

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560393

研究課題名(和文)100W超級送信用超伝導フィルタの開発

研究課題名(英文)Development of 100 W-class superconducting transmit filter

研究代表者

齊藤 敦(Saito, Atsushi)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70313567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では次世代移動体通信のための100W超級送信用超伝導フィルタを開発すること目的として超伝導バルク共振器フィルタの設計・作製・評価を行った。フィルタ構造としてディスク型共振器が高耐電力に有効であることを明らかにした。また、5段ディスク共振器フィルタを設計・試作し126 Wという世界最高の耐電力特性を得ることができた。今回までの研究成果から、申請者が提案する超伝導バルク共振器フィルタは低損失、高耐電力、急峻なスカート特性を併せ持つ次世代送信用超伝導フィルタとして有望であることを明らかにできた。さらに多段化による諸特性の傾向が一般的な薄膜型と異なる点が新たな物理的興味として見出された。

研究成果の概要(英文)：100-W class superconducting transmit bandpass filters (BPFs) using high-temperature superconducting (HTS) bulks (Gd-Ba-Cu-O) for a next generation mobile communication system were studied. We found that a disk-type resonator has been useful for a higher power-handling capability (PHC). The 3- and 5-pole BPF were designed and fabricated. The highest PHC value of 126 W in the world was measured. From this research, our BPF with low-loss, high-PHC, and sharp skirt property will be useful for the 5th generation mobile communication system. And new physics which was different from the conventional phenomena of the thin-film BPF was found.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：高温超伝導 バルク マイクロ波 フィルタ 耐電力特性

1. 研究開始当初の背景

超伝導体は通常の金属導体に比べて高周波帯での損失が極めて少ないことから、その起源の調査研究と高周波デバイスへの応用研究が成されてきた。特に、受信用超伝導フィルタの研究が行われ、既に米国・中国で実用化されている。しかしながら、送信用超伝導フィルタは未だ実用化に至っておらず、学術的な研究課題も残っていた。更なる高速・大容量通信が望まれている高度情報化社会における移動体通信技術の進展のために、早急な送信用超伝導フィルタの研究開発とその実用化が望まれている。しかしながら、実用レベルのスペックは瞬時耐電力 100 W 以上が必要であると考えられており、研究開発当初までに達成報告例はなかった。

我々は、熔融法で作製した単結晶超伝導バルクの高周波損失(表面抵抗)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、高い臨界電流を持つ単結晶超伝導バルクが高周波デバイスへも応用可能であることを初めて示した。また、3次元電磁界解析シミュレータを駆使して5 GHz帯バルク共振器フィルタを設計し、熔融法により作製した単結晶超伝導バルクを用いてフィルタを試作してきた。これらの周波数特性及び耐電力特性の評価結果から、研究開始当初までに以下のような知見を得ていた。

- ① 円形ディスクを誘電体に埋め込む構造により高い共振の Q 値が得られる
- ② 基板材料には比較的安価なアルミナ(Al_2O_3)誘電体を使用可能
- ③ 共振器には単結晶超伝導バルクを使用し、個々の共振器を分割することが有効
- ④ 周波数特性の調整方法は誘電体・磁性体ロットリング法が有効
- ⑤ 超伝導バルクリング共振器を用いた3段フィルタの耐電力特性は25 W以上を示す

以上の知見に加え、これまでの実験結果と電流密度分布のシミュレーション結果からGd-Ba-Cu-Oディスク共振器フィルタは、耐電力100 W以上を達成できるという予想ができていたが、実験的な検証には至っていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、共振器に超伝導単結晶バルクを加工した共振器を採用することによって、実用化レベルである100ワット(W)超級の送信用フィルタを実現することを第1目標とした。また、共振器数を増加することにより急進なスカート特性をもつフィルタを設計・試作し、共振器数(段数)に対する耐電力特性の関係を明らかにすることを2つ目の目標とした。研究の進展の中で、共振器数と耐電力特性の関係が一般的な薄膜フィルタとは異なるというこれまでにない新たな現象を見出し、解析的、実験的な知見を得るとともに、物理的な解釈を得ることを目指した。

3. 研究の方法

目標とする送信用フィルタの開発として超伝導バルク共振器フィルタの設計と作製を行った。設計には全ての共振器の共振器間結合とすべての共振器の共振周波数の情報をマトリクス化し周波数特性を計算するソフトウェア(couple-Fil)と3次元電磁界シミュレータ(MW Studio)を用いた。フィルタの設計では、まず、最もシンプルで成果のあるチェビシェフ型(ストレート型)フィルタを採用した。これまでとの相違点は、誘電体基板を個々の共振器ごとに分離した構造を用いることにより各共振器間の余分な飛越結合を低減させたフィルタを実現できる点である。共振器に用いる超伝導バルクは新日本製鐵株式会社による熔融単結晶Gd-Ba-Cu-Oバルクを提供していただいた。また、超伝導バルクを誘電体基板に梱包するための加工アルミナ基板は京セラ株式会社にて購入した。周波数特性は20 K GM冷凍機付きチャンバーとベクトルネットワークアナライザを用いて評価を行った。フィルタには各共振器の共振周波数と結合係数を独立に変化可能なトリミングロッド機構を付加し、良好なフィルタ特性が得られるように低温で周波数特性を観測しながら調整が可能である。また、耐電力特性の評価については研究開始当初25 Wまで測定可能なシステムをすでに構築できていたが、本提案の目標達成のために100 Wのパワーアンプを本予算により購入し測定システムの改良を行った。

4. 研究成果

(1) 超伝導バルクフィルタの最適共振器形状
これまでの研究成果から、独立型構造による共振器形状を採用することで、不要飛び越し結合を抑制が期待できる。本研究では、独立型構造バルク3段ディスクフィルタと独立型構造バルク3段リングフィルタの設計・作製評価を行い、共振器形状による耐電力特性の差異を調査した。まず、フィルタの電流密度分布解析を行い、バルクディスクフィルタとバルクリングフィルタの耐電力特性の差異を予測した。図1にバルクディスクフィルタ及びバルクリングフィルタの電流密度分布解析結果を示す。中心周波数に1 Wの電力を入力した場合、バルクディスクフィルタとバルクリングフィルタの最大電流密度解析結果はそれぞれ、338 A/m、377 A/mが得られた。式(1)を用いて電流密度の比から耐電力特性の倍率を予測することができる。

$$P_{\text{disk}}/P_{\text{ring}} = (J_{\text{max ring}}/J_{\text{max disk}})^2 \quad (1)$$

ここで P_{disk} はバルクディスクフィルタの耐電力特性、 P_{ring} はバルクリングフィルタの耐電力特性であり、 $J_{\text{max ring}}$ はバルクリングフィルタの最大電流密度、 $J_{\text{max disk}}$ はバルクディスクフィルタの最大電流密度である。最大電流密度の解析結果より、ディスクフィルタの方が1.25倍高い耐電力特性を得ることが出来ると予測することができた。

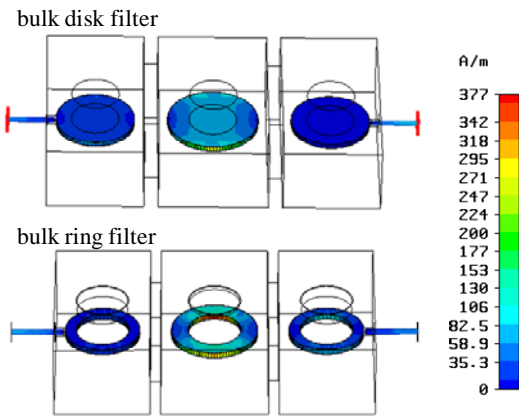


図1 電流密度分布解析結果

フィルタ設計を基に、単結晶超伝導バルク、アルミナ基板銅キャビティを作製後フィルタの作製を行った。単結晶超伝導バルクは、Modified Quench and Melt Growth (改良型 QMG 法)により作製した $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ であり、マイクロ波帯においても超伝導薄膜と遜色ない十分に低い表面抵抗を示すことがわかってきている。ベクトルネットワークアナライザを用いて作製したフィルタの周波数特性を測定した。

バルクディスクフィルタ及びバルクリングフィルタの周波数特性測定結果をそれぞれ図 2(a), (b)に示す。測定温度 $T = 20 \text{ K}$ において両フィルタともに、不要な飛び越し結合の無い良好なフィルタ特性を得ることができた。

次に、 $T = 20 \text{ K}$ におけるバルクディスクフィルタ及びバルクリングフィルタの耐電力特性測定結果を図 3 に示す。横軸の実効入力電力はフィルタの反射とケーブルのロスを含めて考慮し、実際にフィルタに入力された

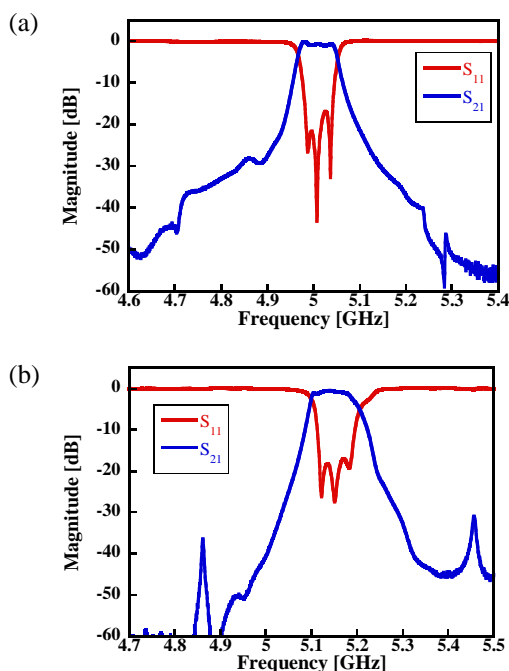


図2 周波数特性(a) disk filter, (b) ring filter

電力を意味している。また縦軸はフィルタから出力された電力である。本研究では共振器の超伝導体がクエンチする直前までの実効入力電力を耐電力と定義した。図 3 より、バルクディスクフィルタの耐電力は 41.7 W 、バルクリングフィルタの耐電力は 26.6 W であった。以上の結果から、ディスク共振器の方が耐電力特性に優れた共振器形状であることを実証することができた。しかし、測定結果ではディスク型フィルタの方が 1.55 倍高い耐電力特性となり、シミュレーションでの最大電流密度解析からの予測値 1.25 倍を超える値となった。この原因としては、シミュレーションによる予想は電流密度のみを考慮して耐電力の差異を予測しており、事実上の要因となる熱による影響を考慮していない。ディスク共振器はリング共振器に比べ共振器の表面積が大きく、また基板との熱接触が大きいこと高い耐電力特性を得ることができたと考えている。

以上の結果から、超伝導バルクフィルタの最適な共振器形状はディスク形状であることを明らかにできた。

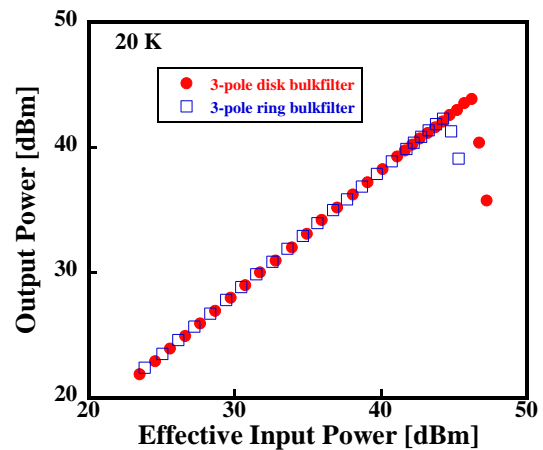


図3 耐電力特性の比較

(2) 3 段、及び 5 段フィルタの設計と評価

次に、独立型構造バルク 3 段ディスクフィルタと同 5 段フィルタの設計・作製評価を行い、段数増加によるフィルタ特性及び耐電力特性の差異を調査した。

ディスク型 5 段共振器フィルタを設計し、最大電流密度を計算した。図 4 に 5 段ディスク型共振器フィルタの電流密度分布のシミュレーション結果を示す。電流密度は中心の共振器の点線で示した部分で最大となり、 279 A/m であった。図 1 で示した 3 段フィルタの最大電流密度と式(1)を用いてフィルタの耐電力特性を計算すると、5 段ディスク型共振器フィルタは同 3 段フィルタに比べて約 1.47 倍以上の耐電力特性を示すことが推測できる。これまでの報告ではフィルタの耐電力特性は共振器の最大電流密度に関係し、薄膜型フィルタにおいてはでは共振器の多段化により最大電流密度は増加し、それに伴い耐電力特性は低下すると報告されている。

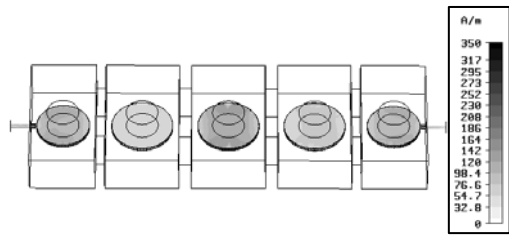


図4 電流密度分布のシミュレーション結果

従って、我々の提案するバルク共振器を用いたフィルタにおける電流密度分布と耐電力特性は、一般的な薄膜型共振器フィルタの多段化による耐電力特性の関係とは異なることが示唆された。

次に、設計を基にディスク型5段共振器フィルタを作製し、周波数特性及び耐電力特性を評価した。図5は $T=20\text{ K}$ における5段ディスク型共振器フィルタの周波数特性であり、明確なフィルタ特性が得られている。中心周波数 4.89 GHz となり、ほぼ目標の値を得た。一方、帯域幅 74.9 MHz 、挿入損失 $IL = -0.475\text{ dB}$ 、最大リターンロス $RL_{\max} = -11.2\text{ dB}$ となり、設計仕様とのずれが生じた。これらの原因として、共振器間距離及び給電線距離が設計と実装で誤差が生じていると考えられるため、今後の改善が必要である。またスカート特性は $4.98\text{ dB}/5\text{ MHz}$ となり、3段フィルタの $2.40\text{ dB}/5\text{ MHz}$ より $2.58\text{ dB}/5\text{ MHz}$ 向上した。したがって、実験的に共振器の多段化によりスカート特性が急峻になることを確認できた。

図6に耐電力特性の測定結果を示す。5段ディスク型共振器フィルタの入力電力 106 W まで、ほぼ線形性の出力電力が得られた。これまでに報告されている3段ディスク型共振器フィルタの耐電力特性 41.7 W と比較すると、5段フィルタの方が約2.54倍以上高い耐電力特性である。この値はこれまでに報告されている値と比較して、最も高い値であり、携帯基地局に応用可能な最終目標値の瞬時 100 W 以上を達成することができた。また、数度の追実験から良好な再現性を得ることができ、最大 126 W の耐電力特性が得られた。

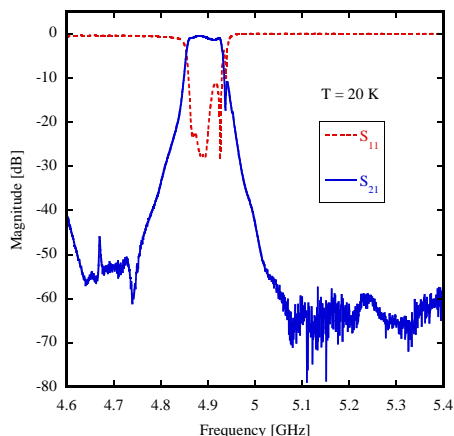


図5 5段ディスク型フィルタの周波数特性

一方で、この結果は一般的な薄膜フィルタの多段化による耐電力特性の傾向と異なっている。これは薄膜フィルタの基板が一体型構造なのに対し、バルクを用いたフィルタの基板は独立型構造であるため、電流集中が均等に分散していると考えられる。しかし明確な結論には至っていないため、バルクを用いたディスク型共振器をさらに多段化し、調査する必要がある。

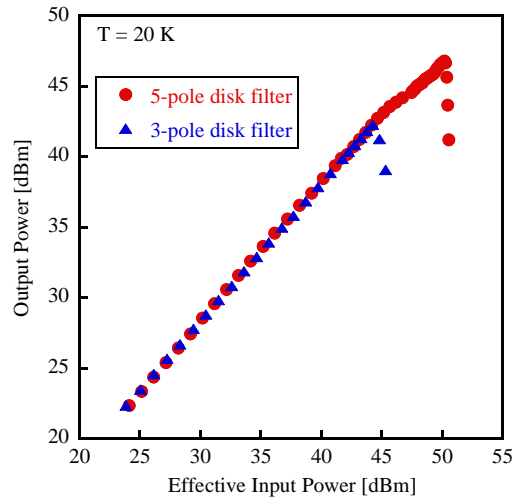


図6 3段及び5段フィルタの耐電力特性

(3) 多段フィルタの設計

本研究で提案した超伝導バルク共振器を用いることによって、これまでに達成できなかった 100 W 以上の耐電力特性を達成し、多段化による更なる耐電力特性の向上を示唆した。多段化によるスカート特性の向上が達成できれば、実用レベルの超伝導フィルタが実現できる。そこで、本研究では超伝導バルク共振器を用いた多段フィルタの設計を行った。設計では、Cascaded Quadruplet (CQ) 構造と呼ばれる飛越結合型フィルタを採用した。CQ 構造はマイクロ波フィルタ設計の分野では良く知られた構造であり、周波数特性に生じる極を利用することで、ほぼ2倍の段数に相当する急峻なスカート特性を実現できる。図7(a)は4段CQフィルタのフィルタトポロジーを示している。1~4は共振器を意味し、青実線が電界結合、赤点線が磁界結合を意味している。飛越結合は1-4間の電界結合で実現する。このようなトポロジーを基に、各結合強度を求め、これらを実現可能なフィルタ構造を最適化した。図7(b)は3次元シミュレーションモデルを示している。2-3間の磁界結合は、同軸線路の開放端により結合を実現し、この同軸線路の長さを調整することで磁界結合の調整を行った。また、S及びLはそれぞれ、入出力ポートを意味している。

図8は4段CQフィルタの周波数特性(シミュレーション結果)を示している。通過帯域の両側に減衰極が生じ、これにより急峻なスカート特性が得られた。

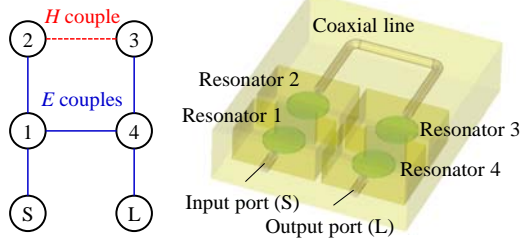


図7 4段CQフィルタのフィルタトポロジー(a)と3次元シミュレーションモデル(b)

次に、本申請の目標を達成するために、更なる多段化を試みた。図9は8段CQフィルタのトポロジーを示している。図10は8段CQフィルタのトポロジー解析結果であり、37 dB/5MHz という急峻なスカー特性を得ることができた。

以上の結果から、超伝導バルク共振器とCQ構造によって急峻なスカー特性を持つフィルタが実現可能であることを明らかにできた。

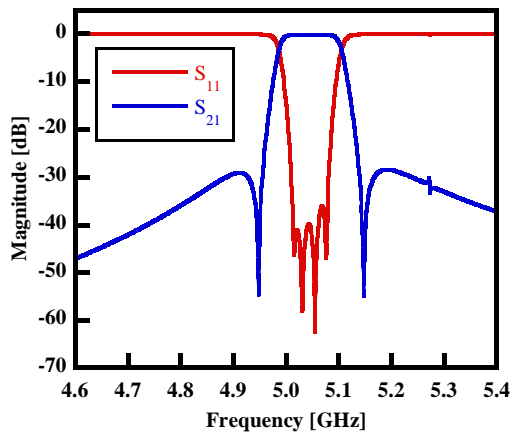


図8 4段CQフィルタの周波数特性

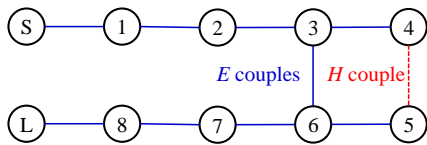


図9 8段CQフィルタトポロジー

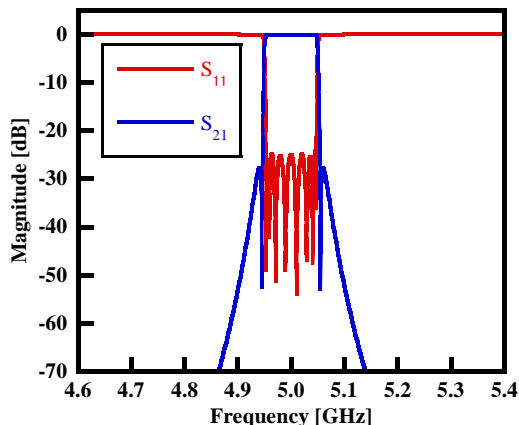


図10 8段CQフィルタの周波数特性

最後に、本研究の具体的な数値目標と、研究成果のまとめを表1に示す。目標とした9段フィルタとスカー特性はシミュレーションにより達成し、その他は実験においても達成できた。特に、5段フィルタにおいて、100W超の耐電力特性が得られたことは特に強調したい成果であった。

表1 本研究の数値目標と研究成果のまとめ

項目	最終研究目標	研究成果	
		シミュレーション	実験
フィルタ段数	9	8(16段相当)	5
挿入損失 [dB]	-1.0	-0.17	-0.475
中心周波数/帯域幅 [GHz]	5/0.1 ± 10%	5.03/0.116	4.89/0.0749
スカー特性 [dB/5MHz]	30	37	4.98
耐電力特性 [W]	40	-	106
相互干渉歪 [dBc]@10W	70	-	70

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計16件)

1. **A. Saito**, R. Tsurui, T. Kato, K. Nakajima, H. Teshima, and S. Ohshima, 100-W-class superconducting transmit bandpass filter using thick disk resonator, Applied Physics Express, 8, 43101 (2015). 10.7567/APEX.8.043101. (査読あり)
2. T. Kato, **A. Saito**, R. Tsurui, H. Teshima, and S. Ohshima, Power-Handling Capability of Superconducting Filters Using Disk- and Ring-Type Bulk Resonators, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, 1501105 (2015). 10.1109/TASC.2014.2377251. (査読あり)
3. **A. Saito**, K. Nakajima, K. Hayashi, Y. Ogawa, Y. Okuyama, D. Oka, S. Ariyoshi, H. Yamada, T. Taino, C. Otani, J. Bae, and S. Ohshima, Relationship between Loaded Quality Factor and Responsivity for NbN-Based MKIDs using Dual-Function Spiral Strip, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, 2401204 (2015). 10.1109/TASC.2014.2367459. (査読あり)
4. A. Kuroda, **A. Saito**, and S. Ohshima, Design and Fabrication of Compact HTS Duplexers Using a CQ Structure With a High Q_u Resonator, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, 1500304 (2015). 10.1109/TASC.2014.2364456. (査読あり)
5. S. Ohshima, S. Takahashi, M. Endo, and **A. Saito**, Improvement of power-handling capability of superconducting filters using 3D-matrix microstrip lines, Journal of Physics: Conference Series, 507, 042027-042030 (2014). 10.1088/1742-6596/507/4/042027. (査読あり)
6. K. Hayashi, **A. Saito**, Y. Ogawa, M. Murata, T. Sawada, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, T. Taino, H. Tanoue, C. Otani, and S. Ohshima, Design and Fabrication of Microwave Kinetic Inductance Detectors using NbN

- Symmetric Spiral Resonator Array, Journal of Physics: Conference Series, 507, 42015-42018 (2014). 10.1088/1742-6596/507/4/042015. (査読あり)
7. K. Sato, S. Sato, K. Ichikawa, M. Watanabe, T. Honma, Y. Tanaka, S. Oikawa, **A. Saito**, and S. Ohshima, Dependences of microwave surface resistance of HTS thin films on applied dc magnetic fields parallel and normal to the substrate, Journal of Physics: Conference Series, 507, 042045-042048 (2014). 10.1088/1742-6596/507/1/012045. (査読あり)
 8. 杉山俊輔, **齊藤 敦**, 大嶋重利, 關谷尚人, スタブ装荷ヘアピン共振器を用いた超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタの設計, 低温工学学会誌, 49, 534-540 (2014). 10.2221/jcsj.49.534. (査読あり)
 9. H. Ishii, T. Kimura, N. Kobayashi, **A. Saito**, Z. Ma, S. Ohshima, Development of UWB HTS Bandpass Filters With Microstrip Stubs-Loaded Three-Mode Resonator, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, 1500204 (2013). 10.1109/TASC.2012.2232697. (査読あり)
 10. Y. Tanaka, M. Akiya, H. Ishii, **A. Saito**, 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, 1500504 (2013). 10.1109/TASC.2012.2234189. (査読あり)
 11. M. Akiya, T. Tatsunokuchi, **A. Saito**, S. Ohshima, Development of IMD3 Measurement System Around 5 GHz Using HTS Notch Filters, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, 1500804 (2013). 10.1109/TASC.2012.2236139. (査読あり)
 12. S. Sato, T. Honma, S. Takahashi, K. Sato, M. Watanabe, K. Ichikawa, K. Takeda, K. Nakagawa, **A. Saito**, S. Ohshima, Introducing Artificial Pinning Centers Into YBCO Thin Films to Improve Surface Resistance in a DC Magnetic Field, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, 7200404 (2013). 10.1109/TASC.2012.2233849. (査読あり)
 13. T. Honma, S. Sato, K. Sato, M. Watanabe, **A. Saito**, K. Koike, H. Kato, S. Ohshima, Microwave surface resistance of YBCO superconducting thin films under high DC magnetic field, Physica C, 484, 46-48 (2013). 10.1016/j.physc.2012.03.035. (査読あり)
 14. J. Muryari, N. Kobayashi, S. Takahashi, K. Hayashi, **A. Saito**, S. Ohshima, Fabrication process of YBCO thin starting from amorphous film for microstrip line device, Physics Procedia, 27, 280-283 (2012). 10.1016/j.phpro.2012.03.465. (査読あり)
 15. M. Konno, T. Sawada, M. Murata, A. Kawakami, **A. Saito**, S. Ohshima, Fabrication and evaluation of hetero-epitaxial multilayer films of Nb/Ain/Nb/NbN for SIS junction, Physics Procedia, 27, 304-307 (2012). 10.1016/j.phpro.2012.03.471. (査読あり)
 16. N. Sekiya, K. Yamamoto, S. Kakio, **A. Saito**, S. Ohshima, Effect of coupling state on power handling capability of HTS, Physics Procedia, 27, 328-331 (2012). 10.1016/j.phpro.2012.03.477. (査読あり)
- [学会発表] (計 12 件)
1. 鶴井椋太, **齊藤 敦**, 加藤知己, 齋藤大暉, 手嶋英一, 大嶋重利, 超伝導バルク共振器を用いた 100 W クラス
 - 送信用フィルタの開発, 応用物理学会, 2015 年 03 月 15 日, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県, 相模原市).
 2. 鶴井椋太, **齊藤 敦**, 加藤知己, 齋藤大暉, 手嶋英一, 大嶋重利, 超伝導単結晶バルク共振器を用いた 100W 級送信用フィルタの開発, 超伝導エレクトロニクス研究会, 2015 年 01 月 14 日, 機械振興会館 (東京都).
 3. 加藤知己, **齊藤 敦**, 鶴井椋太, 手嶋英一, 大嶋重利, ディスク型・リング型超伝導バルク共振器フィルタの耐電力特性比較, 電子情報通信学会, 2014 年 03 月 18 日, 新潟大学 (新潟県, 新潟市).
 4. 黒田晃弘, **齊藤 敦**, 大嶋重利, 超伝導 CQ フィルタを用いたデュプレクサの設計と評価, 超伝導エレクトロニクス研究会, 2014 年 04 月 17 日, 機械振興会館 (東京都).
 5. 黒田晃弘, 塚三洋, **齊藤 敦**, 大嶋重利, 高無負荷 Q 共振器を用いた小型超伝導分波器の設計, 応用物理学会東北支部大会, 2013 年 12 月 05 日, 山形大学 (山形県, 米沢市).
 6. 加藤知己, **齊藤 敦**, 鶴井椋太, 手嶋英一, 大嶋重利, 独立型構造 3 段ディスク超伝導バルクフィルタの作製と評価, 応用物理学会東北支部大会, 2013 年 12 月 05 日, 山形大学 (山形県, 米沢市).
 7. 佐藤敬介, 市川光, 今野正貴, **齊藤 敦**, 大嶋重利, 応用物理学会東北支部大会, 2013 年 12 月 05 日, 山形大学 (山形県, 米沢市).
 8. K. Sato, S. Sato, K. Ichikawa, M. Watanabe, T. Honma, Y. Tanaka, S. Oikawa, **A. Saito**, S. Ohshima, Dependences of microwave surface resistance of YBCO, 11th European Conference on Applied Superconductivity, 2013 年 09 月 15 日~2013 年 09 月 19 日, イタリア (ジェノバ).
 9. 加藤知己, **齊藤 敦**, 鶴井椋太, 手嶋英一, 大嶋重利, ディスク共振器を用いた 3 段超伝導バルクフィルタの作製と評価, 応用物理学会, 2013 年 09 月 17 日, 同志社大学 (京都府, 京都市).
 10. 杉山俊輔, 關谷尚人, 秋谷守紀, 田中佑斗, 黒田晃弘, **齊藤 敦**, 大嶋重利, スタブ装荷ヘアピン共振器を用いた超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタ, 超伝導エレクトロニクス研究会, 2013 年 04 月 19 日, 機械振興会館 (東京都).
 11. 澤田俊宏, 村田光茂, 林賢人, 田中希, 小川祐平, 高橋峻平, 塚三洋, **齊藤 敦**, 大嶋重利, a 面及び r 面サファイア基板上での高品質 Nb 薄膜の作製と評価, 応用物理学会東北支部大会, 2012 年 12 月 07 日, 東北大学 (宮城県, 仙台市).
 12. 高橋峻平, 秋谷守紀, **齊藤 敦**, 大嶋重利, 3 次元マトリクス路線を用いた超伝導フィルタの高耐電力化, 秋季低温工学・超伝導学会, 2012 年 11 月 08 日, 岩手大学 (岩手県, 盛岡市).

[その他]

ホームページ

<http://www.ohshima-lab.yz.yamagata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 敦 (SAITO Atsushi)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 70313567