

自動車軽量化に寄与する高強度薄鋼板

High Strength Steel Sheets for Light Weight Vehicle

岸田 宏 司^{*)}
Koji KISHIDA

抄 録

自動車と薄鋼板は需給の強い絆で結ばれており、薄鋼板は自動車のニーズに対応して進歩してきた。最近では地球環境への対応から軽量化が自動車に強く求められており、軽量化と衝突安全性能向上を両立させる材料として高強度薄鋼板が注目されている。現在ではホワイトボディ重量に占める高強度薄鋼板の重量比率は約30%に達している。自動車用薄鋼板を高強度化する意義を整理するとともに、自動車を構成する部品毎に使用される鋼板に求められる性能は異なるが、これらの要求性能を満たすべく開発されてきた高強度薄鋼板のうち、主なものについてその強化機構毎に特徴と適用例を述べた。

Abstract

Automobiles and steel sheets are bound together by a strong bind of supply and demand. Steel has progressed by corresponding to automotive needs. In recent years, there is a heavy demand for light-weight automobiles to correspond to the global environment and a high strength steel sheet as a material that can be both lightweight and improve the performance of safety in impacts is gathering attention. Currently, the share of heavy materials of high strength steel sheets is approximately 30% of white body heavy materials. Along with reorganizing the meaning of strengthening steel sheets for use in automobiles, this paper discusses the characteristics and examples of application of the main strengthened steel sheets from among the high strength steel sheets that were developed to meet these performance requirements although the performance required of steel sheets used in each of the parts that compose an automobile is different.

1. 緒言

日本の自動車産業における4輪車の総生産台数は1960年には年間100万台足らずであったが、1970年には約500万台、1990年には1350万台超と急増した。その後国内生産台数は減少しているが、日本のメーカーの海外生産台数は着実に増え続け、国内と海外での生産台数の合計は1995年には1550万台を越えている¹⁾。この自動車を原材料面から見ると、小型普通乗用車の平均材料構成比率は1992年はおよそ鉄鋼70%(うち普通鋼55%、特殊鋼15%)、アルミニウム6%、プラスチック7%となっており、鉄鋼材料が圧倒的な数量を占めている。自動車を構成する主要鋼材は普通鋼鋼材である薄鋼板であり、1995年には表面処理鋼板を含めた冷間圧延鋼板と熱間圧延鋼板を合わせて1000万トンを超える量が自動車産業で消費されている²⁾。

このように自動車と薄鋼板は需給の強い絆で結ばれている。従って日本の薄鋼板は量はもとより質の面でも大きな成長を遂げたが、これは自動車業界の要求に応えるべく努力した結果であるといっても過言ではない。本報では、自動車業界からの要求の変遷と、それに沿って進められた薄鋼板開発の歴史を簡単に振り返ったの

ち、省エネルギー効果の大きい自動車車体軽量化に寄与すべく開発された高強度薄鋼板に焦点を当てる。

2. 自動車のニーズに対応した薄鋼板の進歩

1955年頃には自動車の大量生産方式と寸法成形化が始まり、薄鋼板の量の増加とともに質の向上が要求された。プレス成形では深絞り成形におけるしわと割れが重大視され、A1キルド鋼の深絞り性改善が必須課題となった。当時、成形の難しい部品には輸入のA1キルド鋼が使われていたが、日本でも適正な製造条件が確立され、1960年代の日本における自動車産業の発展を支えた。1960年代に入り自動車生産が急増したが、自動車パネルの形状品質向上の点から形状凍結性が重視され始め、低降伏点鋼が要求された。これに対して、米国から導入されたオープンコイル焼鈍技術は、脱炭、脱窒による結晶粒成長と、固溶炭素と固溶窒素の低減による遅時効化と低降伏点化を可能とした。

1960年代後半に自動車需要が一層高まるとともに、成形の連続化、高速化が進み、車種やモデルチェンジも急増した。そのため、成形安定性の高い鋼板やトラブル時の緊急避難材が強く求められた。こうした時期に鉄鋼メーカーでは製鋼工程での真空脱ガス処

^{*)} 名古屋技術研究部 研究部長 工学博士
愛知県東海市東海町5-3 ☎476-8686 ☎(052)603-7615

理による高純度鋼製造技術や連続焼鈍技術が大きく進歩し、深絞り性の極めて優れたTi添加極低炭素鋼板等のIF(Interstitial Free)鋼が開発された。

一方、1970年代に入ると自動車の社会性が意識され、米国運輸省による実験安全車の提唱を口火として、衝突に対する自動車安全基準が各国で制定された。この社会的要請は、自動車用鋼板に対してそれまでの軟らかい鋼板から一変してより硬い鋼板を要求することとなった。ただし、この段階ではバンパーや各種補強部品などの低加工度の強度部品の高強度化が中心であったため、鉄鋼メーカーでは造船用やラインパイプ用に使用されていた高強度鋼の技術トランスファーで対処することができた。

しかし第一次石油危機が勃発した1973年以降には、自動車の燃費改善等の省エネルギー問題や排ガス、CO₂低減が社会的ニーズとして顕在化し、その一手段として車体の軽量化が検討されてきた。自動車の車体軽量化は、主として従来より高強度の薄鋼板を使用し、構造体としての車体の機能を維持したまま部材の肉厚を下げる方法が取られた。この段階での狙いは高強度鋼板化により自動車車体の重量軽減をはかることであるため、車体重量中の占有率の高い内・外板パネルや足廻り部品のような高加工度の部品が対象となり、成形性に優れた高強度鋼板が必要となった。

このような用途に用いられる薄鋼板は、単に高強度であれば良いわけではなく、既存のプレス加工技術が対応できるような成形性を有していなければならない。薄鋼板の場合、引張強さが340MPa以上のものを高強度鋼板と呼ぶが、プレス技術者からみれば340MPa級鋼板はまさしく高強度薄鋼板なのである。こうした背景のもと、高強度と高成形性を両立させるべく開発された薄鋼板がP添加鋼板、焼き付け硬化型鋼板(BH鋼板)、複合組織鋼板(DP鋼板)、熱処理強化型鋼板、高残留オーステナイト鋼板(TRIP鋼板)などである。現在ではホワイトボディ重量に占める高強度薄鋼板の重量比率はおよそ30%³⁾に達しており、高強度薄鋼板が車体の軽量化に大きく貢献している。

3. 自動車用薄鋼板の高強度化の意義

ホワイトボディを構成する部品は表1に示すように、パネル部品、構造部品、足廻り部品及び補強部品に大別できる。これらの部品には、用途に応じていくつかの性能が要求される。たとえばパネル部品では成形性、張り剛性、耐デント性、耐食性が、構造部材では成形性、部材剛性、衝撃エネルギー吸収能、疲労耐久性、耐食性、溶接性が要求され、足廻り部品では成形性、部材剛性、疲労耐久性、耐食性、溶接性が、補強部品では衝撃エネルギー吸収能、溶接性が特に重要となる。

パネル部品の板厚は張り剛性と耐デント性を満足するように決定されている。このうち、耐デント性⁴⁾は成形された部品の降伏強度とともに向上するので、成形上の問題が無いかぎり剛性が確保される範囲内で高強度化することによって板厚を減少させ、軽量化できるメリットがある。同様に、構造部品においては衝撃エネルギー吸収能⁵⁾や耐久強度⁶⁾が強度とともに向上するので、部材剛性が確保される範囲において、高強度化は軽量化や衝突安全特性を向上できるメリットがある。足廻り部品や補強部品についても同様であり、衝撃エネルギー吸収能、疲労耐久強度が強度とともに向上するので鋼板高強度化の意義がある。

なお、高強度鋼板使用比率の増加による省エネルギー効果の試算

表1 薄鋼板が用いられる自動車部品の分類、代表的部品例、要求特性と主な板厚決定要因

部品分類	代表的な部品	要求される特性	主な板厚支配要因
パネル部品	外板：ドア 内板：フロアー	成形性(深絞り、張出し、形状凍結)、張剛性、耐デント性、耐食性	張剛性 耐デント性
構造部品	メンバー カウルボックス	成形性(張出し、曲げ、形状凍結)、部材剛性、衝撃吸収能、耐久強度、耐食性、溶接性	部材剛性 衝撃吸収能 耐久強度
足廻り部品	ロアアーム ホイール	成形性(張出し、伸びフランジ、形状凍結)、部材剛性、耐久強度、耐食性、溶接性	部材剛性 耐久強度
補強部品	ドアインパクト ビーム	成形性(曲げ、形状凍結)、衝撃吸収能、溶接性	衝撃吸収能

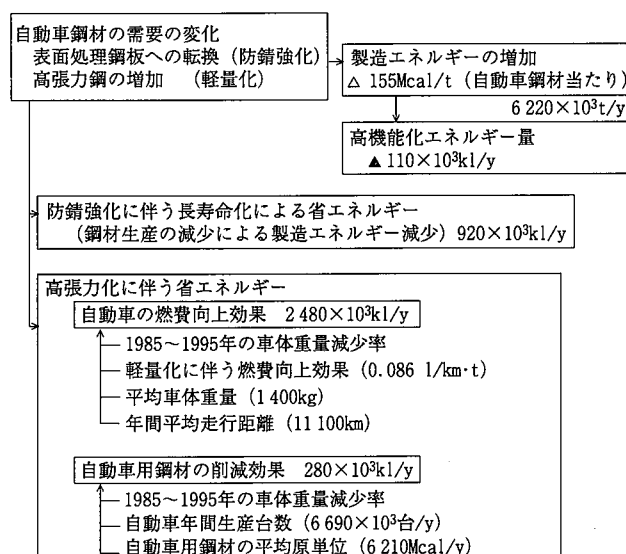


図1 自動車用鋼板の高機能化によるエネルギー削減イメージフロー⁷⁾

が、通商産業省と日本鉄鋼連盟によってなされている。図1⁷⁾は自動車用鋼板の高機能化(高強度化と表面処理化)によるエネルギー削減イメージフローを示している。これによればホワイトボディでの高強度鋼板の使用比率が10%から30%に増加し、表面処理機能の向上により自動車の寿命が6.7から9.3年に延長されると仮定した時に、鋼板製造時の高機能化のためのエネルギー増加分を差し引いても、日本全体で重油換算で年間357万キロリットル、すなわち国内鉄鋼業の消費エネルギーの数%分に相当する量の省エネルギーに貢献するとされている。

4. 主な高強度薄鋼板とその強化機構

これまでに開発されてきた高強度薄鋼板の強化機構と得られる引張強さレベルと成形性の指標との関係を、熱間圧延鋼板について図2⁸⁾に、冷間圧延鋼板について図3⁹⁾に示す。ここでは主な高強度薄鋼板とその強化機構について述べる。

4.1 固溶体強化型高強度薄鋼板

自動車外板パネルに使用される高強度鋼板の必要条件は、高いr

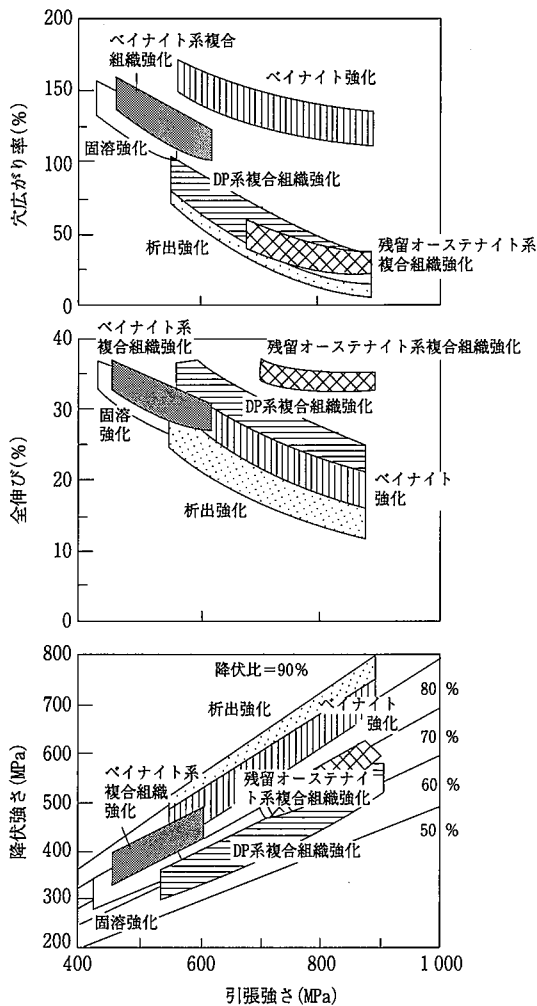


図2 高強度熱間圧延鋼板の引張強さと加工性の関係⁸⁾

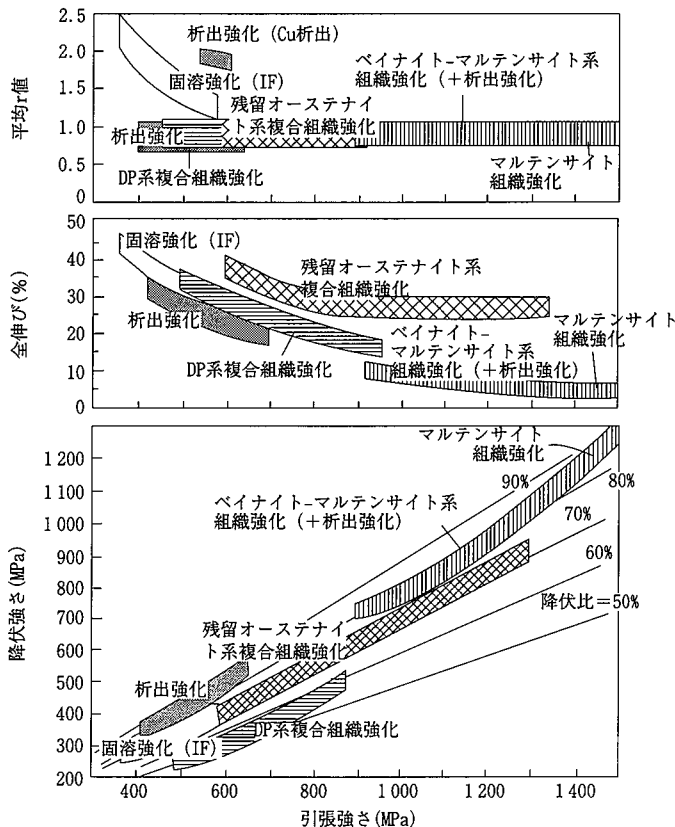


図3 高強度冷延鋼板の引張強さと加工性の関係⁹⁾

値と低い降伏点である。低降伏点が必要な理由は、プレス時の面ひずみを防止するためには降伏点は240MPa以下でなければならないことが経験的に知られているからである⁸⁾。C, Si, Mn, Pなどを添加してフェライト地を硬くすることが鋼を強化する基本であるが、深絞り用鋼板に主として用いられるのはPである。この理由は、P以外の元素は固溶Cが共存するとr値が低下するためである¹⁰⁾。P添加低炭素A1キルド鋼板は1.6程度の高いr値を持ち広く使用されているが、外板パネルに使用される場合には降伏点を240MPa以下にするために、その強度グレード(日本では引張強さで表す)は340MPa級以下に現在は制限されている。

P添加低炭素A1キルド鋼板よりも更に深絞り加工性の優れた鋼板が、IF鋼にP, Mn, Siなどの固溶体強化元素を添加して製造される^{11,12)}。この鋼板には固溶炭素や固溶窒素が存在しないので基本的には非時効性鋼板である。固溶炭素が存在しないと二次加工脆化が起こりやすくなるが、これを防止するためにBを微量添加¹³⁾することもある。

4.2 BH鋼板及び熱処理強化型鋼板

BH鋼板はプレス成形時は軟質で、塗装焼き付け(熱処理としては170℃で20分程度の保持)時に硬化する。この鋼板は固溶C量を鋼板中に適量残存させ、プレス成形時に導入される転位を塗装焼き付け時の熱を利用して固溶Cで固着し、降伏点を上げることを意図した鋼板である。BH量はプレス成形時のひずみ量によって変化し、低ひずみ域で大きいので、BH鋼板の用途としてはドアやフードなど比較的加工度の低い部品が適している。焼き付け硬化は固溶Cによるひずみ時効を利用した強化方法であり、常温時効による材質劣化を抑えつつBH量を確保することが必要である。室温保持時の降伏点伸びの回復を抑制するために、BH量の上限は約60MPaに制限される。この鋼板は当初、低炭素A1キルド鋼の箱焼鈍法で開発されたが、現在は主として成形性の優れた極低炭素鋼板をベースに製造されている。

これに対し、プレス成形後に500~700℃で数分間の熱処理を行うことにより降伏点のみならず引張強さが約150~250MPa上昇する鋼板が開発されている¹⁴⁾。この鋼板は極低炭素IF鋼に1mass%を超えるCuが添加されており、熱処理前には390MPa級IF鋼と同等の成形性があり、熱処理後に590MPa級の強度になる。図4¹⁴⁾に1.6mass%Cu添加鋼の熱処理による強度の上昇例を示す。550℃で

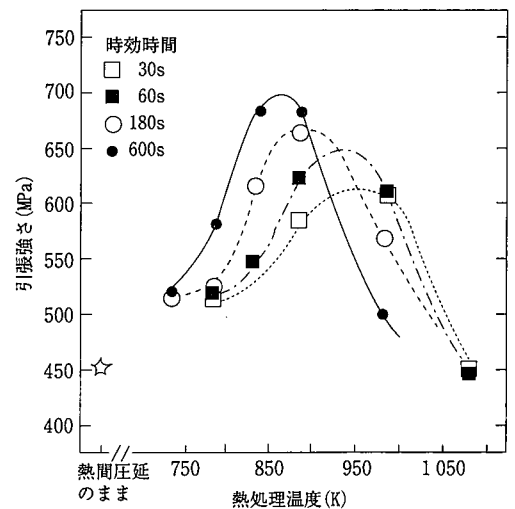


図4 1.6mass%Cu添加熱間圧延鋼板の引張強さに及ぼす熱処理温度と時効時間の影響¹⁴⁾

10分保持すると引張強さは230MPa上昇する。この大幅な強度上昇は、数nmの大きさでフェライト基地と整合な準安定相のbcc-Cuの析出によるものである¹⁵⁾。この鋼を適正な条件で冷間圧延鋼板とした場合には、深絞り性に好ましい再結晶集合組織が形成され、引張強さが590MPa級でr値が約1.9と高い鋼板となる¹⁶⁾。

4.3 組織強化型高強度鋼板

低温変態相を活用した組織強化型鋼板は、マイクロ組織を構成する相の構成によって鋼板の特性が大きく変化し、得られる強度も440~1470MPaと広範囲である。

4.3.1 DP鋼板及びベイナイト鋼板

DP鋼板はフェライト相とマルテンサイト相界面に存在する可動転位により、同じ引張強さでも降伏点が低く、低降伏比となる。このため加工時の弾性回復量が小さく形状凍結性に優れている。また析出強化型鋼板に比べて伸びが大きく、張り出し加工性に優れ、疲労耐久性も優れている¹⁷⁾ことからホイールディスク等に使用されている。ただし局部変形能に依存する伸びフランジ性はやや劣る。これは変形能の大きく異なる二相界面が延性破壊の起点になるためと考えられている。またDP冷間圧延鋼板はr値が低い。これは結晶方位的にr値に寄与しないマルテンサイトが存在すること、硬質なマルテンサイト周辺では塑性変形に際して多重すべりが生じ変形がランダム化するためと考えられている。

ベイナイトを主体とした熱間圧延鋼板は強度範囲が440~880MPaにわたるが、その特徴は伸びフランジ性に優れる点にある。これはマイクロ組織が均一であるためである。これをベースに成分や熱間圧延条件を適正化することにより、マイクロボンドの起点となりうるセメントサイトを微細分散させることで更に伸びフランジ性を改善した鋼板が開発されている¹⁸⁾。本鋼板はサスペンションリンクなど厳しいバーリング加工性が求められる部品に適している。

4.3.2 TRIP鋼板

この鋼板はもともと張り出し成形性に優れた鋼板として開発された。この鋼はTRIP効果(変態誘起超塑性: Transformation Induced Plasticity)を利用した超延性鋼板である。ベイナイト、あるいはフェライト+ベイナイトの基地中に、変形によりマルテンサイトに変態しうる準安定オーステナイトが数%から30%程度残留した鋼板である¹⁹⁾。従来のTRIP鋼は高合金鋼であったのに対して、薄鋼板で実用化されている鋼板は単純なC-Si-Mn系の成分である。二相域での合金元素の分配とベイナイト変態中のオーステナイト中へのCの濃縮によりオーステナイト相の安定化を達成したものである。

この鋼板はn値が高く張り出し性に優れているが、深絞り性にも優れている。鋼板の深絞り性はr値により支配されるというのが一般的な理解である。TRIP鋼は集合組織がランダムなためにr値が低いにもかかわらず深絞り性に優れている理由は、オーステナイトが加工に誘起されてマルテンサイトに変態する仕方が変形様式によって変わるためである。図5²⁰⁾に示すように縮みフランジ変形部では残留オーステナイトがマルテンサイト変態しにくく、変形抵抗が低く保たれる。これに対し、引張変形部ではマルテンサイトに変態して硬化するので破断耐力は高くなる。すなわち、縮みフランジ抵抗は低く、破断耐力は高いとの深絞り変形に適した応力状態になるのがその理由である。

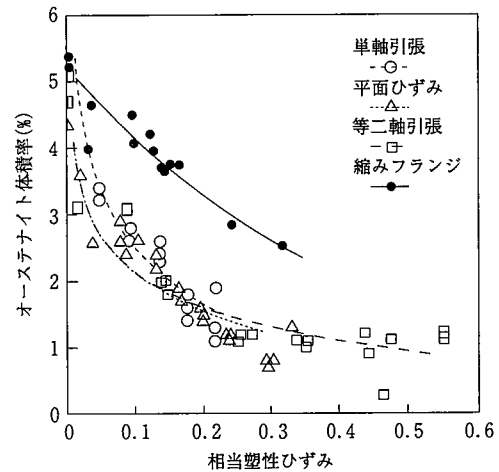


図5 変形様式とTRIP鋼中の残留オーステナイト量の変化²⁰⁾

4.3.3 超高強度鋼板

自動車の補強部品用途に、ベイナイトあるいは焼戻しマルテンサイトを活用した強度レベルが980~1470MPa級の超高強度冷間圧延鋼板が開発されている²¹⁾。バンパーレインフォースメントなどの補強部品は主に曲げ成形で加工されるので、曲げ成形性を確保する必要がある。超高強度鋼板の曲げ成形性はマイクロ組織の均一性との相関性が強い²¹⁾。これは曲げ変形が加えられた時の亀裂発生が、軟質部と硬質部の界面あるいは硬質部の内部で生じることによって考えられている。また980MPa超の高強度鋼板では水素に起因する遅れ破壊にも配慮する必要がある。遅れ破壊の防止には水素のトラップサイトを制御することが必要で、炭化物の制限や残留オーステナイト量の制限²²⁾がなされている。バンパーレインフォースメントは軽量化と運転操作性向上のために、近年では980~1180MPa級超高強度鋼板の成形品が使用されている。

5. 結言

自動車の材料構成比率に占める高強度薄鋼板の比率を更に高めていくには、素材と利用加工技術の両面からの更なる改善が必要である。利用加工技術研究の対象は大別して、成形、溶接、接合、塗装、防錆にあるが、鉄鋼メーカーにおいては試験片を用いた基礎的な研究や試験のみならず、実部品を対象とする設備を開発して評価を進め、より高い信頼性を得てきたことが特徴としてあげられる。加えて、材料に最も適した条件を需要家に提案する価値を付加することも、商品化を進める上でますます必要となっている。

参考文献

- 1) 鉄鋼界報, (1670), (1996)
- 2) 日本鉄鋼協会自動車材料検討部会編:自動車産業と共に歩む鉄鋼業, 1997
- 3) 氏原新:塑性と加工, 35(404), 1023(1994)
- 4) 中川威雄監修, 薄鋼板成形技術研究会編:プレス成形難易ハンドブック, 第2版, 東京, 日刊工業新聞, 1997, p.340
- 5) Uenishi, A., Suehiro, M., Kuriyama, Y., Usuda, M.: IBEC'96, Automotive Body Interior & Safety Systems, 1996, p.89
- 6) 水井正也, 高橋学: CAMP-ISIJ, 5, 1867(1992)
- 7) 通産省資源エネルギー庁, 日本鉄鋼連盟: LCAの視点からみた鉄鋼製品利用のエネルギー評価調査, 1997-3, p.29
- 8) 潮田浩作: 鉄鋼の高強度化の最前線, 日本鉄鋼協会材料の組織と特性部会鉄鋼の高強度化研究会, 1995-3, p.1
- 9) Akisue, O., Usuda, M.: Nippon Steel Technical Report, (57), 11(1993)

- 10) 松藤和雄, 下村隆良, 大沢紘一, 奥山健, 木下正行, 逢坂忍: 日本鋼管技報. 84,14 (1980)
- 11) 高橋延幸, 柴田政明, 古野嘉邦: 鉄と鋼.66,S1127(1980)
- 12) Brun,C., Patou,P., Parniere,P.: Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel, Proc. B.L.Bramfitt, P.L.Mangonon, Jr. ed. 1982, p.173
- 13) 高橋延幸, 柴田政明, 早川浩, 古野嘉邦, 白田松男, 山本広一: 鉄と鋼. 69,A297 (1983)
- 14) Kishida,K., Oda,M., Ikenaga,N., Takita,M., Akisue,O.: SAE Technical Paper Series 900735.1990
- 15) 黒澤文夫, 植森龍治, 岸田宏司, 秋末治: 極低炭素鋼板の金属学. 日本鉄鋼協会基礎研究会極低炭素鋼板研究会, 1993-5, p.87
- 16) 岸田宏司, 秋末治, 池永則夫, 黒澤文夫, 長村光造: 日本金属学会会報. 31(10),538 (1992)
- 17) 水井正也, 武智弘, 関根知雄: 鉄と鋼.76(3),414(1990)
- 18) Matsuzo,N., Itami,A., Koyama,K.: SAE Technical Paper Series 910513. 1991
- 19) Matsumura,O., Sakuma,Y., Takechi,H.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn.27,570 (1987)
- 20) 樋渡俊二, 高橋学, 佐久間康治, 白田松男, 秋末治, 伊丹淳, 池永則夫: CAMP-ISIJ,5,1847(1992)
- 21) 山崎一正, 水山弥一郎, 岡賢, 土屋裕嗣, 安田秀名: 新日鉄技報. (354), 32(1994)
- 22) 山崎一正, 水山弥一郎: 鉄と鋼.83,754(1997)