

第 1 編 高性能な鋼材の製造技術とその特性

1. まえがき

本編では、鋼材の製造技術やその発展に支えられた鋼材の高性能化について、その概要や技術的な背景などを述べる

金属(Metal)とは、単一元素の固まりのうち、金属光沢をもち、熱や電気をよく導き、展性(圧力や打撃によって、破壊されることなく薄く広げることのできる性質)や延性(弾性限界を超えても破壊されずに引き伸ばされる性質)に富む物質のことである。また、さまざまな異種の金属間の固溶体(2 種以上の物質が混合して完全に均一な固相となる固体)や金属間化合物(金属元素同士が簡単な整数比で結合し、規則正しい配列をした結晶構造をもつ化合物)を合金(Alloy metal)といい、一般にはこれも金属に含まれる。金属には、金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)、鉄(Fe)、アルミニウム(Al)など様々なものがあるが、今日、建設用の金属系材料としては、鉄(Fe)に 0.02%～2.0%程度の炭素(C)を含有した鋼(Steel)が最も一般的に用いられている。

2. 鋼材の種類とその分類

2.1 鉄鋼材料の分類

鋼は、強度(Strength)、延性(Ductility)、(破壊)じん性(Toughness)などの機械的性質(Mechanical Properties)が優れており、所定の形に組み立てるための溶接性(Weldability)などの加工性(Workability)、長期間使用しても劣化がほとんど生じない耐久性(Durability)などにも優れており、建設分野ではコンクリートと並ぶ最も重要、かつ必要不可欠な材料として用いられてきている。

鉄鋼材料の性質を変化させる最も重要な元素は炭素(C)である。鉄(Fe)は、炭素(C)の含有量によってその性質が大きく変わり、炭素(C)量の少ないものは比較的柔らかくて良く粘り(低強度、高じん性)、炭素(C)量の多いものは硬くて脆い(高強度、低じん性)性質になることが知られており、炭素(C)の含有量によってその呼び名が区別されている。炭素(C)量が少ないもの(0.02%程度以下)を鉄(純鉄:Pure Iron)、標準的なもの(0.02%～2.0%程度)を鋼、多いもの(2.0%以上)を铸铁(Cast Iron)(または銑鉄(Pig iron))と呼んで区別している(表-2.1.1)。

表-2.1.1 鉄鋼材料の分類(炭素(C)量によるもの)

鉄(純鉄)	炭素(C)量が0.02%以下と少なく、軟らかく伸びが大きい。磁性材料や粉末冶金、触媒など用途が限られる。
鋼	炭素(C)を0.02～2.0%程度含むもので、強度と粘り強さを兼ね備えている。現在、構造物として使われる鉄鋼材料のほとんどが鋼である。炭素(C)や他の元素の含有量などによって、鋼はさらに細かく分類される。
铸铁(銑鉄)	炭素(C)量が2.0%以上で鋼よりも多く、熔融温度(融点)が低い。材料を熱で溶かして型に流し込み、冷えて固まった後に型から取り出す鑄造に使われる。

それ以外にも、鉄鋼材料の分類は目的に応じて様々なものがある。その例を表-2.1.2に示す。

表-2.1.2 鉄鋼材料の分類の例

(1)成分による分類	普通鋼、炭素鋼、極低炭素鋼、低炭素鋼、中炭素鋼、高炭素鋼、特殊鋼、合金鋼、低合金鋼、中合金鋼、高合金鋼、Si-Mn鋼、Ni鋼、Cr鋼、Mo鋼、Ni-Cr 鋼、Cr-Mo鋼、Cr-Mo-V鋼、高Mn鋼、ケイ素鋼など
(2)硬さおよび強さによる分類	極軟鋼、軟鋼、硬鋼など 高強度鋼、高張力鋼、超高張力鋼など
(3)性質による分類	普通鋼、特殊鋼、強靱鋼、肌焼鋼、窒化鋼、耐熱鋼、低温用鋼、耐候性鋼、耐海水鋼、耐摩耗鋼、耐サワー鋼、非時効性鋼、快削鋼、ステンレス鋼、超合金、電磁鋼、非磁性鋼など
(4)用途による分類	自動車用鋼板、一般構造用鋼、橋梁用鋼、建築構造用鋼、機械構造用鋼、圧力容器用鋼、ラインパイプ用鋼、配管用鋼管、ボイラー用鋼管、熱交換器用鋼管、化学用鋼管、油井用鋼管、構造用鋼管、工具鋼、高速度鋼、軸受鋼、ばね鋼、ピアノ線など
(5)形状による分類	薄板(薄鋼板)、中板、厚板(厚鋼板)、極厚板、ストリップ(帯鋼)、鋼管、形鋼、H形鋼、I形鋼(Iビーム)、山形鋼(アングル)、鋼矢板(シートパイル)、条鋼、棒鋼、線材、箔など
(6)製造工程・熱処理工程による分類	熱延鋼板、熱延まま鋼、非調質鋼、焼ならし鋼、調質鋼、焼入れ焼戻し鋼、TMCP鋼、冷延鋼板、連続焼鈍冷延鋼板、鑄鋼、鍛鋼など

(7)金属組織・特殊熱処理法による分類	フェライト鋼，フェライト・パーライト鋼，パーライト鋼，オーステナイト鋼，ベイナイト鋼，マルテンサイト鋼，二相鋼，オースフォーム鋼，マルエージング鋼，PHステンレス鋼など
(8)後処理による分類	表面処理鋼板，トタン，ブリキ，亜鉛鉄板，メッキ鋼板，溶融亜鉛メッキ鋼板，電気亜鉛メッキ鋼板，有機塗装鋼板，着色鋼板，カラー亜鉛鉄板，カラーステンレスなど
(9)製鋼法・脱酸法による分類	転炉鋼，平炉鋼，電炉鋼など リムド鋼，セミキルド鋼，キャップド鋼，キルド鋼，アルミキルド鋼，チタン脱酸鋼など

2.2 鉄鋼材料の生産量と建設分野での使用量

第二次世界大戦後の主要な鉄鋼生産国・地域別の粗鋼生産量の推移を図-2.2.1に示す。粗鋼(crude steel)とは、転炉や電気炉などで精錬された鋼のことで、圧延や鍛造など加工をして製品とする前の鋼である。鉄鋼製品には鋼材や鋳鍛造品などいろいろなものがあるが、最終製品では各々製造工程が異なり歩留などが異なるため、生産量の比較を行う場合はこれらの原料となる製鋼段階の粗鋼が指標として用いられることが多い。現在、国別での粗鋼生産量の第1位は中国、第2位はインドで、近年における両国の粗鋼生産は飛躍的に伸びている。鉄鋼製品は建設業、機械産業、自動車、その他の高級消費財などの生産に必要な原材料であり、鉄鋼の生産は、大量の原材料・エネルギー、機械設備の投入を要することから、産業発展の牽引車にもなっている。かつての日本がそうであったように、中国の鉄鋼業はここ20年あまりの急速な経済成長に伴い、生産力が大きく上昇し、コロナ禍の前の2019年度の粗鋼生産量はおよそ10億トンに達し、世界生産(18億7千万トン)の5割超を占めるまでに成長している。

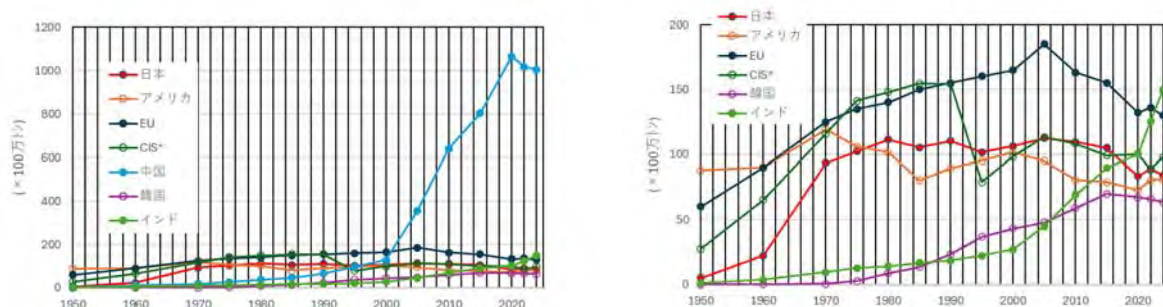


図-2.2.1 主要製鉄国・地域の粗鋼生産長期推移 ²⁾を参考に編集作成

[出典：Steel Statistical Yearbook, Statista, World Steel Association]

日本では戦後すぐの1946(昭和21)年の20万トンから1973(昭和48)年に1億2千万トンを記録するまでは高度成長期に飛躍的に増大したが、以降は1億トン前後でほぼ横ばいであり、2019年の粗鋼生産量は9,928万トンで世界第3位である。鉄鋼の生産量は経済成長に比例すると言われており、人口一人あたりの鉄鋼消費量は経済成長に伴って増加する傾向にある。世界鉄鋼協会(World Steel)によれば、2021年の世界の鉄鋼需要量は18.7億トンと予測されているが、長期的に見ても世界の鉄鋼需要は拡大傾向が続き、世界の人口増加予想や経済成長予測等を踏まえると、世界の粗鋼生産量は2019年の18.7億トンから、2050年に約27億トン、2100年に約38億トンに増加するとの試算もある。

日本の鉄鋼業の最大の武器は、長年にわたって培われた高度な技術力である。海外の鉄鋼メーカーでは生産が難しい「高級鋼材」を、日本の鉄鋼業は得意としている。自動車向けの鋼板、石油や天然ガスの採掘用のパイプや輸送に用いられるパイプライン用の鋼材など、高度な技術を要求される高品質の鋼材については、日本の鉄鋼メーカーの独壇場である。

日本国内での 2019 年度の普通鋼の分野別鋼材需要量を図-2.2.2 に示す。国内の鋼材消費量は、およそ 5,000 万トンであり、土木、建築を合わせた建設分野で半分近くの約 43%を占めている。

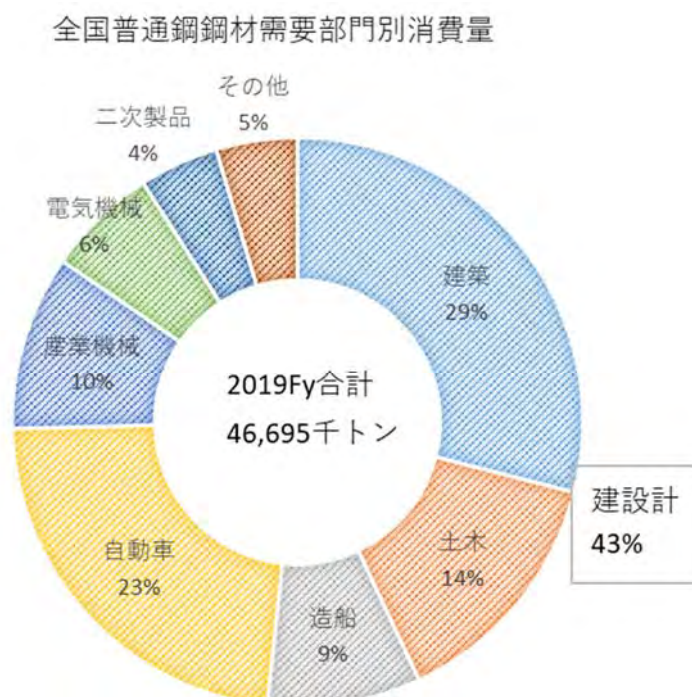


図-2.2.2 日本国内の鋼材需要部門別消費量の割合 ³⁾ を参考に編集作成

[出典：(一社)日本鉄鋼連盟ホームページ，用途別受注統計，日本鉄鋼連盟，2022 年]

土木分野の中で鋼材を利用する代表的な構造物の一つである橋梁（鋼材を主体とする鋼橋）に着目し、(一社)日本橋梁建設協会における鋼橋上部工の受注量(国内、海外を含む)の推移を図-2.2.3に示す。土木鋼構造物の中では橋梁がその象徴に位置づけられることが多いが、近年では 20 万トン／年程度と量としては多くはない。しかし、新しい技術の導入により、高性能な鋼材適用をリードしてきた分野であり、土木鋼構造のシンボルともいえる分野である。



図-2.2.3 鋼橋受注量の推移 ⁴⁾ を参考に編集作成

[4) 橋梁年鑑 令和 2 年版，日本橋梁建設協会]

第2章 参考文献

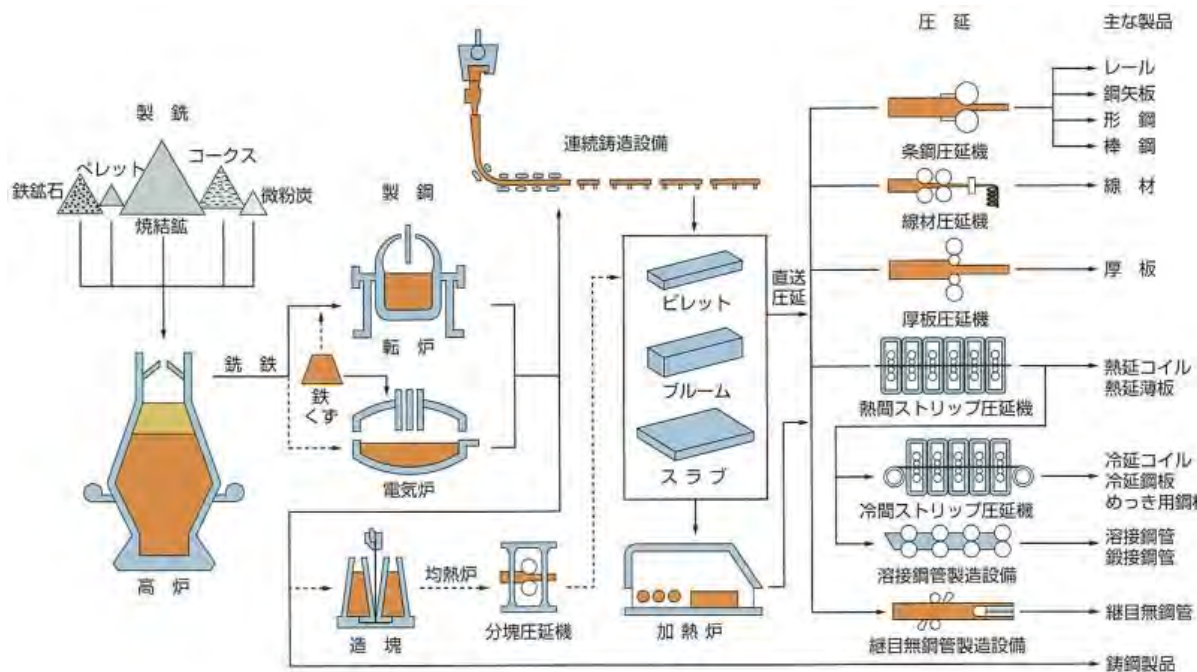
- 1) 日本製鉄(2020)：日本製鉄ファクトブック 2020
- 2) Steel Statistical Yearbook, Statista, World Steel Association
- 3) (一社)日本鉄鋼連盟ホームページ，用途別受注統計，日本鉄鋼連盟，(<https://www.jisf.or.jp/data/yoto/index.html>)，2022年 [2022.6.17 確認]
- 4) 橋梁年鑑 令和2年版，日本橋梁建設協会

3. 鋼材の製造技術

鉄鋼材料のもととなる鉄(Fe)を製造する方法である製鉄法は、高炉(Blast furnace：溶鉱炉ともいう)を用いて鉄鉱石と石炭などの原料から鉄(Fe)を取り出す高炉法と、電気炉(Electric furnace：電極に高電圧をかけてアーク熱を発生させる炉)を用いて鉄スクラップを溶解して鉄を得る電炉法に二分される。一般に高炉材は均質な原料を使用し、それを厳密に管理された製造ラインで製造するために、高品質であるとされている。一方、電炉材はスクラップを原料としているため、一般的に品質にバラツキが生じやすく、製造工場ごとに設備や製法が異なるため品質の違いが生じる可能性があるとしている。このため、現時点では高性能鋼材のほとんどが高炉法により製造されている。

3.1 鋼材の製造工程

高炉法を例にとると、鋼材は一般に、**図-3.1.1** に示す工程で生産されている。原料の鉄鉱石から鉄を作り出す工場を製鉄所(Steel Mill)と言い、高炉を使って鉄鉱石から鉄を取り出し、これを精錬して加工し、鋼板(Steel plate)、鋼管(Steel pipe)、形鋼(Shaped steel)、棒鋼(Steel bar)、亜鉛鉄板(Galvanized steel sheet)などの最終製品を作り出すまでの工程を持つ製鉄所は銑鋼一貫製鉄所と呼ばれている。銑鋼一貫製鉄所では大まかには、製銑(溶鉱炉で鉄鉱石から銑鉄(4～5%程度の炭素(C)を含む鉄(Fe))を作る工程)→製鋼(不純物の除去や合金元素の添加により、銑鉄から溶鋼(溶けた鋼)を作る工程)→ casting(溶鋼をスラブ、ブルームなどの固まりに casting 込む工程)→圧延(スラブ、ブルームなどを圧延機に通して棒・板などに引き延ばす工程)という過程を経て製造されている¹⁾。また、一部の製品では、型に溶鋼を流し込んで固める casting 鋼や、圧延の代わりに鍛造で成形されるものなどもある。これらの工程のそれぞれにおいて、技術の大きな進展が図られてきているが、製鋼工程における不純物の除去精度の向上などによる成分系のコントロールの高精度化や、圧延工程における温度制御技術の進歩が鋼材の高性能化に直接的に大きく寄与してきた。以下、各工程の概要と技術の進展について簡単に示す。



※表面処理設備をへて電気ブリキ、電気亜鉛めっき鋼板、溶融亜鉛めっき鋼板などの製品に

図-3.1.1 鋼材の製造工程¹⁾

[出典：鉄ができるまで[パンフレット]，日本鉄鋼連盟，2015]

3.2 各工程の概要と鋼材の高性能化への貢献

3.2.1 製鉄工程

製鉄プロセスの最上流に位置する製鉄(せいせん)工程は、天然資源である鉄鉱石から炭素(C)を多く含む鉄(Fe)である銑鉄(pig iron)を得る工程である。酸素(O)と結び付いた酸化鉄を含む鉄鉱石と石炭を蒸し焼きにしたコークスを高温下で化学反応させ、酸化鉄から酸素(O)を取り除いて(還元)、鉄(Fe)を取り出す。鉄鉱石から銑鉄を製造する設備は高炉(または溶鉱炉)と呼ばれ、その高さは 50m 以上にもなり、製鉄所のシンボルになっている(写真-3.2.1)。高炉は、鉄鉱石に含まれる酸素(O)を効率よく除去(還元)する装置であり、生産性とエネルギー効率を追求した結果として、円筒のトックリ型の形状をしている。高炉の原型は 14~15 世紀に出現し、改良が加えられてきた。18 世紀後半以降の近代において発展した製鉄―製鋼プロセスにより高品質の鋼が大量生産されるようになり、今日に至るまで銑鉄製造の主流となっている。日本では、1857 年に近代製鉄の夜明けとなった釜石の大橋高炉が登場した後、1901 年に官営八幡製鉄所で高炉操業が開始され、以後 100 年以上にわたって高炉製鉄が生産の優位を保ち続けている。



写真-3.2.1 高炉(溶鉱炉)の例²⁾

【出典：日本製鉄(2026a)：日本製鉄株式会社ホームページ／企業情報／工場見学／製鉄工程】

高炉による製鉄の主原料は、鉄鉱石、石炭、石灰石であるが、高炉内での反応の促進や強度を確保する観点から、原料の鉄鉱石は、粉状にした鉄鉱石を石灰石と混ぜて一定の大きさに焼き固めた焼結鉱に、燃料の石炭は蒸し焼きにしたコークスにして用いられる。高炉の最上部(炉頂)から焼結鉱とコークスを交互に層を作るように装入し、その層状態をなるべく崩さないように炉内を下降させる。炉下部にある送風羽口からは熱風とコークスの補完還元材である微粉炭などを吹き込む。この熱風で微粉炭やコークスが燃焼し、一酸化炭素(CO)や水素(H)などの高温ガス(還元ガス)が発生する。そしてその還元ガスが激しい上昇気流となって炉内を吹き昇り、炉内を下降する鉄鉱石を昇温させながら酸素(O)を奪い取っていく(間接還元)。溶けた鉄(Fe)分はコークス層内を滴下しながらコークスの炭素(C)と接触してさらに還元(直接還元)され、炭素(C)を 5%弱含む溶銑(溶けた銑鉄)となり炉底の湯溜まり部に溜まる。溶銑は炉底横に設けられた出銑口から取り出され、次の製鋼工程へと運ばれる。出銑と同時に、シリカ(SiO_2)やアルミナ(Al_2O_3)などの鉄鉱石中の不純物が溶解・分離されたスラグも排出され、これらの副産品はセメント材料などとして再利用される。

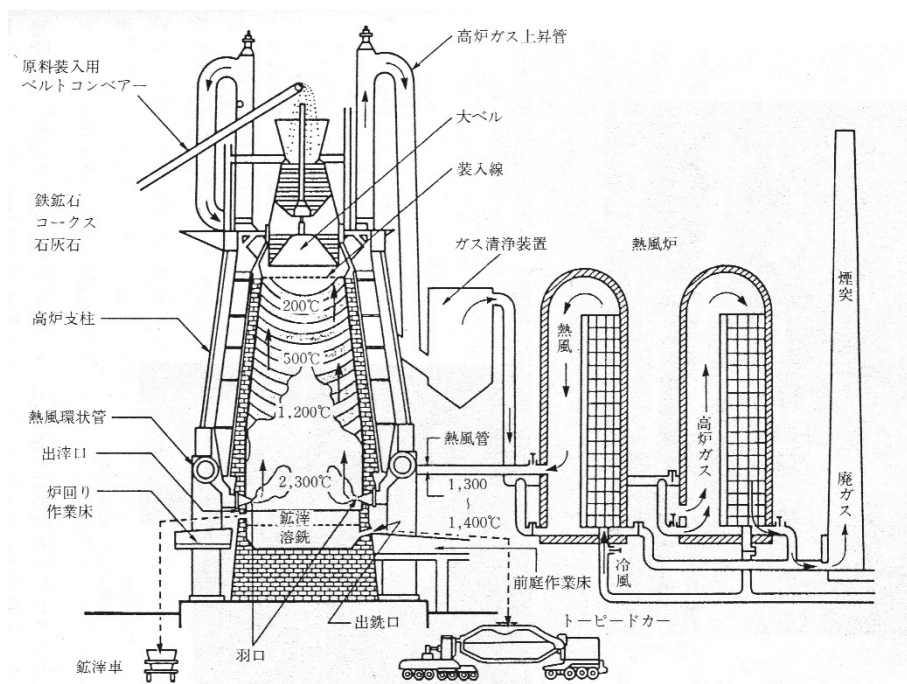


図-3.2.1 高炉と周辺設備³⁾

[出典：橋本篤秀[監修](1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版]

高炉で取り出された銑鉄は硬いけれどももろくて壊れやすく、鋳型に入れて鋳物にすることはできるが、押し曲げたり伸ばしたり加工することはできない。銑鉄の一部は鋳物(鋳鉄・鋳鋼製品)の原料となる鋳物銑となるが、大部分は次工程の製鋼用の原料となる。そのため、精錬して過剰な炭素(C)や不純物を取り除く製鋼工程へ送られる。

高炉では、以上のような工程で製鉄が行われているが、製鉄工程においては、高炉の大型化による製造の効率化、より安価な原燃料の使用技術、高炉／コークス炉の寿命延長技術、エネルギー削減技術、廃棄物のリサイクル技術、地球環境対応技術等の開発が行われ、高品質な鋼材を安定的かつ経済的に供給することに貢献してきた。

3.2.2 製鋼工程

高炉において取り出した溶銑(溶けた銑鉄)は、4～5%の炭素(C)を含み、燐(P)、硫黄(S)などの不純物も多いため、これらを低減し、種々の用途に適用できる鋼に精錬する工程が製鋼工程である。製鋼では、通常、大量生産方式に適した転炉(Converter)が用いられ、特殊な場合(たとえば転炉での成分調整が困難、または少量生産など)には電気炉が用いられている。

高炉で取り出された溶銑は魚雷(トープード)の形をしたトープードカー(混銑車)に入れて製鋼工場へ運ばれる(写真-3.2.2)。転炉法による製鋼工程では、トープードカーでの運搬途上における溶銑予備処理(溶銑に含まれるケイ素(Si)や硫黄(S)、燐(P)などの不純物を予め除去するプロセス)と、転炉において炭素(C)を除去する一次精錬により不純物を取り除かれ、そしてその後、溶鋼中に残った水素(H)や窒素(N)などの気体を取り除き、必要に応じてさらに硫黄(S)を除去し、かつ成分調整の合金添加を行う二次精錬が行われる。



写真-3.2.2 トーピードカー(混鉄車)

製鋼工程の中心となる転炉はつぼ型（洋梨型）で，この中で銑鉄が鋼に精錬される．まず少量の鉄スクラップが装入され，次に高炉から出銑された溶銑がトーピードカーから溶銑鍋（溶銑を運搬する容器）に移され，溶銑鍋から転炉へ流し込まれ(写真-3.2.3)て，炭酸カルシウム（生石灰）を主成分としたスラグ原料を加えて転炉内での精錬が始まる．高圧の酸素(O)を吹き込み，攪拌することで，その酸素(O)が銑鉄中の炭素(C)，ケイ素(Si)，燐(P)，マンガン(Mn)などと急速に反応し，燃焼による高熱が発生する．ここで生じた酸化物は炭酸カルシウムと結び付き，スラグとして安定化する．この酸化反応によって炭素(C)が除去されるとともに，燐(P)やケイ素(Si)は比重が軽く上部に浮上するスラグに取り除かれ，低炭素(C)で不純物の少ない鋼が生まれる．それでもまだ微量の酸素(O)や不純物が残る．不純物の少ない高級鋼を製造するためにはこれらの成分をさらに取り除いて成分を調整する二次精錬が行われる．二次精錬の方法は多様だが，真空の容器に溶鋼を吸い上げ，またはアルゴン(Ar)ガスなどの不活性ガスを吹き込んで還流させて，炭素(C)，酸素(O)，窒素(N)，水素(H)などの不要な成分をガスとして抜いてしまう真空脱ガス技術が広く用いられている(図-3.2.3)．



写真-3.2.3 溶銑鍋から転炉への溶鋼の挿入の例⁴⁾

[出典：日本製鉄(2026b)：日本製鉄株式会社ホームページ／企業情報／工場見学／製鋼工程]

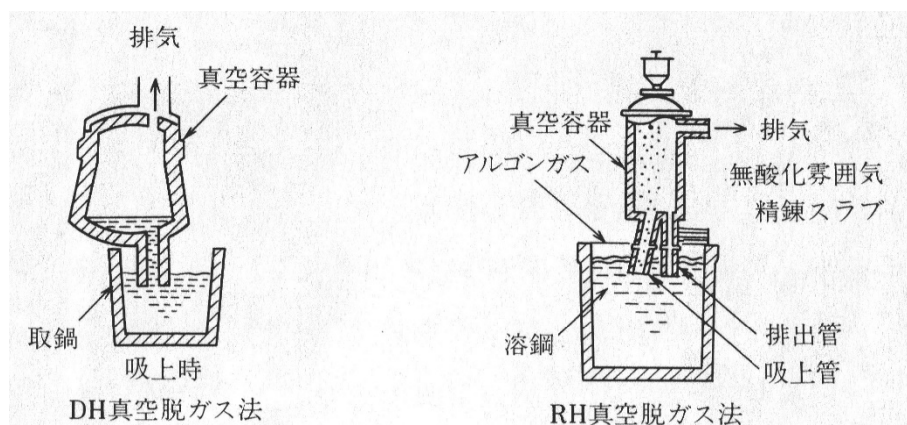


図-3.2.3 真空脱ガス処理³⁾

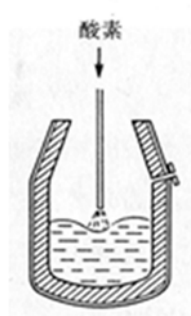
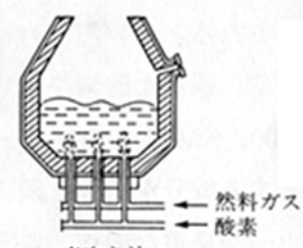
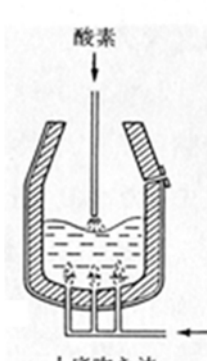
[出典：橋本篤秀[監修](1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版]

現在の転炉の原型（酸性底吹き転炉法）は，1856 年，イギリスの H.ベッセマーによって発明（ベッセマー転炉）された．当初は，転炉底のノズルから空気（酸素(O)）を吹き込む底吹きで，銑鉄中の炭素(C)を一酸化炭素(CO)，二酸化炭素(CO₂)に変換して取り除いた．しかし，炉壁の材料が珪石でできていたことから，不純物である燐(P)が取り除けなかった．これを改良したのが 1879 年に登場した「トーマス転炉（塩基性底吹き転炉法）」であり，溶銑中の燐(P)を除去することができるようになった．それと並行して，1856 年に登場した平炉（蓄熱炉，open-hearth furnace）が，アメリカを中心に普及した．銑鉄と鉄スクラップを入れて，蓄熱室で加熱した空気で燃料を燃焼させ，その熱を反射盤で炉全体に回し，加熱しながら不純物を酸化させて溶鋼をつくる方法である．しかし，平炉では冷えた銑鉄やスクラップを使用し，加熱に時間がかかるため徐々に衰退し，1960 年代以降はわが国からは姿を消している．

転炉に酸素(O)を吹き込む方法も，表-3.2.1 に示すような改良が加えられ，現在は上底吹き転炉が主流になり，上から吹き込まれる酸素(O)と底部からの攪拌力によって，製鋼に要する時間は飛躍的に短縮されている．

表-3.2.1 転炉の酸素吹き込み方法³⁾を参考に編集作成

[出典：橋本篤秀[監修](1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版]

 酸素 上吹き法	 酸素 燃料ガス 底吹き法	 酸素 不活性ガス 炭酸ガス 燃料ガス 酸素 上底吹き法
1949 年，上から吹くだけで十分に溶銑が攪拌されることがわかり，「上吹き転炉」が実用化された．	底部を保護する技術が現れ，再び底吹き転炉が登場．攪拌力が強く反応速度は速いが，上部の温度が上がりにくかった．	現在の主流．上吹きで酸素を吹き込みながら，攪拌力の強い底吹きを補完的に行う手法

鋼材に含まれる不純物の低減が図られている例として、硫黄(S)の精錬限界の変遷を図-3.2.4に示す。技術の進展により、精錬限界の大幅な低減が図られてきていることがわかる。

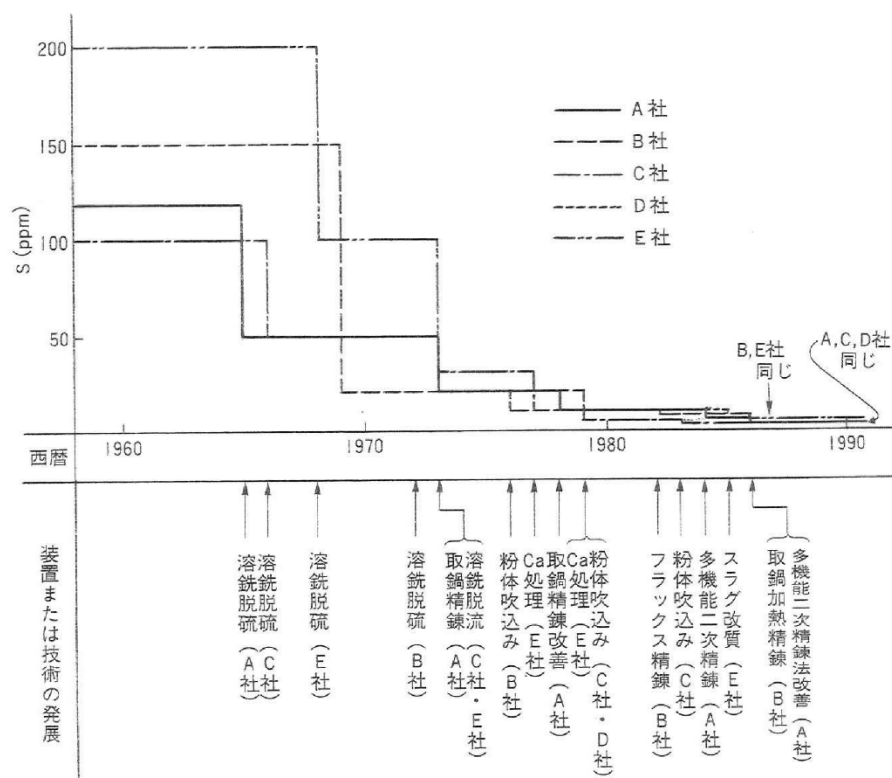


図-3.2.4 硫黄(S)の精錬限界の変遷⁵⁾

[出典：梶岡博幸(1997)：取鍋精錬法—多品種・高品質鋼 量産化への挑戦—，地人書館]

3.2.3 連続鋳造（連鋳）と造塊

製鋼工場で精錬を終了した溶鋼は、鋳型に注入・凝固させ、スラブやビレットなどの鋼片となる。1960年代までは、鋳型に溶鋼を流し込み、自然に冷やして固めた鋼の塊を再び加熱して、分塊圧延機で伸ばして鋼片をつくっていたが、1970年代になると、溶鋼から直接鋼片をつくる連続鋳造の適用が拡大していき、今日ではほぼ100%が連続鋳造となっている。連続鋳造で対応できない特殊な場合（たとえば、大単重鋼板、極厚鋼板など）では、現在でも造塊法により製造される場合がある。

（1）連続鋳造

連続鋳造(Continuous Casting)法は、溶鋼を最上部の鋳型に注ぎ、側面が凝固したものを鋳型の底から引き出していく。分塊工程の省略による生産性向上と、溶鋼の熱を効率的に活用できる省エネルギー、偏析が少なく品質が安定している。などの特長がある。連続鋳造では、溶鋼が固まるまでに、鋼中の介在物をできるだけ浮かせて除去するため、鋳造機の形状を工夫したり、電磁攪拌技術（磁界を回転移動させて溶鋼に流れを作り、介在物が溜まったまま固まらないようにする技術）を導入することにより、凝固過程で生じる偏析や介在物を軽減し、スラブの品質を一段と向上させている。

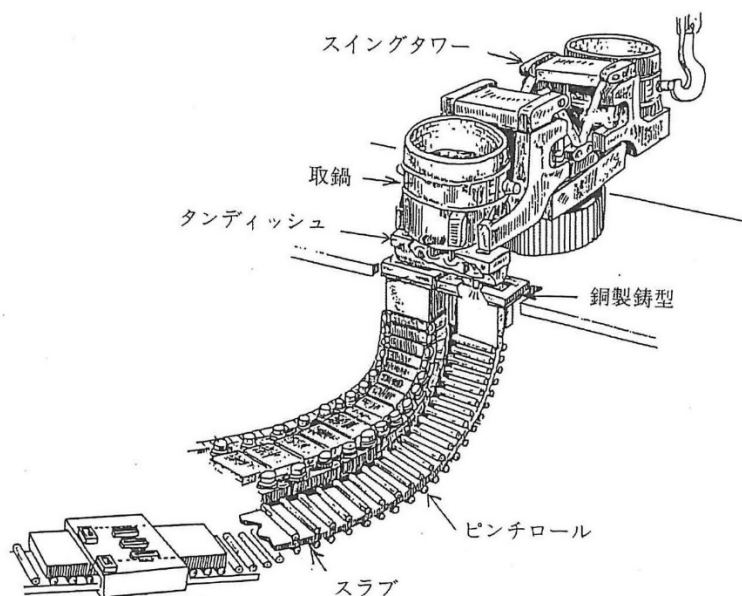


図-3.2.5 連続鋳造機³⁾

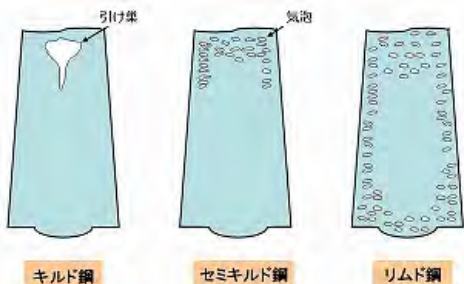
[[出典：橋本篤秀[監修](1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版]]

（2）造塊

現在ではそのほとんどが連続鋳造となり、使用されることが少なった鋼塊法であるが、鋳型へ溶鋼を注入して作る鋼塊は、溶鋼の脱酸の強弱によりリムド鋼(rimmed steel)、セミキルド鋼(semikilled steel)およびキルド鋼(killed steel)に区分される(表-3.2.2)。鋼の品質に着目すると、リムド鋼、セミキルド鋼、キルド鋼と脱酸が強化されるにしたがって内部品質は良好となる。現在でも造塊法により製造される極厚鋼板あるいは大単重鋼板ではキルド鋼が用いられている。

表-3.2.2 鋼塊の種類⁶⁾を参考に編集作成

[出典：ヤマシナ(2026)：株式会社ヤマシナホームページ／ねじ職人コラム／ねじ用材料③]

キルド鋼	キルド鋼は、フェロシリコンやアルミニウム等で脱酸が十分に行われているため、内部に不純物が少ない鋼である。気泡が無く組織は大体均一で優良な性質を備えている。そのため、キルド鋼で作られる鋼は、品質は優れているが、圧延歩留りが悪いため、比較的高価な鋼といえる。脱酸が十分な為、固まる際のガスの放出がなく静かに凝固する。死んだように静かな鋼、酸素を殺す(killed)という意味でキルド鋼と呼ばれている。
セミキルド鋼	セミキルド鋼は、キルド鋼とリムド鋼の中間程度の脱酸を行った鋼である。
リムド鋼	リムド鋼は添加材を使用せず、キルド鋼に比べ脱酸が十分でないため、内部に炭素(C)・磷(P)等の不純物が残り品質が一定しない。しかし、圧延歩留りが良いため、キルド鋼に比べ安価な鋼といえる。脱酸が不十分な為、 casting 及び凝固中にガスが放出し火花を散らしながら外側から固まり、表面に「リム層」という層ができる。リムとは「ふち」の事で、リムド鋼とはふち付鋼という意味である。
	

3.2.4 圧延工程：制御圧延・制御冷却(TMCP)，形鋼圧延など

圧延とは、2つあるいは複数のロールを回転させ、その間に鋼を通すことによって板・棒・管などの形状に加工する方法である。製鋼工程で成分調整したスラブなどの鋼片を赤熱するまで加熱してロールの間で押し延ばし、板や形鋼などのいろいろな形状に加工する工程を熱間圧延という。鋼片などを圧延したものを鋼材と呼ぶ。厚板、形鋼などのほとんどは熱間圧延だけで最終製品を作り込むが、薄板では熱間圧延した鋼材をさらに常温で圧延する工程で製造されており、その製品は冷間圧延材と呼ばれる。ちなみに、鉄鋼製品の分類では、板厚 3mm を境として、それより薄いものを薄板(Steel sheet)、それより厚いものを厚中板と呼び、3～6mm を中板、6mm 以上を厚板(Steel plate)と区分している。

圧延作業は、鋼材製造工程の中心をなすものであり、圧延の良否が寸法精度、平坦度、表面品質、機械的性質など鋼材の品質におよぼす影響は大きい。適切な形状にするためには、圧延方法を目的・用途に合わせて選択する必要がある。厚板の製造には上下に配置したロール圧延、H 形鋼の加工には上下左右から圧延するユニバーサル圧延など加工形状に合わせた圧延方法が選択される。



写真-3.2.4 厚板の圧延の例⁷⁾

【出典：日本製鉄(2026c)：日本製鉄株式会社ホームページ／企業情報／工場見学／厚板工場】

さらに、最近では仕上圧延機の直後に加速冷却設備を設置し、オンラインで圧延後の鋼板の冷却速度を制御する技術が開発、実用化されており、この技術により低炭素当量(C_{eq})で高強度、高じん性な鋼板の製造が可能となり、また、オンラインでの焼入れも可能となっている。

3.2.5 鋼管の製造方法

鋼管は、その必要サイズおよび要求性能に応じて各種の製管法により製造されている。鋼管の製造方法の模式図を図-3.2.6に示す。

まず、製造方法により継目無鋼管(シームレス鋼管)と溶接鋼管の2種類に分類される。

継目無鋼管は、ビレットと呼ばれる中実の棒状素材にピアサーで孔あけ加工をした後、マンドレル圧延と呼ばれる方法により鋼管形状に圧延し、更にサイザーで形状を整えて鋼管を製造する。製造された鋼管には必要に応じて熱処理が施される。継目無鋼管は製造方法の特性から小中径の厚肉の鋼管に多く適用される。

溶接鋼管は、主としてスパイラル鋼管、電縫鋼管、UOE鋼管に分類される。

スパイラル鋼管は熱延鋼板(ホットコイル)を母材として、これをらせん(スパイラル)状に成型して製造される。製管溶接は内面および外面から主にサブマージアーク溶接を適用して実施される。この製造法は熱延鋼板を原料とすること、らせん成型をすることから原材料の幅に関わらず大径の鋼管を成型でき、比較的薄肉大径の鋼管の製造に適している。

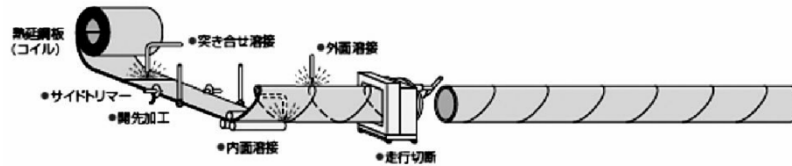
電縫鋼管はスパイラル鋼管と同じく熱延鋼板を原料として製造される。鋼管の直径に応じた幅にスリットされたコイルを筒状に成型しつつ突合せ部を電気抵抗溶接し鋼管を製造する。熱延鋼板を母材とすること、鋼管直径が熱延鋼板の幅に制約を受けることから薄肉で比較的径の小さな鋼管の製造に適する。

UOE鋼管はスパイラル鋼管や電縫鋼管と異なり厚板を母材として、プレス成形により鋼管形状に成型し突合せ部を内外面からサブマージアーク溶接して製造される。プレス成形の途中段階で鋼板断面がU型、O型になること、製管溶接後に拡張(Expand)を行うことからUOE鋼管と呼ばれる。本製造方法は厚板を母材とすることから大径厚肉の鋼管製造に適している。

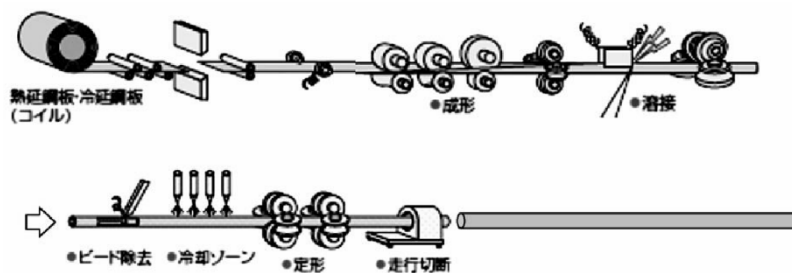
このほか、厚板をローラーやプレス機で円形に成形し、突き合わせ溶接して鋼管とする板巻き鋼管があるが、専用の工場や鋼構造物の製作工場で製造されるものであり、製鉄所では製造されていない。



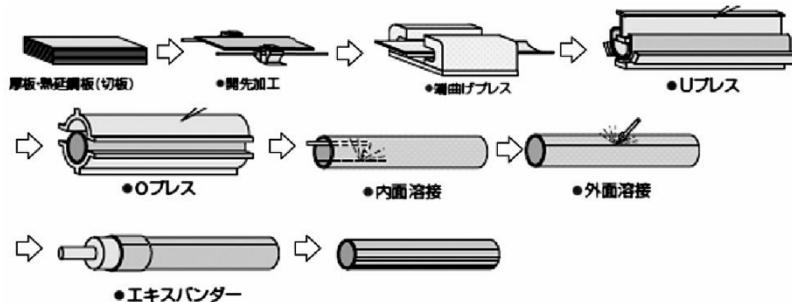
(a) 継目なし鋼管



(b) スパイラル鋼管



(c) 電縫鋼管



(d) UOE 鋼管

図-3.2.6 鋼管の製造方法の例⁸⁾

[出典：濱田昌彦(2011)：パイプライン「材料編」，溶接接合教室，溶接学会誌，Vol. 80, No. 2, pp. 44-51]

3.2.6 後処理

(1) 熱処理

規格に熱処理が規定されている場合，あるいは必要により熱処理を行う場合には，鋼材は熱処理工程に送られる．熱処理工程は，所定の温度への加熱，均熱保持および冷却の3工程からなり，目的とする特性を付与するために焼入焼戻し，または焼ならしなどの処理が行われるが，目的に応じて温度や保持時間，冷却速度などが調節されている．

また，焼入れ時の冷却性能の向上および熱処理材の表面品質確保のため，熱処理前にはショット工程を通し圧延スケールが除去される．焼入装置についても，焼入れ時の冷却効率が優れ，かつ，鋼板の焼入れムラの減少および平坦度の改善に効果のある装置が広く用いられている．

(2) 表面処理

橋梁の主部材に使われることはないが、付属品などに用いられる厚さ 3mm 以下の薄板と呼ばれる鋼板では、機械的性質とともにその表面形状や外観が重視されることが多く、さびを防止するために各種の表面処理を施した美しい製品が要求される。表面処理の代表的なものは金属被覆であり、そのほとんどはめっきである。鋼板の表面を錫(Sn)でめっきしたものはブリキ、亜鉛(Zn)でめっきしたものは亜鉛鉄板(トタン)である。メッキ以外にも塗装や化学的な処理を施したものがある。表面処理鋼板では、圧延後に連続処理がなされており、精密な制御のもとに安定した品質の製品が高効率で大量に生産されている。

第3章 参考文献

- 1) 鉄ができるまで[パンフレット], 日本鉄鋼連盟, 2015
- 2) 日本製鉄(2026a): 日本製鉄株式会社ホームページ/企業情報/工場見学/製鉄工程
(<https://www.nipponsteel.com/company/tour/process01.html>), [2026.4.6 確認]
- 3) 橋本篤秀[監修](1993): 建築構造用鋼材の知識, 鋼構造出版
- 4) 日本製鉄(2026b): 日本製鉄株式会社ホームページ/企業情報/工場見学/製鋼工程
(<https://www.nipponsteel.com/company/tour/process02.html>), [2026.4.6 確認]
- 5) 梶岡博幸(1997): 取鍋精錬法—多品種・高品質鋼 量産化への挑戦—, 地人書館
- 6) ヤマシナ(2026): 株式会社ヤマシナホームページ/ねじ職人コラム/ねじ用材料③
(<https://www.kk-yamashina.co.jp/column/2012/05/28/%e3%81%ad%e3%81%98%e7%94%a8%e6%9d%90%e6%96%99%e2%91%a2/>), [2026.4.6 確認]
- 7) 日本製鉄(2026c): 日本製鉄株式会社ホームページ/企業情報/工場見学/厚板工場
(<https://www.nipponsteel.com/company/tour/process04.html>), [2026.4.6 確認]
- 8) 濱田昌彦(2011): パイプライン「材料編」, 溶接接合教室, 溶接学会誌, Vol.80, No.2, pp.44-51

4. 鋼材の高性能化技術

4.1 鋼材のもつ特性への要求

橋梁や建築、造船などの鋼構造の発展の歴史を振り返ると、構造物の大型化が進展するとともに、設計・施工の合理化、耐久性の向上などの要求性能の多様化が継続的に生じてきており、これらの多様な要求を満たすために、様々な性能を有する高性能鋼材の開発と利用が進められてきた。各種鋼構造物においては、構造物の大形化などに対する安全性を確保して、それに加えて、溶接作業の効率化などを実現しながら設計・施工の合理化をはかるために、鋼材に要求される諸性能は一段と厳しくなるとともに、それに加えて多様化が進展してきた。これに伴い鋼材には、主に、高強度化やじん性の改善、耐ぜい性破壊特性の向上、溶接性の改善と継手性能の向上、内部欠陥、偏析および非金属介在物の低減などが求められ、これらの性能を飛躍的に改善する高性能鋼の研究、開発が行われてきた。

4.2 鋼材特性の高性能化の方法

図-4.2.1 は鋼の理論的な強度と実用的な鋼材の強度レベルとの対比を示したものである。鋼材の強度は、様々な手段により高められていることがわかる。

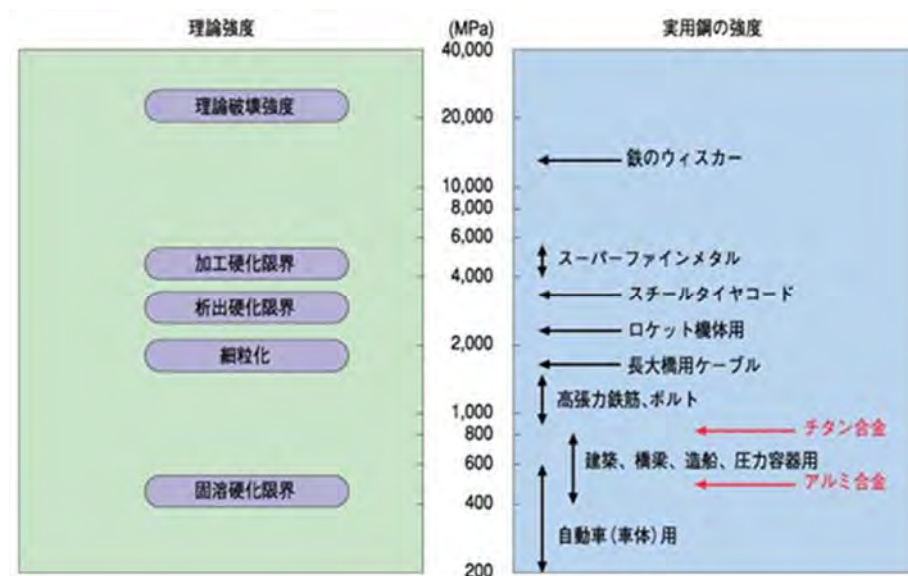


図-4.2.1 鉄の理論強度と実用鋼の強度レベル¹⁾

〔出典：JFE21 世紀財団(2022)：JFE21 世紀財団ホームページ，鉄鋼プロセス工学入門，第1章 A. (7) 実用鋼の強度〕

鋼材の機械的性質，加工性，溶接性などの諸性質は，基本的には添加される合金成分(化学成分)と鋼材の有する金属組織の影響を大きく受ける。高性能な鋼材の実現を可能にする重要な手段としては，所定の性能を得るために効果のある添加元素の種類と量を決定する成分設計と金属組織を適切に制御する圧延，熱処理技術があげられ，必要に応じてこれらを種々組合せることによって鋼材の持つ性能を最大限に引き出すことで，所要の性能を有する各種鋼材が開発されてきている。

4.2.1 冶金学的方法

(1) 化学成分の影響

鋼は，金属元素である鉄(Fe)を主成分とし，種々の元素を含有させた合金である。鋼中には，必要に応じて種々の元素が添加されるが，それ以外にも不純物として磷(P)，硫黄(S)など，ガス成分として水

素(H), 酸素(O), 窒素(N)などを含有している。鉄以外の元素は、微量であっても鋼の性質に大きな影響を及ぼすため、不純物の低減と添加元素の効果を引き出す成分設計の進展が高性能鋼の実現には重要になる。

鉄鋼材料の強度に最も大きな影響を与える元素は炭素(C)である。炭素(C)そのものは硬くはないが、鋼中ではセメンタイト(Fe_3C)と呼ばれる炭化物となり、硬くかつ引張強さも大きくなる効果がある。炭素鋼における炭素(C)量と鋼材の引張強度の間にはおおよそ次の関係があるとされている【大和久, 1978】²⁾。

$$\text{鋼材の引張強さ(N/mm}^2\text{)}=9.8[(100\times\text{C}\%)+20] \quad \cdots (4.2.1)$$

実際の鋼材では炭素(C)量が増えると硬くなるとともに伸びが低下し、もろ(脆)くなる。また、溶接性などの加工性も著しく低下する。実際の鋼材に添加される元素は炭素(C)のみでなくケイ素(Si)、マンガン(Mn)、燐(P)、硫黄(S)などがあり、炭素(C)を含めたこれらの元素を鋼の 5 元素と言い、鋼の基本をなす元素である。これ以外により硬くするためや、高強度、耐疲労性、耐食性などを向上させるために様々な特殊元素が添加されている。これらの各種成分のうち主要元素が鋼材の性能に与える影響について表-4.2.1 に示す。

鋼材の製造においては、添加元素によってその性質が変化することを利用して、その量をコントロールすることにより、高性能化をはかることが重要な手段の 1 つになっている。

表-4.2.1 添加元素が鋼材の性質に及ぼす影響

C(炭素)	鋼中の C は、強度上昇、焼入性向上に有効であり、機械構造用鋼などは C 量を増し、さらに必要に応じて焼入焼戻し処理などを行い、高強度を得ている。しかし、C 量が増加すると延性、じん性が低下し、また、溶接性にも悪影響をおよぼすので、通常、溶接構造用鋼では C 含有量を 0.20% 以下におさえ、Si, Mn, V などの合金元素を添加している。
Si(ケイ素)	脱酸剤として添加される。通常、0.5% 以下であり、延性、じん性をほとんど損なうことなく強度を高める。また、この程度であれば溶接熱影響部 (HAZ) の硬化、延性低下にもそれほど大きな影響はないといわれている。
Mn(マンガン)	通常、2.0% 以下であり、Mn 量の増加とともに伸び、絞りおよびじん性をほとんど損なうことなく強度は上昇する。また、Mn は、焼入性を著しく高めるので、焼入焼戻し熱処理を施す鋼には必要な元素である。
P(燐)	鋼のじん性や溶接性を損ない、溶接時の高温割れ発生の原因ともなるので、通常、0.04% 以下におさえられている。しかし、耐候性向上に著しい効果があるので、溶接部のじん性劣化防止と高温割れ防止の対策を施した P 含有量 0.07% 以上の溶接構造用高耐候性高 P 系鋼板が実用化されている。
S(硫黄)	通常 0.04% 以下が不純物として含まれる。硫黄快削鋼のような特殊な例を除き、じん性、溶接性、加工性はもちろん、鋼板の板厚方向の特性にも悪影響をおよぼすので極力少なくすることが望ましい。
Cu(銅)	熱間加工割れの問題があるが、耐候性に効果があり、また、析出硬化により強度が増大する。耐候性鋼板には不可欠な元素である
Ni(ニッケル)	強度、じん性の双方に有効な元素であり、低温用鋼板などには必要に応じて 0.5 ~ 9% の Ni が添加されている。
Cr(クロム)	焼入性を増大させる。耐候性、耐食性の向上に有効な元素であり、耐酸化性、耐

	高温水素脆化性などの向上にも寄与する。耐候性鋼板，その他耐食性を必要とする鋼板，高温用鋼板などには不可欠な元素である。
Mo(モリブデン)	高温強度を増し，焼戻し脆化を防止する有効な元素であり，高温用鋼には 0.5～1.0%の Mo が添加されている。
V(バナジウム)	強度を増加させるとともに焼戻し軟化抵抗を増大させる元素である。0.02～0.06%程度の V を添加し炭化物，窒化物を効果的に析出させることにより強度，じん性の改善が可能である。
Nb(ニオブ)	0.02～0.05%程度の添加でフェライトの生成を抑制し，再結晶温度を上げ結晶粒の微細化を図ることができ，これによって大幅なじん性改善が可能である。また，炭化物，窒化物を効果的に析出することにより高強度を得ることができる。
Al(アルミニウム)	脱酸剤として添加される。また，加熱時のオーステナイト結晶粒の粗大化を防止する有効な元素であり，じん性を向上させる。
B(ホウ素)	0.0003～0.002%というごく微量の添加で焼入性を高める。590N/mm ² 級，780N/mm ² 級鋼板などの焼入焼戻し型高張力鋼板では，B を適量添加することにより焼入性の向上が図られている。
Ti(チタン)	C, N との親和力が強いので，適量の添加は微細な炭窒化物を鋼中に安定して生成し，HAZ じん性低下の防止に有効である。
H(水素)	じん性低下や遅れ割れ，溶接時のビード下割れ，銀点などの欠陥の主要因となる。割れは，圧延後または溶接後 200℃以下の常温付近に冷却されてから発生する。したがって，水素性欠陥を生じやすい鋼種では製鋼時脱ガス処理を適用し，さらに必要に応じてスラブまたは製品での徐冷処理により水素の低減を図っている。一方，溶接施工時には，溶接材料の選択，乾燥，予熱および後熱などにより溶接継手部への水素侵入防止および拡散性水素量の低減を図っている。
O(酸素)	主として Si, Mn, Al などと化合して非金属介在物の形で鋼中に存在し，鋼の諸性質に悪影響をおよぼすので，できるだけ少なくする必要がある。
N(窒素)	製鋼時に大気中より侵入し，大部分は Al, Ti, Nb などと化合し窒化物として存在する。したがって，N 量を適切に制御し，Al, Ti, Nb などの元素を適量添加して窒化物を形成させ，組織の微細化を図るための有効な元素である。しかし，過剰の N は，鋼板の加工後の時効硬化の原因となり，また，溶接部のじん性劣化の原因ともなるので好ましくない。

(2) 金属組織の影響

鋼材は鉄(Fe)原子が規則正しく配列された結晶構造(crystal structure)を有している。その結晶構造は，基本構造として図-4.2.2に示す体心立方格子(bcc)，面心立方格子(fcc)，六方稠密格子(hcp)の3つがある。鋼材では，結晶が無数につながり，数十～数百 μm の大きさの単結晶からなる結晶粒(crystal grain)を構成している。さらに，それぞれ異なった方向を向いた結晶粒が多数集まってできた多結晶体が鋼材である(図-4.2.3)。鋼材の組織は，肉眼や拡大鏡で見たときの組織（マクロ組織）と顕微鏡で見たときの組織（ミクロ組織）に分類される。

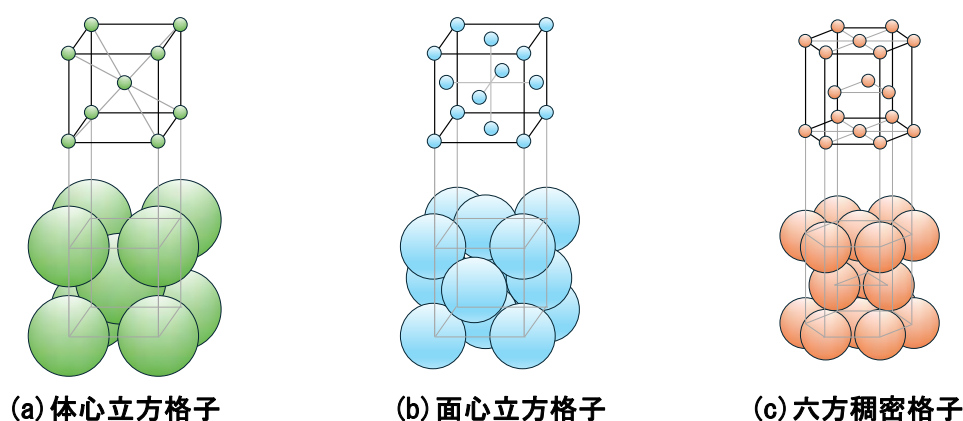


図-4.2.2 金属の結晶構造

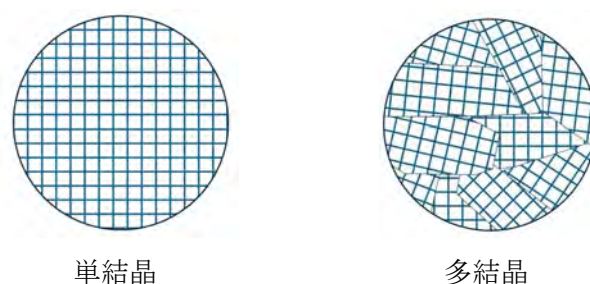
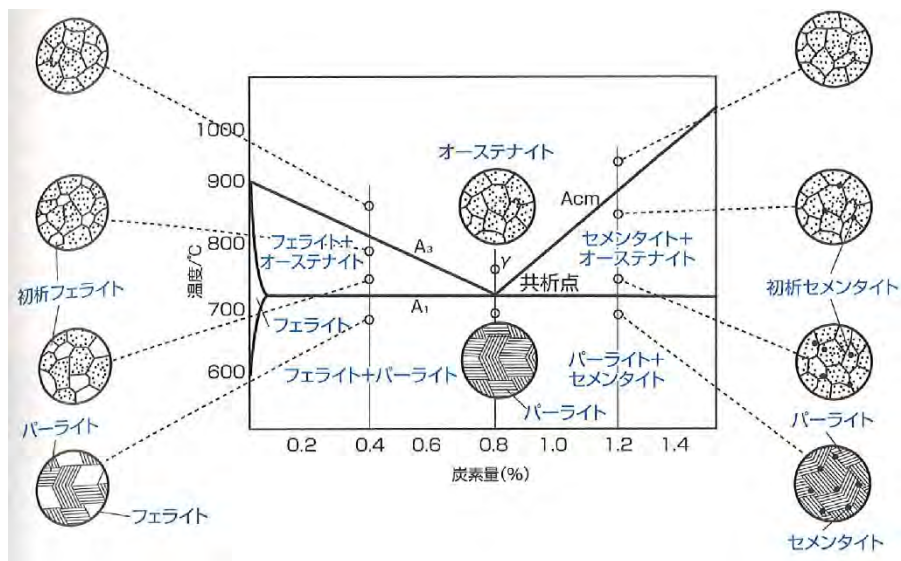


図-4.2.3 単結晶と多結晶

鋼材の機械的特性をはじめとする種々の性質と密接に関係しているのがミクロ組織である。一般的な鋼材では、ミクロ組織の大きさは数 μm から数百 μm 程度であり肉眼で直接観察することが難しいため、光学顕微鏡や走査電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) を用いて観察される。

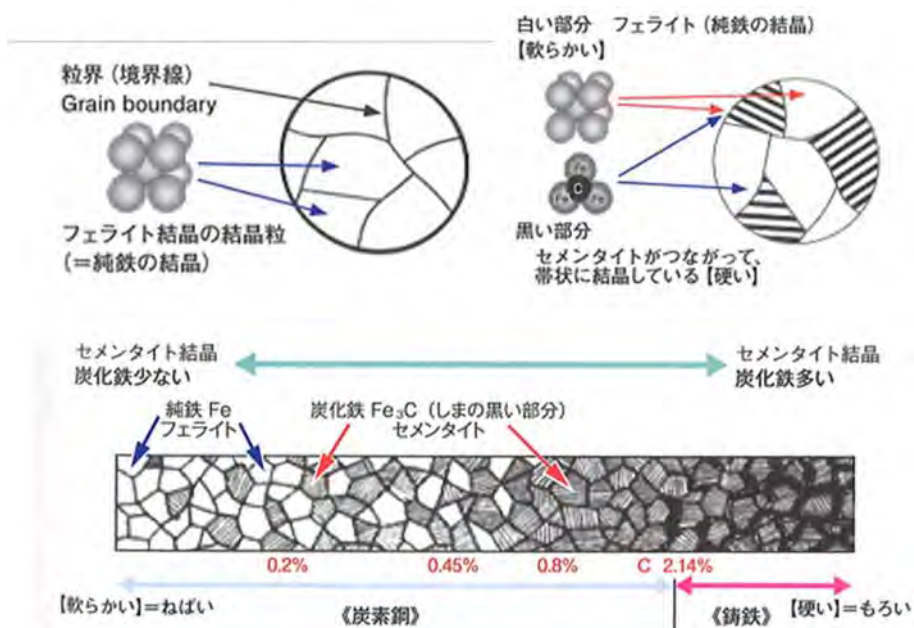
鋼材は、炭素(C)以外の元素を添加したり、製造過程において温度(熱履歴)を制御したりすることにより結晶粒の種類(フェライト、パーライト、マルテンサイト、オーステナイト、ベイナイトなど様々なものがある)やその大きさ、方向などを目的に応じて変化させることができ、いろいろな性能を付与することができる[大和久, 2003]³⁾。

主要な鋼材の金属組織の例を表-4.2.2に示す。鉄(Fe)は室温では結晶構造が体心立方格子 (bcc) のフェライト (α 鉄) で、温度を上げると面心立方格子 (fcc) のオーステナイト (γ 鉄) に変わる。種々な炭素(C)量の Fe-C 合金を、オーステナイト域に加熱した後冷却速度を変えて室温まで冷やすと、図-4.2.4のようにさまざまな組織が得られる。Fe-C 合金の変態組織は、一部の例外を除いてフェライト(α 鉄)とセメンタイト(Fe_3C)の2相からなり、熱処理によりセメンタイトの形態やサイズを変化させることによって組織が変化し、鉄鋼材料の強度が幅広く変化する。このように、鋼材 (Fe-C) 合金では強度の異なる変態組織を使い分けることによって、幅広い強度がカバーされている。



(a) Fe-C 平衡状態図と鋼の代表的組織⁴⁾

[出典：田中和明(2021)：図解入門 最新金属の基本がわかる事典 [第2版]，秀和システム]



(b) 鋼の結晶組織と炭素量依存性⁵⁾

[出典：横山明宜(2012)：元素から見た鉄鋼材料と切削の基礎知識，日刊工業新聞社]

図-4.2.4 炭素量と鋼材組織の関係のイメージ図

表-4.2.2 代表的な鋼材の組織の例

フェライト (ferrite)	金属組織学では、 α 鉄のことをフェライト (Ferrite) と呼んでいる。フェライトは最大 0.022% の炭素しか固溶できないので、ほとんど純鉄に近い組織で、柔らかく、展延性が大きい。
セメンタイト (cementite)	冶金学上、炭化鉄 (Fe_3C : 炭素量 6.67%) のことをセメンタイトという。セメンタイトは金属的光沢を有して、非常に硬くて脆い。顕微鏡組織に現れる形態はいろいろで例えば、層状 (層状セメンタイトとして層状パーライト中に存在) や、球状 (球状セメンタイト)、網状 (網状セメンタイトとして過共析鋼 [0.85~2.1%C] 中に現れる)、遊離状 (遊離セメンタイト) などがある。
パーライト (pearlite)	パーライトは、フェライトとセメンタイトとの共析晶 (eutectoid) で、フェライトとセメンタイトとがお互いに薄い薄膜の層状になっており、光源を斜めから当てて観察すると、ちょうど真珠貝 (pearl) のような色合いを示すことから名付けられた。パーライトは、オーステナイト状態の鋼を焼なましした時に得られる組織で、鋼の組織としてはベースになるもので硬さ、強さとも小さく、安定な組織である。
オーステナイト (austenite)	オーステナイトは、イギリスの Sir Robert Austen (オーステン卿) が発見した組織である。炭素を固溶している γ 鉄、すなわち γ 固溶体 (侵入型固溶体) で、結晶構造は面心立方晶 (F.C.C.) で、鋼を A1 変態点 (727°C) 以上に加熱したときに得られる組織である。炭素の溶解度は 1140°C で 2.1% で、炭素含有量に応じて物理的/機械的性質が異なる。非磁性体で、電気抵抗が大きく、マルテンサイトよりも硬さは低い。C% が多いほど硬くなる。常温では不安定な組織で、常温で加工すればマルテンサイトに変化する。顕微鏡的には多角形の組織である。
マルテンサイト (martensite)	マルテンサイトは、焼入組織の代表的な組織である。炭素を固溶している α 鉄、すなわち α 固溶体 (侵入型固溶体) で、結晶構造は体心正方晶 (B.C.T.) 及び体心立方晶 (bcc.) であり、オーステナイトを急冷して焼入れしたときに得られる。鋼の熱処理組織の中で最も硬く、もろい。マルテンサイトは顕微鏡的には、麻状または針状の組織で、オーステナイトよりも密度が小さいため、オーステナイト→マルテンサイトへの変化の際には膨張する。
ベイナイト (bainite)	ベイナイトは、パーライトとマルテンサイトの中間の温度領域で形成されるフェライトとセメンタイトとの複合組織の総称である。鋼の化学成分、変態前のオーステナイトの結晶粒サイズ、冷却速度、変態温度域の要因によって様々な形態のベイナイト組織が形成される。 顕微鏡組織は、黒色の羽毛状 (パーライト様)、もしくは黒色の針状 (マルテンサイト様) を呈する。黒色羽毛状組織を上部ベイナイト (upper bainite)、黒色針状組織を下部ベイナイト (lower bainite) と呼び、区別している。

鉄(Fe)の金属組織と強度は、高温のオーステナイトから低温に温度が下がる間に存在する「変態温度域 (800°C ~ 300°C)」をどのような冷却速度で冷やすかにより大きく変化する。ゆっくり冷やせば、引張強度が 400 から 500N/mm² 級のフェライトとパーライト (一部ベイナイト) の混合組織になる。

これをもっと速く冷却すると、600 から 800N/mm² 級の強度を持つベイナイト組織に変わる．さらに速く冷却すると 800N/mm² 以上の強度を持つマルテンサイト組織が得られる（図-4.2.5）．これらの組織の大きな違いは鉄(Fe)の中の炭素(C)の存在状態にある．ゆっくり冷やせば，その間に炭素(C)原子が動いて（これを拡散という）鉄(Fe)との化合物をつくることができるため，純鉄に近いフェライトと炭素(C)を多く含むパーライトに分離する．早く冷やすと，鉄(Fe)と炭素(C)が十分に動く時間がなく，鉄(Fe)の中に炭素(C)原子がそのまま閉じ込められたマルテンサイトになる．ベイナイトはこれらの中間の組織である．このように，冷却速度の変化によってさまざまな形に結晶組織が変化するため，鋼材の組織を制御するには，変態が起こる温度域での冷却速度の制御が重要になる．

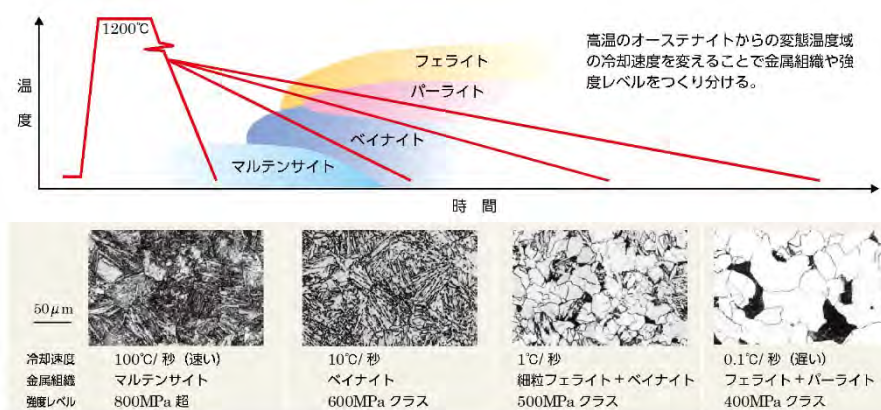


図-4.2.5 冷却速度と得られる組織⁶⁾

[出典：日本製鉄(2021)：厚板／総合カタログ(Cat. No. A001_03)]

4.2.2 熱処理による高性能化の方法

鋼材の金属組織を改善する有効な手段の一つが，熱処理(Heat Treatment)による方法である．熱処理とは，鋼の変態を促進あるいは抑制したり，再結晶あるいは原子の拡散を行わせることをいい，熱処理によって鋼板に所要の機械的性質が付与される．鋼材に付与する性質に応じて異なる熱処理方法が用いられ，その種類は多いが，通常，鋼材に施す熱処理として代表的なものは，焼入焼戻し，焼ならし焼戻し，焼ならしである．それぞれの熱処理の概要を表-4.2.3に，処理のプロセスのイメージを図-4.2.6にそれぞれ示す．

表-4.2.3 熱処理の種類と概要

焼き入れ(Quenching)	「焼き入れ」は、鋼を変態点(組織の構造が変化する点)以上の温度まで上昇させ、一定時間置いた後、急激に冷却する熱処理である。鋼を硬くすることが焼き入れの目的であるが、硬化の程度は鋼に含まれる炭素量や合金元素によって最高硬さや硬化の深さが変化する。その変化の度合いが高い鋼ほど「焼き入れ性がよい」と言われる。
焼き戻し(Tempering)	焼き入れによって鋼の組織はマルテンサイト化して硬くなるが、そのままではもろく、割れなどが生じやすい。「焼もどし」はそこからさらに再加熱して硬さを調整し、粘りや強じん性を高める熱処理である。基本的に焼き入れと焼き戻しはワンセットで行い、硬くて丈夫な製品づくりに生かされている。
焼きなまし(Annealing)	「焼きなまし(焼鈍)」とは、鋼を軟らかくし、組織を均一にするために行われる熱処理である。焼きなましには、目的によって「拡散焼きなまし」、「完全焼きなまし」、「球状焼きなまし」、「等温変態焼きなまし」、「応力除去焼きなまし」などに分けられ、低温で応力を除去する「応力除去焼きなまし」、高温で成分や不純物を均一化する「拡散焼きなまし」など、目的に合わせた温度で焼きなましを行なうことで、さまざまな性質改善ができる。
焼きならし(Normalizing)	鋼材製造過程の加工によって生じたひずみにより生じた鋼の不均一な組織を改善するため、鋼の組織を均一化、微細化する熱処理が「焼きならし(焼準)」である。変態点より高めの温度で再加熱し、空冷することで結晶粒が微細化されるので、強じん性などの性質の向上、残留応力の除去などができる。

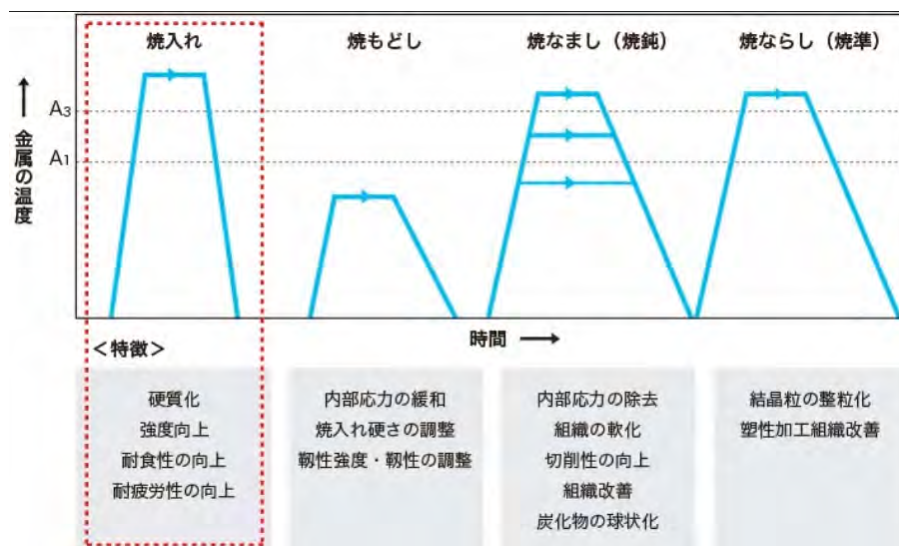


図-4.2.6 熱処理のイメージとその目的⁴⁾

[出典：田中和明(2021)：図解入門 最新金属の基本がわかる事典 [第2版]，秀和システム]

4.2.3 圧延技術による高性能化の方法

溶接構造用鋼板に要求される諸特性のうち、特に重要なものとして材料特性面からは強度とじん性があげられ、また、施工面からは耐溶接割れ性とHAZじん性があげられる。これらの性能を同時に満足させるため、メタラジー(金属材料工学)に対する理解の深化と製鋼技術・圧延冷却技術の進歩をベ-

スとして、近年における鋼材製造の革新的な技術、熱加工制御法(TMCP : Thermo Mechanical Control Process)に関する技術が誕生し、鋼材圧延技術は著しい進歩を遂げている。

一般的に、鋼材は高強度化するほど多量の合金が添加され、それによって溶接作業に様々な制約が生じ、施工性は悪化する傾向にある。図-4.2.7 に、圧延過程での熱加工履歴において結晶粒が微細化されていく様子を従来法と対比して模式的に表す。TMCP において従来法より結晶粒が細粒化されるのは、圧延時の加熱温度の低温化、圧延時の温度調整によって結晶粒の細粒化をはかるとともに、冷却速度を精密に調整することによって金属組織を制御することによっている。これらを実現するためには、スラブの均一加熱、圧延途中での鋼板の温度測定、強力な圧延設備、冷却時の精密な温度測定、均一な冷却を行うための水冷設備などの諸技術が不可欠であり、高度な技術が必要とされる。

TMCPの最大の特徴は、同一強度レベルの従来鋼（アズロール材：圧延したままで熱処理を行っていない鋼材）に比べてミクロ組織の微細化が図れることであり、溶接性などを損なう添加物の量を抑えつつ、高強度かつじん性に優れた鋼材を作り出すことができる点である(図-4.2.8)。強度上昇とじん性の向上には、結晶粒の微細化が効果的であることはよく知られているが、TMCPによる鋼板のフェライト結晶粒は従来の圧延まま、あるいは焼ならし型の鋼板にくらべ、 $1/3 \sim 1/4$ 程度に細粒化される。

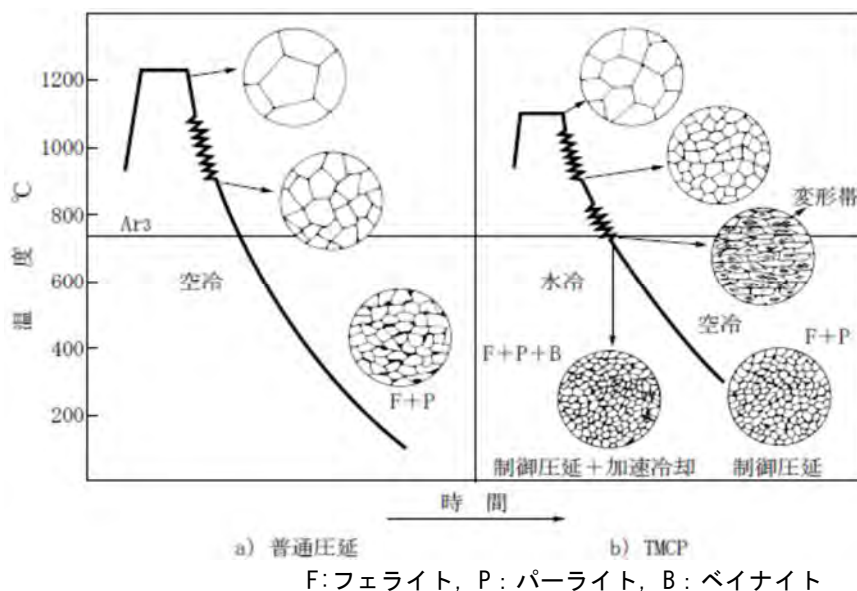


図-4.2.7 TMCP と普通圧延の結晶粒微細化過程の一例⁷⁾

[出典：神戸製鋼所(2022)：神戸製鋼所ホームページ，厚板の知識]

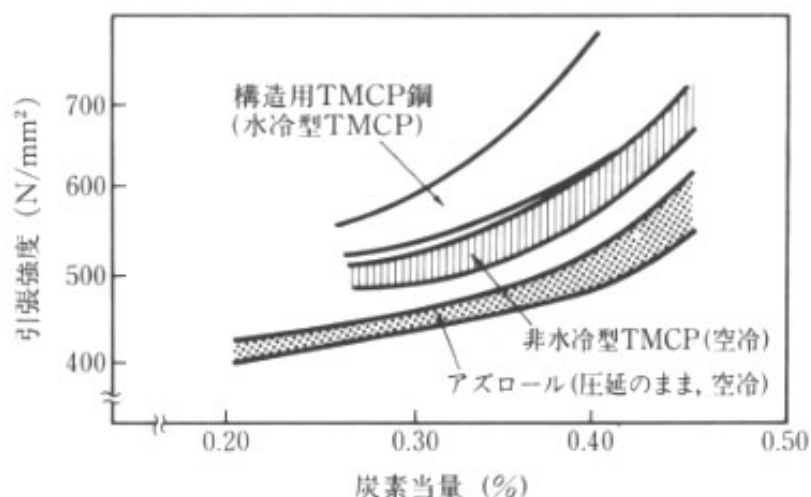


図-4.2.8 炭素当量と引張強さの模式図⁸⁾

〔出典：日本鋼構造協会(1998)：鋼構造技術総覧[土木編]，技報堂出版〕

4.2.4 高性能化に用いられる手段

構造物に用いられる鋼材に要求される主要性能は強度，じん性，耐溶接割れ性や HAZ じん性で，これらの特性を向上させるために工業的に用いられている手段を整理して表-4.2.4 に示す．鉄(Fe)にさまざまな元素を調合してより良い特性を実現する「合金添加」と，鉄に最適な温度の履歴を与えて望ましい金属組織を得る「熱処理」が高性能化を実現する主要な手段である．

表-4.2.4 厚板の主要性能向上に用いられる工業的手段の例⁷⁾

〔出典：神戸製鋼所(2022)：神戸製鋼所ホームページ，厚板の知識〕

項目	改善手段	圧延まま	焼ならし	制御圧延	制御圧延 +加速冷却
強度	化学成分	◎	◎	○	○
	結晶粒微細化	—	—	○	○
	ベイナイト生成	—	—	—	○
じん性	C 量低減	—	—	○	○
	結晶粒微細化	—	○	◎	◎
耐溶接割れ性	C,Ceq 低減	—	—	○	◎
HAZ じん性	C,Ceq 低減	—	—	○	◎
	微量元素添加	—	—	○	○

高度な熱処理技術が実用化されるまでは，強度，じん性の確保はほとんどが合金添加(化学成分)量の調整に依存したものであったが，TMCPでは，鋼板製造工程のなかで強度とじん性の調整が可能であり，これらの効果を活用して鋼板の諸特性の向上が図られている．現在では，微量元素の添加により再結晶，変態，析出挙動を制御し鋼の特性を向上させるマイクロアロイング技術等の鋼材の性質を向上・改善させる様々な冶金的な技術開発や，TMCPに代表されるような制御圧延と制御冷却等の製造プロセスの技術革新，およびそれらを組み合わせる技術により，鋼材の高性能化が進んでいる．

4.3 鋼材を高強度化する方法

鋼材の強度を増加させるということは，塑性変形を生じにくくすることを意味する．鋼材の塑性変

形の原因となるのは、**図-4.3.1**に示すような金属原子の格子欠陥である転位(dislocation)であるとされている。鋼材の強度には転位が重要な役割を果たしていると考えられており、低い強度で降伏が生じる原因であるとされている転位の運動を妨げるような仕組み（これを強化機構という）を鋼材中に作ることが行われている。鋼材の引張強度を高める強化機構としては、以下のような手法が用いられている[谷野ら, 2001 ; 新日本製鐵, 2009]⁹⁾。

- ① 合金元素による固溶強化・・・鋼材中に侵入型固溶原子（炭素(C),窒素(N)等）及び置換型固溶原子（ケイ素(Si),マンガン(Mn),ニッケル(Ni),クロム(Cr)等）を添加することで鉄(Fe)の結晶格子にゆがみを生じさせ、転位の動きを阻害し強化をはかる
- ② 結晶粒微細化強化・・・結晶粒の微細化により強化する方法。結晶粒界を転位が乗り越える際に運動の障害となるため、結晶粒界の面積が広がるように結晶粒を微細化する。鋼材の降伏強度は次式のように粒径(d)の-1/2乗に比例するとされている(ホール・ペッチの関係式)。

$$\sigma_{yp} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad \cdots (4.3.1)$$
- ③ 粒子分散化強化・・・ニオブ(Nb),バナジウム(V),チタン(Ti)等の析出硬化元素を添加活用し、鋼材中に微細な粒子を析出させることで、析出物周辺の鉄(Fe)格子にひずみが生じ、転位の運動の障害物となり、強度を上昇させる。
- ④ 組織強化・・・焼入れ焼き戻しや加速冷却でマイクロ組織をベイナイトやマルテンサイトに制御する。
- ⑤ 加工強化・・・制御圧延(低温圧延)や伸線加工等により転位を増加させる。高い転位密度を示す鋼材は、転位が互いに絡み合って更なる転位の運動が阻害されることによって高強度化する。

所定の強度及びその他の要求性能を満足する鋼材を製造するために、これらの手法等を用い、また組み合わせることで材質の設計を行うことで新しい鋼材の開発が行われる。

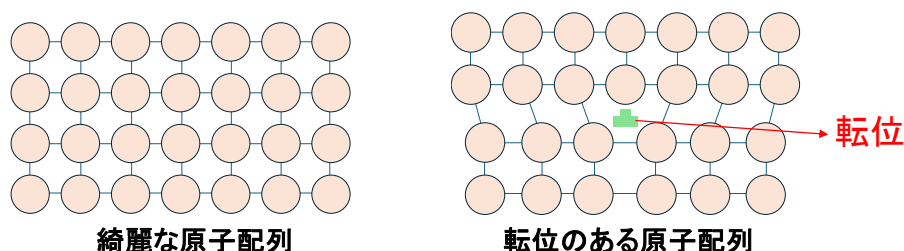


図-4.3.1 転位

また、鋼材の塑性変形が始まる降伏現象に関しては、上降伏点、下降伏点の存在や明確な降伏点を示さない場合など、いくつかのパターンが見られるが、軟鋼の場合は、理論上では定性的に次のように解釈されている。降伏は転位の移動集中により起こる。そして転位の動きを釘づけしている炭素(C)又は窒素(N)の侵入型溶質原子の存在があり、この釘づけをはずすために大きな応力を必要とするが、一旦釘づけをはずせばそれ以後は小さな応力で転位を動かし続けられる。前者に対応する大きな応力が上降伏点で後者の応力が下降伏点であるとされている。炭素(C)含有量の多いフェライト・パーライト鋼やマルテンサイト鋼などで一般にこのような降伏現象を示さないと考えられているのは釘づけ以外の他の障害物すなわち炭化物の存在が釘づけをはずす以上の応力をかけなければ転位を動かさないような妨害をしているためであると考えられている。

4.4 鋼材の破壊じん性を向上させる方法

4.4.1 ぜい性破壊の防止

延性破壊は塑性変形の延長線上にある破壊であり、変形が大きくなるなどの予兆があるが、塑性変形せずに、突然ガラスのように破断する場合がある。これを「ぜい性破壊」といい、最も避けるべき危険な破壊形態である。ぜい性破壊は、鉄の結晶をサイコロにみたてた場合に数字の書いてある面（へき開

面)に沿って割れるという体心立方格子金属(bcc)の特徴的な現象である(図-4.4.1)。特に、構造物の一部に力が集中してかかったり、衝撃的な力がかかったり、使用温度が著しく低かったりする条件が重なった場合に起こることがある。高強度鋼ほど高い力がかかることになるので、何も策を講じなければ、高強度鋼ほどぜい性破壊を起こし易いことになる。このぜい性破壊を防ぐ特性が「破壊じん性」である。

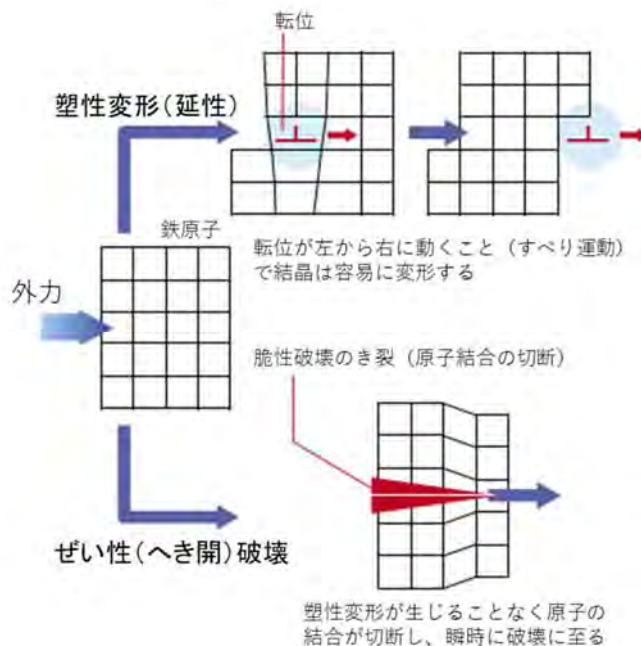


図-4.4.1 延性破壊とぜい性破壊¹⁰⁾

〔出典：新日本製鐵(2009)：鉄と鉄鋼がわかる本，日本実業出版社〕

このように一般に、降伏強度の上昇は破壊じん性を低下させる。しかし、結晶粒径の微細化は強度を高めつつ破壊じん性を向上させる。鋼材では一般に、破壊じん性のことを単にじん性と呼ぶ。じん性とは原子の結合の切れにくさであり、切れにくいほどぜい性破壊を起こしにくい。鋼は原子の並んだ方向に沿って割れる。結晶粒界は、原子の並んだ方向（原子結合の切れる方向）が変化する場所となるため、ぜい性破壊の割れ（き裂）が進む障害となる。よって、結晶粒が微細なほど材料全体でぜい性破壊への抵抗が高まり、じん性が高まるとされている(図-4.4.2)。

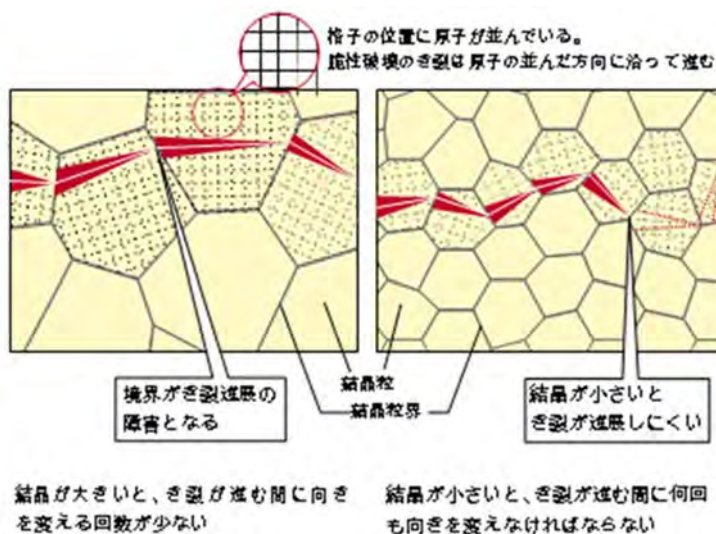


図-4.4.2 ぜい性破壊のき裂進展と結晶粒サイズの関係¹⁰⁾

〔出典：新日本製鐵(2009)：鉄と鉄鋼がわかる本，日本実業出版社〕

4.4.2 低温ぜい性の向上

温度が下がるとじん性が下がる現象を低温ぜい性という。低温ぜい性は、普通鋼などの体心立方格子(bcc)構造の金属に特有の現象である。bcc 金属では温度の低下や高速変形によって降伏(転位のすべり)に必要な応力が急激に上昇するが、へき開面や粒界面の結合強度(ぜい性破壊応力)は温度にあまり依存しない(図-4.4.3)。両者の交わる点の温度が遷移温度 vT_s で、これ以下の温度で応力をかけると材料が塑性変形する前に破壊する。延性破壊とぜい性破壊の境界となる遷移温度(vT_s)以下の温度では降伏(塑性変形)強度よりぜい性破壊応力の方が低くなり、ぜい性破壊すると理解されている[牧, 2015]¹¹⁾。このことから、高強度化や切欠きのような塑性変形の拘束、高速負荷などによって降伏強度 σ_s が上昇すると、 vT_s が高温側に移行してぜい性破壊が起こりやすくなる。また、結晶粒の粗大化や不純物元素の粒界偏析が起こると、ぜい性破壊応力 σ_B が低下し、 vT_s が上昇するため、結晶粒の微細化と不純物の低減が遷移温度を下げる有効な手段であるとされている。

鋼は常温以下ではフェライトなどの bcc 構造の組織になっているのに対し、ニッケル(Ni)、アルミニウム(Al)などは面心立方格子(fcc)構造になっており、降伏強度の温度依存性が小さく、ぜい性破壊応力に達しないため、低温ぜい性は見られない。このため、低温用途で用いられる鋼材として、面心立方格子(fcc)構造をとるオーステナイト系のステンレス鋼やニッケル(Ni)を多く含むニッケル(Ni)系鋼材が用いられる。

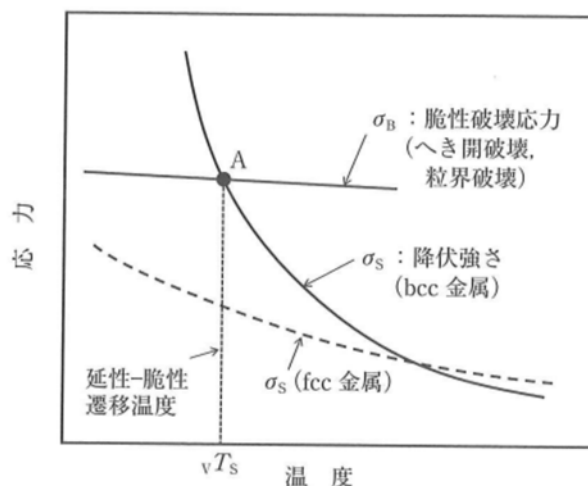


図-4.4.3 延性-ぜい性遷移温度の説明¹¹⁾

[出典：牧正志(2015)：鉄鋼の組織制御 その原理と方法，内田老鶴園]

4.5 鋼材の延性を高める方法

通常、鉄(Fe)と炭素(C)の合金である鋼は軟らかい母相(フェライト)と硬い第二相(パーライト又はセメンタイト)とからなる。このような鋼材では、荷重の増加と共に軟らかい母相が変形するが、硬い第二相は塑性拘束の働きをして変形を阻止しようと抵抗する。従って硬い第二相の占める率が多ければ多い程、塑性拘束力が大きくなり延性は低下するとされている。

また、結晶粒の微細化は鋼の延性を向上させるといわれている。破壊の原因となる延性き裂の発生は塑性ひずみが集中した場所での転位の運動の難易度に左右され、固溶元素あるいは析出物などによって鋼の降伏強度が高くなると転位の移動が困難となり、亀裂界面の形成が容易になるため、鋼の延性は低下するとされている。これに対し、結晶粒の微細化によってき裂発生抑制および伝播抵抗向上の効果が高まるために伸びが向上すると考えられている。

4.6 鋼材の溶接性を高める方法

鋼構造物の製作には溶接が広く採用されている。構造物が健全であるためには、鋼材が十分な強度と変形性能を有している必要があるが、溶接部は形状的にも金属組織的にも不連続になりやすく破壊の起点になる可能性が高いため、鋼材と同等以上の性能を確保する必要がある。鋼の溶接性を阻害する要因となるのが、溶接割れの発生と溶接にともなうじん性の低下である。

4.6.1 溶接割れの防止

溶接時に発生する割れには、高温割れと低温割れの2種類がある。溶接終了直後、溶接部が冷える前に発生する割れが高温割れであり、低温割れとはその名の通り、溶接終了後溶接部が冷えてから発生する割れのことを指す。溶接の完了した数日後に発生することもあるので、低温割れの防止は重要である。低温割れの発生要因については、炭素量、拡散性水素量、拘束度・応力集中、溶接入熱量・予熱、など多くの要因が複合して発生するとされている。

低温割れの発生を防止するためには、これらへの配慮が必要となるが、鋼材の観点からは、溶接部の硬さが高くならなければよいと考えられており、溶接部の硬さを評価する指標として、炭素当量(C_{eq})や溶接割れ感受性組成(P_{cm})などの化学成分パラメータが提案されている。

炭素当量(C_{eq})は、鋼材の組成（化学成分）から計算されるもので、各成分の一次式の形で表されるのが通常で特に炭素(C)の係数を1とするため炭素当量(C_{eq})と呼ばれている。炭素当量(C_{eq})が最初に発表されたのは1940年で、低温割れの評価以外にも、溶接部硬さを評価するためのものも発表された(図-4.6.1)。現在のHAZ最高硬さ推定は、溶接条件（またはそれから決定される800℃から500℃までの冷却時間）や鋼材組成の関数として与えられているが当時は、溶接条件を一定として成分の影響を表す指標として炭素当量(C_{eq})が導入された。炭素当量(C_{eq})が高くなると硬さが高くなり、かつ、一般的に硬い場合ほど低温割れが発生しやすいため、硬さ用炭素当量(C_{eq})が高くなると、低温割れの危険も高くなる。

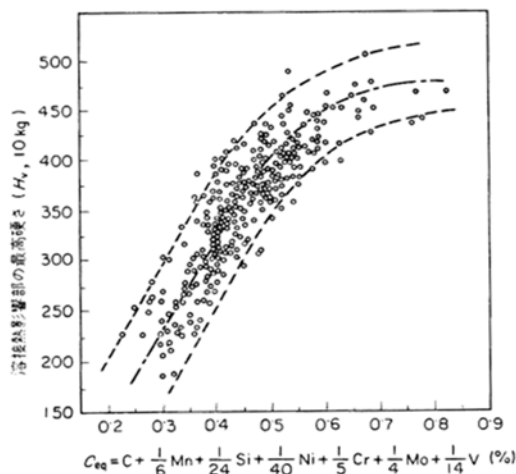


図-4.6.1 炭素当量(C_{eq})と溶接熱影響部の最高硬さの関係¹²⁾

〔出典：森田耕次〔監修〕：新しい建築構造用鋼材〔第2版〕，鋼構造出版〕

最高硬さのほかに、溶接部の拡散性水素(H)量の増加や継手に働く応力の上昇も溶接冷間割れを増大させる。また、溶接後、300℃から常温までの温度範囲を徐冷すると水素(H)が放出され、溶接冷間割れが減少することが知られており、徐冷を行うために、溶接前に鋼材を予熱することが有効であるとされている。

低温割れを防止する予熱温度の決定方法については、溶接協会規格(WES 3002)に、鋼材成分、拡散性水素(H)量、応力から、初層溶接のルート割れを対象にした低温割れを防止できる予熱温度の下限を

求める考え方が以下のように示されている。

溶接割れ感受性組成(P_{CM})は次の式により計算する。

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (\text{重量}\%) \quad \cdots (4.6.1)$$

応力については、板厚に比例して高くなると仮定し、これに、拡散性水素量の寄与を加え、溶接割れ感受性指数(P_c)は次式により計算する。

$$P_c = P_{CM} + t/600 + H/60 \quad \cdots (4.6.2)$$

ただし、 t は mm で表した板厚、 H はグリセリン法で計った拡散性水素量(ml/100g)

これらの数値から、次式により割れを防止する鋼板予熱温度： $T_0(^{\circ}\text{C})$ を計算する。

$$T_0 (^{\circ}\text{C}) = 1440 \times P_c - 396 \quad \cdots (4.6.3)$$

図-4.6.2 は、 P_c 値と割れ防止に必要な予熱温度の関係であるが、よい相関を示していることがわかる。

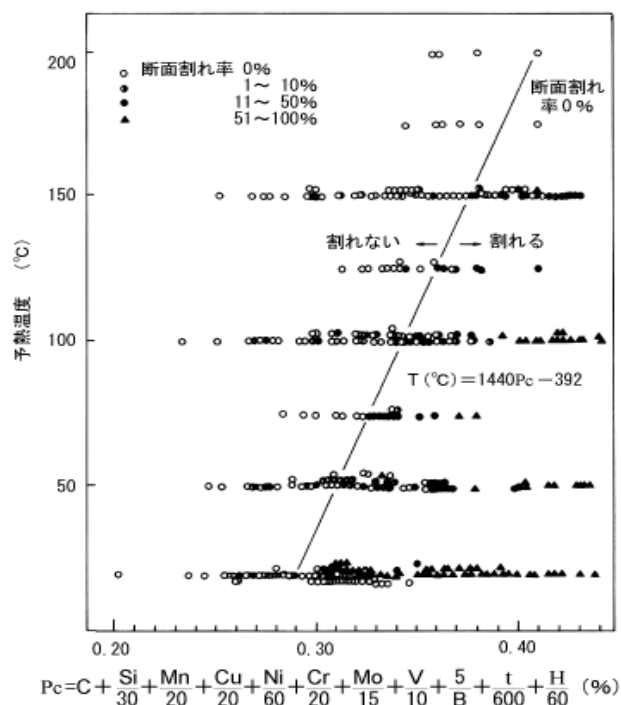


図-4.6.2 溶接割れに関する溶接割れ感受性指数 P_c と予熱温度の関係¹³⁾

[出典：日本溶接協会(1996)：WES 3001 溶接用高張力鋼板 解説]

4.6.2 HAZ じん性

鋼材の特性に大きな影響を及ぼす結晶粒は、溶接時に鉄(Fe)の溶融温度に近い $1,400^{\circ}\text{C}$ の超高温にさらされると急激に成長する。溶接の場合、熱影響部(HAZ)がこのような超高温状態に数十秒置かれるため、鋼の結晶粒は粗大化してもろくなる(図-4.6.3)。国内の鉄鋼メーカーのそれぞれが独自に、結晶粒の粗大化を防ぐために酸化物や硫化物などの微細な粒子を数多く分散させ、結晶粒の成長を“ピン止め(抑止)”する技術が開発されている。常温で鋼に極微細な粒子を分散させることは技術的に難しいことではないが、 $1,400^{\circ}\text{C}$ という超高温では鋼中に存在するほとんどの微細粒子は溶けてなくなってしまうため、高温に耐えられる粒子の研究が進められてきた。

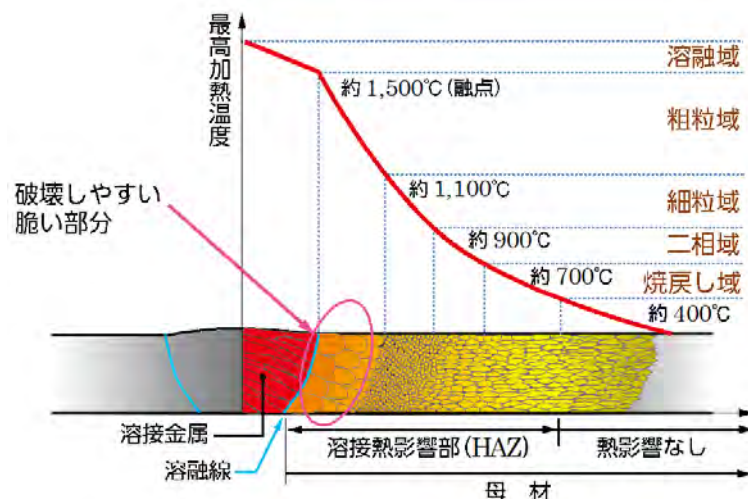


図-4.6.3 溶接部近傍の加熱温度と組織のイメージ⁶⁾

[出典：日本製鉄(2021)：厚板／総合カタログ(Cat. No. A001_03)]

図-4.6.4 に HAZ じん性向上技術の高度化の例を示す[加茂，2016]¹⁴⁾．1970 年代に、TiN のピン止め効果により HAZ 部の旧オーステナイト粒径の粗大化を抑制する技術(図-4.6.4(b))が確立された．その後のさらなる大入熱化の流れを受けて、1990 年代初めには、高温で安定なチタン(Ti)の酸化物を旧オーステナイト粒内での変態の核として利用する技術(図-4.6.4(c))が開発された．粗大な旧オーステナイトの粒内からフェライトを生成させる (IGF：Intragranular Ferrite と呼ばれる) ことにより、最終的な金属組織の微細化が可能となった．チタン(Ti)の酸化物は周囲のマンガン(Mn)原子を取り込むことにより、マンガン(Mn)希薄域を形成する傾向があるため、これによりチタン(Ti)酸化物近傍の変態開始温度が高くなり、優先的にフェライトを生成させることができるとされている．さらに、2000 年代には、高温でも安定かつ微細に分散する酸化物・硫化物が見出され、それにより、さらに大入熱による高温においても強力なピーニング効果を発現させることができる大入熱溶接用鋼(図-4.6.4(d))が実用化されている．HAZ の旧オーステナイト粒径とシャルピー吸収エネルギーには概ね相関があり、旧オーステナイト粒径が細かいほど高い吸収エネルギーが得られるとされている．

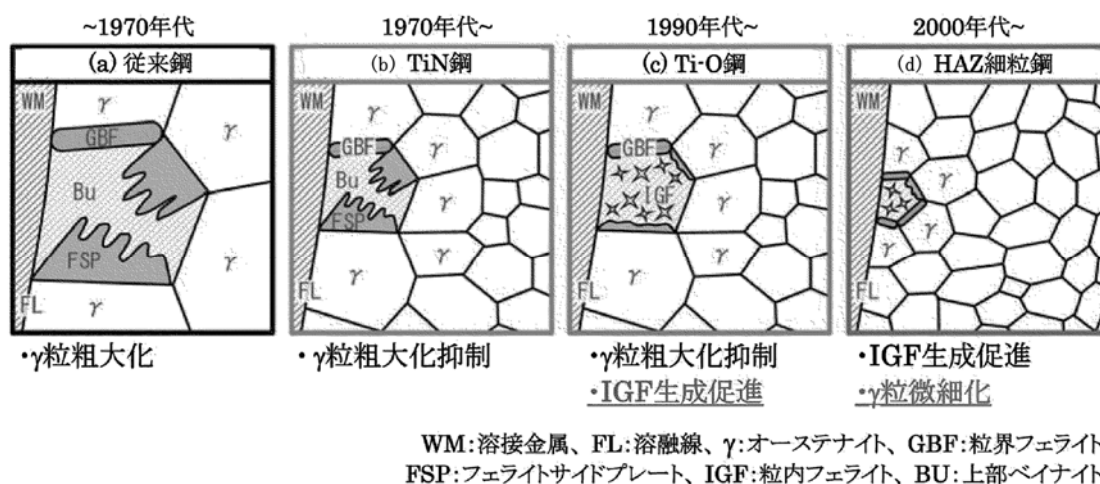


図-4.6.4 HAZ じん性向上の変遷の事例¹⁴⁾

[出典：加茂孝浩(2016)：建築構造用鋼板の概要，溶接技術者交流会 WE-COM マガジン，第 19 号]

4.7 鋼材のヤング率を高める方法

一般に鋼材は強度に関わらず、ヤング率(弾性係数)はほぼ一定である。これは、鋼材が無秩序な方向を向いた無数の小さな結晶粒(crystal grain)からなる多結晶体であることに起因するものである。鋼材の結晶粒を構成する単位格子構造は、図-4.6.5 に示すように、体心立方格子(bcc)をしており、異方性(unisotropic)を有している。単位格子のうち、原子間距離が最も短い[111]方向のヤング係数 E_{111} が最も高く、原子間距離が最も長い[100]方向のヤング係数 E_{100} が最も低い。その値はそれぞれ $E_{111}=290,000\text{N/mm}^2$ 、 $E_{100}=135,000\text{N/mm}^2$ であるとされている。多結晶体である鋼材の中では、結晶粒がランダムな方向を向いた状態にあるため、マクロな鋼材の挙動は、等方性(isotropic)とみなすことができ、ヤング係数は方向依存性がなく、おおよそ $E=205,000\text{ N/mm}^2$ となる。

この性質を利用すると、鋼材中の結晶粒がすべて[111]方向に向いていれば、通常の鋼材の 1.4 倍($=290,000/205,000$)のヤング率を持つ鋼材が理論上得られる。鋼材の冷間圧延(常温付近での圧延)により、結晶粒の方向が揃うことが知られており、ある特定の方向(一般には圧延直角方向)のヤング率が通常の 1.2 倍程度になるとの報告がある[桑村, 2002]¹⁵⁾。

ヤング率の向上は、たわみの抑制や座屈強度の向上に有効であると考えられ、その実用化が期待されている。しかし、現在でもまだ試作の域にあり、実用化には至っていない。

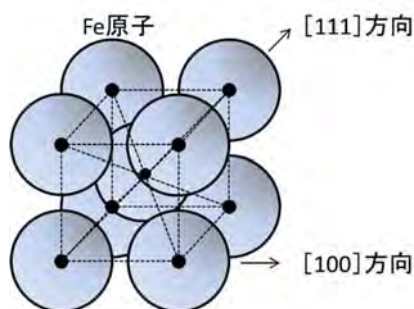


図-4.6.5 鋼材の格子構造(体心立方格子)

4.8 鋼材の遅れ破壊への対応

遅れ破壊は、負荷応力がかかっている高強度鋼が塑性変形することなしに突然、ぜい性的に破壊する現象である。引張強度が $1,200\text{N/mm}^2$ を超えるような高強度の鋼材で生じやすいとされており、かつては建築鉄骨や橋梁などで腐食環境に曝された $1,300\text{N/mm}^2$ 級、あるいは一部の $1,100\text{N/mm}^2$ 級の高力ボルトで遅れ破壊が発生した事例がある。

遅れ破壊した鋼材の破断面では粒界破壊が観察される。これは、水素ぜい性によるものであり、鋼中に侵入した水素(H)原子が、鋼材の欠陥や粒界などの欠陥部分で水素ガスとなり、部分的に高圧化し、その圧力が鋼材の破壊臨界圧力以上になると発生するとされている。

遅れ破壊の原因になる水素(H)は、常温で鋼材の結晶格子内を拡散して移動する拡散性水素と、鋼材の結晶中に閉じ込められる残留水素とがあり、遅れ破壊の原因となるのは、拡散性水素である。拡散性水素の発生源は、溶接時に侵入するものと、腐食環境から侵入するものが主なものである。溶接時は、溶接金属のフラックス中の水分や、溶接部にあるさびや塗装などが発生源になる。腐食環境では、金属表面で発生した水素イオン(H^+)が金属内に侵入し、内部に拡散していく。

遅れ破壊に影響する因子としては、鋼材の組織、強度、拡散性水素濃度、応力、欠陥など複数ある。鋼材の組織では、マルテンサイトやパーライトなど溶存水素濃度が低いと言われる鋼材で、また、強度面では高強度鋼で、遅れ破壊は生じやすいとされている。拡散性水素濃度は、溶接部や腐食部で大きくなり、ボルト締結部や溶接部近傍のように使用時の内部応力が高い部分で高くなりやすい傾向がある。また、溶接のビード部やクレーター、表面傷や内部の介在物のような欠陥、応力集中しやすい部分が多いと遅れ破壊は起こりやすいとされている。

耐遅れ破壊特性を高める鋼材の開発では、これらの条件を取り除いたり、影響を小さくするような工夫がなされている。

第4章 参考文献

- 1) JFE21 世紀財団(2022) : JFE21 世紀財団ホームページ, 鉄鋼プロセス工学入門, 第 1 章 A.(7)実用鋼の強度(http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_1/1a_7.html) [2022.9.8 確認]
- 2) 大和久重雄(1978) : JIS 鉄鋼材料入門, 大河出版
- 3) 大和久重雄(2003) : 鋼のおはなし(改訂版), 日本規格協会
- 4) 田中和明(2021) : 図解入門 最新金属の基本がわかる事典 [第 2 版], 秀和システム
- 5) 横山明宜(2012) : 元素から見た鉄鋼材料と切削の基礎知識, 日刊工業新聞社
- 6) 日本製鉄(2021) : 厚板／総合カタログ(Cat.No.A001_03)
- 7) 神戸製鋼所(2022) : 神戸製鋼所ホームページ, 厚板の知識(<https://www.kobelco.co.jp/files/ATUITA>) [2022.9.8 確認]
- 8) 日本鋼構造協会(1998) : 鋼構造技術総覧[土木編], 技報堂出版
- 9) 谷野満, 鈴木茂(2001) : 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
- 10) 新日本製鐵(2009) : 鉄と鉄鋼がわかる本, 日本実業出版社
- 11) 牧正志(2015) : 鉄鋼の組織制御 その原理と方法, 内田老鶴圃
- 12) 森田耕次[監修] : 新しい建築構造用鋼材[第 2 版], 鋼構造出版
- 13) 日本溶接協会(1996):WES 3001 溶接用高張力鋼板 解説
- 14) 加茂孝浩(2016) : 建築構造用鋼板の概要, 溶接技術者交流会 WE-COM マガジン, 第 19 号
- 15) 桑村仁(2002) : 鋼構造の性能と設計, 共立出版, pp.56-57.

5. 橋梁分野で実用化されている高性能鋼

土木分野の鋼構造物と言った場合、技術的な象徴として必ず鋼橋(Steel Bridge:主要部材を鋼材で構成した橋梁)の技術が紹介される。鋼橋においては付属品などを含めると使用部位に応じて多種多様の鉄鋼材料が用いられているが、ここでは橋梁の主に上部構造の主要部材に用いられる鉄鋼材料とその高性能化について述べることにする。

5.1 橋梁分野における鋼材の高性能化の変遷

5.1.1 橋梁用高性能鋼の概要

鋼橋に汎用的に使用されている鋼種と比較して、強度、じん性、溶接性、曲げ加工性、耐腐食性などにおいて、より優れた性能を有する鋼種、鋼材を総称して橋梁用高性能鋼という[鋼材倶楽部, 1998]

¹⁾ 鋼橋設計面での大きな変革や施工の合理化の要望に応えるものとして、種々の高性能鋼が実用化・適用され、道路橋示方書等の技術基準に取り入れられている。

5.1.2 高性能化の変遷

鉄鋼材料が橋梁の主要部材の材料として用いられるようになってからおよそ 240 年が経過している。世界で初めて鉄鋼材料が橋梁の構造部材として使われたのは、1779 年完成の英国の Iron Bridge であることはよく知られている[橋梁工学ハンドブック編集委員会, 2004]²⁾。当時の鉄鋼材料は炭素(C)の含有量が比較的多い鑄鉄であり、非常に脆く、伸び性能もあまりないものであった。このため、引張力の作用する部材への適用は不適切であり、Iron Bridge では部材に圧縮力が作用するアーチ構造が採用されている。

しかしながらその後、錬鉄(Wrought iron: 炭素(C)の含有量 0.1%以下で、硬度が低いが可鍛性のある鉄)を経て、伸び性能、じん性に優れる鋼が大量に製造されるようになり、引張、曲げなどの様々な力を受ける部材への適用が可能となって設計の自由度が増した結果、様々な形式の橋が建設されるようになった[日本橋梁建設協会, 2004]³⁾。鋼材の実用化以来、今日に至るまで、その製造技術や加工技術は長足の進歩を遂げてきており、鋼材性能の向上が橋梁の進歩に大きな影響を与えてきたことは紛れもない事実である。

橋梁用の鋼材が備えるべき条件は、強度と延性、じん性のバランスが良好で、しかも安価なことである。橋梁用鋼材は、その時代時代における性能への要求に応えることと、逆に新たな鋼材の性能を活用する新構造を開発するという双方向のたゆまぬ努力によって発展してきたと言える。図 5.1.1 は、新しい鋼材の開発とその適用の歴史を年表に整理したものである。わが国では、Iron Bridge から 89 年後の 1868 年に長崎に架けられた、輸入錬鉄を用いたプレートガーダー橋のくろがね橋が鉄鋼系橋梁の嚆矢であるとされている[土木学会, 1964: 成瀬, 1994: 鋼材倶楽部, 1995]^{4) ~ 6)}。鋼橋は、1888 年完成の天竜川橋梁が最初であるが、20 世紀に入ってからほぼ独占的に鉄鋼材料を主構造に用いた橋梁の主要材料として鋼材が用いられるようになり、今日もなお、技術開発による高性能化が進行しており、橋梁用構造材料の主役の座を占め続けている。

年代	設計基準における主要鋼材の変遷(道路)	鉄鋼材料の橋梁への適用例	構造用鋼材の発達
1750			鉄鉄 ○ルツボ鉄鋼(英)
1800		★アイアンブリッジ(英：鉄鉄)[1779]	鉄鉄 ○バドル鉄鉄(英)
1850			
1900		・くろがね橋(わが国初の鉄橋輸入鉄鉄)[1868] ★イース橋(米：鋼)[1874] ・弾生橋初の国産鉄橋(鉄鉄、鉄鉄)[1878] ★ブルックリン橋(並鉛めっき鋼鋼)[1883] ・国鉄/天竜川橋梁(鋼材の初使用)[1888] ・フォース鉄道橋(英：鋼)[1890]	鋼 ○ベッセマー製鋼法(英) ○ジーマンズ/マルチン平炉製鋼法(独仏) ○トーマス塩基性転炉製鋼法(英) 高鋼炭素鋼
1920			○電気炉製鋼法(英) ・Mn 鋼(デュコール鋼)(英)
1940	道路構造に関する細則案[1926]/SC39 鋼道橋橋設計示方書案[1939]/SS41	・永代橋(デュコール鋼)[1926]	低合金鋼 ☆JES20 号 SC39[1924] ☆JES20 号 SS34,SS41[1938]
1960	鋼道橋橋設計示方書[1956]/SS41	・国鉄/角川橋(高力ボルト)[1954] ・神奈川県/相模大橋(500MPa 級鋼)[1955] ★第二カルキネッス橋(T-1 鋼800MPa 級鋼)[1958] ・芦有道路/西村橋、平野橋(600MPa 級鋼)[1960]	○純鉄素上吹き転炉法(英) ○連続鋳造法★JIS 制定 [1949] ・T1 鋼(調質高張力鋼)(米)
1980	鋼道橋橋設計示方書[1964]/SS50, SM50A 追加 鋼道橋橋設計示方書追補[1967] /SM50Y, SM53, SM58 追加 本州四国連絡橋公団規格[1968] /HT70, HT80 道路橋示方書[1972] /SM41,SMA41,SMA50,SMA58 追加	・芦有道路/金邊橋(アルミ合金)[1961] ・若戸大橋(ロックドコイルロープ)[1962] ・流架川橋(並鉛めっき橋)[1963] ・京葉道路/花輪分道橋(800MPa 級鋼)[1964] ・知多2号橋(耐候性鋼)[1967] ・国鉄/美和川橋梁(耐震鋼板)[1974] ・阪神高速道路/港大橋(700,800MPa 級鋼)[1974] ・国鉄/第五厚肉川橋梁(TMCP 鋼)	調質鋼 ☆JIS G 3106 SM50Y, SM53, SM58[1966] ☆JIS G 3114 SMA[1968] TMCP 鋼
2000	道路橋示方書[1990] 道路橋示方書[1993]/鋼材記号 SI 単位化 道路橋示方書[1996]/SS 材の溶接原則禁止，降伏点一定 鋼，LP 鋼板，予熱低炭鋼，大人熱溶接鋼，高じん 性鋼，耐ラメ鋼についての記述追加	・羽田空港/ドブリッジ [1993] (7t の冷間曲げ加工) ・日本道路公団/深沢川橋 [1995] (LP 鋼板) ・日本道路公団/滝下橋 [1997] (角形鋼管) ・日本道路公団/東海大府高架橋[1998] (ウェブのエレクトロガス溶接) ・日本道路公団/東京湾アクアライン[1998] (チタンクラッド鋼) ・本州四国連絡橋公団/明石海峡大橋[1998] (1800MPa 級ケーブル，予熱低炭型 800MPa 級鋼) ・北陸新幹線/北谷道路分道橋 [1998] (Ni 系高耐候性鋼材)	
2020	道路橋示方書[2002]/Ni 系高耐候性鋼についての記述追加 道路橋示方書[2012]/解説への SBHS 記載 道路橋示方書[2017]/SBHS400(W)，SBHS500(W)追加	・入野橋[2007](耐疲労鋼) ・南北水路橋新橋[2008](BHS500) ・東京ゲートブリッジ[2012](BHS500 現場溶接) ・永田橋[2010](SBHS500) ・新宮川橋[2012](SBHS400) ☆蔚山大橋[2015](1960MPa ケーブル)	☆BHS500(W),BHS700W ☆JIS G 3140 SBHS500(W)，SBHS700(W)[2008] ☆JIS G 3140 SBS400(W)[2011] ☆JIS II 06 1960MPa ケーブル[2021]

図-5.1.1 鋼材とその橋梁への適用の変遷

近年に至るまでのわが国における橋梁用鋼材の技術開発の歴史は、大きく、以下の3つの時代に分けることができると考えられる。

- ① 橋梁用材料としての地位を確立する時代
- ② 本州四国連絡橋に代表されるような巨大構造物の構築を可能とするための技術開発の時代
- ③ 性能設計に代表される要求性能の多様化の時代

これらそれぞれの時代における鋼材の技術開発のキーワードは、①溶接構造用鋼材、②高強度鋼、③高性能鋼、であると考えられる。

鋼橋の歴史の初期にあたる戦前においては、溶接の信頼性が低かったこともあり、形鋼、鋼板などを工場、現場を問わずリベットで組み立てる構造が一般的であった。橋梁に用いられる鋼材の規格は、1925年に制定された JES(日本標準規格)第 20 号「橋梁建築其ノ他鋼材」の St39(強度 39～47kgf/mm²[380～460N/mm²])に始まり、その後、規格の統合、整理などを経て一般構造用圧延鋼材、SS(Steel Structure の略)材の規格が制定された[多田, 2000]⁷⁾。鋼材の強度に最も大きな影響を与えるのは炭素(C)であり、炭素(C)の含有量を多くすれば容易に高強度化が可能となる。しかしながら、炭素(C)は強さを増す反面で脆さも増し、また、溶接部の熱影響部を硬く脆い組織にするなどの影響があるため、溶接用鋼材では炭素(C)量などの溶接部の性能に影響を与える元素を制限する必要がある。また、溶接後の構造物のぜい性破壊を防ぐため、鋼材の粘り強さを保証する必要がある。SS 材の規格は、炭素(C)量に関する規定などがなく、基本的に規格体系として溶接性に対する配慮はなされていない。鋼構造物の溶接接合は 1920 年代ごろから用いられるようになったが、1930 年代に欧州で溶接橋がぜい性破壊した事故や、戦時中に米国で溶接船がぜい性破壊する事故などが発生し、その原因究明が進められた結果、溶接構造物に使用される鋼材の品質改善が進められることとなり、1952 年に溶接構造用圧延鋼材 SM41(現在の SM400)が JIS となった。SM(Steel Marine の略)材は、溶接部の硬化を抑えるため、炭素(C)の含有量を 0.20%以下とし、ケイ素(Si)、マンガン(Mn)などの元素を添加することで強さと粘り強さのバランスを確保し、溶接時に割れの原因となる有害なリン(P)、硫黄(S)の量を制限している。また、溶接構造物のぜい性破壊を防ぐため、B、C 材としてシャルピー衝撃試験値が規定されている。日本では戦後、溶接技術の発展とその信頼性の向上に伴い、1960 年代以降は、工場での組立てはすべて溶接により行われるようになった。SM 材は、今日でもなお、橋梁用鋼材のベース規格として用いられている。しかしながら、後で述べるように、今日供給される鋼材の性能はこれらの規格を大幅に上回るものとなっているため、鋼材の高性能化にマッチした規格が求められるようになったことも事実である。

1960 年代ごろから、わが国では、本州四国連絡橋建設プロジェクト(本四架橋)に代表されるように、橋梁技術の世界的な頂点を目指した長大橋の建設が推進された。長大橋では、強度の高い鋼材を用いれば部材断面を小さく、自重を軽減することができ、製作、運搬、および架設費の削減を図ることができる。したがって、鋼材の最も基本的な特性である強度を高めた高強度鋼の開発が求められることとなった。しかしながら、一般に高強度化することによって鋼材の伸び性能、溶接性は低下し、なおかつ高いじん性が要求されることとなり、安全性、使用性などから要求される品質を確保することが難しくなる。したがって、高強度でありながらも溶接性にも優れ、なおかつ高いじん性を有する高強度鋼の開発が焦点となった。1960 年代頃まで橋梁用鋼材としては SS41, SM41(今日の SS400, SM400)などの 400N/mm² 級の鋼材が主流であった。鋼板の強度はこの 400N/mm² 級を基点に、合金元素の添加により強化した 500N/mm² 級鋼、焼入れ、焼戻しなどの熱処理を利用した調質鋼の 600N/mm² 級鋼、そして、本四架橋をターゲットにした 700N/mm² 級鋼、800N/mm² 級鋼へと着実に高強度化の道を歩んできた。今日、橋梁分野で一般的に用いられている鋼板の機械的性質を表-5.1.1 に示す。800N/mm² 級の鋼板は、わが国では 1964 年に京葉道路の花輪跨道橋に初めて適用され、1974 年完成の阪神高速道路・港大橋で大量に採用されるに至った。しかしながら、疲労設計上の問題とともに、鋼材面からは合金元素添加量の増加にともなって 100℃以上の予熱が必要になるなど溶接性低下の問題があり、その適用にはおのずと制約があった。このような問題を克服するため、高張力鋼の低温割れ防止対策を従来よりも強化した予熱低減型 HT780 が開発され、1998 年完成の明石海峡大橋に適用された。予熱低減型 HT780 には、表-5.1.2 に示すように、Cu 析出型予熱低減鋼[岡村ほか, 1994]⁸⁾と低 P_{CM} 型予熱低減鋼[大西ら, 1995 ; 中川ら, 1998]^{9)・10)}の 2 種類のタイプがあるが、いずれのタイプでも予熱温度は 50℃程度と大幅な低減が実現し、製作の省力化が図られている。従来型と予熱低減型の HT780 の化学成分の比較例を表-5.1.3 に示す。

表-5. 1. 1 構造用鋼材の機械的性質(抜粋)

記号	規格	板厚 (mm)	降伏点 または 耐力 (N/mm ²)	引張 強さ (N/mm ²)	伸び			シャルピー 吸収 エネルギー
					板厚 (mm)	試験片	(%)	
SM400	JIS G 3106	≦16	245≦	400-510	t≦16	1A 号	18≦	A:規定なし
		16<t≦40	235≦		16<t≦50	1A 号	22≦	B:0℃ 27J≦
		40<t≦100	215≦		40≦t	4 号	24≦	C:0℃ 47J≦
SM490		≦16	325≦	490-610	t≦16	1A 号	17≦	A:規定なし
		16<t≦40	315≦		16<t≦50	1A 号	21≦	B:0℃ 27J≦
		40<t≦100	295≦		40≦t	4 号	23≦	C:0℃ 47J≦
SM490Y		≦16	365≦	490-610	t≦16	1A 号	15≦	A:規定なし
		16<t≦40	355≦		16<t≦50	1A 号	19≦	B:0℃ 27J≦
		40<t≦75	335≦		40≦t	4 号	21≦	
		75<t≦100	325≦					
SM520		≦16	365≦	520-640	t≦16	1A 号	15≦	A:規定なし
		16<t≦40	355≦		16<t≦50	1A 号	19≦	B:0℃ 27J≦
		40<t≦75	335≦		40≦t	4 号	21≦	C:0℃ 47J≦
		75<t≦100	325≦					
SM570		≦16	460≦	570-720	t≦16	5 号	19≦	-5℃ 47J≦
		16<t≦40	450≦		16≦t	5 号	26≦	
		40<t≦75	430≦		20≦t	4 号	20≦	
		75<t≦100	420≦					
HT690 (HT70)	HBS G 3102	8≦t≦50	590≦	690-830	8≦t≦16	5 号	17≦	-35℃ 47J≦
		50<t≦75	570≦	670-810	16≦t≦25	5 号	23≦	
					20≦t≦75	4 号	17≦	
HT780 (HT80)		8≦t≦50	690≦	780-930	8≦t≦16	5 号	16≦	-40℃ 47J≦
		50<t≦75	670≦	760-910	16≦t≦25	5 号	22≦	
					20≦t≦75	4 号	16≦	

*HBS(Honshu-shikoku Bridge authority Standard):本州四国連絡橋公団規格

表-5.1.2 従来型と予熱低減型 HT780 の特長¹¹⁾

【出典：米山徹，一井延朗(1995)：橋梁用予熱低減型 HT780 の適用について，川田技報，Vol.14,pp.104-110.】

	特長
従来型 HT780	・強化合金元素を添加して強度を上げ，かつ焼き入れ性の向上を図っている． ・じん性改善のため，A_{c3} 変態点まで再度焼き戻しをした調質鋼である． ・合金元素が多く，C_{eq} および P_{CM} が高い傾向にあり，より高い予熱が必要．
Cu 析出型 予熱低減 HT780	・焼き入れ性を増して溶接 HAZ 硬さに影響を及ぼす元素を低減． HAZ 硬さ $H_v \leq 350$，$C \leq 0.07\%$，B:フリー ・低 C による母材の強度不足を補うため，析出強化元素の Cu を 1%程度添加． ・TMCP の 1 種である制御圧延－DQT(直接焼入れ焼戻し)プロセスの製鋼法を採用して析出強化作用による高強度化と強じん性化を図っている．
低 P_{CM} 型 予熱低減 HT780	・$P_{CM} \leq 0.23\%$，$C \leq 0.09\%$により溶接割れ感受性を低減． ・Nb，V 添加によって軟化対策を施している ・適正な焼き入れ性を確保するために，$C_{eq}=0.45\text{-}0.53\%$の範囲に収めている． ・TMCP 技術により高強度化及び強じん化を図っている．

表-5.1.3 HT780 の化学成分の例¹¹⁾

【出典：米山徹，一井延朗(1995)：橋梁用予熱低減型 HT780 の適用について，川田技報，Vol.14,pp.104-110.】

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	C_{eq}	P_{CM}
従来型 (HBS HT780)	≤ 0.14	0.15- 0.55	0.60- 1.55	≤ 0.015	≤ 0.015	必要に応じて添加可						$\leq 0.53^*$	—
Cu 析出型	0.06	0.26	1.34	0.007	0.002	0.97	1.03	0.46	0.31	0.04	—	0.57	0.25
低 P_{CM} 型	0.07	0.28	1.00	0.006	0.001	0.02	1.00	0.70	0.40	0.51	0.015	0.52	0.22

単位(%)

* $t \leq 50\text{mm}$ ：これを超える場合は溶接部最高硬さ，ビード曲げを満足すればよい

1990 年ごろからは，本四架橋が完成を迎えるとともに社会環境に大きな変化が見られるようになった．すなわち，従来の長大橋を建設する技術から，一般的な橋梁を低価格かつ高耐久に作る方向に目標が変化してきた．橋梁の建設においてはコスト縮減，維持管理の軽減，環境との適合性などがより強く求められるようになり，これに対応して，床版構造の高耐久性化を実現することで主桁本数を減らすと共に桁の補剛材削減などの加工を最小限として合理化を図った合理化橋梁や，建設から廃棄に至るまでの橋梁のライフサイクルコストを意識したミニマムメンテナンス橋など，新しい概念に基づく鋼橋が提案，建設されるようになった．長大橋とは異なり，通常の鋼橋では高強度化による軽量化にも限界があり，なおかつ鋼材コストが高くなることもあって，鋼材性能への要求は高強度化よりもむしろその他の機能への要求が高まってきたといえる．鋼材の製造技術，ならびに利用技術の高度化を背景に，このような多様な要求に応じて，従来汎用的に使用されている鋼種と比較して，強度，じん性，溶接性，曲げ加工性，耐腐食性などにおいて，より優れた性能を有する鋼種，鋼材が近年数多く用いられるようになってきた．これらの鋼材は高性能鋼(High Performance Steel)[日本鉄鋼連盟，2019]¹²⁾と総称されている．

次の項で，近年用いられるようになってきた，橋梁用の高性能鋼の概要について説明する．

5.2 橋梁用高性能鋼

前項で述べたように、最近では、高性能鋼を活用することによってコスト縮減や合理化を図る機運が高まってきており、1996(平成 8)年以降の道路橋示方書などの設計基準にも高性能鋼が記載されている。道路橋示方書に規定されている高性能鋼の例を表-5.2.1 に示す。

表-5.2.1 橋梁用高性能鋼の例

種類	特長	適用効果
耐候性鋼	鋼材表面に緻密なさびを生じ、そのさびが鋼材表面を保護し、以降のさびの進行を大幅に緩和する鋼材	塗装が不要となることからライフサイクルコストの低減が可能
降伏点一定鋼	板厚 40mm を超えても降伏点または耐力の保証値が変化しない鋼材	鋼重軽減や設計の簡素化が可能
高じん性鋼（冷間曲げ加工用鋼）	曲げ加工部のじん性が十分確保できるように、高いシャルピー吸収エネルギーを保証した鋼材	従来よりも厳しい曲げ加工が可能
予熱低減鋼	溶接時の予熱温度の低減を可能とした鋼材	工場や現地施工における予熱作業およびその付帯作業の軽減が可能
大入熱溶接用鋼	大入熱溶接を適用しても優れた溶接品質の確保を可能とした鋼材	溶接施工の効率化が可能
耐ラメラテア鋼	板厚方向絞り値を保証した鋼材	溶接施工上の対策とあわせて、溶接後のラメラテアの発生防止が可能
LP(Longitudinally-Profiled)鋼板	長手方向に板厚が連続的に変化する鋼板	板継ぎ溶接などの加工増を招くことなく重量の低減が可能

以下、表-5.2.1 に示した高性能鋼について簡単に紹介することにする。なお、次節以降で説明するものについてはここでは省略する。

5.2.1 降伏点一定鋼

橋梁に適用される SM(JIS G 3106)では、表-5.1.1 からわかるように、鋼材の保証降伏点は板厚が大きくなるほど低下している。これは、板厚によって圧延時の鋼材内部の冷却速度が異なり、圧延終了時の温度が一定とならないためであり、一般に板厚が厚くなるほど降伏点は低下する。降伏点一定鋼とは、図-5.2.1 に示すように、保証降伏強度を板厚にかかわらず一定としたものである。

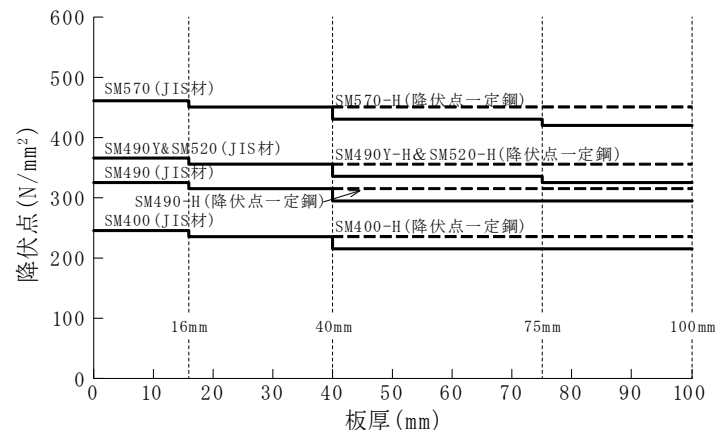


図-5.2.1 降伏点一定鋼

鋼橋では、製作性、溶接性などの制約から、以前は板厚 50mm 以上の厚板は使用されていなかった。しかしながら、鋼材性能の高度化を背景に橋梁建設の合理化、省力化などの要求に基づき、50mm を超えるような鋼板が使われるようになり、道路橋示方書では 1996(平成 8)年にそれまでの板厚 50mm までという制限が 100mm にまで拡大された。この結果、厚肉の鋼板の使用が一般的になるとともに、このような板厚の増加に伴う保証降伏点の低下の問題がクローズアップされるようになった。

以前の許容応力度設計ではもちろんのこと、部分係数設計(限界状態設計)に移行した現在の道路橋示方書[日本道路協会, 2017]¹³⁾においても、強度の基準となるのは降伏強度で、降伏強度が高く取ればその分だけ抵抗強度が大きくなり、板厚が削減できるため、設計上有利であることから、橋梁用鋼板では一般に用いられている。

5.2.2 高じん性鋼

鋼材の破壊じん性の評価指標には様々なものがあるが、通常、高じん性鋼と言え、シャルピー吸収エネルギーの値が高い鋼材のことを指す。鋼材のシャルピー吸収エネルギーの向上は現在に至るまでの鋼材性能向上の顕著な例であると言える。過去と近年における鋼板のシャルピー吸収エネルギーの比較を図-5.2.2 に示す。この図から、過去に比べて、鋼材のじん性は大幅に向上してきていることがわかる。

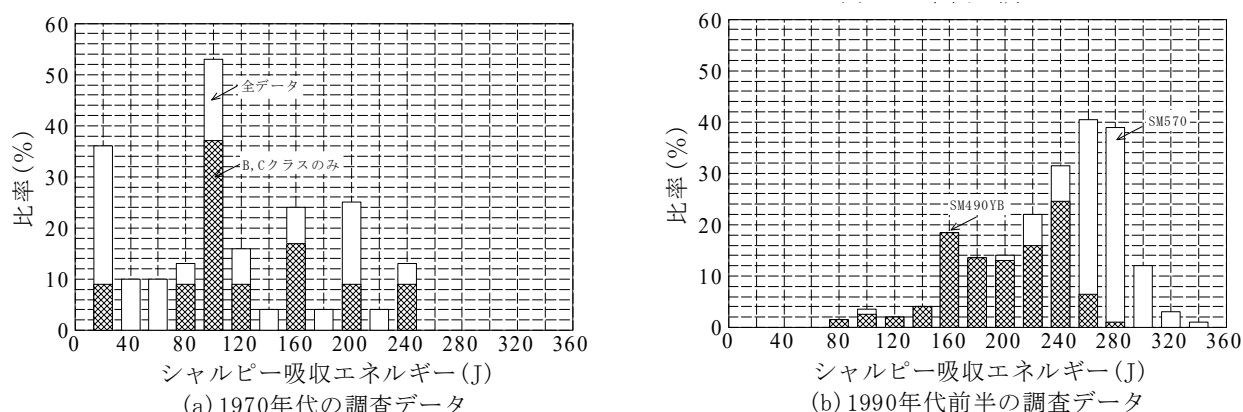


図-5.2.2 鋼板のシャルピー吸収エネルギー¹⁴⁾を参考に編集作成

[出典：本間宏二，三木千壽，征矢勇夫，笹尾英弥，奥村健人，原修一(1997)：冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究，土木学会論文集，I-40，No. 570，pp. 153-162.]

高じん性鋼が有効に活用できる例として、冷間曲げ加工の高度化を挙げることができる。一般に、鋼材に冷間曲げ加工を行うと、塑性ひずみの生じた部分のじん性が低下するという問題がある。従来、道路橋示方書では、冷間曲げ加工(常温での塑性加工)に関して、曲げ半径を板厚の 15 倍以上確保するように規定されてきた。これは、塑性ひずみの大きさに比例してじん性の低下量は大きくなり、3%の塑性ひずみを与えただけでも鋼材のじん性が相当低下するという過去の実験結果に基づいて決められたものである。これに対し、最近のように鋼板のじん性が通常の SM 材の規格よりも十分に高く、なおかつ曲げ加工後の時間の経過に伴うじん性の低下(ひずみ時効という)に影響を与える窒素(N)の量が少ない(0.006%以下)場合、3%よりも大きな塑性ひずみを与えてもシャルピー吸収エネルギー、破面遷移温度などのじん性の指標は十分に要求値を確保できることが確かめられている[本間ら，1997]¹⁴⁾。このようなことから、1996(平成 8)年の道路橋示方書から、冷間曲げ加工の許容曲げ半径はシャルピー吸収エネルギーが規定された温度(SM490Y の場合は 0℃)でそれぞれ 150 J，200 J 以上の場合、板厚の 7 倍または 5 倍以上にまで緩和されている。



図-5.2.3 冷間曲げ加工¹²⁾

〔出典：日本鉄鋼連盟(2019)：高性能鋼の概要(橋梁向け)〔パンフレット〕〕

今までよりもよりシャープな冷間曲げ加工が可能となることで、例えば4枚の鋼板を溶接で箱形断面に組み立てている鋼製橋脚の角部を冷間加工により構成することにより、溶接延長を削減してコスト削減を計ると同時に、欠点となりやすい角部の溶接を無くすことで耐震性能に対する信頼性を向上することが可能となる【山崎ら，2021】¹⁵⁾などのメリットが生じる。

5.2.3 予熱低減鋼

鋼材を溶接する場合、一般に鋼材の合金元素量が多いほど、また、板厚が厚いほど溶接割れが生じやすくなるため、予熱(Pre-heating)が必要になる(4.6.1 参照)。しかし、高温の予熱作業は施工管理に各種の制約があるため、製作の省力化のためには、予熱温度の低減、省略が求められることになる。

道路橋示方書では、予熱温度の目安を、過去の研究成果【日本鋼構造協会，1972】¹⁶⁾をもとに、鋼材の溶接割れ感受性組成(成分パラメータ) P_{CM} と板厚に依存する拘束度、溶接により溶接部に進入する水素量をパラメータとして、以下の式で与えている。

$$\text{予熱温度算定式 } T_p(^{\circ}\text{C}) = 1440P_w - 392$$

$$P_w = P_{CM} + (H_{GL}/60) + (K/400,000)$$

P_{CM} : 溶接割れ感受性組成

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

H_{GL} : 溶接金属の拡散性水素量

(低水素被覆アーク溶接の場合 2ml/100g,

サブマージアーク溶接及びガスシールドアーク溶接の場合 1ml/100g)

K : 溶接継手の拘束度

$$(K = 200t \text{ N/mm} \cdot \text{mm}; t = \text{板厚, ただし, } t > 50\text{mm のときは } t = 50)$$

この式からわかるように、鋼材の板厚が大きくなるほど、また合金元素が多くなるほど、予熱温度は上昇することがわかる。逆に、予熱温度の低減を図るには、成分パラメータである P_{CM} を低く抑えればよいことがわかる(図-5.2.4)。

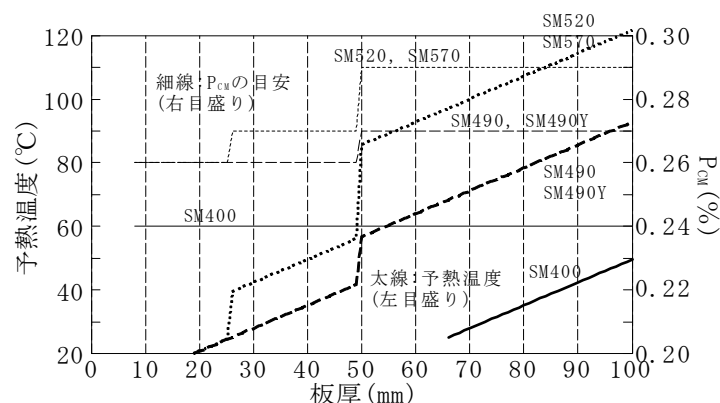


図-5.2.4 P_{CM} と予熱温度の標準

予熱低減鋼は、TMCP 技術などを用い、必要な強度を確保しつつ、鋼材中に含まれる合金元素の量を抑えて、溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) を低くした鋼材で溶接時の予熱温度の低減が可能となる。

ただし、実際の溶接作業において優れた耐割れ性能を得るためには、母材のみならず溶接金属の耐割れ性も十分なものでなくてはならない点に注意が必要である。

5.2.4 大入熱溶接用鋼

溶接の入熱によって、鋼材の溶接部周辺に熱影響部(HAZ:Heat Affected Zone)が形成される。一般に入熱量が増加するほど HAZ 部のじん性は低下する。このため、鋼構造物の溶接施工においては、鋼材熱影響部のじん性劣化を防止する目的で入熱量の制限が行われている。例えば、道路橋の基準である道路橋示方書では、調質鋼(SM570Q)の溶接入熱量を 70,000J/cm に制限している。

大入熱溶接用鋼とは、溶接時に従来の入熱量制限を超える入熱量が加わる大入熱溶接法を適用しても、優れた溶接品質を確保できる鋼材のことを言う。入熱量の制限が緩和できることによって、高能率の溶接法が適用可能となり、溶接の能率が向上する。

近年では、現場溶接における施工能率の向上の一環として、大入熱溶接が適用される場合がある。その代表的なものは、少数主桁橋梁における鋼 I 桁ウェブの突合せ溶接にエレクトロガス溶接(EGW)が採用された例である。少数主桁橋の場合、ウェブの板厚が 25~30mm 程度となるが、この溶接に用いられる EGW の入熱量は 150~200kJ/cm 程度になる。図-5.2.5 に、大入熱溶接を行なった場合の鋼材溶接部のシャルピー吸収エネルギーと炭素当量(C_{eq})との関係を模式的に示す。道路橋示方書では、溶接継手の強度、じん性も母材の要求値以上を確保することが要求されているが、一般の鋼材を用いて大入熱溶接を行なうと、図-5.2.5 のように HAZ 部でのじん性低下が大きく、要求性能を満足できない場合がある。

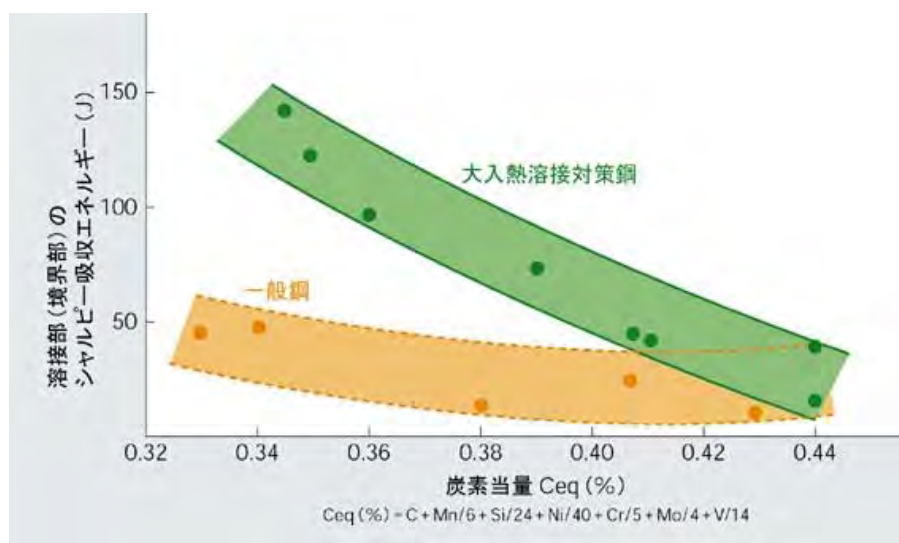


図-5.2.5 大入熱溶接用鋼の溶接部じん性のイメージ¹²⁾

[出典：日本鉄鋼連盟(2019)：高性能鋼の概要(橋梁向け) [パンフレット]]

大入熱溶接用鋼は、燐(P)、硫黄(S)等の不純物の低減と低炭素当量(C_{eq})化(あるいは低 P_{CM} 化)を行い、これに加えて、結晶粒の粗大化防止策を行い、微細な HAZ 組織を得ることによってじん性の確保を行なっている。(4.6.2 参照)

5.2.5 耐ラメラテア鋼

近年、鋼構造物の大型化かつ複雑化にともない、鋼橋分野においても、拘束の厳しい溶接継手により板厚方向に大きな引張応力を受ける構造(例えばラーメンの隅角部など)を採用するケースが多くなってきている。道路橋示方書によればこのような構造部材には、溶接ラメラテアが発生

する危険性があるので、耐ラメラテア鋼の使用が推奨されている。

ラメラテアは溶接による影響で板厚方向に働く残留応力と水素の侵入の影響で、圧延により伸展した鋼中の硫化マンガン(MnS)を主体とする非金属介在物を基点として層状に割れが発生する現象(図-5.2.6)で、溶接割れの一種として知られている。

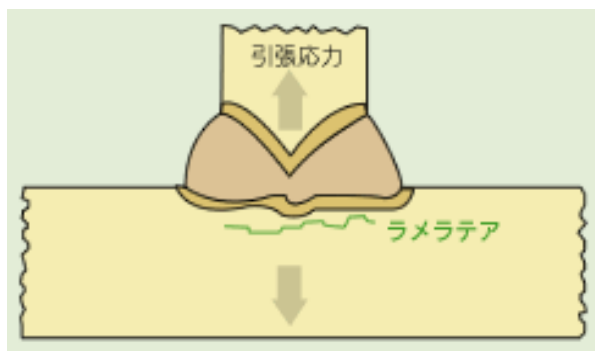


図-5.2.6 ラメラテア¹²⁾

[出典：日本鉄鋼連盟(2019)：高性能鋼の概要(橋梁向け)[パンフレット]]

耐ラメラテア性の向上のためには、低硫黄(S)化、清浄度向上および偏析の軽減が必要である。耐ラメラテア性の評価は、板厚(z)方向の引張試験における試験片の断面収縮率(絞り値) ϕ_z と鋼中硫黄(S)濃度の組み合わせで規定されている。

表-5.2.2 JIS G 3199 による耐ラメラテア鋼の板厚方向の絞り値

クラス 番号	3 個の試験値 の平均値	個々の 試験値	S 量(%)	
				(受渡当事者間の協 定によって適用す る)
Z15(S)	15%以上	10%以上	0.010 以下	
Z25(S)	25%以上	15%以上	0.008 以下	
Z35(S)	35%以上	25%以上	0.006 以下	

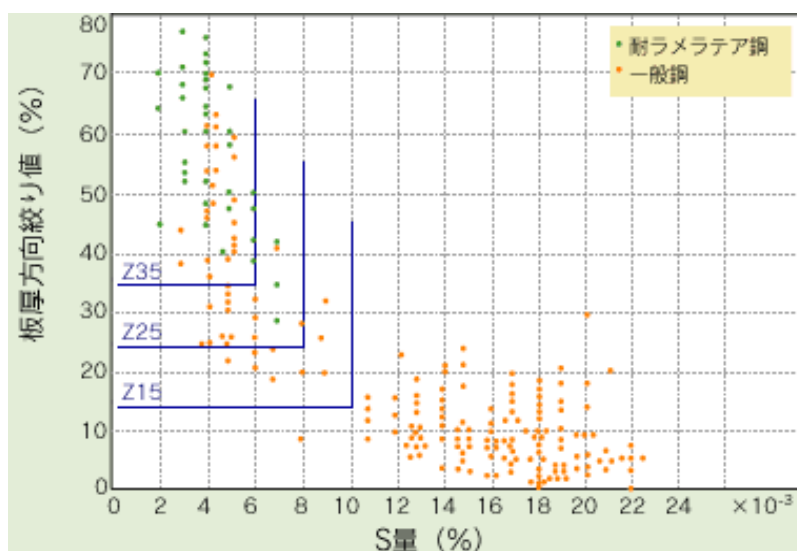


図-5.2.7 S量と板厚方向絞り値の関係¹²⁾

[出典：日本鉄鋼連盟(2019)：高性能鋼の概要(橋梁向け)[パンフレット]]

ラメラテア発生危険性がある溶接構造部材では、溶接加工上の対策とともに、耐ラメラテア鋼の使用によりラメラテアの発生を大幅に低減することができる。

5.3 橋梁用高降伏点鋼板 SBHS

5.3.1 SBHS の開発経緯

SBHS の開発経緯を表-5.3.1 に示す。橋梁用高性能鋼は、米国での橋梁向けの High Performance Steel の開発 [FHWA, 2002]¹⁷⁾ に刺激を受け、東京工業大学の創造プロジェクト研究体(代表：三木千壽教授(当時))において、鉄鋼メーカー、橋梁メーカー参画のもと、産学連携プロジェクトとして 1994 年に発足した「高性能鋼の利用技術研究会」にて検討が開始された。研究会では、橋梁の性能を高めるために鋼材へ要求される性能やそれを受けて鋼材が備えるべき材料特性についての検討が行われ、その成果として橋梁用高性能鋼 BHS (Bridge High-performance Steel) が提案された [三木ら, 2003]¹⁸⁾。

研究会での高性能鋼の提案を受け、実橋梁への適用を意識して、2005 年に日本鉄鋼連盟製品規定として BHS(BHS500(W), BHS700(W))が規格化(MDCR0014-2004) [日本鉄鋼連盟, 2004]¹⁹⁾ され、東京ゲートブリッジなどへの適用検討が開始された。SBHS は、この BHS をベースとして JIS 化された鋼材で、2008 年に JIS G 3140 橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS500(W), SBHS700(W)) として制定された。一部相違はあるものの、その規格内容は BHS を踏襲したものとなっている。また、2011 年の改正で BHS では提案されていなかった SBHS400 が追加されている。SBHS の規格の概要を表-5.3.2 に示す。橋梁用鋼材は従来引張強度保証下限値を用いた記号表示がなされてきた (例えば、引張強さ 490N/mm² 級(50 キロ)鋼は SM490Y) が、橋梁設計には降伏強度が用いられることを考慮して SBHS では降伏強度保証下限値を用いた記号表示とされている (例えば、引張強さ 490N/mm² 級(50 キロ)鋼は SBHS400)。SBHS は降伏強度の保証下限値が 400, 500, 700 N/mm² の 3 種類からなり、各鋼種に橋梁分野において維持管理コスト軽減への期待から普及の進んできた耐候性仕様 (強度表記の後に W を付与) を加えた計 6 種類の鋼材で構成されている。

SBHS(JIS 化前の BHS を含む)は、その開発過程で東京ゲートブリッジなど実工事への適用実績が積上げられ、材料としての信頼性を明らかにすることで、その適用範囲が広げられてきた [土木学会, 2009]²⁰⁾。さらに、JIS 化完了後の次のステップとして、鋼材の一般化をはかるため、設計基準への反映が進められてきた。その過程で、大学や関係機関の協力のもとに、材料特性や耐荷力、疲労強度等の強度特性、さらには溶接施工試験などの製作性に関するデータが蓄積され、その信頼性が示されてきた。例えば、座屈強度の検討では、自由突出板や両縁支持板などの構造物を構成する板要素、柱や桁などの橋を構成する部材のそれぞれで、降伏比が高いことによる強度低下がないことなどを実証するため、部材製作時の初期不整の影響も考慮した系統的な実大規模の破壊実験が数年間かけて実施され、十分な安全性を有することが検証されてきた [野阪ら, 2013 ; 高木, 2018]^{21), 22)}。その成果として、2017 年に道路橋の設計基準である道路橋示方書 [日本道路協会, 2017]¹³⁾ に具体的な設計手法が規定されるに至った。

技術基準に記載されたことにより、鋼材としてはその利用が一般化したと考えられ、メリットを上手に活かし、その利用をさらに拡大していく取り組みが行われている。

表-5.3.1 SBHS の開発経緯

年	できごと
1994～2000	「高性能鋼の利用技術研究会」における橋梁用高性能鋼(BHS)の概念提案
2003	橋梁用高性能鋼材(BHS500, 700)の提案
2004	NETIS 登録 (橋梁用高性能鋼材(BHS 鋼))
2005	BHS500, 500W, 700W(社)日本鉄鋼連盟製品規定)設定
2006	臨海中央橋に約 1,200 トン初適用
2007	東京ゲートブリッジに約 16,100 トン適用
2008	SBHS500, 500W, 700, 700W 鋼材 JIS 公示
2010	鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物改訂 永田橋に約600トンJIS化後初採用
2011	SBHS400,400WがJISに追加
2011～	設計・施工に関する技術の蓄積とともに, 多様な橋梁形式への適用が進む
2017	道路橋示方書(平成 29 年版)に SBHS400(W), SBHS500(W)が規定される

表-5.3.2 SBHS の規格概要 (JIS G 3140)

(a) 機械的性質

種類の記号	板厚(mm)	降伏点または 耐力(N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	シャルピー吸収 エネルギー	P _{CM}
SBHS400	6≦t<100	400 以上	490~640	√E ₀ ≧100J @圧延直角方向	0.22 以下
SBHS400W					
SBHS500		500 以上	570~720	√E ₋₅ ≧100J @圧延直角方向	0.20 以下
SBHS500W					
SBHS700	6≦t≦75	700 以上	780~970	√E ₋₄₀ ≧100J @圧延直角方向	0.30 以下
SBHS700W					(6≦t≦50) 0.32 以下 (50<t≦75)

(b) 化学成分

種類の記号	単位 %											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	N
SBHS400	0.15 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	—	—	—	—	—	—	0.006 以下
SBHS400W	0.15 以下	0.15～ 0.55	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	0.30～ 0.50	0.05～ 0.30	0.45～ 0.75	—	—	—	0.006 以下
SBHS500	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	—	—	—	—	—	—	0.006 以下
SBHS500W	0.11 以下	0.15～ 0.55	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	0.30～ 0.50	0.05～ 0.30	0.45～ 0.75	—	—	—	0.006 以下
SBHS700	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.015 以下	0.006 以下	—	—	—	0.60 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.006 以下
SBHS700W	0.11 以下	0.15～ 0.55	2.00 以下	0.015 以下	0.006 以下	0.30～ 1.50	0.05～ 2.00	0.45～ 1.20	0.60 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.006 以下

5.3.2 SBHS の特長

SBHS と従来の構造用鋼材(SM)の主要な材料特性の比較を表-5.3.3 に示す。前述のように SBHS は橋梁構造への適用を前提として、インフラストラクチャーとしての橋梁の性能を高めるための要求性能に合わせて、鋼材自身が有する諸性能を高めている。要求性能を満足するための製造方法として、

SBHS ではその製造に熱加工制御(TMCP)を適用することが標準とされ、金属組織の微細化によって高い降伏強度を確保しながら、添加する合金元素の量を抑制して溶接性の向上、優れたシャルピー吸収エネルギーの保証などを実現している。

表-5.3.3 SBHS と従来鋼との主な性能の比較(板厚 50mm の場合)

		490N/mm ² 級鋼		570N/mm ² 級鋼		780N/mm ² 級鋼	
		SBHS400 SBHS400W	従来鋼 (SM490Y /SMA490W)	SBHS500 SBHS500W	従来鋼 (SM570 /SMA570W)	SBHS700 SBHS700W	従来鋼 (HT780*)
強度	降伏点 (N/mm ²)	≥ 400	≥ 335	≥ 500	≥ 430	≥ 700	≥ 685
	降伏点 一定	○ (6・100mm)	△ (≥ 40mm)	○ (6・100mm)	△ (≥ 40mm)	○ (6・75mm)	△ (≥ 40mm)
加工性 溶接性	高じん 性	○ (100J@0℃: 圧延直角方向)	△ (47J@0℃: 圧延方向)	○ (100J@-5℃: 圧延直角方向)	△ (47J@-5℃: 圧延方向)	○ (100J@-40℃: 圧延直角方向)	△ (47J@0℃: 圧延方向)
	予熱低 減	○ (予熱なし)	△ (≥ 80℃)	○ (予熱なし)	△ (≥ 80℃)	○ (≥ 50℃)	△ (≥ 100℃)
耐食性	耐候性	○ (SBHS400W)	○ (SMA490W)	○ (SBHS500W)	○ (SMA570W)	○ (SBHS700W)	—

○：通常仕様で対応、△：通常仕様では未対応

*:本州四国連絡橋公団規格 HBS G 3102

以下に、橋梁用鋼材に対する要求性能と SBHS の特性の関係について述べる。

(1) 強度レベル

わが国の鋼橋の設計は伝統的に降伏強度を基準とする弾性設計(許容応力度設計)が主流であった。降伏強度が高いことが鋼重削減につながり、経済的なメリットが大きい。しかし一方で、鋼材重量は降伏強度だけで決まるものではなく、たわみなどの剛性や疲労強度も考慮する必要がある。鋼重を削減できる強度には適切なレベルがある。鋼橋で一般的な I 形の桁断面を有する鈑桁橋を対象とした試算によると、降伏強度の増加に伴い鋼材重量は低減するものの、降伏強度が 500N/mm² 程度を超えると、たわみ制限や疲労強度が断面決定を支配する要因となり、それ以上の高強度化は鋼重低減につながらないことが明らかにされている【小西ら, 2000】²³⁾。また、吊橋や斜張橋のような大規模な橋梁については、橋梁自身の重量である死荷重の比率が大きく、その軽減が経済性に大きな影響を及ぼす。例えば、長らく世界最長のスパンを誇った橋梁である明石海峡大橋では引張強度 780N/mm² クラスの鋼材が多く用いられている。これらを考慮して、SBHS ではまず最初に、降伏強度を 500N/mm², 700N/mm² とした SBHS500 および SBHS700 の 2 種類が JIS 制定された。さらにその後、一般的な橋の合理化を最大限にはかるため、鋼橋で最も多く用いられている SM490Y の降伏強度を 10~23% 引き上げた降伏強度 400N/mm² の SBHS400 が JIS に追加されている。

一方で、橋梁の建設技術のトレンドとして、橋梁の大型化や部材製作の省力化が進展してきたのに伴い、橋梁に使用される鋼材は厚肉化してきた。例えば、道路橋示方書では、使用する板厚は従来 50mm までに制限されていたものが、1996(平成 8)年に 100mm まで使用可と緩和され、50mm 以上の厚肉の鋼材の使用が一般的となった。しかし、ここで問題となったのが降伏強度で、従来の汎用鋼種(SM)では板厚が厚くなるほど保証降伏点が低減されるため、板厚に応じて強度が変化することになり、設計の煩雑化を招いていた。このような設計の煩雑さを回避するため、板厚 40mm 以上の鋼板については降伏点一定鋼(-H と表記)として、板厚 40mm 以下の降伏強度を保証した鋼板が一般的には用いられている(図-5.3.1)。このように現在では、板厚 100mm まで一定の降伏強度を保証することが可能であるため、SBHS では板厚によらず降伏強度は一定の値を保証している。

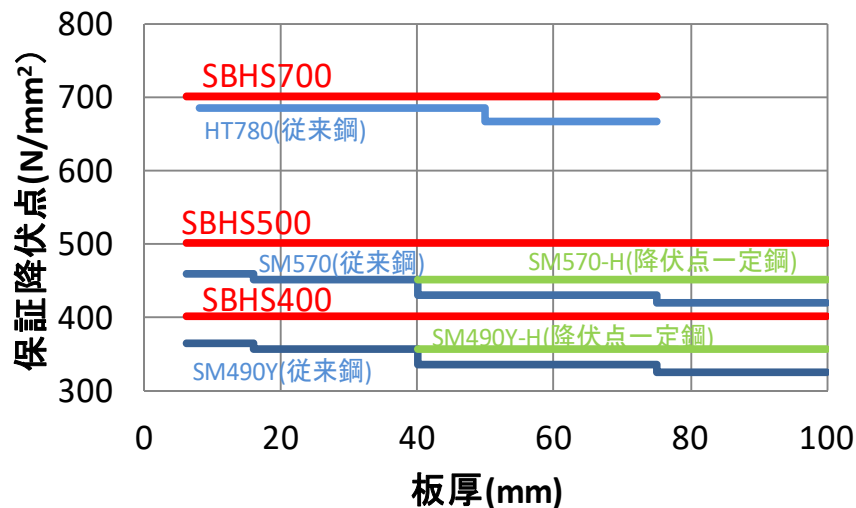


図-5.3.1 鋼種ごとの板厚と保証降伏点の関係

(2) シャルピー吸収エネルギー

ぜい性破壊を防止し，構造物全体の安全の信頼性向上を図るためには，鋼材は高いじん性を有することが求められる．一般に，厚板の強度や伸びについては圧延方向と圧延直角方向で大きな違いはないとされているが，シャルピー吸収エネルギーは圧延方向に比べ圧延直角方向が低下する傾向にある．このため，道路橋示方書では橋梁部材の製作においては主たる応力の方向と鋼材の圧延方向を一致させるのを原則としている．SBHS では，じん性が低下する圧延直角方向に対し，100J 以上と従来(27J または 47J 以上)よりも高いシャルピー吸収エネルギーを保証しており，圧延直角方向に対しても材料の信頼性が高い．このため，応力の方向を圧延方向と一致させる必要がなくなり，部材の板取りを自由にできる【日本道路協会，2017】¹³⁾ (図-5.3.2)．さらには，トラス橋やアーチ橋における部材が交差する格点などの多方向から力が作用する部材についても，圧延方向，圧延直角方向のどちらに対してもその信頼性が保証されていることになるので，SBHS の適用により構造物としての信頼性は大きく向上する．

なお，SBHS で保証している 100J 以上という高いシャルピー吸収エネルギーは，鋼板の冷間曲げ加工に対する信頼性の向上などを目的に設定されたものであり，JIS G 3140 の解説【日本規格協会，2011】²⁴⁾ にもその旨の記載がある．一般に，溶接部のシャルピー吸収エネルギーは母材よりも低下するため，溶接部で所要のじん性を確保することが重要である．橋梁の場合，溶接部のシャルピー吸収エネルギーは従来の実績等から 47J を確保すれば十分であると考えられるため，SBHS を使用した場合でも溶接部への要求値は 47J 以上(試験温度は鋼種により異なる)とされており【日本道路協会，2017】¹³⁾，母材のような高いじん性は求められていない．

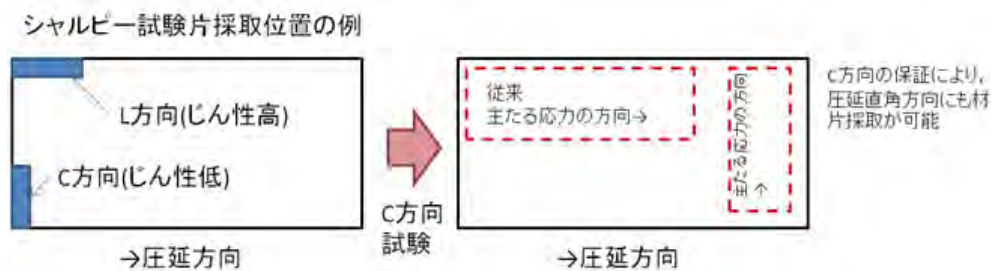


図-5.3.2 板取りの方向の例

(3) 溶接性

橋梁では部材の組み立てに溶接が不可欠であるため、橋梁用鋼材の溶接施工性の向上は、製作における効率化の観点で重要である。特に従来の SM570 以上の高強度鋼や拘束の強い厚肉の鋼板の溶接では低温割れの抑制対策として予熱を必要としており、製作効率低下の要因のひとつとなっていた。道路橋示方書では、1996(平成 8)年から式(5.3.1)に示す溶接割れ感受性組成(P_{CM})を指標とする予熱温度の算定基準が採用されている。このため、SBHS では、高強度と溶接性を両立させるために P_{CM} を低く抑えることにより、予熱の省略または軽減を図っている(図-5.3.3)。

$$P_{CM} = C + Mn/20 + Si/30 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + Cu/20 + 5B \quad (\%) \cdots (5.3.1)$$

また、厚肉の鋼板の溶接施工の合理化には 1 パスあたりの入熱量を増やし、パス数の削減を図ることも有効である。道路橋示方書における SM570 の溶接入熱の許容値(70,000J/cm)は SM490Y などの汎用鋼種(100,000J/cm)よりも低く抑えられており、製作の効率化の妨げとなることがある。SBHS では、SBHS400 はもちろんのこと、SM570 に相当する SBHS500 においても溶接の入熱量は 100,000J/cm まで許容される。また、降伏強度や引張強度などの強度やじん性の確保、溶接割れの防止など、溶接部の性能を確保するためには、溶接材料も重要な要素であるが、SBHS の母材特性に合わせた専用の溶接材料の開発も鋼板の開発と同時に進められており、溶接材料の JIS 改正に合わせて SBHS 用の溶接材料が JIS 化されている【日本橋梁建設協会, 2013】²⁵⁾。

これらの溶接に対する性能を有する SBHS400, SBHS500 は従来の汎用鋼種である SM490Y と同等以上の優れた溶接性を有する鋼板であるといえる。製作性の向上を確認するため、SBHS を用いた実大の I 桁の製作試験[安藤ら, 2006]²⁶⁾ も行われており、橋梁製作における良好な溶接性が実証されている。

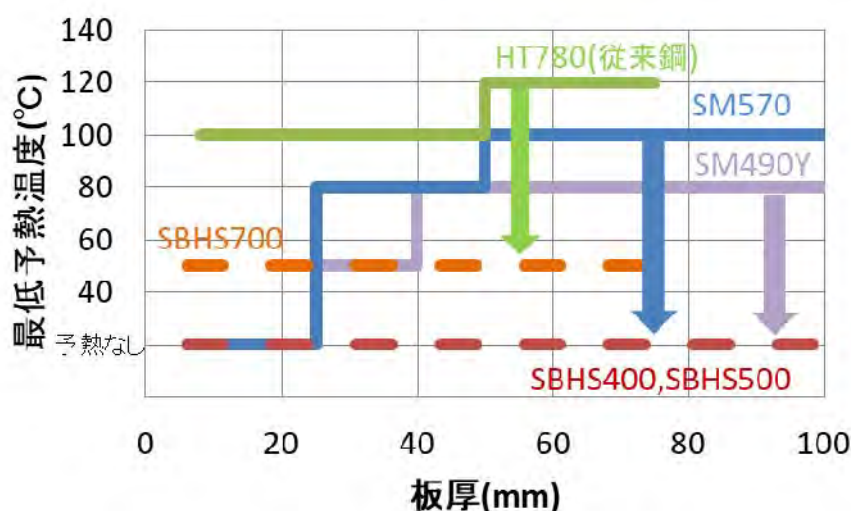


図-5.3.3 SBHS による予熱温度の低減

(4) 耐候性

耐候性鋼は耐候性の向上に有効な合金元素の添加により、緻密なさびを形成して鋼材表面を保護し、腐食速度を抑制する鋼材である。近年では、わが国のインフラの高齢化を受けて、ライフサイクルコストの低減や維持管理の手間を最小化するミニマムメンテナンス橋に関する意識が高まってきており、この観点から塗装省略による維持管理の負担減を目指して、耐候性鋼を適用した橋梁が増加してきている【日本橋梁建設協会, 2019】²⁷⁾。

溶接構造用の無塗装仕様の耐候性鋼は JIS G 3114 に SMA の W 種として規定されており、耐候性

の向上に有効、かつ溶接性への影響が比較的小さい元素である銅(Cu)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)の添加量が規定されている。橋梁分野では、その利用は一般化しているが、適用できる環境や構造詳細に各種の制約があり、塩分濃度の高い環境や水が滞留するような湿潤環境では効果が期待できないため、適用にあたっては鋼道路橋防食便覧[日本道路協会, 2014]²⁸⁾などの技術基準に従って適切に利用する必要がある。

耐候性鋼の耐食性能は添加する合金元素の成分系によって決まるといえるが、SBHS では耐候性鋼(W)仕様として、SMA-W 程度の耐候性を付与することを目的に、JIS の SMA-W と同様の銅(Cu)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)の添加量が規定されている。なお、SBHS の JIS 付属書では、各合金元素の添加量から耐候性の程度を評価できる耐候性合金指標(r 値)[三木ら, 2003]²⁹⁾が参考として記載されている。

(5) その他特性

SBHS では、製鋼技術の進展による不純物(硫黄(S),窒素(N))の低減も規格に盛り込まれ、構造物の信頼性向上に寄与している。

橋梁部材においては、板厚方向に力を受ける溶接継手も存在し、鋼板の表面に平行な割れの発生を防止する耐ラメラテア性など、厚さ方向特性に配慮しなければならない場合がある。SBHS では、耐ラメラテア特性に影響する硫黄(S)含有量を 0.006%以下と規定している。これは、厚さ方向特性として JIS G 3199 の最高レベルである厚さ方向絞り値 Z35 に相当するものである。

また、窒素(N)は冷間曲げ加工におけるひずみ時効硬化によるじん性の低下に影響するとされており、SBHS では、その含有量は時効によるじん性低下への影響がないとされる 0.006%以下に規制されている。

ただし、これらの性能は、厚さ方向の絞り値による耐ラメラテア性や、厳しい冷間曲げ加工後もじん性が所定の値を確保できることを保証するものではなく、そのような性能を求める場合には別途試験などを行い、性能を確認する必要がある。性能の保証が必要な場合は、道路橋示方書などの技術基準に示されている耐ラメラテア性や強冷間曲げ加工に対する特殊仕様を適用する必要があることに注意しなければならない。

5.3.3 SBHS の適用メリット

(1) SBHS の特長

建設コストの縮減、ならびに構造物の信頼性の向上をはかることで、橋梁の高性能化を推進することを目指して開発された高性能鋼 SBHS について、その開発の経緯と鋼材の特長について紹介した。

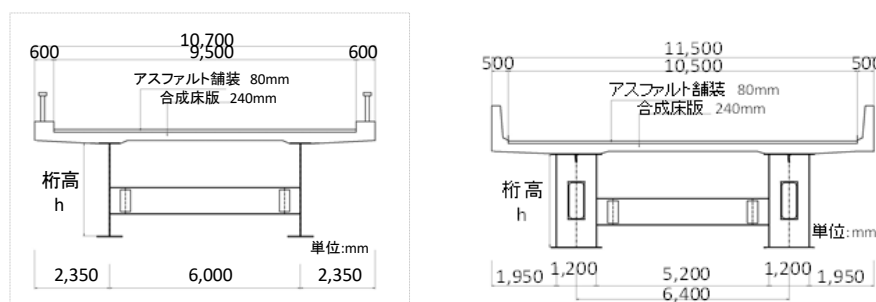
主として鋼材特性の観点から SBHS を紹介したが、橋梁の設計・施工においてはその他に様々なメリットが期待できる。例えば、鋼種の集約などもその一つである。現在、橋梁分野では、鋼種により SS, SM, 強度により 400,490,490Y,520,570 や-H, じん性により A,B,C など多くの仕様があり、これらを組み合わせた約 30 種類の鋼材が使用されている。SBHS の導入により、橋に使われる溶接構造用の厚板は基本的に SM400, SBHS400, SBHS500 の 3 種類でほぼ対応できることになるので、使用する鋼材の種類が大幅に削減される。これにより設計・製作・施工の各段階で鋼材の選択・管理に関する負荷の軽減が期待される。

SBHS は従来から橋梁に使用されてきた鋼材を、基本的にはその規格範囲内で橋梁用として必要な性能に関して高性能鋼化したものであり、いわばベースとしての鋼材性能を高性能化したものといえる。必要があれば JIS で保証される SBHS の性能に加えて、さらに高い性能を付与することも可能である。

(2) 具体的なメリットの試算例

SBHS のような高性能鋼を用いることで、鋼材の使用数量を減らすことができるとともに、溶接性の向上や軽量化による製作コストの低減によって、橋梁建設の合理化やコスト縮減が期待できる。

文献[高木ら, 2020]³⁰⁾において、部分係数設計法による道路橋示方書[日本道路協会, 2017]¹³⁾の規定に基づいてわが国の道路橋で平均スパン 60m の 3 径間連続合成 2 主鈑桁、ならびに平均スパン 80m の 3 径間連続細幅箱桁(図-5.3.4)へ SBHS400, 500 を適用した場合の試算結果が報告されている。



合成 2 主鈑桁(3@60m)

合成細幅箱桁(75+90+75m)

図-5.3.4 試算の対象橋梁³⁰⁾

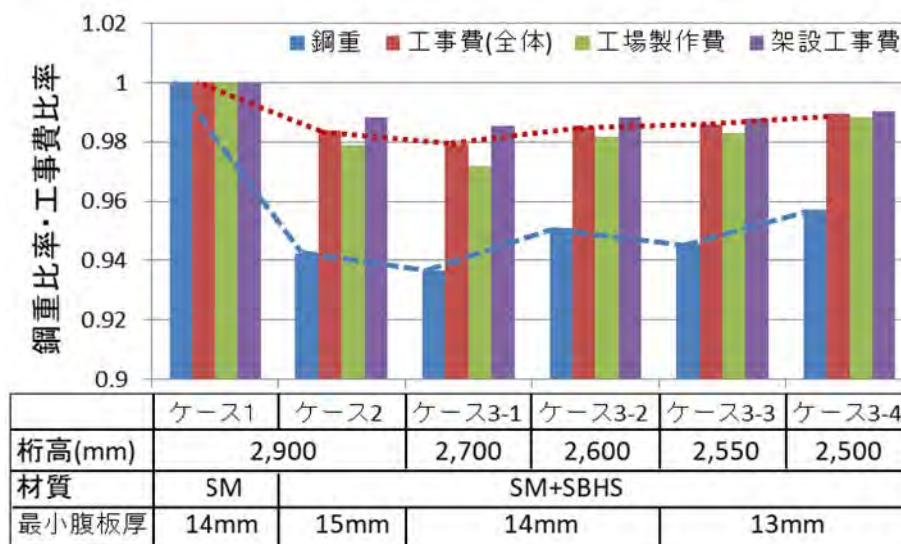
[出典：高木優任，加藤真志，松下政弘，壺岐浩(2020)：A study on Effective Utilization of SBHS for Steel Highway Bridge based on a Trial Design, 橋梁と基礎, pp.35-40.]

比較検討は、表-5.3.4 に示すケースで行われ、従来鋼 (SM) のみで断面を構成した場合[ケース 1] を基準とし、ケース 2 ではケース 1 から桁高を変化させずに単純に SBHS に置き換えることによる効果を検討し、ケース 3 では SBHS を適用して複数の桁高での試算を行い、鋼重・コストが変化する傾向が調べられている。

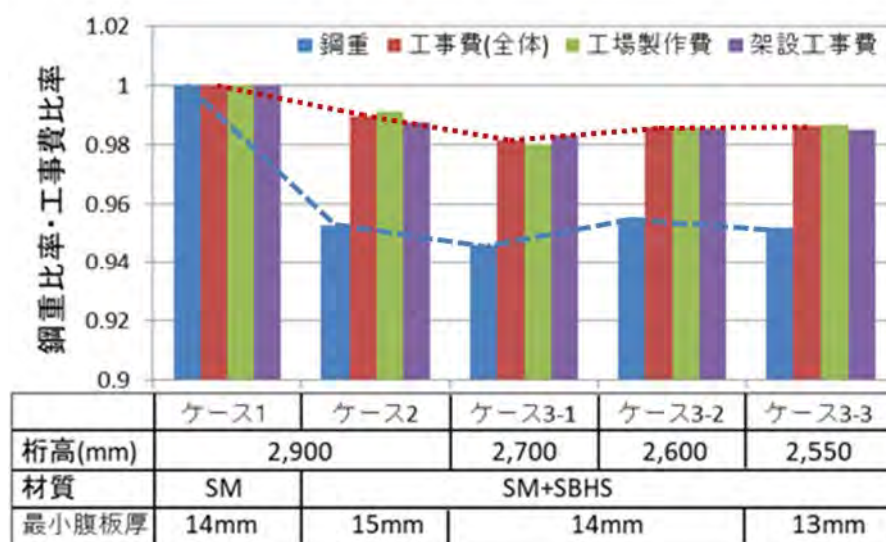
表-5.3.4 比較検討ケース

	検討条件
ケース 1	SM のみから選択[基本ケース]
ケース 2	SM+SBHS400, 500 から選択 [桁高はケース 1 と同じ]
ケース 3	SM+SBHS400, 500 から選択 [桁高はケース 2 から低減]

試算の結果、得られた鋼重と建設コストの比較を図-5.3.5 に示す。鋼重に関しては、桁高を低減していくと腹板厚が段階的に薄くなるため、最低腹板厚が下がる部分で鋼重は減るが、フランジ厚は桁高が低くなるほど厚くなるため鋼重は増える。この結果、従来鋼と同等の腹板厚となる桁高の上限で鋼重は最小となった。ただし、桁高を 2550mm 程度まで低くしても全体鋼重は大きく増えることはないことがわかる。また、工場製作費、ならびに架設工事費とこれらを合計した工事費(全体)に関しては、鋼重が最小となるケースが最小となることがわかる。全般に、細幅箱桁の方が鋼重低減幅が小さく、工事費の削減効果も 2 主合成鈑桁よりも小さい結果となっている。また、2 主合成鈑桁では製作費の低減の方が大きく、細幅箱桁では架設工事費の低減の方が大きくなる傾向がみられた。これは、細幅箱桁では腹板の数が多くなるため、桁高低減の効果が大きく表れなかったことと、細幅箱桁の方が規模が大きく、鋼重削減の絶対値が大きくなるため、鋼重に比例して算出する架設費の低減が大きくなったことが理由と考えられる。



(a)連続合成2主鈑桁



(b)連続合成細幅箱桁

図-5.3.5 試算結果³⁰⁾

[出典：高木優任，加藤真志，松下政弘，壺岐浩(2020)：A study on Effective Utilization of SBHS for Steel Highway Bridge based on a Trial Design, 橋梁と基礎, pp.35-40.]

以上をまとめると，SBHS の適用について，鈑桁ならびに箱桁での試算結果から，SBHS の適用により標準的な鈑桁，箱桁形式において 5%程度鋼重の低減を図ることができること，および 2%程度の建設コスト縮減が可能であることが確認されている．また SBHS の場合，腹板の最低板厚が増加しない桁高を選定することが鋼重低減に有効であること，ならびに桁高を低減しても鋼重の増加は小さくなく，桁高の低減に有効な鋼材であることが確認されている．

5.4 今後の展望

鋼材への要求性能には，設計体系が大きな影響を与える．それは，設計体系により，部材に要求される性能が変わり，それによって鋼材への要求性能も変化するからである．

道路橋示方書等のわが国における橋梁設計基準は長年，材料の弾性域しか利用しない許容応力度設計法(Allowable stress design)によって設計されてきた．また設計基準においては，JIS の最低限の性

能を有する材料が供給される場合を想定してその体系が構築されてきた。限界状態設計法(Limit State Design)が以前より取り入れられている欧米の諸外国では、中間支点部での応力再分配を利用するオートストレス設計や、断面の全塑性強度を利用するコンパクト断面設計など、鋼材の塑性域までを利用する設計法が導入されており、鋼材の降伏後の余力と塑性変形能力などが規定されている。わが国でも、1995(平成 7)年に発生した兵庫県南部地震以降、耐震設計の観点から、鋼材の塑性変形によるエネルギー吸収が着目され、鋼材の塑性域の性能が構造物の挙動に及ぼす影響が積極的に研究されるようになった結果、鋼製橋脚に関しては鋼材の塑性変形性能を設計に取り込むようになった。2017(平成 29)年の道路橋示方書改定では部分係数設計法(限界状態設計法)へと移行し、多様な設計が導入できる環境が整いつつある。しかし、現状では既存の鋼材の性能を前提とするまでに止まっており、鋼橋として理想的な鋼材性能を明示できるまでには至っておらず、今後の課題となっている。

現在、わが国においても世界規模での規格統一化の要求を背景に、構造物への要求性能を明示し、その性能が満足されることを自由な方法で検証することが可能となる性能設計(Performance Based Design)の導入が関係各機関で検討されている。性能設計では、要求性能を満たすための方法は設計者に委ねられるため、新技術の導入などが従来の仕様設計に比べて容易となることが期待される。設計の自由度が高まるため、鋼材性能の活用もまた活発になると期待される。

しかしながら、鋼材性能の高性能化だけでは効果が限られたものとなる恐れがあり、最大限の効果を発揮させるためには、構造開発との有機的な連携が不可欠である。これまでのように、構造形式の開発と併せて、今後も鋼材性能の高性能化とその活用へのたゆまぬ努力が継続されていくことであろう。

第5章 参考文献

- 1) 鋼材倶楽部橋梁研究会(1998):高性能鋼の概要(橋梁向け)[パンフレット]
- 2) 橋梁工学ハンドブック編集委員会(2004): 橋梁工学ハンドブック, 技報堂出版
- 3) 日本橋梁建設協会(2004): 新版 日本の橋—鉄・鋼橋のあゆみ—, 朝倉書店
- 4) 土木学会(1964): 日本の土木技術—100年の発展のあゆみ—, KK 技報堂
- 5) 成瀬輝男(編)(1994): 鉄の橋百選—近代日本のランドマーク—, 東京堂出版
- 6) 鋼材倶楽部(1995): 土木鋼構造物の技術史-水圧鉄管とゲート・港湾構造物・橋梁・ケーブル
- 7) 多田宏行[編著](2000): 橋梁技術の変遷—道路保全技術者のために—, 鹿島出版会
- 8) 岡村義弘, 糟谷正, 山場良太, 田中睦人, 為広博(1994): Cu析出強化型予熱低減 HT780 鋼の開発, 鋼構造論文集, Vol.1, No.1, pp.53-62
- 9) 大西一志, 末田恭輔, 岡口秀治, 原修一, 別所清(1995): 予熱低減型 HT780 鋼板の開発, 圧力技術, Vol.33, No.4, pp.182-189.
- 10) 中川一郎, 大井健次, 板倉教次(1998): 予熱低減型 HT780 調質高張力厚鋼板, 川崎製鉄技報, Vol.30, No.3, pp.188-189.
- 11) 米山徹, 一井延朗(1995): 橋梁用予熱低減型 HT780 の適用について, 川田技報, Vol.14, pp.104-110.
- 12) 日本鉄鋼連盟(2019): 高性能鋼の概要(橋梁向け)[パンフレット]
- 13) 日本道路協会(2017): 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編
- 14) 本間宏二, 三木千壽, 征矢勇夫, 笹尾英弥, 奥村健人, 原修一(1997): 冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究, 土木学会論文集, I-40, No.570, pp.153-162.
- 15) 山崎諒, Jing Nie, 竹嶋夏海, 岡田誠司, 小野潔(2021): SBHS700 製 R 付き箱型断面短柱の局部座屈挙動に関する実験的研究, 第 24 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.273-276.
- 16) 日本鋼構造協会溶接割れ研究班(1972): 鋼構造物における溶接割れ防止のための予熱条件の選定について, JSSC, Vol.8, No.80, pp.22-50

- 17) FHWA(2002): High Performance Steel Designer's Manual
- 18) 三木千壽, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸(2003): 橋梁用高性能鋼材(BHS500,BHS700)の提案, 土木学会論文集 No.738, I-64, pp.1-10
- 19) 日本鉄鋼連盟(2004): 製品規定 MDCR0014-2004, 降伏点 500N/mm² 及び降伏点 700N/mm² 溶接構造用圧延鋼材
- 20) 土木学会 新しい高性能鋼と利用技術調査研究小委員会(2009): 新しい高性能鋼材の利用技術調査研究報告書～SBHS500(W), SBHS700(W)の設計・施工ガイドライン(案)～
- 21) 野阪克義, 奥井義昭, 小室雅人, 宮下剛, 野上邦栄, 長井正嗣(2013): SBHS を用いた鋼 I 桁の耐力特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.70-79.
- 22) 高木優任(2018): 橋梁用高性能鋼材 SBHS, 土木学会誌, Vol.103,No.5, pp.16-17.
- 23) 小西拓洋, 高橋和也, 三木千壽(2000): 高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性, 土木学会論文集 No. 654/I-52, pp. 91-103
- 24) 日本規格協会(2011): JIS G 3140 橋梁用高降伏点鋼板
- 25) 日本橋梁建設協会(2013): 現場溶接施工管理の手引き(改訂版)
- 26) 安藤隆一, 田中睦人, 松田譲, 岡野重雄(2006): BHS500 鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性 (第1報) ～ (第3報), 土木学会第 61 回年次学術講演会, I-143～I-145, pp.285-290.
- 27) 日本橋梁建設協会(2019): 耐候性鋼橋梁実績資料集, 第 24 版.
- 28) 日本道路協会(2014): 鋼道路橋防食便覧
- 29) 三木千壽, 市川篤司, 鵜飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛(2003): 無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案, 土木学会論文集, No.738, I-64, pp.271-281.
- 30) 高木優任, 加藤真志, 松下政弘, 壺岐浩(2020): A study on Effective Utilization of SBHS for Steel Highway Bridge based on a Trial Design, 橋梁と基礎, pp.35-40.

6. 橋梁以外の分野での鋼材の高性能化の事例

本章では、鋼構造が適用される橋梁分野以外の各分野での鋼材への要求性能の変化と高性能鋼の開発の事例をまとめる。

6.1 建築分野

6.1.1 建築鉄骨向け鋼材の高性能化 [森田, 2008]¹⁾

わが国で建築構造用に一般に使用できる鋼種、鋼材はJISの中から建築基準法施行令で指定されているもの、またはこれと同等品と認められたものに限定されている。また、1981(昭和56)年に施行された新耐震設計法では骨組の変形による地震エネルギー吸収を前提としていることから、部材の塑性変形能力の確保や、部材性能を十分に発揮させるための接合部耐力の確保等が求められている。

建築鉄骨用鋼材は、以前はJISによるSSやSMの使用実績が多かったが、これらは建築以外の一般的な用途にも用いる材料であることから、規定項目は比較的少なくなっている。このため、JISを満足していても、必ずしも建築分野固有の使用状況や耐震性能の要求を満足できず、不都合が生じる可能性が指摘されていた。実際に、1989(平成元)年ごろに、溶接構造用圧延鋼材としてJISを満足しながらも建築鉄骨の通常の溶接工法で組み立てた時に鋼板が開裂する事例が多数発生し、いわゆる不良鉄骨問題として社会問題化した。この問題に対する材料面からの改良策の一つとして、建築構造専用の鋼材規格が検討されるに至った。

各種の検討の結果、建築構造用鋼材への要求性能として、

- ① 塑性変形能力の確保
- ② 溶接性の確保
- ③ 板厚方向性能の確保
- ④ 公称断面寸法の確保
- ⑤ 使用部位を考慮した適切な鋼種選択

が提示され、規格内容の検討が行われた。この結果、1994年に、新しい建築構造用鋼材のJIS(JIS G 3136「建築構造用圧延鋼材」)が制定された[日本規格協会, 1994]²⁾。この新しい鋼材は、SN(Steel New structureの略)と呼ばれる。SNは、上記の背景により建築鉄骨に固有の要求性能を考慮して規格化されたものであり、建築鉄骨で使用する部位を考慮して、A、B、C種に分類されている。SNの規定項目の特長を表-6.1.1に、規定の概要を表-6.1.2にそれぞれ示す。また、SNでは板厚許容差が厳格化されている。特にマイナス(-)側の許容差は鋼板及び鋼帯では0.3mmと設定されている。H形鋼でも板厚に応じて0.3mm($6 \leq t < 16\text{mm}$)、0.7mm($16 \leq t < 40\text{mm}$)、1.5mm($40 \leq t < 100\text{mm}$)と厳格化されている。

以下に、SNの規定の考え方を示す。

A種・・・二次部材やトラスのように弾性範囲内で使用し、溶接を行わない場合を主用途とする鋼種。

SN400Aが規格化されており、SS400をベースとして炭素(C)含有量を新たに0.24%以下と規定している。

B種・・・塑性変形能と溶接性の確保を意図したものであり、耐震上主要な構造部材を主用途とする鋼種。

SN400B、SN490Bが規格化されている。SMのB種をベースとして、化学成分では溶接性や衝撃特性に影響を与える不純物である燐(P)、硫黄(S)が低減され、溶接性の指標となる炭素当量(Ceq)が規定されている。また、機械的性質に関しては、降伏点の上限値、降伏比の上限値、シャルピー吸収エネルギーを規定している。降伏点の上限値は、不静定次数が一般に高い建築鉄骨において降伏点が大きくばらつくと、耐震設計において鉄骨構造物の設計者が意図したものとは異なる破壊形態や損傷状態となることを避けるために設けられたもので、降伏点の下限値 $+120\text{N/mm}^2$ として設定されている。降伏比は、塑性変形時の塑性化領域の拡大やボルト孔等の断面欠損の影響を考慮して定められたもので、降伏比 $(YR) = \text{降伏点}(YP) / \text{引張強度}(TS) \leq 80\%$ とされた。シャルピー吸収エネルギー量についてはSMのB種の規定をそのままスライドし27J(0℃)以上と規定されている。

C種・・・B種の性能に加えて、板厚方向の絞り値や超音波探傷（UT）検査を規定したものであり、溶接組立箱形断面柱のスキンプレートのように、板厚方向の特性をとくに重視する使用方法を主用途とする鋼種である。SN400C、SN490Cが規格化されている。板厚方向特性をさらに改善するために、化学成分として、燐(P)、硫黄(S)をそれぞれ0.02%、0.008%以下にまで低減するとともに、Z方向(板厚方向)引張試験による絞り値の下限を25%(3個の平均値)としている（ただし、個々の試験値の下限は15%以上）。

表-6.1.1 建築構造用鋼材(SN)の規定の概要（追加項目）

種類 の 記号	適用 厚さ (mm)	機械的性質					化学成分				
		降伏点 または 耐力 (N/mm ²) 下限/ 上限	降伏比 上限(%)	シャルピー 吸収 エネルギー (J) 下限 [0℃]	Z方向 絞り値 %下限 [3個の平 均]/[個々 の試験値]	UST	C上限 (%) 厚さ 50mm以 下/50mm 超	P 上限 (%)	S 上限 (%)	C _{eq} 上限 厚さ 50mm以 下/50mm 超	P _{CM} (*) 上限
SN400 A	6/40	235/—	—	—	—		0.24 /0.24	0.050	0.050	—	—
	40/100	215/—									
SN400 B	6/12	235/—	80	27	—	オプショ	0.20 /0.22	0.030	0.015	0.36 /0.36	0.26
	12/40	235/355									
	40/100	215/335									
SN400 C	16/40	235/355	80	27	25/15	適用	0.20 /0.22	0.020	0.008	0.36 /0.36	0.26
	40/100	215/335									
SN490 B	6/12	325/—	80	27	—	オプショ	0.18 /0.20	0.030	0.015	0.44 /0.46	0.29
	12/40	325/445									
	40/100	295/415									
SN490 C	16/40	325/445	80	27	25/15	適用	0.18 /0.20	0.020	0.008	0.44 /0.46	0.29
	40/100	295/415									

(*)受け渡し者の協定によりC_{eq}に代わりに適用

表-6.1.2 建築構造用鋼材(SN)の概要³⁾

[出典：志村保美(2011)：建築鉄骨「材料編」，溶接接合教室実践編，溶接学会誌Vol. 80, No. 4, pp. 39-44]

鋼種	規格	構造計算仮定 との整合性	溶接部の品質			変形能力確保 保有耐力接合	板厚方向特性	
		板厚公差の 厳格化	C上限 規定	シャルピー 規定	P, S規定*1 C _{eq} , PCM	降伏比 降伏点上限	P, S規定*2 絞り値	UT 規定
SS400	JIS G 3101	×	×	×	×	×	×	×
SM400A, SM490A	JIS G 3106	×	●	×	×	×	×	▲
SM400B, SM490B		×	●	●	×	×	×	▲
SN400A	JIS G 3136	●	●	×	×	×	×	×
SN400B, SN490B		●	●	●	●	▲	×	▲
SN400C, SN490C		●	●	●	●	●	●	●

備考) *1:P<0.030, S<0.015, *2:P<0.020, S<0.008

SN規格は、鋼板や形鋼などが対象となっているが、従来のJIS材である構造用炭素鋼鋼管（STK規格）や冷間成形角鋼管（STKR規格及びSTKC規格：ただしSTKCは日本鋼構造協会規格）についても、以下のようにSNに対応した規格が設定されている。

① STKN（建築構造用炭素鋼鋼管）

引張強さ400N/mm²級のSTKN400W,STKN400B, 引張強さ490N/mm²級のSTKN490Bの3鋼種がJIS(JIS G 3475)として制定された. STKN400WはSNのA種に相当するものであるが, 建築構造に用いられる鋼管では溶接を行わないことはありえないので炭素当量(Ceq)が規定されている.

STKN400B, STKN490BはSNのB種に相当するものである. STKNでは, 冷間成形による時効硬化の危険を避けるため, 窒素(N)の上限値0.006%が規定されている.

② BCR,BCP（冷間成形角形鋼管）

冷間成形角形鋼管には主として, 熱延コイルから円形に成形し, シーム溶接した後, 角形に成形するロール成形角形鋼管と, 厚板をプレスにより曲げ加工してシーム部をサブマージーク溶接して製作するプレス成形角形鋼管がある(図-6.1.1). 従来, ロール成形角形鋼管として, JIS G 3466にSTKRが規格化されており, プレス成形角形鋼管には日本鋼構造協会(JSSC)が定めるSTKC規格があったが, SNのB種に対応した規格としてロール成形品に関してBCR295が, プレス成形品に関してはBCP235とBCP325が日本鉄鋼連盟製品規定(MDCR002, MDCR003)[日本鉄鋼連盟, 2017a; 日本鉄鋼連盟, 2017b]^{4),5)}として規格化されている. 両規格では降伏点の下限値を名称としている. BCPについては, ほぼSNのB種もしくはSTKNのB種に対応した規格となっているが, BCR295については, 降伏点の下限値が295N/mm²であり, SNとは異なる. BCRは製法上, 平坦部でも冷間加工の影響を受けて, 降伏点が上昇し, 降伏点がばらつくこと, 主に柱材への使用を想定しており, 塑性変形能力への要求値も大きくないことから, 降伏点のレンジも150N/mm², 降伏比を90%以下としているところがSNとは大きく異なる点である.

また, JISに規定されているSNの強度クラスは引張強さ400N/mm²級,490N/mm²級の2種類のみであるが, 高層建築, 超高層建築への適用を目指し, 降伏比を制限した低降伏比高張力鋼として引張強さ570N/mm²級鋼(SA440)が鋼材倶楽部規格[鋼材倶楽部, 1996]⁶⁾として制定され, 改訂を経て今日に至っている[日本鉄鋼連盟, 2016c]⁹⁾. SA440の機械的性質に関する規格の概要を表-6.1.3に示す. この鋼材では, 圧延後に熱処理(焼きなまし)を行うことにより, 降伏比を低下させている(図-6.1.2).

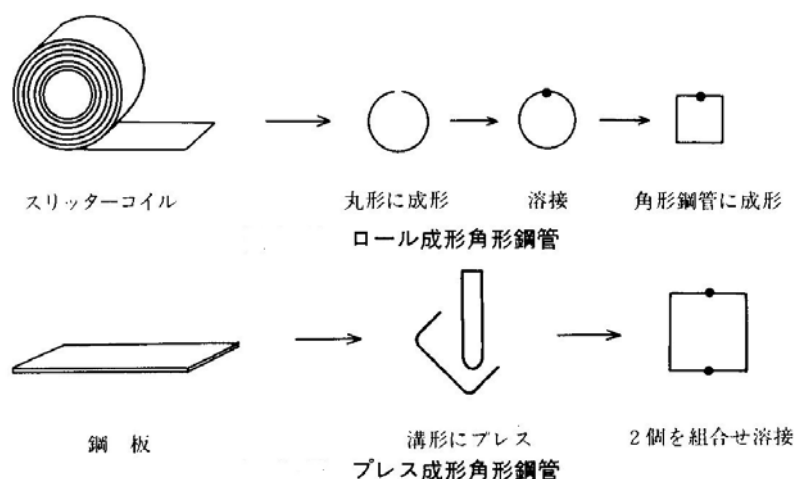


図-6.1.1 角形鋼管の製造方法¹⁰⁾

[出典：橋本篤秀[監修](1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版]

表-6.1.3 SA440の機械的性質の規格(概要)⁶⁾を参考に編集作成

[出典：鋼材倶楽部高性能鋼利用技術小委員会(1996)：建築構造用高性能 590N/mm² 鋼材(SA440)設計・溶接施工指針]

種類	板厚 t(mm)	引張試験				シャルピー 吸収 エネルギー (J)	厚さ方向 絞り (%)
		降伏 耐力 N/mm ²	引張 強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び (試験片) %		
SA440B	19以上 100以下	440以上 540以下	590以上 740以下	80以下	20以上 (4号) 26以上 (5号)	47以上	—
SA440C							25以上

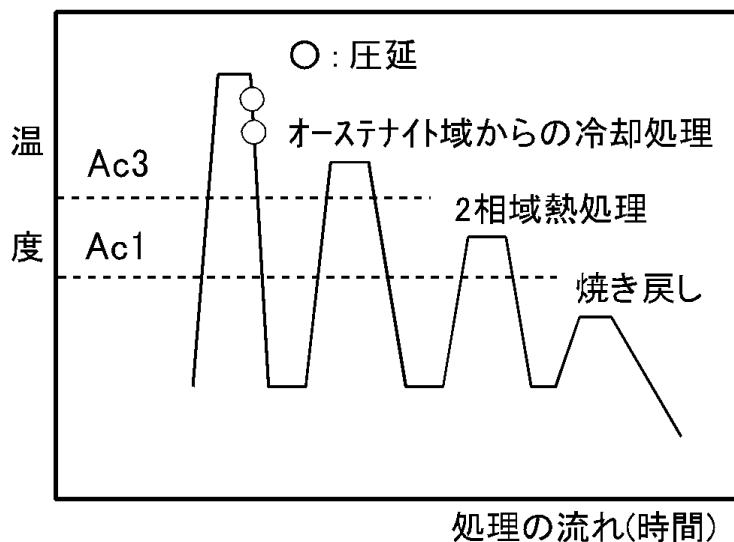


図-6.1.2 SA440の製造プロセスのイメージ³⁾

[出典：志村保美(2011)：建築鉄骨「材料編」，溶接接合教室実践編，溶接学会誌Vol. 80, No. 4, pp. 39-44]

また近年では、建築物の高層化・大規模化に伴う鉄骨部材の大型化に応じるため、建築構造用 TMCP 鋼材と呼ばれる高強度鋼材が開発されており、鋼材メーカー毎に個別に国土交通大臣認定を取得して製品化され、建築分野では広く採用されている。

建築構造用TMCP鋼材は、各鋼材メーカーによって内容が若干異なっているが、これらに共通の名称と規格を与えることで、利用技術の強化と鉄骨製作技術の競争力を向上させることを目的として、表-6.1.4に示す日本鉄鋼連盟の製品規定(MDCR0016, MDCR0017) [日本鉄鋼連盟, 2016a ; 日本鉄鋼連盟, 2016b]^{7), 8)} が定められている。表に示す規定は、鋼材メーカー毎の大臣認定を基本として、各々の認定範囲を包含するように設定されたものであり、一部の規格値（降伏点または耐力の上限値）については、個社の認定内容と異なる部分があるので留意が必要である。

表-6.1.4 建築用TMCP鋼材(概要)

種類	板厚 t(mm)	引張試験				シャルピー 吸収 エネルギー* (J)	厚さ方向 絞り (%)	炭素当量*** (%) (t(mm))
		降伏 点また は耐力 N/mm ²	引張 強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び (試験片) %			
TMCP325B	40超	325~455	490~610	80以下	21以上(t≤50:1A号)	47以上(0℃)	—	t≤50:0.38以下
TMCP325C	100以下				23以上(40<t:4号)		25以上**	50<t:0.40以下
TMCP355B	40超	355~475	520~640	80以下	19以上(t≤50:1A号)	47以上(0℃)	—	t≤50:0.40以下
TMCP355C	100以下				21以上(40<t:4号)		25以上**	50<t:0.42以下
TMCP385B	12以上 100以下	385~505	550~670	80以下	15以上(t≤40:1A号)	70以上(0℃)	—	12≤t<19:0.44以下
TMCP385C	16以上 100以下				20以上(19≤t<100:4号) 26以上(t≤50:5号)		25以上**	19≤t<50:0.40以下 50<t≤100:0.42以下

*Vノッチ試験片圧延方向

** 3 個の平均(個々の値は15以上)

***当事者間の協定により溶接割れ感受性組成(P_{CM})の適用も可

6.1.2 超高強度鋼の適用

わが国の建築鉄骨分野では、変形性能が得づらく、耐震性が確保しにくいとの理由から、高強度鋼の利用は進んでこなかったが、近年、高強度鋼の利用を可能にするべく、活発な研究開発がなされてきた[森田, 2008]¹⁾。その結果、高強度化に必要な鋼材の特性として降伏比を低くし、伸び性能を改善した引張強さ780N/mm²級鋼, 950N/mm²級鋼が開発され、建築構造物の耐震性能を確保する新しい構造コンセプトと共に、建築鉄骨への適用が試みられてきている。以下に、その概要を示す。

建築分野においては、大規模な地震時の建物の安全性と人命確保を目的に、建築基準法で決められた規模以上の建物には耐震設計が義務付けられている。大規模地震時には鉄骨構造の一部に塑性変形を許容することにより地震エネルギーを効果的に吸収して建物の倒壊を防ぎ、人命を守ることを最も基本的な考え方としている。この考えに従えば、塑性化の生じるような大規模な地震の後、建物には永久変形が残留することとなり、引き続いての利用や居住が困難になる事態が予想され、国民生活や経済活動への影響が大きくなることが懸念された。そこで、大規模地震時にも鉄骨構造を弾性に保ちつつ、建物の安全と人命の確保、経済活動へのダメージの軽減を目指した技術開発が行われた(図-6.1.3)。

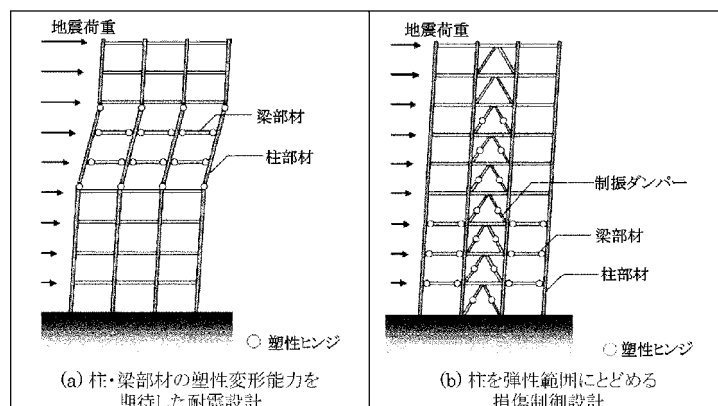


図-6.1.3 耐震設計の考え方¹⁾

[出典：加茂孝浩(2016)：建築構造用鋼板の動向，日本溶接協会WECOMマガジン，第19号]

その一つ、「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発プロジェクト」が2004(平成16)年から官民の多くの組織が参加した府省連携プロジェクトとして実施された。その構造性能としては、「震度7クラスの地震でも建物の主要部材は弾性挙動に収まり損傷を生じない」ことが目標とされ、使用鋼材としては従来鋼の2倍の強度を有する革新的鋼材として引張強さ780N/mm²級の鋼材(H-SA700)が開発されることとなった。この鋼材は、耐震安全性の確保に塑性変形性能を期待せず、弾性限を活用するもので、経済合理性の観点から、従来の「合金元素の添加+調質熱処理」による製造法ではなく、「低合金+TMCP」により高強度化した仕様となっている。H-SA700については溶接継手の研究も行われたが、部材断面の組み立てや部材同士の接合についても、リユース性実現のため、基本的には溶接を使用せず、ボルトやはめ込み等の乾式接合を主たる接合法に据えており、そのため必ずしも溶接性は求められていない。このプロジェクトは、2008(平成20)年度に実大規模の試験建物を建設し、所期の構造コンセプトを実証して終了している。この結果を受けて、H-SA700は規格化(日本鉄鋼連盟製品規定MDCR0015)[日本鉄鋼連盟, 2012]¹²⁾ されている。

表-6.1.5 H-SA700の機械的性質(概要)

	板厚	降伏点 または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	シャルピー吸収 エネルギー (J)
H-SA700A	6≦t≦ 50	700以上 900以下	780以上 1000以下	98以下	t≦20mm	≧47(0℃)
H-SA700B					16以上(5号) 20mm<t 24以上(5号) 16以上(4号)	≧47(-20℃)

さらに、大規模地震下での鉄骨建物の無損傷化技術の開発を目指して、産学連携研究が2003(平成15)年から行われた。この研究では、地震により建物に入力されるエネルギーは制振デバイス等の専用の機構で吸収させ、柱、梁等の架構は弾性に保つことを基本コンセプトとし、柱や梁には弾性変形のできるだけ大きくなる鋼材を使用することで制振デバイスのエネルギー吸収効果を最大限に発揮させることとしている。したがって、使用鋼材としては溶接構造用として使用実績のある最高強度の鋼材、引張強さ1000N/mm²級の鋼材(HT1000)の使用を前提としている。

HT1000の機械的性質の設定例を表-6.1.6に示す。建築鉄骨への適用では、降伏強度880N/mm²(引張強さ950N/mm²)の高強度鋼材が開発・実用化され、国土交通大臣による認定を受けて実構造物への適用も進められた[加茂, 2016]¹¹⁾。高強度鋼の適用には、上述のように高強度であることによる大きな弾性範囲を最大限活用できる制振ダンパーの導入が不可決であるが、実適用ではこのような設計が行われたことにより、耐震性の向上とともに、柱断面の縮小による大空間の実現などの効果が得られたことが報告されている。

表-6.1.6 引張強さ1,000N/mm²級鋼板の機械的性質の設定例¹³⁾

[出典：日本製鉄(2019)：建設用資材ハンドブック[カタログ]]

	C _{eq} (%)	P _{CM} (%)	降伏点 または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	シャルピー吸収 エネルギー (J)	Z絞り (%)
HT950B	0.62 以下	0.34 以下	880以上 1060以下	950以上 1130以下	98以下	t≦16mm	t≦12mm	— 25以上
HT950C						13以上(5号) 16<t≦20mm 19以上(5号) 20mm<t 13以上(4号)	53以上(*1) t>12mm 70以上(*2)	

*1：サブサイズ(Vノッチ10×7.5)，*2：Vノッチ10×10

6.1.3 HAZじん性の確保

建築構造用鋼材において、高強度化・耐震性能向上とならぶもう一つの大きな動きは、溶接継手部の高じん性化である。1995(平成7)年の兵庫県南部地震を契機に鉄骨建築物に対する必要じん性の検討[建設省建築研究所ら, 1999]¹⁴⁾が行われ、当時の建設省のもとで「柱梁溶接接合部のぜい性的破断防止ガイドライン」が作成された[建築研究所ら, 2003]¹⁵⁾。この中で、図-6.1.3のような継手破断耐力比(P_{max}/P_u)と必要な溶接部シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー値の関係が示され[鈴木ら, 2001]¹⁶⁾、継手破断耐力比が0.9の場合に27J(0℃)、1.0の場合は70J(0℃)の吸収エネルギーが必要であることが示唆された。

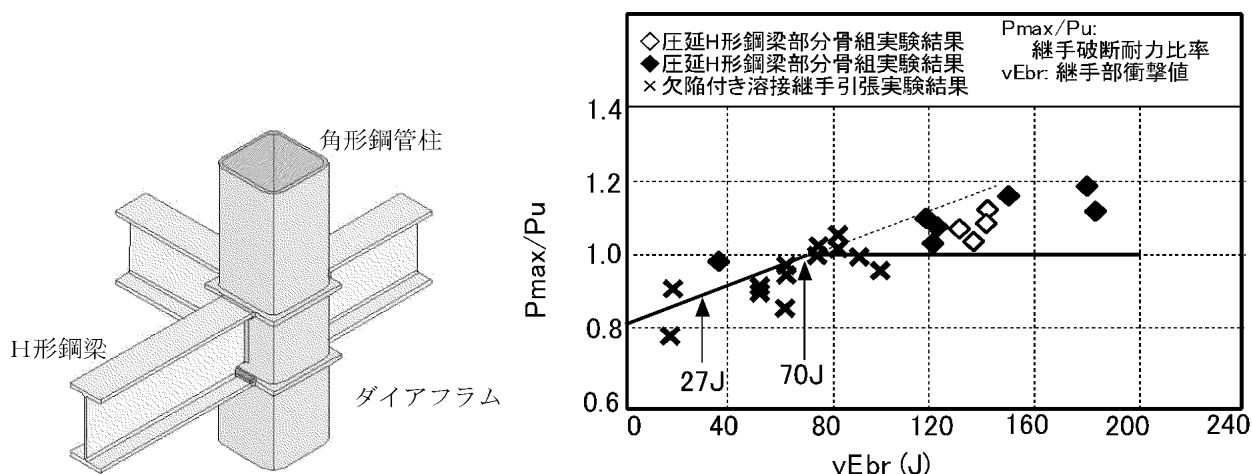


図-6.1.4 はり端溶接接合部のじん性と継手破断耐力比の関係³⁾

[出典：志村保美(2011)：建築鉄骨「材料編」，溶接接合教室実践編，溶接学会誌Vol. 80, No. 4, pp. 39-44]

また、これと並行して、鋼材の溶接継手部の有するじん性を簡便に評価、推定する方法が、建築研究所、鋼材倶楽部（現 日本鉄鋼連盟）および溶接協会の共同研究として検討された。その成果として、「柱梁溶接を想定した炭酸ガス多層盛溶接の継手部で、27Jまたは70J以上のシャルピー衝撃試験吸収エネルギーの値を確保するための化学成分の目安」を算出する以下の式が提案されている[古谷ら, 2001]¹⁷⁾。

$$vE(0^{\circ}C) \geq 70J: f_{HAZ} \leq 0.58 \% \quad - (6.1.1)$$

$$vE(0^{\circ}C) \geq 27J: f_{HAZ} \leq 0.63 \% \quad - (6.1.2)$$

ただし、 $f_{HAZ} = C + Mn/8 + 6(P+S) + 12N - 4Ti$ (mass % : Ti 量が0.005 %以下の場合にはTi 量は0 とする)

これらの式から、溶接継手のじん性向上には低炭素(C)化、燐(P)、硫黄(S)、窒素(N)などの不純物元素の低減が重要であることが理解できる。日本鉄鋼連盟において建築用鋼材規格(SN)をベースに、この f_{HAZ} 式を満足する鋼材規格「耐震建築溶接構造用圧延材」(日本鉄鋼連盟製品規定MDCR0011)[日本鉄鋼連盟, 2014]¹⁸⁾ が制定されている。また溶接部全体で必要とされる特性を確保するために、溶接材料および施工法の検討も行われ、推奨される溶接施工条件がJIS Z 3312の解説に取り入れられている。

6.1.4 火災への対処(耐火鋼)

鉄骨構造物は、火災により高温になると、その耐力が低下して建築物の自重を支えられなくなるため、通常はロックウールやセメント系材料を吹き付けたり、ケイ酸カルシウム板等により被覆するなどの耐火被覆を施すことで、火災時にも鋼材の温度が上昇しないような対策が取られている。以前の建築基準法では、建築物の部位ごとに定められた所定の法定時間において、鋼材の温度が350℃を超

えないように耐火被覆で保護することが義務付けられていた。これは、鋼材の高温強度（降伏耐力）が、350℃を超えると常温の2/3以下に低下することによっている(図-6.1.5)。耐火被覆は、その材料自体および施工にコストがかかるため、鉄骨構造の一つの弱点となっていた。

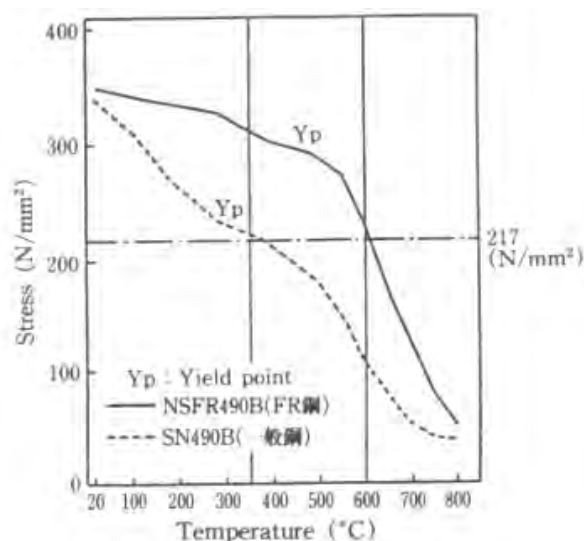


図-6.1.5 耐火鋼(490N/mm²級)の高温強度の例¹⁹⁾
 [出典：日本鋼構造協会(1998)：鋼構造技術総覧[建築編]，技報堂出版]

このような背景から、鋼材の高温時の強度特性を改善した建築構造用耐火鋼(FR鋼)が開発された[千々岩ら，1993；作本ら，1994；森田，2008]^{20)，21)，1)}。この耐火鋼は、従来の建築構造用鋼材の溶接性や耐震性などの特性を保持したまま、高温時の鋼材の耐力低下を少なくしたものである。主に、モリブデン(Mo)やニオブ(Nb)さらにはクロム(Cr)、バナジウム(V)等を微量添加することで、モリブデン(Mo)等の合金元素の固溶硬化、ニオブ(Nb)等の析出物と合金元素の相互作用により高温時の強度を確保している。耐火鋼(490N/mm²級)の高温時の強度特性の例を、通常の鋼材と比較して図-6.1.5に示す。この図より、耐火鋼では、600℃の高温時においても、常温時の降伏耐力の2/3を維持していることがわかる。したがって、耐火鋼を使えば、火災時の鉄骨の温度が600℃以下となる範囲では、耐火被覆を省略することができるとともに、鉄骨の温度を600℃以下に保てばよくなることから、耐火被覆の厚さ等の仕様を大幅に低減することができることとなる。自走式駐車場では、主な可燃物は自動車であり、外壁も開放されている場合が多く、火災性状は比較的特定されやすく、耐火鋼を用いて耐火被覆を省略した事例が多いようである。常温での引張強度特性が400N/mm²級及び490N/mm²級の耐火鋼が適用された例が多いが、SA440規格(表-6.1.3参照)に準拠した引張強さ590N/mm²級の耐火鋼が適用された例もある。

一方で、ステンレス鋼も高温時の耐力特性が優れていることから、以前より種々のプラントにおいて高温となるボイラー用や配管用の鋼材として用いられている。ステンレス鋼の項でも述べるように高温使用向けのオーステナイト系やフェライト系の種々のステンレス鋼があるが、ここでは構造用として一般的に使用されるオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS304について、その高温時の強度特性を図-6.1.6に示す。図によれば、200℃近辺までは製造時の熱処理の効果が消失するため、降伏耐力が低下するが、その後は700℃をこえるまで降伏耐力の低下は少ない。600℃を越える領域では上記の耐火鋼を超えるといつてよい。

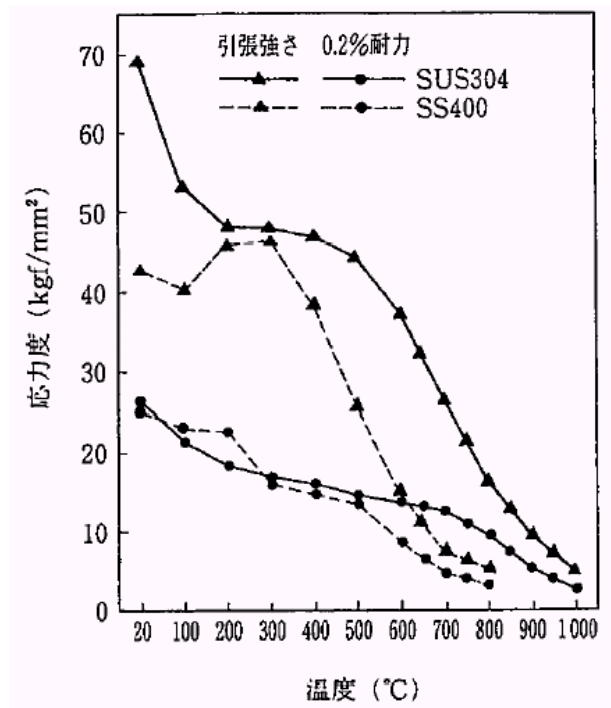


図-6.1.6 ステンレス鋼(SUS304)の高温強度の例¹⁾

[出典：森田耕次[監修](2008)：新しい建築構造用鋼材[第2版]，鋼構造出版]

以上のように，耐火鋼の適用は一時期広がりを見せたものの，近年では，耐火性を実現する添加元素の価格高騰による鋼材コストの上昇もあり，耐火鋼の利用は一時期に比べ，減少傾向にある．現在では，コストへの影響が少ない合金元素の探索などの対策が行われている．

6.2 造船分野

6.2.1 造船用鋼材の規格

船舶は、海洋を航行する大型の鋼構造物であり、多数の人命と貴重な積荷を積載しているために高い安全性が要求される。船体構造は航海中、波浪による荷重の変動、動揺・振動など複雑な外力を受けるため、重大な事故が発生しないよう、船殻部材には十分に信頼のおける鋼材を利用しなければならない。このため、造船用鋼材は国および船級協会の規則にしたがって試験・検査され、合格したものしか使用することができない。

日本国内の造船所で建造されている船は、小型船(内航船)と中大型船(外航船)に分類される。小型船は、一般的に JIS 鋼材を使用するのに対し、中大型船は各船級協会の認定規格鋼材を使用して船級規格に従い、建造される。船級協会とは、船舶所有者の希望により所有する船に格付けする団体機関のことであり、海上保険業者や荷主は、その格付けにより船舶そのものを見なくても、船体や貨物に保険を掛けることができるとされている。主な海運国にはそれぞれの船級協会が存在し、日本・NK(日本海事協会)、英国・LR(ロイド船級協会)、米国・ABS(アメリカ船級協会)、ノルウェー・DNV(ノルウェー船級協会)などがある。

表-6.2.1 は、国内で広く使用されている日本海事協会(NK)規格の鋼材を示したものである。JIS の SM は Steel Marine を略したものであり、その名の通りもともとは造船用の鋼材を基にしたものであるが、JIS が橋梁、建築、船舶、車両、石油貯槽等の一般的な鋼構造物に使用される鋼材を想定して規格が制定されているのに対し、NK 規格は船舶の構造材に最も適した鋼材として規格化されているため、JIS に比較して規定が細部にわたっている。

NK 規格においては、各々の鋼のグレード別にその満足すべき条件が定められている。それぞれのグレードでは、

グレード A(A 級) 普通鋼材

グレード D(D 級) ハイグレード鋼材

グレード E(E 級) とくに、切欠ぜい性に耐えうる鋼材

グレード F(F 級) 十分な低温じん性を有する鋼材

といった考え方で規格が定められている。

亀裂の発生、伝播を最小限に食い止める目的で使用されるものをクラック・アレスターという。D 級鋼は、亀裂（クラック）に対して強い耐久性をもち、E、F 級鋼はクラックが伝播しにくい強い性質をもっている。

表-6.2.1 船体用圧延鋼材(NK 鋼材規格：抜粋)

種 類	記 号	引張試験		衝撃試験		
		降伏点又耐力 (N・mm ²)	引張強さ (N・mm ²)	試験温度 (℃)	吸収エネルギー 3 個の平均	
					L	T
軟 鋼	KA	235以上	400～490	—	—	—
	KB			0	27以上	20以上
	KD			－20		
	KD			－40		
高張力鋼	KA32	315以上	440～590	0	31以上	22以上
	KD32			－20		
	KE32			－40		
	KF32			－60		
	KA36	355以上	490～620	0	34以上	24以上
	KD36			－20		
	KE36			－40		
	KF36			－60		
	KA40	390以上	510～650	0	41以上	27以上
	KD40			－20		
	KE40			－40		
	KF40			－60		

6.2.2 造船用高性能鋼の事例

近年、造船分野では特定の貨物に向けて作られる専用船化が進み、それに合わせて船体構造の高性能化と建造の生産性向上が推進され、その過程で鋼材に対しさまざまな開発ニーズが提示されるとともに、それに合わせて新しい技術・鋼材が開発されてきた。ここでは、造船分野でのニーズに応えるため開発された鋼材について、その材質設計の考え方や性能などを紹介する。

(1) 溶接施工効率向上—TMCP 鋼，大入熱溶接用鋼

コンテナ船は、ISO により規格化されたコンテナを海上輸送する貨物船であり、タンカーと並んで、海上貨物輸送の主流を占めている。

コンテナ船は図-6.2.1 に示す通り、コンテナを数多く積載するため大きな開口が船体の上甲板に設けられており、波により船体全体を曲げようとする荷重(縦曲げ)を受け止める構造部材が少ない。このため、船体上部の負担が大きく、デッキ上部やハッチサイドコーミングと呼ばれる船体側面に肉厚かつ高強度の鋼材が使用される。



図-6.2.1 コンテナ船の構造の特長²²⁾

[出典：廣田一博，中川隆，武田信玄，橋吉美，多田益男(2007)：世界初の船体用降伏応力 47 kgf/mm² 級高張力鋼の開発と実船適用，三菱重工技報，Vol. 44, No. 3]

コンテナ船は、かつてはパナマ運河を通過できる限界の大きさの船舶(パナマックス型船舶)が最大であったが、パナマ運河を通過しないオーバーパナマックス型の出現とともに、近年の遠距離物流の増加を背景にコンテナ船の大型化が急速に進んだ。さらに、2000年代には水深 16m のスエズ運河を通ることのできる限界の大きさのスエズマックス(コンテナ積載数 14,000 TEU)、2010年代には一番浅いところで水深 25m となるマラッカ海峡を通ることのできるマラッカマックス(コンテナ積載量 18,000TEU)を超えて大型化が進み、2010 年代後半には 20,000 TEU(Twenty feet Equivalent Unit:20 フィートコンテナ換算個数)を超える超大型船が建造された。こうした大型コンテナ船においては使用される鋼材の高強度化、厚肉化が著しく、より強度の高い、板厚の厚い鋼板が求められてきた。しかし、高強度化、厚肉化するためには、炭素当量(Ceq)の増加につながる合金元素のさらなる添加が必要であり、溶接性、溶接継手じん性を劣化させる原因となる。また、製作の効率化のため、厚肉鋼板の溶接には高能率溶接方法であるエレクトロガスアーク溶接(EGW)による立向 1 パス施工の適用が進んでおり、その際の溶接入熱は 400 kJ/cm を超える超大入熱となる。このため溶接熱影響部(HAZ)の組織は著しく粗大化し、継手部のじん性が大きく劣化するという問題があった。

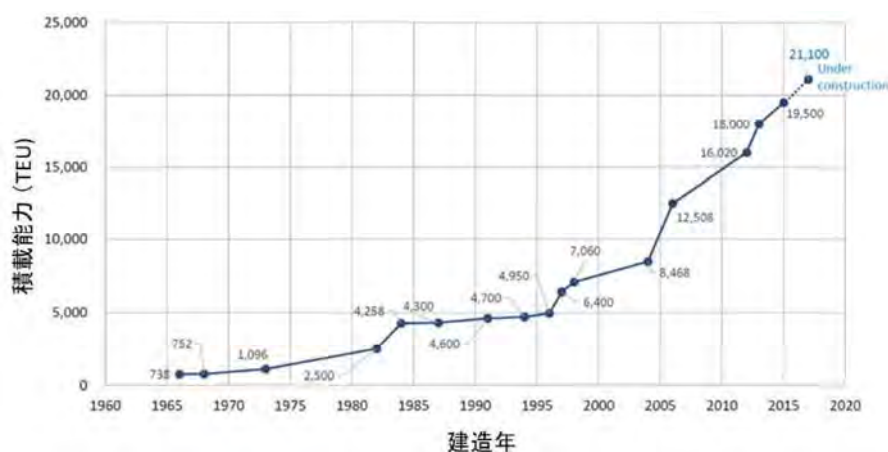


図-6.2.2 コンテナ船の規模の変遷²³⁾

[出典：井上健裕(2020)：アレスト設計と溶接-1：船体構造-1(コンテナ船，材料アレスト)，日本溶接協会 WE-COM マガジン，第 35 号]

従来コンテナ船では甲板側に降伏応力 355N/mm^2 ないし 390N/mm^2 級の高張力鋼が使用されてきたが，高強度かつじん性に優れた 460N/mm^2 級高張力鋼が開発されるなど高強度化してきている．母材の添加元素の低減，HAZ の粒径制御技術，HAZ の粒内組織制御といった技術コンセプトにもとづいた，高強度かつ大入熱溶接対策を施した鋼材の開発が行われてきており，大型コンテナ船などに用いられている．また，優れた低温じん性が要求される造船用低温用鋼や F 級鋼についても，同様のコンセプトにより開発・実用化が行われている．

(2) 安全・環境意識の高まりーアレスト鋼

アレスト鋼とは，航行中の事故などにより鋼材に亀裂が発生した場合において，ぜい性亀裂の伝播を抑制し船体の損傷被害を最小限にとどめる性能（アレスト特性）を備えた鋼板のことである．

昔のように，リベットで鋼板を接合した船舶では，ぜい性亀裂が発生しても，リベット接合部の構造の不連続によりぜい性亀裂が停止し，ぜい性破壊による大規模破壊を防止することができた．しかしながら，現在の全溶接船ではぜい性亀裂の伝播を途中で停止させることが極めて困難である．そのため，ぜい性亀裂を伝播停止させるクラックアレスターとして，高じん性の鋼板を舷側厚板(シアストレーキ)[舷側の最上部の側外板・岸壁との接触など大きな力がかかる部分]や梁上側板[一番外舷側の鋼甲板]に配置するぜい性亀裂アレスト設計が行われる．すなわち，万一亀裂が発生・伝播しても，適切な部材で停止させるバックアップアレスト機能を持たせる設計である．

図-6.2.3 に，大型コンテナ船のぜい性亀裂アレスト設計の例を示す．この例では，ハッチサイドコーミングの溶接継手部で発生したぜい性亀裂を，強力甲板に配した十分なぜい性亀裂停止性能を有する鋼板で停止させる設計となっている．このようなぜい性亀裂アレスト設計の適用においては，ぜい性亀裂伝播停止性能を有する鋼板の開発とその定量的な評価が必要となる．日本海事協会(NK)では，表-6.2.2 に示すように，既往の研究で得られた知見を参考に，アレスト特性に係る特性区分として，とくに板厚の厚い鋼材を対象に，船舶の最低使用温度である -10°C におけるぜい性亀裂伝播停止じん性値 K_{ca} を考慮した鋼板についての規則を定めている[井上，2020]²³⁾．

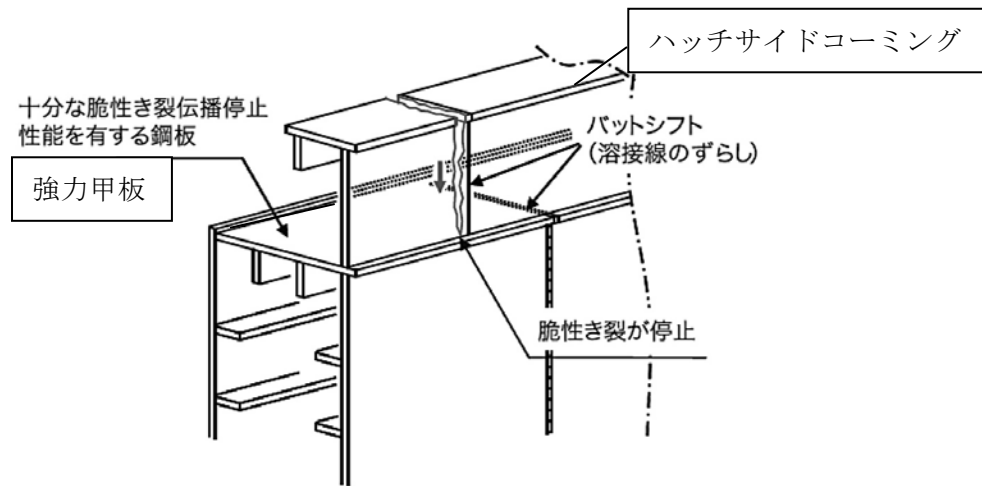


図-6.2.3 ぜい性亀裂アレスト設計の一例²⁴⁾

[出典：日本海事協会(2009)：「大型コンテナ船の YP47 鋼の使用に関するガイドライン」の概要（特集＞材料），日本海事協会会誌 No. 288.]

表-6.2.2 ぜい性亀裂伝播停止特性を特別に考慮する厚肉鋼板への要求性能の例

付加記号*	板厚 (mm)	温度勾配型 ESS0 試験または温度勾配型二重引張試験	
		評価温度(°C)	ぜい性亀裂伝播停止じん性値 Kca (N/mm ^{1.5})
BCA1	50<t≤80	-10	6,000 以上
BCA2	80<t≤100	-10	8,000 以上

*国際船級協会連合 (IACS) UR W31

（３）造船用 LP 鋼板

LP 鋼板とはロール方向に連続的に板厚を変化させた厚板で、構造物の溶接箇所や鋼材重量の低減を可能とした高性能鋼の一種である。鋼板を圧延する際にロールの間隔を連続的に変化させることによって板厚差が造りこまれている。

図-6.2.4 に造船用に使用されている代表的な LP 鋼板の形状を示す。LP1, LP2 は長手方向一方向に板厚が変化するもので、LP2 は先端、尾端に等厚部を設けている。この等厚部により溶接継ぎ手部の板厚の一定化を図ることができる。また、LP7, LP8 は長手方向一方向に 2 段階に板厚が変化する鋼板である。LP 鋼板の製造は当初、一方向 LP 鋼板のみであったが、二方向 LP 鋼板や最大板厚差勾配を従来より大きく(4～6mm/m→8 mm/m)したものや 2 段階 LP 鋼板などが開発されてきている。

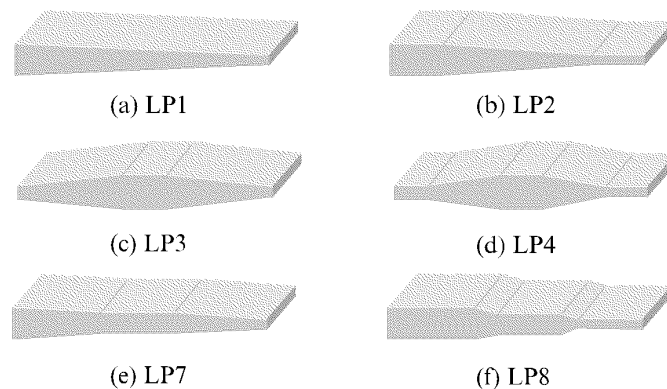


図-6.2.4 LP 鋼板の形状例²⁵⁾

[出典：井原健滋，弓削佳徳，松永直己(2014)：高機能 LP 鋼板の製造技術，JFE 技報，No. 33, pp. 32-36]

図-6.2.5 にバルクキャリア(鉱石、石炭、穀物等を貨物室に積載して運搬するばら積み貨物船)を例に、LP 鋼板の適用イメージを示す。例えば、トランスバルクヘッド(船倉の横方向隔壁)においては、軽量化を図るべく、船底から応力が小さくなる上部に向かって板厚を薄くしていく必要がある。従来は、厚さの異なる多数の鋼板を溶接で板継ぎして施工していたが、長手方向で厚さに段差を設けた差厚鋼板や LP 鋼板を適用すると、溶接個所の削減と軽量化が可能となる。トランスバルクヘッド以外にも、アッパーデッキ、ボトムプレートなど、断面力が変化する多くの個所に LP 鋼板は使用されている。

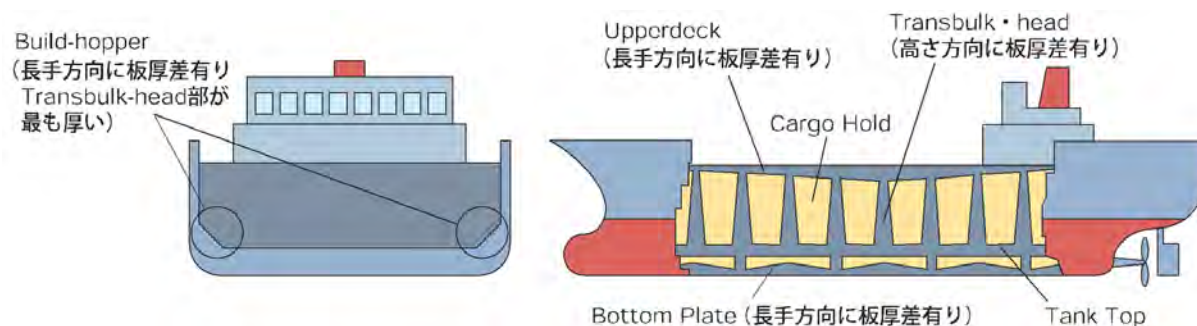


図-6.2.5 バルクキャリアでのLP 鋼板の適用イメージ²⁶⁾

[出典：JFE スチール(2007)：JFE のLP 鋼板(テーパプレート) [Cat. No. C1J-014-01]]

(4) 船舶向け低温用鋼

船舶向けの低温用鋼は使用温度の下限値(約 -10°C)よりも低い温度で使用する鋼材で、LPG(液化石油ガス;Liquefied Petroleum Gas)船、LNG(液化天然ガス;Liquefied Natural Gas)船のタンクおよび周辺船体構造部、冷凍運搬船の冷凍庫など -40°C 以下にさらされる箇所に使用される。各種液化ガスの沸点と適用鋼材の例を図-6.2.6 に示す。

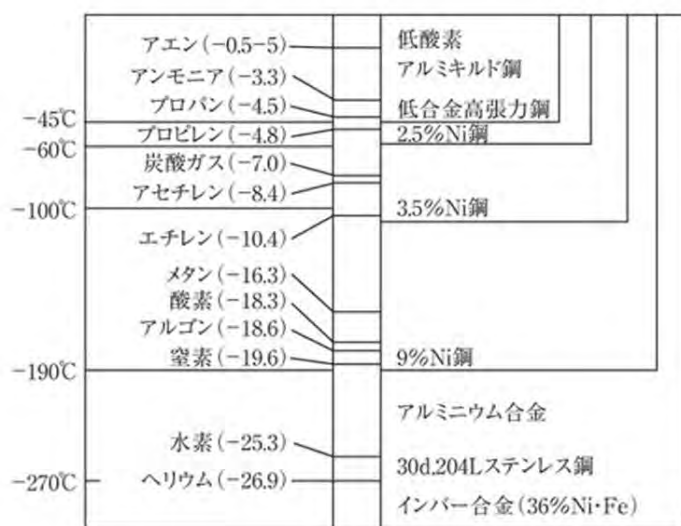


図-6.2.6 各種液化ガスの沸点と適用鋼材²⁷⁾

[出典：神戸製鋼所(2022a)：ぼうだより技術ガイド，新人営業マンのための溶接基礎講座，第8回 造船向け低温用鋼について]

低温用鋼はその溶接構造物の健全性，信頼性および安全性を確保するために，最低使用温度におけるぜい性破壊に対する抵抗が優れていることが必須の条件であり，特に，ぜい性亀裂の伝播を停止する特性(アレスト性)が要求されるようになっている。それに伴って溶接継手部にも，より高いじん

性値が要求されており，海洋構造物を中心に破壊じん性値として，亀裂開口変位試験（CTOD 試験;Crack Tip Opening Displacement test）の要求が付加されるようになってきており，溶接材料の選択，施工法の確立が経済性，生産性の面からも重要である。

低温用鋼の代表的なものはアルミキルド鋼，低合金高張力鋼，1.5～2.5%Ni 鋼，3.5%Ni 鋼，5%Ni 鋼，9%Ni 鋼，オーステナイト系ステンレス鋼などがある．その利用は主として石油・ガスなどのエネルギー関連分野の生産（海洋構造物）・輸送（ガス運搬船，パイプライン）・貯蔵（圧力容器）などの分野で使用されている．造船用鋼材規格の例として，日本海事協会(NK)の造船規則の例を表-6.2.3 に示す．

表-6.2.3 造船用低温鋼（NK 規格）の概要

鋼材記号	脱酸形式	化学成分(%)						Ceq (%)	熱処理	引張試験			衝撃試験		
		C	Si	Mn	P	S	Ni			YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	伸び (%)	試験温度 (°C)	平均値(J)	
														L	T
KL24A	Al 処理 細粒 キルド	≤0.16	0.1	0.7	≤0.03	≤0.025	—	≤0.41	焼ならし	235≥	400-510	20≥	-40	41≥	27≥
KL24B		≤0.14	—	—					又は TMCP				-50		
KL33			0.5	1.6					焼入焼戻し	325≥	440-560		-60		
KL37									又は TMCP	360≥	490-610	19≥			
KL2N30		≤0.14	≤0.3	≤0.7	≤0.025	≤0.025	2.1-2.5	—	焼ならし又	295≥	420-570		-70		
KL3N32							3.25-3.75		は焼ならし	315≥	440-590		-95		
KL5N43		≤0.12		≤1.5			4.75-6.0		後焼戻し	420≥	540-690		-110		
KL9N53		≤0.10		≤0.90			8.50-9.50		2 回焼ならし	520≥	690-830	18≥	-196		
KL9N60									後焼戻し						
									焼入焼戻し	590≥					

上記のように，特に使用温度が低い場合は，ニッケル(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．ニッケル(Ni)は，低温での転位易動度の上昇を通じて低温じん性を顕著に改善するとされているが，実用元素としてはニッケル(Ni)だけがこの機能を有することが知られている．9%Ni 鋼に優れたじん性を付与するため，微細な焼戻しマルテンサイトや，若干量の微細なオーステナイトを生成させるため，最適な製造方法で作られている【古谷，2019】²⁸⁾．

（５）耐食鋼

1990 年代以降，タンカーの原油流出による海洋汚染が非常に大きな問題となり，国際海事機関(IMO : International Maritime Organization)によってタンカーの国際ルールが厳格化されてきた．代表的なものとしては，構造対策では鋼殻を二重化するダブルハル化が，腐食対策では原油タンク（Crude Oil Tank : COT）の防食基準化等がある．1990 年代に発生したバルクキャリア沈没事故の多くは，船齢 15 年以上の老朽船であるとされており，船齢が高くなるにつれて損傷の原因が腐食であることが多いとの調査結果もある．このことから，船体の腐食を抑制することは，安全性や寿命延長とそれに伴うライフサイクルコスト軽減のための重要な課題と認識されている．オイルタンカーへの高耐食鋼の適用が可能になれば，船舶建造の生産性向上，コスト削減，さらには事故による環境負荷の低減等が期待される．オイルタンカーの破損事故の一因となる原油タンク COT の腐食については，1999 年に日本造船研究協会により鉄鋼，造船，船主などの海事関係者からなる研究部会が設置され，COT 内の腐食環境と腐食メカニズムについて大規模な調査研究が行われた【日本造船研究協会，2002】²⁹⁾．図-6.2.7 に COT 内の腐食環境を模式的に示す．オイルタンカーで腐食が問題となるのは，COT 上甲板裏(上板)と底板とであるが，この両者は腐食環境が大きく異なり，それぞれ異なる様式の腐食が発生することが報告されている．

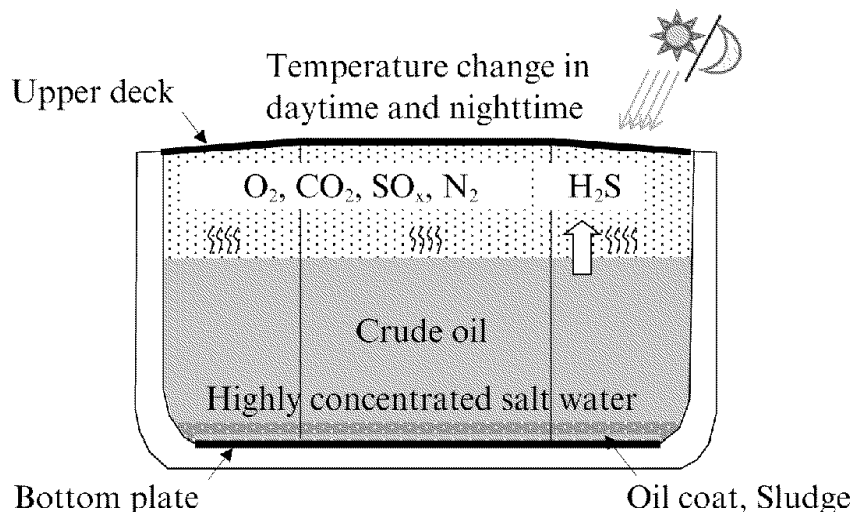


図-6.2.7 原油タンカーCOT 内の腐食環境³⁰⁾

[出典：池田博司，寒沢至，三島永嗣(2020)：原油タンカー荷油タンク用耐食鋼（JFE-SIP®-OT1, OT2）の開発，JFE 技報，No. 46，pp. 8-14.]

COT 上板は，原油から発生する硫化水素（ H_2S ）と空きスペースに導入された防爆用の排ガス（ $\text{O}_2\text{-CO}_2\text{-SO}_x\text{-N}_2$ ）が混合された雰囲気曝されるとともに，昼夜の温度変化による乾湿繰り返しの過酷な腐食環境におかれることで全面腐食となるが，腐食速度は $0.1\text{mm}/\text{年}$ 程度と小さいことがわかっている。

一方，COT 底板はオイルコートと呼ばれる油分層で覆われているが，スラッジ（原油固形分や鉄さび，硫黄(S)の混合物）が堆積し，その上に原油から分離した高濃度塩水が滞留した環境に置かれている。オイルコートは定期的な洗浄時に損傷を受けることが多いとされており，欠損が生じると塩水環境において，オイルコート欠損部分が局所的なアノード，スラッジがカソードとなってマクロセル（腐食電池）が形成され，孔食が発生し，成長する。さらに，腐食の進行に伴い，孔食内部で pH が低下することにより孔食成長が加速され，孔食の進展速度は $4\text{mm}/\text{年}$ に達するケースもあるとされている。ただし，数年の周期で行われる定期的なドック点検において，オイルコートは再生され，局部腐食の成長が停止することが確認されている。

このような COT 内の腐食問題に対し，船舶の安全性向上，環境汚染防止の観点から，IMO において COT の性能基準が 2010 年に制定され，防食措置が義務化された。防食措置としては，塗装，耐食鋼の使用が定められている。こうした状況を背景として，日本の各鉄鋼メーカーでは，それぞれの技術を駆使した独自の耐食性鋼板（環境の異なる上板用と底板用の 2 種類）を開発し，実船への適用が進められている[伊藤ら，2014；池田ら，2020；神戸製鋼所，2022]^{31)，30)，32)}。これらは，添加元素の最適化と TMCP 技術を応用することにより，従来の鋼板と同様の機械的性質，加工性，溶接性を有しながら，それぞれの環境での腐食速度を抑える機能を有している。この原油タンカーの貨物油タンク用耐食鋼が SOLAS 条約（海上人命安全条約）で塗装に代わる代替手段として認められたことにより，船舶建造の生産性向上，船舶のメンテナンスコスト削減，環境負荷の低減等種々の観点から，より適切な技術を採用することが可能となった。

6.3 自動車分野

地球環境問題の観点から、CO₂総排出量の2割ほどを占める自動車分野においては、CO₂排出削減ないし燃費向上の法制化が進んでいる。このようなCO₂排出削減にはエンジンの改良・ハイブリッド化などと併せて軽量化が大きな鍵となっている。一方で、安全性の確保も重要な課題であり、衝突安全性を確保しながら自動車を軽量化することが乗用車においては重要な課題となっている。

自動車の車体を構成している鋼材部品の例を図-6.3.1に示す。自動車に使用される鉄鋼材料は、主として車体に鋼板類が、足回り関係に棒鋼や鋼管などが使用される。車体は、高張力鋼板や防せい鋼板（表面処理鋼板）など多種類の鋼板を使用し、数多くの部品がプレス成形されて、部品同士を重ね合わせて点(スポット)溶接することにより組立てられている。棒鋼・鋼管については高強度化に主眼が置かれているため、合金元素の添加量の多い特殊鋼に属するものも使用されている。

なお、自動車用の鋼板はその厚さが3mm以下の「薄板」と呼ばれる鋼板であり、建設分野や造船分野などで用いられる「厚板」とは製造法が異なるため、以下で示す鋼板を厚板でそのまま製造することは現時点では困難であることを付記しておく。

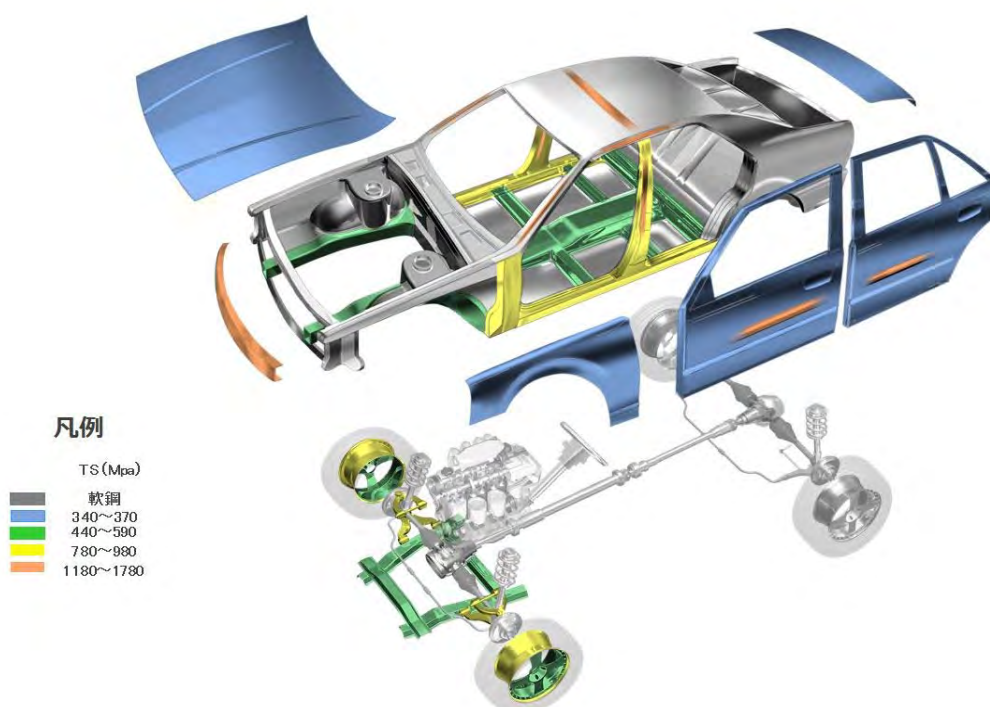


図-6.3.1 自動車の車体構成の例³³⁾

〔出典：日本製鉄(2022)：日本製鉄ホームページ，軽量化・衝突安全性確保に貢献するハイテン（自動車用高強度鋼板）〕

6.3.1 車体中使用される鋼板

鉄鋼材料は、リサイクル方法が確立しており環境負荷が小さいこと、ひずみ速度依存性が高いため、成形時には柔らかく、衝突時には十分な強度が得られるように調整することが可能であることから自動車での環境と衝突安全性の両立に好適な材料と考えられている。自動車用材料としての鋼材の可能性については、1994年に発足した世界18か国の鉄鋼メーカー35社と、欧州の自動車メーカーで共同開発された鋼製主体の超軽量車のプロジェクト ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body)、続く ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concept)、ドアなどのクローージャや足回りの軽量化を扱った ULSAC (Ultra Light Steel Auto Closures)、ULSAS (Ultra Light Steel Auto Suspension) などのプロジェクトが展開され、その成果として世界各国の安全基準を満たした

上で、高張力鋼板（ハイテン）の活用により、20-30%の軽量化の可能性が示された。

現在では、外板パネルには柔らかい薄鋼板を使い、骨格に使われる鋼板を高強度化するという二極化が進んでいる。図-6.3.2に示すように、自動車の車体においては、フロントおよびリア側には衝突エネルギーを吸収するための安定した圧壊特性が求められるのに対し、中央のキャビン部分には乗員を保護するために、高い変形耐性が求められる。これら車体の必要特性に合わせ、車体のフロント・リア側には伸びを活かした衝撃吸収性能が求められるため、引張強さ 780 MPa 以下のハイテン材の適用が主に検討されるとともに、キャビン側には変形耐性が高い高ハイテン材の適用が優先的に検討され、鋼材を適材適所に配置することで、軽量化と衝突安全性の両立がはかられている。



図-6.3.2 自動車車体への要求性能³⁴⁾

〔出典：齋藤和也(2014)：まてりあ(日本金属学会会報), Vol. 53, No. 12, pp. 584-588.〕

このような背景から、自動車用材料として、従来の成形性に優れた軟らかい鋼板から、現在は軽量かつ成形性と高強度を両立させた材料が求められている。それを実現する鋼板が、軽量で衝突エネルギー吸収能力に優れた高張力鋼板(ハイテン)である。以下に、代表的な自動車用のハイテンについて説明する。

6.3.2 各種高張力鋼板 [World Auto Steel, 2009]³⁵⁾

自動車用鋼板では、その用途により各種の強化機構(鋼材の強度を向上させる手法。4.3 参照)を利用した高張力鋼板が実用化されている。従来の自動車構造用ハイテンでは、各種合金成分の添加により高強度化をはかる固溶強化型や析出強化型ハイテンが主流であったが、より高強度化が求められたことで、組織強化によるハイテンが使用されるようになってきている。車体の構造用材料としては、引張強さ(TS:Tensile Strength) 440MPa クラスが主流であったものが、近年の車では 590MPa クラスが多用されている。さらに、キャビンまわり、シートレール(座席を固定するレール部分)などでは、980MPa クラスが実用化されている。また、従来から超ハイテンといわれるベイナイト組織や焼戻しマルテンサイト組織による超高強度材が使用されていたバンパリインフォース(バンパーの裏側に挿入される補強材)やドアインパクトビーム(ドアの内側にある補強材)などの補強部材では、980MPa クラスから 1,180-1,480MPa クラスへと移行している。

図-6.3.3 に代表的な自動車用の鋼材を強度-伸びバランスの関係で示す。図に示すように、一般に鋼材の強度と伸びの関係はトレードオフの関係にあり、高強度になるほど伸び性能は低下し、プレス成型などの加工性は低下する。これを克服するため、高強度でありながら伸び性能を改善する鋼材の開発が行われてきた。

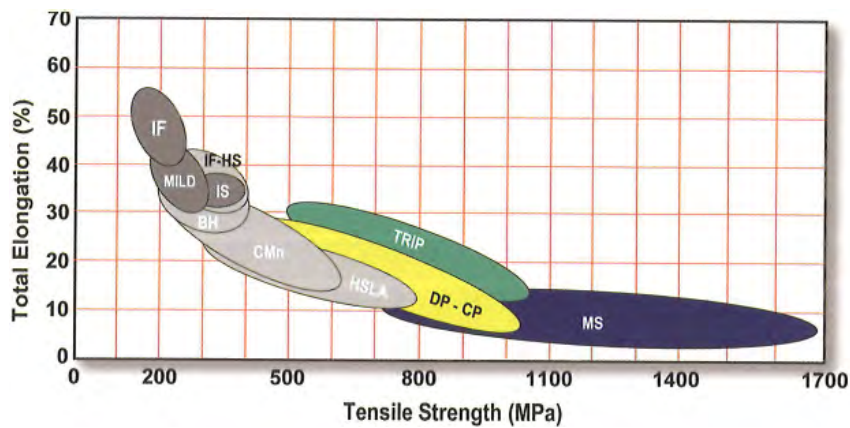


図-6.3.3 自動車用鋼板の強度－伸びバランス ³⁵⁾

[出典：WorldAutoSteel 日本委員会(訳)(2009)：スーパー鉄鋼「先進ハイテン」 世界のクルマを軽く安全に，文藝春秋企画出版部，p. 15]

従来のハイテンと近年の先進ハイテンの最も大きな違いはそのマイクロ組織(4.2.1(2)参照)にある。従来のハイテンが1種類の組織(单相)のフェライト鋼であるのに対して，先進ハイテンは2種類以上の組織(複相)からなり，フェライト，マルテンサイト，ベイナイト，残留オーステナイト(鋼を焼き入れする際に完全にマルテンサイトにならずに一部変態していないオーステナイトとして残ったもの)などの相の割合によって機械的な性質を変化させている。先進ハイテンの中には加工硬化指数(n 値)が高く加工性に優れるもの，極めて高い降伏強度と引張強さを示すもの，焼付け塗装工程で硬くなる焼付け硬化性を持つものなど使用部位にあわせて求められる多様な性能を持つ鋼板が開発されている。

(1) DP 鋼

DP(Dual Phase)鋼は，金属組織そのものに強度を付与した組織強化型のハイテンの一つで，その金属組織は軟らかいフェライト相と硬いマルテンサイト相の2つの相(Phase)からなるマイクロ組織を有している。図-6.3.4は，フェライトと炭素(C)量の高いマルテンサイトと残留オーステナイトが混在した組織である島状マルテンサイトを含むDP鋼のマイクロ組織を模式的に示したものである。一般に硬いマルテンサイト相の割合が増えると強度は増すが，加工性が悪くなり，自動車の製造時におけるプレス加工や成形性に問題が出てくるため，柔らかいフェライト相により低降伏比とし，大きな伸びを確保する(図-6.3.5)。DP鋼では変形を受けた場合，ひずみは島状マルテンサイトを囲む柔らかいフェライト相に集中するため，この鋼板特有の高い加工硬化特性が得られる。

DP鋼は，熱延製品ではオーステナイト相，冷延製品ではオーステナイト・フェライト2相域から，冷却によりオーステナイトの一部をフェライトに変態させ，その後急速に冷却して残ったオーステナイトをマルテンサイトに変態させることによって製造される。

Ferrite-Martensite DP

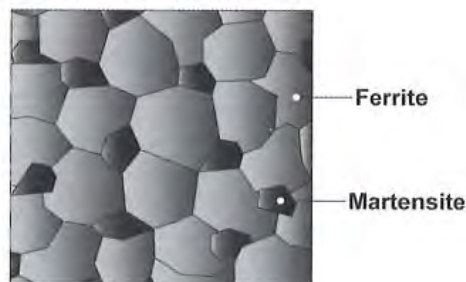


図-6.3.4 DP鋼の組織イメージ ³⁵⁾

[出典：WorldAutoSteel 日本委員会(訳)(2009)：スーパー鉄鋼「先進ハイテン」 世界のクルマを軽く安全に，文藝春秋企画出版部，p. 19]

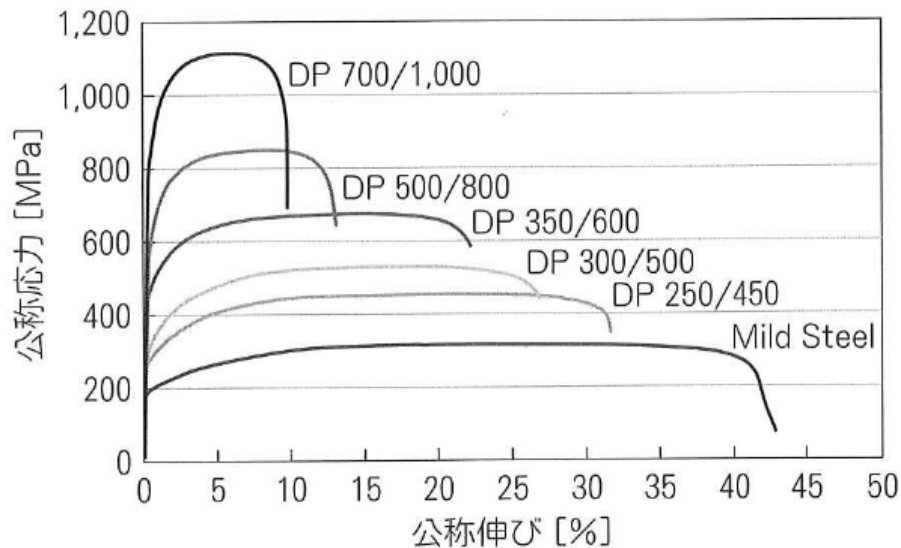


図-6.3.5 DP 鋼の応力-伸び関係 ³⁶⁾

[出典：鳥塚史郎，高木節雄，瀬沼武秀[監修] (2016)：しなやかで強い鉄鋼材料－革新的構造用金属材料の開発最前線，エヌ・ティー・エス，p. 7]

(2) TRIP 鋼

TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼は，変態誘起塑性（何らかの力が加わった際に金属組織の変態を誘発する性質）を利用した極めて伸びの大きな鋼材である。「プレス成形の際は延性が高い」まま，「衝突変形の際には，硬いマルテンサイトに変態する」という特長を持っている。ベイナイト相あるいはフェライトーベイナイト相の中に，変形によりマルテンサイトに変態する残留オーステナイトを数%～30%前後残留させた組織になっている(図-6.3.6)。この残留オーステナイトはひずみの増大に応じて次第に硬いマルテンサイト相に変態することでその部分の強度が高まり，相対的に低強度である周囲に変形が伝播することで，高い加工性が得られる。TRIP 鋼は強度が大きく，良好な加工性を有するのみならず，衝突時の衝撃吸収性が大きいという特長がある。

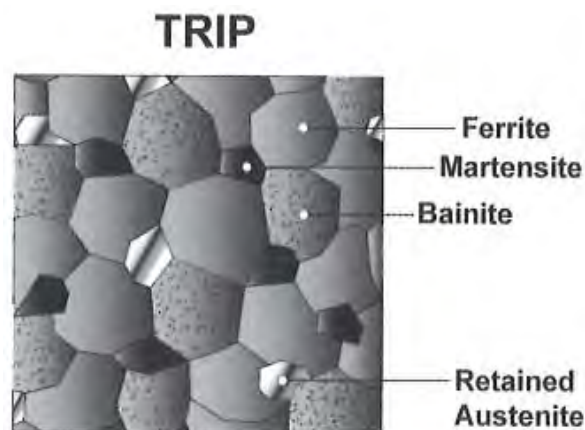


図-6.3.6 TRIP 鋼の組織イメージ ³⁵⁾

[出典：WorldAutoSteel 日本委員会(訳) (2009)：スーパー鉄鋼「先進ハイテン」 世界のクルマを軽く安全に，文藝春秋企画出版部，p. 21]

残留オーステナイト相を常温まで安定に保つためには炭素(C)を適量含ませる必要があるため，フェライト／ベイナイト相の生成を促進させるケイ素(Si)やアルミニウム(Al)を添加することでこれらを制御する工夫がなされている。残留オーステナイトがマルテンサイトに変態し始めるひずみレベルは炭

素(C)量の調節によって変えることができるとされており、成形した後もオーステナイトが残り、衝突時の変形によってマルテンサイトに変態するよう調整されている。図-6.3.7 に模式的に示すように、一様変形中に部分的にくびれが発生したとき、その近傍の残留オーステナイトがマルテンサイトに変態して強度が増し、くびれが進展せずに一様変形が継続されることで、高い延性が得られる。図-6.3.8 は、同一強度の高張力鋼、DP 鋼と TRIP 鋼の応力-ひずみ関係を比較したものであるが、TRIP 鋼の延性が優れていることがわかる。

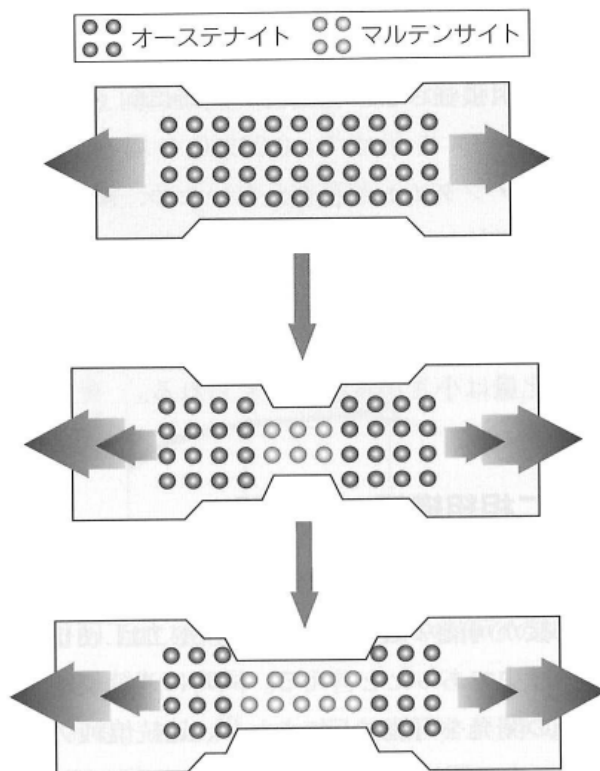


図-6.3.7 TRIP 鋼の加工誘起変態挙動³⁶⁾

[出典：鳥塚史郎，高木節雄，瀬沼武秀[監修]（2016）：しなやかで強い鉄鋼材料－革新的構造用金属材料の開発最前線，エヌ・ティー・エス，p. 8]

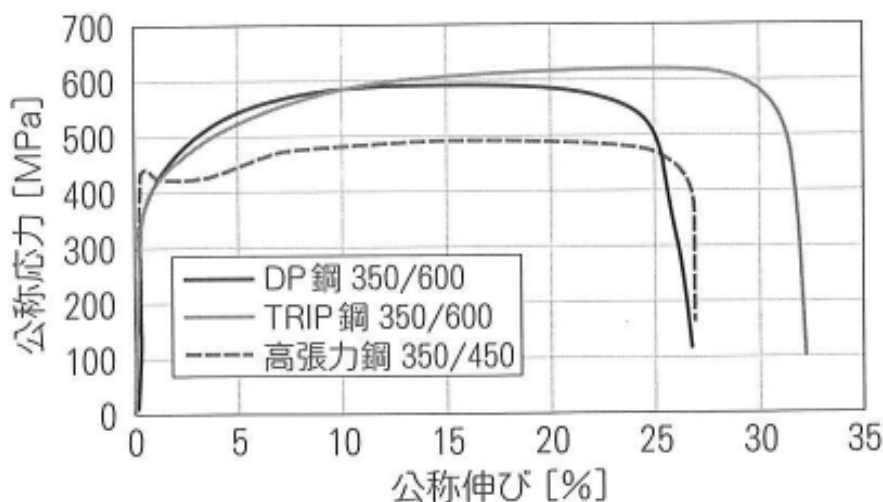


図-6.3.8 TRIP 鋼と他のハイテンとの応力-伸び関係の比較³⁶⁾

[出典：鳥塚史郎，高木節雄，瀬沼武秀[監修]（2016）：しなやかで強い鉄鋼材料－革新的構造用金属材料の開発最前線，エヌ・ティー・エス，p. 8]

(3) MS 鋼(マルテンサイト鋼)

MS 鋼は、最高 1,700MPa の引張強さを持ち、複合組織鋼の中でも最も高い引張強さを示す。MS 鋼の特長は、少量のフェライトやベイナイトを含むマルテンサイト・マトリックス(合金の体積の大部分を占める組織構成要素)であり、熱間圧延または連続焼鈍工程で存在するオーステナイトを急冷してほぼ完全にマルテンサイトに変態させることにより製造される。また、成形後の熱処理によっても製造が可能とされている。延性を向上させるため、MS 鋼の焼入れ後に焼戻し処理を行うと、極めて高い強度でも十分な成形性を確保することができる。

MS 鋼は、急冷によってほとんどのオーステナイトをマルテンサイトに変態させる。このため、焼入硬化性を高め、マルテンサイトを強化するために主に炭素(C)が添加されているが、残留オーステナイトの生成を少なくし、マルテンサイトとベイナイトを強化して微細析出物を形成するように、マンガン(Mn)、ケイ素(Si)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)、ボロン(B)、バナジウム(V)、ニッケル(Ni)をさまざまな組み合わせで添加する成分設計がなされている。

6.3.3 従来型ハイテン

自動車用鋼板は軽量化のため薄さが求められるが、薄い鋼板の炭素(C)量を増やして硬くすると、面ひずみといわれる成形不良などが発生し、加工がしにくくなるためプレス成形に支障をきたす。限られた時間の中で大量生産を行う自動車産業では、高強度でありながら加工性の良いハイテンが求められてきた。

(1) IF 鋼(Interstitial Free 鋼)

自動車分野では、プレス成形性をよくするため、深絞り加工(一枚の鋼板に圧力を加えて絞り込むことで凹状に成型する加工)に優れ、その性能を表す r (ランクフォード)値の高い鋼板をつくることが目標とされてきた。自動車のさまざまなデザインを可能とするには、この深絞り加工を量産工程において効率よく行えることが必須であるとされている。

IF 鋼とは、炭素(C)量を 10ppm(0.00001%)以下とした極低炭素鋼である。炭素(C)量を下げれば鋼材は柔らかくなるが、冷延加工時に鉄(Fe)と炭素(C)が結びついたセメンタイトがあると硬くなるため、IF 鋼では炭素(C)と結合しやすいチタン(Ti)、ニオブ(Nb)を添加することにより、炭素(C)を無害化している。また、これらの元素により鋼板内の炭素(C)が固定されるため、時効劣化が起きないのも大きな特長である。

IF 鋼は単なる低炭素(C)鋼とは異なり、炭素(C)がチタン(Ti)やニオブ(Nb)で固定されているため、ストレッチャーストレインと呼ばれる成型時のしわ発生が抑制され、成形性に優れるため、過酷な深絞り加工にも耐えることができる。

(2) BH 鋼 (Bake Hardening 鋼)

BH 鋼板とは、焼付硬化鋼板とも言い、特に自動車用として開発された鋼板である。BH 鋼板は、加工の際は柔らかくてプレス加工に支障がなく、加工が完了した後、鋼板を塗装して熱で乾燥させる際(焼付)に、その熱で鋼板自体が硬化する性能を持つ鋼材である。鋼板に極微量残された固溶炭素(C)や窒素(N)が焼付け工程(約 170℃で 20 分程度)時に鋼材中を移動し、すべり変形をしにくくすることで鋼板が硬くなるとされている(図-6.3.9)。

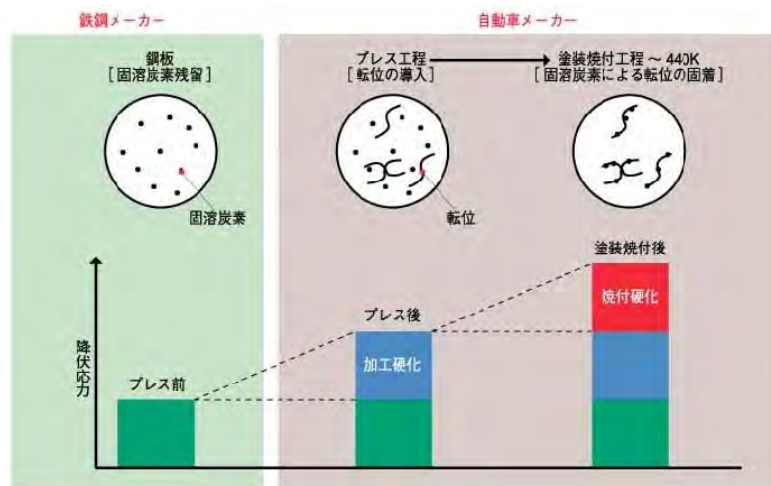


図-6.3.9 BH 鋼の強化メカニズムのイメージ³⁷⁾
 [出典：JFE21 世紀財団 (2022)：鉄鋼プロセス工学入門]

BH 鋼では、チタン(Ti)、ニオブ(Nb)の添加量を制御して鋼材中の炭素(C)を固定し、室温で 6 か月程度保管しても時効劣化がおきにくくしている。ただし、耐時効性に保証期限があり、加工には使用期限があるため、注意を要する。

6.3.4 成形技術と組み合わせた高張力鋼

自動車の軽量化と衝突安全性の向上を目的に、自動車用の鋼板では引張強さが 1GPa(1,000MPa)を超える超高張力鋼板の開発が望まれていた。しかし、1.2GPa(1,200MPa)以上の鋼板の冷間プレス成形は成形荷重やスプリングバックの増大、成形性や金型寿命の低下につながるため困難とされていた。この問題を解決するために、成形技術と熱処理を組み合わせた「ホットスタンプ」技術が実用化されている。これは、炭素(C)を 0.25%程度含む鋼板を 900℃ 程度に加熱し、完全にオーステナイト化した後プレスを行い、その後金型もしくは水冷や空冷により焼入れすることでマルテンサイト相を発生させるものである(図-6.3.10)。この方法で容易に 1,500MPa 以上の強度を持つ部材が得られるとされている[森, 2015]³⁸⁾。焼き入れ後の強度は炭素(C)量で決まり、C=0.22%で 1,500MPa 程度のものが一般的である。

問題は、プレス加工中高温で大気雰囲気さらされるため、表面が酸化し化成処理不良が生じることである。また、防せい鋼板の主流である亜鉛めっきが、その融点(419℃)が低く、鋼板加熱時に溶融・気化するため使用が困難であり、それに代わるアルミめっき鋼板などによるホットプレスが試みられている。

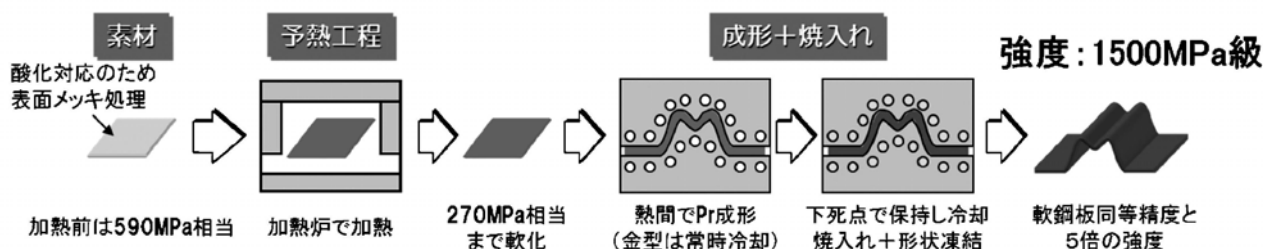


図-6.3.10 ホットスタンプ工程のイメージ図³⁴⁾
 [出典：齋藤和也 (2014)：まてりあ(日本金属学会会報), Vol. 53, No. 12, pp. 584-588.]

表-6.3.1 ホットスタンプ材の長所と短所³⁴⁾

[出典：齋藤和也(2014)：まてりあ(日本金属学会会報), Vol. 53, No. 12, pp. 584-588.]

長所	短所
成形と焼入れ熱処理を同時に行うため、1,500MPa の高強度成形部材が得られる。	金型内での冷却には 10 秒程度の時間が必要であるため、冷間成形に対し生産性が低い。
高温成形のため冷間の高張力鋼板に対し材料伸びが高く成形限界が高い。	焼入れ後の製品は高強度であるため、金型による後加工では刃具の損耗が激しい。 →レーザーによる後加工が必要となり、設備投資・ランニングコストが高い。
成形中に導入されるひずみが高温により回復されるため、残留応力が小さく、スプリングバックがほとんど無い。 →成形精度が良い。	大型連続加熱炉やレーザー設備の投資額が大きい。

6.3.5 自動車用棒鋼及び線材

自動車のエンジンや駆動系、足回りで使用される棒鋼，線材でも，近年高強度化が進行しており，ボルト，懸架ばね，駆動系材料などでその傾向が顕著である．これら高強度の材料では，腐食などにより鋼中に侵入した微量の拡散性水素(H)が粒界などに集まり，亀裂を生じさせる「遅れ破壊」が問題となる．遅れ破壊は，熱処理を行った高強度鋼が，数秒から数十年後に突然破壊にいたる現象であり(4.8 参照)，特に 1,200MPa 以上の引張強度(TS)を有する材料で顕著に現れる．遅れ破壊の原因である拡散性水素(H)は，炭化物，窒化物，硫化物などの析出物，結晶粒界や転位にトラップされる．遅れ破壊を防止するために，チタン(Ti) やバナジウム(V)系の析出物をトラップサイトとして利用することや，熱処理により粒界析出物の制御を行い，粒界強度を低下させないような対策が取られている．

6.4 その他の分野

6.4.1 建設機械

今日におけるグローバル化の進展, 発展途上国での都市化の推進, 原燃料価格の高騰などを受けて, 世界規模での原燃料の掘削量や建設工事の量は大幅に増加しており, それらが建設機械の需要を拡大しているといわれている. 世界規模での需要の高まりを受けて, 建設機械の大型化, 長寿命化, 地球環境問題への対応が迫られるようになっている. 鋼材への要求として例えば, 大型化への対応では超高強度鋼の実用化, 長寿命化への対応では, 耐摩耗性を高める取り組みなどがそれぞれ挙げられる.

(1) 高強度鋼

建設用クレーンは, その作業効率を上げるための大型化の一方で, クレーン重量の軽量化を果たすべく, 特にブームやアウトリガーに使用される鋼材には高強度化が求められている. 重量物を吊り下げるクレーンは吊り材の重量を長いアーム(ブーム)で支えており, アームは重い荷重と自重に耐え, しなやかさが求められる. このため, 軽量化をはかる目的で超高張力鋼が適用されてきた. 一方で地球環境問題への対応からクレーン自体の重量の制約も厳しい. そのため, より高強度な厚板が必要とされる.

クレーンのアームの自重軽量化を図る, あるいは吊り上げ荷重をより大きくするために, 現在では引張強さが $1,000\text{N/mm}^2$ を超える強度の厚板が使用されるようになっており, 最も高強度なものでは降伏応力が $1,300\text{N/mm}^2$ のものまで適用事例がある.

(2) 耐摩耗鋼

ブルドーザーの排土板, ダンプの荷台部分(ベッセル), 油圧ショベルやホイールローダーのバケットなど, 使用中に土砂や岩石, 岩盤などからの衝撃を受け摩耗する建設機械, 産業機械の部材には耐摩耗性が求められる. これらの部材に使用される鋼材には, 普通鋼に比べ摩耗量が少ない高硬度の耐摩耗鋼が広く使用される. 鋼板の耐摩耗性に関しては, 実用的には鋼板の表面硬さと強い相関があることが知られている. このため, 耐摩耗鋼のグレードは表面硬さを基準に決定されることが多い. この際, 表面硬さの測定には通常ブリネル硬さが適用される. 市販されている耐摩耗鋼は, 鋼材メーカーによる違いはあるが, ブリネル硬さ(HB)で 400~600 クラスの鋼材が多く使われている. 耐摩耗鋼の適用により, 機械の軽量化や高性能化とともに, 部材の補修, 交換などランニングコスト削減も図ることができる」とされている.

鋼板硬さを高くする簡便かつ経済的な方法は, 焼入れ処理によってマルテンサイト組織とすることである. マルテンサイトの硬さは主として炭素(C)量によって決まり, その他の合金元素が強度に与える影響は小さいことが知られている. 耐摩耗鋼では, 焼入れ処理によってマルテンサイト組織を得ているが, 適切な焼入れ性を確保することを目的としつつ, 溶接性も考慮して各社独自の成分設計がなされている. 一方で, 耐摩耗鋼には硬度のみならず, 寒冷地で使用する場合の信頼性を向上させる低温じん性, 製造時の施工性を改善するための良好な溶接性, 曲げ加工性も重要な特性である. 鋼材のじん性は, 一般的に硬さの上昇にともなって低下するが, 有効結晶粒径を小さくすることで硬さを維持したままじん性の向上を図ることが行われている. 一部の耐摩耗鋼では, 前組織の細粒化, 適切な添加元素調整によるマルテンサイト変態温度の調整を通じて有効結晶粒径の微細化を図り, 低温じん性を向上させている. また, 溶接性については, 低温割れの防止を図るため, 低温割れ感受性を表す指標である C_{eq} あるいは P_{CM} を可能な限り小さくする成分設計が行われ, 予熱温度の低減が図られている.

6.4.2 パイプライン

鋼管を用いたパイプライン輸送システムは、石油の輸送効率向上を目的に開発導入され順次その利用範囲が拡大されてきた。その設計・施工技術の発展により次第に大規模なパイプラインの建設が可能になり、その建設地域もアラスカやシベリア等の寒冷地、北海やメキシコ湾等での深海海底へと拡大してきた。とくに、天然ガスの大量輸送システムとしての役割は大きく、国境を越えた天然ガス輸送量の約 80%はパイプライン輸送によるものとの報告もある[濱田, 2011]³⁹⁾。



写真-6.4.1 ラインパイプの敷設工事の例(最終的にはパイプは埋設される)⁴⁰⁾

【出典：新日本製鉄(2009)：鉄の薄板・厚板がわかる本，日本実業出版社】

パイプラインシステムは生産井戸から生のガスを輸送するフローライン、それらを集合して一次処理施設までの輸送を行うギャザリングライン、脱水等の一次処理を行ったガスを市場近郊まで輸送するトランクライン、さらに最終消費者に届けるディストリビューションラインから構成される。各部分を構成するパイプライン用の鋼管は、ラインパイプと総称され、そのサイズ、必要特性は適用部分に応じて異なる。

たとえば、生産地から市場近郊まで天然ガスを輸送するトランクラインでは大量輸送を担うため、大口径で高圧操作することが輸送効率向上の観点から求められ、高強度の大径鋼管が必要とされる。また、パイプライン敷設地がアラスカ、シベリア等の寒冷地である場合には安全性確保の観点から厳しい低温じん性が要求される。さらに、パイプラインの敷設速度は現地での円周溶接の速度で決まるため、ラインパイプには極めて高い溶接性が要求され、鋼材には低温割れ感受性が低く、溶接予熱が不要で高じん性が得られる低炭素(C)鋼であることが求められる。

このように、ラインパイプには使用目的に応じて様々な性能が求められることになるが、大局的には大径厚肉化、高強度化の方向で開発が進められてきた。とくに、ラインパイプの高強度化は鋼材使用量の低減、円周溶接コストの削減を通してガス輸送コストの低減に寄与するため、盛んに開発が行われてきている。

表-6.4.1 API 5L 規格での強度要求値（抜粋）

グレード	シームレス鋼管あるいは溶接鋼管の管体							溶接シーム
	降伏強度 *1 (MPa)		引張強さ Rm (MPa)		降伏比 YS/TS	炭素当量		引張強さ (MPa)
	Min	Max	Min	Max		CE(IIW)	CE(Pc m)	
L450Q or X65Q L450M or X65M	450	600	535	760	0.93	0.43	0.25	535
L485Q or X70Q L485M or X70M	485	635	570	760	0.93	0.43	0.25	570
L555Q or X80Q L555M or X80M	555	705	625	825	0.93	0.43	0.25	625
L625M or X90M	625	775	695	915	0.95		0.25	695
L690M or X100M	690	840	760	990	0.97		0.25	760
L830M or X120M	830	1050	915	1145	0.99		0.25	915

*1 : L555 以下は $R_{t0.5}$ (0.5%全伸び耐力), L625 以上は $R_{p0.2}$ (0.2%オフセット耐力)を適用

$$CE(IIW)=C+Mn/6+(Cu+Ni)/15+(Cr+Mo+V)/5 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$CE(Pcm)=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B \quad \dots\dots\dots (2)$$

X65やX80などの名称が付されているパイプライン用の鋼管のグレードはラインパイプ規格として世界で広く採用されている API(American Petroleum Institute) 5L 規格での強度等級が一般的である。API 5L 規格での X65 グレード以上への要求特性の一部を抜粋して表-6.4.1 に示す。この規格は 1928 年に制定され、制定当時は B グレードと呼ばれる降伏強さ ≥ 35 ksi(=211MPa)、引張強さ ≥ 60 ksi(=414MPa)までが規定されていた。その後、高強度化要求の高まりと、それに対応した製造技術開発の進展に応じて高強度グレードが追加制定されてきた。1980 年代に X80(降伏強度 550N/mm²以上)が規格化、実用化され、それ以降、高強度化の研究開発が盛んに進められ、2007 年の改定において制御圧延鋼板(TMCP 鋼)を母材とする溶接鋼管に対して X90、X100 および X120 グレードが規定されると同時に ISO 3183 との共通化が図られた。なお、2007 年時点では焼入・焼戻しで製造される鋼管については従来の最高グレードである X80 に据え置かれていたが、X90 および X100 グレード追加の改訂作業が実施され 2010 年 10 月に発効している。

上述のような強度・じん性バランスに優れ、かつ優れた溶接性を備えた鋼管を製造するため、UOE 鋼管の素材となる鋼板の製造には制御圧延と加速冷却が適用されている。フェライト結晶粒の微細化とベイナイトやマルテンサイト等の低温変態組織の生成により、高強度化と高じん性化が図られている。

X100, X120 ラインパイプ用鋼板は、優れた溶接性と母材じん性を得るために 0.1%以下の低炭素(C)鋼を用い、割れやじん性低下の原因となる硫黄(S)を 0.001%未満まで低減すると共に、TMCP 技術、とくに加速冷却技術が最大限活用されている。X120 ではさらに高強度化するために下部ベイナイト組織が活用されており、その組織を得るために、合金成分としてボロン(B)が微量添加され、さらに低い加速冷却停止温度が適用されている。また、ボロン(B)の添加は母材の強度を高めるだけでなく、シーム溶接部の HAZ の組織も下部ベイナイト化され、HAZ じん性向上にも有効とされている。

さらに、X120 ラインパイプの伸び性能を改善するため、加速冷却時に冷却速度を変化させること

や、伸び性能の低いベイナイト単一組織ではなく、フェライトーベイナイト二相組織として高一様伸びを確保した材料も開発されている。

6.4.3 水圧鉄管

水力発電所はスケールメリットを追及するため、高落差・大容量化の道を歩んできた。水圧鉄管の高落差大容量化に伴う鉄管重量および溶接量の増加に対し、管胴に高強度鋼を使用することで、板厚の低減により鉄管の重量や溶接量を低減し、水圧鉄管の建設費の多くを占める現地工事費を低減することができる。水圧鉄管の大型化と高張力鋼適用の推移を図-6.4.1に示す。縦軸は設計最大水頭（H）と内径（D）の積で水圧鉄管の規模を表すものである。水圧鉄管用の高張力鋼については、1975年に大平発電所に最大板厚 36mm の HT780（SHY685）が初めて適用され、その後は HT780 を使用した水圧鉄管が次々と建設されてきた。また、HT-950 の適用など、さらなる高強度化が図られている。

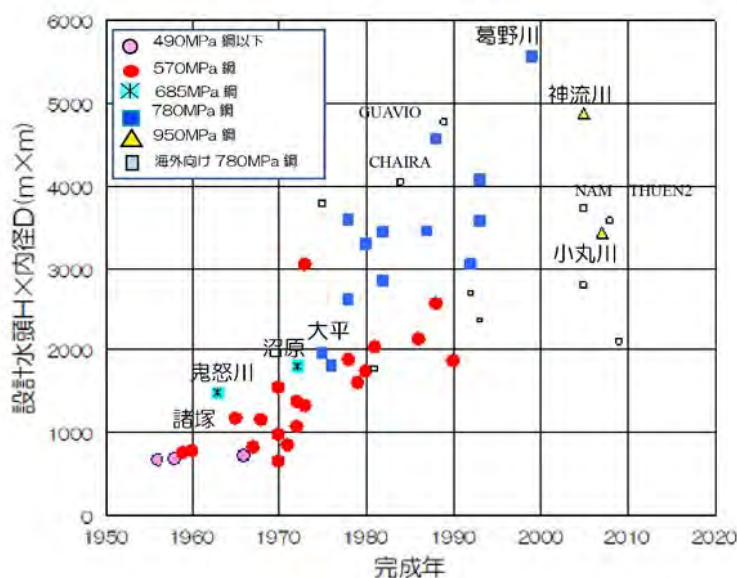


図-6.4.1 水圧鉄管の規模の変遷⁴¹⁾

〔出典：渡邊望(2018)：水圧鉄管用 HT950 の開発と溶接施工法の確立・実用化～溶接管理技術者の体験紹介から～，日本溶接協会 WE-COM マガジン(溶接技術者交流会)，第 28 号〕

現在の水圧鉄管における最高強度の鋼板である HT950 鋼材，溶接材料および施工法の開発は 1982 年頃から始められた。HT950 鋼板および溶接継手の目標性能は，以下の基本的な考え方に基づいて設定され，鋼板および溶接材料の開発が行われた。

① HT780 と同等の安全性が確保されること

じん性については HT780 に対する考え方を踏襲した。

- ・鋼材は最低使用温度 0℃でぜい性破壊の伝播を停止する性能を有すること
- ・溶接部は最低使用温度 0℃でぜい性破壊を発生しない性能を有すること

② HT780 と同程度の能率で施工できる溶接性・施工性を有すること

- ・予熱・パス間温度，溶接入熱量，後熱条件，使用可能な溶接方法等

③ 板の材料費の単価が，HT780 との許容応力比以下であること

この研究成果を基に，水門鉄管協会にて 1999 年に「950N/mm²級高張力鋼材（HT100）の水圧鉄管適用への技術指針」が制定され，同時に日本電気技術規格委員会（JESC）の規格として承認された。水圧鉄管用 HT100(HT950)鋼板及び溶接継手に関する仕様は表-6.4.2 に示す通りである。

表-6.4.2 鋼板および溶接継手の機械的性質 (t≤50mm の場合)

	HT780		HT950	
	母材	溶接部	母材	溶接部
0.2%耐力(N/mm ²)	685 以上	—	885 以上	—
引張強さ(N/mm ²)	780~930	780 以上	950~1,130	950 以上
伸び	16%以上		12%以上	
許容応力(N/mm ²)	330		400	
引張強さに対する安全率	2.35		2.35	
破面遷移温度	-40℃以下	0℃以下	-50℃以下	-10℃以下
シャルピー吸収エネルギー 試験温度	47J 以上 -40℃	47J 以上 0℃	47J 以上 -55℃	47J 以上 -10℃

わが国で初めて HT950 が適用されたのは、2005 年に運転を開始した東京電力神流川発電所で、管胴部の最大板厚は 72mm、使用された HT950 は約 2,330 トン（鉄管重量の約 46%）であった。さらにその後、九州電力小丸川発電所にも約 1,300 トン（鉄管重量の約 37%）の HT950 が適用されており、管胴部の最大板厚は 66mm であった。なお神流川発電所と小丸川発電所は、HT950 を使用した水圧鉄管として世界で唯一稼動しているものとされている。

神流川水力発電所の水圧鉄管の概要と使用材料を図-6.4.2 に示す。神流川発電所では HT950 を適用したことにより、水圧鉄管の重量を約 17%削減し、斜坑の据付期間を約 10%短縮する等の効果が得られたことが報告されている[渡邊, 2018]⁴¹⁾。



図-6.4.2 神流川発電所の水圧鉄管⁴¹⁾

[出典：渡邊望(2018)：水圧鉄管用 HT950 の開発と溶接施工法の確立・実用化～溶接管理技術者の体験紹介から～，日本溶接協会 WE-COM マガジン(溶接技術者交流会)，第 28 号]

第6章 参考文献

- 1) 森田耕次[監修](2008)：新しい建築構造用鋼材[第2版]，鋼構造出版
- 2) 日本規格協会(1994)：JIS G 3136「建築構造用圧延鋼材」
- 3) 志村保美(2011)：建築鉄骨「材料編」，溶接接合教室実践編，溶接学会誌 Vol.80, No.4, pp.39-44
- 4) 日本鉄鋼連盟(2017a)：建築構造用冷間ロール成形角形鋼管（BCR295），日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR0002
- 5) 日本鉄鋼連盟(2017b)：建築構造用冷間プレス成形角形鋼管（BCP235, BCP325），日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR0003
- 6) 鋼材倶楽部高性能鋼利用技術小委員会(1996)：建築構造用高性能 590N/mm² 鋼材(SA440)設計・溶接施工指針
- 7) 日本鉄鋼連盟(2016a)：建築構造用 TMCP 鋼材（TMCP325, TMCP355），日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR 0016-2016.
- 8) 日本鉄鋼連盟(2016b)：建築構造用高性能 550N/mm² 鋼材（TMCP385），日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR 0017-2016.
- 9) 日本鉄鋼連盟(2016c)：建築構造用高性能 590N/mm² 鋼材（SA440）設計・施工指針，第3版.
- 10) 橋本篤秀[監修](1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版
- 11) 加茂孝浩(2016)：建築構造用鋼板の動向，日本溶接協会 WECOM マガジン，第19号
- 12) 日本鉄鋼連盟(2012)：建築構造用高強度 780N/mm² 鋼材（H-SA700），日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR0015
- 13) 日本製鉄(2019)：建設用資材ハンドブック [カタログ]
- 14) 建設省建築研究所，鋼材倶楽部(1999)：建設省総合技術開発プロジェクト報告書「次世代鋼材による構造物安全性向上技術の開発」，「接合部・施工と破断」分科会報告書
- 15) 建築研究所，日本鉄鋼連盟(2003)：鉄骨梁端溶接接合部の脆性の破断防止ガイドライン・同解説，日本建築センター
- 16) 鈴木孝彦，石井匠，森田耕次(2001)：鋼構造の耐震設計「破壊・破断対策」，建築技術，9月号，No.619, p.140
- 17) 古谷仁志，植森龍治，栗飯原周二，富田幸男，池辺卓，小嶋敏文，岡本晴仁，久保高宏，安藤隆一，樋口孝一，向井昭義，森田耕次(2001)：建築柱梁接合部を再現した溶接部の HAZ 靱性に及ぼす鋼材化学成分の影響とその定式化，鋼構造論文集，Vol.8, No.32, pp.17-31
- 18) 日本鉄鋼連盟(2014)耐震建築溶接構造用圧延鋼材，日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR 0011-2014.
- 19) 日本鋼構造協会(1998)：鋼構造技術総覧[建築編]，技報堂出版
- 20) 千々岩力雄，為広博，吉田譲，船戸和夫，植森龍治，堀井行彦(1993)：建築用耐火鋼板の開発と実用化，新日鐵技報，第348号，pp.55-62
- 21) 作本好文，千々岩力雄(1994)：建築構造用耐火鋼(FR 鋼)の開発と実用化，鋼構造論文集，Vol.1, No.1, pp.25-40
- 22) 廣田一博，中川隆，武田信玄，橋吉美，多田益男(2007)：世界初の船体用降伏応力 47 kgf/mm² 級高張力鋼の開発と実船適用，三菱重工技報，Vol.44, No.3
- 23) 井上健裕(2020)：アレスト設計と溶接-1：船体構造-1(コンテナ船，材料アレスト)，日本溶接協会 WE-COM マガジン，第35号
- 24) 日本海事協会(2009)：「大型コンテナ船の YP47 鋼の使用に関するガイドライン」の概要(<特集>材料)，日本海事協会会誌 No. 288.
- 25) 井原健滋，弓削佳徳，松永直己(2014)：高機能 LP 鋼板の製造技術，JFE 技報，No.33, pp.32-36
- 26) JFE スチール(2007)：JFE の LP 鋼板(テーパプレート)[Cat.No.C1J-014-01]
- 27) 神戸製鋼所(2022a)：ぼうだより技術ガイド，新人営業マンのための溶接基礎講座，第8回 造船向け低温用鋼について

(https://www.boudayori-gijutsugaido.com/gaido/catalog/freshsales/#target/page_no=27)

[2022.9.8 確認]

- 28) 古谷仁志(2019): 高張力鋼, 特集 特殊鋼の合金元素の基礎知識, 特殊鋼, Vol.68, No.4, p.26
- 29) 日本造船研究協会 第 242 研究部会(2002): 原油タンカーの新形コロージョン挙動の研究—研究概要総括書—
- 30) 池田博司, 寒沢至, 三島永嗣(2020): 原油タンカー荷油タンク用耐食鋼 (JFE-SIP®-OT1, OT2) の開発, JFE 技報, No. 46, pp. 8-14.
- 31) 伊藤実, 鹿島和幸, 本田貴之, 原宗理, 稲見彰則, 西村誠二(2014): 原油タンカー用高耐食性厚鋼板(NSGP®), 新日鉄住金技報, 第 400 号, pp.86-91.
- 32) 神戸製鋼所(2022b): 神戸製鋼所ホームページ, 原油タンカー用耐食鋼「KPAC®-1」「KPAC®-2」, (https://www.kobelco.co.jp/products/plate/shipbuilding/kpac_1_2.html) [2022.5.17 確認]
- 33) 日本製鉄(2022): 日本製鉄ホームページ, 軽量化・衝突安全性確保に貢献するハイテン (自動車用高強度鋼板) (https://www.nipponsteel.com/tech/nssmc_tech/car/car_01/) [2022.9.8 確認]
- 34) 齋藤和也(2014): まてりあ(日本金属学会会報), Vol.53, No.12, pp.584-588.
- 35) WorldAutoSteel 日本委員会(訳)(2009): スーパー鉄鋼「先進ハイテン」 世界のクルマを軽く安全に, 文藝春秋企画出版部
- 36) 鳥塚史郎, 高木節雄, 瀬沼武秀[監修] (2016): しなやかで強い鉄鋼材料—革新的構造用金属材料の開発最前線, エヌ・ティー・エス
- 37) JFE21 世紀財団(2022): 鉄鋼プロセス工学入門 (<http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/index2.html>) [2022.9.8 確認]
- 38) 森謙一郎(2015): ホットスタンピング入門 自動車軽量化に向けた超高強度部材成形法, 日刊工業新聞社
- 39) 濱田昌彦(2011): パイプライン「材料編」, 溶接接合教室—実践編—, 溶接学会誌, Vol.80, No.2, pp.44-51.
- 40) 新日本製鉄(2009): 鉄の薄板・厚板がわかる本, 日本実業出版社
- 41) 渡邊望(2018): 水圧鉄管用 HT950 の開発と溶接施工法の確立・実用化～溶接管理技術者の体験紹介から～, 日本溶接協会 WE-COM マガジン(溶接技術者交流会), 第 28 号
- 42) 日本鋼構造協会(1998): 高張力鋼(780N/mm² 級鋼)の建築構造物への適用, JSSC テクニカルレポート No.4
- 43) 日本鉄鋼連盟(2012): 建築構造用高強度 780N/m² 鋼材(H-SA700), 日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR 0015-2012.

7. 鉄鋼製品の高性能化

前章では、各分野での高性能な鋼材の開発動向について述べた。本章では、主に建設分野で用いられる厚板以外の高性能鋼材について述べる。

7.1 線材・棒鋼の高強度化

線材(Wire rod)とは、棒状に熱間圧延されコイル状に巻かれた鋼材のことで、図-7.1.1に示すように、線材を径の小さいダイスに通して引き抜く伸線加工(Drawing)によってさらに細く伸ばされたものが鋼線(Steel wire)である。また棒鋼(Steel bar)とは、棒状に圧延または鍛造され所定の長さに切断された鋼材のことである。線材・棒鋼は市販の鋼材の中で最も高強度化が進んでいる。ここでは、建設分野を中心に、線材・棒鋼の高強度化の状況と構造物への適用事例について述べる。

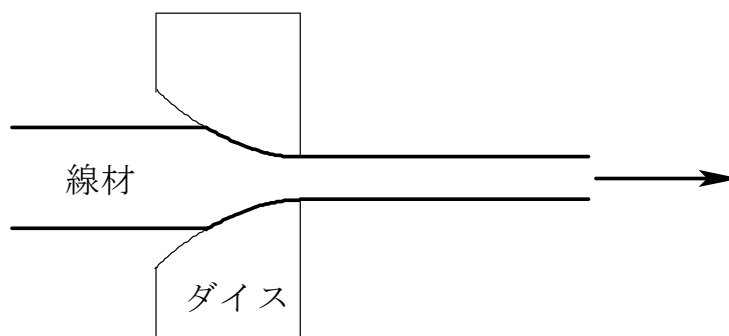


図-7.1.1 伸線加工

7.1.1 高強度鉄筋 [永井, 1990 ; 上田, 1994 ; 口石, 1995]^{1) ~3)}

近年、鉄筋コンクリート造の高層建築の建設需要が高まってきており、コンクリートの高強度化が進行してきている。構造の面から見れば、コンクリートの高強度化によって断面の縮小が可能になるが、鉄筋の強度がそのままであれば、鉄筋の太径化と配筋ピッチの減少で対処することになり、過密配筋が避けられなくなる。このような中、鉄筋コンクリート建築の高層化を目指し、建設省(現 国土交通省)が中心となり、1988年から1992年にかけて「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術開発(New RC 総プロ)」が産・官・学一体で実施され、New RC 構造に適した高強度鉄筋の開発が行われた。New RC 総プロで開発目標とされた高強度鉄筋の強度水準は、降伏点または耐力で685 N/mm²および980 N/mm²の2種類が規定され、従来の鉄筋(SD 材)との混同を裂けるため USD という呼称がつけられている。その目標性能を表-7.1.1に示す。USD685 は圧延のままで、USD980 は焼入れ焼戻し処理により製造され、圧延制御と製鋼技術の向上で対応している。

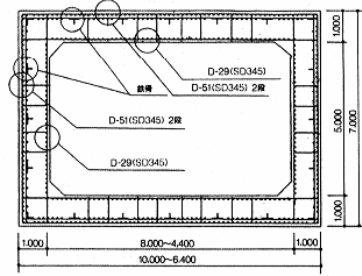
表-7.1.1 高強度鉄筋の機械的性質(概要)

種類 の 記号	降伏点または耐力 (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び(%)		曲げ性		主な用途
			降伏棚の ひずみ度*	伸び	曲げ 角度	内側 半径	
USD685A	685~785	85 以下	1.4 以上	10 以上	90°	2 d	柱および梁の主筋
USD685B	685~785	80 以下					
USD980	980 以上	95 以下	—	7 以上	90°	4 d	
USD785	785 以上	—	—	8 以上		1.5 d	せん断補強筋
USD1275	1275 以上	—	—	7 以上		2d	

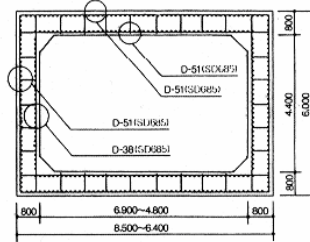
*降伏棚のひずみ度は、弾性伸びを含み、規格降伏点または耐力の上限値を鉄筋の実強度値が通過する点とする。

橋脚断面の比較

● 従来の橋梁



● 鷺見橋



鷺見橋一般図

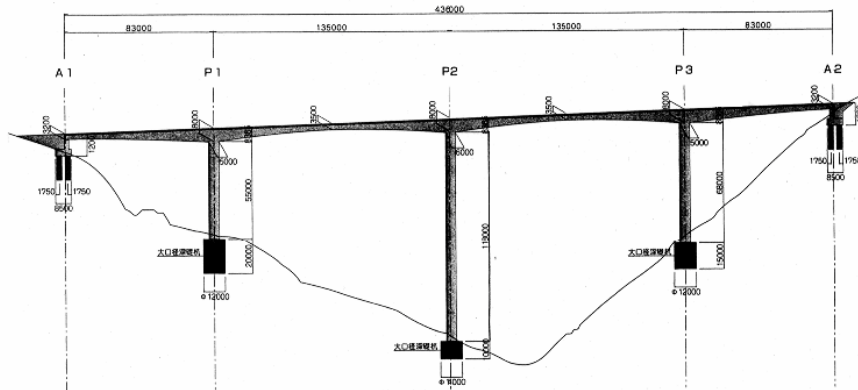


図-7.1.3 鷺見橋⁴⁾

[出典：水口和之，芦塚憲一郎，大塚一雄，天野玲子(1999)：スーパーRC工法，橋梁と基礎，Vol. 33，No. 8，pp. 141-144]

7.1.2 高張力ケーブルと PC 鋼線

(1) 高張力ケーブル

吊橋のメインケーブルとして用いられるケーブル(Cable)は，直径5mm程度のワイヤ（素線）を束ねて扱いやすい太さのストランド(strand)とし，さらにそのストランドを束ねたものである(図-7.1.4)。ストランドを工場で製作し，現場でストランドの集束を行えば直径1m以上のケーブルを造ることができる。ケーブルは，ワイヤおよびストランドの束ね方によって幾種類かに分類される(図-7.1.5)が，吊橋のメインケーブルあるいは斜張橋には，束ね方による強度の低下がほとんどない平行線ケーブルが用いられる。

長大吊橋では，スパン長の増加に伴って自重が増加し，同じ強度のケーブルを用いた場合，必要なケーブル断面は大きくなっていく。長大吊橋の主ケーブルに高強度のワイヤを用いれば，ケーブル断面が減少し，架設工事の効率化，主塔高さの低減や補剛構造の簡素化が実現できる。図-7.1.6は，吊橋用ケーブルの強度の変遷を示したものである。1927年完成のジョージワシントン橋(米)以降，1,600MPa級鋼線で推移していたが，1998年に完成し，長らく世界最長であった明石海峡大橋(中央支間長1,991m)では，1,800MPa級のワイヤ（線径5mm）が開発され[高橋ら，1994]⁷⁾，主ケーブルに使用されている。以降，さらに高強度の1,860MPa級や1,960MPa級の橋梁ケーブル用亜鉛めっき鋼線も開発され，蔚山大橋などに用いられた[日本鋼構造協会，2021]⁸⁾。

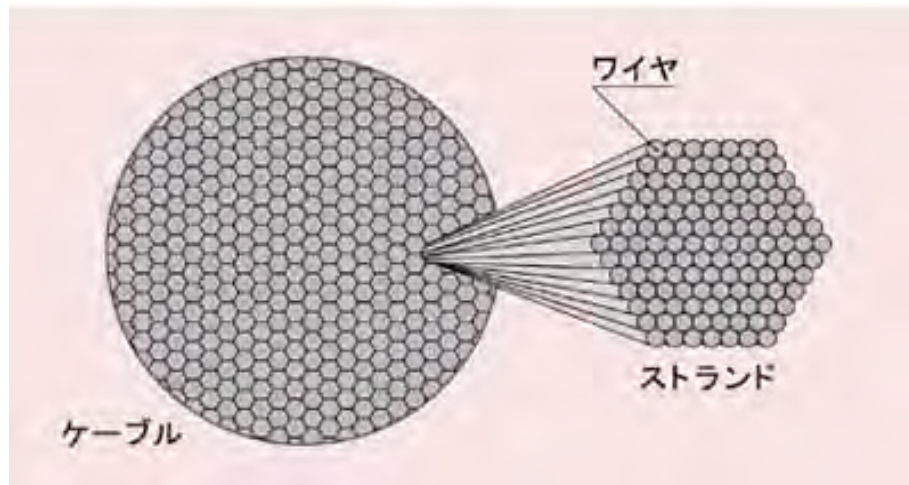


図-7.1.4 ケーブルの構成⁹⁾

[出典：日本鉄鋼連盟(2019)：高性能鋼の概要(橋梁向け) [パンフレット]]

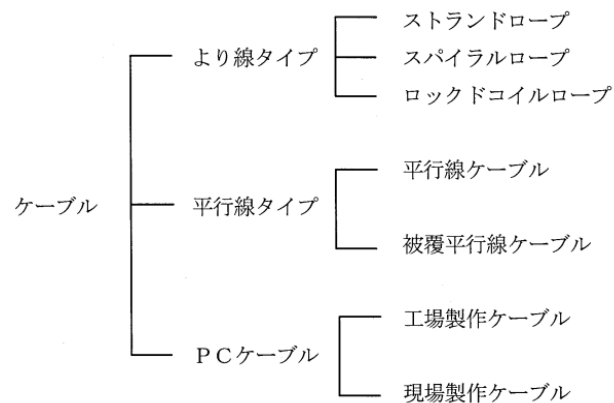


図-7.1.5 ケーブルの種類

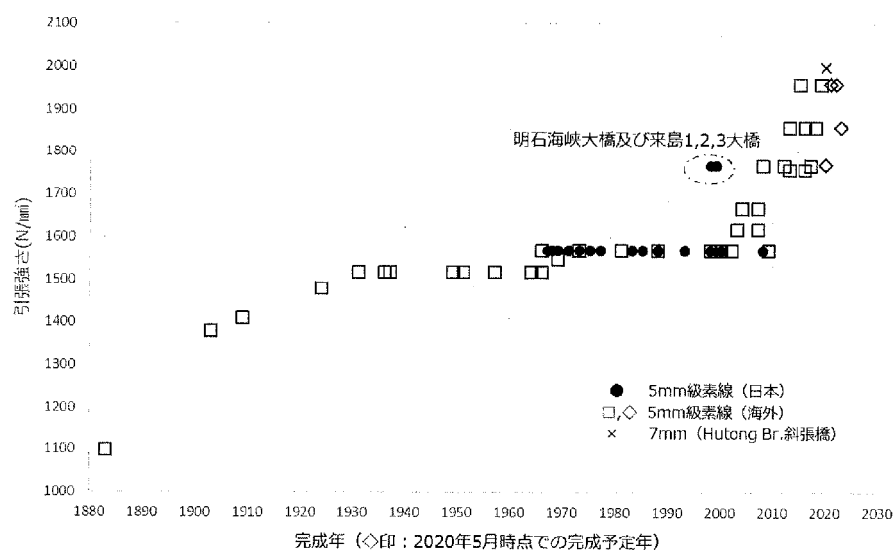


図-7.1.6 ケーブルワイヤの強度の変遷⁸⁾

[出典：日本鋼構造協会(2021)：構造用ケーブル材料規格，平行線ストランド JSS II 06-2021.]

ケーブルを構成する亜鉛めっき鋼線は、高炭素(C)のパーライト鋼を伸線加工することによって得られる高強度の高炭素鋼線に亜鉛めっきをほどこしたものである。熱間圧延された直径5～10mm程度のピアノ線(文字通り、楽器のピアノの弦などに用いられる鋼線)を原料とし、

パテンティング(熱処理)→伸線加工→亜鉛めっき

という工程で製造される。パテンティング処理とは、900-1,000℃に加熱した後、冷間引抜きに適した組織を得るため、熔融鉛浴中を通過させるなど適切な温度条件で冷却してパーライト組織に相変態させる熱処理のことである。従来、線材のパテンティングは、熱間圧延線材をワイヤメーカーで再加熱し、鉛浴に浸漬する鉛パテンティング(Lead Patenting: LP)処理により行われてきた。しかしながら、①環境負荷物質である鉛(Pb)を使用すること、②線材の再加熱、鉛(Pb)の加熱で製造過程におけるエネルギーコストとCO₂の排出量が増加すること、③ワイヤメーカーにより品質にばらつきがあること、などが課題となっていた。このため、鋼材メーカーにおいて線材の製造工程で直接熔融塩に浸漬(ソルトバス)することによりパテンティングを行うことが可能なDLP(Direct in-Line Patenting)と呼ばれるインライン熱処理技術が開発されている[真鍋ら, 2016]¹⁰⁾。

鋼線中のパーライトは、セメンタイトという炭化物(Fe₃C)と炭素(C)をほとんど含まないフェライト(鉄)が層状になった組織で(図-7.1.7)、その強度は、セメンタイト同士の間隔(ラメラ間隔という)が狭いほど、またフェライトの硬さが高いほど増加するといわれている。



図-7.1.7 伸線加工されたパーライト組織⁷⁾

[出典：高橋稔彦，樽井敏三，今野信一(1994)：橋梁ケーブル用180kgf/mm²ワイヤの開発，鋼構造論文集，第1巻，第4号，pp.119-126]

鋼線の強化を図るためにはもっと細い径まで伸線加工(加工強化)すればよいが、施工のことを考えると5mm程度が扱いやすいし、単純に加工度を増やすことは鋼線の延性低下を招く。また、単純な炭素(C)量の増加も、鋼線の延性低下と亜鉛めっき時の強度低下が大きくなるという問題点がある。このため、ワイヤ強度の増加には、①ケイ素(Si)添加による固溶強化、②クロム(Cr)添加による結晶粒微細化強化によりパテンティング材の強化をはかるとともに、③ケイ素(Si)、クロム(Cr)添加により亜鉛めっき工程での強度低下を防いでいる。また、伸線加工率を増すことによっても強度を上昇させ、従来型の1,600MPa級鋼よりも200MPa強度の高い1,800MPa級の鋼線を実用化している。また、同様の考え方で1,800MPa級鋼線にクロム(Cr)を0.3%程度まで増量添加することで、2,000MPa級鋼線(線径5mm)も開発されている。表-7.1.2に1,800MPa級及び2,000MPa級の亜鉛めっき鋼線用線材の化学成分の例を示す。表-7.1.3には試作された2,000MPa級鋼線の機械的性質の例を示す。試作された5mm/2,000MPa級の亜鉛めっき鋼線が明石海峡大橋にて使用された1,800MPa級の鋼線と同等以上の機械的性質、疲労特性、低温特性及び耐遅れ破壊特性を有していることが確認されている[樽井ら, 1999]¹¹⁾。

表-7.1.2 2,000MPa級亜鉛めっき鋼線用線材の化学成分例 (mass%)¹¹⁾

[出典：樽井敏三，西田世紀，吉江淳彦，大羽浩，浅野厳之，落合征雄，高橋稔彦(1999)：2000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2300MPa級PCストランド用線材の開発，新日鐵技報，第370号，pp. 45-50]

強度レベル	C	Si	Mn	Cr
1,800MPa級	0.82	0.25	0.50	—
2,000MPa級	0.88	0.25	0.30	0.30

表-7.1.3 2,000MPa級亜鉛めっき鋼線の機械的性質¹¹⁾

[出典：樽井敏三，西田世紀，吉江淳彦，大羽浩，浅野厳之，落合征雄，高橋稔彦(1999)：2000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2300MPa級PCストランド用線材の開発，新日鐵技報，第370号，pp. 45-50]

0.2%耐力	1,771 MPa
引張強さ	2,059 MPa
伸び	6.3%
ねじり回数	24

これらの開発を経て，1,860MPa級および1,960MPa級の橋梁用ケーブル素線がJIS G 3571に，ケーブルがJSS II 06 [日本鋼構造協会,2021]⁸⁾にて規格化されている。

ケーブル素線のじん性，延性を評価する上で，ねじり回数は重要な特性である．ねじり回数は，素線径の100倍の長さの試験片の片端を固定しもう一端を回転させることによって，素線が破断するまでの回転数をねじり回数として評価する試験である．素線が均質に製造されていることを示す指標であるが，延性の低い鋼線の場合，低いねじり回数でデラミネーションと呼ばれる伸線方向に沿った縦割れ（亀裂）が生じやすく，高強度の鋼素線になるほど，ねじり回数は低くなる傾向にある．橋梁用高強度ケーブルについては，ISO 19203とJSSC II 06で規格化されているが，これらのねじり回数に対する規定の比較を表-7.1.4に示す．ISOでは，わが国で採用されてきたねじり回数の実績に基づいて規定されているJSSC基準よりも低く，かつ高強度になるほど許容されるねじり回数を低減している．JSSC基準に基づくわが国のケーブルではじん性（耐デラミネーション特性）に非常に優れていることがわかる．

表-7.1.4 ねじり回数規定の比較

規格	線径区分 (mm)	引張強さ区分				
		ST1570	ST1670	ST1770	ST1860	ST1960
JIS G 3571	5.00～6.00	14 回以上				
	7.00	12 回以上				
ISO 19203	5.00～6.00	14 回以上	14 回以上	12 回以上	10 回以上	8回以上
	7.00	12 回以上	12 回以上	10 回以上	8 回以上	6 回以上

（２）高強度PC鋼線

プレストレストコンクリート(PC)にプレストレスを導入するために用いられるPC鋼線も高強度化が進行している．PC鋼線の製造では，高炭素(C)鋼線を素材とし，パテンティング，伸線加工のあと，ホットストレッチング処理が施される．ホットストレッチング処理とは，PC鋼線の伸び，疲労ならびにリラクセーション特性を改善する目的で行われる250℃付近での加熱処理である．

PC ストランド用鋼線は ASTM A416 及び JIS G3536 に規定された 270K 級(1,800MPa)が主体であったが，高強度コンクリートの実用化に伴い，300K や 330K 級の高強度 PC ストランドが開発試作され，一部実用化に至っている．表-7.1.5 に開発鋼の化学成分の一例を，また表-7.1.6 には試作さ

れた公称径 12.7mm の 7 本撚りストランド(素線径 $\phi 4.22$)の機械的性質を示す。平行線ケーブルと同じく、ケイ素(Si)、クロム(Cr)の添加による強化を図っており、ストランドの機械的性質も 330K 級の高強度化が図られているとともに、強度増加にもかかわらず降伏比の上昇は小さいことがわかる。

表-7.1.5 330K級PC鋼線用鋼の化学成分例 (mass%)¹¹⁾

[出典：樽井敏三，西田世紀，吉江淳彦，大羽浩，浅野巖之，落合征雄，高橋稔彦(1999)：2000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2300MPa級PCストランド用線材の開発，新日鐵技報，第370号，pp. 45-50]

強度レベル	C	Si	Mn	Cr
270K級	0.81	0.22	0.74	—
330K級	0.98	1.20	0.30	0.19

表-7.1.6 PCストランド(開発鋼)の機械的性質¹¹⁾

[出典：樽井敏三，西田世紀，吉江淳彦，大羽浩，浅野巖之，落合征雄，高橋稔彦(1999)：2000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2300MPa級PCストランド用線材の開発，新日鐵技報，第370号，pp. 45-50]

鋼種	線材径 (mm)	引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	降伏比 (%)	ヤング率 (GPa)	伸び (%)
270K級	10.5	1,913	1,775	92.7	2.01	8.0
330K級	10.0	2,343	2,144	91.5	2.02	8.2

7.1.3 超高力ボルト (F10T から F14T へ)

高力ボルト摩擦接合は、高度な施工技術を必要とせず、安定した接合品質を得られることから、鋼構造物の現場接合法として今日、主流の座を占めている。摩擦接合用高力ボルトについては、JIS B 1186でF8T(引張り強さ800N/mm²級)、F10T(引張り強さ1,000N/mm²級)、F11T(引張り強さ1,100N/mm²級)の3種類が規定されているが、最も一般的に使用されているのはF10Tである。以前はF13T(引張り強さ1,300N/mm²級)まで規定され使用されてきたが、遅れ破壊(Delayed fracture)【松山，1989；日本橋梁建設協会，2000】^{12)，13)}が認められたことからこの規格が削除され、現在では土木構造物にはF11Tも使用されなくなっている。

近年、極厚材や高強度材の高力ボルト接合に対するニーズの高まりに対応して、高力ボルト接合部のボルト本数を低減して施工の省力化・スピードアップを図るために、遅れ破壊に対する抵抗性を高めたF14T(引張り強さ1,400N/mm²)級の強度をもつ超高力ボルトが開発・実用化されている。【日本鋼構造協会，1998b；宇野，2000；窪田ら，2003】^{14)～16)}

遅れ破壊とは、4.8に示したように、高力ボルトやPC鋼棒などにおいて、荷重が作用した状態で一定時間経過後に突然破壊する現象で、材料の高強度化に伴いその感受性が高くなるため、高強度化の最大の阻害要因となっている。土木鋼構造物での遅れ破壊の発生プロセスは一般には以下の様に説明されている。

- ① 使用環境中でボルトが腐食し、ボルト中に水素が浸入。
- ② ボルト中に浸入した拡散性水素(H)がねじ部等の応力集中部に集積。
- ③ 拡散性水素(H)量が鋼材の許容できる水素(H)量（限界拡散性水素濃度【山崎ら，1999】¹⁷⁾）を超えると亀裂が発生。
- ④ 亀裂の成長がある段階に達すると破壊が発生（遅れ破壊）。

図-7.1.8は、このプロセスを模式的に表したものである。

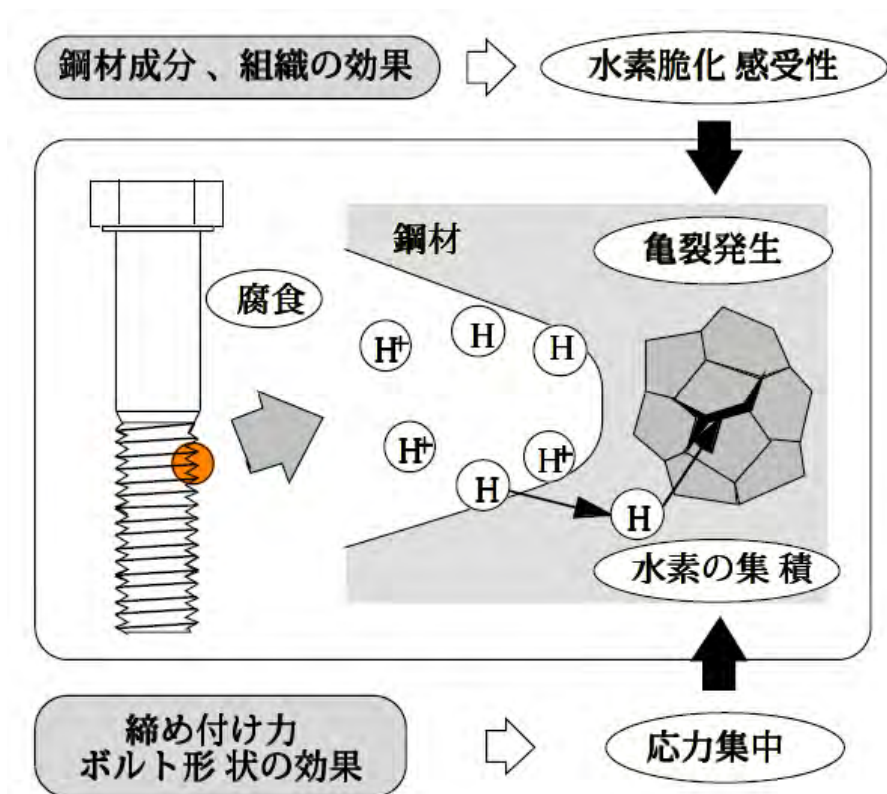


図-7.1.8 遅れ破壊の発生過程¹⁶⁾

[出典：窪田伸，宮川敏夫(2003)：トルシア形超高力ボルト，JSSC，No. 49，2003. 7]

ボルト用鋼は中炭素鋼の焼入れ焼き戻し処理により製造される焼き戻しマルテンサイト組織を有しており，遅れ破壊特性に劣るとされている．遅れ破壊では，多くの場合旧オーステナイト（ γ ）粒界破壊を生じるため，旧 γ 粒界を強化する方法として，①燐(P),硫黄(S)等の粒界偏析元素の低減，②ニオブ(Nb),チタン(Ti),バナジウム(V)等の添加により細粒化し，③高温焼き戻しによる旧 γ 粒界のフィルム状セメンタイト析出の防止，等が報告されており，開発されたF14T級高力ボルトではモリブデン(Mo),バナジウム(V)添加により旧 γ 粒の10 μm 以下への細粒化と，高温焼き戻しを可能としたこと等により遅れ破壊抵抗性を向上させたとされている[山崎ら，1999]¹⁷⁾．表-7.1.7にF14T級ボルト用鋼の化学成分例を，図-7.1.9にF14T級ボルト用鋼と通常のF10Tボルトの強度および限界拡散性水素濃度を比較したものを示す．F14T級ボルト用鋼は標準的なF10T用鋼材の約3倍の限界拡散性水素濃度を有することがわかる．さらに，遅れ破壊を生じにくくするために，ボルトねじの形状の改良により応力集中を緩和する等の工夫によりさらに遅れ破壊に対する耐性を向上させている．

表-7.1.7 F14T級ボルト鋼の化学成分例(mass%)¹⁷⁾

[出典：山崎真吾，久保田学，樽井敏三(1999)：遅れ破壊特性の評価方法と耐遅れ破壊高強度鋼の開発，新日鐵技報，第370号，pp. 51-55]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
F14T級開発鋼	0.40	0.22	0.74	<0.010	<0.010	1.20	Addition	

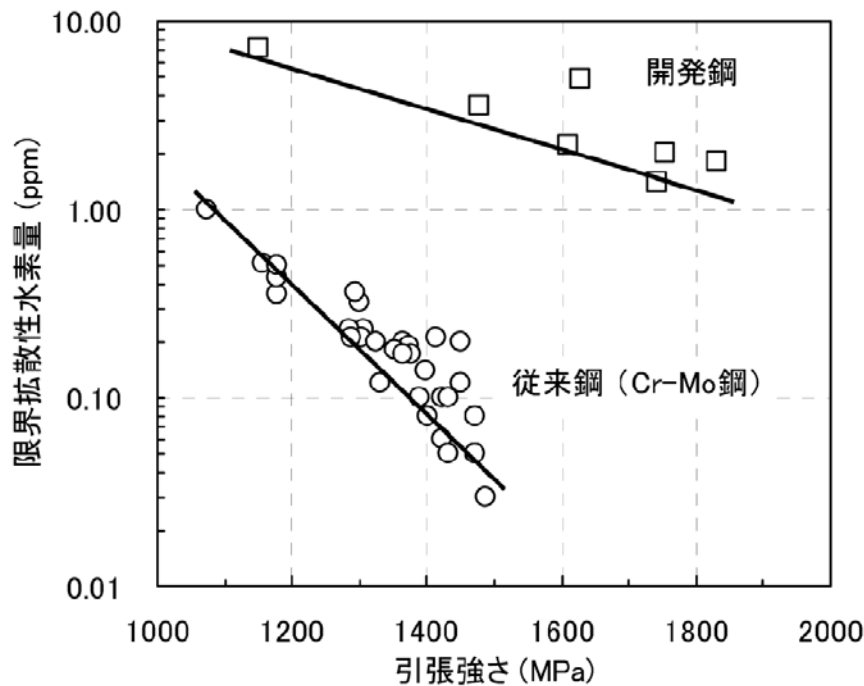


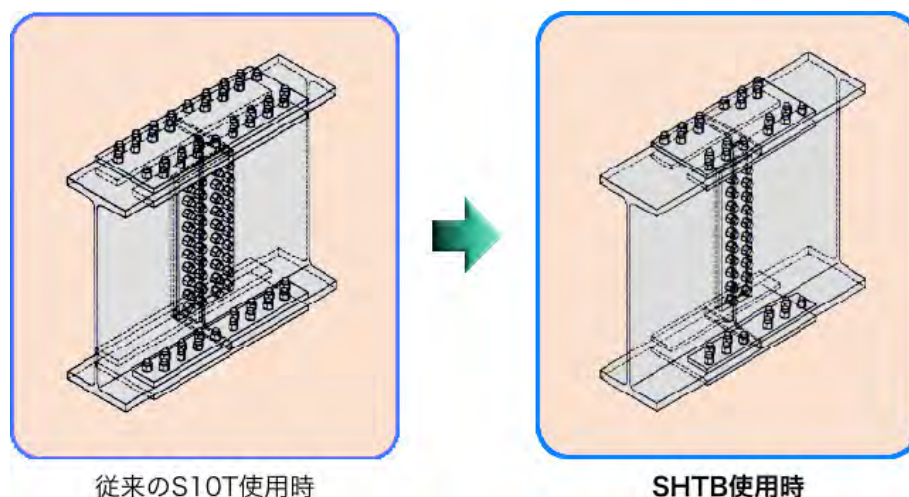
図-7.1.9 限界拡散性水素濃度¹⁸⁾

[出典：樽井敏三，久保田学(2011)：水素脆化評価法と耐遅れ破壊特性向上技術，新日鉄技報，第 391 号]

図-7.1.10に，従来のF10Tの高力ボルトを用いて接合されたH形鋼と，F14T級の超高力ボルトを用いて接合されたH形鋼の接合部の比較を示すが，接合部が極めてコンパクト化されることが分かる。建築構造物等の屋内使用ではすでに多くの実績が報告されているが，屋外で使用される橋梁等では遅れ破壊に対する警戒心が強く，その普及は進んでいないが，今後主部材の高強度化に対応可能な新接合技術として適用が期待される。

このようにして開発されたF14T級高力ボルトの道路橋への適用について，土木分野において使用されている高力ボルト(F10T級)との性能比較のため，高力ボルト摩擦接合のすべり係数などの強度特性の載荷試験による確認，ならびに長期間屋外で直接自然環境にさらされる腐食環境での耐遅れ破壊性能を確認するための暴露試験などが実施されている[玉越ら，2013；横井ら，2015]^{19)・20)}。検討の結果，F14T，S14Tの超高力ボルトは，現在道路橋で用いられているS10T，F10Tに準じた適用条件において使用できる可能性が高いとの結果が得られている。

このような検討の結果を受け，2017(平成29)年の道路橋示方書にS14Tが使用材料として掲載されるに至った。ただし，遅れ破壊に対する安全性が完全に確認されたとは言いきれない状況に鑑みて，遅れ破壊が生じにくい条件(環境)での適用を前提として，適用する母材と連結板の鋼種，ならびに環境に制限が加えられている。



従来のS10T使用時

SHTB使用時

図-7.1.10 S10T と S14T ボルトを用いた接合部の比較²¹⁾

[出典：日鉄ボルテン(2022)：日鉄ボルテンホームページ，トルシア形超高力ボルト〔SHTB〕]

7.1.4 スチールコード [田代ら，2003]²²⁾

自動車のタイヤなどに用いられるスチールコードは，量産される鋼材の中で最も強度の高い材料として知られており，その強度は現在，線径 0.2mm で 4,000MPa にまで達している．また，細径になるほど高強度化が進行し，線径 0.04mm では 5,700MPa の極細線も試作されている．高強度ワイヤと同様に，スチールコード用の極細線材はパテンティングと伸線加工を繰り返し施して製造される．図-7.1.11 に鋼線の線径と強度との関係を示す．炭素(C)量，ならびに伸線加工率を上げることでワイヤの強度を上昇させているが，径が細くなるほど高い強度を得ることができることがわかる．これら高強度鋼線の製造においては，原料の線材中に偏析，非金属介在物などがあると，伸線加工中に断線が生じるため，偏析，非金属介在物の厳しい制御を行った清浄度の高い高炭素鋼線材が用いられる．

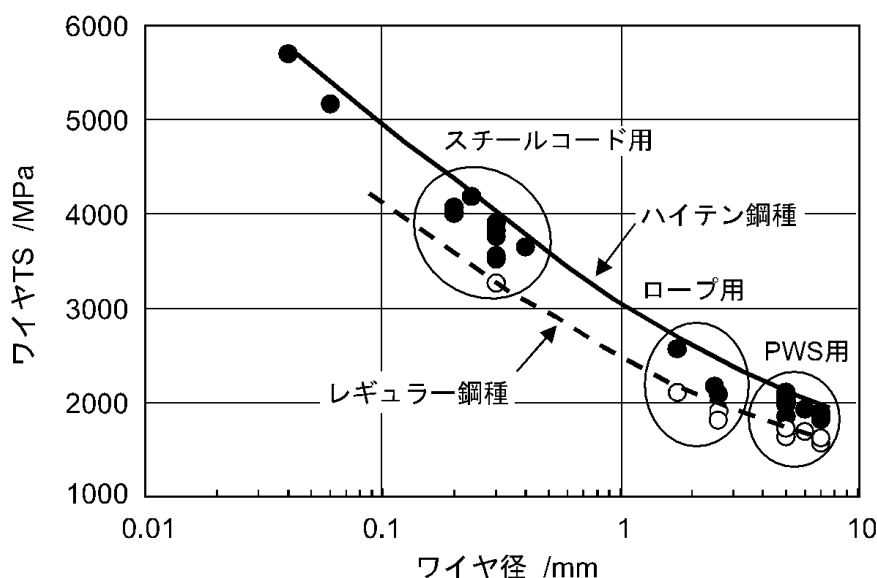


図-7.1.11 高強度鋼線の線径と強度の関係²³⁾

[出典：山崎真吾，浅川基男(2018)：鋼炭素鋼線の歩みと最新動向－伸線技術分科会，ぷらすとす(日本塑性加工学会会報誌)，Vol. 1, No. 3, pp. 45-49.]

近年では、上記の高強度なスチールコードの短繊維を相当量混入させた高じん性繊維補強コンクリートが開発されており、コンクリート材料の引張強度や曲げ強度を高め、じん性を向上させることを可能としている。図-7.1.12には、スチールコードの短繊維を混入させた高じん性繊維補強コンクリート板の曲げ-たわみ曲線の例を示すが、鋼繊維によりコンクリートの高強度化が図られていることがわかる。

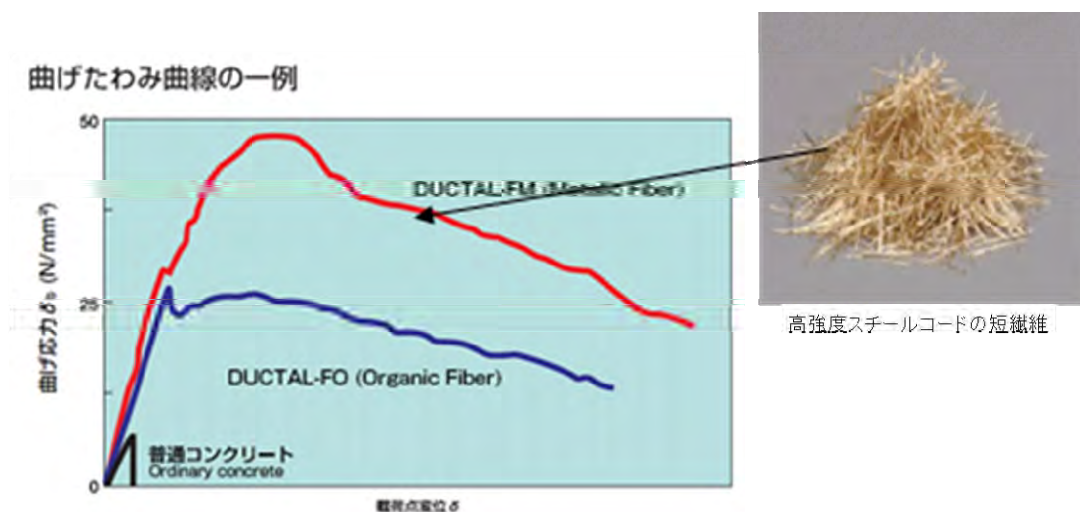


図-7.1.12 高強度スチールコードの短繊維を混入させた高じん性繊維補強コンクリートの曲げ-たわみ曲線²⁴⁾
 [出典：太平洋セメント(2020)：ダクトル [パンフレット]]

7.2 形状を改良した鋼材

鉄鋼材料では、材質だけでなく新しい形を作りこむ技術も進展してきている。ここでは、圧延で一定の断面形状をもつように作られる形鋼(Shaped steel)や圧延によりこれまでとは異なる形状を作り出した鋼材について紹介する。

7.2.1 合理的な形状をもつ圧延H形鋼 [志賀, 1990 ; 山中, 1995]^{25), 26)}

圧延H形鋼は、製鉄所にて断面がH形状になるように圧延された鉄鋼製品で、形鋼の代表的な製品である。わが国では1960年代(昭和30年代後半)から製造が開始されている。製造技術の革新により、近年ではこれまでとは異なる合理的な形状を有するH形鋼が製造されるようになった。

(1) 外法一定H形鋼

従来、H形鋼は図-7.2.1に示すような、水平ロールとたてロールが同一面に組み込まれたユニバーサル圧延により製造されており、ウェブの内法寸法は水平ロール幅により決定されるため、H形鋼の断面は内法一定であった(図-7.2.2 右側)。内法一定の場合、フランジの板厚が異なると梁高さが異なることになるため、建築構造物のように上フランジ面をレベルにする必要がある場合などには、継手部でのフィラープレートの枚数、種類が多くなる問題があった。外法寸法一定のH形鋼は、図-7.2.3に示すウェブ内法拡大圧延、あるいはウェブ内法縮小圧延の技術を開発することにより、外法を一定に保つことが可能となった。この技術により、同一シリーズ内で梁成・梁幅一定のサイズ構成になっており、設計の簡素化と加工の効率化を図ることが可能である。また、これに加えて制御圧延を導入することにより、従来のH形鋼よりもフランジの板厚に対するウェブの板厚を薄くすることができるようになったため、軽量化による経済的な設計が可能である。

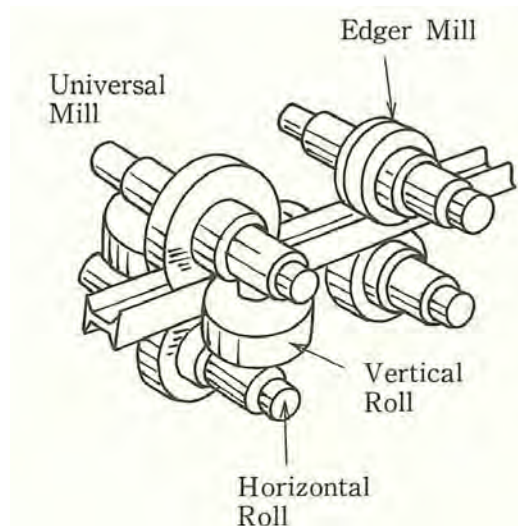


図-7.2.1 H形鋼の圧延イメージ²⁷⁾

[出典：橋本篤秀(監修)(1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版，p.109]

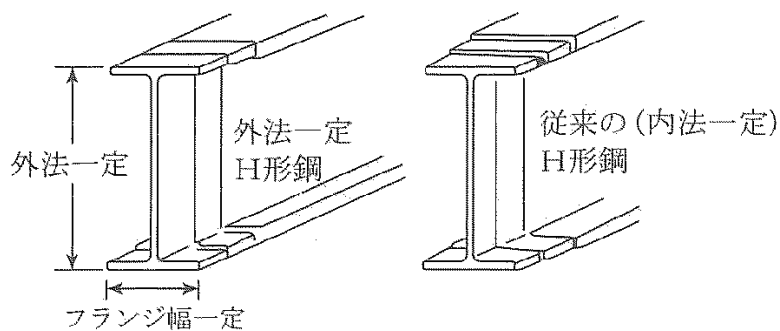


図-7.2.2 外法一定H形鋼²⁸⁾

[出典：森田耕次(監修)(2008)：新しい建築構造用鋼材[建築構造用鋼材の知識 2008]，鋼構造出版，p.103]

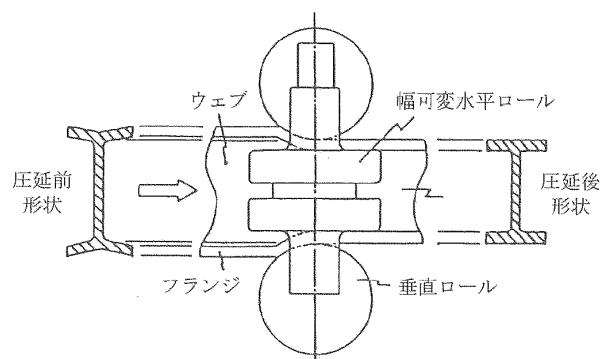
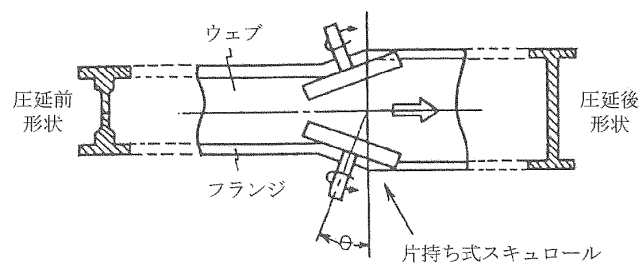


図-7.2.3 ウェブ内法拡大・縮小圧延²⁸⁾

[出典：森田耕次(監修)(2008)：新しい建築構造用鋼材[建築構造用鋼材の知識 2008]，鋼構造出版，p.104]

(2) 大型H形鋼

圧延形鋼として商品化されているH形鋼の最大ウェブ高さは長年 900mm 程度までであったが、圧延技術の発展により、1999 年にウェブ高さが 1,000mm までのH形鋼[河村ら, 2001]²⁹⁾ が、2020 年にはさらにウェブ高さが 1,200mm のH形鋼[日本製鉄, 2021]³⁰⁾ も商品化されている(図-7.2.4)。このような大型化により、梁成、梁幅に加えウェブ厚、フランジ厚にもバリエーションがあり、H形鋼で対応できる範囲は大幅に広がってきており、橋梁や建築物の大スパン化等のニーズに応えてきている。

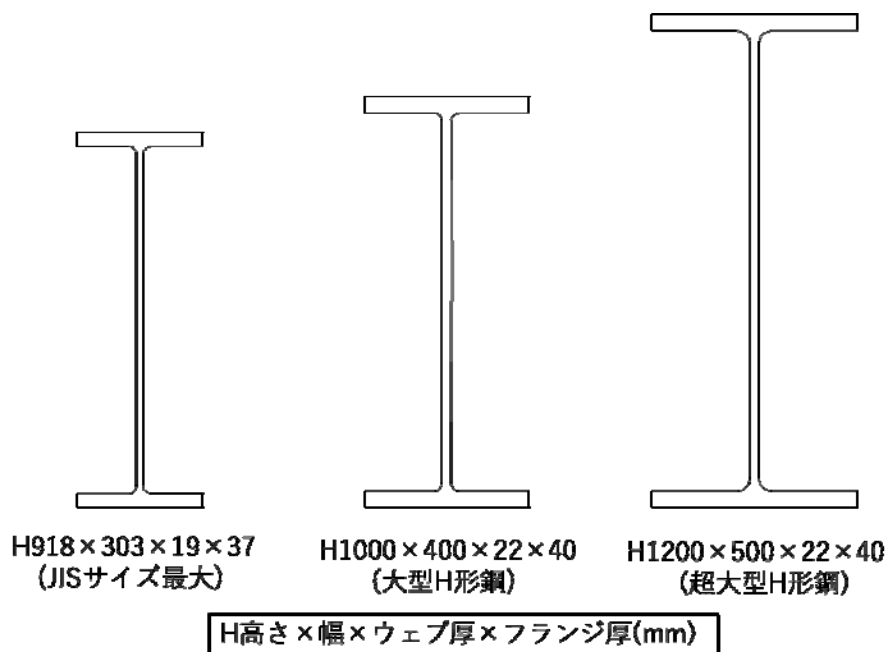


図-7.2.4 大型圧延H形鋼の例

(3) TMCP 極厚H形鋼

極厚H形鋼はフランジ、ウェブの板厚が大きいH形鋼で、主に高層建築の柱材に用いられる。1960年代に本格使用されていたが、1969年の常温におけるぜい性破壊問題の指摘等に伴い、その使用量は減少していた。その後、1990年代に入り、鉄鋼メーカーにおける製鋼・圧延技術の進歩による熱加工制御圧延(TMCP)を応用したTMCP 極厚H形鋼の開発と、利用者側における建設コスト削減ニーズにより、極厚H形鋼が高層建築物の柱材として再び設計に使用されるようになった。

厚肉大断面のH形鋼は、鋼材メーカーにより対応できる材質や寸法に違いがあるが、梁成(高さ)×梁幅(フランジ幅)で表示される寸法で、H400×400、H500×500 が現在生産されている(図-7.2.5、図-7.2.6)。柱材に用いられるH形鋼には強度の他、溶接性能とじん性が要求される。このニーズに対応するため、TMCP 極厚H形鋼では、TMCP 技術をH形鋼の製造に適用して、低炭素当量(Ceq)化することで溶接性を向上させている。このような極厚サイズでは、フランジとウェブの交点にあたるフィレット部に圧延時の圧下力が伝達されずその部分の組織が粗大化する課題があったが、ニューオキサイドメタラジー(NOM)技術と呼ばれる溶接入熱による組織の粗大化を抑制する技術(4.6.2 参照)などの適用により克服している。

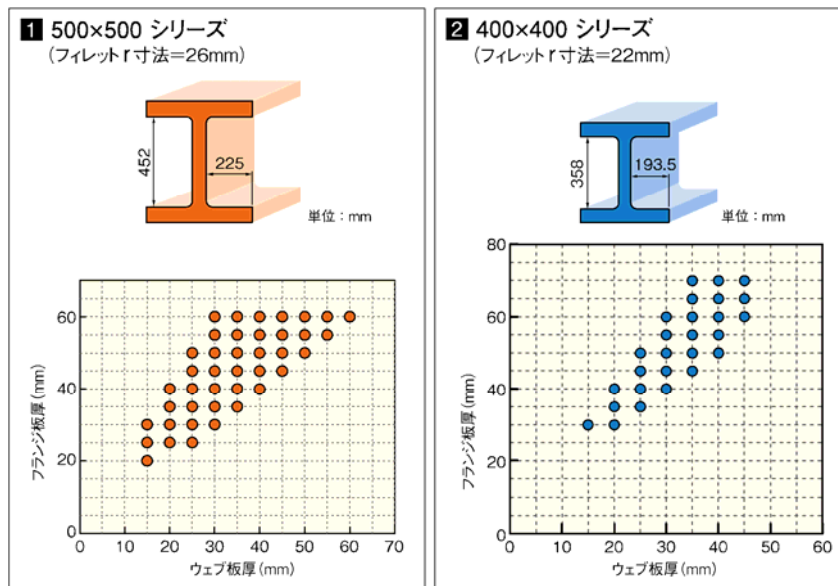


図-7.2.5 極厚H形鋼の例³¹⁾

[出典: JFE スチール(2023): JFE のH形鋼 (Cat. No. D1J-101-15) [パンフレット]]

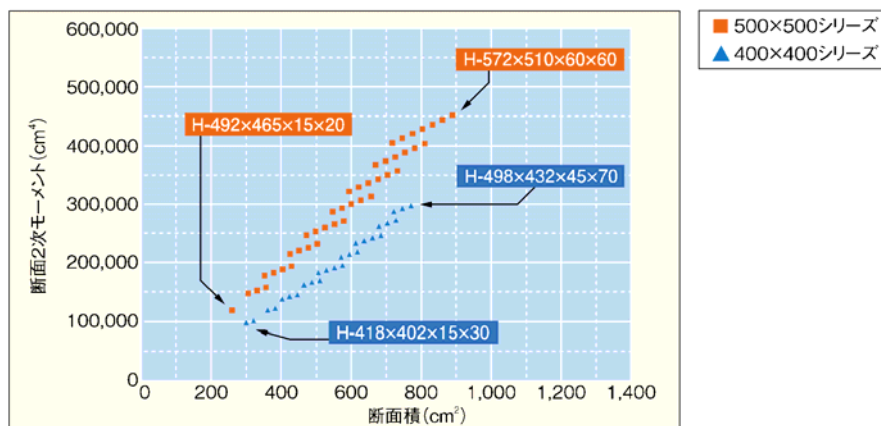


図-7.2.6 極厚H形鋼の断面性能の例³¹⁾

[出典: JFE スチール(2023): JFE のH形鋼 (Cat. No. D1J-101-15) [パンフレット]]

7.2.2 合理的な形状を有する鋼矢板

鋼矢板は、図-7.2.7に示すように、両側に嵌合爪を有する折り板状の形鋼で、板厚が8mm以上のものはH形鋼と同様に熱間圧延により製造される。ただし、H形鋼のようなユニバーサル圧延法を用いず、圧延ロールに形状に合わせた凹凸をつけた孔型(カリバーという)を作り、これらの孔型の間を配列にしたがって順次通過させ、徐々に最終的な製品形状に圧延仕上げしてゆく孔型圧延という方法によって製造される。一般には、側面の嵌合爪を互いに嵌め合わせながら地中にバイブロハンマーを用いた振動工法や圧入工法にて打ち込み、連続した地中壁を構築する。河川の護岸、土留め壁や止水壁として利用されている。

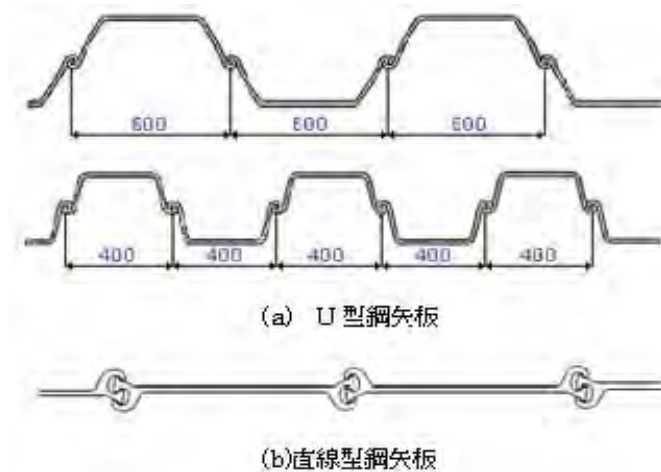


図-7.2.7 鋼矢板³²⁾

[出典：鋼管杭・鋼矢板技術協会(2022)：鋼管杭・鋼矢板技術協会 HP，鋼矢板とは]

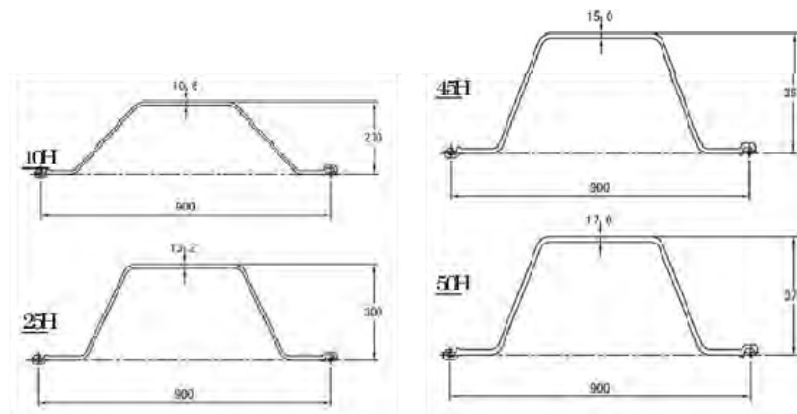


図-7.2.8 ハット形鋼矢板³³⁾

[出典：鋼管杭協会(2004)：次世代鋼矢板ハット形鋼矢板900 [パンフレット]]

鋼矢板はわが国に 1903 年頃に技術導入されたが，当初は嵌合爪の形状や矢板の断面形状についても種々の形状が商品化されていた．しかしながら，施工性や製造の効率性等の観点から，**図-7.2.7**に示すような形状の U 型鋼矢板と特殊用途向けの直線鋼矢板に集約されている．1997 年頃までは鋼矢板の最大幅は 500mm であったが，公共工事費の縮減の流れの中で圧延技術の進展にも支えられ，1997 年に 600mm 巾の U 形鋼矢板が商品化された．また，2004 年には**図-7.2.8**に示すような幅 900mm のつば付き帽子のような形状のハット形鋼矢板が商品化されるなど，大型化が進んだ．ハット型鋼矢板は，商品化の当初，従来の U 型鋼矢板のⅡw，Ⅲw 型に相当する 10H，25H の 2 種類のみであったが，現在ではさらに大型化した 45H，50H が追加され，そのラインナップが強化されている【**鋼管杭・鋼矢板技術協会，2022**】³²⁾．

鋼矢板の大形化では，壁の単位長さあたりの施工枚数は減るものの，1 枚あたりの施工性の低下が懸念されるが，ハット形鋼矢板では折り板断面の折り曲げ角度などの形状を工夫することで，地盤への貫入抵抗を減らし，従来の 600mm 幅の鋼矢板と同等の施工性を確保したとされている．また，従来の U 形鋼矢板では嵌合爪を互い違いに嵌め合わせながら壁体を構築するため，嵌合爪が壁体の中心軸上にくる．そのため，せん断力による爪部のすべりを考慮して断面効率を減ずる必要があったが，ハット形状の鋼矢板では嵌合爪が壁体の縁端に位置するため，せん断すべりによる断面効率の低減が不要となり，経済性を向上させている【**乙志ら，2015**】³⁴⁾．

7.2.3 突起付き鋼材

近年では、鋼とコンクリート、それぞれの長所を組み合わせることによって、合理的に強度、じん性を高めた合成・複合構造の建設例が多くなっている。これらの合成・複合構造では鋼材とコンクリートの一体化をどのように確保するのが重要な課題である。

コンクリートとの付着を取るために表面に突起を付けた鋼材としては、鉄筋が代表的なものであるが、鋼板や形鋼においても、コンクリートとの付着性能の向上を狙って、**図-7.2.9** 及び **図-7.2.10** に示すように圧延時に高さ 2mm 前後の表面突起を付けた形鋼や鋼板が商品化されている。フランジの外面に縞状に表面突起を設けた H 形鋼、圧延方向に縞状の突起を設けた熱延鋼板のコイルを、スパイラル状の円形の鋼管に成形・溶接して製造された外面、内面もしくは内外面突起付き鋼管等が商品化されている。突起を有しない場合に比べて、突起により付着性能は大幅に向上させることができる。

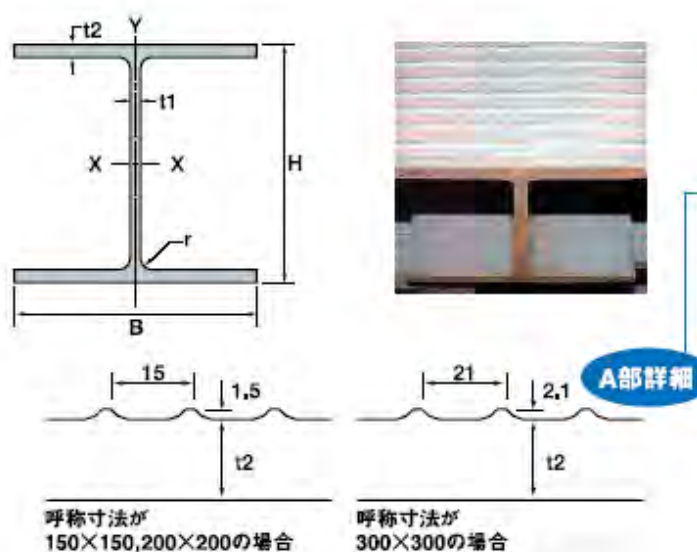


図-7.2.9 フランジ外面突起付き H 形鋼³⁵⁾

[出典：JFE スチール (2009)：ストライプ H-橋脚用 H 形鋼 (Cat. No. D1J-504) [パンフレット]]

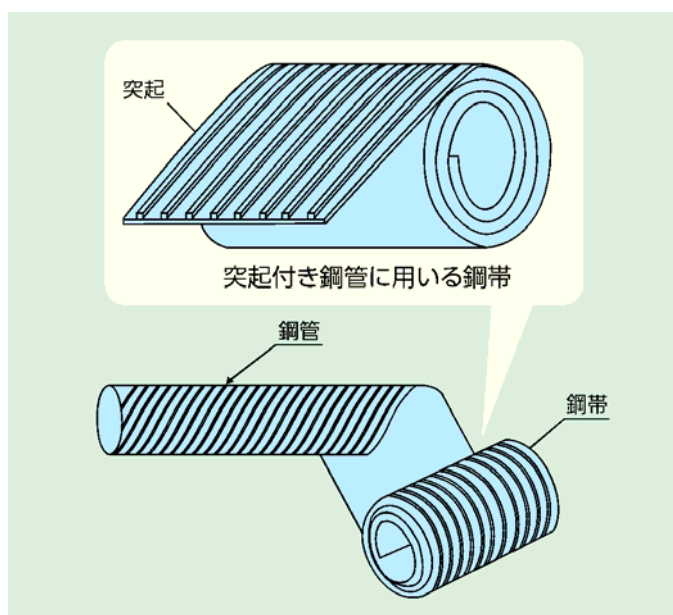


図-7.2.10 突起付鋼管³⁶⁾

[出典：日本製鉄 (2020)：日本製鉄の鋼管杭・鋼矢板工法 (Cat. No. K119_02) [パンフレット]]

また、H形鋼のフランジ間にコンクリートが充填される場合の付着をとるために、フランジの内面側、フランジとウェブの交差部に突起を設けた内面突起付きH形鋼も一部の鉄鋼メーカーで商品化されている。

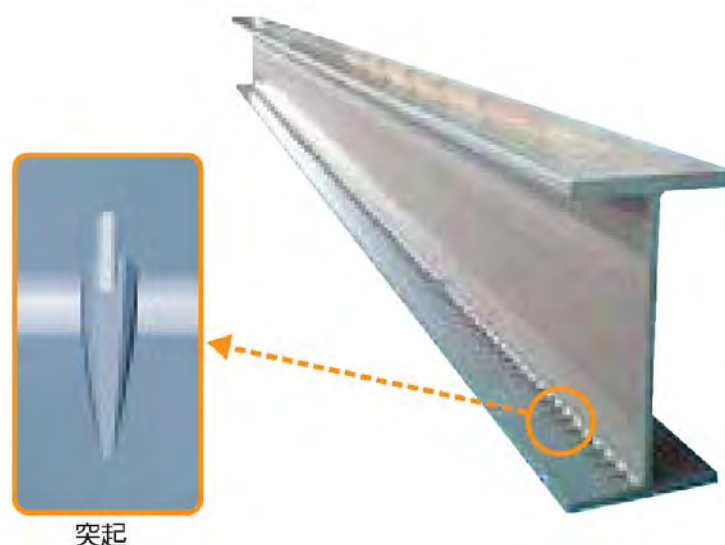


図-7.2.11 フランジ内面突起付きH形鋼³⁷⁾

〔出典：JFE スチール(2022)：J グリップH(内面突起付きH形鋼) (Cat. No. D1J-521-01) 〔パンフレット〕〕

7.2.4 LP 鋼板

鋼板は、その製造過程で材料のスラブを加熱して赤熱状態にし、圧延機のローラーを通すことで薄く長く延ばし、板状に成形している。このため、通常の鋼板は、鋼板全体にわたり板厚が一定である。これに対し、LP 鋼板 (Longitudinally Profiled Steel Plate, テーパープレートともいわれる) は、鋼板圧延中に圧延機のロールギャップ (ロールとロールの隙間) を変化させることで鋼板の板厚を圧延方向 (長手方向) に変化させた鋼板である(図-7.2.12)〔日本鋼構造協会, 1995〕³⁸⁾。製造可能寸法は圧延設備の能力に制限され、板厚、板幅等により変化する。国内の鉄鋼メーカーでは 1mあたりの最大板厚差が 4~6mm/m程度といわれていたが、近年では 8mm/m程度まで製造可能とされている。

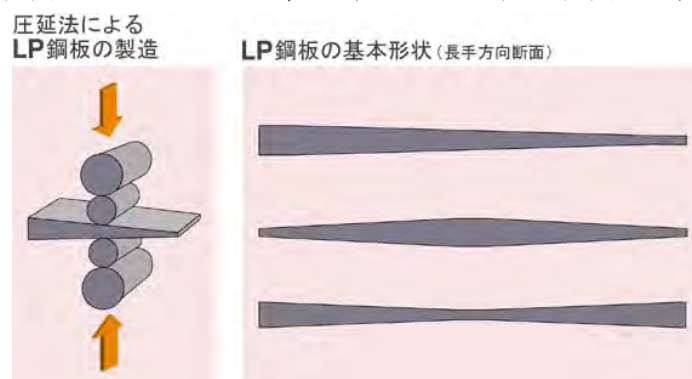


図-7.2.12 LP 鋼板の圧延と基本形状⁹⁾

〔出典：日本鉄鋼連盟(2019)：高性能鋼の概要(橋梁向け) 〔パンフレット〕〕

従来、橋梁の鈑桁などでは鋼材重量をおさえるために、設計上必要な強度を考慮して、板厚・板幅の異なる板を溶接で板継ぎし使用していたが、このことは一方で製作工数の増加をもたらしていた。また一方で、近年の合理化桁では一部材一断面とし、断面変化を設けずに加工度が低減されているが、板厚は部材の中で応力が最も大きくなる断面で決まっており、鋼重増となっている。LP 鋼板を用いることにより、板継ぎ無しで連続的に板厚を変化させることが可能となるため、溶接箇所の減少や鋼

材重量削減が可能となる(図-7.2.13)。造船分野の項(6.2.2(3)参照)で述べたように、LP 鋼板は当初、造船用の鋼材として使用されていたが、1984 年頃から欧州において橋梁に採用され始めた[橋梁と基礎, 1989]³⁹⁾。わが国では、少数主桁橋のような大断面桁において、LP 鋼板は構造の単純化、鋼材重量軽減に効果的であり、こうしたニーズにマッチするものとして採用された例がある。

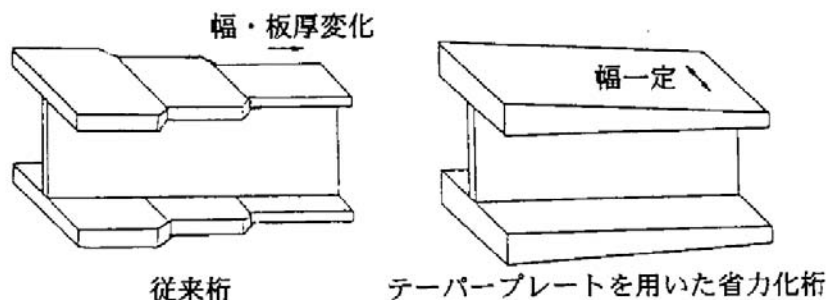


図-7.2.13 LP 鋼板の利用法の例⁴⁰⁾

[出典：坂田豊，藤井康盛，鈴木昭信，高木優任，西海健二，楠隆，都築岳史，宇佐見明(1998)：橋梁用途の新材料および新建材，新日鐵技報，第 368 号，pp. 44-52]

図-7.2.14 は橋梁の桁での LP 鋼板の効果的な適用方法を模式的に表したものである[堀田ら，2000]⁴¹⁾。この図から明らかなように、断面力の変化があまりないところに使用しても板厚差が小さいために鋼重の削減効果は大きくなく、板厚差の大きくなる部分，例えば中間支点付近であるとか、応力の交番部付近に LP 鋼板を用いれば鋼重低減効果が大きく、コスト縮減に効果的である。また、橋梁分野においては桁への適用ばかりでなく、橋脚基部の曲げモーメント変化に合わせて板厚を変化させた LP 鋼板を用いることで大規模地震時の鋼材の塑性化領域を広げ、橋脚のエネルギー吸収を向上させ耐震性能の向上を図る手法[池内ら，2001；上野谷ら，2002]^{42)，43)}なども提案されている。

ただし、一般的な LP 鋼板の勾配は 4mm/m 以下であり、橋梁で求められる勾配よりも小さいことが多いため、最近の適用例はほとんどない。

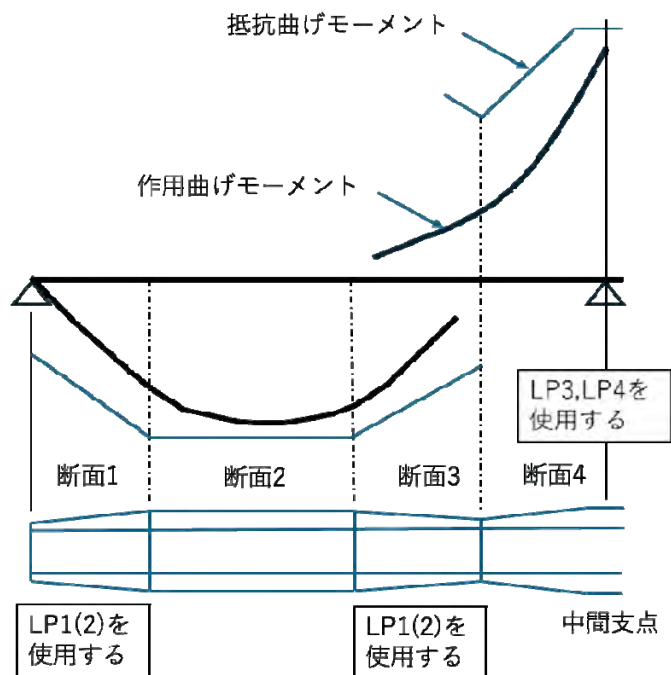


図-7.2.14 断面構成⁴¹⁾を参考に編集作成

[出典：堀田毅，工藤純一，谷俊寛，西村宣男(2000)：鋼橋への LP 鋼板の適用，橋梁と基礎，Vol. 34，No. 4，pp. 11-14]

第7章 参考文献

- 1) 永井義規(1990)：ニューRC 用高強度鉄筋と最近の動向，第 134 回西山記念技術講座，土木・建築材料の現状と将来，(社)日本鉄鋼協会，pp.103-126
- 2) 上田修三(1994)：最近の建築・土木用高機能鋼材，鋼構造論文集，第 1 巻，第 1 号，PP.127-141
- 3) 口石茂松(1995)：条鋼製品の最近の動向，第 157・158 回西山記念技術講座，21 世紀のインフラを支える条鋼製品，pp.1-21
- 4) 水口和之，芦塚憲一郎，大塚一雄，天野玲子(1999)：スーパーRC 工法，橋梁と基礎，Vol.33，No.8，pp.141-144
- 5) 上東泰，山本徹(2011)：新東名高速道路佐奈川橋の設計と施工—高強度材料を用いた PRC 箱桁ラーメン橋—，コンクリート工学，Vol.49,No.7，pp.34-40.
- 6) 富山茂樹，今塩屋勝，吉川真仁，池谷博文(2017)：高さ125 mの橋脚を有する東海北陸自動車道鷺見橋（Ⅱ期線）工事—ハーフプレキャストを適用した橋脚の急速施工—，コンクリート工学，Vol.55，No.10，pp.894-899.
- 7) 高橋稔彦，樽井敏三，今野信一(1994)：橋梁ケーブル用 180kgf/mm² ワイヤの開発，鋼構造論文集，第 1 巻，第 4 号，pp.119-126
- 8) 日本鋼構造協会(2021)：構造用ケーブル材料規格，平行線ストランドJSSⅡ06-2021.
- 9) 日本鉄鋼連盟(2019)：高性能鋼の概要(橋梁向け) [パンフレット]
- 10) 真鍋敏之，山崎真吾，磯新，疋田尚志，大羽浩，西田世紀，松井直樹(2016)：環境負荷低減型高強度 PWS ワイヤ用線材の開発，新日鉄住金技報，第 406 号，pp.70-76.
- 11) 樽井敏三，西田世紀，吉江淳彦，大羽浩，浅野厳之，落合征雄，高橋稔彦(1999)：2000MPa 級亜鉛めっき鋼線及び 2300MPa 級 PC ストランド用線材の開発，新日鉄技報，第 370 号，pp.45-50
- 12) 松山晋作(1989)：遅れ破壊，日刊工業新聞社
- 13) 日本橋梁建設協会(2000)：遅れ破壊とその対策
- 14) 日本鋼構造協会(1998)：鋼構造技術総覧[建築編]，技報堂出版
- 15) 宇野暢芳(2000)：現実となった F14T 超高力ボルト，建築と社会，pp.
- 16) 窪田伸，宮川敏夫(2003)：トルシア形超高力ボルト，JSSC，No.49，2003.7
- 17) 山崎真吾，久保田学，樽井敏三(1999)：遅れ破壊特性の評価方法と耐遅れ破壊高強度鋼の開発，新日鉄技報，第 370 号，pp.51-55
- 18) 樽井敏三，久保田学(2011)：水素脆化評価法と耐遅れ破壊特性向上技術，新日鉄技報，第 391 号
- 19) 玉越隆史，石尾真理，大久保雅憲，加藤浩一，氏本 敦ほか(2013)：超高力ボルトの橋梁分野への適用に向けた各要因の影響，土木技術資料，Vol.55，No.5，pp.34-37
- 20) 横井芳輝，水口知樹，玉越隆史(2015)：超高力ボルトの鋼道路橋への適用性に関する実験，土木技術資料，Vol.57，No.7，pp.6-9
- 21) 日鉄ボルテン(2022)：日鉄ボルテンホームページ，トルシア形超高力ボルト [SHTB] (<http://www.bolten.co.jp/products/product/101-detail/349-2018-01-29-06-46-22>) [2022.9確認]
- 22) 田代均，樽井敏三(2003)：ハイテンスチールコードの現状，新日鉄技報，第 378 号，pp.77-80
- 23) 山崎真吾，浅川基男(2018)：鋼炭素鋼線の歩みと最新動向—伸線技術分科会，ぶらすとす(日本塑性加工学会会報誌)，Vol.1,No.3,pp.45-49.
- 24) 太平洋セメント(2020)：ダクトル [パンフレット]
- 25) 志賀勝利(1990)：土木建築用新形鋼—H形鋼と鋼矢板—，第 134 回西山記念技術講座，(社)日本鉄鋼協会，pp.77-102
- 26) 山中栄輔(1995)：H形鋼圧延設備技術および製造技術の進歩と品質の向上，第 157.158 回西山記念技術講座，(社)日本鉄鋼協会，pp.23-58
- 27) 橋本篤秀(監修)(1993)：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版，p.109

- 28) 森田耕次(監修)(2008)：新しい建築構造用鋼材[建築構造用鋼材の知識2008]，鋼構造出版
- 29) 河村有秀，山本晃輝，今村晴幸(2001)：超大型外法一定H形鋼 1000，950mm シリーズ，川崎製鉄技報，Vol.33,No.3,pp.128-131.
- 30) 日本製鉄(2021)：超大型外法一定H形鋼 メガハイパービーム®[パンフレット]
- 31) JFEスチール(2023)：JFEのH形鋼 (Cat.No.D1J-101-15) [パンフレット]
- 32) 鋼管杭・鋼矢板技術協会(2022)：鋼管杭・鋼矢板技術協会 HP，鋼矢板とは
(<http://www.jaspp.com/kouyaita/>) [2022.9.8確認]
- 33) 鋼管杭協会(2004)：次世代鋼矢板ハット形鋼矢板 900 [パンフレット]
- 34) 乙志和孝，原田典佳，西山輝樹，鈴木崇，片岡直人，横山秀幸，山下浩，三浦洋介(2015)：ハット形鋼矢板のラインナップ拡充 (NS-SP-45H・50H)，新日鐵住金技報，No.403, pp.56-61.
- 35) JFEスチール(2009)：ストライプH橋脚用H形鋼 (Cat.No.D1J-504) [パンフレット]
- 36) 日本製鐵(2020)：日本製鉄の鋼管杭・鋼矢板工法(Cat.No.K119_02) [パンフレット]
- 37) JFEスチール(2022)：JグリップH(内面突起付きH形鋼) (Cat.No.D1J-521-01) [パンフレット]
- 38) 日本鋼構造協会(1995)：テーパプレート，新製品・新工法，JSSC，No.17, pp.42-44
- 39) 橋梁と基礎 海外文献研究グループ(1989)：LP プレートの橋梁への適用，橋梁と基礎，Vol.23, No.9, pp.50-51
- 40) 坂田豊，藤井康盛，鈴木昭信，高木優任，西海健二，楠隆，都築岳史，宇佐見明(1998)：橋梁用途の新材料および新建材，新日鐵技報，第 368 号，pp.44-52
- 41) 堀田毅，工藤純一，谷俊寛，西村宣男(2000)：鋼橋への LP 鋼板の適用，橋梁と基礎，Vol.34, No.4, pp.11-14
- 42) 池内智行，能瀬正憲，西村宣男，高木優任(2001)：テーパ付き鋼板を用いた鋼製橋脚の耐震性能向上策，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集第 1 部 (A)，pp.648-649
- 43) 上野谷実，中村雅樹，福本秀士，山本定弘(2002)：板厚テーパ箱形断面柱の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol.9, No.33, pp.25-35

8. 構造物の耐久性を向上させる高性能鋼

8.1 建設分野における耐食性金属材料

鋼材にはさび(錆, rust)がつき物であるが、さびが発生すると外観を損なうとともに、機能の低下が生じる。さらにさびが進行すると断面欠損が生じ強度が確保できなくなるなどの問題を生じる。社会資本の蓄積が進み、その高齢化が進行するのに伴い、より長期間にわたり使用可能で、維持補修の手間が極力かからない耐食性材料への期待が高まっている。また、当初の設計時においてもライフサイクルコスト (Life Cycle Cost : LCC) をミニマム化するとの観点から、使用する材料や構造の検討がなされるようになってきている。そのため、LCC の低減、最適化を実現できるような高耐食性を確保することが可能な材料への期待が高まってきている。

8.1.1 耐候性鋼（ニッケル系高耐候性鋼）

耐候性鋼は、銅(Cu)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)等の耐候性の向上に有効な元素を微量添加した鋼材であり、生じるさびが緻密で保護性を有するために、時間の経過とともに腐食速度が低下する鋼材である【市川ら，2005；日本鉄鋼連盟ら，2010；日本橋梁建設協会，2021】^{1) ~3)}。このため、構造物として長期間無塗装で用いることができ、塗装の塗り直しの維持管理費用が低減できる利点を有する。耐候性鋼は、1933年に米国のUS スチール社においてCOR-TEN 鋼として誕生し、わが国には1960年ごろに技術導入され、わが国独自の研究開発の知見を反映して、1968年に溶接構造用耐候性鋼材として、JIS 規格が制定された。もともとの耐候性鋼は、塗装の耐久性を向上させる目的で開発されたものであるため、1983年のJIS改正では、化学成分の異なる塗装用(SMA-P 種)と無塗装用(SMA-W 種)の2種類が規定された。その後、幾度かの改正を経て現在の規格(JIS G 3114)となったが、道路橋については塗装用の効果が明確でなかったこともあってほとんど使われることがなくなり、1989(平成2)年の道路橋示方書からは無塗装仕様(SMA-W)のみが使用されるようになった。このため、今日、耐候性鋼と言えば、一般に無塗装仕様(SMA-W)のことを指す。

耐候性鋼は、溶接構造用鋼材としての優れた特性を有するとともに、適切な計画、設計、施工、維持管理により無塗装で優れた防食性能を発揮するため、橋梁のLCCの観点から魅力的な素材である。ただし、表層に生成するさび層の状態は環境条件によって変化し、大気中の塩分が多い環境や鋼材表面に湿潤状態が継続するような環境に曝された場合には、保護性のあるさびは生成せず、腐食速度の速い層状の剥離さびが生じる。このようなことから、橋梁分野では、広範囲の暴露試験結果をもとに、飛来塩分量を目安とした指針【建設省土木研究所ら，1993】⁴⁾ が与えられており(飛来塩分量が0.05mdd (mg/dm²/day) 以下で適用可能)、図-8.1.1に示すように海岸線からの離岸距離による適用基準が与えられている。また寒冷地においてはスパイクタイヤの使用が禁止されて以来、融雪剤の散布が増加しており、このような地域においてもその使用に当たっては注意を要する。

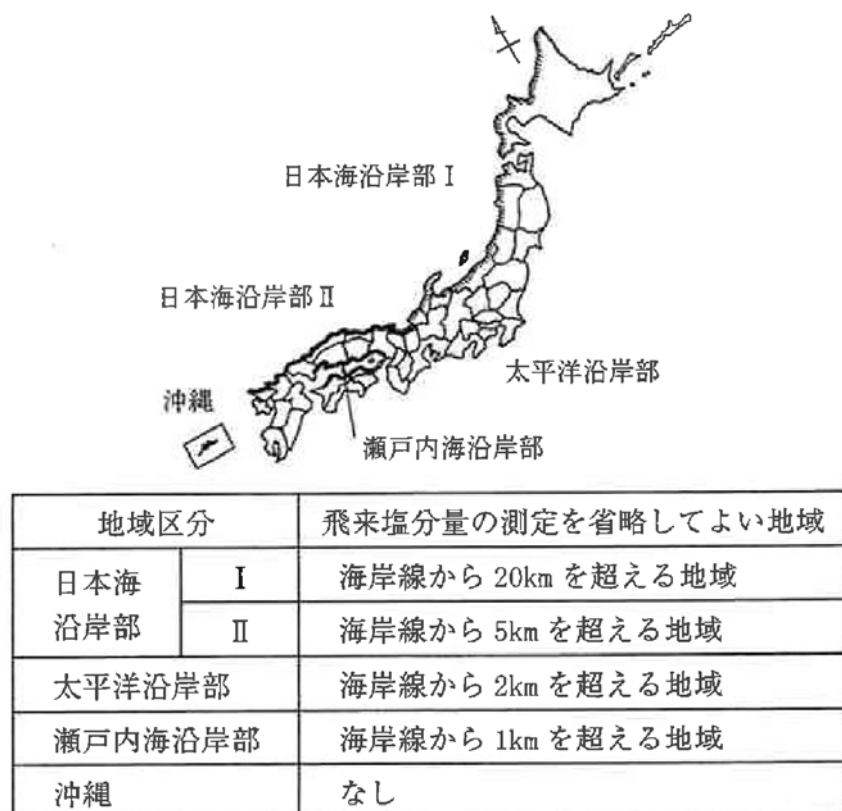


図-8.1.1 耐候性鋼材の無塗装使用可能地域⁵⁾

[出典：日本道路協会(2017)：道路橋示方書(Ⅱ鋼橋・鋼部材編)・同解説，丸善出版]

このような背景のもと，海岸線が多い日本特有の地形，気候風土に対応すべく，また融雪剤を散布する地域など，飛来塩分量0.05 mdd 以上の地域でも適用できる耐候性鋼としてニッケル(Ni)系高耐候性鋼が開発され[宇佐見ら，2002]⁶⁾，数多くの適用実績がある。

従来のJIS耐候性鋼材SMA(Steel Marine Atmosphericの略)では，飛来塩分の多い環境において生成したさび層の分析がなされており，塩化物イオン(Cl⁻)がさび層の内面から地金の界面にまで侵入，濃縮し，さび層の外面にはナトリウムイオン(Na⁺)が分布していることが報告されている(図-8.1.2)。このことから，さび層内面では，低PH，高塩化物雰囲気となり，腐食が進行するものと考えられている。

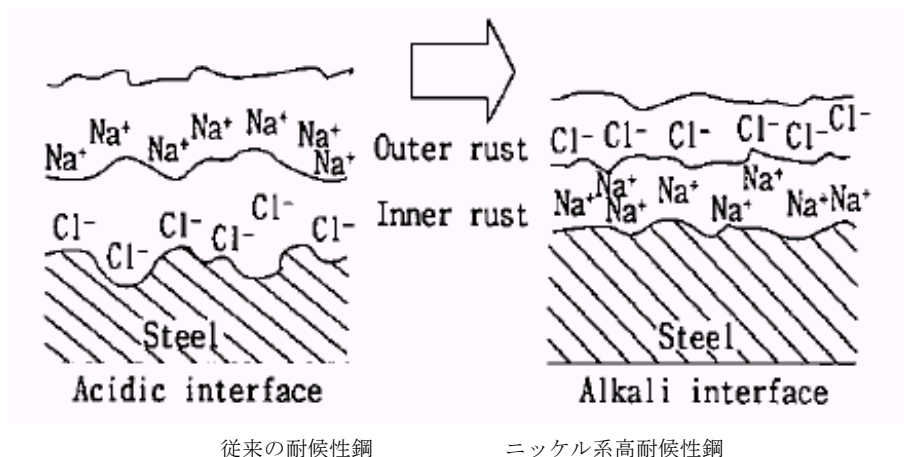


図-8.1.2 耐候性鋼の塩化物イオンの分布⁶⁾

[出典：宇佐見明，紀平寛，楠隆(2002)：耐塩害性を高めた 3%Ni 耐候性鋼，新日鐵技報，第 377 号.]

一方でニッケル(Ni)系高耐候性鋼においても同様に、飛来塩分の多い環境において生成したさび層の分析がなされているが、塩化物イオン(Cl⁻)はさび層の外層に留まっており、ナトリウムイオン(Na⁺)がさび層内面側に凝縮していることが報告されている。これは、ニッケル(Ni)及び銅(Cu)の作用によるものと考えられおり、これによりさび内面および地金界面は高アルカリで低塩化物イオン(Cl⁻)環境となることから、耐候性元素であるニッケル(Ni)、銅(Cu)により緻密で保護性の高いさびが地金の界面に生成されるものと考えられている【宇佐見ら，2002】⁶⁾。

表-8.1.1にニッケル(Ni)系高耐候性鋼の成分例を示す【宇佐見ら，2002；川野ら，2002；鹿毛ら，2004】^{6)～8)}。クロム(Cr)無添加を基本として、ニッケル(Ni)は1.0～3.0%程度添加されたものが開発されている。比較的低ニッケル(Ni)のものでは、それを補うためモリブデン(Mo)やチタン(Ti)が添加されている。その他の成分はJIS G 3114溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材に規定される範囲内として、低炭素(C)量で溶接性や機械的性質についても従来の耐候性鋼材と同等の性能を有するものとされている。

表-8.1.1 ニッケル(Ni)系高耐候性鋼(490MPa級)の化学成分例(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	P _{CM}
鋼種1(A社)	0.06	0.20	0.85	0.005	0.002	0.32	3.05	0.02	—	—	0.18
鋼種2(B社)	0.02	0.29	0.92	0.006	0.005	0.37	2.68	—	—	—	0.14
鋼種3(B社)	0.07	0.32	0.71	0.033	0.002	N/A	1.45	—	0.32	—	0.16
鋼種4(C社)	0.05	0.25	1.09	—	—	1.00	1.02	0.04		0.047	0.19
JIS G 3114	<0.18	0.15 /0.65	<1.40	< 0.035	< 0.035	0.3 /0.5	0.05 /0.30	0.45 /0.75	—	—	—

高飛来塩分の環境下において、従来の耐候性鋼JIS SMAとニッケル(Ni)系高耐候性鋼の腐食量を実環境での暴露試験により比較したものを図-8.1.3に示す【宇佐見ら，2002】⁶⁾。ニッケル(Ni)系高耐候性鋼は従来の耐候性鋼と比べて腐食量が極めて小さく、塩分飛来量が高い環境においても、保護性さびの形成により高い耐候性を示すことがわかる。

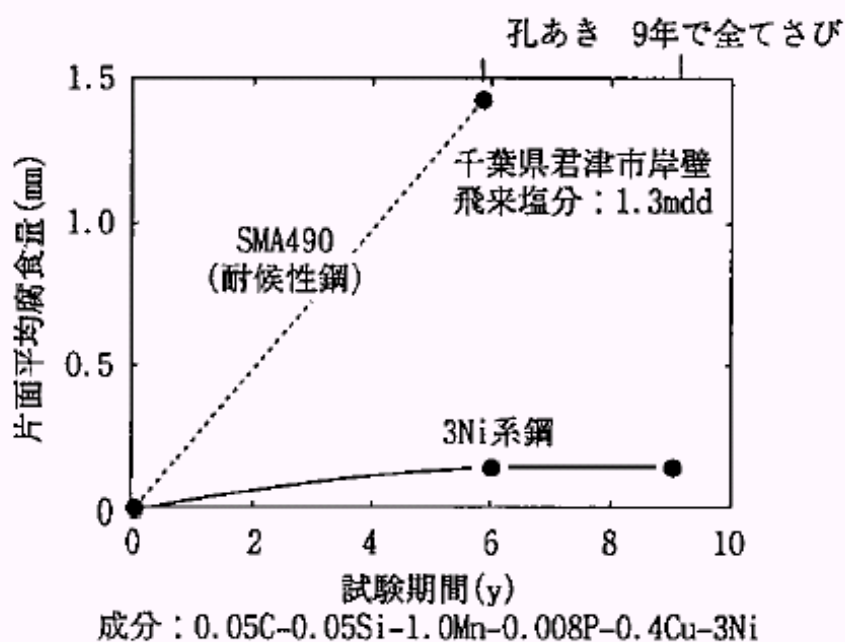


図-8.1.3 ニッケル(Ni)系高耐候性鋼の腐食量－時間曲線⁶⁾

〔出典：宇佐見明，紀平寛，楠隆(2002)：耐塩害性を高めた3%Ni 耐候性鋼，新日鐵技報，第377号.〕

従来、耐候性鋼では保護性の高いさびが一旦形成されると、腐食性の環境においても腐食の進行が停止するというような誤解がなされていた面もあった。しかしながら、合金元素の添加により耐食性を高めた高耐候性鋼においても、飛来塩分量、温度、湿度等の環境条件に応じて徐々に腐食は進行する。したがって、使用する場所での環境条件（飛来塩分量、温度、湿度、濡れ時間、風速、硫黄酸化物(SO_x)量など）と使用する鋼材の合金量に応じて、当該鋼材の腐食の進行を評価して、構造物の設計に反映することが非常に重要である。最近では、これらの条件から耐候性鋼材の100年程度の長期腐食減耗量を予測する手法が各種開発されており【紀平ら，2004；鹿毛ら，2006】^{9)・10)}，より精緻に耐久性を評価することができるような環境が整えられている。

8.1.2 ステンレス鋼

ステンレス鋼(Stainless steel)は、耐食性を向上させる目的で、鉄(Fe)にクロム(Cr)，あるいはクロム(Cr)とニッケル(Ni)を主成分として添加した高合金鋼(合金成分が10%を超えるものを高合金鋼，それ以下を低合金鋼という)である。一般にはクロム(Cr)の含有量が約10.5%以上のものをステンレス鋼という【日本規格協会，2000】¹¹⁾。ステンレスとはStain(さび)-less(少ない)，すなわち「さびが少ない」という意味で，その名が示す通り一般の鋼に比較すると極めて優れた耐食性を有する材料である。しかしながら，特定の環境，使用条件の下ではさびることがあるので正しい使い方をする必要がある。ステンレス鋼がさびにくいのは，鉄(Fe)にクロム(Cr)を添加するとクロム(Cr)が酸素(O)と結合して鋼の表面に薄い保護被膜(不動態被膜という)を生成し，これがさびや汚れの進行を防ぐ役割を果たすためである(図-8.1.4)。また，この不動態被膜は100万分の3mm程度のごく薄いものであるが，大変強靱で，一度壊れても，周囲に酸素(O)があれば自動的に再生する機能をもっている。

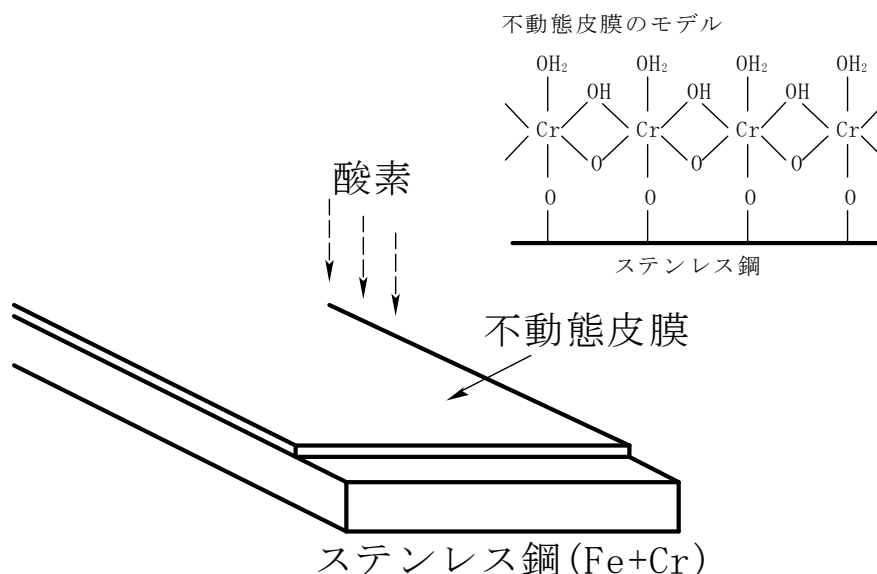


図-8.1.4 ステンレス鋼表面の不動態被膜

ステンレス鋼は，その金属組織により主にマルテンサイト系，フェライト系，オーステナイト系および二相系に分類される。このうち，フェライト系およびマルテンサイト系のステンレス鋼は一般に鉄(Fe)-クロム(Cr)合金であり，オーステナイト系ステンレス鋼は鉄-クロム-ニッケル(Fe-Cr-Ni)合金である。また，この他にオーステナイトとフェライトの二相組織を持つ二相ステンレス鋼や，析出強化を利用して強度の向上を図った析出硬化型ステンレス鋼がある。表-8.1.2に各ステンレス鋼の特徴と主な用途をまとめたものを示す。

表-8.1.2 各種類別の代表鋼種の特長と用途¹²⁾を参考に編集作成

[出典：ステンレス協会(2022)：ステンレス協会 HP]

	ステンレスの分類	代表的鋼種(主成分)	耐食性* (孔食指数 Cr+3.3Mo)	特長	主な用途
400系	マルテンサイト系 (磁性)	SUS410 (13%Cr)	★ (12.5)	焼入れ可能 汎用鋼種	排ガス処理設備, マフラー, ボルト
		SUS440 (18%Cr)	★★ (17.0)	耐磨耗性大	軸受, ベアリング, 刃物
	フェライト系 (磁性)	SUS430 (18%Cr, 低炭素)	★★ (17.0)	耐食性, 加工性, 溶接性に優れる 汎用鋼種	厨房用品, 建築内装 自動車部品, 化学プラント
		SUS444 (19Cr2Mo-Ti, Nb, Zr 低炭素)	★★★★ (25.0)	耐食性に優れる	温水機器, 貯水槽, 排気系部品
300系	オーステナイト系 (非磁性)	SUS304 (18%Cr-8%Ni)	★★★ (19.0)	耐粒界腐食性良 成形性, 溶接性良, 汎用鋼種	建材, 構造材, 内外装材, 化学プラントタンク
		SUS316 (18%Cr-12%Ni-2%Mo)	★★★★ (25.0)	耐食性に優れる じん性, 低温, 高温 強度大	工業設備, 圧力容器, 食品工業, 原子炉機器, 水管橋, 水道管
	2相系 (オーステナイトと フェライトの複合) (磁性)	SUS329J1 (25%Cr-4.5%Ni-2%Mo)	★★★★★ ★ (31.0)	耐海水性, 耐応力, 耐食性に優 れる	海水熱交換器, 化学プラント, バルブ, 水門, 排煙脱硫装置
		SUS329J4L (25%Cr-6%Ni-3%Mo-N-低炭素)	★★★★★ ★ (32.0~ 35.0)	耐食性に優れる 高強度(標準品より 2倍の強度)	公害防止機器, ガス・石油開発の掘削プラ ットホーム
	析出硬化系	SUS630 (17Cr-4Ni-4Cu-Nb)	★★ (16.0)	高強度, 析出硬化性 を持たせた鋼種	スプリング, ボルト, バルブ, 航空機部品, 建築用金具, ヨット
		SUS631 (17Cr-7Ni-Al)	★★ (17.0)	耐食性, 溶接性	シャフト スチールベルト

*耐食性の指標は、孔食指数 (PRE : Pitting Resistance Equivalent) で示す。PRE = %Cr + 3.3%Mo

ステンレス鋼として最も代表的なものは、オーステナイト系の 18%クロム-8%ニッケル(18Cr-8Ni) ステンレス鋼であり、全製造量の 60%を超える。オーステナイト系ステンレスは一般に延性およびじん性に富み、曲げ加工性が良好で溶接性も優れている。このため、構造材に用いられるのもオーステナイト系ステンレス鋼で、その代表的な鋼種である SUS304(18Cr-8Ni ステンレス)が多く用いられている。構造用ステンレスとして用いられるのは、SUS304 の他に、モリブデン(Mo)を添加して耐食性を高めた SUS316、窒素(N)およびニオブ(Nb)を添加して高強度化した SUS304N2 などがあり、建築の骨組み構造などに、耐食性や意匠性を併せ持った構造物として適用されている[ステンレス建築構造設計基準作成委員会, 2001]¹³⁾。その機械的性質を表-8.1.3、応力-ひずみ曲線を図-8.1.5 にそれぞれ示す。ステンレス鋼は炭素鋼に見られるような降伏棚を示さず、ラウンドハウス型の応力-ひずみ曲線を示す。このため JIS では 0.2%オフセット耐力が規定されているが、JIS が定めた建築構造用ステンレスの規格(JIS G4321)では、0.1%オフセット耐力が採用されている。これは、上記応力-ひずみ曲線の特性から、0.2%オフセット耐力時では接線剛性の低下がかなり大きいことを配慮したものとされている。

表-8.1.3 構造用ステンレス鋼の機械的性質(概要)

項目	単位	SUS304	SUS316	SUS304N2	SM400	SM490
密度	g/cm ³	7.93	7.98	7.93	7.85	
線膨張係数	×10 ⁻⁶ /°C	17.3	16.0	17.3	12.0	
熱伝導率	W/m・K	16	16	16	50	
ヤング係数	×10 ⁵ N/mm ²	1.93	1.93	1.93	2.05	
ポアソン比	-	0.3	0.3	0.3	0.3	
		ステンレス建築構造協会規格			JIS 規格*	
降伏点又は 0.1%耐力	N/mm ² 下限/上限	235/-	235/-	325/440	235/-	315/-
引張強さ	N/mm ² (下限)	520	520	690	400	490
降伏比	%(上限)	60	60	-	-	-
伸び	%(下限)	35	35	35	21	21

*16<t<40 の時の規格値

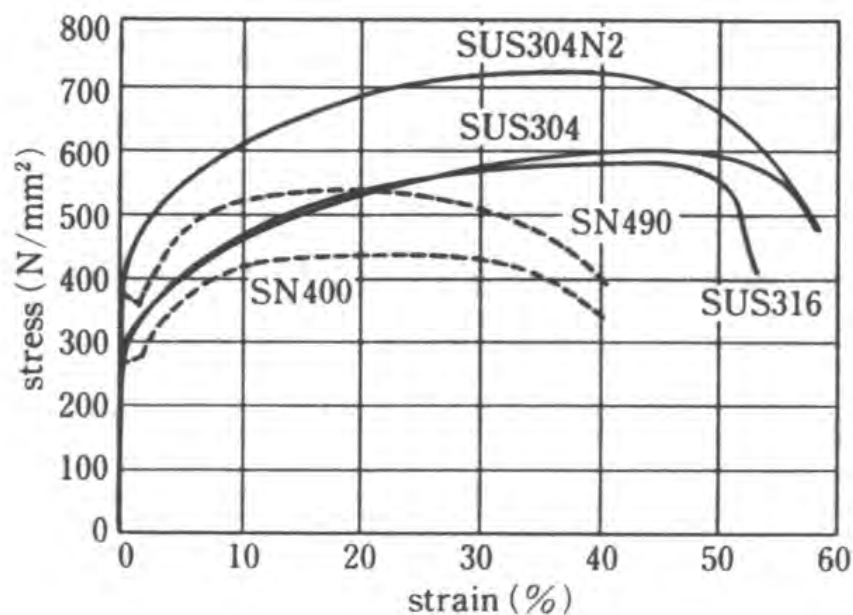


図-8.1.5 ステンレス鋼の応力—ひずみ関係の例¹³⁾

[出典：ステンレス建築構造設計基準作成委員会(2001)：ステンレス建築構造設計基準・同解説(第2版)，技報堂出版]

一方、ステンレス鋼は酸素(O)が十分に存在する環境では不動態被膜に均一に覆われ高い耐食性を示すが、ステンレス鋼を海水中で使うと貝などの付着物によりステンレス鋼の隙間の不動態被膜が不安定となることがある。これは「すき間腐食」と呼ばれる現象で、以下のようなメカニズムで生じる(図-8.1.6)。付着物との隙間のステンレス鋼表面から鉄(Fe)やクロム(Cr)が溶けだし、水の水酸化イオン(OH-)と結合する。すると水が分解して水酸化イオン(OH-)が消費され水素イオン(H+)が残って隙間に蓄積されることでPHが低下し酸性となる。不動態被膜はあるPH以下となると不安定となり破壊される。その結果、その部分が激しく腐食する。

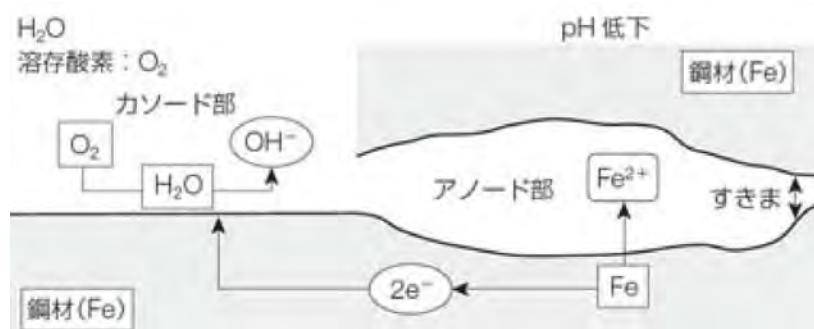


図-8.1.6 すき間腐食のメカニズム¹⁴⁾

[出典：土木学会(2019)：大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策，鋼構造シリーズ 30]

これに対し，ステンレス鋼に，十分な量のクロム（Cr），ニッケル（Ni），モリブデン（Mo）等を増量添加し，不動態被膜を強化させることにより，耐食性を強化したスーパーステンレスと呼ばれる特殊な耐海水ステンレス鋼も開発されている．その代表的な成分系は 20Cr-18Ni-6Mo-N でチタンにも匹敵する耐食性を有しているとされている．腐食環境として非常に厳しい海洋構造物の防食方法として，耐海水性ステンレス鋼の薄板を鋼構造物の表面にライニングした工法[伊藤ら，2002；佐藤ら，2002]^{15)・16)}等も開発されている．

表-8.1.2 に示したように，ステンレス鋼には多くの種類があり，耐食性と強度に合わせて材料選択がなされている．従来，建築，土木などの構造物にはオーステナイト系の SUS304 や SUS316 が主に用いられてきたが，SUS304 などのオーステナイト系の耐力は，構造用鋼材の SM400 クラスの強度しかない．このため，ステンレスは高い耐食性を有するものの強度が低く高価なので，土木構造物での利用は進んでこなかった．従来のオーステナイト系に代わり，高価な添加元素を削減し，SM490 クラスの耐力を有する材料としてリーニ二相系ステンレス鋼（SUS 323L，23%Cr-4%Ni-N）が開発され，材料コストの低減による経済合理性の追求が図られている[岡田ら，2017]¹⁷⁾．近年，わが国の橋梁でも，親水テラスの歩道橋や木造歩道橋の橋脚の水中の補強部材などに適用された実績がある[吉川，2018；赤澤ら，2019；横溝，2022]^{18)～20)}．

また，これまでの研究成果を踏まえて，構造用ステンレス鋼を土木構造物に適用するにあたっての設計・製作・施工における具体的な材料選択や設計計算の方法，維持管理の考え方が示された，「ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針（案）」[日本鋼構造協会，2015]²¹⁾もまとめられており，実構造物への適用環境が整えられてきている．

8.1.3 チタン

チタン(Ti)は地殻中で 9 番目に多い元素で，1790 年に英国で発見され，ギリシャ神話に出てくる地球の最初の子供 Titans にちなんで，チタンと名付けられた．チタン(Ti)は，軽くて丈夫な金属で，溶解する温度が主要な金属の中で最も高い 1668℃であり，その表面に化学的に安定で高い密着性を有する保護性の酸化被膜が生成されるため，海水中での耐食性は白金(Pt)に次ぐ強さを誇っている．また，生体との適合性が高く人体に優しいことが知られているが，精錬が難しく，天然に存在する二酸化チタン（TiO₂）から純粋なチタン（Ti）を取り出す方法が見つかったのは，チタン(Ti)発見から 100 年以上たった 1910 年であり，工業用に大量生産が可能になったのは第二次世界大戦後（1948 年）のことである．また非常に高価であるため，現在でもコストより性能が重視される場面で多く使われている．具体的な例では，戦闘機や潜水艦，ロケットなどに大量に使用されてきた．図-8.1.7 にチタン(Ti)の特性を他の金属材料と相対比較したものを示す．比重は鉄(Fe)の約 60%で，ヤング率は約 50%，熱伝導率が約 30%となっている．強度はほぼ同程度で，成形性については，深絞り加工性(Deep drawing：6.3.3(1)参照)は良いが，鋼にくらべて加工時のスプリングバックが大きく，張出加工(Stretch expand forming：板材に金型などで圧力を加え，伸ばして立体状に成形する加工)は難しい．

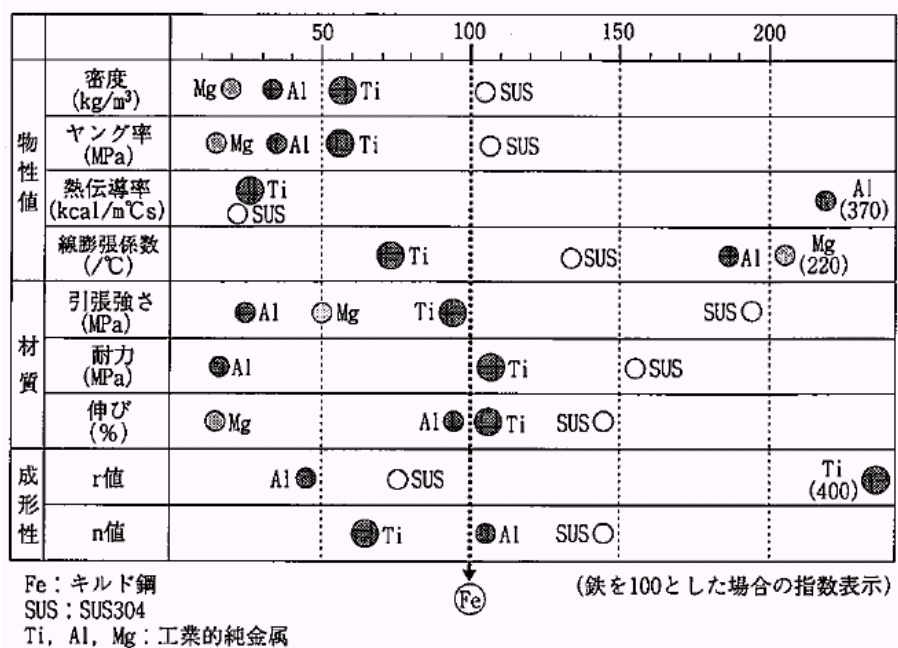


図-8.1.7 チタンの機械的特性（鋼材等との相対比較）²³⁾

[出典：木村欽一，木下和宏，徳野清則，清水寛史(2001b)：建築，土木，海洋分野へのチタン材の適用状況と今後の展望，新日鉄技報，第375号，pp.6-10]

なお，抜群の耐食性から，近年では建物の屋根壁材としての使用も年々増加している．野球場やサッカースタジアム，国際展示場等の屋根材や，過酷な海浜地域での屋根壁材としての使用が進んでいる．最近では酸性雨の影響で歴史的建造物に使用されてきた銅(Cu)板の腐食が急速に進んだことから，その分野でもチタン(Ti)の適用が進んでおり，チタン板の意匠性を高める取組みがなされている．チタン(Ti)表面に凹凸を転写したり，アルミナのショットブラストで光沢度を低くくしたり，発色させる方法などが開発されている．また，施工後数年経過すると，当初の銀色から茶色味を帯びた色に変色するという変色問題があったが，これも変色し難い材料等が開発されている[木村ら，2001a]²²⁾．

一方で海洋構造物等の大型で高い耐久性を要求される構造物にチタンを使用する場合には，コストを低減するため，構造部材として使用するのではなく，薄板あるいは鋼板の表面側にチタンを金属組織的に接合したクラッド鋼(clad steel)として用いられる．チタンクラッド鋼板は，図-8.1.8に示すように，鋼板（母材）の片面，あるいは両面に純チタン（合わせ材）を接合したものである．チタンクラッド鋼の利点は，純チタン(Ti)の海水に対する半永久的な耐食性の一方で，母材の鋼部分を鋼構造物に溶接し，ライニングすることが可能なことである．このような利点から，海洋部に建設される構造物の中でも厳しい腐食環境となる飛沫，干満帯の防食法として利用されており，東京湾アクアラインの橋脚，浮体橋の夢舞大橋(大阪市)などで実績がある．なお，チタン(Ti)と鋼を溶接した場合，脆弱な金属間化合物の生成に起因する割れ問題があり，直接溶接することは困難とされているが，チタンクラッド鋼を突き合わせて開先を取り，まず鋼材部分の溶接を行い，さらに開先の上をチタン板で覆ってチタン間の溶接を行うことで問題なく接合することができる[松岡ら，2001]²⁴⁾．

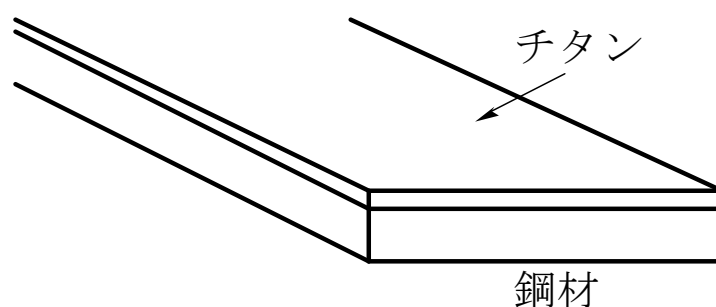


図-8.1.8 チタンクラッド鋼

最近では、コスト低減のためにクラッド鋼を用いずに、チタンを鋼材に直接汎用性の高いアーク溶接する技術も研究され【村井，1999】²⁵⁾，また各種の接着材等を用いてチタンの薄板を直接鋼材表面に貼り付ける技術【土木研究所，2006】²⁶⁾等が開発，提案されている。

8.1.4 めっき鋼材

めっき(鍍金；Plating)とは，金属または非金属の表面を他の金属の薄膜で覆うことである．めっき材料として有名なものにトタン，ブリキがある．トタンは鋼材に亜鉛(Zn)をめっきしたものであり，ブリキは鋼材にスズ(Sn)をめっきしたものである．亜鉛(Zn)は鋼材より腐食しやすく，亜鉛(Zn)が鋼材よりも先に腐食されることで鋼材の腐食を防ぐという犠牲防食(sacrificial protection)の代表例である．これに対し，スズ(Sn)は鋼材より腐食しにくいため，全面を覆うことで鋼材の腐食を防ぐことができるが，一部でも鋼材が露出するとその箇所から鋼材の腐食が開始するという欠点がある．また，めっきする方法の代表的なものとして，電気めっき(電解溶液中で被めっき物を陰極として通電し，表面にめっき金属を電気化学的に析出させるめっき法)と，溶融めっき(金属を溶融した中に被めっき物を入れ，溶融した金属を付着させるめっき法)がある．電気めっきは，溶融めっきに比べ，加工性が優れるという特徴を有するが，めっきする金属の付着量が少なくなる．土木分野では耐久性が重視されるため，めっき材料としては溶融亜鉛めっき鋼板が最もよく用いられている。

溶融亜鉛めっき鋼板の目付け量は片面90～300g/m²が一般的である．溶融亜鉛めっき鋼板の腐食量は腐食環境の緩やかな地域で5～10g/m²/年，海岸地域では20～30g/m²/年であるといわれている．環境の厳しい地域や住宅等の建築物の長寿命化の要求に対しては，さらなる耐食性向上を狙い，亜鉛-アルミニウム(Zn-Al)合金系のメッキ鋼板が開発されてきた．さらに，マグネシウム(Mg)を相当量添加したより高レベルの耐食性を示す新しい合金めっき鋼板が開発，商品化されている。

現在商品化されているものとして，亜鉛マグネシウム(Zn-Mg)合金系ではめっき層の組成がZn-Mg(0.5%)のもの【新頭，1998】²⁷⁾，亜鉛-アルミニウム-マグネシウム(Zn-Al-Mg)合金系ではアルミニウムめっき層の組成がZn-Al(11%)-Mg(3%)-Si(0.2%)【盛本，2002】²⁸⁾，Zn-Al(6%)-Mg(3%)【日本製鉄，2022】²⁹⁾のものがある．これらのめっきではめっき層の表面に非常に緻密なマグネシウム(Mg)含有腐食生成物が形成されることにより，この腐食生成物が保護被膜となって優れた耐食性を有するとされている(図-8.1.9)．

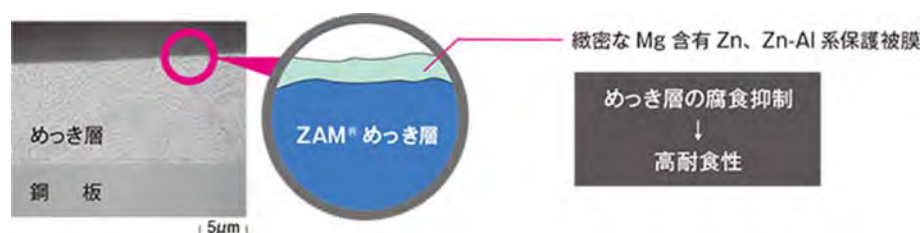
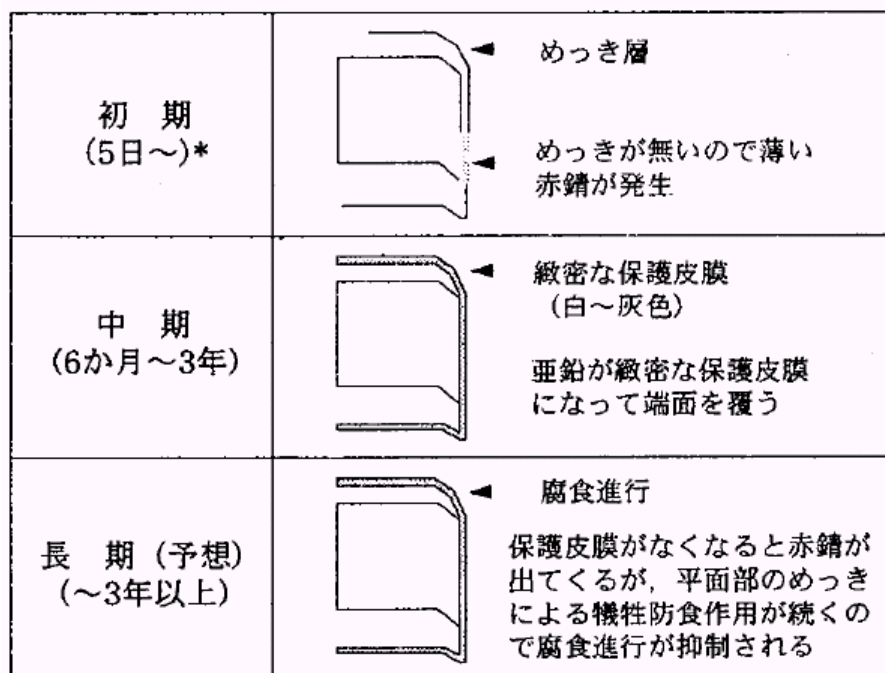


図-8.1.9 亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金系メッキのメッキ層²⁹⁾

【出典：日本製鉄(2022)：日本製鉄(株)HP ZAM®の耐食機構】

さらに、これらの高耐食亜鉛めっき鋼板では、鋼板を切断した端面において優れた耐食性を有することも大きな特徴となっている。図-8.1.10に示す様に鋼板切断面では鋼板素地部が露出することになるが、緻密なマグネシウム(Mg)を含有する亜鉛(Zn)系保護被膜が流れ出し端面部を覆うことにより、通常の亜鉛めっきによる犠牲防食機構による端面防食性能以上の性能を示すとされている。



* ()内の年数は大気暴露における推定

図-8.1.10 切断面の腐食経時変化²⁷⁾

[出典：新頭英俊，西村一実，岡田哲也，西村信明，浅井謙一(1998)：高耐食性 Zn-Mg 合金めっき鋼板“ダイマジンク”の開発と製品，新日鉄技報，第 369 号，pp. 61-65]

亜鉛-マグネシウム(Zn-Mg)合金系のめっき鋼板は厚目付け(200～550g/m²程度)のものが商品化されており、切断端部の耐食性を重視する場合に用いられている。一方で、亜鉛-アルミニウム-マグネシウム(Zn-Al-Mg)合金系はより高い耐食性を有することから、薄目付け(30～200g/m²程度)のものが提供されている。加工性や耐疵(きず)付き性等にも優れていることから、広い用途に用いられている。

さらに、最近では合金メッキの成分系を Zn-Al(19%)-Mg(6%)-Si(微量)とした、より一層の高耐食化を図ったプレめっき鋼板(製鉄所でめっきを行った薄鋼板)も開発、実用化されている。腐食加速試験(塩水噴霧→乾燥→湿潤を繰り返す JASO 試験)の結果から、溶融亜鉛めっき鋼板の 10 倍、上記の高耐食亜鉛めっき鋼板の約 2 倍の平面部耐食性が得られたことが報告されている[日本製鉄, 2022]²⁹⁾。高耐食性を実現するメカニズムは、時間の経過とともに表面に亜鉛イオン (Zn²⁺)とマグネシウムイオン (Mg²⁺)がめっき表面に供給されることでより強固な保護被膜が形成され、腐食因子の侵入を防いで腐食の進行を遅らせていると分析されている。

8.1.5 塗装周期延長鋼

近年、高度経済成長期に建設された多数の橋梁の高齢化が進行し、維持管理費用の増大が社会的な問題となっている。鋼橋の大部分は塗装による防食が採用されており、塗装橋梁では、鋼材の腐食により、定期的な塗り替え塗装が必要となる。塗装を長寿命化することによる LCC 削減を目指し、鉄鋼メーカー各社では、それぞれで独自の効果を有する塗装周期延長鋼板が開発・製品化されている(表-8.1.4)。

各社で添加される元素や効果は異なるものの、鋼材中に添加した耐食元素の効果により、塗膜下での腐食の進展を防ぐという機能は共通している。各製品とも、耐食元素については JIS の化学成分に規定がないため、JIS 規格の SS や SM などの構造用鋼をベースに、耐食元素を添加することで効果を担保するものとなっている。

塗装を長寿命化する効果については、現在のところ統一された試験方法があるわけではないが、各社独自の加速試験や大気暴露試験を行い、塗膜下での腐食の進展や塗膜の剥がれが抑制されることが確認されている。

表-8.1.4 塗装周期延長鋼

CORSPACE® [青木ら, 2019] ³⁰⁾	鋼材に微量の錫 (Sn) を添加したもので、錫イオン(Sn ⁺)に鉄イオン(Fe ⁺)の溶出を抑えてアノード反応を抑制しさびを予防する効果があり、塗膜欠損部や塗膜劣化部の腐食を抑えることが可能である。
EXPAL® [中村ら, 2020] ³¹⁾	鋼材中に複合添加した耐食元素(Cu, Ni, Sn, W)の作用により、塗膜下で保護性さびを形成し、さび層が地鉄の腐食を抑えると同時に、外部の塩素イオン透過を妨げるカチオン選択透過性により腐食を抑えることで塗膜劣化を抑制する。
エコビュー® [高橋ら, 2014] ³²⁾	チタン(Ti)、ニッケル(Ni)、銅(Cu)を最適添加し、塗装キズ部やコバなどからの腐食の進行を抑制する。

8.2 ぜい性破壊の防止

通常、物体に力を加えていくと変形するが、弾性領域を超えると、塑性変形を起こして大きな変形が生じる。しかしながら材料自体のじん性が低い場合には、ほとんどこの塑性変形を伴わず、ほぼ弾性状態のまま破壊に至る場合がある。このような破壊をぜい性破壊(Brittle fracture)と言い、鋼材に発生する亀裂は不安定、かつ高速で進展する。構造物では、ぜい性破壊はほとんど変形を伴うことなく突然破壊することになり危険なので、避けなければならない破壊形態である。

8.2.1 大入熱溶接に対応した高 HAZ じん性鋼 [新日本製鐵, 2004; 児島ら, 2004a; 児島ら, 2004b]³³⁾ ~35)

構造物の大型化、高層化などに伴って、それに使用される鋼材は高強度化、厚肉化が進行している。一方で、構造物の組み立てには溶接が不可欠であり、溶接時に溶接部に近い熱影響部(Heat-Affected Zone:HAZ)の組織が粗大化し、じん性の劣化が生じる(4.6.2参照)。これを防止するため、溶接施工時には入熱量の制限が行われるので、厚肉の鋼板を溶接する場合には、溶接を何回も繰り返して行う必要があり、作業能率が低下するという問題がある(図-8.2.1)。製作における作業の効率化、省力化などが求められる中、厚肉の鋼板を1パスで施工できる溶接効率の良いエレクトロスラグ溶接などの大入熱溶接(入熱量1000kJ/cm程度)を行っても高いじん性を保持できる鋼材が求められている。

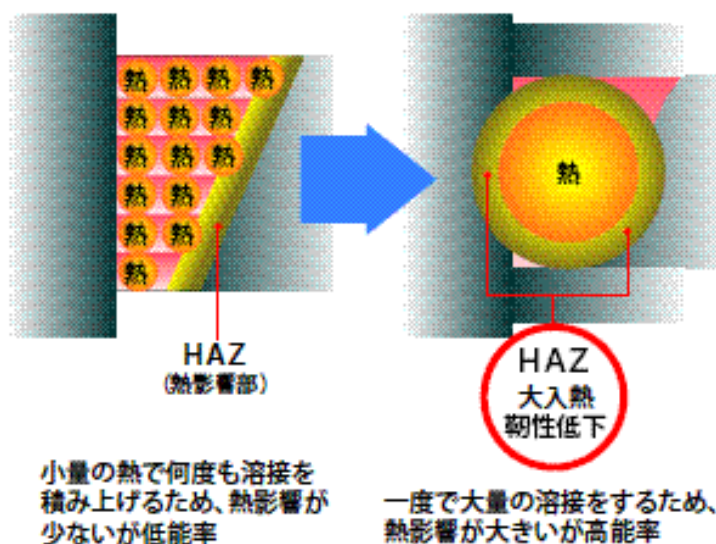


図-8.2.1 多層盛溶接と大入熱溶接の比較³⁶⁾

[出典：新日本製鐵(2009)：鉄と鉄鋼がわかる本，日本実業出版社]

4.6.2 で示したように、従来、HAZ じん性を高めた厚鋼板として、TiN や TiO₂ によるピン止め効果(鋼中に分散された粒子が結晶粒の成長を抑制し、結晶粒を微細化する効果、図-8.2.2 参照)を利用した TiN 鋼が広く実用化されている[新日本製鐵, 2009]³⁶⁾。しかし、TiN は、入熱量の大きい溶接時のように高温で長時間にわたって加熱されるとその大部分が固溶して機能しなくなる課題があった。そこで、近年では、熱的に安定な酸化物や硫化物の微細粒子を鋼中に分散させたり(ニューオキサイドメタラジー技術=NOM 技術と呼ばれる)、単純な TiN とは異なる新しいタイプの粒子を活用して HAZ 組織を顕著に微細化する技術が開発されており、HAZ 部の大幅なじん性の向上が図られた鋼材が開発されている。図-8.2.3 と図-8.2.4 に従来鋼と高 HAZ じん性鋼の再現 HAZ の組織とじん性の例を示す。高 HAZ じん性鋼では、γ 粒の粗大化が著しく抑制されており、粒界フェライトが微細化するとともにじん性が大幅に向上していることが確認できる。

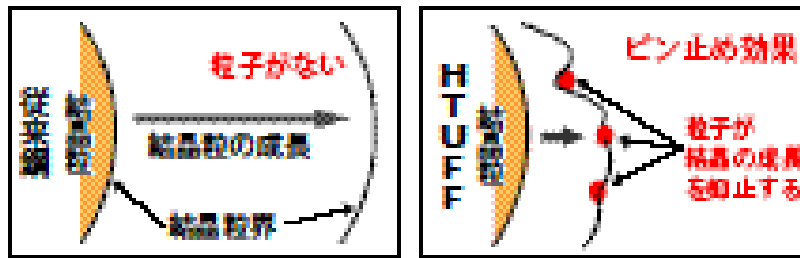


図-8.2.2 ピン止め効果による HAZ の組織細粒化 ³⁶⁾

[出典：新日本製鐵(2009)：鉄と鉄鋼がわかる本，日本実業出版社]

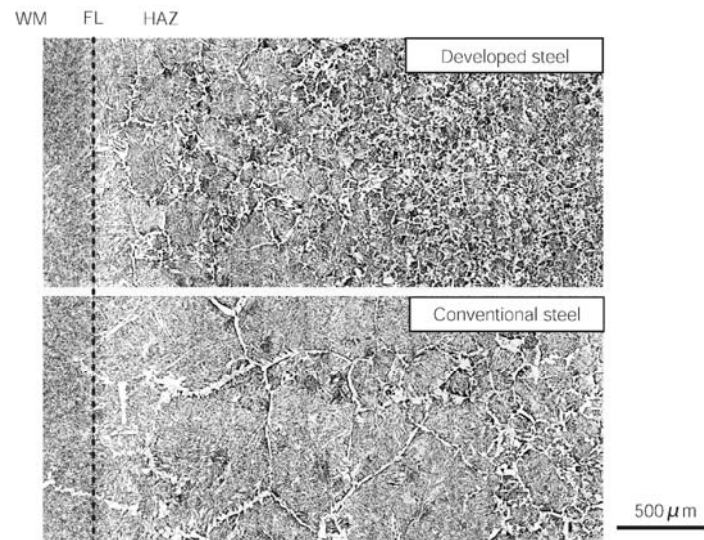
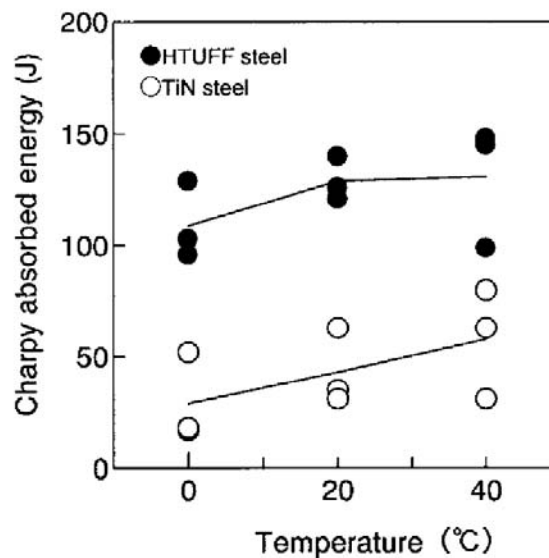


図-8.2.3 高 HAZ じん性鋼と従来鋼 (TiN 鋼) の ESW 継手における HAZ 組織の比較 ³⁴⁾

[出典：児島明彦，清瀬明人，植森龍治，皆川昌紀，星野学，中島隆雄，石田浩司，安井洋二 (2004a)：微細粒子による HAZ 細粒高靱化技術” HTUFF®” の開発，新日鐵技報，第 380 号，pp. 2-5.]



相当入熱量：70kJ/mm，最高加熱温度：1400℃

図-8.2.4 シャルピー吸収エネルギーの比較 ³⁴⁾

[出典：児島明彦，清瀬明人，植森龍治，皆川昌紀，星野学，中島隆雄，石田浩司，安井洋二 (2004a)：微細粒子による HAZ 細粒高靱化技術” HTUFF®” の開発，新日鐵技報，第 380 号，pp. 2-5.]

8.2.2 ぜい性亀裂の伝播を阻止するSUF鋼 [石川ら, 1995; 木村ら, 2002]^{37), 38)}

造船や低温貯蔵の分野では、万一ぜい性破断が発生した場合を想定して、ぜい性亀裂の伝播を阻止しうる性能を求めるフェールセーフ機能を意図した設計概念が採られる場合がある。このような要求に対応して開発されたものに表層超微細粒(SUF; Surface layer with Ultra Fine grain microstructure)鋼板がある。

SUF鋼板とは、図-8.2.5に示すように、鋼板の表裏層に超微細粒組織を有した鋼板である。鋼材は、結晶粒が小さくなると、ぜい性破壊に対する抵抗力が増すという性質がある(4.4.1参照)。SUF鋼は、この性質を利用して、鋼板表層部の耐ぜい性破壊(アレスト)性能を著しく向上させた、板厚方向に複数の層を有するハイブリッド鋼板である。鋼板表層面の金属組織は $1\sim3\mu\text{m}$ という超微細な組織であり、温度上昇時に圧延することによって、超微細組織を有する圧延鋼板の製造が可能になった。SUF鋼はさらに、ぜい性破壊しにくい結晶方位を有しており、ぜい性亀裂の伝播に対して極めて優れた阻止性能を発揮することが確かめられている。

船体や構造物等の破壊形態上のクリティカルとなる部分の一部にこの鋼材を適用することで、万一の場合の船舶の沈没や重大事故を抑止することを目的として用いられている。

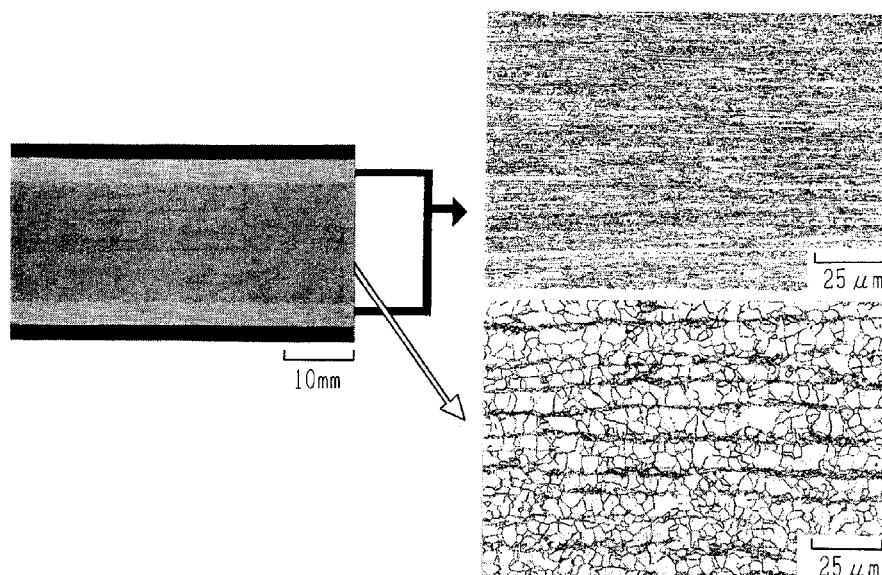


図-8.2.5 SUF鋼の表層と内部の組織の例³⁷⁾

[出典：石川忠，萩原行人，野見山裕治，栗飯原周二(1995)：表層超細粒鋼のぜい性亀裂伝播停止特性(その1)，日本造船学会論文集，第177号，pp. 259-267.]

8.3 耐疲労性能の向上

一回の作用では破壊しないような荷重レベルでも、繰り返し作用することで破壊に至る現象を疲労破壊(fatigue fracture)と呼んでいるが、金属疲労の問題はジャンボジェット機の墜落事故や、鋼製の道路橋脚の疲労亀裂が社会問題化されるなど、金属系材料が克服すべき重大な課題の一つである。今日、鋼構造物のほとんどは溶接構造が主体となり、高強度化が進んできたことで、疲労の面ではより厳しい状況となっており、耐疲労性能の向上が求められている。

8.3.1 耐疲労鋼の開発 [菅田ら, 2001; 有持ら, 2003]^{39), 40)}

鋼構造物の疲労問題と言えば、主に溶接部の疲労であり、溶接部の形状に起因する応力集中の度合いと溶接熱による溶接部近傍の残留応力の状況が耐疲労性能に大きく影響する。したがって、応力集中や残留応力を減ずるように溶接部のディテールを工夫したり、溶接止端をグラインダー処理やピーニング処理を行う方法等により疲労性能の改善を図るのが一般的であり、鋼材によって溶接構造物の疲労強度を改善することは困難であると考えられてきた。しかしながら近年、疲労亀裂の進展については、鋼材のミクロ組織が強く影響することが明らかにされてきた。

このメカニズムに基づき、鋼材を適切なフェライト・ベイナイト二相組織とすることで、耐疲労性能を向上させた耐疲労鋼が開発されている[菅田ら, 2001]³⁹⁾。図-8.3.1 に従来鋼と耐疲労鋼の金属組織の比較を示すが、従来鋼(SM490 相当)のフェライト・パーライト組織に対し、耐疲労鋼では結晶粒の細かなフェライト・ベイナイト二相組織とすることで繰返し負荷に伴う強度変化が亀裂進展駆動力や破壊抵抗に有利に働くと考えられている。図-8.3.2 に提案されている疲労損傷の遅延メカニズムの模式図を示す。

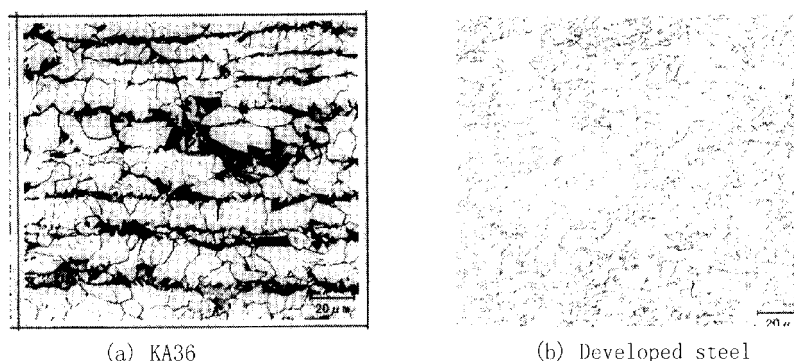


図-8.3.1 鋼材の金属組織比較³⁹⁾

[出典：菅田登，有持和茂，藤原知哉，永吉明彦，稲見彰則，山下正人，矢島浩(2001)：金属組織制御による鋼材の疲労亀裂進展特性の改善—疲労特性の優れた船体用鋼板の開発，日本造船学会誌論文集 190 号]

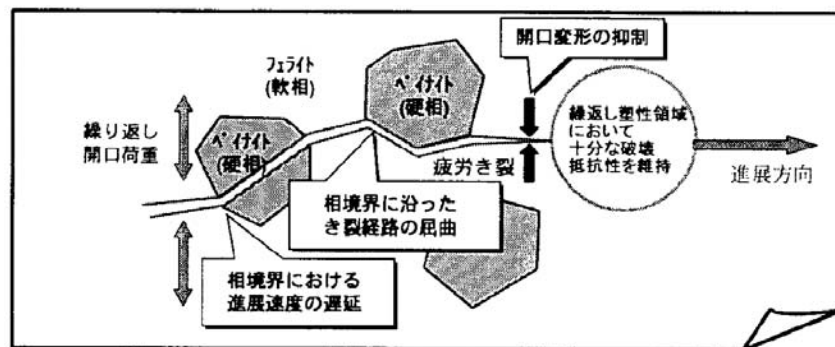


図-8.3.2 疲労損傷遅延メカニズム⁴⁰⁾

[出典：有持和茂，矢島浩，渡辺栄一，稲見彰則，勝元弘，菅田登(2003)：船体用耐疲労鋼の開発，日本造船学会誌，第 874 号，pp. 438-439]

図-8.3.3に耐疲労鋼の疲労亀裂進展特性を従来鋼と比較したものを示す。溶接部を破壊起点とする継手や構造モデルにおいて耐疲労鋼適用による疲労寿命延伸効果が確認されている。図-8.3.4は疲労強度改善効果の一例として、造船分野で用いられるサイドロンジモデルの疲労試験結果を示している。応力拡大係数が小さい範囲や応力レベルが小さい範囲では、その疲労性能改善効果は顕著である。ただし、その改善効果は、応力集中の度合いや応力レベル等に依存することや、溶接構造は多種多様であることを十分に配慮して、その適用を検討する必要がある。

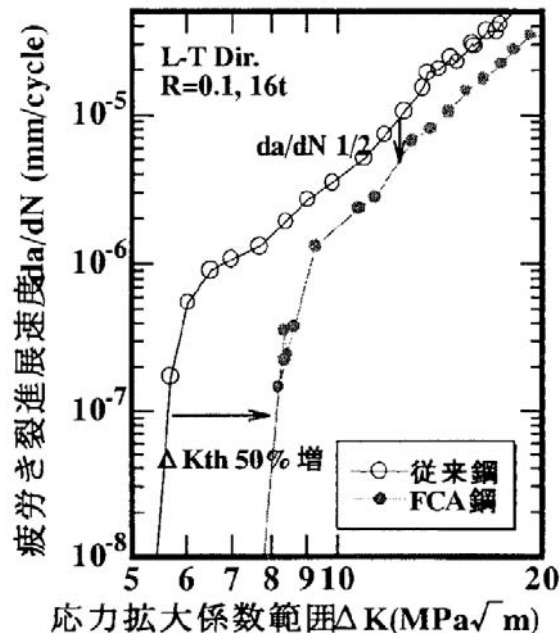


図-8.3.3 疲労亀裂進展特性⁴⁰⁾

[出典：有持和茂，矢島浩，渡辺栄一，稲見彰則，勝元弘，菅田登(2003)：船体用耐疲労鋼の開発，日本造船学会誌，第874号，pp.438-439]

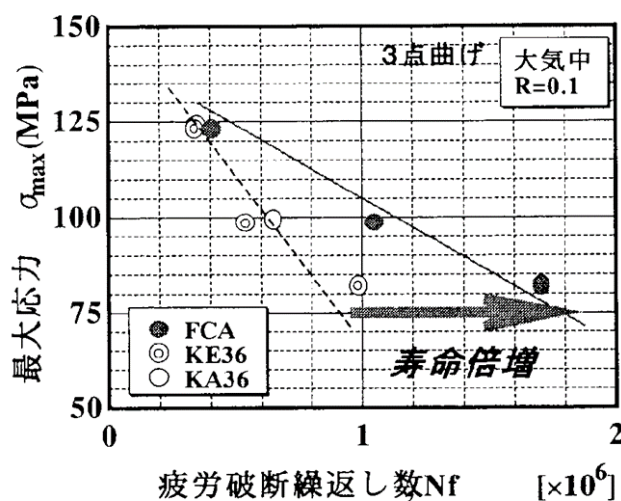
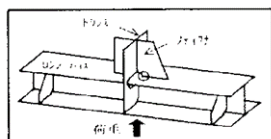


図-8.3.4 構造物モデルでの疲労試験結果⁴⁰⁾

[出典：有持和茂，矢島浩，渡辺栄一，稲見彰則，勝元弘，菅田登(2003)：船体用耐疲労鋼の開発，日本造船学会誌，第874号，pp.438-439]

疲労以外の特性に関しては耐疲労鋼は従来鋼と同等以上とされている．変動応力低減技術と耐疲労鋼の組合せで船体構造の疲労強度を高めることが期待されており，一部造船分野において実用化も進められている【有持ら，2003】⁴⁰⁾．

橋梁分野では，疲労耐久性が向上できることに着目し，耐疲労鋼をフィンガータイプの伸縮装置のフェイスプレートに適用した製品【横河 NS エンジニアリング，2020】⁴¹⁾ や，実橋梁の部材および鋼床版のデッキプレートに疲労対策として適用された例がある【JFE スチール 2003；山本ら，2007】^{42)，43)}．

8.3.2 低温変態溶接材料 【太田ら，2000；太田ら，2001；銭谷，2005】^{44)～46)}

溶接では，金属の接合部を高熱で溶かして一体化し，つなぎ合わせる．鋼材の溶接部は，溶けて固まった後，冷やされると収縮する．この収縮は周囲の母材に拘束されるので，溶接部は周囲から引張られ，引張残留応力を生じる(図-8.3.5)．このように，通常の溶接材料を用いて製作した溶接部には収縮により引張残留応力が誘起されるため，溶接部の疲労強度は，母材強度や継手形式等にかかわらずほぼ同一で，母材疲労強度より一般に低くなる．低温変態溶材は，溶接部に圧縮の残留応力を，溶接終了後に何も手を加えることなく誘起できる溶接材料として開発された．低温変態溶材は，室温付近で金属組織が変化（マルテンサイト変態）することによって膨張する(図-8.3.6)．この膨張は，周囲の母材から拘束されるので，溶接部は周囲から押込められ，圧縮残留応力が生じる．この圧縮残留応力は，溶接部に作用する引張応力の変動範囲を小さくするように働くので，疲労強度を高めることができる．表-8.3.1 にその成分例を示すが，ニッケル(Ni)やクロム(Cr)を多量に添加してマルテンサイト変態膨張の開始温度が 200℃から 350℃程度になるように調整されている．

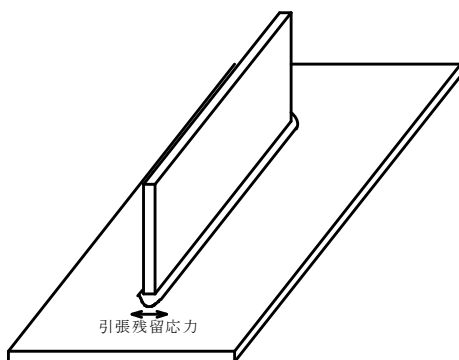


図-8.3.5 溶接部の残留応力

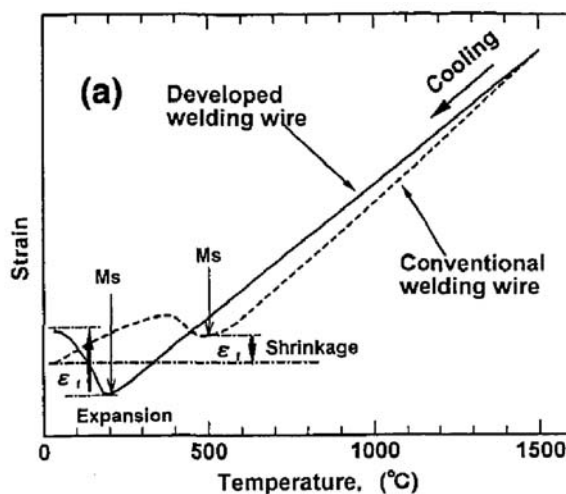


図-8.3.6 温度変化に伴う溶材の熱ひずみの変化 ⁴⁴⁾

【出典：太田昭彦，渡辺修，松岡一祥，志賀千晃，西島敏，前田芳夫，鈴木直之，久保高宏(2000) 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上，溶接学会論文集，第18巻，第1号，pp.141-145】

しかしながら、現段階では、開発された溶接材料の溶接性の悪さ、溶接材料自体の性能（強度、じん性など）への懸念から、低温変態溶材を直接部材の溶接に用いるのではなく、溶接止端部の後処理として、本溶接のビードの上から被せ、低温変態溶材を付加ビードとして溶接を行う利用法が提案【富永ら，2004】⁴⁷⁾されており、溶接止端部への圧縮残留応力の導入と、それに伴う疲労性能の向上が確認されている。

圧縮残留応力の導入による疲労性能の向上効果は認められているものの、圧縮残留応力は目に見えないことからその確認方法や、加工及び施工段階での経時的な応力再分配等による残留応力の変化等の課題がある。

表-8.3.1 低温変態溶材の成分例 (mass%)⁴⁷⁾

[出典：富永知徳，三木千壽，高橋健，糟谷正，森影康(2004)：低温変態溶材を用いた既設鋼橋の疲労強度向上方法の研究，土木学会論文集 No. 759/I-67, PP. 355-367]

溶材	Ms(°C)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
A 材	350	0.055	0.17	0.25	0.007	0.004	10.02		
B 材	250	0.037	0.20	0.70	0.011	0.003	9.78	11.02	0.28
C 材	250	0.054	0.55	0.90	0.004	0.002	10.20	10.30	
D 材	200	0.050	0.43	0.27	0.018	0.009	9.94	15.20	

Ms：マイテンサイト変態開始温度

第8章 参考文献

- 1) 市川篤司，三木千壽編著(2005)：現代の橋梁工学，サイエンス社
- 2) 日本鉄鋼連盟，日本橋梁建設協会(2010)：耐候性鋼の橋梁への適用 [パンフレット]
- 3) 日本橋梁建設協会(2021)：耐候性鋼橋梁の手引き
- 4) 建設省土木研究所，鋼材倶楽部，日本橋梁建設協会(1993)：耐候性鋼の橋梁への適用に関する研究報告(XX)，1993.3.
- 5) 日本道路協会(2017)：道路橋示方書(Ⅱ鋼橋・鋼部材編)・同解説，丸善出版
- 6) 宇佐見明，紀平寛，楠隆(2002)：耐塩害性を高めた 3%Ni 耐候性鋼，新日鐵技報，第 377 号.
- 7) 川野晴弥，岡野重雄，堺雅彦，中山武典，湯瀬文雄，長谷薫 (2002)：海浜・海岸耐候性鋼板と溶接材料，神戸製鋼技報/Vol. 52, No. 1, pp.25-28
- 8) 鹿毛勇，松井和幸，川端文丸(2004)：橋梁用のミニマムメンテナンス実現のための耐候性鋼板とその利用技術，JFE 技報，No. 5, pp.31-37
- 9) 紀平寛，田中睦人，安波博道，竹澤博，楠隆，松岡和巳，原田佳幸，田辺康児(2004)：3%ニッケル高耐候性鋼の適用可能性検討方法，新日鐵技報，第 380 号，pp.28-32
- 10) 鹿毛勇，塩谷和彦，武村誠洋，小森務，古田彰彦，京野一章(2006)：実曝露試験に基づくニッケル系高耐候性鋼の長期腐食量予測，Zairyo-to-Kankyo(材料と環境)，Vol.55,pp.152-158.
- 11) 日本規格協会(2000)：JIS G 0203 鉄鋼用語(製品および品質)
- 12) ステンレス協会(2022)：ステンレス協会 HP (<http://www.jssa.gr.jp/>) [2022.9.8 確認]
- 13) ステンレス建築構造設計基準作成委員会(2001)：ステンレス建築構造設計基準・同解説(第 2 版)，技報堂出版
- 14) 土木学会(2019)：大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策，鋼構造シリーズ 30
- 15) 伊藤壮一，諏訪稔，北川尚男(2002)：耐海水ステンレスクラッド鋼管，JSSC, No.50, pp.19-21
- 16) 佐藤弘隆，石田雅巳，金井久，岩見博志，河合康博，高橋陽一，盛高裕生(2002)：海洋構造物防食ライニングへの高耐食ステンレス鋼の適用開発，新日鐵技報，第 373 号，pp.34-38
- 17) 岡田修幸，田所裕，柘植信二，江目文則，木崎雅之 (2017)：省資源化社会に貢献する省合金ニ相系ステンレス鋼，材料と環境，Vol.66, pp.263-267

- 18) 吉川一成(2018)：清澄排水機場吐出樋門における隅田川テラス橋梁へのステンレス鋼の適用，JSSC, No.33, pp.28-29.
- 19) 赤澤泰，金箱温春，潤井駿司，松井幹雄，初鹿明(2019)：史跡鳥取城跡擬宝珠橋の計画と設計，橋梁と基礎，Vol.53, No.7, pp.15-20.
- 20) 横溝浩幸(2022)：隅田川テラス 連絡橋(月島川，大島川)の施工概要―二相ステンレス鋼の適用，JSSC, No.49, pp.30-31.
- 21) 日本鋼構造協会(2015)：ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針 (案)，JSSC テクニカルレポート No.108.
- 22) 木村欽一，正木基身，村山正俊，加古幸博(2001a)：チタンの製造技術開発と用途開拓，新日鉄技報，第 375 号，pp.2-5
- 23) 木村欽一，木下和宏，徳野清則，清水寛史(2001b)：建築，土木，海洋分野へのチタン材の適用状況と今後の展望，新日鉄技報，第 375 号，pp.6-10
- 24) 松岡和巳，木下和宏，鳥井正志(2001)：メガフロート長期防食法へのチタンクラッド鋼の適用技術開発，新日鉄技報，第 375 号，pp.78-82
- 25) 村井康生，斉藤健司(1999)：チタンの鋼板への直接ライニング技術，神戸製鋼技報 Vol.49, No.3, pp.57-60
- 26) 土木研究所(2006)：チタン箔シートによる重防食塗膜の耐久性補強マニュアル(案)
- 27) 新頭英俊，西村一実，岡田哲也，西村信明，浅井謙一(1998)：高耐食性Zn-Mg合金めっき鋼板“ダイヤモンド”の開発と製品，新日鉄技報，第369号，pp.61-65
- 28) 盛本康秀，本田和彦，西村一実，田中暁，高橋彰，新頭英俊，黒崎将夫(2002)：建材向高耐食性溶融Zu-Al-Mg-Si合金めっき鋼板“スーパーダイヤモンド”，新日鉄技報 No.377, pp.22-24
- 29) 日本製鉄(2022)：日本製鉄(株)HP ZAM®の耐食機構
(<https://www-zam.nipponsteel.com/quality/flat/>) [2022.9.8 確認]
- 30) 青木康素，高田佳彦，菅江清信，上村隆之，那須和夫，壺岐浩(2019)：Sn 添加耐食鋼の塗装寿命延長効果と鋼道路橋での適用事例，橋梁と基礎，Vol.53, No.10, pp.29-34.
- 31) 中村直人，三浦進一，羽鳥聡(2020)：塗装寿命延長鋼(EXPAL)の開発，JFE 技報，No.46, pp.38-43
- 32) 高橋章，兼石義統，湯瀬文雄，松下政弘(2014)：ロングライフ塗装用鋼板(エコビュー)による 10 年暴露試験評価結果，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，V-459.
- 33) 新日本製鐵(2004)：溶接部の破壊に強い厚板 HTUFF，日本スチールマンズリー，2004 年 7 月号，pp.1-4
- 34) 児島明彦，清瀬明人，植森龍治，皆川昌紀，星野学，中島隆雄，石田浩司，安井洋二(2004a)：微細粒子による HAZ 細粒高靱化技術“HTUFF®”の開発，新日鉄技報，第 380 号，pp.2-5.
- 35) 児島明彦，吉井健一，秦知彦，佐伯修，市川和利，吉田譲，志村保美，東清三郎(2004b)：大入熱溶接に対応した建築鉄骨用高 HAZ じん性鋼の開発，新日鉄技報，第 380 号，pp.33-37
- 36) 新日本製鐵(2009)：鉄と鉄鋼がわかる本，日本実業出版社
- 37) 石川忠，萩原行人，野見山裕治，栗飯原周二(1995)：表層超細粒鋼のぜい性亀裂伝播停止特性(その 1)，日本造船学会論文集，第 177 号，pp.259-267.
- 38) 木村英彦，秋庭義明，田中啓介，近藤淳，石川忠(2002)：超微細鋼(SUF 鋼)における疲労亀裂伝ばいにおよぼす微視組織の影響，材料，Vol.51, No.7, pp.795-800.
- 39) 菅田登，有持和茂，藤原知哉，永吉明彦，稲見彰則，山下正人，矢島浩(2001)：金属組織制御による鋼材の疲労亀裂進展特性の改善―疲労特性の優れた船体用鋼板の開発，日本造船学会誌論文集 190 号
- 40) 有持和茂，矢島浩，渡辺栄一，稲見彰則，勝元弘，菅田登(2003)：船体用耐疲労鋼の開発，日本造船学会誌，第 874 号，pp.438-439
- 41) 横河 NS エンジニアリング(2020)：SEF ジョイント 100―進化した鋼製フィンガージョイント，(Cat.No.2012111005) [パンフレット].

- 42) JFEスチール(2003)：耐疲労鋼AFD®鋼 (SM490, SM490Y AFD) (Cat.No.C1J-033) [パンフレット]
- 43) 山本貴之，山野達也，森下泰光(2007)：入野橋(和歌山県)耐疲労鋼の適用－世界初の耐疲労鋼適用橋梁－，高田機工技報，No.22，pp.14-20.
- 44) 太田昭彦，渡辺修，松岡一祥，志賀千晃，西島敏，前田芳夫，鈴木直之，久保高宏(2000) 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上，溶接学会論文集，第 18 巻，第 1 号，pp.141-145
- 45) 太田昭彦，渡辺修，松岡一祥，前田芳夫，鈴木直之，久保高宏(2001)：低変態温度溶接材料を用いた角回溶接継手の疲労強度向上，溶接学会論文集，第19巻，第2号，pp.373-376
- 46) 銭谷哲，早川直哉，山本純司，平岡和雄，森影康，久保高宏，安田功一，天野虔一(2005)：高張力鋼の低温割れを防止する新低変態温度溶接材料の開発，溶接学会論文集，第23巻，第1号，pp.95-102
- 47) 富永知徳，三木千壽，高橋健，糟谷正，森影康(2004)：低温変態溶材を用いた既設鋼橋の疲労強度向上方法の研究，土木学会論文集 No.759/I-67，PP.355-367

9. その他の機能性材料

9.1 低降伏点鋼[森田, 2008]¹⁾

鋼構造物は巨大地震時にその一部が降伏し、塑性変形することで地震のエネルギーを吸収することができる。耐震設計では、そのような鋼材の塑性化による地震エネルギーの吸収能力を評価して、経済的な設計を行うことが一般的に行われている。しかしながら、柱や梁等の構造部材が塑性化してしまうと、地震後の復旧には多大な時間と費用がかかることとなる。そこで近年では、制振ダンパーと呼ばれる特定の部材を積極的に塑性化させ、それ以外の主要な構造部材の塑性化・損傷を最小限にする「損傷制御」という考え方が普及してきている。このような制振ダンパーを用いると、地震後、塑性化した制振ダンパーのみを取替えることで、迅速な復旧が可能となるため、建築構造物を中心に橋梁などにも[宇佐美ら, 2005]²⁾ 広く用いられるようになってきている。

表-9.1.1 低降伏点鋼の機械的性質

鋼種	降伏点 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)
LYP100	—	80-120	200-300	50 以上
LYP235	215-245	—	300-400	40 以上

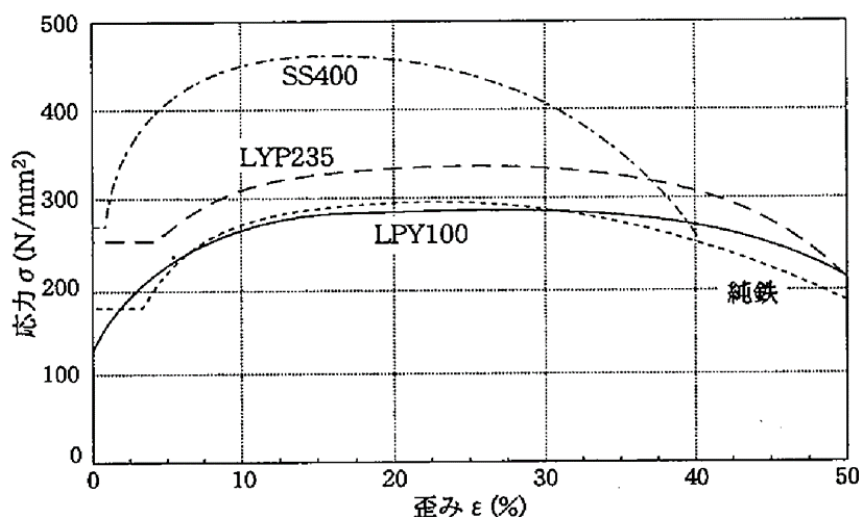


図-9.1.1 応力—ひずみ関係³⁾

[出典：山口種美, 中田安洋, 竹内徹, 池辺卓, 長尾年通, 南昇, 鈴木孝彦(1998)：極低降伏点鋼，低降伏点鋼を使用した制振技術の開発，No. 368, pp. 61-67]

このような制振ダンパー向けの鋼材として開発されたのが、低降伏点鋼と呼ばれる鋼材で、化学成分において添加元素を極力低減した純鉄に近いものである。製鋼過程で不純物を低減し、圧延後に焼なましにより粗大粒とし、降伏強度を下げている。早期に降伏して地震エネルギーの吸収が行われるように降伏点（耐力）は、100N/mm² レベル（LYP100）から 235N/mm²（LYP235）レベルと低く、また構造物において設計者が意図したとおりに降伏するように降伏点（耐力）のばらつきのレンジも狭く管理されている。伸び性能は 50%以上（LYP100）と 40%以上（LYP235）レベルを確保しており、大きな塑性変形能力が要求される制振ダンパー用として必要とされる変形性能を有する。表-9.1.1 にその機械的性質をまとめたものを、図-9.1.1 に応力—ひずみ関係をまとめたものを示す。繰り返し荷重による低サイクル疲労特性は従来鋼と同等であるが、ひずみ速度依存性は従来の SM490 材よりも大きい。図-9.1.2 にその特性を示すが、LYP100 では比較的大きなひずみ速度依存性を示すため、想定されるひずみ速度に応じてその影響を配慮する必要がある。

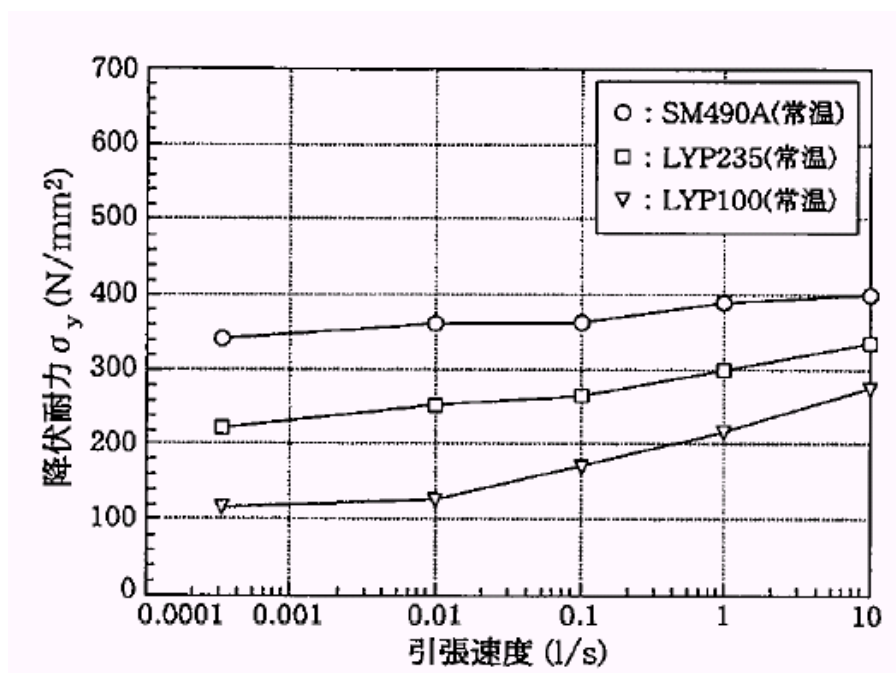


図-9.1.2 降伏耐力のひずみ速度依存性³⁾

[出典：山口種美, 中田安洋, 竹内徹, 池辺卓, 長尾年通, 南昇, 鈴木孝彦(1998)：極低降伏点鋼，低降伏点鋼を使用した制振技術の開発，No. 368，pp. 61-67]

低降伏点鋼を組み込んだ制振ダンパーとしては，建築分野では主に図-9.1.3のような形式が用いられている。

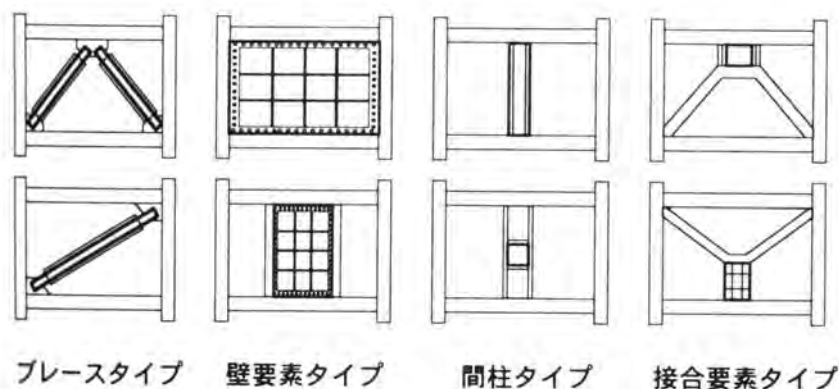


図-9.1.3 制振ダンパーの例¹⁾

[出典：森田耕次(監修) (2008)：新しい建築構造用鋼材[建築構造用鋼材の知識 2008]，鋼構造出版，p. 44]

土木分野では，複雑な構造物への制振ダンパーの適用が進められている。制振ダンパーとしては，各種のものが開発されているが，「制震ブレース」や「座屈拘束ブレース」と呼ばれる芯材となる鋼材を軸圧縮時の座屈を防ぐ部材で拘束した軸降伏型のブレース材が中心になっており，芯材に低降伏点鋼を適用することで引張・圧縮両方向の安定した繰返し塑性変形を確保して高い履歴減衰性能が得られるようにしている例が多い。常時やレベル1地震時には弾性部材として機能し，レベル2クラスの大規模地震時に芯材が降伏して塑性変形を起こし，エネルギーを吸収するように設計されている。大規模なトラスやアーチ，方杖ラーメンなどの複雑な橋に対する耐震対策として，主部材をつなぐ対傾

主桁部：安定照査の結果〔道路橋示方書Ⅱ 4.3 式(4.3.4)〕

数値が1以下であれば、安定照査としては問題ないといえます。

制振ブレース設置前	1.4
制振ブレース設置後	0.7

制振ブレース設置前	1.3
制振ブレース設置後	0.8

[出典：日鉄エンジニアリング(2022)：日鉄エンジニアリング HP, 土木・橋梁用アンボンドブレース]

図1 柱基礎形式の比較

(a) 単柱フーチング形式

(b) 単柱鋼管柱基礎形式

(c) 横つなぎ材の構造

(d) 横つなぎ材の構造

[出典：金治英貞，篠原聖二(2012)：損傷制御設計を用いた鋼管集成橋脚の開発とシミュレーション技術，第15回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.39-52.]

I – 129

銅-アルミニウム-ニッケル(Cu-Al-Ni)合金等の銅(Cu)系合金や金(Au)合金, 銀(Ag)合金といった非鉄系合金を中心に開発がなされてきている【丸山ら, 1996】⁶⁾。

ニッケル-チタン(Ni-Ti)合金は, 形状回復温度より高温側でオーステナイト相という結晶構造をとるが, これを冷却するとマルテンサイト相に変態し, このマルテンサイト相は外部からの力で簡単に變形させることができる。通常の金属は, 大きな力で變形させると, 原子間の結合のすべりである転位が進展・蓄積することで變形するが, この相は原子間の結合を切らず原子間が相互に少しずつ位置関係をずらしながら變形する(図-9.2.1)。これを再加熱し構造がオーステナイト相に逆変態するとき, 原子間の位置関係も元に戻ろうとし, ニッケル-チタン(Ni-Ti)合金の形状も元の形にもどる。

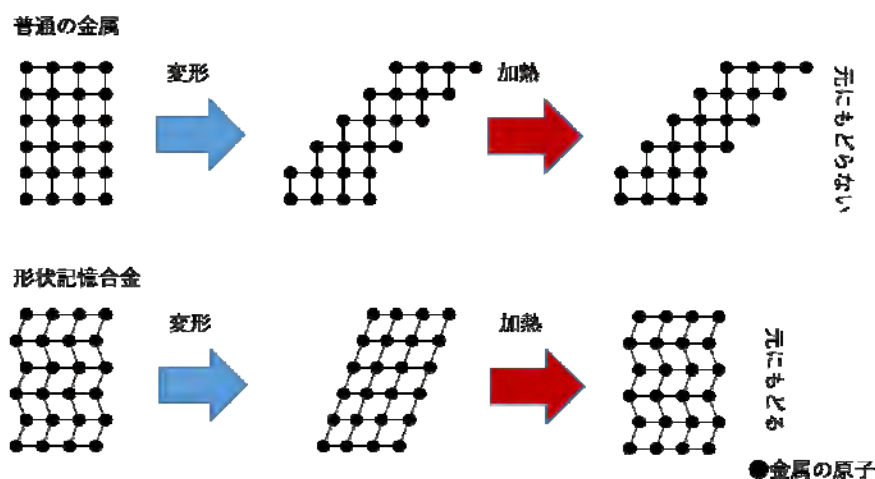


図-9.2.1 形状記憶合金の變形イメージ

一方で, 鉄(Fe)合金においても, 鉄-マンガン(Fe-Mn)系や鉄-ニッケル(Fe-Ni)系の合金において形状記憶の現象が現れることが知られている。わが国では, 鉄-マンガン-ケイ素(Fe-Mn-Si)合金, 鉄-ニッケル-コバルト-チタン(Fe-Ni-Co-Ti)合金などが提案されている【丸山ら, 1996】⁶⁾。鉄(Fe)系の形状記憶合金は, ニッケル-チタン(Ni-Ti)合金ほどの形状復元特性を示さないが, 比較的安価で, 強度も強く, 形状記憶の回復温度が高いなどの特徴がある。溶接性や加工性も良好であり, 大型部材の製作が可能なことから, 建設分野においても応用されている【大塚ら, 1998】⁷⁾。表-9.2.1 に鉄-マンガン-ケイ素(Fe-Mn-Si)系の形状記憶合金の基本特性を示す。

表-9.2.1 鉄-マンガン-ケイ素(Fe-Mn-Si)系の形状記憶合金の基本特性⁸⁾

【出典：粕谷太郎, 小幡常雄, 三木甫, 丸山忠克 (1999)：地下空間構築に用いる曲線パイプ接合技術の開発, 地下空間シンポジウム論文報告集 (土木学会), Vol. 4, pp. 275-282】

物理的特性		
密度 (25℃)	g/cm ³	7.2～7.5
融点	℃	1,320～1,350
比熱	cal/g・deg	0.13
線膨張係数	×10 ⁻⁶	18
熱伝導率	cal/cm・deg・sec	0.02
比抵抗	×10 ⁻⁶ /Ω・cm	100～130
ヤング率	×10 ⁻⁵ N/mm ²	1.814
ポアソン比		0.285
変態温度	℃	-20～25
変態温度	℃	130～185
磁氣的性質		常磁性

機械的特性		
引張強度	N/mm ²	686～1275
降伏耐力	N/mm ²	245～295
伸び	%	30
硬さ	Hv	190～200
記憶特性		
形状回復タイプ [*]		一方向性
形状回復歪み	%	2.5～4.5
形状回復応力	N/mm ²	147～196

応用例としては、鋼管の非溶接接合に用いられた例が報告されている【粕谷ら，1999；山本ら，2003】^{8)・9)}。図-9.2.2 に鋼管同士を形状記憶合金の円筒を用いて接合する方法を模式的に示すが、拡張した形状記憶合金の円筒に、接合する鋼管を両側より挿入したのち、誘導加熱により円筒の合金を約 300℃に加熱することで円筒を縮管し、鋼管を締め付けることで鋼管同士を接合するという方法である。この際、鋼管と合金円筒の間にシアキーを仕込む等の工夫により、十分な強度の接合が可能となっている【粕谷ら，1999】⁸⁾。

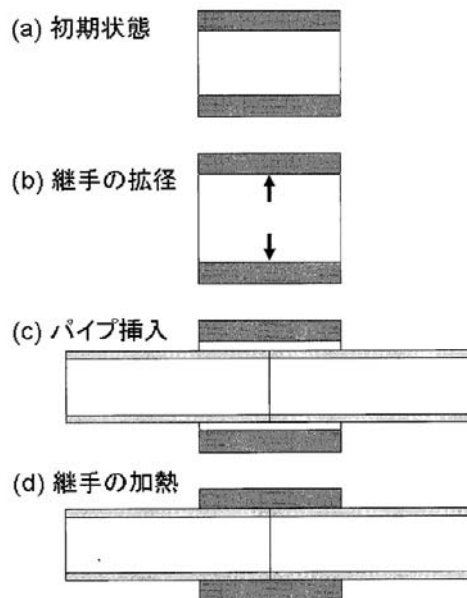


図-9.2.2 形状記憶合金継手によるパイプの接合 ¹⁰⁾

【出典：澤口孝宏(2007)：形状記憶合金の最新研究動向，化学と教育，Vol.55，No.9】

9.3 非磁性鋼 【市川ら，1992；市川ら，1994；成田，1998；新日本製鐵，1999】^{11)～14)}

非磁性鋼(Non-magnetic steel)とは、強磁性でない鋼，すなわち、磁石に付かない鋼の通称である。一般に磁場中での磁化のしやすさの尺度である透磁率 μ を用い、その値が1.02以下のものをいう場合が多い。

磁気浮上式リニアモーターカーのように高い磁場を使用する施設，地磁気観測施設などの磁氣的雑音を嫌う施設，電解精錬炉などの大電流を用いる施設などでは，磁性材料の存在により磁界の乱れを生じたり，エネルギーロスを生じたりする，などの不都合が生じる。したがって，これらの設備には非磁性が求められ，設備を構成する材料も非磁性であることが求められる。

鋼材では，オーステナイト組織が非磁性であることが知られており，オーステナイト系ステンレス鋼，高マンガン鋼などがこれに該当する。しかしながら，ステンレス鋼は元来耐食性の向上を主目的としているので，クロム(Cr)，ニッケル(Ni)など比較的高価な添加元素が多く含まれており，高価であることに加え，加工によって磁性が生じるという問題がある。これに対し，高マンガン鋼は比較的

安価な添加元素であるマンガン(Mn)を多く含む安定したオーステナイト組織であり、ステンレス鋼よりも安価で、加工を行っても非磁性の劣化が生じないという特徴を有しており、非磁性鋼として注目されている。

表-9.3.1に、高マンガン鋼の種類と特徴、用途の例を示す。また、表-9.3.2に化学成分の例を示す。

表-9.3.1 高マンガン鋼の種類・特徴・用途¹³⁾

[出典：成田信之[編著](1998)：鋼橋の未来－21世紀への挑戦，4.3 磁気浮上式鉄道橋梁，技報堂出版，pp.121-124]

鋼種	特徴	用途
25%Mn鋼	極低温においても安定して非磁性であり、高い強度とじん性を有する。熱膨張係数が小さい。良好な被削性と溶接性を有し、加工が容易。	超伝導磁石保持材 極低温用非磁性材料 常温用非磁性構造物
25%Mn-15%Cr鋼	上記の25%Mn鋼に加え、耐銹性を有する。	上記の25%Mn鋼と同一
18%Mn鋼	常温～50℃付近まで安定して非磁性である。ある程度の切削加工と溶接が可能である。	常温用非磁性構造物
15%Mn鋼	常温付近で安定して非磁性である。	常温用非磁性構造物
13%Mn鋼	優れた耐摩耗性を有する。	耐摩耗用鋼材

表-9.3.2 高マンガン鋼の化学成分の例¹³⁾

[出典：成田信之[編著](1998)：鋼橋の未来－21世紀への挑戦，4.3 磁気浮上式鉄道橋梁，技報堂出版，pp.121-124]

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Al	N
25%Mn鋼	≤0.3	≤1.0	25	≤0.03	≤0.01	1	5	—	—	0.1	0.03	0.1
25%Mn-15%Cr鋼	≤0.08	≤1.0	22-25	≤0.03	≤0.01	1-4	13-15	0.5 -1.0	0.5 -1.0	—	0.03	0.20 -0.30
18%Mn鋼	0.45- 0.50	0.20 -0.60	17-19	≤0.03	≤0.01	1	2	—	—	—	0.03	0.01 -0.02
15%Mn鋼	0.6	≤1.0	15	≤0.03	≤0.05	—	—	—	—	—	0.03	0.02
13%Mn鋼	0.9 -1.3	≤1.0	11-14	≤0.03	≤0.05	—	—	—	—	—	—	—

高マンガン鋼は加工硬化が大きいいため、被削性などの加工性は一般的な鋼材に比べて低下する。このため、ドリルによる孔あけ加工などは普通のドリルを使うとドリルの損耗が早いことや、ガス切断時には切断面の表面粗さのばらつきが大きく、適切な切断条件の設定が難しいなどの問題点が指摘されている。一方で、構造物の製作に欠かせない溶接性や、耐久性に関係する疲労強度は一般の鋼材とほとんど変わらないことが報告されている。

しかしながら、オーステナイト系ステンレスに比べて安価ではあるものの、普通鋼に比べると高価であることは事実であり、硬く、加工性に劣るため、リニアモーターカーではどうしても非磁性が必要となる部位、例えばガイドウェイ構造物、あるいはその近傍にのみ使うこととされている[市川，1997]¹⁵⁾。

9.4 制振鋼板

近年、振動、騒音を低減してより良い環境を目指すことが社会的な要求となっている。振動、騒音の低減には発生源を絶つ、伝播経路で吸収抑制するなどの技術が必要であるが、その一つに制振鋼板の利用がある。

制振鋼板は、鋼板での振動の発生を抑えて騒音を低減しようとするものである。制振鋼板には、制振性能を発揮する合金を添加した合金系と鋼板の間に40～60μm程度の粘弾性を有する樹脂を挟み、樹脂のずり(せん断)変形により振動を吸収する樹脂サンドイッチ型(図-9.4.1)の2種類がある[日本鋼構造協会, 1998]¹⁶⁾。

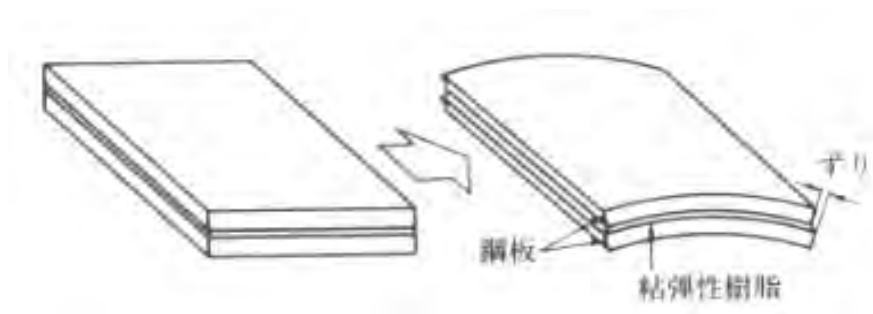


図-9.4.1 制振鋼板(樹脂サンドイッチ型)¹⁶⁾

[出典：日本鋼構造協会(1998)：鋼構造技術総覧[土木編]，技報堂出版，pp. 49-52]

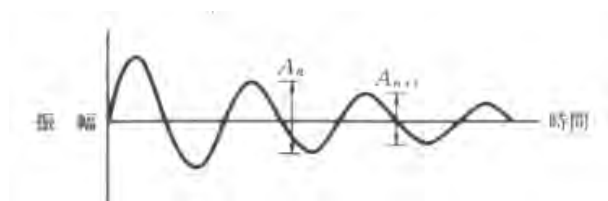


図-9.4.2 減衰の定義¹⁶⁾

[出典：日本鋼構造協会(1998)：鋼構造技術総覧[土木編]，技報堂出版，pp. 49-52]

制振性能は、物体の振動がどの程度早く減衰するかを表す損失係数 η (式(9.4.1))で表される(図-9.4.2)。

$$\eta = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right) \quad - (9.4.1)$$

(A_n :振動の振幅)

各種材料の損失係数を図-9.4.3に示す。損失係数は、普通の鋼板が0.001程度であるのに対し、合金型が0.01～0.03程度、樹脂サンドイッチ型が0.1前後である。

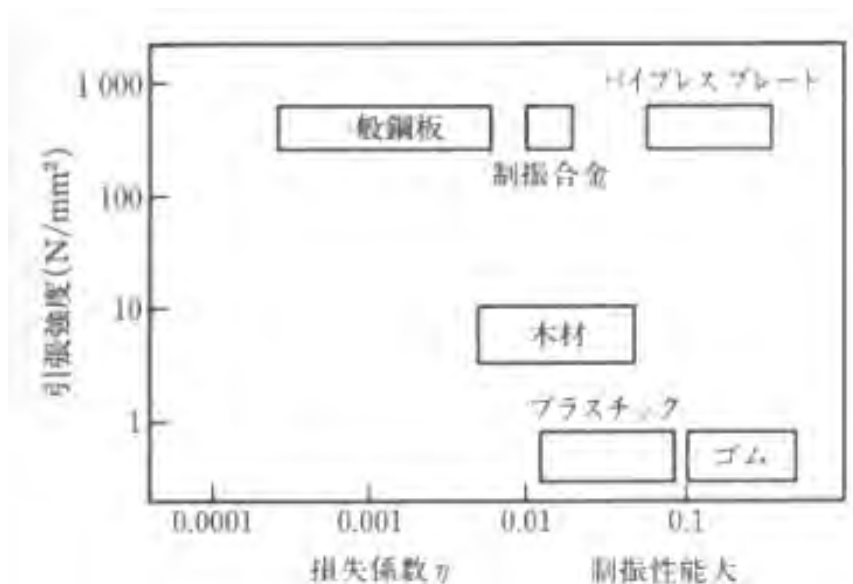


図-9.4.3 各種材料の減衰性能¹⁶⁾

[出典：日本鋼構造協会(1998)：鋼構造技術総覧[土木編]，技報堂出版，pp. 49-52]

合金型は，ガス切断，溶接性等の加工性については普通鋼と同等であり，加工性に優れるが，その振動減衰機構上の理由から，鋼板に大きなひずみを加えると制振性能が低下することが知られており，土木構造物本体に適用された例はない．それに対し，樹脂サンドイッチ型制振鋼板の方は，鋼板の間に熱に弱い樹脂を挟み込んでいるため，ガス切断が不可能であり，溶接に際しては熱影響で樹脂がガス化して欠陥の原因となるため，溶接部近傍の樹脂をあらかじめ除去しておく必要がある(図-9.4.4)など，加工性は普通鋼よりも低下する．また，鋼板を2枚貼り合わせた構造であるため，座屈強度などの評価は2枚板として評価することになり，必要板厚が増えることや，ボルト継手において樹脂のクリープ変形によるボルトの軸力抜けが大きくなるなどの問題がある[佐々木ら，1997]¹⁷⁾．しかしながら，上述のように制振性能が優れていることから，構造物より発生する騒音を低減するため，鋼鉄道橋への適用が検討された例がある．鋼鉄道橋における構造音は，板厚が薄く振動しやすい上に音の放射面積が大きいウェブが主音源になっていることが指摘されている．そのため，鋼鉄道橋から放射される構造音を低減するためには，ウェブの振動を抑えることが効果的で，鋼鉄道橋のウェブに制振鋼板を用いることが考えられており，1970年代に2橋，1990年代に1橋の建設例が報告されている[佐々木ら，1998]¹⁸⁾．

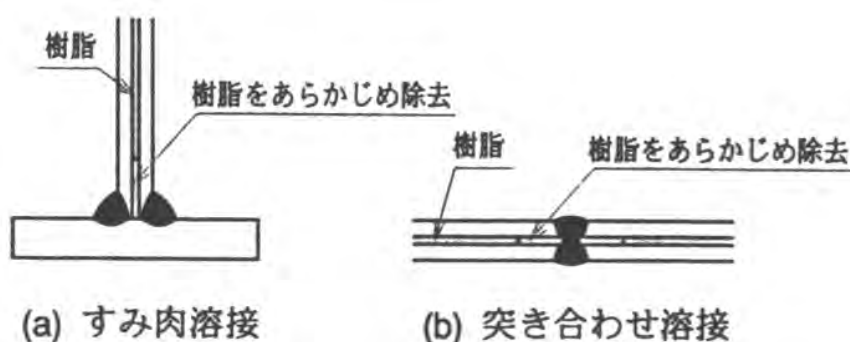


図-9.4.4 制振鋼板の溶接部¹⁹⁾

[出典：1 宮崎晴之，矢部泰彦，市川篤司，川原田亨，安波博道，佐々木道夫(1997)：制振鋼板を用いた鋼橋の設計施工に関する検討，土木学会第52回年次学術講演会後援概要集第1部(A)，pp. 654-655]

図-9.4.5は、模型走行試験による騒音の測定結果を示したものである。模型を用いた走行実験[佐々木ら，1997]¹⁷⁾，および実橋の騒音測定[佐々木ら，1998]¹⁸⁾により，普通鋼を用いた橋梁に比べて数dBの騒音低減効果があることが報告されている。

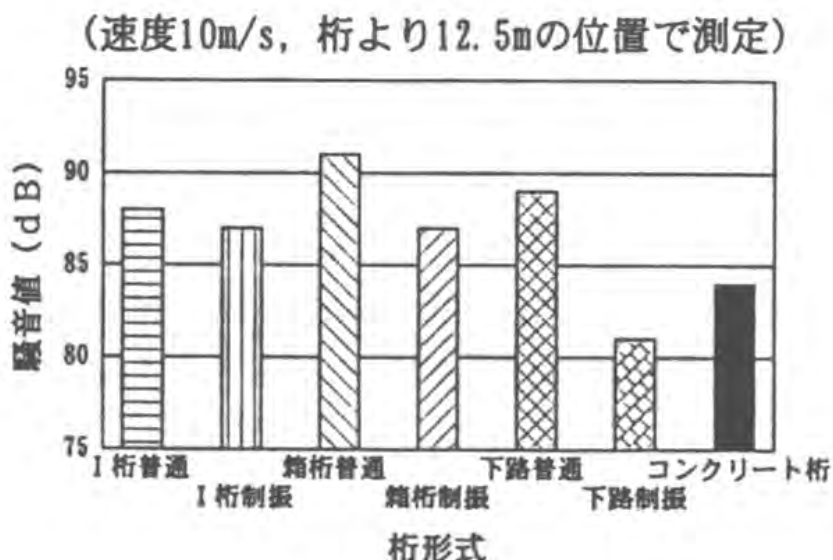


図-9.4.5 模型桁試験の騒音測定結果¹⁷⁾

[出典：佐々木道夫，市川篤司，小林潔，安波博道，川原田亨(1997)：鋼鉄道橋の走行模型実験による騒音測定，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第1部(A)，pp.664-665]

樹脂サンドイッチ型の制振鋼板は，自動車や家電などに適用される薄板を使用したものは現在でも製造されている。しかしながら，橋梁へ適用する厚板を使用したものは，鋼板の製造の効率が悪くコストが嵩むことから，現在では製造されなくなっている。また，実構造物においても，溶接時に一工夫が必要なこともあって製作に手間がかかり，製作コストが嵩むなどの理由から，本体構造に適用された例は，上記のもの以降は報告されていない。

第9章 参考文献

- 1) 森田耕次(監修)(2008)：新しい建築構造用鋼材[建築構造用鋼材の知識2008]，鋼構造出版
- 2) 宇佐美勉(2005)：耐震構造から制振構造へ，横河ブリッジグループ技報，No.34，pp.16-23
- 3) 山口種美，中田安洋，竹内徹，池辺卓，長尾年通，南昇，鈴木孝彦(1998)：極低降伏点鋼，低降伏点鋼を使用した制振技術の開発，No.368，pp.61-67
- 4) 日鉄エンジニアリング(2022)：日鉄エンジニアリング HP,土木・橋梁用アンボンドブレース
(https://www.eng.nipponsteel.com/steelstructures/product/bridge/unbondedbrace_bridge/)
[2022.9.8 確認]
- 5) 金治英貞，篠原聖二(2012)：損傷制御設計を用いた鋼管集成橋脚の開発とシミュレーション技術，第15回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.39-52.
- 6) 丸山忠克，大塚広明(1996)：ここまできた鉄系形状記憶合金，金属，Vol.66，No.12，pp.1079-1088
- 7) 大塚広明，棚橋浩之，丸山忠克，村上雅人，山田寛之(1998)：鉄系形状記憶合金と構造材用継手の開発，まてりあ，第37巻，第4号，pp.283-285
- 8) 粕谷太郎，小幡常雄，三木甫，丸山忠克(1999)：地下空間構築に用いる曲線パイプ接合技術の開発，地下空間シンポジウム論文報告集（土木学会），Vol.4，pp.275-282

- 9) 山本匡昭, 前殿裕章, 松野進, 梅本幸作, 中村公生, 道浦吉貞, 久保紘(2003): 遠心鑄造法による鉄系形状記憶合金パイプ継手の実用化開発, クリモト技報, No.49, pp.52-58
- 10) 澤口孝宏(2007): 形状記憶合金の最新研究動向, 化学と教育, Vol.55, No.9
- 11) 市川篤司, 穴見源八(1992): 鋼構造物と超電導磁気浮上式鉄道, 橋梁と基礎, Vol.26, No.4, pp.19-26
- 12) 市川篤司, 村田清満, 穴見源八, 松浦章夫(1994): 高マンガン鋼の浮上式鉄道構造物への利用に関する研究, 鋼構造論文集, 第1巻, 第1号, pp.63-72
- 13) 成田信之[編著](1998): 鋼橋の未来—21世紀への挑戦, 4.3 磁気浮上式鉄道橋梁, 技報堂出版, pp.121-124
- 14) 新日本製鐵株(1999): 制振鋼板—バイブレス— [カタログ]
- 15) 市川篤司(1997): リニアモーターカーと鋼材, ステンレス建築, No.8, pp.13-17.
- 16) 日本鋼構造協会(1998): 鋼構造技術総覧[土木編], 技報堂出版, pp.49-52
- 17) 佐々木道夫, 市川篤司, 小林潔, 安波博道, 川原田亨(1997): 鋼鉄道橋の走行模型実験による騒音測定, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 1 部(A), pp.664-665
- 18) 佐々木道夫, 中嶋智, 高木優任, 市川篤司, 池田学(1998): 制振鋼板製鋼鉄道橋の経年変化について, 鋼構造年次論文報告集, 第 6 巻, pp.371-376
- 19) 宮崎晴之, 矢部泰彦, 市川篤司, 川原田亨, 安波博道, 佐々木道夫(1997): 制振鋼板を用いた鋼橋の設計施工に関する検討, 土木学会第 52 回年次学術講演会後援概要集第 1 部(A), pp.654-655
- 20) 鋼材倶楽部(1998): 新しい建築構造用鋼材, 鋼構造出版

10. 今後の展望

ここでは、鉄鋼材料の技術開発の方向性を示した「超鉄鋼プロジェクト」、ならびに地球規模の問題である地球環境問題の解決に向けた喫緊の課題である「カーボンニュートラル」の実現に向けた鉄鋼業の取組みを紹介する。

10.1 超鉄鋼材料プロジェクト

10.1.1 超鉄鋼材料プロジェクトの目指したもの [長井, 2006]¹⁾

鉄鋼材料は、構造材料として最も汎用性の高い金属材料であり、これまで見てきたように、産業技術の発展に伴い、金属材料に要求される機械的特性や機能的特性は益々高まってきている。また、1950年代からの高度成長期に整備してきた高層ビルや交通網などの社会基盤が更新時期を迎えつつあることもあり、社会資本及び構造物の軽量化や安全性の向上、さらには長寿命化等によるトータルライフサイクルコストの低減に資する優れた構造材料が求められている。

また、地球環境問題への関心の高まりから、省エネルギー、省資源、環境調和性等といった環境負荷の軽減や資源保存に対する社会的要請もますます大きくなってきている。鉄鋼材料は、スクラップの電気炉での再生というリサイクルシステムの最も整備された素材の一つあるが、リサイクルの過程で除去し難い銅(Cu)などの元素（トランプエレメントと呼ばれる）の蓄積による鋼材材質への影響も指摘されている。また従来、金属材料の特性向上は熱処理、合金元素添加等の技術によって行われてきたが、リサイクルしやすいように希少合金元素を使わずに高性能化を図る等の、リサイクル性等に優れた材料開発も求められている。

一方で、近年の基礎的な研究によって、材料の結晶粒径を微細化することで、強度、じん性、耐食性等が大きく向上することが明かにされてきた。先述の TMCP 技術は合金元素を極力抑えて強度とじん性を向上させるが、組織の結晶粒径は、フェライト粒径で $5\mu\text{m}$ 程度が限界であった。これを $1\mu\text{m}$ 以下のオーダーまで組織を微細化することができれば、希少な合金元素を使わずに、従来鋼(400MPa 級鋼)の 2 倍の強度を持ち、じん性等の諸特性を向上させることができるとされている [栗飯原, 2002 ; 玉生ら, 2002]^{2), 3)}。

このような背景のもと、軽量化、長寿命化とともに高強度・高性能なリサイクル性等に優れた汎用構造材料という次世代の鉄鋼材料の創出を目指す産官学参画の共同研究プロジェクトとして、経済産業省の「スーパーメタルの技術開発」プロジェクト、および文部科学省の「新世紀構造材料「超鉄鋼材料」(略称: STX-21)」プロジェクトがいずれも 1997 年に立ち上げられた。

前者の「スーパーメタルの技術開発」では、鉄(Fe)系スーパーメタルとアルミ(Al)系スーパーメタルの 2 つが開発目標としてあげられているが、鉄系では最終目標を「均一な複相組織鋼化によって、結晶粒径が $1\mu\text{m}$ 程度以下で、大きさが 1mm 以上の厚さを持つ微細組織鋼の創生技術を確立すること」[栗飯原, 2002]²⁾ と設定し、5 年間の研究により、大ひずみ加工や強磁場中加工熱処理によって実験室規模の熱延実験で厚さ 5mm の鋼板の試作に成功し、鋼板内で $1\mu\text{m}$ 以下の微細結晶粒組織化を達成している。試作された超微細粒鋼について、900MPa 以上の強度及び 20%以上の伸び特性を有し、じん性・疲労強度の等の特性の向上を確認してプロジェクト目標を達成している。このプロジェクトは、超微細粒鋼の工業生産を可能ならしめる革新的なプロセス基盤技術と、超微細粒鋼の実用化を可能とする革新的接合技術の研究開発を行う「環境調和型超微細粒鋼創生基盤技術開発」プロジェクト [木内, 2003]⁴⁾ へ引き継がれ、現在もその流れをくむ研究が続けられている。

一方、後者の「超鉄鋼材料」プロジェクトでは、「強度 2 倍、寿命 2 倍」の鉄鋼材料「超鉄鋼(Ultra Steel)」の創製を目指し、単なる材料創製に留まらず、溶接等の方法で構造体に組み上げる構造化技術とその構造物が実用環境で十分に耐える性能を有するかを実証する評価技術との有機的結合を目指した基礎研究および開発が行われた [萩原ら, 2002a]⁵⁾。「超鉄鋼材料」プロジェクトでは、「都市新基盤構造物」という建設分野での活用をその柱として目標を設定し、開発が進められた [高橋, 2002 ; 萩原ら, 2002b]^{6), 7)} ことから、以下では「超鉄鋼プロジェクト」についてより詳しく紹介する。

超鉄鋼プロジェクトは 1997 年から 10 年構想で開始された。その目標は、上記の様に、希少な合金をなるべく使わない、リサイクルしやすい鉄鋼材料で「強度 2 倍、寿命 2 倍」の鉄鋼材料を開発することであった【長井，2006】¹⁾。具体的な課題としては、以下が設定された。

強度 2 倍材料の研究として、

①溶接が容易で合金元素を使わない溶接構造用の超微細粒 800MPa 級鋼の開発

②溶接継手に替わる高強度ボルト継手の実現、あるいは自動車部品などの軽量化の実現を目指す 1500MPa 級鋼の開発

寿命 2 倍材料の研究として、

③石炭火力発電のエネルギー効率の 5 % 向上を可能にする高強度フェライト系耐熱鋼の開発

④海浜・海洋環境用の省ニッケル(Ni)高耐食性ステンレス鋼，Ni レス耐候性鋼の開発

1997 年～2002 年の第 1 期の研究で、超鉄鋼材料を実験室レベルでつくることができるようになったことが報告されている【高橋，2002；萩原ら，2002a】^{6)・5)}。また、その材料の機能を生かす溶接技術の基盤も確立し、さらに遅れ破壊やクリープ特性で新しい評価法も提案されている。2002 年からの第 2 期の研究においては、実験室レベルから工業化を視野に入れた基礎研究への展開がなされた。「都市新基盤構造物」と「高効率火力発電プラント」を目標に設定し、構造物をリサイクル性に優れた強度も寿命も同時に 2 倍にする「ファクター 4」の高強度耐食鋼と耐熱鋼を創製すること、及び材料の優れた機能を生かす新構造の模擬体製作からその特性評価が行われた【高橋，2002；萩原ら，2002b】^{6)・7)}。

図-10.1.1 は、超鉄鋼を橋梁に適用した場合のイメージを示したものである。鋼桁には、微細粒高強度鋼とニッケル(Ni)レス高耐候性鋼を組み合わせたもの、桁の現場接合には遅れ破壊に強い超高強度のボルト接合、また、海水につかる橋脚は耐海水高窒素(N)ステンレス鋼を使うことが想定されている。さらに、疲労強度を倍増する溶接材料を使い、高強度でかつ長寿命化をはかることで、軽量化とともにトータルコストを下げることも考えられている。

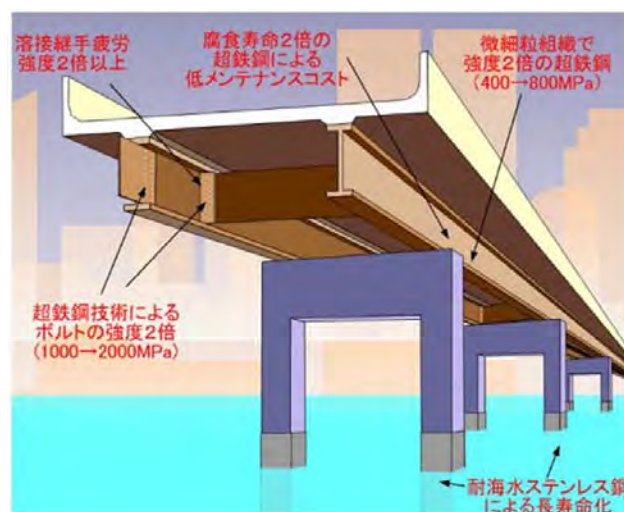


図-10.1.1 超鉄鋼による橋梁構造 ⁸⁾

【出典：物質・材料研究機構 (2022)：物質・材料研究機構 HP，高強度耐食鋼 TF】

次項以降では、超鉄鋼プロジェクトにおいて得られた成果を、建設分野に関係する部分を中心に、文献【長井，2006】¹⁾をもとに簡潔にまとめて記す。

10.1.2 高強度化 【物質・材料研究機構，2001】⁹⁾

(1) 800MPa 級土木建築用鋼材

リサイクル性を損なわずに高強度化を図る手段として、鋼材の成分は SM490 と同等としつつ、結晶粒径を約 1 μ m 以下までにするという従来技術を超える結晶粒細粒化強化により目標強度を達成す

ることを目指して開発が進められた。結果、600℃～650℃という従来よりも比較的低温のフェライト相状態で、何回にも分けて大圧下（ひずみ2以上）を与えることにより実現可能であることを見出している。現実には、このような大圧下により、鋼全体に均一にひずみを与えることが課題となるが、2方向（上下、左右）圧延により実験室での試作に成功したとされている。開発鋼の強度および破壊じん性について図-10.1.2 及び図-10.1.3 に示す。開発鋼は、従来のマルテンサイト鋼の HT780 とほぼ同等の強度および伸び性能を合金元素の添加を行わずに達成されていることがわかる。また、細粒化により破壊じん性については SM490 に比べてさえ大幅に改善されている。

さらに、その実用化に向けて、圧延技術としては、鋼材を 90°回転させることによる熱間での 2 方向圧延法を開発し幅 80mm 程度の厚板試作を成功させている。さらに、クロス角度 10°の多方向クロス圧延法の検討が行われたことが報告されている。

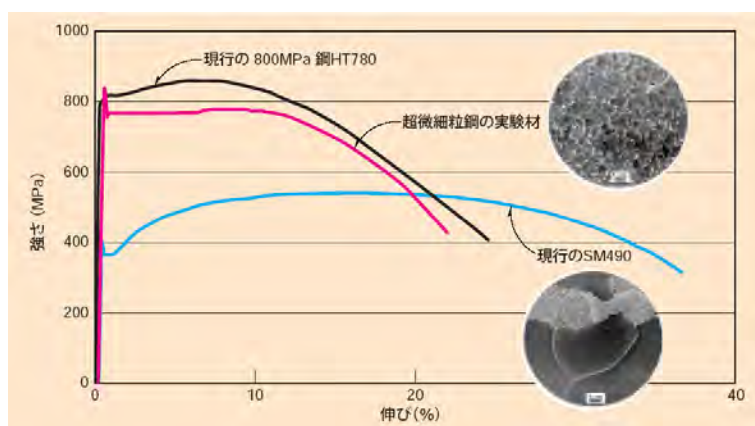


図-10.1.2 開発材の引張応力—ひずみ曲線⁹⁾

〔出典：物質・材料研究機構(2001)：近未来の鉄鋼材料を知る(高強度化版) 〔パンフレット〕〕

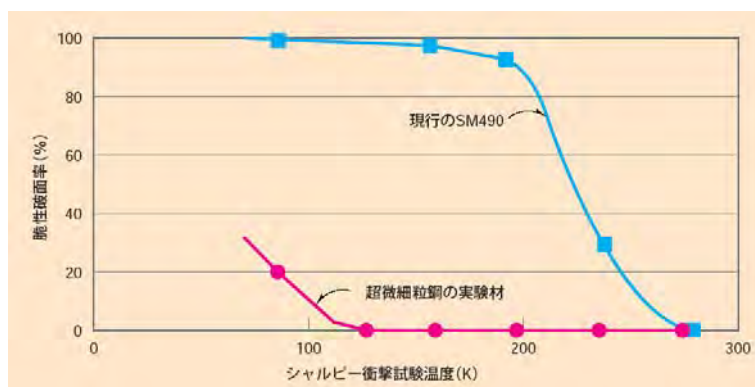


図-10.1.3 開発材のシャルピー衝撃試験でのぜい性破面率⁹⁾

〔出典：物質・材料研究機構(2001)：近未来の鉄鋼材料を知る(高強度化版) 〔パンフレット〕〕

溶接技術としては、細粒結晶を損なわないような低入熱溶接法として、パルス状の高溶接電流を用い開先幅 5mm という狭開先ガスメタルアーク溶接プロセスや、溶け込み深さが 20mm にも及ぶ大出力パルス変調 20kw 炭酸ガス溶接機が開発されている。

（2）1,500MPa 級超高強度ボルト・バネ用鋼

このクラスの高強度化については、遅れ破壊と疲労破壊の克服が最大の課題である。

ボルト・バネ用鋼は焼き戻しマルテンサイト組織であり、遅れ破壊の克服にはその旧 γ 粒界を強化する必要がある。これを達成するため、SCM440 鋼をベースに、図-10.1.4 に示すような改良オース

フォーム加工熱処理法を開発している，この方法では，800℃という温度でオーステナイト相組織を50%圧下することで，結晶粒界を1 μm 単位で凹凸に湾曲させ，粒界に析出するセメントサイトを微細化することに成功している．これにより，遅れ破壊強さの大幅な向上（図-10.1.5 参照）と，疲労限が引張強さの0.5以上という疲労強度の向上を達成したとされている．

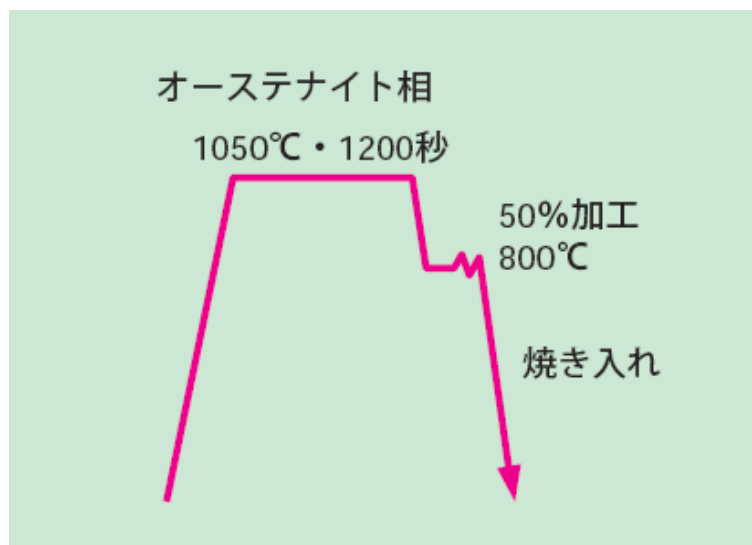


図-10.1.4 1,500MPa級材を実現する改良オースフォーム加工熱処理⁹⁾

[出典：物質・材料研究機構(2001)：近未来の鉄鋼材料を知る(高強度化版) [パンフレット]]

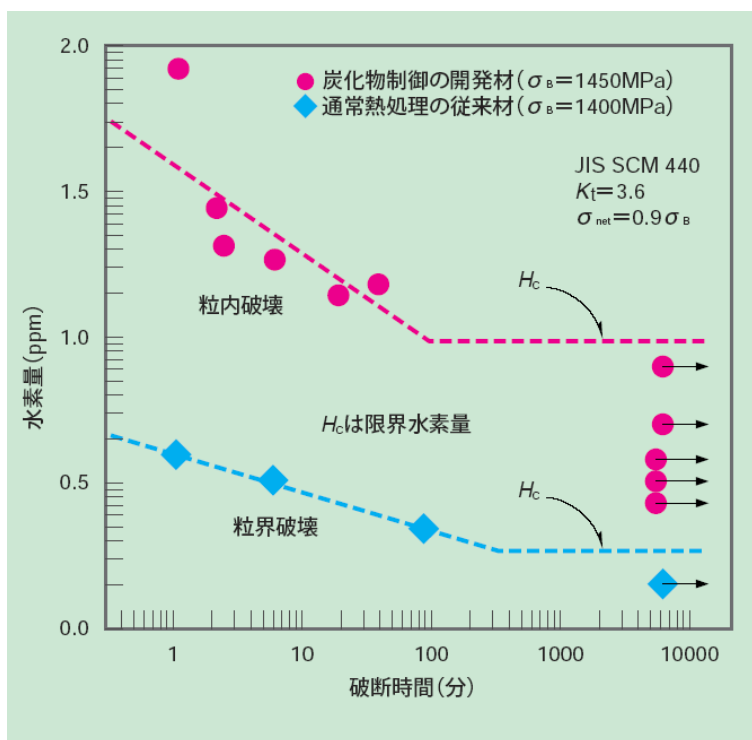


図-10.1.5 開発材と通常熱処理材の遅れ破壊試験による水素量-破壊時間曲線⁹⁾

[出典：物質・材料研究機構(2001)：近未来の鉄鋼材料を知る(高強度化版) [パンフレット]]

10.1.3 超長寿命化 —新しい耐候性鋼 [物質・材料研究機構, 2004]¹⁰⁾

前節にて述べたように耐候性鋼は銅(Cu)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)やモリブデン(Mo)、チタン(Ti)を少量含む低合金鋼であるが、超鉄鋼プロジェクトにて目指すものは資源循環型社会の実現に貢献しうる、希少資源元素であるクロム(Cr)やニッケル(Ni)等を用いず、リサイクルしにくい銅(Cu)を含まない耐候性鋼の開発であった。この課題に対し、熱力学計算と結晶構造解析を駆使し、鉄酸化物の化学的安定性を分析することにより、新しい耐候性鋼として、地球に豊富にある元素で、リサイクル性に優れたアルミ (Al) とケイ素 (Si) を添加した耐候性鋼の可能性が見出されている。耐食性についても良好な結果が得られている(図-10.1.6)。また、これらの元素の添加にて劣化するじん性の問題については、超微細粒鋼化技術にて克服し、降伏強さが 700~900MPa の高い耐食性を有する耐候性鋼が実現できたとされている。

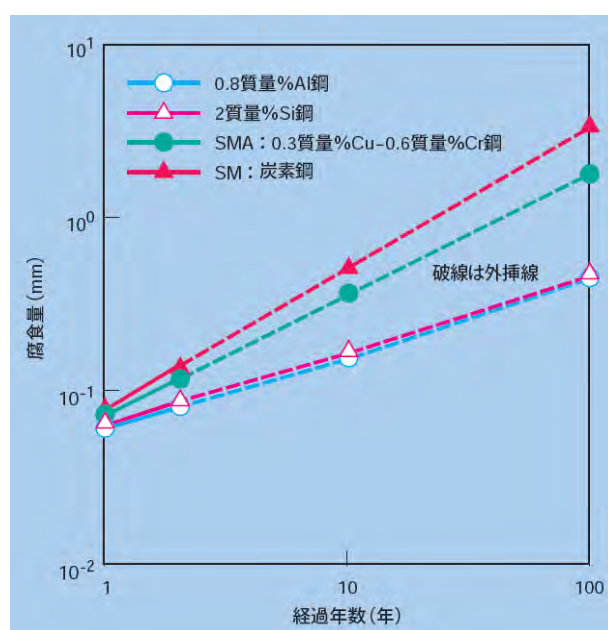


図-10.1.6 AlとSi 添加した試作耐食鋼の暴露試験による耐食性評価 (2年の大気暴露より100年を推定)¹⁰⁾

[出典：物質・材料研究機構 (2004)：近未来の鉄鋼材料を知る(耐候性鋼，腐食解析版) [パンフレット]]

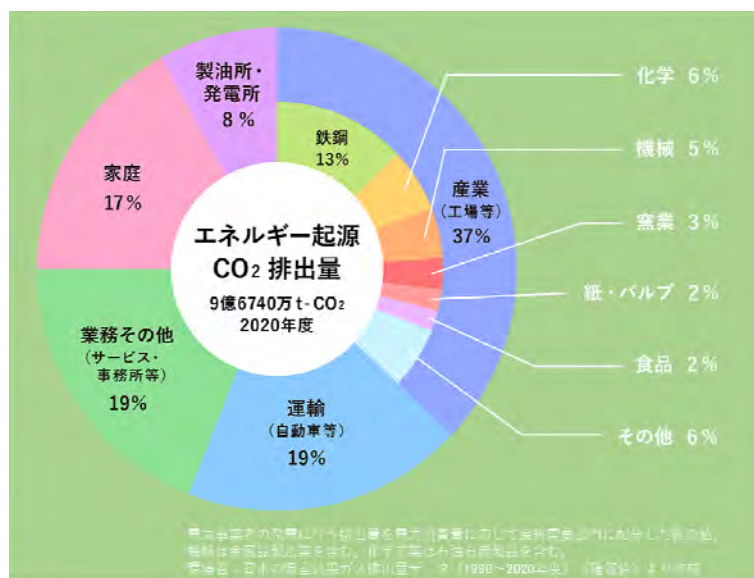
10.2 地球環境問題の解決に向けた鉄鋼業界の取り組み（ゼロカーボン・スチール）

10.2.1 ゼロカーボン・スチールが求められる背景

1992年に採択された国連気候変動枠組条約以降、世界的に温室効果ガスの排出量を削減するための議論がなされてきた。地球温暖化の原因は温室効果ガス（グリーンハウスガス：GHG）であり、このまま排出が続けば21世紀末には平均気温が4℃上昇し、水不足や農作物の減少、干ばつや森林火災、海面の上昇など深刻な影響が出ると予測されている。

1997年には、第3回国連気候変動枠組条約の締約国会議（COP3：The 3rd Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change）が開催され、温室効果ガス削減のために京都議定書が採択された。京都議定書では、参加した先進国全体に対して、「温室効果ガスを2008年から2012年の間に、1990年比で約5%削減すること」を要求し、実現に向けた努力が続けられた。京都議定書は一定の成果を上げたものの、発展途上国には削減義務が課せられず、地球規模でのGHG排出量は増加する結果となった。地球規模の課題である気候変動問題の解決に向けて、2015年にパリ協定が採択され、世界共通の長期目標として、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求すること（2℃目標）」、「今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成すること」等が合意された。この実現に向けて、120以上の国と地域が「2050年カーボンニュートラル」という目標を掲げている。

このような動きを受け、日本では、2020年10月、菅義偉首相（当時）が所信表明演説で「2050年までに温暖化ガスの排出を全体としてゼロにする」と宣言し、日本政府として2050年までにカーボンニュートラルの実現を目指すことが示された。カーボンニュートラルとは、二酸化炭素（CO₂）などの温室効果ガスの排出量と吸収量を同じにして、全体としてゼロにする取り組みである。温室効果ガスの排出そのものをゼロにするのは難しいため、排出量を抑制しつつ、再生可能エネルギーや温暖化ガス回収技術などを導入することで、生産活動と環境保護の両立が目指されている。



（国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィスデータを基に作成）

図-10.2.1 日本国内でのCO₂排出量のシェア¹¹⁾

【出典：日本鉄鋼連盟(2022)：日本鉄鋼連盟 HP，カーボンニュートラルへの挑戦】

「2050年カーボンニュートラル宣言」を受け、日本でもさまざまな産業分野で温室効果ガス排出を削減する取り組みが進められている。産業分野の中でもCO₂の排出量が多い鉄鋼業界(図-10.2.1)では、

脱炭素化に向けた取り組みが急ピッチで進められている。

国際エネルギー機関（IEA）の予測では、製造過程での水素の利用、CCUS（CO₂回収・有効利用・貯留：Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）の活用などで、鉄鋼材料の製造工程の CO₂ 排出量が実質ゼロとなる「グリーンスチール」の市場が、2050 年時点では約 5 億トンになり、2070 年には生産される鉄鋼のほとんどが、グリーンスチールに変わることが見込まれている。2019 年頃から欧州の主要鉄鋼メーカーがカーボンニュートラル（CN）の目標設定とそのための実行計画を発表したが、2020 年後半以降、日本、中国、米国等の主要鉄鋼メーカーが相次いで 2030 年前後の CO₂ 排出量の削減目標、2050 年のカーボンニュートラルの達成、さらにこれらに向けた実行計画を発表している。

10.2.2 橋梁分野におけるカーボンニュートラル

地球環境問題への関心の高まりを背景にして、CO₂ 排出量の削減が議論されるようになって以来、橋梁建設においても、建設から供用、廃棄に至るまでのライフサイクルでの CO₂ 排出量を評価する LCA 分析が行われてきた。試算の結果によると、材料製造に由来する排出量が多くを占めることが指摘されており、鋼材の製造過程における CO₂ 排出量が鋼橋建設の 60・70%程度を占めることが示されている。このことから、ゼロカーボン・スチール実現への期待が高まっている。

10.2.3 カーボンニュートラルの実現に向けた技術開発

日本の鉄鋼業全体を代表する団体である（一社）日本鉄鋼連盟において、これまでも地球温暖化問題の解決に向けた日本全体の鉄鋼業としての取り組みが推進されてきている。「低炭素社会実行計画」として、①エコプロセス（鉄鋼製造時におけるさらなる CO₂ 排出削減への取り組み）、②エコプロダクト（高機能鋼材の供給により最終製品での使用段階の CO₂ 削減への貢献）、③エコソリューション（世界で最もエネルギー効率の良い鉄鋼製造技術の海外への移転・普及）の「3つのエコ」と、④革新的な技術開発、の4つに対する取り組みにより、全世界的な CO₂ 排出量の削減に貢献してきている。日本政府の 2050 年カーボンニュートラル宣言を受けて、日本鉄鋼連盟では、「我が国の 2050 年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針」を発表し、わが国政府の野心的な方針に賛同し、これに貢献すべく、日本鉄鋼業としてもゼロカーボン・スチールの実現に向けて、果敢に挑戦することを宣言している。

日本鉄鋼業のこれまでの取り組みであるエコプロセス、エコプロダクト、エコソリューションを継続するとともに、鉄鋼業自らの生産プロセスにおける CO₂ 排出削減に挑戦することが宣言されている。

以下では、鉄鋼業におけるゼロカーボン・スチールの実現に向けた技術開発の背景と動向について詳しく説明する。

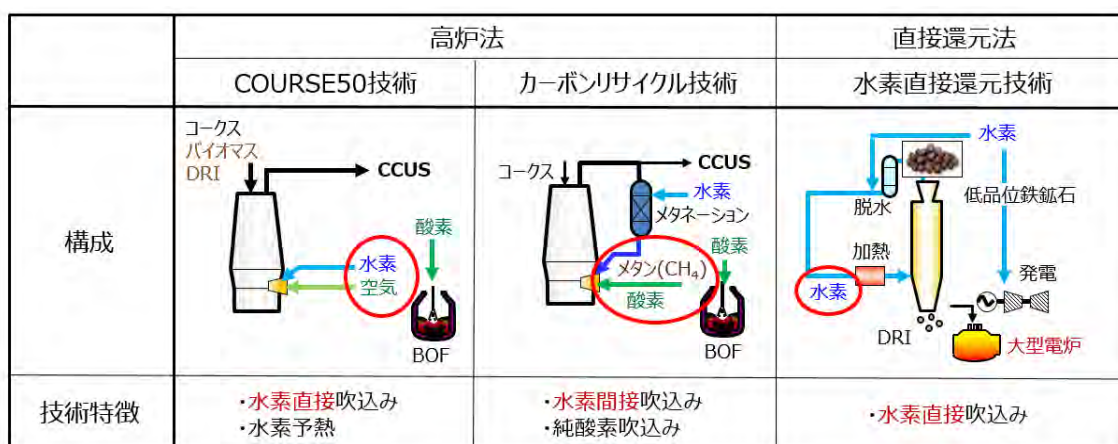
（１）鉄鋼業における CO₂ 排出量削減の考え方

世界の鋼材の 40%は国境をまたいで取引されており、日本の場合、鋼材生産の 60%以上が直接、間接に輸出され、世界の鉄鋼需要を満たしている。このように鉄鋼産業は、サプライチェーン、マーケットともにグローバル化しており、鉄鋼セクターの実効的な温暖化対策にはグローバルな視点が欠かせないとされている。

日本の鉄鋼業はこれまで優れた省エネルギー・環境技術で世界の鉄鋼業界全体に大きく貢献してきた。また、製品機能においても世界をリードし、自動車の軽量化や電動化を始め、製品の高機能化、効率化に資する鋼材の開発を通じて、わが国の国際競争力強化、人類の豊かさと地球環境の両立に貢献してきたことは紛れもない事実であり、これらは 2030 年以降の長期温暖化対策においても基本となる考え方である。

CO₂ 排出を抑えながら鉄鉱石から鉄鋼材料を作り出す（鉄を還元する）技術としては、図-10.2.2 に示す方法が現在考えられている。現在、日本の鉄鋼生産で主流になっているのは、「高炉法」である。

1.2 で述べたように、「高炉法」では、鉄鉱石やコークス(石炭を蒸し焼きにしたもの)を「高炉」とよばれる炉に投入し、炉の中で鉄鉱石から鉄だけを取り出す(還元)と同時に、鉄鉱石を溶かす(溶解)工程を一貫で行う。炭素を多く含むコークスを使って鉄鉱石を還元するので、CO₂が大量に発生する。これに対し、製鉄プロセスにおける CO₂の排出量を削減するため、コークスのかわりに水素を使って鉄鉱石を還元する「水素還元製鉄」技術が注目されている。これには、コークスの一部をメタンガスに置き換える方法と、コークスを全く用いずに水素で直接還元する直接還元の2種類がある。直接還元法では、天然ガスを使用して鉄鉱石を固体のまま還元し、そのあとで電炉に移して溶解が行われる。コークスを使わないため、100%水素(H)のみによる鉄鉱石の還元反応(水素還元製鉄)ができる可能性を秘めている。しかし、高炉法のように鉄鉱石の還元と溶解をひとつの炉で一貫しておこなうことができないため、エネルギー効率が低いのが難点である。また、電炉は高炉にくらべて不純物を除去することが難しいため、不純物が多く含まれる低品位の鉄鉱石が使えないなど、原料の制約もある。また、後述するように、この技術には様々な課題があり、世界的にもまだ技術が確立されていない。



※水素の調達方式によっては、H₂ではなく、NH₃の形態で炉に投入する可能性も考えられる。

図-10.2.2 鉄鉱石の還元方法¹²⁾

〔出典：大竹真貴(2021)：特殊鋼倶楽部 HP, 『「グリーン成長戦略」と鉄鋼分野における脱炭素化に向けた取組』講演会資料〕

また、鉄鋼製造での環境負荷を抑制するのであれば、鉄鉱石から鉄鋼材料をつくる(高炉)よりも、スクラップ(電炉)を活用すればよいとの意見もある。スクラップを有効利用すれば、資源の節約になることは間違いない。ただし、鉄鋼は自動車や各インフラ、電子電気機器などで2050年以降も需要が大きく、それを十分に満たす量のスクラップは発生しないと見込まれている。そのため、今後は、現在利用されている不純物の少ない高品質なスクラップに加えて、品質の低いスクラップについても最大限活用しつつ、鉄鉱石を活用した製鉄技術も並行して続けていくことが必要となるとされている。

表-10.2.1 銑鉄生産量・スクラップ利用量見通し¹³⁾

〔出典：日本鉄鋼連盟(2020)：日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」〕
(億 t)

	2015	2050	2100
最終製品中鋼材量	12.9	21.3	30.1
粗鋼生産量	16.2	26.8	37.9
銑鉄生産量	12.2	14.0	12.0
スクラップ利用量	5.6	15.5	29.7

(2) 鉄鋼メーカーの対応

日本鉄鋼連盟は、2030年以降を見据え、最終的なCO₂排出ゼロの鉄鋼『ゼロカーボン・スチール』を目指した「長期温暖化対策ビジョン—ゼロカーボン・スチールへの挑戦—」（鉄連長期ビジョン）を2018年11月に策定し、公表・実行されている。同ビジョンでは、鉄鋼製造における2℃シナリオ達成の見込みを示すとともに、1.5℃シナリオの実現に向けては超革新技術が必要となることが示されている。日本では世界に先駆けて、2008年から「水素活用還元プロセス技術（COURSE50）」というプロジェクトが開始されている。高炉法におけるコークスの一部を製鉄所内で発生する水素(H)で代替すること及び高炉から発生するCO₂を分離・回収することでCO₂排出量の削減を目指すものであり、2030年頃の実用化を目指して技術開発が進められている。一方で、CO₂排出量の大幅な削減には、従来の高炉を用いる製鉄技術では実現することが困難であるとされており、究極的には高炉を用いずに水素(H)のみで鉄鉱石を還元する水素還元製鉄技術などの超革新技術による「ゼロカーボン・スチール」の実現に挑戦することが示されている。

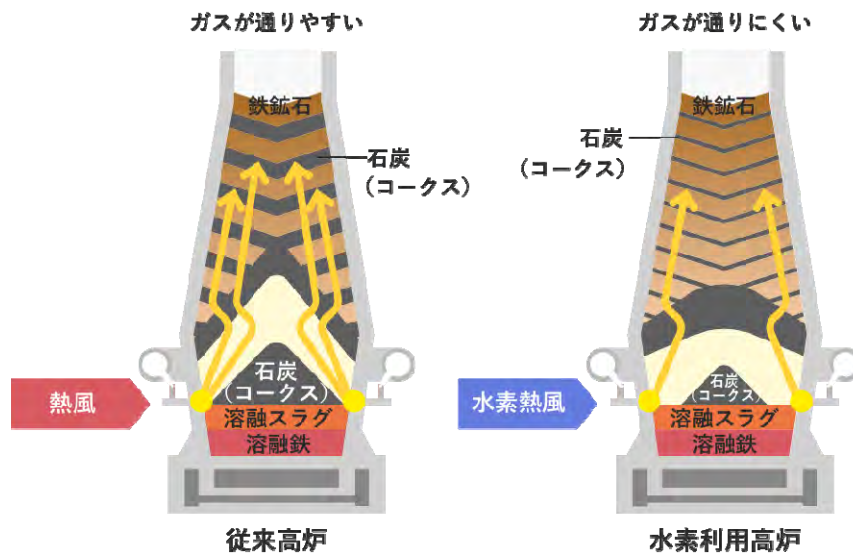


図-10.2.3 高炉製鉄での水素利用のイメージ¹¹⁾

〔出典：日本鉄鋼連盟（2022）：日本鉄鋼連盟 HP，カーボンニュートラルへの挑戦〕

(3) 技術開発

1) 技術開発のロードマップ

鉄鋼業における革新技術開発のロードマップ〔日本鉄鋼連盟，2020〕¹³⁾を図-10.2.4に示す。

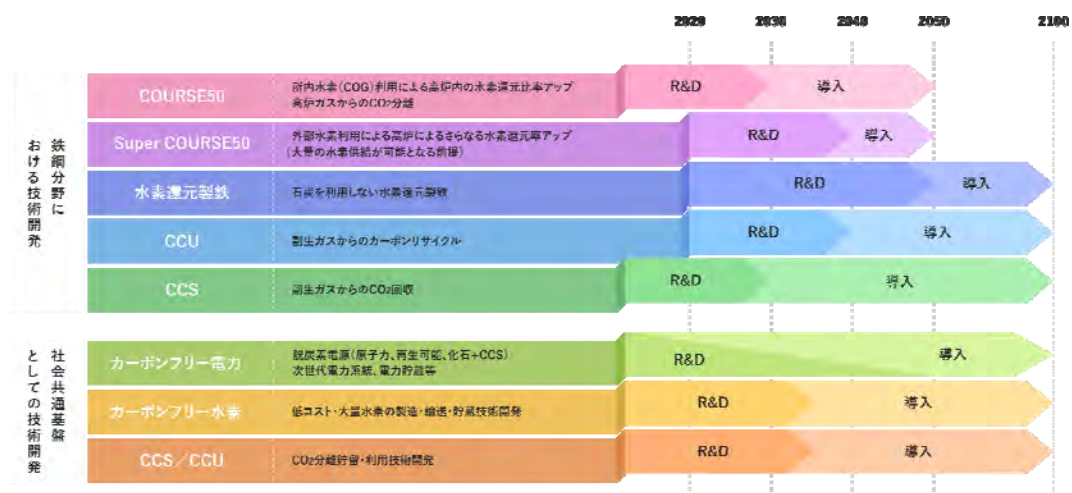


図-10.2.4 鉄鋼業の革新技術開発に向けたロードマップ¹³⁾

〔出典：日本鉄鋼連盟（2020）：日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」〕

当面は高炉法が、技術的にも経済的にも鉄鋼製造法の主流と考えられるため、高炉を前提とした低炭素化技術の確立が先行して進められている。先述のように、日本鉄鋼業では、2030年時点での実用化に向けて、COURSE50やフェロコークスなどの革新的製鉄技術の開発が鋭意続けられている。これらの技術が実用化された場合、天然資源ルートのCO₂排出量の10%削減が期待される（CCS効果を除く）。鉄連長期ビジョン[日本鉄鋼連盟、2020]¹³⁾では、最終的にCO₂排出ゼロの鉄鋼（ゼロカーボン・スチール）製造に向けた日本の鉄鋼業における道筋を描いている。その道筋は、現在開発が進められているCOURSE50プロジェクトからステップアップして、高炉での極限までの低CO₂排出を目指したSuper COURSE50、さらには究極のCO₂排出ゼロ製鉄技術である水素還元製鉄へと進むものである。

高炉内の反応を促進してCO₂の発生を抑える技術として開発が進むのが、コークスの一部を「フェロコークス」という材料に置き換える技術である。通常のコークスや鉄鉱石とともに高炉に投入すると、フェロコークスに含まれる金属鉄が還元反応を促進する触媒として働き、還元が高速化して、結果として低い温度で還元反応が起きる。必要な熱の量を抑えられるためコークスと補助燃料に使う微粉炭の投入量を減らすことができ、CO₂排出量を抑えられる。2023年頃までにCO₂排出量を約10%削減する技術の確立が目指されている。

COURSE50では、大量水素供給の社会基盤が存在しない現状においても水素による鉄鋼製造を一部実現すべく、製鉄所内で発生する副生ガス（現在は他の加熱設備等で利用されている）を高炉に回すことにより、高炉に10%程度までは水素を吹き込めると判断し、それに応じて高炉に投入する炭素量を減らすための研究開発が進められている。一方ゼロカーボン・スチールに向けては、十分な水素供給の社会基盤ができる時代を見越して、製鉄所外から水素を購入してさらに高炉への水素吹込み量を増やし、高炉の炭素量を減らす限界への挑戦(Super-COURSE50)を行うとされている。

なお、Super COURSE50では上記の通り、高炉を使う限り削減できない還元時の支えとなるコークスから発生する炭素(C)をゼロにすることができない。そのため、CCUS（CO₂ Capture, Utilization and Storage：CO₂捕集、利用、貯留）技術を組み合わせて残りのCO₂の排出を抑制する技術開発も必要である。特にCCS（CO₂捕集、貯留）においては貯留地の整備等の社会基盤整備も併せて必要とされている。

しかし、これらの取り組みだけではパリ協定が目指す長期目標レベルに到達することはできず、それらを超えた「超革新技術」が必要となる。日本鉄鋼業は、COURSE50・フェロコークスの開発によって得られる知見を足掛かりとして、最終的には製鉄プロセスからのゼロエミッションを可能とする水素還元製鉄技術、CCS、CCUの開発に挑戦するとの宣言がなされている。

水素還元製鉄に利用される水素は、製鉄のみならず自動車や民生など様々なセクターで広く利用されることから、社会共通基盤のエネルギーキャリアとして開発、整備されていることが前提となる。特に基礎素材である鉄鋼の製造に利用される水素は、カーボンフリーであることはもとより、安価安定供給も重要な要件となる。また、CCS実施に当たっては、大量のCO₂の安価輸送・貯留技術の開発に加え、CO₂貯留場所の確保や社会受容性、実施主体や経済的負担の在り方など、技術面を超えた課題の解決にあたる必要があるとされている。

2) 鉄鋼製造における水素利用の課題

水素還元による鉄鋼製造については、具体的には以下のような課題があり、実用化に向けての技術開発を推進していかなければならない。

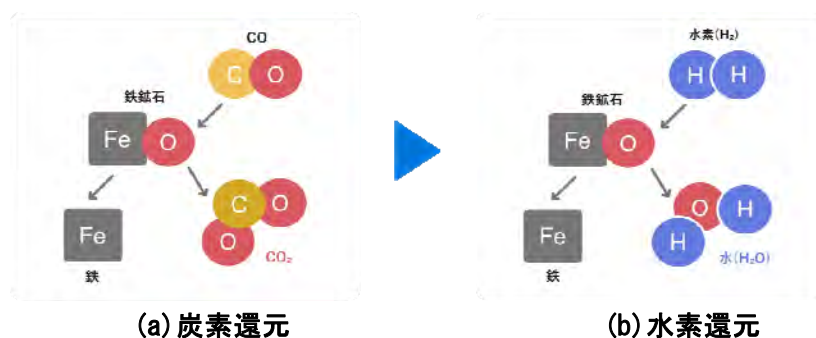


図-10.2.5 鉄の還元反応¹¹⁾

〔出典：日本鉄鋼連盟(2022)：日本鉄鋼連盟 HP，カーボンニュートラルへの挑戦〕

① 水素で還元すると冷えてしまう

従来の石炭(コークス)による鉄鉱石の還元反応は発熱反応なので、反応が進むと鉄が溶けて出てくる。一方、水素による鉄鉱石の還元は吸熱反応であり、熱を必要とする反応なので、水素を加熱しないと反応が進まない。爆発性のある水素ガスを大量に高温に加熱する技術はこれまで世の中のどこにもない技術であり、非常にハードルの高い技術開発が求められる。

② 従来の鉄鋼製造法では作れない。

現在の鉄鋼製造は、「高炉」と呼ばれる高さが 100m 程の高さがある巨大な反応炉を用いて行われる。高炉に鉄鉱石とコークス(石炭)を交互に積層し、下から高温の空気を送風すると高炉内で還元反応が起こり、鉄鋼が製造され、CO₂が排出される。この際、コークスは燃えるのではなく、鉄鉱石の還元反応の原料として作用するが、それとともに鉄鉱石を固体として支え、高炉内の通気性を維持するという重要な役割も果たしている。一方、コークスを水素ガスに置き換えた場合、水素は気体なのでこの固体の支えがなくなることになる。従来の高炉法に水素を入れることはコークスを減らすことになるため、高炉に水素を入れる量には限界がある。

高炉法はエネルギー効率、生産性共に非常に優れた鉄鉱石還元法で、数百年の歴史があり、世界の鉄鋼生産の大部分がこの方法で行われている。また、極めて巨大な反応炉で、その製造には何百億円もの費用がかかるため、従来の高炉を生かしつつ、ぎりぎりどこまで水素を入れられるかが技術上の大きな課題となっている。

③ 大量の安価カーボンフリー水素が必要

石炭は炭鉱で採掘できるが、水素ガスは地球上にはほとんど存在せず、人為的に作る必要がある。しかし、水素の利用はこれまで一部の産業に限られているため、現在、大量の水素を広範囲に供給する社会基盤はほとんどない。また、水素製造はこれまではほとんどが化石燃料から作られており、水素製造時にも CO₂ が発生している。ゼロカーボン・スチールのために使う水素は、その製造時にも CO₂ を出さない水素（カーボンフリー水素）でないとゼロカーボンにはならない。さらに、鉄鋼は世の中のあらゆる場所で大量に使用されている基礎素材であるため、その製造に必要な水素も安価であることが求められる。つまり、ゼロカーボン・スチールの実現には、大量の安価カーボンフリー水素の供給という社会インフラの整備も不可欠である。

(4) 今後の見通し

ゼロカーボン・スチールへの挑戦は、現在進行中の「COURSE50」について、2030 年までのなるべく早い段階で水素還元技術を確認し、2030 年には商用第 1 号機を稼働することを目標としている。また、高炉を用いた「カーボンリサイクル」などの技術については、それぞれの要素技術を開発し、実験を重ねたうえで、2040 年代半ばごろの社会実装を目指している。「直接還元技術」についても同

様に、水素だけで還元する技術を 2040 年代半ばに社会実装すべく、開発を続けるとしている。

このように、日本の鉄鋼業では、「2050 年カーボンニュートラル」の実現のため、ゼロカーボン・スチールの実用化に向けた取り組みが着々に行われている。いずれも相当にハードルの高い技術開発への挑戦が必要とされるが、気候変動問題の解決に残された時間は少ないため、実現への不断の努力が続けられていくものと考えられる。

社会実装に向けては、こうした技術を確立すると同時に、それを支えるための社会インフラの整備が欠かせないとされており、たとえば、水素(H)を活用していくため水素(H)を安定的に供給するサプライチェーンの構築、排出された CO₂を回収し、再利用する CCUS の促進などであり、また、グリーンスチールの環境価値が、市場で適切に評価されることも重要である。そのためには、需要家も含めたサプライチェーン全体でコストを負担するしくみをつくっていくことが必要となるとされている。

第 10 章 参考文献

- 1) 長井寿(2006)：超鉄鋼 強度 2 倍×寿命 2 倍の実力と可能性，日刊工業新聞社。
- 2) 栗飯原周二(2002)：鉄系スーパーメタルプロジェクトの研究開発（終了報告），(財)金属系材料研究開発センター，JRCM ニュース No.191
- 3) 玉生良孝，緒形俊夫(2002)：微細結晶粒金属材料の研究開発動向，文部科学省科学技術研究所，科学技術動向・月報，No.16
- 4) 木内学(2003)：環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術開発，(財)金属系材料研究開発センター，JRCM ニュース No.195
- 5) 萩原行人，高橋稔彦(2002a)：超鉄鋼プロジェクトの目指すもの，第 6 回超鉄鋼ワークショップ，pp.1-16
- 6) 高橋稔彦(2002)：超鉄鋼材料研究 4 年半の成果と次期構想，第 6 回超鉄鋼ワークショップ，pp.17-20
- 7) 萩原行人(2002b)：安全で安心な社会・都市基盤実現を目指す超鉄鋼，第 6 回超鉄鋼ワークショップ，pp.28-29
- 8) 物質・材料研究機構(2022)：物質・材料研究機構 HP，高強度耐食鋼 TF (https://www.nims.go.jp/usp/index_ja2.html) [2022.9 確認]
- 9) 物質・材料研究機構(2001)：近未来の鉄鋼材料を知る(高強度化版) [パンフレット]
- 10) 物質・材料研究機構(2004)：近未来の鉄鋼材料を知る(耐候性鋼，腐食解析版) [パンフレット]
- 11) 日本鉄鋼連盟(2022)：日本鉄鋼連盟 HP，カーボンニュートラルへの挑戦 (<https://www.carbon-neutral-steel.com/>) [2022.9.8 確認]
- 12) 大竹真貴(2021)：特殊鋼倶楽部 HP，『「グリーン成長戦略」と鉄鋼分野における脱炭素化に向けた取組』講演会資料 (<https://www.tokushuko.or.jp/event/20211102.htm>) [2022.9.8 確認]
- 13) 日本鉄鋼連盟(2020)：日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」