◁放射光源シリーズ(2)▷

電子蓄積リングとは(2)

加藤政博　(分子科学研究所*)

1. はじめに

シンクロトロン放射光源用電子蓄積リングについての解説の第２回目である。第１回目では電子蓄積リングの構成と主な構成要素の機能について解説した。今回は，電子蓄積リングを周回する電子ビームの性質，特にその形状について，前回同様，放射光を利用する研究者や学生向けに，なるべく平易な解説を試みる。

2. 電子ビームの形状

ビームという言葉からは一つながりの紐のような形状を想像するが，電子蓄積リングを周回する電子ビームは，**Fig. 1** に示すように，幾つかの塊に分かれている。この電子の塊のことをバンチと呼ぶ。バンチが偏向電磁石や挿入光源を通過するたびにシンクロトロン放射する。このためにシンクロトロン放射光はパルス的になる。

電子ビームがバンチに分裂するのは高周波加速に原因がある。前回説明したように，電子蓄積リングを周回する電子ビームがシンクロトロン放射によって失ったエネルギーは高周波加速空洞によって補給される。高周波加速空洞内には振動電場が生成されており，この電場はある瞬間にはビームの進行方向を向いているが，振動周期の半分の時間がたつと進行方向と逆を向いてしまう。電子がエネルギーを補給されるには電場が進行方向を向いているときに空洞を通過しなくてはならない。このために電子ビームはバンチに分裂し，バンチとバンチの間隔は電場の振動周期に等しくなる。例えば Photon Factory[1)] や SPring-8[2)] で採用されている高周波加速の周波数は５億ヘルツ（500 MHz）であり，この場合バンチ間隔は時間にして２ナノ秒，距離では60 cm となる。

個々のバンチの形状は扁平な楕円体である。その大きさはリングによって様々である。概略の数字を挙げれば，バンチの進行方向の径（長さ）は数 cm から数10 cm，バンチの進行方向に垂直な断面の形状も楕円であるが（**Fig. 2** 参照），その水平方向の径（幅）はおおよそ数 mm，垂直方向の径（高さ）は数100ミクロン程度である。説明は省略するが，電子はバンチの中心に対してガウス分布している。ここで述べた楕円体の径はガウス分布のシグマに相当する量である。

バンチの長さはリングの場所に寄らず一定であるが，バンチの断面形状はリングの場所によって大きく変わる。これはレンズのような働きをする四極電磁石の収束発散作用によるものである。リングの各場所でのビームサイズがどのようになっているか，UVSOR[3)] の例を **Fig. 3** に示す。一般にビームが細く収束されている場所では角度広がりが

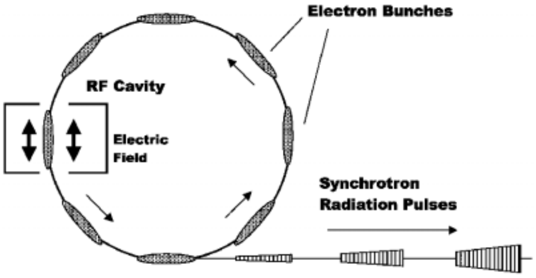

Figure 1.　Electron bunches and synchrotron radiation pulses.

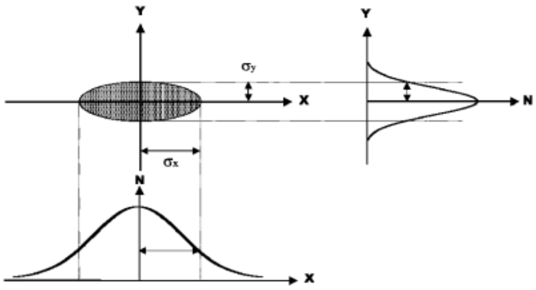

Figure 2.　Cross-section of an electron beam.

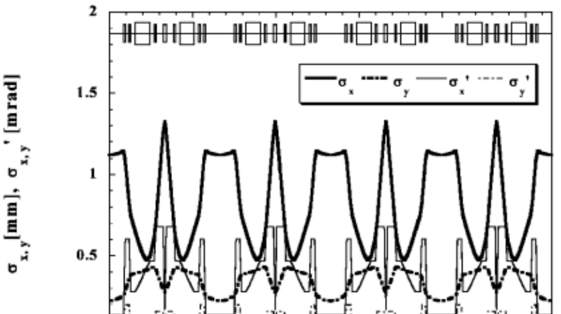

Figure 3.　Beam size (σ) and divergence (σ') of the electron beam in UVSOR[3)]. The x and y denote horizontal and vertical directions respectively.

* 分子科学研究所　〒444‒8585　愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38
TEL: 0564‒55‒7206　FAX: 0564‒54‒7079　E-mail: mkatoh@ims.ac.jp

(C) 2003 The Japanese Society for Synchrotron Radiation Research

大きく，広がっている場所では角度広がりが小さい。厳密さにこだわらずにいえば，ビームの空間的広がりと角度的広がりをかけたものはエミッタンスと呼ばれ，リングの場所に依らず一定となる。エミッタンスは電子ビームの指向性の高さをあらわす量であり，光源加速器の基本性能を示す重要なパラメタである。

3. 電子ビームの広がりの原因

電子ビームの空間的広がり，即ち，バンチの断面積（あるいはエミッタンス）やバンチの長さ，といった量は，放射光の明るさ（輝度）やパルス長といった光源の基本性能に直結する重要な量である。これらの量がどのようにして決まるか，その詳しい説明は今後本シリーズの中でなされるはずである。ここではなぜビームがある大きさを持つのか，その根本的な原因について説明しておくことにする。

結論から言えば，電子ビームが空間的にある広がりを持つのは，シンクロトロン放射光を光子という形で放出することに原因がある。例えば，Photon Factory[1)]ではリングを1周する間に電子は約40万電子ボルト（400 keV）のエネルギーをシンクロトロン放射の形で失う。Photon Factory のシンクロトロン放射光の代表的なエネルギーは4千電子ボルト（4 keV）程度である。従って電子はリングを1周する間に100個程度の光子を放出する。問題は，この100個というのがあくまで平均的な値に過ぎないということである。光子の放出は量子論的な，つまり確率的な現象である。従ってある電子は90個しか光子を出さないかもしれないし，別なあるものは110個出すかもしれない。

全く同じエネルギーをもつ幾つかの電子がリングを周回し始めたとする。この状態は長くは続かない。ある電子はリングを1周する間に90個しか光子を放出せず，別なある電子は110個放出する。このようにして個々の電子のエネルギーは異なったものになる。即ち電子ビームはエネルギー的に広がる（ばらつく）ことになる。そのまま周回を続けるとエネルギーのばらつきはどんどん大きくなる。しかし一方で，エネルギーの高い電子ほどたくさんシンクロトロン放射するという事情があり，これはエネルギーのばらつきの増大を抑える働きをする。最終的にはこの2つがつりあう形でエネルギー広がりはある値に落ち着く。多くのリングでは0.1%程度である。例えば Photon Factory ではビームエネルギー25億電子ボルトを中心としておおよそ±250万電子ボルトの範囲で電子のエネルギーがばらついている。

同様なことが空間的な広がりについても言える。今，空間的広がりがゼロのビームを考える。つまり，全ての電子は全く同じ軌道上を走っているとする。この状態は長くは続かない。これらの電子が偏向電磁石中を走っているときにある電子は光子を放出し，あるものは放出しない。光子を放出した電子はその分エネルギーを失う。エネルギーが下がると同じ磁場中でもより大きく進行方向を曲げられる

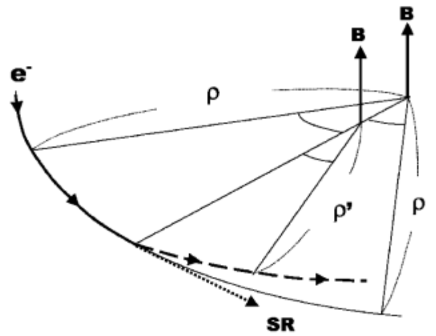

Figure 4. Photon emission in a bending magnet.

（**Fig. 4** 参照）。このようにしてそれぞれの電子は異なった軌道を描いて進むようになる。即ち空間的な広がりが発生する。周回を続けると電子ビームはどんどん空間的に広がっていくことになるが，一方で高周波加速がこれを抑制する。説明は省略するが，加速には個々の電子の運動方向を揃える働きがある。この2つがつりあう形でビームの空間的広がりはある値に落ち着く。

ところで，エネルギーを失った電子はより大きく進行方向を曲げられる，と説明したが，あくまで同じ軌道面内で水平方向に進行方向が変わるのであって，軌道面から垂直方向にそれるわけではない（**Fig. 4** 参照）。つまりこの過程では水平方向にのみビームが広がり，垂直方向には広がらない。先にも述べたように，ビームの断面形状は，一般に水平に大きく垂直に小さいが（**Fig. 2** 参照），その理由はここにある。説明は省略するが，垂直方向のビームサイズは，電磁石の磁場の誤差により水平方向の広がりが垂直方向に回り込むことで生じている。

最後に，バンチの進行方向の広がり，つまりバンチの長さはどのようにして生じるのであろうか。その原因はエネルギーの広がりにある。エネルギーの高い電子ほど偏向電磁石中で曲げられにくく，偏向半径が大きくなる。偏向半径が大きいと軌道長も長くなる。一方で相対論的な電子の走る速度はエネルギーに依らずほぼ光速度に等しい。従って，エネルギーの高い電子ほどリングを1周するのに時間がかかる。このように周回時間がエネルギーに依存することで，エネルギーの広がりがビーム進行方向の広がりを生み出す。

4. 終わりに

放射光源シリーズの第1回，2回として，シンクロトロン放射光源として現在最も一般的に用いられている電子蓄積リングについて，その概要を説明した。電子蓄積リングは，(1)加速器技術的に成熟している，(2)運転維持管理が比較的容易である，(3)原理的に電子ビームの安定性が高い，(4)多数の放射光ビームラインを設けることが可能であり経済性が高い，(5)放射線の発生量が小さい，など，光源用加速器として非常に優れている。その一方，電子蓄積リング

を周回する電子ビームは放射光の放出によりある大きさの空間的，エネルギー的広がりを持つことが避けられない。この電子ビームの広がりは，空間的，時間的，あるいはエネルギー的に，非常に密度の高い放射光を生成しようとするときには，その妨げとなる。この電子蓄積リングの持つ限界を打ち破るために，最近では，放射光源用加速器として直線加速器の利用が提唱され始めている[4)]。電子蓄積リングはこれら先端的な光源と相補的な光発生装置として，今後も幅広い分野で利用されていくものと思われる。

参考文献

1）http://pfwww.kek.jp
2）http://www.spring8.or.jp
3）http://www.uvsor.ims.ac.jp/
4）北村英男「第24回ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources」,「放射光」第15巻第4号，61（2002）