

LONGITUDINAL BEAM PROFILES AFFECTED BY THE CURRENT RIPPLES OF BENDING MAGNETS IN HIMAC SYNCHROTRON

Ken Katagiri, Takuji Furukawa, Akihiro Higashida, Kota Mizushima, Yoshiyuki Iwata, Shinji Sato, Toshiyuki Shirai, and Koji Noda

Department of Accelerator and Medical Physics, National Institute of Radiological Sciences,
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan

Abstract

The relation between the longitudinal-emittance growth and the noise profiles of the power supply for the bending-magnets was studied to avoid the particle losses from the bucket during the several-minutes circulation. In order to investigate the effect of the actual noise ripples of the power supply, as well as monochromatic noise near to the synchrotron-oscillation frequency, on the temporal evolution of the longitudinal emittance, the beam distribution on the longitudinal phase space was simulated using the tracking method. We found that the longitudinal emittance was increasing with time owing to the series of the noise spectrum, not to the monochromatic noise.

HIMAC シンクロトロンにおける BM 電源ノイズの縦方向ビームプロファイルへの影響

1. はじめに

放射線医学総合研究所では、2011年5月より3次元スキヤニング照射法による治療を開始した[1, 2]. この照射の為に、エネルギー変更時間の短縮化とデューティー比の向上を狙って、可変エネルギーパターンによる運転制御と拡張フラットトップ運転をHIMAC シンクロトロンで採用している[3]. この運転では、入射・加速されたビームを各エネルギーで必要に応じた量だけ取り出し、使い切れずに残った場合には、減速の後に異なるエネルギーで取り出しを行う。この新たな方法を運用場合には、照射レートが非常に低い場合等、ビームが取り出し区間で数分間リング内を周回する場合がある。

これまでに行った5分程度のフラットトップ拡張運転試験では、縦方向エミッタンスが時間と共に増加し、さらにバケットからのビーム溢れが生じる事を確認している。バケットから溢れたビームは、先に述べた可変エネルギーパターンでの減速時に失われる。したがって、デューティー比向上の観点から、このエミッタンス増加/ビーム溢れは好ましくない。

縦方向エミッタンス増加の原因の一つとして、Bending Magnet (BM) 電源のノイズによって生じる周長の変化が挙げられる。そこで、エミッタンス増加の改善法を検討する為に、BM 電源ノイズの振幅や帯域成分と縦方向エミッタンスの関係を調査した。非断熱的な影響を与えうるリップルを故意に電源に印加し、エミッタンスの増加とバンチ形状の変化を測定した。また、この実験結果の検証を行う為に、同様の電源リップルを考慮したエミッタンスの時間依存性、及び位相空間内粒子分布を求める計算を行った。さらに、測定により得たノイズ信号を使った計算も行い、縦方向エミッタンスの時間変化を検証した。

2. 実験と計算の方法

実験時のHIMAC シンクロトロンのパラメータを表1に示す。バンチプロファイルはリング内の静電ピックアップからデジタルオシロスコープを用いて測定した。測定したバンチ波形より得られる $\pm 1\sigma$ のプロファイル幅から、位相空間状のハミルトニアンを仮定し、その面積を積分することで、エミッタンスを求めた。磁場変動 $\Delta B/B$ は、サーチコイルにより測定した。面積 $2 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 、100回巻きのサーチコイルを偏向電磁石の磁極間に挿入しその出力を直接データロガーで測定した。電源リップルは、電流振幅強度 $\Delta I/I=10^{-4}$ となるように、信号発生器を用いて電源に備わる外部補正端子から印加した。

計算は粒子トラッキング法を用いて行った。粒子数は 10^3 個とし、必要に応じて600秒までの計算を行った。位相空間上での初期分布は、運動量広がり $\Delta p/p$ を $\pm 1\sigma=2.5 \times 10^{-4}$ でガウス分布させ、また位相方向には一様に分布させた。この状態から、キャプチャと加速を含めて計算し、フラットトップ開始直後の分布を決定した。単色リップル、及びノイズの印加は $t = 1 \text{ s}$ から開始した。測定から得たノイズを

表 1: ビーム試験時のパラメータ

Beam species	290-MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$ ion
Number of ions per cycle	$\sim 10^{10}$
Betatron tune (Q_x, Q_y)	(3.68, 3.13)
Momentum spread after injection (1σ)	2.5×10^{-4}
Longitudinal rf voltage V_{rf}	2.0 kV
Transition gamma γ_t	3.67
Harmonic number h	4
Revolution frequency @ flattop f_{rev}	1.498 MHz
Frequency of synchrotron oscillation @ flattop f_s	1.18 kHz

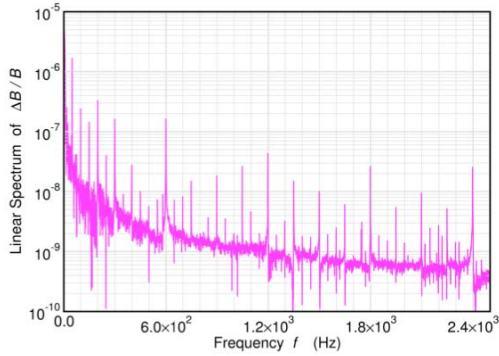


図 1: $\Delta B/B$ のスペクトル分布

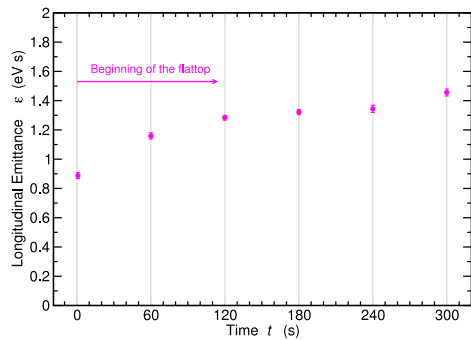


図 2: 縦方向エミッタンスの測定結果.

計算に用いる場合には、周回周波数より十分に低い $f < 20 \text{ kHz}$ ($\ll 10^3 \text{ kHz}$) 以下の帯域成分だけを考慮した。また、ターン数が同じであれば、全ての粒子が同じ摂動を受けると仮定した。

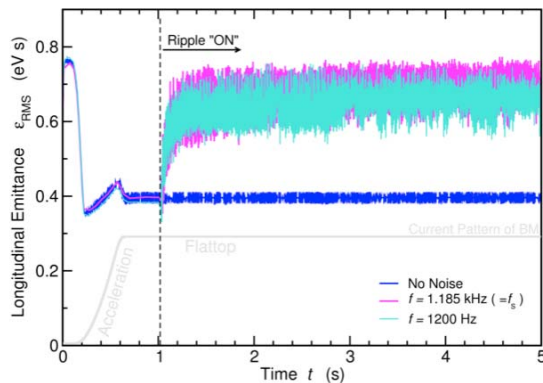


図 3: 縦方向エミッタンスの計算結果. 単色リップルの場合.

3. 実験/計算結果

図 1 に、サーチコイルによって得られた磁場変動値 $\Delta B/B$ の周波数解析結果を示す. 50 Hz の商用周波数成分と 24 相 (=12×2) サイリスタ整流回路に起因する 600 Hz (=50×12) の定数倍に当たる成分でピークを見る事が出来る. 最も大きい成分は 50 Hz 成分で、 $\Delta B/B \sim 10^{-6}$ である.

図 2 にバンチプロファイル測定によって得られたエミッタンスの時間依存性を示す. 各々のエラーバーは、1500 周回分の測定データの平均として評価した. 時間の経過とともに、単調にエミッタンスが増加している事が分かる.

図 3 に、単色リップルを加えた場合のエミッタンスの時間依存性の計算結果を示す. 単色リップルの周波数は、 $f = f_s$ (シンクロトロン振動数) 及び 1200 Hz であり、また比較のためリップル無しの結果もプロットしてある. $t = 0.6$ での急激な変化は、加速区間にでのアクセプタンスの変化に起因する. $t = 1 \text{ s}$ でのリップル印加開始と共に急激にエミッタンスは増加する. しかし、その後にエミッタンスの値は一定の値を保たれ、単色のリップルのみでは図 2 のような単調増加は見られない事が分かった.

単色のリップルを印可した場合の粒子運動の変化を理解するために、位相空間上での分布を時間の経過と共にプロットした. その結果を図 4 (a) - (d) に示す. この計算では、 $f = 1200 \text{ Hz}$ のリップルを印加している. エミッタンスの広がり、図 3 の示す通り、リップル印加と同時に生じていることが分かる. その後、エミッタンスの増加は無いままに、リップルの振動数に同期したダイポール振動をしている事が分かった. リップル振動数に同期したダイポール振動は、実験においても同様に確認出来た. 図 5 は、 $\Delta B/B \sim 10^{-4}$ でリップルを印可した場合のバンチプロファイルをマウンテンプロットした結果である. この実験では、 $f = f_s$ のリップルを加えているため、その周波数で振動が見られる. 図中”A”の示す通り、

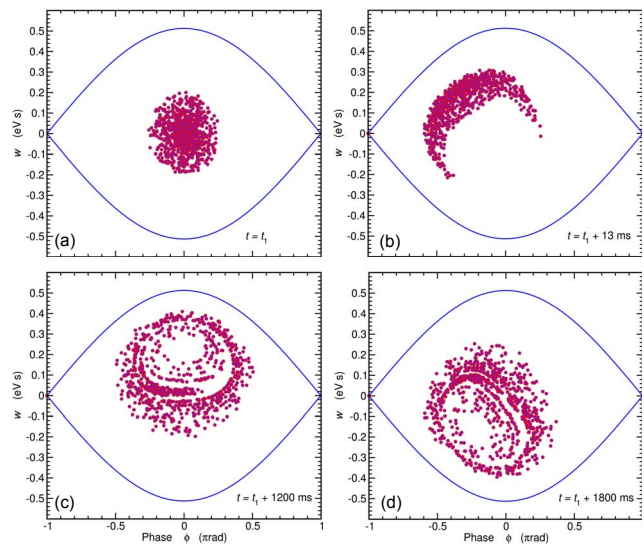


図 4: 位相空間上での時間変化

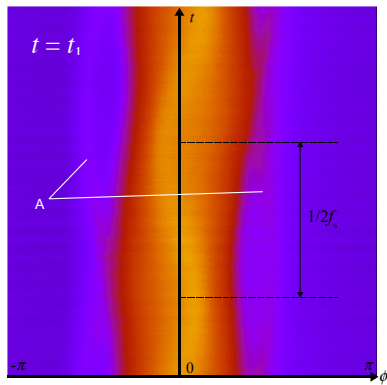


図 5: 実験により得られたマウンテンプロット. シンクロトロン振動数に等しい電源リップルを加えた場合.

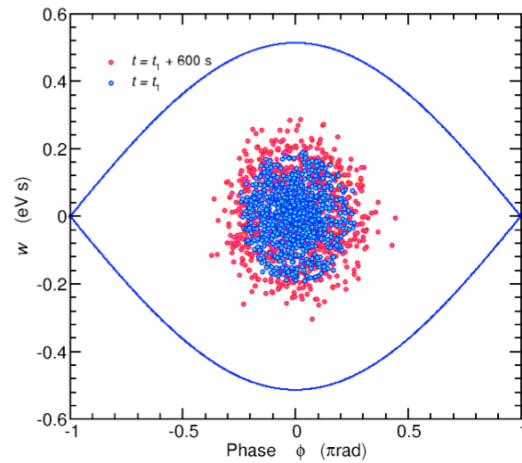


図 7: 位相空間上での $t=0, 600$ s におけるビーム分布の違い. 実験により得たノイズを用いた場合.

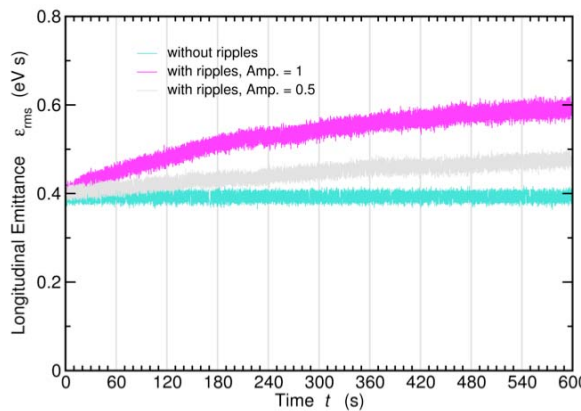


図 6: 縦方向エミッタンスの計算結果. 実験で測定したノイズを用いた場合.

バケットから溢れるビームがフィラメンテーション状に存在する事が分かる. これは, すでにエミッタンスが広がった状態から振幅の大きいリップルを加えたために, ダイポール振動の際にセパトリクスを超えて溢れた為である.

以上の計算結果からは, 基本的に単色のリップルだけではエミッタンスの単調増加にはならない事が分かった. 周波数の異なる複数のリップルを磁場変動として加えた場合に生じる位相空間上でのビーム分布の変動を考察する為に, 測定により得られた実際の磁場変動 $\Delta B/B$ データを用いた計算を行った. 図 6 にこの結果を示す. 比較のため, ノイズ無しの場合 (without ripples), 振幅を $1/2$ にした場合 (Amp.=0.5), 測定データそのままの場合 (Amp. = 1) の 3 つに関してプロットした. 時間の経過と共に, エミッタンスは単調に増加している事が分かる. また, その増加は 300 秒の周回で数十パーセント程度であり, 図 2 の実験結果での増加量と近い結果が得られた. シンクロトロン振動数は, セパトリクス内の粒子位置に依存して連続的に変化する. そのため, 各粒子の振動振幅の程度によって, その粒子を

加熱しうる帯域が決まる為に, 単色のリップルでは生じなかった, エミッタンスの時間に対する単調増加が複数のリップル成分を含む場合には生じたと考えられる. エミッタンスの絶対値が異なるのは, 今回のシミュレーションでは, 加速中のトラッキング誤差を考慮していない為である.

図 7 に位相空間上での分布の違いを示す. 600 秒間の周回により, 明らかにエミッタンスブローアップが生じている事が分かる.

4. 結論

縦方向エミッタンス増加の原因を調べるため, 単色のリップルを電源に印可した場合のビーム分布及びエミッタンスの変化を, 実験と計算により調査した. 計算の結果からは, 変動の振幅が十分に大きくても, 単色のリップルだけではダイポール振動を励起するのみであり, 直接的にはエミッタンスの時間に対する単調増加には繋がらないことが分かった. 複数の周波数の異なるリップル成分を含んだ実際の電源ノイズを考慮した計算では, 周回時間の増加と共に, エミッタンスも単調に増加することが確認された.

今後は, エミッタンスの時間に対する単調増加に強く影響を及ぼす帯域分布を詳しく調査し, ビーム溢れの改善法を検討する予定である.

参考文献

- [1] T. Furukawa, et al., Med. Phys. 37 (2010) 5672.
- [2] K. Mizushima, et al., in this proceedings.
- [3] Y. Iwata et al., Nucl. Instr. and Meth. A 624 (2010) 33.