

スーパーインバーの線膨張係数測定による学生実験での教育効果

小笠原 誠*

Evaluation of Educational Effect on Student Experiment by Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Super-inver

Makoto Ogasawara*

要旨: 本学で初年次教育として開講している基礎工学実験において、機械工学に対して更なる興味を喚起することを目的として、既存の線膨張係数測定の実験内容に低熱膨張材料であるスーパーインバーを試験片として加えた。本報では、スーパーインバーを未知試料として学生へ提示し、線膨張係数や比重、色などからこの材料を推定する課題を与えた場合の学習効果について、アンケートなどにより評価した結果を示す。

キーワード: 線膨張係数, 学習効果, スーパーインバー

1. 緒言

機械工学に関する専門的な授業を効果的に履修するためには、その前段階として物理学や統計学などの基礎的な範囲を十分に理解しておく必要がある。そのため多くの教育機関では、初年次教育において物理学実験などを必修科目としている。本学の機械システム系デジタルエンジニアリング科、及びメカトロニクス科でも職業能力開発促進法第十九条における職業訓練の基準¹⁾に則り「基礎工学実験」と称した授業科目を通じて、学生へ上述の内容に関する学習や理解を促している。

基礎工学実験では様々な実験テーマが取り上げられているが、この中に金属の熱膨張に関する実験がある。これは鉄やアルミニウムなどの一般的な工業材料について線膨張係数を測定することで、機械設計において重要な部品間の温度差に起因する熱応力の理解や、ひずみゲージに代表される計測センサの温度特性を考慮した選定に有効であると考えられる。ただし学習効果としては、この実験テーマで対象とした金属以外の様々な材料についても学生が興味を持ち、自発的・継続的に学習していくことが望ましい。ここで更なる学習意欲の向上に対しては、線膨張係数に特徴を有する材料についても測定を行うことで、驚きや興味を引き出す方法が考えられる。

そこで本報では、この金属材料の線膨張係数測

定という実験テーマについて更なる学習意欲の向上を目指し、バイメタルの低膨張側によく用いられているスーパーインバー²⁾を測定対象に加えた場合の学習効果について報告する。特に授業では、スーパーインバーを未知試料として学生に提示し、実験結果からそれを推定する課題を設定することとして、課題の正答率や実験終了後のアンケートにより学習効果を評価する。また、実験装置は市販の学生実験用のものを使用するため、線膨張係数が鉄の約 1/100 であるスーパーインバーに対する熱膨張の測定可否についても併せて報告する。

2. 線膨張係数の測定

2.1 線膨張係数

線膨張係数とは温度 1K の上昇によって生じる物体の伸び Δl と元の長さ l の比である。例えば、物体の温度が T_1 から T_2 へ上昇した時に、固体の一方向の長さが l から l' に増加したとすると、線膨張係数 α は以下のように与えられる。

$$\alpha = \frac{l' - l}{l \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{\Delta l}{l \cdot (T_2 - T_1)} \cdots \cdots (1)$$

金属材料の場合、この線膨張係数は概ね $10^{-5} \sim 10^{-6}$ と極めて小さい値であるため、物体の伸び Δl の測定では通常 1/1000mm 程度の精度が必要となる。

* 山形県立産業技術短期大学校
〒990-2473 山形県山形市松栄 2 丁目 2 番 1 号

* Yamagata College of Industry & Technology
2-2-1, Matsuei, Yamagata, Yamagata, 990-2473, Japan
e-mail: m-oga@astro.yamagata-cit.ac.jp

2.2 実験装置と計測原理

線膨張係数を測定する場合には光干渉法、歪みゲージ法、X線回析法などの種々の手法がある³⁾が、本実験テーマでは、式(1)における l 、 Δl 、 T_1 、 T_2 の測定に(株)島津理化製の線膨張率測定器HK-4を用いる。HK-4は図1のように、水蒸気により試験片を加熱する構造となっており、試験片の変形量測定にはオプティカルレバーを用いる仕様となっている。

オプティカルレバーとは、測定対象にレバーを介して鏡を取り付け、測定対象の動きを鏡に映るものや反射する光の強度の変化で測定するものの総称で、HK-4では鏡に映ったスケールの目盛の変化を望遠鏡から読み取ることで Δl を算出するために用いられる。ここで図2(a)から(b)のように長さ l の試験片が温度 T_1 から T_2 まで加熱されることで、その結果 Δl だけ熱膨張したとする。このとき前脚を試験片の上端面に設置された脚間長 r のオプティカルレバーは角度 ϕ だけ傾き、それにより望遠鏡によるスケールの読みが S_1 から S_2 に変化する。まず、ここでは角度 ϕ は微小であると考え、以下の関係が成立するとする。

$$\phi \approx \tan \phi = \frac{\Delta l}{r} \dots (2)$$

望遠鏡からのスケールの読みは図2(a)、(b)に示すように加熱前後で 2ϕ 分変化するため、この差を s とすると以下の関係が成立する。

$$s = S_2 - S_1 \dots (3)$$

$$2\phi \approx \tan 2\phi = \frac{s}{D} \dots (4)$$

ここで式(2)、(4)より ϕ を消去して式(1)に適用することで線膨張係数 α は次式によりそれぞれ測定した値から算出することができる。

$$\alpha = \frac{r \cdot s}{2D \cdot l \cdot (T_1 - T_2)} \dots (5)$$

なお、試験片の温度は蒸気加熱管の上方と下方に

挿入した2本の水銀温度計の平均値とする。

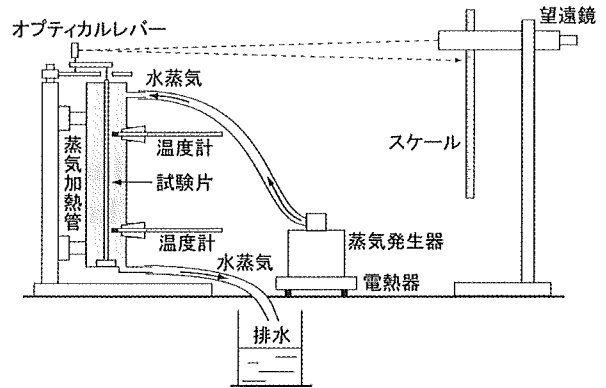
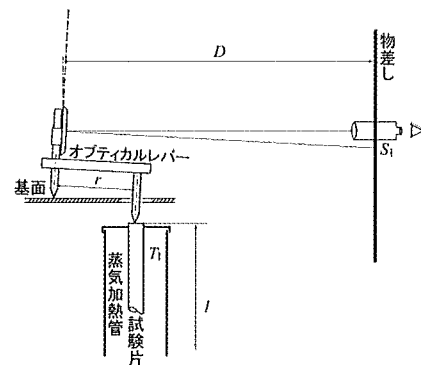
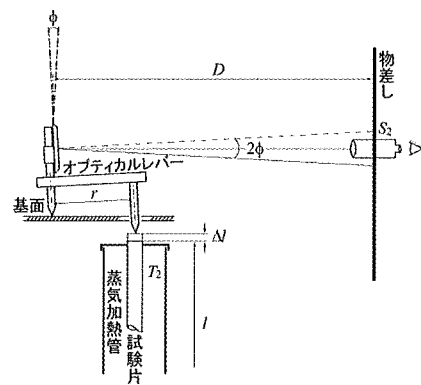


図1 線膨張率測定器 HK-4



(a) 加熱前



(b) 加熱後

図2 オプティカルレバーによる変形量測定

3. 実験

3.1 インバー合金

シャルル・エドゥアール・ギョームは1897年にFe-36Ni合金(質量%)が室温環境下で熱膨張がほぼ0であるという特性を発見した。室温付近で熱膨張が温度に対してinvariableであったことがインバーの語源である⁴⁾。その後、東北大学の増本らにより精力的な研究がなされ、次々と新しいイ

ンバー合金が発明された。本実験テーマで使用するスーパーインバーも増本らにより発明された合金の一つであり、インバーにコバルトを添加した Fe-32Ni-5Co (質量%) で線膨張係数は $0.5 \times 10^{-6}/K$ であるといわれている⁵⁾。またスーパーインバーの比重は質量%より概算で 8.24 である。本節では、この線膨張係数の測定の可否について検討する。

3.2 線膨張係数測定実験

線膨張率測定器 HK-4 を用いてスーパーインバーの線膨張係数を測定する。試験片であるスーパーインバーは(株)ニラコ社より購入したφ5.0×約500mmの丸棒とした。実験条件および結果、またそれらを用いて式(5)より導出した線膨張係数を併せて表1に示す。なお、実験回数を3回とし、表1ではその平均値を記載することとする。この結果からスーパーインバーの線膨張係数は $0.21 \times 10^{-6}/K$ となった。なお、標準偏差は 1.55×10^{-9} であった。この結果は3.1節で示した値よりも低くなっているが、Fe-Ni-Co合金はわずかな質量濃度の違いにより線膨張係数が大きく変化する特性を有しており、例えば63.5Fe-31.5Ni-5Coで線膨張係数は $0.207 \times 10^{-6}/K$ であることが報告されている²⁾。よって今回購入したスーパーインバーの質量濃度もこれに近いものだった可能性が考えられる。

また同実験条件においてHK-4付属の鉄試験片の線膨張係数を測定した結果は $12.3 \times 10^{-6}/K$ であった。これらを比較することで、スーパーインバーの線膨張係数が極端に小さいという特性をHK-4で十分に観察することができるといえる。

表1 スーパーインバーの測定実験結果

試験片比重	8.20
オプティカルレバーの脚間長 r [mm]	29.2
計測器間距離 D [m]	2000
加熱前の試験片長さ l [mm]	503.2
加熱前の試験片温度 T_1 [K]	302.2
加熱前のスケール値 S_1 [mm]	246.7
加熱後の試験片温度 T_2 [K]	371.5
加熱後のスケール値 S_2 [mm]	245.7
線膨張係数 α [$10^{-6}/K$]	0.21

4. 学習効果

4.1 課題正答率

前述の通り、本実験テーマではスーパーインバ

ーを未知試料として学生へ手渡し、比重や特徴的な線膨張係数、金属光沢などの見た目、質感からその未知試料がなにかを予測する課題を提示した。この課題に対する27名の学生の正答率は55.6%であった。誤答例としてはリチウム、カドミウム、石英ガラスなどがあった。これは材料の選定条件として特徴的な線膨張係数のみに注目してしまい、比重や見た目などを判断基準に含めなかったことや、調査資料としてインターネットホームページを利用したが、そこに記載されていたデータの信頼性の低かったことなどが原因としてあげられる。よって授業におけるレポート作成指導の際には上記の点を特に注意する必要があるといえる。

4.2 アンケート結果

本実験テーマによる学習意欲の向上を評価するために、履修学生へ実験レポート提出後にアンケートをとった。アンケート内容は設問を設ける形のものではなく、この実験に関する感想を自由記述するものとした。このアンケート結果をまとめたものを図3に示す。この結果から従来の線膨張係数の測定という実験テーマに特徴的な熱膨張特性を有する材料を対象に加えることで、一定の学習意欲の向上が伺えることが分かる。一方で改善を望むコメントも見られた。これはスーパーインバーの線膨張係数が他の金属に比べて著しく低いという特徴に注目できずに、得られた実験結果のみから未知試料を調査したことが原因と考えられるため、この点に注意して指導することで更なる学習効果の向上も望むことができるといえる。

スーパーインバーを実験の対象に加えたことにより学習効果が伺えるコメント

- ・未知試料については、その調べ方の訓練にもなるので、とても良い。このような新鮮な実験をもっと考えてもらいたい。
- ・未知試料の実験では線膨張係数が非常に小さい材料があることがわかり、材料の種類の違いにより線膨張係数がことなることを強く実感でき、とても勉強になった。
- ・未知試料の実験では線膨張係数がとても低く貴重な体験ができた。これからも続けて行けばいいのではと思う。(同様の意見×2)
- ・また機会があった時に比重や体積、密度などもっと深いところまで調査したい。

実験テーマ自体に学習効果が伺えるコメント

- ・材質の違いによって温度に対する変化の違いが実際に観察できてよかった。勉強になった。
- ・実験は手間がかかりとても大変だったが、チームワークにより楽しく実験ができて良かった。
- ・線膨張係数を考慮した機械設計をする必要があることが分かった。

改善を望むコメント

- ・未知試料についてもっと見つけやすいものにしてほしい。(同様の意見×4)
- ・実験で得た線膨張係数と一致するのを見つけれることができなかった。
- ・未知試料の選定については選択肢を設けて、その中から選ぶ形が良い。(同様の意見×3)

図3 自由形式アンケート結果抜粋

5. 結 言

本報では、初年次教育における基礎工学実験で行われる線膨張係数の測定について、従来の実験内容に特徴的なスーパーインバーを実験対象に加えた場合の学習効果について評価を行った。その結果から明らかになったことを以下にまとめる。

- i) スーパーインバーの線膨張係数は、市販されている(株)島津理化製の線膨張率測定器 HK-4 を用いることで観察可能である。
- ii) 特徴的な熱膨張特性を有する材料も未知試料として実験対象に加えることで、一定の学習意欲が向上することをアンケート結果により確認した。この試みにおいて効果的に学習意欲を高めるためには、未知試料の材料選定に対する適切な調査手法と、学生が実験で得られた数値のみにとらわれないようにするような指導を行うことが重要である。

また、更なる学習意欲向上へは、本報で取り上げたスーパーインバーとは逆に、ポリエチレンやポリプロピレン、シリコン樹脂などの線膨張係数が 10^{-4} オーダーと非常に高いものも実験対象として加える方法も考えられる。

謝 辞

最後に、本学機械システム系デジタルエンジニアリング科の庄司英明先生から多大なご協力とご支援をいただきましたことをここに記し、謝意を表します。

文 献

- 1) 労務行政研究所：職業能力開発促進法（労働法コメント 8），労務行政（2008）
- 2) 立原：金属の熱膨張について，北海道東海大学芸術工学部紀要, Vol.12, pp.1-15 (1992)
- 3) 日本熱物性学会：新編熱物性ハンドブック，養賢堂，pp.686-690 (2008)
- 4) 深道：インバー合金の種類と基礎物性，まてりあ, Vol.36, No.11, pp.1064-1069 (1997)
- 5) 岸田，増本：インバー合金の各種精密制御機器への応用，まてりあ, Vol.36, No.11, pp.1080-1085 (1997)