

## ビーム安定化に向けて(1)

田中 均 財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1  
E-mail: tanaka@spring8.or.jp

### 1. はじめに

放射光を利用する実験ユーザーであれば、自分の使っている光源の光が「もっと安定であれば良いのに」と感じたことが一度はあるだろう。特に、最近の高輝度光源では、利用できる光がシャープなので、光のもとになるビームの安定度は、この高輝度光のメリットを最大限に引き出す上で極めて重要になる。

実験ユーザーに不利益をもたらすビームの不安定性は、(a)加速または蓄積される電子・陽電子（以下電子）の軌道や収束ポテンシャルを構成する電場や磁場の変動によって引き起こされるものと(b)電子が真空チェンバーや空洞に作る航跡場や、電子とチェンバー内のイオンや光電子、または加速されている別の電子との散乱によって引き起こされるものの2つに大別される。前者(a)は、加速または蓄積される一電子の安定性の問題であり、電流に依らず変動が引き起こされる。一方後者(b)は、バンチ電流や蓄積電流が増加するに従い劇的に効果が大きくなるので、加速または蓄積できる電流値の上限を与える。ここでは、ビーム安定化を(a)一電子の安定性の観点から、正確にはなく、分かりやすく説明してみたい。

### 2. 加速器内の電子を安定に蓄積・加速する電磁場

加速器中を周回する電子は偏向電磁石（一定のダイポール磁場を与える2極電磁石。通常軌道面が水平なので軌道の上下にN極とS極があり、一様な垂直磁場を与える）により軌道が構成される。軌道（Orbit）とは電子の運動が加速器一周で周期条件を満たす粒子の軌跡（Trajectory）のことである。

軌道に沿って、軌道からの変位に線形な収束力を与える4極電磁石を配置すると、リング一周の積分として、軌道を極小とする双曲ポテンシャルが構成され、電子の水平・垂直微小振動（ベータatron振動）が軌道の周りで安定化する。

一方、放射光リングでは電子が磁場で曲げられることで放射される光が実験に利用される。周回している電子は、放射によりエネルギーを失うので、周回ビームに同期したRF加速電場でエネルギーが補償され、一定の蓄積エネルギーが維持される。この加速電場にも、蓄積エネルギーに対応する加速位相の周りで、エネルギー偏差を帰還する線形の電場勾配がついている。これにより、4極電磁石と同

様に、エネルギー振動を安定化する双曲ポテンシャルが加速位相を中心に構成される。

これらの安定化ポテンシャルの働きで、放射光リングを周回する電子は軌道上の加速位相のまわりに集群し、固まり（バンチもしくはビーム）を形成する。電子の固まり（以下電子ビーム）は放射プロセスの統計的揺らぎ（振動励起）で絶えず攪乱され、放射による振動減衰と加速器パラメータや誤差磁場などの要素で決まる有限の広がり（中心付近はほぼガウス分布）を、時間、水平、垂直の3方向で持つ。軌道は、ビームの進行方向に直交する横方向空間分布の中心に常に位置し、加速位相は放射光パルスの繰り返しを規定する。

### 3. 振動が引き起こす光軸/光強度/波長変動

2節で述べたようにダイポール磁場分布<sup>\*1</sup>が電子ビームの加速器内での軌道を決定する。従って、放射光リング軌道上でのダイポール磁場分布が時間的に変動すれば、加速器を周回する電子ビームの水平（垂直）方向の重心が全周に渡り変位する（軌道が歪む）ことになる。軌道変動は光源点での光の位置と角度が時間的に変わることを意味し、実験ハッチ内での光の重心位置を変化させるだけでなく、分光後の光の強度や波長をも変動させる。軌道変動の時間スケールが測定積分時間に近い場合には、測定データに明確な軌道変動の影響が現れる。

軌道が変動しない場合でも、軌道と加速位相の周りの電子ビーム広がりが変動すれば、位相空間内での電子ビームの密度が変動し、放射される光の輝度が低下したり、光のパルス幅が変動する。水平と垂直2方向の電子ビーム広がりの変動は、特定の周波数成分を有する誤差磁場による軌道周りの微小振動の励起（共鳴）によって主に引き起こされる。共鳴には水平振動を増大させる1次元の共鳴の他、水平と垂直の振動エネルギーの交換が生じる2次元の結合共鳴等がある。

電子ビームの時間方向の広がりやRF加速電場の電圧や位相の早い変動によって主に増大する。時間方向の広がり拡大は、電子ビームのエネルギー広がりの拡大を伴な

<sup>\*1</sup> 正確には平均的なエネルギーロス分布（放射や航跡場）とエネルギー利得（加速空洞でのエネルギーゲイン）にも依存する。

うので、光のパルス幅が変動するだけでなく、アンジュレータ放射の共鳴エネルギースペクトル幅も増大し、ピーク強度を低下させる。これらの変動は結果として分光後の光強度を低下させる。

測定の前時間比に比べ軌道変動が十分早い場合には、水平、垂直の電子ビーム広がりが増大した場合と同様に、試料上での時間平均輝度の低下を引き起こす。

ここでは、これ以降、軌道変動をどのように安定化していくかに限定して話を進める。

#### 4. ビーム軌道変動要因

##### ① 電磁石やビーム位置モニタ (BPM)<sup>\*2</sup>の位置を変動させる要因

軌道からの変位に比例した磁場を発生する4極電磁石の磁場中心が、軌道から微小変位  $dx$  だけずれると、 $dx$  に応じたダイポール磁場が軌道上に発生する。一方、 $dx$  に依らず一様磁場を発生する偏向電磁石は微小変位で新たなダイポール磁場が軌道上に発生することはない。6極電磁石のような非線形電磁石は、微小変位  $dx$  の2次以上に比例して磁場を発生する。このダイポール磁場は極めて小さく、これによる軌道の歪みは通常無視できる。電磁石振動のうち、4極電磁石の振動が主に軌道変動を引き起こすことが理解できたであろう。

軌道を構成する偏向電磁石の配置が、建物の歪み等で軌道方向にズレると、ダイポール磁場が変化し、軌道の歪みが生じる。月と地球の位置の変化による重力変動(潮汐)や、地震や波浪のような強大なエネルギーによる岩盤の収縮・拡大を通し、リングの周長が変化すると、周回ビームのエネルギーが変化し、結果として水平軌道の歪みが発生する。このようなメカニズムで軌道変動を起こす要因を以下にまとめる。

- (a) 施設の回転機、圧縮機、配管などの振動：数 Hz～数百 Hz の4極電磁石の振動
- (b) 電磁石冷却水の脈動：数 Hz～数百 Hz の4極電磁石の振動
- (c) マシントネル内への挿入光源 (ID) 等重量物の設置：数日～数週間の重量物設置床面の変形
- (d) マシントネル内の温度分布の変動：数日に渡る磁石架台の熱変形
- (e) 電磁石と真空チェンバーの干渉：真空チェンバーの熱変形によるゆっくりした4極磁石位置の変位
- (f) BPM のノイズや再現性：軌道補正プロセスを通してのビーム軌道測定誤差による軌道変動(変動周期は軌道補正プロセスの補正周期に依存)
- (g) 外気温変動：1日及び年周期の建家及び基礎の収縮と拡大

- (h) 日照の変化<sup>1)</sup>：1日及び年周期の建家の変形
- (i) 地球潮汐<sup>2)</sup>：約12時間周期の岩盤の拡大・収縮
- (j) 車、電車<sup>\*3</sup>等の振動：数 Hz～数百 Hz の4極電磁石の振動
- (k) 地震：数秒～数十秒周期の4極電磁石の振動と岩盤の拡大・収縮
- (l) 海の波浪：1 Hz 以下の4極電磁石の振動と岩盤の拡大・収縮
- (m) 加速器建設地域での降雨：大地圧の変化による数時間から数日の床面の変動
- (n) 蓄積電流の変化：入射間隔(数時間～1日)で繰り返す BPM 位置の変化

##### ② 電磁石磁場や環境磁場を変動させる要因

軌道を構成する偏向電磁石や軌道歪みを直す補正磁石の磁場の時間的変化は、加速器内のダイポール磁場分布を直接変動させる。このようなメカニズムで軌道変動を起こす要因を以下にまとめる。

- (a) 電磁石電源のリップルやパワーライン変動：数 Hz～数百 Hz の4極電磁石、偏向電磁石励磁電流変動
- (b) 偏向電磁石冷却水の温度変動：数分～数十分周期の偏向電磁石ヨーク形状の変形
- (c) ID 設置による電磁石端部境界条件の変化：ID 両端ステアリング電磁石の積分磁場の变化 (ID 設置時にステップ的に作用)
- (d) 実験ホールやマシントネル内のクレーン位置：クレーンの動きに応じた軌道上の地磁気分布の変化
- (e) 隣接する加速器等の運転：運転サイクルに応じた軌道上の環境磁場の変動

##### ③ 新たな磁場を軌道上に発生させる要因

軌道上に新たな変動磁場を発生し、加速器内のダイポール磁場分布を変動させることで軌道変動を引き起こす要因を以下にまとめる。

- (a) 4極電磁石内部の真空チェンバー振動：4極磁場とチェンバー振動が誘起する渦電流による数 Hz～数百 Hz のダイポール磁場の発生
- (b) 実験ユーザーの持ち込む超電導磁石等：実験ホールに設置した電磁石の励磁により軌道上に磁場が発生(励磁パターンに依存)
- (c) ID の誤差磁場：ID ギャップ変更による誤差磁場の変化
- (d) ビーム入射：入射パルス電磁石の励磁による誤差磁場の発生

##### ④ リングの放射損失分布を変動させる要因

ID ギャップの変更は、軌道上での ID のピーク磁場を

<sup>\*2</sup> BPM の測定値を軌道の補正に使用しているため、測定値に誤差が入ると、補正を通して逆に軌道が歪められる事になる。

<sup>\*3</sup> 2000 年の EPAC で CERN の S. Myers は “Twelve Years of Beam in LEP: the Good, the Bad, and the Unforeseen” とい招待講演の中でフランスの高速列車 TGV がジュネーブに近づいてくるのがビームの挙動で分かったという話をしていたのが印象的である。

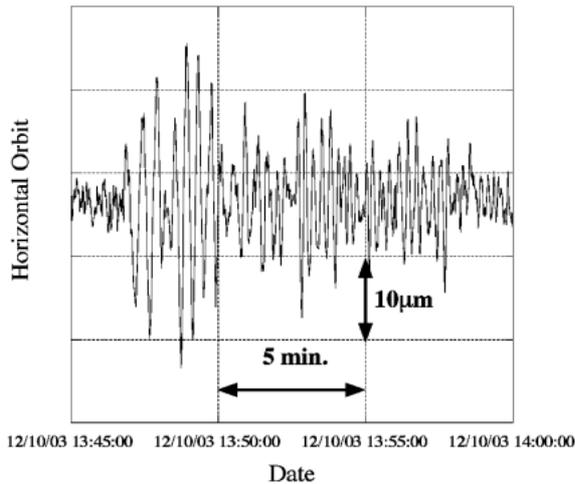


Figure 1. Horizontal orbit variation by an earthquake observed at the SPring-8 storage ring. The earthquake of which magnitude is M6.7 was occurred in the offing of Taiwan winter 2003. The above variation was observed by the BPM at the center of the unit cell at the time when the earthquake just occurred.

変化させるので、各 ID での放射パワーが変化する。これにより、リングに沿った電子ビームの蓄積エネルギー\*4が変化し、主に水平方向に軌道を歪める。

Fig. 1 に地震で生じた SPring-8 蓄積リングの水平軌道変動の例を示す。SPring-8 の軌道周期補正システムでは、Fig. 1 の変動を補正できない。このため、地震発生時にはユーザーに「どの程度の振動がどの時間帯に発生していたか」という情報を流している。

周長の変化は、ビームのエネルギーを変化させ、エネルギー分散部\*5で水平軌道を歪める。SPring-8 ではエネルギー分散部の BPM で水平軌道変位を観測することで、蓄積リングの周長の変化を常時モニターしている。測定した周長の変化をもとに、ビームエネルギーを一定に保つように RF 周波数に 0.1 Hz の精度で帰還をかけている。Fig. 2 に温度の年変動が原因と考えられる SPring-8 蓄積リングの RF 周波数（周長）の変化を、Fig. 3 に地球潮汐で引き起こされた RF 周波数（周長）の変化を示す。

Fig. 4 には電源改造前後での水平軌道変動スペクトルを示す。4 極電磁石電源の改造によって電流リップルが減少し、1 Hz 前後の軌道変動成分が大幅に低減していることが分かるだろう。

## 5. ビーム軌道変動の抑制

軌道変動を抑えるには、変動要因の抑制と軌道変動補正

\*4 当たり前のことだが、リングを周回するビームのエネルギーはリングに沿って一定ではない。高周波加速空洞の配置や放射損失の場所と損失量に依り、リングの各位置でのビームのエネルギーが決まる。厳密には、高周波加速空洞直後がビームのエネルギーが一番高い。

\*5 設計エネルギーからの偏差に比例し、軌道がずれる場所。

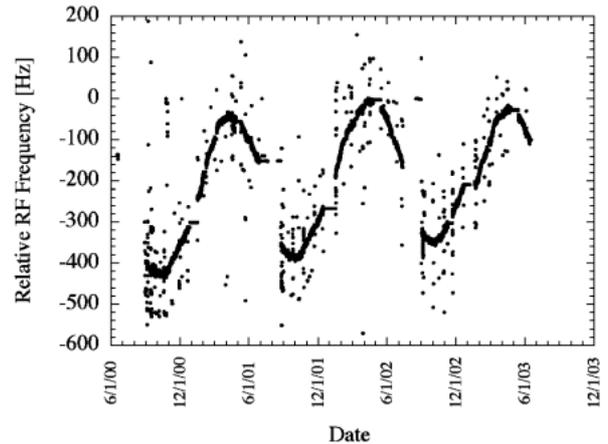


Figure 2. Change of the RF frequency from the year 2000 to 2003 observed at the SPring-8 storage ring. The clear change with a one-year cycle is seen in the figure. Since the frequency change of 100 Hz corresponds to the circumference change of 300  $\mu\text{m}$ , the circumference of the storage ring varies by about 1 mm for one year.

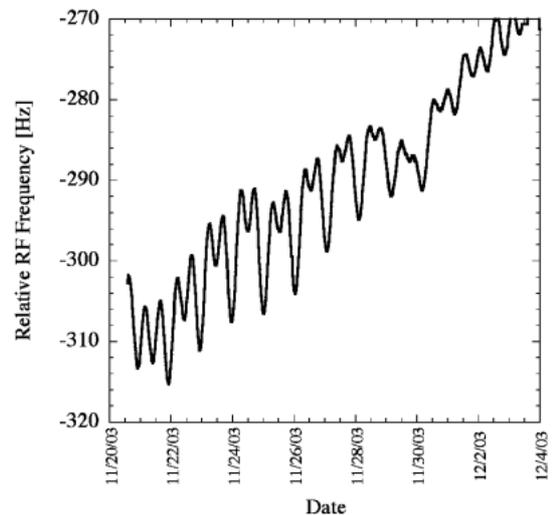


Figure 3. Change of the RF frequency for two weeks observed at the SPring-8 storage ring. This variation has a twelve-hour cycle roughly and we predict that earth tide causes this kind of variation. The variation by earth tide is about 10 Hz giving the circumference change of 30  $\mu\text{m}$ .

が車の両輪になっている。究極の軌道安定性は、補正のみからも、変動要因抑制のみからも得られないのは言うまでもないが、変動要因を抑えておくことで、補正に対する要求を大幅に緩和できる。

4 節で述べた軌道変動要因を考慮し、電磁石やその架台、電磁石電源、パワーケーブルの引き回しとその断熱、チェンバーの材質や固定方法、冷却水配管のレイアウト、BPM の配置と固定法など加速器構成要素を、軌道変動抑制の観点から計画・設計する事が肝要である。日照や気温の変化を受けにくい入母屋式構造の採用、トンネル内及び実験ホールの温度分布を安定させる空調システムなど建家

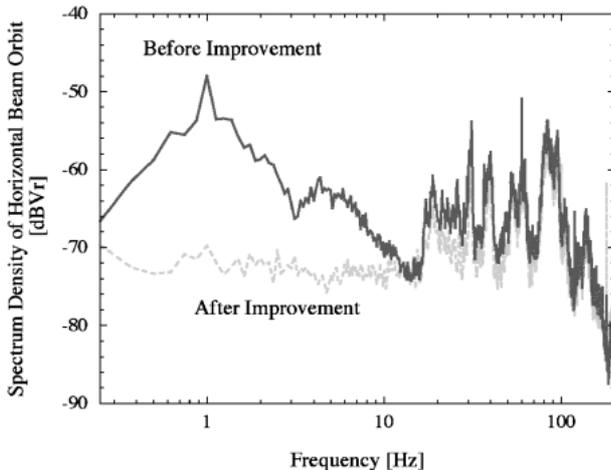


Figure 4. Power spectrum-difference in the horizontal orbit variations observed at the SPring-8 storage ring. The solid and broken lines show respectively the spectra before and after improvement of the power-supplies for the quadrupole magnets. The significant reduction by the improvement is seen around the frequency of 1 Hz.

の設計にも配慮が必要だ。そればかりか、Global Linear Collider (GLC) 建設候補地選定<sup>3)</sup>でも分かるように、極限の軌道安定性を追求するには、建設サイトの選定が極めて重要になる。強固かつ安定した岩盤地層と軟弱な堆積層では、自然振動の大きさが全く異なるからである。ESRF<sup>4)</sup>のように Drac と Isere 2つの川の三角州で、かつ近くに幹線道路が走っている場所に施設を建設すると、河川の増水や幹線道路のマンホール上を通過する大型トラックの影響までもが軌道変動に現れる事になる。

今後、軌道安定化を行っていく上で特に重要になる4つの事柄をSPring-8の事例をまじえ以下にまとめる。また、軌道安定化の現状については、SPring-8で開催された軌道安定化国際ワークショップ2002のURL <http://www.spring8.or.jp/e/conference/iwbs2002/index.html>で各施設の取り組みや達成された安定度等を知ることができる。

### 5.1 挿入光源 (ID) の透明化

最近では、ユーザー運転時にビームライン毎に自由にIDギャップや位相を動かし、エネルギースキャンや偏光高速切り換えを行いながら実験できる「独立チューニング」という運用方式が主流になってきている。IDの磁場調整技術も格段に進歩<sup>5)</sup>しているが、軌道安定度の向上も著しい。挿入光源主体の高輝度光源であれば、挿入光源の誤差磁場は、現状、最も大きい軌道変動要因の1つであろう。色々な放射光施設で改善に向けた取り組みが進行中<sup>6,7)</sup>であるが、IDの誤差磁場による軌道変動を抽出する精度を如何に上げるかが最大の課題になっている。

### 5.2 電磁石とチェンバーの振動対策

比較的周波数の高い振動を誘起する電磁石とその架台、真空チェンバーの振動対策は、軌道フィードバック補正の

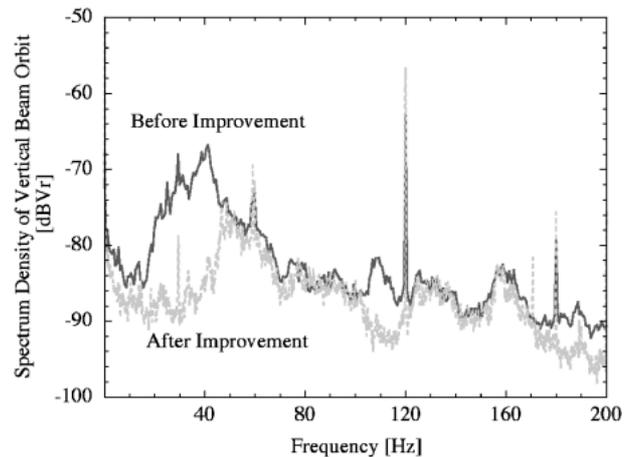


Figure 5. Power spectrum-difference in the vertical orbit variations observed at the SPring-8 storage ring. The solid and broken lines show respectively the spectra before and after suppression of the vacuum chamber vibration in the quadrupole magnets. The significant reduction by the suppression is seen in the frequency range from 30 to 60 Hz.

帯域を考えると重要である。最近、SPring-8では数十～数百Hzの周波数帯域の軌道変動のかかなりの部分が、4極電磁石内のアルミ製真空チェンバーの振動から生じていることが分かり<sup>8)</sup>、その対策を実施することで、**Fig. 5**で示すようにかかなりの抑制効果が得られた。4極磁場は水平・垂直偏差に対し磁場が線形に変化するので、チェンバーの振動に対し水平・垂直ダイポール磁場を打ち消すように渦電流が流れ、これがビーム軌道を振動させる。アルミは、ステンレスに比べ、電気抵抗が小さく誘導電流が流れやすいので、アルミ製真空チェンバーにおいてこの効果が顕著である。

ステンレスチェンバーを用いているESRFからは、真空チェンバーの振動が誘起するビーム振動の問題は報告されていない。この周波数帯の主なソースは、電磁石架台と4極電磁石の振動のようで、架台や電磁石に振動減衰器を設置<sup>9)</sup>し、軌道変動の抑制を行っている。SPring-8の電磁石架台と4極電磁石の振動は、現状、かなり小さく抑えられており、ESRFのような架台や電磁石の防振対策は今のところ不要である。

### 5.3 光軸モニタリングシステム

放射光リングの場合、蓄積ビームの安定化は、放射される光を安定化させるためである。光軸(光ビームの重心)の高速・高精度でのモニタリングは、光軸の安定性を保障する上で極めて重要になる。もちろん、この情報は上流のビーム軌道制御にも役立てることができる。光軸を測定する光位置モニター(XBPM)設置位置は、光学系の変動と軌道変動を分離する意味からも分光器やスリット等、光を整形する光学機器の上流に置くことが望ましい。また、XBPMの軌道変動に対する感度は、発光点での電子ビームの角度発散によるので(ベータatron関数を小さくする

とXBPMの感度は上がる), ラティス設計の際には十分検討する必要がある。XBPMの現状での問題点は, ID光軸観測におけるIDギャップ依存性<sup>10)</sup>にあり, これは上流の偏向電磁石等からのノイズ光がID光と重なり合うために引き起こされる。X線領域では, 従来の光電子放出型と異なり, 高エネルギー光により感度の高い光伝導型モニターの開発<sup>11)</sup>が進められている。IDのパラメータを固定すれば, 高い再現性が得られるので, SPring-8では2003年秋から, サイクル間の軌道設定にXBPMの利用が開始された。

#### 5.4 高速高精度軌道補正システム

徹底的な変動要因除去を行ったとしても, 軌道変動をゼロに抑えることはできない。最後に残った小さな変動を実験者に気づかれることなく綺麗に補正できれば究極のビーム安定性に近づくことができる。このためには, 高速・高精度のビーム軌道補正システムを構築する必要がある。高速と高精度は原理的に両立が難しく, 現在もっとも進化した第3世代放射光リング Swiss Light Source (SLS)でもグローバルの軌道補正を $\sim 1$  Hzでしている<sup>12)</sup>にとどまっている。SLSは高速の軌道補正を念頭に, BPMとステアリングの配置を最適化し, 局所補正の重ね合わせでリング全周の補正が完結するように工夫されている<sup>13)</sup>。これによりリング一周の軌道情報を一箇所に集める必要がなく, 高速・高精度補正が実現できると期待されている。この方法であれば, 大きいリングでもデータ転送の問題が生じない。一方, SPring-8では, 徹底した変動要因除去を実施し, 高い周波数域までリング全周の軌道変動モードを単純化し, シンプルなシステムで効率的な補正を行うことを目指して努力を続けている。このようなアプローチでどの程度の軌道安定性が確保されるのかは, 今後明らかにされていくであろう。

#### 6. 別の意味での安定化: Top-up 運転

これまでは放射光リングに蓄積されている電子ビームの軌道変動について議論してきた。しかし, 光の安定性を考える時, 分光器やミラー等光学機器の安定度も無視できない。第3世代の高輝度光源では, 光のパワーが狭い領域に集中し, 光学機器の熱負荷が極めて厳しい状況にある。蓄積電流の減衰やビーム入射時のビームシャッター開閉による熱負荷の変動は, 無視できない光学系の変動を引き起こす。注意深く設計されたSPring-8のX線光学系ですら, ビーム入射後1時間程度は光学系が安定しないビームラインもあるらしい。このような状況を打破するには, 光学系を熱的平衡状態(一定の熱負荷)で使用し続けること, 即ち, 一定の蓄積電流を実現するのが早道だ。ビームシャッターを閉めずにビーム入射をするだけでも, ビーム

シャッターを閉じた従来の入射に比べ, 光学系の熱的安定性の向上が期待できる。このような背景から, ユーザー実験と平行し, 短い時間間隔で随時ビーム入射を行い一定の蓄積電流を維持するTop-up運転が注目を集めている。この運転は, タウシェック効果(同一バンチ内での電子・電子散乱によるビーム損失)が著しい低エネルギー放射光リングで, 高輝度を狙う場合には不可欠になる。8 GeVと比較的高エネルギーのSPring-8ですら, 蓄積ビームの高密度化によるビーム寿命低下は避けられず, 2004年中のTop-up運転導入を目指し, 開発・調整が進められている。Top-up運転の難しさは, ビーム入射プロセスの透明化(実験しているユーザーに見えない)と, 入射ビーム損失を極限まで抑えることの2点であり, 簡単な解説は参考文献<sup>14)</sup>にまとめられている。

#### 7. 謝辞

高輝度光科学研究センターの木村洋昭氏には, 実験ユーザーの立場から, 加速器屋の書いた説明の分かりにくい箇所の指摘, 構成や内容に対する助言をいただきました。また早乙女光一氏からは, 加速器屋として内容に関するコメントを頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) K. Fuke: *Jpn. J. Appl. Phys.* **26**, 285 (1986).
- 2) S. Daté and N. Kumagai: *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **421**, 417 (1999).
- 3) GLC Project, KEK Report 2003-7.
- 4) Conceptual Design Report, The Red Book Draft B, ESRF (1987).
- 5) 挿入光源ハンドブック '96, JASRI (1996).
- 6) M. Lonza et al.: Proc. of the 8th European Particle Accelerator Conferenc, Paris, June 3-7, France, 2002 (EPS-IGA and CERN) p. 2091.
- 7) T. Nakatani et al.: presented in the 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, San Francisco, Aug. 25-29, U.S.A.
- 8) S. Matsui et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, L338 (2003).
- 9) L. Zhang: Proc. of the 7th European Particle Accelerator Conferenc, Vienna, June 26-30, Austria, 2000 (Austrian Academy of Science Press) p. 2489.
- 10) H. Aoyagi et al.: *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **467-468**, 252 (2001).
- 11) H. Aoyagi et al.: presented in the 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, San Francisco, Aug. 25-29, U.S.A.
- 12) M. Böge et al.: Proc. of the 8th European Particle Accelerator Conferenc, Paris, June 3-7, France, 2002 (EPS-IGA and CERN) p. 2067.
- 13) M. Böge et al.: Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conferenc, New York City, Mar. 29-April 2, U.S.A., 1999 (BNL and IEEE) p. 2091.
- 14) 田中 均, 大熊春夫: SPring-8 利用者情報, **Vol. 8**, No. 5, 298 (2003).