

KEK-PS磁場によるKEKBベータトロンチューンの変動

家入 孝夫¹、生出 勝宣、大西 幸喜、小磯 晴代、末武 聖明、飛山 真理、船越 義裕、吉田 正人
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

KEKBに於いて、ベータトロンチューンのスペクトルが乱れ、チューン測定が正しく行われなかったことがあった。このチューン・スペクトルの乱れは、KEKB電磁石電源の電流変動によって生じ、又その電源変動はKEKの陽子シンクロトロン(KEK-PS)の運転とも関係していた。KEK-PSの影響を確かめるために、PSの磁場サイクルに同期してKEKBのチューンを測定し、KEKBのチューンがPS磁場サイクルに同期して変化していることを確認した。又、チューン・スペクトルの乱れは、半整数共鳴のストップバンド巾と関係していることがわかった。

1. はじめに

KEKBは、B-中間子生成のための電子・陽電子円形衝突型加速器で、周長が約3kmの2つのリングを持つ[1]。1つは、3.5GeVの陽電子リング(LER)で、もう1つは8.0GeVの電子リング(HER)である。各リングにはそれぞれ1300以上のバンチが蓄積され、ビーム電流は各リングとも1A以上である。電子・陽電子の衝突は一ヶ所で行われ、世界最高のルミノシティ $1.6 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成している。

ベータトロンチューンはKEKBの性能を上げるための重要なパラメータの一つである。特に、水平方向チューンはダイナミックなビーム・ビーム効果を期待し、半整数共鳴の極近傍にセットされている。したがって、非常に高いチューンの安定性が要求される。そこで、チューンの測定値と目標値を比較し、四極電磁石でその差分を補正するフィードバック制御を常時行っている。

昨年10月初め、図1に示すように、LER水平方向チューン・スペクトルに大きな乱れが観測され、チューン測定ができなかったことが生じた。同時に、ルミノシティが約10%低下していた。スペクトルの乱れは偶発的に生じるので、当初その原因がわからず、モニター自身に問題があるのではと疑われた。調査の結果、ビーム自身のチューンが変動しているのではないかと思われるようになった。この時期にKEK-PSの運転が再開されたこともあり、PSの影響が考えられた。KEK-PSとKEKBとは同じKEK敷地内にあるため、KEKB運転開始からその影響が問題になっていた。以前、PSの磁場によりLER垂直方向軌道が変動することが観測され、その対策としてもれ磁場を打ち消す補正コイルがKEKBリング内に設置された[2]。これでPSの影響は取り除かれたと思われた。PSの影響

は、ほんとうになくなったのであろうか。

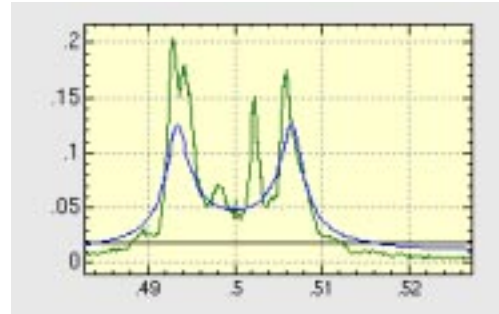


図1：LERで観測された水平方向のチューン・スペクトル。横軸はチューン、縦軸は振幅。図の緑色線は測定されたスペクトルで、半整数(0.5)に対して非対称、青色線はフィットしたスペクトルを示す。フィットされたスペクトルは半整数に対して対称で、0.5065の端数部チューンを示す。

2. チューン測定システム

KEKBには2種類のチューン測定システムがある。1つはビーム全体のチューンを測定する、もう1つはバンチ毎のチューンを測定するシステムである。後者はゲートチューンモニター(GTM)と呼ばれている。図2に示すように、GTMはバンチ毎横方向フィードバックシステムと共存し、共通のパワーアンプとキッカー電極が用いられている。ボタン電極のビーム信号は高速スイッチ(GATE-1)で測定したいバンチ信号のみが取り出される。ゲートされたバンチ信号のパルス波高値が10μsのビーム回転周期でサンプルされる。その振動成分がスペクトラム・アナライザーに入力される。チューンの水平・垂直成分はボタン電極を含め独立した回路で検出される。端数部チューンはスペクトルのピーク周波数を求め、回転周波数で割った値から求められる。この測定システムにおいて、横方向フィードバックによるダンピングのためにチューンのスペクトルが広がり、スペクトルのピーク値が不確かになるのを防ぐため、測定されるバンチに対してフィードバックを無効にする操作を[GATE-2]で行っている。又、ビーム・ビーム効果によるスペクトルの広がりを避けるために、非衝突バンチのチューンが測定されている。

図2に示されているバンチ振動検出回路(BOD)に注目しよう。この回路で、ビームパルス信号のピーク値が回転周期毎にサンプルホールドされ、その振動成分が検出される。振動振幅のビーム電流依存性をなくすために、ビームパルスの振幅は、ベータト

¹ E-mail: takao.ieiri@kek.jp

ロン振動数より十分ゆっくりした時定数をもったフィードバックループにより一定に保たれている[3]。しかし、この一定振幅を作るループに問題があった。ビームパルス波高値の参照電圧を決めるポテンショメータからの電圧が温度変化などにより不安定になり、振幅一定ループが異常になることがたびたびあった。そこで、参照電圧生成をポテンショメータから外部の16ビットDACに切り替えた。その結果、振幅一定ループの動作が安定になり、チューン測定が安定になった。

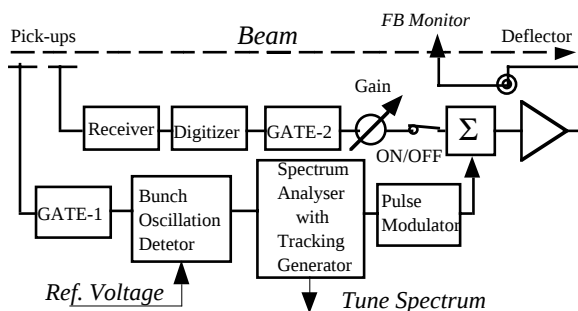


図2：チューン測定システムの概念図

3. チューン測定

3.1 KEK-PSとの関係

KEK敷地内にはいくつかの大きな加速器がある。周長3kmのKEKB地下トンネルは、KEK-PS施設の真下を横切り、PSリングを内包している。したがって、KEKBとPSとの干渉は予想される。KEKB運転開始直後の1999年4月頃、LERの垂直方向に2秒周期の軌道変動が観測された。実際、KEKBのビームライン上で周期変動する磁場が観測され、この軌道変動の発生源はPSの電磁石電源からのもれ磁場であることがわかった。そこで、もれ磁場を打ち消す補正コイルがKEKBトンネル内に設置され、軌道変動は抑えられた[2]。ところが、PSが運転状態になると、図1に示すような水平チューンの異常スペクトルが偶発的に観測された。このスペクトル異常は昨年10月に限らず、2003年1月から2月にかけて及び2004年2月にも観測された。特に、2004年10月初めに生じたスペクトル異常は、同時にルミノシティが10%以上も低下したので、大きな問題となった。異常なスペクトルが観測された時期は、いずれもKEK-PSが速い取り出しモードで運転を行っていた時期と重なっていた。

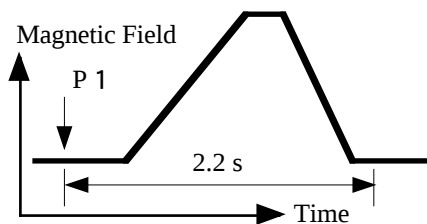


図3：KEK-PSの磁場サイクル、周期2.2秒、P1はPS磁場パターンに同期したパルス。

KEK-PSは0.5GeVの陽子ビームを12GeVまたは8GeVに加速する陽子シンクロトロンである。実験目的によりその周期が2.2秒または4.0秒になる。図3は、2.2秒周期の速い取り出しモード磁場パターンを示している。

3.2 PSサイクル同期測定

PS磁場の影響を確かめるために、PSに同期したパルスP1（図3参照）をスペクトラム・アナライザの周波数スイープのトリガーとしてチューンを測定した。図4はLERとHERで水平方向チューンを測定した結果を示す。PS一周の間で、水平チューンが、P1から0.6～0.7秒後と1.3秒付近でチューンが大きく変わり、LERで最大0.003、HERで0.0016変化している。これはP1からの時間とスイープ時間とを考慮すると、PS磁場の立ち上がりとしち下がり時刻に対応している。しかし、いずれの場合もチューンが下がることから、磁場変化が直接チューンに影響を及ぼしているとは考えにくい。グラフからチューンの変化はPS一周でおよそ3つの領域に仕切られる。

一方、KEKBの四極電磁石電源でPSの影響を調べたところ、配線がリング全周のループをつくっている四極電磁石電源に変化が現れた。PSが運転していない時の電流変動は全中で5ppmであったが、PSが運転状態になると、20ppmから30ppmに増加した。この電流変動はKEKBの電源・磁石システムにPSのもれ磁場がカップルして生じたと考えられる。LERのQFタイプ四極電磁石に20ppmの変動を仮定した時、水平方向チューンの変化は0.002になり、観測結果とほぼ合っている。又、電流変動の周波数成分は主に1.37Hz成分であった。これは2.2秒周期の3倍に相当し、チューンの時間変化から推定される周波数スペクトルとも一致している。

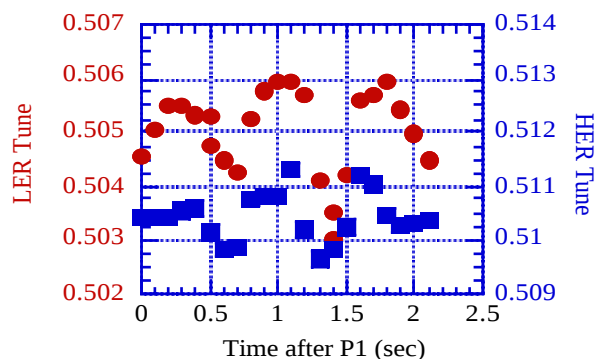


図4：LER水平チューン（赤丸）とHER水平チューン（青四角）をPS磁場同期時刻の関数として示した。

各種のPS運転モードで測定した結果をまとめると、

- LERとHERの水平方向チューンが0.003、0.0016それぞれ変動した。
- チューンの変動はおよそPS磁場の立ち上がりとしち下がりに対応していた。
- PSが4秒周期になっても、チューンは磁場の

- 立ち上がりとしち下がりに対応して変化した。
- 垂直方向チューンの変動はほとんどなかった。
- 四極電磁石電源内部の時定数調整で、チューンの変動巾は約半分に減った。
- PSのエネルギーが12GeVから8GeVになると、両リングともチューンの変動はほとんどなくなった。

3.3 さらにチューンを半整数に近づけると

我々は電磁石電源の調整によってチューンの変動を小さくすることができた。しかし、変動は全くなかったわけではない。端数部チューンを0.504以下にセットすると図5に示すように半整数付近に新たなピークが現れた。このスペクトルの乱れは、KEK-PSの運転状態にも関係しているとともに、LERの水平方向クロマティシティにも依存することがわかった。すなわち、クロマティシティを大きくすると、不安定領域のスペクトルが成長し、逆にクロマティシティを小さくすると、半整数共鳴領域の乱れも弱まった。又、チューンを半整数から遠ざけると半整数付近の乱れはなくなった。これらの結果から、チューンの変動が半整数共鳴と関係していることがわかる。

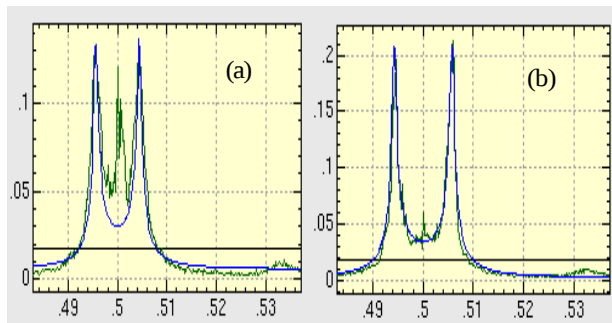


図5：LER水平チューンの端数が0.5044(a)と0.5058(b)の時のスペクトルの違い。半整数付近のスペクトルに違いが現れる。

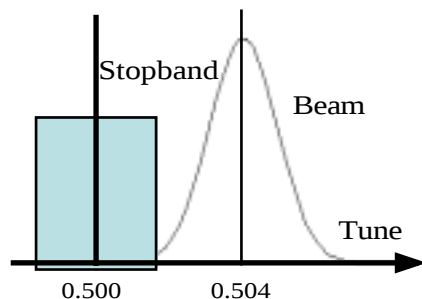


図6：半整数共鳴ストップバンドとビームのチューンスプレッドを概略的に描いたもの。実際の分布や境界はもっと複雑でダイナミックなものと思われる。

LERのビームは 7.3×10^{-4} rms エネルギー スプレッドをもっている。図6に示すように、ビームエネルギー

とある有限なクロマティシティのために、ビームはチューンの広がり(Tune Spread)をもつ。一方、半整数共鳴のストップバンド巾はチューン変動に関係し、その巾はチューン変動の丁度2倍になる[4]。したがって、チューンが半整数に接近し、その裾にいる粒子が半整数共鳴領域に入ると、その粒子は不安定になる。半整数付近で観測されたスペクトルはこの不安定粒子によるものと思われる。

4. まとめ

KEKBのLER水平チューン・スペクトルに異常な振舞いが観測された。この異常な振舞いは、KEK-PSが2.2秒周期の速い取り出しモードで運転していた時期と重なっていた。チューンの変動は四極電磁石の磁場変動が直接の原因であるが、一部の四極電磁石の電源がKEK-PS磁場変化の誘導を受けていたことによる。このように、チューンモニターは、ビームスペクトルの異常を検知し、加速器のハードウェアに対して警告を与えた。これは、ビームモニター本来の役目を果たした一つの例と言える。

四極電磁石の電源の調整により、チューンの変動は小さくなったものの、その変動がなくなったわけではない。実際、チューンをさらに半整数共鳴に近づけると、スペクトル波形が乱れることが観測された。チューンの変動巾は、一般に半整数共鳴のストップバンド巾とも関係している。特に、半整数共鳴近くで運転しているKEKBにとっては、チューンの変動は重要な関心事である。このストップバンドへの引き込み現象は、ビームダイナミクスの観点からも興味あるテーマである。

KEK-PSは今年12月で物理実験を終了すると聞いている。したがって、今後PSの影響はないであろう。しかし、チューンを変化させる要因は他にもいろいろあるので、今後とも注意して観測すべきである。チューン及びそのスペクトルは、ビームダイナミクスを調べる時に有益なビーム情報を我々に与える。

各種データを提供していただきましたKEKBコミッショニンググループの方々、PS運転に関して調査ご協力いただきましたKEK-PSの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Akai, et al., “Commissioning of KEBK”, Nucl. Instrum. Methods A499 191 (2003).
- [2] T. Mimashi, et al., “Coherent Beam Oscillation in the Frequency Region from 0.1Hz to 50Hz at KEBK Ring”, Proceedings of the EPAC 2000, Vienna, Austria, 424 (2000).
- [3] T. Ieiri, et al., “The Transverse Feedback System for the TRISTAN AR”, Proceedings of the 5th Symposium on Accelerator Science and Technology”, Tsukuba, Japan 157 (1984).
- [4] E. Courant and H. Snyder, “Theory of the Alternating-Gradient Synchrotron”, Annals of Physics, 3, 1 (1958).