

マッチングファンド方式による産学連携研究開発事業

ミリ波イメージングレーダーの開発

研究開発プロジェクト総括研究成果報告書

平成13年5月

総括代表者

間 瀬 淳

(九州大学先端科学技術共同研究センター・教授)

企業分担代表者

坂 田 栄 二

(九州日立マクセル株式会社新分野開発プロジェクト・プロジェクト長)

研究開発プロジェクトの背景・経緯と目的

光学測定において、可視光-X線領域では、それぞれの波長域に感度をもつ多チャンネル検出器が市販されており、高時間・空間分解特性をもつ画像計測が進んでいるが、ミリ波・サブミリ波領域では殆どなされていない。一方、最近の通信需要の急激な増加という市場の要請と、半導体素子の性能向上により、ミリ波を利用したシステムの実用化の気運が高まっている。ミリ波帯でのイメージング装置、すなわち、画像計測システムの確立は、その中でも大いに実現が期待される分野の一つと考えられる。

代表者等は、先端的なミリ波計測システムの開発および改良を、核融合プラズマを対象とした高温プラズマ診断への適用を図りながら行ってきた。イメージング装置の中心となる多チャンネル検出器は、アンテナアレイにビームリード形ショットキーバリアダイオードを接着したハイブリッド形検出器から、モノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)の技術を用い、アンテナ、ショットキーバリアダイオード、中間周波数アンプが一体化したモノリシック形検出器を企業研究機関との協力で完成し、その高性能特性を検証した。また、光線追跡計算を用いた準光学結像系の設計・製作を行い、理論値との比較も行ってきた。両者を組み合わせた計測装置は、プラズマからのサイクロトロン放射イメージングの測定に有効なシステムとして期待されている。一方、ミリ波を用いた反射計(レーダー)測定も開発を進めており、高速掃引FM反射計、超短パルス反射計など世界に先駆けて成果を上げてきている。

入射波とイメージング装置を組み合わせた、能動的なイメージングレーダーを完成させることにより、プラズマを動的にも画像化する究極的な診断法が実現するものと考えている。一方、ミリ波デバイスおよびシステムに関連したシンポジウムや国際会議において、他分野の研究者および企業研究者と接する機会が多く、そこでの議論からプラズマ以外の分野においても十分応用できることが提案されており、本研究を企画する発端となった。また、ミリ波MMIC技術の利用には企業研究機関の協力が不可欠であるが、本研究に参加する企業の関連施設が保有する基盤技術のレベルで十分可能であると考えられている。

本研究は、ミリ波帯で動作する多チャンネル検出器と光学素子を組み合わせた能動的なイメージング(撮像)装置を製作し、種々の用途に活用するべく実証実験を行っていくことを目的とした。具体的には、以下ようになる。

① 平面形アンテナアレイ、周波数変換のためのショットキーバリアダイオード、中間周波数アンプ、および局部発振器で構成される集積化された受信機システム、および光学素子から構成されたミリ波イメージングアレイ(撮像装置)の設計・製作を行い、実験室でのシミュレーション実験に適用する。

② モノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)を利用したイメージングレーダー装置の開発を、産学連携のもとに進め、コストの低減化、コンパクト化の方式を探り、その実用化を促進させる。

共同研究組織

- | | |
|----------|--|
| ・総括代表者 | 間瀬 淳(九州大学・先端科学技術共同研究センター・教授) |
| ・研究分担者 | 北條仁士(筑波大学・物理学系・助教授) |
| ・企業分担代表者 | 坂田栄二(九州日立マクセル株式会社・新分野開発プロジェクト・プロジェクト長) |
| ・ | 嶋津博士(九州日立マクセル株式会社・EF2事業部・事業部次長) |
| ・ | 青井正司(九州日立マクセル株式会社・新分野開発プロジェクト・主任) |
| 合 計 | 5名 |

研究期間 平成12年3月17日～平成13年3月31日

研究開発の実施状況等

(1) 研究開発の実施状況

ミリ波イメージングレーダー装置は、被測定物体にプローブ光を入射する発振器、光学系、及び検出器アレイで構成されている。受動方式では入射光源が不要で、物体の放射する熱雑音のうちミリ波帯を受信し、光源の像を形成するものであるが、能動方式では、プローブ光として周波数変調あるいはパルス変調された発振器の利用によりレーダーの原理も利用する。本研究の当初の研究計画・方法は以下の通りである。

）ミリ波帯域で動作する高感度検出器アレイを協力企業の研究施設において製作する。モノリシック集積回路技術により試作しプラズマ計測に適用した検出器では、ガリウム砒素（GaAs）基板上に広帯域特性をもつボウタイアンテナ、アンテナの中心に位置するショットキーバリアダイオード、ダイオードにより周波数変換された中間周波数出力を増幅するヘテロバイポーラ接合トランジスタ（HBT）アンプが一体化している。アンテナとしてはボウタイアンテナ以外に、多チャンネル化が容易なパッチアンテナ、高利得をもつ八木宇田アンテナが考えられ、それぞれを試作した後、特性を比較し、実用化に適しているものを選択するとともに、設計の最適化を実現する。この特性測定には、ベクトルネットワークアナライザーと精度の高いアンテナ特性測定が可能な近傍界アンテナ計測システムを使用する。

）準光学伝送（レンズ、ミラーの組み合わせ）で損失および収差の少ない光学系を設計・製作するがウスビーム伝搬公式と光線追跡計算を併用しその最適化を図る。

）入射光源としては、周波数変調されたミリ波、短パルスミリ波、フーリエ周波数成分がミリ波領域に達する超短パルス波を利用し、レーダー方式としての性能および有効性を比較検討する。超短パルス波の更なる高周波化のためには、光源として 60-90 GHz 帯のガン発振器を利用したアップコンバーター方式を用いる。超短パルス波などの光源および信号処理部は現有設備を利用する。

）光学系と二次元検出器を組み合わせたイメージングレーダー装置を製作し、大学におけるシミュレーション実験で性能を確認した後、各種測定への適用を図っていく。プラズマ測定には文部省核融合科学研究所および日本原子力研究所の大型装置を利用する。実験の進行を一層促進させるためポスドクを雇用する。

）光学系および検出器アレイアンテナの設計の指針を得るため、ミリ波帯電磁波の種々の媒質中の二次元伝搬特性を調べる計算機シミュレーションを実行する。さらに本計測システムの有効性を確かめるため、ミリ波診断シミュレータの構築を行う。この課題は筑波大学の研究分担者が担当する。その目的のためサーバーと端末を有する計算機システムを設置する。

研究代表者、研究分担者、および企業研究分担者間の役割分担を図示すると図1のようになる。

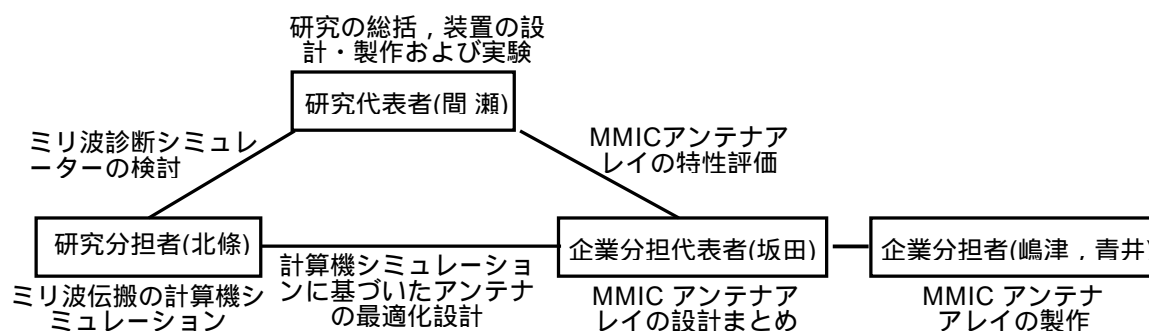


図1 . 研究組織と役割分担

(2) 各機関別の研究開発目標, 実施方法, 成果

(2-1) 九州大学

今年度は, ミリ波イメージングレーダーの構成のための重要な要素である, 準光学結像系を用いたイメージング装置, 周波数変調波 (FM) あるいはパルス波を入射波として用いたレーダー装置の設計および製作を行い, 種々の分野への応用に関する原理的実証を目標とした。

本研究機関では, 前記実施状況の (), (), () を中心として研究を進めてきた。以下, ミリ波イメージング装置を核融合プラズマ測定に適用した結果, パルスレーダーの一種として最近注目を浴びている超短パルスレーダーのプラズマ計測への応用, FM あるいはパルスレーダーによるコンクリート非破壊検査について得られた成果を記述する。

1. 電子サイクロトロン放射 (Electron Cyclotron Emission: ECE) イメージング

1.1 はじめに

核融合プラズマにおける電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測は, 受信周波数がプラズマ中の半径方向の局所位置に対応するという, 他の計測法にはない特徴を有しており, 等磁気面上のプラズマを投影するイメージングアレイ (撮像装置) と結合させることによりプラズマ断面の分布情報を得ることができる。また, 多チャンネル信号の相関測定によりインコヒーレントな雑音に埋もれる電子温度揺動の測定が可能となる。本研究は, この ECE イメージングを LHD で実現し, 電子温度揺動のスペクトルおよび分布情報の詳細を得ることを目的としている。ミリ波帯におけるイメージング測定は, 中小型の装置では実現しているが, LHD のような大型装置において実現することができれば, 今後の揺動解析の研究に大いに貢献するものと考えられる。

1.2 実験装置

ミリ波イメージング装置は, 準光学結像系と平面型検出器アレイにより構成される。LHD に設置したシステムの概略を図 2 (左) に示す。準光学結像系としては, 回転楕円面で構成される集光ミラーと平面ミラーを真空容器内に設置することにより, 真空窓は実質 200 mm で済ませることが可能となった。図 2 (右) は光学系の光線追跡計算結果, 図 3 はプラズマ中心に対応する位置に周波数 140 GHz の点光源を置いて測定したエアリーパターンの結果である。X 軸上のパターンがトロイダル面に, Y 軸上のパターンがポロイダル面に相当する。図より, 二次元面上プラズマ中心領域 ± 100 mm で有効なパターンを得ることができた。光学系の倍率も設計値と良く一致し 0.68 であった。

検出器は, テラテック株式会社第一研究部において, マイクロ波モノリシック集積回路 (MMIC) 技術により製作された。受信アンテナ (ボウタイアンテナ), 周波数変換のためのショットキーバリアダイオード, および ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) アンプが GaAs 基板上に一体化しており, 何度かの改良の後, 図 4 (右) に示すようなパターンとなった。本検出器のヘテロダイン特性を 70-140 GHz 帯で実施し, ハイブリッド検出器と比較して中間周波数 10 GHz と約 1 桁の広帯域特性をもつことが確かめられている。検出器はアルミニウム製のシールドボックス内に並べられ, 雑音成分の除去

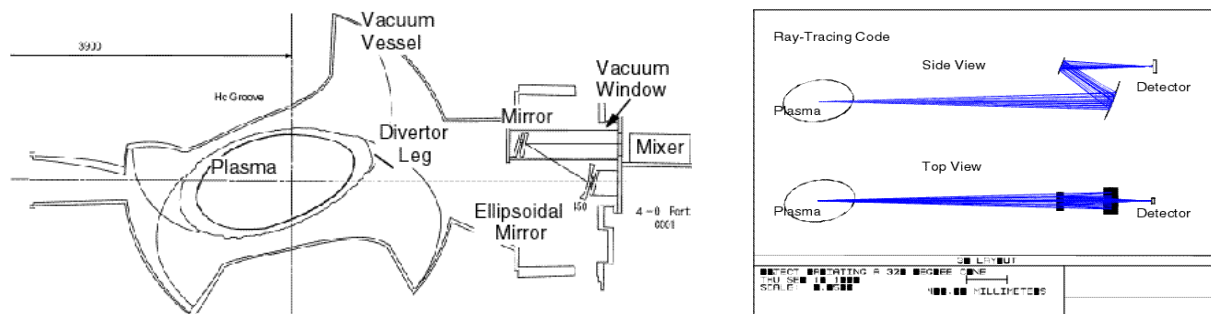


図 2 LHD-ECE イメージング光学 (左) と光線追跡結果 (右)。

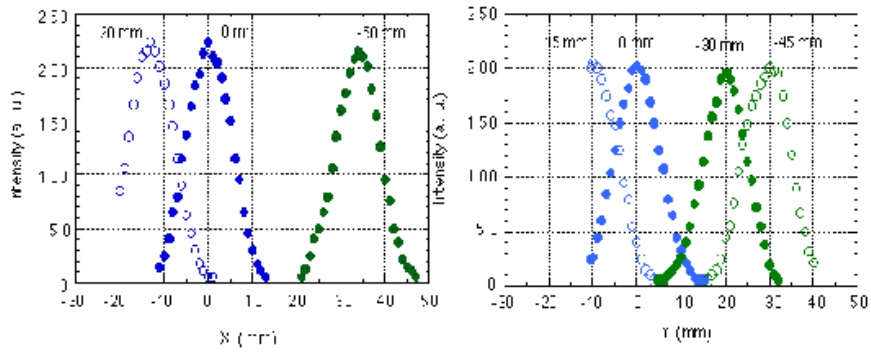


図3 光学系のエアリーパターン .

のため信号側（検出器面）および局部発振器（LO）側（検出器裏面）の両側に、140 GHz TE₁₀ 基本モード導波管で構成されるアンテナアレイが取り付けられている。ECE 信号と LO 出力をミックスすることにより得られる中間周波数（IF）信号は、HBT アンプ+メインアンプ（周波数帯域 1-8 GHz，利得 80 dB）により増幅され、フィルターバンク（中心周波数 1-8 GHz，帯域幅 300 MHz）により分割された後、それぞれの周波数ごとに第2 検波器により自乗検波される。全システムを LHD に設置したときの配置図を図5 に示した。

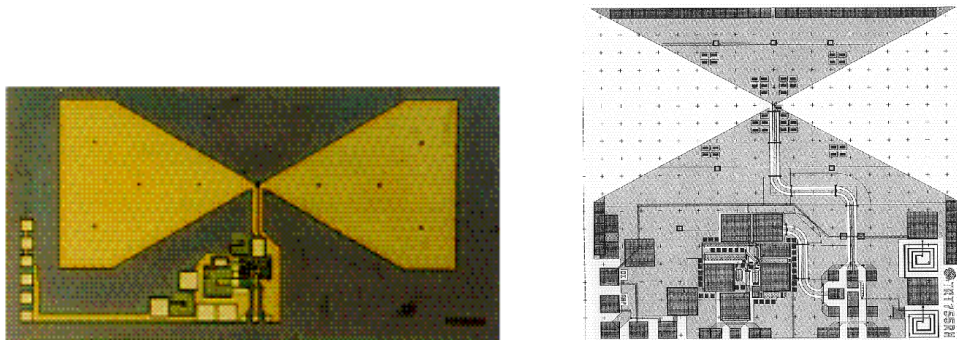


図4 検出器のマスクパターン . 左：初期パターン，右：改良型（テラテック(株) 第一研究部）.

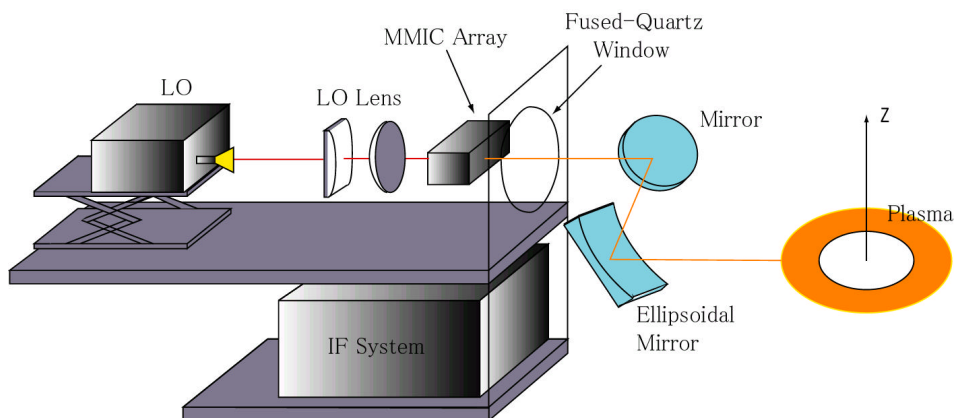


図5 LHD における ECE イメージング装置の全体図 .

1.3 実験結果

初期実験より、信号波形は LHD 計測システムのヘテロダイン受信機信号とよく一致していることが確かめられた。また、今回の実験で、同時 2 検出器および各周波数チャンネルにわたって ECE 信号を得ることに成功している。ただし、デジタルスコープにより得られたものであり、高周波成分の解析および相関処理などは今後の課題である。

LHD における ECE イメージング測定のための光学系の真空容器内取り付け、検出器マウント、LO 光学系、および IF システムの設計・製作を行い。全システムを用いて LHD プラズマからの ECE 信号の検出に成功した。

2. 超短パルスレーダー

2.1 超短パルスを用いた計測

時間幅 τ_p をもつインパルスは、そのフーリエ成分として、特性周波数 $\omega_0 = 1/\tau_p$ 、最大周波数 $\omega_{\max} = 2/\tau_p$ で分布するスペクトルを有する。従ってその周波数がマイクロ波～ミリ波領域に達するパルス幅 100 ピコ秒 (ps) 以下の超短パルス波は、一台のパルス発振器で多数個の周波数固定発振器あるいは広帯域掃引発振器と等価な役目をもつことになる。超短パルスを入射波として用いることにより種々の測定対象に対応して最適な周波数領域を選択することができるとともに、透過、反射、および吸収など様々な特性を同時に持たせることも可能となる。例えば、プラズマのカットオフ周波数より低いフーリエ周波数成分は、カットオフ層により反射されるが、周波数によって反射点が異なり反射波に時間差が生じるため、検出器への到達時間と周波数スペクトルを測定することによりプラズマの密度分布を決定することができる。一方、高周波成分はプラズマ中を屈折あるいは電子サイクロトロン共鳴周波数領域では吸収を受けながら透過する。この電磁波の屈折はプラズマの密度の関数であり、また、吸収は密度および電子温度両者の関数であるため、透過波の周波数スペクトルを測定することにより電子温度を決定することも可能となる。

2.2 超短パルス反射計の定常プラズマへの適用

超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用の応用として、核融合実験装置の計測手段として最も期待されている反射法への適用がある。プラズマがほぼ定常の場合には、パルスの繰り返しを利用し、サンプリングスコープを利用することが考えられる。この場合反射波波形を直接観測するため、時間・周波数解析をほどこすことができれば、周波数対飛行時間を連続的に求めることが可能となる。本研究では高周波励起誘導結合形プラズマに超短パルス反射計を適用した。図 6 (上) にプラズマが無い場合と有る場合の反射波を示した。初期の時間 (< 72.5 ns) に見られるのは、入射窓からの反射で、プラズマが生成された場合、72.7-74.5 ns の間で大きな反射波を観測することができる。この反射波の周波数スペクトルの時間変化を得ることができれば、各周波数に対する飛行時間が連続的に求められることになる。

実験ではまず

$$\varphi_{\omega}(t) = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi}} \exp(i\omega t) \exp\left(-\frac{\omega^2 t^2}{8\sigma\pi^2}\right)$$

で表されるガウシアン・ウエーブレットを用い、

$$S(\omega, t) = \int s(\tau) \varphi_{\omega}(t - \tau) d\tau$$

の重畳積分を行うことにより、反射波信号 $s(t)$ のウエーブレット・スペクトルを導出した。図 6 (下) が反射波形にウエーブレット変換を施したもので、プラズマからの反射波の時間・周波数を分解良く求め

ることができる。さらに、導波管内伝搬による分散特性を考慮することにより、各周波数に対する飛行時間から Group Delay が得られ、密度分布を再構成することができる。

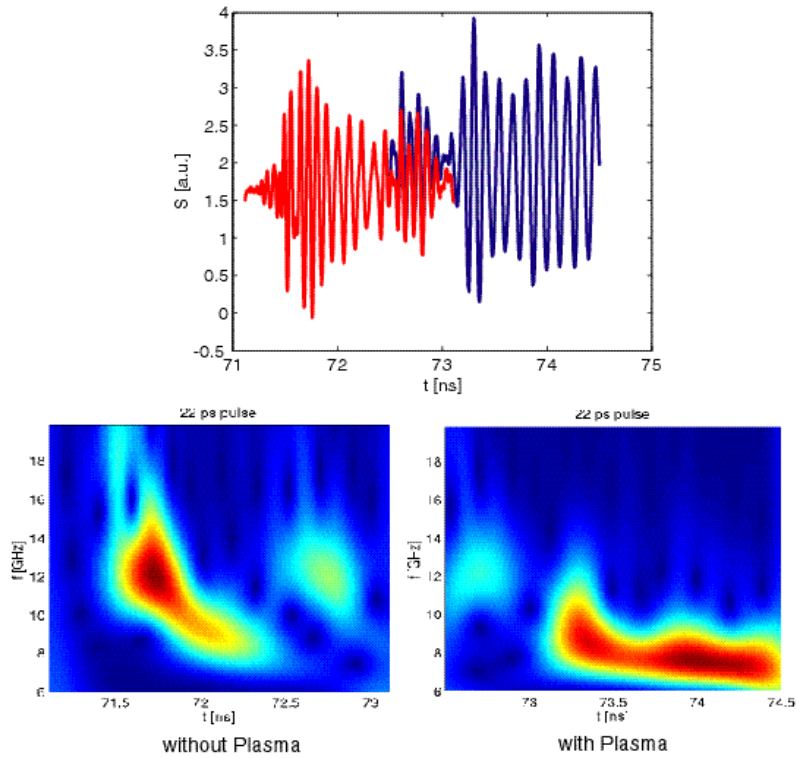


図6 上：誘導結合形定常プラズマに適用した超短パルス反射計信号，
下：プラズマの有無に対するウェーブレット解析信号。

本研究では、新しく Signal Record Analysis (SRA) 法による密度分布再構成を提案した。この方法は、インパルスのプラズマ中伝搬に関する解析モデルを用い、仮定された密度分布による反射波波形を反復計算しながら実験値に対応する波形を与える分布を導出していくものである。ウェーブレット解析では図7左に示されるように周波数スペクトルが単調変化でなく異なる時間で同じピーク周波数を持つ場合、右図のように密度分布が非現実的なものとなることがあったが、SRA 法では図8のようにプロファイルの全体像を信頼度良く求められる。また、パルスの繰り返しにより反射信号を必要データ数だけ積分し逐次解析することにより、密度分布の時々刻々の変化をオンラインで表示することが可能となった。

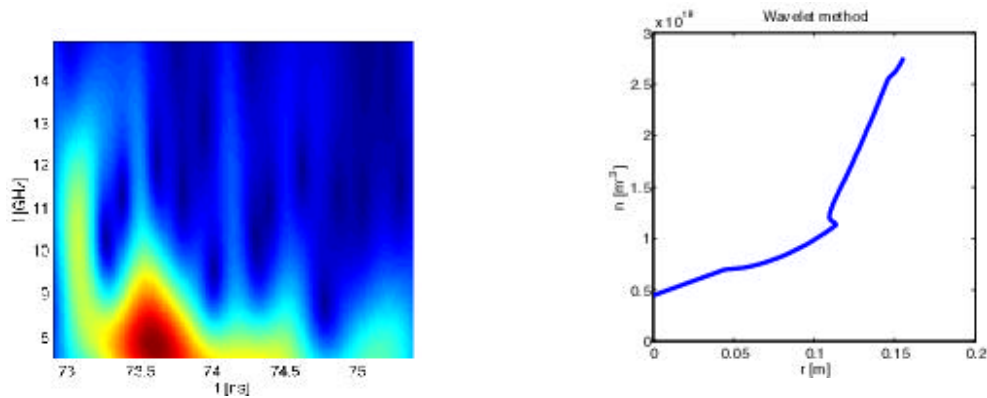


図7 ウェーブレットスペクトルの例（左）と、その時の密度分布再構成結果（右）。

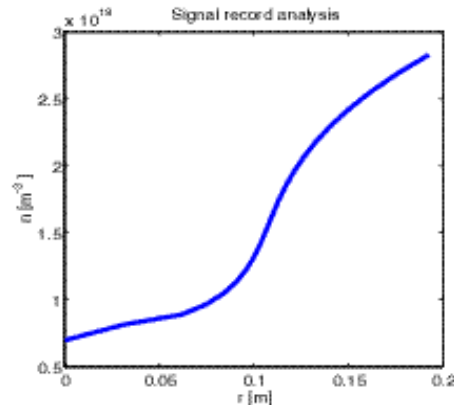


図8 図7と同一ショットでSRA法により得られた密度分布再構成結果。

3. FMあるいはパルスレーダーの非破壊検査への応用

3.1 コンクリート試供体の非破壊検査実験—透過法

ミリ波イメージングレーダーの応用分野の一つとして非破壊検査が考えられる。本章ではその原理的実証を行うため、麻生セメント株式会社より提供された、図9に示されるようなコンクリート試供体を用いて実験を行った。電磁波の媒質中の伝搬は、マクスウエル方程式を用いることにより次の波動方程式で記述することができる。

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = -\gamma^2 E_x$$

ただし、 γ は伝搬定数である。上式のうち z の正方向に進む波は、

$$E_x = E_0 e^{-\gamma z}, \quad \gamma = \alpha + j\beta$$

で与えられる。ただし、 α は減衰定数、 β は位相定数で、

$$\alpha = \frac{1}{2} \omega \sqrt{\epsilon \mu_0} \tan \delta$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu_0}, \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

のように表すことができる。ただし、 ω は入射波の周波数、 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 、 ϵ_r は媒質の比誘電率、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 μ_0 は真空中の透磁率、 $\tan \delta$ は減衰定数である。実験ではまず、図10(左)に示すような透過法を用い、伝搬定数を評価することを試みた。入射波にはPSL社3500Dインパルス発生器を用い、同軸・導波管変換器によりWRD-750導波管に変換する。その後さらにXバンド導波管に変換し、角錐ホーンによりコンクリートに照射する。透過波は、空間分解を得るため、WRD-750導波管の切り口をそのまま使用した。超短パルスは、フーリエ成分としてマイクロ波～ミリ波領域の周波数を含むが、導波管を伝搬するとその伝搬速度の違いにより(分散特性)、周波数が高い成分から低い成分に徐々に変化しているチャープト波形となる。入射パルスの繰り返しを利用すると、サンプリングスコープにより図10(右)に示すような波形を直接得ることができる。各周波数に対して供試体と自由空間中のパルスの位相差と減衰率から上式を用い誘電率、すなわち屈折率を評価する。

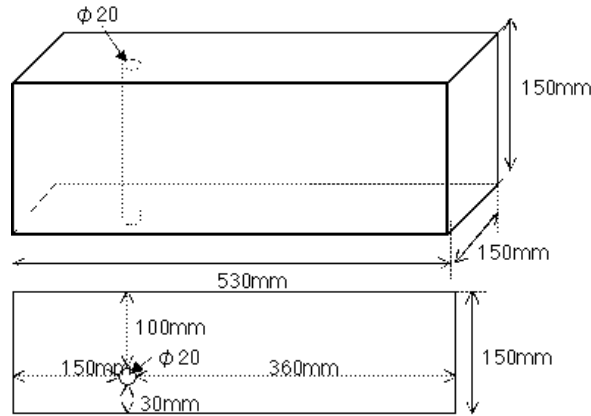


図9 コンクリート試供体の概略図 .

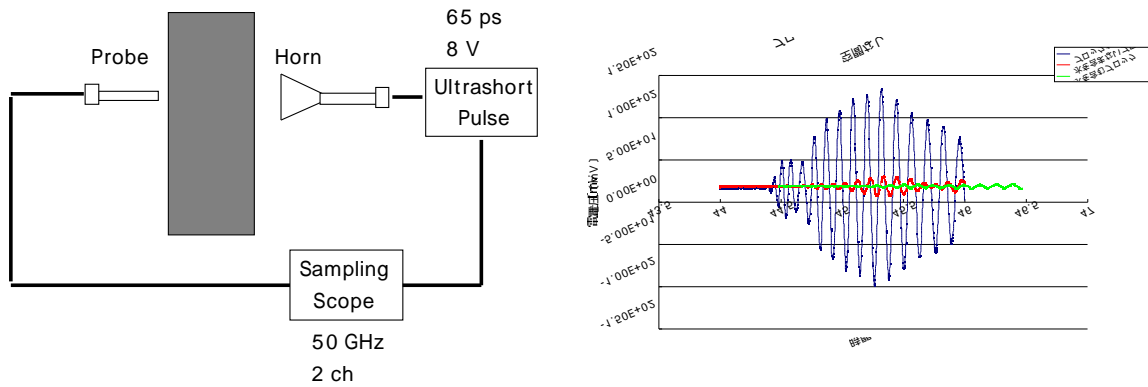


図10 伝搬定数評価のための透過法の概略（左）と透過パルスの波形（右）.

図11 に実験により得られた屈折率分布を示す。エッジから 15 cm の位置で空隙があるため屈折率の値が変化していることが明らかとなっている。ただし、透過法であるため、ビームの通過領域に空隙があることが分っても、空隙の奥行き方向の位置を評価することは不可能となっている。

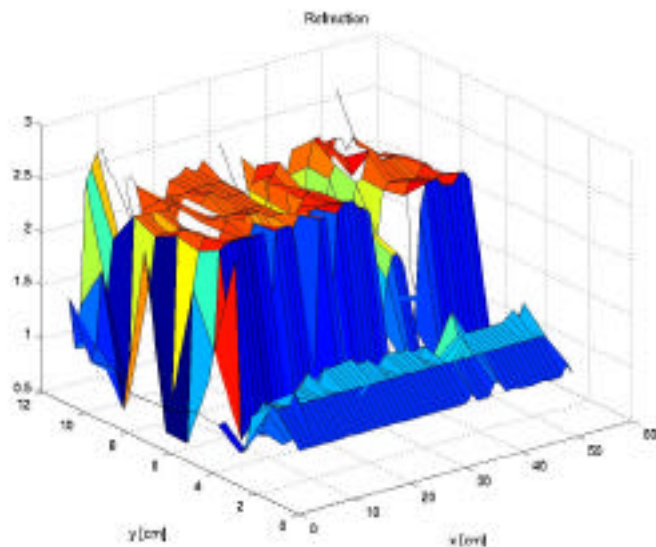


図11 コンクリート試供体の屈折率分布 .

3.2 コンクリート試供体の非破壊検査実験—反射法

透過法の欠点を補うものとしてレーダーの原理を利用した反射法がある。反射法では、誘電率の不連続面において電磁波が反射されるが、反射点の位置がレーダーの原理で、遅れ時間により決定することができる。本研究では、図 12 に示すように、ネットワークアナライザーを用い、周波数を掃引することにより、遅れ時間の周波数依存性を測定した。図 13 がコンクリートの各位置に対し測定した Group delay から得られたもので、局所的な変化より、コンクリート中の空隙の存在を推定することができる。

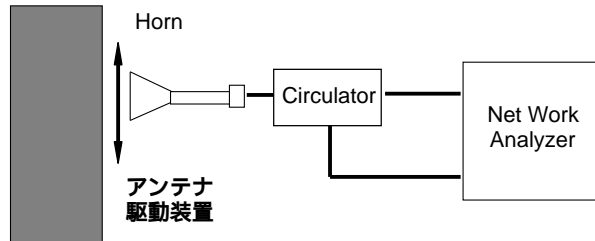


図 12 反射法を用いたコンクリート試供体測定法の概略。

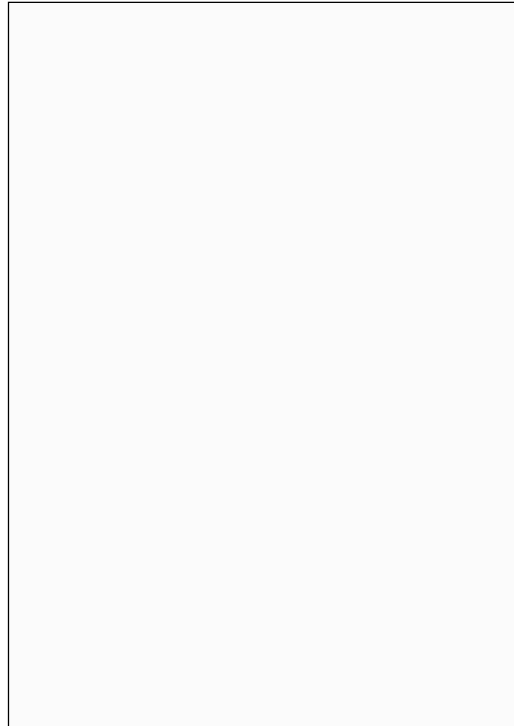


図 13 遅延時間測定により評価した、コンクリート内部の分布。上：平面図，下：三次元図。

(2-2) 筑波大学

研究開発目標

本研究機関では、プラズマを含む媒質中の電磁波（ミリ波、マイクロ波等）の伝播、反射、吸収を解析するためのシミュレーションコードを作成し、プラズマ診断への応用も含めたミリ波イメージングレーダーに関する計算機シミュレーションを実施して、シミュレーションの立場からミリ波イメージングレーダーの原理検証を行うことを目的としている。

実施方法

固体媒質に対するシミュレーションでは、電磁場 E , H に対するマクスウェルの方程式

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = - \nabla \times E$$

$$\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times H - \sigma E$$

を FDTD 法と同様な手法により、空間微分は差分化して、時間発展を Runge-Kutta 法を用いて解く。またプラズマ流体に対しては、電磁場 E , B に対するマクスウェルの方程式とプラズマ電流 J に関する運動方程式の結合系

$$\frac{\partial B}{\partial t} = - \nabla \times E$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = c^2 \nabla \times B - \frac{J}{\varepsilon_0}$$

$$\frac{dJ}{dt} = \varepsilon_0 \omega_{pe}^2 E - \frac{e}{m_e} J \times B_0 - \nu J$$

を解く。ここで、 ω_{pe} は電子プラズマ周波数である。

以上の二つのシミュレーションモデルに対して Fortran 言語で書いたシミュレーションコードを作成して、幾つかの問題に対して計算機シミュレーションを実施した。この数値計算は、当該研究費で購入した Compaq 製の Alpha Server DS20E を用いて行った。以下に、計算機シミュレーションにより得られた研究成果の幾つかを述べる。

計算機シミュレーションによる成果

1. コンクリートを対象としたパルスレーダーのシミュレーション

ここでは1次元 (x 方向にとる) モデルを用いる。 $x = 0$ の領域にコンクリートを配置し、 $x < 0$ は真空とする。コンクリートに対しては比誘電率を $\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 = 6.5$ 、電気伝導度は $\sigma = 1.375 \text{ S/m}$ とし一定値を仮定した。 $x = -80 \text{ cm}$ の位置から

$$E(t) = E_0 t \exp[-(t/a)^2]$$

で与えられるサブサイクルパルス（最大振幅は1に規格化しており、パルス幅は $\tau_{\text{FWHM}} = 1.13a$ で与えられる）をコンクリートに垂直に照射して、 $x = -40 \text{ cm}$ の位置においてコンクリートから帰ってくる反射

波を観測した。電磁波のパルス幅が $\tau_{FWHM}=50\text{ps}$ の場合の計算機シミュレーション結果を図14に示す。一番上の図はコンクリートのみの場合の電場の信号で、下の左側はコンクリートの中に空洞がある場合のもので、また右側は中に金属片がありそこで電磁波の反射が起こる場合である。空洞がある場合、その位置に関係した時間差をもって反射信号にくぼみが見れる。一方金属片による電磁波の反射の場合、反射信号はその位置に関係した時間幅を持った有限幅の信号となる。

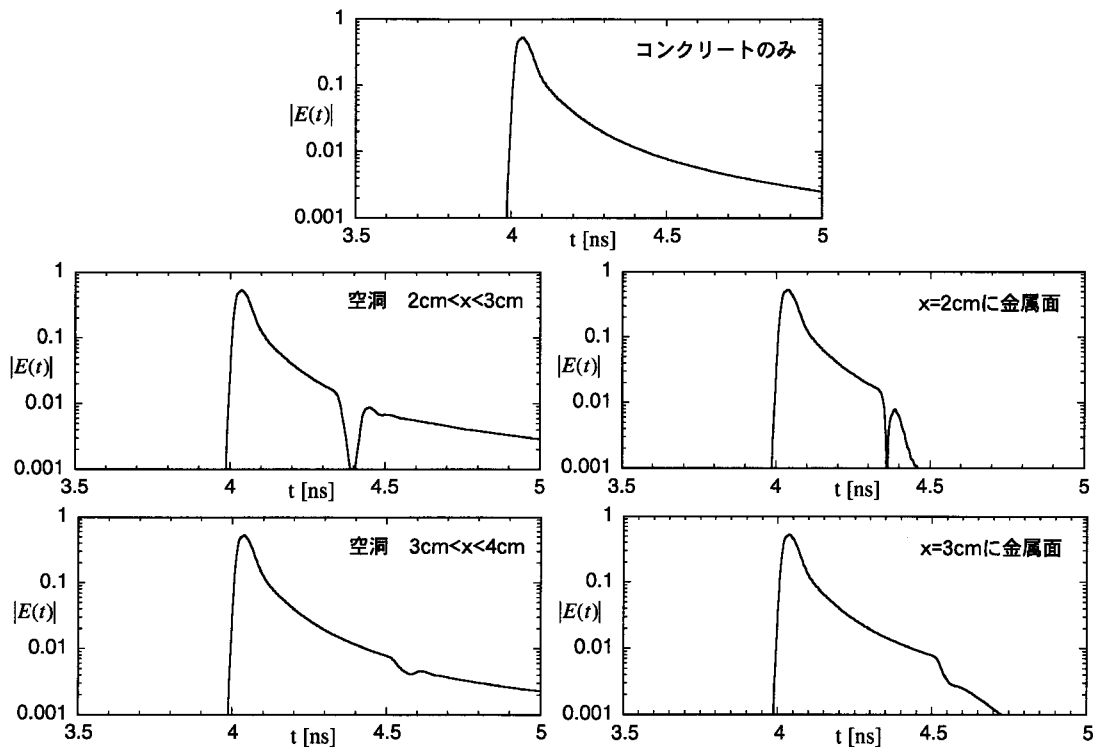


図14 50psの電磁波のパルス入射に対するコンクリートからの反射波信号。

また、図15は電磁波のパルス幅が $\tau_{FWHM}=800\text{ps}$ の場合の計算機シミュレーションの結果である。この場合、空洞の存在による反射波への影響がコンクリート表面での反射成分にマスクされるようになり、空洞の存在を見分けることが困難となっている。

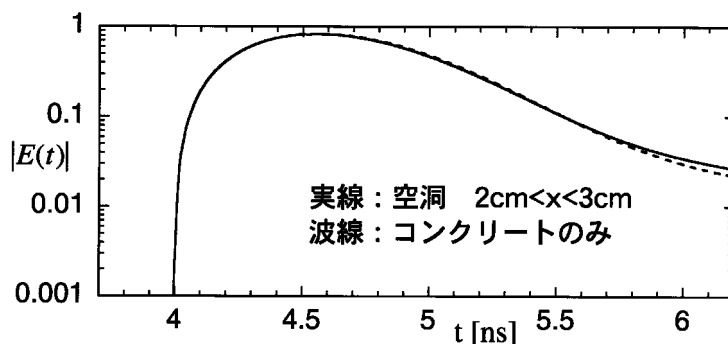


図15 800psのパルス入射に対するコンクリートからの反射波信号。

2. プラズマを対象とした超短パルスイメージング反射法のシミュレーション

ここではプラズマの反射法計測に関して、超短パルス電磁波を用いたプラズマの2次元計測に関する計算機シミュレーションを実行して、プラズマ分布や揺動の可視化計測に関する可能性を調べた。プラズマの多次元計測では、プラズマからの反射波を受信する検出機をアレイ状に配置して、各検出機で受信した反射波信号をもとにプラズマの密度分布等を再構成する。正常波の超短パルスの伝播に関する2次元シミュレーション結果の一例を図16に示す。ここで紙面に垂直なy方向を向いた一様磁場はと仮定している。

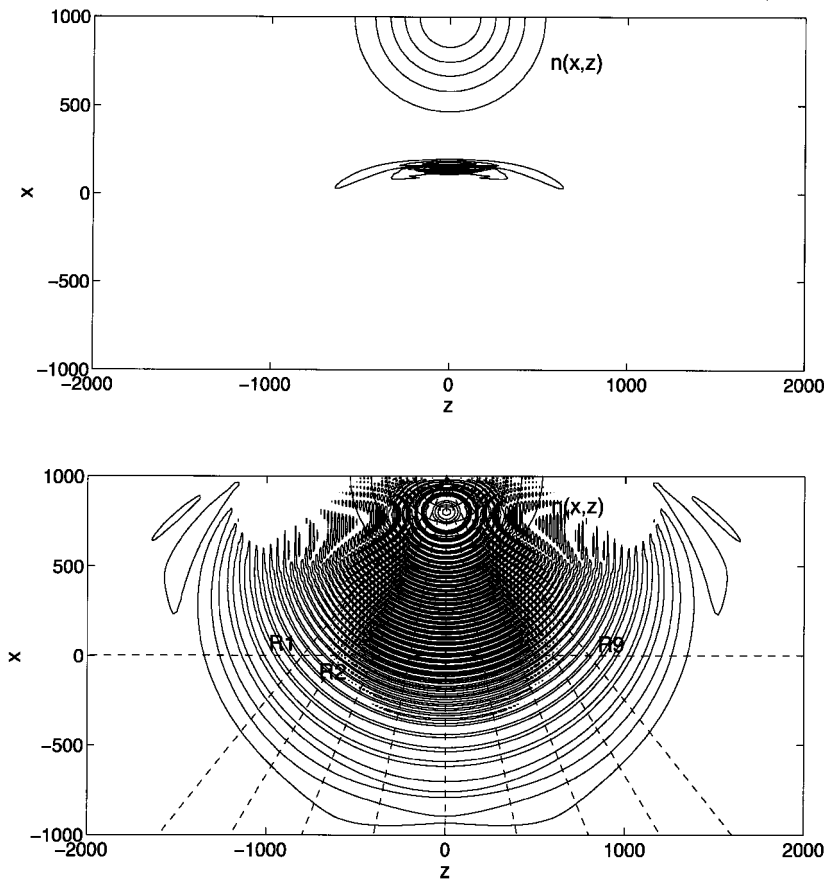


図16 プラズマにおける超短パルスの伝播に関する2次元シミュレーション。

上図は入射パルス $E_y(x, z, t)$ の波形のスナップショットであり、下図はプラズマからの反射波の波形のスナップショットを表す。密度 $n(x, z)$ はガウス分布を仮定し、図に密度分布の等高線が示してある。 $x=0$ の位置にある R1 から R9 の9点は反射波を受信するための検出器の位置を表す。図17はR1からR5の各検出器で受信された反射波信号の時間変化を示してある。図18は各検出器で受信された反射波信号に対してアーベル逆変換を用いて再構成された密度分布(白丸)を表している。但し、各検出器からプラズマの中心に向かう波線で示した線上での分布である。実線はオリジナルの密度分布である。シミュレーションでは、各検出器での密度分布の再構成がうまくいっていることが分かる。これらの計算結果を全て合成することにより、プラズマの2次元密度分布を再構成することが可能となる。

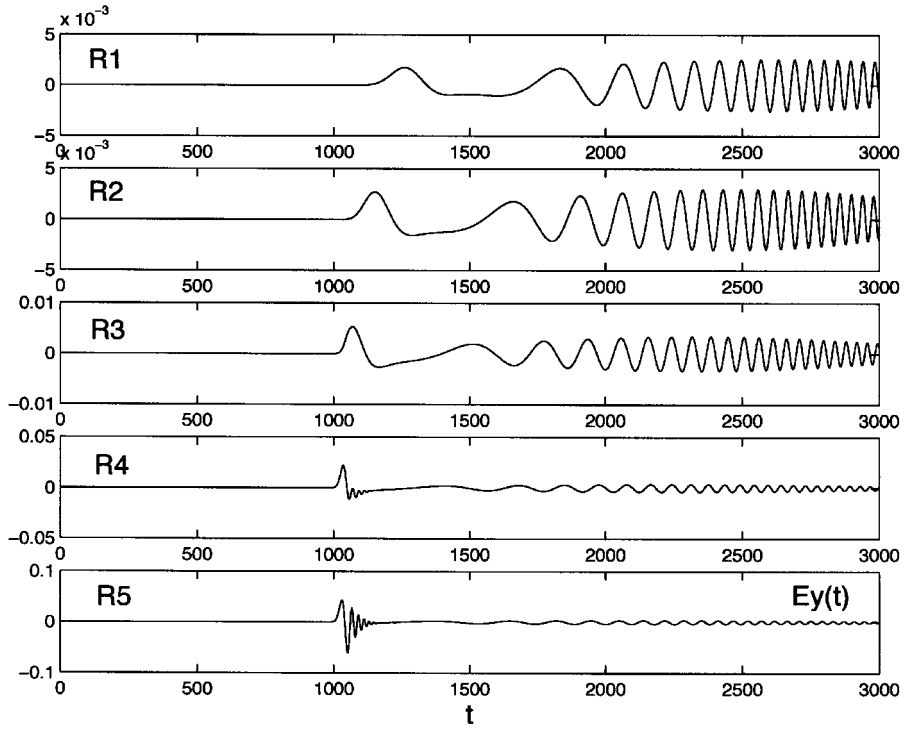


図 17 各検出器で受信されたプラズマからの正常波の反射波の信号 .

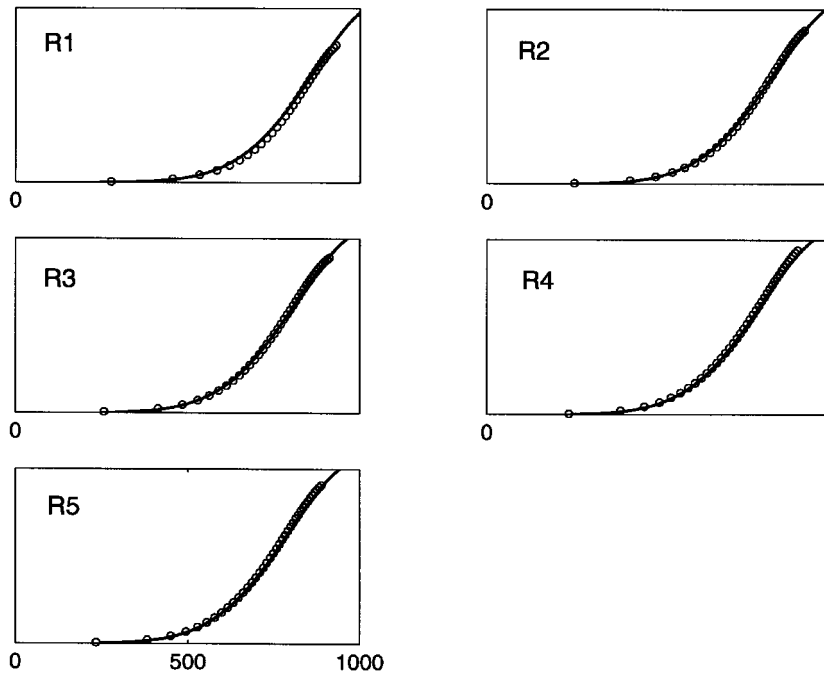


図 18 各検出器のデータからアーベル逆変換で再構成された密度分布 (白丸) .

(2 - 3) 九州日立マクセル株式会社

1 . はじめに

この共同研究の個別計画として、九州日立マクセル株式会社は、「ミリ波アンテナアレイの開発」と題した研究テーマを分担し、研究開発を進めてきた。

まず事業化を進めるに当たって、ミリ波で動作する各種アンテナのコスト、生産性、耐久性等の量産上考慮すべき内容について比較検討を進め、実用化に適した物を選択し、設計の最適化のための伝送線路の表面粗さ、端面精度、断面形状による導体損等のデータを収集体系化する事を目指した。更に光学系（誘電体レンズ）と二次元検出器（アレイ）を組み合わせたイメージングレーダ用アンテナアレイの製作のための素子相互間干渉をシミュレーションし、素子間最適距離を検討し、実用化に向けて、最適なアンテナ全体構造を設計する事とした。

本研究の結果により、車載レーダとして自動車産業での利用が、また電磁波探査装置として鉄道建築関連産業での利用が普及すれば、高効率かつ高信頼性をもつ事故防止法としての貢献が期待される。

また安全かつ確実な地雷探査システムの開発は、産業界の直接的な拡大は期待できないものの、現在でも世界に埋設されている約 9,000 万個の地雷の 1 日も早い撤去を実現し、安全で暮らしやすい生活環境を獲得するだけでなく、この研究結果に基づいて、ガス、水道管、電話線等の埋設物探査装置として応用展開されるものである。これらの展望と計画についても概説する。

2 . アンテナ単素子の評価

2 - 1 求められるアンテナ

電磁波を使用するセンサーシステムとして、イメージングレーダが注目を集めている。

イメージングレーダの量産化に当ってアンテナに求められる特性は、屋外使用に耐えることである。屋内無線LANのように通常の生活環境での使用ではごく普通のタイプのアンテナでも十分対応できるが、ITS (Intelligent Transport Systems) に代表される屋外使用では、本来のアンテナ機能に加え、次のような特性が求められる。

簡単，軽量

耐候性（温度，湿度，防水）が高いこと

衝撃，振動に強いこと

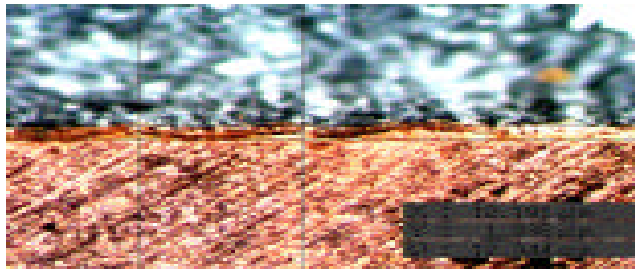
これまでのイメージングレーダは主として単一の検出器（アンテナ素子）を備え、この検出器を物標に対して機械的にスキャンニングすることにより像を形成していたが、スキャンニング用の複雑な走査機構が必要であり、形状が大きく重くなり可搬性が低く、しかも瞬時に映像化できない等の実用上不十分なものであった。

そこで注目されたのが、多数のアンテナ素子を 2 次元的に配置したアレイ方式である。この場合のイメージング分解能は、アレイのアンテナ素子のレイアウト間隔で決まることになり、接近させるほど分解能はあがる。しかしアンテナ素子は隣接するアンテナ素子との間で、接近すればするほど素子間相互結合により電磁的結合が大きくなり相互影響が出る。特にアンテナ素子の隣接側の端面形状がいびつであれば表面電流がエッジに集中し相互影響が大きくなる。

したがって求められる平面アンテナは、隣接側のエッジ形状に十分配慮しなければならない。このエッジ形状は多くの場合、製造方法により決定される。このような観点からまず平面アンテナの製造方法について検討した。

2 - 2 各種製法

アンテナの量産化に当り、パターン形成方法には、コスト、製作時間、設備等の観点から次のような方法が実用化されている。



切削式形成方法

図 19 切削式形成方法

図 19 は、ほぼ 6,000 回転/分で高速回転するエンドミルでパターンに沿って銅箔の端面を切削除去したもので、回転数を高

めるほど端面の平滑度は高くなるが、図 19 では、約 12 μ ピッチ、深さ 2 μ の連続円弧状凹凸が現出する。

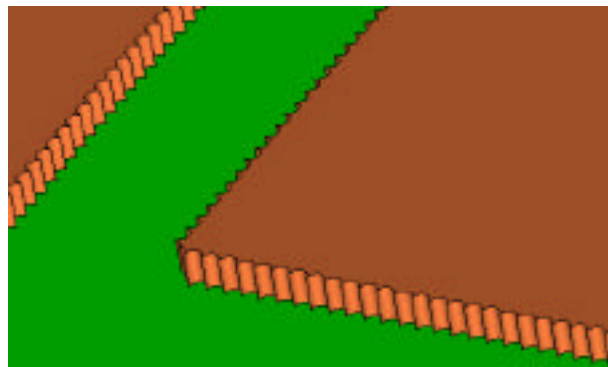


図 20 はこの方式で形成された端面を模式的に表現したもので、垂直方向に凹入している。

図 20 凹入端面の模式図

エッチング式形成方法

図 21 は、エッチング式形成方法である。エッチング式形成方法である。本方式は必要部分をレジスト膜で被覆し、エッチング液に浸漬することで不要部分を蝕刻するため、端面がすり鉢状に丸みを帯びて凹入することになる。



図 21 エッチング式形成方法

その様子を図 22 に模式的に示す。

上記凹入により、パターン線の稜線は鋭角状の尖った形状となっており、給電ライン

インは、上面側より基板側が幅広サイズになる傾向にある。

このエッチング式は導体幅が 100μ を下回るとエッチング過不足が生じやすく、特に基板サイズが大きくなると中心部と周辺部との幅寸法ばらつきが顕著になり、誤差の生じやすいものである。

また、エッチング後の表面は、ざらつきのある表面粗度の粗い

ものとなり表皮抵抗が大きくなる傾向にある。このため使用周波数に限界が存在する。

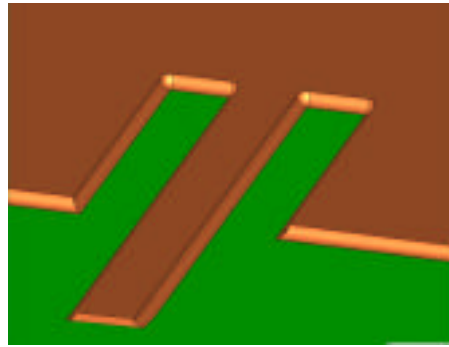


図 22 すり鉢状凹入の模式図

E F 2 式形成方法

表面に導電性を付与した基板の表面に、アンテナパターンに相当する露出するレジスト膜を張り、その露出部分に電鍍を施し、その後レジスト膜を除去したもので、Electro Fine Forming (略称 E F 2) と言う。図 23 その一例を示す。

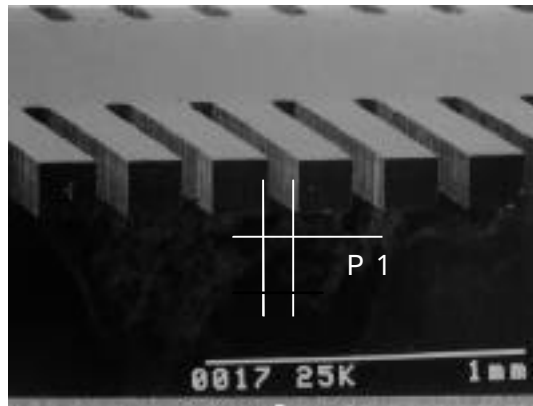


図 23 電鍍式形成方法

端面は垂直に形成され、稜線はいずれもほぼ直角を確保でき、表面電流が過度に稜線に集中するのを軽減できる。また隣接導体間距離 $P 1$ を導体厚さより小さく設定できる事により、線密度の高いパターンにも対応できる可能性がある。

その他の製法

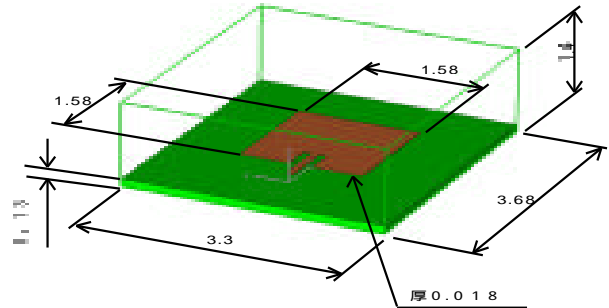
上記各種製法以外にレーザー加工式、プレス式や印刷式等もミリ波対応パターン製作方法が提案されているが周波数が高くなるほど製法は制約される。ミリ波帯のような高い周波数になると表皮効果による導体表面電流の集中だけでなく、導体稜線やエッジ部分への電流集中が生じ、生産に際してはこれらの2つを考慮する必要がある。

2 - 3 製法別シミュレーション評価

2 - 3 - 1 解析条件

同一パターンモデルを 切削式 , エッチング式 , E F 2 式の 3 製法で製作した場合の製法固有の特性をシミュレーションした。

使用したシミュレーションツールはドイツ C S T 社の MW - S T U D I O である。モデルに用いた平面アンテナを図 24 に示す。計算モデルの設定値は次の通りとした。



- () 負荷インピーダンス 50
- () プリント基板の誘電率 2.2
- () 基板の銅箔厚さ 18 μm
- () 誘電正接 (tan) 0.00085

図 24 平面アンテナのモデル

2 - 3 - 2 解析結果

この解析では , S パラメータ , 磁界強度 , 遠方界放射パターン等の結果が得られる。しかしこれらの結果は , 製法上に起因する特性差を比較するには十分ではない。解析の結果 , 最も顕著に製法による

特性が現れたのは二次元ベクトル表面電流分布 , 電界強度特性である。

図 25 , 図 27 はエンドミル切削によりパターンを形成したために , 銅箔端面に波打状の凹凸が生じたもので , ベクトルは一定の流れを持たない事を示している。このため放射効率は低い。

図 26 はエッチングにより形成されたもので , 端面は鋭角のエッジ稜線を持つすり鉢状である。僅かに流れは確認されるがエッジ稜線に表面電流は集中し ,

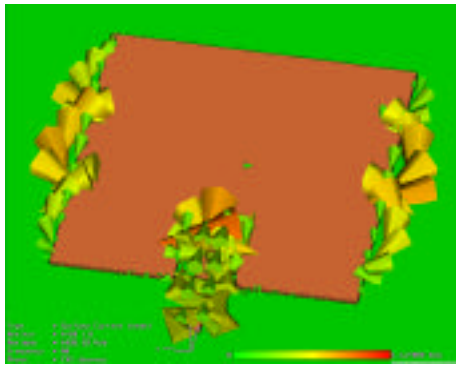


図 25 切削式パターン（凹入断面形状）の二次元ベクトルの表面電流分布

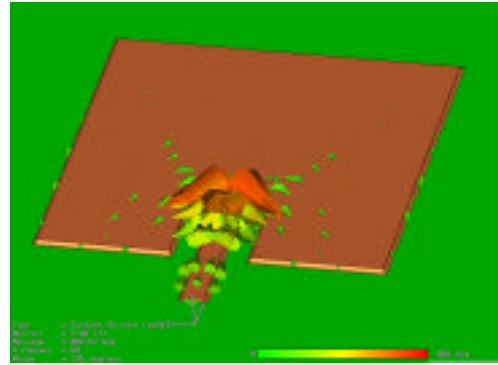


図 26 エッチング式パターンの二次元ベクトルの表面電流分布

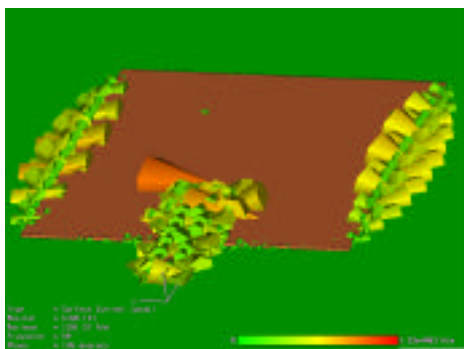


図 27 切削式パターン（突出断面）の二次元ベクトルの表面電流分布

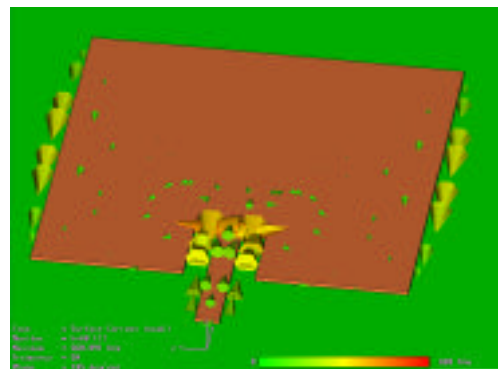


図 28 EF2式パターンの二次元ベクトルの表面電流分布

放射が阻害されているものとおもわれる。特に基板に密着した下側の稜線の先端角が鋭く小さいため、その特異性で大部分がパターン下面と基板との間に強い電流が流れ、殆どの電磁エネルギーが空間に出て行くことは少なく、隠れてしまうものと思われる。

図 28 は、EF2式によるもので、他のものに比べ電流分布は、はっきりとした一定の流れを持っており、効率的な放射が期待できる。

図 29, 30, 31 は電界強度をスライス表示したものであるが、EF2式アンテナ（図 31）の放射強度が最も大きいことが伺える。次に効率が良いのは切削式アンテナ（図 30）である。図 29 のエッチング式は上記両者と比較すると放射強度は低い。これはパターンの端面がすり鉢状のため、上

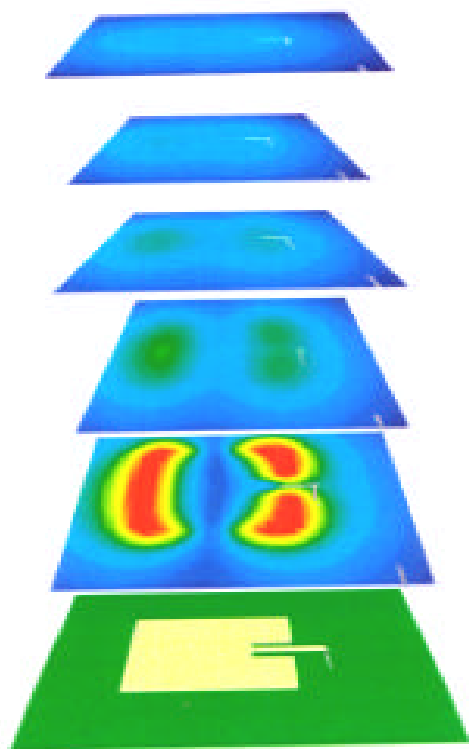


図 29 エッチング式アンテナの電界強度特性

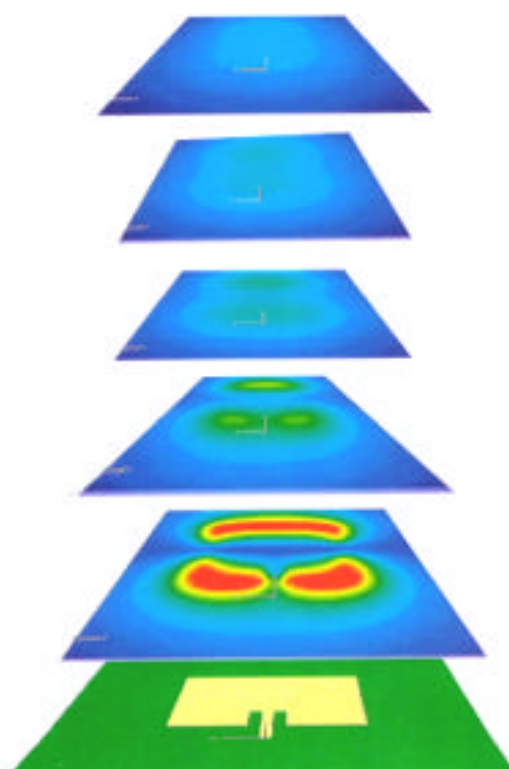


図 30 切削式アンテナの電界強度特性

面側と下面の基板側とでは，ストリップの幅が異なり，設計値どおりのライン幅を得ることが難しい製法である。

以上の結果から，ミリ波帯のアンテナパターンを形成する製法は，E F 2 製法が最も好ましいことがわかる。特に E F 2 製法はパターン端面が垂直面で構成され，表皮効果およびエッジ形状による電流の集中が生じ難く，放射効率を高めることができる。

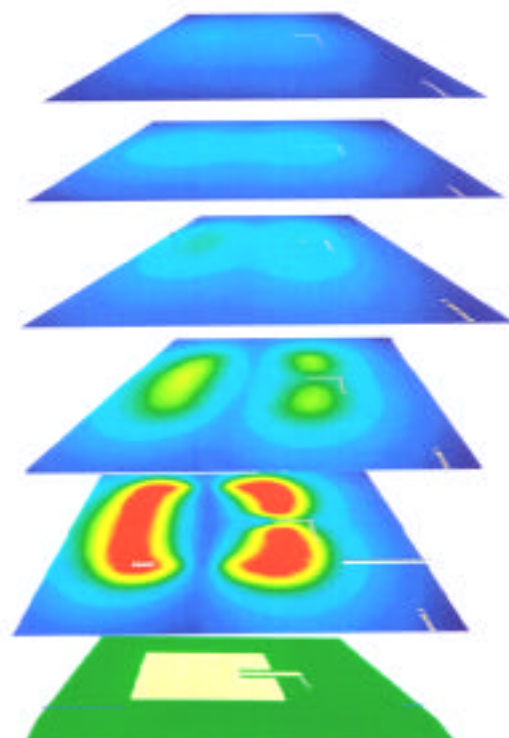


図 31 E F 2 式アンテナの電界強度特

3. 平面アンテナの試作と評価

3 - 1 試作

本試作は，図 32 に示す内容で行った。図 33 は，試作品の平面外観である。

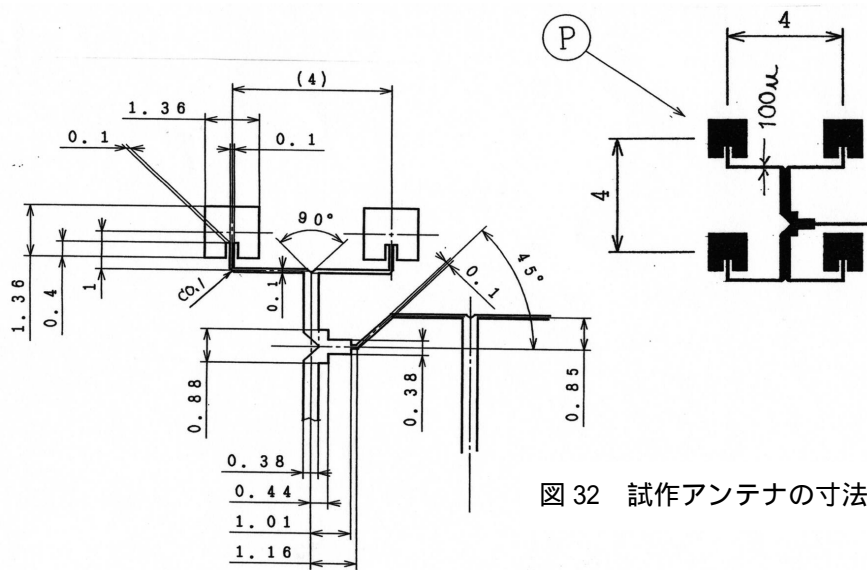


図 32 試作アンテナの寸法

⒫ 部詳細 (10/1)

3 - 2 試作品の評価

この試作品は，ポリイミドフィルムに E F 2 製法で試作したもので，給電ラインは図 34 に示すように直線性が高くまた，給電平面，アンテナ面はいずれも E F 2 特有の鏡面仕上げとなっており，面粗度は極めて高いものとなっている。



図 33 試作品平面外観

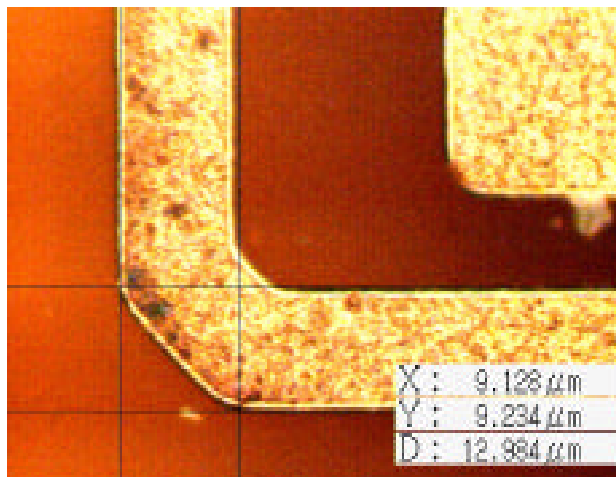


図 34 給電ラインの直線性

3 - 3 給電ライン断面の評価

図 35 は試作品給電ラインの断面測定結果を示しており、給電ラインの幅は、

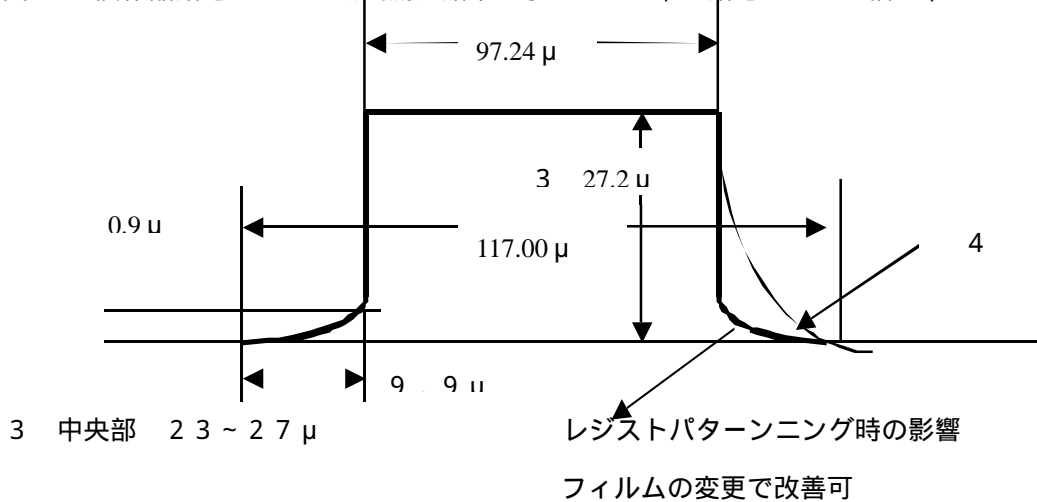


図 35 給電ラインの断面

設定値 100 μm に対し、97.24 μm の仕上がりで E F 2 の特性が出ている。

端面はほぼ垂直壁で構成され、上面稜線は直角に形成されている。また下部の基板に接している部分は厚さ 1 μm 以下、幅約 10 μm の末広がり部分が形成されているが、レジストパターンニングの影響であり、量産に当ってはフィルムの変更で改善できるものである。

したがって、E F 2（電気鋳造）製法による平面アンテナは以下のような特徴を有する。

端面が垂直で直線性が高い

上面稜線の直線性が高い

上部角部が直角で給電ラインの上面と下面の幅が同じ

上面の面粗度が高い

近年はより高い周波数になって、平面導体も断面寸法がミクロンオーダーとなりストリップ導体の有限な導電率に起因する損失が問題となってきているが、この製法によれば、不必要なエッジ部への集中が軽減できる。

4. イメージングシステムの設計

アンテナアレイを用いたイメージングシステムには、対物レンズと擬似半球状の基板レンズの2枚のレンズを用いる。この場合基板レンズは擬似半球状なのでアンテナアレイのサイズ、つまり分解能の大きさをサイズが決定され、アンテナアレイのサイズはレンズの光軸方向奥行きに等しいため、素子数を増やすほど大きなレンズが要求され、大型となり、重く、屋外での使用に支障が出たり、携帯が難しくなる。そこで本研究では、複眼レンズを用いることを検討した。

図36は基板レンズとして複眼レンズを用いたものである。

この方式の特徴は、1つのレンズに1つのアンテナ素子が対応する単位アンテナ系（ユニット）が多数配列されている。

どのユニットも結像するが、レンズピッチと結像する位置のピッチのずれにより検出される受信信号はユニットごとに異なる。

そこですべてのユニットからの受信信号を集め、ピッチのずれを考慮した演算（信号レベル差）をおこなうことにより、対象物の情報を得ることができる。

このような構成のイメージングシステムでは、構造が簡単になるとともに小型軽量化され、しかも屋外使用時に要求される温度、湿度や振動、衝撃に耐えうるものとするのが期待できる。

今後、試作を進め検証する予定である。

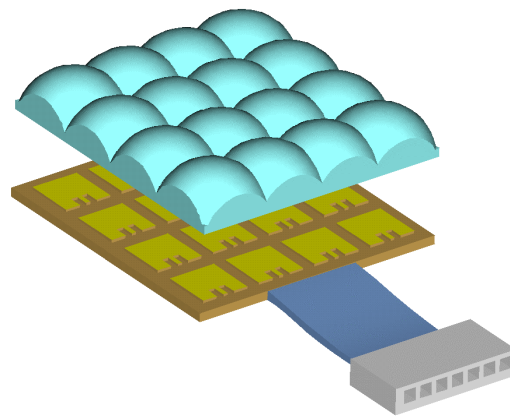


図36 複眼レンズ式イメージングシステム

まとめ

(1) 当該研究開発プロジェクト全体の進捗状況及び成果のまとめ

ミリ波イメージングレーダーの構築とその応用に対する原理的実証を行うことを目的として、モノリシックアンテナの設計・製作と比較、ミリ波イメージング装置、および、ミリ波レーダー装置の設計・製作と実機適用。種々の媒質中におけるミリ波の伝搬、反射、吸収に関する計算機シミュレーションを試みた。得られた成果を要約すると、

）ミリ波で動作する各種アンテナのコスト、生産性、耐久性等の量産上考慮すべき内容について比較検討を進め、実用化に適した物を選択し、設計の最適化のための伝送線路の表面粗さ、端面精度、断面形状による導体損等のデータを収集体系化した。さらに、光学系（誘電体レンズ）と二次元検出器（アレイ）を組み合わせたイメージングレーダ用アンテナアレイの製作のための素子相互間干渉をシミュレーションし、素子間最適距離を検討し、実用化に向けて、最適なアンテナ全体構造を設計した。

）ミリ波イメージング装置を。核融合プラズマ、特に核融合科学研究所大型ヘリカル装置 LHD の電子サイクロトロン放射（ECE）イメージングの測定に適用した。平成 12 年度の実験において、各チャンネルで ECE 信号が確認されている。平成 13 年度に 計算機を用いた信号処理系を利用することにより、電子温度分布および温度揺動の可視化が実現するものと考えている。

）超短パルス波レーダー応用の一環として、プロセスプラズマに用いられている定常プラズマを対象として、超短パルス反射計を適用し、密度分布再構成に新しい手法を提案した。従来の、反射波信号にフィルターバンクを用い、各フィルター出力毎の飛行時間を求める方法では、密度分布のプロットは離散的なものとなり、超短パルスの持つ周波数特性を有効に利用することができないが、反射波形を直接時間・周波数解析する手法が応用できれば、その特長を發揮することができる。

）非破壊検査への応用として、コンクリート内部の状態を探查することを目的として、周波数変調波あるいはインパルスの伝搬、あるいは反射特性を調べた。その結果、内部の空隙による誘電率の不連続や金属等が、透過波の振幅および位相変化、あるいは反射波を引き起こし、その評価によりその位置、大きさ等を見積もれることを明らかにした。

）プラズマを含む媒質中の電磁波（ミリ波、マイクロ波等）の伝播、反射、吸収を解析するためのシミュレーションコードを作成し、プラズマ診断への応用も含めたミリ波イメージングレーダーに関する計算機シミュレーションを実施し、シミュレーションの立場からミリ波イメージングレーダーの原理検証を行うことに成功した。

(2) 今後の展開

各分野における今後の研究体制と実用化予定は以下の通りである。

- ・ミリ波イメージングレーダーとしての車載レーダー等への応用は、九州日立マクセル株式会社との研究協力を継続し、イメージングレーダー用アンテナアレイの設計・製作と特性測定を繰り返し、その最適化を図り、平成 14 年度中に実用化のめどをつけ、平成 15 年 4 月に事業化することを目標としている。
- ・核融合プラズマ診断に対しては、米国プリンストンプラズマ物理研究所、カリフォルニア大学デービス校、オランダ FOM プラズマ物理研究所、および核融合科学研究所との研究協力のもと、平成 13 年度受動的なイメージング計測を確立し、平成 14 年度から能動的なシステム（ミリ波イメージング反射計—ミリ波イメージングレーダーと等価）に移行、平成 15 年度より計測開始を見込んでいる。
- ・超短パルス反射計を利用したプラズマ密度分布モニターはプロセスプラズマ等での有効性が実証され、実験装置を対象として既に実用化している。平成 13 年度中に計測の信頼度を更に向上させ、平成 14 年度中に事業化も視野に入れた実用化を目指している。本研究項目については、日立製作所機械研究所と研究協力を進めていく。（特許申請予定）
- ・類似の応用として測定が困難な液面あるいは粉体レベルを計測するマイクロ波レベル計の考察が始ま

っており、機械関連企業との研究協力で平成 14 年 4 月の実用化を目指している。

・コンクリート等の非破壊検査装置は、平成 13 年度周波数の最適化および画像処理ソフトウェアの改良を行い、建築関連企業の協力を得て、平成 14 年 9 月での実用化を目指している。(特許申請予定)

キーワード

ミリ波デバイス、ミリ波システム、画像計測、レーダー、非破壊検査

研究成果発表

1. H. Hojo, A. Mase,
“Ultrashort-Pulse Cross Polarization Scattering in Plasmas with Magnetic Shear”
J. Plasma Fusion Res. SERIES 3, 597 (2000).
2. 間瀬 淳
「ミリ波技術とプラズマ計測」
プラズマ核融合学会 - 第 39 回若手夏の学校 (2000 年 8 月) 207-226 頁
3. A. Mase, *et al.*,
"Development of Advanced Millimeter-Wave Plasma Diagnostics"
Conf. Digest of the 25th Int. Conf. on Infrared and MillimeterWaves, Beijing (2000) p. 85.
(invited paper)
4. H. Hojo, A. Mase,
“Theory and Simulation on Cross Polarization Scattering of Ultrashort-Pulse Electromagnetic Waves”
Proc. 2000 Int. Cong. on Plasma Phys., Quebec (Nov. 2000) CP1.094.
5. A. Mase, *et al.*,
“ECE Imaging Work on GAMMA 10 and LHD”
Fusion Eng. Design 53, 87 (2001).
6. Y. Kogi, A. Mase, H. Hojo, A. Itakura, M. Ichimura, T. Tamano,
“Measurement of Cross-Polarization Scattering Using Ultrashort Pulse Microwaves”
Rev. Sci. Instrum. 72, 355 (2001).
7. A. Mase, *et al.*,
“Application of Millimeter-Wave Imaging System to LHD”
Rev. Sci. Instrum. 72, 375 (2001).
8. A. Mase, A. Yamamoto, L. G. Bruskin, M. Ohashi, T. Deguchi,
“Application of Ultrashort Pulse Reflectometry to a Steady State Plasma”
Proc. 5th Int. Reflectometry Workshop, Toki (2001).
9. L. G. Bruskin, A. Mase, A. Yamamoto, M. Ohashi, T. Deguchi,
“Profile Reconstruction Methods for Pulse Reflectometry”
Jpn. J. Appl. Phys. (in press)
10. Y. Kogi, A. Mase, H. Hojo, A. Itakura, M. Ichimura, K. Yatsu,
“Measurement of Ultrashort-Pulse Cross-Polarization Scattering in a Tandem Mirror”
Jpn. J. Appl. Phys. (in press)