

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月28日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21604010

研究課題名（和文）バンチフィードバックによるビームサイズ増大現象の研究

研究課題名（英文）Study of beam size blowup due to transverse bunch feedback noise.

研究代表者

飛山 真理 (TOBIYAMA MAKOTO)

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：60207595

研究成果の概要（和文）：横方向バンチフィードバックシステムに由来するノイズがビームに与える影響について、KEKB 加速器を用いてシステムに注入するノイズを制御することにより定量的に測定し、シミュレーションの結果と比較し、良い一致を得た。並行して不要なノイズを発生しにくく、バンチ間分離が良いバンチ位置検出回路を開発し、DAFNE 加速器フィードバックシステムを用いて検証し、ルミノシティに対しての影響を測定し、ルミノシティに影響が出ないことを確認した。

研究成果の概要（英文）：Effect of the noise from the bunch feedback system has been studied using KEKB collider. Degradation of luminosity and vertical beam size was measured quantitatively with the artificially injected noise. The results have been compared with the beam-beam simulation and have shown good agreements. Low noise feedback detector with good bunch isolation has also developed and tested using DAFNE collider. No degradation of luminosity with the feedback system was shown.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：加速器科学・ビームモニター

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：加速器、計測工学、ビーム制御、フィードバック

1. 研究開始当初の背景

KEKB リングで衝突実験中、鉛直方向バンチフィードバックゲインに依存する鉛直方向のビームサイズ増大、ルミノシティの低下という現象が観測されていた。この現象はバンチフィードバックシステムの広帯域ノイズが衝突によるビーム間力により増幅されるといふモデルで定性的に説明されていたが、実

験的にはどの周波数帯の、いくら以上の振幅のノイズの影響が大きいのかは分かっていなかった。また、ノイズの影響を小さくするバンチ位置検出回路についても、明確な方針はなかった。

2. 研究の目的

横方向フィードバックシステムのような広

帯域のキックをビームに与えることが出来るシステムが衝突ビームに与える影響を実験とビームビームシミュレーションの双方向から検証し、定量的な関係を得る。この結果を基に、広帯域ノイズをビームに与えないフィードバック位置検出システムを開発し、この効果を実際の加速器を用いて検証する。

3. 研究の方法

(1)KEKB 加速器を用いた実験

KEKB 加速器の定常衝突状態ビームを用い、外部から制御された擾乱信号をビームに与え、ビームサイズとルミノシティの関係を精密に測定する。水平方向にはクラブ空洞を位相変調することでビームにキックを与える。鉛直方向にはバンチ位置検出回路に擾乱信号を加え、フィードバックアンプ、フィードバックキッカーを用いてビームを励振する。バンチの振動の様子は、フィードバックシステム内の全バンチ対応バンチ振動レコーダーを用いて、振動周波数、振幅を定量的に測定する。印加信号として、正弦波を用いることでノイズの周波数成分の違いによる効果の差を測定する。また、振幅を変えることにより、非線形効果の確認を行う。また、帯域制限されたホワイトノイズを印加することで、フィードバックシステム内で発生するノイズの影響を定量的に測定する。

(2)ビームビームシミュレーションによるビームサイズ増大現象研究

ストロング・ストロング・ビームビームシミュレーションを用いて、衝突状態のビームに擾乱が与えられたときの応答を、実験条件に即してシミュレーションを行い、ビームサイズ、ルミノシティについての結果を求め、それらを実験的に測定されたものと比較する。

(3)バンチフィードバックシステムの低ノイズ化、およびそれに基づく回路の検証

バンチフィードバックシステムがビームにもたらすノイズおよび不正キック源について、検出ヘッド(ボタン電極)からバンチ位置検出回路、デジタルフィルター、大出力フィードバックアンプ、フィードバックキッカーの各所においてノイズ成分および寄与の検証を行い、ノイズ等不要成分の少ない回路の試作開発を行い、その回路を実際のフィードバック装置に組み込み、効果の測定、実証を行う。KEKB リングよりもエネルギーが低い INFN-LNF DAFNE リングを使い、より厳しい条件で検証を行うことにより、SuperB 加速器や SuperKEKB 加速器のような、低エミッタンス高ルミノシティ加速器での効果を検証する。

4. 研究成果

(1)励振実験

①クラブ空洞の位相変調を用いた励振

KEKB 加速器で使用したクラブ空洞は、バンチの重心には力を与えず、バンチ前後の位置に比例して水平にそれぞれ逆方向にキックを与えることにより、衝突点で有限角度衝突ではなく正面衝突をさせるデバイスであり、超伝導加速空洞の TM110 モードを加速周波数と同期した同じ周波数で励振することで動作させている。このとき、加速信号が位相変調されていると、バンチ重心も変調周波数でキックを受けることになり、バンチの振動が励振される。この状態で、位相振動の周波数と振幅をパラメータに励振状態(振幅、振動数)、ルミノシティを記録していった。周波数を一定にし、振幅を変えていくと、図1の様に

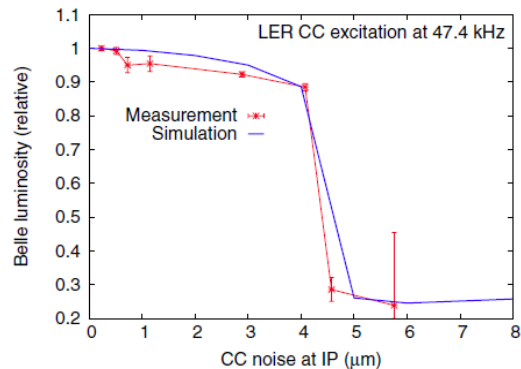


図1 変調振幅とルミノシティ

ある振幅を超えたところで大きなルミノシティの低下が観測され、シミュレーションの結果と極めて良い一致を見た。Beam-beam シミュレーションによると、図2の様にある振

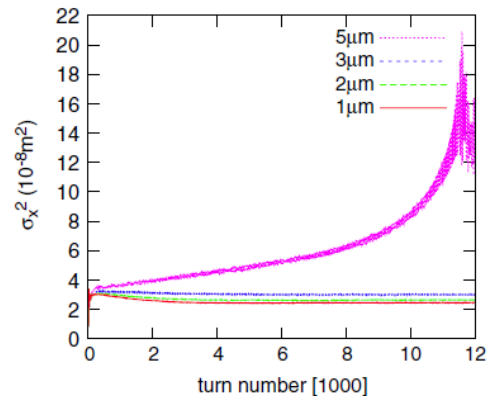


図2 ビームビームシミュレーション

幅でビームサイズが急激に増大する不安定現象が起きることが分かった。また、変調周波数および振幅を変えて測定した振動スペクトルは、図3の様になり、 σ モード(衝突する2つのビームが同じ方向に振動する)と π モード(衝突するビームがお互いに逆方向に振動する)の間のベースラインの高さも、

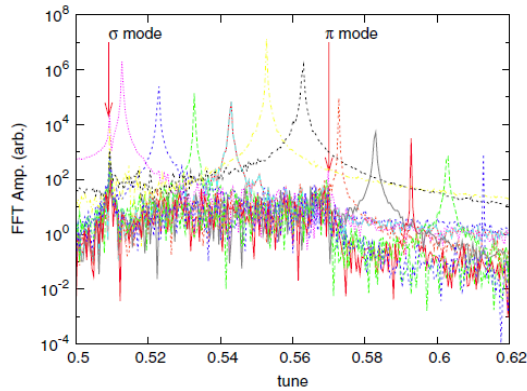


図3 観測された振動スペクトラム

応答も明らかに良いことが分かった。対応するビームビームシミュレーションからは図4の様にσモードとπモードの間で振幅が

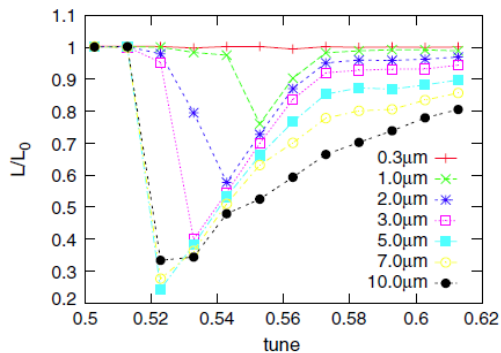


図4 振幅と振動数(simulation)

5μm以上でルミノシティシフトに大きな影響が出るということが分かった。振幅が小さいうちはπモードに近い周波数がルミノシティに大きく影響するが、振幅が大きくなるにつれ、バンチ振動の周波数がσモードに近い方向にシフトしてゆき、ルミノシティを低下させていくことが分かった。

②バンチフィードバックシステムを用いた実験

KEKB-LERの鉛直方向バンチフィードバックシステム信号に人為的にノイズ成分(単一周波数、ホワイトノイズ)を重畳させ、衝突中のビーム応答、鉛直方向ビームサイズ、ルミノシティを測定した。ノイズ重畳は2 Tap FIR フィルター出力下流で、広帯域大出力増幅器の前で行い、ビーム振動はBunch Oscillation Recorder、ビームサイズは放射光干渉計を用いて測定を行った。なお、2 Tap FIR フィルターは現在の位置データから前周の位置データを引き算することにより、DCはじめにオフセット(および周回周波数の整数倍の成分)を除去する物で、周波数応答はDC以外ほぼフラットでノイズ除去性能はないので、このノイズ自体はフィードバック位置検出回路で発生した物と見なすことが出来る。単一

周波数で振幅を変えながら励振した振幅を測定した場合、図5の様に(A)ベータトロン

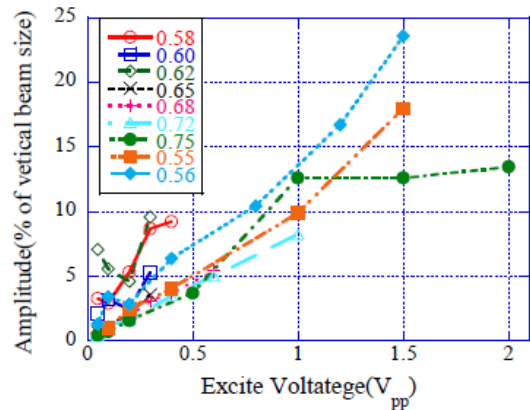


図5 励振振幅とビーム振動実測値

周波数より遙かに遠い(πモードよりも遠い)周波数でもかなりの振幅まで励振できる。(B)σモードより低い周波数ではほとんど励振できない。(C)πモードに近い領域が容易に励振出来る、ということが分かった。これらの励振の様子を横軸に外部から与え単一周波数の振幅、縦軸に全バンチの振幅の平均値をとり表示すると、図6の様になり

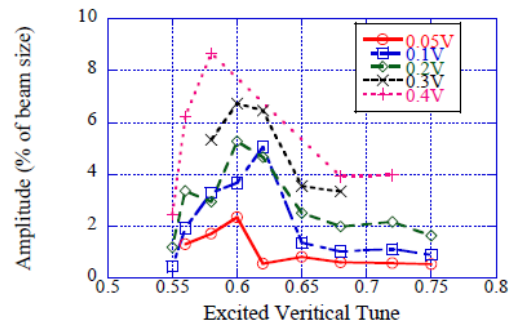


図6 バンチ振動周波数と振幅の関係

クラブ空洞位相変調時に行ったビームビームシミュレーションの結果と非常に良く似た傾向を示した。

励振振幅とそのときのルミノシティを励振周波数ごとの線で表示したものは図7の

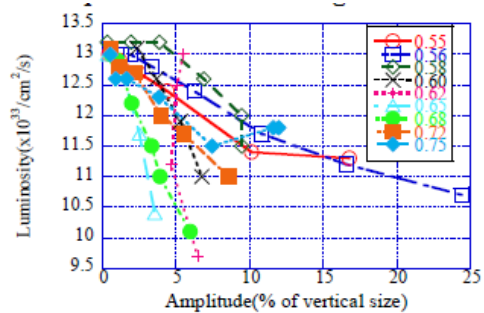


図7 ルミノシティと振動振幅(実測)

ようになり、πモードに近い周波数では他の

周波数領域に比べ、小さなノイズ振幅でも大きくルミノシティが低下している。ビームビームシミュレーションを同じ条件で行い、結果を比較すると図8のようになり、実験結果を非常に良く再現することが分かった。

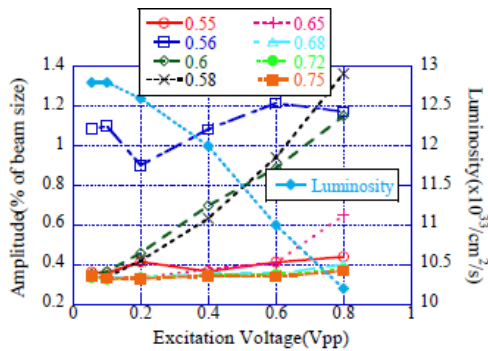


図8 ルミノシティと振動振幅(simulation)

次に、ノイズ源を5 MHz以下に帯域制限したホワイトノイズとし、その振幅を変えたときの、ビームの振動成分ごとの振幅、ルミノシティの変化を記録した。ここで、振動成分毎の振幅とは、Bunch Oscillation Recorderの20msに渡る全バンチの振動をFFTし、その周波数毎の振幅を換算した物である。

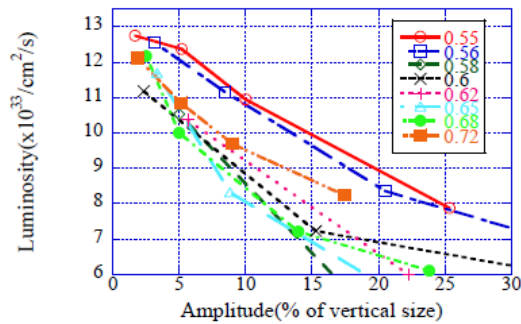


図9 ホワイトノイズ励振時の励振振幅とルミノシティ、振動周波数

結果は図9のようになった。ホワイトノイズを入れた場合、今までの結果から予想されるようにノイズの振幅が増大したとき、ノイズのうちビームビーム相互作用の π モードに近い周波数成分だけが成長し、ルミノシティ低下をもたらす。それ以外の周波数成分はバンチ振動・ビームサイズ、さらにルミノシティ低下には寄与していないことが確認できた。ここで、ルミノシティがノイズ注入しないときに比べて5%低下した時のホワイトノイズ振幅は、0.4Vpp程度であることが分かった。この値はフィードバックシステム内信号レベルと比べて桁違いに大きな値であり、到底通常の健全なバンチ位置検出回路やデジタルフィルターから発生することはあり得ない。

(2) 低ノイズバンチ位置検出回路の開発

ノイズの効果測定実験と並行して、よりノイズが少ないバンチ位置検出回路の開発を行った。KEKBで使用していた回路の問題点として(A)バンチ間信号のアイソレーションが良くなく、ビーム由来(ボタン電極自体のリンギングに加えて、ボタン電極以外で発生し真空チェンバー中を伝搬してくるHOMなど)のノイズ成分がかなり重畳してしまうこと(B)回路で使用している高周波増幅器などのノイズフィギアが良くなく、ノイズベースをあげてしまっている(C)同期検波後の回路がAC結合回路になっているため、バンチトレインの切れ目など大きなトランジェントビームローディングが発生する点で大きく出力が動いたとき、その後方でベースラインが変動し、デジタルフィルターのADCのダイナミックレンジを無駄に消費する、という点があった。このため、(A)バンチの信号成分を検出するバンドパスフィルターとして、DC成分を全く通さないコムフィルター構成のストリップライン結合型フィルターをSLACの協力で製作し、採用した。(B)バンチ位置検出器前段に近い増幅器について、低NFのものをいくつか時間応答特性について検証を行い、実際の回路に採用した(C)同期検波後の低域濾波器を今まで使用していたバターワース応答の物からベッセル型のものに変更し、さらに後段の増幅器としてDC結合の広帯域増幅器に変更した。これら以外にも、使用するマイクロ波要素について、特性測定、NF測定などを行い、突出した高NF要素や低帯域要素がないように工夫を行った。開発したバンチ位置検出回路のブロック図を図10に示す。

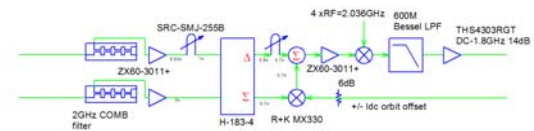


図10 バンチ位置検出回路

製作したバンチ位置検出回路について、ステップリカバリーダイオードを用いた同期式パルス発生器からの疑似ボタン電極信号を入力し、出力のノイズレベルなどの検証を行い、十分な低ノイズ性能であることを確認した。

①KEKB 加速器を用いた実験

KEKB 加速器のLER 横方向フィードバックシステム鉛直方向に開発したバンチ位置検出回路を組み込み、旧来の位置検出回路と比較して単独ビーム状態および衝突実験時にビームに与える影響を調べた。なお、デジタルフィルターとしては、最長8 Tap FIR フィルターまで構成可能な iGp デジタルフィルターを用いた。

単独ビーム状態で、運転最大電流値までビ

ーム入射、保持が可能であったので、横方向フィードバックシステムとしてはいずれも問題なく動作していることが分かった。衝突時においても、ルミノシティや鉛直方向ビームサイズには明らかな影響は見られなかった。さらに、新型検出回路と iGp の組み合わせで、鉛直方向フィードバックゲインを通常よりあげた状態にしてみたが、ルミノシティ、鉛直方向ビームサイズには有意な差は見られなかった。但し、この実験を行ったとき、KEKB リングはクラブ衝突状態であり、旧来のフィードバックシステムでも、鉛直方向フィードバックゲインをあげてもルミノシティに関してそれほど有意な差は見られない状態であったので、これだけで新型回路+iGp システムで問題が解決されたと断言することは出来ない。

②DAFNE 加速器での実験

イタリアの INFN-LNF(フラスカティ研究所)にある DAFNE コライダーリングは、対称エネルギーで有限角度公差による衝突を行うが、KEKB と比べて周長が非常に短く、ビームエネルギーも低いため、横方向バンチフィードバックシステムのノイズによる影響を大きく受けやすい。実際、陽電子リングにおいて、鉛直方向フィードバックゲインをあげると明らかにルミノシティの低下が起きるとい現象が確認されており、低フィードバックゲイン運転をせざるを得ない状況であった。DAFNE リングでは、バンチ位置検出はボタン電極信号をハイブリッドで直接引き算して位置情報を出すという、極めて荒く、ノイズの影響も大きく、かつ扱いにくい手法が使われていた。この DAFNE リングフィードバックシステムに、この研究で開発したバンチ位置検出システムを組み込み、ルミノシティに対するフィードバックシステムの影響を測定する実験を SLAC の Dr. J. Fox および INFN-LNF の Dr. A. Drago の協力のもと行った。デジタルフィルターとしては iGp の 12 ビット版である iGp12 を使用したが、フィルター長としては、通常運転で使用していた 6Tap FIR をそのまま使用した。

残念ながら、DAFNE リングは重篤な故障が頻発しており、1 回目は装置を輸送し実験開始する直前に運転不能となったため、現地ではビームオフ時のノイズ調査のみ可能であった。また、2 回目の実験機会でも、運転条件の変更により、ビーム運転が非常に不安定な状態で、ルミノシティは低くビーム寿命も極端に短く、十分定量的な実験が出来る状態ではなかったが、iGp12 のデータ収集機能を使いフィードバックループ内でのノイズレベル、周波数成分をビームのあるなし、単独ビーム、衝突ビームの各条件で比較するとともに、このバンチ位置検出システムを付け

た状態で鉛直方向ゲインをあげ、24 時間の衝突実験を行った。得られたルミノシティは、旧検出回路を用いた物と比べても差は見られる、鉛直方向フィードバックゲインをあげた状態であっても、ルミノシティに明らかな影響が出ないことは確認出来た。

(3)まとめ

本研究により、フィードバックシステムやクラブ空洞など、ビームに影響を与えるデバイスから与えられたノイズが衝突ビームに与える影響について、定量的な知見が得られた。これは、直接には SuperKEKB や SuperB 加速器のような低ミッタンス・高ルミノシティ加速器において、フィードバックシステムを建設する際、ノイズレベルをどこまで下げなければならないかということに関する確実なガイドラインとなるし、ILC ダンピングリング用のフィードバックシステムについても、有用な情報となる。開発された低ノイズバンチ位置検出システムは、SuperKEKB でも SuperB でも基本的に使用される予定である。また、Crab 空洞でのノイズレベル、およびそれが衝突ビーム、ルミノシティに及ぼす影響が定量的に測定できたので、Crab 空洞を LHC などで使用する場合、LLRF に対しての位相安定性などについて多くの有用な情報源となる。

ビームビーム衝突現象とノイズの効果をシミュレーションに検証するストロング・ストロング効果のビームビームシミュレーションの結果と、実験の結果は驚くほど良く一致していることが検証できた。このことから、ビームビームシミュレーション自体の信頼性を証明しているともいえるし、今後発生するビーム衝突に関わる複雑な現象についても、十分な予言、解析能力があるということが実証できたという点で、衝突型加速器のビーム物理に対して大きなインパクトがあるといえる。

本研究で確認されたルミノシティを低下させるノイズレベルは、バンチ位置検出回路あるいはデジタルフィルターで生成されることは極めて考えにくいほど巨大なため、KEKB 加速器で観測された鉛直方向フィードバックゲインによるルミノシティ低下の原因とは考えにくいことが分かった。このため、他の原因を探る必要がある。この可能性の一つとして、当時の有限角度衝突で衝突点保持フィードバックに用いていたいわゆる鉛直方向サイズフィードバックが考えられる。このフィードバックでは、衝突点の水平方向のずれと、鉛直方向のビームサイズに、バンチ進行方向のバンチ内不安定性から来る関係があったことを用いて衝突点付近の水平バンプを動かしていた。もしもフィードバックシステムからのノイズにより、鉛直方向ビー

ムサイズが少し増大すると、この軌道フィードバックは水平方向に互いにオフセットを取る方向に作用する。衝突が最適でなくなるため、鉛直方向にはビームビーム効果でさらにビームサイズは大きくなり、これが正帰還となり衝突条件は悪化し、ルミノシティが低下していたと想像出来る。このことを実証するためには、単独ビーム条件で印加ノイズとビームサイズとの関係を厳密に測定すること、さらにこの条件で、バンチ形状まで入れたビームビームシミュレーションを行い、効果が再現されるかどうか調べる必要がある。近々には、NSLS-II など稼働を開始する低エネルギー大電流第3世代光源加速器での実験が可能であれば、より多くの知見が加わると思われるし、さらに SuperKEKB 加速器や SuperB 加速器では、元々の鉛直方向のエミッタンス、xy 結合などが極めて小さいため、特に鉛直方向に関してはフィードバックシステムなどのノイズの効果が大きく出ると想像出来、運転開始後早期にフィードバックゲインと鉛直方向ビームサイズに関する実験を行い、衝突実験に備えることが必要と思われる。

DAFNE 加速器の運転予定は現時点では SuperB 加速器建設との関係で不定な部分が多いが、可能であれば引き続きバンチフィードバックシステムがルミノシティやビームサイズに与える影響の研究を続けることで、大角度、長バンチ長衝突でのビームダイナミクスと、外来ノイズの影響に関する新たな知見が得られると思われる。

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1件)

- ① K. Ohmi, R. Tomas, Y. Funakoshi, R. Calaga, T. Ieiri, Y. Morita, K. Nakanishi, K. Oide, Y. Ohnishi, Y. Sun, M. Tobiyama and F. Zimmerman
“Response of colliding beam-beam system to harmonic excitation due to crab-cavity rf phase modulation”, PRST-AB, 14, 111003(2011), 査読有
10.1103/PhysRevSTAB.14.111003

[学会発表] (計2件)

- ① Makoto Tobiyama and Kazuhito Ohmi,
“Study of beam size blowup due to transverse bunch feedback noise on e+ e- collider”, DIPAC2011, Hamburg, Germany, 16, May, 2011.
- ② M. Tobiyama, H. Fukuma, K. Shibata, M. Tejima, S. Hiramatsu, K. Mori, H. Ishii,

T. Obina, “Development of Button Electrodes for SuperKEKB Rings”, Beam Instrumentation Workshop 2010, Santa Fe, NM, U.S.A, 2010年5月4日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飛山 真理 (TOBIYAMA MAKOTO)
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：60207595

(2) 研究分担者

大見 和史 (OHMI KAZUHITO)
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：10194292

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

John D. Fox
SLAC National Accelerator Laboratory・教授

Alessandro Drago
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati・教授