

バイメタルを用いた極低温用光ファイバ温度計の開発

R&D OF OPTICAL FIBER THERMOMETER FOR VERY LOW TEMPERATURE WITH BIMETAL

清水洋孝[#], 小島裕二, 仲井浩孝, 中西功太, 原和文, 本間輝也

Hiroataka Shimizu[#], Yuji Kojima, Hiroataka Nakai, Kota Nakanishi, Kazufumi Hara, Teruya Honma

KEK High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

To operate accelerators which adopt superconducting radio frequency scheme, it is necessary to control cryogenic systems including huge amount of cryogen like liquid helium and nitrogen stably. Achieving above, it is important to monitor temperatures of cryogen or instruments at each stage correctly, and feedback to the control system. Usual resistance thermometers, however, cost if measurement points are increasing, and need to introduce many metallic signal lines which connects environmental temperature to very cold one. In this report, R&D study details about a new thermometer using fiber Bragg grating (FBG) are described. FBG sensors are already used for monitoring temperatures and stresses. To apply FBG scheme to very low temperature environment, however, wavelength-temperature correlation is smeared out by reason of frozen degree of freedom of FBG. In this paper, especially, the new idea of a supporting jig for FBG to improve the degradation of the FBG response is reported.

1. はじめに

超伝導加速方式を利用した加速器施設の運転には、液体状態のヘリウムや窒素を含む、大量の冷媒を使用する冷凍サイクルを連続的且つ安定的に制御・運用する事が必要である。この目的を達成する為には、サイクルの各段階における冷媒の温度を正しく測定して、制御に反映させる必要がある。しかし通常使われている様な測温抵抗体を用いた場合では、測定点を増やす事に伴う費用の増加や、断熱シールド内へ大量の金属製の信号線を持ち込む事による熱侵入の問題が生じる。

これらの問題を克服する事を目的として現在行っている、光ファイバを用いた極低温用温度計の開発について、報告を行う。通信用の光ファイバにブラッググレーティング (Bragg grating) と呼ばれる格子構造を持たせたものが、その格子間隔の変化を捉えて波長の変化として検出出来る事から、優れた応力センサや温度計として既に様々な分野において用いられている。我々はこのグレーティングファイバの特性を活かし、4K 以下の極低温領域で使える温度計の開発に取り組んでいる。今回は特に、極低温領域におけるグレーティングファイバの波長変化の鈍化を補い、温度計としての機能を保持する為に必要な補助治具の開発に関しての報告を行う。

2. FBG の環境依存性の検証

FBG の極低温域での利用可能性を検討するために、典型的な冷媒である液体窒素と液体ヘリウムを用いて、その波長変化の様子を観察した[1]。液体窒素を用いた 77K までの試験結果と、4K までの液体ヘリウムまでの試験結果が滑らかに繋がる事を予想していたが、実際に得られた結果は、液体ヘリウム中での単位温度あたりの波長変化の割合の方が、大きいと言う結果であった。各

[#]hirotaka@post.kek.jp

液体冷媒への直接浸漬実験に替えて、雰囲気ガス中で行った同様の実験においても、やはりヘリウム雰囲気中での波長変化の方が大きいと言う結果が得られた[1]。

上で得られた冷媒や雰囲気ガス毎に異なる結果は、
①窒素雰囲気で起こる特殊な現象
②ヘリウム雰囲気で起こる特殊な現象
③FBG が接触する冷媒が変わる度に起こる現象
の何れかであると考えられた為、その検証を行う事を目的として、真空中における FBG の冷却実験を行った。

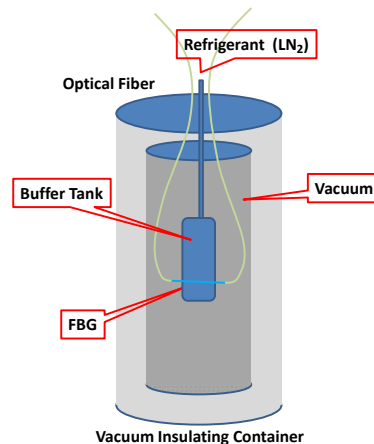


Figure 1: Experimental set-up for an indirect cooling.

上に冷却実験の概略図を示す。真空中に吊るされた、金属製の中間容器に FBG を直接貼り付け、容器内へと冷媒である液体窒素を注ぐ。内側からの熱伝導によって冷やされた FBG の波長変化の様子を観察する。中間容器には、参照用温度計の Pt-Co 温度計が別途貼り付けられている。断熱真空槽内を真空 (1×10^{-1} Pa 程度) に保つ事で、雰囲気ガスの影響を排除した環境での波長変化の様子を観測した。

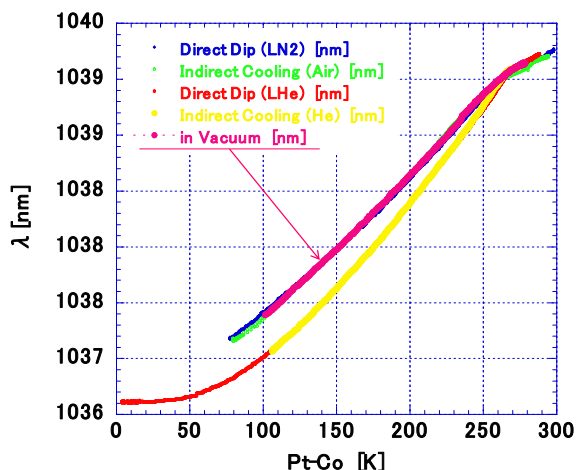


Figure 2: A temperature-wavelength correlation result.

上に、これまでに行った直接浸漬実験の結果(青: 冷媒液体窒素, 赤: 冷媒液体ヘリウム)と、各雰囲気ガス中での冷却実験の結果(緑: 空気雰囲気, 黄: ヘリウム雰囲気)、及び今回行った真空環境中における昇温時の温度波長相関の結果を載せる。この結果から解る様に、真空中における FBG の波長変化の様子は、ヘリウム雰囲気での変化の様子とは異なり、窒素雰囲気で得られた結果と同じ振る舞いである事が見て取れる。

得られた結果の解釈を行う上で、FBG の作製過程に含まれる水素ローディングと言う工程が重要な役割を担っていると考えられる。FBG はファイバ外側からレーザーの干渉波を照射する事で、コア部分に任意の周期のグレーティングを作製する事で作られる。しかしこの手法が試された当初は、コア上に大きな屈折率変化を持つグレーティング構造を安定的に作り出す事が難しく、実用に耐える格子を作製する事が困難であった。この状況を一変させたのが、グレーティング処理を施すファイバを、事前に高圧の水素雰囲気に置き、水素を吸蔵させる事で光感性を高める、水素ローディングの手法の発表によってである[2]。今日では、10MPa 程度の圧力の水素環境に10日以上置く事で、照射されるレーザーに対する光感性の向上を図っている[3]。レーザーの照射後、グレーティング生成に関与しなかった水素は、徐々にファイバから抜け出し、大気中に放出されるが、ヘリウム雰囲気中に FBG を置いた際には、水素に代わってヘリウム原子がファイバ中に吸蔵され、ファイバの持つ屈折率を変化させていると考えられる。しかし窒素程度にまで原子番号が大きくなると、上の様な吸蔵が起こらず、真空中での冷却と同じ結果を与えていると考えられる。これらの結果から、ヘリウム雰囲気中での特異な温度波長相関の結果が理解され、より大きな波長変化が得られていたと考えられる。

3. FBG の極低温域への応用

上で述べた様に、2-4 K の極低温環境を与えるヘリウム雰囲気の中では、現在使用を考えている FBG の温度波長相関が、正の方向に補正され、単位温度あたりの波長変化の様子が見え易い方向に変化している事が解った。この変性は FBG の温度計利用と言う観点からは、有

利に働く変化であるが、その補正効果を含めた場合であっても、20 K 以下の温度領域における波長変化の割合がほぼ0となっており、FBG 単体のままでは、温度変化を波長変化として出力出来ない。

この困難を解消するため、補助的な治具を考案し、FBG と併用する事で、極低温域においても温度計として機能する様に改良する事が本研究の目的である。参考となる先行研究としては、高温超伝導体を使った線材からなる、磁気浮上式鉄道用ソレノイドの温度モニタへの応用研究が挙げられる[4]。この応用研究では、測定する温度範囲を 20-77 K と設定し、この温度領域での FBG の温度感受性を如何に高めるかについて研究が為されている。つまり温度の低下によって FBG が縮む効果を最大限引き出すための工夫が考察されている。一方、我々が今目標としている温度領域は、2-4 K と更に一桁程度低い。ヘリウムが液化する様な温度領域である事を考慮すると、FBG 自身の熱収縮の自由度は既に凍結していると考えるのが自然であり、何らかの他の方法が必要と考えられる。

FBG の温度波長相関を補助する機構として考えた一つの案が、下に示すバイメタル効果を用いた治具である。

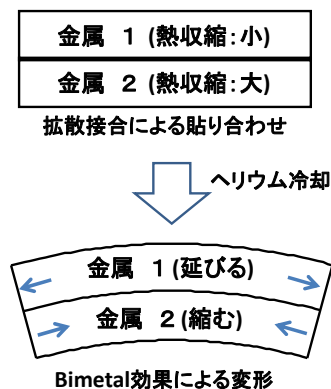


Figure 3: Basic idea for FBG jig using bimetal effect.

貼り合わされた線膨張係数の小さな金属と大きな金属の、単位温度変化あたりの伸び率の違いを利用すると、温度が下がれば下がる程、縮む金属の引っ張られる形で、線膨張係数の小さい方の金属片が伸びる様に振る舞うと言う予測に基いた着想である。この伸びる側の金属面に FBG を固定する事で、低温になる程グレーティング間隔が伸びる様な、負の線膨張係数を持つ振る舞いをする事が期待される。

この振る舞いを検証する為に、非常に単純な模型を使った有限要素法での数値計算を行った。線膨張係数の小さい金属としてはインバーを、大きい金属としては、アルミを使って計算を行った。実際の計算に必要な低温域での各物性値に関しては、アメリカ国立標準技術研究所が公開している数値を用いた[5]。

有限要素法による数値計算からは、確かに線膨張係数の小さい側の金属面が、低温域に行くほど引き延ばされる様な結果が得られた。この振る舞いを、より定性的に理解する為に、原子間の相互作用ポテンシャルを表す、レナード-ジョーンズ・ポテンシャルと呼ばれる模型を導入して考察を行う。この模型は、下に示す様に原子間距離

の12乗に比例する斥力項と、6乗に比例する引力項からなる経験的なモデルであるが、今考えている金属結晶についても、適用出来ると仮定する。

$$U(r) = 4\epsilon \left\{ \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right\}$$

このモデルに従って、有限要素法で得られた結果を解釈すると下の図の様になると考えられる。

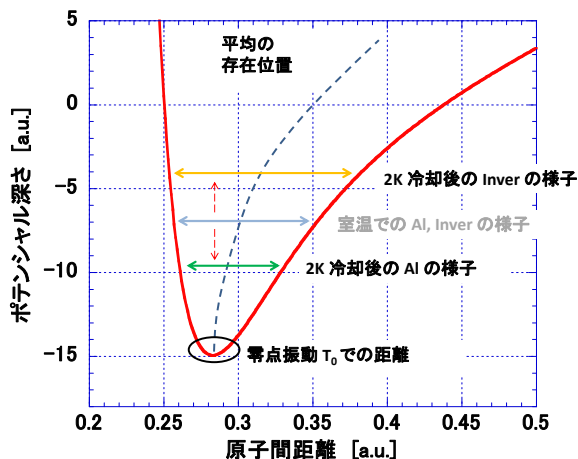


Figure 4: Schematics of the potential model.

冷却前の状態では、インバー・アルミ共に何の応力も受けていない状態に留まっている。冷却が始まると、線膨張係数が小さいインバー側は、アルミ片に引っ張られる事で徐々に伸びる。ポテンシャルモデルによる素朴な解釈では、これは温度の上昇に相当しており、負の線膨張係数を持つと解釈する事で理解出来る。対してアルミ片の振る舞いとしては、実際には極低温域まで冷却が行われているにも拘らず、貼り付けられたインバー片を引き延ばす仕事の反作用を受けて、本来到達するべき収縮量に達する事が出来ない状態に陥る。インバー・アルミの両方が、単体で冷却を受けた場合には、模型の描くポテンシャルの底近くまで落ち込む事が自然と思われるが、お互いがバイメタルとして接合されている結果、一方はポテンシャルのより高い位置に移動し、他方は本来落ち切る位置よりも高い位置に留まると言う、不安定な状態に落ち着いている事が解る。

FBG を利用した極低温領域の温度計開発に際して、このバイメタル特有の不安定性を利用すると言うのが、この研究における新しい着想である。実装の概略と温度検出に至る流れを下に示す図に従って説明する。

バイメタルの線膨張係数が小さい金属側に固定された FBG は、極低温領域に置かれた際、バイメタルの反りに伴って引っ張り応力を感じ、格子間隔が広がった状態になる。この時 FBG には白色光は送られていない。(Step-1) バイメタル・FBG の温度計が熱浴と十分に熱的平衡に至った後、温度計測を開始する。FBG に白色光を導入し、導入直後の FBG からの反射光の波長をまず測定する。光ファイバ上に刻まれたグレーティング部分からは、クラッドモードと呼ばれるコア部分からの染み出しの光が存在する事が知られており、この光による発熱を、バイメタルの低伸縮側の金属に吸収させる。熱浴へ

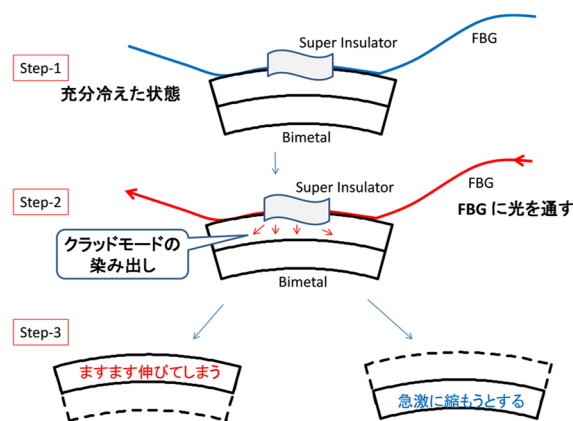


Figure 5: An idea for the supporting jig of FBG.

の熱の拡散を防ぐために、FBG には多相断熱フィルムによる被いが為されている。(Step-2) クラッドモードによる発熱を受けた結果、FBG と接している金属面は、加熱によって熱膨張を行う。レナード-ジョーンズ・ポテンシャルモデルの解釈に従うと、元々引っ張られて伸びていた金属片が、熱膨張によってますます伸びていく描像となる。この反動によって、バイメタルの線膨張係数が大きい側の金属片は、自身の熱収縮に対する障害が取り除かれた様に感じ、順当にポテンシャルの谷に落ち込もうとするはずである。(Step-3) 実際のバイメタルの反りで規定される最初のポテンシャル位置から、白色光導入後に落ち込むポテンシャル位置までの差を、FBG の波長の変化として読み取る事で、温度を検出しようとする狙いである。

4. 実験的検証

ここまで、現在開発を進めている FBG の補助治具に関しての説明を行って来たが、実際の導入に際しては、種々の難しさが伴う。素朴な期待として、常温時に歪みの無い状態のバイメタルから実験を開始しようとした場合、冷間圧延と呼ばれる手法によって熱を加えずに異種金属の圧延接合を行う必要がある。また、熱収縮率等の理想的な金属の組み合わせでバイメタルを特注する事は費用的な問題を克服する必要がある。これらの要請から、基礎実験の段階では市販されている製品のバイメタルに頼らざるを得ない。何れにせよ、常温時に反りや歪みの無い状態のバイメタルに FBG を貼り付けた後、極低温領域まで冷やした時に、FBG が弛んで波長変化を検出出来なくなる状態を避けたい。つまり常温から冷やした際に、少なくとも熱収縮率の小さい側の金属片が、負の線膨張係数を持つ様な振る舞いをする事が期待される。FBG に対する補助的な治具としての利用が可能かどうかを調べる為に、市販のバイメタルを用いて、この振る舞いの検証を行った。

使用したバイメタルは、低膨張率側が 36Ni-Fe 合金、高膨張率側が 22Ni-4Cr-Fe 合金の合板で、製品 (100mm×200mm) からの切り出しには、ワイヤーカットを用いた。(切り出し寸法は 10mm×40mm) 伸縮の検証は、ひずみゲージを使った直接測定によって行った。使用したゲージは、4 K の温度域まで測定出来る型の物を利用した。(共和電業:KFL-1-120-C1-11) 下に、ひずみ

ゲージを貼り付けた試験片と貼り付けていない試験片の予備冷却試験の様子を載せる。

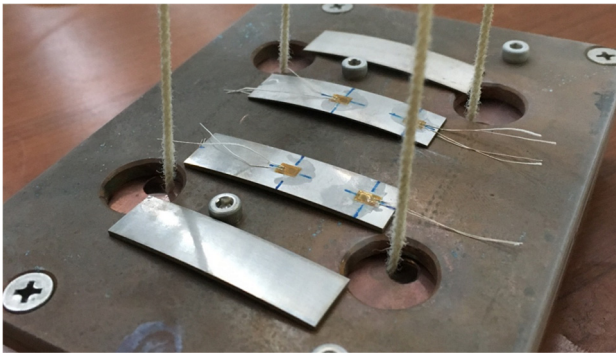


Figure 6: A snapshot of the test pieces pre-cooling test.

写真中央2枚の試験片が、ひずみゲージを貼り付けた物、両端の2枚が、切り出したままの状態のバイメタルである。接着剤を使ったひずみゲージの貼り付けは、何もしない状態に比べて、バイメタルの伸縮に影響を与えている可能性はあるが、素朴な予冷試験後の外観目視からは、反りの様子に大きな差は確認されなかった。この状態から配線処理を行い、ひずみ量の測定を行った。動ひずみ測定器としては、共和電業:DPM-603B を用いた。結線の方法としては、ひずみゲージを試験片の裏表に貼り付け、その両方をブリッジに組み込む事で、曲がり具合を測定する、”曲げひずみ測定法”と言う配線方法に従った[6]。

試験片中央部でのひずみ測定の結果は、予備冷却試験において凸面(線膨張係数が小さい側の面)になると思われた側の歪み量が $+5350 \pm 212 \mu \epsilon$ となり、一方凹面(線膨張係数が大きい側の面)になると思われた側の歪み量が、ほぼ等量の負の値となった。冷却前の状態でブリッジの 0 点合わせを行った後、冷却後に正の歪みを得られたと言う事から、使用したバイメタルは、期待通り、冷却に伴ってその凸面側が引き延ばされている事が確認出来た。

この試験片中央部の測定結果から、次の様な事が解る。仮にひずみ量を $+5000 \mu \epsilon$ とし、FBG 部分の有効部分の長さを 30 mm と考えると、伸びに相当する量 ΔL と元々の長さ L との比がひずみ量 ϵ である事から、 ΔL が約 150 μm 程度であると見積られる。これは FBG で測定したい波長変化に比べて非常に大きな変位量であるが、ひずみゲージの代わりに、FBG を実際に貼り付けた場合には、FBG 自身がひずみに対して抵抗となる為、変位量は大きく減少する事が予想される。現在使っているバイメタルがどの程度の反りを示すかを慎重に見積りながら、今後の温度計作製を進めて行く予定である。

参考文献

- [1] H. Shimizu *et al.*, ”熱収縮による波長の変化を用いた極低温用光ファイバ温度計の開発”, Proceedings of the Particle Accelerator Conference(2013).
- [2] P.J. Lemaire *et al.*, ”High Pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitive and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres”, Electron. Lett., vol.29, no.13, p1191, 1993.
- [3] K. Nakagawa *et al.*, ”Fabrication of fiber Bragg grating structure”, J. Soc. Mat. Sci., vol.52, No.2, pp185-191, 2003.
- [4] H. Yamada *et al.*, RTRI REPORT Vol.28, No.9, Sep. 2014.
- [5] <http://cryogenics.nist.gov/>
- [6] 高橋 賞, 河合正安, ”ひずみ測定入門”, 大成社.