

SuperKEKBにおけるビームローディングに起因する縦方向不安定性を抑制する RF フィードバックの検証

VERIFICATION OF RF FEEDBACK TO SUPPRESS LONGITUDINAL INSTABILITY DUE TO BEAM LOADING IN SUPERKEKB

赤井和憲*, 可部農志, 小林鉄也, 中西功太, 西脇みちる

Kazunori Akai*, Atsushi Kabe, Tetsuya Kobayashi, Kota Nakanishi, Michiru Nishiwaki
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

SuperKEKB has been operating for physics run as Phase 3 commissioning, following the first beam collision tuning conducted in 2018. Design beam current of SuperKEKB is 3.6 A for positrons and 2.6 A for electrons, respectively, which are about twice that were achieved in the predecessor KEKB. Key issues for the RF system include measures for heavy beam-loading on the accelerating mode such as Robinson instability and other related matters. In addition to ordinary amplitude and phase control loops, the LLRF system is equipped with direct RF feedback system, which reduces effective impedance of high Q superconducting cavities, and a damper to suppress the zero-mode beam oscillation. This paper describes analytic calculation and simulation of the zero-mode longitudinal beam dynamics and stability with these loops as well as measured property in beam operation.

1. はじめに

電子・陽電子衝突型加速器 SuperKEKB は、2010 年まで運転を続けた前身の KEKB からルミノシティを飛躍的に高める大規模な改造を行った後、2016 年から衝突無しの運転（フェーズ 1）を開始し、Belle II 測定器導入後の 2018 年からビーム衝突調整（フェーズ 2）、現在はフェーズ 3 として物理データ収集のための運転を続けている。2020 年 6 月にはピークルミノシティが世界最高記録を突破し、 $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達している [1]。

SuperKEKB の蓄積ビーム電流設計値は陽電子 3.6A、電子 2.6A と、いずれも KEKB 実績値の約 2 倍である。これまでの運転では、Belle II へのバックグラウンドの問題からビーム電流は約 1 A 以下に抑えられてきたが、対策を進めながら、衝突点絞り込み及び電流増強等の努力を続けている。設計値を目指したビーム電流増強に関して、RF システムには、加速モードへの大電流のビームローディングとの相互作用に起因する諸問題への対策が、KEKB にも増して一層重要となる。加速モード帯域において、周回する多数のバンチ間の結合の状態によって、加速周波数そのものであるゼロモードと、周回周波数離れた -1 モード、-2 モード等が関係する。このうち、ビーム加速に本質的なゼロモードは LLRF 制御系全体の特性や性能と深く関わる。Robinson 不安定性 [2] やギャップトランジェントなど、RF システムとビームローディングの相互作用に起因する諸問題を十分考慮して RF システムを設計・構築・運用する必要がある。

ゼロモードのビームローディング対策として、SuperKEKB の LLRF 制御系には通常の振幅・位相制御に加え、インピーダンスの高い超伝導空洞の実効的負荷 Q 値を低減するための直接 RF フィードバック (direct RF feedback: DRFB) や、ビーム振動を検出してリングの位相を制御するゼロモードダンパー (zero-mode damper: ZMD) などを組み込んでいる。DRFB 及び ZMD はい

ずれも KEKB でも運用したが [3,4]、SuperKEKB の設計ビーム電流を見据えた定量的な解析を進めた。また、2019 年 6 月のビーム運転において、ゼロモード振動数の変化やビーム不安定性に関するスタディを行ない、DRFB 及び ZMD の効果を検証した。本発表では、SuperKEKB のゼロモードのビームローディングに起因する縦方向ビームダイナミクスに関する解析計算及び制御ループの特性を含めたシミュレーションについて示すとともに、ビーム運転における測定についても報告する。

2. SUPERKEKB のビームローディング

2.1 RF システム概要

SuperKEKB の RF システムには加速空洞として、KEKB 用に開発された ARES 型常伝導空洞及び超伝導空洞 (superconducting cavity: SCC) の 2 種類を使用している。ARES 空洞は、加速空洞を高い Q 値の貯蔵空洞に結合させることにより、一方 SCC は ARES 空洞の約 3 倍の高い加速電圧により、いずれも空洞内に貯蔵される電磁エネルギーが高いのでディチューニング量が抑えられ、-1、-2 モード等の不安定性を抑制する個別モードダンパー [5] の負荷が軽減される。また、バンチギャップトランジェントの軽減にも効果がある [6]。

RF システムに関連するパラメータを Table 1 に示す。加速空洞は、電子リング (High Energy Ring: HER) は SCC と ARES の両方、陽電子リング (Low Energy Ring: LER) は ARES のみである。これらの加速空洞は KEKB から引き続き運用しているが、ビームパワーを増やすため、ARES 空洞のうち 14 台について、入力カップラーを結合度の大きいものに交換し、1:2 構成 (クライストロン 1 本で空洞 2 台をドライブ) から 1:1 構成に改造した。LLRF 制御系は、SuperKEKB 用に FPGA を用いた新しいデジタル制御システムを開発し、ARES 空洞のうち 1:1 構成の 9 ステーションに導入した [7]。それ以外の ARES 空洞 13 ステーション及び SCC 用 8 ステーションには、アナログフィードバックを主体とするシステムを

* kazunori.akai@kek.jp

KEKB から引き続き使用している。1 MW 連続波出力のクライストロン及び高圧電源、RF ハイパワー機器の大部分も KEBK から引き続き使用している。

Table 1: RF-Related Design Parameters of SuperKEKB

Parameter	LER	HER
Beam energy [GeV]	4	7
Beam current (I_B) [A]	3.6	2.6
Total RF voltage (V_c^T) [MV]	10~11	15~16
One turn energy loss [MV]	1.76	2.43
Beam power [MW]	~8	~8
RF frequency ($\omega_{rf}/2\pi$) [MHz]		508.9
Synchrotron freq. ($\omega_{s0}/2\pi$) [kHz]	2.4	2.7
Cavity type	ARES	SCC / ARES
Number of cavities	22	8 / 8
Number of klystron stations	16	8 / 6
RF voltage/cavity (V_c) [MV]	0.5	1.5 / 0.5
R/Q of cavity [Ω]	15	93 / 15
Loaded Q (Q_L) [$\times 10^4$]	2 [†] ~3 [‡]	~5/2 [†] ~3 [‡]

[†]for klystron 1 : ARES 1 stations and [‡]for 1 : 2 stations.

2.2 ゼロモードのローディング対策

ゼロモードの Coherent な振動を $\sim \exp(j\Omega_0 t)$ と表したとき、 $p = j\Omega_0$ とおくと、ビームと RF 空洞の相互作用のもとでの縦方向運動の解析から得られる実数係数の 4 次方程式 (Eq. 1) の解として p が得られる [2]。

$$p^4 + 2\sigma p^3 + (\omega_{s0}^2 + \sigma^2 \sec^2 \psi)p^2 + 2\omega_{s0}\sigma p + \omega_{s0}^2 \sigma^2 \left\{ \sec^2 \psi + \frac{\tan \psi}{\sin \phi_s} Y \right\} = 0 \quad (1)$$

ここで、 σ は空洞の damping rate、 ψ はチューニング角、 ϕ_s はビームの平衡位相角、 ω_{s0} はゼロ電流のシンクロトロン周波数である。また、 Y はビーム誘起電圧 $V_{br} = (R/Q) Q_L I_B$ と空洞電圧 V_c の比 V_{br}/V_c で、ビームローディングの強さを表す。Eq. (1) が不安定根を持たない条件として、Routh-Hurwitz の安定判別法の適用により (i) $\tan \psi < 0$ かつ (ii) $Y \sin 2\psi + 2 \sin \phi_s > 0$ が得られ、Robinson 安定性の条件として知られる [2]。

空洞のチューニング制御は通常 loading angle ϕ_L (RF 源からの電流と空洞電圧の相対位相) にもとづいて行われ、 ψ とは $\tan \psi = \tan \phi_L (1 + Y \cos \phi_s) - Y \sin \phi_s$ の関係がある。通常、反射パワーが最小となる optimum tuning $\phi_L = 0$ 、もしくはわずかに $\phi_L < 0$ のオフセットをつけることで、安定条件 (i) は自動的に満たされる。一方、条件 (ii) はいわゆる static Robinson limit であり、ある閾値以上のビーム電流で不安定となる。 ϕ_L を $\phi_s - \pi/2$ に近づければ閾値は上がり、さらに深くオフセット $\phi_L < \phi_s - \pi/2$ をつけた場合はこの式の閾値はなくなる。しかしこれでは、高いビーム電流での安定領域の-margin が小さく、わずかな位相揺らぎやビーム振動などで安定性が失われる。また、実際のビーム運転では

後述のように、ビームと振幅や位相などの制御ループとの干渉の影響等があり、より低い電流で制限される要因となる。さらに、optimum tuning から遠く離れた ϕ_L では、必要なパワーが $1/\cos^2 \phi_L$ 倍、高くなる。

SCC は intrinsic Q 値が $Q_0 \sim 10^9$ と高く、負荷 Q 値 Q_L が入力カプラーの外部 Q 値にほぼ等しい。 R/Q が高いこともあって、SuperKEKB の設計ビーム電流において、SCC では $Y \sim 10$ と非常に高い値となる。Robinson limit への十分なマージンを確保する観点からは、 Q_L を現在の 1/4 程度にまで下げたいところである。しかし、 Q_L 変更には空洞の真空を破ってカプラーの結合度を深くする作業が必要で、SCC 内面の汚染による性能劣化のリスクがある。また、現行の入力カプラーでの実績がないこと、ビーム負荷無しの全反射状態での入力パワーが Q_L に反比例して増えることなどの問題もある。

そこで、 Q_L 変更作業は行わず、DRFB による実効的な beam loading 低減によって対処している。SCC 用 LLRF の概略を Fig. 1 に示す。通常の振幅制御 (auto level control: ALC) と位相制御 (phase lock loop: PLL) に加えて、DRFB により空洞電圧 V_c のピックアップ信号の一部を高周波のままメインラインに戻している。DRFB を備えた系のベクトル間関係を Fig. 2 に示す。メインラインへの合流点直前において、feedback 信号 V_{FB} のメインライン信号 V_{gr}^{main} に対する振幅比 α_{dr} 及び V_c の逆位相からの位相差 ϕ_{dr} を定義する。DRFB 込みでの空洞の transfer function $G_T(s)$ は、RF 周波数 ω_{rf} で回転する系で表現すると Eq. (2) となる。ここで、 R は共振点での空洞のインピーダンスであり、 γ_{dr} は DRFB の開ループゲインで α_{dr} とは $\gamma_{dr} = \alpha_{dr}/(1 - \alpha_{dr})$ の関係がある。DRFB により、空洞の実効インピーダンス及びビームローディング Y が $1/(1 + \gamma_{dr} \cos \phi_{dr})$ の比で低減され、ディチューニングによる振幅・位相制御間のクロストークも抑制される。なお、クライストロン周辺に特化した内側ループもあるが、空洞制御ループやビーム振動と干渉しないようにパラメータを調整している。

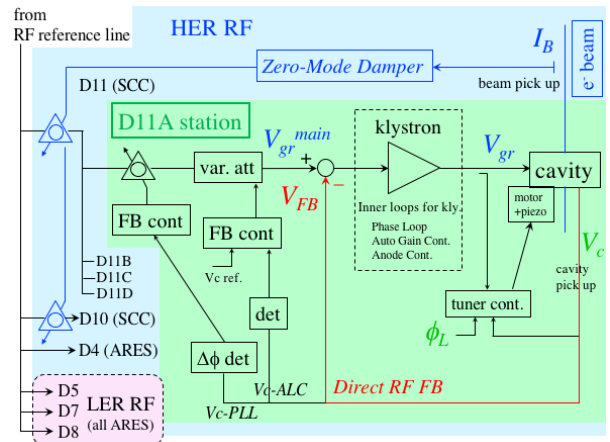


Figure 1: Schematic view of LLRF system for SuperKEKB. Green colored part is for one SCC station in HER. Blue (red) colored region shows HER (LER).

$$G_T(s) = \frac{R\sigma}{s + \sigma \{1 - j \tan \psi + \gamma_{dr} \exp(-j\phi_{dr})\}} \quad (2)$$

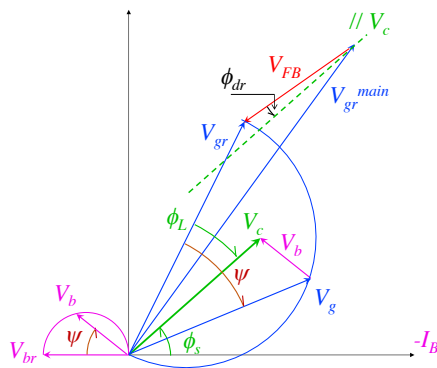


Figure 2: Vector relation with DRFB implemented.

ARES 空洞のアナログフィードバック主体 LLRF の 13 ステーションには、SCC と同様 DRFB を備えている。また、現在開発を進めている SCC 用デジタル LLRF システムにも DRFB 相当の機能を組み込んでいる。

ZMD は、Fig. 1 に示すように、空洞から離れた位置のボタン電極で得られるビーム信号から振動成分を取り出し、RF ステーションの位相制御信号に重畳させている。HER は D10 と D11 の SCC ステーションに、LER は D7 と D8 の ARES ステーションに作用し、ゼロモードのビーム振動を減衰させる。

3. 解析計算及びシミュレーション

Coherent 振動数の変化及びシステムの安定性に関して解析計算を行い、DRFB 及び ZMD の効果について調べた。LER は ARES のみであり、HER には SCC と ARES が共存するが、 $Y = V_{br}/V_c$ 値で SCC は ARES の約 5 倍大きいこと、また HER の全加速電圧の約 4 分の 3 が SCC によって供給されることから、主として HER の SCC 単独の場合について解析を行なった。

3.1 Coherent 振動数

最初に、HER に SCC のみが存在するとして、 $\phi_L = 0$ で Eq. 1 を解いた結果を Fig. 3 に示す。 Ω_0 の real part は振動数を、imaginary part は減衰率を表し、いずれもゼロ電流の振動数 ω_{s0} で規格化している。 Ω_0 とともに $-\Omega_0^*$ も解であるが、real part が正の方の解のみを示した。2 つの分枝があるが、 $\text{Re}[\Omega_0]$ がゼロ電流で ω_{s0} に等しく、電流増加とともに減少している Sol. 1 がいわゆる beam mode、ゼロ電流で 0 で電流とともに周波数が増加している Sol. 2 が cavity mode である。cavity mode は、先行するバンチが作るウェイクが空洞のディチューン ψ のために RF 周波数とは異なる周波数で後続バンチのウェイクと重なることで発生する。

なお、beam mode と cavity mode の周波数が交差するあたりでは、モード間の結合が起こりうる [8]。仮に、例えば momentum compaction が 2 倍大きいなどして、 $\omega_{s0}/2\pi$ が HER 設計値 (2.7 kHz) の 2 倍 (5.4 kHz) であった場合には、Eq. (1) の解は Fig. 4 で示すように、周波数の交差するあたりで周波数と減衰率のいずれも、大きく影響し合う。しかし、実際の HER 設計パラメータにおいては、Fig. 3 からわかるように、2 つのモードがほぼ

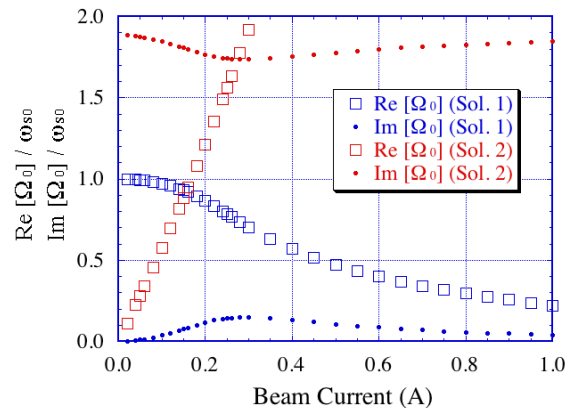


Figure 3: Coherent synchrotron oscillation frequency and damping rate with only SCC in HER.

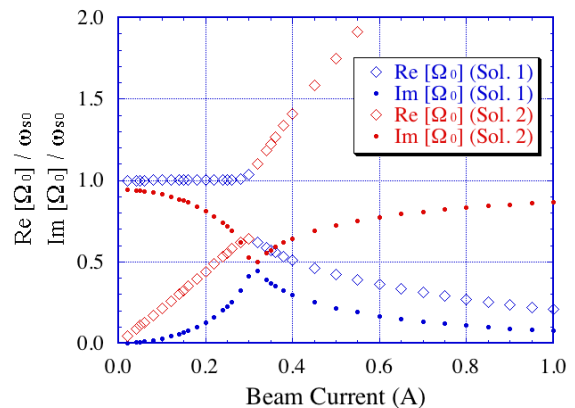


Figure 4: Coherent synchrotron oscillation frequency and damping rate with only SCC in HER in case where ω_{s0} is twice the design value.

独立であり、かつこの場合の cavity mode は imaginary part が大きく直ちに減衰するため、観測にかかる振動としては beam mode が重要である。したがって、以下では beam mode のみに注目する。

次に、DRFB の影響について調べる。DRFB のゲインが -6.0 dB と -4.5 dB の場合について、Eq. (2) を用いて Eq. (1) を解いて得られた beam mode の周波数を Fig. 5 に四角のデータで示す。ここで、ゲインは α_{dr} の dB 表示であり、 $\alpha_{dr} = -6.0$ dB は開ループゲイン $\gamma_{dr} = 1.0048$ に、 $\alpha_{dr} = -4.5$ dB は $\gamma_{dr} = 1.4732$ に相当する。図からわかるように、電流増加による振動数の減少が DRFB によって緩和される。すなわち、Robinson 不安定性の閾値 ($\text{Re}[\Omega_0] = 0$ となる電流に相当) が高くなる。

さらに、SCC と ARES が共存する状況を考える。この場合、空洞に関連する σ や ψ などのパラメータが 2 種類あるため、Eq. (1) にあたるものは 6 次式になる。ところで、Fig. 5 に重ねて、RF 源が作る電圧 V_g がビーム振動の restoring force であるとして計算した振動周波数をドットでプロットした。上述の Eq. (1) から求めた周波

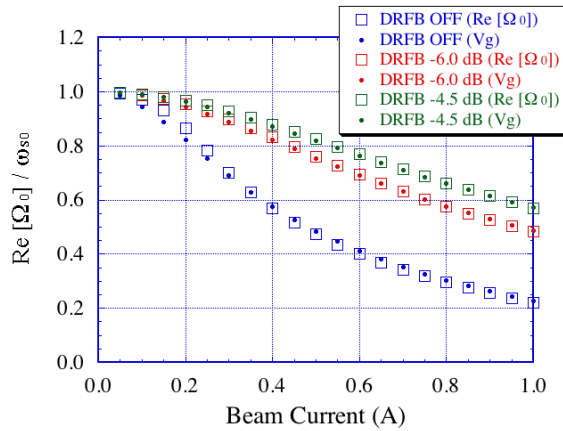


Figure 5: Coherent synchrotron oscillation frequency with only SCC in HER for various DRFB parameters, calculated by Eq. (1) (squares) and from V_g vector as restoring force (dots).

数 $\text{Re} [\Omega_0]$ と良く一致している。SCC と ARES 共存の場合もモード間の干渉が無視できるので、 V_g のベクトル和を restoring force とした計算で振動数が十分正確に得られる。計算結果は第 4 章に、スタディでの測定値とともに Fig. 8 に示す。

3.2 安定性のシミュレーション

空洞電圧は LLRF システムの振幅及び位相制御によって維持される。しかし、ビーム電流とともにディチューン量が増えるため、ビームと振幅・位相ループの干渉が発生し、Robinson limit より低い電流での不安定発生要因となる。したがって、ゼロモードの安定性を調べるには、これらの制御ループを含めた解析が必要である。そこで、Fig. 6 のブロック図で示されるシステムについて、MATLAB/Simulink [9] を用いてシミュレーション計算を行なった。 G_{pp}^G 、 G_{pa}^B など表記される要素は RF 源から空洞への、あるいはビームから空洞への、振幅及び位相に関する transfer function であり、Ref. [10]¹ で定式化された各要素に、Eq. (2) を適用して DRFB の効果を取り入れた。また、PLL、ALC 及び ZMD 用のフィードバック制御回路 (図中 FBC 及び ZMD controller) の特性は、スタディで実際に運用した値を与えた。

シミュレーションでは、位相の reference 入力にステップ変化を与えた時の時間的応答が計算される。ステップ応答で発生した振動が減衰するか、増大して発散するかによって、安定/不安定の判断とする。例として、Fig. 7 に SCC のみ、DRFB 無し、ZMD OFF、 $\phi_L = -8 \text{ deg}$ の場合のビーム位相を示す。振動はビーム電流 700 mA では速やかに減衰し、770 mA でもかろうじて減衰するが、780 mA では逆に増大している。この場合、770 mA を安定限界とみなす。振動の周波数は約 1 kHz で、 ω_{s0} の約 1/3 に低下している。同様にして、DRFB を ON とし、-6 dB、-4.5 dB、-3 dB の各ゲインに対して、さらに

¹ Ref. [10] の平衡位相角 ϕ_B の定義は、本論文の ϕ_s とは $\phi_B = \phi_s + \pi/2$ の関係にある。

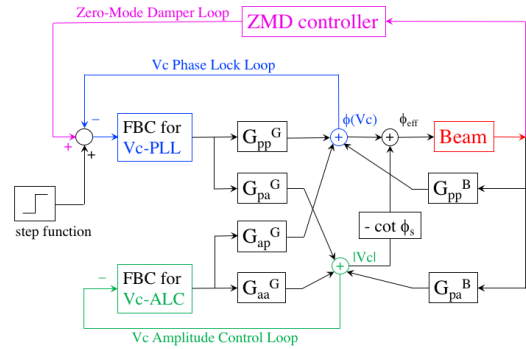


Figure 6: Block diagram of RF system and beam used for simulation. DRFB is taken into account in G 's.

ZMD を投入した場合についても、それぞれ安定限界となるビーム電流を求めた。これらの結果を Table 2 にまとめた。DRFB の効果でビームと振幅・位相ループの干渉が低減されるため、安定限界の電流が大きく改善されている。ZMD の効果も明らかに見えている。

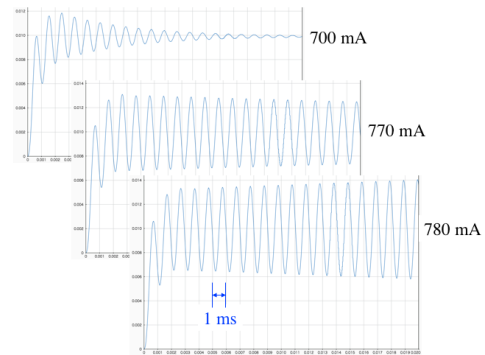


Figure 7: An example of simulation results. Step response of beam phase with only SCC in HER without DRFB or ZMD.

Table 2: Simulation Results of Maximum Beam Current in HER with only SCC

PLL and ALC gain = 100				
	DRFB off	-6.0 dB	-4.5 dB	-3.0 dB
ZMD off	0.77 A	1.11 A	1.23 A	1.42 A
ZMD ON	0.99 A	1.41 A	1.53 A	1.70 A
PLL and ALC gain = 50				
	DRFB off	-6.0 dB	-4.5 dB	-3.0 dB
ZMD off	1.07 A	1.59 A	1.79 A	2.14 A
ZMD ON	1.30 A	1.98 A	2.24 A	2.68 A

PLL と ALC については、ゲインを下げると最大電流が増加する傾向がみられるが、下げすぎるとフィード

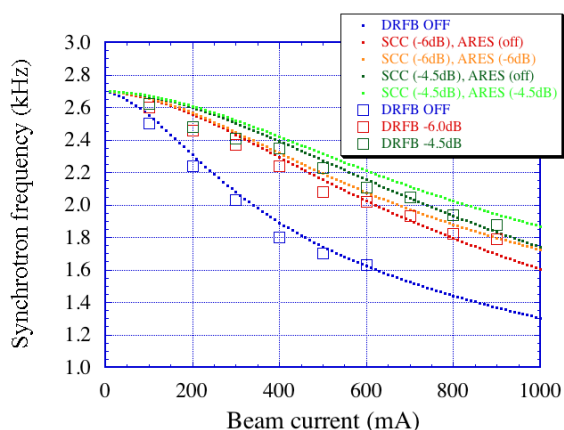


Figure 8: Calculated (dots) and measured (squares) frequencies of coherent synchrotron oscillation with SCC and ARES in HER for DRFB off, -6 dB and -4.5 dB.

バックの定常偏差が大きくなる。これらの制御系を持つフィルターの時定数も含めた最適化の余地がありそうであるが、それは今後の課題としたい。

4. ビーム運転での測定及び計算との比較

2019年 spring run の運転停止直前の6月末にマシンタイムを得て、HER ビームを使って DRFB と ZMD の効果を確認するスタディを行なった。スタディでの主要な運転パラメータを Table 3 に示す。ビーム電流はその時点での真空機器等の運転実績を勘案し、最大 900 mA に制限した。ZMD のフィルター時定数やループ位相はスタディに先立って調整した。DRFB はゲインや位相の調整をビーム無しで行い、-6.0 dB (通常運転の値) と、それより高い -4.5 dB を必要に応じて切り替えた。

Table 3: Machine Parameters at Beam Study in HER

Max. beam current allowed	900 mA
RF voltage/cavity [MV]	1.35 (SCC) / 0.425 (ARES)
Loading angle (ϕ_L) [deg]	-8 (SCC) / -5 (ARES)
DRFB gain	off, -6.0 dB, -4.5 dB
ZMD	off, ON

スタディではまず、DRFB、ZMD いずれも OFF の状態でビームをゼロから積み上げ、スペクトラムアナライザ等で Coherent 振動を観測した。ビーム電流の増大とともに振動数が低下し、振幅が増大した。電流 675 mA あたりで振幅が急激に増大し、それ以上の蓄積ができなかった。そこで一旦手動アポートし、ZMD ON にして積み始めると、900 mA まで問題なく蓄積できた。次に、DRFB をゲイン -6.0 dB で投入し、ZMD OFF と ON のそれぞれの条件でビームをゼロから積み上げ、Coherent 振動数及び振幅を測定した。さらに、DRFB ゲイン -4.5 dB でも同様に ZMD OFF と ON で測定した。いずれの場合も許容値の 900 mA までビームを蓄積できた。特に、DRFB と ZMD 両方 ON の場合は、サイドバンドがほと

んど観測できない程度にまで、振動が抑制された。

以上の測定で得られた Coherent 振動数を、計算値とともに Fig. 8 にプロットした。点線で示したデータは、SCC と ARES の V_g ベクトル和から求めた計算値である (第 3.1 章参照)。計算では ARES の DRFB は 8 台すべてに適用しているが、実際には 8 台のうち 5 台に DRFB が装備されている。図で四角で表したデータは測定値であり、SCC 8 台すべてと ARES 5 台について、DRFB のゲイン設定は同じ値である。DRFB ON と OFF のいずれの場合も、測定された振動数と計算値は良い一致を示している。なお、図に示していないが、ZMD ON の場合の振動数測定値は OFF の場合と大差なかった。これは、ZMD ができるだけ reactive な成分を持たず、振動抑制に最大の効果を持つように位相調整したためである。

安定性について、第 3.2 章のシミュレーション解析結果は SCC 単独で DRFB 無し、ZMD OFF では 770 mA が安定限界であった。一方スタディでは前述のように DRFB 無し、ZMD OFF では 675 mA で急激に振動が増大し、それ以上は蓄積できなかった。ARES 空洞との共存が安定性を増す効果はあるものの、他方で実際の運転では位相揺らぎや各種マシネラーなどのために計算値よりも低い電流で制限される面もあるので、それらを考慮すると、シミュレーションと測定値との間に大きな矛盾は無いと言える。また、DRFB あるいは ZMD を投入した場合は、シミュレーション結果 (Table 2) は安定限界が 900 mA を超えていたが、スタディでも許容値の 900 mA まで問題なく蓄積できた。

5. まとめ

SuperKEKB の加速モードへの大電流ビームローディングに起因するゼロモードの安定性は、設計値に向けたビーム電流増強にとって重要な鍵の一つである。DRFB 及び ZMD がゼロモードの安定化に果たす役割を、理論計算及びシミュレーションによって振幅・位相制御ループも含めて定量的に解析した。ビームスタディでの測定結果とも矛盾のないことが確認でき、今後のビーム電流増強の見通し及び指針が得られた。

参考文献

- [1] <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2020/06/26/1400/>
- [2] K. W. Robinson, CEAL-1010, Feb 1964, Cambridge Electron Accelerator.
- [3] K. Akai *et al.*, Proc. 11th Symp. on Accel. Sci. and Tech., Harima, Japan (1997) p. 179.
- [4] K. Akai *et al.*, Proc. EPAC98, Stockholm, UK (1998), p. 1749.
- [5] K. Hirose *et al.*, Nucl. Inst. Methods, A 953 (2020) 163007.
- [6] T. Kobayashi and K. Akai, Phys. Rev. Accelerators and Beams 19, 062001 (2016).
- [7] T. Kobayashi *et al.*, Proc. IPAC2015, Richmond, VA., USA (2015), p. 924.
- [8] N. Towne and J. M. Wang, Phys. Rev. E 57, No. 3 (1998), p. 3461.
- [9] MATLAB/Simulink by The MathWorks, Inc.
- [10] F. Pedersen, IEEE Trans. Nuclear Science, NS-22, No. 3, 1975, p. 1906.