

Burst Coherent Radiation at the SPring-8 Storage Ring

Takeshi NAKAMURA, Shiro TAKANO, Kazuhiro TAMURA, Mitsuhiro MASAKI, Akira MOCHIIHASHI

Japan Synchrotron Radiation Research Institute / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, JAPAN 679-5198

Abstract

At the SPring-8 storage ring, the anomalous longitudinal bunch shape deformation and the increase of the energy spread were observed at the high bunch current, and the burst density modulation by microwave instability at such regime was expected by the PIC simulation with the estimated wake functions, which explained the observed bunch shape deformation and energy spread. Such density modulation should produce the coherent radiation and the burst edge coherent radiation was surveyed at the accelerator diagnostics beam line II (BL05SS).

SPring-8 蓄積リングにおけるバースト的コヒーレント放射の測定

1. はじめに

バンチ電流の増大に伴い、バンチ長よりも短い波長での放射がバースト的に発生することが、種々の蓄積リングにおいて観測されている[1-5]。しかし、これらの報告は、比較的低エネルギーの小型リングでの観測であり、SPring-8級の大型のリングでの観測はこれまで報告されていない。SPring-8 蓄積リングでは、バンチ長、バンチ時間形状およびエネルギー広がりバンチ電流依存性の測定から、3mA/bunch 以上で何らかの現象が生じていることが判明している。また、MAFIA などの数値計算や、理論計算から得られたウェーク場を用いたPICシミュレーションでは、このバンチ電流以上において、バンチ内部に細かいバンチ(マイクロバンチ)を生成するマイクロウェーブ不安定性が発生するという結果が得られている。これらから、3mA/bunch 以上においてマイクロバンチによる mmスケールでのコヒーレント放射が発生していることが期待される。そこで、今回、このようなコヒーレント放射の計測を、エッジ放射を用いて行い、バンチ電流に比例以上の強度依存性を持つ放射の発生を観測した。

2. バンチ長、エネルギー広がりバンチ電流依存性

SPring-8 蓄積リングのパラメータを表1に示す。

表1: SPring-8 蓄積リングのパラメータ

Energy	E_0	8	GeV
Revolution period	T_0	4.8	μs
Synchrotron Period	T_s	0.5	ms
Natural energy spread (rms)	$\sigma_{\delta, Ring}$	0.11	%
Momentum Compaction Factor	α	1.46×10^{-4}	
Average Radius	$\langle R \rangle$	230	m
Bending Radius	R	39.3	m
Natural Bunch length (rms)	σ_z	3.5	mm
Beam pipe radius	b	20	mm

ストリークカメラを用いたバンチ長測定および、ディスプレイのある場所でのビームサイズ計測から得られたエネルギー広がりバンチ電流依存性をそれぞれ図1および図2に示す。

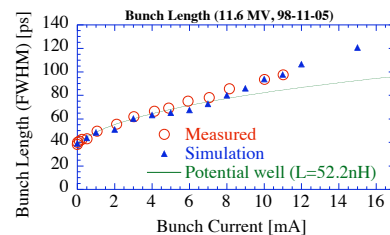


図1 バンチ長のバンチ電流依存性(○)。実線は broadband impedance としてインダクタンス 52.2nH を仮定した場合の potential well distortion によるバンチ長。6 mA/bunch で傾きが増大している。▲はシミュレーション結果を示している。

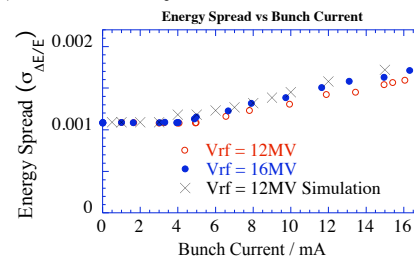


図2 エネルギー広がりバンチ電流依存性。4mA/bunch 付近から広がりが増大している。点×はシミュレーションの結果を示している。

図1では、バンチ長の増大率が、6mA/bunch 近辺から増大しており、エネルギー広がりが無いともしもめた potential well distortion (PWD)の計算では説明が困難である。そこでエネルギー広がりを、ディスパージョンが0でない場所でのビームの水平方向サイズの測定から求めた結果を図2である。エネルギー広がりは、5mA/bunch から顕著に現れており、バンチ長の伸び方の異常はエネルギー広がりに関連する可能性がある。

3. ウェーク場を用いたPICシミュレーション

これらの現象の解析のため、MAFIAの計算や、理論式から得られたウェーク(図3)をもとに PIC シミュレーション[6,7]を行った。求めたバンチ長を図1、エネルギー広がりを図2に、またバンチ形状を図4に示す。これらは観

測値とよく一致している。文献[6]では、ウェークの計算結果をモデルに当てはめてシミュレーションを行っていたが、今回は、ウェーク自体を用いて行ったところ、エネルギー広がりが発生し、実験とのよい一致をみた。なお、図1-5の測定および計算時のRF空洞の数は、現在と異なり、24台である。

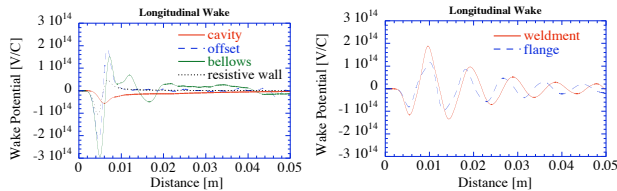


図3 シミュレーションで用いたウェーク。バンチ長1mm (rms) のウェークをグリーン関数として用いた。Cavity(RF空洞), bellows, offsets (ビームパイプ接合部のずれによる段差), weldments (溶接接合部:幅×深さ=0.5mm×2mmのギャップ、共振周波数~32GHz)、flange (幅×深さ=0.5mm×3mmの三角形の溝、共振周波数~34GHz)についてはMAFIAの結果であり、resistive-wall(アルミ)は文献[8]の式(2.22)を用いた。

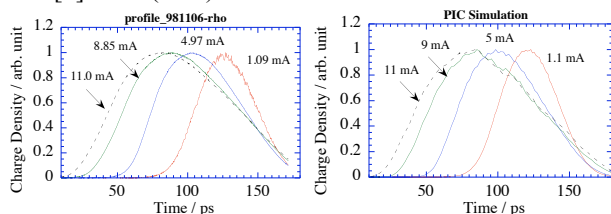


図4 バンチの時間形状のストリークカメラによる測定結果(左) およびPIC シミュレーションの結果(右)を示す。シミュレーション結果は、時間平均を行っているストリークカメラの結果にあわせて時間平均したものであるため、大バンチ電流でのマイクロバンチはならされている。

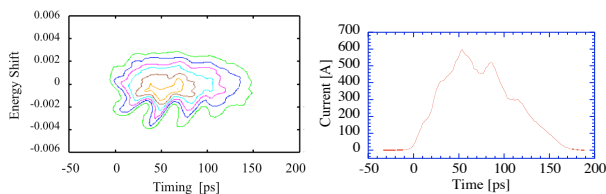


図5 上図のシミュレーションにおける11 mA/bunch での粒子の位相空間分布(左)と時間分布(右)。図4とは異なり、単一ターンでのショット(データ)である。マイクロバンチが形成されているのがわかる。

エネルギー広がり発生は、図5に示す粒子分布のように、マイクロバンチの発生によるものとなっている。さて、weldments や flange のウェークを除いたシミュレーションでは、マイクロバンチは生じずエネルギー広がり大きく低減するので、シミュレーション上では、これらのウェークが、マイクロバンチの生成に寄与していることがわかってきている。また、シミュレーションでは、これらのウェークが、マイクロバンチを生成する過程で、より高い周波数成分をもつ急峻な電荷分布を生成していることも判明しているので、今回得られた 75-100GHz の高い周波数でのコヒーレント放射の生成も、ほぼ、このようなビームパイプの

形状変化によるウェークの寄与の可能性は残されている。但し、シミュレーションでは1mm(rms)のバンチの生成するウェークをもとにしており、その周波数帯域は 50GHz程度から落ち始めるため、より短いバンチの生成するウェークを用いたシミュレーションが必要である。

4. コヒーレント放射の計測

Schottky barrier diode を用いた検出器[9] を用いて、SPRing-8 蓄積リングの加速器診断用ビームラインID05[10] の下流の偏向磁石の入り口において発生するエッジ放射を測定した(図6)。エッジ放射は、長波長では偏向磁石からの通常のシンクロトロン放射より強く、かつ指向性がよいので[11,12]、通常のシンクロトロン放射のビームパイプによるカットオフより低い周波数の放射が観測できる可能性がある。偏向磁石入り口発生したエッジ放射は、ミラー、クォーツ窓を経てホーンアンテナにより収集され検出器へと導かれる。得られた放射の強度のバンチ電流依存性を図7に示す。低電流では観測されなかった放射が、バンチ電流の増大とともに急激に増大している。放射強度の時間構造を図8に示す。5mA/bunch では定常的に発生しているが、9 mA/bunch, 11mA/bunch の大電流ではバースト的に発生している。

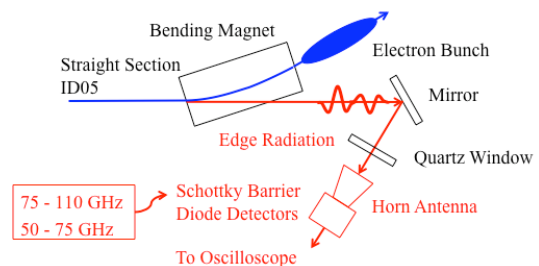


図6 コヒーレントエッジ放射計測のセットアップ。帯域の異なる2台の検出器を用いた。

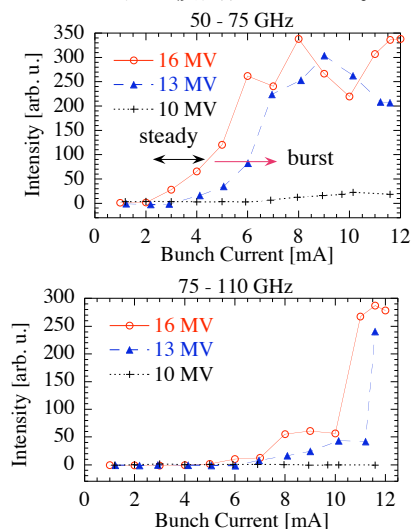


図7 放射強度のバンチ電流依存性。上図は 50-75GHz 帯域の検出器、下図は 75-100GHz 帯域の検出器での結果であり、RF加速電圧 (16MV, 13MV, 10MV)を変えて測定を行った。

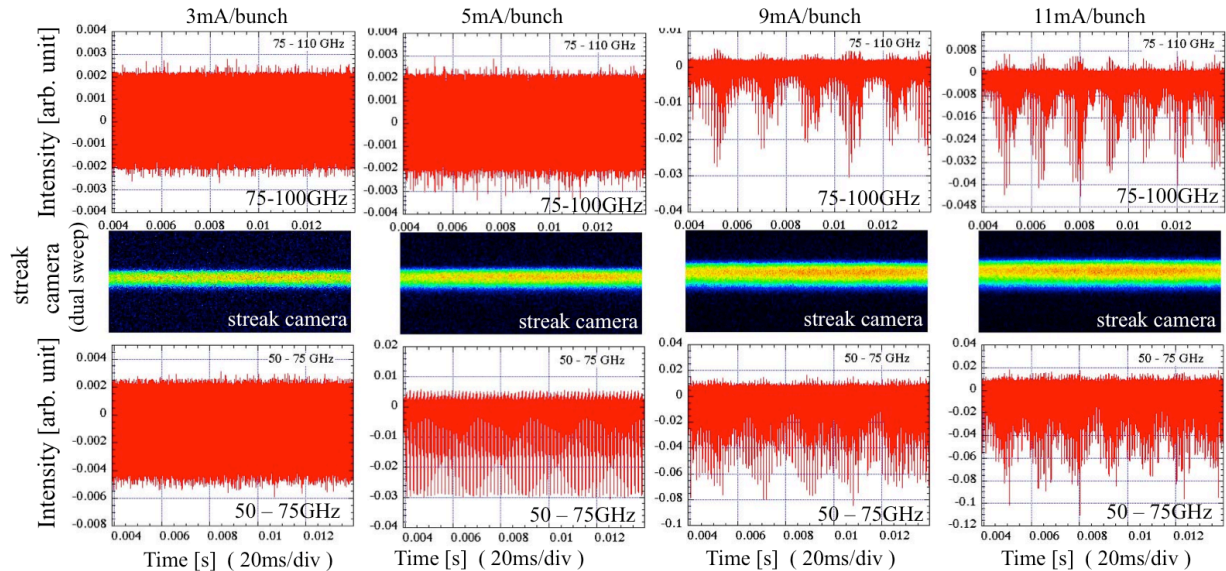


図8 コヒーレント放射強度の時間構造。信号は負の側に出ている。左から、3, 5, 9, 11mA/bunch。上図が75-100GHz検出器、下図が 50-75 GHz検出器での測定。中央の図は、ストリークカメラの結果(dual sweep での計測であり、縦:バンチ形状測定、横:検出器の時間スケールと同等、但し、同期はとれていない)を示す。

5. コヒーレント放射ウェークの寄与の検討

コヒーレント放射自体がウェークとして働き、マイクロウェーブ不安定性を引き起こし、マイクロバンチを生成するという現象が、小さなリングではバースト的なコヒーレント放射の主な原因と示唆されている[3]。ここでは文献[13]に従い、その寄与を検討した。得られたパラメータを表にしめす。ウェークを発生するコヒーレント放射は、通常のシンクロトロン放射のみを仮定している。

表:2 コヒーレント放射のウェークによるマイクロウェーブ不安定性の見積もり[13]

観測された放射帯域	50-75 GHz	75-100 GHz
放射の増大の閾値電流	3mA/bunch	11mA/bunch
Peak current	370 A	660 A
Energy spread (rms)	0.11 %	0.15 %
Bunch length (rms)	6.4 mm	10.5 mm
Bunch shape spectrum	< 16 GHz	< 4.6 GHz
Unstable frequency	< 120 GHz	< 110 GHz
Synchrotron radiation	110GHz (文献[14])	
ビームパイプカットオフ	210 GHz (文献[13,15])	

表2から、11mA/bunch では、110 GHz 以下の周波数で不安定となることがわかる。一方、文献[14]から求めたビームパイプのカットオフ周波数(これ以下ではシンクロトロン放射が発生しない)は110GHzとなり、周波数帯域が重なる110GHz付近では不安定が生じている可能性がある。しかし、カットオフ周波数から、50-75GHz の領域ではコヒーレント放射による不安定性は考えにくい。そのため、この領域の不安定性は、形状変化のウェークによる可能性が高いと考えられる。また、定常的な放射がみられた領域では、PWD によるバンチ形状の変形による放射が示唆される。なお、観測された放射は、通

常のシンクロトロン放射に比べて角度広がりが狭くカットオフ周波数が低いと期待されるエッジ放射、または形状変化で発生したウェークが伝播してきたのではないかとと思われる。前者であればエッジ放射自体による不安定性も今後の検討課題となる。

最後に、コヒーレント放射と検出器に関しての有益な助言について庄司善彦博士(兵庫県立大)に感謝します。

参考文献

- [1] U. Arp, et al., Phys. Rev. ST-AB, 4, 054401 (2001)
- [2] G. L. Carr, et al., NIM A 463, p387 (2001).
- [3] J. M. Byrd, et al., Phys. Rev. Lett. 89, 224801-1 (2002).
- [4] M. Kato, et al., Proc. of 加速器学会2004, p.199.
- [5] Y. Shoji, et al., Synchrotron Radiation Instrumentation: 9-th International Conference, p107 (2007).
- [6] T. Nakamura, EPAC94, WEP104G (1994). T. Nakamura, Proc. of 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Japan.
- [7] T. Nakamura, Workshop SAD2006 (<http://acc-physics.kek.jp/SAD/SAD2006/Doc/Slide/Nakamura.pdf>). Also in <http://acc-web.spring8.or.jp/~nakamura>. (2006),
- [8] A. Chao, "Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators", Wiley, (1993).
- [9] Millitech, <http://www.millitech.com/MixersDetectors.htm>
- [10] 高野史郎, et al., "SPring-8蓄積リング加速器診断ビームラインの現状", proc. of 加速器学会2009.
- [11] S. Takano, SPring-8 Annual Report '95, p136 (1995), http://www.spring8.or.jp/pdf/en/ann_rep/95/p136-137.pdf, S. Takano, ビーム物理研究会2005 (2005), (<http://beam.spring8.or.jp/beamphysics>).
- [12] O. V. Chubar, M V. Smolyakov, PAC93, p.1626.
- [13] S. Heifets and G. Stupakov, Phys. Rev. ST-AB 5, 054402 (2002).
- [14] R. Warnock, et al., Phys. Rev. ST-AB 8, 014402 (2005).
- [15] J. Schwingner, LBNL-39088 (1945).