

鋼の熱処理実験および材料試験における学生の理解度の向上 — 走査型電子顕微鏡を用いた破面観察による教育的効果 —

石橋 大作・南 明宏・篠崎 烈

〈令和6年1月4日受理〉

Improvement of deeply understanding of heat treatment and material tests for steel in the engineering experiment for students

-The educational effect of fracture surface observation with scanning electron microscope-

ISHIBASHI Daisaku・MINAMI Akihiro・SHINOZAKI Akira

In the mechanics course of Ariake Kosen, there are engineering experiment themes about the heat treatment for medium carbon steel materials and the observation of metal fracture surfaces by using a scanning electron microscope. Although students understand the heat treatment at classroom lectures, they rarely experience it in real engineering experience. In the observed experiments with scanning electron microscopy, students can observe the fracture surfaces in the tensile tests for materials after heat treatment.

In this paper from these backgrounds, therefore the understanding for heat treatments by experiment of heat treatment temperatures change and tensile tests, the noticing from observing fracture surfaces using a scanning electron microscope are discussed.

1. はじめに

有明工業高等専門学校のメカニクスコース5年次に行う工学実験の中に、中炭素鋼材の熱処理実験と走査型電子顕微鏡（以後SEMとする）による金属の破断面観察や成分分析をテーマにしたものがある。熱処理とは、図1に示すような加熱炉と急冷のための油槽を用いて鋼を熱したり冷やしたりすることで材料の特性を変化させることである。しかし、熱処理を行った鋼材は見た目では、どのような熱処理を行った判別できないために、座学で学ぶ熱処理の知識を実体験として理解するには、引張試験やその後の各熱処理の破断面や破断したパターンなどの観察が必要となる。

本稿では本校メカニクスコースにおける熱処理実験によって熱処理温度や引張試験を実体験し、SEMによる破断面の観察をした学生たちの気づきを記しつつ、授業のあり方などについて報告する。

2. 熱処理と走査型電子顕微鏡実験の内容

2.1 中炭素鋼材の熱処理実験の目的

学生が行う中炭素鋼材の熱処理実験の目的を下記に示す。

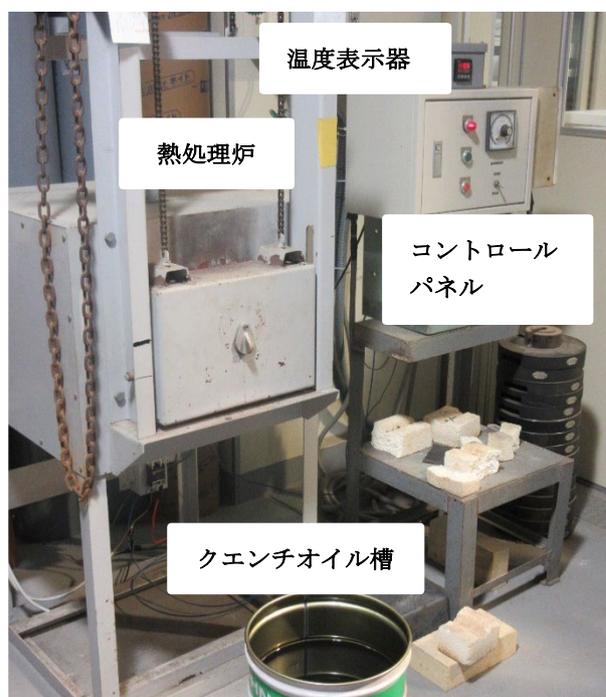


図1 熱処理実験用の熱処理炉
および装置の外観

- 1) 4大熱処理方法の目的や特徴を理解すること
- 2) 焼入れ, 焼戻し, 焼なましの熱処理操作方法を体験し, 処理方法の違いを理解すること
- 3) 上記の2)の熱処理後の組織変化を判断するために材料引張り試験を実施し, 破断荷重, 伸び等を計測・測定して評価すること

引張り試験後に破断形状や破面の観察を行うための試験片を製作する。

2.2 SEMによる金属破断面観察の目的

金属材料の破断した後の面には, どのような破壊で破断したかの過程が記録されている. この破断面を観察することにより, 破断機構あるいは破壊の原因に関する貴重な情報を入手することができる. このような金属破断面の情報を入手する時にはSEMを用いて観察することで可能になる. そのため本実験の目的は, 金属材料等の延性, 脆性, 疲労波面を観察し, それぞれの破断面の特徴を把握することである.

2.3 熱処理の方法

熱処理の試験片 (JIS 規格 2号試験片) の材質はS45Cを使用する. 熱処理は, 焼入れ, 焼戻し, 焼なましの3種類を行う.

熱処理 (焼入れ) を行う際は, クエンチオイルを使用する. 焼戻しを行うために焼入れを初めに行う必要があるため試験片の2本を焼入れする. 焼入れを行っている様子を図2に示す. その時の温度は, 840°Cで保持時間は30分間で行う. その時の熱 (処理) サイクルを図3に示す. また, 焼戻しの温度は400°Cと600°Cの2種類で行う. その焼戻し時の温度の違いによる試験片の色の違いを図4に示す. 焼なましは, 840°Cまで加熱し, その後, 30分間保持し熱処理炉の中に入れた状態で常温になるまで徐冷する.

学生は熱処理炉の中が840°Cの時と600°Cの時の温度の違いによって鋼 (試験片) の色が変わることを確認することができた.

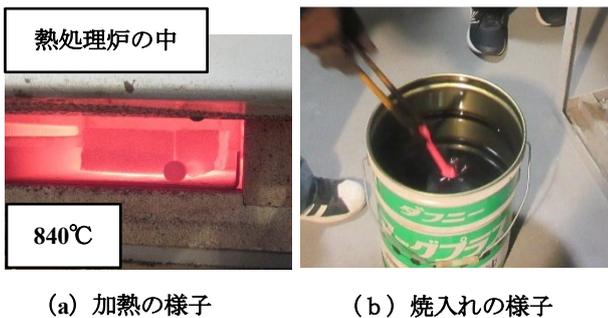


図2 加熱状態の試験片と焼入れ

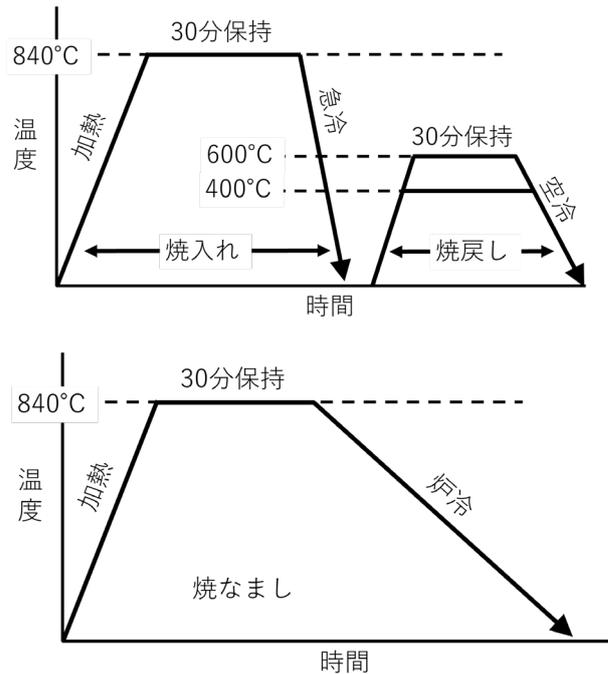


図3 熱 (処理) サイクル図

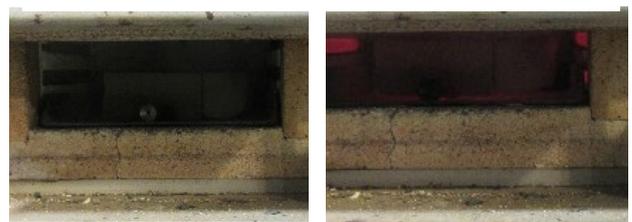


図4 焼戻し時の温度による色の変化

2.4 引張り試験

引張り試験では, 破断荷重や降伏点荷重から応力測定, また, 伸び測定や絞りの測定も行う. 引張り試験の荷重とストロークの関係を図5に示す. 図5のグラフから焼入れされた材料は降伏点が見えなくストロークも短く破断している特徴がある. 焼なましされた材料はストロークが長くなる特徴が確認でき

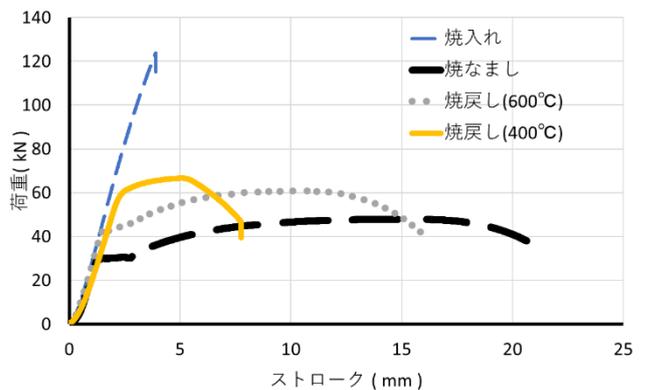


図5 各熱処理の違いに対する引張り試験結果の比較

る。焼戻しでは、焼戻し温度の 400°C と 600°C ではストロークの違いがはっきりしていることが確認できる。引張強度が強い熱処理方法は、焼入れ、焼戻し 400°C、焼戻し 600°C、焼なましの順となった。

応力、伸び、絞りの測定結果から焼入れされた材料は伸び、絞りの変化が少ないことを確認することができた。

学生は同じ鋼 (S45C) で熱処理の方法により引張強度や伸び、絞りに違いがあることに気付くことができた。また、同じ焼戻しの熱処理方法であってもその焼戻し温度の違いにより明らかに引張試験の結果に違いを確認することができた。

2.5 破断面観察

引張試験後の破断面の観察を行った。その破断面を図 6 に示す。破断面の特徴を下記に示す。

図 6 (a) 焼入れの破断面は、塑性変形が少なく目視で確認することができるくらいに平らな状態で破断している。これは脆性破壊の影響が大きいことが考えられる。図 6 (b) 焼なましの破断面は絞りが目視で確認することができ、試験片の周囲にはシャーリップが確認することができた。

図 6 (c) 400°C 焼戻しの破断面は、焼なましの破断面の特徴と似ている。

図 6 (d) 600°C 焼戻しの破断面は、他の破断面の表面に見られないシェブロンパターンに似た破断面を確認することができた。

それぞれの破断面に特徴があり、中炭素鋼材がどのような熱処理を行ったか引張試験後の破断面から推測することができる。

学生も破断面を見て特徴があることに気付くことができた。また、焼入れを行った鋼には塑性変形が小さいことに気付き、焼入れ効果を確認することができた。同時に弾性変形や塑性変形があることで破断面に違いが現れることに気付くことができた。

2.6 光学顕微鏡による組織観察

熱処理を行う前の組織と各熱処理を行った後の組織を図 7 に示す。組織観察を行うために金属表面を鏡面に加工を行う。その金属表面を 2.5% 硝酸アルコールに浸して腐食を行った。光学顕微鏡の対物レンズは 50 倍を使用した。熱処理を行うことで金属組織が変態していることが確認できる。熱処理を行う前では、パーライト (黒) とフェライト (白) の組織率がパーライト 6 : フェライト 4 くらいである。また、焼入れ後の組織は全体的にマルテンサイト (黒) 組織に変態



図6 引張試験後の各破断面

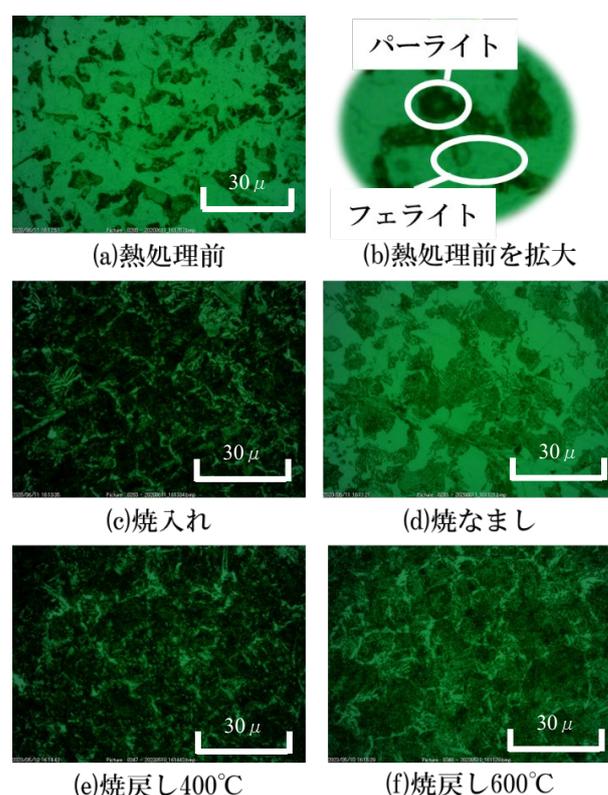


図7 熱処理前と各熱処理後の金属組織

していることがわかる。焼なましの組織は、パーライトの組織に焼戻し 600°C は、セメンタイトが析出した焼戻しソルバイトと呼ばれる組織になっている。焼戻し 400°C は、焼戻しトールスタイトと呼ばれる組織になっている。¹⁾ 学生は目視で確認をすることができないが顕微鏡を用いて観察を行うことで金属組織の違いがあることに気付くことができた。

2.7 SEM 観察用試験片製作

引張試験の破断面をSEMで観察を行うために、引張試験後の試験片をSEMの試料室に入るサイズに手動による切断加工を行った。手動で行う理由として、熱処理の影響を感じることを目的に弓ノコ（人力）で切断加工を行った。その製作を行う前と後の試験片を図8に示す。

焼入れの試験片を製作する時の弓ノコで加工を行う場合は、弓ノコの刃が入らない、刃が滑るような感じがして作業を行うことが大変で困難であることを体験することができた。また、弓ノコで加工を行う場合、学生は、焼なましと焼戻しの比較は同じような感じで加工をすることができ、熱処理の方法の違いで切削加工に違いがあることに気付くことができた。

今回、学生が切断加工をできない試験片とできる試験片の比較をするために、熱処理を行う前と各熱処理を行った後をビッカース硬さ試験で硬さの測定を行った。その結果を図9に示す。硬さを比較すると焼入れを行うことで硬さが大きくなることが確認でき、400 [HV] を超えることで手動による切断が困難になると考えられる。また、焼なましを行った鋼は、熱処理を行う前と比較すると硬さへの影響があまり見られなかった。



図8 引張試験後の試験片とSEM観察用試験片

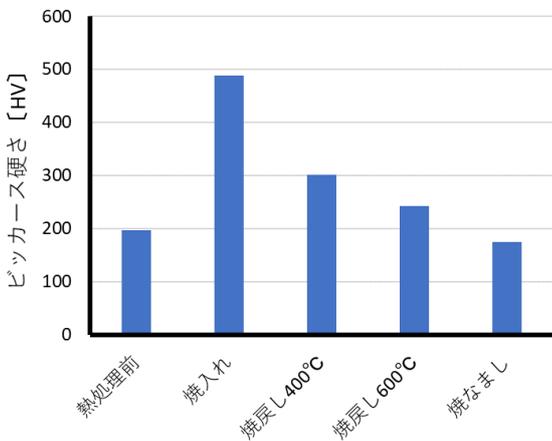


図9 熱処理前と各熱処理後の硬さ測定の結果



図10 SEMによる破断面の観察の様子

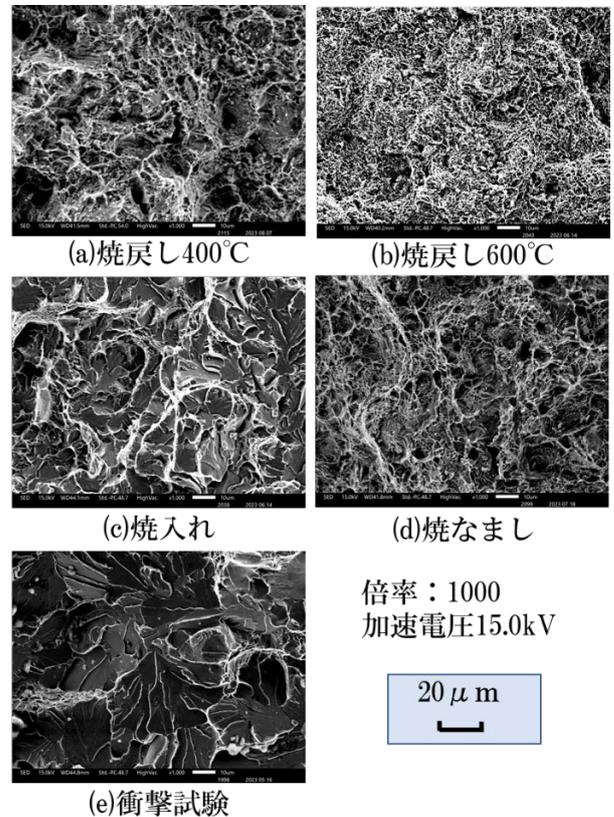


図11 SEMによる破断面観察の写真

2.8 SEMによる破断面の観察

SEMによる破断面の観察を行っている様子を図10に示す。SEMの観察は倍率1000倍で行い、加速電圧は15kVで行った。金属破断面の観察は、各熱処理後の破断面や衝撃破面など行った。そのSEMで観察した写真を図11に示す。

学生は、各熱処理の種類によって破断面が違うことを気づくことができた。また、焼入れにリバーパターン、焼戻しにディンプルパターンが現れることや同じディンプルパターンでも粒の大きさに

違いがあることを確認することができた。学生にとってSEM観察が初めてというものが多く、光学顕微鏡では観察が難しい高倍率1000倍での破断面観察に感動する者が多く見られた。光学顕微鏡で観察することが難しい破断パターンをSEMで、より詳しく観察することができることに学生は気づくことができた。同時にSEMは、試験片を入れる場所が真空にされていることや電気を通さないものの観察が難しいことを学ぶこともできた。

3. 実験後の学生の感想と理解についての考察

3.1 熱処理実験後の感想

熱処理実験後の学生の感想を下記に示す。

- ・4年生までの材料学で習った授業内容を実際に実験することで処理方法がどのような効果があるか理解することができた。
- ・焼入れをすることで材料が硬くなることを弓ノコで切断する時に実感した。
- ・焼入れ、焼戻し、焼なましをやってみて、今まで授業で学んだことがイメージすることができた。
- ・同じ材料でも熱処理条件を変えるだけで破断面や強度など大きく変わることが興味深いと思った。
- ・熱処理によって材料の性質が変化することは知っていたが実際に実験を行って最大荷重、伸び、絞りの結果が想像以上に違いがあり驚いた。
- ・同じ材料でも熱処理によってこれほど性質が変化するなら、機械などをつくる時に材料を検討するだけではなく熱処理を検討するのも良いと思った。
- ・3つの熱処理を体験し同じ材料でも最大荷重がかなり変わることや、伸びない材料や伸びる材料に変化することに驚いた。・試験片にカップ&コーンがきれいに見れてよかった。
- ・炉冷の内容が良く理解できなかったが実験をして理解できた。

3.2 SEMによる金属の破断面観察の感想

SEMによる金属の破断面観察実験後の学生の考察と感想を下記に示す。

- ・倍率 1000 倍というのは初めて見る世界で、想像以上に画面に新鮮に写って驚いた。
- ・SEMを利用して破断面の模様を確認すると熱処理の仕方により形状が大きく違うことがわかった。
- ・各熱処理の違いでディンプルパターンの大きさの違いがあった。
- ・焼入れ、焼戻し、焼なましで大きく違いがわかり面白かった。

・SEMを用いて様々な破面を観察し、その中でも、熱処理の仕方などの違いによって断面の違いが顕著に現れることが分かった。

・疲労破壊したものと衝撃破壊をしたものの内部の破面ではどのような情報が残っているか、どんなパターンがあるか理解できた。

3.3 学生の理解についての考察

工学実験を行うこと（学生が体験すること）で理解度の向上を確認できたことを下記に示す。

- (1) 熱処理を体験することで温度の違いによる中炭素鋼材の色が変化することを学生は実際に確認することができた。
- (2) 引張試験の結果から同じ中炭素鋼材であっても熱処理の方法によって引張強度や伸び、または絞りに違いがあることを確認することができた。
- (3) 実際に弓ノコを使用して試験片の切断をすることで焼入れを行った中炭素鋼材の加工を行うことが大変であることを体験することができた。
- (4) 熱処理の方法によって金属が変態することで設計を行う場合にも熱処理の知識の必要性を再認識することができた。
- (5) 各熱処理を行うことで破断面や実験の結果から特徴があることに気付くことができた。
- (6) 学生は、目視で確認できない金属破断面を倍率 1000 倍で確認することで、各熱処理の仕方や破断方法の違いによって破断面の違いに気づくことができた。

4. おわりに

学生は熱処理実験を体験することにより、熱処理の知識が必要であることを確認することで、より熱処理について理解することの大切さを学ぶことができた。また、各実験を行うことで学生から、座学で学んだことを実験で再度、学び直しをすることやイメージすることができたなどの感想があった。本研究を返して、実験を経験することの大切さを改めて確認することができた。

参考文献

- 1) 荘司郁夫, 小山真司, 井上雅博, 山内啓, 安藤哲也: 機械材料学, 丸善出版株式会社, (2014年)
- 2) 石橋大作, 南明宏, 篠崎烈: 熱処理学生実験による教育的効果, 2023年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集, (2023年), E83, pp.412-413