

氏 名 Yuki Abe

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2485 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Evaluation of wakefield effects to nanometer small beam

論文審査委員 主 査 増澤 美佳
加速器科学コース 教授
柴田 恭
加速器科学コース 教授
佐藤 政則
加速器科学コース 教授
奥木 敏行
加速器科学コース 准教授
照沼 信浩
加速器科学コース 教授
柏木 茂
東北大学 電子光理学研究センター 准教授

博士論文の要旨

氏 名 : Yuki Abe

論文題目 : Evaluation of wakefield effects to nanometer small beam

本研究では、ATF という理想的な研究環境を利用し、ナノメートル極小ビームに対するウェイク場の影響を定量的に評価した。

幾何学的な形状変化のあるところをビームが通過した際に励起される電磁場をウェイク場と呼ぶ。励起されたウェイク場は同一バンチ内後方や後続のバンチに作用し、ビームの不安定性を引き起こすことがあり、ビームに対するウェイク場の影響評価は次世代の先端加速器技術の開発において重要な研究テーマである。現在、次世代の高エネルギー物理実験を担う加速器の一つとして、大型の線形加速器を建設する計画 (International Linear Collider project) が検討されている。衝突実験における事象生成数を増やすため、ルミノシティを上げる必要がある。線形加速器においては一度衝突したビームは再度衝突することではなく、可能な限りビームのサイズを小さくすることでルミノシティを最大化する。ナノメートル極小ビーム (以降、極小ビームと呼ぶ) を生成するための最終収束技術は ILC 実現において重要な技術の一つである。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の先端加速器試験施設 (ATF) では、極小ビームを安定に実現するためのビーム制御、計測技術の研究開発と ILC に要求される最終収束技術の検証が行われている。ATF では ATF2 プロジェクトとして 2 つの研究目標を掲げている (1) 最終収束技術の実証のため IP (仮想衝突点) における鉛直ビームサイズ 37nm まで到達 (2) IP におけるビームの位置をナノメートルオーダーで安定化させる。現状では両目標はほぼ達成されている。

ATF ではバンチ強度を上げた際にビームサイズが増大するという現象が観測されている。その主たる要因はウェイク場、特に short-range 横方向ウェイク場の影響とされている。ウェイク源の構造中心からオフセットがある位置を通過した際に励起された横方向ウェイク場はバンチ後方に対してキックとして作用し、バンチの分布を歪ませる。オフセットが大きくなるに伴って作用するキックも強くなる。このオフセットは、通常、軌道の歪みやウェイク源の設置ズレに起因するが、ATF ではビーム光学系の特性から、軌道の揺らぎによっても発生する。軌道の揺らぎに伴い励起されるウェイク場は時々刻々と変化する。IP におけるショット毎のビーム位置の変動を引き起こす。ATF では複数のバンチから構成される投影ビームサイズとして鉛直ビームサイズを評価している。そのため、ウェイク場に起因するバンチの歪みと各バンチの位置の変動がビームサイズ増大として観測される。バンチの強度が増すにつれ、ウェイク場によるキックの影響も強くなるため、結果として鉛直ビームサイズのバンチ強度依存性が観測される。

ATF では低エミッタンス、ナノメートルサイズの高品質なビームの生成が可能な加速器を有する。加えて、高精度なモニターを使用し、ビームの位置とサイズを精密に測定可能であることから、極小ビームに対するウェイク場の影響を詳細に研究できる理想的な研究環境であると言える。本研究では、ATF という理想的な研究環境を利用し、極小ビームに

対するウェイク場の影響を定量的に評価し、期待できる低減効果について検討した。

評価に当たり、励起される **short-range** 横方向ウェイク場を確認するため、ATF ビームラインに実装されている計 21 種のウェイク源の 3 次元電磁場解析を実施した。解析的な評価を基に、ICF70 真空フランジや空洞型 BPM、コリメーターなどがウェイク源として影響が強いことが示された。得られた計算結果を基に ATF ビームラインを再現するウェイク場モデルを構築し、3 つの実験的手法に基づいてウェイク場による極小ビームへの影響を評価した。

(1) 軌道応答を基にした単一のウェイク源が持つ極小ビームに対する影響の評価

内部構造が複雑なウェイク源においても妥当なウェイク場モデルを想定できているか確認するため、ウェイク源単体が持つビームへの影響を軌道の応答を基に評価した。実験において目的とするウェイク場キックを生成するため、新たに可動式の真空容器を設計・製作し、ビームライン上に実装した。任意の内部形状を持つブロックを真空容器内部に配置することで目的とするウェイク源を構築し、遠隔操作可能な位置調整機構による位置の調整によってウェイク場キックの強さを調整する。シミュレーションで想定された範囲内の実験結果が得られており、想定するウェイク場モデルの妥当性が示された。

(2) 可動式ウェイク源によるビームサイズ増大低減技術の性能確認

ビーム軌道の歪みや各ウェイク源の設置ズレに起因するウェイク場の影響を低減する技術の性能評価を行った。主要なウェイク源とされる CBPM (2 個) と真空ベローズを可動式ウェイク源としてビームラインに導入し、ウェイク場のカウンターキックを用いてビームサイズ増大の低減を図る。完全にビームサイズ増大を低減することはできないが、一定の低減効果がある事を明らかにした。

(3) 軌道揺らぎに起因するウェイク場の極小ビームに対する影響の評価

軌道揺らぎに起因するウェイク場の極小ビームに対する影響の評価に当たり、軌道揺らぎによって引き起こされるウェイク場の影響を意図的に強くするため、外部から軌道揺らぎを生成した。仮想衝突点 (IP) におけるビームの位置の変動が生じると外部軌道揺らぎ由来のビームサイズ増大が発生してしまうため、空芯型ステアリング電磁石 2 台を用いて IP における角度の変動のみが生じるように外部軌道揺らぎを生成した。IP における角度揺らぎとビームサイズ増大の関係を確認することで軌道揺らぎによって引き起こされるウェイク場による極小ビームへの影響を明らかにした。シミュレーション結果と実験結果は標準誤差の範囲で一致している。

構築したウェイク場モデルを基に、ウェイク源の撤去や改修によって期待できるウェイク場の低減効果を検討した。主要なウェイク源に対するウェイク場低減対策を施すことで、現状のウェイク場による影響を約 40% 程度低減することが可能であることが示された。

本研究は、より実際のビームラインを再現するウェイク場モデルを構築し、極小ビームに対するウェイク場の影響を評価した。IP における角度揺らぎとビームサイズ増大の関係を確認することで軌道揺らぎによって引き起こされたウェイク場による極小ビームへの影響を明らかにした。構築したウェイク場モデルを基に、ウェイク源の撤去や改修によって期待できるウェイク場の低減効果を検討した。主要なウェイク源に対するウェイク場低減

対策を施すことで、現状のウェイク場による影響から約 40%程度低減することが可能であることが示された。本研究にて得られた成果は、極小ビームに対するウェイク場の影響低減を通して、安定な極小ビームの生成に貢献する。

博士論文審査結果

氏 ^{Name in Full} 名 Yuki Abe

論文題目 ^{Title} Evaluation of wakefield effects to nanometer small beam

本研究は、国際リニアコライダー計画に代表される最先端のナノメートル極小ビーム(ナノビーム)の安定的実現のために必要とされるビーム誘起電磁場(ウェイク場)の影響評価に関するものである。出願者は、先端加速器試験施設の最終収束試験ビームライン(ATF2)を用いたナノビーム生成実験を、ウェイク場源となるコリメータ、真空フランジ、真空ポート、空洞型ビーム位置モニタ等のビームライン上の様々な構造について三次元電磁場計算を実施した。次に求められたウェイク場を取りこんだビームシミュレーションを行いウェイク場のビームへの影響を定量的に評価した。また、自ら設計したウェイク場評価装置をビームラインに導入しナノビームの応答を実験的に評価している。この装置では、真空容器内に任意の形状のウェイク場発生源を構築し、さらにビームに対して進行横方向の位置を変えてウェイク場によるビームキック量を変化させることができる。ビーム試験ではATF2 ビームラインでの大きなウェイク場を作る空洞型ビーム位置モニターとストレートパイプを模した構造を設定して、ウェイク場源単体での影響の定量的な評価を行った。出願者はさらにビームの角度ジッターがもたらすウェイク場内の軌道の動的な違いによる影響にも注目し、その影響についての評価を行い、ビームライン全体にわたるウェイク場の影響がシミュレーションと誤差の範囲内で一致することを実験的にも確認した。具体的には軌道補正用ステアリング電磁石を用いて人工的にIP(Lattice上の衝突点)で角度ジッターを生じさせ、これがナノビームのビームサイズ増大の一因となっていることを定量的に評価した。これらの研究成果は将来の先端加速器におけるナノビームの安定的実現のための技術と更なる高度化に向けた重要な知見を与えるものであり、加速器技術開発として価値のある研究であると考えられる。

本審査委員会において、出願者は研究内容を明瞭かつ簡潔に発表し、質疑に対して的確に回答した。本研究に関連した研究成果については、国際会議で1回、加速器学会で2回発表し主著者としてプロシーディングスを書いている。また査読付き国際論文誌 *Phys. Rev. Accel. Beams* への掲載に向けて準備中であり、2月中に投稿される予定である。出願者はATFでの国際共同実験を通して日頃から海外研究者との議論を英語で行っており、本博士論文も英語で執筆されていることから、研究活動に必要な十分な英語能力を有すると判断される。

以上のことから、審査委員全員一致で阿部優樹氏の博士論文の本審査を合格と判定した。

以上