

特殊鋼

2023 **3**
Vol.72 No.2
The Special Steel

特集

特殊鋼の技術と用語のやさしい解説（技術解説編）

一般社団法人 特殊鋼倶楽部

特殊鋼

3

目次

2023

【特集／特殊鋼の技術と用語のやさしい解説 (技術解説編)】

1. まえがき…………… (一社)特殊鋼倶楽部 迫間 保弘 2
 2. 工具鋼…………… (株)プロテリアル 荒木 理 3
 3. 機械構造用炭素鋼…………… 大同特殊鋼(株) 田中 優樹 7
 4. 構造用合金鋼…………… 愛知製鋼(株) 水谷 隆 12
 5. ばね鋼…………… 三菱製鋼(株) 宮田 将晴 16
 6. 軸受鋼…………… 山陽特殊製鋼(株) 栗田 俊 20
 7. ステンレス鋼…………… 日鉄ステンレス(株) 東城 雅之 24
 8. 耐熱鋼…………… 日本冶金工業(株) 及川 誠 27
 9. 快削鋼…………… 日本製鉄(株) 間曾 利治 32
 10. ピアノ線材…………… (株)神戸製鋼所 酒道 武浩 35
 11. 高張力鋼…………… 日本製鉄(株) 柳田 和寿 38
 12. マルエージング鋼…………… (株)プロテリアル 大石 勝彦 42
 13. 超合金…………… 大同特殊鋼(株) 大木優太郎 46
 14. 電子材料…………… (株)プロテリアル金属 堀部 孝広 49
(株)プロテリアル金属 山本 晋司
 15. 電磁鋼板…………… JFEスチール(株) 尾田 善彦 53
- “特集” 編集後記…………… (株)プロテリアル 酒寄 一志 75

【編集委員】

委員長	迫間 保弘 (大同特殊鋼)
副委員長	白神 哲夫 (中川特殊鋼)
委員	宇田川毅志 (愛知製鋼)
〃	吉原 直 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	深瀬美紀子 (大同特殊鋼)
〃	青山 敦司 (日本製鉄)
〃	正能 久晴 (日本金属)
〃	谷井 一也 (日本高周波鋼業)
〃	吉田 統樹 (日本冶金工業)
〃	酒寄 一志 (プロテリアル)
〃	大石 裕之 (三菱製鋼)
〃	阿部 泰 (青山特殊鋼)
〃	高橋 秀幸 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	番場 義信 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	関谷 篤 (竹内ハガネ商行)
〃	平井 義人 (平井)

■業界のうごき	56
▲特殊鋼統計資料	59
★倶楽部だより (2022年12月1日～2023年1月31日)	63
☆特殊鋼倶楽部の動き	65
◇お知らせ 第247・248回西山記念技術講座	70
メタルジャパン 関西展に常設出展	73
☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧	74

特集／「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説(技術解説編)」編集小委員会構成メンバー
(2022年9月20日現在)

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	酒寄 一志	日立金属(株)	金属材料事業本部 技術部長
委員	宇田川毅志	愛知製鋼(株)	品質保証部 お客様品質・技術室 主任職
〃	吉原 直	(株)神戸製鋼所	鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット線材 条鋼商品技術部グループ長
〃	深瀬美紀子	大同特殊鋼(株)	技術開発研究所 企画室 主任部員
〃	青山 敦司	日本製鉄(株)	棒線事業部 棒線技術部 棒線技術室 室長
〃	谷井 一也	日本高周波鋼業(株)	富山製造所 技術部 開発室 課長
〃	吉田 統樹	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 課長
〃	大石 裕之	三菱製鋼(株)	技術開発センター 製品評価グループ マネージャー
〃	高橋 秀幸	伊藤忠丸紅特殊鋼(株)	特殊鋼本部 前橋支店 支店長
〃	白神 哲夫	中川特殊鋼(株)	フェロー

一人一題

「36年目の体質改善！」

南海モルディ(株)
代表取締役社長

ふく はら ち さと
福 原 千 里



いつもお世話になります。南海モルディ(株)(旧社名：南海鋼材(株))の福原千里と申します。昨年9月より代表取締役社長に就任しはや半年、70歳まで務めるとしてこれから約35年間と思うと、改めて業界の先輩方への尊敬の念が深まります。若輩者ですが、今後とも宜しく願い申し上げます。

このような機会をいただきましたので、2つほどお話できればと思います。

まずは、「お勧めのお子さん教育法！」です。私は定期テスト勉強を1週間前から、きっちり頑張っていました。さて何のために?!実は、お小遣いがテストの順位で決まっていたのです。どういうことかと言いますと、例えばまず上限額を決めます。「5万円」としましょう。テストの成績順位が10位などであれば、お小遣い額は「5万円÷10=5千円」と連動します。1点でも多く取る!モチベーションを上げるためには、親御さんも上限額は多少ギャンブルしてあげてください(笑)。“学生は勉強が仕事”とは言葉そのままに、勉強で稼ぐシステム!お勧めです。

さて、私は左耳が先天性難聴で、健康診断での“5,000Hz以上難聴”という言葉をそのまま鵜呑みに36年間過ごしていたわけですが、皆さんもそういう“生まれつきの体質だから”と括っていることはありませんか?

きっかけは昨年末最後の日。左前席の営業部員同士が楽しく談笑していたのを、どうやっても聞き取れないのでおかしいなと思いました。“5,000Hz以上の難聴”とは生活音域は問題ない、つまり1,000~2,000Hzの人間の会話は問題ない範疇だからです。

検査の結果、生活音域も中度難聴に悪化していることが判り、念のため「識別能力」も診てみましょうとなりました。「あ」とか「じ」とか、単音を聞いて答える検査で、いやいやそんなの!と臨みましたが、何度か苦笑い。能力が15%ダウンしていました。そのときの気持ちは“しまったな”です。早めに分かっていたら、識別能力が落ちないうちに補聴器を付ければよかったですから。

これは代替わりの影響も大きく、皆さんの貴重なひと言を漏らさず聞き取りたい、その思いが強くなった表れとも思います。補聴器の見目はワイヤレスイヤホンそのもので、相手様も確認しづらいでしょうし、こちらもわざわざ言うこともしないので、この機会に報告させて頂こうと思いました。また皆さんの身体も、ご自身でしか僅かな異変に気づけないのだと、改めてのキッカケになればと思います。

最後に余談ですが、補聴器の値段、ご存知ですか?最近では「AI」が搭載されており、高い物は片耳70万円と驚きです!昨今の科学技術は“有っても無くても”のレベル、豊かさの追求という印象が強いですが、企業は競争力強化のためにも留まることを知りません。ただ、1つの技術は多くの側面をもつことを知り、慎重に選択することが、私たち一般消費者の役割としても一層重要になってきたと感じます。



1. まえがき

(一社)特殊鋼倶楽部 はぎ ま やす ひろ
編集委員会 委員長 迫 間 保 弘

当倶楽部の機関紙「特殊鋼」は、特殊鋼業界でのタイムリーな話題や、特殊鋼業界に関わるメンバーへの情報提供、知識提供を目的としたテーマなど、読者の皆様に少しでもお役に立てる内容を盛り込むべく編集委員会で議論をしながら作成しています。

今回の特集は、「特殊鋼」の別冊である「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説」が平成10年（1998年）に発刊されてから20年以上が経過する中で、自動車の電動化、IT化の大きな進歩、3D積層造形など、世の中のニーズやモノ作りのプロセスも大きく変化しており、その材料である特殊鋼も種々の影響を受けながら改善・開発が進んでいます。「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説」は、若手技術者や営業の皆様へのハンドブックとして活用されていますが、時代の変化に合わせて最新の内容に更新すると共に、更に分かり易く、活用しやすくすることが必要と判断しました。そこで、22年9月号「特殊鋼の基礎」、23年3月号「物理的性質・機械的性質・熱処理」、7月号「鉄鋼用語解説」、11月号「新材料・磁性材料用語解説」の全4回に分けて、内容の見直しを行うこととしています。

今回は、「物理的性質・機械的性質・熱処理」の特集となります。特殊鋼には多くの鋼種があり、多様な熱処理を加えることで、同じ成分の材料とは思えないほど材料特性は変化します。工業的に

はそのような材料特性の変化を上手く活用し、鍛造・切削・熱処理などの製造工程の最適化を図ることで最終製品の部品特性を作り込むと共にコスト低減を図っていくことが重要となります。一方で、その材料特性の変化が大きいことから、モノ作りの工程を適切に設定するのは知恵と経験が必要で、時には実作業の中で種々のトラブルや課題が出てくることも良くあります。今回の特集では、特殊鋼を使用したモノ作りの最適化・トラブル対応において、一つのガイダンス・ヒントとなるような内容を目指しています。

また、今回の特集を編集するにあたり、編集委員会で従来の「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説」のように「物理的性質」「機械的性質」「熱処理」と個別に解説するよりも、鋼種別に「物理的性質・機械的性質・熱処理」について一貫して解説した方が、より実践的に使いやすいとの意見があり、今回は代表的な鋼種群について、用途、必要な特性、適用する熱処理、不具合事例、最近の技術動向などを一貫して解説するように変更しましたので、読者の皆様の業務の中で活用いただければと考えています。

最後に、今回の特集の作成にあたり、多大なるご尽力をいただいた編集委員各位と各社の執筆者各位、および一般社団法人特殊鋼倶楽部の事務局の方へ深く感謝申し上げます。

[大同特殊鋼(株) 鋼材営業本部 材料技術サービス部 部長]

2. 工具鋼

(株) プロテリアル あら き **荒木** さとし **理**
冶金研究所 特殊鋼研究部

工具鋼は、金属、非金属材料の切削、塑性加工などの各種治具・工具として用いられる鋼であり、JISでは炭素工具鋼、合金工具鋼、高速度工具鋼の3規格に分類される。炭素工具鋼は0.55~1.5%の炭素を含有し、特別に合金元素を添加しない工具鋼である。合金工具鋼は炭素工具鋼に合金元素を添加し、材料特性を改善した鋼であり、主用途によって切削工具用、耐衝撃工具用、冷間金型用、熱間金型用の4つに区分される。高速度工具鋼は高炭素鋼に合金元素を比較的多量に添加し、切削工具および金型などに用いられる工具鋼である。この中で代表的な工具鋼であるSKS3、SKD11、SKD61、SKH51について解説する。

I. 特性

a 鋼種名

SKS3 (0.95C-1Mn-0.75Cr-0.75W)

SKD11 (1.5C-12Cr-1Mo-0.35V)

SKD61 (0.4C-1Si-0.35Mn-5Cr-1.2Mo-1V)

SKH51 (0.85C-4Cr-5Mo-6W-2V)

b 一般的な用途の概要

SKS3：冷間プレス型、シャー刃、ゲージ等

SKD11：冷間鍛造型、冷間プレス型、ロール、転造ダイス、シャー刃、ゲージ、耐摩耗治具等

SKD61：熱間鍛造型、熱間プレス型、ダイカスト型、押出工具、シャー刃、ゲージ、線引ダイス、各種抜き型等

SKH51：冷間鍛造型、冷間プレス型、精密金型、

切削工具等

c 必要とされる特性

SKS3は、冷間金型用の合金工具鋼であり炭素工具鋼SK材をベースにMn、Cr、Wを添加することで耐摩耗性、耐熱性、焼入性を改善している。

SKD11は、SKS3同様に冷間金型用の合金工具鋼である。SKS3と比較してC、Cr量が多く、被削性は劣るが硬質な炭化物を多量に分散させることで耐摩耗性を大きく向上させている。また、熱処理による変形が小さい、焼入性が良いなどの特長がある。

SKD61は、熱間金型用の合金工具鋼である。熱間工具鋼には高温強度（軟化抵抗）に加えて韌性、耐ヒートクラック性などが要求されるため、炭素工具鋼に対してC量が少なく、Cr、Mo、Vを添加してサブミクロンサイズの炭化物を分散させることで各特性を得ている。

SKH51は、モリブデン系の高速度工具鋼（ハイソ）である。Mo、W、Vを多量に添加することでSKD11よりも韌性、硬さ、耐摩耗性をさらに向上させている。

(1) 物理的性質（主にCAE解析を行う場合に必要となる）

各鋼種の物理的性質を表1に示す。

①密度

密度はFeの密度（7.87g/cm³）と同程度であるがFeより密度が大きい元素（Co、Ni、Mo、W等）量が多いほど大きくなり、Feより密度が小さい元

表 1 各鋼種の物理的性質

JIS分類		密度g/cm ³	熱膨張係数 (20~200℃平均) ×10 ⁻⁶ /℃	熱伝導率 20℃ W/(m・K)	ヤング率 kgf/mm ²	
合金工具鋼	冷間用	SKS3	7.85	13.6	23.3	20,100
		SKD11	7.71	11.2	20.6	21,100
	熱間用	SKD61	7.74	11.3	24.6	21,000
高速度工具鋼		SKH51	8.08	11.2	21.0	21,600

※標準焼入れ、焼戻しでの測定値

素（C、Si、Mn、Cr、V等）量が多いほど小さくなる。SKH51が最も大きい。

②熱膨張係数

熱膨張係数は温度変化による材料の寸法変動の大きさを示す値である。合金元素量が多いほど小さくなる。SKD11、SKH51が小さい。

③熱伝導率

熱伝導率は材料内部の熱の伝わりやすさを示す値である。炭素量、合金元素量が多いほど小さくなり、SKD11、SKH51が小さい。また、母相中に溶け込んでいる（固溶）元素量が多いほど小さくなるため、焼なまし状態よりも焼入状態の方が値は小さくなる。

④ヤング率（縦弾性係数）

ヤング率は引張試験での弾性変形域における変形のしにくさを示す値であり、応力とひずみの比例係数である。MoやW系の炭化物が多量に存在するSKH51が最も大きな値を示す。

（2）機械的性質（添加されている合金元素の種類や量、熱処理状態によって変化する）

①高温強度（軟化抵抗）

一般的に温度が高いほど強度は低下するため、高温下で使用する工具鋼は使用中に強度や耐摩耗性が低下していく。高温強度は高温で安定な炭化物を母相中に析出させることで高める事ができ、Cr、Mo、W、Ti、Vなどの炭化物形成元素を添加することが有効である。

②耐摩耗性

耐摩耗性は工具表面を被加工材が摺動するとき生じる摩耗に対する抵抗力の指標である。一般的に硬さが高いほど耐摩耗性は大きくなるため、硬質な炭化物を多量に分散させたり、表面処理（浸炭、窒化、硬質皮膜処理など）を施したりすることにより耐摩耗性を向上させることができる。また、表面処理の種類（浸炭窒化、DLC皮膜など）によっては潤滑性を持たせたり摩擦係数を下げることによって耐摩耗性を向上させる手段もある。

③疲れ強さ

工具に応力が繰り返し負荷された際に生じる疲労破壊に対する抵抗力の指標である。疲れ強さは材料組織中の欠陥だけではなく、表面粗さ、切欠き形状などの応力集中部の存在、引張残留応力な

どにより低下する。疲れ強さの向上のためには組織の均一微細化、仕上面粗さを良くする、表面に圧縮残留応力を付与することが有効である。

④韌性

韌性は割れやクラックの発生し難さの指標であり、韌性が高い工具鋼ほど粘り強く割れにくい。シャルピー衝撃値（動的韌性）や抗折力（静的韌性）による評価が一般的に知られている。硬さと韌性はトレードオフの関係であるため、硬さが高いほど韌性は低下する。また、同じ硬さでも粗大な炭化物が多量に存在する工具鋼では韌性が低いが、炭化物量が多くても微細・均一に分散させた工具鋼では韌性が高くなる。また、後述するが焼入冷却速度が遅くなっても韌性は低下する。

⑤耐ヒートクラック性

熱間工具鋼の表面は、高温の被加工材との接触による加熱と潤滑剤や離型剤塗布による冷却の熱サイクルの繰り返しにより局所的な膨張・収縮によって微小なき裂（ヒートクラックまたはヒートチェックと呼ぶ）が発生する。大気接触によるき裂内部の酸化も加わってヒートクラックは徐々に進展して割れや欠けの原因となり金型寿命が低下したり、意匠性が要求される用途では被加工材の表面品質の劣化が問題となる。加熱温度域では強度（高温強度）が高く、冷却温度域では韌性が高い工具鋼ほど耐ヒートクラック性は優れる。

⑥焼入性

焼入性は焼きの入りやすさを示す指標である。工具鋼を焼入れる場合、表面部は早く冷やされるため焼きが入りやすいが、中心部ほど冷却速度が遅くなるため焼きが入りにくく硬化させにくい。中心部まで完全に焼きを入れるためには、中心部の冷却速度を速くするか、焼入性を向上させる必要がある。冷却速度を速くすると焼割れや変形の危険性が高まる。材料が大型になると内部の冷却速度を速くするのは困難になる。そのため、冷却速度に合わせて中心部まで焼きが入るように焼入性が良い工具鋼を使用することが望ましい。Mn、Mo、Cr等を添加することで焼入性を向上させることができる。

II. 熱処理

工具鋼は必要な材料特性を得るために適正な熱処理を施すことが重要である。各鋼種の標準的な

熱処理条件と焼入焼戻し硬さを表2に示す。

a 主な熱処理

(1) 焼なまし (焼鈍)

焼なましは適当な温度に加熱・保持した後、徐冷する熱処理である。焼なましの目的は、組織制御、内部応力の除去、軟化による被削性・加工性の改善、靱性の改善等があり、目的に応じて加熱温度を調整する必要がある。代表的な焼なましは次の通りである。

①完全焼なまし…組織制御や被削性・加工性の改善を目的として、亜共析組成の工具鋼（約0.8% C以下）では A_{c3} 点以上、過共析組成の工具鋼（約0.8% C以上）では A_{c1} 点以上に加熱・保持後、徐冷する。

②応力除去焼なまし…鍛造、機械加工、溶接などで生じる内部応力の除去を目的として、 A_{c1} 点以下に加熱・保持後、徐冷する。特に精密工具で実施される。

③球状化焼なまし…被削性・加工性の改善を目的として、炭化物を球状化させる。球状化焼なま

しの方法は、 A_{c1} 点直下の温度に加熱、長時間保持した後、徐冷する（長時間加熱法）、 A_{c1} 点直上の温度に加熱、保持した後、 A_{r1} 点直下の温度に冷却、保持した後、徐冷する（等温保持徐冷法）、 A_{c1} 点直上と A_{r1} 直下で加熱と冷却を繰り返した後、徐冷する（繰り返し加熱冷却法）などがある。

(2) 焼入れ

焼入れは組織をオーステナイトからマルテンサイトに変態させ、硬さを得るための熱処理である。各鋼種の適正な焼入温度（オーステナイト化温度）に加熱・保持して組織をオーステナイト化した後、急冷する。マルテンサイトの硬さは炭素含有量とともに増大する（図1）。焼入温度が高いと結晶粒が粗大化して靱性が低下し、焼入温度が低いと十分な硬さが得られないため、焼入温度は亜共析組成の工具鋼では A_{c3} 点、過共析組成の工具鋼では A_{c1} 点より30~50℃高い温度が望ましい。加熱は予熱を行いながら全体が均一に温度上昇するように加熱する。保持時間は短いと焼入れ前に存在していた炭化物がオーステナイト中に固溶せず未固溶

表 2 各鋼種の標準的な熱処理条件と焼入焼戻し硬さ

JIS分類		焼なまし	焼入れ	焼戻し	焼入焼戻し硬さ	
合金工具類	冷間用	SKS3	750~800℃ 徐冷	830℃ 油冷	180℃ 空冷	≥60HRC
		SKD11	830~880℃ 徐冷	1030℃ 空冷	180℃ 空冷	≥58HRC
	熱間用	SKD61	820~870℃ 徐冷	1020℃ 空冷	550℃ 空冷	≥50HRC
高速度工具鋼		SKH51	800~880℃ 徐冷	1220℃ 油冷	560℃ 空冷	≥64HRC

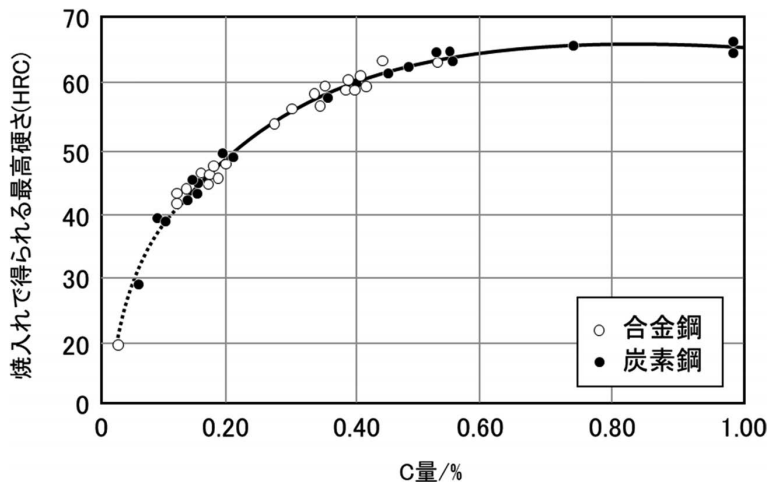


図 1 鋼のC量と焼入れで得られる最高硬さの関係 (田村今男、牧正志 編：「鉄鋼材料 講座・現代の金属学 材料編4」、日本金属学会 (1985)、p.99)

表 3 代表的な冷却方法とその特徴

冷却方法 (冷媒の種類)	長所	短所
水冷	冷却速度が速い	歪み、割れ
油冷	油種により冷却速度の調整が可能	油火災 部分過冷による割れ
ソルト冷却	均一冷却 高温域冷却能が大きい	水冷孔目詰り 排水、ソルトスラッジ汚染
加圧ガス冷却	光輝肌焼入れ 無公害	設備高価 大型品で冷却速度不十分
衝風冷却	歪制御が可能	冷却速度が不十分

速い
↓
遅い
昇降速度

炭化物が残存してしまうので工具の寸法に応じて決める。冷却方法は各鋼種の焼入性と寸法に応じて中心部まで焼きが入るように、水冷、油冷、ソルト冷却、ガス冷却、衝風冷却等を使い分ける。各冷却方法の特徴を表3に示す。冷却速度が速いほど高強度化、高靱性化が可能であり、焼入性が悪い鋼種は大物の工具への使用には適さない。SKS3やSKH51等は速い冷却速度で焼入れを行う必要があるが、焼入性の良いSKD11やSKD61等は空気焼入れが可能である。

(3) 焼戻し

焼入れたままでは硬いが脆く大きな内部応力が存在するため、そのまま使用すると仕上加工や使用中に変形や割れが生じる場合がある。また、焼入れ時に100%マルテンサイト組織にはならず、オーステナイトが一部残存する(残留オーステナイト)。残留オーステナイトは、不安定なため工具使用中にマルテンサイトに変態して形状や寸法変化が生じたり、硬さが低いため硬さ不足の原因になる。そこで、組織や特性を調整するためにA₁点以下の適当な温度に加熱・保持した後、冷却する焼戻しを行う。焼戻しを行うことで炭化物析出に伴うマルテンサイト組織の安定化、内部応力の緩和、残留オーステナイトの分解が生じ、焼戻し温度を変化させることで特性を制御することができる。焼戻し温度が高いほど硬さは低下し靱性は高くなるため、硬さや耐磨耗性が要求される場合は200℃以下の低温焼戻しを実施し、靱性が要求される場合は400℃以上の高温焼戻しを行う。工具鋼では耐磨耗性や靱性を得るために焼戻しは2回以上行う。これは残留オーステナイトの分解と焼戻しによって生成したマルテンサイトの安定化のためである。Coを含む高速度工具鋼は3回以上焼戻しを行う。

b 不具合事例、改善事例

(1) 熱処理変寸、経年変寸

焼入れ、焼戻しを行うことで加熱・冷却時の温度分布による熱応力やマルテンサイト変態のタイミングの差などに起因した膨張・収縮により熱処理変寸が生じる。また、熱処理後に残留オーステナイトが時間経過とともにマルテンサイト変態して膨張する経年変寸が生じる場合がある。特に、晶出炭化物が多量に存在するSKD11やSKH51では変寸量に異方性がある。例えば、SKD11はファイバー方向(鍛造・圧延の長手方向)へ大きく膨張し、焼戻し温度500℃以上で変寸量が急激に大きくなる。また、変寸量は低温焼戻しでは小さいが、高温焼戻しでは大きくなる。熱処理変寸は避けることができないが、鋼材の切り出し位置や方向、焼戻し温度の管理、焼入冷却方法の最適化によって軽減することができる。経年変寸は、焼入冷却時に室温以下まで冷却するサブゼロ処理を行う、焼戻し後に250~450℃の中温焼戻し(安定化処理)を行うなどの対策が有効である。

(2) 冷却速度の不足

工具鋼を使用する上で焼入冷却速度は重要である。一般的に冷却速度が遅いと焼入硬さが低下する。SKD61では焼入冷却速度が遅くなると、靱性が大きく低下する。これは焼入冷却中に高温域での炭化物の粒界析出と低温域での粗大なベイナイト変態の影響である。そのため、これらの温度域を速く冷却することが有効であり、特に粗大ベイナイトの生成を抑制する低温域での急冷は必須となる。SKH51は焼入冷却速度の影響がより大きく、硬さ、靱性ともに大きく低下しやすい。硬さ不足を避けるために油冷以上の急冷焼入れの適用が必要となる。

3. 機械構造用炭素鋼

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 田中優樹
 機能性材料研究室 副主席研究員

I. 特性

- a 鋼種名：S10C～S75C (0.08～0.80C-0.2Si-0.6Mn)、S09CK～S20CK (0.07～0.23C-0.2Si-0.6Mn)

JISでは、S10C～S75CとS09CK～S20CKの全27種の機械構造用炭素鋼が規定されている。主成分はC、Si、Mnであり、Si、Mnについては、いずれの鋼種もほぼ同じ範囲で規定されている。各鋼種の違いはC量であり、0.07% (S09CKの下限) から0.80% (S75Cの上限) と非常に広い範囲で規定されている。これら鋼種のうち、S60C～S75Cは鋼板、および鋼帯だけに適用される規格である。また、S09CK～S20CKはP、S、およびCu、Ni、Crを他の鋼種よりも低く抑えられており、表面処理用のはだ焼用鋼として規定されている。

- b 一般的な用途の概要

機械構造用炭素鋼は自動車や一般機械、産業用機械などの多くの機械部品に使用されている。これら機械部品では、強度や疲労、靱性といった特性が高いレベルで要求されるため、機械構造用炭素鋼の多くは、塑性加工や各種熱処理（焼入れ焼

戻し、浸炭焼入れ、高周波焼入れなど）によって、強度、靱性を向上させてから使用される。ただし、機械構造炭素鋼は、Ni、Cr、Mo等の合金元素を含んでおらず焼入れ性が低いため、用途としては小～中物部品が中心となる。中でも低炭素鋼は焼入れ性が低く、また焼きが入ったとしても強度自体がそれほど高くないことから、浸炭焼入れのほかは、焼入れ焼戻しされることは少なく、焼ならしによって特性を改善したり、引抜きなどの冷間加工によって強度を向上させたりして使用される。低炭素鋼の代表的な用途としては、ワッシャーやボルト等の小物部品が挙げられる。一方、中～高炭素鋼はある程度の焼入れ性が得られることから、中物部品にも使用が可能であり、代表的な用途としては、焼入れ焼戻しや高周波焼入れされたシャフトや歯車等が挙げられる。また、焼ならしままや冷間加工によって強度を上昇させて使用される場合もある。

- c 必要とされる特性

機械構造用炭素鋼は、熱間圧延や熱間鍛造などの熱間加工によって、棒鋼、平鋼、形鋼、鋼板などに成形された後、さらに鍛造、切削、冷間加工、熱処理などが行われる。このため、本鋼材は、強

表 1 焼ならし後、完全焼なまし後の機械的性質 (S28C～S58C)¹⁾

鋼種	変態温度 [°C]		焼ならし条件および焼ならし状態の機械的性質と硬さ					完全焼なまし条件と焼きなまし硬さ	
	A _{C1} ～A _{C3}	A _{F3} ～A _{F1}	条件 [°C、空冷]	降伏点 [kg/mm ²]	引張強さ [kg/mm ²]	伸び [%]	硬さ [H _B]	条件 [°C、炉冷]	硬さ [H _B]
S28C S30C	720～815	780～720	850～900	29以上	48以上	25以上	137～197	約840	126～156
S33C S35C	720～800	770～710	840～890	31以上	52以上	23以上	149～207	約830	126～163
S38C S40C	720～790	760～700	830～880	33以上	55以上	22以上	156～217	約820	131～163
S43C S45C	720～780	750～680	820～870	35以上	58以上	20以上	167～229	約810	137～170
S48C S50C	720～770	740～680	810～860	37以上	62以上	18以上	179～235	約800	143～187
S53C S55C	720～765	740～680	800～850	40以上	66以上	18以上	183～255	約790	149～192
S58C	720～760	730～680	800～850	40以上	66以上	15以上	183～255	約790	149～192

度や靱性などの最終製品における機械的性質だけでなく、鍛造性や被削性といった途中工程における製造性も必要となる。

製造性の一例として、冷間鍛造性や被削性の指標となる焼ならし後と完全焼なまし後の硬さを表1に示す¹⁾。ここでの焼ならし後の硬さは直径25mmの試験片における値である。本表が示すように、焼ならし、完全焼なまし共に、高炭素鋼の方が硬さは高くなる。冷間鍛造においては、成形性や設備負荷の観点から素材硬さは低い方が好ましいた

め、冷間鍛造性については高炭素鋼の方が不利となる。一方、切削加工では、素材硬さは高すぎても低すぎても良くなく、概ねHB170~200付近が好ましい硬さといわれている²⁾。このため、通常は各鋼種において良好な被削性が得られよう適正な熱処理が施されるが、表1から高炭素鋼ほど焼なましを施す必要があることが分かる。

強度特性、靱性の一例として、S35C~S55Cにおける焼入れ焼戻し後の硬さ、引張特性、シャルピー衝撃値を図1に示す³⁾。本図における試験片

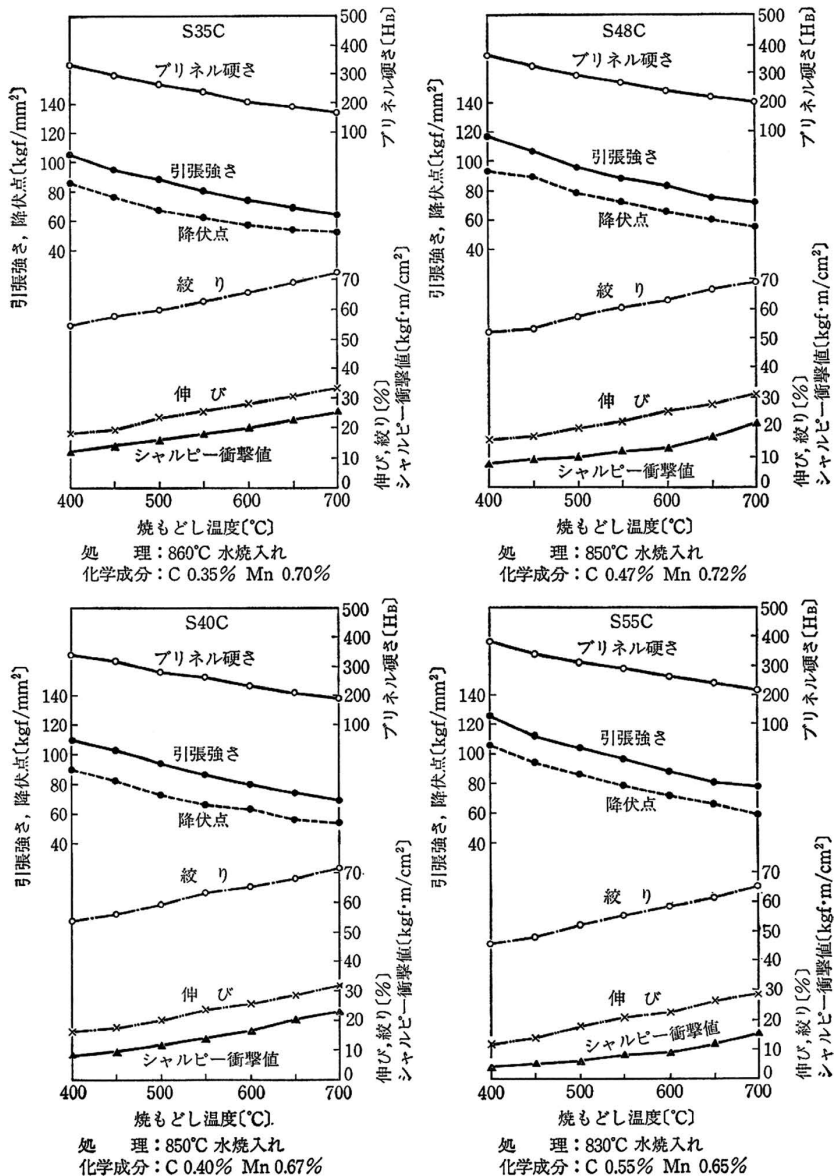


図 1 焼入れ焼戻し後の機械的性質 (S35C~S55C)³⁾

表 2 焼ならし後、焼入れ焼戻し後の疲れ強さ (S15C～S55C)³⁾

鋼種	熱処理 [°C]			真破断力 [kgf/mm ²]	回転曲げ 疲れ限度 [kgf/mm ²]	両振引張圧縮 疲れ限度 [kgf/mm ²]	両振ねじり 疲れ限度 [kgf/mm ²]
	焼ならし	焼入れ	焼戻し				
S15C	880～930	—	—	72～105	16～27	13～22	10～17
S25C	860～910	—	—	74～109	19～30	15～25	11～18
S35C	840～890	—	—	76～112	21～30	17～27	11～20
S45C	820～870	—	—	77～114	22～31	19～29	12～21
S35C	—	840～890水冷	550～650急冷	110～146	24～38	21～35	11～21
S45C	—	820～870水冷	550～650急冷	120～153	27～40	23～36	14～22
S55C	—	800～850水冷	550～650急冷	127～158	31～41	24～36	15～23

は直径25mmであり、焼入れ温度は860～830℃である。いずれの鋼種も焼戻し温度が高いほど硬さや引張強さは低下し、伸び、絞り、シャルピー衝撃値といった延性、靱性は向上する。ここで同じ焼戻し温度で比較すると高炭素鋼の方が硬さや引張強さは高く、一方で延性や靱性は低くなる。以上が焼入れ焼戻し後の機械的性質の概要になるが、機械構造用炭素鋼では、鋼種と焼戻し温度とを組み合わせることによりある程度の範囲で任意の機械的性質を得ることができる。また、疲れ強さの一例として、表2にS15C～S55Cの焼ならし後、焼入れ焼戻し後の各疲れ限度を表2に示す。同様の熱処理であれば、引張強さと同じく高炭素鋼の方が疲れ強さは高くなる。

II. 熱処理

a 主な熱処理

機械構造用炭素鋼に適用される熱処理は、焼ならし、焼なまし、焼入れ焼戻しその他、浸炭焼入れ、高周波焼入れなどの表面硬化処理がある。以下に、各熱処理の概要を述べる。

(1) 焼ならし

焼ならしは鋼材をAc₃点から40～60℃程度高い温度に加熱して均一なオーステナイト組織にした後、大気中にて放冷するか、またはファンなどで送風して冷却する処理である。通常は、熱間圧延材や熱間鍛造材において施されることが多く、組織の微細化、機械的性質の改善、被削性の向上といった目的のために適用される。

(2) 焼なまし

機械構造用鋼炭素鋼では目的に応じて様々な焼なましが施される。主要なものとしては、完全焼

なまし、球状化焼なまし、低温焼きなまし の3つが挙げられ、以下に概説する。

①完全焼なまし

完全焼なましは、鋼材をAc₃点から30～50℃程度高い温度に加熱した後、炉冷または、その他の方法によって徐冷する処理である。本処理では、軟化や内部ひずみの除去といった効果が得られ、主に切削加工性や冷間加工を容易にする目的で適用される。

②球状化焼なまし

球状化焼なましは様々なヒートパターンがあるが、代表的なものとしては、A₁点以上に加熱しその後徐冷する、あるいはA₁点以上に加熱した後にAr₁点直下まで徐冷し、その後一定時間保持するパターンが挙げられる。球状化焼なましでは、セメントタイトを球状化することで完全焼なましよりも一層軟化させることが可能であり、主に冷間加工における塑性加工を容易にするために適用される。

③低温焼なまし

低温焼なましは、A₁点以下の温度に加熱し、一定時間保持した後、空冷する処理である。本処理は簡便な方法で軟化やひずみの除去ができることから、冷間加工の途中で硬くなった鋼材を軟化させるためや切削加工前の硬さの調整といった目的で適用される。

(3) 焼入れ焼戻し

焼入れ焼戻しは、A₃点以上の温度に加熱して油や水で急冷しマルテンサイト組織を得る処理（焼入れ）と、続けてA₁点以下の適当な温度に再加熱して冷却する処理（焼戻し）とを行う熱処理である。一般的に、焼戻しを300～400℃で施した場合の組織をトルースタイト、500～600℃で施した場

合の組織をソルバイトと呼んでいる。これら組織の違いは、焼戻し時に生成するセメンタイトのサイズであり、高温で焼戻しをしたソルバイトの方がより大きなセメンタイトを呈している。焼入れ焼戻しでは、適度な強度と韌性を得ることができることから、多くの場合、最終製品に必要な機械的性質を得るために適用される。また、中物部品においては、被削性の均一化など製造性を改善する目的のために適用される場合もある。

(4) 浸炭焼入れ

浸炭焼入れは、 A_3 点以上の適当な温度に加熱し、表面から炭素を浸入させて表層部を高炭素化した後に焼入れを行う処理である。浸炭の方法としては、固体浸炭、液体浸炭、ガス浸炭、真空浸炭（減圧浸炭）がある。浸炭焼入れ後は、多くの場合、 180°C 程度で焼戻し処理が施される。浸炭焼入れに使用される鋼種は主には低炭素鋼であり、多くの場合、PやSをより低く抑えたS09CK～S20CKが使用される。浸炭焼入れでは、表層部は高炭素で硬く、内部は低炭素で軟らかく韌性に富むといった品質が得られる。機械的性質としては、優れた耐摩耗性や疲れ強さ（曲げ疲労、転動疲労等）が得られ、このような特性が必要とされる歯車やシャフト等に適用される。

(5) 高周波焼入れ

高周波焼入れは、高周波誘導電流による誘導加熱作用によって、表層部を部分的あるいは全体を加熱した後、水あるいは水溶性冷却剤で焼入れを行う処理である。高周波焼入れでは、内部が加熱されず、素材の硬さがそのまま内部の硬さになる。よって、低炭素鋼では十分な内部硬さが得られないため、通常は中炭素鋼が使用される。高周波焼入れでは、浸炭焼入れと同様に、優れた耐摩耗性や疲れ強さが得られることから、主に歯車やシャフト等に適用される。

b 不具合事例

本稿では、焼入れ処理における不具合として、焼割れ、変形、焼むら、硬さ不足について概説する。

(1) 焼割れ

焼入れ時は、急冷により鋼材の内外に温度差が生ずる。これにより熱応力が発生するが、マルテンサイト変態開始温度（ M_s 点）以下では、マルテ

ンサイトとオーステナイトとの比体積の差による変態応力も発生する。形状によってはこれら2つの応力が複雑に影響し合うが、それらの和が引張応力となることで、焼割れが発生すると考えられる。特に高炭素鋼では、マルテンサイトが硬くてもろく、また変形能もないため焼割れを起こしやすい。その他、焼割れの要因としては、鋼材の肌あれがひどい、応力集中しやすい形状にある、焼入れ温度が高すぎる、加熱が不均一、冷却が早すぎるといったことが挙げられ、これらを適正化することで改善がなされる。

(2) 変形

焼入れ処理において、加熱が不均一であったり、加熱炉内で部品が不適切な支えられかたをしていると変形が起こる。また、複雑な形状や置き方が適正でない場合、冷却が不均一になるため、熱応力や変態応力も不均一となり変形が起こる。この他、焼入れ処理前に焼ならしや焼なましをせず、例えば鍛造ままで組織が不均一な状態で焼入れ処理を行うと変形が起こる場合がある。これら焼入れ処理による変形は、特にシャフトのような長いものにおいて曲がりやねじりといった形であらわれる。変形の抑制には、部品の置き方、支えかたの適正化や焼ならし等の前処理導入が有効となる。

(3) 焼むら

焼入れしたものがしばしば硬さが不均一で、いわゆる焼むらが起こることがある。焼むらは均一に加熱されないことや、冷却中における気泡の付着、冷却液の攪拌不良による冷却の不均一、あるいは表層スケール、脱炭層の存在によって起こり、これらを適正化することで改善される。

(4) 硬さ不足

焼入れ後に、全体として硬さ不足となることがある。これは、使用される鋼材の焼入れ性が、部品の大きさや焼入れ装置の冷却能に対して不十分であり、焼きが入らなかったことによる。このような硬さ不足は、焼入れ性の高い鋼材を使用することや焼入れ装置の冷却能を上げることにより改善される。

Ⅲ. 技術動向

機械構造用炭素鋼をベースとした様々な高機能材が開発されている。その代表が熱間鍛造用非調

質鋼である。非調質鋼は焼入れ焼戻し（調質）を省略することができる鋼であり、具体的には炭素鋼をベースにV⁴⁾やTi⁵⁾等の析出強化元素を添加した鋼材である。非調質鋼は自動車用のコネクティングロッドやクランクシャフト等の鍛造部品に広く使用されており、製造コストやCO₂排出量の削減に寄与している。このほか、中炭素鋼をベースとした冷間鍛造性に優れる高周波焼入れ用鋼も開発されている⁶⁾。本開発鋼は圧延材ままで優れた冷間鍛造性を示すことから、球状化焼きなましなどの軟化熱処理を省略することができる。

本鋼材は自動車用のドライブシャフト等の高周波焼入れ部品に使用され、製造コスト、CO₂の削減に寄与している。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会：鋼の熱処理、改訂5版、p. 354 (1969)
- 2) 特殊鋼倶楽部：特殊鋼ガイド 第4編 熱処理、p. 20 (1979)
- 3) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧、第3版、第IV巻 鉄鋼材料、試験・分析、p. 115~116 (1981)
- 4) 丹羽祐久、町田功、加藤哲男、上原紀興、田中良治：電気製鋼、vol. 53、p. 26 (1982)
- 5) 渡里宏二、相原賢治：CAMP-ISIJ、vol. 9、p. 506 (1996)
- 6) 瓜田龍実、並木邦夫：電気製鋼、vol. 63、p. 59 (1991)



4. 構造用合金鋼

I. 特性

a 鋼種名

構造用合金鋼鋼材は機械構造用炭素鋼鋼材にCr、Ni、Moなどの合金元素を添加したもので、JIS規格には、「JIS G 4053 機械構造用合金鋼鋼材」¹⁾、「JIS G 4052 焼入れ性を保証した構造用鋼鋼材 (H鋼)」²⁾が規定されている。本稿ではJIS G 4053に規定されている鋼種について述べる。JIS G 4053の鋼種を成分系で分けるとCr鋼、Cr-Mo鋼、Ni-Cr鋼、Ni-Cr-Mo鋼、Mn鋼、Mn-Cr鋼、Al-Cr-Mo鋼に分けられる。

(1) Cr鋼 (例 SCr420、SCr435)

Cr鋼は1%程度のCrを添加したものでCrの焼入れ性を向上する効果により、機械的性質が改善される。

(2) Cr-Mo鋼 (例 SCM420、SCM435)

Cr-Mo鋼は1%程度のCrと0.2%程度のMoを添加したものでCr鋼より焼入れ性が向上している。また、Moの効果によりCr鋼より焼戻し脆性が改善されている。

(3) Ni-Cr鋼 (例 SNC415、SNC836)

Ni-Cr鋼は1~3%程度のNiと1%以下のCrを

添加したもので、Cr鋼より焼入れ性、韌性が向上している。

(4) Ni-Cr-Mo鋼 (例 SNCM420、SNCM439)

Ni-Cr-Mo鋼はNi-Cr鋼にMoを添加して焼入れ性を向上させるとともに、Ni-Cr鋼の欠点の焼戻し脆性を改善している。また焼戻しでの軟化がしにくいいため、高温での焼戻しにより強韌性を高めることが可能である。

(5) Mn鋼 (例 SMn420、SMn438)

Mn鋼は1%以上のMnを添加することにより、焼入れ性が向上している。安価なMnにより焼入れ性を改善できるが、焼割れ、焼戻し脆性が起きやすい欠点がある。

(6) Mn-Cr鋼 (例 SMnC420、SMnC443)

Mn-Cr鋼はMn鋼に0.5%程度のCrを添加してMn鋼の欠点を改善している。

(7) Al-Cr-Mo鋼 (SACM645)

Al-Cr-Mo鋼はJISではSACM645のみで、焼入れ焼戻しをして機械加工後に窒化することにより、表層は硬く、内部は韌性があり、歪の少ない製品を作ることができる。

機械構造用合金鋼鋼材 (JIS G 4053) の成分系について表1に示した。

表 1 機械構造用合金鋼鋼材 (JIS G 4053) の成分系¹⁾

成分分類	用途分類	鋼種例	成分系
Cr鋼	肌焼鋼	SCr420	0.20C-0.25Si-0.75Mn-1.05Cr
	強靱鋼	SCr435	0.35C-0.25Si-0.75Mn-1.05Cr
Cr-Mo鋼	肌焼鋼	SCM420	0.20C-0.25Si-0.75Mn-1.05Cr-0.20Mo
	強靱鋼	SCM435	0.35C-0.25Si-0.75Mn-1.05Cr-0.22Mo
Ni-Cr鋼	肌焼鋼	SNC415	0.15C-0.25Si-0.50Mn-2.25Ni-0.35Cr
	強靱鋼	SNC836	0.36C-0.25Si-0.50Mn-3.25Ni-0.80Cr
Ni-Cr-Mo鋼	肌焼鋼	SNCM420	0.20C-0.25Si-0.55Mn-1.80Ni-0.50Cr-0.22Mo
	強靱鋼	SNCM439	0.39C-0.25Si-0.75Mn-1.80Ni-0.80Cr-0.22Mo
Mn鋼	肌焼鋼	SMn420	0.20C-0.25Si-1.35Mn
	強靱鋼	SMn438	0.38C-0.25Si-1.50Mn
Mn-Cr鋼	肌焼鋼	SMnC420	0.20C-0.25Si-1.35Mn-0.52Cr
	強靱鋼	SMnC443	0.43C-0.25Si-1.50Mn-0.52Cr
Al-Cr-Mo鋼	窒化鋼	SACM645	0.45C-0.32Si-1.50Cr-0.22Mo-0.95Al

b 一般的な用途の概要

構造用合金鋼は自動車、建設機械など広い分野の強度重要部品に使用されている。構造用合金鋼は大きく、肌焼鋼（C濃度0.25%以下、浸炭焼入れ実施）、強靱鋼（焼入れ焼戻し実施）、窒化鋼（窒化処理実施）に分けられる。用途例を以下に示す。

(1) 肌焼鋼（主な鋼種名：SCr420、SCM420）

自動車用歯車、自動車用CVTプーリー、自動車用ステアリング部品、工作機械用ボールネジナット、工作機械用リニアガイドブロック

(2) 強靱鋼（主な鋼種名：SCr435、SCM435）

自動車足回り部品、自動車用エンジン部品、ボルト、油圧ブレーカー用チゼル

(3) 窒化鋼（SACM645）

大型ギヤ部品、航空機エンジン部品、射出成形用シリンダー・スクリュ

c 必要とされる特性

構造用合金鋼の部品に要求される主な特性は強度と靱性であるが、疲労強度や耐摩耗性が要求される場合もある。また鍛造等の塑性加工や切削加工によって部品に加工されるため、加工性も重要である。

構造用合金鋼は強度と靱性を得るために、熱処理が実施される。肌焼鋼は浸炭により表層は高炭素になるため、焼入後は高強度になり耐摩耗性がよくなるが、浸炭層以外の母材は低炭素のままであるため靱性を確保できる。強靱鋼は焼入れ焼戻しにより、良好な強度、靱性を得ている。窒化鋼は窒化処理によって肌焼鋼より硬さの高い表面層が得られ、550℃程度での変態を伴わない処理のため熱処理ひずみも小さくなる。機械構造用合金鋼鋼材（JIS G 4053）の熱処理後の材料データ例³⁾について表2に示した。表2のデータ例は鋼材から軸方向に鍛伸又は切削によって作製した径25mmの供試材を熱処理した後、引張試験片、衝撃試験片を削り出して、これを試験した場合の値である³⁾。機械的性質は熱処理条件や材料径によって異なるため、設計などで機械的性質が必要な場合はこれらをそのまま使用するのではなく、条件にあった値を十分に検討する必要がある。

II. 熱処理

a 主な熱処理

構造用合金鋼の熱処理をその目的で分類すると、

表 2 機械構造用合金鋼鋼材（JIS G 4053）の熱処理後の材料データ例³⁾

成分分類	鋼種例	熱処理 ℃		引張試験（4号試験片）				衝撃試験 (Uノッチ試験片)	硬さ 試験
		焼入れ	焼もどし	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	絞り %	衝撃値 (シャルピー) J/cm ²	硬さ HBW
Cr鋼	SCr420	1次850~900油冷 2次800~850油冷 又は925保持後 850~900油冷	150~200空冷	-	830以上	14以上	35以上	49以上	235~321
	SCr435	830~880油冷	520~620急冷	735以上	880以上	15以上	50以上	69以上	255~321
Cr-Mo鋼	SCM420	1次850~900油冷 2次800~850油冷 又は925保持後 850~900油冷	150~200空冷	-	930以上	14以上	40以上	59以上	262~352
	SCM435	830~880油冷	530~630急冷	785以上	930以上	15以上	50以上	78以上	269~331
Ni-Cr鋼	SNC415	1次850~900油冷 2次740~790水冷 又は780~830油冷	150~200空冷	-	780以上	17以上	45以上	88以上	235~341
	SNC836	820~880油冷	550~650空冷	785以上	930以上	15以上	45以上	78以上	269~321
Ni-Cr-Mo鋼	SNCM420	1次850~900油冷 2次770~820油冷	150~200空冷	-	980以上	15以上	40以上	69以上	293~375
	SNCM439	820~870油冷	580~680急冷	885以上	980以上	16以上	45以上	69以上	293~352
Mn鋼	SMn420	1次850~900油冷 2次780~830油冷	150~200空冷	-	690以上	14以上	30以上	49以上	201~311
	SMn438	830~880油冷	550~650急冷	590以上	740以上	18以上	50以上	78以上	212~285
Mn-Cr鋼	SMnC420	1次850~900油冷 2次780~830油冷	150~200空冷	-	830以上	13以上	30以上	49以上	235~321
	SMnC443	830~880油冷	550~650急冷	785以上	930以上	13以上	40以上	49以上	269~321
Al-Cr-Mo鋼	SACM645	880~930油冷	680~720急冷	685以上	830以上	15以上	50以上	98以上	241~302

主に加工性を確保するため実施されるものと、主に部品の強度特性を確保するため行われるものに分けられる。

(1) 主に加工性を確保するための熱処理

①焼ならし (Normalizing)

方法：鋼を A_{c3} 点以上の適切な温度に加熱し完全にオーステナイト化した後、炉外で放冷又は送風冷却する。

効果：前加工の影響を消失させ、結晶粒が微細で均一になることにより、機械的性質の改善、被削性の改善、内部ひずみ（残留応力）の除去、ミクロ組織の均一化。

②焼なまし (Annealing)

・完全焼なまし (Full Annealing)

方法：鋼を A_{c3} 点以上の適切な温度に加熱し、一定時間保持した後、 A_{r1} 点以下の温度まで徐冷する。

効果：軟化、ひずみ除去、ミクロ組織の均一化。

・等温焼なまし (Isothermal Annealing)

方法：鋼を A_{c3} 点以上の適切な温度に加熱し完全にオーステナイト化した後、 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ に冷却し、この温度に保持後冷却する。

効果：完全焼なましと同じだが、冷却時間が短縮でき、熱効率がよい。

・球状化焼なまし (spheroidizing annealing)

方法：鋼を A_1 点直上又は直下の温度で長時間保持して、パーライトをくずしてセメントサイトを球状化する。

効果：完全焼なましと同じだが、焼なましの中で一番軟化するため、冷間加工に適している。

・低温焼なまし (Low Temperature Annealing)

方法：鋼を A_1 点以下の温度（ 600°C 程度）に加熱し一定時間保持した後空冷する。

効果：軟化、ひずみ除去、脱炭や酸化を最小限にできる。

(2) 主に部品の強度特性を確保するための熱処理

①焼入れ・焼戻し (Quenching and Tempering)

方法：鋼を A_{c3} 点以上の適切な温度に加熱保持し、組織を完全にオーステナイト化した後、適切な冷却剤で急冷して（焼入れ）硬くてもろいマルテンサイト組織化する。その後、 A_{c1} 点以下の適切な温度に加熱保持して冷却（焼戻し）することにより、炭化物を析出させて安定な組織にし、靱性を

を向上させる

効果：硬さ、靱性が向上する。焼戻しをする温度が高いほど軟化するが、靱性は向上する。

②浸炭 (Carburizing)

方法：炭素量の少ない（ 0.25% 以下）鋼をカーボンポテンシャルの高い雰囲気中で A_{c3} 点以上の適当な温度に加熱保持して、鋼の表面 1mm 程度に炭素を浸透させた後に焼入れ焼戻しをすることにより、表面は硬く、内部は靱性を高くする。プロパンやブタンなどのガスを主原料として変成したガスを使ったガス浸炭が生産性、製造コストに有利であるため広く行われている。

効果：表面硬さは 750HV 程度になり、内部硬さは 400HV 程度になることで高い疲労強度や耐摩耗性が得られる。

③窒化 (Nitriding)

方法：鋼をアンモニアガス等の 550°C 程度の雰囲気中で長時間加熱して表層に硬い窒素化合物をつくる。

効果：表面硬さは $1,000\text{HV}$ 程度になり、浸炭に比べて耐摩耗性に優れている。また、変態を伴わない処理のため、内部硬さは処理前と変わらないし変形も少ない。

各熱処理方法について、横軸に時間、縦軸に温度を取り比較したものを図1に示す。

b 不具合事例

構造用合金鋼の熱処理における不具合事例を紹介する。

(1) 焼ならし

合金含有量が多い鋼は、加熱後の空冷で硬いベイナイト組織になるため、切削加工性が悪くなる。そのため、合金含有量が多い鋼は、焼なましをしたほうが良い。また、鋼材表面の酸化による焼べりが原因で、機械加工後の黒皮残りが発生することがある。

(2) 焼なまし

特に球状化焼なましを行う場合は、温度カーブによってミクロ組織が大きく変わるため温度管理が重要である。加熱による酸化、脱炭の不具合は加熱温度、均熱時間の条件によって変動するため注意が必要である。脱炭深さの規格が厳しい場合は無酸化熱処理が有効であるが、コストアップになる。

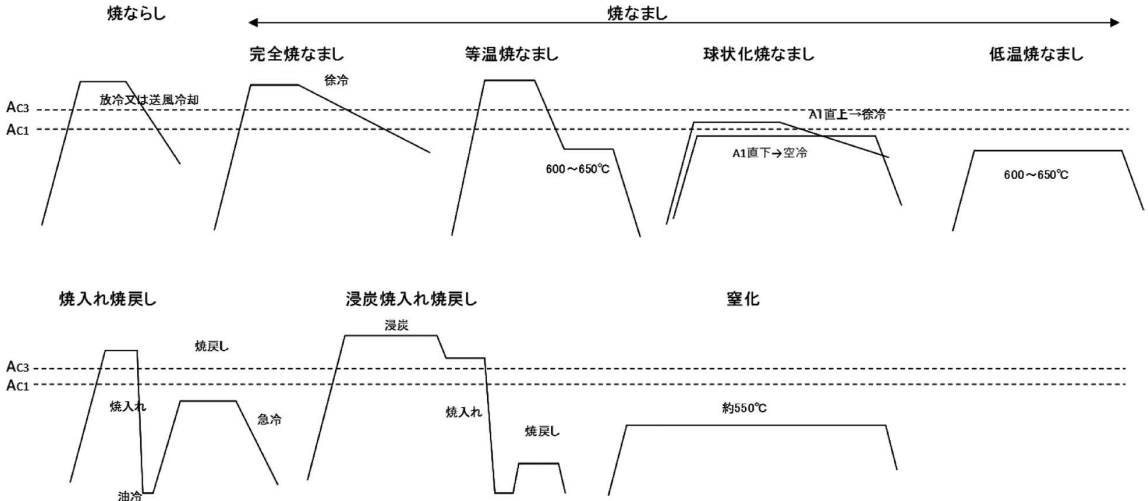


図 1 各熱処理方法の比較図

(3) 焼入れ・焼戻し

①組織不良

肉厚のある部品の場合、炉の操業条件によって、加熱の設定温度まで達しない場合があり、焼入れ後の内部硬さが不足する場合があるため、適切な設定温度、時間等を選定する必要がある。なお、定期的に被熱処理材の中心部まで設定温度に達しているかシース熱電対を埋め込んで確認するとよい。また、焼入れ温度、冷却速度不足、材料の焼入れ性が不適切な場合も組織不良となるため注意が必要である。

②焼割れ・変形

焼入れ冷却時に熱収縮とマルテンサイト変態による膨張が同時に起きることにより、焼割れや変形が発生することがある。対策として、均一に冷却できるようにしたり、冷却剤を水冷→水溶液→油と変更して冷却速度を下げたり、冷却方法をマルクエンチ、マルテンパー、オーステンパーに変更したりする。

③焼戻し脆性

低温焼戻し脆性とは300℃程度での焼戻しをした際に現れる脆化現象であり、この温度域での焼戻しを避けるべきである。高温焼戻し脆性とは500℃程度での焼戻しをしたり、より高い温度で焼戻しをした後に500℃付近でゆっくり冷却した場合に現れる脆化現象であるため、この温度域での焼戻し

を避けたり、この温度域では急冷するべきである。製品形状、割れや変形防止のために焼戻し後に急冷できない場合はMoを含有した鋼を適用したほうが良い。

(4) 浸炭

浸炭は950℃程度で長時間加熱されるため結晶粒の粗大化の恐れがある。防止するため、ピン止め効果のあるAINを析出させて粗大化を防止する。またガス浸炭の場合、浸炭雰囲気中に酸素が存在するため、表層の酸化物が析出、浸炭異常層が生成することにより、強度低下を招く恐れがある。対策として粒界酸化の抑制に効果がある開発鋼を採用したり、真空浸炭を採用する。

(5) 窒化

表面硬さ、窒化深さは材料成分、表面状態、熱処理条件により変化するので注意を要する。また、焼戻し温度が窒化温度より低い場合は窒化により焼戻しされて内部硬さが低下するため、焼戻し温度は窒化温度より上げる必要がある。また、窒化の処理時に急激に加熱したり、冷却したりすると、熱応力により窒化層が割れることがあるので注意を要する。

参考文献

- 1) JIS G4053 (2016)
- 2) JIS G4052 (2016)
- 3) JISハンドブック2020①鉄鋼 I P2868~P2873

5. ばね鋼

三菱製鋼(株) 技術開発センター 解析評価グループ グループ長 みや た まさ はる
宮田将晴

I. 特性

ばねに使用される鋼種は多種多様であり、ばねの種類、使用目的・環境を考慮して選択されるが、ばね鋼を製造工程の面から分類すると、「熱間成形」および「冷間成形」に大別され、加工方法によって使用される鋼種が異なる。

日本産業規格 (JIS) に規定されている「熱間成形ばね」の規格はJIS G 4801 ばね鋼鋼材であり、「冷間成形ばね」の規格としては、硬鋼線SW (JIS G 3521)、ピアノ線SWP (JIS G 3522)、オイルテンパー線SWO (JIS G 3560、G 3561) などがあ。上記の鋼種は、若干の差異はあるが炭素鋼系、Si-Mn系、Mn-Cr系、Si-Cr系、Cr-V系およびこれらにB、Moなどを添加して焼入れ性を改善したばね鋼である。また、ばね用ステンレス鋼線SUP (JIS G 4314)、炭素工具鋼鋼材SK (JIS G 4401)

等が用途・環境によって、ばね材料として使用されている。表1に代表的なばねの種類、用途、鋼種の例を示す。

表1に示すように、ばねは様々な目的や環境下で使用されるため、使用中にばねに加わる荷重には、静的荷重や繰返し荷重、衝撃荷重の動的荷重があることから、それぞれの荷重に応じてばねに必要な特性も異なる。

ばねに要求される性能の中で最も重要なものは、ばね特性であり、要求される荷重特性を定められた寸法範囲内で満足させなければならない。そのため、ばねの設計には適正な弾性係数の値、高い寸法精度が必要になる。弾性係数は、化学成分、温度、加工度や熱処理条件などにより変化するが、常温においては、表2に示すJIS B 2704-1: 2018から抜粋した主な鉄鋼ばね材料の縦弾性係数Eおよび横弾性係数Gを用いれば良いとされている。

表 1 ばねの種類、用途、および使用鋼種の例¹⁾

種類	用途	鋼種
重ね板ばね	自動車、鉄道車両懸架用	SUP6、SUP9、SUP9A、SUP10、SUP11A
コイルばね	自動車、鉄道車両懸架用 鉄道車両懸架用、一般機械用大型ばね 一般機械用小物ばね 一般機械、自動車懸架用 内燃機関用弁ばね 耐食性の要求されるばね	SUP6、SUP7、SUP9、SUP12 SUP9A、SUP10、SUP11A、SUP13 SW、SWP SWO、SWOSM、SWOSC-B SWO-V、SWOCV-V、SWOSC-V、SWPV SUS-WP
トーションバー	自動車用 自動車スタビライザ 自動車、鉄道車両、OA機器	SUP9、S45C SUP9、S48C、SUP11A、STKM15A相当材 SWP-A、SWP-B、SWO-V、SWOSC-V、 SUS304WPB
薄板ばね (皿ばね含む)	産業機器、自動車、家電製品など 情報機器関連の耐食性を要求される分野 耐食性を要求されるエンジン部品など	SK95、SK85、S45C-S70C、SUP10 SUS301CSP、SUS304CSP SUS631-CSP
渦巻ばね	産業機器、建設機器、家電など 自動車、産業機器、家電など	SK95、SK85 SWRH62-82、SUP12、SK95、SK85、 SUS301-CSP、SUS631-CSP
ばね座金	ボルト、ナット締結緩み止め	SWRH、SW、SWP、S〇〇CM、SK〇M

また、荷重特性は、ばね設計計算式から曲げ応力を受ける板ばねの場合では板厚の3乗、ねじり応力を受ける巻ばねの場合では線径の4乗で影響を受けるため、高い寸法精度がばね材料には必要になる。

熱間成形ばね用鋼材として焼入れ焼戻しをして使用されるばね鋼は、鋼の中でも高強度鋼に分類され、必要な機械的性質を列挙すると、

- ①高い弾性限
- ②高い疲労特性
- ③高硬度領域で十分な靱性があること

が挙げられる。

これらの特性の中で、弾性限や疲労特性は、降伏点（0.2%耐力）、引張強さ及び硬度と強い相関関係がある。

JIS G 4801: 2005に記載されているばね鋼の機械的性質を表3に示す。鋼種ごとに焼入れ、焼戻しの熱処理温度が設定されており、全鋼種で363～429HBの同じ硬さ範囲において、引張特性が定められている。しかし、使用されている各種ばねの

硬さ（強度）は、ばねの種類や用途などによって異なるため、必ずしも表3に示す焼戻し温度で熱処理されているわけではない。近年、あらゆる部品の高強度化が進められていることから、ばねも表3よりも高い硬度（＝低い焼戻し温度）で使用されている場合がある。

焼入れ焼戻したばね鋼の疲労特性は、鋼種によらず低い硬度から高い硬度に上がるにつれ疲労限度も比例して高くなり、50HRC（481HBW）以下であれば疲労限と硬度は比例すると云われている。しかし、硬度がある程度以上に高くなると、急激に疲労限度は低下することが知られている。高硬度にて疲労限度が上昇しない理由としては、非金属介在物、不完全焼入組織などの鋼中の内部欠陥、熱処理による脱炭やキズなどの表面欠陥などの影響が生じるためである。

また、硬度が上がるとともに引張強さ、0.2%耐力、疲労強度も上昇するが、鋼の靱性、伸びおよび絞りも低下する。そのため、ばねを設計する際には、十分な靱性を保つ硬度領域で設計しなくてはならない。言い換えれば、必要な強度の硬さで、靱性が低下しないような鋼を選択する必要がある。

II. 熱処理

ばね鋼は、鋼の中でも高強度鋼に分類され、その性能を発揮するように成分設計がなされており、適切な熱処理が重要となる。ばね鋼の熱処理は、加熱（オーステナイト化）→焼入れ→成形→焼戻しの工程を経る「熱間成形」と、オイルテンパー線に代表される「冷間成形」の2つに大別されるこ

表 2 各種ばね用材料の縦弾性係数、横弾性係数²⁾

材料		縦弾性係数E (N/mm ²)	横弾性係数G (N/mm ²)
ばね鋼鋼材 高鋼線 ピアノ線 オイルテンパー線		2.06×10 ⁵	7.85×10 ⁴
ばね用 ステンレス鋼線	SUS302	1.86×10 ⁵	6.85×10 ⁴
	SUS304		
	SUS304N1		
	SUS631J1	1.96×10 ⁵	7.35×10 ⁴

表 3 JIS G 4801: 2005におけるばね鋼鋼材の機械的性質³⁾

記号	熱処理 (°C)		機械的性質				
	焼入れ	焼戻し	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ (HB)
SUP6	830～860油冷	480～530	1,080以上	1,230以上	9以上	20以上	363～429
SUP7	830～860油冷	490～540	1,080以上	1,230以上	9以上	20以上	363～429
SUP9	830～860油冷	460～510	1,080以上	1,230以上	9以上	20以上	363～429
SUP9A	830～860油冷	460～520	1,080以上	1,230以上	9以上	20以上	363～429
SUP10	840～870油冷	470～540	1,080以上	1,230以上	10以上	30以上	363～429
SUP11A	830～860油冷	460～520	1,080以上	1,230以上	9以上	20以上	363～429
SUP12	830～860油冷	510～570	1,080以上	1,230以上	9以上	20以上	363～429
SUP13	830～860油冷	510～570	1,080以上	1,230以上	10以上	30以上	363～429

とは、既に述べた通りである。しかしながら、どちらも熱処理の基本的な考え方は同じであるため、ここでは「熱間成形」の熱処理について述べる。

a 加熱

熱間成形では、加熱設備から抽出された材料が成形、焼入れに至るまでにある程度の時間経過が生じるため、温度低下が必然的に起きてしまう。焼入れまでの間でオーステナイトからフェライトへの変態が開始する A_{r3} 温度以上の温度を保持する必要が生じるため、加熱設備での温度設定は抽出から焼入れまでの温度低下を考慮して、加熱温度を決めなければならない。しかし、加熱温度以外にも管理すべき多くのポイントがある。以下に、加熱時に発生する代表的な問題を述べる。

〔脱炭〕脱炭とは、鋼材を加熱する際に、酸化性雰囲気（大気、水蒸気、酸素など）中の酸素と鋼中の炭素が結合して、鋼材表面から炭素が失われていく現象である。脱炭には大きく分けて、鋼材の表層部にフェライトだけの層ができるフェライト脱炭と炭素含有量が減少し、鋼材内部よりも低炭素組織の層ができる全脱炭がある。ばね表面に脱炭が生じると、その部分の強度が著しく低下するため、ばねの耐久性、耐へたり性が低下する。また、耐久性向上を目的とした熱処理後にばね表面に圧縮残留応力を付与するショットピーニングと呼ばれる工程での効果も低下する。

熱処理での脱炭を防止する方法としては、

- ①無脱炭性雰囲気中で加熱
- ②フェライト+オーステナイト2相領域からオーステナイト単相までの加熱時間は短時間とする
- ③必要温度以上に極端な過熱をしない
- ④昇温、冷却途中の時間は可能な限り短時間で行い変態を終了させる
- ⑤加熱保持時間はオーステナイト化に必要最低限の時間とする

などが挙げられるが、①の状態に出来ない場合でも、②～⑤の加熱条件で管理することでかなりの脱炭防止効果がある。

〔結晶粒粗大化〕結晶粒微細化元素量にもよるが、加熱温度が高すぎると、結晶粒の粗大化を起こす。この場合、伸び、絞りや衝撃値の低下などの靱性低下を引き起こすので、不必要な過熱は避けるべきである。

〔加熱不足〕オーステナイト化温度が低すぎる場合や保持時間が低すぎる場合には焼入れ不良を起こす場合がある。

b 焼入れ

オーステナイト化されたばね鋼は、成形を経て焼入れされ、マルテンサイトとなる。その冷媒としては、鉱物油を主とする焼入油が多く用いられる。焼入れ時のトラブルとしては、冷媒の温度や攪拌による部位別の変態速度の差による曲がり、焼割れ、置き割れ、不完全焼入れ等が挙げられる。

〔焼割れ〕焼入れ途中または、直後に材料が割れる現象。焼割れの原因は、不均一な冷却によるマルテンサイト変態時の不均一膨張によるもので、急激に形状が変化するような部材で起きやすい。また、表面キズ、非金属介在物があるとその部分を起点として割れが発生する場合がある。

〔置割れ〕置割れは、焼入れ後しばらく時間が経過したのちに割れる現象。焼入れ時に変態しきれない残留オーステナイトがマルテンサイト化するために起こるもので、焼入れ後ただちに焼戻しを行うことで防止できる。

〔不完全焼入れ〕鋼材の焼入性不足、質量効果を原因とする冷却不足、オーステナイト化温度よりも低い温度で焼入れの実施、焼入れの際の冷却速度が小さい場合などによって起こり、焼入れが不完全でマルテンサイト以外のフェライトやベイナイト組織を含むものをいう。完全なマルテンサイトのみのものと比べて焼入れ硬度は低くなり、焼戻しによって同一の引張強さでも靱性や疲労限が低下する。

これら焼入れ起因のトラブルを未然に防止するには、形状寸法に適した加熱温度、冷媒、鋼材を選択することが必要になる。

c 焼戻し

焼入れ後にばね鋼は、350～500℃程度の温度で焼戻しが実施され、焼戻しマルテンサイトと呼ばれる組織となる。現在ではあまり用いられないが、低温焼戻しで光学顕微鏡では識別できないほど微細なフェライトとセメンタイトからなる組織をトルースタイト、高温焼戻しでフェライトと粒状に析出成長したセメンタイトの混合組織をソルバイトと呼ぶ。焼戻し温度は、要求される機械的性質により、予めその鋼で求められた焼戻し性能曲線

から決定する。焼戻しでのトラブルとしては、形状寸法によっては短時間加熱により内部まで均一な温度にならないうちに加熱を終了してしまうと表層と内部で硬度差が生じてしまう。そのため、形状寸法を考量した焼戻し時間を設定する必要がある。

d 低温歪取り焼鈍

冷間成形ばね鋼は、既にばねとして必要な機械的性質を備えているが、成形中に有害な引張残留応力が発生してしまい、この引張残留応力が残存した場合、耐久性、耐へたり性が低下してしまう。この有害な残留応力を除去するために、成形後に200~450℃程度の温度で加熱する。歪取りのためには、温度が高い方が良いが、焼戻し温度が高すぎると冷間成形ばね鋼の強度が低下してしまうため注意が必要である。

e MAF処理¹⁾

MAF (Modified Aus-fomig) 処理は、オースフォーム処理を実用性に向くように改良した加工熱処理である。オースフォーム処理は1951年、R. A. Harveyによって最初に研究され、板ばねへの適用については、1968年にFord Motor社によって研究がなされた。

通常の焼入れ処理、オースフォーム処理、MAF処理の違いを簡単に説明する。図1は鋼の焼入れ時のTTT曲線を概念的に表したものであり、図中の線Iが通常の焼入れ処理である。図中の線IIがオースフォーム処理であり、 A_{c3} 変態点以上に加熱し、準安定オーステナイト範囲まで急冷し、数十%の塑性変形加工を付与したのち急冷を行い、マルテンサイト変態を起こさせるものである。特徴は強度が上昇し、延性・靱性が低下しないことである。これに対して、図中の線IIIはMAF処理であり、安定オーステナイト域から準安定オーステナイト域の間で塑性変形加工をしたのち、パーライト変態が開始する前に急冷し、マルテンサイト

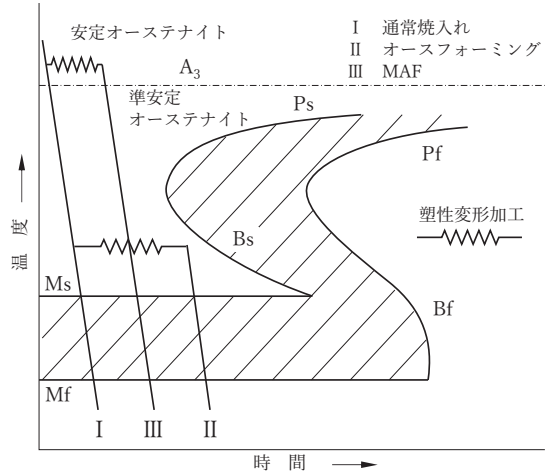


図 1 ばね鋼の焼入れ時のTTT曲線

変態を起こさせるものである。オースフォーム処理に比べ、強度、延性、靱性とも低いが、通常の焼入れ処理をしたものに比べ強靱化が望める。

MAF処理品の結晶粒は、通常の焼入れ処理品に対して微細なものになっており、塑性変形加工度が増すにつれ、極めて微細かつ扁平な結晶粒が層状になっている。このような結晶粒は、動的再結晶により生じ、オースフォーム処理の特徴である。

これまで、ばね鋼の代表的な熱処理について述べたが、ばね鋼に限らず多くの鉄鋼製品は熱処理が必要である。熱処理は加熱と冷却のプロセスであるから、大きな熱エネルギーを消費しなければならない。今後、脱炭素社会に向けて、より環境負荷が低い設備、手法への切替えを図ることが大切である。

参考文献

- 1) ばね技術研究会編：ばね用材料とその特性（日刊工業新聞社、2000）p. 5、80
- 2) JIS B 2704-1：2018
- 3) JIS G 4801：2005

6. 軸受鋼

山陽特殊製鋼(株) 研究・開発センター くりた しゅん
 新商品開発室 商品開発1グループ 栗田 俊

I. 特性

軸受鋼には、ズブ焼入れで使用される高炭素クロム軸受鋼、高周波焼入れで使用される中炭素鋼系軸受用鋼（S53C等）、浸炭焼入れで使用される肌焼合金鋼系軸受用鋼（SCr420、SNCM220～815等）、そして耐食・耐熱鋼系軸受用鋼（SUS440C、M50等）があり、使用環境に応じて適宜選定される。本稿では最も一般的な高炭素クロム軸受鋼の特性・熱処理について述べる。

a 鋼種名（代表的な化学成分）

以下に高炭素クロム軸受鋼の鋼種名と主要化学成分を示す。高炭素クロム軸受鋼はSUJ2～SUJ5がJIS G 4805（2019）に規定されており、約1 mass%のCと1～1.5mass%程度のCrを基本成分とし、Cr、Si、Mn、Moの含有量により焼入性を変化させている。

- ・ SUJ2 (1.0C-0.25Si-0.40Mn-1.45Cr)
- ・ SUJ3 (1.0C-0.55Si-1.05Mn-1.05Cr)
- ・ SUJ4 (1.0C-0.25Si-0.40Mn-1.45Cr-0.15Mo)
- ・ SUJ5 (1.0C-0.55Si-1.05Mn-1.05Cr-0.15Mo)

b 一般的な用途と概要

高炭素クロム軸受鋼は耐摩耗性や転動疲労特性に優れた特殊鋼であり、主にエンジンから足回りに至る動力伝達系部品の中でも軸受の軌道輪（レース）そして転動体（ボール、ころ）に使用されている。

c 必要とされる特性（物理的特性、機械的特性）

軸受は過酷な作動条件下で用いられることが多いため、高炭素クロム軸受鋼は特殊鋼の中でも厳しい品質が要求される鋼の一つである。ここでは高炭素クロム軸受鋼の物理的性質（ヤング率、密度、熱伝導率、熱膨張係数）と機械的性質（硬さ、転動疲労特性）について述べる。

(1) 物理的性質

高炭素クロム軸受鋼製の部品は通常焼入焼戻し状態で使用されるが、軸受の製造工程においては加工性の改善を目的に球状化焼なまし実施されるため、表1に示す物性値は球状化焼なまし状態、焼入焼戻し状態の値を示す。

表 1 高炭素クロム軸受鋼の主な物理的性質

項目	鋼種	熱処理	物性値	参考文献
ヤング率	SUJ2	A、F	$2.2 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$	1) (常温)
	SUJ3	A、F	$2.1 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$	
密度	SUJ2	A	7.82	2)
		Q	7.78	
	SUJ3	A	7.82	
		Q	7.78	
熱伝導率	SUJ2	A	$0.112 \text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$	2) (測定温度：20°C)
		Q	$0.072 \text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$	
	SUJ3	A	$0.089 \text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$	
		Q	$0.064 \text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$	
熱膨張率	SUJ2	A	$10.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	2) (温度範囲： 20～200°C)
		Q	$10.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	
	SUJ3	A	$11.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	
		Q	$10.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	

A：球状化焼なまし F：熱間鍛造状態 Q：焼入焼戻し

①ヤング率

一般的にヤング率は組織不感性といわれており、わずかな添加元素や不純物あるいは熱処理の影響はほとんど受けない¹⁾。他方、多結晶金属においてヤング率は温度依存性を示しており、400℃付近までは直線的に、500～600℃付近において曲線的に減少する。

②密度

密度は球状化焼なまし状態と焼入焼戻し状態では、結晶構造が少し異なるため多少の差が認められる。焼入焼戻し状態ではマルテンサイト変態による膨張により比重は小さくなる。

③熱伝導率

熱伝導率は測定温度によって変化するので、ここでは20℃での値を示す。これらの物性値は測定によるばらつきや方法の違い、供試材の熱処理や化学成分によって異なることがある。

④熱膨張率

熱膨張率は温度区間毎の平均膨張率として示されており、ここでは20～200℃の区間での値を示す。熱膨張率はオーステナイト変態点以下では成分の影響が明瞭ではないが、変態点以上では成分の影響（特にC）が大きく、高炭素クロム軸受鋼は熱膨張率が大きい特徴をもつ。

(2) 機械的性質

①硬さ

高炭素クロム軸受鋼の重要な機械特性は、耐磨耗性や転動疲労特性に影響する焼入焼戻し硬さである。他にも切削等の加工を要する場合、球状化焼なまし硬さが重要となる。SUJ2において、800～850℃で焼入れ、150～200℃で焼戻した場合、焼入焼戻し硬さは60～65HRCである。現在、JIS G 4805 (2019) で規定されている機械的性質は切削用熱間圧延材の球状化焼なまし硬さのみであり、SUJ2で201HBW (94HRB) 以下、SUJ3で207HBW (95HRB) 以下と規定されている。

②転動疲労特性

高炭素クロム軸受鋼の重要な機械特性である転動疲労寿命に関しては、例えばスラスト型寿命試験が行われ、一定の面圧、回転数、潤滑油状態、および温度条件において試験を実施し、試験片の剥離が生じるまでの寿命を比較する。転動疲労寿

命試験では同一ロット、同一条件で試験した場合でも寿命のばらつきが大きいいため、平均寿命 (L_m) ではなく、試験片の破損確率10%となる寿命 (L_{10}) 等で評価される。同じ材質、硬さにおける L_{10} は介在物の種類によらず転動面下の剥離が生じる危険性のある部分に存在する最大の介在物の大きさが大きく影響すると考えられ³⁾、介在物の小径化が重要であることが分かっている。

II. 熱処理

ここでは高炭素クロム軸受鋼が鋼材から軸受製品に完成するまでに鋼材メーカー、及び軸受加工メーカーで施される熱処理を簡単に説明する。また、各熱処理における代表的な不具合事例と改善事例を紹介する。

a 主な熱処理

(1) 均熱拡散処理 (ソーキング)

高炭素クロム軸受鋼は、巨大共晶炭化物と呼ばれる凝固時に不可避に発生する粗大な炭化物を解消するため、連続製造で製造したブルームや造塊のインゴットに対して均熱拡散処理 (ソーキング) を施す。均熱拡散の温度は固相線直下の1200～1250℃程度で長時間保持が必要であるが、処理温度や時間はブルーム・インゴットのサイズや偏析の度合いによって左右される⁴⁾。

(2) 焼ならし

高炭素クロム軸受鋼を鍛造や圧延等の熱間加工後に空冷すると、オーステナイト単相から A_{cm} 変態点で粒界に初析の網状炭化物が析出し、 A_1 変態点で粒内に共析炭化物が生成する⁵⁾。太丸の鋼材では熱間加工後の冷却速度が遅くなり、初析の網状炭化物が成長し易い。成長した網状炭化物はその後の球状化焼なましのみでは完全に消失せず、良好な球状化組織になり難い。これを解消するために球状化焼なましの前に焼ならしを行う。

焼ならしの処理温度は A_{cm} 点直上である850～900℃であり、初析網状炭化物が残存しない範囲で可能な限り低温かつ短時間で保持後、空冷もしくは強制冷却を行う。焼ならしを行った高炭素クロム軸受鋼の硬さは32～38HRC程度であり、マイクロ組織は旧オーステナイト粒界の網状炭化物が分断されており、粒内はラメラ状のパーライトと粒状の炭化物組織を呈している。

(3) 球状化焼なまし

高炭素クロム軸受鋼は1mass%のCを含有するため、熱間加工ままではおよそ35~40HRCの硬さレベルになる。したがって、球状化焼なましによって旋削・研削や冷間加工が容易な硬さ・組織の制御が必要となる。球状化焼なましは A_1 点以上 A_{cm} 点以下のオーステナイト+炭化物の2相域に昇温して元はパーライトである組織において一部の炭化物をオーステナイト中に固溶させることにより炭化物を粒状化した状態で残存させる。そこから A_1 点付近を十分に徐冷してパーライト組織に戻ることなく、未固溶炭化物を核としてマトリックスのCを炭化物として析出させることで0.5~1.0 μm の均一な球状化炭化物組織とする熱処理である(図1)。

球状化焼なましを行った高炭素クロム軸受鋼の硬さはSUJ2では90HRB程度、SUJ3では94HRB程度⁶⁾であるが、その硬さは球状化炭化物の分散状態とマトリックスのフェライト粒径とに左右され、特に炭化物間距離を広げることにより硬さを低減することができる⁷⁾。

(4) 焼入焼戻し

高炭素クロム軸受鋼は軸受のレースやボール・ころに旋削または研削された後、軸受の要求特性(耐摩耗性、転動疲労特性)を満たすために焼入焼戻し処理を行う。焼入処理では A_1 点以上 A_{cm} 点以下で加熱してオーステナイト中に炭化物を適度に溶かし込み急冷することで硬さ60HRC以上のマルテンサイト組織を得る。焼入温度が高く、保持時間が長いと炭化物がオーステナイト中に固溶しすぎて、マルテンサイトが脆化したり、残留オーステナイトが増加したりし、部品の強度低下や後述する寸法変化等の問題をもたらす。逆に焼入温度が低すぎると炭化物の固溶が少なくなり、十分な硬さを得られない。焼入れされたままのマルテンサイトは不安定で非常に脆いため焼戻しが行われ

る。焼戻しによりマルテンサイトから炭化物が析出し、安定した焼戻しマルテンサイトとなることで韌性が確保される。

焼入れの処理温度は800~840℃程度であり、適切な焼入れが行われた場合、オーステナイト中に固溶するC量は0.6mass%程度であり、残りの0.4mass%程度は球状化炭化物として残存する。焼戻し処理は120~200℃程度で1~2時間行う。焼戻し温度は要求硬さにより選定されるが、高い硬さを求められるボール・ころは120~160℃程度と低めの温度で実施する。

b 不具合事例、改善事例

(1) 均熱拡散処理における不具合事例、改善事例

均熱拡散処理は凝固時に偏析した元素を均一化させるために実施する処理であり、高温であるほど短時間での処理が可能であるが、液相の発生により脆化(オーバーヒート)する恐れがあるので処理温度と時間の設定には慎重を要する。処理時間は連続鑄造の普及やそれに伴う電磁攪拌・圧下技術の進歩により、造塊と比較して短時間の処理で良好な品質を得られるようになっている⁴⁾。

(2) 焼ならしにおける不具合事例、改善事例

焼ならしでは保持温度を高温にしすぎたり加熱時間が長すぎたりすると、炭化物が完全に固溶し、冷却速度が速くなければ新たな網状炭化物が析出する。焼ならしは網状炭化物を分断することが目的であるため、適切な処理温度・処理時間で実施する必要がある。

(3) 球状化焼なましにおける不具合事例、改善事例

球状化焼なましではオーステナイト化加熱温度、徐冷終了温度が重要ポイントとなる。球状化焼なましにおける組織不良を図2に示す²⁾。加熱温度が高すぎると核となる未固溶炭化物が不足し、冷却時に A_1 点に達すると一挙にパーライト組織が発生する。また、加熱温度が低すぎると元々のパー

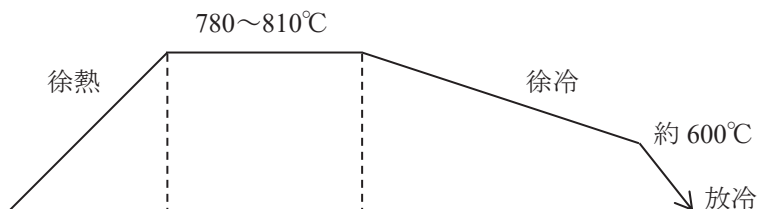
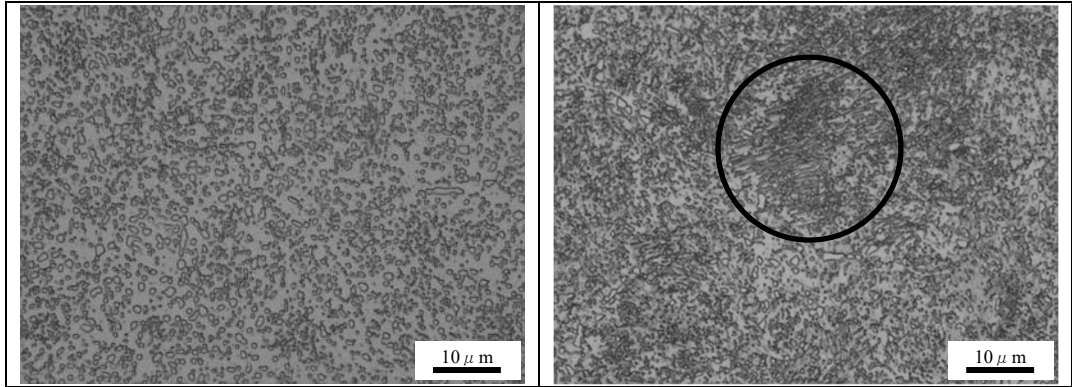


図1 高炭素クロム軸受鋼の球状化焼なましの一例



(a) 良好な球状化組織

(b) 球状化不良組織（徐冷終了温度が高い場合）

図 2 球状化不良事例（丸：パーライト組織）

ライト組織が分断されずに冷却後も残存する。徐冷終了温度は A_1 点に至らず放冷を開始するとパーライト組織が発生し、硬さが高くなる。球状化焼なましにおける組織不良は次工程の旋削・研削や冷間加工への影響だけでなく、強度面にも影響を及ぼすので高炭素クロム軸受鋼の機能を発揮させるうえで注意を要する。

（４）焼入焼戻しにおける不具合事例、改善事例

焼入れではオーステナイト中に球状化炭化物を適量残存させることが耐摩耗性のために重要である。また、比較的高い温度で使用される軸受では使用中に残留オーステナイトのマルテンサイトへの分解が進むことによる寸法変化が問題となる。寸法を安定化させるため、 200°C より高い温度で焼戻し処理を行う場合もある⁴⁾。

Ⅲ. 技術動向

世界的にカーボンニュートラル社会の実現に向

けた取り組みが活発化しており、例えば、自動車業界のCASE化の推進、エネルギー分野での風力発電の拡大など、軸受の使用環境は大きく変化している。したがって、軸受の使用用途に応じた品質・機能の要求レベルは益々高度化されている。他方、熱処理工程等軸受の製造における CO_2 排出量削減に寄与する軸受鋼が求められる等、様々なニーズに対応する技術開発が進められている。

参考文献

- 1) 原隆啓、高田正男、太田邦夫、鳥谷徹：鉄と鋼、49（1963）13、p 1885-1891
- 2) 山陽特殊製鋼社内データ
- 3) 長尾実佐樹、平岡和彦、雲丹亀泰和：山陽特殊製鋼技報、12（2005）、p 38-45
- 4) 平岡和彦：第188・189回 西山記念技術講座（2006）、p 119-140
- 5) 瀬戸浩蔵：山陽特殊製鋼技報、3（1996）、p 64-71
- 6) 平塚悠輔：特殊鋼、64（2015）7、p 33
- 7) 平岡和彦、木下斎：山陽特殊製鋼技報、6（1999）、p 47-51

7. ステンレス鋼

日鉄ステンレス(株) とう じょう まき ゆき
商品開発部 主幹 東 城 雅 之

マルテンサイト系ステンレス鋼

I. 特性 (物理的性質、機械的性質)

マルテンサイト系ステンレス鋼は焼入れ硬化性を有している。SUS410 (13Cr (C≤0.15%)) の代表用途として刃物が挙げられる。刃物は、焼入れ・焼戻しにより、硬さに加え、使用時の刃こぼれを防ぐために靱性が与えられる。

II. 熱処理

・焼入れ

マルテンサイト系ステンレス鋼は高温 (900~1100℃) ではオーステナイト組織を示し、急冷することによりマルテンサイト組織に変態し、硬化

する。このプロセスを焼入れという。マルテンサイト系ステンレス鋼の機械的性質は焼入れ状態において最高の強度、硬さが得られる。図1に示すように、焼入れ硬さは、C量の影響をうけ、C量の高いものほど硬化し易い。SUS410の焼入れ組織を写真1に示す。

・焼戻し

焼入れ状態ではマルテンサイト組織は硬くて脆いため、通常は、内部応力緩和による靱性改善を目的に、焼戻しが行われる。刃物等、硬度を優先する場合は低温焼戻し (100~250℃空冷) を、機械部品類等、靱性を優先する場合は高温焼戻し (600~750℃急冷) を行う。

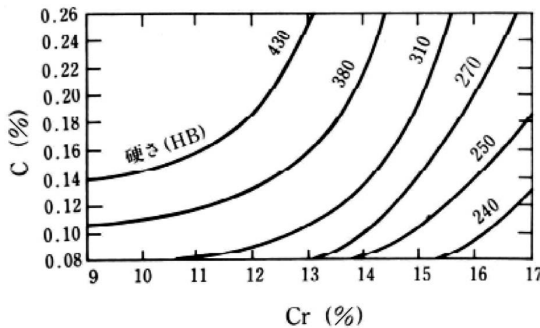


図 1 焼入れ硬さとCr、Cの関係¹⁾



写真 1 マルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS410) の焼入れ組織

フェライト系ステンレス鋼

I. 特性 (物理的性質、機械的性質)

フェライト系ステンレス鋼は、マルテンサイト系ステンレス鋼と比較し、軟質で加工性に優れると共に、耐食性に優れる。また、線膨張係数がオーステナイト系ステンレス鋼に比較し低く、熱疲労特性に優れる。

SUS430 (18Cr) は、以上の特性から、家電機器、厨房機器、自動車用途等、幅広い用途で使用される。

II. 熱処理

SUS430は熱処理により硬化する事がほとんどなく、焼きなましにより、良好な機械的性質と耐食性が得られる。

・焼きなまし

適切な温度 (700~1050℃) に加熱し、その温度に保持した後、徐冷を行う熱処理を焼きなましという。熱処理温度が高すぎると、結晶粒の粗大化による絞りや曲げ加工面の肌荒れ (オレンジピール) の原因となったり、粒界腐食感受性の増加、靱性の劣化につながる。したがって、焼きなまし温度は機械的性質の許容される範囲で低めに設定することが望ましい。なお、500℃付近で加熱される

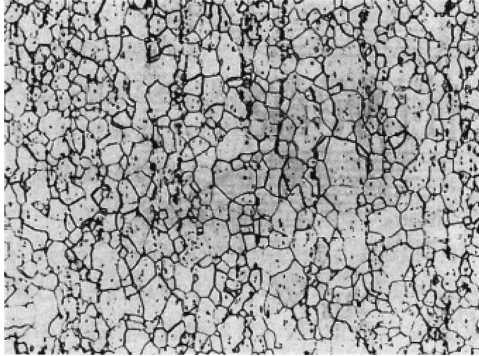


写真2 フェライト系ステンレス鋼 (SUS430) の焼きなまし組織

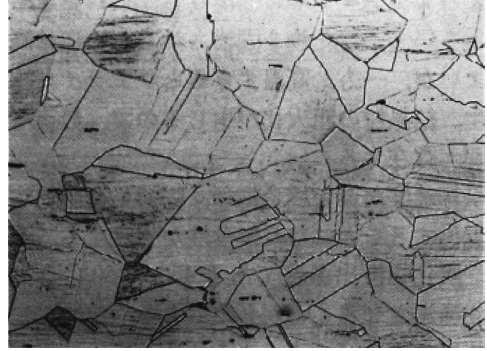


写真3 オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) の固溶化熱処理組織

と475℃脆性を示すため、注意が必要となる。SUS430の焼きなまし組織を写真2に示す。

オーステナイト系ステンレス鋼

I. 特性 (物理的性質、機械的性質)

オーステナイト系ステンレス鋼の代表鋼種であるSUS304 (18Cr-8Ni) は、加工性、耐食性、溶接性に優れる事から、家庭用品、建設材料、食品設備、一般化学設備等、最も幅広く汎用的に用いられている。

SUS304は、冷間加工によりマルテンサイト組織に変態するため、加工硬化すると共に磁性も帯びるようになる。

SUS304を含むオーステナイト系ステンレス鋼の特徴として、応力腐食割れ感受性が挙げられる。応力腐食割れは引張応力が作用した腐食環境で起こる腐食現象である。対策としてはCr、Mo添加による耐食性向上やNi添加が有効である。

II. 熱処理

SUS304は、加工硬化の影響を除去すると共に、炭化物を粒内に固溶させる事による耐食性確保を目的に、固溶化熱処理を施す。

・固溶化熱処理

炭化物を固溶体に溶解する温度以上 (920~1180℃) に加熱後、急冷してその析出を阻止する操作を固溶化熱処理という。炭化物固溶の面からはC量の多いものほど、温度は高めにとる必要がある。一方で、絞り加工時の肌荒れを防ぐためには結晶粒度が小さい事が必要で固溶化熱処理の温度は低めが良い。冷却は炭化物の粒界析出を防ぐ

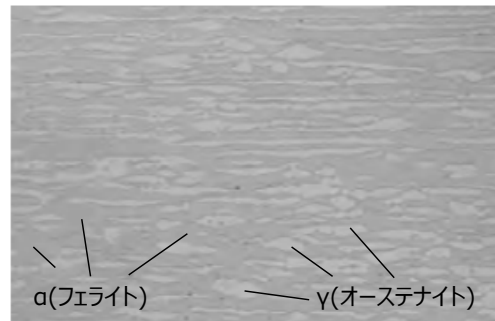


写真4 オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼 (SUS329J4L) の固溶化熱処理組織²⁾

のに十分な速さが必要である。SUS304の固溶化熱処理組織を写真3に示す。

オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼

I. 特性 (物理的性質、機械的性質)

オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼は、SUS304などのオーステナイト系ステンレス鋼に比較し、強度が高く、優れた耐食性を示すため、海水環境用途や化学プラントに用いられる。

Cr、Mo、Nを多く含有したSUS329J4L (25Cr-6Ni-3Mo-0.2N-低C系) は、耐海水性や耐すきま腐食性が要求される海水熱交換機、化学プラントなどで排ガス中の硫黄成分を除去するための排煙脱硫装置等に使用される。

II. 熱処理

・固溶化熱処理

オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼は、オーステナイト組織とフェライト組織の割合をほぼ等しく得るための温度 (950~1100℃) に加熱し

て固溶化熱処理を行う。約700～900℃の範囲で冷却速度が低下すると、窒化物やシグマ相等の金属間化合物が析出し、靱性が劣化する。さらに500℃付近で加熱されると475℃脆性を示すため、注意が必要となる。SUS329J4Lの固溶化熱処理組織を写真4に示す。

参考文献

- 1) 日本金属学会、日本鉄鋼協会編：鉄鋼材料便覧（1967）、p. 607 [丸善]
- 2) ステンレス協会 条鋼委員会編：ステンレス条鋼製品の手引き（2013）、P 22

表 1 各種ステンレス鋼の物理的性質

鋼種		SUS410	SUS430	SUS304	SUS329J4L
比重	10^{-3}kg/cm^3	7.75	7.70	7.93	7.80
比熱	$\text{kJ}/(\text{k}\cdot^{\circ}\text{C})$	0.46	0.46	0.50	0.50
熱伝導率 (100℃)	$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	24.2	26.0	16.3	20.9
線膨張係数 (0～100℃)	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	9.9	10.5	17.3	14.8
比電気抵抗	$10^{-8}\cdot\Omega\cdot\text{m}$	57	60	72	80
透磁率	H/m	高	高	12.8	高

表 2 各種ステンレス鋼の機械的性質

鋼種	SUS410	SUS430	SUS304	SUS329J4L
熱処理	焼なまし	焼きなまし	固溶化熱処理	固溶化熱処理
0.2%耐力 (N/mm ²)	343	333	274	678
引張強さ (N/mm ²)	500	510	617	847
伸び (%)	35	30	58	27
硬さ (HV)	156	160	166	286

注) 各鋼種の機械的特性は代表例

8. 耐熱鋼

日本冶金工業(株) ソリューション営業部 おい かわ まこと
 ソリューション営業部長 **及川 誠**

I. 特性

a 耐熱鋼の種類と用途

耐熱鋼は、JIS G0203に「高温における各種環境で耐酸化性、耐高温腐食性、または高温強度を保持する合金鋼」と規定され、石油精製プラント、エンジン排気系部品、タービンや工業炉など様々な用途で使用される。

JIS G4311に耐熱鋼棒・線材として35鋼種、JIS G4312に耐熱鋼板・鋼帯として28鋼種が規定され、表1¹⁾に示すようにSUH鋼種以外に一部のSUS鋼種も含まれる。これは、ステンレス鋼の耐食性を

向上させるCrが、同時に耐熱鋼としての特性も向上させて耐熱用途にも適用されるためである。

また、耐熱鋼は、主に組織により4つの系に分類されるので、各系の特徴をまとめる。

オーステナイト系耐熱鋼は面心立方構造のため、体心立方構造のフェライト系、マルテンサイト系に比べて拡散速度が遅く、高温側での高温強度、クリープ強度が高い。また、耐酸化性も有するため、一般的に高温強度、クリープ特性を必要とする用途で、高温域で使用される。なお、熱疲労特性が要求される部材への適用には注意を要する。また、固溶化熱処理の後に時効処理を行い、より

表 1 代表的な耐熱鋼の成分と用途¹⁾

	鋼種	成分	用途
オーステナイト系	SUH31	15Cr-14Ni-2Si-2.5W-0.4C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH35	21Cr-4Ni-9Mn-N-0.5C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH37	21Cr-11Ni-N-0.2C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH38	20Cr-11Ni-2Mo-高P-B-0.3C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁、耐熱ボルト
	SUH309	22Cr-12Ni-0.2C	加熱炉部分、重油バーナー
	SUH310	25Cr-20Ni-0.2C	炉部分、ノズル、燃焼室
	SUH660	15Cr-25Ni-1.5Mo-V-2Ti-Al-B-0.06C	タービンロータ、ボルト、ブレード、シャフト
	SUH661	22Cr-20Ni-20Co-3Mo-2.5W-1Nb-N-0.1C	タービンロータ、ボルト、ブレード、シャフト
	SUS304-HR	18Cr-8Ni	汎用耐酸化鋼
	SUS309S-HR	22Cr-12Ni	炉材
SUS310S-HR	25Cr-20Ni	炉材、自動車部品用材料	
SUS316-HR	18Cr-12Ni-2.5Mo	熱交換器、高温腐食用ボルト	
SUS347-HR	18Cr-9Ni-Nb	化学プロセス部材	
フェライト系	SUH21	19Cr-3Al-0.08C	発熱材料、自動車排ガス浄化装置用材料
	SUH409L	11Cr-Ti-0.03C	自動車排ガス浄化装置用材料、マフラー
	SUH446	25Cr-N-0.2C	燃焼室
	SUS405-HR	13Cr-Al	タービン材、焼入用部品
	SUS410L-HR	13Cr-低C	自動車排ガス処理設備、ボイラ燃焼室、バーナー
SUS430-HR	18Cr	耐酸化用部品、炉部品、オイルバーナー	
マルテンサイト系	SUH1	9Cr-3Si-0.4C	ガソリン及びディーゼルエンジン吸気弁
	SUH3	11Cr-2S-1Mo-0.4C	高級吸気弁、低吸気弁、ロケット部分、予燃焼室
	SUH11	9Cr-1.5Si-0.5C	ガソリン及びディーゼルエンジン吸気弁、バーナーノズル
	SUH600	12Cr-Mo-V-Nb-N-0.15C	蒸気タービンブレード、ディスク、ロータシャフト、ボルト
	SUH616	12Cr-Ni-1Mo-1W-V-0.25C	高温構造部品、蒸気タービンブレード、ディスク、ロータシャフト、ボルト
	SUS403-HR	13Cr-低Si	タービンブレード、蒸気タービンノズル
	SUS410-HR	13Cr	耐酸化用
SUS410J1-HR	13Cr-Mo	タービンブレード、高温用部品	
SUS431-HR	16Cr-2Ni	スプリング、ワッシャー、計器部品	
析出硬化系	SUS630-HR	17Cr-4Ni-4Cu-Nb	シャフト類、タービン部品、積層板の押板
	SUS631-HR	17Cr-7Ni-1Al	高温ばね、ベローズ

高い強度を有する鋼種もある。

フェライト系耐熱鋼は体心立方構造のフェライトを母相とし、総じて炭素量も高くもないため、高温強度は高くない。一方、熱膨張係数は小さく、熱伝導性も高いために、熱疲労特性に優れる。また、耐酸化性は有するので、強度をそれほど必要とされない部材に適用される。

マルテンサイト系耐熱鋼は、焼入焼戻し処理により、焼戻しマルテンサイトに炭化物が析出した組織となり、靱性や強度が向上する。そのため、600℃くらいまでは他の系に比べて最も高温強度や高温クリープが強いが、さらに高温となると組織変化により強度は急激に低下する。一方、Cr量はあまり高くなく、かつ炭化物も析出するので、他の系に比べて耐酸化性は低い。よって、600℃程度までの中温域で、耐酸化性よりも強度を重視する用途に適用される。

析出硬化系耐熱鋼は、析出硬化性を与える元素を添加し、析出硬化処理によって優れた高温強度を持つ。本系は析出相により高強度を有するが、析出相の粗大化等の組織変化を生じるような高温域では強度は低下するので、使用温度は500℃程度までとなる。

b 物理的性質

物理的性質にはヤング率、密度、比熱、熱伝導度等があるが、耐熱鋼においては、熱疲労特性や耐酸化性に影響を及ぼす熱膨張特性が最も注目すべき性質である。表2に代表鋼種の熱膨張特性を示す²⁾。

熱疲労とは、加熱や冷却に伴う熱膨張や熱収縮が拘束される部材などで、加熱・冷却により内部に応力が発生し、この温度変化に伴う応力の増減

表 2 代表的な耐熱鋼の熱膨張特性²⁾

	鋼種	平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
オーステナイト系	SUH310	17.5 (0~649℃)
	SUH660	17.7 (21~750℃)
	SUS304	18.8 (0~649℃)
	SUS347	19.1 (0~649℃)
フェライト系	SUH409L	12.6 (20~700℃)
	SUH446	11.6 (0~649℃)
	SUS430	11.9 (0~649℃)
マルテンサイト系	SUH1	12.4 (20~600℃)
	SUS410	11.7 (0~649℃)
析出硬化系	SUS630	11.3 (21~427℃)

が繰り返されることで材料が損傷する現象である。熱膨張特性には金属組織の影響が大きく、フェライト系耐熱鋼は熱膨張係数が小さく熱疲労特性に最も優れ、一方、オーステナイト系耐熱鋼は熱膨張係数が大きく熱疲労特性に劣る。例えば、自動車排気系のエキゾーストマニホールドなどで、熱疲労特性が問題になる場合には、フェライト系耐熱鋼が適用されている。

耐酸化性では、特に繰返し加熱環境下で熱膨張係数が影響する。熱膨張係数が大きく、酸化スケールとの熱膨張差が大きいオーステナイト系耐熱鋼では酸化スケールの剥離が生じやすく、一方、熱膨張係数が小さいフェライト系耐熱鋼では酸化スケールの剥離が少なく、繰返し酸化特性に優れる。

c 機械的性質

耐熱鋼で重要な高温強度特性には、クリープ特性、高温疲労特性、(前述の)熱疲労特性がある。

クリープとは、高温下で金属材料に一定の負荷がかかった際に、時間とともに変形が進行し、最終的には破断にいたる現象である。一定温度、一定荷重下で生じる典型的なクリープ曲線は、図1³⁾に示すように、ひずみ速度が時間とともに減少する遷移クリープ(第1次クリープ)、ひずみ速度が時間とともにほぼ一定となる定常クリープ(第2次クリープ)、再びクリープ速度が時間とともに加速される加速クリープ(第3次クリープ)に分けられる。クリープ現象は一定温度では荷重が大きいほど、一定荷重では温度が高いほど変形が速くなり、破断時間は短くなる。

クリープ特性には、主にクリープ強度とクリープ破断強さがある。前者は一定温度下で規定した

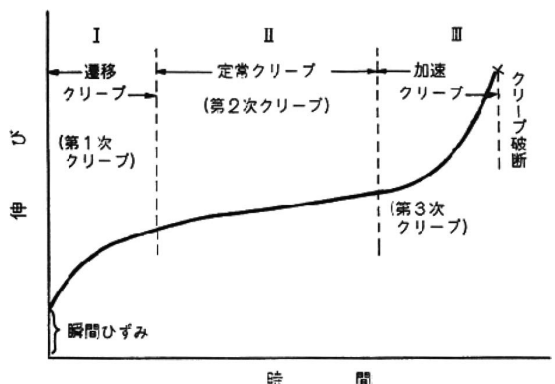


図 1 典型的なクリープ曲線³⁾

負荷時間に規定したひずみを生じる応力で、例えば、1,000時間で0.1%のひずみ (0.1%/1,000h) を生じる応力などがある。後者は一定温度下で一定時間にてクリープ破断を生じる応力で、例えば、 10^3 時間で破断する応力などがある。図2に代表的な耐熱鋼のクリープ破断強度の比較⁴⁾を示す。マルテンサイト系耐熱鋼は焼入れ-焼戻し状態で使用し、中温度域での強度に優れるために約600℃程度まで使用されるが、Mo、V、Nbなどを添加したSUH600やSUH616ではさらに600℃近傍のクリープ強さが改善されている。これ以上の温度域ではオーステナイト系耐熱鋼が他の系に比べて高強度であるために選択される。さらに、オーステナイト系耐熱鋼の中でも、SUH38やSUH661などは時効処理を行うことで、炭化物等を析出させて、より高強度を得ている。

高温疲労とは、高温域での繰返し応力を受けて材料が損傷する現象である。高温における疲労現象は、温度、繰返し速度、雰囲気、材料の組織変化等が影響するため、常温のそれに比べて複雑になるが、高温疲労強度と高温引張強さにはそれなりの相関が確認されている⁵⁾。

II. 熱処理

a オーステナイト系耐熱鋼

本系の大部分は固溶化熱処理状態で使用される。また、時効処理を施して、高強度を得る鋼種もいくつかある。

(1) 固溶化熱処理

固溶化熱処理は前処理で生成したマルテンサイトやひずみをなくし、また炭化物を固溶させてオーステナイト単相にして、優れた耐食性と加工性等を確保する熱処理である。

熱処理温度は、炭化物を固溶させるためには高温ほどよいが、高温にしすぎるとフェライトの発生や結晶粒の粗大化が生じるので、最適な温度範囲が存在する。冷却は急冷とする。550~800℃近傍の温度域で冷却速度が遅いと、Cr炭化物が主に結晶粒界に析出し、耐食性が劣化するので、熱処理でCを固溶化した後はCr炭化物が析出しないように急冷することが必要である。

(2) 安定化熱処理

安定化元素のTi、Nbを添加したSUS316Ti、SUS321、SUS347では安定化熱処理を施す場合が

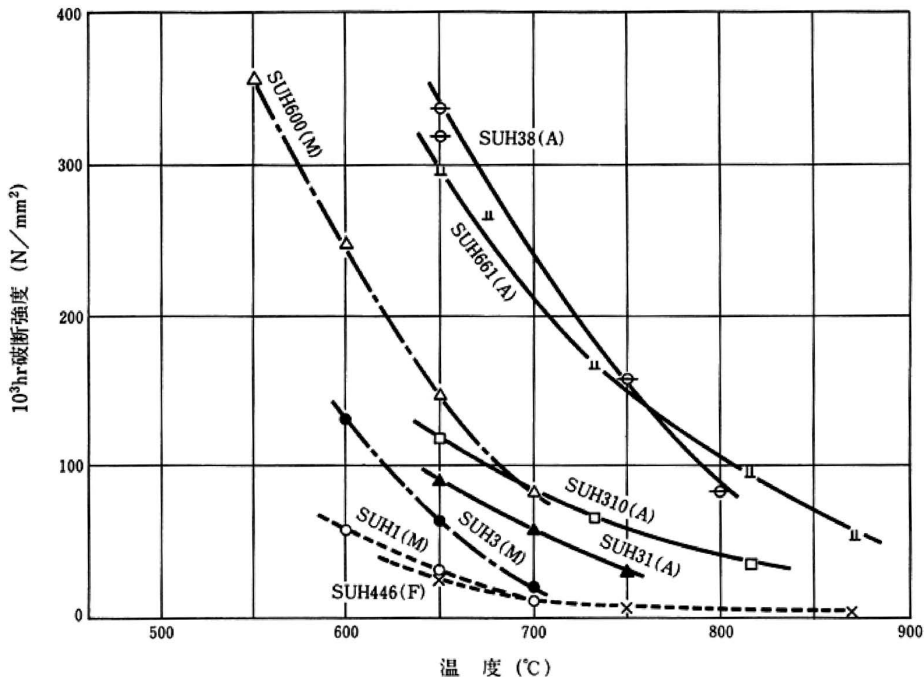


図2 耐熱鋼のクリープ破断強度の比較⁴⁾
(図中のAはオーステナイト、Fはフェライト、Mはマルテンサイトを示す。)

ある。安定化熱処理はCrよりもCとの親和力の大きいTiやNbと固溶Cを反応させて析出物とし、固溶C量を低減して、Cr炭化物の粒界析出を防ぎ、耐粒界腐食性を向上させる熱処理である。

熱処理温度は、Cr炭化物が析出し難い温度域(850℃以上)で、かつTiCやNbCが十分に析出し固溶C量を低下させる温度(930℃以下)とし、冷却は、固溶C量が十分に低減しているので、急冷とする必要はない。

(3) 時効処理

SUH35、SUH36、SUH660、SUH661などでは、硬さや機械的な強さを高めるために固溶化熱処理後に時効処理を実施する。

時効処理は30番台の系では炭化物を析出することを、600番台では金属間化合物や炭化物を析出することを目的としており、固溶化熱処理状態を記号Sで、固溶化熱処理後時効処理状態を記号Hで表す。

b フェライト系耐熱鋼

本系は高温に加熱してもほとんどフェライト組織であるために焼入れによる硬化はなく、焼なまし状態で使用される。

焼なましは前工程で発生したひずみや応力を除去し、組織の均質化と優れた耐食性、良好な加工性を得る熱処理である。なお、熱処理温度が高すぎると結晶粒が粗大化し、韌性は劣化し、粒界腐食感受性も高まるので、焼なまし温度は機械的性質の許す範囲で低くするほうが無難である。また、高Cr系に特有な475℃脆性(475℃前後の温度に長時間保持すると脆くなる現象)が問題になる場合には、冷却の際に400~500℃の領域を速やかに通過させることが望ましい。

c マルテンサイト系耐熱鋼

本系は焼入れによりマルテンサイト組織となつて硬化し、さらに焼戻しによって韌性と強さを兼ね備えた性能が得られるため、焼入焼戻し状態で使用される。

(1) 焼入れ

焼入れはオーステナイト化した後にマルテンサイト変態させ、高強度を得るための熱処理です。

熱処理温度は変態開始温度以上とし、オーステナイト化して、成分の均質化を図った後、油冷でマルテンサイト化する。熱処理時に多くのCr炭化物が分解するので、拡散の遅いCrが移動して均質

化が図れるように保持時間は十分にとる必要がある。熱処理温度は、高くすることで炭化物が多く分解し、オーステナイト中の固溶C量が増し、焼入れ後の硬さが増加する。しかし、高温にしすぎると、固溶C量のさらなる増加によりマルテンサイト変態開始温度が低くなり、残留オーステナイトが増加して硬さが低下する。一方、熱処理温度が低い場合には、オーステナイト化が不完全となり、十分な焼入れ硬さを得られない。よって、最適な熱処理温度を選ぶ必要がある。

(2) 焼戻し

焼入れ状態では硬さが高いものの脆いので、焼戻しにより硬さを幾分犠牲にして用途上必要な韌性を得る。耐熱鋼では、高温での使用中に焼戻しが進行して急速に強度が低下したり、性能が変化したりすることは好ましくなく、安定化した焼戻し状態しておく必要がある。

一般的には、使用温度よりも高い温度での焼戻しが選ばれ、主に600~800℃で行われる。なお、中間温度域の400~550℃では韌性の低下、耐食性の劣化が生じるので、この温度域での焼戻しは避けるようにする必要がある。また、焼戻し後の冷却時には、この温度域を速やかに通過させることが必要である。

(3) 焼なまし

焼なましは前工程で生じたひずみや組織不均質性を除去して、軟質で冷間加工や機械加工に適する状態にする熱処理である。本系では、鍛造、熱間圧延などの熱間加工後は焼きが入り硬化しているので、機械加工や冷間加工をやすくするために、あるいは、置き割れなどが生じないように焼なましを行う。

焼なましの方法には主に完全焼なましと低温焼なましがある。完全焼なましはオーステナイト変態開始点(A_1)より50℃から100℃程度高い温度に加熱してオーステナイト化し、徐冷時に炭化物を析出してフェライトに完全に変態させ、軟化する方法である。低温焼なましは A_1 点直下のフェライト+炭化物領域で再結晶させ、加工性を回復させるもので冷間加工後の軟化方法などとして用いられる。

d 析出硬化系耐熱鋼

本系は固溶化熱処理後に析出硬化処理を行い、基

地に微細な第2相を均一に析出させて、強度を得る。

SUS630は固溶化熱処理により低Cの軟質マルテンサイトとなり、析出硬化処理でCu-rich相を析出させる。析出硬化処理は熱処理温度が最も低いH900処理で最大の強度が得られ、熱処理温度が高くなると強度は低下し靱性が改善される。SUS631は固溶化熱処理により準安定オーステナイトとなり、析出硬化処理ではオーステナイト相のMs点調整とマルテンサイト化を行い、510℃あるいは565℃の最終熱処理段階でNi-Alの金属間化合物を析出させて硬化させる。両鋼種ともに使用時にはマルテンサイト基地に析出相を含む組織である。

具体的な熱処理条件については、耐熱鋼棒の熱

処理条件がJIS G4311の附属書JAに、耐熱鋼板及び耐熱鋼帯の熱処理条件がJIS G4312の附属書JAに記載されているので、参照されたい。

参考文献

- 1) JISハンドブック1 鉄鋼 I、日本規格協会編、(2020)、p. 2822-p. 2826
- 2) 耐熱鋼高温特性データシート、ステンレス協会技術員会編、ステンレス協会発行、(1978)、p. 4-p. 5
- 3) 特殊鋼ガイド 第5編 特性と事故例、特殊鋼倶楽部「特殊鋼ガイド初級編集委員会」編、特殊鋼倶楽部発行、(1979)、p. 179
- 4) 特殊鋼の技術と用語のやさしい解説、特殊鋼倶楽部編集委員会編、特鋼倶楽部発行、(1998)、p. 28
- 5) 金澤健二、山口弘二、佐藤守夫、西島敏：材料、37 (1988)、p. 254



9. 快削鋼

日本製鉄(株) あいそとしはる
九州技術研究部 首席主幹研究員 間曾利治

I. 特性

a 規格

被削性の向上に特化した鋼材規格として、例えばJISに規定されている硫黄快削鋼SUM23 (0.26~0.35%S)、硫黄鉛複合快削鋼SUM24L (0.26~0.35%S-0.10~0.35%Pb) などのように多量のSやPbが添加されている。機械的性質を維持しつつ被削性を高めた鋼材として、快削元素の種類や添加量に応じて、JASOで規定されるS1 (0.04~0.07%S)、L2 (0.10~0.30%Pb) などを基本成分の鋼種記号の後に付記して表される。

b 一般的な用途

快削鋼とは快削元素の添加により被削性を向上させた鋼であり、代表的な快削元素としてSとPbが挙げられる。快削鋼はOA機器や油圧部品などに用いられる低炭素快削鋼と、自動車のエンジンや足回り部

品などに使用される機械構造用快削鋼に大別される。

c 必要とされる特性

(1) 物理的性質

快削鋼の物理的性質について、例えば、ヤング率、密度、熱伝導率、電気抵抗率、熱膨張係数は快削元素の添加量が実用鋼で使用される範囲であれば、基本鋼に対してほとんど変わらない。磁氣的性質は、軟磁性鋼においてSを過剰に添加した場合に保磁力を増加して磁気特性を低下させる¹⁾。これは旧オーステナイト粒界にFeSが析出するためであるとされており、FeSが残存ないようにMn/S比を適正に制御した軟磁性材料の開発事例がある。

(2) 機械的性質

Sを添加した快削鋼は引張強さ、耐力などの強度特性は基本鋼とほぼ同等であるが、圧延や鍛造によってMnSが長く伸ばされるため、機械的性質に異方性が生じる。そのため、図1、2のように、

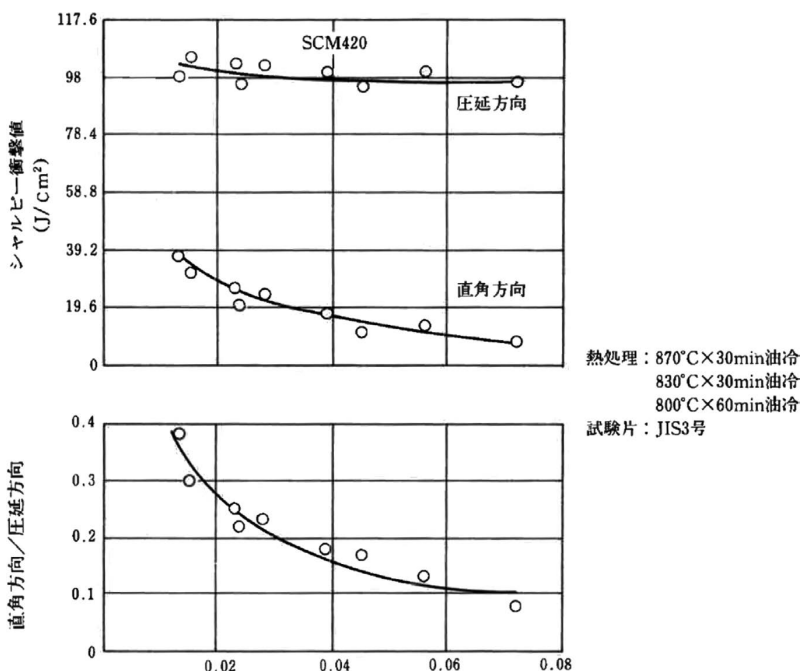


図 1 シャルピー衝撃値に及ぼすS含有量の影響²⁾

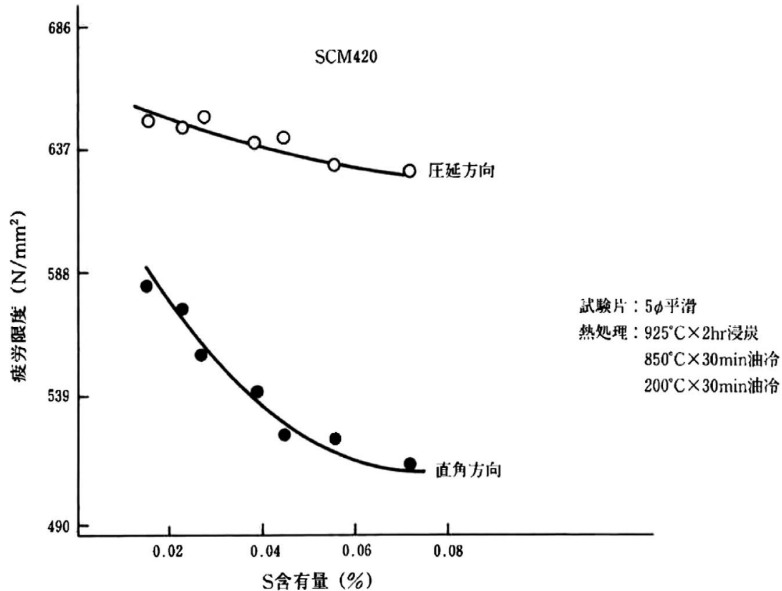
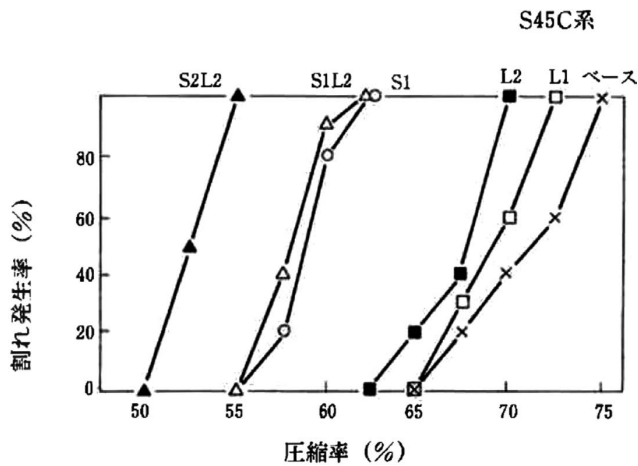


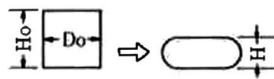
図 2 回転曲げ疲労限に及ぼすS含有量の影響²⁾



<試験条件>

試験片: 20φ×30L (Ho/Do=1.5)

圧縮加工率 = $\frac{H_0 - H}{H_0} \times 100(\%)$



熱処理: 球状化焼なまし

図 3 冷間鍛造性に及ぼすS、Pbの影響²⁾

加工に直角の方向の衝撃値、延性や疲労強度が低下する²⁾。また冷間加工においても、図3のようにS添加量が増えると割れが発生しやすくなる。異方性の軽減のため、TeやCaなどを添加して硫化物

を球状化する形態制御が行われる場合がある。

Pbを添加した快削鋼は常温での機械的性質は基本鋼とほとんど変わらない。冷間加工性についても、鉛快削鋼は図3に示したように基本鋼に比べ

て若干劣るが、硫黄快削鋼に比べると良好である。しかしながら、温間での機械的性質は、200℃以上から衝撃値や延性が基本鋼よりも低下し、特に300～400℃では低下が大きい³⁾。これは、Pbは融点が327℃と低いため、溶融脆化が生じることが主な理由であるといわれている。疲労強度は鋼中のPb粒子が応力集中源になって低下する場合があるが、回転曲げ疲労では実用上差支えない程度の低下とされている。一方、歯車や軸受などでみられる転動疲労では高面圧が繰り返し付加されることで温度が上昇し、Pb粒の溶融、膨張によりクラックを発生、成長させるため、疲労寿命が著しく低下する。

II. 熱処理

・主な熱処理方法

機械構造用として使用される快削鋼の熱処理には主に焼ならし、焼なまし、焼入れ・焼戻しなどがある。これらの熱処理は快削鋼と基本鋼で変わりはない。焼ならしは、 A_{c3} (亜共析鋼) 又は A_{cm} (過共析鋼) 点以上の適切な温度に加熱した後、通常は空气中で放冷する処理がなされる。焼なましは目的に応じていくつかの処理があるが、例えば完全焼なましでは鋼を A_{c3} 又は A_{c1} 点以上の温度に加熱し徐冷される。焼入れ・焼戻しでは、 A_{c3} 又は A_{c1} 点以上の温度に加熱して急冷後、 A_1 点以下の温度に加熱し、冷却される。

多くの場合、焼入れ・焼戻しで必要な強度を付与する前に切削加工が行われる。圧延や鍛造のま

まで切削加工が施される場合もあるが、被削性向上のために焼ならしや焼なましによって硬さを最適に調整される。一般に、被削性は材料が硬いほど低下し、延性が高いほど低下するため、最適な硬さが存在する。また、マイクロ組織も被削性に影響し、例えば、中炭素鋼において粗いパーライト組織は緻密なパーライト組織や球状化セメンタイト組織と比べて、切欠き効果が大きいため被削性が良いといわれている⁴⁾。また、結晶粒度に関して、旧オーステナイト粒度がやや粗めの均一なフェライト-パーライト組織とすると被削性は良好である。歯車用肌焼鋼では、鍛造で高温に加熱して加工を加えた後に、連続冷却せずに650℃前後で等温保持する処理（鍛造恒温焼ならし）を行うことでこのような組織を得て被削性を改善している事例もある⁴⁾。

熱処理時の結晶粒度は鉛快削鋼のほうが基本鋼よりも細粒であるとされている³⁾。但し、焼入性や浸炭性に及ぼすPbの影響はほとんど認められていない。これはPbは鋼中で介在物として存在していることに加え、上記の細粒化効果は焼入性に影響を及ぼすほど大きくないためと考えられている。

参考文献

- 1) 千葉政道、阿南吾郎、尾崎勝彦：神戸製鋼技報、Vol. 55、No. 2 (2005)、p. 18
- 2) 特殊鋼、Vol. 42、No. 6 (1993)、p. 14
- 3) 木村篤良：西山記念技術講座、(1984)、p. 131
- 4) 小林一博：熱処理、Vol. 41、(2001)、p. 196

10. ピアノ線材

(株)神戸製鋼所 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部 しゅ どう たけ ひろ 酒 道 武 浩

I. 特性

a 鋼種名

ピアノ線材は日本産業規格JIS G 3502で規定される鉄鋼材料であり、鋼種名はSWRSxxx (SWRSはSteel Wire Rod for Spring略)と表記される¹⁾。SWRSxxxの最初のxxは線材に含まれる炭素量を示し62 (炭素量の範囲が0.60~0.65%)から92 (同0.90~0.95%)まで9段階あり、最後のxにはマンガ量によってA (0.30~0.60%)もしくはB (0.60~0.90%)が入る。したがって、ピアノ線材は計18種類に区分される。

b 用途

ピアノ線材は伸線加工により所望の線径や強度に減面することで使用される。その主な用途にはミュージックワイヤを始め、タイヤの補強材であるスチールコードや半導体結晶を太陽光パネルやICチップ用にスライスするためのソーワイヤ、長大橋など大型構造物を補強するPC鋼線やクレン・エレベータ用各種ケーブル、各種ばね用オイルテンパー線などがあり、ピアノ線材は私たちの生活の身近なところに数多く使用されている。

c 必要とされる特性

伸線加工は大きな塑性変形を伴うため、ピアノ線材にはそれに耐えられるよう厳しい品質管理が要求される。JISで規定される品質項目には化学成分、脱炭層深さ、寸法、表面疵 (きず) 深さ、引張強さなどがある。化学成分については特に炭素量の管理幅が狭く、これは製品強度への影響が他の化学成分に比べて大きく強度がばらつきやすいためである。脱炭層は線材内部に比べて炭素濃度が低い表層組織を指し、顕微鏡による組織観察や硬さ試験によって深さを測定する。脱炭層が深いと引張強度や疲労強度が低下する。寸法は狙い線径からの許容誤差に加えて偏径差も規定されており、製品強度のばらつきや伸線時のダイスへの片当たりによる断線および焼き付きを配慮している。

表面疵は伸線性や伸線後の見栄えに影響するため、できる限り浅い方が望ましい。また、圧延時に発生するへげ疵や虫食い疵といった有害な欠陥や搬送時のすり疵についても注意を払わなければならない。そのほか伸線性や製品強度に影響する中心偏析や非金属介在物の清浄度については用途によって管理が必要となる。

II. 熱処理

a 主な熱処理

ピアノ線材に施される熱処理であるパテンティングについて紹介する。ピアノ線材は主としてパーライト組織で構成される。パーライト組織は鉄を主成分とする軟質なフェライト (α -Fe) と、鉄原子と炭素原子が3:1の割合で結合した硬質なセメンタイト (Fe_3C) の層状 (ラメラ) 組織であり、その層間隔やノジュールサイズ (ラメラ組織の配向が同じ領域をコロニー、フェライトの結晶方位が同じコロニーの集まりをノジュールという) によって引張強さや絞りといった機械的特性が変化する。パテンティングは、950°C程度のオーステナイト域に加熱した線材を500~600°Cに急速冷却および恒温保持することで、均一で微細なパーライト組織を得ることを目的に行われる。パーライト組織が線材の内部と表層で均一でない場合、伸線時に歪が集中して断線の原因となる。またラメラ間隔が粗いパーライト組織では伸線前の引張強度や伸線時の加工硬化率が低くなり伸線後に十分な強度を得られない恐れがある。

パテンティングにはダイレクトパテンティング、すなわち銅片を線材に熱間圧延した後にそのまま急速冷却してパテンティングを行う方法と、室温まで冷めた線材を再度加熱するオフラインパテンティングの2種類がある。以下にそれぞれの特徴について説明する。

(1) ダイレクトパテンティング

ダイレクトパテンティングでは、熱間圧延後に

リング状に巻き取られた高温の線材を直接急冷してパテントングするので、線材を伸線加工するワイヤメーカーの熱処理工程を省略し、加工コストやCO2排出量を低減できるメリットがある。この方法はさらにステルモア法やEDC法（Easy Drawing Conveyor）、DLP法（Direct in-Line Patenting）などに区分される^{2)~4)}。ステルモア法は圧延後にコンベア下部から風をかけて衝風冷却を行う。またEDC法は沸騰水、DLP法は熔融塩をそれぞれ冷媒として線材を急速冷却するパテントング方法であり、後者ほど冷媒の冷却能が高い。図1は炭素鋼のTTT（Time-Temperature Transformation）線図のイメージ図を示したものである。TTT線図とは材料を恒温保持したときの温度と時間による組織の変化を表した図であり、パテントングや焼なまし、オーステンパーなどにおいて最適な温度および保持時間の探索に用いる。理想的なパテントングとしては図1の①に示すようにオーステナイト域から急速に冷却し、ノーズ温度（パーライト変態が最も早く完了する温度）付近でパーライト変態が開始して均一で微細なパーライト組織を作り込むのが望ましい。一方、②や③のように冷媒の冷却能が低いあるいは線径が太く冷却速度が遅い場合、ノーズ温度に到達する前の高温域からパーライト変態が開始しラメラ間隔が粗く不均一なパーライト組織が形成される。

(2) オフラインパテントング

オフラインパテントングはコイル状に巻かれた線材を直線状に繰り出して加熱炉および冷媒を

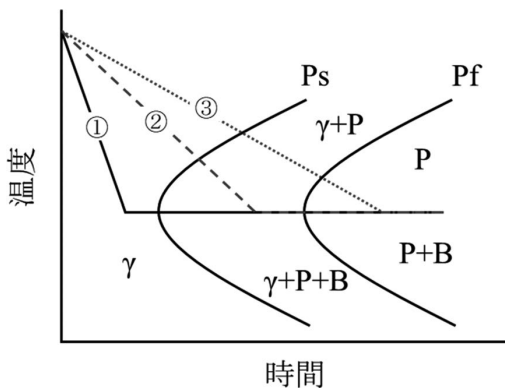


図1 炭素鋼のTTT線イメージ
 (γ: オーステナイト、P: パーライト、B: ベイナイト、
 Ps: 変態開始、Pf: 変態完了)

通過させ、連続的に熱処理する方法である。熱処理にはサブライスタンド、加熱炉、冷媒槽、巻取機といった設備が必要でありダイレクトパテントングに比べて処理コストが高くなるが、ダイレクトパテントングではコイル状で処理するため線材どうしの重なりによって組織ばらつきが生じやすいのに対して、全長に亘り均一な組織を作り込みやすいというメリットがある。冷媒の種類によって鉛パテントング、流動槽パテントング、水パテントング、空気パテントングなどがある⁵⁾。熔融鉛の冷却能は非常に高いためロープ用などの太径線材においても均一なパーライト組織の形成を可能にするが、鉛は人体に有害であり熱処理時に鉛ヒュームが発生するため浄化設備など環境対策が必須となる。流動槽はジルコンサンドなどの固体粒子を充填した槽であり、その粒子を550℃程度に加熱攪拌した状態のなかに線材を通すことでパテントング処理を行う。鉛パテントングに比べて冷却速度に劣るが環境に優しい熱処理と言える。水パテントングや空気パテントングはさらに環境面やコスト面で優れた方法であるが、線温の制御が難しく均一なパーライト組織を得るのが難しいため高い制御技術が要求される。

b 不具合事例、改善事例

ここではパテントングにおける代表的な不具合事例と対策について紹介する。

(1) 残存スケール

熱間圧延後の線材表面には酸化被膜（スケール）が形成される。スケールが伸線時に残存していると、伸線後の表面肌や伸線性に悪影響をおよぼすため、伸線前に除去しておく必要がある。一般的な脱スケール方法としては、塩酸や硫酸などの酸によりスケールを溶解除去する化学的脱スケール法（以下、酸洗）と、線材に軽度の曲げ加工やねじり加工を施すことでスケールを分断剥離させる機械的脱スケール法（メカニカルデスケリング、以下MD）が挙げられる。MDは酸洗に比べて環境面やコスト面で有利である反面、スケールが残存しやすいというデメリットがある。そこでMD後にスケールが残存する場合は圧延後の巻取り温度を高くすることで改善が可能である。巻取り温度を高くすると線材表面に形成されるスケールが厚

くなり、MD時にスケールが割れやすくなるためである。一方、酸洗後にスケールが残存する場合には巻取り温度を低くしてスケール厚さを薄くすることが有効である。

(2) 過冷 (マルテンサイト)

パテンティングではマルテンサイトの生成に注意が必要である。オーステナイトからパーライト組織への変態は500~600℃で促進される。しかし、圧延後の衝風冷却において冷却速度が速すぎたり塩浴中の保持時間が短かったりするとその温度域でパーライト変態が完了せず、500℃未満に冷却された未変態オーステナイトはやがてマルテンサイトと呼ばれる、炭素原子が鉄の結晶格子内に過飽和に固溶した硬質で脆い組織に変態する。マルテンサイトは伸線時の断線原因となるため、マルテンサイトが生成されないよう冷却速度や保持時間を鋼種や線径に応じて調整しなければならない。

(3) 未固溶セメンタイト

オフラインパテンティングにおいてオーステナイト域に加熱昇温する際、加熱温度や加熱時間が十分でないと元の組織（基本的にはパーライト組織）のセメンタイトが完全に固溶しない場合がある。この未固溶セメンタイトは写真1に示すようにパテンティング後、パーライト組織内に球状で存在し強度に寄与しないため最終製品の強度不足の原因となる。したがって加熱温度を高くする、もしくは線速を下げた加熱時間を延ばすという対策がとられるが、その場合オーステナイト粒の粗大成長による焼入れ性の上昇にも気を付けなければならない。焼入れ性とはオーステナイト相から冷却した時のマルテンサイト変態のしやすさを表す指標であり、化学成分の添加量やオーステナイト粒の大きさによって変化する。焼入れ性が高いほどパーライト変態の開始および変態速度が遅くなり、マルテンサイトが生成されるリスクが高くなることから、パテンティング条件を変更する場合は全体的なバランスを考慮する必要がある。

(4) 初析セメンタイト

初析セメンタイトは炭素を多く含む過共析鋼において形成される。パテンティングの冷却工程において冷却速度が不十分な場合、オーステナイト粒界に沿った筋状のセメンタイトが析出し、酷い

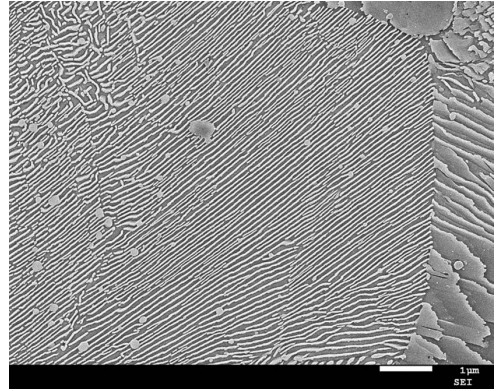


写真1 未固溶セメンタイト

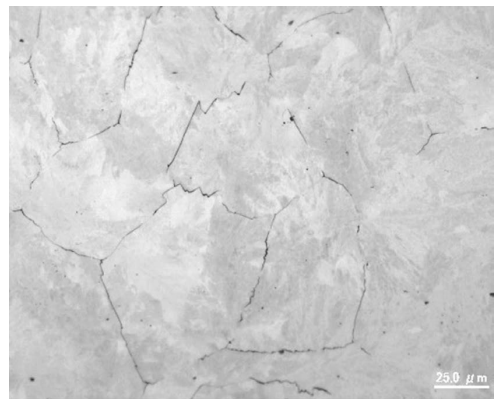


写真2 初析セメンタイト

場合には結晶粒全体を囲いさらに周囲と連結してネットワーク形状となる(写真2)。初析セメンタイトはラメラセメンタイトに比べて厚く、その変形能は低いため、伸線時界面に沿ってクラックが発生したり初析セメンタイトが分断したりすることで断線に繋がる。初析セメンタイトを抑制するには線材の炭素量を少なくする、あるいは加熱後(ダイレクトパテンティングの場合は圧延後)の冷却速度の向上が有効である。

参考文献

- 1) 一般財団法人日本規格協会：JISハンドブック 鉄鋼Ⅱ (2021)、1755
- 2) 一般社団法人日本塑性加工学会：引抜き加工、コロナ社 (1990)
- 3) 大羽浩ら：新日鉄技報、386 (2007)、48
- 4) 三宮章博ら：R&D神戸製鋼技報、31 (1981)、30
- 5) 高橋栄治ら：鉄と鋼、62 (1976)、1373

11. 高張力鋼

日本製鉄(株) やなぎ た かず ひさ
厚板技術部・主幹 柳 田 和 寿

I. 特性

a 鋼種

代表的な高張力鋼の規格として、一般構造用圧延鋼材 (G3101)、溶接構造用圧延鋼材 (G3106)、溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 (G3114)、低温圧力容器用炭素鋼鋼板 (G3126)、低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板 (G3127)、圧力容器用鋼板 (G3115) などのJIS規格がある。

b 一般的な用途

橋梁、建築、圧力容器、造船などの用途で、溶接性の優れた鋼材として広く適用されている。

c 必要とされる特性

高張力鋼に必要とされる母材の性能としては引張特性、靱性、用途適用性、高温特性、耐環境脆化特性、疲労強度などが挙げられる。

(1) 物理的性質

高張力鋼の場合、添加する合金元素は少量であるので、物理的性質は炭素鋼とほとんど変わらない。従って、特筆すべき物理的性質はないが、下記に高張力鋼の物理的性質を示す。

- ①密度：組成、熱処理に対しあまり敏感に変化しない。
- ②比熱：変態点近傍以外では組成、熱処理に対し、あまり変化しない。
- ③熱伝導率：常温付近では組成、熱処理によってかなり変化するが700℃以上では差が少なくなる。固溶元素を添加すると低下する。
- ④線膨張係数：常温以上ではほぼ一定であるが、低温側では減少する。
- ⑤弾性率：完全な結晶では、結晶構造に基づく定まった値をとるが、実際の結晶では転位などの欠陥のため若干減少する。また歪硬化したものでは減少する。

(2) 機械的性質

①引張特性

鋼の強度を高くする方法としては、炭素含有量を高くすることが最も経済的である。しかしながら高張力鋼が重要な構造部材に使用されるに依り、溶接性、切欠き靱性やその他の特性も配慮する必要があり、成分としてはC、Ceq (炭素等量^{*1}) は低めに抑え、次の方法で強度を高めている。

- ・合金元素の添加による固溶、または析出強化、
- ・結晶粒の微細化、
- ・調質熱処理、
- ・制御圧延^{*2}、及び熱加工制御^{*3}

②切欠き靱性

切欠き靱性は脆性破壊への抵抗値を示す特性である。靱性破壊は次の条件が揃った時に発生する低応力破壊である。①応力 (外力、残留応力)、②切欠き (溶接欠陥、使用中に発生する亀裂)、③使用温度、④材料特性 (切欠き靱性)

従って、脆性破壊を防止するためには設計、溶接技術、非破壊検査技術、鋼材の選択などが重要である。鋼材の靱性を改善するには結晶粒を微細化することが重要であり、このためにはAl、Tiなどを少量添加し、窒化物による細粒化、制御圧延

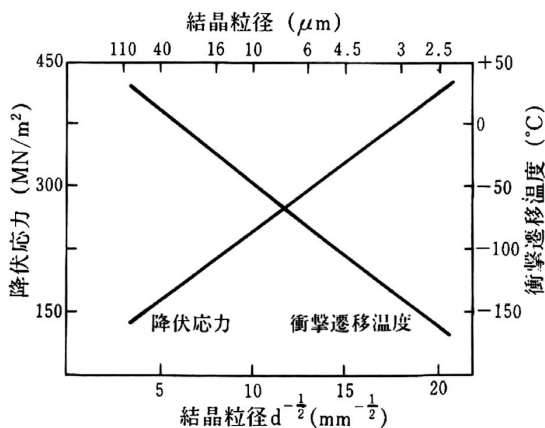


図 1 0.1% C鋼における降伏強さと切欠き靱性に及ぼすフェライト粒径 (藤田他訳：鉄鋼材料の設計と理論)

表 1 高張力鋼板の性能例

鋼種	化 学 成 分															製 造 法	板 厚	引張り		衝 撃				
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	B	P _{CM}	C _{eq}			YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	エネルギー		vTs ℃		
																				J	℃			
HT 50	5A 汎用鋼	0.14	0.14	1.44	0.020	0.009										0.24	0.40	R	32	380	550	147	0	-24
	5B 大入熱用	0.08	0.32	1.29	0.013	0.002	0.17	0.22			0.012	0.013				0.19	0.30	TMC	50	386	530	254	-40	-94
	5C 耐ラメラテア	0.15	0.43	1.42	0.015	0.003	0.24	0.33				0.039				0.24	0.41	N	50	414	565	218	-20	-45
	5D 耐候性	0.12	0.26	1.17	0.021	0.004	0.31		0.46		0.06					0.24	0.43	R	25	431	560	129	0	-51
	5E 低YR	0.12	0.26	1.33	0.007	0.002						0.017	0.020			0.20	0.36	TMC	80	381	558	119	-20	-30
HT 60	6A 汎用鋼	0.13	0.26	1.34	0.017	0.002				0.06						0.21	0.37	Q	32	523	627	214	0	-52
	6B クラックフリー	0.08	0.28	1.38	0.016	0.003			0.18	0.16	0.05					0.18	0.40	Q	32	551	634	243	-10	-79
	6C 大入熱用	0.12	0.08	1.40	0.016	0.006	0.31	0.26		0.08	0.04			0.002		0.23	0.39	Q	40	551	659	186	-10	-75
	6D 低YR	0.14	0.32	1.39	0.008	0.001		0.18		0.18	0.05					0.24	0.44	QLT	80	456	637	270	0	-65
HT 80	8A (球形タンク)	0.12	0.26	0.86	0.008	0.002	0.24	0.93	0.40	0.35	0.04			0.0011	0.25	0.47	Q	38	765	824	197	-20	-100	
	8B (ベンストック)	0.10	0.31	0.90	0.007	0.005	0.26	1.03	0.47	0.47	0.03			0.0012	0.25	0.50	Q	50	803	844	210	-40	-93	
	8C (海構)	0.11	0.09	1.18	0.007	0.001	0.23	1.97	0.64	0.44	0.03			0.0008	0.28	0.59	Q	200	697	767	226	-40	-90	
	8D Niなし	0.12	0.26	0.57	0.016	0.006	0.21		0.97	0.42	0.03			0.0009	0.25	0.53	Q	32	823	867	190	-20	-81	
HT100	10A (ベンストック)	0.12	0.17	0.74	0.003	0.001	0.26	1.58	0.53	0.54	0.036			0.011	0.0009	0.27	0.53	Q	50	945	974	192	-60	-93
	10B (産機)	0.18	0.27	1.34	0.007	0.002		0.24	0.49	0.04			0.027	0.0034	0.32	0.59	Q	60	962	1,013	75	-40	-36	

や熱加工制御など、加熱圧延過程の細粒化など種々の方法がある。切欠き靱性に及ぼすフェライト結晶粒度の影響を図1に示す。また高張力鋼板の性能例を表1に示す。

*1) 炭素等量：引張強さ、溶接部最高硬さに対する炭素以外の合金元素の影響力を炭素量に換算したもの。JISでは溶接性に対する炭素等量として、次式を採用している。

$$C_{eq}(\%) = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

*2) 制御圧延：熱間圧延の一種で加熱温度、圧延温度、圧延圧下量を適正に制御することによって、鋼の結晶粒を微細化し特性を出す圧延法

*3) 熱加工制御：制御圧延を基本に、その後空冷または強制的な制御冷却を行う圧延法

II. 熱処理

a 主な熱処理

各種鋼板の製造方法と得られる特性を表2に示す。圧延まま、或いは焼ならしにより得られる強度水準は引張強さで490N/mm² (HT50) までである。引張強さが590N/mm² (HT60) 以上の鋼板は通常、焼入れ-焼戻しによって得られる。圧延ままであるが組織を微細にして熱処理材と同等、或いはそれ以上の性能を得る方法が制御圧延、或いは熱加工制御である。溶接性を考慮した引張強

さ490N/mm²以上の鋼板で圧延まま、焼ならし、焼ならし-焼戻し、制御圧延、熱加工制御で製造したものを非調質高張力鋼^{*4)}という。HT60以上の高張力鋼は大部分焼入れ-焼戻しを行うことにより製造され調質高張力鋼^{*5)}という。

*4) 非調質高張力鋼

HT50はSM490としてJISに取り入れられ、比較的低い炭素等量で製造可能であるので、溶接性の優れた鋼材として橋梁、建築、压力容器や造船用に広く使用されている。この材料は一般にSi-Mn系高張力鋼とよばれ、基本的な成分はC≤0.20%、Si≤0.55%、Mn≤1.50%で圧延まま、或いは焼ならし処理を施して製造される。組織は主としてフェライト・パーライト組織である。この種の鋼材で合金元素添加量をできるだけ抑制して、強度と切欠き靱性の向上を図る方法として制御圧延、熱加工制御がある。この場合、微量のNbやVを添加して、その炭窒化物の析出物を利用して、さらに高強度化、低炭素量化を図ることが出来る。一方、熱間加工を受けても材質変化の少ないことを要求される部材などでは、焼ならし材の切欠き靱性確保にはAlやNbなどを添加しAlNやNbCの析出物のオーステナイト粒成長防止作用を利用して、細粒のフェライト・パーライト組織を得ることが多い。

＊5) 調質高張力鋼

焼入れ-焼戻し処理を施すと同一成分の非調質鋼より高い強度が得られるので、同一強度で低炭素量化が可能で溶接性が改善される。しかも一般に調質鋼は切欠き靱性が優れているので、HT60ないしはHT80として橋梁、圧力容器、水圧鉄管等に広く使用されている。HT60のうち板厚の薄いものはSi-Mn系の炭素鋼であるが、板厚の増加に応じて0.1%以下のVや少量のCu、Ni、Cr、Moなどが添加される。HT60の焼入れ組織は完全マルテンサイトになることは少なく、通常フェライトパーライト混合組織である。HT80は焼入性を十分高くするとともに、焼戻し軟化抵抗も大きくする必要があるので、低温での靱性が要求される用途にはNi、Cu、Cr、Mo、Bなどが添加され、焼入れ性を高めると共にMo、Vによる二次硬化が利用され

る。HT80の製造で最も重要な技術はB処理である。Bを有効に活用するにはBNを形成し、焼入れ性を低下させるNの量やNをAlNとして固定するAlの添加量の制御が重要である。HT80の組織はマルテンサイトかマルテンサイト微細ベイナイトの混合組織である。

b 不具合事例、改善事例

写真1は静かな港に停泊していた米国の戦時標準船(全溶接船)の一隻が、突然二つに破壊した時の姿を写している。船体のどこかに加わった力が、最も弱いところに集中して生じた脆性破壊だった。当時の関係者は、多数の標準船を徹底的に調査し、脆性損傷を受けた船とそうでないものを統計処理して、母材のシャルピー値が0℃で21J以上あれば損傷の率は極めて低いことが分かった。現在でもこの値は鋼材規格の重要な尺度となっている。

表 2 鋼板の製造方法と諸特性¹⁾

製造方法	強度水準	変態モード	マイクロ組織	靱性	溶接性
圧延のまま	軟鋼～HT50	拡散変態	粗粒フェライト+パーライト	△	△
制御圧延	軟鋼～HT60	拡散変態	細粒フェライト+パーライト	◎	○
熱加工制御	軟鋼～HT60	拡散変態(高温域)+非拡散変態(低温域)	微細粒フェライト+ベイナイト	◎	◎
焼ならし	軟鋼～HT50	拡散変態	細粒フェライト+パーライト	○	○
焼入れ-焼戻し	HT60～	非拡散変態	焼戻しマルテンサイト	◎	○

注：△：悪い，○：よい，◎：大変よい

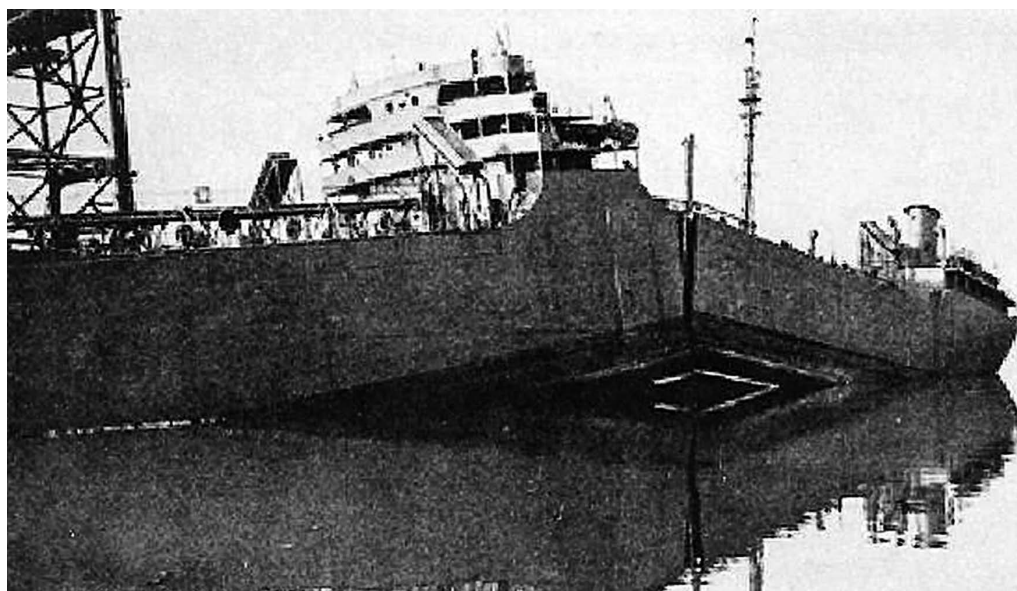


写真 1 米国の戦時標準船(全溶接船)の脆性破壊の様子(掲載元:鉄と鉄鋼がわかる本)

強度と靱性のバランスを適正に維持して両立させる、最も有力な方法が結晶粒の微細化である。そのため、鋼に適切な温度履歴を与えて望ましい金属組織を得る熱処理が有効である。

Ⅲ. 技術動向

従来の製造法に比べて、金属制御の制御範囲を大きく広げ、結晶粒の飛躍的な微細化を可能とし

た技術がTMCPである。また、圧延時の温度コントロールにとどまらず、製鋼段階から始まり、鋼片の加熱、圧延、制御冷却に至る各工程で、連続的に金属組織を制御することにより、必要な特性を鋼に与えることができる。TMCPはフェライト以外のマルテンサイト、ベイナイトといった高強度の金属組織についても幅広く制御することが可能である（図2）。

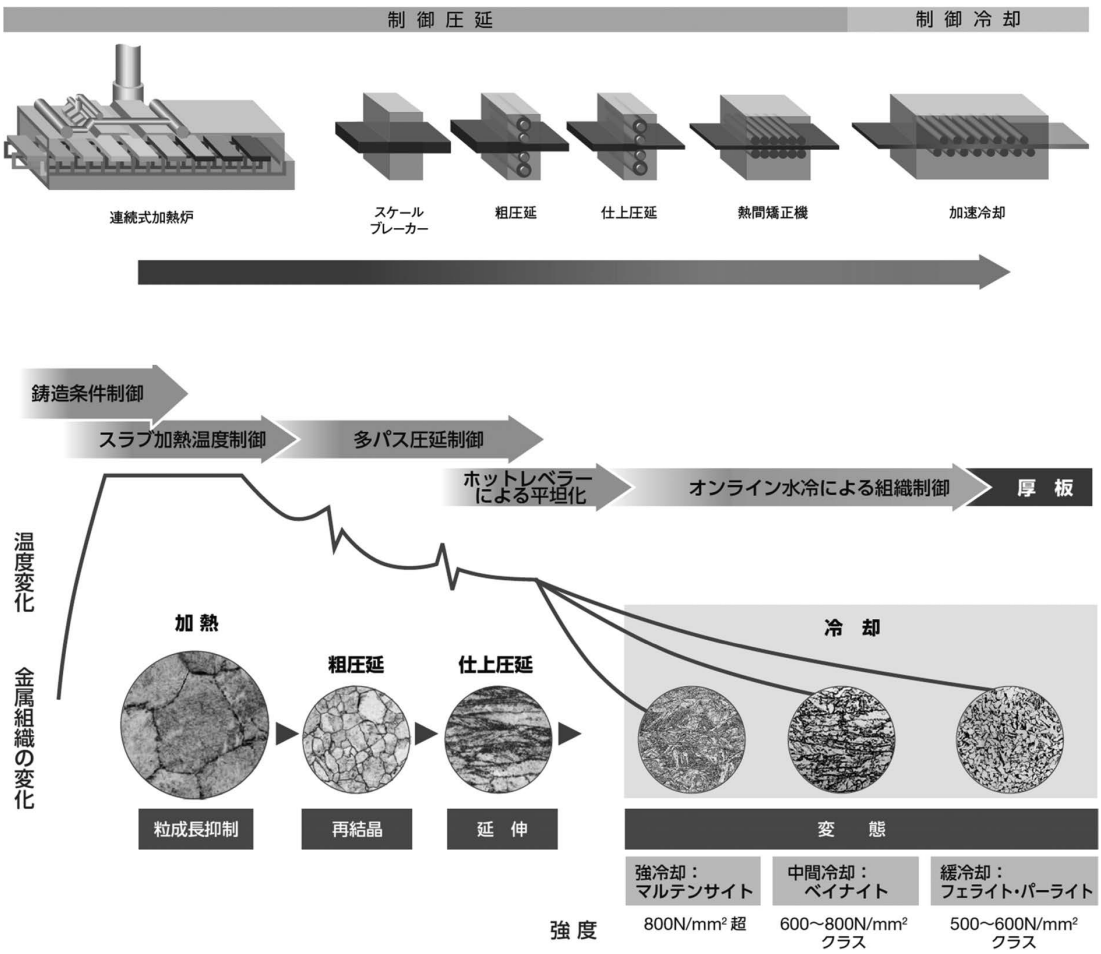


図 2 金属組織を連続的に制御するTMCP (掲載元: 日本製鉄 厚板/総合カタログ)

12. マルエージング鋼

(株)プロテリアル 冶金研究所 おお いし かつ ひこ
 特殊鋼研究部 高機能材グループ 大 石 勝 彦

I. 特性

a 鋼種名

18%Niマルエージング鋼 (Fe-18Ni-8Co-5Mo-0.4Ti-0.1Al (mass%))

マルエージング鋼は、固溶化処理によりオーステナイト組織となり、その後の冷却によりマルテンサイト化し、このマルテンサイト組織を時効処理することで析出強化するのでマルテンサイトのエージング、すなわちマルエージング (Maraging) と言われている¹⁾。マルエージング鋼には18Ni、20Ni、25Niなどの鋼種が開発されているが、18Niが最も広く用いられている。18Niマルエージング鋼の代表的な化学組成を表1に示す²⁾。マルエージング鋼の基本成分はFe-X-Yと示されるように最低でも3元素が必要である³⁾。Xはマルテンサイト変態に必要な元素であり、一般にオーステナイト安定化元素のNi、Coが選ばれる。Yは析出に必要な元素であり、Mo、Tiが選ばれ、それぞれ金属間化合物を形成し強化に寄与する。高い強度を得るためには金属間化合物を多量に析出させるのが

有効であり、この構成元素を多く添加するほど析出強化の向上が期待できる。

b 一般的な用途の概要

マルエージング鋼は一般的な鋼に比べ、機械的特性、加工性に優れており、熱処理も容易である。そのため、宇宙、海洋開発、原子力、航空機などの先端的技术分野から、自動車、各種加圧容器、工具類などの一般産業分野など、様々な用途で使用されている。具的な用途としては、航空機用エンジンシャフト、ロケットのモーターケース、プラスチック精密金型、自動車用のCVT (Continuous variable Transmission: 無段変速機) の金属ベルト用リング、ゴルフクラブのヘッドなどが挙げられる。

c 必要とされる特性

(1) 物理的性質

表3に18Niマルエージング鋼の物理特性を表に示す²⁾。

なお、ここで記載した特性値は代表的なものであるため実際の製品で得られる特性値とは異なることがあるためご注意ください。

表 1 18%Niマルエージング鋼の化学成分

グレード	当社鋼種名	化学組成 (mass%)					
		Ni	Co	Mo	Ti	Al	Fe
250	YAG250	18	8	5	0.4	0.1	Bal.
300	YAG300	18	9	5	0.9	0.1	Bal.
350	YAG350	18	12	4	1.7	0.1	Bal.
285	YAG285	18	0.5	2	1.9	0.1	Bal.

表 2 18%Niマルエージング鋼の機械的特性

グレード	当社鋼種名	0.2%耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %	Vノッチシャルピー衝撃値 J/cm ²
250	YAG250	1,600~1,800	1,650~1,850	6~12	35~60	30~56
300	YAG300	1,900~2,100	1,950~2,150	6~11	30~50	15~32
350	YAG350	2,200~2,450	2,250~2,500	5~10	25~50	10~16

(2) 機械的性質

表1に示す18Niマルエージング鋼の機械的特性を表2に示す²⁾。各グレードの250～350は、0.2%耐力レベル(単位ksi:1ksiは約7MPa)を示している。また、強度が高いほど析出強化に寄与する合金元素量が多く、その強化量はMo当量(Mo(%)+Co(%)/3+3Ti(%))に比例し、Mo当量1%当たり100MPa程度の強度上昇が報告されている⁴⁾が、強度レベルは主にTi量によって調整される。YAG[®]285は、高価な合金元素のMo、Co量を低減する一方で、Ti添加量を高めることで高い強度を得た鋼である。マルエージング鋼は、強度や延性が高く、比強度に優れるとともに、高いじん性を持つ。また、加工硬化が少なく冷間加工性が良好で、溶接性、被削性にも優れる。一般的なマルエージング鋼は、Cをほとんど含まないFe-Ni-Coを母相成分とし、Mo、Tiを適量添加することで2,000MPa前後の高い引張強度が得られる。固溶化処理状態では高密度の転位を含むマルテンサイト組織であるが、Cを含まないため硬さは300HV前後と軟らかく加工性や溶接性に優れている。時効処理後の熱処理変寸も少なく、仕上げ加工も容易であり高い比強度と良好な加工性が得られる。

II. 熱処理

a 主な熱処理

マルエージング鋼の熱処理は、先述したようにマルテンサイト組織を形成する固溶化処理と金属

間化合物を形成する時効処理の2段階で行われる。固溶化処理は800℃～900℃の温度域で行われ、昇熱過程でマルテンサイトから約500℃から逆変態オーステナイトが生成するが、事前に冷間加工などにより材料中に歪を付与した状態であれば、さらに加熱温度を高めることでオーステナイト粒は再結晶し、結晶粒は微細化される。形成されたオーステナイト組織をその後冷却することでマルテンサイト組織が得られる。マルテンサイト変態は200℃前後より開始し(Ms点)、100℃前後で変態が終了する(Mf点)。合金量が多くなるとMf点が室温に近くなるため、固溶化処理の冷却終点温度が高いと残留オーステナイトが残存するようになり引張強度が低下する。Ms点およびMf点におよぼす合金元素の影響については岡田らの多重解析式で整理されている⁵⁾。

時効処理は500℃前後で行われ、一般的には時効温度が低くなるほど最高硬さは高まるが、時効処理に要する時間は長時間化するため、時効処理条件は特性と製造性の観点から選ばれることが多い。CoとMoを含むマルエージング鋼の時効過程では、最高時効状態で金属間化合物として板状Ni₃MoおよびNi₃Tiが微細析出する。MoやTiは析出物を形成し直接的に強化に寄与するが、Coは固溶状態でマルテンサイト組織の靱性を向上させるとともにMoの固溶度を下げてMo系の金属間化合物の時効析出過程を早める働きがあり、間接的に時効析出に寄与する元素である⁶⁾。

表 3 18%Niマルエージング鋼の物理的特性(時効状態)

グレード		250	300	350
当社鋼種名		YAG250	YAG300	YAG350
特性	単位			
密度	g/cm ³	8.0	8.0	8.1
ヤング率	N/mm ² ×10 ³	186	190	200
ポアソン比		0.30	0.30	0.30
平均熱膨張係数	×10 ⁻⁶ /℃	11.3 (20～480℃)	11.3 (20～480℃)	11.4 (20～480℃)
熱伝導率	W/(m・K)	20.9 (20℃) 25.5 (200℃) 27.6 (400℃)		25.1 (20℃) 26.8 (100℃)
電気抵抗	μΩcm	60～70 (820℃固溶化処理) 35～50 (480℃時効処理)		

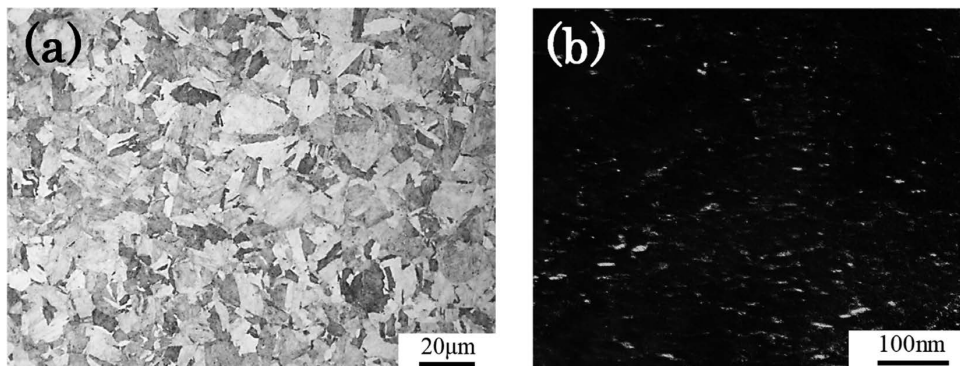


図 1 マルエージング鋼の熱処理組織
(a) 光学顕微鏡写真、(b) 電子顕微鏡写真

次に、一般的なマルエージング鋼の熱処理組織を図1に示す⁷⁾。図1(a)および(b)は850℃で1時間の固溶化処理後、480℃で3時間の時効処理を行ったマイクロ組織である。図1(a)は光学顕微鏡を用いて組織観察したもので、母相はラスマルテンサイト組織であり旧オーステナイト粒内に白黒のコントラストで示されるポケットやブロック領域が見られる。図1(b)は透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて観察したもので、母相のラスマルテンサイト中に時効処理で析出した数十nmサイズの析出強化相であるNi₃Tiが見られる。

b 不具合事例、改善事例

強度改善 (疲労強度改善)

現在普及している自動車変速機のCVTに用いられるマルエージング鋼は、その強化機構が金属間化合物(Ni₃Ti、Ni₃Mo)による析出強化を主体としたものであることから種々の合金元素が添加されている。この中で特に強化に寄与するTiは、非常に活性な元素であり、容易にNやCと結合して硬質の非金属介在物である窒化物(TiN)や炭窒化物(Ti(C,N))を形成し、高サイクル域の疲労起点となるため問題となっている。当社では、独自の溶製法によりその非金属介在物サイズを疲労起点とならないように微細化する技術を確立しているが、更なる高強度化を実現することを目的に、このような非金属介在物を形成しないTiを含まないマルエージング鋼を開発している⁸⁾。これらのマルエージング鋼はCo、Al添加量の調整によりNi₃Mo相およびNiAl相を形成することで析出強化能を大幅に高め、また、Crを添加することで従来のマ

ルエージング鋼と同じく窒化処理を可能にしている。

延性改善

マルエージング鋼は非常に高い強度レベルでの延性が高いことが特徴であるが、更に延性を高めるために結晶粒を微細化することが有効である。冷間加工と熱処理の組み合わせを最適化することで微細化が可能である。また、結晶粒微細化元素としてB(ホウ素)を微量添加することもある。

じん性改善

マルエージング鋼のような高い強度レベルでは、じん性の向上は極めて重要である。不純物元素の低減により、じん性が向上することが知られている。不純物を極少量まで減らすことが基本的なじん性向上方法である^{9)、10)}。

Ⅲ. 技術動向

マルエージング鋼はその高い強度やじん性が特徴であるが、これらの特性に対して鋼中の不純物元素や非金属介在物は特性に大きく影響を及ぼすため低減する必要がある。そのため真空誘導溶解炉や、さらには真空アーク再溶解などの二重溶解を用いた特殊溶解技術¹¹⁾が有効であり使用用途に応じて適宜使用される。

また、航空機エンジン部材としてマルエージング鋼をベースとした高強度材も開発されており、Cや炭物形成元素を添加することで、従来のマルエージング鋼の強化機構である金属間化合物に加えて炭化物強化を利用して高強度化を実現している¹²⁾。

近年では、マルエージング鋼の金属粉末材料を金属積層造形分野に適用している。マルエージン

グ鋼の優れた特性により今後も新たな技術への展開が見出されることが期待される。

参考文献

- 1) 大和久重雄：日本金属学会会報、Vol. 3、No. 12 (1964)、P. 719-728
- 2) 日立金属株式会社 安来工場技術資料No. 231、YSSマルエージング鋼YAG
- 3) 鈴木朝夫：鉄と鋼、Vol. 59、No. 6 (1973)、P. 822-841
- 4) 河部義邦：日本金属学会会報、Vol. 14、No. 10 (1975)、P. 767-777
- 5) 岡田康孝、邦武立朗：鉄と鋼、Vol. 67、No. 6 (1981)、P. 791-798
- 6) 中村峻之、細見広次：自動車技術、Vol. 42、No. 6 (1988)、P. 705-710
- 7) 大石勝彦：特殊鋼、Vol. 67、No. 2 (2018)、P. 42
- 8) 大石勝彦、雀部晋輔、柴崎洋志：日立金属技報、Vol. 37 (2021)、P. 36-43
- 9) 河部義邦：日本金属学会会報、Vol. 14、No. 10 (1975)、P. 767-777
- 10) 河部義邦：ふえらむ、Vol. 4、No. 10 (1999)、P. 662-665
- 11) 岸上一郎、稲葉栄吉、菅洋一：日立金属技報、Vol. 28 (2012)、P. 46-49
- 12) Ferrer L. Cryogenic treatment of martensitic steel with mixed hardening、Patent CA2777034 A1 — Snecma



13. 超合金

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 おおきゆうたろう
耐食・耐熱材料研究室 大木 優太郎

はじめに

超合金とは一般的にFeの含有量が50%以下であり、主成分によってFe基、Ni基およびCo基に分類される。本稿では超合金の中でも代表的なNi基超合金に着目し、いくつか代表的な合金について用途に応じた要求特性や熱処理について概説する。なお合金成分や組織については「2022年9月号 特集：特殊鋼の基礎」にて取り上げたため、そちらで参照されたい。

I. 特性

a 合金名：Inconel[®]718 (Fe-0.04C-19Cr-52.5Ni-3Mo-0.5Al-0.9Ti-5.1Nb) (InconelはHuntington alloys Corporationの登録商標)

(1) 一般的な用途

Inconel718は鍛造や圧延により製造されることが多く、耐熱性に優れるため航空機やガスタービン部材、ロケット部材、原子炉部材、熱間押出工具などの高温に曝され、強度が要求される部材で使用される。また、加工性に優れるため帯や線材への加工が可能であり、自動車用ターボ部材のガスケットやファスナーなどの耐熱部材にも使用される。さらに、耐食性と強度のバランスが良いため、石油や天然ガスなどの掘削装置部材にも使用されている。近年では、粉末やワイヤーなどによる積層造形品としての検討も盛んに行われており、航空宇宙分野での利用が期待されている。

(2) 要求特性

耐熱用途としては高温強度やクリープ特性、高温疲労特性など用途に応じて要求特性は異なる。また高温では酸化による減肉が生じるため、耐酸化性も重要となる。一方で、耐食用途としては強度と靱性のバランスに加え、腐食環境中での応力腐食割れなどに対する耐性が要求される。

b 合金名：Inconel625 (Ni-0.05C-21.5Cr-9Mo-3.6Nb-0.2Ti-0.2Al)

(1) 一般的な用途

Inconel625は優れた耐食性を有することから、化学プラント部材、海水処理設備などで使用される。またInconel718には劣るものの、高温強度にも優れるため、压力容器や熱処理炉材等にも使用される。そのため、大型製品の溶接用ワイヤーとしても多く使用されている。

(2) 要求特性

耐食用途としては耐孔食性、耐すきま腐食性、耐酸性などの耐食性が要求される。また、耐熱用途としては高温強度やクリープ特性、耐酸化性が要求される。

c 合金名：Udimet[®]520 (UdimetはSpecial Metals Corporationの登録商標) (Ni-0.04C-19Cr-6Mo-12Co-1W-2Al-3Ti)

(1) 一般的な用途

Udimet520は非常に優れた耐熱性を有するため、航空機・ガスタービン向けの部材として使用される。

(2) 要求特性

高温強度やクリープ特性、高温疲労特性、耐酸化性等が要求される。

d 合金名：Inconel713C (Ni-0.12C-12.5Cr-4.2Mo-6.1Al-0.8Ti-2.2Nb)

(1) 一般的な用途

Inconel713CはNi基鋳造合金であり、航空機・ガスタービン向け部材だけでなく、自動車用ターボチャージャー部品やプレス鍛造金型、ダイカスト金型で使用される。

(2) 要求特性

耐熱用途としての利用が一般的であり、非常に高温までの高温強度や疲労特性、クリープ特性、耐酸化特性が要求される。

II. 熱処理

a 主な熱処理

超合金は大きく固溶強化型合金と析出強化型合金に大別される。固溶強化型合金とは文字通り、圧延や鍛造等の前工程で析出した炭化物や金属間化合物などを固溶化熱処理により母相へ固溶させて均一かつ単相の組織とすることで、耐食性を高めた合金である。固溶強化型Ni基超合金ではNi母相に対し、Cr、Mo、W、Co等が固溶強化元素として添加されることが多く、前述したInconel625を含むInconel600番台、Incoloy800[®]番台（IncoloyはHuntington alloys Corporationの登録商標）やHastelloy[®]（HastelloyはHaynes Internationalの登録商標）合金等が分類される。一方で、析出強化

型合金は固溶化熱処理後に時効熱処理を行い、炭化物や金属間化合物を均一に析出させて高強度化した合金を指す。Ni基合金では強化相として金属間化合物である γ' -Ni₃Al（ガンマプライム）相や γ'' -Ni₃Nb（ガンマダブルプライム）相を利用した合金が多く、Inconel718やUdimet520、Inconel713Cが該当する。また、Inconel713C等の铸造合金は γ' 相が多量に析出する成分となっており、溶解-铸造後の冷却中に γ' 相が析出するため、熱処理をせず铸造のままの状態で使用されることが多い。ただし、部材の大きさや铸造方法によって冷却が速く γ' 相が十分な量析出していなかったり、冷却が遅く γ' 相が粗大な状態となっていたりして、強度が低下してしまう場合は固溶化熱処理と時効熱処理を実施する必要がある。

以上より、超合金の熱処理は析出物の制御が重要であり、つまり状態図や時効硬化曲線等の平衡論、速度論的な理解が必要となる。

b 熱処理事例

ここではInconel718の用途に応じた熱処理の違いについて取り上げる。図1にInconel718のTTP（Time-Temperature-Precipitation）図（イメージ）を示す。TTP図とは縦軸に温度、横軸に時間を取り、温度・時間でどのような析出物が析出するかを示した図である。AMS（Aerospace Material Specification：航空宇宙用材料規格）に代表される耐熱用途では、980℃程度で固溶化熱処理が行われる。また、この合金は鍛造前に δ -Ni₃Nb（デルタ）相を析出させる熱処理を行い、 δ 相をピン止め粒子として利用

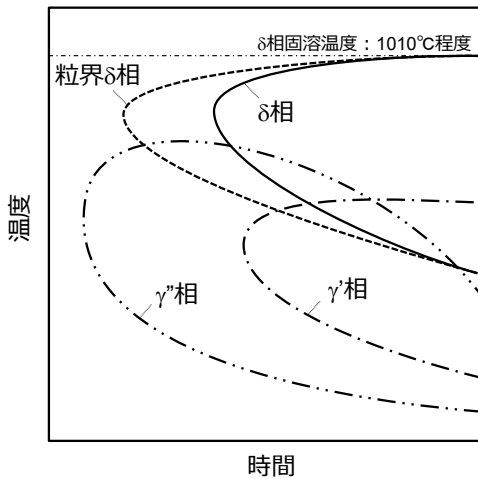
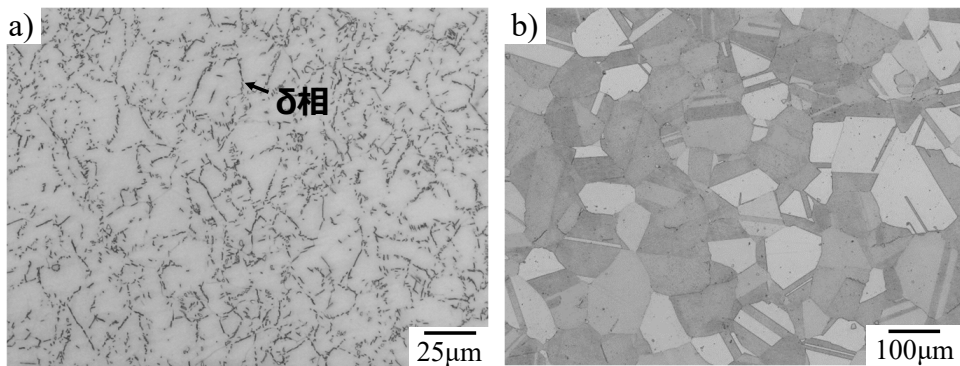


図 1 Inconel718のTTP図（イメージ）



(a) AMS規格相当

(b) API規格相当

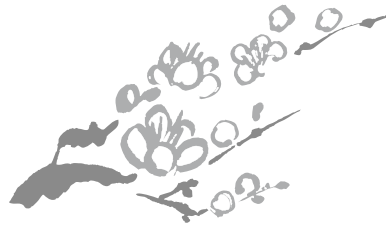
図 2 Inconel718の用途別熱処理後の組織

し微細結晶粒を得る δ プロセスと呼ばれる手法で製造されることがある。その場合、 δ 相析出温度域で熱処理されるため、固溶化熱処理後でも粒界に δ 相が残存した図2(a)のような組織となる。この粒界に残存した δ 相は結晶粒微細化だけでなく、クリープ特性向上にも寄与する。その後の時効熱処理は、まず720℃程度で保持後、そのまま620℃程度まで冷却して再度保持する二段階熱処理で行われ、粒内に γ' 相と γ'' 相が析出した組織となる。一方で、石油に関する規格を制定しているAPI (American Petroleum Institute: アメリカ石油協会) 規格に代表される耐食用途では、1040℃程度で固溶化熱処理が行われるため、 δ 相が完全に固溶した図2(b)のような組織となる。これは粒界に δ 相

があると、衝撃特性や耐食性の低下を招くため、耐食用途では完全に固溶させる必要がある。このように用途、要求特性に応じた組織の作りこみが重要である。

Ⅲ. 技術動向

最近の急激なカーボンニュートラルへのシフトにより、自動車の内燃機関からEV、FCVへの転換、火力発電から再生可能エネルギーへの転換などが急速に進んでいる。超合金の製造工程の中でも熱処理を短時間化あるいは省略することができれば、省エネ・脱炭素へ貢献できると考える。そのためには、短時間で強化相を析出させるような成分設計が必要であり、今後の材料開発に期待したい。



14. 電子材料

(株) プロテリアル金属 堀部孝広
 技術開発部 技術開発グループ
 (株) プロテリアル金属 やまもと しんじ
 技術開発部 技術開発グループ 山本晋司

電気抵抗材料

I. 特性

電気抵抗材料は一般に遷移金属と貴金属または遷移金属同士の合金から成り、用途からは精密抵抗材料、一般抵抗材料、電熱材料に大別されます。

ここでは、電気抵抗材料として使用される銅、ニッケル、鉄系の合金材料について述べます。

精密抵抗材料は標準抵抗器、電気計測器、分流器などの高精度抵抗器に用いられ、電気抵抗のばらつきの小さいこと、抵抗の温度係数が0に近いこと、対銅熱起電力の小さいこと、特性の経年変化の小さいことなどが要求されます。

一般抵抗材料の要求性能は精密抵抗材料とほぼ同等だが、それほど精度を要せず、経済性が重視されます。

電熱材料には電気抵抗が高く、高温での耐酸化性、耐食性、高温強度に優れ、高温での長時間使用に耐えること、冷熱サイクルに強いこと、加工性が良いことなどが要求されます。

a 物理的性質

電気抵抗材料は物理的性質のうち、特に電気的特性が重視されます。

表1に主な一般抵抗材料と電気的特性を示します。

一般抵抗材料のうち、銅マンガと銅ニッケル、ニッケルクロムの一部は精密抵抗材料に用いられ、鉄クロムとニッケルクロムの一部は電熱材料として用いられます。

b 機械的性質

加工歪は電気的性質に著しい影響を与えます。

一般に、電気抵抗材料は冷間加工により体積抵抗率は上昇、温度係数は低下し、強度は向上します。

加工歪の存在は安定度を悪くするので、通常は焼鈍を加えて使用されます。

表2に主な一般抵抗材料と機械的性質を示します。これらは焼鈍後の機械的性質です。

表 1 主な一般抵抗材料と電気的特性 (JIS C2532: 1999)

種類		記号	体積抵抗率 [$\mu\Omega \cdot m$]		特性 (参考値)		
名称	種別		基準値	許容差	平均温度係数 [$10^{-6}/K$] (23~100°C)	対銅熱起電力 [$\mu V/K$] (0~100°C)	最高使用 [°C]
鉄クロム	142種	GFC142	1.42	± 0.06	100	- 4	400
	123種	GFC123	1.23	± 0.06	150	- 3	400
ニッケルクロム	112種	GNC112	1.12	± 0.05	150	+ 1	500
	108種	GNC108	1.08	± 0.05	50	+ 5	500
銅マンガ	44種	GCM44	0.440	± 0.030	+ 50	± 2	150
銅ニッケル	49種	GCN49	0.490	± 0.030	± 80	- 41	400
	30種	GCN30	0.300	± 0.024	200	- 32	300
	15種	GCN15	0.150	± 0.015	500	- 25	250
	10種	GCN10	0.100	± 0.012	700	- 18	220
	5種	GCN5	0.050	± 0.0075	1,500	- 13	200

表 2 主な一般抵抗材料と機械的性質 (JIS C2532: 1999)

種類		記号	引張強さ [MPa]	伸び [%]
名称	種別			
鉄クロム	142種	GFC142	640~880	10以上
	123種	GFC123	590~830	
ニッケルクロム	112種	GNC112	640~880	20以上
	108種	GNC108	690~930	
銅マンガン	44種	GCM44	340~590	10以上
銅ニッケル	49種	GCN49	410~540	25以上
	30種	GCN30	270~540	20以上
	15種	GCN15	250~490	
	10種	GCN10	250~440	
	5種	GCN5	200~390	

II. 熱処理

電気抵抗材料の電気的性質を評価する際に、製品とは別に伸線、引抜きまたは裁断によって試験片を作成する場合には適当な熱処理を施して試験片のひずみを除去する必要があります。

ニッケルクロムは仕上げ焼きなましで急冷されると抵抗値が数%小さくなる特性があり、冷却条件にも留意する必要があります。

III. Q&A

a 平均温度係数とは何ですか

あらゆる物質は温度変化によって抵抗値が変化していきます。

その変化の割合を抵抗温度係数といいます。

平均温度係数はある温度aからbの間の変化の割合を指し、単位は $10^{-6}/K$ です。

b 導体抵抗と体積抵抗率の違いは

導体抵抗は均一な断面積をもつ電気導体の長さ方向における所定長さ当たりの電気抵抗値、体積抵抗率は単位体積あたりの電気抵抗値のことをいいます。

c 金属の電気抵抗が変化するのはなぜか

金属は内部に存在する自由電子により電荷が運ばれ、電流が流れます。

自由電子の移動が遅い（自由電子の移動が阻害される）と電気抵抗が高くなり、電流が流れにくくなります。

この自由電子の移動を阻害する要因は、格子振動（フォノン）と呼ばれる金属原子自体が振動し

ていることと格子欠陥が挙げられます。

そのため、一般的な金属は温度が上昇したり、加工によるひずみをうけることで自由電子の移動が阻害されて電気抵抗が上昇します。

銅マンガンや銅ニッケルの一部の合金は常温付近の抵抗変化が小さい性質を持っています。

低熱膨張材料

金属材料を加熱すると原子の熱振動によって殆どの場合膨張する。しかし、中にはある一定条件下ではあまり膨張しない材料があり、低熱膨張材料と呼ばれている。

Fe-Ni系合金は低い熱膨張係数を持つことが知られており、室温付近の熱膨張係数はNiが36mass%（以下、組成は全てmass%で表記）付近で極小を示す。この合金は強磁性体であり、低熱膨張特性を示すのはキュリー温度以下での話である。また、Fe-Ni系合金にCoを添加するとキュリー温度を高めることができるため、更に高い温度域まで低熱膨張特性を維持できるようになる。Fe-29%Ni-17%Co合金は、低温域（室温～約350℃）ではFe-36%NiやFe-41%Niより大きい熱膨張係数を示すが、400℃以上の高温域まで硬質ガラスと近い熱膨張特性を有している。近年では自動車の電動化等に伴いパワーデバイスが高温動作する傾向があり、長期信頼性を確保するために各デバイスの熱応力を緩和する目的でFe-Ni系合金を選択するケースが増えてきている。

表 3 主な低熱膨張材料と熱膨張係数

温度範囲	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	Fe-36%Ni	Fe-41%Ni	Fe-29%Ni-17%Co
30~150 $^{\circ}\text{C}$	1.2~2.7 ¹⁾	—	—
30~300 $^{\circ}\text{C}$	—	4.0~4.7 ²⁾	—
30~400 $^{\circ}\text{C}$	—	—	4.60~5.20 ³⁾
30~450 $^{\circ}\text{C}$	—	6.7~7.4 ²⁾	5.10~5.50 ³⁾

表 4 低熱膨張材料と機械的特性

仕上げ状態	引張強さ (MPa)		
	Fe-36%Ni	Fe-41%Ni	Fe-29%Ni-17%Co
熱処理	≤ 586 ¹⁾	—	≤ 570 ³⁾
1/2圧延	≥ 593 ¹⁾	—	590~700 ³⁾
硬質圧延	≥ 724 ¹⁾	—	≥ 700 ³⁾

I. 特性

a 物理的性質

低熱膨張特性を有する代表的な金属材料にFe-Ni系合金がある。表3に代表的な低熱膨張材料の熱膨張係数を示す。Fe-Ni系合金は、半導体Siと近い熱膨張係数となるため、半導体チップの周辺部材と組合せたりリードフレーム材料として利用されている。Fe-Ni-Co合金は、硬質ガラスやセラミックスの封止材料として用いられている。

b 機械的性質

構造材料ではないため、機械的特性を要求されるケースは少ないが、プレス機などで曲げ加工や打ち抜き加工をして使用されるため、用途に応じて機械的特性を調整して使用されている。表4に低熱膨張材料の機械的性質を示す。

II. 熱処理

Fe-Ni系合金やFe-Ni-Co系合金は熱処理が難しい材料ではないが、その後の加工性に影響するため、材料全体で均一な熱処理をすることや、熱処理によりテンパーカラーが付かないように等、熱処理をする上での一般的な注意事項を守る必要がある。

III. Q&A

a 熱膨張係数とは何ですか

温度の上昇によって金属材料の体積や長さが膨

張する割合。測定した温度範囲で膨張した量を温度あたりで示したものです。

b なぜ、Fe-Ni系合金は低熱膨張特性を持っているのですか

Fe-Ni合金はインバー合金 (invariableの略) とも呼ばれ、温度上昇に伴い格子振動に起因する熱膨張と、自発磁化による体積ひずみが小さくなることに起因する収縮が打ち消しあうために熱膨張係数が小さくなると理解されています。

c 低熱膨張材料は他にどのようなところに使用されていますか

代表的なものとしては、熱膨張係数の異なる金属材料を2枚以上貼り合わせたバイメタルという材料が安全装置に使われています。温度の上昇による膨張量の違いを活かして、材料が変形するようになっており、温度計や温度調節装置など様々なところに利用されています。

磁性材料

Fe-Ni系合金は、パーマロイと呼ばれる代表的な高透磁率材料である。Fe-Ni合金の初透磁率 μ_i は、Niが78%付近で著しい極大値を示す。78%Ni付近の組成をベースに合金元素を単独あるいは複合添加した材料はPCパーマロイと呼ばれている。磁歪と磁気異方性をゼロ近傍にしつつ、かつ規則格子の生成を抑制するように成分調整されており、高透磁率が得られるパーマロイとして現在でも実用

表 5 直流磁気特性 (JIS C 2531: 1999)

種類	磁気等級	初比透磁率 μ_i			保磁力 H_c (A/m)			磁束密度 B_H (T)	
		測定点 H (A/m)	厚さ (mm)			厚さ (mm)			磁界の強さ (A/m)
			0.05以上 1.0以下	0.4以上 1.5以下	1.5を超えるもの	0.05以上 1.0以下	0.4以上 1.5以下	1.5を超えるもの	800
PB	-04	0.8	-	4,000以上	3,000以上	-	12以下	12以下	1.40以上
	-06			6,000以上	5,000以上		10以下	10以下	
	-10			10,000以上	7,000以上		6以下	6以下	
PC	-10	0.4	-	10,000以上	-	-	4以下	-	0.5以上
	-30			30,000以上	15,000以上	-	4以下	4以下	0.65以上
	-60			60,000以上	30,000以上		2以下	4以下	
	-100			100,000以上	50,000以上		1以下	2以下	

されている。磁性材料が持つもう一つの特徴にキュリー温度がある。キュリー温度を利用した材料を感温磁性材料と呼び、キュリー温度は材料の組成を変化させることによってコントロールすることができる。代表的な感温磁性材料にはFe-Ni合金やFe-Ni-Cr合金などがある。

I. 特性

・物理的性質

表5にPCパーマロイ、PBパーマロイの直流磁気特性を示す。

PCパーマロイは、その高透磁率特性を活かし、微弱な電流を検出する高感度の電流センサや、微弱な磁気を遮蔽する磁気シールド材として使用されている。Fe-41~51%Ni合金はPBパーマロイと呼ばれ、高飽和磁束密度と高透磁率特性を利用して電動パワーステアリング用のトルクセンサ部材やウォッチ時計のステップモータ用ヨーク材等に使用されている。

II. 熱処理

パーマロイは、部品形状に加工した後に1000℃以上に保持した水素雰囲気炉中または真空炉中で、磁性焼鈍と呼ばれる熱処理を施して結晶粒を粗大化させた状態で使用されるのが一般的です。用途によって求められる磁気特性は異なりますが、基本的には高透磁率と高飽和磁束密度が求められます。

III. Q&A

a 透磁率とは何ですか

物質の磁化のし易さを表す指標のことで、透磁

率が高いほど磁化し易いことになります。高い透磁率の材料は磁気シールド効果に優れた材料になります。

b キュリー温度とは何ですか

磁性材料は温度上昇により磁気特性が低下していき、透磁率が空気とほぼ同じになる（磁性が消失する）温度をキュリー温度と言います。

c パーマロイを熱処理する際の注意点は何ですか

Niが約50~90%の組成範囲では、冷却の方法によって規則格子 Ni_3Fe が生成し磁気異方性が変化することが知られているため、磁性焼鈍を行う際には冷却方法に注意する必要があります。また、磁性焼鈍後にひずみや変形が加わると磁気特性が劣化しますので、最終の部品形状に加工後に磁性焼鈍を行う必要があります。

d パーマロイは磁性焼鈍せずに使用することはできますか

表5に示すパーマロイの磁気特性を得るためには、磁性焼鈍を行うことが必須となります。

e パーマロイの厚板材や棒材で、薄板材と同じ磁気特性を得ることはできますか

表5に示す通り、板厚が厚くなりますと透磁率は低下します。棒材も同様です。一般的に厚板材や棒材では、薄板材と比較して透磁率は下がり、保磁力は高くなる傾向があります。

参考文献

- 1) ASTM F1684-06 (2021)
- 2) ASTM F30-90 (1996)
- 3) ASTM F15-04 (2017)

15. 電磁鋼板

J F E ス テ ー ル (株) お だ よ し ひ こ
スチール研究所 電磁鋼板研究部部長 尾 田 善 彦

I. 特 性

a 代表的な化学成分

電磁鋼板は変圧器やモータの鉄心材料として使用されており、電気エネルギーを磁気エネルギーに変換するキーマテリアルである。電磁鋼板の歴史は古く、1900年に英国のHadfieldが鉄にSiを添加することにより鉄損が低下する現象を発見したことに端を発しており¹⁾、電磁鋼板は別名けい素鋼板とも呼ばれている。電磁鋼板には方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板があるが、ここでは無方向性電磁鋼板を取り上げ、成分、熱処理、技術動向について説明する。

(1) Si、Alの影響

鋼にSiを添加すると鋼の電気抵抗が高くなり、材料を磁化した際に発生する渦電流を低減できることから電磁鋼板にはSiが比較的多量に添加されている²⁾。例えば、電気自動車の駆動モータに使用されるような高級無方向性電磁鋼板では約3%程度のSiが添加されており、特殊な材料では6.5%のSiを添加したものもある。AlもSi同様鋼の電気抵抗を高める効果があるため、高級電磁鋼板ではSi以外にAlも添加されている。また、Si、Alは結晶磁気異方性を低減する元素であり³⁾、これら元素を添加すると磁化が容易になるというメリットも有している。

(2) S、N、Oの影響

鋼中のSはMnS等の硫化物を、NはAlN等の窒化物を、OはSiO₂、Al₂O₃等の酸化物を形成し、磁壁移動を妨げることから鉄損を増加させる原因となる。また、これら微細な硫化物や窒化物は結晶粒成長性を低下させるためヒステリシス損を増加させることも知られている。このため、無方向性電磁鋼板ではS、N、O等の不純物元素を極力低減する試みがなされている⁴⁾。

(3) Sn、Sbの影響

無方向性電磁鋼板は数10 μ m～数100 μ m程度のサ

イズの結晶が多数集まって形成されている。磁気特性は多数の結晶がどのように集積しているかにより大きく変化し、結晶がある特定の方位にそろった組織は集合組織と呼ばれている。Sn、Sbは粒界偏析型の元素であり、電磁鋼板の製造中に結晶粒界に偏析し、磁気特性に好ましい集合組織を発達させることが知られている⁵⁾。また、Sn、Sbは鋼板表面に偏析し、仕上げ焼鈍時の鋼板表層の窒化を抑制し、鉄損低減に寄与することも知られている⁶⁾。

b 一般的な用途の概要

前述したように電磁鋼板は無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板に大別される。無方向性電磁鋼板は磁気特性の異方性が小さいことから、主にモータや発電機の鉄心材料として用いられており、特に最近では電気自動車や風力発電機の普及にともない需要が急拡大している。一方、方向性電磁鋼板はその組織制御の難しさから鉄の芸術品とも呼ばれており、圧延方向に極めて優れた磁気特性を有していることから主に変圧器の鉄心材料として使用されている。

c 必要とされる特性

電磁鋼板に求められる特性は、鉄心を磁化した際の損失が小さいこと（低鉄損）、より少ないエネルギーで磁化できること（高磁束密度、高透磁率）が求められており、用途によってはさらに高強度や高疲労強度、優れた熱伝導率も求められる。これら特性を満たすため、板厚を比較的薄くすること（0.2～0.5mm程度）、鋼板表面に絶縁被膜を塗布すること、製造プロセス最適化により磁気特性に好ましい組織に制御することが行われている。

図1にEV駆動モータ用の無方向性電磁鋼板に求められる特性を示す。加速、登坂時にはモータの高トルクが必要となるため、高磁束密度、特に飽和領域の高い磁束密度が求められる。市街地走行時にはモータの高効率化が必要となり、電磁鋼板には低鉄損が求められる。高速走行時にはモータ

は高速で回転するため、電磁鋼板には高速回転に耐える高強度、高疲労強度および高周波域における低鉄損が求められる。

II. 熱処理

・主な熱処理

無方向性電磁鋼板は、製鋼段階で必要な成分に調整した後、熱間圧延を行い、必要に応じて熱延板焼鈍を行った後、冷間圧延、仕上焼鈍を行い、製品となる⁷⁾。

熱延板焼鈍は冷間圧延前の組織を適正化することにより、高磁束密度化、低鉄損化するために行われており、850~1050℃程度で数10秒~数分もしくは750~850℃程度で数時間の熱処理が行われている^{8)、9)}。

仕上焼鈍は結晶粒径の適正化による低鉄損化のために行われており、非酸化性雰囲気にて850~

1050℃程度で数10秒~数分の熱処理が行われている^{10)、11)}。

また、近年、高い素鋼板を製造するため、新たな熱処理技術も開発されている。鉄にSiを6.5%添加した場合、磁歪（材料を磁化した場合の伸び縮みであり騒音の原因となる）がほぼゼロとなり、透磁率および鉄損が最も優れた値を示すことが知られていたが、Si量が増加すると材料の伸びが急激に低下し、圧延により薄鋼板を製造することが困難となるため、従来の最高級電磁鋼板ではSi添加量は3%程度に制限されていた。これに対し、連続浸珪プロセスが開発されたことから、6.5%けい素鋼板が工業的に生産されるようになってきている。図2に6.5%けい素鋼板の製造プロセスを示す。Si量が3%程度の材料を冷間圧延により0.1~0.2mm程度の板厚とした後、四塩化珪素ガスを鋼板表面に吹き付けながら高温で焼鈍することにより、Siを鋼板表層に浸珪し、その後の焼鈍により鋼板内部に拡散させることにより、板厚方向にSiを均一化させた6.5%けい素鋼板が製造されている¹²⁾。

III. 技術動向

無方向性電磁鋼板の主な用途であるEVモータでは小型化の観点から高速化が指向されている。モータを高速化した場合、鉄損中の渦電流損が増加することから、渦電流損を低減するための試みがなされている。薄電流損を低減するためには、板厚低減、高Si化が効果的であり、板厚0.2mm程度の薄電磁鋼板も開発されている。

さらに、最近では前述したCVD連続浸珪法を活用して図3に示すように板厚方向にSiの濃度勾配

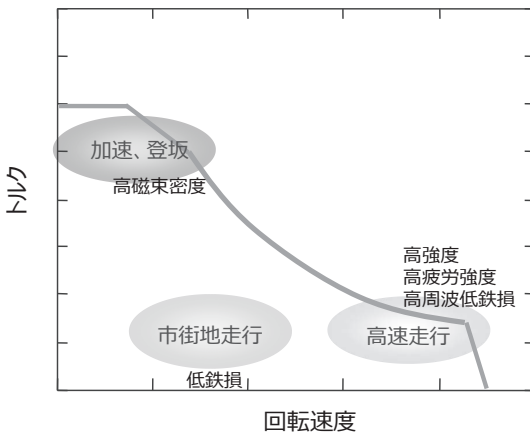


図 1 EVモータ用電磁鋼板に求められる特性

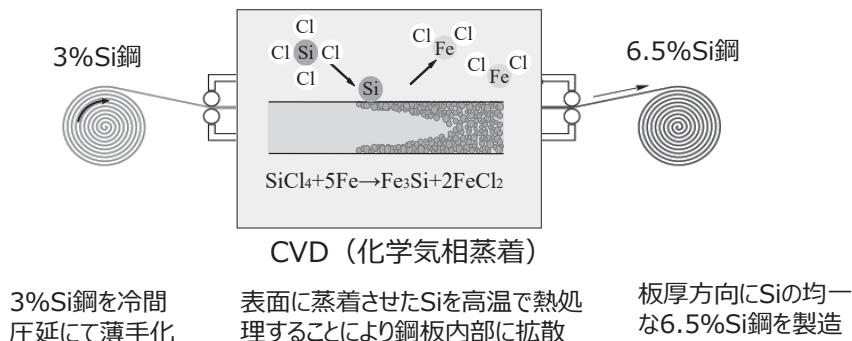


図 2 CVD連続浸珪法による高い素鋼板の製造方法

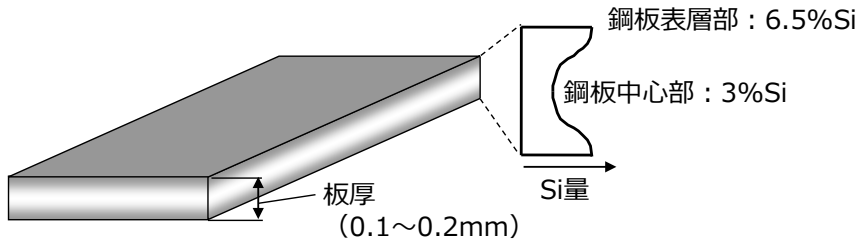


図 3 Si傾斜磁性材料の板厚方向のSi分布模式図

を付与したSi傾斜磁性材料も開発されている¹³⁾。本手法は連続浸珪法の後半部分の拡散熱処理を適正化することにより板厚方向のSiの濃度勾配を制御するというものである。Si傾斜磁性材料は10kHz以上の高周波域で6.5%けい素鋼板を凌ぐ鉄損特性を有しているだけでなく、板厚中心部のSi量が6.5%けい素鋼板に比べて低いいため、磁束密度が高く、打ち抜き等の加工性に優れる、省資源化につながるというメリットを有しており、太陽光発電のリアクトルや小型高速モータの鉄心材料として使用されている。

参考文献

- 1) W. F. Barrett, W. Brown and A. Hadfield: Sci. Trans. Roy. Dublin Soc, Vol. VII, PART IV, (1900) pp. 67-126
- 2) K. Matsumura and B. Fukuda: IEEE Trans. on Mag., Vol. Mag-20, No. 5, (1984) pp. 1533-1538
- 3) R. C. Hall: Journal of Applied Physics, Vol. 31, (1960) pp. 1037-1038
- 4) H. Shimanaka, Y. Ito, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura and Y. Shono: TMS-AIME, (1980) pp. 193-204
- 5) K. Fukuda and T. Nagai: J. Mat. Eng. and Performance, (1992) p. 1219
- 6) 尾田善彦、田中靖、山上伸夫、千野淳、山田克美：電気学会論文誌 A, Vol. 123, No. 1, (2003) pp. 83-88
- 7) 小原隆史：西山記念技術講座、第155回、156回、pp. 153-196
- 8) 田中隆、屋舗裕義：住友金属、Vol. 45, No. 5, (1993) pp. 29-32
- 9) H. Shimanaka, Y. Ito, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura and Y. Shono: TMS-AIME, (1980) pp. 193-204
- 10) I. Tanaka, H. Yashiki: ISIJ International, Vol. 47, No. 11, (2007) pp. 1666-1671
- 11) Y. Oda, Y. Tanaka, A. Chino and K. Yamada: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 254-255, (2003) pp. 361-363
- 12) 高田芳一、阿部正広、田中靖、岡田和久、平谷多津彦：まてりあ、vol. 33, (1994) pp. 423-425
- 13) 平谷多津彦、浪川操、二宮弘憲、尾田善彦、戸田広朗：電気学会論文誌A, Vol. 134, No. 11, (2014) pp. 610-619

業界のうごき

伊藤忠丸紅鉄鋼と大阪ミガキ メガサスの全株取得で事業継承

伊藤忠丸紅鉄鋼は大阪ミガキと共同で、ステンレス磨棒鋼メーカー・メガサスの発行済み全株式を取得した。株式取得後の社名はメガサスで変わらず、株主構成は伊藤忠丸紅鉄鋼が65%、大阪ミガキが35%。

伊藤忠丸紅鉄鋼グループおよびサンユウグループの大阪ミガキとの共同経営で同社事業を継承することで、多品種・小ロットを得意とするメガサスの特色をより一層強化し、ユーザーへのきめ細かなサービスを提供する。

メガサスは、1947年鍋倉金属商店として設立。60年にステンレス鋼線の細物伸線加工を開始し、71年に鍋倉金属、79年に鍋倉金属工業に社名変更、07年から現社名に変更している。(12月20日)

岡谷鋼機 新物流センター建設 タイムリーに供給する体制強化

岡谷鋼機は、名古屋市中川区内に「岡谷富船第2物流センター」を建設した。エレクトロニクス製品(半導体など)やメカトロ製品(工具など)を保管し管理効率を高めるとともに、顧客が必要とする商品をタイムリーに供給する体制を強化。太陽光パネルや蓄電池の設置で、省エネ・環境に配慮しCASBEE(建築環境総合性能評価システム)のAランク認証を取得。3月から本稼働を開始する。

新物流センターは、既設の岡谷富船物流センターの北側に隣接し、地上4階建てで延床面積は5,323平方メートル。太陽光発電パネル(400ワット×141枚)と蓄電池1基(毎時32キロワット)を設置し、自家消費費用に再生可能エネルギーの活用を図るなど、高い環境性能を備えた施設。一部、外部で保管していた自社のエレクトロニクス製品やメカトロ

製品の在庫を集約し、管理経費の圧縮を図るほか、取引先に対する賃貸倉庫としても運用する。(1月20日)

佐藤商事 厚木に車部品工場 ユーザー重視した販売体制強化

佐藤商事は、大和ハウス工業から事業用地を取得し、100%子会社で自動車部品を製造する富士自動車興業の厚木工場を建設する。

土地売買契約は2022年12月14日に締結した。取得した神奈川県厚木市の事業用地(面積5,766平方メートル)を富士自動車興業に賃貸する。富士自動車興業にとって第2の拠点となる厚木工場(建屋面積3,241平方メートル)を建設し、自動車部品を製造する。

厚木工場の建設は24年2月29日の竣工を予定。厚木工場の建設費用は事業用地取得費用と建屋建設費用を含めて、24億円を計画する。主力ユーザーを重視した販売体制を強化し、佐藤商事グループのさらなる事業拡大を図る。(12月15日)

サハシ特殊鋼 BMプラ業拡大 ペレットの生産増強を検討

サハシ特殊鋼は、昨夏にスタートしたバイオマスプラスチック事業を拡大する考え。量産化にめどを付けたバイオマスプラスチックペレットの製造能力を、今後客先評価を得た後、ライン増設などで引き上げを検討するもので、海洋プラスチックごみ問題などでプラスチック代替として利用促進が期待されている新素材の供給力を高め需要増に対応していく。

製造するバイオマスプラスチックペレットは、コーヒー、茶殻、木材破片などの植物由来原料(50%)とプラスチック(50%)を混合したバイオマスプラスチック製。植物由来原料が50%以上を占めるのは一般的に高い比率で、脱プラスチック社会への貢献度が高い。

同社は昨年7月から協力企業などと食品・植物残渣の回収からペレットの製造販売を開始。ペレットを購入したメーカーでは圧縮成型などが施され、トレイやヘルメット、パレットなどの商品となっている。(1月26日)

三悦 本社工場に超硬丸鋸機導入 速度アップや廃材料削減で効果

三悦は、本社工場にノリタケカンパニーリミテド製の超硬丸鋸切断機、シンカットマスター「NCS-5/100」を導入した。既存設備の老朽化に伴うリプレース。付加価値の高い小ロットの長尺加工において、安全性の向上およびリードタイムの短縮など、作業性の一段の高度化を図るもので、昨年11月から本格稼働を開始した。

新切断機は高い機械剛性と専用鋸刃で、従来機に対し大きく実切断速度をアップした高速切断や、歩留まりを大幅に向上し廃材料が削減できる環境性などが特長。従来機と同様に、高付加価値の小ロット長尺品の加工に充てており、特注仕様で長尺の鋼材を設置できる架台も取り付け、作業性を向上している。

同社では昨年1月にもシンカットマスターの「NCS-5/75」を導入し、切断機を13基に増加しながら新鋭機による高い生産性を実現している。

(1月19日)

三和特殊鋼 CNC旋盤を更新 形状測定機も導入、精度向上へ

三和特殊鋼は、既存設備の老朽化に伴うリプレースとして本社倉庫内にDMG森精機製のCNC旋盤「NLX3000/700」(12インチタイプ)を導入した。さらに形状測定機も導入する予定で、投資額は計約3,000万円。機械加工部門の製品精度向上を図ることで、ユーザーへの対応を強化する。

新たに導入したCNC旋盤は、ミリング(切削工具を高速で回転させて、

業界のうごき

回転軸に固定した鋼材などを削る)仕様で、多種多様なワークに対応。鋼材寸法は150-350ミリメートル径、長さ500ミリメートル。同倉庫内には13台の旋盤が設置されており、うち1台が耐用年数を超過したことで、新鋭機にリプレースした。主に熱間鍛造メーカー向けに活用する。

2024年度を最終年とする中期3カ年経営計画では、販売エリア拡大や新規顧客開拓の推進、新鋼種や新製品、新市場への積極参入、機械加工部門の拡充などを図り、工具鋼の販売量について月間300トン必達を目指している。(12月12日)

三菱商事 鋼材ミルシート電子化 スマホで鋼材管理サービスを提供

三菱商事は、ミルシート電子化プラットフォーム「Mill-Box (ミル・ボックス)」「Mill-Box (トレース・プラス)」のサービスを開始。

鉄鋼での鋼材品質証明(ミルシート)や鋼材現物がマニュアルで管理され、紙による情報のやり取りが鉄鋼サプライチェーン全体で非効率を招き、鋼材トレーサビリティ担保でも相応のコストが発生、鋼材流通にとって大きな負担となっている。

ミルシートをベースとしたトレーサビリティ情報の授受を電子上で行う「ミル・ボックス」と、鋼材現物の流通加工管理をスマートフォン上で行う「ミル・ボックス・トレース・プラス」をそろえる。スマホでQRコードを読み取り、データを取得する仕組み。システムを浸透させ、流通からサプライチェーン全般での効率性アップを促進する。一部試験的な提供では年間1,080時間の作業時間削減効果が創出できると評価されている。(12月16日)

三井物産金属関連事業の次期中計 還元鉄や電池材、リサイクル注力

三井物産の金属関連事業は、2023

年度からの次期中期計画でも安定供給と脱炭素の二刀流で対面業界に貢献する方針。鉄鋼原料、銅など非鉄資源、鋼材などの安定供給を継続し、原料炭も移行期に必須の原料として安定供給を続ける。

現中経ではモザンビークの原料炭・インフラ、豪州の一部原料炭、チリの一部銅鉱山の権益売却の一方、チリの銅鉱山の権益買い増し、豪州の鉄鉱山の拡張などを進め、金属資源を中心に資産を良質化した。非焼成ペレット技術を持つ英バインディング・ソリューションズへの出資など次世代技術の育成にも手を広げてきた。

次期中経でも鉄鋼原料、銅など非鉄資源や鉄鋼製品の安定供給を維持、強化し、次世代の収益源の資産を積み上げる。

鉄鋼製品ではインフラ、流通、モビリティ、エネルギーなど対応すべき分野で収益の基盤を固めてきた。今後は損益分岐点を下げる努力の一方で、新しい分野の開拓も継続する。商社機能をより磨く方針だ。(12月19日)

愛知製鋼 印バルドマンの鋼材供給 東南ア拠点向け1月から開始

愛知製鋼は、2019年から資本提携し、技術支援してきたインドの特殊鋼メーカー、バルドマン・スペシャル・スチール(本社=パンジャブ州ルディアナ市)から愛知製鋼ASEAN鍛造拠点(タイ、インドネシア)への鋼材供給を、23年1月から開始。供給量は足回りやエンジン、トランスミッション部品向けに、23年度中に年間約1万2,000トン进行計画。その後はさらに生産能力を拡大させ25年度で同約2万3,000トンを、将来的には同約3万トンを目指していく。

愛知製鋼は、ASEAN地域での競争力向上やインド市場進出、日本国内の激しい需要変動に対応する生産

の上方弾力性確保を目的に、バルドマンへの資本参加と現地現物での技術支援を継続的に実施し、昨年9月には第2期技術支援契約を締結。さらなる製品の品質向上や、従来比20%以上の生産性向上を目指すとともに、ASEAN鍛造拠点へのバルドマンからの鋼材供給開始を計画していた。

(12月23日)

神戸製鋼所の低CO₂材を適用へ 日産自動車、23年販売の車種に

神戸製鋼所と日産自動車は、神戸製鋼所が生産する低二酸化炭素(CO₂)高炉鋼材とグリーンアルミ原料を用いたアルミ板材を2023年に発売する車種に順次適用する。50年のカーボンニュートラル実現に向けて、供給網に関わるスコープ3のCO₂削減に力を注ぐ。

日産自動車は、セレナe-powerに神戸製鋼所の低CO₂鋼材Kobenable Steel(コベナブル・スチール)を量産車では初めて採用。コベナブル・スチールは「マスバランス方式」を採用。加古川製鉄所、神戸線条工場で生産する全ての薄板、厚板、線材・条鋼製品で低炭素鋼材を供給することができる。

低炭素アルミ板材はフードやドアなど外板パネルで採用される。真岡製造所で溶解・ casting、圧延を担う。将来的には押出材やアルミ鍛造サスペンションへの適用も検討していく。低炭素地金による板製造により、CO₂排出量を従来の50%程度に削減する。

(12月20日)

山陽特殊製鋼 エコリーフ取得 国内特殊鋼専門メーカーで初

山陽特殊製鋼は、自社で製造・販売する特殊鋼製品(ステンレス鋼除く)について、第三者機関によって検証された環境情報を定量的に開示する環境ラベル「エコリーフ」の認

業界のうごき

証を取得した。国内特殊鋼専門メーカーによる認証取得は初めて。

エコリーフは、LCA手法を用いて製品の資源採取から製造、物流、使用、廃棄・リサイクルにわたる全ライフサイクルを踏まえた定量的な環境情報を開示する環境ラベル。第三者検証によって信頼性・透明性が確保されたデータを開示することで、ユーザーが使用する製品に関する定量的な環境負荷を評価し、環境に配慮した製品を選択する上での判断材料とすることが可能となる。

認証取得により自社製品に関する客観的で透明性の高い環境情報をユーザーに提示することが可能となることで、環境に配慮した高品質な特殊鋼製品の提供を通じて、持続可能な社会の実現に貢献していく。(1月23日)

JFEスチール、第6高炉再稼働 千葉地区 精度向上など技術投入

JFEスチールは、2022年9月から改修工事のため休止していた東日本製鉄所・千葉地区の第6高炉(炉容積5,153立方メートル)の火入れを1月13日に行い、再稼働させた。1998年の改修から20年以上が経過していたため、自動車向け超ハイテン鋼板の生産など機能強化などを狙いに改修を行っていたもので、改修後の第6高炉は炉容積が変わらないものの、炉内への原料装入位置の制御精度の向上、データサイエンス技術を活用した炉熱制御精度の改善、炉前機器の更新による作業性の向上など、さまざまな技術を投入した最新設備となった。投資額は約430億円。

東日本製鉄所・千葉地区は高炉1基体制で、年間粗鋼生産量は364万8,000トン(2021年度実績)。薄板類を中心に鉄粉、ステンレスなどを製造している。昨年4月から改修に向けて半製品や母材原板を備蓄し、千葉地区分についてはこれまで主に備蓄品

や在庫品で対応していた。(1月17日)

大同特殊鋼 知多に旋回式電炉 建屋含め導入検討、CO₂削減へ

大同特殊鋼は、知多工場(愛知県東海市)のステンレス鋼・工具鋼や軸受鋼を生産する第2CCラインに、2030年までに大型旋回式電炉2基を導入することを検討している。CO₂排出量削減を図ることなどを目的とした取り組みで、新建屋などの建設も含めた投資額は数百億円規模の見込み。CO₂フリー電源の購入割合を、27年までに70%に高める計画。

大型旋回式電炉導入は目標とする30年にCO₂排出量を13年対比で50%削減するための、革新的製鋼プロセス導入の一環。第2CCラインに3基ある80トン電炉を、ステンレス鋼と工具鋼、軸受鋼とで使い分け効率的な生産を図るため、150トンもしくは100トンの大型旋回式電炉2基に集約、不均一溶解の解消で溶解時間を短縮することなどにより、CO₂排出量の削減につなげる方向で検討する。新電炉は2CCに近い場所に移設。搬送距離、時間の短い省エネルギーを追求したレイアウトとする。(12月21日)

日鉄ステンレスのステンレス鋼 巖島神社大鳥居修理工事に採用

世界遺産の巖島神社(広島県廿日市市)大鳥居保存修理工事に日鉄ステンレスのスーパーステンレス鋼NSSC270厚板と二相ステンレス鋼SUS329J4L棒鋼が採用された。

巖島神社のシンボルの一つである大鳥居は東西にクスノキの自然木の支柱を、前後に杉の袖柱2本ずつの計4本で構成された木造両部鳥居。現在の鳥居は1875年に建立され、平清盛が建てた初代鳥居から9代目にあたる。1950-51年に修理工事が行われていたが、長年雨風にさらされ、

腐食が進行し、アリなどの虫害による破損や劣化が進んでいた。

今回の保存修理工事は、クスノキ製支柱の継ぎ手や傷んでいた部分を、耐食性と強度ともに優れるスーパーステンレス鋼厚板のバンドで補強し、そのバンドを二相鋼製ボルトで固定。これにより大鳥居の耐震性向上と大幅な寿命延伸を実現する。保存修理工事は2019年6月に始まり、22年12月に終えている。(1月24日)

日本製鉄、昭電などと開発を開始 排ガス中CO₂、効率的に分離回収

日本製鉄は昭和電工や大分大学などと共同で、新規分離剤の開発により低圧かつ二酸化炭素(CO₂)が低濃度(大気圧で10%以下)な排出ガスから、効率的にCO₂を分離・回収する技術の開発を始めた。トン2,000円台という画期的な低コストを目標に定め、2030年代後半の社会実装を図る。昭和電工は回収したCO₂を化学品の原料として再利用し販売するビジネスモデルの構築も目指す。

新エネルギー・産業技術総合開発機構のグリーンイノベーション基金によるもの。期間は22-30年度までの9年間で、事業総額約84億円を予定。大学は大分大のほか大阪大学、京都大学、千葉大学、名古屋大学、北海道大学が参加する。

分離回収には既存分離剤・ゼオライトなどに代え、新たに構造柔軟型PCP(多孔性配位高分子)を活用する。材料の構造が柔軟に変化してCO₂分子を取り込み、複合体を形成。CO₂の高い選択性が期待できる。同社は前処理から分離・回収、分離剤改良まで一貫して担う。分離剤の量産技術は昭和電工が担当。パイロットプラントでの検証は20年代後半を見込む。(12月23日)

文責：(株)産業新聞社

特殊鋼統計資料

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

鋼種別

(単位：t)

年月	構造用鋼				特殊用途鋼						計	合計
	工具鋼	機械構造用炭素鋼	合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'21 暦年	221,395	4,709,058	3,726,591	8,435,649	374,891	987,441	2,578,832	580,434	4,875,054	493,548	9,890,200	18,547,244
'22 暦年	206,094	4,161,155	3,482,662	7,643,817	318,691	838,284	2,439,490	475,955	4,516,055	447,854	9,036,329	16,886,240
'20 年度	161,061	3,578,698	2,956,593	6,535,291	309,316	702,538	2,114,557	428,594	4,153,666	397,469	8,106,140	14,802,492
'21 年度	227,889	4,669,266	3,691,309	8,360,575	359,466	975,524	2,584,063	571,328	4,747,315	487,191	9,724,887	18,313,351
'22. 1-3月	58,692	1,133,091	910,122	2,043,213	82,074	220,665	621,363	131,479	1,134,062	122,232	2,311,875	4,413,780
4-6月	54,666	1,003,201	855,459	1,858,660	78,750	218,728	596,110	118,904	1,134,452	114,063	2,261,007	4,174,333
7-9月	46,999	996,288	849,948	1,846,236	76,617	200,068	638,774	115,906	1,146,735	101,301	2,279,401	4,172,636
10-12月	45,737	1,028,575	867,133	1,895,708	81,250	198,823	583,243	109,666	1,100,806	110,258	2,184,046	4,125,491
'21年 11月	19,551	388,574	298,018	686,592	28,799	85,188	222,985	51,302	390,490	32,633	811,397	1,517,540
12月	19,214	361,956	283,965	645,921	27,567	75,973	234,781	43,857	367,511	41,411	791,100	1,456,235
'22年 1月	18,209	378,351	298,237	676,588	25,175	76,825	204,627	40,835	403,226	40,020	790,708	1,485,505
2月	22,658	362,211	300,079	662,290	28,144	71,123	205,466	42,810	348,389	34,340	730,272	1,415,220
3月	17,825	392,529	311,806	704,335	28,755	72,717	211,270	47,834	382,447	47,872	790,895	1,513,055
4月	18,786	339,219	291,299	630,518	27,161	71,108	200,101	40,680	384,959	37,949	761,958	1,411,262
5月	17,608	333,873	300,345	634,218	24,043	71,240	196,022	41,215	394,593	38,242	765,355	1,417,181
6月	18,272	330,109	263,815	593,924	27,546	76,380	199,987	37,009	354,900	37,872	733,694	1,345,890
7月	16,090	320,424	296,553	616,977	25,760	73,427	209,409	40,154	363,507	32,149	744,406	1,377,473
8月	15,308	329,391	274,061	603,452	22,611	62,534	222,303	36,578	401,647	35,116	780,789	1,399,549
9月	15,601	346,473	279,334	625,807	28,246	64,107	207,062	39,174	381,581	34,036	754,206	1,395,614
10月	16,490	357,381	301,222	658,603	28,608	68,094	190,015	38,150	372,924	41,187	738,978	1,414,071
11月	15,324	345,164	300,086	645,250	26,549	68,296	197,861	34,586	384,759	35,699	747,750	1,408,324
12月	13,923	326,030	265,825	591,855	26,093	62,433	195,367	36,930	343,123	33,372	697,318	1,303,096
前月比	90.9	94.5	88.6	91.7	98.3	91.4	98.7	106.8	89.2	93.5	93.3	92.5
前年同月比	72.5	90.1	93.6	91.6	94.7	82.2	83.2	84.2	93.4	80.6	88.1	89.5

出所：経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

形状別

(単位：t)

年月	形鋼	棒鋼	管材	線材	鋼板	鋼帯	合計
'21 暦年	278,898	6,065,226	856,955	3,846,183	1,081,675	6,422,384	18,551,321
'22 暦年	293,422	5,402,883	1,019,267	3,386,987	1,083,496	5,701,276	16,887,331
'20 年度	237,286	4,512,899	780,205	3,099,528	935,791	5,241,093	14,806,802
'21 年度	286,265	6,051,725	877,842	3,749,037	1,115,176	6,239,200	18,319,245
'22. 1-3月	70,771	1,461,908	244,217	897,420	267,034	1,473,559	4,414,909
4-6月	71,956	1,339,400	254,912	814,997	272,696	1,420,368	4,174,329
7-9月	84,129	1,313,407	263,763	798,334	277,872	1,435,102	4,172,607
10-12月	66,566	1,288,168	256,375	876,236	265,894	1,372,247	4,125,486
'21年 11月	29,975	524,016	55,264	291,930	101,076	515,593	1,517,854
12月	21,349	464,149	70,251	307,874	93,864	499,461	1,456,948
'22年 1月	21,233	472,269	85,072	299,898	85,549	521,885	1,485,906
2月	21,597	484,203	87,412	275,110	83,726	463,906	1,415,954
3月	27,941	505,436	71,733	322,412	97,759	487,768	1,513,049
4月	22,479	440,709	93,362	281,028	98,222	475,462	1,411,262
5月	24,502	455,424	84,364	263,527	90,490	498,868	1,417,175
6月	24,975	443,267	77,186	270,442	83,984	446,038	1,345,892
7月	41,729	447,779	92,640	258,723	82,034	454,554	1,377,459
8月	16,861	408,817	98,612	267,493	97,178	510,582	1,399,543
9月	25,539	456,811	72,511	272,118	98,660	469,966	1,395,605
10月	21,063	455,338	90,559	301,824	90,234	455,050	1,414,068
11月	25,686	429,672	82,444	299,399	87,905	483,218	1,408,324
12月	19,817	403,158	83,372	275,013	87,755	433,979	1,303,094
前月比	77.2	93.8	101.1	91.9	99.8	89.8	92.5
前年同月比	92.8	86.9	118.7	89.3	93.5	86.9	89.4

出所：『経済産業省生産動態統計』から作成。

特殊鋼鋼材の鋼種別販売(商社+問屋)の推移 (同業者+消費者向け)

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'21 曆年	245,486	2,716,911	1,455,748	4,172,659	49,883	399,243	1,459,480	124,703	61,853	95,991	2,191,153	6,609,298
'22 曆年	240,621	2,647,463	1,418,096	4,065,559	60,774	373,650	1,457,325	114,890	71,058	91,912	2,169,609	6,475,789
'20 年度	211,779	2,240,670	1,213,083	3,453,753	55,083	328,523	1,232,187	108,689	56,572	82,995	1,864,049	5,529,581
'21 年度	247,110	2,752,134	1,092,322	3,137,987	36,133	300,281	1,125,634	93,152	45,860	73,500	1,674,560	4,996,127
'22年 4月	22,967	223,859	118,078	341,937	4,141	29,596	127,524	9,440	6,542	7,718	184,961	549,865
5月	17,548	205,591	109,979	315,570	3,411	29,187	118,960	8,488	6,207	6,603	172,856	505,974
6月	19,943	218,744	121,484	340,228	3,882	31,703	133,659	9,712	7,250	7,177	193,383	553,554
7月	20,128	231,998	122,059	354,057	4,248	31,614	126,212	9,248	6,547	7,464	185,333	559,518
8月	18,215	201,777	111,210	312,987	3,185	26,829	101,871	8,189	4,925	7,616	152,615	483,817
9月	21,172	228,226	123,791	352,017	3,721	30,942	113,074	9,209	5,754	9,168	171,868	545,057
10月	20,185	217,124	117,525	334,649	8,701	34,403	117,978	9,690	5,333	8,395	184,500	539,334
11月	19,319	209,822	115,273	325,095	8,713	32,445	119,009	9,984	5,384	7,461	182,996	527,410
12月	17,614	203,853	111,764	315,617	8,400	30,511	112,074	7,960	5,274	6,631	170,850	504,081
前月比	91.2	97.2	97.0	97.1	96.4	94.0	94.2	79.7	98.0	88.9	93.4	95.6
前年同月比	90.6	88.5	93.0	90.0	202.6	89.9	83.5	77.9	96.4	85.2	87.3	89.1

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の推移

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'21 曆年	8,055	246,632	158,245	404,877	24,939	38,834	144,605	29,563	168,305	22,668	428,914	841,846
'22 曆年	10,897	221,700	136,904	358,604	21,346	37,569	156,975	22,390	137,751	16,870	392,901	762,402
'20 年度	6,109	225,231	149,743	374,974	25,103	34,654	118,733	24,034	145,894	22,503	370,921	752,004
'21 年度	7,544	239,228	149,869	389,097	21,922	36,386	140,730	29,025	139,691	23,830	391,584	788,225
'22年 4月	8,012	247,938	157,940	405,878	25,592	34,058	143,141	30,246	158,409	23,196	414,642	828,532
5月	7,787	238,089	148,881	386,970	21,424	36,986	136,008	29,769	166,985	23,302	414,474	809,231
6月	9,965	235,519	143,029	378,548	25,580	38,079	135,043	27,688	161,691	20,630	408,711	797,224
7月	9,211	224,039	138,083	362,122	23,037	38,143	143,161	23,582	155,867	19,530	403,320	774,653
8月	10,099	233,714	151,418	385,132	23,725	36,519	156,782	27,165	199,220	26,602	470,013	865,244
9月	10,567	227,351	143,353	370,704	22,840	36,087	158,521	23,893	158,711	25,119	425,171	806,442
10月	10,644	227,059	140,180	367,239	22,444	37,856	151,554	23,042	136,776	23,914	395,586	773,469
11月	10,472	225,398	143,009	368,407	24,487	37,084	150,496	21,897	140,504	19,005	393,473	772,352
12月	10,897	221,700	136,904	358,604	21,346	37,569	156,975	22,390	137,751	16,870	392,901	762,402
前月比	104.1	98.4	95.7	97.3	87.2	101.3	104.3	102.3	98.0	88.8	99.9	98.7
前年同月比	135.3	89.9	86.5	88.6	85.6	96.7	108.6	75.7	81.8	74.4	91.6	90.6

出所: 経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'21 曆年	78,090	352,845	202,875	555,720	11,864	65,865	261,863	14,113	18,074	7,971	379,750	1,013,560
'22 曆年	81,587	253,146	197,352	450,498	11,832	52,605	258,437	12,975	14,050	8,869	358,768	890,853
'20 年度	64,494	277,040	177,841	454,881	11,736	53,793	217,355	14,206	16,535	5,470	319,095	838,470
'21 年度	77,786	312,576	208,973	521,549	13,253	62,840	253,404	15,438	16,809	10,270	372,014	971,349
'22年 4月	78,462	289,591	201,973	491,564	12,950	60,493	244,062	15,088	16,402	11,034	360,029	930,055
5月	81,124	276,043	206,542	482,585	12,991	59,252	246,276	15,808	15,326	11,238	360,891	924,600
6月	79,817	265,365	202,893	468,258	12,736	57,865	242,550	14,588	15,204	10,985	353,928	902,003
7月	79,045	247,674	200,718	448,392	12,604	57,098	243,366	12,730	14,304	10,928	351,030	878,467
8月	80,639	251,111	201,328	452,439	12,412	56,466	247,760	12,021	14,508	10,256	353,423	886,501
9月	78,376	248,813	195,425	444,238	12,322	52,575	247,329	11,034	14,674	9,900	347,834	870,448
10月	81,517	253,927	197,247	451,174	12,256	52,776	251,765	12,057	14,023	9,854	352,731	885,422
11月	80,549	248,667	198,668	447,335	12,831	52,074	251,946	11,374	14,344	8,965	351,534	879,418
12月	81,587	253,146	197,352	450,498	11,832	52,605	258,437	12,975	14,050	8,869	358,768	890,853
前月比	101.3	101.8	99.3	100.7	92.2	101.0	102.6	114.1	98.0	98.9	102.1	101.3
前年同月比	104.5	71.7	97.3	81.1	99.7	79.9	98.7	91.9	77.7	111.3	94.5	87.9

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

特殊鋼鋼材の輸出入推移

輸出

(単位：t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼					その他の鋼			特殊鋼鋼材合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	ステンレス鋼	快削鋼	ピアノ線材	計	高炭素鋼	合金鋼	計	
'21 暦年	41,270	437,028	558,747	995,775	198,944	846,790	122,324	73,541	1,241,600	2,866	5,394,930	5,397,827	7,676,441
'22 暦年	39,183	381,705	495,244	876,949	166,355	786,178	97,860	71,081	1,121,474	3,180	4,900,636	4,903,816	6,941,422
'20 年度	30,661	286,158	400,957	687,115	139,795	757,155	88,335	64,008	1,049,293	2,961	4,065,480	4,068,440	5,835,508
'21 年度	42,446	428,197	548,765	976,962	197,417	846,850	121,221	64,398	1,229,885	3,006	5,313,266	5,316,272	7,565,565
'22年 3月	3,881	35,609	44,593	80,202	17,194	80,077	11,874	4,427	113,571	311	482,185	482,496	680,150
4月	3,537	29,493	43,825	73,319	14,241	63,212	9,455	5,418	92,326	226	387,026	387,253	556,434
5月	2,663	29,932	36,235	66,167	10,733	67,245	9,011	8,650	95,639	228	504,954	505,181	669,651
6月	4,433	38,104	46,606	84,710	16,297	77,790	10,335	7,368	111,790	475	448,505	448,980	649,913
7月	3,489	32,206	40,279	72,485	14,017	64,387	11,931	3,143	93,479	203	408,382	408,585	578,038
8月	3,385	27,597	33,042	60,639	12,231	59,601	4,918	4,633	81,383	183	380,267	380,450	525,856
9月	2,646	29,962	34,361	64,322	13,818	61,311	8,725	4,471	88,325	166	402,565	402,731	558,024
10月	3,266	26,411	43,620	70,031	14,265	68,475	6,331	5,522	94,594	244	384,935	385,179	553,070
11月	3,244	39,194	46,008	85,203	10,636	55,160	4,360	9,811	79,966	410	369,508	369,918	538,331
12月	2,472	33,450	43,639	77,089	17,578	61,462	5,095	8,211	92,346	271	412,499	412,770	584,677
前月比	76.2	85.3	94.8	90.5	165.3	111.4	116.9	83.7	115.5	66.0	111.6	111.6	108.6
前年同月比	71.7	93.9	91.3	92.4	94.6	88.6	40.4	138.3	86.7	139.9	88.4	88.4	88.5

出所：財務省関税局『貿易統計』から作成。

輸入

(単位：t)

年月	工具鋼	ばね鋼	ステンレス鋼					快削鋼	その他の鋼			特殊鋼鋼材合計	
			形鋼	棒鋼	線材	鋼板類	鋼管		計	高炭素鋼	合金鋼		計
'21 暦年	3,425	7,333	282	12,395	11,674	237,726	18,602	280,679	310	7,765	274,257	282,022	573,769
'22 暦年	4,066	16,285	236	12,418	11,486	264,312	20,503	308,955	171	7,158	178,218	185,376	514,853
'20 年度	3,570	8,042	435	11,445	8,396	188,470	15,730	224,477	250	6,395	358,609	365,004	601,343
'21 年度	3,909	9,290	270	12,657	12,725	249,314	19,380	294,346	270	7,528	237,040	244,568	552,383
'22年 3月	523	1,341	22	954	690	21,249	1,870	24,786	・	587	18,528	19,115	45,782
4月	278	1,166	16	1,224	1,553	21,529	1,800	26,122	-	276	17,884	18,160	45,726
5月	557	1,023	27	1,126	1,040	22,944	1,608	26,744	・	349	14,659	15,008	43,351
6月	346	1,438	17	913	750	28,947	1,877	32,504	21	1,006	11,867	12,873	47,181
7月	324	2,109	21	1,326	1,293	28,501	1,975	33,115	26	743	13,910	14,653	50,227
8月	304	393	8	1,005	729	21,910	1,827	25,479	28	1,043	14,712	15,755	41,959
9月	303	2,256	19	737	611	18,289	1,505	21,160	22	168	12,849	13,017	36,759
10月	279	841	13	1,183	850	14,550	1,881	18,477	3	490	12,386	12,876	32,477
11月	254	2,118	39	986	802	19,805	1,647	23,278	・	176	17,530	17,706	43,355
p 12月	249	1,421	13	944	697	15,737	1,478	18,869	-	866	14,835	15,701	36,240
前月比	97.9	67.1	32.4	95.8	86.9	79.5	89.7	81.1	-	493.1	84.6	88.7	83.6
前年同月比	152.3	221.8	50.0	96.4	74.4	73.9	107.9	76.6	-	677.3	74.0	77.8	79.4

出所：財務省関税局『貿易統計』から作成。

(注) p:速報値

関連産業指標推移

(単位：台)

(単位：億円)

年月	四輪自動車生産		四輪完成車輸出		新車登録・軽自動車販売		建設機械生産		産業車輛生産		機械受注額	産業機械受注額	工作機械受注額
	うちトラック	うちトラック	うちトラック	うちトラック	うちトラック	フルドーザ	パワーショベル	フォークリフト	ショベルトラック				
'21 暦年	7,846,958	1,154,054	3,818,910	379,007	4,448,340	765,762	-	222,252	119,477	11,205	102,086	55,176	15,414
'22 暦年	-	-	3,813,269	406,156	4,201,320	747,543	-	232,300	126,560	11,795	107,418	52,146	17,596
'20 年度	7,969,529	1,064,697	3,670,709	275,189	4,656,632	790,406	-	184,423	105,357	8,726	94,870	50,322	9,885
'21 年度	7,545,201	1,130,201	3,684,025	384,446	4,215,826	742,108	-	228,923	122,697	11,671	103,732	49,494	16,675
'22年 3月	719,354	107,429	321,457	37,874	512,862	85,473	-	22,508	11,657	962	8,695	7,142	1,663
4月	584,420	95,683	314,263	36,231	299,620	54,987	-	17,076	10,831	866	9,630	3,782	1,550
5月	420,233	56,416	206,566	27,928	261,433	49,341	-	13,800	8,348	711	9,088	4,290	1,533
6月	668,628	102,623	308,462	34,457	327,896	59,575	-	19,999	11,295	1,010	9,170	4,947	1,547
7月	699,708	107,455	356,957	38,341	349,335	60,894	-	19,394	10,660	976	9,660	3,768	1,424
8月	584,291	90,642	293,765	32,976	290,042	55,432	-	16,553	8,998	833	9,098	4,928	1,393
9月	757,799	115,750	369,095	36,358	395,163	69,750	-	20,480	11,637	1,243	8,680	4,476	1,508
10月	694,160	107,244	331,958	37,226	359,159	62,914	-	21,877	11,338	1,159	9,147	3,290	1,411
11月	767,244	113,308	371,870	32,284	377,079	68,593	-	22,342	11,710	1,216	8,388	4,158	1,342
12月	-	-	356,975	30,893	344,364	59,443	-	20,822	10,514	1,114	8,519	5,081	1,405
前月比	-	-	96.0	95.7	91.3	86.7	-	93.2	89.8	91.6	101.6	122.2	104.7
前年同月比	-	-	145.0	105.5	123.3	122.9	-	103.7	98.2	99.9	98.1	134.5	94.2

出所：四輪自動車生産、四輪完成車輸出は(一社)日本自動車工業会『自動車統計月報』、
 新車登録は(一社)日本自動車販売協会連合会『新車・月別販売台数(登録車)』、
 軽自動車販売は(一社)全国軽自動車協会連合会『軽四輪車新車販売確報』、
 建設機械生産、産業車輛生産は『経済産業省生産動態統計』、
 機械受注額は内閣府『機械受注統計調査』、産業機械受注額は(一社)日本産業機械工業会『産業機械受注状況』、
 工作機械受注額は(一社)日本工作機械工業会『受注実績調査』

(注) r:訂正値

特殊鋼需給統計総括表

2022年12月分

鋼種別	項目	月別					
		実数 (t)	前月比 (%)	前年同月比 (%)	2015年基準指数 (%)		
工 具 鋼	熱間圧延鋼材生産	13,923	90.9	72.5	67.5		
	鋼材輸入実績	249	97.9	56.9	80.8		
	販売業者	受入計	18,652	101.6	84.4	69.1	
		販売計	17,614	91.2	90.6	67.1	
		うち消費者向	14,604	92.0	91.2	77.2	
		在庫計	81,587	101.3	104.5	138.1	
	鋼材輸出船積実績	2,472	76.2	70.9	51.9		
	生産者工場在庫	10,897	104.1	135.3	131.4		
	総在庫	92,484	101.6	107.4	137.3		
	構 造 用 鋼	熱間圧延鋼材生産	591,855	91.7	91.6	86.5	
販売業者		受入計	318,780	99.2	90.6	48.8	
		販売計	315,617	97.1	90.0	48.3	
		うち消費者向	252,990	97.7	90.9	57.6	
		在庫計	450,498	100.7	81.1	128.0	
鋼材輸出船積実績		77,089	90.5	95.6	93.8		
生産者工場在庫		358,604	97.3	88.6	102.5		
総在庫		809,102	99.2	84.2	115.3		
ば ね 鋼		熱間圧延鋼材生産	26,093	98.3	94.7	72.6	
		鋼材輸入実績	1,421	67.1	132.9	348.6	
	販売業者	受入計	7,401	79.7	188.0	34.9	
		販売計	8,400	96.4	202.6	40.0	
		うち消費者向	3,106	119.0	106.4	66.8	
		在庫計	11,832	92.2	99.7	96.9	
	鋼材輸出船積実績	17,578	165.3	123.2	111.8		
	生産者工場在庫	21,346	87.2	85.6	82.7		
	総在庫	33,178	88.9	90.2	87.2		
	ス テ ン レ ス 鋼	熱間圧延鋼材生産	195,367	98.7	83.2	85.1	
鋼材輸入実績		18,869	81.1	64.8	130.4		
販売業者		受入計	118,565	99.5	87.1	47.3	
		販売計	112,074	94.2	83.5	44.6	
		うち消費者向	54,676	96.0	79.9	97.8	
		在庫計	258,437	102.6	98.7	189.1	
鋼材輸出船積実績		61,462	111.4	80.8	70.1		
生産者工場在庫		156,975	104.3	108.6	136.2		
総在庫		415,412	103.2	102.2	164.9		
快 削 鋼		熱間圧延鋼材生産	36,930	106.8	84.2	72.0	
	販売業者	受入計	9,561	102.8	98.3	67.6	
		販売計	7,960	79.7	77.9	55.3	
		うち消費者向	7,720	79.9	79.0	55.4	
		在庫計	12,975	114.1	91.9	95.9	
	鋼材輸出船積実績	5,095	116.9	41.5	53.2		
	生産者工場在庫	22,390	102.3	75.7	80.7		
	総在庫	35,365	106.3	81.0	85.6		
	高 抗 張 力 鋼	熱間圧延鋼材生産	343,123	89.2	93.4	83.1	
		販売業者	受入計	4,980	87.3	95.8	48.4
販売計			5,274	98.0	96.4	51.8	
うち消費者向			4,450	98.0	96.1	66.4	
在庫計			14,050	98.0	77.7	128.2	
生産者工場在庫		137,751	98.0	81.8	72.6		
総在庫		151,801	98.0	81.4	75.7		
そ の 他		熱間圧延鋼材生産	95,805	92.1	81.6	69.2	
		販売業者	受入計	37,577	98.1	76.4	92.7
			販売計	37,142	93.1	89.0	91.6
	うち消費者向		35,962	92.0	91.2	97.9	
	在庫計		61,474	100.7	83.3	115.7	
	生産者工場在庫	54,439	97.1	88.5	78.7		
	総在庫	115,913	99.0	85.6	94.8		
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱間圧延鋼材生産合計	1,303,096	92.5	89.5	82.8	
		鋼材輸入実績計	36,240	83.6	78.3	44.6	
		販売業者	受入計	515,516	98.9	89.2	50.7
販売計			504,081	95.6	89.1	49.5	
うち消費者向			373,508	96.3	89.0	64.8	
在庫計			890,853	101.3	87.9	139.8	
鋼材輸出船積実績計		584,677	108.6	97.2	90.9		
生産者工場在庫		762,402	98.7	90.6	97.0		
総在庫		1,653,255	100.1	89.1	116.2		

出所: 鋼材輸入実績及び鋼材輸出船積実績は財務省関税局『貿易統計』、

それ以外は経済産業省『経済産業省生産動態統計』、『鉄鋼生産内訳月報』、但し総在庫は特殊鋼倶楽部で計算。

(注) 総在庫とは販売業者在庫に生産者工場在庫を加算したもの、生産者工場在庫は熱間圧延鋼材のみで、冷間圧延鋼材及び鋼管を含まない。また、工場以外の置場にあるものは、生産者所有品であってもこれを含まない。

倶楽部だより

(2022年12月1日～2023年1月31日)

海外委員会

専門部会 (12月23日・対面会議+Web会議)
2022年度海外調査事業の中間報告 (コベルコ
ビジネスパートナーズ) について
「特殊鋼生産を取り巻く環境変化と地政学的リ
スクの検討」

専門部会 (1月27日・対面会議+Web会議)
2022年度海外調査事業の中間報告 (日鉄総研)
について
「中国の特殊鋼需給動向調査～中国特殊鋼産業
の現状と展望、技術と価格からみた競争力に
ついて～」

市場開拓調査委員会

調査WG (12月22日・Web会議)
2022年度市場開拓調査事業の中間報告 (現代
文化研究所) について
「主要国におけるカーボンニュートラル進展と
日本の特殊鋼産業への影響」

特殊鋼PR展示・講演会WG

第9回高機能金属展 東京展に協賛すると共
にブースを出展 (12月7～9日)
第9回高機能金属展 東京展において技術セ
ミナーを開催 (12月8日)

講演会 (12月2日)

演 題：中国・脱炭素への論調変化と今後
の戦略
講 師：(株)現代文化研究所
市場戦略情報第2領域 主任研究員
八杉 理 氏
方 式：オンライン配信
申込者：約100名

講演会 (1月26日)

演 題：世界的な自動車の電動化と国際間連
携への考察～アジアにおける日本と
台湾との連携可能性について～
講 師：(株)現代文化研究所
市場戦略第一領域 主任研究員
清田麻喜子 氏

方 式：オンライン配信

申込者：191名

編集委員会

本委員会 (12月19日・Web会議)

- ①特別委員の報告
- ②2023年5月号特集「金属3Dプリンター技術
と業界の最新動向 (仮題)」の編集方針、内
容の確認

小委員会 (1月17日・Web会議)

2023年7月号特集「特殊鋼の技術と用語のや
さしい解説 (用語解説・鉄鋼用語編) (仮題)」
の編集内容の検討

流通委員会

説明会 (12月23日)

演 題：2022年度第4・四半期の特殊鋼需要
見通し
講 師：経済産業省 製造産業局 金属課
課長補佐 佐藤 俊輔 氏
方 式：オンライン同時配信 (東京・名古屋・
大阪3地区)
参加者：86名

カーボンニュートラルWG

第18回会合 (12月22日・Web会議)
第19回会合 (1月27日・Web会議)

ミルシート電子化拡大WG

第7回メーカー会合 (12月6日・Web会議)

[大阪支部]

講演会 (12月8日・三団体共催)

演 題：ニュースの裏側から日本の今後を読む
講 師：読売テレビ放送 報道局 解説委員長
高岡 達之 氏
方 式：オンライン+対面
申込者：56名

説明会 (12月23日・全特協との共催) 再掲

演 題：2022年度第4・四半期の特殊鋼需要
見通し

講師：経済産業省 製造産業局 金属課
課長補佐 佐藤 俊輔 氏
方式：オンライン配信
参加者：17名（大阪地区参加）

方式：オンライン配信
参加者：23名（名古屋地区参加）

[名古屋支部]

部会

構造用鋼部会（1月24日・対面会議）
ステンレス鋼部会（1月31日・対面会議）

講座、研修会、セミナー等

生産性向上研修（12月14日）

テーマ：事故を無くす安全衛生活動

講師：（一社）中部産業連盟 山口 郁睦 氏

方式：オンライン参加

受講者：19名（名古屋地区参加）

説明会・講演会

説明会（12月23日）再掲

演題：2022年度第4・四半期の特殊鋼需要
見通し

講師：経済産業省 製造産業局 金属課
課長補佐 佐藤 俊輔 氏

生産性向上研修（1月19日）

テーマ：業務効率向上のための時間管理

講師：（一社）中部産業連盟 高橋 拓也 氏

方式：オンライン参加

受講者：23名（名古屋地区参加）



『中国・脱炭素への論調変化と今後の戦略』 講演会の開催

市場開拓調査委員会では、特殊鋼の需要開拓事業の一環として、需要産業の動向・展望について講演会を実施しております。

トヨタグループの調査会社の㈱現代文化研究所殿より講師をお招きして、「中国・脱炭素への論調変化と今後の戦略」を題材としてご講演いただきました。中国は、2020年9月の国連総会において、習近平国家主席が、「3060」（2030年前にカーボンピークアウト、2060年にカーボンニュートラル）を宣言いたしました。また、2022年10月において、中国でこれから5年間の国を率いる新指導部の選出があり、ゼロカーボン戦略が経済社会の発展とエネルギーの安全性を重視する方向へと舵を切ることとなりました。このような論調変化の中で、産業・企業は「3060」へいかに取り組むべきか、社会技術のイノベーションをいかに実践していくかがますます問われる状況となっております。

講演会では、まず中国のエネルギー情勢を確認した上、カーボンピークアウトに向けたエネルギー構造の転換と、素材産業を中心とする企業の取り組みと、中国現地の各種専門家へのオンラインインタビューで得た日本への示唆点をご報告いただきました。

今後の日中協力に関する政策的な対応を考えることに加え、今後の中国の選択によって世界が影響を受ける諸課題のご紹介がありました。会員の皆様の今後の対策の検討等、議論のたたき台として参考になりました。

1. 日 時：2022年12月2日（金） 13時30分～15時30分
2. 場 所：オンライン配信
3. 演 題：「中国・脱炭素への論調変化と今後の戦略」
4. 講 師：株式会社現代文化研究所 主任研究員 八杉 理 氏
5. 申込数：約100名

『世界的な自動車の電動化と国際間連携への考察』 講演会の開催

市場開拓調査委員会では、特殊鋼の需要開拓事業の一環として、需要産業の動向・展望について講演会を実施しております。

トヨタグループの調査会社の㈱現代文化研究所殿より講師をお招きして、「世界的な自動車の電動化と国際間連携への考察」を題材として、アジア地域内における国家戦略的連携の方向性を台湾を事例に詳細に分かり易い内容にて、ご講演いただきました。日本をはじめ各国の自動車産業は2050年カーボンニュートラル実現に向けて車両の電動化（EV）を加速させ、そうした中、米中対立やウクライナ戦争等による地政学リスクが横たわっており、EV化に伴う半導体や部素材の安定調達は一層重要性を増しています。サプライチェーンの強靱化は現下の国際情勢並び産業のグリーン化（グリーントランスフォーメーション）への転換期における競争力確保の観点から、国家レベルの課題となりつつあります。

本講演会では、まず主な国々でのEV化取組を概観し、その中での日本の現在地（日本のEV化の目標と現状、地政学上の日本の立ち位置）を把握し、米中対立／米国との同盟関係の中におけるサプライチェーンの強靱化の観点から、アジア領域内における国家戦略的連携のひとつの方向性として、EV化への取組み過程で半導体や電子類等、自動車サプライチェーンの裾野や強みを伸ばしつつ、台湾との連携可能性について言及いたしました。

会員の皆様の今後の対策の検討等、議論のたたき台として参考になりました。

1. 日 時：2023年1月26日（木） 13時30分～15時30分
2. 場 所：オンライン配信
3. 演 題：「世界的な自動車の電動化と国際間連携への考察
～アジアにおける日本と台湾との連携可能性について～」
4. 講 師：株式会社現代文化研究所 市場戦略第一領域所属 主任研究員 清田麻喜子 氏
5. 申込数：191名

『2022年度ビジネスパーソン研修講座「企業活動シミュレーション」』 を開催しました

本講座は、一般社団法人特殊鋼倶楽部人材確保育成委員会が人材育成事業の一環として、毎年度タイムリーなテーマを選定し実施しています。

2022年度については、これまでと異なり、受講選択肢の拡充を図る目的で、一つは会員ニーズの高い時宜に適したテーマを、もう一つは同じテーマを数年繰り返して行う2方式としました。

本年度2回目となる今回は、会員ニーズを反映し時宜に適したテーマを毎回選定実施する方式として、コロナ感染がある程度落ち着きを見せる中、政府の対策も緩和の方向にあり、感染対策を十分に講じた上で、対面により以下のとおり「企業活動シミュレーション」とのテーマで開催することにしました。

本講座は、通り一遍の座学ではなく、実務に即した内容を実例をベースに講義、個人ワーク、グループワークを織り交ぜた演習実践型として理解をより深め習得向上を図りました。特に、今回はこれまでと一味違うゲーム要素を取り入れた模擬会社経営を行う体験型学習を中核に置き、興味の湧く中での学びの効果が得られたと考えます。

受講者は今岡講師の説明に神経を集中して耳を傾け、講義と演習の反復により理解度が増大することで、即実務に役立てられるようにと学び取っている様子でした。1日目の終了後に懇親会を開き、コロナ禍で一層機会のなかった他社との交流ができ、打ち解けた雰囲気の中で有意義な時間を過ごしました。

受講者からの受講後のアンケートでは、“レゴブロックを使ったロールプレイングが難しかったが、分かり易く楽しかった”、“日々の業務では会計や経営といった普段意識しないことを考えることができ、非常に勉強になった”、“集中力を切らすことなく、取り組むことができた”など普段できない貴重な体験ができたことへの感覚が面白く感じられ、総じて受講者からの高評価を得られました。

受講されました皆様には、一日半大変お疲れさまでした。

日 時：2023年2月16日（木） 13時00分～17時00分

2月17日（金） 9時00分～17時00分

場 所：「鉄鋼会館」802～804号室（東京都中央区日本橋茅場町3-2-10）

テ ー マ：企業活動シミュレーション

ね ら い：市場・顧客が何を求めており、それをいかに自社の利益に結び付けていくかという視点より、経営戦略・マーケティングの基礎知識の習得と顧客志向を理解する…基礎力を身に付ける。

- 1) 市場（顧客）のニーズに合わなければ売れない…ニーズ型商品展開＝商売に繋げるマーケティング力↑
- 2) 「外部からの視点」をもつ…自部署以外からの視点
- 3) 「経営戦略」や「中期計画」への参画意識を持ち、常に自分自身の業務に結び付ける…経営的な視点（全体感・しくみの把握・当事者意識）

講座概要：経営シミュレーション（MACS）で体験する。

- 1) 経営戦略・マーケティング→ワークシート作成（SWOT・PPM・基本戦略など）
- 2) 財務→PC入力（予算・コスト計算・決算書）
- 3) PDCAサイクルを回す（2期間）
⇒計画（目標）をたて、実行する（P⇒D）
⇒自分、チームの状況を振り返り（問題解決）、次に活かす（C⇒A）。

シミュレーション概要：

- 1) レゴブロックを材料とみなし、「自動車」を製造・販売している会社を、2期間経営する。
- 2) 会社は設立後5年を経過しており、6年目から引き継ぐ。
- 3) 創業時からのトラックの受注生産のみを行ってきたが、会社は取り巻く環境かの変化や市場ニーズに合わせて、バス・スポーツカー事業にも進出する予定。

講師：コベルコビジネスパートナーズ株式会社 ビジネス研修部 研修開発グループ
シニアコンサルタント 今岡 伸一 氏

受講者数：29名

【会場の様子】



「伊藤忠丸紅鉄鋼株式会社の紹介」「2023年の世界経済見通し」 講演会の開催

流通海外展開委員会では、特殊鋼流通の海外展開に関する課題に資する事業の一環として、特殊鋼倶楽部ならではの特殊鋼・鉄鋼に関連した情報提供を目的に、2019年度より会員商社4社の方々に商社鉄鋼部門の海外展開状況の紹介を内容とする講演を実施しています。

今回は、その4回目として、伊藤忠丸紅鉄鋼株式会社殿、丸紅経済研究所殿から講師をお招きし、お話を伺うことといたしました。

伊藤忠丸紅鉄鋼株式会社の紹介、2023年の世界経済見通しについて、分かり易い説明と資料により、最後まで熱心に講師の話に耳を傾け、講演後の質疑応答も活発に行われ、盛会の内に終了いたしました。多数のご参加を賜り、厚く御礼申し上げます。

日 時：2023年2月21日（火） 13時30分～15時30分

方 式：オンラインによる東京・名古屋・大阪同時配信

挨 拶：一般社団法人特殊鋼倶楽部 流通海外展開委員会 委員長 中川陽一郎 氏
(中川特殊鋼株式会社 取締役社長)

演 題：1)「伊藤忠丸紅鉄鋼株式会社の紹介」
2)「2023年の世界経済見通し」

講 師：1) 伊藤忠丸紅鉄鋼株式会社 自動車鋼材本部 特殊鋼・線材部長 塗師 康史 氏
2) 丸紅経済研究所 経済調査チーム長 チーフ・エコノミスト 井上 祐介 氏

申込者：203名

■ お知らせ ■ ■ ■ ■ ■

第247・248回西山記念技術講座

サステナブルな社会を支える高機能厚板の技術進展と将来展望

▼2023年5月24日（水）（大阪／対面開催）

▼2023年6月6日（火）（東京／ハイブリッド開催）

主催（一社）日本鉄鋼協会 協賛（一社）特殊鋼倶楽部

講座の視点

2000年代以降、カーボンニュートラル社会実現に向けた地球規模での環境課題克服への取り組みや、持続的なグローバル経済の発展、巨大災害への備えとしての国土強靱化の推進など、社会環境は変化を続けている。社会基盤を支える各種鋼構造物は大型化、高機能化しており、これに利用される各種の高性能厚板やその利用技術は発展を遂げてきた。

本講座では、過去約20年間で、造船、インフラ、エネルギー分野など、重要な社会基盤の鋼構造物建造を実用化するために開発された厚鋼板およびその利用技術に関する技術進展を概説するとともに、脱炭素社会への貢献など、社会の持続的発展に将来寄与することが期待される厚板分野の将来展望を紹介する。

1. 日時・場所：

第247回（大阪）：2023年5月24日（水）9：30～16：45 受付時間：9：00～15：45

【対面開催】CIVI研修センター新大阪東7階E705会議室

（大阪市東淀川区東中島1-19-4 LUCID SQUARE SHIN-OSAKA）

<https://www.civi-c.co.jp/access.html#higashi>

第248回（東京）：2023年6月6日（火）9：30～16：45 受付時間：9：00～15：45

【ハイブリッド開催】鉄鋼会館 会議室（東京都中央区日本橋茅場町3-2-10）

<https://www.tekko-kaikan.co.jp/publics/index/4/> ※Cisco Webex Meetingsを使用

*今後の感染状況によっては、6月6日をオンライン開催とし、6月6日のみとなる場合がございます。

あらかじめ、ご了承下さい。その場合、5月24日の参加申込は自動的に6月6日に振替となります。

ご了解の上、お申込み下さい。

2. 内容および講演者、司会者

司会者：重里 元一（日本製鉄株）

1）9：30～10：30 厚鋼板の高強度化のための微細組織制御

東北大学 金属材料研究所 教授 古原 忠

2）10：30～11：30 アーク溶接技術の進歩

株神戸製鋼所 溶接事業部門 技術センター溶接開発部 上席研究員 佐藤 統宣

3）12：30～13：30 造船、インフラ分野における高性能厚板の開発動向

JFEスチール株 常務執行役員 スチール研究所 副所長 長谷 和邦

司会者：高木 周作（JFEスチール株）

4）13：30～14：30 エネルギー分野を支える高機能厚鋼板の技術動向

日本製鉄株 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究部 室長 加茂 孝浩

- 5) 14:45~15:45 衝突による船舶からの油流出事故防止に関する研究と耐衝突性能向上のための高延性厚鋼板の実用化

(国研)海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

海難事故解析センター センター長 山田 安平

- 6) 15:45~16:45 水素機器用鋼材の技術基準 東京大学 生産技術研究所 教授 吉川 暢宏

3. 講演内容

1) 厚鋼板の高強度化のための微細組織制御

古原 忠

低合金低炭素鋼を基本とする厚鋼板の高強度化・高靱性化の追求は、社会インフラなどを支える大型鋼構造物の高機能化において必須である。高強度厚鋼板の組織と特性の制御では、熱間加工と制御冷却を組み合わせた加工熱処理による相変態組織の微細化が必須である。本講座では、組織微細化の鍵であるオーステナイト母相組織および冷却時の各種相変態組織の制御に関する基本原理について述べるとともに、マイクロアロイングや介在物制御による微細化についても概説する。

2) アーク溶接技術の進歩

佐藤 統宣

アーク溶接が発明されて約120年経過している。その間に、様々な溶接方法、溶接材料、溶接機器等が開発・適用され、造船、建築、エネルギー等の生活基盤を支える鋼構造物や自動車を始めとする輸送機器等にも広く活用されている。また、適用分野・箇所は多岐に亘っており、それぞれに合わせて技術的進歩を重ね、今日でも欠かせない技術の一つとなっている。本講座では、現在でも広く使われている各溶接材料での鋼種や施工法における最新技術と、溶接材料と組合せる溶接プロセス、中厚板用溶接ロボットの最新技術等を適用事例と併せて紹介していく。

3) 造船、インフラ分野における高性能厚板の開発動向

長谷 和邦

社会を取り巻く環境変化は大きく、21世紀の社会基盤を支える厚板に対しても、益々高度で複雑な品質、性能が要求されるようになってきた。これに対して、各厚板メーカーは、高強度厚肉化のみならず、破壊・疲労安全性や耐食性、溶接部等の加工性向上を達成するべく、日々、更なる高機能化に向けた技術開発に取り組んでいる。

本講座では、前回2007年の西山記念技術講座厚板特集以降に開発、実用化された厚板商品や厚板利用技術のうち、特に、造船、土木建築および橋梁分野における社会環境変化と、注目すべき厚板および利用技術の開発事例について紹介する。

4) エネルギー分野を支える高機能厚鋼板の技術動向

加茂 孝浩

エネルギーの安定確保は、安全保障の観点で益々重要な課題である。また、脱炭素化の潮流において、化石燃料から代替エネルギーへの転換に向けた技術開発が盛んである。すなわち、環境負荷が比較的小さい天然ガスや、洋上風力発電等の再生可能エネルギー、次世代エネルギーとしての水素やアンモニアなど、様々なエネルギー源の利用拡大に向けた検討が進んでいる。エネルギーの輸送・貯蔵技術の進展において鋼材が果たす役割は大きく、高効率化や低コスト化、安全性向上を実現すべく様々な高機能鋼板が開発・実用化されている。本講座では、エネルギー分野を支える高機能鋼板の技術動向について紹介する。

5) 衝突による船舶からの油流出事故防止に関する研究と耐衝突性能向上のための高延性厚鋼板の実用化

山田 安平

海洋環境汚染防止の観点から、船舶、とりわけ、油タンカーからの大規模油流出事故防止は重要な課題の1つである。エクソン・バルディス号の事故を契機に、タンカーには、二重船殻（ダブル・ハル）が強制化されたが、その後も油流出事故は後を絶たない。船舶からの油流出事故防止に関する研究の歴史を概説すると共に、ダブル・ハル強制化後の国際海事機関（IMO）における油流出防止規制に関する議論を簡単にご紹介する。近年、我が国で開発し、実船適用されている新材料「高延性鋼」と、その開

発過程での非線形シミュレーション結果、実験結果等について、ご紹介する。また、当該鋼材「高延性鋼」の実船適用状況、船級承認・Class Notation（船級符号）付与、「先進船舶」としての政府の減税措置、入港料減免制度との関係についても、概要をご紹介する。

6) 水素機器用鋼材の技術基準

吉川 暢宏

カーボンニュートラルの実現に向かい、エネルギー媒体としての水素利用が推進されつつある。金属材料の水素脆化の問題は古くから認識されており、劣化の程度を適切に評価し安全に鋼材を利用するための技術開発も進められてきた。2050年のカーボンニュートラルに向けては、超高压あるいは液化された水素を大量に流通させることを想定しており、安全と安心を確保するための技術的要求の質が大きく変化したといえる。本講演では、超高压水素を貯蔵する水素スタンド用蓄圧器と大量の液化水素を貯蔵する平底円筒型貯槽の技術基準において、鋼材に要求されている信頼性確保の方策を解説する。

4. 参加申込み【3月下旬開始予定】

[申込方法] 本会Webサイトからの事前申込みとします。当日参加受付は行いません。

第247回（5月24日）：会場の収容人数の関係上、定員になり次第締切とします。

第248回（6月6日）：会場での参加者は、収容人数の関係上、定員になり次第締切とします。

オンラインでの参加者は、人数制限は行いません。

[支払い方法] ①クレジットカードのオンライン決済 または、②郵便振替のいずれかの方法で、事前の入金をお願いします。

※請求書の発行は致しません。

[締め切り] 申込、入金ともに**4月25日（火）までに完了**するようお願いします。

※入金の確認後、開催約1週間前にテキストと領収証を送付します。

※ご入金後の返金はいたしません。また、当日不参加の場合も返金はいたしませんのでご了承ください。

※オンライン受講についての詳細は本会Webサイトに掲載します。

5. 参加費（税込み、テキスト付）

会員8,000円、一般15,000円、学生会員1,000円、学生一般2,000円

注）会員割引は個人の会員のみ有効です。協賛団体の個人会員、学生会員も含まれます。

*非会員でご参加の方で希望される方には、下記会員資格を進呈します。（入会方法は別途ご案内いたします。）

- ・一般（15,000円）で参加 ⇒ 2023年12月までの準会員資格
- ・学生一般（2,000円）で参加 ⇒ 2023年12月までの学生会員資格

★テキストは、講座終了後残部がある場合、鉄鋼協会会員価格、及び一般価格で販売いたします。テキスト購入のお申込みは、本会Webサイト（出版図書案内：<https://www.isij.or.jp/publication/books.html>）をご覧ください。

問合せ先：（一社）日本鉄鋼協会 育成グループ

TEL：03-3669-5933 FAX：03-3669-5934 E-mail：educact@isij.or.jp

～メタルジャパン 関西展に常設出展～

第10回 [関西] メタルジャパン (高機能金属展)

会期：2023年5月17日(水)～19日(金)

時間：10:00～18:00 19日(金)のみ17:00終了 会場：インテックス大阪

主催：RX Japan 株式会社 協賛：(一社)特殊鋼倶楽部

特殊鋼倶楽部では、今日のような厳しい社会経済環境に対応するため、「パーマクライシス」長期間続く不安定な状況時代での「わが国特殊鋼の競争力の強化」を図るべく取り組んでいくことが必要と考えております。こうした背景を踏まえ、市場開拓調査委員会の事業の一環として、毎年、東京と大阪で開催される「メタルジャパン (高機能金属展)」への出展は、特殊鋼への理解を深めてもらうことを目的とする最適な活動と考えます。

今回の関西会場では、東京と同様に、特殊鋼倶楽部ブースにて、特殊鋼商品知識の普及及び啓蒙、特殊鋼倶楽部及び会員会社の紹介、当倶楽部出版物配布、共同出展される会員会社の特色ある製品・技術・サービスを展示します。

また、協賛団体セミナーと題し、会員会社よりセミナーに登壇いただく予定です。

是非ともご来場下さい。お待ちしております。

【特殊鋼倶楽部ブース内会員会社展示】

- ・秋山精鋼株式会社 殿
 - ・株式会社川口金属加工 殿
 - ・南海モルディ株式会社 殿
- (上記、五十音順)

【協賛団体セミナー予定】

日程、会社名等は、調整中です。

一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧

(社名は50音順)

[会 員 数] (正 会 員) 製造業者 25社 販売業者 101社 合 計 126社	【販売業者会員】		
【製造業者会員】 愛 知 製 鋼 (株) 秋 山 精 鋼 (株) (株)川口金属加工 高周波熱錬(株) (株)神戸製鋼所 合同製鐵(株) 山陽特殊製鋼(株) J F E スチール(株) J X 金 属 (株) 下村特殊精工(株) 大同特殊鋼(株) 高砂鐵工(株) 東北特殊鋼(株) 日鉄ステンレス(株) 日本金属(株) 日本高周波鋼業(株) 日本精線(株) 日本製鐵(株) 日本冶金工業(株) (株)広島メタル&マシナリー (株)不二越 (株)プロテリアル 三菱製鋼(株) ヤマシンスチール(株) 理研製鋼(株)	愛 鋼 (株) 青 山 特 殊 鋼 (株) 浅 井 産 業 (株) 東 金 属 (株) 新 井 ハ ガ ネ (株) 粟 井 鋼 商 事 (株) 伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株) 伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株) (株)ISSリアライズ (株)U E X 確 井 鋼 材 (株) ウ メ ト ク (株) 扇 鋼 材 (株) 岡 谷 鋼 機 (株) カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株) 兼 松 (株) 兼松トレーディング(株) (株)カムス (株)カワイスチール 川 本 鋼 材 (株) 北 島 鋼 材 (株) ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株) 小 山 鋼 材 (株) 佐 久 間 特 殊 鋼 (株) 櫻 井 鋼 鐵 (株) 佐 藤 商 事 (株) サ ハ シ 特 殊 鋼 (株) (株)三悦 三 協 鋼 鐵 (株) 三 京 物 産 (株) 三 興 鋼 材 (株) 三 和 特 殊 鋼 (株) J F E 商 事 (株) 芝 本 産 業 (株) 清 水 金 属 (株) 清 水 鋼 鐵 (株) 神 鋼 商 事 (株) 住 友 商 事 (株) 住友商事グローバルメタルズ(株)	大 同 興 業 (株) 大同DMソリューション(株) 大 洋 商 事 (株) 大 和 特 殊 鋼 (株) (株)竹内ハガネ商行 孟 鋼 鉄 (株) 辰 巳 屋 興 業 (株) 千 曲 鋼 材 (株) (株)テクノタジマ (株)鐵鋼社 デルタスチール(株) 東京貿易マテリアル(株) (株)東信鋼鉄 (株)トーキン 特 殊 鋼 機 (株) 豊 田 通 商 (株) 中 川 特 殊 鋼 (株) 中 島 特 殊 鋼 (株) 中 野 ハ ガ ネ (株) 永 田 鋼 材 (株) 名 古 屋 特 殊 鋼 (株) ナ ス 物 産 (株) 南 海 モ ル デ ィ (株) 日 金 ス チ ール (株) 日 鉄 物 産 (株) 日 鉄 物 産 特 殊 鋼 (株) 日 本 金 型 材 (株) ノ ボ ル 鋼 鉄 (株) 野 村 鋼 機 (株) 白 鷺 特 殊 鋼 (株) 橋 本 鋼 (株) (株)長谷川ハガネ店 (株)ハヤカワカンパニー 林 田 特 殊 鋼 材 (株) 阪 神 特 殊 鋼 (株) 阪 和 興 業 (株) (株)日立ハイテク (株)平井 (株)フクオカ	藤 田 商 事 (株) 古 池 鋼 業 (株) (株)プルータス (株)プロテリアル特殊鋼 平 和 鋼 材 (株) (株)堀田ハガネ (株)マクスコーポレーション 松 井 鋼 材 (株) 三 沢 興 産 (株) 三 井 物 産 (株) 三井物産スチール(株) (株)メタルワン (株)メタルワンチューブラー (株)メタルワン特殊鋼 森 寅 鋼 業 (株) (株)山一ハガネ 山 進 産 業 (株) ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株) 山 野 鋼 材 (株) 陽 鋼 物 産 (株) 菱 光 特 殊 鋼 (株) リ ン タ ツ (株) 渡 辺 ハ ガ ネ (株)

“特集” 編集後記

今回の特集は、2022年9月号「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説」の第二弾として、代表的鋼種の「特性」「熱処理」を主とした技術解説編としました。

一般的な用途および必要とされる特性、主な熱処理方法、熱処理における不具合事例、改善事例等を鋼種毎にまとめております。

編集に当たっては、若手の技術者や営業担当のみなさんに、使い易い教材としてご使用頂きたい

という想いでまとめました。ご活用頂ければ幸いです。

最後に本件の編集にご対応頂きました執筆者の皆様、編集委員および事務局の皆様にご挨拶を申し上げます。引き続きのご支援を賜りますようお願い致します。

〔(株) プロテリアル さかより ひとし
金属材料事業本部技術部 部長 酒寄 一志〕

特 集 / 金属3Dプリンター技術と業界の最新動向

- I. 総論 金属3Dプリンター技術の概論
- II. 金属粉末を用いる金属3Dプリンターの種類と特長
- III. 金属粉末製造技術と特長
- IV. 二次加工技術と造形適用事例
- V. わが社の製品紹介

7月号特集予定…特殊鋼の技術と用語のやさしい解説（用語解説・鉄鋼用語説）

特 殊 鋼

第 72 卷 第 2 号
© 2 0 2 3 年 3 月
2023年2月25日 印 刷
2023年3月1日 発 行

定 価 1,252円 送 料 200円
1年 国内7,434円（送料共）

発 行 所
一般社団法人 特 殊 鋼 倶 楽 部
Special Steel Association of Japan

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3丁目2番10号 鉄鋼会館
電 話 03(3669)2081・2082
ホームページURL <http://www.tokushuko.or.jp>

編集発行人 脇 本 眞 也
印刷人 増 田 達 朗
印刷所 レタープレス株式会社

本誌に掲載されたすべての内容は、一般社団法人 特殊鋼倶楽部の許可なく転載・複写することはできません。