

## 第4世代移動体通信基地局用最高出力超伝導フィルタの開発

研究代表者 齊 藤 敦 山形大学 大学院理工学研究科 准教授

### 1 研究開始当初の背景

送信用超伝導フィルタを実現するために、共振器内の電流分布を分散させる薄膜型共振器の構造開発[1, 2]や、超伝導厚膜の研究[3]、ひずみの発生機構に関する研究[4]が成されてきた。一方、我々は、溶融法で作製した単結晶バルクの表面抵抗（マイクロ波損失）が一般に市販されているマイクロ波デバイス用高品質高温超伝導薄膜と同程度であることを初めて明らかにし、超伝導バルクの高周波応用の可能性を示した[5]。さらに、3次元電磁界解析シミュレータを用いて超伝導バルク3段共振器フィルタを設計・試作し、周波数特性及び耐電力の評価を行ってきた。研究開発当初までに3段Dy-Ba-Cu-O系超伝導バルクリングフィルタの耐電力特性が10W以上であることを確認しており、更なる高耐電力化と高スカート特性が望まれていた。

### 2 研究の目的

次世代（4G：第4世代）移動体通信基地局へのオール超伝導フィルタの実装を目指し、以下を具体的な超伝導送信用フィルタ特性の仕様と数値目標とした。

- ・ 中心周波数：5 GHz
- ・ 帯域幅：100 MHz
- ・ 挿入損失：1 dB 以下
- ・ スカート特性：30 dB/10 MHz 以上
- ・ 耐電力：40 W 以上

### 3 研究の方法

本研究で作製する超伝導バルクフィルタの耐電力特性及び相互干渉ひずみ(IMD)を正確に評価するために、まず、評価システムの構築を行った。次に3段バルクリングフィルタを用いた耐電力試験を行った。耐電力特性の目標を達成するために、共振器材料としてDy-Ba-Cu-O系超伝導バルクとGd-Ba-Cu-O系超伝導バルクのどちらがより高い耐電力を実現できるかを調査した。さらに、共振器をディスク型に変更した場合の耐電力特性の向上を検討した。

また、周波数特性の目標を達成するために、カップリングマトリクスにより必要な段数を見積もり、その具体的な構造を検討した。その検討から、飛び越し結合を用いた9段フィルタが必要であることを明らかにし、同フィルタを実現するための基礎的な実証を行うために、2段、3段、4段フィルタを設計し、作製・評価を行った。

### 4 研究成果

#### 4-1 IMD測定システムの構築

本研究で作製する超伝導バルクフィルタの耐電力特性及び相互干渉ひずみ(IMD)を正確に評価するために、評価システムの構築を行った。

図1にIMD測定システムのブロック図を示す。新規に信号発生器(SG)を導入することにより最も簡単な耐電力評価システムを構築できた。システムのノイズレベルを調査したところ、IMD3のレベルが大きく、一般的な超伝導フィルタのIMD3特性を測定することが困難であることがわかった。そこで、超伝導2信号通過フィルタの導入を提案し、その有効性について調査した。図2は、超伝導2信号通過フィルタの周波数特性を示している。このフィルタは2つの基本信号のみを通過させ、IMD3波( $2f_1-f_2$ )を低減させることができる。このフィルタは後に示す2段バルクディスク共振器フィルタで実現した。図3にIMD3の測定結果を示す。入力電力が22 dBmまでは線形性であり、IMD3は基本波の傾きに対して3倍の傾きで増加していることが確認できた。また、基本波とIMD3の交点で定義されるIP3は55.81 dBmであった。図2の周波数特性をもつ超伝導2信号通過フィルタをシステムに組み込むことで、システムにおけるIMD3の出力電力が22.95 dBm低減し、IP3は10.9 dBm増加した。

以上の結果から、超伝導 2 信号フィルタが IMD3 波測定においてノイズレベルの低減に有効であり、簡易なコンポーネントでも低ノイズ IMD3 波測定システムが実現できることを明らかにした。今後、この 2 信号通過フィルタの特性向上によりさらに、低い IMD 測定システムが実現できると期待できる。

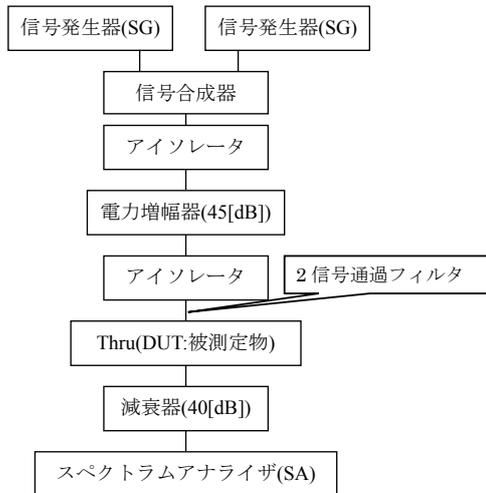


図 1 IMD 測定システムのブロック図

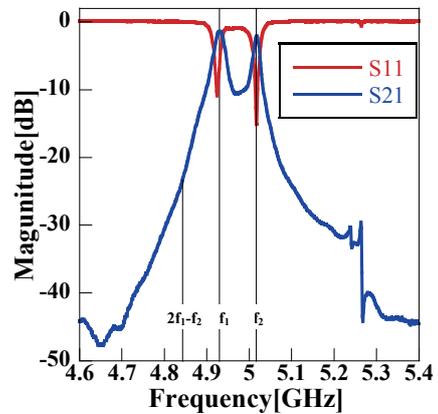


図 2 超伝導 2 信号通過フィルタの周波数特性

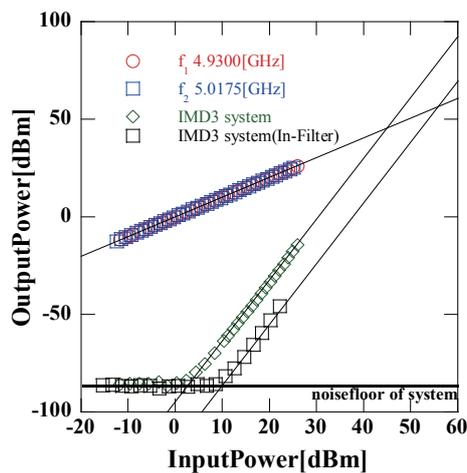


図 3 IMD 測定結果

#### 4-2 3 段超伝導バルクリングフィルタの耐電力特性 (Dy-Ba-Cu-O 系と Gd-Ba-Cu-O 系超伝導バルクの比較)

3 段超伝導バルクリングフィルタを用いた耐電力試験を行った。耐電力特性の目標を達成するために、共振器材料として Dy-Ba-Cu-O 系と Gd-Ba-Cu-O 系超伝導バルクのどちらがより高い耐電力を実現できるかを調査した。

図 4 は 3 段超伝導バルクリングフィルタの電磁界解析モデル(a)と作製したフィルタの写真(b)である。

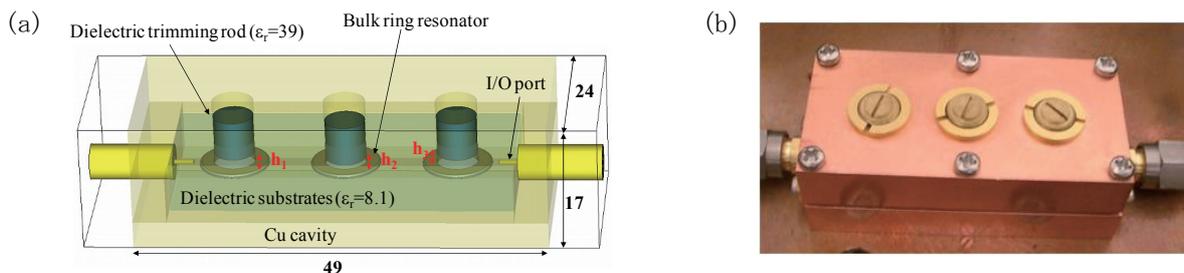


図 4 3 段超伝導バルクリングフィルタの電磁界解析モデル(a)と作製したフィルタの写真(b)

図5は3段 Dy-Ba-Cu-0 超伝導バルクリングフィルタの典型的な周波数特性であり、フィルタ特性が得られていることがわかる。図6は3段超伝導バルクリングフィルタの典型的な耐電力特性である。Dy-Ba-Cu-0 バルクを用いた場合、ほとんどの場合約 10 W 程度の耐電力であったのに対して、Gd-Ba-Cu-0 バルクを用いた場合、25 W 以上でも線形性を保っていた。よって、Gd-Ba-Cu-0 バルクの方が高耐電力フィルタ材料として有望であることが明らかとなった。この理由は、Dy-Ba-Cu-0 に比べて Gd-Ba-Cu-0 バルクの熱伝導率が良いためであると考えている。

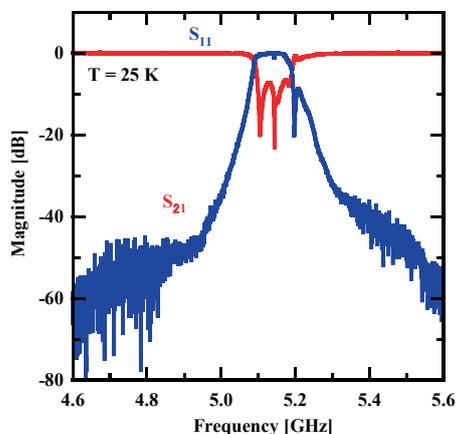


図5 3段 Dy-Ba-Cu-0 超伝導バルクリングフィルタの周波数特性

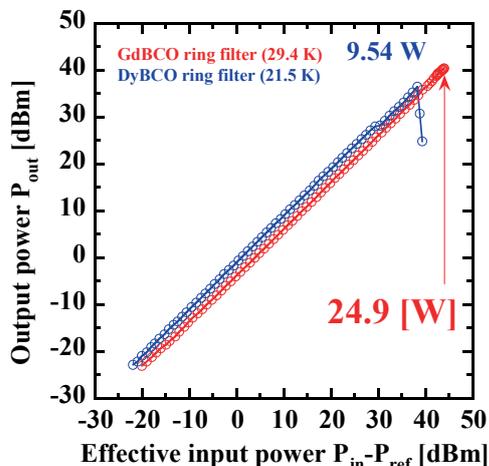


図6 3段超伝導バルクリングフィルタの耐電力特性 (赤) Gd-Ba-Cu-0, (青) Dy-Ba-Cu-0

#### 4-3 更なる高耐電力化に向けた3段超伝導バルクディスクフィルタの検討

共振器をディスク型に変更した場合の耐電力特性の向上を電磁界シミュレーションにより検討した。図7は3段バルクリングフィルタ(a)及びディスクフィルタ(b)の電流密度分布を示している。この結果から、ディスク共振器はリング共振器に比べて約4倍の耐電力特性を示すことが予想できる。従って、Gd-Ba-Cu-0 ディスク共振器フィルタは、100 W 以上の耐電力特性を示すことが予想される。この実験的検証は、今後の課題である。

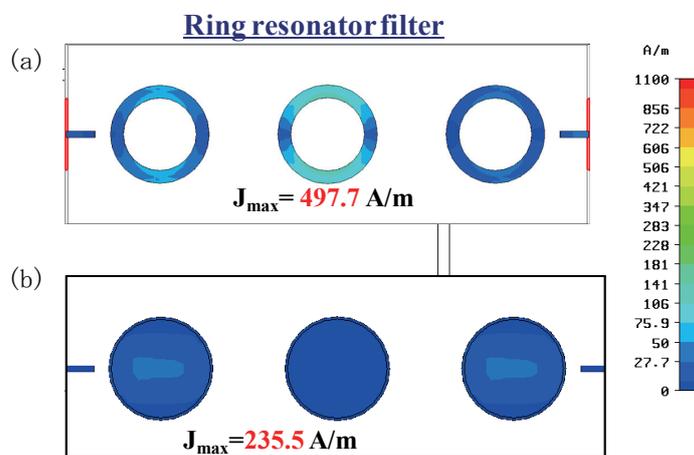


図7 3段バルクフィルタの電流密度分布 (a) リング共振器, (b) ディスク共振器

#### 4-4 飛び越し結合9段フィルタの設計

周波数特性の目標を達成するために、カップリングマトリクスにより必要な段数を見積もり、その具体的な構造を検討した。図8はフィルタトポロジーを示しており、電磁界の流れを考えることにより周波数特性を計算することができる。図9はその周波数特性を示しており、急峻なスカートを示すフィルタが得られている。

図8,9に示したフィルタを実現するための基礎的な実証を行うために、S-1-9-Lを考慮した2段フィルタ、S-4-5-6-Lを考慮した3段フィルタ、S-1-2-3-4-Lを考慮した4段フィルタを設計・試作した。

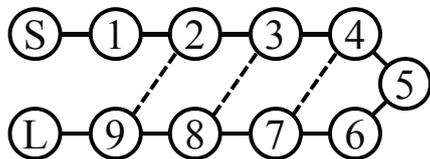


図8 飛び越し結合を用いた9段フィルタのフィルタトポロジー

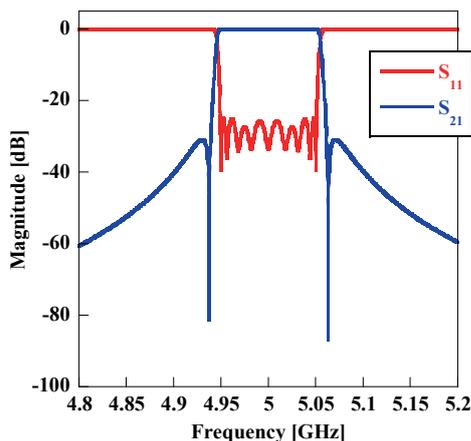


図9 飛び越し結合を用いた9段フィルタの周波数特性

#### 4-5 フィルタの設計と作製

##### (1) 2段フィルタの設計と作製

超伝導バルクディスク共振器を用いた2段フィルタの設計と作製を行った。図10はシミュレーションによる周波数特性(a)と作製写真(b)を示している。図11は実験結果を示しており、フィルタ特性が得られている。挿入損失が仕様よりも少し大きいのが、これは、給電線の長さを調整することで改善可能であると考えている。フィルタの耐電力特性は、約10Wであったが、この結果については、周波数特性の改善後再調査の必要がある。

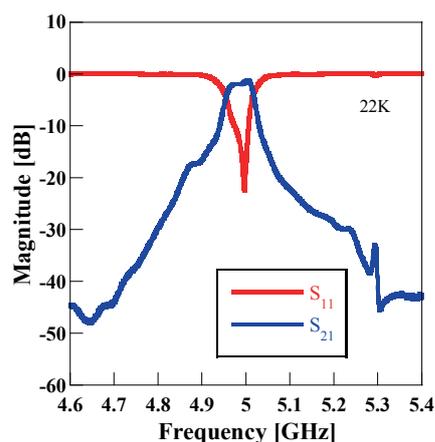
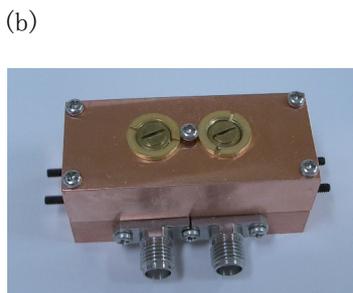
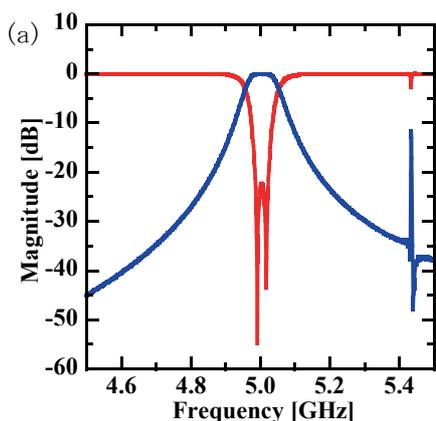


図10 2段フィルタの周波数特性(シミュレーション) (a)と作製写真(b)

図11 2段フィルタの周波数特性(実験結果)

##### (2) 3段フィルタの設計と作製

次に3段フィルタの設計と作製を行った。図12はシミュレーションによる周波数特性(a)と作製写真(b)を示している。シミュレーションによる数値特性には、高周波側に余剰な通過帯域が見られるが、今後の多段化により低減させることができるものと考えている。図13は実験結果を示しているが、大きな挿入損失により特性が劣化している。この原因が、図8におけるS-4-5-6-Lを考慮した折り返し構造に起因するかを再検討する必要がある。

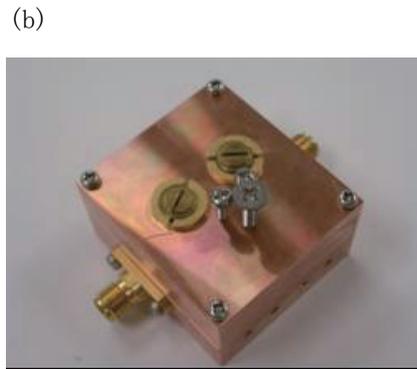
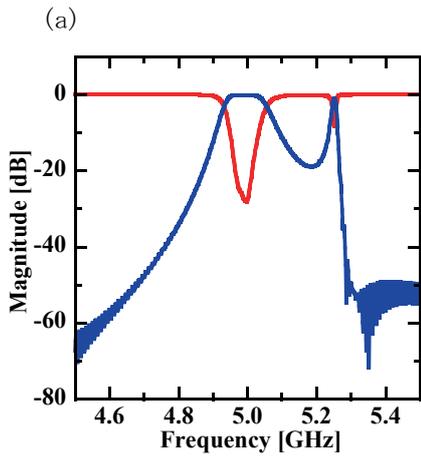


図12 3段フィルタの周波数特性(シミュレーション) (a)と作製写真(b)

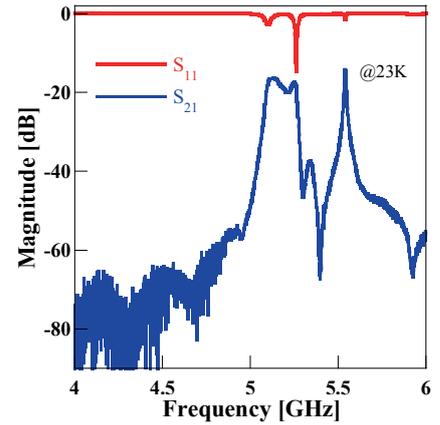


図13 3段フィルタの周波数特性(実験結果)

### (3) 4段フィルタの設計と作製

次に4段フィルタの設計と作製を行った。図14はシミュレーションによる周波数特性(a)と作製写真(b)を示している。図15は4段フィルタの周波数特性を示している。フィルタ特性が得られたが、挿入損失が約4dBであった。この原因は、給電線の長さによる結合係数の誤差が原因であると考えられる。図16に同フィルタの耐電力特性を示す。入力10Wでも線形性を保つことから、より高耐電力なフィルタの実現が期待される。以上の結果から、9段フィルタ実現の指針を得ることができた。

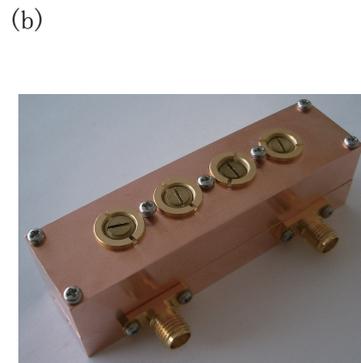
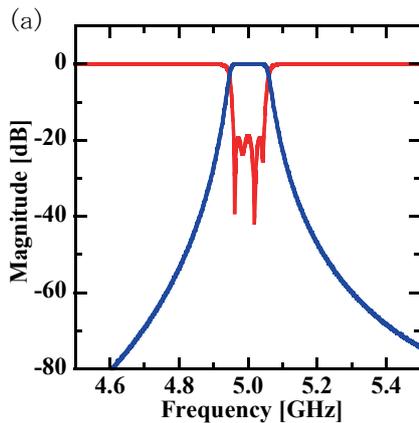


図14 4段フィルタの周波数特性(シミュレーション) (a)と作製写真(b)

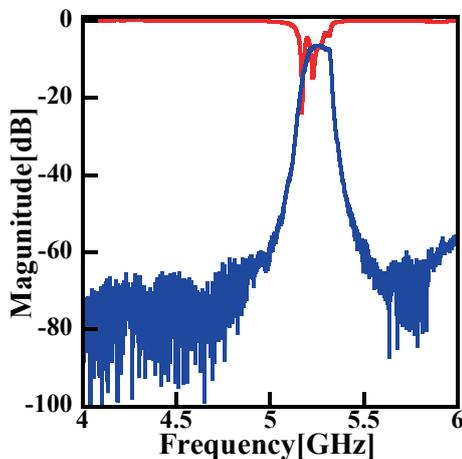


図15 4段フィルタの周波数特性(実験結果)

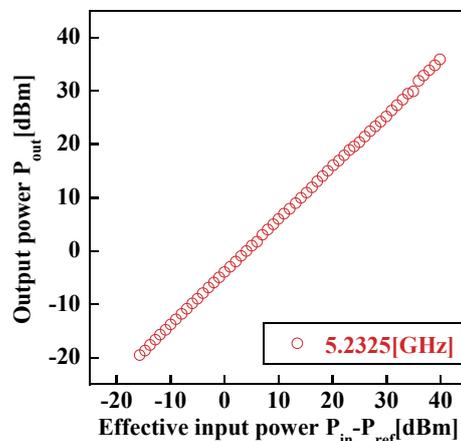


図16 4段フィルタの耐電力特性(実験結果)

## 【参考文献】

- [1] 加屋野博幸, 等, 電子情報通信学会論文誌C, Vol. J90-C, No. 3, 188-196 (2007).  
[2] S. Takeuchi, **A. Saito**, et al., Physica C 486, 1954-1957 (2007).  
[3] S. K. Remillard, et al., J. Supercond. I. Novel Mag., Vol. 11, No. 1, 47-56 (2001).  
[4] D. E. Oates, J. Supercond. Novel Mag., Vol. 20, No. 1, 3-12 (2007).  
[5] **A. Saito**, et al., Physica C, 445-448, 330-333 (2006). (ISS2005 招待講演論文)  
[6] **A. Saito**, et al., Journal of Physics: Conf. Ser. 97, 012228 (2008).

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Comparison of power handling capabilities of sliced and conventional microstrip line filters	Journal of Physics: Conference Series	2010
Power-Handling Capability of Transmit Filters using Superconducting Bulk Ring Resonators	IEEE Trans. Appl. Supercond.	2009
Automatic trimming technique for superconducting band-pass filter using a trimming library	IEICE Trans. Electron	2009