

## KEKB のルミノシティの最近の進展について

船越 義裕\*

## About Recent Improvement in the Luminosity at KEKB

Yoshihiro FUNAKOSHI\*

## Abstract

A new luminosity record of  $21.08 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , which is the world record at present, was achieved at KEKB in the spring run of 2009. The previous record was  $17.60 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  achieved in November 2006. This significant improvement in the luminosity was brought mainly by the newly installed skew-sextupole magnets, which are believed to correct the chromaticity of x-y coupling at IP. In addition, the increase of the HER beam current also contributed to the luminosity improvement. This beam current increase became possible by solving the physical aperture problem around the crab cavities.

## 1. はじめに

KEKB は 1998 年 12 月に運転が開始され、もう 10 年を越えて運転が継続している。この間、PEP-II との熾烈な競争に打ち勝ち、ルミノシティに関する数々の世界記録を打ち立てて来た。しかし、ピークルミノシティに関しては、2006 年 11 月に  $17.60 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の記録が作られた後は、crab 空洞の導入後、長らく記録更新からは遠ざかっていた。しかし、2009 年の春の運転において、従来の記録を大きく更新する進歩があり、現在のピークルミノシティの記録は  $21.08 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に達している。図 1 に、KEKB の運転の全歴史を示す。この稿では、この最近の性能向上の理由とその意義について述べたい。

## 2. Crab 空洞を用いたビーム運転 (2008 年夏までの状況)

Crab 空洞は、2007 年の初めに KEKB リングに導入され、2007 年 2 月から crab 空洞を用いたビーム運転が開始された。Crab 空洞を用いたビーム運転の経緯については、これまでに報告を行っている<sup>1-3)</sup>。以下に、2008 年夏ぐらいまでの運転の状況を簡単にまとめる。図 1 から分かるように、この頃までは crab 空洞を用いた運転では、crab の導入前よりやや低いルミノシティに留まっていた。但し、ビーム電流に関

しては、特に HER で crab 導入前より低い値で運転が行われていた。

図 2 に 1 バンチあたりのスペシフィックルミノシティの電流依存性のデータを示す。これは、2008 年夏までの状況である。ここで、1 バンチあたりのスペシフィックルミノシティとは、ルミノシティをまずバンチ数で割り、さらにバンチ電流の積で割ったものである。図 2 は、crab 空洞を用いた運転の二つの問題点を示している。まず、低電流では crab 空洞を用いた crab 衝突 (実質的に正面衝突と等価) で、crab 空洞を用いない交差衝突 (交差角は 22 mrad) より高いスペシフィックルミノシティが得られるが、電流が高くなってくると、その差が縮まってくる。また、crab 衝突ではシミュレーションの予言値と実験値がやはり低電流では一致しているが、電流が高くなるに従って、実験値がシミュレーションより低くなる傾向がある。もう一つの大きな問題点は、crab 衝突の場合、バンチ電流を上げていくと、交差衝突の場合より低いバンチ電流で陽電子ビーム (場合によっては電子ビーム) のビーム寿命が短くなって、それ以上バンチ電流が増やせなくなってしまうことである。図 2 で crab 衝突のデータが交差衝突の場合より低い電流までしかないのはそのためである。その結果、crab 衝突ではスペシフィックルミノシティは交差衝突の場合より高いにもかかわらず、全ルミノシティは交差衝突

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

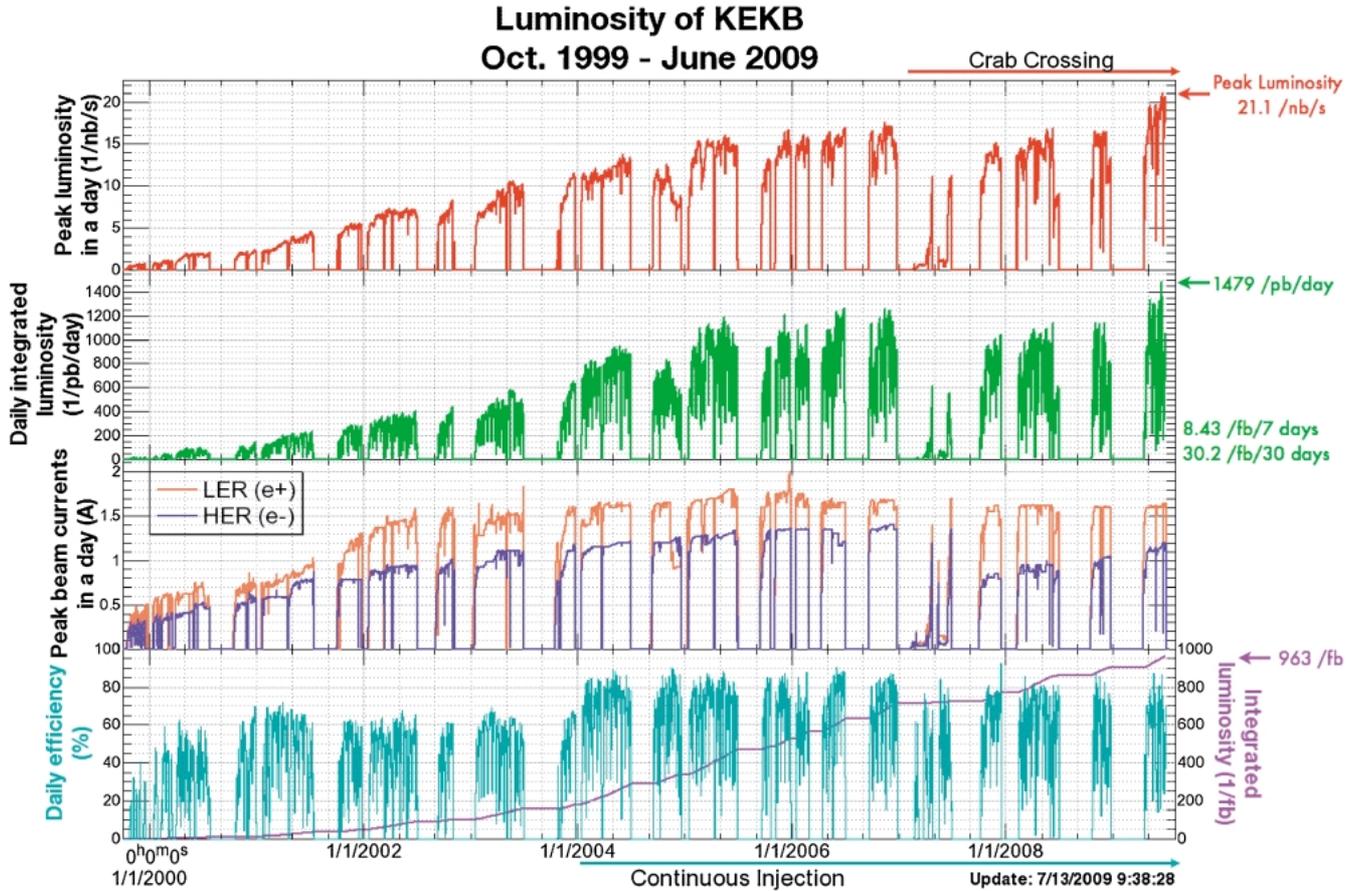


図1 KEKB 加速器の歴史

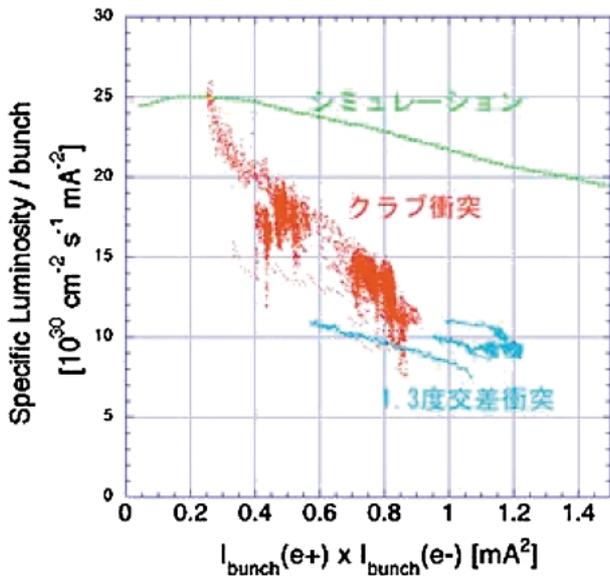


図2 2008年夏までのスペシフィックルミノシティの状況

より低い値に留まっていた。

### 3. 最近の進展

以上見てきたように、crab 空洞を用いた運転におけるビーム性能に関して、二つの大きな問題があった。第一は、ビーム電流が高い領域で、スペシフィックルミノシティがシミュレーションと比べて著しく低いということ、第二は、バンチ電流がビーム寿命によって制限され、crab 導入前ほど高いバンチ電流を蓄積できないことであった。

#### 3.1 Crab 空洞付近の物理アパーチャーの問題

これら二つの問題のうち、ビーム寿命の問題は、crab 空洞付近の物理アパーチャーが疑われた。すなわち、crab 空洞付近の水平方向のビームサイズが、ビームビーム効果のために著しく大きくなり、ビーム寿命を充分長く保つための真空チャンバーのアパーチャーが不足するという可能性が指摘された。この問題は、SuperKEKB の IR の設計を行っている際に発見されたものであるが、この問題が厳しいのは、KEKB や SuperKEKB で水平方向のチューンが半整

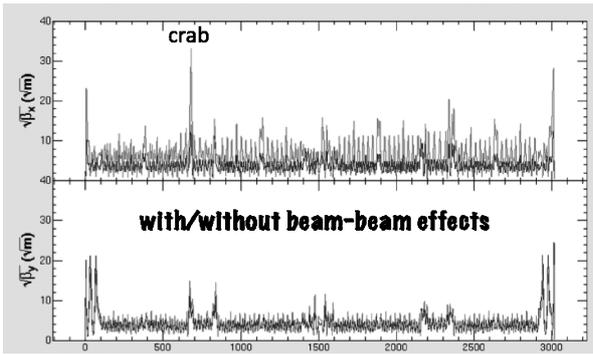


図3 ビームビーム効果によるベータ関数の変化.  
2008年夏前のLERの場合

数に非常に近いためである。衝突点では相手のビームが作る電磁場をお互いに感じるが、第ゼロ近似ではその力は、Q電磁石と同じ力 (focusing force) になる。その結果、全周のベータ関数が歪み、エミッタンスは増大する。ビームビーム効果がない場合 (シングルビームの場合)、水平エミッタンスは、LER (Low Energy Ring), HER (High Energy Ring) でそれぞれ 18 nm, 24 nm であるが、これがビームビーム効果で、それぞれ 50 nm, 57 nm 程度に広がる。ベータ関数の変化の一例として LER の 2008 年夏前の場合を図3に示す。

図3から分かるように、水平方向のベータ関数は crab 空洞の近くで著しく大きくなる。これを説明するためには、まず crab 交差を実現するための条件を説明する必要がある。衝突点での交差角を  $\phi_x$  (KEKB では 22 mrad) とすると、crab 電圧  $V_c$  などは、以下の条件を満たす必要がある。

$$\frac{\phi_x}{2} = \frac{\sqrt{\beta_x^* \beta_x} \cos(\pi \nu_x - |\Delta\psi_x^c|) V_c \omega_{RF}}{2 \sin \pi \nu_x E c}$$

ここで、 $\beta_x, \beta_x^*$  はそれぞれ、crab 空洞の場所と衝突点での水平方向のベータ関数、 $\nu_x$  は水平方向のチューン、 $\Delta\psi_x^c$  は、crab 空洞から衝突点までのベータatron位相を表す。また、 $\omega_{RF}, E, c$  はそれぞれ、RF 空洞の角振動数、ビームエネルギー、光速度、を表す。ここで、水平方向のチューン  $\nu_x$  は半整数に近い値が取られる。チューンはルミノシティと密接な関係があり、高いルミノシティを得るには半整数に近い値に取る必要があるためである。次に、crab 電圧  $V_c$  はそれほど高くできないので、できれば低い値に留めるよう他のパラメータを調整することが望ましい。まず、 $\cos$  の項を最大にするために、 $\Delta\psi_x^c$  の端数部は  $\pi/2$  (または  $3\pi/2$ ) に取る。次に、衝突点の水平ベータ関

数  $\beta_x^*$  も crab 電圧を下げるためには大きい方が望ましいが、この量もルミノシティに関係する量なので、通常自由には変えられない。Crab 交差の実験が始まった頃は 0.8 m, または 0.9 m に取っていた。従って、必然的に  $\beta_x^*$  を大きくせざるを得ない。そして、ビーム衝突時にはビームビーム効果のために、ベータ関数がさらに大きくなってしまふ。これは、衝突点と crab 空洞の間のベータatron位相が  $\pi/2$  (または  $3\pi/2$ ) であるために、ビームビーム力の収束成分により  $\beta_x^*$  がさらに大きくなってしまふ (crab 空洞がベータ関数のビートの山に来る) ためである。図3で、グラフの両端付近 (衝突点付近) に水平ベータ関数が大きな場所があるが、そこでは真空チャンバーのアーチャーが広いので、ビーム寿命が問題になることはない。このように、Crab 空洞付近の物理アーチャーで (バンチ電流が高いときに) ビーム寿命が決まっているという可能性が高いので、この問題に対処するためにいくつかの対策が講じられた。まず、LER では crab 空洞の場所でベータ関数が最大になるのではなく、その周辺で極大になっていた。2008年夏のシャットダウン時に LER の crab 空洞が設置されている日光直線部の四極電磁石の配線を大幅に変更することにより、crab 空洞でのベータ関数が付近で極大になるようにした。

図4, 5に LER 日光直線部のオプティックスの 2008年夏前の状況と、2008年秋以降の状況を示す。これらは、ビームビーム効果がない場合であるが、この対策により、crab 空洞の場所ではベータ関数の大きさを変えずに、crab 空洞付近 (及びその下流のもう一方) の水平ベータ関数の極大点で、ベータ関数が大幅に小さくなった。この対策により、LER のビーム寿命の問題はかなり改善し、HER のバンチ電流をより高い値まで増やすことができるようになった。しかし、それでも HER のバンチ電流を増やしていくと、ビーム寿命の減少が見られた。また、HER のビーム寿命も LER のバンチ電流が増えると減少する傾向が見られたが、HER の日光直線部でのオプティックスは、既に crab 空洞の場所で水平ベータ関数が極大になるように設計されていた。

さらにバンチ電流を上げるために、次に考えられたのは crab 電圧  $V_c$  を上げることである。もしより高い crab 電圧が得られれば、 $\beta_x^*$  を下げることができ、crab 空洞付近のアクセプタンスを広げることができる。通常、crab 電圧を上げすぎるとトリップ頻度が増えて安定な運転ができなくなるので、無理のない程度になるべく高い値に設定して、運転が行われている。

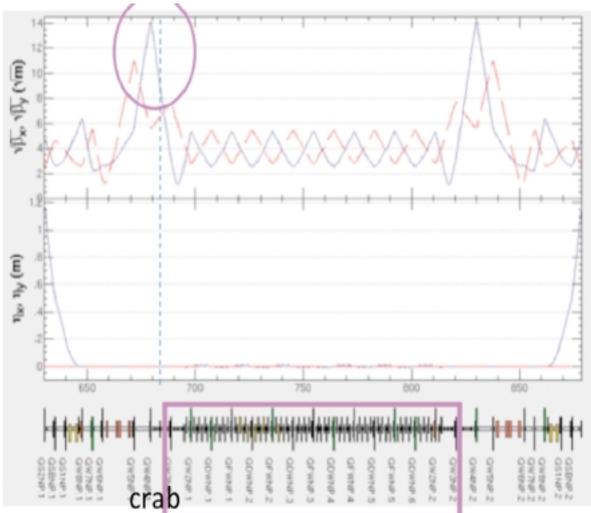


図4 LER 日光直線部のオプティックス (2008年夏前)

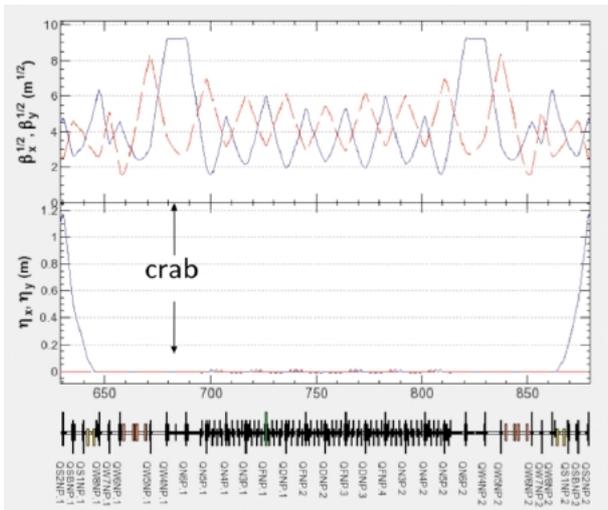


図5 LER 日光直線部のオプティックス (2008年秋以降)

Crab 電圧の安定領域を引き上げる目的で、crab 空洞の He 冷凍機の減圧運転が試みられた。減圧により He 温度を下げるができるが、crab 空洞の R&D 時の経験により、He 温度を下げればより高い crab 電圧で安定に運転できることが期待された。この He 冷凍機の減圧運転は、最終的に 2009 年の 4 月の初めに試みられたが、He 温度を下げて、crab 電圧の上限は特に変わらないことが判明したため、この試みは失敗に終わった。これと平行して、もう一つ試みられたのは、衝突点の水平ベータ関数  $\beta_x^*$  を広げることである。衝突点の水平ベータ関数を広げると、ビームビームシミュレーションではルミノシティが低下するので、できればより小さな値で運転するのが望ましい

のだが、ビーム寿命の問題を研究する一環として、 $\beta_x^*$  を 0.8 m または 0.9 m から 1.5 m に広げた運転が試みられた。その結果、LER, HER のバンチ電流の制限は非常に緩和されて、バンチ電流積で 1.5 mA<sup>2</sup> で運転が可能になった。これは、crab 導入前の実績値より高く、SuperKEKB の大電流オプションの場合と同じである。肝心のルミノシティの方であるが、 $\beta_x^*$  を 0.8 m または 0.9 m から 1.5 m に広げてよくチューニングすれば、到達可能なルミノシティはほぼ同じだということが判明した。2009 年春の運転では、 $\beta_x^*$  は 1.5 m または 1.2 m で運転が行われた。その結果、バンチ電流を増やしても安定に運転できるようになり、図 1 に見られるように、ビーム電流（特に HER）を徐々に増やすことが可能になり、それに連れてルミノシティも徐々に増えている。最近のルミノシティの改善一因はここにある。このように、バンチ電流の制限の問題は、crab 空洞付近のオプティックスの改善（LER）と衝突点ベータ関数を広げることで、一応回避できることが分かったが、この crab 付近の物理アパーチャーの問題は、これを改善することにより、スペシフィックルミノシティも改善することが期待された。というのは、バンチ電流が増えてビーム寿命の減少が見られる場合、経験的に衝突点で水平方向の軌道のオフセットを付けると、ビーム寿命の問題がある程度改善することが知られていたからである。バンチ電流が増えて相手のビーム寿命が減って来たら、水平方向の軌道オフセットを衝突点でつけることによりビーム寿命はある程度回復するが、ルミノシティはある程度落ちてしまう。実際、バンチ電流が高いところでは、ある程度水平オフセットをつけて（head-on 衝突からずらして）運転が行われていた。この水平オフセットのために、バンチ電流が高いところではスペシフィックルミノシティが落ちている可能性が考えられた。しかしながら、スタディの結果、確かに非常にバンチ電流が高い場合は、スペシフィックルミノシティが 10% 程度落ちる場合があるが、これで図 2 における、シミュレーションと実験の食い違いが説明できるほどではないことが判明した。

### 3.2 スキュー 6 極電磁石による x-y coupling の chromaticity の補正

バンチ電流が高い領域で、スペシフィックルミノシティがシミュレーションと食い違うという問題に関しては、まだその原因は判明していない。様々な可能性が実験的に、またシミュレーションを用いて、調べられている。それらのうち、シミュレーションで可能性の一つとして浮上して来たのは、衝突点に x-y

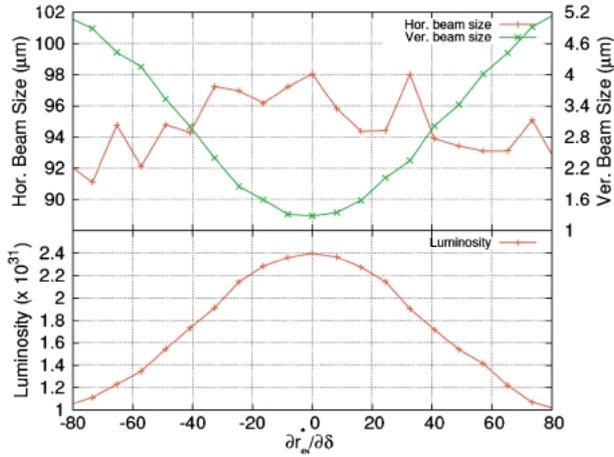


図6 衝突点での x-y coupling の chromaticity (HER) の効果に関するビームビームシミュレーションの一例

coupling のエネルギー依存性 (chromaticity) があって、その量がある程度大きいとルミノシティを低下させるという可能性である。このシミュレーションは、大見氏と D. Zhou 氏によって行われた<sup>5)</sup>。そのシミュレーションの結果の一例を図6に示す。図6で水平軸は HER の  $r_{4N}^*$  のエネルギー依存性に対応する。ここで、 $r_{4N}^*$  は

$$r_{4N}^* = R_4^* \sqrt{\beta_y^* / \beta_x^*}$$

で表される量で、 $\beta_x^*$ ,  $\beta_y^*$  は衝突点での水平、および垂直方向のベータ関数、また  $R_4^*$  は衝突点での x-y coupling を表現する量の一つである。SAD では、局所的な x-y coupling を表現する量として、以下で定義される  $R_1, R_2, R_3, R_4$  を用いる。

$$\begin{pmatrix} u \\ p_u \\ v \\ p_v \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x \\ p_x \\ y \\ p_y \end{pmatrix}$$

$$T(s) = \begin{pmatrix} \mu I & SR^t S \\ R & \mu I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu & 0 & -R_4 & R_2 \\ 0 & \mu & R_3 & -R_1 \\ R_1 & R_2 & \mu & 0 \\ R_3 & R_4 & 0 & \mu \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mu^2 + \det R = 1$$

以上のように、リングの各点における x-y coupling は  $R$  と呼ばれるマトリックスで表現され、このマトリックスの4つの要素で、通常座標  $(x, p_x, y, p_y)$  とカップリングがないノーマル座標  $(u, p_u, v, p_v)$  が結びつけられる。

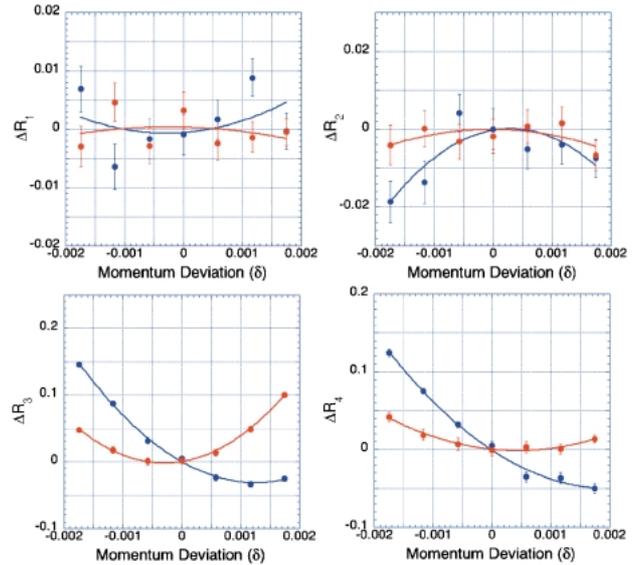


図7 衝突点での x-y coupling の chromaticity (HER) の測定の一例

図6から分かるように、 $r_{4N}^*$  のエネルギー依存性が大きければ、ルミノシティが落ちる。問題は、この量が実際のリングでどれぐらいの大きさの値を取るかであるが、まずマシンエラーのない理想的なオプティックスの場合でも、このそのエネルギー依存性は存在し、 $-10$ 程度の値になることが知られている。また、全周の6極電磁石の設置誤差を考慮すると、これと同程度のずれが生じる可能性があることも分かっている。これらを考慮すると、この  $r_{4N}^*$  のエネルギー依存性のために、ルミノシティが例えば10%程度落ちる可能性もあることになる。

以上は、シミュレーションの話であるが、実際のリングでこの衝突点における x-y coupling の chromaticity に関する実験も2種類行われた。すなわち、この x-y coupling の chromaticity を測定する試みとこの chromaticity を補正してルミノシティの変化を見る試みである。

図7に HER の衝突点での x-y coupling のエネルギー依存性の実測の一例を示す<sup>4)</sup>。この衝突点での x-y coupling は、リングに蓄積された測定用のバンチを入射用のキッカーで蹴り、衝突点の両側の BPM (この例では QCS 電磁石の外側の BPM) でターン毎の振動を測定し、水平方向から垂直方向への振動の回り込みを測定することにより測定される。この測定では BPM に回転誤差があると、測定された x-y coupling にオフセットがのることになるが、この chromaticity 測定ではエネルギーをずらしてその差分だけを見るので、この BPM の回転誤差の影響は避け

られる。ビームのエネルギーを変えるには、リングの RF 周波数をずらす。図 7 には赤と青で示された二種類のデータがあるが、赤は後述するスキュー 6 極電磁石を使った補正を入れたものである。青のデータは、この補正をしない場合のデータである。この測定から、スキュー 6 極電磁石を用いると、衝突点での x-y coupling の on-momentum 付近の傾き (linear chromaticity) をほぼゼロに補正できることがわかる。

上述のように、x-y coupling の chromaticity はスキュー 6 極電磁石を用いれば補正可能で、2009 年の冬のシャットダウン中に両リングにこのスキュー 6 極電磁石が設置され、2009 年 5 月よりビーム運転での使用が始まった。通常の 6 極電磁石の場合、ビーム軌道の垂直方向の位置に応じてビームはスキュー Q 成分を感じるが、スキュー 6 極電磁石の場合、水平分散がある場所におくと、パンチ内の各粒子のエネルギーに応じて水平位置が異なり、その結果エネルギーに応じて異なったスキュー Q 成分を感じるようになる。その結果、スキュー 6 極を用いると x-y coupling の chromaticity の補正が可能になることが理解できるであろう。実際には、HER には 10 ペア、LER には 4 ペアのスキュー 6 極電磁石を設置した。HER に設置されたスキュー 6 極電磁石の写真を図 8 に示す。各ペアの電磁石は一つのバイポーラー電源で励磁される。各電磁石の  $K_2$  の最大値は HER で  $0.13 \text{ m}^{-2}$ 、LER で  $0.44 \text{ m}^{-2}$  程度である。ここで、 $K_2$  は  $B''L/B\rho$  を表す。各ペアの二台の電磁石の間のトランスフォーマトリックスは磁場の非線形成分がペアの電磁石の間でキャンセルされるように、 $-I$  であることが望ましいが、実際にはこの条件は成り立っていない。しかし、 $-I$  からそれほど外れておらず、また  $K_2$  値がそれほど大きくないこともあり、これらの電磁石を最大値で励磁しても、ダイナミックアパーチャの減少等の悪影響は見られないことが、シミュレーションで示されている。

このスキュー 6 極電磁石を用いて衝突点での x-y coupling の chromaticity を補正することにより、より高いルミノシティが得られるかどうかの実験が行われた。手順としては、 $R_1 \sim R_4$  の chromaticity の値を一つずつスキャンしながらルミノシティを測定して最大ルミノシティを与える値にセットし、次のスキャンに移るといった方法を繰り返した。両リングのスキャンを行った結果、この x-y coupling の chromaticity の調整により、約 15% ルミノシティが上昇することが確かめられた。図 9 に、スキュー 6 極を用いた場合と用いない場合のスペシフィックルミノシティの比較



図 8 HER に設置されたスキュー 6 極電磁石

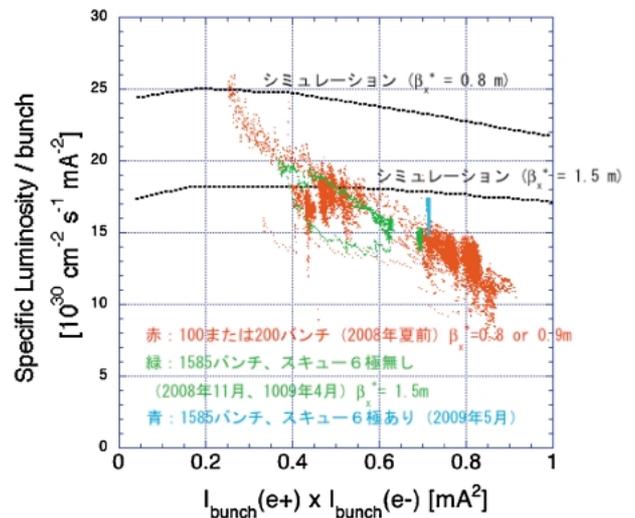


図 9 スキュー 6 極を用いた場合と用いない場合のスペシフィックルミノシティの比較

を示す。図で、緑色のプロットがスキュー 6 極を用いない場合を、また青色のプロットはスキュー 6 極を用いてチューニングした場合を表す。また、このルミノシティの値を最大にする調整の後、図 7 に示された方法で、この chromaticity の直接測定を行った結果、それぞれの linear chromaticity の値は、ゼロに近づいていることが確かめられた。このことはルミノシティの向上は、主に衝突点での x-y coupling の chromaticity 調整によるものであることを示唆している。

以上は、物理実験のための運転と平行して行われたものであるが、パンチ電流が高い場合のスペシフィックルミノシティをスタディしたい場合は、物理実験を行う 1585 バンチを用いると現在の KEKB にとっては全電流が高くなり過ぎるため、専用のマシンタイムを用いてバンチ数を減らした状態でスタディを行う。

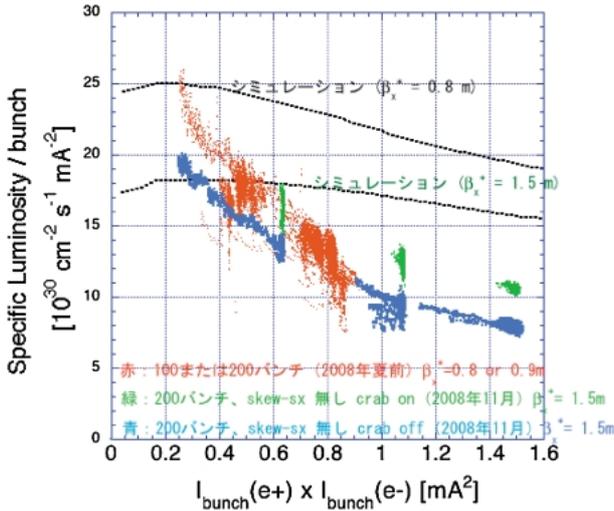


図10 Crab 空洞オンとオフのスペシフィックルミノシティの比較 (スキュー6極を用いない場合)

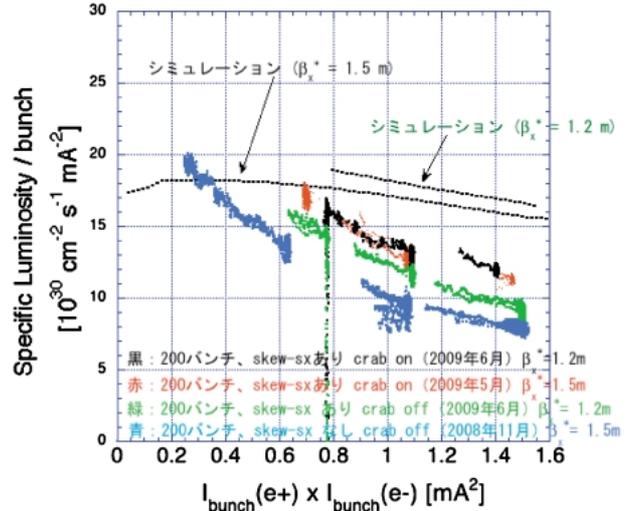


図12  $\beta_x^* = 1.2\text{ m}$  と  $\beta_x^* = 1.5\text{ m}$  のスペシフィックルミノシティの比較 (crab 空洞オン, スキュー6極オン). Crab 空洞をオフの状態, スキュー6極のオンとオフの場合のスペシフィックルミノシティの比較も示す.

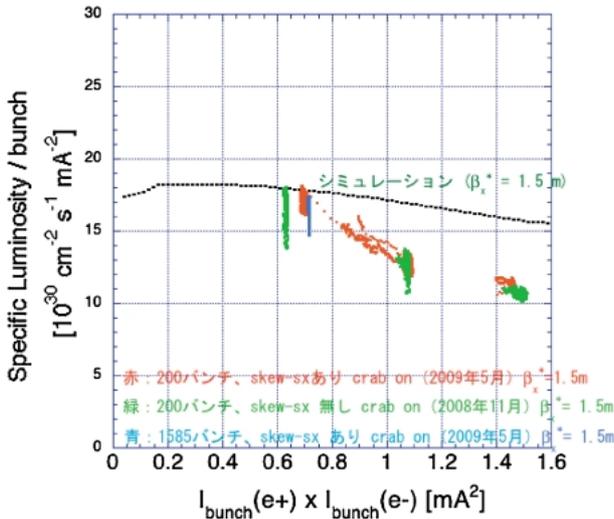


図11 スキュー6極を用いた場合と用いない場合のスペシフィックルミノシティの比較 (crab 空洞オン)

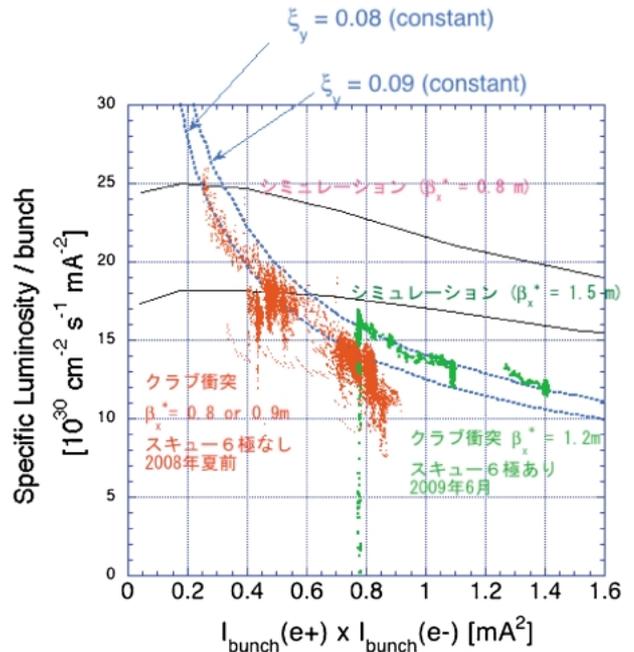


図13 Crab 空洞を用いた場合のスペシフィックルミノシティの電流依存性.  $\xi_y = 0.08$  で一定, および  $\xi_y = 0.09$  で一定の線も示す

以下に, この少数バンチの状態でのスタディの結果をまとめる. バンチ数をリング当たり 200 に減らして実験が行われた. バンチ電流を増やしたい場合でも, ここまでバンチ数を減らすことは必須ではないが, このバンチ数の場合, バンチ間隔が平均 24.5 RF bucket と長く, バンチ数が多い場合に問題になりうる LER の電子雲の問題も回避することができるため, このバンチ数を採用した.

この少数バンチのスタディでは, まず 2008 年 11 月に行われた, crab 空洞がオンの場合とオフの場合のスペシフィックルミノシティの比較のスタディの結

果を図 10 に示す. これは, もちろんスキュー6極電磁石導入前のデータである. 図から分かるように, ルミノシティの crab 空洞オンとオフでの差は約 20% で, 意外に差が小さいことがわかった. 交差角衝突による幾何学的なルミノシティのロス は 10% 程度と見

積もられるため、crab 空洞を用いるとこの幾何学的ロスの回復以上の効果があることは分かったが、期待されたほどのゲインは達成されていないともいえる。以上の測定では、ビーム寿命の問題を軽減するために衝突点での水平ベータ関数として  $\beta_x^* = 1.5 \text{ m}$  を用いた。 $\beta_x^* = 1.5 \text{ m}$  の場合のビームビームシミュレーションによるスペシフィックルミノシティの予言値は図 10 に示されているように、 $\beta_x^* = 0.8 \text{ m}$  の場合よりかなり低い。そして、バンチ電流積が低い場合は実験値と一致するか、予言値の方が実験値よりやや低い場合もある(図 9)。これは、ビームビームシミュレーションで用いられるシングルビームでの(つまりビームビーム効果無しの)グローバルな x-y coupling の値が実際より大きいことを意味している可能性がある。但し、シミュレーションで用いられた値(両ビームとも 1%)は、シングルビームでのビームサイズ測定に基づくものである。また、図 10 と図 9 を比較すると分かるが、2008 年 11 月のデータで crab オンの場合、少数バンチにすると 1585 バンチの場合に比べて、スペシフィックルミノシティがやや高く出る。これは、多数バンチの場合、電子雲の効果でスペシフィックルミノシティがやや下がっていることを意味するものと考えられる。

次に、スキュー 6 極を用いた場合でバンチ電流の高い場合のデータを図 11 に示す。まず、この場合の少数バンチ(200 バンチ)と多数バンチ(1585 バンチ)を比較すると、少数バンチの方がややスペシフィックルミノシティが高いが、何故かスキュー 6 極を用いない場合より差が小さい。その理由は不明である。少数バンチの状態でのマシンのチューニングが不十分である可能性もあるが、データの各点で 1 シフト(8 時間)程度のチューニング時間は取っていて、これはどの測定でも同程度である。次に、スキュー 6 極を用いた場合と用いない場合の比較は、比較的小電流( $0.6 \sim 0.7 \text{ mA}^2$ )では、(スペシフィックルミノシティの電流依存性を考慮すると)スキュー 6 極を用いた場合の方がやや高いが、バンチ電流が高い領域ではその差はかなり小さい。スキュー 6 極を用いるとシミュレーションの予言値と実験値が一致することが期待されたが、この実験の範囲ではやはり従来通りの不一致が存在するという結果になった。

最後に、衝突点のベータ関数を  $\beta_x^* = 1.2 \text{ m}$  に絞った場合のデータを示す。2009 年の春以降は基本的に  $\beta_x^* = 1.5 \text{ m}$  で運転が行われていたが、 $\beta_x^* = 1.2 \text{ m}$  に絞り、物理実験を行いながら充分チューニングすれば、ルミノシティのより高い領域に行けるのではないかと

いう推測のもと、このベータ関数の変更が行われた。KEKB のピークルミノシティの記録は、 $\beta_x^* = 1.2 \text{ m}$  で達成されているが、スペシフィックルミノシティがそれほど改善したわけではない。図 12 に、スキュー 6 極を用いた場合の、 $\beta_x^* = 1.2 \text{ m}$  と  $\beta_x^* = 1.5 \text{ m}$  の場合の比較を示す。図から分かるように、シミュレーションではある程度の改善が期待されたが、実験値では、 $\beta_x^* = 1.2 \text{ m}$  と  $\beta_x^* = 1.5 \text{ m}$  で、スペシフィックルミノシティの達成値には大きな差がない。さらに、crab 空洞を用いない場合でもスキュー 6 極の効果があるかどうかを調べるための実験を行った。実験時の  $\beta_x^*$  は  $1.2 \text{ m}$  であった。これと比べるべきスキュー 6 極オフのデータは  $\beta_x^* = 1.5 \text{ m}$  のものしかないが、 $\beta_x^* = 1.2 \text{ m}$  と  $\beta_x^* = 1.5 \text{ m}$  の違いは小さいと仮定すると、図 12 から分かるように crab オフの場合もスキュー 6 極電磁石の効果は(crab オンの場合と同程度に)大きいと言える。但し、この違いの一部が衝突点のベータ関数の違いによるものである可能性を否定することはできない。

#### 4. まとめと議論

以上述べたことをまとめると、最近の KEBK のルミノシティの向上の要因は、ビーム電流が増えたこととスキュー 6 極電磁石の導入によりスペシフィックルミノシティが向上したことである。ビーム電流の増加は crab 空洞付近の物理アパーチャーを広げることにより可能になった。スキュー 6 極電磁石は、衝突点での x-y coupling の chromaticity を補正することに用いられ、その結果スペシフィックルミノシティも向上した。このスキュー 6 極電磁石は crab オフの場合にも効果があることがわかった。また、スキュー 6 極電磁石を用いて、スペシフィックルミノシティは向上したが、ビームビームシミュレーションの予言値と比べると、特にバンチ電流が高いところで、まだ食い違いは大きい。これらをどう考えるかであるが、以下、ビームビームパラメータという観点から考えてみたい。

図 13 に、2008 年夏前と 2009 年 6 月のスペシフィックルミノシティの比較を示す。どちらも少数バンチのデータである。2008 年の夏前は  $\beta_x^* = 0.8 \text{ m}$  または  $0.9 \text{ m}$  であったが、2009 年 6 月のデータは  $\beta_x^* = 1.2 \text{ m}$  のものである。2009 年のデータの方がより高いスペシフィックルミノシティを示すが、これは主にはスキュー 6 極の効果と思われる。これらのデータにビームビームパラメータ  $\xi_y = 0.08$  (一定) と  $\xi_y = 0.09$  (一定) の線を書き加えた。大雑多に言うと、2008 年夏

前のデータは、 $\xi_y=0.08$ の線上にあり（データのばらつきの上限では0.09に接している）、2009年6月のデータは $\xi_y=0.09$ の線上にある。つまり、2008年夏まではビームビームパラメータは、0.08程度であったが、その後のスキュー6極の設置等の努力の結果、この値が0.09まで上がったと言える。しかし、もし $\beta_x^*=0.8$  mでのシミュレーションの予言値が実現すると、 $\xi_y=0.15$ 程度に到達するはずで、そこまではまだ道のりは遠いとも言える。2009年の秋の運転では、さらに高いビームビームパラメータを得るための努力を続ける予定である。

現在のところ、実験値とシミュレーションの不一致を説明するシナリオとして最も可能性が高いと考えられているのは、衝突点におけるx-y coupling（そのchromaticityではない）の補正が充分ではなく、その結果、大電流でスペシフィックルミノシティが落ちるといふシナリオである。KEKBの実際のマシンチューニングでは、衝突点におけるx-y couplingは、衝突点の比較的近傍のビーム軌道を変化させる（軌道のバンプを作る）ことにより調整が行われている。衝突点に比較的近くにあるいくつかの6極電磁石の垂直方向の軌道を変化させるとビームの感じるスキューQ成分が変化するが、そのスキューQ成分を用いて、衝突点におけるx-y couplingの値（具体的には $R_1 \sim R_2$ ）を変化させることによりチューニングが行われている。原理的には、チューニングに用いる軌道のバンプ（これをチューニングノブなどと呼ぶ）の高さを大きくしていけば、衝突点のx-y couplingの大きさは（バンプを立てられる限り）どんどん大きくできる。しかしながら、ある程度以上大きなバンプを立てると衝突点でのx-y couplingが変化するだけではなく、垂直方向のエミッタンスが大きくなり衝突点でのベータ関数も大きく変化することが、最近問題視されるようになって来た。従って、衝突点にある程度以上大きなx-y couplingがあると、チューニングノブの副作用により通常のチューニング方法でそのcouplingを補正できても、別の理由でルミノシティは上がらないことになる。現在のKEKBでチューニングノブを用いて衝突点に作っているx-y couplingの大きさは、6極電磁石の設置誤差から想定される量

より、かなり大きな量である。ノブを立てない状態での実際のx-y couplingはさらに大きい可能性がある。その大きなx-y couplingの原因としては、Belle検出器のソレノイド磁場の補正が充分でないことが考えられる。このソレノイド磁場の補正を再考することが一つの可能性である。もう一つの努力の方向として、衝突点でのx-y couplingの値の直接測定がある。これについては、これまでも努力が続けられてきたが、BPMの回転誤差を除去することが難しいことや測定誤差の問題で、これまで直接測定が十分うまくいっているとは言えない。今後も、この方向に沿っての努力も継続する予定である。

## 5. おわりに

現在のKEKBは今年度で運転を終了し、（予算がつけばであるが）2010年度からはSuperKEKBへのアップグレードの工事に入ることが予定されている。SuperKEKBの従来のデザイン（大電流オプションと呼んでいる）の場合、高いビームビームパラメータを得ることは本質的に重要である（デザイン値は0.3を越える）が、最近検討されているイタリア方式（ナノビームオプションと呼んでいる）の場合、ビームビームパラメータは0.09程度を想定しているの、この値は一応達成されていると言える。しかしながら、例えばスキュー6極電磁石が高いルミノシティを得るのに重要な手段だということがわかったことは、SuperKEKBにとっても有益なことである。このように、現行のKEKBでの経験は、どのようなものであっても将来の役に立つ可能性がある。現在、ルミノシティの高さにおいて世界の最先端を走るKEKBにおいて可能な限りの経験を積み、将来のSuperKEKBにおいても有用な手段を引き出すことの意義はやはり大きいといえる。

## 参考文献

- 1) 船越義裕, 加速器, 4(4), 309 (2007).
- 2) Y. Funakoshi *et al.*, Proc. of EPAC08, 1893 (2008).
- 3) Y. Funakoshi *et al.*, Proc. of PAC09, (2009).
- 4) Y. Ohnishi *et al.*, submitted to Phy. Rev. ST AB.
- 5) D. Zhou *et al.*, to be submitted to Phy. Rev. ST AB.