

## PRACTICAL APPLICATION OF VERY PRECISE FREQUENCY CALCULATION TO A DISK-LOADED STRUCTURE

Higo T., Koike S., Higashi Y., Iwashita Y.†, Dolgashev V.\$,  
Yamamoto M.#, Yamamoto A.#, Honzawa S.# and Kaneko H.#

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaragi, 305, Japan

† Accelerator Laboratory, Nuclear Science Research Facility, Institute for Chemical Research, Kyoto University

Gokanosho Uji, Kyoto 611, Japan

\$ Butker Institute of Nuclear Physics

630090, Nobosibirsk-90, Russia

# Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI)

Toyosu 3-1-15, Koto-ku, Tokyo 135, Japan

### Abstract

A code "PISCES-II" has been improved for the precise calculation of the electromagnetic field in a cavity. The code was used for a precise frequency evaluation for the disk-loaded detuned structure. The calculated frequency converges better than  $10^{-5}$  in a reasonable CPU time. The results were compared to the frequencies measured experimentally. The absolute agreement was better than 1MHz in 11.4GHz. This precision is good enough for evaluating the frequencies of the higher modes in the cavity with introducing the same calibration value throughout the structure.

### 精密周波数計算のディスクロード型構造への実際的適用

#### 1. 序

大電流、低エミッタンスのマルチバンチビームを加速する必要がある線形加速器の加速管では、長距離ウェークフィールドをコントロールして先頭バンチの残したウェークフィールドを後続バンチに影響を与えないようにする必要がある。リニアコライダーでも、特に横方向キックモードによるマルチバンチエミッタンス増加が非常に厳しい制約となっている[1]。この長距離ウェークフィールドの影響を抑える目的で、加速管内のHOM周波数に分布を持たせた離調型加速管が研究されている[2]。この分布を実現するためには加速構造の有するHOMモードの周波数を精度良くコントロールする必要があり、本論文は、そのための基礎研究である。

加速管として働くにはまず、加速モードの周波数に十分な精度でチューニングされていることが重要である。通常は、セルを接合した後、加速モードを測定しながらセル壁の変形を行うことにより、

セルの固有周波数をチューニングしてしまう。しかしこれを行うと、加速モードとは異なるフィールドパターンを有する他の高次モードの周波数はコントロールが効かなくなり、設計した周波数分布等が得られなくなる可能性がある。

しかるに、加速モード、高次モードともに周波数を十分精度良く計算して寸法を決め、その寸法精度を保つようにセルの加工、接合を行うことができれば、高次モードの周波数コントロールが設計通りにできることになる。本論文では、その第一歩として、加速モードに対する周波数計算精度と、その寸法精度実現に関連した、セル加工、寸法測定、RF測定等の現状を紹介し、精密周波数計算を生かした製作可能性を議論する。

#### 2. 検討に用いた構造

図1にXバンドディスクロード型加速構造の加工上の基本セルを、表1にはその重要寸法を示した。本論文では、このセルをスタックして構成さ

れる離調型加速管を直接の応用と考えており、この基本セルの周波数評価が主テーマである。ここでは、この加速管の最上流A、中央部B、最下流Cのセルを取り出し、各々のセルを無限個並べた時にできる周期構造の周波数評価を行う。

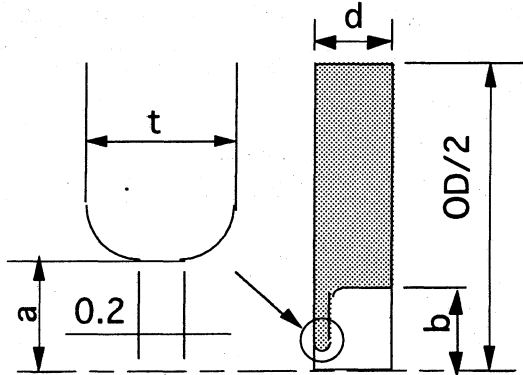


図1 ディスクロード型構造

表1 主な寸法 30 °C (mm)

タイプ	cell #	a	t	b
A	11	4.9077	1.5876	22.2114
B	58	4.4991	1.9614	21.9184
C	123	4.1014	2.2124	21.6437

但し、全て共通に OD = 80.0, d = 8.7474

### 3. 周波数精密計算

計算に用いた1セル形状を図2に示す。ここで用いた計算コード(PISCES-II)は、1セル内をSUPERFISHと同様のメッシュに分割し、周期境界条件を課して解くが、分割数に対する収束特性を良くするためアイソパラメトリック2次要素を採用している[3]。但し、確認のため、一次要素までに制限した計算で得られた周波数をSUPERFISHのそれと比べ、 $10^{-5}$ 以上の精度で矛盾無きことを確認している。図3に、周波数計算結果と計算時間に対するメッシュの大きさの依存性を示した。この

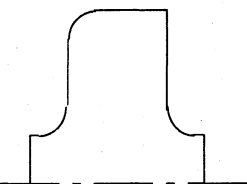


図2 1セル計算形状

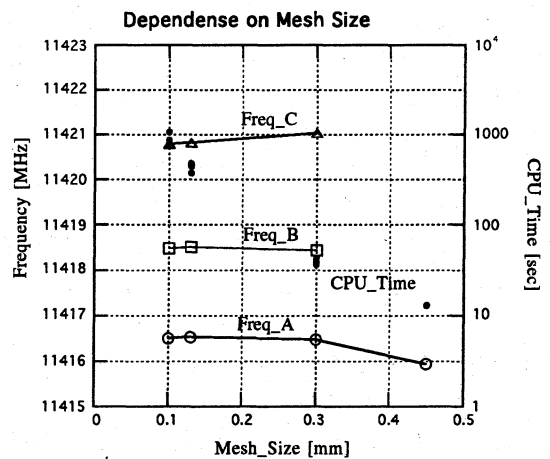


図3 計算結果：周波数とCPU時間のメッシュサイズ依存性

図から、メッシュが充分細かく、0.1mm程度なら、20分以下の計算で、 $10^{-5}$ の収束精度が得られることがわかる。但し、ディスクの真中、即ち、フラット部の中央で分割しているため、0.1mm以上のメッシュサイズの場合に対しても、ここが0.1mmに固定されているため、この部分のメッシュの大きさ依存性は含まれていない。計算は、DEC3000 AXP-500 (146.7MIPS) を用いて行った。

### 4. セル加工方法と寸法測定

最終のセル加工は、超精密旋盤にてダイヤモンドバイトを使用して行う。半径方向の絶対寸法精度維持は、基準セル(マスターゲージ)を製作しそれとの比較測定を旋盤機上で行うことにより達成する。基準セルの内径、外径等重要寸法は、万能測長機(分解能 $0.1\mu\text{m}$ ) [4]、マイクロセンス(精度 $\sim 0.025\mu\text{m}$ )及びスケール(分解能 $0.05\mu\text{m}$ )の組み合わせにより測定して絶対寸法とする。この万能測長機の絶対精度は、精度 $0.3\mu\text{m}$ の1級ブロックゲージで確認している。

厚さ方向の寸法管理は、旋盤機上で、旋盤のスケールとマイクロセンスを用いて $0.1\mu\text{m}$ 級の精度で行える。

R部の形状精度は、ダイヤモンドバイトの半径評価が重要になり、ダミーテストセルを切削してその半径をテーラーホブソン製ホームタリサーフで測定し $0.2\mu\text{m}$ 程度の精度で決めることが出来る。

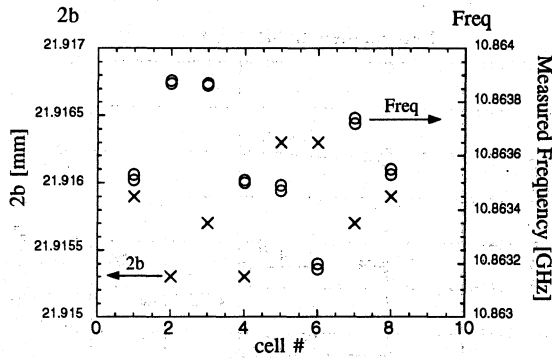


図4 各セル周波数と2b寸法の測定値

加工時と同じ測定方法を用いた2b寸法の測定結果を図4に示した。公差である $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内のコントロールが出来ていることが確認できる。

### 5. RF測定

共振モードの周波数は特に2b寸法に敏感であり、加速モードも例外でなく、 $\delta f/f = \delta b/b$ である。3種類のテストセル群（各8セル）の中で、最も2b寸法のばらつきが大きかったタイプについての2b寸法と加速モードに似た電磁場パターンを持つモードの周波数測定結果を、図4に示した。周波数のばらつきは $\pm 0.4\text{MHz}$ で、寸法測定のばらつきより大きく、2b寸法以外の形状の違いが効いている可能性を示唆しているが、 $10^4$ の精度は充分確保できていることがわかる。

次に、周波数の絶対値の測定について述べよう。単なるスタックでの測定と接合後の周波数は異なることが予想されるが、圧力依存性の測定から、 $10\text{g/mm}^2$ 以上の加圧力では $0.1\text{MHz}$ 以内に収束しており、この締め付け圧力を標準に採用する。さて、ハーフセルで  $(3n-1)$ セルをはさんで $2\pi/3$ モードを

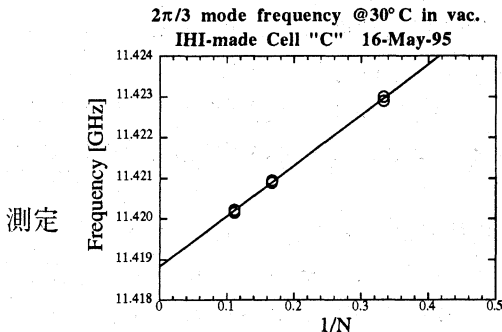


図5 絶対周波数測定

し、 $1/n$ の関数としてプロットすることにより、 $n \rightarrow \infty$ から容易に周期構造を形成したときに対応する $2\pi/3$ モードの周波数を測定できる。図5に示したように、精度 $\pm 0.2\text{MHz}$ 程度で決定出来ることが分かった。但し、温度や湿度等による周波数の校正誤差は、 $0.1\text{MHz}$ 程度におさえることができる。こうして得られた周波数値を用いて、計算値と比べると図6のようになる。

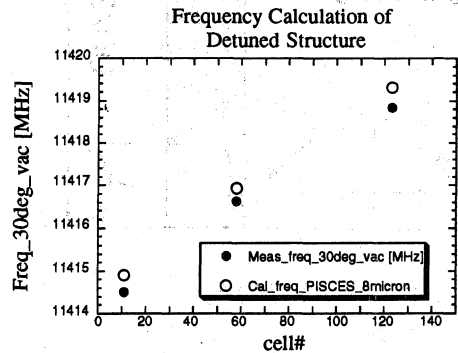


図6 離調型空洞の周波数計算

●：測定値、○：PISCES-II

全てのテストセル（セル# 11、58、123）に対して、PISCES-IIによる計算値○は測定値●より $0.4\text{MHz}$ 高いことが分かった。金属壁ロスのある場合、完全導体に比べて $\delta\omega/\omega = -1/2Q$ だけシフトするが、 $Q$ 値が5000程度であるのでこの量だけでも $-1\text{MHz}$ になり、計算値は $0.6\text{MHz}$ 低いことになる。しかしこれが全空洞に共通であれば、これも含めて校正値とできる。

以上から、計算上 $10^5$ 以上の精度に収束していても、実際の加工方法による詳細な寸法変化などが効いて、絶対値では、 $0.5\text{MHz}$ 即ち $5 \times 10^{-5}$ 程度の校正値が必要であることが判明した。しかし、加速管の全体にわたって、同一校正値を考慮するだけで、周波数が $0.1\text{MHz}$ 、即ち、 $\sim 10^{-5}$ の精度で評価出来ることも分かった。

### 参考文献

- [1] "JLC-I", KEK-Report 92-16.
- [2] T. Higo et al., Proc. 1995 Part. Accel. Conf., Dallas, USA and KEK Preprint 95-22.
- [3] Y. Iwashita, Proc. of the 1994 International Linac Conference, Tsukuba, Japan, p239, 1994.
- [4] 東ドイツ、カール・ツァイス・イエナ社製。