

# 極低温環境での光ファイバ温度測定の感度向上

山田 秀之\* 水野 克俊\* 小方 正文\*

## Improvement of the Sensitivity to Temperature of Optical Fiber Sensor at Cryogenic Temperature

Hideyuki YAMADA Katsutoshi MIZUNO Masafumi OGATA

We are developing a technique to measure the temperature by making use of an optical fiber sensor inside the superconducting magnet adopting high-Tc superconducting wire. It is possible to measure the temperatures at multiple points by one optical fiber, instead of setting the conventional temperature sensors at each measuring point. Also, the optical fiber sensor is suitable for measuring the temperature inside the cryogenic equipment because of the merits of low heat invasion into it and high voltage insulation. In order to develop the optical fiber temperature sensor which can measure the temperature with high precision at cryogenic temperature and under vibration and magnetic field, we carried out various experiments, such as improvement of the sensitivity to temperature using zinc-plated coating and the durability test by mechanical vibration, the operation check of TDM (Time Division Multiplexing) type, the fabrication of low-cost zinc-plated optical fiber.

キーワード：光ファイバ、極低温機器、温度測定、超電導磁石、感度向上

### 1. はじめに

実用化されつつある高温超電導磁石は、20～77K程度の温度で使用可能であるため冷凍機による伝導冷却が主流になると考えられ、内部温度の監視が必要である。この温度監視に光ファイバ温度センサを使用することを検討しているが、低温になると光ファイバの材料である石英ガラスの熱膨張率が小さくなり、光ファイバ温度センサの測定原理から、感度が低下してしまうことになる<sup>1) 2)</sup>。これまでの検討の結果、熱膨張率の大きい材料であるアクリル樹脂の上に、熱伝導率の大きい材料であるニッケルを二重にコーティングすることで、コーティングなしに対して約1.3倍の感度が得られた。更なる感度向上を目指し、銅の場合で約1.86倍、亜鉛の場合で約3倍の感度が得られた。亜鉛を更に厚くコーティングした光ファイバ温度センサも製作して極低温での温度依存性を確認した。

また、光ファイバ温度センサを使用するにあたって、その環境で使用可能かを検証することは必要不可欠である。超電導磁気浮上式鉄道において超電導磁石は車両に搭載され<sup>3)～6)</sup>、車両走行に伴う振動を受ける。そのため、光ファイバ温度センサの振動に対する耐久性を確認した。

2012年5月号の鉄道総研報告<sup>7)</sup>にて、光ファイバ温

度センサを用いた極低温機器の温度測定技術について、その必要性、方式と原理、適用イメージ、確認試験結果と感度向上方策を報告した。また、2013年10月号のRRR<sup>8)</sup>にて、更なる感度向上方策、超電導コイル通電時の温度測定、機械加振試験による振動環境下での出力確認、レイリー散乱光を用いた分布型光ファイバ温度センサと熱シミュレータ内部の温度測定結果を報告した。今回は、更なる感度向上を目指した方策と、超電導磁気浮上式鉄道の超電導磁石に搭載されることを想定し、振動環境下での耐久性確認を実施した。また、これまで実施してきた波長分割方式より、温度差が大きくても測定可能で信頼性の高い時分割方式の確認試験と、低コストを目指した亜鉛めっき光ファイバを試作したので、これらの結果について報告する。

### 2. 光ファイバ温度センサの感度向上

光ファイバ温度センサは、入射した光の反射波の波長が、温度変化に伴う光ファイバの熱伸縮により変化するため、その変化量から温度を測定することができる。このような測定原理のため、低い温度では光ファイバの材料である石英ガラスの熱膨張率が小さくなるため、光ファイバの熱伸縮量が少なくなるに伴って、波長変化量も少なくなるにより感度が低下することになる。低温でも感度が大きく低下しない方策として、低温においても熱膨張率が比較的大きい材料を光ファイバ表面に

\* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

コーティングすることにより、その材料の熱伸縮に伴って光ファイバを熱伸縮させることを考えた。これまでの報告<sup>1) 2) 7) 8)</sup>では、熱膨張率の大きい材料であるアクリル樹脂の上に熱伝導率の大きい材料であるニッケルを二重にコーティングした光ファイバ温度センサを製作し、温度依存性を確認した結果、例えば20～50K間のグラフの傾きを比較すると、コーティングなしのセンサに対して約1.3倍となり、感度が向上した。今回、熱伝導率の大きい金属のみをコーティングした光ファイバ温度センサでは、銅または亜鉛をコーティングすることにより感度が向上した。また、更なる感度向上を目指して、これまでで最も感度が高く安定した出力の得られた亜鉛を、更に厚くコーティングした光ファイバ温度センサを製作して低温での温度依存性を確認した。

2.1 コーティング材料の選定

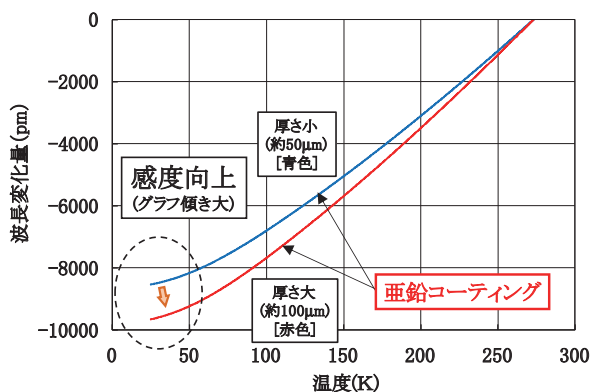
アクリル樹脂をコーティングした光ファイバは、例えば20～50K間のグラフの傾きを比較すると、コーティングなしのセンサに対して約6.4倍であり、前述のアクリル樹脂の上にニッケルを二重にコーティングしたものより感度向上が大きい。しかし、一部の波長変化が安定せず、再現性が良くなかった。これは、光ファイバの熱伸縮による影響と、アクリル樹脂の熱伝導率が石英ガラス及びニッケルより小さいため、一様に熱が伝わらないことによる影響が考えられる。また、アクリル樹脂の上にニッケルを二重にコーティングした光ファイバは、熱伝導が良いために波長変化が安定しているが、感度はアクリル樹脂のみより向上しなかった。これはヤング率の大きいニッケルがアクリル樹脂の熱伸縮を抑制しているためと考えられる。

上記のことから、低温での熱膨張率が大きく、かつ熱伝導率の大きい材料を検討して銅と亜鉛を選定し、亜鉛コーティングにおいて高い感度向上が得られた。また、図1に示すように((a)は波長変化量の温度依存性を、(b)は同じデータの波長変化率の温度依存性を示している)、計算結果よりコーティング厚さが厚いほど感度が向上することがわかっている。表1に、光ファイバ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熱伝導率を示す。

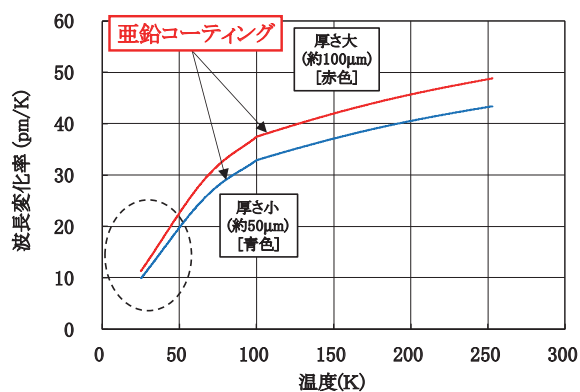
2.2 試験結果

感度向上方策の効果確認試験には、多点型光ファイバ温度センサを用いた。この多点型は、1本の光ファイバに複数形成されているFBG部と呼ばれる温度センサ部に生じた温度変化を検出する測定方式であり、FBG方式とも呼ばれる。FBGとは、Fiber Bragg Gratingの略で、光ファイバコアに周期的な屈折率変化を有する回折格子を形成したデバイスである。

このFBG部に銅または亜鉛をコーティング、また、



(a) 波長変化量の温度依存性



(b) 波長変化率の温度依存性

図1 亜鉛コーティング光ファイバ計算値比較

表1 各材料の熱膨張率，熱伝導率

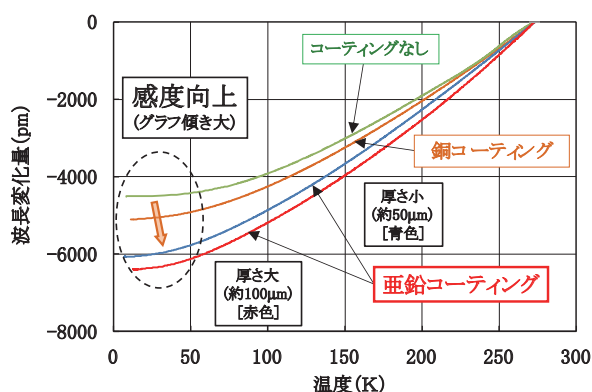
	石英ガラス	アクリル樹脂	ニッケル	銅	銀	亜鉛
熱膨張率 × 10 <sup>-6</sup> /K at 50K	0.054	16.2	1.7	3.65	8.04	15.2
熱伝導率 W/m・K at R.T.	1.5	0.2	90	398	427	121

亜鉛を厚くコーティングした光ファイバ温度センサを製作して、冷却試験により効果を確認した。

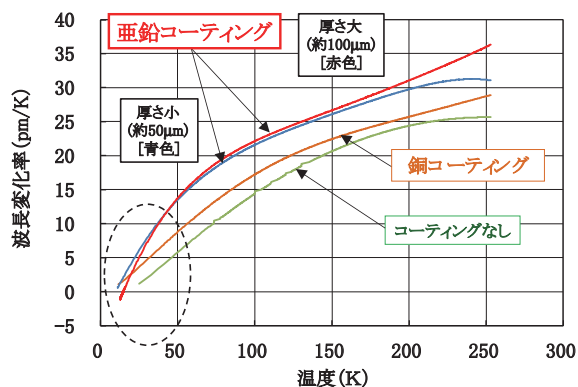
最初の亜鉛コーティング厚さが約50µmに対し、2倍の約100µmの厚さをコーティングしたFBG部を持つ光ファイバ温度センサを製作した。比較として、抵抗温度センサもFBG部を設置した同じ箇所を設置した。冷却容器内を真空排気した後、冷凍機の伝導冷却により冷却板を室温から約10Kまで冷却して、その後、冷凍機を停止して自然放置により室温まで昇温した。

図2に、測定した結果を示す。図1と同様に(a)は波長変化量の温度依存性を、(b)は同じデータの波長変化率の温度依存性を示している。

この結果より、例えば20～50K間(図2(a)の点線で囲んだ範囲)のグラフの傾きを比較すると、コーティングなしに対して、銅では約1.86倍、亜鉛では約3倍に感度が向上した。また、厚膜亜鉛では、計算ではコーティング厚さを50µmから100µmにすることで、25～



(a) 波長変化量の温度依存性



(b) 波長変化率の温度依存性

図2 コーティング光ファイバ温度測定結果

50K 間の波長変化量、25K での波長変化率とも約 1.15 倍になるが、実測したデータでは、厚さが約 2 倍になっても感度はほぼ同じであった。

光ファイバに厚さ約 100 $\mu\text{m}$  の亜鉛コーティングを行った FBG 部を数箇所製作したが、設置における作業ミス等により、1 箇所のみでの測定結果しか得られなかったため、今後、複数箇所の測定を行って精査していく予定である。ただし、2 倍に厚膜化しても効果は低くならないということがわかった。

### 3. 機械加振による耐久性確認

光ファイバ温度センサは、通常のポリイミド被覆の部分は直径 0.15mm で非常に細くできている。また、低温での感度を向上するためにコーティングするのは温度センサ部である FBG 部のみで、隣の FBG との間はポリイミド被覆であるため、FBG 部にコーティングした場合、コーティング部と非コーティング部の界面での断線が懸念される。

光ファイバ温度センサは、超電導磁石内部の温度監視のために開発しているセンサであり、冒頭で述べたように、超電導磁気浮上式鉄道において超電導磁石は車両に搭載され、走行に伴う振動により断線しないかを確認し

ておく必要がある。

よって、加振装置を用いて光ファイバ温度センサの機械加振試験を実施し、振動に対する耐久性を確認した。

#### 3.1 試験方法

図 3 に、加振装置の概要図を示す。

光ファイバ温度センサを機械加振装置に設置して、上下方向に最大振動加速度  $\pm 15\text{G}$ 、加振周波数 80Hz の振動を、断線するまで、もしくは 556 時間経過するまで加振した。556 時間はリニア車両の運転パターンを仮定して、走行 15 年相当で共振速度に滞在する時間を積算したものである。なお、加振試験は連続ではなく、1 日 1.0 ~ 7.5h の範囲で実施し、その累計時間を加振時間とした。

温度センサ部である FBG 部以外は、保護のために、低温環境でも使用可能なフッ素樹脂チューブを設置した方が良いと考えているが、光ファイバ温度センサとフッ素樹脂チューブとの接触部で断線する懸念があるため、一部にフッ素樹脂チューブを設置して加振した。

故障の判断は、光ファイバ温度センサに、可視赤光源を入射し、コネクタの反対側の先端から光が出るかどうかで行った。

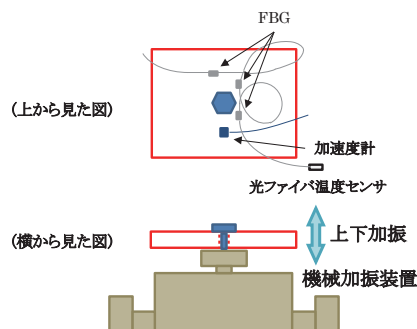


図3 光ファイバ温度センサ加振試験概要図

#### 3.2 試験結果

最初の加振試験において、480 時間でコネクタの根元が断線した。これは光ファイバ全体に対して、コネクタの重量比が大きいためであり、コネクタを確実に固定する必要のあることがわかった。

次に、コネクタを確実に固定した状態で再度実施し、556 時間加振しても変化がなかった。よって、コネクタをしっかりと固定しておけば、15 年相当のリニア走行による振動を与えても、断線しないことが確認できた。

### 4. 時分割方式

図 4 に WDM 方式と TDM 方式の原理図を示す。

波長分割である WDM 方式は、温度センサ部である FBG 部からの反射光の波長の違いで位置を特定する方式である。1 本の光ファイバで多点の温度測定を行う

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

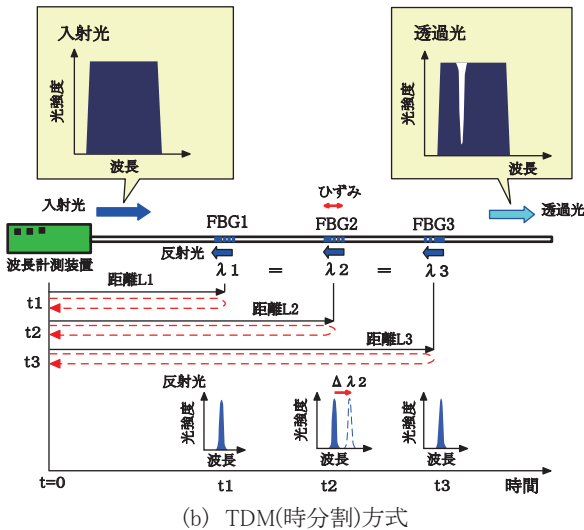
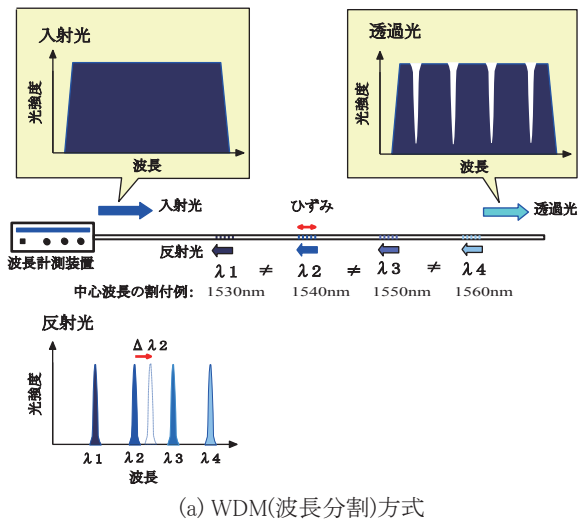


図4 WDM方式とTDM方式の原理図

場合、測定可能な波長範囲は決まっているため、FBG部毎の波長の刻み幅が小さくなる。よって、1本の光ファイバの中で温度分布の勾配が大きくなると、異なるFBG部で同じ波長の反射光が戻ってくる可能性があり、位置の特定が困難になる。

それに対して、時分割であるTDM方式は、FBG部からの反射光が戻ってくる時間で位置を特定する方式であり、FBG部毎の反射光の波長をずらす必要はなく、異なるFBG部の波長が重なっても位置の特定が困難になることはない。また、そのために1本の光ファイバにWDM方式より多数のFBG部を設けることが可能で、更に同一の波長で良いため、システム設計が単純となり、FBG部の製造とシステム設計に関わる費用を低減することができる。しかし、反射光の戻ってくる時間差で位置を特定するためにFBG間距離をある程度長くする必要があります。

このWDM方式とTDM方式の違いを、液体窒素を用いた温度変化試験で確認した。

4.1 試験方法

図5に試験装置の概要図を示す。アルミ板上に光ファイバ温度センサと熱電対をテープで貼り付けて、液体窒素を用いて冷却させる試験を実施した。

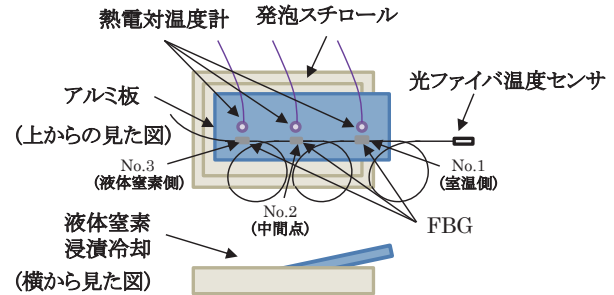


図5 液体窒素を用いた温度変化試験概要図

4.2 試験結果

図6にWDM方式で測定した結果を示す。グラフは光ファイバ温度センサ出力である波長変化量と熱電対による温度の時間変化を示している。

図7にTDM方式で同様に測定した結果を示す。この結果より、WDM方式はTDM方式と比較すると波形が歪んでおり、No.2とNo.3の結果は出力された波長が重なってしまったためにTDM方式とは全く異なる値を示していることがわかる。それに対して、TDM方式は3点とも比較的滑らかで良好な出力が得られている。なお、

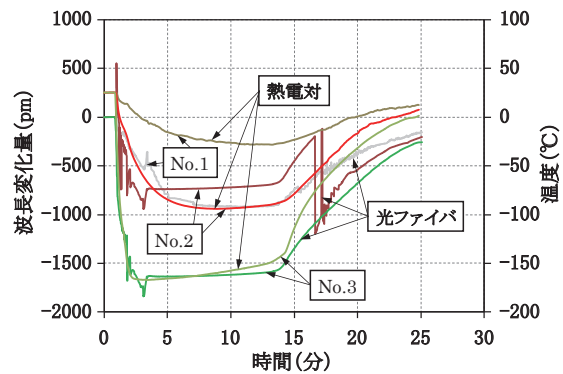


図6 WDM方式の温度変化試験結果

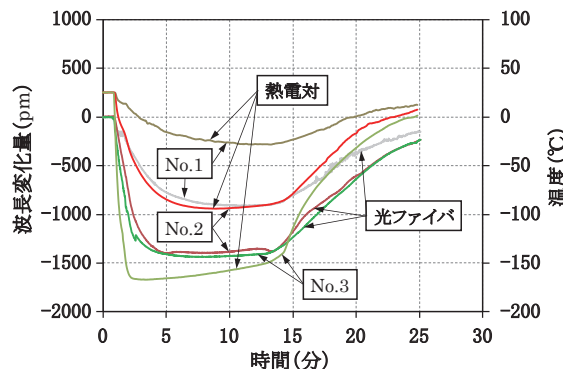


図7 TDM方式の温度変化試験結果

No.2 と No.3 の波長変化量が、温度が異なるにもかかわらずほぼ同じ値であるのは、各 FBG 部で温度に対する波長変化量の値が異なるためと考える。

TDM 方式は FBG 間距離を長くする必要があるが、FBG 部の反射光の波長をずらす必要はなく、異なる FBG 部の波長が重なって位置の特定が困難になることがないため、WDM 方式より温度差が大きくても測定でき、信頼性が向上することがわかった。

## 5. 亜鉛めっきの低コスト化

感度向上のための亜鉛コーティングについて、低コスト化を目指し、亜鉛を電気めっきするための下地金属のコーティングにスパッタリングを用いずに、無電解ニッケルめっきによる方法で試作を行い、光ファイバと亜鉛コーティングの接着性を確認した。

### 5.1 試験方法

無電解ニッケルめっきを施した後に亜鉛めっきした光ファイバ(以下、「亜鉛めっき光ファイバ」)を試作し、コーティングした層が温度変化しても光ファイバから剥がれないことを確認するため、液体窒素に浸けて、目視確認と引張試験を実施した。

なお、亜鉛めっき光ファイバが製作可能かどうかを確認するための試作であるため、FBG 部を持たない短い光ファイバを用いた。

また、試作にあたって、以下のことがわかった。

- (1) アルカリ系エッチングまたはふっ素系エッチングにより光ファイバ表面の前処理を行った後、無電解ニッケルめっきを行い、通常と比較的容量の大きいめっき用電源を用いて、亜鉛めっきを行った。その結果、表面が平滑にならずに凹凸のある状態になった。
- (2) 次に、ふっ素系エッチングにより光ファイバ表面の前処理を行った後、無電解ニッケルめっきを行い、微小電流の流せる精密電源を用いて、亜鉛めっきを行った。その結果、表面の凹凸は少なくなったが、平滑な表面にはならなかった。
- (3) さらに、前処理の薬品を強アルカリ性の硝酸にしたところ、表面が平滑になった。

### 5.2 試験結果

図 8 に、液体窒素に浸けた後の亜鉛めっき光ファイバの写真を示す。

液体窒素に浸けた結果、目視では異常は認められず、コーティングした層が剥離することはなかった。また、図 9 に示すような、光ファイバと亜鉛コーティングの界面の引張試験では、2 本の光ファイバの亜鉛コーティング部分をエポキシ樹脂で固め、それぞれの光ファイバの

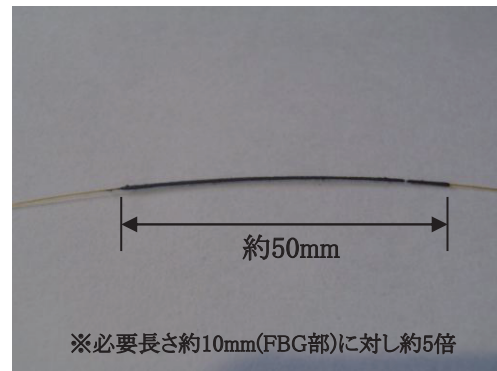


図 8 液体窒素浸漬後の亜鉛めっき光ファイバ

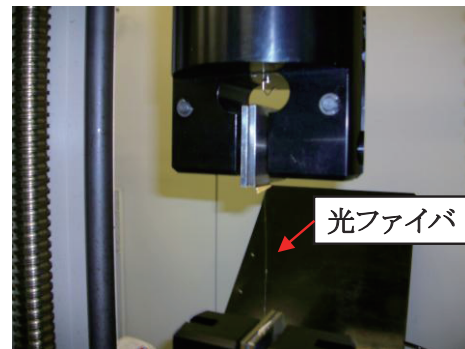


図 9 光ファイバと亜鉛コーティングの界面の引張試験

両端を引っ張ったところ、11.3N でエポキシ樹脂と亜鉛コーティングの間で破断したが、光ファイバと亜鉛コーティングの界面では剥離しなかったため、ある程度の接着性があることを確認した。

以上より、専用設備が必要であるスパッタリングによる下地金属コーティングを行わずに、無電解ニッケルめっきを下地金属とした亜鉛めっきができることが確認できた。

今後、平滑にめっきする方法として、以下を検討していく。

- (1) 亜鉛めっき液をアルカリ性から酸性に変更する。低電流にてアルカリ性のめっき液で長時間めっきすると、石英が溶けて折れやすくなる。また、強アルカリ性のエッチングにより前処理を行う場合、処理時間が長いと光ファイバが溶ける可能性がある。
- (2) 前処理工程をウェットエッチングからドライ方式に変更する。エッチングで荒らさないため、表面が平滑になる可能性がある。

## 6. まとめ

以下の項目について試験を実施し、それぞれ以下の成果が得られた。

- (1) 光ファイバ温度センサの感度向上  
極低温での更なる感度向上を目指して、銅または亜鉛

## 特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

をコーティングすることにより、亜鉛では約3倍に感度が向上した。また、亜鉛コーティングの厚さを厚くした光ファイバ温度センサを製作し、波長変化率の温度依存性を測定した結果、計算では厚さが約2倍(50→100 $\mu$ m)になることで約15%の感度向上になると予想されたが、実際に測定した結果、厚さが約2倍になっても感度はほぼ同じであった。今後、測定数を増やして精査していく予定である。

## (2) 機械加振による耐久性確認

光ファイバ温度センサの機械的耐久性確認として、加振試験を実施し、光ファイバ全体に対して、コネクタの重量比が大きいため、コネクタを確実に固定する必要があることがわかった。また、これにより、15年相当のリニア走行による振動を与えても、断線しないことが確認できた。

## (3) 時分割方式

時分割(TDM)方式はFBG間距離を長くする必要はあるが、位置の特定に関して、温度差が大きくても測定できることから、波長分割(WDM)方式より信頼性が向上することがわかった。また、TDM方式は、1本の光ファイバにWDM方式より多数のFBG部を設けることが可能で、更に同一の波長で良いため、システム設計が単純になり、FBG部の製造とシステム設計に関わる費用を低減するメリットがある。

## (4) 亜鉛めっきの低コスト化

感度向上のためのFBG部の亜鉛コーティングについて、専用設備が必要であるスパッタリングによる下地金属コーティングを行わずに、無電解ニッケルめっきを下地金属とした亜鉛めっきができることが確認できた。

以上の成果により、超電導磁石内部の温度監視システムとして、光ファイバ温度センサを用いて、安定して感度良く、また実使用環境で内部温度を測定できることが確認できた。

この研究は国土交通省の補助金により実施した。

## 文献

- 1) Yamada, H., Tanaka, Y., Ogata, M., Mizuno, K., Nagashima, K., Okumura, S., and Terada, Y., "Measurement and improvement of characteristics using optical fiber temperature sensors at cryogenic temperatures," *Physica C*, Vol. 471, Issue 21-22, pp. 1570-1575, 2011.
- 2) 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
- 3) Iwamatsu, M., Ogata, M., Seino, H., Herai, T., and Asahara, T., "Development of Superconducting Magnet for Simplified Ground Coils," *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 47, No. 1, pp. 12-17, 2006.
- 4) Kusada, S., Igarashi, M., Nemoto, K., Okutomi, T., Hirano, S., Kuwano, K., Tominaga, T., Terai, M., Kuriyama, T., Tasaki, K., Tosaka, T., Marukawa, K., Hanai, S., Yamashita, T., Yanase, Y., Nakao, H., and Yamaji, M., "The Project Overview of the HTS Magnet for Superconducting Maglev," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, Issue 2, pp. 2111-2116, 2007.
- 5) Kalsi, S.S., "The application of high temperature superconductors to Maglev magnets," *Appl. Supercond.*, Vol. 3, Issues 1-3, pp. 163-168, 1995.
- 6) D'Ovidio, G., Crisi, F., Navarra, A., and Lanzara, G., "Comparison of maglev behavior of three inductors with static and dynamic field interacting with a HTC superconductor: Test and evaluation," *Physica C*, Vol. 449, Issue 1, pp. 15-20, 2006.
- 7) 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
- 8) 山田秀之, 小方正文, 水野克俊, 長嶋賢: 極低温機器の温度を監視する, RRR, Vol. 70, No. 10, pp. 12-15, 2013