

接触熱抵抗の測定

○佐々木 知依^{a)}

^{a)} 高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

物体と物体が接触しているときに、その接触面での伝熱を正しく評価することはなかなか難しい。接触面での伝熱には、接触面の表面粗さ、物体の硬さ、物体の熱伝導率、接触圧力などが主に効いてくる。実際の物体を使って接触における伝熱の実験装置を製作した。

その背景には、私の直面した問題があった。J-PARC 加速器の新しいビーム診断装置の開発において、その真空容器内でのビームの作る電磁場と構造による高周波の共振の問題があった。その対策に真空中に誘電体である炭化珪素(SiC)と磁性体であるフェライトを挿入し高周波を吸収させた[2,3]。これらの吸収体での電磁波吸収による発熱は、そのサポートである固定シリンダを通じて大気に放熱されるが、この伝熱において吸収体とサポートの接触熱抵抗が問題となった。われわれは、この接触面に柔らかくかつ薄い純アルミニウムのシート挟むことで、接触熱抵抗を減じる方法を取ることにしたが、その効果を定量化する必要があった。

本論文ではこれらの実際のマテリアルと接触の条件

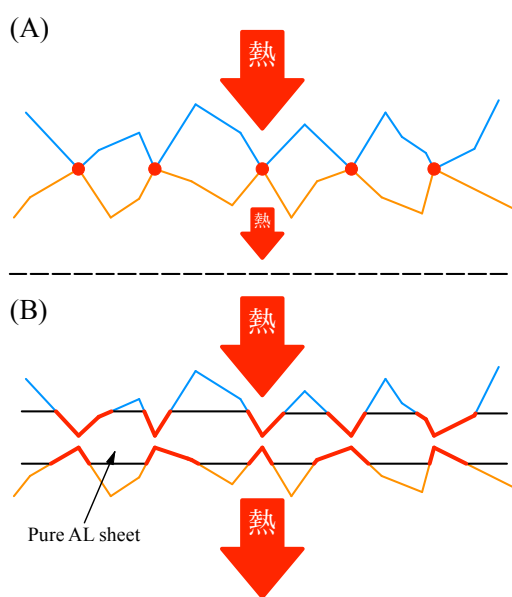


図1 接触熱抵抗の概念図 (a: 接触媒体がない場合, b: 柔らかく薄い接触媒体がある場合)。

における接触熱抵抗の測定方法とその評価を述べる。

2. 接触熱抵抗とは

図 1(A)は拡大した接触面のイメージ図である。接触する2つの物体の間に熱の流れがある場合、見かけの接触面積よりも真実接触面積が小さいことが多く、接触熱抵抗が大きくなる。接触熱抵抗は接触圧力、物体の硬度、熱伝導率、表面粗さ、接触圧力によって変化する。熱抵抗を減じるには、低硬度にする、高熱伝導率にする、表面粗さを小さくする、接触圧力を高めることが有効になる。また、図 1(B)のように柔らかく、かつ薄く、熱伝導率の高い物質を接触媒体として挟むことも有効である。

3. 伝熱の検討モデル

伝熱の検討モデルを図2に示す。SiCセットでは1セットあたり4個のSiCブロック(寸法: $65 \times 65 \times 30 \text{ mm}^3$)、フェライトセットでは1セットあたり49個のフェライトコア(寸法: 外径16 mm, 内径9 mm, 高さ28 mm)が、柔らかい純アルミシート(厚み $106 \mu\text{m}$) [3]を挟んで、サポートのシリンダにアルミボルトで固定されている。シリンダは SUS304 で吸収体取り付け部の板厚は20 mmである。実際は電磁波吸収により吸収体自体が発熱するが、このモデルでは吸収体の真空側端面から入熱し、シリンダを通して大気側(30°Cに固定)に放熱させる。

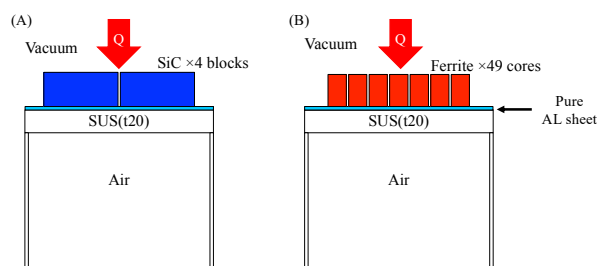


図2 伝熱の検討モデル (A: SiC セット, B: フェライトセット)。

4. 接触熱抵抗の測定

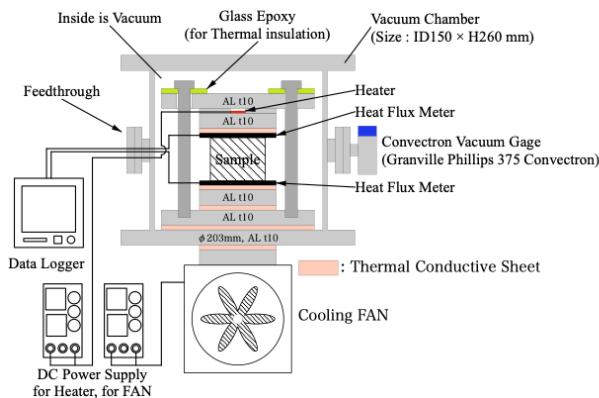


図3 熱抵抗測定装置の全体図。

まず、この実験のために製作した真空中における熱抵抗を評価する装置について説明する(図3)。試料の熱抵抗 R [K/W] は試料を通過する熱流束 Q [W/m²] と熱流束流入部の温度 T_{in} [°C]、流出部の温度 T_{out} [°C] の差を測定することで、 $R=Q/\Delta T$ で算出できる。図3に示す測定装置は試料への熱流束流入部と流出部において、それぞれの熱流束と温度を測定するシステムである。熱流束は試料の上部にあるセラミックヒーター(40 W)で発生させる。熱流束は下方に流れ、ヒーターの下には発生した熱流束を一樣に拡散させるために厚み5 mmのアルミ板を配置し、その下にサーモパイルを用いた熱流束計[4](江藤電気、M55B、50×50×t0.85 mm³)を通して試料を配置した。試料の下流部は、同じ熱流束計を置き、その下に熱拡散用のアルミ板と、チャンバ底板、大気側に取り付けた放熱のための冷却扇(CPUファン)で構成されている。試料の接触面の加圧は、これらの測定部を上下のアルミ板(150×150×t10 mm)で挟み、4本のボルト(M8、ステンレス製)によるプレス機構で行う。締め付けトルクと接触圧の関係は測定部をロードセルに置き換えて校正した。これらの測定セットは、真空容器(寸法: ID150×H260 mm、ICF70ポート付き)に収め、スクロールポンプで排気した。真空圧力はコンベクトロンゲージで測定し、実験中の圧力は10 Pa程度であった。ヒーターの加熱開始から1~2時間程度後に、温度と熱流束が定常状態になってから測定を行っている。

次に、実際の試料と接触媒体の熱抵抗測定について述べる。図4(A)がその測定のセットアップであり、DUTは本装置で使用する電磁波吸収体のSiC、フェライト、シリンダ材質のSUS304である。接触媒体はアルミシート(昭和電工、厚さ106 μm、熱伝導率237 W/mK[5])である。測定される熱抵抗 R_{TOT} は、熱流束計の熱抵抗

($2 \times R_{HFM}/2$)、接触媒体と熱流束計の接触熱抵抗($2 \times R_{AL-HFM}$)、接触媒体の熱抵抗($2 \times R_{AL}$)、接触媒体と試料との接触抵抗($2 \times R_{AL-DUT}$)、試料の熱抵抗(R_{DUT})の合計となる。

$$R_{TOT} = 2 \frac{R_{HFM}}{2} + 2R_{AL-HFM} + 2R_{AL} + 2R_{AL-DUT} + R_{DUT} \quad (1)$$

これらの各熱抵抗値を独立して扱うことができない。このため、前もって図4(B)の測定により、熱流束計の熱抵抗($2 \times R_{HFM}/2$)、接触媒体と熱流束計の接触熱抵抗($2 \times R_{AL-HFM}$)、接触媒体の熱抵抗(R_{AL})の和を測定しておき、式(1)から減じた。これにより接触媒体と試料との接触熱抵抗($2 \times R_{AL-DUT}$)、試料の熱抵抗(R_{DUT})の合計を得た。熱流束計とDUTの熱抵抗はそれぞれの熱伝導率、断面積、厚みから計算したものをを用いた。尚、DUTの断面積は、SUS304ブロックの断面は熱流束計と同じサイズ50×50 mm²であるが、SiCブロックは断面形状が65×65 mm²であり熱流束計より大きかった。フェライトは外径16 mm×内径9 mm×高さ28 mmのトロイダルコア5つを熱流束計間に挟んでおり、その断面積は熱流束より小さかった。上記の熱抵抗の算出方法において、SUS304とSiCブロックでは熱流束計の断面積50×50 mm²を用いた。

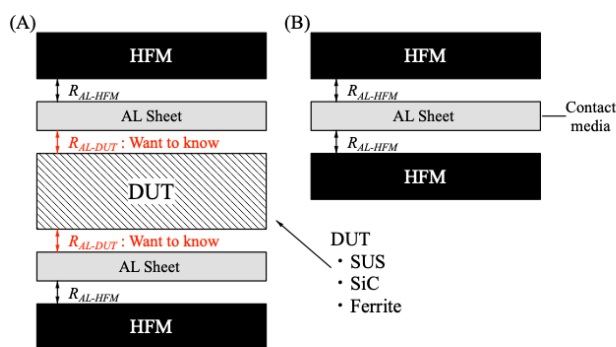


図4 熱抵抗測定部の拡大図 (A: ALシート-DUT間の測定用, B: ALシート-熱流束計間の測定用)。

5. 測定結果

接触熱抵抗の算出に用いた断面積 S 、厚み t 、熱伝導率 λ [5-7]、上下の熱流束計間の熱抵抗測定値 R 、接触圧 P と、算出したDUTとアルミシートの接触熱抵抗 r 、接触熱抵抗率 r^* を表1にまとめた。接触圧 P は、プレス機構のナットの締結トルクを増していき、 R_{TOT} がほとんど変化しなくなったときの値である。接触熱抵抗率は、小さい順にSiC、SUS、フェライトとなった。

表1 熱抵抗測定の結果

DUT	R [K/W] (Include AL)	P [MPa]	S [mm ²]	t [mm]	λ [W/(mK)]	r [K/W] (Contact)	r^* [K m ² /W]
SUS304	0.057	6.33	2500	25	16	0.029	5.81×10^{-5}
SiC	0.015	6.33	2500	30	170	0.013	3.18×10^{-5}
Ferrite (Scores)	0.49	5.78	685	28	3.5	0.46	3.15×10^{-4}

フェライトの接触熱抵抗は他2つと比較してやや大きく、SiCと比較すれば約10倍大きかった。フェライトでは他と比べて粗面がやや粗いことと、熱伝導率がSiCの2%程度と小さいことが原因と考えられる[3]。

6. 温度上昇の見積もり

次に、これらの結果を基に実際に装置で使用した時の吸収体の温度上昇を見積もった。見積もりでは、開発中のビーム診断装置の電磁波シミュレーション[1]から見積もられる吸収体全数（6ポート）でのパワロス11Wが、1つのポートに集中して発生する場合を想定した。図5がその結果である。SiCとフェライトそれぞれで接触媒体のアルミシート無し[3]の場合と有りの場合の温度差を計算した。SiCの接触部の温度差はアルミシート無しで0.32℃、有りで0.38℃であった。アルミシートの有無でほぼ同じ温度差だった。これは、SiCブロックの接触面が表面粗さRa0.8まで研磨されており、アルミシート無しでも理想的に密着した接触の場合には、良好な熱接触が期待できることを意味している。フェライトの接触部の温度差は、アルミシート無しで9.4℃、有りで5.3℃であった。アルミシートを入れることで、温度差をおよそ半分まで小さくすることができた。これはフェライトの接触面の表面粗さが大きいために接触熱抵抗が発生するが、柔らかいアルミシートによって接触面積を増やすことで接触熱抵抗を有意に小さくできることを意味している。実際の診断装置においても伝熱の改善となり、電磁波吸

収体での入熱許容量を大きく取れることにつながった。

7. まとめ

実験装置を自作し、真空中での接触熱抵抗を評価した。また、物体との接触媒体に柔らかい純アルミニウムのシートを用いる場合の接触熱抵抗の低減効果を、SiC、フェライト、SUS304について評価した。その結果、特に接触面が粗い物体の場合に大きく接触熱抵抗を低減する効果があることがわかった。

今回の評価で比較したアルミシート無しでの接触熱抵抗は計算値を使用した。今後は、それを測定して実験値としての比較を行いたい。また、装置は汎用的な装置として他の人達も使用できるように整備を進めたい。

参考文献

- [1] Y. Hashimoto et al., “Development of A Wide Dynamic-Range Beam Profile Monitor Using OTR And Fluorescence For Injected Beams In J-PARC Main Ring (2)”, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki Online, Japan Aug.2021, pp481-485; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP024.pdf
- [2] T. Sasaki et al., “Development of A Wide Dynamic-Range Beam Profile Monitor Using OTR And Fluorescence For Injected Beams In J-PARC Main Ring (3)”, Proc. PASJ2022, Online (Kyushu University), Oct. 2022, pp560-564; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEP0/WEP020.pdf
- [3] T. Sasaki et al., “Development of A Wide Dynamic-Range Beam Profile Monitor Using OTR And Fluorescence For Injected Beams In J-PARC Main Ring (4)”, Proc. PASJ2023, Chiba (Nihon University), Aug. 2023, pp282-286;
- [4] 江藤電気株式会社, “熱流センサー” http://www.etodenki.co.jp/ht_flux/index.htm
- [5] JSME, 伝熱工学資料 改訂第5版, 2009; pp.281-285; ISBN 9784888981842
- [6] クアーズテック, “CERASIC®-B 常圧焼結SiCセラミ

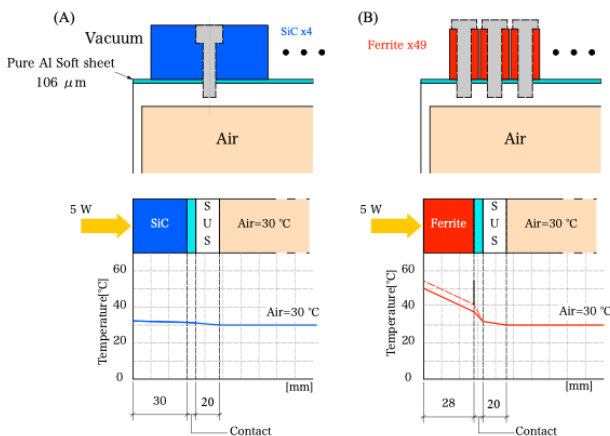


図5 温度上昇の見積もり (A: SiC の場合, B: フェライトの場合, 点線: AL シート無し, 実線: AL シート有り)

ックス”

<https://www.coorstek.com/jp/industries/general-industrial-products/ceramic-b-normal-pressure-sintered-ceramics/>

- [7] S. Terui et al., “Development of ferrite higher order mode absorber for SuperKEKB vacuum system”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 1053, Aug. 2023.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900223003613>