

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390138

研究課題名(和文)ビッグデータ解析を応用した大型加速器ビーム制御・運転システムの開発

研究課題名(英文)Development of the beam control system using a big data analysis for the large scale accelerator

研究代表者

佐藤 政則 (Sato, Masanori)

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

研究者番号：90353367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、ビッグデータ解析を応用した大型加速器ビーム制御・運転システムの開発研究をおこなった。EPICSフレームワークを基盤としたソフトウェアを開発し、大量の加速器機器およびビームパラメータを継続的に収集することに成功した。また、約100台のビーム位置モニタ情報を、ビームショットごとに同期して取得することに成功した。これらの情報を利用して、複数パラメータ間の相関解析をおこない、ビームジッタ源の同定によるビーム運転の効率化に関する知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have studied the operational availability of beam control system based on the big data analysis especially for the large scale accelerator. The application software by using EPICS framework has been developed for aiming at the continuous acquisition of large number of accelerator parameters. In addition, the beam orbit data from 100 beam position monitors can be synchronously obtained. We obtained the information about the feasibility of effective beam operation using the beam jitter analysis based on the big data analysis framework.

研究分野：加速器科学

キーワード：大規模加速器 ビーム制御 加速器制御 ビッグデータ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、粒子加速器を用いた研究テーマは、高エネルギー物理学実験を始めとして、基礎物質科学・ナノテクノロジー、および生命科学など多岐にわたる。次世代の高度な利用実験のためには、超高輝度・高安定なビームの利用が必須であり、粒子加速器の性能が利用実験の成果を大きく左右することとなる。加速器の性能とは、電子源・加速空洞・高周波源・電磁石および電源など、個々の構成機器の性能・信頼性はもちろんのこと、ビーム運転の可用性から決定付けられる指標である(図1)。

特に、SuperKEKB, ILC, CLIC 及び FCC のような超大型最先端加速器においては、膨大な量の制御パラメタを常に最適化し、高品質なビーム運転を維持する必要がある。そこで、本研究に於いては、ビッグデータ解析を応用した大型加速器ビーム制御・運転システムの開発をおこない、大規模加速器に於けるビームの高可用化を試みることにする。

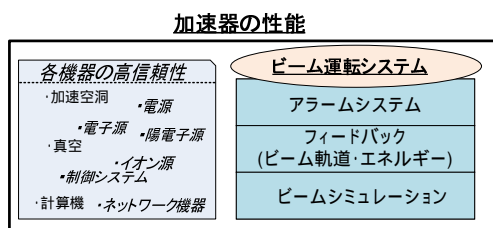


図1: 加速器の性能

### 2. 研究の目的

従来の加速器科学分野においては、多くの研究者が加速空洞・電源・真空システムなどのハードウェア開発、あるいは関連したビーム物理学の研究に注力してきた。一方、加速器ビーム運転に関するソフトウェア技術は、計算機科学の発展にともない大幅な進歩を遂げたと言えるが、近年のビーム運転システムは、ILC, CLIC 及び FCC のような超大型加速器の運転にそのまま適用できるレベルとは言い難い。大規模加速器では、その制御対象点数の多さから、単純な機器故障に起因しない場合のビーム変動の抑制が困難である。

これらの理由から、次世代加速器の運転効率を最大限に高めるためには、従来の水準を超える新しいビーム運転システムが不可欠である。本申請では、「大容量のパラメタロギング」及び「ビッグデータ解析」を基盤としたビーム運転システムを開発する。これらをアラームシステム及びデータマイニングによる相関解析システムへ応用し、延いては、

ビーム安定化のためのフィードバックシステムに適用する。フィードバックシステムは、ビーム軌道、エネルギー、及びエネルギー広がりなどを長期間安定に保つことを目的とする。最適なフィードバック目的量や制御量の選択についても、ビッグデータ解析による知見を考慮しておこなうことにより、直感的には俄に思い浮かばないようなフィードバックアルゴリズムを採用することが可能となる。これらの組み合わせにより、大規模加速器システムを安定に運転することができるよう、先進的ビーム運転システムを構築する(図2)。

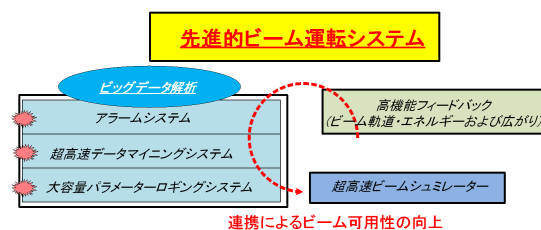


図2: 先進的ビーム運転システム

### 3. 研究の方法

高エネルギー加速器研究機構電子陽電子入射器(KEK 入射器)の実運転パラメタを部分的に用いて、大量の機器データおよびビーム情報(ビーム軌道、エネルギー、エネルギー広がり等)の相関解析を高速におこなうための高速計算サーバを導入し、システム構築をおこなう。また、これらの相関解析結果を用いて、高品質ビームを達成するためのフィードバック機構を開発し、システムへの実装をおこなう。

本システムでは、ストリームコンピューティング技術を基盤とした高速データマイニングシステムを高精度加速器ビーム制御へ実装することを目標とする。

第二年度に於いては、膨大な機器データおよびビーム情報を蓄積するための、大規模ストレージ装置を導入および試験する。また、本ストレージ装置を用いて、KEK 入射器の全機器データおよび全ビーム情報を蓄積し、初年度に開発する高性能ビーム運転システムと連携させる。KEK 入射器のビームスタディー時間を用いて、現実のビーム情報を用いたフィードバック試験をおこなう。これらの結果を基に、本システムを実ビーム運転に適用可能なレベルへ高めるための開発をおこなう。

最終年度においては、第二年度までに開発したシステムを KEK 入射器の実ビーム運転システムに実装し、試験をおこなう。その結果、詳細な性能評価をおこない、システム開発へのフィードバックをおこなう。

#### 4. 研究成果

次世代の先端的大型加速器のビーム運転効率を最大限に高めるためには、従来の水準を凌駕する新しいビーム運転システムが不可欠である。このため、本研究では、「大容量のパラメタロギング」及び「ビッグデータ解析」を基盤としたビーム運転システムの開発を目指してきた。

本研究に於いては、ビッグデータ解析を基盤とした大容量相関解析をおこない、隠れたビーム変動要因を突き止める。それにより、当該機器の安定性向上、あるいはフィードバック処理によるビームジッタ改善を目論んでいる。従って、大容量の運転パラメタを長期間安定に蓄積することは、本研究の基盤技術と言える。本研究では、加速器制御システムとして世界中で使用され、KEK に於いても広く利用されている Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) を基盤としてソフトウェアの開発をおこなった。既存の優れたソフトウェア開発基盤を使用することにより、ソフトウェアの開発期間を短縮化することに成功した。

大容量運転パラメタ蓄積技術を確立するため、高速計算機サーバ及び大容量ネットワークディスクを導入した。ネットワークディスクは 66 TB のディスクを搭載し、スペアディスクを 3 本設けた上で RAID システムとして運用することにより、大容量性を確保しつつ信頼性を高めている。これらの計算機サーバ及びネットワークディスクを使用し、KEK 入射器の実ビーム運転パラメタ（ビーム軌道、RF 位相、タイミング情報などの設定値及び測定値）を、EPICS によるアーカイバシステムに蓄積し続けることに成功した。本試験に於いて蓄積に用いたパラメタ総数は 42,000 点に及んだ。この試験結果より、現実の大規模加速器におけるデータロギングシステムに要求される計算機及びディスク能力を見積もるための知見が得られた。一部の蓄積データに抜けが見られる現象があり、今後、原因の究明及び改善を目指す予定である。

加速器運転に最も重要な情報の一つは、ビーム位置及びバンチ電荷量である。KEK 入射器では、91 台のストリップライン型ビーム位置モニタ(BPM)を用いて、ビーム非破壊の計測をおこなっている。現在、KEK 入射器で使用している BPM データ収集系は高速デジタルオシロスコープを用い、位置測定精度 25  $\mu\text{m}$  を達成している。さらに高精度のビーム位置測定を実現するため、VME カードを用いたデータ収集系を開発し、5  $\mu\text{m}$  の測定精度を達成した。既に、16 台の BPM を高精度データ収集系に更新し、運用に用いている。何れのデータ収集系に於いても、KEK 入射器の最大ビーム繰り返しである 50 Hz での測定に対応している。さらに、これらのシステムはイベント型タイミングシステムより配信されるビームショット番号情報を使用する

ことにより、50 Hz での完全同期が保証されたデータを収集することが可能となっている。入射先のリングに於いてシングルショット BPM を完備すると、電子銃からリング内までのビーム情報をショットごとに計測することが可能となり、ビーム物理学研究の強力なツールとなる。

図3に、デジタルオシロスコープ型 BPM データ収集系によるビーム位置計測時間間隔を示す。この図より、50 Hz (20 ms 間隔)での安定したデータ収集が可能であることが確認できる。また、図4は同じくデジタルオシロスコープ型 BPM データ収集系によるバンチ電荷量の計測結果である。本結果は、KEK 入射器最上流の BPM に於いて測定したものであり、バンチ電荷量 0.1 nC, 1 nC, 10 nC 運転モードを 20 ms ごとに切り替え、対応する個別のパラメタとしてロギングをおこなったものである。この結果より、データ収集系としては 50 Hz での動作をおこない、10 nC モードでの電子銃ミスファイヤ現象が捉えられていることが見て取れる。このような現象を捕捉すると同時に、他の機器情報 (RF 位相など) も全て取得することにより、ビーム不安定性源の迅速な特定につながる。

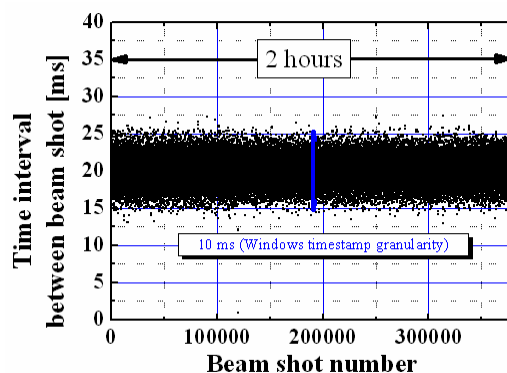


図3：デジタルオシロスコープ型 BPM データ収集系によるビーム位置計測時間間隔

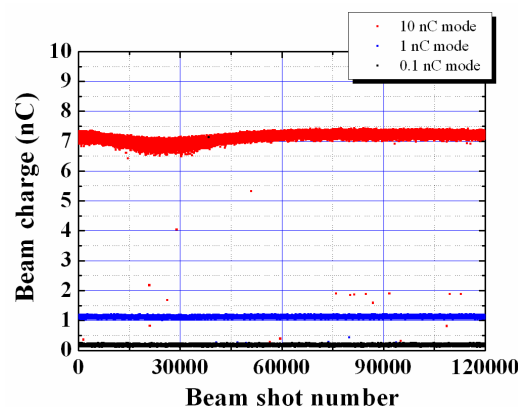


図4：デジタルオシロスコープ型 BPM データ収集系によるビーム電荷量の測定結果

既に、KEK 入射器では、50 Hz での計測が可能で高速 RF 位相・振幅モニタを開発し、インストール済みである。近々予定している本格運用開始後、全 BPM 情報及び RF 測定情報を用いたビッグデータ解析を試みる。

また、KEK 入射器における熱電子銃からのビームジッタ（ショットごとのビーム軌道変動）の原因を特定するため、本システムを用いた相関解析をおこなった。SuperKEKB へのビーム入射運転中であつたため、ビーム軌道を積極的に変化させたデータ収集はまだおこなっていない。そのため、明らかなビームジッタ要因の特定には至らなかった。近々、全ての BPM において高精度な測定が可能となるため、大量にデータを蓄積することでビッグデータ解析をおこない、ビームジッタ要因を特定する予定である。

研究者番号：90353367

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 政則 (SATO Masanori)

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