

加速器ビームモニタ解析に用いる数値解析法に関する研究

学位論文内容の要旨

今日では、加速器は学術研究用途以外にも医療用、産業用など幅広い分野で利用され、加速される粒子の種類やエネルギー、パワーは非常に幅広くなっている。その中でも、電子加速器はシンクロトン放射光や自由電子レーザーをはじめ、その他方法も含めて次世代の光源としての利用や研究が行われており、それに伴って加速器のビームには、低エミッタンス、低エネルギー広がり、高輝度、高安定性が要求されている。このような高品位ビームの発生は、電子ビームの発生源や加速機構の発展によるものであるが、加速したビームを計測診断する種々のビームモニタの果たす役割も大きい。そのため、ビームの位置やプロファイル、エネルギー、エミッタンス、波形などを精度よく測定できるビームモニタが必要とされている。特に、ビームに影響を与えずに測定できる非接触型のビームモニタは、加速器運転中の常時監視やフィードバック制御に必要であり、重要である。

非接触型のビームモニタの設計や動作解析には、電磁気理論による設計と実験による検証とともに、数値解析による設計や動作解析も行われてきた。近年では、電子計算機の能力および数値解析手法の発達に伴い、数値解析による設計で詳細な検討が行われることも多い。この際、加速器内部に設置されるビームモニタの解析には、加速管などの解析に用いられる各種の加速器設計用、あるいは汎用の電磁界解析コードが使用されている。その一方で、加速器の外部で用いるビームモニタの解析には、自由空間を模擬できることが必要であり、さらに、加速されたビームの位置や方向を自由に設定できることが望ましいが、このような解析に関する報告は少なく、解析コードも整備されておらず、汎用の電磁界解析コードでは対応していない。

本論文では、このような加速器のビームモニタの解析に用いるために、有限差分時間領域法 (FD-TD 法) において、加速器のパルス状ビーム、特に相対論的な電子ビームを電磁波源として扱い、その軌道を空間差分の格子にかかわらず自由に設定可能な方法を提案した。

FD-TD 法は、マクスウェル方程式を空間差分および時間差分で近似して、定められた境界条件と初期値から時間発展的に電磁界を解く数値解法であり、時間領域における電磁界の数値解法として広く用いられている方法である。FD-TD 法において、加速器のパルス状ビームは移動する局在化した電流として扱われ、電流密度として差分化されたマクスウェル方程式中に現れる。電流密度も空間差分の格子にしたがって方向別に分けられ、各々が僅かに異なる位置に配置される。そのために、ビームの軌道が空間差分の格子に一致しない場合には、電荷保存則を満足したまま電流を移動させることが難しくなる。一方、散乱界表示 FD-TD 法では、解析空間に到来する入射電磁界は既知であるとして、解析空間中に存在する導体表面や誘電体内部などで発生する散乱電磁界のみを FD-TD 法で計算する。

この場合はビームの軌道や位置は空間差分の格子とは無関係に設定可能だが、全ての時刻において、導体表面や誘電体内部の全ての位置でビームが発生する電磁界が計算できなければならない。任意の位置におけるビームが発生する電磁界は、遅延ポテンシャルを用いてビーム軌道全体にわたって空間積分を行って求めなければならないが、散乱体の全ての位置で数値積分で求めるとその計算量は非常に多くなる。

本論文で提案した方法では、ビームと同じエネルギーを持つ点電荷がビームと同じ軌道を運動する場合の電磁界を入射電磁界として用いて散乱界表示 FD-TD 法で計算を行い、得られた電磁界の波形をパルス状ビームの波形と畳み込み積分することで、ビームの軌道に制約を受けず、計算量の大幅な増加も無く、ビームによって生じた電磁界が散乱体で散乱された結果を得ることが可能である。しかしながら、相対論的な点電荷の周辺の電磁界は極めて高速のパルスとなり、非常に高い周波数のスペクトルを含む。そのため、FD-TD 法のような離散時間系で扱う場合にはサンプリング定理に注意しなければならない。そこで、運動する点電荷の周辺電磁界のスペクトルを求め、軌道からの距離、点電荷の運動エネルギー、許容できるエイリアス誤差から必要なサンプリング間隔を決定する式を導出した。また、FD-TD 法では、離散時間の間隔を小さくすると計算時間が増大するだけでなくグリッド分散による誤差も増加するため、入射電磁界は細かい時間間隔でサンプリングを行い、それよりも粗い FD-TD 法の離散時間間隔へ変換する方法を用いた。この場合に数値的な低域通過フィルタが必要となるが、この低域通過フィルタの設計およびフィルタを通すことによって生じる振幅や位相の誤差についても検討した。これらサンプリングやフィルタによる誤差は、FD-TD 法自体による誤差と同程度であれば十分である。そのため、FD-TD 法の空間や時間の離散化に伴って生じるグリッド分散誤差についても検討を行い、空間差分の格子の間隔と分散性、異方性による誤差の関係を示した。

この方法を用いて定在波分布測定による電子線形加速器の微細構造パルス幅推定法の解析を行った。時間領域において、電子ビームに伴う電界とその反射波および誘起された電荷からの輻射波が複雑な定在波分布を形成することを示し、先に実験によって得られていた定在波分布の様子を良く説明することに初めて成功した。

一方、本論文では、静電界や周波数領域での解析に用いる、境界要素法における薄い金属境界の扱いに関する方法についても示した。

境界要素法では、支配方程式から導いた境界積分方程式を境界上に節点を置いて離散化を行い、境界積分は区分的に数値積分で処理することで節点上の変数に関する連立方程式に帰着させる。境界積分の積分核には、特異性のあるグリーン関数かより特異性の強いグリーン関数の導関数が含まれている。そのため、薄い導体板のように境界が隣接している場合には数値積分の精度が悪化するのを防ぐため、導体板の厚さに応じて境界要素を細かく離散化するなどの対策が必要となる。

本論文で示した方法では、境界要素の大きさは変えずに隣接した境界の距離を 0 とすることで、隣接した境界に対する境界積分を解析的に処理して数値積分に起因する誤差を除いた。このとき、金属境界であれば境界条件からより特異性の強いグリーン関数の導関数が含まれている境界積分は相殺される点に着目した本方式では、隣接していない節点からの数値積分においても誤差が減少し、解析の精度が向上した。

解析例としてストリップラインの特性インピーダンスを求め、従来の方法と比較して薄い金属境界を含む場合でも境界要素を増加させずに解析の精度を保つことが可能であることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 澤 村 貞 史
副 査 教 授 成 田 正 邦
副 査 助 教 授 富 岡 智

学 位 論 文 題 名

加速器ビームモニタ解析に用いる数値解析法に関する研究

加速器は古くから用いられている装置であるが、近年多くの学会に加速器部会が設立されるに至っているように、その利用分野は益々広範囲にわたっている。中でも電子線加速器は次世代光源として特に高品位ビームの発生が要求されている装置であり、その発生ビームを計測診断する種々のビームモニタの果たす役割は重要で、特にビームに影響を与えずに測定できる非接触型のビームモニタは、加速器運転中の常時監視やフィードバック制御のために必須とされている。このような非接触型ビームモニタの設計や動作解析は、今日では数値解析によって詳細な検討が行われている例が多いが、これまでは加速器ビームパイプ内に置かれたモニタの解析が主で、ビームパイプの外で計測するタイプのビームモニタの数値解析手法の整備は未だ不十分である。

本論文は、パルス状ビーム解析に適する時間領域数値電磁界解法である有限差分時間領域法 (FD-TD 法) を、境界条件に関らずビームモニタ設計や動作解析に適用可能とすることを目的としてなされたものであり、その主要な成果は次のように要約される。

(1) FD-TD 法において、空間および時間の離散化に伴って生じるグリッド分散誤差について検討を加え、伝播方向、周波数、空間および時間の離散化の大きさに対する伝播速度の誤差という形でまとめ、必要とされる精度を満たす空間および時間の離散化の大きさを決定する指針を示している。

(2) FD-TD 法における、加速器のパルス状荷電粒子ビームの取扱いについて考察し、荷電粒子ビームを移動する局在化した電流として扱う従来用いられてきた方法では、特に開放領域においては解析上困難が多いことを指摘し、散乱界表示 FD-TD 法の優位性に言及している。さらに、その際の入射界の計算量を低減するために、パルス状荷電粒子ビームを点電荷で置き換えて入射界を計算することを提案している。即ち、この点電荷の作る入射界から解析領域中の電磁界の時間変化を求め、その後パルス状ビームの波形との畳み込

み積分で与えられる電磁界を周波数空間においてスペクトルの積として演算し逆変換することにより、実用的な計算量で計算できることを示している。

(3) 高エネルギーの点電荷の移動に伴う周辺電磁界は非常に高周波のスペクトル成分を含むため、FD-TD 法のような離散時間系で扱う場合にはサンプリング周期を適正に選びエイリアス誤差を避ける必要があることに言及している。そのため、著者は、まず運動する点電荷の周辺電磁界のスペクトルを求め、サンプリングによって生じるエイリアス誤差とサンプリング周期の関係を示し、このことより、点電荷のエネルギー、電磁界を求める位置と点電荷の軌道との距離、許容できるエイリアス誤差等を考慮に入れてサンプリング周期を決定する式を導出している。

(4) 上記の方法で決定したサンプリング周期は FD-TD 法の離散時間幅の数分の一から数十分の一となるが、単に FD-TD 法の離散時間の幅をこのサンプリング周期に合わせて小さくすることは上述の分散誤差のため計算精度や計算時間の面から不利であることにも言及し、適正なサンプリング周期で求めた入射界を FD-TD 法の離散時間の幅に合わせるための新しい手法を提案している。このときに用いる数値的な低域通過フィルタの特性について考察し、FD-TD 法の解析精度に影響を与えない低域通過フィルタの諸定数の決定法をも明らかにしている。

(5) 著者は、提案した手法を用いて、電子線形加速器の微細構造パルス幅推定法に用いられる定在波分布の解析を行い、時間領域において、電子ビームに付随する電界とその反射波、誘起された電荷から放射される輻射波が複雑な定在波分布を形成することを初めて定量的に明らかにすることに成功している。この結果は、実験によって得られる定在波分布の様子と極めて良く一致していることを確認している。

(6) 著者は、電極等に薄い金属境界を含む静電誘導型のビームモニタの解析に用いる目的で、ポアソン方程式の境界要素法解析において、薄い隣接する金属境界の距離を零とすることで、特異性を持つ積分核を含む境界積分を解析的に処理して数値積分に起因する誤差を除くとともに、より特異性が強い積分核を含む境界積分が相殺されるため解析の精度が向上することも明らかにしている。更に、有限の厚みを持つ金属境界に対して、上記の方法で厚さを零とした金属境界でその表面を置き換えることで解析の精度を向上できることを示し、マイクロストリップラインの解析で本手法の有効性を示している。

これを要するに、著者は、有限差分時間領域法を用い、加速器のパルス状荷電粒子ビームを対象とする数値解析手法においていくつかの新知見を得たものであり、さらに、加速器ビームモニタの解析に適用して実験との比較においてその有効性を確認しており、数値解析学および加速器工学の進歩に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があるものと認める。