

## 高周波空洞壁の稜線での磁場集中評価

岩下芳久<sup>A)</sup>、肥後寿泰<sup>B)</sup>、山本 顕義<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 京都大学化学研究所原子核科学研究施設 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<sup>C)</sup> 石川島播磨重工業 (株) 〒235-8501 横浜市磯子区新中原町 1

### 概要

従来、加速管内における放電の元凶は高電界だと思われていて、そのような領域の電界強度が必要以上に上がらないよう、境界壁に角を作らない構造にするようにしてきた。最近、電場が強くなくても、磁場がそれなりに存在すると角の部分で表面電流密度が上がり、発熱による温度上昇が放電の種になるということが指摘されている。ここでは、現実的な形状で簡単なモデル化を行い、磁場集中の程度をシミュレーションで求めた結果を示す。

### 1 はじめに

リニアコライダーGLC[1]の主線型加速器に用いる加速管には、下記の3点、1. 高電界加速 (50MV/m)、2. ウェーク場の抑制、3. 安価は量産、の要求が課せられている。第2項に関しては、DDS (減衰+離調) 方式をもちいて長距離ウェーク場の抑制が可能であることを実証した[2]。その後、実機相当の加速管の高電界試験を経て、第1項には、低群速度、低入力電力、高シャントインピーダンス構造、等が重要らしいことが認識されてきて[3]、現在では、セル形状はFig. 1に示す形状を基礎に最終実証試験を進めている。

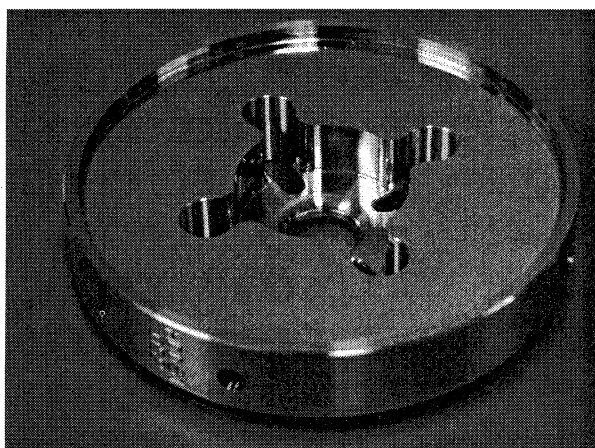


Fig. 1 HDDS cell

これまで、鋭い峰状の部分を磁場が乗り越える場所で、局所的に表面電流が増大し、セルを構成する材料である銅の表面に亀裂やただれ状の変化を観測して、磁場の局所増大の問題がクローズアップされた[4]。HDDS セルは3D形状が必須であり、同様の磁場増大を起こさないように設計製作することが安定な高電界運転には重要な要素の一つである。そこで、本稿では現在の HDDS セルに準

ずるセルで生じる磁場増大の定量的評価を行い、確実に局所磁場を抑えるための許容誤差仕様、セルの特性向上のための設計改良の可能性、量産に向けての配慮等への第一歩にすることができると考える。

### 2 形状

Fig. 2に示す表面磁場分布から分かるように、2種類の磁場増大ケアが必要な場所がある。第1は、HOM 取り出しポートへの開口部の旋盤加工とミリングのつなぎ目付近、第2は平面部分から HOM 結合用の V 字状スリットへの落ち込む部分である。特に第2の場所は、電界も強い場所近傍であり、磁場電場双方に関わるメカニズムがある場

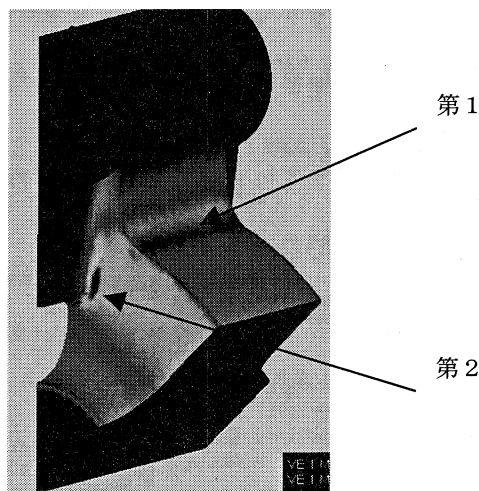


Fig. 2 Magnetic field distribution on the surface

合に重要な場所となり要注意である。

本評価を行うにあたり、上記2カ所の場所を、セル外周部にあけたチャンネルへの開口部として評価する。そのとき開口部の間口の幅、開口部継ぎ目の形状 (接線が角度をもって交差する場合の角度や先端の丸み形状) が重要なパラメータとなるので、本稿ではそれらに関する依存性を計算評価する。なお、現在の加速管製作工程には、セルのエッチング洗浄が含まれ、これにより $\sim 3$ ミクロンの表面が溶かされるため、先端部分の R は5ミクロンが標準である。

### 3 シミュレーション

前述のように評価する対象は3D形状であるが、特徴を抽出するため、単純な形状でモデル化を行う必要がある。今

回は、円筒空洞の外壁に2ヶ所ポート用の溝を設けた境界を持った形状を2次元で取り扱う。ここで、上下左右の対称性を用いて4分の一に対象領域を減らし、Fig. 3の様な境界を使って円筒空洞中における軸対称モードの $TM_{010}$ として、有限要素法を用い固有値問題を解析する。ここでは、2種類の加工面(R 11に旋盤加工部と半径rのミリング加工部)を接続する場所にてできる各接線の交差角度Xを定義し、さらに、その凸の角がエッチング洗浄により丸められる効果を半径5マイクロで両加工部に接する円で近似する。溝の深さは常に遮断波長以下であると仮定できるので、溝の深さは幅の2倍とし、幅にかかわらずその底(右端の壁)の存在が内部の電磁場に影響を及ぼさないようにした。

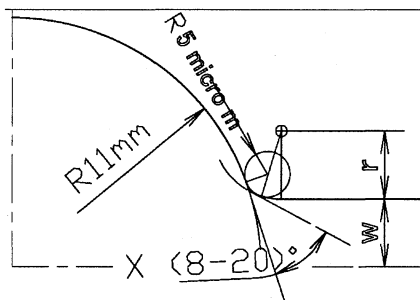


Fig. 3 Simplified model for the field enhancement factor.

使用するコードはPISCES-II[5]である。メッシュを切る際に半径1.1mmの領域の中の5マイクロの部分の正確に表現しなければならないため、サイズが千倍以上違うメッシュを取り扱う必要上、デローニー分割法を使ったメッシュジェネレーターを今回、制作した[6]。隣り合うメッシュの大きさの比が2倍以上にならないように、メッシュサイズが徐々に変化するように設定を行っている (Fig. 4参照)。入力ファイル形式は、従来との互換性を持たせるためPOISSON/SUPERFISHのそれと同じ様式にした。

磁場増大の指標としてはFig. 5に示すように、最大磁場(たいていは境界の最もとがった部分で生じる)と、そこから最も遠くで影響の小さいと思われる、境界の上部での磁場の値との比  $H_{max}/H_{wall}$  を用いた。主加速セルに相当

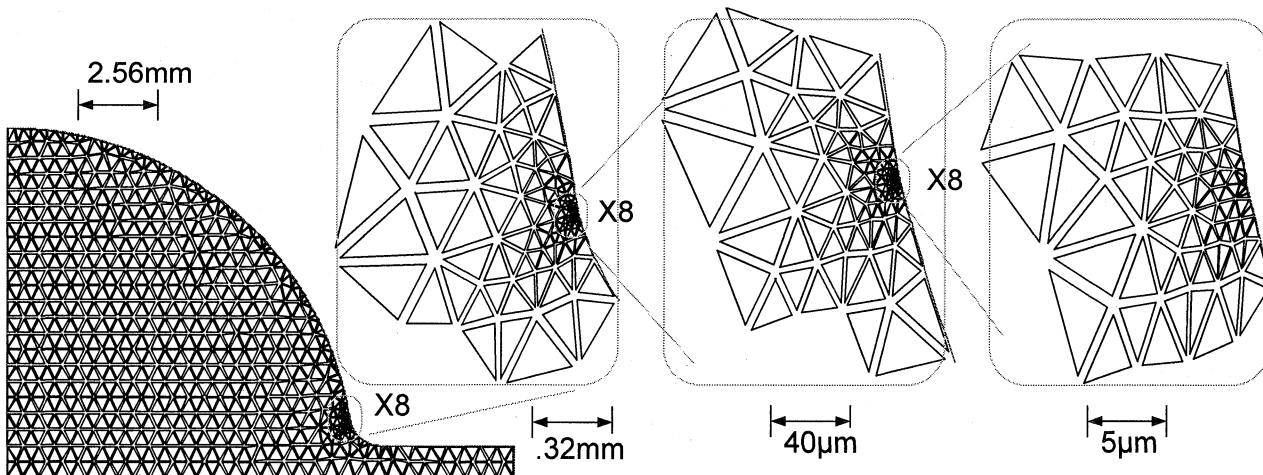


Fig. 4 Example of generated mesh with large ratio in mesh size.

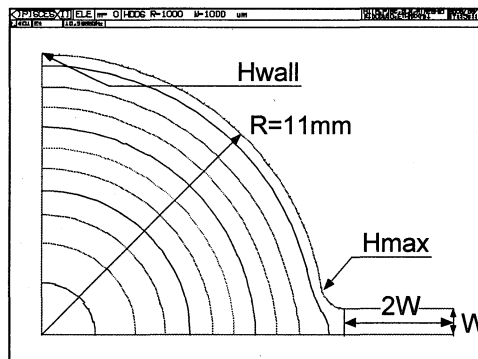


Fig. 5 Contour plot of  $E_z$ , which represents magnetic field lines. The enhancement factor is defined by  $H_{max}/H_{wall}$ .

する部分の半径は1.1mmに固定したため、形状が変わるにつれて固有周波数は変化するが、磁場の増大比率を評価するという観点での影響は小さいのでこの変化は無視している。

PISCES-IIは元々、軸対称境界中のダイポールを含む全てのモードを求めることができる (SUPERFISHは $TM_0$ の軸対称モードのみ)。2次元断面を扱うために本評価の初期段階では半径に1m程度の下駄を履かして大半の大きなトラスとして擬似的に2次元を表現することによって計算を行っていた。しかし、このような極端に大きさの違うメッシュを扱うと、面積比では6桁以上もの違いが出るなどして、桁落ちの影響が懸念されることもあり、ソルバーであるPISCES-IIにおいても2次元(並進対称)への対応を行った。

また、物理的には凸の角があると電磁界としては特異点を生じ、数値解析上の障害となるが、今回用いる境界は全て直線と円弧で表現され、かつ凸の角が生じないように構成されているので、このような特異点はない。SUPERFISH等のように一次要素での解析では曲線部分は折れ線で近似して解析せざるを得ないので、今回のように境界上の磁場の最大値を求める場合には誤差が大きくなって来る。しかし、PISCES-IIでは要素として二次のアイソパラメトリック要素を用い、曲がった境界も表現できるようになっているので、このような凸の角がない境界が適切に扱え、誤差の少ない評価が可能である。

### 4 計算結果と議論

今回の計算はFig. 3に示す(W、r、X)の各量を変化させ実施した。表1に実際に評価したパラメータを示す。表のポート半幅はFig. 3のWに、継ぎ目交差角は同Xに、またポート開口部半径は同rに対応する。これらのとる範囲は現在の標準セル寸法を基準に選定した。因みに、Fig. 2の第1で示す部分は(W=3mm、X<5°、r=2mm)、第2の部分は(W=1mm、X~8°、r=0.5mm)である。但し、鋭角で交差する点での増大は無限大になり物理的ではないので、現在適用している3μm程度のエッチングによりその先端部分が半径5μmの円弧状の丸みを帯びると仮定した。これにより半径11mm、5μm、r mmの3つの円弧をつなげたスムーズな構造として評価した。

Table 1 入力パラメーター

ポート半幅	W mm	1, 2, 3, 5
継ぎ目交差角	X degree	0, 5, 12, 20
ポート開口部半径	r mm	0.2, 0.5, 1

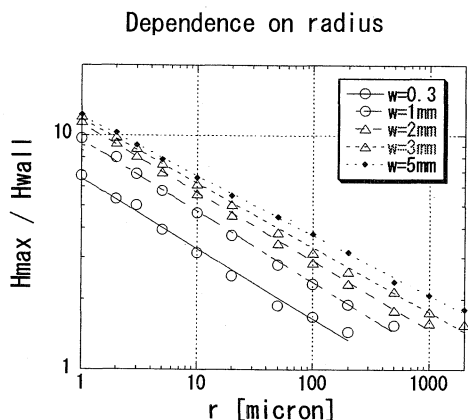


Fig. 6 Enhancement versus r for the case of X=0.

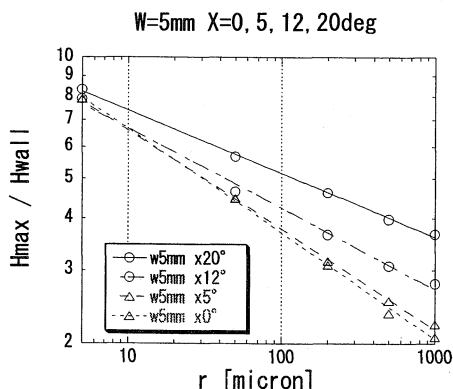


Fig. 7 Enhancement at finite crossing angles.

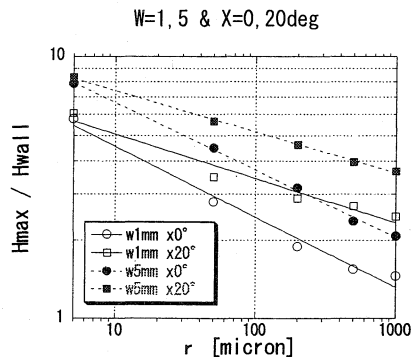


Fig. 8 Enhancement versus radius for slot widths and finite crossing angles.

交差角が0の場合の増大比を図6に示したが、 $r^{-1/3}$  ~  $r^{-1/4}$ の累乗依存性を示す。実際のセル製作では、安定した接続状態を実現するために、あえて有限角度Xをつけている[7]が、W=5mmの場合の増大比を図7に示した。やはりrの累乗依存性を持ち、交差角が有限である寄与はRが大きいくほど顕著に現れることが分かる。総合して増大比の交差角度とスロット巾に関する依存性を図8に示したが、1. スリット巾が大きいと増大比は上昇する、2. rを大きくとることで増大比を抑えることができる、3. 交差角が大きくなるとrを大きくすることによる増大比の抑制効果が減少する、等が分かった。

現在のセル設計では、接線が連続である場合でも、図3の第1、第2の位置に対する増大比は1.5程度に抑えられている。実際には接線の交差角度は有限であり、増大比は更に増えるが、W=3→X=5° 又は W=1→X=8° 程度であれば増大比2に抑えられ、実用的な設計が可能である。

### 5 まとめ

この評価により局所磁場増大を適度な範囲に抑制した定量的なセル設計が可能となった。但し実際には、3次元構造により発生する増大にも考慮して設計することが必要と考える。

### 参考文献

- [1] GLCTA ロードマップレポート, <http://lcdev.kek.jp/ProjReport/>, 2003
- [2] KEK Report 2000-7, SLAC-R-559
- [3] "Processing Studies of X-band Accelerator Structures at the NLCTA", C. Adolphsen et al., ROAA003, Proceedings of PAC2001, Chicago, 2001.
- [4] V. Dolgashev, KEK-SLAC ISG9 Meeting (December, 2002 at KEK), <http://lcdev.kek.jp/ISG/ISG9.html>
- [5] Y. Iwashita: "PISCESII: 2.5D RF CAVITY CODE WITH HIGH ACCURACY", Beam Science and Technology, NSRF ICR Kyoto Univ., 7, 14-18 ISSN 1342-033X (2002)
- [6] 谷口健男: FEMのための要素自動分割- デローニー三角分割法の利用, 森北出版; ISBN:4627914008, 1992
- [7] T. Higo et al.: "Improved HDDS cell fabrication", GLCX-006, <http://lcdev.kek.jp/TechNotes/>, 2003