

特殊鋼[®]

2024 9
Vol.73 No.5
The Special Steel

特集

ミルシートと技術データに関する解説

一般社団法人 特殊鋼倶楽部

特殊鋼

| 9 | 目次 2024

【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	平地 伸吾 (愛知製鋼)
〃	土橋 智也 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	深瀬美紀子 (大同特殊鋼)
〃	松原 大 (日本製鉄)
〃	竹内 俊哉 (日本金属)
〃	黒川 政人 (日本高周波鋼業)
〃	佐藤 正昭 (日本冶金工業)
〃	上野 友典 (プロテリアル)
〃	佐野 太一 (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)

まえがき

一般社団法人特殊鋼倶楽部 編集委員会 委員長 迫間 保弘 1

I. 総論

1. ミルシートを読む

1) 単位の話	日本製鉄㈱	宮本 翔	2
2) 鋼の性質を左右する最重要因子 化学成分	日本製鉄㈱	宮本 翔	4
3) 鋼のねばさを評価するシャルビー衝撃値	日本製鉄㈱	渡部 了	5
4) 硬さ	日本製鉄㈱	小山 隆治	7
5) 機械設計強度の目安 引張特性	日本製鉄㈱	渡部 了	9
6) 焼きの入り易さを読む 鋼の焼入性試験方法 (ジョミニー式一端焼入方法)	日本製鉄㈱	小山 隆治	10
7) 鋼の諸特性の代表指標 結晶粒度	日本製鉄㈱	門田 淳	12
8) 鋼中介在物量の多少を表す 清浄度	日本製鉄㈱	大久保 真	13
9) 鋼材表層部の炭素量低下度を表す 脱炭	日本製鉄㈱	鈴木 正伸	14
10) 鋼材の全体品位を見る マクロ組織	日本製鉄㈱	磯 新	15
11) 細かく調べて全体を判断する ミクロ組織	日本製鉄㈱	高橋 幸弘	16

2. 熱処理データを読む

1) 状態図	JFEスチール㈱	今浪 祐太	18
2) CCT曲線	JFEスチール㈱	中島 孝一	19
3) TTT曲線	JFEスチール㈱	一宮 克行	20

3. 物理定数を読む

1) 変形のしにくさを表す 弾性係数	愛知製鋼㈱	松井 達哉	21
2) 温度による長さ、体積の変化を知る 熱膨張係数	愛知製鋼㈱	松井 達哉	23
3) 熱の伝わりやすさを表す 熱伝導率	愛知製鋼㈱	松井 達哉	25

II. 各論

1. 構造物用鋼

1) 浸炭、窒化等の硬さ分布曲線	㈱神戸製鋼所	齋藤 知昭	27
2) 被削性	㈱神戸製鋼所	濱 達哉	29
3) 焼戻し性能曲線	㈱神戸製鋼所	奥本 剛史	31
4) 遅れ破壊曲線	㈱神戸製鋼所	安居 尚志	32
5) 遷移温度曲線	㈱神戸製鋼所	齋藤 知昭	33
6) 冷間鍛造性 (変形抵抗)	㈱神戸製鋼所	劉 曉宇	34

2. ばね鋼

1) 疲れ特性 (S-N曲線)	三菱製鋼㈱	河口 和紀	35
2) リラクセーション (へたり)	三菱製鋼㈱	河口 和紀	37

3. 軸受鋼

転動寿命試験	山陽特殊製鋼㈱	藤松 威史	39
--------	---------	-------	----

4. 工具鋼

1) 鏡面度	㈱プロテリアル	宍道 幸雄	41
2) ヒートチェック試験	㈱プロテリアル	兼近 領	43
3) 経年変化	㈱プロテリアル	松岡 禎和	45
4) 抗折試験	㈱プロテリアル	斉藤 武文	46
5) 焼戻硬さ曲線 特性を十分に引き出すための焼戻条件とは？	日本高周波鋼業㈱	黒川 政人	48

6) 摩耗試験機 耐摩耗性を評価するための試験機	日本高周波鋼業(株)	黒川 政人	49
7) 熱処理変寸 焼戻しによって寸法が変化する	日本高周波鋼業(株)	黒川 政人	51
8) 軟化抵抗 高温下での硬さ低下に要注意	日本高周波鋼業(株)	黒川 政人	53
5. 耐熱鋼			
1) 高温機械的性質	大同特殊鋼(株)	副田 凌雅	54
2) クリープ特性	大同特殊鋼(株)	副田 凌雅	56
3) 高温酸化	大同特殊鋼(株)	副田 凌雅	57
4) 高温腐食	大同特殊鋼(株)	副田 凌雅	58
6. ステンレス鋼			
1) 腐食試験	日本冶金工業(株)	橋本 暢之	59
2) 応力腐食割れ試験	日本冶金工業(株)	橋本 暢之	61
3) 加工硬化曲線	日本冶金工業(株)	三浦 健介	62
7. 電磁材料			
ヒステリシス曲線	(株)プロテリアル	藤原 義行	63
8. その他			
1) 溶接性 ～高温割れ～	大同特殊鋼(株)	服部 広基	64
2) 破面の見方	愛知製鋼(株)	宇田川毅志	66
“特集” 編集後記	(株)神戸製鋼所	土橋 智也	85

■業界のうごき	68
▲特殊鋼統計資料	71
★倶楽部だより (2024年6月1日～7月31日)	75
◇お知らせ	
メタルジャパン 東京展 出展内容充実	77
第253・254回西山記念技術講座	78
第75回白石記念講座	81
☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧	84

特集／「ミルシートと技術データに関する解説」に関する編集会議構成メンバー(2024年3月25日現在)

役 名	氏 名	会 社 名	役 職 名
編 集 長	斎藤 隆	(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 主任部員
委 員	平地 伸吾	愛 知 製 鋼 (株)	品質保証部 お客様品質・技術室 主幹
〃	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	東京支社部長 市場開拓・CS
〃	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
〃	松原 大	日 本 製 鉄 (株)	棒線事業部 棒線技術部 棒線技術室 室長
〃	黒川 政人	日本高周波鋼業(株)	富山製造所 技術部 担当部長
〃	佐藤 正昭	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 次長
〃	鳴海 雅稔	青 山 特 殊 鋼 (株)	静岡支店 技術部長
〃	白神 哲夫	中 川 特 殊 鋼 (株)	フェロー

まえがき

一般社団法人特殊鋼倶楽部 編集委員会 委員長 迫間保弘

2024年9月号の特集は、「ミルシートと技術データに関する解説」となります。

鋼材メーカーが発行するミルシートは、鋼材の製造ロット、材質といった情報に始まり、成分値、焼入性、機械的特性（引張特性、シャルピー衝撃値）、製品硬さなど多くの分析・試験結果を記載し、鋼材の品質を証明するための書類となります。しかし、非常に多種の試験項目があり、それに付随する試験片や熱処理条件なども記載されるため、ミルシートに記載されている内容を良く理解しながら正しく読み取る必要があります。例えば、ミルシートに熱処理硬さが30HRCと書かれていたからと言って、実際の部品で必ず30HRCとなる訳ではなく、ミルシートに書かれた値はJIS規格等の公的規格で規定された一定の試験片形状、一定の熱処理条件下での硬さを示していることにも注意が必要となります。

また、JIS規格、ASTM規格などの公的規格も随時改変が実施されているため、最新の規格の確認を行うと共に、お客様との仕様書、契約書なども、公的規格との整合性を図って行く必要もあります。特殊鋼に関わる皆様は、このようにミルシートに多くの場面で触れる事となりますので、ぜひ今回

の特集を参考にいただければと考えています。

更に、今回の特集では代表的な技術データに関する解説も記載させていただきました。特殊鋼をお使いいただく中で、最終ユーザー様、加工メーカー様などから様々な技術的な課題や改善要望が出てくると思います。特殊鋼は、切断、熱間鍛造、冷間鍛造、引き抜き、切削、熱処理など多くの加工工程を経て最終製品となりますが、その各々の加工工程の中で必要とされる技術データは多岐にわたります。また、鋼材の種類によって、ギヤ材料では被削性、浸炭時の硬さ特性、ステンレスでは耐食性、耐熱鋼では高温下でのクリープ特性など求められる技術データも変わってきます。特殊鋼に関わる皆様が、技術データの意味をしっかりと理解し、関係者の間で共通の技術用語として活用されることが、相互に間違いや齟齬が発生せず正しく技術的な議論を可能とするためには重要だと思います。

今回は、ミルシート、技術データの解説を特集させていただきましたが、皆さんの業務の中で必要となる内容だと思いますので、ぜひ一読いただき、普段の業務の中でご活用いただければ幸いです。

〔大同特殊鋼(株) 技術開発研究所〕



I. 総 論

1. ミルシートを読む

1) 単位の話

日本製鉄(株) 棒線事業部 棒線技術部 みやもと しょう
棒線技術室 棒線企画・管理課 主査 宮 本 翔

◇ 単位とは

単位とは、世の中にある様々なものや事象などの量を測り、定量的に示すために使われている。例えば日本独自に使用されてきた、部屋の広さを示す「畳」についても面積の単位の一つである。しかし、万国で共通認識を持つためには国際的な共通単位が必要であり、物理現象全般を表すためにSI単位（Système International d'Unités）が制定され、現在も運用されている。

◇ SI単位とは

SI単位系は7個の基本単位（表1）が設けられ、この基本単位の乗除算の組み合わせにて表現される固有名称を有する22個の組立単位（表2）にて

表 1 基本単位

量	単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
重さ	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2 組立単位抜粋（全22単位）

量	単位		
	名称	記号	定義
力	ニュートン	N	mkg^{-2}
応力、圧力	パスカル	Pa	N/m^2
仕事、熱量	ジュール	J	N/m
仕事率	ワット	W	J/s
平面角	ラジアン	rad	m/m
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
電位差	ボルト	V	J/C

表 3 SI単位に使われる接頭語抜粋

倍数	接頭語		倍数	接頭語	
	名称	記号		名称	記号
10^{12}	テラ	T	10^{-1}	デシ	d
10^9	ギガ	G	10^{-2}	センチ	C
10^6	メガ	M	10^{-3}	ミリ	M
10^3	キロ	K	10^{-6}	マイクロ	μ
10^2	ヘクト	h	10^{-9}	ナノ	N
10	デカ	da	10^{-12}	ピコ	p

構成される。さらに大小の量を表現するために、10の累乗倍の数を示す接頭語（表3）を付与し構成されている。

例えば、鉄鋼材料の強さを示す引張強さ（応力）である N/mm^2 は、単位の組み合わせによる変換を行うと以下の様になる。

例)

$$\text{N/mm}^2 = \text{N}/10^{-6}\text{m}^2 = 10^6\text{N/m}^2 = 10^6\text{Pa} = \text{MPa}$$

◇ 単位に関する日本の法律

日本においては計量法にて、法定計量単位はSI単位に準拠したものが指定されており、法定計量単位以外のもの取引または証明に用いることが禁じられている。ただし用途を限定した場合には、非SI単位を用いることができる。例えば、宝石の質量を示すカラット (ct) や食べ物のカロリー (cal) などがある。

よって非SI単位であるインチ (in) やオンス (oz) などは、日本国内での取引においては使用ができないことに注意が必要である。

◇ 鉄鋼材料規格の単位の変遷

過去の鉄鋼材料規格は、SI単位系ではなく、MKS単位 (3個の基本単位、長さ：メートル [m]、重さ：キログラム [kg]、時間：秒 [s]) で規定され用いられていた。

特に鋼の基本物性である引張強さ (応力) などでは、 $\text{kgf/mm}^2 \Rightarrow \text{N/mm}^2$ と表示する数値が変わることもあるため、過去の資料や図面などを見る際には、注意が必要である。

例)

1. 引張強さ

$$\begin{aligned} 41\text{kgf/mm}^2 &= 41 \times 9.80665\text{N/mm}^2 \\ &\Rightarrow 402\text{N/mm}^2 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

2. シャルピー衝撃エネルギー

$$\begin{aligned} 5.0\text{kgf} \cdot \text{m} &= 5.0 \times 9.80665\text{J} \\ &\Rightarrow 49\text{J} \end{aligned}$$



2) 鋼の性質を左右する最重要因子 化学成分

日本製鉄㈱ 棒線事業部 棒線技術部 みやもと しょう
棒線技術室 棒線企画・管理課 主査 宮 本 翔

◇ 化学成分とは

鋼はその中に含まれる元素の種類や量を調整することにより、硬さやねばさ、その他の性質を変化させることが可能で、この性質を利用して様々な用途に適した鋼材を作りこむことができる。

この鋼中に含まれる元素の含有量のことを化学成分といい、鋼の性質を左右する最も重要な項目として、溶解（製鋼番号）ごとに分析試験が行われている。

◇ 化学成分の分析試験

製鋼プロセスにて成分調整が行われた溶鋼は、取鍋（とりべ）にいて連続鑄造機もしくは造塊場へ運び、鑄型に流し込んで鑄造を行う。

この溶鋼を鑄込む際に行われる分析を、溶鋼分析（とりべ分析、レードル分析）といい、製鋼番号ごとに溶鋼分析を行い化学成分が決定する。試料を採取するタイミング及び位置は、JISにて方法が決められている。詳細についてはJIS G 4017を参照されたい。

現在主流の分析方法は、固体発光分光分析装置にて、試料に高電圧を加えてアーク／スパーク放電で励起（エネルギーを与える）させ、元素毎に異なる発光スペクトルを分光して検出することで、定量の分析を行うことができる。これら元素ごとにJIS G1211～1281にて評価する方法が定められている。

この溶鋼分析が代表分析結果になり、同じ製鋼番号ならば同一のデータになる。その一方で、製品（圧延や鍛造）毎にサンプリングし分析するものを製品分析（チェック分析）という。製品分析は、注文者からの要求があるときに実施される。

製品分析値を見るときに注意しなければならないのは、溶鋼分析値とは誤差が生じることである。これは各規格で定められていたり、JIS G0321で許容される変動値が規定されている。これは鑄造時の偏析（成分の偏り）などの影響で断面内に成分

の差異がでるためである。

◇ 化学成分のミルシートへの記載方法

溶鋼分析値や製品分析値で得られた値はミルシートまでつながり、ミルシートには質量分率wt%（単に%と記載されることもある）で情報が伝送される。ただし、化学成分は小数点、時にはppmオーダーで制御されているため、小数点を省略可するために、 $\times 100\%$ や $\times 10,000\%$ といったように、表記することが主流である。

例）下記の様にミルシート記載する場合がある。

[C] が $0.13\text{wt}\% \Rightarrow 13(\times 100)\%$ 、

[B] が $15\text{ppm}(0.0015\text{wt}\%) \Rightarrow 15(\times 10,000)\%$

ミルシートには、実績値を報告する以外に、規格値（その規格で許容される上下限值）を併記することがあり、ミルシートを見れば成分だけではなくその規格の管理範囲を把握することができる。

成分には、元素単体の報告以外に、炭素当量（equivalent carbon content: C_{eq} ）と呼ばれる合金元素の影響度を表す計算式やTotal Elements (T.E.) と呼ばれる不純物元素の合計値が記載されることがある。これらは、様々な定義式が存在しているため、ミルシートごとに C_{eq} やT.E.にはどういった計算式なのか、どの元素の合計値なのかは備考欄などに明記されている。

◇ 化学成分と鋼の性質

鋼には通常C、Si、Mn、P、Sと呼ばれる主要5元素が踏まれており、それ以外に様々な元素を意図的に添加することで鋼の性質を千差万別に引き出すことができる。

例えば、機械構造用合金鋼鋼材の一つであるSCM材はCrとMoを添加することで、5元素で構成されている機械構造用炭素鋼鋼材のSC材に対して焼入れ特性を飛躍的に向上させることができる。このように鋼に入れる化学成分は特性を決めるための重要な要素となる。

3) 鋼のねばさを評価するシャルピー衝撃値

日本製鉄(株) 棒線事業部 棒線技術部 渡部 了
棒線技術室 棒線企画・管理課 主幹

◇ シャルピー衝撃試験とは

鋼は低温になると脆くなりますが、このことが広く知られるようになったのは、第2次世界大戦中に量産されたアメリカの鋼製全溶接構造の輸送船（リバティー船）の事故の解析によると言われています。

鋼材のねばさ、あるいは脆さを測定する試験方法として、大きなハンマーを振り下ろしサンプルを叩き割る、シャルピー衝撃試験という試験方法があります。この試験方法は、JIS Z 2242に「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」として規定されています。

◇ シャルピー衝撃試験の方法

シャルピー衝撃試験機の模式図を図1に示します。ハンマー頭部の中央部分が試験片と衝突するよう設計されています。標準試験片は長さ55mmで、一辺が10mmの正方形断面を持つ形状です（材料から標準試験片を採取できない場合、厚さ7.5mm、5mm又は2.5mmのサブサイズ試験片を用いることもあります）。試験片の長さ中央部分には溝（ノッチと呼ぶ）が彫られています。ノッチの形状は、ノッチ角度45度、ノッチ深さ2mm及び

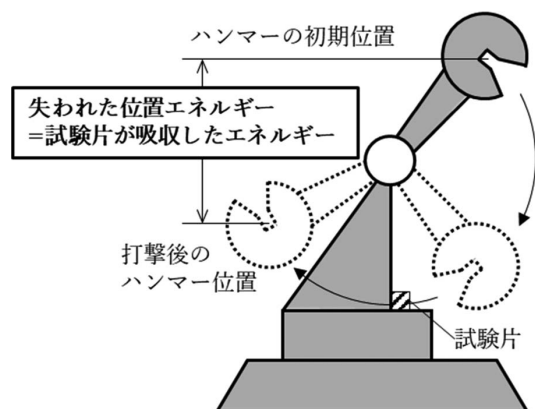


図 1 シャルピー衝撃試験機模式図

ノッチ底半径0.25mmのVノッチ、もしくはノッチ深さ5mmおよびノッチ底半径1mmのUノッチがあります（受渡当事者間協定により、ノッチ深さを2mmとすることも認められています）。

試験片を試験機中央に横向きに置き、ノッチの反対側にハンマーが当たるようにセットします。ハンマーの固定を解除すると、ハンマーは自重でスイングし、試験片への打撃後に反対側に反動であがりますが、ハンマーの初期位置と打撃後の高さの差が失われた位置エネルギーとなり、これが試験片が吸収したエネルギー＝吸収エネルギーとなります。

◇ シャルピー衝撃値の読み方、使い方

吸収エネルギーの単位としてはJ（ジュール）が用いられます。また、試験片のノッチ底の断面積（Uノッチでノッチ深さが2mmの場合は、 $0.8\text{cm} \times 1\text{cm}$ で 0.8cm^2 ）で割って、単位面積当たりのエネルギー表示が行われています。これは一般的にシャルピー衝撃値と呼ばれますが、サブサイズ試験片を用いた場合や、ノッチ深さが異なる試験片を評価する際に重要です。

また、衝撃試験後の破断試験片の破面を観察し、脆性破面率（単位％、脆性破面率と延性破面率の合計で100％）といった評価も行われます。

同一試験材で各試験温度での吸収エネルギー、

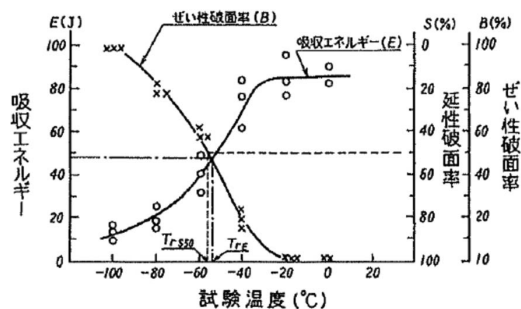


図 2 破面率遷移温度及びエネルギー遷移温度例 (JIS Z 2242)

脆性破面率、延性破面率をグラフ化したものの一例を図2に示します。破壊のモードが延性破壊から脆性破壊に変わる温度は遷移温度と呼ばれますが、一般論として、遷移温度よりも下の温度で使用する

ことは危険（＝脆くなっている）と言えます。
※熱処理後の吸収エネルギーの記載があった場合、熱処理は25mmの試験片でおこなうこととなっています。



4) 硬さ

日本製鉄(株) 品質保証部 小山隆治

◇ 硬さの表示

硬さ試験は、引張試験と同様に鋼材の使用上の基準として広く行われています。硬さの表示は試験機の型によって異なり、ブリネル硬さ、ロックウェル硬さ、ショア硬さ、ビッカース硬さなどがあります。

これらの数値はそれぞれ独自のものですが、相互に換算表が作られています（例えば、SAE J 417など）。硬さ表示の使い分けは、測定する鋼材の硬さ、形状、大きさ、製品の慣例等に応じて行います。

◇ 硬さ試験方法

硬さの値は、材料の表面に一定の荷重で硬質の圧子押し込む、あるいは、ハンマーを落とすなどした際の変形量から求めます。

ブリネル硬さは、HBWで表示します。鋼球を試験片に押しつけ、鋼球分のくぼみをつけた時の荷重を、くぼみの表面積で割った値をいいます。

ロックウェル硬さには、2種類あります。1つは、鋼球を試験片に押しつけたときのくぼみの深さから求めます。他は、ダイヤモンド円錐体を試験片に押しつけたときのくぼみの深さから求めます。前者をロックウェルB硬さ（HRB）と称し、

主に軟らかい鋼材の硬さ測定に、後者をロックウェルC硬さ（HRC）と称し、主に硬い鋼材の測定に使用します。

ショア硬さは、HSで表示します。ダイヤモンドをつけた重錘をある高さから落下させ、試験片に衝突して跳ね上がる高さをもって硬さを表します。この試験機は小型であり、使用は簡便で、試験片にきずをつけないことから、大型の鋼材の硬さ測定にしばしば使用されます。しかし、信頼性に乏しく、JISでは、硬さ試験は連続して測定した5点の平均値をもって測定値とするようになっています。

ビッカース硬さは、HVで表示します。ダイヤモンドの四角錐を試験面に押しつけ、くぼみの面積で荷重を割った値をいいます。ビッカース硬さ試験の測定原理を図1に示します。この硬さ測定は、窒化層、浸炭層、高周波加熱層などの比較的薄い層の硬さ測定に広く使用されます。

◇ 硬さ測定前の熱処理について

硬さ測定の前に熱処理を行う場合、鋼材のサイズが重要です。JISハンドブック巻末の「熱処理後の材料データ例」では、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のデータであることが明記されています。

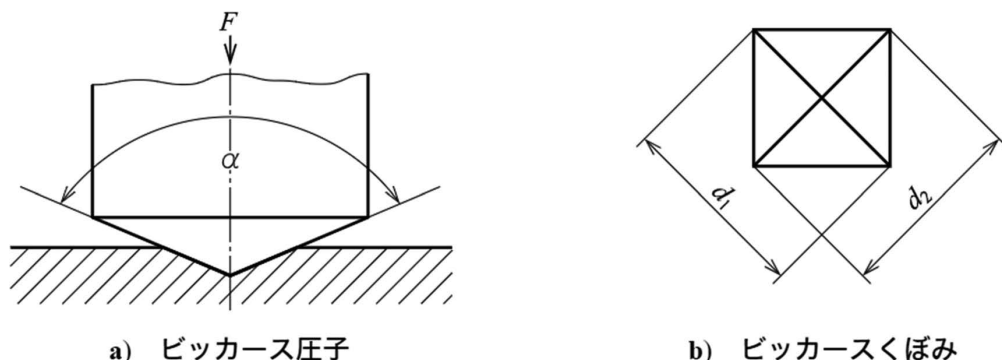


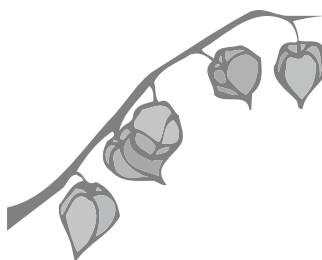
図 1 試験の原理、圧子及びビッカースくぼみの形状（JIS Z 2244）

素材サイズが25mmよりも大きい場合、そのまま熱処理を行なっても芯部まで焼きが入らず、「熱処理後の材料データ例」に記載された硬さを満足できないケースがあるため、注意が必要です。

◇ ミルシートの読み方

ミルシートには、熱処理後の「硬さ」とは別枠

で、「製品硬さ」が記載されることがあります。「硬さ」は一般的に焼入れ焼もどし後の硬さを表し、「製品硬さ」は圧延ままの硬さを表します。しかしながら、コイル材などで圧延後に鋼材メーカーで球状化焼鈍などの焼なましを行った場合は、「製品硬さ」の欄に焼なまし後の硬さを記載する場合もあります。



5) 機械設計強度の日安 引張特性

日本製鉄(株) 棒線事業部 棒線技術部 わた なべ さとる
棒線技術室 棒線企画・管理課 主幹 渡 部 了

◇ 引張試験とは

引張試験は、材料の基本的な機械的性質を決定する重要な試験です。試験機に取り付けた試験片を一軸方向にゆっくりと引っ張ることによって引張強さ（破断するまでの強さ）、降伏点または耐力（塑性変形が始まるまでの強さ）、伸び、絞り（ねばさの指標）を測定します。

◇ 引張試験

引張試験の試験方法はJIS Z 2241に「金属材料引張試験方法」として規定されています。試験機としては引張試験の他に圧縮や曲げ等の試験ができる万能試験機が多く用いられています。試験機は荷重の発生、荷重の試験片への伝達、荷重を検出する装置からなっています。負荷方法は電動式のインストロン型と油圧式のアムスラー型がありますが、一般的にはインストロン型が多く使われています。荷重の検出はロードセルで行い、伸びの検出は差動トランスが多く用いられます。試験片形状はJIS Z 2241内で、板状、棒状、管状、円弧状それぞれの形状毎に1～14号の試験片に区分されており、大きくは図1に示す3種類の型に分けられます。

◇ 引張特性値の読み方

軟鋼を引っ張ると荷重－変位線図が得られます。これを応力－歪み線図にしたのが図2となります。

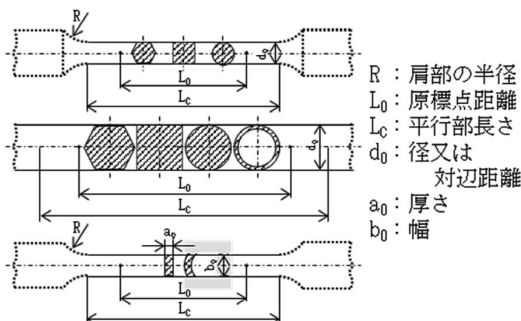


図 1 引張試験片の形状 (JIS Z 2241)

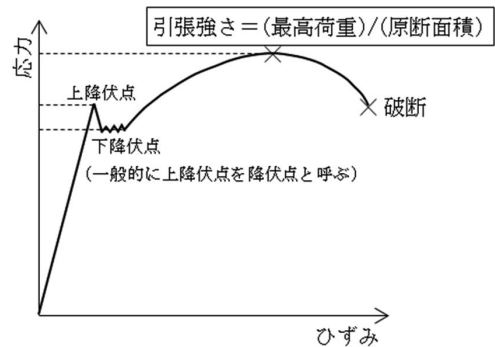


図 2 応力－ひずみ線図の例

軟鋼では降伏点が現れますが軟鋼以外の特殊鋼などでは降伏点が現れないケースがほとんどで、この場合は耐力で表します。耐力は一般的には0.2%の永久伸びを生じる点を取って表します。

$$\text{耐力}(\sigma_{0.2}) = \frac{0.2\% \text{の永久伸びでの荷重}}{\text{原断面積}}$$

また、最高荷重を試験片の元の断面積で割った値が引張強さとなります。

伸び（破断伸びともいう）を求める場合は破断後、試験片が一直線となるようにつきあわせ、評点間距離を測定して、元の長さに対する増加分を百分率で表します。

$$\text{伸び}\delta(\%) = \frac{\text{破断後の標点距離} - \text{原標点距離}}{\text{原標点距離}} \times 100$$

絞りは引張破断された試験片では破断部が局部収縮を生じ、この部分が最も細くなります。この部分の断面積減少率を百分率で表した値が絞りであり、材料のねばさの尺度となっています。

$$\text{絞り}\phi(\%) = \frac{\text{原断面積} - \text{破断部最小面積}}{\text{原断面積}} \times 100$$

※熱処理後の引張特性の記載があった場合、熱処理は25mmの試験片でおこなうこととなっています。

では焼入端から離れても高い硬さを維持しますが、低焼入性の炭素鋼では急激に硬さが低下することが判ります。

水冷端から離れるに従い焼入組織（マルテンサイト組織）の比率は減少しますが、50%マルテンサイト組織の得られる水冷端からの距離をジョミニ距離と呼んでいます。

焼入端からの各距離での冷却速度は、任意の寸法の丸棒を水冷あるいは油冷した際の横断面各部の冷却速度と対応させることが可能です。つまり

焼入性図表（ジョミニ硬さ曲線）が判れば、丸棒断面の焼入れ硬さ分布を予測することが可能なわけです。

実用的には浸炭して用いられる肌焼鋼の焼入性を指定する場合にも用いられます。例えば、歯車の大きさにより歯元の焼入れ時の冷却速度はジョミニ距離に対応できますので、 $J_9 = 30 \sim 35\text{HRC}$ というような指定が可能です。これは焼入れ端からの距離9mmの硬さが30~35HRCであるような焼入性を有する材料であることを意味しています。



7) 鋼の諸特性の代表指標

結晶粒度

日本製鉄(株) 棒線事業部 棒線技術部 もん でん 門 田 あつし 淳
棒線商品技術室 特殊鋼商品技術課 主幹

◇ 結晶粒とは

合金（ここでは鋼を代表として考えます）は結晶構造の異なるものが混じりあった状態になっています。

結晶構造はX線を使わないと調べることができませんが、結晶は鋼の表面を鏡面状に磨いてから酸で腐食すると、顕微鏡で見ることができます。

鋼は多くの小さな結晶の集まりで、この粒を結晶粒、粒の大きさの指標を結晶粒度と呼んでいます。

この結晶粒の大きさによって、その材料のねばり強さや種々の性質が異なってくることから、「結晶粒度は鋼の諸特性の代表指標」と言っても良いかと思います。

◇ 結晶粒度の測定方法

この結晶粒度の顕微鏡による観察方法は「フェライト結晶粒度」と「オーステナイト結晶粒度」の2つの測定法があり、粒度は番号で表示されます。結晶粒度は結晶粒が細くなるほど数字が大きくなります。一般に結晶粒度5以上を「細粒鋼」と定義しています。

これらの測定方法はJIS G 0551で定められており、ミルシートには粒度番号と共に測定方法も明示されています。

また、お客様が鋼材を使用目的に応じた試験方法を指定することもできます。

フェライト結晶粒度は主に純鉄や炭素含有量0.25%以下の低炭素鋼に用いられる方法です。

オーステナイト結晶粒度は中炭素鋼や合金鋼のねばり強さ（機械的性質）や熱処理時の特性などに影響をおよぼす指標です。

◇ 結晶粒度の読み方・使い方

結晶粒度は、鋼の種類（化学成分）が同じ場合には、製造時の鋼の冷却速度によって変化します。一般に、冷却速度が遅くゆっくり冷やされた場合の結晶粒は荒くなり、冷却速度が速く急冷になるほど結晶粒度は細くなります。

従って、同一鋼種のミルシートの結晶粒度を“読む”ことは、その圧延時の冷却状況を知ることになり、“製造工程が安定していたか・異常はなかったかを判定”することができます。

通常の工業生産（＝ミルシート）ではありえないことですが、ある同一鋼種のサンプルの結晶粒度を測定した際に粒度の違いが見られた場合には、冷却不足や異常復熱（＝粒度が粗い）、過剰冷却や異常水の飛散（＝粒度が細かい）などの製造工程での冷却状況の違いや異常が推定できます。

◇ 結晶粒度と鋼材の性質

特殊鋼に関連深い「オーステナイト結晶粒度」と鋼材の性質の関係について説明したいと思います。

オーステナイト結晶粒度が細くなると、同一硬さでの靱性（ねばり強さ）の向上・熱処理ひずみの低減・疲れ強さの向上・熱処理割れ（焼き割れ）の抑制といった鋼材性質の変化（向上）がみられます。

この結晶粒度をコントロールする方法としては、先に述べた冷却速度の他に、鋼の化学成分が大きく影響します。そこで鋼材メーカーでは添加成分の工夫や圧延時の冷却制御によって、結晶粒の細かい鋼材を製造し、お客様の使用目的に応じた材料特性が得られるようにしています。

このように結晶粒度は鋼の諸特性を瞬時に把握する「重要な代表指標」ということができるわけです。

8) 鋼中介在物量の多少を表す 清浄度

日本製鉄㈱ 棒線事業部 棒線技術部 おおくば 大久保
棒線商品技術室 上席主幹

しん
真

◇ 清浄度とは

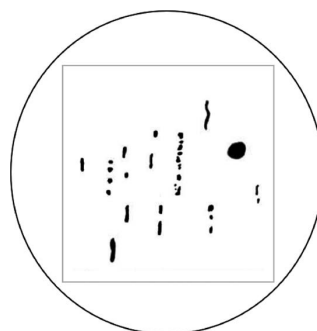
鋼中には非金属介在物が不可避免的に存在します。鋼材には非金属介在物を積極的に活用する快削鋼のような鋼種もありますが、一般的には非金属介在物を起点として、ベアリング用途、歯車用途およびばね用途などでは早期破壊が、冷間加工鋼や高炭素鋼線材などでは加工中の破壊が起こる場合があるため実用範囲内で少ない方が良く考えられています。この鋼中の非金属介在物量の多少を表す指標が清浄度です。

◇ 清浄度測定方法

鋼の使用目的に対する適性を評価するのに広く使われているのがJIS清浄度（G0555：2023）です。ISO4967を基とした試験方法ですが、旧来からの点算法も附属書JAとして規定されており、現在でも用いられています。どちらも供試材から試験片を切出し、規定の寸法の被検面に研磨して仕上げた後、検鏡して介在物を評価します。介在物の種類は、それぞれ以下の通り分けられます。

■JIS G0555法の介在物の種類

- －グループA（硫化物系）：高延伸性で、一般的に端が丸く、アスペクト比（長さ／厚さ）が広い範囲をとる灰色の個別の粒子。
- －グループB（アルミナ系）：単体粒子は、変形しないで、角張っており、低アスペクト比（一般的に3未満）をとる、変形方向に整列した、（三つ以上の）黒又は青みがかった粒子群。
- －グループC（シリケート系）：高延伸性で、一般的に端が鋭く、広い範囲のアスペクト比（一般的に3を超え）をとる、黒又は濃い灰色の個別の粒子。
- －グループD（粒状酸化物系）：変形しないで、角



張っているか又は円形で、低アスペクト比（一般的に3未満）をとり、ランダムに分布する、黒又は青みがかった粒子。

- －グループDS（個別粒状介在物系）：円形または円形に近く、直径が13μm以上の単独の粒子。

■JIS G0555点算法の介在物の種類

- －A系介在物：加工によって粘性変形したもの（硫化物、シリケートなど）。
- －B系介在物：粒状の介在物が、加工方向に集団をなして不連続に並んだもの（アルミナなど）。
- －C系介在物：粘性変形をしないで不規則に分散するもの（粒状酸化物など）。

◇ 清浄度の使い方

鋼材の用途に応じて、需要家から清浄度の規格が提示される場合があります。例えば、冷間加工素材であればアルミナ系介在物が破壊起点となることから、アルミナ系介在物を一定値以下にするように求められます。また軸受用途やばね用途では非金属介在物が早期破壊の原因になることがあり、これら介在物の規格が提示されます。このように清浄度は、鋼材から製造される部品を破壊に至らしめないための指標として用いられています。鋼材メーカーは要求清浄度を満足するため、清浄度に関する製造工程管理を行い操業の最適化に努めています。

9) 鋼材表層部の炭素量低下度を表す 脱炭

日本製鉄㈱ 北日本製鉄所 品質管理部 すすきまさのぶ
室蘭棒線管理室 棒線商品企画課 課長 鈴木正伸

◇ 脱炭とは

鋼が酸化性雰囲気中、高温で加熱されると、鋼中の炭素は酸化され CO_2 となって取り去られます。この鋼表面の炭素濃度が低下した部分が脱炭（層）と呼ばれています。

棒線製造工程内では、熱間圧延前の鋼片加熱時や焼鈍時等に脱炭は進行します。従って、ばね、浸炭部品等の表面が常に高応力に晒されるような部品に加工される鋼材は特に厳格な脱炭品質が求められています。

〔一部厳格部品については、表面品質（脱炭、表面きず）を確保するため、需要家において皮むき工程を付加しているケースも有るほどです〕

◇ 脱炭（層）測定法

鋼の表層部の炭素濃度が減少する脱炭（層）深さには、主に以下の種類（表1）があり、「鋼の脱炭層深さ測定方法」としてJIS G 0558にも規定されています。

尚、脱炭層の測定方法としては採取横断面試料による顕微鏡観察試験（写真1）、またはその面の

「鋼の脱炭層深さ測定方法」としてJIS G 0558にも規定されています。

◇ 脱炭の読み方、使い方

熱間圧延や熱処理によって鋼の表層部が減少する現象が脱炭ですが、その中でフェライト脱炭の場合は炭素がほとんど抜けて純鉄（＝フェライト）になった部分であり、部品の表面品質に与える影響は、全脱炭のそれに比べて、極めて大きいことを留意しておく必要があります。

また、全脱炭でも、ばねやシャフト、歯車等の常に表層部に最大応力がかかる部品では疲労破壊の起点となりうるため、十分な注意が必要です。

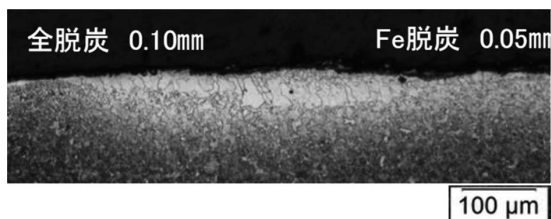


写真1 ばね鋼のフェライト脱炭（Fe脱炭）と全脱炭

表 1 脱炭層の主な種類（JIS G 0558）

脱炭層	定義	表示記号 (顕微鏡組織試験による測定方法)
①全脱炭層深さ	脱炭層の表面から脱炭層と生地との区別ができない点に至るまでの垂直距離	DM-T
②フェライト脱炭層深さ	鋼の表層部で、脱炭しフェライトのみとなった層の表面からの垂直距離	DM-F
③特定残炭率脱炭層深さ	ある一定の残炭率（残存炭素量／生地炭素量；顕微鏡組織で判定）をもつ部分までの表面からの垂直距離	DM-S

10) 鋼材の全体品位を見る

マクロ組織

日本製鉄(株) 棒線事業部 棒線技術部
棒線商品技術室 線材商品技術課 主幹

いそ
磯

あらた
新

◇ マクロ組織とは

鍛造もしくは圧延した鋼材の切断面などを肉眼か10倍以内の拡大鏡を用いて観察し識別する組織をマクロ組織といいます。

ミルシートでは、偏析や内部割れおよびパイブといった铸造凝固時の状態や介在物、きずを観察・判断する場合に用いています。また、マクロ組織試験の特徴は、非金属介在物試験（清浄度）や顕微鏡による組織観察（ミクロ組織）などが、製品のごく一部からの試験であるのに対し、鋼材の切断面全体を観察するため、比較的製品全体の品位を表しているといえます。

◇ マクロ組織試験

炭素鋼や合金鋼に適用される塩酸法による場合

の簡単な試験要領を図1に示します。

〔詳細はJIS G 0553（鋼のマクロ組織試験方法）に規定されています〕

◇ マクロ組織で観察、判定されるもの

マクロ組織試験では、主に、表1の項目を観察することができ、お客さまとの仕様から必要な項目について合否判定を行っています。項目は多数ありますが、主に铸造時の凝固状態を観察し、その善し悪しを判定する事が多いようです。

観察される例として、中心部偏析の悪いものを写真1に示します。

◇ ミルシートの読み方

複数の項目を判定しても最終合否結果だけを記載している場合が多いようです（GOOD表示や評点など）。

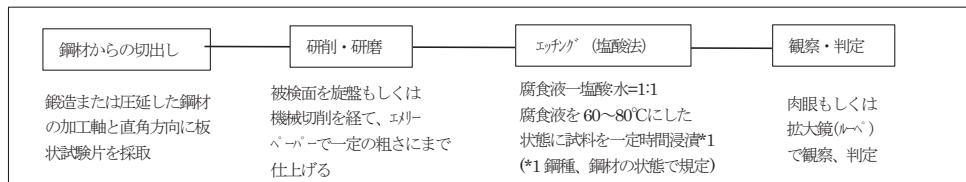


図 1 塩酸法による場合の試験要綱概略

表 1 マクロ組織で観察できる主な項目

観察される項目	内 容
・樹脂状結晶	鋼の凝固の時に樹脂状に発達した一次結晶
・インゴットパターン	鋼の凝固過程で成分の偏りのため、輪郭状に腐食の濃度差が現れたもの
・中心部偏析	鋼の凝固過程で成分の偏りのため、中心部に腐食の濃度差が現れたもの
・多孔質	鋼材全体にわたり、または中心部に腐食が短時間に進行して海綿状に現れたもの
・中心部多孔質	
・ピット	腐食により、鋼材断面全体にわたり、または中心部に肉眼で見える大きさに点状の孔を生じたもの
・中心部ピット	
・気泡	ブローホールまたはピンホールが完全に圧着されず、その跡をとどめたもの
・介在物	肉眼で認められる非金属介在物
・パイブ	鋼の凝固収縮による一次また二次パイブが完全に圧着されず、中心部にその跡をとどめたもの
・毛割れ	腐食により、断面に細く毛状に現れたきず
・もめ割れ	不適当な搬送または圧延作業により、中心部に亀裂を生じた割れ
・周辺きず	周辺気泡によるきず、圧延及び鍛造にきず、その他鋼材の外周部に生じたきず

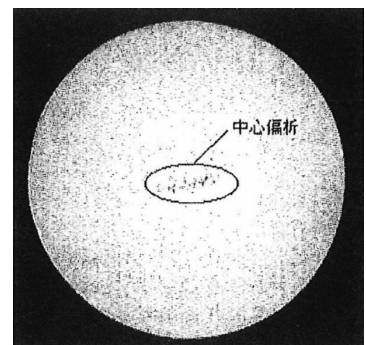


写真 1 中心部偏析不良

11) 細かく調べて全体を判断する

ミクロ組織

日本製鉄㈱ 棒線事業部 棒線技術部 たか はし ゆき ひろ
棒線商品技術室 線材商品技術課 主幹 高 橋 幸 弘

◇ ミクロ組織とは

顕微鏡で観察できる寸法（1～数十 μm 以下）の金属組織を一般にミクロ組織といいます。これは、金属原子どうしの配列（結晶構造）にもとづく（フェライトやオーステナイトなどの）集合や（セメンタイトなどの）金属間の化合物などの分布からなりたっており、それらの分布は、鑄造、圧延、鍛造あるいは熱処理によってさまざまに変化します。

これらを自在に変化させることで、材料機能を設定したり、金属の性状を判断する尺度として、幅広く用いられています。

◇ ミクロ組織試験

ミクロ組織を見るためには、まず検査したい面を平滑な鏡面に仕上げます。これだけでは、何の変哲もないただ輝いた面です。しかし、これを思い切って、薬品（腐食液と言います）に浸してやると、（ミクロ組織に対応した）さまざまな模様が現れてきます。実は、金属内部は、細かくみると、不均一な状態であり、その結果、薬品との反応の程度に強弱の差があるので模様が現れてくるのです。

これらの模様を見やすくする工夫として、薬品の選定には、目的にあった使い分けが必要となっています。

- ①圧延後組織、鍛造後組織、焼入れ後組織を見たい場合は、ナイトール（硝酸アルコール溶液）を使用。
- ②焼鈍後組織を見たい場合は、炭化物の状態がポイントとなるので、（ピクリン酸ソーダ液を使用する場合が多い。

さらに、薬品の使用には、写真をプリントする

ときのように、コントラスト（濃淡）を調整すべく、薬品の濃度、温度、処理時間の調整も大切です。

◇ ミクロ組織の見方

ミクロ組織は、光学顕微鏡を用いて観察されます。そのときの倍率は、100～400倍が一般的です（さらに高倍率が必要な場合は、電子顕微鏡を使用します）。

ミクロ組織観察例として、写真1～3を示します。ミクロ組織を観察することで、鋼材圧延まま（フェライトとパーライト、写真1）か、焼入している（マルテンサイト、写真2）か、あるいは、球状化焼鈍している（球状化組織、写真3）かといったようにどの製造工程を経てきたかがわかります。

このような組織の種類に加えて、組織の結晶粒の大きさ、分布状態、非金属介在物、欠陥の有無等を観察することにより、目的の品質が得られているかどうかをチェックすることもできます。

ただし、顕微鏡観察において、検査できる視野が限定されていることを忘れがちです。したがって、その試料の採取位置、採取方向、研磨、腐食方法を頭に入れておくことも大切です。

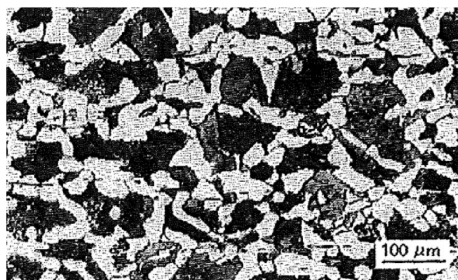


写真1 フェライト（＝白い部分）とパーライト

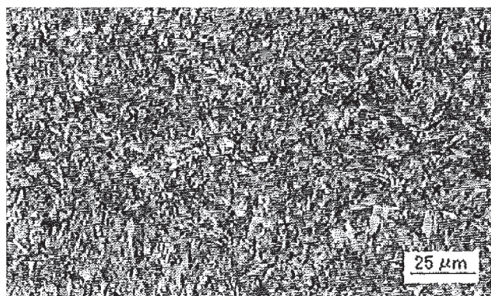


写真 2 焼入組織（マルテンサイト）

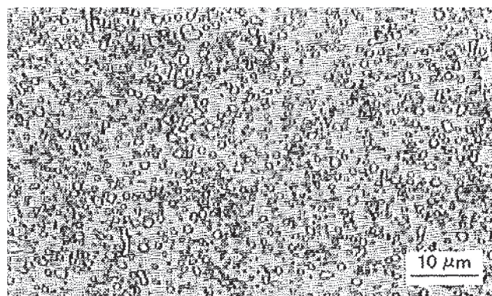


写真 3 球状化組織



2. 熱処理データを読む

1) 状態図

JFEスチール(株) スチール研究所 いま なみ ゆう た
構造材料研究部 主任研究員 今 浪 祐 太

◇ 状態図とは

物質は温度や圧力の変化によって3つの状態(気相・液相・固相)の何れか、あるいはそれらの複合状態を呈します。一定の温度および圧力に十分長い時間保たれ、もはや状態が変化せず安定した状態を平衡状態といいます。一般に、状態図という場合は平衡状態図を意味しており、物質の組成、温度および圧力によって変化する安定相について可視化して知らせてくれるものです。従って、状態図を用いることで、ある組成の合金を熱処理した場合に、どのような組織変化を示すか事前に予測を立てることが可能となります。

◇ 炭素鋼の状態図を読む

鉄-炭素系状態図の例を図1に示します¹⁾。純鉄の場合、炭素濃度がほぼゼロの位置を参照することにより融点は1536℃でこの温度以下ではフェ

ライト(体心立方晶)となり、911~1392℃ではオーステナイト(面心立方晶)に変化し、更に911℃以下では、再びフェライトに変化します。

1. 極低炭素鋼 ($C \leq 0.02\%$)

炭素濃度約0.02%以下の鋼を高温から十分ゆっくりと冷却する場合(図中WW'線)、オーステナイト単相(①)からオーステナイト粒界に沿ってフェライトが生成します(②)。さらに温度低下してフェライト単相域にて変態が完了します(③)。

2. 亜共析鋼 ($0.02\% \leq C \leq 0.77\%$)

炭素濃度約0.02%~0.77%の鋼(図中XX'線)も同様にオーステナイト単相(①)から粒界に沿ってフェライトが生成しますが(⑤)、さらに温度低下してA1点(727℃)に達するとフェライトとセメンタイトが同時に析出する共析変態が現れます(⑥)。このような共析組織はフェライトとセメンタイトが層状に重なっており(ラメラ状)、パーライトと呼称されております。また、共析組織のパーライトに先んじて生成するフェライト(⑤)は初析フェライトと呼称される場合もあります。

3. 共析鋼 ($C = 0.77\%$)

炭素濃度約0.77%の鋼(図中YY'線)では、オーステナイト単相(①)のままA1点(727℃)に達すると共析変態が生じます。この場合、室温では全面パーライト組織(⑦)が得られます。

4. 過共析鋼 ($0.77\% \leq C$)

炭素濃度約0.77%以上の鋼(図中ZZ'線)では、オーステナイト単相(①)から粒界に沿って初析セメンタイトが生成し(⑧)、さらに温度低下してA1点(727℃)に達すると共析変態が生じます(⑨)。

参考文献

1) 谷野満、鈴木茂、鉄鋼材料の科学、内田老鶴圃、2001、p. 81

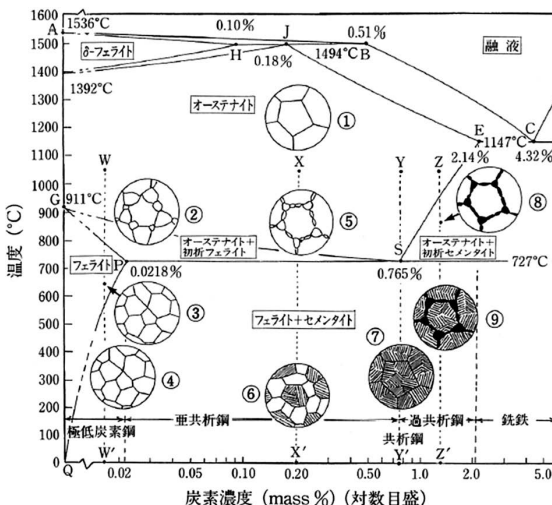


図 1 鉄-炭素系状態図¹⁾

2) CCT曲線

JFEスチール(株) スチール研究所 なか しま こう いち
構造材料研究部 主任研究員 中 島 孝 一

◇ CCT曲線とは

鋼は高温域のオーステナイト相からの各冷却方法（各冷却速度）により、室温での組織が異なります。一定の冷却速度（連続冷却）で冷却した時にどのような組織が現れるかを示した図がCCT線図（Continuous Cooling Transformation Diagram）です。焼入れにあたって各鋼の焼きの入りやすさ（マルテンサイトの生成のしやすさ）等を知る重要な知見となります。

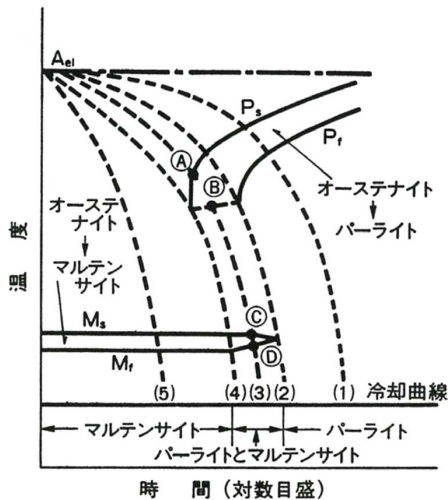


図 1 共析鋼の連続冷却変態線図¹⁾

◇ CCT曲線を読む

共析炭素鋼（C＝約0.77%）の例を図1¹⁾に示します。(1)→(5)と左側にいくほど冷却速度が順に大きくなっています。(1)～(2)では、P_s線でパーライト変態が開始、P_f線で終了し、室温で全面がパーライト組織になります。(3)では、冷却中のパーライト変態が完了せず、Cでマルテンサイト変態が生じ、室温でパーライトとマルテンサイトの混合組織になります。(4)より大きい冷却速度では全面マルテンサイトが得られます。なお、(2)(4)はそれぞれ下部臨界冷却速度、上部臨界冷却速度とよばれています。

◇ CCT曲線の求め方

鋼は相や組織が変化する際に寸法変化が生じます。これを利用して、高温域のオーステナイト相から種々の冷却速度で冷却した場合の寸法変化を熱膨張計等で測定し、この変化点（温度）を求めます。これを結ぶことにより、変態開始線や終了線を温度と時間（対数）の関係図に記入してCCT曲線を作成します。

参考文献

1) 日本金属学会編、鉄鋼材料、1985、p. 28

3) TTT曲線

JFEスチール(株) スチール研究所 いち みや かつ ゆき
構造材料研究部 主任研究員 一 宮 克 行

◇ TTT曲線とは

一般的な鉄鋼材料では、高温のオーステナイト域から急冷し、所定の温度で保持した場合に、どのような相、組織が生成するかを時間の対数に対して示した図がTTT曲線図（Time Temperature Transformation-Diagram）^{1), 2)}です。通常の熱処理では一定温度での等温変態（恒温変態）はあまりありませんが、どのような相、組織が、どれくらいの時間で生じるのかを知ることが、熱処理を行う上で重要な知見となります。

◇ TTT曲線を読む

TTT曲線はCカーブと呼ばれる曲線を描きます。550℃付近の変態までの時間が最も短い部分をノーズ（鼻）、マルテンサイト変態直上で300℃付近の変態に時間がかかる部分をベイ（湾）と呼びます。このような曲線になる理由は、ノーズより高温では、過冷度（平衡変態点 A_1 との温度差）が増加すると変態の駆動力が増し、変態までの時間が短くなります。一方、ノーズより低温になると原子の

拡散が遅くなるため変態も遅くなります。またマルテンサイト変態は、一般には潜伏期がないため、マルテンサイト変態開始温度（ M_s ）になると瞬時に変態が起こることから、直線で描かれます。

◇ TTT曲線の求め方

オーステナイト相から平衡変態点 A_1 以下の所定の温度まで急冷した後、保持中の変態に伴う試験片の寸法変化を測定します。また変態開始後のある時間経過したサンプルを急冷し、ミクロ組織の確認を行い、これをマップ上に記載し、変態開始、変態終了位置を結んだものがTTT曲線図となります。共析炭素鋼の例を図1に示します。

このような主相に関するTTT曲線図以外にも、特定の析出相、析出物についてのTTT曲線図も作成され、鉄鋼材料の組織及び材質制御に活用されています。

参考文献

- 1) 日本金属学会編、鉄鋼材料、1985、p 23
- 2) 榎本正人、金属の相変態 材料組織の科学入門、内田老鶴圃、2000、p 223

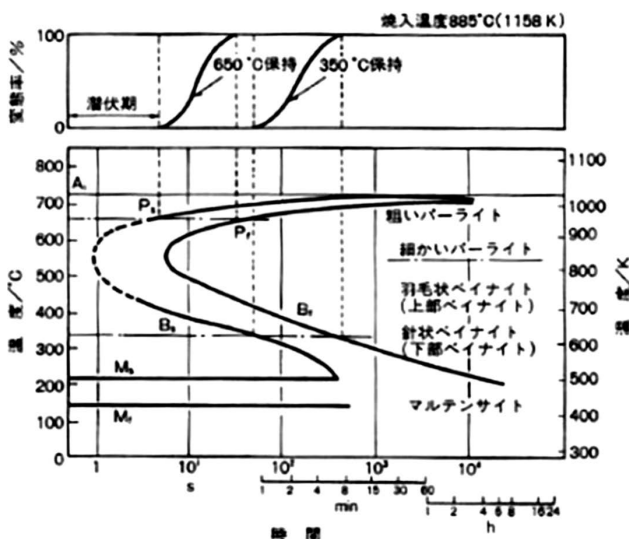


図 1 共析鋼の恒温変態図（参考文献1、p 23より引用）

3. 物理定数を読む

1) 変形のしにくさを表す

弾性係数

愛知製鋼(株) 品質保証部 まつ い たつ や
お客様品質・技術室 主査 松 井 達 哉

◇ 弾性係数とは

弾性係数とは、「変形のしにくさ」を数値で表わした物性値で、永久変形を伴わない弾性域で適用される数値です。数値が大きいほど変形しにくいことを表し、剛性が高いことを示しています。この弾性係数には、縦弾性係数（記号： E ）、横弾性係数（記号： G ）、体積弾性係数（記号： K ）があります。縦弾性係数は、一般にヤング率とも言われ、他に曲げ剛性、たわみ剛性とも呼ばれます。横弾性係数は、剛性率、ズレ弾性とも呼ばれます。それぞれの物性値を式で表すと①～③のように表されます。

①縦弾性係数(E) = ヤング率

$$E = \sigma / \varepsilon$$

σ ：垂直応力、 ε ：縦ひずみ

②横弾性係数(G) = 剛性率

$$G = \tau / \gamma$$

τ ：せん断応力、 γ ：せん断ひずみ

③体積弾性係数(K)

$$K = p / \varepsilon_v$$

p ：弾性体表面に一樣に働く応力（例えば水圧）

ε_v ：体積ひずみ

これらの係数は、単結晶体では異方性があるため、一樣には言えませんが、多結晶体では、剛性が高ければ、どの係数も高く、また、それらは相互に関連した値となっています。

◇ 材料一般について

一般に弾性係数と言うと、縦弾性係数、即ちヤング率を指します。ヤング率の測定は様々な方法により実施され、図1に示すように静的試験（Static

Test）、動的試験（Dynamic Test）に分類されます。各測定方法では、原理、測定温度範囲、試験片の寸法など異なるため、適切な方法を選定する必要があります。

炭素鋼他、各種鋼のヤング率を表1に示します。



図 1 代表的なヤング率の測定方法

表 1 各種材料のヤング率

材 料	ヤング率 E (MPa)
ダイヤモンド	788,000
Al_2O_3 (アルミナ)	345,000
炭素鋼	200,000～216,000
SUS430 (Cr系)	200,000
SUS304 (Ni-Cr系)	193,000
鑄鉄 (球状化黒鉛)	83,300～137,200
銅	129,400
銀	82,700
アルミニウム	70,300
ガラス	69,100
木 材	13,000
ポリスチレン	2,760
ナイロン	2,760
ポリエチレン	138

鋼はヤング率の高い材料に属し、入手しやすさ、コスト、その他の機械的特性等を考慮すると、構造材料として大変好ましい特性を備えた材料であることが分かります。

◇ 鋼について

鑄鉄のヤング率は炭素鋼より低いのですが、その理由は、ヤング率の低いグラファイトがパーライト素地中に分散しているからです。逆に言うと、ヤング率の高い物質を鋼中に分散させることによって、その鋼のヤング率を高めることが可能です。高剛性鋼は、この考え方から生み出されたもので、そのヤング率は、混入された物質と素地の鋼の複

合則によって達成されます。

鋼のヤング率を高めることにより、新たな効果が期待できます。一例として、軸物の回転体を高剛性化することで、回転時の軸のたわみが小さくなり、振動騒音が小さくなります。また、回転体の共振点が高くなるため、その分、回転速度を上げることも可能となります。工作機械に高剛性鋼を採用することにより、工具の逃げが小さくなり、被加工物の工作精度を上げることが可能だと考えます。また、自動車エンジン内の運動部品に高剛性鋼を適用することで設計変更による大幅な軽量化や高速化などの高性能化を図ることが期待されていますが、コストや素材供給面で課題があると考えられています。



2) 温度による長さ、体積の変化を知る 熱膨張係数

愛知製鋼(株) 品質保証部 まつ い なつ や
お客様品質・技術室 主査 松 井 達 哉

◇ 熱膨張係数とは

温度上昇によって物体の長さや体積が膨張する割合を温度あたりで示したものを線膨張係数、または熱膨張係数と呼ばれています。

温度 T において、長さ ℓ 、体積 V の物体を温度 $(T+dT)$ にすると長さ ℓ と体積 V はそれぞれ $(\ell+d\ell)$ 、 $(V+dV)$ になります。この現象を熱膨張といいます。単位温度変化あたりの長さの変化比を線膨張係数 α 、体積変化比を体膨張係数 β といい、それぞれ次式で定義されます。

$$\alpha = (1/\ell) \times (d\ell/dT)$$

$$\beta = (1/V) \times (dV/dT)$$

線膨張係数 α は、固体にだけ、体膨張係数 β は、固体、液体、気体いずれについても定義できる量であり、金属材料で使用される熱膨張係数といえば、線膨張係数 α 、を指します。

◇ 材料による熱膨張係数の違い

熱膨張係数は、物質固有のものであり、含有する合金成分の種類と量によって変化します。表1に炭素鋼、合金鋼、ステンレス鋼の平均線膨張係数を示します。表中の数値、例えば炭素鋼（C：0.42%）0～100℃の $\alpha=11.2[\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$ は、線膨張係数の定義より、材料長さ1,000mmの鋼材が0℃から100℃に上昇した場合、1.12mm長くなることを示しています。

$$d\ell = 11.2[\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}] \times 1,000[\text{mm}] \times 100[^{\circ}\text{C}]$$

表にあるように炭素鋼、合金鋼、ステンレス鋼のいずれも線膨張係数は、温度上昇と共に増大しております。またオーステナイト系ステンレス鋼（18-8）は、炭素鋼、合金鋼に比べ、その値が大きいことがわかります。例えば650℃まで温度が上昇すると炭素鋼との比較で1,000mmあたり約2.4mm

表 1 炭素鋼、合金鋼、ステンレス鋼の平均線膨張係数

鋼種・成分 (%)				平均線膨張係数 $\alpha[\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$			
炭素鋼 焼なまし状態	C	Mn	Si	0～100℃	0～300℃	0～500℃	0～700℃
	0.06	0.38	0.01	12.6	13.5	14.2	15.0
	0.23	0.64	0.11	12.2	13.1	13.9	14.9
	0.42	0.64	0.11	11.2	13.0	14.0	14.9
合金鋼 焼もどし状態	鋼種			20～100℃	20～300℃	20～500℃	20～700℃
	SAE1145（快削鋼）			11.6	13.1	14.2	15.1
	SAE5140（Cr-Mo鋼）			11.2	12.4	13.6	—
	SAE52100（軸受鋼）			—	13.4	14.2	14.6
ステンレス鋼	鋼種			0～100℃	0～315℃	0～538℃	0～650℃
	12Cr			9.9	10.1	11.5	11.7
	18Cr			9.0	10.5	11.2	11.3
	18Cr-8Ni（18-8）			17.3	17.8	18.4	18.7

※出典：鉄鋼材料便覧、金属データブック

の長さの差が生じます。従って、オーステナイト系ステンレス鋼を高温で使用する場合には、熱膨張が他の鋼より大きいことに注意する必要があります。

◇ 熱膨張係数を活用した合金・商品例

熱膨張係数は、物質固有のものであることから、その特性を活かした材料・商品が広く使用されています。その代表的なものがインバーとバイメタルです。

インバーは、Ni36%の鉄-ニッケル合金で、0～1000℃の温度範囲で、 $\alpha = 0 \sim 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の低熱膨張材であり、熱膨張を嫌う精密測定具、半導体

露光装置などに使用されます。またスーパーインバーと呼ばれるNi31.5% - Co5% - 鉄63.5%の3元合金はさらに熱膨張係数の値が小さく、インバーの約1/10であり、ブラウン管のシャドーマスク、半導体関連部品の基礎部分や発電機器など、より温度環境の厳しい分野で使用されています。

バイメタルはインバーと銅（0～1000℃の温度範囲で $\alpha = 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）などの熱膨張係数が異なる金属同士を張り合わせて、熱変動に伴う変形を利用したもので、バイメタル式温度計、電気釜、トースター等の家庭用電気機器、室温調節器、ラジエーターの水温調節装置等、幅広く使用されています。



3) 熱の伝わりやすさを表す

熱伝導率

愛知製鋼(株) 品質保証部 まつ い なつ や
お客様品質・技術室 主査 松 井 達 哉

ま え が き

熱伝導率とは、「熱の伝わり易さ」を数値化した物性値で、英語ではthermal conductivity、記号では λ が用いられます。単位としては、 $W/(m \cdot K)$ で表され、熱伝導率が高いほど熱が伝わり易いことを示しています。

熱の運び手は、「自由電子」と「格子振動」に分けられ、自由電子が熱を運ぶことができるのは、金属のように自由に移動できる電子を十分に持つ場合です。自由電子が少ない酸化物などの物質は、格子振動が熱の運び手となります。これらの物質の原子は、結晶構造を造り、互いに強く結びついているため、ある原子が激しく振動すると、その振動が隣の原子にも伝わり、結果として熱が伝えられることになります。

◇ 各種材料の熱伝導率

表1に常温での各種材料の熱伝導率の一覧表を示します。最も高い物質は、ダイヤモンドであり、それは、原子の結合が最も強く、原子の質量も小さいからです。工業的には特殊な電子デバイスの放熱用に使用されています。また同様の目的にダイヤモンドより安価な Al_2O_3 （アルミナ）や AlN （窒化アルミ）も使われ、LSIなどのパッケージ基板、薄膜磁気ヘッドの基板などに利用されています。これらも原子の結合は共有結合で極めて強く、かつ、軽い元素からなっており格子振動で熱を伝えやすい構造になっています。

ガラスは、酸化物ではありますが非晶質構造で、原子の結合が乱れているため、熱振動は伝わりにくいです。

表 1 常温での各種材料の熱伝導率

材 料	熱伝導率 $W/(m \cdot K)$
ダイヤモンド	5,780
銀	413
銅	372
金	293
アルミニウム	195
クロム	97
ニッケル	84
鉄	79
炭素鋼	58
鑄 鉄	46～57.3
SUS 430 (Cr系)	26
SUS 304 (Ni-Cr系)	16
コンクリート	1.6
ガラス	0.8
木 材	0.12
空 気	0.03
水	0.60

◇ 金属材料の熱伝導率

先にも述べたように、金属は、大部分の熱を自由電子が運搬しているので、熱伝導率は、自由電子が多いほど高くなります。銀や金は、原子1個につき1個の自由電子を持っていますが、純鉄は0.4個であり、それだけ熱伝導率は低いです。ちなみに熱伝導率と、やはり自由電子が関与する物性値である電気伝導率は、比例関係にあります。

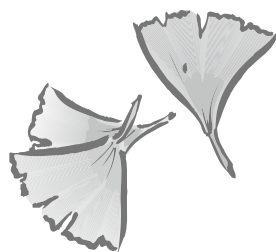
銀や金は、熱伝導材料として最適ではあるが、高価であるため、電子機器などでは、極限られた部品に使用されています。場合によっては、銅などの価格の低い金属に金メッキを施して用いることもあります。また銅は、加工性が良く、耐熱性も比較的良好なので化学プラント、ボイラー等の

熱交換器などに広く利用されており、強度が必要な場合は合金が使われます。但し、合金になると自由電子は、添加元素にぶつかり拡散し、移動が妨げられるため、熱伝導率は低下します。

アルミの熱伝導率は、銅の約60%ですが、密度は1/3なので、軽量化が求められる自動車のエンジン部品（エンジンブロック、ピストン）や足廻り

部品（ナックルアーム）等にアルミ合金として使用されています。

銅は、鉄とC（炭素）の合金であり、Cの含有量とともに熱伝導率は低下します。更にNiやCrなどの元素を大量に添加した18-8ステンレス鋼（SUS304）は、熱を伝えにくい材料であり、浴槽、高保温性水筒、液体窒素容器等に利用されています。



Ⅱ．各 論

1．構造用鋼

1) 浸炭、窒化等の硬さ分布曲線

(株)神戸製鋼所 鉄鋼アルミ事業部門 さいとうともあき
技術開発センター 線材条鋼開発部 線材条鋼開発室 齋藤知昭

◇ 浸炭焼入れ、窒化加工等の表面硬化処理

通常の焼入れ・焼戻し処理を施した鋼材は、強度とじん性に優れますが、自動車に適用される歯車など、繰返し応力による疲労破壊が問題となる部品では、鋼材表面においてより高い強度が求められます。一般に、鋼材に高い耐面疲労強度・耐摩耗性を付与するためには、浸炭焼入れ（以降浸炭）、窒化加工（以降窒化）、高周波焼入れ、ショットピーニングなどの機械加工、金属による表面被覆などの表面強化手法が用いられます。代表的な表面硬化処理方法である浸炭では低炭素合金鋼などが用いられ、表層部に炭素を拡散させた後に焼入れ（急速冷却）することで表層を硬化させます。窒化では変態点以下の温度で窒素を表層部に拡散させることで表層に硬さを付与します。

◇ 硬さ推移曲線の読み方

図1に浸炭および窒化により表面硬化処理した硬さ推移曲線の一例を示します。グラフの横軸には硬化処理後の鋼材表面から内部への深さ方向の距離を、縦軸には硬さ（ビッカース硬さなど）をとります。表面近傍が最も硬く、深くなるほど硬さが低下していくことが分かります。浸炭あるいは窒化では、それぞれ表層からなだらかに炭素あるいは窒素の濃度が低下することで硬さも低下します。ただし、窒化ではごく最表層に硬質な窒化化合物層が形成し、その下に窒素の拡散層が形成するという特徴があります。また、硬さ推移曲線が横軸と平行になる深さでは表面硬化処理時に炭素や窒素が侵入しておらず、母材（生地）成分に

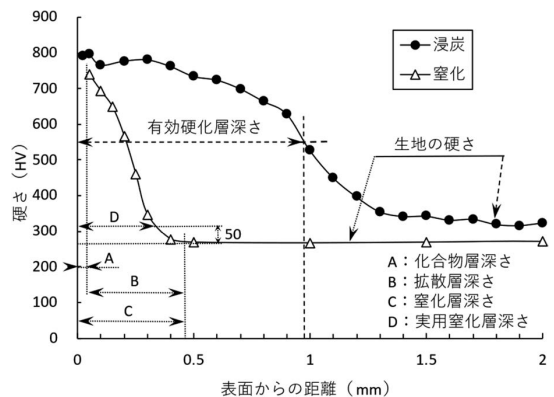


図 1 浸炭および窒化後の硬さ推移曲線の一例

より硬さが決まります。この位置の硬さを芯部硬さや内部硬さと言うこともあります。

◇ 硬さ推移曲線の使い方

実部品の浸炭や窒化が正常に行われているかの判定指標として有効な硬さ推移曲線ですが、実用上は以下の代表値を比較する場合があります。

一つ目は、表面硬さです。浸炭の場合、一般に表層の炭素濃度が0.7～0.8%で最大の表面硬さが得られます。更に炭素濃度が高くなると比較的軟質な残留オーステナイト相の割合が増加し硬さが低下します。窒化の場合、表面硬さの測定方法がJIS G 0563に規定されており、表示記号も規定されています。

二つ目は、硬化層の深さです。浸炭の場合、有効硬化層深さが用いられ、測定方法がJIS G 0557に規定されています。これは硬化層の表面から硬さが550HVとなる深さまでの距離を表し、一般的

には1.0mm前後です。窒化の場合、化合物層、拡散層それぞれの深さに加え、これらの和で求まる窒化層深さが用いられます。更に、窒化層の表面から生地の硬さより50HV高い硬さとなる深さまでの距離を表す実用窒化層深さ（図1中D）も用い

られますが、硬化層の深さは浸炭と比較して浅く、一般的に数百 μm 程度です。

なお、侵入炭素や窒素の影響を受けない生地（内部、芯部）の硬さも実部品の強度特性を把握する上で重要な指標の一つです。



2) 被削性

(株)神戸製鋼所 鉄鋼アルミ事業部門 はま 濱
技術開発センター 線材条鋼開発部 線材条鋼開発室

たつ や
達 哉

◇ 被削性とは

被削性とは、切削加工時における材料の「削られやすさ」のことです。工作機械を用いて材料に必要な形状に削り出す加工方法を切削加工と称し、機械部品の多くは、切削加工により所定の部品形状に成形、加工されます。

被削性は、必ずしも材料特性のみによって決まるものではなく、工具の材種、工具の形状、切削条件や切削方式などにも影響を受けます。一般的に材料が硬くなるほど寿命が低下するが、試験条件が変わると被削性の優劣が逆転したりすることもあり、材料間の比較評価を行う際は試験条件にも注意が必要となります。

一般的に被削性を評価するには、①工具寿命の長短、②切りくず処理性、③仕上げ面粗さまたは精度の良否、④切削時の抵抗の大小、の4つの尺度（基準）が用いられます。その中でも重要な工具寿命と、切りくず処理の難易について、下記で取り上げます。

①工具寿命

工具寿命とは工具の摩耗量が一定以上大きくなる、または工具が破損することによって、その後

の切削が不可能となる寿命を称します。工具寿命を評価するときは主に、「摩耗量－切削距離のグラフ」と「切削速度－切削時間のグラフ（V-T線図）」が使用されます。

「摩耗量－切削距離のグラフ」は、一定の切削条件においてある工具摩耗量に達するまでの摩耗量推移を、切削距離を横軸としてグラフにしたものです。ある工具摩耗量までの切削距離が長い方が、工具寿命が長い、被削性が優れるという評価になります。

「V-T線図」は、ある工具摩耗量に達するまでの切削時間Tと切削速度Vの関係を両対数座標上にプロットしたものです。図1にS10CとS45CのV-T線図の例を示します。V-T線図では同じ切削速度では切削時間が長い方が、同じ切削時間では切削速度が速い方が、被削性に優れるという評価になり、図1ではS10Cの方が被削性に優れると評価できます。

なお、「V-T線図」は旋削試験の工具寿命評価を実施する場合で使用されます。ドリル試験の工具寿命を評価する場合は、切削時間の代わりにドリルで加工できる穴深さの合計Lで整理した「V-L線図」を用います。

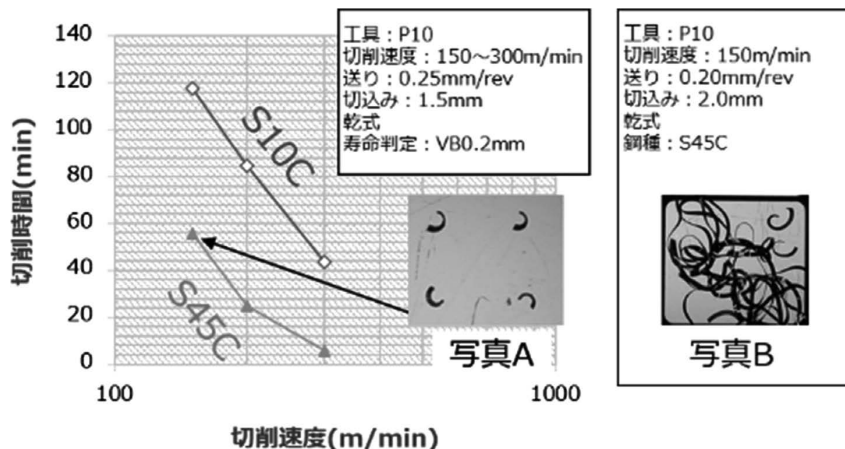


図 1 炭素鋼のV-T線図と切りくず写真

②切りくず処理性

切削加工中に生成される切りくずは、工具や加工物に絡みつくと、工具欠けや自動運転停止などの不具合につながるため、切りくず形状や流出状態の制御は重要となります。

切りくず処理性の一般化された評価方法はないですが、通常は、切りくずが短く切れやすいか、長くつながりやすいかによって評価します。切り

くずが短ければ、切りくず処理性に優れるという評価になります。切りくずの評価を行う際は、複数の異なる切削条件（切削速度、送り、切込み）での切りくず形状を評価した方が良いです。

図1に切削条件が異なるS45Cの切りくず写真を示します。写真Aは写真Bに対し、切りくずが短くなっており、切りくず処理性に優れていると評価できます。



3) 焼戻し性能曲線

(株)神戸製鋼所 鉄鋼アルミ事業部門 おくもと たけし
技術開発センター 線材条鋼開発部 線材条鋼開発室 奥本剛史

◇ 焼戻し性能曲線とは

焼入れによって得られたマルテンサイトは硬さが著しく高いですが、靱性が低いため、焼入れした鋼を焼戻しして靱性を回復させます。焼戻しには、用途や目的によって低温焼戻し（150～250℃）と高温焼戻し（400～650℃）があります。一方、それらの中間の温度域では、焼戻し後に衝撃値が大きく低下するため、この温度域を避けて焼戻しを行います。

- ・ 低温焼戻し：150～250℃程度で行われ、硬さをあまり低下させずに内部応力を低下させることができます。炭素工具鋼や合金工具鋼（熱間金型鋼を除く）など、硬さや耐磨耗性を要求される鋼種に用います。
- ・ 高温焼戻し：400～650℃程度で行われ、焼戻温度が高くなるにつれて、降伏強さ、引張強さ、硬さは連続的に低下しますが、衝撃値や伸び、絞りには向上します。機械構造用鋼など、高靱性を要求される鋼種に用います。
- ・ 焼戻し脆性：炭素鋼では200～400℃付近、NiやCrなどを添加した合金鋼では500℃付近で焼戻しを行うと、衝撃値や伸び、絞りなど靱性が大きく低下することがあります。これらの現象を、それぞれ低温焼戻し脆性、高温焼戻し脆性と言い、焼戻し脆性が発生する温度域での焼戻しは構造用の用途では特に避ける必要があります。ただし、高温焼戻し脆性は、500℃付近より高い温度に加熱したとしても、冷却時に500℃付近を徐冷すると脆化が発生します。そのため、500℃付近を速やかに冷却する必要があります。一方、低温焼戻し脆性は、発生温度域より高い温度で焼戻しを行うと脆化は発生しません。

焼戻し性能曲線とは、焼戻し処理の温度と、焼戻し後の機械的性質の関係を示したものです。焼戻し性能曲線を使用すれば、焼戻し条件に対する機械的特性の推定や、指定された強度に必要な焼戻し条件を求めることができます。

◇ 焼戻し性能曲線の読み方、使い方

焼戻し性能曲線の例を図1に示します。焼戻し温度が上がると、硬さは低下しますが、衝撃値や伸び、絞りなどは大きく上昇することが分かります。一方、200～400℃付近で、衝撃値が大幅に減少しており、低温焼戻し脆性が発生していることが分かります。焼戻し性能曲線は、成分や焼入れ状態が異なると変化するため、鋼種が異なると同じ強度を得るための焼戻し温度は異なります。

焼戻しによる機械的性質の変化は、焼戻し温度のほか処理時間にも影響されます。温度 T (K) で時間 t (h) の焼戻しを行ったとき、 $P=T(\log t + C)$ を焼戻しパラメータと呼び（ C ：定数）、同じ鋼種に対しては、焼戻し温度や処理時間が異なっても、焼戻しパラメータが同じであれば、強度はほぼ同一になります。一方、靱性については、焼戻しパラメータが同じでも異なる場合がありますので注意が必要です。

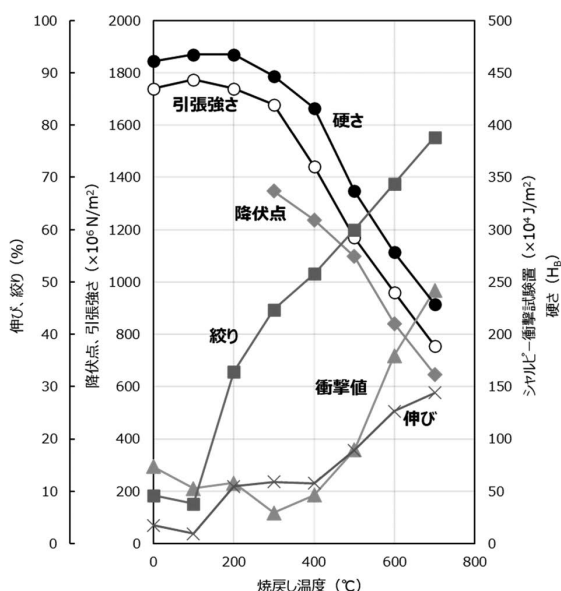


図 1 SCM435の焼戻し性能曲線

4) 遅れ破壊曲線

(株)神戸製鋼所 鉄鋼アルミ事業部門 やす い たか ゆき
技術開発センター 線材条鋼開発部 線材条鋼開発室 安居 尚 志

◇ 遅れ破壊とは

遅れ破壊とは、材料に荷重が負荷されてからある時間経過後に突然破壊を生ずる現象であり、材料、応力、環境の3要素の相互作用によって発生する。また、遅れ破壊は水素起因で発生すると知られており、材料の遅れ破壊発生リスクは、鋼材の限界水素量 H_c （遅れ破壊を起こさせない上限の水素量）が、実環境から侵入する水素量 H_e を上回っていれば発生しにくいと判断できる¹⁾。

近年、カーボンニュートラル実現に向け、内燃機関のCO₂削減に向けた燃焼効率向上や軽量化技術開発は依然として取り組まれており、鉄鋼材料への高強度化ニーズは絶えることがない。高強度化すると、遅れ破壊感受性が増大するため、メカニズム解明に向け様々な研究が行われている。

◇ 遅れ破壊試験と遅れ破壊曲線

前述の通り、材料の耐遅れ破壊特性を把握するには、 H_c と H_e を評価する必要がある。 H_c を評価する方法は、定荷重法、定歪み法、定歪み速度法(SSRT)の3つに大別できる。前二者は、簡便で広く実施されているが、実環境のようなマイルド環境で評価するには、長時間を要し、場合によっては遅れ破壊を生じないなどの問題がある²⁾。一方、SSRT法は徐々に応力を付加する応力増加型の試験であり、微量の水素量でも脆化させ強制的に破断させるため、いずれの環境でも迅速に評価が可能である。本報では、一例としてSSRT法により得られた遅れ破壊曲線を紹介する。

図1にSSRTの試験結果を示す。横軸にSSRT後の拡散性水素量、縦軸に破断時の最大応力を示す。拡散性水素は、常温で鋼中を拡散する水素のことを指し、遅れ破壊に悪影響を及ぼす水素である。

例えば、1,000MPaの応力負荷環境下を想定した場合、SCM440の H_c は約0.2ppmとなるが、開発鋼は約3.3ppmと非常に高く、開発鋼の方が多くの水

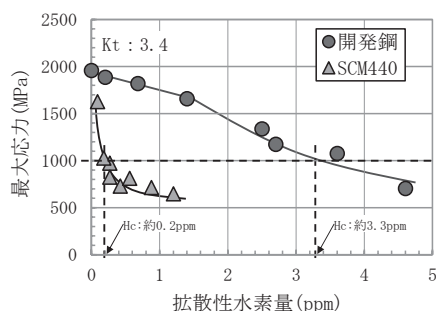


図 1 拡散性水素量と最大応力の関係

素量が侵入する環境においても高強度を維持できる。

H_e を評価する方法は、酸浸漬、電解陰極チャージ、高圧水素ガスなど様々な方法がある。酸浸漬は、溶液中に試験片を浸漬させ、腐食反応により発生した水素をチャージする方法である。浸漬試験は、簡便な方法であり、溶液の種類や浸漬時間を変化させることにより、チャージ量を制御することも可能である。電解陰極チャージは、溶液中に試験片と対極を浸漬し、電気分解を行うことで水素をチャージする方法であり、溶液の種類、電流密度の制御によって目標の水素量をチャージしやすい方法である。高圧水素ガスは、400~600℃程度の高温で10~30MPa程度の高圧水素ガスに試験片を暴露させる方法であり、比較的安定的に多数の試験片への水素チャージが可能である³⁾。

◇ 今後の課題

遅れ破壊を抑制するには、発生メカニズムを明確にすることも重要だが、評価方法を確立することも重要である。実環境での水素の侵入・放出挙動、応力の経時変化等を模擬し、適切に評価することでより一層正確に遅れ破壊リスクを判断でき、最適な材料選定が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 山崎真吾ら：鉄と鋼、83 (1997)、42-47
- 2) 漆原亘ら：R&D神戸製鋼技報、52 (2002)、57-61
- 3) 家口浩ら：こべるにくす、42 (2014)、1-3

5) 遷移温度曲線

(株)神戸製鋼所 鉄鋼アルミ事業部門 さいとうともあき
技術開発センター 線材条鋼開発部 線材条鋼開発室 齋藤知昭

◇ じん性の温度依存性について

通常の鉄鋼材料は、使用されている温度がある温度より低くなると著しくもろくなり、じん性が低下します。これは温度低下に伴い、破壊の形態が延性からぜい性的に変化していくためです。この現象が広く知られていなかった頃は、寒冷地で使用される大型船の沈没など、低温におけるぜい化を原因とした大事故が度々発生していました。じん性が求められる材料においては、その材料が使用される温度に合わせた試験を行う必要があります。

◇ 遷移曲線とは

遷移曲線の求め方はJIS Z 2242に規定されています。図1に遷移曲線の一例を示します。横軸には試験温度、縦軸には吸収エネルギー、延性（又は、ぜい性）破面率、あるいは横膨出をとります。ここで、延性（又は、ぜい性）破面率とは、試験片の破面の全面積に対する延性（又は、ぜい性）破面の面積の百分率を表します。また、横膨出とは衝撃試験後の破面の特定の辺の長さが試験前の長さに対しどれだけ横に張り出した（延びた）かを表します。遷移曲線を作成する場合、まず、延性破面率100%及びぜい性破面率100%に相当する温度を含む温度領域において、適切な試験温度を複数選び衝撃試験を行い、試験結果を表す各点のほぼ中央を結ぶことで、遷移曲線が得られます。

なお、遷移曲線は外挿によって描いてはいけなことがJIS G 2242に規定されています。同じ試験温度において、吸収エネルギー、延性破面率、および横膨出が大きいほどじん性が高い材料であると言えます。実用的には、吸収エネルギーがある限界以下に低下する温度を遷移曲

線より求めることができます。例えば、必要な吸収エネルギーが40J以上である場合、図1の材料では、 -60°C 以下の環境下での使用が困難であると判断できます。

◇ 遷移温度の求め方

遷移温度を求める方法はJIS Z 2242に記載されています。遷移温度には破面遷移温度とエネルギー遷移温度があります。図1において、前者は延性破面率が50%となる温度（ $T_{50\%SFA}$ ）を表し、後者は延性破面率が100%となる最低温度に対応する吸収エネルギーと、ぜい性破面率が100%となる最高温度に対応する吸収エネルギーとの、平均吸収エネルギーに相当する温度を表します。エネルギー遷移温度は、簡便な方法として延性破面率が100%となる温度における吸収エネルギーの50%に相当する温度（ $T_{50\%US}$ ）として求めることもできます。

鋼のじん化には、延性破面率が100%となる吸収エネルギーの上昇、あるいは、破面遷移温度やエネルギー遷移温度の低下の2つの方向があります。具体的な方策としては、一般的に結晶粒の微細化および不純物元素や非金属介在物の低減が有効とされています。

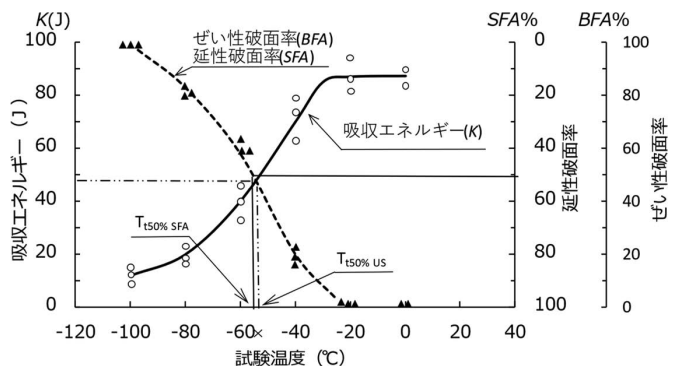


図 1 遷移曲線の一例

6) 冷間鍛造性 (変形抵抗)

(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 線材条鋼開発室 劉

ぎょう う 曉 宇

◇ 冷間鍛造とは

冷間鍛造とは金属材料を室温又は室温に近い温度で加工を行う塑性加工方法の一つである。同じ素材を指定の形状に加工する際に、鍛造加工は素材を切削する必要がないため材料ロスは低い。また、熱間や温間鍛造に比べて材料の加熱が不要であり、CO2削減にもメリットがあると言われている。一方、鍛造された製品は鍛圧方向に繊維線のような金属組織が顕微鏡で見られる。それを鍛流線又はメタルフローという。金属材料内に発生する鍛流線は強度を維持できるため、材質の強度を考える際に重要なポイントである。

但し、冷間鍛造は室温にて行う加工であるので、素材を圧下する際に金型への圧力も高くなり、金型の摩耗が起りやすい。更に、材料の加工硬化によって金型に過大な圧力が加わることで、金型に早期破損に生じることがある。冷鍛加工を実施する前に、金属材料の冷間鍛造性を考慮する必要がある。

◇ 変形抵抗とは

変形抵抗は金属材料の冷間鍛造性を評価するために重要な指標である。変形抵抗とは、冷間鍛造加工で材料を変形させるために必要となる応力であり、変形抵抗が小さい材料を選択の方が加工を行いやすくなる。

一般的には、日本塑性加工学会が規定した摩擦の影響を考慮した端面拘束圧縮試験で測定する方法が知られている。素材を円柱のように加工し、特殊圧盤を用いて試験片端面を完全拘束状態で単軸静的に圧縮する。据え込み中の変位と荷重を測定し、圧縮率-変形抵抗曲線(図1)又は荷重-対数ひずみの曲線を得られる。

・標準試験片：φ10mm×15mmL (H/D=1.5相当)

・ひずみ速度： $10^{-3} \sim 10^{-1}/s$

・対数ひずみ： $\varepsilon = F(e) = F\left(\frac{h_0 - h}{h_0}\right)$

・変形抵抗： $Y = \frac{1}{f} \cdot \frac{P}{A_0}$

変形抵抗は温度の影響が大きく、塑性加工の解析には加工時の温度における変形抵抗を用いることが不可欠である。

◇ 冷間鍛造性の影響因子

冷間鍛造性の影響因子を大きく分けると、加工工程と素材自身の2つが考えられる。このうち素材要因については、鋼材成分と金属組織の影響が知られている。Cは鋼材の硬さを上昇させるため変形抵抗を増大させる。Nは変形中に動的ひずみ時効を生じさせて、変形抵抗を上昇させることもある。組織の観点から、セメンタイトの含有量と存在形態は重要なポイントである。パーライト組織中に板状セメンタイトの硬度は高い、割れ発生の起点になりやすい。但し、形状を変化させる球状化焼きなまし(SA)など熱処理を行うことで、変形抵抗を大幅に改善することはできる。

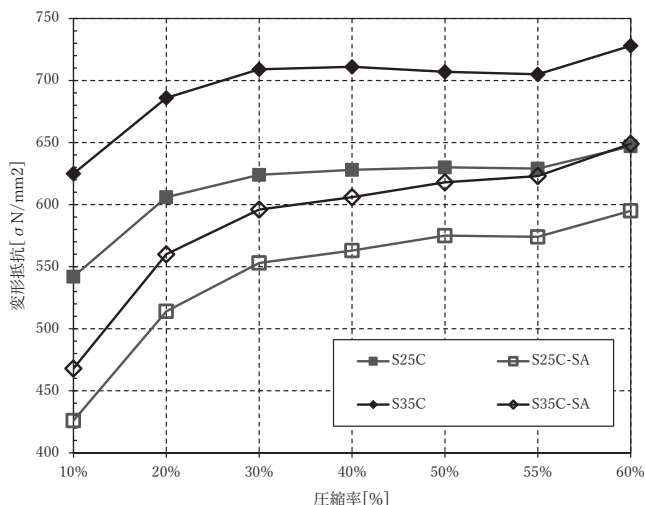


図 1 圧縮率-変形抵抗曲線の例

2. ばね鋼

1) 疲れ特性 (S-N曲線)

三菱製鋼(株) かわぐちかずのり
千葉製作所 技術部 河 口 和 紀

◇ 疲れとは

材料が静的に使われた場合の強さを示す指標として、降伏強度や引張り強さがあります。ところが材料に繰返し応力(荷重)を作用させると、降伏強度よりも低い強度で壊れることが経験的に知られています。

このように繰返し応力下で、破壊する強度が低くなる現象を疲れと言います。多くの機械・構造物は繰返し応力を受けているので、疲れは設計する際重要な現象と言えます。

◇ 疲れの特徴

疲れによる破壊は、①作用した応力が静的強度以下で生じる。②外見上、ほとんど変形を伴わずに進行し、ある日突然破壊する。③作用した応力が高いほど破壊するまでの繰返し数は少なくなる。④鉄鋼材料では作用応力が低くなり、ある値以下になると破壊を起こさなくなる。等の特徴があります。

◇ 疲れ特性の測定

実際の機械・構造物は形が複雑で、しかも作用応力も規則的に変動しないので、疲れ特性の評価には、試験片・試験方法を決め、一定の振幅応力を繰り返し与え、振幅の大小と破壊までの繰返し数を測定する試験が行われます。

この試験で測定したデータを、縦軸に応力振幅:S、横軸に破壊までの繰返し数:Nで示したのが図1です。試験片が破壊した点を○で、破壊しなかった点を→で付けて示し、これらの点を結んだ線をS-N線図と呼んでいます。図の右下で曲線が水平になる時、その振幅応力を耐久限度(疲れ限度)と呼び、これにより小さい応力では破壊し

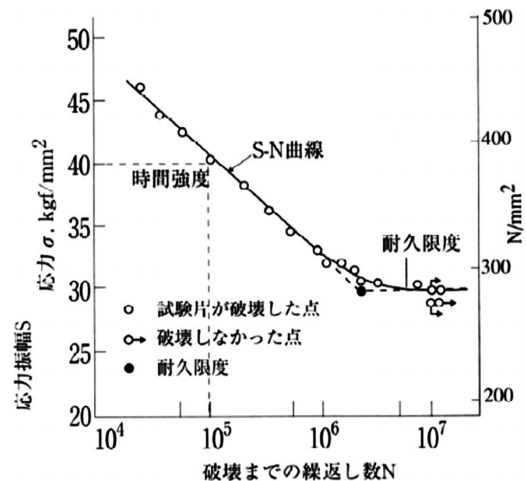


図 1 S-N曲線

ない事を示しています。耐久限度を一般的に疲れ強さと言います。また線図から破壊繰返し数:Nに対応する応力:Sを求め、これを時間強度と呼び、時間強度で疲れ強さを示すこともあります。

疲れ試験方法はJISに2つ(Z 2274-5)が規格化されています。

◇ 耐久限度に影響する因子

耐久限度は材料の引張強さ(硬さ)と強い関係があり、引張強さが約 1.470N/mm^2 (150kgf/mm^2)までは比例し、引張強さが上がると耐久限度も向上します。

耐久限度を向上させる方策として表面の硬さを上げたり、表面に残留応力を付与する表面処理が有効です。また表面状況(表面異常層・疵・粗さ)が問題となります。

近年ではグローバル化により、海外生産や材料を海外から調達する場面も多くなってきています。同じ材質であっても材料メーカー(品質)によっ

て、耐久限度や時間強度の傾向が異なる可能性もあるので品質評価が重要です。

◇ S-N曲線の活用

S-N曲線では耐久限度と時間強度が重要です。永久に壊れない設計をするには耐久限度が用いら

れ、疲れが問題にならない場合は想定される繰返し数に対する時間強度を用いれば耐久限度を用いるより設計応力を高く取れます。

同じ耐久強度を得るにも材料・熱処理・表面処理等のいくつかの組合せが考えられ、それらの比較にも有効です。



2) リラクセーション (へたり)

三 菱 製 鋼 (株) かわ ぐち かず のり
千葉製作所 技術部 河 口 和 紀

◇ リラクセーションとは

全ひずみを一定に保っている場合、時間とともにクリープ（塑性）ひずみが生じ、弾性ひずみが減るため応力（荷重）が低下する現象です。一般に室温よりも高い温度にさらされる部品で問題となる特性です。

◇ リラクセーションの例

高温機器に使われる締付けボルトは高応力下で高温にさらされるため、リラクセーションにより締付け力が時間とともに低下します。コンクリートパイル中のPC鋼材では養生時、または室温での使用中にリラクセーションを生じると強度が低下します。ばねでも似た現象があり荷重を一定に保っていると時間とともにへたりが生じると強度が低下します。

ばねでも似た現象があり荷重を一定に保っていると時間とともにへたりが起こりばねの高さが低くなります。

◇ リラクセーション試験

金属材料を対象として日本ではJIS Z 2276「金属材料の引張りリラクセーション試験方法」が規定されています。

試験方法は規定の温度に保持した上、規定の全ひずみあるいは初期応力を与えた状態で全ひずみを一定に保ち、応力の変化を測定するもので、クリープを起こすような条件下で試験を行うと、応力は時間の経過とともに初期の値から低下していきます。

試験条件が同じならば応力の低下が少ない方が特性がよく、この応力と時間の関係を示したものがリラクセーション曲線です。

図1にクリープとリラクセーションの関係を示します。クリープは一定の応力を掛けたまま時間の経過に伴ってひずみが増加していく現象であり、

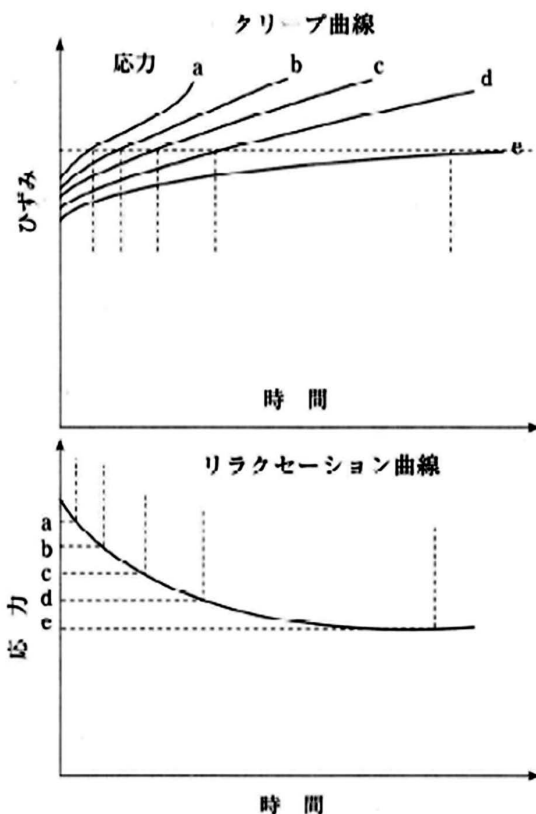


図 1 クリープとリラクセーションの関係図

リラクセーションはクリープ試験で幾つかの応力で試験した結果からひずみが同じ時間を求めて、応力と時間に置き換えたものと考えられます。

コイルばねにおいてもばねのへたりを測定するために同様な試験を行ってます。室温で全ひずみを一定にして締め付けを行い、規定の温度で一定時間保持後、室温で締め付けを解除し、ばねの高さがどれだけ低くなるかを測定、高さの低下が少ない方が特性がよいのです。

この方法は厳密にはリラクセーション試験ではないが簡便な方法として広く利用されています。

◇ 試験結果の活用

リラクセーションが問題となる用途では材料を選定する際、また構造物の保守安全管理の面から部品の点検・交換時期を決めるために重要なデータと言えます。

ばねではへたりが生じると車体のバランスが崩

れるのでへたりは重要な特性で、材質やへたり防止処理の効果を確認するために活用されています。

へたりを改善するためには硬さを上げたり、セッチング等の処理が有効です。

このようにリラクセーション特性は設計ばかりでなく、構造物の維持・管理に活用される重要な特性です。



3. 軸受鋼

転動寿命試験

山陽特殊製鋼(株) 藤 松 威 史
研究・開発センター

◇ 軸受の転動疲労とは

回転軸を支持する軸受は、一对のリング状部品（軌道輪）の間に転動体（玉、ころ、ニードル等）が微小な面積で転がり接触する構造を有し、それに伴う繰り返し負荷で疲労し、はく離に至る。このタイプの疲労は、転がり接触部直下の部品内部で集中的に進行する特徴があり、転動疲労と呼ばれる（転がり疲れとも言う）。軸受は、作動環境や負荷条件、配置スペースの制約等を考慮しながら、多彩なサイズや種類の軸受のなかから選定され、使用される。選定に必要な情報は、軸受メーカーのカタログ等で提供され、ユーザー側での軸受の寿命評価は通常必要としない。一方、軸受製品や、その素材である軸受用鋼の良否評価を目的に、軸受や軸受用鋼のメーカー側で転動寿命の評価が行われている。

◇ 転動寿命試験について

転動寿命評価に対し、特に規格化された方法は無い。そこで、軸受を試験機に組み込んで評価する方法や、軸受の機構を模して評価する方法等が各社で行われている。比較的共通して利用されるのは、スラスト玉軸受の機構を模した方法（スラスト型転動寿命試験）である。スラスト玉軸受は、円周溝加工を施した上板と下板の間に鋼球（玉）が複数配置された構造を持つ。スラスト型転動寿命試験では、下板を平板（評価用鋼材から作製）に代えることで玉との転がり接触部の負荷を高めて平板側で優先的にはく離させ、寿命を評価する。

転動寿命は、同一ロットの鋼材を同一試験条件で評価した場合でもばらつきが出る。そこで、複数枚の試験を行い、寿命ばらつきを加味して寿命レベルを判断する。そのために、取得した寿命

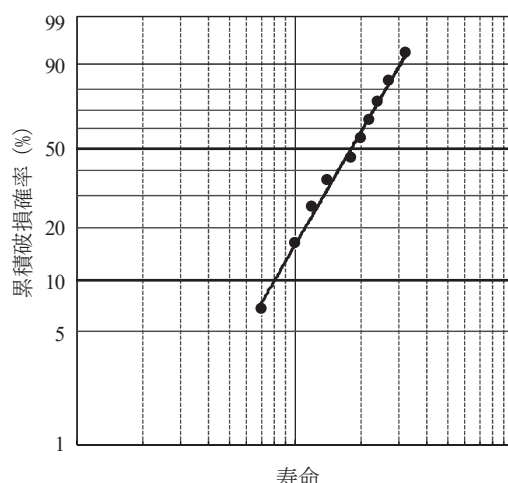


図 1 ワイブルプロットの作成例

データを元に図1に例示したワイブルプロットを作成する。このプロットを用いた評価は、寿命がワイブル確率分布に従う場合に行うことができ、その場合の寿命は最も弱い箇所の寿命に依存する。軸受の内部起点ははく離は、部品内部の弱点（素材となる鋼中の非金属介在物等の内部欠陥）を起点に起こるため、その寿命特性はワイブル確率分布に従うとみられている。

ワイブルプロットでは、横軸を寿命（対数軸表示）、縦軸を累積の破損確率として、寿命の短いものから順に下からプロットし、それらに対し最小二乗法により近似直線を引く。これにより平均寿命（累積破損確率50%に対応する寿命 L_{50} ）や、短寿命はく離のしやすさ（同10%に対応する寿命 L_{10} ）が一つの目安）等が評価される。スラスト型転動寿命試験は異なるロットや異なる材料、あるいは熱処理を変えた材料の寿命比較にも利用できる。転動寿命の評価に関し、最近では、寿命の評価結果に乱数シミュレーションを適用して寿命有意差

を評価しやすくする方法が提案されている¹⁾。また、スラスト型転動寿命試験を応用し、平板中に介在物を人工埋設して介在物起点の寿命やき裂挙動を検証する研究も行われている²⁾。

参 考 文 献

- 1) 藤田 工、佐々木敏彦：トライボロジスト、59、10（2014）、P. 667
- 2) 藤松威史：山陽特殊製鋼技報、25（2018）、P. 31



4. 工具鋼

1) 鏡面度

(株)プロテリアル しん じ ゆき お
安来工場 技術部 穴 道 幸 雄

◇ 工具鋼における鏡面度

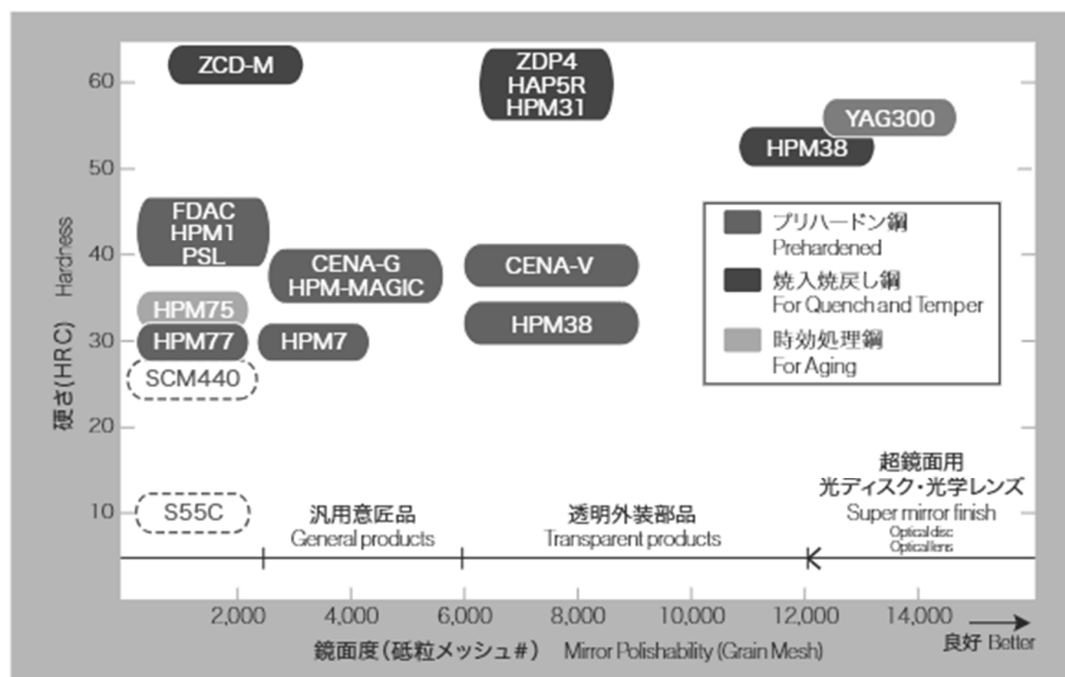
金型表面の状態が成形品表面に転写され易いプラスチック成型用金型用鋼において、鏡面度は、特に重視される項目のひとつとなる。最終仕上げで到達可能な鏡面度は鋼材によって異なってくるため、鋼材の製造メーカーからは、各鋼材の最終仕上げで到達可能な鏡面度（仕上げ面粗さ、もしくは最終仕上げでの研磨砥粒の大きさ等）のマップ図等が示されている。図1にこうしたマップ図の例を示す¹⁾。

◇ 鏡面度の評価方法

日本工業規格では、JIS Z 8741に鏡面光沢度-測定方法が規定されているが、反射光束を測定しての評価のため、測定機器が必要となる²⁾。

この他、鏡面度は表面欠陥の有無にて評価されることも多い。鏡面の表面欠陥部分では、特異的に光が乱反射し、その存在が強調される。このため、目視でも高感度で確認でき、実際の金型の製造工程では、こうした目視による確認が行われることが多い。

表面欠陥の原因調査では、光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡などが用いられ、光学顕微鏡では色の



【FDAC、HPM-MAGIC、HPM、CENA、HAP、ZCD、PSL、ZDP、YAG は(株)プロテリアルの登録商標です。】

図 1 鏡面仕上げ性位置付け図（概念図）

情報も得られ、X線分析装置を備えた走査型電子顕微鏡では、成分の情報も得られ、表面欠陥の原因を調査するうえでの重要な情報が得られる評価方法となっている。

◇ 鏡面度への影響因子

鏡面度への影響因子は、①研磨作業に起因するもの、②金型に用いられる鋼材の特性に起因するもの、の2つに大別できる。

①研磨作業に起因するもの

鏡面磨き工程は、磨き工程までの加工疵の除去、面出しを目的とした粗研磨工程（砥石、ペーパー等）と鏡面に仕上げる鏡面研磨工程（ダイヤモンドペースト等の遊離砥粒）に分けられ、各々の研磨工程では段階的に砥粒の大きさを小さくしての研磨が行われる。この両者の研磨率（単位時間当たりの研磨量）は、粗研磨の方が遥かに大きく、粗研磨工程での研磨疵が鏡面研磨工程まで残存すると鏡面でのピンホールやうねりといった表面欠陥の原因となる。

◆鋼材特性に起因するもの

鋼材中には不可避で非金属介在物や炭化物、ミ

クロ偏析が存在し、これらが鏡面磨き工程で破碎・脱落したり、凹凸の原因となることで鏡面におけるピンホールやうねりといった表面欠陥となる。このため、こうした面で優れた再溶解材は高い鏡面度を得るためには有利となる。また、硬さが高いことで深い研磨疵が入り難くなるため、硬さは高い方が有利となる。なお、材料特性に起因して形成された表面欠陥が欠陥として認識されるには、鏡面の仕上げ粗さが影響する。上記した到達可能な鏡面度は、この鋼材特性による表面欠陥が認識されるまでの仕上げ粗さを示している。

◆その他

製造工程等で腐食（錆）が発生すると、形成されピットが残存することで表面欠陥となる場合がある。このため、製造工程中、及び保管時には腐食（錆）の発生に注意する必要がある。材質特性として耐食性の高い鋼材は、こうした腐食（錆）に起因した表面欠陥の抑制に有利となる。

参 考 文 献

- 1) ㈱プロテリアル カタログ「YSS高級プラスチック金型用鋼」
- 2) 日本工業規格 JIS Z 8741-1997「鏡面光沢度-測定方法」

2) ヒートチェック試験

(株)プロテリアル かね ちか おさむ
安来工場 技術部 兼 近 領

◇ ヒートチェックとは

ダイカストや熱間鍛造などに使用される金型の表面は、被加工材との接触時には加熱され、離型剤や潤滑剤などの塗布時には冷却されます。このような熱サイクルが金型表面に繰り返し与えられることにより発生するクラックをヒートチェックと言います。

◇ ヒートチェック試験

主にダイカスト金型や熱間鍛造金型のヒートチェックを再現し、様々な金型材料や表面処理の耐ヒートチェック性を評価する加速試験がヒートチェック試験です。以下にプロテリアルにおける試験方法の事例を紹介します。試験方法の一例を図1内左上に示します。試験片は直径80mm、厚さ50mmの丸鋼材で狙いの硬度に調質後、丸断面端面を試験面として使用します。試験片端面へ高周波誘導加熱及び噴霧水冷却を繰り返し行い試験

片の表面に加熱と冷却に伴う熱応力を繰り返し与えヒートチェックを発生させます。目標温度までの加熱過程とそれに続く冷却温度までの冷却過程を1サイクルとし、この1サイクル毎に試験片の表面へ圧縮応力と引張応力とを作用させることで熱間工程における金型の温度環境を模擬しています。試験片の試験面を10秒間かけて所定の加熱温度（ダイカスト金型を想定した場合は600～650℃、熱間鍛造金型を想定した場合は700℃前後）まで加熱し（加熱温度での保持無し）、15秒間で70℃まで冷却するという工程を繰り返し行うという内容です。試験サイクル数は試験片の鋼種や表面処理の種類によって異なりますが、2,000～4,000サイクル前後で評価されることが一般的です。このヒートチェック試験は一般的な熱間加工環境と比べ温度振幅やそれに伴う熱応力が大きくまたサイクルタイムは短く、実際の金型環境に対し短サイクル側で耐ヒートチェック性を評価ができるメリットがあります。

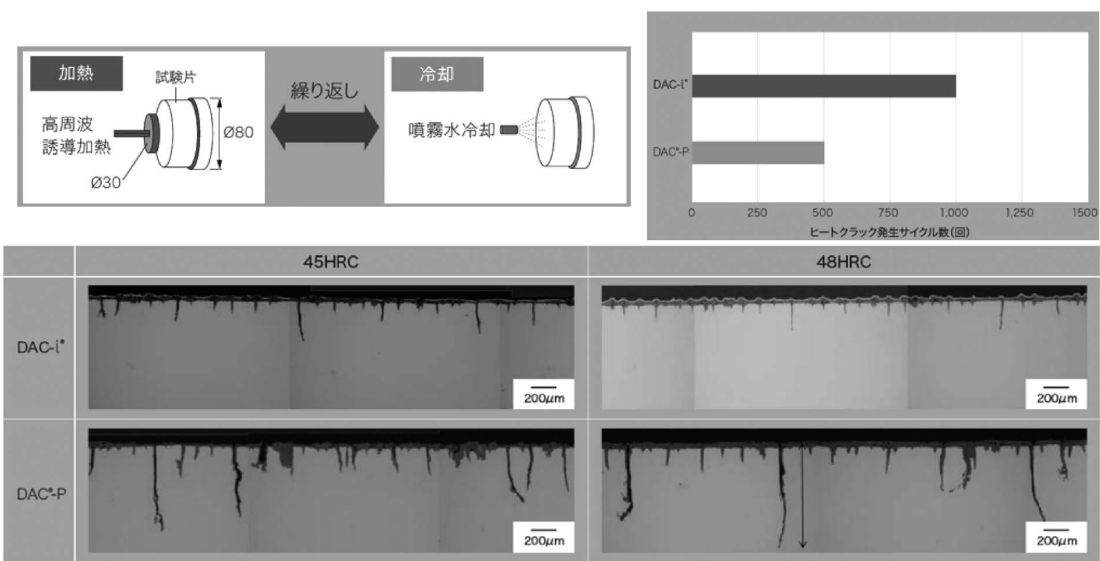


図 1 ヒートチェック試験方法（左上）と発生サイクル数の例（右上）および3,000サイクル後におけるヒートチェックの断面観察事例（下）

◇ ヒートチェック試験結果の読み方

1. ヒートチェック発生サイクル数

ヒートチェック試験結果の一つとして図1内右上に示すようなヒートチェック発生サイクル数のデータがあります。

これは一定サイクル毎に試験を中断し試験片の表面を観察して、ヒートチェックが発生し始めたサイクル数を測定したデータです。ヒートチェック発生サイクル数が大きい方が初期のヒートチェックが発生しにくいことを示します。ヒートチェック試験は加速試験であるためヒートチェック発生サイクル数は実際の金型環境の結果に対し短サイクル側となることが一般的です。

2. ヒートチェック深さ

ヒートチェック試験が終了した後、試験片を切断し、断面観察によりヒートチェックが進展した深さを測定します。例えば図1内下では矢印で示す部分が最大ヒートチェック深さです。また、発生しているすべてのヒートチェック深さの測定し、その総和をヒートチェック発生本数で除した値が平均ヒートチェック深さです。最大および平均ヒートチェック深さが浅いほどヒートチェックが内部へ進展しにくいことを示します。

以上のように、ヒートチェック試験はダイカストや熱間鍛造に使用される金型材料の初期ヒートチェックの発生しにくさや、内部への進展しにくさを評価することができます。



3) 経年変化

(株)プロテリアル まつ おか よし かず
安来工場 技術部 松 岡 禎 和

◇ 経年変化とは

金型やゲージ、部品類で熱処理後、ある期間が経過した時に寸法が変化する現象を経年変化や経時変化と呼びます。これは、主に熱処理では変態しなかった未変態オーステナイト（残留オーステナイト）が時間経過とともに徐々にマルテンサイト変態し、膨張することによって生じます。金型に経年変化が生じるとその金型から製造される製品の寸法が変化するなどの問題に発展します。近年では精密部品製造のために金型にも一層厳しい寸法精度が要求されるため、経年変化を抑制することが重要です。

◇ 経年変化対策について

経年変化対策の一つは残留オーステナイトを減らすことです。代表的な方法としてサブゼロ処理（深冷処理）、焼戻しやショットピーニングがあります¹⁾。サブゼロ処理は焼入れ後に鋼を室温以下の温度に冷却して残留オーステナイトをマルテンサイト変態させる処理であり、ドライアイス（ -78°C ）などが用いられます。焼戻しでは加熱温度が上がることで残留オーステナイトが炭化物とフェライト（マルテンサイトの形態と高密度の転位を引き継いだ組織）に分解します。図1は、金型やゲージ類に使用されるSKS3、SKD11、SKD61、SKH51における焼戻し温度と残留オーステナイト量の関係を示します²⁾。焼入れ後の残留オーステナイト量やその分解挙動は鋼種によって異なりますが、SKD11では約500℃以上で分解が開始し、約550℃で完了します。但し、温度を上げ過ぎると軟化してしまうため、目標硬さが高い場合には500℃前後の残留オーステナイトが分解しきらない温度で焼戻されます。図2は、SKD11における熱処理条件別の経年変化測定例を示します。焼戻しだけを施した場合の膨張が最も大きく、サブゼロ処理により残留オーステナイトが減少し、経年変化も軽減されています。高い寸法安定性が要求される精密金型はサブゼロ処理でも不

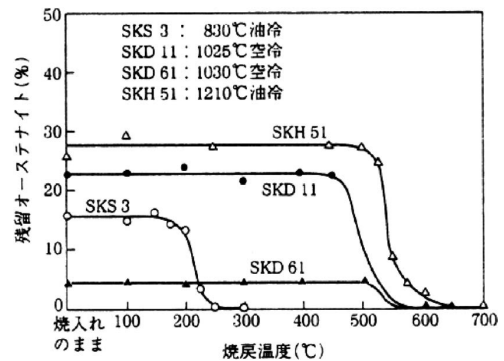


図 1 残留オーステナイト量の変化²⁾

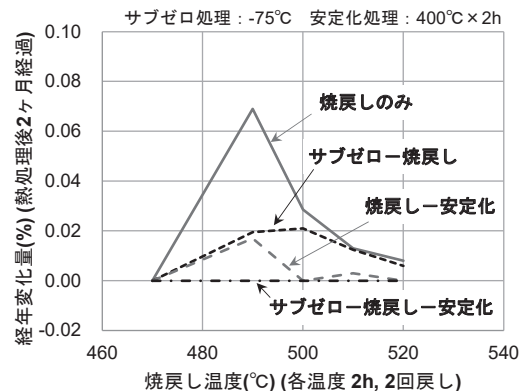


図 2 SKD11の経年変化測定例

十分であり、他の処理と組み合わせる必要があります。SLDでは焼戻し後に250～400℃で加熱保持する安定化処理により残留オーステナイトの安定性を高めることで経年変化を更に抑制できます。

このようなサブゼロ処理や安定化処理の他にも焼入れの温度や冷却方法、金型の大きさや形状など、様々な要因が残留オーステナイトに影響します。そのため、状況に応じた最適な処理を見出すことが重要になります。

参考文献

- 1) 例えば 牧正志：「鉄鋼の組織制御：その原理と方法」、内田老鶴圃（2015）
- 2) 水野博司：特殊鋼、36（1987）、10、p 38

4) 抗折試験

(株)プロテリアル さいとう たけふみ
安来工場 技術部 齊藤 武文

◇ 抗折試験とは

材料評価の指標の一つに「靱性」があります。靱性とは材料の粘り強さをあらわします。靱性の評価に用いられる試験にシャルピー衝撃試験と抗折試験があります。前者は、耐衝撃性や動的靱性を評価する試験であり、後者は静的靱性を評価する試験に用いられ、衝撃値や吸収エネルギー値が高いほど粘り強い材料と評価されます。抗折試験は、冷間工具鋼や高速度工具鋼などの高硬度材料を用いた曲げ試験になります。曲げ試験により、供試材の曲げ荷重とたわみ量を測定することによって、供試材の抗折力や吸収エネルギーを求めることができます。

◇ 抗折試験方法

抗折試験は、高硬度材の静的靱性を評価する曲げ試験になります。試験方法は一般に「3点曲げ」と「4点曲げ」の2種類の方法があります。前者は、試験片の両端を支えて中央に荷重を与える方法で、後者は、試験片の両端を支えて左右両支点から等しい距離の位置に同じ大きさの2つの荷重を加える方法になります。4点曲げは、2つの荷重の間で材料に一樣な荷重が加わるため、3点曲げに比べて安定した試験方法になります。図1に3点曲げの概略図を示します。試験片を両端で支えて試験片中央部に先端が半円球の押し金具を用

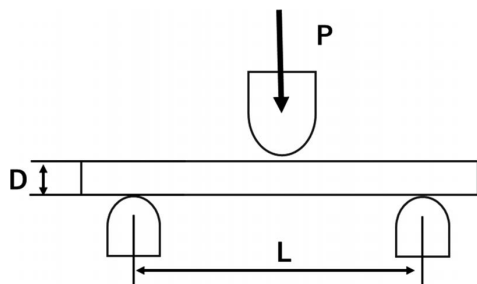


図 1 抗折試験の概要（3点曲げ）

いて試験を行います。試験機は、圧縮試験機や万能試験機が用いられます。抗折試験片は、従来はJIS Z 2203に規定されていましたが、現在はJISに規定はないものの、丸棒や角棒状の試験片を用いて行います。

曲げ試験において試験片が破断に至るまで荷重を与え、たわみ量と荷重を連続的に測定すれば、引張試験の荷重－伸び線図に対応する荷重－伸び線図を描くことが出来ます。応力と歪が比例する範囲では、丸棒試験片の最大応力 σ は（1）式で表せ、この時の最大破断荷重を抗折力と呼んでいます。ここでP：破断荷重、L：支点間距離、D：試験片の直径。

$$\sigma = 8PL/\pi D^3 \quad (1)$$

吸収エネルギーは破壊に費やした仕事量に相当しますので、荷重－伸び線図で得られる領域の面積により求めることが出来ます。

◇ 抗折力の実例

図2に各種工具鋼の抗折力と硬さの関係を示します。抗折力は硬さとの関係において凸状の曲線となります。ある適切な硬さの時に最大の抗折力

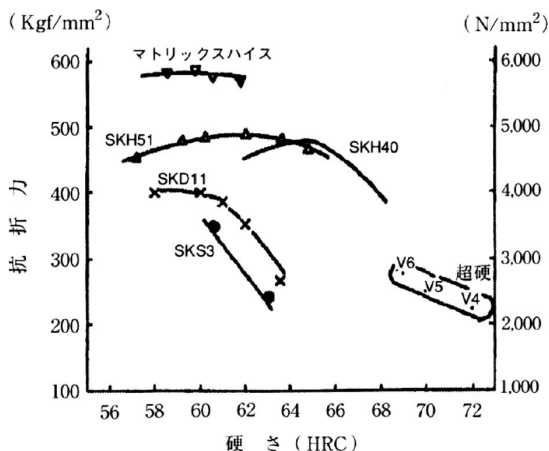


図 2 各種工具鋼の抗折力と硬さの関係

が得られ、これより硬さを上げても抗折力は向上しません。一般的な冷間工具鋼（SKD11）より高速度工具鋼（SKH51）は抗折力が高く、高速度工具鋼の場合は、約62HRC付近に抗折力の極大値が認められ、更にマトリックスハイスは高速度鋼に

比べて高い抗折力を持ち合わせています。

超硬合金の抗折力は、 $3,000\text{N/mm}^2$ に近い材料もありますが、同じ抗折力で特殊鋼と比較した吸収エネルギー値は、特殊鋼の方が一般には大きい傾向にあります。



5) 焼戻硬さ曲線 特性を十分に引き出すための焼戻条件とは？

日本高周波銅業(株) 富山製造所 技術部担当部長 黒川政人

◇ 焼戻はなぜ必要なのか

工具鋼は、一般的に焼入焼戻の熱処理を施して使用されます。焼入れは、工具鋼の組織を変えて硬さを上げるために行ないます。では、なぜ焼戻しが必要なのでしょう？

焼入ままの工具鋼の組織は、焼入れによるマルテンサイトと焼入時の冷却でマルテンサイトに組織変態できなかった残留オーステナイトと呼ばれる組織からなっています。

焼入ままの場合、例えばSKD11では62HRC程度の高硬さを示します。高硬さですが靱性(粘さ)に劣るため、このまま使用すれば使用中に破損してしまいます。一方、残留オーステナイトは、そのままにしておくと使用中の応力、外力によりマルテンサイトに組織変態してしまい割れ、変形、変寸を引き起こします。

即ち、硬いだけでは工具としての特性を発揮できないばかりか、工具の破損、変形、変寸というトラブルが発生します。

このため、焼入後には必ず“焼戻し”が施されます。焼戻しにより、焼入れによるマルテンサイトは硬いだけでなく靱性を持った組織となります。また、焼戻しにより残留オーステナイトのマルテンサイトへの組織変態が促進され、上述のような工具使用中のトラブルを防止することができます。また、焼戻しにより、その工具に適した硬さに調整することができ、焼入れにより生じた内部応力も軽減されます(内部応力が高いまま使用すると、使用中に破損が生じやすくなります)。

◇ 焼戻硬さ曲線の読み方、使い方

工具、金型には焼戻しが必要なことは、上述の通りです。焼戻しの大きな目的として、“適した硬さに調整すること”が挙げられます。“適した硬

さ”とは、工具、金型で加工されるワークにより決定され、工具鋼の特性を十分に発揮できる硬さに焼戻しにより調整する必要があります。図1に代表的な工具鋼の焼戻温度と硬さの関係を示します。焼戻しによる軟化特性はその材質により異なるため、必要な硬さを得るには焼戻温度を何℃にすれば良いかが焼戻硬さ曲線から解ります。焼戻硬さ曲線には、大きく分けて二種類があり、SKS3のように焼戻温度を上げると単純に硬さが下がるもの、SKD11、SKH51のように二次硬化と呼ばれる硬さが上昇する温度域を持つものがあります。

この焼戻硬さ曲線を上手に活用することにより、焼戻しによる適切な組織を得るとともに、適切な硬さを得ることができ、初めて工具鋼の特性を十分に引き出すことができます。

なお焼戻しは材質によって2～3回施されることがあります。

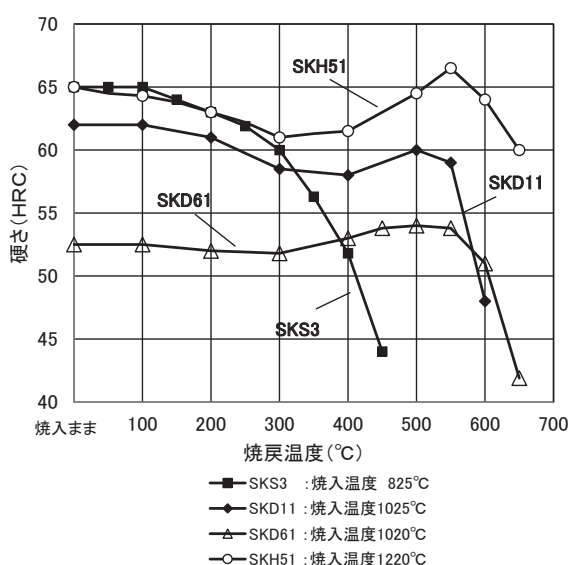


図 1 焼戻硬さ曲線の例
(出典：特殊鋼2001年5月号)

6) 摩耗試験機

耐摩耗性を評価するための試験機

日本高周波銅業(株) 富山製造所 技術部担当部長 黒川 政人

◇ 摩耗とは

金型、工具を使用する際、避けられないのはワーク（被加工材）との接触です。接触によりワークもさることながら金型、工具も摩擦により摩耗します。摩擦の現象で身近なものは自動車のブレーキだと思います。ディスクブレーキであれば、ブレーキパッドをブレーキディスクに押し当て、その摩擦力で自動車の速度を制御します。

その際、ブレーキパッドもブレーキディスクも摩耗により削られ減っていきます。同様の現象が金型、工具が使用される際にも発生します。

摩耗現象には、凝着摩耗（adhesive wear）と引っかけ摩耗（abrasive wear）があります。凝着摩耗は、『真実接触する粗さの突起の凝着部分が破壊されることによる摩耗現象』と定義付けられています。接触する二つの面の微小な突起部分が摩擦により凝着を引き起こします。これが引っ張られてちぎれることを繰り返して、摩耗が進行する現象です。一方、引っかけ摩耗は『摩擦面間に介する

異物により、その面が削り取られる摩耗現象』と定義付けられています。接触する二つの面の間に微小な硬い異物が存在し、それが接触する面を引っ掻くことにより摩耗が進行する現象です。

摩耗に影響を及ぼす因子として、接触しあう材料の表面硬さ、表面粗さ、表面皮膜、接触面積、接触圧力、温度等々が挙げられます。これら因子が複合して作用することで摩耗が発生します。

◇ 摩耗試験機

工具、金型の摩耗特性を数値化して評価する方法が摩耗試験であり、その試験に用いられるのが摩耗試験機です。摩耗試験機には種々のものが存在します。主なものを以下に紹介します。

①大越式摩耗試験機

図1に示すように、固定された試験片（摩耗を評価したい材料）に相手材を設定した荷重で押し付け相手材を回転させることにより、試験片の摩耗を発生させる方式の試験機です。相手材の回転数を設定することにより摩擦速度を設定して試験

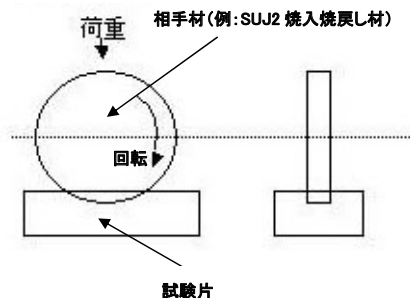


図 1 大越式摩耗試験機の例および試験模式図
(出典：株式会社コベルコ科研様HP)

を行ない、試験により生じた摩耗によるくぼみの深さを測定して比摩耗量を算出します。相手材、荷重、摩擦距離を同じとして試験片を変えて比摩耗量を測定することにより、相対的に耐摩耗性を評価することができます。

②その他の試験機

大越式摩耗試験機の他に、ピンオンディスク方式（回転するディスク状の試験片にピンを押し付

ける方法）ピンオンプレート方式（往復運動をするプレート状の試験片にピンを押し付ける方法）、ブロックシリンダ方式（回転するシリンダ状の試験片の上下、または左右からブロックを押し当てる方式）等、種々の試験方式、試験機があります。これらの試験では、試験片の表面に皮膜処理をしたり、潤滑油脂を供給して試験をするなど実際に使用される環境での摩耗試験ができることが特徴です。



7) 熱処理変寸 焼戻しによって寸法が変化する

日本高周波銅業(株) 富山製造所 技術部担当部長 くろ かわ まさ ひと 黒川政人

◇ 熱処理変寸とは

工具鋼は焼きなまし状態の時は、フェライト＋炭化物組織であり、焼入によりマルテンサイト組織となります。マルテンサイト組織は、焼入加熱によって固溶した炭化物の炭素原子が結晶格子に侵入することにより、体積が大きくなります。従って、焼入加熱温度が高いほど炭化物が多く固溶し、炭素原子の侵入が多くなり体積膨張も大きくなります。次に焼戻しを施すと、焼戻温度に依存して炭化物の析出が進み体積が収縮します。また焼入れにより生じた残留オーステナイトが焼戻しによりマルテンサイト組織に組織変態し体積が変化します。

従って、焼入前の材料寸法を基準とした場合(ゼロとした場合)、焼入ままでは膨張していますが、焼戻温度を上げていくにつれて収縮し、更に焼戻温度を上げていくと残留オーステナイトがマルテンサイトに変態することにより膨張するといった挙動を示します。この体積変化がいわゆる“熱処理変寸”です。

工具鋼を熱処理した際に発生しうるトラブルとして、この“熱処理変寸”による寸法変化が挙げられます。金型、工具は単体ではなく他の部品と組み合わせて使用されることが多く、熱処理変寸を考慮しないと熱処理後の仕上げ加工代が過多に

なる等の不具合が発生します。

実際には、工具の形状、材料の方向性(圧延、鍛造の軸方向に対して平行な方向と垂直な方向では変寸が異なる)、熱処理条件の違い等により変化しますので注意が必要です。

なお、熱処理変寸と熱処理変形は異なるものであり、前者は上述のような組織変化によるもの、後者は熱応力による塑性変形、例えば、焼入れ時の冷却方向の不適や熱処理時の置き方の不適により生じる反り、曲がり等を指します。

◇ 熱処理変寸の例

図1に代表的な工具鋼の熱処理変寸の挙動を示します。横軸に焼戻温度、縦軸に熱処理変寸を取ると、焼戻温度が高くなるにつれて、変寸率が小さくなっているのが解ります。更に焼戻温度を上げていくと右肩下がりに小さくなっていく変寸率が、プラス側に転じているのが見て取れます。これが前述の残留オーステナイトがマルテンサイトに変態するために起こる体積膨張です。図1から解るように熱処理変寸がプラスに転じる温度域は材質により異なり、SKS3では200～300℃で生じるのに対し、SKD11では500℃以上で生じます。

このように、材質によって変寸率の変化に違いがあるため、その熱処理変寸の特性には十分な配慮が必要です。

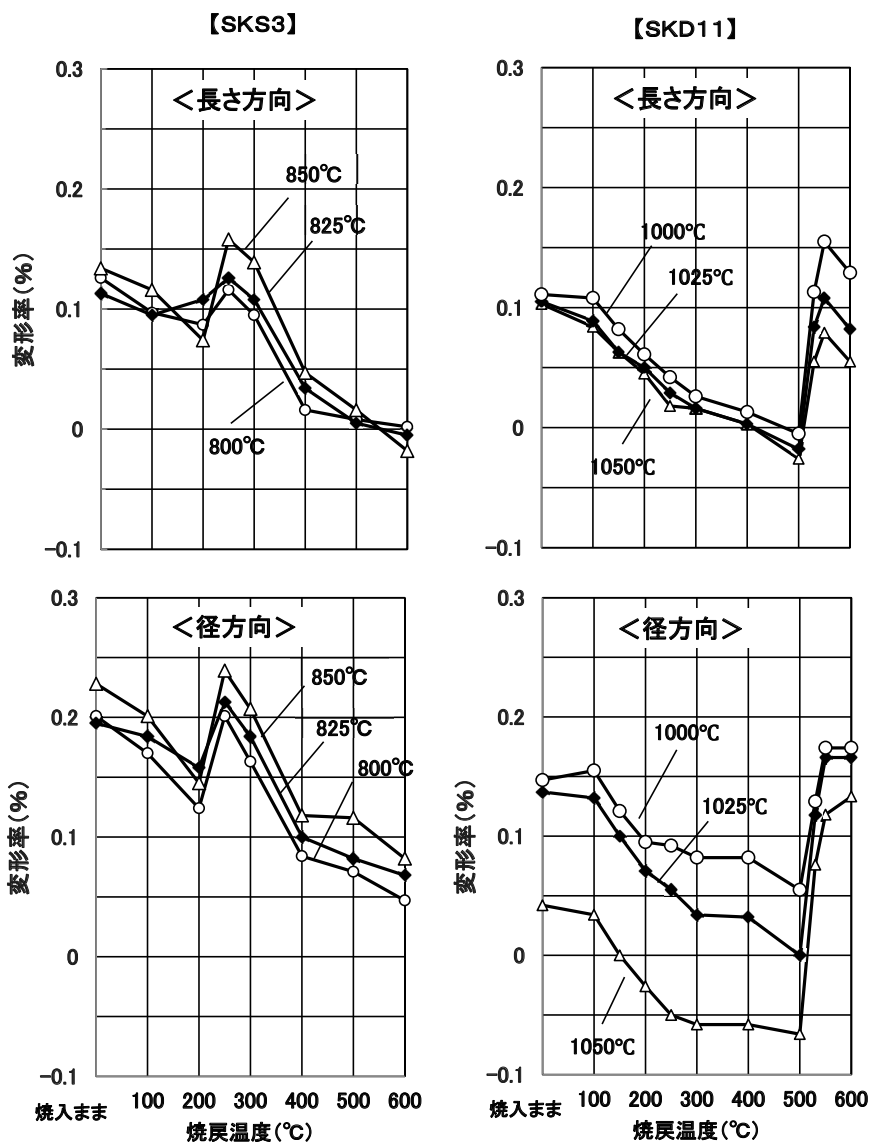


図 1 工具鋼の熱処理変寸
(出典：特殊鋼2001年5月号)

8) 軟化抵抗 高温下での硬さ低下に要注意

日本高周波鋼業(株) 富山製造所 技術部担当部長 黒川 政人

◇ 工具鋼の軟化抵抗とは

工具鋼はその使用環境により、様々な影響を受けます。その一つが“軟化”です。アルミ押出に用いられる工具は、600℃以上に加熱されたアルミビレットと長時間接します。クランクシャフトなどの熱間鍛造に用いられる熱間鍛造型は1000℃を超えるワークと間欠ではあるものの長時間接します。工具鋼が高温物と長時間あるいは間欠的に接すると、高温で焼戻される場合と同様に硬さが低下していきます。これが工具鋼の“軟化”です。

工具鋼を高温で使用した場合、早期に軟化が進行してしまうと、変形の発生、摩耗の促進が早期に発生してしまい被加工物の寸法や形状が思ったように出なくなります。従って、高温環境下で使用される熱間工具鋼には、高い軟化抵抗が求められます。

工具鋼はMo、Vといった元素を含み、炭化物として存在します。これらの炭化物の存在が高温による軟化を低減する作用を起こします。これを軟化抵抗と呼びます。熱間工具鋼であるSKD61は約1.3%のMo、約1%のVを含有し、冷間工具鋼であるSKD11よりもMo、Vを多く含有します。一般的にSKD61は冷間加工での耐摩耗性の面ではSKD11には劣りますが、軟化抵抗の面ではSKD11に勝ります。

◇ 熱間工具鋼の軟化抵抗

図1にSKD62焼入焼戻材（硬さ47HRC）を500～700℃で長時間加熱保持した場合の硬さの変化を示します。横軸に時間を対数で取り、縦軸に硬さを取ると、保持温度が高いほど加熱保持時間に伴う硬さの低下が大きいことが解ります。このように、軟化は時間よりも温度依存度が高いと言えます。

軟化抵抗は焼戻しの理論と同じであり、温度、時間の変数により示される焼戻しパラメータと呼ばれる変数で表すことができます。

図2に熱間工具鋼各種の焼戻軟化抵抗の比較を示します。横軸に記載した $P = T(20 + \text{Log}t) \times 10^{-3}$ の式において、Pは焼戻しパラメータを、Tは焼戻

温度（絶対温度：K）、tは保持時間（時間）、Cは炭素量に関する定数（炭素量0.2～0.4%の熱間工具鋼は20、炭素量1.0%程度の冷間工具鋼は15を適用）を示します。前述の式から、時間tは対数で寄与しているため温度Tよりも型さの変化（軟化）への寄与率は低いと言えます。即ち、軟化は時間よりも温度の寄与が大きいことが解ります。

図2において焼戻しパラメータPが大きくなっても、硬さの低下が小さい材質が軟化抵抗が高い（高温での軟化がしにくい）材料と言えます。

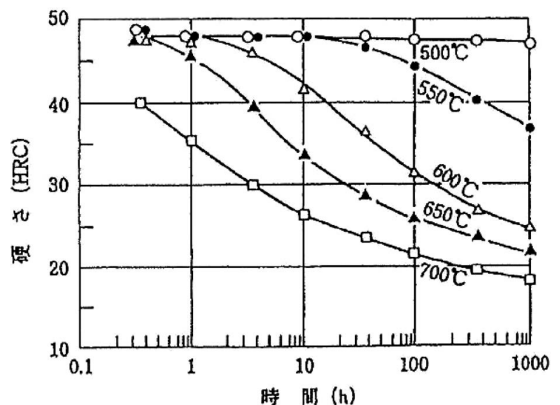


図 1 SKD62試料を各温度で加熱保持した場合の時間に対する室温硬さの変化
(出典：特殊鋼2001年5月号)

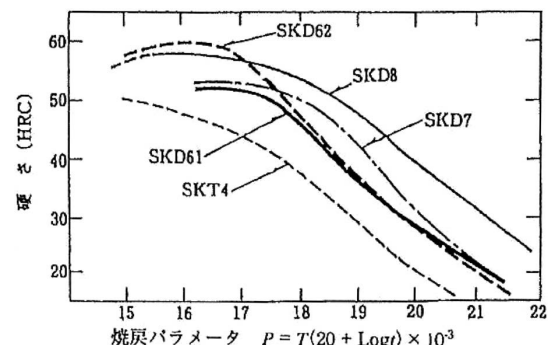


図 2 熱間工具鋼各種の焼戻軟化抵抗の比較
(出典：特殊鋼2001年5月号)

5. 耐熱鋼

1) 高温機械的性質

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 そね だ りょう が
ステンレス・高合金材料技術研究室 副 田 凌 雅

金属材料の高温での機械的特性としては、室温の場合と同様に引張特性、疲労特性、衝撃特性、硬さなどの特性が重要となります。それら以外に、高温でのみ問題となる機械的特性として、熱疲労特性とクリープ特性が挙げられます。

一般的に、金属材料に強度を付与する場合には、焼入れや時効処理などの熱処理が施されます。これら熱処理によって得られたミクロ組織は、室温では安定なため高い強度が得られますが、高温では不安定となり崩壊し強度が保たれないことがあります。したがって、金属材料の室温機械的特性と高温機械的特性の間に必ずしも相関はないため、高温での使用を想定する際は、高温での機械的特性を評価する必要があります。

◇ 高温引張特性

引張強度、耐力および伸びなどの高温引張特性は、室温の場合と同様に強度を評価する上での基本となります。図1にSUS304とSUH660の高温引張試験の結果を示しますが、一般的に金属材料は、

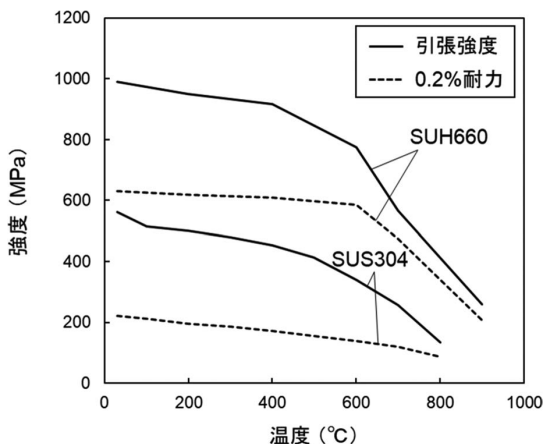


図 1 SUS304およびSUH660の高温引張特性

温度の上昇とともに軟化します。

高温の引張試験の場合、試験時の引張速度の影響を受けやすくなります。高温では、引張変形によって加工硬化した材料が焼なまされて、強度が低下します。引張速度が遅くなることは、高温で長く保持されることになり、焼きなましの時間が長くなるため、強度が低下するのです。このように、高温の強度を論じる上では、変形速度が重要になってきます。したがって、高温の強度を比較するためには、試験時の変形速度が同じであることが必要です。JIS G 0567の「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」では、引張速度の規定が設けられており、試験によって強度にばらつきが生じないように注意されています。

◇ 熱疲労特性

室温において、材料中に繰り返し応力が生じると、引張強度よりも小さい応力で材料が破壊します。この現象を疲労と言います。同様の現象が高温でも生じ、中でも材料が加熱／冷却を繰り返される場合には、材料中に加熱／冷却に伴う熱膨張によって繰り返し応力が発生し、破壊に至ることがあります。この現象を熱疲労と言います。したがって、加熱／冷却が繰り返される部品では、この熱疲労特性を重要視する必要があります。JISでは、JIS Z 2278「金属材料の熱疲労試験方法」にその評価方法が規定されています。

◇ クリープ特性

機械部品においては、高温で一定の応力が負荷されて使用される場合があります。金属材料に耐力よりも低い荷重を負荷すると、室温の場合には時間が経っても材料に塑性変形は生じませんが、高温では時間とともに塑性変形が生じます。これ

をクリープ現象と言い、高温の機械的性質として非常に重要な特性になります。したがって、高温で長時間使用される部品の設計には、前述の高温

引張特性データのみならず、クリープ特性を考慮した設計が必要になります。クリープ特性については次頁で詳述します。



2) クリープ特性

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 そえ だ りょう が
ステンレス・高合金材料技術研究室 副 田 凌 雅

◇ クリープ特性とは

金属材料に耐力よりも低い応力を負荷すると、室温の場合には塑性変形を生じませんが、高温では時間とともに塑性変形を生じます。この現象をクリープ現象と言います。高温で長時間応力が負荷される部品の設計の際には、耐力よりも低い応力で破壊が生じてしまう懸念があるため、このクリープ特性を重要視する必要があります。

クリープ現象は、時間経過に従って次のように3つの過程で説明されます。まず応力を負荷すると、移動しやすい転位が急激に移動することで、比較的大きく材料が変形します。この過程を遷移クリープ（1次クリープ）と呼びます。次に、材料の変形に伴って転位密度が大きくなることで加工硬化が生じ、この加工硬化と転位の回復が釣り合うようになって、材料があまり変形しない状態になります。この過程を定常クリープ（2次クリープ）と呼びます。最後に破断に向けて大きく変形が生じ、破断に至ります。この過程を加速クリープ（3次クリープ）と呼びます。クリープ現象は、基本的に原子の移動に相当するので、特に原子が移動しやすい粒界は、クリープ現象を生じやすい傾向にあります。そのため、粒径が小さいとクリープ現象を生じやすい粒界が増えることになるため、クリープ変形しやすくなります。

◇ データの読み方、使い方

クリープ特性の評価方法は、JIS Z 2271「金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法」に規定されています。クリープ破断試験は温度、応力を変えて試験を行い、図1に示すように温度ごとに応力とクリープ破断時間との関係を示す曲線が得られます。この曲線から各温度における任意の

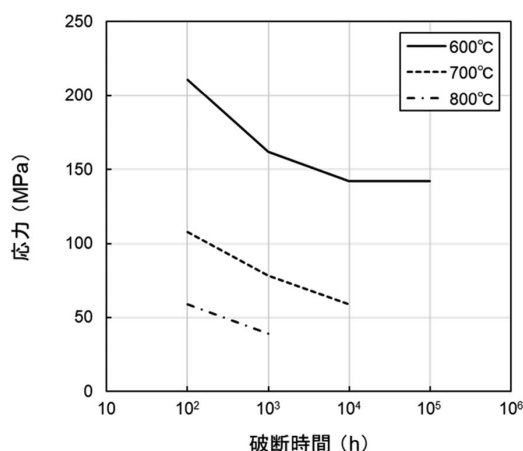


図 1 SUS304の応力-クリープ破断時間線図

時間のクリープ破断応力を求めることができます。クリープ現象は高温ほど生じやすいため、試験温度が高温になるにつれて破断は短時間、低応力側へ移ります。

このクリープ破断試験は、温度と応力の2条件を変えて各温度、各時間における破断応力を探る必要があります。そのため、試験数が多くってしまいがちですが、ラーソンミラーパラメータと呼ばれるパラメータを使用すれば、クリープ破断応力を外挿することができ、少ない試験数でクリープ特性を評価することができます。ラーソンミラーパラメータは、 $T[C + \log(t_r)]$ (T : 温度、 t_r : 破断時間、 C : 定数) で計算されます。得られたクリープ破断試験の結果から、ラーソンミラーパラメータを横軸、応力を縦軸にとると、1本のマスターカーブを得ることができます。ラーソンミラーパラメータは、温度と破断時間の関数なので、任意の温度、時間におけるクリープ破断応力を推定することができます。

3) 高温酸化

大同特殊銅(株) 技術開発研究所 そえ だ りょう が
ステンレス・高合金材料技術研究室 副 田 凌 雅

◇ 高温酸化とは

高温では使用環境中の酸素が合金元素と反応し、表面に酸化物層（酸化スケール）を形成します。この酸化スケールが剥離すると、また新たに表面が酸化されます。このように、表面の酸化とスケールの剥離が繰り返されることで、材料が減肉していきます。材料の合金成分によってこの材料表面での酸化反応挙動が異なるため、高温酸素雰囲気下で使用する部品の設計の際には耐酸化性を重要視する必要があります。

耐酸化性を改善する元素としては、Cr、Al、Siが挙げられます。酸化物の形成挙動は、熱力学的な安定性と拡散の速さで決まります。Cr、Al、Siは、 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 の酸化物を形成します。これらの元素は、FeやNiと比べて酸化物の熱力学的安定性が高いため、材料表面で酸化物を形成しやすく、また酸化物中の拡散が遅いため、酸化の進行が遅く酸化スケールが薄くなります。また、これら元素の酸化物は緻密なため、酸素の侵入を防ぐことができ、耐酸化特性を向上させます。

Fe-Cr合金では、Cr含有量の増加に従って酸化スケールが薄くなりますが、Cr含有量が15%以下であると、 Cr_2O_3 の酸化スケールが形成されないため、良好な耐酸化特性は得られません。一方で、Cr含有量が15%を超えると、 Cr_2O_3 が形成され始め、さらに20%を超えると、 Cr_2O_3 が単独で形成され、良好な耐酸化特性が得られます。

実際の機械部品は、高温で長時間保持され酸化される場合と、加熱冷却を繰り返され酸化する場合があり、前者を連続酸化、後者を繰返し酸化と呼びます。酸化スケールを構成する酸化物は、金属よりも熱膨張係数が小さいです。そのため、繰返し酸化では、スケールと合金間の熱膨張差に起因して酸化スケールが剥離し、酸化が進行しやすい

くなります。したがって、繰返し酸化においては、熱膨張係数の大きい合金ほど酸化が進行しやすい傾向にあります。

◇ データの読み方、使い方

高温酸化に対する評価方法は、JIS Z 2281「金属材料の連続酸化試験法」とJIS Z 2282「金属材料の高温繰返し酸化試験」に規定されています。材料が酸化すると、酸素が取り込まれる分、材料の質量が増加します。酸化試験では、この質量の増加分を計測して酸化増量と呼びます。図1は、SUS304の各温度における連続酸化および繰返し酸化試験の結果です。JISでは、連続酸化試験の試験時間は、原則100時間と決められています。繰返し酸化は、加熱／冷却サイクルが200回で、高温保持されている時間は合計で100時間になります。どちらの試験においても、高温ほど酸化増量が大きくなりますが、繰返し酸化の方が酸化増量は大きく、厳しい酸化条件であることが分かります。また、酸化増量の代わりに、酸化スケールを除去し、初期重量からの減量で表した酸化減量が用いられることもあります。酸化スケールが剥離して材料が減肉するほど、酸化減量は大きくなります。

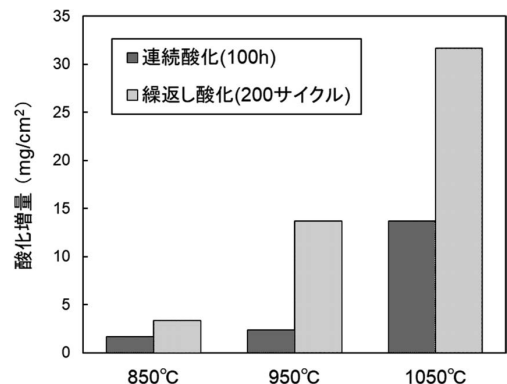


図 1 SUS304の酸化試験結果

4) 高温腐食

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 そえ だ りょう が
ステンレス・高合金材料技術研究室 **副 田 凌 雅**

◇ 高温腐食とは

高温腐食は複雑な現象であり、特に重要な高温腐食には次のものがあります。

1. バナジウムアタック

工場のボイラや船舶の燃料等に使用される重油中には、微量のV、SおよびNaが含まれ、その量は産地によって異なります。この重油が燃焼すると、 V_2O_5 や Na_2SO_4 の燃焼灰が生成します。これら V_2O_5 と Na_2SO_4 が化合してできる混合灰は、融点が 700°C 以下と低く、この混合灰が溶融して合金表面に堆積すると、合金表面に形成した保護性の酸化被膜が溶融し、著しい酸化が生じます。この現象をバナジウムアタックと言います。

2. 硫化腐食 (サルファアタック)

重油中にSが多い場合、重油の燃焼によって Na_2SO_4 が生成します。これが合金の酸化スケールの上に堆積し溶融すると、酸化スケールを破壊して、金属と金属の硫化物の共晶を生成します。この共晶は融点が低いため、合金が著しく腐食されます。これを硫化腐食 (サルファアタック) と言います、特にNiは硫化腐食されやすく、Niを含む合金で顕著に発生します。

3. 高温ガス腐食

上述のバナジウムアタック、硫化腐食は、燃焼生成物が酸化スケール表面に堆積して、高温腐食が進行します。一方で、高温ガス腐食はこれらの堆積物がなく、高温のガス成分によって腐食を受ける場合を言います。腐食性ガスとしては、例えば、硫化性ガス (H_2S 、 SO_2)、浸炭性ガス (CO 、 CO_2)、窒化性ガス (NH_3 、 N_2)、塩化性ガス (HCl 、 Cl_2)、その他ハロゲン系ガス (F_2 、 I_2 、 Br_2) 等が挙げられます。

◇ データの読み方、使い方

高温腐食に対する評価方法は、2004年にJIS Z 2290「金属材料の高温腐食試験方法通則」に規定

されました。

中でも、バナジウムアタック、硫化腐食は、JIS Z 2292「金属材料の塩塗布高温腐食試験方法」(燃焼生成物を模擬した混合灰を試験片表面に塗布する試験方法) や、JIS Z 2293「金属材料の塩浸せき及び塩埋没高温腐食試験方法」(燃焼生成物を模擬した混合灰中に試験片を浸漬させる試験方法) にて評価されます。バナジウムアタックを評価するための混合灰には $85\% V_2O_5$ - $15\% Na_2SO_4$ を使用し、硫化腐食を評価するための混合灰には $90\% Na_2SO_4$ - $10\% NaCl$ を使用します。試験温度、試験時間については、特に規定されておらず、例えば $800^{\circ}\text{C} \times 20\text{h}$ で試験されることがあります。腐食量の評価は、腐食後の試験片の表面スケールを除去して、初期の試験片との重量差を腐食減量として評価します。もしくは、試験片の厚さ変化を計測し、変化量を侵食深さとして評価します。

図1は $90\% Na_2SO_4$ - $10\% NaCl$ 混合灰を用いて各種Ni基合金について耐硫化腐食性を評価したものです。合金中のCr量が増加すると、硫化腐食による腐食減量が低下し、耐高温腐食性が良くなることが分かります。

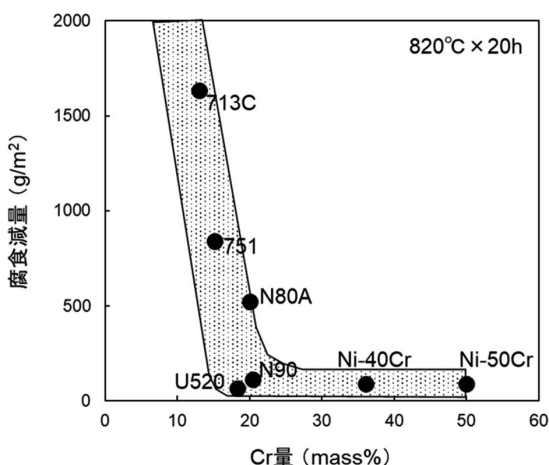


図 1 Ni基合金のCr量と耐硫化腐食性の関係

6. ステンレス鋼

1) 腐食試験

日本冶金工業㈱ 川崎製造所 はし もと のぶ ゆき
品質保証部 検査課 課長 橋 本 暢 之

まえがき

ステンレス鋼の表面は、不動態皮膜と呼ばれる厚さが数nmの非常に緻密で密着性の高い膜で覆われており、この皮膜で保護されている限り腐食することはない。しかしながら、不動態皮膜が破壊されても修復されない環境に置かれた場合、腐食が生じる。ステンレス鋼の耐食性の評価方法として、腐食試験があり、種々の試験方法がJIS等に規格化されている。

◇ 粒界腐食

オーステナイト系ステンレス鋼は、500～800℃の範囲に長時間曝されるとステンレス鋼中の炭素がクロムと結合し、クロム炭化物となって粒界に析出する（鋭敏化という）。この結果、結晶のクロム炭化物近傍はクロム欠乏状態となって、不動態を維持できなくなり、粒界に沿って腐食が進行する。この現象を粒界腐食という（写真1）。粒界腐食を評価する方法として、次のような粒界腐食試験方法がある。

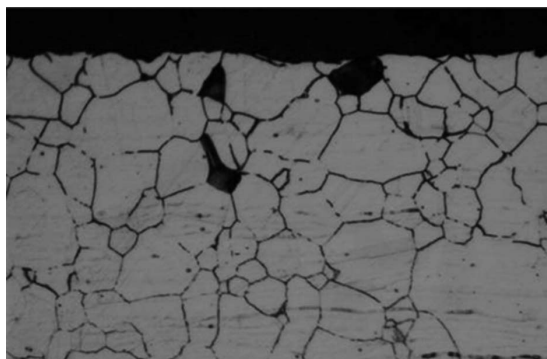


写真1 粒界腐食

①ステンレス鋼のしゅう酸エッチング試験方法 (JIS G 0571)

しゅう酸溶液中での電解エッチング後、顕微鏡試験による組織観察のスクリーニングを行い、熱酸腐食試験を行う必要があるかどうかを判別する方法。このエッチング試験における評価が良好であれば、熱酸試験を省略することができる。

②ステンレス鋼の硫酸・硫酸第二鉄腐食試験方法 (JIS G 0572)

50%硫酸に硫酸第二鉄を添加した沸騰液中に試験片を120時間浸漬し、腐食減量を測定する方法。粒界におけるクロム炭化物の析出に伴う粒界腐食を検出するもの。腐食度は硫酸濃度に影響されやすいので、試験液の調整を精密に行う必要がある。

③ステンレス鋼の65 %硝酸腐食試験方法 (JIS G 0573)

沸騰65%硝酸への浸漬により、クロム炭化物やシグマ相の析出による粒界腐食感受性を調べるもので、他の方法ではわからないシグマ相析出に起因する粒界腐食も検出できる。粒界腐食の検出力は強いが、試験時間が長く、試験液も毎回更新する必要がある。

④ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法 (JIS G 0575)

沸騰硫酸・硫酸銅水溶液中に試験片を16時間浸漬し、試験後90°以上曲げて粒界に割れが生じるか否かを調べる試験で、クロム炭化物の析出に伴う粒界腐食を純粋に検出できる。また、比較的短時間で評価できるが、評価方法が曲げ割れの観察によるもので定性的であり、ある程度の熟練を必要とする。

◇ 孔食、すきま腐食

孔食は、通常塩化物を含む水環境におかれた不

動態皮膜が局部的に破壊されて、孔状に腐食が進行する腐食現象である。孔食発生部では腐食電池を形成し、自己触媒的に進行する。すきま腐食は、フランジの接合部など構造上の隙間部で酸素の供給が不足し、時間とともに不動態の維持ができなくなり発生する腐食で、孔食と同様の機構で腐食が進行する。

耐孔食性を評価する腐食試験としては、ステンレス鋼の塩化第二鉄腐食試験方法（JIS G 0578）がある。この試験方法は、塩化第二鉄溶液中にステンレス鋼を24時間浸漬し、規定の温度での腐食

度と孔食の発生状況により評価を行うA法と、72時間浸漬による孔食発生臨界温度（CPT）を測定するB法がある。また、それ以外として、不動態皮膜の貫通電位を測定するステンレス鋼の孔食電位測定方法（JIS G 0577）もある。

すきま腐食試験方法については、JISでは特に規定された方法はないが、ASTMではテフロン製ワッシャーを隙間材として使用した試験方法により、孔食と同様の条件、同じ溶液を用いた浸漬試験により、すきま腐食発生臨界温度（CCT）を求め評価する方法がある。



2) 応力腐食割れ試験

日本冶金工業㈱ 川崎製造所 はし もと のぶ ゆき
品質保証部 検査課 課長 橋 本 暢 之

◇ 応力腐食割れ (SCC :Stress Corrosion Cracking)

塩化物イオン (Cl^-) などのハロゲンイオンが存在する環境で、引張応力がかかっている状態にあるときに発生する腐食割れで、応力に対して直角方向に割れ、かつ枝分かれして進展するオーステナイトステンレス鋼に多い現象である (写真1)。配管や機器の破損を引き起こすため、様々な事故の原因となる。応力は操業中に材料にかかる作動応力や熱応力、装置の拘束応力、加工時の残留応力などがある。応力腐食割れの発生は、材料の感受性、引張応力及び環境要因の3条件が揃ったときに生じる。

応力腐食割れの特徴は結晶粒を貫く割れであるが、炭化物が存在する場合は、結晶粒界に沿って割れることがあり、貫粒割れと粒界割れの2種類に分類される。

◇ 応力腐食割れ試験

ステンレス鋼の応力腐食割れ感受性を評価する方法としては、ステンレス鋼の応力腐食割れ試験方法 (JIS G 0576) があり、A法: 42%塩化マグネシウム応力腐食割れ試験方法と、B法: 30%塩化カルシウム応力腐食割れ試験方法の二つの試験方法が規定されている。

①A法: 42%塩化マグネシウム応力腐食割れ試験方法

143℃の沸騰42%塩化マグネシウム溶液中に試験片を浸漬させる試験で、塩化マグネシウム溶液中における、応力腐食割れ感受性を評価する方法であり、単軸引張試験とU字曲げ試験の2通りの試験方法が規定されている。この試験では、条件が実際の使用環境と必ずしも一致しないため、評価を他の環境に適用することは適性を欠く恐れがあるので注意が必要である。また、材質により加工硬化による耐力の上昇度が異なるため、例えば

オーステナイト系ステンレス鋼と二相ステンレス鋼を比較する場合、データの取り扱いにも十分注意しなければならない。尚、ASTM においても、塩化マグネシウム溶液により応力腐食割れ感受性を評価する方法が規定されているが、沸点155℃、濃度45%とJIS法とは条件が異なる。

②B法: 30%塩化カルシウム応力腐食割れ試験方法

80℃の30%塩化カルシウム溶液中に試験片を浸漬させる試験で、低濃度の塩化物溶液中で、孔食を起点とした応力腐食割れの発生、及び鋭敏化材の粒界応力腐食割れ性を評価する試験方法であり、U字曲げ試験が規定されている。42%塩化マグネシウム溶液を用いたA法については、試験条件が厳しく、ステンレス鋼で実用上遭遇する腐食環境とはかならずとも一致しないことや、SUS304とSUS316の耐応力腐食割れ感受性の差を明確にできない問題があり、新たな試験方法として30%塩化カルシウム溶液を用いた本法が制定された経緯がある。U字曲げ試験はA法と同様である。ボルト・ナットの締め付け部が、溶液中に浸漬されるとすきま腐食が発生し応力腐食割れ試験結果に影響を与えることから、締め付け部は浸漬されない半浸漬法としているが、締め付け部等にすきま腐食が発生した場合は、試験結果の取り扱いに注意が必要である。

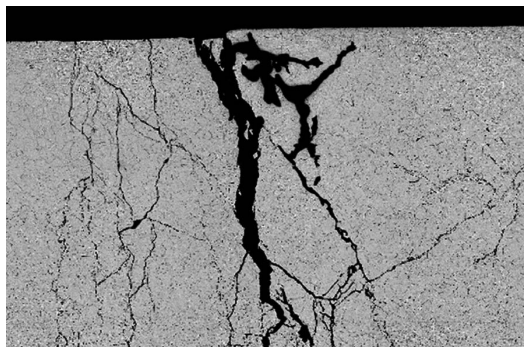


写真1 応力腐食割れ

3) 加工硬化曲線

日本冶金工業(株) 三浦健介
ソリューション営業部 課長

金属は圧延や引き抜き、押し出し、鍛造などの冷間加工をすることで強度や硬さが高くなる。これは、塑性変形に伴い転位が増殖・蓄積されることによるもので、変形量が増えるとともに加工に必要な力も増大する。この現象を加工硬化という。加工硬化はプレス、曲げなど多種多様な成形の加工性に影響するとともに、ばねなどの加工製品の強度を確保するためにも重要な特性である。

ステンレス鋼は金属組織により大別されるが、塑性加工に用いられるステンレス鋼はオーステナイト系（以下 γ 系）、フェライト系（以下 α 系）、オーステナイト・フェライト二相系（以下二相系）がほとんどである。さらに γ 系ステンレス鋼は、SUS304やSUS301などの塑性加工時に組織がマルテンサイト変態しやすい準安定 γ 系と、SUS316などの組織が変化しにくい安定 γ 系に分けられる。

加工硬化曲線とは縦軸に引張強さや硬さなどの機械的性質を、横軸に加工量をとったもので、図1に準安定 γ 系のSUS304、SUS301、安定 γ 系のSUS316、二相系のSUS329J4L、 α 系のSUS430の加工硬化曲線の一例を示す。図1は引張強さと冷間圧延率との関係を示したもので、冷間圧延率が増

大するほど引張強さも増大していることが分かる。

γ 系は α 系や二相系よりも曲線の傾きが大きく、塑性加工により強度が上がりやすい。 γ 系の中でも準安定 γ 系は加工量が増大するほどマルテンサイト変態量が増えるため、曲線の傾きがより大きくなる。

準安定 γ 系のマルテンサイト相への変化のしやすさは成分値が影響しており、その指標として、Ni当量がある。Ni当量は γ 相の安定度を示す指標で、大きい程 γ 相は安定でマルテンサイト変態しにくい。代表的な式として、平山の式などが知られている。

$$\text{平山の式：Ni当量} = 12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + Ni + 0.65Cr + 0.98Mo$$

また、準安定 γ 系の加工硬化は加工温度にも左右されることが知られており、加工温度が高い程マルテンサイト変態が抑制される。温度の影響についての指標としてMd30があり、野原の式などが知られている。

$$\text{野原の式：Md30(}^{\circ}\text{C)} = 551 - 462(C + N) - 9.2Si - 8.1Mn - 13.7Cr - 29.0(Ni + Cu) - 18.5Mo - 68.0Nb - 1.42(v - 8.0) \quad (v: \text{ASTMの粒度番号})$$

Md30は γ 相単相の材料に30%の引張変形を与えた時、組織の50%がマルテンサイト変態する温度を示した指標で、Md30が低い程 γ 相は安定である。

準安定 γ 系においては、その成分から γ 相の安定度を知ることによって加工量や加工温度の影響を予測し、加工後の製品の強度を推定することが重要となる。

ステンレス鋼には時効処理をすることで強度が上がる析出硬化系もあるが、固溶化処理状態からの加工硬化挙動は固溶化状態の組織により大別でき、SUS631は準安定 γ 系に近い加工硬化挙動を示す。

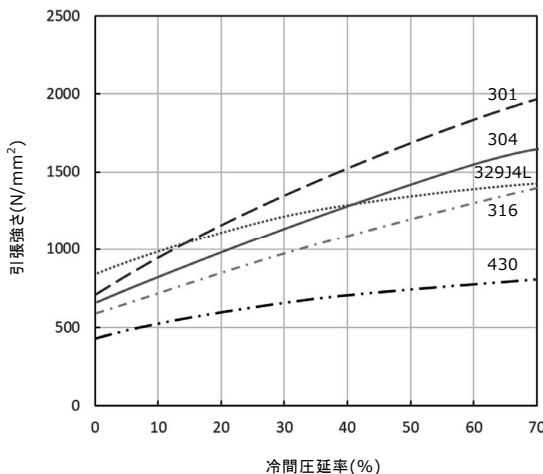


図1 引張強さにおよぼす冷間圧延の影響

7. 電磁材料

ヒステリシス曲線

(株) プロテリアル 安来工場 冶金研究所 高機能材グループ 研究員 藤原 義行

磁性材料は外部から印加する磁場に対して材料内部の磁化の強さや向きを変化させる材料であり、一般的に軟磁性材料と硬磁性材料に分類されます。軟磁性材料は電磁鋼板（FeSi系合金）、パーマロイ（FeNi系合金）等が代表的な材料であり、磁場によって材料内部の磁化および磁化反転を容易に変化させる材料で、保磁力が低く、透磁率と飽和磁束密度の高い磁性が求められます。一方、硬磁性材料は永久磁石のことであり、着磁された磁化を維持するため、保磁力が高く、そして残留磁束密度の高い磁性が求められます。

上述した磁気特性の各指標を表すのがヒステリシス曲線（または磁化曲線）になります。また、横軸に外部から印加する磁場 H （A/m）、縦軸に外部磁場によって磁性体内部に誘導される単位面積あたりの磁束を表す磁束密度 B （T）を用いた場合は B - H 曲線とも呼ばれます。

ここで、磁性材料のヒステリシス（ B - H ）曲線を図1に示します。磁場に対する磁束密度の履歴は、（1）磁性材料が磁化されていない消磁状態の原点 O から磁場を印加すると、磁束密度は $O \rightarrow a$ と増加し

ます。この $O \rightarrow a$ 部分は初磁化曲線と呼ばれ、磁束の立上り易さを表す透磁率 μ （H/m）と、初磁化曲線上の磁束密度 B_m （ m ：磁場の強さ）を示します。透磁率は原点 O と原点に接近した小さな磁場域のある1点とを結ぶ直線の勾配で表される初透磁率 μ_i と、初磁化曲線上で勾配が最も大きくなる最大透磁率 μ_m の指標がよく用いられ、一般には透磁率（H/m）を真空の透磁率 μ_0 [$4\pi \times 10^{-7}$ （H/m）] で割った無次元の比透磁率として表されます。また、磁束密度 B_m は磁場を増加させると、材料固有の飽和磁束密度 B_s まで増加します。なお、初磁化曲線上で示される各指標は、特に軟磁性材料において重要視されます。（2）任意の磁場まで印加した後、逆に磁場の強さを減少させていくと、磁束密度は初磁化曲線に沿って戻らず、 $a \rightarrow b$ のように減少し、印加する磁場をゼロまで戻しても残留磁束密度 B_r が残ります。この残留磁束密度は、特に硬磁性材料において重要な指標となります。（3）さらに正負を反転させた磁場を増加させると、磁束密度は $b \rightarrow c$ のように減少し、ある磁場の強さにおいて磁束密度はゼロとなります。この $b \rightarrow c$ 部分は減磁曲線と呼ばれ、硬磁性材料の特性を示す重要な曲線となります。また、磁束密度がゼロとなる磁場の強さ（負の符号はつけない）は保磁力 H_c と呼ばれ、軟磁性材料は小さく、硬磁性材料は大きいことが求められます。（4）負側の磁場をより増加させると、磁束密度は $c \rightarrow d$ と減少（負側に増加）し、（5）次いで磁場の強さを減少させると、磁束密度は $d \rightarrow e$ と変化します。（6）さらに磁場の正負反転と強さを増加させると、磁束密度は $e \rightarrow f \rightarrow a$ と増加します。

このように磁性材料はヒステリシス曲線上において示される特性指標も多く、磁性材料の特性を議論するうえで、ヒステリシス曲線の測定とその理解が必要となります。

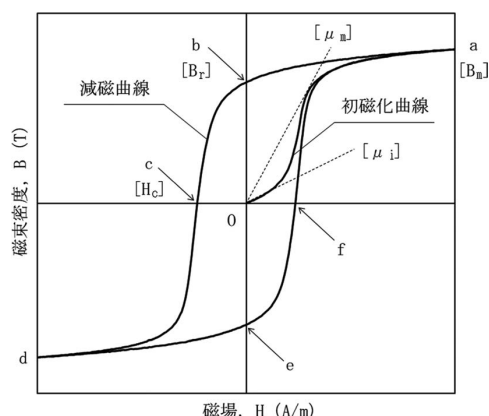


図 1 磁性材料のヒステリシス（ B - H ）曲線

8. その他

1) 溶接性 ～高温割れ～

大同特殊鋼(株) はっ とり ひろ き
技術開発研究所 服 部 広 基

◇ 溶接性の定義

一般に溶接性は、

- ①「欠陥のない健全な溶接ができるか」という、材料の溶接加工上の難易の程度を示す溶接性(狭義の溶接性)
- ②「溶接後の継手性能が、構造物の使用目的を満足させることができるか」という使用性能に関する溶接性(広義の溶接性)

の2つの意味で使われている。

狭義の溶接性は熱影響部の硬化性と低温割れ感受性を示す。広義の溶接性は継ぎ手の破壊靱性疲労特性、高温強度、クリープ特性、耐食性、耐応力腐食割れなどである¹⁾。

◇ 溶接部組織

図1は溶接部横断面の模式図である。溶接部は溶接金属、熱影響部(HAZ)および熱影響を受けていない母材から成っている。また、溶接金属と熱影響部との境界をボンド部と呼ぶ。

溶接金属は溶接中に熔融凝固した金属で、急冷されているため、金型に鋳込まれた鋳鋼と同じような組織を呈している。また、熱影響部は、溶接入熱、ボンド部からの距離によって加熱される温

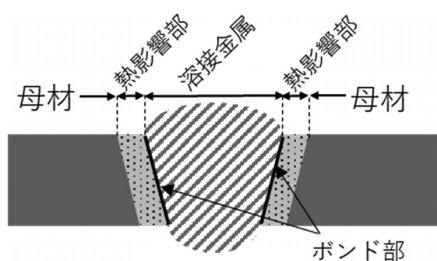


図1 溶接部横断面の模式図

度や冷却速度が異なるため、組織、硬さなどがそれに応じて連続的に変化する。

◇ オーステナイト系ステンレス鋼の高温割れ

各種金属材料の中で、オーステナイト系ステンレス鋼は炭素鋼と同様に比較的容易に溶接を行うことができるが、溶接時に高温割れを発生したり、使用環境によっては溶接部に腐食の問題が発生することがある。

その高温割れには、凝固割れと液化割れに分類される。凝固割れはP、Sなどの不純物が溶接の最終凝固部に濃縮し融点を低下させ、凝固収縮に伴い固液共存域にひずみが作用し割れる。また、液化割れは多層盛時に溶接熱で前の層の粒界に凝固割れ同様に低融点金属化合物及びMnSなどが生成され、その固液共存域にひずみが作用し割れる。

オーステナイト系ステンレス鋼は、溶接金属での δ フェライト量の生成能から完全オーステナイト系と δ フェライトを晶出する準安定オーステナイト系に大別される。図2²⁾はオーステナイト系ステンレス鋼309溶接金属の高温割れ感受性に及ぼす

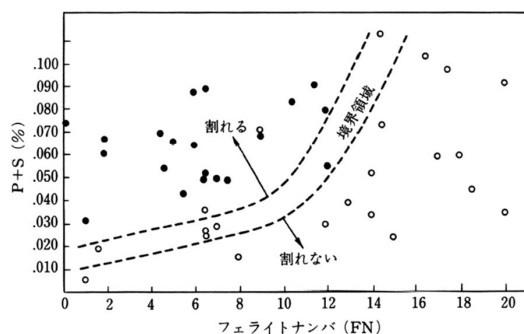


図2 オーステナイト系ステンレス鋼309溶接金属の高温割れ感受性に及ぼす(P+S)量並びにフェライト番号(量)の影響

(P+S) 量並びにフェライト番号（量）の影響である。完全オーステナイト系は δ フェライトが無い為、高温割れ感受性が高い。一方、準安定オーステナイト系は数%の δ フェライトを含有させればP、Sを固溶することができ高温割れを防止することができる。ただし、 δ フェライトが多すぎると高温での長時間使用による σ 相脆化や、極低温での脆化の直接要因となりじん性を低下させることがある。オーステナイト系ステンレス鋼中の δ フェライト量は磁気的な測定方法で測定が可能である。

◇ミルシートのみかた

ミルシート化学成分欄からは、P、Sの量が読み取れる。そのP+Sの量によって、高温割れ感受性を知ることができる。

参 考 文 献

- 1) 産報出版：溶接・接合技術総論 P 127-179 (2015)
- 2) 産報出版：溶接技術の基礎 P 106 (1986)



2) 破面の見方

愛知製鋼(株) 品質保証部 室長 宇田川 毅 志
お客様品質・技術室

まえがき

機械部品で折損が発生した場合、最初を実施することは折損した破面の観察である。破面は色々な情報を持っており、破壊の過程を調べることの出来る唯一の証拠であり、重要な手がかりを提供してくれる。

本稿では破面の見方について、簡単に解説する。

◇ 破面の見方

破面の観察には目視や低倍率での観察によるマクロ観察と、高倍率でより詳細を確認するミクロ観察がある。これは破壊モードを推察するうえで、状況により使い分けられるが、併用する場合も多い。

鉄鋼材料の破面を大きく区別すると表1のように区分される。

以下に表1内の破面形態について簡単に解説する。

①延性破面

比較的硬さが低い（例えば軟鋼など）材料に大きな静的荷重がかかり、破壊した場合に見られる破面である。破壊の近傍では伸びや絞りの塑性変形を伴い、カップコーンが形成される。マクロ的に破面を見た時にカップコーンの底は灰色の繊維状の形状を示す。また、SEMでミクロ的に破面を見た時は写真1に示すように延性的な破面の特徴であるディンプルと呼ばれるくぼんだ形状が見られる。これは結晶内のすべりや、空孔が集合することにより発生する。

②脆性破面

比較的硬さ高い（例えば鋳鉄）材料に大きな静的荷重がかかり、破壊した場合に見られる破面である。延性破面とは異なり、結晶粒内のすべりがさほど進行せず、結晶面が一気に分離することで発生する。マクロ的に破面を見た時に破面はギラギラと光って見える。ミクロ的に破面を見た時は写真2に示すように粒内のへき開面で発生する場合と、写真3に示すように粒界で発生する場合がある。

表 1 鉄鋼材料の破面の一例

形態	特徴
延性破面	静荷重で変形量の大きい破壊
脆性破面	静荷重で変形量が比較的小さい破壊
疲労破面	繰り返し応力により発生する破壊

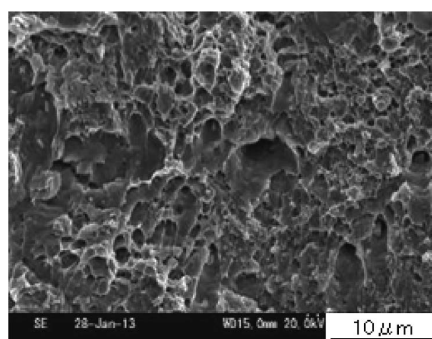


写真1 延性破面

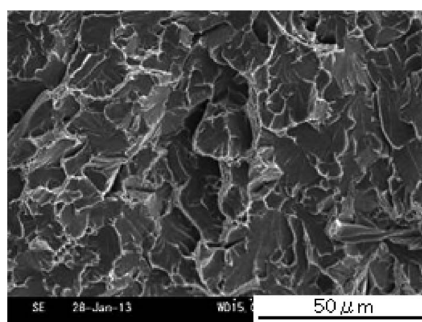


写真2 脆性（へき開）破面

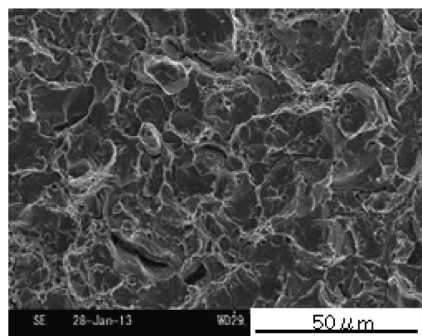


写真3 脆性（粒界）破面

③疲労破面

1、2回荷重が作用しただけでは破壊することの無い材料においても、荷重が繰り返し作用する場合に発生する。この破壊は繰り返し使用により徐々に進行するものである。マクロ的に破面を見た時は写真4に示すようにクラックの進展に伴う貝殻状のビーチマークや複数のき裂が合わさって出来た段差（ラチェットマーク）が見られる。ミクロ的に破面を見た時は写真5に示すようなストライエーションというスジを示している場合があり、ストライエーションが見られた場合はその間隔を測定することで、使用応力を推定できる。

むすび

今回、破面の種類とその見方について簡単に紹介しました。一般に機械部品の使用環境は複雑で、破面を見た時に必ずしも今回紹介したケースが発生するわけでは無いので、原因の推定をすることは簡単なことではありません。破面の正しい解釈をするためには多くの破面事例を知ることが一番重要です。本稿をきっかけに破面形態に興味を持ち、色々な事例集を見ていただくようになれば幸いです。



写真4 疲労破面

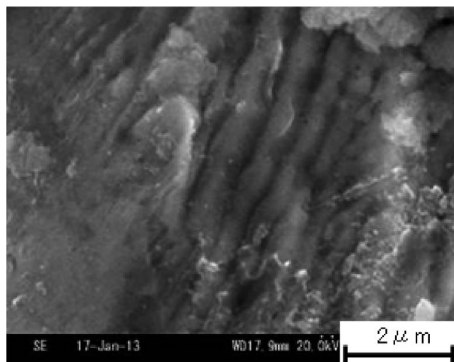


写真5 ストライエーション

業界のうごき

UEX、東京配送センター建て替え 10億円投資、建屋面積3割拡大

UEXは、2026年5月完成予定で東京配送センター（東京都江東区）を建て替える。現建屋の老朽化対策が主目的で、建屋面積は現状より3割拡大になる。搬入搬出経路の一方通行化やクレーン増設による積み下ろし作業の効率化も図り、物流業界の労働時間規制問題の解決につなげる。事務所も建て替える。

工事期間は約2年を見込む。建て替え費用の概算は10億円を見込むが、6月時点のものであり、今後の建設資材価格の高騰で上振れる可能性がある。

今年度中に伊勢原スチールサービスセンター（神奈川県伊勢原市）にあるCO2レーザ3基のうち1基を18KWファイバーレーザに更新することも決めた。投資額は1億9,000万円。同センターは昨年度もCO2レーザ1基をファイバーレーザに更新しており、切断工程の生産性向上に努めている。（6月6日）

大同DMソリューションが新中期 鋼種・二次加工品・精密部品を拡大

大同DMソリューションは、今期をスタート年度とする3カ年の中期経営計画を策定し、国内外で扱い鋼種や二次加工、精密部品の拡大に注力していく。10年後には生産効率を現状より30%改善し、ROS5%以上の達成を目指す。

素材販売だけでなく、工具鋼に関する事業の収益最大化を目指し、加工、熱処理・表面処理事業の拡大を狙う。自社の加工設備や技術力を有効に活用し、金型以外の製品・部品分野にも力を入れることにより、金型向け工具鋼を軸としながら他の分野を拡張する方針。

事業領域拡大のため、国内では

MIRAI（みらい）開拓部を発足させ、今年4月から本格的に活動を開始。二次加工品や精密部品、プラスチック成型に使われるステンレス系金型の素材・加工品など新規需要分野を開拓していく。海外戦略については7月に開設する海外本部で検討していく。（6月10日）

千曲鋼材、茨城と浦安でFレーザ稼働 切板加工能力増強、省エネも

千曲鋼材は、発振器出力12KWの門型ファイバーレーザ切断機を茨城事業所（常陸大宮市工業団地内）と浦安工場倉庫（浦安第1鉄鋼団地内）に1台ずつ新設した。切断能力の増強と省エネ対応強化を目的に、両拠点で更新投資として新鋭機を導入した。各種特殊鋼厚板の切板製品を高品位に切断することで顧客満足度を向上するとともに、消費電力や消耗品の低減により約50%のランニングコスト削減を見込む。

茨城では4KWのCO2レーザ2台と入れ替え、浦安では4KWのCO2レーザ1台とリプレースした。有効切断幅は2台とも5.25メートルで、有効切断長さは茨城が20メートル、浦安が16.3メートル。母材の板厚や鋼種、表面性状に合わせた高品位な切板加工を可能にしている。

今回の設備投資は「省エネ補助金」対象に採択された。2台とも1月末に設置を完了し、調整・試運転を経て、稼働は軌道に乗っている。（7月18日）

野村鋼機、前橋支店を移転拡張へ 5億円で用地取得、敷地3.7倍に

野村鋼機は前橋支店（群馬県前橋市）を拡張移転する。同市の工業団地内にある4,100坪の土地を5億円で取得し、そこに支店を移す。敷地面積は3.7倍になり、在庫能力が高まる見通し。移転日や支店建屋の竣工時期などは未定で、市場環境を考慮し

て決める。

移転先は熱間工具鋼の機械加工拠点である関東テクノセンター（同市）から車で5分ほどの工業団地内にあり、同センターとの連携がとりやすい立地にある。現前橋支店が手狭になっていたため、昨年度までは関東スチールセンター（茨城県稲敷市）に倉庫を新設する予定としていたが、前橋市の土地取得の打診があった。倉庫新設の計画を白紙に戻して再考した結果、前橋支店を拡張移転する決断に至った。

新支店にどの鋼材を在庫するかについて、特殊鋼センター（千葉県浦安市）の一部在庫を移す選択肢も検討しているが、特殊鋼センターの在庫・物流機能は変わらない。（6月13日）

三井物産、印大手スクラップ業者に出資 原料安定供給とCE確立を目指す

三井物産は、インドの大手金属リサイクル業、MTCビジネス・プライベート（本社・ムンバイ）に出資する。24年度中に20%超の出資を完了し、MTCは三井物産の持ち分法適用会社となる見込み。出資額は非公表。三井物産とMTCは互いの強みを生かすことで、成長するインド市場で鉄鋼業の原料安定供給とサーキュラーエコノミー（CE）の確立を図る。

1974年創業のMTCは、インド全土に30以上のヤードを展開するファミリー企業。金属スクラップやニッケル、コバルト、合金鉄などの扱量は220万トンで、約190万トンが鉄スクラップ。インド市場は成長が見込まれ、数年後にはMTCのスクラップ扱量は倍増が期待される。

三井物産は豪州や欧米で事業を手掛ける世界最大規模の総合リサイクル業、シムスにも出資している。インドで強い集荷力を有するMTCをパートナーとすることでインド市場の成長を取り込む。（6月18日）

業界のうごき

メタルワン、伊変圧器コア会社買収 方向性電磁鋼板の加工分野強化

メタルワンは、方向性電磁鋼板（GO）を使用するイタリアの変圧器用コアメーカー、LAGOR（ラゴア）を買収し子会社化した。買収金額は明らかでないが、投資規模はメタルワンにとり過去2番目となる。メタルワンは欧州GO市場での需要増に応えとともに、ラゴアの技術力とメタルワンのグローバルネットワークを掛け合わせた展開も図る。

ラゴアは1971年設立で2023年12月期の売上げ規模は8,500万ユーロ（約145億円）。従業員は200人規模で、伊北西部のピエモンテ州アスティ県に3工場を持つ。欧州の大手変圧器用コアを重電メーカーや変圧器メーカーへ供給している。

メタルワンはラゴアとGOの供給で取引があり、ここで築いた創業家との信頼関係から今回の買収に至った。株式の過半数を取得して連結子会社とし、創業家も一定の株式を継続保有することで円滑な事業承継を図る。経営陣はメタルワンから派遣する。

（7月19日）

愛知製鋼、水素燃焼で鋼材熱処理 刈谷工場で実証試験開始

愛知製鋼は、刈谷工場にある鋼材熱処理炉の水素燃焼対応工事を完了し、水素燃焼技術の実証試験を開始した。同工場は地道な省エネ活動に加え、再エネ電力、カーボンニュートラル都市ガス（天然ガスの採掘から燃焼までの工程で発生するCO2を森林保全プロジェクトなどを通じて相殺したLNGで製造した都市ガス）の導入で2022年3月に年間約1万2,000トンのCO2排出量を削減、CNを実現している。

またクリーンエネルギーとして水素に着目し、東邦ガスグループとア

イチセラテックの協力を通じて、都市ガスを使用する鋼材熱処理炉の水素燃焼対応工事を進めてきた。

今回の実証試験では水素による鋼材熱処理技術の開発を目標とし、水素燃焼の検証や知見収集など、水素活用に向けた実証を進める。中部圏水素協議会の一員として実証試験から得られた知見を活用し、他工場での水素利活用の展開も目指す。

（7月8日）

山陽特殊製鋼が製造技術を開発 高純度・球形シリコン粉末

山陽特殊製鋼は、半導体などに使用されるシリコン（Si）について、高純度であり、かつ球形で流動性にも優れる粉末を製造する技術を開発した。この製造技術によるシリコン粉末を適用することで、半導体の電気特性安定化やデバイスの信頼性向上などが期待できるようになる。同社は半導体関連以外の用途も開拓する。

シリコンは半導体特性や高温・化学的安定性といった特徴を有し、半導体デバイスや太陽光発電機器などに広く用いられる。溶射や肉盛用途でシリコンを使う場合、高純度シリコンやシリコン合金のインゴットを粉砕した粉末が使用されるが、粉砕法では粒子が不定形状で粉末の流動性が低くなり、ノズル詰まりの原因になる課題があった。

同社は、グラファイトを使用しない耐火物系坩堝でシリコンやシリコン合金を溶融して、不活性ガスでアトマイズする製造技術を開発した。

（7月9日）

JFEスチール、グリーン線材が採用 資源循環型コンテナの取手部品

JFEスチールのグリーン鋼材「JGreeX（ジェイグリークス）」が棒鋼・線材分野で初めて採用された。佐藤製作所（本社・三重県桑名市）

が製造する100%再生プラスチック使用の資源循環型コンテナ「LOOPOX（ルーボックス）」の取手部分に使われる。鋼材（普通線材）は住友商事グローバルメタルズを通じて鈴豊精鋼で加工され、佐藤製作所でLOOPOXに組み込まれる。従来もJFEの普通線材が使用されているが、11月頃からJGreeXを採用したLOOPOXが販売・出荷される見込み。

LOOPOXは、佐藤製作所と新東通信（本社・名古屋市中区）が普及を目指すサーキュラーエコノミー製品。標準サイズは410ミリ×340ミリ×200ミリで耐荷重は約30キログラム。本体の原料には再生ポリプロピレンを使用し、原料製造に係るCO2排出量を大幅に削減しており、JGreeX採用でさらなる削減につなげる。

（7月17日）

下村特殊精工が新中計・長期ビジョン 30年度売上高、外販数量3割増目指す

下村特殊精工は、2024年度から26年度までの中期経営計画と30年度までの長期ビジョンを策定した。30年度までに23年度比で売上高、外販数量を3割増やす計画だ。新中計・長期ビジョンの重点施策は「新領域」。サイズ・加工・鋼種の3点においてこれまで同社が手掛けていた領域を広げていく。

サイズは、3型の連続抽伸ラインを導入し、より太径の磨棒鋼製品の製造・販売を検討する。同時に細径のニーズにも対応していく。加工のサイズレンジを拡大することで幅広いニーズを取り込む狙い。加工では、事務用品（ボールペンチップ）事業における中間製品の製造・販売などを展開することで、より高付加価値な事業ビジネスを構築していく。鋼種については、前中計から注力する鉛フリー材や難加工材のほか、チタンなど新鋼種の加工技術の確立を目指す。

（6月10日）

大同特殊鋼が新中期計画を策定 成長分野などに1,500億円投資

大同特殊鋼は、2027年3月期を最終年度とする新中期経営計画を策定した。成長市場と位置付ける関連製品事業の拡大や新規顧客開拓などによる事業ポートフォリオの変革、長期的事業成長を支えるためDXによる人的・組織的な経営基盤の強靱化、ESG経営の高度化などを推進。最終年度までに連結営業利益600億円（IFRS適用、前期実績は日本基準で421億円）、ROE9%以上（前期は12.5%、特別損益除くと7.8%）を目指す。成長市場製品の生産能力増強などを中心に前中計比約1.5倍となる累計1,500億円の投資を計画している。

高合金の生産プロセスを抜本的に変革するプロジェクトにも着手する。300億円を投じて大規模な機能強化を実施する。渋川、知多第2工場両拠点で設備の新増設を展開。渋川では大型4面鍛造機の新設、真空誘導溶解炉の増強も行う。2027年度までに整備を完了し、生産能力を約2倍へ高めるとともに生産サイズ拡大を図る。（6月7日）

日本金属、異形圧延製品をブランド化 「ファイン・プロファイル」を拡販

日本金属は、独自の冷間圧延技術や専用設備を組み合わせ鉄系から非鉄系まで多様な金属に対応する冷間異形圧延製品を「Fine Profile（ファイン・プロファイル）」と命名し、商標登録した。同社が独自の基準で認定する環境配慮製品「エコプロダクト」における主要ブランドの一つに位置付け、拡販を図る。

ファイン・プロファイルは、鉄系・非鉄金属を独自の圧延技術によって幅方向に板厚が異なる異形断面形状へ連続的に加工した製品の総称。切削や研削などさまざまな加工の代替手段として、ユーザーの工程削減、

環境改善、製造コスト削減、歩留まり向上などに貢献する。

同社は長年にわたり鉄系の冷間異形圧延製品を「異形鋼」として製造・販売し、近年は無酸素銅、銅合金、アルミ合金、純チタン、チタン合金、純ニッケル、マグネシウム合金など非鉄金属材料にも幅を広げている。

（7月24日）

日本冶金工業、超広幅板を製品化 高耐食・耐熱合金「NAS625」

日本冶金工業は、高耐食・耐熱合金「NAS625」（UNS N06625）の超広幅プレートの製品化に成功した。合併会社を通じて協力関係にある中国・南京鋼鉄の広幅圧延機を活用し、板厚15ミリ×板幅3,100ミリの超広幅プレートを製品化した。天然ガスプラント用配管などの素材として超広幅プレートを供給することで、溶接工数の低減による製造納期短縮や製造コスト低減に寄与する。

NAS625は優れた耐食性と耐熱性を兼ね備えるニッケル基合金で、高温での強度が高く熱間圧延が難しい。天然ガスプラント用配管などで求められる板厚サイズに対応するのは極めて難度が高いが、製造条件の適正化などを追求して製品化に成功した。超広幅プレートを配管素材に使うと狭幅プレートに比べて造管時の溶接線を減らすことができる。

中国市場ですでに販売実績があり、今後は中東などの天然ガス・LNG案件向けの拡販も見込む。（6月20日）

プロテリアル、鳥取子会社を統合 パワーエレクトロニクス事業を強化

プロテリアルは、鳥取市内にあるパワーエレクトロニクス事業部応用部品部と、完全子会社のプロテリアルフェライト電子を10月1日付で統合し、パワーエレクトロニクス事業部の鳥取工場にする。プロテリアル

は電動車やスマートフォンなどの高効率化、小型軽量化に貢献するパワーエレクトロニクス事業の一つにしており、鳥取工場をパワー半導体関連を含めたパワーエレクトロニクスの研究開発、生産を担う主力拠点に位置付ける。

応用部品部はパワーエレクトロニクスの研究開発や設計がメインで、プロテリアルフェライト電子は軟磁性材料・部品の開発、製造やパワー半導体向け窒化ケイ素基板の製造などを行っている。2013年に日立金属・鳥取工場（当時）と日立フェライト電子（同）が実質的に統合して、現在のプロテリアルフェライト電子に発展しており、あらためて鳥取地区で一体運営体制を強化する。（7月23日）

三菱製鋼、メキシコばね子会社を増資 今期営業黒字化の見込み

三菱製鋼は、メキシコにおけるばね事業の完全子会社に対する増資を決めた。子会社は自動車サスペンション用ばね（スタビライザ）を生産する「MSSC MFG MEXICANA」（アグアスカリエンテス市）。2017年4月に営業生産を開始し、これまで損失計上が続いていたが、売価改善の進捗や生産量の増加により、2024年度の営業黒字化にめどが立った。これを機に財務体質を強化し成長戦略を描くため、6月中に約18億円の増資を実行する。

三菱製鋼は、海外子会社の赤字資金は親子ローンで支援し、営業黒字化にめどが立つ段階で増資を行い、財務健全化と自立を図る方針としている。海外ばね事業では2024年3月に北米MSSCに対する増資を行っている。

三菱製鋼が増資を引き受けるとともに貸付金の返済を受けるため、連結業績と財務に与える影響は軽微となる。（6月21日）

文責：（株）鉄鋼新聞社

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	構 造 用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張鋼	その他		
'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
'23 暦年	131,234	3,899,876	3,309,651	7,209,527	305,663	732,298	1,949,309	440,740	4,731,166	371,781	8,530,957	15,871,718
'22 年度	182,740	4,012,556	3,357,873	7,370,429	311,005	793,313	2,311,937	456,157	4,507,723	423,410	8,803,545	16,356,714
'23 年度	124,303	3,808,100	3,291,381	7,099,481	303,187	735,856	1,953,747	433,670	4,829,099	376,470	8,632,029	15,855,813
'23. 7-9月	26,313	978,133	866,866	1,844,999	75,678	187,207	471,916	111,729	1,248,342	96,472	2,191,344	4,062,656
10-12月	31,337	984,424	810,733	1,795,157	79,080	180,417	488,160	110,947	1,212,803	88,301	2,159,708	3,986,202
'24. 1-3月	28,407	892,716	767,063	1,659,779	71,912	179,252	498,248	104,611	1,223,663	102,477	2,180,163	3,868,349
4-6月	31,225	852,571	785,419	1,637,990	71,608	169,398	509,372	98,132	1,144,155	94,333	2,086,998	3,756,213
'23年 5月	12,338	328,136	301,747	629,883	24,464	63,799	163,134	36,763	416,512	32,096	736,768	1,378,989
6月	11,797	330,585	270,437	601,022	27,932	68,380	173,418	37,751	386,691	29,594	723,766	1,336,585
7月	10,747	339,636	307,640	647,276	27,577	67,017	167,599	35,808	397,380	30,878	726,259	1,384,282
8月	7,165	298,290	250,449	548,739	20,496	56,933	157,521	33,753	419,799	31,087	719,589	1,275,493
9月	8,401	340,207	308,777	648,984	27,605	63,257	146,796	42,168	431,163	34,507	745,496	1,402,881
10月	10,637	330,374	289,712	620,086	25,381	56,771	148,392	35,709	407,462	32,767	706,482	1,337,205
11月	10,268	340,608	286,660	627,268	27,645	62,265	170,404	39,084	419,744	26,926	746,068	1,383,604
12月	10,432	313,442	234,361	547,803	26,054	61,381	169,364	36,154	385,597	28,608	707,158	1,265,393
'24年 1月	8,297	305,237	260,534	565,771	20,176	58,454	156,079	36,081	443,561	35,346	749,697	1,323,765
2月	10,399	285,776	254,630	540,406	26,042	60,596	174,801	32,795	380,592	34,116	708,942	1,259,747
3月	9,711	301,703	251,899	553,602	25,694	60,202	167,368	35,735	399,510	33,015	721,524	1,284,837
4月	10,034	264,730	241,242	505,972	23,084	54,442	161,654	29,710	368,511	32,227	669,628	1,185,634
5月	9,225	311,683	287,379	599,062	24,460	61,149	173,596	32,123	380,888	31,595	703,811	1,312,098
6月	11,966	276,158	256,798	532,956	24,064	53,807	174,122	36,299	394,756	30,511	713,559	1,258,481
前 月 比	129.7	88.6	89.4	89.0	98.4	88.0	100.3	113.0	103.6	96.6	101.4	95.9
前年同月比	101.4	83.5	95.0	88.7	86.2	78.7	100.4	96.2	102.1	103.1	98.6	94.2

出所：一般社団法人日本鉄鋼連盟『特殊鋼鋼材生産・消費・在庫内訳』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
'22 暦年	293,422	5,401,742	1,019,267	3,386,987	1,083,496	5,701,276	16,886,190
'23 暦年	232,299	5,089,014	930,232	3,120,799	1,021,303	5,477,902	15,871,549
'22 年度	278,130	5,185,205	997,569	3,270,099	1,070,471	5,555,186	16,356,660
'23 年度	224,655	5,025,161	936,013	3,117,568	1,033,099	5,519,352	15,855,848
'23. 7-9月	63,402	1,291,768	248,030	793,923	279,239	1,386,253	4,062,615
10-12月	51,194	1,274,735	207,850	810,680	250,978	1,390,760	3,986,197
'24. 1-3月	47,835	1,180,377	228,300	777,301	265,805	1,368,919	3,868,537
4-6月	56,041	1,143,543	231,302	746,405	273,606	1,305,295	3,756,192
'23年 5月	19,762	439,045	84,860	260,339	79,810	495,172	1,378,988
6月	22,183	444,201	71,057	254,832	76,282	467,935	1,336,490
7月	20,995	438,701	103,368	263,532	86,255	471,432	1,384,283
8月	11,866	392,938	69,527	244,818	84,371	471,964	1,275,484
9月	30,541	460,129	75,135	285,573	108,613	442,857	1,402,848
10月	18,966	437,015	83,080	260,985	76,245	460,914	1,337,205
11月	18,457	434,810	75,327	281,251	94,100	479,660	1,383,605
12月	13,771	402,910	49,443	268,444	80,633	450,186	1,265,387
'24年 1月	15,336	384,265	84,493	262,672	95,569	481,430	1,323,765
2月	16,926	382,904	80,180	253,809	81,099	444,828	1,259,746
3月	15,573	413,208	63,627	260,820	89,137	442,661	1,285,026
4月	17,998	344,918	80,634	238,726	96,806	406,544	1,185,626
5月	19,251	409,384	87,970	265,602	85,648	444,236	1,312,091
6月	18,792	389,241	62,698	242,077	91,152	454,515	1,258,475
前 月 比	97.6	95.1	71.3	91.1	106.4	102.3	95.9
前年同月比	84.7	87.6	88.2	95.0	119.5	97.1	94.2

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)

												(単位: 万円)	
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 レ テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 力 鋼	そ の 他			
'22 暦 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	
'23 暦 年	222,460	2,603,870	1,370,867	3,974,737	96,262	338,483	1,206,080	101,169	58,915	82,812	1,883,721	6,080,918	
'22 年 度	232,624	2,551,967	1,358,265	3,910,232	72,037	360,226	1,396,971	106,248	68,738	89,161	2,093,381	6,236,237	
'23 年 度	218,218	2,615,710	1,413,014	4,028,724	95,069	331,334	1,159,703	99,779	58,281	81,495	1,825,661	6,072,603	
'23年	10月	20,581	250,129	136,525	386,654	9,094	32,455	99,104	8,612	4,769	7,386	161,420	568,655
	11月	18,519	244,028	131,643	375,671	8,659	28,419	100,228	9,121	5,759	6,667	158,853	553,043
	12月	16,649	226,282	124,265	350,547	8,312	28,074	96,034	8,163	4,878	6,255	151,716	518,912
'24年	1月	16,736	211,956	115,755	327,711	7,219	25,628	87,119	6,793	4,638	6,138	137,535	481,982
	2月	17,298	215,734	119,487	335,221	7,398	27,393	95,542	8,486	5,313	6,178	150,310	502,829
	3月	17,257	195,123	114,007	309,130	7,825	22,826	97,572	7,659	4,937	7,295	148,114	474,501
	4月	17,322	209,620	120,371	329,991	7,119	25,466	97,835	7,352	5,473	8,223	151,468	498,781
	5月	17,971	215,755	121,978	337,733	7,376	27,031	105,002	7,373	5,191	5,305	157,278	512,982
	6月	17,364	212,701	118,510	331,211	7,870	29,982	102,863	7,823	5,131	6,482	160,151	508,726
前 月 比	96.6	98.6	97.2	98.1	106.7	110.9	98.0	106.1	98.8	122.2	101.8	99.2	
前年同月比	92.5	98.1	104.5	100.3	97.4	102.6	99.4	87.6	102.4	90.2	98.9	99.6	

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 レ ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 力 鋼	そ の 他			
'22 暦 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	
'23 暦 年		6,379	184,699	122,687	307,386	17,529	33,998	112,876	17,584	147,601	16,229	345,817	659,582	
'22 年 度		8,870	207,670	133,119	340,789	17,942	28,734	126,791	21,907	129,474	19,381	344,229	693,888	
'23 年 度		6,318	190,855	126,343	317,198	21,360	32,140	115,164	19,343	145,922	20,728	354,657	678,173	
'23年	10月	5,326	193,014	124,999	318,013	17,787	31,816	96,180	21,202	148,963	23,132	339,080	662,419	
	11月	5,719	195,715	122,668	318,383	17,681	30,703	107,724	19,403	137,179	20,080	332,770	656,872	
'24年	12月	6,379	184,699	122,687	307,386	17,529	33,998	112,876	17,584	147,601	16,229	345,817	659,582	
	1月	6,275	193,940	123,871	317,811	17,848	30,429	112,645	21,139	155,758	26,397	364,216	688,302	
	2月	6,834	199,119	124,482	323,601	19,326	32,509	115,026	19,220	154,755	27,598	368,434	698,869	
	3月	6,318	190,855	126,343	317,198	21,360	32,140	115,164	19,343	145,922	20,728	354,657	678,173	
	4月	5,409	180,027	113,027	293,054	18,926	28,648	114,106	16,870	144,963	22,198	345,711	644,174	
	5月	5,106	180,460	118,152	298,612	17,653	30,137	112,087	19,764	157,293	20,036	356,970	660,688	
	6月	6,274	171,692	122,663	294,355	17,179	33,207	99,577	17,543	153,522	18,824	339,852	640,481	
前 月 比		122.9	95.1	103.8	98.6	97.3	110.2	88.8	88.8	97.6	94.0	95.2	96.9	
前年同月比		56.4	86.6	92.7	89.1	91.0	102.6	76.7	91.7	108.9	100.4	94.4	91.3	

出所：一般社団法人日本鉄鋼連盟『特殊鋼鋼材生産・消費・在庫内訳』から作成。

特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)

(単位:t)

平成30年度												単位：億円	
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 レ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 力 鋼	そ の 他			
'22 暦 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	
'23 暦 年	79,254	272,987	225,003	497,990	4,212	53,648	245,905	12,373	13,819	6,796	336,753	913,997	
'22 年 度	81,307	258,660	201,555	460,215	5,698	53,549	251,097	11,289	13,844	10,330	345,807	887,329	
'23 年 度	80,788	265,640	219,878	485,518	4,220	53,304	254,822	12,870	13,897	9,408	348,521	914,827	
'23年 10月	78,816	241,960	195,315	437,275	3,936	52,542	246,707	11,192	13,959	7,272	335,608	851,699	
11月	77,771	238,409	192,463	430,872	3,348	53,053	246,656	12,289	13,241	7,019	335,606	844,249	
12月	79,254	272,987	225,003	497,990	4,212	53,648	245,905	12,373	13,819	6,796	336,753	913,997	
'24年 1月	78,805	273,421	217,674	491,095	3,983	52,479	247,115	12,445	13,791	7,098	336,911	906,811	
2月	78,950	262,986	215,291	478,277	4,189	53,578	247,111	13,237	13,772	7,232	339,119	896,346	
3月	80,788	265,640	219,878	485,518	4,220	53,304	254,822	12,870	13,897	9,408	348,521	914,827	
4月	80,430	262,061	217,724	479,785	4,860	54,140	253,568	12,875	13,798	6,994	346,235	906,450	
5月	83,899	262,420	217,044	479,464	4,202	56,650	248,315	11,621	13,592	7,615	341,995	905,358	
6月	84,822	260,928	220,183	481,111	3,831	55,172	247,509	12,529	13,800	8,351	341,192	907,125	
前 月 比	101.1	99.4	101.4	100.3	91.2	97.4	99.7	107.8	101.5	109.7	99.8	100.2	
前年同月比	102.7	105.0	111.1	107.7	95.7	101.1	100.1	115.7	100.5	89.8	100.4	104.4	

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	
'22 暦 年	39,183	381,705	495,244	876,949	166,355	786,001	97,860	71,081	1,121,297	3,180	4,900,636	4,903,816	6,941,245
'23 暦 年	27,430	330,181	432,404	762,585	154,170	687,942	77,594	49,297	969,003	2,384	4,406,897	4,409,280	6,168,298
'22 年 度	37,482	369,309	484,741	854,050	164,491	757,239	90,378	70,711	1,082,819	3,209	4,735,671	4,738,880	6,713,231
'23 年 度	25,446	328,463	410,320	738,783	145,601	678,595	76,319	49,323	949,838	2,112	4,543,153	4,545,265	6,259,333
'23年 9月	2,051	30,472	35,489	65,961	13,741	56,952	9,076	5,546	85,314	162	364,442	364,603	517,929
10月	2,276	28,373	38,103	66,476	12,640	53,845	5,500	3,238	75,223	132	363,648	363,780	507,755
11月	2,124	25,926	38,496	64,422	12,866	52,844	8,150	4,203	78,063	153	375,885	376,038	520,647
12月	2,180	32,094	35,514	67,607	12,199	62,200	6,849	5,511	86,758	219	361,406	361,625	518,171
'24年 1月	1,964	24,215	29,411	53,626	10,843	51,299	6,154	2,166	70,462	142	389,404	389,546	515,598
2月	2,038	25,993	34,570	60,563	11,784	56,863	5,731	7,758	82,136	270	370,271	370,541	515,277
3月	2,361	31,035	31,061	62,096	9,479	61,263	7,057	3,586	81,385	119	413,614	413,732	559,574
4月	2,239	22,257	40,106	62,363	15,310	58,713	6,655	2,890	83,568	202	321,172	321,374	469,544
5月	2,221	29,829	31,659	61,488	15,232	63,665	3,814	8,443	91,154	159	370,619	370,778	525,641
6月	2,298	26,670	34,504	61,174	12,357	58,919	8,561	4,919	84,757	141	338,779	338,919	487,147
前 月 比	103.5	89.4	109.0	99.5	81.1	92.5	224.5	58.3	93.0	88.4	91.4	91.4	92.7
前年同月比	95.3	93.4	96.5	95.2	78.5	99.9	145.8	114.3	99.8	75.7	83.4	83.4	87.3

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	
'22 暦 年	4,066	16,285	344	12,418	11,486	264,312	20,503	309,062	171	7,158	178,111	185,269	514,853
'23 暦 年	2,272	21,741	399	9,614	9,100	201,615	18,626	239,354	74	13,527	170,682	184,208	447,649
'22 年 度	3,489	17,731	395	11,981	10,646	235,419	20,335	278,777	138	8,721	173,885	182,606	482,740
'23 年 度	2,233	22,166	407	9,430	9,110	217,254	18,220	254,420	71	12,336	168,071	180,407	459,297
'23年 9月	250	1,751	32	830	686	18,214	1,756	21,519	2	975	17,190	18,165	41,686
10月	127	1,701	38	673	881	15,234	1,390	18,215	3	486	11,512	11,998	32,044
11月	175	1,648	43	649	736	17,558	1,780	20,767	2	1,273	16,720	17,992	40,585
12月	164	1,449	17	866	935	16,705	1,201	19,724	2	1,835	12,205	14,040	35,379
'24年 1月	170	1,698	63	712	828	19,173	1,567	22,343	3	779	13,911	14,690	38,903
2月	123	1,540	50	738	715	21,994	1,310	24,808	12	382	12,658	13,040	39,524
3月	263	2,153	29	903	789	17,680	1,454	20,855	1	1,253	14,162	15,415	38,686
4月	243	2,252	54	901	941	25,133	1,477	28,506	5	1,440	13,727	15,167	46,173
5月	228	1,856	51	939	951	23,994	1,883	27,818	2	880	11,323	12,203	42,107
p 6月	344	2,048	67	856	793	20,483	1,377	23,575	1	1,444	16,037	17,481	43,450
前 月 比	150.6	110.4	132.0	91.1	83.4	85.4	73.1	84.7	48.0	164.2	141.6	143.3	103.2
前年同月比	149.4	78.5	275.8	109.0	136.6	108.4	77.9	106.9	-	114.9	95.1	96.4	101.0

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	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			
'22 暦 年	7,835,482	1,184,553	3,813,269	406,156	4,201,320	747,543	-	232,157	126,574	11,795	107,418	52,146	17,596
'23 暦 年	8,998,538	1,127,470	4,422,682	341,140	4,779,086	777,949	-	238,886	105,102	13,322	103,550	55,504	14,865
'22 年 度	8,100,863	1,195,947	3,864,096	396,817	4,385,649	765,986	-	230,526	123,367	12,099	107,937	52,652	17,056
'23 年 度	8,678,446	1,034,605	4,462,335	317,691	4,528,668	713,014	-	235,643	99,584	13,384	102,968	55,822	14,531
'23年 9月	840,648	100,193	411,833	30,877	437,493	73,318	-	20,944	8,780	1,257	8,548	5,487	1,339
10月	818,358	100,250	403,899	28,334	397,672	62,456	-	21,210	8,592	1,348	8,536	3,099	1,121
11月	857,001	104,551	399,591	24,474	411,089	66,278	-	20,533	8,649	1,306	8,219	3,428	1,159
12月	741,457	90,612	432,532	29,727	362,839	60,334	-	19,282	7,957	1,144	8,378	7,359	1,271
'24年 1月	578,126	61,653	295,133	22,755	334,876	48,691	-	17,370	6,780	888	8,238	3,716	1,110
2月	616,763	54,964	350,166	21,657	344,820	45,355	-	18,150	7,825	1,123	8,868	4,075	1,142
3月	710,389	93,766	348,539	22,262	451,444	66,076	-	19,546	7,899	1,022	9,130	6,459	1,357
4月	646,404	84,926	365,106	26,501	310,345	50,902	-	17,550	8,081	1,107	8,863	3,962	1,209
5月	651,285	82,304	295,741	21,975	312,406	50,375	-	17,038	8,149	1,043	8,578	5,167	1,245
6月	-	-	362,975	26,221	373,599	60,806	-	17,212	8,347	1,069	8,761	5,472	1,338
前 月 比	-	-	122.7	119.3	119.6	120.7	-	101.0	102.4	102.5	102.1	105.9	107.5
前年同月比	-	-	88.8	82.0	95.1	101.1	-	78.1	85.1	87.7	102.2	115.8	109.7

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

2 0 2 4 年 6 月 分

鋼種別	月 別		実 数 (t)	前 月 比 (%)	前 年 同月比(%)	2015年基準 指 数(%)	
	項 目						
工 具 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		11,966	129.7	101.4	58.1	
	鋼 材 輸 入 実 績 計		344	150.6	149.4	111.6	
	販 売 業 者	受 入 計	18,287	85.3	92.6	67.7	
		販 売 計	17,364	96.6	92.5	66.1	
		うち消費者向	14,491	95.9	92.4	76.6	
		在 庫 計	84,822	101.1	102.7	143.6	
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		2,298	103.5	95.3	48.2	
	生 産 者 工 場 在 庫		6,274	122.9	56.4	75.7	
	総 在 庫		91,096	102.3	97.2	135.3	
	構 造 用 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		532,956	89.0	88.7	77.9
販 売 業 者		受 入 計	332,858	98.7	102.8	50.9	
		販 売 計	331,211	98.1	100.3	50.7	
		うち消費者向	268,506	98.2	99.8	61.1	
		在 庫 計	481,111	100.3	107.7	136.7	
鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		61,174	99.5	95.2	74.4		
生 産 者 工 場 在 庫		294,355	98.6	89.1	84.1		
総 在 庫		775,466	99.7	99.8	110.5		
ば ね 鋼		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		24,064	98.4	86.2	66.9
		鋼 材 輸 入 実 績 計		2,048	110.4	78.5	502.6
	販 売 業 者	受 入 計	7,499	111.6	95.4	35.4	
		販 売 計	7,870	106.7	97.4	37.5	
		うち消費者向	2,577	116.4	91.0	55.4	
		在 庫 計	3,831	91.2	95.7	31.4	
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		12,357	81.1	78.5	78.6	
	生 産 者 工 場 在 庫		17,179	97.3	91.0	66.5	
	総 在 庫		21,010	96.1	91.8	55.2	
	ス テ ン レ ス 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		174,122	100.3	100.4	75.8
鋼 材 輸 入 実 績 計		23,575	84.7	106.9	162.9		
販 売 業 者		受 入 計	102,057	102.3	96.2	40.7	
		販 売 計	102,863	98.0	99.4	40.9	
		うち消費者向	51,578	101.0	94.4	92.2	
		在 庫 計	247,509	99.7	100.1	181.1	
鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		58,919	92.5	99.9	67.2		
生 産 者 工 場 在 庫		99,577	88.8	76.7	86.4		
総 在 庫		347,086	96.3	92.0	137.8		
快 削 鋼		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		36,299	113.0	96.2	70.7
	販 売 業 者	受 入 計	8,731	142.7	102.2	61.7	
		販 売 計	7,823	106.1	87.6	54.4	
		うち消費者向	7,202	106.5	84.1	51.7	
		在 庫 計	12,529	107.8	115.7	92.6	
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		8,561	224.5	145.8	89.5	
	生 産 者 工 場 在 庫		17,543	88.8	91.7	63.2	
	総 在 庫		30,072	95.8	100.4	72.8	
	高 抗 張 力 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		394,756	103.6	102.1	95.6
		販 売 業 者	受 入 計	5,339	107.1	98.5	51.9
販 売 計			5,131	98.8	102.4	50.4	
うち消費者向			4,322	100.3	104.5	64.5	
在 庫 計			13,800	101.5	100.5	125.9	
生 産 者 工 場 在 庫		153,522	97.6	108.9	81.0		
総 在 庫		167,322	97.9	108.1	83.4		
そ の 他		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		84,318	90.9	86.1	60.9
		販 売 業 者	受 入 計	35,722	100.7	95.8	88.1
			販 売 計	36,464	112.8	100.2	90.0
	うち消費者向		35,262	112.3	100.6	96.0	
	在 庫 計		63,523	98.8	99.5	119.6	
	生 産 者 工 場 在 庫		52,031	103.7	101.8	75.2	
	総 在 庫		115,554	101.0	100.5	94.5	
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産 合 計		1,258,481	95.9	94.2	80.0
		鋼 材 輸 入 実 績 計		43,450	103.2	101.0	53.5
		販 売 業 者	受 入 計	510,493	99.7	100.4	50.2
販 売 計			508,726	99.2	99.6	50.0	
うち消費者向			383,938	99.9	98.5	66.7	
在 庫 計			907,125	100.2	104.4	142.3	
鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		487,147	92.7	87.3	75.8		
生 産 者 工 場 在 庫		640,481	96.9	91.3	81.5		
総 在 庫		1,547,606	98.8	98.5	108.7		

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。



(2024年6月1日～7月31日)

総会

2024年度（6月10日・対面+Web）

- ①2023年度事業報告について
- ②2023年度決算について
- ③2023-24年度役員選任について

理事会

第2回（6月10日・対面+Web）

副会長の選任について

海外委員会

専門部会（7月4日・対面+Web）

- ①2023年度調査事業報告について
- ②2024年度調査事業テーマについて

市場開拓調査委員会

本委員会（7月29日・対面+Web）

- ①2023年度調査事業報告について
- ②2024年度調査事業テーマについて
- ③2024年度講演会テーマについて
- ④2024年度展示出展について

調査WG（7月9日・対面+Web）

- ①2023年度調査事業報告について
- ②2024年度調査事業テーマについて

編集委員会

本委員会（6月25日・対面+Web）

- ①11月号特集「特殊鋼棒線の圧延・鍛造に関する解説」の編集方針、内容の確認
- ②2025年1～11月号特集テーマの各月号への割振り

編集会議（7月19日・対面+Web）

2025年1月号特集「よくわかる特殊溶解－特殊鋼の製鋼工程（高炉・電炉・製錬の設備と技術について）（仮題）」の編集内容の検討

人材確保育成委員会

大学学生人材育成事業

一般社団法人日本鉄鋼協会主催「2024年度経営幹部による大学特別講義」において、特殊鋼メーカーの講師による講義で、特殊鋼俱

楽部発行の特殊鋼業界紹介パンフレット「夢みる鉄」を配布する等の協力を実施。

開催校：九州大学（7月8日）

受講生：工学部Ⅱ群（物質科学系）2年生（200名程度）

講師：山陽特殊製鋼㈱

取締役常務執行役員

柳本 勝氏

流通委員会

説明会（7月18日）

演題：2024年度第2・四半期の特殊鋼需要見通し

講師：一般社団法人特殊鋼倶楽部 事務局
内田 宏幸

方式：オンライン同時配信（東京・名古屋・大阪3地区）

聴講者：105名

カーボンニュートラルWG（第Ⅱ期）

第9回会合（6月26日・Web）

第10回会合（7月23日・Web）

講演会（6月7日・Web）

講演会（6月13日・Web）

講演会（6月19日・Web）

その他

物流2024年問題について、一般社団法人日本鉄鋼連盟主催「製品物流小委員会」への特殊鋼メーカー3社と共に参加協力。

7月度小委員会（7月3日・対面+Web）

[名古屋支部]

定時総会（6月11日・対面）

①2023年度事業・決算報告

②2024年度事業計画（案）・収支予算（案）・役員体制（案）承認

部会（対面会議）

構造用鋼部会（7月17日）

工具鋼部会（7月23日）

ステンレス鋼部会（7月31日）

説明会（7月18日・全特協との共催）

演 題：2024年度第2・四半期の特殊鋼需要
見通し

講 師：一般社団法人特殊鋼倶楽部 事務局
内田 宏幸

方 式：オンライン配信（東京・名古屋・大
阪3地区）

聴講者：37名（3地区計105名）

[大阪支部]

定時総会（6月11日・対面）

①2023年度事業・決算報告

②2024年度事業計画（案）・収支予算（案）・
役員改選（案）承認

③会員の異動

説明会（7月18日・3団体共催）

演 題：2024年度第2・四半期の特殊鋼需要
見通し

講 師：一般社団法人特殊鋼倶楽部 事務局
内田 宏幸

方 式：オンライン配信（東京・名古屋・大
阪3地区）

聴講者：19名（3地区計105名）



■ お知らせ ■ ■ ■ ■ ■

～メタルジャパン 東京展 出展内容充実～

第11回メタルジャパン（高機能金属展）[東京展]

会期：2024年10月29日(火)～31日(木)

時間：10:00～18:00 31日(木)のみ17:00終了 会場：幕張メッセ

主催：RX Japan 株式会社 協賛：(一社)特殊鋼倶楽部

世界規模での地球温暖化による影響が懸念されており、温室効果ガス抑制の脱炭素社会に向けた対応策が急がれています。

100年に一度の変革といわれる自動車の電動化、脱炭素化への電炉の拡充、太陽光や風力の再生可能エネルギー発電への拡大と、製造業のあり方も大きく変貌することとなり、特殊鋼業界においても例外ではありません。

こうした状況に特殊鋼という素材がより高機能材料に向けた技術開発をし、需要産業の技術革新、新規用途などへ更なる貢献が可能であり、特殊鋼倶楽部の事業の一環として年2回の「メタルジャパン」への出展は、特殊鋼の重要な役割を広められる場であります。

今回、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、協賛団体専門セミナーと題し、会員1社に専門技術セミナーに登壇いただきます。万障お繰り合わせの上、ご来場下さい。会場にて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】（五十音順）

・秋山精鋼株式会社 殿 ・南海モルディ株式会社 殿 ・日本金属株式会社 殿

【協賛団体専門技術セミナー予定】

日 時：2024年10月29日（火）12時15分～13時00分

場 所：幕張メッセ 第11回メタルジャパン会場内

演 題：モビリティの電動化に貢献する機能材料

講 師：大同特殊鋼株式会社 機能製品事業部 帯鋼製品部 帯鋼技術サービス室 室長 石川 浩一 氏

第253・254回西山記念技術講座 最新シミュレーション技術の進歩と鉄鋼業への展開

▼2024年10月16日（水）【大阪／対面開催】

▼2024年10月30日（水）【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

コンピュータ技術の発展とともに、近年のシミュレーション技術は大きく進歩している。大規模計算が可能となることでより精緻かつ迅速な解が得られるようになり、あらゆる産業・業界で活用が広がっている。また、精度・計算速度の向上を目指したデータサイエンス手法との融合も進み、現実の現象とシミュレーションとの対応が向上している。このような環境の中、現在のシミュレーション技術の最先端と、その適用・応用の現状と指針を学ぶことは、鉄鋼エンジニアの成長と業界の発展にとって極めて重要である。

そこで、本講座ではシミュレーション技術の最先端と、また、それらの鉄鋼業界への適用の可能性を新進気鋭の研究者に解説いただき、今後の鉄鋼技術の進歩発展に結び付けることを目的とする。

1. 日時・場所

第253回（大阪）：2024年10月16日（水） 9：15～17：00 受付時間：8：45～16：00

【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254回（東京）：2024年10月30日（水） 9：15～17：00 受付時間：8：45～16：00

【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 鉄鋼会館7・8F）

<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、10月30日をオンライン開催とし、10月30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、10月16日の参加申込は自動的に10月30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：西岡 浩樹（日本製鉄株）

1）9：15～10：30 【基調講演】GPUスパコンによる混相流シミュレーションと流体構造連成解析
東京工業大学 教授 青木 尊之

2）10：30～11：30 製鉄プロセスへの粒子・流体解析の応用と情報抽出
東北大学 多元物質科学研究所 教授 埜上 洋

司会者：飯塚 幸理（JFEスチール株）

3）12：30～13：45 【基調講演】塑性加工におけるシミュレーションの活用と今後への期待
物質・材料研究機構 構造材料研究センター

異方性材料グループ グループリーダー 井上 忠信

4）13：45～14：45 原子シミュレーションによる格子欠陥ダイナミクス解析
金沢大学 理工研究域 機械工学系 教授 下川 智嗣

司会者：田中 克廣（株神戸製鋼所）

5）15：00～16：00 結晶塑性有限要素法による不均一変形の数値解析

熊本大学 大学院先端科学研究部 教授 眞山 剛

6）16：00～17：00 データ科学と融合した材料の組織と変形挙動の数値シミュレーション技術

東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門 教授 山中 晃徳

3. 講演内容

1）【基調講演】GPUスパコンによる混相流シミュレーションと流体構造連成解析 青木 尊之

世界的にスパコンは演算性能の高いGPUを用いる方向に向かっている。混相流や流体構造連成問題は気液界面や物体が時間的に変動するため解析が難しいとされてきた。近年、流体解析は計算効率が高く高精度計算が容易な直交格子を利用する計算が増えている。実用解析においては、計算領域の全域に均一な格子を割り当てることは計算負荷やメモリの観点で非常に困難なことが多い。そこで、気液界面や物体表面近傍に高解像度格子を動的に配置することが可能なAMR（Adaptive Mesh Refinement）法が注目されている。さらに非圧縮性流体に対して陽解法の弱圧縮性計算手法を導入しGPU実装することで、大規模計算にスケールする高速、高精度、高効率なシミュレータを実現することができる。これらをさまざまな混相流および流体構造連成の実問題に適用、その有効性を示す。

2）製鉄プロセスへの粒子・流体解析の応用と情報抽出 荻上 洋

鉄鋼製錬には粉粒体を取り扱うプロセスが数多く存在し、その内部の混相流動状態を把握するため、様々な手法でシミュレーションが実施されている。本講では連続体の数値流体力学的手法と粒子追跡法の連成による混相プロセス解析のモデル構成の基礎を概説し、粒子・流体シミュレーションの最新の応用例を紹介する。近年では、粒子・流体解析ツールがコモディティ化しており、粒子群や流体の全体的な挙動を手軽にシミュレーション可能になっているが、モデル構成に着目すれば、より多くの情報抽出が可能であり、その実施例についても紹介する。

3）【基調講演】塑性加工におけるシミュレーションの活用と今後への期待 井上 忠信

加工熱処理を通じて、鉄鋼材料などの微視組織を制御し、機械的特性を改善する試みにおいて、結果を事前に予測できるシミュレーションへの期待は極めて大きい。

本講座では、有限要素シミュレーションを活用し、小さなサンプルを対象にした組織微細化の基礎研究成果を実機プロセス（鍛造（対象：低炭素鋼）、棒圧延（対象：低炭素鋼・マグネシウム合金）、板圧延（低炭素Nb鋼））に展開した例や微細粒鋼の脆性破壊応力を得る手法について紹介するとともに、塑性加工によるシミュレーションの問題点や今後の期待について概説する。

4）原子シミュレーションによる格子欠陥ダイナミクス解析 下川 智嗣

鉄鋼材料の力学特性を理解するには、転位、変形双晶、相変態などの格子欠陥ダイナミクスやそれに及ぼす粒界、異相界面の影響を理解することが大切である。原子シミュレーションは個々の原子のダイナミクスを直接取り扱うため格子欠陥ダイナミクスを理解するための一つの有効な道具である。本講座では、原子シミュレーションを用いた炭素クラスターと転位の相互作用、フェライト・セメンタイト異相界面を介した格子欠陥の発展、変形誘起マルテンサイト変態の核生成等の解析例を通じて、原子シミュレーションの役割を述べる。

5）結晶塑性有限要素法による不均一変形の数値解析 眞山 剛

結晶塑性構成式は、金属材料における塑性変形機構を、せん断面とせん断方向を陽に考慮して連続体力学の枠組みで表現する。特に結晶塑性構成式を用いた有限要素解析は、複雑な形状／任意の境界条件下の変形解析が可能であることから、材料の微視構造を含めた変形解析を実施する上で強力な手法である。本講座では、結晶塑性有限要素法を用いた解析例として、単結晶から多結晶までの変形解析について紹介する。また、商用有限要素法を用いて同様の解析を実施する手順についても概説する。

6) データ科学と融合した材料の組織と変形挙動の数値シミュレーション技術 山中 晃徳

フェーズフィールド法と有限要素法は、鉄鋼材料をはじめとする材料の組織と力学特性の解析と予測のための数値シミュレーション方法として発展してきた。しかしながら、どちらの数値シミュレーション方法も、材料物性値やパラメータを必要とし、その同定は容易でない場合も多い。最近では、データ科学や機械学習を用いて、実験データに基づき逆問題的に材料物性値やパラメータを推定し、数値シミュレーションの高精度化を目指す潮流が強い。本講座では、ベイズの定理に基づくデータ同化やベイズ最適化などを応用して、実験データに基づき数値シミュレーションに必要な物性値・パラメータの逆推定を可能とし、高精度な材料組織予測や材料加工性予測に資する技術の研究事例を紹介する。

4. 参加申込み 【8月初旬開始予定】

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

第253回（10月16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254回（10月30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9月18日（水）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。

※ご入金後の返金および当日不参加の場合の返金はいたしませんので、ご了承下さい。

※オンライン受講については、開催1週間前に、申込者にメールにてご案内致します。

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 ⇒ 2025年12月までの準会員資格

・学生一般（2,000円）で参加 ⇒ 2024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 E-mail：educact@isij.or.jp

第75回白石記念講座

データ駆動型材料開発の最前線とその適用例

▼2024年11月21日（木）【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

大量のデータの収集・分析を始点として研究を行うデータ駆動型の研究開発は、コンピュータなどのハード面、情報科学技術などのソフト面の発達により、近年目覚ましい発展を遂げてきた。本手法の適用により、今後材料開発の分野においてもますますの加速や高度化が予想される。

本講座では、データ駆動型材料開発における最新技術動向を紹介した上で、データセットの構造を理解するための強力なツールであるトポロジカルデータ解析や画像解析に焦点を当てて、その基礎から適用例までを学ぶことを目的とする。

1. 日時・場所：2024年11月21日（木） 9：20～16：55 受付時間 9：00～15：55

鉄鋼会館 会議室（東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館7F）

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

*今後の状況によっては、オンライン開催へ変更する場合がございます。あらかじめご了承下さい。

2. 講演題目および講演者、司会者

司会者：井上 純哉（東京大学）

1）9：20～10：30 【基調講演】データ駆動型材料設計に関する産総研の取り組み

産業技術総合研究所 執行役員 材料・化学領域長 濱川 聡

2）10：30～11：30 量子アニーリングを用いたブラックボックス最適化手法と材料科学への応用

物質・材料研究機構 マテリアル基盤研究センター チームリーダー 田村 亮

司会者：濱川 聡（産業技術総合研究所）

3）12：30～13：40 【基調講演】データ駆動科学と冶金学の融合に向けて

東京大学 生産技術研究所 教授 井上 純哉

4）13：40～14：40 トポロジカルデータ解析を用いてミクロ構造とマクロ物性をつなぐ

東北大学 材料科学高等研究所 准教授 赤木 和人

司会者：赤木 和人（東北大学）

5）14：55～15：55 深層ニューラルネットワークによる材料パターン情報学の試み

一橋大学 大学院 ソーシャル・データサイエンス研究科 准教授 本武 陽一

6）15：55～16：55 金属の破断面解析と機械学習の融合研究の紹介

労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所

機械システム安全研究グループ 部長代理 山際 謙太

3. 講演内容

1）【基調講演】データ駆動型材料設計に関する産総研の取り組み

濱川 聡

産業技術総合研究所（産総研）は、統合イノベーション戦略推進会議において決定された「マテリアル革新力強化戦略」の実現に向けて、データ駆動型材料開発・マテリアルDXを組織的に推進している。本講演では、マテリアルズ・インフォマティクス（MI）研究、プロセス・インフォマティクス（PI）研

究、及びその実施拠点として整備したマテリアル・プロセスイノベーションプラットフォーム、並びにデータプラットフォームとして構築したAIST Materials Gate DPF (DPF) について紹介する。

2) 量子アニーリングを用いたブラックボックス最適化手法と材料科学への応用 田村 亮

データ駆動型材料開発の大きな目的の1つとして、「機械学習の予測を利用することで、少ない実験回数でより良い材料特性を持つ材料を見つける」ことが挙げられる。これを実現する手法としてベイズ最適化をはじめとするブラックボックス最適化手法が活用されており、材料開発で多くの成功例が生み出されている。しかし、材料の組成、構造、プロセスの多様性により候補材料数が増大してしまうと、ブラックボックス最適化に要する計算時間が現実的ではなくなるという問題があった。そこで、量子アニーリングや類似手法をハードウェアに実装したイジングマシンといった次世代計算技術を利用することで、候補材料数が激増した場合でも、高速にブラックボックス最適化を実施できる手法を開発した。本講演では、開発手法を材料科学研究へ適用した事例を紹介する。

3) 【基調講演】データ駆動科学と冶金学の融合に向けて 井上 純哉

構造材料の特性は、結晶構造や分子構造だけでなく、結晶粒や析出物のサイズや形状など、様々なスケールの組織因子によって左右される。また、これらの組織因子は、製造・加工プロセス中に生じる様々な非平衡現象が複合的／競合的に生じることで複雑に変化する。そのため、構造材料の開発では、材料の本質的な理解が重要となるだけでなく、過去のデータや経験則も活用しながらの試行錯誤も不可欠となっており、膨大な労力と時間が不可欠となってきた。この様な状況を打破すべく、近年機械学習の力を借りて所望の特性を持った材料の設計をする試みがされている。本講演では、その様な試みの一つとして深層学習モデルと物理モデルの融合による材料組織推定のための枠組みに関する研究を紹介したいと思う。

4) トポロジカルデータ解析を用いてミクロ構造とマクロ物性をつなぐ 赤木 和人

物質材料のミクロ構造には組成やプロセス条件を反映した情報が含まれており、適当な物理モデルを介して種々のマクロ物性と結び付いているものと考えられる。パーシステント・ホモロジーと呼ばれる数学の枠組みを活用したトポロジカルデータ解析 (TDA) を用いると、複雑なピクセル画像や原子配置といった離散点データを n 次元の「穴」の形や大きさに基づいて定量化できるようになり、実材料へのデータ科学的アプローチに顕微画像データなどを用いる道が拓ける。本講座では、金属組織の走査電子顕微鏡 (SEM) 画像や大規模なシミュレーションデータにTDAを適用して記述子を生成し、機械学習と組み合わせてミクロな構造的特徴とマクロ物性をつなぐ回帰モデルを構成できることを、具体例を交えて紹介する。

5) 深層ニューラルネットワークによる材料パターン情報学の試み 本武 陽一

驚異的な発展が続く、深層ニューラルネットワーク (DNN) を用いた画像認識・生成技術、構造材料の組織構造のような材料パターン (画像) やそのダイナミクス (動画) を情報科学的にモデル化し理解・予測することに活用する研究が活発に行われている。本講演では、そのような「材料パターン情報学」とでも括ることができる研究領域についての最新の動向を紹介する。例えば、高分子破面から靱性を予測する我々の研究事例等を元に、最近の画像認識でよく用いられる、Transformer型のDNNモデル (言語モデルを起源としてChatGPT等の大規模言語モデルにも組み込まれる) について、従来の材料パターン分析でもよく使用されてきた畳み込み型DNNではなくTransformer型のDNNを材料科学データの分析に活用する意義について紹介する予定である。

6) 金属の破断面解析と機械学習の融合研究の紹介 山際 謙太

金属の破断面には破壊機構に関係した模様が残されている。この模様を調査することで機械構造物等の破壊の原因を知ることができ、これを破断面解析と呼ぶ。破断面解析では、肉眼で破断面を観察した後に、走査型電子顕微鏡 (SEM) で拡大して観察し、そこで観察される模様を分類することで破壊機構を推定する。本講演では、10万枚を超える破面のSEM画像を学習用データとして取得し、多層型ニューラルネットワークに学習させ、破断面の模様の分類に成功した例について紹介する。

4. 参加申込み【9月初旬開始予定】

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

※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。

[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10月24日（木）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は、開催1週間前に、申込者にメールにてご案内致します。

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 ⇒ 2025年12月までの準会員資格

・学生一般（2,000円）で参加 ⇒ 2025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、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）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

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】		【販売業者会員】			
製造業者	24社	愛 鋼 (株)	大 同 興 業 (株)	古 池 鋼 業 (株)	
販売業者	100社	青 山 特 殊 鋼 (株)	大同DMソリューション(株)	(株) プ ル ー タ ス	
合 計	124社	浅 井 産 業 (株)	大 洋 商 事 (株)	(株) プロテリアル特殊鋼	
		東 金 属 (株)	大 和 特 殊 鋼 (株)	平 和 鋼 材 (株)	
		新 井 ハ ガ ネ (株)	(株) 竹内ハガネ商行	(株) 堀 田 ハ ガ ネ	
		栗 井 鋼 商 事 (株)	孟 鋼 鉄 (株)	(株) マクシスコーポレーション	
		伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株)	辰 巳 屋 興 業 (株)	松 井 鋼 材 (株)	
		伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株)	千 曲 鋼 材 (株)	三 沢 興 産 (株)	
		(株) I S S リ ア ラ イ ズ	(株) テ ク ノ タ ジ マ	三 井 物 産 (株)	
		(株) U E X	(株) 鐵 鋼 社	三井物産スチール(株)	
		碓 井 鋼 材 (株)	デルタステール(株)	(株) メ タ ル ワ ン	
		ウ メ ト ク (株)	東京貿易マテリアル(株)	(株) メタルワンチューブラー	
		扇 鋼 材 (株)	(株) 東 信 鋼 鉄	(株) メタルワン特殊鋼	
		岡 谷 鋼 機 (株)	(株) ト ー キ ン	森 寅 鋼 業 (株)	
		カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株)	特 殊 鋼 機 (株)	(株) 山 一 ハ ガ ネ	
		兼 松 (株)	豊 田 通 商 (株)	山 進 産 業 (株)	
		兼松トレーディング(株)	中 川 特 殊 鋼 (株)	ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株)	
		(株) カ ム ス	中 島 特 殊 鋼 (株)	山 野 鋼 材 (株)	
		(株) カ ワ イ ス チ ー ル	中 野 ハ ガ ネ (株)	陽 鋼 物 産 (株)	
		川 本 鋼 材 (株)	永 田 鋼 材 (株)	菱 光 特 殊 鋼 (株)	
		北 島 鋼 材 (株)	名 古 屋 特 殊 鋼 (株)	リ ン タ ツ (株)	
		ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株)	ナ ス 物 産 (株)	渡 辺 ハ ガ ネ (株)	
		小 山 鋼 材 (株)	南 海 モ ル デ ィ (株)		
		佐 久 間 特 殊 鋼 (株)	日 金 ス チ ー ル (株)		
		櫻 井 鋼 鉄 (株)	日 鉄 物 産 (株)		
		佐 藤 商 事 (株)	日鉄物産特殊鋼(株)		
		サ ハ シ 特 殊 鋼 (株)	日 本 金 型 材 (株)		
		(株) 三 悦	ノ ボ ル 鋼 鉄 (株)		
		三 協 鋼 鉄 (株)	野 村 鋼 機 (株)		
		三 京 物 産 (株)	白 鷺 特 殊 鋼 (株)		
		三 興 鋼 材 (株)	橋 本 鋼 (株)		
		三 和 特 殊 鋼 (株)	(株) 長谷川ハガネ店		
		J F E 商 事 (株)	(株) ハヤカワカンパニー		
		芝 本 産 業 (株)	林 田 特 殊 鋼 材 (株)		
		清 水 金 属 (株)	阪 神 特 殊 鋼 (株)		
		清 水 鋼 鉄 (株)	阪 和 興 業 (株)		
		神 鋼 商 事 (株)	(株) 平 井		
		住 友 商 事 (株)	(株) フ ク オ カ		
		住友商事グローバルメタルズ(株)	藤 田 商 事 (株)		

“特集” 編集後記

今号は「ミルシートと技術データに関する解説」という特集です。

ミルシート情報を始めとする技術データは、特殊鋼の品質特性を表しています。特殊鋼を扱う中で、普段から目にしていて何となく知っているようで、実は十分に理解していないというものが誰にでもあるのではないのでしょうか。

今回の特集では、特殊鋼に携わる全ての皆さんが理解できるように、技術データの意味、試験方法、関連する規格や単語、さらにグラフや写真の見方などをやさしく解説しています。JISハンド

ブックや金属材料のテキストの敷居が高いという方も、是非一読いただければ幸いです。実務の中で疑問が生じたら、辞書代わりに拾い読みしていただくという活用方法もあると思います。

最後に、本特集に御寄稿いただいた執筆者の皆様、御協力いただきました編集委員の皆様および事務局の皆様に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

〔(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 主任部員 土橋 智也〕

特 集／特殊鋼棒線の圧延・鍛造に関する解説

I. 総論

II. 製造工程

1. 鋼片精整
2. 圧延
3. 鍛造（熱間）
4. 製品検査（棒鋼）

III. 各論

1. 制御・精密圧延技術
2. 調整冷却技術
3. 製品検査技術

IV. 最近のリフレッシュ事例

1. 分塊工場
2. 棒線工業
3. 製品精整

V. 会員メーカーの技術動向

1月号特集予定…製鋼の設備と技術

特 殊 鋼

第 73 巻 第 5 号

© 2 0 2 4 年 9 月

2024年8月25日 印 刷

2024年9月1日 発 行

定 価 1,320円 送 料 200円

1年 国内7,782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。