

極低温用温度計開発の進捗

PROGRESS REPORT OF THERMOMETER DEVELOPMENT FOR VERY LOW TEMPERATURE USE

清水 洋孝[#], 小島 裕二, 仲井 浩孝, 中西 功太, 原 和文, 本間 輝也
Hirotaka Shimizu [#], Yuji Kojima, Hirotaka Nakai, Kota Nakanishi, Kazufumi Hara, Teruya Honma

KEK High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

This report addresses about progress status of R&D for very low temperature use thermometers ongoing in KEK. This thermometer adopted several new technologies and materials to maintain the sensitivity against very low temperature environment. Especially, one of the most important idea for this new device construction is to use of the fact that almost all metallic materials have the same property that its specific heat capacity becomes extremely small in very low temperature region. This fact mentioned and explained by Debye model, and confirmed in many kind of materials actually. To detect a minute distortion of the metallic base as a change of temperature, optical fiber material will be adopted. The environmental temperature change will affect to the metal base strain, and the strain change will be transformed to stress which the optical fiber feels. As a result, reflected light wavelength which selected by a grating section of the optical fiber will be changed as the temperature varies. The most important point is those sequential information conversions are detectable or not. To achieve the sensitive thermometer development, current status of the performance tests of each devices are reported.

1. はじめに

現在開発を進めている、極低温用の温度計の開発[1-3]について、進捗を報告する。この温度計では、極低温域での感度の維持のための工夫として、デバイの模型[4]によって示唆される様な、金属結晶の比熱が極端に小さくなる事実を利用しようと考えている。金属の僅かな歪みの変化を温度として検出するために、光ファイバー材料を利用する予定であるが、実際の環境温度の変化が金属の歪みの変化に転写され、更にこの歪みの変化が、光の波長の変化へと焼き直されているかどうか、温度計開発にとって最も重要な開発課題である。この点に関して、現在行っている試験の結果を報告する。

2. 低温環境でのバイメタル特性の再考

2.1 歪み測定

一般的な測温抵抗体で極低温の温度を測定する場合、幾つかの問題点が挙げられる。一つの例としては、次の様な点が考えられる。従来の測定方法に従えば、測定点毎に金属製の信号線を導入せねばならず、これらの信号線の多くは、断熱真空槽中に敷設される事が多い為、対流による熱の散逸が期待出来ない。常温側から極低温側へと続く、熱の通り道を供給する事になる。この点を改善する目的で、光ファイバ材料を用いた温度計開発を行っている[1-3]。この温度計の基本的な動作原理としては、先行研究[5]に倣ったもので、光ファイバ中に施された Bragg grating が、環境温度の変化に従って、その格子間隔を変化させる特性を利用したもの

である。しかし先行研究の想定利用温度域とは異なり、超伝導加速空洞の冷却プラントの温度を測定する事が最終的な目標である事から、温度計に期待される動作環境温度は、4 K から 2 K 以下の極低温環境となる。この様な温度環境下では、一般的な物質の分子結合間の伸縮の自由度は、完全に凍結されており、文字通り凍り付いた状態となっている。即ち、Bragg grating の温度変化特性だけを期待したのでは、正しく機能する温度計としての応用は不可能である事を意味している。

この問題点を補う為に、金属治具の併用を行い、極低温環境下においても、活性を失わず、環境温度の変化が信号として読み取れる様な組み合わせを提案し、温度計としての機能を持たせる研究開発を行っている。

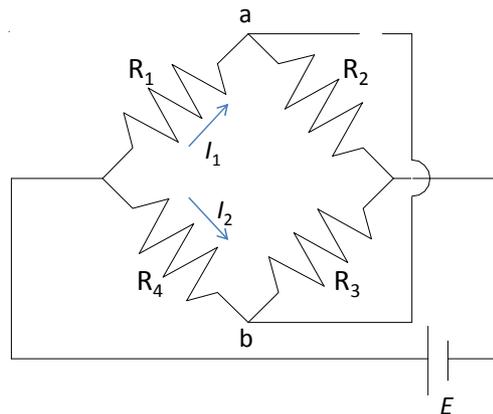


Figure 1: Wheatstone bridge for strain gauge measurements.

金属の治具としては、熱収縮率の異なる金属を貼り合

[#]hirotaka@post.kek.jp

合わせた構造を持つ、一般的なバイメタルの使用を考えている。バイメタルの持つ特性として、極低温環境下では、熱収縮率の大きい金属側がより縮もうとする挙動を示す。この時、熱収縮率の小さい金属側は、貼りあわされた収縮率の大きい金属側に引っ張られる事で、低温環境下にある場合においても、常温時の長さよりも長くなる挙動を示す事を、温度計開発に利用しようという試みである。これまでの研究において、上記のバイメタルの低温特性を実験的に確認して来たが、ここでこれまでの測定結果をもう一度見直し、得られた結果について再検討を行う。

バイメタルの伸縮に関しては、低温用歪みゲージを用いた直接測定を実施した。バイメタルの熱伸縮を、 10^{-6} 程度の歪み量として取り扱う必要がある為に、Fig. 1 に示した様な、Wheatstone bridge 回路を用いて評価する方法が一般的であるので、ここではその手法に従う[6]。図中の R_1 から R_4 までの電気抵抗は、測定対象に貼り付けた歪みゲージ本体の抵抗、若しくは、歪みの影響を受けない擬似的な対象に貼り付けたダミー抵抗を表しており、この抵抗の組み合わせによって、様々な歪み量の測定が可能となる。ブリッジの両端に起電力 E が印加された際に、ブリッジ中央の a-b 間に発生する電位差を測定する事で、各抵抗に生じた歪み量を抽出して知る事が出来る。測定量である a-b 間の電位差 e は、

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E$$

と表す事が出来る。もし最初に、 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ の関係が成り立ち、ブリッジが平衡している場合には、各抵抗に生じる歪みに由来した抵抗値のずれを δR とした場合、出力電位差は、

$$e = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\delta R_1}{R_1} - \frac{\delta R_2}{R_2} + \frac{\delta R_3}{R_3} - \frac{\delta R_4}{R_4} \right) E$$

と表す事が出来る。通常の歪み測定においては、4 つの抵抗値を平衡状態において揃える事が一般的であり、歪みゲージを用いる場合は、それらのゲージのゲージ率 K_s は全て等しいと考えるのが自然である。この仮定に従うならば、歪み量 ε が導入出来て、

$$\frac{\delta R_i}{R_i} = K_s \varepsilon_i$$

と定義される事から、印加電圧と歪み量、測定される電圧の関係は、

$$\text{測定電圧} = \frac{K_s}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \times \text{印加電圧} \quad (1)$$

と求める事が出来る。1から4までの各歪み量が持つ符号に、正負の違いがある事を利用して、抽出したい変化量が得られる様な抵抗体の配置を行う事が重要である。

2.2 これまでの測定方法と結果

最初に行った熱収縮の様子を確認する試験として、

バイメタルの裏面と表面の同じ位置に、同じ歪みゲージを貼り付けた物を用意した。測定の為の結線としては、Fig. 2 に示した配線を試した。 R_1 と R_2 の位置に表裏に貼り付けた歪みゲージが対応し、 R_3 と R_4 の位置には、温度変化を受けない固定抵抗が接続されている。

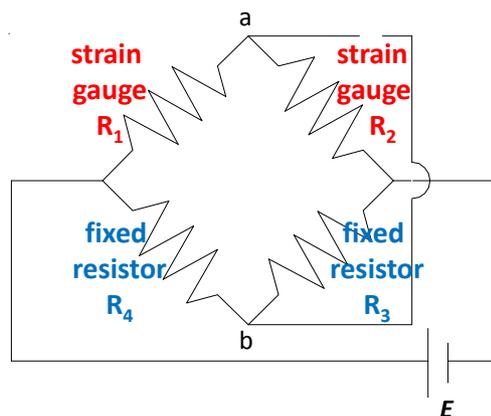


Figure 2: 2-active-gauge method. (flexural strain only)

上の測定方法で低温環境下でのバイメタルの伸縮の様子を測定した結果、凸面では正の歪みを観測出来た。この事から、確かに熱膨張率の小さい金属側(低温環境では凸面になる)において、金属面が伸びている結果が得られたと考えた。しかし歪み量と測定電圧の関係 (1) に戻って再検討すると、この測定方法では、表面と裏面が等量伸びたり縮んだりした場合の歪み量の寄与は、互いに符号が逆になっている為に、相殺されてしまう事が解る。即ち、ここで測定された正の歪み量は、バイメタル効果で金属片が反った効果 (の 2 倍) だけが抽出されており、熱収縮による縮みの効果は表裏で相殺されてしまっているため、厳密には凸側の金属面が、本当に伸びているかどうかの判断が、この段階では出来ない。より正確な伸縮の状態の把握の為に、歪みゲージと固定抵抗の結線を変更した結果を以下に述べる。

2.3 新しい測定方法と結果

次に試した結線を Fig. 3 に示す。歪みゲージはやはりバイメタルの裏面と表面の同じ位置に貼られている。歪みゲージを R_1 と R_3 の位置に配線する事で、双方からの

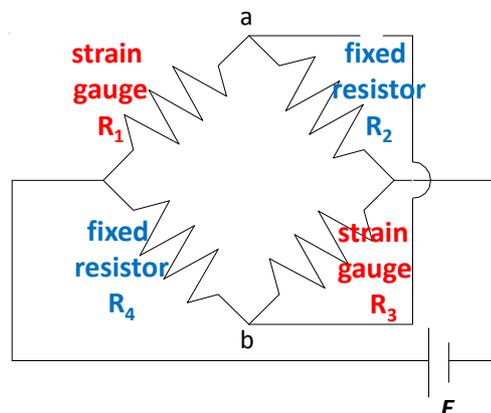


Figure 3: Opposite sides 2-active-gauge method.

歪みの効果の寄与は同符号となり、表面と裏面の曲げ歪みの効果が自動的に相殺され、熱収縮に伴う伸び(又は縮み)の効果(の2倍)だけが抽出される。この機能を期待した配線であったが、常温時にどうしても平衡した状態を作る事が出来ず、実際の測定に利用する事が出来なかった。これは使用した固定抵抗器と貼り付けた歪みゲージの抵抗値が常温時に僅かな違いを持っており、その積を計算すると備え付けの可変抵抗器で補償出来る範囲を越えてしまい、平衡状態で成立すると仮定した $R_1R_3=R_2R_4$ の関係式が成り立たない事に原因がある。この事から、歪みゲージと固定抵抗器が混在する結線方法を諦め、Fig. 4 に示される新しい配線を試した。

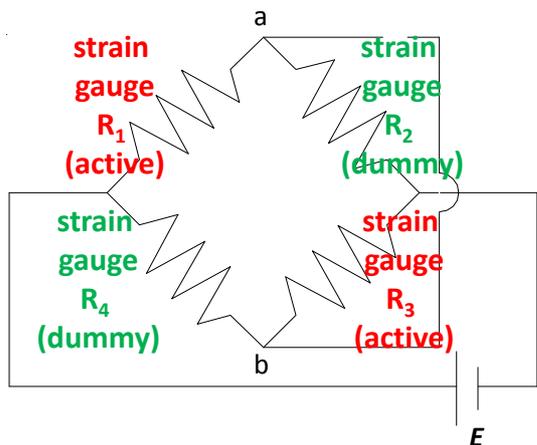


Figure 4: 4-gauge-active-dummy method.

Figure 4 の配線図では、これまで固定抵抗器を使っていた R_2 と R_4 の位置にも、歪みゲージが接続されている。この図中に書かれている "active" と "dummy" の違いは、"active" と示されている R_1 と R_3 の歪みゲージは、実際に冷却して熱収縮の様子を調べるバイメタル試験片に貼り付けられているのに対し、"dummy" 側の R_2 と R_4 とは、常に室温に保存される参照用のバイメタル試験片に貼られたゲージの抵抗であり、冷却される側の抵抗値と同じ初期抵抗を模擬的に回路に与える為に用意されたものである。再び式 (1) に戻って評価して見ると、dummy 抵抗側の歪み量 ε_2 と ε_4 は冷却を受けないために 0 のままであり、実効的には Fig. 3 と同じ歪みの効果の抽出が期待出来る配線になっている事が解る。

Table 1: Results of 4-Gauge-Active-Dummy Method

Objects	Measured Strain [$\mu\epsilon$]
t = 1.0 mm (convex)	-770
t = 1.0 mm (concave)	-770
t = 0.5 mm (convex)	-360
t = 0.5 mm (concave)	-440

Table 1 に、Fig. 4 の配線での測定の結果を示す。試験片として用意したバイメタルの厚みは 1 mm のものと 0.5 mm のものの 2 種類である。凹面側と凸面側の両方の測定において、概ね同じ値が得られており、全ての測

定された歪み量が負の符号を持っている事が特徴的である。この結果から、Fig. 4 で示す結線では、バイメタルの曲げ歪みの効果が表面と裏面で相殺され、純粋な熱収縮の効果だけが抽出されていると理解出来る。またその観測値が全て負の量である事から、熱収縮の効果で長手方向に縮んでいる事も読み取る事が出来、凹面と凸面での測定結果がほぼ同じ大きさを示している事から、均等に縮んでいる様子も確認出来る。

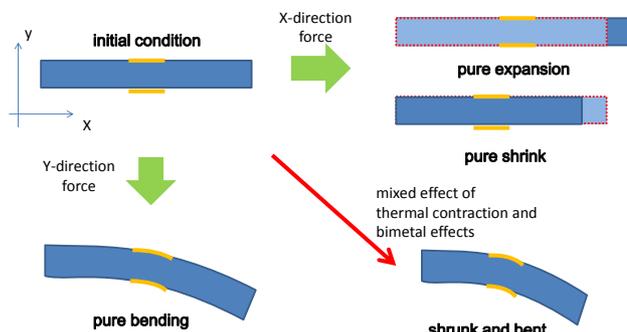


Figure 5: Target reconsideration.

最初に行われた曲げ歪み測定の結果では、約 5000 $\mu\epsilon$ 程度の歪み量が測定されていたが、改良された Fig. 4 の結線での測定では、一桁小さい収縮の様子が観測された。これらの結果は、Fig. 5 に示した Y 方向のみの力が加わった場合と、X 方向のみの力が加わった場合にそれぞれ相当すると考える事が出来る。しかし実際にバイメタル試験片を冷やした時に発生する歪みは、X 方向の力と Y 方向の力を同時に作用させた結果として生じる歪み量であり、バイメタル上に貼り付ける光ファイバが感知するのも、この様な合成された歪み量となるはずである。従って、引っ張り方向 (X 方向) と曲げ方向 (Y 方向) を別々に検知する測定ではなく、両者の合力をそのまま抽出して観測する方法が望ましい。以上の考察を基に、最も実効的な測定結果を与える結線として、Fig. 6 の様な配線を最後に試した。

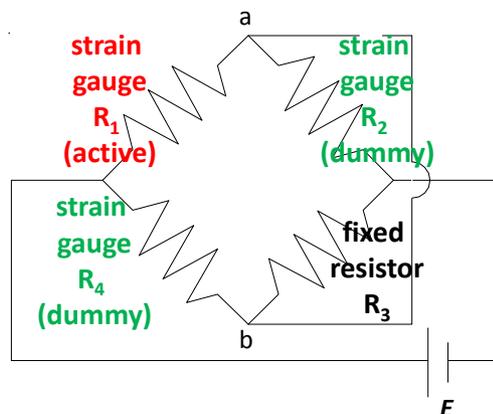


Figure 6: Modified 1-active-gauge method.

これまで行ってきた歪み測定では、バイメタル試験片の両面に貼り付けられた歪みゲージの存在を活かし、凸面と凹面(熱膨張率の小さい面と大きい面)の振る舞いの違いを利用する事で、より明確な伸縮の結果を得る事を目標としてきた。しかしその結果として、伸縮の効果

抽出する場合には曲げ歪みが、曲げ歪みの効果を抽出する場合には伸縮の効果が、それぞれ相殺により捨象されており、裏表に貼られたゲージの利点を活かす測定が出来ていなかった。Figure 6 に示す結線では、バイメタル試験片の表面若しくは裏面に貼られた、1 枚のゲージだけに着目し、伸縮と曲げの両方の効果を踏まえた歪み量を観測する事を目的としている。このため、これまで相殺の効果を与えていた R_3 の位置にのみ、常時室温に置かれる固定抵抗器を割り当て、 ϵ_3 の寄与を 0 に保つ事で、 ϵ_1 の値の直接測定が可能となっている。凸面の歪みの総量を知りたい場合には、凸面側に貼られた歪みゲージの抵抗を R_1 の位置に、逆に凹面の歪みの総量を知りたい場合には、凹面側に貼られた歪みゲージの抵抗を R_1 の位置に置く事で、どちら側の面の歪み量でも測定出来る。

Table 2: Results of Modified 1-Active-Gauge Method

Objects	Sample Center [$\mu\epsilon$]	Sample Edge [$\mu\epsilon$]
t = 1.0 mm (convex)	2300 ± 63	2150 ± 81
t = 1.0mm (concave)	-2570 ± 46	-2655 ± 121
t = 0.5 mm (convex)	2580 ± 40	2290 ± 54
t = 0.5 mm (concave)	-2370 ± 64	-2475 ± 129

Table 2 に、Fig. 6 の結線を用いた測定での結果を示す。試験片の中央と端の裏表面に貼られた歪みゲージが、室温から液体窒素環境に移された場合の歪み量を測定した。この結果から、試験片の厚さや測定場所に依らず、熱膨張率の大きい側の面は縮んでいるが、熱膨張率の小さい側の面が冷却によって確かに伸びている事が確認出来る結果が得られた。

3. バイメタルの比熱について

最初に述べた様に、本研究では、極低温環境下において、金属結晶等の物質の比熱が、著しく小さくなる特徴を捉え、それを温度計として利用する事を目標としている。極低温環境下で凍結した分子間の自由度に外から熱を与える事で、非常に小さな比熱を利用して物質の

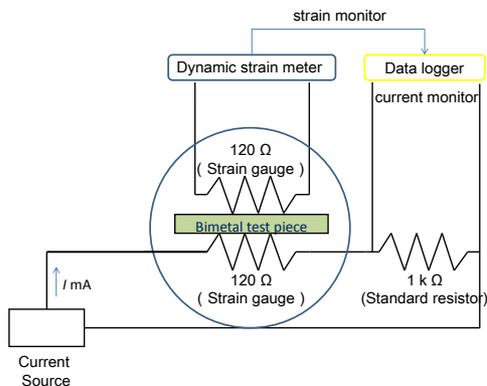


Figure 7: Circuit for specific heat evaluation.

温度を上げる。この結果、凍結していた自由度に活性が戻り、バイメタル効果によって微小ながらも歪みが生じるので、それを光ファイバを用いて検出する事が目的である。そこで、現在市販で手に入るバイメタル試験片について、常温ではどの程度の熱を与える事で、バイメタル効果が発現するかを試験した。Figure 7 に試験の回路図を示す。バイメタル試験片の表裏に貼り付けた歪みゲージ 2 枚の内、一枚を歪み測定用に残し、もう一枚には電流を流す事で発熱を促す。この電流によって発生した熱で誘起されるバイメタル効果を検出する事が目的である。下に、通電時に生じる動歪みアンプでの測定例を示す。

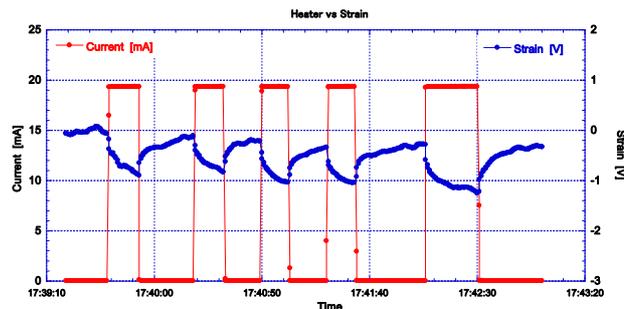


Figure 8: Bimetal response when current applied.

Figure 8 から明らかな様に、通電時にバイメタル効果が発現し、動歪みアンプの出力が変化している様子が確認出来る。Figure 8 の接続は、熱膨張率が大きい面に貼られた歪みゲージに通電し加熱した結果であり、発現するバイメタル効果が大きい。しかし実際の温度計の構想では、光ファイバによる漏れ光での加熱は熱膨張率の小さい側の面が想定されている為、通電する歪みゲージを反対側の物に切り替えて、通電量と観測された歪み量の関係を纏めた結果を Fig. 9 に示す。

Figure 8 の結果では、20 mA の通電時に、-1 V 程度の出力が観測されていたのに比べ、Fig. 9 の結果では、約半分の -0.5 V 程度の出力に落ちている。更に 8 mA 程度の通電時の出力結果の検出が下限となっており、5 mA 以下の通電では、発現した歪み量の検出が非常に困難な状況であった。この原因は、動歪みアンプ出力のドリフトにあり、通電前の状態で 0 点合わせを行っても、

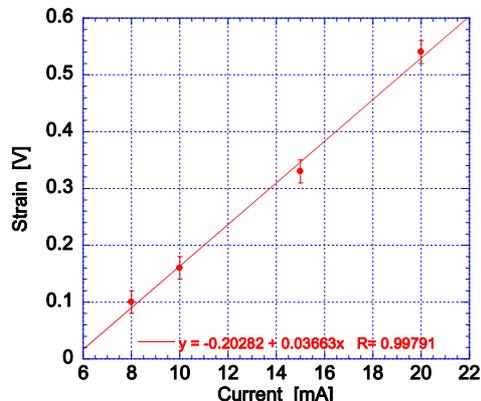


Figure 9: Detected strain against applied current.

通電後に歪みゲージの熱が冷めても0点がずれており、正確な歪み量測定が困難なためである。現在恒温槽の用意を進めており、動歪みアンプ出力の安定化に向けた改良を行っている。

4. まとめ

現在極低温環境下で機能する温度計の開発を行っている。温度検知機構の根幹を成すと考えている、低温環境下で延びる性質を示すバイメタルの特性を詳細に測定し、予想通りの振る舞いをしている事を確かめた。バイメタル試験片を補助治具とした温度計の開発を引き続き行っていく。

上述の歪み量測定を繰り返す中で、バイメタル効果の発現に必要な熱量の測定を行う着想を得た。これは今まで歪み量測定に用いていた歪みゲージを、発熱体として扱う事で、強制的にバイメタル効果を発現させ、その大きさを通電に用いていないゲージを使って測定する方法である。測定の結果、10 mA 程度の電流の通電で、バイメタル効果が検出出来る事を確認した。歪みゲージの内部抵抗値が120 Ωなので、約12 mW程度の熱量を与えれば、検出出来る大きさの歪みが発生した事になる。一方で、実際の熱源となるのは光ファイバであるが、このファイバからの漏れ光であるクラッドモードの熱量としては、概ね μW程度と予想されている。常温環境下で、望ましい熱量と供給が期待出来る熱量の間に約1000倍の差がある事が解る。この必要な熱量の差が、バイメタルを極低温環境に置く事により、自身の比熱が極端に小さくなる事で補うと言うのが、本研究の狙いである。今後比熱の減少の程度や、実際の光ファイバからの漏れ光の詳細な測定を通して、開発を進める予定である。

謝辞

本研究は科研費 [JSPS KAKENHI Grant Number JP18K04951] の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Shimizu *et al.*, “R&D of optical fiber thermometer for very low temperature”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 1281-1284.
- [2] H. Shimizu *et al.*, “R&D of optical fiber thermometer for very low temperature with bimetal”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 733-736.
- [3] H. Shimizu *et al.*, “Performance test of FBG and bimetal for very low temperature thermometer use”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 682-685.
- [4] T. Kurosawa, “物性論”, 基礎物理学選書, 裳華房.
- [5] H. Yamada *et al.*, RTRI REPORT Vol. 28, No. 9, Sep. 2014.
- [6] S. Takahashi *et al.*, “ひずみゲージによるひずみ測定入門”, 大成社.