

AN ANALYSIS ON THE IH-TYPE CAVITY WITH NUMERICAL METHODS

K.Satoh, S.Kamohara, T.Hattori and E.Arai

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

ABSTRACT

An equivalent circuit analysis has been done on the IH-type cavity. Parameters of the equivalent circuit have been determined by using some numerical methods for three-dimensional configurations. We have calculated resonance frequencies, accelerating-field and magnetic-field distributions for some structures. Good agreement with experimental results have been obtained.

数値計算を用いたIH型空洞の解析

1. 序

IH型リニアックは、加速空洞内の電磁場分布の対称性に乏しく、電磁場解析コードを用いて設計を行うことは困難である。したがって、スケールモデルによる実験を重ね、要求される共振周波数、加速電界分布、シャントインピーダンス等を持つ構造を決定してきた。われわれは、共振周波数、加速電界分布等を等価回路解析により求めることを考え、等価回路に用いる静電容量やインダクタンスを3次元形状について計算により決定する試みを行っている。また、実際の空洞内の表面電流密度分布を、簡素化した空洞についての計算で予測することを検討している。これらの結果について、モデル実験との比較を交えて報告する。なお、用いた主な計算法は以下のものである。

- 1) 三角形表面電荷法——静電容量の計算に用いている。電極表面を三角形の要素に分割し、各要素の電荷密度と境界点の電位の関係から電荷密度を決定する。各要素の電荷と電位、電界の関係が解析式で表わせるので精度が高く、計算値と測定値が良く一致することが確認されている。
- 2) 3次元有限要素法 (Exotic Model) —— 共振電磁界を解くのに用いている。理研の原氏、和田氏、東大の菊池氏らにより開発された方法で、要素の辺上で辺方向の成分を未知変数にとる。要素は自由度の高い四面体要素を用いている。計算には、東大のスーパーコンピューターを使用している。円筒空洞の共振周波数に関しては解析解と2%以内で一致した。

2. 等価回路解析による共振周波数、加速電界分布の決定

解析は、リッジを持った空洞に関して行っている (Fig. 1)。エンドウォールとリッジ端部の間をエンドスペース、リッジを切り欠いて作った空間をマグネティック フラックス インデューサーと呼んでいる。加速構造の1セルとその等価回路をFig. 1に示す。静電容量は、ドリフトチューブ同士(Cd)、ドリフトチューブとリッジ上面(Cs)、及びリッジ上面同士(Cr)に存在すると仮定した。インダクタンスは、空洞壁とリッジ側面を方位角方向に流れる電流に因るもの(Lt)、リッジ上面を加速軸方向に流れる電流に因るもの(Ll)、ステムを流れる電流に因るもの(Ls)が存在すると考えた。セルの両側の境界は鏡影面と考え、同一構造が無限に繰返されているとして各パラメーターを算出した。静電容量は、表面電荷法で計算した。Lpは無限に長いソレノイドの一部として計算し、断面積は空洞断面の半分からリッジの幅の分を除いたものとした。Llは表面電荷法の考え方を応用

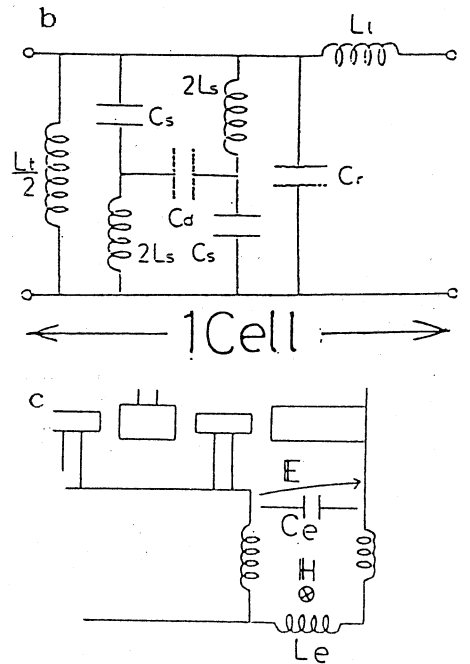
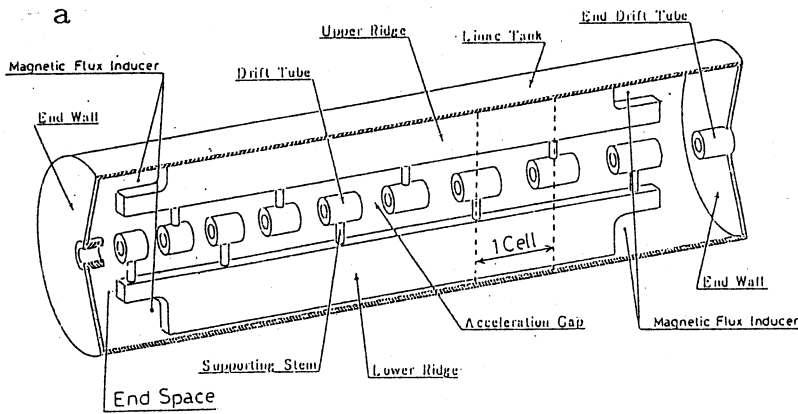


Fig. 1 a) IH型空洞の例
 b) 1セルの等価回路表現
 c) エンドスペースの取扱い

した表面電流法により求めた。Lsはステムに一樣に流れる電流により1セルに蓄えられる磁束を無限並びのステムからの影響を仮定して計算し、求めた。

まず、等速モデル（セル長一定）で、リッジとエンドウォールが短絡している場合について共振周波数を求め、モデル実験との比較を行った。分散関係式は、次のようになる。ただし、各パラメータは単位長さ当りに変換してある。また、 ω は角周波数、 n はハーモニックナンバー、 l は空洞長を表す。

$$\omega^2 L_t C_0 = \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2$$

ここで

$$C_0 = \frac{4 C_d C_s^2 L_s^2 \omega^4 - 4 C_s L_s (C_d + C_s) \omega^2 + C_d + 2 C_s}{4 C_s L_s^2 (2 C_d + C_s) \omega^4 - 4 L_s (C_d + C_s) \omega^2 + 1} + C_r - \frac{2}{\omega^2 L_t}$$

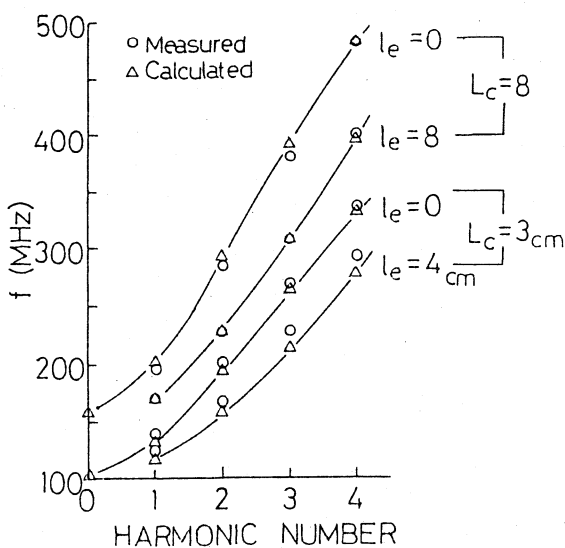


Fig. 2 周波数の計算例

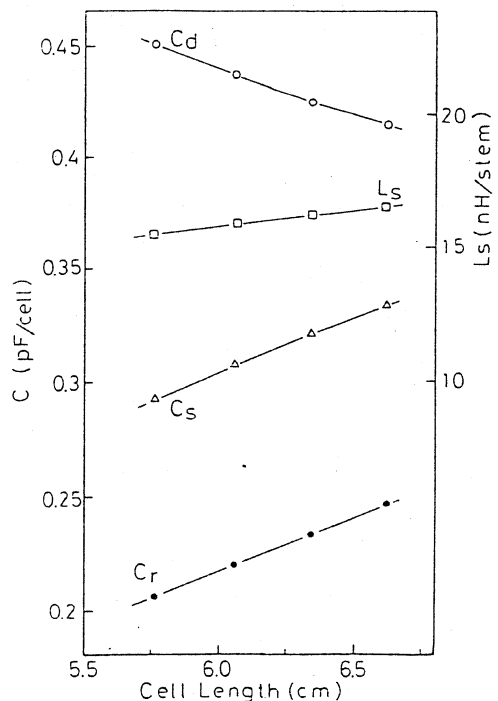


Fig. 3 パラメーターの計算例

エンドスペース、インデューサーは、Fig. 1 に示すように l_e と C_e で表し空洞端部にこの回路を付加した。 l_e と C_e はドリフトチューブとステムを取去ったリッジだけを有する空洞の分散関係より求めた。この分散関係は測定と有限要素法で求められ、両者は良い一致を得ている。 l_e 、 C_e と n 次の共振角周波数 ω_n 、及び空洞中央部の一様な回路の C_r 、 L_t 、 L_l との関係は次の式で表わされる。

$$\frac{2L_e}{1 - \omega_n^2 L_e C_e} = (-1)^{n+1} \left\{ \tan\left(\frac{1}{2} \omega_n (L_l (C_r - \frac{2}{\omega_n^2 L_t}))^{0.5}\right) \right\} (-1)^n \left(\frac{L_t L_l}{\omega_n^2 L_t C_r - 2}\right)^{0.5}$$

このようにして求めた l_e 、 C_e を用いドリフトチューブが付いた空洞（等速モデル）の共振周波数を計算した。以上の結果の例を測定値と共に Fig. 2 に示す。図中の L_c はセル長を、 l_e はエンドスペースの長さを表す。また、空洞径は 40 cm、空洞長 80~96 cm、リッジ間隔は 8 cm である。加速モードに関して 5% 以内で一致している。

次に加速モデル ($\beta = 0.07 \rightarrow 0.084$) について、各セルを 4 端子回路とし、F 行列を用いた 4 端子回路網解析を行なうため、パラメータを各セル長について計算している。Fig. 3 に、結果の一部を示す。これらの値を用いて、共振周波数、加速電界分布等を決定する。

3、空洞内の磁場分布の計算

有限要素法により、リッジのみを有する空洞について計算を行なった。Fig. 4 に要素分割の例を示す。これは、四面体要素に分割する前段階であり、節点の総数は 1512 である。これを元に四面体要素、及び辺の中点を生成し、最終的には計算点は 6476 となる。CPU 時間はこの例の場合 34 秒である。Fig. 5 に空洞内面付近の磁場分布を測定値と共に示す。ドリフトチューブを装荷した場合電流が低エネルギー側に集中し、計算からややずれていくのが分る。

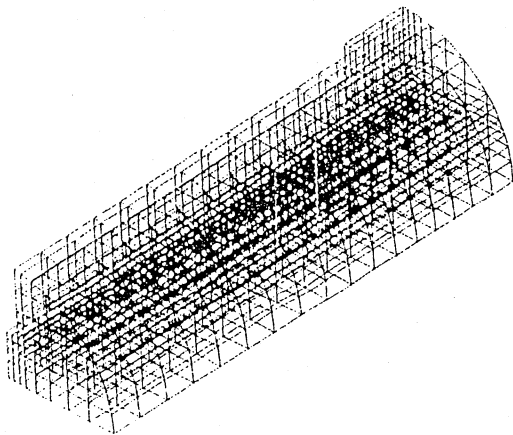


Fig. 4 要素分割の例 (1/8 対称)

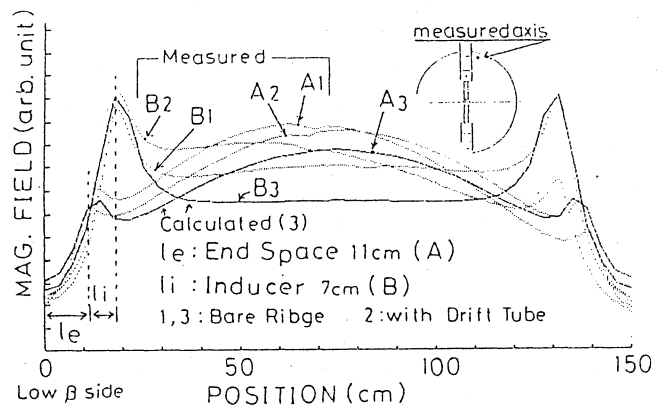


Fig. 5 磁場分布の計算例

4、まとめ

いくつかの数値計算法を用いて、等価回路のパラメータを計算し、複雑な IH 型空洞の共振周波数、加速電界分布等を予測する試みが為され、良い結果が得られた。また、空洞内の表面電流密度分布も簡素化した空洞についての解析からある程度予想できると言える。

今後は、エネルギー利得の大きなタイプの IH 型空洞や、他の複雑形状の空洞の解析を試み、今回論じた手法による空洞設計法の応用の可能性を検討する予定である。