

製造中核人材育成講座 テキスト  
(基礎講座用)

金属熱処理スーパーマイスタープログラム  
「金属熱処理の基礎と実践」

東京工業大学  
社会人教育院

# 金属熱処理スーパーマイスタープログラム

## 「金属熱処理の基礎と実践」

第1章	鋼の熱処理	寺田芳弘(東京工業大学准教授)
第2章	金属の塑性変形	竹山雅夫(東京工業大学教授)
第3章	状態図	梶原正憲(東京工業大学准教授)
第4章	熱処理設備技術	河田一喜(オリエンタルエン지니어リング(株)代表取締役社長)
第5章	表面硬化理論	奥宮正洋(豊田工業大学教授)
第6章	熱処理による応力とひずみ	奥宮正洋(豊田工業大学教授)
第7章	熱処理シミュレーション技術	奥宮正洋(豊田工業大学教授)
第8章	鋼の用途と組織制御	松尾 孝(東京工業大学名誉教授)
第9章	鋼の組織と強度	廣澤渉一(横浜国立大学准教授)
第10章	非鉄金属の熱処理	熊井真次(東京工業大学教授)
第11章	分析・評価	村石信二(東京工業大学助教)

## 第1章 鋼の熱処理

## 目次

1.1	鉄の結晶構造と格子定数	1-1
1.2	鉄-炭素系状態図	
1.2.1	状態図の基礎	1-3
1.2.2	鉄-炭素系状態図の読み方	1-3
1.3	炭素鋼の標準組織	1-5
1.4	過冷オーステナイト	1-8
1.5	連続冷却変態線図	1-10
1.6	マルテンサイト変態	
1.6.1	マルテンサイト変態の特徴	1-13
1.6.2	マルテンサイト組織	1-13
1.6.3	マルテンサイト相の結晶構造	1-14
1.6.4	マルテンサイト変態における形状変化	1-15
1.7	恒温変態線図	
1.7.1	恒温変態線図	1-16
1.7.2	ベイナイト組織	1-16
1.8	炭素鋼の焼もどし過程	
1.8.1	残留オーステナイト	1-19
1.8.2	焼もどし過程	1-20
1.8.3	焼もどし中の長さ変化	1-20
1.9	変態線図に及ぼす合金元素の影響	
1.9.1	状態図に及ぼす合金元素の影響	1-22
1.9.2	TTT 曲線に及ぼす合金元素の影響	1-22
1.10	合金鋼における焼もどし過程	1-24

## 第2章 金属の塑性変形

## 目次

2.1	弾性変形と塑性変形の違い	
2.1.1	引張試験	2-1
2.1.2	応力-ひずみ曲線	2-2
2.1.3	真応力と真ひずみ	2-3
2.2	理想強度と結晶欠陥	
2.2.1	理想強度と実際の強度	2-7
2.2.2	金属の結晶構造と結晶欠陥	2-8
2.2.3	結晶面および結晶方向の表示法	2-10
2.3	転位とは	
2.3.1	刃状転位	2-13
2.3.2	らせん転位	2-13
2.3.3	混合転位	2-14
2.3.4	バーガースベクトル	2-14
2.3.5	転位密度	2-15
2.4	転位の運動と塑性変形	
2.4.1	転位の動き	2-17
2.4.2	すべり系と結晶構造	2-17
2.4.3	すべりと塑性変形	2-18
2.5	単結晶の塑性変形	
2.5.1	臨界分解せん断応力	2-21
2.5.2	fcc 単結晶の塑性変形と活動すべり系	2-23
2.5.3	ステレオ投影図 (結晶方位の表わし方)	2-25
2.5.4	引張方位と主すべり系	2-27
2.5.5	単結晶の応力-ひずみ曲線	2-28
2.6	多結晶の塑性変形	
2.6.1	結晶粒界と粒界転位	2-30
2.6.2	多結晶体の連続変形	2-30
	Von Mises の法則	
	Ashby の変形モデル	
2.6.3	粒界による強化	2-32
	Hall-Petch の法則	

2.7	金属材料の強化方法	
2.7.1	転位強化	2-34
2.7.2	粒界強化	2-34
2.7.3	析出分散強化	2-35
2.7.4	固溶強化	2-37
2.8	熱処理による組織制御	
2.8.1	回復	2-38
2.8.2	再結晶	2-38
2.8.3	粒成長	2-41
2.8.4	組織と強度の関係	2-42
2.9	鋼の熱処理による組織制御	
2.9.1	自動車用鋼板とは	2-43
2.9.2	鋼の強化方法	2-44
2.9.3	鋼の組織	2-45
	(1) 鋼の状態図	
	(2) 標準組織	
2.9.4	鋼の組織制御	2-46

### 第3章 状態図



## 目次

3.1	状態図の基礎	
3.1.1	純物質の状態図	3-1
3.1.2	相平衡の熱力学	3-3
3.1.3	相安定性	3-5
3.1.4	Fe の状態図	3-7
3.1.5	種々の状態図表示法	3-8
3.2	二元系状態図	
3.2.1	状態図の読み方	3-12
3.2.2	二元系状態図の種類	3-13
3.2.3	状態図と材料組織	3-14
3.2.4	モルギブズエネルギー曲線と熱力学的平衡条件	3-16
3.2.5	化学ポテンシャル表示による二元系状態図	3-21
3.2.6	Fe-C 二元系の状態図	3-21
3.3	三元系状態図	
3.3.1	三元系状態図の表示法	3-24
3.3.2	モルギブズエネルギー曲面と熱力学的平衡条件	3-28
3.4	Fe 基三元系合金の状態図	
3.4.1	Fe-Cr-C 三元系	3-30
3.4.2	Fe-Cr-N 三元系	3-31
3.4.3	Fe-Cr-Ni 三元系	3-34
3A.	補遺	
3A.1	種々の数学関数	
3A.1.1	指数関数	3-37
3A.1.2	対数関数	3-38
3A.2	熱力学の関係式	
3A.2.1	活量と化学ポテンシャル	3-39
3A.2.2	ギブズの相律	3-40

## 第 4 章 熱処理設備技術

## 目次

4.1	熱処理設備技術-1：各種熱処理炉・機器の構造と特徴	
4.1.1	熱処理炉の種類と特徴	4-1
4.1.2	熱処理設備の有効加熱帯および有効処理帯	4-8
4.1.3	抵抗炉	4-9
4.1.4	熱処理炉の熱勘定	4-11
4.1.5	熱処理用冷却装置	4-12
4.1.6	関連設備と機材	4-14
4.2	熱処理設備技術-2：温度制御の理論と実際	
4.2.1	温度測定方法	4-27
4.2.2	温度制御	4-31
4.3	熱処理設備技術-3：雰囲気制御の理論と実際	
4.3.1	雰囲気ガスの種類	4-37
4.3.2	熱処理雰囲気ガスの種類と製造方法	4-37
4.3.3	雰囲気ガス分析計	4-41
4.3.4	雰囲気ガスと金属との反応	4-44
4.4	熱処理設備技術-4：設備保守管理・環境保護・安全対策	
4.4.1	熱処理炉の機器の保守管理	4-49
4.4.2	温度管理	4-55
4.4.3	冷却能管理	4-57
4.4.4	雰囲気管理	4-60
4.4.5	環境保護対策	4-61
4.4.6	安全対策	4-64

## 第5章 表面硬化理論

## 目 次

5.1	浸炭焼入れおよび浸炭窒化焼入れの原理と方法	
5.1.1	各種浸炭法の解説	5-1
5.1.2	浸炭の基礎	5-2
5.1.3	ガス浸炭処理および焼入れの操業方法	5-2
5.1.4	浸炭における雰囲気ガスの管理法	5-5
5.1.5	浸炭窒化处理	5-7
5.1.6	CP 値換算方法	5-9
5.2	窒化の原理と方法	
5.2.1	窒化の原理と方法	5-12
5.2.2	軟窒化	5-13
5.2.3	プラズマ窒化	5-13
5.2.4	その他の窒化法および軟窒化法	5-14
5.3	窒化品の一般的な性質	
5.3.1	表面構成相	5-14
5.3.2	他の表面硬化法との比較	5-14
5.4	高周波熱処理およびショットピーニングの原理と方法	
5.4.1	高周波熱処理作業	5-16
5.4.2	高周波焼入装置	5-17
5.4.3	高周波熱処理と金属学的影響	5-18
5.4.4	高周波熱処理作業	5-19
5.4.5	焼入冷却剤	5-19
5.4.6	高周波誘導加熱による焼戻しと焼なまし	5-19
5.4.7	高周波焼入れ設備の取扱い	5-19
5.4.8	高周波熱処理での欠陥と防止法	5-19
5.5	ショットピーニング	5-20
5.6	前後工程とのコラボレーション	
5.6.1	前後工程とのコラボレーションが必要な理由	5-20
5.6.2	トラブル対策への表面分析の適用	5-20

5.7	表面硬化熱処理の今後の展望	
5.7.1	表面硬化熱処理の現状	5-22
5.7.2	表面硬化熱処理の課題	5-22
5.7.3	洗浄工程	5-22
5.7.4	表面硬化熱処理の分野における課題への取り組み	5-23
5.7.5	装置およびプロセスからのアプローチ	5-24
5.7.6	天然ガス適用ハイブリッドカーボンポテンシャル制御ガス浸炭法の特徴	5-27
5.7.7	複合熱処理	5-28
5.8	その他，表面硬化熱処理において現在検討・適用されている内容	
5.8.1	直接浸炭法	5-28

## 第6章 熱処理による応力とひずみ

## 目次

6.1	熱処理により生じる応力	
6.1.1	焼入れ過程における焼入れ材の温度の時間的变化	6-1
6.2	焼入れに伴う相変態 (マルテンサイト変態)	
6.2.1	焼きが入るとは	6-1
6.2.2	マルテンサイト変態とは	6-1
6.3	熱処理に伴って生じる応力	
6.3.1	熱応力	
6.3.2	変態応力	6-2
6.3.3	冷却方法の影響	6-3
6.3.4	炭素量の影響	6-3
6.3.5	加熱温度の影響	6-4
6.3.6	質量効果の影響	6-4
6.3.7	材料の方向性, 偏析, 脱炭等の影響	6-4
6.4	熱処理により生じる変形, ひずみ, および割れ	
6.4.1	加熱・冷却過程が形状変化に及ぼす影響	6-6
6.4.2	材料を一部冷却した場合の形状の変化	6-6
6.4.3	加熱にともなう変形	6-7
6.5	ひずみ発生メカニズム	
6.5.1	焼入れに伴い発生するひずみ	6-7
6.5.2	曲がりが発生するメカニズム	6-7
6.6	焼割れ	
6.6.1	変態応力が主となるもの	6-9
6.6.2	変態膨張量の部分差, 熱応力によるもの	6-9
6.6.3	表面欠陥によるもの	6-9
6.6.4	組織不良による強さの低下	6-9
6.7	各種表面硬化法により生じる応力とひずみおよび機械的性質の違い	
6.7.1	高周波焼入れで生じる応力と耐疲れ強さ	6-10
6.7.2	高周波焼入れにおける残留応力発生メカニズム	6-10
6.7.3	浸炭焼入れおよび窒化処理において発生する応力と応力勾配	6-11
6.8	ひずみの低減法と制御法の検討, および熱処理で生じる応力の有効利用	
6.8.1	疲れ強さの向上	6-14



6.9 熱処理によって生じるひずみ

6.9.1 ひずみ発生の原因と対策

6-14

6.9.2 ひずみ発生を低減した熱処理法

6-15

## 第7章 熱処理シミュレーション技術

## 目 次

7.1	浸入元素濃度勾配のシミュレーション	
7.1.1	炭素濃度プロファイルシミュレーション	7-1
7.1.2	処理条件決定ソフト	7-1
7.1.3	表面熱処理を行う際に目標とする代表特性	7-2
7.2	浸炭におけるシミュレーションの原理	
7.2.1	拡散の法則	7-2
7.3	焼入れにおける冷却過程のシミュレーション	
7.3.1	冷却過程のシミュレーションに関する研究	7-5
7.3.2	冷却過程をシミュレートする際に用いる解法	7-6
7.3.3	冷却過程のシミュレーション法	7-9
7.3.4	鋼円柱の焼入れシミュレーション結果	7-11

## 第8章 鋼の用途と組織制御

## 目次

8.1	自動車のプレス用鋼板は鋼ではなく純鉄	
8.1.1	鋼の降伏現象	8-1
8.1.2	降伏現象とコトトレル固着	8-2
8.1.3	ストレッチャーストレイン現象	8-4
8.2	プレス用鋼板を強化するには(IF鋼-純鉄を強くするには)	
8.2.1	プレス用鋼板には純鉄が	8-5
8.2.2	結晶粒径を小さくすることで高強度化する理由	8-5
8.2.3	ホールペッチの式	8-6
8.3	プレス成形性が要求される自動車外板用のIF鋼の組織とは	
8.3.1	ランク・フォード値とは	8-7
8.3.2	ランク・フォード値を大きくする方法とは	8-7
8.3.3	結晶粒径を小さくする方法	8-9
8.4	自動車のシャーシは高張力鋼にまかせて	
8.4.1	非調質型高張力鋼とは	8-11
8.4.2	調質型高張力鋼とは	8-11
8.4.3	超強じん鋼とは	8-11
8.5	高機能を備えた自動車部品の秘密を知ろう	
8.5.1	ジョミニ試験	8-13
8.5.2	焼入れ性に及ぼす炭素の効果	8-15
8.5.3	焼入れ性に及ぼす合金元素の効果	8-16
8.6	エンジンプロックで鑄鉄が存在価値を示す	
8.6.1	鑄鉄の種類	8-17
8.6.2	ダクタイル鑄鉄	8-17
8.6.3	可鍛鑄鉄	8-17
8.6.4	エンジンプロックには	8-17
演習問題集		8-20

第9章 鋼の組織と強度

## 目 次

9.1	はじめに	9-1
9.2	実験方法	
9.2.1	炭素鋼の種類と化学組成	9-1
9.2.2	炭素鋼の熱処理	9-1
	(1) 熱処理の種類	9-1
	(2) 熱処理の方法	9-1
9.2.3	組織観察	9-2
	(1) 観察面の研磨	9-2
	(2) 組織観察および写真撮影	9-2
9.2.4	ビッカース(Vickers)硬さ試験	9-2
9.2.5	引張試験	9-2
9.3	実験結果のまとめ方	
9.3.1	組織観察結果	9-2
9.3.2	硬さ試験結果	9-2
9.3.3	引張試験結果	9-3
9.4	考察	
9.4.1	炭素鋼の標準組織とパーライト変態	9-3
9.4.2	過冷オーステナイトおよび連続冷却変態	9-4
9.4.3	炭素鋼の焼入れとマルテンサイト変態	9-6
9.4.4	焼入れマルテンサイト組織の焼もどし過程	9-8
9.4.5	炭素鋼の機械的性質と変形機構	9-8
9.5	総合討論問題	9-9
9.6	報告書の書き方	9-9
9.7	まとめ	9-10

## 第10章 非鉄金属の熱処理



## 目 次

10.1	非熱処理型合金と熱処理型合金	
10.1.1	アルミニウム合金の調質	10-1
10.1.2	非熱処理型合金展伸材の調質	10-3
10.1.3	熱処理型合金展伸材の調質	10-4
10.2	熱処理と時効析出組織	10-6
10.3	時効析出の平衡論と速度論	
10.3.1	時効析出の平衡論：自由エネルギー変化	10-10
10.3.2	時効析出の速度論：TTT 曲線	10-12
10.4	熱処理，組織，強化機構間の相互関係	
10.4.1	種々の強化機構と析出組織との関係	10-13
10.4.2	時効硬化曲線と強化機構との関係	10-15

## 第 11 章 分析・評価

## 目 次

11.1 F E S E Mによる炭素鋼の焼入れ・焼戻し組織の観察	
11.1.1 鋼の熱処理と組織	11-2
Fe-C 系状態図	11-2
標準組織	11-2
焼入れ, 焼もどし組織	11-4
11.1.2 走査型電子顕微鏡の原理	11-6
電子顕微鏡	11-6
電子顕微鏡の分解能	11-6
電子線の入射と反射 (反射電子, 二次電子, 電磁波)	11-8
11.2 鋼の焼入れ, 焼もどし組織のX線結晶構造解析	
11.2.1 熱処理による鋼の組織変化と結晶構造	11-11
11.2.2 鋼に含まれる結晶構造と格子定数	11-13
11.2.3 結晶構造解析	11-14
11.2.4 回折角の算出法	11-15
11.2.5 面間隔と回折角の算出	11-16
11.2.6 まとめ	11-17
参考資料	
X線とは?	11-18
回折とは?	11-18
X線を発生させるには?	11-19
結晶の表記方法	11-21
原子位置	11-21
結晶方位	11-21
結晶の格子面	11-22
結晶構造因子	11-23
単純立方構造	11-24
体心立方構造	11-24
面心立方構造	11-25