

[F17p23]

DEVELOPMENT OF THE L-BAND MULTI-CELL SUPERCONDUCTING CAVITY WITH STIFFENERS

Masanori MATSUOKA, Kohichi OHKUBO, Toshiyuki YAMANAKA, Tomohiro ITO*
Eiji KAKO**, Kenji SAITO**, Toshio SHISHIDO**, Masaaki ONO**, Shuichi NOGUCHI**

MHI, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Kobe Shipyard & Machinery Works
1-1, Wadasaki-cho 1 chome, Hyogo-ku, Kobe, 652-8585

*MHI, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Takasago Research & Development Center
2-1-1, Shinhama Arai-cho Takasago Hyogo-ken, 676-8686

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

ABSTRACT

Since 1990, L-band niobium superconducting cavities have been developed with collaboration between MHI and KEK.

The development of the multi-cell cavity with stiffeners is presented.

強め輪付き多連空洞の開発

1. 概要

次世代の素粒子物理用の加速器として、電子一陽電子衝突型線形加速器が注目されている。この加速器として、XバンドまたはCバンドの常伝導、Lバンドの超伝導空洞 (TESLA; TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) が有力候補と考えられている。

当社では、1990年より、高エネルギー加速器研究機構との協力により、Lバンド超伝導加速空洞の開発を行ってきた。これまでの空洞試作を通じて、TESLAで求められる高電界性能 (25MV/m以上) に対応できる基本的な空洞製造技術を確立しつつある⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

ここでは、TESLA用空洞の特徴である高電界かつパルス運転に対応すべく、電磁力による空洞変形を評価し、これを抑制できる構造の検討をパルス応答解析により行った。

2. 検討手順

パルスの電磁力による空洞変形量を求める為の手順を図1に示す。まず、空洞内表面に発生する電界と磁界を解析コード“Superfish”によって求め、この値から電磁力を計算する。

さらに、空洞の機械的な固有振動数を求め、

この結果と先に求めた電磁力データをパルス応答解析コードに入力し、パルスの電磁力が空洞に印加されたときの空洞変形量を計算する。なお、固有振動数解析結果については、実際に振動計測を行い、両者を比較して、解析モデルの妥当性を確認する。

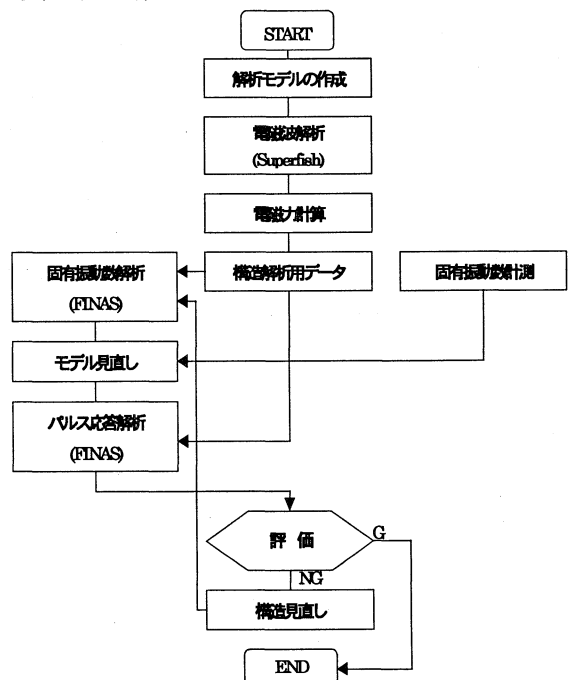


図1. パルス電磁力による空洞変形量の計算

3. 空洞内に生じる電磁力

空洞内に生じる電磁力 p [Pa] は、空洞内表面の電界 E_0 [V/m] と磁界 H_0 [A/m] を用いて、以下の式で求められる。

$$p = \frac{1}{4} (\epsilon_0 E_0^2 - \mu_0 H_0^2) \quad (1)$$

図2の9連空洞空洞内の電磁力を計算するために、3連空洞の計算モデルを用いた。まず、3連空洞内表面に生じる電界と磁界を解析コード“Superfish”によって求め、(1)式に代入して各部の電磁力を計算した(加速電界 E_{acc} を 30MV/m とした)。結果を図3に示す。

9連空洞の電磁力は、3連空洞の解析で得られた結果を元に、中央の7セルですべて同様の電磁力が働くものと仮定して求めた。

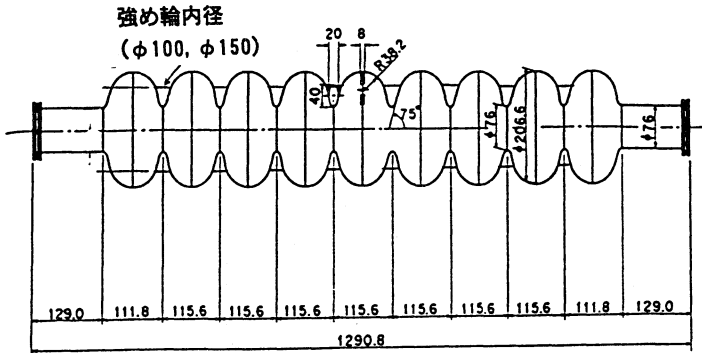


図2. 9連空洞の形状

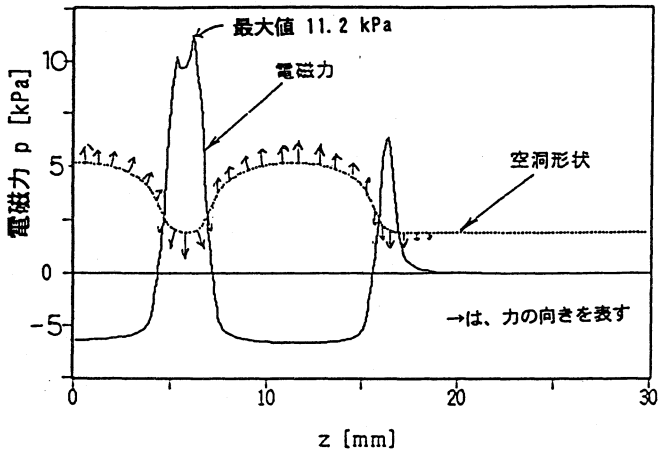


図3. 空洞内電磁力分布 ($E_{acc}=30\text{MV/m}$)

4. 固有値解析

図2に示す9連空洞の機械的固有振動数を求めた。解析モデルの板厚は、実際にハーフセルの板厚を計測した結果を用いた。解析結果を表1に示す。同表に、実験結果も併記する。各モードで解析結果の方が約15%程度高くなっているが、これは、実際の空洞の板厚が、表面研磨によって薄くなり、剛性が小さくなったためであると推定される。

表1. 9連空洞の固有振動数

次数	解析値	実験値
1	147.2Hz	122.5Hz
2	291.8Hz	245.0Hz
3	431.1Hz	367.5Hz
4	561.8Hz	487.5Hz
5	680.1Hz	600.0Hz

5. パルス応答解析

TESLAでは、数msのパルス運転が検討されている。ここでは、2msのパルス電磁力を空洞に印加したときの空洞変形量を計算した。図4に、パルス電磁力のパターンを示す。

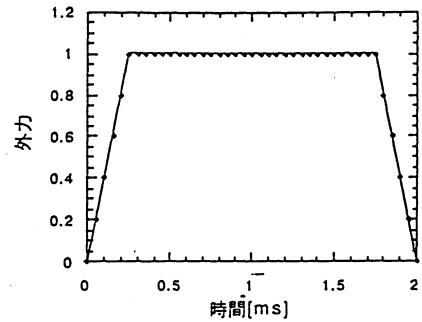


図4. パルス電磁力のパターン

3, 4項で得られた電磁力分布および固有振動数の結果を解析コード“FINAS”に入力し、得られた空洞変位分布を図5に示す。最大変位は、 $0.7\mu\text{m}$ であり、場所は、アイリス部付近である。この部分の変位による周波数の変化率は、Superfishの計算により、

$$\frac{\partial f}{\partial z} = 0.37\text{MHz/mm} \quad (2)$$

であるので、変形による共振周波数の変化は、259Hzと概算される。共振周波数が変化すると、空洞への高周波電力が減少してしまう。 Q_L が 3×10^6 のとき、259Hzの変化によって、投入効率は、41%に落ちる。

そこで、空洞のセル間に強め輪を施工し、剛性を上げることによって、変形を抑える検討を行った。強め輪直径を $\phi 100\text{mm}$ 、 $\phi 150\text{mm}$ の2種類として、空洞の剛性の変化を求めた。結果を図6に示す。図から分かるように、 $\phi 100\text{mm}$ では、強め輪無しに比較して、固有振動数はそれほど大きくなっておらず、剛性が向上していないことが分かる。一方、 $\phi 150\text{mm}$ の場合、剛性は約2倍となっており、剛性が固有振動数の2乗に比例すること、変位量が剛性に反比例することを考慮すると、変位量は約1/4に抑えられることが期待できる。

実際に、 $\phi 150\text{mm}$ の強め輪を施工した場合

の空洞変形量を計算した。結果を図7に示す。図より、変位量は、 $0.17\mu\text{m}$ となっており、強め輪なしの場合の1/4であり、妥当な結果といえる。この場合の周波数変化は、(2)式より、63Hzになり、電力投入効率は92%に向上する。

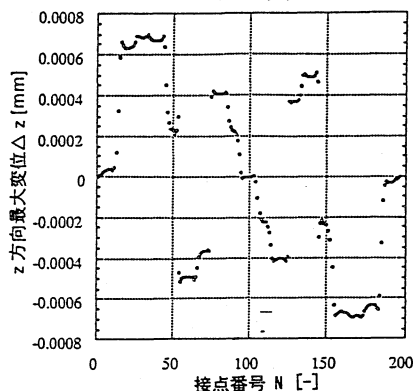


図5. パルス電磁力による空洞の変形 (強め輪なし)

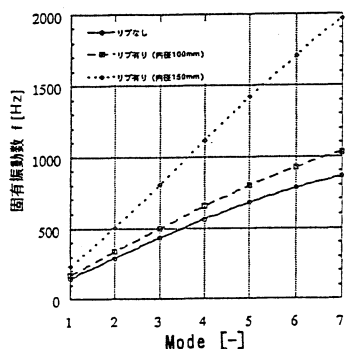


図6. 強め輪施工による剛性 (固有振動数) の変化

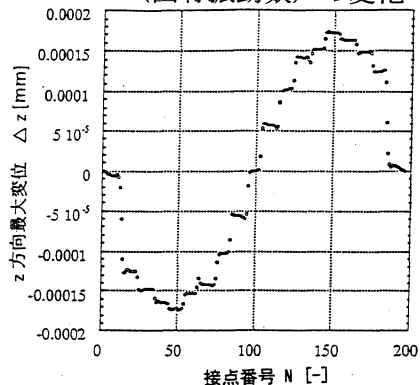


図7. パルス電磁力による空洞の変形 ($\phi 150\text{mm}$ の強め輪あり)

6. 強め輪付き3連空洞の試作・評価

以上の検討結果をもとに、 $\phi 150\text{mm}$ の強め輪を有する3連空洞の試作を行った。

図8に試作した3連空洞を示す。この3連空洞に電解研磨 ($80\mu\text{m}$)、熱処理 ($760^\circ\text{C} \times 5$ 時間)、仕上げ電界研磨 ($20\mu\text{m}$)、高圧水洗 (3時間) を施した後 (表面処理は野村鍍金

(株)にて実施)、低温での性能計測を実施した。計測結果を図11に示す。

16MV/mで急激なQ値劣化が始まり、20MV/mでクエンチが発生し、性能が制限された。

そこで、空洞に電界研磨 $40\mu\text{m}$ および高圧水洗3時間を施し、再度性能計測を行った。

再計測の結果、高電界でのQ値の劣化はなくなり、最大加速電界も23MV/mまで向上した (結果のグラフは発表当日報告)。クエンチ時の発熱箇所は、第一回目の計測と同様に上部セルの赤道部であった。

性能計測後、発熱箇所を高エネ研所有の空洞内面観察装置を用いて計測したが、発熱箇所には異常は見られなかった。

今後、再度研磨を行い、性能計測し、強め輪が、TESLA仕様の高電界性能に影響を与えないことを確認する。

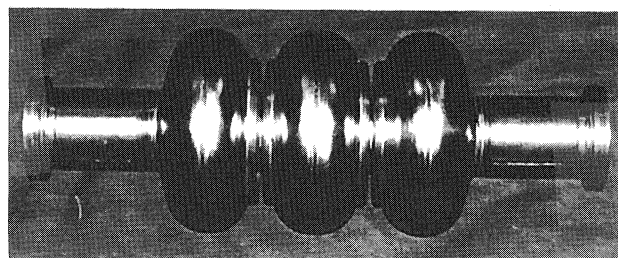


図8. 強め輪付き3連空洞

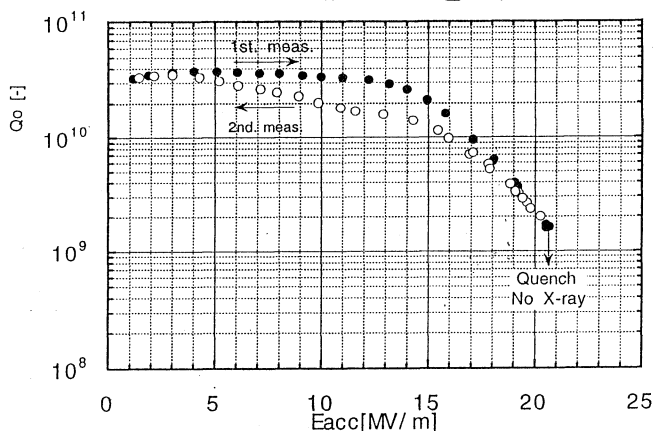


図9. 3連空洞性能計測結果

(参考文献)

- (1)M.Matsuoka,etc.,Proc. of the 19th Linear Accelerator meeting in Japan,1994,pp197-199
- (2)M.Matsuoka,etc.,Proc. of the 21th Linear Accelerator meeting in Japan,1996,pp240-242
- (3)M.Matsuoka,etc.,Proc. of the 22nd Linear Accelerator meeting in Japan,1997,pp 146-148