

## 学 位 論 文 題 名

# Time and Frequency Response Analysis of Transmission Line Transformer and Applications for Linear Accelerator Injection System

(伝送線路型トランスの時間及び周波数応答解析と線形加速器入射系への応用)

## 学位論文内容の要旨

電子線形加速器はマイクロ波電磁場のエネルギーを用いて電子を加速する装置であり、学術研究から医療目的まで幅広く利用されている。近年、応用範囲の拡大に伴い加速ビームのエネルギー、スペクトル、エミッタンス特性の改善、高輝度化、高強度化、及び安定性の向上が行われ、いわゆる「先端加速器」へと進化を続けている。

電子線形加速器では、電子は加速管内部のマイクロ波電磁場の特定位相において加速されるため、電子入射系とマイクロ波源とのあいだに精密な同期を取り、加速管に電子を打ち込む初期入射加速が行われる。この同期には時間揺らぎが小さい高速のトリガーパルス信号を用いる必要がある。電子の初期入射エネルギーの安定性を維持し、高品位のビームを得るため入射加速には直流電位差による方式が用いられる。このため 100kV 以上の高い直流加速電位に設置された電子入射系へ、サブナノ秒領域の立ち上がり特性をもつトリガーパルス信号を伝送する必要がある。1) 直流絶縁、2) 高耐電圧、3) 高速パルス応答の諸性能を有する伝送方式が要求される。これらの要求を満たす方式として光パルス信号による伝送方式が用いられているが電気-光-電気の変換を行うため能動回路素子の使用、及び装置の複雑化に伴う時間揺らぎ、温度変化など環境に伴う動作の安定性、及び長期運転におけるブレイクダウン等の問題を解決せねばならない。

本研究はこれらの問題を回避するため、能動素子を用いることなく上記の要求を満たす伝送方式として伝送線路により構成されたトランス (伝送線路型トランス) によるトリガー信号絶縁伝送素子の開発を目的とした。伝送線路型トランスは通常のパルストランスに比較して 3) 高速のパルス応答 (sub-nano second rise time) あるいは高周波応答 (GHz) を実現することが容易である。しかし、1) 直流絶縁と 2) 高耐電圧を同時に実現することは困難である。この困難を克服するため、本研究では従来の伝送線路型トランスに対し、新しいトポロジー (線路の接続及び幾何学的形態) の導入を行い、これら三つの要求を同時に満たすトランスの開発を行った。これにより高い安定性を維持し、時間揺らぎの発生が無い、動作環境の影響を受け難いトリガーパルス信号の絶縁伝送方式を実現することが可能となる。

近年、伝送線路型トランスの応答特性の評価法として、理想伝送線路に迷容量等の回路要素を導入することにより等価回路を構築し、解析コードを用いたシミュレーション等が

行われている。著者はこのような経験的手法によらず反射のダイアグラムを用いた計算手法を導入することによってトランス内部を伝搬する入射・反射・透過波の諸量からインパルス応答関数を導出することに成功した。またダイアグラム上におけるこれら信号波のトレースによりトランスの応答機構が直感的に理解可能であることを示した。以上の解析結果からトランスの挿入損失及び時定数等のもつ物理的な意味を明らかにし、これらの知見を基にトリガートランスの試作を行った。本論文は以下の 8 章より構成されている。

第 1 章では本研究の背景、目的と研究手法および論文構成の概略について述べている。

第 2 章では通常の伝送線路型トランスについて述べ、1) 直流絶縁可能な伝送線路型トランスを構築するための伝送線路のトポロジーを提案している。

第 3 章では本論文で用いる時間領域の解析手法の基本概念について述べている。具体的には線路内部を進行する電磁波の不連続境界における入射・反射・透過波の大きさを計算する手法として反射のダイアグラムを使用することを提案している。

第 4 章では、トランス内部に蓄えられる電磁エネルギーの振る舞いを考察し、擬似的な伝送線路の概念を導入して線路内部を伝搬する信号に対し回路モデルを構築している。このモデルを用いてトランスのインパルス応答関数を導出し、単位階段関数入力に対するトランスの出力応答から挿入損失及び時定数のもつ物理的な意味を明らかにしている。

第 5 章では前章で求めたインパルス応答関数のフーリエ変換によって周波数応答関数を導出している。この解析結果より新しくトランスフォーマーモード周波数の概念を導入し、これによって周波数特性を記述する方法を提案している。更に擬似的な伝送線路の特性解析を行い、伝送線路型トランスの周波数応答関数が示す固有な特性の物理的な意味を明らかにしている。

第 6 章では市販の高周波セミリジッド同軸ケーブルと高透磁率の磁性材を用いてテストトランスを作成し、5 章で導出した周波数応答関数に対して低域特性を中心に実験的検証を行っている。更に測定結果から伝搬特性を求め擬似的な伝送線路の物理概念の有効性を検証している。以上の知見を基に、

第 7 章では 1) 直流絶縁と 2) 高耐電圧を同時に実現するため新しいトポロジーによるトリガートランスの試作とその特性の測定結果について述べている。一つは帯状並行平板伝送線路によって構成され、もう一つは円環形状並行平板伝送線路によって構成されている。これらのトランスの測定結果から立ち上がり時間特性約 600ps のパルス信号をおよそ -2.0dB の挿入損失で直流電位差 150kV の高電位部へ絶縁伝送可能であること実証している。

第 8 章は以上の要約となっている。

本研究で得られた知見は加速器工学のみならず、広くエレクトロニクス及びパルス電磁エネルギー工学等の諸研究分野に対する寄与が期待される。

# 学位論文審査の要旨

|     |      |         |
|-----|------|---------|
| 主 査 | 教 授  | 古 坂 道 弘 |
| 副 査 | 特任教授 | 鬼 柳 善 明 |
| 副 査 | 教 授  | 佐々木 浩 一 |
| 副 査 | 准教授  | 富 岡 智   |

## 学 位 論 文 題 名

# Time and Frequency Response Analysis of Transmission Line Transformer and Applications for Linear Accelerator Injection System

(伝送線路型トランスの時間及び周波数応答解析と線形加速器入射系への応用)

本論文は電子線形加速器、電子入射系の制御を行う高速トリガーパルス信号の絶縁伝送方式の開発研究について記述したものである。

電子線系加速器はマイクロ波の電磁場を用い電子を加速する装置である。現在の加速器に要求される高品質の電子ビームを得るためには初期加速ビームの安定性が要求される。電子はマイクロ波電磁場の特定位相において加速されるため、電子入射系とマイクロ波源とのあいだに精密な同期を取り初期加速によって加速管に電子を打ち込む必要がある。これを実現するためにサブナノ秒以下の高速のトリガーパルス信号(高周波信号)を100 kV以上の直流加速電位に設置された電子入射系へ伝送する必要がある、高周波信号の絶縁伝送という技術的に困難な課題を解決しなくてはならない。

この困難を回避するためパルス信号を光パルス信号に変換し光ファイバーを用いて絶縁伝送を行う方式が用いられている。しかし、この方式は能動回路素子を使用して電気-光-電気の変換を行うため、装置の複雑化に伴う時間揺らぎ発生の抑制、環境に伴う動作の安定性及び長期運転におけるブレイクダウン等の問題が付随する。能動回路素子を使用しなくても高周波数信号の直流絶縁伝送はトランスにより可能である。しかし従来のパルストランスは直流高耐電圧性能の実現は可能であるが高い周波数成分(～GHz)を有する高速パルス信号の伝送は不可能である。一方、エレクトロニクスの分野で用いられる伝送線路モードを用いた形式のトランスでは、高速パルス信号の伝送は可能であるが直流絶縁が不可能であり、かつ高い耐電圧特性の実現は困難である。これら「直流絶縁・高耐圧絶縁・高周波信号伝送」という3つの課題をクリアーするために新しい着想によるトランスを開発する必要がある。

本論文は伝送線路形式のトランスの動作原理にさかのぼり、i) その応答機構の詳細について明らかにし、ii) 得られた知見を元に、新しいトランスのトポロジー(線路形態、接続幾何形態)を考案することにより、上述の3の課題を解決可能なトランスが実現可能であることを示すことを目的としたものである。

はじめに理論解析を行い時間領域と周波数領域におけるトランスの応答関数を導出した。時間領域の解析の基本概念として線路内部、及びトランスの構造に付随する擬似的な線路を進行する電磁波の諸量を反射のダイアグラムを応用することによって計算した。求めたインパルス応答関数及び

単位ステップ応答関数に対する考察から挿入損失及び応答の時定数の持つ物理的な意味を明らかにした。

次にインパルス応答関数のフーリエ変換により周波数応答関数を導出した。解析結果の考察から新しくトランスフォーマーモード周波数の概念を導入し、伝送線路トランスの有する固有の周波数応答特性の物理的な意味を説明することに成功した。更にトランスの構造に付随する擬似的線路のインピーダンス解析を行い、伝送線路トランスの高周波特性が容量性リアクタンス、低周波特性が誘導性のリアクタンスによって支配されることが解析の結果から必然的に導かれることを示した。

近年、伝送線路トランスの応答特性の評価法として、理想伝送線路を基に迷容量及び漂遊インダクタンスを付加することによって等価回路を構築し、回路網解析コードによるシミュレーション結果との突き合わせ等が行われている。このような従来からの手法では、回路構成が決まればその特性の解析をすることはできるが、今回の場合のように、新しい回路構成を発案するような場合には「どのような回路構成の時にどのような性能になるかを直感的に推論できる」解析手法が必要となる。本論文では上記のように、トランスを構成する線路を反映する擬似的伝送線路を進行する電磁波に関し、インパルス応答関数及び単位ステップ応答関数をもとに反射のダイアグラムを用いて計算することによって、直感的理解を可能とする解析手法を考案したものである。さらに、時間及び周波数領域におけるトランスの解析により応答特性を求めることに成功した。

以上の解析結果は、市販の高周波セミリジッド同軸ケーブルと高透磁率の磁性材を用いて試作した試験用トランスを用いた低域の周波数特性を中心とした実験により実証された。このことにより、伝搬特性からトランスフォーマーモード周波数の概念および擬似的伝送線路の物理概念の有効性を検証している。

上記一連の研究結果により得られた知見を基に、並行平板伝送線路を用いた二つの形式の直流高耐電圧のトリガー信号絶縁伝送トランスを試作した。これらトランスの測定結果から立ち上がり時間特性約 600 ps の高速パルス信号をおよそ -2.0 dB の挿入損失で直流電位差 150 kV の高電位部へ絶縁伝送可能であることが実証された。すなわち「直流絶縁・高耐圧絶縁・高速パルス信号の伝送」という 3 つの課題を同時にクリアすることに成功している。

これを要するに、著者は、伝送線路形式のトランスの動作原理に関する理論解析より新知見を得、これを基盤として要求された性能の絶縁伝送方式の開発に成功したものであり、工学的な学術性の強い研究を行ったものと認めることができる。これらの研究成果は加速器工学のみならず、広くエレクトロニクス及びパルス電磁エネルギー工学等の諸研究分野に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。