体験実習付き授業プログラムの開発と実践

Development and Execution of a Lecture Program Combined with Hands-on Activities

福 森 勉^{※1}
Tsutom FUKUMORI

中木村 雅 史^{※1}
Masafumi NAKAKIMURA

千 田 進 幸^{※1}
Shinkoh SENDA

佐 藤 一 雄^{※2}
Kazuo SATO

A hands-on learning program linked with a lecture “Materials Processing” has been developed and executed for sophomores in mechanical engineering course in Nagoya University, under a collaboration of a professor and technical staffs. Students learn ideas of elastoplasticity, workhardening, and plastic-strain energy dissipation in metals during the lecture. Within a month after the class, students take the exercise, where three typical modes of deformation; tensile, compressive, and bending, are experienced. It is planned so that they use their own muscles and senses for deforming metals and measuring data before calculations. Obtained success and problems in the program are discussed after the first three years of the program execution.

Keywords : Materials Processing, Hands-on Learning, Plastic Working

キーワード：材料加工学，補完実習，塑性加工

1. まえがき

著者らが子供だった1970年代初頭以前は、針金を幾度も曲げたり釘をハンマーで何回もたたいたりすると、金属が熱くなるという経験を誰もが当たり前のよう共有していた。銅線をたたけば簡単に伸ばせることも知っていた。中学校の技術家庭科では、ブリキを曲げて塵取りを製作したり、鉄を加工してドライバーを作ったりした。近年、これらがパソコンの実習に取って代われ、これまで行われていたボール盤、帯鋸盤、ヤスリなどを使った金属加工実習は行なわれなくなった。大学に入学する学生の多くは、小・中学、高校生活を通して金属を加工した経験が無く、身近にある金属材料の種類やそれらの性質の違いを知らない。

一方で教科書を中心とする教材は、かつての十代の世代が共有していた実体験、経験を前提に作られている。それらの教材をそのまま使って教室の授業をすすめても、知識として理解を定着させることは難しい。授業を理解する上での基礎的体験が不足しているのである。名古屋大学工学部機械系教室では、金属に触れ親しむ目的で、平成14年から5年間に渡り、はがき大の1枚の銅板を加工してオブジェを製作するメタルクラフト実習¹⁾を講義と並行して実施した。終了後の受講学生に対するアンケートの分析結果から、このようなクラフト実習は基礎体験を与えるには一定の成果を得たと考える。しかし、期末試験の結果と照らし合

わせて分析してみると、授業で教えた材料加工に関する専門用語を学生が十分理解し応用するのに、必ずしも効果があったとはいえない。

そこで、平成19年度より実習内容を一新し、より講義内容に踏込んで、教科書²⁾の基本的用語を体感する授業補完実習を企画・開発し実施している^{3), 4)}。このように授業の進行とリンクし、授業で習った知識を早々に実習や実験で検証し教育効果を高める試みは、「レクチャー・ラボ」などの名称で東京工業大学⁵⁾、東京大学⁶⁾などに於いても行われている。

本論文では、著者らが独自に企画・開発した「材料加工学」補完実習の内容、および平成21年度までの3年間の実施結果について述べ、さらに実施効果の分析結果を論じる。

2. 目的および企画上の特徴

本学工学部機械系コースシラバスでは、「材料力学」が2年生前期に、「材料加工学」が2年生後期に、「学生実験（引張試験）」が3年生後期にカリキュラムされている。材料加工学は2単位の選択科目であり、達成目標は(1)材料の強度と加工性にかかわる機械的特性値の物理的意味を理解し説明できる、(2)工業製品を製作するための各種加工手段を理解し説明できる、(3)塑性加工プロセスを、金属の塑性変形における応力とひずみの関係において力学的に理解し説明できる、の3項目である。特に(1)に関して、基本的な弾性・塑性、塑性ひずみ、加工硬化、および加工エネルギーの熱への変換の概念は、実体験なしには興味が湧かないと考え、希望者のみ参加できる補完実習を学生に提供

平成22年2月22日受付

※1名古屋大学全学技術センター

※2名古屋大学大学院

した。成績は学期末試験のみで決まり、実習参加は合否に関係ないが、参加して合格した者には100点満点で5点加算すると学生には事前に伝えた。

実験には、できるだけ実験者の五感に訴えるような機器を、担当教員と技術職員が相談しながら開発した。これらは市販の実験機器に比べて精度は劣るが、以下のような特徴を有する。

- (1) 引張試験では、あえて専用の材料試験機を使用せず、バイスに手を加えた治具を使い、人力により金属の引張り試験を行う。機構部の摩擦力も含まれるが、どれほどの力で金属が変形するかを体験することができる。一方、圧縮試験では手動油圧プレス機を用い、つぶす感覚（ハンドルの重みが増すこと）が手に少しでも伝わることを期待した。
- (2) 荷重、伸びひずみ、圧縮ひずみ、加工硬化、および加工熱の計測のため、ばねばかり、マイクロメータ、デジタルノギス、マイクロスコープ（顕微鏡）、熱電対温度計などを使用した。実習では、これらの基本的な道具の使用方法についても同時に習得させる。（平成21年度より引張試験用の荷重測定にはロードセルを使用した）

さらに、実施にあたっては授業の進度に合わせることで、専門知識の定着効果を高めることを狙った。各専門用語を授業で学んだ後、遅くも1ヶ月以内に実習ができるように担当教員と協議し日程調整を行った。実習指導は技術職員が行った。学生数は指導員1人に対して学生3名までの少人数グループ制とし、メンバー全員に対して同じレベルの体験ができるように考慮した。実習時間は各グループ2時間以内で3種類の課題（後述する）を終えるようプログラム設定した。実習を希望する学生には、事前に自身で考えた実験方法レポートの提出（平成19年度のみ実施）、さらに実験後の結果のまとめと考察のレポート提出を義務づけた。データ処理は手計算（電卓使用）を基本とした。

3. 実施方法

3.1 実施時期

授業「材料加工学」は2年生の後期に設定されており、10月上旬より授業が開始される。図1に、授業と補完実習のタイムスケジュールを示す。授業が2～3

図1 補完実習実施スケジュール

回終了し、補完実習で行う項目に関しての内容が終了した10月下旬に、実習説明会を授業の一部時間（30～40分）を使って行った。参加は強制でなく希望者のみで、募集を1～2週間程度行う。その後、授業の無い曜日の午後を選んで、11月中旬から補完実習を開始し、一日2グループずつ実施した。実習時間帯は、午後1時から4時30分までの3時間30分（休憩を含む）である。その内2時間が実質的な実習に充てられる。実習項目を2つに分け、1グループ1時間程度で前半と後半の入れ替え制で進める。実習終了後、残りの時間を使ってデータ整理の仕方やグラフ化の手順などを説明し、1週間後を目途にレポート、アンケートの提出を求めた。1月下旬に、レポート返却および授業内の時間を使って本実習の報告会を科目履修者全員に向けて実施している。2月上旬に実施される期末試験において、実習受講者の成績調査を行っている。

3.2 実習方法

本実習は、授業の前半で学習する「弾塑性変形」、「加工硬化」、「塑性加工熱」の3項目の理解を深め、以下の操作、現象の確認ができることを期待した。

- (a) 公称応力－公称ひずみ線図、真応力－真ひずみ線図が描ける。
- (b) 加工硬化指数（ n 値）を導ける。
- (c) 真応力－真ひずみ線図を使えば引張り・圧縮特性が同じ線図で描ける。
- (d) 塑性変形に要した外部の仕事は、加工熱に変換される。

以下に実習内容を説明する。

- (1) アルミニウム材（A1070）のO材とH材の塑性変形特性を比較する。

バイスの口金を改良し（図2）、口金間に固定した試験片の引張試験を行う。引張力はバイスハンドルにばねばかりを取り付けて回転トルクを計測し、この値からネジの摩擦を無視して計算した。試験片（最小断面の厚み：2mm、幅5mm、長さ30mm）はA1070の軟質材（O材）および硬質材（H材）の2種類（図3）を

図2 バイスを用いた引張試験

図3 引張試験片

図4 圧縮試験片

図5 手動油圧プレスによる圧縮試験

図6 顕微鏡による圧痕の観察

図7 塑性加工熱の検証

用意し、それぞれ荷重－伸びのデータを採る。計測には、前述のばねばかりのほか、マイクロメータ、デジタルノギスなどを使用する。なお、O材試験片は、すべて技術職員が自作し、電気炉により430℃で90分加熱後、炉冷（除冷）したものをを用いた。

(2) 手動油圧プレスを使った圧縮試験と加工硬化の検証（図5）

手動油圧プレス機を用いて、円柱試験片（直径10mm、高さ10mm）の圧縮試験を行い荷重、試験高さ、外形のデータを採る。このデータから、公称ひずみ、公称応力、真ひずみ、および真応力を計算し、真応力－真ひずみ線図を描き加工硬化係数を求める。平成19年度の本実習は銅材で行ったが、平成20年度の見直しにより(1)の実習との整合をはかるためアルミニウム材（A1070）のO材、H材に変更した（図4）。なお、均一な圧縮変形を実現するため、試験片端面と工具面との摩擦力を低減する目的で、試験片端面には二硫化モリブデン潤滑剤をスプレー塗布した。次に、加工硬化を検証するため、前記で圧縮した試験片と非圧縮試験片にそれぞれ鋼球による等荷重押し込み実験を行い、顕微鏡を用いて圧痕径の比較観察を行い、硬さの違いを確認する（図6）。

(3) 弾塑性変形および塑性加工熱の検証（図7）

バイスに固定したSUS304（厚み2mm、幅20mm、長さ150mm）の帯板の曲げ角度の戻り量から弾性・塑性変形の違いを認識させる。曲げ角度は分度器の描かれたボードを用いて、一方、曲げ力はばねばかりを用い

て計測する。帯板を手で繰り返し曲げて、帯板曲がり部分の温度上昇を熱電対温度計で計測する。手で行った仕事すべて熱に変換されたものと仮定して、その温度上昇を計算し理論値と比較考察させる。なお、この実験を実施する際の注意点として、試験片には熱伝導性の低い材料（SUS板）を用いること、バイス口金と試験片の帯板の間に断熱材（ダンボール）を挟むこと、および短時間で素早く行うことなどが必要である。

3.3 データの整理とレポート

計測誤差が大きい実験であるため、実習終了後に、データ整理とグラフ化について、「その手順を詳しく説明している。データを表にまとめる」「データを使って計算から、公称応力・公称ひずみ、真応力・真ひずみ、加工熱など各値を求める」「グラフ化する」「現象から法則性を考察する」「理論値との違いを考察する」という一連のプロセスをたどってレポートにまとめさせる。提出させたレポートは教員と技術職員が内容を確認し、それぞれコメントを添えて返却している。

3.4 結果の処理とレポート例

図8から図10は、本実習結果について学生がまとめた手書きのグラフの一例を示している。図8は、(1)の実習で行ったO材、H材の引張試験結果である。左側は荷重－伸び線図、右側は公称応力－公称ひずみ線図および真応力－公称ひずみ線図になる。図9は、(2)でおこなった圧縮試験によるもので、左は荷重－試験片高さ、右は真応力－公称ひずみ線図を示している。図10は、真応力－真ひずみ線図（両対数グラフ）から

図8 引張試験結果 (A1070のO材, H材)

図9 圧縮試験結果 (A1070のO材, H材)

図10 引張と圧縮によるn値の比較 (A1070のO材, H材)

n 値 (近似直線の傾き) を求めている。左は引張試験、右が圧縮試験結果によるものである。これらのグラフからO材, H材の特性の違いが判り、さらにn 値もJISの値と近い値が求められる。実験結果によるグラフ作成を通じて、学生には以下の点について学習し考察させている。

- 引張試験において、同じ材質でもO材, H材では、最大荷重などに違いがあること。
- 引張試験でO材, H材の一樣伸びの値が違うこと。
- 圧縮試験のO材, H材ひずみ量の違いは、荷重が小さい時に顕著であること。
- 圧縮試験では、圧縮量とともに急速に圧下力が増大すること。
- 応力の値はひずみと共に斬増する。→加工硬化
- O材の方が加工硬化し易いこと。
- n 値の求め方、物理的な意味。

4. 各年度の実施結果および見直し箇所

毎年、実施後の結果をもとに教員と技術職員で課題点を協議し、次年度の取り組みの際に改善を加えている。表1は、3年間の実施結果と見直し箇所を表にまとめたものである。

4.1 実習手法の変更

平成19年度から平成20年度への見直し箇所は、(2)圧縮試験の試験片材質を(1)引張試験との整合性をはかるため、銅材からアルミ材に変更した。これによりデータ処理に真応力-真ひずみ線図を加え引張試験と圧縮試験の両方からn 値を求め両者を比較させた。(3)塑性加工熱の実験では、温度センサプローブを熱容量の小さいタイプに変更することで、加工中連続して計測し温度変化を確認できるようにした。

平成21年度の見直しでは、各実習グループ間で最も測定データにバラつきが大きかった、(1)引張試験の荷重計測を、ばねばかりによる方法からバイス口金部に取り付けたロードセルと動ひずみ計による電気的計測に変更した。これにより、手動による体感部分を残しながら、データのバラつきを大きく改善することができた。

4.2 受講者数向上への取り組み

本実習は希望者を対象に企画しており、毎年、授業履修者95名程度に対して40名の募集枠で準備している。平成19年度の受講者数は17名であった。予定数より少なかった理由としては、実習参加の条件として、実習方法を各自が考えるという事前レポートを課したことが考えられる。平成20年度より事前レポートを廃止して募集を行っている。平成20年度は25名の受講者、平成21年度は28名(申込者32名)と増えてきた。平成21年度の場合、申込者数と受講者数に違いがあるのは、実習会場の案内に不備があり、当日受講できなかった者がいるためである。

4.3 レポート回収率の向上の取り組み

上記に述べた2年目の実習手法の変更により、初年度100%であった実習終了後のレポート提出率が56%に激減してしまった。その原因は、提出されたレポートやアンケートから、次のような理由によるものと推測された。引張試験において、ばねばかりにより荷重を計測していたので、グループによっては、大きな誤差やデータのばらつきがあること。そのデータをもとに処理しても規則性を見出せずにモチベーションが下がったり、嫌気がさしたりしたこと。加えて、圧縮試験との比較のためグラフ化の作業が大幅に増えたことなどが考えられる。また、実習結果のデータの処理の仕方、グラフの描き方の説明が十分でなかったことも挙げられる。3年目(平成21年度)では、前述の荷重測定手法の変更に加えて、実習終了後に行っているデータ処理手順の説明に時間をかけ、模範グラフの資料も配布するようにした。その結果、レポート回収率

表1 3年間の実施結果と見直し箇所

		平成19年度	平成20年度	平成21年度
(1)引張試験	材 料	Al (A1070) のH材, O材		
	力計測法	ばねばかりによるトルク計算		ロードセルによる直接測定
	実習項目	荷重－伸び線図 真応力－公称ひずみ線図	荷重－伸び線図 真応力－公称ひずみ線図 真応力－真ひずみ線図→n 値の計算 (圧縮と比較)	
(2)圧縮試験 加工硬化	材 料	Cu丸棒 (φ10×10mm)	Al (A1070) のH材, O材 (φ10×10mm)	
	実習項目	荷重－変位線図 真応力－真ひずみ→n 値	荷重－変位線図 真応力－公称ひずみ線図 真応力－真ひずみ線図→n 値の計算 (引張と比較)	
	観 察 法	圧痕観察 マイクロスコープ		顕微鏡/目視
(3)塑性加工熱	材 料	SUS 304 帯板 (2×150×20mm)		
	実習項目	加工後センサをあてて測定	加工中に連続測定 (熱容量の小さい高感度温度センサ)	
受講数・評価	受 講 者 レポ ー ト	17名/約95名 (事前有り, 終了後回収率100%)	25名/約95名 (事前無し, 終了後回収率56%)	28名(申込者32名)/約95名 (事前無し, 終了後回収率89%)
	期 末 試 験	平均点とヒストグラムの 比較, レポート内容	実習関連問題と非関連問題で効果を確認 平均点と分布図, レポート内容	

は89%まで改善できた。

4.4 期末試験結果の分析方法変更と成果

初年度は, 総合得点ヒストグラムと平均点について, 補完実習受講者と未受講者間の比較を行ったが顕著な差がなかったことから, さらに詳細に実習の効果を分析する必要があると考え, 実習内容に関連する問題と非関連問題に分けて得点結果を比較することとした。なお, 試験は記述式で, 「慣用ひずみ ϵ と真ひずみ ε の定義」, 「材料試験で得られる n 値についての定義と物理的意味」などを問う問題を関連事項として出題した。図11は, 平成20年度期末試験における補完実習受講者と未受講者の得点分散図および平均点を示している。縦軸に実習関連問題30点, 横軸に非関連問題70点の合わせて100点とし, 一人ひとりの得点をプロットしたものである。グラフ上の直線は, 受講者と未受講者の近似直線であり, 破線の交点が平均点である。図中には近似直線の周囲に分布する得点の傾向を見やすくするため, 受講者の集団の約80%が含まれる楕円を描いて示した。平均点を中心に配点の比を考慮し, 縦軸(関連問題)方向に±8点, 横軸(非関連問題)方向に±20点の範囲をカバーする楕円で, 近似直線上に主軸が一致するように描いた。同様に未受講者も楕円

図11 平成20年度期末試験における実習受講の効果

を破線で示した。この結果から, 受講者の分布が未受講者の分布の上側(縦軸方向)にあることがわかる。したがって関連問題については補完実習の効果が出ていることが判る。非関連問題に関しては, 受講者よりも未受講者の平均点がわずかながら高い。これは成績がトップから8位までの優秀な学生が実習を受講しなかったことと関係している。この上位者の得点が未受講者全体の平均点を約2点押し上げており, これが上記のグループ間の差となった。成績上位者には, 実習なしの授業に出席するだけで内容が容易に理解できるのだろうと推測している。本実習は, 本学機械システムコースで普通レベルの者に対して, 特に前記の達成目標(1)の強化に効果が認められた。

5. アンケート結果

図12は, 平成21年度の実習終了後のアンケート結果を示している。補完実習が「授業の理解に役立ったか?」の問いに, 「大いに役立った」62%, 「ある程度役立った」33%, 「どちらともいえない」5%, 「あまり・全く役立たない」0%。

実習が授業の理解に役立ちましたか?

実習で理解が深まった用語は何か?

○弾性	10%	○真ひずみ	43%
○塑性	14%	○真応力	52%
○一様伸び	0%	○ポイド	0%
○最大荷重	24%	○相当ひずみ	5%
○n値	76%	○相当応力	5%
○くびれ	43%	○O材	81%
○塑性仕事	0%	○H材	81%
		(塑性エネルギー)	

図12 受講学生アンケート結果 (平成21年度)

役立った」33%,「どちらともいえない」5%,「あまり役立たない」「全く役立たない」は0%と否定的な意見はなく,3年間を通して大きな変化はみられなかった。次に,この実習で「理解が深まった技術用語は何か?」を訊ねたところ,「O材」,「H材」,「n値」という回答が多かった。

コメントとしては,「同じに見えるアルミO材とH材でも降伏応力に大きな違いがあること」,「手で変形させて金属に加えた仕事で温度上昇することなど体感できた」と答えており,本実習が目的とする,実際に金属材料に触れて体感してもらうという意図は伝わったものと考えられる。

6. 教育効果の検証

本実習の目的のひとつは,これまで述べてきたように金属加工の経験のない学生に体感的に金属材料の特性を理解させ授業に興味を持ってもらうことにある。

実習終了後のアンケート結果は3年間を通じて受講者のほぼ全員が,程度の差はあるが授業の理解に役立ったと回答している。理解の深まった技術用語の意味として「O材」「H材」「n値」「対数ひずみ」を挙げている。また,コメントから「授業では文字とスライドによる説明のためよく理解できなかったが,実際に見たり触ったりしたことで理解し易くなった」「測定データをもとにグラフを描いたり,値を出すことは大変であったが,その分理解が深まった」などの意見が多くあった。以上の結果からこの補完実習内容が学生に受け入れられ授業への関心・意欲向上の一端となっているものと考えられる。

期末試験の結果は,関連問題と非関連問題を比較することで教育的成果を検証することができた。実習の受講者は,関連問題の得点では高いが,非関連問題の得点では低い。実習で取り扱わなかった事項にも興味や関心を持たせ,教科全体として総合的な理解力の向上につながるような指導方法をめざす必要がある。

さらに,この実習の間接的な目的として考えている,実験,データの収集,データの処理,グラフ化,および規則性・法則性の確認などの一連の作業体験が,今後の卒業研究や大学院での研究活動に活かされることを期待している。

7. あとがき

授業補完実習を企画後,教員と技術職員が協力して試行錯誤を繰り返しながら改良を加え,開始3年目からはほぼ定常的な実施形態が整ってきた。実習にあたっては,直接的に3名の技術職員が学生25名の実習に合計45時間・人をかけている。さらにその前後に実験装置,試験片の製作,レポートのチェックなどで20時間・人が必要である。一方,担当教員は,実習項目に関わる授業内容を事前に技術職員に講義し,実習内容

に関する疑問をすべて解決しておく必要がある。ここに教員と技術職員の相互信頼と連携が必要である。技術職員が学生に対して実習内容について自信を持って指導・説明できるようになることで,学生との意思疎通も円滑化してきた。担当教員が負担した実験機器の製作・購入,材料の購入は3年間で合計20-25万円程度であったが,実習が軌道に乗れば材料費の負担程度で実施できるのできわめて少額である。本論文では成績向上の効果を2年目の期末試験結果で論じたが,ごく最近得た3年目の期末試験でも確実に結果に反映されている。以上のような補完実習を今後,授業受講者全員に科するか,現状の自由参加に止めるかは,費用対効果の観点から今後検討の余地があるが,一般に機械系の力学科目,材料学科目で,このような補完実習の実施を検討する価値があると考ええる。

参 考 文 献

- 1) 千田進幸, 松浦英雄, 福森 勉, 松室昭仁: 大学1, 2年生のための感性・創造実習やじろべ製作, 工学教育, 53-1 pp.53-56, 2005
- 2) 吉田総仁, 篠崎賢二, 京極秀樹, 山根八洲男: 機械技術者のための材料加工学入門, 共立出版社, 2003
- 3) 福森 勉, 千田進幸, 中木村雅史, 佐藤一雄: 授業「材料加工学」に連携した体感型実験システムの構築, 平成20年度工学・工業教育研究講演会 講演論文集, pp.512-513, 2008. 8
- 4) 福森 勉, 千田進幸, 中木村雅史, 佐藤一雄: 体験実習付き授業プログラムの構築と実践, 平成21年度工学・工業教育研究講演会 講演論文集, pp.184-185, 2009. 8
- 5) 岩附信行, 東京工業大学: レクチャー・ラボ統合型授業に基づく機械工学カリキュラム, 平成20年度工学教育連合講演会講演予稿集, pp.11-23, 2008
- 6) 石川明克, 杉本十太郎, 東京大学: 学部2年生対象「材料の変形と破壊」実験, 平成19年度実験実習技術研究会報告集, pp.41-46, 2008. 3

著 者 紹 介

福森 勉

1981年名古屋大学技官。在職中,近畿大学卒業。主に,機械工作と電子回路によるメカトロニクス装置の設計製作に携わる。創造工学センターを拠点とした各種ものづくり講座を企画・実施。現在,名古屋大学全学技術センター工学系 装置開発技術系班長