

# cERL の入射超伝導空洞の HOM を使ったビームタイミング測定 BEAM TIMING MEASUREMENT USING HOMs IN INJECTOR SUPERCONDUCTING CAVITY AT CERN

岡田貴文<sup>\*A)</sup>、梅森健成<sup>B)</sup>、加古永治<sup>B)</sup>、許斐太郎<sup>B)</sup>、阪井寛志<sup>B)</sup>  
Takafumi Okada<sup>\*A)</sup>, Kensei Umemori<sup>B)</sup>, Eiji Kako<sup>B)</sup>, Taro Konomi<sup>B)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>SOKENDAI, The Graduate University of Advanced Studies

<sup>B)</sup>KEK, High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

Timing of beam with respect to the acceleration RF in cERL has been analyzed by measuring HOMs excited in an injector superconducting cavity. Currently, the beam timing has been adjusted by measuring the beam energy at the downstream of cavity. The beam traveling through the cavity excite HOMs. Most preferable monopole modes with beam timing information was investigated. Analysis of the excited HOMs in injector superconducting cavity in cERL confirmed that the beam timing can obtain. There was a high level noise derived from klystron, and also the resolution was limited by the performance of the oscilloscope. It is found that both suppression of noise and improvement of resolution are necessary for a system development in the future study.

## 1. はじめに

cERL は KEK に建設された ERL (Energy Recovery Linac) の実現のための実証機である。ERL は加速した電子をもう一度加速空洞に通すことで、エネルギーを回収し、高輝度大電流ビームが得られるとされる加速器である。大電流で連続 (CW) 運転のためには超伝導空洞が必要であり、cERL には 2cell の入射器超伝導空洞 3 台と 9cell の主空洞 2 台がインストールされている。

cERL は光陰極 DC 電子銃から放出された電子は常伝導パンチャー空洞によって圧縮され、1.3 GHz 入射超伝導空洞によって加速される。その後、合流部にて線形加速部分へと入り、1.3 GHz 主加速空洞でエネルギーが受け渡しされる。また入射されるビームの特性の診断のため合流部で曲げず入射器ビーム診断部へ送ることもできる。

2017 年 3 月に行われた運転は大バンチ電荷、低エミッタンス運転を目的とされ、周回を行わない運転であった。

ビームが空洞のような構造体を通過する際、ウェイク場が誘起される。空洞は多くの固有共振モードを持つため、加速周波数以外の HOM が残る。このときモノポールモードは径方向の位置依存性をもたない。ダイポールモードは BPM として利用されるが、同様にモノポールモードもビームの位相診断に用いることができる [1] [2]。

FLASH [3] では TESLA 型 9-cell 超伝導空洞のモノポールモードを測定することで、加速 RF に対するビームの位相を測定している。しかし FLASH では 0.3 nC/bunch とバンチ電荷が大きかった。今回の測定は、最大 40 pC/bunch で 2cell 入射超伝導空洞 3 台のうちの 1 台を使用した。また測定する空洞のシャントインピーダンスが 2 セルだと低いため、測定系のフィルター構造を工夫し、十分な強度のシグナルが観測できるようにした。結果として HOM の測定によってビームの位相を確認し、システム化のための分解能向上への課題を報告する。

\*okadat@post.kek.jp

## 2. 測定原理

ビームが加速空洞を通過する際、ウェイク場が発生し空洞内に加速モード以外の高調波モード (HOM) を誘起する。このときモノポールモードは対称性により、ビームの電荷のみに依存し、径方向への依存性を持たない。誘起される電圧はモード  $n$  のロスファクターを  $k_n$  とすると、

$$V_n = 2k_n q \quad (1)$$

$$k_n = \omega_n (R/Q)_n \quad (2)$$

である。ロスファクターはモード  $n$  の共振周波数  $\omega_n$  と空洞の形状によって決まる  $(R/Q)_n$  によって定義される。

Figure1 は 2 セル入射超伝導空洞に 40 pC のバンチが通過した際に HOM カプラーから取り出されるシグナルを式 (2) を使って計算した結果である。TM011 モードの  $\pi$  モード、 $\pi/2$  モードのみを考え、使用したパラメータは SUPERFISH を用いて求めた。周波数は 2281 MHz, 2312 MHz, バンチ電荷 40 pC, ロスファクターは 0.0061 V/pC, 0.236 V/pC である。ケーブルロスなどは考慮していない。これを見ると mV 以上の電圧が得られるため、測定可能な強度だと見積もった。

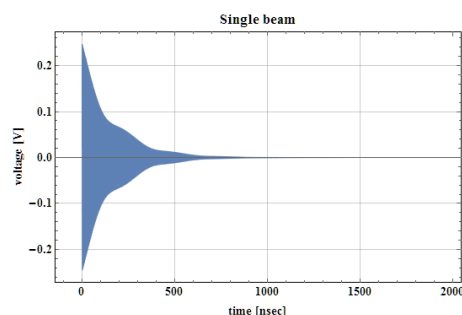


Figure 1: Calculation of a signal from INJ-HOM coupler without cable loss. TM011mode.  $q=40$  pC,  $k_n=0.0061$ , 0.236 V/pC.

空洞に誘起された HOM はビーム不安定性やパワロスを引き起こすためビームライン上の RF 吸収体で減衰させる、もしくは外部に取り出す必要がある。cERL の入射超伝導空洞には HOM を取り出すために、同軸アンテナ型 HOM カプラーが取り付けられている。HOM カプラーは加速モード 1.3 GHz は外部に取り出さないよう結合度が低く抑えられているが、空洞内のパワーが大きいため HOM カプラーからは加速モードと HOM が取り出される。したがって HOM カプラーからの加速モードとモノポールモードの信号を検出すればビームの加速モードに対するタイミングつまり位相が得られる。

### 3. 実験方法

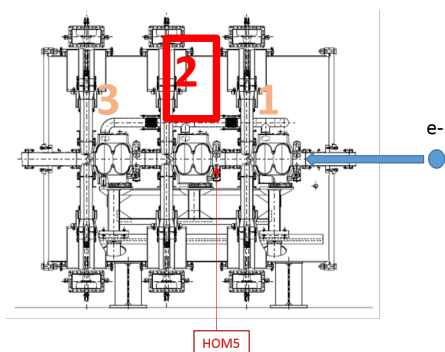


Figure 2: Injector cryomodule based on [4]

Figure 2 に示すように、cERL の入射超伝導空洞は 2 セルで 5 つの HOM カプラーを持つ。入射器クライオモジュール内には同じ空洞が 3 台インストールされている。今回は 2 番目の入射超伝導空洞の上流側の HOM5 と呼ばれる HOM カプラーを使用した。モノポールモードのうち TM011 の  $\pi$  モード (2288 MHz) を計測に使用した。これは近くにほかの HOM がなく、HOM カプラーの結合係数  $Q_{ext}$  が高く、より強い信号が得られたからである。

Figure 3 にセットアップの図を示す。HOM カプラーからは同軸ケーブルが制御室までつながっている。終端は 50  $\Omega$  終端であり、同軸ケーブルでオシロスコープ (Tektronix DPO71604) に接続した。計測の際、ほかの周波数の信号を強く減衰させるため、フィルターを挿入した。オシロスコープのトリガーは電子銃のカソードを励起するためのレーザーのプレアンプからの信号を使用した。プレアンプからビームの信号までは約 1.6 msec の delay があった。

今回の cERL 運転はバンチが 162.5 MHz の繰り返してマクロパルス 5 Hz 周期のバーストモードで行われたが、この測定時はレーザーをパルスに絞り、シングルバンチ運転にして行った。

Figure 4 にこの実験でのビームタイミングの定義を示す。今回、オシロスコープでタイミングを測定するにあたりトリガーをレーザーのプレアンプに固定してある。したがって、測定の原点は常にビームに対して固定される。加速モードに対するビームタイミングの

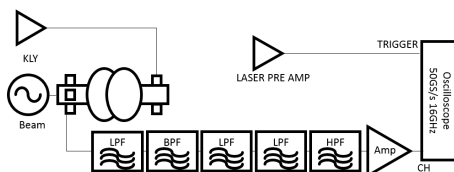


Figure 3: Schematic diagram of a setup of measurement. Trigger is a signal from a preamp of laser.

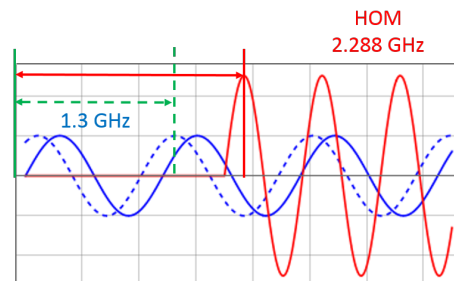


Figure 4: Definition of the beam timing in this experiment.

計測を確かめるため、空洞内の加速モードの位相を変化させることでビームタイミングとの関係を測定した。

### 4. 信号解析

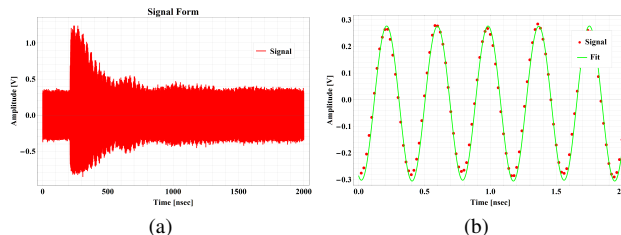


Figure 5: An example of the waveform and curve fitting. Left is example of the waveform for a single beam from HOM5. Right shows example of the curve fitting. the fitting function is superposition of 1.3 GHz wave and 2.6 GHz wave. Red: The data from oscilloscope, Green: The curve fitting.

Figure 5 の左図にオシロスコープで計測した信号の例を示す。大きく立ち上がったときにビームが通過したと考えられる。ビームによる信号の以前はクライストロンから空洞に送られる加速モード 1.3 GHz と 2 倍高調波 2.6 GHz を含んでいる。空洞内の 2 倍高調波は加速モードと比べ小さいが、HOM カプラーが 1.3 GHz のノッチフィルター構造となっているため、オシロスコープで計測する信号では 2 倍高調波 2.6 GHz は無視できない大きさになっている。加速モードの位相を定義する際にビームによる信号がないこの部分をフィッティングすることによって定義してある。

計測された信号中のスペクトルを Figure 6 に示す。注目する TM011 モードの周波数の強度は 0.198 mV、2.6 GHz は 0.9 mV が得られている。

ビームによる信号を分離するため、それ以前にも含

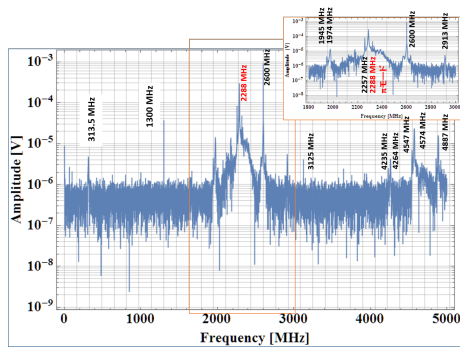


Figure 6: Spectra of a single beam from INJ2 HOM coupler No.5.

まれていた 1.3 GHz, 2.6 GHz の信号を差し引いた。それを Figure 7 に示す。

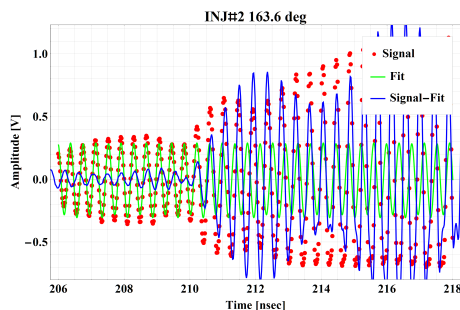


Figure 7: Reduced the fundamental RF from a beam signal. Red:Data from oscilloscope, Green:The curve fitting of the fundamental RF 1.3 GHz and 2.6 GHz, Blue:Data eliminated by the fundamental RF 1.3 GHz and 2.6 GHz.

エラーは使用したオシロスコープの分解能 0.02 nsec = 4.68 deg とした。分離後の信号として支配的なものは 2.288 GHz であるためこの信号をはじめの立ち上がり付近で局所的にフィッティングすることでビームのタイミングを定義した。フィッティングの範囲はピークから  $\pm 0.5$  nsec とした。また 1.3 GHz に対する位相として知るため、タイミングを時間から位相に変換した。

これを空洞内の加速モードの位相を 10 $\mu$ sec ずつ変化させ、タイミングを測定した結果を Figure 8 に示す。横軸が加速モードの位相であり、縦軸が HOM の加速モードに対する位相である。加速モードの変化に対して、ビームのタイミングは固定されるはずであるため、傾きは 1 である。測定では傾きとして 1.072 を得ている。回帰直線の傾きを考えるので信頼区間は 95% のとき 0.995 – 1.15 となる。

## 5. まとめと考察

cERL の入射超伝導空洞を利用して、HOM を使ったビームのタイミング測定を行った。統計が少ないため解釈は難しいが、ビームタイミングを測定できたことが確かめられた。より確かなものにするにはデータを多くする必要がある。また今回分解能として 4.68 deg があったが実用的な分解能は 0.1 deg 以上が要求される。これは今回は INJ2 の HOM5 の 1 つポートを利用した

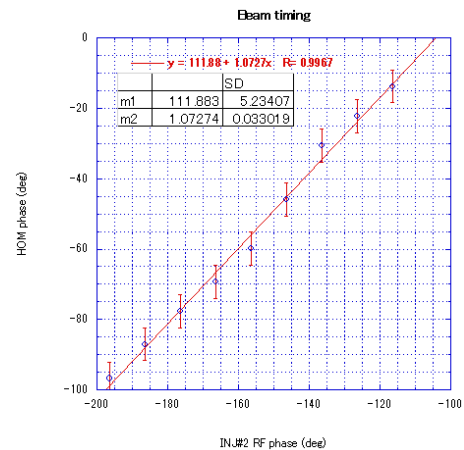


Figure 8: Beam timing (deg) vs RF phase in cavity.

が、他の空洞や他の HOM ポートからの信号も使うことで改善できる [3]。また、注目した HOM の周波数の付近に 2.6 GHz の信号があったが、これをよりよいフィルターを使うなど抑制することが性能向上につながる。また測定はシングルバンチで行ったが、バーストモードではビームの繰り返しの 162.5 MHz の整数倍の信号が強く残り、HOM を分離することが難しい。これらの問題を解決することが、HOM のタイミングモニターとして実用化のための課題となる。

## 参考文献

- [1] L. Shi *et al.*, “MEASUREMENT OF BEAM PHASE AT FLASH USING HOMs IN ACCELERATING CAVITIES”, Proceedings of IPAC’16, Busan, Korea, MOPOR039.
- [2] 本田洋介 他, “cERL 入射超伝導空洞の高次モードによるビーム位置測定”, Proc. of 12th PASJ2015, THP089, 2015.
- [3] S. Molloy *et al.*, “High precision superconducting cavity diagnostics with higher order mode measurements”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 9, no. 11, p. 112802, 2006
- [4] S. Noguchi *et al.*, “PRESENT STATUS OF SUPERCONDUCTING CAVITY SYSTEM FOR CERL INJECTOR LINAC AT KEK”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, WEPEC024.