

次世代移動体通信基地局用大電力送信用フィルタの開発

研究代表者 齊藤 敦 山形大学 大学院理工学研究科 教授

1 研究開始当初の背景

超伝導体はマイクロ波帯での損失が極めて低いことから、低挿入損失特性と急峻なスカート特性を両立した帯域通過フィルタが実現できる。既に受信用超伝導フィルタの研究は実用レベルにあり、米国と中国の一部で運用されている。一方で、送信用超伝導フィルタの研究は、高い耐電力特性を必要とすることから、実用レベルには至っていなかった。送信用超伝導フィルタを実現するために、これまで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[1-3]や、超伝導厚膜を用いたフィルタの研究[4]が成されてきた。最高出力の送信用超伝導フィルタを実現するためには、大きな高周波電流をいかに分散させるかが重要となる。我々は、溶融法で作製した超伝導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、超伝導単結晶バルクの厚さ方向への電流分散を目的とした高出力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共振器フィルタを設計し、試作及び周波数特性、耐電力の評価を行ってきた。この間、電気通信普及財団の助成（平成21年～22年）を受け、研究を飛躍的に進歩させることができた。また、その後の継続的な研究の結果として、以下のような成果を得てきた。

- ① 超伝導バルクディスク共振器5段フィルタにて耐電力100W以上を得た。[6]
- ② 共振器の形状は、リング型よりディスク型の方が高い耐電力特性を示した。[7]
- ③ 3段よりも5段フィルタの方が高い耐電力を示した。[8]

耐電力100W以上は現在の超伝導送信用フィルタとしては最高記録であり、また、段数の増加に対して耐電力が増加することは、これまでの薄膜型フィルタとは異なる傾向であるとともに、段数の増加により耐電力とスカート特性が同時に向上するという非常に興味深い結果を得ることができた。以上のような経緯から、最高性能送信用超伝導フィルタが現実味を増してきたが、最終的な実験実証は未だ成されていなかった。

2 本研究の目的と実施項目

本研究では、薄膜に代えて超伝導単結晶バルクを用いた効果的な多段化設計によって、高い耐電力特性と急峻なスカート特性を両立させた最高性能送信用超伝導フィルタを開発することを最終目的としている。

本課題では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。

- ① 中心周波数：5 GHz, ② 帯域幅：100 MHz, ③ 挿入損失：1 dB 以下
- ④ スカート特性：30 dB/5 MHz 以上, ⑤ 耐電力：100 W 以上

上記数値目標を達成するために、研究期間内に以下の点に焦点を絞り研究を実施した。

1. 超伝導バルク共振器フィルタにおける外部Q値 (Q_e) 調整機構の提案と実証
2. 超伝導バルク共振器を用いたCQ型フィルタの設計と作製

3 研究の成果

3-1 超伝導バルク共振器フィルタにおける外部Q値調整機構

(1) 概要

従来の超伝導バルク共振器フィルタにおいて、既存の共振周波数シフトによるトリミングのみでは周波数特性の改善に限界がある。周波数特性の調整には結合係数と外部Q値 (Q_e) の調整が効果的であり、特に Q_e は周波数特性の向上に有効である。本課題では超伝導バルク共振器フィルタにおいて、 Q_e 調整による周波数特性トリミングの有効性を実験的に検証した。従来の超伝導バルク共振器フィルタに付属可能で、低温でロッドの上下のみで実現可能な Q_e 調整機構を提案・設計・実装し、 Q_e 調整の実験を行った。その後、先行研究の5段フィルタに Q_e 調整機構を実装し、既存の共振周波数調整技術と Q_e 調整により周波数特性のトリミングを行った。

(2) 外部 Q 値調整機構の設計

これまでのバルクフィルタにおける Q_e の値は、励起ポートとなる同軸ケーブルの中心導体先端の長さを微調整することで行ってきた。しかし超伝導フィルタにおける周波数特性の測定は、真空チャンバー内にフィルタを入れ測定を行うため、既存の方法では測定中の Q_e の調整は不可能であった。そこで今回、測定中の Q_e 調整を可能にする構造を提案した。図 1 に提案した Q_e 調整機構のシミュレーションモデルを示す。また、図 2 にその側面構造の概略図を示す。 Q_e を調整するため、励起ポートと共振器の間に空間を設け、この空間を横切る励起ポートから共振器へ伸びた中心導体線上にロッド近づけることで Q_e 調整を行う。 Q_e の調整のシミュレーションは給電線からのロッドの高さを h_Q として、 h_Q を変化させた場合の Q_e を解析した。また、ロッドの材質は誘電体と導体を想定した。

図 3 に解析した周波数特性からの得られた Q_e と h_Q の関係を示す。 Q_e 調整ロッドに誘電体を用いたとき、外部 Q 値は 33 ~ 64 に変化した。 Q_e の変化は、ロッドが給電線に近づくにつれ大きく変化することがわかった。一方、導体ロッドを用いた場合、外部 Q 値は 23 ~ 61 に変化した。 Q_e の変化は、ロッドが近づくとともに緩やかに変化することがわかった。

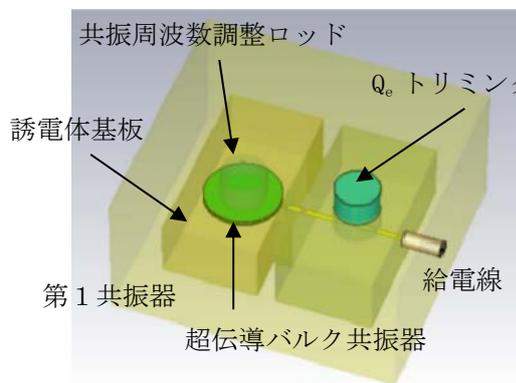


図 1 外部 Q 値調整機構のシミュレーションモデル

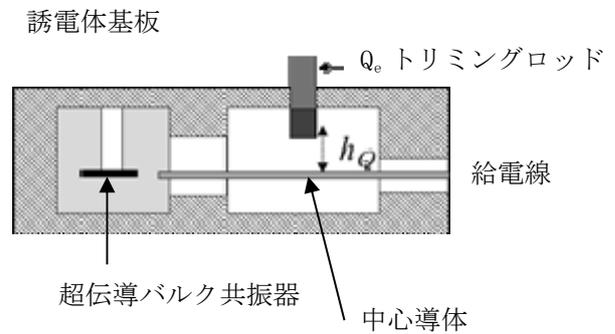


図 2 側面構造の概略図

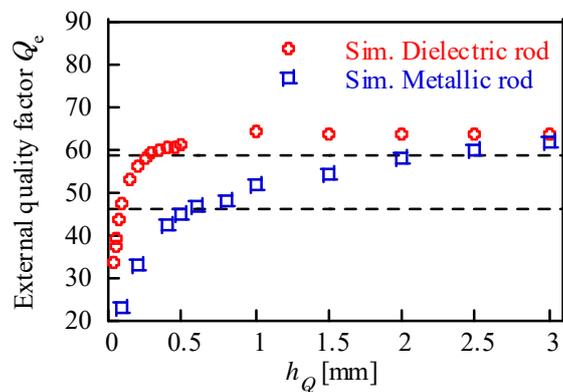


図 3 シミュレーションによる Q_e と h_Q の関係

(3) 外部 Q 値調整機構の実装と実験結果

外部 Q 値 (Q_e) 調整機構のシミュレーションを参考に、先行研究のキャビティの一部を用いて Q_e 調整機構を実装し、 Q_e 調整の実験検証を行った。図 4 に Q_e 調整機構の実装写真を示す。共振器には先行研究と同様に超伝導バルクを用いており、超伝導バルクはアルミナ基板に埋め込まれ、キャビティ本体の中央に設置した。また励起ポートである同軸ケーブルは中心導体が伸びており、アルミナ基板内部の共振器直前まで到達している。この中心導体上に、キャビティ上蓋に取り付けられたロッドを近づけることで Q_e 値を調整した。またドライバーによるネジの回転によりロッドが上下駆動する構造になっている。

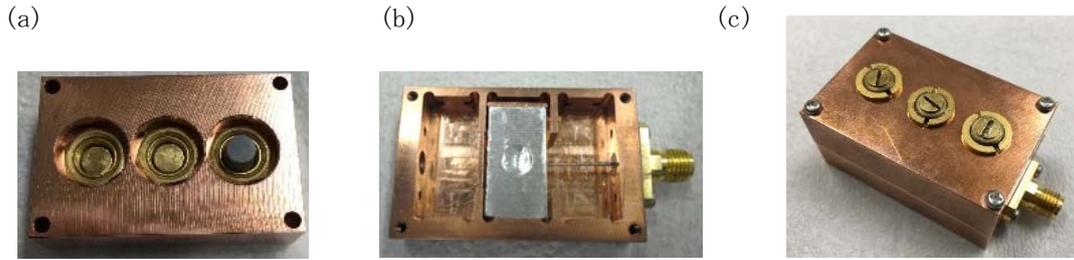


図4 Q_e 調整機構の実装写真。(a) Q_e 調整機構用ロッドが設置された上部構造。(b) 共振器、給電線が設置された下部構造。(c) 上下組み合わせた Q_e 調整機構付き1共振器。

図5に Q_e 調整の実験結果を示す。 Q_e 調整ロッドに誘電体を用いたとき、 Q_e は47～64に変化した。 Q_e の変化は、ロッドが給電線に近づくにつれ大きく変化している。一方で導体ロッドを用いた場合、 Q_e は44～66に変化した。 Q_e の変化は、ロッドが給電線に近づくときと緩やかに変化している。シミュレーションで予測(図3)と実験結果(図5)を比較すると、誘電体ロッドと導体ロッドそれぞれにおいて Q_e の変化は非常に近い傾向を示した。表1に Q_e の調整範囲をまとめた。導体ロッドにおいて Q_e の調整目標を達成しており、導体ロッドが Q_e の調整に有効であることを実験的に明らかにした。

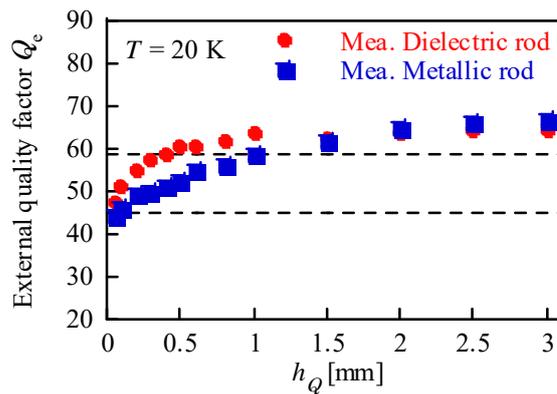


図5 Q_e 調整機構を用いた Q_e と h_Q の実験結果

表1 Q_e 変化量の比較

	目標値	シミュレーション	実験結果
誘電体ロッド	45 ~ 59	33 ~ 64	47 ~ 64
導体ロッド		23 ~ 61	44 ~ 66

(4) 外部Q値調整機構付き5段フィルタの設計

外部Q値 (Q_e) 調整機構を先行研究のフィルタに取り付けてシミュレーションを行った。図6にシミュレーションモデルを示す。また図7に側面構造の概略図を示す。共振器の真上には既存の周波数特性トリミング技術による共振周波数調整ロッドを設置している。またフィルタの1段目と5段目の共振器の真上には導体ロッド、フィルタの中央の2段目、3段目、4段目の共振器の真上には誘電体ロッドを設置している。一方で励起ポートから伸びた給電線上には Q_e 調整ロッドが設置されている。シミュレーションでは、これらロッドの高さ h_{Q1} 、 h_{Q2} 、 $h_1 \sim h_5$ を変化させることで周波数特性の最適化を行った。

Q₀調整ロッドに誘電体を用いたときの周波数特性の最適化結果を図8(a)に示す。ロッドの高さは $h_{q1} = h_{q2} = 2.3$ mm、 $h_1 = h_5 = 2.55$ mm、 $h_2 = h_4 = 3$ mm、 $h_3 = 3$ mmであった。周波数特性の最適化により、良好なフィルタ特性を得ることができており、中心周波数 $f_0 = 4.97$ GHz、挿入損失 $IL = -0.34$ dB、帯域幅 $BW = 107$ MHz、最大リターンロス $RL = -13.6$ dBを得た。また、Q₀調整ロッドに導体を用いたときの周波数特性の最適化結果を図8(b)に示す。ロッドの高さは $h_{q1} = h_{q2} = 2.5$ mm、 $h_1 = h_5 = 2.5$ mm、 $h_2 = h_4 = 3$ mm、 $h_3 = 3$ mmであった。周波数特性の最適化により、良好なフィルタ特性を得ることができており、中心周波数 $f_0 = 4.97$ GHz、挿入損失 $IL = -0.34$ dB、帯域幅 $BW = 107$ MHz、最大リターンロス $RL = -15.0$ dBを得ることができた。

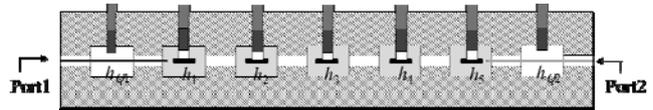
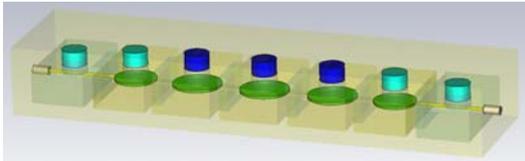


図6 Q₀調整機構付き5段フィルタのシミュレーションモデル

図7 側面構造の概略図

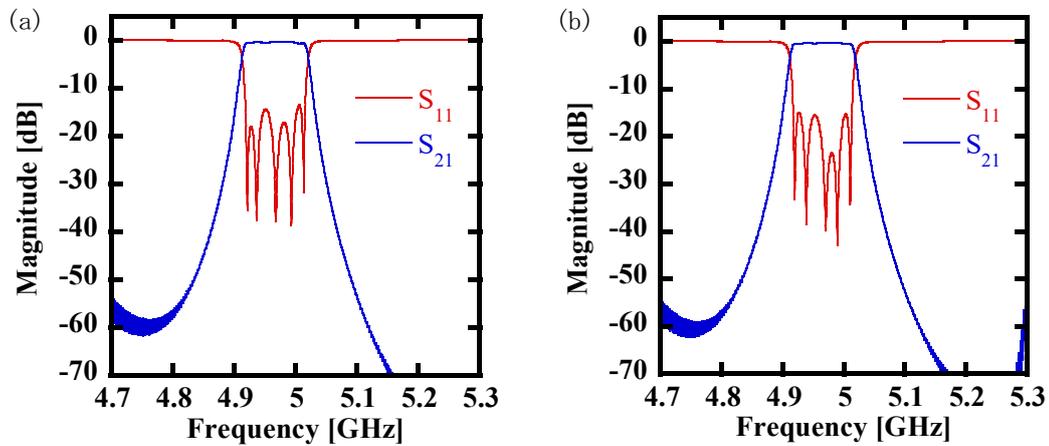


図8 Q₀調整機構付き5段フィルタにおける周波数特性。(a) Q₀調整ロッドに誘電体を用いたときのシミュレーション結果。(b) Q₀調整ロッドに導体を用いたときのシミュレーション結果

(5) 外部Q値調整機構付き5段フィルタの実装と実験結果

外部Q値(Q₀)調整機構付き5段フィルタのシミュレーション結果を参考に、先行研究の5段フィルタの外側にそのままQ₀調整機構を取り付け、5段フィルタを実装した。実装写真を図9に示す。共振器の真上には既存の周波数特性トリミング技術による共振周波数調整ロッドを設置している。またロッドの種類はシミュレーションと同様に設置している。一方でQ₀調整ロッドは励起ポートから伸びた給電線上にそれぞれ設置している。実験は真空チャンバー内に実装したフィルタを入れ、温度 $T = 20$ Kに冷却後、適宜ロッドの高さを調整することで周波数特性のトリミングを行った。またQ₀調整ロッドに誘電体と導体をそれぞれ用いて2種類の実験を行った。

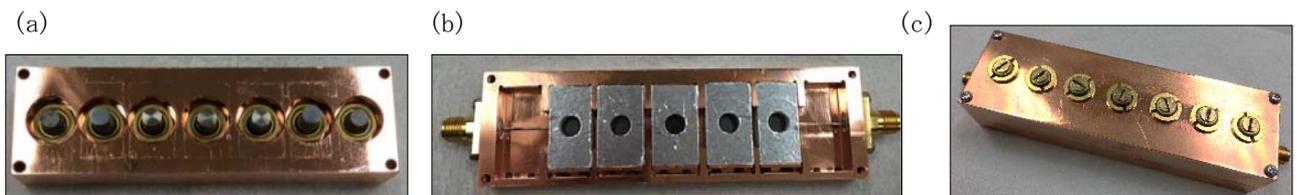


図9 外部Q値調整機構付き5段フィルタの実装写真。(a) Q₀調整機構用ロッドが設置された上部構造。(b) 共振器、給電線が設置された下部構造。(c) 上下組み合わせた外部Q値調整機構付き5段フィルタ。

図 10 (a) に Q_e 調整ロッドに誘電体を用いたときの周波数特性を示す。周波数特性のトリミングによって明確なフィルタ特性を得ることができており、中心周波数 $f_0 = 5.04$ GHz、挿入損失 $IL = -1.45$ dB、帯域幅 $BW = 74$ MHz、最大リターンロス $RL = -10.5$ dB であった。一方で調整ロッドに導体を用いたときの実験結果を図 10 (b) に示す。周波数特性のトリミングによって明確なフィルタ特性を得ることができており、中心周波数 $f_0 = 5.05$ GHz、挿入損失 $IL = -1.79$ dB、帯域幅 $BW = 74$ MHz、最大リターンロス $RL = -13.7$ dB であった。調整機構付き 5 段フィルタの周波数特性は調整機構なしの 5 段フィルタにみられた通過特性と反射特性の乱れを改善できており、良好なフィルタ特性を得ることができた。特に調整ロッドに導体を用いた場合において、反射特性のディップを明確に 3 本確認することができた。

また、表 2 に調整機構なし 5 段フィルタと調整機構付き 5 段フィルタにおけるフィルタ特性のパラメータをまとめた。 Q_e 調整ロッドに導体を用いたとき帯域幅を保ったまま最大リターンロス RL を 2.5 dB 向上することができた。一方で挿入損失 IL は大きくなった。この理由として、本実験で用いた超伝導バルク共振器は作製から 3 年以上経過しているため、超伝導特性に劣化が生じ挿入損失 IL は大きくなったと考えられる。したがって、超伝導バルクの劣化を改善することで挿入損失 IL は向上すると考えられる。以上結果より、超伝導バルク共振器フィルタにおける Q_e 調整による周波数特性トリミングの有効性を示し、調整に導体ロッドを用いることが効果的であることを明らかにした。[9]

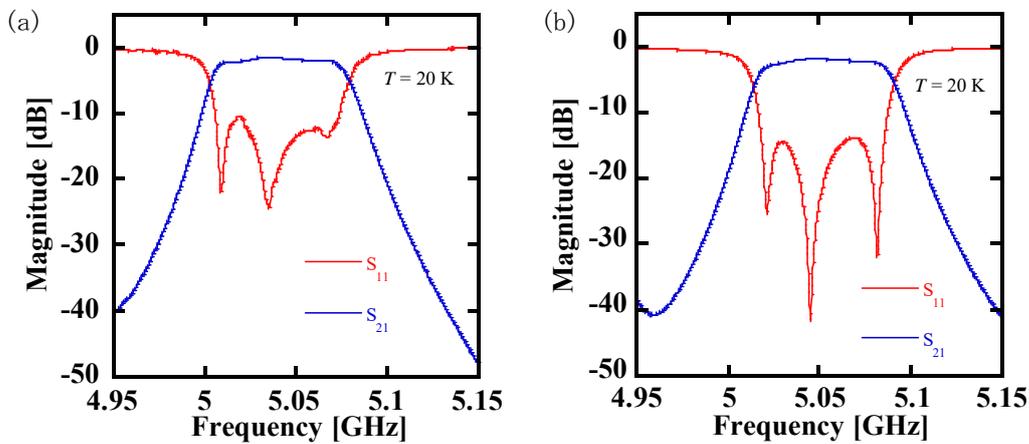


図 10 外部 Q 値調整機構付き 5 段フィルタの周波数特性。(a) Q_e 調整ロッドに誘電体を用いたときの実験結果。(b) Q_e 調整ロッドに導体を用いたときの実験結果。

表 2 調整機構なし 5 段フィルタと調整機構付き 5 段フィルタにおけるフィルタ特性のまとめ

	外部 Q 値調整機構なし	外部 Q 値調整機構あり	
		誘電体ロッド	導体ロッド
中心周波数 f_0 [GHz]	4.89	5.04	5.05
帯域幅 BW [MHz]	74.9	74	74
挿入損失 IL [dB]	-0.48	-1.45	-1.79
最大リターンロス RL [dB]	-11.2	-10.5	-13.7

3-2 超伝導バルク共振器を用いた CQ 型フィルタの設計と作製

(1) 概要

超伝導バルク共振器フィルタの実用化のために、目標とする急峻なスカート特性を得るためにはさらに共振器の数を増やす（多段化）必要がある。多段化の際、直列に共振器を増加することが設計上は容易であるが、直列方向のフィルタのサイズが大型化してしまう。冷凍機冷却による実用化を考慮すると多段化の際の小型化が課題となっていた。そこで本課題では、飛び越し結合の一種である CQ (Cascaded Quadruplet) 結合を採用することで、多段化の際の大型化を低減しつつ急峻なスカート特性が得られないかを検討した。CQ 結合は通過域の両端に一对の減衰極を生成し、同じ共振器数の直列結合フィルタより急峻なスカート特性を得ることができる [10, 11]。しかしながら、共振器間の飛越結合を厳密に制御する必要があり、通常の直列型よりも設計の難易度が上がってしまう。本課題では、CQ 構造を導入した 4 段 CQ フィルタの実現可能な 3 次元構造を明らかにすることを目標とした。その際、作製後に結合係数を調整できる機構を新たに提案し、その調整機構についての検討を行った。また、最適化されたフィルタを作製し、その周波数特性の評価を行った。

(2) 4 段 CQ フィルタの設計

フィルタの設計仕様を中心周波数 $f_0 = 5$ GHz、通過帯域幅 $BW = 100 \pm 5$ MHz、リターンロス (RL) > -30.0 dB として設計を行った。図 11 に 4 段 CQ フィルタのトポロジーを示す。一段目と二段目及び三段目と四段目の共振器間の結合と一段目と四段目の結合は磁界結合である。また、三段目と四段目の共振器間の結合は電界結合である。フィルタの全共振器間の電磁界結合を計算するソフトウェア CoupleFil を用いて結合係数、外部 Q 値を求めた。表 3 に CoupleFil より得られた各結合係数の理論値の結合マトリックスを示す。正符号の値は磁界結合、負符号の値は電界結合を表している。また、図 12 に 4 段 CQ フィルタの理想的な周波数特性を示す。通過域の両端にある急激に減衰している点が減衰極である。この減衰極が CQ フィルタの特徴である。

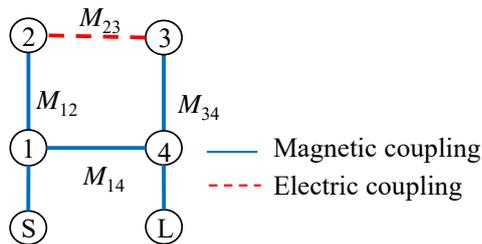


図 11 4 段 CQ フィルタのトポロジー

	S	1	2	3	4	L
S		47.56				
1	47.56		5000		0.00496	
2		0.0150		5000	-0.0134	
3			-0.0134		5000	0.0150
4		0.00496		0.0150		5000
L					47.56	

表 3 各結合係数の結合マトリックス
共振周波数 $M_{11}, M_{22}, M_{33}, M_{44}$: [MHz]

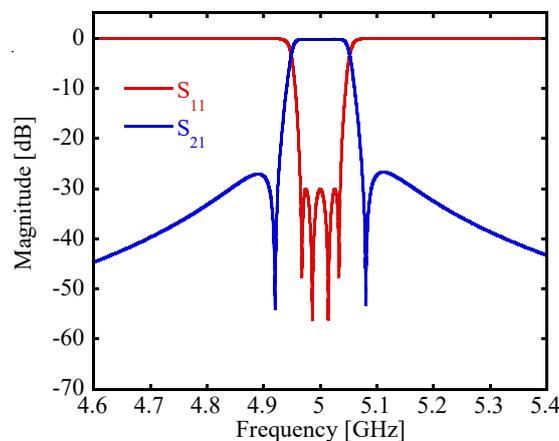


図 12 4 段 CQ フィルタの理想的な周波数特性

図 13 に本研究で提案した 4 段 CQ フィルタの構造図を示す。4 段 CQ フィルタを結合ごとに 3 種類に分解し周波数特性の解析による結合強度評価を行うことで共振器間距離を決定した。周波数特性の解析は 3 次元電磁界シミュレータ (MW STUDIO) を用いた。共振器間距離の決定の際、共振器の共振周波数を調整するトリミングロッドを超伝導バルク真上に取り付けた。ロッドの先端には誘電率 45 の誘電体を設置した。この誘電体を共振器の近づけることで共振周波数を低周波側へシフトさせることができる。周波数特性の解析の際、ロッドの高さは 1 mm に固定した。

図 14 に磁界結合 M_{12} (M_{34}) を得るための解析モデル図及び解析結果を示す。磁界結合は共振器間を大気空間で結合させた。 a_1 の値を固定し、 a_2 を変化させて理論値を満たす共振器間距離を決定した。解析結果より大気空間の大きさは $a_1 = 7.00$ mm、 $a_2 = 0.84$ mm とした。

図 15 に磁界結合 M_{14} を得るための解析モデル図及び解析結果を示す。 b_2 の値を固定し、 b_1 を変化させて同様に共振器間距離を決定した。解析結果より大気空間の大きさは $b_1 = 5.88$ mm、 $b_2 = 0.70$ mm を得た。

同様に電界結合 M_{23} を得るために周波数特性を解析した。電界結合は共振器間に誘電率 45 のセラミックを用いて結合させた。さらに、4 段 CQ フィルタの作製後に電界結合の結合係数を調整できる調整機構を提案した。電界結合はセラミックの隣にある大気空間が大きくなると、結合係数が小さくなる。そこで、銅ロッドを挿入し、空間の大きさを変化させることで結合係数を調整することができるか否かの検討を行った。図 16 にロッドの高さと結合係数の関係及び結合係数調整機構のモデル図を示す。挿入図はモデルの上面図とモデルの側面図である。また、大気空間の大きさは $8.00 \times 8.00 \times 6.50$ mm³ であり、銅のロッドの直径は 7.8 mm とした。解析はセラミックの大きさ $c_1 = 3.10$ mm とし、ロッドの高さ h_d を変化させた。この際、二つのロッドは同じ高さになるように同時に変化させた。解析結果より、結合係数を理論値付近に調整できることがわかった。また、結合係数が理論値に最も近いロッドの高さは $h_d = 2.80$ mm とであることがわかった。

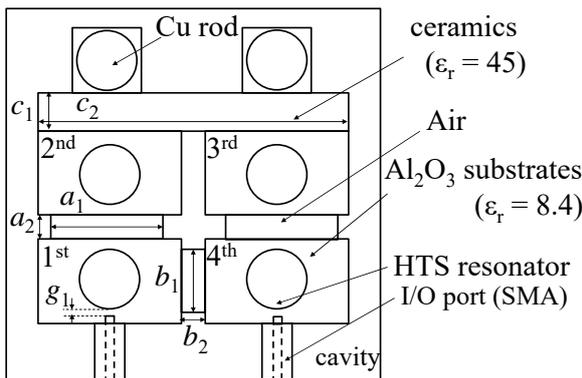


図 13 4 段 CQ フィルタの構造図

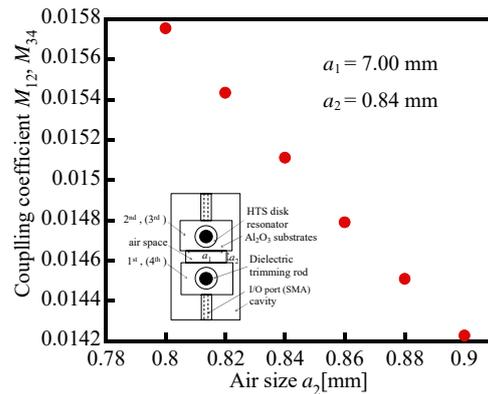


図 14 磁界結合 M_{12} (M_{34}) の共振器間距離解析結果

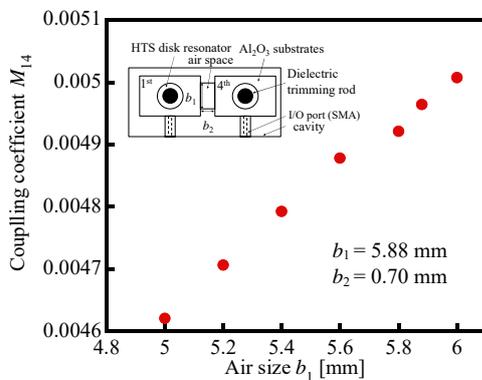


図 15 磁界結合 M_{14} の共振器間距離解析結果

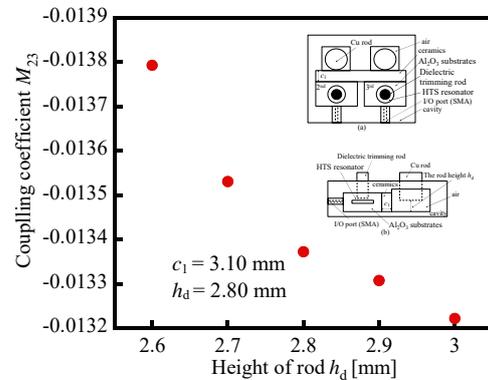


図 16 磁界結合 M_{23} のロッド高さ解析結果

各共振器間距離、結合構造をもとに4段CQフィルタのモデルの電磁界解析を行い、周波数特性を計算した。また、各共振器の共振周波数を調整するための誘電体ロッドを導入した。さらに、一段目と四段目の誘電体ロッドの高さを h_1 、二段目と三段目の誘電体ロッドの高さを h_2 とした。図 17 に 4 段 CQ フィルタの 3 次元モデル図を示す。解析結果は共振周波数のずれや共振器間に強い結合が生じ、目標とする周波数特性を得ることができなかった。これは実際のフィルタは共振器間距離の解析モデルのように 2 つの共振器のみの結合ではない。例えば、一段目の共振器は空間で二段目と四段目の共振器と結合している。したがって、共振器間距離を決定するための解析モデルが実際のモデルと異なったため、結合係数にずれが生じたと考えられる。そこで最適化として、共振周波数のずれについては共振器の大きさや誘電体ロッドを用いて調整した。また、通過帯域での強い結合については空間の大きさ、給電ギャップ距離を変化させて再解析を行った。図 18 に最適化後の 4 段 CQ フィルタの周波数特性を示す。最適化後の 4 段 CQ フィルタの周波数特性と Couplefil で求めた理想的な周波数特性の比較を行うために、表 4 に周波数特性をまとめた。表の calculated は CoupleFil より得られた周波数特性の値である。一方、simulated は MW STUDIO より得られた周波数特性の解析結果である。表 4 より中心周波数、スカート特性は couplefil より得られた周波数特性の値と同様な値となった。また、表 5 に最適化前後のサイズを示す。以上より、4 段 CQ フィルタの最適モデルを得ることができた。[12]

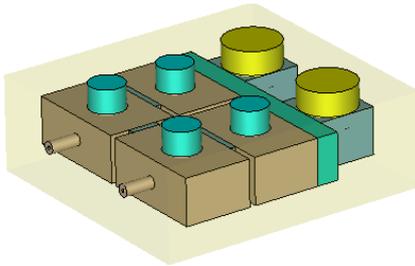


図 17 4 段 CQ フィルタの 3D モデル図

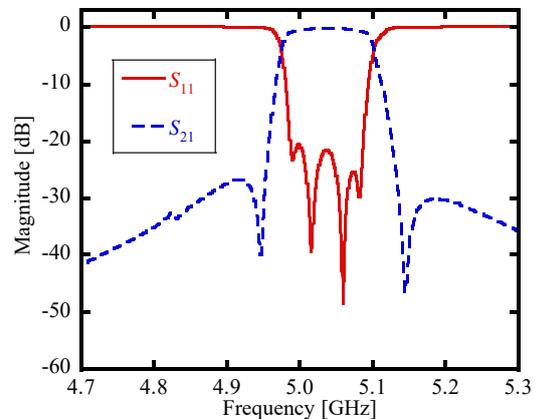


図 18 最適化後の 4 段 CQ フィルタの周波数特性

表 4 Couplefil で計算した周波数特性と最適化後の 4 段 CQ フィルタの周波数特性の比較

	計算 (Couplefil)		解析結果(MW-STUDIO)	
中心周波数 f_0 [GHz]	5.00		5.04	
帯域幅 BW [MHz]	100		124	
挿入損失 IL [dB]	-0.16		-0.45	
最大リターンロス RL [dB]	-30.0		-21.8	
減衰極位置 f_{t1}, f_{t2} [GHz]	4.92	5.08	4.95	5.15
スカート特性 [dB/5 MHz]	3.47		3.23	

表 5 最適化前後で変更した各パラメータの値

パラメータ		最適化前 (初期条件)	最適化後
$M_2 (M_3)$ [mm]	a_1	7.00	7.20
	a_2	0.84	0.80
M_4 [mm]	b_1	5.88	4.00
	b_2	0.70	0.90
M_3 [mm]	c_1	3.10	3.00
Height of rod h_d [GHz]	h_d	2.80	4.60
Height of rod h_1 [GHz]	h_1	1.00	2.80
Height of rod h_2 [GHz]	h_2	1.00	3.00

(3) 4段 CQ フィルタの作製と評価

前節のシミュレーション結果を元に、フィルタの作製及び周波数特性の評価を行った。図 19 に作製した 4 段 CQ フィルタの各パーツ及び外観図を示す。超伝導バルク共振器は、改良型 QMG 法によって作製された単結晶 GdBCO バルクを用いた。また、超伝導フィルタを包括している誘電体には多結晶アルミナ基板（比誘電率 8.40）を用いた。4 段 CQ フィルタはストリップライン構造がもとになっており、アルミナ基板の中に超伝導バルク共振器が入っている構造となっている。この構造の実現のため、アルミナ基板を図 19 (b) のように 2 つのパーツに分けた。共振器をアルミナ基板内に挟み込み、アルミテープを用いて 2 つのアルミナ基板を固定・梱包した。さらに、結合に関与する側面部分、同軸コネクタの中心導体を挿入する部分及び誘電体ロッドを挿入する部分のアルミテープを除去した。セラミックも同様にアルミテープを用いて外側を覆い、結合に関与する部分及び銅ロッドを挿入する側面部分のアルミテープを除去した。その後、アルミナ基板を銅キャビティに固定し、銅蓋を被せ、誘電体ロッド及び銅ロッドを挿入した。

作製したフィルタを真空チャンバー内のコールドヘッドに固定し、冷凍機で温度 $T=20\text{ K}$ まで冷却した。真空チャンバーの蓋にはロッドの高さを変更できるドライバ機構が備えつけており、真空中かつ冷却中で共振周波数の調整が可能である。ベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いて周波数特性の測定を行った。

図 20 に 4 段 CQ フィルタにおける周波数特性の実測結果を示す。通過帯域の両端に一組の減衰極を持つフィルタ特性を得ることができた。しかし、中心周波数が高周波側にシフトし、解析結果と同様な特性を得ることができていない。この原因としては実測に使用した誘電体セラミックの比誘電率の値が大幅に小さかったためであると考えている。現在、この誘電体セラミックスの比誘電率を別な手法で評価し、約 21.5 であることまで確認できている。従って、比誘電率 45 の誘電体セラミックスを用いた実験を行うことで 4 段 CQ フィルタの実現が可能であると考えている。

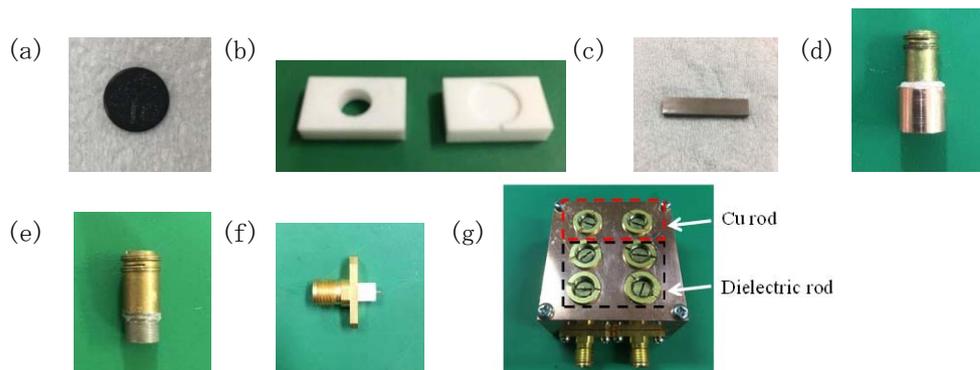


図 19 4 段 CQ フィルタの各パーツ及び外観図 (a) GdBCO バルク共振器, (b) アルミナ製誘電体基板, (c) 誘電体セラミックス, (d) 銅ロッド, (e) 誘電体ロッド, (f) SMA コネクタ, (g) 4 段 CQ フィルタパッケージ

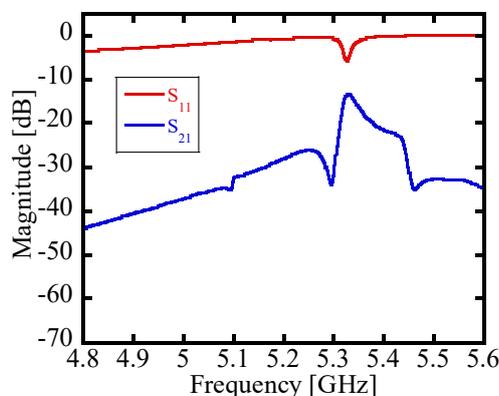


図 20 4 段 CQ フィルタにおける周波数特性の実測結果

4 まとめ

本研究では、超伝導単結晶バルクを用いた効果的な設計によって、高い耐電力特性と急峻なスカート特性を両立させた最高性能送信用超伝導フィルタを開発することを最終目的とし、研究期間内に以下のような成果を得た。

超伝導バルク共振器フィルタにおいて、外部 Q 値 (Q_e) 調整による周波数特性トリミングの有効性を明らかにするため、まず、ロットの上下のみで Q_e 値を可変可能な機構を提案し、シミュレーションと実験の良好な一致を得た。この機構を5段フィルタに拡張したシミュレーション及び実験から、良好な周波数特性を得ることができた。このことから、今回提案した Q_e 調整機構の有効性を明らかに出来た。

また、Cascaded Quadruplet (CQ) 構造を導入した4段 CQ フィルタを実現するために、低温環境で結合係数を調整できる機構を新たに提案し、その調整機構についての検討を行った。その結果、解析より結合係数調整機構付きの4段 CQ フィルタの3次元構造を明らかにした。4段 CQ フィルタの実測では超伝導バルク共振器を用いたフィルタで初めて一組の減衰極有するフィルタ特性を得ることができた。

【参考文献】

- [1] S. Takeuchi, M. Osaka, H. Kinouchi, S. Ono, A. Saito, A. Akasegawa, T. Nakanishi, A. Kawakami, K. Yamanaka, K. Kurihara, and S. Ohshima, Power handling capability improvement of HTS filter with sliced microstrip line resonators, *Physica C*, 468, pp. 1954-1957, 2008.
- [2] Y. Endo, S. Ono, M. Uno, T. Saito, A. Saito, K. Nakajima, and S. Ohshima, Improvement in Power-Handling Capability of Superconducting Filters Using Multi-Layered Microstrip Line Resonators, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 21, No. 3, pp. 559-562, 2011.
- [3] Y. Tanaka, M. Akiya, H. Ishii, A. Saito, and S. Ohshima, Improving Power-Handling Capability of 4-Pole HTS Filters by Expanding Line Width of Resonator 2 with Narrow Slits, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23, No. 3, A. N. 1500504, 2013.
- [4] S. K. Remillard, A. Abdelmonem, P. O. Radzikowski, N. D. Lazzaro, D. S. Applegate, *J. Supercond.*, Field Deployable Microwave Filters Made from Superconductive Thick Films, Vol. 14, No. 1, pp. 47-56, 2001.
- [5] A. Saito, N. Sekiya, H. Teshima, H. Obara, Y. Noguchi, H. Hirano, S. Hirano, and S. Ohshima, Surface resistance measurement of modified QMG superconducting bulks, *Physica C*, 445-448, pp. 330-333, 2006. (ISS2005 招待講演論文)
- [6] A. Saito, R. Tsurui, T. Kato, K. Nakajima, H. Teshima, and S. Ohshima, 100-W-class superconducting transmit bandpass filter using thick disk resonator made with Gd-Ba-Cu-O single-crystal bulk, *Appl. Phys. Express*, Vol. 8, A. N. 043101, 2015. (第7回応用物理学学会超伝導分科会論文賞受賞論文)
- [7] T. Kato, A. Saito, R. Tsurui, H. Teshima, and S. Ohshima, Power-Handling Capability of Superconducting Filter Using Disk- and Ring-Type Bulk Resonator, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25, No. 3, A. N. 1501105, 2015.
- [8] R. Tsurui, T. Saito, T. Kato, H. Teshima, S. Ohshima and A. Saito, Power-Handling Capability of Superconducting Transmit Bandpass Filter When Number of Bulk Resonators Is Increased, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 26, No. 3, A. N. 1501004, 2016.
- [9] A. Saito, T. Saito, T. Saito, S. Kodama, K. Nakajima, and S. Ohshima, Trimming Mechanism of External Quality Factor in HTS Bandpass Filter using Bulk Resonators, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 4, A. N. 1500205, 2018.
- [10] C. Bin, Z. XueQiang, S. Liang, B. YongBo, G. Jin, L. ChunGuang, L. Hong, Z. Qiang, and H. YuSheng, A high-performance narrowband high temperature superconducting filter, *Chinese Sci Bull.*, Vol. 55, No. 14, pp. 1367-1371, 2010.
- [11] B. Yu, B. Jia, and Z. Zhu, A Novel Approach for Changing the Coupling Nature Between TE_{018} -Mode Dielectric Resonators, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 226-231, 2016.
- [12] T. Saito, S. Kodama, T. Saito, S. Ohshima, and A. Saito, Design of High Power Handling Filter Using Cascaded Quadruplet Superconducting Bulk Resonators, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 4, A. N. 1500704, 2018.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Power-Handling Capability of Superconducting Transmit Bandpass Filter When Number of Bulk Resonators Is Increased	IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, No. 3, A. N. 1501004	2016年6月
Trimming Mechanism of External Quality Factor in HTS Bandpass Filter using Bulk Resonators	IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, No. 4, A. N. 1500205	2018年6月
Design of High Power Handling Filter Using Cascaded Quadruplet Superconducting Bulk Resonators	IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, No. 4, A. N. 1500704	2018年6月
CST STUDIO SUITE による高周波デバイスの設計・開発例 ～超伝導とエレクトロニクス応用～	CST STUDIO SUITE User Group Meeting, pp. 1-13	2016年5月
電磁界解析ソフトを用いた高周波帯超伝導デバイスの設計～超伝導体をどのように取り扱うか～	第64回応用物理学会春季学術講演会, ランチョンセミナー	2017年3月
外部Q値調整機構を備えた送信用超伝導バルクフィルタの周波数特性の改善	2016年第77回応用物理学会秋季学術講演会, 15a-D61-8	2016年9月
超伝導バルク共振器を用いたCQ結合型送信用フィルタの設計	第71回応用物理学会東北支部学術講演会, 1pA11	2016年12月
CQ結合型8段超伝導バルク共振器を用いた送信用フィルタの設計	2017年第78回応用物理学会秋季学術講演会, 6p-S43-14	2017年9月