

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 極低温機器の 温度を監視する

超電導磁石の非破壊検査技術の一つとして、光ファイバーを用いて極低温機器内部の温度を監視する技術を開発しています。光ファイバーによる温度センサーのメリットとして、1本のセンサーで多点を測定することができる、多数の銅線を配線する必要がないため冷却容器内部への熱侵入量が少ない、光ファイバーはガラスであるため電気絶縁性が高い、原理的に電磁ノイズに強い、などが挙げられます。極低温機器への適用にあたって実施した感度向上方策及び各種確認試験結果について紹介します。

## はじめに

超電導磁気浮上式鉄道における超電導磁石は在来鉄道の輪軸と電動機の一部に相当する機能を持つ重要な装置であるため、その異常を検知して、大きな故障が発生しないようにする必要があります。しかし、超電導磁石は溶接構造の金属製の外槽に覆われており、解体検査が難しく、内部構造も複雑で既存の非破壊検査技術が適用しにくいのが現状です。このため、このような超電導磁石に適用できる非破壊検査技術の開発が必要です。

特に、実用化されつつある高温超電導磁石は、液体ヘリウム温度(4.2K)より高い温度で、かつ液体窒素温度(65K~77K)より低い温度域で使用されるため冷凍機による伝導冷却が主流になると考えられますが、伝導冷却の場合は超電導磁石内部に温度分布がついてしまうため、内部の温度監視を行う必要があると考えられます。

図1に示すように、光ファイバーを用いると、多点の温度を1本のファイバーで測定できるため、極低温機器の内部温度分布の監視に便利です。ここでは、極低温での感度向上のための方策として、熱膨張率の大きい材料を温度センサー部にコーティングした光ファイバーの測定結果、また、使用環境の検証として、超電導コイルに光ファイバーを設置して温度上昇するまで通電した場合の温度測定結果、リニア車両の走行に伴う振動と同等の振動を与えた場合の温度測定への影響確認結果について述べます。また、これまで検討を進めてきたFBG (Fiber Bragg Grating) 方式に加え、一般的なものとは異なる原理で温度測定がで



**山田 秀之**  
Hideyuki Yamada  
浮上式鉄道技術研究部  
低温システム研究室  
主任研究員  
[専門分野] 超電導工学



**小方 正文**  
Masafumi Ogata  
浮上式鉄道技術研究部  
低温システム研究室  
主任研究員  
[専門分野] 超電導工学



**水野 克俊**  
Katsutoshi Mizuno  
浮上式鉄道技術研究部  
低温システム研究室  
研究員  
[専門分野] 超電導工学



**長嶋 賢**  
Ken Nagashima  
浮上式鉄道技術研究部  
部長  
[専門分野] 超電導工学

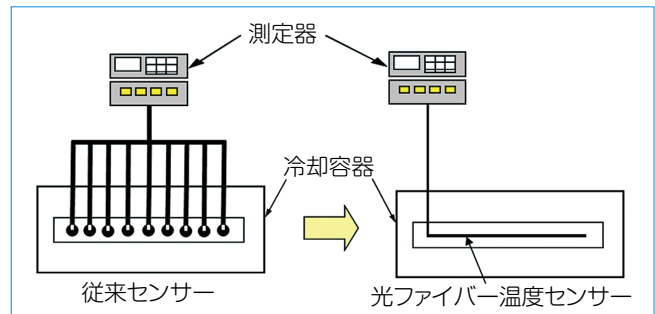
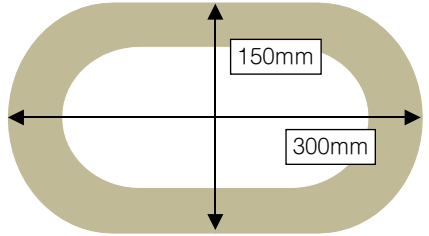


図1 多点温度測定従来センサーと光ファイバー温度センサーの比較

表1 光ファイバーとコーティング材料の物性比較

	ファイバー	アクリル	ニッケル	銅	亜鉛
熱膨張率 (50K) [10 <sup>-6</sup> /K]	0.054	16.2	1.7	3.65	15.2
ヤング率 [GPa]	70	3.3	207	110	96.5
熱伝導率 (室温) [W/m/K]	1.5	0.2	90	398	121

表2 高温超電導コイル仕様

線材タイプ	YBCO(MOCVD)/Hastelloy
線材幅/厚さ	4.1mm/0.1mm
線材長さ	100m
内径	100mm
外径	150mm
直線部長さ	150mm
ターン数	143ターン
外形寸法	

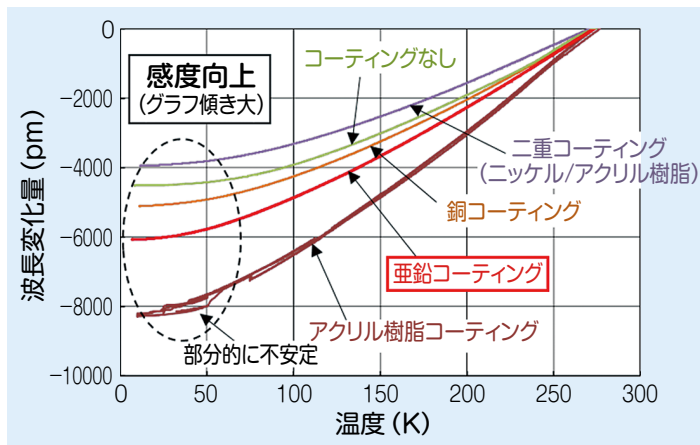


図2 コーティングなしと各種コーティングの特性比較

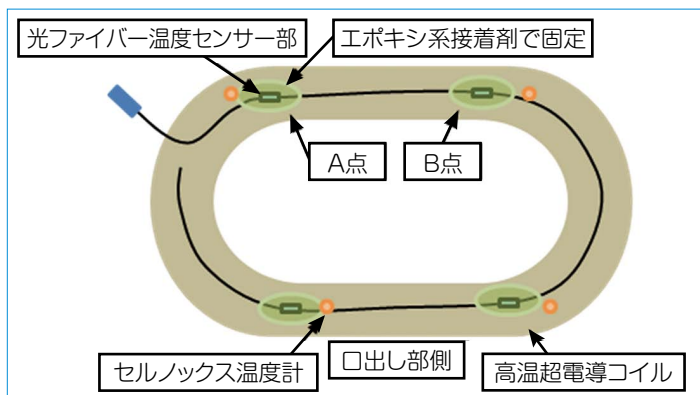


図3 高温超電導コイルへの光ファイバー及びセルノックス温度計設置図

きる分布型による極低温での温度測定結果、「熱シミュレーター」を用いた実機大の模擬コイルの温度測定結果についても説明します。

### 感度向上

FBG方式の光ファイバー温度センサーは、温度変化すると、温度センサー部であるFBG部のグレーティング間隔が熱伸縮で変化するため、入射した光がFBG部で反射して戻ってくる反射光の波長が変化します。この波長変化量と温度との関係より温度を測定することができます。しかし、50K程度以下の極低温になると、光ファイバーの材料である石英ガラス及びその被覆材の熱膨張率が小さくなるため、波長変化量も小さくなり、感度が低下します<sup>1),2)</sup>。

Frövelら及びRajnikumarらは、ステンレスチューブをFBG部に取り付けて接着する方法、アルミニウム、銅、鉛、インジウムといった金属をFBG部にコー

ティングする方法などを提案し、これらの中ではアルミニウムとインジウムの二重コーティングで高い感度が得られていますが、大きく向上していません。

私たちはこれらの研究を踏まえ、さまざまな材料の熱膨張率とヤング率から感度向上を予測して、アクリル樹脂、ニッケル、銅、亜鉛を選定しました。表1に、光ファイバーに用いている石英ガラスと選定した材料の熱膨張率及びヤング率、また参考として、熱伝導率を示します。コーティング光ファイバーを測定した結果、図2のグラフに示すように、コーティングなしに対して、アクリル樹脂で約6.4倍感度が向上しましたが、熱伝導率が低いため出力が不安定でした。しかし、安定出力を得ることを目的として、アクリル樹脂の上にニッケルをコーティングした二重コーティングで約1.3倍、安定出力と大きい熱膨張率の両方が得られる銅で約1.86倍、亜鉛で約3倍感度向上が得られました。

### 超電導コイル通電温度測定

超電導コイルは外部からの擾乱(熱や振動など)の要因により超電導状態から常電導状態に移行するクエンチが発生する可能性があります。どこで発生するか予測できないスポット的な温度上昇を起点にクエンチが発生し得ることから、その温度上昇を光ファイバー温度センサーで検知できるかどうかを検証するため、超電導コイルに光ファイバー温度センサーを設置して温度上昇するまで通電した場合の温度測定を実施しました。

表2に示す仕様的高温超電導コイル<sup>3)</sup>に、FBG方式の光ファイバー温度センサーを沿わせて、FBG部をエポキシ系接着剤で固め、FBG部近傍に極低温領域で正確な測定が可能なセルノックス温度計を設置して、伝導冷却により冷却し、高温超電導コイルに電流を通電しました。図3に光ファイバー及びセルノックス温度計を設置した状態

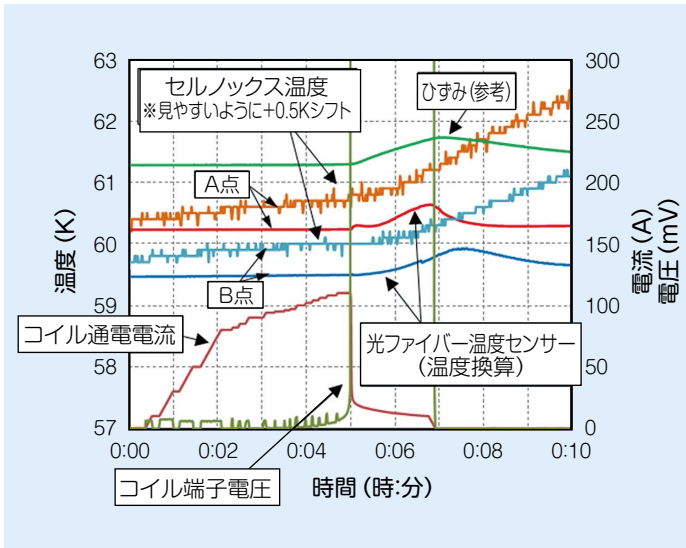


図4 高温超電導コイル温度測定結果

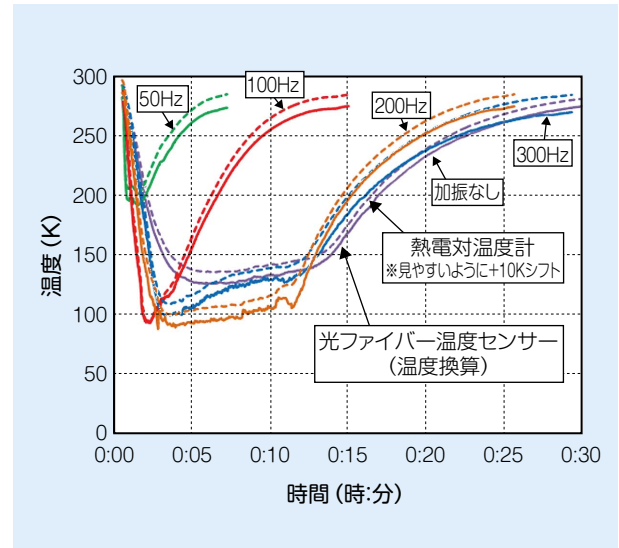


図5 機械加振試験温度測定結果

の模式図を示します。

図4に測定結果を示します。なお、光ファイバー温度センサーの出力は、セルノックス温度計の温度と波長変化量の関係から換算した温度で示しています。コイルを60K以下に冷却した後、コイルに電流を通電し徐々に上げていったところ、110Aで熱暴走して、コイル端子電圧が上昇し、セルノックス温度計の温度、光ファイバーの出力とも上昇し始めました。セルノックス温度計の温度が上がり続けているのに対して光ファイバー温度センサーの出力が途中から下がっているのは、コイルを固定しているアルミ板が熱収縮したためと考えられます。いずれにしても、コイル内の温度上昇開始を光ファイバー温度センサーにより検知できることがわかりました。ただ、原理上、温度変化とひずみ変化の区別ができないこともわかりました。

### 機械加振試験

超電導磁気浮上式鉄道の超電導磁石は車両に搭載され、地上コイルとの磁気吸引・反発により車両が推進・浮上します。高い敷設精度で設置されてい

る地上コイルですが、離散的に設置されていますので、走行に伴う車両の振動が発生します<sup>4)</sup>。

一方、光ファイバー温度センサーは温度変化に伴う熱伸縮によるひずみを検知することで温度を測定していることから、振動による温度測定への影響を確認しました。

液体窒素を注入してから蒸発するまで温度を変化させた場合の加振試験を実施しました。光ファイバーのFBG部をアルミ板にアルミテープで貼り付け、その近傍温度を熱電対により測定しました。加振試験は、振動加速度約100m/s<sup>2</sup> (10G)で、振動周波数を50, 100, 200, 300Hzと変えて実施しました。

図5に測定結果を示します。なお、光ファイバー温度センサーの出力は、熱電対の温度と波長変化量の関係から換算した温度で示しています。この結果より、光ファイバー温度センサー出力は、熱電対による温度測定値とよく合っていることから、加振してもその影響は小さいことがわかりました。

よって、正確な温度測定ではなく、超電導磁石内部の温度異常を監視するための使用目的であれば、問題なく

使用できるレベルと考えます。なお、200Hzと300Hzの条件で、光ファイバー温度センサー出力の一部に見られる若干の脈動は、熱電対温度にも若干の脈動が見られることから、注入した液体窒素が振動により踊ったために発生したと考えられます。

### 分布型光ファイバー

光ファイバー温度センサーは「多点型」と「分布型」の2種類があり、これまで多点型であるFBG方式の開発を進めてきましたが、一般的なものとは異なる原理で温度測定できる分布型の光ファイバー温度センサーについて、極低温での出力確認を実施しました。

FBG方式がFBG部に設けたグレーティングで光を反射するのに対して、分布型の場合は、グレーティングなどの加工が一切ない光ファイバーを使用するため、入力した光は光ファイバー内で散乱光として反射します。散乱光にはいくつかの種類があり、これまで一般に使用されているのはブリルアン散乱光ですが、約100K以下で周波数の変化量が温度低下につれて減少し、約50K以下では逆に周波数が増えて、

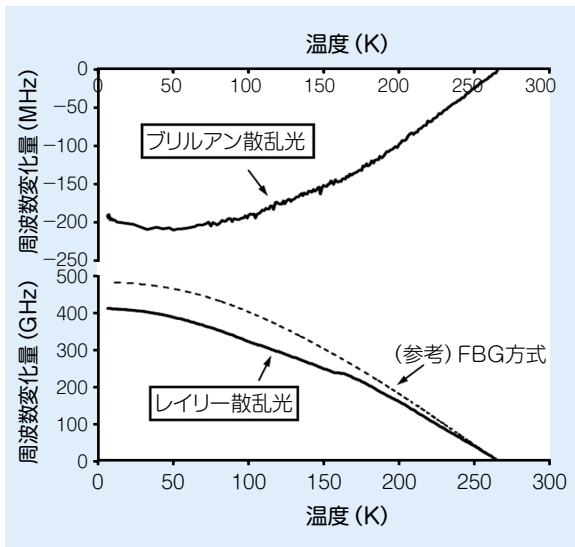


図6 分布型光ファイバー低温特性測定結果

1つの周波数に対応する温度が2つ存在するため、極低温では使用できないことがわかりました。それに対して、レイリー散乱光は、さまざまな周波数成分がランダムに入っているためこれまで使用されていませんでしたが、極低温での出力を確認した結果、図6に示すように、レイリー散乱光を用いた方式は、温度と周波数変化量は1対1の関係であり、どの温度においても単調変化であることを確認し、極低温での温度測定ができることがわかりました。なお、原理的に温度とひずみを独立に測定できます<sup>5)</sup>。

### 熱シミュレーター温度測定

FBG方式及び分布型両方について、実機大高温超電導磁石内部の温度測定を検証するため、超電導コイルを模擬したSUS製コイルを冷却してクライオスタット内の温度分布を模擬する「熱シミュレーター」を用いて、ニューブレクス社との共同研究により模擬コイルの温度分布測定を実施しました。

大きさ約1,210mm×約610mmの実機大模擬コイルにFBG方式及び分布型用光ファイバー、FBG部近傍にセル

ノックス温度計を設置し温度変化する過程の温度を、ニューブレクス社の測定器NBX-7020などで測定しました。

図7にFBG方式及び分布型の測定結果を示します。なお、コイル内のある点の約290Kから約60Kの範囲における温度と光ファイバーの出力変化量の関係を示しています。FBG方式、分布型のブリルアン、レイリーとも実機大であっても約60Kまで問題なく測定できることがわかりました。

### おわりに

光ファイバー温度センサーについて、極低温での感度向上、超電導コイル通電温度測定、機械加振試験、熱シミュレーター温度測定を実施して、光ファイバーが超電導磁石の内部温度を監視する手段として使用可能であることがわかりました。また、FBG方式に限らず、分布型も使用できることがわかり、今後、それぞれの特徴を生かした使い方を検討していきたいと思います。光ファイバーの今後については、実際の超電導コイルを使用した超電導磁石内部に組み込んで検証していくことと、低温での測定精度向上、長尺光ファイ

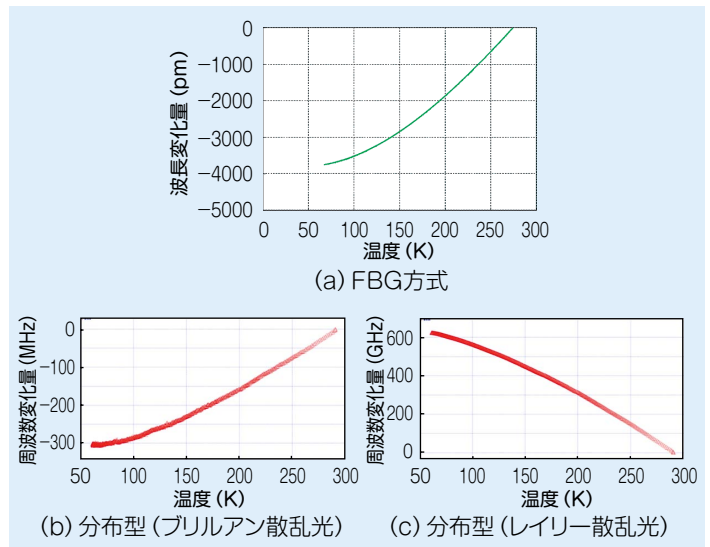


図7 熱シミュレーター温度測定結果

バーの安定的な測定方法の検討に取り組んでいきます。

なお、本研究の一部は国土交通省からの補助金を受けて実施しました。

RRR

### 文献

- 1) 山田秀之, 田中芳親, 小方正文, 水野克俊, 奥村昌平, 寺田佳弘, 長嶋賢: 極低温での光ファイバ温度センサの感度向上, 低温工学誌, Vol.47, No.2, pp.96-102, 2012
- 2) 山田秀之, 小方正文, 水野克俊, 長嶋賢: 光ファイバを用いた極低温機器の温度測定技術の開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.5, pp.23-28, 2012
- 3) 小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓, 長嶋賢: 冷却システムと励磁電源が分離可能なRE系モビルマグネット, 春季低温工学・超電導学会, 3C-a01, 2010
- 4) 脇耕一郎, 清野寛, 岩松勝: 浮上式鉄道用超電導磁石の機械加振試験(2)～推進・浮上同時加振のための予備試験～, 春季低温工学・超電導学会, 1P-p20, 2008
- 5) 高見涼太郎, 山内良昭, 岡林泰広, 岸田欣増, 小湊健太郎, 濱田衛: 光ファイバ分布計測技術による極低温下の温度測定, 秋季低温工学・超電導学会, 1P-p08, 2011