

特集2 KEKB B ファクトリーのコミッションング

KEKB での電子雲対策

福間 均*・川本 崇

Mitigation of the Electron Cloud Effect in KEKB

Hitoshi FUKUMA* and Takashi KAWAMOTO

1. はじめに

KEKB の運転が始まってまもない 1999 年春、ビームサイズを高分解能で測定できる干涉計ビームサイズモニタが稼働し始めると陽電子リング (LER) の垂直方向ビームサイズがビーム電流とともに増大していく現象が観測された。垂直方向ビームサイズが増えるるとルミノシティが低下するためこの現象は極めて重要であることが認識され、直ちに現象の原因究明ならびにその対策の検討が始まった。現在では、この現象は電子雲不安定性と呼ばれる現象であることがわかっており、対策のためにソレノイド巻き線が LER ほば全周にわたって施されている。ここでは、KEKB での電子雲不安定性の原因究明の経緯と、その対策として行われたソレノイド磁石設置について述べる。

2. 電子雲によるビーム不安定性

シンクトロン放射光がビームチェンバ壁に当たると光電子が放出される。光電子は正電荷を持つ陽電子ビームから引力を受け加速され、対向するビームチェンバ壁に当り二次電子を放出する。二次電子もまたチェンバ壁に当って電子を放出し電子の増殖が起きる。増殖した電子はビームの周りに雲のように集まりビームと電磁相互作用を起こしビームの運動を不安定にする。電子の集合を電子雲と呼び、それによって起きるビーム不安定性を電子雲不安定性と呼んでいる。電子雲不安定性には、電子雲を介して各バンチが相互作用することによって起きる結合バンチ不安定性とバンチ内の陽電子が不安定になる単バンチ不安定性がある。後者ではバンチの形が変形し見かけ上バンチの横方向サイズが増大したように見える。電子雲不安定性は陽子ビームでも起き、この場合電子雲の種は (LHC の

ように放射光がでるほどエネルギーが高い加速器を除けば) ビームロスにより壁から出る電子が主である。

電子雲不安定性は、例えば CERN ISR での e-p 不安定性のように、古くから知られていたが、大電流・多バンチ蓄積リングの登場によって重要性が再認識されるようになった。そのきっかけは、伊澤らによる KEK フォトンファクトリ (PF) での陽電子蓄積時に起きる結合バンチ不安定性の観測¹⁾と大見によるビーム-光電子相互作用に基づくその理論的解釈²⁾であると考えられる。PF での観測結果は KEKB 設計の最中にもたらされたため急遽 KEKB での対策が検討され、不安定性が起きた場合はソレノイド磁場をかけて電子をチェンバ壁付近に集めて不安定性を弱め、残るバンチ振動はフィードバックシステムで強制的に抑えることになった。ただし、このとき想定されていたのは、後に問題となった単バンチ不安定性ではなく結合バンチ不安定性だった。

3. 電子雲対策の経緯

陽電子ビームの垂直方向サイズ増大が観測されたのは、前述したように、1999 年春頃である。そのあと生出、Zimmermann らによってビームサイズ増大が電子雲によるのではないかという仮説が出され、チェンバ壁から放出される電子を除くため、その形から C ヨーク磁石と呼ばれる小さな永久磁石が多数チェンバ表面に取り付けられた³⁾。図 1 で C の形をしたものが鉄のヨークで、ヨーク先端についている丸いオセロの駒状のものが永久磁石である。C ヨーク磁石は、製作が短期間でできチェンバへの取り付けも容易なため、電子雲仮説を早急に確かめるために導入された。C ヨーク磁石を取り付けたあとビームサイズを測定してみると、バンチ間隔が大きいときは磁石のビームサイ

* 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization, KEK
(E-mail: hitoshi.fukuma@kek.jp)



図1 ビームチェンバに取り付けられたCヨーク永久磁石.

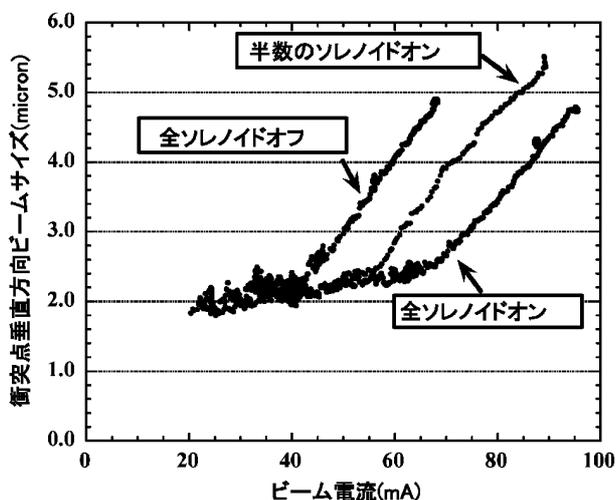


図2 ソレノイドオン・オフによるビームサイズの変化.

ズへの効果があるが、通常の運転で使われていた4 RF バケツ間隔ではあまり効果がないことがわかった。そこで電子雲がより効率的に除かれることを期待して、2000年9月にCヨーク磁石を約2,800個のソレノイド磁石に置き換える大作業が行われた。この間、理論面では単バンチ不安定性のモデルとしてF. Zimmermannによる単バンチビームブレイクアップモデル⁴⁾や大見およびZimmermann⁵⁾によるヘッド・テイル不安定性モデルが提案されている。2000年秋のビーム運転でソレノイド磁石のビームサイズおよびルミノシティに対する効果が確認された⁶⁾。図2にソレノイドオン・オフ時の垂直方向ビームサイズをビーム電流の関数として示す。ソレノイドをオンすることでビームサイズ増大が始まる電流値が上がったことが分かる。ソレノイド磁石の効果はルミノシティ測定で

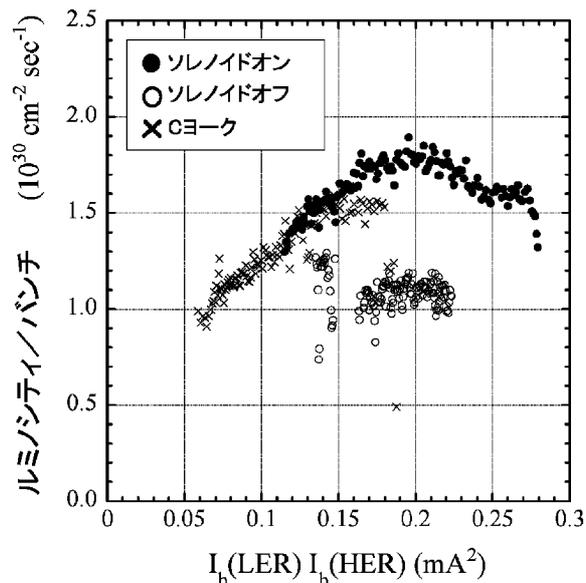


図3 ソレノイド磁石のバンチ当りルミノシティに対する効果. 横軸は、電子リングと陽電子リングのバンチ電流積.

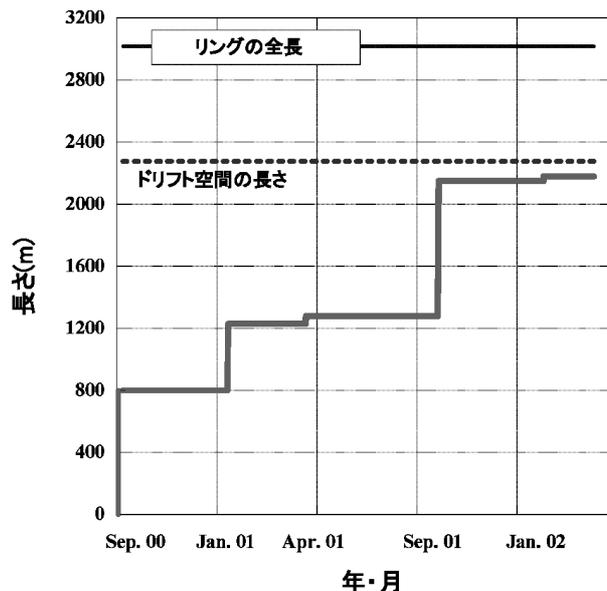


図4 20 Gauss以上のソレノイド磁場区間の長さの変遷.

も確認された⁶⁾。図3にバンチ当りのルミノシティ測定を示す。図にはCヨーク磁石での測定も示されている。ルミノシティが飽和する電流値がソレノイド磁石の場合よりも低い。ソレノイド磁石のルミノシティへの効果が確認されたので加速器運転休止期間のたびにソレノイド磁石の追加が行われ、2002年2月には、バンチ間隔4 RF バケツでは電流1300 mAまでビームサイズ増大が起きなくなるまでになった。図

4 にソレノイド磁場で覆われた区間の長さの変遷を示す。

2002 年以降、大規模なソレノイド磁石の設置は行われていない。ソレノイド磁石の極性が変わる部分（磁場がほとんど零の部分）や磁場が零である四極磁石の中心部に電子雲が溜まるのではないかとという疑いから、ソレノイド磁石の極性変更を試みたり、四極磁石のチェンバにフラットケーブルで作ったソレノイド磁石を巻いたりしてみたが、いずれも大きな効果はなかった。

設計の段階で予想されていた電子雲による結合バンチ不安定性も実際に観測されたが、当初の予定通り、ソレノイド磁石とバンチフィードバックシステムの併用により抑制されている。

4. ソレノイド磁石

ソレノイド巻き線は基本的に人海戦術による作業だったが、細山らによって巻き線機が開発され作業は大幅に能率化された。ソレノイド磁石間の結線は KEKB 関係の職員総出で行われた。磁場の極性は四極磁石間で積分ソレノイド磁場を相殺するように決められた。

図 5 にリングに設置されたソレノイド磁石を示す。図左に見えるのがポビン型で銅線がポビンの上に 2 層巻かれている。右に見えるのはポビンレスソレノイド磁石と呼んでいるものでベローズの上や NEG ポンプの両脇などポビン型を巻くことが困難な場所に取り付けられている。表 1 にソレノイド磁石のパラメータを示す。線材は主に直径 2 mm のエナメル銅線である。電源には KEKB のステアリング磁石用の電源を一部転用したり、トリスタン加速器のステアリング電源を再利用したりした。

図 6 にポビンレスソレノイド磁石の巻き線作業の様子を示す。右に見えるものが巻き線機である。巻き線棒が上部の回転軸によって回転し銅線が棒に巻かれる。棒は巻き線終了後取り外される。巻き線数は 200 ターンである。この巻き線機一台で、移動時間も含めて一日に 20 から 50 個程度のソレノイドが巻ける。

NEG ポンプポートやビーム位置モニタ (BPM) のようにソレノイドを巻くことが難しい場所には C ヨーク磁石や中山ら考案の永久磁石が取り付けられた。図 7 に BPM に取り付けられた永久磁石を示す。図に見えるアルミパイプ中に C ヨーク磁石に使った永久磁石がスタックされており棒磁石を形成している。この棒磁石を BPM の周りに配置するとソレノイド磁場に良く似た磁場が作られる。磁場の強さは約

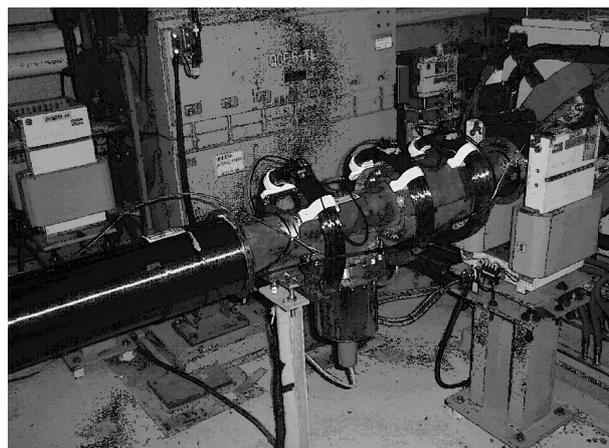


図 5 リング中のソレノイド磁石。左手の長いソレノイドがポビン型で右手のリング状のソレノイドがポビンレス型。

表 1 ソレノイド磁石の諸元

型	長さ (mm)	直径 (mm)	巻き数 (ターン)	コイル中心磁場 (電流 5 A 時) (Gauss)
ポビン	150-650	148	250 等	45
ポビンレス	40	220	190, 200	48
同上	40	250	200	43
同上	40	300	200	37

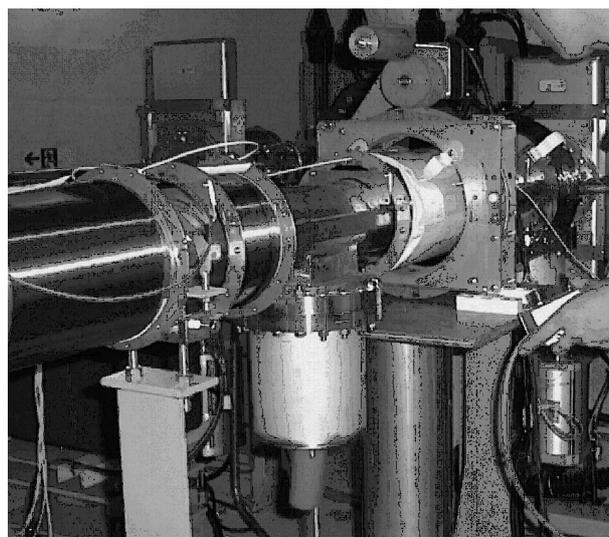


図 6 ソレノイド巻き線作業 (エスケーサービス加藤俊一郎氏提供)。



図7 ビーム位置モニタの周りにおかれた永久磁石ソレノイド。

45 ガウスである。

現在、約 10,000 個のソレノイド磁石が設置されている。個数が多いため、管理表や個々のソレノイドに付けるラベルの作成、巻き線数の確認、極性の確認等ソレノイド磁石の管理作業は大変であった。

5. おわりに

ソレノイド磁石によって電子雲不安定性を抑えルミノシティを回復できたが、バンチ間隔を 2 RF バケツト間隔にするとまだビーム幅の増大が観測されている。バケツト間隔を短くすると電子雲が増えて取り除ききれないと考えられる。更に電子雲を減らすためには、1) アンテチェンバの採用等により電子雲の種である光電子を減らす、2) 二次電子放出率の低い TiN 等をチェンバ表面にコーティングする、3) 偏向電磁石の中のように磁場が強いところでは、弱いソレノイド磁石は効果がないと考えられるので、静電電極やのこぎり型表面のチェンバを使用する、等の対策が提案されており、いずれも KEKB の真空グループをはじめとして精力的に開発が進められている。

前述したように KEKB で電子雲不安定性が問題になった頃は電子雲不安定性の重要性が再認識された時期であり、CERN、ロスアラモス、SLAC、中国 IHEP 等多くの研究所で、電子雲研究が急進展した時期と重なる。また、現象の解明や対策の検討には、F. Zimmermann 氏ら海外の研究者の貢献があった。電子雲研究およびその対策は国際共同研究が有効に機能した例の一つであると思う。

また、KEKB の電子雲対策では、巻き線機や永久磁石の考案、電子量測定モニタの製作、バンチフィードバック用機器やバンチ毎観測モニタによるビーム観測等グループ横断的に色々なアイデアがでて対策が進展していった。KEKB の自由な雰囲気がかうまく機能した結果だと思う。

最後に、多数のソレノイド巻き線を短い運転休止期間中に完了できたのは、実際に巻き線作業を担われたエスケーサービスの加藤氏ら業者の方々のおかげである。ここに感謝します。

参考文献

- 1) M. Izawa, Y. Sato and T. Toyomasu, "The Vertical Instability in a Positron Bunched Beam", *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 5044 (1995).
- 2) K. Ohmi, "Beam-Photoelectron Interactions in Positron Storage Rings", *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 1526 (1995).
- 3) H. Fukuma et al., "OBSERVATION OF VERTICAL BEAM BLOW-UP IN KEKB LOW ENERGY RING", in Proceedings of EPAC00, Vienna, 1122 (2000).
- 4) F. Zimmermann, "Electron-Cloud Studies for the Low Energy Ring of KEKB", CERN SL-Note-2000-004 AP (2000).
- 5) K. Ohmi and F. Zimmermann, "Head-Tail Instability Caused by Electron Clouds in Positron Storage Rings", *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 3821 (2000).
- 6) H. Fukuma et al., "Study of Vertical Beam Blowup in KEKB Low Energy Ring", in Proceedings of HEACC2001, Tsukuba (2001).