



入門講座

鉄鋼の日本工業規格—6

JIS 冷延鋼板とその製造技術

The JIS Cold Rolled Steel Sheets and
Its Manufacturing Technology

日新製鋼(株)
グループ商品開発戦略本部・技術研究所
鋼材研究部 鋼材第一研究チーム
主任研究員

川本明人
Akito Kawamoto

日新製鋼(株)
グループ商品開発戦略本部・技術研究所
鋼材研究部 鋼材第一研究チーム
チームリーダー

重富智治
Tomoharu Shigetomi

1 はじめに

冷延鋼板 (SPC : Steel Plate Cold) は自動車をはじめ、電気、機械、建設などの様々な産業分野で使用されている汎用鋼板で、その用途は多岐にわたる。なかでも自動車向けには全冷延鋼板の60%強が使用されている(図1¹⁾)。冷延鋼板はその用途から、①軽加工用、②深絞り用、③硬質用、④高強度用に分類される。①～③は冷間圧延鋼板及び鋼帯 (JIS G 3141 : 2011) に、④は自動車用加工性冷間圧延高張力鋼板及び鋼帯 (JIS G 3135 : 2006) にJIS化されている。

本稿では、JIS冷延鋼板規格の概要、冷延鋼板の代名詞でもある深絞り用冷延鋼板の製造技術とその鉄鋼材料学について解説する。なお、JIS冷延鋼板の入門書としては、日本鉄鋼協会編集の「冷延鋼板マニュアル」があるので学習意欲のある方は参考にされたい。また、使用した専門用語は日本規格協会編集の「JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ」の鉄鋼用語及びアグネ技術センター編集の「金属用語辞典」を参考にした。

2 JIS 冷延鋼板規格の概要

JISの目的²⁾は、適切な品質とその評価方法の規格化により、製品の使用者ニーズ及び公共の利益等の社会ニーズ、あるいは安全性や環境保護との技術的な連携を図ること、また商取引上の利便性を提供し、技術の利用普及を促進すること、更には製品性能の客観的比較を可能とし、真に技術的な競争を促進することにある。JIS冷延鋼板もその一つであり、鉄鋼製品の品質の改善、生産能率の増進、生産の合理化や商取引の単純公正化、ユーザーの利便化・合理化を目的として制定された国家規格である。そのため、JIS規格には鉄鋼材料学に関する解説はない。冷延鋼板の鉄鋼材料学については別途専門書³⁾で理解を深めて頂きたい。ここでは、主にJIS冷延鋼板の種類及び機械的性質に関連した内容について解説する。外観、形状及び試験・検査などについては言及しないため、規格の詳細は日本規格協会発行の「JIS規格票」もしくは「JISハンドブック②鉄鋼Ⅱ」を参照して頂きたい。

SPCとは、熱延鋼板を素材に冷間圧延し、焼きなましを施した後、必要に応じて調質圧延(スキンパス)を行った鋼板と定義できる。板厚は通常0.15～3.2mmで、熱延鋼板 (JIS G 3131 : 2010) に比べ、厚み許容差、表面品質(綺麗、平坦)に優れ、かつ軟質なため加工性に優れると言った特徴を有する。

JIS冷延鋼板は適用区分から、SPCC、SPCD、SPCE、SPCF及びSPCGの5種類が規定されている。SPCFとSPCGの2種類は製造工場出荷後6か月間、非時効性を保証しなくてはならない。非時効性とは、加工した際にストレッチャストレーンを発生しない性質を言う。調質区分として、A(焼きなまし)、S(標準調質)、8(1/8硬質)、4(1/4硬質)、2(1/2硬質)及び1(硬質)の6種類あり、硬質区分はSPCCだけに適用される。SPCC硬質材の製造方法は特に規定されていない。調質圧延とともに、化学成分の調整で硬さを上げることがで

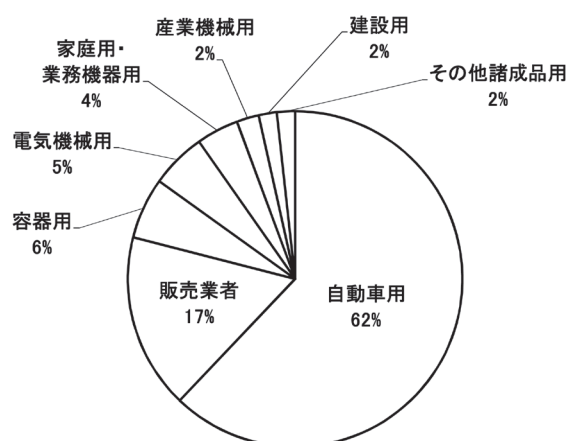


図1 冷延鋼板の用途別受注比率 (2013年度)

きる。表面仕上げ区分として、D（ダル仕上げ）とB（ブライト仕上げ）の2種類がある。これらの区分組合せで品質特性を識別するように規格記号が表示される。その組合せ数は合計26種類になる。例えば、SPCC-SDならば、一般用冷延鋼板（SPCC）で標準調質（S）が施され、表面がダル仕上げ（D）の製品を示す。また、SPCのJIS規格では幅600mm未満で冷間圧延する鋼板をみがき鋼板と定義している。通常の冷延鋼板に比べ、機械的性質や寸法許容差の狭レンジ管理、外観の厳格管理が行われている。

表1に、標準調質の冷延鋼板の化学成分と機械的性質（板厚0.6～1.0mm）を示す。化学成分値（質量％）は溶鋼分析値である。化学成分は4種類（C, Mn, P, S）が規定され、必要に応じて合金元素を添加してもよい。鋼種は特に規定されていないが、SPCGは通常IF（Interstitial Free）鋼で製造される。機械的性質は厚さレンジ毎に引張試験値で規定されている。引張試験における幅ひずみと板厚ひずみの比で求められる塑性ひずみ比（ランクフォード値、JIS Z 2254）はSPCGだけで規定されている。ここでは硬質材の規格は示さないが、SPCC硬質材は硬さで規定されている。その硬さはHRB（ロックウェル硬さ）又はHV（ビッカース硬さ）のいずれかによる。

冷延鋼板規格にはJIS以外に、団体規格、メーカー規格、ユーザー規格と多岐にわたる。これら鋼板規格の適正化・簡素化を図るために、自動車用向けについては、日本鉄鋼連盟が自動車業界の協力を得て制定した自動車用冷延鋼板規格（JFS A 2001：2014）がある。種類は軟鋼板と高強度鋼板（ハイテン）を含め29種類ある。化学成分は特に規定していな

い。表面仕上げ区分では表面粗さ（JIS B 0601：2013）が規定されている。表2に、自動車用冷延鋼板規格の軟鋼板の機械的性質（板厚0.8～1.0mm）を示す。また、参考までに相当JISを示す。JIS規格に比べ、規定値は狭レンジ化されており、更に深絞り性の指標である塑性ひずみ比（ランクフォード値）が規定されている。この規格は市場の実態に合わせた標準板厚と供給可能な板厚範囲が規定されるなど、市場性を考慮した体系になっており、自動車用鋼板は主にこの規格にて商取引されているため、自動車用鋼板を選択する際には利便性に優れる。

3 深絞り用冷延鋼板の開発を支えた製造技術の変遷

冷延鋼板開発の歴史は深絞り性を付与する再結晶集合組織の製造技術の歴史でもある。深絞り用冷延鋼板の特性（ランクフォード値）とその製造技術の変遷については既に優れた解説がある⁴⁻⁶⁾。ここでは、先達の研究成果や開発事例を基に、1960年以降、現在までの深絞り用冷延鋼板の開発を支えた製造技術の変遷について簡単に解説する。

図2に、深絞り用冷延鋼板のランクフォード値（r値）とそれを支えた製造技術の変遷を示す。縦軸に深絞り性の指標であるr値を、横軸に年代（世代区分）を示す。解説では冷延鋼板の軽加工用と深絞り用を区分するr値として、日本鉄鋼連盟の自動車用冷延鋼板規格におけるJSC270Eの数値を採用し、r値が1.4以上を深絞り用冷延鋼板とする。簡潔に言えば、製造技術の変遷は①連続焼鈍技術確立までの第一世代、②高純度鋼製造技術確立までの第二世代、そして③現在までの第三世代に区分できる。

第一世代では、箱焼鈍法による深絞り用冷延鋼板（低炭素

表1 標準調質の冷延鋼板の化学成分と機械的性質（板厚0.6～1.0mm）（JIS G 3141：2011から抜粋）

種類	化学成分（質量％）				機械的性質（0.6≦板厚<1.0）			
	C	Mn	P	S	降伏点（MPa）	引張強さ（MPa）	伸び（％）	r値
SPCC	≦0.15	≦0.60	≦0.100	≦0.035	—	—	—	—
SPCD	≦0.10	≦0.50	≦0.040	≦0.035	（≦240）	≧270	≧38	—
SPCE	≦0.08	≦0.45	≦0.030	≦0.030	（≦220）		≧40	
SPCF	≦0.06		≦0.030	≦0.030	（≦210）		≧42	
SPCG	≦0.02	≦0.25			（≦190）		≧44	

表2 自動車用冷延鋼板規格の軟鋼板の機械的性質（板厚0.8～1.0mm）（JFS A 2001：2014から抜粋）

種類 (記号)	板厚 (mm)	機械的性質(0.8≦板厚<1.0)				JIS相当
		引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	伸び (%)	r値	
JSC270C	0.3～3.2	≧270	135～255	39～48	—	SPCC
JSC270D	0.4～3.2		125～215	42～51	≧1.2	SPCD
JSC270E			120～195	44～52	≧1.4	SPCE
JSC270F	0.4～2.3		110～175	46～54	≧1.6	SPCF
JSC270G		≧260	100～165	48～56	≧1.8	SPCG

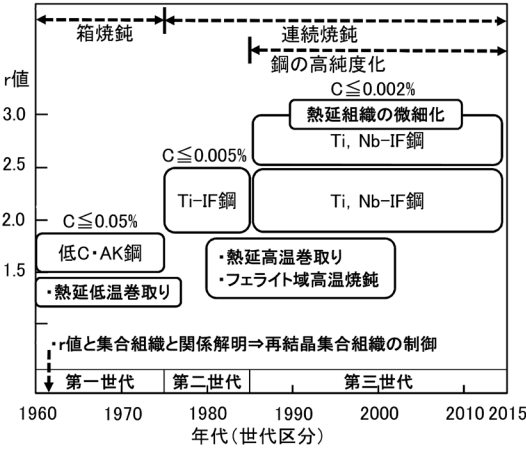


図2 深絞り用冷延鋼板のランクフォード値（r値）とそれを支えた製造技術の変遷

アルミキルド鋼：0.05%C-0.3%Mn)が開発・実用化された⁴⁾。熱延時に低温巻取り ($\leq 600^{\circ}\text{C}$) を行ってAlとNを過飽和に固溶させておき、冷延後の箱焼鈍の昇温過程で徐熱し、再結晶に先立つ回復段階でAINを析出させて、焼鈍 ($\geq 650^{\circ}\text{C}$) で{111}再結晶集合組織を発達させることで、1.5~1.8のr値が得られている。箱焼鈍法では、再結晶終了後の徐冷で固溶炭素が炭化物として析出するため非時効性となる。再結晶終了時の金属組織は、圧延方向に展伸したパンケーキ状の組織となる。鋼板の深絞り性を支配するのは鋼板の再結晶集合組織であることが解明されるまでは、低炭素アルミキルド鋼の深絞り性はこの展伸結晶粒の生成と深い関係にあると考えられていたが、これはAINの析出による粒成長のピン止め効果の結果である。

第二世代では、連続焼鈍設備の稼動とともに、連続焼鈍による深絞り用冷延鋼板 (Ti-IF鋼：0.005%C-0.1%Mn-Ti) が開発・実用化された⁷⁾。図3に示すように、連続焼鈍プロセスは、急熱-高温焼鈍 (再結晶粒成長) -急冷の短時間の焼鈍処理 (10分前後) を特徴とするため、箱焼鈍処理 (1週間前後) のようなAIN析出を利用した製造はできない。そのため、急加熱-高温焼鈍でも{111}再結晶集合組織が発達しやすい極低炭素Ti-IF鋼が登場した。しかし、炭素量が約0.005%であるためそれに見合うTi量も約0.10%必要となり、再結晶粒の成長を促進するには連続焼鈍としては高温で長時間の焼鈍が必要であった。製造プロセスは、熱延時に高温巻取り ($\geq 650^{\circ}\text{C}$) を行ってTiCを析出させ、高圧下率 ($\geq 75\%$) で冷延した後、高温焼鈍 ($\geq 800^{\circ}\text{C}$) することで、1.9~2.5のr値が得られている。Ti-IF鋼では、固溶炭素、窒素が熱延段階ですでにTiC、TiNとして析出・固定化しているため、完全非時効性である。

第三世代になると、製鋼・真空脱ガス処理技術の更なる進歩に伴い、鋼中の炭素量が0.002%以下で、添加するレアメタル元素 (Ti, Nb) が減量となり、経済的に大量生産することが可能となった。開発・実用化された鋼種は極低炭素Ti, Nb-IF鋼 (0.002%C-0.1%Mn-Ti, Nb) である⁴⁾。製造プロセスは、熱延時高温巻取り ($\geq 650^{\circ}\text{C}$)、冷延高圧下率 ($\geq 75\%$)、連

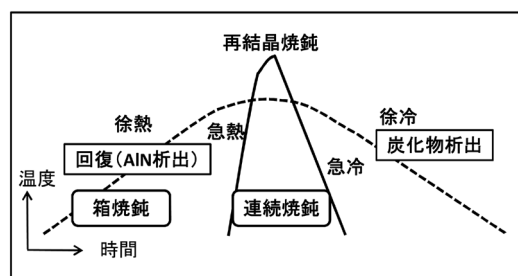


図3 深絞り用冷延鋼板の焼鈍サイクルの概略図

続焼鈍 ($\geq 800^{\circ}\text{C}$) と製造条件はほぼ同じで、1.9~2.5のr値が得られている。そしてIF鋼の純度が高まるにつれて、熱延鋼板の粗粒化に起因したr値劣化の問題が大きくなった。熱延鋼板の微細化には仕上げ温度の低温化、高圧下圧延、冷却開始時間の短縮化などが有効で、2.5を超えるr値が得られている⁸⁾。また、熱延でのフェライト域潤滑圧延技術が実用化され、2.9~3.1の高r値が得られている⁹⁾。

4 冷延鋼板の鉄鋼材料学

4.1 降伏点現象の機構とひずみ時効

金属の塑性変形は、結晶格子中の転位 (線欠陥) が動くことで生じる。また、金属の降伏応力とは多数のすべり転位が様々な障害物に打ち勝って長距離運動を起こすのに必要な最小せん断応力のことである。

図4に低炭素鋼の応力-ひずみ曲線を示す。焼きなましままの低炭素鋼 (図4の①) を引張試験すると、上降伏点後の急激な応力低下 (降伏点現象と呼ぶ) に続き、ほぼ一定の応力 (下降伏点) で塑性変形が進む。上降伏点を超えると大量の転位が一斉に動き始め、リュウダース帯と呼ばれる帯状の塑性変形領域の発生と伝播が始まり、降伏点伸び (リュウダース変形) を示す。その後ひずみの増加とともに、応力が増加する加工硬化現象を示す。上降伏点は試験片の形状、結晶粒径、ひずみ速度などの試験条件の影響を受けやすく不安定である。一方、下降伏点は材料の巨視的な塑性変形が開始する応力で安定している。プレス成形の際に、降伏点伸びが起こると、鋼板表面にしわ模様 (ストレッチャストレイン) を生じ、外観上好ましくない。

低炭素鋼のストレッチャストレインの抑制技術には、①塑性変形を与えて可動転位を導入 (調質圧延)、②鋼中の侵入型原子 (C, N) を低減 (製鋼・真空脱ガス処理)、③鋼中の侵入

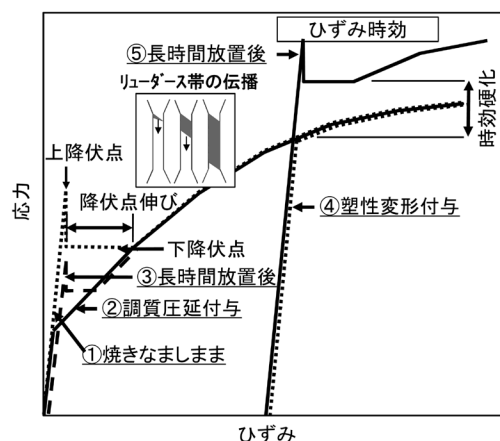


図4 低炭素鋼の応力-ひずみ曲線における降伏点現象とひずみ時効

型原子 (C, N) の固定化 (IF鋼化) などがある¹⁰⁾。可動転位の導入や侵入型元素の低減の技術では、長時間放置で再び降伏点現象が生じる (図4の③) ため、完全非時効性は難しい。完全非時効性を保証する場合、IF鋼の利用が最も得策である。

また、下降伏点を越えて塑性変形 (加工硬化) を受けた試験片に、荷重除去後ただちに再荷重した場合、降伏点は表われないが (図4の④)、荷重除去後長時間放置し再荷重すると再び降伏点を示す (図4の⑤)。この現象をひずみ時効という。このひずみ時効現象を積極的に利用した鋼板として、焼き付け硬化 (Bake Hardening) 高強度鋼板が開発されている¹¹⁾。

多結晶低炭素鋼の降伏点現象 (リューダース帯の発生と伝播) の機構には、①Cottrellの固着説¹²⁾、②Johnston-Gilmanの塑性抵抗説¹³⁾、③藤田の結晶粒間拘束モデル¹⁴⁾、④高木の粒界Pile-upモデル¹⁵⁾が提案されている。しかし、Cottrellの固着説とJohnston-Gilmanの塑性抵抗説では降伏点現象の結晶粒径依存性を説明できないなどの問題点が指摘されており、現在でもその機構解明が続けられている。これまでの研究からみて単一の機構ではないようである。各モデルの詳細は省略するが、興味ある方は参考文献¹²⁻¹⁵⁾をご覧ください。

4.2 深絞り性発現の機構

深絞り性の指標であるr値を高めるには、板面に {111} 再結晶集合組織を発達させればよいことが知られている¹⁶⁾。そのためには、IF鋼化が有効である。IF鋼が有効である機構としては、固溶炭素や窒素が存在すると、結晶粒内のせん断帯が発生しやすく、そこから {110} <001> 方位が再結晶して、{111} 再結晶集合組織の発達を阻害すると考えられている¹⁷⁾。また、IF鋼の {111} 再結晶集合組織形成には、熱延鋼板の結晶粒径が重要であることが知られている。すなわち、熱延板の結晶粒径が粗大な場合には {110} <001> 方位 (Goss方位) が再結晶して、{111} 再結晶集合組織の発達を阻害する。熱延板の結晶粒径が細かな場合にはr値に理想的な {111} <110> 及び {111} <211> 方位が発達する。細粒鋼では {111} 再結晶集合組織の核発生サイトである結晶粒界が多く、更に結晶粒内では結晶粒界による拘束により多重すべりが多くの領域で生じるため不均一な高ひずみ域 (変形帯) が発生しにくく、結晶粒内での再結晶核が発生しにくいことによるものと考えられている¹⁸⁾。

4.3 深絞り用冷延鋼板の材料設計

単に低炭素鋼板を軟質化するだけなら、技術的に難しくはない。軟質化は鋼の強化¹⁹⁾の逆で、転位の運動の障害となる格子欠陥を減らすことが基本原理となる。鋼の高純度化で溶質元素や不純物、そして介在物の減量を行い、高温焼鈍で転位密度の減量と結晶粒径の粗大化を図ることで軟質化が可

能である。しかし、軟質化だけでは深絞り性は付与できない。前述の通り、深絞り性には再結晶集合組織が関係する。深絞り性付与は、表3に示す各種製造技術に基づき設計される。

再結晶粒はひずみの少ない (低転位密度) 結晶粒であるため、再結晶集合組織の形成と同時に軟質化も達成される。深絞り性付与の製造技術としては、①鋼の高純度化 (溶質元素、不純物、介在物の減量)、②IF鋼化、③熱延結晶粒の微細化、④炭窒化物の完全析出と粗大化、⑤冷延集合組織の発達と再結晶核の高密度化 (高圧下率)、⑥完全再結晶 (高温焼鈍) などがあり、鋼成分をはじめ、製造条件を最適化することで、2.5を超えるr値の鋼板の開発できる⁹⁾。ただし、高純度化で留意すべきことは、あまりに高純度化が進むと再結晶粒が成長しやすく粗大粒になり、プレス成形時にオレンジの皮のような肌荒れ (オレンジピール) が生じ、表面品質を劣化させる可能性がある。また、熱延結晶粒の粗大化はr値の劣化につながる。そのため、IF鋼では熱延結晶粒を微細化するプロセス設計が重要となる。

5 深絞り用冷延鋼板の温故知新

前述のとおり、深絞り用冷延鋼板開発の歴史は、主に自動車外板パネル用軟鋼板への成形性付与技術の歴史と言ってもよい。1960年代から深絞り用冷延鋼板の歴史が刻まれ、様々な深絞り用冷延鋼板が開発・実用化されてきた。

鋼板成形の際、板厚減少を抑えるような集合組織の発現機構が解明され、軟鋼板への成形性 (特に深絞り性) 付与技術が確立するまでには停滞時期があった。{111} 再結晶集合組織の形成が高深絞り性発現の機構であることが解明され、製鋼・真空脱ガス処理による高純度鋼製造技術が登場したことで、極低炭素IF鋼が開発・実用化された。また、1970年代半ば以降、燃費向上・排ガス規制を背景とした車体軽量化及び車体衝突安全性から高強度鋼板への成形性 (特に深絞り性) 技術が求められ、極低炭素IF鋼をベースにした深絞り用高強度鋼板が開発・実用化されている。これからも冷延鋼板の高

表3 深絞り性向上のための製造技術

製造プロセス	狙い	製造技術
製鋼	高純度化	溶質原子 (固溶C, N), 介在物の減量
	IF鋼化	化学量論的な適量添加 (Ti, Nb)
熱延	結晶粒の微細化	仕上げ温度の低温化
		冷却開始時間の短縮化
		高圧下圧延
		フェライト域潤滑圧延
	炭窒化物の完全析出と粗大化	高温巻取り
冷延	冷延集合組織発達と再結晶核の高密度化	高圧下圧延
焼鈍	完全再結晶	フェライト域高温焼鈍

機能化の基軸は、高成形性（特に深絞り性）と高強度化であり、現在も継続的に研究・開発が進められている。しかし、残された技術課題の一つに、鋼板特性のバラツキの最小化がある。この技術課題の解決により成形限界に対する余裕度が大きくなり、加工歩留まり改善につながる。この技術課題は鉄鋼材料共通の技術課題であり、その改善技術は各メーカーのノウハウとなっている。

一方、1990年以降、地球環境問題や資源枯渇・資源制約問題が顕在化し、それら問題への対応も同時に求められる時代になった。環境・資源への配慮はモノの生産、使用、廃棄の各段階で問われる。深絞り用冷延鋼板の開発から誕生した極低炭素IF鋼は、高純度鋼をベースにレアメタル（Ti, Nb）元素を微量添加した鋼板（マイクロ・アロイング²⁰⁾）であることから、再利用における精錬時の分離・除去困難元素（トラップ元素, Cu, Sn）の問題²¹⁾もほとんどなく、環境・資源問題を先取りした“先進冷延鋼板”と言える。

冷延鋼板をはじめ鉄鋼材料の高機能化・高度化のためには、技術者・研究者が限られた資源の有効利用に真剣に取り組む必要がある。なかでも、ユビキタス元素（クラーク数が大きい元素）活用²²⁾やレアメタル元素のマイクロアロイングがますます重要となる。そのためには、鉄鋼の分析評価技術の高度化はもとより、計算材料科学を活用することで、機能・特性を支配する原理原則を解明し、それに基づいたナノオーダーでのミクロ組織の最適化を図る製造技術の確立が不可欠である²³⁾。近年発展の著しい最先端解析技術や計算材料科学の応用によって鉄鋼材料の更なる進化・高度化が進展することを期待したい。

6 終わりに

冷延鋼板は平凡で目立たない材料であるが、今後も重要な社会基盤材料の一つである。冷延鋼板に限らず、鉄鋼のJIS規格は商取引の共通言語（作法）であり、実務経験を積むことでその読み方は体得できる。しかし、モノづくりは材料、加工プロセス、そしてユーザーのノウハウの共同作業で、材料だけでモノづくりが完結しない。ユーザーが必要としているのは材料そのものではなく、材料のもつ機能・特性である。鉄鋼材料そのものは味もそっけもないが、鉄鋼材料のもつポテンシャルはきわめて多様性に富んでいる。本稿が鉄鋼材料の理解に少しでも役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟 鉄鋼統計専門委員会：鉄鋼統計要覧，日本鉄鋼連盟，(2014)，72.
- 2) 工業標準化について，日本工業標準調査会ウェブサイト，www.jisc.go.jp.
- 3) 例えば、谷野満，鈴木茂共著：材料学シリーズ，鉄鋼材料の科学，鉄に凝縮されたテクノロジー，内田老鶴圃，(2001)
- 4) 秋末治：まてりあ，33 (1994) 1, 24.
- 5) 岸田宏司：ふえらむ，2 (1997) 9, 679.
- 6) 富田俊郎：塑性と加工，54 (2013) 2, 111.
- 7) 福田宣雄，清水峯男：鉄と鋼，61 (1975) 6, 817.
- 8) T.Senuma, M.Kameda and M.Suehiro：ISIJ Int., 38 (1998) 6, 587.
- 9) 西村恵次，福井義光，川辺英尚：川崎製鉄技報，31 (1999) 3, 161.
- 10) 梅本実，登坂章男，小原隆史：ふえらむ，4 (1999) 8, 543.
- 11) 佐藤進，岡田進，加藤俊之，橋本修，花澤利健，恒川裕志：川崎製鉄技報，23 (1991) 4, 293.
- 12) A.H.Cottrell and B.A.Bilby：Proc.Phys.Soc., 62A (1949), 49.
- 13) W.G.Johnston and J.J.Gilman：J.Appl.Phys., 30 (1959), 129.
- 14) 藤田広志著：講座・現代の金属学 材料編3 材料強度の原子論，日本金属学会，(1985)，175.
- 15) K.Takeda, N.Nakada, T.Tsuchiyama and S.Takaki：ISIJ Int., 48 (2008), 1122.
- 16) 長島晋一，武智弘：鉄と鋼，54 (1968) 11, 1152.
- 17) T.Haratani, W.B.Hutchinson, L.L.Dillamore and P.Bate：Metal Sci., 18 (1984) 2, 57.
- 18) 阿部光延，小甲康二，林征夫，速水哲博：日本金属学会誌，44 (1980) 1, 84.
- 19) 高木節雄：第198回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(2009)，73.
- 20) 西澤泰二：まてりあ，40 (2001) 5, 437.
- 21) 片山裕之，水上義正：まてりあ，35 (1996) 12, 1283.
- 22) 若生昌光：まてりあ，35 (1996) 12, 1311.
- 23) 杉山昌章，長谷川泰士：日本金属学会誌，75 (2011) 1, 29.

(2015年4月20日受付)