

# 工業教育（機械工学分野）におけるアクティブラーニングの効果

—— 「機械材料学」に関する実例の紹介と考察 ——

水野 衛<sup>1</sup>・尾藤 輝夫<sup>1</sup>・境 英一<sup>1</sup>  
小宮山崇夫<sup>1</sup>・吉澤 結子<sup>2</sup>・津田 渉<sup>2</sup>

機械工学は工学の中でも教育課程がある程度確立された分野であり、多くの大学に機械工学に関する学科があるが、核となるカリキュラムはほぼ同じである。機械工学の基礎をなし中心となるのが、材料力学、熱力学、流体力学、機械力学の"四力"（よんりき）と呼ばれる科目である。これらの専門分野は物理学、中でも力学を基礎にした学問であり、物理学ならびにそれを基礎とした専門科目を理解するためには数学も必要となり、大学入学後は数学や物理学を修得してから専門科目を履修する。また、機械工学はものづくりの学問であり、実習や製図などエンジニアとしての技能を身に付けるための科目や専門科目を深く理解するための演習や実験も教育課程に用意されている。日本全国の大学にあるいわゆる"機械工学科"は、これらの学問分野や授業科目を中心に、各大学・学科ごとの特徴を出すための工夫がなされたカリキュラムを編成している。

ところで、機械工学のカリキュラムの中に「機械材料学」という科目がある。この科目は、機械要素や機械構造物に使われる材料、主に、金属、プラスチック、セラミックスなどの材料特性や種類・特徴などを学習する。その理由は、機械要素や機械構造物を設計・製作するときに材料の種類と特性を知らないと、設計時に材料を選択したり、壊れないように寸法を決めたり、また、設計した物の加工法を適切に選んだり、実際に加工したりということができないためであり、機械工学を専攻する多くの学生が学習する。そのため、「機械材料学」も比較的"機械工

学科"の教育課程の中に標準的に入っている大学が多い。また、「機械材料学」はどちらかといえば材料学の基礎と、具体的な機械材料の知識をオムニバスの的に学習することが多く、数学や物理学の知識も必要としないため、低学年で履修することが多い。本学でもクサビ型カリキュラムの関係もあり、機械知能システム学科では1年生の前期（1セメスター）に配置されている。1セメスターの授業は、特に普通科の高校を卒業した学生にとっては工学の知識はまったくなく、金属材料として何があるかも答えられない学生も少なくない。そのような学生を対象に授業を行う場合、教授しなければならない知識もある程度多くなり、簡単な実験や実習を授業時間内に実施することが難しい場合がある。

システム科学技術学部のシステム科学技術基礎科目では、入学したばかりの学生に対しこれから学ぶ専門分野への動機付けを行い、ものづくりの楽しさを実際に体験できるような導入科目として「創造科学の世界 A~D」を1セメスターに開講している。機械知能システム学科では「創造科学の世界 A」として、学科を構成する代表的な専門分野を手や体を動かして体験できる教育プログラムを提供している。例えば、流体力学分野では学部棟の吹き抜けを利用して紙飛行機を飛ばしたり、材料力学分野では紙を使い講義室でもできる強度試験を実施している。「機械材料学」の関連では、講義室でできる金属材料に関する簡単な実験を行っている。「機械材料学」に関しては1セメスターで専門科目の授業があるため、座学で学んだ知識を再度ア

<sup>1</sup>システム科学技術学部

<sup>2</sup>生物資源科学部

クティブラーニングを通して理解を深め定着するという側面を持っている。本稿では、まず初めに、「創造科学の世界 A」で実施している「機械材料学」に関する実験と講義科目「機械材料学」との関係を紹介し、その相乗効果について考察する。

一方、本荘キャンパスには学生の自主的、創造的な科学活動を支援する目的から創造工房が平成13年に設立されており、工具や測定機器、コンピューターなどものづくりや実験に必要な設備をライセンス制で使用することができる。また、地域貢献の一環として夏休み科学教室「創造学習」を企画し、地域の小中学生の科学への興味や好奇心、ものづくりへの意欲を育み、それらを充足させるための活動を行っている。学内の学生向けには「創造楽習」("学"ではなく、"楽"の字を使用)と題して夏期と冬期の2回に分けて楽しみながら科学に親しむための講座を開催している。「機械材料学」と関連付けて企画しているわけではないが、「機械材料学」あるいはその発展科目である「破壊力学」と内容的に関係の深い「創造楽習」の講座として"破壊して観よう"というのがある。例年、機械知能システム学科の1年生も参加することから、専門科目「機械材料学」と「破壊力学」との関係性や相乗効果についても本稿で紹介し考察する。

なお、本稿では「機械材料学」と「破壊力学」に関する知識と関連付けて実験等の意義や効用を説明し考察しており、各専門科目については参考文献に教科書を挙げておくので、詳細はそちらを参照されたい。また、創造工房や「創造楽習」については参考文献にそれらのホームページを記載しておく。

### 「創造科学の世界 A」

「創造科学の世界 A」は、学科を代表する各専門分野の教員がそれぞれの専門性を活かし、実際に手や体を動かす作業や実験を取り入れた授業を行ったり、あるいは、グループワークをしながらこれから学ぶ機械工学という学問分野への興味を引き出し、学修への動機付けを行っている。導入科目としての側面を持つことから、

「健康講座：心と体の健康」や「導入講座：キャリアデザイン（目標設定）のしかた～未来の自分をつくる」、あるいは、学長による講話も取り入れている。また、学生自主研究の紹介や地元企業の工場見学も実施している。

機械材料学分野の担当としては、尾藤輝夫教授を主担当として"金属を知るための簡単な実験"を1セメスターの最後の方で実施している。「機械材料学」の授業が同じ1セメスターにあるため、ある程度「機械材料学」の授業を聞いてからこの実験に臨むための配慮をしている。"金属を知るための簡単な実験"は名古屋工業大学で考案されたもので(小山、小坂井、及び土井(2002))、本学ではその一部を実施している。数種類の金属(銅、アルミニウム、ステンレス鋼、ピアノ線、形状記憶合金)の針金とライター、紙コップと水、アルミホイルを全学生に配布し、講義室の机に座ったまま、金属材料の本質を理解できるような実験を行っている。この実験では主に金属材料の次のような性質を"指先"で体験してもらっている。

- (1) 金属による熱伝導率の違い
- (2) 加工硬化と回復
- (3) 焼き入れと焼き戻し
- (4) 形状記憶合金の性質

### 熱伝導率

金属材料は、金属原子が金属結合により結晶構造を作り固体として存在する。金属結合の特徴は、自由電子が自由に固体内を移動することであり、これにより金属特有の材料特性(電気が流れる、金属特有の光沢など)が出現する。我々は日常生活の中で、金属材料は一般に熱をよく伝えるという経験を持っている。これは、温度が高い・低いと人間が感じる原因となっている原子の運動エネルギーを金属結合特有の自由電子が材料内で運ぶためである。

そこで、"金属を知るための簡単な実験"では、金属材料として銅とステンレス鋼の針金を使用し、針金の一端を手で持ち、反対側をライターで炙る。最初は銅の針金で実験を行うと、これまでの経験通りすぐに針金は熱くなり、多くの学生は手を放す。熱せられた針金を落としても机が焦げ付かないように机の上にはアルミホ

ルが敷かれており、学生はその上で実験を行っている。次にステンレス鋼の針金で同様の実験を行う。そうするといつまで針金を熱しても一向に熱くならない。針金を炙っているライターの方が熱くなり、多くの学生それをきっかけに実験を止める。

ステンレス鋼は鋼（鉄と炭素の合金）に Cr あるいは Cr と Ni を添加した合金であり、添加された Cr 原子や Ni 原子は自由電子の移動を固体内で妨げるため、自由電子は原子の運動エネルギーを遠くの原子まで届けられず、すなわち、熱の伝わり方が悪くなり、銅の針金の様には熱くならない。実際に手で熱の伝わり方の違いを体験した後、尾藤教授により種明かし（材料学的な説明）がある。すなわち、金属材料は金属結合により結晶構造を有し、自由電子の移動により熱が伝わるが、合金化することにより自由電子の移動が制限され、熱の伝わり方が遅くなる。学生は「機械材料学」の授業で知識として学んだことを、「創造科学の世界 A」で別の教員から説明を聞き、再度知識を確認し理解するとともに、指先でそれを体験することになる。このように知識と経験が合理的に結びついたとき、学生は熱の伝わり方を原子レベルで理解し、またその知識は手の感触（経験の記憶）とともに脳に深く刻まれる。すなわち、見えない金属中の電子の移動を熱の移動として指先で感じ、経験することがこの実験の本質である。なお、上述のように熱伝導率は自由電子の移動のしやすさで決まるため、電気をよく通す材料（自由電子がよく動く材料）は熱もよく伝えることになる。

### 加工硬化

針金を任意の箇所で切断したいとき、切断したい箇所を中心に何回も反対方向に折り曲げるとそこで針金が切れることを我々は普通の生活の中で経験している。これは材料学的には加工硬化で材料が硬く脆くなり、そこで脆性破壊していると説明できる。"金属を知るための簡単な実験"においても針金の同じ箇所を何回も繰り返し折り曲げ、硬さの変化を指先で感じ、加工硬化を直接経験してもらう。また、硬くなった箇所をライターで熱して柔らかくなる回復も

経験してもらう。

金属が曲がって力を取り除いても元に戻らない永久変形は塑性変形と呼ばれ、せん断力により原子がずれる滑り変形によって起こる。この滑り変形は規則正しく並んだ結晶構造の乱れである転位の移動により起こる。また、塑性変形が進むと転位の数が増え、これらがお互いに絡み合っただけで転位は動きにくくなる。この段階で塑性変形をさらに起こそうとすると、大きな力で動きにくくなった転位を動かさないと滑り変形は起こらないので、人間の指は材料が硬くなったように感じる。これを加工硬化と呼ぶが、この実験では転位の数が増え、転位が移動しにくくなるという原子レベルの現象を、針金が硬くなるという指先の感覚で体験することになる。

逆に言えば、指先で触っていた針金が硬くなった時、針金の中で転位の数が増えそれが絡み合っただけで動きにくくなっている画像が頭の中でイメージできれば、この実験は成功と言える。もちろんそのために、実験をした直後に尾藤教授は分かり易く印象に残る図面や動画を示しながら、転位の移動や塑性変形という現象を解説している。「創造科学の世界 A」の全授業が終わった後のレポートを見ていると、学生からは「機械材料学」の授業で習った知識を、「創造科学の世界 A」で再度実験で体験し、また、分かり易い図面や動画で解説してくれるので、大変勉強になるとの回答を得ている。すなわち、座学で教員から学生に知識を教授することも大切であるが、それを後日実験で体験し、再度解説することによりその知識の理解は深まり、また、実際に体験したことは知識とともに記憶に長く留まることになる。いかに印象的な画像や体験をタイミングを見計らいながら学生に与えることができるかが重要なポイントと言える。

### 焼き入れ・焼き戻し

焼き入れは、赤く熱した金属を水などに入れて急冷する熱処理で、金属を硬くするために行われる。ただし、焼き入れだけでは硬くなるが脆くなるため、実用的には焼き入れの後、焼き戻しも行い、ある程度破壊に対する抵抗（靱性）も付与する。

"金属を知るための簡単な実験"では、ピアノ

線（炭素鋼）で焼き入れと焼き戻しを体験する。すなわち、何もしない状態のピアノ線は硬くて指では曲げられない。次に、ピアノ線をライターで赤くなるまで熱して紙コップの中の水にかけると、ジュッという音とともに多少湯気が出てピアノ線は急冷される。この焼き入れをしたピアノ線を指で曲げると簡単に折れてしまう。焼き入れにより硬く脆くなったことを簡単にピアノ線が折れるという現象として体験する。そして、焼き入れをしたピアノ線を再度ライターで軽く加熱して冷ますと焼き戻しがなされ、今度は非常に硬いが折れることが無い、すなわち、硬いが韌性を持った金属線に仕上げることができる。

焼き入れ・焼き戻しは、温度変化による鋼の結晶構造の変化（変態）と温度を変化させる速度の違いにより結晶構造の変化が異なることを、針金の性質を通して体験することになる。材料学的には、針金を赤く熱した状態がオーステナイト、ゆっくり冷やした状態がパーライト、水に入れて急冷した状態がマルテンサイト、マルテンサイトを焼き戻した状態がトールスタイトと呼ばれる組織（結晶構造）になっており、それぞれの結晶構造の違いが針金の性質の違いに現れている。針金をライターで熱することにより真っ赤になった針金、それを一気に水に付けることによりジュッという音がして急冷される様子は非常に印象的であり、学生はこの体験により焼き入れの操作を記憶に留めるとともに、焼き入れの後、焼き戻しをする理由も実際の体験を通して学ぶことになる。

### 形状記憶合金

形状記憶合金はそのネーミングからも容易にどのような材料か推測できるが、普段の生活の中でもその名前を耳にすることが多く、大学に入ってすぐの1年生であってもどのような材料かは知っている学生が多い。形状記憶合金にはいろいろな種類の合金系があるが、“金属を知るための簡単な実験”では、Ti と Ni の合金系を使用している。

形状記憶合金の針金を折り曲げてからライターで炙ると、針金が記憶している元の真っ直ぐな状態に戻る。この戻るときの速度が思いの外速く、その変位も大きく、針金の挙動がまるで生

物のような動きのため、ほとんどの学生は声を上げて驚く。一方で、この熱で針金動く様を見ていると、機械を動かすための駆動源として活用できるのではないかと、学生は知的好奇心をくすぐられる。この驚きと何かに応用できるのではないかと思わせる体験は、将来エンジニアに育つであろう機械知能システム学科の学生の今後の工学教育に非常に重要であり、学習意欲を高めるための大きな動機付けとなっている。

ちなみに、形状記憶合金は温度変化によりオーステナイト相とマルテンサイト相の間で相変態を起こす。室温のマルテンサイト相で力を加えて変形させると、原子の結合が切れる滑り変形による塑性変形ではなく、原子の結合はそのままにせん断変形に起因した変形を起こす。そのため、相変態する温度を形状記憶合金に与えると、形状記憶合金はオーステナイト相に変態し、元の安定な形に戻る。したがって、この形状記憶合金の実験では、加熱すると温度によって相変態が起きるとい現象を体験を通して学び、形状記憶合金の生物のような動きと共に記憶に留めることができる。

このように「創造科学の世界 A」は、高校を卒業したばかりの学部1年生が受講し、体験的な学習を通してこれから学ぶ専門科目を学修するための動機付けを行っている。一方、クサビ型カリキュラムの一環として1セメスターにおいて比較的物理学や高度な数学の知識を必要としない「機械材料学」が配置されており、機械工学の教育課程に含まれる専門科目を1年生の前期から学ぶ。「機材材料学」ではある程度の知識を教授し学生はそれを学習する必要があるが、“金属を知るための簡単な実験”のようにその知識を指先で材料の変化として感じ、目で見て体験することは、専門的な知識の理解を深める上でも、その知識を長く記憶に留める上でも非常に重要であり効果的であるといえる。

### 「創造楽習」

本荘キャンパスにある創造工房は、システム科学技術学部の創造工房委員会が企画・運営を行っている。学生の自主的、創造的な科学活動

を支援する目的から、ものづくりや実験に必要な設備をライセンス制で使うことができる。学内の学生向けの企画として夏期と冬期の各シーズンに「創造楽習」を行っている（"楽"の字を使用）。この「創造楽習」は学生教育の一環として、課外講座を通して学生の知的好奇心を刺激し、自発性・積極性を涵養することを趣旨としている。学内の教員に講師を募集し、企画書を提出してもらい、応募学生の有無により開催される。必ずしも創造工房の施設を使用するわけではなく、各教員の趣向を凝らした内容で、それを実施するのに相応しい場所や装置が使用される。平成28年度の夏期と冬期に企画されたテーマはそれぞれ次の通りである。

#### 平成28年度夏期

- ・極小世界の加工を体験しよう
- ・曇った日に天体観測可能なシステム構築
- ・3D プリント & 3D CAD ソフトを体験してみよう
- ・単3電池1本で汎用 LED を光らせよう！
- ・Arduino を使ってみよう
- ・知って得する♪電子部品の使い方！～人感センサー～
- ・LaTeX でかっこいい論文を書こう～数式を自由自在に書けるようになる～
- ・建築空間と暮らしを描いた映像作品を楽しむ（荻上直子監督の一連の作品から）
- ・光のいろいろ中級編～光を制御して色を変える～
- ・破壊して観よう

#### 平成28年度冬期

- ・CAVE に対応した VR アニメをつくる
- ・空気で A ha! 体験 (Solidworks Flow Simulation)
- ・紙で防音構造を設計しよう (Solidworks Simulation)
- ・オリジナルランプシェードを作ろう
- ・力が加わる物体がどのように変形するか計算してみよう (ANSYS 入門)
- ・3色 LED ライトを自作してみよう～回路設計から製作まで～

いずれも1～2回程度で完結する内容で、講師は若手の助教、准教授が多いが、教授が直接担当しているテーマもある。テーマと概要を見ると、担当する教員の専門や教育分野と関係が深いことが分かる。この企画は教員の自主的な応募によって成り立っていることを考えれば、学生に教員自身の専門分野に興味を持ってもらいたいという教員の熱意が感じられる。また、学生が興味を持ち、初学者であっても気軽に参加し、体験できるよう、テーマ名や内容も工夫されている。

本稿の主題である「機械材料学」と関連深いテーマとしては「破壊して観よう」が挙げられる。ここ数年連続して電子情報システム学科の小宮山崇夫助教と機械知能システム学科の境英一助教により企画・実施されており、学科を超えた教員の連携によって成り立っている点も特徴である。概要は、「材料を引っ張って破壊すると、その壊れた面には壊れ方の情報が現れます。陶磁器のように割れたのか、鉛のように延びながら割れたかなど、破壊の進み具合がわかります。材料を壊して、電子顕微鏡で破壊の様子を観察してみよう。」となっている（募集要項の概要より）。「機械材料学」の授業中にこの企画を紹介することもあり、例年、「機械材料学」の講義を履修している機械知能システム学科の1年生も何名か参加している。

#### 破壊して観よう

平成28年度の「破壊して観よう」の募集に対し、機械知能システム学科1年生が1名、4年生が1名、総合システム科学専攻の博士課程後期課程の学生2名の応募があった。この企画では炭素鋼の丸棒試験片で引張試験を行い、単位面積当たりの力である応力と初期長さに対する伸び率であるひずみを計算する。引張試験は試験片の破断まで行い、その破面を電子顕微鏡で観察する。丸棒による引張試験は、機械材料の特性を知る材料試験の中でも基本となるものである。丸棒の引張試験は室温と液体窒素で冷却した-196℃で行う。「機械材料学」では延性-脆性遷移や低温脆化という概念を習う。すなわち、室温で引張試験を行ったとき、炭素鋼は滑り変形による塑性変形を生じるため、炭素鋼は延性を

示す。しかし、材料を低温に保つと滑り変形が起きにくくなり、脆性を示す。温度により同じ材料でも延性から脆性に遷移する。材料が延性から脆性に遷移すると変形の仕方も変化し、応力-ひずみ関係にもその変化が現れる。また、材料の特性が変われば破壊の仕方も変化し、その様子が破面に現れる。今年度の"破壊して観よう"は、このような温度変化による材料特性の変化を丸棒による引張試験により確認し、破壊した試験片の破面を後日電子顕微鏡で観察することにより、破壊特性の変化も確認しようとするものである。

ちなみに、温度が変わると変形や破壊の仕方が変化するように、同じ材料であっても力が加わる（あるいは変形する）速度が変わると変形や破壊の仕方が変化する。一般的に、金属材料であれば速度が速いほど塑性変形が起きにくくなり、脆性的な性質を示すようになる。これは温度変化と同じで、速度が速くなると原子レベルでの滑り変形が起きにくくなるためである。そのため、過去には速度の速い衝撃荷重を与えるためシャルピー衝撃試験を実施したこともある。また、同じ条件で荷重を加えても材料が変わればその変形・破壊の仕方が変化するため、素材による材料特性の変化を体験するための実験も過去には"破壊して観よう"のシリーズとして企画・実施している。「創造楽習」はある程度の予算措置もあることから、企画する教員の側も知的好奇心を基に楽しみながらいろいろな企画を試しており、そうした教員側の熱意も学生には十分伝わっているようである。

### 引張試験

金属材料の引張試験は「機械知能システム学実験」のテーマの一つとして実施しており、機械知能システム学科の学生は3年生の前期セメスター（5セメスター）で体験済みである。引張試験では試験片を引っ張った荷重と変形した長さ（変位）を測定し、試験片の初期断面積と初期長さから応力とひずみを計算する。そして、試験片が変形し破壊するまでの応力-ひずみ関係から材料特性を評価する。

今回使用した試験片は炭素鋼の丸棒で、滑り変形の結果現れる塑性変形の開始点である降伏

点も明確に応力-ひずみ関係に現れる。図1に丸棒試験片を試験装置に取り付けている様子を示す。今回の企画では、室温と液体窒素で冷やした $-196^{\circ}\text{C}$ でそれぞれ引張試験を行う。応力とひずみの概念は機械工学の一般的な教育課程の中では「材料力学」という科目で習い、機械知能システム学科の学生は2年生で学習する。試験片の直径をマイクロメーターで測り断面積を計算し、試験片を引っ張る荷重から単位面積当たりの力である応力を計算する。直径が約1 cmの丸棒試験片を降伏させ、破断させるのに数 ton の力が必要である。引張試験が進むと、炭素鋼の試験片の中央部は目で見ても分かるくらいに細くくびれて、そこで大きな音とともに破断する。直径1 cmの炭素鋼の丸棒が目の前で引き伸ばされ、破断する荷重を試験装置で確認し、その荷重から応力を実際に電卓で計算する。こうした一連の作業と体験により、炭素鋼の降伏や試験片のくびれ、最終的な破断を実体験として記憶に留め、また、各現象が応力-ひずみ関係にどのように現れるのかを関連付けて理解することが「機械材料学」的にも、その後「材料力学」を学修する上でも重要である。



図1. 炭素鋼丸棒試験片を試験装置に取り付けている様子。

炭素鋼の丸棒を室温において引張荷重で破断した場合に見られる破壊様式は、"カップアンドコーン"と呼ばれる。丸棒を引っ張ると中央部でくびれが生じるが、これは塑性変形が集中的に起こるために生じる。塑性変形が集中的に起きた中央部とその外側の弾性変形の箇所とでは直径方向の収縮率が異なるため、塑性変形が集中的に起きている中央部ではその周囲の弾性変形部から変形を拘束されることになるので("塑性拘束"と呼ばれる)、結果として直径方向外側に引っ張られることになる。丸棒は元々長さ方向に引っ張られているので、その荷重とあわせて、この試験片中央のくびれ部では3軸の引張荷重状態となり、微小空洞ができる。この微小空洞が塑性変形によって成長し、合体することにより試験片中央部にはコイン状の欠陥ができる。このコイン状の欠陥が成長し自由表面に近づくと塑性拘束は消失し、45°方向のせん断破壊が生じる。これらのメカニズムにより試験片の一方は容器状に、他方は円錐状に破断するため、カップアンドコーン破壊と呼ばれる。

一方、液体窒素で冷却した-196°Cで引張試験を行った場合、低温脆化により塑性変形は起こりにくくなる。この延性-脆性遷移は塑性変形が開始する応力である降伏応力が大きくなることにより、応力-ひずみ関係から確認することができる。また、室温の丸棒試験片で一般的なカップアンドコーン破壊は塑性変形に起因した塑性拘束や45°方向のせん断破壊により起こるが、液体窒素で冷却した低温では塑性変形が起きにくくなるため、試験片の破壊様式も異なり、平坦な破断面を示すようになる。このように、巨視的な試験片の破壊形態の変化からも低温脆化を確認することができる。

ただし、低温での引張試験は試験片を発泡スチロールの容器で覆い、その上部から液体窒素を注入して冷却するため、必ずしも試験片全体が均一な温度にならず、理想的な低温脆化は再現されていない。また、試験片を発泡スチロールで覆うため、試験片が伸びて破断するまでの様子は目視で確認することができない。それでも大学に入学したばかりの1年生にすれば、液体窒素を実際に目にするのは初めてであり、低温脆化は引張試験結果に顕著に現れることから、

温度変化による塑性変形の起きにくさを体験することができる。また、破壊メカニズムの違いは破面にも現れるため、破面を電子顕微鏡で観察することにより低温脆化を確認できる。

## 破面観察

材料の破壊のメカニズムが変化すれば、破壊した面(破面)に残る痕跡や様相も変化する。このように、破面を顕微鏡で観察し、その材料がどのように破壊したのかを分析する手法はフラクトグラフィと呼ばれる。電子顕微鏡は材料学の分野において多くの情報をもたらす強力なツールとして重宝されており、システム科学技術学部の管理機器として開学当初から学部で所有し管理している。今回の企画では、電子顕微鏡の仕組みと操作方法、その威力を体験してもらうことも目的としている。

前述の通り、引張試験を行う温度を変化させるとせん断力による原子のずれである滑り変形の起きやすさが変化し、すなわち、塑性変形のしやすさが変化する。その塑性変形のしやすさの変化により破壊の仕方も変化する。室温で引張試験をした場合、カップアンドコーン破壊が生じる。破面の中央部は塑性拘束による3軸引張状態により微小空洞の生成と成長が起きており、破面の試験片側面に近い箇所では45°方向のせん断破壊が起きている。したがって、破面にはこれらの痕跡が観られる。一方、液体窒素で冷却した-196°Cで引張試験を行った場合、材料は低温脆化によりせん断力による滑り変形に起因した塑性変形が起きにくくなっており、"劈開"により材料は破壊する。劈開は規則正しくならんだ結晶構造をとる原子を垂直方向に引っ張ることによる分離であり、特定の格子面で原子が分離した平坦なフェセットが観られるのが特徴である。今回の観察ではこれらの違いを走査型電子顕微鏡(SEM)で観察する。

走査型電子顕微鏡は電子線を物質の表面に照射し、物質から放出される二次電子の情報から物質表面の立体的な像を得るものであり、光学顕微鏡に比べて解像度が高く、焦点の合う奥行方向の範囲が広いのが特徴である。したがって、今回行った炭素鋼の破面観察にもその威力を発揮する。すなわち、カップアンドコーン破壊で

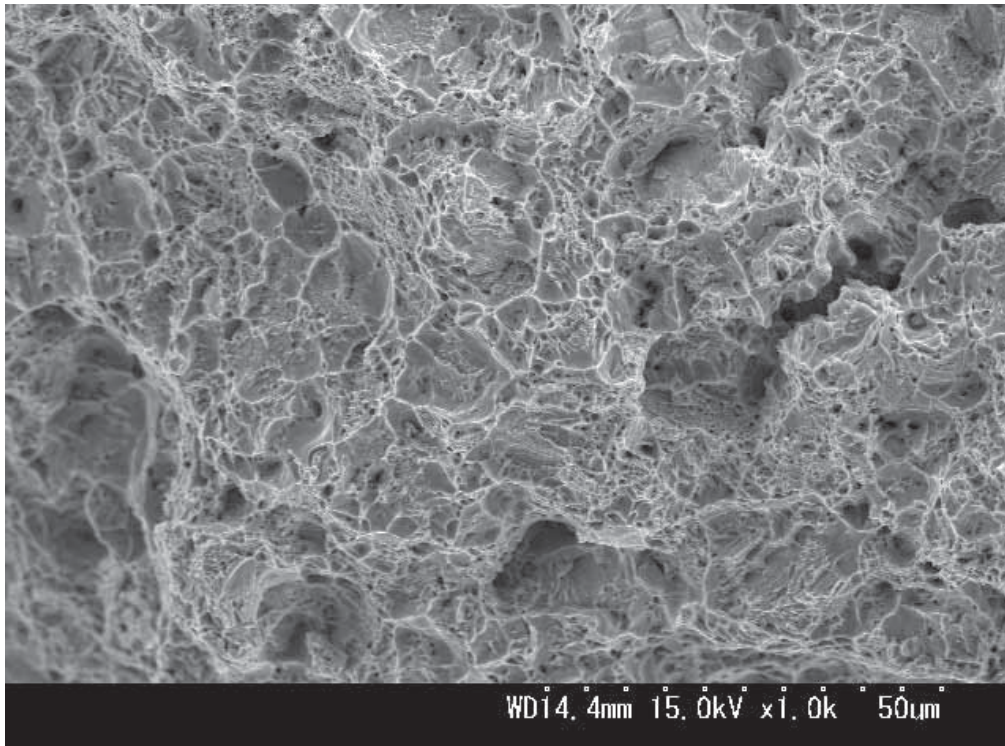


図2. 室温で引張試験を行った時の炭素鋼丸棒試験片の破面 (SEM 写真).

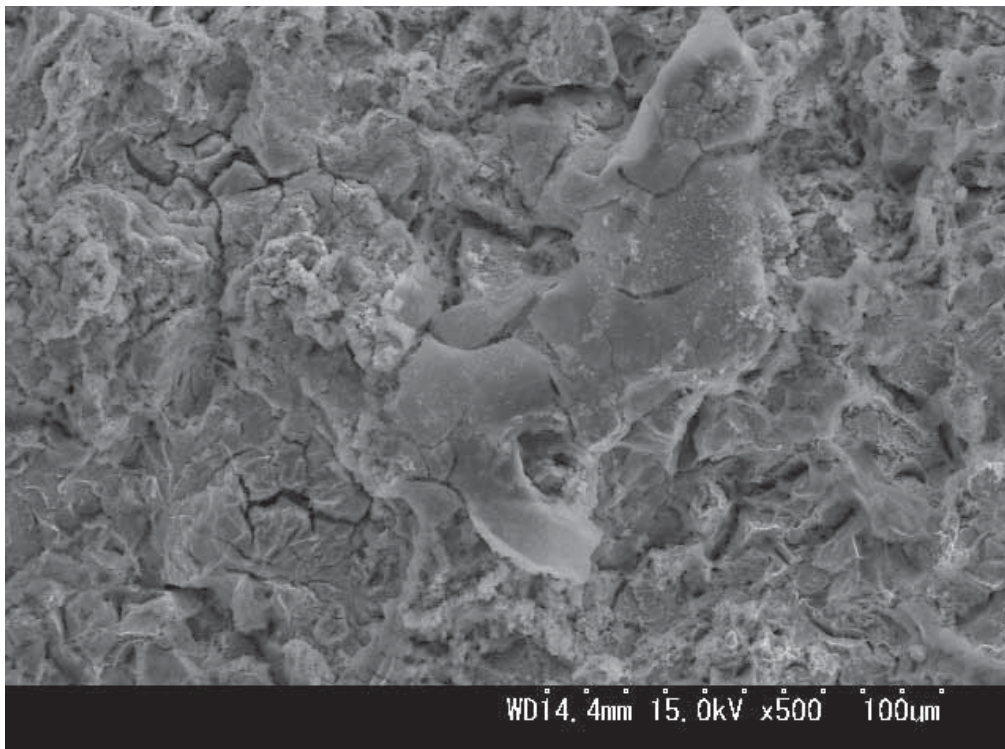


図3. 液体窒素で冷却した-196°Cで引張試験を行った時の炭素鋼丸棒試験片の破面 (SEM 写真).

は微小空洞が成長した後である凹凸がはっきりと映し出され (図2)、また、劈開破壊では平坦なファセットが観察される (図3)。これらの電子顕微鏡の画像を見ることにより知的的好奇

心は刺激され、他の研究にも利用したいとの意欲を高める。

金属材料の破壊であるカップアンドコーン破壊や劈開破壊、フラクトグラフィーに関しては、



機械工学におけるカリキュラムでは「破壊力学」という専門科目で習い、機械知能システム学科では3年生の後期で学修する。「破壊力学」は機械材料の破壊様式やそのメカニズムを学び、破壊現象を理論的に整理し予測するための方法を身に付ける。その理由は、機械要素や機械構造物が壊れないように設計するのに利用するためである。「破壊力学」の基礎となるのは「機械材料学」であり、金属材料の結晶構造や破壊に影響を及ぼす塑性変形、材料特性を知るための材料試験、金属組織や破面を観察するための光学顕微鏡や電子顕微鏡などの材料試験法は「機械材料学」の授業で習う。すなわち、「破壊力学」で習う破壊メカニズムは「機械材料学」で習う内容を基礎として理解することが可能であり、「破壊力学」は「機械材料学」の発展科目として位置付けられる。したがって、機械工学を専門とする機械知能システム学科の学生が「機械材料学」を学ぶ意義が、金属材料の破壊現象を理解するのに必要であるということ、実験を通して体験し知ることが有意義であり、1年生で「機械材料学」を学ぶことの動機付けとなる。破壊現象をリアルタイムで、その場で電子顕微鏡で観察することは特殊な装置があれば可能であるが、本学では難しい。しかし、破面観察を通して破壊の際に何が起きたかを後から確認し、そのメカニズムと関連付けて理解することは重要である。

### おわりに

いわゆる「機械工学科」の標準的な教育課程では「機械材料学」を多くの大学で学ぶ。本学の機械知能システム学科では、クサビ型カリキュラムの関係もあり、高校を卒業したばかりの1年生の前期に配置されている。「機械材料学」では高度な数学や物理学を必要とせず、知識の教授が中心となるが、その知識の理解を深めるためには実際に目で見て、手で触って感じる事が大切であり、機械知能システム学科では「創造科学の世界 A」の一コマとして「金属を知るための簡単な実験」を行っている。また、1年生は大学入学後に専門科目に必要な基礎科目を勉強するが、それが将来どのように専門科

目につながっていくのかを早い段階で知ることが、基礎科目をしっかりと学修し、専門科目へとつなげていくための動機付けを行う上で非常に重要である。その意味から、創造工房で企画している「創造楽習」において「破壊して観よう」を企画し、興味のある学生がこの企画に主体的に参加し、「機械材料学」を基礎としその発展科目にあたる「破壊力学」の内容を実際に体験することは非常に有益である。それは他の科目についても言えることであり、その趣旨を理解している熱心な教員によって、各自の専門を体験してもらうための多くの企画が「創造楽習」では提案され、実施されている。

「機械材料学」や「破壊力学」で扱う現象は、普段目にする素材や日用品など日常生活で経験的に認知していることが多いマクロレベル、光学顕微鏡などでも一部観察可能な結晶粒が数個から数十個含まれるメゾレベル、そして、結晶構造を構成する原子などのミクロレベルで議論される。マクロレベルの現象は普段日常生活でも体験することが多く、経験的に理解することができ、それを学問的に整理・分類し、知識として系統的に学習する。しかし、これらの現象が現れるメカニズムは普段は目にするできないメゾレベル、あるいは、ミクロレベルの働きによって生じている。そのメカニズムを授業の中で知識として学修した後に、実験によって五感を使って体験することにより、理解を深め、長く記憶に留めることができるようになる。

今回紹介した事例は、金属材料の特性変化や変形・破壊など原子レベルの現象を実際に指で触って、指で感じて体験する、あるいは、試験片のリアルタイムな形状変化として間接的に観察したり、電子顕微鏡のような強力なツールを使ってその痕跡を画像で確認する作業を行っている。この見えない現象をいかに実体験として経験し、学生に驚きをもって記憶させられるかが鍵になる。また、そうした体験を通して材料の中の見えない現象を画像として理解し、実際の現象と結びつけて記憶する作業が重要である。

「創造科学の世界 A」の一コマとして実施している「金属を知るための簡単な実験」の様に普段使用している講義室でも実施可能な実験もあり、工夫次第ではもっと多くの現象を体験す

ることが可能である。そのためには、教員は常日頃から情報収集を行うとともに、いかに簡単な実験で本質を体験することができるか、そういった教材づくりに頭を捻る必要がある。また、「創造楽習」の様に教員も楽しみながら企画し、ある程度の予算措置が付けば、熱心な教員のインセンティブとして働くため、財政的な支援も重要な要素であることは言うまでもない。

#### 参考文献

- 日本機械学会（編）（2008）.『機械材料学』. 東京：丸善出版.
- 小林英男（1993）.『破壊力学』. 東京：共立出版.
- 秋田県立大学創造工房委員会（n.d.）.「秋田県立大学創造工房」. <http://www.akita-pu.ac.jp/system/sozokobo/Top.html>
- 小山敏幸，小坂井孝生，土井稔（2002）.「金属を知るための簡単な実験」『まてりあ』41（6），440-443.