

氏 名 廣澤 航輝

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2140 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 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 Beam-Beam Effects and Optics Aberrations at IP of  
SuperKEKB

論文審査委員 主 査 准教授 飯田 直子

准教授 中西 功太

准教授 宮島 司

助教 杉本 寛

准教授 小林 鉄也

シニアフェロー 大見 和史

高エネルギー加速器研究機構加速器科学支援センター

研究員 福間 均

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設  
加速器第四研究系

主任研究員 菖蒲田 義博

日本原子力研究開発機構

J-PARC センター 加速器ディビジョン加速器第三セクション

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏名 廣澤 航輝

論文題目

Beam-Beam Effects and Optics Aberrations at IP of SuperKEKB

本研究では、SuperKEKBにおいて、理想的なビーム光学系に対する磁場エラーの影響が及ぼす、衝突点におけるX-Y結合の評価と、その補正を行った。X-Y結合は4次元相空間上の座標軸回転ずれである。衝突点でのX-Y結合は、衝突断面のxy平面の回転ずれに起因する幾何ルミノシティの低下だけでなく、ビームビームキックにも影響を与え、その効果をより複雑にしてしまう。円形コライダーでは、周回ごとに座標が振れた状態でビームが互いに蹴られるため、その影響が繰り返し積み重なる。このことから、衝突点におけるX-Y結合は、特に注意して補正しなければならない重要な問題の一つであり、その正確な評価にはビームビーム効果を考慮する必要がある。

SuperKEKB 加速器の衝突方式は、ナノビーム方式と呼ばれる新たな方法を採用している。最もルミノシティを上げることができるとされる、Crab Waist方式のアイデアの一部を適用し、将来的にCrab Waist方式を適用することも見据えた方法である。ナノビーム方式は、極低エミッタンスのリングで衝突点ベータ関数を極限まで絞り、かつ電子・陽電子ビームの衝突角度を大きくすることで、衝突時の砂時計効果によるベータ関数の実効的な制限を超えてベータ関数を絞ることができる方法である。このナノビーム方式はSuperKEKBが世界で初めてのビーム運転を行う方式であり、SuperKEKBで期待通りのルミノシティを出力することができれば、その結果が将来計画の衝突方式の指針となる。そのため、ナノビーム方式での衝突点ビームダイナミクスの調整方法を確立することは、将来のコライダーにとっても参考となる重要な研究である。

衝突点ビームダイナミクスの研究は、ビームビーム相互作用に着目し、バンチが交差する際の荷電粒子間のキックによってバンチ形状が変化する様を追跡していく。バンチ形状は、バンチ間キックだけでなく、周囲の環境に大きく依存し、リング一周の磁石での色収差の影響や非線形キックの影響も受ける。これらを計算する衝突シミュレーションは2種類あり、片バンチの粒子分布を固定して、もう一方の分布変化のみを追跡する、weak-strongモデルと両バンチの粒子分布変化を追跡し、キック力を逐次計算するstrong-strongモデルがある。本研究では、加速器リングの光学エラーに起因する問題に注目するため、weak-strongモデルを用いて衝突シミュレーションを行っている。

SuperKEKBのPhase-2コミッションングにおいて、衝突点垂直ベータ関数を絞ったにも関わらず、ルミノシティが向上しない問題があった。スペシフィックルミノシティ(ルミノシティ/バンチ電流積)のバンチ電流積の関係を図1に示す。これは、衝突位置調整や軌道調整などの調整を繰り返し行った結果である。この図から、低電流時において、X線モニタの測定エミッタンスから期待されるルミノシティよりも、測定ルミノシティ(衝突点での実効ビームサイズ)の方が低いという点に着目し、この問題の解決に取り組んだ。

期待されるルミノシティが得られない原因が衝突点における X-Y 結合であると推察し、 $(r_1, r_2)$  と呼ばれる結合パラメータが無視できない場合に、このルミノシティ低下を説明できることを見出した。そこで、ビーム光学系のエラーが及ぼす衝突に対する影響を定量的に評価するために、weak-strong モデルのビーム衝突シミュレーションを行った。各 X-Y 結合パラメータをスキャンしながらスペシフィックルミノシティの電流依存性を計算することで、各結合パラメータがルミノシティにどの程度影響するかを評価した。また、結合パラメータと実際の磁場変化量の関係を計算し、シミュレーションで得られた値を得るための磁場変化量を見積もった。この計算結果を踏まえて、衝突点 X-Y 結合の補正を行うために、skew4 極補正磁石を用いた補正方法の検討を行った。衝突領域外側の skew4 極磁場補正コイルに加え、衝突領域の最終集束超伝導磁石 (QCS) の補正コイルを用いた方法により、結合パラメータをスキャンし、ルミノシティの向上を達成した。この時、特にビームサイズに直接寄与する  $r_1$  と  $r_2$  を重点的に調整している。補正によるルミノシティの変化はビームビームシミュレーションの結果とも一致し、世界初のナノビーム方式における X-Y 結合の調整方法の一つを確立することができた。

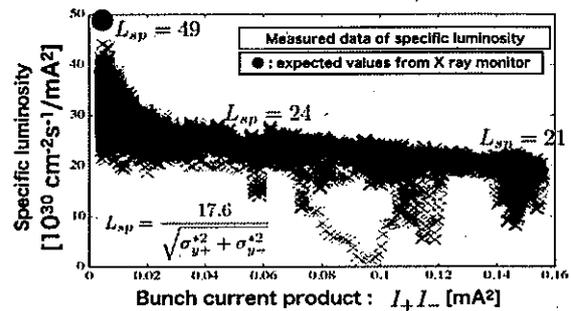
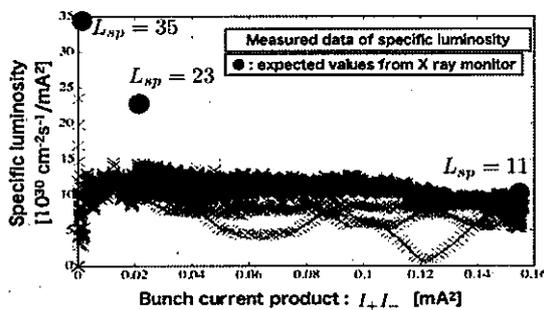


図 1. X-Y 結合補正前のスペシフィックルミノシティ 図 2. X-Y 結合補正後のスペシフィックルミノシティ

続いて、衝突点における X-Y 結合の原因を特定することを目標とし、まずは衝突点での結合パラメータをビーム位置モニタ (BPM) の測定から直接計算する方法を検討した。解析データには、2 種類の測定データを用いた。1 つは 6 週のシングルキック COD の測定データで、もう 1 つは入射キックによる振動の Turn by Turn (TbT) 測定データである。QCS 磁場を変えた時のビーム振動をこの 2 種類の方法で測定し、それぞれ異なる解析方法で、衝突点における X-Y 結合パラメータを求めた。その結果と実際のルミノシティスキャンで得られた補正值を比較することで、2 種類の測定の再現精度を調べた。その結果、衝突点最近傍の BPM (MQC1) の TbT データに対して、フーリエ変換 (FT) によるベータトロンの固有モードの分離 (図 3) と衝突点の物理変数への転送 (図 4) を順に行うことで、ルミノシティスキャンによる補正值を最も再現できることを見出した。

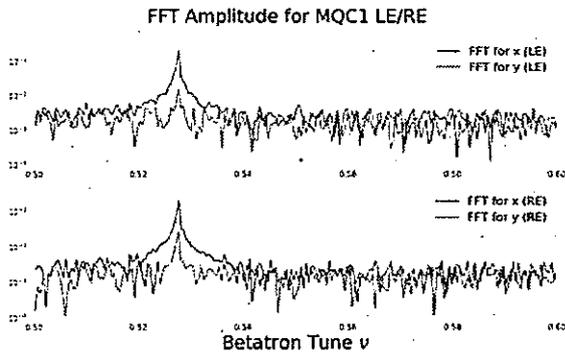


図 3. BPM (MQC1) TbTデータのフーリエスペクトル

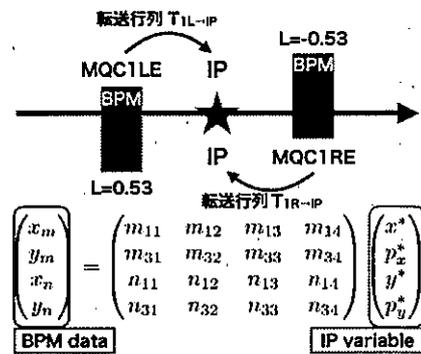


図 4. BPM測定値を用いたIPの物理変数の計算

更に、解析方法の比較検討を元に、再現性が良いと判断される FT によるモード分離から衝突点 (IP) への転送という方法を用いて、IP 近傍の磁場のもつエラー量を特定することを試みた。TbT-BPM の周回ごとの測定データに含まれるビーム光学系のエラー範囲は、BPM の場所によって異なる (図 5)。これに着目して、IP 近傍 (IR) の部分的なエラーを特定するために、SAD のモデル磁場に追加のエラーを仮定したモデル (図 6) を構築した。実際の測定値と SAD モデルを用いた計算値の違いから、仮定したエラーの具体的な値を計算した。求めたエラーの値を用いることで、真の転送行列を再構成することが出来る。そして、真の転送行列を計算することで、部分的なエラーの及ぼす IP への影響が評価できる。再構成した転送行列の妥当性は、転送行列のエラーをリング一周分のエラーに仮定することで、ルミノシティスキャンによる補正値の再現性で確認することが出来る (解析中)。このように、BPM の組み合わせを自由に選ぶことで、任意の場所のエラーが及ぼす IP への影響を計算できる解析方法を考案した。

HER(SAD)	Position (L side)	Position (R side)
IP	0 m	3016.314 m
MQC1	0.53 m	3015.784 m
QC1L/RE	0.89 - 1.9 m	3014.404 - 3015.404 m
MQC2	2.25 m	3013.814 m
QC2L/RE	2.12 - 3.2 m	3012.874 - 3014.074 m
...	...	...
MQLC3	12.935 m	3003.38 m

IPの実際の値を最も再現しうる。(MQC1)

QC1エラーのIPに対する影響を含まない。(MQC2)

IRのIPに対する影響を含まない。(MQLC3)

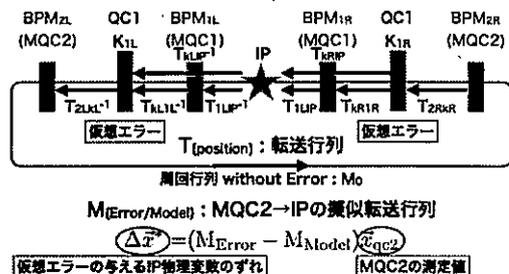


図 5. 各 BPM 測定値の持つ実際の IP の再現性の違い 図 6. 仮定エラー挿入による IP への寄与計算のモデル

以上の内容を博士論文としてまとめ、本研究の成果として報告する。

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 廣澤 航輝

論文題目 Beam-Beam Effects and Optics Aberrations at IP of SuperKEKB

廣澤氏の論文は、SuperKEKB 加速器のルミノシティ向上のための衝突点光学系調整に関する研究である。SuperKEKB 加速器は電子陽電子衝突リング加速器で、新物理発見のため、前身である KEKB 加速器が達成した世界最高ルミノシティの更に 40 倍を目指し、ナノビーム・スキームと呼ばれる世界初となる衝突方式を採用している。そのため、SuperKEKB の成否は、将来的な大強度加速器の設計に大きく影響を与えることになり、世界からも注目されている。

SuperKEKB のコミッショニングにおいて衝突調整が始まった段階で、スペシフィック・ルミノシティ（ビーム電流で規格化されたルミノシティ）の測定値がエミッタンスからの期待値に比べて著しく小さい、という問題があり、廣澤氏は、その原因の解析と解決方法の研究を行なった。

廣澤氏は、ビームモニタの測定値とシミュレーションを元に解析し、問題の原因は衝突点 (IP) における 4 次元相空間上の座標軸回転ずれ (X-Y 結合) であると推察した。X-Y 結合がある場合の衝突では、座標が捩れた状態でビームが互いに蹴られるため、円形加速器では、その影響が繰り返し積み重なる。従って、X-Y 結合等の正確な評価には衝突によるビームビーム効果を考慮する必要がある。

このように廣澤氏は、ビームビーム効果を考慮した評価結果を元に IP における X-Y 結合パラメータ (R2) の調整を行ない、IP 最近傍の 4 極磁石 (QC1) の補正コイルを用いて磁場エラーを補正することができた。また、これにより評価・推察が正しいことが確認できた。その結果、ルミノシティを著しく向上させることができ、計算結果とも一致した。以上の結果から、廣澤氏は、IP で極小ベータ関数をもつ円形衝突加速器では、リング全体の補正磁石では消せない IP 結合が起こりうることを示し、IP 最近傍のスキュー補正磁石の重要性を指摘した。このように、IP での X-Y 結合補正の重要性を、理論、実験の両面で明確に指摘したものは本研究が初めてであり、世界初のナノビーム衝突方式における衝突調整手法の一つを確立した。この成果は、今後の SuperKEKB の性能向上のみならず、現在計画中である FCC-ee (CERN) や CEPC (中国) 等の設計に重要な貢献をすることが期待される。

次に廣澤氏は、Turn-by-Turn (TbT) ビームモニタの測定データから、光学系のエラー量 (結合パラメータ) を直接推定するための解析手法を独自に考案した。そこでは、調和解析法 (フーリエ変換と ベータatron 振動基準の座標のモード解析) と C.O.D. フィッティング法 (Courant-Snyder invariant, Twiss パラメータ, X-Y 結合パラメータのフィッティング) の 2 種類の解析方法を詳しく考察した。その結果、TbT データを用いた調和解析法が、エラー量を特定するのに最も有効で、また、フーリエ変換による振動モード分離と

座標データの転送を行う順序が重要であることを示した。これより、光学系エラー源を定量評価する解析手法について重要な知見が得られた。

更に廣澤氏は、TbT-BPM の周回ごとの測定データに含まれるビーム光学系のエラー範囲は、BPM の場所によって異なることに着目した。そこで、上記の解析方法を利用し、IP 近傍の磁場エラーを特定する手法について独自の提案を行なっている。

本審査会における質疑に対しては、自らの考えをしっかりと説明し、本研究に関して深い理解力と考察力を有していることを伺うことができた。

これらの研究に関しては、IPAC の国際会議等 (peer review 付き) で発表し、また別途、投稿論文を準備中である。博士論文は英語で書かれ、廣澤氏は海外施設でのインターンシップを2回 (CERN、DESY) 経験しており、英語力に関しても問題ないと判断できる。

以上により、本論文は十分に学位授与に値すると認められ、審査員全員一致で合格とした。