

授業「材料加工学」補完実習の実験技術の改善

○皆川 清^{A)}、中木村 雅史^{A)}、福森 勉^{A)}、千田 進幸^{A)}

^{A)}工学系技術支援室 装置開発技術系

はじめに

受講する学生に、中高生の時に金属を加工した体験があるか聞いている。私達の時代は文鎮・ちり取り・本箱などの加工を体験したが、現在の学生達はほとんどそれらの体験をしていない。

機械科では平成14年から18年までメタルクラフト実習で銅板を形から設計し図面通りに切り出しヤスリで削り、曲げたりして balanサー（ヤジロベ）を作ることを体験させてきましたが、必ずしも授業の内容に整合したのではなく、金属の変形を体験するにとどまるものであった。



図1 曲げ、切り出し、接合

平成19年度より担当の教員の要請により体験型の授業補完実習が企画された。

- ・「弾塑性」「加工硬化」「塑性加工熱」と言った学習項目とリンクしたもの。
- ・授業「材料加工学」学習日と実習実施日との間をおかない。
- ・体験を重視する（簡易な手動装置、手計算、手書きレポート）
- ・少人数制で毎回6～8名を半数ずつ入れ替えて全員が何らかの作業を交代して行う。

本技術系研修は、4年間行ってきた機械系の授業「材料加工学」の補完実習においてさらなる改善を行うことで計測などの精度及び能率アップを図ることを目的とした。そのため参加する学生たちがより実験に興味をいだき理解を深め、教育効果の高い実験の構築を目指した。その内容を報告する。

1. これまでの経過と成果

表1はこれまで行ってきた実習の改善結果と受講者数などをまとめたものである。年を追う毎に測定機器が良くなり、測定精度も上がってきており、また、実習希望者の数も増えてきている。今年度は過去最高の41名の受講の希望があった。

表1. 4年間の実習改善効果と受講者数及びレポートの回収率など

		平成19年度	平成20年度	平成21年度/22年度
(1) 引張試験	材料	Al (A1070)の H材, O材 ※22年度はA1050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(φ10×10 mm) Al (A1070)の H材, O材(φ10×10 mm)		
	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/マイクロスコープ(平成21/22年度)
(3) 塑性加工熱	材料	SUS 304 帯板(2×150×20 mm)		
	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)	
受講者 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)/36名/約95名 (事前無し, 終了後回収率89%/92%)
	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	

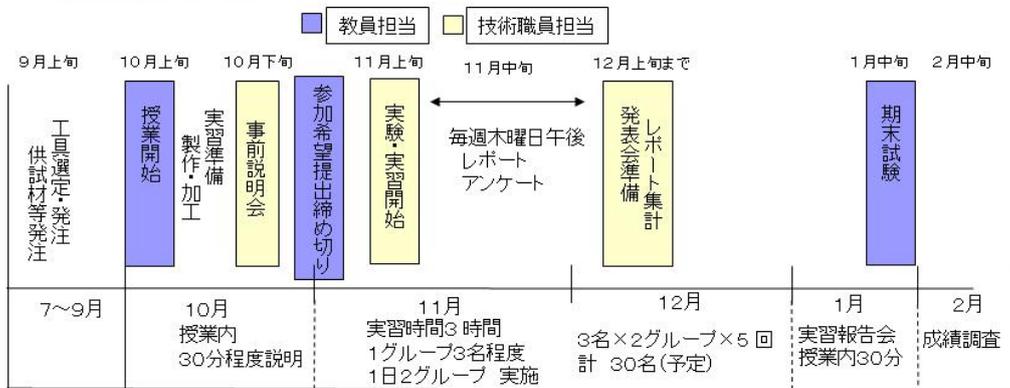
2. 実習の内容とスケジュール

授業は対象が「材料加工学」機械工学系コース2年生で講義内容は塑性ひずみ、弾性・塑性、加工硬化及び加工熱で、万力による引張り試験、圧縮試験と硬さ試験及び板の繰り返し曲げの3つの実習を行った。事前に授業の時間をお借りして説明会を行い、1回6名を2班にして5回の日程を考えたが、今年度は申込者が多く過去最多の41名の応募があり、1回8名で5回おこなうこととし、日程は11月10日から17日、24日、12月1日及び8日の計5回とした。表2に講義内容と実習内容との対応及び測定工具・供試材の選定から製作、実験・実習及びまとめまでのタイムスケジュールを表す。

表2. 授業補完実習の内容とタイムスケジュール

授業: 「材料加工学」	講義内容	実習内容
受講対象: 機械工学系コース2年生(後期) 選択科目・履修者95名 テキスト: 機械技術者のための材料加工学入門(吉田他 共立出版)	塑性ひずみ 弾性・塑性 加工硬化 加工熱	万力による引張り試験(実習1) 圧縮試験と硬さ試験(実習2) 板の繰り返し曲げ(実習3)

実施スケジュール



今年度は、機械系学生実験の機械加工体験を創造工学センターの機械工作室で行うことになったため、隣の電子回路室をお借りして行った。一部、手動プレスによる圧縮試験のみ、工作室で行った。

3. 供試材

引張り試験は切削で大量の試験片を作るのは大変なので板を4枚重ねてワイヤカットによる放電加工で製作した。板厚 2mm の純アルミニウム A1070 (純度 99.7Al) の H 材で、幅 40mm、長さ約 98mm、平行部長さ 15mm、平行部幅 5mm、標点間距離 10mm、平行部の断面積 10mm²。圧縮試験片は、以前は卓上精密旋盤で1個1個旋削していたが、両端の旋削では時間がかかるので、今回は、φ10mmの丸棒を10本並べて引張試験と同じようにワイヤカットによる放電加工で行った。これにより大幅

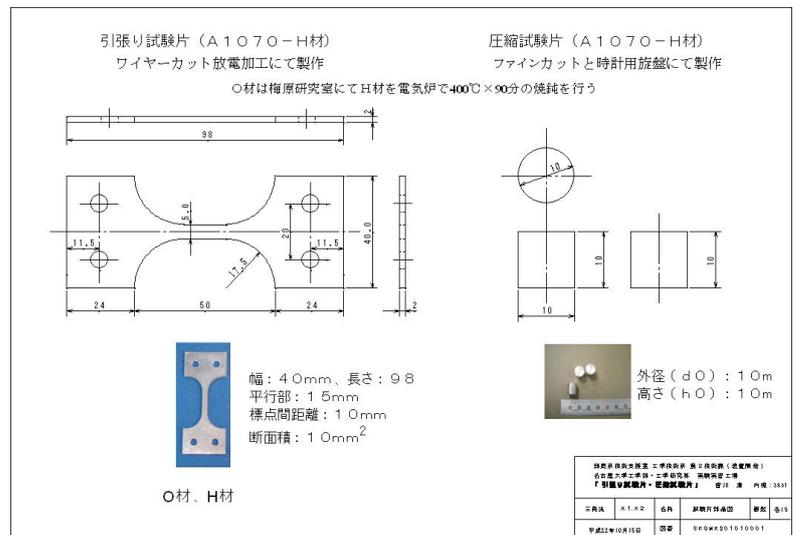


図2. 引張試験片と圧縮試験片の供試材

な時間短縮がはかれた。

外径10mm、高さ10mmの試験片を予備も含めて40個弱製作し、約半数を機械工学の梅原研究室の電気炉をお借りして焼鈍を行い、完全再結晶させO材とした。

繰り返し曲げによる加工熱体験の試験片は板厚 2mm、幅 15mmのステンレスのフラットバー（帯板）を 150mmの長さにカットしたものを用意した。

4. 実験・実習

図3は、前年度の万力を使った簡易引張り試験である。ノギスの内径測定部で伸びを計測し、ロードセルで荷重を測定する。奥に試験片があるため、伸びの正確な測定が難しい。

今回は図4のように先端が長くて鋭いノギスを入手したことにより、座ったままで評点間距離が以前より容易に測定が可能となった。試験片が破断するまで10数点計測し、荷重-伸び、公称応力-公称ひずみ、真応力 σ -真ひずみ ϵ を計算し、グラフにプロットする。また、 $\sigma = F/\epsilon^n$ の硬化式から両対数グラフにもプロットすると関数の1次式と同じように直線になるのでその傾きを求めて加工硬化指数(n値)を求め、O材、H材と比較検討する。

図5左側が手動プレスによる圧縮試験である。上ダイスと下ダイスの間に試料を置き潤滑剤としてモリブデンの入った潤滑剤を両端面に噴霧する。てこの原理のように手動で油圧の力で荷重をかけていき、負荷のメモリを見ながら止める。

10kNから60kNまで6回繰り返し高さと直径を2方向測定させ、記入する。

硬さ試験は金型の中に試験片を置き鋼球を載せて錘 5kg を置いて 30 秒保持したときの圧痕を観察・測定する。試験片は加工前のO材と 60kN かけて押しつぶし、加工硬化した試験片の2種を比較する。圧痕をマイクログラフで拡大観察し、その大きさ（直径）を金尺で計測する。

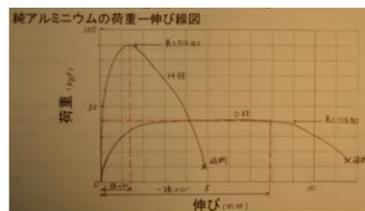
アルミニウム (A1070) 試験片の引張力と伸びを測定



バイスを利用した簡易引張試験



試験片



試験片 A1070 H材とO材

図3. バイス（万力）を使った引張試験片（昨年）

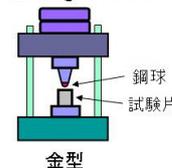


図4. 新しく入手したノギスによる標点距離の測定

手動プレスによる圧縮



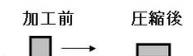
重り 5 kg - 30秒保持



金型

加工前(O材) 圧縮後

マイクログラフによる圧痕観察(加工硬化の比較)



外径(d_0)10mm
高さ(h_0)10mm

図5. 手動油圧プレスによる圧縮試験（左側）と金型による硬さ試験（右側）

図6は、圧痕観察・測定のための機器で全てキーエンス製。昨年まではパソコンに入力してソフトウェアで観察・測定していたが、応答に遅延が大きく、よくハングアップした。今年度はディスプレイに直接入力したので圧痕の位置が容易に特定でき、操作性が格段に上がった。



キーエンス製
高精密クイックマイクロスコープ
VH-5000
ズームレンズ VH-Z25
倍率:25倍~175倍
ワーキングディスタンス:25.5mm
フリーアングル観察システム
VH-S30
ディスプレイ ソニー製

図6. 圧痕観察・測定のための機器

図7は、圧痕をマイクロスコープで80倍(測定時)に拡大したものである。左が電気炉で完全に焼き鈍しをしたもの、右が10mmから約2mmまで圧縮したものである。加工硬化したことがよくわかる。1500番の耐水性研磨紙をかけたことで、鮮明に圧痕が観察できている。

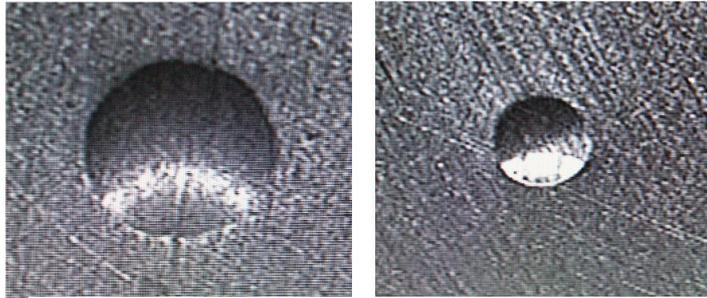


図7. 圧縮前と圧縮後の圧痕の拡大写真

図8は、試験前の試験片と試験後の写真である。O材の試験片の高い延性と表面の荒れが観察できる。

塑性加工熱の体験は、図9のように小型万力に写真のように断熱のため段ボールで2mmのステンレス板を挟み込み、左右に50mmの幅で革製の軍手で10回素早く曲げ変形を加えたときの曲げ部分の温度と加工前の室温を高感度デジタル温度計で測定する。また、理論値の計算を行う。レポートをまとめるとき、下記の計算式を利用する。

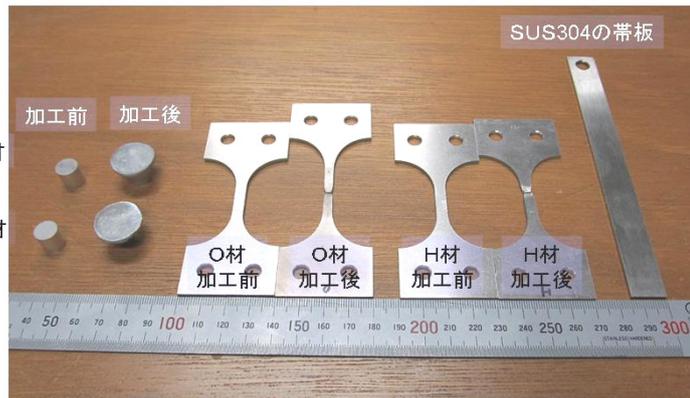


図8. 圧縮前と圧縮後の圧痕の拡大写真

試験片に与える塑性仕事： $F \times X = \Delta T$ °C上昇するのに必要な熱エネルギー： $V \times \rho \times \gamma \times \Delta T$

試験片を50mm曲げる際の力 F (kg·f)
 曲げる前の試験片温度 T_0 (°C)
 曲げ終わり時の試験片温度 T_1 (°C)
 変位(曲げた総距離) X 100×2×10(mm)
 温度上昇部分の体積 V 15×20×2(mm)
 試験片密度 ρ (g/cm³)
 比熱 γ (J/g·K)

- 手法：① SUS試験片<2×150×15(mm)>をバイスで固定し、仕事エネルギーを加える(手で10往復曲げる)
 ② 曲がり部分の温度を測定する
 ③ 加えた仕事が全て熱に変換されたと仮定して、温度上昇の理論値を計算する
 ④ ②で測定した数値と理論値を比較する

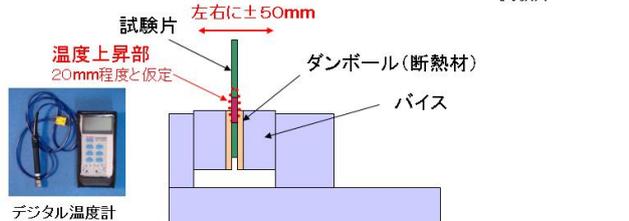


図9. 塑性加工熱を体験

上式から ΔT の理論値を算出する。このとき、各数値の単位に注意する。

図 10 は、試験のデータシートの例である。枠は空白になっているので、手書きでデータを書き込む。右は圧縮試験のデータシートの計算結果の例である。データを書き込み計算する。レポート提出用に引張・圧縮試験のデータシート、方眼紙数枚、両対数グラフ用紙及びレポート表紙なども準備しお渡した。

(1) 引張試験データシート								2010
○ 材	長さ	伸び	荷重	公称応力	公称ひずみ	真応力	真ひずみ	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

○ 材 (A1070) 圧縮試験の結果 (2) 圧縮試験記録用紙								2008
荷重 kN	高さ h (mm)	外径 d (mm)	面積 A (mm ²)	公称応力(N/mm ²)	公称ひずみ h ₀ -h/h ₀	真応力(N/mm ²)	真ひずみ ln(d ₀ /d)	
0	h ₀ : 9.86	d ₀ : 10.00	A ₀ : 78.50					
10	8.50	10.83	92.07	0.127	0.138	0.109	-0.148	
20	5.35	13.83	149.92	0.255	0.457	0.133	-0.611	
30	3.87	16.27	207.80	0.382	0.608	0.144	-0.935	
40	3.03	18.29	262.60	0.510	0.693	0.152	-1.180	
50	2.54	19.93	311.80	0.637	0.742	0.160	-1.358	
60	2.19	21.45	361.18	0.764	0.778	0.166	-1.505	
70								

H 材 (A1070)							
荷重 kN	高さ h (mm)	外径 d (mm)	面積 A (mm ²)	公称応力(N/mm ²)	公称ひずみ h ₀ -h/h ₀	真応力(N/mm ²)	真ひずみ ln(d ₀ /d)
0	h ₀ : 10.22	d ₀ : 10.02	A ₀ : 78.81				
10	10.16	10.02	78.81	0.127	0.006	0.127	-0.006
20	6.26	13.02	133.07	0.254	0.387	0.150	-0.490
30	4.35	15.62	191.52	0.381	0.574	0.157	-0.854
40	3.40	17.66	244.82	0.508	0.677	0.163	-1.101
50	2.82	19.56	300.33	0.634	0.724	0.166	-1.288
60	2.38	20.96	344.86	0.761	0.767	0.174	-1.457
70							

D₀ 0.91 mm 圧縮後 D 0.58 mm

図 10. 引張試験 (左) ・圧縮試験 (右) 用データシート



図 11. 各実習風景

各実習風景を図 11 に示す。実習後、休憩を挟んでレポートのまとめ方の説明を行い、最後の感想も含めた意見交換を行い、レポートの提出期限を説明して実習を終える。創造工学センターのオープン利用やものづくり公開講座の案内もしている。教員の検閲後、レポートを閲覧させていただき、今後の参考にしたい。今後も金属の加工に興味を抱き、少しでも理解を深めていただけるよう丁寧に行ってきたい。

5. まとめ

この研修のまとめを以下に報告する。

- (1) 先端が長くて鋭い特殊なノギスを手に入ることにより、効率よく測定でき精度も上がった。
- (2) ワイヤカット放電加工で引張・圧縮の試験片を加工することにより、効率よく製作できた。
- (3) 昨年まではパソコンに入力してソフトウェアで観察・測定していたが、応答が遅くて、よくハングアップした。今年度はディスプレイに直接入力したので操作性が格段に上がった。
- (4) 硬さ試験の端面を手に入れた 1500 番の耐水性研磨紙で研磨することにより、圧痕が鮮明に観察でき、測定が容易になった。

- (5) 加工熱体験の試験片をフラットバー（帯板）、革製手袋を入手することにより、安全に曲げの力を入れられるようになった。
- (6) 単軸の引張、圧縮は塑性加工の基本なので、実際に材料に触れ、実験することにより、2年生の内にしっかり覚えておくことで、2軸、曲げ曲げ戻し（深絞り加工）など複雑な加工理論が理解しやすくなると考える。

最後に、この研修を認めていただき、受けさせていただきましたことに感謝いたします。

6. 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, Vol.53, No.1, pp53-56 (2005)
- (2) 福森勉, 千田進幸, 中木村雅史, 佐藤一雄: 授業「材料加工学」とリンクした補完実習の企画と実践, 平成20年度京都大学総合技術研究会 報告集第II分冊, pp178-179
- (3) 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・工業教育研究講演論文集, pp512-513
- (4) 「材料加工学」授業補完実習プログラムの開発, 日本機械学会東海支部57期総会講演会講演論文集, (2008.3.10-11) No.083-1, pp85-86
- (5) 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, pp184-185, 2009.08
- (6) 福森勉, 千田進幸, 中木村雅史, 皆川清, 佐藤一雄: 授業「材料加工学」補完実習4年間の取り組み, 名古屋大学工学研究科・工学部 技術部「技報」Vol.13, pp55-58, 2011.03