

特殊鋼®

2023

Vol.72 No.6

11

The Special Steel

特集

特殊鋼の技術と用語のやさしい解説（用語解説編・新材料、磁性材料等）

特殊鋼

11 目次 2023

【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)
〃	齋藤 隆 (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)
〃	谷井 一也 (日本高周波鋼業)
〃	吉田 統樹 (日本冶金工業)
〃	上野 友典 (プロテリアル)
〃	佐山 博信 (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)

【特集／特殊鋼の技術と用語のやさしい解説 (用語解説編・新材料、磁性材料等)】

I. 構造用鋼	大同特殊鋼(株) 山崎 歩見 1
II. 工具鋼	(株)プロテリアル 福元 志保 4
III. 特殊用途鋼	
1. 快削鋼	7
2. ステンレス鋼	9
3. 耐熱鋼	11
4. 軸受鋼	12
5. ばね鋼	14
6. 高張力鋼	15
7. マルエージング鋼	17
8. ピアノ線材	18
9. 肉盛合金・溶接材	19
IV. 機能材料	
1. 形状記憶合金・超弾性合金	20
2. 低熱膨張合金	22
3. 金属間化合物	23
4. 医療用材料	25
5. 放熱材料	26
6. 超合金	28
7. 制振鋼板	29
8. 制振合金	30
9. クラッド材	31
10. 超電導	32
11. チタン合金	33
12. 金属箔	35
13. ターゲット材	37
14. ハイエントロピー合金	39
15. 金属積層造形材	40
16. 電磁波吸収材	41
17. 電気抵抗材料	42
V. 磁性用語	
磁性体の種類と分類、基礎用語	大同特殊鋼(株) 齋藤 章彦 44
VI. 硬質磁性材料	
1. 希土類磁石	48
2. ボンド磁石	49
3. フェライト磁石	50
VII. 軟質磁性材料	
1. 電磁鋼板	51
2. 電磁ステンレス鋼	52
3. 電磁軟鉄、パーマロイ	54
4. アモルファス・ナノ結晶合金	56
5. 粉末軟磁性材料	58

Ⅷ. 非磁性

1. 非磁性鋼…………… 59 2. 非磁性ステンレス鋼… 61

“特集” 編集後記…………… 大同特殊鋼(株) 深瀬美紀子 77

■業界のうごき ……………	62
▲特殊鋼統計資料 ……………	65
★倶楽部だより (2023年8月1日～9月30日) ……………	69
☆特殊鋼倶楽部の動き ……………	71
☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧 ……………	76

特集／「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説(用語解説編・新材料、磁性材料等)」
編集小委員会構成メンバー

(2023年5月23日現在)

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	深瀬美紀子	大同特殊鋼(株)	技術開発研究所 企画室 主任部員
委員	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
〃	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	東京支社部長 市場開拓・CS
〃	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
〃	竹内 俊哉	日本金属(株)	技術部門 技術部 部長
〃	谷井 一也	日本高周波鋼業(株)	富山製造所 技術部 開発室 課長
〃	吉田 統樹	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 課長
〃	佐山 博信	三菱製鋼(株)	技術開発センター 研究第一グループ グループ長
〃	高橋 秀幸	伊藤忠丸紅特殊鋼(株)	特殊鋼本部 前橋支店 支店長
〃	番場 義信	(株) U E X	仕入部長 兼 仕入部 仕入チームリーダー
〃	白神 哲夫	中川特殊鋼(株)	フェロー

特集

特殊鋼の技術と用語の やさしい解説

用語解説編・
新材料、磁性材料等



I. 構造用鋼

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 やま ざき あゆ み
構造材料研究室 室長 山 崎 歩 見

まえがき

構造用鋼は、JIS規格において「JIS G 4051 機械構造用炭素鋼鋼材」¹⁾、「JIS G 4052 焼入性を保証した構造用鋼鋼材 (H鋼)」²⁾、「JIS G 4053 機械構造用合金鋼鋼材」³⁾で規定されている。本稿では、それらに規定されている代表鋼種および一般的な用途、必要とされる特性、適用される熱処理の概要について述べる。

I. 特性

a 鋼種名

(1) 炭素鋼 (S10C~S75C)、はだ焼鋼 (S09CK~S20CK)

機械構造用炭素鋼鋼材として、S10C~S75CおよびS09CK~S20CKが規定されている。SC鋼の主成分はC、Si、Mnであり、Si、Mnについてはいずれの鋼種もほぼ同じ範囲である (0.2Si-0.6Mn)。各鋼種の違いはC量であり、非常に幅広い範囲が規定されている (0.08~0.80C)。SK鋼はP、S、およびCu、Ni、Crが低めに抑えられており、表面処理用はだ焼鋼として規定されている¹⁾。

(2) Cr鋼 (SCr420、SCr435など)、Cr-Mo鋼 (SCM420、SCM435など)

機械構造用合金鋼鋼材として規定されているCr鋼は1%程度のCrを添加した鋼で、Crの焼入れ性向上効果により、機械的性質が改善される。Cr-Mo鋼はCr鋼に0.2%程度のMoを添加した鋼で、Cr鋼より焼入れ性が向上している³⁾。他にNi-Cr鋼 (SNC415など)、Ni-Cr-Mo鋼 (SNCM420など)、Mn鋼 (SMn420

など)、Mn-Cr鋼 (SMnC420など)、Al-Cr-Mo鋼 (SACM645) が規定されている³⁾。

b 一般的な用途

(1) 炭素鋼 (S10C~S75C)、はだ焼鋼 (S09CK~S20CK)

自動車や各種機械などの多くの機械部品に使用されている。これらの機械部品では、高い強度や疲労、靱性が求められるため、塑性加工や各種熱処理 (焼入れ焼戻し、浸炭焼入れなど) によって強度、靱性を向上させてから使用される。

(2) Cr鋼 (SCr420、SCr435など)、Cr-Mo鋼 (SCM420、SCM435など)

はだ焼鋼 (SCr420、SCM420など) は自動車用歯車やCVTプーリーなどに使用される。強靱鋼 (SCr435、SCM435など) は自動車足回り部品やエンジン部品などに使用される。

c 必要とされる特性

いずれの鋼種も主な必要特性は強度と靱性であるが、疲労強度や耐摩耗性が要求される場合もある。また、鍛造などの塑性加工や切削加工などの製造性も必要となるため、適切な熱処理が施されるのが一般的である。代表鋼種の熱処理後機械的性質と硬さを表1に示す⁴⁾。

II. 熱処理

以下で、機械構造用炭素鋼鋼材および機械構造用合金鋼鋼材に適用される代表的な熱処理について述べる。なお、熱処理用語は「JIS G 0201 鉄鋼用語 (熱処理)」⁵⁾で規定されている。

表 1 焼ならし後、完全焼なまし後の機械的性質と硬さ (S28C～S58C)⁴⁾

鋼種	変態温度 [°C]		焼ならし条件および焼ならし状態の機械的性質と硬さ					完全焼なまし条件と焼なまし硬さ	
	A _{C1} ～A _{C3}	A _{r3} ～A _{r1}	条件 [°C、空冷]	降伏点 [kg/mm ²]	引張強さ [kg/mm ²]	伸び [%]	硬さ [H _B]	条件 [°C、炉冷]	硬さ [H _B]
S28C S30C	720～815	780～720	850～900	29以上	48以上	25以上	137～197	約840	126～156
S33C S35C	720～800	770～710	840～890	31以上	52以上	23以上	149～207	約830	126～163
S38C S40C	720～790	760～700	830～880	33以上	55以上	22以上	156～217	約820	131～163
S43C S45C	720～780	750～680	820～870	35以上	58以上	20以上	167～229	約810	137～170
S48C S50C	720～770	740～680	810～860	37以上	62以上	18以上	179～235	約800	143～187
S53C S55C	720～765	740～680	800～850	40以上	66以上	15以上	183～255	約790	149～192
S58C	720～760	730～680	800～850	40以上	66以上	15以上	183～255	約790	149～192

(1) 焼ならし (Normalizing)

焼ならしは、鋼材をA_{C3}点から40～60°C程度高い温度に加熱し、オーステナイト組織とした後、大気中で放冷または送風冷却する処理である。組織の微細化、機械的性質の改善、被削性向上などの目的のために適用される。

(2) 焼なまし (Annealing)

目的に応じて様々な焼なましが施される。本稿では主要な焼なましについて概説する。

①完全焼なまし (Full Annealing)

鋼材をA_{C3}点から30～50°C程度高い温度に加熱し、オーステナイト組織とした後、炉冷または徐冷する処理である。軟化や内部ひずみの除去などの効果が得られ、主に切削加工や冷間加工を容易にする目的で適用される。

②球状化焼なまし (Spheroidizing Annealing)

代表的な処理条件として、A₁点以上に加熱しその後徐冷する、あるいはA₁点以上に加熱した後にA_{r1}点直下まで徐冷し、その後一定時間保持するパターンが挙げられる。球状化焼なましは、セメントサイトを球状化することで完全焼なましよりも一層軟化させることが可能であり、主に冷間加工を容易にするために適用される。

③低温焼なまし (Low Temperature Annealing)

A₁点以下の温度に加熱し、一定時間保持した後、空冷する処理である。簡便な方法で軟化や内部ひずみ除去ができることから、冷間加工や切削加工

前の硬さ調整などの目的で適用される。

(3) 焼入れ焼戻し (Quenching and Tempering)

焼入れ焼戻しは、A₃点以上の温度に加熱して油や水で急冷しマルテンサイト組織を得る処理(焼入れ)と、続けてA₁点以下の適当な温度に再加熱して冷却する処理(焼戻し)である。適度な強度と靱性を得ることが出来ることから、最終製品に必要な機械的性質を得るために適用される。

(4) 浸炭焼入れ (Carburizing)

浸炭焼入れは、A₃点以上の適当な温度に加熱し、鋼材表面から炭素を侵入させて表層部を高炭素化した後、焼入れを行う処理である。表層部は高炭素で硬く、内部は低炭素で軟らかく靱性に富む品質が得られる。

(5) 高周波焼入れ (Induction Hardening)

高周波焼入れは、高周波誘導電流による誘導加熱作用によって、表層部を部分的あるいは全体的にA₃点以上に加熱し、水あるいは水溶性冷却剤で焼入れを行う処理である。表層部はマルテンサイト組織が得られるため硬く、内部は素材硬さがそのまま内部硬さとなる。

(6) 窒化 (Nitriding)

窒化は、アンモニアガスなどの窒化性ガス雰囲気中でA₁点より低い温度に加熱し、鋼材表面から窒化を侵入させて表層に硬い窒素化合物を作る処理である。表層は浸炭焼入れに比べて硬く、耐摩耗性に優れることが特徴である。

むすび

本稿では、構造用鋼に関する代表鋼種、用途、特性および適用される熱処理について概説した。より詳細な情報を求める場合は、「特殊鋼の技術と用語の優しい解説－技術解説編」⁶⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) JIS G 4051 (2023)
- 2) JIS G 4052 (2023)
- 3) JIS G 4053 (2023)
- 4) 日本鉄鋼協会：鋼の熱処理、改訂5版、P354 (1969)
- 5) JIS G 0201 (2023)
- 6) 特殊鋼倶楽部：特殊鋼、72巻、2号、P7 (2023)



II. 工具鋼

(株) プロテリアル ふくもと しほ
安来工場 冶金研究所 **福元志保**

工具鋼は主に金型、切削加工用の工具に使用されています。工具の使命は設計された工具仕様の範囲内で、同一形状の部品を大量に製造することであるので、複数の鋼の種類の中から、仕様に合った適切な鋼が使用されます。JISの鋼材分類によれば工具鋼は「炭素工具鋼鋼材」の0.55から1.50mass%の炭素を含有するSK、「合金工具鋼鋼材」のSKSとSKDやSKT、「高速度工具鋼鋼材」のSKHとして定義されています。市場では工具鋼の使用環境に応じて、冷間加工に使用される工具鋼を「冷間工具鋼」、同様に熱間加工では「熱間工具鋼」の用語が使用されることもあります。高速度工具鋼は英文表記「High Speed Tool Steels」の「ハイ・スピード・スチール」の一部を省略して「ハイス」、粉末ガスアトマイズ法で製造した粉末をHIP (Hot Isostatic Press) 法により焼結した後に鍛造された鋼は「粉末ハイス」と呼ばれます。JISの鋼材分類では粉末ハイスとしてSKH40が定義されています。

I. 特性

a 鋼種名

SKS3 0.95C-1Mn-0.75Cr-0.75W
SKD11 1.5C-12Cr-1Mo-0.35V
SKD61 0.4C-1Si-5Cr-1.2Mo-1V
SKH40 1.3C-4Cr-6W-5Mo-3V-8Co
SKH51 0.85C-4Cr-6W-5Mo-2V

b 一般的な用途の概要

SKS3 冷間金型 (プレス型、シャー刃等)
SKD11 冷間金型 (プレス型、冷間鍛造型等)
SKD61 熱間金型 (プレス型、ダイカスト型、押出工具)
SKH51 切削工具、冷間鍛造型、冷間プレス型など
SKH40 切削工具、冷間鍛造型など

c 必要とされる特性

SKS3は、冷間金型用の合金工具鋼で、炭素工具鋼を基にMn、CrおよびWを添加して特性を向上させています。SKD11も冷間金型用の合金工具鋼で、SKS3と比較してC、Cr量が多く、硬質な炭化物を多量に含ませることで特性を向上させています。SKD61は、SKS3に対してC量が少なく、Cr、MoおよびVを添加した熱間金型用の合金工具鋼で、高温強度、靱性および耐ヒートクラック性などが求められます。SKH51は、モリブデン系高速度工具鋼で、Cr添加とともにMo、WおよびVを多量に添加することで、硬さ、靱性および耐摩耗性を向上させています。粉末ハイスのSKH40はSKH51に比べるとVとCoを多量に添加することにより、さらに硬さ、靱性および耐摩耗性を向上させています。

(1) 物理的性質

密度は、Feよりも密度が大きい元素 (Co、Ni、MoおよびWなど) の量が増えると増加し、Feよりも密度が小さい元素 (C、Si、Mn、CrおよびV

表 1 各鋼種の物理的性質

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

※標準焼入れ、焼戻しでの測定例

など)の量が増えると減少します。SKH51の密度が最も大きくなります。熱膨張係数は、合金元素の量が多いSKD11とSKH51が小さくなります。熱伝導率は、炭素量と合金元素量が多いSKD11とSKH51が小さくなります。また、基地に含まれる元素量が多い焼入れ状態の値が小さくなります。ヤング率は、SKH51にはMoやW系の炭化物が多く存在し、最も大きな値を示します(表1)。

(2) 機械的性質

①高温強度(軟化抵抗)

高温下で使用される工具鋼は使用中に強度と耐摩耗性が低下します。高温強度は、Cr、MoおよびVなどの炭化物形成元素を添加することで向上させることができます。

②耐摩耗性

鋼材に硬質な炭化物を分散させたり、金型に表面改質処理を施したりすることで耐摩耗性を向上させることができます。また、工具の硬さを高めることも有効です。

③疲れ強さ

材料組織の均一微細化や表面粗さを細かくする、圧縮残留応力の付与などが疲れ強さの向上に有効です。また、工具に繰り返し加わる力学的な負荷状況に応じて硬さを調整することも有効です。

④靱性

靱性の高い工具は割れにくいのですが、耐摩耗性に寄与する硬さと相反する関係にあります。一般的には鋼材の組織を微細かつ均一に制御すると靱性向上に寄与します。

⑤耐ヒートクラック性

高温下での工具の表面は、加熱と冷却すなわち膨張と収縮を繰り返す熱疲労によって表面に微細な割れ(ヒートクラック)が発生することがあります。高温強度が高く、冷却時の靱性が高いほど耐ヒートクラック性が向上します。

⑥焼入性

焼入性は焼入れた後の硬さの得られ易さを意味する特性です。この特性は鋼種の合金組成に依存しますので、鋼種ごとの適切な手順による焼入処理が必要です。

II. 熱処理

a 主な熱処理

(1) 焼入れ

焼入れは、組織をオーステナイトからマルテンサイトに変態させ、硬さを得るための熱処理です。焼入れでは、適正な焼入温度(オーステナイト化温度)に加熱・保持して組織をオーステナイト化し、急冷します。マルテンサイトの硬さは炭素含有量とともに増加します。焼入温度は亜共析組成の工具鋼では A_{c3} 点、過共析組成の工具鋼では A_{c1} 点より30~50℃高い温度が望ましいです。加熱は全体が均一に温度上昇するように予熱を行います。保持時間は鋼材の寸法に応じて決める必要があります。冷却方法は各鋼種の焼入性と寸法に応じて水冷、油冷、ソルト冷却、ガス冷却、衝風冷却などを使い分けます(表2)。

(2) 焼戻し

焼戻しは、焼入れ時の硬さや内部応力を緩和するために行われる熱処理です。焼戻しでは、組織や特性を調整するために A_1 点以下の適当な温度に加熱・保持し、冷却します。焼戻しにより、マルテンサイト組織の安定化、内部応力の緩和、残留オーステナイトの分解などが生じます。焼戻し温度の変化によって特性を制御することができます。焼戻し温度が高いほど硬さは低下し、靱性は高くなります。耐摩耗性や靱性を得るために工具鋼では焼戻しを2回以上行うことがあります。

b 不具合事例と改善策

(1) 変寸

熱処理変寸は、熱処理時の温度分布による熱応

表 2 各鋼種の標準的な熱処理条件と焼入焼戻し硬さ

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

力やマルテンサイト変態の組み合わせによって生じる膨張・収縮の現象です。また、経年変寸は熱処理後、時間の経過とともに残留オーステナイトがマルテンサイト変態して膨張する現象です。SKD11やSKH51等の鋼材では異方性の変寸が生じることがあります。熱処理変寸を軽減するためには、採取位置や方向の管理、焼戻し温度、焼入冷却方法の最適化が有効です。経年変寸を抑制する対策として、室温以下まで冷却するサブゼロ処理や中温焼戻し（安定化处理）を行うことが効果的です。

(2) 焼入冷却速度

焼入冷却速度の管理は工具鋼において重要です。一般に冷却速度が遅いと焼入硬さが低下します。

SKD61ではこの速度が遅いと韌性が大きく低下します。これは冷却中の高温域での炭化物の粒界析出と低温域での粗大なベイナイト組織の生成が影響しています。したがって、高温域と低温域を速く冷却し、特に低温域での急冷を意識する必要があります。SKH51では焼入冷却速度の影響が大きく、硬さと韌性が大幅に低下し易くなります。硬さの低下を抑制するためには、油冷以上の冷却速度が可能な焼入を行う必要があります。

参考文献

荒木 理：工具鋼、特殊鋼、72 (2023)、p 3
特殊鋼の技術と用語のやさしい解説、特殊鋼倶楽部、1998



Ⅲ．特殊用途鋼

1．快削鋼

日本製鉄㈱ 九州技術研究部 鍛造・鋼材研究室 棒線研究課
あいそとしはる 間 曾 利 治

I．特性

快削鋼とは快削元素の添加により被削性を向上させた鋼であり、代表的な快削元素としてSとPbが挙げられる。快削鋼はOA機器や油圧部品などに用いられる低炭素快削鋼と、自動車のエンジンや足回り部品などに使用される機械構造用快削鋼に大別される。前者は被削性の向上に特化しており、例えばJISに規定されている硫黄快削鋼SUM23 (0.26~0.35%S)、硫黄鉛複合快削鋼SUM24L (0.26~0.35%S-0.10~0.35%Pb) などのように多量のSやPbが添加される。後者は機械的性質を維持しつつ被削性を高めており、快削元素の種類や添加量に応じて、JASOで規定されるS1 (0.04~0.07%S)、

L2 (0.10~0.30%Pb) などを基本成分の鋼種記号の後に付記して表される。

Sを添加した快削鋼は引張強さ、耐力などの強度特性は基本鋼とほぼ同等であるが、圧延や鍛造によってMnSが長く伸ばされるため、機械的性質に異方性が生じる。そのため、例えば図1のように、加工に直角の方向の衝撃値、延性や疲労強度が低下する¹⁾。冷間加工においても、S添加量が増えると割れが発生しやすくなる。異方性の軽減のため、TeやCaなどを添加して硫化物を球状化する形態制御が行われる場合がある。

Pbを添加した快削鋼は常温での機械的性質は基本鋼とほとんど変わらない。冷間加工性についても、鉛快削鋼は基本鋼に比べて若干劣るが、硫黄

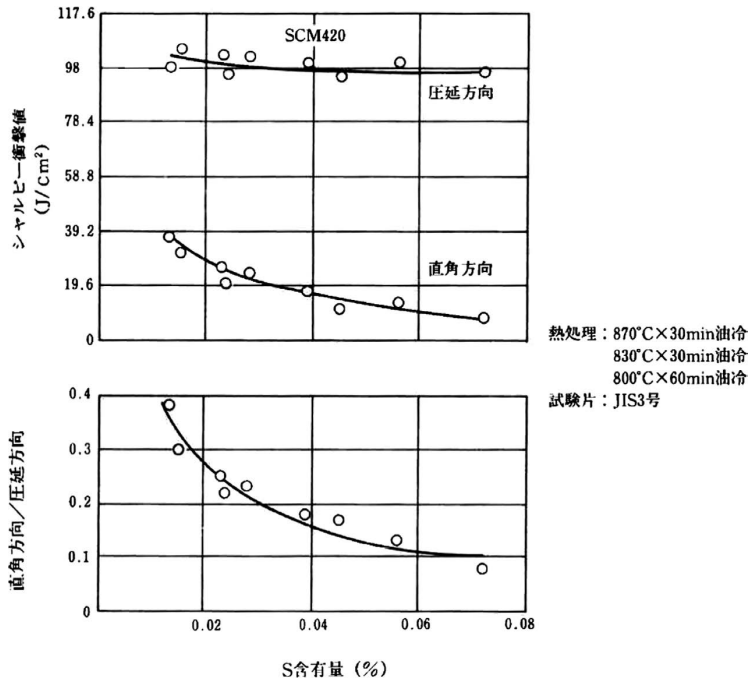


図 1 シャルピー衝撃値に及ぼすS含有量の影響¹⁾

快削鋼に比べると良好である。しかしながら、温間での機械的性質は、200℃以上から衝撃値や延性が基本鋼よりも低下し、特に300～400℃では低下が大きい²⁾。これは、Pbは融点が327℃と低いため、溶融脆化が生じることが主な理由であるといわれている。疲労強度は回転曲げ疲労では実用上差支えのない程度の低下とされているが、歯車や軸受などでみられる転動疲労では高面圧が繰り返し付加されることで温度が上昇し、Pb粒の溶融、膨張によりクラックを発生、成長させるため、疲労寿命が著しく低下する。

Ⅱ. 熱処理

機械構造用として使用される快削鋼の熱処理には主に焼ならし、焼なまし、焼入れ・焼戻しなどがあり、基本鋼と変わりはない。多くの場合、焼入れ・焼戻しに必要な強度を付与する前に切削加工が行われる。圧延や鍛造のままで切削加工が施される場合もあるが、被削性向上のために焼なら

しや焼なましによって硬さを最適に調整される。一般に、被削性は材料が硬いほど低下し、延性が高いほど低下するため、最適な硬さが存在する。また、マイクロ組織も被削性に影響し、例えば、中炭素鋼において粗いパーライト組織は緻密なパーライト組織や球状化セメンタイト組織と比べて被削性が良いといわれている³⁾。また、結晶粒度に関して、旧オーステナイト粒度がやや粗めの均一なフェライト-パーライト組織とすると被削性は良好である。歯車用肌焼鋼では、鍛造で高温に加熱して加工を加えた後に、連続冷却せずに650℃前後で等温保持する処理（鍛造恒温焼ならし）を行うことでこのような組織を得て被削性を改善している事例もある³⁾。

参考文献

- 1) 特殊鋼、Vol. 42、No. 6 (1993)、p. 14
- 2) 木村篤良：西山記念技術講座 (1984)、p. 131
- 3) 小林一博：熱処理、Vol. 41 (2001)、p. 196

2. ステンレス鋼

日本冶金工業(株) さとうまさあき
ソリューション営業部 次長 佐藤正昭

ステンレス鋼は、鉄にクロムを10.5%以上含む合金鋼で、英語ではstainless（さびにくい）steel（鋼）と言う。ステンレス鋼の最大の特徴は、表面に不動態皮膜と呼ばれる、極めて薄く（厚さは数nm）Crを主体とする酸化物・水酸化物が形成され、それが保護皮膜となり大気中や水環境において鉄に比べ優れた耐食性を示すことである。この不動態皮膜は破壊されても、通常的生活環境であれば瞬時に自己修復され耐食性を維持することとなる。ステンレス鋼が誕生して100年以上が経過する中で、耐食性・耐熱性・加工性等々の機能性を向上させた様々なステンレス鋼が開発されてきた。現在、JISでは約110種類のステンレス鋼が規格化されているが、各社独自の開発鋼種を含めると200種類を超える。

ステンレス鋼はCrを主成分とするCr系ステンレス鋼と、Cr及びNiを主成分とするCr-Ni系ステンレス鋼に大別されるが、金属組織による分類ではマルテンサイト系、フェライト系、オーステナイト系、オーステナイト・フェライト系（2相系）、析出硬化系の5種類に分類される。表1に各種ス

テンレス鋼の分類と主な特徴を示す。マルテンサイト系（JISではSUS400系）はCr系に属し、13Cr鋼と呼ばれるSUS410が代表的な鋼種である。熱処理により硬化することが特徴で、刃物などに使用される。18Cr鋼と呼ばれるSUS430に代表されるフェライト系（SUS400系）もCr系であるが、マルテンサイト系に比べればC量が少なく、熱処理によって硬化しない。一般的に耐食性はマルテンサイト系よりも良好で、Crの増量やMoの添加、あるいはCやNを低減して更に耐食性を高めた鋼種もある。18-8ステンレス鋼（18%のCrと8%のNiを含有）と呼ばれるSUS304に代表されるオーステナイト系（SUS300系、一部SUS800系）はCr-Ni系に属し、固溶化熱処理状態ではステンレス鋼の中で唯一磁性を有さない。他のステンレス鋼に比べ耐食性や加工性が良好であるが、種々の腐食に対する抵抗性を改善させるために多くの鋼種が開発され、現在JISではステンレス鋼の中で最も多い約60の鋼種が規格化されている。なお、Niの一部をMnに置き換えた省資源型のSUS200系ステンレス鋼もオーステナイト系に属する。SUS329J4L

表 1 ステンレス鋼の分類と特徴

分類		化学組成	代表例	特徴	
				磁性	焼入性
Cr系	マルテンサイト系 (SUS400系)	高C 11.5~18%Cr	SUS410、SUS420J1、 SUS440A	あり	あり
	フェライト系 (SUS400系、他)	低C 11.5~30%Cr	SUS410L、SUS430、 SUS436L、SUS444	あり	なし
Cr-Ni系	オーステナイト系 (SUS300系、 一部SUS200系、SUS800系、他)	15~26%Cr 3.5~28%Ni	SUS301、SUS304、 SUS316、SUS310S、 SUS312L、SUS836L	なし (※)	なし
	オーステナイト・フェライト系 [2相系] (SUS300系、一部SUS800系)	20.5~28%Cr 1.5~8%Ni	SUS329J3L、 SUS329J4L	あり	なし
	析出硬化系 (SUS600系)	マルテンサイト系	15~18%Cr 3~5%Ni	SUS630	あり
オーステナイト系		16~18%Cr 6~8%Ni	SUS631	あり	なし

※：固溶化熱処理状態

に代表されるオーステナイト・フェライト系（SUS300系）はCr-Ni系に属する。オーステナイト相とフェライト相がおよそ1：1で混在する金属組織を有し、オーステナイト系に比べ強度がかなり高いのが特徴である。またCr含有量が高いので、耐食性にも優れる。SUS630に代表される析出硬化系（SUS600系）はCr-Ni系に属し、析出硬化熱処理によりCuや金属間化合物が微細に析出させることで硬化することが特徴である。

なおJISには無い定義ではあるが、耐食性向上に効果のあるCr、Mo、Nを多く含有し、PRE（Pitting Resistance Equivalent） $= \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times N$ が40以上の「スーパーステンレス鋼」と呼ばれる高耐食ステンレス鋼もある。オーステナイト系ではSUS836Lがその代表である。

以上のステンレス鋼は、その特性、特に耐食性に応じて、建材・建設、家庭用機器、輸送、産業用機械、プラントなどの様々な分野で利用されている。



3. 耐熱鋼

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

耐熱鋼は、石油精製プラント、エンジン排気系部品、工業、タービンやボイラーなどで使用されており、「高温における各種環境で耐酸化性、耐高温腐食性、または高温強度を保持する合金鋼」とJIS G0203に規定されている。JIS G4311に耐熱鋼棒・線材として35鋼種、JIS G4312に耐熱鋼板・鋼帯として28鋼種が規定されており、代表的な鋼種を表1に示すが、SUH鋼種以外に一部のSUS鋼種も含まれる。これは、ステンレス鋼の耐食性を向上させるCrが、耐酸化性なども向上することで耐熱用途にも適用されるためである。

耐熱鋼は、金属組織により4つの系に分類されるので、各系の特徴を説明する。

面心立方構造を持つオーステナイト系耐熱鋼は、体心立方構造のフェライト系、マルテンサイト系に比べて拡散速度が遅く、高温域での高温強度、クリープ強度が高い。さらに、耐酸化性も有するため、一般的に高温強度、クリープ特性を必要とする用途で、特に600℃以上の高温域で使用されることが多い。固溶化熱処理状態で使用される鋼種が多いが、SUH35やSUH660などは固溶化熱処理後に時効処理を行い、より強度を高めて使用される。なお、本系は、フェライト系、マルテンサイト系に比べて熱膨張係数が大きいことから、熱疲労特性が要求される部材への適用には注意を要する。

フェライト系耐熱鋼は体心立方構造のフェライトを母相とし、総じて炭素量も高くもなく、また、焼きなましによる軟化状態で使用されることが多く、高温強度は他の系に比べ劣る。一方、熱膨張係数は小さく、熱伝導性も高いため、熱疲労特性には優れる。また、耐酸化性も有するので、強度をそれほど必要とされない部材に適用される。

マルテンサイト系耐熱鋼は、焼入焼戻し処理により、焼戻しマルテンサイトに炭化物が析出した組織とし、靱性や硬度を向上させている。他の系に比べ600℃くらいまでは最も高温強度やクリープ強度が高いが、さらに高温となると組織変化により強度は急激に低下する。一方、Cr量はあまり高くなく、かつ炭化物も析出するので、耐酸化性は高くない。よって、600℃程度までの中温域で、耐酸化性よりも強度を重視する用途に適用される。

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

なお、耐熱鋼の熱処理等については「2023年3月号特集：特殊鋼の技術と用語のやさしい解説(技術解説編)」にて取り上げており、そちらを参照されたい。

表 1 代表的な耐熱鋼の成分と用途

	鋼種	成分	用途
オーステナイト系	SUH35	21Cr-4Ni-9Mn-N-0.5C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH660	15Cr-25Ni-1.5Mo-V-2Ti-Al-B-0.06C	タービンロータ、ボルト、ブレード、シャフト
	SUS304-HR	18Cr-8Ni	汎用耐酸化鋼
	SUS310S-HR	25Cr-20Ni	炉材、自動車部品用材料
フェライト系	SUH446	25Cr-N-0.2C	燃焼室
	SUS430-HR	18Cr	耐酸化用部品、炉部品、オイルバーナー
マルテンサイト系	SUH3	11Cr-2S-1Mo-0.4C	高級吸気弁、低級吸気弁、ロケット部分、予燃焼室
	SUH600	12Cr-Mo-V-Nb-N-0.15C	蒸気タービンブレード、ディスク、ロータシャフト、ボルト
	SUS403-HR	13Cr-低Si	タービンブレード、蒸気タービンノズル
析出硬化系	SUS630-HR	17Cr-4Ni-4Cu-Nb	シャフト類、タービン部品、積層板の押板
	SUS631-HR	17Cr-7Ni-1Al	高温ばね、ペローズ

4. 軸受鋼

山陽特殊製鋼(株) 研究開発センター 福岡 しま とし ほ
研究開発企画グループ 福嶋利保

I. 一般的な用途と概要

本稿では最も一般的な高炭素クロム軸受鋼の特性・熱処理について述べる。

高炭素クロム軸受鋼は耐摩耗性や転動疲労特性に優れ、主にベアリングの軌道輪及び転動体（ボール、コロ）に使用される。

II. 化学成分

高炭素クロム軸受鋼はJIS G4805 (2019) にSUJ2～SUJ5が規定されており、約1mass%のCと1～1.5mass%程度のCrを基本成分とし、Cr、Si、Mn、Moの含有量により焼入性が調整されている。なお代表的な組成（単位はmass%）は以下の通りである。

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

III. 主な熱処理

1) 均熱拡散処理（ソーキング）

高炭素クロム軸受鋼は、凝固時に不可避に発生する粗大な炭化物の解消を目的に、ブルームやインゴットの状態にて均熱拡散処理（ソーキング）が施される。均熱拡散は固相線直下の1200～1250℃程度での長時間保持が必要であり、処理温度や時間はブルーム・インゴットのサイズや偏析の度合いによって調整される¹⁾。

2) 焼ならし

高炭素クロム軸受鋼は、鍛造や圧延等の熱間加工後の放冷によって粒界に初析となる炭化物が網状に析出する。この網状炭化物は、その後の球状化焼なましのみでは完全に消失しないため、一般的にはその解消を目的として球状化焼なましの前に850～900℃からの空冷による焼ならしが行われる。

3) 球状化焼なまし

高炭素クロム軸受鋼は、熱間加工ままではおよそ35～40HRCと硬いため、旋削や冷間加工が容易な硬さ・組織を得る目的で球状化焼なましが行われる。球状化焼なまし後の硬さはSUJ2では90HRB程度、SUJ3では93HRB程度²⁾である。図1に一般的な球状化焼なまし熱処理のパターンを示す。

4) 焼入焼戻し

高炭素クロム軸受鋼はベアリングの形状に加工された後、耐摩耗性、転動疲労特性を満たすために焼入焼戻し処理が行われる。

焼入は通常800～840℃程度の温度からの油冷により行われ、150～200℃程度で焼戻しを行って靱性を確保する。

IV. 要求特性

1) 焼入焼戻し硬さ

高炭素クロム軸受鋼では、耐摩耗性や転動疲労特性を左右する焼入焼戻し硬さが重視され、上述の一般的な条件では60HRC以上が得られる。

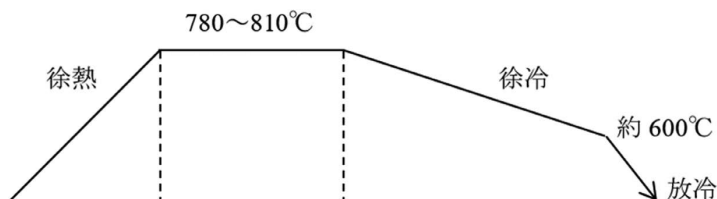


図 1 高炭素クロム軸受鋼の球状化焼なましの一例³⁾

2) 転動疲労特性

高炭素クロム軸受鋼の主な用途であるベアリングでは、特に転動疲労寿命が問われるため、同鋼にはそれらを左右する清浄度（非金属介在物の大きさや量）が厳しく要求される。

軸受鋼の転動疲労寿命は、スラスト型寿命試験により評価されることが一般的であり、試験片の剥離発生までのサイクル数が評価値となる。同じ材質、硬さにおける寿命は転動面下の剥離が生じ

る危険性のある体積中（危険体積）に存在する最大介在物の大きさに支配されると考えられており、介在物の小径化が重要な品質指標だとされている⁴⁾。

参考文献

- 1) 平岡和彦、木下京：山陽特殊製鋼技報、6（1999）、p 47-51
- 2) 平塚悠輔：特殊鋼、64（2015）7、p 33
- 3) 栗田俊：特殊鋼、72（2023）3、p 20-22
- 4) 長尾実佐樹、平岡和彦、雲丹亀泰和：山陽特殊製鋼技報、12（2005）、p 38-45



5. ばね鋼

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

日本産業規格（JIS）に規定されているばね鋼の種類としては、ばねの製造工程によって、「熱間成形」と「冷間成形」と呼ばれる製造工程別の鋼種に大別される。熱間成形とは、素材を加熱し、ばね形状に成形後、焼入れ・焼戻しの熱処理を施し、強度を調整する製造工程であり、冷間成形は素材段階での熱処理により強度を調整したものをばね形状に成形する製造工程をいう。一般的に、熱間成形は大型のばね、冷間成形は小型のばねに用いられる。

ばね鋼は、鋼の中でも高強度鋼に分類され、熱間、冷間成形用の鋼種に施される熱処理としては、鋼の一般的な熱処理である「焼入れ」・「焼戻し」が行われる。焼入れは、鋼を鉄-炭素平衡状態図にある A_3 変態点よりも高い温度に加熱し、水や油などに浸漬させ急冷することで「マルテンサイト」と呼ばれるマイクロ組織に相変態させる処理である。焼入れ後に続いて処理される焼戻しは、マルテンサイトを A_1 変態点以下の温度で加熱し、微細なセメンタイトを析出させた「焼戻しマルテンサイト」と呼ばれるマイクロ組織に変化させる処理である。焼入れ後に焼戻しを行う目的は、焼入れ後のマルテンサイトは硬く脆いため、焼戻しにより軟化、延性を回復させることである。焼入れ・焼戻しの熱処理を施し、冷間成形用の線材を連続的に処理する工程を指して、「オイルテンパー処理」と呼ぶ。また、焼入れ・焼戻し以外のばね鋼に施される代表的な熱処理としては、「パテンチング処理」や「オーステンパー処理」が挙げられる。パテンチング処理は、鋼を A_3 変態点以上に加熱し、500℃

前後に熱浴に浸し急冷した後、冷却することで、鋼のマイクロ組織を加工性に優れた微細なパーライト組織にするための処理方法である。この処理は、線材を連続的に処理するために使用され、主にピアノ線や硬鋼線の製造に適用される。オーステンパー処理は、炭素0.6%程度の高炭素鋼に焼入れ温度に加熱後、300~500℃の温度に急冷保持して恒温変態させ、鋼のマイクロ組織を硬さと靱性を持つベイナイトに相変態させる処理方法である。他にもMAF処理など、用途に合わせた熱処理がばねに施される。

ばねの製造時に問題となる事象としては多種にわたる。代表的な例として、焼入れ前の加熱時に発生する「脱炭」と呼ばれる現象がある。脱炭とは、加熱時に鋼中の炭素が表面で酸化し、表面から炭素が失われていく現象であり、この現象が起ると鋼表面の強度の低下してしまう。特に熱間成形では、比較的寸法の大きなものを加熱するため、芯部の温度が上がるまでに長時間加熱を施す必要があることから、表面からより深いところまで脱炭が進行する。他に冷間成形の場合、ばねに成形中に有害な引張残留応力が発生し、耐久性が低下するのを防止する歪取り焼鈍（応力除去焼鈍）が施される。

上述したばね鋼の特性、熱処理に関する詳細な内容は、本誌23年3月号にて解説している。

参考文献

ばね技術研究会：ばね用材料とその特性（日韓工業新聞）2000年
日本ばね学会：ばね 第4版（丸善）2008年

6. 高張力鋼

日本製鉄(株) やなぎ た かず ひさ
厚板技術部・主幹 柳 田 和 寿

I. 特性

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

一般的な用途として、橋梁、建築、圧力容器、造船などの用途で、溶接性の優れた鋼材として広く適用されており、引張特性、靱性、用途適用性、高温特性、耐環境脆化特性、疲労強度などが要求される。

物理的性質は、高張力鋼の場合、添加する合金元素は少量であるので、物理的性質は炭素鋼とほとんど変わらず、機械的性質としては以下が挙げられる。

1) 引張特性

以下、鋼材の強度を制御する方法である。

- ①合金元素の添加による固溶、または析出強化、
- ②結晶粒の微細化、③調質熱処理、④制御圧延、及び熱加工制御

2) 切欠き靱性

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

従って、脆性破壊を防止するためには設計、溶接技術、非破壊検査技術、鋼材の選択などが重要である。鋼材の靱性を改善するには結晶粒を微細化することが重要である。

II. 熱処理

主な熱処理は、圧延まま、或いは焼ならしにより得られる強度水準は引張強さで490N/mm² (HT50) までである。引張強さが590N/mm² (HT60) 以上の鋼板は通常、焼入れ-焼戻しによって得られる。圧延ままであるが組織を微細にして熱処理材と同等、或いはそれ以上の性能を得る方法が制御圧延、或いは熱加工制御である。溶接性を考慮した引張強さ490N/mm²以上の鋼板で圧延まま、焼ならし、焼ならし-焼戻し、制御圧延、熱加工制御で製造したものを非調質高張力鋼という。HT60以上の高張力鋼は大部分焼入れ-焼戻しを行うことにより製造され調質高張力鋼という。

不具合、改善事例として、過去に、静かな港に停泊していた全溶接船が、突然二つに破壊する事例が散発した。船体のどこかに加わった力が、最も弱いところに集中して生じた脆性破壊だった。当時の関係者は、多数の標準船を徹底的に調査し、脆性損傷を受けた船とそうでないものを統計処理して、母材のシャルピー値が0℃で21J以上あれば損傷の率は極めて低いことが分かった。現在でもこの値は鋼材規格の重要な尺度となっている。

最近の技術動向としては、従来の製造法に比べて、金属制御の制御範囲を大きく広げ、結晶粒の飛躍的な微細化を可能とした技術がTMCPである。また、圧延時の温度コントロールにとどまらず、製鋼段階から始まり、鋼片の加熱、圧延、制御冷却に至る各工程で、連続的に金属組織を制御することにより、必要な特性を鋼に与えることできる。TMCPはフェライト以外のマルテンサイト、ベイナイトといった高強度の金属組織についても幅広く制御することが可能である (図1)。

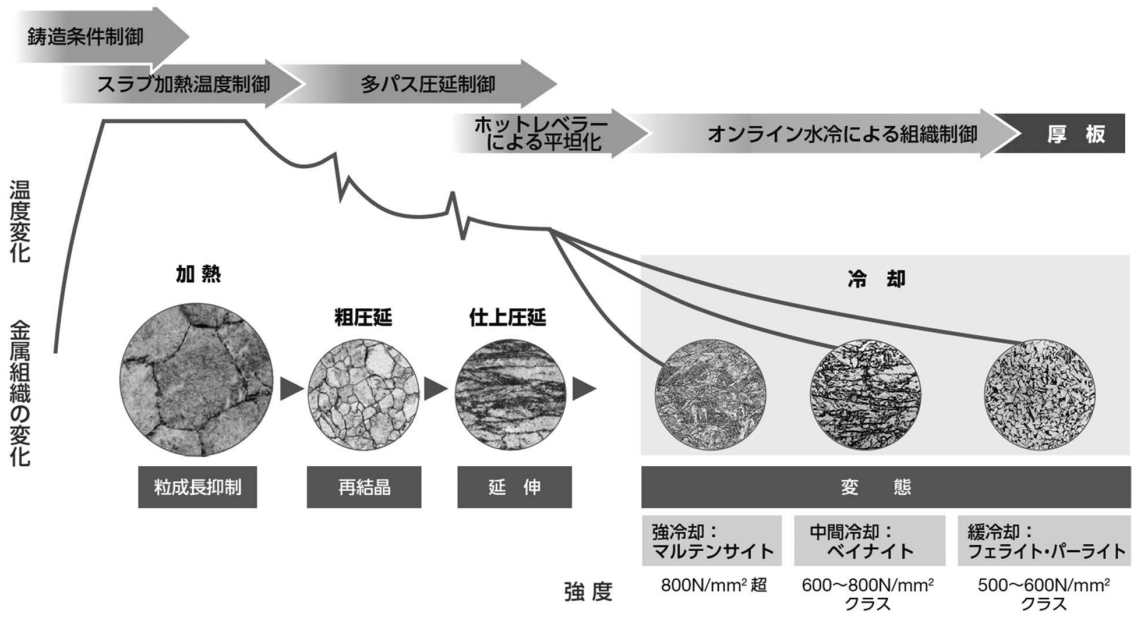
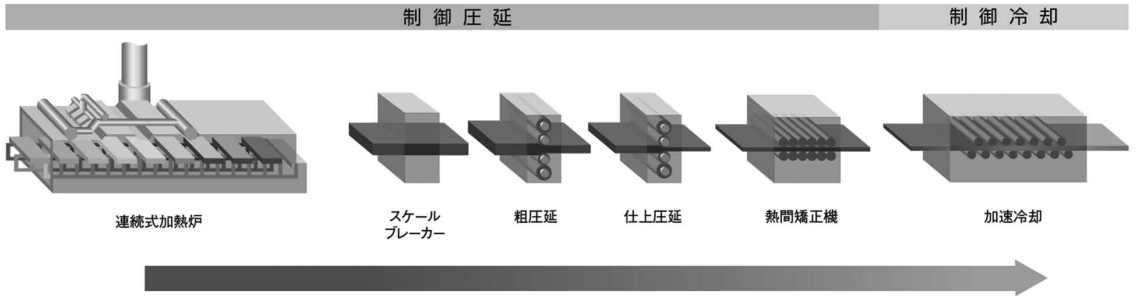


図 1 金属組織を連続的に制御するTMCP (掲載元：日本製鉄 厚板／総合カタログ)

7. マルエージング鋼

株式会社 プロテリアル 安来工場 おお いし かつ ひこ
冶金研究所 高機能材グループ 大 石 勝 彦

マルエージング鋼は、固溶化処理によりオーステナイト組織となり、その後の冷却によりマルテンサイト化し、このマルテンサイト組織を時効処理することで析出強化するのでマルテンサイトのエージング、すなわちマルエージング (Maraging) と言われている¹⁾。マルエージング鋼には18Ni、20Ni、25Niなどの鋼種が開発されているが、18Niが最も広く用いられている。代表成分はFe-18Ni-8Co-5Mo-0.4Ti-0.1Al (mass%)²⁾である。

マルエージング鋼は一般的な鋼に比べ、機械的特性、加工性に優れており、熱処理も容易である。そのため、宇宙、海洋開発、原子力、航空機などの先端的技術分野から、自動車、各種加圧容器、工具類などの一般産業分野、更には近年注目されている金属積層造形など、様々な用途で使用されている。

一般的なマルエージング鋼は、Cをほとんど含まないFe-Ni-Coを母相成分とし、Mo、Tiを適量添加することで2,000MPa前後の高い引張強度を得ることができる。固溶化処理状態では高密度の転位を含むマルテンサイト組織であるが、Cを含まないため硬さは300HV前後と軟らかく加工性や溶接性に優れている。時効処理前後の熱処理変寸も少なく、仕上げ加工も容易であり高い比強度と良好な加工性が得られる。

マルエージング鋼の熱処理は、先述したようにマルテンサイト組織を形成する固溶化処理と金属間化合物を形成する時効処理の2段階で行われる。

固溶化処理は800℃～900℃の温度域で行われ、昇熱過程でマルテンサイトからオーステナイトへ変態する。形成されたオーステナイト組織をその後冷却することでマルテンサイト組織が得られる。時効処理は500℃前後で行われ、一般的には時効温度が低くなるほど最高硬さは高まるが、時効処理に要する時間は長時間化するため、時効処理条件は特性と製造性の観点から選ばれることが多い。

一般的なマルエージング鋼の熱処理組織は、ラスマルテンサイト組織を母相とし、旧オーステナイト粒内にパケットやブロック、更にはラスなどの下部組織で構成される。母相のラスマルテンサイト中に時効処理により数十nmサイズのMo及びTiを含む金属間化合物が生成することで析出強化する。

マルエージング鋼はその高い強度やじん性が特徴であるが、これらの特性に対して鋼中の不純物元素や非金属介在物が特性に大きく影響を及ぼすため低減する必要がある。そのため真空誘導溶解や、さらには真空アーク再溶解などの二重溶解を用いた特殊溶解技術³⁾が有効であり使用用途に応じて適宜使用される。

参考文献

- 1) 大和久重雄：日本金属学会会報、Vol. 3、No. 12 (1964)、P. 719-728
- 2) 中村峻之、細見広次：自動車技術、Vol. 42、No. 6 (1988)、P. 705-710
- 3) 岸上一郎、稲葉栄吉、菅洋一：日立金属技報、Vol. 28 (2012)、P. 46-49

8. ピアノ線材

(株)神戸製鋼所 鉄鋼アルミ事業部門 しん どう よう すけ
技術開発センター 線材条鋼開発部 **新 堂 陽 介**

ピアノ線材は日本産業規格JIS G 3502で規定される鉄鋼材料であり、鋼種名はSWRSxxx (SWRSはSteel Wire Rod for Spring略)と表記される¹⁾。SWRSxxxの最初のxxは線材に含まれる炭素量を示し62 (炭素量の範囲が0.60~0.65%) から92 (同0.90~0.95%) まで9段階あり、最後のxにはマンガ量によってA (0.30~0.60%) もしくはB (0.60~0.90%) が入る。そのため、計18種類に区分されている。主な用途はミュージックワイヤをはじめ、タイヤの補強材であるスチールコード、半導体結晶を太陽光パネルやICチップ用にスライスするためのソーワイヤ、長大橋など大型構造物を補強するPC鋼線やクレーン・エレベータ用各種ケーブル、各種ばね用オイルテンパー線など多岐にわたる。

ピアノ線材は伸線により塑性加工することで所望の線径や強度を得る。伸線時に問題となる断線を防止するために、パテンティングと呼ばれる熱処理を行い均一で微細なパーライト組織を得ておく必要がある。パテンティングには線材圧延後に等温保持するダイレクトパテンティングと圧延後の線材を再加熱するオフラインパテンティングの2種類がある。ダイレクトパテンティングは熱間圧延後にリング状に巻き取られた高温の線材を直接急冷して等温保持するので、後の熱処理工程を省略でき、加工コストやCO₂排出量を低減できるメリットがある。この方法はステルモア法やEDC法 (Easy Drawing Conveyor)、DLP法 (Direct in-Line Patenting) などに区分される^{2)~4)}。

一方、オフラインパテンティングはコイル状に巻かれた線材を直線状に繰り出して加熱炉および冷媒を通過させ、連続的に熱処理する方法である

ため全長に亘り均一な組織を作り込みやすいというメリットがある。冷媒の種類によって鉛パテンティング、流動槽パテンティング、水パテンティング、空気パテンティングなどがある⁵⁾。

伸線加工においてスケールが残存していると、伸線後の表面肌や伸線性に悪影響をおよぼすため事前に除去しておく必要がある。一般的な脱スケール方法としては、塩酸や硫酸などの酸によりスケールを溶解除去する化学的脱スケール法 (以下、酸洗) と、線材に軽度の曲げ加工やねじり加工を施すことでスケールを分断剥離させる機械的脱スケール法 (メカニカルデスケーリング、以下MD) が挙げられる。MDは酸洗に比べて環境面やコスト面で有利である反面、スケールが残存しやすいというデメリットがある。

また、パテンティングにおいて過冷組織 (マルテンサイト) が生成していると、伸線時の断線に繋がる可能性がある。圧延後の衝風冷却において冷却速度が速すぎたり、塩浴中の保持時間が短かすぎたりするとパーライト変態が完了せず、硬質で脆いマルテンサイト組織が生成される。そのため、マルテンサイトが生成されないよう冷却速度や保持時間を鋼種や線径に応じて調整する必要がある。

参考文献

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

9. 肉盛合金・溶接材

(株)神戸製鋼所 溶接事業部門 おお づ みのる
技術センター溶接開発部 主任研究員 大 津 積

鋼を取り扱う業種で「肉盛する」と言う場合、一般的に鋼の表面に肉盛溶接を行うことを意味すると思う。「肉盛溶接」はJIS Z 3001-1で定義されている用語であるが、英語のoverlay weldingの方が鋼板の上に溶接金属を積層していくというイメージをしやすい。JIS Z 3001-1の「肉盛溶接」の周辺には関連する用語が並んでいるので、ぜひハンドブックなどで一度ご参照いただきたいが、この肉盛溶接はサーフェシング（surfacing）の一種と定義されている。サーフェシングは所要の性質、寸法などを得るために母材表面に層を加える操作で、その一種として肉盛溶射、溶射、バタリングと並んで肉盛溶接が分類されている。さらに、目的に応じて硬化肉盛溶接、耐食肉盛溶接などに分類されており、例えば一般的な構造用高張力鋼の表面に高硬度の溶接金属を肉盛して耐摩耗性を付与したり、耐熱鋼の表面にステンレス溶接金属を肉盛して、耐熱・耐腐食性を付与するなどがそれらに当たる。構造物全体を高硬度の材料や、耐腐食性の高い材料で製造すると、加工が困難になったり、コストが高くなったりするため、構造物の本体は加工しやすくコストも比較的低い鋼種で製作し、必要な部分の表面だけに目的の性質を付与する肉盛溶接を実施することが一般的に行われる。

また、2種以上の異なる材料を剥がせないように接合したクラッド鋼が既製品として市販されている。この接合はクラッド加工処理と定義されているが、具体的にはいくつかの方法があって、肉盛溶接はそのひとつである。

肉盛溶接は、ガス溶接、被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接、各種ガスシールドアーク溶接、プラズマアーク溶接、エレクトロスラグ溶接とほぼ全ての溶接法で行われる。

一方で、肉盛溶接は施工管理が難しい溶接である。溶接では母材の一部が溶融し、溶接材料から移行した溶着金属と混合して「希釈」した溶接金属（＝肉盛合金）になるが、希釈の大小で溶接金属の成分が変わるため、機械的性質も変わってしまう。母材を溶かした深さである「溶込み」を減らせば希釈は小さくなるが母材から溶接金属が剥がれるリスクが大きくなり、逆に溶込みが大きすぎると希釈が大きく、合金成分の比率が低下して所要の性能が得られなくなるリスクが大きくなる。また、母材と肉盛合金の機械的性質が大きく異なるため、肉盛合金が剥がれたり、割れたりするリスクが大きい。そのため、適切な溶接方法、溶接材料の選択が必要になり、また溶接作業の前後に予熱、溶接直後熱などの処理が必要になるケースや、母材と肉盛合金の間に中間的な性質の材料を「下盛」する必要があるケースもあり、適切な溶接施工の選択と管理が重要になってくる。

肉盛の用途としては、耐摩耗性が必要なショベルカーのショベルの爪、クラッシャーやカッターの刃の製造や補修のための硬化肉盛、リアクターなど圧力容器の内面の耐食肉盛などが上げられるが、これらにとどまらず様々な用途で過去から使用されており、ごく一般的な加工方法の一つであると言える。

IV. 機能材料

1. 形状記憶合金・超弾性合金

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 機能材料研究室 主席研究員 **もり い こう いち**
森 井 浩 一

形状記憶効果、超弾性という特異な性質はどちらも熱弾性型マルテンサイト変態に起因する現象であり、基本同じ材料でも使用する温度・応力によって発現する現象が変わるため、着目する効果によって形状記憶／超弾性合金という呼称が使い分けられている。この特性を発揮する金属材料は多数報告されているが、この中で最も多く工業的な応用が進んでいるのがTi-Ni系合金である。本報ではTi-Ni合金を中心に解説する。

I. 特性

マルテンサイトは、高温で安定な相（オーステナイト、母相）からの冷却で生じる他、母相状態での応力、静水圧を加えることによって生じることがある。合金を扱う上で変態温度の把握が重要で、通常 示差走査熱量測定（DSC）によって求

められる。この変態温度は温度ヒステリシスがあり、応力誘起の場合も応力ヒステリシスがあることにも注意されたい。

形状記憶効果は、ある形状の合金を低温相（マルテンサイト）の状態に変形させても、母相になる温度以上に加熱しマルテンサイト逆変態が起こることで、変形前の形状に戻る現象をいう。基本的には低温から高温側への一方向の回復動作である。超弾性は、母相状態から負荷をかけた際、応力誘起マルテンサイト変態によって生じた変形が、除荷時の逆変態によって回復する性質のことを言う。この時の形状回復ひずみ量は最大で8%程度である。これを超えると形状記憶回復温度（または A_f 温度）以上に加熱しても完全に元の形状に戻らず、残留伸び（残留ひずみ）となる。

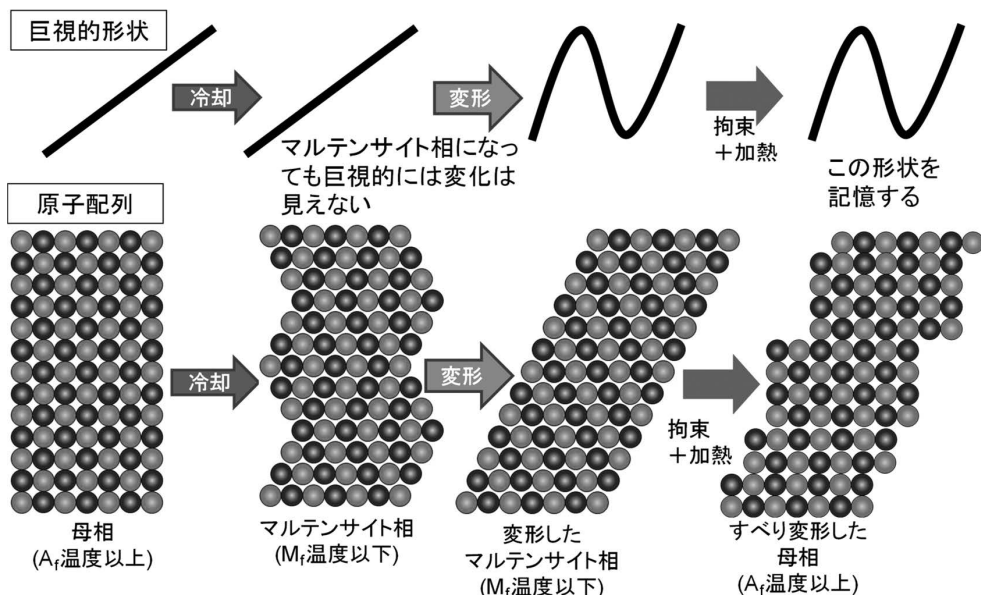


図 1 形状記憶熱処理時の巨視的形狀と原子配列との関係

II. 使用方法

実用的なTi-Ni合金は、主にNi濃度が50～51at%の組成が用いられ、用途によってCu、Co、Feなどの第三元素を少量添加した組成もある。溶解－鋳造－鍛造－伸線工程を経た合金は、まず、均質化処理したTi-Ni合金素材に冷間加工を施し所望の線径にする。次に記憶させたい形状に拘束して400～500℃に加熱した後に冷却する「形状記憶熱処理」を行う（図1）。変態温度は、合金の組成の他、冷間加工率、形状記憶熱処理の温度・時間の影響を受ける。

形状記憶素子として使用する場合、動作ストロークを大きくとるためコイルばねの形状とすることが多く、さらに温度の昇降温により二方向動作を繰り返し行いたい場合は形状記憶ばねとバイアスばねとを組合せたバイアス法とすることが多い。

III. 技術動向

材料の観点では、Ti-Ni合金の他、FeMnSi、CuMnAl系や医療用途の観点からNiを含まないTi合金系などの開発も行われている。ただし、Ti-Ni合金で生体アレルギーの報告事例は無い点は付記

しておく。また、磁場の変化に伴って効果を発現する磁性形状記憶合金も存在する。さらにハイエントロピー合金の中にも形状記憶・超弾性特性を示す材料があり、新たな材料視点での開発が行われている。

用途の観点からは、現在も市場が拡大している医療用途の他、建築・土木用途、弾性熱量効果を利用した冷凍方式への応用も検討されている。

参考文献

- 1) 入門書として。トコトンやさしい形状記憶合金の本（一社）形状記憶合金協会編著 日刊工業新聞社 2016年6月22日発行
- 2) 最近の技術解説書として。「金属」Vol. 88（2018）、No. 8、No. 9 形状記憶合金 最近の材料開発と応用の発展
- 3) 形状記憶合金に関するJISリスト
形状記憶合金用語 …JIS H 7001（2009）
形状記憶合金の変態点測定方法 …JIS H 7101（2002）
Ti-Ni系形状記憶合金線の定温引張試験方法 …JIS H 7103（2012）
形状記憶合金コイルばねの定ひずみ試験方法 …JIS H 7105（2012）
形状記憶合金コイルばねの定ひずみ熱サイクル試験方法 …JIS H 7106（2002）
Ti-Ni形状記憶合金線、条及び管 …JIS H 7107（2009）
インプラント用チタン－ニッケル（Ti-Ni）合金 …JIS T 7404（2013）

2. 低熱膨張合金

東北特殊鋼(株) 技術統括部 さ の りゅう た
技術企画チーム 主任 佐野 電太

まえがき

一般的な金属は加熱をすると膨張、冷却すると収縮するが、低熱膨張合金は特定温度域において寸法の変化が小さい特徴がある。これまで様々な低熱膨張合金が開発され、制御機器・精密計測機器・半導体製造装置等に用いられる部材など、熱膨張による寸法変化を嫌う場所で使用されている。本稿ではその代表例を紹介する。

☆36インバー

1897年スイス人物理学者ギョームは、Fe-36%Ni合金でインバー特性を発見し、後にノーベル賞を受賞している。インバー特性とは、温度の上昇に伴い、原子の熱振動による膨張と磁化減少で原子間の反発力が弱まることによる収縮が打ち消し合うことで熱膨張係数が殆ど変化しなくなることであり、Fe-Ni合金においてNiが36%のとき、常温付近での熱膨張係数が最も低くなることが知られている。36%Ni材は36インバー合金と呼ばれ、Coを添加してさらに熱膨張係数を低下させたものはスーパーインバー (Fe-32Ni-5Co) として知られている。これらは流体制御部品など熱膨張による寸法変化を嫌う制御機器・精密機器などの分野で使用されている。

☆コバルト・42アロイ

コバルトはFeに29%のNi、17%のCoを配合した合金である。常温から400℃にかけて熱膨張係数が低く、硬質ガラスに近い値であるため、硬質ガラスに接する封着材やICリードフレーム等に用いられることが多い。42アロイはFeにNiを42%配合した合金であり、コバルトに近い熱膨張係数を持つため、類似の用途に適用される。

☆ステンレスインバー

36インバーは熱膨張係数が低く広く用いられる反面、塩水等の腐食環境では耐食性に劣る。低熱膨張性耐食性を両立させた合金にステンレスインバーと呼ばれるものがある。これはFe-Co-Crの三元系合金において54%Co、36.5%Fe、9.5%Cr

としたもので、低い熱膨張係数を維持しつつ、塩水に対する耐食性を有する¹⁾。

☆エリンバー

低熱膨張合金とは異なるが、温度によるヤング率の変化を抑えた合金として、エリンバーを紹介する。通常の金属は温度とともにヤング率が減少する。エリンバーは温度上昇に伴うヤング率の減少と磁化減少による外形の変化がともに打ち消す合うことでヤング率が一定となる。化学組成として、Feに36%のNi、12%のCr、1~2%のMnを加えたものが代表例として挙げられる。エリンバーは化学成分に加えて、熱間加工や熱処理を駆使することによりエリンバー特性を発揮するものであり、幾つかの化学組成においてエリンバー特性が確認されている。身近なところでは時計のひげゼンマイ等、温度による弾性の変化を嫌う精密制御機器、精密計測機器などの分野で使われる。

むすび

最後に低熱膨張合金の熱膨張係数を図1に示す。ここに紹介したもの以外にも熱処理や加工を駆使し熱膨張係数がほぼ0 (あるいは負の値) になる技術や難切削である低熱膨張合金に快削性を付加した合金等、各社独自の低熱膨張合金が開発されている。今後も用途に応じた様々な低熱膨張合金が開発されることが期待されている。

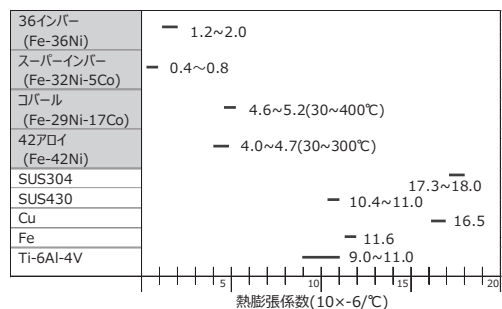


図 1 低熱膨張合金の熱膨張係数

参考文献

1) 増本量：金属学会誌 (1938年第2巻第4号)

3. 金属間化合物

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 小柳 慎彦
耐食・耐熱材料研究室 室長

まえがき

一般的な合金では添加された金属原子は結晶格子にランダムに配置され規則性がないが、ある特定の組み合わせでは金属原子同士あるいは金属原子と非金属原子がある一定の整数割合で結合し、結晶構造的に規則性をもつ相が形成される。この結晶構造的に規則性をもつ相は金属間化合物と呼ばれる。金属間化合物は、一般的な金属材料と異なり特徴的な特性を有することから様々な分野で活用されている。特に、耐熱材料では欠かすことのできない重要な相であり、特殊鋼領域で利用される代表的な金属間化合物について紹介する。

◇ Ni系金属間化合物

Ni基超合金に代表される耐熱材料は高温で高い強度を得るため、 γ' (ガンマプライム) 相と呼ばれる金属間化合物を活用している。 γ' 相はNiとAlとが3 : 1の比率で結合した金属間化合物であり Ni_3Al と表現される。 γ' 相には高温で強度が上昇する逆温度依存性¹⁾という特徴があり、高温で使用される耐熱材料では γ' 相を析出させて高温での強度低下を抑制している。 γ' 相の形態は球状や角状などさまざまだが、小さいものでは数nmから、大きなものでは $1\mu\text{m}$ 程度以下の状態で利用される。なお、実用材ではNiとAlに加えてTiやNb、Taなどが添加されており γ' 相を強化している。他に γ'' (ガンマダブルプライム Ni_3Nb)などが耐熱材料で利用されている。一方、マルエージング鋼や析出硬化型ステンレスなどの高強材においても金属間化合物は利用されている。いずれも溶体化処理でマルテンサイト組織を得た後、時効処理でNiAlや Ni_2Mo などの金属間化合物を析出させて高強度を得ている。金属間化合物による析出強化では靱性を大きく低下させることなく高強度化が可能であり、優れた強度-靱性バランスを得ることが可能である。図1に γ' 相(Ni_3Al)とNiAlの結晶構造を

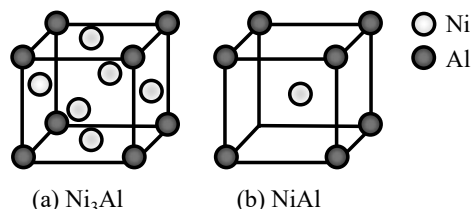


図 1 Ni_3Al およびNiAlの結晶構造

示すが、Ni原子とAl原子が規則正しく配置された構造となっている。

◇ Ti系金属間化合物

Ti合金は軽量で高強度であることから航空機用ジェットエンジンなどで使用されている。ただし、耐熱性が低いため適用範囲は限定的である。しかし、Ti系金属間化合物であるTiAl合金は軽量かつ高温強度が高いため、自動車用ターボチャージャーのタービンホイールや航空機用ジェットエンジンの低压タービンブレードなどで使用されている²⁾。金属間化合物は一般的に脆いため単体での使用は限定的であり、析出物などとして活用するのが一般的であるが、TiAl合金については全てが金属間化合物で形成されている。そのため製品実用化のハードルは高く、材料開発のみならず製造技術、設計技術などの様々な技術が集約され実用化に至った²⁾。

むすび

金属間化合物は必ずしも有益な特性が得られるわけではなく、一部の金属間化合物では製造性や特性を低下させるなど有害な場合もある。例えば、ステンレス鋼における σ (シグマ) 相や、Ni基超合金におけるLaves (ラーベス) 相などは熱間成形時に割れの起点となることがある。近年では、それらの有害相をうまく活用しようという試み^{3), 4)}もあり、特殊鋼においては金属間化合物とうまく付き合っていくことが重要となる。

参考文献

- 1) P. Beardmore, R. G. Davies, and T. L. Johnston: TMS-AIME, 245, p. 1537
- 2) 小柳禎彦：電気製鋼、88 (2017)、p. 77
- 3) 竹山雅夫：まてりあ、56 (2017)、p. 145
- 4) 竹山雅夫：まてりあ、60 (2021)、p. 281



4. 医療用材料

愛知製鋼(株) スマートカンパニー とみ た はる のぶ
デンタル事業室 富田晴伸

まえがき

医療用材料とは、一般的に材料自身または機器の材料として人体に使用することを目的としたものとされる。

代表的な材料は

- ①ステンレス鋼；SUS316Lなど
- ②チタン、チタン合金
- ③セラミックス；ジルコニア、アルミナなど
- ④高分子材料；ポリアセタールなど

がある。

本稿では、医療用材料の生物学的安全性、法規制と素材開発によって実現した歯科用精密磁性アタッチメントについて紹介する。

◇ 医療用材料の生物学的安全性

医療用材料は、機械的特性に加え、生物学的安全性を求められる。生物学的安全性評価とは、医療機器を使用する環境に対して、材料が適しているか評価するものである。ここで、重要な点は医療機器を使用する環境という点である。医療機器は、様々な環境下で使用される。例えば、メスでは一時的に表皮に接触する機器であり、インプラントでは長期間体内に留置される機器である。明らかに両者の使用環境が異なっている。

そこで生物学的安全性評価では、以下の視点から使用環境を分類し、評価項目を決定する。

- ①接触部位の分類：体表面接触、体内と体外とを連結、体内埋め込み
- ②接触部位の分類
- ③接触期間による分類：一時的接触、短・中期的接触、長期的接触

分類結果にて、ISO10993-1「医療機器の生物学的評価」に基づき、細胞毒性試験、急性毒性試験、埋植試験などの生物学的安全性評価項目を専門家とともに決定し評価を行う。安全性が十分に担保

されることを確実にする。

◇ 医療機器の法規制

医療機器とは、本邦の法令では、「人若しくは動物の疾病の診断、治療若しくは予防に使用されること、又は人若しくは動物の身体の構造若しくは機能に影響を及ぼすことが目的とされている機械器具等」と定義されている。

上述した材料を医療行為に使用するためには、医療機器として、認可を取得しなければならない。

◇ 応用例

歯科用精密磁性アタッチメントは、磁力により義歯の維持を目的とした医療機器である。1950年代頃から試みは始まったが、実用にあたり「磁石は口腔内環境で容易に腐食し磁力が消失する。」また「補綴領域に使用可能な大きさの磁石では、義歯に必要な維持力を得られない（開磁路設計の限界）。」という問題があり、なかなか実現に至らなかった。

そこで我々は独自開発した良好な軟磁性特性を有し、生物学的安全性のある軟磁性ステンレス鋼AUM20（当社鋼種名）で磁石を覆う閉磁路設計にて解決することとした。

結果、92年に当時の厚生省の承認を取得し、歯科用精密磁性アタッチメントの実用化に成功した。歯科用精密磁性アタッチメントは安定した維持力、容易な装着と撤去という点で高い有用性等があることが認められ、21年に保険適用された。

むすび

医療用材料の生物学的安全性、医療機器の法規制及び、材料開発によって実現できた歯科用精密磁性アタッチメントについて紹介した。

今後、素材の開発により今まで実現できなかった数多くの治療法が実現されることを願っている。

5. 放熱材料

(株)神戸製鋼所 素形材事業部門 の 野村 幸矢
銅板ユニット 銅板工場 開発室 主任研究員

まえがき

電気や運動のエネルギーを利用すると必ず排熱が発生する。このような熱は速やかに放散・移動させなければならない。熱が滞ると、電気エネルギー利用機器では機能低下や故障を引き起こされる。そのために放熱材料が必要とされる。

放熱材料選定は難しい作業である。その理由には二つある。一つは、放熱性能を数値化しにくいことである。材料強度は引張強さや硬さなどで定量化できるが、放熱性能は材料の熱的性質だけでなく、形状や重量、設置場所、発熱体との接触状態などの要素で複合的に決まる。二つ目は、放熱以外の機能も求められるためである。本記事では放熱性能を数値化しやすい半導体リードフレーム（以下LFと表記）を例にとり、この分野の世界標準の銅合金KFC[®]を題材に解説を行う。

◇ 放熱部材としてのリードフレームについて

LFは金属圧延板をプレスやエッチングでムカデのような形状に成形した部材である。樹脂製ICパッケージの外部に飛び出した金属製リードがその一部である。LFの機能は三つある。以下に列挙する。

- (1) 繊細な半導体素子を搭載し、電気的接続を施したあとパッケージングする組立て搬送キャリアとしての役割
- (2) 半導体素子と外部を電気的につなぐ端子としての役割
- (3) 半導体素子の発熱を外部へ移動させる放熱用材料としての役割

LFは素子を搭載した状態で接合のために数百度に加熱される。また機器使用中は発熱を速やかに移動させる高い熱伝導率も求められる。強度、耐熱性、熱伝導性の最適バランスを達成した銅合金の代表格がKFC[®]である。

◇ 放熱材料としてのKFC[®]

図1に主な銅合金の特性位置付けを示す。この図中には主にLFに使用されている銅合金に絞って示した。横軸には硬さを取った。(硬さ/3)×9.8が引張強さにほぼ等しい。これは硬さ圧子が測定材に侵入する際に圧子投影面積の3倍の領域に影響を及ぼすため、このような関係が成り立つ。KFC[®]はHv130なので引張強さは約420MPaである。縦軸の導電率Ecは電気抵抗の純銅に対する比率を示す。参考までに最良の伝導体である銀は105%IACS、高純度鉄は15%IACS、銅は7%IACSである。Ecの4倍が室温での熱伝導率にほぼ等しくなる。これはヴィーデマン・フランツの法則と呼ばれ、電気も熱も金属中の電子が担い手となるため、このような比例関係が成り立つ。KFC[®]は90%IACSなのでその熱伝導率は360W/m・Kである。KFC[®]は0.1%の鉄、0.03%の燐、残部が銅からなる合金である。これら微量元素と熱処理の組み合わせによ

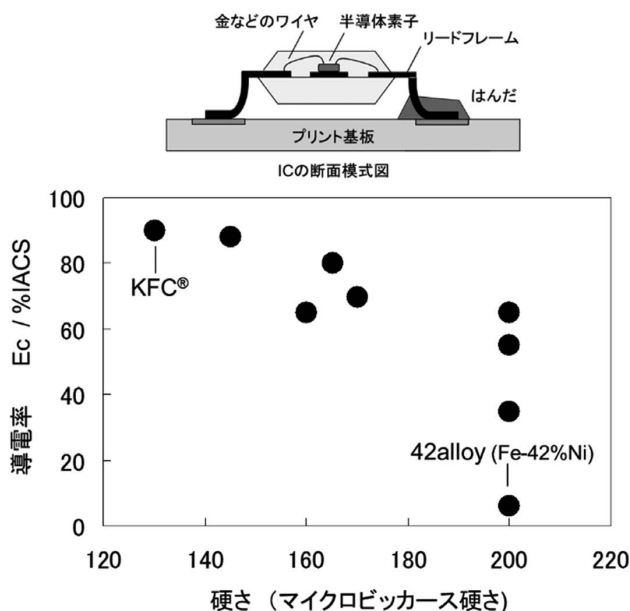


図 1 半導体リードフレーム用銅合金の位置付け

りKFC[®]の材料組織中には直径が数ナノメートルサイズの鉄リン化合物が発生し、特に耐熱性向上に絶大な効果を与える。純銅の熱伝導率の1割を半導体組み立て時の耐熱性向上に振り当ててLFの3つの機能を最大限高められるよう合金設計されている。

むすび

合金に求められる特性をさらに伸ばし、あるいは新たな機能を付与する開発は活発に行われている。今後は顧客に適切な合金を推奨するアドバイザーとしての役割も重要になると想定している。



6. 超合金

大 同 特 殊 鋼 (株) おお き ゆうたろう
技術開発研究所 耐食・耐熱材料研究室 大 木 優太郎

◇ 概 要

超合金 (Superalloy) は、自動車の内燃機関、航空機や発電用のガスタービン、さらにはロケット用エンジンや化学石油プラントなど、耐熱鋼やステンレス鋼よりも過酷な耐熱性および耐食性が求められる部位で使用される。超合金の成分に明確な定義はないが、一般的にはFe含有量が50%以下であり、主成分によってFe基、Ni基およびCo基に分類される。また、その製法によって展伸合金と鑄造合金に分類され、近年は金属粉末を用いた積層造形法による製造も行われている。なお本稿は「2022年9月号 特集：特殊鋼の基礎」、「2023年3月号 特集：特殊鋼の技術と用語の優しい解説」の要約のため、詳細はそちらで参照されたい。

◇ 要求特性

超合金は耐食用途と耐熱用途に大別される。耐食用途としてはステンレスでは耐えられない非常に腐食性の強い過酷な環境で使用され、それぞれの環境に応じて耐腐食性に優れる材料が選定される。一方、耐熱用途として求められる機械的特性は高温引張強度、クリープ寿命および疲労強度などが挙げられ、さらに耐酸化性や耐高温腐食特性などが求められる場合が多い。実際は用途によって重視される特性が異なり、様々な使用環境に適した材料を、経済性を考慮しながら多種多様なラインナップの中から使い分けている。

◇ 合金解説

超合金は主に耐食性重視の固溶強化型と強度重視の析出強化型に分けられる。析出強化型は添加される合金元素の選択により多様な化合物が形成するが、その中でも γ' -Ni₃Al相は高温ほど強度が増

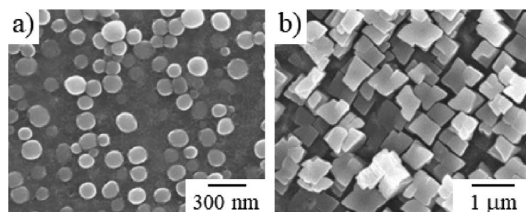


図 1 (a) Udimet 520、(b) Inconel 713Cに析出した γ' 相

加する逆温度依存性を有するため、ほとんどの耐熱合金の析出強化相として利用されている。図1にNi基合金中に析出した γ' 相の組織写真を示す。一般的に、熱間加工性の点から鍛造合金の γ' 相体積率は約50%以下に制限されており、その析出形態は(a)に示すUdimet[®]520 (Special Metalsの登録商標)に析出した γ' 相のように球状を取ることが多い。一方、熱間加工が不要な鑄造合金では γ' 相体積率は50%を超えており、代表的な鑄造合金である(b) Inconel[®]713C (Huntington alloysの登録商標)では立方体状に析出する。他にも超合金中には多種多様な化合物が、加工や熱処理により形態やサイズをコントロールされて析出する一方で、特性を低下させてしまう場合もあるため、使用環境を理解して材料選定を行うことが重要である。

むすび

超合金は用途が多岐にわたり、多種多様な材料が開発されている。近年、急速にカーボンニュートラルへのシフトが進んでおり、水素やアンモニア、バイオ燃料などを使用した内燃機関などが開発されている。今後はより一層、使用環境に応じた材料の使い分けおよびそれに適した材料開発が求められるであろう。

7. 制振鋼板

日本製鉄(株) 名古屋製鉄所 品質管理部 もり た しげ みつ
薄板管理室 冷め管理課 主幹 **森田重光**

制振鋼板は、二枚の鋼板の間に、数十マイクロンの粘弾性樹脂をサンドイッチした構造からなる鋼板です。鋼板が振動（＝曲げ変形）したときに、樹脂層がずり（＝剪断変形）を受けることで、この繰り返しによって振動エネルギーが粘弾性樹脂層に吸収され、振動が低減されます。粘弾性樹脂層の中では、高分子同士がずれあうことで、振動エネルギーが高分子間の摩擦熱として吸収され、熱エネルギーとして外部に放散されます。これが制振鋼板により振動が低減されるメカニズムです。

制振鋼板を直接たたいてみますと、見た目は金属でありながら、金属らしい甲高い音はせず、木材をたたいているようなポコポコッという鈍い音がします。このように、鋼板そのものに直接、制振効果が備わっていますので、後付けでゴム系などの防振材料を追加して施工する場合と比較した場合には、

- ①防振材料の追加の施工が不要なため、重量の増加が抑えられる、
 - ②鋼板に直接制振効果を備え、構造部材として鋼板と同等の強度・耐久性が得られる、
 - ③鋼板のスクラップと同様に鉄屑としてリサイクル回収ができる、
- 等の利点があります。

鋼板の間に挟まれている樹脂は、一般に、低温ではガラス状態という硬いプラスチック状態から、

高温では軟らかいゴム状態となります。このちょうど変わり目の温度範囲を粘弾性状態と言い、制振効果が最も高くなる温度領域となります。マイクロには、樹脂中の高分子が適度にずれやすく適度に抵抗することで、振動エネルギーを高分子間の摩擦熱として効率的に吸収できる温度領域が粘弾性状態です。そのため、制振鋼板には適用される目的に応じて、鋼板の間の樹脂の特性を選択（＝使用される温度付近がちょうど粘弾性状態になる樹脂を選択）できるように、常温用から高温用の制振鋼板の種類を備えています。

身の回りの適用例として、常温用の制振鋼板は、雨音を低減する金属製の屋根材や、工場などの騒音を抑える排気ダクトや防音壁、モーターなどの振動音を低減するカバーなどに、通常の鋼板から制振鋼板に置き換えて使われています。高温用の制振鋼板は、自動車のエンジンやトランスミッション回りのカバー類など、多種に使用されています。

鋼板の間の樹脂に金属粒を添加することでスポット溶接を可能にした制振鋼板もあります。鋼板の種類を選択することで深絞りのプレス成形が可能な制振鋼板、亜鉛めっき鋼板などの防錆性能を持った制振鋼板もあります。このため、現在使用されている鋼板パネル類を、同じ鋼板を使用した制振鋼板に置き換えることで、表面の鋼板は変えることなく振動低減効果が期待できる材料です。

8. 制振合金

(株) プロテリアル よこやま しんいちろう
安来工場 冶金研究所 所長 **横山 紳一郎**

金属バットで野球のボールを打つと、甲高い音が響くように、多くの金属材料は、硬いものと当たると振動により金属音を発生する。対照的に硬いものと当たると、振動を吸収して鈍い音を発する金属材料がある。このような金属材料は、制振合金と呼ばれ、材料の内部で振動を減衰させる性質をもっている。工業的には、制振合金は工作機械のシューター¹⁾や、自動車用のカムシャフトギヤ²⁾等、振動や騒音が問題となる幅広い用途で適用検討されてきた。

制振合金の振動を減衰させる性質は内部摩擦と呼ばれ、対数減衰率 δ や共振の鋭さを表すQ値の逆数の Q^{-1} で表される。 δ や Q^{-1} の値が大きい材料ほど、内部摩擦が大きく、優れた制振合金と言える。制振合金で内部摩擦が得られるメカニズムは、材料の組織や性質と関係しており、そのメカニズムから強磁性型、双晶型、転位型、複合型の4種類に分類される²⁾。

強磁性型の制振合金は、強磁性材料がもつ磁歪の性質を利用している。磁歪は、強磁性材料を磁化すると、材料が弾性変形する性質であるが、逆に強磁性材料に弾性応力を負荷すると、機械的なひずみに加えて、磁壁の移動により磁気的なひずみも発生する。弾性応力を除荷すると、機械的なひずみはゼロになるが、磁気的なひずみはゼロに戻らず、ヒステリシスが発生する。このヒステリシスが振動を減衰する内部摩擦となる。それ故、強磁性型の制振合金としては、磁歪が大きく、磁壁の移動が容易な軟磁性材料が適しており、具体的にはFe-Cr-Al合金¹⁾やFe-Co合金³⁾等が挙げられる。

双晶型の制振合金は、特殊な双晶に応力の負荷と除荷を繰り返した際に起きる可逆的なせん断変形を利用した制振合金である。熱弾性型のマルテンサイト⁴⁾にせん断力を加えると、ある層の結晶が将棋倒し的に向きを変えて変形を起こす。応力を除荷すると、結晶は元の形に容易に戻り、将棋倒しが往復運動することによって、振動を吸収する。双晶型の制振合金としては、Mn-Cu合金や、この合金を改良したMn-Cu-Ni-Fe合金⁴⁾等がある。

転位型の制振合金は、結晶中の転位の運動による内部摩擦が大きい合金である。純MgやMg-Zr合金等が転位型の制振合金である。また、複合型の制振合金は、母相と第二相から成る合金で、その界面での粘性または塑性流動により振動を吸収する。黒鉛鋳鉄やZn-Al合金が複合型の制振合金である。

制振合金は、構造材料として用いられることから内部摩擦に加えて強度も求められる場合が多いが、一般的に内部摩擦と強度は相反する⁴⁾。また、制振合金の内部摩擦は、温度、振動の振幅と周波数に依存して変化することから、使用条件に合わせて適切な制振合金を選定する必要がある。

参考文献

- 1) 長谷雄雄、堀井満夫、天野景隆：日本金属学会会報 第18巻 第2号 (1979) pp. 134-135
- 2) 天野景隆、青木忠昭、比内正勝、鈴木雄一：「制振材料 その機能と応用 (編集委員長：田中良平)」日本規格協会 (1992) pp. 189-231
- 3) Hakaru Masumoto, Showhachi Sawaya and Masakatsu Hinai: Trans. JIM, Vol. 19 (1978) pp. 312-316
- 4) 川原浩司、殷福星：真空 第42巻 第1号 (1999) pp. 11-16

9. クラッド材

日鉄ステンレス(株) た な か い く お
商 品 開 発 部 田 中 郁 雄

◇ クラッド鋼

クラッド鋼は2つ以上の材料を重ね合わせた積層形の複合材料の1つである。

構造材料としては、表1に示すように強度を受け持つ軟鋼あるいは低合金鋼を母材とし、その表面に耐食性、耐摩耗性等の機能を有した合せ材を組み合わせる場合が多い。

◇ クラッド鋼の種類と適用例

表 1 クラッド鋼の種類と適用例

合せ材の種類 (母材は軟鋼または低合金鋼)	特徴		
	機能	用途例	
ステンレス鋼	SUS304、 SUS316L、 SUS444、 SUS329J3L等	耐摩耗性 耐食性	ダム、 ケミカルタンカー、 石油化学等
ニッケル合金系	モネル、 インコネル、 ハステロイ等	耐食性	石油化学、 石油精製プラント等
銅合金系	キューブロニッケル、 銅、黄銅等	耐食性	海洋構造物部材、 熱交換器等
その他	チタン、アルミ、 タングステン等	耐食性	水処理、化学工業等

◇ クラッド鋼の製造方法

クラッド鋼の製造方法には、①組立圧延法、②爆着圧着法、③拡散溶接法、④肉盛溶接法等がある。

一般的なステンレスクラッド鋼の製造方法は組立圧延法で、溶接組立したスラブを熱間圧延にて母材と合せ材を圧着させるとともに所定の製品寸法まで圧延する方法である。

◇ クラッド鋼の分類

クラッド鋼の分類には2種類ある。

①1種：合せ材を含めて強度材料として設計したもの及び特別用途のもの。

特別の用途の例としては、高温などで使用する場合、構造物の製作時に厳しい加工を施す場合などを対象としたもの。

②2種：合せ材の強度を含めず母材の強度のみで設計したもの。

例としては、合せ材を腐れ代として設計したものやライニングの代わりに使用するもの。

◇ 化学成分

化学成分はの化学成分は母材および合せ材各々を規定した規格に従う。

◇ 機械的性質

1) 引張強さ：

①1種は母材および合せ材の各々のa) 厚み、b) 引張強さの規格下限値を比例配分して算出する。

②2種は母材の引張強さ規格下限値に従う。

2) 曲げ試験：

①表曲げは合せ材を外側に曲げ、合否基準は合せ材の規格に従う。

②裏曲げは母材を外側に曲げ、合否基準は母材の規格に従う。

3) せん断試験：

合せ材を母材から接合面と並行に剥離させるせん断応力のみを作用させて接合強度を測定する試験。例：ステンレスクラッド鋼の場合：判定基準は200N/mm²以上。

◇ 接合状態の確認

①クラッド鋼の接合部の健全性を確認する方法として、超音波探傷試験により確認する。

探傷方法は水浸法または直接接触法を採用する。

②接合状態の判定には2つの等級がある。

a) F等級…クラッド鋼の全面を探傷し、非接合部大きさへ面積の判定基準が厳しい。

b) S等級…クラッド鋼を内部を200mmピッチで探傷し、非接合部の判定はF等級より厳しくない。

10. 超電導

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 かわしましんや
 材料研究所 材質制御研究室 川嶋 慎也

超電導現象とは特定の金属やセラミックスを極低温に冷却することで電気抵抗がほぼゼロとなる現象である。温度に加え、材料固有の3つの臨界条件下（臨界温度 T_c 、臨界磁場 B_c 、臨界電流 I_c ）において、超電導状態になることが可能である。図1に示すように、電子対-フォノン相互作用に基づくBCS理論で説明出来るNbTi合金や Nb_3Sn 化合物に代表される液体He温度（4.2K）で使用される低温超電導体や、液体 H_2 温度（20K）で使用が想定される鉄系、液体 N_2 温度（77K）以上での使用が期待されるビスマス系やイットリウム系の銅酸化物高温超電導体、さらに近年、超高压下と制

限付きであるが室温 T_c も報告されている水素化物など多くの超電導体が報告されている。

超電導体を線材化し、コイル状にすることにより、高磁場環境をコンパクトなサイズの装置で実現できる。超電導マグネットの実用化された応用例としては、医療用などの磁気共鳴イメージング（MRI）装置や創薬において重要なタンパク質の構造解析に用いられる核磁気共鳴（NMR）装置に主に用いられている。その他の応用先として、リニアモーターカーや熱核融合炉、粒子加速器、電力貯蔵などがさかんに研究が行われている。

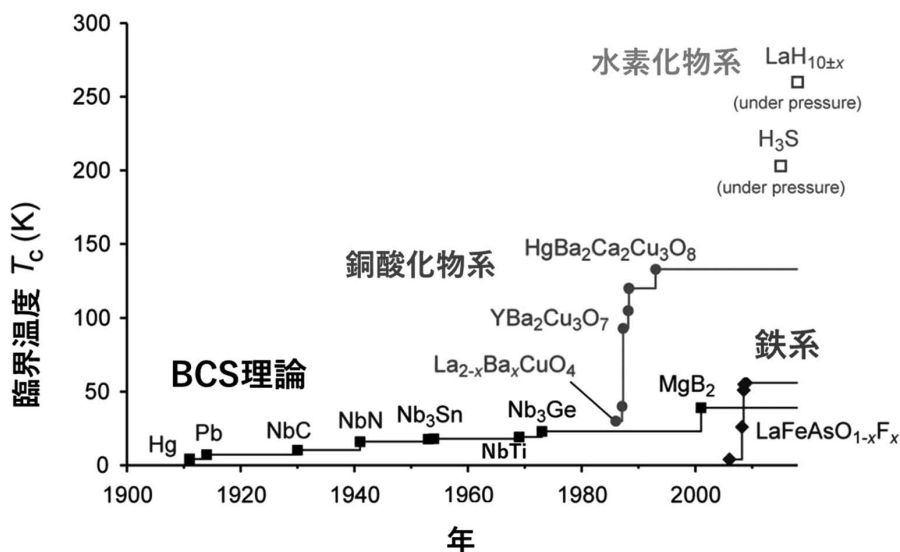


図 1

引用元：<https://www.phys.chuo-u.ac.jp/labs/kittaka/contents/others/tc-history/index.html>
 (2023年9月7日時点)

11. チタン合金

(株)神戸製鋼所 素形材事業部門 チタンユニット 逸見 義男
チタン工場 技術部 開発室 シニアプロフェッショナル

チタンは原子番号22の遷移金属である。日本で工業的な生産が開始されたのは1955年と比較的近年である。チタンと他の汎用金属との比較で、重要な特徴は耐食性で、特に海水には白金並みの際立った耐性を発揮する。これは、表面を覆う安定な酸化被膜（不動態被膜）が、外部の腐食環境からチタンを遮断し保護するからである。他にも、優れた生体適合性を有すること、並びに、チタン合金は比強度が高いことが特徴である。更にチタン合金は、添加される元素に応じて、前述以外の様々な特徴を発揮する。

チタン合金の組織は、大別して α 相 (hcp) と β 相 (bcc) の2相の結晶相で構成される。添加元素には、 α 相を室温付近で安定にする α 安定化元素と、 β 相を安定にする β 安定化元素、どちらにも属さない中性元素がある。添加元素の種類と量によって構成相の比率が変わり、それに応じて全般的な材料諸特性が変わることから、チタンは、添加元素を含まない純チタンと、 α 型、ニア α 型、

$\alpha+\beta$ 型、ニア β 型、 β 型の5つの型のチタン合金に分類される。図1は、これらの型とその代表的な合金、各型における物性値や材料諸特性の定性的な傾向を示したものである。

これら分類ごとの適用例を以下に示す。

- ・純チタン (α 単相)：耐食性を生かした適用例が多い。産業分野では、海水を冷媒に用いる伝熱板や伝熱管、化学工業における反応槽、配管や食塩電解装置など、最近では車載用燃料電池の電極などに用いられている。また建築土木分野では、軽量性を生かした寺社仏閣などの建造物の屋根への適用例がある。民生用途分野では、軽量性と熱を伝え難い性質を生かしてアウトドア用のナイフやフォークなどのカトラリーに適用されている。
- ・ α 型/ニア α 型合金： α 型合金においては、極低温における優れた強度延性バランスを生かした液体燃料タンクや、微量の貴金属元素添加で耐隙間腐食性を向上させ、化学工業や食



図1 各種チタン合金の構成相による分類とそれに伴う緒特性の傾向
 (「チタンの基礎と応用」内田老鶴圃 (2023) 第2章2.1.2 P31 図2.3を参考に編集)

塩電解の過酷な腐食環境下へ適用する例がある。またニア α 型合金は、耐酸化性と耐高温クリープ性に優れるため、低合金系では2輪と4輪車の排気マフラー部材に、高合金系では航空機エンジンディスク等に適用されている。

- ・ $\alpha + \beta$ 型合金：強度と延性のバランスに優れており、チタン合金の中で最も適用例が多い。航空機の機体部品やエンジン部品、身近なと

ころでは、ゴルフクラブヘッドや人工骨などに適用されている。

- ・ニア β 型/ β 型合金：ニア β 型合金は、高強度で疲労特性と靱性にも優れた特徴を活かした航空機の主脚部材やエンジン部品などへの適用例がある。また β 型合金には、低剛性を活かした眼鏡フレームや、加工熱処理により極めて高い強度を付与された自転車ギアなどへの適用例がある。



12. 金属箔

(株)プロテリアル金属 堀部 孝広
技術開発部

非常に薄い金属片は金属箔と呼ばれます。

どの厚みから箔とされるかは統一的な決まりは無く、一部の材質ではJIS規格で規定されており、例えばアルミは厚み0.2mm以下が箔に該当します。

殆どの材質は規定が無い場合が多く、慣習的には0.1mm以下のものを金属箔と呼ぶことが多いと思われます。

金属箔の製造方法は主に二つあり、圧延により製造されたものは圧延箔、電解により製造されたものは電解箔と呼ばれます。

圧延箔は、金属を圧延プロセスによって薄く加工して作られる箔のことを指します。

圧延プロセスは金属の板を二本のローラー間を通して薄く延ばし、所望の厚さと寸法に仕上げる方法です。

一般的には冷間圧延されるため、金属の硬度和強度が向上し、硬くて薄い箔が得られます。

電解箔は、電解法によって金属表面に別の金属層を堆積させて作られる箔のことを指します。

電解法は電気化学的な反応を利用して金属イオンを電極上に付着させるプロセスであり、これによって電極の表面に別の金属の薄い層を形成します。

産業用途への利用については、薄いことと、各金属の特性が併用される形で使用されます。

代表的な用途は、次の通りです。

・リチウムイオン電池

リチウムイオン電池の主要な構成要素は、正極と負極および電解質です。

充電および放電時にリチウムイオンは電池内を移動し、電極と電解質の間で電気化学的反応が進行します。電池の容積が小さくても、薄く電気抵抗の低いアルミ箔と銅箔を正極、負極として何層も積層することで、電池の容量を増やすことが可

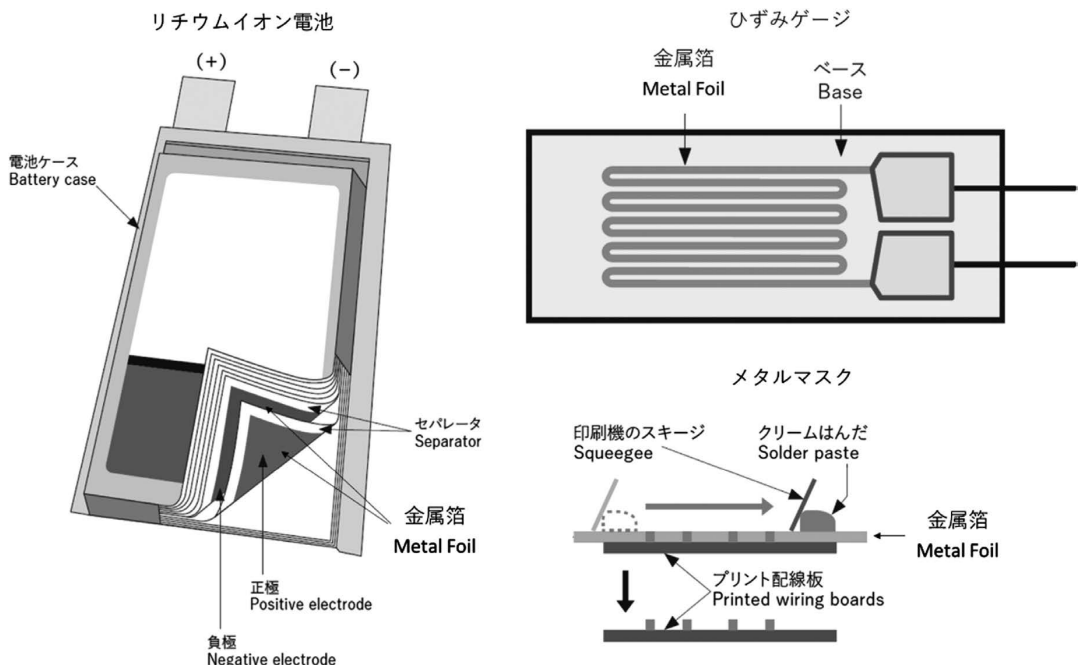


図 1 金属箔の用途例

能となります。

- ・ひずみゲージ

ひずみゲージの測定原理は、物体のひずみによってひずみゲージの電気抵抗が変化することを利用して利用しています。

薄い金属箔を使用する利点としては、電気抵抗材料を薄くすることで、抵抗値が大きくなる事に加え、測定対象物の変形に対しての応答性が良くなり、物体のひずみを精度良く評価することが可能となります。

- ・メタルマスク

メタルマスクは、半導体製造や液晶ディスプレイなどの微細なパターンや構造を形成する際に使用される治具です。

パターンの形成はエッチング加工により行われるため、厚さが薄い金属箔の方がより高精細なパ

ターンの形成が可能となります。

また、使用環境によっては熱膨張の影響を受けたり、化学薬品の影響を受けたりするケースがあり、メタルマスクに使用する材質を適切に選定する必要があります。

- ・小型スイッチ

プッシュボタンスイッチと呼ばれる小型スイッチの可動接点は動作時に大きな表面応力が生じる為、繰り返し動作に対する耐久性と作動時の操作感を確保するため、高強度のステンレス箔をドーム形状に加工し、複数枚積層させた構造とされています。

可動接点が小さくなるほど、より薄いステンレス箔を使用する必要があります。

上記以外にも様々な分野に金属箔は使用されています。

13. ターゲット材

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 戸塚 巡
機能材料研究室 主任研究員

まえがき

私たちの身の回りにはスマートフォン、カメラなど電子機器や、機械加工などに使用される工具・金型などには、その使用用途に適した薄膜が使用されている。

薄膜の成膜には蒸着、スパッタリング、イオンプレーティングなどのPVD (Physical Vapor Deposition) という技術が使用されており、それらの成膜に使用される原料はターゲット材と呼ばれている。

PVD法の工程としては、真空中に固体の皮膜材料(ターゲット材)と皮膜対象品(基材)を設置し、ターゲット材を物理的作用(加熱、イオンで叩き出すなど)で蒸発させて基材の上に膜を成膜する。一例として図1にスパッタリングによる成膜の模式図とAlターゲット材を使用してガラス基材上にAl膜を500nm成膜したサンプル写真を示す。スパッタリングではArイオンをターゲット材に衝突させることでターゲット材の粒子が叩き出され

基板上に堆積する。堆積時間を調整することでナノメートル単位での膜厚調整が可能であり、均一で薄い薄膜を得ることができる。

◇ ターゲット材の製法

ターゲット材の製法は材料により適した方法が選択される。金属ターゲット材は主に溶解法で製造され、材料を溶解でインゴットを製造した後、必要に応じて鍛造、圧延、熱処理などを行い機械加工でターゲット材の形状に仕上げる。セラミックや酸化物、溶解法で製造が難しい合金ターゲット材は粉末焼結法で製造され、材料粉末を混合機やボールミルを使用して混合した後、型に入れてホットプレス、HIP、CIPなどの焼結方法で焼結体を製造し、機械加工を行う。

粉末焼結法は様々な組成のターゲット材を製造できるメリットがある一方、大型なものを製造しにくい、粉末表面に付着した酸化物の影響により純度が上げにくい等のデメリットがあり目的の特性に合わせて最適な製法を検討する必要がある。

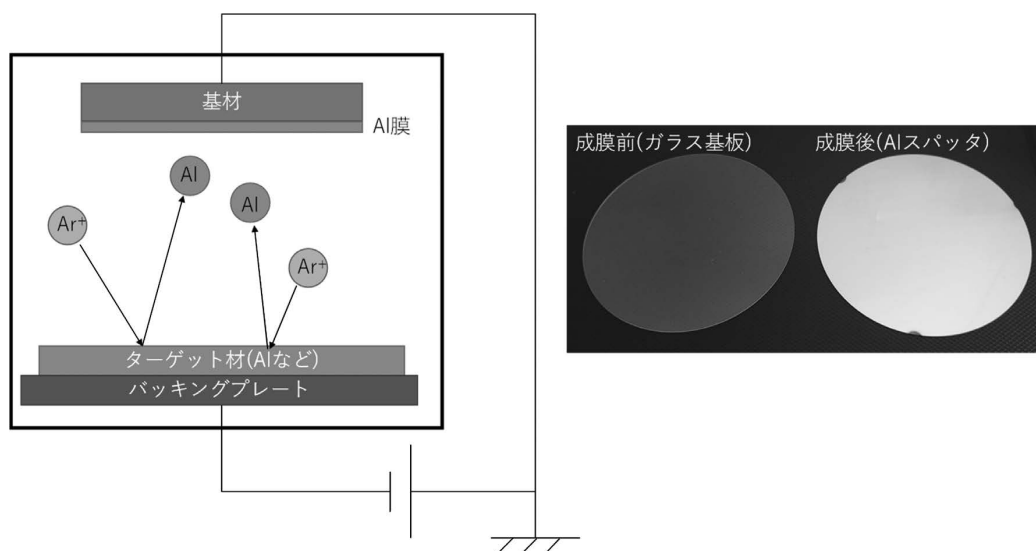


図 1 スパッタリング法と成膜前後のサンプル

◇ ボンディング工程

それぞれの方法で製造されたターゲット材はPVD装置に取り付けやすいよう、図2のようにバックングプレートと呼ばれるCuやAlなどの板にInなどの低融点金属を使用して接着するボンディングを行う。

Inとの濡れ性が悪い材料では接着時に気泡が混入しターゲット材とバックングプレートの接着率が悪くなりPVD中にターゲット材が剥がれてしまうなどの不具合が起きる。そのため超音波による濡れ性の改善やNiメッキなどの接着層を付加する処理が行われる。

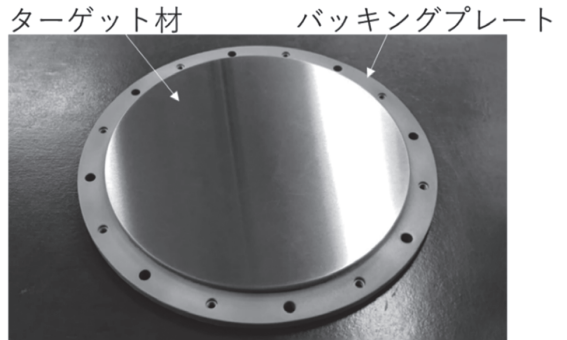


図 2 ターゲット材の外観



14. ハイエントロピー合金

(株)プロテリアル グローバル技術革新センター 桑原 孝介
デジタル開発部 主管 研究員

ハイエントロピー合金 (high entropy alloy) は2004年に台湾国立清華大のYeh教授が「5種類以上の構成元素から成る等原子分率の単相固溶体合金」として提唱した合金群です¹⁾。近年では定義を拡げて「多元系状態図の中央付近の高濃度固溶体合金や多相合金」として扱われることも増えて活発に研究開発が進められています。

ハイエントロピー合金は鉄鋼や銅合金、チタン合金など特定元素を基とする合金では無くアモルファスや金属ガラスのような合金の構造を示す概念です。名前に含まれるエントロピーとは熱力学における配置のエントロピーを指します。ハイエントロピー合金には図1 (b) のように構成元素が不規則に混ざり合うハイエントロピー条件で安定化する合金と言う意味があります。不規則な混合によって、不均一に歪んだ結晶格子や遅い原子拡散、多様な原子間相互作用による新物性発現 (カクテル効果) の特徴を持つとされます。

多元系状態図の中央付近の合金と言うと無数の組合せがありそうですが、原子半径や価電子数、相溶性などを考慮して互いに均一に混ざり合う元素から成る等原子分率の合金群を中心に研究が進

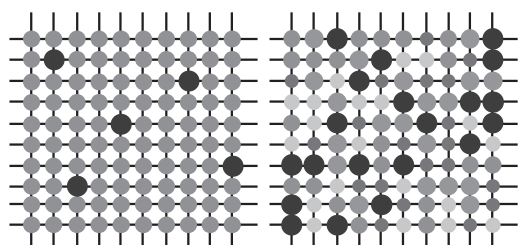
められています。代表例には周期表の第4周期の遷移金属から成る面心立方構造系のCrMnFeCoNiなどや、第4族から第6族の遷移金属を中心とする体心立方構造系のNbMoTaWなどがあります。CrMnFeCoNiでは強度と延性が低温で増加する特性²⁾、NbMoTaWでは1600°Cまで維持される高温強度³⁾ など特異な特性が報告されています。優れた機械特性を活かすハイエントロピー超合金 (high entropy superalloy) 等としての次世代の超耐熱合金、耐照射合金としての検討に加えて、生体インプラントや新たな反応触媒など様々な新材料への適用が図られています。

ハイエントロピー合金の多くはラボスケールの検討が進められていますが、産業適用に向けては構成元素が不規則に混ざり合うハイエントロピー条件を構造体中で制御して発現させる事が課題となります。構成元素には融点や蒸気圧、耐酸化性など異なる特性の元素群を相当量含み、溶解や casting、加工や熱処理法などで新たなプロセス技術を要すると見込まれます。このようなハイエントロピー合金に対応する製造技術として、金属粉末を原料とする積層造形法の適用が検討されています。

ハイエントロピー合金にはこれまで検討されなかった新材料を生み出す可能性があります。皆様の分野でも新材料開発の切り口として検討されてはいかがでしょうか？

参考文献

- 1) J. W. Yeh et al., *Advanced Engineering Materials*, vol. 6, p. 299 (2004)
- 2) B. Gludovatz et al., *Science*, vol. 345, p. 1153 (2014)
- 3) O. N. Senkov et al., *Intermetallics*, vol. 19, p. 698 (2011)



(a)通常の合金(固溶体) (b)ハイエントロピー合金
図 1 ハイエントロピー合金の原子配置を示す模式図

15. 金属積層造形材

山陽特殊製鋼(株) 粉末事業部 さわ だ とし ゆき
粉末技術部 技術2G長 博士(工学) 澤田俊之

◇ 金属積層造形 (Metal Additive Manufacturing)

金属積層造形は金属の粉末、ワイヤーを原料とし、必要な部分のみレーザー、電子ビーム、アークなどの熱源で溶融させ、その凝固物を多層に積み上げていくことで3次元形状の製品を製造する技術である。3D-CADなどの3次元データから直接製品を製造できるため、金型などの治具が不要となることや従来プロセスでは製造できなかった複雑な3次元構造体を製造できるなど多くのメリットがある。従来のように鋳造や鍛造で製造した材料を切削、研削、放電加工などにより「除去」していく製法と異なり、必要な部分だけ「付加」していく製法であることから、積層造形は付加製造 (Additive Manufacturing) と呼ばれる。また、3Dプリンタとも呼ばれる。

主な金属積層造形法として、粉末床溶融結合法、指向性エネルギー堆積法、結合剤噴射法、材料押出法などの方式がある。以下では、これら方式のなかで適用、検討が進んでいる3方式について、一般的な原理を概説する。

◇ 粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion: PBF) 法

造形テーブルに原料となる粉末を薄く1層分敷き (粉末床)、3D-CADなどでプログラムされた製品形状のスライスデータを必要部分として熱源で

溶融し、凝固させる。その後、造形テーブルが1層分下降し、その上に新たな粉末を1層分敷き、必要部分を溶融、凝固させる工程を繰り返す。これにより、熱源が照射されていない部分は粉末のまま残留し、照射された部分は凝固物となり3次元形状を持つ金属積層造形材が得られる。

◇ 指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition: DED) 法

熱源照射口と粉末やワイヤーなどの原料の供給口が一体となった積層ノズルを持ち、このノズルが熱源により溶融された原料を噴射しながら3次元データでプログラムされた経路に沿って移動する。これにより、必要部分にのみ溶融原料が吹き付けられ、これが凝固、堆積することで3次元形状を持つ金属積層造形材が得られる。

◇ 結合剤噴射 (Binder Jetting: BJT) 法

PBF法と同様に粉末を薄く1層分敷き、この粉末床に3次元データでプログラムされた必要部分のみバインダーを吹き付ける。さらにその上に新たに粉末を1層分敷き、バインダーを吹き付ける。このように、粉末の敷き詰めとバインダーの吹き付けを繰り返した後、バインダーを乾燥させることで、バインダー吹き付け部のみ粉末同士が固着した3次元形状の粉末固着物が作製される。次に、この粉末固着物を高温の炉で処理し、粉末焼結の原理により、高密度な3次元形状の金属積層造形材が得られる。

16. 電磁波吸収材

山陽特殊製鋼(株) 粉末事業部 ほそ み りょう へい
粉末技術部 技術 3G 細見凌平

◇ 電磁波吸収材とは

電磁波吸収材は、電磁波を吸収し、熱に変換できることから、電磁波の反射や透過を抑制することが可能であり、現在も電子機器から発生する不要な電磁波を吸収することや、通信の混信を防止することを目的として様々な電子機器や構造物などに活用されている。

近年では、自動車の自動運転化や電子機器の高実装化、高周波化が進行している。自動車の自動運転技術が開発されるにあたり、現在、24GHz帯、76GHz帯、79GHz帯のレーダーが運転支援のために実装され始めている。また、2020年ごろに利用が開始された5G通信においては、Sub6と呼ばれる3.7GHz帯と4.5GHz帯、ミリ波と呼ばれる28GHz帯が使用されている。これらの周波数帯を利用した技術が今後さらに普及すると予想される中で、電子機器内部で発生した不要な電磁波によって電子機器自身が誤作動を起こす場合や、電子機器から発生した電磁波によって他の電子機器に影響を及ぼす場合がある。これらのリスクを解消するには、電磁波吸収材の活用が有効である。

◇ 電磁波吸収材の種類

電磁波吸収材は、電磁波を熱に変換する機構により、導電性材料、誘電体材料、磁性材料の3種に分類することができる。

・導電性材料

導電性材料は材料内部に電流が流れることで電磁波のエネルギーが熱に変換される。この材料は、炭素材料や金属を繊維状にしたものが用いられることが多く、その繊維を布状に織り上げる、

もしくは樹脂に分散させてシート化した上で使用する。

・誘電体材料

誘電体材料に電界を加えた場合、低い周波数では電流が流れないため熱は発生しないが、周波数が高くなると電流が流れることにより、電磁波のエネルギーが熱に変換される。このような材料としては、カーボン粒子を混合したゴムシート、グラファイト含有発泡スチロール、カーボン含有発泡ウレタンなどがある。

・磁性材料

磁性材料に電磁波を入射すると、材料中に存在する磁壁や磁気モーメントが周波数に合わせて振動する。電磁波の周波数が高くなると、それらの振動はそれぞれ特定の周波数で共鳴を起こし、運動エネルギーとして吸収される。吸収されたエネルギーは、最終的には熱エネルギーへと変換される。このような材料としては、フェライト（酸化鉄）や金属磁性材料（Fe-Si-Al系合金など）がある。特に金属磁性材料を電磁波吸収材として使用する場合は、粉末の材料を樹脂やゴムなどに分散させてシート化することが多い。

◇ 電磁波吸収材の今後

現在日常の様々な場面において用いられている電磁波吸収材であるが、今後さらに電子機器の使用周波数が高周波化することが見込まれ、それに伴い高周波帯に対応した電磁波吸収材も必要となると考えられる。電磁波吸収材の材料や形状を工夫することにより、電磁波を吸収する周波数帯をコントロールできることから、より一層電磁波吸収材の活躍の幅が広がると予想される。

17. 電気抵抗材料

(株)プロテリアル金属 堀部 孝広
技術開発部

電気抵抗材料は、電気回路や電子機器において電流を流す際に、電子の運動による抵抗を生じる材料のことを指します。

これらの材料は電気エネルギーを熱エネルギーに変換する特性を持ちます。

電気抵抗の特性は多くの電子機器や回路において重要な役割を果たし、正確な電気信号の制御や安定した動作を実現するために必要です。

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

精密抵抗材料は、高精度抵抗器や電気計測器、分流器などに使用されます。

その要求性能としては、電気抵抗のばらつきが小さいことに加え、温度により抵抗値が変化する程度をあらわす、抵抗温度係数が0に近いこと、電気特性の経年変化が小さいことが求められます。

また、電極に銅が接合される場合には、銅と電気抵抗材料間で生じる熱起電力により、抵抗値の変化が温度の影響を受け大きくなることを抑制する為、対銅熱起電力が小さいことも求められます。

一般抵抗材料は精密抵抗材料とほぼ同等の性能

を持ちつつも、それほど精度を要しないため経済性が重視されます。

一般抵抗材料は、一般的な電子機器や回路に広く使用されます。

電熱材料には高い電気抵抗性が求められ、高温での耐酸化性、耐食性、高温強度に優れている必要があります。

また、長時間の高温使用や冷熱サイクルへの耐久性も求められます。

これらの電気抵抗材料は、様々な電子機器や電気回路の設計と機能に影響を与えます。

特に抵抗器と呼ばれる電気抵抗を持つコンポーネントは、回路の電流制御や電圧分配など、様々な用途で利用されます。

さらに別の用途には、電気抵抗の性質を利用して熱発生などの現象も応用されます。

電気抵抗材料の選択は、特定のアプリケーションにおける電氣的性能や環境条件を考慮することが重要です。

デバイスや回路の性能を最適化するために、適切な電気抵抗材料を選定する必要があります。

表1に主な一般抵抗材料と電氣的特性を示します。一般抵抗材料の中で、銅マンガと銅ニッケル、

表 1 主な一般抵抗材料と電氣的特性 (JIS C2532:1999)

種類		記号	体積抵抗率 [$\mu\Omega \cdot m$]		特性 (参考値)		
名称	種別		基準値	許容差	平均温度係数 [10-6/K] (23~100°C)	対銅熱起電力 [$\mu V/K$] (0~100°C)	最高使用 [°C]
鉄クロム	142種	GFC142	1.42	± 0.06	100	-4	400
	123種	GFC123	1.23	± 0.06	150	-3	400
ニッケルクロム	112種	GNC112	1.12	± 0.05	150	+1	500
	108種	GNC108	1.08	± 0.05	50	+5	500
銅マンガ	44種	GCM44	0.440	± 0.030	+50	± 2	150
銅ニッケル	49種	GCN49	0.490	± 0.030	± 80	-41	400
	30種	GCN30	0.300	± 0.024	200	-32	300
	15種	GCN15	0.150	± 0.015	500	-25	250
	10種	GCN10	0.100	± 0.012	700	-18	220
	5種	GCN5	0.050	± 0.0075	1500	-13	200

ニッケルクロムの一部は精密抵抗材料にも使用され、鉄クロムとニッケルクロムの一部は電熱材料として用いられます。

電気抵抗材料の評価に際しては、機械加工により試験片を作成する場合は電気的性質を正確に測定するために、適切な熱処理を行ってひずみを除去する必要があります。

加工ひずみは電気的性質に著しい影響を与えます。

一方、使用に際しては、電気抵抗材料は冷間加工により体積抵抗率は上昇、温度係数は低下し、強度は向上しますが、加工歪の存在は安定度を悪くするため、一般的には熱処理を施して使用されます。

特にニッケルクロムについては、仕上げ焼きなましで急冷されると抵抗値が数%小さくなるという点にも留意して熱処理する必要があります。



V. 磁性用語

磁性体の種類と分類、基礎用語

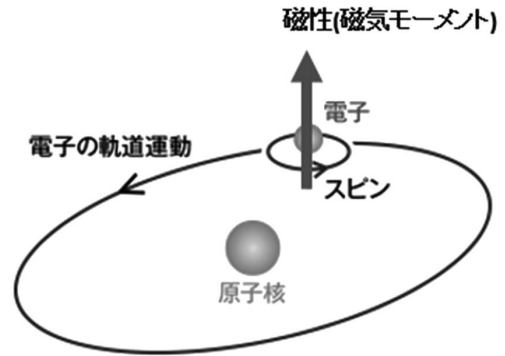
大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 さいとう あき ひこ
軟磁性材料研究室 主席研究員 工学博士 齋藤 章彦

初めに磁性体の種類と分類を図1に示し、磁性体を理解するために(1)強磁性が現れるメカニズムと(2)強磁性材料(軟質磁性材料、硬質磁性材料等)と(3)非磁性材料(反磁性材料等)について述べます。

(1) 強磁性が現れるメカニズム

すべての物質は原子の集まりです。原子は一つの原子核と電子からできています。太陽の周りを地球が自転しながら回るように、電子も自転(スピン)しながら核の周りを決まった軌道を回ります。電子の自転は円電流を作ると考えられ、磁石と同等ですので、電子は小さな磁石であり、ボア磁石と呼ばれます。電子のうち、特定の軌道にある電子だけが同じ向きに並ぶ性質があるため、原子磁石になります。このような特殊な電子を持つのは、遷移元素と呼ばれ、鉄、コバルト、ニッケルの鉄属遷移元素とネオジウム等の希土類遷移元

素です。また、この原子磁石が近くの原子磁石と同じ向きに並ぼうとします。これを交換相互作用と呼び(図2)³⁾、特定の原子間距離や結晶構造や非晶質のとき出現します。原子磁石になれる特別



電子の自転と軌道運動によりコントロールされる磁気モーメント

図 2 電子の自転と軌道運動による磁気モーメント

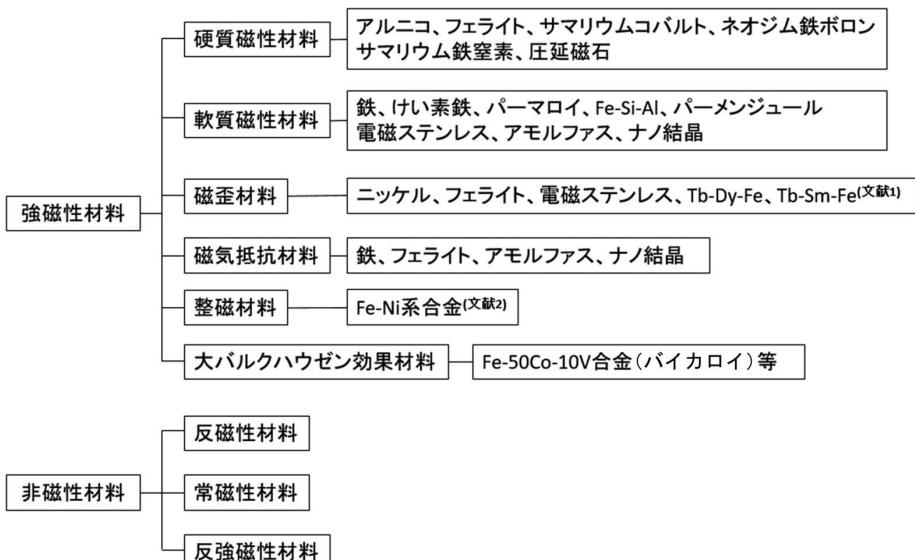


図 1 磁性体の種類と分類

な元素を含み、交換相互作用が働く物質が強磁性となります。原子磁石を含んでいても交換相互作用がなければ、強磁性体にはなりえない。現在の磁性材料は、すべて人工的に作ったものです。

(2) 強磁性材料

隣り合うスピンの同じ向きに並び、全体で大きな磁気モーメントを有する物質です。硬質磁性材料、軟質磁性材料、磁歪材料、磁気抵抗材料、整磁材料、大バルクハウゼン効果材料等があげられます。軟磁性材料とは磁石にくっつき、外部の磁界を取り除くと速やかに磁気がなくなり、元の状態に戻る材料です。硬磁性材料とはいわゆる磁石のことで、保磁力が大きく永久磁石として用いられる。磁歪材料とは磁界をかけることによって変形する材料です。磁気抵抗材料とは磁界をかけることによって電気抵抗が変化する材料です。整磁材料(合金)とは、主に、Fe-Ni系でNi量によりキュリー温度が変化する性質を利用した材料です。大バルクハウゼン効果材料とは、外部磁界を0.01Hz~10kHzで変動させると、電圧パルスが発生させる材料です。

(3) 非磁性材料

強磁性でない物質で、反磁性材料、常磁性材料、反強磁性材料等があげられます。反磁性材料とは、磁場をかけた時、磁場とは逆の方向に物質が磁化され、磁場とその勾配の積に比例する力が反対方向に生ずる材料です。常磁性材料とは、磁場がない状態では磁化を持っておらず、磁場を印加した場合に弱く磁化する材料です。反強磁性材料とは、隣り合うスピンの反対向きに並び、全体では磁気モーメントを持たない状態の材料です。

◇ 基礎用語

ここでは、枚数上、主な基礎用語のみの説明としますが、詳しく知りたい方は、大同特殊鋼のホームページの軟磁性材料の用語集⁴⁾や中部エレクトロニクス振興会のEMC用語辞典の第3章⁵⁾を参照されたい。

(1) 磁力線

磁石の上に紙をのせて鉄粉をふりかけると、鉄粉がN極とS極を結ぶたくさんの綺麗な曲線模様を描く、この曲線を磁力線と呼ばれます。

(2) 磁束 ϕ

磁力線の束を磁束と呼び、SI単位は [Wb] (ウ

エーバ) です。

(3) 磁束密度B

単位面積を貫く磁束量を磁束密度と呼び、SI単位は [T] (テスラ) です。

(4) 磁界H

磁性体に印加する磁界の強さであり、SI単位は [A/m] (アンペア毎メートル) です。

(5) 透磁率 μ

磁性体の磁化のしやすさを表し、SI単位は [H/m] (ヘンリー毎メートル) です。真空の透磁率を μ_0 と表し、値は、 $4\pi \times 10^{-7}$ です。透磁率 μ と磁束密度Bと磁界Hには、 $\mu = B/H$ の関係があります。比透磁率 $\mu_r (= \mu/\mu_0)$ は、透磁率 μ を真空の透磁率 μ_0 で割ったもので、無名数です。これまでは直流の磁界での透磁率 μ の話ですが、交流磁界では、複素比透磁率 μ_r と呼び、 $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ の関係です。この μ_r' は、複素比透磁率の実部を表し、 μ_r'' は、複素比透磁率の虚部を表し、これは、交流磁界を磁性体に印加すると、磁界Hに対して、磁化の遅れが生じるため、便宜上、交流磁界Hと同位相成分 μ_r' と90度遅れた位相成分 μ_r'' に分けて表します。磁気損失は、 μ_r'' からも起因します。

(6) ヒステリシス曲線 (B-H曲線)

外部磁界を印加したとき、磁性体が磁化していく様子を示す曲線 (図3 ヒステリシス曲線) です。

試料にかける磁界Hを初め0からHm (最大磁界) まで増し、次にHmから0へと戻し、更に、0から-Hmへ、-Hmから0へ、0から+Hmへと変化させたときに、試料の磁束密度Bの変化を描いたグラフです。横軸に磁界H [A/m]、縦軸に磁束密度B [T] をとります。同じ値の磁界Hに対して、行きと帰りでは違った磁束密度Bを示し、履歴現象ですから、履歴曲線 (ヒステリシス曲線) と呼びます。

(7) 飽和磁束密度Bs

最大磁界が図中a点 (=Hm) 以上になると、ヒステリシス曲線の形は変わらなくなります。磁性体の磁化が飽和に達したのです。あとは $\mu_0 H$ の直線的増加分が加わるだけです。最大磁界Hmに対して最大磁束密度Bmを用いるのが正しいが、便宜的に飽和磁化に達したときの磁束密度を飽和磁束密度Bsと呼びます。

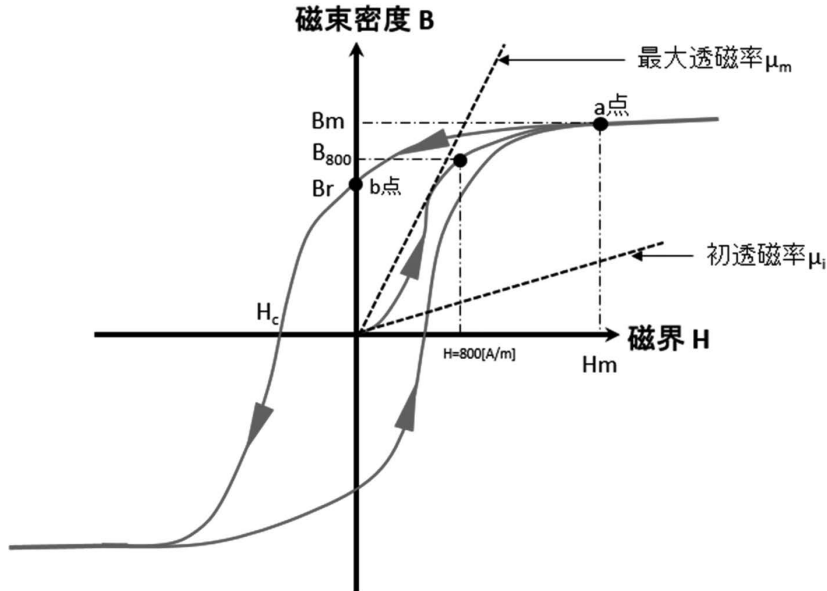


図 3 ヒステリス曲線

(8) 残留磁束密度 B_r

図3ヒステリス曲線で、磁界を0からa点 (H_m) まで印加し、次に磁界を0まで減らしても磁束密度 B の値は0に戻らず、b点にずれてしまう。b点では、外部磁界がないのに、磁束密度が残っているという意味で、残留磁束密度 B_r と呼んでいます。

(9) 磁気損失

磁性体に交流磁界を印加したとき、エネルギー損失が生じます。磁気損失と呼ばれ、ヒステリス損失、うず電流損失、残留損失（磁壁移動の緩和と共鳴、磁区回転の共鳴（自然共鳴）、磁気余効の共鳴、寸法共鳴等）が挙げられます。図4に磁気損失の概念図を示します。

(10) うず電流損失

磁性体を交流で磁化すると、その周波数の磁束変化が起こり、起電力 $e_k = -\frac{\partial B}{\partial t}$ が電磁誘導によって発生します。金属磁性体（良導体）では、起電力 e_k によって、電流 i が流れ、ジュール熱となって電力 $W = ie_k$ を消費します。また、磁性体の大きさ δ に比べて、 $\delta < s$ （表皮深さ）なら、うず電流損失 W_e は次式となります。

$$W_e = \frac{\pi^2 \delta^2 B^2 f}{C \rho} \text{ [W/m}^2\text{]} \dots \text{式 (1)}$$

磁気損失

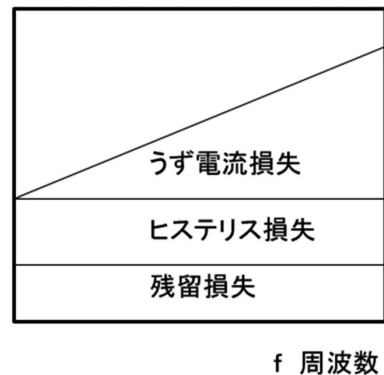


図 4 金属軟質磁性材料の磁気損失の周波数特性（概念図）

ここで、 δ [m] は磁性体の大きさ、 B [T] は磁性体の磁束密度、 f [Hz] は周波数、 ρ [Ω m] は磁性体の体積抵抗率（電気抵抗）、 C は磁性体の形状によって次式で決まります。

- 無限に広い板 δ [m] は板厚さ $C = 6$
- 無限に長い円棒 δ [m] は直径 $C = 16$
- 球 δ [m] は直径 $C = 20$

(11) 表皮深さ（スキンドープス）

電磁波（印加交流磁界）は磁性体に入ると減衰するが、その電磁波が磁性体表面の $1/e$ に弱まるまでに入り込む距離 s （板厚さ）を表皮深さ、侵入深さ、スキンドープスと呼んでいます。

(12) 交流磁界と磁性体中の磁界H/H₀

板形状の厚さは δ [m]として、幅方向と長さ方向の長さを無限遠と仮定すると、マクセルの方程式から板厚の中心から厚さ方向に x の位置の磁界Hと外部磁界H₀との関係は次式です⁶⁾。ここで、 μ は

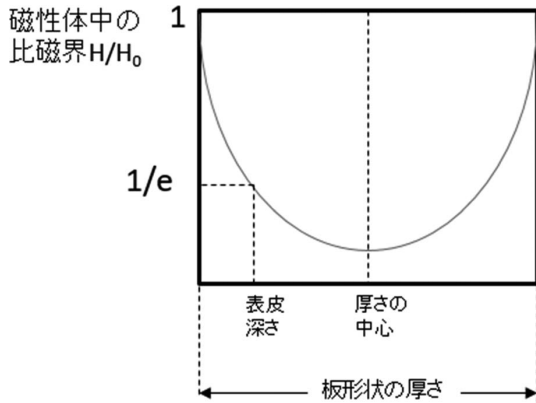


図 5 磁性体中の磁界H/H₀と板形状の厚さ (概念図)

磁性体の透磁率[H/m]、 f は周波数[Hz]、 ρ は磁性体の体積抵抗率[Ω m]です。磁性体中の磁界H/H₀と板形状の厚さ(概念図)を図5に示す。

$$\frac{H}{H_0} = \left[\frac{\cosh \frac{2\theta x}{\delta} + \cos \frac{2\theta x}{\delta}}{\cosh \theta + \cos \theta} \right]^{1/2} \dots \text{式 (2)}$$

$$\theta = 2\pi\delta \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} \dots \text{式 (3)}$$

参考文献

- 1) 特開平01-246342
- 2) 加藤哲男：電気製鋼：pp. 277-286：(1964)
- 3) 太田恵造：磁性材料選択のポイント：pp. 18-19：(1989)
- 4) <https://www.daido.co.jp/products/smm/glossary/index.html> (記述：齋藤章彦)
- 5) 中部エレクトロニクス振興会：EMC用語辞典：第3章(担当：齋藤章彦) (2010)
- 6) R.M.Bozorth：Ferromagnetism：pp. 769-770 (1951)

VI. 硬質磁性材料

1. 希土類磁石

大同特殊鋼(株) 日立敬子
技術開発研究所 粉末技術研究室

希土類磁石は、希土類元素と鉄属元素（鉄、コバルト）、少量の添加元素から構成される金属間化合物で、現在量産されているのは、Sm-Co磁石（サマリウムコバルト磁石）、Nd-Fe-B磁石（ネオジム磁石）、Sm-Fe-N磁石（サマリウム鉄窒素磁石）の3種類である。磁石材料として高い残留磁束密度（磁力）と保磁力（耐熱性、耐反磁界性に相当する指標）を得るためには、磁石相の固有磁気特性だけでなく製造方法に起因する材料の組織制御も重要となる。磁力は磁石相の密度が高く、磁石材料を構成する結晶粒の方位（SN方向）が揃っている組織ほど強力になる。一方で保磁力は微細組織ほど優位であることが経験的にわかっている。

図1に、代表的な永久磁石の最大エネルギー積（磁力に相当）と保磁力を示す。図の右上ほど高磁気特性となる。各磁石材料は製造方法により、焼結磁石、熱間加工磁石、ボンド磁石に分類される。焼結磁石と熱間加工磁石はほぼ真密度で磁石相の結晶方向も揃っているため高磁力を示す。一方で

ボンド磁石は磁石原料粉と樹脂を混合しており、磁石相の結晶方位をそろえた製品（異方性）とランダムの製品（等方性）が存在する。

世界初の希土類磁石は、1967年に発明されたSm-Co磁石である¹⁾。Sm-Co磁石は耐食性と残留磁束密度の温度安定性に優れているため、磁力の温度安定性を要する磁気センサーや音響機器などの精密機器に使用されている。

その後、1982年に佐川ら²⁾とCroatら³⁾によりそれぞれ独立に発明されたのが、ネオジム磁石である。今でも世界最強の磁気特性を示している。佐川らの発明したネオジム焼結磁石は、磁気特性と工業生産性の高さから高特性磁石の主流となっている。一方、Croatらが発明した急冷薄帯は、主にボンド磁石の原料として使用されている他、熱間加工磁石⁴⁾の原料としても使用されている。ネオジム磁石は高出力化が必要な電動車駆動モーターへの使用量が急増している。

次に発明されたのはSm-Fe-N磁石^{5)、6)}である。優れた固有磁気特性を有するが、600℃以上の加熱により磁石相が分解されてしまうため高密度化が難しく、ボンド磁石として量産されている。耐食性、温度安定性に優れているため、水中や高湿雰囲気で使用されるモーターに適用されている。

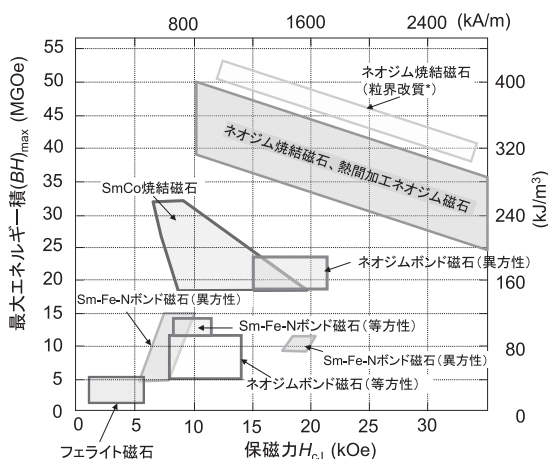


図1 代表的永久磁石の特性マップ
*粒界改質：保磁力向上のための処理法⁷⁾

参考文献

- 1) G. Hoffer and K. J. Strnat, IEEE Trans. Mag., MAG-2, 487 (1966)
- 2) M. Sagawa, et al, J. Appl. Phys., 55, 2083 (1984)
- 3) J. J. Croat, et al, Appl. Phys. Lett., 44, 148 (1984)
- 4) R. W. Lee, Appl. Phys. Lett., 46 (8), 790 (1985)
- 5) 今井秀秋、入山恭彦、特許公報、特許第2703281号
- 6) J. M. D. Coey and H. Sun, J. Magn. Magn. Mater. 87, 251 (1990)
- 7) 中村 元、まてりあ、50巻9号、374 (2011)

2. ボンド磁石

愛知製鋼㈱ 開発本部 未来創生開発部 やま ざき まさ お
EVモーター開発室 チーム長 山崎理央

◇ ボンド磁石の特徴

永久磁石は、焼結磁石とボンド磁石に大別される。ボンド磁石は、図1に示すように磁石粉末と樹脂から構成されており、磁石粉末を樹脂と混ぜて固化成形することで得ることができる。ボンド磁石は、非磁性の樹脂を含んでいるため焼結磁石に比べて磁力が劣る。その一方で、形状自由度と寸法精度が高くロータに適した複雑な形状の磁石を切削加工せずに作ることができ、さらには、樹脂の特性を活かすことでロータへの接着が不要であったり、渦電流損失による発熱が小さくモータの高速回転化がし易いなど利点も多い。このため、ボンド磁石はマグネットシートや家電、自動車の補機モータ、最近ではドローン¹⁾など様々な用途に使われている。

◇ ボンド磁石の製造方法

ボンド磁石の成形方法は、圧縮成形法と射出成形法に分類される。圧縮成形法の樹脂には、エポキシなどの熱硬化性の樹脂が用いられる。圧縮成形法は射出成形法よりも高い圧力で成形することができ、また、用いる樹脂量も15vol%程度と少ないため、比較的高い磁力の磁石を得ることができる。射出成形法の樹脂には、ナイロン樹脂 (PA)

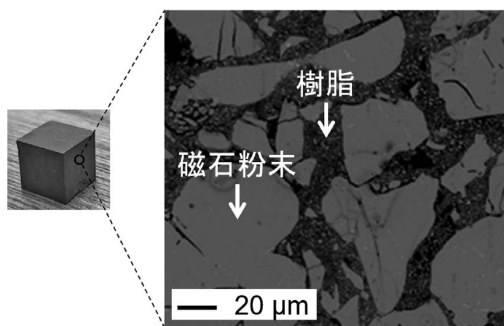


図1 ボンド磁石の断面の組織

やポリフェニレンサルファイド樹脂 (PPS) などの熱可塑性樹脂が用いられる。射出成形法は樹脂量が30~50vol%と多いため、圧縮成形法と比べて磁力が低い、その一方で、圧縮成形法よりもさらに形状自由度が高く、3次元の磁石形状を作ったり、ロータに直接磁石を成形 (一体成形) したりすることが可能となる。このため、高磁力の磁石を得たい場合には圧縮成形法が、複雑な形状の磁石を得たい場合には射出成形法が適している。磁石粉末は、希土類系とフェライト系がある。希土類系にはNd-Fe-B系とSm-Fe-N系が主に用いられる。希土類系はフェライト系よりも高磁力で、およそ3倍の差がある。一方で、高価な希土類を20~30wt%含んでいるため、フェライト系よりも価格が高くなる。このため、高磁力の磁石を得たい場合には希土類系が、磁力よりも価格の安さを求める場合にはフェライト系が適している。このように、ボンド磁石は成形方法と磁石粉末を自由に選択することができるが、それぞれ利点と不利点がある。そのため、どの方法を選択するかは、用途に応じて使い分ける必要がある。

◇ ボンド磁石の今後の展望

今後、世界人口の増加に伴い、永久磁石においては資源の有効活用やモータの省エネルギー化が課題となっている。これを解決するには、ボンド磁石を用いたモータの設計の最適化が有効だと考えられる。ボンド磁石は形状自由度が高く、渦電流損失も小さいため、設計次第ではモータの更なる小型・高効率化が可能となる。これによって、使用する磁石量や消費電力の抑制が期待できる。このため、ボンド磁石の需要は今後さらに高まっていくものと考えられる。

参考文献

1) 愛知製鋼株式会社ホームページ: <https://www.aichi-steel.co.jp/>

3. フェライト磁石

(株) プロテリアル たに おく やす あき
磁性材料事業部 磁性材料研究部 谷 奥 泰 明

フェライト磁石は酸化第二鉄 (Fe_2O_3) を主成分とする複合酸化物である。1933年に加藤与五郎、武井武博士により立方晶のスピネル型フェライトであるコバルト・鉄酸化物 (OP磁石) が永久磁石として優れた特性を有することが初めて発表された¹⁾。OP磁石はコバルトスピネルフェライト (CoFe_2O_4) とマグネタイト (Fe_3O_4) との固溶体で、その組成式は $\text{Co}_{0.75}\text{Fe}_{2.25}\text{O}_4$ で表される²⁾。しかしながらOP磁石はCoを含み高価であること、機械的強度があまりよくないことなどから、永久磁石材料としてはあまり大きな工業用途は見いだせなかったという³⁾。

今日、世界各国で量産されているフェライト磁石は、1952年Philips社のWentらにより詳細な研究発表がなされた⁴⁾ 六方晶系のマグネトプランバイト型 (M型) 構造を有するバリウム (Ba) フェライトおよび1963年Westinghouse社のCocharadtらが発表したストロンチウム (Sr) フェライトである⁵⁾。これらを総称してM型フェライトと呼称される。このマグネトプランバイト型 (M型) 構造とは、天然鉱物のマグネトプランバイト (磁鉛鉱) と同じ結晶構造で、六方晶系 (空間群: $\text{P6}_3/\text{mmc}$) に属する。また、これらM型フェライトの組成式は一般的に $\text{AO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Aの元素がSrやBaなど) で表される。磁石から取り出せるエネルギーの大きさは、磁束密度 B と磁場 H に比例し、これら積の極大値を最大エネルギー積 ($(BH)_{\text{max}}$) と呼ぶ。M型フェライト磁石は最大エネルギー積がNd-Fe-B系磁石を代表とする希土類磁石のそれと比較すると10%程度と小さいが、酸化鉄を主成分とするこ

とから化学的に安定であり、コストパフォーマンスに優れるという利点が挙げられる。

ここで、M型フェライトの磁石性能向上の取り組みをいくつか紹介する。M型Srフェライトの組成式は $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ と表されるが、Feの一部をCoで、Srの一部をLaで複合置換したSr-La-Co系M型フェライトにおいて磁石特性が向上することが報告された^{6), 7)}。さらにフェライト磁石の組成に関する改良が進み、Srの代わりに同じアルカリ土類金属元素であるCaを用いたCa-La-Co系フェライトが小林らによって開発された⁸⁾。このCa-La-Co系フェライト磁石の特徴を簡単に述べる。1つ目は、磁石特性を向上させるCoをSr-La-Co系M型フェライトに比べて多く置換できていることである。2つ目は、Caが同じアルカリ土類金属元素であるSrとは別のサイトを置換していることである。このことが磁石特性向上の一因と考えられている⁹⁾。フェライト磁石の更なる高性能化に向けて、今後は微細構造に着目した技術開発の推進が必要となるだろう。

参考文献

- 1) 加藤与五郎ら：電気学会雑誌、53、408-412 (1933)
- 2) 中村弘ら：粉体および粉末冶金、5 (3) (1958)
- 3) 岩間義郎ら：硬質磁性材料 (磁気工学講座3) (1976)
- 4) J. J. Went, et al., Philips Tech. Rev., 13, 194-208 (1952)
- 5) A. Cocharadt, J. Appl. Phys., 34, 1273-1274 (1963)
- 6) K. Iida, et al., J. Magn. Soc. Japan, 23, p. 1097 (1999)
- 7) 緒方安伸ら：粉体および粉末冶金、50 (8)、636-641 (2003)
- 8) 小林義徳ら：粉体および粉末冶金、55 (7)、541-546 (2008)
- 9) 小林義徳：大阪大学大学院工学研究科 博士学位論文 (2016)

VII. 軟質磁性材料

1. 電磁鋼板

日本製鉄(株) 薄板事業部 佐藤 浩明
電磁鋼板技術部 電磁鋼板管理室長

電磁鋼板は鉄の磁気特性を利用した薄鋼板であり、変圧器やモータ・発電機の鉄心のほとんどに使用され、見えないところで我々の社会生活を支える重要な磁性材料です。

電磁鋼板には方向性電磁鋼板 (Grain-Oriented electrical steel, GO) と無方向性電磁鋼板 (Non-Oriented electrical steel, NO) の二種類があり、主にGOは変圧器の鉄心に、NOはモータ・発電機の鉄心に使用されています。近年ではハイブリッドカーや電気自動車のモータにも採用され、自動車の性能を左右する重要な材料となっています。

電磁鋼板に要求される磁気特性には大きく分けて二つあります。一つは磁気エネルギーを閉じ込める性能である磁束密度 (正確には、磁場に対する敏感さである透磁率) が高いことです。もう一つは電気エネルギーと磁気エネルギーの変換時に熱として失われる損失 (鉄損) が小さいことです。電磁鋼板は、これら二つの特性を高めるための造り込みを施しています。

磁束密度を高める造り込みとは、結晶方位の制御です。鉄は原子一つ一つの持つ磁力 (磁気モーメント) が強くそれぞれが平行に揃って自発的に磁化を形成する性質を持つ “強磁性体” です。この磁化が結晶中でどの方向を向いているかによってエネルギーが変化するため、磁化されやすさが結晶の方向に依存する磁気異方性が発現します。鉄の結晶構造では $\langle 100 \rangle$ 軸が最も磁化されやすい方向 (磁化容易軸) です。

GOは面内に $\langle 100 \rangle$ 軸を含む $\{110\}$ 面を $\langle 100 \rangle$ 軸が圧延方向から数度以内に収まるように揃えており、圧延方向の磁束密度を大幅に高めています。一方、NOは面内に $\langle 100 \rangle$ 軸を2方向含む $\{100\}$ 面を増やすほか、面内に $\langle 100 \rangle$ 軸を含まない $\{111\}$ 面を低減することで磁束密度を高めています (図1)。

もう一方の重要な磁気特性である鉄損は、磁化

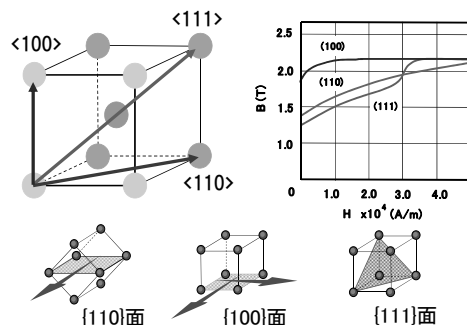


図 1 鉄の結晶構造と磁気異方性

変化で誘導される電流 (渦電流) による発熱 (渦電流損) が主要因の一つです。渦電流を抑制するために、電磁鋼板では電気抵抗を高める合金元素を積極的に添加しており、電気抵抗増加の効果が大きく、かつ安価な珪素 (Si) が最もよく用いられています。鉄に珪素を加えると磁気特性が良くなることは1900年に英国人Hadfieldらによって見出され、かつて電磁鋼板は珪素鋼板 (Silicon steel) とも呼ばれておりました。また、渦電流の抑制には、板厚の薄手化も有効です。積工数は増加してしましますが、板厚の薄い電磁鋼板を用いることで、鉄心の損失を低減することができます。

電磁鋼板の板厚が一般の鉄鋼材料と比較して薄いのはこのためです。このとき、積層した鋼板間で渦電流が流れることのないよう、電磁鋼板の表面には絶縁被膜が塗布されています。これら渦電流を抑制する手法のほか、電磁鋼板が磁化されるのを妨げる結晶粒界、不純物、歪み等の低減や、 $\langle 100 \rangle$ 軸を鋼板面内で増加させることも鉄損低減には有効です。電磁鋼板はこれらを総合的に制御することで、鉄の磁気特性を最大限引き出しています。

電磁鋼板は電力社会の省エネルギー化を支える基幹材料として、今後とも高性能化を進め、我々の社会生活を支え続けます。

2. 電磁ステンレス鋼

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 さいとう あき ひこ
軟磁性材料研究室 主席研究員 工学博士 齋藤 章彦

一般に「ステンレス鋼」と聞くと、磁石を近づけても、くっつかない非磁性材料として知られていますが、電磁ステンレス鋼は、弱い磁石でもくっついて錆びない特殊な材料です。

1959年頃、アメリカ雑誌に低炭素で13%Crを含有するステンレス鋼が記載されました¹⁾。1970年代に入ると、従来、ガソリン燃料（以下燃料）をエンジンシリンダー内へキャブレターで空気と混合挿入噴射し爆発させていたが燃料をかなりの割合で無駄にしていた。そこで、電磁弁（電子制御式噴射弁インジェクター、以下インジェクター）の開閉で燃料をエンジンシリンダー内へ噴射し無駄な燃料を低減した。インジェクター構造を図1²⁾に示す。現在では、インジェクターの開閉を担うコア、磁気回路を形成するハウジング、固定子側ではばねに反発してコアを電磁力で吸引駆動するコネクタに電磁ステンレス鋼が採用され、燃料ボ

ンプ電磁弁にも使用されます。他に高硬度電磁ステンレス鋼もあります。ここでは主な用途であるインジェクターと電磁ステンレス鋼について記述します。

◇ 快削性

コネクタは冷間鍛造成型後、燃料が通過する細長い穴を開けます。快削元素を電磁ステンレス鋼に添加することで穴あけを可能にした「快削電磁ステンレス鋼」が誕生しました³⁾。

◇ インジェクターに求められる電磁弁開閉の応答性向上

当初、電磁ステンレス鋼はコネクタのみに使用され、コアは高透磁率パーマロイPB、ハウジングは高磁束密度の電磁軟鉄が使用された。1987年頃から、インジェクターは、キャブレターに替わ

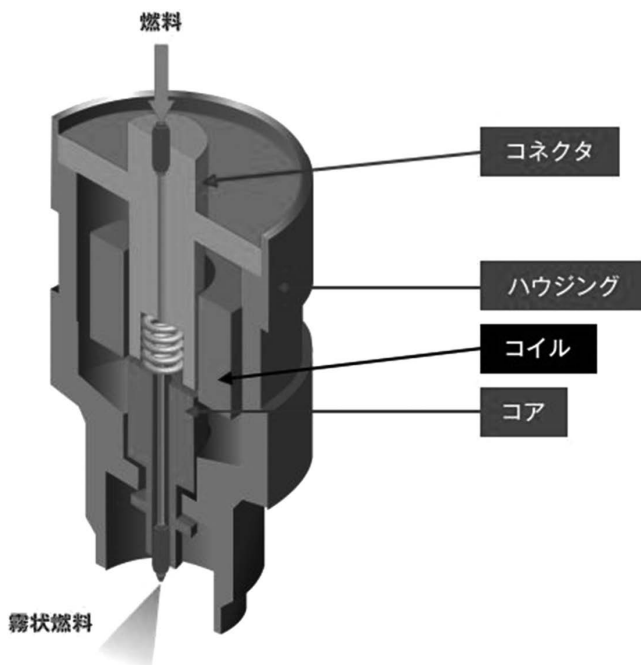


図 1 ガソリン自動車の電子制御式燃料噴射弁（インジェクター）

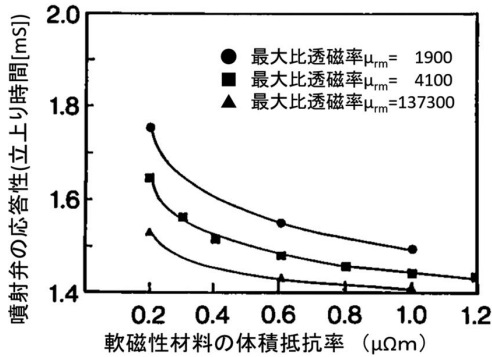


図 2 軟質磁性材料の体積抵抗率と比透磁率 μ_{rm} の噴射弁の応答性(立上り時間)に及ぼす影響

り使用が拡大し、さらなる燃費向上に対応するため、高精度噴射や噴射弁の開閉速度向上が求められ、大同特殊鋼は動磁場解析を行い材料の電磁気特性、比透磁率、保磁力、飽和磁束密度、体積抵抗率のうち、電磁弁の応答性に効果がある特性を定量的に解析した結果(図2)⁴⁾、比透磁率や保磁力はある程度あればよく、応答性に一番効くのは体積抵抗率である事を見出し、従来材Fe-13Cr-0.8Si-0.3Alに対してSiの代わりに少量Alを添加することでFe-13Cr-0.7Al新電磁ステンレス鋼を開発し、ハウジングやコアにも採用されインジェクターの性能(電磁弁開閉応答性)を向上させた。

◇ 耐食性

バイオや粗悪ガソリン等の粗悪燃料にも錆びな

い耐食性をもつ電磁ステンレス鋼は、ハウジング、コアにも使用が拡大した。寒冷地やアメリカ等では道路凍結防止のために塩をまいた。ハウジングは道路からの塩の影響を受け、塩水噴霧にも耐える耐食性が必要で、当初採用された電磁軟鉄は、成形後、耐食性向上のためメッキ塗装を行いコスト高に繋がっていた。大同特殊鋼の新電磁ステンレス鋼は、材料表面にアルミナや酸化クロム層が形成され耐食性が向上し、ハウジングにも採用された⁴⁾。

◇ 冷間鍛造性

従来、ハウジング、コネクター、コアは切削加工した。材料歩留は悪い。部品メーカーは歩留向上・コスト低廉化を目指し素材を100%使う冷間鍛造工程を取り入れ、電磁軟鉄並の冷間鍛造性と電磁軟鉄の3.5倍の体積抵抗率と耐食性と軟磁気特性を求めた。大同特殊鋼の新電磁ステンレス鋼は、電磁軟鉄並の冷間鍛造性や高耐食性やCrとAlの複合添加効果で電磁軟鉄の3.5倍の体積抵抗率値を達成しました。

参考文献

- 1) 加藤哲男：折々の葉 pp. 115-116 (2007)
- 2) <https://www.daido.co.jp/products/smm/what/activity.html>
- 3) 加藤哲男：電気製鋼 Vol 42, No. 1, pp. 41-54 (1971)
- 4) 齋藤章彦：電気製鋼 Vol 61, No. 3, pp. 183-192 (1990)

3. 電磁軟鉄、パーマロイ

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 さいとうあきひこ
 軟磁性材料研究室 主席研究員 工学博士 齋藤章彦

◇ 電磁軟鉄

電磁軟鉄はJIS-C2504で定義され、主な用途はリレー、電磁石、磁気クラッチ、ブレーキ、発電機、モータ等の鉄芯、継鉄、磁気シールド等です。直流磁気特性によって分類され、SUY-0 (保磁力 $H_c < 60$ [A/m])、SUY-1 ($H_c < 80$ [A/m])、SUY-2 ($H_c < 120$ [A/m])、SUY-3 ($H_c < 240$ [A/m]) で、いずれも印加磁界4,000 [A/m] 時の磁束密度 $B \geq 1.60$ [T] です。最近ではxEVに使用されるリレー鉄芯として使用されています。磁気特性 (保磁力 H_c がいくつ以下) を品質保証しています。これらの保障値に従って、顧客はどの電磁軟鉄を使用するかを判断します。

◇ 電磁軟鉄の磁気焼鈍

電磁軟鉄は、主に、部品成型後、磁気特性を確保するために焼鈍処理を行い、真空中で850℃×2時間 (保持)→炉冷却です。化学成分は、 $C \leq 0.030$ 、 $Si \leq 0.20$ 、 $Mn \leq 0.50$ 、 $P \leq 0.030$ 、 $S \leq 0.030$ で、不純物の低減により軟磁気特性を担保しています¹⁾。

◇ パーマロイ

パーマロイはFe-Ni系の軟質磁性材料です。JIS-C2531で定義され、Ni成分で、41~51%をPB、70~85%をPC、35~40%をPDと分類されます。パーマロイPBの用途は、大電流/高感度用磁気センサー、磁気シールド、xEV用電流センサー、自動車電動パワーステアリング用トルクセンサ、変流器、ステッピングモータ等です。パーマロイPCの用途は、微弱磁界/超高感度用磁気センサー、磁気シールド、xEV用の充電ケーブル内の漏電遮断器用ZCTコア、xEV用電流センサー、自動車電動パワーステアリング用トルクセンサ、変流器、ステッピングモータ等です。大同特殊鋼では、Fe-41%NiのMENPB-L、Fe-45%NiのMENPB、Fe-48%NiのMENPB-S、Fe-81%Ni-5%MoのMENPC-1、Fe-78%Ni-4.5%Mo-3.5%CuのMENPC-2をラインアップしています。各種パーマロイ系軟磁性材料の位置付けを図1に示す。

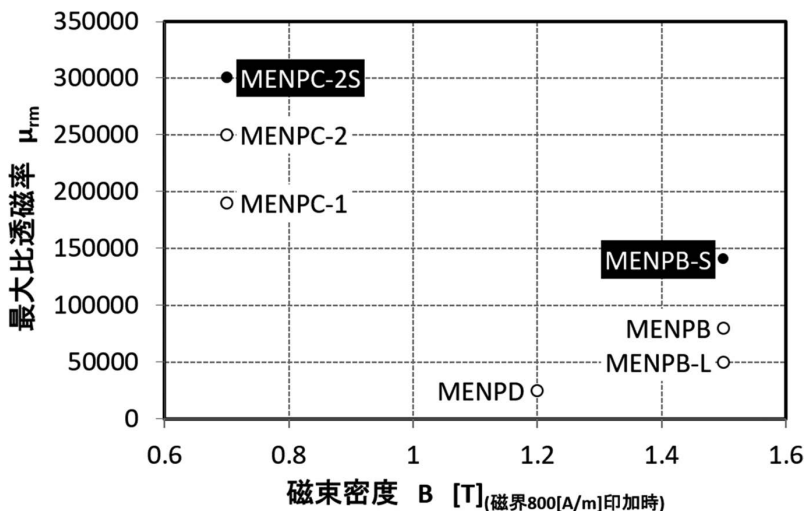


図 1 最大比透磁率 μ_m と磁束密度B

◇ パーマロイPC系材料の最適成分設計例
 ー 超高透磁率材MENPC-2S

パーマロイPC系材料では、磁性成分（Fe、Ni）以外の成分、Cu、Mo等も磁気特性に影響があります。磁氣的Ni原子数とFe原子数の最適な比が存在

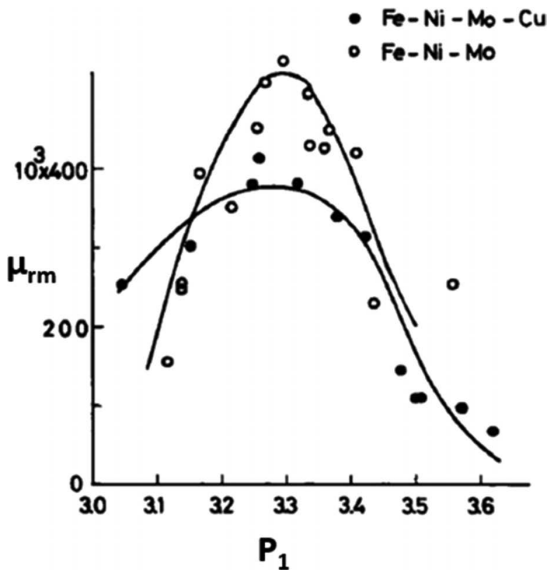


図 2 最大比透磁率 μ_{rm} とP1値

在します。Fe、Ni以外の添加元素・不純物元素の価電子により3d空孔が埋められ、磁気モーメントが失われます。Fe、Ni元素やCu、Mo他の添加元素及び不純物元素の成分値を（1）式で理論計算し、P₁値を3.31にすると最大比透磁率 μ_{rm} の最高値が得られます。パーマロイMENPC-2Sは、MENPC-2から微量添加元素の成分バランスと製造プロセスを最適化し超高透磁率化を達成した材料です^{2)~4)}。

$$P_1 \cong \text{MagneticNi} / \text{Fe}$$

$$= \left\{ C_{Ni} - \frac{1}{3} \sum_i (5Z_i - 3) C_i \right\} / C_{Fe} \dots\dots (1)$$

ここで、C_{Ni} : Ni at%、C_{Fe} : Fe at%

C_i : 添加元素iのat%

Z_i : 添加元素iの価電子数（例えばCuではZ_i = 1、MoではZ_i = 6）

参考文献

- 1) 加藤哲男：電気製鋼 Vol 36、No. 3、pp. 107-115 (1965)
- 2) 加藤哲男、高野正吉、矢萩慎一郎：電気製鋼、48 (1977) pp. 265-270
- 3) プレスリリース：https://www.daido.co.jp/about/release/2018/0301_smm.html
- 4) 新聞記事（鉄鋼新聞）：https://this.kijii.is/349395437108806753

4. アモルファス・ナノ結晶合金

(株) プロテリアル おお たくもと き
グローバル技術革新センター 主任研究員 太田 元基

◇ 液体急冷合金

商業的に広く流通しているアモルファス合金もナノ結晶合金も液体急冷法という casting 技術で製造されている。溶融した液体金属を高速で回転する銅合金製のローラーに垂らし、半周ほど密着させた後に剥離して薄帯（リボン）を得る方法である。板厚を0.03mm以下に保てば 10^6 K/s台の高い冷却速度で合金は急冷され、アモルファス状態で製造される。アモルファス状態とは、原子が結晶材料のように規則的な配列をしておらず、ランダムに配置された状態となる。そのため、構造的な異方性が低く、それに伴って磁気的異方性も極めて低い状態となっている。このことで磁化の磁場への追従性が良好となり、鉄心（コア）材料として優れた性質、すなわち低損失・高透磁率を示す。

◇ Fe基アモルファス合金リボン

Feを主原料とし、SiやBを含むアモルファス合金は、幅：約140–210mm、厚み：約0.025mmが

製造されており、リボンを巻取ったスプール状の形態で出荷される。流通しているFe基アモルファス合金の飽和磁束密度 B_s は、常温で1.56–1.63T、保磁力 H_c は1.5–2.0A/mである。この性質により、Fe基アモルファスリボンは、高効率な配電用トランスのコアとして用いられ、省エネルギーに大きく貢献する。ただし、コアの大きさには、材料の飽和磁束密度 B_s が大きく関係しており、電磁鋼板の B_s 、2.0T強程度と比べ、低 B_s であるため50–60Hzの商用周波数で用いる場合はコアの大型化が課題となる。より高い10kHz程度の周波数では、カットコアやブロックコアの形状でインダクターとして用いられる。板厚が0.03mm以下と薄く、加えて電気抵抗率が $1.20–1.38\mu\Omega\cdot m$ と高いため、高電気抵抗により渦電流損失が抑えられ、コア自身の発熱が結晶系のコアよりも低くなる。設計上の動作磁束密度を高く設定することが可能となる。さらに高い100kHz程度の周波数では、渦電流損失をさらに低減させる必要性が生じるため、アモルファスリボンを粉碎してフレーク状にしたコアが

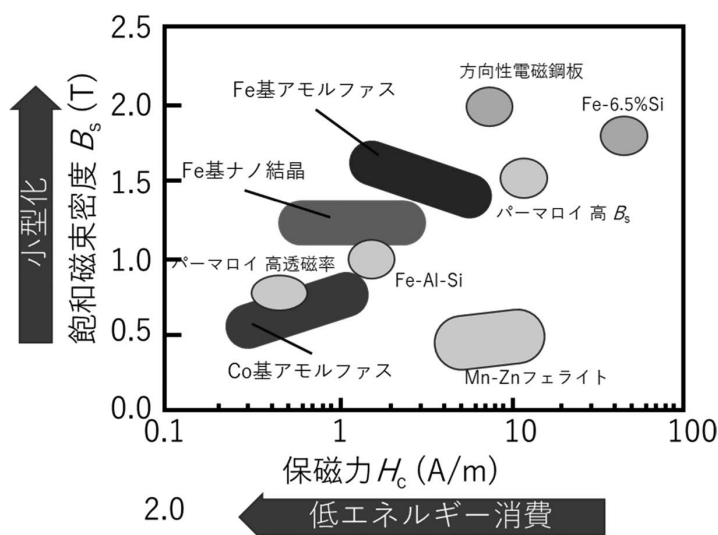


図 1 飽和磁束密度 B_s vs. 保磁力 H_c の軟磁性材料マップ上のFe基アモルファス・ナノ結晶合金リボンのポジショニング

使われる。Fe基アモルファス合金リボンは、飽和磁歪 λ_s が 27×10^{-6} 程度と他の軟磁性材料に比べて高く、磁気特性が応力やひずみの影響を受けやすいため注意が必要である。流通している多くのFe基アモルファスコアは熱処理の工夫等でこれらの影響が最小限になるように調整されている。

◇ Co基アモルファス合金リボン

Co基アモルファス合金リボンの B_s は $0.57 - 0.77\text{T}$ であるが、 λ_s が 0.5×10^{-6} 以下であるため、優れた軟磁気特性を示す。用途は、次に紹介するFe基ナノ結晶リボンと似通ったものになる。

◇ Fe基ナノ結晶リボン

代表的なFe基ナノ結晶リボンは、Fe-Cu-Nb-Si-B系であり、アモルファス状態が得られるように板厚が 0.018mm 程度に鑄造され、その後、熱処理を施すことで、アモルファスの母相中に平均結晶粒径が $10 - 20\text{nm}$ のナノ結晶粒が無数に存在するナノ結晶

組織となる。熱処理の初期段階でCuを主成分としてクラスターが形成され、それを核としてbcc-FeSiが析出し、成長するが、Nbを多く含む残留アモルファス相がbcc-FeSi結晶粒の成長を抑制することでナノ結晶組織が実現されている。この平均結晶粒径は、磁壁幅よりも狭く、各結晶粒の結晶磁気異方性が相殺されて、磁気異方性が極めて低くなり、良好な軟磁気特性を示す。流通している代表的なFe基ナノ結晶合金リボンの B_s は 1.23T で、 λ_s が 1×10^{-6} 以下である。高周波で用いる軟磁性材料は λ_s がゼロ近傍となる材料、例えば、Fe-Ni（パーマロイ）やCo基アモルファス合金、ソフトフェライトなどが多く使われているが、これらと比べ、Fe基ナノ結晶合金リボンは高い B_s を有する。数kHz - 数十kHzでは、高周波トランスとして用いられる。50kHz以上では、コモンモードチョークなどのノイズフィルターとしての用途が増え、数百kHzでは、磁気シールドなどに用いられる。他の高周波用軟磁性材料と比べて、 B_s が高いため、デバイスの小型化に貢献する。

5. 粉末軟磁性材料

三菱製鋼(株) 技術開発センター ひろ かわ しゅう すけ
研 究 第 三 グ ル ー プ 廣 川 脩 祐

まえがき

軟磁性材料のうち、電子機器で用いられる電子部品に対する適用の1つとして粉末形状の軟磁性材料があり、主に加圧成形されてインダクタ等電子部品の磁心として用いられるほか、樹脂とともにペースト状に加工され、電子基板で発生した電磁ノイズを熱に変換するノイズ吸収材として用いられる。本稿では軟磁性粉末について述べる。

◇ 製法

軟磁性粉末の製造法の1つがアトマイズ法である。アトマイズ法とは、るつぽ内で溶解した原料をノズルから鉛直滴下し、高圧の水や不活性ガスを噴霧して溶解原料を液滴化、急冷凝固させ粉末を得る製法である。噴霧させるものによって水アトマイズ法、ガスアトマイズ法と呼ばれている。そのほか、溶解原料を回転するディスクに滴下して粉末化するディスクアトマイズ法や、高速回転水流を搭載したS.W.A.P.法等の製法が用いられている。

◇ 要求される粉末特性

軟磁性粉末の要求特性として粒子の大きさや球形状化、低不純物化が挙げられる。水アトマイズ、ガスアトマイズ両製法と粉末特性の比較を表1に示す。水アトマイズ法はガスアトマイズ法と比べ粉末が異形状化しやすく不純物である含有酸素量が高い一方、微粉末の製造が可能で、製造コストが相対的に低い。ガスアトマイズ法は含有酸素量

が低く真球状の粉末を製造できる。上記の製法によって製造された粉末は粒子径が一定ではなく、その大きさに幅をもつ。この幅を表したものが粒度分布である。粒度分布もまた粉末の重要な物性値であり、軟磁気特性に大きく寄与するが、アトマイズ法を用いた場合製造条件によって粒度分布を制御することが比較的容易であるため、軟磁気特性を制御しやすい。

◇ 要求される軟磁気特性

軟磁性粉末は主に電子部品で用いられることから、インダクタ用途では高磁束密度、低コアロス等が求められる。高磁束密度実現のためには透磁率の高い材料を選択するほか、粉末の充填性を高め単位体積あたりの磁性体量を増やすことが挙げられる。低コアロス実現、特に低渦電流損失のためには、粒子表面に絶縁被膜を形成させ電氣的に絶縁させることで粒子間に発生する渦電流を抑制する手法や、粒子径を小さくし粒子内で発生する渦電流を低減させることが挙げられる。

むすび

当社では最近ガスアトマイズ量産炉を新設し、水アトマイズ、ガスアトマイズの両製法で粉末製造が可能となった。今後のさらなる要求ニーズの高まりに対応し、粉末の特性改善に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 粉体および粉末冶金、48、8 (2001)、P697
- 2) 神戸製鋼技報、65、2 (2015)、P12

表 1 アトマイズ製法と粉末特性の比較

製法	形状	含有酸素量	製造コスト	当社製品例
水アトマイズ法	異形状	高	安	Fe-Si-Cr、Fe-Ni
ガスアトマイズ法	球形状	低	高	Fe-Si-Al

Ⅷ. 非磁性

1. 非磁性鋼

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 耐食・耐熱材料研究室 主任研究員 たか はし ま り
高橋 茉莉

まえがき

鉄鋼材料は磁性を持つものが多いが、一部の鉄鋼材料では磁性を持たない非磁性材と呼ばれる材料がある。非磁性を示す鉄鋼材料としてはSUS304に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼があるが、NiやCrを多量に含むため高価であり、本稿では、より安価な元素であるMnやCで構成された非磁性鋼として高マンガン鋼について紹介する。

◇ 高マンガン鋼の特性

鉄中に大量のMnとCを添加して室温でオーステナイト相を安定化させて非磁性とし、耐摩耗性や靱性を高めた材料である。代表的な基本組成はFe-11~13Mn-0.9~1.2C (mass%) であり、開発者の名前をとってハッドフィールド鋼とも呼ばれている。さらに、耐摩耗性の向上や衝撃特性の改善を狙った材料¹⁾や課題の一つである被削性を改善した材料²⁾も開発されている。表1に代表的な高マンガン鋼 (SCMnH11) の引張特性をSUS304との比較で示す。高マンガン鋼はSUS304より強度が高く、延性も同程度と十分高い。高マンガン鋼は優れた靱性と高い加工硬化能を活かして、破碎機や鉄道の交差レールなど大きな衝撃を受ける用途での耐摩耗用鋼として使用されている。

◇ 高マンガン鋼の製造方法

高マンガン鋼は圧延加工でも製造可能だが、SUS304などと比べて熱間加工性が悪く、また加工硬化性が大きいことから切削成形時の負荷が大きく、被削性も悪い。そのため、実製品に近い形状まで製造可能な鍛造と呼ばれる製法で製造されることが多い。実際、JIS規格においても圧延鋼板としての規格は制定されていないが、鍛鋼品としての規格が制定されている (JIS G5131)。

高マンガン鋼は鍛造まま状態や圧延加工後は炭化物が存在するため脆く、靱性を得るために1050~1100℃の温度で水割処理と呼ばれる炭化物を母相中に固溶させる処理を実施してオーステナイト相を得ることが一般的である。耐摩耗性が要求される高C材の鉄鋼材料では高温のオーステナイト域から冷却するとマルテンサイト変態を生じることがあり、割れを抑制するため徐冷を実施することが多いが、高マンガン鋼においてはオーステナイト域からの冷却速度が遅い場合炭化物が析出してしまうため、速やかに水冷などで冷却することが必要となる。

◇ 実用例

高マンガン鋼は鉄道における列車の進行方向を振り分ける分岐器のクロッシングと呼ばれる部品に使用されている³⁾。クロッシングは列車通過時

表 1 代表的な高マンガン鋼の引張特性

鋼種	JIS規格	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	備考
SCMnH11	G5131	≥390	≥740	≥35	鍛造材
SUS304	G4303	≥205	≥520	≥40	熱間加工材

に大きな衝撃荷重を繰り返し受けつつ、突発的な損傷に対する安全度を確保するため、耐摩耗性と衝撃特性が要求されます。高マンガン鋼はこれらの特性に優れた材料であり、また、クロッシングは複雑形状であることから鋳造で製造されています。実際の製造工程では、鋳造後に熱処理、機械加工、研磨、検査が行われ、レールとクロッシングを溶接する技術開発も行われている。

むすび

高マンガン鋼は低コストな非磁性材料というだ

けでなく、優れた耐摩耗性や靱性を有する材料です。材料開発の歴史は古く、様々な用途で使用されていますが、一方で昨今のSDGsの考え方の中で改めて省資源材料として注目される可能性のある材料と期待されます。

参考文献

- 1) 松野進、上田泰：鋳造工学、70（1989）9、p. 659
- 2) 加藤哲夫、藤倉正国、矢萩慎一郎：電気製鋼、50（1979）4、p. 251
- 3) 梅村孝雄：特殊鋼、61（2012）5、p. 26



2. 非磁性ステンレス鋼

日本冶金工業(株) よしだとうき
ソリューション営業部 課長 吉田 統樹

電子機械部品・精密部品等の最先端産業において、磁界による熱発生や、磁気ノイズを防止するための特性として非磁性が必要となる。しかしながら、ステンレス鋼の5種類のうち4種類（マルテンサイト系、フェライト系、二相系、析出硬化系）は磁性を有しており、唯一オーステナイト系のみが固溶化熱処理状態で非磁性である。そのオーステナイト系ステンレス鋼であったとしても、SUS304等の準安定オーステナイト系の鋼種は、冷間加工を受けると加工硬化と同時に磁性が生じる。これは、加工誘起変態によってオーステナイト相から強磁性のマルテンサイト（ α' ）相が生成されるためである。この加工誘起による α' 相の生成しやすさは、材料の成分含有量からMd30として以下の式で示される。

$$\text{Md30}(\text{C}) = 551 - 462(\%C + \%N) - 9.2\%Si \\ - 8.1\%Mn - 13.7\%Cr - 29.0\%Ni$$

Md30は30%の歪みを与えた時に50%の α' 相を生成する温度であり、この値が低いほど加工誘起による α' 相が生成しにくいことを示す。

本項の非磁性ステンレス鋼とはMd30を用いた成分設計によって、冷間加工後も α' 相の生成を抑制し非磁性であるオーステナイト系ステンレス鋼のことである。

非磁性ステンレス鋼は成分含有量によってCr-Ni系とCr-Mn-N系に大きく分類される。Cr-Ni系には、18Cr-8NiであるSUS304の基本組成よりもCr、Ni量を多く含有させることでオーステナイト安定度を高めた鋼種として、SUS305、SUS310S、NSS305M1、さらには固溶強化元素であるNを添加することで冷間加工後に高強度を示すNSS305M3等がある。Cr-Mn-N系には、Niの代わりにMn、Nの成分を含有させることで固溶強化とともにオーステナイト安定度を高めた鋼種として、NASNM15、NSSC130Mがあり、これらはSUS304と同等の耐食性を有しつつ、強い冷間加工後も高強度かつ非磁性である。また、軟質化し加工性を改善させたNASNM17もCr-Mn-N系の鋼種に含まれる。上記

以外に使用環境に合わせた非磁性ステンレス鋼として、析出硬化熱処理による強度向上が可能なDSN6や、同じく析出硬化が可能であり優れた耐海水性を有しているDSN9もある。

非磁性の評価には比透磁率 μ が用いられる。固溶化熱処理状態で非磁性のオーステナイト系ステンレス鋼の比透磁率 μ は、通常1.00~1.01程度の値を示す。非磁性ステンレス鋼と準安定オーステナイト系ステンレス鋼における冷間加工後の磁性の違いを比較するために、準安定オーステナイト系ステンレス鋼のSUS304、Cr-Ni系非磁性ステンレス鋼のSUS305、およびCr-Mn-N系非磁性ステンレス鋼のNASNM15Mにおける比透磁率と圧延率の関係を図1に示す。この図からSUS304は冷間圧延によって比透磁率が大きく上昇しており、磁性が生じていることが分かる。一方、非磁性ステンレス鋼のSUS305では20%程度の冷間圧延までは比透磁率の上昇が見られない。NASM15NMについては70%程度の冷間圧延を受けても比透磁率の上昇は見られず、強い冷間加工後も非磁性を維持している。

以上のように、冷間加工後も磁性が生じない非磁性ステンレス鋼は、鋼種ごとに特徴があり用途に応じた環境で利用されている。

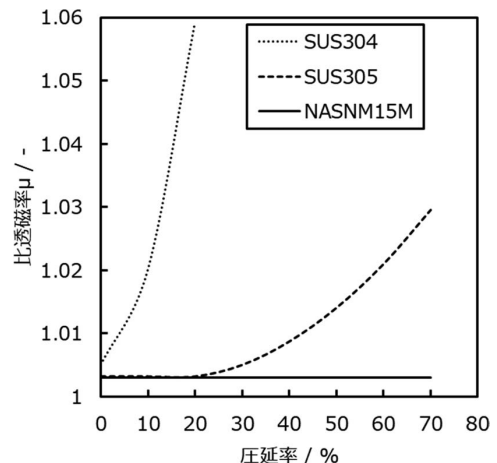


図1 非磁性ステンレス鋼の比透磁率と圧延率の関係

業界のうごき

浅井産業、愛知県に拠点開設 物流機能強化、在庫能力拡大

浅井産業は、愛知県高浜市に田戸サービスセンター（田戸SC）を開設した。最大で3,000トンの構造用鋼などを在庫することで近隣の物流拠点、衣浦サービスセンター（衣浦SC）を補完し、同社在庫能力の拡大を図る。11月に本格稼働を開始した。

田戸SCは敷地面積7,400平方メートルに、建屋面積3,420平方メートルの鋼材倉庫と350平方メートルの部品倉庫、165平方メートルの事務所で構成。衣浦SCから1.3キロメートル離れた場所に立地。

田戸SCの鋼材倉庫は荷役作業の安全性確保の観点から4.8トン運転台付きホイストクレーンを4基有し、うち2基は棒鋼を安定して運搬できる2フック仕様で、残り2基は将来を見据えた1フックとした。クレーンの走行車輪はウレタン材を採用。部品倉庫はリードフレームや射出成型機部品のシリンダーを在庫する。建屋には太陽光発電設備を設置し倉庫内の電力を自家調達する体制も整えた。

（9月4日）

川本鋼材、旋盤増設で長尺対応 大型品対応と加工内製化目的に

川本鋼材は、本社加工工場に最長8メートルまでの長尺特殊鋼丸鋼の加工に対応可能な汎用旋盤を1基増設し、稼働を開始した。長尺対応旋盤を5基体制とし、加工能力を20%程度拡大することで部品の大型化ニーズなどへの対応を図るとともに、若手技術者の育成によるスキル向上を進め、今後の内製率拡大につなげていく。

導入機種は、大日金属工業製の「DL120」。最長8メートルまでの長尺加工が可能で、最大径も820ミリ、直径500ミリまで対応可能な既存設備に比べ大径化する。8メートル対

応機種は2基となった。

現在は、旋盤加工の一部を外注で対応しているが、加工業界全体の人手不足や技術者の高齢化などにより、将来的には難しくなることから、内製率の向上も念頭に設備増設を決定。設備体制の拡充で若手技術者の技能向上による品質面の強化も図りながら、顧客への安定供給に備えていく。

（9月22日）

住友商事グローバルメタルズ GHG排出量可視化企業と提携

住友商事グローバルメタルズは、温室効果ガス（GHG）排出量算定や可視化ソリューションを手掛けるゼロボードとソリューションパートナーシップ契約を締結した。ゼロボードのパートナー企業の1社として日本企業のカーボンニュートラルの取り組みを支援する。

ゼロボードはGHG排出量算定・可視化のためのクラウドサービス「Zero board（ゼロボード）」のほか、専門家によるサステナビリティ経営コンサルティングおよびソリューションパートナー企業によるGHG排出量削減ソリューションをそれぞれ提供し、情報共有のためのユーザーコミュニティ「All Aboard!（オールアボード）」を運営している。住商グローバルメタルズとしては取引先に対し、ゼロボードが提供するクラウドサービスを紹介するとともに排出量削減のニーズを持つユーザー企業に対し、同社の知見を生かしたソリューションを提供する。

（9月12日）

インドで2輪EV駆動装置製造 豊田通商など3社、合弁会社設立

武蔵精密工業（ムサシ）、デルタ電子、豊田通商はこのほど、インドに2輪車用EV駆動ユニットの製造・販売を目的とした合弁会社を設立することで合意した。2024年1月

頃に生産ラインを立ち上げる。当人は1ラインで生産し、3年以内に4～5ラインに増設する方針だ。30年には年間100万台を販売する計画。

新たに設立する「ムサシ・デルタ・イーアクスル・インディア」はムサシの子会社がガルタナータカ州に構えるバンガロール工場内に立地。出資比率はムサシの現地法人が51%、デルタ電子が34%、豊通が15%。サプライチェーンは豊通が持つノウハウを活用してインドを中心とするサイクルを構築する計画。これにより競争力の向上を図るほか、自動車の国産化を奨励する同国の政策に対応する。金属材料も立ち上げ時は品質確保のため一部で国外のものを使うが、将来的には大部分を現地で調達する。

（9月25日）

ノボル鋼鉄、売上高倍増目指す ニッケル合金流通を子会社化

ノボル鋼鉄は、2023年6月28日付でニッケル高合金流通の彩光サスアロイを完全子会社化した。同社を傘下に収めたこともあり、23年6月期のグループ会社を含む売上高は91年6月期以来32年ぶりに100億円を達成。三上見史社長は「念願とする売上高100億円を達成したが、次はグループ売上高200億円に向けてM&Aを含めた事業拡大を目指す」と次なる中長期目標を立てる。

彩光サスアロイは98年設立のニッケル高合金流通。年間売り上げ規模は7億円、従業員は7人。板橋区に拠点を有し、倉庫を持たない。取り扱う製品が大きく異なることから、両社間の取引はなかった。彩光サスアロイは後継者不在を理由に事業承継先を探しており、ノボル鋼鉄はM&A仲介企業からの紹介を受け、業容拡大や調達先拡充の観点から子会社化することを決めた。彩光サスアロイ本社の移転・ノボル鋼鉄への集約予定はない。

（9月12日）

業界のうごき

ヤマト特殊鋼、山形新工場が竣工 機械加工拠点、自動化設備導入

ヤマト特殊鋼は、山形県天童市に開設した山形第三工場が竣工し、稼働を開始した。9月28日に新工場の門出を祝う竣工式が開かれた。同社は1991年に山形県東根市に工場を開設し、06年に天童市に山形第二工場を開設。特殊鋼の丸棒切断から始まった業務は加工領域へと拡大してきた。需要増への対応などを目的として工場開設に至った。三浦良典社長は新工場について「力を発揮し、さらに発展の礎を築くことができるよう、社員一同精進していく」と述べた。

新工場は敷地面積2万4,343平方メートル、延べ床面積3,995平方メートル、建築面積3,667平方メートルの鉄骨造。CNC旋盤と複合加工機による機械加工に特化した拠点。自動化・業務効率化を目的に、鋼材の出し入れ作業を行うロボットや、連続無人加工を実現した高効率複合加工機、操業状況可視化システム「WellLine（ウェルライン）」などを導入している。

(9月29日)

神戸製鋼所、新軟磁性鋼板を開発 線材を鋼板化、加古川で量産検討

神戸製鋼所はソレノイド部品や電磁リレーなど主に直流用途への使用を想定した新しい純鉄系軟磁性鋼板を開発した。取引先の一部にサンプル出荷を行うなど、市場性・事業可能性などの調査に着手するとともに、加古川製鉄所での量産に向けた検討も始めた。数年内の商品化を目指している。

「KELMOS」と呼ぶ磁性鋼板で、線条部門で量産中の純鉄系軟磁性鋼（線材）・ELCH2を鋼板化したもの。合金や不純物成分をできる限り減らしたことで、硬さが低く、加工性に優れたものになったほか、適切な電磁焼鈍により、電磁軟鉄（JISC2504）

SUY-0に相当する磁気特性が得られた。一般のSPCC（冷間圧延鋼板）に比べ、保磁力に優れ、また磁気特性を示す指標の一つである磁束密度は1割ほど上回る効果を確認している。EV（自動車電動）化など新たな需要分野の開拓を進めたい考え。

(9月26日)

インド拠点、CO₂排出25%減 山陽特殊製鋼、製造に再エネ活用

山陽特殊製鋼は、インドで特殊鋼製造に使う電力の一部に再生可能エネルギーを活用する。子会社で特殊鋼製造・販売のサンヨウ・スペシャル・スチール・マニュファクチャリング・インディア社（SSMI）が印電力大手のタタ・パワーの子会社と太陽光発電による再エネ由来電力の購入契約を締結した。

再エネ事業を手掛けるタタ・パワー・リニューアブル・エナジー社が来年3月をめぐに、マハラシュトラ州で120メガワットの太陽光発電プラントを設置する計画で、SSMIが28メガワット分の太陽光発電による電力（年間約6,200キロワット）を購入する。

必要な電力の一部に再エネ由来のものを活用することで、特殊鋼製造過程で排出されるCO₂の25%相当、年間で最大約4万2,500トンの排出量を削減できる見込み。2030年にCO₂排出原単位を16年度比40%削減し、50年のカーボンニュートラルを目標に掲げる。

(9月7日)

JFE、インドで電磁鋼板製造へ JSWと現地合弁設立で正式契約

JFEスチールは、インドのJSWスチールとインド国内に方向性電磁鋼板の製造販売を行う合弁会社JSWJFEエレクトリカルスチールを設立することで正式に合弁契約を締結した。JSWスチールの熱延原板を使った方

向性電磁鋼板の一貫製造体制をインド国内で構築し、エネルギー効率に優れた方向性電磁鋼板の高級グレード品をフルラインアップで製造・供給することで、グリーンな送配電インフラ整備につなげるなどが狙い。総投資額は6億7,000万ドル（約940億円）。

新会社はJFE・JSWがそれぞれ50%の折半出資で、事業拠点はJSWのビジャナガール製鉄所があるインド・カルナタカ州ベラリー地区に設立する。

関係当局の認可を得て、合弁会社を設立し、各種ミルや焼鈍など方向性電磁鋼板の製造に必要な設備の建設に着手する予定で、2027年度のフル生産を目指している。

(8月4日)

大同特殊鋼、福岡に新試験機導入 耐水素材開発へ、6億円を投資

大同特殊鋼は耐水素材材料の研究開発を促進するため、約6億円を投じ、水素関連製品の性能や信頼性を評価する第三者機関である、福岡県糸島市の水素エネルギー製品研究試験センター（ハイトレック）内に高圧水素ガス雰囲気材料試験機を設置した。

導入した試験機は高圧水素ガスを封入した耐圧容器の中で、引張特性や疲労特性などの部品設計で要求される材料評価を行う「高圧水素ガス雰囲気材料試験機（外圧式）」、丸棒試験片の軸中心部に細穴加工を施し、試験片内部を高圧水素ガスに曝しながら引張試験、疲労試験を行う「高圧水素ガス雰囲気材料試験機（内圧式）」、サンプルを高圧水素ガス中に曝露することで材料への水素の侵入速度や侵入量の調査などを行う、「曝露試験装置」の3種類。

試験機活用で、耐水素材材料の特性向上やコスト低減につながる材料開発を推進し、水素社会構築への貢献を進める。

(9月29日)

業界のうごき

日鉄ステンレス・山口製造所光 320億円投資し連続設備更新

日鉄ステンレスは、山口製造所光エリア（山口県光市）光製鋼工場のスラブ用連続铸造設備（スラブCC）について、約320億円を投じリフレッシュする。大規模改修でスラブの表面品位や内部品質が向上し、従来以上の高纯净度を求められる製品や難製造品の製造メニューが拡大。新エネルギー分野や次世代自動車分野など脱炭素社会で高度化する需要を捕捉し、多彩な製品の提供を目指す。

新スラブ用連続铸造設備は、能力が年間約50万トン、稼働時期は2026年度上期末の予定。スラブCCは、八幡製鉄光製造所時代の60年に5フィート幅連続として設置してから60年以上が経っていた。スラブCCのリフレッシュに合わせて、ブルーム用連続铸造設備についても物流の整流化を実現し、生産構造の最適化を図る。建設工事が大規模かつ長期にわたることや、設備の立ち上げを万全とすべく「光5CC建設推進班」を設置する。（8月7日）

鋳鉄製品の生産体制を一段と強化 高周波子会社、鋳型能力を増強へ

日本高周波鋼業グループの高周波鋳造は、鋳鉄製品の生産体制を強化する。2023年内をめどに本社・工場で手掛ける鋳鉄製品の生産能力を高めるとともに、DX（デジタルトランスフォーメーション）を活用することで不良率を現行比1%以上引き下げる。

高い品質が需要家に認められ、近年、トラックや建設機械、産業機械などで受注が伸長。鋳鉄製品の損益も改善し、23年4—6月期は営業損益で黒字転換した。ただ、鋳型の一つである中子の生産能力不足で受注制限を余儀なくされていることから、23年内には大型中子造型機を1基増

設して鋳鉄製品の月間生産能力を100トン増やして3,000トンに引き上げ、ニーズを捕捉できる体制を整える。

本社・工場に製造現場向け工程監視ソフトを導入するなど、DX化を推進中。製造現場にデジタル技術を取り入れ、生産トラブルの早期対処や生産性向上を実現している。（8月25日）

低CO₂鋼材、油井管が採用決定 日本製鉄、オランダの地熱開発で

日本製鉄は、低CO₂鋼材「NSカーボレックスニュートラル」の13%クロム鋼シームレス油井管がオランダの地熱開発事業者が手掛けるプロジェクトに採用が決まった。マスパランス方式を活用し鉄鋼製造プロセスにおけるCO₂の温室効果ガス排出削減量を割り当てた鉄鋼製品として、カーボンニュートラル社会への貢献が期待されている。

提供するのはオランダの地熱開発事業者85デグリーズ・リニューアブル社がITECOオイルフィールドサブライ・フランス社をパートナー企業として手掛ける地熱開発プロジェクト。

オランダ社は同国西部でクリーンエネルギー開発を手掛け、オランダ全体の地熱開発プロジェクトをリード。日鉄の低CO₂鋼材である13%クロム鋼シームレス油井管の価値を認め、プロジェクト全体のカーボンニュートラル化を推進する中で高く評価したことが採用につながった。（9月29日）

日本冶金工業子会社が投資 ステンレスBA自動造管設備導入

日本冶金工業グループでステンレス溶接鋼管メーカーのナストーアは、インラインBA（光輝焼鈍）付き自動造管ラインを茅ヶ崎製造所（神奈川県茅ヶ崎市）に導入する。高機能材溶接鋼管の競争力強化が目的。燃料電池向けプラントなどのカーボンニュートラル関連や、薬品工場、熱

交換器用途需要の捕捉を目指す。稼働開始は2024年5月、投資額は約4億円。

導入する設備は、水素ガス雰囲気中で熱処理が可能な光輝焼鈍炉と溶接部の冷間加工装置を有した連続自動造管機で構成。ニッケル合金や二相ステンレス鋼、オーステナイトステンレス鋼などを加工する。生産能力は月間18トン向上し、納期は15日から30日程度の短縮が見込まれる。従来設備は熱処理の際に鋼管表面が酸化し脱クロム層が発生していたが、導入する設備では還元性の水素雰囲気熱処理で酸化しないため、スケールの発生を抑えて品質が改善する。（9月14日）

プロテリアル、傘下の流通と共同 内航船で鋼材輸送の実証実験開始

プロテリアルとプロテリアル特殊鋼は、内航船を活用した輸送に取り組んでいる。

運転手の時間外労働規制強化に端を発した「物流の2024年問題」や環境負荷を抑えた移動でCO₂排出量削減に貢献する「モーダルシフト」の観点から導入を決めた。昨年から実証実験として取り組みがスタートした。

実証実験は、プロテリアルの安来工場（島根県安来市）からプロテリアル特殊鋼東日本物流加工センター（埼玉県加須市）の輸送ルートで、プロテリアル特殊鋼向けの工具鋼が対象。これまでは島根と埼玉の間を片道10時間以上かけてトラックで運んでいた。実証実験は、島根県の安来工場から岡山県まで陸送（トラック）で運んだ後、岡山県から千葉県まで内航船で輸送し、千葉から陸路で埼玉県の物流加工センターへ向かう。これにより納期は従来に比べて1日延びるが、運転手の労働時間規制をクリアできる。（9月5日）

文責：(株)産業新聞社

特殊鋼統計資料

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

鋼種別

(単位：t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力	その他		
'21 暦年	221,395	4,709,058	3,726,591	8,435,649	374,891	987,441	2,578,832	580,434	4,875,054	493,548	9,890,200	18,547,244
'22 暦年	206,094	4,161,155	3,482,662	7,643,817	318,691	838,284	2,439,490	475,955	4,516,055	447,854	9,036,329	16,886,240
'21 年度	227,889	4,669,266	3,691,309	8,360,575	359,466	975,524	2,584,063	571,328	4,747,315	487,191	9,724,887	18,313,351
'22 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
'22. 7-9月	46,999	996,288	849,948	1,846,236	76,617	200,068	638,774	115,906	1,146,735	101,301	2,279,401	4,172,636
10-12月	45,737	1,028,575	867,133	1,895,708	81,250	198,823	583,243	109,666	1,100,806	110,258	2,184,046	4,125,491
'23. 1-3月	35,338	984,492	785,333	1,769,825	74,388	175,694	493,810	111,681	1,125,730	97,788	2,079,091	3,884,254
4-6月	38,246	952,827	846,719	1,799,546	76,517	188,980	495,423	106,383	1,144,291	89,220	2,100,814	3,938,606
'22年 7月	16,090	320,424	296,553	616,977	25,760	73,427	209,409	40,154	363,507	32,149	744,406	1,377,473
8月	15,308	329,391	274,061	603,452	22,611	62,534	222,303	36,578	401,647	35,116	780,789	1,399,549
9月	15,601	346,473	279,334	625,807	28,246	64,107	207,062	39,174	381,581	34,036	754,206	1,395,614
10月	16,490	357,381	301,222	658,603	28,608	68,094	190,015	38,150	372,924	41,187	738,978	1,414,071
11月	15,324	345,164	300,086	645,250	26,549	68,296	197,861	34,586	384,759	35,699	747,750	1,408,324
12月	13,923	326,030	265,825	591,855	26,093	62,433	195,367	36,930	343,123	33,372	697,318	1,303,096
'23年 1月	10,758	331,191	262,646	593,837	23,487	64,599	164,079	34,868	387,230	32,249	706,512	1,311,107
2月	12,306	321,354	252,217	573,571	26,558	57,958	162,938	36,468	334,507	31,260	649,689	1,235,566
3月	12,274	331,947	270,470	602,417	24,343	53,137	166,793	40,345	403,993	34,279	722,890	1,337,581
4月	14,111	294,106	274,535	568,641	24,121	56,801	158,871	31,869	341,088	27,530	640,280	1,223,032
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
前月比	66.7	87.8	81.4	84.8	74.3	85.0	94.0	94.3	105.6	100.7	99.1	92.1
前年同月比	46.8	90.6	91.4	90.9	90.6	91.0	70.9	92.3	104.5	88.5	92.2	91.1

出所：経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

形状別

(単位：t)

年月	形鋼	棒鋼	管材	線材	鋼板	鋼帯	合計
'21 暦年	278,898	6,065,226	856,955	3,846,183	1,081,675	6,422,384	18,551,321
'22 暦年	293,422	5,401,742	1,019,267	3,386,987	1,083,496	5,701,276	16,886,190
'21 年度	286,265	6,050,584	877,842	3,749,037	1,115,176	6,239,200	18,318,104
'22 年度	278,130	5,184,392	997,569	3,270,099	1,070,471	5,555,186	16,355,847
'22. 7-9月	84,129	1,313,407	263,763	798,334	277,872	1,435,102	4,172,607
10-12月	66,566	1,288,168	256,375	876,236	265,894	1,372,247	4,125,486
'23. 1-3月	55,479	1,243,417	222,519	780,532	254,009	1,327,469	3,883,425
4-6月	62,224	1,277,181	251,833	735,664	237,077	1,373,420	3,937,399
'22年 7月	41,729	447,779	92,640	258,723	82,034	454,554	1,377,459
8月	16,861	408,817	98,612	267,493	97,178	510,582	1,399,543
9月	25,539	456,811	72,511	272,118	98,660	469,966	1,395,605
10月	21,063	455,338	90,559	301,824	90,234	455,050	1,414,068
11月	25,686	429,672	82,444	299,399	87,905	483,218	1,408,324
12月	19,817	403,158	83,372	275,013	87,755	433,979	1,303,094
'23年 1月	19,898	411,241	78,269	261,088	89,757	450,854	1,311,107
2月	16,185	406,995	71,180	257,956	66,834	416,414	1,235,564
3月	19,396	425,181	73,070	261,488	97,418	460,201	1,336,754
4月	20,279	393,935	95,916	220,493	80,985	410,313	1,221,921
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
前月比	56.5	89.6	67.3	92.9	97.8	100.1	92.1
前年同月比	70.4	96.1	70.5	91.5	86.8	92.4	91.1

出所：『経済産業省生産動態統計』から作成。

特殊鋼鋼材の鋼種別販売(商社+問屋)の推移 (同業者+消費者向け)

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼							計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他			
'21 暦年	245,486	2,716,911	1,455,748	4,172,659	49,883	399,243	1,459,480	124,703	61,853	95,991	2,191,153	6,609,298	
'22 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	
'21 年度	247,110	2,752,134	1,092,322	3,137,987	36,133	300,281	1,125,634	93,152	45,860	73,500	1,674,560	4,996,127	
'22 年度	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	
'22年 12月	17,614	203,853	111,764	315,617	8,400	30,511	112,074	7,960	5,274	6,631	170,850	504,081	
'23年 1月	17,273	194,923	96,843	291,766	7,239	25,625	104,030	7,483	4,498	6,249	155,124	464,163	
2月	18,899	207,662	107,158	314,820	7,802	29,904	105,918	8,194	5,570	6,692	164,080	497,799	
3月	19,361	208,388	103,101	311,489	8,594	27,467	116,662	8,651	5,454	7,987	174,815	505,665	
4月	19,212	188,764	93,541	282,305	8,038	25,446	104,970	9,059	4,820	7,212	159,545	461,062	
5月	19,465	197,523	102,953	300,476	6,876	28,681	95,350	7,740	4,853	6,527	150,027	469,968	
6月	18,776	216,782	113,450	330,232	8,076	29,208	103,453	8,928	5,012	7,187	161,864	510,872	
7月	18,564	214,988	110,039	325,027	7,952	27,956	99,028	9,154	4,869	7,972	156,931	500,522	
8月	16,961	210,199	117,866	328,065	7,868	26,542	83,966	7,529	4,048	6,276	136,229	481,255	
前月比	91.4	97.8	107.1	100.9	98.9	94.9	84.8	82.2	83.1	78.7	86.8	96.2	
前年同月比	93.1	104.2	106.0	104.8	247.0	98.9	82.4	91.9	82.2	82.4	89.3	99.5	

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

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

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の推移

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼							計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他			
'21 暦年	8,055	246,632	158,245	404,877	24,939	38,834	144,605	29,563	168,305	22,668	428,914	841,846	
'22 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	
'21 年度	7,544	239,228	149,869	389,097	21,922	36,386	140,730	29,025	139,691	23,830	391,584	788,225	
'22 年度	8,870	207,670	133,119	340,789	17,942	28,734	126,791	21,907	129,474	19,381	344,229	693,888	
'22年 12月	10,897	221,700	136,904	358,604	21,346	37,569	156,975	22,390	137,751	16,870	392,901	762,402	
'23年 1月	10,139	223,278	146,521	369,799	19,537	35,904	157,955	23,252	162,728	21,153	420,529	800,467	
2月	10,506	217,654	135,080	352,734	22,415	32,434	139,638	24,843	140,379	20,826	380,535	743,775	
3月	8,870	207,670	133,119	340,789	17,942	28,734	126,791	21,907	129,474	19,381	344,229	693,888	
4月	10,790	200,880	131,879	332,759	19,417	30,385	130,004	20,955	143,028	18,211	362,000	705,549	
5月	10,265	209,719	127,480	337,199	19,015	32,108	129,650	21,385	137,902	20,332	360,392	707,856	
6月	11,124	198,175	132,254	330,429	18,880	32,376	129,892	19,138	141,017	18,740	360,043	701,596	
7月	8,903	198,786	129,848	328,634	20,510	33,025	128,468	18,643	142,136	19,783	362,565	700,102	
8月	5,300	202,583	135,438	338,021	17,208	35,141	115,344	22,024	160,053	21,536	371,306	714,627	
前月比	59.5	101.9	104.3	102.9	83.9	106.4	89.8	118.1	112.6	108.9	102.4	102.1	
前年同月比	52.5	86.7	89.4	87.8	72.5	96.2	73.6	81.1	80.3	81.0	79.0	82.6	

出所: 経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼							計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他			
'21 暦年	78,090	352,845	202,875	555,720	11,864	65,865	261,863	14,113	18,074	7,971	379,750	1,013,560	
'22 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	
'21 年度	77,786	312,576	208,973	521,549	13,253	62,840	253,404	15,438	16,809	10,270	372,014	971,349	
'22 年度	81,307	258,660	201,555	460,215	5,698	53,549	251,097	11,289	13,844	10,330	345,807	887,329	
'22年 12月	81,587	253,146	197,352	450,498	11,832	52,605	258,437	12,975	14,050	8,869	358,768	890,853	
'23年 1月	81,879	256,088	200,010	456,098	7,543	54,067	253,500	12,829	13,916	9,251	351,106	889,083	
2月	80,951	261,811	202,544	464,355	5,468	53,055	253,884	11,681	13,805	9,534	347,427	892,733	
3月	81,307	258,660	201,555	460,215	5,698	53,549	251,097	11,289	13,844	10,330	345,807	887,329	
4月	80,837	247,843	195,238	443,081	4,944	50,387	243,658	11,272	13,711	9,876	333,848	857,766	
5月	81,642	252,735	200,367	453,102	4,220	53,273	244,734	11,215	13,321	9,697	336,640	871,204	
6月	82,604	248,417	198,112	446,529	4,003	54,554	247,344	10,829	13,729	9,301	339,760	868,893	
7月	81,511	243,074	195,606	438,680	4,153	53,439	250,109	9,966	13,327	8,168	339,162	859,353	
8月	80,427	240,311	194,421	434,732	3,758	56,113	247,957	10,393	13,427	7,168	338,816	853,975	
前月比	98.7	98.9	99.4	99.1	90.5	105.0	99.1	104.3	100.8	87.8	99.9	99.4	
前年同月比	99.7	95.7	96.6	96.1	30.3	99.4	100.1	86.5	92.5	69.9	95.9	96.3	

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。

特殊鋼需給統計総括表

2023年8月分

鋼種別	項目	月別					
		実数 (t)	前月比 (%)	前年同月比(%)	2015年基準指数(%)		
工 具 鋼	熱間圧延鋼材生産	7,165	66.7	46.8	34.8		
	鋼材輸入実績	171	113.9	56.1	55.4		
	販売業者	受入計	15,877	90.9	80.2	58.8	
		販売計	16,961	91.4	93.1	64.6	
		うち消費者向	14,305	90.4	95.7	75.6	
		在庫計	80,427	98.7	99.7	136.2	
	鋼材輸出船積実績	1,656	90.4	48.9	34.7		
	生産者工場在庫	5,300	59.5	52.5	63.9		
	総在庫	85,727	94.8	94.5	127.3		
	構 造 用 鋼	熱間圧延鋼材生産	548,739	84.8	90.9	80.2	
販売業者		受入計	324,117	102.2	102.2	49.6	
		販売計	328,065	100.9	104.8	50.2	
		うち消費者向	270,217	102.8	112.8	61.5	
		在庫計	434,732	99.1	96.1	123.5	
鋼材輸出船積実績		54,422	83.7	89.7	66.2		
生産者工場在庫		338,021	102.9	87.8	96.6		
総在庫		772,753	100.7	92.3	110.1		
ば ね 鋼		熱間圧延鋼材生産	20,496	74.3	90.6	57.0	
		鋼材輸入実績	1,425	63.4	362.4	349.6	
	販売業者	受入計	7,473	92.2	249.7	35.3	
		販売計	7,868	98.9	247.0	37.5	
		うち消費者向	2,288	85.3	106.9	49.2	
		在庫計	3,758	90.5	30.3	30.8	
	鋼材輸出船積実績	8,361	57.0	68.4	53.2		
	生産者工場在庫	17,208	83.9	72.5	66.6		
	総在庫	20,966	85.0	58.0	55.1		
	ス テ ン レ ス 鋼	熱間圧延鋼材生産	157,521	94.0	70.9	68.6	
鋼材輸入実績		22,979	103.0	90.1	158.8		
販売業者		受入計	81,814	80.4	77.0	32.6	
		販売計	83,966	84.8	82.4	33.4	
		うち消費者向	43,498	85.9	88.3	77.8	
		在庫計	247,957	99.1	100.1	181.4	
鋼材輸出船積実績		57,766	110.5	97.2	65.9		
生産者工場在庫		115,344	89.8	73.6	100.1		
総在庫		363,301	96.0	89.8	144.2		
快 削 鋼		熱間圧延鋼材生産	33,753	94.3	92.3	65.8	
	販売業者	受入計	7,956	96.0	106.4	56.3	
		販売計	7,529	82.2	91.9	52.3	
		うち消費者向	6,951	79.1	91.9	49.9	
		在庫計	10,393	104.3	86.5	76.8	
	鋼材輸出船積実績	3,876	59.7	78.8	40.5		
	生産者工場在庫	22,024	118.1	81.1	79.4		
	総在庫	32,417	113.3	82.7	78.5		
	高 抗 張 力 鋼	熱間圧延鋼材生産	419,799	105.6	104.5	101.7	
		販売業者	受入計	4,148	92.9	80.9	40.3
販売計			4,048	83.1	82.2	39.8	
うち消費者向			3,341	83.2	81.1	49.8	
在庫計			13,427	100.8	92.5	122.5	
生産者工場在庫		160,053	112.6	80.3	84.4		
総在庫		173,480	111.6	81.2	86.5		
そ の 他		熱間圧延鋼材生産	88,020	89.9	90.1	63.6	
		販売業者	受入計	34,492	102.4	104.1	85.1
			販売計	32,818	91.3	95.3	81.0
	うち消費者向		31,313	90.2	99.6	85.2	
	在庫計		63,281	102.7	94.8	119.1	
	生産者工場在庫	56,677	107.3	89.8	81.9		
	総在庫	119,958	104.8	92.4	98.1		
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱間圧延鋼材生産合計	1,275,493	92.1	91.1	81.1	
		鋼材輸入実績計	38,319	93.6	91.3	47.2	
		販売業者	受入計	475,877	96.9	96.8	46.8
販売計			481,255	96.2	99.5	47.3	
うち消費者向			371,913	98.0	106.6	64.6	
在庫計			853,975	99.4	96.3	134.0	
鋼材輸出船積実績計		504,194	97.7	95.9	78.4		
生産者工場在庫		714,627	102.1	82.6	90.9		
総在庫		1,568,602	100.6	89.5	110.2		

出所: 鋼材輸入実績及び鋼材輸出船積実績は財務省関税局『貿易統計』、

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

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

倶楽部だより

(2023年8月1日～9月30日)

清水新会長就任記者会見 (8月7日・対面)

8月7日に清水達也新会長(大同特殊鋼株 代表取締役社長)、報道関係者8社11名との記者会見を行った。

海外委員会

専門部会(9月26日・ハイブリッド会議:対面+Web)

- ①2023年度海外調査事業進捗状況報告について
- ②2023年度事業進捗状況報告について
- ③2023年度会計報告について
- ④個別通商問題について
- ⑤中国ステンレス鋼AD調査に関するWTO紛争解決について

説明会(8月24日)

演題:2022年度調査報告書「特殊鋼生産を取り巻く環境変化と地政学リスクの検討」

講師:コベルコビジネスパートナーズ(株) 産業情報部 産業情報グループ 主任研究員 本城 貴充氏

方式:ハイブリッド説明会(対面・オンライン配信)

申込者:70名

説明会(9月8日)

演題:2022年度調査報告書「中国の特殊鋼需給動向調査-中国特殊鋼産業の現状と展望、技術からみた競争力について」

講師:日鉄総研(株) サステナビリティソリューション事業部 産業・資源循環技術部 調査第一室 研究主幹 大内 邦彦氏

方式:ハイブリッド説明会(対面・オンライン配信)

申込者:110名

市場開拓調査委員会

調査WG

2023年度特殊鋼の最終用途別需要実態調査に関して、7月下旬から8月上旬にかけて関係

業界9団体に出向き協力依頼を行った。

特殊鋼PR展示・講演会WG

第10回高機能金属展 東京展出展キックオフミーティング(8月29日・Web会議)

- ①共同出展社紹介
- ②出展内容について
- ③ブースレイアウトについて
- ④今後のスケジュールについて

説明会(9月1日)

演題:2022年度調査報告書「主要国におけるカーボンニュートラル進展と日本の特殊鋼産業への影響」

講師:(株)現代文化研究所 市場戦略情報 第1領域 領域リーダー 山元 哲史氏

方式:ハイブリッド説明会(対面・オンライン配信)

申込者:140名

編集委員会

本委員会(8月22日・ハイブリッド会議:対面+Web)

- ①2024年1月号特集「特殊鋼の原料事情(仮題)」の編集方針、内容の確認
- ②「特殊鋼」誌の定価改定について
- ③特殊鋼倶楽部 清水新会長の記者会見の報告

特集編集会議(9月22日・ハイブリッド会議:対面+Web)

2024年3月号特集「特殊鋼と切断(仮題)」の編集内容の検討

人材確保育成委員会

委員会(9月5日・ハイブリッド会議:対面+Web)

- ①委員交代の報告
- ②2023年度事業計画の概要説明
- ③2023年度ビジネスパーソン研修講座実施の検討
- ④2023年度特殊鋼教養講座実施の検討
- ⑤2023年度大学学生人材育成事業(業界紹介)

パンフレット「夢みる鉄」の普及

⑥2023年度名古屋支部及び大阪支部での人材育成活動の報告

⑦2022年度事業報告の件

⑧特殊鋼倶楽部 清水新会長の記者会見の報告

2023年度特殊鋼教養講座1回目（東京地区）
（9月15日）

テーマ：鉄鋼業の歴史と先端技術による未来への挑戦

講師：（一社）特殊鋼倶楽部 専務理事
脇本 眞也 氏

方式：対面

受講者：30名

カーボンニュートラルWG（第Ⅱ期）

第2回会合（8月23日・Web会議）

第3回会合（9月28日・Web会議）

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。

8月度小委員会（8月23日・ハイブリッド会議〔対面+Web〕）

[大阪支部]

第1回三団体責任者会議（対面・8月22日）
講演会・賀詞交換会他共催事業の検討

第1回人材確保育成委員会（対面・9月13日）

①同委員会取組概要・組織

②本年度行事の取組状況及び予定の説明

③その他

[名古屋支部]

生産性向上研修（9月6日・三団体共催）

テーマ：ビジネス現場における交渉力

講師：㈱マーケティングトルネード
佐藤 昌弘 氏

方式：対面

受講者：28名

中堅社員研修（9月13日・三団体共催）

テーマ：仕事の質とスピードを上げるための
思考力を鍛える

講師：㈱名南経営コンサルティング
三軒 佳 氏

方式：対面・オンライン

受講者：23名

2022年度海外委員会調査「特殊鋼生産を取り巻く環境変化と地政学リスクの検討」報告書（ダイジェスト版） 説明会の開催（ハイブリッド報告会）

海外委員会の海外市場調査事業は、海外の主要特殊鋼市場の需給動向等について調査を行い、会員各位のご参考に供してまいりました。

2022年度は、「特殊鋼生産を取り巻く環境変化と地政学リスクの検討」の調査を行い、報告書に取りまとめ報告会を開催いたしました。

神戸製鋼所グループの調査会社でコベルコビジネスパートナーズ株式会社殿より講師をお招きして、「特殊鋼生産を取り巻く環境変化と地政学リスクの検討」を題材として本報告書をダイジェスト版にてご解説頂きました。本調査は初の試みとして特殊鋼を生産するうえで必要な原料に焦点を当てて行いました。鉄スクラップ、主要添加元素であるクロム、ニッケル、モリブデンを取り上げ、それぞれの世界需給、輸出入動向、価格推移、主要生産国の資源政策等をわかりやすく詳細に紹介しております。

鉄スクラップでは、各国が進めるカーボンニュートラル関連の政策のもと、鉄スクラップを原料とした電炉法による鉄鋼生産が増えることが見込まれており、世界全体の需給バランスについて試算した結果もまとめています。クロムでは、日本の特殊鋼生産に使われる低炭素クロムは、ロシアやカザフスタンからの輸入が多いことに焦点をあて、その調達リスクを中心に整理しています。ニッケルでは、主要生産国であるインドネシアと主要消費国である中国の動向と、ニッケル需要の伸長が見込まれる電池材料分野の動向を踏まえ、日本における特殊鋼生産への影響について考察しています。モリブデンでは、日本の主要輸入元である南米の鉱業政策動向や、国際価格の低下を背景とした中国のモリブデン輸入について情報を整理し、ご報告頂きました。

特殊鋼の主要添加元素は、産出国・地域が偏在していることから、地政学的な環境変化によって大きく影響を受けることが想定されます。特殊鋼メーカーもその対応が迫られる中、今後の対応を展望する上での、議論のたたき台としてとして参考になりました。

1. 日 時：2023年8月24日（木）13時30分～15時30分
2. 演 題：2022年度調査報告書「特殊鋼生産を取り巻く環境変化と地政学リスクの検討」
（ダイジェスト版）
3. 報 告 者：コベルコビジネスパートナーズ株式会社
産業情報部 産業情報グループ 主任研究員 本城 貴充 氏
4. 聴講者数：約70名

2022年度市場開拓調査「主要国におけるカーボンニュートラル進展と日本の特殊産業への影響」報告書（ダイジェスト版） 説明会の開催（ハイブリッド報告会）

市場開拓委員会では、委員会活動の一環として新たな需要分野における特殊鋼使用動向調査並びに需要産業における特殊鋼使用実態調査を行っております。

2022年度は「主要国におけるカーボンニュートラル進展と日本の特殊産業への影響」の調査を行い、報告書に取りまとめ報告会を開催いたしました。

トヨタグループの調査会社でございます株式会社現代文化研究所殿より講師をお招きして、「2022年度の調査は、「カーボンニュートラル」に焦点を当て、海外主要国・地域のカーボンニュートラルに関する政策やそれに対する海外鉄鋼・特殊鋼メーカーの対応状況、さらには、カーボンニュートラルの進展に伴って想定される日本の鉄鋼（特殊鋼）業界のリスクやチャンスを短・中・長期で考察することにしました。

具体的には、海外主要国・地域（EU・米国・中国・タイ・インド）等における、①カーボンニュートラル関連政策・規制、②特に、鉄鋼業界や自動車業界に関わる政策・規制、③これら政策・規制に対する鉄鋼・自動車業界側の評価や対応、④そこから見えてくる各国・地域の政府の鉄鋼産業へのスタンス、などについて、専門家へのインタビューも実施して把握したうえで、各国・地域における主要鉄鋼・特殊鋼メーカーのカーボンニュートラルへの対応状況と、日本の鉄鋼・特殊鋼メーカーの取り組み状況を比較しながら、各社の特徴を整理しました。

さらに、海外の主要鉄鋼・特殊鋼メーカーのカーボンニュートラル戦略や今後の事業リスク／チャンスを把握すべく、当該メーカーにインタビューを実施し、合わせて、市場開拓調査委員の皆様にも同種のアンケートを実施することにより、これらの比較分析を行い、詳細にわかりやすくダイジェスト版にてご報告頂きました。

1. 日 時：2023年9月1日（金）13時30分～15時30分
2. 演 題：2022年度調査報告書「主要国におけるカーボンニュートラル進展と日本の特殊産業への影響」（ダイジェスト版）
3. 報告者：株式会社現代文化研究所 市場戦略情報第1領域 領域リーダー 山元 哲史氏
4. 聴講者数：約140名

2022年度海外調査「中国の特殊鋼需給動向調査—中国特殊鋼産業の現状と展望、技術からみた競争力について」報告書（ダイジェスト版） 説明会の開催（ハイブリッド報告会）

海外委員会では、委員会活動の一環として海外の主要特殊鋼市場の需給動向等について調査を行っております。

2022年度は「中国の特殊鋼需給動向調査—中国特殊鋼産業の現状と展望、技術からみた競争力について」の調査を行い、報告書に取りまとめ報告会を開催いたしました。

日本製鉄グループの調査会社でございます日鉄総研株式会社殿より講師をお招きして、「中国の特殊鋼需給動向調査—中国特殊鋼産業の現状と展望、技術からみた競争力について」を題材として本報告書をダイジェスト版にてご解説頂きました。本調査では、中国の特殊鋼需給動向を文献調査と現地ヒアリング調査により情報を収集し整理しました。また、日本と中国の代表的な特殊鋼企業の特許取得動向を比較することにより、中国特殊鋼企業の技術開発戦略について考察し、また価格面では、中国のECサイトで取引されている特殊鋼の店売り価格の実態等についても調査しました。

中国では高品質の国産鋼材を目指す政策の下、中国製の特殊鋼はコスト競争力に優れているだけでなく品質も向上し、日本製の品質に近づいています。また納期面などサービスの水準も大きく向上してきております。こうした中国鉄鋼業（特殊鋼業）の現状を、本調査では主要メーカーの実態を分析することで詳しく紹介しております。

中国はGDP世界第2位の経済大国に成長し、自動車販売台数は2009年以降13年連続で世界第1位を継続しており、自動車・自動車部品などの特殊鋼ユーザー産業としても魅力的な市場であり、品質、価格、サービスにおいて中国の特殊鋼メーカーとの競争が激しくなることは容易に想定されます。ダイジェスト版を本報告会におきまして、詳細にわかりやすく、ご報告頂きました。

1. 日 時：2023年9月8日（金）13時30分～15時30分
2. 演 題：2022年度調査報告書「中国の特殊鋼需給動向調査—中国特殊鋼産業の現状と展望、技術からみた競争力について」（ダイジェスト版）
3. 報告者：日鉄総研株式会社 サステナビリティソリューション事業部
産業・資源循環技術部 調査第一室 研究主幹 大内 邦彦 氏
4. 聴講者数：約110名

「2023年度 特殊鋼教養講座（1回目）東京地区対面方式」 を開催しました

本講座は、一般社団法人特殊鋼倶楽部 人材確保育成委員会が人材育成に関する事業の一環として、会員各社の社員教育の一助となるべく毎年度実施しています。

今回は2023年度の第1回目として、コロナ感染もある程度沈静化状態となり、国の規制措置も緩和の方向に舵を切ったことから、感染対策を取りつつ東京地区において対面により下記のとおり開催しました。

受講者の皆様は、直接講師から説明を受けることに神経を集中して耳を傾け、学びとっている様子で、充実した時間を過ごしていました。また、講座終了後に懇親会を開催し、他社の方との交流や講師への質問などされ、有意義な場となりました。

受講されました皆様には、大変お疲れさまでした。

日 時：2023年9月15日（金）15時30分～18時15分

場 所：「鉄鋼会館」803・804号室（東京都中央区日本橋茅場町3-2-10）

演 題：「鉄鋼業の歴史と先端技術による未来への挑戦」

講 師：一般社団法人特殊鋼倶楽部 専務理事 脇本眞也

受講者：30名

「第10回メタルジャパン 高機能金属展 東京展」 (於：幕張メッセ) へ出展しました。

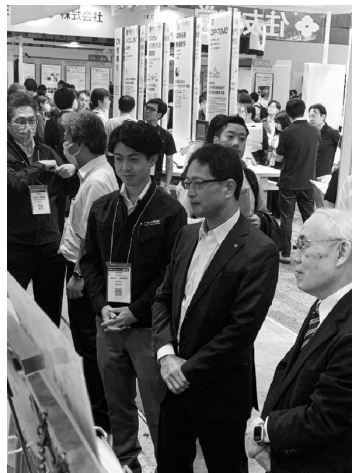
特殊鋼倶楽部は10月4日～6日に幕張メッセで開催されました「第10回メタルジャパン 高機能金属展 東京展」の協賛団体として出展しました。

特殊鋼倶楽部ブースには、会員企業から自社製品PRを目的として秋山精鋼株式会社殿、ヤマト特殊鋼株式会社殿の2社が出展し、積極的なPR活動を実施しました。

また、10月6日には、メタルジャパン専門セミナーに大同特殊鋼(株) 機能製品事業部次世代製品開発センター新事業企画推進室 奥村 鉄平様が「特殊鋼と3Dプリンタ」と題して講演されました。

ブースには多くの方にお立ち寄り頂き、特殊鋼及び当倶楽部の認知度アップに貢献しました。

以下に会場写真を掲載いたします。



一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覽

(社名は50音順)

【会 員 数】 (正 会 員) 製造業者 25社 販売業者 100社 合 計 125社	【販売業者会員】		
【製造業者会員】 愛 知 製 鋼 (株) 秋 山 精 鋼 (株) (株)川 口 金 属 加 工 高 周 波 熱 錬 (株) (株)神 戸 製 鋼 所 合 同 製 鐵 (株) 山 陽 特 殊 製 鋼 (株) J F E ス チ ー ル (株) J X 金 属 (株) 下 村 特 殊 精 工 (株) 大 同 特 殊 鋼 (株) 高 砂 鐵 工 (株) 東 北 特 殊 鋼 (株) 日 鉄 ス テ ン レ ス (株) 日 本 金 属 (株) 日 本 高 周 波 鋼 業 (株) 日 本 精 線 (株) 日 本 製 鉄 (株) 日 本 冶 金 工 業 (株) (株)広 島 メ タ ル & マ シ ナ リ ー (株)不 二 越 (株)プ ロ テ リ ア ル 三 菱 製 鋼 (株) ヤ マ シ ン ス チ ー ル (株) 理 研 製 鋼 (株)	愛 鋼 (株) 青 山 特 殊 鋼 (株) 浅 井 産 業 (株) 東 金 属 (株) 新 井 ハ ガ ネ (株) 粟 井 鋼 商 事 (株) 伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株) 伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株) (株)I S S リ ア ラ イ ズ (株)U E X 確 井 鋼 材 (株) ウ メ ト ク (株) 扇 鋼 材 (株) 岡 谷 鋼 機 (株) カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株) 兼 松 (株) 兼 松 ト レ ー デ ィ ン グ (株) (株)カ ム ス (株)カ ワ イ ス チ ー ル 川 本 鋼 材 (株) 北 島 鋼 材 (株) ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株) 小 山 鋼 材 (株) 佐 久 間 特 殊 鋼 (株) 櫻 井 鋼 鐵 (株) 佐 藤 商 事 (株) サ ハ シ 特 殊 鋼 (株) (株)三 悦 三 協 鋼 鐵 (株) 三 京 物 産 (株) 三 興 鋼 材 (株) 三 和 特 殊 鋼 (株) J F E 商 事 (株) 芝 本 産 業 (株) 清 水 金 属 (株) 清 水 鋼 鐵 (株) 神 鋼 商 事 (株) 住 友 商 事 (株) 住 友 商 事 グ ロ ー バ ル メ タ ル ズ (株)	大 同 興 業 (株) 大 同 D M ソ リ ュ ー シ ョ ン (株) 大 洋 商 事 (株) 大 和 特 殊 鋼 (株) (株)竹 内 ハ ガ ネ 商 行 孟 鋼 鉄 (株) 辰 巳 屋 興 業 (株) 千 曲 鋼 材 (株) (株)テ ク ノ タ ジ マ (株)鐵 鋼 社 デ ル タ ス テ ー ル (株) 東 京 貿 易 マ テ リ ア ル (株) (株)東 信 鋼 鉄 (株)ト ー キ ン 特 殊 鋼 機 (株) 豊 田 通 商 (株) 中 川 特 殊 鋼 (株) 中 島 特 殊 鋼 (株) 中 野 ハ ガ ネ (株) 永 田 鋼 材 (株) 名 古 屋 特 殊 鋼 (株) ナ ス 物 産 (株) 南 海 モ ル デ ィ (株) 日 金 ス チ ー ル (株) 日 鉄 物 産 (株) 日 鉄 物 産 特 殊 鋼 (株) 日 本 金 型 材 (株) ノ ボ ル 鋼 鉄 (株) 野 村 鋼 機 (株) 白 鷺 特 殊 鋼 (株) 橋 本 鋼 (株) (株)長 谷 川 ハ ガ ネ 店 (株)ハ ヤ カ ワ カ ン パ ニ ー 林 田 特 殊 鋼 材 (株) 阪 神 特 殊 鋼 (株) 阪 和 興 業 (株) (株)平 井 (株)フ ク オ カ 藤 田 商 事 (株)	古 池 鋼 業 (株) (株)プ ル ー タ ス (株)プ ロ テ リ ア ル 特 殊 鋼 平 和 鋼 材 (株) (株)堀 田 ハ ガ ネ (株)マ ク シ ス コ ー ポ レ ー シ ョ ン 松 井 鋼 材 (株) 三 沢 興 産 (株) 三 井 物 産 (株) 三 井 物 産 ス チ ー ル (株) (株)メ タ ル ワ ン (株)メ タ ル ワ ン チ ュ ー ブ ラ ー (株)メ タ ル ワ ン 特 殊 鋼 森 寅 鋼 業 (株) (株)山 一 ハ ガ ネ 山 進 産 業 (株) ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株) 山 野 鋼 材 (株) 陽 鋼 物 産 (株) 菱 光 特 殊 鋼 (株) リ ン タ ツ (株) 渡 辺 ハ ガ ネ (株)

“特集” 編集後記

昨年9月号から始まった「特殊鋼の基礎」シリーズですが、最終回の今号は「用語解説編」として機能材料・磁性材料を特集しました。一部に「鋼」ではないものも含まれておりますが、特殊鋼メーカーが取り扱う製品という位置づけで取り上げております。昨今のカーボンニュートラル社会への取り組みで注目される材料などもありますので、ご参照ください。

機能材料・磁性材料はそれぞれ用途や特徴ごとに材料を分類して、分かりやすくお伝えできるような内容としました。また、特集の前半部分には従来の特殊鋼製品の簡単な要約も加えましたので、初めて特殊鋼・機能材料に接する方の材料理解の入り口として、この特集号を辞書代わりにご活用いただけますと幸いです。もし本紙でご興味を持たれたり、さらに詳しく知りたい材料がありましたら、特殊鋼倶楽部のホームページから過去の特殊鋼誌を閲覧することが出来ますので、こちらもぜひご覧ください。

さて、今回の「特殊鋼の基礎」シリーズの元となった「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説」の初版が発刊されたのは、長野オリンピックが開幕し、明石海峡大橋が開通した1998年でした。その後の25年で地球温暖化は一段と加速し、特殊鋼各社でも脱炭素社会に向けた取り組みは喫緊の課題となっております。地球環境の保全やより良い社会の実現に向けて、「鋼」という既存の枠にとらわれずに「素材」という縁の下の力持ちとして社会に貢献したい。本特集で取り上げた多種多様の材料から、そんな意気込みもお伝えできれば幸いです。

最後になりましたが、本特集号にご寄稿頂きました執筆者の皆さま、ご協力を頂きました編集委員の皆さま及び事務局各位に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

〔大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 企画室 主任部員 深瀬美紀子〕

特 集 / 最近の特殊鋼原料事情

- I. 総論
- II. 鉄源
- III. レアメタル
- IV. 特殊鋼のリサイクル
- V. 会員メーカーの省資源・リサイクル関連技術と商品

3月号特集予定…特殊鋼の切断と最新動向

特 殊 鋼

第 72 卷 第 6 号
© 2 0 2 3 年 11 月
2023年10月25日 印刷
2023年11月1日 発行

定 価 1,252円 送 料 200円
1年 国内7,434円 (送料共)

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

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

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

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

「特殊鋼」誌第72巻索引

2023年1～11月

	号・頁
「2023年新年挨拶」……………藤岡 高広	1・1
「会長就任ご挨拶」……………清水 哲也	7・1
【年頭所感】	
「年頭所感」……………山下 隆一	1・3
「2023年を迎えるにあたって」……………大前 浩三	1・5
「激動の世界情勢にあって歩む道」…榎 巳芳	1・6
「2023年 年頭挨拶」……………水野 正士	1・7
「年頭所感」……………三原 雄二	1・8
「年頭所感」……………錦織 正規	1・9
「年頭所感」……………山下 敏明	1・10
「年頭所感」……………園田 裕人	1・11
「年頭のご挨拶」……………谷口 徹	1・12
【需要部門の動向】	
産業機械……………片岡 功一	1・13
カーボンニュートラルの特殊鋼業界への インパクトとその対応……………藤岡 高広	1・17
【一人一題】	
「36年目の体質改善！」……………福原 千里	3・1
「三つのしんか」……………野澤 哲夫	5・1
■ 特集記事 ■	
☆ 未来に貢献する新材料、新技術	
I. 自動車	
1. 愛知製鋼(株)…1・20	7. ㈱プロテリアル…1・30
2. 山陽特殊製鋼(株)…1・22	8. 大同特殊鋼(株)…1・31
3. 大同特殊鋼(株)…1・24	9. 日本製鉄(株)…1・33
4. 愛知製鋼(株)…1・26	10. JFEスチール(株)…1・35
5. 大同特殊鋼(株)…1・27	11. ㈱神戸製鋼所…1・37
6. ㈱神戸製鋼所…1・29	
II. 航空宇宙	
1. 日本冶金工業(株)…1・39	2. ㈱プロテリアル…1・40
III. 電気・電子	
1. 三菱製鋼(株)…1・41	3. 日本製鉄(株)…1・45
2. 大同特殊鋼(株)…1・43	4. ㈱神戸製鋼所…1・47
IV. 産業機械	
1. 日本冶金工業(株)…1・48	3. 日本高周波鋼業(株)…1・50
2. 大同特殊鋼(株)…1・49	
V. 建築・プラント・エネルギー・インフラ	
1. JFEスチール(株)…1・51	3. 日本製鉄(株)…1・54
2. 愛知製鋼(株)…1・53	4. 山陽特殊製鋼(株)…1・56
VI. 会員メーカーの新材料、新技術	
……………	1・58～1・60
日本高周波鋼業(株)、山陽特殊製鋼(株)、JFEスチール(株)	
☆ 特殊鋼の技術と用語のやさしい解説 (技術解説編)	
1. まえがき……………迫間 保弘	3・2
2. 工具鋼……………荒木 理	3・3
3. 機械構造用炭素鋼……………田中 優樹	3・7
4. 構造用合金鋼……………水谷 隆	3・12
5. ばね鋼……………宮田 将晴	3・16
6. 軸受鋼……………栗田 俊	3・20
7. ステンレス鋼……………東城 雅之	3・24
8. 耐熱鋼……………及川 誠	3・27
9. 快削鋼……………間曾 利治	3・32
10. ピアノ線材……………酒道 武浩	3・35
11. 高張力鋼……………柳田 和寿	3・38
12. マルエージング鋼……………大石 勝彦	3・42
13. 超合金……………大木優太郎	3・46
14. 電子材料……………堀部 孝広	3・49
15. 電磁鋼板……………山本 晋司	
尾田 善彦	3・53
☆ 金属3Dプリンター技術と業界の最新動向	
I. 総論 金属3Dプリンター技術の概論	
……………京極 秀樹	5・2
II. 金属粉末を用いる金属3Dプリンターの種類と特長	
1. 造形方式	
1) パウダーベッド方式	
①レーザービームを用いたパウダーベッド 方式の特徴……………加納 佳明	5・6
②電子ビーム金属積層造形の特長と 造形事例紹介……………飯田 雅彦	5・10
2) デポジション方式 (指向性エネルギー堆積法)	
……………吉村 仁	5・13
3) バインダージェット方式……………高橋 友	5・16
III. 金属粉末製造技術と特長	
1. 金属3Dプリンタ用原料粉末の製造に用いられる ガスアトマイズ法の特長……………澤田 俊之	5・19
2. プラズマ回転電極法についての最近の 研究開発動向……………千葉 晶彦	5・22
3. 水アトマイズ法の特徴と最新動向	
……………相原 道孝	5・28
IV. 二次加工技術と造形適用事例	
1. 二次加工技術	
①研磨	
Drylyte [®] テクノロジー (乾式電解研磨装置DLyte) のご紹介、および組み合わせ研磨による 表面改質について……………成川 慎一	5・31
②金属積層造形品の品質改善に使用される HIP処理とは……………増尾 大慈	5・35
③積層造形へのブラスト・ピーニング技術	
……………辻 俊哉	5・38
2. 造形適用事例	
①航空宇宙分野への適用……………橘 孝洋	5・42
足立 将基	
②各種金型への適用……………高田 真	5・45
③金属3Dプリンターの歯科医療への適用	
……………石野 享	5・50
④銅系粉末を使用した高周波加熱用コイルの 3Dプリンタによる造形……………今増 寿尚	5・54
大沼 悠人	
V. わが社の製品紹介	
……………	5・57～5・60
山陽特殊製鋼(株)、大同特殊鋼(株)、日本精線(株)、 ㈱プロテリアル	

☆ 特殊鋼の技術と用語のやさしい解説 (用語解説編・鉄鋼用語)

I. 製鉄・製鋼

直接還元製鉄法... 7・2 転炉... 7・11
グリーンスチール... 7・4 AOD、VOD... 7・11
COURSE50 取鍋精錬(脱ガス)... 7・13
(革新製鉄プロセス技術開発)... 7・4 連続鋳造法... 7・15
SUPER-COURSE50... 7・5 タンディッシュ... 7・17
CCS・CCUS... 7・5 電磁攪拌装置... 7・17
高炉... 7・6 軽圧下... 7・18
アーク炉... 7・7 鋼片... 7・18
炉体巡回式電気炉(STARQ)... 7・8 造塊法... 7・19
スクラップ予熱式電気炉... 7・9 VIM... 7・19
偏心炉底出鋼... 7・10 ESR・VAR... 7・20
溶銑予備処理... 7・10

II. 圧延・二次加工

圧延(鋼片、線材、棒鋼)... 7・21 非破壊検査、超音波探傷試験、
コンパクトミル... 7・22 磁気探傷試験、浸透探傷試験、
RSM... 7・23 過電流探傷試験、漏洩磁束探傷試験
3ロールブロックミル... 7・23
圧延ロール 2次加工(線材の伸線)... 7・28
鋳鉄(グレン、ダクタイル)、 冷間鍛造... 7・29
鋼系(アダマイト、黒鉛)、 熱間鍛造... 7・30
ハイス、WC... 7・24 熱冷複合鍛造... 7・31
加工熱処理 TMCP... 7・25 軸肥大加工... 7・31
精密圧延・精密圧延材... 7・25

III. 材質

非調質・非調質鋼(冷鍛)... 7・32 耐腐蝕性、耐酸化鋼、低ひずみ鋼... 7・36
非調質鋼(熱鍛用途、直接切削用途)... 7・33 熱処理時間短縮鋼... 7・37
焼鈍、焼準省略鋼... 7・34 高纯净度鋼... 7・38
耐遅れ破壊、耐遅れ破壊非調質鋼... 7・35 非鉛快削鋼... 7・39

IV. 熱処理(鋼材組織)

Fe-C(鉄-炭素)系平行状態図... 7・40 窒化、硫化... 7・44
恒温変態線図(TTT)... 7・40 固溶化熱処理... 7・45
連続冷却変態曲線(CCT)... 7・41 焼入れ・焼戻し... 7・46
変態... 7・41 焼ならし(焼準)、焼なまし(焼鈍)... 7・46
残留オーステナイト... 7・42 サブゼロ処理... 7・47
時効... 7・42 パテンチング... 7・47
非金属介在物... 7・42 リターデット、EDC、DLP... 7・48
中心偏析... 7・42 熱処理炉、浸炭焼入れ炉... 7・50
浸炭、浸炭窒化、浸炭焼入れ... 7・43 雰囲気ガス... 7・51
真空熱処理... 7・43

☆ 切削加工の基礎と最近の動向

I. 総論

1. 切削加工の歴史・現状とその原理
..... 笹原 弘之 9・1

II. 切削加工のトレンド

1. 切削加工の高速化... 中川 純一 9・6
2. 切削シミュレーション... 鯨井 孝典 9・10

III. 切削加工機の種類

1. 旋盤... 藤原 卓也 9・15
2. ボール盤... 谷崎 泉 9・18
3. マシニングセンタ... 多賀 充 9・20
4. 複合加工機... 家田 光将 9・22
5. ホブ盤... 瓜生耕一郎 9・24

IV. 切削工具の種類

1. 旋削工具... 古屋 孝一 9・27
2. 深穴加工のトレンドと超硬ドリルの進化
..... 山本 剛広 9・30
3. エンドミルとは—基礎・種類と用途・進化—
..... 岩田 正己 9・33

V. 先端加工技術の紹介

1. ハードワーリング加工... 永井 太郎 9・35

2. 最新ワイヤ放電加工技術による加工事例
..... 近久晃一郎 9・37

VI. 切削加工に対する会員メーカーの取り組み
..... 9・39~9・41
フジオーゼックス(株)、(株)不二越、(株)プロテリアル

☆ 特殊鋼の技術と用語のやさしい解説 (用語解説編・新材料、磁性材料等)

I. 構造用鋼... 山崎 歩見 11・1

II. 工具鋼... 福元 志保 11・4

III. 特殊用途鋼

1. 快削鋼... 11・7 6. 高張力鋼... 11・15
2. ステンレス鋼... 11・9 7. マルエージング鋼... 11・17
3. 耐熱鋼... 11・11 8. ピアノ線材... 11・18
4. 軸受鋼... 11・12 9. 肉盛合金・溶接材... 11・19
5. ばね鋼... 11・14

IV. 機能材料

1. 形状記憶合金・超弾性合金... 11・20 10. 超電導... 11・32
2. 低熱膨張合金... 11・22 11. チタン合金... 11・33
3. 金属間化合物... 11・23 12. 金属箔... 11・35
4. 医療用材料... 11・25 13. ターゲット材... 11・37
5. 放熱材料... 11・26 14. ハイエントロピー合金... 11・39
6. 超合金... 11・28 15. 金属積層造形材... 11・40
7. 制振鋼板... 11・29 16. 電磁波吸収材... 11・41
8. 制振合金... 11・30 17. 電気抵抗材料... 11・42
9. クラッド材... 11・31

V. 磁性用語... 齋藤 章彦 11・44

VI. 硬質磁性材料

1. 希土類磁石... 11・48 3. フェライト磁石... 11・50
2. ボンド磁石... 11・49

VII. 軟質磁性材料

1. 電磁鋼板... 11・51 4. アモルファス・ナノ結晶合金... 11・56
2. 電磁ステンレス鋼... 11・52 5. 粉末軟磁性材料... 11・58
3. 電磁軟鉄、パーマロイ... 11・54

VIII. 非磁性

1. 非磁性鋼... 11・59 2. 非磁性ステンレス鋼... 11・61

【業界の動き】... 毎号掲載

【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... 毎号掲載
▲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)... 毎号掲載
▲特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の
推移... 毎号掲載
▲特殊鋼鋼材の流通在庫の推移(商社+問屋)... 毎号掲載
▲特殊鋼鋼材の輸出入推移... 毎号掲載
▲関連産業指標推移... 毎号掲載
▲特殊鋼需給統計総括表... 毎号掲載

【倶楽部だより】... 毎号掲載

【特殊鋼倶楽部の動き】... 1・71、3・65、7・61、11・71

◇お知らせ

第247・248回西山記念技術講座... 3・70
メタルジャパン 関西展に常設出展... 3・73
メタルジャパン 東京展に継続出展... 9・51
第74回白石記念講座... 9・52
第249・250回西山記念技術講座... 9・55

【会員会社一覧】... 毎号掲載