



入門講座

鉄鋼の日本工業規格-3

SM規格はインフラに欠かせない 溶接構造用材料

The SM Standard is a Welded Structural Material Necessary to Infrastructure

井上 肇
Hajime Inoue

新日鐵住金(株) 君津製鉄所
品質管理部 品質保証室
室長

1 はじめに

JIS G 3106 (溶接構造用圧延鋼材：以下、SM規格という。)に規定された鋼材 (以下、SM材という。) は、日本国内のみならず、世界各国で使用されている溶接構造用の鉄鋼材料である。SMは、Steel Marineの略称であり、日本工業規格 (以下、JISという。) の規格番号G3106として、溶接構造用圧延鋼材の規格名称を持っている。本稿では、溶接構造用鉄鋼材料として最もポピュラーな規格の一つであるSM規格について解説する。

2 SM規格の概要

2.1 SM規格の成り立ち

SM規格は、JIS規格番号G3106であり、Gは鉄鋼分野を示している。このG3106は多くの鉄鋼材料がそうであるように、(一社)日本鉄鋼連盟が原案作成団体となっている。

SM規格は、1952年にJISとして制定され、その後11回の改正を経て、現在2008年版が最新版として、その規格票は(一財)日本規格協会から購入できる。1952年以前には、SM規格は存在しないが、日本の構造用圧延鋼材として最も古い規格として1924年に制定された日本標準規格 (以下、JES) 第20号がある。しかしながらこの規格は、化学成分の規定がPとSのみであり、また衝撃特性も規定されていないため、一般構造用圧延鋼材 (JIS G 3101、いわゆるSS規格) の前身と考えるのが妥当である。一方、同じ1924年に制定されたJES第21号は、造船用圧延鋼材の名称であり、SM規格の略称がSteel Marineであることを考えると、こちらがSM規格の前身と考えられる。

1952年のJIS新規制定時には、引張強さ400MPa級の4種

類のみで構成されていたが、1959年の最初の改正で高張力鋼として引張強さ490MPa級が追加され6種類となった。同時に衝撃特性を表すA種、B種及びC種が規定された。

1966年の3回目の改正で現在に近い形となり、引張強さ520MPa級と570MPa級が追加され、11種類となる。当時は、重力単位系で表わされていたため、400MPa級の材料はSM41Aなどと称されていた。

1988年の7回目の改正では、1992年の計量法の制定に先んじてSI単位系が導入され、SM41AはSM400Aのように11種類全てが変更になっている。

SM規格から派生した溶接構造用材料としては、1994年に制定された建築構造用圧延鋼材のJIS G 3136 (いわゆるSN規格：Steel New Structureの略)、2008年に制定された橋梁用高降伏点鋼板のJIS G 3140 (いわゆるSBHS規格：Steel Bridge High performance Structureの略) がある。

2.2 用途

溶接構造材料としてのSM材は、規格名称の文字通り、基本的に溶接構造物に用いられる。用途は、JIS G 3106の箇条1の適用範囲に、橋梁、船舶、車両、石油貯槽、容器その他と記載されているが、実態として船舶は日本海事協会などの船級規格が使われ、SN規格の制定に伴って削除された建築にも使用されている。国内外で社会インフラに欠かせない最も重要な鉄鋼材料の一つである。SM規格の用途例を図1に示す。この中でSM規格は、橋梁では桁部分、建築では柱や梁、石油貯槽では側板や屋根に用いられている。まさに構造物の主要部材に使われる鋼材である。これらの部材は、厚さが厚いため、厚鋼板が最も多い。

なお、鋼管については、JIS G 3106で規定されていないため、SM規格の鋼管は存在しないが、SM規格の鋼板を巻いた



図1 SM規格の用途例

鋼管は存在するので、注意が必要である。

2.3 種類

SM規格は2.1で言及したように現在11種類ある。全てSMを頭に冠し、引張強さの程度を表す400、490、520及び570の数字とじん性レベルを表すA、B及びCの記号で成り立っている。また引張強さ490MPa級においては降伏点が高めのYの記号も用いられる。SM規格の種類を表1に示す。

熱間圧延鋼材として、鋼板、鋼帯、形鋼及び平鋼がある。鋼板には厚板と薄板があり、厚さで区分される。JISの定義では、厚さ3mm以上は厚板とあるが、一般には3mm以上6mm未満は中板、6mm以上を厚板と呼ばれている。薄板は厚さ3mm未満をいう。鋼帯とはコイル状の巻いたもので、通常ホットコイルと呼ばれている。形鋼はH形、I形、山形、溝形などの断面形状を有するものである。平鋼は4面とも圧延された幅500mm未満の板状製品である。

2.4 JIS 認証

SM規格に限ったことではないが、現在のJISマーク表示制度は、2004年に適合性評価制度の国際整合化などを目的とした工業標準化法の改正により、民間認証機関が製品認証を行っている。SM規格の場合、国に登録された国内外4社の登録認証機関が製造工場の品質管理体制を審査し、JISマークの表示を認めている。SM規格を審査可能な登録認証機関は、国内では日本検査キューエイ(株)(略称、JICQA)と(一財)日本品質保証機構(略称、JQA)、国外では韓国標準協会(略称、KSA)と韓国化学融合試験研究院(略称、KTR)がある。

現在、これらの登録認証機関より、国内17社の31事業所、国外は韓国、中国など5カ国に渡って19社の24事業所がSM規格のJIS認証を受けており、製品にJISマークが表示されている。

表1 SM規格の種類

種類の記号	引張強さレベル	じん性レベル
SM400A	400MPa 級	要求なし
SM400B		27J 以上
SM400C		47J 以上
SM490A	490MPa 級	要求なし
SM490B		27J 以上
SM490C		47J 以上
SM490YA		要求なし
SM490YB		27J 以上
SM520B		520MPa 級
SM520C	47J 以上	
SM570	570MPa 級	47J 以上

2.5 製造方法

SM規格は、規格名称より圧延鋼材であり、JIS G 3106の箇条1の適用範囲より熱間圧延にて製造されるものである。また、2015年に改正されるJIS G 3106には熱間押し法が製造方法として追加される。

JISの熱間圧延には、圧延のまま(以下、アズロール)、低温のオーステナイト域で圧延を終了する古典的制御圧延、未再結晶域で圧延の大部分を行う熱加工圧延、制御圧延に引き続き変態温度域を空冷よりも早い冷却速度で冷却する加速冷却などが含まれる。TMCPによる製造方法は、JISでは熱加工制御と定義され、制御圧延を基本に、その後空冷又は強制的な制御冷却を行う二つの方法がある。TMCPとは、Thermo Mechanical Control Processの略である。SM規格にTMCPを適用する場合には、受渡当事者間で協定しなければならない。

熱間圧延後に可能な熱処理は、焼ならし(Normalizing)、焼戻し(Tempering)、焼入れ焼戻し(Quenching and Tempering)が認められている。また、TMCPは熱処理の一つとして規定されている。

2.6 化学成分

SM規格は、溶接構造用材料であるため、JIS G 3106で化学成分を厳格に規定している。類似規格のSS規格 (JIS G 3101、Steel Structureの略) は、一般構造用圧延鋼材として溶接性を考慮しないため、490MPa級以下の化学成分の規定はPとSのみである。SM規格のPとSは、SS規格の規定値よりも厳格で、いずれの種類においても0.035%を上限としている。

SM規格の場合、化学成分は溶接部の特性を満足させるべく、P、S以外にC、Si、Mn量が規定される。規定値は、11種類それぞれで微妙に異なり、C量については、要求される強度やじん性レベルに応じて、0.18~0.23%を上限としている。SM規格の化学成分規定を表2に示す。

化学成分で特徴的なのは、炭素当量 (以下、 C_{eq}) 又は溶接割れ感受性組成 (以下、 P_{CM}) の規定がSM570やTMCPで製造される場合に適用されることである。SM570やTMCP以外に対しても需要家から C_{eq} や P_{CM} が要求されることも少なくない。とりわけ橋梁用途の場合、予熱温度の標準を適用するために、 P_{CM} が個別に要求されることがある¹⁾。

2.7 機械的性質

SM規格には、機械試験として、JIS Z 2241による引張試験

とJIS Z 2242による衝撃試験が要求される。衝撃試験は、厚さ12mmを超えて適用される。SM規格の機械的性質規定を表3に示す。

引張試験では、降伏点又は耐力、引張強さ及び伸びの規定がある。引張試験片はJIS Z 2241で1A号、5号の板状試験片又は4号の棒状試験片を使用しなければならない。

衝撃試験は、種類に応じて要求がある場合には、SM570では-5℃、それ以外では0℃でシャルピー吸収エネルギーを測定しなければならない。2008年の改正において、需要家との合意があれば、試験温度は規定よりも低い温度で実施しても良いことになった。衝撃試験の方法はISO規格と同じ試験片がJIS Z 2242で規定されており、2mmVノッチ試験片を使用しなければならない。橋梁用途では、冷間曲げ加工半径によって、150J又は200J以上の高吸収エネルギー値が要求されることがある¹⁾。

用途によっては、耐ラメラテア特性が必要な場合があり、その場合にはJIS G 3199による厚さ方向の引張試験又は、より厳しいS量が需要家より要求されることがある。

2.8 その他SM規格に要求される事項

SM規格では、JIS G 3106において、他の鋼材規格同様に形

表2 SM規格の化学成分規定 (代表として厚さ50mm以下)

種類の記号	C	Si	Mn	P及びS
SM400A	0.23%以下	規定なし	2.5xC%以上	0.035%以下
SM400B	0.20%以下	0.35%以下	0.60%以上	
SM400C	0.18%以下		1.50%以下	
SM490A	0.20%以下	0.55%以下	1.65%以下	
SM490B	0.18%以下			
SM490C				
SM490YA	0.20%以下	0.55%以下	1.65%以下	
SM490YB				
SM520B				
SM520C				
SM570	0.18%以下	0.55%以下	1.70%以下	

表3 SM規格の機械的性質規定 (代表として厚さ16mm)

種類の記号	降伏点又は耐力	引張強さ	伸び	引張試験片	試験温度	シャルピー吸収エネルギー
SM400A	245MPa以上	400MPa以上 510MPa以下	18%以上	1A号	要求なし	
SM400B					0℃	27J以上
SM400C						47J以上
SM490A	325MPa以上	490MPa以上 610MPa以下	17%以上		要求なし	
SM490B					0℃	27J以上
SM490C						47J以上
SM490YA					要求なし	
SM490YB	365MPa以上	520MPa以上 640MPa以下	15%以上		0℃	27J以上
SM520B					0℃	27J以上
SM520C						47J以上
SM570	460MPa以上	570MPa以上 720MPa以下	19%以上		5号	-5℃

状や寸法などの許容差、外観、表示、報告等、詳細に規定がある。例えば、厚鋼板の場合の形状はJIS G 3193、報告する検査文書はJIS G 0415の要求に従わなければならない。先の製造方法、化学成分、機械的性質などに加え、これらの要求事項に合致したもののみが、JISとしてのSM規格を名乗ることができる。

2.9 SM規格に類似した外国規格

SM規格は、国際整合化を図るため、1999年に国際規格ISO630シリーズをベースに技術的内容を一部変更された。ISO630シリーズは、TC17/SC3委員会で審議され、2011年にPart 1とPart 2が、2012年にPart 3が発行されており、JIS G 3106はこれら3つの規格に準拠すべく2015年に改正される。Part 1とPart 2は一般的要求事項、Part 3は鋼材規格としての要求事項が規定されている。参考までに、Part 4はSM規格の強度よりも高い鋼材、Part 5は耐候性鋼材、Part 6は耐地震用鋼材の規格である。

欧州では、CEN（欧州標準化委員会）より発行されているEN10025シリーズがSM規格に類似している。しかしながら化学成分や規格の性質など完全に一致するものではない。EN10025シリーズのPart 1は一般要求事項、Part 2は非合金鋼材、Part 3は焼きならし鋼材、Part 4はTMCP鋼材、Part 5は耐候性鋼材、Part 6はQT鋼材が規定されている。いずれも2004年が最新版であるが、現在はISO規格への整合化を図るため2011年にDraft版が発行されている。

アメリカでは、ASTM（アメリカ材料試験協会）よりA283規格、A529規格、A572規格等が構造用鋼として発行されているが、化学成分、機械的性質などSM規格との差異はENシリーズよりも大きい。

3 SM規格の製造技術

3.1 製造プロセス²⁾

3.1.1 製鋼

SM規格の製造において、JIS G 3106では製鋼プロセスは規定されていないが、通常、転炉又は電炉で製造される。二次精錬は必要に応じて合金添加、脱ガスや粉体吹込みなどの処理が行われる。

転炉法では、溶接構造用として有害なPやSの不純物は、最初に溶銑予備処理として熱力学的に有利なように高温域で脱Sを行った後、低温域で脱Pが行われることが多い。その後、転炉で脱Cし、じん性向上のため細粒鋼とすべくSiやAlなどを用いたキルド鋼として製造されるのが一般的である。

castingは、国内では連続 casting法が最もポピュラーであるが、数百mmの厚さには造塊法を用いることもある。 castingされた鋼片は、形状によって、スラブ、ブルーム、ビレットに大別される。

3.1.2 加熱・圧延

JIS G 3106には、明確に加熱しなければならないと規定されていないが、熱間圧延鋼材であることから、加熱プロセスは必要である。また2015年の改正で規定される熱間押し出しプロセスは、加熱することが条件になっている。

製鋼プロセスで得られた鋼片は、1,000~1,300°Cに再加熱され、 casting組織をオーステナイト単相とする。加熱温度は、形鋼など加工度の高い製品の場合には、より高温側に近い操業が指向される。

加熱された鋼片は、熱間圧延や熱間押し出しによって、最終製品の形状に仕上げられる。2.5で言及したように、JIS G 3106では、TMCPの適用は製造者の判断のみでは適用できない。

3.1.3 熱処理

SM規格で認められている熱処理は、2.5で述べた焼ならし、焼戻し、焼入れ焼戻しがある。

焼きならしは、オフラインの熱処理炉でオーステナイト単相に加熱後空冷して、圧延による組織の不均一を除去し、結晶粒を微細化させるために用いられる。主に製造者の判断で、490MPa級、520MPa級の製造に用いられるプロセスである。

焼入れ処理は、オフラインの熱処理炉で行う場合、オーステナイト単相に加熱し、迅速に冷却する操作である。焼入れままでは硬くてもろいマルテンサイトであるため、その後の焼戻し処理で強度、じん性のバランスをとる³⁾。一方、JISでは、オフラインの熱処理炉を使わずに圧延直後にオンラインで焼入れする直接焼入れ(Direct Quenching)が認められている。従って、この直接焼入れは、製造者の判断で適用することができる。TMCPと同じ冷却装置を使うこともあるが、TMCPとは異なるものと定義されている。焼入れ焼戻しを行った鋼材を調質鋼ともいう。

SM規格を焼入れした場合には、焼戻しを行わなければならない。焼入れ後の鋼材の組織は非常に硬いマルテンサイト(+ベイナイト)組織であるため、強度、じん性を確保するため適切な温度で焼戻し処理を行う。機械的性質を満足させるため、焼入れを伴わずに単独で焼戻し処理を行うこともある。

3.1.4 検査、表示

SM規格は、化学成分、機械的性質、形状、寸法、質量、外観を検査して合格しなければならない。質量については、鋼板、形鋼及び平鋼は、通常、計算質量が用いられる。鋼帯の質量は、実測しなければならない。

検査に合格したSM規格は、SM400Aなどの種類、溶鋼番号又は検査番号、寸法、製造業者名等が表示され、検査報告書が発行される。

3.2 SM材の材料設計思想

3.2.1 化学成分設計⁴⁾

JIS規格品として製造するためには、表2の化学成分規定を満足しなければならない。そして表3の機械的性質の規定を満足するよう、さらに需要家での用途を考慮した化学成分設計を行う。

基本的な考え方として、400MPa級ならば、Cの他に固溶強化元素としてSi、Mnを活用する。特にMnはCに比べて、炭素当量式からも分かるように溶接に与える影響は小さい。Siは脱酸元素として用いられるが、垂鉛めっきを施す構造物の場合にはめっき焼けを防ぐべく適正なSi量に抑える必要がある⁵⁾。またSiスケールの生成や溶接熱影響部に発生するMA (Martensite Austenite constituent) を考慮してSi添加量を抑えることもある。

490MPa及び520MPa級の場合には、圧延プロセスと合わせて成分設計を行う。例えば、Nbは析出強化元素として、制御圧延やTMCPで効果を発揮する。Vはアズロールでも析出強化する有効な元素である。需要家より低温での衝撃特性が要求されれば、CuやNiなどの合金元素を、高温での強度が必要であれば、CrやMoなどの合金元素を添加することもある。

570MPa級は、焼入れ性を高めるために焼入れ焼戻し処理を行うとき、Bを活用することもある。

3.2.2 加熱・圧延プロセス設計

加熱・圧延条件はその後の加工度合いや化学成分に応じて決定する。

400MPa級は、C、Si、Mnで構成されるため、化学成分による加熱・圧延の制約は少ない。ほとんどはアズロールで製造される。このときの圧延温度は高温で仕上げるのが可能なため、圧延がボトルネックになることもなく、生産性が最も高い方法であるが、切断までの冷却時間が長くなる欠点もある。アズロールで得られる組織は、オーステナイトからの冷却速度が遅いため、比較的粗大なフェライトとパーライトで構成される。

490MPa及び520MPa級は、適用する強化機構によって加熱・圧延条件が決まる。Nbを有効に活用するときは、Nb炭窒化物を圧延で析出させるべく、加熱プロセスでは十分固溶する温度が必要である。Cuを多量に含む場合には、表面赤熱ぜい性を防ぐべく適切な加熱温度を選択する。また加熱時の初期オーステナイト粒の大きさが最終製品のじん性レベルに影響を与えることを考慮し、適切な加熱条件で作業を行う必要がある。

490MPa及び520MPa級の圧延プロセスとして、アズロール以外に、制御圧延を活用する方法がある。具体的には、C量や他の合金元素量に応じて、Ar3~900℃で圧延を行う。溶

接時の予熱や入熱を最適化する目的で、 C_{eq} や P_{CM} を抑えるべく制御圧延のためにNbなどの合金を活用することもある。未再結晶域での圧延は、アズロール材よりも結晶粒は微細なフェライトとパーライトで構成される。最近では、より溶接性を高めるためにTMCPを適用することが多い⁶⁾。図2に示すように C_{eq} や P_{CM} を増加させることなく、機械的性質を満足できるので、需要家は溶接メリットを享受すべく、490MPa級及び520MPa級をTMCP指定する注文が増えつつある。TMCPのほとんどは、制御圧延後に加速冷却を行うプロセスが採用され、CCT線図に従い適切な冷却速度で冷却することで、微細なベイナイトが得られる。

570MPa級は、オフラインでの焼入れ焼戻しの熱処理プロセスを採用する場合、焼入れ温度で圧延組織がキャンセルされるので、圧延はアズロールで行うのが一般的である。一方、オンラインの直接焼入れを行うときは、圧延後にAr3温度以上のオーステナイト状態から水冷する必要があるため、加熱温度を適切に制御する。また、570MPa級は焼入れ焼戻しの代わりにTMCPを用いて製造することもある。

例として、アズロールの400MPa級、制御圧延の490MPa級、TMCPの490MPa級、直接焼入れ+焼戻しの570MPa級のマイクロ組織を図3に示す。

3.2.3 熱処理プロセス設計

製造者の判断で焼きならし、焼入れ焼戻し又は焼戻しが実施できるので、規定された機械的性質を満足させるために適切な熱処理プロセスの選択が可能である。

400MPa級は、通常熱処理を実施しないで機械的性質を満足させることができるが、0℃よりも低い温度でのシャルピー吸収エネルギーが要求されたり、厚さの大きい鋼板を製造する場合は、焼きならしを製造者の判断にて実施することがある。

490MPa級及び520MPa級もほぼ同様の考え方でプロセス設計される。

570MPa級は、協定でTMCPを適用しなければ、通常焼入

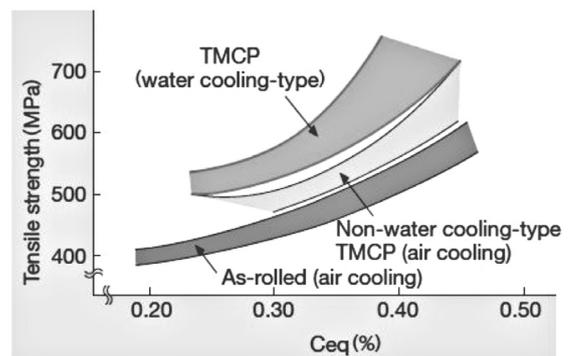


図2 TMCP適用における炭素当量と引張強さの関係⁶⁾

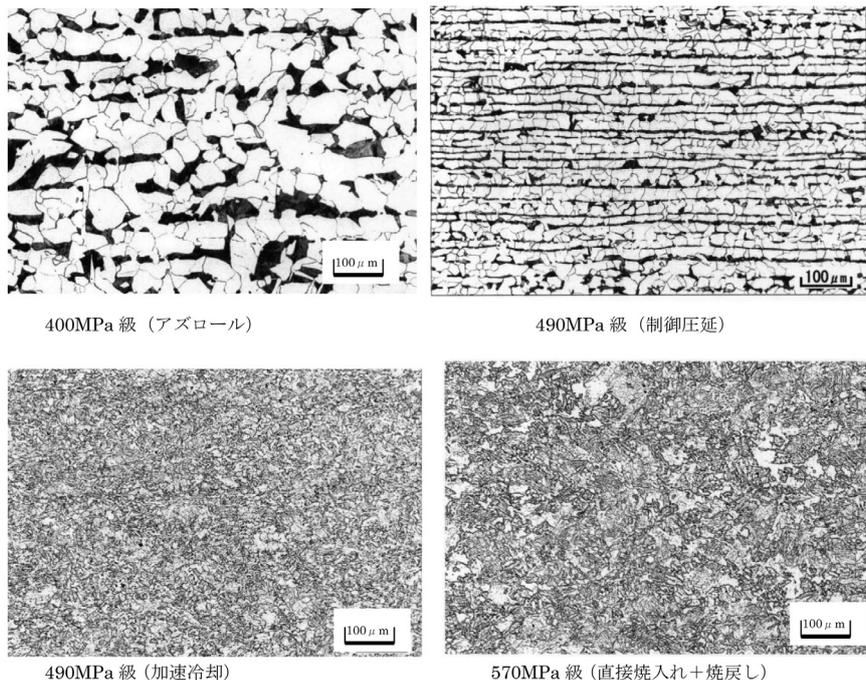


図3 鋼材のマイクロ組織例

れ焼戻しを実施する。焼入れは、熱処理炉での処理と直接焼入れを製造者の判断で選択できる。焼入れ後の焼戻し温度は、強度、じん性バランスを考慮して決定する。焼戻し温度が未知の場合には、横軸に焼戻し温度、縦軸に機械的性質を取り、成分、厚さに応じたテンパーカーブを採取して焼戻し温度を決定する。

4 これからのSM規格

2015年に改正されるSM規格は、熱間押し形鋼の規定が追加される。また、引張試験片1A号が採取できない辺40mm未満の形鋼や幅40mm未満の平鋼に対して、引張試験片14B号が採用できるよう見直されている。その他、2.9で述べたように対応する国際規格ISO630シリーズのPart 1、Part 2及びPart 3に準拠していることが織り込まれている。

日本は、WTO/TBT協定を批准しているため、ISO規格の整合化は極めて重要である。各国で溶接構造用鋼の規格内容が一致すれば、製造者、使用者ともにメリットは大きい。しかしながら建築基準法や高圧ガス保安法などの強制法規の縛りで規格内容の大きな変更は難しいのが現状である。現在のISO630シリーズの特徴は、EU、アメリカと共存する体系となっており、将来的に各国で使用される溶接構造用鋼の統一化の可能性を残している。

SM規格は、2.4で述べたように各国で生産されている。あいまいな規格表現は避けるべきで、技術的に問題が発生する

規定は避けなければならない。例えば衝撃試験温度を-20℃で実施した場合、より厳格な試験のはずなのに、2008年改正以前ではJIS規格として認められなかった。2015年に追加される熱間押し形鋼の規定は、標準化レベルを上げた内容となっている。形状の多様性を鑑みて、適用寸法に制約を課すと共に、引張試験片は変更できるよう拡張性を持たせている。

SM規格の目指すべき方向は、溶接構造用鋼として、世界各国のインフラで使用される規格になることである。

謝辞

本解説を執筆するにあたり、(一社)日本鉄鋼連盟標準化センターの阿部主査には全体をご指導頂きました。ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 日本道路協会, (2012)
- 2) 鉄鋼便覧第5版, 日本鉄鋼協会, (2014)
- 3) 鋼の熱処理 基礎と作業標準, 日本鉄鋼協会, (1967)
- 4) 白幡浩幸: 溶接学会誌, 78 (2009) 3, 30.
- 5) 溶融亜鉛めっき橋設計・施工マニュアル, 日本橋梁建設協会, (1990)
- 6) 鉄の薄板, 厚板がわかる本, 日本実業出版社, (2009)

(2014年12月22日受付)