

## C 形導波管の高周波特性

### RF PROPERTY OF C-SHAPE WAVEGUIDE

沢村 勝<sup>#</sup>

Masaru Sawamura<sup>#</sup>

National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

#### Abstract

A new type of waveguide, which is named C-shape waveguide, has been proposed. This waveguide is made by deforming rectangular waveguide into cylindrical shape. It is similar to a coaxial line and the inner conductor and the outer conductor are connected with a plate which corresponds to waveguide side wall. It enables efficient cooling by connecting the inner connector through the connecting plate. Though the waveguide is similar to a coaxial line, it has cut-off frequency. The RF property was measured with a transmission model and calculated with the RF simulation code. The results of measurement and calculation will be presented.

#### 1. はじめに

同軸管のような構造で内軸を効率よく冷却でき、導波管のように遮断周波数を持つ新しいタイプの導波管として C 形導波管 (C-shape waveguide: CWG) を提案している[1,2]。この C 形導波管の断面は同軸管の内軸と外軸の一部を板で連結した形をしており、断面の形がアルファベットの「C」のような形をしている。

CWG の応用として、エネルギー回収型リニアック (ERL) のような大電流で CW 運転する超伝導加速器における高調波モード (Higher Order Mode: HOM) の減衰がある。HOM の減衰は、冷凍機システムへの負荷を減らしたり、ビーム不安定性による加速電流のしきい値を大きくしたりするために、特に重要になっている。

これまで楕円空洞においてはアンテナ/ループ型 HOM カップラーや、ビームライン型 HOM ダンパー、導波管型 HOM カップラーなど様々なタイプの HOM 減衰器が開発されている。

ビームライン型 HOM ダンパーは大電力を取り扱えることや、軸対称のためビームに対するキック力が働かないなどの利点がある。しかし、加速モードを排除するフィルター構造がないため、加速モードに影響を及ぼさないように空洞から遠く離す必要があり、その結果パッキングファクターの低下や実効的な加速電界の低下をもたらす。

アンテナ/ループ型 HOM カップラーは空洞近くのビームパイプに取り付けられるため、余分な長さのビームパイプを必要としない。しかし、空洞近くに取り付けるためには加速モードを排除するフィルター構造が必要であるが、冷却後はフィルターの調整をすることはできない。さらに HOM 電力はコネクタを通して HOM カップラーの外部に取り出されるが、コネクタ内軸と外軸との間の熱伝導が悪く、コネクタ発熱の問題が起こる[3,4,5]。コネクタ内軸と外軸との間にサファイヤなどを用いて熱伝導を良くすることができるが、大電流 ERL で要求される大電力 HOM を取り出せるかは不確定である。

導波管型 HOM カップラーは原理的に遮断周波数をもつハイパスフィルタであるが、アンテナ/ループ型

HOM カップラーに比べてサイズが大きくなってしまふ。

CWG をアンテナ/ループ型 HOM カップラーに用いることにより内軸の発熱の問題を解決し、導波管型 HOM カップラーのように遮断周波数を持つためフィルター構造が不要となる。

この CWG 伝送モデルを製作し、高周波特性の測定を行ったので、その結果について報告する。

#### 2. CWG 伝送モデル

CWG の基本的な高周波特性を確かめるため、Figure 1 のような CWG 伝送モデルを製作した。このモデルは両端に N 型コネクタ-同軸変換器を取り付け、中央部分が CWG となっている。内軸と外軸をつなぐ仕切板は、Figure 2 のように放射状のものと平行平板のものを製作した。放射状の仕切板は形状を簡単な円柱座標で表わすことができるため、遮断周波数を解析的に求めることができる。

Table 1 に CWG 伝送モデルの主なパラメーターを示す。外軸径は固定し、内軸径または仕切板の角度を変えることにより遮断周波数を変えることができる。長さの違う 4 種類モデルを組み合わせることで、長さを 65mm から 560mm まで変えることができる。

CWG 伝送モデルを用いた透過係数の測定結果と、同じ形状モデルを CST Microwave Studio で計算した透過係数の計算結果を Figure 3 と Figure 4 に示す。Figure 3 は CWG の長さが 560mm で、放射状仕切板の角度を変えたものである。角度が大きくなるにしたがって遮断周波数が高くなっているのが分かる。また Figure 4 は CWG の長さが 560mm で、平行平板の仕切板で内軸径を変えた時のものである。内軸径が小さくなると遮断周波数が高くなっていくのが分かる。Figure 3 と Figure 4 とも計算結果と測定結果はよく一致している。

<sup>#</sup> sawamura.masaru@qst.go.jp



Figure 1: CWG transmission model (top). CWG with parallel connecting plate (bottom left) and CWG with radial connecting plate (bottom right).

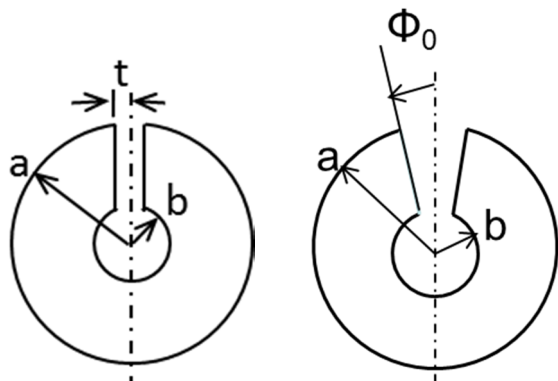


Figure 2: Parameters of CWG with parallel connecting plate (left) and radial connecting plate (right).

Table 1: Parameters of CWG Transmission Mode

Outer Diameter (2a) mm	Inner Diameter (2b) mm	Connecting Plate Half Thickness (t) or Half Angle ( $\Phi_0$ )	Length mm
42	9	Parallel 2mm	
42	12	Parallel 2mm	
42	15	Parallel 2mm	65
42	18	Parallel 2mm	115
42	18	Radial 15deg	165
42	18	Radial 30deg	215
42	18	Radial 45deg	
42	18	Radial 60deg	

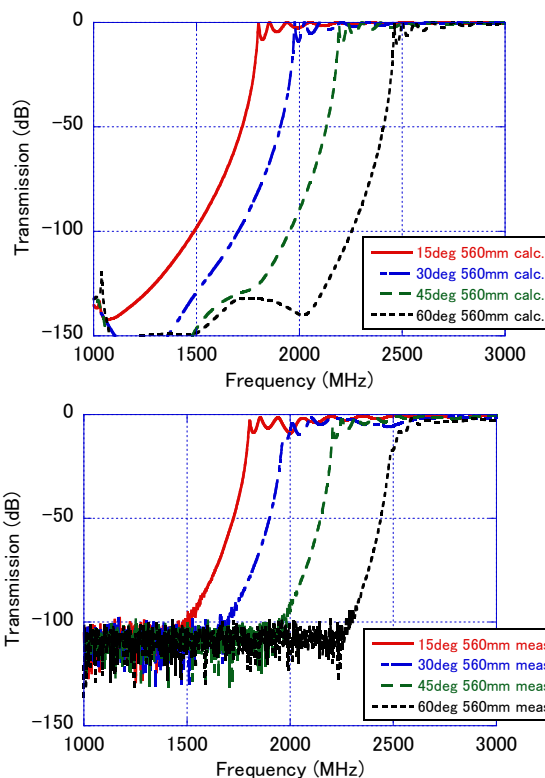


Figure 3: Calculated (top) and measured (bottom) transmission of CWG with radial connecting plate.

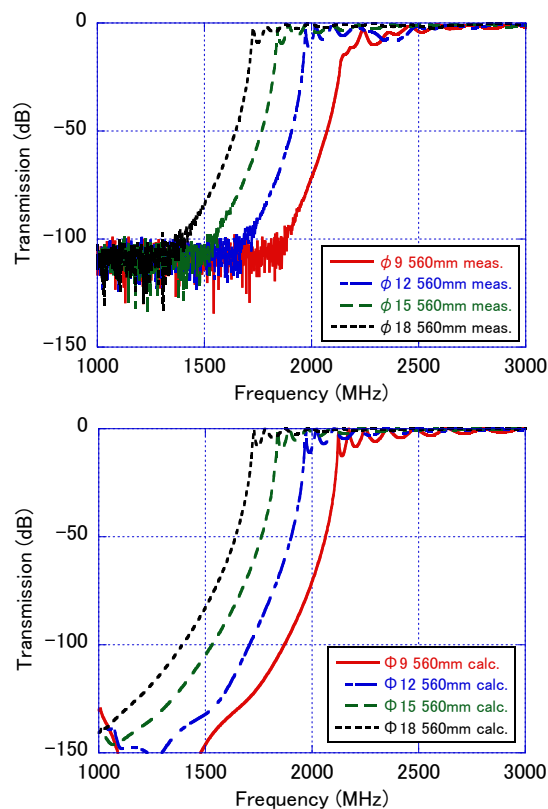


Figure 4: Calculated (top) and measured (bottom) transmission of CWG with parallel connecting plate.

### 3. CWG 遮断周波数

Figure 2 (right)のように仕切板が放射状になっている場合、CWG 内の電磁界分布は円柱座標を用いて表すことができる。TE モードの一般解を、仕切板境界で半径方向電界がゼロ、内軸、外軸境界で周方向電界がゼロという境界条件で解くと、

$$\nu = \frac{\pi}{2(\pi - \phi_0)} \quad (1)$$

$$J'_\nu(k_c a) Y'_\nu(k_c b) - J'_\nu(k_c b) Y'_\nu(k_c a) = 0 \quad (2)$$

から固有値  $k_c$  を求めることができ、遮断波長は、

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c} \quad (3)$$

と表せる。(2)式の近似解は、

$$k_c \approx \frac{2\nu}{a+b} \quad (4)$$

であるので、遮断波長は、

$$\lambda_c \approx 2 \times \frac{\pi - \phi_0}{\pi} \times \pi(a+b) \quad (5)$$

となり、これは平均周長が遮断波長の半分に相当することになる。

CWG の測定と計算において Figure 3 や Figure 4 のように遮断周波数付近の波形が明確でないため、 $S_{21}$  パラメータの減衰部分をフィッティングすることにより遮断周波数を求める。Z 方向に進行する TE 波は遮断周波数以下の場合、減衰定数  $\gamma$  で長さ方向に減衰する。したがって CWG の長さを  $z$  とすると、 $S_{21}$  パラメータは

$$S_{21} = e^{-2\gamma z} \quad (6)$$

$$\gamma = \sqrt{k_c^2 - k^2} = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f_c^2 - f^2} \quad (7)$$

となるため、 $z$  と  $f_c$  を変数として、 $S_{21}$  波形をフィッティングすることによって、遮断周波数を求めることができる。

これにより求めた計算と測定の遮断周波数を Figure 5 に、解析値からの誤差を Table 2 に示す。測定値と計算値はほぼ解析値と一致しているが、近似値は 3%程度低くなっている。

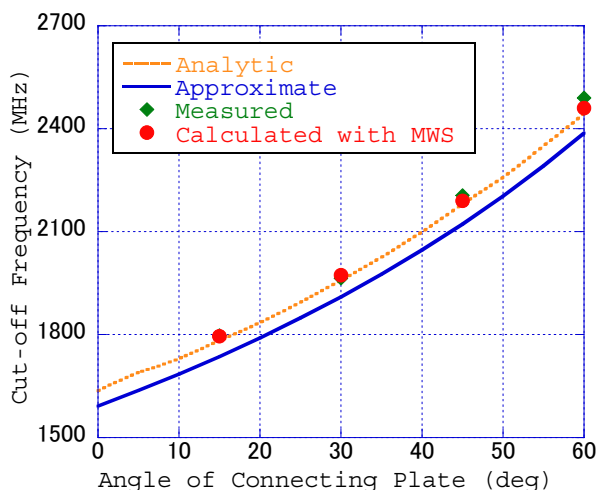


Figure 5: Cut-off Frequency of CWG with radial connecting plate.

Table 2: Cut-off Frequency Errors of Measured, Calculated, and Approximate Values of CWG With Radial Connecting Plate

Connecting plate angle	15deg	30deg	45deg	60deg
Approximate	-2.6%	-2.5%	-2.7%	-2.3%
Measured	0.8%	0.3%	1.2%	1.9%
Calculated by MWS	0.7%	0.7%	0.4%	0.6%

平行仕切板の場合は、遮断周波数を解析的に求めることはできないが、放射状仕切板では、解析値と計算値は一致しているので、計算値を基準に考える。平行仕切板で板厚は変えずに内軸径のみを変えた場合の計算値、測定値、さらに平均周長から求めた遮断周波数の近似値の結果を Figure 6 に示す。測定値は計算値と一致しているが、近似値は 3-8%程度小さくなっている。また内軸径を  $\phi 18$  に固定し、仕切板の厚さを変えた場合の遮断周波数の計算値と近似値を Figure 7 に示す。こちらも近似値は計算値に比べ 4%程度小さくなるが、厚さが変わることによる変化はほとんどない。

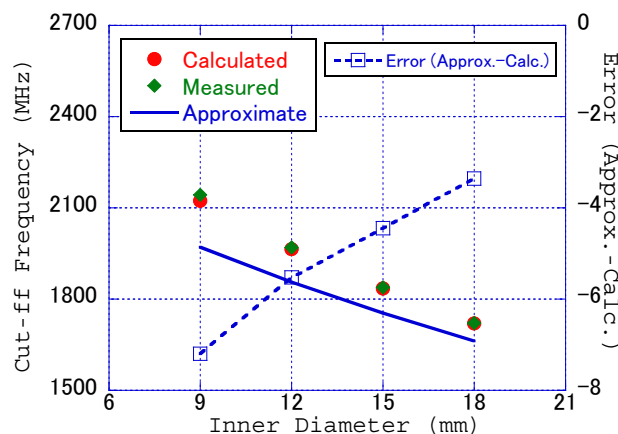


Figure 6: Cut-off frequency of CWG with parallel connecting plate as a function of inner diameter.

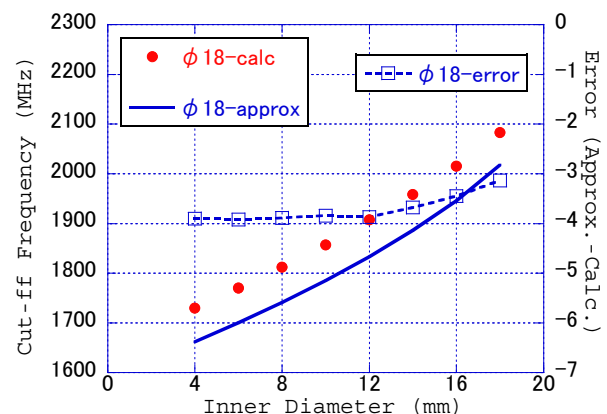


Figure 7: Cut-off frequency of CWG with parallel connecting plate as a function of connecting plate thickness.

#### 4. まとめ

CWG の基本的な高周波特性として遮断周波数をシミュレーション計算、測定、近似計算から求めた。シミュレーション計算と測定値はよく一致しているが、近似値は数%程度低くなっている。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K04726 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] M. Sawamura *et al.*, “NEW DESIGN OF HOM COUPLER USING COAXIAL-LIKE ROUNDED WAVEGUIDE”, Proc. Of SRF2013, Paris, France, Sept. 23-27, 2013, pp.1081-1084.
- [2] M. Sawamura *et al.*, “ERL超伝導スポーク空洞加速器の開発計画”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013, pp.956-959.
- [3] P. Kneisel *et al.*, “Testing of HOM Coupler Designs on a Single Cell Niobium Cavity”, Proc. of PAC2005, Knoxville, USA, May 16-20, 2005, pp.4012-4014.
- [4] G. Wu *et al.*, “Electromagnetic Simulations of Coaxial Type HOM Coupler”, Proc. of 12th SRF (SRF2005), Ithaca, USA, July 10-15, 2005, pp.600-603.
- [5] J. Sekutowicz, “Improved Heat Conduction Feedthroughs for HOM Couplers at DESY”, Proc. of ERL2011, Tsukuba, Japan, Oct. 16-21, 2011, pp.102-104.