

## あいち SR における RF 位相変調法を用いた電子ビーム安定化

### STABILIZATION OF ELECTRON BEAM BY AN RF PHASE MODULATION AT AICHI SR STORAGE RING

今尾健太<sup>#,A)</sup>, 保坂将人<sup>B)</sup>, 高嶋圭史<sup>A,B)</sup>, 持箸晃<sup>A,B)</sup>,  
真野篤志<sup>B)</sup>, 石田孝司<sup>B)</sup>, 藤本将輝<sup>C)</sup>, 加藤政博<sup>B,C)</sup>

Kenta Imao<sup>#,A)</sup>, Masahito Hosaka<sup>B)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>B)</sup>, Akira Mochihashi<sup>B)</sup>  
Atsushi Mano<sup>B)</sup>, Takashi Ishida<sup>B)</sup>, Masahiro Katoh<sup>C)</sup>, Masaki Fujimoto<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>B)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

<sup>C)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

#### Abstract

In the Aichi SR storage ring, longitudinal coupled-bunch instability occurs above threshold current about 24mA. To suppress the instability, we tested phase modulation technique in which the phase of an RF accelerating voltage was modulated with a frequency of 2 times synchrotron oscillation frequency. By applying the phase modulation with an appropriate amplitude, the longitudinal coupled-bunch instability was successfully suppressed. The larger modulation amplitude is, or the larger beam current is, gave a larger modulation frequency range where the longitudinal coupled-bunch instability was suppressed.

#### 1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター(あいち SR)[1]の光源加速器は、50MeV 直線加速器、1.2GeV ブースターシンクロトロン、1.2GeV 電子蓄積リングから構成されている。ここで、蓄積リングのパラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Parameters of Storage Ring

Beam Energy	1.2GeV
Circumference	72m
Beam Current	>300mA
RF-Frequency	499.97MHz
Harmonic Number	120
Damping Time	(6.69, 6.69, 3.34)ms
Revolution Time	240ns
Synchrotron Frequency	42.3kHz

あいち SR では 2013 年 3 月の稼動開始時よりビーム電流 300mA でのトップアップ運転を行っている[2]。当初から、縦方向の電子ビーム不安定性が確認されているが、その原因についてはこれまで明らかになっていない。本研究では、あいち SR における電子ビーム不安定性を抑制する手法として、RF 位相変調法を試みている。

先行研究では、シンクロトロン振動数の 2 倍で RF 加速空洞の電圧を位相変調させることで、電子ビーム不安定性を抑制できることが報告されている[3,4]。通常、加速空洞の電圧は下式で表される。

$$V = V_0 \sin(\omega_{RF}t + \theta) \quad (1)$$

$V_0$ は最大電圧、 $\omega_{RF}$ は RF 周波数、 $\theta$  は位相オフセット

である。位相変調を適用することにより、加速空洞の電圧は以下の式で表される。

$$V = V_0 \sin(\omega_{RF}t + \theta + \varphi_{m0} \sin(\omega_m t)) \quad (2)$$

$\varphi_{m0}$ は変調振幅、 $\omega_m$ は変調周波数(シンクロトロン振動数 2 倍付近に相当)である。本研究では、あいち SR の加速空洞に位相変調法を導入する準備として、どのような条件で位相変調を適用すると、電子ビームの不安定性が抑制されるか探った。

#### 2. 実験

##### 2.1 電子ビーム不安定性の観測

我々は電子ビームの不安定性の性質をスペクトラムアナライザにて観測した。スペクトラムアナライザを用いて蓄積リング内のピックアップ電極からのビーム信号の周波数スペクトルを観測した。蓄積電流値 300mA、120/120 バンチの uniform filling におけるスペクトルの様子を Figure 1 に示す。499.69MHz と 999.38MHz で RF 周波数に対応するピークが見られ、その他のピークは周回周波数のハーモニクス、あるいはそのサイドバンドと考えられる。周回周波数ハーモニクスの中で、比較的強度が大きいピーク(赤丸で示す)について着目し、その付近のスペクトルの様子を Figure 2,3 に示す。周回周波数の 123 次高調波(512.18MHz、モード 3 に相当)、333 次高調波(1382.48MHz、モード 28 に相当)では、upper sideband の強度が大きく出現していることがわかる。このことから、モード 3 およびモード 28 の不安定性が発生していると言える。モード 28 の不安定性については、加速空洞の高次モードと考えられる。加速空洞の製作時の試験によって、1373MHz に TM021 という

<sup>#</sup> imao.kenta@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

longitudinal mode が確認されており、この周波数はモード 28 の 1382MHz と非常によく一致している。モード 3 の不安定性については、それに該当する加速空洞の高次モードが確認されておらず、現状では原因を特定できていない。

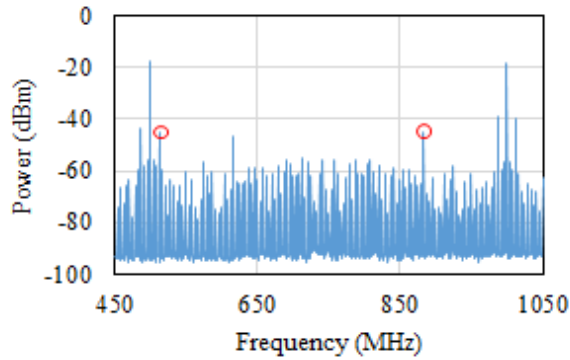


Figure 1: Beam spectrum at uniform filling 300mA condition. Red circles correspond to the enhanced spectral peaks.

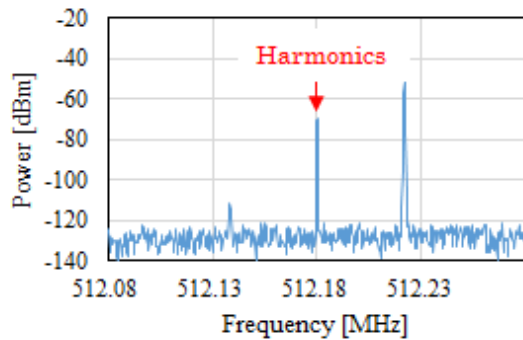


Figure 2: Beam spectrum around 123th harmonics (mode 3) of the revolution frequency.

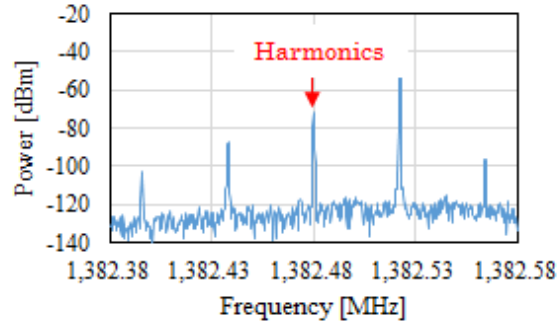


Figure 3: Beam spectrum around 332th harmonics (mode 28) of the revolution frequency.

次に我々は不安定性が生じるビーム電流の閾値を観測した。Filling を 110/120 バンチ条件 (あいち SR の通常運転時の filling) で蓄積電流値を 20.09mA か

ら 300.97mA まで増加させていき、ビームスペクトルを観測した。電流を増加させていった際に、シンクロトロンサイドバンドのピークが出現した時点での電流を不安定性のビーム電流閾値と判断した。20.09mA から 31.93mA に増加させた際に不安定性を示すサイドバンドが出現したため、300.97mA まで電流を増加させた後に電流を 26.93mA まで減少させ、そこから細かく電流を下げながら閾値を測定した。ここで、不安定性の強度の評価方法として、我々は不安定性を示すサイドバンドの信号強度の、周回周波数ハーモニクス信号強度に対する比を不安定性強度と定義する。Figure 4 に不安定性強度を dB 単位で示した場合のビーム電流依存性を示した。青丸は電流を増加させながら測定した点、赤丸は電流を減少させて測定した点を表す。Figure 4 において、赤線で示した -50dB の信号強度がバックグラウンドレベルであるため、不安定性強度の値が -50dB を超えたとき不安定性が生じることを示す。この結果から、不安定性が生じるビーム電流閾値は 23.50mA と 24.00mA との間に存在すると確認できた。

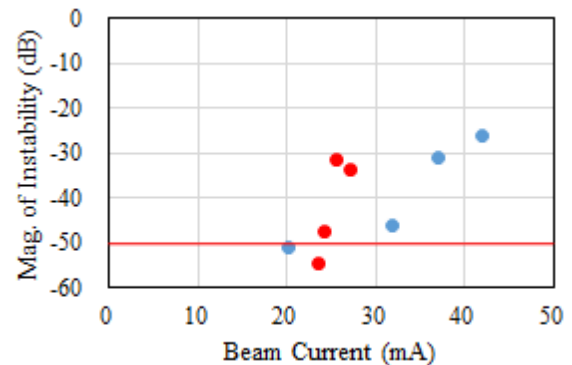


Figure 4: Dependence of the magnitude of instability on the beam current. Red line corresponds to the background level in the measurement.

## 2.2 位相変調実験のセットアップ

通常運転で使用しているシグナルジェネレータでは位相変調実験が不可能であるため、我々は新たに位相変調が可能なシグナルジェネレータと位相変調制御用のファンクションジェネレータを導入した。これによりファンクションジェネレータから  $\omega_m$  (変調周波数) を出力してシグナルジェネレータに入力し、またシグナルジェネレータで  $\varphi_{m0}$  (変調振幅) を設定することで、位相変調実験が可能になった。そのブロック図を Figure 5 に示す。まず、ビーム蓄積しない状態で RF 加速空洞単体による位相変調試験を行った。初めに、変調振幅を増加させていきながら加速空洞内の真空度と加速空洞からの反射パワーの測定を行い、位相変調によって RF 加速空洞システ

ムに問題が生じないことを確認した。

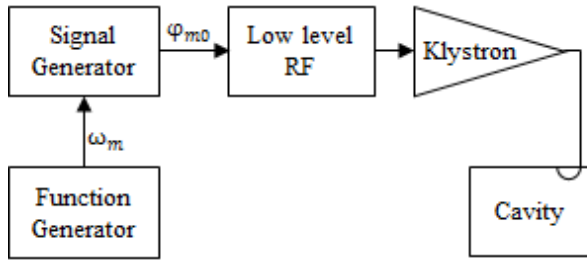


Figure 5: Phase modulation block diagram.

次に RF 加速空洞内の電磁場の観測を行い、位相変調が機能しているか確認試験を行った。RF 加速空洞のピックアップアンテナからの RF 信号をスペクトラムアナライザで解析した。入力 RF 信号による主ピークと位相変調によるサイドバンドとの信号強度比と、理論計算値を比較することで位相変調の状態を確認した。理論的には、位相変調を加えた RF 加速空洞に入力される電流は下式となる。

$$\begin{aligned} i_g &= i_{g0} e^{i(\omega_{RF}t + \theta + \varphi_{m0} \sin(\omega_m t))} \\ &= i_{g0} e^{i\theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\varphi_{m0}) e^{i(\omega_{RF} + n\omega_m)t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$i_{g0} = \sqrt{\frac{16\beta P_g}{R_{sh}}} \quad (4)$$

ここで、 $J_n(x)$  はベッセル関数、 $R_{sh}$  は空洞シャントインピーダンス、 $\beta$  はカップラー結合係数、 $P_g$  は RF 電源出力パワーである。(3)式より、RF 電源によって空洞で発生させる電圧は下式となる。

$$V_g = i_{g0} e^{i\theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\varphi_{m0}) Z_L(\omega_{RF} + n\omega_m) e^{i(\omega_{RF} + n\omega_m)t} \quad (5)$$

$Z_L(\omega)$  は空洞インピーダンスである。位相変調では変調振幅が大きくなると、それに伴って上式内のベッセル関数の値が上昇する。したがって、信号強度の変化はベッセル関数のみの変化に依存すると考えられ、dB 単位で換算した信号強度の計算値は下式となる。

$$\text{dB} = 10 \log_{10}(J_n(\varphi_{m0}))^2 \quad (6)$$

位相変調の確認試験では、変調周波数をシンクロトロン振動数 2 倍近傍(84kHz)と固定し、変調振幅を変化させてスペクトル測定を行った。スペクトラムアナライザで RF 周波数(499.69MHz)の近傍を観測すると、シンクロトロン振動数 2 倍のサイドバンドが出現することが確認できた。そのサイドバンドの信号強度を位相変調によるパワーと仮定し、0.005rad 毎

に測定した結果と(6)式を比較した結果を Figure 6 に示す。Figure 6 の点線は対数近似関数を表しており、その係数は実験値、計算値それぞれ 8.7263、8.6844 でよく一致しているが、切片では約 10dB の差が見られる。これは空洞のインピーダンスの周波数依存性を反映していると考えられる。この試験から、RF 加速空洞に位相変調が適用されていることが確認できた。

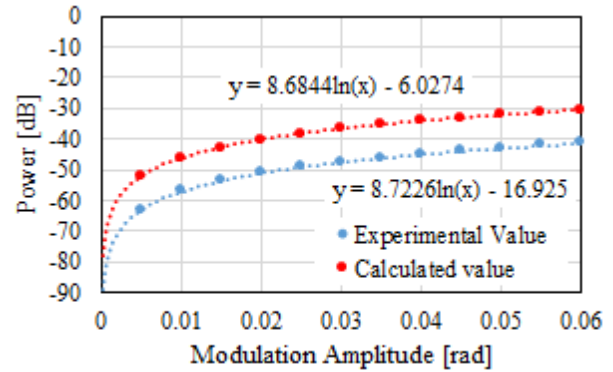


Figure 6: Comparison of sideband strength of phase modulation peak between experiment and calculation.

### 2.3 位相変調実験

Filling を 120/120 バンチで電子ビームを蓄積して、位相変調実験を行った。その際、我々は変調周波数、変調振幅、ビーム電流値の 3 つを変数として、位相変調による電子ビーム安定化条件を探った。我々はスペクトラムアナライザを用いて、周回周波数の 123 次高調波(512MHz、モード 3 に相当)とそのサイドバンドに着目し、シンクロトロン振動数 1 倍のサイドバンドが消えた状態を電子ビーム安定範囲と定義した。実験方法は次の通りに行った。①ビーム電流値、変調振幅を固定し、変調周波数を電子ビームが安定する値より低く設定する。②変調周波数を増加させていき、シンクロトロン振動数 1 倍のサイドバンドが消えた値を最小変調周波数とした。③再び変調周波数を増加させていき、シンクロトロン振動数 1 倍のサイドバンドが現れた値を最大変調周波数とした。④ビーム電流値、あるいは変調振幅を変えて、②③を繰り返した。ビーム電流 295mA における電子ビーム安定化範囲を Figure 7 に示す。Figure 7 では、低周波数(下側)と高周波数側(上側)の 2 群にデータ点をプロットしたが、この低周波数側プロットと高周波側プロットの間に挟まれた領域が位相変調によりビームが安定化できた範囲である。この図から、変調振幅を大きくすると電子ビーム安定化範囲は広がることがわかる。また、変調振幅を 0.050rad に固定し、ビーム電流を変化させた場合の変調周波数の電子ビーム安定化範囲を Figure 8 に示

す。この図から、ビーム電流値が大きい程、電子ビーム安定化範囲が広がるのがわかる。なお、ビーム電流 170mA 以下において、電子ビーム安定化が不可能であったため、170mA 以下はプロットをしていない。

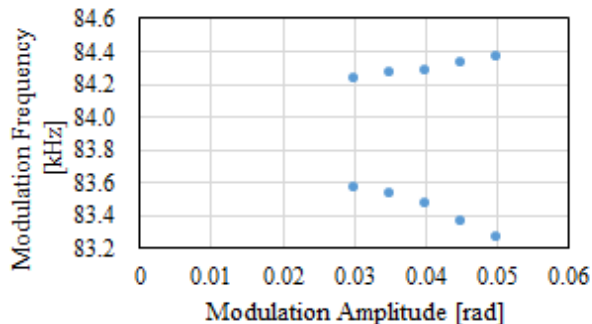


Figure 7: Stable region of the beam at beam current 295mA.

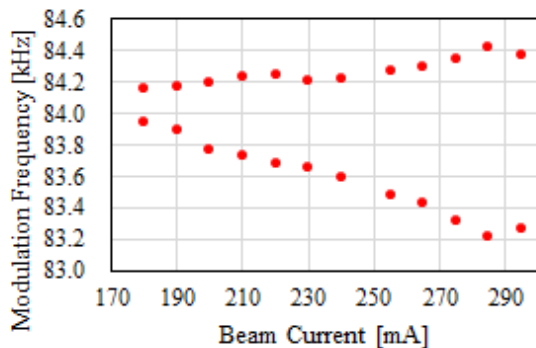


Figure 8: Stable region of the beam at modulation amplitude 0.050rad.

### 3. 考察・今後の展望

Figure 7,8 から、位相変調によって電子ビームを安定化できる条件は変調振幅、およびビーム電流値に大きく依存していることが判明した。ビーム電流値における、電子ビームが安定となる最小の変調振幅のプロットを Figure 9 に示す。点線は最小二乗法による近似直線である。

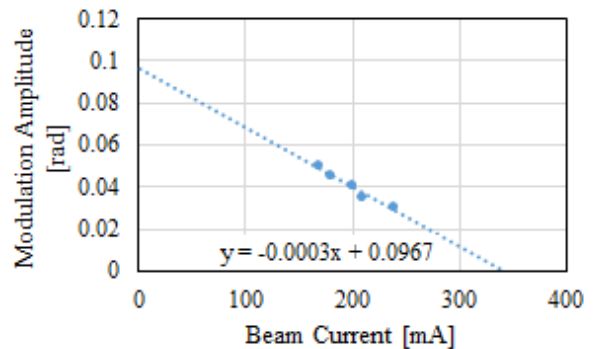


Figure 9: Dependence of the minimum modulation amplitude on the beam current to stabilize the beam.

図から、ビーム電流が小さくなるほど、電子ビーム安定化に必要な変調振幅は大きくなるのがわかる。このことから、ビーム電流即ちビームによる空洞内の誘導電圧が大きければ、ビームを安定化させるための位相変調振幅は小さくて済む傾向があることが分かる。先行研究により、シンクロトロン振動周波数の 2 倍で位相変調を加えると、ビームが 4 極振動をすることが指摘されている[3]。このことから、ビームによる空洞内の誘導電圧もこの 4 極振動を励起する一因となっていると考えられる。

今後は位相変調による電子ビーム安定化条件として、変調振幅、およびビーム電流値がどのように影響するか詳しく考察する必要がある。そのため、今後はシミュレーション計算を導入し、加速空洞やパンチの挙動を実験と比較することで、位相変調のより詳細な現象を理解するべく研究をすすめていく。

### 謝辞

本研究を進める上で、あいち SR の技術職員の方々をはじめ、多くの加速器関係者の方々による多くのご支援やご指示をいただきました。ここに深く感謝いたします。

### 参考文献

- [1] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- [2] N. Yamamoto *et al.*, AIP, **1234**, pp. 591-594 (2010).
- [3] S.Sakanaka *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **3**, 05701 (2000).
- [4] J.Fursch, Doctoral thesis. Tech. Univ. of Dortmund (2014).