

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540315

研究課題名 (和文) 半整数共鳴近傍における特異なビームダイナミクスの研究

研究課題名 (英文) Research on Peculiar Beam Dynamics in the Vicinity of Half-Integer Resonance

研究代表者

家入 孝夫 (IEIRI TAKAO)

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：90100809

研究成果の概要：クラブ型衝突を世界で最初に実現し、世界最高の衝突性能を誇る KEKB 加速器において、バンチ毎のビームパラメータ (ビーム位置、ビーム位相及びベータトロンチューン) を測定し、そのビームダイナミクスを調べた。その結果、ダイナミックビーム・ビーム効果、クラブ型衝突の効果及びその影響などの新しい現象を観測した。さらに、衝突性能を決めるビーム・ビーム力の上限を評価することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：ビーム計測

科研費の分科・細目：物理学／素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器；ビーム物理；ビーム計測

1. 研究開始当初の背景

KEKB 加速器を用いた Belle 実験は、2001 年に B 中間子崩壊過程で CP 対称性の破れを測定した。この測定により、小林・益川理論を実験的に証明したことが評価され、2008 年のノーベル物理学賞受賞に貢献した。

世界最高のルミノシティを生成している KEKB 加速器は、より高いルミノシティを生成するために、ベータトロンチューンを半整数の極近傍に設定している。衝突型加速器では、動作点が半整数に近づくと、衝突の強さに依存するダイナミックビーム・ビーム効果

が顕著に現れ、オプティクスが乱れる。オプティクスの乱れは、加速器の安定性とも関係する。又、KEKB のバンチは非常に狭い間隔で置かれているので、バンチとその環境との相互作用により後続のバンチパラメータが変わることが予想される。このように様々な複合的な要因でビームがダイナミックに変化する。

KEKB 加速器はもともと水平方向に有限角で衝突させていたが、2007 年にクラブ空洞と呼ばれるビーム偏向装置を導入したことにより、実効的な正面衝突を実現させるこ

とができた。シミュレーションによれば、ルミノシティが倍近く増加することが予想された。クラブ空洞による衝突効果を調べることは重要である。

2. 研究の目的

KEKB 加速器は2つのリングからなり、1つは8GeVの電子ビーム、もう1つは3.5GeVの陽電子を貯蔵する。それぞれ、High Energy Ring(HER)、Low Energy Ring (LER)と呼ばれている。2つのリングの周長は約3kmで、加速周波数は500MHz、バンチを最大5120個蓄えることができる。しかし、実際は、電子・陽電子のバンチはそれぞれ6ns間隔で、約1600個のバンチが連なっている。このバンチの連なりをバンチトレインと呼ぶ。各バンチには100億個以上の粒子が塊となっている。このように多数の粒子ビームを蓄積した加速器に何らなる異常が生じた時、ビームを安全に捨てるために、バンチをリング全体に入れないで、トレインの後にバンチを入射しない領域を作っている。

衝突型加速器の性能指標であるルミノシティを上げるためには、できるだけ多くのバンチ数とできるだけ粒子密度の高いバンチが要請されている。バンチ間隔が狭くなると、バンチとその環境との相互作用によりバンチ通過後にウェーク場が発生する。このウェーク場が後続バンチに影響を与える。その結果、同じバンチ電流値であっても、バンチが置かれている場所に依存し、バンチの軌道、位相、チューン、サイズなどのビームパラメータが変化するかもしれない。ウェーク場の効果は加速器の性能を制限させるので、この効果を調べることは、重要である。そのためには、バンチ毎のビームパラメータを測定することが必要である。

3. 研究の方法

バンチ毎のビームパラメータを測定するには、いくつかの方法が考えられるが、我々は、ゲート回路を使ってある特定のバンチを取り出し、そのバンチ信号を回転周期以内で信号処理する方法をとった。ゲート法測定により、バンチ毎の軌道、位相及びベータatronチューンを精密に測定した。又、ビーム・ビーム効果によるチューンシフトは、非線形共鳴振動を伴うので、チューンスpekトルの形状からチューンシフトを求めた。外部誘因によるバンチ全体の変動の影響を防ぐために、基準となるバンチのパラメータもモニターし、その差を用いた。

4. 研究成果

KEKB 加速器の衝突実験中や特別なビーム条件でビーム計測した。以下の項目に各実験の概要とその結果を述べる。

(1) クラブ空洞の効果

斜め交差衝突に比べ、正面衝突はバンチ間の水平方向の空間電荷力が強くなることが予想される。図1に示すように、バンチの空間電荷力を表す水平方向ビーム・ビームキックがクラブ空洞により強くなった。これは、実効的ビームサイズが小さくなったことを意味している。

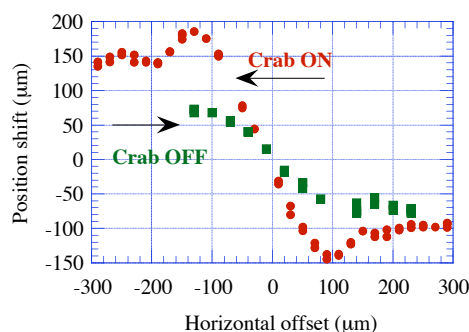


図1：位置モニターで測定した衝突バンチと非衝突バンチの水平軌道の差（ビーム・ビームキックに比例する）を衝突点における両ビームの水平方向軌道差の関数として表した。クラブ空洞をオン/オフした状態で測定した。

(2) ダイナミックビーム・ビーム効果

測定された衝突バンチと非衝突バンチの軌道差とオブティクスパラメータを使い、ビーム・ビームキックを求めた。測定値と計算値とを比較すると、測定値から求めたビームサイズは、ゼロ電流でのサイズに比べ小さくなっていることがわかった。測定された実効的サイズはゼロ電流でのサイズに比べ約80%縮んでいることがわかった。このサイズ縮小は、チューンが半整数共鳴近くに設定されていることによる現象である。このダイナミックビーム・ビーム効果は、計算値とほぼ一致した。このダイナミック効果により、ルミノシティが、さらに増加することが期待される。

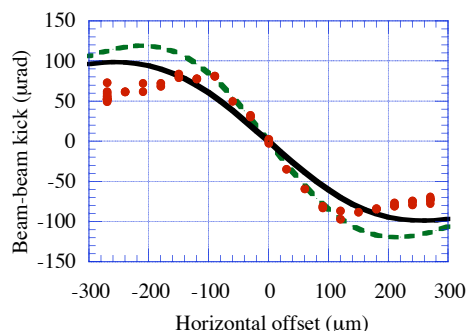


図2：衝突点での水平方向軌道差の関数としてビーム・ビームキックを示す。赤点は測定

値、黒実線はゼロ電流での計算値、緑破線は軌道の中心付近で測定に合わせたもの。

(3) バンチ毎のビーム位相測定

ビーム電流の増加に伴い、加速空洞でのビーム負荷も大きくなる。ビーム負荷によって加速空洞の共振周波数が変わるので、ビーム電流に応じて加速空洞の調整を行っている。しかし、ビーム負荷が一樣でないため、ビームの回転周期内でビーム位相の変化が生じる。図3は電子（青）と陽電子（赤）バンチの位相をバケット番号の関数として表した。位相の全体的な変化は両ビームともやく 3° で同じであるが、変化の仕方に違いが見られる。この違いは、加速空洞の性質に違いによる。LERは常伝導空洞で加速しているが、HERは常伝導空洞と超伝導空洞の両方を用いている。超伝導空洞のQ値が常伝導空洞のQ値より高いためである。

この位相の違いは、衝突する各バンチの位相が同じではないことを意味する。この位相差により衝突点の進行方向位置がずれることが予想される。位相差から推定した衝突点のずれと衝突測定装置 (Belle) で直接衝突点を測定した結果と一致した。この結果は、位相測定が確かな精度で正確に測定されていることを示唆している。

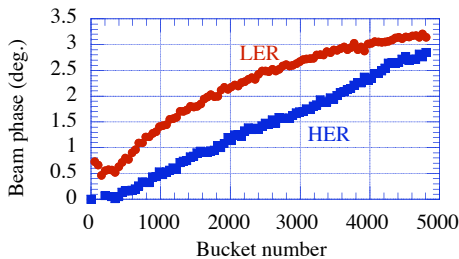


図3：バンチトレインに沿ったビーム位相の変化、赤が陽電子 LER、青が電子 HER のビーム位相。

図3でLERのトレイン先頭部で位相の急激な変化が見られる。この位相変化を詳しく調べるために、短いトレインを使って位相と水平軌道を測定した。図4のようにビーム位相が50バケットまでに急激に増加しているのがわかる。このような急激な位相変化を起こすのは、常伝導空洞の加速モードではなく、それに寄生しているQ値に低いモードであることが予想される。図4で注目すべきなのは、位相の変化に追従して水平軌道も変化している。この軌道変位は、クラブ空洞の二次的効果によることがわかった。本来、クラブ空洞はバンチの重心がクラブキックのゼロクロス電圧と合っていることが仮定されている。しかし、KEKB加速器では、バンチ毎の位相が異なる。図5に示すように、位相シフト

したバンチがクラブ空洞を通過すると、位相シフトのためにバンチ重心もキックされる。このキックはリング全周に波のように伝搬する。

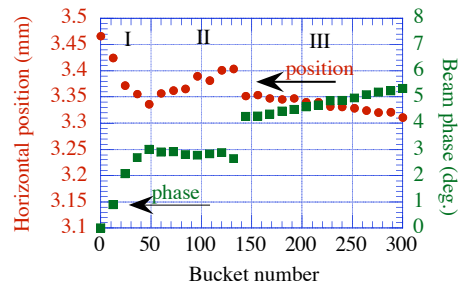


図4：トレイン先頭部でのビーム位相（緑四角）と水平方向ビーム軌道（赤丸）の変化。

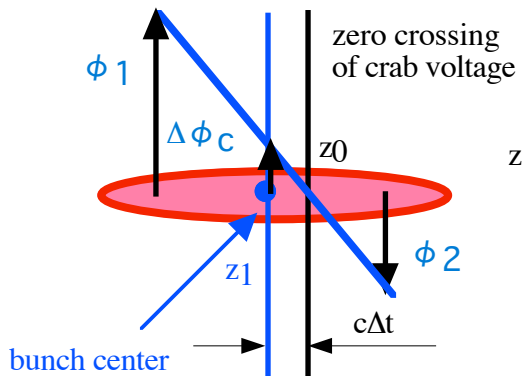


図5：位相（タイミング）シフトしたバンチがクラブ空洞を通過すると、バンチ重心が $\Delta\phi_c$ のキックを受ける。

(4) ビーム・ビームチューンシフト測定

バンチの衝突により、バンチ内の各粒子はお互いの空間電荷力により収束力を受け、バンチのチューンが増加する。この収束力は、バンチの粒子密度に比例するので、チューンの変化からバンチのサイズを推定することができる。チューンの変化はバンチの形状に依存するので、非線形を示す。衝突バンチのチューンが同じの場合は、0モードと π モードのチューンが生成するが、チューンが同じでないため、衝突により生成した2つのチューンの両方が衝突の影響を受ける。又、ビーム・ビームチューンスpekトルは非線形共振現象であるので、ビーム振動の共振周波数が振幅に依存する。したがって、見かけのチューンが変わったかのように見える。このような非線形効果を考慮して衝突によるチューンの変化を測定した。チューンシフトをバンチ電流積に対して測定した。図6に示すように、垂直方向ビーム・ビームパラメータは、極めて低い電流で飽和をしていることがわかる。この飽和現象はビーム・ビーム限界を

示し、垂直方向ビームサイズが極めて低い電流から増加していることを示唆している。

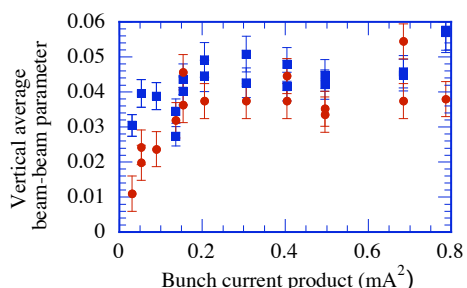


図6：垂直方向ビーム・ビームパラメータをバンチ電流積の関数として表示した、赤はチューンシフトからビーム・ビームパラメータ、青はバンチ毎ルミノシティモニターから求めたもの。

一方、水平方向のビーム・ビームパラメータを電流積の関数として図7に示した。水平方向は、垂直方向で観測された飽和現象は見られない。測定されたビーム・ビームパラメータはダイナミック効果を入れた計算値に近い値を示している。これは、図2に示されるようにダイナミック効果で水平方向の中心付近のビームサイズが縮んだために、ビーム・ビーム力が強くなった結果であると考えられる。

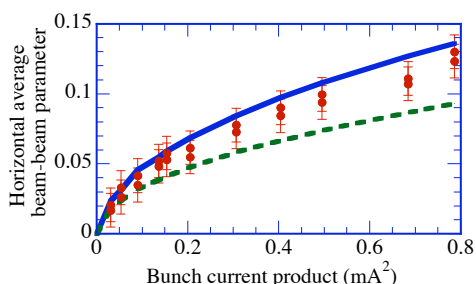


図7：水平方向チューンシフトから求めたビーム・ビームパラメータをバンチ電流積の関数として赤点で表示した。実線はダイナミック効果を入れた計算値、破線はダイナミック効果なしでの計算値。

KEKBは、ルミノシティをさらに2桁近く上げる改造計画がある。その計画によれば、バンチ間隔は2nsになる予定である。そこで、ゲートのスイッチ時間は1ns以下が要求される。現状のゲートのスイッチ時間は3nsなので、使えない。そこで、スイッチ時間が500psのゲート回路を開発した。図8に示すように、バンチ間隔が2ナノ秒でもバンチを取り出せる高速のゲートモジュールを試作した。今後、さらにバンチ間隔が狭くなり、強いウェーク場の下でも測定ができるようになるであろう。



図8：上の波形は静電型電極で検出したバンチトレイン信号、バンチ間隔は2ns、下はゲート回路により、上のバンチトレイン信号から1つのバンチを取り出した波形。横軸の全幅は10ns。

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 5件)

- ① T. Ieiri, K. Akai, H. Fukuma and M. Tobiyama
Title: "Beam Dynamics Measurements using a Gated Beam-Position Monitor at KEKB"
Accepted for publication in Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A
査読：有、2009年
- ② T. Ieiri, H. Fukuma, Y. Funakoshi, M. Masuzawa, K. Ohmi and M. Tobiyama
Title: "Measurement of Beam-Beam Kick using a Gated Beam-Position Monitor under Crabbing Collision at KEKB"
Proc. of EPAC08 p.1143-1145
査読：無、2008年
- ③ T. Ieiri, Y. Ohnishi, M. Tobiyama, and S. Uehara
Title: "Measurement of Coherent Beam-Beam Tune Shift during Crabbing Collision at KEKB"
Accepted for publication in Physical Review Special Topics Accelerator and Beams,
査読：有、2009年
- ④ Y. Funakoshi, M. Masuzawa, T. Ieiri (他7名、6番目)
Title: "Orbit Feedback System for Maintaining an Optimum Beam Collision"
Physical Review Special Topics Accelerator and Beams, 10, 101001-11
査読：有、2007年
- ⑤ T. Ieiri, H. Fukuma, Y. Ohmi and M. Tobiyama
Title: "Measurements of Wake Effects due to Electron Cloud at KEKB"
Proc. of International Workshop on Electron-Cloud Effects (ECLLOUD07)

査読：無、2007年、ページ152-159

〔学会発表〕（計 1件）

①家入孝夫

標題：「ゲート制御型ビーム位置モニターとKEKBでの応用」

第5回日本加速器学会

2008年8月7日、東広島市中央公民館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

家入 孝夫 (IEIRI TAKAO)

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：90100809

(2) 研究分担者

池田 仁美 (IKEDA HITOMI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究

施設・助教

研究者番号：80370071