

超電導体の電磁氣的・熱的現象の複合シミュレーション

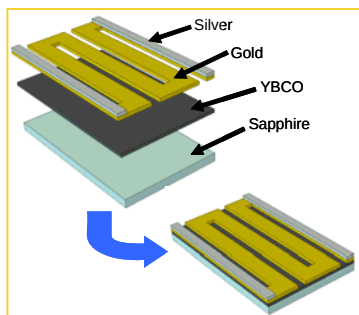
■複雑な物理現象のシミュレーション

超電導状態は臨界電流 J_c 、臨界磁場 B_c 、臨界温度 T_c という 3 つの物理パラメータのバランスで成り立っていて、非常に複雑かつ非線形性の強い現象です。これらの物理現象を詳細にシミュレーションする技術はまだ確立されておらず、応用・学術の両面から非常に魅力のある研究分野です。

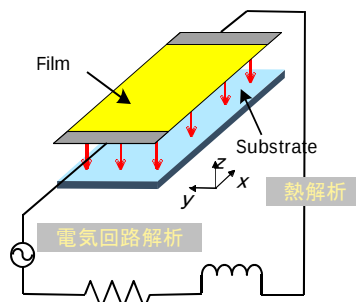
■超電導限流器の解析

工場などの産業施設に落雷が起こり、施設内の電力系統に過度の電流が流れて機器の破損が起こると生産ラインに大きな損失が出てしまいます。このような際に超電導限流器が活躍します。超電導体はある冷却温度で流せる電流の値が決まっています（臨界電流値）、この値を超えると抵抗値が非常に高くなり、流れる電流が激減します。超電導限流器はこの特徴を利用します。すなわち、落雷で電力系統内に大電流が流れた際に、超電導限流器が常電導状態に転移し、流れる電流の量を制限します。これにより、生産ライン全体に過度の電流が流れるのを防ぎ、機器類を保護することが可能です。しかし、大電流が流れた時に超電導部分で起こる物理現象を把握するため、様々な角度からのアプローチが必要です。

本研究室では、「ミアンダ型」と呼ばれる形式の超電導限流器に注目し、学生自身の手により解析モデル、及び物理的な支配方程式を構築し、解析プログラムを開発しています。これを用いることにより、電磁界、熱、電気回路を組み合わせた連成解析を行っています。



(a) ミアンダ型超電導限流素子



(b) 解析モデル

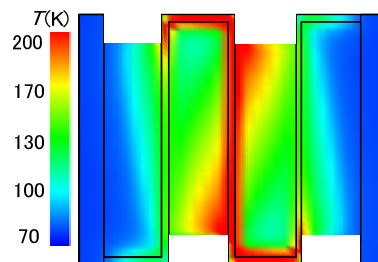
$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$\mathbf{T}$: Current Vector potential
($\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}$) ρ : resistivity

$$\rho_m c \frac{\partial T}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\}$$

ρ_m : mass density c : specific heat
 k : thermal conductivity

(c) 支配方程式（上：電磁現象，下：熱現象）



(d) 自作プログラムによる解析結果

図 1：ミアンダ型超電導限流機の概要とそのシミュレーション手法

■高温バルク超電導体のパルス着磁

高温バルク超電導体は、コンパクトで強力な磁石としての応用が期待されています。着磁する方法の一つとして、超電導体に外部からパルス磁界を加えて捕捉させる、パルス着磁法があります。パルス着磁は、電磁界と熱が複雑に絡み合う現象であり、補足される磁界の強度や分布は、印加磁界や冷却条件に大きく依存します。シミュレーションにおいては、超電導体の持つ電気特性の非線形性や、非一様性、その温度依存性なども考慮する必要があります。

本研究室では、有限要素法と呼ばれる手法を用いて、磁界や温度の分布の解析を行っています。解が速やかに収束しない場合も多く、解析には様々な工夫が必要です。一方で、超電導体内部の分布など、実測が難しい様々な情報を得ることができます。

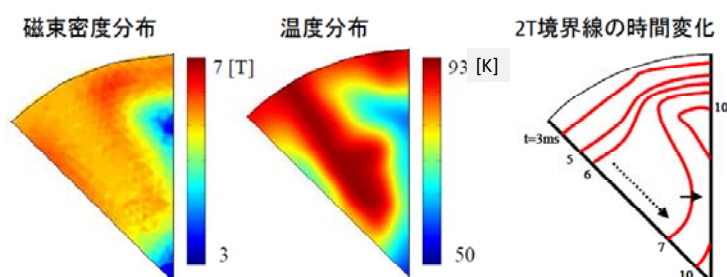


図 2：高温バルク超電導体のパルス着磁における電磁界と熱の連成解析

■発表文献

1. H. Ohsaki, M. Sekino, and S. Nonaka: "Characteristics of Resistive Fault Current Limiting Elements using YBCO Superconducting Thin Film with Meander-shaped Metal Layer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.19, No.3, pp.1818-1822, 2009.
2. Y. Ichiki and H. Ohsaki: Numerical analysis and design of fault current limiting elements using large-size YBCO thin films, Physica C: Superconductivity, Vol.463-465, pp.1168-1171, 2007.
3. Y. Ichiki and H. Ohsaki: Influence of Inhomogeneous Superconducting Properties of YBCO Thin Film on Current Limiting Characteristics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.17, No.2, pp.1811-1814, 2007.
4. Y. Komi, M. Sekino, and H. Ohsaki, "Three-dimensional numerical analysis of magnetic and thermal fields during pulsed field magnetization of bulk superconductors with inhomogeneous superconducting properties," Physica C - Superconductivity and Its Applications, vol. 469, pp. 1262-1265, 2009.
5. R. Shiraishi and H. Ohsaki, "Flux dynamics in inhomogeneous bulk superconductor during pulsed field magnetization," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, pp. 1794-1797, 2006.