

# 冷間強加工を施された構造用金属材料の 熱的強度と非熱的強度の分離に関する研究

東京工業高等専門学校 機械工学科  
准教授 小泉 隆行

(2021 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021037-C2)

キーワード：非熱的応力，熱的応力，冷間加工

## 1. 緒言

最近、著者らは次世代の構造用材料と目されてきた工業用純金属の巨大ひずみ加工材において、新たな特性を発見した。それは、冷間で巨大ひずみ加工が繰り返された材料では、ひずみ速度依存性が著しく増加してしまう点である<sup>1,2)</sup>。これまで示されてきたように、巨大ひずみ加工材では、準静的なひずみ速度 ( $10^{-2}\sim 10^{-4}$  /s) での単軸引張試験において流動応力が増大する。しかしながら、 $10^{-7}$  /sオーダーでの低ひずみ速度では流動応力が著しく低下することから、恒久的に静的負荷を受け続けるような用途において、必ずしも高強度材と見做すことはできない<sup>1,2)</sup>。すなわち、準静的なひずみ速度の単軸引張試験のみでは、構造用材料としての適正評価を正しく行えない場合がある。構造用材料に必要な強度を考える場合、第一義的には静的負荷に対する恒久的な応力保持能力が求められる。仮に、環境温度や時間の変化によって、その能力が失われるのであれば、構造物や輸送機器の安全性は大きく損なわれてしまう。材料が有するひずみ速度依存性の影響を除去したうえで流動応力を評価することが求められる。

単軸引張試験で得られる流動応力 $\sigma$ は、式(1)に示すように、転位運動における大きな障害物との長距離相互作用に対応する非熱的応力成分 $\sigma_1$ と、局所的な障害物との短い相互作用に対応する熱的応力成分 $\sigma^*$ の2つに分離することができる<sup>3)</sup>。

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma^* \quad (1)$$

一般的に、 $\sigma_1$ は温度や時間(ひずみ速度)に依存しないが、 $\sigma^*$ は原子の熱振動エネルギーの寄与を反映して、これらに強く依存することが知られている。 $\sigma_1$ を評価することで、構造用材料の第一義的な強度である恒久的な応力保持能力を見積もることが可能であるが、実験で直接的に求めることは難しい。これまでの機械・構造設計では、準静的なひずみ速度の単軸引張試験から得られる0.2%耐力( $\sigma_{0.2}$ )に対し、任意の安全率を用いて許容応力を決定するのが慣例であった。 $\sigma \approx \sigma_1$ との仮定が前提にあったと推測されるが、この誤差が大きくと、安全率が作用することで問題の顕在化には至らなかったと考えられる。近年では、カーボンニュートラルの実現に向けて、輸送機器の軽量化に伴う温室効果ガスの削減が重要なテ

ーマである。安全性を保持したまま軽量化を促進させるためには、これまで以上に材料の機械的特性を詳細に把握し、可能な限り安全率を小さくする極限的な設計が求められていくであろう。

板ばね用金属材料では、冷間圧延に伴う加工硬化の発現によって弾性域が大きく拡張される。面内異方性が顕著に現れ、引張や圧縮などの負荷方向の違いに応じてその大きさが異なる<sup>4~6)</sup>。現状、準静的なひずみ速度の $\sigma$ に含まれる $\sigma_1$ の割合は明らかにされていない。材質や加工条件、さらには面内及び負荷方向の異方性に関する $\sigma_1$ を広範囲に調査することは極限的な設計を目指すうえで有益な情報になるであろう。本研究では、冷間圧延が施された板ばね用りん青銅材を対象に、引張負荷における非熱的応力成分 $\sigma_1$ とその面内異方性について評価する。なお、本報告は、「小泉隆行:銅と銅合金, 61 (2021) 130-134.」に掲載された内容を引用し、再編集したものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 非熱的応力成分 $\sigma_1$ の評価

理論上、ひずみ速度を無限大まで低下させて単軸引張試験を行うことで、 $\sigma_1$ の流動応力曲線を得ることが可能である。著者らの経験上、実験による低ひずみ速度の単軸引張試験は $10^{-6}\sim 10^{-7}$  /sのオーダーが限界であり、 $\sigma_1$ を直接的に求めることは難しい。準静的なひずみ速度の $\sigma$ と低ひずみ速度の $\sigma$ を比較し、両曲線がどの程度一致するか調査することで、 $\sigma \approx \sigma_1$ の関係が成立するか定性的に評価できると考えられる。

$\sigma_{0.2}$ における $\sigma_1$ の定量的な評価を行うため、温度やひずみ速度の関数である Larson-Miller パラメータ<sup>7)</sup>を用いて、外挿により $\sigma_1$ を評価する方法が提案されている<sup>8~12)</sup>。信頼性の高い $\sigma_1$ を求めるためには、広範囲の温度とひずみ速度による単軸引張試験結果が必要となる。ところが、再結晶温度域やそれ以上の温度域での実験結果が多く用いられているにも関わらず、温度変化による材料の組織変化が理論的に考慮されていない。この問題を解決するため、著者ら<sup>1)</sup>は室温での応力緩和試験とカーブフィッティングを用いて外挿により $\sigma_1$ を評価する方法を提案した。巨大ひずみ加工材を対象とした先行研究<sup>1,2)</sup>では、信頼性の高い $\sigma_1$ を得ることができており、本研究においても同様の手法を用いて $\sigma_1$ の評価を行う。詳細について

は 2.3.2 で説明する。

## 2.2 供試材および力学試験片

供試材は板厚 1.0 mm の冷間圧延が施されたばね用りん青銅板 (JIS-C5210-H, 市販材) を用いた。単軸引張試験片および応力緩和試験片の形状は JIS13 号 B 試験片 (平行部長さ 60 mm, 平行部幅 12.5 mm) とした。面内異方性の影響を調査するため, 試験片の切り出し方向を圧延方向から 0° (RD), 45° (DD), 90° (TD) に設定した。圧延方向 1200 mm, 圧延直角方向 180 mm の板面内から, ワイヤカット放電加工により試験片を作製した。ひずみ測定は, 引張試験片面内の中心部にひずみゲージ (TML FLAB-2-17-3LJCT-F) を 1 枚貼付し, 3 線式 1 アクティブゲージ法により実施した。

## 2.3 力学試験条件

### 2.3.1 単軸引張試験

単軸引張試験は, 一般的な準静的ひずみ速度 ( $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2}$  /s) と低ひずみ速度 ( $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6}$  /s) の 2 条件を設定し, 万能試験機 (Shimadzu Autograph AG-X 100 kN) を用いて室温で実施した。

### 2.3.2 応力緩和試験

応力緩和試験は万能試験機を用いて室温で行い, 対数ひずみ  $\epsilon = 0.5\%$  と  $1.5\%$  で各 24 時間実施した。引張負荷中のひずみ速度は  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-4}$  /s, 緩和試験中はひずみが一定になるようフィードバック制御を行い, クロスヘッドを微動させた。その後, 実験結果における  $\epsilon = 1.5\%$  の 24 時間の真応力-緩和時間関係に対して, 式(2)によるカーブフィッティング<sup>2)</sup>を行い, 無限時間後の残留応力  $\sigma$  を  $\sigma_1$  として評価した。

$$\sigma = \sigma_1 - A_1 e^{-\frac{t}{x_1}} - A_2 e^{-\frac{t}{x_2}} - A_3 e^{-\frac{t}{x_3}} \quad (2)$$

ここに,  $\sigma_1$  は非熱的応力成分,  $t$  は緩和試験中の経過時間,  $A_n$  と  $x_n$  はフィッティングパラメータである。本研究では,  $\epsilon = 1.5\%$  の  $\sigma_1$  のみを評価していることから,  $\sigma_1$  の流動応力曲線を直接的に得ることができない。ここでは, 0.2% 耐力以降の対数ひずみでは, 緩和試験開始時の応力  $\sigma_0$  に対する  $\sigma_1$  の応力残留率  $(1 - (\sigma_0 - \sigma_1)/\sigma_0)$  に大きな差異は無いと仮定し, 負荷中に得られた  $\sigma$  の流動応力曲線に対して,  $\epsilon = 1.5\%$  における  $\sigma_1$  の応力残留率を乗ずることで  $\sigma_1$  の流動応力曲線を得た。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 真応力-対数ひずみ関係及び応力残留率-緩和時間関係

単軸引張試験及び応力緩和試験結果における真応力-対数ひずみ関係,  $\epsilon = 1.5\%$  での応力緩和試験結果における応力残留率-緩和時間関係を Fig. 1 に示す。また, カ

ーブフィッティングによって決定された式(2)に関するパラメータを Table 1 に示す。Fig. 1 内の左図において, 「 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2}$  /s」と「 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6}$  /s」で示されたのは一般的な準静的ひずみ速度と低ひずみ速度の引張試験によって得られた流動応力曲線である。また, 「 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-4}$  /s」で示されたのは応力緩和試験に関する流動応力曲線である。Fig. 1 内の右図は,  $\epsilon = 1.5\%$  での応力緩和挙動を示している。2.3.2 節で示した通り, この実験結果に対して式(2)によるカーブフィッティングを行うことで,  $\epsilon = 1.5\%$  での  $\sigma_1$  (Fig. 1 左図の「 $\sigma_1$  at  $\epsilon = 1.5\%$ 」) 及び応力残留率を得た。その後,  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-4}$  /s の流動応力にその応力残留率を乗ずることで  $\sigma_1$  の流動応力曲線を求めた (Fig. 1 左図の「Flow stress of  $\sigma_1$ 」)。

RD と TD (Fig. 1(a),(c)) では, 供試材が有するひずみ速度依存性の影響によって  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2}$  /s と  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6}$  /s の  $\sigma$  に差異が生じる。緩和試験結果の応力残留率は 24 時間 (86400 秒) で下限近傍になるが, その後も僅かに応力が減少していく。この応力緩和挙動をカーブフィッティングによって良好に再現できており, 決定係数  $R^2$  は 0.9 以上を示す (Table 1)。また,  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-4}$  /s と  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6}$  /s の  $\sigma$  が概ね一致していることから,  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-4}$  /s 以下のひずみ速度であれば  $\sigma \approx \sigma_1$  と見做しても問題ないように見える。しかしながら,  $\sigma_1$  は  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6}$  /s の  $\sigma$  よりも有意に低下する。

DD (Fig. 1(b)) でも,  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2}$  /s と  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6}$  /s の  $\sigma$  に差異が生じ, ひずみ速度依存性の影響が確認される一方, 緩和試験結果の応力残留率は約 7 時間 (25200 秒) で下限値をとる。以降は, 僅かに応力が増加するものの, 応力緩和挙動は停滞していると考えられる。この影響によってカーブフィッティングの精度は低下するが ( $R^2 = 0.44$ , Table 1), 応力残留率の下限値と緩和試験 24 時間時点での応力残留率から判断して, 得られた  $\sigma_1$  に大きな問題は無いと考える。また,  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6}$  /s の  $\sigma$  が  $\sigma_1$  と概ね一致している。低ひずみ速度の単軸引張試験のみでも  $\sigma_1$  を定量的に評価できる場合があると言えるが, RD と TD の結果が示す通り, すべての試験条件で成立するわけではないことから, 注意が必要である。

### 3.2 非熱的応力成分 $\sigma_1$ と熱的応力成分 $\sigma^*$ の分離評価

単軸引張試験結果の  $\sigma_{0.2}$  について, 式(1)を用いて  $\sigma_1$  と  $\sigma^*$  に分離した結果を Fig. 2 に示す。 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2}$  /s での  $\sigma_{0.2}$  を 100% とした場合に含まれる  $\sigma_1$  は RD = 87.3%, DD = 91.6%, TD = 88.3% である。比較的近い値が得られていることから, その面内異方性は小さい。RD と TD では約 88%, DD では約 92% と非常に高い割合の  $\sigma_1$  が存在するため, 従来の準静的な単軸引張試験結果の  $\sigma_{0.2}$  には, RD と TD で約 12%, DD で約 8% の  $\sigma^*$  が含まれていたことになる。本供試材では,  $\sigma \approx \sigma_1$  の仮定が概ね成立して

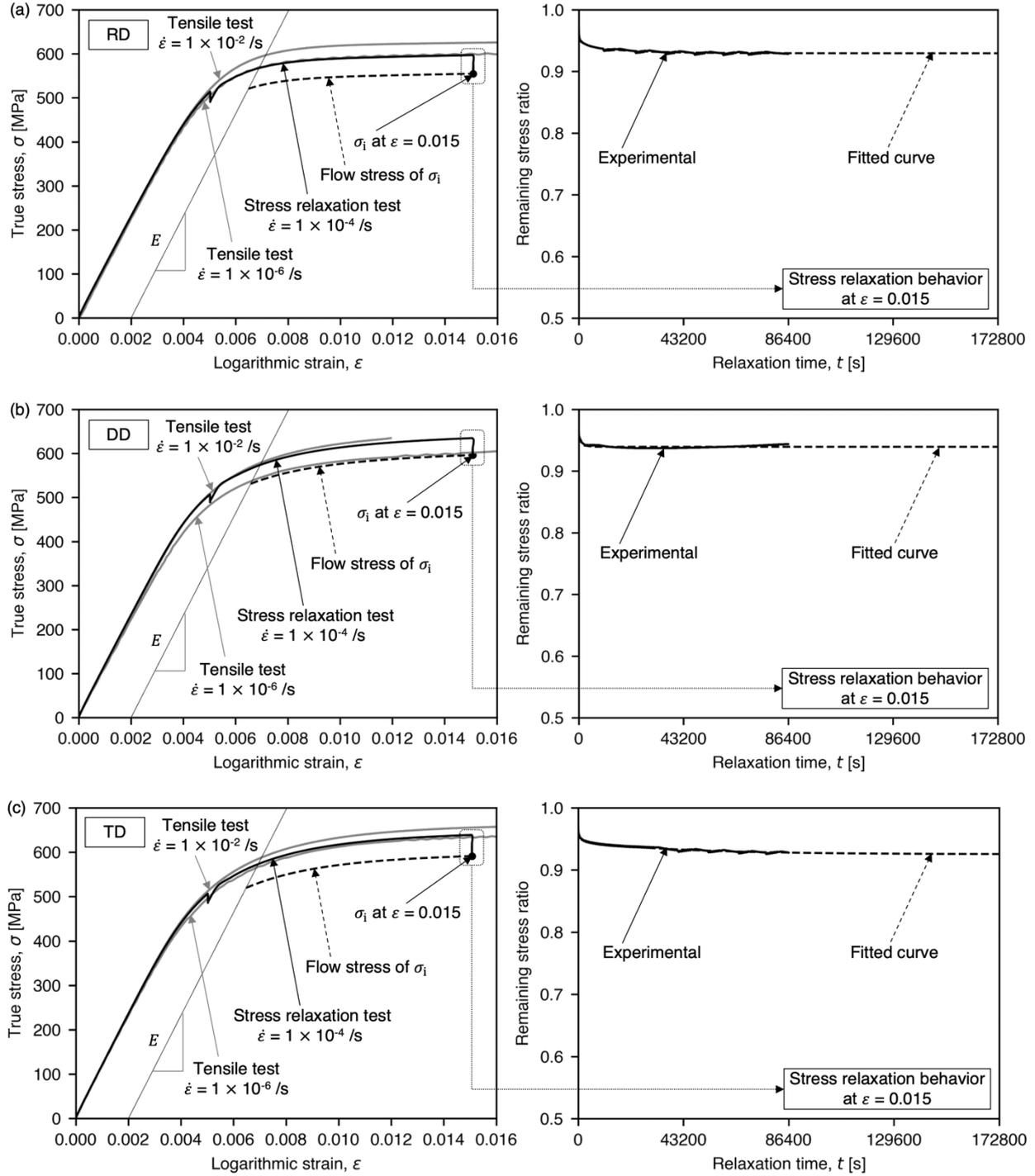


Fig. 1. Experimental curves of true stress versus logarithmic strain and remaining stress ratio versus relaxation time during stress relaxation test: (a) RD, (b) DD and (c) TD.

Table 1. Details of curve fitting of the experimental stress relaxation behaviors using Eq. (2).

In-plane direction	$\sigma = \sigma_i - A_1 e^{-t/x_1} - A_2 e^{-t/x_2} - A_3 e^{-t/x_3}$ [MPa]							Coefficient of determination
	$\epsilon = 1.5\%$							
	$\sigma_i$	$x_1$	$A_1$	$x_2$	$A_2$	$x_3$	$A_3$	$R^2$
RD	554.75	19308.32	7.34	2401.09	-7.38	65.10	22.78	0.9279
DD	596.15	1412.93	-54.87	1412.93	42.50	-	-	0.4373
TD	591.15	36.20	25.62	25.62	1309.58	41845.19	13.06	0.9660

いると言えるが、 $\sigma^*$ を一概に無視することはできないであろう。次に、 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6} /s$ での $\sigma_{0.2}$ と $\sigma_1$ の関係について考察する。全試験条件において、 $\sigma_1$ が $\sigma_{0.2}$ を下回っており、RD と TD では明瞭な差異が確認される。本研究で用いた応力緩和試験とカーブフィッティングによる外挿法は、 $\sigma_1$ の定量的な評価を実施するうえで有効な手法の一つであると言えよう。

本供試材において、 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2} /s$ の $\sigma_{0.2}$ に含まれる $\sigma_1$ は3方向の平均から89%程度であり、非常に高い割合を占める。 $\sigma_{0.2}$ を構成する $\sigma_1$ と $\sigma^*$ の比率は冷間加工によって供試材に付与する相当ひずみ量で変化すると考えられる。事実、巨大ひずみ加工による工業用純アルミニウムと純銅材では、供試材に付与した相当ひずみが200%を超えるとひずみ速度依存性と応力緩和は増大し、準静的なひずみ速度の $\sigma_{0.2}$ における $\sigma_1$ の割合が著しく低下する<sup>1,2)</sup>。応力緩和は材料内部の可動転位の増加によって大きくなることが示唆されている<sup>13~18)</sup>。

西畑ら<sup>19)</sup>は、圧下率33%（相当ひずみ約47%）のC5210-H板材の力学的特性を評価し、本実験結果に近い耐力や引張強さを示している。本供試材に付与された相当ひずみも同程度であり、冷間で巨大ひずみ加工が繰り返された材料のように、可動転位が内部に多く存在する状態ではなかったと推測される。これが本供試材における準静的なひずみ速度の $\sigma_{0.2}$ において、 $\sigma_1$ が支配性を持った理由であると考えられるが、本メカニズムの解明については今後の検討課題である。

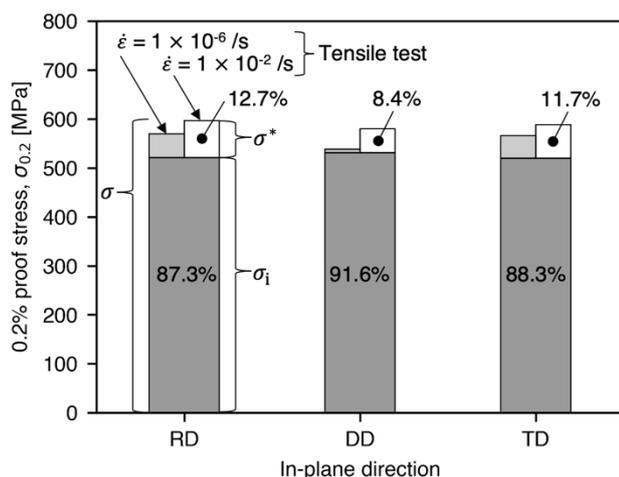


Fig. 2. Breakdown of tensile flow stress  $\sigma$  at a plastic strain of 0.002 (0.2% proof stress,  $\sigma_{0.2}$ ) into athermal stress component  $\sigma_1$  and thermal stress component  $\sigma^*$ .

#### 4. 結言

本研究では、冷間圧延が施されたばね用りん青銅板（JIS-C5210-H）の非熱的応力成分 $\sigma_1$ とその面内異方性について評価した。得られた結果を以下に示す。

- [1] 著者らが提案した応力緩和試験とカーブフィッティングによる外挿法は、本供試材の $\sigma_1$ を定量的に評価するうえで有効な手法であることを示唆した。
- [2] 低ひずみ速度（ $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6} /s$ ）の引張試験のみでは、 $\sigma_1$ を正確に評価できない場合があることを示唆した。
- [3]  $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-2} /s$ での $\sigma_{0.2}$ に含まれる $\sigma_1$ は、RD と TD で約88%、DDで約92%と非常に高い割合を占め、その面内異方性は小さいことを明らかにした。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2021 年度前期奨励研究助成により遂行されたものです。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) T. Koizumi, A. Kurumatani, M. Kuroda: Sci. Rep., 10 (2020), 14090.
- 2) T. Koizumi, K. Ogoda, M. Kuroda: Metall. Mat. Trans. A, 53 (2022), 2004–2017.
- 3) A. Seeger, J. Diehl, S. Mader, H. Rebstock: Phil. Mag., 2 (1957), 323–350.
- 4) 小泉隆行：黒田充紀：銅と銅合金, 56 (2017) 200–204.
- 5) 小泉隆行：ばね論文集, 65 (2020) 7–14.
- 6) 小泉隆行：プレス技術, 60-7 (2022) 25–29.
- 7) F.R. Larson, J. Miller: Trans. ASME, 74 (1952), 765–771.
- 8) K. Ogawa, H. Kobayashi, K. Yoshida, F. Sugiyama: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 43 (1994), 304–309.
- 9) K. Ogawa, T. Nojima: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 37 (1988), 1171–1177.
- 10) N. Tsuchida, Y. Izaki, T. Tanaka, K. Fukaura: Tetsu-to-Hagané, 97 (2011), 201–208.
- 11) N. Tsuchida, Y. Tomota, H. Moriya, O. Umezawa, K. Nagai: Acta Mater., 49 (2001), 3029–3038.
- 12) J.-H. Park, Y. Tomota, S. Takagi, S. Ishikawa, T. Shimizu: Tetsu-to-Hagané, 87 (2001), 657–664.
- 13) M.A. Muñoz-Morris, C. Garcia Oca, D.G. Morris: Scripta Mater., 48 (2003), 213–218.
- 14) C. Watanabe, H. Hiraide, Z. Zhang, R. Monzen: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 54 (2005), 717–723.
- 15) E. Sato, T. Yamada, H. Tanaka, I. Jimbo: Mater. Trans., 47 (2006), 1121–1126.
- 16) F. Nishijima, K. Nomura, C. Watanabe, R. Monzen: J. Jpn. Inst. Met. Mater., 72 (2008), 427–432.
- 17) R. Monzen, C. Watanabe: Mater. Sci. Eng. A, 483–484 (2008), 117–119.

18) K. Hariharan, P. Dubey, J. Jain: Mater. Sci. Eng. A, 673 (2016), 250–256.

19) 西畑三樹男, 崎田栄一, 清水雄司: ばね論文集, 25 (1980) 26–33.