

LORENTZ DETUNING OF HIGH-FIELD SUPERCONDUCTING CAVITY AND COMPENSATION WITH TUNER

Toshiyasu Higo¹, Yasuo Higashi, Hiroshi Yamaoka, Fumio Furuta, Takayuki Saeki, Osamu Araoka, Masayoshi Wake
and Kenji Saito

KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

For the cavities of ILC, the frequency tuner which can compensate a Lorentz detuning larger than 2kHz is needed for a high-field operation over than 35MV/m. A ball-screw tuner was designed aiming at a large dynamic range of compensation for the cavity operated even higher gradient of 45MV/m level. This tuner response was studied with investigating the cavity characteristics. Tests were performed both at room temperature and at a liquid nitrogen temperature. A high dynamic range of 5kHz was found feasible.

高電界超伝導空洞のローレンツデチューニングとボールスクリュウ型チューナーによる補償

1. はじめに

高電界（～35MV/m）で運転する超伝導リニアコライダ（ILC）の空洞では、2kHzを超える大きなローレンツデチューニングを補償できる周波数チューナーが必須である。筆者らのグループでは更に高い電界（～45MV/m級）を目指した試験開発を進め、総合的に高電界化の技術的評価を行ってILCへの寄与を行う方針である。重要な技術要素には、空洞本体の製作、表面処理、高電力ケーブルなどと共にチューナーの開発が必須である。チューナーに至っては未だ35MV/mレベルでさえ実証されていないのが現状である^[1]。最近TESLA空洞に対して機械共鳴を使って20MV/mでのチューニングが実証されたが^[2]、更に大きいダイナミックレンジを目指した試験は待ち状態である^[3]。本稿では、大きいダイナミックレンジをとれるボールスクリュウ型チューナー^[4]の設計と常温での動作試験結果をのべ、5kHzの補償を実現できる見通しを得たことを述べる。

2. ローレンツデチューニング量

ILC (International Linear Collider) では、現在BCD (Basic Design) として、9セル1.3GHz超伝導空洞を用いる。35MV/m級の高い電場を実現したときに生ずるMaxwell応力はアイリス部で25kN/m²、赤道部で6kN/m²に達する。これが厚さ～3mmのニオブ板で形成されるセルを変形させるため、バンド幅数100Hz ($Q_{ex} \sim 3 \times 10^6$) で運転される空洞のチューニングをkHzオーダーで狂わせるため、チューニングが必要である。

この評価で重要になる機械パラメータは空洞やそ

れを支持するチューナーとHeジャケット系の剛性で

Item	Values	Units
Shrinkage of a bare cavity	56	microns
Total axial force due to Maxwell's stress	103	N
Shrinkage of actual cavity with tuner and jacket	1.73	micron

ある。Table 1にイチロー空洞^[5]の計算結果を示す。

Table 1 Mechanical stiffness of ICHIRO cavity.

2.1 空洞機械特性と静的デチューニング量

9セル空洞のローレンツデチューニング量は、RF電磁場により発生するMaxwell Stressに起因する空洞の変形をANSYSにより評価し、Maxwell Stressと同じ関数形で表される周波数摂動との積を各空洞毎に全表面で積分することにより評価した。Fig. 1に示したセル毎の周波数変化の和をもって9セル空洞の周波数変化とした。結果は

$$\Delta F / E_{acc}^2 = -1.49 [Hz / (MV / m)^2]$$

となった。

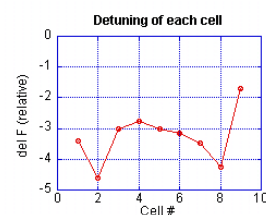


Fig. 1 Detuning of each cell.

¹ E-mail: toshiyasu.higo@kek.jp

2.2 動的デチューニング量

空洞は0.5msの立ち上がりと1ms程度のビームオン時間により構成される5Hzのパルス運転である。このため、パルス内の時間変化する周波数デチューニングは前節で評価した静的なデチューニング量と異なることが考えられる。まず空洞の両端を固定して周波数の時間変化を追った^[6]。45MV/m運転時の計算結果をFig. 2に示す。青点線で示す E_{acc}^2 に良く一致していることが分かった。実際の場合にはチューナーシステムの有限の剛性により若干空洞が縮まりその分デチューニングが大きくなる。時間レスポンスは、空洞の剛性に比べてチューナーの剛性が充分高いので、時間反応はFig. 2に従うはずである。チューナーの有限剛性によるデチューニングの増大は、Maxwell Stressによる空洞の縮みからでき、これらをまとめるとTable 2のようになる。

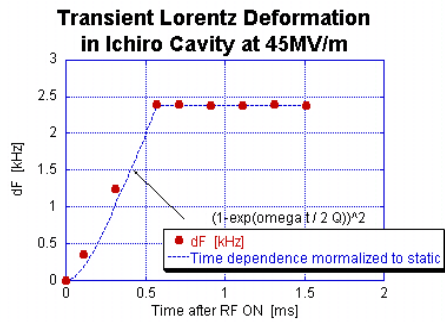


Fig. 2 Transient detuning.

Table 1. Lorentz detuning of ICHIRO cavity

Frequency shift	ΔF_{LD}	k_{LD}
	at 45 MV/m	Sensitivity
Units	kHz	Hz / (MV/m) ²
Single cell with both ends fixed	- 1.73	- 0.85
Cavity with two ends fixed	- 2.38	- 1.18
Actual cavity with tuner and jacket	- 3.02	- 1.49

3. チューナーによる補償

3.1 静的チューニング

空洞の両端を引っ張ることにより周波数を上げることができる。感度はデチューニングと同様に計算でき、イチロー空洞では368Hz/micronである。

3.2 動的チューニング

2.2節で述べたようなパルス運転に対するチューニングもパルス応答が必要である。ANSYSで0~1ms間でリニアに空洞両端を引っ張ったときの周波数

変化を計算した結果がFig. 3である。1 m s 程度の時間では、静的な係数に比べて2割ほど小さいことが分かった。

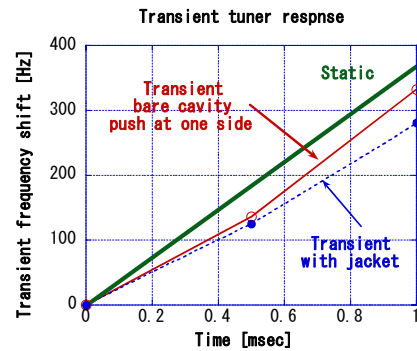


Fig. 3 Transient tuning characteristics

4. チューナーの設計

45MV/mを目指すイチロー空洞では、Table 1より3kHzのチューニングが必要である。この高いダイナミックレンジを実現し、更にZ軸方向の剛性を充分大きくとるためにFig. 4に示す同軸ボールスクリュー型チューナーを考案した^[4]。写真をFig. 5に示す。最外周にギアを掘ってあり、スローチューニングはこれをウォームギアで回転させる。また、ピエゾ素子を用いて同じ最外周ギアを周方向にたたき、速い応答を得る。

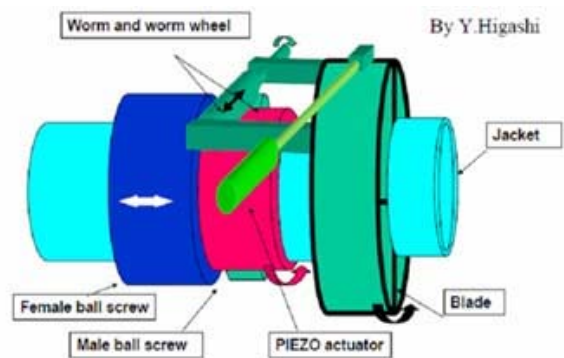


Fig. 4 Coaxial ball-screw tuner.

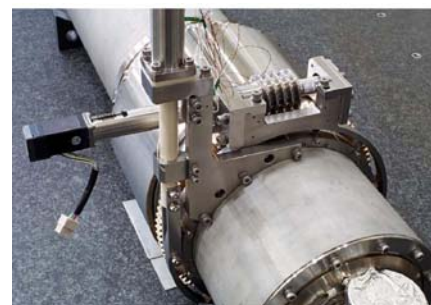


Fig. 5 Tuner with He Bessel.

5. 実際の空洞の機械的レスポンス

実際にHeベッセルとチューナーを空洞に取り付けて機械性能を調べた。

5.1 パルス応答と周波数スペクトル

2msのドライブパルスに対する空洞全長の時間応答と空洞のRF共振周波数の変化を調べた結果をFig. 6に示した。この例から空洞の全長で周波数の変化が殆ど決まっていることが分かる。またこれをFourier変換すると示したようになり、250Hz近辺と350Hz近辺に主要モードのあることが分かる。

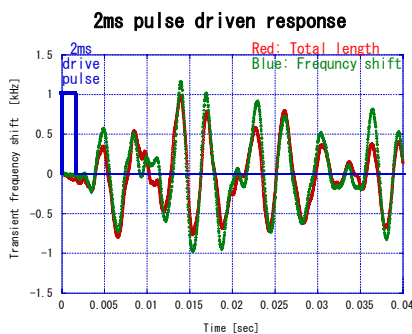


Fig. 6 Mechanical and electrical (1.3GHz) response to 2ms drive pulse.

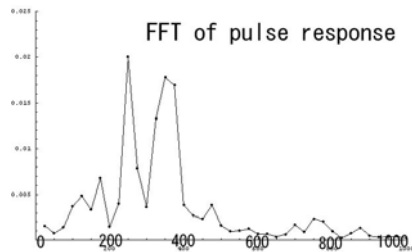


Fig. 7 FFT of response to pulse drive.

5.2 機械共振モード

ピエゾ素子にサイン波を加え、ドライブ周波数を掃引してRF周波数のレスポンスを計測した結果をFig. 8に示した。これは低温試験を可能にするチャンパー内に設置した時のものである。赤は常温、青

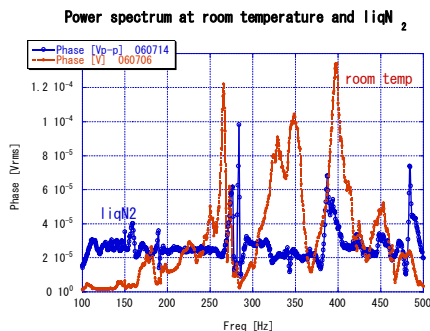


Fig. 8 Frequency spectrum of cavity/tuner system.

は液体窒素温度での結果である。常温では前節のFFTで顕著に表れていた二つの周波数域にパンプが見られ、更に400Hz付近にも大きなピークが確認された。また、低温では270Hz付近のピークは以前存在するが、その他の共鳴は顕著でなくなることも分かった。更に低温ではQ値が上がることも確認された。

5.3 動的レスポンス

5Hzでの運転に同期させて2msのパルス駆動した場合のレスポンスをFig. 9に掲げた。276Hz近辺の高いQ値を持つモードによりパルス間に振動が残っていることが分かる。

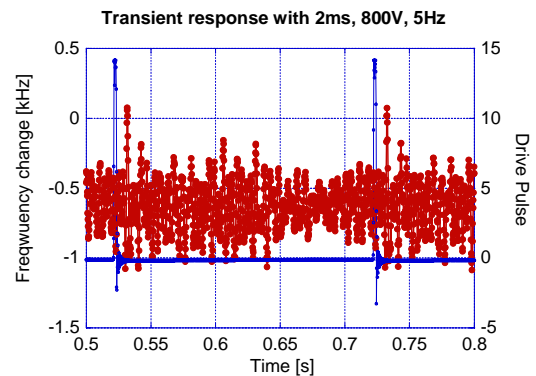


Fig. 8 Frequency shift driven by 5Hz 2ms pulse.

6. サマリー

800Vのパルス駆動で1kHzのチューニングが得られた。この時の主要周波数は276Hzである。ダイナミックレンジを増加させるには、てこ等の機械的増大メカニズムが必要である。276Hzでハーモニックドライブすると、0~200Vの駆動電圧でもチューニング量2.5kHzが得られた。電源の増強でレンジを広げられよう。

参考文献

[1] BCD, ILC Web site, <http://www.linearcollider.org/cms/>.
 [2] P. Sekalski et al., EPAC 2006, THPCH175, Edinburgh, UK, 2006.
 [3] C. Pagani, private communication.
 [4] 東保男, <http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG5notes/>.
 [5] 両角裕一, *ibid*.
 [6] T. Higo et al., ILS Asia NOTE, 2006-001, <http://lcdev.kek.jp>.