

連携記事

過共析鋼を用いたスチールコードの高強度化

Application of Hypereutectoid Steel to Strengthening of Steel Tire Cord

西田世紀
Seiki Nishida

新日本製鐵(株) 技術開発本部
君津技術研究部 主幹研究員

1 はじめに

スチールコードは、高炭素鋼を伸線加工して得られる線径が0.15～0.38 mm、引張強さ3～4 GPaの高強度のワイヤを撚り合わせたものである。その製造には製鋼から撚り線に至るまで多くの工程があり、その1つ1つの工程にスチールコードを安定的に製造するための技術が盛り込まれている。鋼材の断面積が最も小さくなる最終伸線加工と撚り線加工では、ワイヤの大きさに対する欠陥の大きさの割合が大きくなるため、限界を超えた介在物、偏析、疵などがあると、断線してその生産性を大きく低下する。このため、スチールコードの生産においては、安定的に大量生産できる事が求められる。スチールコードを高強度化する場合でも、同様に生産性が求められる。炭素量0.70%の鋼が1960年代にスチールコード用に使用され始め、1980年代に炭素量0.80%の鋼、1990年代に炭素量0.90%の鋼がそれぞれ開発されている。当初2.8 GPa程度だったスチールコードの強度は、近年では4.0 GPa程度に引き上げられている。この解説では、鋼材開発の立場から過共析鋼を用いたスチールコードの高強度化について説明する。

また、スチールコードの高強度化における取り組みについては、昨年、「ふえらむ」の特集で樽井¹⁾が「スチールコードの組織制御と高強度化」として幅広く技術解説しているのでもちかも参考にさせていただきたい。

2 スチールコードの製造工程

図1に線材からスチールコードの製造工程²⁻⁴⁾を示す。中間パテンティング処理は可能であれば省略している。高強度化を考える場合は、鋼の成分、最終パテンティング処理工程での組織調整、最終伸線加工工程での加工方法の3つを上手く組み合わせる事で目的とする強度と延性を実現し、最終工程の撚り線加工で安定製造できる事が目標になる。この撚り線加工工程では、素線を複数本撚り合わせる際に素線に曲げや捻りが加えられるので、この加工に耐えられる延性が必要となる。

3 パーライト組織

3.1 パーライトの組織因子

高炭素鋼パーライトの組織因子は高橋ら⁵⁾によって、図2に示す様に、①ラメラ間隔：セメントタイト間隔 ②パーライトコロニー：ラメラの向きが同じ領域、③パーライトブロック：ラメラの向きに関係なくフェライトの結晶方位が同じ領域、の3つとされている。組織単位として最も小さいラメラ間隔に関する研究は、恒温変態温度による変化に関してZener⁶⁾の研究やパーライト鋼の強度と関係付けたEmbury⁷⁾やLangford^{8,9)}などの研究がある。パーライトブロックについては高橋らがエッチピット法でパーライトブロックサイズを測定し、絞り値との相関を見出している。EBSD (Elec-

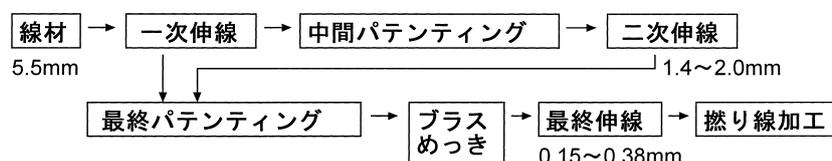


図1 スチールコードの製造工程

tron Back Scatter Diffraction) 法による結晶方位マッピングが容易になった近年は、少しずつパーライトブロックの測定やパーライトコロニーを解析する研究¹⁰⁻¹²⁾が増えている。

3.2 恒温変態組織

最終パテンティング工程では、ワイヤの組織をパーライトに調整する。例えば、JIS SWRS82A (以後、S82Aと記す)を530℃と570℃でパテンティング処理をしてSEMで観察すると図3¹³⁾になる。530℃でパテンティング処理を行った場合には、パーライト以外に上部ベイナイトが生成し、570℃では、ほぼパーライトとなる。Zener⁶⁾はラメラ間隔が過冷度に反比例する事を示しており、一般的に変態温度が低いほどラメラ間隔が小さくなる。また、合金元素の効果は田代ら¹⁴⁾によって詳しく調査され、Cr添加でラメラ間隔が

微細になる。

3.3 恒温変態温度と機械的性質の関係

最終パテンティング処理する恒温変態温度を変えた際のS82Aの2 mm径ワイヤの引張強さ (TS) と絞り値 (RA) の変化が図4¹⁵⁾である。図には変態組織がパーライト、上部ベイナイト、これらの混合組織となる変態温度範囲を示した。組織をパーライトのみにする場合には、570℃以上でパテンティングを行う必要がある。TSを高くするためパテンティング温度を570℃以上に下げると上部ベイナイトが少し混ざった組織となる。

4 伸線加工による機械的性質と組織の変化

4.1 応力-ひずみ曲線の変化

高炭素鋼を伸線加工して得られるワイヤの応力-ひずみ曲線を図5¹³⁾に示す。S82Aの1.7 mm径のワイヤを570℃で鉛パテンティング処理してパーライト組織に調整し、その後伸

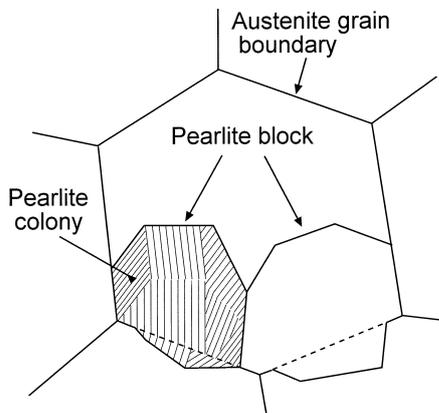


図2 パーライトの組織因子 (模式図)

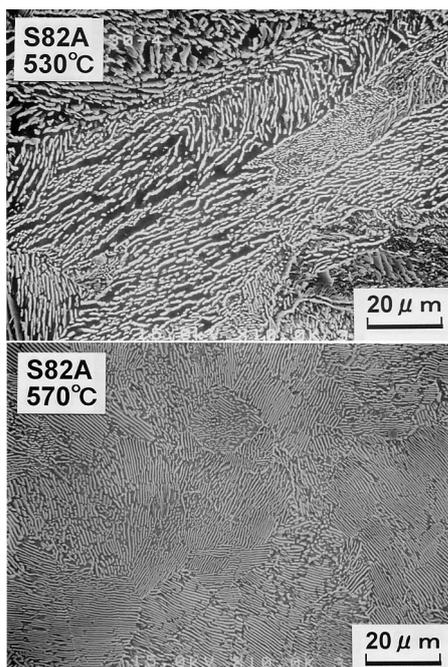


図3 高炭素鋼の恒温変態組織 (S82A)

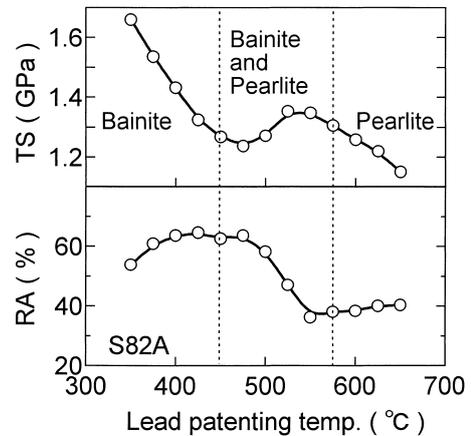


図4 恒温変態温度と機械的性質の関係

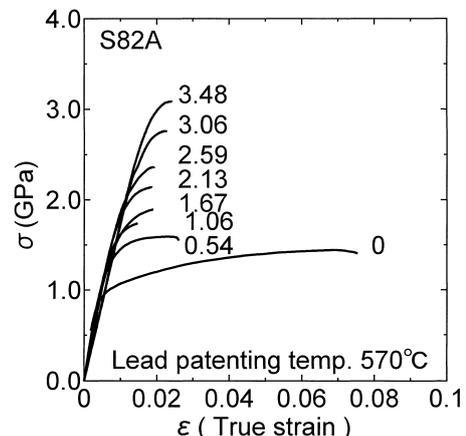


図5 伸線加工ワイヤの応力-ひずみ曲線

線加工した場合である。図中の数字は、減面率（伸線加工量）を真ひずみで示した値である。減面率を増やすに従って、強度が高くなり、全伸びが小さくなる事が判る。伸線加工による加工硬化挙動や絞り値などの延性は使用するダイス、潤滑剤、伸線速度によっても変化する。図6にRAの変化を示す。加工量が真ひずみ2までは、絞り値が大きくなるが、その後は緩やかに低下する。さらに加工すると急に脆性的な破壊となり絞りが無くなる。

4.2 伸線加工による加工硬化曲線

図7に横軸に減面率をひずみ量で示し、縦軸に図6に示したS82Aの各減面率の引張強さをプロットした。併せて、Langfordら¹⁶⁾が純鉄線を用いて行った同様の試験の最大変形応力を示す。純鉄の場合は伸びが大きいため、連続した1つの曲線となる。S82Aの場合は伸びが小さいため、プロット点で示した。純鉄と比較してパーライト鋼は強度が高く、加工硬化率が非常に大きい。

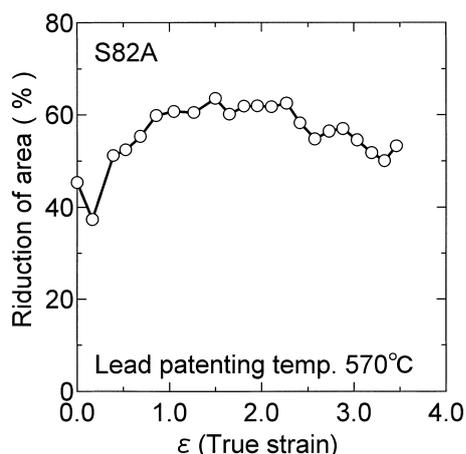


図6 伸線加工したワイヤの絞り値の変化

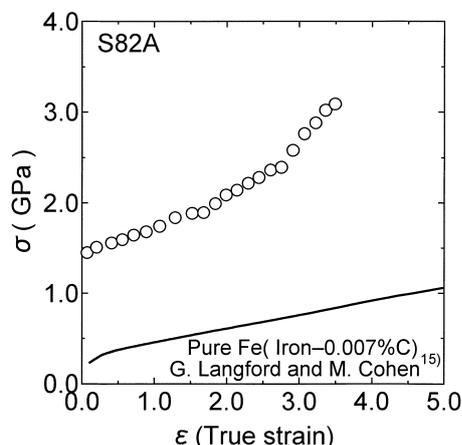


図7 伸線加工における加工硬化曲線

5 伸線加工によるパーライト組織の変化

図8に96ACr (0.96% C-0.2% Si-0.3% Mn-0.2% Cr)の伸線加工による組織の変化を示す。図8は、伸線ワイヤの横断面からTEMで組織観察を行った際の明視野像である。伸線加工によりパーライトは、ラメラ間隔が狭くなり、フェライト中の転位密度が上昇している事が判る。また、ラメラの方向が伸線方向にそろい、 $\langle 110 \rangle$ のフェライト集合組織¹⁷⁾が形成される。

図9¹⁸⁾に0.96% C鋼を真ひずみ5まで加工した際の縦断面の組織を示す。真ひずみ3.58では、パーライトラメラが伸線方向に揃い、ラメラの境界が明瞭に観察できる。真ひずみ5.11の材料では、ラメラの境界が不明瞭になっている。最近の研究¹⁹⁻²¹⁾で、真ひずみ1.6の材料ではセメンタイトが分解、再固溶する事が判明し、このメカニズムについて研究がなされている。また、セメンタイトの分解は延性の低下を引き起こす²²⁾とされている。

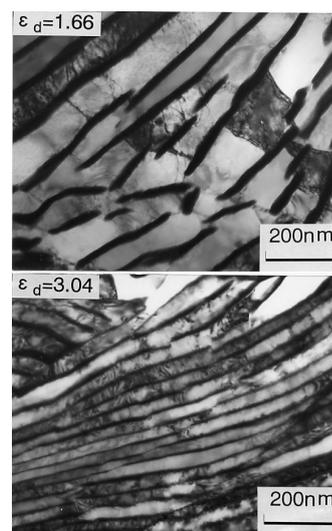


図8 伸線加工したワイヤの横断面組織 (0.96% C鋼 TEM)

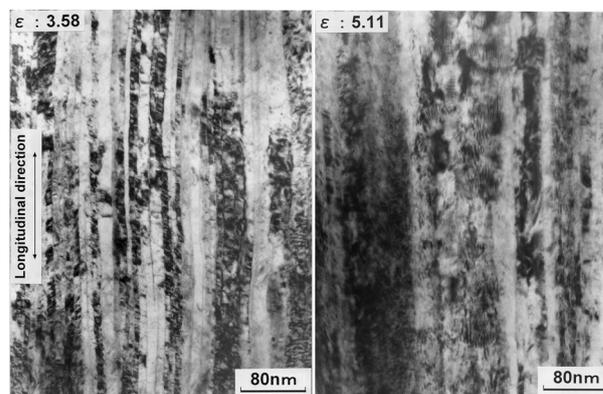


図9 伸線加工したワイヤの縦断面組織 (0.96% C鋼 TEM)

6 高強度化の考え方

高強度化の手法に関して落合ら²³⁾は、図10に示す3つの手法 ($\Delta\sigma_1$:パテンティング強度の上昇、 $\Delta\sigma_2$:加工硬化率の上昇、 $\Delta\sigma_3$:伸線加工量の増加)に分類して考える事を提案し、これら3つの和が最大となる様にすることを提案している。 $\Delta\sigma_1$ と $\Delta\sigma_2$ は、主に鋼材成分やパテンティング処理条件に依存する。一方、 $\Delta\sigma_3$ はこれらよりも、ダイス1枚の減面率、潤滑剤、プラスめっき条件などの伸線加工技術にも大きく依存する。また、伸線加工後に様々な曲げ加工²⁴⁾などを加える事で延性が改善できるため、付加的な加工による延性改善による伸線加工量の増加方法も研究されている。

6.1 過共析鋼による高強度化

ここでは、スチールコードの高強度化に用いられる過共析鋼の特徴について先に示した3つの強化手法に則って説明する。

(1) $\Delta\sigma_1$ に対する効果

図11に0.9% C鋼と0.8% C鋼をパテンティング処理した際の鉛浴温度とパテンティング強度の関係を示す。いずれの鋼の場合も鉛パテンティング温度が高くなると、パテンティング処理後の強度が高くなる。パテンティング材の変形応力 σ は、フェライトの強度 σ_a とセメンタイトの強度 σ_θ と複合則を用いて次式で表される。

$$\sigma = V_\theta \sigma_\theta + V_a \sigma_a$$

ここで、 V_θ はセメンタイトの体積分率、 V_a はフェライトの体積分率である。炭素量を増やす事はセメンタイトの体積分率 V_θ を増やす事になるため、炭素量を増やすと強度は上昇する。近年の研究でTomotaら²⁵⁾は、セメンタイトの強度が約5 GPaである事を明らかにしている。さらに、 σ_a もラメラ間隔の微細化による強度上昇をすると考えられる。パテン

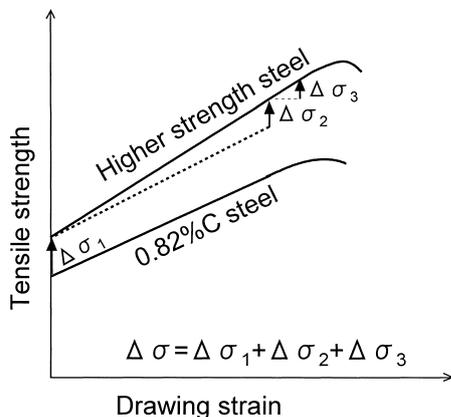


図10 スチールコードの高強度化手法

ティング処理した鋼線の、鉛浴温度とラメラ間隔の関係を図12に示す。C量の多い方がCr添加に関わらずラメラ間隔が小さくなる。

(2) $\Delta\sigma_2$ に対する効果

伸線加工後の強度の変化をS82Aと92ACr (0.92% C-0.2% Si-0.3% Mn-0.2% Cr) で比較したものを図13¹³⁾に示す。過共析鋼化によって加工硬化率が大きくなる事が判る。この原因は主にラメラ間隔の微細化とそれに伴う転位密度の増加に起因するものと思われるが、真ひずみ2以上ではセメンタイトが分解してフェライト中に炭素が再固溶するために固溶強化とする考え方もある。今後、転位密度の上昇、セメンタイトの分解、集合組織、固溶強化それぞれが定量的に研究され、強化機構がより明らかとなる事を期待したい。

(3) $\Delta\sigma_3$ に対する効果

落合ら²³⁾は過共析鋼における初析セメンタイトは、最終パテンティング処理によって生成を抑制する事かつ無害化可能な事を示している。田代ら²⁶⁾は、ラメラセメンタイト量の多

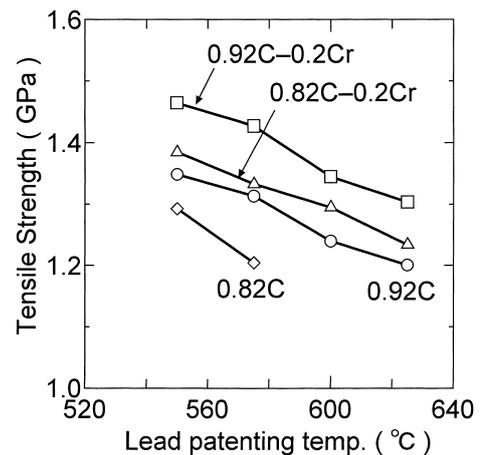


図11 パテンティングワイヤの引張強さ

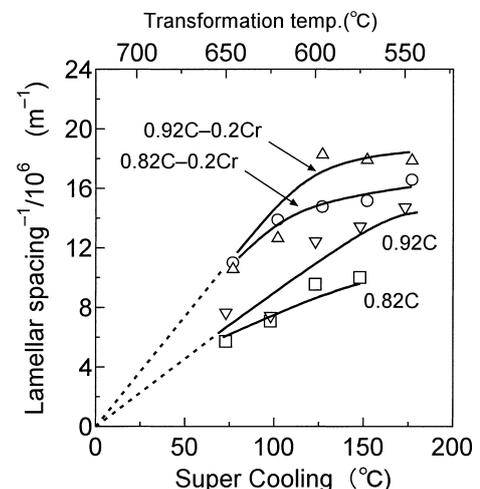


図12 過冷度とラメラ間隔の関係

い過共析鋼の加工限界が共析鋼より小さくなる事を示している。高強度化する上で過共析鋼化する事のメリットは、 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ を大きくする事ができるため、同一の強度を得るのに必要な $\Delta\sigma_3$ を小さくできる事と理解できる。つまり、総合的に高い強度を得る事が過共析鋼では容易と考えられる。

落合らは上部ベイナイトの抑制が伸線ワイヤのデラミネーション発生防止に有効である事も示している。また、長尾ら²⁷⁾は過共析鋼の初析セメンタイトの発生に伴う第二相フェライトをB添加で抑制する事がデラミネーションの抑制につながる事を示している。図14に92ACr鋼とS82Aのそれぞれの非ラメラ組織のパテンティング温度を変えた場合の出現割合¹³⁾を示す。過共析鋼の方が上部ベイナイトを主体とする非ラメラ組織の出現が抑えられている。デラミネーションは捻り試験を行った際に、ねじりの初期に縦割れが発生する現象である。捻り線加工では、捻り線中に捻りを加えるため、捻回試験でのデラミネーションの有無が延性指標の1つとなっている。

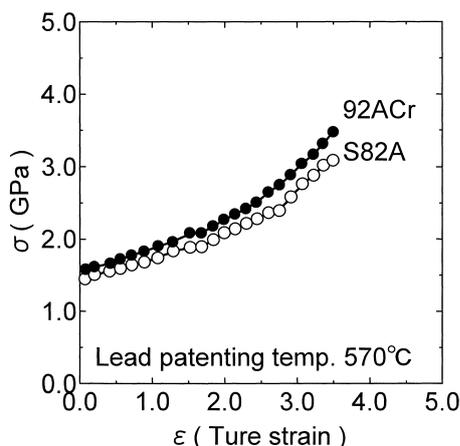


図13 伸線加工による加工硬化の違い

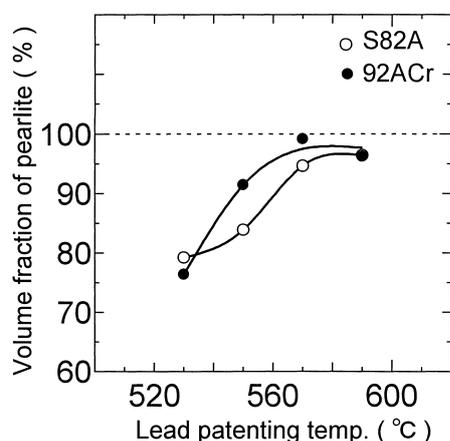


図14 恒温変態温度と非ラメラ組織

6.2 過共析鋼の強度レベル

高強度スチールコードに使用されている鋼の成分と強度を表1に示す。同じ線径で比較して、過共析鋼を用いる事で3.9~4.2GPaの強度が得られている。

7 今後のハイテン化の課題

以上、過共析鋼によるスチールコードの高強度化について説明した。紹介した過共析鋼化の考え方の中に、セメンタイトの分解は考慮されていないが、過共析鋼を用いて加工量を抑える事が、セメンタイト分解抑制にも有利に働いていると考えられる。大藤らは0.9% Cの鋼を真ひずみで4伸線加工し、TSが3.9GPとなるワイヤにおいて0.4% Cがセメンタイトから分解しているとしている。さらに強度を上げる場合には、セメンタイトの分解は避けられない問題と思われ、この事を加味した強化指針が必要と思われる。

また、伸線加工技術の向上も減面率を大きくする事が可能になり $\Delta\sigma_3$ を向上するために重要である。長尾ら²⁹⁾は多重スキンパス伸線を用いる事でデラミネーションの抑制が可能となり、0.2 mm4200 MPaのスチールコードが得られる事を示している。この事に代表される様に、伸線加工メーカーでの熱処理技術、伸線加工技術は高強度化と切り離せない技術である。

一方でECAP、ARB、HTPといった真ひずみで4を超える領域の研究³⁰⁾が進んでいる。Ivanisenko³¹⁾は0.8% C鋼のHTPによる試験で全てセメンタイトが分解してナノ結晶フェライトが得られるとしている。その時の硬度は11 GPaとなっている。Honoら³²⁾は過共析鋼を真ひずみ5.1の加工でナノフェライトのファイバー組織が得られるとしており高強度化の可能性が示されている。ナノ結晶の材料を実用化するにはまだ時間がかかると思われる。

過共析鋼の組織制御の可能性を示す報告に大藤ら³³⁾の報告がある。準安定オーステナイト域で高炭素鋼を加工して恒温変態すると初析セメンタイトの生成が抑制される事を示している。

パーライト組織を用いたスチールコードの高強度化の分野は、まだまだ奥が深く興味が尽きない領域である。パーライト鋼の1つ1つの現象が解明され、さらに高強度化が進む事を期待したい。

表1 過共析鋼スチールコードの強度

C	Si	Mn	Cr	B	線径	引張強さ	
0.92	0.2	0.5	-	-	0.2mm	3.9~4.0GPa	文献 4) 20) 28)
0.92	0.2	0.3	0.2	-	0.2mm	4.0GPa	文献 28)
0.96	0.2	0.3	0.2	-	0.2mm	4.1GPa	文献 23)
0.99	0.2	0.4	0.3	0.002	0.2mm	4.2GPa	文献 29)

8 おわりに

過共析鋼線材の技術開発は15年以上前に行われたものである。加工技術の向上と高強度化ニーズの高まりにより、漸く0.90% Cクラスの過共析鋼の使用量が増え始めている。本稿が過共析鋼線材を再認識する一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 樽井敏三：ふえらむ, 11 (2006), 791.
- 2) R.M. Shemanski and G. Rogers : Mechanical working and steel processing proceedings, (1989), 403.
- 3) T.W. Tyl : Wire J. Intern., 39 (2006) 2, 122.
- 4) 南田高明, 平賀範明, 柴田隆雄：神戸製鋼技報, 50 (2000) 3, 31.
- 5) 高橋稔彦, 南雲道彦, 浅野巖之：日本金属学会誌, 42 (1978), 708.
- 6) C.Zener : Trans. Metall. Soc. AIME, 167 (1946), 550.
- 7) J.D. Embury and R.M. Fisher : Acta Metal., 14 (1966), 147.
- 8) G. Langford : Metal. Trans., 1 (1970), 465.
- 9) G. Langford : Metal. Trans., A 8A (1977), 861.
- 10) 戸高義一, 梅本実, 土谷浩一, 鈴木真由美 : CAMP-ISIJ, 17 (2004), 1390.
- 11) 西田世紀 : CAMP-ISIJ, 17 (2004), 1425.
- 12) 諸岡聡, 友田陽, 足立吉隆 : CAMP-ISIJ, 20 (2007), 1301.
- 13) S. Nishida, A. Yoshie and M. Imagumbai : ISIJ, 38 (1998), 177.
- 14) 田代均, 佐藤洋 : 日本金属学会誌, 55 (1991), 239.
- 15) 吉江淳彦, 伴野俊夫, 杉丸聡, 新保泰広, 西田世紀, 関隆一, 川名章文, 伴野貢市 : 新日鉄技報, 370 (1999), 27.
- 16) G. Langford and M. Cohen : Trans. ASM, 62 (1969), 623.
- 17) 稲数直次 : 金属引抜 加工と集合組織, 近代編集社
- 18) 越智達郎, 西田世紀, 杉山昌章, 高橋淳, 樽井敏三 : 新日鉄技報, 386 (2007), 5.
- 19) J. Languillaume, G. Kapelski and B. Baudalet : Acta Mater., 45 (1997), 1201.
- 20) 大藤善弘, 浜田貴成 : 鉄と鋼, 86 (2000), 105.
- 21) 樽井敏三, 丸山直紀 : 鉄と鋼, 90 (2004), 1031.
- 22) 樽井敏三, 丸山直紀 : 鉄と鋼, 91 (2005), 265.
- 23) 落合征雄, 西田世紀, 大羽浩, 川名章文 : 鉄と鋼, 79 (1993), 1101.
- 24) 田代均, 西田世紀, 樽井敏三, 大橋章一, 佐々木正司, 中村謙一, 吉江淳彦, 出町仁 : 新日鉄技報, 370 (1999), 39.
- 25) Y. Tomota, T. Suzuki, A. Kanie, Y. Shiota, A. Mori-ai, N. Minakawa and Y. Mori : CAMP ISIJ, (2004), 364.
- 26) 田代均, 佐藤洋 : 日本金属学会誌, 11 (1991), 1232.
- 27) 長尾護, 家口浩, 茨木信彦, 落合憲二 : 鉄と鋼, 89 (2003), 329.
- 28) 田代均 : まてりあ, 44 (2005), 495.
- 29) 長尾護, 黒田武司 : 鉄と鋼, 90 (2004), 588.
- 30) 「超強加工の材料科学」研究会 シンポジウム, “超強加工の最前線 ~強加工の現状と応用~” テキスト
- 31) Y. Ivanisenko, W. Lojikowski, R.Z. Valiev and H.-J. Fecht : Acta Materialia, 51 (2003), 5555.
- 32) H. Hono, M. Ohnomura, M. Murayama, S. Nishida, A. Yoshie and T. Takahashi : Scripta Mater., 44 (2001), 977.
- 33) 大藤善弘, 相原賢治, 西沢泰二 : 鉄と鋼, 83 (1997) 9, 581.

(2008年1月10日受付)