

ビーム安定性(2)

中村 剛 財高輝度光科学研究センター 加速器部門 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
E-mail: nakamura@spring8.or.jp

今回は、ビームが自分自身の発する電磁場により自ら不安定になって暴れる現象についての話である。リング中のビームの電流を増やしていくと、ある電流値を境に、ビームが水平方向や垂直方向または、到着時間やエネルギーについてのコヒーレントな振動を始める。このような現象はビーム不安定性と呼ばれており、ビームとそれを取り巻く環境とが相互作用して生じる電磁場が、ビーム自身に跳ね返って不安定にしてしまうために発生する。ビーム不安定性が生じると、ビームがビームダクトの壁にぶつかって失われたり、ビームの見かけ上のサイズ（水平、垂直方向の寸法やパンチ長、エネルギー広がり）が増大して、使い物にならなくなってしまふ。ビーム不安定性が発生する蓄積電流値は、その設計値¹に比べて遥かに低い値であることが多く、対処法を設計の段階で十分に検討しておく必要がある。

以下では、このような現象がなぜ発生するのか、そして、それを抑制するためにどのような手法がつかわれているのかについて解説する。

蓄積リングでは、これまで本シリーズにて解説されてきているように、ビームに対して横方向（水平、垂直方向）へは4極磁石による収束力、縦方向²（到着時間のずれ—エネルギー空間）へは高周波加速による収束力を発生させて、それぞれの方向へのポテンシャルを作り出し、ビームをその平衡点に閉じ込めている。横方向の振動をベータatron振動、縦方向の振動をシンクロtron振動とよぶ。これに加えて大電流のビームでは、ビームが環境と相互作用して生じている電磁場（これをウェーク場³とよぶ）がビームに力を及ぼしている。何らかの影響で、ビームがその平衡点の周りに振動を始めたとしよう（Fig. 1）。

この振動によりビームを取り巻く環境を通じてウェーク場が変動し、ビームに与える力が変動する。この変動がビームの振動をさらに強める場合には正のフィードバックとなる⁴。たとえば水平や垂直方向の振動が発生した場

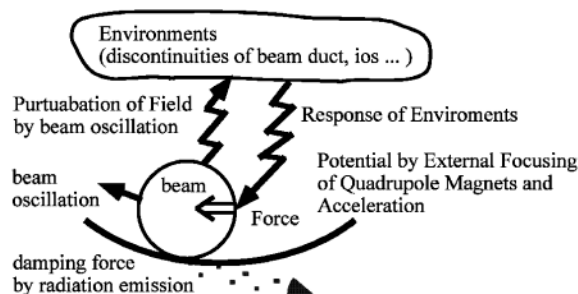


Figure 1. Beam Instability. Field produced by a beam affects itself and form positive feedback loops through the response of its environments.

合、この振動によって生成されるウェーク場は、振動の方向に対する力を発生する。この力がもとの振動を強めるように働くとビームは不安定になる。また、縦方向の振動が発生し、ウェーク場の発生源でのビームの到着時間が前後すると、ウェーク場も到着時間の変動分だけ位相が変動して発生する。ウェーク場がビームを加減速する際に、この位相の変動は加減速についての変動を生じる。この加減速の変動によるエネルギーの変化は、シンクロtron振動により到着時間の変動を引き起こすが、この到着時間の変動が、最初の変動を強め合う場合には不安定となる。

さいわいなことに、電子ビームには放射光を出すことにより生じる振動の減衰機構（放射減衰）⁵があり、この正のフィードバックの成長率がこれを上回らないかぎりビームは安定であるが、ビーム電流が増大すると、正のフィードバックがこの減衰機構に打ち勝ち、振動は成長してビームは不安定となる。この電流が不安定性発生のおしきい値となっている。ただし、ある不安定性⁶では、フィードバックのメカニズム自体にしきい値を生じる機構が内在する場合があります、そのような不安定性では、ビーム電流がそのしきい値を越えない限りフィードバックは成立せず、ビームが

¹ 電流の増大による放射光のパワーの増大と、その照射をうけるビームダクトや吸収体の熱負荷、加速用高周波電力などとの兼ね合いで決まる

² 英語では、横方向の～=transverse、縦方向の～=longitudinal

³ wake field = 航跡場であるが、ビーム後に残すためこのように呼ばれている

⁴ 逆に負のフィードバックとなって振動を減衰してくれる場合もある

⁵ 放射減衰の時定数は数 ms 程度であるが、エネルギーを低くすると放射光の放出が小さくなり、この減衰はエネルギーの3乗に反比例して弱くなるので、低エネルギーにした時にはあまり期待できなくなる

⁶ 例えばシングルパンチ不安定性の一種のモード結合不安定性など

Table 1 放射光リングで現れる主な不安定性の種類と発生源, SPring-8 リングでの発生電流値

		マルチバンチ	シングルバンチ
振動の方向と特性	縦方向 強さ $1/b$	加速空洞の高次モード SPring-8 では観測されていない	バンチ長の増大* >1 mA/bunch で発生 エネルギー広がり† >7 mA/bunch で発生 小さな凹凸（ベローズ, フランジ, 溶接部等）が発生源
	横方向（水平, 垂直） 強さ β/b^3	加速空洞の高次モード >50 mA で発生 壁抵抗（真空封止挿入光源） >50 mA で発生	モード結合不安定性 >4 mA/bunch で発生（両方向） head-tail 不安定性（クロマチシティ >0 で抑制） 凹凸, 壁抵抗が発生源

b はビームダクトの径や挿入光源のギャップを表す

β はウェーク場の源でのベータ関数の値を示す。安定周回時のビームサイズの 2 乗に比例

* Potential-well distortion と呼ばれる静的な現象であり, 正のフィードバックが起こるわけではない

† microwave 不安定性（後述）

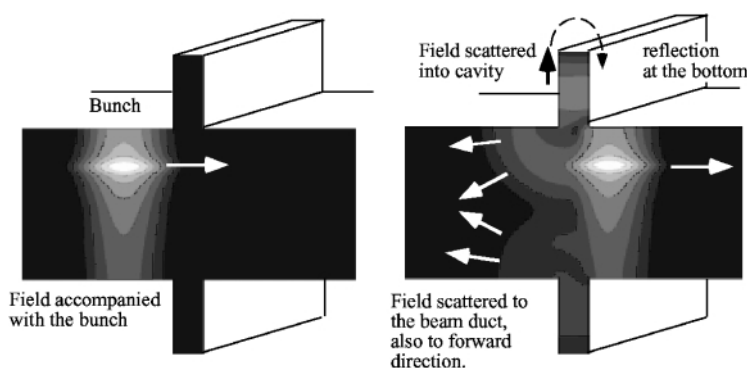


Figure 2. Wake field produced by a bunch passing a small cavity. A field accompanied with the bunch is scattered at the cavity to the beam duct and to the cavity and accelerate/decelerates longitudinally and/or kick transversely the beam.

不安定となることはない。

放射光リングで問題となるビーム不安定性の種類を Table 1 に示す。振動の方向によって, 時間—エネルギー空間での振動が増大する縦方向不安定性, 水平, 垂直方向（横方向）の振動が増大する横方向不安定性に分けられ, また, 多数個のバンチが協力して不安定となるマルチバンチ不安定性, 単一のバンチ内部での振動が増大するシングルバンチ不安定性がある。

ウェーク場の発生

ビームがその環境と相互作用して発生する電磁場として, ビームが走っているビームダクト内面のもつ凹凸や電気抵抗によりビームのもつ電磁場が乱されて発生するもの, ビームダクト内を漂う原子をビームがイオン化することにより生じるイオンの静電場, またイオンの分布がビームの位置変動を感じて変化し, それ生じる新たな電場分布などがある⁷。このうち, 放射光リングにおいて最も深刻なものは前者であり, それについて述べる。

ビームはビームダクト（ビームパイプ）とよばれる真空

ダクトの中を周回している。このときビームダクトにはビームに随伴して電磁場が流れている⁸（Fig. 2）。

ビームダクト内面には凹凸, すなわちフランジや溶接などの接合部, ベローズ, 挿入光源等でのビームダクトの形状変化, 高周波加速空洞など, そして内面の電気抵抗があるが, それらをビームが通過する際にはビームに随伴してきた電磁場が乱されて新たな電磁場=ウェーク場を発生する。ウェーク場はビームに跳ね返ってビームを加減速したり横方向のキックを与えたりする⁹。Fig. 2 のように, ビームが空洞を通過する場合には, ビームの持っていた電磁場は, 一部はビームパイプ内に散乱されたり, 一部は空洞内部に散乱されたりしてウェーク場を発生する。ビームダクトの遮断周波数より高い周波数の成分は, ビームダクト内を拡散していくため, 素早く減衰するが, 空洞内部に散乱されたウェーク場のうち, ビームダクトの遮断周波数より低い低周波の成分は閉じ込められてしまい, 長い時間

⁸ 光速に近いのでビームに付随する電磁場はビームに真横に発生している。光速なのに真横に電磁場があるのは, 電子がここまでやってくるよりだいぶ以前に電子が発生した電磁場がここまで届いているから

⁹ 電子はほぼ光速であるが, ウェーク場はビームをななめに追っかけていくので, ある程度はまでは近づける

⁷ その他, KEKB などの大電流陽電子ビームでは放射光が生成する 2 次電子の雲もある

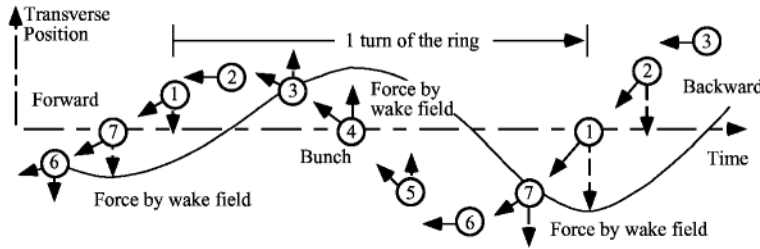


Figure 3. Transverse multi-bunch instability driven by long lifetime wake field. Small circles show bunches. The numbers in the bunches are for identification. A solid line and dashed arrows are the amount of kicks on bunches by wake field. Excitation of the wake field is proportional to shift of the transverse position of a bunch from the axis and the kick arose after 90 degree phase shift.

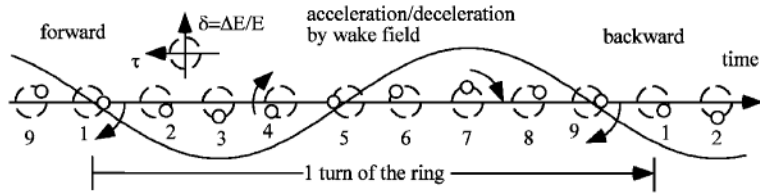


Figure 4. Longitudinal multi-bunch instability driven by long lifetime wake field. Small circles show bunches and dashed circle shows the orbit in a timing-energy phase space of the bunches. The numbers besides the bunches are for identification. A solid line is the acceleration/deceleration of bunches by the wake field. Excitation of the wake field is proportional to the shift of the timing and the acceleration/deceleration arose after 90 degree phase shift. Actual period of the synchrotron motion is hundreds times longer than rotation period of a ring.

にわたって残留することになる。高周波数成分は強いけれどもビームダクト径程度の寿命しか持たないので、シングルバンチ不安定性を引き起こし、閉じ込められた低周波成分は、いくつものバンチにわたって力を及ぼすので、バンチ間の結合を引き起こし、マルチバンチ不安定性を引き起こす。なお、あるウェーク場の発生源において、ウェーク場を発生しているビームを電流、ウェーク場によるビームのエネルギーの変化を電圧と考え、周波数領域で眺めると発生源はインピーダンスとして表されるため、ウェーク場の発生源をインピーダンスとよぶ場合が多い¹⁰。

不安定性の種類

ビーム不安定性には、ビームを構成するバンチが協力して不安定になるマルチバンチ不安定性¹¹と、一つのバンチ内部で振動が発生して不安定となるシングルバンチ不安定性とがある。

マルチバンチ不安定性

マルチバンチ不安定性は多数個のバンチがウェーク場を通して結合し、協力して不安定となる現象である。あるバンチが振動してウェーク場の変動を発生したとする。このウェーク場は、後続のバンチの振動を励起し、この振動はより新たなウェーク場を発生する。これが回り回って最初のバンチの振動を励起するように働く正のフィードバック

グループが閉じてビームは不安定となる。**Fig. 3**に横方向のマルチバンチ不安定性、**Fig. 4**に縦方向のマルチバンチ不安定性を示す。

バンチがウェーク場を通して強く結合するためには、あるバンチの発生したウェーク場は後続のバンチがやってくるまで持続している必要がある。放射光リングにおいて問題となるのは、高周波加速空洞の高次モードによる縦方向や横方向不安定性と、真空封止型挿入光源の抵抗壁による横方向不安定性である。

高周波加速空洞の高次モード¹²

高周波加速空洞は高周波を蓄積して大きな加速電界を発生する装置である。加速空洞はビームダクトの遮断周波数¹³より低い周波数の多くの電磁場固有共振モード¹⁴を持っており、これらは長く持続するウェーク場の発生源となって、バンチ間の結合を引き起こす。**Fig. 5**では、横方向の不安定性を引き起こす共振モードの一つであるTM110モードの、中心軸からずれたバンチによる励起とそれにより後続のバンチが受ける横方向の力を示している。

真空封止型挿入光源の抵抗壁

真空封止型挿入光源は、電気抵抗が大きく、かつ、非常に狭いギャップでの運転となるため、垂直、水平方向に強

¹⁰ 不安定性の解析は、昔から周波数領域で行われてきた経緯がある

¹¹ バンチ結合不安定性 (coupled-bunch instability) とも呼ばれる

¹² HOM (Higher Order Mode) とも呼ばれる

¹³ 例えば半径50 mm では TE 波で1.76 GHz, TM 波で2.3 GHz

¹⁴ 通常、基本モードは加速に用いており制御可能であるが、問題となるのは高次モードである

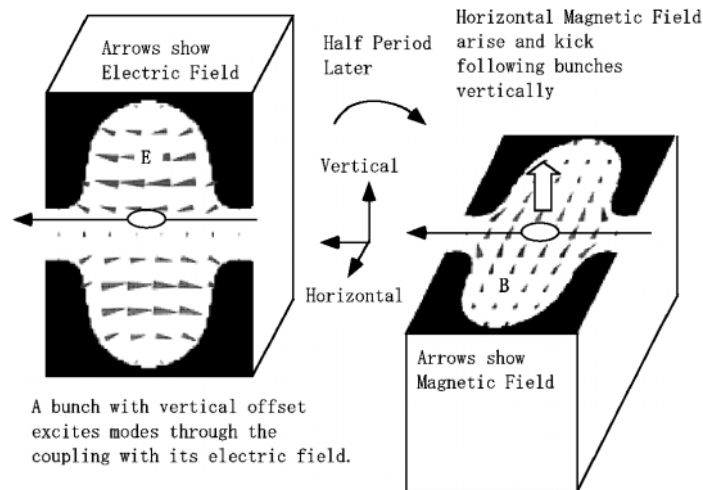


Figure 5. An example of a higher order mode, TM110, one of the dangerous transverse wake source. A bunch with upward offset excites the mode with being decelerated by its electric field (left). After half period of the mode, horizontal magnetic field arose and kick following beam vertically (right).

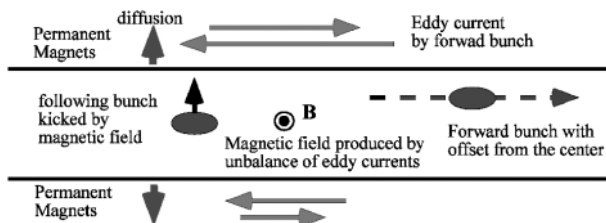


Figure 6. Wake field produced by resistive-wall. A bunch with upward offset produces the un-balance of the eddy-current in the upper and lower wall. Resulting horizontal magnetic field kick vertically following beam.

いウェーク場を引き起こし、横方向ビーム不安定性を引き起こすことがある¹⁾。この型の挿入光源は、ビームを蛇行させるための磁石を真空中に置いているが、この磁石はアルミなどの通常のビームダクトの材質に比べて2桁ほど電気抵抗が高いため、ビームが通過する際にビーム側の表面に発生した壁電流が渦電流となって残留し磁石内部にしみ込んでゆく (Fig. 6)。この渦電流はビームに平行に流れるため、ビーム軸上に横方向磁場を生じ、ビームを横方向に蹴る。ビームが挿入光源の中心軸を通過しているなら、上下に流れる渦電流による力は打ち消し合うが、軸を上下にずれて通過すると、発生する渦電流のバランスが崩れて上下方向に後続のビーム(バンチ)を蹴ることになる。この渦電流の効果は、周波数が低いほど大きくなるので、低周波の領域で不安定性が発生する。この効果を和らげるため、SPring-8では数十ミクロン厚の金属シートが磁石表面にかぶせられているが²⁾、低周波のため表皮厚が数百ミクロンになってしまうので、渦電流の発生をすべて押さえることができていないわけではない。

また、全周のビームダクトの材質にステンレスを用いた場合にも、アルミや銅に比べて電気抵抗の大きい同様の

の現象が起こりやすくなるので、注意が必要である。

シングルバンチ不安定性

バンチの前方の振動が発生するウェーク場がバンチの後方の振動を励起し、これがシンクロトロン振動により前後が入れ替わった後も、その振動を励起し合う場合に発生する不安定性である (Fig. 7)。

横方向の不安定性ではバンチの後方に励起される振動は、バンチ前方部の振動に比べて90度遅れているため、ある程度の電流値までであれば前後が入れ替わることにより、振動の成長が押さえられる。しかし、クロマチシティ(色収差)¹⁵⁾があると、バンチの前後が入れ替わる際にこの位相が90度からずれる¹⁶⁾。この効果によりクロマチシティが正の場合には、バンチの重心の運動は、ウェーク場により減衰させられることがわかっている。これはhead-tail減衰と呼ばれている。逆にクロマチシティが負の場合には、励起されることになり、head-tail不安定性となる。このため、通常の放射光リングでは、クロマチシティは正で運転されている¹⁷⁾。また、振動の励起の強さ=バンチ電流がある値を越えた場合には、前後の入れ替わりを繰り返しているうちに振動が増大する現象が生じ、モード結合不安定性(mode-coupling)と呼ばれている。これは不安定性のメカニズム自体にきい値が存在する不安定性である。

また、縦方向では、バンチ内部のさざ波のような電荷密

¹⁵⁾ 電子のエネルギーがずれた際に、ベータトロン振動の周波数がそれに応じてずれる場合の比例定数

¹⁶⁾ 前後が入れ替わる際にはエネルギーがずれるが、このズレとクロマチシティにより、ベータトロン振動の早さが変わり、位相のズレを生じる

¹⁷⁾ このとき、バンチの前方部と後方部の相対位置の振動は励起されるが、成長率が小さいのであまり問題とならない

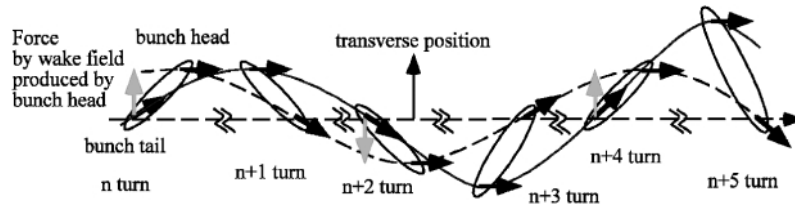


Figure 7. Snapshot of transverse motion of a single-bunch. Dashed line is the trajectory of the head of the bunch and solid line shows that of the tail. Wake field produced by the head of the bunch kicks the tail of the bunch. Because the head and the tail change the position after half-period of the synchrotron motion, the growth of instabilities does not happen in such a way. Even wake field of short lifetime can contribute this mechanism.

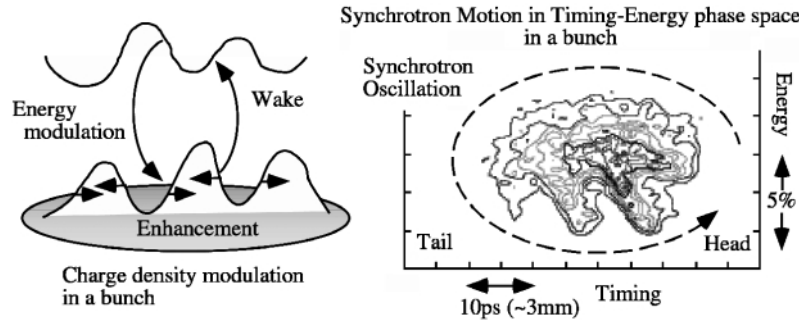


Figure 8. Microwave instability. Charge density modulation produces wake field and accelerate/decelerate electrons. The resulting energy modulation enhances the density modulation through synchrotron motion. The left is the result of a simulation using calculated wake field for the SPring-8 storage ring.

度の変調が、それに応じたウェーク場を発生して、さざ波中の電子を加減速し、さざ波をさらに成長させる不安定性がある (Fig. 8)。生じたさざ波が強い電磁場¹⁸を発生するので、microwave 不安定性¹⁹と呼ばれており、シンクロトロン振動の周期より早く成長する不安定性である。これが起こると、バンチのエネルギーが広がり、またその分、バンチ長も広がる。また、バンチ長より小さな凹凸が発生するウェーク場は、バンチ長のスケールで見ると、バンチの前方部を減速し、後方部を加速するようなものであるが、これは加速空洞による加速電界を打ち消す方向である。そのため、バンチ電流がある程度以上となると、バンチ長が長くなっていく (Potential-well distortion)。

このような、シングルバンチ内部で生じる現象は、寿命が短いウェーク場でも生じるが、そのようなウェーク場は、加速空洞や電気抵抗に加えて、ビームダクト内面の小さな凹凸でも発生する。

さらにシングルバンチでの大電流蓄積では不安定性以外にも、ピーク電流の増大に伴っての発熱や高電界の発生が問題となるが、これらは機器の損傷にもつながるため注意が必要である。

ビーム不安定性の抑制

¹⁸ 一種のコヒーレント放射光

¹⁹ 最近のリングでは凹凸が mm 程度なので、発生する波長も mm 程度である。適切なウェーク場を導入してワザと引き起こせばサブミリ波を発生できて使えるかもしれない。

不安定性の抑制には、その原因となる環境の応答を変えて成長率を押さえ込む方法、ビームを形成する電子のベータatron振動やシンクロトロン振動にばらつきを持たせ、ビームの重心振動を早く減衰させて不安定性の成長に打ち勝つ方法、ビームの振動を測定し、それに応じて外力を加えて能動的に振動を減衰させるフィードバックを用いる方法などがあり、それぞれを組み合わせると不安定性を抑制している。

ビームダクト径を大きくとる

ビームのエネルギー変動を引き起こすウェーク場の強さは、ビームダクトの大きさに反比例し、横方向のキックを引き起こすウェーク場の強さは、ビームダクトの大きさの3乗に反比例する。このため、ビームダクトの大きさを大きくとれば不安定性の問題は小さくなるが、大きな磁石や電源が必要であり、また高周波加速空洞の効率が下がるので、必要な高周波パワーや空洞の数が増えてしまう。すなわちコストがかかることになる。また、挿入光源部は小さなギャップとせざるを得ない。なお、加速空洞等の横方向のウェーク場の強い発生源は、ベータ関数の値の小さなおとりに設置するとビームへのキックの影響が小さくなって影響を低減できる。

凹凸の抑制

最近のリングではフランジやベローズなどの可動部に生じる凹凸を、ビームの進行方向に延びるフィンガーをすだれのように何本も橋渡しすることにより遮蔽しているが、

フィンガーのそり²⁰や、取り付けのための段差が残り、凹凸をmm以下とすることは難しい²¹。一つの凹凸の発生するウェーク場は小さくとも、凹凸が大量にあるので、すべてからの寄与はかなり大きなものとなってしまう、不安定性の原因となりうる。横方向不安定性は後述する方法での抑制が可能であるが、microwave不安定性やPotential-well distortionによるバンチ長の増大は、それを抑制する手法がまだないので²²、大電流で短いバンチを得るためにはいまのところは設計段階から凹凸の減少方法やビームパイプ径のサイズをつめていく必要がある。

加速空洞の工夫

加速空洞の高次モードが発生する不安定性は、高次モードの共鳴幅が狭い=減衰が遅いモードほど強い不安定性を引き起こす。一方、ビームはベータatron振動やシンクロtron振動は狭い周波数でしか振動することができない。そこで、この共鳴幅が狭いことを逆に利用して、高次モードの周波数を、ビームが応答することのない周波数へとずらすことにより²³不安定性を起こさないようにすることができる。これには空洞の温度調整や加速モードとは独立に制御することのできる高次モードチューナーをもちいる。初期のKEK-PFやSPring-8ではこの方法が採用された³。また、現在のKEK-PFやNewSUBARUでは高次モードを外に吸い出すための導波管を空洞に取り付け、高次モードが発生しても中に残留しない工夫を行った空洞(dumped cavity)⁴を用いている。

クロマティシティを大きくする

クロマティシティ(色収差)はビームのベータatron振動の周波数が電子のエネルギーのズレによりどのように変化するかを示すパラメータである。これを0でない値とすれば、ビームはもともとエネルギー広がりを持っていて電子はその広がり程度の振幅でエネルギー振動を行っているので、これとクロマティシティが結合してベータatron周波数を変調し、非線形振動を行うようになる。これによってある程度は横方向の不安定性を弱めることができる⁵。SPring-8では、クロマティシティを大きい値とすることにより横方向不安定性を抑制していたが、非線形振動に伴う入射ビームの損失や寿命の問題を抱えていた。

ビームの振動数の広がり導入

ビームを構成する電子やバンチが横方向や縦方向のポテンシャル中の運動においてそれぞれ異なる振動数で振動すれば、電子やバンチの位相はバラバラになり、ビームの

コヒーレントな振動は消失する²⁴。

横方向では、ビームサイズが大ききなリングであれば、8極磁石などの非線形磁場を用いてベータatron振動数に振幅依存性を持たせ、電子がそのビームサイズ程度の振幅の広がりを持っていることを利用してベータatron振動数に広がりを持たせることができるが、ビームサイズの極小を狙った低エミッタンスリングでは、これを行うには強い非線形磁場を持ち込む必要があり、入射効率や寿命などの悪化をもたらすので用いることは困難である。そこで、SPring-8ではシンクロtron周波数でクロマティシティを変調する手法を考案し⁶、NewSUBARUリングにおいて実験を行う計画である。

また、縦方向のマルチバンチ不安定性では、バンチ毎にシンクロtron振動を変えて不安定性を抑制している。加速空洞には外部の高周波源から加速電磁場のエネルギーが供給されており、一方、バンチが通過する際には、バンチが空洞内部にある加速電磁場からエネルギーを奪う²⁵。リング内のバンチの分布に、ギャップを作り、バンチがない部分を作ると、その部分では、高周波源からエネルギーだけが供給されるので、加速電界が徐々に強くなる。一方、バンチがある部分では、逆にバンチがエネルギーを奪うので、加速電界は徐々に弱くなる。この効果によりバンチごとに加速電圧振幅を変えることができ、シンクロtron振動の振動数をずらすことができる。実際にESRFでは、この方法で縦方向マルチバンチ不安定性を抑制している⁷。SPring-8でも、大電流運転が必要となった場合にはこの方法を用いることになるであろう。

フィードバック

SPring-8では横方向について、バンチごとに位置を測定し、それに応じてバンチ毎にキックを与えて振動を減衰させる bunch-by-bunch フィードバックを開発し、利用運転に用いている (Fig. 9)⁸。これにより従来では横方向不安定性の抑制に必要であった大きなクロマティシティを小さくでき、柔軟な運転が可能となった。SPring-8の装置では、位置の測定時のノイズがフィードバックを励起してビームの残留振動を引き起こす現象を解析し、それを押

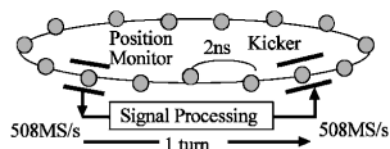


Figure 9. Transverse bunch-by-bunch feedback system.

²⁰ 接触圧を持たせるため、フィンガーにバネ性を持たせなければならないのでわざとつける

²¹ フィンガー間のビーム進行方向にそった狭い隙間はさほど問題とはならない。

²² これらが抑制できる手法があればビーム冷却も可能かもしれない

²³ ビームが振動しても高次モードの周波数がビーム振動の周波数からずれていて応答できないともいえる

²⁴ 加速器ではランダウ減衰と呼ばれているが、プラズマ物理では「ランダウ減衰=振動数の広がり+それによるビームの電磁波からのエネルギーの吸収」だが、不安定性では後半部がないので…

²⁵ ビームローディングと呼ばれる

さえ込むためにモニタを含めた低ノイズ-高精度のシステムを開発した点ならびに高速のデジタル信号処理にFPGAを用いている点が特徴であり、10 μm 程度のサイズのビームでも問題なく運転することができている。

このように、ビーム不安定性の抑制は、ビームが相互作用する対象となりうるもの、すなわちビームダクトを含めた真空系、高周波加速空洞、真空封止型挿入光源などについて設計時から検討する必要がある、場合によってはフィードバックやクロマチシティの変調等の不安定性除去装置を準備しておく必要がある。最近はこれら不安定性除去装置の発展により、放射光リング程度の電流であればマルチバンチ不安定性はかなり抑制されているので、これからの蓄積リングの設計での自由度は広がっている。

ビーム不安定性についてのより深い議論については、テキスト⁹⁾を参照いただきたい。また、定量的な議論については電磁場解析プログラムを用いたウェーク場の計算やそれをもとにしたシミュレーションが行われているが、それらについておよび、本記事中のいくつかのトピックスについては、¹⁰⁾のweb ページを参照いただきたい。

参考文献

- 1) T. Nakamura, et al.: "Resistive-Wall Coupled-Bunch Instability Driven by In-Vacuum Insertion Devices in the SPring-8 Storage Ring", Proc. of 2001 Particle Acc. Conf., p. 1969.
- 2) T. Hara, et al.: *J. Synchrotron Rad.* **5**, 403 (1998).
- 3) H. Ego, et al.: *J. Synchrotron Rad.* **5**, 379 (1998).
- 4) M. Izawa, et al.: *J. Synchrotron Rad.* **5**, 369 (1998).
- 5) T. Nakamura, et al.: "Chromaticity for Energy Spread Measurement and for Cure of Transverse Multi-Bunch Instability in the SPring-8 Storage Ring", Proc. of 2001 Particle Acc. Conf., p. 1972.
- 6) T. Nakamura: "Cure of Transverse Instabilities by Chromaticity Modulation", Proc. of 1995 Particle Acc. Conf., p. 3100.
- 7) O. Naumann and J. Jacob: "Landau Damping of Longitudinal Instabilities for the Operation of the ESRF Storage Ring", Proc. of the 6th European Part. Acc. Conf., Stockholm, June 1998.
- 8) 中村 剛, 他: "SPring-8 におけるアナログ分配, FPGA を用いた横方向 bunch-by-bunch フィードバックの開発", 新領域 (ビーム物理), 日本物理学会第59回年次大会 (2004).
- 9) A. Chao: "Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators", Wiley.
- 10) <http://acc-web.spring8.or.jp/~nakamura>