

はじめに

この講義では、電子蓄積リングでの、電子軌道の変動とその安定化についてお話しします。加速器内のビームを安定に回すことは、加速器科学の大きな目標の一つであって、粒子加速器内でのビーム不安定一般に関しては、古くから議論されて来ています。さらには、このビームの不安定を安定化するための装置も、様々に開発されています。一方電子蓄積リングが、そこから発生する放射光を利用するために利用され始めると、新たな問題が起こってきました。そこでこの講義では、ビーム変動とその安定化の問題を考えるに際して、電子蓄積リングを、放射光光源として使用する時に重要となる問題点を中心に、説明したいと思います。

放射光ユーザーにとって、蓄積リングの「安定化」と言っても、多様な意味を持っています。例えば、真空度やビーム寿命など、運転性能パラメータ値の向上による「運転の安定」を意味することもあります。この講義ではその中の、ビーム自体の運動・ダイナミクスという面での安定化を考えます。さらに、ビーム自体の運動といっても、その時間的スケールは非常に広いレンジにわたっていますので、この講義ではそのうち、秒～年のオーダーのものだけを取り扱い、RF空洞に起因するような速い動きは別の講義で取り扱われる予定です。。

まず第1章で、放射光光源用加速器に於ける軌道安定化の必要性を、光源の高輝度化と関連づけて述べます。続いて、軌道変動の具体的な例について、筆者が実際に経験したPFリングでの実例をもとに第2章で述べ、その安定化の一般的な議論がそれに続いています。最後に、第4章ではビーム安定化の装置の例として、二種類のフィードバック・システムについて、少し詳しく説明します。以下の講義では、電子と陽電子との区別に関して、内容的には差がないので、以後一括して「電子」と呼ぶことにします。

また、講義の内容は筆者が見聞きしたものに限られており、抜け落ちていた点も多いことを、あらかじめお断りしておきます。説明にあたっては、なるべく皆さんが頭の中で、軌道変動及びその安定化の具体的なイメージを描けるように、努力するつもりですが、果たしてうまくい

くでしょうか。

1. 何故「軌道の安定化」が必要なのか

1-1. 放射光用光源としてのストレージリングの特徴

放射光は、蓄積リング内を周回する電子から放射されています。一般に、荷電粒子が加速度運動をする時、その進行方向に強く集中して放射される連続スペクトルの光が、放射光と呼ばれるものです。これを逆に、光を受ける側から見れば、放射光は、磁場の中を周回している電子自体から放射されて来るわけです。従って、真空ダクトの中を、個々の電子が磁場からの力を受けながら動いている軌跡そのものが、放射光の光源となる訳です。これは、X線管のように、机の上に置いておけば不動（であろう）と考えられる場合とは、状況が違います。電子がたどる軌道が、なんらかの原因で変動すれば、放射光の光源もまた変動してしまうのです。放射光を光源として実験に使用する場合に、光源自体に動かれては実験が出来なくなります。つまりこれらの実験では、光源が安定している事が必要であり、その為には電子軌道が安定している事が必要となってくるのです。大雑把に言って、これが「軌道の安定化」が必要な理由です。

ここで、軌道の動き方には二種類が考えられます。一つは、軌道の「位置」が動くもの、もう一つは、軌道の「傾き」が変わるものです。光源から L だけ離れた場所での光軸の位置 Y は、光源の位置 x とその傾き x' を使って表わすと、

$$Y = x + L \cdot x' \quad (1.1)$$

のように書けます。ここで、光源点に位置変化 Δx のみがある場合 ($\Delta x \neq 0$, $\Delta x' = 0$) は、 $\Delta Y = \Delta x$ ですが、傾きの変動があると ($\Delta x' \neq 0$)、光軸の変動量は

$$\Delta Y = \Delta x + L \cdot \Delta x' \quad (1.2 a)$$

$$\Delta Y' = \Delta x' \quad (1.2 b)$$

と表わせます。傾きの変動が実験者へ与える影響は、 $\Delta Y'$ の変動よりも、 ΔY の変動をとおしてやってきます。つまり、光源からの距離 (L) が長くなればなるほど、光源での微小変動は拡大されることになります。例えば、 $\Delta x = 20 \mu\text{m}$ で $\Delta x' = 20 \mu\text{rad}$ とすると、光源から 30 m 地点での光軸の変動量は、

$$\begin{aligned} \Delta P &= 20 \mu\text{m} + 30 \text{m} \cdot 20 \mu\text{rad} \\ &= 620 \mu\text{m} \end{aligned}$$

にもなります。ここから、軌道の位置変動を抑えるだけでなく、その角度変動の抑制も重要である事がわかります。このような光軸の変動は、それぞれのビームラインの構成にも依りますが、一般的には、光量の減少をもたらします。光量の変化は、光ビームのサイズにガウス型を仮定しますと、

$$\Delta I / I = 1 - \exp(-(\Delta y)^2 / 2(\sigma_y)^2) \quad (1.3)$$

となり、光軸がそのビームサイズの σ (標準偏差) 分だけ動いたとすると ($\Delta y / \sigma_y = 1$)、

$$\Delta I / I \sim 0.4$$

となり、強度は 4 割も変動することになります。光軸の変動を実験者のスリット上で、この値以下に抑えるためには、(1) 式から見て、電子ビームの変動 (Δx 、 $\Delta x'$) に対する制限は、厳しいものになります。

このように、光源としてのストレージリングは、そのビーム軌道自体が光源であるという特性から、軌道の安定化が特に重要になるのです。

1-2. 光源の高輝度化に向けて

現在建設中であるか、或いは稼働を開始した、いわゆる第三世代の放射光専用蓄積リングでは、放射光ビームの輝度の更なる向上をめざしています。これは放射光ビームのスポットを小さくすること、すなわち電子ビームの低エミッタンス化を図ることで達成されています。比較的ゆっくりした電子軌道の変動が、上で述べたような放射光光軸の位置変動をもたらすのに加えて、

軌道変動が速い場合には「実効的な」ビームサイズを増大させます。これは「実質的な」エミッタンスの増大をもたらすので、せっかく高輝度化しても十分に活かされないことになります。(図 1.1)

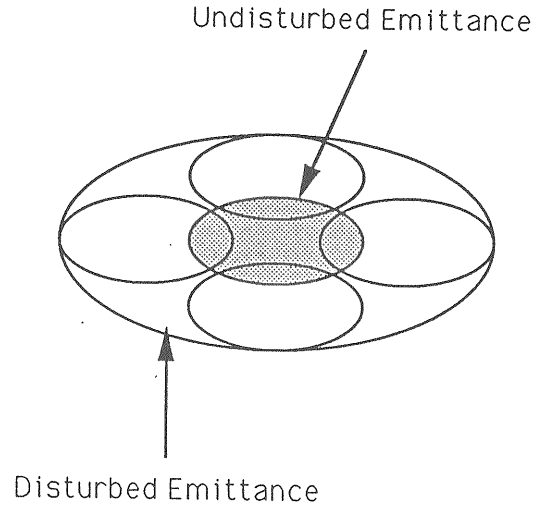


図 1.1 実質的なエミッタンスの増大

本来のエミッタンスを

$$\epsilon^2 = \langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle \quad (1.4)$$

とすると、ビーム変動の結果このエミッタンスは、

$$\overline{\epsilon}^2 = \langle \overline{x^2} \rangle \langle \overline{x'^2} \rangle \quad (1.5)$$

と増大します。ここで、 \overline{x} と $\overline{x'}$ はビーム変動がある時の位置と傾きです。この時エミッタンスの増大は、

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \frac{\langle \Delta x^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle} \quad (1.6)$$

と見積られます。放射光用蓄積リングの設計輝度を、この増大したエミッタンスで除したものは、その総合性能を評価する際の一つの指標となるのではないのでしょうか。

高輝度化・低エミッタンスリングでは、一般的にビーム・オプティクス設計上、収束力を非常に強くしてあるので、四重極電磁石本体の

位置変動に起因する電子ビームの変動が大きくなっています。さらに、この軌道が変化した電子ビームが、四重極磁石から受ける影響も又大きくなっており、こういった、外乱に対する「敏感さ」の増大が、第三世代リングの特徴となっています。この特徴が、安定性の問題に対する真剣な取り組みをうながして来たのです。

2. 軌道変動の例

2-1. 変動のモニター類

軌道変動をモニターする手段としては、主に二つのモニターを用いました。一つは電子ビームの位置モニター（BPM）で、これはPFリングの周上の46箇所に設置されており、電子ビームによって6つのボタン型の電極に誘起される信号を使って、その垂直・水平方向の位置を測定するものです。（図2.1）6つの電極からの電圧信号（ V_1, V_2, \dots, V_6 ）と、水平・垂直方向の電子軌道の位置（ X, Y ）とは次のような関係にあります。

$$X = S_x \cdot \frac{(V_3 + V_4) - (V_1 + V_6)}{(V_3 + V_4) + (V_1 + V_6)} + X_c \quad (2.1)$$

$$Y = S_y \cdot \frac{V_2 - V_5}{V_2 + V_5} + Y_c \quad (2.2)$$

ここで、 X_c と Y_c は、BPMの電気的中心と機械的中心との差であり、 S_x と S_y は、B

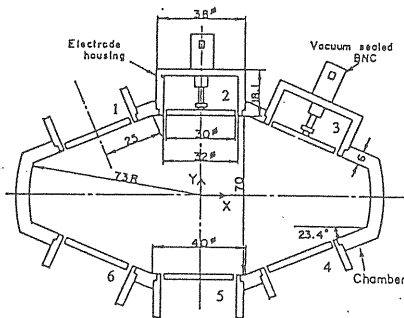


図2.1 ビーム位置モニター

PMの位置測定感度で、ほぼ $S_x \sim 20 \text{ mm}$ 、 $S_y \sim 18 \text{ mm}$ といった値をとります。

しかし、すべての電極からの信号をRF同軸スイッチにより切り替えて計測する為、一回の測定に30秒程が必要で、その間の電子軌道の平均値といったものが得られることとなります。また計測システム全体の位置測定の精度は、トータルで約 $10 \mu\text{m}$ です。

二つめのモニターは、放射光の光軸の位置を計測するモニターです。PFでは、1985年にビームモニタリング専用のビームライン21番（BL-21）が建設され、そこにワイヤー型のVUV用光位置モニターとX線用イオンチェンバー型位置モニターが設置されました。ワイヤー型のモニターは、水平に張られた上下2本のタングステン・ワイヤーから、光電効果によって放出される微少電流の割合によって、光軸の垂直方向の位置を計測するものです。（図2.2）また、イオンチェンバー型のモニターは、放射光によるガスのイオン電流を、上下二つの三角形に分割された陰極に集めて、その上下の出力の割合から垂直方向の位置を求めるものです。上下のワイヤー或いは電極からの信号（それぞれ U, D とする）と、光ビームの重心の位置 Y_p は、次式で表わされます。

$$Y_p = k \cdot \frac{U - D}{U + D} \quad (2.3)$$

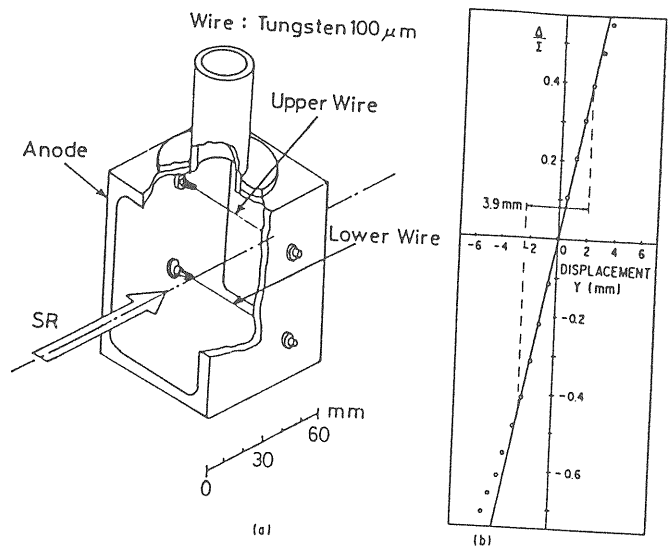


図2.2 ワイヤー・モニターの構造と直線性

ここでkは、モニター固有の比例係数であって、図2.2にその様子が示されていますが、通常はモニターの中心付近の直線性の良いところで使用します。

これらの光モニターの詳細については、他の講義が予定されています。

2-2. 「秒」～「年」のオーダーでの軌道変動の例

これまでのPFリングでの運転に於いて、様々な軌道変動（ビーム不安定）が発見されてきました。バンチを成して周回している電子ビームの不安定な動きには、バンチ内での振動のような速いものから、季節の温度変化による非常に

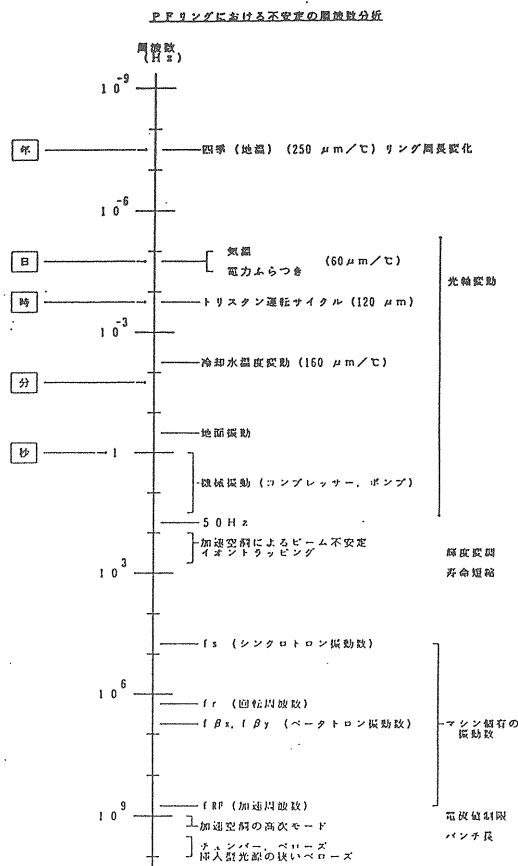


図2.3 周波数による不安定な分類

ゆっくりしたものまで、多岐にわたっています。これらの変動（不安定）を、その特徴的な周波数で分類してみると図2.3のようになります。

この図からもわかるように、放射光用リングでの不安定と一口に言っても、その領域は非常に広く、周波数で言って18ケタにも及んでいます。はじめにも述べたように、この講義では数十Hz以下の、周回するビームの重心が平均的に行なう変動（軌道変動）を取扱い、それよりも速い不安定は、別の講義で取扱われます。

(a) 「秒」のオーダーの動き

放射光用の位置モニターがBL-21に設置され、光軸の位置変動がリアルタイムで観測できるようになるとすぐに、チャートレコーダーによる位置変動の記録が始まりました。しかし、数Hz以上の動きはチャートレコーダーでは記録できないので、モニターからの信号を、直接FFTアナライザーで周波数分析し、その周波数成分を調べました。（図2.4）この図はワイヤーモニターからの信号のものです。他のモニターでもほぼ同様の結果が得られています。

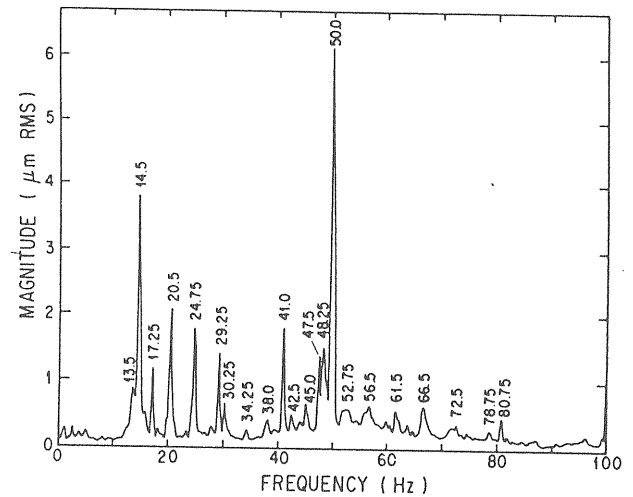


図2.4 垂直方向ビーム位置のノイズ・スペクトル

光軸変動の周波数成分のうち目につくものはほとんど、DCから100Hzの間に分布していて、これより高い周波数領域には特に目立つ成分はありません。50Hzの成分は、電源周りのノイズが混入したものと思われます。図2.

4の中で周波数が特定されている各成分が何に起因するものかは、後に明らかになったのですが、その周波数から見て何かの振動が原因であろうと想像されました。つまり、そういった振動が、PFリングの四重極電磁石に伝わって、ビームの感じる磁場の振動(磁場誤差)となり、最終的に放射光ビームの振動となって観測されているものと類推されました。

1987年の2月に、この推測を間接的に証明する事件が発生しました。PFリングでは放射光の輝度を高めるために、リング・オプティクスを変更して、エミッタンスの低減化を行いました(430 nm·rad → 130 nm·rad)。この改造では、4台の四重極電磁石を追加し、四重極電磁石の電源の増強を行いました。この結果、四重極電磁石の磁場勾配が大きくなると共に、四重極電磁石の位置でのベータatron関数が大きくなりました。

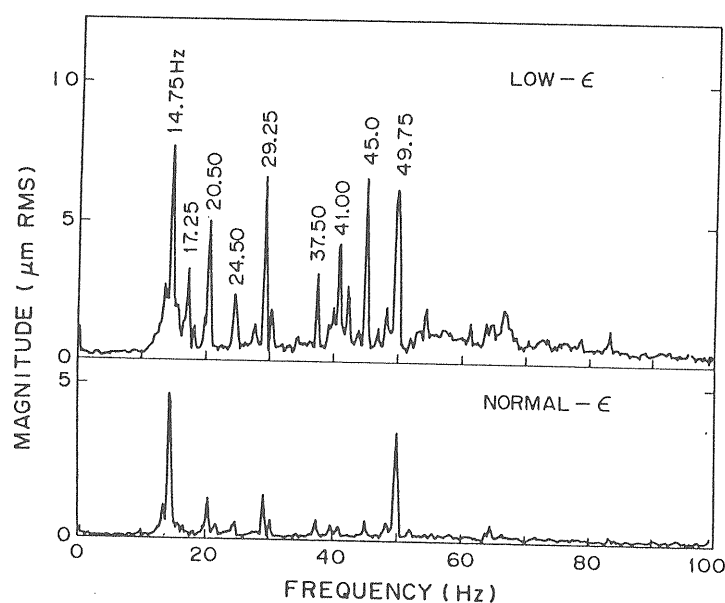


図2.5 低エミッタンス化前後での、ビームノイズ強度の比較

この低エミッタンス化の後に、ビーム変動のノイズ成分はどうなったでしょうか。図2.5から明らかなように、各成分は2~3倍大きくなっています。これは四重極電磁石自体の振動量は変わっていないのに、低エミッタンス化へのオプティクス変更により、大きなビーム変動となってあらわれたものと思われる。このオーダーの変動は、実験者から見ると光が「またたいて」

いるように見え、実質的な輝度の減少を引き起こします。

(b) 「分」のオーダーの動き

PFリングの低エミッタンス化によって、放射光の輝度は約10倍になりました。しかしこの輝度向上のメリットを小さくしてしまうようなビーム変動が、次々と見つかりました。それらをまとめたのが図2.6です。この図の中のBで示された光軸の動きを見ると、そこに或る構造が有ることがわかります。これは周期約15分の変動で、リングの電磁石や真空チェンバーを冷却している冷却水の温度変化と関連していました。

PFリングの冷却水システムには、二台の冷却ファンがあり、一台は常に動いているのですが、二番目のファンは冷却水の温度が25℃まで上昇すると動き始め、ほぼ2分後に24℃まで下がると止るようになっていました。つまり、冷却水の温度は、24~25℃の1℃以内に制御はされているのですが、その範囲内での温度変化が光軸を動かしていたのです。図中の「b₁」点で、冷却水の温度が25℃に達して冷却ファンが始動し、「b₂」点で24℃となり冷却ファンが止っていたのです。

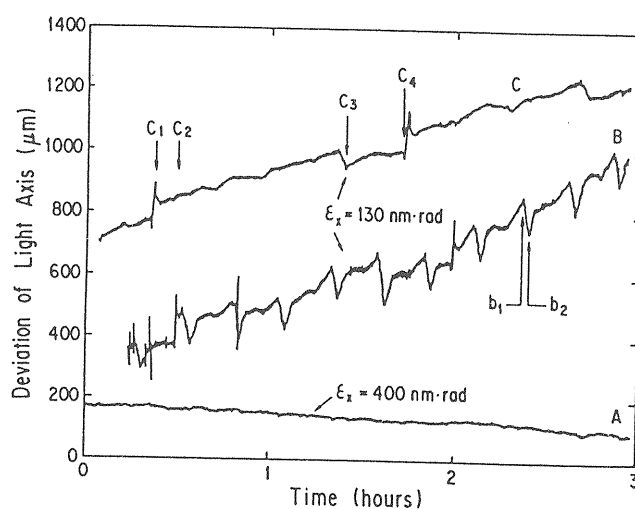


図2.6 光軸の垂直方向の動きの例

(c) 「時」のオーダーの動き

この冷却ファンを止めてみると、図2.6中の

Cのような動きが現われてきました。この、ほぼ1時間ごとに現われる光軸変動は、PFリングに隣接しているトリスタン・メインリング (MR) の運転と関連している事がすぐにわかりました。

MRの電磁石の電源ケーブルには、漏れ磁場を打ち消すリターン・ワインディングが無く、このためMRの加減速中に、PFリング全体に余分な磁場が発生し、誤差磁場となって光軸を動かしていました。この漏洩磁場は、平均するとPFリングに於いて水平方向に約20 mGaussに達しました。

図2.6のCにおける動きは、 c_1 点(0 GeV)から c_2 点(6 GeV)に加速して、トリスタン・アキュムレーションリング (AR) からの入射を行ない、更に実験エネルギーまで加速をおこなって c_3 点(25 GeV)に達し、実験が終了すると次の入射にそなえて、磁気履歴を消すために40 GeVまで加速してから(c_4 点)、再び0 GeVに戻ります。

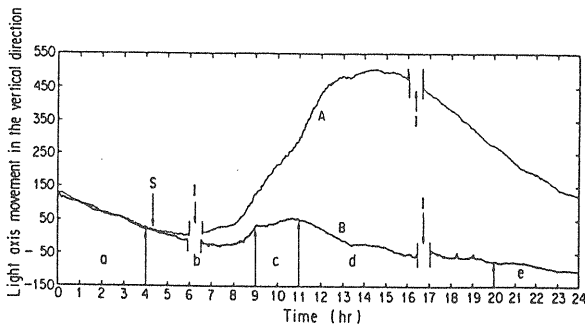


図2.7 光軸の垂直方向位置の1日の変化

(d) 「日」のオーダーの動き

冷却水温の変動やMRの加減速による光軸の変動は、図2.6からもわかるように、 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ (光源点から12 m地点)にも及んでいます。この動きだけでも実験者には大きな影響ですが、更に大変な動きが現われたのです。図2.6のAは、低エミッタンス化する以前の光軸の動きの典型的なものです。これに対しBとCは、低エミッタンス化後の動きであって、「分」や「時」のオーダーの動きを取り除いてもまだ残る「右上がり」の動きが見られます。この動きを1日に互って示したのが、図2.7です。

光軸は垂直方向に、一日の間にサインカーブのような動きをしています。この動きは、最大2 mm (光源から12 m地点)にも及び、実験者は光軸を見失い実験が出来なくなりました。この「日較差変動」に関してまず判ったことは、ビームラインでの光軸の動きが、PFリング中の電子ビーム軌道の変動からもたらされている事でした。図2.8 aには、日の出から8時間の間の垂直方向の電子軌道16本が重ねて書いてあります。これを見ると、PFリング内の特定の部分の軌道の変動が大きく、一方では「節」となって、ほとんど変動していない場所もある事がわかります。この軌道変動の、一日の変動分だけを取り出してみると、図2.8 bのような形になります。これが、日較差変動の変動パターンと言えるものです。PFリング内の電子軌道の位置情報から、(1.1)式を使ってビームラインでの光軸の変動量を求めた値と、実際に観測された光軸の変動量とは、誤差の範囲内で一致しています。

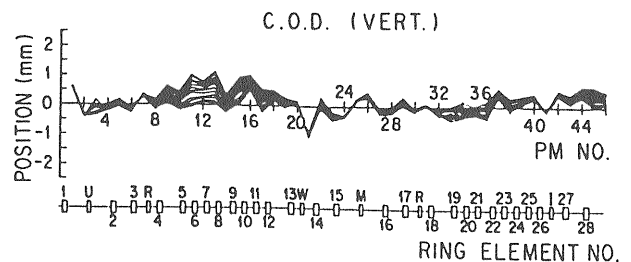


図2.8 a 垂直方向の電子ビーム軌道の変動

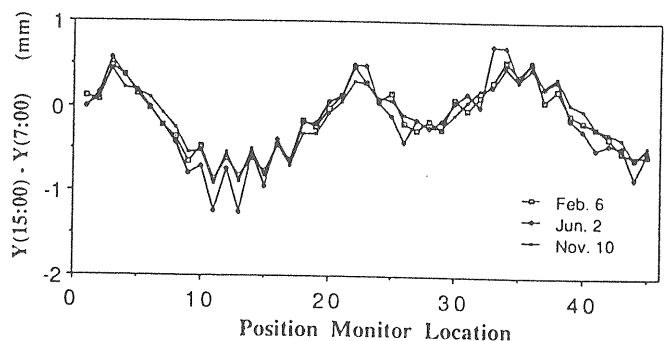


図2.8 b 日較差変動の変動パターン

次にこの日較差が、外気温や天候など建物の外側の気象条件に、大きく依存して変化するこ

とが判りました。例えば図2.7には、1988年6月23日(図中のA)と24日(同じくB)の光軸の動きが示してあります。23日は晴天で、光軸の動きは2.5mmにも及びましたが、一転して24日は、朝のうち曇っていた上に11時頃から雨が降りだしたので、光軸の変動はほぼ止ってしまいました。この二者の光軸変動の違いは、外気温の違い以上に、天候特に日照に依存していると推測されました。

その推測を裏付けるデータが図2.9です。ここには9日間の光軸変動と外気温、それに天候の状況がまとめてあります。光軸変動が、外気温のみならず、雨や雪という天候の変化にも依存しており、PFリング建屋の伸び縮みが起こっていると考えられました。更に詳しく見ると、光軸変動と外気温それぞれのピークの位置がほぼ一致しているのがわかります。建屋の天井のコンクリート本体の温度を測ってみると、天井表面の温度は、日照と共に急上昇して正午頃にピークを迎えますが、天井本体はそれより数時間遅れてピークに達します。良く知られているように、外気温も日照のピークから数時間遅れて最高になるので、両者が一致したのです。PFリング建屋の伸縮が、その建屋内の四重極電磁石を動かして、光軸の日変動を起こしているという仮説はこうしてたてられました。これらの発見と、後にのべるシミュレーションから、この日変動の詳細がわかっていったのです。

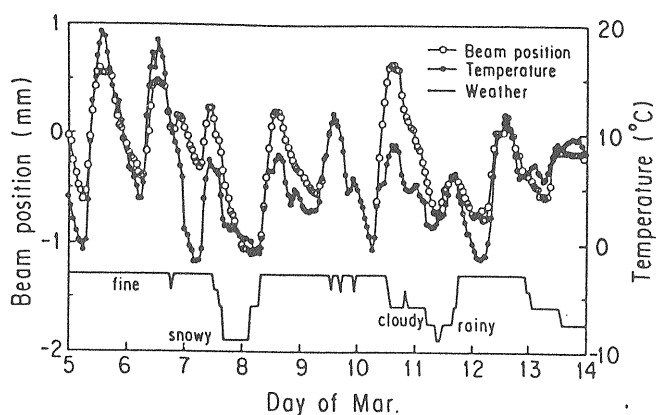


図2.9 光軸変動、外気温と天候の比較

(e) 「月」のオーダーの動き

一日の間の外気温の変化や日照が、建物の伸縮をもたらすならば、一年間の変化も又あるは

ずです。季節ごとの地面の温度の変化も加わり、例えば夏には建屋が伸びるに連れてPFリングも伸び、その周長が増大します(五円玉を熱すると、その穴は大きくなる)。従って電子軌道の長さ(C)を、それに合わせて延ばしてやる必要があります、それは加速のRF周波数(f_{RF})を下げてやればよいのです。

図2.10に、1988年5月から一年間のリング周長の伸びが、各月の平均気温と共に示してあります。一年間のRF周波数の変動量(Δf_{RF})は約10kHzで、リング周長の伸びとRF周波数との間の関係式

$$\frac{\Delta f_{RF}}{f_{RF}} = \frac{\Delta C}{C} \quad (2.4)$$

ここで $f = 500 \text{ MHz}$
 $C = 187 \text{ m}$

より計算すると、周長の伸び(ΔC)は約0.6mmとなります。この電子軌道の伸びは、水平方向のもので、偏向電磁石からの光を使用している場合は影響が少ないのですが、挿入光源からの光を使っている場合には問題になってきますし、RF周波数を使つての修正は、平均的なものであって、個々の光源ごとに行なわれているものではありません。

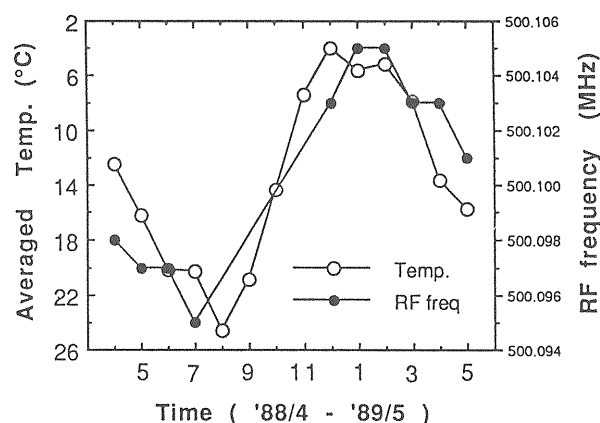


図2.10 一年間のリング周長の伸び

(f) 「年」のオーダーの動き

更にオーダーがあがって、数年に互る変動と

しては、PFリング建屋の建設時以降の乾燥による縮みや、地盤の変動による建物の歪みなどに起因するものが考えられます。実際PFリングでも、建屋の乾燥によるとおもわれる加速RF周波数の変化や、トリスタン富士実験室建設による地盤の沈下等がありました。長期運転の開始時の調整で間に合う程度におさまっています。

3. 軌道の安定化

第2章で様々な軌道変動の例を見てきました。次にはこれらの変動を取り除いて、ビーム軌道を安定化しなければなりません。軌道を安定化するためには、二つの考え方があります。一つは、変動を起こしている要因を特定して、除去することです。もう一つは、謂わば対症療法ですが、変動を測定した上で、何らかの方法によって、この変動を打ち消す安定化装置、いわゆるフィードバック(FB)システム、を設けることです。変動の原因が不明であったり、原因は特定できても取り除けない場合や、軌道変動へつながるメカニズムが明らかでない場合などにも有効です。ここでは、まず不安定要因の特定や除去が出来たものについて述べ、軌道変動のメカニズムについて考えたあと、様々なFB方式について述べます。

3-1. 不安定要因の除去

(a) 振動源の特定とその除去

「秒」のオーダーの変動に関して、図2.4に示されている100Hz以下の光軸振動は、何らかの振動源からの振動がリングトンネルの床を振動させ、そこに設置されている四重極電磁石をもまた振動させた結果、ビーム変動へと繋がっていく、とそのメカニズムは想像されています。そこで、この「秒」のオーダーの振動の振動源を特定すべく、実験が行なわれました。

実験は、リングトンネル内の12ヶ所に振動計を設置して、リングの運転状態から一つづつ振動源と思われる機器を停止させてゆき、その

データから振動源を特定しようというものです。結局、すべての成分について特定できました。それらの振動成分の多くは、建物の空調設備からのもので、その他は超伝導ウイグラーのHe用冷凍機と真空排気装置からのものでした。最も大きな成分であった14.5Hzの振動振幅は約0.1 μ mで、他はそれ以下でした。しかし、例えば冷凍機に由来する20.5Hz成分の振幅は、冷凍機近辺のトンネルフロアでも0.08 μ mでしたが、光源から12m地点で2 μ mの光軸変動を励起していました。

5Hz以下の低い振動成分については、トンネル内の振動計には多くのピークが観測されましたが、一方で光軸変動のスペクトルには、14.5Hz以下の成分は見当たりませんでした。これはコンクリート中での振動の伝播速度を考慮すると、振動の波長が建物の長さよりも大きくて、建物全体が同一位相で振動しているために、光軸変動として観測されていないと思われます。しかしこういった地面の振動による、低い周波数の動きは、次世代の大型放射光施設では、建物の直径がその波長と同程度となるために、無視しえないものとなるでしょう。地面の動きとその加速器への影響についての詳細は、参考文献を見てください。

(b) 冷却水温度の一定化

「分」のオーダーの動きの例として取り上げた、リングの冷却水温度の変動に起因する光軸変動については、原因は容易に類推されました。問題となった冷却系では、蓄積リングの電磁石と真空チェンバーを冷却しているのですが、おそらく冷却水温の変化で四重極電磁石のコイル部が伸縮し、磁場の変動となって顕れていると推測されます。ところが、水温の変化とほとんど同時に光軸の変化が発生していて、熱的な伸縮時に期待される「時間遅れ」が見られないなど、光軸変動をもたらすメカニズムについては、まだ完全には解明されていません。

そこで変動の原因を取り除くべく、まず冷却水温の変化が軌道変動の原因であることの確認をしました。これには、実際に冷却システムを手動で操作して水温を変化させ、ビーム変動の発生を観測してその因果関係を確認しました。この冷却システムは、冷却塔(二台のファン)と熱交換器によって温度制御が行なわれており、

冷却塔でON/OFF制御の粗調を行ない、熱交換器で連続制御の微調を行なっています。そこで次に、ファンの冷却能力を一定量に調整して、問題となったON/OFFが起こらずに、熱交換器だけで温度制御を行なえる条件を探して、 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内の温度変化におさえました。この範囲内では、目立った光軸変動はありませんでした。年間を通じて、このような運転状態で自動制御出来るように、改善がなされました。

(c) 蓄積リング床面の鉛直変位の測定と建屋の断熱

「日」のオーダーの動きである日較差変動は、日照等の環境条件のもと、蓄積リングを収納している建屋（光源棟と呼ばれています）が変形し、その歪みが蓄積リング床面の鉛直変位となって、四重極電磁石を動かすと想像されました。そこで、まず上で述べた推理が正しいかどうか、蓄積リング床面の鉛直方向の変位を、実際に測定してみることにしました。

放射光実験施設の光源棟は、地下1階、地上2階建て鉄筋コンクリート造りの建物でその荷重は30m下の砂層に杭で支持されています。PFリングは周長187mで、28台の偏向電磁石と58台の四重極電磁石が、光源棟1階に楕円状に並んでいます。（図3.1）この長い蓄積リング床面の鉛直変位を測定する装置として、

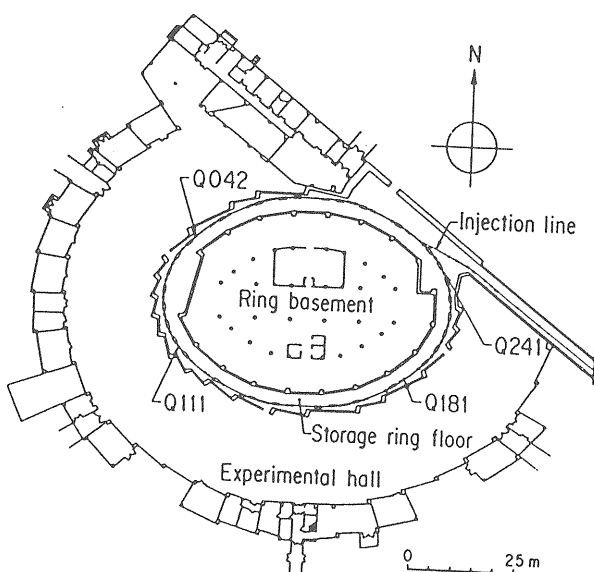


図3.1 光源棟の平面図

図3.2に示すような、水連通管の原理を利用した装置を開発しました。この装置は、水の入ったタンク及びそれらをつなぐ水連通管と空気連通管から構成されています。タンクが設置された床に鉛直方向の相対変位が生じると、水連通管を通じて水が移動し、つながれた各タンク内の水位が変化します。この水位の変化をタンク上面に固定されたレーザー変位計で計測し、各タンク間の鉛直方向相対変位を測定するものです。空気連通管は各タンク内の水面にかかる大気圧が等しくなるように設けたもので、使用した水は長期にわたる測定中の変質をふせぐために純水としました。本装置は12台のタンクから成り、それぞれのタンクは四重極電磁石の足元に設置されました。

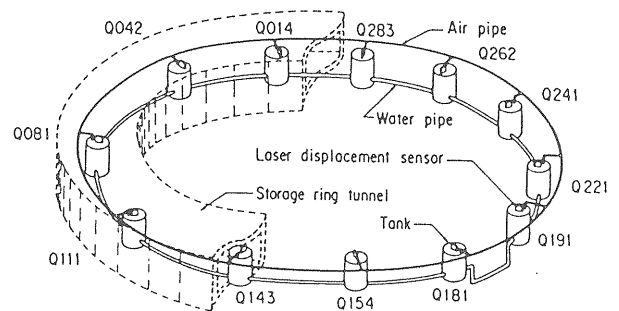


図3.2 蓄積リング床面の鉛直変位測定用水タンク・システム概念図

実際の測定に先立って、水連通管の原理の基礎実験を3台のタンクで行ない、測定値の精度及び流体移動の即応性について検討しました。（図3.3）使用したレーザー変位計の分解能は $2\mu\text{m}$ でしたが、地盤の常時微動や交通振動などのノイズが $\pm 5\sim 10\mu\text{m}$ あることから、結果の信頼性は $10\mu\text{m}$ のオーダーと考えられます。また、タンクに変位が生じた時に水が安定するまでの時間は、水連通管に直径40mmの塩ビパイプを使えば、約0.8分であってこれは計算値とも一致しました。つまりタンクを設置した床面に鉛直変位が生じて、1分以内にリング内の水連通管内の水は速やかに移動して、各タンクの水位の変化として測定できる訳です。これは、1日周期の日較差変動を計測するには十分な即応性です。

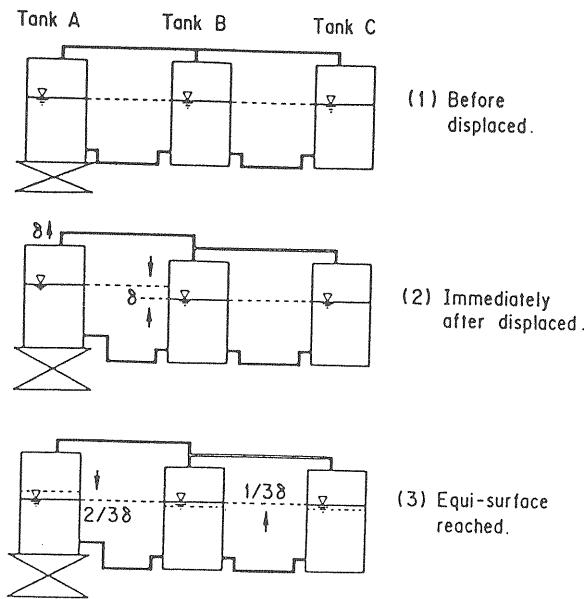


図 3.3 水連通管の基礎実験

また清水建設（株）の協力を得て、光源棟の熱歪みのシミュレーションを行ない、測定結果との比較を行ないました。PFリング内の二箇所の水タンク間の相対的鉛直変位が、1日の時間変化と共に変わる様子を図3.4に示します。測定値は、明け方と日中に極に達する日較差変動の形を示しており、シミュレーションもほぼそれを再現しています。一方、PFリングに沿った形での鉛直床変位の測定結果を、図3.5に示します。測定結果を見ると、変位量は最大で0.15mmにも達しています。またその変形の形は、リングの短径方向と長径方向とが単純に逆位相

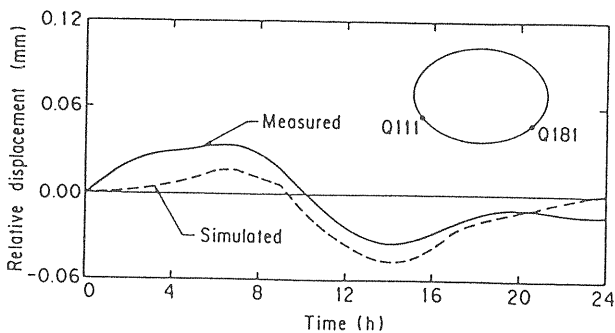


図 3.4 リング 2 点間の相対的鉛直床変位の時間変化の様子（シミュレーションの結果との比較）

でゆがんでいる訳ではありません。シミュレーションに於いては、PFリングを完全な楕円と仮定しているため、変形の形が単純な形となっています。実際のリングでは、ライナックからの入射路があるために、建物は完全な楕円ではなく、リング・トンネルに偏在するコンクリート壁の割れ目のためもあると、シミュレーションとは一致していないと考えられます。シミュレーションと測定結果とのズレも、主に入射路の近辺で大きくなっています。

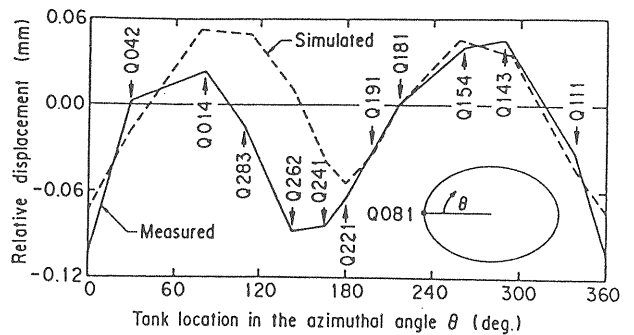


図 3.5 リングに沿った相対的鉛直床変位（このデータは15時のもので、シミュレーションの結果と比較）

リング床変位の測定とシミュレーションの結果から、光源棟の天井が日照等の熱的ストレスで伸びることが、床変位の最大の要因であることがわかりました。そこで、軌道変動の要因を取り除くために、1990年の1月に、天井約9000m²を、厚さ50mmの断熱材で覆う工事を行ないました。（図3.6）断熱材の厚さは、天井の1日の温度変化を1℃以内に抑えるという条件から決定されたものですが、温度の実測結果からも、この条件が満たされていたことが確認されました。（図3.7）

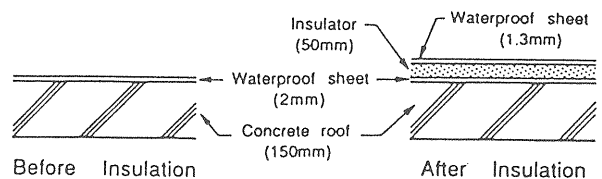


図 3.6 断熱工事前後の天井の構造

この天井の断熱化工事の前後で、鉛直方向の床変位はどうなったでしょうか。図3.8に示されているように、断熱化後は床変位が平均してほぼ1/2になり、大きな効果が確認されました。

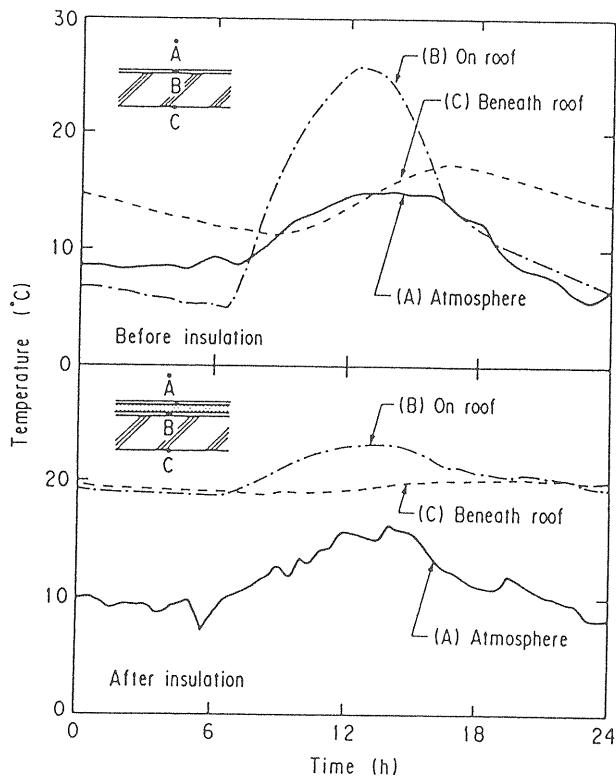


図3.7 断熱工事前後の天井の温度変化

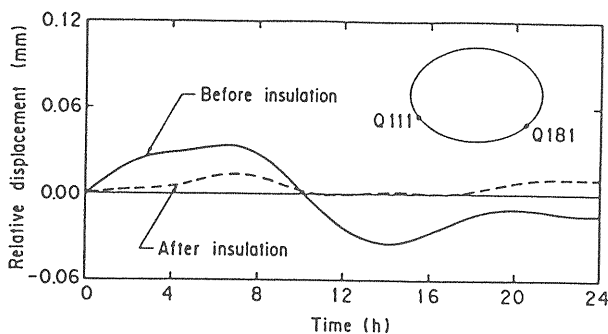


図3.8 断熱化前後での、リングの相対的鉛直床変位の比較

フランスのグルノーブルで1992年の始めから運転を開始した、ヨーロッパ・シンクロトロン放射施設 (European Synchrotron Radiation

Facility, 略称 E S R F) の6 GeV蓄積リングでも、この水連通管システムと同じ原理を使った、静水圧レベリング・システム (Hydrostatic Levelling System, 略して H L S) を、アライメント時に使用しています。ガーダーと呼ばれる台の上に、4台の四重極電磁石と3台の六重極電磁石をあらかじめ精密に並べておき、このガーダーの位置と傾きのみならず、96台の同様のガーダー間の相対位置を、ガーダーに取付けられたH L Sを使って測ろうという戦略です。さらに、H L Sとサーボジャッキを組み合わせ、リアルタイムに、ガーダーの変位の補正を行なうことも計画されています。

3-2. 軌道変動のメカニズム

3-1節で述べたように、変動の原因から光軸の変動へとつながるメカニズムは、必ずしも全てが判明しているわけではありません。ですが変動のほとんどのものは、蓄積リングが設置されている床面の振動や変位となって現われ、電磁石類へその変動が伝わり、電子ビームを動かしていると考えられます。

偏向電磁石が、水平方向に動いた時の磁場への影響は、一次のオーダーではありません。しかし、四重極電磁石の一台が、例えば垂直方向に動くと、電子ビームが感じるエラー磁場が生じます。このエラー磁場のうち二重極成分が、ビームをキックしてその下流の軌道に軌道変位を生じさせます。

このメカニズムは、良く知られているように、四重極電磁石の設置時に、設置エラーがある場合に、閉軌道のズレ (COD) が発生する機構と同じです。磁場勾配 g を持つ四重極電磁石の中心が中心軌道に対して、垂直方向に δy だけズレているとすれば、発生する誤差磁場は $g \delta y$ です。その時キック角 θ は、

$$\theta = - \frac{g l \delta y}{B \rho} \quad (3.1)$$

となります。ここで、 l は磁石の長さです。①点でこのシングルキック $\theta(1)$ を受けた粒子の、②点での変位置量 $\delta y(2)$ は、

$$\delta y(2) = \theta(1) (2 \sin \pi \nu)^{-1} (\beta_1 \beta_2)^{1/2} \cdot \cos(\pi \nu - |\phi_2 - \phi_1|) \quad (3.2)$$

で与えられます。この式で分母にある共鳴項 $\sin \pi \nu$ は、ベータトロン振動数 ν が整数に近づくとつれて、大きくなり、ビームが発散して回らなくなります。

また実際には、誤差磁場によるキックはリングの周上に任意に分布しており、より複雑な取り扱いが必要となります。こういった誤差磁場の問題や、その結果発生する軌道の歪みの詳細は、他の講義で触れらる予定です。

3-3. 様々な安定化の方式

何らかの軌道変動が発生した場合に、その変動を修正して安定な状態に持って行くには、いくつかの方法が考えられます。それらの方法は、何が変動しているのか（変動する要素）と、何を補正するのか（補正する要素）によって、分類することができます。

ここで、変動及び補正する要素としては、

1. 電子軌道
2. 放射光位置

の二つが考えられ、これらの組み合わせのうち、以下の三つの補正方法が考えられます。

- (a) 電子軌道 の変動を測定して、電子軌道 を、補正する方法。
- (b) 放射光位置 の変動を測定して、電子軌道 を、補正する方法。
- (c) 放射光位置 の変動を測定して、放射光位置 を、補正する方法。

以下、この三つの方法について、実例に即してお話します。

(a) 電子軌道の変動を測定して、電子軌道を補正する方法

1. COD補正による方法

放射光の源が電子ビームであることを思い出せば、光源である電子軌道の変動そのものを測り、かつ補正する方法は、まず第一に考えられる方法です。この時、電子ビーム軌道の変動量を測るのは、2-1節で述べたボタン型電極のビーム位置モニター（BPM）であり、補

正するのは、蓄積リングの周上に設置されている、補正用の二極電磁石（ステアリング電磁石）です。

一般に蓄積リング内の電子は、リングを構成している各電磁石の中心を通る軌道（これを設計軌道と呼びます）上を巡っている訳ではなく、磁場の誤差等によって歪められた閉軌道（closed orbit）上を周回しています。この閉軌道と設計軌道との差を、閉軌道の歪み（closed orbit distorsion、略してCOD）と呼びます。CODが大きくなり過ぎると、電子が蓄積リング中を回れなくなるので、適切に補正する必要があります。COD補正の実際については、他の講義で詳しく説明されるので、そちらに譲りますが、2章で述べた軌道変動のうち、「月」や「年」というゆっくりとした動きは、このCOD補正を行なって修正します。

2. グローバルFBシステムによる方法

COD補正による方法では、歪んだ電子軌道をその設計軌道（或いは何らかの「基準軌道」）へと、一気に修正するものです。この時実験者から見ると、光軸の位置は階段状に動き光軸を見失ってしまいます。日較差変動に対する補正も、出来得る限り連続的かつ滑らかに行なわれる必要があります。このためにPFリングでは、電子軌道全体を、その基準軌道へと、連続的に修正する、グローバルFBシステムとよばれるものを作り、運転に使用してきました。詳しくは、4-2節で述べます。

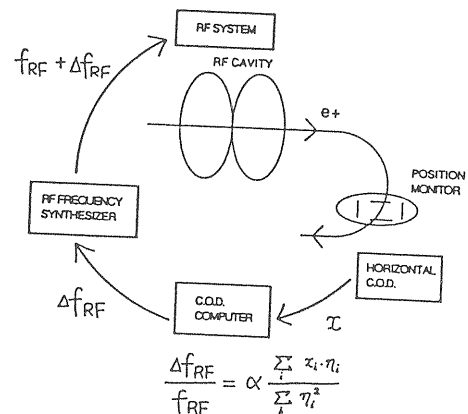


図3.9 水平方向FBのシステム図

3. 水平方向の日較差変動用FBシステム (RF周波数補正) による方法

2-2節で述べたように、季節ごとにPFリングは伸縮し、水平方向のビーム位置は相対的に変化しています。ところが同様の事は一日単位でも起こっており、特に分散関数 (dispersion function) の大きい所で顕著に現われます。この謂わば日較差変動の水平方向成分を抑えるために、RF周波数をリングの伸縮に従って変更する、水平方向のFBシステムが必要になりました。

図3.9に、このシステムのブロック図を示します。BPMを使って、30分ごとに水平方向の電子ビーム軌道を測定し、リングの周長の伸び ΔC を計算します。

$$\frac{\Delta C}{C} = -\alpha \cdot \frac{\sum x_i \eta_i}{\sum \eta_i^2} \quad (3.3)$$

$$(i = 1, \dots, 45)$$

ここで、 x_i はBPMで測定した水平方向の電子ビームの位置を、 η_i はそこでの分散関数の値を、また α はモーメント・コンパクション・ファクターを、表わしています ($\alpha = 0.015$)。上式から求めた ΔC は、(2.4)式よりRF周波数の変化分 (Δf_{RF}) に直され、RFシステムに伝えられて、RF周波数が変更されます。このシステムにより、水平方向の軌道変動が約1/5に抑えられている様子が、図3.10からわかります。

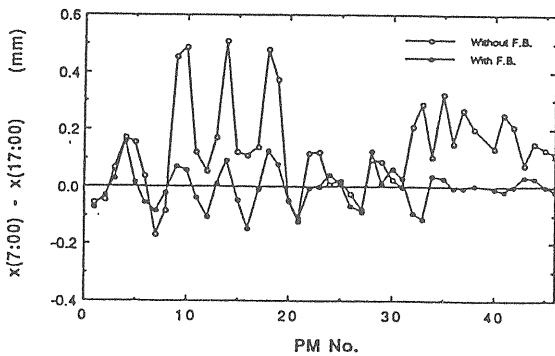


図3.10 水平FB前後の比較

(b) 放射光位置の変動を測定して、電子軌道を補正する方法 (ローカルFBシステム)

この方法は、各ビームラインにおける実験場所で測定した光位置が安定するように、電子軌道を補正するという、放射光用蓄積リングならではの方法です。特に、DCから数十Hzまでの速い変動にも対応出来るように、アナログ回路を使った信号処理がなされている点と、ローカル・バンプと呼ばれる局所的な補正磁場を使用して、各ビームラインごとの安定化が可能である点が、特徴となっています。そのために、ローカルFB法と呼ばれています。

このローカルFBシステムについては、4-3節で詳しく述べます。

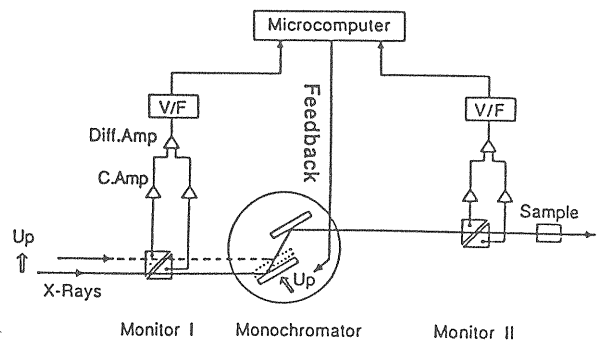


図3.11 BL-3AのFBシステム図

(c) 放射光位置の変動を測定して、放射光位置を補正する方法

最後に、放射光の位置変動を測定して、その位置に合わせて光学装置を移動させて、相対的に放射光位置を修正する方法があります。PFリングのBL-3Aには、放射光実験施設の小山氏たちによって、垂直方向の放射光位置を安定化させる為のFBシステムが設置されています。このビームラインには、図3.11に示されているように、二重結晶のモノクロメータとその前後に2台の光位置モニターがあって、第一のモニターで測定した光位置情報から、モノクロメータの第一結晶を動かすことで、第二のモニターでの光位置が動かないようにコントロールしています。

図3.12に、このFBシステムを働かせた時

の様子が示されています。第一のモニターには、入射してくる光の垂直方向の位置変動が記録されており、第二のモニターには、FBをON/OFFした場合の違いが示されています。FBシステムが働いている場合に、光位置はほぼ10 μm 以内に抑えられています。これは、実験者の自己防衛的方法といえます。

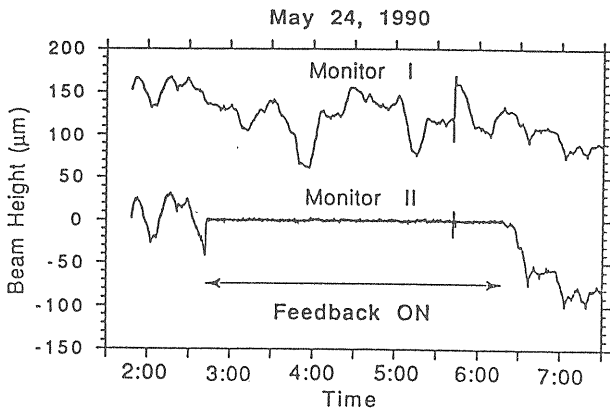


図 3.12 BL-3AでのFBの様子

4. フィードバック・システム

この章では、PFリングで使用された、二種類の軌道補正用フィードバック・システムについて、紹介します。

4-1. グローバルFBシステム

前述したように、電子軌道の変動量を測って、電子軌道自体を補正する方法の一つに、グローバルFBシステムがあります。ここではPFリングで使われてきたシステムについて、その変遷も含めて述べます。図4.1に、このシステム全体のブロック図を示します。システムを構成しているコンポーネントは主に三つで、それは、軌道位置を計測するモニター部・位置情報から補正量を計算する制御部・電子軌道を補正する磁石系です。

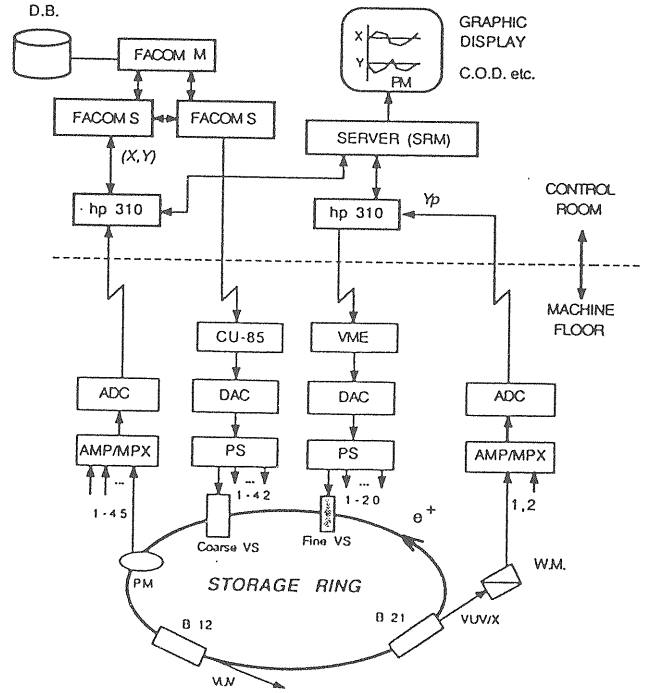


図 4.1 グローバルFBシステムのブロック図

(a) 固定パターン法

日較差変動が起こっている時の、電子軌道の変動パターンは、図2.8bに示されているように、一年を通じてほとんど同じ形をしています。この事実を使って、最初のFBシステムが、低エミッタンス化直後につくられました。そのため、この方法を固定パターン法と呼びます。この方法では、まず決定された軌道変動のパターンに基づいて、各補正マグネットへの指令値を計算し、一日の最大変動量の $1/400$ を、補正の一単位とします。この量は、BL21の光モニターでみると、約 $5 \mu\text{m}$ の光軸変動に対応するものです。そうして、BL21のモニターに $5 \mu\text{m}$ の変動が観測されたら、その補正方向も含めて、一単位の軌道補正を行なうものです。

このFBシステムが完成して、ひとまず実験は行なえるようになりました。しかし、この方法の弱点としては、(1) 軌道変動のパターンを固定したためにこれと異なった軌道変動が起こっても、日較差変動とみなして補正してしまう事、(2) 補正マグネットの制御系とマグネット自体の分解能の不足のために、一単位の補正量が時々抜け落ちる事、などがありました。どちらの弱点も、軌道変動をかえって大きくして

しまう結果になってしまいます。

(b) 可変パターン法

上記の弱点を改良すべく、新たな方法が考えられました。まず、任意の形の軌道変動に対応するために、COD補正を連続的に行なう方式にしました。この方式では、30分毎に測定されている電子軌道のデータに基づいて、現在の軌道と「基準軌道」との「差」を求め、各マグネットでの補正量を計算します。(この計算の詳細は他の講義を参照してください)しかし、その補正を一気には行なわず、次の軌道測定までの30分間をかけて、1秒ごとに、1/500づつ補正していきます。このような、滑らかな補正を実行するため、マグネット系も新しくしました。補正磁石は、芯を積層珪素鋼板で作られており、磁場設定に対して速い応答が可能です。さらに巻き数も少なく、ビームの蹴り角は小さいのですが、これも応答を速くしています。この補正磁石を20台、リング周上に挿入したうえ、制御系もVME (Versa Module in Euro format) バスによって12 bitのDACをコントロールして、滑らかな補正に充分な分

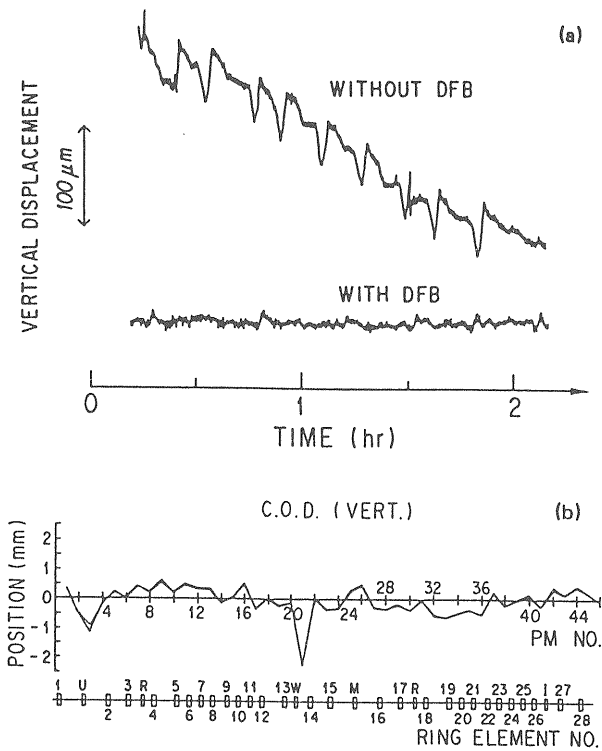


図4.2 グローバルFBシステムによるビームの安定化の様子

解能を確保しました。新しい補正電磁石と電源は、後で述べるローカルFBシステムでも使用できる仕様となっています。

このシステムによって、ビーム変動が落ち着いた様子は図4.2に示されています。残された問題点としては、電子軌道を計測するBPM系のうち、測定結果に大きなバラつきを示すものが何ヶ所かあると、そのバラついた軌道に基づいて補正作業を始めてしまうことがあります。これはBPM系のメンテナンスをこまめに行なうことや、大きくバラついたデータは補正時に取り除くルーチンを組み込むことで、対応しています。将来的には、ビームラインでの光軸位置の情報を基にした、より精密なシステムに発展する可能性もあります。

4-2. ローカルFBシステム

各ビームラインごとに、実験装置のある場所での光軸位置を測定して、そのビームラインの光源点の電子軌道だけを修正する事をめざして、ローカルFBシステムが開発されました。このシステムは、すべてアナログ回路で作られているので、2-2節でみたような「秒」のオーダーの変動にも対応できる可能性を持っています。

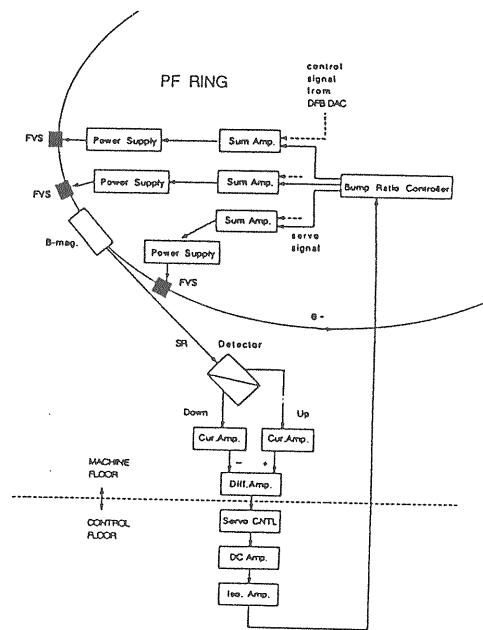


図4.3 ローカルFBシステムの構成図

さらに、電子軌道を全周に亙って「平均的」に修正するグローバルFBシステムとは違って、この方法は原理的には、各ビームラインごとに希望の位置に光軸を調整することも出来ます。

このローカルFBシステムは、(a) 光軸位置を測定する光モニター部、(b) 補正信号によりバンブ磁場を作る補正磁石部、(c) 位置信号を増幅して周波数特性を保障するサーボコントローラ部、の三つの部分から構成されています。(図4.3)

(a) 光モニター部

ここには、光モニター本体と電流アンプ、それにモニターの上下電極からの信号を(2.3)式に従って位置信号へ変換するためのアナログ信号の割り算回路、が準備されています。

(b) 補正磁石部

この補正磁石部には、補正信号からローカルバンブを作るためのバンブレシオコントローラと、ステアリング電磁石及びその電源、それに他のシステムからの補正信号と加え合わせて電源へ伝えるサムアンプ、とからなっています。

ここでローカルバンブとは、局所的に閉じた形のマグネティックバンブであって、その作り方は、使用する補正電磁石の数により、3マグネットバンブ法と4マグネットバンブ法があります。

3-2節で見たように、場所①でビームが受けたキック θ_1 によって、場所②に生じる軌道変位 $\delta y_1(2)$ は、

$$\delta y_1(2) = \theta_1 (2 \sin \pi \nu)^{-1} (\beta_2 \beta_1)^{1/2} \cdot \cos(\pi \nu - |\phi_1 - \phi_2|) \quad (4.1)$$

です。ここで θ はキック量を表わします。また角度変位 $\delta y_1'(2)$ は、

$$\delta y_1'(2) = \theta_1 [(2 \sin \pi \nu)^{-1} (\beta_2 / \beta_1)^{1/2}] \cdot [\pm \sin(\pi \nu - |\phi_1 - \phi_2|) - \alpha_2 \cos(\pi \nu - |\phi_1 - \phi_2|)] \quad (4.2)$$

と書けます。

1. 3マグネットバンブ法

文字どおり3台の補正電磁石で閉じたバンブを作る方法です。図4.4を見てください。このバンブが局所的に閉じるための条件は、①②③それぞれの場所でのキックが、③に作る軌道変位の和と角度変位の和がゼロになることです。

$$\delta y_1(3) + \delta y_2(3) + \delta y_3(3) = 0 \quad (4.3)$$

$$\delta y_1'(3) + \delta y_2'(3) + \delta y_3'(3) = 0 \quad (4.4)$$

この式に(1)、(2)式を代入して、キック θ_1 について整理します。

$$A_1 \theta_1 + A_2 \theta_2 + A_3 \theta_3 = 0 \quad (4.5)$$

$$B_1 \theta_1 + B_2 \theta_2 + B_3 \theta_3 = 0 \quad (4.6)$$

これを θ_1 について解くと、

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = - (\beta_1 / \beta_2)^{1/2} \cdot \frac{\sin(\phi_3 - \phi_1)}{\sin(\phi_3 - \phi_2)} \quad (4.7)$$

$$\frac{\theta_3}{\theta_1} = (\beta_1 / \beta_3)^{1/2} \cdot \frac{\sin(\phi_2 - \phi_1)}{\sin(\phi_3 - \phi_2)} \quad (4.8)$$

となります。従って(4.7)、(4.8)式より、3つのマグネットへのバンブレシオが計算できます。バンブレシオ・コントローラは、この比に従ってマグネットを励磁します。

また、光源点が①②間に有る場合、光源点での位置変位と角度変位は、それぞれ

$$\delta y_1(s) = \theta_1 (\beta_s \beta_1)^{1/2} \sin(\phi_s - \phi_1) \quad (4.9)$$

$$\delta y_1'(s) = \theta_1 (\beta_1 / \beta_s)^{1/2} \cdot [\cos(\phi_s - \phi_1) - \alpha_s \sin(\phi_s - \phi_1)] \quad (4.10)$$

と表わされます。

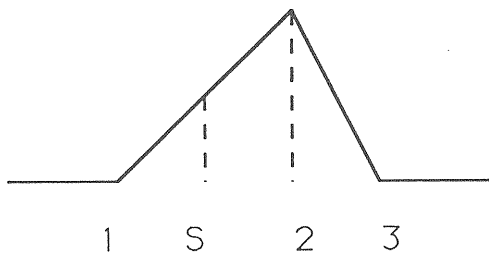


図4.4 3マグネット・バンプシステム。①②③は、マグネットの位置を示し、Sは光源点の位置を示しています。

ところが、3マグネットバンプ法では、光源点における軌道の傾きを作り出してしまいます。この角度補正エラーは、光モニターと実験者との距離によって増幅されてしまいます。

2.4 マグネットバンプ法

3台のマグネットと1台の光モニターでのシステムで起こる問題を解決するには、4台のマグネットと2台の光モニターのシステムへ拡張することで逃げられ、このシステムでは、位置と角度を独立に補正できます。

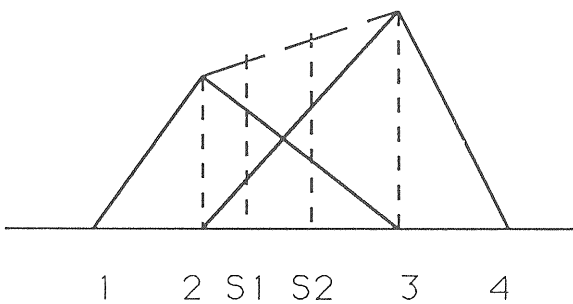


図4.5 4マグネット・バンプシステム(記号の意味は図4.4と同じ)

4台のマグネットで作るローカルバンプは、2つの3マグネットバンプの線形結合と考えられます。この2つの3マグネットバンプを、a、bとし、それぞれの強さを θ_a 、 θ_b とします。従ってこのパラメータを定めるために、2つの光モニターからの情報(2ヶ所の光ビーム位置、あるいは1ヶ所の位置と光軸の傾き)が必要で

す。

バンプa(①、②と③で構成)が、s1での位置をコントロールし、バンプb(②、③と④で構成)が、s2での位置をコントロールするならば、②と③のマグネット間の軌道の位置と傾きを、全てコントロールする事ができます。マグネット②と③の間にある光源点での位置と角度は、

$$\begin{aligned} \delta y(s_i) &= \delta y_{3a}(s_i) + \delta y_{2b}(s_i) \\ &= \theta_a (\beta_3 \beta_{s_i})^{1/2} \sin(\phi_3 - \phi_{s_i}) \\ &\quad + \theta_b (\beta_2 \beta_{s_i})^{1/2} \sin(\phi_{s_i} - \phi_2) \\ &\quad (i = 1, 2) \quad (4.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta y'(s_i) &= \delta y'_{3a}(s_i) + \delta y'_{2b}(s_i) \\ &= -\theta_a (\beta_3 / \beta_{s_i})^{1/2} \cdot \\ &\quad [\cos(\phi_3 - \phi_{s_i}) + \alpha_{s_i} \sin(\phi_3 - \phi_{s_i})] \\ &\quad + \theta_b (\beta_2 / \beta_{s_i})^{1/2} \cdot \\ &\quad [\cos(\phi_{s_i} - \phi_2) - \alpha_{s_i} \sin(\phi_{s_i} - \phi_2)] \\ &\quad (i = 1, 2) \quad (4.12) \end{aligned}$$

となります。これをまとめると、

$$\begin{bmatrix} \delta y(s1) \\ \delta y(s2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_a \\ \theta_b \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

となります。ところが、図4.5からもわかるように、3マグネットバンプはs1、s2両方の位置を変えてしまうので、見通しが良くありません。そこで、s1での位置だけを変えてs2の位置はゼロとする4マグネットバンプと、その逆のバンプに分離すると、見通しがよくなります。分離するためには、次の行列[C]を見つければよいのです。

$$\begin{aligned} [C] \cdot [A] &= \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \quad (4.14) \end{aligned}$$

ここで、 $c_{11} = c_{12} = 1$ として、残る係数を決定します。

$$c_{12} = -a_{12} / a_{22} \quad (4.15)$$

$$c_{21} = a_{21} / a_{11} \quad (4.16)$$

従って新しいバンプのパラメーターは、

$$\theta_{a'} = \theta_a - \frac{a_{12}}{a_{11}} \cdot \theta_b \quad (4.17)$$

$$\theta_{b'} = -\frac{a_{21}}{a_{11}} \cdot \theta_a + \theta_b \quad (4.18)$$

となります。

(c) サーボ・コントローラ部

サーボコントローラ部は、FBのゲインを制御すると共に、コンベンセイターによって、FB信号の周波数特性を調整するものです。

モニターで検出された、位置のズレの信号（エラー信号）をそのまま増幅して補正電磁石系に送っても、ビーム変動は収まりません。電磁石の電源や電磁石自体に周波数特性があり、エラー信号の周波数が高くなると応答しづらくなりますし、信号に位相遅れが生じてきます。コンベンセイターは、これらFBループ上の機器の周波数特性を補償して、高い周波数領域までゲインが下がらず、位相遅れが90度をきって、正帰還とならないように調整するものです。付録A.2に、簡単なコンベンセイターのまとめがあります。

PFリングでのアナログFBシステム全体をブロック図で示すと、図4.6のようになります。このFBシステムの伝達関数は、二つのコンポ

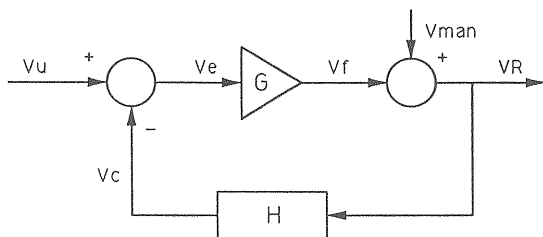


図4.6 アナログFBシステムのブロック図

ーネント $G(i\omega)$ と $H(i\omega)$ に分けられます。 G はサーボ・コントローラの伝達関数であり、 H はそれ以外のマグネット・システムや光モニター系の伝達関数です。従って、このシステムの、オープン・ループの伝達関数は GH であって、クローズ・ループのそれは $1/(1+GH)$ となります。実際に求めてみると、ここでの信号の流れは、以下の式で表わされます。

$$V_e = V_u - V_c \quad \dots\dots\dots ①$$

$$V_c = H(i\omega) \cdot V_R \quad \dots\dots\dots ②$$

$$V_R = V_f + V_{man} \quad \dots\dots\dots ③$$

$$V_f = G(i\omega) \cdot V_e \quad \dots\dots\dots ④$$

ここで①と②より

$$V_e = V_u - H(i\omega) \cdot V_R$$

ここに③を代入して

$$V_e = V_u - H(i\omega) \cdot (V_f + V_{man})$$

さらに④を代入

$$V_e = V_u - H(i\omega) [V_{man} + G(i\omega) V_e]$$

従って、

$$V_e [1 + GH] = V_u - H(i\omega) V_{man}$$

$$\therefore V_e = \frac{V_u - H \cdot V_{man}}{1 + GH}$$

ここで、 $V_u - HV_{man} = V_u'$ を実効的な補正なしのビーム位置とすると、結局

$$V_e = \frac{V_u'}{1 + GH} \quad (4.19)$$

となります。DCゲイン ($\omega = 0$) に対して、 $GH(i0) = G_0 H_0$ は、

$$G_0 H_0 = \frac{V_u'}{V_e} - 1 \quad (4.20)$$

となります。

P Fリングでは、いくつかのビームラインにおいて、ローカルF Bのテストを行ってきました。図4.7に、B L 1 2での結果を示します。図の上半分はB L 1 2に設置されているワイヤモニターからの信号をF F Tアナライザーで周波数分析したもので、下半分はチャートレコーダーに記録された光軸変動の様子です。光ビームの動きがほとんど無くなっているのと共に、速い振動成分も抑えられているのがわかります。14.5 H z成分は約1 / 1 0 0に減衰しました。

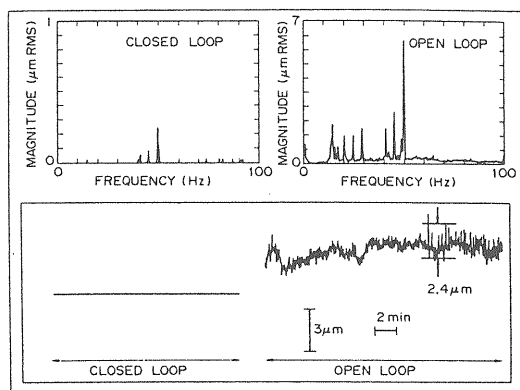


図4.7 ローカルF Bシステム作動前後でのビーム変動の比較

このシステムの問題点として残されているのは、P Fリングには既に多くの機器が設置されているため、ローカルバンプを作る補正電磁石を、各ビームラインごとに設けるスペースが無く、一つのバンプ内に複数の光源点が含まれてしまうことです。このために、あるビームラインでの光軸位置信号で、隣のビームラインの光源点にF Bがかかり、そのビームラインでは完全に安定化されないのです。さらに実際に使用する場合には、ビームラインの開／閉を受けてからF Bを開始／終了までのアルゴリズムの確立や、複数のF Bシステム間でのインターフェアランスの可能性などを検討しなければなりません。

終わりに

この講義録を作るにあたって、放射光光源系の多くの方々には大変お世話になりました。また勉強の機会を与えて頂いた木村嘉孝加速器研究部総主幹に感謝します。

参考文献

- [1] T. Katsura, Y. Kamiya, K. Haga, T. Mitsuhashi, N. Nakamura, M. Katoh, and I. Abe, *Rev. of Sci. Instrum.*, **60**, 1507 (1989). P Fリングでの、様々なビーム変動について。
- [2] K. Huke, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, 285 (1987). 速い振動成分の振動源の同定に関して。
- [3] R. O. Hettel, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-30, No. 4, 2228 (1983). T. Katsura, Y. Kamiya, K. Haga, T. Mitsuhashi, and R. O. Hettel, *Proceedings of 13th International Conference on High Energy Accelerators*, Vol. 2, pp. 243-246 (1988). R. J. Nawrocky, J. W. Bittner, Li Ma, H. M. Rarback, D. P. Siddons and L. H. Yu, *Nucl. Instrum. Methods* **A266**, 164 (1988). ローカルF Bシステムについて。
- [4] T. Katsura and Y. Fujita, *Rev. Sci. Instrum.*, **62**, 2550 (1991). P Fリング室床の鉛直方向の動きとそのシュミレーションについて。
- [5] G. E. Fischer, *AIP Conference Proceedings*, **153**, 1047 (1987). 地面の動きの加速器への影響について。
- [6] A. Koyama, S. Sasaki, and T. Mori, *Photon Factory Activity Report #8* (1990) p. I-9. B L 3 Aでのフィードバックに関して。

Appendix A フィードバックとは

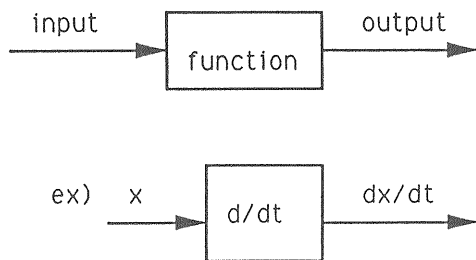
フィードバックの基本的な部分について、本文中の説明に必要な事項だけを、簡単に述べてみたいと思います。

A.1 基本用語とブロック図

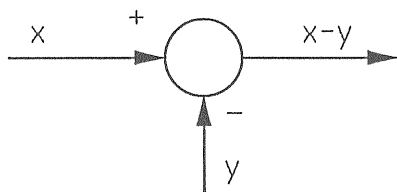
始めに「基本用語」と、信号の流れの様子を目に見えるように示した「ブロック図」について説明します。

(1) ブロック図とは、信号の流れが目に見えるように表わした図です。

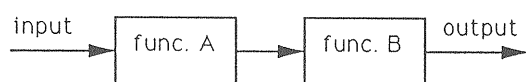
- ・ 四角い箱で「作用」(function)を表わし、矢印で「信号の流れ」を表わします。



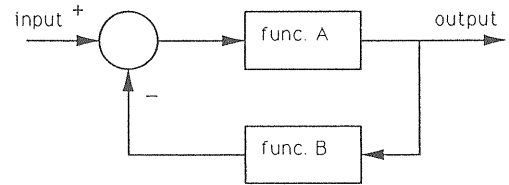
- ・ また丸印で、「信号の合流点」を表わします。



- ・ 「オープン・ループ (open-loop)」とは、コントロール作用が出力から独立しているもので、「クローズ・ループ (close-loop)」とは、これと違いコントロール作用が、出力に何らかの形で依存しているものをいいます。

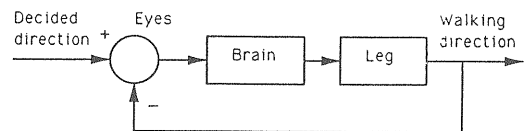


オープン・ループ



クローズ・ループ

- ・ 「フィードバック」とは、クローズループ・コントロールシステムの特徴で、出力を入力と比較して、適切なコントロール作用を、出力と入力との関数として作り出すことです。例として、決められた方向に歩いて行くという動作を、一つのシステムと考えて、ブロック図で表わしてみると、以下のようになります。



(2) ラプラス変換と伝達関数

- ・ $f(t)$ のラプラス変換されたものを $F(s)$ とします。

$$L[f(t)] = F(s) \quad (\text{A.1})$$

そうして、特定の入力に対するシステムの応答のラプラス変換は

$$Y(s) = P(s) \cdot X(s) \quad (\text{A.2})$$

で与えられます。(すべての初期値がゼロである時) この逆変換

$$y(t) = L^{-1}[P(s) \cdot X(s)] \quad (\text{A.3})$$

は、システムの時間応答であって、 $P(s)X(s)$ の極 (pole) を探して、そこでの留数 (residue) を求めることで決められます。

- ・ システムの「伝達関数」(transfer function)

$P(s)$ とは、インパルス入力に対するシステムの反応をラプラス変換したもののことです。つまり、伝達関数 $P(s)$ を持つシステムへの入力がインパルスであって、かつすべての初期値がゼロである時に、出力のラプラス変換が $P(s)$ であるということです。

(例)
$$\frac{d^2 y}{d t^2} + 3 \frac{d y}{d t} + 2 y = x + \frac{d x}{d t}$$

入力と出力が、上の式で表わされるシステムの伝達関数はどうなるか考えてみます。まずこの式のラプラス変換をとると、

$$s^2 Y(s) + 3 s Y(s) + 2 Y(s) = X(s) + s X(s)$$

となります。整理すると、

$$Y(s) = \left(\frac{s + 1}{s^2 + 3 s + 2} \right) X(s)$$

となり、結局伝達関数 $P(s)$ は、

$$P(s) = \frac{s + 1}{s^2 + 3 s + 2} \quad (A.4)$$

となります。

A.2 コンペンセーターとその設計

アナログ・フィードバック系でのコンペンセーターとして使用する、三種類の一般的な伝達関数があります。

(1) リード・コンペンセーター
その伝達関数は、

$$P_{Lead}(s) = \frac{s + a}{s + b} \quad (A.5)$$

で、 $s = -a$ にゼロを、 $s = -b$ に極を持ちます。 $(b > a)$

(2) ラグ・コンペンセーター

その伝達関数は、

$$P_{Lag}(s) = \frac{a (s + b)}{b (s + a)} \quad (A.6)$$

で、 $s = -b$ にゼロを、 $s = -a$ に極を持ちます。 $(b > a)$

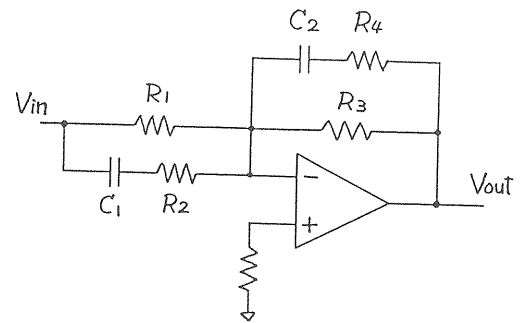
(3) ラグ・リード・コンペンセーター

その伝達関数は、

$$P_{LL}(s) = \frac{(s + a_1) (s + b_2)}{(s + b_1) (s + a_2)} \quad (A.7)$$

このコンペンセーターは、2つのゼロと2つの極を持っていて、 $b_1 > a_1$ 、 $b_2 > a_2$ です。

実際の回路では、図A.1のような、アクティブフィルタを何段か重ねて、希望のコンペーションを行ないます。



図A.1 コンペンセーター

これは、ラグ・リード・コンペンセーターで信号は、

$$V_{out} = - V_{in} \cdot$$

$$\frac{[R_3 (1 + s (R_1 + R_2) C_1) (1 + s R_4 C_2)]}{[R_1 (1 + s R_2 C_1) (1 + s (R_3 + R_4) C_2)]} \quad (A.8)$$

と変換される。従って2つのゼロは、

$$z_1 = 1/2\pi (R_1 + R_2) C_1 \quad (\text{A.9})$$

$$z_2 = 1/2\pi R_4 C_2 \quad (\text{A.10})$$

であり、2つの極は、

$$p_1 = 1/2\pi R_2 C_1 \quad (\text{A.11})$$

$$p_2 = 1/2\pi (R_3 + R_4) C_2 \quad (\text{A.12})$$

となります。