

連携記事

超微細粒組織を持つ高強度精密 ねじの量産化を世界で初めて実現

—CO₂ 排出量 50% 削減—

World First Commercial Mass Production of High Strength Microscrew with Ultrafine Grained Structure

—50% Reduction in CO₂ Emission—

兵庫県立大学 大学院工学研究科 教授
物質・材料研究機構 特別研究員

鳥塚史郎
Shiro Torizuka

物質・材料研究機構
材料創製・信頼性グループ

村松榮次郎
Eijiro Muramatsu

はじめに

小ねじは、精密機器を組み立てるためになくてはならない鋼製品であり、高強度が要求される。小ねじ及び強度区分8.8以上のボルトは、球状化焼鈍処理や、浸炭焼入、焼入・焼戻し処理などの多くの熱処理工程を経てねじ・ボルトに加工されている。その工程を図1に示す。まず、鉄鋼メーカーで製造された線材 (SWCH16A等) は、二次圧延メーカーで球状化焼鈍により軟化処理され、伸線が行われる。伸線とともに線材は加工硬化するので、再び焼鈍して軟化処理される。こうしてできた鋼線は、ねじメーカーに送られ、冷間圧造によりねじ頭部が成形され、転造により軸部にねじ山が成形され

る。この後、熱処理メーカーで焼入・焼戻しが行われ、ねじは高強度化される。最後に、めっきメーカーでめっき処理されるが、この時にねじ中に入る水素を取り除くために、ベーキングを行う。このような工程をとるのは、ねじ加工前の素材としては、やわらかいほうがよいが、ねじ加工後は強靱である必要があるため、このように多くの熱処理が行われる。しかし、省エネルギー、低CO₂排出の観点からは望ましいことではない。そのため、焼入・焼戻し工程を省くことが可能な非調質鋼の開発が行われてきた。しかしながら、焼入で得られる強度は、引張強さで1GPaを超える高強度である。非調質鋼で、そもそも、ここまで強度を上げることは容易ではない。そのうえ、延性の低下が避けられない。そのため、ねじのような十字リセス (ドライバービット嵌合のための溝) を有する複雑塑性加工品の成形に対応できる非調質鋼は、これまで存在してこなかった。しかし、高強度と高成形性を兼ね備えた非調質鋼の実現とそのねじへの応用は、CO₂削減が急務となっている現在、待ち望まれてきたものである。我々は、超微細粒鋼を、その解決手段と考えて研究を行ってきた。

結晶粒の直径がミクロン (千分の一mm) 以下のサブミクロン超微細粒金属は、合金元素添加なしで、高強度、高靱性を期待できることから¹⁾、ECAP法やHPT法などといった強加工方法が提案され、多くの研究が行われてきた²⁴⁾。しかし、研究としては多くの優れた報告があるが、超微細粒金属が実用化された例はなかった。その原因は、第一に結晶粒微細化によって強度は著しく上がるものの延性が低下すること、第二に、サブミクロンレベル超微細粒組織をもった材料を量産する技術がなかったことがあげられる。金属全般にいえることであるが、強度が上がると伸びが低下するという宿

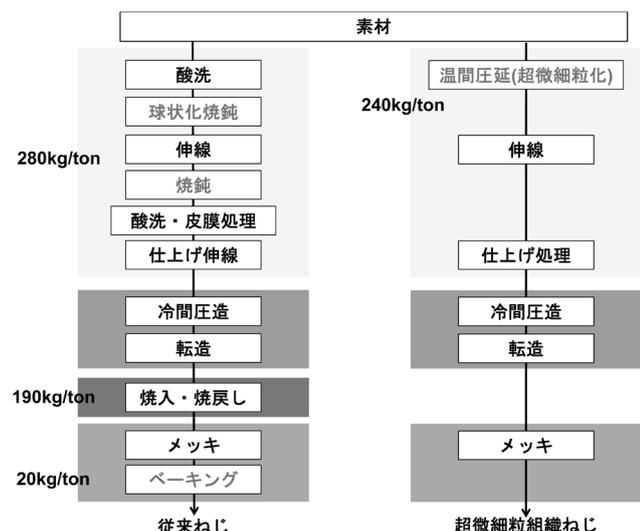


図1 超微細粒技術を利用したねじ製造工程における熱処理省略

命があり、これをトレードオフの関係というが、結晶粒微細化法でも例外ではなかった。したがって、せつかく強度をあげても延性が低下してしまうということから逃れることはできなかった。

この2つの課題の解決が、われわれの長年の課題であり、その解決によって超微細粒組織を持つ高強度精密ねじとしての実用化が達成できた。以下、その経緯について解説する。

2 結晶粒微細化基礎検討

(1) 1パス圧縮加工熱処理による結晶粒微細化の条件把握

相変態あるいは再結晶を利用したいずれの方法においても、超微細粒組織形成のためにはひずみで1ないし2を超える大ひずみ加工が必要とされる^{5,6)}。1997年に開始された超鉄鋼研究において、大ひずみ導入可能な通電加熱を用いた平面ひずみ圧縮型の加工熱処理シミュレータを用いて基礎検討を行った。従来の加工シミュレータでは、1パスで導入できるひずみは1.5程度が最大であったが、本方法により、ひずみ4まで導入可能となった。温度範囲400-850℃の広範な大ひずみ加工熱処理実験を行い、図2に示す結晶粒微細化マップを作成した⁷⁻¹⁵⁾。

その結果、フェライト粒の大きさは加工で与えられるひずみには影響されず、加工温度およびひずみ速度に影響されることがわかった。5°以上の方位差角を持つ粒界で囲まれ内部にサブグレインを含まない新しく生成したフェライト粒の平均粒径に対するZ因子依存性を図2 (b)⁹⁻¹⁵⁾に示す。本研究のデータはほぼ1本の直線上に乗り、粒径dとZ因子の間に

は(1)式の関係があった。ここで、ZはZener-Hollomon因子で、ひずみ速度と加工温度を変数に持つパラメータである。

$$d(\mu\text{m}) = 10^{2.07} Z^{-0.16} \dots\dots\dots (1)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Qにはキュリー点(T_c=1053K)以下のフェライト鉄の自己拡散の活性化エネルギー254kJ/molを、ひずみ速度には見かけの圧縮ひずみ速度を用いた。

平均粒径はZ因子で決定される。また、図2 (b)に示すように、全面等軸粒が生じる動的再結晶に必要なひずみは

$$\epsilon = 0.15Z^{0.1} \dots\dots\dots (3)$$

と表すことができた。例えば、全面等軸微細粒0.5μmを得ようとした場合は、矢印に示すように、LogZ=13.5下で、ひずみε>3.2を導入すれば良いことが示される。図2は組織制御に必要な加工条件を表す工業的に有用な微細化プロセスマップともいえる。結晶粒超微細化の指導原理は高Z-大ひずみ加工であり、超微細素材大型化のためのプロセスパラメータを定式化できた。

(2) 温間溝ロール圧延による微細粒棒鋼の製造

大ひずみの材料内への導入は容易ではない。微細化プロセスマップで明らかにした高Z-大ひずみ加工と大ひずみ導入の基本原則である多方向加工に基づき^{16,17)}、ラポレバル溝ロール圧延機、さらに民間の実機溝ロール圧延機を利用して、18mm角で長さ20mの棒鋼の試作を行った¹⁸⁾。図3に示すように、溝ロールでは材料が2次的に減面されるため、大ひずみが導入可能であることに注目し、80角から18角まで圧延を、500℃で等温21パス圧延を行った。図3に外観写真も示す。その結果、ひずみの増加にともない微細粒が生成し、全面が0.5-0.7μm超微細粒で占められるようになった。温間温度域で多パス圧延をすることによって、超微細粒組織

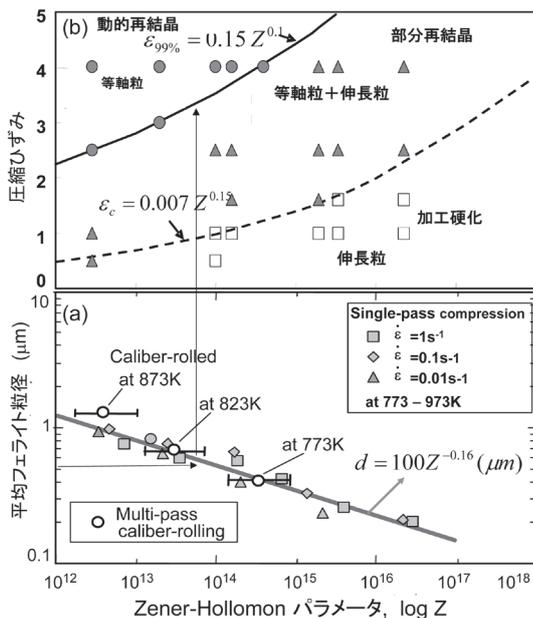


図2 微細化プロセスマップ, (a) Z値と粒径の関係、(b) Z値と動的再結晶に必要なひずみの関係⁹⁻¹⁵⁾

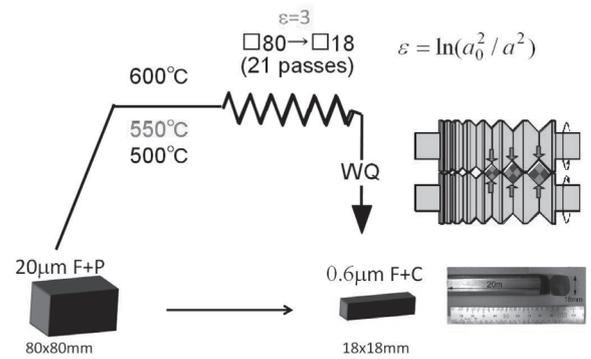


図3 温間多パス溝ロール圧延、加工条件、圧延機模式図¹⁸⁾

が得られることを明らかにした。

図4は、素材である20 μm フェライト組織が、温間溝ロール圧延後、0.7 μm の超微細フェライト組織となることを示している。結晶粒微細化には、温間温度域での大ひずみの導入が必要であるが、1パスで導入する必要はなく、多パス化が可能であることを明らかにした点は、実用化を考えるうえで成果となった。

(3) 微細粒鋼の魅力的力学的性質

以上のように機械試験可能な大きさの超微細バルク材が製造可能になったことを利用して、超微細粒組織の力学的性質の調査を行った。炭素量を0.02%から0.45%までのさまざまな炭素量組成のSi-Mn鋼を用意し、温間溝ロール圧延で組織をサブミクロンまで微細化し、その力学的性質を調べた結果を図5に示す。各組成において、結晶粒径を5 μm から0.5 μm まで微細化することによって、降伏強さは約2倍以上となる¹⁸⁻²¹⁾。また、炭素量が増加するにつれて、強度と全伸びが同時に向上していることがわかる。また、強度が上昇すれば、伸びが減少するのが一般的であるが、微細粒鋼の場合は、炭素濃度の増加が、強度と伸びを同時に向上させる。超微細粒鋼の問題点の一つは一樣のびの低下であることが知られている。ここに示したように、炭素量の増加、すなわち、セメント分散によって加工硬化率が大きくなること、そのため一樣のびが大きくなることを見いだした²⁰⁾。

超微細粒鋼は、絞りにも優れている。この場合の絞りとは、

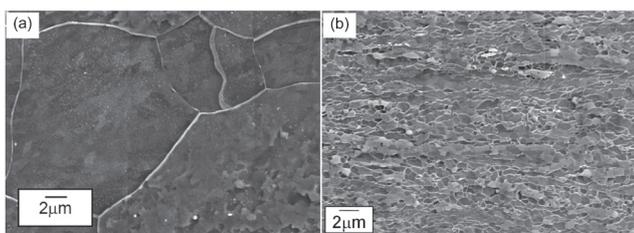


図4 温間多パス溝ロール圧延による超微細粒組織の生成¹⁸⁾ (a) 素材20 μm フェライト粒組織、(b) 温間多パス圧延後の0.7 μm 超微細フェライト粒組織

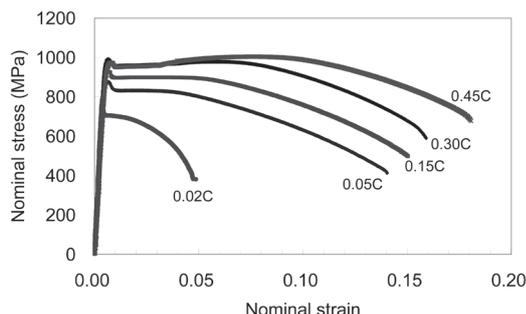


図5 超微細粒鋼の応力-ひずみ曲線におよぼす炭素濃度の影響²¹⁾

引張試験片が破断するまでの面積減少率である。図6に示すように、超微細粒鋼の強度-絞りバランスは、フェライト-パーライト、ベイナイト、マルテンサイトに比べ、最も優れていることを明らかにした²¹⁾。これは超微細粒鋼の成形性を検討してゆく上での重要な基礎データとなった。

3 強度と成形性の両立と超微細粒組織線材の量産化

結晶粒微細化に伴う延性(伸び)の低下を、第2相との複合化によって解決しようとした研究報告は多いが、必ずしも成形性向上という観点からは、成功していない。超微細粒鋼は、上述のように、強度-絞りバランスが優れている²¹⁻²³⁾。我々は、むしろ第2相の全くない純鉄に近い組成を追求し、延性的一种である絞り特性を高めることによって、成形性を良好な状態を実現できた。例えば、図7 (a) の上に示すフェライト+パーライト組織を冷間加工すれば、1GPaの強度は出せるが、ねじに成形したら割れてしまう。図7 (b) の下に示す純鉄に近い組成の極低炭素フェライト単相組織をサブミクロンレベルまで超微細化した。その結果、冷間加工後1GPa以上

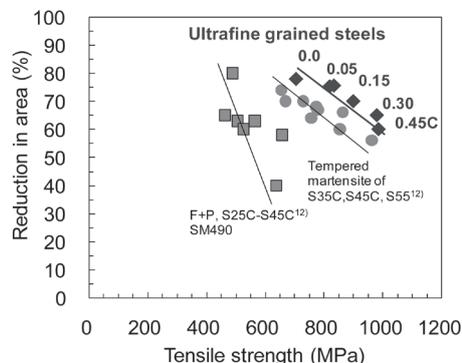


図6 超微細粒鋼の強度-絞りバランス²¹⁾

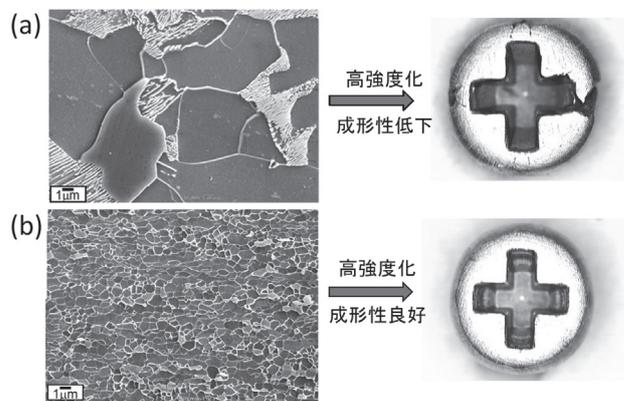


図7 (a) 普通鋼(フェライト+パーライト複相鋼)の高強度化による成形性低下の例と (b) 低炭素超微細粒組織の持つ高成形性の例

の高強度と延性の指標である絞り値75%以上の高延性が得られ、ねじ成形しても割れない高成形性を実現できた。超微細粒鋼は、普通鋼に比べ、数十倍の粒密度であり、これが高強度を発現する。

超微細粒組織鋼が線材として供給できるようになれば、この線材を新しい高強度非調質冷間圧造用鋼として提供できることになる。超微細粒組織を持った線材を製造するためには、連続大ひずみ圧延が必要である。大ひずみの導入方法は多方向加工がある^{16,17,24,25}。多方向加工は鍛造型の圧縮加工であるが、それを圧延で連続的に実現するための連続圧延プロセスの開発を行った^{26,27}。図8に連続多方向加工のための連続温間圧延機の模式図を示すが、(1) 連続圧延 (2) 温間制御圧延、(3) オーバル・スクエア孔型多方向圧延から構成された圧延機を試作した。

0.01C-0.2Mn-0.3Siの組成の鋼を素材とし、本温間連続圧延コンパクトプロセスによって、サブミクロンの微細粒鋼を作製した。直径6mmの線材をスタート材とし、3mmまで、圧延温度500℃の温間圧延を行うことによって、図9に示す数10kgの線材が製造できた²⁷。また、図10に本線材の圧延方向に平行な断面の組織写真を示す。等軸超微細な組織であることがわかる。温間連続圧延プロセスによって、大きな塑性ひずみが導入され、微細組織が形成されたことを示している。さらに、本連続温間圧延で製造した線材を直径1.3mmまで冷間伸線した。この線材を素線としてM1.6マイクロねじの成形((株)降矢技研)を行った。マイクロネジ成形には、

ダブルヘッダー方式を用いた。ネジ頭部(リセス)を圧造するときの割れの発生の有無を持って成形性の良否を評価した。比較材として、SWCH16A冷間圧造用鋼の冷間伸線材を用いて、同様にマイクロねじ成形を行った^{26,27}。SWCH16A鋼に冷間伸線材では、割れが発生した。一方、温間圧延に冷間圧延を組み合わせて製造した鋼線は、引張強さ1100MPaとなった。この場合も圧造時に割れは生じなかった。図11に本M1.6マイクロねじの外観を示す。図12にはねじの断面組織を示すが、図12(a)に示すように、マイクロねじの断面組織は超微細である^{23,26,27}。比較のSWCH16A鋼の組織を図12(b)に示すが、はるかに粗大であることがわかる。

本超微細粒組織高強度ねじは、図13のパナソニック初のスマートフォンP-07C 2011年8月発売)に採用され、後継機のP-03E ELUGAに至るまで採用され続け、ねじの累計製造個数は約1000万個を超えている。サブミクロン超微細粒組織金属の量産・実用化を達成した世界初の成果となった。

量産化にあたっては、ねじ製造に関しては(株)降矢技研、線材製造に関しては大阪精工株式会社と物質・材料研究機構との5年以上にわたる共同研究があって、実現できたものである。さらに、近畿経済産業局サポインなど、競争的研究資金の援助もあった。

4 メリットと今後の展開

図1左に示すように、ねじ製造1トンあたり490kgのCO₂

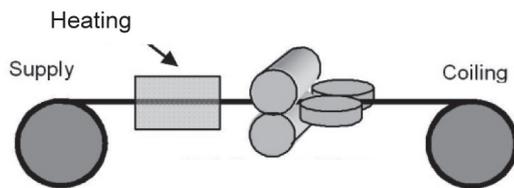


図8 連続温間圧延システム²⁷⁾

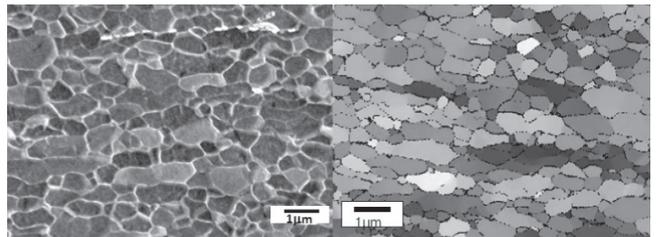


図10 超微細粒組織線材コイルの圧延方向に平行な断面組織²⁷⁾

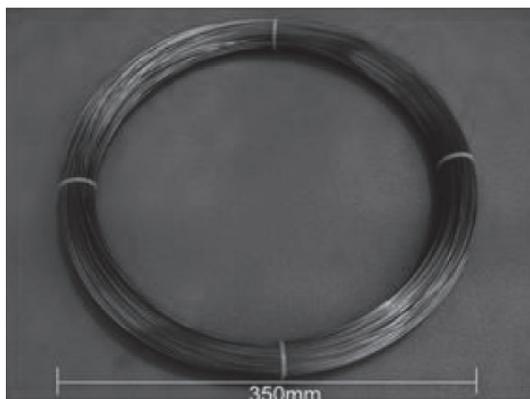


図9 超微細粒組織線材（直径3mm）コイルの外観^{23, 27)}

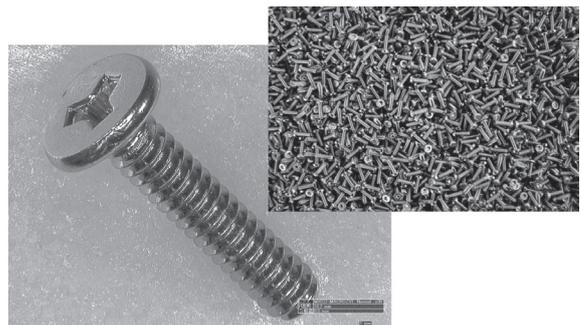


図11 超微細粒組織M1.6ねじの外観

を排出すると推定されるが、本超微細粒組織ねじは、製造工程における5つの熱処理の削減により、CO₂排出量はねじ製造1トンあたり240kgとなり、従来法に比べCO₂排出量の50%削減を可能にできた²⁶⁾。本技術は、情報家電、自動車、医療用分野など、高強度精密部品を必要としている産業のほとんどに及ぶ。熱処理を省略しても、引張強さ1GPaを超える高強度で高信頼性を有する超微細粒組織高強度精密部品製造の広範囲な実現が期待できる。超微細粒組織高強度精密ねじは、その第一歩である。広範囲な実現に向けて、今後努力し、その結果が、日本全体で年間11億トン排出しているとされているCO₂ガスの削減にもつなげたい。

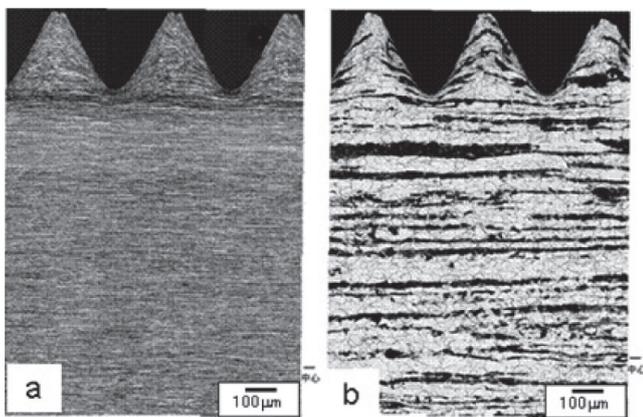


図12 M1.6マイクロねじの内部組織、(a)超微細粒線材より製造、(b)20μm組織鋼線材より製造^{23,27)}



図13 スマートフォンに採用された超微細粒組織を持つM1.6高強度精密ねじ

5 まとめ

超鉄鋼研究の開始から15年以上経つが、企業との長年の協力のもと、大きな課題の解決によって、鋼の超微細粒組織化を用いた高強度精密ねじの量産化を世界で初めて実現でき、CO₂排出量50%削減につながった。ねじの累計製造個数は1000万個を超えた。今後の環境重視、低エネルギー化の中で、大きなメリットであり、幅広い発展が期待できる。ねじは、それ自体は小さいが、本技術は環境・エネルギー問題の解決に寄与するものである。今後も、本技術をさらに発展させ、より広範囲な応用につなげたい。

謝辞

研究の遂行に当たり、物質・材料研究機構 花村年裕博士、塚本雅敏博士、櫻井昇氏、野澤智子氏、土谷悦子氏、高鍋あい子氏、エレナ ブルガレビッチ氏、永嶋泰代氏、奥田正美氏、細田義郎氏、材料創製・加工ステーションの方々、大阪精工株式会社森川勉氏、(株)降矢技研鈴木由幸氏、(株)小松精機工作所小松隆史氏に多大なご協力を頂いた。また、近畿経済産業局サポインのご支援もいただいた。

参考文献

- 1) 牧正志：第177・178回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(2002)，3.
- 2) V.Segel, V.Renznikov, A.Drobyshevsky and V.Kopylov : Russ Metall, 1 (1981), 115.
- 3) N.Tsuji, Y.Saito, H.Utsunomiya and S.Tanigawa : Scripta Materialia, 40 (1999), 795.
- 4) I.Saundars and J.Nutting : Metal Sci., 18 (1984), 571.
- 5) 鳥塚史郎，長井寿，佐藤彰：塑性と加工，42 (2001)，287.
- 6) 鳥塚史郎：ふえらむ，10 (2005)，188.
- 7) 鳥塚史郎，梅澤修，津崎兼彰，長井寿：鉄と鋼，86 (2000)，801.
- 8) 大森章夫，鳥塚史郎，長井寿，山田賢嗣，向後保雄：鉄と鋼，88 (2002)，857.
- 9) A.Ohmori, S.Torizuka, K.Nagai, N.Koseki and Y.Kogo : Materials Transactions, 45 (2004)，2224.
- 10) N.Murty, S.Torizuka and K.Nagai : Scripta Materialia, 53 (2005)，763.
- 11) N.Murty, S.Torizuka, K.Nagai, N.Koseki and Y.Kogo : Scripta Materialia, 52 (2005)，713.
- 12) N.Murty, S.Torizuka and K.Nagai : ISIJ Int., 45 (2005)，1651.
- 13) N.Murty, S.Torizuka and K.Nagai : Materials Transactions, 46 (2005)，2454.

- 14) N.Murty, S.Torizuka and K.Nagai : Materials Science and Engineering A, 410-411 (2005), 319.
- 15) S.Torizuka and N.Murty : Materials Science Forum, 558-559 (2007), 595.
- 16) 鳥塚史郎, 井上忠信, 長井寿 : 鉄と鋼, 86 (2000), 807.
- 17) 井上忠信, 鳥塚史郎, 長井寿 : 鉄と鋼, 86 (2000), 793.
- 18) 大森章夫, 鳥塚史郎, 長井寿, 山田賢嗣, 向後保雄 : 鉄と鋼, 89 (2003), 781.
- 19) S.Torizuka, A.Ohmori, N.Murty and K.Nagai : Scripta Materialia, 54 (2006), 563.
- 20) A.Ohmori, S.Torizuka and K.Nagai : ISIJ Int., 44 (2004), 1063.
- 21) S.Torizuka, E.Muramatsu, N.Murty and K.Nagai : Scripta Materialia, 55 (2006), 751.
- 22) S.Torizuka and E.Muramatsu : Steel Research International, 81 (2010), 258.
- 23) 鳥塚史郎 : まてりあ, 45 (2006), 438.
- 24) 井上忠信, 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 長井寿 : 鉄と鋼, 94 (2008), 164.
- 25) 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 井上忠信, 長井寿 : 日本金属学会誌, 72 (2008), 571.
- 26) 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 鈴木由幸, 森川勉 : 第63回度塑加工連合講演会講演論文集, (2012), 19.
- 27) S.Torizuka, E.Muramatsu, T.Komatsu and S.Nagayama : Nanostructured metals and alloys 1, Woodhead publishing, Cambridge UK, 6 (2011), 715.

(2015年6月30日受付)