

加工硬化を見て理解する

永井 恭一

医療学部 医療工学科 臨床工学コース
e-mail:nagai@toua-u.ac.jp

はじめに

教員になり大学生を教えて約20年になるが、講義の方法については今も少なからず試行錯誤の状態である。工学に関する講義は基礎知識を伝えるという部分が多く、一人対数十人の講義では教員から学生への一方通行の講義になりやすい。どのようにすれば学生の自発性を引き出せるか、学生が自分で考えて原理や法則に納得し、理解できるようにするかは非常にむずかしいと感じる。

学生のようによく観察することは大切なことであろう。90分の講義の中では途中眠たそうな顔をしたり、下を向いていたり、隣としゃべり出すような学生も見かける。一本調子で話すのではなく、大切な箇所は語気を強めるなど変化も必要になる。私もそうであるが、大学では教科書を使わない講義も多々あり、このような場合プリントなどの資料を準備しておくことは教員にとっては話す内容に詰まったりすることがなく、学生にとっても聞きやすく理解しやすくなるので、必要なことのように思える。また、ノートを取らせるような講義形式もよいと思えるが、授業に集中させ続けるだけでなく、途中で少し脱線したり、息抜きを入れたりすることも必要であろう。

大学に限らず最近では教育機材が整い、パソコンやプロジェクタを使って、カラフルな図などをスクリーンに映し出すタイプの講義が多く見られる。学生の注意を引きつけ、少しでも興味や関心をもたせるという意味では有効と思える。小学校でも現在は電子黒板やタブレットパソコンなど授業のデジタル化が進んでいる⁽¹⁾とのことであり、私たちの時代とは大きな違いである。

加工硬化の実験

視覚に訴え、授業に引きつけるということでは実験を行うことも有効であろう。また、これがいくらかの息抜きになる場合もある。教室で行う実験は簡単なものしかできないという制限もあるが、シンプルであるということはわかりやすさにつながるようにも思える。

金属には加工をしてひずみを与えると硬くなるという現象が起こり、加工硬化と呼ばれる。図1は工業用純アルミニウム板に、圧延（ローラーの間に板材を通して板厚を減少させる操作）を行ったときの圧延の加工度とビッカース硬さの関係を示したものである⁽²⁾。〔以下、アルミニウムをAlと略記する場合もある。〕図からAl板の硬さは加工度に対してほぼ直線的に増加していることがわかり、加工度の高い領域でも飽和せず増加している。金属の性質として強さ、硬さ、延性などがあるが、これらは金属が変形されると変化するという特徴がある。私が担当する医療工学科の3年生に対して、「材料工学」の授業でこの加工硬化（あるいは

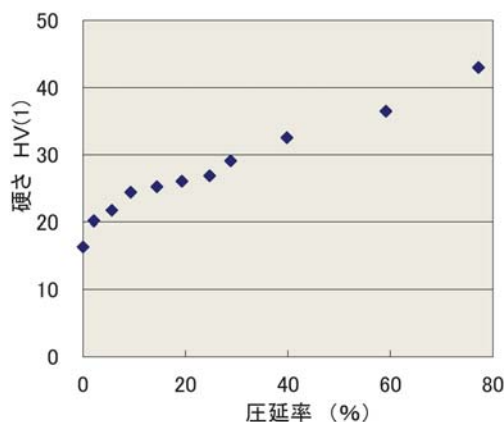


図1 Al板の加工による硬さの変化

は変形による金属の性質の変化)を単純に説明してもあまり理解してもらえない。

そこで、次のような実験と組み合わせて理解を促している。高さ30cm程度の位置にAl線が引っ掛けられるような枠を用意する。このAl線に曲げ荷重を加えるが、その負荷形式は2つの支点で支え、その中央に荷重を加える3点曲げと呼ばれるものである。アルミニウムは加工硬化しやすい代表的な金属であり、取り扱いも容易なのでこれを用いている。

実験内容は次の通りである。

- ①Al線を枠に引っ掛け、中央におもりを静かに載せる(図2(a))。すると、Al線はおもりを支えられず、おもりとともに落下する(図2(b))。
- ②次に、落ちたAl線の中央部分を2、3回折り曲げて(図2(c))、その後直線状にしたものと同じおもりを載せると、今度は落ちずにおもりを支えることができる(図2(d))。

金属の硬さと強さはほぼ対応する関係にある。硬さは硬さ試験機で数値を出すことができ、評価することはできるが、見て感じるという点ではややわかりにくく、それに比べて曲げ強さはおもりを使って落ちたり落ちなかったりするのが見てわかり、このような場合にはその大小が判断できる。

この実験では強さに違いが出た(すなわち硬さに違いが出た)ことを、目で見えて実感できるようにするという目的がある。したがって、最初はおもりが落ちて、次にAl線を変形させるとおもりは落ちないようにすることがポイントであり、このためにAl線の寸法、枠のスパン(Al線を引っかける支点間距離)、おもりの重さを前もって計算しておく必要がある。

材料力学によれば、Al線の直径を d (mm)とすると、断面係数 Z は $Z = \pi d^3 / 32$ (mm^3)であり、

またおもりの重さを P (N)、スパンを s (mm)とすると、この実験の場合、曲げモーメント M (N・mm)は $M = (1/4) P s$ である。したがって、弾性変形での曲げ応力 σ (N/mm^2)は

$$\begin{aligned}\sigma &= M/Z \\ &= (1/4) P s / (\pi d^3 / 32) \\ &= 8 P s / \pi d^3\end{aligned}\quad (1)$$

のようになる。ここで、

$$P = 2 \sim 2.5 \text{ (N)}, d = 3 \text{ (mm)}, s = 200 \text{ (mm)} \quad (2)$$

とすると、

$$\sigma \doteq 38 \sim 47 \text{ (N}/\text{mm}^2) = 38 \sim 47 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

が得られる。

焼なまし状態のアルミニウムの引張強さは約70~90 N/mm^2 であり⁽³⁾⁽⁴⁾、耐力は約30~35 N/mm^2 である⁽³⁾⁽⁴⁾。(2)式の荷重、寸法の条件ではAl線は弾性限度を越して、「く」の字になって折れ曲がりおもりと一緒に落下する。おもりは耐力を少し越えるぐらいの重さがよく、ここでは2~2.5N($\doteq 200 \sim 250\text{gf}$)としたが、この重さなら落ちて危ないことはない。実験②でAl線を曲げ変形させた後にはおもりが落ちないようにしなければならないが、5回以内の折り曲げではっきりと加工硬化が現れ、おもりを支えることができる。

硬さともろさの関係は学生に勘違いされやすい。特に、本学科の学生のような場合にはまちがいのないように伝えておく必要がある。硬いという性質は変形しにくいということであり、壊れにくいということではなく、また金属が硬いという性質をもつ場合には、もろいという性質につながることになる。針金で同じ箇所を何度も繰り返して折り曲げると、引きちぎれてしまう。これは加工硬化の身近な例であり、折り曲げた部分がしだいに硬くなり、同時にもろくなって破断するというところで、硬さともろさの関係をよく示した例でもある。

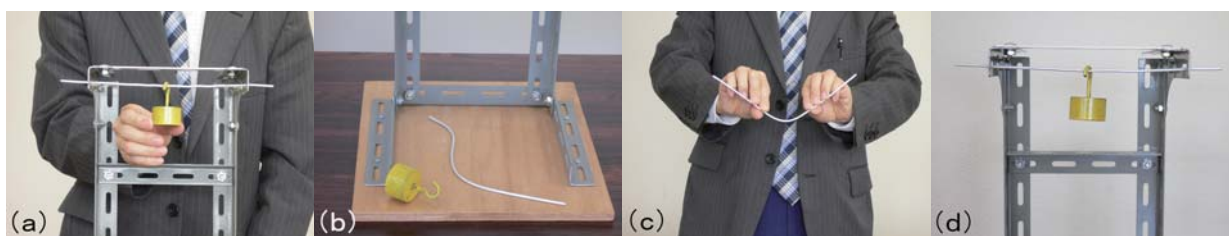


図2 加工硬化の実験のようす

工学部の中の機械や材料に関係した学科の学生が対象の場合には、加工硬化の知識だけでなく、メカニズムの話が必要となる。実際の金属には多くの欠陥が存在していること、そして塑性変形と転位（線欠陥）の移動、転位の増加と動きにくさなどである。しかし、本学科の学生には、メカニズムの話は省略して金属にこのような性質があることを知らせるだけにしている。

実験試料の熱処理

この実験に使うAl線はホームセンターや100円ショップでアルミ針金などと表示されているもので十分であるが、これらは加工硬化された状態で売られているので、このままで使用するのではなく、電気炉などを用いて焼なまししておいた方がよい。工作が苦手であれば、電気炉は比較的簡単に自作できる。用意するものはニクロム線、電気炉用炉心管、断熱材^(*)、スライダック（変圧器）、交流電流計、熱電対、電線、ステンレス針金、圧着端子などであり、その他温度調節計があれば好都合である。

作製方法は（コイル状の）ニクロム線を引き伸ばし、炉心管に巻き付け、ニクロム線の位置が動かないように針金などで2,3ヶ所を固定する。アルミナセメントがあれば水で溶かしてニクロム線を覆うように塗り、乾燥させて断熱材を巻き付ける。アルミナセメントがなければ断熱材を直接巻き付けてもよいと思われる。

また、回路には交流電流計を取り付けておくのがよい。ほぼ最小限の回路としては、スライダック、電気炉（ニクロム線）、電流計であり、図3のような構成となる。このように、スライダックがあれば電圧を100Vから変えて加熱できるが、これがない場合は直接ニクロム線に100Vがかかった状態での加熱となる。図4は電気炉の例を示したものである。炉心管は内径60mm、長さ600mmのものを使用し、断熱材の厚さは約60mmとした。

電気炉ができたら、Al線を約550℃で1時間加熱保持して冷却する。例えば、図4の電気炉の場合、65V、11.3A（約730W）で550℃までの時間は70～80分である。炉中で冷却するなら、保持時間を

若干短くしてもよいであろう。

温度調節計は設定値で温度を一定にすることができるとともに、測定温度もわかる便利な機器であるが、これがない場合には（回路に中間スイッチなどを入れて）手で電気炉をONまたはOFFにして温度を一定保持することになる。保持時間が1時間なので何とか対応できるが、注意点は余熱に注意することであり、設定温度の少し手前でONまたはOFFにすることである。また、温度についても熱電対の起電力をテスターなどで測定すればわかり、例えば室温20℃でアルメル・クロメル熱電対を使用するとき、19.8mVが500℃、21.9mVが550℃に相当する。

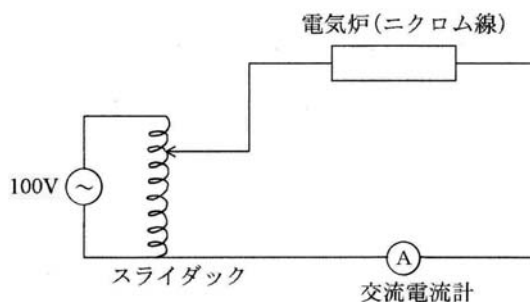


図3 電気炉を用いた回路



図4 電気炉

(*) 断熱材の例：ニチアス社製、ファイフレックスブランケットT/# 5120など

一方、購入したままの（ある程度加工硬化している）AI線でもさらに加工硬化は起こるので、熱処理をしなくても購入したままのAI線で加工硬化の実験は可能である。例えば、購入したままのAI線を使う場合には、(2)式の $d = 3$ (mm), $s = 200$ (mm) の寸法条件で、おもりを約6Nに増やす必要がある。ただし、この場合には落下したAI線を約10回以上折り曲げないとはっきりした強さ（硬さ）の違いが現れないこともあり、熱処理した場合に2, 3回の折り曲げではっきり加工硬化が起こるのに対して、インパクトの点ではいくらか劣ることになる。

最後に

今の時代は、大学でも教員が以前にもましてわかりやすく授業を行うようになってきている。また、学生による教員の授業評価も行われていて、教員の授業方法が改善されているように思える。コンピュータを使った教育機材が充実して、視覚に訴えながらわかりやすい授業を行えることは、教員にとってはありがたい。また、教室での実験も視覚に訴えることができることは、学生にとって、わかりやすさや理解の促進につながるであろう。

ここでは授業に簡単な実験を取り入れることを提案し、一例として加工硬化の取り扱いを紹介した。このような実験により授業内容の理解を増すだけでなく、これがきっかけとなり学生が興味や関心をもち、自ら学ぼうとする姿勢につながれば幸いであると考えます。

文 献

- (1)朝日新聞西部本社版，2011年12月8日朝刊など
- (2)永井恭一：未発表
- (3)<http://www.zerocut-watanabe.co.jp/contents/handbook/hand041.html>
- (4)<http://tatenejouhou.di-k.net/altokusei1.html>