

OBSERVATION OF THE LORENTZ DETUNING, AND THE COMPARISON BETWEEN THE EXPERIMENT AND THE CALCULATION FOR STF BASELINE CAVITY

Yasuchika Yamamoto¹, Hitoshi Hayano, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Masato Satoh, Toshio Shishido, Ken Watanabe
High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The degradation of the field in one pulse by the Lorentz detuning is one of the important problems in ILC (International Linear Collider), which is operated with the repetition rate of 5Hz and the pulse width of 1.5msec. The STF Baseline cavity in KEK has the stronger mechanical stiffness than TELSA's one in DESY. The reason is that the effect by the Lorentz detuning is smaller. Recently, the data of the Lorentz detuning above 25MV/m (Max. 28MV/m) in STF Phase-1.0 were acquired. The results were compared with the numerical simulation, which is used "Two Modes Model". They are almost consistent with each other and the "Two Modes Model" is found to be valid. In the future, the effect of the Piezo compensation will be added in the numerical simulation.

STFベースライン空洞におけるローレンツデチューニングの観測とモデル計算との比較

1. はじめに

KEKに新たに建設中の超伝導空洞開発・試験設備 (Superconducting rf Test Facility, STF) では DESY 研究所において開発されてきた TESLA タイプの 9 セル空洞に改良を加えた TESLA-like 空洞 (STF ベースライン空洞) を開発している。その主な特長は、電磁界的ローレンツ応力による歪みが出るだけ小さくなるようにエンドセル部分の機械的強度を増やしている点にある。この改良により、ローレンツ力による離調量が TESLA 空洞の半分以下に抑えられることになる。

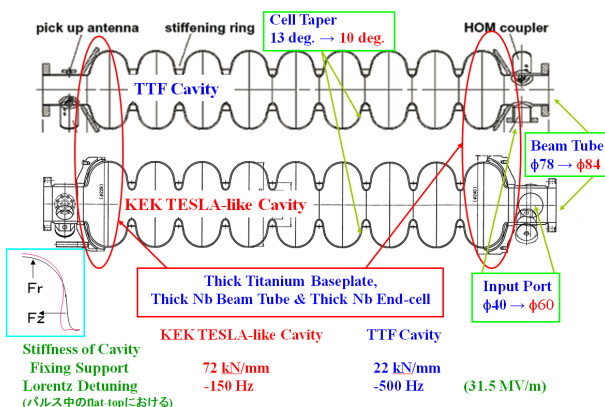


図1: TESLA空洞と TESLA-like 空洞の違い

一般に、ローレンツ離調の補正は以下の3つの方法によって行われる。

- (1) ピエゾ素子を用いる
- (2) 空洞周波数に初期オフセットを設ける

(3) 空洞の機械的剛性を強くする
STF ベースライン空洞ではこれらを全て行っており、パルス内の離調量を最小にすることを狙っている。その理由は、第一に空洞が離調することで生じるフィールドの低下を補うための余分な投入パワーを減らすことにある。第二は、離調が大きくなるとピエゾ素子にかかる負担も大きくなりそのために消耗が激しくなって交換の必要が生じるため、出来るだけ長持ちさせることにある。

最近、STF Phase-1.0 において 25MV/m 以上 (最大は 28MV/m) の安定な状態におけるローレンツ離調の測定が行われた。得られた結果に物理的な解釈を与えるために、簡単な機械振動モデル ("Two Modes Model") を考案し、それによって空洞のローレンツ離調が生じるものとして数値的な計算を試みた。測定結果と数値計算の結果は矛盾しておらず、このモデルが妥当であることが確認された。また、ピエゾを用いてローレンツ離調の補正を行うデータも取得した。その結果、ピエゾの励振条件にはある程度の余裕が存在し、離調補正のパラメータには選択的な余裕があることが判明した。ピエゾの効果も入れた数値計算も行い、その結果も観測データとほぼ矛盾していないものであった (very preliminary)。

2. ローレンツ離調と機械振動

一般に、超伝導空洞は電磁場の増加に伴い電磁界的なローレンツ応力による影響で空洞が歪められる。そのため空洞周波数もずれることになり、特にパルス運転を行っている加速器においてはパルス内の電磁場が一定に保てなくなるといった問題が生じるため、

¹ E-mail: yasuchika.yamamoto@kek.jp

ローレンツ離調を補正することが必須となっている。その効果は電磁場の強さの2乗で利いてくるため、ILCのような高加速勾配でかつパルス運転される加速器において特に問題となる。

ローレンツ離調により空洞周波数は下がる方向へ動くため、パルスの立ち上がりの前に予め周波数にオフセットを持たせておく(当然、高い方向へ持って行く)、パルスのflat-top(ビームが通過する部分)ではほぼresonanceに近いところに持ってくる事ができる。残った微小な離調量をピエゾで補正すれば、ほぼ平坦な加速勾配のパルスが得られることになる。

ローレンツ応力を受けた空洞はある機械振動モードで励振され、それに応じて空洞周波数も振動することになる。機械振動モードは一般に無数のモードが存在するが、数千Hz以上の速いモードは空洞の応答が追い付かないため、すぐに減衰してしまうものと予想される。昨年行われたSTF Phase-0.5やDESY研究所のTESLAでの経験では、通常200Hz辺りに大きなピークを持った機械振動が存在しており、それは空洞を軸方向に伸縮させるモードで、ローレンツ離調の主要なモードであることがわかっている。

3. STF Phase-0.5/1.0における観測結果

3.1 STF Phase-0.5^[1,2]

昨年の10、11月にSTFにおいてSTF Phase-0.5と呼ばれるクライオモジュール試験が行われた。これは4空洞の冷却試験を行うPhase-1.0に進む前段階として、一台の空洞のみをクライオモジュールに入れて冷却試験を行うというものである。この時使用された空洞は、B.L.#3(ベースライン空洞3号機)と呼ばれる空洞で最大加速勾配が19.3MV/mに到達した。ローレンツ離調のデータはやや低いフィールドの18MV/mで主に測定された。

一方、低電力での機械振動モードの観測も行われ、予想されたように200Hzに大きな共鳴があることがわかった。これは、大電力試験時にパルスの立ち下り以降の位相のリングングをフーリエ変換し、その周波数成分を調べることで確認された。

3.2 STF Phase-1.0

4台の空洞のクライオモジュール試験を行うSTF Phase-1.0は今年の5月から始まり、一台の空洞のみ7月に大電力試験を行った。使用された空洞はベースライン空洞2号機と呼ばれ、縦型クライオスタットを用いた性能試験では29.4MV/mに到達した空洞である。4台の空洞を一列に繋げる4連化と呼ばれるクリーンルーム作業を行っていたため、空洞内にダストが入り込んで性能を制限してしまう可能性があったが、結果は28.1MV/mまで到達しPhase-0.5よりも高いフィールドでのローレンツ離調のデータを得ることができた。図2はその時取られたオシロスコープでの波形である。上が周波数に初期オフセットが

無い場合の波形で、下が400Hzのオフセットを持たせた時の波形である。波形中で青は入力パワーの出力、水色が信号発信器と入力ラインの位相差、紫が空洞の透過パワーの出力、緑が信号発信器と空洞との位相差、である。フィールドは25~26MV/mである。

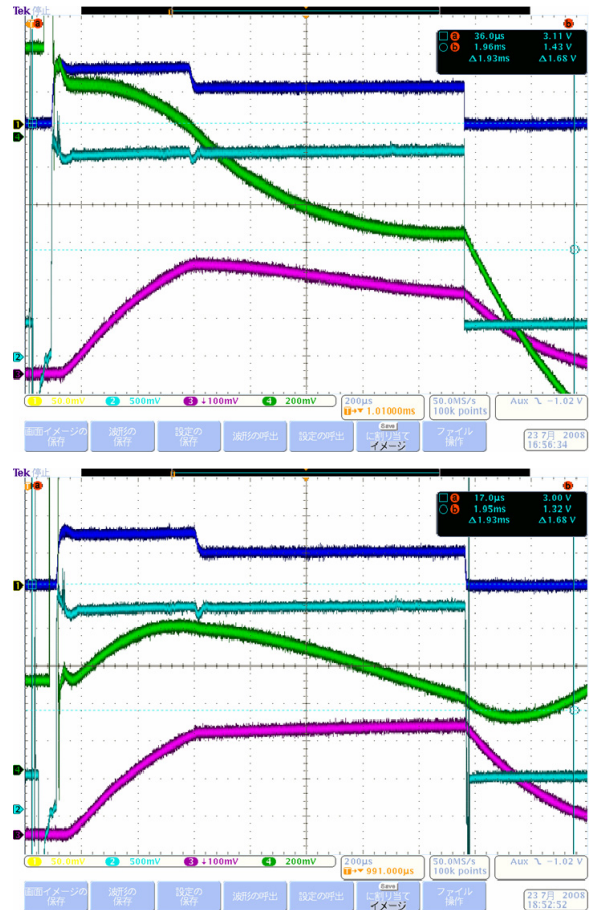


図2: オフセットの有り無しでの観測波形の違い

オフセットを持たせるだけで、空洞をresonanceに近いところに持ってこられるということが容易に見て取れる。残った離調量はピエゾを使って補正を行うことになる。その一例が以下にある図3である。

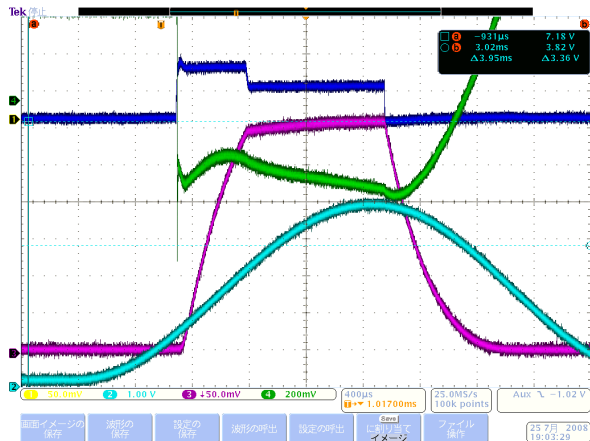


図3: ピエゾによるローレンツ離調補正

水色だけが図2と異なり、これはピエゾを励振させ

ているドライブ波形である。この例の場合、ピエゾは250Hzで励振させて、立ち上がりはRFの立ち上がりの800 μ sec手前である。周波数オフセットは200Hzである。図2の400Hzのオフセットをかけた場合と見比べると、flat-topでの離調量が半分程度になっていることがわかる。これまでのところ、ピエゾを励振させている波形のタイプは正弦波的なものであるが、完全に補正させるには任意波形を入れる必要があると思われる。

4. 機械振動モードのモデルの導入とローレンツ離調の数値シミュレーション^[3]

一般に、空洞電圧を求める方程式は以下のようなもので与えられる。

Cavity Voltage Equation

From J. Slater

$$\frac{d^2}{dt^2} V(t) + (1 + j \frac{Q_L}{Q_0}) \frac{\omega_0}{Q_L} \frac{d}{dt} V(t) + \omega_0^2 V(t) = U(t)$$

$$\tilde{V} = \tilde{V}_d + (\tilde{V}_o - \tilde{V}_d) \exp\left(-\frac{t}{T_F}\right) \exp\left(j \frac{\tan \psi}{T_F} t\right)$$

Equi-angular Spiral

各項の係数が時間に関して一定であるなら解析的に解けるが、そうでない場合はどうするか？

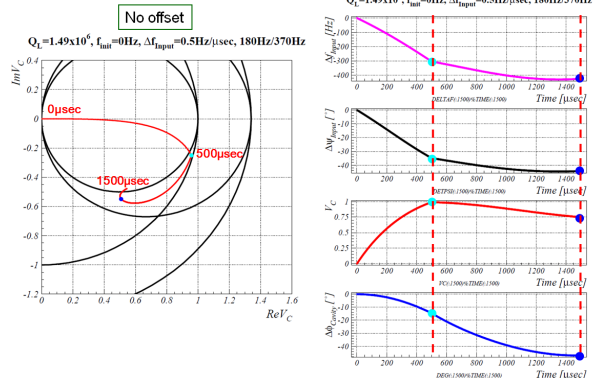
図4: 空洞電圧の時間変化を表す式^[4, 5]

これは各項の係数が時間に関して一定であるときは解析的に解くことができるが、離調量が時々刻々と変化していくような場合には解くことができない。このような場合には、ごく短時間の間は各項の係数が一定であるとみなし、瞬間的な振舞いを数値的に解いてそれを積算することで空洞電圧の時間的な振舞いを知ることができる。

STF Phase-0.5/1.0で得られたローレンツ離調の測定結果について物理的な解釈を与えるために、主に2つの機械振動モード(slow modeとfast mode)が寄与するとした”Two Modes Model”を考案し、数値シミュレーションを行った。以下の図5はその計算結果で、周波数に初期オフセットが有る場合と無い場合のそれぞれの例を示している。いずれの場合も空洞の応答は初め原点から傾き0で出発する。500 μ secに到達する間の振舞いは両ケースで明らかに異なり、一方はresonanceから外れる方向に向かい、他方はresonanceに近づくように振舞う。この結果から、周波数に初期オフセットを持たせることが本質的に重要であるということが容易に見取れる。

得られた結果をSTF Phase-1.0で得られた結果と比べたものが図6である。両ケース共に観測結果をよく再現しており、”Two Modes Model”が機械振動モードの近似的なモデルとして妥当なものであることを示している。一般に空洞の機械振動モードは無数存在するが、この結果を見るとあたかも2つの代表的なモードのみで実際の空洞の応答が説明できるという驚くべき結果を示している。

Example of the calculation for the transient response①



Example of the calculation for the transient response②

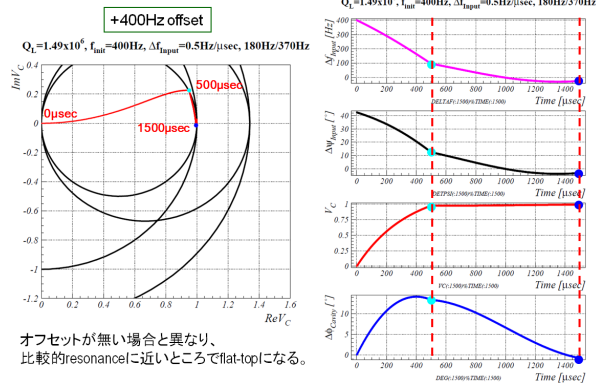


図5: “Two Modes Model”により得られた結果

次の段階としては、数値シミュレーションにピエゾの効果も入れることで、これによりローレンツ離調の補正条件(Piezo criteria)をシミュレーションから求めることができるようになる。この試みはまだ始められたばかりであるが、ピエゾの動作条件は比較的尤度が大いという結果が得られている。このことは、ピエゾの動作パラメータを一意に定める必要がなく、各空洞の機械的剛性の微妙な違いに応じて比較的自由に選ぶことができるということである。STF Phase-1.0の秋の運転では4空洞の同時ハイパワー試験も予定されており、さらに詳細なデータが得られると期待される。

Comparison between experiment and calculation

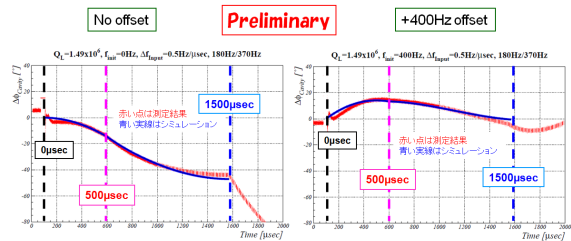


図6: 観測データと数値シミュレーションの比較

5. まとめ

STF Phase-1.0において加速勾配が28MV/m以上でのローレンツ離調の観測データが得られた。その結果は、期待されたようにTESLA空洞の半分以下になっており、空洞の機械的剛性を増やした効果が表れている。また、ピエゾ素子を用いてローレンツ離調の補正を試み、いくつかのパラメータで補正が可能であることを示した。このことは、ピエゾの動作条件に比較的余裕があるということで、空洞毎の機械的剛性の微妙な違いに応じてパラメータを選ぶことができるということである。

得られたローレンツ離調の結果について、物理的な解釈を得るために機械振動モードを簡単なモデルで近似して数値シミュレーションを行った。その結果を観測データと比較したところ、両者はよく一致しており、仮定したモデル”Two Modes Model”が妥当な近似であるということが示された。今後は、ピエゾの効果も数値シミュレーションに取り入れて、ピエゾの動作範囲をシミュレーションから求めるということを試みる予定である。

参考文献

- [1] E. Kako, et al, MOPP131, EPAC'08, Genoa, Italy, Jun. 23-27, 2008.
- [2] 加古永治. 加速器, **5**(2), 2008, p.117.
- [3] Y. Yamamoto et al., TILC08, Sendai, Mar. 2-7, 2008, URL: <http://ilcagenda.linearcollider.org/materialDisplay.py?contribId=74&sessionId=61&materialId=slides&confId=2432>
- [4] J.C. Slater, Microwave Electronics, Rev. Mod. Phys. **18**, 441-512 (1946).
- [5] P. Wilson, High Energy Electron Linacs, SLAC-PUB-2884, Nov., 1991.