

## COUPLING INSTABILITY IN HIMAC SYNCHROTRON

T.Uesugi\*<sup>A)</sup>, K.Noda<sup>A)</sup>, S.Shibuya<sup>A)</sup>, E.Syresin<sup>B)</sup>, I.Meshkov<sup>B)</sup>,  
T.Fujisawa<sup>A)</sup>, D.Tann<sup>A)</sup>, H.Uchiyama<sup>A)</sup>, S.Ninomiya<sup>C)</sup>, Y.Hashimoto<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>National Institute of Radiological Sciences (NIRS), 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555

<sup>B)</sup>Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Moscow region, 141980, Russia,

<sup>C)</sup>Research Center of Nuclear Physic (RCNP), Osaka University, 10-1 Mihogaoka, Ibaraki-shi, Osaka 567-0047

<sup>D)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801

### Abstract

Coupling resonance was observed at operating points near to  $Q_x - Q_y = 1$ . The coherent instability was developed at a high-density electron-cooled beam, when the betatron tune was near the resonance line. The instability was suppressed by applying an RF-knockout to reduce the peak density of the beam. The coupling strength was measured without electron-beam. There were residual components of the xy-coupling in the absence of the electron beam. The coupling strength was measured in different methods, with and without cooler-solenoid.

## HIMAC シンクロトロンにおける結合共鳴不安定性

### 1. はじめに

HIMAC<sup>[1]</sup> シンクロトロンにおいて、電子冷却<sup>[2]</sup> を用いた  $\text{Ar}^{18+}$  ビームの蓄積実験を行なったところ、粒子数が  $1 \times 10^9$  を越えたあたりで激しくビームが失われる不安定性が観測された。この現象は xy 結合を起こしたベータatron振動の増大をともない、電子ビームの空間電荷に関連していた。

以下では、まず第2節において、電子ビームがないときの xy 結合を測定した結果を紹介し、第3節で観測されたビームの不安定性と電子加熱モデルによるシミュレーション結果、さらに不安定性の対策を示す。

### 2. x y 結合の測定

線形な xy 結合を含むベータatron振動は、トランスファー行列を用いた手法によって解かれており<sup>[3,4]</sup>、固有モードのチューン、固有ベクトルがそれぞれ解析的に与えられている。結合の強さはパラメータ

$$C_n = \frac{1}{8\pi} \oint \sqrt{\beta_x \beta_y} \left[ \left( \frac{\partial B_x}{\partial x} - \frac{\partial B_y}{\partial y} \right) + B_\theta \left( \frac{\alpha_x - i}{\beta_x} - \frac{\alpha_y + i}{\beta_y} \right) \right] \exp(in\phi) R d\phi, \quad (1)$$

によって決まる<sup>[5]</sup>。

xy 結合の強さの測定には、(1) 結合共鳴近辺の動作点でビームのコヒーレントモードのチューンを測定する方法、(2) xy 各方向の振幅のうなりを測定する方法がある。さらに、HIMAC シンクロトロン (下リング) ではシートビームプロファイルモニター (SBPM)<sup>[6]</sup> によって二次元のビームプロファイル測定が可能であるため、(3) ビームの xy 実空間上の傾きを測定して算出することもできる。以下、(3)(1) の二通りの方法で、HIMAC シンクロトロンの xy 結合を測定した例を示す。

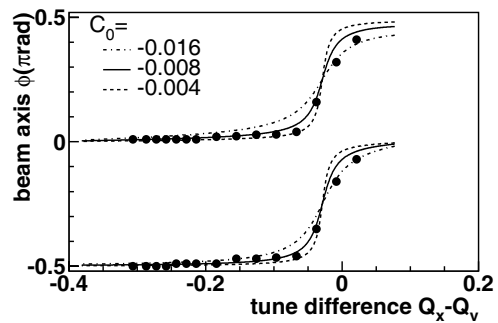


図 1: ビーム断面の主軸の傾き。  $Q_x$  はに固定。

#### 2.1 エラーによる結合: ビーム断面分布から測定

HIMAC シンクロトロンがもともと持っている xy 結合を、SBPM を用いて測定した。差共鳴 ( $Q_x - Q_y = 0$ ) の近辺においてビームの二次元プロファイルを測定したところ、xy 面内で傾いた楕円分布が観測された。測定されたプロファイルの主軸 (長軸・短軸) の傾きを鉛直チューンに対してプロットすると、図 1 の黒丸のようになった。差共鳴から離れた動作点では、傾きは 0 (水平方向) および  $\frac{\pi}{2}$  (鉛直方向) に一致し、共鳴の前後で回転していることがわかる。

解析解 (図の線群) と比較すると、実験で得られた xy 結合の強さは 0.01 前後となる。この値は、集束磁石のアラインメントエラーでは説明がつかないほど大きい。他の原因として、主偏向磁石のもつ六極磁場成分<sup>[7]</sup> が、COD をもつビームによって実効的にスクュー四極磁場として働いていることが考えられる。この場合、COD が一様に 1cm だけずれていれば、実験結果と一致する値が得られる。

#### 2.2 ソレノイドによる結合: チューンシフトから測定

電子冷却装置のソレノイドを励磁したときの xy 結合の強さを、モードチューンの測定を通して算出し

\* E-mail: touesugi@nirs.go.jp

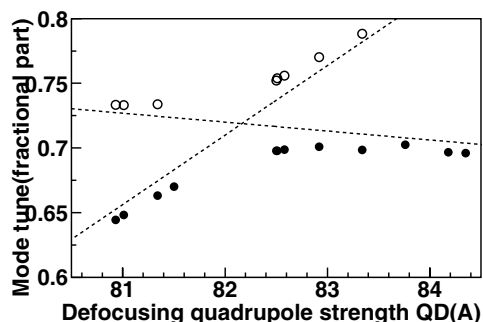


図 2: 固有モードのチューン。

た。発散磁石 (QD) の電流値によって動作点を (3.7,2.7) 付近で変化させ、モードチューン測定した (図 2)。差共鳴から離れたところでは QD に対してほぼ線形 (図の点線) な依存性を持つが、差共鳴近傍ではモードチューンがシフトし、完全に差共鳴に一致するところではビームが安定に周回できない。共鳴近傍では  $\Delta Q \sim 0.05$  程度のギャップができています。これは結合の強さ  $C_1=0.006$  に相当し、与えたソレノイド磁場による結合とほぼ一致する。

### 3. 電子冷却時の x y 結合不安定性

#### 3.1 不安定性

大強度のビームを得るために、電子冷却を用いた多重入射の実験<sup>[2]</sup>を行っていたところ、図 3 に示すように、コヒーレント振動を伴う急激なビームロスが観測された。また、ビームプロファイルを見ると、不安定性がおきているときにはビームが鉛直方向からやや傾いた方向に発散していた (図 4)。ただし図 4 は図 3 と異なる条件で観測されたもので、こちらは入射後 2.5 秒でビームロスがおこっている。2.5 秒以前では、電子冷却によって主に水平方向にビームが圧縮されている。

詳細な比較実験の結果、このようなビーム不安定性は、(1) イオンビームの密度 (2) 電子ビームの密度がともに大きいときに起こり、(3) 差共鳴 ( $Q_x - Q_y = 1$ ) の近傍で特に激しいことがわかった。これらの性質から、ビーム不安定性はイオンビームと電子ビームの空間電荷による相互作用が関連していると考えられる。

#### 3.2 電子ビームによる結合：モデル計算

電子冷却装置内でのイオンビーム ( $Z = x + iy$ ) および電子ビーム ( $Z_e$ ) の重心運動は、空間電荷効果を考慮して以下の方程式で記述される。

$$\ddot{z} + i\omega_{ci}\dot{z} + \omega_{pi}^2 z = \omega_{pi}^2 z_e \quad (2)$$

$$\ddot{z}_e + i\omega_d \dot{z}_e = i\omega_d z \quad (3)$$

ここで、 $\omega_{ci}$  はソレノイド磁場中のイオンビームのサイクロトロン振動数、 $\omega_{pi}$  は電子ビームの空間電荷によるイオンのプラズマ振動数、 $\omega_d$  はイオンビームの空間電荷とソレノイド磁場で決まる電子ビーム

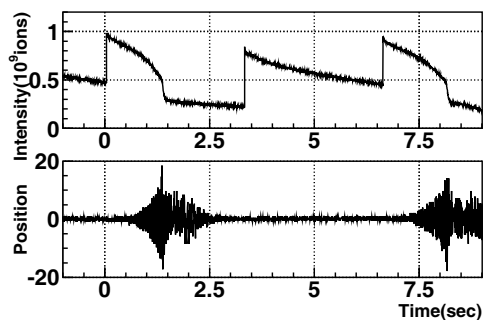


図 3: 観測されたビームロス (上) とコヒーレント振動 (下)。 $I_e = 150\text{mA}$ ,  $R = 3.3$ ,  $(Q_x, Q_y) = (3.69, 2.88)$ 。

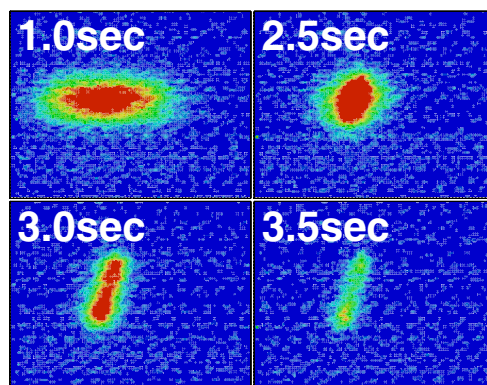


図 4: 不安定性のおきているときのビームプロファイルの変化。数字は、入射後の時間。

のドリフト振動数である。境界条件  $(Z_e, \dot{Z}_e) = (0, 0)$  を用いて上の方程式を積分すれば、電子冷却装置に対応する  $Z$  のトランスファー行列が得られる。このトランスファー行列は行列式が 1 にならない。したがって、シンクロトロンリング一周のトランスファー行列を作ると、これは指数関数的に発散あるいは集束する二つの固有解をもつ。この現象は電子加熱と呼ばれる<sup>[8,9,10]</sup>。

図 5 に増大率の計算結果を示す。図に示すように、差共鳴 ( $Q_y = 2.75$ ) および和共鳴 ( $Q_y = 3.25$ ) に相当する動作点において、増大率が大きくなっていることがわかる。また、和共鳴よりも差共鳴の方が増大率ははるかに大きいことも実験結果と一致している。

#### 3.3 不安定性の解消：シェイキング

空間電荷による不安定性は、ピーク (中心部) の空間電荷密度を減少させることによって軽減できると考えられる。そこで、RF-KO を用いてイオンビーム中心部の粒子を選択的に共鳴<sup>[11]</sup>させ、ピーク密度を減少させることを試みた。RF-KO の周波数を、鉛直チューンの周辺で微調整したところ、図 3 の不安定性は 230kHz の RF-KO によって解消された。

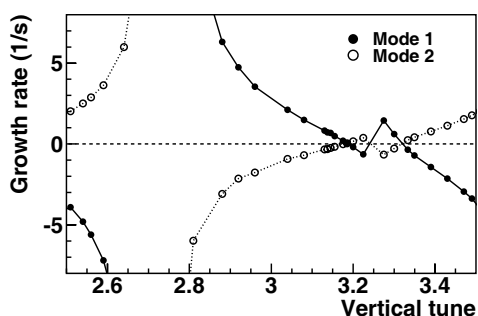


図 5: 不安定性のモデル計算。  $n_e = 150mA$ ,  $N_i = 1 \times 10^9$ ,  $Q_x = 3.725$

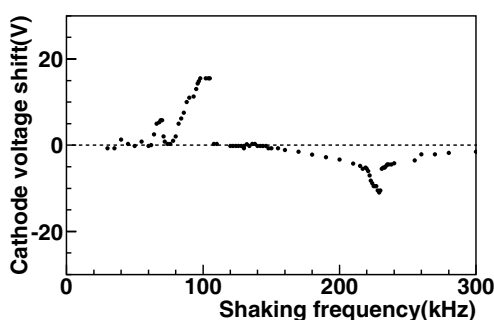


図 6: スペクトラム

電子ビームの条件が変わっても、同様に RF-KO によって不安定性が解消され、貯蓄されるイオンビームの強度が増加することが確かめられた。

### 3.4 残留ガスイオンの除去

電子冷却装置中の残留ガスは、一次粒子との衝突によってイオン化し、冷却装置にトラップされる。このような残留イオンが媒体となって、冷却電子ビームを不安定にすることが知られている<sup>[13, 12]</sup>。残留イオンを除去するため、冷却装置内の電極に電場を加えた<sup>[13]</sup>。残留イオンは、その比電荷に応じて周波数

$$\omega = \sqrt{\omega_{pr}^2(1-\eta) + \omega_{cr}^2/4} \pm \omega_{cr}/2, \quad (4)$$

の電場と共鳴して取り出される。ここで  $\omega_{cr}$  と  $\omega_{pr}$  はそれぞれ残留イオンのサイクロトロン振動数、電子電場中でのプラズマ振動数で、いずれも残留イオンの比電荷に依存する。また  $\omega_{pr}$  には、残留イオンによる電子ビームの中性化を考慮して因子  $(1-\eta)$  を加えてある。

残留ガスの除去は、中性化された電子ビームのポテンシャルを測定することで確認できる。図 6 は、周波数を変えたときのカソード電圧（電子ビームのポテンシャル）を示す。実験では、60~70 kHz と 80~110 kHz にピーク、220~230 kHz には負のピークが観測された。60~70 kHz のピークは、比電荷 20 前後に対する式 (4) のプラスの解に相当し、例えば  $H_2O^+$  等のイオンが除去されたと推測される。また、80~110 kHz のピークは、比電荷 8~10 の場合のプラスの解、また

は比電荷 4 の場合のマイナスの解に相当し、例えば  $H_2O^{2+}$  や  $He^+$  が挙げられる。

## 4. まとめ

HIMAC シンクロトロンにおいて、xy 結合の強さを二通りの方法で測定した。xy 結合はソレノイドやスキュー四極磁石等を励磁しない場合でも存在した。これは現在のところ、偏向磁石の六極成分磁場が関係していると考えられる。

次に、電子冷却によって得られた高密度ビームでは、xy 結合の差共鳴に相当する動作点において、激しいコヒーレント振動を伴う不安定性が観測された。不安定性は、冷却電子ビームとイオンビームの相互作用によるもの（電子加熱）と考えられる。

## 参考文献

- [1] Y. Hirao et al., Nucl. Phys., **A538**(1992) 541c.
- [2] K. Noda et al., "Electron Cooling Experiments at HIMAC Synchrotron", Proc. of EPAC'04, Lucerne, 2004.
- [3] D. Edward and L. Teng, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS-20, No.3 (1973), 885.
- [4] G. Parzen, Proc. of PAC'93, Washington DC, May 1993, pp.486.
- [5] G. Guignard, CERN 78-11 (1978).
- [6] Y. Hashimoto et al., NIM **A527** (2004), 289.
- [7] A. Itano et al., Proc. of 8<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology, 1991, Saitama, Japan, pp.200, 1991.
- [8] V. V. Parkhomchuk and V. B. Reva, Jour. of Exper. and Theor. Phys., v.91, N5(2000), 975.
- [9] P. R. Zenevich and A. E. Bolshakov, NIM **A441** (2000), 36.
- [10] A. Burov, NIM **A441** (2000), 23.
- [11] K. Noda et al., NIM **A492** (2002), 253.
- [12] Y. Korotaev et al., NIM **A441**(2000), 96.
- [13] J. Bossert et al., NIM **A391** (1997), 110.