

Spectral Analysis of Electromagnetic Field Created by Electron Beam in the Cylindrical Waveguide

Hiroyasu ITOH, Satoshi TOMIOKA, Takeaki ENOTO
Department of Nuclear Engineering, Hokkaido University
Kita13 Nishi8 Kita-ku Sapporo, Hokkaido, 060

ABSTRACT

To examine the spectrum of the electromagnetic field created by micro-pulses of electron beams, we placed two reflective conductive plates in a cylindrical waveguide. We measured the spatial distributions of the resulting standing wave. Also we analysed the same configuration and obtains the spatial distributions. Furthermore we compared these two spectra in the frequency domain.

電子ビームにより円筒導波管内に形成される電磁界の周波数解析

1. はじめに

相対論的電子ビームのパルス構造やエネルギー分布を求めるためには、電子ビームによって形成される電磁場を調べることが必要である。しかし1パルスを構成する多数のマイクロパルスの半値幅が数十psecしかないため、アンテナを用いてマイクロパルスによる電界を測定する場合、その時間変化を測定することは困難である。そこで別の方法として、円筒導波管内に反射板を配置して定在波を作り、電界成分の空間的な分布を測定し、そのフーリエ変換により波数スペクトルを求め、導波管内の分散を考慮することで周波数スペクトルを求める。この方法を用いれば、低い周波数帯域のオシロスコープを使用しても、検波した空間分布からマイクロパルスによる高周波成分を求めること、或いはマイクロパルスの時間幅等を求めることが可能であると考えられる。

一方、円筒導波管内の相対論的電子ビームの周囲に形成される電磁界分布の過渡解析を行うことにより、マイクロパルスによる電界の時間変化が得られ、アンテナやオシロスコープの周波数特性の影響を受けていない理想的な周波数スペクトルが求められる。このスペクトルにアンテナゲインの周波数特性、オシロスコープの周波数特性等々を考慮すると実際の時間応答波形が求められる。さらに本解析結果を用いて、電界の空間分布を定在波により求め、実験結果と直接比較

することも行った。

2. 定在波測定

実験には北大 45MeV electron LINAC の電子ビームをパルス幅 10nsec にて使用した。マイクロパルスの半値幅は推定数十 psec であり、繰り返し周期は 2.856GHz である。

134mmφ×415mm の円筒導波管をビーム取り出し孔に取り付け、更にビーム進行方向に垂直に、向かい合う 2 枚の反射板 (間隔 355mm) を配置し、定在波を発生させた。更に図 1 に示すように、セミリジッド型同軸ケーブルにより製作したダイポールアンテナをステッピングモーターに取り付け、進行方向に 1mm 間隔で移動させて電界の空間分布測定を行った。

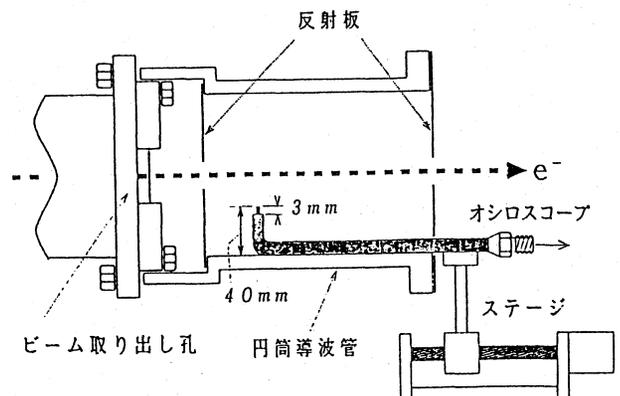


図 1 定在波の測定体系

アンテナからの出力は、二乗検波特性を持つクリスタル検波器 (HP8470B: 10MHz to 18GHz) を通して、デジタルストレージオシロスコープ (帯域 100MHz) に取り込んだ。今回使用したダイポールアンテナのアンテナ長は 3mm、その共振周波数は 25GHz 付近である。このアンテナを導波管壁から 40mm の高さにおいて水平に移動させて測定した。

図 2 は、アンテナによって得られた出力電圧の最大値 (peak to ground) をプロットしたものである。今回は、測定体系の制約から 1mm 間隔で 256 点しか測定できなかったが、この波形に対してハニング・ウィンドウによるウィンドウ処理をした後、フーリエ変換により波数空間に変換した。さらに円筒導波管内の電磁界を TM_{01} モードと仮定して、分散を考慮して周波数スペクトルを求めた。図 3 にこの周波数スペクトルを示す。

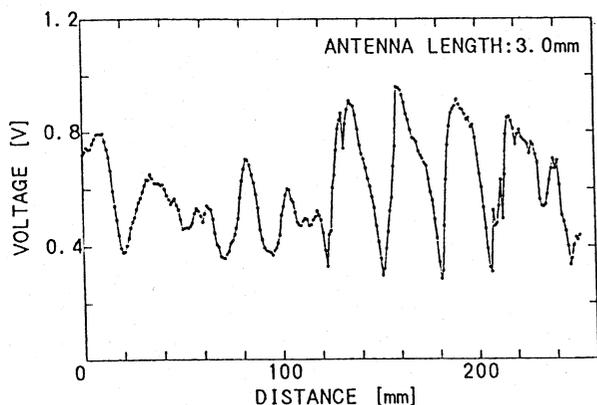


図 2 電界成分 E_r の空間分布

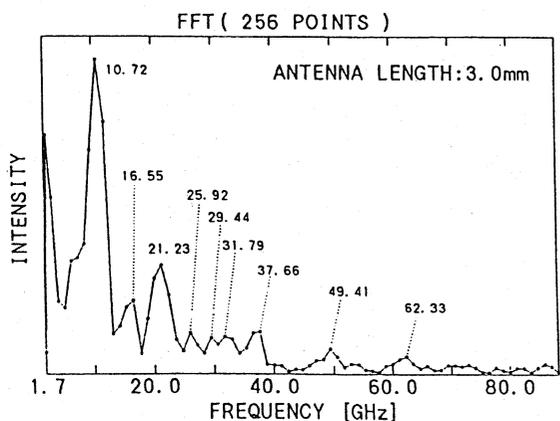
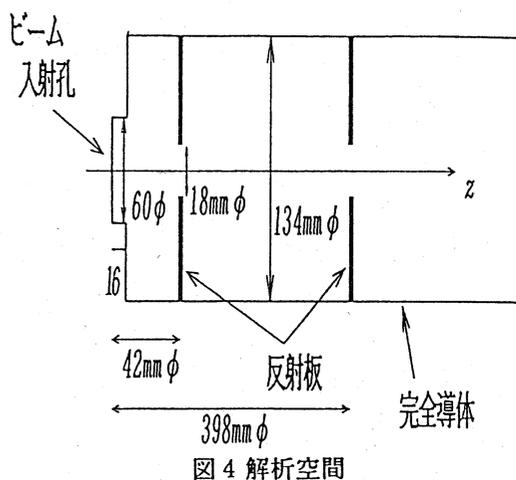


図 3 実験結果の周波数スペクトル

3. 解析モデル

軸対称構造の円筒導波管の中心軸上を光速の電子ビームが通過するモデルを考え、導波管内の電磁界の過渡解析を、円柱座標系における有限差分時間領域 (FD-TD) 法によって解析した。この FD-TD 法は、マクスウェル方程式の回転に関する二式を、時間と空間に関して直接差分化する手法である。本解析では、空間ステップ間隔を $dr = dz = 1\text{mm}$ 、時間ステップ間隔を $dt = 1.67\text{psec}$ とし、解析空間は前述の実験で使用した導波管の体系に合わせ、中心軸に平行な断面とした (図 4)。



境界条件としては、導波管壁及びビーム入射孔、反射板を完全導体とし、進行方向に導波管が十分長く続いていると仮定した。一方電子ビームは、ビーム径 6mmφ で半径方向に一様分布し、進行方向に時間半値幅 20psec のガウス分布をしたマイクロパルスが、クライストロンの加速周期 350psec で繰り返し解析空間に入射すると仮定した。さらにこのマイクロパルスが集まって半値幅 10nsec のガウス分布を形成するとし、本解析では 51 個のマイクロパルス列を入射させた。

4. 解析結果

定在波測定の体系に合わせて 2 枚の反射板 (厚さ 1mm) を、 $z=42\text{mm}$ と 397mm の位置に配置した場合に、解析空間内の任意の点 $(r,z)=(27, 310)$ における、径方向の電界成分 E_r の時間変化を図 5 及び図 6 に示す。マイナス側にマイクロパルスによる直接の放射電界が見られ、また周囲境界は電気壁であることから、

反射板で反射された成分が逆位相側に現れている。

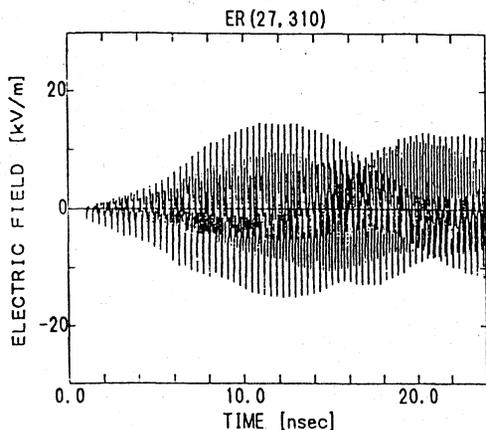


図5 電界成分 E_r の時間変化 (解析、反射板)

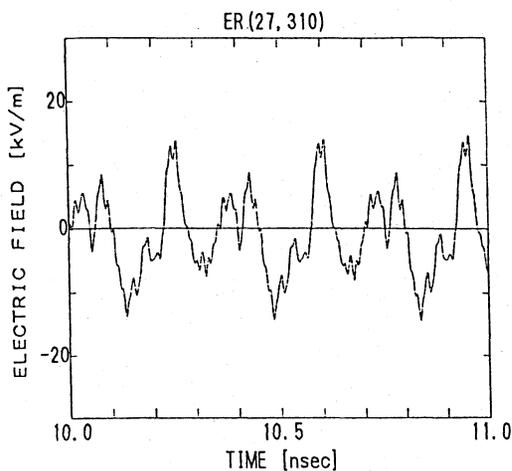


図6 電界成分 E_r の時間変化 (拡大)

また図7は、実験に合わせて $r=27\text{mm}$ の高さにおける、 z 軸方向に変化する $z=43\sim 397\text{mm}$ の空間分布を表している。但し、出力値は電界成分 E_r の絶対値である。

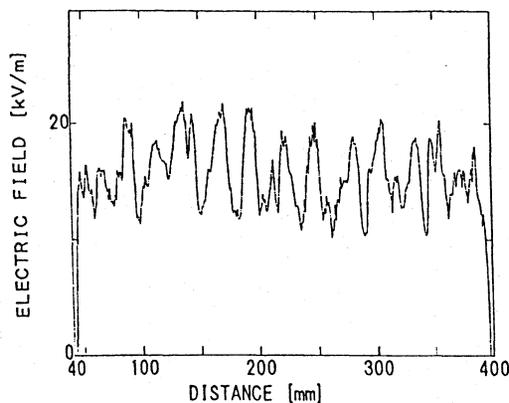


図7 電界成分 E_r の空間分布 (解析、反射板)

これらの解析による時間変化、空間変化の出力値に対して各々周波数スペクトルを求めた。図5の時間変

化については、8.0nsec から 8192 点のデータに対してハニング・ウィンドウによるウィンドウ処理を行い、そして高速フーリエ変換 (FFT) を行った (図8)。

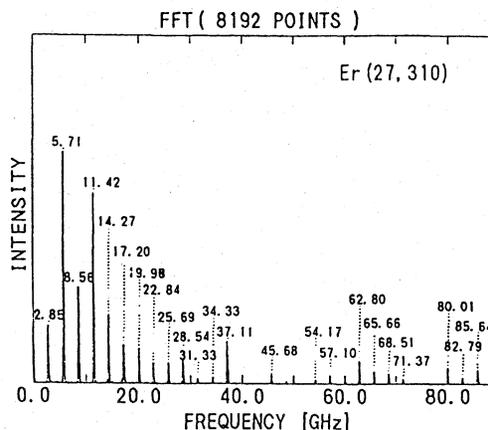


図8 時間変化の周波数スペクトル (解析、反射板)

また図7の空間分布については、実験での測定点に合わせた 256 点 ($z=93\sim 348\text{mm}$) に対し、実験の場合と同様の処理を行った。図9に求めた周波数スペクトルを示す。

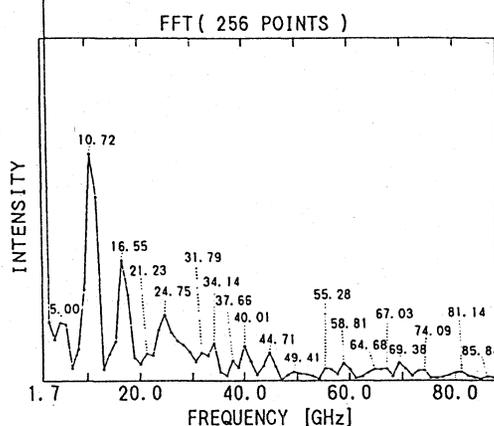


図9 空間的変化の周波数スペクトル (解析、反射板)

実験結果 (図3) と解析結果 (図9) を比較すると、データ点数が少ないため、周波数分解能が低いのが、良く一致していることが分かる。但し実験結果の方は、アンテナの放射特性、ゲイン特性や検波器、オシロスコープの周波数特性の寄与を含んでいるため、スペクトル強度は解析結果とは異なるものになっている。これらの影響も考慮した解析は今後の課題である。

また時間応答波形から求めた解析結果 (図8) と空間分布から波数スペクトルに一度変換してから求めた周波数スペクトル (図9) が異なっているが、この原因と

しては、マイクロパルスの幅が数十 psec と狭く、通常のような連続波の作る定在波のスペクトルとは異なるためであると考えられる。

5. まとめと今後の課題

円筒導波管内に反射板を配置し、あえて定在波を発生させた体系で、実験、並びに解析により空間的な電界分布を求めた。次にこの分布を波数空間に変換した後、導波管内の分散を考慮して周波数空間に変換した結果、両方の周波数スペクトルは良く一致した。今後、電子ビームの放射電磁界のスペクトルを精度良く求めるために、定在波測定の測定点数を増やすことが必要である。

また、短パルス状のマイクロパルスの作る電磁界であるため、その定在波と時間応答波形の違いについては、どの時間軸でデータ処理をするかに強く依存すると考えられ、更に検討する必要がある。

更に解析手法に関しては、アンテナ、オシロスコープの周波数特性を考慮した解析を行う必要がある。

参考文献

- [1] K.S.Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-14, pp.302-307, May 1966.
- [2] A.Taflove and M.E.Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol.23, pp.623-630, Aug. 1975.
- [3] H.Itoh, S.Tomioka, T.Enoto, "Use of Slot Antennas in Measurement and Transient Analysis of Electromagnetic Field Created by Electron Beam," *PROCEEDINGS OF THE 17th LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN*, pp.207-209, Sep. 1992.