

## 光ファイバを用いた極低温機器の温度測定技術の開発

山田 秀之\* 小方 正文\*

水野 克俊\* 長嶋 賢\*

### Development of Temperature Measurement Technique inside Cryogenic Equipment Using Optical Fiber

Hideyuki YAMADA Masafumi OGATA

Katsutoshi MIZUNO Ken NAGASHIMA

The superconducting magnet using high-Tc superconducting wire is being developed for practical applications by many research groups throughout the world. Monitoring the temperature inside the superconducting magnet is effective to detect the indication of failures and prevent the magnet suffered from damage. It is possible to measure the multipoint temperature by one optical fiber, instead of setting the conventional sensors on each point. Also, the optical fiber sensor has the merit of low heat invasion into the cryogenic equipment. We report the temperature measurement technique inside cryogenic equipment using the 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

### 1. はじめに

超電導を用いた磁石を利用した機器の開発が活発に実施されており、超電導磁石を用いた浮上式鉄道<sup>1), 2)</sup>、磁気軸受<sup>3) - 5)</sup>、モータ<sup>6), 7)</sup>等はいくつもの人々により実用化のための研究開発が実施されている。特に、超電導磁石は医療用MRIで実用化されていて、超電導を用いることにより常電導より鮮明な画像を得ることができるため、超電導磁石の占める割合が大きくなっている。

高温超電導線材を用いた超電導磁石の実用化に向けた研究も進んでいる。高温超電導線材は20～77K程度の温度で使用することが可能であるため、液体ヘリウムを用いた冷媒冷却より、冷凍機を用いた伝導冷却はコスト的にメリットがあり、取り扱いも比較的簡単になる。そのため、高温超電導磁石が実用化された際は、伝導冷却が主流になると予想される。超電導状態ではなくなり磁石としての機能が消失して熱暴走する場合はスポット的に温度が上昇してそこを起点に発生する可能性があり、冷媒冷却の場合、冷却に必要な冷媒の量が充分にある限り温度を冷媒の沸点以下に保つことができるため、冷媒の残量を監視することで熱暴走を未然に防止することができる。それに対し、伝導冷却の場合は超電導磁石内部全体を均一な温度に保つことが比較的困難であるため、超電導磁石内部の温度を監視することは熱暴走防止に必

要不可欠な方法の一つであり、そうすることで異常を早期に検知でき、大きな故障を未然に防止することができると思われる。

光ファイバ温度センサは、連続的もしくは光ファイバ1本に最大40箇所程度まで設けた温度センサ部により、光ファイバに沿った温度分布を測定することができ、また、石英ガラスでできていることから、従来の温度センサの金属を用いているリード線より熱伝導率が非常に小さいため、熱侵入量を非常に少なくできる。よって、極低温である超電導磁石内部の温度監視として、従来の温度センサを測定すべきすべての点に取り付ける代わりに、1本もしくは数本の光ファイバ温度センサを用いることはメリットが大きい。さらに、石英ガラスは高い電気絶縁性能を有しているため、超電導コイルに大電流を流すことで大きな磁場を発生する超電導磁石の内部温度測定では、電氣的に安全に使用することができ<sup>8)</sup>、また、非金属材料であるため電磁ノイズに対して強いという特徴も有している。そのため、超電導磁石内部の温度分布をモニターする方法として、光ファイバ温度センサ適用に関する開発を行っている。

本報告では、いくつかあるタイプのうち、極低温でも実用可能性のあるタイプの光ファイバ温度センサを選択して、極低温機器内を温度監視する技術について報告する。

\* 浮上式鉄道技術開発部 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

2. 光ファイバ温度センサの方式と原理

光ファイバ温度センサには、光ファイバ内での散乱光を検出して利用する分布型の測定方式と多点の温度センサ部での反射光を検出して利用する多点型の測定方式の大きく2つの方式がある。以下にそれぞれの測定方式の概要と測定原理について説明する。

2.1 分布型光ファイバ温度センサ

光ファイバは光を通すと、図1に示すような微弱な散乱光が発生し戻ってくる性質がある。分布型光ファイバ温度センサは、光ファイバに沿って連続的に発生するこれらの散乱光が温度により変化することで温度変化を検出する測定方式であり、このうち、一般的にラマン散乱光を用いた方式とブリルアン散乱光を用いた方式がある<sup>9)</sup>。なお、分布型光ファイバ温度センサは、後述するFBG (Fiber Bragg Grating) 方式のような加工を必要としないため、一切加工していない一般的な光ファイバを、そのままセンサとして使用できることが特徴である。

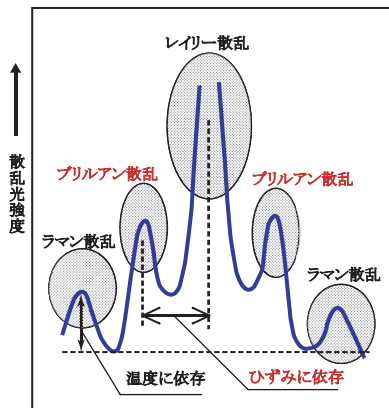


図1 散乱光

ラマン散乱光を用いた方式は、温度に依存して散乱光の強度が変化し、歪による影響をほとんど受けなため、温度測定に適した方式であるが、極低温になると散乱光強度が大きく減衰し、測定が困難になるため<sup>10)</sup>、今回の検討からは除外した。

ブリルアン散乱光を用いた方式は、光ファイバの歪及び温度変化に伴う熱伸縮に依存して散乱光の周波数が変化する。ブリルアン散乱光を用いた方式であるBOTDR方式は、Brillouin Optical Time Domain Reflectometryの略で、光ファイバに光を入射し、反射してくるブリルアン散乱光の周波数の変化を測定することにより温度に換算でき、かつ、入射した光に対するブリルアン散乱光の反射時間により、温度変化した位置を把握することができる。位置は連続的に測定できるため、温度を分布的に測定することが可能となる<sup>9)</sup>。しかし、反射してくるブリルアン散乱光は微弱であるため測定誤差が大きくな

る。このため、入射光としてパルス光を多数入射し、反射してくるブリルアン散乱光を複数回測定して統計処理を行うことで精度を高めている。このため、測定精度及び空間分解能と測定時間がトレードオフになることが課題になっている。

BOTDR方式は、上記の課題があるため、これらの課題を改善する目的で、以下の2つの方式が開発されている。

1つはDP-BOTDR方式である。これはDouble Pulse Brillouin Optical Time Domain Reflectometryの略で、反射してくるブリルアン散乱光の強度を増加させることを目的に、入射光を連続した2つのパルス光としている。この方式は、1回のブリルアン散乱測定につき2つのパルス光を光ファイバに入射する。反射してくる2つの散乱光をヘテロダイン変調した後、2つのパルス光の包絡線に対応する整合フィルタを通して処理することにより、パルス光の幅を狭くしても、2つの散乱光間で干渉が生じてブリルアン散乱光強度の山と谷をはっきりする。そのため、測定精度及び空間分解能が向上し、測定時間が短縮できることを特徴としている<sup>9), 11)</sup>。

もう1つはBOCDA方式である。これはBrillouin Optical Correlation-Domain Analysisの略で、光ファイバの両端から予めブリルアン散乱光の周波数変化に相当する周波数差の連続光を対向伝搬させ、誘導効果を生じさせることでブリルアン散乱光の強度を増加させる。また、連続光の周波数を変調することで、誘導されるブリルアン散乱光が局在的に発生することで、連続光の変調周波数変化で位置を特定できるため、空間分解能が向上できることを特徴としている<sup>12), 13)</sup>。

2.2 多点型光ファイバ温度センサ

多点型光ファイバ温度センサは、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加工して形成したデバイスであり、グレーティング周期に応じた特定の波長( $\lambda_B$ )を反射する特性を有する。 $\lambda_B$ は、周囲の温度変化に応じて変化するため、 $\lambda_B$ の変化量から温度を計測することが可能となる。このように、FBG方式は各位置のグレーティングを個別に認識することができ、最も有望なシステムの一つである<sup>14)</sup>。

図2に、FBG方式の原理を簡単に示す。

光ファイバに入射した光がFBG部で反射して戻ってくる。このFBG部にはそれぞれのFBG部で異なる周期のグレーティング構造を持つため、それぞれのFBG部で反射してきた光の波長は異なっている。よって、図に示すように、異なった波長 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ が測定されるため、どの位置の温度を測定しているかを特定することができ

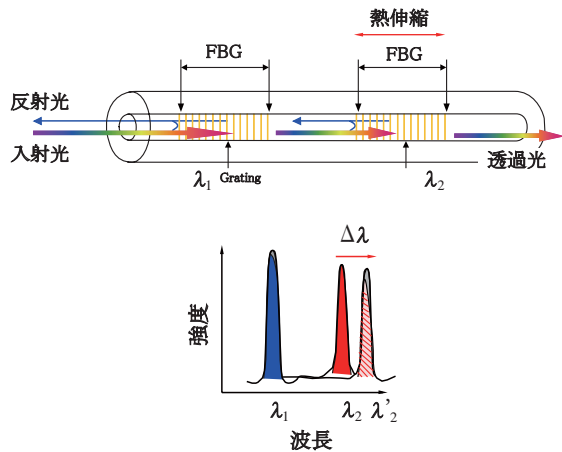


図2 FBG方式原理図

る。温度が変化すると、そのFBG部の波長がシフトするため、温度を測定することができる。図で反射光の波長が $\lambda_2$ であるFBG部で温度変化があると、 $\Delta\lambda$ 分シフトして $\lambda_2'$ の値になる。このシフト分を測定することにより温度に換算できる。

以上のような原理のため、温度変化している位置を特定でき、また、反射光が分布型の散乱光より強いため測定精度も高い。

### 3. 適用のイメージ

冒頭で述べたように、本開発は高温超電導磁石内部の温度監視を行うことを目的としており、図3に超電導磁石内部の温度測定に光ファイバ温度センサを適用した場合のイメージを示す。

光ファイバ温度センサを超電導磁石内部の超電導コイル、冷却容器、冷却配管、荷重支持断熱材取付部などに沿って取り付け、これらの温度分布を測定することにより、熱暴走の要因となる超電導磁石内部の摩擦発熱や断熱異常による熱侵入、冷却容器・冷却配管の漏洩や閉塞等による温度上昇を早期に検出できるような状態監視が可能になると期待できる。

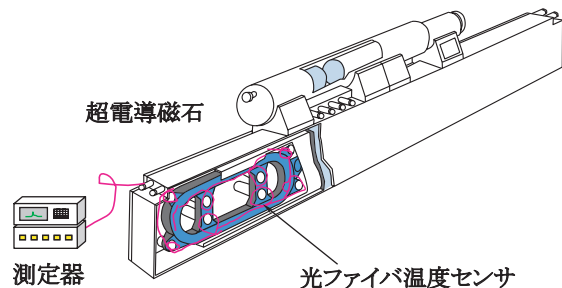


図3 光ファイバ温度センサ適用イメージ

### 4. 分布型光ファイバ温度センサ確認試験

分布型光ファイバ温度センサの極低温における特性を

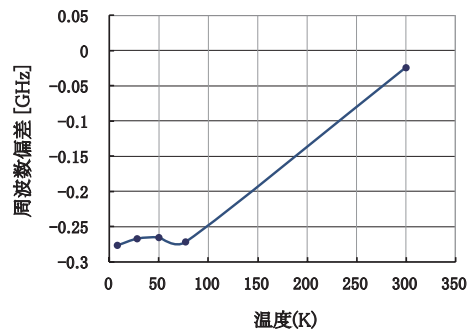
検証するため、DP-BOTDR方式及びBOCDA方式について確認試験を実施した。

それぞれの分布型光ファイバ温度センサを冷却容器内の冷凍機に接続した伝熱板に設置し、伝熱板には比較用の抵抗温度センサを取り付けた。冷却容器内を真空排気した後、冷凍機の伝導冷却により伝熱板を室温から約10Kまで冷却した。

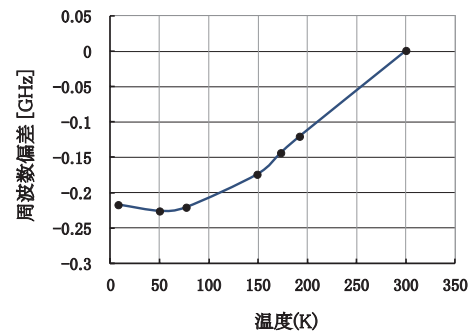
図4に、それぞれの測定した結果を示す。

どちらの方式についても、約80K以下の極低温では周波数偏差の変化量が温度低下につれて減少して、逆に周波数偏差が減り、1つの周波数偏差に対応する温度が2つ以上存在するという結果になった。

以上より、分布型光ファイバ温度センサは、ブリルアン散乱光を利用した方法においても、極低温では温度測定が困難であることがわかった。



(a) DP-BOTDR方式



(b) BOCDA方式

図4 分布型の周波数偏差温度依存性

### 5. 多点型光ファイバ温度センサ確認試験

多点型光ファイバ温度センサの極低温における特性を検証するため、FBG方式の確認試験として、温度測定再現性確認及び多点同時温度測定を実施し、さらに感度向上させる方策を行い、その確認試験を実施した。

#### 5.1 温度測定再現性確認

同じ温度測定を2回行い、再現性を確認した。

5つのFBG部を持つ光ファイバ温度センサを冷却容器内のアルミ製の冷却板に設置した。また、比較として、抵

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

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10 Kまで冷却して、その後、時間短縮のために窒素ガスを冷却容器内に注入して強制的に室温まで昇温した。これを2回実施した。

図5に、測定した結果を示す。FBG部からの反射光の波長変化量であるFBGシフト量の温度依存性を示している。なお、FBG部を5箇所設置したが、そのうちのFBG1, FBG3, FBG5の3点とFBG2, FBG4の2点がそれぞれ自乗平均平方根で2%以下のばらつきであるため、代表としてFBG2とFBG5の2箇所の結果を示している。なお、冷却板にアルミを用いていることと温度を一定に制御した測定では落ち着くまで数分程度時間をおいていることから、測定箇所による温度の差は小さいと考えられるため、FBG2とFBG5の差は製作誤差によるものと考えられる。この光ファイバ温度センサを実用化する場合、各FBG部の温度とFBGシフトの関係を較正值として前もって測定しておくため、各FBG部間での差は温度測定精度には関係ない。

FBG2とFBG5それぞれの2回の結果を比較すると、温度を固定して測定した結果は自乗平均平方根で1%以下のばらつきであり、良い再現性が得られた。

しかし、図5に示すように250K付近の温度域で部分的にFBGシフトが安定しなかった。これは光ファイバの熱伸縮による影響と考えられる。FBG部は冷却板に接触している必要があるが、熱伸縮に対しては吸収できるようにする必要があると考え、アルミテープで固定する際に、アルミテープが光ファイバと接着しないように、アルミテープの内側の一部にポリイミドテープを貼りつけた。

このため、FBG部は熱伸縮に対して自由に動けるようになっているが、熱伸縮方向の固定は静的摩擦力に頼っているため、熱伸縮による力が静的摩擦力を上回るとFBG部の位置が移動してしまうことになる。そのためにFBGシフト量が部分的に安定しなかったと考えられる。

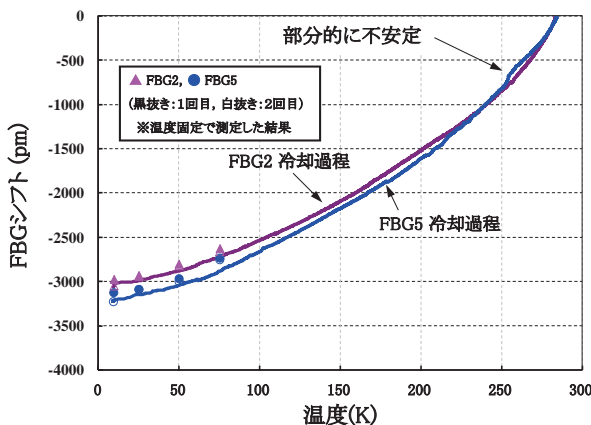


図5 多点型の温度測定再現性確認結果

5.2 多点同時温度測定

温度分布が異なる極低温機器内部を測定することで多点測定が同時にできることを確認した。

図6に、測定した装置の概要図を示す。

4つのFBG部を持つ光ファイバを冷却容器内に設置した。FBG部を温度が異なる4箇所、支持台、外側の熱シールド、内側の熱シールド、模擬コイルに設置した。また、比較として、抵抗温度センサもFBG部を設置した同じ箇所に設置した。冷却容器内を真空排気した後、冷凍機の伝導冷却により模擬コイルを室温から約25Kまで冷却した。なお、内側の熱シールドにヒーターを設置しており、冷却した後、ヒーターを焚くことによる温度変化を確認した。

図7に、測定した結果を示す。4箇所それぞれのFBGシフト量及び抵抗温度センサによる温度の時間変化を示している。

これらの結果により、極低温での温度の異なる多点を同時に測定できることを確認できた。

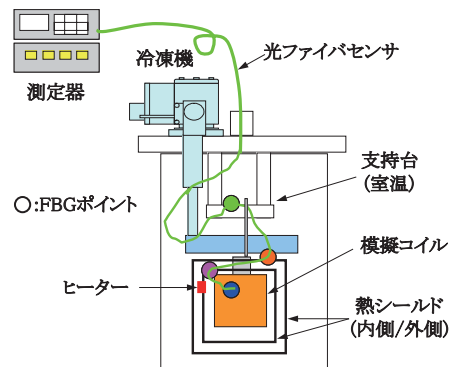


図6 多点型の多点同時温度測定装置

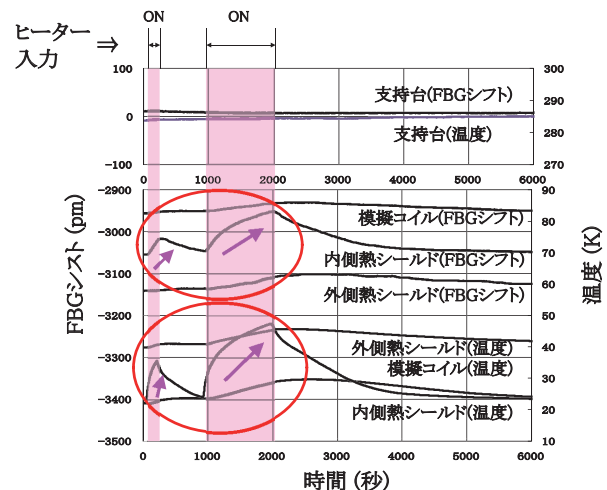


図7 多点型の多点同時温度測定結果

5.3 感度向上

再現性確認試験結果である図5のグラフを見ると、例えば、FBG2のFBGシフトの変化量は、表1に示すように、温度が下がるにつれて徐々にFBGシフトの変化量が小さくなっていて、さらに低い温度ではもっと小さい値

表1 FBG シフト変化量の温度依存性

温度範囲 (K)	250-200	200-150	150-100	100-50	50-10
FBGシフト変化量 (pm/k)	13	11	9	7	4

であると想定される。変化量が小さいと温度に対する感度が悪くなり、測定精度が低下する。よって、極低温での感度が向上するための方策の検討を行い、検討した結果の方策を施した光ファイバ温度センサを製作して、確認試験を実施した。

5.3.1 感度向上方法の検討

FBG方式はFBG部での温度変化による熱歪を検知することで反射波長が変化するため、これまで、センサの感度を向上するための方策として、ステンレスチューブをFBG部に取り付けて接着する方法<sup>15)</sup>、アルミ、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<sup>16), 17)</sup>、などが提案されており、これらの中では、アルミ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る。よって、感度を向上するための方策として、FBG部被覆材の熱膨張率もしくはヤング率を大きくすることが考えられる。

熱膨張率が高い材料としてはナイロン樹脂、テフロン樹脂、アクリル樹脂などが考えられ、この中で極低温で熱膨張率が最も高い材料はアクリル樹脂である。ヤング率が高い材料としては鉄、銅、鉛、ニッケルなどが考えられる。

以上のことを踏まえ、筆者らは熱膨張率の大きい材料として、もともと光ファイバにも使用されているアクリル樹脂を選定し、また、ヤング率の大きい材料として、今回はニッケルを選定した。その理由として、光ファイバに金属をコーティングする技術は一般的ではなく、特殊な加工になるため、製作時点でコーティング可能な金属がニッケルであったためである。

5.3.2 実験による確認

FBG部にアクリル樹脂をコーティングした光ファイバとニッケルをコーティングした光ファイバ、また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光ファイバを製作して、実験により効果を確認した。

5つのコーティングしたFBG部を持つ光ファイバをそれぞれ冷却容器内の冷却板に設置した。また、比較として、抵抗温度センサもFBG部を設置した同じ箇所に設置した。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。これを2回実施した。

図8に、測定した結果を示す。FBGシフト量の温度依存性を示している。なお、FBG部を5箇所設置したが、5箇所の出力が自乗平均平方根で2%以下のばらつきであるため、代表としてFBG1の結果を示している。また、グラフには2回実施した冷却時と昇温時の結果を示している。

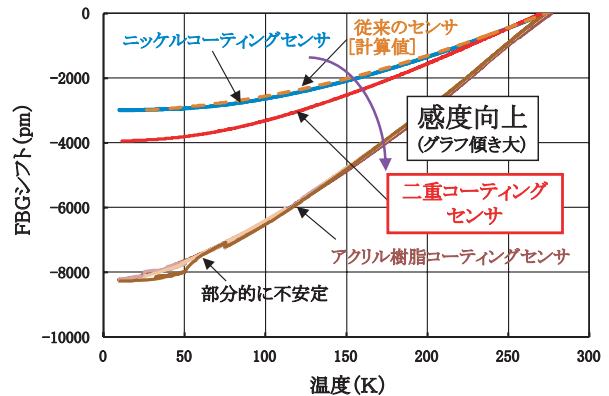


図8 多点型の感度向上確認試験結果

アクリル樹脂をコーティングした光ファイバは、例えば10～50K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倍であるため、感度が向上した。しかし、一部のFBGシフトが安定しなかった。これは再現性のところで述べたように、光ファイバの熱伸縮による影響と考えられるが、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、熱伝導が良くないことからFBG部に様に熱が伝わらなくてFBGシフトが安定しないことによる影響も考えられる。

ニッケルをコーティングした光ファイバは、熱伝導が良いためにFBGシフトが安定しているが、感度はコーティングなしとほぼ同じであった。これはヤング率より熱膨張率の方が感度向上に大きく寄与していることが考えられる。

二重コーティングした光ファイバは、FBGシフトが安定しており、かつ、例えば10～50K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倍であるため感度も向上した。つまり、二重にコーティングすることにより、両方の効果を併せ持った結果が得られた。

6. まとめ

光ファイバ温度センサの極低温での適用のために、分布型であるブリルアン方式のDP-BOTDR方式及びBOCDA方式について極低温確認試験を実施し、また、多点型であるFBG方式について再現性及び多点同時測定の確認試験を実施した。さらに、極低温での感度低下に対する向上方策を検討した。

その結果、以下のことがわかった。

[分布型光ファイバ温度センサ]

- ・ DP-BOTDR方式、BOCDA方式とも極低温では温度測定が困難であることがわかった。

[多点型光ファイバ温度センサ]

- ・ 再現性については、2回測定した結果、ほぼ同じ値が

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

得られたので、良い結果が得られた。

- ・ 多点同時測定については、温度の異なる複数測定点を極低温まで同時に測定できた。また、ヒーター入力を行い、光ファイバ温度センサのFBGシフトがヒーター近傍で温度上昇と同程度に上昇していることを確認できた。
- ・ 極低温での感度向上については、アクリル樹脂をコーティングした光ファイバは、感度が向上したが、一部のFBGシフトの値が安定しなかった。ニッケルをコーティングした光ファイバは、FBGシフトが安定しているが、感度はコーティングなしとほぼ同じであった。二重コーティングした光ファイバは、FBGシフトの値が安定しており、かつ、感度も向上した。
- ・ FBGシフトが一部安定しなかった理由は、1つは、FBG部が熱伸縮に対して自由に動けるようにしたことで、熱伸縮による力が静的摩擦力を上回ってFBG部の位置が移動してしまうためにFBGシフト量に変化したためであり、もう1つは、アクリル樹脂の低い熱伝導率による不均一な熱伝導のためであったと考える。

今後、FBG部の固定方法及び極低温の感度が向上し、かつ安定な結果の得られるコーティング方法の開発を進める。また、FBG方式以外の効果のある方法についても検討する。

この研究により、極低温で多点型光ファイバ温度センサを適用できる可能性があることがわかった。よって、熱侵入を極力少なくできるように、超電導磁石内部の温度を監視することができると期待できる。

この研究は国土交通省の補助金により実施している。

文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Nagashima, K., Seino, H., Sakai, N., and Murakami, M., "Superconducting magnetic bearing for a flywheel energy storage system using superconducting coils and bulk superconductors," *Physica C*, Vol. 469, Issues 15-20, pp. 1244-1249, 2009.
- 4) Werfel, F.N., Flögel-Delor, U., Rothfeld, R., Wippich, D., and Riedel, T., "Centrifuge advances using HTS magnetic bearings," *Physica C*, Vol. 354, Issues 1-4, pp. 13-17, 2001.
- 5) Strasik, M., Hull, J.R., Johnson, P.E., Mittleider, J., McCrary, K.E., McIver, C.R., and Day, A.C., "Performance of a conduction-cooled high-temperature superconducting bearing," *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 151, Issue 3, pp. 195-198, 2008.
- 6) Watanabe, E., Kikukawa, K., Satoh, Y., and Torii, S., "Development of a superconducting claw-pole motor," *Physica C*, Vol. 468, Issues 15-20, pp. 2087-2090, 2008.
- 7) Nakamura, T., Ogama, Y., Miyake, H., Nagao, K., and Nishimura, T., "Novel rotating characteristics of a squirrel-cage-type HTS induction/synchronous motor," *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 20, pp. 911-918, 2007.
- 8) Adachi, S., "Distributed optical fiber sensors and their applications," *SICE Annual Conference 2008*, pp. 329-333, 2008.
- 9) 足立正二:分布型光ファイバセンサの原理と応用, 日本学術振興会 光エレクトロニクス第130委員会公開シンポジウム講演予稿集, 2007
- 10) 戸崎達哉他: 光ファイバのラマン光散乱特性と分布型温度センサ, フジクラ技報, Vol.76, pp. 28-32, 1989
- 11) 坂入良幸他: ダブルパルスを用いた高距離分解能 BOTDR, 第40回光波センシング技術研究会講演論文集, pp.155-160, 2007
- 12) 笹岡英資他: ブリルアン散乱型光ファイバ温度センサ (Thermo Gazer), SEIテクニカルレビュー, Vol.170, pp. 15-19, 2007
- 13) 石岡昌人他: 航空機搭載型 BOCDA 分布型光ファイバセンサ, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, OFT2007-10, pp. 45-50, 2007
- 14) Mizunami, T., Tatehata, H., and Kawashima, H., "High-sensitivity cryogenic fibre-Bragg-grating temperature sensors using Teflon substrates," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 914-917, 2001.
- 15) Frövel, M., Pintado1, J.M., Güemes, A., del Olmo, E., and Obst, A., "Multiplexable fiber Bragg grating temperature sensors embedded in CFRP structures for cryogenic applications," *3rd Euro. Conf. Structural Health Monitoring*, p. 938, 2006.
- 16) Rajini-Kumar, R., Suesser, M., Narayankhedkar, K.G., Krieg, G., and Atrey, M.D., "Performance evaluation of metal-coated fiber Bragg grating sensors for sensing cryogenic temperature," *Cryogenics*, Vol. 48, pp. 142-147, 2008.
- 17) Rajinikumar, R., Süßer, M., Narayankhedkar, K.G., Krieg, G., and Atrey, M.D., "Design parameter evaluation of a metal recoated Fiber Bragg Grating sensors for measurement of cryogenic temperature or stress in superconducting devices," *Cryogenics*, Vol. 49, pp. 202-209, 2009.