

特殊鋼

2019
Vol.68 No.4

7

The Special Steel

特集／特殊鋼の合金元素の基礎知識



特殊鋼

7

目次

2019

【編集委員】

委員長	井上幸一郎 (大同特殊鋼)
副委員長	渡辺 豊文 (中川特殊鋼)
委員	沢田 譲 (愛知製鋼)
〃	増田 智一 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	小川 道治 (大同特殊鋼)
〃	洲崎 恒年 (日鉄日新製鋼)
〃	正能 久晴 (日本金属)
〃	殿村 剛志 (日本高周波鋼業)
〃	浜田 貴成 (日本製鉄)
〃	戸塚 覚 (日本冶金工業)
〃	北園 大輔 (日立金属)
〃	福田 方勝 (三菱製鋼)
〃	阿部 泰 (青山特殊鋼)
〃	池田 正秋 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	岡崎誠一郎 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	金原 茂 (竹内ハガネ商行)
〃	平井 義人 (平井)

【特集／特殊鋼の合金元素の基礎知識】

I. 総論

資源としての合金元素

…………… 国立研究開発法人物質材料研究機構 原田 幸明 2

II. 合金元素の役割

1. 主要5元素……………	愛知製鋼(株)	宇田川毅志	10
2. 高温強度……………	日立金属(株)	田村 庸	12
3. 耐食性……………	日本冶金工業(株)	戸塚 覚	15
4. 結晶粒制御……………	山陽特殊製鋼(株)	橋本 和弥	17
5. 被削性……………	大同特殊鋼(株)	大橋 亮介	20

III. 合金元素の応用

1. 高張力鋼……………	日本製鉄(株)	古谷 仁志	24
2. 超強力鋼 (マルエージング鋼)	……………	……………	……………
……………	日立金属(株)	西田 純一	28
3. 構造用鋼……………	愛知製鋼(株)	牧野 孔明	30
4. ばね鋼……………	三菱製鋼(株)	蓑口 光樹	33
5. 軸受鋼……………	山陽特殊製鋼(株)	藤松 威史	36
6. 快削鋼……………	日本製鉄(株)	長谷川達也	39
……………	日本製鉄(株)	伊藤 誠司	……………
7. 工具鋼……………	日立金属(株)	福元 志保	42
8. ステンレス鋼……………	日鉄ステンレス(株)	柘植 信二	45
9. 耐熱鋼……………	日本冶金工業(株)	平田 茂	49
10. 超合金……………	大同特殊鋼(株)	鷲見 芳紀	54
11. 機能材料			
(1) 電子材料……………	(株)日立金属ネオマテリアル	横山紳一郎	57
(2) 電磁鋼板……………	JFEスチール(株)	高島 稔	60

(3) 磁石	愛知製鋼(株)	山崎 理央	63
12. チタン合金	(株)神戸製鋼所	森倉 功和	66
“特集”編集後記	愛知製鋼(株)	沢田 譲	79

● 「ご挨拶」	一般社団法人特殊鋼倶楽部	会長 樋口 眞哉	1
---------	--------------	----------	---

■ 業界の動き	69
---------	----

岡谷鋼機、創業350周年で各種計画 中川倉庫新築や記念コンサート
クマガイ特殊鋼、プラズマ切断機増設 厚板溶断能力2割増
三和特殊鋼が第4次中期経営計画 年商50億円へ基盤づくり
大同DMソリューション 工具鋼加工事業、国内外で強化
大洋商事、フィリピンで産機部品加工 新会社設立、20年初に稼働、他

▲ 特殊鋼統計資料	72
-----------	----

★ 倶楽部だより (2019年4月1日～5月31日)	76
----------------------------	----

経済産業省からのお願い	77
-------------	----

☆ 一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧	78
-----------------------	----

特集／「特殊鋼の合金元素の基礎知識」編集小委員会構成メンバー

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	沢田 譲	愛知製鋼(株)	品質保証部 お客様品質・技術室 主査
委員	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	東京支社部長 自動車・産機営業部 自産機CS室長 品質保証部
〃	大矢 耕二	大同特殊鋼(株)	ソリューションパートナー部 副主席部員
〃	洲崎 恒年	日新製鋼(株)	商品品質・技術サービス部 特殊鋼品質・ 技術サービスチーム 主任部員
〃	戸塚 覚	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 部長
〃	古谷 匡	日立金属(株)	特殊鋼カンパニー 技術部長
〃	福田 方勝	三菱製鋼(株)	技術開発センター
〃	渡辺 豊文	中川特殊鋼(株)	鉄鋼事業部 技術部長
〃	金原 茂	(株)竹内ハガネ商行	技術部長

「ご挨拶」



一般社団法人特殊鋼倶楽部 会長 樋口 眞哉

2019年5月の一般社団法人特殊鋼倶楽部第38回定時総会、理事会で、前任の石黒大同特殊鋼株式会社社長の後を受け、会長に選任されました山陽特殊製鋼株式会社社長の樋口眞哉です。

石黒前会長は、「日本のものづくりを特殊鋼が支えている」との我々の思いを広く伝えていくことが当倶楽部の使命と述べてこられました。私も、「特殊鋼の本当の価値」を、①ユーザー業界、②学生など一般社会、③外国政府も含めた海外に、広く認知して頂けるよう努めていく所存です。

ご案内のとおり、特殊鋼は、最先端技術の「粋」です。国語辞典を開きますと、「特殊」には「限られた若干のものだけにいえること」という意味と、「平均的なものを超えていること」という意味があります。日本の特殊鋼は、正しく「平均的なものを超えている」鋼です。

今年は令和元年ですが、平成を振り返りますと、我が国における特殊鋼の熱延鋼材生産量は、平成元年は1,590万トンでしたが、平成30年は2,080万トンと3割増えています。決して「限られた若干のもの」ではなく、我が国の製造業の競争力の根本を支える成長産業です。

我が国特殊鋼業は、自動車等のユーザーと共同で開発を行い、品質の素材への「つくり込み」によって、加工コスト削減、軽量化等を実現してきましたが、海外では、このような直接協力は、一般的ではありません。ユーザーのニーズに応じて日本の特殊鋼業は技術・品質・サービスを高め、その特殊鋼を用いたユーザーが世界市場で繁栄する関係が機能してきました。一方で、電極などの副資材価格や物流価格の高騰等、我々特殊鋼業界を取り巻くコスト事情は大変厳しく、増収減益という状況下にあります。主要設備が老朽化してくる中、上記のユーザーとのwin-win関係を維持していくために、再生産可能な水準の収益確保が必要です。そのためにも、サ

プライチェーン全体での「特殊鋼の本当の価値」の理解を深めていきたいと思えます。

人手不足も深刻な問題です。学生など一般社会にとっては、特殊鋼そのものが知られていない場合も多く、知っていても成熟産業、衰退産業とのイメージなのではないでしょうか。上述の通り、特殊鋼は成長産業ですし、我々が連携していけば特殊鋼の未来は明るいと思っています。平成の30年間、更には昭和の時代も含め、我が国特殊鋼業は、世界一の技術水準を維持し、主要な外貨獲得産業であり続けてきた「しぶとい産業」です。我々も特殊鋼の性能を生かしきれていない面が多々あり、日夜、開発・改良を続けていますが、まだまだ技術的にも発展の余地があります。こういった「特殊鋼の本当の価値」を、学生など一般社会に伝える必要があります。

米国の鉄鋼に25%の輸入関税を課し、また、米中貿易摩擦が激化し、世界的に保護貿易的な動きが相次いでいます。しかしながら、日本の特殊鋼は、輸入国の国内産業では製造できない高性能・高付加価値の製品で、輸入国の国内産品と競合しておらず、輸入関税が課せられると、輸入国のユーザー産業の競争力を損なうことになります。通商問題にしっかり対応し、海外でも日本の「特殊鋼の本当の価値」を正しく理解してもらうことがより重要となっています。

特殊鋼倶楽部は、1952年に設立され、特殊鋼流通の円滑化と需要の拡大という共通目標達成に向けた、メーカーと販売業者が平等の資格の合同組織です。特殊鋼業界の直面する課題の中で、個社では対応が難しい課題、一企業ではなし得ないことに、特殊鋼倶楽部として、会員が連携、協力して取り組んでいくことが必要と考えております。皆様からの特殊鋼倶楽部及びその会員各社へのご支援をお願い申し上げます。

I. 総論

資源としての合金元素

国立研究開発法人 物質材料研究機構 名誉研究員 原田 幸明

◇ 素材Japanは今も健在

まず図1を見ていただきたい。これは1990年以降の日本の輸出製品の金額構成を分野ごとに見たものであり、リーマンショックや東日本大震災のまえの2009年に発表したものを現時点でフォローしたものである。2009年当時には工業素材の輸出シェアが自動車の輸出シェアを抜いて、まさに「素材Japanである」との指摘を行った¹⁾が、それ以降も、自動車に大きく差をつけ、今や我が国の

輸出製品の金額で1/4は工業素材となっている。素材Japanは量的な側面では今もますます盛んである。その工業素材のうちの1/4は鉄鋼および鉄鋼二次加工製品であり、我が国の産業の中での鉄の占める位置は依然として大きいものがあるといえる。

このように日本の産業にとって大きな位置を占める素材であるが、その素材の原料となる資源のほとんどを海外からの輸入に頼らざるを得ないのが我が国の現状であり、資源の安定確保は我が国の重要課題となっている。特に、近年の資源状況

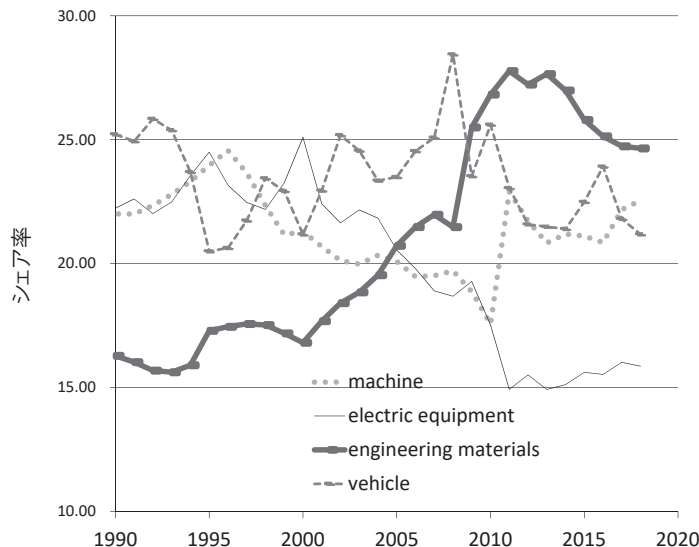


図 1 我が国の輸出の金額シェアの推移

は、ひとつに発展途上国の経済成長による資源需要の急速な拡大、さらに従来欧米などの支配下にあった資源保有諸国の権利としての発言権の増大、そしてそのような状況をも踏まえた、資源の金融商品化の動きの強まり、という大きな変化を迎えており、安定で持続的な供給のための努力は欠くべからざる存在になっている。

鉄資源も現有埋蔵量を年間消費量で割ったいわゆる静的耐用年数がいまや100年を切り70年代になってきているが、さらに特殊鋼の合金元素成分は相対的に不安定な市場を形成しているレアメタルに属しており、その資源対策は極めて重要である。

◇ レアメタルと特殊鋼

特殊鋼はもちろん鉄鋼のグループに属する。しかし合金化の成分はレアメタルに属している。レアメタルとは、実は和製英語である。英語でレアメタルに相当する言葉はマイナーメタルであり、鉄や銅のように世界的な規模での市場が確立してしるメジャーメタルに対して、小規模で不安定な市場の金属を指している。このマイナーメタルに属しながらも我が国の産業にとって重要で政策的な対応が必要な金属に対して、1980年代に当時の通産省が名付けたのがレアメタルである。

現在レアメタルというとインジウムやタンタル、

コバルトなどハイテク電子部品に使用されている金属が中心だと思われがちであるが、実はレアメタルと命名したときに注目されていて物は合金鋼に用いられる成分なのである。図2に使用量の多いレアメタルを横軸にその年間使用量、縦軸に合金やメッキとして鉄鋼と一緒に使用される割合を示しており²⁾、量的にいうならばレアメタルの大部分が鉄と共存して使用されていることがわかる。

またもう一つの視点がある。合金鋼は鋼材そのものとしてはそのベースとなっている元素は鉄であり量的にも成分の大部分を占めている。しかし、これを資源の目で見ると大きく変わってくる。目の前にある鋼材なり製品なりの重量、それは現実的な重量であるが、この鋼材なり製品を作るときにどのくらいの資源を使っているのかという見方をすれば、その量や構成比率が大きく異なってくる。たとえば消費者の手元に50gのスプーンがあったとする。もちろんその重量は50gである。しかしそのスプーンは一個当たり60gのステンレスから打ちぬかれているかもしれない。その60gのステンレスをつくるのに鉄が50g、ニッケルが10g要ったとする。その鉄50gを作るためには100gの鉄鉱石が必要で、還元のためにまた100g程度のコークスも必要になる。そのコークスや鉄鉱石を得るために、資源採取の現場では合わせて400gの天然資源が消費されている。ニッケル10gの場合

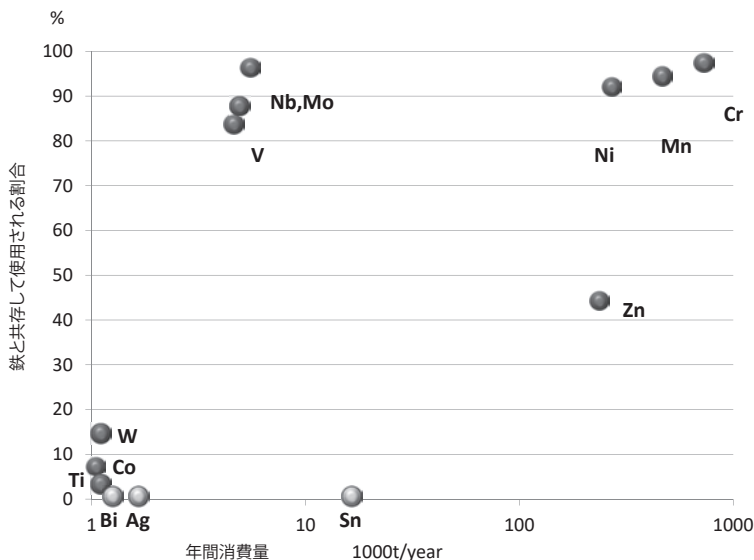


図 2 レアメタルの消費量と鉄と共存して使用される割合

には、その量は2.6tonにもなり、これを合わせると3tonの天然資源が50gのスプーンのために消費されたことになる。

このスプーン50gを消費端量、3tonを資源端量と呼ぶとわかりやすい。この資源端重量は正式にはTMR (Total Material Requirement: 関与物質総量³⁾) と呼ばれるもので、製品や素材の背後に背負っているということでエコロジカル・リュックサック⁴⁾とも呼ばれる。あえて和訳すれば環境背後量とでもいうところであろう。

資源端重量で見れば、合金鋼にはもはや鉄というより添加元素のほうが大きいものが多い。なぜならば鉄の1kg当たりの関与物質総量は8kg程度であるが、ニッケルなど多くの添加元素の関与物質総量は1kgあたり数百から数千と大きな値になるからである。図3にさまざまな合金鋼の資源端重量を示した。すなわち縦軸は1トンの消費端重量に対して何トンの資源端重量があり、その構成を色分けしてある。図には示していないが普通鋼は約8であり、多くの合金鋼の鉄の寄与部分は灰色で示してある。Cr、Mn系はあまり大きな変化はないが、Ni、W、MOなどを含むと資源端重量は極めて大きくなり、SKH2やSUS316では50近い値

になっており、その大部分がNi、W、MO、V等の添加レアメタルである。このように合金鋼は資源の目から見ると、もはや鉄というよりレアメタルの方に属するのである。

◇ 偏在する資源と中国に集中する生産

では特殊鋼に使用される合金元素の現状を見てみよう。周知のように特殊鋼の合金元素の多くはフェロアロイの形で鉄に添加される。このフェロアロイの貿易フローを国連貿易統計のデータ⁵⁾をもとにビジュアライズしたものが図4a、図4bである。図のそれぞれの点はデフォルトした国を表し、白抜きで数字が入っているものは有力輸出国でISO国名コードをうっている。数字はその金額(輸出入がある場合は相殺)、白丸に黒字は輸入国、線は貿易の流れで輸入側の金額をもとに太さを表している。図4aは1990年のもので図4bは2017年のものであり、ちょうど平成の初めと終わりの世界の状況を比較したものになっている。

1990年にはフェロアロイは南ア(ZA)、ブラジル(BR)、ノルウェー(NO)などから、日本(JP)、ロシア(当時はソ連、RU)に集中している。なお1,000,000は金額の単位でドルで表されている。こ

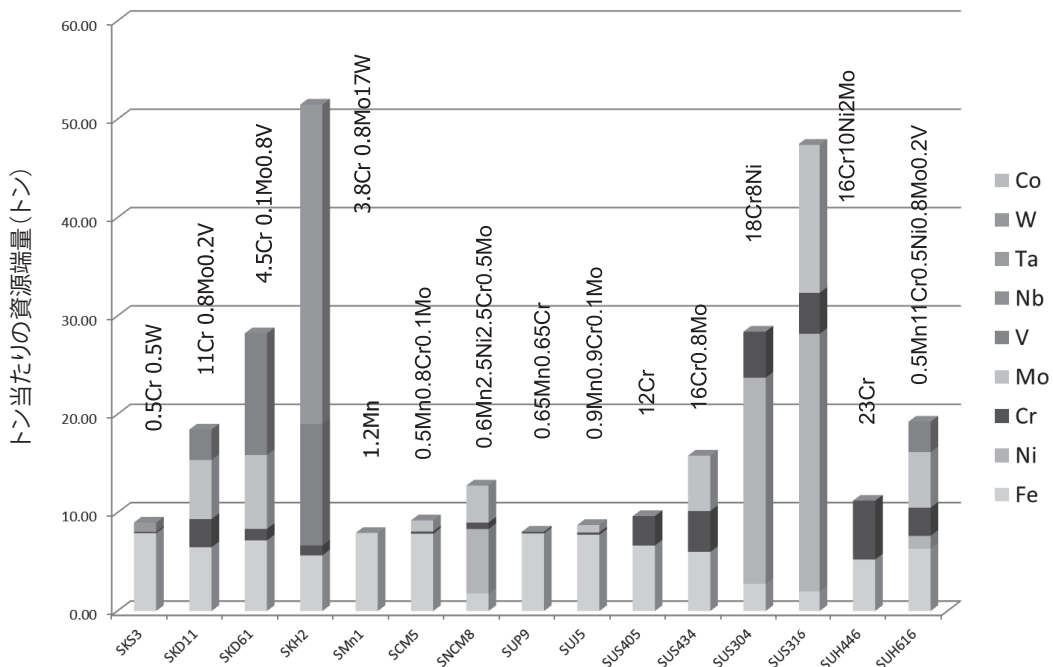


図 3 合金鋼の資源端量

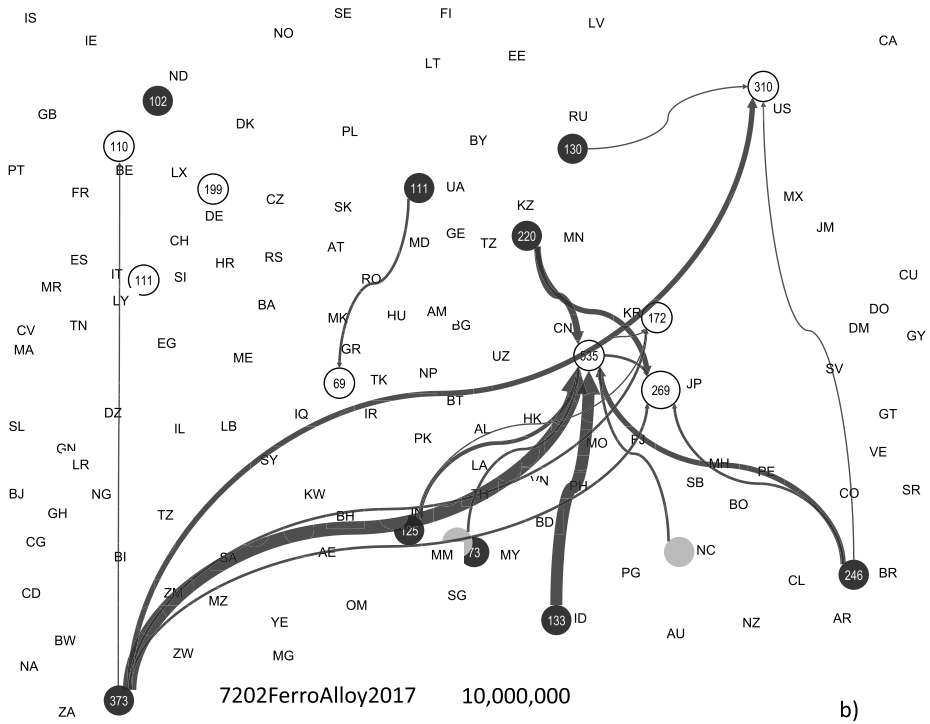
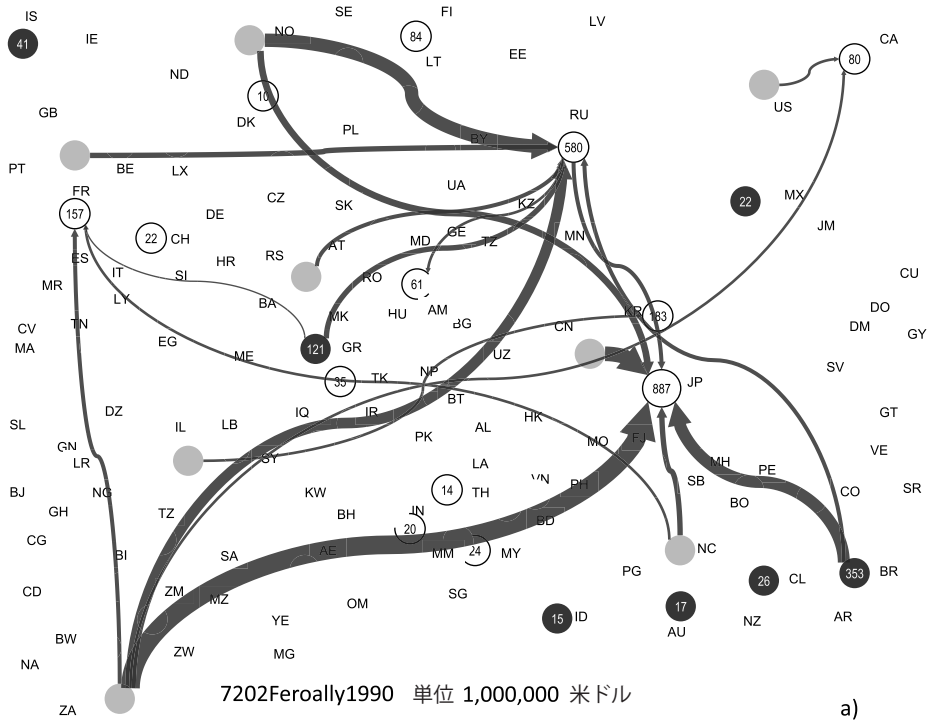


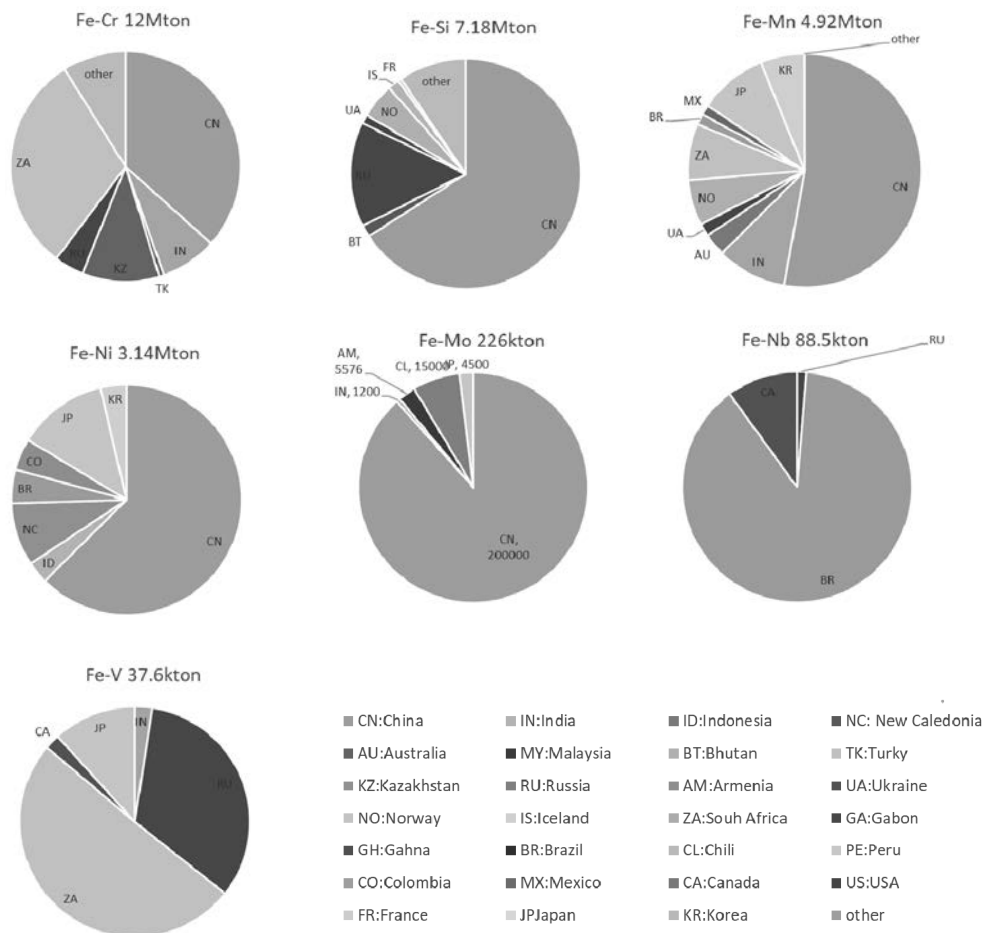
図 4 フェロアロイの貿易フロー a) 1990年b) 2017年

れに対し2017年では、まず取引額がヒト桁増大し、ほとんどのフェロアロイが中国に流れ込んでいる。日本の輸入金額も3倍にアップしているものの、世界の流れの中ではもはやマイナーな存在になっている。またその中国への大きなフローの形成に合わせて、インドネシア (ID)、インド (IN)、マレーシア (MY)、カザフスタン (KZ) さらにはミャンマー (MM) など新たな資源国が登場してきているのも変化の特長である。

これをフェロアロイの生産の側から見たものが図5aであり、米国鉱山局 (USGS)⁶⁾ の mineral commodity 情報をもとに作成してある。Fe-Mo、Fe-Si、Fe-Ni、Fe-Mnでは中国の生産が半数以上のシェアを占めている。Fe-Nbは後にふれるNb資源の特殊性でブラジルがほとんどの産出と生産を行っている。Fe-Vで中国の産出がないが、これはV資源やその埋蔵量の関係、さらにはここでは紹

介できていないが国連貿易統計で中国がFe-Vを生産していないとは課が得られず、これはUSGSのデータに抜けがあったとみるべきであろう。また、Fe-Ni、Ne-Mn、Fe-Vでは日本もかなりの生産シェアを持っている。これは日本に資源があるからではなくフェロアロイ原料を輸入してフェロアロイ化を国内で行っているためである。韓国 (KR)、フランス (FR) など日本ほどではないがフェロアロイを製造している。

日本等のケースを考えれば資源という視点で見ると、フェロアロイの製造よりも元素自体の産出を見るのが適切ということになる。図5bはそれぞれの金属分の国ごとの産出、図5cはその埋蔵量を示した。Crは最大の埋蔵量の国はカザフスタンであり、南アフリカがそれに次ぎ、そこにインドを加えるとほとんどこの3国で埋蔵量シェアは占められる。生産では南アフリカが約半分の



a)

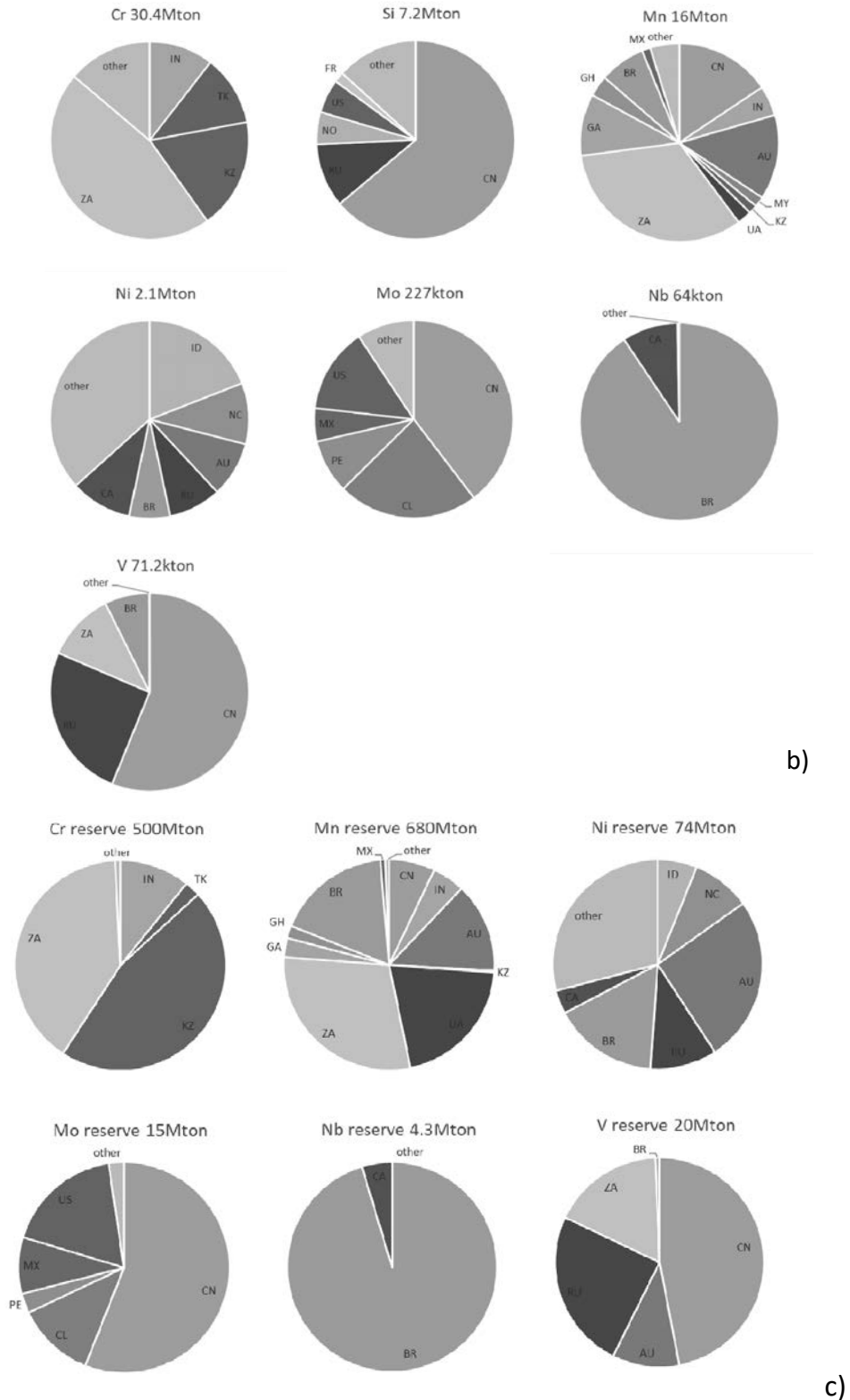


図 5 フェロアロイ元素の a) フェロアロイ生産量、 b) 元素産出量 c) 元素埋蔵量

シェアを持ち、トルコ（TK）がインドを凌ぐ産出国となっている。Siは普遍的に存在しているため埋蔵量のデータはUSGSにはない。産出状況は中国が2/3とFe-Siとほぼ同じシェア関係になっている。Mnの埋蔵量は南アフリカ、ウクライナ（UA）でほぼ半分を占め、それにブラジル、オーストラリア（AU）が続く。産出は1/3が南アフリカであり、中国、オーストラリア（AU）と続くがガボン（GA）、ガーナ（GH）のアフリカ諸国が参入している。Niは鉄とともに地球のコアに存在することもあり元素の中では比較的偏在性が弱く、特に近年酸化鉍であるラテライトが製錬の対象となってきたため低緯度地域での採掘可能性が増している。埋蔵量としてはオーストラリア、ブラジル、ニューカレドニア（NC）が大きく、ロシア、インドネシア（ID）などが有力であるが、中国にはあまりない。産出もインドネシア、ニューカレドニア、オーストラリアと南の方の占める割合が大きい。一方で埋蔵量的にみてこれか中国依存度の増大が懸念されるのがMo、Vであり、埋蔵量の半分が中国にある。産出もすでに中国依存度が大きくなっており、Vでは半分を超え、Moでは2/3でありそれまで最大の産出国であったチリ（CL）を抜いてしまっている。Nbは例外的存在でブラジルのアラシャにNbの濃縮された良質な鉍山があり、世界の埋蔵量、生産のほとんどを担っている。ブラジルは他の資源国と比べると安定な状態にあるために現在そう問題にならないが、資源の偏在性という意味では注意をしておくべき存在でもある。

◇ これからの金属資源

ここまで特殊鋼の合金成分の資源状況を見てきたが、それにとどまらず全体として資源の状況は厳しいものがある。資源の需要と消費は産業革命以来うなぎのぼりであり、特に近年は発展途上国の経済の急速な拡大と、電気自動車の電池やモーターに代表される新たなイノベーションの追及の二つの側面から今までにない速度で資源需要が高まっている。さらに注意しなければならないのは経済のカジノ経済化であり、多くのレアメタル類が投機の対象となってきており、ちょっとした需給動向変化を予測させる情報で価格が大幅に変動するなど安定供給が阻害される要因が増している。さらに鉍山会社のM&Aが進む中で持続可能な新規の採掘技術の発展も難しい状態も出てきつつあり、従来のように資源需要に対しての安定供給体制を確保するには大きな努力が必要な時代に突入している。

需要面で見てもこの21世紀に大きな変化が訪れることが予想される。一般に発展途上の国々では鉄をはじめとする金属の一人当たりの国内需要量はそのくのにGDPとほぼ比例関係で成長してきた。これが発展段階を終え一人当たりGDP一万ドルに達するとほぼ横ばいとなる。これは発展段階では道路や電気などの社会インフラに大量の資源が投入されることから理解できよう。そして、21世紀の末には殆どの国々が一人当たりのGDP一万ドルに達すると予想されている。これは資源需要が（人口）×（日本、アメリカ並みの一人当た

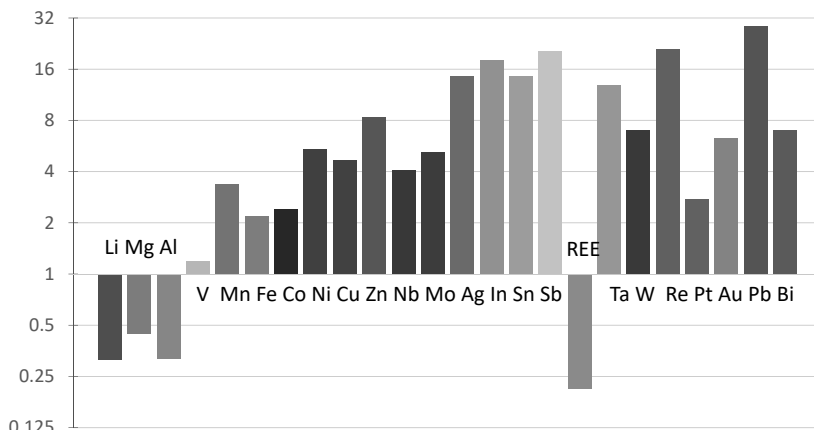


図 6 2100年までに必要とされる金測量の予測（各金属の現有埋蔵量を1として）

り消費量)になることを意味している。

そのようにして計算し、2100年までに必要となるとされるそれぞれの金属の量をその金属の現有埋蔵量を1としてあらわしたのが図6である⁷⁾。すなわち、2100年までの需要を現有埋蔵量のみで賄えるものは、Li、Mg、Alそれにレアアース(主として軽希土)ぐらいしかなく、鉄でも現有埋蔵量の倍の需要が予想され、他の金属類に至っては数倍から数十倍もの需要が予想されるのである。

これに対する対策は、かつて元素戦略でかかげた「減量化」「循環」を推し進めることである。現在、資源価格が一時期の急騰期を過ぎて一時的な停滞期に入り、10年前のような騒ぎはひと段落ついているかのような感覚が蔓延している。しかし、着実に資源需要の増大、資源の流れの集中、持続可能な供給の不安定化は起こっている。これがカタストロフィーとなって表れてからではすでに打つ手をなくした状況に追い込まれているだろう。

かつての元素戦略⁸⁾が希土類などの資源問題の激化に先行して手を打ち始めたように、「減量化」「循環」の新たな対応が求められている。

参考文献

- 1) 原田、井島、片桐、「トレードフローで見る日本素材産業の位置」日本金属学会誌、Vol.73、No.3(2009)161-170
- 2) 原田「希少金属の現状と対策」西山記念講座215、216回(2013)3-16
- 3) 「関与物質総量(TMR)の算定」NIMS-EMC材料環境データNo.10(2008)
- 4) F. シュミットブリーク「ファクター10 エコ効率革命」佐々木健訳、スプリングー・フェラク、東京(1997)
- 5) UN COMTRADE Database、<http://comtrade.un.org/db/>
- 6) 「Commodity Statistics and Information」National Minerals Information Center <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information>
- 7) 原田「都市鉱山の概要」化学工学 Vol.82(2018)No.8 p410-413
- 8) 原田、河西「動き出したレアメタル代替戦略」日刊工業(2011)



Ⅱ. 合金元素の役割

1. 主要5元素

愛知製鋼(株) 品質保証部 担当員 うだ がわ 宇田川 たけ し 毅 志
お客様品質・技術室

まえがき

主要5元素とは、炭素 (C)、珪素 (Si)、マンガ (Mn)、リン (P)、硫黄 (S) を示します。鉄鋼材料の多くは成分値について、上限や下限の値が元素ごとに定められています。これは各元素の含有率によって鋼の機能が決定するためです。元素はそれぞれ役割をもっており、意図的に添加されているものもあれば、可能な限り、少なくしたいものの、製造工程上、完全には取り除けないものもあるため、含有してもよい上限だけを定めて品質管理を行っているものもあります。

◇ 各元素の役割

炭素 (C)

炭素は、特殊鋼として最も重要な元素といえます。材料中の鉄と結合し、硬さの硬いセメンタイト (Fe_3C) となり、非常に薄い層状のフェライトとセメンタイトが交互に並んだ状態を析出するパーライトを形成します。写真1に示すように炭素の含有率が高いほど、パーライト分率が多くなり²⁾、硬さは硬くなります。なお、鉄と炭素のみの材料ならば、0.77%の炭素を含有することで、フルパーライト組織になります。

また、焼入処理を行う材料においては、図1に示すように炭素含有率によってマルテンサイト硬さは決定し、炭素の含有率が増加するに従い、硬さは硬くなります¹⁾。

その他、炭素含有率が高くなると溶接性が大幅に悪化します。

鉄鋼材料においては、機能的性質に一番大きく寄与する元素となります。

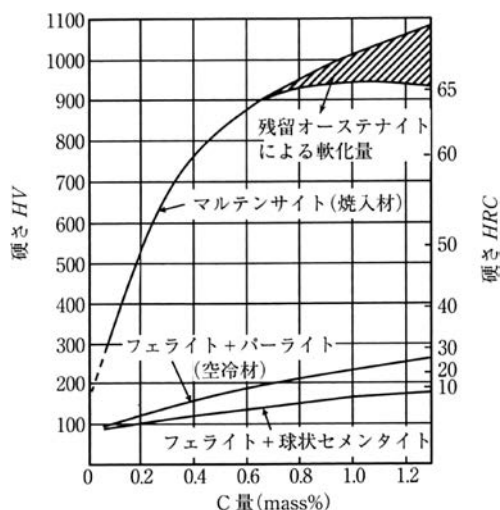


図 1 C量と硬さ

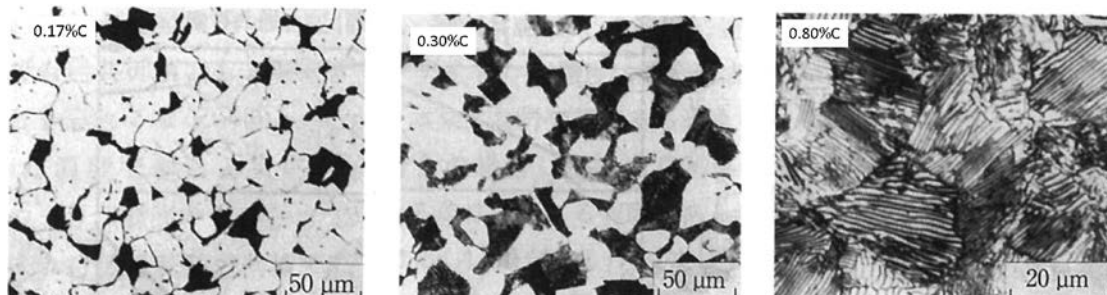


写真1 C量の違いによる組織の違い

珪素 (Si)

珪素はフェライトを安定化する元素で、材料中のフェライトに固溶し、フェライト硬さ（引張強度）を向上させるのに非常に有効な合金で、一般的には0.35%程度含有されます。また、耐熱性にも優れており、図2に示すように添加量を多くすることで、焼入後の焼戻し時の硬さ低下を抑制する効果があります²⁾。ただし、添加量が多すぎると材料が脆化（靱性が低下）してしまいます。また、浸炭鋼に対しては浸炭性を悪化させるという欠点もあります。

珪素が高い材料としては高Siのバネ鋼があり、高いものでは約2%の珪素が含有されています。

鋼の製造工程においては、製鋼時に脱酸材として用いられる合金です。また、高温加熱で脱炭を助長する成分であるため、注意が必要です。

マンガン (Mn)

材料中の靱性を向上させるのに非常に有効な合金です。ただし、添加量が多すぎると、逆に材料が脆化（靱性が低下）してしまいます。

また、焼入性を高めるのにも非常に有効な合金であり、微細なパーライト形成を促進する元素でもあるので、大半の特殊鋼には添加されている元素です。後述しますが、硫黄 (S) との結合力が強いため、Mn以外の元素との硫化物を形成させない効果もあります。

オーステナイトを安定化する元素であり、ステンレス鋼においては代表例として、ハッドフィー

ルド鋼のようなMnを多く含み、Niを少なくした鋼もあります。また、構造用鋼（焼入鋼）においては多量に添加すると残留オーステナイトを生成するため、硬さが低下することがあり、注意が必要です。

製鋼時に脱酸材として用いられる合金であり、溶鋼からの凝固段階では、他の元素と比較すると偏析が少ない元素です。

リン (P)

材料中の粒界に偏析しやすく、靱性や材料強度を低下させやすいので、出来るだけ少なくしたい合金です。一般的には、0.040%以下とします。ただし、加工性（切り屑処理性）を高めるため、意図的に添加する場合がありますが、先述したように延性や靱性を損ねる欠点があります。また防錆性を増加させることも知られており、その目的で添加することもあります。

その他に材料が本来よりも低い強度で破壊を起こす「低温脆化」に寄与する有害な合金として、知られており、また、含有率が高いと溶接性にも悪影響を及ぼします。総じて言えば、特殊な目的以外では、できるだけ少なく制御することが必要な元素です。

硫黄 (S)

材料中に存在するMnと結合し、MnSという介在物を形成しやすい元素です。

快削鋼においてはこのMnSが潤滑効果やチップブレーカーとして働き、切削性を向上させるため、意図的に添加しています。

軸受鋼などの高強度鋼に置いてはこのMnSが起点となって、疲労破壊を生じやすくするため、なるべく低減することが望ましいとされており、0.001%程度まで下げています。

含有率が高いとP同様、溶接性にも悪影響を及ぼしたり、表面きずなど品質面でも有害な元素です。

参考文献

- 1) 牧正志著、鉄鋼の組織制御 その原理と方法
- 2) 安達裕司ら、愛知製鋼技報 Vol. 22 No. 1 (2004)

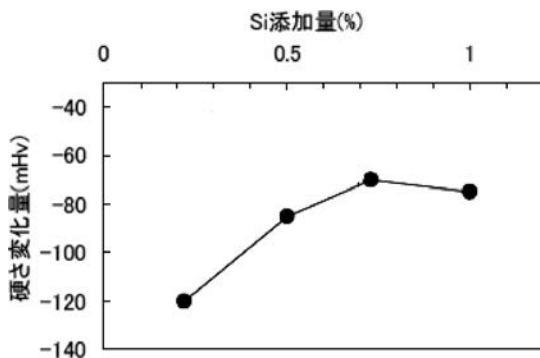


図 2 Si量と焼戻し前後の硬さ差分

2. 高温強度

日立金属(株) 安来工場 技師長 田村 庸

まえがき

高温強度は引張試験またはクリープラプチャー試験によって測定される。両者の違いは試験時間であり、主な用途によって使い分けられるが、ここでは熱間鍛造型のように比較的短時間の高温強度が要求される熱間工具鋼の試験温度による引張強さの挙動を図1に示す。高温強度は時間依存性

が強くここでは試験温度における保持時間10min.の最大引張強さで示されている。まずJIS SKD61とSKD7を比較すると、室温から500℃までは試験片の焼入れ焼戻し硬さが高いほど高温強度が高いことがわかる。SKD61に比べて高温強度が高いとされるSKD7は調質硬さが同じであれば、500℃まではSKD61と高温強度に差はない。一方、600℃以上700℃までの高温強度はSKD7が高い。これは化学成分の差にもとづく差である。図1にはマトリクスハイス鋼の高温強度も示した。55HRC以上の硬さで調質される本鋼は500℃までは硬さの、600℃以上は化学成分のはたらきで室温から700℃までJIS鋼に比べて高い高温強度を示す。

◇ 合金元素のはたらき

表1にJIS SKD61とSKD7の化学成分のうち高温強度に影響をおよぼす合金元素量を示した。600℃以上の高温強度が高いSKD7はSKD61と比べると、Crが低め、Moが高めである。高温強度は、これらの合金元素量と焼入温度で決まる基地に固溶したCと合金元素が、焼戻し過程で合金炭化物の析出を伴う二次硬化反応と対応する特性と考えることができる。

鉄鋼材料の物理冶金学の権威として知られたシェフィールド工科大学のPickering教授による著書にまとめられている「二次硬化鋼の焼入れ焼戻し硬さ特性に及ぼす合金元素の影響」の助けを借りて、合金元素のはたらきを解説する¹⁾。

図2に、Cr添加の、焼戻し温度に対する焼戻し硬さに及ぼす影響を示す。Crは多量に添加しないと二次硬化は生じない。また図1に示したように、600℃以上の高温強度を得るために合金の設計は行

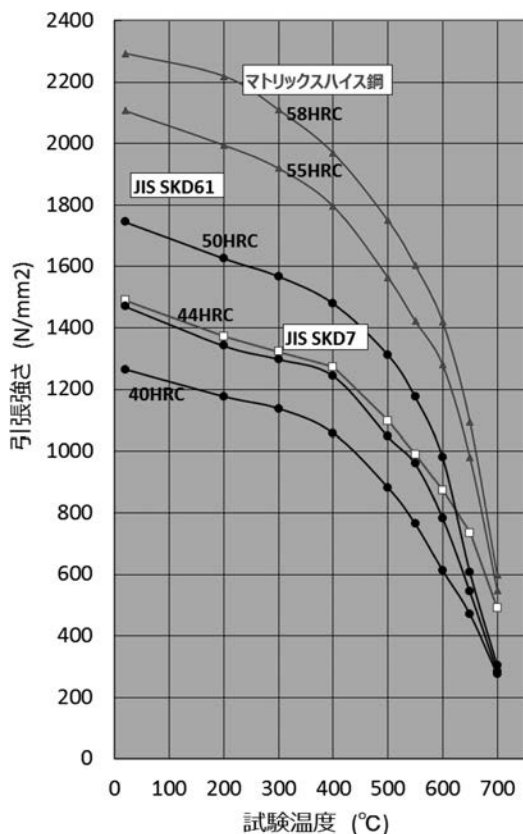


図1 熱間工具鋼の高温強度

表1 熱間工具鋼JIS SKD61とSKD7の化学成分 (mass%)

	C	Cr	Mo	V
SKD61	0.35-0.42	4.80-5.50	1.00-1.50	0.80-1.15
SKD7	0.28-0.35	2.70-3.20	2.50-3.00	0.40-0.70

われるが、Crは600℃以上の焼戻しでの軟化が大きく高温強度への寄与は小さいことがわかる。Cr量は必要な焼入性、使用温度での耐食性、耐酸化性などの点から決められる。低合金鋼に生成するセメントイト (Fe_3C) を抑えることで焼入性などの特性が得られる。

図3に示すようにMo、V添加による二次硬化は、焼戻し軟化抵抗を著しく高める。これが600-

700℃の高温強度を高めるはたらきである。3%以上のMoを添加しても硬化はほとんど増えない。以上のことが、標準鋼SDK61に対して、高温強度を重視したSKD7についてはCrが低め、Moが2.5-3.0%とされている理由である。マトリクスハイス鋼は、これらの熱間工具鋼に比べて、高いC、V量が添加されているので、室温から700℃まで高い高温強度を維持できる。一方で、焼入プロセスではこれらが形成する炭化物を基地に固溶させて、焼戻しの二次硬化反応を得るために高めの焼入温度を採用する必要がある。

◇ 炭化物の観察

以上紹介した研究は1950年代から行われてきたものである。1960年代に入り、焼戻し過程での炭化物の析出反応による二次硬化挙動を電子顕微鏡で確認しようという研究がさかんに行われた。図2や図3に示した合金元素による二次硬化は基地から析出する Cr_7C_3 、 Mo_2C 、 V_4C_3 といった炭化物の作用であるが、個々の炭化物は $0.1\mu\text{m}$ 以下のたいへん微細な大きさであり、観察するのも大変であった。英国のHoneycomb博士からこれらの成果がまとめられている。当時の電子顕微鏡像²⁾と最近の観察事例を比較して図4に示す。当時は550℃で100h焼戻しを行い、ある程度炭化物を成長させて一定の大きさになった炭化物を観察していたが、

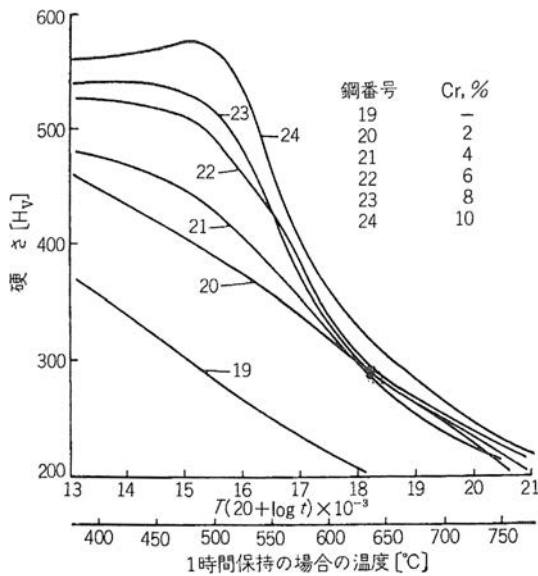


図2 0.3% C - 1% Mn鋼の焼入れ焼戻し硬さに及ぼすCrの影響

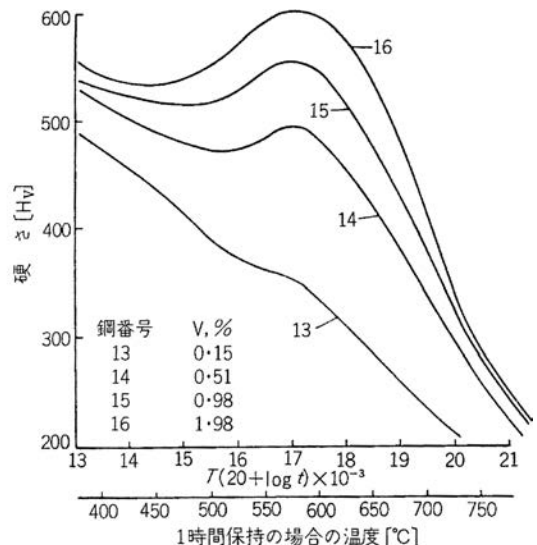
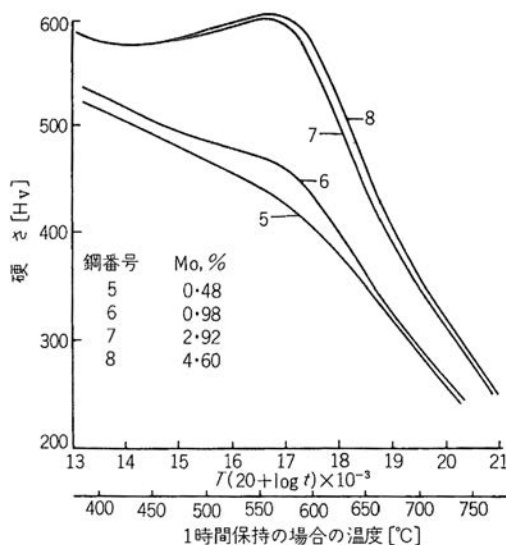


図3 0.4% C - 1% Mn - 1% Cr鋼の焼入れ焼戻し硬さに及ぼすMo、Vの影響

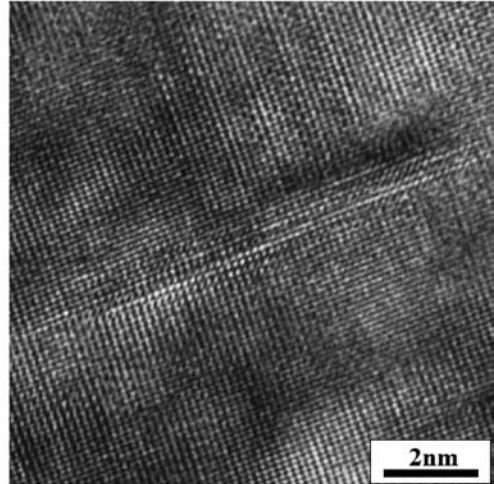
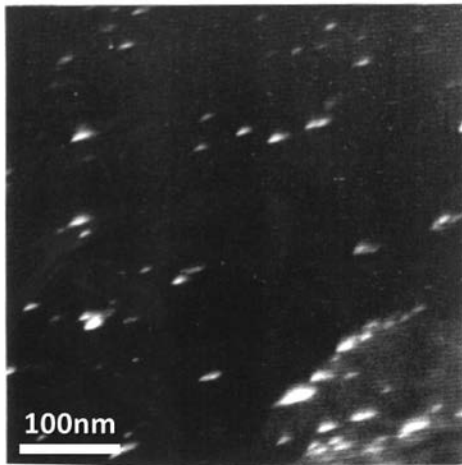


図 4 焼戻し過程で析出する V_4C_3 の透過型電子顕微鏡による観察例
 左：0.2%C-0.2%V鋼を焼入れ後、 $550^{\circ}C \times 100h$ 焼戻しした試料で観察（暗視野像）；1966年²⁾
 右：SKD61を $1020^{\circ}C$ で焼入れ後、 $550^{\circ}C \times 2h$ 焼戻しした試料で観察（他波格子増）；日立金属

40年の電子顕微鏡の進化で $550^{\circ}C \times 2h$ の実用焼戻し条件でも観察できるようになった

むすび

現在でも材料の合金成分の設計は半世紀以上も前の研究成果をベースとしているが、解析手法は格段の進化を遂げている。一方、本稿にも紹介した合金元素は、原料価格の乱高下が材料の価格変動にも影響を及ぼし、特殊鋼業の経営課題のひとつ

つとなっている。高温強度という観点で考えると省資源は難しい課題であるが、解析手法の進化がより効率的な合金元素の活用の方向性を示すことが期待される。

参考文献

- 1) 藤田利夫、柴田浩司、谷野満 訳：鉄鋼材料の設計と理論、丸善株式会社（1981年）
- 2) D. Raunor, J. A. Whiteman and R. W. Honeycombe, J.I.S.I. 1966、204、349

3. 耐食性

まえがき

ここでは、特殊鋼に添加される合金元素のうち、クロム、ニッケル、コバルト、銅の添加による効果を耐食性を中心に解説する。

一般的に鋼の防食では、1. 耐食性のある物質で覆う（メッキ鋼板・塗装鋼板）2. 錆の形態をコントロールして腐食の進行を防ぐ（耐候性鋼）3. 不動態皮膜を形成・強化することによって錆を防ぐ（ステンレス鋼）4. 電気化学的反応で防食する（電気防食）等が主なものだが、この項では合金元素による耐食性向上に焦点を当て、上記4元素による「錆の形態をコントロールして腐食の進行を防ぐ効果」と「不動態皮膜の形成・強化に影響を与える効果」を中心に解説する。

◇ クロムCr

原子番号24、原子量51.9961、遷移金属、融点は1907℃、常温の密度は7.19g/cm³。鋼の耐食性を向上させる代表的な元素である。六価のクロムは非常に毒性が強く各種法規で規制されているが、一方、三価のクロムは必須の栄養素でもある。産地に偏りがあり安全保障上国内で60日分備蓄されている。

鉄にクロムを1%、2%と段階的に添加した合金を作り大気中での暴露腐食試験を行うと、クロムの増加に伴い腐食減量は減少し、10%を超えた

付近ではほぼ腐食しなくなる。JISではクロムを10.5%以上含む鋼をステンレス鋼と定義している。

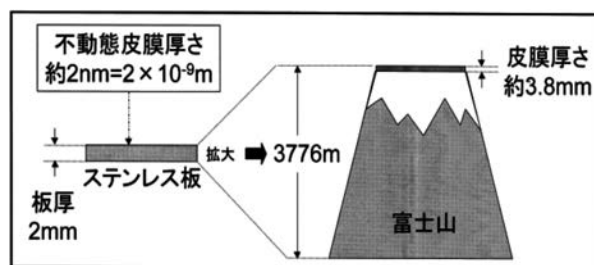
クロムは空気中の酸素や水分と反応して水酸化物または酸化物で構成される緻密で強固な不動態皮膜を形成する。腐食の進行とは金属の酸化反応の進行であるが、不動態皮膜は強力なバリアーとなつて酸化の進行を妨げる。クロムの含有量が増加するにつれ不動態は安定化し、耐孔食性、耐すきま腐食性、耐SCC（応力腐食割れ）性が向上するため、高耐食ステンレス鋼では25%程度まで添加される。

不動態皮膜は極めて薄い（1~3nm）ため目に見えないが、空気中でステンレス鋼の表面にキズをつけて破壊されても速やかに再生する自己修復機能を有している。図1は不動態皮膜厚さを表す模式図で、これほど薄くかつ可視光線を通すため金属光沢のままの表面となる。

耐候性鋼にはSMA鋼、SPA鋼などがあるが、銅、クロム、ニッケル等の添加（1%以下）により、表層のγ-FeOOH（レピドクロサイト）と、クロムが濃縮したα-(Fe, Cr)OOH（クロム置換型ゲーサイト）の保護性の強い緻密な二層構造の錆を形成し、海水飛沫が直接付着するような環境以外では良好な耐候性を発揮する。

◇ ニッケルNi

原子番号28、原子量58.6934、遷移金属、融点



厚さ2mmのステンレス板を富士山の高さまで拡大しても
不動態皮膜の厚さは約3.8mm

図 1 不動態皮膜の薄さの模式図

1455℃、常温の密度は8.908g/cm³。ニッケルも国内で60日分備蓄されている。

ステンレス鋼においてニッケルは不動態化を促進し、且つ、不動態皮膜を安定化させる効果も認められる。従って添加により耐孔食性、耐隙間腐食性、耐SCC性が向上する。アルカリに対しても比較的強い耐食性を示す。

・耐侯性鋼においては微量の添加ではクロムよりニッケルの方が腐食減量の低下が著しいとの報告もある。また、ニッケルを1～3%添加したニッケル系高耐侯性鋼も開発されている。

◇ コバルトCo

原子番号27、原子量58.933、遷移金属、融点1495℃、常温の密度は8.90g/cm³。

物理・化学的にニッケルとよく似た性質を示し、Fe-Ni合金では(Ni+Co)をニッケルの含有率とみなす場合もある。添加効果はニッケルと同等だがコバルトのほうがはるかに高価なためニッケルの代替としては使われない。コバルトも国内で60日分備蓄されている。

◇ 銅Cu

原子番号29、原子量63.546、遷移金属、融点1085℃、常温の密度は8.94g/cm³。

ステンレス鋼において銅は不動態化を促進する効果がある。よって耐孔食性等々向上の効果がある。また硫酸環境下の全面腐食に対して顕著な耐食性向上効果がある。ニッケルと共に用いることにより効果は上昇する。

耐侯性鋼においては弱酸性環境にて腐食を抑制する効果がある。また耐硫酸性については低合金鋼でも添加の効果が認められる。

◇ その他元素

クロム、ニッケル、コバルト、銅の耐食性に関する効果をまとめたが、これら4元素以外にもステンレス鋼においては、モリブデン・タングステン・チタン・ニオブ・窒素等も耐食性を向上させる元素として知られており、耐侯性鋼においてリンはその添加効果が認められている。

参考文献

- 腐食・防食の材料化学 下平三郎 アグネ技術センター 1995
ステンレス鋼の科学と最新技術 ステンレス協会 2011
最新さびの基本と仕組み 長野博夫/松村 昌信 秀和システム 2010
低合金鋼の大気腐食 田原 晃 物質・材料研究機構 2003
耐食合金リーフレット 日本冶金工業株式会社 2016
ステンレスの初歩2015 ステンレス協会 2015
防食技術便覧 腐食防食協会 1986

4. 結晶粒制御

山陽特殊製鋼(株) 研究・開発センター 橋本 和 弥
新商品・技術開発室 商品開発1グループ グループ長

まえがき

自動車や建設機械、産業機械の歯車・シャフト等の動力伝達部品には、主に肌焼鋼が用いられる。また、これら部品には、高い疲労強度や耐摩耗特性が求められるために、浸炭焼入焼戻しが施される。浸炭処理部品の機能を左右する重要な因子の一つとして、鋼の結晶粒径があげられる。期待どおりの高い部品機能を発揮させるためには、部品機能低下を引き起こす浸炭処理中のオーステナイト結晶粒の粗大化を抑制することが重要である。図1¹⁾に部品機能に関する事例として、オーステナイト結晶粒径とシャルピー衝撃値との関係を示す。オーステナイト結晶粒径が大きくなると、衝撃値が低下する傾向にあることが分かる。特に、昨今は、製造コスト低減策や環境対策として、鍛造においては従来の熱間鍛造から亜熱間鍛造、冷間鍛造へと低温側へシフトすることが図られている。また、浸炭処理においても1050℃での浸炭処理が可能な熱処理炉が開発され、浸炭温度上昇による更なる浸炭時間の短縮化が図られている。ど

ちらの対策においても、浸炭処理中のオーステナイト結晶粒を制御することの重要性が更に増すこととなる。以下には浸炭処理中のオーステナイト結晶粒の制御に関して、粗大化に繋がる粒成長を制御する役割を担う鋼中析出物、ならびに構成する合金元素に注目して解説する。

◇ 結晶粒制御における鋼中析出物の役割

鉄鋼材料には、母相とは異なる第二相として析出物が存在する。この析出物は、鋼の強化方法である析出強化や結晶粒微細化強化に対して影響を及ぼすことが知られている。この結晶粒微細化強化に関与する理由は、析出物がオーステナイト粒界をピン止めし、粒成長を抑制する働きをする点にある。析出物は、温度によりその大きさが変化する。高温に保持するほど、相対的に小さい粒子が消滅し大きい粒子が成長する。更に高温に上げると完全に母相に溶解する。その挙動のために、高温ではオーステナイト粒界は移動し易くなる。その結果として、析出物によってピン止めされていた一部の結晶粒は、周りの結晶粒を取り込んで

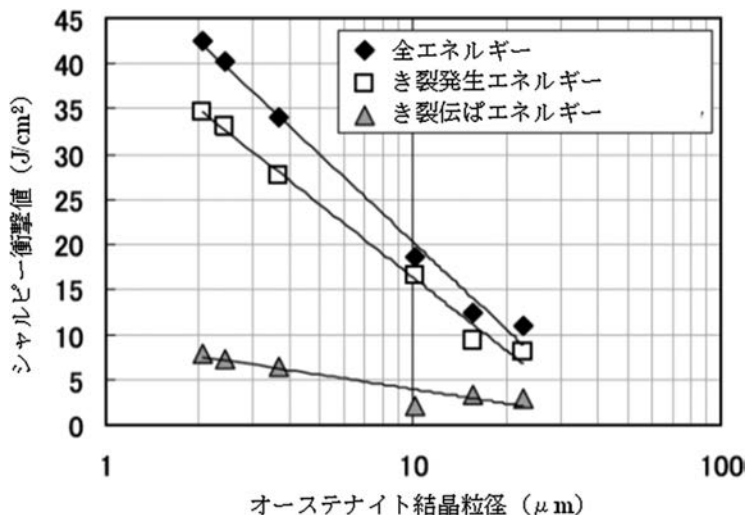


図 1 オーステナイト結晶粒径とシャルピー衝撃値との関係¹⁾

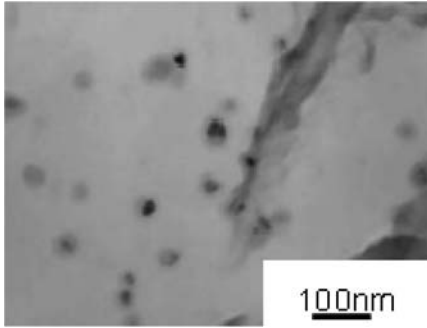


図 2 AlN微細析出物

粗大粒に成長する。なお安定的にピン止めするためには、析出物自体の数が多いほど良い。すなわち析出物の総量は温度により決まるので、温度が同じであれば析出物径が小さいほど効果的であるといえる。図2に代表的な析出物であるAlNの透過電子顕微鏡（TEM）で観察した写真を示す。1000℃で保持、冷却後のAlNの大きさは、十nmのオーダーであることがわかる。

機械構造用肌焼鋼における浸炭処理中のオーステナイト結晶粒の制御に關与する鋼中析出物を構成する代表的な元素の種類には、アルミニウム（Al）、ニオブ（Nb）、チタン（Ti）、バナジウム（V）があげられる。それぞれの元素を添加した鋼が汎用的に使用されている。それら鋼で構成する主な析出物はAl添加の場合には窒化アルミニウムAlNが、Nb添加の場合にはニオブ炭窒化物Nb(C,N)が、Ti添加の場合にはチタン炭化物TiCが、V添加の場合にはバナジウム炭化物VCである。これらの析出物は、オーステナイト中への固溶量や高温での安定性が異なるので、結晶粒粗大化抑制に対する効果が異なる。特にVCは、高温安定性に乏しく、高温で浸炭するような場合におけるオーステナイト結晶粒制御には向かない。そこで次項では、合金元素として特にAl、Nb、Tiを取り上げて、浸炭処理中のオーステナイト結晶粒の制御に關して、粗大化に繋がる粒成長を制御することに特化して解説する。

◇ 結晶粒制御に影響を及ぼす元素

1. Al

Alは、機械構造用鋼の製造において脱酸元素として利用されており、汎用的に鋼中に含有してい

る元素である。また、代表的な粒度調整元素でもある。その結晶粒制御効果は、古くから多くの研究が報告されている。Alの場合には、AlNが微細粒子として鋼中に析出することでオーステナイト結晶粒の制御に寄与する。現在、JISに規定された鋼種をベースにAl量とN量を管理した結晶粒度調整鋼が、幅広く製造されている。このAl量とN量には、適正な添加範囲が存在する。AlN析出物量を増大させること、すなわちAl量とN量を増やすことが結晶粒粗大化抑制に有効である。その一方でAl量を0.04%以上にすると、かえって結晶粒粗大化温度が低下するとの報告がある。これらの挙動はAlNの固溶-析出特性に依存している。なお、AlNの場合には、後述するNbやTiに比べて実用鋼における析出物量が少ない。そのために昇温により徐々に固溶し始めると、粒界のピン止めに必要な量に比べて、析出物量が不足し易い。従って、1000℃以上のような高温で結晶粒粗大化を抑制するためには、よりピン止め力の強い析出物を利用することが必要となる。その推奨する合金元素として、以降にNbとTiを紹介する。

2. Nb

Nbは、Nb(C,N)を形成することで結晶粒粗大化抑制に寄与する粒度調整元素である。一般的に、Nb添加鋼は、AlとN量を管理した結晶粒度調整鋼では結晶粒粗大化が抑制できない工法で部品を製造する場合に使用されている。Nb添加鋼は、JISに規定されている成分を有する鋼種にNbを添加した鋼が一般的である。更に粒度調整以外の特性向上を図るために製鋼メーカー独自に各成分を調整したNb添加鋼も提案されている²⁾。Nbの添加量についてはAlと同様に適正な範囲が存在するといわれている。0.03%Nbを添加することで、結晶粒粗大化温度を100℃程度上昇させる。しかし、0.1%以上添加しても更なる粗大化温度の上昇は認められず一定の値に収束するとの報告がある³⁾。Nb添加鋼の場合には、実用面においてNb系析出物とAlNを併用する、すなわちNbに加えてAlとN量も適正化すれば、Nb系析出物とAlNどちらか単独に比べて高温まで結晶粒が粗大化し難い。その一例として、Nb：0.03%以上、Al：0.03%以上、N：130ppm以上の組成とすることで1050℃の高温での浸炭処理に耐えうる肌焼鋼が提案されている⁴⁾。

3. Ti

Tiは、鋼中でチタン炭化物 (TiC) やチタン窒化物 (TiN)、チタン硫化物 (TiS系) を形成することが知られている。特にTiCは、結晶粒成長を抑制することにも有効である。Tiは、AlやNbに比べて多量の0.13%以上を添加しても結晶粒粗大化抑制に有効に機能することが示されている。その結果として鋼中にTiCが多量に析出できること、更にTiCがAlNやNb (C,N) よりも微細に析出することの両方の効果により、Ti添加鋼は、結晶粒粗大化温度を大きく向上できると報告されている⁵⁾。表1には、その事例として、SCM420をベースとしたAl-N調整鋼 (表中SCM420H)、SCM420に0.03%Nbを添加した鋼 (表中SCM420+Nb)、SCM420に0.15%Tiを添加した鋼 (表中SCM420+Ti) の結晶粒度特性を示す。その粒度特性は熱間鍛造・焼きならしの熱履歴のみを模擬し950℃から1050℃の各温度で6h保持後水冷した材料で評価した。SCM420+Tiは、SCM420+Nbが1025℃での熱処理 (擬似浸炭) 後において一部

混粒であったことに比べると1050℃での熱処理においても整細粒を保っている。

むすび

浸炭の高温化や冷鍛後にそのまま直接浸炭する工程における結晶粒粗大化抑制は益々重要となっている。一方で、図1に示したとおり、NbやTiを積極的に添加した鋼を用いて、熱処理を工夫すれば3 μ m程度の微細な結晶粒径に制御することも可能である。本報告で紹介したNb添加やTi添加が積極的な機能向上の方策として利用されることも、今後期待したい。

参考文献

- 1) 西川元裕、平岡和彦：山陽特殊製鋼技報、Vol. 14、No. 1 (2007) 42-49
- 2) 例えば、藤松威史、丸山貴史、中崎盛彦：まてりあ、Vol. 56、No. 2 (2017) 79-81
- 3) 紅林豊：電気製鋼、Vol. 67、No. 1 (1996) 26-33
- 4) 原田典恒、山田雄一、加藤和彦：三菱自動車テクニカルレビュー、Vol. 12 (2000) 47-53
- 5) 田中高志：山陽特殊製鋼技報、Vol. 10、No. 1 (2003) 53-56

表 1 結晶粒度特性調査結果⁵⁾

[○： 整細粒、△： 一部混粒、×： 全面混粒]

鋼種	950℃	975℃	1000℃	1025℃	1050℃
SCM420+Ti	○	○	○	○	○
SCM420+Nb	○	○	○	△	△
SCM420H	○	△	△	×	×

5. 被削性

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 副主任研究員 **大橋 亮介**

◇ 被削性の評価基準と影響因子

切削とは素材の不要部分を切り屑として取り去る除去加工であり、削られる被削材は工具を押しつけられることで塑性変形し、さらには破壊されることで本体と切り屑に分離される。工具を被削材に押しつけると、工具前方に一次せん断域（一次塑性域）と呼ばれるせん断変形域と、切り屑が工具に接触しながらすくい面に沿って移動する際の摩擦により二次せん断域（二次塑性域）が生じる。この領域で刃先周辺の局部変形が促進され、その部分が被削材本体と分離することで、変形した部分が切り屑として除去される。切り屑生成の模式図を図1に示す。

それと同時に、工具は被削材から大きな反力（切削抵抗）を受けるとともに変形による発熱により工具刃先の温度上昇（切削温度）が生じる。これらが原因となり、工具の損傷や切り屑のトラブルを引き起こす。工具が損傷すると、部品に要求される寸法精度や切削仕上げ面粗さを得ることが出来ないため、工具は「寿命」と判断される。加工現場での主な被削性の判断基準は、①切削抵抗の大きさ②工具寿命の長さ③寸法精度と切削仕上げ面の品位④切り屑処理の容易さである。工具寿

命のみが被削性を決定するものではないことに留意いただきたい。

上述した各特性は、材料因子、切削工具因子、切削条件等、様々な要因に影響される。材料因子としては、基本組成、熱処理、加工履歴および介在物などの因子が力学的あるいは物理化学的な材料特性の変化を介して被削性に影響すると考えられるが、本報では介在物に関して主に記す。

◇ 各快削元素の特徴

1. 鉛 (Pb)

鋼中でPbは非金属介在物周りに存在したり、素地（マトリックス）中に微細に分散している¹⁾。Pb粒は切削時、工具・切り屑間の摩擦抵抗を緩和する潤滑効果がある。そのため、Pb添加鋼はPbを添加しない場合に比べ、工具・切り屑間の接触面積が小さくなり、付着層である構成刃先が小さくなる²⁾。その結果として、一般的には工具への負担が軽減されるために工具寿命が長くなる。さらに、切削仕上げ面粗さが小さくなり、高精度加工が可能になる。また、Pb含有量の増加につれて工具寿命が向上するが、0.1mass%Pbまでの効果が著しく大きいと報告されている³⁾。ただし、同一添加量での比較では、PbはSやPなどの快削元素に比べて極めて優れた被削性を得ることができるものの、高速切削では工具寿命が劣る場合も認められる⁴⁾。この原因としては、工具・切り屑接触長さが小さいため、工具刃先の温度が局部的に高くなること、鋼中のPbによる超硬工具の腐食作用が挙げられている^{5)、6)}。Pbは切削工具中のCoに対する溶解度がなく、切削工具への構成刃先（被削材）の溶着を抑制することにより、切削仕上げ面粗さを改善するとも考えられている⁷⁾。鋼中のPbが切り屑処理性を改善する要因は、工具・切り屑接触面積が小さくなるため切り屑がカールしやすいことに加えて、Pbは融点が低い（327℃）、切削中の温度上昇により熔融脆化して切り屑を分

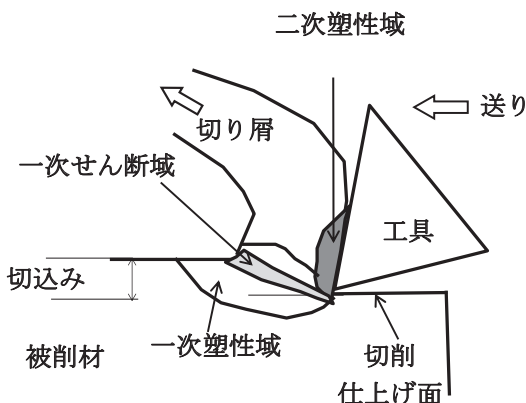


図 1 工具刃先近傍の切り屑生成の断面図

断しやすくするためと考えられている。

しかし、1990年代から、環境負荷物質低減の観点で世界的にPbの使用が制限される潮流になっており、廃自動車指令（End-of-Life Vehicles Directive：ELV指令）等で、Pbを含む特定有害物質の使用が制限され始めた。鋼材へのPb添加により高い被削性を付与できることから、切削加工における動力負荷が低減され、省エネルギー対策としての効果も期待できるとの主張もあり、現時点で0.35mass%以下のPb快削鋼は同指令の適用除外となっている。しかし、国内の自動車メーカーや部品加工メーカーでは、Pbの使用を規制する動きが強まり、製鋼メーカーはPb快削鋼に代わる非Pb快削鋼の研究開発に着手し、Pbを代替可能な有望な快削鋼として、Bi、硫化物形態制御、BN、黒鉛、P、Sn、Te、Ti等が見出された。代表的なものを以降で紹介する。

2. カルシウム (Ca)

Ca合金によらず通常のAl、Fe-Siなどにより鋼を脱酸した場合、脱酸生成物として Al_2O_3 、 SiO_2 などの介在物が残留し、これらは硬質であるため被削性の観点では工具にアブレシブに作用し、有害と見なされており、これら脱酸生成物の溶湯系外への浮上、分離除去が製鋼技術の大きな課題である。一方、Ca快削鋼はこのように一般に有害と見なされていた脱酸生成物を脱酸の調整により非金属介在物の形態、組成を被削性にとって好ましいものに調整するものであり、脱酸調整快削鋼とも呼ばれる。すなわち、AlやFe-Siで脱酸した通常鋼と清浄度はほぼ同じであっても、Ca合金によって溶鋼を脱酸して含Ca脱酸生成物を鋼中に残留させることで、被削性向上に役立たせるものである。

Ca脱酸した鋼は高速切削下での超硬工具の摩耗を顕著に抑制する。Ca脱酸鋼では鋼中の酸化物系介在物が軟化・溶融して工具面にbelagと呼ばれる付着物を形成し、超硬工具の熱拡散摩耗を抑制する役割を担う⁸⁾。

それゆえに、工具に付着する介在物の軟化と流動性が被削性に対する重要因子であり、切削温度に見合った最適な介在物組成が存在することが見出されている。図2に示すように、酸化物系介在物の融点 (T_{MP}) と平均切削温度 (T_C) との比が約1.7で工具寿命が長いことが示されている⁹⁾。

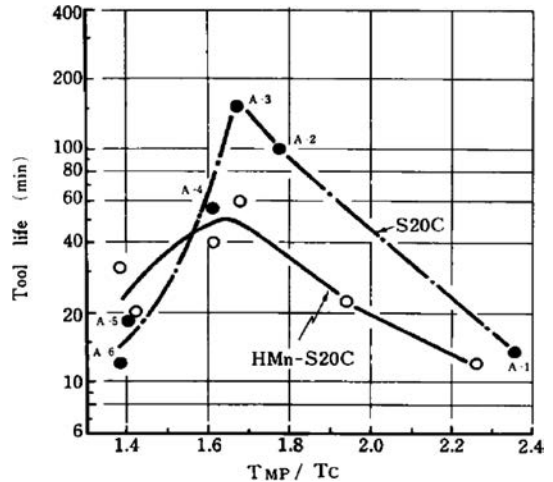


図 2 超硬工具の工具寿命に及ぼす T_{MP} (介在物融点)/ T_C (平均切削温度)の影響⁹⁾

T_{MP}/T_C が大きい場合には介在物の軟化が起こりにくいため介在物が工具面に付着しにくく、 T_{MP}/T_C が小さい場合には介在物の流動性が大きくなりすぎて付着物が工具から脱落しやすく、共に工具摩耗が増大すると考えられる。

Ca脱酸鋼で生成される酸化物系介在物は一般にCaO-SiO₂-Al₂O₃三元系から成っており、良好な工具寿命が得られる付着物組成として最も多く報告されているのはアノールサイトとゲーレンナイトである。融点はアノールサイトが1150~1480℃、ゲーレンナイトが1450~1540℃との測定例がある^{10)、11)}。

しかし、強度特性の劣化がなく、工具寿命からみた被削性が概ね優れているCaを単独添加した快削鋼の切削加工上の欠点は、材料延性の低下要因がないことにより切り屑処理性は通常鋼と変わらないこと、ならびに高速度鋼ドリル加工において工具寿命が通常鋼と変わらないという2点がある。そのため、実用のCa快削鋼はPbやSとの複合快削鋼となっている。

3. ビスマス (Bi)

Biは融点が271℃であり、マトリックスに固溶せず、300℃近辺でPb以上に絞り値を減少させることが報告されており、切削中の温度上昇により溶融脆化して切り屑を分断しやすくするPbの代替物質として見出されてきた^{3)、12)}。Pb同様の低融点物質であるが、人体への蓄積性はPbより極めて低いとされる。鋼中でBiはMnSの端部に付着するか、

あるいは微粒子として存在する。また、切削時には切り屑裏面に20~40Åの薄いBi膜が生成することが確認されている¹³⁾。Biの被削性向上効果は絞り値の減少による切削中のせん断ひずみの減少、溶融したBiの薄膜による潤滑作用として考えられている。切り屑処理性やハイスドリル寿命に関して、Biは添加量がPbの半分でも同等以上となり、0.05~0.10mass%の含有量で十分な効果が得られる^{14)、15)}。ただし、超硬工具寿命向上効果はPb快削鋼と同様にあまりみられない。

4. 硫黄 (S)

Sはマトリックスにほとんど固溶せず金属間化合物FeSを形成する。このFeSは共晶点が非常に低く、熱間圧延中に溶けて空孔状となり、切欠効果を増すので鋼が割れやすくなる。従って溶鋼中にSとの親和力がFeより強いMnをS添加量の3倍以上入れてMnSを形成させたものがS快削鋼の原形である¹⁶⁾。S快削鋼では鋼中に非金属介在物としてMnSが生成・分散しており、これが切削時の応力集中源としてき裂の発生・伝播を助長することで広範な条件下で快削性を発揮する。安価で優れた被削性が得られるため、一番多く生産されてきた。

しかし、硫化物は熱間加工方向に延伸する特徴があることに起因して鋼材の圧延方向とその直交方向で強度差(異方性)が出る課題がある。また、先述した通り、非Pb化が求められているが、**図3**に示すように、同一添加量ではSに比べてPbは良好な切り屑処理性を有しており¹⁷⁾、ユーザーの量産工程において切り屑処理性が課題となりうる。

そこで、非Pb化の開発では、被削性と機械的強度の両立のために、硫化物形態制御による異方性

改善や切り屑処理性改善が精力的に研究され、硫化物のアスペクト比低減や均一分散化によって異方性軽減が図られている^{18)~20)}。硫化物均一分散には、溶鋼段階の鋼にCaやMgを添加することでCa系酸化物やCa-Mg系酸化物を人工的に生成し、これを硫化物の核として利用する^{18)、20)、21)}。さらに、CaやMgを添加した鋼では、硫化物中にCaやMgが固溶して熱間加工中の硫化物変形を抑えるため、低アスペクト比の硫化物を得やすくなる。そのため、Ca、Mg添加を利用したシャルピー衝撃値の異方性改善が報告されている²⁰⁾。さらに、CaやMgを添加したタイプの非Pb硫黄快削鋼は、工具表面温度が高温になる超硬工具旋削の際に被削材中の比較的低融点のCa、Mg含有酸化物、あるいは(Ca、Mn)Sのような硫化物が工具表面に付着して保護膜を形成し、熱拡散による工具摩耗を大きく軽減する^{18)~22)}。上述したCa処理により硫化物の形態を制御することで、Pb快削鋼と同等以上に切り屑処理性が改善された鋼が報告されている²²⁾。他に、MnSを微細化することで、Pb快削鋼と同等の切り屑処理性を得ることが可能となったとの報告もある²³⁾。

5. BN

六方晶窒化ホウ素(h-BN)は白色黒鉛とも称され、下記で記述する黒鉛に類似した結晶構造、物理的性質を有し²⁴⁾、自己潤滑性を有するため、固体潤滑剤として使用されている。このBNを鋼中に析出させた鋼には、潤滑効果のみならず、切欠き効果、切り屑せん断域での脆化作用、工具の拡散摩耗抑制効果により、低速のハイスドリル加工から超硬工具での高速旋削まで広い範囲で、Pb快削鋼同等以上の優れた被削性を有することが報告されている^{24)~28)}。なお、BN含有快削鋼の切削時に工具表面へAlNが付着して拡散摩耗を抑制すると報告されている。AlNの付着しやすさは工具種で異なり、P種工具やTiAlNコーテッド超硬工具が優れていると報告されている^{27)、28)}。さらに、このBN介在物は析出物であり、MnS介在物やPbに比べて小さいため、従来の快削鋼の使用が敬遠される高応力、高面圧負荷の部材に対しても適用可能であること²⁵⁾、BN介在物はMnS介在物に比較して冷間鍛造性の劣化を低く抑えることができるので、冷間鍛造性向上を目的に低S量化をはかり、被削

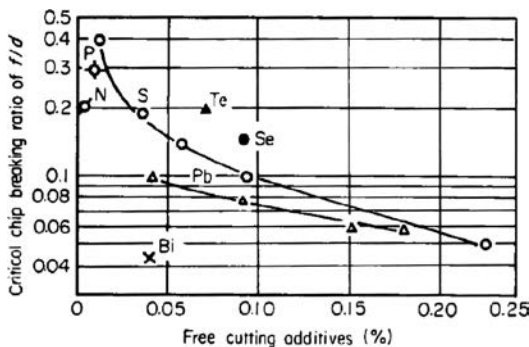


図 3 切り屑処理性に及ぼす f/d (送り)/ d (切込み) と快削元素との関係¹⁷⁾

性の劣化をBNで補うことが可能であり、冷鍛用途への適用が期待されている²⁹⁾。

6. 黒鉛

上述した通り、従来の快削鋼は非金属介在物を多く含むことから冷間鍛造性に優れるとは言いがたく、冷間鍛造性を阻害しない快削鋼の開発事例として、BN快削鋼以外に鋼中セメントイトを黒鉛化して利用するものがある。黒鉛は固体潤滑剤として利用されることから考えても被削性を改善する効果があることは容易に類推できるが、硬質なセメントイトを軟質な黒鉛に変えることにより、鋼の硬さが低下するので冷間加工性も良好になる²⁹⁾。被削性に関して、黒鉛の潤滑作用により、超硬工具による旋削性がPb快削鋼同等以上になるとの報告もある³⁰⁾。また、黒鉛の分布状態が工具寿命に影響を及ぼす可能性が報告されており、黒鉛を微細に析出させる方法^{31)、32)}も研究されている。さらに、鋼中の黒鉛は焼入時の加熱により、鋼材母相中に固溶するので疲労強度へ悪影響を及ぼさない²⁹⁾。しかし、鋼中セメントイトの黒鉛化には長時間の熱処理が必要であり、これを容易にすべく化学成分を調整すると焼入性が低下するなどの課題あり、解決が望まれる。

参考文献

- 1) 渡里宏二、藤原順介：精密工学会誌、76 (2010) 5、557
- 2) 橋村雅之、宮本健一郎、広角太郎、宮西慶：まてりあ、46 (2)、105
- 3) 伊藤哲郎、加藤剛志、山田博之：電気製鋼、38 (1967) 237
- 4) 伊藤哲郎：鉄と鋼、47 (1961) 3、504
- 5) 伊藤哲郎：鉛快削鋼の被削性、京都大学、学位論文、(1968) 6
- 6) 奥島啓式、岩田一明：機械学会論文集、28 (1962) 187、404
- 7) 竹山秀彦：鉄鋼材料の被削性、日本金属学会・鉄鋼協会東海支部、(1976)、1
- 8) 藤原達雄、伊藤哲郎：日本金属学会会報15 (1976) 10、613
- 9) 伊藤哲郎、高橋徹夫、木村篤良、山野清市：電気製鋼、44 (1973) 1、29
- 10) T. Sata, R. Murata and T. Akasawa: Int. Symp. Influence Metall. Mach. Steel, (1977) 357
- 11) T. Fujiwara, S. Abeyama, A. Kimura, S. Nakamura and T. Itoh: Int. Symp. Influence Metall. Mach. Steel, (1977) 129
- 12) 柴川雅実、鹿磯正人、松島義武、家口浩：R&D神戸製鋼技報、51、No. 1 (2001)、13
- 13) D. Bhattachaya: 22nd Mech. Work. Steel Process Conf. Proc., ISS, 18 (1980) 153
- 14) R. H. Aborn: Proc. Int. symp. Influence Metall. Mach. Steel, (1977)、381
- 15) W. Bartholome and H. Setter: Werkstoffkunde der Gebräuchlichen Stäle, Entwicklung der Stahlsorten, ihre Vereinheitlichung und Normung TeilII, Verlag Stahleisen, Dusseldorf (1977) 259
- 16) 伊藤哲郎：精密機械、49 (1983) 9、124
- 17) 山本俊郎、熊谷憲一：鉄と鋼、62 (1976) 1、72
- 18) 狩野隆、羽生田智紀：電気製鋼、75 (2004)、27
- 19) 速石正和、狩野隆、紅林豊：電気製鋼、73 (2002)、5
- 20) 常陰典正、藤松威史、平岡和彦：山陽特殊製鋼技報、10 (2003)、35
- 21) 家口浩、土田武広、新堂陽介、坂本浩一、柴川雅実、鹿磯正人：R&D神戸製鋼技報、52、3 (2002)、62
- 22) 狩野隆、次井慶介、中村貞行：電気製鋼、71 (2000)、89
- 23) 渡里宏二：機械技術、60 (2012)、39
- 24) 村上俊之、富田邦和、白神哲夫：JFE技報、23 (2009)、10
- 25) 羽生田智紀、中村貞行：材料とプロセス、3 (1990)、864
- 26) 羽生田智紀、中村貞行：電気製鋼、65 (1994)、4
- 27) 山根八州男、田中隆太郎、関谷克彦、鳴瀧則彦、白神哲夫：精密工学会誌、66 (2000)、229
- 28) 田中隆太郎、山根八州男、関谷克彦、鳴瀧則彦、白神哲夫：精密工学会誌、72 (2006)、1227
- 29) 三木武司、小此木真、戸田正弘、橋村雅之、蟹沢秀雄、片山昌：塑性と加工、40 (1999)、1111
- 30) 岩本隆、村上俊之：JFE技報、4 (2004)、64
- 31) 中村貞行、羽生田智紀：電気製鋼、60 (1989) 3、265
- 32) 河端良和、森田正彦、富樫房夫、東野建夫：材料とプロセス、3 (1990)、754

Ⅲ. 合金元素の応用

1. 高張力鋼

日本製鉄(株) ふるやひとし
名古屋技術研究部 博士(工学) 古谷仁志

まえがき

高張力鋼は「建築、橋、船舶、車両、自動車その他の構造物用及び圧力容器用として、通常、引張強さ490N/mm²以上で溶接性、切欠きじん性及び加工性も重視して製造された鋼材」とJIS G

0203で定義されている。高張力鋼の使用によって、板厚低減による構造物重量の低減や施工費用の削減、さらに構造物の大型化による空間利用効率の向上が可能になる¹⁾。厚鋼板の高張力鋼として、引張強さ490、570~590、780、950N/mm²級の鋼材（以下HT490、HT570-590、HT780、HT950と

表 1 高張力鋼の成分・製造方法・機械的性質の規格例

規格	種類の記号	成分および製造方法							機械的性質									
		成分 (wt%)						炭素当量 ^{*1}	溶接割れ感受性組成 ^{*2}	製造方法	備考1	引張試験				衝撃試験		備考2
		C	Si	Mn	P	S	その他					降伏点または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J) ^{*3}	
JIS G 3106 溶接構造用 圧延鋼材	SM490A	≦0.22						なし (TMC 以外)	なし (TMC 以外)	[必要に応じて] 焼ならし 焼入焼戻し等 [協定により] 熱加工制御等	成分は板厚 50mm超 100mm以下の例	≧295	490~610	-	≧23	なし	なし	引張試験は 厚さ40mm超 75mm以下の例
	SM490B	≦0.20	≦0.55	≦1.65	≦0.035	≦0.035										0	≧27	
	SM490C	≦0.18					-	≦0.40 (TMC)	≦0.26 (TMC)							0	≧47	
	SM570	≦0.18	≦0.55	≦1.70	≦0.035	≦0.035		≦0.47 (TMC)	≦0.30 (TMC)							-5	≧47	
JIS G 3128 溶接構造用 高降伏点鋼板	SHY68SNS	≦0.14	≦0.55	≦1.50	≦0.015	≦0.015	Cu ≦0.50 Ni: 0.30-1.50 Cr ≦0.80 Mo ≦0.60 V: 0.05 B ≦0.005	≦0.57	-	焼入焼戻し	成分は板厚 50mm超 75mm以下の例	≧665	760-910	-	≧16	-40	≧47	引張試験は 厚さ50mm超 100mm以下の例
JIS G 3114 溶接構造用 耐熱性 熱間圧延鋼材	SMA490BP	≦0.18	≦0.55	≦1.40	≦0.035	≦0.035	Cu: 0.20-0.35 Cr: 0.30-0.55	≦0.42 (TMC)	なし (TMC 以外)	[必要に応じて] 焼ならし 焼入焼戻し等 [協定により] 熱加工制御等	成分は板厚 50mm超 100mm以下の例	≧335	490~610	-	≧21	0	≧27	引張試験は 厚さ40mm超 75mm以下の例
JIS G 3127 低温圧力容器用 ニッケル鋼鋼板	SL9N590			≦0.90			Ni: 8.50-9.50			焼入焼戻し ^{*4}		≧590	690~830	-	≧21	-196	≧41	引張試験は 厚さ20mm超の例
	SL7N590	≦0.12	≦0.30	≦0.015	≦0.015		Ni: 6.00-7.50	-	熱加工制御後 焼戻し ^{*4}									
JIS G 3136 建築構造用 圧延鋼材	SN490B				≦0.030	≦0.015		≦0.46 (TMC 以外)	≦0.29 (TMC 以外)	[必要に応じて] 焼ならし等 [協定により] 熱加工制御等	SN490Cには 厚さ方向の 絞り規定あり	295~415	490~610	≦80	≧23	0	≧27	引張試験は 厚さ40mm超 100mm以下の例
	SN490C	≦0.20	≦0.55	≦1.65			-	≦0.40 (TMC)	≦0.26 (TMC)	成分は板厚 50mm超 100mm以下の例								
JIS G 3140 橋梁用 高降伏点鋼材	SBHS500		≦0.55				N ≦0.006			熱加工制御		≧500	570~720	-	≧20	-5	≧100	引張試験は 厚さ20mm超の例
	SBHS500W	≦0.11	0.15-0.55	≦2.00	≦0.020	≦0.006	Cu: 0.30-0.50 Ni: 0.05-0.30 Cr: 0.45-0.75 N ≦0.006	-	≦0.20	[協定] 焼入焼戻し等								

* 1 炭素当量Ceq (%) = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

* 2 溶接割れ感受性組成P_{CM} (%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

* 3 3本の平均値

* 4 必要に応じて中間熱処理（焼戻しに先立ちオーステナイトおよびフェライトの2相域から冷却する熱処理）を行ってもよい

表 2 高張力鋼の成分・製造方法の実績例²⁹⁾

種類の記号	板厚 (mm)	製造方法	成分 (wt%)														
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq	P _{CM}	
SM490	35	圧延まま	0.16	0.35	1.45	0.012	0.004									0.40	0.24
SM570	25	焼入焼戻し	0.08	0.2	1.28	0.010	0.001			0.25	0.17	0.04		0.0010	0.38	0.18	
SHY685NS	50	焼入焼戻し	0.12	0.24	0.88	0.004	0.001	0.17	0.98	0.48	0.40	0.04		0.0010	0.53	0.26	
SMA490	25	圧延まま	0.13	0.45	1.00	0.018	0.005	0.32	0.11	0.49		0.06			0.43	0.24	
SL9N590	40	焼入焼戻し	0.05	0.25	0.57	0.002	0.001		9.46						0.78	0.24	

$$Ceq = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

呼ぶ) や、建設機械など一部の分野ではさらに強度の高い鋼材が使用されている²⁾。また、強度・靱性・溶接性以外に、耐食性や高温強度、極低温の靱性に優れた鋼材や、建築・橋梁など特定の構造物で必要とされる性能を具備した鋼材がある。

本報では、厚鋼板の溶接構造用高張力鋼につき、合金元素の役割を概説する。本報で紹介する鋼材のJIS規格例を表1に、実績成分・製造方法例を表2に示す。

◇ HT490

フェライト-パーライト組織から成る軟鋼のC量を増大すると、パーライト分率が増えて高強度化するが、同時に靱性や溶接性が低下する。このため欧米では、Cを低減するとともに、Si、Mn等を添加して主に固溶強化による強度増大³⁾をはかり、靱性、溶接性も確保する開発が主に1930年代に行われた⁴⁾。このような高張力鋼として例えばドイツのSt52⁵⁾がある。

日本における溶接構造用HT490の開発は、戦前の艦艇用鋼板の開発に遡る^{6)~8)}。海外材を参考にして、Si-Mn系成分をはじめ種々の成分が検討された。戦後、民生品を含めて溶接性を考慮した開発が進み、1950年代の実用化を経て、1959年に溶接構造用圧延鋼材JIS G 3106 (SM) にSM50 (現在はSM490) として記載された⁷⁾。合金元素は、C、Si、Mn、P、Sが規定されており、要求靱性の有無や水準に応じてC量上限が設定されている。さらに溶接時の割れ防止や予熱低減のため、必要に応じて炭素当量あるいは溶接割れ感受性組成が規定される。現在、SM鋼は、橋梁、建築などの社会インフラに用いられる溶接構造用鋼として最も

ポピュラーな規格の一つとなっている⁹⁾。

なお、HT490を含めた高張力鋼の開発の歴史のなかで、厚鋼板の高強度化と優れた靱性・溶接性を達成する製造技術としてTMCP (thermo mechanical control process) が1970-80年代に発展した。規格には明示されないが、Nb、Tiといったマイクロアロイが、溶接性を大きく損なうことなく強度、靱性を確保する合金元素として重要な役割を果たしている¹⁰⁾。厚鋼板では、造船やラインパイプの分野で様々な高張力鋼が開発されてきた¹¹⁾。

◇ HT570-590

日本におけるHT570-590の開発^{4)、5)、12)}では、高張力鋼に必要な強度、靱性、溶接性を同時に満足するための成分系の検討が1950年代に始まった。例えば、米国で開発されたV-Ti系のVanity鋼をモデルにV、Ti、Ni、Cr、Moなどが添加された種々の成分が試行された。一方で製造方法は、従来通り、圧延ままおよび焼ならしであった。このため、板厚が増大した場合に溶接性の確保が困難となり、実用化には至らなかった。引き続き、既に米国で実用化されていた焼入・焼戻しによる製造が検討され、結果として、日本製鋼所による2H鋼の開発を端緒に、各社が調質HT570-590を製造する体制を整え、橋梁、タンクなど様々な分野で実用化を果たした。

現在、板厚が小さい鋼板や、靱性、溶接性の要求が低位のHT570-590については圧延ままで製造するケースはあるものの、調質型のHT570-590も一般的に製造されている。JIS規格には、1966年のSM規格改正時にSM58 (現在はSM570) が追加された¹³⁾。

◇ HT780

HT780の元祖となるのは、1952年に初めて焼入・焼戻しにより製造された米国U.S.SteelのT-1鋼である⁴⁾。焼入・焼戻し技術は、日本でも前記のようにHT570-590開発において活用され、さらにHT780開発にも用いられた^{4)、5)}。

HT780のマイクロ組織は焼戻しマルテンサイトが主体となる⁸⁾。焼入性を高めてマイクロ組織をマルテンサイト主体とするため、Cr、Mo、V、Bといった元素や、同時に低温靱性を改善するNiが、要求性能に応じて添加される。

1960年代以降、HT780は球形LPGタンクに多数使用されたが、その後1970年代になって、橋梁やペンストックにも使用されるようになった¹⁴⁾。特に橋梁用HT780では、高温予熱作業の負荷を低減するため、Cuを添加したCu析出予熱低減型HT780などが開発された。JIS規格としては、ペンストック等への適用を踏まえて、1983年にJIS G 3128溶接構造用高降伏点鋼板 (SHY) が制定された。

なお、高張力鋼の高強度化はその後も続いており、ペンストックでは引張強さ950N/mm²級の鋼材が使用され¹⁵⁾、建設機械分野では引張強さ1,000N/mm²超の鋼材が使用されている²⁾。

◇ 耐候性鋼

耐候性鋼は、表面に緻密な保護性さびを形成させ、比較的穏やかな腐食環境中でのさびの成長を抑制する鋼材である¹⁴⁾。大気中での耐錆性を向上させる合金元素として、Cu、Cr、P、Niが知られており¹⁶⁾、種々の成分を組み合わせた耐候性鋼がこれまでに開発されてきた¹⁷⁾。

耐候性鋼の歴史は、1933年にU.S.Steel社が開発したUSS COR-TENに始まる¹⁴⁾。日本では、1950年代後半から、COR-TENの技術導入や独自の開発が進められ、商品化された¹⁸⁾。しかし、開発から橋梁での無塗装使用には長い利用技術開発の歴史があり、数十年の歳月を要した。JISには、1968年に規格化された溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材JIS G 3114 (SMA) など、いくつかの種類がある。SMAは、SMと同様に、橋梁などの構造物に多数適用されている。

◇ 低温用鋼

高張力鋼のうち、低温容器等に使用され、低温靱性および溶接性を重視して製造された鋼材は低温用鋼と呼ばれる。特に使用温度が低い場合は、Ni添加鋼が使用される。例えば、沸点が-160℃程度のLNGの貯槽には9%Ni鋼が用いられる。Niは、低温での転位易動度の上昇¹⁹⁾を通じて低温靱性を顕著に改善するとされており、実用元素としてはNiだけがこの機能を有する²⁰⁾。9%Ni鋼の優れた靱性は、前記の効果のほか、最適な製造方法で作られた微細な焼戻しマルテンサイトであることや、若干量の微細なオーステナイトが生成することも寄与していると考えられている²⁰⁾。9%Ni鋼は、米国のINCOが開発²¹⁾した鋼材であり、その後、日本でもLNGタンクへの実適用を経て、JIS G 3127低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板 (SLxNxx) として1977年にJIS規格化された。

近年、TMCP技術や特殊熱処理技術、合金成分の最適化などを活用して、高価なNiを削減した7%Ni鋼が開発、実用化され²²⁾、JIS G 3127に記載された。

◇ 建築用鋼

建築分野では、JIS G3101 一般構造用鋼SS400や前述のSM490Aが主に使用されてきた。1981年のいわゆる新耐震設計法は、構造骨組の塑性変形能力を従来以上に重要視する設計法に改定され、鋼材には塑性変形能力や溶接性などが必要だが、規格には規定されていなかった。その後、1990年代前半のいわゆる不良鉄骨問題を契機として新しい規格の必要性があらためて認識され、1994年にJIS G 3136 (SN) が規格化された^{23)、24)}。

SN鋼の成分規定はSM鋼と同様C、Si、Mn、P、Sの5元素のみであるが、不純物元素P、Sの上限がより低く設定されるとともに、溶接性の確保のため、製造方法によらずに炭素当量あるいは溶接割れ感受性組成が規定された。さらに、構造の塑性変形能力を確保するため、降伏点の上限および降伏比の上限が規定された。

なお、この分野では国土交通大臣による大臣認定を受けた高張力鋼として、降伏強さ880N/mm² (引張強さ950N/mm²) の高強度鋼材が開発、実用

化され²⁵⁾ており、さらに高層建築の施工時に適用される大入熱溶接においても、溶接熱影響部で優れた靱性を確保する鋼材が開発されている²⁶⁾。

◇ 橋梁用鋼

橋梁分野ではSM鋼、SMA鋼などの溶接構造用鋼が従来使用されてきた。一方、1990年代から産官学が連携して、高性能鋼の活用や鋼構造の国際競争力強化といった視点で議論および開発を推進した。その結果、TMCPを活用した、降伏強度 500N/mm^2 (引張強さ 570N/mm^2)を標準として、それを補う降伏強度 400N/mm^2 (引張強さ 490N/mm^2)、降伏強度 700N/mm^2 (引張強さ 780N/mm^2)をもち、さらに耐候性仕様を設けた高性能鋼材が開発された。その後2008年に、強度・破壊靱性・溶接性・加工性・耐候性等、橋梁に要求される各種の特性を最適なレベルに高めた鋼材として、橋梁用高降伏点鋼板JIS G 3140 (SBHS) が規定された^{27), 28)}。

SBHSの成分は、靱性・溶接性を確保しながら高強度を実現するため、Cの含有量を抑えるとともに、不純物元素量を大幅に低減し、溶接割れ感受性組成 P_{CM} を低く抑えた。また、曲げ性能を確保するため、歪時効特性を考慮してNの上限規定を設けた。さらに、耐候性を有する仕様ではCu、Ni、Crが規定された。

むすび

厚鋼板として使用される各種の高張力鋼につい

て、合金元素の役割を概説した。

参考文献

- 1) 児島明彦：溶接学会誌、77、3 (2008)、p 237
- 2) 堅田寛治：ふえらむ、18、2 (2013)、p 61
- 3) 荒木透：鉄と鋼、58、13 (1972)、p 1753
- 4) 柴田浩司：鉄と鋼、67、7 (1981)、p 1026
- 5) 鋼材倶楽部新製品紹介編集小委員会：JSSC、3、14 (1967)、p 25
- 6) 柴田浩司：鉄と鋼、67、7 (1981)、p 1026
- 7) 堀川一男：金属、51、10 (1981)、p 70
- 8) 邦武立郎：ふえらむ、3、10 (1998)、p 729
- 9) 井上肇：ふえらむ、20、4 (2015)、p 139
- 10) 牧正志：鉄と鋼、100、9 (2014)、p 1062
- 11) 小指軍夫：制御圧延・制御冷却、(1997)、p 28
- 12) 荒木透：金属、50、1 (1980)、p 73
- 13) 橋本宇一、稲垣道夫：Journal of JSME、71、591 (1968)、p 458
- 14) 日本鉄鋼協会：わが国における厚板技術史、(2001)
- 15) 上田修三：構造用鋼の溶接、(1997)、p 63
- 16) 谷野満：鉄鋼材料の科学、(2001)、p 231
- 17) 百合岡信孝、大北茂：鉄鋼材料の溶接、(1998)、p 38
- 18) 堀川一男：金属、51、10 (1981)、p 70
- 19) 前野圭輝ら：鉄と鋼、98、12 (2012)、p 667
- 20) レスリー鉄鋼材料学：(1960)、p 130
- 21) 大岡耕之：学位論文「9%ニッケル鋼に関する研究」、(1965)
- 21) C. W. Marschall: Trans ASM、55、(1962)、p 135
- 22) 加賀谷崇之ら：新日鐵住金技報、400、11 (2014)、p 38
- 23) 橋本順次：溶接学会誌、65、3 (1996)、p 228
- 24) 志村保美：溶接学会誌、80、4 (2011)、p 311
- 25) 加茂孝浩ら：新日鐵住金技報、400、(2014)、p 67
- 26) 児島明彦ら：新日鐵技報、380、(2004)、p 33
- 27) 田中睦人：ふえらむ、17、4 (2012)、p 199
- 28) 和田浩介：ふえらむ、17、4 (2012)、p 207
- 29) 斉藤直樹：特殊鋼、51、3 (2002)、p 27

2. 超強力鋼（マルエージング鋼）

日立金属(株) 西田純一
冶金研究所 主管研究員

まえがき

鉄鋼材料の多くのマルテンサイト鋼は侵入型元素の炭素を過飽和に固溶させたマルテンサイトにより高強度化が行われるが、マルエージング鋼は炭素をほとんど含まず、置換型固溶元素を過飽和に固溶する極低炭素マルテンサイト合金である。マルテンサイト変態によって生じた転位を析出サイトとして、時効処理によって金属間化合物などを微細に分散析出させることにより、優れた強度と靱性が得られる。固溶化処理状態で高密度の転位を含むマルテンサイト組織となるが、硬さは約300HVと軟らかいため加工性に優れている。またC量も少ないため溶接性も良好である。時効硬化処理後の熱処理変寸が少なく、仕上げ加工も容易である。

1950年代後半から開発され、高い比強度と良好な加工性が得られることから、宇宙、海洋開発、原子力、航空機などの先端的技術分野から、各種加圧容器、工具類などの一般産業分野にも用途が広がっている。

代表的なマルエージング鋼は18%Niを含むNi-Co-Mo系マルエージング鋼で、化学成分と引張特性を表1に示す。グレード250～350は0.2%耐力レベル（単位ksi：1ksiは約7MPa）を示している。強度の高い鋼種ほど析出硬化量が多く、その強化量はMo当量（Mo（%）+Co（%）/3+3Ti（%））に比例し、Mo当量1%当たり100MPa程度の強度

上昇が報告されている¹⁾。この鋼の多くは多量のMo、Coと少量のTi、Alからなるが、YAG[®]285はTiを高めることにより、高価なMo、Coを低減した鋼である。

◇ 合金元素の役割

合金元素の役割は大きく二つに分類される。一つは、基質をマルテンサイト組織とするために、オーステナイト域を広げてマルテンサイト変態を生じさせる元素でNi、Mn、Coなどがある。もう一つは、時効により析出させる元素で、オーステナイト域を狭めてフェライト相に固溶限をもつMo、Ti、Alなどがある。これらの元素は母合金元素と結合して金属間化合物の析出物となって析出硬化する。

溶体化処理において昇熱過程でマルテンサイトから約500℃から逆変態オーステナイトが生成するが、さらに加熱温度を高めるとオーステナイト粒は再結晶し、結晶粒は微細化される。溶体化処理温度としては800～900℃が一般的である。

マルエージング鋼は200℃前後でマルテンサイト変態が開始（Ms点）し、100℃前後で変態終了（Mf点）する。合金量が多くなるとMf点が室温に近くなるため、溶体化処理の冷却終点が高いと残留オーステナイトが残り引張強さが低下する。Ms点及びMf点に及ぼす合金元素の影響については、岡田らの多重回帰分析式で整理されている²⁾。

表 1 代表的な18%Niマルエージング鋼の化学成分および引張特性

グレード	化学成分 (mass%)						引張特性			
	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Fe	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
250	18	8	5	0.4	0.1	Bal.	1,700	1,790	13	52
300	18	9	5	0.9	0.1	Bal.	1,910	2,010	10	48
350	18	12	4	1.7	0.1	Bal.	2,310	2,400	8	45
YAG [®] 285	18	0.5	2	1.9	0.1	Bal.	1,860	1,950	11	50

注) YAG[®]は日立金属(株)の登録商標です。

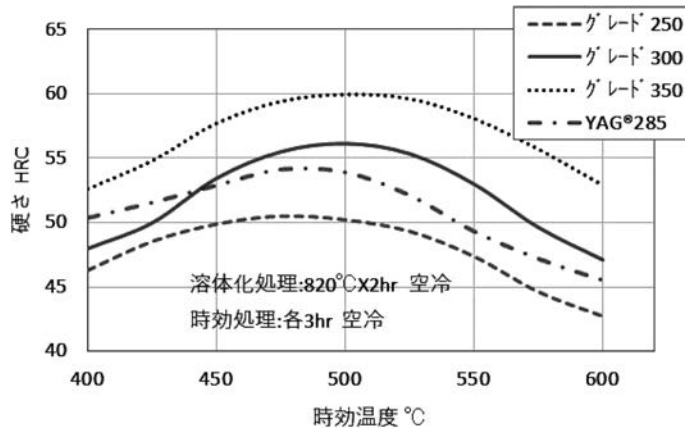


図 1 代表的な18%Niマルエージング鋼の時効硬さ

マルエージング鋼は500°C前後の時効処理により最高硬さが得られる。代表的な例として各グレードのマルエージング鋼を820°Cで溶体化処理をした後に、各時効温度で3時間の処理を行った時の時効硬さを図1に示す。CoとMoを含むマルエージング鋼の時効過程では、最高時効状態で金属間化合物として板状Ni₃Moが微細析出する。Ni₃Tiも少量ながら析出する³⁾。Coの役割は、Coの金属間化合物は析出しませんが、約350°Cで短範囲のFe (Co, Ni) の規則相が形成され、Ni原子を排斥するために、Ni₃Moの析出を促進する効果があると考えられている。TiについてはTi量の増加に伴い、硬化に寄与する相がNi₃MoからNi₃Tiに移行し、1%以上ではNi₃Tiのみで硬化するため³⁾、時効硬化におけるCoの役割は小さくなる。NiについてはNi量の増加に伴い、析出速度は速くなり、切り欠き引張強さは向上し、靱性を向上させる作用がある。

一般に最高硬さが得られる条件で高い延性が得られ、破壊靱性値 (K_{IC}) が最も優れている¹⁾ので、この最高時効状態で使用される。過時効組織では微量のγ相の析出により疲労亀裂の進展に対して大きな抵抗となる効果も報告されているが⁴⁾、また同時に析出する粗大Fe₂Moの平衡相析出の悪

影響もあり靱性の改善が得られない場合もある。

◇ 最近の傾向

マルエージング鋼は高強度で延性に優れることが特徴であるが、3,000MPaを越える強度水準になると結晶粒径の影響を受けやすくなるために、高強度材では加工熱処理や、Bの微量添加などにより結晶粒の微細化が図られている。靱性の向上には、溶解法の進展により、不純物が低減し、強度-靱性のバランスが改善された。また特殊な熱処理として、未再結晶溶体化処理により靱性が改善されることが報告されている⁵⁾。

以上のように、マルエージング鋼は様々な特徴をもっており、近年では金属積層造形の分野でも用途が広がってきている。

参考文献

- 1) 河部義邦：日本金属学会会報、14 (1975)、10号、p 767-777
- 2) 岡田康孝、邦武立郎：鉄と鋼、67 (1981)、6号、p 791-798
- 3) 徳永洋一、高木節雄：日本金属学会会報、21 (1982)、4号、p 234-241
- 4) 森山三千彦、高木節雄、徳永洋一：J. Soc. Mat. Sci., Japan、43 (1994)、No. 492、p 1106-1112
- 5) 安野拓也、栗林一彦、堀内良、大塚正久：鉄と鋼、77 (1991)、p 1725-1732

3. 構造用鋼

愛知製鋼(株)のこうめい
部品開発部 駆動開発室 牧野孔明

まえがき

構造用鋼は自動車をはじめとして、建設機械、農業機械、工作機械、油圧機器等産業機械のあらゆる分野の重要部品として使用されている。

JISには機械構造用炭素鋼と機械構造用合金鋼に大別され、規定されている。

◇ 機械構造用炭素鋼

現在、JISに規定されている機械構造用炭素鋼全27種類を表1に示す。これらの鋼種のうち、S09CK、S15CK、S20CKはP、SおよびCu、Ni、Crを他の鋼種より低く抑え、特にはだ焼用鋼として使用される。

S60CからS75Cは鋼板および鋼帯だけに適用する規格である。

機械構造用炭素鋼は熱間圧延、熱間鍛造などの熱間加工後にさらに切削、引抜き、熱処理などが加えられる。このため、機械構造用炭素鋼は最終製品の機械的性質を満足させるのみでなく、途中工程の加工性を満足させることが要求される。

一般に機械構造用炭素鋼はC（炭素）量の増加とともに強度は増加し、逆に延性、靱性は低下する。また、焼入性は合金鋼と比べて低いため、大型部品では芯部まで焼入れができない欠点がある。このため、低炭素鋼は焼入れ焼戻しされることは

ほとんどなく、熱間加工ままや、焼ならしを施した状態で使用される。中炭素鋼は低炭素鋼に比べ焼入性が高いため、小型部品での焼入れ焼戻しや高周波焼入れなどが適用される。

◇ 機械構造用合金鋼

機械構造用合金鋼については40種類がJISに規定されている。その一例を表2に示す。これらはJISにおいては明確に区分されていないものの、強靱鋼（焼入れ焼戻しをして使用される）と、はだ焼用鋼（浸炭焼入れ焼戻しをして使用される）および、表面窒化用鋼（窒化して使用される）に大別される。

1. 強靱鋼

強靱鋼は強さと靱性を必要とされる機械構造用部品に使用されることから、一般的に焼入れ焼戻しが施される。

強靱鋼として使用される鋼種は炭素量が0.25～0.50%程度の鋼にSi、Mn、Cr、Ni、Moなどの元素が適量添加されている。

以下に鋼種ごとの特徴と合金元素の役割について述べる。

(1) Cr鋼

この鋼種は炭素鋼にCrを添加するとともに、Mnをやや高めに添加することで焼入性を向上させている。Crにより焼入性が向上するのは、パーラ

表 1 機械構造用炭素鋼の化学成分 (mass%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S
S10C～S25C	0.08～0.28	0.15～0.35	0.30～0.60	0.030以下	0.035以下
S28C～S58C	0.25～0.61	0.15～0.35	0.60～0.90	0.030以下	0.035以下
S60C～S75C	0.55～0.80	0.15～0.35	0.60～0.90	0.030以下	0.035以下
S09CK	0.07～0.12	0.10～0.35	0.30～0.60	0.025以下	0.025以下
S15CK	0.13～0.18	0.15～0.35	0.30～0.60	0.025以下	0.025以下
S20CK	0.18～0.23	0.15～0.35	0.30～0.60	0.025以下	0.025以下

*S10C～S75CはCu：0.30%、Ni：0.20%、Cr：0.20%、Ni+Cr：0.35%を超えてはならない。
S09CK、S15CK、S20CKはCu：0.25%、Ni：0.20%、Cr：0.20%、Ni+Cr：0.30%を超えてはならない。

表 2 機械構造用合金鋼の化学成分の一例 (mass%)

分類	鋼種	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
Cr鋼	SCr435	0.33~0.38	0.15~0.35	0.60~0.90	—	0.90~1.20	—
	SCr420	0.18~0.23	0.15~0.35	0.60~0.90	—	0.90~1.20	—
Cr-Mo鋼	SCM435	0.33~0.38	0.15~0.35	0.60~0.90	—	0.90~1.20	0.15~0.30
	SCM420	0.18~0.23	0.15~0.35	0.60~0.90	—	0.90~1.20	0.15~0.25
Ni-Cr鋼	SNC836	0.32~0.40	0.15~0.35	0.35~0.65	3.00~3.50	0.60~1.00	—
	SNC415	0.12~0.18	0.15~0.35	0.35~0.65	2.00~2.50	0.20~0.50	—
Ni-Cr-Mo鋼	SNCM439	0.36~0.43	0.15~0.35	0.60~0.90	1.60~2.00	0.60~1.00	0.15~0.30
	SNCM420	0.17~0.23	0.15~0.35	0.40~0.70	1.60~2.00	0.40~0.60	0.15~0.30
Mn鋼	SMn438	0.35~0.41	0.15~0.35	1.35~1.65	—	0.35以下	—
	SMn420	0.17~0.23	0.15~0.35	1.20~1.50	—	0.35以下	—
Mn-Cr	SMnC443	0.40~0.46	0.15~0.35	1.35~1.65	—	0.35~0.70	—
	SMnC420	0.17~0.23	0.15~0.35	1.20~1.50	—	0.35~0.70	—
Al-Cr-Mo鋼	SACM645	0.40~0.50	0.15~0.50	0.60以下	—	1.30~1.70	0.15~0.30

*いずれの鋼種もP:0.030%以下、S:0.030%以下。

*Cr鋼、Cr-Mo鋼、Mn鋼、Mn-Cr鋼、Al-Cr-Mo鋼はNi:0.25%、Cu:0.30%を超えてはならない。

*Ni-Cr鋼、Ni-Cr-Mo鋼はCu:0.30%を超えてはならない。

*SACM645のAlは0.70~1.20%とする。

イト変態等の拡散型変態を遅延させるためである。また、Crは炭化物を形成することから、焼戻し軟化抵抗が大きくなる。

ただし、焼戻し温度500℃付近での脆化（焼戻し脆性）が大きいため、500℃以上で焼戻しする場合は急冷することが望ましい。

(2) Cr-Mo鋼

この鋼種はCrに加えMoを添加し、Cr鋼よりも焼入性を向上させている。MoもCrと同様、拡散型変態を遅延させるため、焼入性を向上させる。また、Cr鋼に比べ焼戻し脆性が小さい。

(3) Ni-Cr鋼

この鋼種はCr鋼にNiを添加することにより、強度、韌性、焼入性をさらに向上させている。

(4) Ni-Cr-Mo鋼

この鋼種はNi-Cr鋼にMoを添加し、Ni-Cr鋼の欠点である焼戻し脆性を改善し、あわせて焼入性を向上させている。

また、焼戻し軟化抵抗が高いため、より高温での焼戻しが可能であり、他の合金鋼に比べ最も高い焼入性と強韌性を示す。

(5) Mn鋼およびMn-Cr鋼

Mnも拡散型変態を遅延させるため、焼入性が向上する。高価なCrやMoを使用せずに焼入性を改

善できるが、焼割れを起こしやすい上に焼戻し脆性に敏感であるなどの傾向がある。Mn-Cr鋼はMn鋼にCrを添加し、これらの欠点をやや緩和したものである。

強靱鋼および、次節で説明するはだ焼用鋼は硬化を目的に焼入れをされることから、焼入性が重要な要素である。そのため、化学成分に加えて、焼入性を保証したH鋼がJISに定められている。

2. はだ焼鋼

機械構造用鋼の中で、一般的にC濃度0.25%以下の低炭素のものがはだ焼鋼として使用される。はだ焼鋼は浸炭焼入れによって表面硬化させるが、その目的は疲労強度と耐摩耗性の向上にある。

一方、浸炭層以外の母材は低炭素であるため、部品全体の韌性を確保できることから、はだ焼鋼は表面の高い疲労強度と耐摩耗性を活かし、歯車や軸受けなどの部品に用いられる。以下にはだ焼鋼の代表鋼種と合金元素の役割について述べる。

(1) Cr鋼

Crは鋼中のCの拡散速度を低下させるため、炭素鋼より浸炭層のC濃度を増加させ、浸炭層硬さを向上させる。

(2) Cr-Mo鋼

Cr鋼に少量のMoを添加したもので、MoもCrと

同様に鋼中のCの拡散速度を低下させ、浸炭層硬さを向上させる。Cr鋼に比べ、焼入性が向上するので、Cr鋼より大きな部品に使用される。

(3) Ni-Cr鋼

この鋼種はCr鋼にNiを添加することにより、強度、韌性、焼入性をさらに向上させている。

(4) Ni-Cr-Mo鋼

Ni-Cr鋼と似た性質を有し、Cr鋼、Cr-Mo鋼に比べ、焼入性、韌性がさらに向上する。

(5) MnおよびMn-Cr鋼

Mnの添加により浸炭性は若干向上する。また、Mnの添加により変態点が低下するため、焼入温度を低く設定でき、結晶粒粗大化や熱処理後のひずみを抑制する利点がある。

3. 表面窒化用鋼

JISではAl-Cr-Mo系のSACM645の1種類のみ規格化されている。Al、Cr、Moは窒化処理により、窒化物を生成するため、硬さの高い表面層を得ることができる。

◇ 最近の傾向

機械構造用鋼およびそれを使用した部品の低コスト化ニーズは常に存在し、近年においても、それらに対応した鋼種開発が進められている。

1. 省合金化

機械構造用合金鋼に添加されている高価なNi、Moなどを低減し、材料コストそのものを低減させたものが複数報告されている。Mo低減による特性

の低下をSi、Mn、Cr添加量の調整により補うもの¹⁾や、Si、Mn低減とNb、Bなどを添加させたもの²⁾などが報告されている。

2. 工程省略

材料コストそのものではなく、部品製造トータルの低コスト化を狙った材料が開発されている。

例えば、冷間鍛造により製造される部品は冷間鍛造前に硬さを低減させる熱処理を施すものが多いが、熱処理を施さなくても硬さを低減できる成分調整を行い、熱処理工程省略を狙ったものが報告されている^{3)、4)}。

むすび

JIS規格鋼の機械構造用炭素鋼と機械構造用合金鋼の各鋼種の特徴と合金元素の役割について述べた。また、最近の傾向として、低コスト化に対応した鋼種開発について述べた。低コスト化以外にも、環境やレアメタルの供給リスクに配慮した材料・プロセス開発なども報告されており⁵⁾、今後新たな部品製造プロセスやそれに適した機械構造用鋼が開発されていくとみられる。

参考文献

- 1) 福田康弘、安達裕司：愛知製鋼技報、35 (2019)、10
- 2) 橋本和弥：特殊鋼、68 (2019)、3、59
- 3) 新堂陽介：特殊鋼、68 (2019)、1、23
- 4) 岩本隆：特殊鋼、68 (2019)、3、61
- 5) 杉浦孝佳、佐藤裕和、安達裕司：愛知製鋼技報、33 (2016)、1、3

4. ばね鋼

三菱製鋼(株) 技術開発センター みのぐちこうき
 研究第二グループ グループ長 養口光樹

まえがき

自動車や建設機械に使用されるばね製品には、その要求特性を満たすよう各種合金元素を添加したばね鋼が用いられている。ばね製品の例として自動車用懸架ばねの外観を写真1に示す。ここではばね鋼の種類を紹介するとともに、ばね鋼に添加される合金元素の役割について述べる。

◇ ばね鋼の種類

ばねは、力を加えて変形させた時、変形を元に戻そうとする力（復元力）が働くことを利用した

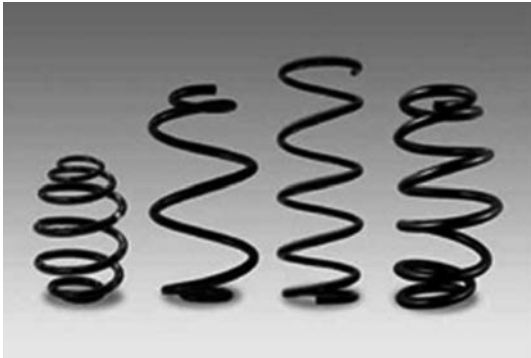


写真1 自動車用懸架ばねの外観

部品の総称である。ばね鋼は、ばねの素材として利用される材料のうち鉄鋼材料のことを言い、日本工業規格（以下、JIS）では、主として熱間成形ばねに使用するばね鋼鋼材を規定したJIS G 4801の他、硬鋼線、ピアノ線、オイルテンパー線、ばね用ステンレス鋼帯、ばね用ステンレス鋼線などいくつかの規格が、ばねの形状や使用される目的などに応じて規定されている。ここでは代表的なばね鋼としてJIS G 4801ばね鋼鋼材に規定されているばね鋼の化学成分及び用途を表1に示す。Fe（鉄）をベースに各種合金元素が添加されており、これに熱処理を施すことで、焼入性、機械的特性、へたり特性、疲れ強さなどばねに要求される性能を発現させることを可能にしている。なお、自動車用懸架ばねや産業機械用ばねに使用されるばね鋼は、他の用途の特殊鋼と比較して高強度で使用されることが多い鋼種である。高強度になるほど素材の欠陥に対する感受性が高くなることから、ばね鋼メーカーは材料の欠陥を可能な限り少なくした高品質な材料を顧客に提供している。

◇ ばねの製造プロセス

代表的なばね製造プロセスとして熱間成形コイルばねの標準的な製造工程を図1に示す。添加さ

表 1 ばね鋼の化学成分

規格記号	化学成分 (%)							主な用途
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	B	
SUP6	0.56-0.64	1.50-1.80	0.70-1.00	-	-	-	-	重ね板ばね、コイルばね及びトーションバー
SUP7	0.56-0.64	1.80-2.20	0.70-1.00	-	-	-	-	
SUP9	0.52-0.60	0.15-0.35	0.65-0.95	0.65-0.95	-	-	-	
SUP9A	0.56-0.64	0.15-0.35	0.70-1.00	0.70-1.00	-	-	-	
SUP10	0.47-0.55	0.15-0.35	0.65-0.95	0.80-1.10	-	0.15-0.25	-	コイルばね及びトーションバー
SUP11A	0.56-0.64	0.15-0.35	0.70-1.00	0.70-1.00	-	-	≥0.0005	大形の重ね板ばね、コイルばね及びトーションバー
SUP12	0.51-0.59	1.20-1.40	0.60-0.90	0.60-0.90	-	-	-	コイルばね
SUP13	0.56-0.64	0.15-0.35	0.70-1.00	0.70-0.90	0.25-0.35	-	-	大形の重ね板ばね及びコイルばね

P、Sはすべてmax 0.030%、Cuはすべてmax 0.30%

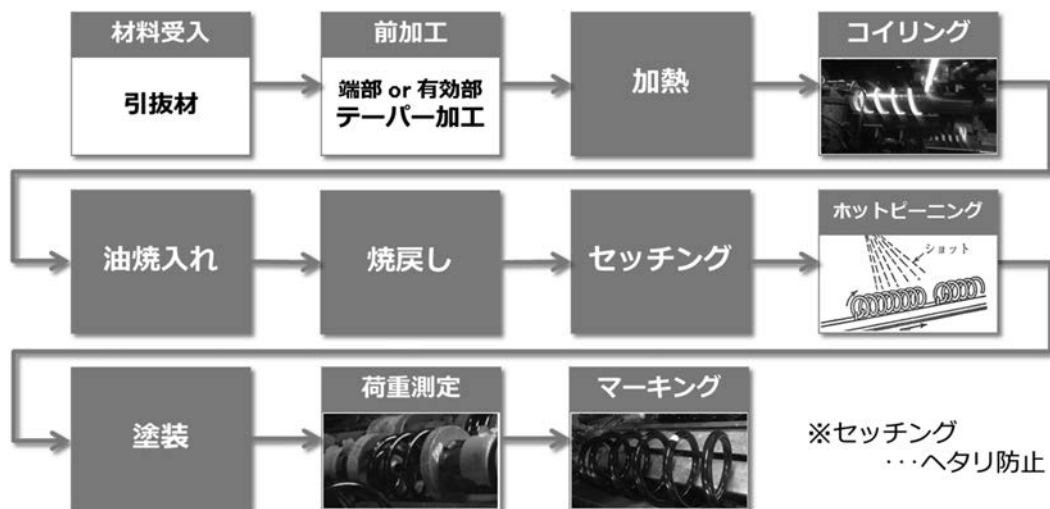


図 1 熱間成形コイルばねの製造工程

れている合金元素の性能を引き出すには、焼入れ、焼戻し工程が必要になる。また、ばねに最大使用荷重以上の応力を付与し、塑性変形を加えることでばねのへたりを防止するセッチング工程、ばねの表面に圧縮の残留応力を付与し、表面欠陥からの亀裂の進展を抑制するショットピーニング工程が製造工程に組み込まれている。

◇ 合金元素の役割

ここでは、ばね鋼に添加されている合金元素がどのような性能を付与しているのか紹介する。

1. C (炭素)

Cは鋼の強度を増加させる基本的元素である。自動車をはじめとした重量のある乗り物の車体を支えるばねにとって、Cによる強度の付与は不可欠である。高応力で使用されるばね鋼においては、強度を高めるために0.5～0.65%程度のCがFeに添加されている。Feは温度により原子の並び方、結晶構造が変化する性質を有しており、この性質を利用した焼入れ処理により強度を高めることが可能である。Cの添加量が増加するにつれ、強度が増加するが、0.6%まで達すると、それ以上の上昇がなくなることが知られている。ばね鋼はこの強度上限を狙ったC量が添加されている。ただし、焼入れをしたまま強度が高い状態ではばねとして使用すると、非常に脆く折損しやすくなるため、オーステナイトに変化する温度より低い温度に保

持する焼戻しと呼ばれる熱処理を行う。焼入れにより格子間に取り込まれたCを、焼戻しすることによりCとFeの化合物であるセメンタイトに変化させ、強度を下げ、粘り強さを付与することで、はじめてばねとして使用することが可能になる。

2. Si (ケイ素)

Siは0.2%耐力や引張強さを向上させる元素であり、特に焼戻し軟化を遅らせる働きがある。焼戻しによる軟化を遅らせることにより高温で焼戻しすることが可能になるので、その分、靱性・延性が向上する。また、Siはフェライトを強化し、ばねの耐へたりに性を向上させる。へたりとは、ばねに荷重を負荷して縮めた後、荷重を取り除くと元のばね高さまでばねが戻らなくなる現象をいい、耐へたりに性が不足すると車体の高さが経年に伴い次第に下がってしまうことになる。ばねの製造工程において、使用中のへたりを防止するために、予め荷重を負荷し、塑性変形を与えるセッチング工程が設けられているが、ばね鋼へのSi添加を行うことでさらに耐へたりに性を高めることができる。そのため、主に乗用車向けの巻ばねに採用されることが多いSUP6、SUP7、SUP12にはSiが添加されている。

3. Mn (マンガン)

Mnは焼入れ性を向上させる元素であり、ばねの中心部にまで強度を付与する。また、焼戻し過程でセメンタイトに固溶し、焼戻し軟化抵抗を増し、強度を向上させる。

4. Cr (クロム)

CrはMn同様に焼入れ性を向上させる元素であり、ばねの中心部にまで強度を付与する。また、焼戻し過程でセメントナイトに固溶し、焼戻し軟化抵抗を増し、強度を向上させる。加えて、ばねに耐腐食性を付与する役割もある。

5. V (バナジウム)

Vは結晶粒を微細化させ、耐力比と靱性・延性を向上させる。450℃以上の温度の焼戻しで析出硬化を生じさせ、焼戻し軟化抵抗を上げ、耐へたり性を向上させる。ただし、近年Vの価格が高騰していることから、Vが添加されているSUP10の採用は少ない傾向にある。

6. B (ボロン)

Bは他の合金元素に比べ微量にて焼入れ性を向上させる効果がある。ただし、B添加による焼入れ性向上効果を正しく得るには鉄鋼メーカーの製造ノウハウが必要である。SUP11AはMn、Crといった焼入れ性向上効果のある合金元素を添加しているSUP9にBを添加することで、さらに高い焼入れ性を付与したばね鋼であり、建設機械向けの大形ばねやトラック向けの大形重ね板ばねに適用されることが多い。

7. Mo (モリブデン)

Moは焼入れ性を向上させるとともに、焼戻し軟化抵抗を上げる。また、耐へたり性を向上させる。JISでは大形ばね向けにMoを添加したSUP13が設定されているが、近年Moの価格が高騰していることから、大形ばね向けにはSUP13よりも安価に提供可能なSUP11Aが採用されることが多い。

8. その他

近年は軽量化要求、車体デザインによるばね形状の制約などから、ばね鋼のさらなる高強度化が求められている。ばねの高強度化は、耐久性や耐へたり性を向上させるが、その一方で高強度化は応力集中に対して鋭敏化するとともに、水素脆化の危険性を高める。そのため高強度化を図ったばね鋼を開発する場合、応力集中源となる要因を減少させたり水素脆性に強くなるような成分設計を行うことが必要になる。このような高強度ばね鋼の開発に当たっては、表2に示すような合金成分を添加し、基本となる化学成分を調整して高強度化を図るとともに耐食性を向上させている。これら合金元素の成分範囲はばねの特性、加工性、製造容易性などのトータルコストを勘案して決定される。

むすび

ばねの主要ユーザーである自動車メーカーでは地球温暖化対策として二酸化炭素排出量削減に取り組んでいる。ばねに関しては高応力化を図ることでの軽量化が求められている。鉄鋼メーカーでは合金元素添加により高応力化と耐腐食性、耐遅れ破壊性などの両立を図ったばね鋼の研究開発が進められてきた。一方、ばねメーカーでは入手しやすいばね鋼規格材を用いて、セッチング、ショットピーニング、塗装などの製造工法を改良することによる高応力化の研究開発も進められており、これらの研究開発を通じて、更なる軽量化が進むものと考えられる。

表 2 合金元素の役割

役割	合金元素	効 用
靱性向上	Si	材料の割れ抵抗性を向上させ、亀裂進展の進行を遅らせる
	Mo、V、Nb、Ti等	結晶粒の微細化
	B	結晶粒界の強化
耐孔食性	Ni、Cu、Cr	耐食性の向上、腐食孔の生成抑制
耐遅れ破壊性	Ti、V、Mo、Nb	炭窒化物の微細分散析出による水素トラップサイトの生成

5. 軸受鋼

山陽特殊製鋼(株) 研究・開発センター 材料研究グループ グループ長 藤 松 威 史

まえがき

軸受は、回転運動や往復運動の軸を支えつつ、それに伴って生じる摩擦損失を可能な限り減らして動力伝達を円滑にする役割を担う。その代表的な種類として、対となる軌道輪（レースとも呼ぶ）の間に転動体（玉、ころ、ニードル等）を挟んだ基本構造から成る「転がり軸受」がある。転がり軸受では、転動体と軌道輪とが油膜を介して微小な面積同士で接触しており、そこに数GPaにも及ぶ高面圧が加わる。したがって、軸受には高い耐久性が必要になる。素材には、JIS G 4805「高炭素クロム軸受鋼鋼材」に規定されたSUJ鋼が多く用いられる。それ以外に、JIS規格の「機械構造用炭素鋼鋼材」（SC系）、「機械構造用合金鋼鋼材」（SCr系やSCM系等）、あるいは機能向上が図られた開発鋼等が適切な硬化処理を施して軸受として用いられる。本稿では、近年の自動車電動化や風力発電拡大の流れも考慮し、軸受鋼の基本機能ならびに機能向上に関わる元素の影響や役割を紹介する。

◇ 軸受鋼の基本機能ならびに機能向上に関わる元素の影響・役割

はじめにSUJ鋼を例に元素の影響や基本的な役割を示す。SUJ鋼は、表1のように約1mass%のCと1mass%超のCrを基本成分とする。通常、SUJ鋼では、球状化焼なましされた軟らかい状態で部品に加工したのち、焼入焼戻しでロックウェル硬

さ60HRC以上程度に硬化させた状態で使用する。これにより、部品加工時には良好な切削加工性を確保し、製品として使用される際には高面圧に耐えることができる。また、そのみならず安定して疲労寿命（転がり疲れ寿命）に優れていることが強く求められる。SUJ鋼における主要元素や微量元素の影響や作用は以下に要約される。

<C> 焼入れにより生じるマルテンサイト組織の硬さ確保ならびに焼入れ性付与に不可欠な元素である。マトリクス中の固溶炭素量は0.5%程が寿命に良いとされ¹⁾、²⁾、残りのCは球状炭化物として残存する。

<Cr> 球状炭化物中に固溶して焼入れ時の炭化物の溶解を遅らせる効果があり、熱処理作業の管理をし易くする²⁾。また、焼入れ性付与のために添加されている。

<Si, Mn, Mo> 主に焼入れ性を高めるために添加される。

<S> 鋼中で硫化物を形成して加工性を改善する作用があり微量に含有される。ただし、寿命に対して有害な影響があると考えられており、一般的な含有量は0.01%以下程度である。

<O> JIS規格には成分規定は無いものの、不純物元素として鋼中で酸化物を形成して寿命に有害な影響を及ぼすため、低減が不可欠である。

続いて表2の転がり疲れの主要損傷タイプ別に、機能向上に関わる合金元素の作用・役割を紹介する。

表 1 高炭素クロム軸受鋼の化学成分（単位：mass%、JIS G 4805:2008より抜粋）

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SUJ2	0.95~1.10	0.15~0.35	0.50以下	0.025以下	0.025以下	1.30~1.60	-
SUJ3	0.95~1.10	0.40~0.70	0.90~1.15	0.025以下	0.025以下	0.90~1.20	-
SUJ4	0.95~1.10	0.15~0.35	0.50以下	0.025以下	0.025以下	1.30~1.60	0.10~0.25
SUJ5	0.95~1.10	0.40~0.70	0.90~1.15	0.025以下	0.025以下	0.90~1.20	0.10~0.25

※不純物としてのNi及びCuは、それぞれ0.25%を超えてはならない。ただし、線材のCuは、0.20%以下とする。不純物としてSUJ2及びSUJ3のMoは、0.08%を超えてはならない。

表 2 軸受の転がり疲れにおける主要な損傷タイプとその発生環境・対策^{3), 4)}

損傷のタイプ		発生する使用環境と主要材料熱処理対策	
内部起点	非金属介在物起点型	清浄潤滑油で十分な油膜が形成される環境 →鋼材の高清浄度化	
	組織変化型	バンド状組織変化（ホワイトバンド：WB）が関与	高接触応力（高面圧）、高温環境 →耐焼戻軟化抵抗の高い鋼材成分 + 高温焼戻し
		不規則型組織変化（白色組織変化：WEA）が関与	水素侵入環境、振動、曲げ応力作用環境 （自動車電装補機用軸受等） →鋼材成分としての高Cr化
表面起点	不良潤滑型	異物混入型 （異物による摩耗、圧痕起因）	トランスミッション、産業機械等の異物混入 潤滑環境→硬さ、残留 γ 増加をもたらす 鋼材成分+各種浸炭浸炭窒化熱処理等
		金属接触型 （すべり発生環境起因）	低粘度潤滑環境、すべりを伴う環境 →耐焼戻軟化抵抗の高い高Si、Mo成分 + 浸炭窒化等

<内部起点型はく離>

このタイプの一つに非金属介在物周囲への応力集中に起因して生じるはく離があり、鋼中O量に関連した鋼材清浄度（介在物の大きさや分布）の度合いによって寿命が左右される。近年、製鋼技術の進歩によりO量は数ppmレベルに低減可能となり、大幅な寿命向上がもたらされている。他方、自動車電動化の流れから燃費向上や搭載スペースのコンパクト化のニーズがあり、それに寄与する軸受の小型軽量化の実現において、作用面圧増大への対応が必要になる。また、風力発電機用軸受では、メンテナンスの困難さから早期はく離の防止が重視される。いずれも鋼材の清浄性が求められるが、O量はほぼ極限まで低減されており、今後は介在物の大きさ・頻度の低減の観点からの適正化がますます重要になるとみられる。

一方、マイクロ組織変化を伴う早期はく離のタイプがあり、それらはバンド状組織変化型と不規則組織変化型に分類される。特徴として、ナイタルエッチングしたマイクロ組織の光学顕微鏡観察において白色を呈する部分（白色組織変化）が見られる。前者は、比較的高温・高面圧環境で発生し、軌道面に対して規則的な角度を持つバンド状白色組織変化（ホワイトバンド：WB）を伴う。後者は、はく離部周辺にき裂を伴った不規則な形状の白色組織変化が分散して見られる。いずれの組織変化部も疲労の影響で生じた非常に微細な結晶で構成される⁵⁾。前者のタイプに対し、1.2% C - 1% Si軸受鋼やSCr420ベース鋼での検討において、

0.5～2%のNi添加でWB生成が比較的軽微となり、寿命が向上したとの報告がある⁶⁾。後者のタイプは、自動車電装補機用軸受^{7), 8)}や、近年では風力発電機用軸受⁹⁾で報告例がある。水素（H）チャージ後の転がり疲れ試験で同様組織が再現されるため¹⁰⁾、水素関与が想定されている。対策として、Cr添加¹¹⁾や残留 γ （オーステナイト）¹²⁾が挙げられ、いずれも水素の拡散防止に効果があると推定されている。合金元素の観点で表面付近の γ 量を増量する手段として、浸炭で表面からCを導入するとともにNも富化する浸炭窒化処理や、高濃度浸炭処理が有効である。

<表面起点型はく離>

部品表面の疲労に起因するタイプであり、異物混入型と金属接触型があり、早期はく離を引き起こす。前者は変速機用や産業機械用の軸受等で発生の可能性があり、部品の摩耗粉が潤滑油中に混入して軸受の軌道面上に圧痕が付くと、圧痕周縁盛り部への繰返しの接線応力の影響で表面き裂が発生し、はく離へと至る¹³⁾。対策として、硬さ増加（圧痕の付きにくさに寄与）やマルテンサイトに比べて軟質な残留 γ の増量（圧痕周縁盛り高さ低減に寄与）が有効とされる。例えば、合金炭化物（ M_7C_3 等）による析出硬化が可能なCr、Mo、Vを添加した鋼材に高濃度浸炭や浸炭窒化を施し、硬さ低下を抑えつつ40%を超える残留 γ 量を含むことで圧痕起点によるはく離寿命の大幅な向上が確認されている¹⁴⁾。後者のはく離は、高速回転や高温環境での潤滑油温上昇に伴う低粘度化潤

滑環境、すべりが発生する環境、あるいは使用中の軸受表面粗さの低下により転動体と軌道輪との間の油膜厚さが減少した場合等における金属同士の接触に起因する。自動車電動化に伴い高速・高温下での軸受の作動が予想され、同タイプが顕在化する可能性がある。対策として、焼戻軟化抵抗性を高めるSi、Moの添加は有効とされる。また、SAE52100鋼（SUJ2相当）のSi量を0.3~0.4mass%程度増量した鋼材に特殊浸炭窒化処理を施して高硬度のSi-Mn系窒化物を析出させることで表面硬さを上昇させた鋼球（転動体）では、油膜形成が十分でない環境であっても鋼球表面粗さが悪化しにくく、長寿命化すると報告されている¹⁵⁾。

表面起点型に関連し、鉄鋼圧延機用軸受において水混入影響によるはく離や異物による圧痕形成の問題がある。水混入環境下で軌道表面の介在物を起点とするき裂が内部に向けて発生し、そのき裂が粒界を優先伝ばするという疲労過程が報告されている¹⁶⁾。対策として、鋼の高清浄度化や、き裂伝ば抑制の観点から粒界強化元素のNi増量が有効とされる¹⁶⁾。異物に対する対策としては上述の方法が利用できる。

むすび

以上、軸受用鋼の元素の作用・役割について説明を加えた。SUJ鋼は登場当初から成分の大きな

変化は無いものの、鋼の高清浄度化の努力によってその特性は大きく向上している。一方で、近年の軸受使用環境の過酷化状況から既存鋼のみでは対処が難しい場合も増えつつあり、合金元素を有効活用した開発鋼の適用も今後さらに進むとみられる。なお、本稿では説明を割愛したが、耐食用途軸受ではステンレス鋼（SUS440C等）も軸受として利用されている。

参考文献

- 1) 矢島悦次郎ら：日本金属学会誌、36、7（1972）、711
- 2) 門間改三ら：日本金属学会誌、32、12（1968）、1193
- 3) 平岡和彦：特殊鋼、66、6（2017）、39
- 4) 常陰典正：月刊トライボロジー、348（2016）、42
- 5) 平岡和彦：鉄と鋼、94、12（2008）、636
- 6) 木南俊哉ら：電気製鋼、73、1（2002）、23
- 7) 玉田健治ら：NTN TECHNICAL REVIEW、61（1992）、29
- 8) 野崎誠一ら：NTN TECHNICAL REVIEW、61（1992）、36
- 9) M. H. Evans：Material Science and Technology、28、1（2012）、3
- 10) 平岡和彦ら：トライボロジスト、52（2007）、888
- 11) S. Fujitaら：Proceedings of WTC 2005、Washington-63400（2005）
- 12) 山田紘樹ら：NSK Technical Journal、689（2017）、6
- 13) 植田 徹ら：NSK Technical Journal、685（2012）、58
- 14) 木澤克彦：トライボロジスト、56、5（2011）、283
- 15) 小俣弘樹ら：NSK Technical Journal、690（2018）、70
- 16) 松本洋一ら：NSK Technical Journal、675（2003）、18

6. 快削鋼

日本製鉄(株) 棒線事業部 棒線技術部 はせがわ たつや
棒線商品技術室 上席主幹 **長谷川 達也**

日本製鉄(株) 八幡製鉄所 いとう せいじ
品質管理部 棒線管理第一室 室長 **伊藤 誠司**

まえがき

快削鋼とは、切削加工される鋼材の切削表面の仕上がり精度の向上や切削工具寿命の向上等を目的に改良を加えた鋼材を指します。また、鋼材の側からは、切削される鋼材を被切材、その性能については被削性と表現されます。

部品としての強度を比較的必要とせず、被削材の寸法・表面粗さといった形状精度を必要とする場合には、日本規格協会：JIS G 4804規定の「硫黄及び硫黄複合快削鋼鋼材」が用いられます。一方、自動車等の機械部品として機械的性質が必要となる場合は、炭素鋼、合金鋼に準拠した鋼材に対し、日本自動車規格会：JASO M 106 にて、硫黄、鉛の添加量を規定しています。

◇ 快削鋼への要求特性

切削加工には旋削、ドリル、フライス、ブローチ、ホブ、といった様々な方法があります。目的とする部品により鋼材の種類も異なりますが、鋼材に要求される特性として、経済性（切削工具寿命、切り屑処理性等）と品質（寸法・表面仕上がり精度等）が挙げられます。以下に、経済性として切削工具寿命と切り屑処理性、品質として表面仕上がり精度について述べます。

1. 切削工具寿命（経済性）

切削工具を長時間使用していくと、工具が摩耗し、寸法精度の低下や工具の欠け等の破損に至り設備停止する場合があります。切削工具の交換サイクルが長いほど経済性に優れます。さらに切削速度を高速化することにより加工時間が短縮され、単位時間当たりの生産量を増やすことができ経済性に効果があります。

2. 切り屑処理性（経済性）

切削加工時に切り屑が発生しますが、これらが

切削工具や切削加工機への絡み付きが生じた場合、設備が停止し絡み付いた切り屑を除去するために多大な時間を要する場合には経済性が損なわれます。従って、切り屑が工具や機械に影響を与えないよう細かく破碎されることが求められます。この切り屑が細かく破碎され処理しやすいことを切り屑処理性といいます。

3. 表面仕上がり精度（品質）

部品の加工精度は、主に精密な寸法精度の確保や表面の粗さを小さくすることによる滑らかさが求められますが、部品の仕上がり精度は、鋼材成分だけでなく、鋼材の硬さ、更に切削条件や工具材質・工具表面コーティングも影響するため、必要により鋼材に熱処理を行って硬さを調整したり、工具材質・コーティング材質の種類を変更して調整を行うこともあります。

◇ 快削鋼の規格

1. 被削性を重視する快削鋼

表1にJIS G 4804「硫黄及び硫黄複合快削鋼鋼材」の成分表を示します。これらの鋼材は、切削加工（ドリル、旋盤等）での仕上がり精度、経済性を向上させることができます。特徴としては、JIS G 4051 のような構造用炭素鋼で規定されている硫黄上限量（0.035%）の10倍程度の硫黄を添加し、必要により鉛を0.10~0.35%の範囲で添加することを規定しています。

2. 機械的性質も必要とされる被削性改善鋼

表2にJASO M 106「被削性改善に対する成分の追加又は変更」の規定を示します。特徴としては、鉛（記号：L）硫黄（記号：S）の添加量を段階的に規定しています。これは必要な機械的性質を確保するためのものです。また、例えばS45Cに対して、硫黄をS2に加え鉛をL2に相当する量を複合添加する場合もあり、その場合は規格表記とし

表 1 硫黄及び硫黄複合快削鋼材の化学成分 (JIS G 4804) (単位%)

種類の記号	C	Mn	P	S	Pb
SUM21	0.13以下	0.70~1.00	0.07~0.12	0.16~0.23	
SUM22	0.13以下	0.70~1.00	0.07~0.12	0.24~0.33	
SUM22L	0.13以下	0.70~1.00	0.07~0.12	0.24~0.33	0.10~0.35
SUM23	0.09以下	0.75~1.05	0.04~0.09	0.26~0.35	
SUM23L	0.09以下	0.75~1.05	0.04~0.09	0.26~0.35	0.10~0.35
SUM24L	0.15以下	0.85~1.15	0.04~0.09	0.26~0.35	0.10~0.35
SUM25	0.15以下	0.90~1.40	0.07~0.12	0.30~0.40	
SUM31	0.14~0.20	1.00~1.30	0.040以下	0.08~0.13	
SUM31L	0.14~0.20	1.00~1.30	0.040以下	0.08~0.13	0.10~0.35
SUM32	0.12~0.39	0.60~1.10	0.040以下	0.10~0.20	
SUM41	0.32~0.39	1.35~1.65	0.040以下	0.08~0.13	
SUM42	0.37~0.45	1.35~1.65	0.040以下	0.08~0.13	
SUM43	0.40~0.48	1.35~1.65	0.040以下	0.24~0.33	

表 2 被削性改善に対する成分の追加又は変更 (JASO M 106) (単位%)

付加記号	Mn				P	S	Pb	Ca
	基本鋼のMn規格下限が0.40未満のもの		基本鋼のMn規格下限が0.40以上のもの					
	下限	上限	下限	上限				
-L1	-	-	-	-	-	-	0.04~0.09	-
-L2	-	-	-	-	-	-	0.10~0.30	-
-S0	-	-	-	-	-	0.015~0.035		-
-S1	+0.20	+0.30	+0.10	+0.20	-	0.04~0.07		-
-S2	+0.30	+0.40	+0.20	+0.30	0.04以下	0.08~0.12		-
-U	-	-	-	-	-	-	-	0.0005~0.008

てS45C-S2L2と付記します。

◇ 合金元素の役割

1. 硫黄 (S)

硫黄は、安価で優れた被削性が得られる元素として最も利用されている元素です。硫黄 (S) は、鋼中のマンガン (Mn) と硫化マンガン (MnS) を形成します。このMnSは介在物ではありますが、硬さが軟らかく鋼材の圧延・鍛伸とともに延伸する、という特徴があります。この軟らかく変形しやすいという特徴が鋼材の被削性改善に寄与します。MnSによる被削性改善効果として下記2点が挙げられます。

①工具と切り屑の間で潤滑材となり摩擦抵抗を下げます。これにより切削工具への負荷 (切削抵抗) を下げるとともに、工具表面温度の

上昇を抑え、工具の劣化・摩耗を抑制し、工具寿命を延長できます。

②被削材が工具と接触し切り屑となる部位は非常に大きな塑性加工を受けます。鋼材の延性が高ければ切り屑は長く伸び、切り屑処理性が低下しますが、MnSが多量に分散していることにより応力集中源として作用し、切り屑に亀裂が発生し破断するため、切り屑処理性に必要な切り屑の破碎をしやすくします。

一方、硫黄の多量添加 (MnS) は、MnSの分散量が多くなると共に、粗大・延伸するため、下記のようなデメリットも懸念するため注意が必要です。

①圧延・鍛伸方向に延伸するため、直角方向に鋼材の延性を低下させます。

②冷間鍛造による強加工時の割れの起点となり、

成形性が低下します。

- ③高周波焼き入れ等の熱処理時に焼き割れの原因となることがあります。

2. 鉛 (Pb)

鉛も硫黄と同様に被削性を改善する元素として広く使用されています。鉛の特徴は鋼中に固溶しないため、単独で存在する場合とMnSと複合介在物として存在する場合があります。鉛は、融点が328℃と低いことが大きな特徴です。鉛による被削性改善効果は、下記の2点が挙げられます。

- ①低融点のため、切削加工中の鋼材の被削面温度の上昇によって鉛が溶融もしくは大きく軟化し、切り屑を脆化させ破砕しやすくなることにより、切り屑処理性が改善されます。
- ②工具との接触部で溶融した鉛が潤滑材として作用し、摩擦抵抗を下げます。その結果、切削抵抗を低減でき、工具へのダメージを軽減することにより工具寿命を延長できます。

一方、鉛は、鋼中では、MnSのような延伸した状態ではなく、粒状で存在しているため、鋼材の圧延・鍛伸の影響による異方性による機械的性質の悪影響は小さいと言われていたますが、高強度・高負荷で使用される鋼材に対する添加には注意が必要です。

また、鉛は環境負荷物質に指定されているため、その使用が制限されつつあります。

3. カルシウム (Ca)

快削鋼の被削性改善元素としてのカルシウムの

歴史は硫黄や鉛より浅く、主に自動車用の構造用鋼部品に用いられる鋼材に添加されています。構造用鋼には通常、脱酸元素としてアルミニウム (Al) が添加され、硬質な酸化物であるアルミナ (Al_2O_3) が介在物として鋼中に存在していますが、アルミニウムやシリコン (Si) のような脱酸元素の調整に加え、カルシウムを適量添加することにより酸化物組成をCaO-SiO₂-Al₂O₃からなる複合酸化物に置き換え、酸化物を低融点化・軟質化することにより、切削工具へのダメージを低減し工具寿命が向上すると言われていました。

4. その他の元素

以上の元素が広く使用されている快削性元素ですが、その他には、ビスマス (Bi)、セレン (Se)、テルル (Te) 等の元素も効果があると言われていました。ビスマスは、鉛と同様に低融点の元素であり、セレン、テルルは、硫黄と同様にマンガンと結合し、被削性改善効果が得られる、と言われていました。

以上のように、鋼の被削性改善は、介在物となる元素の添加・改質により効果を得ることができ、生成される介在物によっては、硬質となり、被削性を劣化させる場合もありますので、そのまとめを表3¹⁾に示します。

参考文献

- 1) 快削鋼の製造技術の発展と品質の向上、第96・97回西山記念技術講座

表 3 被削性に及ぼす介在物の影響¹⁾

被削性に好ましい介在物		被削性に好ましくない介在物	
MnS	HV=170~200	Al ₂ O ₃	HV=2000~3500 1300~1500
Mn(S, Se)		3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	
Mn(S, Te)		NbC, Nb(CN)	
(Ca, Mn)S		Zr(C, N)	
Pb		CaO·6Al ₂ O ₃	
Bi			
CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	550		
2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	780		
3MnO·2Al ₂ O ₃ ·5SiO ₂			

7. 工具鋼

日立金属(株) 冶金研究所 福元志保

まえがき

工具鋼は金型、切削工具および部品などに多く用いられている。工具鋼の特徴は要求特性に合った合金元素が添加されている。狙いとして製品に求められる硬さ、強度、その他の特性を得るためである。その他の特性として、耐摩耗性、じん性という延性や粘さ、耐食性、使用温度で硬さが低下しにくいなどの軟化特性などである。これらの特性を得るためには焼入れや焼戻し等の熱処理を処理する必要がある、そのために合金の添加が必要な場合がある。工具鋼は様々な要求特性に合った合金元素の活用や製造方法などで造りこまれてきた。特殊鋼メーカーで製造されている工具鋼は一般的には加工メーカーが加工し易いように素材硬さを低めるために焼鈍状態で出荷される。製品に求められる特性を得るために焼入れや焼戻しなどの熱処理が施される。詳細な解説については清永¹⁾がまとめており、今回は工具鋼における合金元素の応用に関する概略を解説する。合金元素を添加した工具鋼の組織の特徴、硬さなどの変化に注目した。

◇ 工具鋼の組織について

工具鋼は焼入れ焼戻し処理後に使用されることから、この熱処理後の組織変化と特性に及ぼす合金元素の効果について以下に述べる。

1. 焼入れ組織

焼入れ加熱で基地に固溶しない炭化物を含む合金元素は炭素と結合しやすい合金元素、すなわち炭化物形成元素として知られている。炭化物の例として工具鋼の一つである高速度工具鋼JIS SKH51の焼入れ組織を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した組織を図1に示す。この写真では基地組織と白い炭化物と灰色の炭化物の2種類が溶け込まず(固溶せず)に存在する。これを未固溶炭化物と呼ぶ。図中に示すようにモリブデン、タングステン

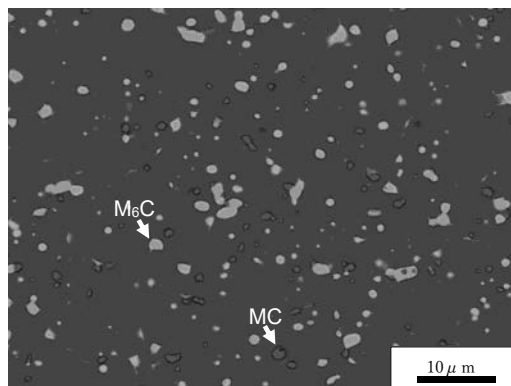


図 1 JIS SKH51 (0.9C-4Cr-6W-5Mo-2V) 鋼の焼入れ焼戻し組織

を多く含む M_6C と呼ぶ炭化物とタングステンやバナジウムを多く含むMC系などが存在する。Mはモリブデン、タングステンおよびバナジウムを含む記号を意味し、Cは炭素を意味する。

他にもクロムを比較的多く添加すると M_7C_3 などが存在することもある。また、一部ではあるが、耐食性向上のためにクロムを多く添加した工具鋼では $M_{23}C_6$ が存在することがある。一般的には炭素が比較的少ないと $M_{23}C_6$ が安定であり、多くなると M_7C_3 が安定に存在し易くなる。これらの未固溶の炭化物は基地より高い硬度が得られるため、鋼材の耐摩耗性に大きく寄与する。しかし、これらの未固溶炭化物の量や形態によっては、炭化物粒径が大きくなり、その量が多くなると、じん性を低めることがあり、用途によって鋼材を使い分ける必要がある。また、JIS SKDシリーズをベースに鋼材の製造方法、組成および組織を最適化することもある。また、未固溶炭化物は焼入れ加熱保持でのオーステナイト粒を微細化させるのに有効な支配因子として知られており、必要に応じて組織制御に用いられている。

2. 焼戻し組織

工具鋼の焼入れ後の基地は焼戻しによりマルテンサイト組織から焼戻しマルテンサイト組織に変

化する。この組織に及ぼす合金元素の影響について述べる。焼戻しによって焼入れ加熱で基地に固溶した合金元素や炭素が微細な炭化物が析出する。この現象により基地の強度や硬さを高められる。微細な炭化物は二次硬化析出炭化物と呼ばれる。一次硬化について述べていないが、焼入れ硬化が「一次硬化」と同一の意味であり、「焼入れ硬化」が一般的な表現である。基地の焼戻し状態を観察する場合は、腐食し光学顕微鏡で観察することが一般的であるが、基地中の微細な2次硬化析出炭化物を観察する場合は光学顕微鏡では困難であるため、透過型電子顕微鏡（TEM）やその他のナノメートル単位での組織を観察できる手法が用いられている。上述した合金元素以外に炭化物形成元素としてはニオブやチタンなどが知られるがバナジウムに似た効果を示す。また、炭化物形成元素ではない代表的な元素としてコバルトがあるが、この元素は主に基地に固溶し、基地の高強度化に寄与することが知られている。

◇ 合金元素と焼入れ温度

工具鋼の用途に適した特性を得るために合金元

素を添加し、熱処理の必要性を前節で述べた。一般に工具鋼の焼入れ温度は炭素鋼より高めである。本節では過共析鋼の組織を例に挙げ、焼入れ温度が一般の炭素鋼より高めとする理由について述べる。図2にCを1.3%添加した1.3C鋼とさらにタングステンを1.8%添加した工具鋼（1.3C-1.8W鋼）の焼入れ組織の焼入れ温度依存性を評価した結果を示す。焼入れ温度は750℃と800℃の2種であり、冷却方法は水冷である。800℃の組織は未固溶の炭化物と基地組織から成る。基地は全てマルテンサイト組織（M）である。この結果から焼入れ温度800℃は炭化物とマルテンサイト組織を得るのに適切な温度であることがわかる。一方、焼入れ温度が50℃低い750℃の組織は1.3%C鋼では800℃と同様な組織であるが、タングステンを1.8%添加した工具鋼には炭化物とマルテンサイト組織以外に硬さが低いフェライト組織が存在した。これはタングステンを添加したことによりフェライト（ α 相）からオーステナイト（ γ 相）に完全に変態する温度が750℃より高めとなったためである。加熱保持中に基地がオーステナイトとフェライトが混在する形態となってしまう、基地をオーステナイト单相

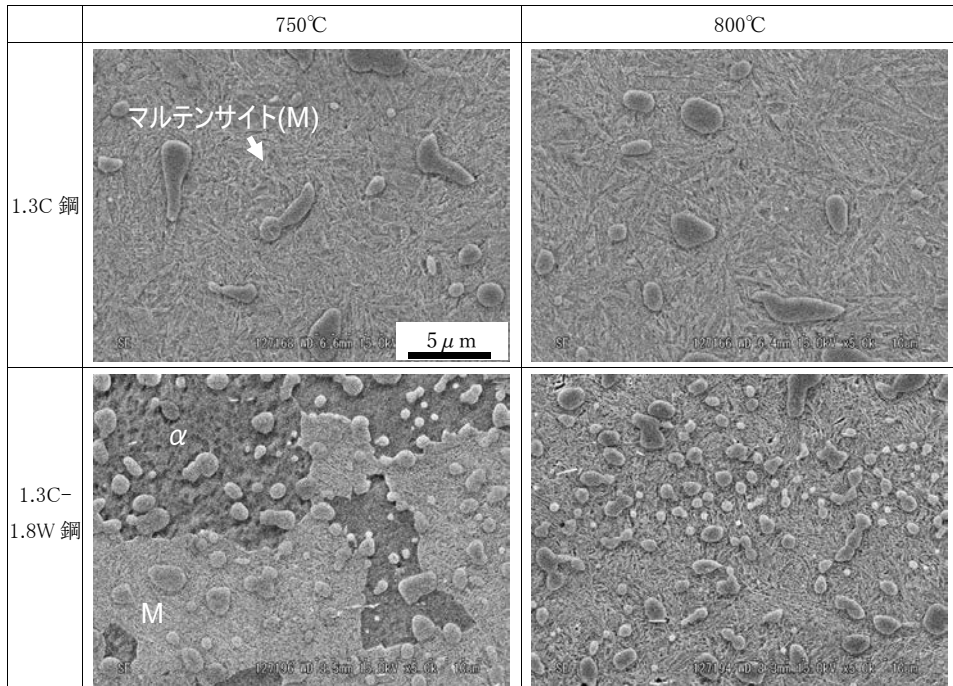


図 2 タングステン添加有無による焼入れ組織の焼入れ温度依存性

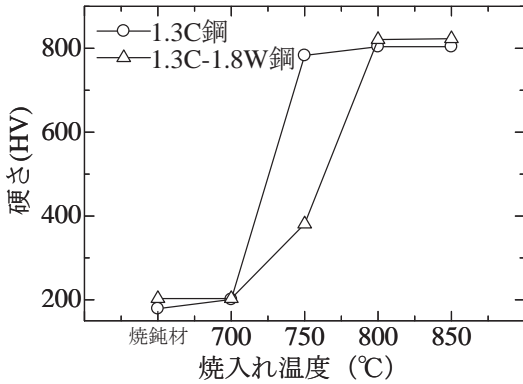


図 3 タングステン添加有無による焼入れ焼戻し硬さの焼入れ温度依存性

とするには焼入れ温度が低めとなったためである。

工具鋼には種々の炭化物形成元素を添加すると、この α 相から γ 相に変態する温度(A1点)が高温側に変化し、炭化物の固溶が進みにくくなるため、基地への十分な固溶量を得るためには高い焼入れ温度が結果として必要となる。ただし、焼入れ温度を高めすぎると、基地組織の単位としての結晶粒が粗大化し、じん性を低めてしまい、工具鋼としての性能を劣化させることになる。以上のように調和のとれた基地と炭化物の状態を得るために、工具鋼の焼入れ温度は炭素鋼より高い温度が設定されている。図3に焼入れ焼戻し硬さの焼入れ温度依存性を示す。炭素鋼では硬さが約800HV得られる焼入れ温度が750°C以上からであるが、Wを添加した工具鋼のA1点が750°Cから高めとなったため、Wを添加した工具鋼は750°Cでは硬さが十分に得られず、800HV以上の硬さを得るには800°C以上の焼入れ温度が必要であることがわかる。

◇ 合金元素と焼戻し

炭素鋼では得られない工具鋼の焼戻し軟化抵抗の特長について述べる。炭素を1%添加した1C鋼とクロム、タンゲステン、モリブデン、バナジウムを多量に添加した工具鋼の一種である高速度工

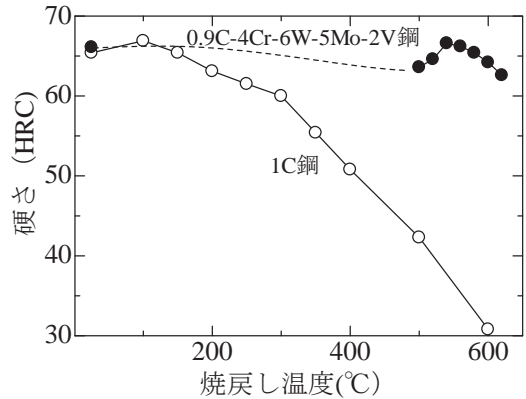


図 4 焼戻し軟化抵抗に及ぼす合金元素の影響

具鋼JIS SKH51の焼戻し軟化抵抗の比較例を図4に示す。1C鋼は焼戻し温度が高くなるにつれ硬さが軟化していくが、工具鋼は室温から500°C付近まで軟化しにくい特性を示す。この特性を軟化抵抗と呼んでいる。この現象は2次硬化とも呼び、焼戻し組織の節で述べたように、軟化抵抗は2次硬化析出炭化物により発現されている。この軟化抵抗は工具鋼の特性とその制御方法を理解するためには重要な因子である。金型など製品の使用中の温度、特に表面温度だけに限定される場合があるが、昇温しても高い軟化抵抗が確保されると、金型などでは耐摩耗性が改善され、使用負荷が高い状況でも高い耐力が得られ、型や部品の精度を維持でき、結果として、金型の高寿命化に貢献できると期待される。

以上述べたように、合金元素の応用例として工具鋼の焼入れ組織とその特性に及ぼす合金元素の役割の概略についてまとめた。工具鋼にとって合金元素は付加価値を高めるのに不可欠であり、この付加価値は今後も特殊鋼メーカーや市場にも共有し続けていくと考えられる。

参考文献

- 1) 清永欣吾、工具鋼、日本鉄鋼協会 (2000)

8. ステンレス鋼

日鉄ステンレス(株) 梶 植 信 二
 研究センター シニアフェロー

まえがき

ステンレス鋼は炭素含有量1.2%以下、クロム含有量10.5%以上の合金鋼と国際標準 (ISO15510) で定義されているように、クロム (以下Cr) はステンレス鋼の必須元素である。鉄 (以下Fe) にCrを合金化すると大気中での発錆に対する抵抗性が著しく改善し、Crが約11%以上で良好な耐食性を示すようになる。この原因はステンレス鋼の表面に数nm厚さのFeとCrのオキシ水酸化物からなる不動態被膜¹⁾ が形成され、これが鋼を大気環境から保護することによる。被膜中のCr量が多くなると緻密で保護性が高い性質を有するようになる。

ステンレス鋼は大きく3つに分類され、添加している主要な合金を表記してCr系、Cr-Ni系、Cr-Mn系と呼んで区分される。Cr系、Cr-Ni系は1910年代に、Cr-Mn系は1930年代にいずれも欧米で誕生し、それぞれ、400、300、200系ステンレスの鋼種群として発展している。3つの鋼種区分は規格番号の一桁目と対応する。

本稿で述べるステンレス鋼の化学組成を表1に示した。汎用鋼の区分の4鋼種のうち、SUS410はマルテンサイト組織 (正方晶)、SUS430はフェライト組織 (体心立方晶)、SUS304とSUS316Lは

オーステナイト組織 (面心立方晶) の金属組織を示す鋼である。表1には汎用鋼以外の区分の中に、SUS430、304、316Lを代替しうるフェライト、オーステナイト、二相組織の鋼種を例示している。これら合計12鋼種を3つの分類で示すとSUS410、430、430J1L、443J1、NSSC FW1はCr系、SUS304、316L、315J1はCr-Ni系、SUS201はCr-Mn系、SUS821L1、323L、329J1はCr-Ni系の鋼種である。

◇ ステンレス鋼の合金元素と金属組織

ステンレス鋼の合金元素と金属組織の関係については、横軸にCr当量、縦軸にNi当量を取って溶着金属の組織と化学組成の関係を示したシェフラーの状態図²⁾ によりおよその判断をすることが可能である。Cr当量はフェライト生成元素の、Ni当量はオーステナイト生成元素のそれぞれの含有量から構成され、それぞれCr、Ni当たりに換算された当量式で計算される値である。図1は、 $Cr当量 = Cr + 1.5Si + Mo + 0.5Nb$ 、 $Ni当量 = Ni + 30(C + N) + 0.5(Mn + Cu)$ の係数式に各元素の重量含有率 (mass%) を代入し、Cr当量が10~40の範囲で作成している。図1の中には表1に示した鋼種やその他の鋼種を含めて、その化学組成の代表値をマルテンサイト、フェライト、オーステナイト、

表 1 汎用ステンレス鋼とその省資源型代替鋼の分類・鋼種名と化学組成

分類	金属組織	鋼種名	主な化学成分の範囲または上限値、NSSC FW1については代表値 (mass%)									PREN _{Mn}	
			C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Cu	N	その他		
汎用鋼	マルテンサイト	SUS410	0.15	11.50-13.50	0.60		1.00	1.00				12	
	フェライト	SUS430	0.12	16.00-18.00	0.60		0.75	1.00				16	
	オーステナイト	SUS304	0.08	18.00-20.00	8.00-10.50		1.00	2.00				19	
		SUS316L	0.030	16.00-18.00	12.00-15.00	2.00-3.00	1.00	2.00				24	
省資源鋼	フェライト	NSSC FW1	0.01	14.4			0.1	0.1		0.01	Sn, Ti, Nb	14	
		SUS430J1L	0.025	16.00-20.00	0.60		1.00	1.00	0.30-0.80	0.025	Ti, Nb, Zr	17	
		SUS443J1	0.025	20.00-23.00	0.60		1.00	1.00	0.30-0.80	0.025	Ti, Nb, Zr	21	
	オーステナイト	SUS201	0.15	16.00-18.00	3.50-5.50		1.00	5.50-7.50		0.25		12	
		SUS315J1	0.08	17.00-20.50	8.50-11.50	0.50-1.50	0.50-2.50	2.00	0.50-3.50			21	
	二相	SUS821L1	0.030	20.50-21.50	1.50-2.50	0.60	0.75	2.00-4.00	0.50-1.50	0.15-0.20			22
		SUS323L	0.030	21.50-24.50	3.00-5.50	0.05-0.60	1.00	2.50		0.05-0.20		25	
		SUS329J1	0.08	23.00-28.00	3.00-6.00	1.00-3.00	1.00	1.50			Cu, W, N添加可	32	

$$PREN_{Mn} = Cr + 3.3(Mo + 0.5W) + 16N - Mn$$

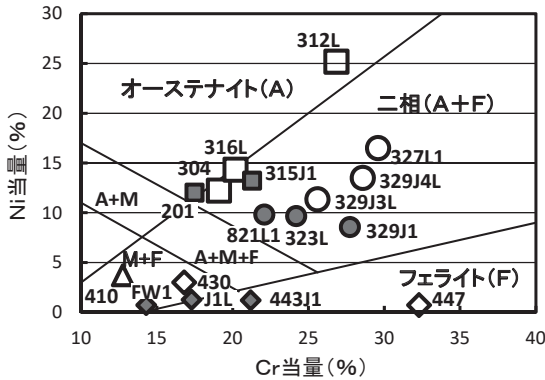


図 1 シェフラー組織図上における各種ステンレス鋼

フェライト+オーステナイト（二相）の組織別にプロットした。ソリッドマークで示した鋼種は、次項以降で述べるSUS430、304、316Lを代替する目的で開発された鋼種、もしくは304、316L以上の特性付与を狙った省資源鋼である。溶着金属と鋼材の組織は異なるところがある。SUS430は図1でM+Fの組織であるが、熱間圧延後に焼戻しされフェライト組織として、SUS304はフェライトを若干含む溶着金属組織から熱間加工・固溶化熱処理を経てほぼオーステナイト単相組織の鋼材として使用される。

◇ ステンレス鋼の機械的性質と耐食性

機械的性質には金属組織の影響が大きく、合金元素の影響も組織により異なる。SUS410の焼入れ熱処理で得られるマルテンサイト組織は硬く、C含有量が多いほど硬くなる。SUS430を焼戻して得られるフェライト組織は軟らかい。C、N量を低減しTi、Nb等の安定化元素を添加した高純度フェライト系ステンレス鋼は熱処理をおこなわなくとも軟らかい性質を有する。オーステナイト組織の機械的強度に及ぼす合金元素の影響は侵入型元素C、Nの強化作用が大きく、Nの作用はCよりやや大きい。オーステナイト組織にMnとNを含有させたSUS201は強度が高く、ばね用の鋼種としても使用される。フェライト・オーステナイト二相鋼でも機械的強度の改善にNが利用されており、この鋼種ではNは溶接部でオーステナイト相を多く析出させ二相の量バランスを保つ作用も有する。マルテンサイトおよびフェライト組織の韌性は乏しく、

オーステナイト組織は韌性に富む。二相組織の常温付近の韌性は良好である。オーステナイト組織は伸びが大きく、加工性に優れる。フェライト組織の伸びはやや低めであるが、マルテンサイト組織より優れる。二相組織の鋼の伸びはフェライト組織の鋼と同様となっている。

耐食性への合金元素の影響は腐食形態により異なるが、基本的にはステンレス鋼の不動態被膜を強化する元素を多く含有するほど孔食、すきま腐食といった形態の局部腐食に対する耐食性が高い。孔食とはステンレス鋼の腐食が局部に集中し、深い食孔が進行する現象であり、すきま腐食は表面から隠れて見えないすきまの中で腐食が進行する現象である。

ステンレス鋼の孔食に対する抵抗性を数値で表す指標として孔食指数（PREN: Pitting Resistance Equivalent Number）がある。この式の係数式には種々のものがあるが、二相系ステンレス鋼では $PREN = Cr + 3.3 (Mo + 0.5W) + 16N$ という式が多く用いられ、各元素の重量含有率（mass%）を代入して算出される。多くのステンレス鋼を対象に孔食指数のNの係数として10~30程度が提案されている。Nをほとんど含まないフェライト系ステンレス鋼ではNの係数を0として計算して良い。また、Mnはステンレス鋼の耐孔食性を低下する元素であり、Cr-Mn系や二相系などのMnを含有する鋼種も含めた統一的な式が必要である。このために $PREN_{Mn} = Cr + 3.3 (Mo + 0.5W) + 16N - Mn$ の孔食指数式が提案されている³⁾。表1には各鋼種の $PREN_{Mn}$ の代表値を表記した。すきま腐食に対する抵抗性を表す式としてCI (Crevice corrosion Index) = $Cr + 4.1Mo + 27N$ が提案⁴⁾ されており、いずれの局部腐食に対してもCr、Mo、Nの含有量が多いほど抵抗性が大きい。

ステンレス鋼の塩酸や硫酸など非酸化性の酸に対する抵抗性はNi、Mo、Cuの含有量が多いほど大きくなる。したがってNiをほとんど含有しないCr系鋼種の酸に対する抵抗性（耐酸性）はCr-Ni系鋼種に対して劣っている。Cr系鋼種の耐酸性や腐食の進展特性を改善するためにMoおよび微量のNi、Cuを含有させたSUS436L、444、445、447や430J1L、443J1等の鋼種がある。

オーステナイト組織ではCr炭化物析出とCr欠乏

層形成に起因する粒界腐食が問題になることがあり、C量を0.03%以下に低減することで成分対策が取られる。また、応力腐食割れは腐食環境のもとで強い応力が作用するとステンレス鋼が割れを生じるものであり、合金元素の影響は単純ではない。塩化物環境での耐応力腐食割れ性にはNi、Si、Cu^{5), 6)}が有効であると言われている。

◇ ステンレス鋼の省資源型鋼と最近の開発動向

ステンレス鋼の代表鋼種SUS304はNiを8%含有するオーステナイト系ステンレス鋼であり、18Cr-8Niの主成分を有する。またその上位鋼種SUS316LはMoを2%含有し、18Cr-12Ni-2Moの成分系である。NiおよびMoはステンレス鋼に優れた特性を付与する元素であるが、非常に高価な元素である。このため、ステンレス鋼の省資源型鋼とはNi、Moの含有量を削減して、特定の用途において304、316Lと同等もしくはそれ以上の特性を付与させる観点で開発が進められてきた。

省資源型鋼の典型としてはNiをほとんど含まないCr系ステンレス鋼がある。マルテンサイト鋼SUS410のC量を低減しCr量を増加した16%CrのSUS430、さらにCr量が30%CrのSUS447までのフェライト系ステンレス鋼が規格化されている。SUS430の耐食性、溶接性を改善したSUS430LX、430J1L⁷⁾、さらにCr量を高めてSUS304に近い耐食性を付与したSUS443J1⁸⁾は高純度フェライト系ステンレス鋼である。2つのJ1L鋼はいずれもNi、Cuを微量添加している。一方、Snを微量添加し、Cr量の削減を狙った新しい考えの省資源型鋼が開発されている⁹⁾。この鋼種はJIS鋼種としては規格化されていないが、表1にNSSC FW1として代表組成を示した。図2⁹⁾に14%Cr鋼にSnを0.1%含有させた時の希硫酸中でのアノード分極曲線を示す。0.4V vs SSE付近にある臨界不動態化電流密度 i_{crit} が17%Cr鋼と同等となり、微量Sn添加によるCr量の削減を可能とした。同様の手法によりCr量が17%の上位鋼も開発されている。

Cr-Mn系ステンレス鋼はMn添加によるNi量削減を狙って1930年代に開発された鋼種であり、現在発展途上国を中心に需要を拡大している。Mnによる耐食性低下作用により、SUS201の孔食指数

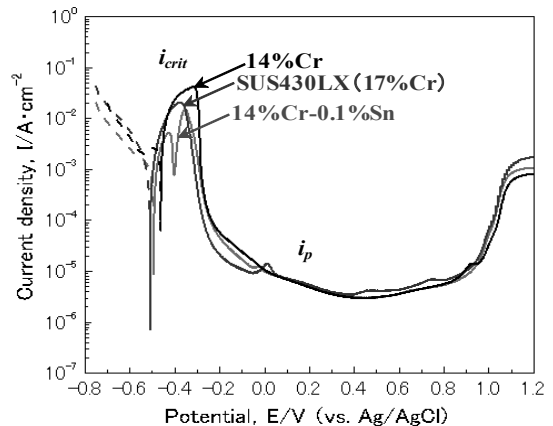


図 2 30°C、5% H_2SO_4 中アノード分極曲線

PREN_{Mn}はSUS410に近い(表1)。2003年からリーマンショックまでの原料高騰の時期にオーステナイト系ステンレス鋼の省Ni化を狙って、耐食性・機械的性質を改善したCr-Mn系鋼種開発が国内で進められた¹⁰⁾。SUS315J1はSUS304、316Lの弱点である応力腐食割れ性を改善した省資源鋼であり、Si、Cuを添加し、Moを節減した⁶⁾。

二相系ステンレス鋼はSUS304、316に比べてNi量が低い省資源鋼であり、316以上の耐食性を示すMo含有鋼として古くSUS329J1が登録されている。二相系の省資源鋼開発はサンドビック社のSAF 2304 (23Cr-4Ni-0.1N)¹¹⁾にはじまった。この鋼種は316鋼とほぼ同等の耐孔食性を有する省Mo鋼である。2000年代に入って、304鋼を代替しうる二相系ステンレス鋼として、アウトクンプ社のLDX 2101 (21.5Cr-5Mn-1.5Ni-0.22N)が開発された。316、304鋼を代替しうる省合金型二相系ステンレス鋼を第四世代、もしくはリーン二相鋼 (Lean Duplex Stainless Steel)と呼ぶ。国内では、新日鐵住金ステンレスによりLDX 2101の溶接性を改善したNSSC 2120が開発され¹²⁾、2015年にNSSC 2120とSAF 2304に対応するリーン二相鋼がSUS821L1、323L(表1)としてJISに登録された。二相系鋼種の降伏強度はオーステナイト系鋼種の約2倍あり、土木構造物用途への適用が進められている^{13)~15)}。高強度・高耐食性の特徴を有する省資源型二相系ステンレス鋼の適用によりダム・水門設備や船舶、容器類の鋼材使用量削減が可能であり、社会資本の長寿命化、ライフサイクルコ

スト低減に寄与していくものと思われる。

参考文献

- 1) 藤本慎司、柴田俊夫：表面技術、47 (1996)、p 1019
- 2) A. L. Schaeffler: Metal. Prog., 56 (1949)、p 680
- 3) 梶村治彦：第215・216回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会編、(2013)、p 17
- 4) N. Suutala, M. Kurkela: Stainless Steels '84. NACE, 1984、p 240.
- 5) H. R. Copson: Physical Metallurgy of Stress Corrosion Fracture、(1959)、p 247
- 6) 足立俊郎、西川光昭、吉井紹泰：日新製鋼技報、63 (1990)、p 109
- 7) 清水敏治、小林未子夫、鋸屋正喜、小池正夫、岩瀬圭伍：日本金属学会報、22 (1983)、335
- 8) 石井和秀、石井知洋、宇城工、柳沼寛、山下英明：まてりあ、47 (2008)、p 45
- 9) 秦野正治、松山宏之、石丸詠一郎、高橋明彦：まてりあ、51 (2012)、25
- 10) 大嶋貴之、羽原康裕、黒田光太郎：鉄と鋼、92 (2006)、p233
- 11) S. Bernhardsson: Duplex Stainless Steels '91 vol. 1、(1991)、p137
- 12) 及川雄介、柘植信二、江目文則、本村洋、井上裕滋：まてりあ、55 (2016)、71-73
- 13) 日本鋼構造協会：JSSCテクニカルレポート108 (2015)
- 14) 佐藤信輔、宮崎靖大：鋼構造年次論文報告集、24 (2016)、p 297
- 15) 柘植信二：JSSC、33 (2018)、p 8



9. 耐熱鋼

日本冶金工業(株) 平田 茂
技術研究所長

まえがき

耐熱鋼は合金鋼の一種で高温における各種環境で耐酸化性、耐高温腐食性、高温強度に優れるため、火力発電プラントや石油精製プラント、エンジン排気系部品など様々な用途で使われている。

JISでは、耐熱鋼棒・線材としてJIS G4311に35種、耐熱鋼板・鋼帯としてJIS G4312に28種が規定してある。表1に示す様に大きく2つに分類され、SUS (Steel Use Stainless) で始まる鋼と耐熱鋼を意味するSUH (Steel Use Heat resisting) で始まる鋼がある。さらに、それぞれ金属組織により

オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、析出硬化系の四つに分類されている。

2019年3月にJISが改正されSUSで始まる材料記号のものには、別のJISに規定のあるステンレス鋼と区別するため“-HR”を付与することとなった。例えば、これまでは耐熱鋼としてもSUS310Sと表記していたが、改正によりSUS310S-HRと表記することで、JIS G4311/G4312を満足する製品であることが明確となった。また、化学組成や機械的性質等もステンレス鋼規格からの引用であったが、JIS G4311/G4312で独自に規定することとなった。これ以外にも数箇所改正されており、詳細は最新

表 1 JIS G4311耐熱鋼棒・線材、JIS G4312耐熱鋼板・鋼帯の分類

SUS				SUH			
分類	種類の記号	耐熱鋼棒・線	耐熱鋼板・帯	分類	種類の記号	耐熱鋼棒・線	耐熱鋼板・帯
オーステナイト系	SUS302B-HR	—	○	オーステナイト系	SUH31	○	—
	SUS304-HR	○	○		SUH35	○	—
	SUS309S-HR	○	○		SUH36	○	—
	SUS310S-HR	○	○		SUH37	○	—
	SUS316-HR	○	○		SUH38	○	—
	SUS316Ti-HR	○	○		SUH309	○	○
	SUS317-HR	○	○		SUH310	○	○
	SUS321-HR	○	○		SUH330	○	○
	SUS347-HR	○	○		SUH660	○	○
	SUSXM15J1-HR	○	○		SUH661	○	○
フェライト系	SUS405-HR	○	○	フェライト系	SUH21	—	○
	SUS410L-HR	○	○		SUH409	—	○
	SUS430-HR	○	○		SUH490L	—	○
	SUS430J1L-HR	—	○		SUH446	○	○
	SUS436J1L-HR	—	○		マルテンサイト系	SUH1	○
マルテンサイト系	SUS403-HR	○	○	SUH3		○	—
	SUS410-HR	○	○	SUH4		○	—
	SUS410J1-HR	○	—	SUH11		○	—
	SUS431-HR	○	—	SUH600		○	—
析出硬化系	SUS630-HR	○	○	SUH616		○	—
	SUS631-HR	○	○				

○：登録有り、—：登録無し

のJISを確認して頂きたい。

耐熱鋼中の合金元素の総量は50%以下で、いずれも数%以上のクロムを含有し、ニッケル、モリブデン、その他の元素を含有する鋼もある。クロムは、常温近傍における耐食性を改善する元素として知られているが、耐酸化性も向上させる。ニッケルやモリブデンは高温強度を向上させるため、ステンレス鋼に含まれる主な元素はいずれも耐熱性も高める元素である。このため、ステンレス鋼は耐熱性にも優れており、これが耐熱鋼の規格にSUSで始まる鋼が含まれている理由である。ただし、ステンレス鋼では耐食性を確保するために炭素量を低くする傾向があるが、耐熱鋼の場合は高温強度を確保するため高めとするものがある。さらに、ステンレス鋼以上に多種の元素を添加し耐酸化性、耐高温腐食性を向上させているものが多い。

耐熱鋼は、高温における各種環境での耐性と強度が求められるが、温度、雰囲気など多様であり、それぞれに適した鋼を選択する必要がある。次に、耐熱鋼の組成と合金元素の役割を金属組織別に代表的な鋼を例として述べる。

◇ 耐熱鋼の組成と合金元素

1. オーステナイト系耐熱鋼

面心立方構造である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較べ構成する元素の拡散速度が小さいため、600℃を越える温度での強度に優れている。主な鋼組成とこれの耐熱性を改善する元素を表2に示す。代表鋼はSUS304-HRであり、18%のCrを含有するため高温でCr₂O₃の強固なスケールが生じ、これが耐酸化性を向上させている。

Cr添加量が増えると耐酸化性は向上する。このためSUS310S-HRの耐酸化性はSUS304-HRより優れている。また、耐酸化性の向上にはSiの添加も有効であり、SUSXM15J1-HRには3.5%のSiが添加してある。Siはスケールと母相の間でSiO₂となりCr₂O₃の安定形成を助ける効果がある。

耐熱性の面からSUS316-HR、SUS347-HRをみると高温強度を改善するMo、Nbが添加してあり、このためSUS304-HRよりも高温強度に優れている。

排気バルブに採用されているSUH35はCとNを多量に含む鋼で、C添加により形成される炭化物による強化とNの固溶強化により高温強度を向上させている。

SUH660は耐熱ボルト、バネなどに用いられる鋼で、Ti、Al添加によるγ相(Ni₃(Al, Ti))による析出強化とMo、Vによる固溶強化により高強度化を図っている。700~760℃で時効熱処理を施し使用する鋼で、これよりも高温では析出強化の効果が失われるため、通常650℃程度までで使用される。

2. フェライト系耐熱鋼

体心立方構造であり、総じてC量が少ないため高温強度は高くない。このためあまり強度を必要としない部位に適用されている。代表鋼はSUS430-HRで表3に示す様に18%のCrを含み、これにより耐高温腐食性を確保している。高価なNiを含まないため安価であるが、475℃前後に保持されると脆化するため注意が必要である。

耐酸化性を改善する元素としては、Cr、Si以外にAlがある。Alの添加により形成される酸化皮膜や内部酸化層が変化し、酸化速度や酸化皮膜の剥離性を改善する。Fe-Cr合金においてAl添加量が数%を越えるとスケール表面にAl₂O₃を形成し、耐

表 2 オーステナイト系耐熱鋼の組成と主な添加元素

種類の記号	主な組成 (wt%)	耐熱性を改善する元素
SUS304-HR	18Cr-8Ni	Cr, Ni
SUS316-HR	17Cr-12Ni-2.5Mo	Cr, Ni, Mo
SUS310S-HR	25Cr-20Ni	Cr, Ni
SUS347-HR	18Cr-12Ni-0.5Nb	Cr, Ni, Nb
SUSXM15J1-HR	20Cr-12Ni-3.5Si	Cr, Ni, Si
SUH35	21Cr-4Ni-9Mn-0.4N-0.5C	Cr, Ni, C, N
SUH660	15Cr-25Ni-1Mo-0.2V-2Ti-0.2Al-B	Cr, Ni, Ti, Al, Mo, V

表 3 フェライト系、マルテンサイト系耐熱鋼の組成と主な添加元素

	種類の記号	主な組成 (wt%)	耐熱性を改善する元素
フェライト系	SUS430-HR	18Cr	Cr
	FCHW1/FCHRW1	25Cr-5Al	Cr, Al
マルテンサイト系	SUS403-HR	13Cr-0.1C	Cr, C
	SUS410J1-HR	13Cr-0.4Mo-0.1C	Cr, C

酸化性を顕著に向上させる。耐熱鋼ではAlを多量に添加した鋼はJISに規定していないが、電熱用合金線および帯としてJIS C2520にAlを添加した鋼がある。線はFCHW1、帯はFCHRW1と呼ばれており、25%のCrに5%のAlが添加してある。これにより1200℃の高温までの使用が可能となっている。

3. マルテンサイト系耐熱鋼

高温から焼き入れることでマルテンサイト組織とする耐熱鋼で、通常、焼き戻しを施し $M_{23}C_6$ などの炭化物を析出させ使用される。Cを0.1%程度含み、13%のCrを含むSUS403-HR、さらにMoを含むSUS410J1-HRがその代表鋼である。その組成を表3に示す。

マルテンサイト系耐熱鋼は、Crの含有量が13%程度と低いため耐酸化性に優れているとは言えない。また、焼き戻し温度以上ではマルテンサイト組織が急激に変化し強度が顕著に低下するため、焼き戻し温度である600℃以上では使用されない。

4. 析出硬化系耐熱鋼

代表鋼はSUS630-HRであり、析出強化元素としてCuが4%程度添加してあることが特徴である。主要成分は、17Cr-4Ni-4Cu-Nb-低Cである。通常、1030~1050℃で固溶化熱処理を施し、冷却しマルテンサイト組織とする。これに400~550℃で時効熱処理を施すことでマルテンサイト母相中にε相(Cu相)を析出させることで高強度化するものである。しかしながら、500℃を越える温度で使用すると、ε相の粗大化、マルテンサイト相の弱体化が起き強度が低下するので使用上限温度は500℃程度となる。

◇ 耐熱鋼の開発動向

JISに規定のある鋼について合金元素とその役割を記載してきたが、より高い温度、より厳しい環境で使用可能となる新規な鋼の開発要求は強い。

また、NiやMo、Nbといったレアメタルが添加しており、歴史的にみてもこれら元素の価格変動は激しい。このため、これら元素の削減も求められている。これらを解決するために開発された耐熱鋼を幾つか紹介する。

1. オーステナイト系耐熱鋼

昨今のエネルギー事情から省エネルギー技術に関する研究は数多く行われており、その一つとして熱交換器を使った排熱利用の高効率化がある。高温用熱交換器は主にSUS310Sが使用されていたが、水蒸気を多く含む燃焼排ガス中で800℃を越えて使用すると高温酸化により材料が損失し使用できなかった。従来の耐熱鋼では適用できない過酷な温度、環境であった。これに対し、図1に示す様にRE (Rare Earth: 希土類元素) であるLa、Ce、およびNdを添加することで耐酸化性を改善し、N、Nbを添加し高温強度を向上させたNAR-AH-7 (現 NSSMC-NAR-AH-7) が開発・実用化されている¹⁾。

また、前述の通り自動車用の排気バルブにはSUH35が広く使用されているが、より高温での強度、硬さが求められる場合はNi基耐熱合金NCF3015 (30Ni-15Cr) などが使用される。これに対し、レアメタルであるNi量低減の要求があり、高温強度、耐摩耗性を維持したままNi量の低減が検討され、DY2-D (21Cr-6Ni-3.2Mo-0.1Nb-0.52C-0.40C)、DY2-H (20Cr-10.5Ni-0.5Mo-0.12Nb-0.22P-0.33C-0.18C) の2つが開発されている²⁾。前者は、Mo添加による固溶強化とC、Nb添加による炭化物による粒界強化を利用、後者は、P添加による粒界析出強化を利用することでNi量を低減している。

2. フェライト系耐熱鋼

自動車の排気系部品であるエキゾーストマニホールドなどの部材には、耐酸化性、耐熱疲労特性が必要である。このためMoを添加し高温強度を向上させたSUS444 (19Cr-2Mo-Nb) が適用されて

鋼種	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Nb	N	RE
開発鋼	0.05	0.4	0.8	0.5	17.4	26.0	0.1	0.21	0.03
SUS310S	0.05	0.6	1.2	—	20.3	24.8	—	0.02	—

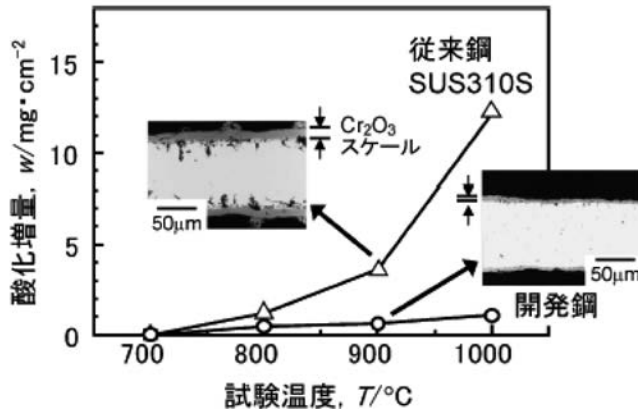


図 1 開発鋼とSUS310Sの酸化挙動の比較¹⁾
(3%O₂-9%CO₂-16%H₂O-N₂、各温度500hr試験)

鋼種		Cr	Nb	Mo	Cu	Al
JFE-TF1	高耐熱鋼	17.5	0.45	—	1.25	0.35
Type429	耐熱鋼	14.6	0.44	—	—	—
SUS444	高耐熱鋼	18.9	0.52	1.8	—	—

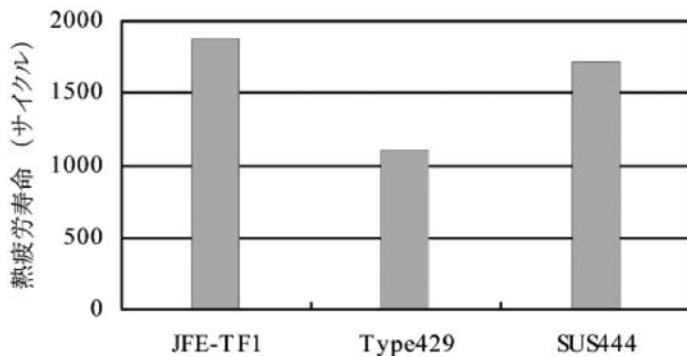


図 2 開発鋼とSUS444の熱疲労寿命の比較³⁾

いるが、Moも前述の通り高価なレアメタルであり削減が求められていた。高温強度を確保するために、Cu添加による析出硬化を利用すること、これの効果が小さくなる800℃以上の強度を確保するた

めに、微量Alによる固溶強化を利用したJFE-TF1 (17.5Cr-1.25Cu-0.45Nb-0.35Al)³⁾が開発されている。図2に示す様にCu、Alの添加により熱疲労特性の改善がされている。同じくCuを添加しMoを必要

最少量としたNSSC[®]448EM (17.1Cr-1.2Cu-0.54Nb-0.3Mo-0.11Ti)⁴⁾も実用化されている。これらは、高温強度の確保をCu+Al、Cu+Moといった複合添加によって達成している。

◇ 合金元素の役割

ここまで紹介したように、耐酸化性を改善する元素は、Cr、Si、Alで、希土類元素であるLa、Ce、Ndを微量添加した例もある。これに対し、高温強度を改善する元素は、C、Ni、Cr、Al、Mo、Nb、V、Cu、N、Pと種類が多い。本稿では述べていないが、Co、W、Ti、Bの添加も効果が知られている。近年、省資源化と称し削減の対象となる元素は、Ni、Mo、Nbなどであり、いずれも主に強度を向上させる元素である。今後とも、これら元素を他の元素で置き換える材料開発は続くも

のと考える。

それぞれの元素の効果は、使用温度、雰囲気によって大きく現れる場合もあれば、そうでない場合もある。目的とする耐熱部材に必要な強度特性、使用環境など使う現場を良く知ることが重要である。これには、材料開発者のみでなく、ユーザー、これらを結びつける営業・流通といった三者の協力が不可欠と考える。

参考文献

- 1) 西山佳孝、大塚伸夫、來村和潔、阿部賢：まてりあ、49 (2010)、P. 72
- 2) 露無崇志、植田茂紀、大崎元嗣、都地昭宏、大石勝彦：Honda R&D Technical Review、26 (2014)、P. 67
- 3) 中村徹之、太田裕樹、加藤康：まてりあ、54 (2015)、P. 18
- 4) 濱田純一、林篤剛、神野憲博、小森唯志、伊藤宏治、福田望、井上宣治：まてりあ、56 (2017)、P. 33



10. 超合金

大同特殊鋼(株) 技術開発研究所 特殊鋼研究部 耐食・耐熱材料研究室 す み よし のり
鷲 見 芳 紀

ま え が き

超合金 (Superalloy) は、オーステナイト系ステンレス鋼よりも高い耐食性や耐熱性を有する合金で、自動車、航空機エンジンなどに代表される内燃機関、あるいは化学プラントなど、高い温度や腐食環境に曝される厳しい環境下で使用される。JISでは耐食性、耐熱性を改善するため合金元素を多量に添加し、鉄含有量が50%以下になっている合金と規定されているが、合金組成に明確な規定はなく、組成によりFe基超合金、Ni基超合金、およびCo基超合金に大別される。またその製法によって鍛造・圧延合金と鋳造合金に分類される。さらに使用環境に応じて耐食材料あるいは耐熱材料として使い分けら

れる。同じ合金で耐食用途にも耐熱用途にも使用される場合もある。本稿では、Inconel、Incoloy (ともにスペシャルメタルズ社 (Special metals corporation (旧インコ社 (International Nickel company)) の開発合金) や、Hastelloy (ヘインズ社 (Haynes International) の開発合金) 等の世界的に広く認知された超合金を紹介する。

本稿では、各種超合金の特徴について述べるとともに、各合金元素の役割について、実用合金を例に概説する。

◇ 超合金の主な用途と要求特性

表1は代表的な超合金の化学組成と主な用途を示したものである。耐食用途として使用される場

表 1 代表的な超合金の化学組成と主な用途

	製法	耐食	耐熱	合金名	Ni	Co	Fe	Cr	Mo	W	Al	Ti	Nb	C	その他	用途
Fe基	展伸		○	SUH660	26.0	-	Bal.	15.0	1.3	-	0.2	2.0	-	0.05	0.8V、1.4Mn、0.015B	タービンロータ、ボルト、ブレード、シャフト
	展伸		○	Incoloy 800	32.5	-	Bal.	21	-	-	0.3	0.4	-	0.05	0.8Mn	シースヒーター外管、化学・石油化学工業の熱交換器配管、浸炭装置原子力蒸気発生管
	展伸		○	Incoloy 800H	32.5	-	Bal.	21	-	-	0.4	0.4	-	0.08	0.8Mn	化学・石油化学工業の反応・分解設備の熱交換器・配管・構成部材
	展伸	○		Incoloy 825	42.0	-	Bal.	21.5	-	-	0.8	-	-	0.03	0.8Mn	硫酸洗浄プラント内の加熱コイル、燃料要素の溶解槽海水冷却型熱交換器、石油精製所の空気冷却型熱交換器
	展伸	○		Incoloy 25-6Mo	25.0	-	Bal.	20	6.5	-	-	-	-	0.02	0.8Cu、0.2N	オフショア・プラネットフォーム設備・機器石油化学工業及び海水冷却装置のチューブ
	展伸 鋳造		○	N155	20.0	20.0	Bal.	21.0	3.0	2.5	-	-	-	0.15	1.5Mn、0.15N	高温用ボルト、熱処理治具
Ni基	展伸	○	○	Inconel 600	Bal.	-	10.0	16.0	-	-	-	-	-	0.08	0.5Cu	化学・食品工業の製造装置、熱交換器、原子炉部品、電子機器部品
	展伸	○	○	Inconel 625	Bal.	1.0	5.0	21.5	9.0	-	0.2	0.2	3.6	0.05		化学工業製品製造設備、核融合炉設備
	展伸	○	○	Hastelloy X	Bal.	1.5	18.0	22.0	9.0	0.6	-	-	-	0.1		ガスタービン部品、工業炉部材、熱処理設備、原子力設備
	展伸	○		Hastelloy C-276	Bal.	2	5	16	16	4	-	-	-	0.01	0.3V	公害防止排煙脱硫装置 (FGD)、化学工業設備バルブ・製紙工場設備
	展伸	○		Hastelloy C-22	Bal.	2	3	22	13	3	-	-	-	0.01	0.3V	化学薬品製造設備、燃焼ガス脱硫装置 (FGD)有害・廃棄物焼却設備
	展伸	○		Inconel X-750	Bal.	-	8.0	16	-	-	0.8	2.5	-	0.08	Nb+Ta 1	ガスタービン・ロケットエンジン部品 航空機・原子炉部品、圧力容器、耐熱スプリング
	展伸	○		Nimonic 80A	Bal.	-	1.5	20.5	-	-	1.4	2.3	-	0.1		陸上・船用内燃機関用排気バルブ、ガスタービン部品
	展伸	○		Nimonic 90	Bal.	18	1.5	19.5	-	-	1.4	2.4	-	0.1		ジェットエンジン、内燃機関の部品 航空・宇宙産業用のファスナー
	展伸	○		Inconel 751	Bal.	-	7.0	16	-	-	1.2	2.4	1.0	0.1	0.003B	航空機・ガスタービン・ロケット・人工衛星・宇宙船の部品 原子炉部品、核燃料スペーサー・スプリング、熱間押出工具
	展伸	○		Inconel 718	52.5	-	Bal. (19)	19	3.0	-	0.50	0.90	5.1	0.04		航空機・ガスタービン・ロケット・人工衛星・宇宙船の部品 原子炉部品、核燃料スペーサー・スプリング、熱間押出工具
	展伸	○		Nimonic 263	Bal.	20	0.7	20	6.0	-	0.50	2.10	-	-		ガスタービンのリング・ケーシング その他板材からの高温用加工部品
	展伸	○		Waspaloy	Bal.	13	1	19	4.0	-	1.4	3.0	-	0.05	0.005B	ジェットエンジン・ガスタービンの回転体等の部品
	展伸	○		Udimet 520	Bal.	12	-	19	6.0	1.0	2.0	3.0	-	0.04	0.007B	ガスタービン・ブレード
	展伸	○		Udimet 720	Bal.	15	-	16	3.0	1.3	2.5	5.0	-	0.06	0.015B、0.04Zr	ジェットエンジンのタービンバケット、翼・車用高温ボルト
	鋳造	○		Inconel 713C	Bal.	-	-	12.5	4.2	-	6.1	0.8	-	0.12	2.2Nb、0.012B、0.1Zr	自動車用ターボ部品、プレス鍛造金型、ダイカスト金型
鋳造	○		Mar-M246	Bal.	10	0.15	9	-	10	5.5	1.5	-	0.15	0.05Zr	自動車用ターボ部品、エンジンノズル、	
鋳造	○		Mar-M247	Bal.	10.0	-	8.3	-	9.5	5.5	-	-	0.08	3Ta、1.5Hf	自動車用ターボ部品	
鋳造	○		CMSX-4	Bal.	9.6	-	6.6	0.6	6.4	5.6	1.0	-	-	0.1Hf、3Re	ジェットエンジン動翼	
Co基	展伸	○		L605	10	Bal.	1.5	20	-	15	-	-	-	0.1	1.5Mn	ガスタービンエンジン、ペアリング用部品
	展伸	○		X40	10.5	Bal.	-	25.5	-	7.5	-	0.2	-	0.05	0.75Si	航空機用ノズルベーン

合、海水、酸、アルカリなどの環境に曝される海水淡水化プラント、化学薬品製造、石油掘削などで使用される。溶液の種類や温度などによって求められる耐食性が異なるため、使用環境に応じた材料選定が必要である。耐熱合金は強化手法の違いにより固溶強化型と析出強化型に分類される。耐熱用途では、高温強度やクリープ強度などの機械的特性に加えて、耐酸化性や耐高温腐食性が必要とされる。使用環境や使用期間によっては、短時間的な強度だけでなく、長時間の組織安定性も考慮に入れた材料選定が必要である。このように一口に超合金と言っても、多様な合金の中から使用環境などにより使い分けられている。

◇ 超合金における合金元素の利用

表2に超合金に使用される合金元素とその役割を示す。基本元素としては主にFe、Ni、Coが母相のオーステナイト相を構成する。Feは安価であるが、Niを添加していくと耐食性、高温強度ともに向上するため、超合金は大まかにNiの含有量で価

格と性能の差別化がされている。Coの添加はオーステナイト母相を固溶強化して高温強度を向上させる。さらにCoを母相としたCo基超合金は融点がFe基超合金やNi基超合金に比べて高く、優れた耐高温腐食性を有している。Coは非常に高価なこともありNi基超合金ほどは多様な種類は無いが、Co基超合金はNi基超合金の強度が低下するような1000℃以上の高温用途向けでは重用されている。

一般に、超合金では耐酸化性、耐食性を向上させるためCrを多く添加しているのが特徴である。Crは表面に安定な不動態被膜を形成することで水の存在する環境下における耐食性を向上させ、一方で高温では緻密なCr酸化物の被膜を形成することで耐酸化性を向上させるため、耐食用途、耐熱用途いずれにおいてもほぼ必須の元素となっている。

耐食合金においては、MoはCrと同様に不動態被膜の安定性を向上させる為、特に厳しい環境での耐食性を要求される用途ではMoを多量に含有する合金、例えばHastelloy C-276 やHastelloy C-22 が使用される。他に、耐食性を向上させる元素と

表 2 超合金に用いられる合金元素の役割

元素名	合金元素の役割
C	種々の元素と炭化物を形成し、高温特性を向上する。しかし高温酸化、耐食性を低下させる。
Cr	多くの超合金の基本添加元素。耐食性、耐酸化性、耐高温腐食性を向上させる。
Ni	オーステナイト相を安定化し、耐食性、高温強度を向上させる。Ni基超合金の母相となる。
Co	オーステナイト相を安定化し、高温強度、特にクリープ特性を向上させる。Co基超合金では母相となる。
Mo	耐食性を大きく向上させる。固溶強化により高温強度を向上させるが、耐酸化性や長時間組織安定性を低下させる。
W	固溶強化により高温強度を向上させる。ただし高価で比重が重い。
Re	Wよりも固溶強化が大きく耐高温腐食性も改善する。ただし非常に高価。
Nb	安定な炭化物を形成し、高温強度を向上させる。析出強化型合金ではNi、Alと共に γ' 相を析出させて高温強度を向上させる。
Ta	Nbと同様、炭化物を形成するほか、Ni、Alと共に γ' 相を析出させて高温強度を向上させる。
Al	Niと共に γ' 相 ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) を形成し、析出強化により高温強度を向上する。
Ti	Alと同様、Niと共に γ' 相 ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) を形成し、析出強化により高温強度を向上する。
B	粒界に偏析し、高温強度、クリープ特性を向上させる。
Zr	粒界に偏析し、高温強度、クリープ特性を向上させる。

してWやTaが利用される。

固溶強化元素として代表的なのは主にMoとWである。しかし、Moの多量の添加は特に800℃以上における耐酸化性を低下させるだけでなく、高温で長時間使用した時に有害な脆化相を形成することがあるため、耐熱合金としての用途では過度の添加は避けられている。WもMoと同様の働きをする元素であるが、原子量が大きいため、一般的には重量パーセントあたりの固溶強化への寄与はMoのおよそ半分と言われている。

固溶強化を利用した代表的な合金として、Fe合金のN155や、Ni合金ではInconel 600、Inconel 625がある。

析出強化には主に析出物として炭化物を利用したものと金属間化合物を利用したものがある。主にCr、W、Mo、Nb、TaおよびTiはCと結びついてMC、 M_7C_3 、 M_6C 、 $M_{23}C_6$ などの炭化物（Mは金属元素）を形成し、高温強度を高める効果がある。NiとAl、Tiは Ni_3 （Al、Ti）の金属間化合物である γ' 相を形成する。NbやTaもこの γ' 相形成元素であり、 γ' 相に固溶して強度を向上させる。一般的に γ' 析出強化型合金では、析出相を固溶化処理により母相に固溶させた後、その後の時効熱処理によって析出させて使用される。

より高温まで強度を確保するためには、これら γ' 形成元素の添加量を増やし γ' 相量を増加させる必要がある。これら γ' 相形成元素が増えるほど、より高温まで γ' 相が安定となるため、固溶温度もそれに応じて高くなる。一方で合金の融点が低下するため、熱間で鍛造可能な温度範囲が狭くなり、鍛造が困難となる。一般に鍛造可能な γ' 相量は体積率で約40%で、Udimet 720が鍛造可能な限界の合金とされている。代表的な析出強化型の鍛造・圧延合金にはInconel X750やNimonic 80Aがあり、700℃程度までの温度域で固溶強化型合金よりも高い強度を示すため、自動車や船用のエンジンバルブに用いられている。

さらに高い γ' 体積率を有する合金は一般的に鍛造によって製造される。代表的な鍛造用合金には

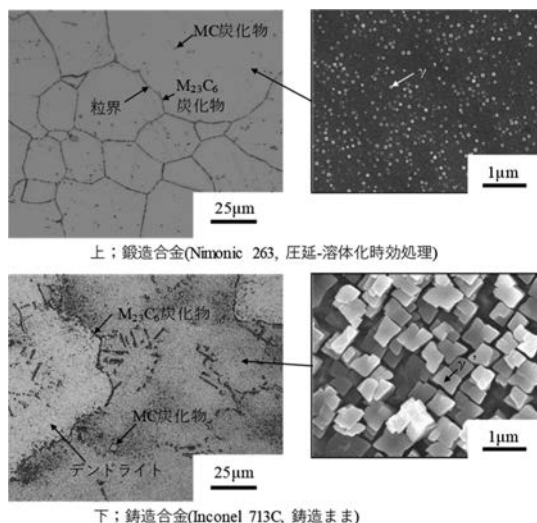


図 1 鍛造用と鍛造用のNi基超合金の組織

Inconel 713C、Mar-M 247などがあり、航空機のジェットエンジンや発電用のガスタービンの動翼、自動車のターボチャージャーのタービンホイールなどに使用されている。図1に鍛造合金と鍛造合金の代表的なマイクロ組織を示す。鍛造合金では微細な球状の γ' 相が粒内に析出しているのに対し、鍛造合金では体積率で最大60%程度にもなる大きな立方体状の γ' 相が粒内に高密度に析出し、粒内の強度を著しく向上させている。結晶粒界には炭化物を析出させる他、粒界を強化する効果のあるZrやBが添加されている。それでも結晶粒界は相対的に弱いため、鍛造合金では結晶粒の方位制御によってクリープ特性を向上させる試みが行われてきた。結晶粒を応力負荷方向に揃えた一方向凝固合金や、結晶粒界を完全に除去した単結晶合金が開発されている。これらの合金では、粒界強化元素であるC、B、Zrはむしろ不純物として添加しないよう規制されている。また、非常に高価ではあるがWよりもさらに固溶強化の大きいReが添加元素として使用されるのも特徴である。単結晶合金として開発された合金の代表的なものに、CMSX-4などがあり、ジェットエンジンの動翼に使用されている。

11. 機能材料

(1) 電子材料

(株)日立金属ネオマテリアル 技術開発部 よこやま しんいちろう
横山 紳一郎

まえがき

電子材料は、携帯端末、ディスプレイ、パソコン等の電子機器に使用される材料の総称であり、用途に応じて機械的特性、熱膨張、熱伝導、耐食性等の各種特性が要求される。本稿では、電子材料の中でも用途の範囲が広く、特殊鋼の部類に位置付けられるFe-Ni系合金を中心に、この合金の特徴である低熱膨張特性に及ぼす合金元素の役割を解説する。また、Fe-Ni系合金は、電流センサや磁気シールド用途で、パーマロイと呼ばれる軟磁性材料としても使用されることから、磁気特性に及ぼす合金元素の役割についても解説する。

◇ 熱膨張特性に及ぼす合金元素の役割

Fe-Ni系合金の特徴の一つは、特定の組成範囲で、金属材料としては低い熱膨張特性をもつことである。それ故、電子機器内で半導体、ガラス、セラミック等の低熱膨張材と封止する用途に使用される。このFe-Ni系合金の低熱膨張特性は、熱振動による体積膨張と、強磁性体故の自発磁化に起因する体積収縮が相殺することによって発現すると考えられている¹⁾。

図1は、Fe-Ni系合金の100℃までの熱膨張係数に及ぼすNi量の影響²⁾を示す。熱膨張係数は、Ni量とともに顕著に変化し、Fe-36mass%Ni組成(以下、組成は、すべてmass%で表記)で極小値を示す。このFe-36%Ni合金の熱膨張係数は、純Feの約1/10の値である。また、これより高Ni組成のFe-42%Ni合金(ASTM F30)は、図2に示す熱膨張曲線において、半導体であるSiと近い熱膨張特性をもつことから、半導体用リードフレーム材料として使用されている。

Fe-Ni系合金に第三元素としてCoを添加すると、熱膨張係数は更に低下する。Fe-32%Ni-5%Co合金

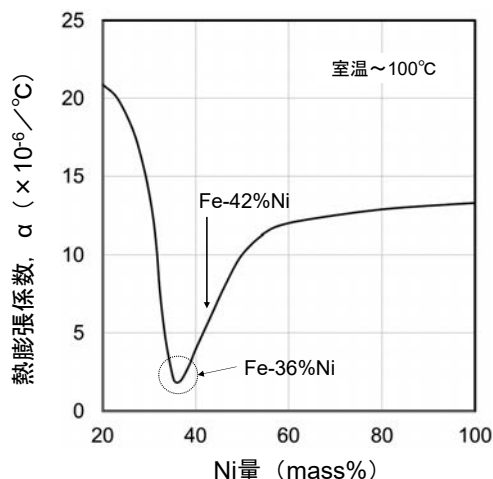


図1 Fe-Ni系合金の熱膨張係数に及ぼすNi量の影響²⁾

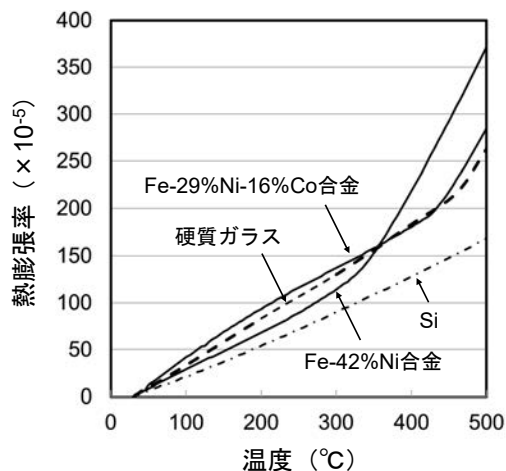


図2 各材料の熱膨張曲線

は、Fe-36%Ni合金よりも低い熱膨張係数を示す材料である。また、Coにはキュリー温度(強磁性体としての性質が失われる温度)を高めることによって、高い温度域まで低熱膨張特性を維持させる効果がある。図2に示すFe-29%Ni-16%Co合金

(ASTM F15) は、室温～約350℃の温度範囲でFe-42%Ni合金 (ASTM F30) より大きい熱膨張率を示すものの、キュリー温度が高く、400℃以上の高温域まで硬質ガラスと近い熱膨張特性をもつことが分かる。この高温域までの低熱膨張特性を利用し、Fe-Ni-Co合金は、硬質ガラスやセラミックの封止材料として用いられている。

Fe-Ni系合金にCo以外の合金元素を添加すると、熱膨張係数は増加する。しかしながら、表面に酸化皮膜を生成してガラスとの濡れ性を向上させる目的で、合金元素としてCrが使用される場合がある。Fe-42%Ni-6%Cr合金 (ASTM F31) やFe-47%Ni-6%Cr合金は、軟質ガラスと近い熱膨張特性をもち、かつ露点管理された湿潤水素雰囲気中での熱処理によりガラスとの濡れ性が良いCrを主体とする酸化皮膜を生成することから、ガラス封止部品として使用される。

◇ 磁気特性に及ぼす合金元素の役割

Fe-Ni系合金のもう一つの特徴は、パーマロイ (名前の由来は、Permeability (透磁率) の高い Alloy (合金。)) と呼ばれる軟磁性材料として、優れた軟磁性を示すことである。パーマロイは、板形状や線形状の素材をプレス加工等によって部品形状に加工した後、1000～1150℃に保持した水素雰囲気炉中または真空炉中で、磁性焼鈍と呼ばれる熱処理を施してオーステナイト結晶粒を粗大化させた状態で使用される。パーマロイがもつ優れた軟磁性を発揮させるためには、この磁性焼鈍が必須の工程となる。磁性焼鈍後に要求される磁気特性は、用途によって異なるが、一般には高透磁率 (磁化され易いこと) と高飽和磁束密度 (磁化された際の磁力が強いこと) が求められる。

図3は、Fe-Ni系合金の飽和磁束密度 B_s と初透磁率 μ_i に及ぼすNi量の影響²⁾を示す。飽和磁束密度 B_s (図3上) は、45%Ni組成の付近で極大値を示す。このFe-45%Ni合金と、その周辺組成の合金は、PBパーマロイ (JIS C 2531) と呼ばれ、高飽和磁束密度と高透磁率特性を利用して電動パワーステアリング用のトルクセンサ部材やクォーツ時計のステップモータ用ヨーク材等に使用される。

一方、初透磁率 μ_i (図3下) は、78%Ni組成付近で著しい極大値を示す。これは、78%Ni組成で

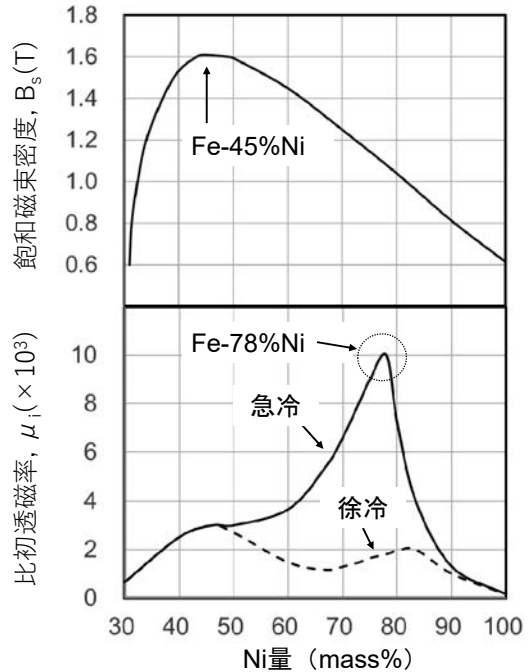


図 3 Fe-Ni系合金の飽和磁束密度と透磁率に及ぼすNi量の影響²⁾

磁歪と磁気異方性が、ともにゼロに近づくからであるとされている³⁾。磁歪とは、磁性材料が磁化された時、伸びたり縮んだりする性質のことで、磁歪がある大きさをもつと、結晶内にひずみがあり、材料の磁化を妨げる。それ故、高透磁率を得るためには、磁歪はゼロであることが望ましい。また、磁気異方性とは、結晶がある特定の方向には磁化され易く、他の方向には磁化され難い性質のことである。一般に、普通材料では、結晶は色々な方向を向いているので、高透磁率を得るためには、どの方向にも磁化され易い、すなわち、磁気異方性がゼロの状態が望ましい。

図3から、Niが約50～90%の組成範囲では、同じNi組成の合金であっても、磁性焼鈍後の冷却方法によって μ_i の値が異なり、徐冷後の μ_i は、急冷後と比較して顕著に低いことが分かる。この原因は、徐冷中に磁気異方性の大きい規則格子 Ni_3Fe が過剰生成するためとされている³⁾。高透磁率を得るためには、規則格子を適度に生成させることがよいとされるが⁴⁾、Fe-Ni二元系合金では冷却過程での規則格子の生成速度が非常に速いため、工業的規模の熱処理では生成量のコントロールが難しい。

それ故、冷却速度の遅い徐冷処理であっても、規則格子をコントロールできるよう、規則格子の生成を抑制する必要がある、この目的で使用される主な合金元素が、MoとCuである。78%Ni付近の組成をベースに、これらの合金元素を単独あるいは複合添加した材料は、PCパーマロイ（JIS C2531）と呼ばれ、急冷が不要で、徐冷時の冷却速度を制御することによって高透磁率が得られる実用的なパーマロイである。PCパーマロイは、磁歪と磁気異方性をゼロ近傍にしつつ、かつ規則格子の生成を抑制するように成分調整されており³⁾、現在、実用されている代表的なPCパーマロイは、78%Ni-5%Mo-4%Cu-Feの四元系合金である。

PCパーマロイの磁歪や磁気異方性は、上述した主要成分の変動に加えて、実用上含まれる微量元素によっても変化するので、透磁率も微量元素を含めた僅かな合金組成の変動によって著しく変化する⁵⁾。それ故、PCパーマロイの製造に際しては、微量元素を含めた合金元素の成分範囲を厳密に管理することが求められる。また、規則格子の生成には磁性焼鈍時の冷却速度が大きく影響することから、冷却速度の管理も重要である。このように、PCパーマロイは、厳密な製造管理を必要とする軟磁性材料であるが、その高透磁率特性を活かし、微弱な電流を検出する高感度の電流センサ

や、微弱な磁気を遮蔽する磁気シールド材として使用されている。

むすび

本稿では、電子材料としての用途の範囲が広く、特殊鋼の部類に位置付けられるFe-Ni系合金の熱膨張特性と磁気特性に及ぼす合金元素の影響を解説した。電子機器内で半導体、ガラス、セラミック等と封止される低熱膨張材の熱膨張制御にはNiとCoが活用されている。また、軟磁性材料として使用され、高飽和磁束密度と高透磁率を特徴とするPBパーマロイの磁気特性制御にはNiが活用されている。更に、極めて高い透磁率を特徴とするPCパーマロイの磁気特性制御にはNi、Mo、Cu等が活用されている。

参考文献

- 1) 深道和明：日本金属学会会報「まてりあ」Vol. 36 (1997) pp. 1064-1069
- 2) Richard M. Bozorth: "Ferromagnetism" D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC. (1951) pp. 102-115
- 3) 金子秀夫、本間基文：「磁性材料」日本金属学会 (1978) pp. 149-152
- 4) 富田貞美：「Ni-Fe系高透磁率合金の低温熱処理に関する研究」東北大学学位論文 (1972)
- 5) 藤原義行、横山紳一郎、長塩隆之：日立金属技報 Vol. 28 (2012) pp. 42-45

(2) 電磁鋼板

JFEスチール(株) スチール研究所 たかしま
電磁鋼板研究部長 高島 稔

◇ 主な用途と要求特性

電磁鋼板は、モータ、変圧器など電気機器の鉄心材料として広く使用されており、その磁気特性は、電気機器の特性に大きな影響を及ぼす。

電磁鋼板は、圧延方向に極めて優れた特性を示す方向性電磁鋼板と、特定の方向に偏りのない特性を示す無方向性電磁鋼板に分類され、更に、板厚および磁気特性によって多数のグレードに分けられる。電磁鋼板の規格は、国際的には国際電気標準会議 (IEC) に、日本国内では日本工業規格 (JIS) に制定されており、JISでは、無方向性電磁鋼板は「無方向性電磁鋼帯JIS C2552」として、方向性電磁鋼板は「方向性電磁鋼帯JIS C2553」として、その詳細が規定されている。本稿では、以下、無方向性電磁鋼板を中心に述べる。

JISにおいて、無方向性電磁鋼板の種類は、たとえば、「35A210」のように表記され、「35」は、呼称厚さが0.35mmであること、「A」は、無方向性電磁鋼板であること、「210」は、鉄損 $W_{15/50}$ (周波数50Hz、最大磁束密度1.5Tのときのエネルギー損失)の保証値が2.10W/kg以下であることを示している。

JIS C2552には、無方向性電磁鋼板の板厚として、0.65mm、0.50mm、0.35mmなどが示されている。従来、0.50mm厚が標準的に用いられてきたが、近年、省エネルギー、CO₂排出量削減の観点から、鉄損に優れる0.35mm厚の無方向性電磁鋼板の使用量が増加している。

また、絶縁コーティングが表面に施されていることも電磁鋼板の特徴である。電磁鋼板は、所定の形状に加工された後、積層されて鉄心となる。このとき、積層された鋼板間に電氣的導通があると、鉄損が劣化することから、絶縁コーティングが表面に施される。このコーティングには、電気絶縁性に加え、耐食性の向上などの目的もある。

◇ 電磁鋼板における鋼中元素の役割

1900年、英国のHadfieldらによって、変圧器の鉄心に使用されていた薄鋼板にSiを加えることによって、磁気特性が改善されることが見出された。以来、鋼中元素が磁気特性に及ぼす影響について、多くの研究が行われた。以下、代表的な元素について、その役割を述べる。

1. Cの影響¹⁾

無方向性電磁鋼板は、数十 μm 程度の結晶粒からなるが、結晶粒は磁区と呼ばれる同一方向の磁化をもった小さな領域に分かれている。鋼中の微細な析出物は、磁壁 (磁区と磁区の境界) の移動を妨げ、鉄損を増加させる。鋼に30ppm程度以上のCが含有されると、時効による微細炭化物の析出により、磁気特性が劣化する。電磁鋼板においては、Cの低減が重要である。

2. S、N、Oの影響^{2)、3)}

MnS、AlN、Al₂O₃、SiO₂といった微細な析出物、介在物は、磁気特性を劣化させる。炭化物と同様、これら鋼中の微細な析出物、介在物は、磁壁の移動を妨げ、鉄損を増加させる。また、粒界移動を妨げ、結晶粒を微細化させることによっても、鉄損を増加させる。以上のことから、電磁鋼板においては、S、N、Oの低減が重要である。

3. Siの影響

鋼にSiを添加すると、鋼の電気抵抗 (比抵抗) が増加、渦電流損が低減し、鉄損が改善する。また、Si添加により、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態点が上昇し、高温焼鈍との組み合わせにより、結晶粒が粗大化、鉄損が改善する。一方、Si添加により、鋼が脆くなり、製造性が劣化することから、Siは、3%程度を上限に添加される。

4. Sb、Snの影響^{2)、4)、5)}

鉄結晶は、 $\langle 100 \rangle$ 方向に磁化されやすく、 $\langle 111 \rangle$ 方向に磁化されにくい。一方、無方向性電磁鋼板は、数十 μm 程度の粒径の多数の結晶から構成され

ている。そのため、無方向性電磁鋼板の磁気特性は、集合組織の影響を大きく受ける。無方向性電磁鋼板は板面内で磁化されることが多いため、板面内に最も<100>方位が多い{100}面方位粒が多い集合組織が好ましい。集合組織を改善する方法として、冷延前に焼鈍を施し、冷延前結晶粒径を粗大化する方法や、Sb、Snを添加する方法が知られている。Sbは、粒界に偏析しやすい元素であり、粒界移動を介して集合組織に影響を及ぼしていると推定される。

◇ 最新の電磁鋼板の動向

近年、CO₂排出量削減・省エネルギーの観点から、世界各国で電気機器の効率規制プログラムがすすめられると共に、太陽光などの再生可能エネルギー、スマートグリッド、電気自動車など、電力の供給・利用方法の高度化・多様化が加速している。

電気機器には、高効率化・小型化が求められ、作動周波数が高周波化し、高周波での磁気特性に優れる電磁鋼板のニーズが高まっている。

このような作動周波数の高周波化に対応する電磁鋼板として、高Si電磁鋼板について述べる。

鋼板中のSi含有量が増加すると、鋼板の電気抵

抗が増加、渦電流損が低減し、鉄損、特に、高周波鉄損が大きく改善ことが知られている。特に、Si 6.5%において、磁歪（磁化による鉄の伸縮）がゼロとなり、優れた磁気特性、低騒音が得られる。しかし、Si含有量の増加により、冷間圧延に耐える機械的特性を維持できなくなるため、6.5%Si電磁鋼板の工業的製造は困難とされてきた。

JFEスチール(株)は、世界に先駆けて化学気相蒸着法（CVD法）を用いた6.5%Si鋼板の連続製造技術確立した。図1に製造法の概要⁶⁾を示す。冷間圧延可能な低Siの薄鋼板を製造し、高温下で鋼板表面にSiCl₄ガスを吹付け、鋼板表面から鋼板内にSi原子を拡散させて、高Si鋼板の製造を実現している。

表1に、6.5%Si鋼の磁気特性を示す。代表的な高周波用鉄心材料である極薄方向性電磁鋼板、鉄系アモルファスの特性例も併せて示す。極薄方向性電磁鋼板は、鉄損が高く、効率の点で劣る。一方、鉄系アモルファスは、板厚が極めて薄いことから、低い鉄損を示すものの、飽和磁束密度が低く、磁歪が大きいことから、小型化や騒音での難点が指摘されている。これらの材料と比較し、6.5%Si鋼板は、優れた鉄損特性と磁歪特性を両立する材料である。

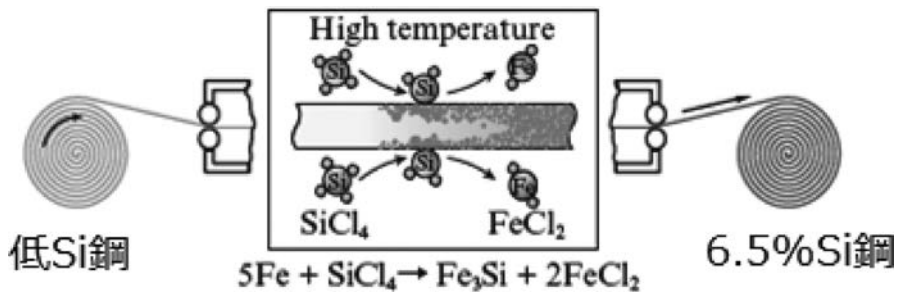


図 1 6.5%Si鋼板の製造方法概要

表 1 代表的な高周波用鉄心材料の磁気特性

材料	板厚 (mm)	飽和磁束密度 (T)	鉄損 (W/kg)				磁歪 400Hz、1.0T (×10 ⁻⁶)
			50Hz 1.0T	400Hz 1.0T	5kHz 0.2T	20kHz 0.05T	
6.5%Si電磁鋼板 (I0JNEX900)	0.1	1.8	0.5	5.7	11.3	6.9	0.1
極薄方向性電磁鋼板	0.1	2.0	0.7	6.4	20.0	14.0	-0.8
鉄系アモルファス	0.025	1.5	0.1	1.5	8.1	3.3	27.0

図2に、高Si鋼板および比較材として無方向性電磁鋼板を使用したモータの効率測定を行った結果⁷⁾を示す。高Si鋼は、低速回転域から高速回転

域まで、優れたモータ効率を示す。特に、5,000rpm以上の高速回転域で、優れたモータ効率が得られている。

高Si鋼板は、高周波鉄損特性に優れるため、高周波リアクトル、高周波トランス、モータなどに広く使用されており、今後、更に、活躍の場が広がると考えられる。

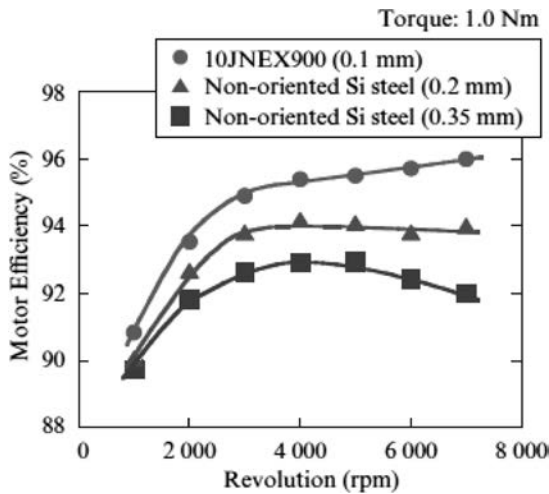


図 2 モータ効率に及ぼすモータ回転速度の影響 (10JNEX900：板厚0.1mmの6.5%Si鋼)

参考文献

- 1) 実川正治、光成元神ら：NKK技報、131 (1990)、P. 16
- 2) H. Shimanaka, Y. Ito et. al: "Energy Efficient Electrical Steels" (1980)、P. 193 [TMS-AIME]
- 3) 入江敏夫、松村治ら：川崎製鉄技報、10 (1978)、P. 15
- 4) T. Kubota, T. Nagai; J. Mater. Eng. Perform. 1 (1992)、P. 219
- 5) M. Takashima, T. Obara, T. Kan; J. Mater. Eng. Perform. 2 (1993)、P. 249
- 6) 笠井勝司、浪川操、平谷多津彦；JFE技報、36 (2015)、P. 12
- 7) 尾田善彦、平谷多津彦ほか：ふえらむ 2012、vol. 17、no. 12、p. 823-828



(3) 磁石

愛知製鋼(株) 未来創生開発部 やま ざき まさ お
モーター・磁石開発室 山崎理央

まえがき

永久磁石とは、一旦磁化されると外部磁場 H を取り除いても磁気分極 J が残り、外部に磁場を発生させる材料の総称である。図1は主な永久磁石の $(BH)_{max}$ の推移を示した図である¹⁾。この $(BH)_{max}$ は最大エネルギー積と呼ばれ、単位体積当たりの永久磁石が外部に放出できるエネルギーの最大値を示している。1917年に東北大学の本多光太郎により開発されたKS鋼を皮切りに、永久磁石の研究が活発になされるようになった。現在、佐川真人らによって開発されたNd-Fe-B系磁石は、最も高い $(BH)_{max}$ を有している。Nd-Fe-B系磁石は、その高い $(BH)_{max}$ から、HDD等に代表される情報・通信機器、家電、駆動用モーター・発電機など、モーターの高効率・小型化が要求される様々な場面で用いられており、今後の省資源・省エネルギー化による、持続可能な社会（スマート社会）を実現する上で、重要な役割を担うと期待されている。本稿では、このNd-Fe-B系磁石に注目し、Nd-Fe-B系磁石の種類と要求特性について述べた後に、そ

の要求を満たすために工業的に添加される各元素の役割および、それらの最近の動向について述べる。

◇ Nd-Fe-B系磁石の種類

Nd-Fe-B系磁石は、主に粉末冶金法で作製される『焼結磁石』と、熱間塑性変形による結晶粒配向を利用して作製される『熱間加工磁石』、磁石粉末を樹脂などのバインダーで固化成形することで作製される『ボンド磁石』に大別される。『ボンド磁石』はさらに、『等方性』と『異方性』の2種類に分類される。等方性ボンド磁石は、液体急冷法により作製された、結晶方位がランダムに配向した等方性磁石粉末が用いられている。一方、異方性ボンド磁石は、結晶方位が一方向に揃った異方性磁石粉末が用いられており、そのため、 $(BH)_{max}$ は等方性ボンド磁石よりも高い。この異方性磁石粉末は、主にNd-Fe-Bと水素との反応を利用したHDDR法²⁾により作製される。

焼結磁石は、最も高い $(BH)_{max}$ を有することから、モーターの小型化が必要な場面での用途に適している。また、熱間加工磁石は、焼結磁石よりも僅かに $(BH)_{max}$ が劣るが、結晶粒子径が微細なため優れた温度特性を有しており、駆動用主機モーターに採用されるなど、最近注目を集めている。しかしながら、これらの磁石は、目的とする磁石形状を得るために機械加工が必要であり、また、その磁石形状も、板状や瓦状、リング形状などの単純形状に限られてしまう。一方、ボンド磁石は、焼結磁石や熱間加工磁石に比べて $(BH)_{max}$ は劣るものの、機械加工が不要であり、さらに、複雑形状やコア材への一体成型が可能となるため、モーターを設計する際の磁石形状の幅が広がるという利点がある。また、ボンド磁石は高い電気抵抗により渦電流損失が小さく、モーターの更なる小型化を行うための高速回転化が可能となるため、今後のスマート社会に要求される省資源化を実現する上で、優れた材料になり得ると期待されている。

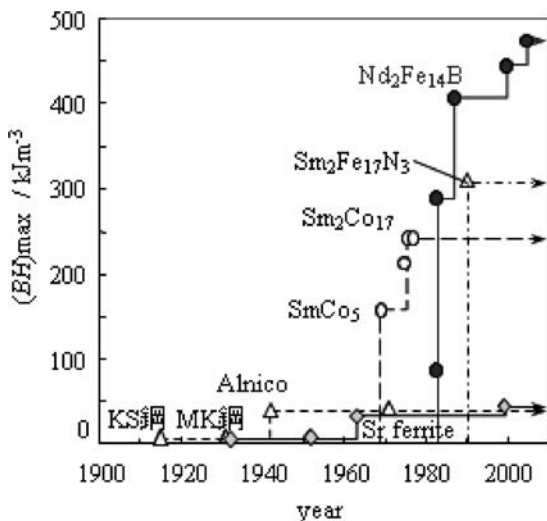


図 1 主な永久磁石の $(BH)_{max}$ の推移¹⁾

◇ Nd-Fe-B系磁石の要求特性

Nd-Fe-B系磁石は、その用途から、180–200℃の高温環境下で用いられる場合が多い。そのような環境下では、高い $(BH)_{\max}$ に加えて、 $1,600\text{kAm}^{-1}$ 以上の高い H_{cj} を有していることが求められる。ここで、 H_{cj} は保磁力と呼ばれ、永久磁石の磁化方向に対して、逆方向に磁場 H を印加した際に、磁化が反転して磁気分極 J の値が丁度 0 になるときの磁場 H の値を指す。 H_{cj} は永久磁石の耐熱性の指標とされており、 H_{cj} が高いほど高温での使用が可能となる。

Nd-Fe-B系磁石では、これらの要求を満足するために、Tb、Dy、Al、Cu、Ga、Coといった元素が添加されている。

◇ Nd-Fe-B系磁石の高 H_{cj} 化の指針

図 2 に、代表的な Nd-Fe-B 系磁石の組織の模式図を示す。Nd-Fe-B 系磁石の組成は、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物の化学量論組成よりも Nd に富んでおり、その組織は、主相である $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相と、それを囲むように粒界に存在している Nd-rich 相からなる。

Nd-Fe-B 系磁石では、主相表面に存在している欠陥や凹凸および、隣接した主相間の磁気的な相互作用によって容易に磁化が反転し、それによって H_{cj} が低下すると言われている。そこで、 H_{cj} の低下を防止する上で重要な役割を担っているのが、粒界相として存在している Nd-rich 相である。Nd-rich 相が主相の周囲を覆うことで、主相表面の欠陥や凹凸が減少し、さらに、隣接した主相間の磁気的な相互作用が遮断されることによって、磁化

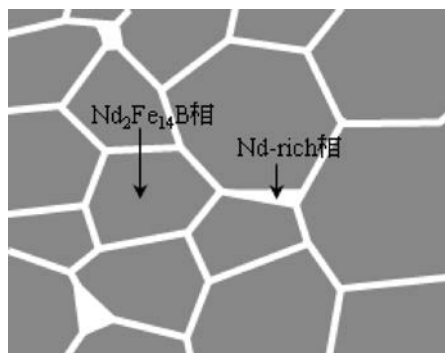


図 2 代表的な Nd-Fe-B 系磁石の組織の模式図

反転が抑制されると考えられている。また、高い H_{cj} を得るためには、主相の H_A を高くすることが重要である。ここで、 H_A は異方性磁場と呼ばれる H_{cj} の理論値であり、主相の Nd を別の希土類元素に置換することで高めることができる。その他に、主相の結晶粒子径を微細化することも重要であるが、これについては本稿では割愛する。

◇ Nd-Fe-B系磁石における各合金元素の役割

以下に、Nd-Fe-B 系磁石の高 H_{cj} 化等の用途にて、工業的に添加される元素の役割について述べていく。

1. Tb、Dy の役割

表 1 に $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ($\text{R} = \text{Nd, Tb, Dy}$) 化合物の磁気的な物性値を示す¹⁾。ここで、 J_s は飽和磁気分極であり、 J_s はその化合物が有することのできる最大の磁気分極 J である。Tb や Dy を微量添加することで、これらの元素は主相の Nd と置換され、それによって主相の H_A を高めることができる。添加量は要求される H_{cj} の値に依って異なるが、一般的には 4–8wt.% 程度である。後述の Al、Cu、Ga の微量添加と組み合わせることによって、 H_{cj} は $1,600–2,400\text{kAm}^{-1}$ 程度まで向上する。しかしながら、これらの元素は Nd に比べて非常に高価であり、また、産出のほとんどが中国に限定されていること、さらには、添加するほど J_s を低下させてしまうことから、添加量をできるかぎり少なくする工夫が必要となる。近年では、Tb や Dy を原料の製造時ではなく、磁石作製後に主相表面近傍にこれらの元素を濃化させる粒界拡散処理によって、従来よりも半分程度の添加量で、同程度の H_{cj} を得ることができる技術が開発され、実用化されている³⁾。

2. Al、Cu、Ga の役割

これらの元素は、微量添加によって Nd-rich 相の融点を下げ、さらに、Nd-rich 相の主相との濡れ性を向上させる効果があると言われている。これに

表 1 $\text{R}_2\text{TM}_{14}\text{B}$ 系化合物の磁気的な物性値¹⁾

化合物	J_s (T)	H_A (MA/m)
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	1.61	5.3
$\text{Tb}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	0.70	17.5
$\text{Dy}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	0.87	11.9

よって、粒界に均一にNd-rich相を浸透させることが可能となる。例えば、Nd-rich相がNd相だと仮定した場合のNd-rich相の融点は1021℃であるが、Nd-Al系、Nd-Cu系、Nd-Ga系の2元系合金の共晶温度は、共晶組成Nd₈₆Al₁₄、Nd₇₀Cu₃₀、Nd₈₀Ga₂₀においてそれぞれ636℃、651℃、520℃であり、いずれの元素を添加しても、Nd-rich相の融点を大きく下げることができる。これらの元素が0.1–0.5wt.%程度添加されると、 H_c は、添加前の800kAm⁻¹から、1,000–1,200kAm⁻¹程度まで向上する。最近、愛知製鋼株式会社では、CuとAlを複合的に粒界拡散処理することで、従来必要なTbやDyを使用せずに1,600kAm⁻¹程度の H_c 有する異方性ボンド磁石用のNd-Fe-B系磁石粉末の量産化に成功しており、耐熱性Dyフリーマグファイン[®]磁粉として商品化している⁴⁾。

3. Coの役割

Coは主相のFeと置換し、 T_c を向上させる効果があることが知られている。ここで、 T_c はキュリー温度のことを指す。一般に希土類磁石の磁気分極 J は温度の上昇と共に低下し、 T_c を超えると常磁性を示す。 T_c が低い場合は、高温で使用することができず磁石の用途が限られてしまうため、 T_c は高ければ高いほど望ましい。Coを添加しない場合のNd-Fe-B系磁石の T_c は310℃程度であるが、Coを添加することで、添加量1wt.%あたりおおよそ10℃

の T_c の向上が見込める。また、 T_c 以外に、CoはNd-Fe-B系磁石の耐食性を向上させる効果があることも知られている。このような理由から、CoはNd-Fe-B系磁石の T_c と耐食性を向上させる上で、非常に重要な位置を占めている。しかしながら、CoはFeに比べて高価であり、また、産出のほとんどが紛争地域であるコンゴに限定されることから、その添加量は一般的には2–5wt.%程度と少量であることが多い。

むすび

Nd-Fe-B系磁石は、今後の持続可能なスマート社会を実現する上で、非常に重要な役割を担っていると考えられる。そのためには、省資源化のみでなく、リサイクル等による資源の有効利用が必要になる。今後、それらを含めた更なる技術の発展がなされることが期待される。

参考文献

- 1) 佐川真人：佐川真人編、永久磁石—材料科学と応用—、アグネ技術センター、(2007)
- 2) T. Takeshita and R. Nakayama: Proc. 10th Int'l. Workshop on R. E. Magnets & Their Applications, Kyoto, (1989)、551–557
- 3) H. Nakamura, K. Hirota, M. Shima, T. Minowa and M. Honshima: IEEE Trans. Magn., 41 (2006) 3844
- 4) 特許5472320

12. チタン合金

(株)神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 まつ くら のり かず
チタン本部 チタン商品技術室 課長 泰 倉 功 和

まえがき

チタンはどのような用途に使われているかご存じだろうか？一般に知られているのは、腕時計やゴルフクラブ、バイクマフラー等であろう。本稿ではあまり知られていないチタンの用途とそれに使われる純チタン、合金の種類についてご紹介する。

最初にチタンの種類をご紹介する。チタンは大きく分けて純チタンとチタン合金に分類される。純チタンはJISにおいて強度レベルの順に1～4種の4種類が規定されている。

チタン合金は、純チタン並みの強度で耐食性を高めた耐食合金と高強度合金があり、更に高強度合金は α 合金、 $\alpha + \beta$ 合金、 β 合金の3種類に分類される。耐食合金はJISにおいて11～23種の13種類が規定されている。

高強度合金としては、純チタンに比べて高温強度が高い α 合金(50種)、強度・延性バランスに優れた $\alpha + \beta$ 合金(60、60E、61、61F種の4種類)、冷間加工性に優れた β 合金(80種)の6種類がJISに規定されている。

◇ 工業用純チタン

工業的に作られた純チタンの純度は、せいぜい99.9%程度で、主な不純物元素としては、置換型元素のFeや浸入型元素のO、N、Cがある。図1に純チタンのビッカース硬度に及ぼす不純物量の影響を示す¹⁾。これらの不純物元素の含有量が多くなると強度が高くなる。一般的にはN、Cの含有量を低く抑えて、O、Feの含有量をコントロールすることで、1～4種の純チタンが作り分けられている²⁾。1種が低強度・高延性で、4種が高強度・低延性の材料である。このうち一般に流通しているのは1種と2種で、丸棒、板材が市中から入手可能である。1種は引張強さが300MPaレベル、2種は400MPaレベルである。プレスなどで

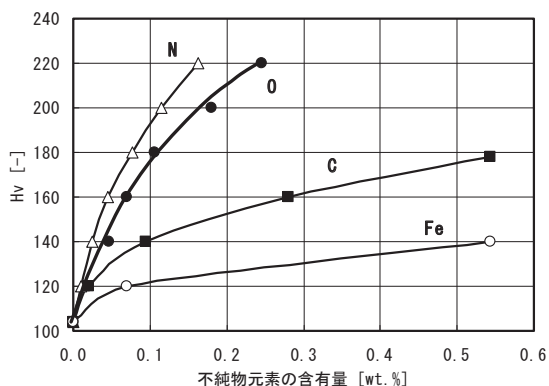


図 1 純チタンのビッカース硬度に及ぼす不純物元素の影響

厳しい張出し加工等を伴う場合は延性の高い1種が用いられる。深絞りについては1種と2種で性能に大差はない³⁾。純チタンの主な用途は耐食用途で、海水を冷媒とする熱交換器や化学プラントの配管、ソーダ電解の浴槽や電極などに使用される。またバイクマフラーや腕時計、カトラリーにも使用されている。

◇ 耐食合金

純チタンはそれ自体耐食性に優れており、これは緻密で安定な酸化被膜(不動態被膜)で表面が覆われていることによる。ステンレスの耐食性が良いのも同じ理由で、チタンの酸化被膜はステンレスに比べて更に緻密で強固なことから、チタンはステンレスよりも優れた耐食性を示す。したがって、この酸化被膜が維持される酸化性酸(硝酸など)の環境では良好な耐食性を示す。一方、沸騰した硫酸や塩酸など還元性酸中では酸化被膜が維持できないため腐食される。また高温下の塩素イオンに対しては隙間腐食がおこる⁴⁾。

チタンの耐食性向上にはPt、Pd、Ir、Rh、Ru等の貴金属系元素やMo、Ta等の添加が有効で⁵⁾、JISには11～23種の13種類の耐食合金が規定されている。代表的な耐食合金はTi-0.15%Pd(11～13

種)であるが、Pdが高価な元素であることから、比較的安価なRu、あるいはCrやNiを複合添加することでPdを減らす、あるいは添加しない耐食合金が開発されている(14、15、17~23種)^{2)、4)}。これらの合金は純チタンの項で紹介した耐食用途の中でも厳しい環境で使用される。

◇ 高強度チタン合金

低温側で稠密六方格子(hcp)の α 相、高温側で体心立方格子(bcc)の β 相が安定となる $\alpha+\beta$ の同素変態があり、添加元素によっては高温相である β 相が常温でも安定となる。これらの相の常温での存在状態によってチタン合金は、 α 単相の α 合金、 α 相と β 相の2相組織となる $\alpha+\beta$ 合金、準安定的であっても常温で β 単相となる β 合金の3種類に分類される。表1にそれぞれの代用的な実用合金を示すとともに³⁾、合金の特性の傾向を図2に示す⁶⁾。以下に各合金の添加元素の役割と材質の特徴および用途について述べる。

1. α 合金

α 合金は α 安定化元素Alの他に中性元素であるSnやZr等を含む α 単相合金である。Alは α 相に固溶して、強度を向上させており、高温強度、耐クリープ性、耐酸化性も向上させる。Al添加量に比例して強度は高くなるが、延性、加工性は劣化していき、約8%を越えるとTi₃Alの金属間化合物が形成され脆くなる。

JIS規格に規定はないが、代表的な α 合金としてはTi-5%Al-2.5%Snがあり、耐熱性や溶接性の理由から航空機のエンジンカバーなどに用いられる。また最近では室温強度が純チタン並みだが、高温(700℃付近)の強度が純チタンの2~3倍のマフラー用の α 合金が開発されている。JIS 50種(Ti-1.5%Al)はその一例である⁷⁾。また、最近では高温強度が高く、更に耐酸化性に優れたマフラー用のチタン合金(例えば、Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb)が開発されており⁸⁾、エンジン直下のエキゾーストパイプや四輪車用のマフラーに採用されている。

表 1 代表的なチタン合金とその引張性質の一例

合金の種類	組成	熱処理	引張性質		
			引張強さ [MPa]	耐力 [MPa]	伸び [%]
α 合金	Ti-5Al-2.5Sn	焼鈍	860	800	16
$\alpha+\beta$ 合金	Ti-8Al-1Mo-1V	焼鈍	1,000	950	15
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	焼鈍	980	890	15
	Ti-3Al-2.5V	焼鈍	680	590	20
	Ti-6Al-4V	焼鈍	980	920	14
		時効	1,170	1,100	10
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	時効	1,270	1,180	10	
β 合金	Ti-13V-11Cr-3Al	時効	1,270	1,230	8
	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	時効	1,440	1,370	7
	Ti-15Mo-5Zr-3Al	時効	1,470	1,450	14
	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	時効	1,230	1,110	10

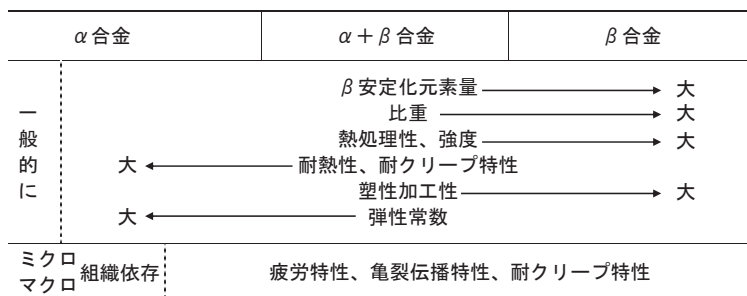


図 2 各種チタン合金の材料特性の傾向

2. $\alpha+\beta$ 合金

$\alpha+\beta$ 合金は α 安定化元素のAlや中性元素のSn、Zrとともに β 安定化元素であるV、Mo、Cr、Fe、等が添加された合金で、常温で $\alpha+\beta$ の2相組織となっている。2相組織とすることで α 合金よりも強度や塑性加工性を高めている。また $\alpha+\beta$ 合金は溶体化・時効熱処理によって1,000~1,200MPa程度の高強度を得ることができる。一般に冷間での塑性加工性は良くないが、熱間の加工性は良好である。

JIS規格ではTi-6%Al-4%V (60種、60E種)とTi-3%Al-2.5%V (61種、61F種)が規定されている²⁾。Ti-6%Al-4%Vは一般に6-4とよばれる最もポピュラーなチタン合金で、強度・延性バランスが良く、航空機などの構造材に使用されている。一般にも流通しており、市中から丸棒の入手が可能である。

$\alpha+\beta$ 合金はJISに規定されている以外にも多くの種類がある。代表的なものに航空機用のエンジン部品などに適用されている耐熱合金がある。チタン合金はNi系超合金ほどの耐熱性は得られず、使用温度の上限は600℃程度であるが、Ni系超合金よりも低比重であり、軽量化のために適用可能な温度の部位に使用されている。代表的な耐熱合金(使用最高温度)としては、Ti-8%Al-1%Mo-1%V (400℃)、Ti-6%Al-2%Sn-4%Zr-6%Mo (380℃)、Ti-6%Al-2%Sn-4%Zr-2%Mo-0.1%Si (520℃)などがある⁹⁾。これらは高温強度向上のためAlが入られ、 α 相と β 相のどちらも固溶強化するSnやZrが添加されている。また固溶Siは高温での強度向上に有効で¹⁰⁾、Ti-Si複化合物として析出させた場合も耐クリープ特性が改善することから¹¹⁾、少量のSiが添加される場合がある。

近年、Cを添加により常温付近ではTi-6-4並みの高強度を有し、700℃超の高温では純チタン並みの変形抵抗で鍛造し易いというチタン合金が開発されており¹²⁾、普及が期待される。

3. β 合金

β 合金は常温でbcc構造を有し、 $\alpha+\beta$ 合金に比べて冷間加工性が優れた合金である。また、溶体化状態で800~1,100MPa、溶体化・時効熱処理で1,200~1,400MPaの高強度が得られる。一方、 β 安定化元素を10~20%程度添加せねばならないこと

から、比重が若干大きくなることや原料コストが高くなる欠点がある。また、ヤング率が α 合金、 $\alpha+\beta$ 合金よりも低い(80~100GPa)という特徴がある。 β 安定化元素としてはFe、Ni、Cr、Mo、Vなどがあるが¹³⁾、延性など他の特性への影響、製造技術やコストなどの観点から主にV、Moが用いられる。 β 合金はゴルフクラブのフェース、眼鏡フレームなどに用いられるが、冷間鍛造が可能なことから、高強度ボルト、ネジ等への用途拡大が期待される。

β 合金の中で、日本で最も汎用的に用いられる合金はTi-15%V-3%Cr-3%Sn-3%Alで、他に代表的な β 合金としてはTi-15%Mo-5%Zr-3%Al、JIS 80種(Ti-22%V-4%Al)^{2)、3)}などがある。

むすび

以上のようにチタン、チタン合金には様々な種類があるが、用途としては、合金は航空機分野、純チタンは高耐食性を生かした電力、化学工業向けが中心となっている。最近では燃料電池のセパレータにも使用され始めており、今後も新たな用途が開発され更にチタンが普及していくことを期待する。

参考文献

- 1) W. L. Finlay and J. A. Synder: Trans. AIME, Vol. 188, p. 280
- 2) JIS H 4600 (2012)
- 3) チタンの加工技術-チタニウム協会編-、日刊工業新聞社(1992)
- 4) 屋敷ら：チタン、45 (1997)、p. 196
- 5) M. Stern and C. R. Bishop: Transaction of the ASM, 52 (1960)、p. 239
- 6) 木村：鉄と鋼、72 (1986)、p. 113
- 7) 森倉：R&D 神戸製鋼技報、Vol. 54, No. 3 (2004)、p. 38
- 8) T. Yashiki: Ti-2007 Science and Technology (2007)、p. 1387
- 9) 西村：日本のチタンの研究開発はどこまで進んでいるか(1993)、p. 159
- 10) Aerospace Structural Metals Handbook、4 (1978)、Code 3718
- 11) W. Cho et al: 6th World Conference on Titanium (1988)、p. 187
- 12) S. Kojima: Ti-2003 Science and Technology (2003)、p. 3089
- 13) 非鉄材料-講座・現代の金属学材料編第5巻-：日本金属学会(1987) p. 118

業界のうごき

岡谷鋼機、創業350周年で各種計画 中川倉庫新築や記念コンサート

岡谷鋼機は、今年、創業350周年の節目を迎えることを記念し、中川倉庫の建て替えや小学生のサッカー大会への支援、SDGsへの取り組み強化など10項目の各種取り組みを実施する。

愛知県サッカー協会が主催する小学生男女サッカーの3大会の冠スポンサーとなる。スポーツ振興により地域の活性化を目指す。また24年ぶりに名古屋で開催される日本医学会総会のイベントの一つ「医学史展」を単独協賛する。

設備投資では中川倉庫の老朽化に伴う新築工事に着手する。同倉庫は、名古屋市と名古屋港管理組合が進める「中川運河再生計画」で「にぎわいゾーン」内に位置するため、昭和初期竣工時の外観を再現した形とし、内装は一新する。今年12月に竣工予定。

SDGsへの全社での取り組みも強化。災害時の電力供給等で近隣地域に貢献するため、本社ビル敷地内にハイブリッド街路灯を設置するなど活動も展開する。(4月3日)

クマガイ特殊鋼、プラズマ切断機増設 厚板溶断能力2割増

クマガイ特殊鋼は、受注拡大に合わせて厚板溶断機能を強化する。本社工場に最新鋭のプラズマ切断機を導入、溶断能力を20%程度引き上げる。能力増強を通じてニーズ対応力に磨きをかけ、営業活動をいっそう強化してさらなる加工数量アップを狙う。

同社はレーザー加工機2台(ファイバー1台、CO2 1台)、ガス溶断機5台、プラズマ切断機1台を有し、産業機械ユーザー向けを中心とする厚板溶断を手掛けている。2月にはプラズマ機のリプレースを実施した。

近年フル稼働が継続するなか、輸送機器関連の大口の新規品番を受注し、既存設備では能力が不足することから溶断機の増設を決めた。

今月据え付け作業が完了した新設備は、コマツ産機製のプラズマ切断機「ツイスター」。有効切断範囲は3.1×8メートル、36ミリまでの板厚に対応するが、6～19ミリの母材を中心に切断、開先加工する。(5月30日)

三和特殊鋼が第4次中期経営計画 年商50億円へ基盤づくり

三和特殊鋼は、今年度(19年12月期)をスタートとする第4次3カ年中期経営計画をまとめた。「一次問屋として売上高50億円が目標。その基盤づくりの3カ年」(勝野茂社長)として、最終年度の21年12月期に売上高36億円、経常利益1億2,600万円を目指す。

中計のテーマは『ものづくり貢献企業の新たな挑戦』としている。営業面では、第1～3次の9年間で300社あった新規販売先を更に開拓する。主力の工具鋼の販売を最終年度に302トン(18年12月期235トン)まで増やす。加工面では、NC旋盤を増設し機械加工に注力してきたが、さらに大型旋盤の導入やマシニングセンター、BTAなど新たな加工分野への進出も検討する。

「流通は人が命」(同)とし、人材育成に力を入れる。同時に4月から土曜の固定休を月2日にするなど休日の増加や新賃金制度の導入で、社員の処遇を改善していく。(4月5日)

大同DMソリューション 工具鋼加工事業、国内外で強化

大同DMソリューションは19年度も国内外で工具鋼の加工事業を強化する。国内では収益性向上を狙いに二次加工品や熱処理加工品、表面処理品の拡販に注力し、三次元加工品

や高性能表面処理品の開発にも注力する。新事業開発では4月に大阪に先進加工センターを開設し、大型3Dプリンタや5軸加工機を導入しており、今後開発を進める。

海外では新しく立ち上げた拠点の収益安定化を重点課題に位置付ける。インド、メキシコ、フィリピン、インドネシアの4拠点が対象になる。インドネシアでは昨年末に金型部品加工を行う現地法人「ダイドーディーエムエス(インドネシア)」を開設し、4月に取引先を招き開所式典を行っている。

その他では18年4月にインド現法がバンガロールに工具鋼の切断・在庫拠点を開設したほか、ベトナム現法、マレーシア現法で新工場建設を検討している。(5月28日)

大洋商事、フィリピンで産機部品加工 新会社設立、20年初に稼働

大洋商事はフィリピンに産機部品の加工・販売を行う新会社を設立した。工場を新設し、2軸CNC旋盤5台や切断機などを導入し、20年初に稼働を開始する。初期の総投資額は約7億円。海外子会社は中国2・韓国1・タイ2・米国1に次ぎ7社目。

海外子会社の展開は04年以降で、中国子会社で特殊鋼棒鋼切断加工、タイ合弁で熱間鍛造を手掛け、新たにフィリピンで機械加工を手掛けるなど、生産・加工分野も広げている。

新会社の資本金は2億5,000万フィリピンペソ(約5億円)で、社長は藤原邦洋取締役大阪支店長が兼任。約15人体制で操業を開始する予定。

国内の事業拠点でも老朽更新や環境改善を進める。昨年、辰巳倉庫の環境改善などで3億円を投じたのに続き、今年5月に福町第一倉庫で丸鋸盤1基を超硬高速機種に更新、8月末に新潟営業所の新事務所棟を完成する。(5月8日)

業界のうごき

ナス物産、中部でレーザー切断機更新 安全対策で事務所建て替えも

ナス物産は、中部加工センター（愛知県小牧市）でCO2レーザー切断機を更新するとともに、豪雨対策と老朽化更新を兼ねて事務所棟を建て替える。新レーザー切断機は8月稼働予定で、新事務所は19年度内の完成を目指す。総投資額は約3億円の見込み。

中部加工センターのレーザー切断機は2基体制で、老朽化の進んだ1号機（4KW機）を三菱電機製の4.5KW機に更新する。ファイバーレーザーの導入も検討したが、切断面を重視してCO2レーザー切断機に更新する。新たに10段ストッカも付帯させる。2号機（6KW機）とは板厚などに応じて使い分ける。

工場事務所棟の建て替えは、近年多発するゲリラ豪雨に備えるのも狙い。工場棟は止水板設置などで対策済みだが、事務所棟の基礎部分をかさ上げし、かつ2階建てとすることで、大きな豪雨に見舞われても安定的に事業継続できるようにする。（5月13日）

日金スチール、ROS 2%台を維持 19年3月期、経常減益3.8億円

日金スチールの19年3月期単独決算は売上高178億2,300万円で前期比5.7%減、経常利益3億8,800万円で同24.1%減、純利益2億2,200万円で同32.7%減の減収減益だが、経常利益、純利益は過去3番目の高水準。ROS（売上高経常利益率）は2.2%と現行中期計画目標（2%）をクリアした。

経常・純利益は17年度が最高で、ニッケルバブル期の07年度が2番目。18年度はこれに次ぐ水準。有利子負債は過去最低水準に圧縮し、D/Eレシオは1.08で過去最高だった。

現行中計では働き方改革にも注力しており、3月末にリスク分担型企業年金を導入し、確定給付型企業年

金から移行した。これに伴い18年度は特別損失を計上した。

有休消化率は16年度48%から17年度54%、18年度63%と上昇しており、100%を目標に掲げる。完全無災害日数は3月末時点で1,643日を達成し、2,000日達成を当面の目標に据える。（5月9日）

ハヤカワカンパニー、タイで発足式典 熱間鍛造品合弁が本稼働

ハヤカワカンパニーのタイ熱間鍛造品合弁「Ryoei Metals (Thailand)」(RMT)が本稼働を開始した。22日に現地で発足記念式典を開催し、素材メーカーや商社、タイ版社「サイアムハヤカワ」など約140人が出席した。

RMTは18年、東南アジア周辺における農機具向けベベルギアなど熱間鍛造品需要の高まりに対応し、子会社の菱栄金属75%、取引先の現地資本SAMCO25%出資で設立したハヤカワグループ初の海外生産拠点。バンコク郊外のシンサコーン工場団地で昨年末に部分稼働を始め、すでに日系農機具メーカーなどから20品番以上の受注を獲得している。

早川元章社長は「菱栄金属と同じ生産技術、生産・品質管理で熱間鍛造製品を生産し、タイなど世界各地の需要家へ製品供給する。設立後1年で人材、設備、体制を整え、4月の本稼働にこぎ着けられたのは、ひとえにステークホルダーの支えのおかげだ」と述べた。（5月23日）

リントツ、半田のスリット加工を省力化 自動刃組みロボットを1基増設

リントツは、半田ステンレス加工センターのスリッターラインに自動刃組みロボット1基を増設し、今月から本稼働をスタートした。オペレーターの手離れを通じて加工業務全体の作業性を高め、加工品の均質化に努めて、将来的に数量拡大を目

指す。投資総額は付帯設備を含めて約3億円。

スリッターラインは5基体制。自動車専用の1号機は、近年の旺盛な需要に伴い月3,500トンと高稼働が継続。残業で対応してきたが、繁忙感が強まる中で工場全体における作業者の最適配置と負担軽減を狙い、省力化投資を行った。

1時間で最大4回刃を交換することができ、2本のアームで次に使用する刃の組み立て、使用済みのものの解体を同時に行えるため従来以上に稼働率を高められる。またロボットによる交換で作業を均質化し、品質のばらつきを低減する効果も期待できる。（5月16日）

秋山精鋼、ベトナムで伸線ライン新設 建屋拡張、20年3月導入へ

秋山精鋼はベトナムの製造拠点「AKIYAMA-SCベトナム」（以下ASV）を増築して新たにコイルtoコイルの伸線ラインを導入する。年内に新建屋を建築し、20年3月をめどに設備を導入する計画。

ASVはコイルtoバー（0型、1型）2基体制で、OA機器部品や自動車関連部品、HDDやモーター部品向けのステンレスや快削鋼を中心に月約500トンを生産する。敷地は1万2,000平方メートル。今回の第2期フェーズで2,600平方メートルを増築し、建屋面積は約7,000平方メートルへ拡張する。

ベトナム国内でハイエンドなステンレスワイヤー製品を製造するコイルtoコイルの伸線ラインは同社が初めてとみられる。バー製品に比べて機械調整時のロスが少なく、生産歩留まりに優位性を生む。また需要先での端材も少なく、取引先へのVA提案に適する。主に小型モーター部品や自動車二輪部品、自動車電装部品向けに拡販する方針。（4月22日）

業界のうごき

高炉4社定年延長、21年度から65歳に 技術・技能伝承に不可欠

日本製鉄、JFEスチール、神戸製鋼所、日鉄日新製鋼の高炉メーカー4社は21年度から、正社員の定年を60歳から65歳に延長する。処遇制度など制度の詳細はこれから詰めるが、入社から65歳までの一貫した人事制度とする方針。多様な人材の活躍（ダイバーシティ）を進める観点から、60歳以降のベテラン社員の能力を引き出し、ものづくり力の強化や企業価値の向上につなげる。他の鉄鋼メーカー・関連企業にも同様の動きが広がりそうだ。

21年4月以降に60歳に到達する人から適用する。鉄鋼大手が定年を延長するのは約40年ぶり。55歳から60歳に延長した前回は1981年度から約10年かけて段階的に引き上げた。今回は一気に65歳まで延長する。

基幹労連は4日、記者会見を行い、「会社側が定年延長の必要性について理解を示したものと重く受け止める」とし、連続した処遇制度の構築についても経営側の決断を高く評価した。

(4月5日)

日本高周波鋼業、分塊圧延ライン更新 生産性向上、コスト削減

日本高周波鋼業は、富山製造所（富山県射水市）で分塊圧延ラインの更新工事を完了し、10日に竣工式を開催した。3月から試験圧延を始め、品質確認を進めており、5月から量産を開始する計画だ。ラインの更新に併せて加熱炉1基を導入し、冷却床も更新した。総工事費は約30億円。

約50年間稼働した既存機の老朽更新により、パワーアップによる生産性向上や多機能化などによるコストダウンを図る。コスト削減効果は年間数億円、月産1,600トンだった生産量は5割増を見込んでいる。

新鋭機はシフティング・リバース方式を採用した二重式圧延機。圧下荷重やモーター出力を高めて、従来の角ビレットだけでなく丸ビレットも生産でき、平板は最終製品まで圧延できる多機能化を実現。小ロット多鋼種のニーズに応える生産体制を構築した。

(4月12日)

日本製鉄、八幡の最新鋭連続铸造機 5月下旬に本稼働、高度ITを駆使

日本製鉄が八幡製鉄所で建設していた最新鋭の連続铸造機が5月下旬に稼働する見通しになった。特殊鋼棒線などの半製品を製造する設備で、生産性向上のほか、高度ITを駆使した操業監視や点検作業の省力化が可能になる。稼働後はユーザーからのアプルーバル取得を進める計画で、約2年後に控える同所の上工程集約に向けた準備が本格化する。

戸畑地区に建設した「第3連続铸造設備」は現在、試運転を行っており来月24日に本稼働する見通し。戸畑の鉄道レールや小倉地区の特殊鋼棒線の半製品（ブルーム）を製造する。

八幡製鉄所では20年度末に上工程集約を実施することが決まっている。この一環で戸畑、小倉両地区の既存連続铸造機3基を休止する。生産能力は年約170万トンと小倉などにある既存連続铸造機と比べ大型化した。ブルームを集中生産し、コスト競争力を高める。投資額は本体と付帯設備で約380億円。

(4月22日)

日立金属、中期経営計画を策定 21年度営業利益率8.3%目指す

日立金属は21年度を最終年度とする3カ年中期経営計画を策定した。「オンリーワン・ナンバーワン事業・製品の拡充」を掲げ、21年度に売上高9,600億円、調整後営業利益800億円、純利益555億円を目指す。今中計から経営指標にROIC（投下資本

利益率）を加え、前中計投資の刈り取り完遂も目指す。設備投資は厳選案件に絞り、3年間で1,860億円に抑制する。うち60億円は本質安全化に充てる。

新中計では「持続可能な社会を支える高機能材料会社」（人をつくり、イノベーションをつくり、未来をつくる）をビジョンに掲げる。21年度に調整後営業利益率で8.3%（18年度5.0%）を目指す。

重点施策は「組織改革によるシナジー最大化」「高成長・高収益分野へのリソース集中」「大型戦略投資のフル戦力化」「フロント強化、顧客との協創」「構造改革、経営基盤強化」。

(4月26日)

広島メタル&マシナリー 造機事業を拡大、大型加工機導入

広島メタル&マシナリーは4月、広島製作所（広島県呉市）製缶工場内に大型門型5面加工機を導入、本稼働を開始した。メタルテックカンパニー・造機部門の大型加工品と高付加価値仕上げ品への対応力を強化する。

造機部門は自動車工場の鍛圧プレス向けフレームや圧延ミルのハウジングなどを製作。製缶から機械加工、塗装、組み立てまでの一貫製造を強みとする。

近年は技能工の高齢化に伴い減衰していた機械加工人員体制の立て直しに取り組んできた。この2年間で製缶工場の大幅拡大や溶接技能工の増員を図り、大型製缶供給体制を整えた。今回、造機事業の基盤となる機械加工能力拡充を目的に5面加工機を導入。天井クレーンも新設し、最大単重を30トンから40トンに引き上げた。今後は大型精密機械の組み立て対応ができる体制の確立を目指す。総投資額は約3億5千万円。

(4月26日)

文責：(株)鉄鋼新聞社

特殊鋼統計資料

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

鋼種別

(単位：t)

年月	構造用鋼				特殊用途鋼						計	合計
	工具鋼	機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力	その他		
'17 暦年	262,744	5,014,549	3,947,953	8,962,502	438,097	1,011,176	2,850,849	629,459	5,562,736	609,458	11,101,775	20,327,021
'18 暦年	265,850	5,232,401	4,055,787	9,288,188	428,588	1,029,788	2,954,588	651,312	5,616,124	552,701	11,233,101	20,787,139
'17 年度	268,659	5,058,907	4,010,098	9,069,005	434,231	1,025,656	2,898,689	637,160	5,672,002	575,660	11,243,398	20,581,062
'18 年度	254,113	5,231,860	4,054,690	9,286,550	430,796	1,032,732	2,881,369	648,216	5,498,472	564,665	11,056,250	20,596,913
'18. 4-6月	69,786	1,325,708	1,025,402	2,351,110	111,727	259,731	736,597	168,272	1,459,353	139,793	2,875,473	5,296,369
7-9月	65,487	1,278,114	980,947	2,259,061	102,331	245,192	739,295	157,371	1,303,340	141,240	2,688,769	5,013,317
10-12月	59,707	1,342,687	1,033,274	2,375,961	107,718	270,652	713,253	166,547	1,388,079	140,477	2,786,726	5,222,394
'19. 1-3月	59,133	1,285,351	1,015,067	2,300,418	109,020	257,157	692,224	156,026	1,347,700	143,155	2,705,282	5,064,833
'18年 3月	23,196	456,026	356,130	812,156	39,962	89,896	263,896	57,929	509,203	46,833	1,007,719	1,843,071
4月	24,591	431,808	346,133	777,941	35,531	85,313	242,146	52,231	470,100	51,271	936,592	1,739,124
5月	21,223	451,591	349,683	801,274	37,301	90,588	245,014	58,280	509,651	40,077	980,911	1,803,408
6月	23,972	442,309	329,586	771,895	38,895	83,830	249,437	57,761	479,602	48,445	957,970	1,753,837
7月	20,555	431,726	349,361	781,087	37,727	81,011	242,273	59,279	396,927	49,094	866,311	1,667,953
8月	20,048	422,671	310,377	733,048	33,536	79,855	246,448	47,506	474,025	50,823	932,193	1,685,289
9月	24,884	423,717	321,209	744,926	31,068	84,326	250,574	50,586	432,388	41,323	890,265	1,660,075
10月	19,299	450,796	355,754	806,550	36,898	91,578	238,598	52,734	492,624	53,380	965,812	1,791,661
11月	20,280	442,033	339,996	782,029	34,331	85,646	232,145	58,757	458,521	43,379	912,779	1,715,088
12月	20,128	449,858	337,524	787,382	36,489	93,428	242,510	55,056	436,934	43,718	908,135	1,715,645
'19年 1月	20,434	434,551	329,353	763,904	37,528	79,435	226,667	54,103	456,023	50,861	904,617	1,688,955
2月	19,080	405,541	331,266	736,807	34,145	83,307	223,912	50,926	402,421	41,825	836,536	1,592,423
3月	19,619	445,259	354,448	799,707	37,347	94,415	241,645	50,997	489,256	50,469	964,129	1,783,455
4月	21,290	413,374	346,443	759,817	34,096	85,831	211,052	52,162	410,739	44,250	838,130	1,619,237
前月比	108.5	92.8	97.7	95.0	91.3	90.9	87.3	102.3	84.0	87.7	86.9	90.8
前年同月比	86.6	95.7	100.1	97.7	96.0	100.6	87.2	99.9	87.4	86.3	89.5	93.1

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
'17 暦年	345,018	6,272,447	1,112,835	4,249,655	1,716,315	6,648,155	20,344,425
'18 暦年	374,683	6,452,802	1,188,873	4,261,952	1,647,479	6,868,340	20,794,129
'17 年度	347,415	6,340,621	1,168,193	4,199,478	1,780,457	6,761,726	20,597,890
'18 年度	383,020	6,439,522	1,203,698	4,292,348	1,495,812	6,788,499	20,602,899
'18. 4-6月	103,104	1,648,385	299,488	1,073,417	445,767	1,728,159	5,298,320
7-9月	89,994	1,558,119	287,903	1,054,854	351,482	1,672,547	5,014,899
10-12月	93,323	1,644,444	299,017	1,093,111	375,559	1,718,060	5,223,514
'19. 1-3月	96,599	1,588,574	317,290	1,070,966	323,004	1,669,733	5,066,166
'18年 3月	25,240	575,761	102,287	369,666	164,399	606,113	1,843,466
4月	41,111	525,948	113,196	359,675	154,446	545,719	1,740,095
5月	23,311	562,037	101,462	361,223	154,804	601,090	1,803,927
6月	38,682	560,400	84,830	352,519	136,517	581,350	1,754,298
7月	29,835	548,334	93,366	365,812	105,218	526,157	1,668,722
8月	26,322	483,072	105,550	352,595	127,862	590,339	1,685,740
9月	33,837	526,713	88,987	336,447	118,402	556,051	1,660,437
10月	30,886	551,807	103,018	368,159	145,165	592,787	1,791,822
11月	31,573	554,793	93,687	357,968	114,486	563,321	1,715,828
12月	30,864	537,844	102,312	366,984	115,908	561,952	1,715,864
'19年 1月	25,837	512,321	103,122	364,796	105,736	577,550	1,689,362
2月	39,550	514,051	99,936	340,701	98,157	500,768	1,593,163
3月	31,212	562,202	114,232	365,469	119,111	591,415	1,783,641
4月	20,116	529,582	107,602	333,637	104,685	524,182	1,619,804
前月比	64.4	94.2	94.2	91.3	87.9	88.6	90.8
前年同月比	48.9	100.7	95.1	92.8	67.8	96.1	93.1

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		
'17 暦年	328,624	3,662,276	3,174,867	6,837,143	209,980	558,894	2,401,141	182,809	98,145	56,347	3,507,316	10,673,083
'18 暦年	330,317	3,525,290	2,049,316	5,574,606	122,660	581,255	1,703,148	181,436	95,234	49,039	2,732,772	8,637,695
'17 年度	328,965	3,482,828	2,582,257	6,065,085	169,371	561,237	2,045,095	180,396	100,874	56,424	3,113,397	9,507,447
'18 年度	322,765	3,543,660	2,028,274	5,571,934	119,549	546,004	1,681,386	179,074	95,026	47,294	2,668,333	8,563,032
'18年 8月	25,643	290,235	160,495	450,730	9,324	46,112	137,312	13,274	6,616	3,912	216,550	692,923
9月	27,216	309,598	163,885	473,483	10,004	56,424	134,952	15,800	7,220	4,068	228,468	729,167
10月	29,600	316,767	185,519	502,286	11,558	52,812	157,772	15,755	9,186	4,474	251,557	783,443
11月	27,902	317,700	179,189	496,889	11,020	47,505	147,140	15,125	8,386	3,840	233,016	757,807
12月	25,884	277,922	160,372	438,294	9,741	36,448	139,276	12,978	7,634	3,727	209,804	673,982
'19年 1月	24,877	284,735	157,391	442,126	14,858	35,139	136,927	12,046	7,415	3,304	209,689	676,692
2月	25,815	277,669	161,764	439,433	5,436	36,083	139,797	13,667	7,824	3,714	206,521	671,769
3月	23,332	278,236	148,944	427,180	4,526	33,997	128,306	15,513	8,456	3,492	194,290	644,802
4月	22,382	272,499	133,232	405,731	4,371	32,005	123,147	11,898	8,116	3,817	183,354	611,467
前月比	95.9	97.9	89.5	95.0	96.6	94.1	96.0	76.7	96.0	109.3	94.4	94.8
前年同月比	83.2	95.2	80.5	89.8	44.5	67.8	89.1	81.5	90.6	96.9	82.3	87.2

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		
'17 暦年	7,366	231,844	127,052	358,896	33,141	32,395	122,991	26,401	188,923	21,699	425,550	791,812
'18 暦年	9,022	265,513	163,666	429,179	30,989	37,438	132,754	28,173	163,433	19,784	412,571	850,772
'17 年度	6,776	223,466	121,672	345,138	32,300	31,384	119,951	28,451	175,114	21,424	408,624	760,538
'18 年度	8,276	237,787	154,530	392,317	29,638	33,728	122,372	25,391	162,107	28,897	402,133	802,726
'18年 8月	7,012	259,265	167,599	426,864	29,224	31,147	137,406	30,284	208,069	31,690	467,820	901,696
9月	10,598	273,664	165,889	439,553	29,226	35,289	143,651	31,958	212,036	29,537	481,697	931,848
10月	8,063	253,996	156,714	410,710	29,757	31,375	135,129	31,878	211,544	22,764	462,447	881,220
11月	9,540	241,817	151,622	393,439	29,236	31,470	130,083	29,512	176,395	20,515	417,211	820,190
12月	9,022	265,513	163,666	429,179	30,989	37,438	132,754	28,173	163,433	19,784	412,571	850,772
'19年 1月	11,565	269,577	157,469	427,046	32,757	33,824	142,362	32,024	159,994	28,013	428,974	867,585
2月	9,451	251,098	155,154	406,252	32,019	31,187	138,320	27,521	156,811	24,435	410,293	825,996
3月	8,276	237,787	154,530	392,317	29,638	33,728	122,372	25,391	162,107	28,897	402,133	802,726
4月	9,881	245,655	162,208	407,863	27,712	33,244	132,935	29,771	179,631	26,382	429,675	847,419
前月比	119.4	103.3	105.0	104.0	93.5	98.6	108.6	117.3	110.8	91.3	106.8	105.6
前年同月比	132.1	106.0	102.3	104.5	100.1	99.0	100.5	100.3	94.2	108.3	98.0	101.3

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		
'17 暦年	55,932	183,466	146,595	330,061	12,917	53,973	144,088	9,965	10,293	2,213	233,449	619,442
'18 暦年	65,783	207,930	157,295	365,225	13,020	47,754	170,896	9,657	10,264	2,925	254,516	685,524
'17 年度	65,001	195,049	149,069	344,118	12,899	52,740	161,067	10,837	10,373	2,192	250,108	659,227
'18 年度	71,065	243,896	179,491	423,387	12,518	51,977	183,062	13,627	10,935	3,646	275,765	770,217
'18年 8月	67,383	204,256	156,134	360,390	13,994	48,611	163,695	10,810	9,810	2,602	249,522	677,295
9月	67,543	201,335	152,839	354,174	13,358	47,303	163,706	10,131	9,794	2,681	246,973	668,690
10月	66,380	200,872	150,347	351,219	13,275	46,570	165,188	8,421	9,694	2,806	245,954	663,553
11月	66,013	201,985	153,821	355,806	13,296	46,987	166,273	9,567	9,585	3,006	248,714	670,533
12月	65,783	207,930	157,295	365,225	13,020	47,754	170,896	9,657	10,264	2,925	254,516	685,524
'19年 1月	68,767	218,512	166,049	384,561	12,149	49,897	174,241	12,416	10,359	3,043	262,105	715,433
2月	68,501	219,821	166,896	386,717	12,264	49,190	177,649	12,793	10,160	3,056	265,112	720,330
3月	71,065	243,896	179,491	423,387	12,518	51,977	183,062	13,627	10,935	3,646	275,765	770,217
4月	72,303	239,997	185,043	425,040	12,821	52,084	179,206	15,172	11,188	3,487	273,958	771,301
前月比	101.7	98.4	103.1	100.4	102.4	100.2	97.9	111.3	102.3	95.6	99.3	100.1
前年同月比	109.4	122.5	122.1	122.3	99.7	94.7	111.5	161.9	103.1	172.7	109.2	116.1

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

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

特殊鋼鋼材の輸出入推移

輸出

(単位: t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						その他の鋼			特殊鋼鋼材合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	ステンレス	快削鋼	ピアノ線材	計	高炭素鋼	その他合金鋼	計		
'17 暦年	42,292	453,298	604,953	1,058,252	187,297	991,116	111,512	120,960	1,410,884	5,337	5,760,691	5,766,028	8,277,455	
'18 暦年	42,373	471,715	598,677	1,070,392	189,872	975,751	118,025	92,901	1,376,549	3,582	5,507,686	5,511,269	8,000,583	
'17 年度	42,058	459,167	611,145	1,070,312	187,017	986,779	109,512	110,363	1,393,671	5,038	5,624,583	5,629,621	8,135,663	
'18 年度	40,883	456,948	586,216	1,043,164	189,839	943,015	119,463	92,202	1,344,519	3,295	5,260,314	5,263,608	7,692,175	
'18年 7月	3,456	40,709	52,914	93,623	19,419	78,743	12,174	5,440	115,776	180	458,007	458,188	671,043	
8月	3,134	38,313	45,464	83,777	14,704	77,426	9,674	9,493	111,297	277	501,122	501,398	699,605	
9月	3,140	34,796	46,405	81,201	11,860	79,756	6,339	9,377	107,333	186	424,856	425,042	616,716	
10月	3,644	44,946	53,726	98,672	14,999	87,744	7,966	9,115	119,323	294	482,237	482,531	704,170	
11月	3,302	37,270	44,858	82,129	15,227	85,209	11,696	8,684	120,817	250	439,336	439,587	645,834	
12月	3,068	40,332	52,223	92,555	15,831	75,118	15,298	6,514	112,761	424	406,495	406,919	615,304	
'19年 1月	2,483	29,789	45,805	75,594	14,550	66,761	4,878	7,549	93,738	157	372,738	372,895	544,709	
2月	3,476	37,331	46,108	83,440	16,459	63,436	10,068	7,973	97,935	416	387,540	387,955	572,806	
3月	3,253	35,643	50,381	86,024	16,712	84,507	9,623	6,321	117,163	296	392,417	392,713	599,153	
4月	3,455	34,018	52,968	86,986	18,434	71,940	6,520	6,279	103,173	535	397,656	398,192	591,806	
前月比	106.2	95.4	105.1	101.1	110.3	85.1	67.8	99.3	88.1	180.8	101.3	101.4	98.8	
前年同月比	83.9	94.8	106.2	101.4	106.9	92.1	108.6	97.7	95.7	187.9	95.3	95.4	96.2	

出所: 財務省関税局『貿易統計』から作成。

輸入

(単位: t)

年月	工具鋼	ばね鋼	ステンレス鋼						快削鋼	その他の鋼			特殊鋼鋼材合計
			形鋼	棒鋼	線材	鋼板類	鋼管	計		高炭素鋼	合金鋼	計	
'17 暦年	3,597	3,665	779	12,136	12,315	206,740	16,077	248,047	127	10,199	599,044	609,243	864,679
'18 暦年	3,821	4,446	1,079	11,731	9,183	222,159	16,704	260,857	297	5,724	444,746	450,470	719,892
'17 年度	3,720	3,649	896	11,567	11,437	216,687	16,435	257,022	125	8,434	544,543	552,977	817,491
'18 年度	3,789	4,813	901	12,809	9,392	214,008	17,217	254,327	379	6,282	524,362	530,643	793,952
'18年 7月	350	508	93	1,036	1,030	19,356	1,441	22,956	31	976	41,187	42,163	66,007
8月	345	365	4	922	340	18,603	1,410	21,278	116	194	19,548	19,742	41,846
9月	185	463	31	845	1,104	12,599	1,267	15,846	6	621	54,323	54,944	71,444
10月	298	468	75	1,106	457	15,995	1,586	19,219	18	223	52,320	52,543	72,547
11月	356	456	20	1,298	861	15,762	1,557	19,498	-	187	49,391	49,578	69,888
12月	335	390	35	1,071	695	18,490	1,349	21,640	31	1,123	43,160	44,283	66,679
'19年 1月	470	424	36	1,443	1,152	17,891	1,544	22,065	21	472	53,928	54,401	77,380
2月	134	276	34	736	391	15,747	1,338	18,245	35	48	51,493	51,541	70,231
3月	273	615	36	1,530	819	14,999	1,651	19,035	36	1,234	59,360	60,594	80,553
p 4月	353	763	37	1,388	946	17,070	1,218	20,658	45	394	46,292	46,686	68,505
前月比	129.3	124.1	103.1	90.7	115.4	113.8	73.8	108.5	124.0	31.9	78.0	77.0	85.0
前年同月比	128.9	252.4	28.2	167.7	101.4	74.6	94.8	79.3	6,363.5	406.8	107.0	107.6	97.9

出所: 財務省関税局『貿易統計』から作成。

(注) p: 速報値

関連産業指標推移

(単位: 台)

(単位: 億円)

年月	四輪自動車生産		四輪完成車輸出		新車登録・軽自動車販売		建設機械生産		産業車輛生産		機械受注額	産業機械受注額	工作機械受注額
	うちトラック	うちトラック	うちトラック	うちトラック	ブルドーザー	パワーショベル	フォークリフト	ショベルトラック					
'17 暦年	9,690,674	1,219,741	4,705,848	368,407	5,234,165	832,195	-	178,930	113,932	11,460	101,431	50,328	16,456
'18 暦年	9,729,594	1,257,111	4,817,470	350,091	5,272,067	867,205	-	r 192,131	121,971	12,099	105,091	50,701	18,158
'17 年度	9,683,262	1,224,728	4,786,909	362,966	5,197,109	832,361	-	182,533	116,204	11,544	101,480	49,284	17,803
'18 年度	9,750,021	1,265,838	4,837,553	347,731	r 5,259,589	882,342	-	197,549	122,108	12,318	104,364	52,276	16,891
'18年 7月	802,215	107,009	380,307	29,955	441,533	71,628	-	15,440	11,138	1,018	9,128	4,276	1,511
8月	693,977	88,672	371,612	24,629	364,218	60,907	-	14,919	8,980	982	9,754	3,499	1,404
9月	809,884	108,120	392,020	30,136	485,377	80,042	-	14,714	9,760	1,087	8,100	4,261	1,535
10月	883,751	115,765	427,073	32,136	418,993	71,176	-	18,877	11,578	1,456	8,720	3,142	1,396
11月	886,966	113,202	430,553	28,053	441,943	83,612	-	18,751	11,163	1,222	8,714	5,655	1,316
12月	792,271	101,323	434,349	27,743	387,525	66,636	-	16,759	9,756	1,078	8,692	3,977	1,355
'19年 1月	790,114	104,623	362,443	24,577	407,975	64,645	-	15,831	9,605	947	8,223	3,553	1,254
2月	864,463	109,305	417,128	29,894	479,427	76,888	-	16,980	9,942	876	8,367	3,329	1,097
3月	900,593	111,152	432,900	30,660	r 640,813	105,840	-	18,714	10,364	956	8,688	8,488	1,307
4月	-	-	422,646	26,241	378,687	62,751	-	17,991	9,773	899	9,137	2,535	1,087
前月比	-	-	97.6	85.6	59.1	59.3	-	96.1	94.3	94.0	105.2	29.9	83.2
前年同月比	-	-	97.8	89.7	103.4	104.4	-	116.2	100.8	122.1	99.6	74.7	66.6

出所: 四輪自動車生産、四輪完成車輸出は(一社)日本自動車工業会『自動車統計月報』、

新車登録は(一社)日本自動車販売協会連合会『新車・月別販売台数(登録車)』、

軽自動車販売は(一社)全国軽自動車協会連合会『軽四輪車新車販売確報』、

建設機械生産、産業車輛生産は『経済産業省生産動態統計』、

機械受注額は内閣府『機械受注統計調査』、産業機械受注額は(一社)日本産業機械工業会『産業機械受注状況』、

工作機械受注額は(一社)日本工作機械工業会『受注実績調査』

(注) r: 訂正值

特殊鋼需給統計総括表

2019年4月分

鋼種別	月別		実数 (t)	前月比 (%)	前年 同月比(%)	2015年基準 指数(%)		
	項目							
工 具 鋼	熱間圧延鋼材生産		21,290	108.5	86.6	103.3		
	鋼材輸入実績		353	129.3	128.9	114.5		
	販売業者	受入計		23,620	91.2	84.3	87.5	
		販売計		22,382	95.9	83.2	85.2	
		うち消費者向		18,605	96.2	95.1	98.3	
		在庫計		72,303	101.7	109.4	122.4	
	鋼材輸出船積実績		3,455	106.2	83.9	72.5		
	生産者工場在庫		9,881	119.4	132.1	119.2		
	総在庫		82,184	103.6	111.7	122.0		
	構 造 用 鋼	熱間圧延鋼材生産		759,817	95.0	97.7	111.1	
鋼材輸入実績			13,658	74.9	91.8	39.3		
販売業者		受入計		407,384	87.8	89.5	62.3	
		販売計		405,731	95.0	89.8	62.1	
		うち消費者向		331,712	97.7	101.1	75.5	
		在庫計		425,040	100.4	122.3	120.8	
鋼材輸出船積実績			86,986	101.1	101.4	105.8		
生産者工場在庫			407,863	104.0	104.5	116.6		
総在庫			832,903	102.1	112.9	118.7		
ば ね 鋼		熱間圧延鋼材生産		34,096	91.3	96.0	94.8	
	鋼材輸入実績		763	124.1	252.4	187.2		
	販売業者	受入計		4,674	97.8	47.8	22.1	
		販売計		4,371	96.6	44.5	20.8	
		うち消費者向		2,796	94.5	64.7	60.1	
		在庫計		12,821	102.4	99.7	105.0	
	鋼材輸出船積実績		18,434	110.3	106.9	117.2		
	生産者工場在庫		27,712	93.5	100.1	107.3		
	総在庫		40,533	96.2	100.0	106.6		
	ス テ ン レ ス 鋼	熱間圧延鋼材生産		211,052	87.3	87.2	91.9	
鋼材輸入実績			20,658	108.5	79.3	142.8		
販売業者		受入計		119,291	89.2	86.5	47.6	
		販売計		123,147	96.0	89.1	49.0	
		うち消費者向		64,643	100.4	104.2	115.6	
		在庫計		179,206	97.9	111.5	131.1	
鋼材輸出船積実績			71,940	85.1	92.1	82.0		
生産者工場在庫			132,935	108.6	100.5	115.4		
総在庫			312,141	102.2	106.5	123.9		
快 削 鋼		熱間圧延鋼材生産		52,162	102.3	99.9	101.6	
	販売業者	受入計		13,443	82.2	102.4	95.1	
		販売計		11,898	76.7	81.5	82.7	
		うち消費者向		11,141	75.2	79.5	80.0	
		在庫計		15,172	111.3	161.9	112.1	
	鋼材輸出船積実績		6,520	67.8	108.6	68.1		
	生産者工場在庫		29,771	117.3	100.3	107.3		
	総在庫		44,943	115.2	115.0	108.8		
	高 抗 張 力 鋼	熱間圧延鋼材生産		410,739	84.0	87.4	99.5	
		販売業者	受入計		8,369	90.7	88.8	81.4
販売計				8,116	96.0	90.6	79.8	
うち消費者向				5,916	92.3	87.8	88.3	
在庫計				11,188	102.3	103.1	102.0	
生産者工場在庫			179,631	110.8	94.2	94.7		
総在庫			190,819	110.3	94.6	95.1		
そ の 他		熱間圧延鋼材生産		130,081	89.8	95.2	94.0	
		販売業者	受入計		35,770	87.5	67.2	88.3
			販売計		35,822	95.6	70.0	88.4
	うち消費者向			32,772	95.5	85.5	89.2	
	在庫計			55,571	99.9	97.4	104.6	
	生産者工場在庫		59,626	95.2	102.9	86.2		
	総在庫		115,197	97.4	100.2	94.2		
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱間圧延鋼材生産合計		1,619,237	90.8	93.1	102.9	
		鋼材輸入実績計		68,505	85.0	97.9	84.3	
		販売業者	受入計		612,551	88.2	86.7	60.2
販売計				611,467	94.8	87.2	60.1	
うち消費者向				467,585	97.0	98.8	81.2	
在庫計				771,301	100.1	116.1	121.0	
鋼材輸出船積実績計			591,806	98.8	96.2	92.0		
生産者工場在庫			847,419	105.6	101.3	107.8		
総在庫			1,618,720	102.9	107.9	113.7		

出所: 鋼材輸入実績及び鋼材輸出船積実績は財務省関税局『貿易統計』。

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

- (注) 1. 鋼材輸入実績は速報値を掲載。構造物用鋼の鋼材輸入実績とは高炭素鋼の棒鋼及び合金鋼の棒鋼、線材を加算したもの。
2. 総在庫とは販売業者在庫に生産者工場在庫を加算したもの。生産者工場在庫は熱間圧延鋼材のみで、冷間圧延鋼材及び鋼管を含まない。また、工場以外の置場にあるものは、生産者所有品であってもこれを含まない。

倶楽部だより

(2019年4月1日～5月31日)

総会 (5月27日)

- ①2018年度事業報告について
- ②2018年度決算について
- ③公益目的支出計画実施完了の報告について
- ④役員(理事及び監事)の任期満了に伴う選任について

理事会

第1回(書面)(5月9日)

- ①2018年度事業報告について
- ②2018年度決算について
- ③公益目的支出計画実施完了の報告について
- ④役員(理事及び監事)の任期満了に伴う選任について
- ⑤第38回総会招集について

第2回(5月27日)

会長、副会長、専務理事の選定について

運営委員会総務・財務分科会合同委員会(5月8日)

- ①2018年度事業報告について
- ②2018年度決算について
- ③公益目的支出計画実施完了の報告について
- ④役員(理事及び監事)の任期満了に伴う選任について
- ⑤第38回総会招集について

編集委員会

小委員会(5月23日)

11月号特集「磁性材料(仮題)」の編集内容及び執筆分担の検討

本委員会(4月5日)

- ①9月号特集「金属系バイオマテリアル(仮題)」の編集方針、内容の確認
- ②2020年1月号以降の特集テーマ選定

流通委員会

説明会(4月9日)

演題:「2019年度第1・四半期の特殊鋼需要見通し」

講師:経済産業省製造産業局金属課計画係長 中村 純也氏

参加者:27名

[大阪支部]

説明会(全特協との共催、4月19日)

演題:「2019年度第1・四半期の特殊鋼需要見通し」

講師:経済産業省製造産業局金属課 課長補佐 篠原 康人氏

参加者:46名

2018年度会計監査(5月15日)

運営委員会(5月15日)

- ①2018年度事業・収支報告
- ②2019年度事業計画(案)・収支予算(案)・役員人事他

[名古屋支部]

運営委員会(4月17日)

- ①2018年度事業報告(案)・決算報告(案)について
- ②2019年度事業計画(案)・収支予算(案)について
- ③第50回名古屋支部総会について
- ④その他報告事項

部会

工具鋼部会(4月11日)

構造用鋼部会(4月19日)

ステンレス鋼部会(4月23日)

二団体共催新入社員研修(4月22日)

- ①愛知製鋼(株)知多工場見学
- ②講義Ⅰ:特殊鋼の基礎知識
講師:愛知製鋼(株) 加藤 英久氏
- ③講義Ⅱ:社会人としての基礎マナー
講師:キャプラン(株) 高橋 典子氏
参加者:80名

2018年度決算会計監査(5月7日)

2019年経済産業省企業活動基本調査に御協力ください

経済産業省大臣官房調査統計グループ

経済産業省では、我が国企業における経済活動の実態を明らかにし、経済産業政策等各種行政施策の基礎資料を得ることを目的として、1992年以降「経済産業省企業活動基本調査」（基幹統計調査）を実施しており、2019年も実施いたします。調査に対する御協力をお願いいたします。

○実施期間：2019年5月16日から7月15日まで

○根拠法令：統計法（平成19年法律第53号）

○調査目的：我が国企業における経済活動の実態を明らかにし、経済産業政策等各種行政施策の基礎資料とします。

○調査対象：経済産業省が所管する産業（別表）に属している事業所を有する「従業員50人以上かつ資本金3,000万円以上の企業」。

○調査結果：2020年1月に速報を公表予定。

○調査方法：対象の企業へ調査関係用品を直接郵送します。

※調査票の提出は、紙調査票のほか、インターネットからオンラインで提出することもできます。

※調査票に記入していただいた事項の秘密は、統計法により厳重に保護されますので、御協力をお願い申し上げます。

(別表)

この調査は、鉱業・採石業・砂利採取業、製造業、電気業・ガス業、卸売業、小売業、クレジットカード業・割賦金融業のほか、下記の産業の括弧内の業種が対象となります。

- 飲食サービス業（一般飲食店、持ち帰り・配達飲食サービス業）
- 情報通信業（ソフトウェア業、情報処理・提供サービス業、インターネット附随サービス業、映画・ビデオ制作業、アニメーション制作業、新聞業、出版業）
- 物品賃貸業（産業用機械器具賃貸業（レンタルを含む）、事務用機械器具賃貸業（レンタルを含む）、自動車賃貸業（レンタルを除く）、スポーツ・娯楽用品賃貸業（レンタルを含む）、その他の物品賃貸業（レンタルを含む））
- 学術研究、専門・技術サービス業（学術・開発研究機関、デザイン業、エンジニアリング業、広告業、機械設計業、商品・非破壊検査業、計量証明業、写真業）
- 生活関連サービス業、娯楽業（洗濯業、その他の洗濯・理容・美容・浴場業、冠婚葬祭業（冠婚葬祭互助会を含む）、写真プリント、現像・焼付業、その他の生活関連サービス業、映画館、ゴルフ場、スポーツ施設提供業（フィットネスクラブ、ボウリング場など）、公園、遊園地・テーマパーク）
- 教育、学習支援業（外国語会話教室、カルチャー教室（総合的なもの））
- サービス業（廃棄物処理業、機械等修理業、職業紹介業、労働者派遣業、ディスプレイ業、テレマーケティング業、その他の事業サービス業）

問い合わせ先：経済産業省大臣官房調査統計グループ企業統計室 TEL：03-3501-1831

一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧

(社名は50音順)

<p>[会 員 数]</p> <p>(正 会 員)</p> <p>製造業者 26社</p> <p>販売業者 103社</p> <p>合 計 129社</p>	【販売業者会員】		
<p>【製造業者会員】</p> <p>愛 知 製 鋼 (株)</p> <p>秋 山 精 鋼 (株)</p> <p>(株)川口金属加工</p> <p>高 周 波 熱 錬 (株)</p> <p>合 同 製 鐵 (株)</p> <p>(株)神 戸 製 鋼</p> <p>山 陽 特 殊 製 鋼 (株)</p> <p>J F E ス チ ー ル (株)</p> <p>J X 金 属 (株)</p> <p>下 村 特 殊 精 工 (株)</p> <p>大 同 特 殊 鋼 (株)</p> <p>高 砂 鐵 工 (株)</p> <p>東 北 特 殊 鋼 (株)</p> <p>日 鉄 ス テ ン レ ス (株)</p> <p>日 鉄 日 新 製 鋼 (株)</p> <p>日 本 金 属 (株)</p> <p>日 本 高 周 波 鋼 業 (株)</p> <p>日 本 精 線 (株)</p> <p>日 本 製 鉄 (株)</p> <p>日 本 冶 金 工 業 (株)</p> <p>日 立 金 属 (株)</p> <p>(株)広島メタル&マシナリー</p> <p>(株)不 二 越</p> <p>三 菱 製 鋼 (株)</p> <p>ヤ マ シ ン ス チ ー ル (株)</p> <p>理 研 製 鋼 (株)</p>	<p>愛 鋼 (株)</p> <p>青 山 特 殊 鋼 (株)</p> <p>浅 井 産 業 (株)</p> <p>東 金 属 (株)</p> <p>新 井 ハ ガ ネ (株)</p> <p>粟 井 鋼 商 事 (株)</p> <p>伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株)</p> <p>伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株)</p> <p>井 上 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株) U E X</p> <p>確 井 鋼 材 (株)</p> <p>ウ メ ト ク (株)</p> <p>扇 鋼 材 (株)</p> <p>岡 谷 鋼 機 (株)</p> <p>カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株)</p> <p>兼 松 (株)</p> <p>兼 松 ト レ ー デ ィ ン グ (株)</p> <p>(株) カ ム ス</p> <p>(株)カワイスチール</p> <p>川 本 鋼 材 (株)</p> <p>北 島 鋼 材 (株)</p> <p>ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株)</p> <p>ケ ー ・ ア ン ド ・ アイ 特 殊 管 販 売 (株)</p> <p>小 山 鋼 材 (株)</p> <p>佐 久 間 特 殊 鋼 (株)</p> <p>櫻 井 鋼 鐵 (株)</p> <p>佐 藤 商 事 (株)</p> <p>サ ハ シ 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株) 三 悦</p> <p>三 協 鋼 鐵 (株)</p> <p>三 京 物 産 (株)</p> <p>三 興 鋼 材 (株)</p> <p>三 和 特 殊 鋼 (株)</p> <p>J F E 商 事 (株)</p> <p>芝 本 産 業 (株)</p> <p>清 水 金 属 (株)</p> <p>清 水 鋼 鐵 (株)</p> <p>神 鋼 商 事 (株)</p> <p>住 友 商 事 (株)</p>	<p>住友商事グローバルメタルズ(株)</p> <p>大 同 興 業 (株)</p> <p>大 同 DM ソ リ ュ ー シ ョ ン (株)</p> <p>大 洋 商 事 (株)</p> <p>大 和 興 業 (株)</p> <p>大 和 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株)竹内ハガネ商行</p> <p>孟 鋼 鉄 (株)</p> <p>田 島 ス チ ー ル (株)</p> <p>辰 巳 屋 興 業 (株)</p> <p>千 曲 鋼 材 (株)</p> <p>(株)テクノタジマ</p> <p>(株)鐵 鋼 社</p> <p>デルタステール(株)</p> <p>(株) ト ー キ ン</p> <p>東京貿易マテリアル(株)</p> <p>(株)東 信 鋼 鉄</p> <p>特 殊 鋼 機 (株)</p> <p>豊 田 通 商 (株)</p> <p>中 川 特 殊 鋼 (株)</p> <p>中 野 ハ ガ ネ (株)</p> <p>永 田 鋼 材 (株)</p> <p>名 古 屋 特 殊 鋼 (株)</p> <p>ナ ス 物 産 (株)</p> <p>南 海 鋼 材 (株)</p> <p>日 金 ス チ ー ル (株)</p> <p>日 鉄 物 産 (株)</p> <p>日 鉄 物 産 特 殊 鋼 西 日 本 (株)</p> <p>日 本 金 型 材 (株)</p> <p>ノ ボ ル 鋼 鉄 (株)</p> <p>野 村 鋼 機 (株)</p> <p>白 鷺 特 殊 鋼 (株)</p> <p>橋 本 鋼 (株)</p> <p>(株)長谷川ハガネ店</p> <p>(株)ハヤカワカンパニー</p> <p>林 田 特 殊 鋼 材 (株)</p> <p>阪 神 特 殊 鋼 (株)</p> <p>阪 和 興 業 (株)</p> <p>日 立 金 属 工 具 鋼 (株)</p>	<p>日 立 金 属 商 事 (株)</p> <p>(株)日立ハイテクノロジーズ</p> <p>(株) 平 井</p> <p>(株)フクオカ</p> <p>藤 田 商 事 (株)</p> <p>古 池 鋼 業 (株)</p> <p>(株)プ ル ー タ ス</p> <p>(株)堀田ハガネ</p> <p>(株)マクスコーポレーション</p> <p>松 井 鋼 材 (株)</p> <p>三 沢 興 産 (株)</p> <p>三 井 物 産 (株)</p> <p>三 井 物 産 ス チ ー ル (株)</p> <p>(株)メタルワン</p> <p>(株)メタルワンチューブラー</p> <p>(株)メタルワン特殊鋼</p> <p>森 寅 鋼 業 (株)</p> <p>(株)山 一 ハ ガ ネ</p> <p>山 進 産 業 (株)</p> <p>ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株)</p> <p>山 野 鋼 材 (株)</p> <p>陽 鋼 物 産 (株)</p> <p>菱 光 特 殊 鋼 (株)</p> <p>リ ン タ ツ (株)</p> <p>渡 辺 ハ ガ ネ (株)</p>

“特集” 編集後記

今月号は、「特殊鋼の合金元素の基礎知識」をテーマにしました。本年1月から編集委員を務め始めたところでの編集小委員長の大役のため、特集内容についてのまとめ方など関係各位にご苦勞とご迷惑をおかけしたことと思います。まず、この場をお借りして、お詫びと感謝を申し上げます。またご多忙の中、今回ご執筆いただいた方々に心からお礼を申し上げます。

2002年3月号で、「やさしく知る合金元素の役割」と題し特集を組んで以来のテーマとなります。特殊鋼を構成する合金元素は、各々重要な役割があります。機械的性質や電磁気特性など、各種の目的に応じて、鋼に様々な合金元素が添加されるわけですが、その効果について理解しやすいようまとめられておりますので、読者の方々にはすんなり腹落ちできるのではないかと考えております。

ただし、各項目においては執筆者によるトーンの違いがありますが、これはひとえに小委員長としての責任だと感じております。

合金元素の役割については普遍的なことが多いので、昔習ったはずなのに忘れてしまったと思われる方は、合金元素の役割について調べたくなったとき、すぐに確認できるよう手元に置いていただいで活用していただければ幸いです。

最近では、省資源の要請を受けて低合金化の動きもあります。常に強度などの性能と、コストの両立を図りつつ、各種の特殊鋼が製造されてきており、その歴史と内容をご理解いただく便利な参考書という位置づけで、繰り返し読んでいただければ嬉しい限りです。

〔愛知製鋼㈱ 品質保証部 さわだ ゆづる〕
お各様品質・技術室 沢田 譲

特 集 / 金属系バイオマテリアルのやさしい解説

- I. 総論
- II. 金属系バイオマテリアルの種類と性質について
- III. 金属系バイオマテリアルの腐食と表面改質
- IV. 金属系バイオマテリアルの適用事例
- V. 各社のバイオマテリアル紹介

11月号特集予定…磁性材料の基礎知識

特 殊 鋼

第 68 卷 第 4 号
© 2 0 1 9 年 7 月
2019年6月25日 印 刷
2019年7月1日 発 行

定 価 1,230円 送 料 200円
1年 国内7,368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 小 澤 純 夫
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。