

UVSOR におけるシングルバンチ運転時のビーム不安定性の測定 MEASUREMENT OF BEAM INSTABILITY IN SINGLE BUNCH OPERATION IN UVSOR ELECTRON STORAGE RING

高橋和義^{#,A)}, 持箸晃^{A,B)}, 保坂将人^{B)}, 長谷川純^{A)}, 藤本将輝^{C)}, 高嶋圭史^{A,B)}, 加藤政博^{C,B)}
Kazuyoshi Takahashi^{#,A)}, Akira Mochihashi^{B)}, Masahito Hosaka^{B)}, Jun Hasegawa^{A)},
Masaki Fujimoto^{C)}, Yoshifumi Takashima^{B)}, Masahiro Katoh^{C)}
^{A)}Graduate School of Engineering, Nagoya University
^{B)}Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University
^{C)}UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

To investigate the single bunch instability at the UVSOR electron storage ring, we measured the electron bunch length by a streak camera. We observed that the bunch length increased and the synchronous phase shifted as the beam current increases. The bunch length in the low current range was consistent with the calculation assuming the momentum compaction factor obtained from the measured synchrotron frequency.

1. はじめに

分子科学研究所極端紫外光研究施設(以下 UVSOR)では通常はマルチバンチ運転を行っている一方でパルス光利用者のためのシングルバンチ運転も年間 2 週程度行っている。UVSOR の主な運転パラメータを Table 1 に、全体図を Figure 1 に示す。

UVSOR ではこれまで大規模な加速器改造を 2 回行っているが、シングルバンチ運転時の最大蓄積ビーム電流は改造を経るに従い次第に低下する傾向がある。我々はこの原因を何らかのビーム不安定性によるものと推測し、本研究ではまず縦方向のビーム不安定性に着目し、シングルバンチ運転時における縦方向の電子バンチの挙動を可視光ストリークカメラにより観測した。特に本論文では、電子バンチ長のビーム電流依存性の測定結果を報告する。

Table 1: Parameter of UVSOR Electron Storage Ring[1]

Energy	750MeV
Beam Current	50mA(single) 300mA(multi)
Circumference	53.2m
RF Frequency	90.1MHz
Harmonic Number	16
Bending Radius	2.2m
RF Voltage	120kV
Momentum Compaction Factor	0.030
Energy Spread	5.24×10^{-4}
Natural Bunch Length	128ps

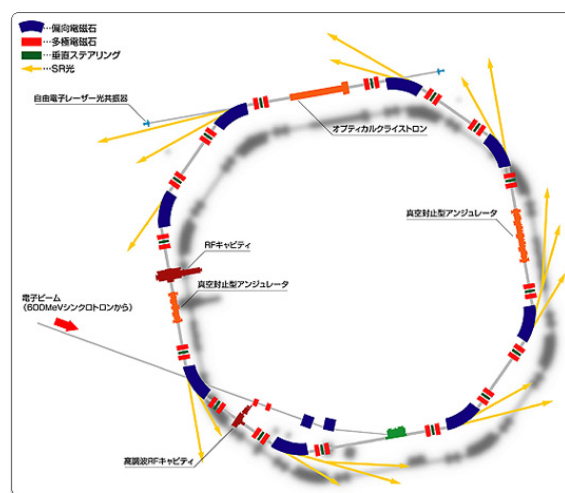


Figure 1: Over view of UVSOR electron storage ring[2].

2. 実験方法

本実験は UVSOR の BL1U(Figure 2)で行い、アンジュレーター光ではなく、アンジュレーターの上流と下流にある偏角電磁石の端部から発せられるエッジ放射光を用いた。

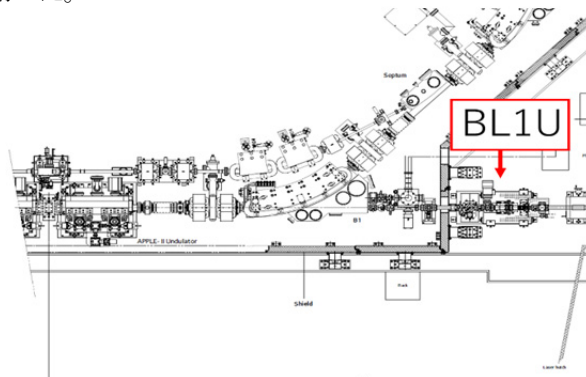


Figure 2: Drawing of UVSOR-BL1U.

[#] takahashi.kazuyoshi@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

2.1 光学経路の構築

取り出したエッジ放射光をストリークカメラへ導入するための光学経路(Figure 3)を構築した。

Figure 3 の右側が光源側となっており、光源側から順にアイリス、ミラー2枚組みのペリスコープ、レンズ、手動シャッター、ND フィルタ、ストリークカメラという経路となっている。アイリスにより放射光の最も明るい部分のみを取出した。続いて、放射光の垂直レベルとストリークカメラの入射スリットに高低差があるためペリスコープを設置して2枚のミラーにより放射光の高さを調節した。その後、ストリークカメラの入射スリットに放射光を入射するため、凸レンズを設置した。最後に、良好な時間分解能を得るために光電面の空間電荷効果を低減すべく ND フィルタを設置し、放射光を減光してストリークカメラに導入した。

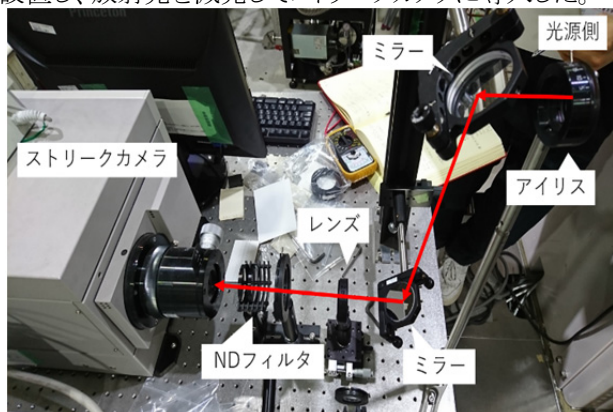


Figure 3: Optical path to streak camera.

2.2 ストリークカメラのセットアップ

本実験では、可視光ストリークカメラ(浜松ホトニクス、C5680)を用いた。このストリークカメラは縦軸方向と横軸方向の二軸掃引を行うため、掃引を行うためのタイミング信号がそれぞれの方向に対して必要である。縦軸方向の掃引については、ビームと同期させるために RF 周波数 90.1MHz のタイミング信号を用いた。横軸方向についてはビームとの同期を考慮せず、本実験では 1Hz のタイミング信号を用いた。

タイミング信号を準備した後、二軸掃引させたストリーク像を確認した(Figure 4)。このとき、電子蓄積リング内の電子ビームのシンクロトロン振動数が 19kHz であることを考慮し、横軸の時間範囲を 1ms として、シンクロトロン振動の発生の有無を容易に確認できるように設定した。

2.3 測定

シングルバンチ運転で電子ビームを約 33mA まで蓄積した。その後、スクレーパーを用いてビーム電流を減少させながらストリーク像を測定、記録した。ビーム電流が減少するにつれ光強度が減少したため、その都度適切なストリークカメラの MCP Gain を選択して実験を行った。

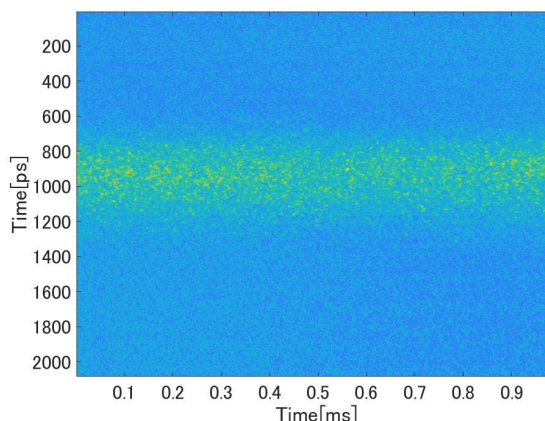


Figure 4: Streak image taken by double axis sweep.

3. 実験結果・解析

3.1 解析方法

安定周回する蓄積ビームは、シンクロトロン位相を中心に正規分布している。したがって、ストリーク像からバンチ長を算出するためには、電子分布を正規関数でフィッティングして、その標準偏差 σ をバンチ長とする方法が一般的である。しかし、電子の分布が正規分布となっているかどうかは自明ではない。そこで本実験では正規関数のフィッティングを行わない方法による解析を行った[3]。

MATLAB を用いて、得られた画像データを光強度を行列要素とする二次元配列(行、列はそれぞれ画像データの水平、垂直方向の pixel 番号に対応する)として扱い、水平方向に射影することで pixel 毎の光強度分布を求めた。光強度分布から、光強度の重心位置 μ (式(3.1.1))、標準偏差 σ (式(3.1.2))を求め、標準偏差 σ をバンチ長と定義した。 x は pixel 番号であり、 $f(x)$ は、その pixel 番号での光強度である。

$$\mu = \frac{\sum xf(x)}{\sum f(x)} \quad (3.1.1)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x - \mu)^2 f(x)}{\sum f(x)} \quad (3.1.2)$$

式(3.1.1), (3.1.2)を利用することで、正規関数フィッティングによらないバンチ長算出が可能であるが、画像データからバックグラウンドを正確に差し引けないと、バンチ長を正確に算出することが出来ない。本実験で得られた画像データには環境光及び測定器のバックグラウンドが入り込んでいる可能性があるため、選択した MCP Gain それぞれの場合においてストリークカメラに放射光を導入しない状態で測定したバックグラウンドデータを差し引いた。Figure 5 の Streak Image にバックグラウンドを差し引いた光強度分布を示す。その後、ストリーク像が写っている領域のみを選択し、その領域で式(3.1.1), (3.1.2)に従って解析を行った。

また、ストリークカメラに入射する光の空間的拡がりすなわち、フォーカス像により観測バンチ長が本来のバンチ長の値よりも伸長する。フォーカス像についても上述

のように光強度分布を求め(Figure 5 の Focus Image)、この光強度分布が正規分布であると仮定して FWHM を算出し、そこからフォーカス像による時間拡がり σ_{focus} を算出した。Figure 5 の Streak Image から求められる観測バンチ長が 158ps であるのに対して Focus Image から求められる時間拡がり σ_{focus} が 25.5ps であったため、フォーカス像の時間拡がりは無視できず校正する必要がある。観測バンチ長を σ 、実際のバンチ長を σ_{bunch} とすると、

$$\sigma_{bunch} = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_{focus}^2} \quad (3.1.3)$$

が成り立つ。これにより、 σ_{focus} 及び解析により得られた σ から実際のバンチ長 σ_{bunch} を求め校正を行った。

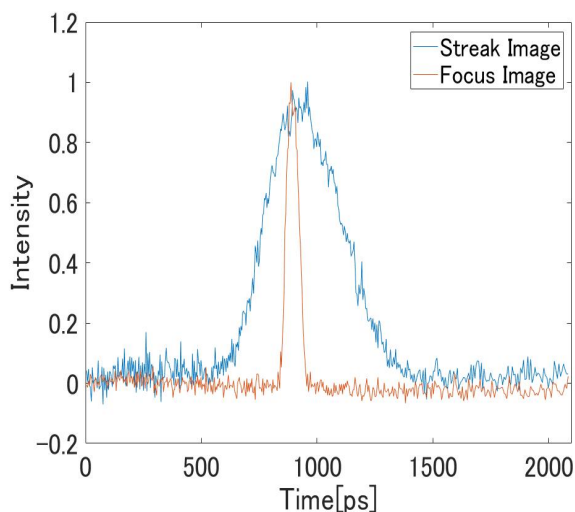


Figure 5: Distribution of SR light obtained by streak image and focus image.

3.2 解析結果

Figure 6 にビーム電流が 2.2mA と 32.9mA のそれぞれにおける光強度分布(光強度のピーク値を 1 としている)の比較図を示す。ここで、図の左側がビームの前方である。Figure 6 から、ビーム電流が増加するにつれバンチ長が伸長し、光強度分布のピークとなるタイミングが前方へ移動していることが分かる。

また、Figure 7 に解析・校正により得られたバンチ長のビーム電流依存性、Figure 8 に光強度分布の重心位置の電流依存性を示す。なお、Figure 8 の縦軸は 32.9mA の時の重心位置を基準とし 0 としている。また、これらのデータについては、バックグラウンドの揺らぎがバンチ長及び重心位置の解析に誤差を与えていると考え、それらの誤差を誤差伝搬則により評価している。0.93mA における誤差が他のデータと比較して大きくなっているのは、バックグラウンドに対するピーク強度が小さく、バックグラウンドの揺らぎの影響が非常に強く表れているためである。

Figure 7 からビーム電流が大きくなるにつれバンチ長が伸長していることが確認でき、Figure 8 からビーム電流が増加するにつれ光強度分布のピークとなるタイミングが前方に移動していることが分かる。

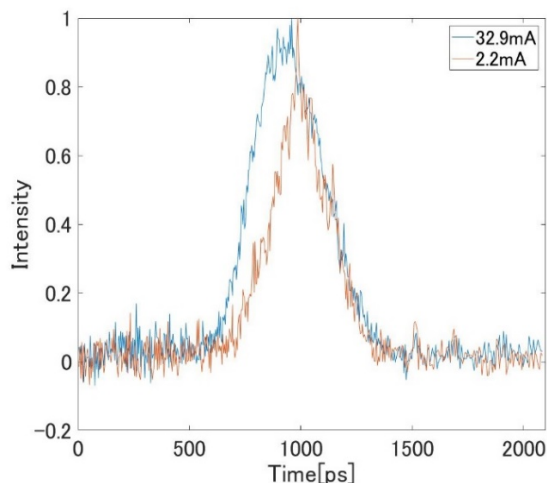


Figure 6: Temporal structure of SR light at 2.2mA and 32.9mA.

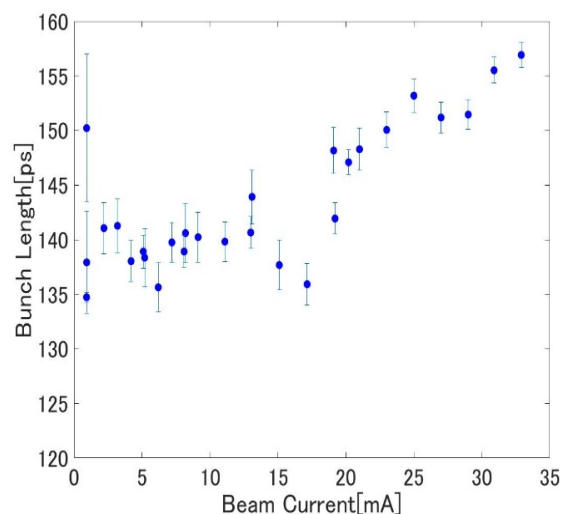


Figure 7: Dependence of bunch length on beam current.

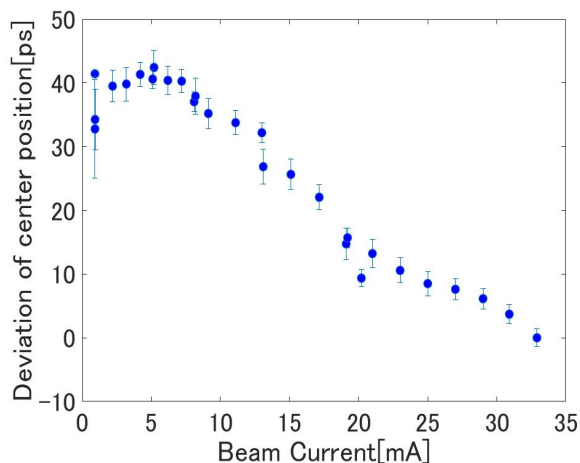


Figure 8: Dependence of center position of the bunch on beam current.

4. 考察とまとめ

本実験で得られた 2.2mA の時のバンチ長 141ps から Momentum Compaction Factor を求めると 0.035 となり、別途測定を行った 2.2mA のときのシンクロトロン振動数は 20.9kHz であり、ここから求められる Momentum Compaction Factor は 0.034 であった。これにより、バンチ長測定結果とシンクロトロン振動数測定結果から求められる Momentum Compaction Factor はほぼ同じであると言えるが、Table 1 に示したデザイン値(0.030)とは若干異なっている。

本実験では、UVSOR の BL1U においてシングルバンチ運転時のバンチ長のビーム電流依存性について測定した。ビーム電流が増加すると、バンチ長が伸長すること、光強度分布の重心位置がずれることを確認できた。Figure 7 の傾向について、Potential Well Distortion[4]と Microwave Instability[4]の両方が考えられるため、バンチ長測定と同時にビームのエネルギー拡がりの測定を今後行い、どちらの影響による傾向なのかを考察する予定である。また、Figure 8 より加速器内の Loss Factor[4]を解析することが可能であるため、今後追実験を行い考察する予定である。

参考文献

- [1] <https://www.uvsor.ims.ac.jp/about/accelerator.html>
- [2] <http://www.aibsc.jp/sj/200604/business/kagaku/index.shtml>
- [3] 山村光平、名古屋大学大学院工学研究科 2017 年修士論文“あいち SR 電子蓄積リングにおける入射時ビーム変動の超高速観測とビーム力学的考察”、pp51.52.
- [4] A. W. Chao, "Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators" (Wiley-Interscience Publication, 1993).