

## KEKB におけるクラブ交差に関するビームスタディ

船越 義裕\*

## Beam Study on Crab Crossing at KEKB

Yoshihiro FUNAKOSHI\*

## 1. 背景説明とスタディの目的

クラブ交差のアイデアは、1988年に R. Palmer によって提唱された<sup>1)</sup>。これは、リニアコライダーにおいて、有限角度衝突の条件で、実質的に正面衝突を回復することを目的としたものであった。次に、1989年には生田と横谷が、有限角度衝突によって生じるシンクロベータトロン結合の項が、クラブ交差を用いることにより除去できることを示した<sup>2)</sup>。これは、リングコライダーの設計に対しても、インパクトを与えるものであった。

この当時、KEK B-factory (KEKB) は設計段階にあったが、有限角度衝突を採用することが検討されていた。KEKB は、ビームエネルギーが非対称な電子・陽電子衝突型の加速器(コライダー)であるので、必然的にダブルリングのコライダーになる。KEKB では低エネルギーリング (3.5 GeV 陽電子) を LER, 高エネルギーリング (8.0 GeV 電子) を HER と呼んでいる。ダブルリングコライダーでは、衝突点の前後で二つのビームの軌道を素早く分離する必要があるが、エネルギーが非対称なコライダーの場合は、衝突点の前後に通常の偏向電磁石を置くことにより、エネルギーの違いを利用して、ビーム軌道を分離することができる。KEKB と競争関係にある PEP-II ではこの方式でビーム軌道を分離している。しかしながら、この分離用偏向電磁石を設置すると、そこから放出される放射光が、物理実験用の検出器に対するバックグラウンドノイズの原因になるという問題がある。さらに、分離用電磁石が衝突点付近の貴重なスペースを食ってしまい、他に設置したいデバイスの設置を諦めざるを得ないというような問題もある。これは間接的に、ルミノシティの低下に結びつく可能性がある。有

限角度衝突の方式を採用すると、この分離用電磁石を省いてもビーム軌道の分離ができるので、これらの問題を回避することができる。KEKB では、最終的に水平方向に  $\pm 11$  mrad の交差角をもってビームを衝突させることになったが、この有限角度衝突方式には、もう一つメリットがある。それは、所謂「寄生衝突」の影響を軽減することができるということである。KEKB のように非常に高いルミノシティを目指すマシンの場合、リングに非常に多数のバンチを詰め込むことになる。この場合、バンチとバンチの間隔が非常に短くなるが、その結果、一方のビームのあるバンチが、他方のビームのあるバンチと正規の衝突点で衝突した後(またはその前)に別のバンチとすれ違うことになる。このすれ違い(寄生衝突)によって、ビームの寿命が減少したり、ビーム軌道が乱されたり、ビームのプロローアップ(ビームサイズの増大)などが生じる可能性がある。しかし、KEKB で採用された  $\pm 11$  mrad では、ほとんど問題ないレベルまで、この寄生衝突の影響が軽減できることがシミュレーションで示されている。有限角度衝突には、このようにいろいろなメリットがある反面、危険性も存在する。有限角度衝突では、衝突点での二つのビームのオーバーラップが少し悪くなるため、ルミノシティがやや悪化する。これは、ルミノシティの幾何学的ロスと呼ばれるが、KEKB の設計パラメータでは、10% 程度のロスである。これに加えて、有限角度衝突では、ビームビーム力の持つシンクロベータトロン結合の項により、シンクロベータトロン共鳴が励起されビームプロローアップが生じ、ルミノシティの低下を招く可能性がある。1970年代に、DESY で稼働した DORIS と呼ばれるマシンでは、垂直方向の有限角度衝突の方式を採用したが、シンクロベータトロン共鳴により、ルミノシテ

\* 高エネルギー加速器研究機構 KEK  
(E-mail: yoshihiro.funakoshi@kek.jp)

ィが大きく制限されてしまうという事態が生じた。この経験をもとに、それ以降のマシンでは有限角度衝突は避けるべきものとされてきた。しかしながら、KEKBでは精力的なシミュレーションにより、有限角度衝突を用いてもシンクロベータトロン共鳴の影響は避けることができ、ルミノシティの設計値が達成できることが示され、有限角度衝突の方式採用に踏み切った。DORISとの主な違いは、KEKBで水平方向の衝突角を導入したことと、およびDORISではビーム不安定性を抑制するためにベータトロン振動数とシンクロトロン振動数に人工的な広がりを作っていたが、KEKBではこの方法を採用しなかったことである。このような経過を経て、KEKBの設計では、水平方向の有限角度衝突方式を採用したが、現実のマシンのビームの振る舞いが、ビームビームシミュレーションとは異なり、シンクロベータトロン共鳴が大きな問題になるような場合にも対応できるように、バックアップの計画として、クラブ空洞の開発も続けることとした。KEKBは1998年12月のビーム運転開始から順調に性能を上げ、有限角度衝突に起因するシンクロベータトロン共鳴の問題がマシンの性能を大きく制限することもなく、2003年5月にはルミノシティの設計値である $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を越え、またビームビーム性能を表すビームビームパラメータ ( $\xi_y$ ) も設計値の0.05を越え、0.056に達した。

以上のように、KEKBでは有限角度衝突のメリットを生かすことにより、所定の性能に到達することが実証され、有限角度衝突の方式は、設計時のもくろみ通り成功したと言える。この時点で、KEKBではクラブ空洞は必要なくなるはずであった。しかし、計算機シミュレーションの進展により、思わぬ可能性が存在することが大見らによって示された<sup>3)</sup>。水平方向のベータトロン振動数が半整数に非常に近い場合は、正面衝突またはそれを実効的に作り出すクラブ交差の衝突方式を用いると、非常に高いビームビームパラメータ ( $\xi_y > 0.1$ ) を達成できる可能性があることが示されたのである。もしこれが実際に達成されれば、現在のKEKBにおいて、ルミノシティが2倍以上向上する可能性がある。図1に、大見によるstrong-strongモデルを用いた、ビームビームシミュレーションの結果を示す。このシミュレーション結果が現れた後、クラブ空洞の重要性が再認識され、続けられていたクラブ空洞の開発のペースに拍車がかげられることになった。

KEKにおけるクラブ空洞開発の歴史と経緯については、前号の日本加速器学会誌に細山氏による詳しい

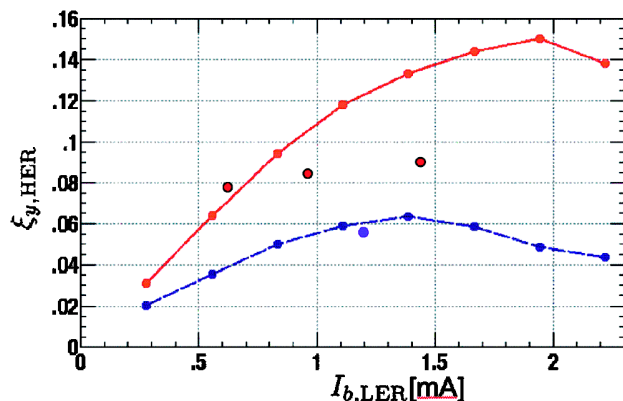


図1 シミュレーションによるビームビームパラメータ ( $\xi_y$ ) の予想値. 青線は、有限角度衝突 ( $\pm 11$  mrad) のものであり、赤線は、正面衝突 (クラブ交差) に対応するものである. シミュレーションでは、所謂「エネルギー透明条件」を仮定している. 図には実験で達成された値が、紫丸 (有限角度衝突) と赤丸 (クラブ交差) で示されている.

報告<sup>4)</sup>が掲載されているので、そちらを参照していただきたい。長年の地道なR&Dが実ってクラブ空洞の開発は成功し、2006年度の冬にクラブ空洞は、KEKBに設置された。クラブ空洞を用いたビームテストは、2007年2月に始まった。このビームテストの主な目的は、以下の3点である。

- 1) クラブ空洞のシステムが、ビームの環境下で安定に動作するか？
- 2) クラブ空洞を用いたビーム衝突 (クラブ交差) で、シミュレーションで予言されているような高いビームビームパラメータ ( $\xi_y$ ) が得られるか？ (このテストは少数バンチで可能である。)
- 3) 実際に高いルミノシティが得られるか？ (このテストのためには、バンチ数を増やして高いビーム電流でクラブ空洞を運転する必要がある。)

以上のうち、1)については、既に細山氏の報告で述べられているので、本稿では、主に2)と3)について、現在までに得られている結果について報告する。

## 2. クラブ交差とクラブ空洞の配置

クラブ交差とは、二つのビーム軌道は衝突点で有限角度を持って交差している状態で、衝突するバンチ同士は実質的に正面衝突するようにさせる方式である。その概念図を図2に示す。

クラブ交差を実現するためには、バンチの前後で逆方向のキックを与える必要があるが、これを実現するのがクラブ空洞である。KEKBでは、超伝導のシングルセルのクラブ空洞を開発した。この空洞ではクラ

ブモードと呼ばれる TM<sub>110</sub> の共振モードが作る軸上の垂直磁場を用いて、ビームを水平方向にキックする．このクラブモードの共振周波数は、加速空洞と同じ 508.9 MHz に合わされ、また水平方向と垂直方向のモードの縮退を解いて、垂直磁場を作り出すモードのみを利用するために、空洞形状を軸対称ではなく、上下に押しつぶしたような形状を用いている．このようなクラブ空洞を用いて、ビームの各バンチの中心が

丁度ゼロクロスタイミングで空洞を通過するようにクラブモードのフィールドを立てれば、バンチの前後で逆の水平方向のキックを与えることができる．

KEKB の設計では、クラブ空洞はそれぞれのリングに対して衝突点の前後に一台ずつ設置して、両リング合計四台の構成になっていた．これは、それぞれのビームに対して、衝突点の手前でのクラブ空洞によるキックを衝突点の後でのキックで吸収して、クラブ空洞によるキックの影響を衝突点付近に局所化するという考え方に基づいたものである．しかし、今回のビームテストでは、この構成とは異なり、**図 3** に示すように各リングに一台のクラブ空洞のみを設置することで、クラブ交差を実現している．

設計とは異なるこのような構成を取った理由は、コストを削減するためである．クラブ空洞の台数を減らすことで、コストを抑えることができることに加えて、空洞を Nikko 地区に設置することにより、超伝導加速空洞に用いられている He 冷凍機を利用することができる．クラブ空洞を衝突点付近に設置した場合には、冷凍機システムを Tsukuba 地区に増設するか、液体 He を Nikko 地区から Tsukuba 地区まで輸送する必要があるため、この設置場所の変更は、大幅なコスト削減になる．クラブ空洞が各リング一台の場合、ビームを構成する各バンチは、リング全周をクラブリング運動することになるが、定常状態ではある状態に落ち着く．これは、バンチ内の longitudinal 方向の位置の関数でクラブ空洞による水平方向のキックが決

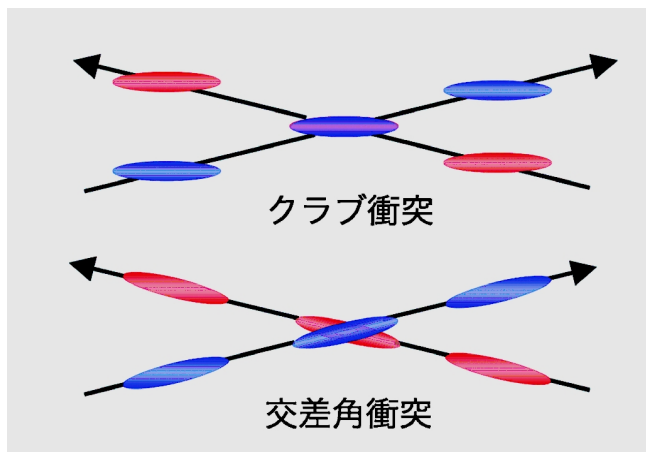


図 2 通常の有限角度衝突とクラブ交差の概念図（リングを上から見た図）．クラブ交差では、バンチの前にいる粒子と後ろにいる粒子で、反対方向にひねられている．このクラブ交差では、図の下から上へローレンツブーストした系で見ると、通常の意味での正面衝突に変換することができる．

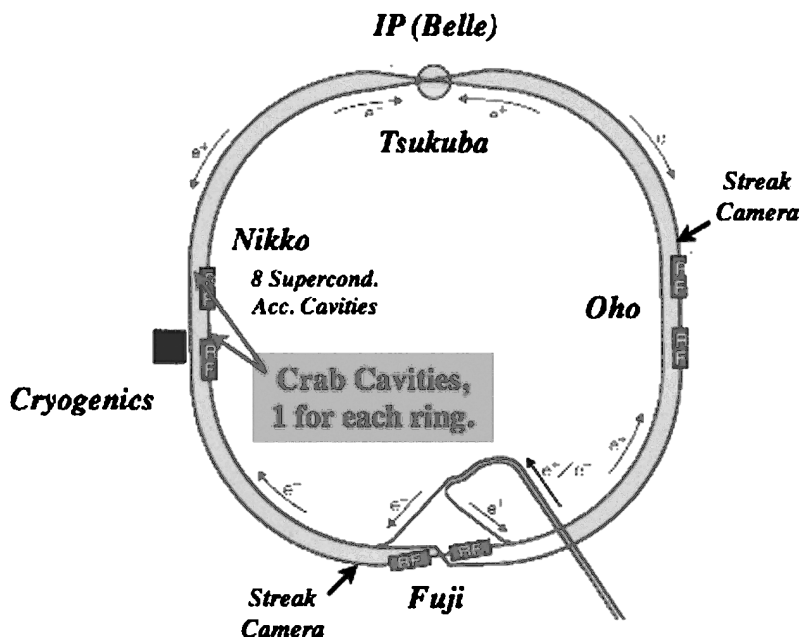


図 3 クラブ空洞の配置．それぞれのリングに各一台設置されている．

まるが、バンチ内の各粒子のシンクロトロン振動を無視すると、longitudinal 方向の位置に応じて異なった閉軌道に落ち着くということに対応している。実際にはバンチ内の各粒子はシンクロトロン振動をしているが、その振動はかなりゆっくりしているので、上に述べた近似で大体正しいと言える。この結果、リングの各点でクラブ角（バンチがどの程度前後でひねれてい

るか）は異なるが、リングの定点で観測すると一定のクラブ角で安定する。クラブ交差を実現するには、衝突点でのクラブ角が（半）交差角  $\phi_x = 11$  mrad に等しくなる必要がある。クラブ空洞による水平方向のキックは、軸上磁場によってもたらされるが、通常（加速空洞とのアナロジーで）仮想的にクラブ電圧  $V_c$  を考え、この電圧によるキックにより水平方向の運動量変化が生じると考える。表 1 にクラブ空洞とクラブ交差に関連するパラメータを示す。表には、クラブ電圧の他、交差角、衝突点およびクラブ空洞の場所での水平方向のベータ関数、リング一周およびクラブ空洞と衝突点の間のベータatron位相の進み、および RF 周波数（加速空洞と同じ）が示されている。この条件を満たすように、クラブ空洞が設置されている Nikko 直線部のオプティックスが変更された。

表 1 クラブ交差に関連するパラメータの典型的な値

	LER	HER	
$\phi_x$	$\pm 11$		mrad
$\beta_x^*$	0.8	0.8	m
$\beta_x^C$	73	162	m
$\psi_x/2\pi$	.505	.511	
$\psi_x^C/2\pi$	0.25	0.25	
Crab $V_c$	0.95	1.45	MV
$f_{RF}$	508.9		MHz

### 3. ビームテストの結果

クラブ空洞を用いたビームテストは、2007年2月14日から始まり、6月30日まで行われた。このスタディ期間中は、物理実験はほとんど行われず、ほぼ

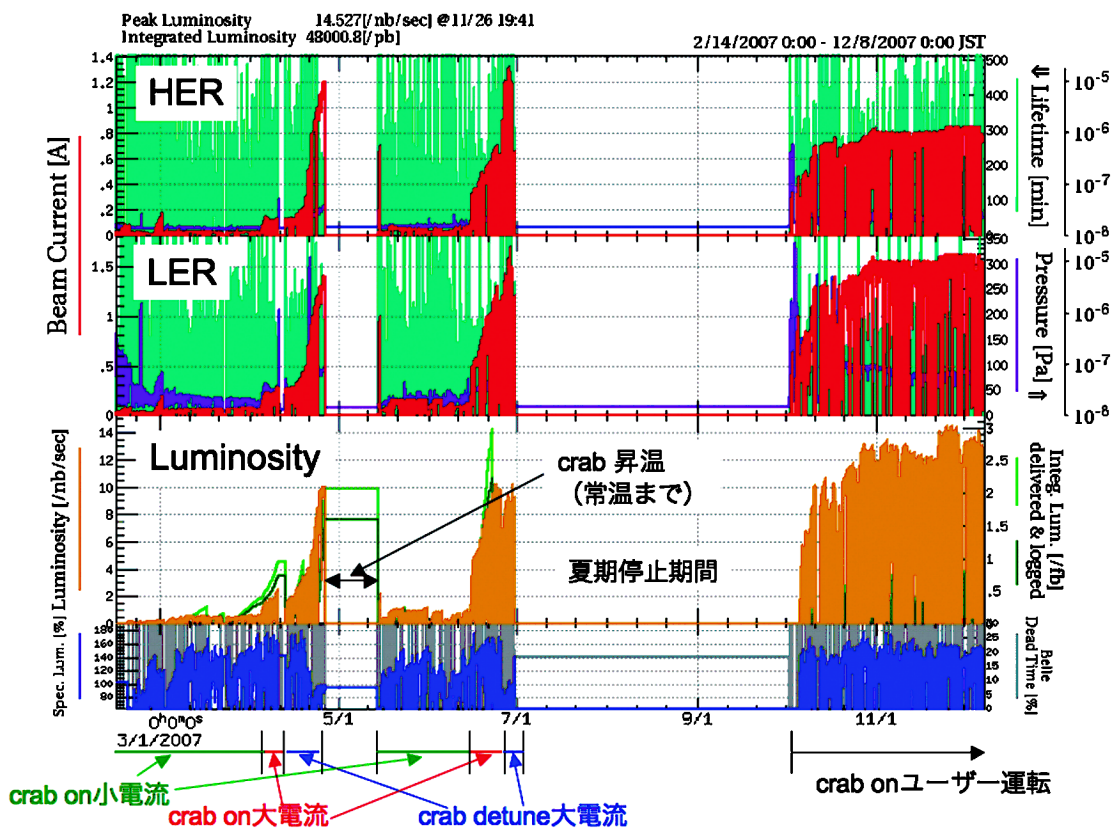


図 4 クラブ空洞を用いたビーム運転の履歴。図中には、HER, LER のビーム電流（赤色）、ルミノシティ（茶色）、スペシフィックルミノシティ（青色）等が示されている。スペシフィックルミノシティは、図 6 の薄青線のうちもっとも長いものを基準に取って、その比で表している。

ビームテストのみを行った<sup>6-8)</sup>。10月2日に開始された秋のランでは、クラブ空洞を用いることによりクラブ交差を実現した状態で物理実験が行われ、この状態でルミノシティを向上させる努力が、この原稿の執筆時点(2007年12月始め)でも続いている。図4に、クラブ空洞を用いたビーム運転の経過を示す。

### 3.1 クラブ空洞の動作のビームでの確認

いくつかの異なる方法でクラブ空洞の動作の確認を行った。第一に、クラブ空洞の位相を変化させて、ビームの水平軌道の変化を観測した。バンチの重心に対しては、クラブ空洞は(クラブ位相に応じて異なる強さの)ステアリング磁石と同等に働くので、軌道変化を測定することにより、クラブキックの強さを確認することができる。クラブ位相を $360^\circ$ 変化させ、軌道変化を $\sin$ 曲線でフィットすることにより、クラブ電圧が求められたが、2台のクラブ空洞とも設定値に対して、2~3%の誤差内で、正しいクラブキックを与えていることが確認できた。また、この測定から、設定すべきクラブ位相も求められた。第二に、最も直接的にクラブ空洞の動作を確認する方法として、ストリークカメラを用いて、各バンチの水平方向の傾斜が測定された<sup>5)</sup>。図5にその結果を示す。ストリークカメラの測定系の特性の把握にやや手間取ったが、最終的にこの測定でもバンチの傾斜角(クラブ角)が、誤差の範囲内で設定値に等しいことが示された。第三に、両リングともクラブ空洞を動作させた状態で、ビームの衝突の状態を観測した。基礎的な測定として、衝突点で水平方向の軌道のオフセットを作り、そのオフセットの大きさの関数として、ビームビームキックの大きさを測定した。ここで言うビームビームキックとは、相手のビームから受けるダイポールキックのことであり、相手のビームが自分のビームの中心にある時は平均的にはゼロであるが、オフセットがあると、オフセット値に応じて異なる値になる。このビームビームキックの大きさも、軌道変化を測定することにより、求められる。その測定の結果、ビームビームキックのオフセット依存性が、従来の交差角衝突の場合に比べて、大幅に大きくなっていることが確認された。これは、クラブ交差では水平方向の有効ビームサイズが、交差角衝突の場合より大幅に小さくなるためであり、このこともクラブ交差衝突の実現を間接的に証明している。

### 3.2 少数バンチでのスタディ

クラブ交差に関するビームテストでは、大きな柱として、少数バンチでビームの衝突性能(スペシフィックルミノシティやビームビームパラメータがどこまで

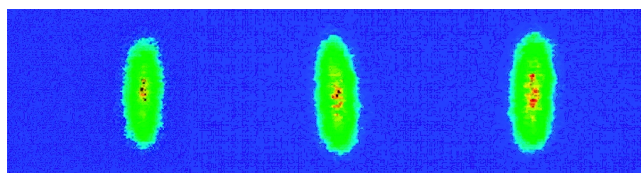


図5 ストリークカメラを用いた、バンチの傾斜の観測(HER)。バンチを上から見た図であり、バンチは図に下から上に向かって進む。左から、クラブ空洞がオフの状態、オンでクラブ位相が $0^\circ$ の場合、オンでクラブ位相が $180^\circ$ の場合に対応している。通常のクラブ交差衝突ではクラブ位相は $0^\circ$ で運転される。

伸びるか?)を調べるスタディが時間をかけて行われた。少数バンチでスタディを行う理由は、大電流でクラブ空洞が壊れるというリスクを避けるためと、大電流では陽電子リングでの電子雲の効果等が加わり純粋なビームビーム性能を見極めにくいこと、等である。クラブ空洞を設置する前の有限角度衝突では、通常それぞれのリングの全バンチ数が1389バンチで物理実験が行われていたが、この少数バンチのスタディでは、全バンチ数が50または100で衝突実験が行われた。もっと少数バンチでもビーム衝突自身は観察できるが、衝突性能の調整にルミノシティを用いるので、あまりルミノシティが低いとルミノシティの測定精度が落ちて調整が難しくなるためこのバンチ数が用いられた。図6に、クラブ交差で得られたスペシフィックルミノシティの電流依存性を示す。図で薄青色は、有限角度衝突の場合のスペシフィックルミノシティであり、その他はクラブ交差の場合のデータである。ここで言うスペシフィックルミノシティとは、ルミノシティの瞬間値をバンチ数で割り、その値をさらにバンチ電流の積で割ったものである。このスペシフィックルミノシティは、衝突点でのビームの断面積に比例する量になるので、もし(水平および垂直方向の)ビームサイズが電流によらず一定であるなら、スペシフィックルミノシティは、電流によらず一定になるはずである。しかし、実際は、図に示されているように、ビーム電流が高くなるに従って、急激に小さくなっている。これは、(特に垂直方向の)ビームサイズがビーム電流とともに増大していることを示しているが、シングルビームではそのようなサイズの増大は見られないので、サイズの増大(ビームブローアップ)は、ビームビーム効果によって生じると言える。図6には、いくつかの異なった水平エミッタンスの組み合わせのデータが示されている。LERとHERの水平エミッタンスについては、従来の有限角度衝突では18 nm

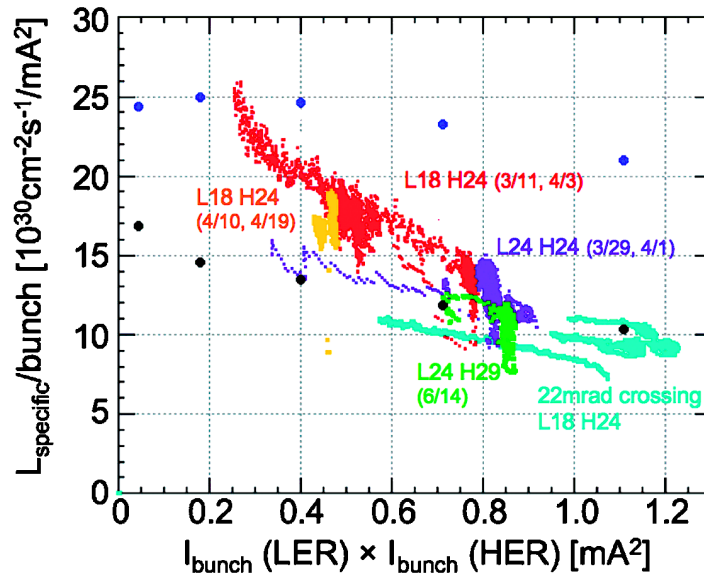


図6 クラブ交差で得られたスペシフィックルミノシティのビーム電流依存性. 異なる水平エミッタンスの組み合わせがテストされた. また, 比較のため従来の有限角度衝突の場合の値も示されている. ビームビームシミュレーションで得られた値も合わせて示されている.

(LER)/24 nm (HER) の組み合わせが用いられていたが, クラブ交差の実験では, この組み合わせに加えて, 24 nm (LER/HER) と 18 nm (LER)/29 nm (HER) などが試された. エミッタンスの値を LER と HER でそろえたのは, 両ビームのビームビーム効果を均衡させることを狙ったものであり, また HER のエミッタンスを大きく (29 nm) したのは, 後で述べるように, ビーム寿命の問題を軽減して, より高いビーム電流を得るためである.

図6のから分かることを以下に説明する. まず, 有限角度衝突とクラブ交差の場合の比較であるが, 図から分かるように, 有限角度衝突の場合の方が高いビーム電流で衝突が行われている. これはクラブ交差の場合にわざとバンチ電流を下げて実験行ったわけではなく, バンチ電流を上げようとする, 相手のビームの寿命が短くなり, 上げたたくても上げられなかったためである. このようなビーム寿命の減少は, ビームビームのシミュレーションでは再現できない. いろいろなスタディを行ったが, この寿命減少については, ビームビーム効果が関与していることを除いて, 具体的なメカニズムについては, 今のところ解明されていない. HER の水平エミッタンスを大きくして, ビームビーム効果を相対的に弱めることにより, HER ビーム電流を増やすことが試みられたが, 図6に見られるように, その効果は非常に限定的であった.

次に, 有限角度衝突とクラブ交差衝突の比較であるが, スペシフィックルミノシティに関して, ビーム電

流が高いところで比較できないという問題がある. 図6の薄青線 (有限角度衝突) には, 複数の線が含まれているが, それらは異なる時期のものに対応している. 一番低くまた長い線は, 2003年に始めてピークルミノシティが  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を越えた時のものである. この頃は, 一度ビーム電流を最大まで積み上げた後, ある程度電流が減少するまで物理実験を続け, その後また最大電流まで積み上げるという運転モードを取っていた. 2004年の始めに, 物理実験を行いながらビーム入射を行う「連続入射方式」が実用化され, 物理実験中はほぼ一定のビーム電流に保てるようになった. 短い薄青線は, この連続入射導入の後のものである. また, 同じ有限角度衝突でも, 様々な努力の結果, 少しずつスペシフィックルミノシティの向上が達成された. 薄青線で, より高い値を与える線は, より新しいものである. 薄青線のうち最も高い値を与える点を, 一番長い線に平行に内挿して比べると, クラブ交差の最大ビーム電流の点では, クラブ交差の方が2~3割程度高いスペシフィックルミノシティを与える. 比較上, これが一応の目安と考えられる.

次に, 実際に得られたスペシフィックルミノシティをビームビームシミュレーションと比較する. 図6には, シミュレーションで予言された値もプロットされている. 青丸と黒丸はそれぞれ, クラブ交差の場合と有限角度衝突の場合に対応している. 図から分かるように, 有限角度衝突の場合, 実験値と予言値がかなり良く一致している. しかし, クラブ交差衝突では,

表2 クラブ交差衝突と有限角度衝突でのマシンパラメータの比較

	2007年4月		2006年10月	
	with crab		w/o crab	
	LER	HER	LER	HER
$E_b$ [GeV]	3.5	8.0	3.5	8.0
周長 [m]	3016		3016	
バンチ数	50+1		1388+1	
$I_{beam}$ [mA]	73.1	28.4	1662	1340
$I_{bunch}$ [mA]	1.43	0.557	1.20	0.965
$\epsilon_x$ [nm]	24	24	18	24
$\beta_x^*$ [m]	0.8	0.8	0.59	0.56
$\beta_y^*$ [mm]	5.9	5.9	6.5	5.9
$\sigma_y^*$ [ $\mu$ m]	1.1	1.1	1.9	1.9
Acc Vc [MV]	8.0	15.0	8.0	15.0
$v_x$	.506	.510	.505	.509
$v_y$	.580	.582	.534	.565
$v_s$	-.0246	-.0226	-.0246	-.0226
$\xi_x$	.108	.101	.117	.070
$\xi_y$	.096	.089	.105	.056
Lum [/nb/s]	0.611		17.12	

低電流では両者が一致するが、電流が高くなると不一致が大きくなっている。高電流でスペシフィックルミノシティを上げるための様々なチューニングが行われたが、現在までのところ、何故シミュレーションが予言する高いスペシフィックルミノシティが実験で達成できないのか理解されていない。

次に、実験で得られたビームビームパラメータをシミュレーションと比較する。この比較は、既に図1で示されている。図から分かるように、有限角度衝突の場合は、ビームビームシミュレーションと実験はよく一致している。図中にプロットされている点は、表2（の右側）に示されているKEKBのピークルミノシティのこれまでの記録の値に対応するものであり、 $\xi_y = 0.056$ である。一方クラブ交差の場合は、実験とシミュレーションの一致が良くない。実験で得られた最大のビームビームパラメータは、 $\xi_y = 0.089$ で表2の左側のパラメータに対応している。これは、図1では一番右の赤丸で示されている。電流が低いところでは、クラブ交差でも実験とシミュレーションが一致してい

表3 クラブ交差衝突と有限角度衝突でのマシンパラメータの比較（大電流の場合）

	2007年11月		2006年10月	
	with crab		w/o crab	
	LER	HER	LER	HER
$E_b$ [GeV]	3.5	8.0	3.5	8.0
周長 [m]	3016		3016	
バンチ数	1584+1		1388+1	
$I_{beam}$ [mA]	1582	839	1662	1340
$I_{bunch}$ [mA]	0.998	0.530	1.20	0.965
$\epsilon_x$ [nm]	18	24	18	24
$\beta_x^*$ [m]	0.9	0.9	0.59	0.56
$\beta_y^*$ [mm]	5.9	5.9	6.5	5.9
$\sigma_y^*$ [ $\mu$ m]	1.1	1.1	1.9	1.9
Acc Vc [MV]	8.0	13.0	8.0	15.0
$v_x$	.506	.511	.505	.509
$v_y$	.570	.590	.534	.565
$v_s$	-.0246	-.0204	-.0246	-.0226
$\xi_x$	.089	.098	.117	.070
$\xi_y$	.093	.088	.105	.056
Lum [/nb/s]	14.60		17.12	

るが、これは、図6でスペシフィックルミノシティが低電流で両者が一致することに対応している。なお、表2では、LERの $\xi_y$ はHERより高い値を示しているが、マシンの性能を議論するには、低い方の値を取る必要がある。

### 3.3 大電流での物理実験

図4に示されているように、クラブ空洞のビームテスト期間中に、大電流ビームを用いたテストが行われたが、これらの結果は細山氏の報告<sup>4)</sup>に詳しいので、この稿では秋以降のクラブ空洞を用いたユーザー運転の状況を簡単に紹介する。秋の運転では、クラブ空洞をオンの状態でユーザー運転を始めた。その狙いは、物理実験に対してある程度のルミノシティを供給しながら、バンチ電流が高いところで、スペシフィックルミノシティが上がらない問題を引き続き調べることにあった。また、バンチ電流が低いところでは、スペシフィックルミノシティが高いことから、バンチ数を増やすことによって、ルミノシティを引き上げることも期待された。表3に、クラブオンで達成された最高ルミ

ノシティとクラブ導入前の最高値の場合のパラメータの比較を示す。表から分かるように、クラブオンでの最高ルミノシティは、まだクラブ導入前の値に達していないが、かなり低いビーム電流（特に HER）で、かなり高いルミノシティが達成された。今後はさらにバンチ数を増やすことで、さらに高いルミノシティが得られるものと期待される。一方、スペシフィックルミノシティに関しては、さまざまな努力にも関わらず、現在までのところ、少数バンチでの値より、大きく改善することはできていない。但し、バンチ数を大幅に増やしても、同じバンチ電流の積で比較すると、スペシフィックルミノシティの低下は小さく、高々 5～10% 程度である。

#### 4. 議 論

ここでは、クラブ交差衝突において、高バンチ電流でシミュレーションで予言される高いスペシフィックルミノシティが達成できない問題について議論する。まず、ルミノシティを上げるためのチューニング方法について簡単に説明した後、ルミノシティの制限要因について考察する。

##### 4.1 マシンチューニングの概要

KEKB の様な高ルミノシティマシンの場合、様々なチューニングが重要であり、そのようなチューニングなしでは、ルミノシティは非常に低く（例えば半分

以下に）になってしまう。KEKB では、二週間に一回ぐらいの頻度で全周の電磁石の初期化を行っているが、初期化後に実績のある値に電磁石をセットする。これがチューニングの出発点である。但し、実績がある値を設定した段階で既に過去のチューニングの積み重ねを継承したことになっている。次に、オプティックス補正と呼ばれる全周の x-y coupling, dispersion および  $\beta$  関数に関する補正を行う。この補正は重要で、その後のチューニングの基礎になる。しかし、これだけでルミノシティが出るわけではなく、表 4 に示すような個々のパラメータに関するチューニングが重要であり、多くのパラメータについて、一つ一つスキャンして最適値を探すようなチューニングが、ほぼ 24 時間態勢で行われている。

##### 4.2 ルミノシティの制限要因

以上に述べたようなチューニングは、様々なマシンエラーの効果を一つ一つキャンセルすることにより、ルミノシティをビームビームシミュレーションに近づけていく過程であると理解できる。現在問題になっている、高電流でスペシフィックルミノシティが上がらない問題の原因として、1) 現在のチューニングパラメータの範囲内で高いルミノシティを与える解が存在するが、何らかの理由でそのパラメータセットへ到達できない、2) 何か別の効果がルミノシティを制限している、の二つの可能性が考えられる。1) について

表 4 KEBK におけるチューニングパラメータ。<sup>1)</sup>は、ルミノシティ ( $L$ ) や放射光モニタの場所で観測された垂直方向のビームサイズ ( $\sigma_y$ ) を指標の一つ一つパラメータスキャンが行われるものである。<sup>2)</sup>は常時フィードバックで追いかけているものであり、そのフィードバックのターゲット値も適宜スキャンして最適値を探している

チューニングパラメータ	観測量	補正の周期
衝突点 (IP) での軌道のオフセット <sup>2)</sup>	ビームビームキック : IP 付近の BPM で測定	1 sec
軌道の衝突角 <sup>2)</sup>	軌道測定 : IP 付近 BPM で測定	1 sec
全周の閉軌道	全周の BPM (約 450 個)	15 sec
クラブ空洞での水平軌道 <sup>2)</sup>	軌道測定 : クラブ空洞付近の BPM で測定	1 sec
ベータトロンチューン <sup>2)</sup>	衝突しないバンチのチューン測定	~20 sec
全周の x-y coupling, dispersion, $\beta$ -beat	キックや RF 周波数変化に対する軌道変化	~2 weeks
LER と HER の相対的な RF 位相 <sup>2)</sup>	バーテックスの重心 (Belle SVD より)	~3 min.
クラブ空洞の RF 位相	水平軌道 (クラブオンとオフの差)	~7 days
LER と HER のクラブ電圧の比	IP での軌道のオフセット (ビームビームキック)	~7 days
クラブ電圧 <sup>1)</sup>	ルミノシティ ( $L$ ) とビームサイズ ( $\sigma_y$ )	~7 days
Vertical waist (minimum of $\beta_y$ at IP) <sup>1)</sup>	ルミノシティ ( $L$ ) とビームサイズ ( $\sigma_y$ )	~1 days
衝突点での x-y couplings, dispersions <sup>1)</sup> ( $\sigma_y$ )	ルミノシティ ( $L$ ) とビームサイズ ( $\sigma_y$ )	~1 days
六極電磁石設定 <sup>1)</sup> ( $\sigma_y$ )	ルミノシティ ( $L$ ) とビーム寿命	~3 days
Crab 空洞の場所での x-y coupling <sup>1)</sup> ( $\sigma_y$ )	ルミノシティ ( $L$ ) とビームサイズ ( $\sigma_y$ )	~3 days



は、パラメータ空間が広すぎて、パラメータを一つ一つスキャンする方法では、良い解に到達できないという可能性が指摘され、この秋からの運転では、表4のうち、衝突点の x-y coupling (4パラメータ) と垂直 dispersion とその傾き (2パラメータ) について、両リング合計で12パラメータを Downhill Simplex 法で同時に探すという試みがなされている。しかし、この方法により、パラメータ探索のスピードが向上した感触はあるが、今までのところ、新しい地平が開けたようには見えない。別の可能性として、ビーム寿命の減少のためによりよいパラメータセットに近づけないという可能性が指摘されている。これについては、さらにスタディが必要であるが、今のところ、このことを強く示唆するデータがあるわけではない。

次に、2)の可能性であるが、これについても、様々な可能性について検討を行っている。例えば、現在運転に用いているワーキングポイントは、 $(2\nu_x + \nu_s = \text{整数})$  のシンクロベータatron共鳴の共鳴線に近い。運転上、この共鳴線はビーム寿命の減少等、様々な影響をもたらしていることが分かっている。この共鳴線は、ビームビーム効果や全周でのクラブリング運動によるものではなく、ラティスの非線形性に由来するものであるが、ルミノシティの制限要因にもなりうる。しかし、現在までに調べられた範囲内では、この共鳴がルミノシティに対する深刻な制限要因になっている可能性は低い。その他、何らかの速いノイズの影響でビーム軌道が振動する可能性や、シングルビームでの垂直エミッタンスが、想定されている値より大きいという可能性等が検討されたが、今のところルミノシティを大きく制限するものは見つかっていない。

## 5. おわりに

2006年度の冬にKEKBリングに設置されたクラブ空洞は、当初考えられていたよりもずっと安定に動作し、現在では大電流のユーザー運転で常時用いられるまでに至っている。クラブ空洞は、放射光マシンで実質的に短バンチを得るための手段として用いることを計画中の研究所もあり、またLHCのアップグレードの一つの項目にもなっている。このように世界の注目を集めるクラブ空洞を、KEKBにおいて、世界に先駆けて開発し、かつ実用化に成功したことは、大きな意義を持つものである。KEKBのクラブ空洞は、ルミノシティへの寄与という意味では、まだ充分その潜在的な可能性を発揮しているとは言えない。クラブ交差によるルミノシティ向上は、現在のKEKBにとってだけでなく、将来のKEKBのアップグレードにとっても非常に重要であり、今後も実用運転を行いながら、スペシフィックルミノシティの向上に向けての努力を続けていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) R. B. Palmer, SLAC PUB-4707 (1988); In Proc. DPF Summer Study Snowmass '88, Snowmass, CO, 1988, ed. S. Jensen. Singapore: World Sci. (1988), p. 613.
- 2) K. Oide and K. Yokoya, Phys. Rev. A40: 315 (1989).
- 3) K. Ohmi et al., Proc. of EPAC06, 616 (2006).
- 4) 細山謙二, 「加速器」Vol. 4, No. 3, 2007 p189.
- 5) H. Ikeda et al., Proc. of PAC07, 4018 (2007).
- 6) K. Oide et al., Proc. of PAC07, 27 (2007).
- 7) H. Koiso et al., Proc. of PAC07, 1487 (2007).
- 8) Y. Funakoshi et al., Proc. of PAC07, 3309 (2007).