

学位論文題名

Self-consistent Analysis of Particle Accelerator Wake fields Based on Time Domain Boundary Element Method

(時間領域境界要素法に基づく粒子加速器航跡場の
自己無撞着解析に関する研究)

学位論文内容の要旨

粒子加速器は、加速空洞や偏向磁石、四重極磁石などの構成部品で作り出した外部電磁場によって荷電粒子ビームを加速・制御する装置である。荷電粒子ビームは通常、多数の荷電粒子が空間的に局在した群(バンチ)の集まりから構成されるが、加速器設計の初期段階においては、まず各粒子が相互作用をしない単一粒子の集まりとしてビームを取り扱い、その動力学を研究する。一方、荷電粒子それ自身は電磁場の源であり、その運動に起因して粒子加速器内においては一種の電流のように振る舞う。このため、加速空洞などでは荷電粒子バンチに付随する電磁場が真空チェンバーの表面で散乱され、二次的な過渡電磁場が発生する。このような過渡電磁場はバンチの後方に影響するため航跡場(Wake Field)とよばれ、外部電磁場に対する擾乱となり、バンチ自身や後続のバンチの動力学に影響を与える。すなわち、加速器内を走るビーム内の多数の荷電粒子は航跡場を介して相互作用することになる。この航跡場を介したビーム・環境相互作用は、結果としてビームのエネルギーロスや品質の劣化を生じ、加速器の安定動作に影響を及ぼすなど有害であり、このため設計段階でその影響を正確に把握する必要がある。とりわけ、素粒子物理学の検証を目的とした国際リニアコライダーやX線自由電子レーザーのメインライナックなど、次世代の高エネルギー粒子加速器の開発では、非常に高強度かつ短バンチ化された高品質な荷電粒子ビーム要求される。ビーム強度が増加すると航跡場が強くなるため、ビーム品質に対して深刻な影響を及ぼすことが懸念されており、したがって、航跡場の発生とその影響の把握は極めて重要な研究課題の一つとなっている。次世代粒子加速器の開発において問題になる航跡場が発生するのは、高エネルギーまで粒子を加速し、システムの大部分を占める主線形加速部だけにとどまらない。必要な短バンチを作り出すために多数の偏向磁石を用いてバンチを圧縮するバンチコンプレッサーといわれる装置では、短バンチの軌道が偏向磁石によって曲げられることによって発生するコヒーレントシンクロトロン放射(CSR)といわれる現象が、別の大きな問題になっている。CSRは、曲線軌道のビームから出るシンクロトロン放射の低周波成分に相当する。この低周波成分、すなわち、長い波長の放射成分は、バンチを構成する膨大な数の粒子からほぼ同位相で重なり合うため放射強度も劇的に強くなり、それがバンチ自身の動力学に深刻な影響を与える可能性がある。この現象では、CSRの場がバンチ内粒子と強く相互作用するため、粒子軌道と場の両方が未知量となり、粒子の運動方程式と場の方程式の両方を矛盾なく自己無撞着(self-consistent)に解く必要がある。これに加えて、実際には真

空チェンバーが存在するため、CSR がチェンバー壁面と相互作用する影響も考慮する必要がある。しかしながら、このような複雑な現象はもはや解析的な手法ではその解析が不可能であるため、コンピュータによる自己無撞着な数値解析が必要不可欠となる。

荷電粒子を含んだ電磁場の境界値問題の数値シミュレーションでは、加速空洞などの航跡場解析で広く用いられてきた従来の差分型時間領域解法がよく知られている。この手法は任意の3次元構造物を取り扱えるが、バンチコンプレッサーのように荷電粒子バンチが曲線運動する場合には、解析領域を有限な格子状に離散化することで深刻な数値誤差を生じるため、適用は非常に困難であることがわかっている。このため、現在の解析では、CSR を含んだバンチに付随する電磁場(自己場)を遅延ポテンシャル場として表し、バンチのソース分布を数値的に積分して計算するアプローチが取られる。このとき、真空チェンバーは2枚の無限並行平板として近似され、その平板の境界からの影響は映像法に基づいて多数のイメージ電荷を置くことで準解析的に考慮されている。この手法は、差分型コードのような領域の離散化がないものの、チェンバーを並行平板で近似しているために左右の壁の影響が考慮されていないという欠点がある。これに対して、近年、チェンバーがビームラインに沿って滑らかなパイプ状であると仮定し、そこを伝搬するCSR を近軸光線近似によって取り扱う手法が開発された。しかしながら、この手法は、ビームに対して後方に伝搬する波を無視しておりパイプ断面形状が急激に変化する場合には適用することができない。このため現在の加速器設計では、任意の3次元構造物を取り扱うことができる計算コードは存在せず、新たな解析手法が強く求められている。

このような背景から、本論文では、荷電粒子系を含む電磁場の境界値問題として上記の航跡場およびCSR の現象を自然な形で定式化に取り込むことできる時間領域境界要素法(TDBEM)に基づく航跡場解析コードの開発を行った。本手法は、時間領域における電磁場の積分表示に基づき、従来の手法では困難である“任意の3次元構造物における曲線軌道荷電粒子ビームの航跡場”を時間領域において直接シミュレートできるという利点を有する。このため、今回開発したコードは、任意の形状の真空チェンバーによる遮蔽効果を考慮したCSR の解析が可能である。また、ビームの直線軌道を仮定すれば線形加速部の構成部品の航跡場解析にも適用でき、非常に応用範囲が広く、CSR や航跡場の影響が深刻になる次世代粒子加速器の設計において極めて有用である。

本研究では、まず、TDBEM の数値計算分野では困難であるといわれている、10万ステップを超えるような長時間ステップでも安定な時間領域計算が可能な、新しい計算スキームの開発に成功した。次に、実用的な大規模計算に対応するため、因果律を利用したメモリ削減技術を組み込み、また効果的な並列化アルゴリズムを考案することで大幅な計算コストの削減を図った。この結果、国際リニアコライダーの主線形加速器などで使用が計画されている実用的な加速空洞(TESLA9セル空洞)に対して、開発したTDBEMコードを適用できるようになり、ドイツ・ダルムシュタット工科大学で開発された最新の航跡場解析コードとの比較を行うことで、TDBEMによる実用的な航跡場解析が可能であることを明らかにした。これら実用的な多くの解析を通して、これまで開発したTDBEMコードの妥当性を可能な限り詳細にチェックした後、偏向磁石において荷電粒子ビームが曲線軌道で運動するようなケースでも適用できるよう拡張した。拡張したTDBEMコードは、一つの興味ある例としてStorage RingモデルにおけるCSRの過渡現象の解析に応用し、円形および正方形断面のビームパイプと、従来の並行平板モデルとの比較を行い、円形ビームパイプが最も強い遮蔽効果を示すことが分かった。最後に、この拡張したTDBEMコードをフィールドソルバとしてトラッキングコードと組み合わせ、任意の加速器構造物内を曲線運動する相対論的荷電粒子ビームを取り扱うことができる自己無撞着ビームダイナミクスシミュレーションコードを開発した。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 富 岡 智
副 査 教 授 日 野 友 明
副 査 教 授 板 垣 正 文
副 査 教 授 川 口 秀 樹 (室蘭工業大学大学院
工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Self-consistent Analysis of Particle Accelerator Wake fields Based on Time Domain Boundary Element Method

(時間領域境界要素法に基づく粒子加速器航跡場の
自己無撞着解析に関する研究)

近年、高エネルギー粒子加速器ではビームの高エネルギー化のみならず、大電流化、短バンチ化、低エミッタンス化が必要とされているが、この大電流化と短バンチ化により、荷電粒子ビームが加速器コンポーネントを通過する時に誘起される航跡場がビーム自身に及ぼす影響も大きくなり、低エミッタンス化の妨げとなることが問題となっている。次世代加速器の設計ではこの航跡場とビームの相互作用の把握が必要であり、そのための解析手法の開発が盛んに行われている。しかし、その多くは単純な形状に近似された境界しか取り扱えない、あるいは、ビームの形状や軌道が制限されている等のため、限られたモデルのビームダイナミクスの評価にしか適用できないという問題がある。

本論文では、このような背景にある航跡場とビーム自身の相互作用の解析手法に対して、時間領域境界要素法 (TDBEM) を用いて、任意の 3 次元構造物において誘起される過渡電磁場の影響下で、ビーム形状あるいは曲線状のビーム軌道を変えながら運動する荷電粒子ビームを、電磁場と粒子の運動方程式を両方矛盾なく取り扱うことのできる (自己無撞着) 解析コードを開発することを目的としたものである。

TDBEM は、電磁場に対する波動方程式から導出される境界積分表示に基づくため、従来の航跡場解析手法のように計算領域内を格子状に離散化せずに荷電粒子を含む電磁場の計算ができ、任意形状の境界中を運動する任意分布と軌道のビームの取り扱いが可能な有効な唯一の手法である。しかしながら、TDBEM を航跡場解析に応用するためには、以下の三つの克服すべき課題があり、本論文では、その解決法を検討している。一つ目は、TDBEM の時間発展型計算スキームが、一般に長時間ステップ計算において数値的に不安定性になり易い点である。それに対して本研究では、定式化を再検討し、全く新しい安定な TDBEM の計算スキームを開発し、十万ステップを超えるよ

うな長時間計算においても安定な計算をはじめて実現している。二つ目の課題として、実際の粒子加速器に応用するためには、TDBEM は所要メモリが莫大になり計算が困難となる点である。これに対して本研究では、因果律を利用したメモリ削減を実現し、実用に耐える大規模計算を可能にした。最後の問題点は、膨大な計算量によりターンアラウンドが大きくなり、効率的な加速器の設計には向かない点である。これに対して本研究では、新しい効率的な並列化アルゴリズムを考案するとともに、さらに界等価定理を利用した計算に必要な領域の削減技術を新たに開発し、計算時間の短縮を図っている。

本論文で提案された TDBEM を用いた具体的な数値解析例として、まず、上記の新しく開発した技術 (安定化スキーム、メモリ削減技術、並列化アルゴリズム、計算領域削減技術) の全てを組み込んだ TDBEM コードの信頼性を評価している。すなわち、解析解の存在する簡単な形状の加速空洞中を直線軌道ビームが通過するモデルの解との比較、さらに実際の大規模な線形加速器空洞について、加速器の設計で既に実績のある差分法に基づく航跡場解析コードの結果との定量的な比較により、新たに開発したコードの信頼性を示している。

さらに、曲線軌道ビームの場合に広く興味を持たれている解析モデルとして、ストレージリングにおけるコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) の過渡現象の解析にこの TDBEM コード応用している。この問題については、これまでの研究例は少なく、近似のない解としては平行平板間を曲線軌道ビームが通過するモデルの解しか得られていない。本研究で開発した TDBEM コードを用い円形および正方形断面のビームパイプと、この平行平板モデルとの比較を行い、ビームパイプの方が強い遮蔽効果を示すことを明らかにしている。

最後に、ビームの作り出す航跡場とビーム自身との相互作用を連成問題として解くために、航跡場解析用の TDBEM コードに粒子軌道計算コードを結合させた自己無撞着解析コードを開発している。曲線軌道荷電粒子の航跡場を自己無撞着解析できるのは本コードが世界的にもはじめてである。とりわけ、このコードは、加速器科学においてその現象の把握が急務であり、解析手法の開発が切望されてきた任意の形状の真空チェンバーによる遮蔽効果を考慮した CSR の解析にも適用が可能である。

これを要するに、著者は、次世代粒子加速器の開発のために必須である航跡場の自己無撞着解析のための新たな数値計算法を開発したものであり、これにより、加速器工学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あるものと認める。