amin, Journal of Plasma Physics, Vol.72 (2006) pp.905-908.
- 5) “Numerical Examination of Operation Modes of Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillator”, H. Yamazaki, H. Takagi, H. Tanaka and K. Ogura, Journal of Plasma Physics, Vol.72 (2006) pp.915-918.
- 6) “Improved Performance of Oversized Backward Wave Oscillator driven by Weakly Relativistic Electron Beam”, S. Aoyama, Y. Miyazawa, K. Ogura, A. Sugawara and M. Hirata, Transaction of Fusion Science and Technology, Vol.51, no.2T (2007) pp.325-327.
- 7) “Slow Cyclotron and Cherenkov Instabilities in Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillator”, Y. Kiuchi, H. Tanaka, K. Ogura, O. Watanabe, T. Cho and Md. R. Amin, Transaction of Fusion Science and Technology, Vol.51, no.2T (2007) pp.331-333.
- 8) “Weakly Relativistic K-Band Oversized Backward Wave Oscillator with Bragg Reflector at Beam Entrance of Slow Wave Structure”, K. Ogura, Y. Miyazawa, H. Tanaka, Y. Kiuchi, S. Aoyama and A. Sugawara, Plasma and Fusion Research, Vol.2, (2007) pp. S1041_1-S1041_4.
- 9) “Studies of a Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillator with Disk Cathode and Rectangular Corrugation”, K. Ogura, Y. Miyazawa, S. Aoyama, Y. Takamura, S. Tamura and A. Sugawara, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.127, no.11 (2007) pp.681-686.
- 10) “Instability of Annular Beam with Finite Thickness in Dielectric-Loaded Cylindrical

Waveguide”, S. Tamura, M. Yamakawa, Y. Takashima and K. Ogura, to be published in Plasma and Fusion Research

- 11) “Operation Characteristics of Microwave Sources Based on Slow-Wave Interaction in Rectangular Corrugation”, Y. Takamura, Y. Kazahari, H. Oe, K. Ogura, A. Sugawara and M. Hirata, to be published in Plasma and Fusion Research

3.2 学会発表

国際会議発表

- 1) “Slow Cyclotron Instability due to Surface Modulation of Annular Beam”, K. Ogura, H. Yamazaki, Y. Kiuchi and Md. R. Amin, The Joint Conference of 19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas and 7th Asia Pacific Plasma Theory Conference, P1-19 (July, 2005, Nara, Japan)
- 2) “Numerical Examination of Operation Modes of Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillator”, H. Yamazaki, H. Takagi, H. Tanaka and K. Ogura, The Joint Conference of 19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas and 7th Asia Pacific Plasma Theory Conference, P1-22 (July, 2005, Nara, Japan)
- 3) “Improved Performance of Oversized Backward Wave Oscillator driven by Weakly Relativistic Electron Beam”, S. Aoyama, Y. Miyazawa, K. Ogura, A. Sugawara and M. Hirata, The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 19P40 (July, 2006, Tsukuba, Japan)
- 4) “Slow Cyclotron and Cherenkov Instabilities in Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillator”, Y. Kiuchi, H. Tanaka, K. Ogura, O. Watanabe, T. Cho and Md. R. Amin, The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 19P43 (July, 2006, Tsukuba, Japan)
- 5) “Operation Mode of Oversized Backward Wave Oscillator Driven by Weakly Relativistic Electron Beam”, K. Ogura, Y. Miyazawa, Y. Kiuchi, S. Aoyama, H. Tanaka and A. Sugawara, The 3rd Japan-US Joint Technical Meeting on Plasma Science and Technology and Pulsed Power Technology, PST-06-59/PPT-06-42 (August, 2006, Kauai, USA)
- 6) “Weakly Relativistic K-band Oversized Backward Wave Oscillator with Bragg Reflector at Input End of Slow Wave Structure”, K. Ogura, Y. Miyazawa, H. Tanaka, Y. Kiuchi, S. Aoyama, Y. Takamura, S. Tamura and A. Sugawara, The 16th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, P5-15 (December, 2006,

Toki, Japan).

- 7) “Instability of Thin-Walled Annular Beam in Dielectric-Loaded Cylindrical Waveguide”, S. Tamura, M. Yamakawa, Y. Takashima and K. Ogura, The 17th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, P1-011 (October, 2007, Toki, Japan).
- 8) “Operation Characteristics of Microwave Sources Based on Slow-Wave Interaction in Rectangular Corrugation”, Y. Takamura, Y. Kazahari, H. Oe, K. Ogura, A. Sugawara and M. Hirata, The 17th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, P2-074 (October, 2007, Toki, Japan).

国内学会等

- 1) 「高周波数化を目的とした弱い相対論的遅波電磁波源の大電力動作」山田大輔，齋藤弘樹，青山悟士，宮澤優士，小椋一夫，平成17年電気学会基礎・材料・共通部門大会（2005年8月，日本大学理工学部駿河台キャンパス1号館）VI-8.
- 2) 「円環状電子ビームと遅波ハイブリッドモードの相互作用の解析」高木宏和，山寄星征，木内豊，田中秀和，小椋一夫，平成17年電気学会基礎・材料・共通部門大会（2005年8月，日本大学理工学部駿河台キャンパス1号館）VI-9.
- 3) 「弱い相対論的大口径遅波電磁波源の大電力動作」宮澤優士，齋藤弘樹，山田大輔，青山悟士，白井健司，小椋一夫，第15回電気学会東京支部新潟支所研究発表会(2005年11月，新潟大学)予稿集 p.44.
- 4) 「周期的矩形コルゲートによる遅波導波管中のチェレンコフ不安定性の解析」田中秀和，高木宏和，木内豊，小椋一夫，第15回電気学会東京支部新潟支所研究発表会(2005年11月，新潟大学)予稿集 p.117.
- 5) 「弱い相対論的電子ビームによる大口径遅波電磁波源」小椋一夫，齋藤弘樹，山田大輔，宮澤優士，青山悟士，日本物理学会第61回年次大会（2006年3月，松山大学）講演概要集 vol.61, Issue 1, Part 2, p.251.
- 6) 「円環状電子ビームを用いた大口径後進波発振器における遅波不安定性の解析」山川光寿，田村修伴，高嶋裕介，小椋一夫，第17回電気学会東京支部新潟支所研究発表会(2007年11月，長岡技術科学大学),論文番号I-11.
- 7) 「K-band 矩形コルゲート導波管の組み合わせによる遅波電磁波源の磁場依存性に関する実験的研究」風張勇介，高村有希，大江弘晃，高嶋裕介，小椋一夫，白井健司，第17回電気学会東京支部新潟支所研究発表会(2007年11月，長岡技術科学大学),論文番号I-12.

4. 研究成果

4.1 研究の背景

大強度電子ビームを用いた大電力マイクロ波源の研究は、パルスパワー技術の進歩に伴い著しく進展してきた [1]。代表的なマイクロ波源を表 1 にまとめる。位相速度が真空中の光速より遅い遅波を利用したクライストロン (Klystron)、マグネトロン (Magnetron)、進行波管 (Traveling Wave Tube: TWT)、後進波発振器 (Backward Wave Oscillator: BWO) などがある。位相速度が光速より速い速波を利用したものは電子サイクロトロンメーザ (Electron Cyclotron Maser: ECM) や自由電子レーザー (Free Electron Laser: FEL) である。これらとは別に大電流電子ビームの空間電荷効果を利用するバーカトル (Vircator) あるいは仮想陰極発振器 (Virtual Cathode Oscillator) と呼ばれているマイクロ波源もある。マイクロ波源をビームの利用方法から分類すると表 1 のように線ビーム型 (O-Type) と電磁場直交型 (M-Type) および空間電荷型 (Space-Charge-Type) とに分類される。

O-Type マイクロ波源では、電子ビーム伝搬のために軸方向に磁場を加えているが、電磁波発生には次の共鳴条件を満たす相互作用を用いる。

$$\omega = k_z v_z + S\Omega$$

ここで、 ω と k_z は電磁波の角周波数と軸方向の波数、 v_z はビームの軸方向速度、 Ω はビーム電子の相対論的サイクロトロン角周波数である。整数 S と Ω の値により次のような相互作用になる。

- ① $S = 0$ チェレンコフ相互作用
- ② $S < 0$ 遅波サイクロトロン共鳴相互作用
- ③ $S > 0$ 速波サイクロトロン共鳴相互作用
- ④ $\Omega = 0$ で①②③が縮態した相互作用

表 1 大電力マイクロ波源

O-Type	Klystron, BWO, TWT, Gyrotron, FEL
M-Type	Magnetron, MILO Crossed-Field Amplifier
Space-Charge-Type	Vircator, Reflex Triode

通常のドップラー効果でサイクロtron共鳴が起きるのが③の速波サイクロtron共鳴相互作用であり、異常ドップラー効果の場合が②の遅波サイクロtron共鳴相互作用である。相互作用③を用いるジャイロtronは現在の核融合プラズマ加熱研究用マイクロ波源として欠かせないものである。軸方向入射電子ビームを利用する電磁波源は、①、②、④に基づいたものである。この場合、ビームと相互作用する電磁波の位相速度は光速より遅い。遅波構造を用いて位相速度を遅くする遅波電磁波源である。大強度相対論的電子ビームを用いる場合、非常に有利である。

マイクロ波源の特徴を表すものとして、その出力 P と周波数 f を用いた Pf^2 がある。横軸をビーム電圧として図1にまとめる。1970年から1990年は、電子ビームの電圧を上げることでマイクロ波のピーク電力を増加させてきた(図の■印)。パルスパワー技術の進歩とあいまって、 Pf^2 は電圧の5乗に比例(図の直線)して増加した。1990年頃、10GW級の多重モード・チェレンコフ発振器(MWCG)が報告された[2,3]。この期間は横軸を年代にしてもほぼ同じ図になる。遅波マイクロ波源は大電力動作に適しているが、出力電力を巨大化する競争が先行し、実用性の視点が欠けていた。最近になり高効率で安定した動作や装置の軽量化に関する研究の重要性が再認識されてきた(図の□印)。

実用性を考えると、弱い相対論的領域で大電力遅波電磁波源の高周波化が大変重要な研究テーマといえる[4-9]。現在、ミリ波帯の代表的電磁波源としては速波電磁波源であるジャイロtron(○印)がある。100GHz以上の周波数帯で大変優れた特性を有するが、大電流での動作には適さない。

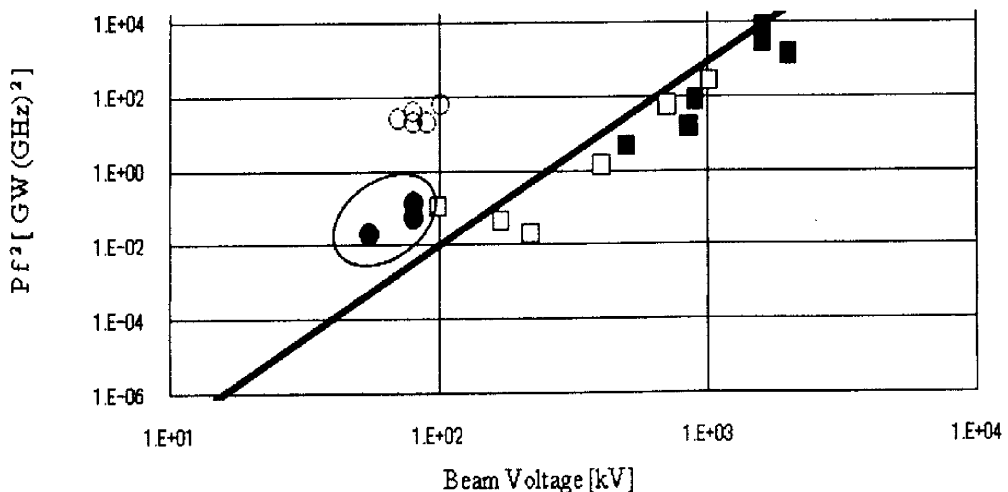


図1 大電力マイクロ波源の出力特性

遅波電磁波源は、軸方向入射の電子ビームが使えるため 100 A 或いはそれ以上の大電流での大電力動作には有利である。■ 印のように、1 MV 前後の相対論的エネルギー領域では大変優れた成果を出している。また磁場がゼロでも、チェレンコフ相互作用と遅波・速波サイクロトロン相互作用が縮退した相互作用④での動作が可能である。磁場を使用しないコンパクトなマイクロ波源 (Pasotron) として、D. M. Goebel 等 (米国) による研究が報告されている (100kV~200kV の□印)。我々の研究対象は、更に低いエネルギー領域である 100kV 以下の弱い相対論的大電力遅波電磁波源である。

遅波電磁波源は、大電力動作には有利であるが高周波数化が難しい。マイクロ波・ミリ波帯への高周波数化においては、「オーバーサイズ」と「モード制御」がキーワードである [2-7]。我々は 20GHz 帯から 40GHz 帯において、この困難な課題に挑戦してきた (●印) [4,6,7]。コンパクトで使い勝手の良い遅波マイクロ波・ミリ波源の研究・開発のためビーム電圧 100 kV 以下での実験を開始した。周波数帯は K バンドおよび Q バンドである。K バンドにおける実験で発振周波数 20 GHz 帯、発振電力数 10 kW から 100 kW が得られた。また軸対称と非軸対称のモードの制御を実証した。ミリ波帯への挑戦である Q バンド実験では、周波数 40GHz 程度のミリ波 (発振電力約 30kW) が得られた。発振特性の指標である (電力) × (周波数の自乗) Pf^2 は K-バンドと同程度であり、弱い相対論的大電力遅波ミリ波源の先駆けとしては成功である。その後、ビームの改善により Q バンドでは発振効率上昇し出力 80kW 程度と大電力遅波ミリ波源として大変有望な結果を出してきた。この段階での Pf^2 を図 1 の楕円の領域に示す。Q バンドの $0.12 [\text{GW} \cdot \text{GHz}^2]$ に対して K バンドは $0.06 [\text{GW} \cdot \text{GHz}^2]$ であり約半分であった。この原因を調べさらに動作特性を改善していく必要がある。

電子ビームが空間の 3 方向へ動くことができるのは当然のことである。しかし電子ビームの垂直方向の擾乱が遅波相互作用に及ぼす影響については、全くといってよいほど研究されていなかった。我々は、境界条件と 3 次元的な擾乱をセルフ・コンシステントに取り入れた解析モデルを開発し、有限強度が磁場の場合に適用できる遅波電磁波源の理論を完成させた [10-14]。有限磁場強度では、異常ドップラー効果による遅波サイクロトロン相互作用が存在することを理論的に明らかにした。新たに提案した理論と異常ドップラー効果による遅波サイクロトロンメーザ動作の原理については米国の雑誌 Phys. Rev. E にも掲載された [12]。ビームの波動を相対論的に扱い、かつ、境界も正しく扱っている。ビーム中やビーム表面の波動については、それぞれ静止プラズマの波動をローレンツ変換する理論がある [15,16]。波動そのものは扱えるが、境界条件をどうするかという問題を解決しなければならない。我々の理論は、ローレンツ変換を満足するのは当然として、その先を行っている。オーバーサイズでは数値が発散してしまい計算できない問題が生じている。オーバーサイズでの解析が可能なプログラム開発が必要である。

4.2 研究の目的

本研究は弱い相対論的大電力遅波ミリ波源のさらなる進展を目指すものである。ビーム中のプラズマ波動利用大電力電磁波源は、プラズマ基礎と応用の分野で大変重要な研究分野である。従来の遅波電磁波源は、周波数が 10 GHz を超えると大電力動作が難しくなる。特に、実用化で望まれるビーム電圧 100 kV 以下での大電力ミリ波発生は困難といわれてきた。周波数を上げるためのオーバーサイズ化に伴うミリ波帯表面波モードの励起と制御の困難さが主な原因である [17]。

本研究は、弱い相対論的電子ビーム (100 keV 以下) によりミリ波帯 (20 GHz-40 GHz 帯) の表面波を励起することを目標とする。ミリ波帯へ向けたオーバーサイズ遅波導波管の電磁波モードは表面波となる。遅波導波管の基本モードである TM モードの分散特性を図 2 と図 3 に示す。前者は X バンドでありオーバーサイズではない。図 3 は K バンドでオーバーサイズの場合である。管壁の空間的周期性から分散曲線も波数空間で周期的となるが、X バンドの場合では、基本モード TM_{01} および高次モード TM_{02} , TM_{03} の「伝搬領域」が「禁止領域」により分離されている。K バンドでは TM_{01} の上限より TM_{02} など高次モードの下限周波数の方が低く、いわゆるモードのオーバーラップが起こり動作モードを制御することが困難になる。図では軸対称の基本モードのみを示しているが、非軸対称モードを含めるとモード制御の問題は深刻なものとなる。本研究では、軸対称と非軸対称モードを解析し、ビームとの相互作用を調べ、励起実験を行う。

オーバーサイズ遅波導波管における問題は、モードのオーバーラップに加えて電場が管壁の近くに集中することが挙げられる。オーバーサイズではない場合 (図 2), 電場は導波管の中心部分まで広がっており体積波と呼ばれる。これに対して、オーバーサイズ (図 3) では、電場は管壁近くに集中しており、管壁から離れると指数関数的に減少する表面波である。電磁波励起実験では、電子ビームの均一性を高めかつ電流密度を上げ、大電力化を図る。さらに、群速度によるモード制御および大電力化を目指す。また、通常のチェレンコフ動作に加えて異常ドップラー効果を用いて大電力ミリ波帯表面波励起と制御を提案し実験により検証する。

遅波導波管の管壁での周期境界条件を扱いに Rayleigh の仮説を用いた解析コードがある。境界の扱いが比較的簡単となり、複雑な周期構造や複雑なビーム相互作用を取り入れやすい手法である。しかし、Rayleigh の仮説を用いた計算では周期的コルゲートの深さがある程度以上深くなると、図 4 (a) に示すようにコルゲート内の電界に特異点が現れてくる。どの程度までの深さなら正しい結果が得られるのかを理解して使用する必要がある。

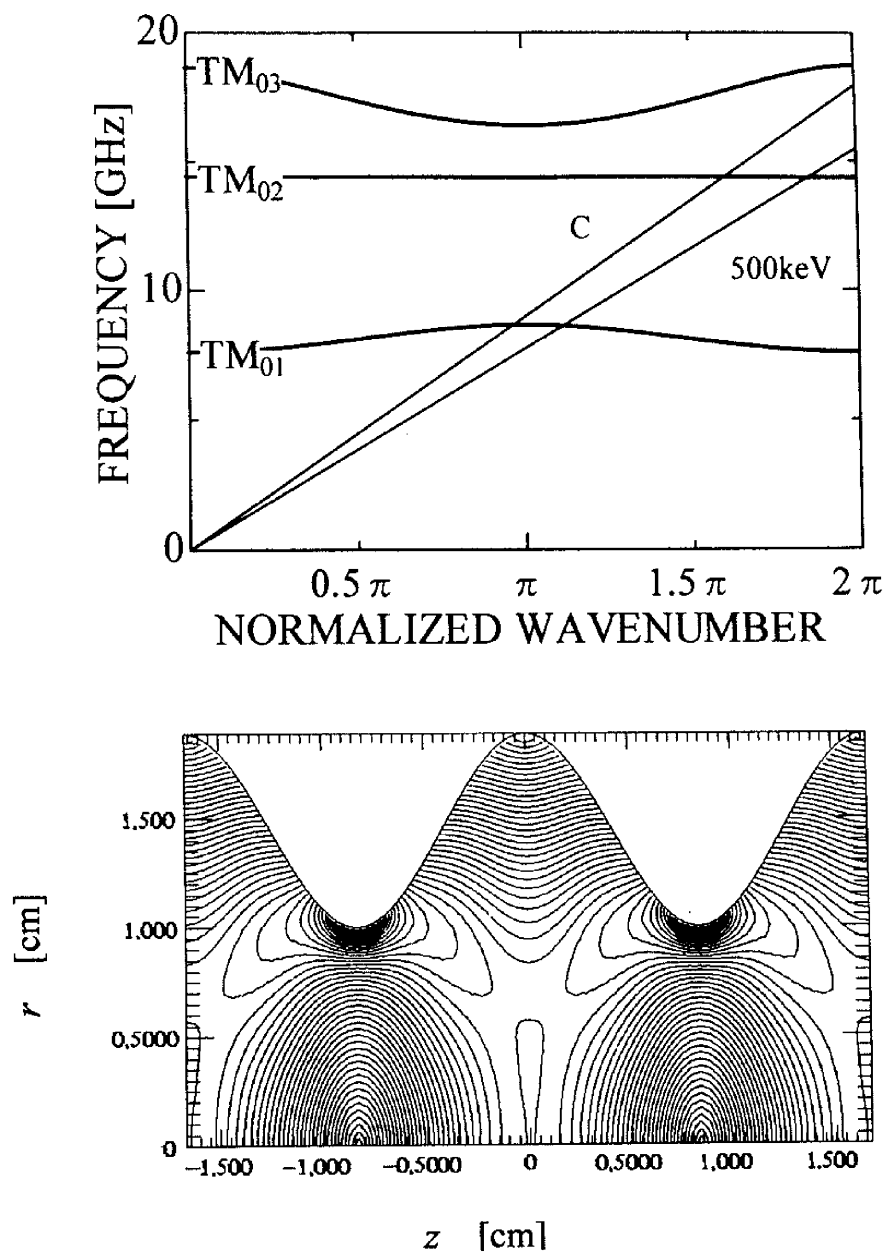


図2 周期的 X バンド遅波導波管の分散特性 (上) と電界強度分布 (下)。上図の実線は光速線 C と 500keV のビーム線である。

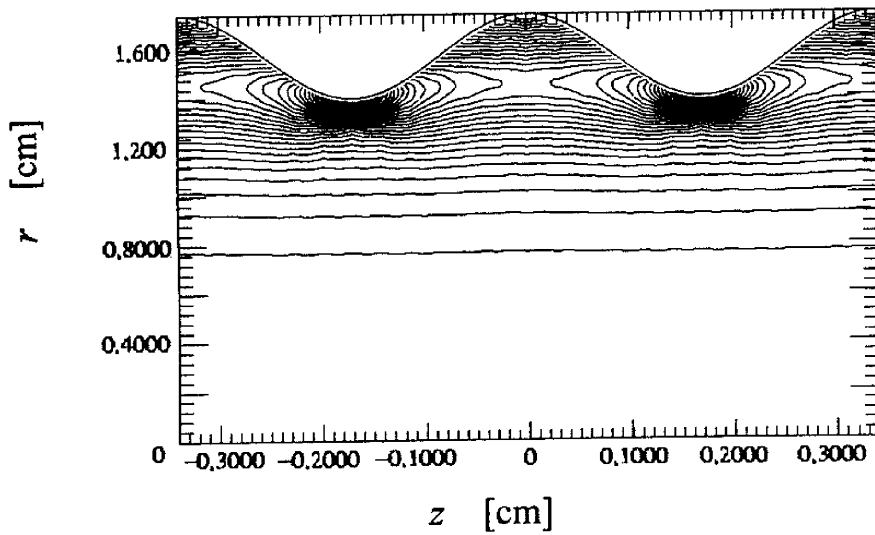
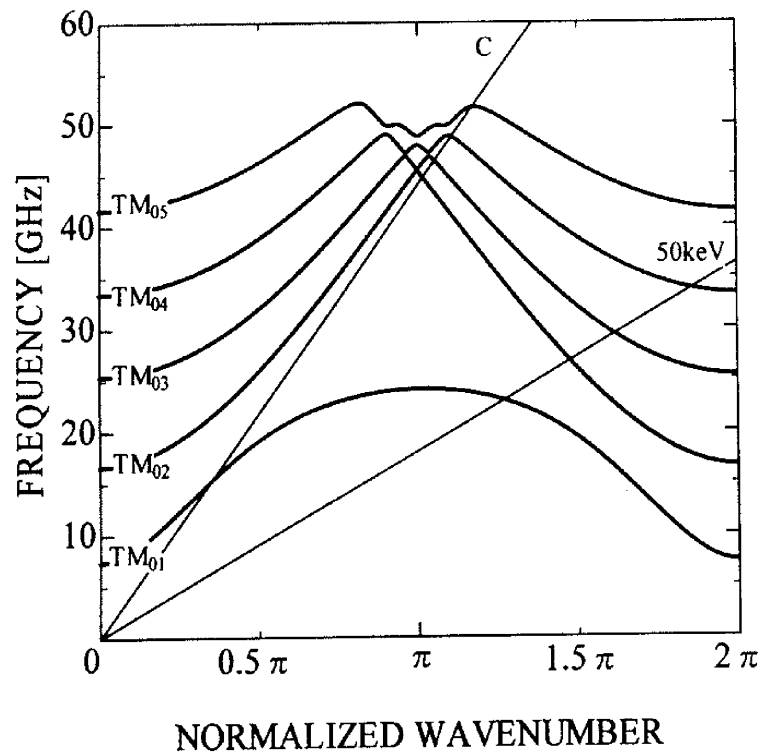


図3 周期的Kバンド遅波導波管の分散特性（上）と電界強度分布（下）。上図の実線は光速線Cと50keVのビーム線である。

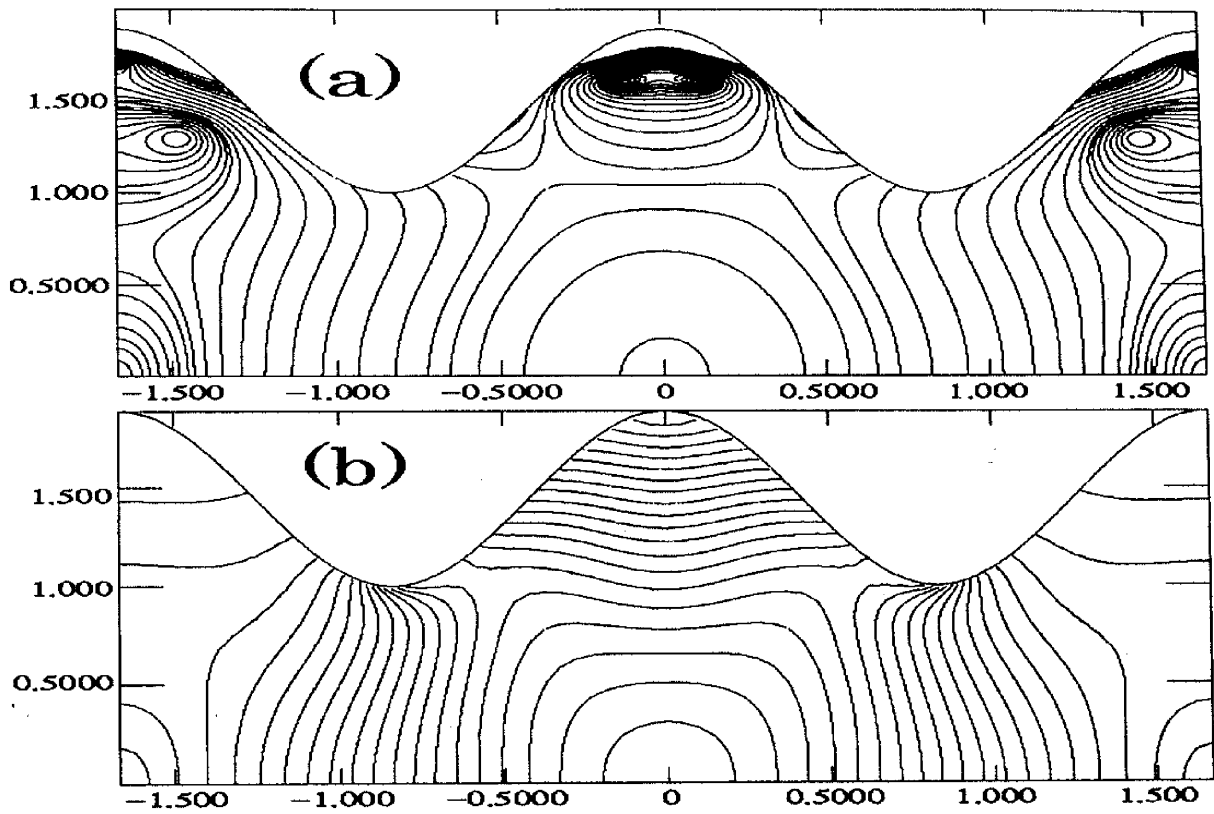


図4 周期的 X バンド遅波導波管の電界強度分布の例：(a) Rayleigh の仮説を用いた解析計算と(b)直接積分による計算である。

Rayleigh の仮説に基づいた解析に加えて直接数値積分による解析コードを準備している[17]。直接数値積分では Rayleigh の仮説は使わないので、その結果を用いて Rayleigh の仮説に伴う特異点の影響を評価できる。直接数値積分では Rayleigh の仮説のような問題は生じないが、管壁は滑らかな関数であることが必要となる。矩形などの角のあるコルゲートや3次元擾乱を取り入れたビーム相互作用を扱うことは困難である。2つの手法を使い分けながら遅波導波管の大変複雑な表面波モードを理論的に調べ、ビームとの相互作用を解明していく。本研究では、遅波構造として三角関数で表される波形コルゲートに加えて矩形コルゲートも用いる。GW級の巨大電力では角のない滑らかなコルゲートを使い導波管内の放電を防ぐ必要があるが、MW級では矩形コルゲートでも使用できる。三角関数に比べて矩形の方がコルゲートは製作するのが容易で、オーバーサイズ遅波導波管の表面波の特性を制御する場合にも有利になる。

遅波導波管の両端の効果や出力部を含めた電磁場特性の評価は、数値解析だけでは無理なため、実験的な評価は欠かせない。これまでにマイクロ波実験では放射パターン測定を行いモードの特定を行った。磁場による発振モード制御に加え、周期的遅波導波管の周期長による軸対称モードと非軸対称ハイブリッドモードの制御を実証した。制御機構は未解明であり今後研究していく必要がある。また、Xバンドにおいては遅波導波管の両端の効果により軸方向モードの電界分布が大きく影響されることを示した。オーバーサイズの場合についても遅波導波管両端の条件が軸方向モードへ及ぼす影響と発振モード制御との関係について研究する。

ビームの3次元的擾乱を取り入れた解析をオーバーサイズでも可能とするためプログラムの開発を行なう。オーバーサイズ特有な問題である複雑なモードを解析しビームとの相互作用を調べていくため数値解析の手法も実験と並行して開発していく。ビームの形状としては、均一な密度で分布している円筒の場合はXバンドで開発されている。しかし円筒であってもオーバーサイズの場合は数値の発散のため計算ができない状態であった。本研究では、円筒および円環の電子ビームにおける理論を完成させる。円環の厚み無限小のシート状でのモデルは、「近似のモデル」ではあるが理論的解析においては重要な役割を果たしてきた。シート状プラズマさらにはシート状ビームの場合、我々の知る限り、垂直方向の変位をセルフ・コンシステントに取り入れた理論はない。本研究では、シート状ビームの垂直方向の変位を取り入れた理論を提案し解析プログラムを開発する。実際のビームの円環は有限の厚みがあり、これに対応した有限の厚みを有する円環の場合についての解析プログラムも開発していく。それぞれの境界条件はモデルの範囲内でセルフ・コンシステントなものであり、その解は対応する境界値問題の固有解となっている。

4.3 研究の内容

電子ビーム

電子ビーム源に関して、高電圧導入部と誘電体による陰極サポート部を改良し陰極部および陰極と陽極間の短絡を防ぎ、パルス放電中の負荷変動を抑え高電圧動作を安定させることができた。さらに、弱い相対論的領域で動作する新しい冷陰極を提案し、均一性の良いビームを得ることができた。本研究で新たに提案した陰極は、図 5 (a) のディスク陰極である。図 5 (b) は冷陰極で一般的に使用されているホロー陰極である。図に定性的に示してあるように、ディスク陰極は電子放射時に余分なプラズマが生成されない。図の右側に 100 kV 以下の弱い相対論的領域におけるビームの焼き付けパターンを示す。ディスク陰極は電子放射面にベルベットを張らない状態で印加電圧を約 50 kV 程度まで下げても動作が可能であった。これまでは円環状電子ビームを得る冷陰極といえばホロー陰極であり、多くの研究者がビーム発生を研究している。電子放射面に誘電体を塗布するなど特殊な加工を施すことで、数 100 kV 以上の相対論的領域でマイクロ波実験に使えるビームを実現してきた。しかし、100 kV 以下の弱い相対論的領域で円環状電子ビームを得ることは非常に困難な問題であった。我々は電子放射面にベルベットを貼り付けることでその問題を解決してきた。図 5 (b) を見るとベルベットによりビームの均一性は格段に向上することが分かる。ベルベットを使用しないとビーム生成すら起きないことがあり、たとえビームが発生しても円環状とは程遠くマイクロ波実験には適さない。ホロー陰極による円環状ビームの厚みはベルベットの取付け方に依存しており、それを工夫して円環の厚みを制御し電流密度を上げる。これに対してディスクタイプでは、ベルベットが有る無しにかかわらず均一に分布した円環状のビームが生成された。しかも焼き付けパターンは、(a) では 1 ショットで (b) では 5 ショットでのものである。ディスク陰極によりビームの均一性は改善され電流密度は上昇していた。ビームの発生条件を調べ、再現性を確認した。新しい陰極と高電圧パルス電源システムと組み合わせて、大電流・高電圧パルス動作について調べた。陰極の耐久性について調べ、10 MW レベルのパルス数 100 ns に対して、1000-2000 ショット以上は使用できることを確認し、100 kW 級の大電力遅波発生実験に応用した。

大電力動作ではパルスショートニングが問題となる。後方の構造物への短絡は無視できるが、陰極と陽極メッシュ間での短絡が大きな問題であった。メッシュを取り除くことでパルス幅や電圧安定性が改善された。負荷変動の軽減および電源の安定化から見ると大変良い結果が得られたと言えるが、メッシュは遅波共振器で発生したマイクロ波を反射させる役目があった。本研究ではメッシュの代わりに後に述べるオーバースイズのブラッグ反射器を用いることでマイクロ波反射の問題の解決を試みた。

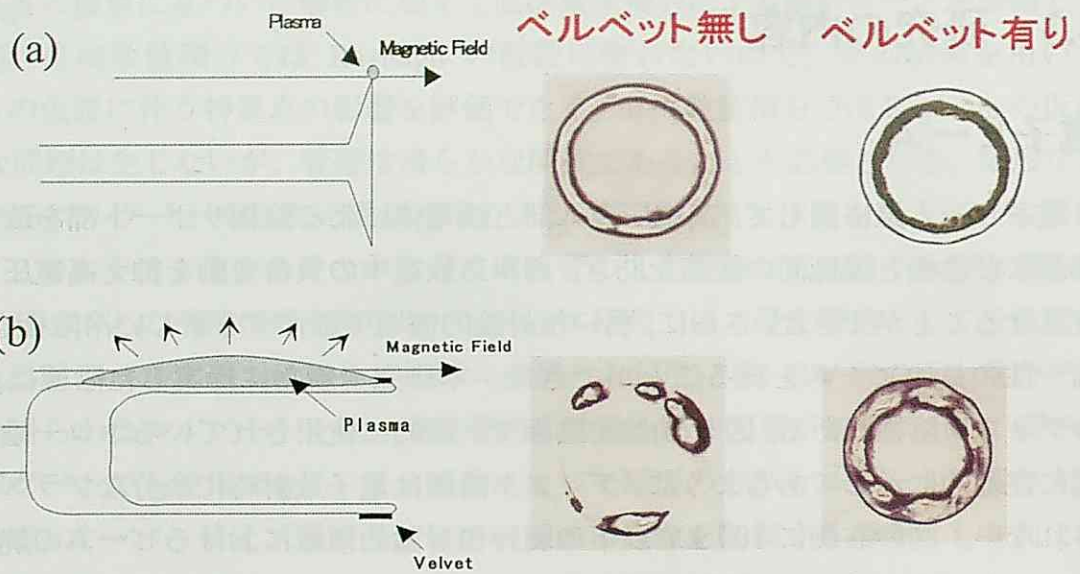


図5 陰極とビームの焼き付けパターン

遅波導波管

波形導波管の内径 $R(z)$ は、 R_0 (平均半径)、 h (振幅)、 z_0 (周期長)、 k_0 (波数周期) として、図6のように式 $R(z)=R_0+h\cos(k_0z)$ で表わされる。本研究では、高周波化のため大口径導波管を用いている。大口径とは導波管直径 D と発振マイクロ波の波長 λ の比、 D/λ が1より大きいことを意味する。実験で使用したKバンドとQバンドのパラメータは表2の通りである。表にはオーバーサイズではないXバンドのパラメータも参考のため載せてある。

表2 異なる周波数帯での波形周期的遅波導波管

	D_0 [mm]	h_0 [mm]	z_0 [mm]	λ [mm]	D_0/λ
K-Band	31.4	1.7	3.4	12.4	2.4
Q-Band	30.0	1.0	2.0	7.46	4.0
X-Band	28.9	4.5	26.7	35.3	1.0

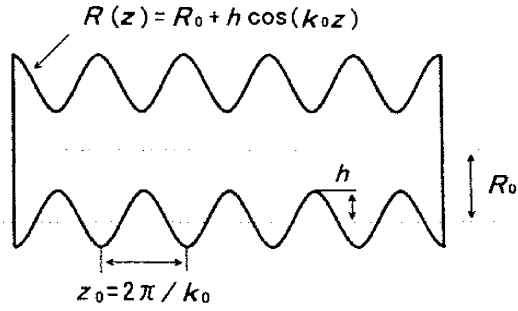


図6 波形遅波導波管

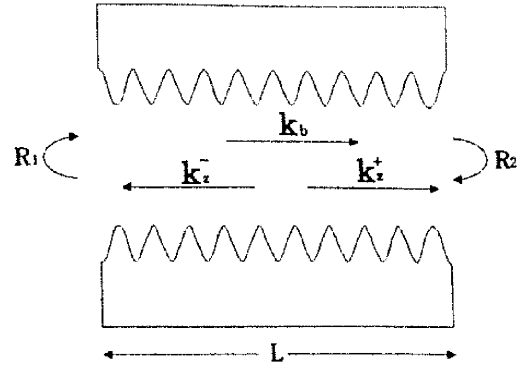


図7 軸方向モードとビームモード

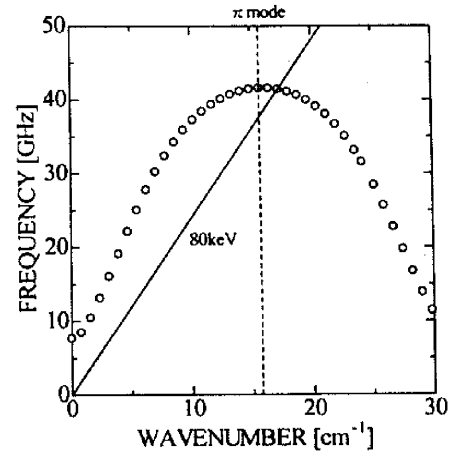
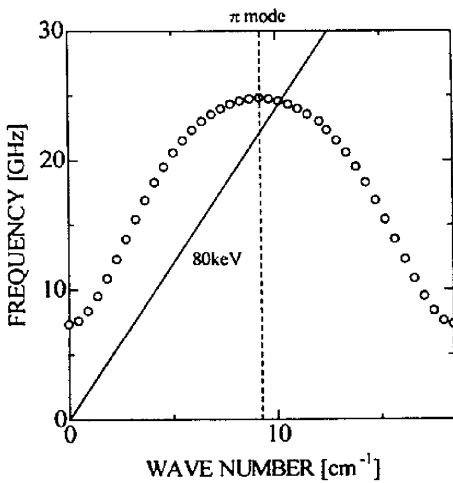


図8 Kバンド(左)とQバンド(右)の軸方向モードとビームモード

図8にKバンド導波管とQバンド導波管の TM_{01} モードの分散関係を示す。導波管が有限長であることを考えると図7に定性的に示しているような軸方向モード(共振モード)が存在する。軸方向モードは導波管モードの進行波(k_s^+)と後進波(k_s^-)から成り、同じく有限長の導波管両端での境界条件を満たすようにビームモード(k_b)と相互作用して、コヒーレントなマイクロ波が励起され取り出されることになる。後進波と進行波の重ね合わせでできた軸方向モードは、図8の○印で示しているように飛び飛びの値をとる。同図の直線は80 keVの電子ビームの理論線を表わす。ビーム線と交わる軸方向モードにおいて発振が起こり、ビーム線が分散関係中の山の頂上部分であるアップercutoff(π モード)に近づくほど大電力が期待できる。励起される電磁波モードの群速度が小さくなり、導波管空洞の実効的なQ値が大きくなるためである。図のビーム線には空間電荷の効果は含まれていない。実際の実験ではビー

ム電流値は 100 A のオーダーである。その空間電荷効果によりビーム線は下がり、図と同じ軸方向モードと相互作用させるには 10 kV 程度高い印加電圧が必要である。

これまでのマイクロ波実験の結果では、周波数の高い Q バンドで高い特性値 Pf^2 が得られた。 π モードに近い動作点の群速度は Q バンド導波管でより小さいことが判明した。そこで K バンドの大電力化のため 80keV のビーム線をより π モードに近づけると同時に π モード近傍の群速度をより小さくした導波管を新しく設計・製作した。設計では 80 kV のビーム線が TM_{01} の π モードで交点を持つようにした。交点の周波数は約 25 GHz とする。設計・製作した波形遅波導波管のパラメータをとして表 3 に示す。

導波管の製作では、まず波形の刃を削ってから、それを使って導波管を波形に削る。波形の刃を作るのに、直径 0.33mm のワイヤを使いワイヤ放電加工を行った。設計したパラメータでは、図 9 のように波の谷の部分にワイヤが入らない。製作のワイヤ放電加工の段階で、図 9 に対応する位置で削りだしが止まってしまう。仕方がないのでその部分はワイヤの円の弧状に削った。このため実際に製作した波形導波管は三角関数とは微妙に異なる。この分散図を数値計算で正確に求めることは困難であるが、製作した導波管と同じ振幅にし、平均半径と周期長は同じにしたパラメータを表 3 に、その TM_{01} モードの分散関係を図 10 に示す。設計したパラメータの分散関係も 0.05 GHz 程度以内で図 10 の分散関係と一致している。図 8 の K バンド導波管と比較すると 80 keV のビーム線が TM_{01} の π モードと交わっていることが分かる。

表 3 新たに設計・製作した K バンド波形周期的遅波導波管

	D_0 [mm]	h_0 [mm]	z_0 [mm]	D_0/λ
設計した導波管	31.400	1.700	3.000	2.7
製作した導波管	31.386	1.693	3.000	2.7

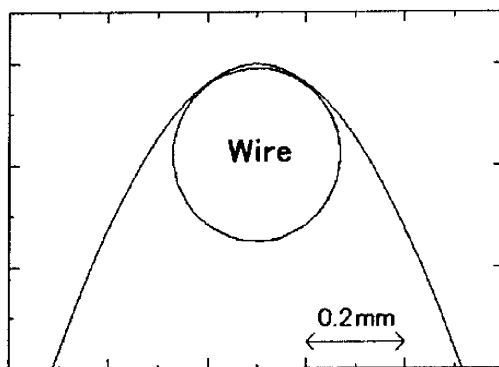


図 9 波形のワイヤ放電加工

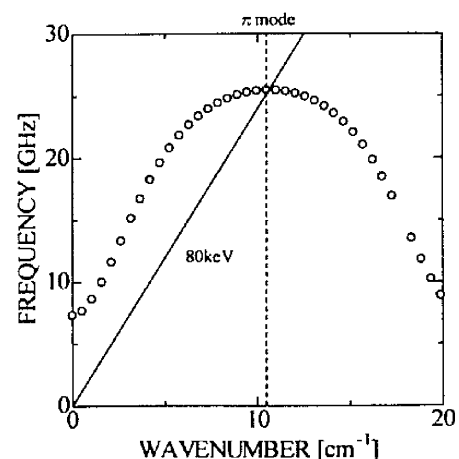


図 10 製作した K バンドの分散特性

マイクロ波実験

電子ビームの均一性の改善とオーバーサイズ遅波導波管特性の改善により 20 GHz 帯で約 500 kW 程度まで出力の増加がみられた。40GHz 帯で約 200kW まで出力が上昇したことを合わせ、図 1 のデータに加えると Pf^2 は図 1 1 の楕円領域に示すようになる。弱い相対論的大電力遅波電磁波源の Pf^2 は、0.30 [GW・GHz²] 以上まで上昇し、矢印の方向に改善された。電圧 50 kV 以下から 100 kV までのデータで、電圧とともに出力特性は良くなっている。このような電圧依存性は、他の遅波電磁波源の結果(■, □)と同様であるが、特性値は桁違いに良いことが本研究の特徴の一つである。

図 1 2 では、周波数-発振電力の出力特性を示しており、■, □, ○印は、図 1 と同じものである。円で囲んだ領域は我々のデータであるが、電圧 50 kV 以下の 100 kW 以下のデータから始まり、60-80 kV の 100 kW 程度へ、そして 90 kV 前後での数 100 kW までと、弱い相対論的大電力遅波電磁波源の特性が改善されている様子がこの図からも理解できる。ビーム回収ポートを使用することで出力に増加の傾向は見られたが、大幅な改善ではなかった。今後さらに検討する必要がある。

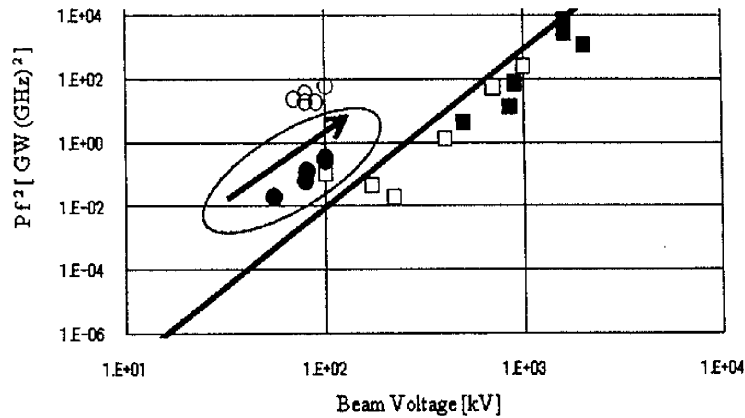


図11 大電力マイクロ波源の出力特性

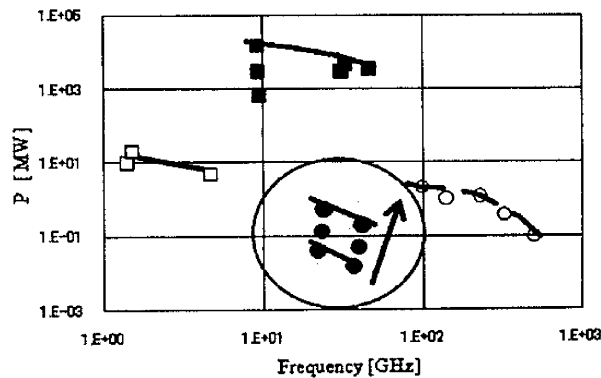


図12 出力特性(周波数 f 対 出力 P)

本研究では、波形コルゲート以外に矩形コルゲートを用いて遅波構造とした。先に述べたように、三角関数の波形コルゲートでは周波数が高い場合や電圧を下げた動作に合うように設計すると製作が難しくなってくる。製作が容易になり製作精度が上がるためである。数 100 kW から MW 級のマイクロ波を対象としており、矩形の角での放電は GW 級ほどの問題にはならない。次に述べるブラッグ反射器は矩形コルゲートにより製作した。

オーバーサイズではない場合は、遅波導波管の端に共振モードに対するカットオフ導波管などを設置し、両端での反射 $R1$ と $R2$ を調整する。しかし、オーバーサイズの場合では、カットオフ導波管の径が遅波導波管の径に比べ小さくなりすぎる。ビーム入射部にカットオフ導波管を設置すると、ビームは遅波導波管の管壁から離れ、表面波との十分な相互作用が得られない。オーバーサイズの場合に軸方向反射 ($R1$ と $R2$) をどのように制御するかは重要な問題である。ビーム発生のところでも述べたように、これまではビーム入射部には陽極メッシュがあった。本研究では、メッシュを取り除き、図 1 4 のように遅波導波管 A をブラッグ反射部を取り付けその影響を調べた。導波管のパラメータは表 4 の導波管 A, B でそれらの分散特性は図 1 5 に示す。ディスクタイプの新しい陰極と組み合わせ、発振出力の安定化および増加が確認できた。また遅波導波管出力側の端の条件を変えることで、軸対称と非軸対称モードの制御が可能であることを実証した。遅波導波管両端の反射は、モード制御および出力制御に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

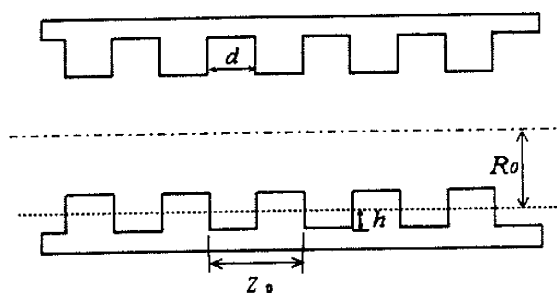


図 1 3 矩形コルゲート遅波導波管

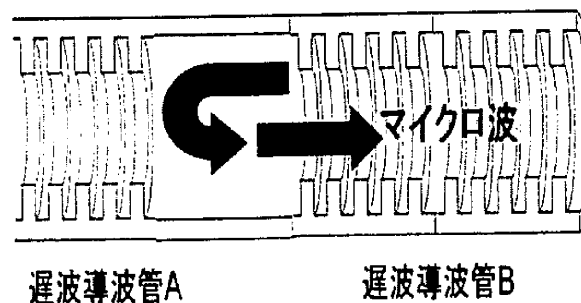


図 1 4 ブラッグ反射器の概念図

表 4 K バンド矩形コルゲート周期的遅波導波管

	D_0 [mm]	h [mm]	z_0 [mm]	d/z_0 [%]	D_0/λ	f [GHz]
導波管A	30.60	1.30	3.40	50	2.2	22.0
導波管B	30.20	1.10	3.00	50	2.6	25.5
導波管C	30.76	1.38	2.20	20	2.5	24.8

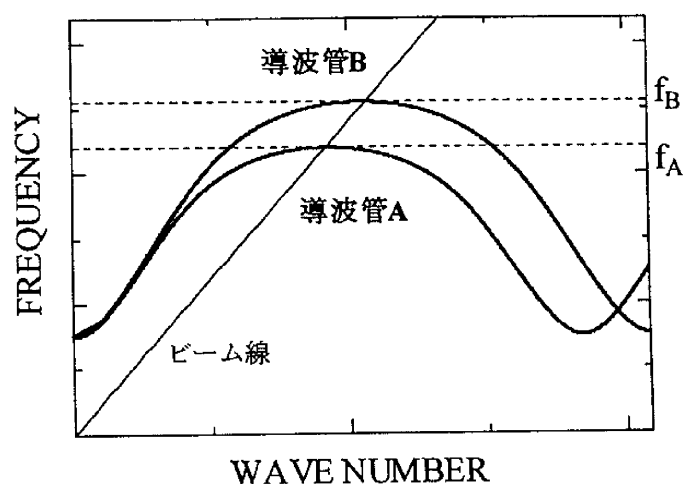


図 1 5 矩形コルゲート遅波導波管分散特性

矩形コルゲートには、三角関数に比べ自由度が1つ増える。溝長 d と周期長 z_0 の比が選べることである。この比を変化させると、アッパーカットオフ付近の分散特性の形状が変化する。この特徴を活かして異常ドップラー効果による表面波励起を調べるための新たな導波管を設計した。遅波サイクロトロン相互作用とチェレンコフ相互作用の共鳴による基本モードの励起と制御を目指したものである。表 4 の導波管 C はアッパーカットオフ付近が平坦な分散特性を持たせるように設計したものである。

図 1 6 に導波管 B と導波管 C の分散特性を示す。周期的遅波構造におけるアッパーカットオフ領域では、導波管モードの群速度が小さくなると同時に管壁に集中した表面波となる。波形（三角関数）コルゲートで矩形コルゲートと同様の分散特性を得ようとする、図 1 6 (a) が製作の限界に近い。図 1 6 (b) は波形コルゲートでは設計はできるが、製作するのは実際上無理である。矩形を採用することで、遅波構造のコルゲートは波形では実現できない平坦なアッパーカットオフを得ることができた。

図 1 6 (a)の矩形($d/z_0=50\%$)では 80keV のビームエネルギーにおいてビームと電磁波の相互作用が π モード付近の後進波領域で起こり、遅波電磁波源は後進波発振器として動作する。図 1 6 (b)の矩形($d/z_0=20\%$)ではアップカットオフ周波数付近の分散曲線が、フラットな形状となっている。80keV のエネルギー領域の相互作用点は進行波領域にシフトしている。ビームエネルギーを下げても 30keV 付近において相互作用点は後進波領域に移る。このように 50 kV 以下の比較的低いビームエネルギーでさえアップカットオフ周波数付近での動作を実現できるのが図 1 6 (b)の矩形($d/z_0=20\%$)の特長の 1 つである。このような分散関係を波形導波管で実現することは無理である。

実際にマイクロ波発生実験で確認してみると、図 1 6 (a)の矩形($d/z_0=50\%$)では、60 kV 以上の電圧で、表面波とのチェレンコフ相互作用の後進波発振器動作により、200 kW 以上のマイクロ波出力が得られた。一方、図 1 6 (b)の矩形($d/z_0=20\%$)では、約 60 kV から 100 kV の印加電圧ではマイクロ波の発振は起こらなかった。しかし、50 kV 以下の約 30kV 付近という低い電圧で磁場を調整することでマイクロ波発振がみられた。磁場依存実験の結果より、0.65 T 付近でマイクロ波出力が共鳴的に増幅する結果が得られた。磁場を調整することでチェレンコフ相互作用と遅波サイクロトロン相互作用が共鳴して異常ドップラー効果による表面波励起が確認されたためと思われる。

図 1 7 に矩形($d/z_0=20\%$)のビームの空間電荷効果を含めた分散関係を示す。図中の横線はチェレンコフ相互作用と遅波サイクロトロン相互作用の共鳴動作点における周波数を表している。理論解析によるとはチェレンコフ相互作用と遅波サイクロトロン相互作用の共鳴磁場は 1.35T となる。これは磁場依存実験でマイクロ波出力がみられた 0.65T の約 2 倍であり、実験結果はチェレンコフ相互作用とセカンド・ハーモニックによる遅波サイクロトロン相互作用の共鳴動作によるものと考えられる。実験結果は、セカンド・ハーモニックにおける異常ドップラー効果による表面波励起を実証するものがある。この遅波サイクロトロンメーザ動作においても、遅波導波管の両端の条件を変えることで、軸対称および非軸対称の発振モード制御が可能であることを示した。得られた表面波励起による発振電力は 1 kW 以下であったが、比較的low磁場で比較的エネルギーの低い領域での表面波励起とモード制御であり、実用面から見ても将来性のある成果といえる。

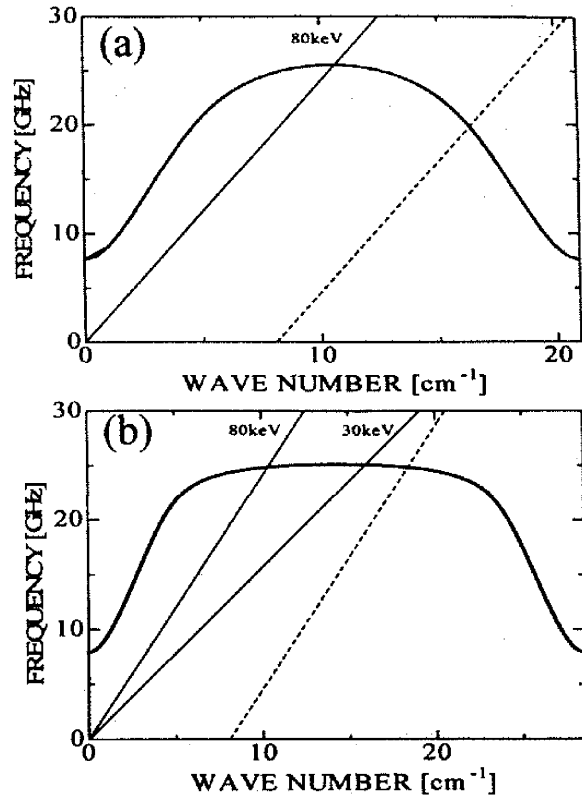


図 1 6 矩形コルゲート遅波導波管の分散特性：(a)は表 4 導波管 B，(b)は表 4 導波管 C の分散特性である。実線と点線は、それぞれビームの空間電荷モードと遅波サイクロトンモードである。

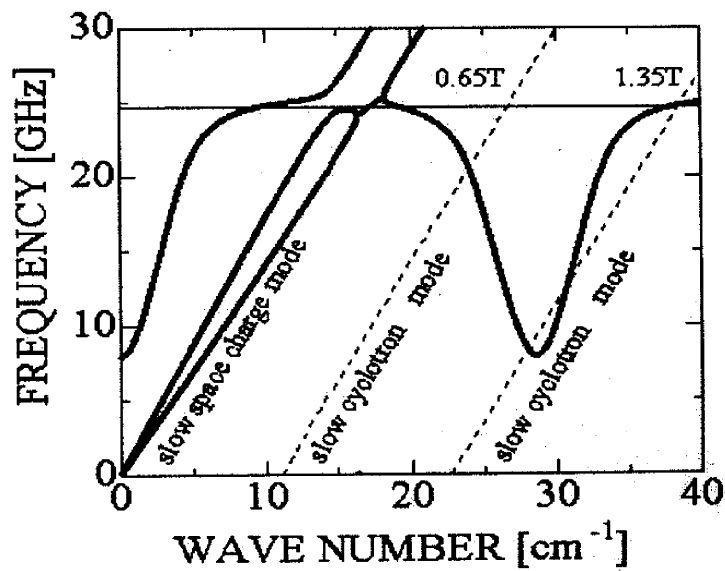


図 1 7 遅波導波管の分散特性とビーム相互作用

遅波導波管特性評価実験

オーバーサイズ遅波導波管の電磁場特性を実験的に評価するためベクトルネットワークアナライザ（図18）と校正キット（図19）を用いてミリ波測定系の評価システムを準備し、空洞共振法により20 GHz帯遅波導波管の分散特性を実験的に評価した。ミリ波帯励起アンテナとしては針アンテナおよび円盤型アンテナ（図20）を用いる。平坦なアップカutoffを有する矩形コルゲート導波管（図21）の軸方向モードを測定した例を図22に示す。軸方向モードに対応して、反射（ S_{11} ）が減り透過（ S_{21} ）が増加する。計算と比較し、結果の正当性について検討した。軸方向モードが全て特定できておらず、高次モードの評価もこれからである。測定系の接合部での共振モードの影響を少なくしていくことも今後の課題である。

ドリフト管を組み合わせた電磁場特性や不連続部の影響を調べ、モード制御に必要な基礎データを収集した。ブラッグ反射の効果を定量的に評価したが、各コンポーネントの共振モードおよび高次モードの影響も大きく、評価システムのさらなる改善が必要である。また30-40 GHz帯においては、導波管モードを励起するアンテナの結合度が悪くなる。今後、ミリ波帯励起アンテナのさらなる検討を進めていく必要がある。

ミリ波測定系の評価システムは、ミリ波発生実験において、遅波電磁源の出力窓と受信アンテナの間の結合度を調べるためにも使用した。放射パターン測定と合わせ出力電力の評価を行っている。今後、受信アンテナ系の検討と合わせ、熱的な出力評価も検討し、さらに評価精度と信頼性を上げていきたい。

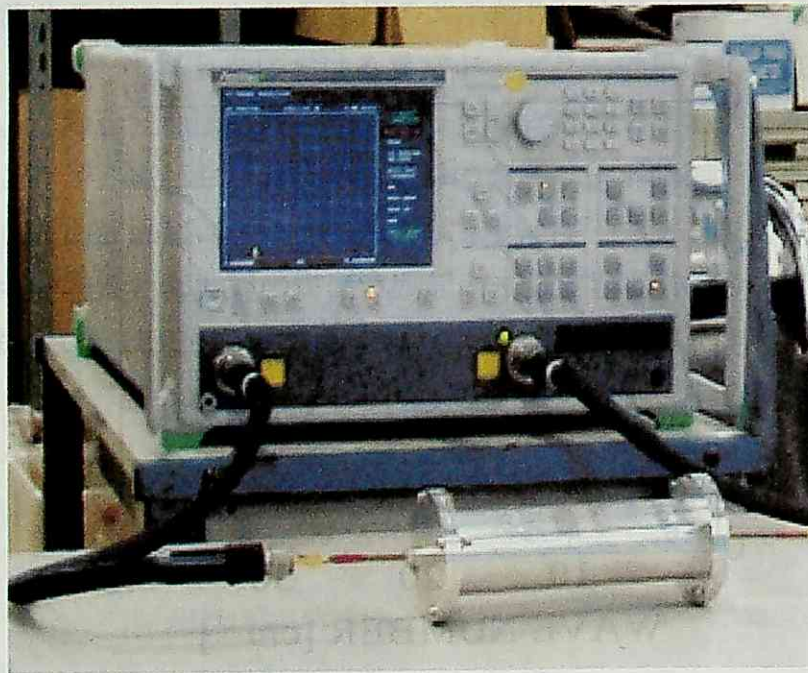


図18 ミリ波帯（DC-40GHz）ベクトルネットワークアナライザ

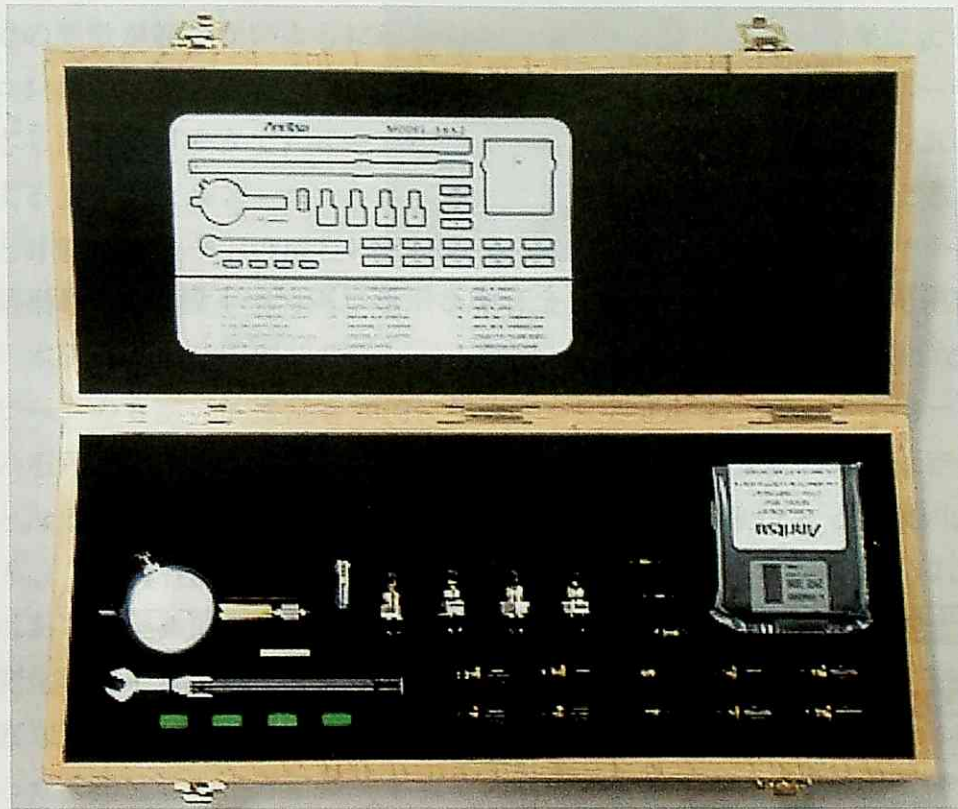


図19 ミリ波帯 (DC-40GHz) 校正キット

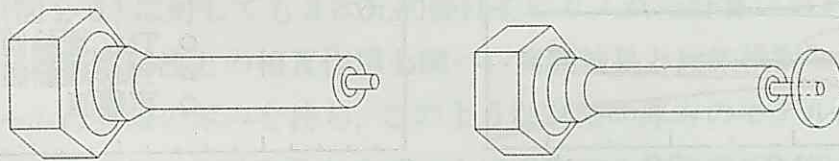


図20 校正用励起アンテナ：針アンテナ（左）と円盤アンテナ（右）

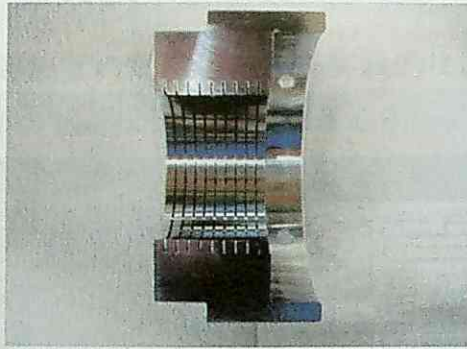


図 2 1 平坦なアップercットオフを有する矩形コルゲート導波管断面

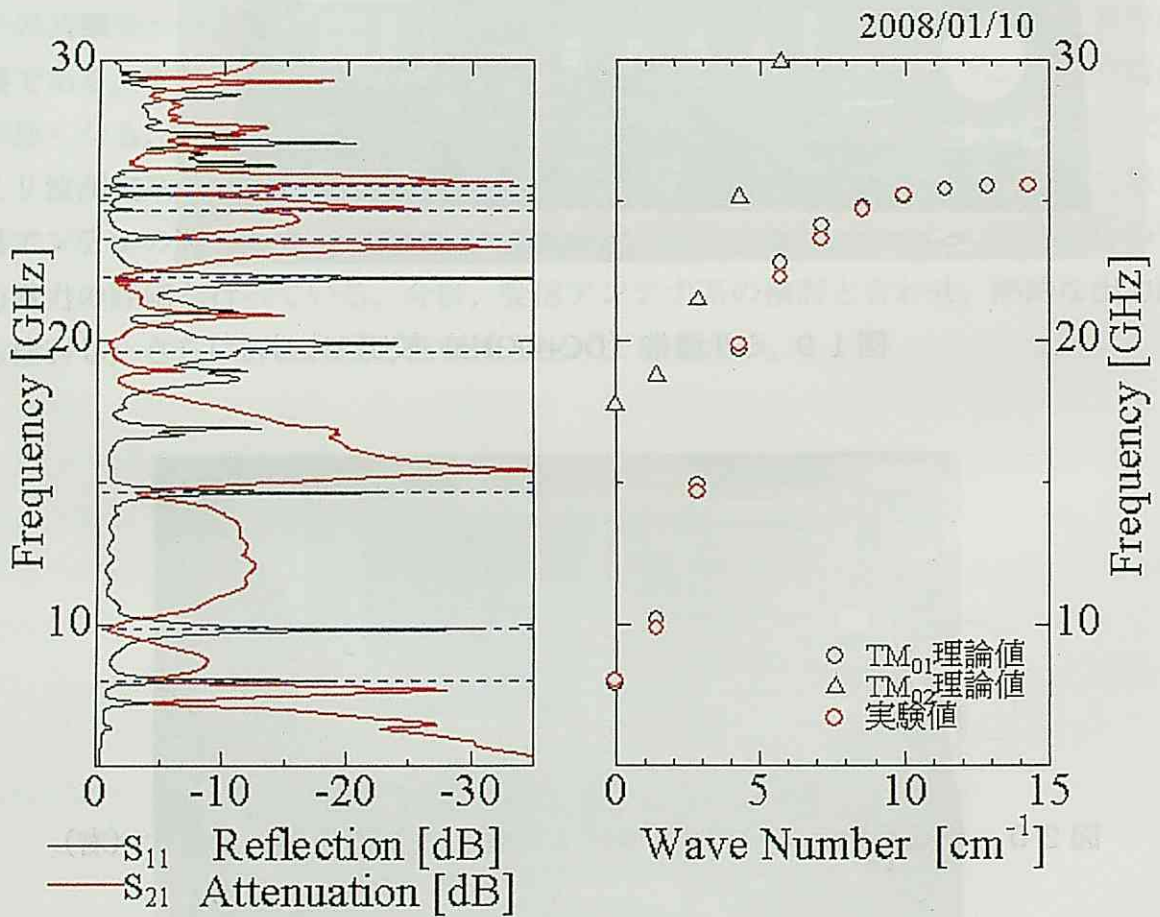


図 2 2 空洞共振法による測定例 ($\phi 3\text{mm}$ の円盤アンテナ使用)

理論的解析

最後に、理論的解析について述べる。オーバーサイズ遅波導波管の場合でも計算過程での発散が起きないように改良を加えた。異常ドップラー効果による遅波サイクロトロン相互作用の計算プログラムを作成し、図 17 のようにオーバーサイズの実験に対応したパラメータで、ビーム相互作用の解析を可能とした。ビームの 3 次元的擾乱による変位をセルフ・コンシステントに扱った数値解析の結果によると、軸対称モードと非軸対称モードの成長率は同じ程度である。実験でも両方のモードが見られ、計算結果と定性的に一致する。ビーム形状としては、均一に分布した円筒状ビームに加え、本研究により円環状電子ビームに対しても解析ができるようになった。

ビームの 3 次元的擾乱を如何に扱うかを定性的に述べる。まず均一な密度で分布している円筒状電子ビーム (図 23) では、ビーム内の擾乱の効果は空間電荷密度の変化となる。境界面に垂直な擾乱は図のように境界面の変位として扱い、ビーム表面 (半径 R_{ba}) の表面電荷として現れる。厚み無限小のシート状のモデルは、「近似モデル」ではあるが理論的解析においては重要なものである。シート面内の変位は面電荷密度の変化として現れるため、一見すると最も簡単なモデルに見える。しかしシート面に垂直な運動が電磁界に及ぼす効果をどのように取り入れるかが大変に難しい課題であった。図 24 のようにシート面そのものの変位を考える必要があり、本質的に非線形モデルである。導波管内の電磁界特性はマクスウェルの方程式と境界値で決まるが、方程式は楕円型であり、境界面上の関数とその微分係数で内部の関数は一意的に決まる。つまり導波管境界とビーム境界により電磁界特性は一意的に決まる。シート面に垂直な運動の効果を取り入れたビーム面上での境界条件を使えばよいことになる。本研究では、求めた境界条件を非線形のまま扱わず、線形化して円環シート状ビームとして、他のビーム形状の結果と比較検討した。さらに、円環の有限の厚みを考慮した場合 (図 25) に対しても 3 次元的擾乱を取り入れた計算プログラムを作成し、固有モードと遅波電磁波との相互作用を調べ、実験結果と比較検討した。実験では円環状電子ビームは有限の厚みを持ち、このような有限の厚みのモデルは当然と思われる。しかし、これまでに有限の厚みのモデルに対応する数値解析の報告が無かったことを考えると、その困難さが理解できるであろう。電子ビームの効果は、図 25 の左側のように電荷密度として現れる場合と右側のように電気二重相として現れる場合がある。前者は図 23 と図 24 に対応しており、ビームモードや相互作用の特徴は円筒状ビームやシート状ビームに対応するものが存在する。ところが電気二重相に対応するビームモードは、我々の知る限り、報告が無い。本研究で初めて明らかにされたといえる。このモードも含めて、チェレンコフ相互作用および異常ドップラー効果での遅波サイクロトロン相互作用による表面波励起を調べるのが可能になった。

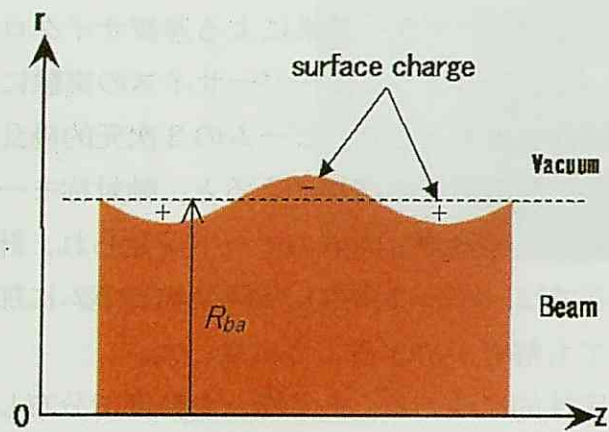


図 2 3 円筒状電子ビーム

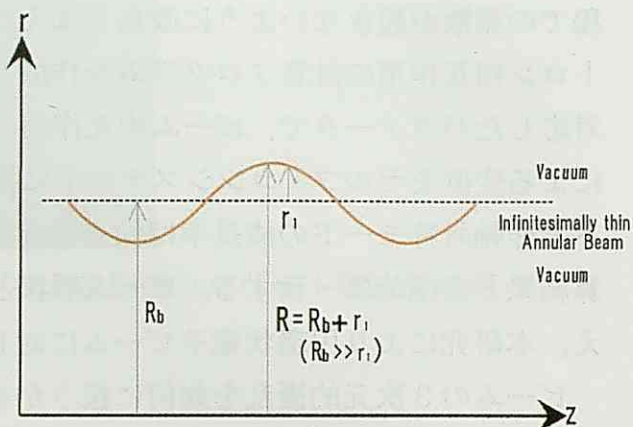


図 2 4 円環シート状電子ビーム

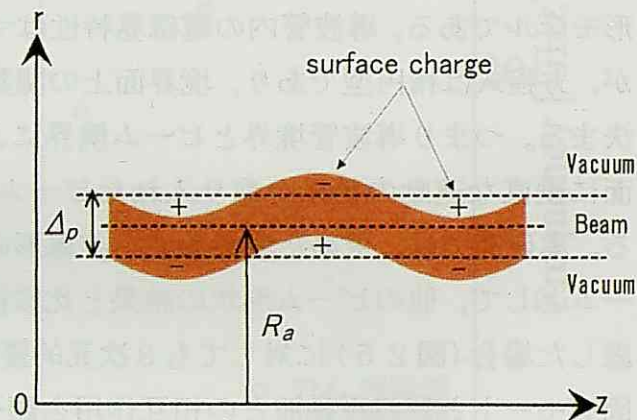
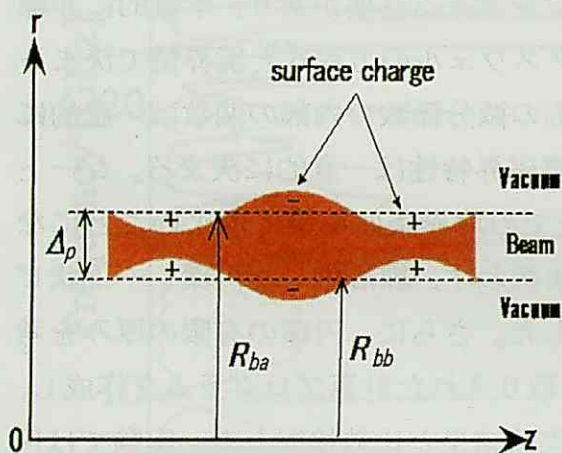


図 2 5 円環状電子ビーム：面電荷（左）と電気二重相（右）

4.4 まとめ

マイクロ波・ミリ波帯への高周波数化においては、「オーバーサイズ」と「モード制御」がキーワードである。本研究では弱い相対論的電子ビームによりオーバーサイズ遅波導波管の表面波を励起することを目指す。チェレンコフ相互作用に加えて異常ドップラー効果による遅波サイクロトロン共鳴相互作用による励起を調べた。以下に成果報告の内容をまとめる。既に学会誌に発表している成果は、本報告書の後半の添付資料に載せた。

弱い相対論的領域では大電流の電子ビーム生成そのものも解決すべき重要な問題である。本研究では新しくディスクタイプの冷陰極を提案し実験に用いた。陰極と陽極間の短絡を防ぎ、弱い相対論的領域で均一性の良いビームを発生させた。ディスクタイプの冷陰極と高電圧パルス電源システムと組み合わせた大電流・高電圧パルス動作について調べた。また、陰極の耐久性について調べ、10 MW レベルのパルス数 100 ns に対して、1000-2000 ショット以上は使用できることを確認し、100 kW 級の大電力遅波発生実験に応用した。

大電力マイクロ波・ミリ波発生に関しては、電子ビームとオーバーサイズ遅波導波管特性の改善により 20GHz 帯で約 500kW, 40GHz 帯で約 200kW まで出力が上昇している。ブラッグ反射器と新しいタイプの陰極を組み合わせることで発振出力の安定化および増加を示した。また遅波導波管端の条件を変えることで、軸対称と非軸対称モードの制御が可能であることを実証した。本研究では、ブラッグ反射器および高周波数や電圧を下げた動作に合うような遅波導波管は、三角関数による波形コルゲートではなく、矩形コルゲートを用いて製作した。製作が容易になり製作精度が上がるためである。ビーム回収ポートを使用することで出力に増加の傾向は見られたが、大幅な改善ではなかった。ビーム回収ポートはマイクロ波の長時間発生やシステムの高効率化には大変重要な技術であり、今後さらに検討する必要がある。

遅波構造として矩形を採用して平坦なアップercットオフを実現した。ビームが 50 kV 以上では表面波とのチェレンコフ相互作用は進行波領域で起こり発振は見られなかったが、比較的エネルギーの低い 40-50 kV 以下では磁場を調整することでチェレンコフ相互作用と遅波サイクロトロン相互作用が共鳴して、異常ドップラー効果による表面波励起が確認された。この遅波サイクロトロンメーザ動作においても、遅波導波管の両端の条件を変えることで、軸対称および非軸対称の発振モード制御が可能であることを示した。本研究で得られた表面波励起による発振電力は 1 kW 以下であったが、比較的エネルギーの低い領域での表面波励起とモード制御であり、実用面から見ても将来製の見込める成果といえる。

オーバーサイズ遅波導波管の電磁場特性を実験的に評価するためベクトルネット

ワークアナライザと校正キットを用いた評価システムを準備し、空洞共振法により 20 GHz 帯遅波導波管の分散特性を実験的に評価した。計算と比較し測定結果の妥当性について検討した。ドリフト管を組み合わせた電磁場特性や不連続部の影響を調べ、モード制御に必要な基礎データを収集した。30-40 GHz 帯においては、導波管モードを励起するアンテナの結合度が悪くなった。今後、ミリ波帯励起アンテナの検討を進めていく。

最後に、数値解析においては、数値の発散を無くしオーバーサイズ遅波導波管の固有モードである表面波との相互作用が解析できるようになった。3 次元的擾乱を取り入れた計算プログラムによりオーバーサイズ遅波導波管の固有モードと遅波電磁波との相互作用を調べ、実験結果と比較検討した。ビーム形状としては、これまでは均一に分布した円筒状ビームのみであったが、本研究により円環状電子ビームに対しても解析ができるようになった。ビームの 3 次元的擾乱による変位をセルフ・コンシステントに扱った数値解析である。異常ドップラー効果による遅波サイクロトロン相互作用の表面波励起をオーバーサイズの実験に対応したパラメータで調べることができるようになった。一般にオーバーサイズ導波管での数値計算は大変に困難である。我々の開発した計算プログラムはその困難さが大幅に軽減されている。今後さらに実験に対応した解析を進め、チェレンコフ相互作用および異常ドップラー効果による遅波サイクロトロン相互作用による表面波励起を定量的に調べていく予定である。

本研究の異常ドップラー効果による表面波励起は、ビーム中のプラズマ波動を利用したものであり、プラズマ波動の基礎と応用の分野で大変重要な研究分野である。流れのあるプラズマの波動とその応用としても大変に興味深いものがあり、プラズマ物理としても今後の発展が期待できるものである。

謝辞

本研究を進めるに当たり、筑波大学の長照二教授、平田真史講師、文部省核融合科学研究所の下妻隆准教授、金沢大学の鎌田啓一教授、安藤利得准教授および宇都宮大学の湯上登准教授には有益なご助言とご指摘を頂きました。深く感謝致します。実験の遂行、データ解析、数値計算等に当たっては、次の学生諸氏に負うところが大きいです。新潟大学大学院自然科学研究科の大江弘晃氏、風張勇介氏、高嶋裕介氏、山川光寿氏、飯塚洋志氏、大坪宏輔氏、番匠聖志氏。ここに感謝致します。

参考文献

- [1] R. J. Barker and E. Schamiloglu, *High-Power Microwave Sources and Technologies* (IEEE Press, New York, 2001).
- [2] S. P. Bugaev, V. A. Cherepenin, V. I. Kanavets, V. I. Koshelev, V. A. Popov, and A. N. Vlasov: “Investigation of a Millimeter-Wavelength-Range Relativistic Diffraction Generator”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol.18, pp.518-524 (1990).
- [3] S. P. Bugaev, V. A. Cherepenin, V. I. Kanavets, A. I. Klimov, A. D. Kopenkin, V. I. Koshelev, V. A. Popov, and A.I.Slepko: “Relativistic Multiwave Cerenkov Generators”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol.18, pp.525-536 (1990).
- [4] K. Ogura, K. Minami, K. Kurashina, W. S. Kim, T. Watanabe, K. Ishi and S. Sugito: “Experiment on a Large Diameter Plasma-Filled Backward-Wave Oscillator”, *Fusion Engineering Design*, **26**, pp.365-373 (1995)
- [5] Md. R. Amin, K. Minami, K. Ogura, X. Z. Zheng, and T. Watanabe: “Resonant Enhancement of Radiation from a Backward Wave Oscillator Utilizing Large Diameter Corrugated Metal Structure”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **64**, pp.4473-4484 (1995)
- [6] K. Ogura, M. R. Amin, K. Minami, X. D. Zheng, Y. Suzuki, W. S. Kim, T. Watanabe, Y. Carmel, and V. L. Granatstein: “Experimental Demonstration of a High-Power Slow-Wave Electron Cyclotron Maser Based on a Combined Resonance of Cherenkov and Anomalous Doppler Interactions”, *Phys. Rev. E*, vol.53, pp.2726-2729 (1996).
- [7] A. N. Vlasov, A. G. Shkvarunets, J. C. Rodgers, Y. Carmel, T. M. Antonsen, Jr., T. M. Abuelfadl, D. Lingze, V. A. Cherepenin, G. S. Nusinovich, M. Botton, and V. L. Granatstein: “Overmoded GW-Class Surface-Wave Microwave Oscillator”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol.28, pp.550-560 (2000).
- [8] K. Ogura, R. Yoshida, Y. Yamashita, H. Yamazaki, K. Komiyama, and M. Sakai: “Study on Oscillation Starting Condition of K-Band Oversized Backward Wave Oscillator Driven by a Weakly Relativistic Electron Beam”, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, vol.6, pp.703-706 (2004).
- [9] K. Ogura, R. Yoshida, K. Komiyama, M. Sakai and H. Yamazaki: “Experimental Demonstration of Mode Change in a Q-Band Oversized Backward Wave Oscillator”, *IEEE Trans.*, vol.124, pp.456-460 (2004).
- [10] K. Ogura, T. Azegami, O. Watanabe, and T. Watanabe, “Interaction of Axially Streaming Electron Beam with Axisymmetric TM Mode in a Periodical Slow Wave Structure with Finite Magnetic Field,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **67**, pp.3462-3470 (1998).
- [11] O. Watanabe and K. Ogura: “Normal Modes and Their High-Frequency Instabilities in

- Unbounded and Bounded Systems with Magnetized Electron Beam”, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, vol.3, pp.601-604 (2000).
- [12] O. Watanabe, K. Ogura, T. Cho, and Md. R. Amin: “Self-Consistent Linear Analysis of Slow Cyclotron and Cherenkov Instabilities”, *Phys. Rev. E*, vol.63, pp.6503(1-9), 2001.
- [13] K. Ogura, H. Yamazaki, O. Watanabe and Md. R. Amin: “Cherenkov Instability due to Unmagnetized Electron Beam in Periodically Corrugated Waveguide”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp.7095-7103 (2003).
- [14] H. Yamazaki, O. Watanabe, Y. Yamashita, M. Iwai, Y. Suzuki, and K. Ogura: “Cherenkov and Slow Cyclotron Instability in Periodically Corrugated Cylindrical Waveguide with Low Magnetic Field Region”, *IEEJ Trans.*, vol.124, pp.477-482 (2004).
- [15] E. Benova, S. T. Ivanov and A. A. Rukhanze: “Surface Waves in a Plasma Flow”, *J. Plasma Phys.*, vol.63, pp.489-493 (2000).
- [16] L. Shenggang, Y. Yang, M. Jie and D. M. Manos: “Theory of Wave Propagation along a Waveguide Filled with Moving Magnetized Plasma”, *Phys. Rev. E*, vol.65, pp.036411(1-8), (2002).
- [17] H. Yamazaki, K. Ogura and T. Watanabe: “Numerical Examination of Electromagnetic Field Properties in a Cylindrical Periodic Slow Wave Structure”, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, vol.6, pp.719-722 (2004).