

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05475

研究課題名（和文）ビーム光学総合計算コードの研究開発

研究課題名（英文）Study and development of integrated code for beam optics and accelerator design

研究代表者

大西 幸喜 (Ohnishi, Yukiyoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：30332117

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：ビーム物理学を基礎として、多様な粒子加速器における現象を統一的に取り扱える総合計算コードの開発を行った。現在稼働中であるSuperKEKB加速器をモデルケースとして、その予言能力と性能向上のための最適化等の評価を行い、計算コードとしての十分な性能を持つことが検証された。こうした研究成果は、将来の大型加速器計画である欧州のFCC加速器や中国のCEPC加速器の設計への一助とすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在において、粒子加速器は、学術研究のみならず、医療や産業など広い分野で利用されている。当該研究は学術分野に的を絞って進められてきたが、加速器総合計算コードは、他分野における粒子加速器の開発にも役立てることができるものである。特に、総合計算コードを用いて加速器を小型化する設計は、コスト削減にもつながり、利用に有利となる。こうした観点から学術的と社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：We have developed a comprehensive calculation code that can handle phenomena in various particle accelerators in a unified manner based on beam physics. Using the SuperKEKB accelerator as a model case, which is currently in operation, we evaluated its predictive capability and optimization to improve its performance, and verified that it has sufficient performance as a calculation code. The results of this research could contribute to the design of future large accelerator projects such as the FCC accelerator in Europe and the CEPC accelerator in China.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：ビーム物理学 加速器 ソフトウェア開発 数値解析 最適化手法

1 研究開始当初の背景

加速器は、放射光利用、医学利用、原子核利用、素粒子物理学実験等、様々な用途で利用されてきた。運転調整中であるスウェーデンの MAX-IV 加速器やフランスで加速器設計が進められ予算が承認された ESRF-II 加速器は、次世代の高輝度光源である。KEK における放射光施設の将来計画として検討されている蓄積リング型の高輝度光源では、これらと同等以上の性能を目指しており、加速器設計を行うための総合計算コードの果たす役割は大きい。陽子シンクロトロンである J-PARC 加速器においては、大強度化を目指すためには空間電荷効果の総合計算コードへの取り込みが必要であった。また、加速器の誤差診断および補正も計算コードの守備範囲である。調整運転をおこないつつ稼働している、超高ルミノシティを目標とする SuperKEKB 加速器においても、誤差診断および補正が性能達成には必要不可欠な課題となっていた。20 年後を見据えた将来計画では、高エネルギー実験を目的とした重心系エネルギー最高値で、350 GeV のリング型コライダーの設計がヨーロッパを中心に進められていた。こうした設計にも計算コードが利用される。

我が国では、Strategic Accelerator Design (SAD) と呼ばれる総合計算コードが、1986 年より KEK で独自に開発されて成果を上げてきたという優位性があった。SAD は、TRISTAN、KEKB 加速器、ATF、国際リニアコライダー (ILC) など、様々な加速器で有用性を実証してきた。この優位性を活かして、さらなる高度化を継続的に推し進めるために、「SAD 高度化プロジェクト」を立ち上げ、常に実践的な問題意識と結び付いた計算コードの改良や開発を中心において研究を行う必要性があった。こうした粒子加速器の高度化に伴い、総合計算コードにおいて近似精度を高める工夫や努力を行うことが求められている状況であった。

2 研究の目的

ビーム物理学を基盤として、多様な粒子加速器のビーム現象を統一的に取り扱えるような汎用性を備えることを目標に、加速器設計から現実の加速器の制御・ビーム性能開発に到る加速器研究の全過程において全てを実行可能な、総合計算コードの開発を進める。現在稼働中である、あるいは将来計画されている加速器は、性能の極限を追求するものが数多くある。これらの高性能加速器における複雑なビーム現象を統一的に高精度で取り扱え、かつ加速器設計に活かせる計算コードの研究開発を研究目的とする。

3 研究の方法

前述の研究目的に沿って、総合計算コードである SAD の高度化を進める。この目標を達成するために必要なものは、新しいアイデアと工夫である。計算コード開発に対してアイデアと工夫を出し合うために、研究者間で活発な議論や交流を行う。また、アルゴリズム開発のためのアイデアの集約、計算コード実装のための環境を共有する、計算コードの有用性を検証するための使用例の収集と比較を行う。国際会議、国際ワークショップ、加速器設計の打ち合わせ等のために研究者を派遣する、または招聘する。SAD ワークショップを開催し、ビーム物理学の議論から実際の加速器での課題や将来計画に至るまでを視野にいれ SAD の開発を通して、将来像を探る計画である。

4 研究成果

実際の加速器について、実状に即した計算コードの開発を行うことを基盤とするが、以下に具体例を挙げる。

- 現状の近軸近似では、進行方向を、段階的に平滑化することにより、横方向にも高次の次数を取り込むことが可能となる。ここで取り扱う磁場は、ソレノイド磁場に限らず一般的なものであり、この方法の定式化を確立。この定式化に基づく数値計算アルゴリズムの開発、既存の計算コード SAD への埋め込み。SuperKEKB 加速器は、最終収束磁石と測定器ソレノイドの設置を終えビーム衝突試験を行っているので、実際のビーム光学系で計算を行い、高次項の有意性を検証した。また、計算アルゴリズムの最適化を行い、実際のビーム光学系での予言能力を高めることができた。
- 実際の加速器、例えば SuperKEKB 加速器を用いた非線形領域のビーム光学系の誤差解析および補正。これらは、Touschek 寿命によって間接的に評価される。十分なビーム寿命を確保するためには、非線形領域の補正が必須であり、また、ルミノシティ性能向上のための X-Y 結合の色収差補正を行うことができた。
- KEK で稼動する線形加速器では、低エミッタンスのビームを供給するための RF 電子銃が利用される。この低エミッタンスのビームを用いたエミッタンス保存の最適化アルゴリズムの検証。放射光によるエミッタンス増大とウエイク場の評価も合わせて行なった。
- マッチングの高度化。6次元の完全な 6x6 行列によるマッチングコードの実装および試験。
- 電荷と質量を独立して持てるように、粒子を一般化して取り扱えるように拡張。

以上の事柄について全般的に評価を行うことができた。研究期間の大部分が、コロナ禍という非常に厳しい環境の中で、研究者間の交流、情報交換が行われた。しかしながら、研究期間中に国際 SAD ワークショップを開催することができたのは幸いであった。ワークショップでは、国内および海外からの研究者を一同に集め、加速器設計、加速器ビーム運転等活発な意見交換および議論を行った。成果報告として、研究開発の詳細については WEB ページによる発信、各論については、加速器関連の学術誌に投稿された。当該研究活動を通して、総合計算コードという側面から、将来の粒子加速器開発の一助とすることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ohnishi Y., et al.	4. 巻 136
2. 論文標題 SuperKEKB operation using crab waist collision scheme	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Plus	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjp/s13360-021-01979-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Thrane P., Tomas R., Koval A., Ohmi K., Ohnishi Y., Wegscheider A.	4. 巻 23
2. 論文標題 Measuring beta* in SuperKEKB with K modulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Accelerators and Beams	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevAccelBeams.23.012803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Keintzel J., Tomas R., Koiso H., Mitsika G., Morita A., Ohmi K., Ohnishi Y., Sugimoto H., Tobiyama M., Yang R.	4. 巻 -
2. 論文標題 SuperKEKB Optics Measurements using Turn-by-turn Beam Position Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IPAC2021	6. 最初と最後の頁 1352-1355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB009	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Sugimoto H., Kosio H., Morita A., Ohnishi Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 SuperKEKB Optics Tuning and Issues	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of eeFACT2022	6. 最初と最後の頁 35-41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-eeFACT2022-TUXAT0103	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大西幸喜
2. 発表標題 ビーム光学総合計算コードSAD
3. 学会等名 第16回日本加速器学会 年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森田昭夫 等
2. 発表標題 Local Orbit Bumpを用いたSuperKEKB最終収束光学系の誤差評価
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉本寛 等
2. 発表標題 SuperKEKBコミッションにおけるビーム光学の調整
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣澤 航輝 等
2. 発表標題 SuperKEKBにおける歪四極磁場成分の衝突点に対する影響とその測定
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大西幸喜
2. 発表標題 Off-momentum Optics at SuperKEKB
3. 学会等名 eeFACT2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生出勝宣
2. 発表標題 Several Topics on Beam Dynamics in FCC-ee
3. 学会等名 eeFACT2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Workshop SAD2019 https://conference-indico.kek.jp/event/75/overview Measuring beta* in SuperKEKB with K Modulation https://cds.cern.ch/record/2652855?ln=ja
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	生出 勝宣 (Oide Katsunobu) (50150008)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他 部局等・名誉教授 (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	杉本 寛 (Sugimoto Hiroshi) (70636448)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教 (82118)	
研究分担者	小磯 晴代 (Koiso Haruyo) (80170174)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・研究員 (82118)	
研究分担者	森田 昭夫 (Morita Akio) (80353366)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授 (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Workshop SAD2019	開催年 2019年～2019年
----------------------------	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スイス	CERN		
イタリア	フラスカティ研究所 (LNF-INFN)		
ロシア連邦	ブドカー研究所 (BINP)		
米国	コーネル大学		
中国	中国科学院高能物理研究所 (IHEP)		