論文

鋼片中心部の偏析拡散に及ぼす圧延条件の影響

勝村 龍郎* 太田 裕樹*

Influence of Rolling Conditions on Reduction of Center Segregation of Steel Ingot

Tatsuro KATSUMURA* and Hiroki OTA*

(Received on July 20, 2018)

Macroscopic segregation occurs easily at the center of materials with large cross-sectional areas, such as blooms, billets, and ingots. Segregation affects the workability and certain other properties such as mechanical strength and corrosion resistance through phase transformation. Therefore, it is important to manufacture homogeneous materials by eliminating segregation. In this study, the influence of manufacturing conditions on the diffusion of segregation is examined. It was found that the diffusive behavior of some elements in the segregation part depended on the rolling ratio, which is defined as the ratio of the areas of the cast material and the rolled material. And it was possible to estimate diffusive behavior using a parameter including Ld/Hm , where Ld is the contact length and Hm is the mean thickness before and after rolling. In addition, from a comparison of conventional and heavy reduction rolling conditions, we suggested that the recrystallization affected the segregation diffusion behavior.

Key words: rolling, material, ingot rolling, steel, segregation, stress field, grooved roll, heavy reduction.

1. 緒言

鉄鋼材料は組成ならびに製造条件を種々変化させることで広範囲にわたる強度の付与やマイクロ組織の制御により靱性の確保も可能となり、多くの特性を得ることができる。このような鉄鋼材料は一般に、インゴット（鋼塊）やスラブ、ブルームと呼ばれる比較的断面積の大きい素材として鋳造を行い、その後、熱間で圧延を施される。薄板として用いられる場合には、さらに冷間圧延を経て最終製品として製造されるが、熱間圧延を終えた段階で形鋼や鋼管の中間素材として用いることも多く、そのため、鋼管など二次製品の素材としても重要な位置を占める。

圧延により製造される製品・中間素材では鋳造により得られた大型の鋳片・鋼塊の欠陥が残存する可能性がある。欠陥は、主に材料中心部に鋳造工程で生成した引け巣が未圧着で残存するポロシティと、溶鋼が凝固する際に生ずる濃化部のマクロ的な偏析に大別できる。ポロシティは大型の鋼片・鋳片を用いると最終凝固時に収縮量が大きくなることから残存しやすいが、多くの場合、圧延や鍛造により小断面化される際の加工度、すなわち断面減少率が大きくなることから加工方法やその条件の適正化により欠陥を防ぐことが可能であるとされる^{1)~4)}。

一方、素材中心に生ずる偏析は、鋳造中の凝固現象についての研究^{5),6)}から、その生成機構が提案^{7),8)}されている。加工に影響を及ぼす素材の偏析はマクロ偏析と称されるも

のが多く、良く知られている形態として A 偏析および V 偏析と呼ばれるものが鋼塊や鋳片に生ずる⁹⁾。このような偏析の生成メカニズムとして現在は凝固におけるデンドライト樹間での溶鋼の流動が阻害されて生ずる現象であるという考え方が基本になっている。近年では偏析の数値モデル化も行われ、鋼塊の中心偏析の再現などもされつつある¹⁰⁾が、凝固後の偏析部は、粒界偏析あるいは組織変化としてその影響が表れる。これらはいずれも加工中には周囲組織と異なる変形挙動を示すことが多く最終製品に疵を伴う欠陥となり、本来求められる製品品質を満たすための阻害要因となり得るため、その抑制技術が検討されている。

この中心偏析のようなマクロ偏析に近い大きな偏析あるいは濃化元素に起因して生じた炭化物などの化合物を拡散により解消するため、高炭素軸受鋼を対象に加熱・均熱の最適条件の検討が報告されている^{11),12)}。さらにマイクロ偏析を対象とした場合には非常に長時間かつ高温の熱処理が必要との報告もある¹³⁾。また Al-Ti, Al-Cu および Al-Cr 合金に Ti, V を添加し、熱処理による均質化効果を検討した報告では、高温長時間熱処理により偏析組織が拡散するとしている¹⁴⁾が、数週間という時間を要するため工業的には容易に適用することは非常に工夫を要する。

他方、凝固後の固相状態における鋼材中心部の偏析拡散を加工により行う技術についてはほとんど報告がない。Al-Cu 合金に Ti, V を添加し、そのマイクロ偏析と均質化処理の影響を調査した報告では、Cu のデンドライトアーム中心の濃度はやや低温の均質化処理のみでは 100 時間を超えても完全平衡には至らず、Ti および V は熱処理のみでは、ほとんど均質化されないが強冷間加工を付与することで濃

* JFE スチール(株) スチール研究所 〒470-2322 半田市川崎町 1-1
Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation
1-1 Kawasaki-cho, Handa, Aichi 470-2322, Japan.
E-mail: t-katsumura@jfe-steel.co.jp

度は減少するとしている¹⁵⁾。しかしながら加工と均質化処理の併用でも初期濃度の3倍程度は残存するとしていることから依然としてミクロ偏析の拡散には課題が多い。特殊鋼を用いた拡散焼鈍に関する実験的検討では、バンド状の偏析が材料中心になるほど強いこと、均質加熱処理の条件さらには断面内での偏析に分布があることが報告されている¹⁶⁾。特に断面内で偏析に分布が生ずることは加工と偏析の傾向に関連性があることを示唆しているが、その詳細は不明なままである。

そこで本報告では偏析の生じやすい大型鋼塊を用い、圧延条件を変更することで半定量的に偏析抑制に及ぼす効果を調査し、拡散挙動のメカニズムについて検討を行った。

2. 実験および解析条件

2.1 材料中心偏析の調査

材料中心の偏析状態は、所定寸法・成分の鋼塊を圧延することによって得た。鋼種は Table 1 に示した代表成分を有する ASTM-A213 T91 鋼を用いた。試験鋼塊の寸法は頭部断面 710×1120 mm、底部断面 620×1050 mm で高さを 2700 mm とし、鋼塊短辺側が 410 mm 厚になるまで、ロール直径が約 1300 mm の水平ロールにより圧延した。この後、さらに圧延を行い2水準の異なる寸法となる丸断面素材を作製し、素材断面積/製品断面積で示される圧下比が異なる素材を得た。ここで素材断面積は試験鋼塊の頭部断面積を基準として求めた。

偏析の調査には圧延後の素材を使用し、その位置は鋼塊高さに換算し頭部寄りとした。その際、横断面内では最も偏析が生じやすいと考えられる材料中心部から小型サンプル2ないし3個を採取した。

実製造における鋼塊圧延では一般にユニバーサル圧延法が用いられる^{17),18)}。これは水平ロールと縦ロールで圧延を行うものであり、水平ロールでの圧延により生じた幅広がり部を含め、幅圧下を縦ロールで圧延するため圧延効率が良いことが特徴である。一方、縦ロールの耐荷重はあまり大きくないことから幅圧下量は小さくなる。このため圧延途中で鋼塊を圧延方向に垂直な断面内で転回することで水平ロールにより圧下を行い、小断面化している。そこでまずユニバーサル圧延法を模擬した圧延で得られた試験材の材料中心における圧下比が偏析に及ぼす影響を調査した。

また異なる圧下比での圧延は材料中心の変形、すなわちひずみが異なるため、同一圧下比でひずみ履歴が異なる強圧下法の適用について検討を行った。強圧下法の一例として Fig. 1 に示すように、ユニバーサル圧延に対し幅圧下を小さい孔型が付与された水平ロールで行うことにより強圧下を行う方法がある。そこで実際の圧延にあたってはこれを模擬した圧延スケジュールを採用し、その偏析の挙動を調査した。

Table 1 Chemical composition of tested material (wt%)

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo
A213-T91	0.09	0.24	0.39	8.31	0.9

Fig. 1 Example of rolling methods in actual mills; universal rolling (left) and high-lift rolling (right)

2.2 材料中心におけるひずみ分布

圧延スケジュールの変更による材料中心のひずみを推定するため、FEM 解析を行った。解析はラグランジュ未定乗数法を用いた剛塑性有限要素解析ソルバーCORMILL¹⁹⁾を用いた。鋼塊圧延は圧延パスが多く、全パスの影響を把握することは困難であること、また偏析の低減には拡散を考慮した場合、高温であることが望ましいと考えられることから初期圧延段階の影響を調査した。

メッシュは圧延の対称性を考慮して 1/4 断面とし、この断面内で圧下方向 10 分割×幅方向 10 分割、長手方向にはロールバイト内を 10 分割程度で出入側に変形域を設け、8 節点 6 面体アイソパラメトリック低減積分要素による三次元解析を行った。

変形抵抗は実験に供した素材の単軸圧縮実験結果から井上²⁰⁾・美坂の式²¹⁾の平均変形抵抗式より求めた流動応力 σ_{eq} を与えた。また温度分布は、以下の方法で採取した結果から設定した。すなわち実機を用い当該寸法素材を設定温度にて加熱、1 パス目の圧延前の実測温度であった 1200 °C および途中パスの外表面温度とそのパス間時間から熱伝達係数を推定し、そこから得られた各パスの温度降下量を 5 °C と平均化して適用した。なお温度分布は 1 次元差分解析を行い、その結果から内部温度は表層より 100 °C 高く設定した。また摩擦係数についてはロールと材料間ではクーロン摩擦が生じており摩擦係数値を 0.3 とした。

3. 実験結果

3.1 偏析拡散に及ぼす加熱と圧下比の重量効果

経験的に知られている加熱・均熱の効果と圧下比の影響を調査するため、同一寸法の鋼塊を用いた圧延を行った。圧延は所定の断面を得たパスで一旦停止し、その後、一方は再加熱を行いさらに小断面となるよう圧下を施し丸断面形状に成形した。この断面寸法は直径 210 mm および 300 mm であり、鋼塊頭部断面寸法に対する圧下比はそれぞれ 23.0 と 11.3 となる。

これら2水準の鋼片について、2.1 節で記述したように材料中心部からサンプルを複数個採取し、これらに EPMA を適用し、8 mm 角の領域を Cr, Mo, S について X 線強度分布を評価した。その元素面分布図を Fig. 2 に示す。同図中、赤色部は強度が大きく、緑など暗色に近づくほど強度が低いことを示す。この強度の大小は、検量線を介し元素濃度の高低と一致する。よって小断面、すなわち圧下比が大きく、初期加熱を含め2回加熱を行った素材は比較的成分の偏析が少ない状態であるのに対し、圧下比が小さく断面面積の大きい素材では Cr, Mo とともに、ほぼ同一箇所濃化していることが認められた。またその濃化部とほぼ同じ位

置でSも濃化していた。このことから圧下比が材料中心の偏析に影響することが明らかとなった。

Fig. 2 Distribution of X-ray strength in the cases of low-reduction-ratio and high-reduction-ratio rolling

3.2 強圧下圧延による偏析拡散の効果

次に加工条件の相違による偏析拡散効果を調査するため、強圧下圧延の適用を行った。圧延スケジュールの一部について、その概要を Table 2 に示す。強圧下圧延の試験においては厳密には各パスの圧下率は若干異なるが、Table 2 ではそれを平均し 5 パスごとの区分における各パスの平均圧下率を記載した。なおここでは幅方向圧下を示すエッジング圧延の圧下量は用いず、主ロールによる圧下方向の圧下率で整理した。すなわち、初期厚みである鋼片短辺側の 620～710 mm 厚から 410 mm 厚までの平均圧下率を示した。

Table 2 Characteristics of each rolling schedule

	Mean reduction ratio	
	Conventional	Heavy reduct.
-5pass	2.95%	8.19%
-10pass	2.37%	3.76%
-15pass	1.89%	
-20pass	2.01%	

従来法では 20 パスまでほぼ同程度の 2～3% となる圧下率で圧延を行っている。他方、強圧下圧延スケジュールでは初期 5 パスまでの前半部分で強圧下とし、1 パスあたりの圧下率を増加させ 10 パスで圧延を完了させ、目標厚みの素材を得た。例えば従来圧延スケジュールでは 5 パス後の目標厚みが 620 mm であるが、強圧下圧延スケジュールでは 460 mm である。

この圧延を施した素材軸芯部の Cr に関し、EPMA 分析による X 線強度を比較した。これを Fig. 3 に示す。同図内の濃淡比から最終製品の断面積が同一となる圧下比においても強圧下圧延を施すことで偏析を軽減できることが認められた。

3.3 加熱回数の偏析拡散に及ぼす影響

3.2 節の結果は、強圧下圧延により偏析を軽減できることを示したが、偏析拡散に及ぼす加工と加熱による効果の重畳の寄与は依然として不明瞭である。そこで加熱のみによる効果を明らかにするため、同じ圧延パススケジュールを適用し最終断面寸法も同じように作製する過程で、その全パスを 1 回加熱で行う方法と、途中パスで再加熱を行う場合とで比較を行った。最終丸断面寸法は 300 mm とし、

途中加熱を行う断面目標寸法は 410×830 mm 程度とした。

Fig. 3 X-ray strength distribution for conventional rolling schedule and heavy reduction schedule

偏析の評価は EPMA による Cr の面分布で行った。これを Fig. 4 に示す。同図より緑あるいは黄色の濃淡の差異は、加熱回数が多い条件でより平坦になっている。このことから加工中に加熱を行うことで、さらに偏析が低減でき得ることが示された。

Fig. 4 X-ray strength distribution for different number of heat charges

4. 検 討

4.1 偏析の定量評価手法

3.3 節に示した加熱回数の変更、すなわち熱履歴変更により異なる元素強度分布が得られ、偏析低減に有効であるという結果を得た。また強圧下では明らかに偏析の低減が認められた。これらをより定量的に比較するため、EPMA 測定領域 8×8 mm の強度分布について Fig. 5 の模式図に示すように、1) 元素量の分布幅、および 2) 中心値から一定の割合の領域を除き元素量が高くなっている濃化面積率、の 2 種を定義し検討を行った。今回提案した指標は、1) が測定範囲内の濃度分布のばらつきを、2) が極端な偏析の有無を評価できるものとして考えた。

Fig. 5 Definition of parameter used for evaluation of segregation

なお偏析は微視組織に対して大きく影響を与える。例えば高温では、偏析の有無により変態温度が変わるため組織に相違が生ずることがある。実使用の高温環境における金属組織への影響等も考慮し、偏析の濃淡を示す本測定による分布幅は 1000 ポイント以下、強偏析部はより小さい方が好ましいとして評価した。

4.2 偏析に及ぼす加熱の効果

定義した評価法を用い、加熱回数を変更した素材における Cr 偏析を比較した。この結果を Fig. 6 に示す。同図によれば強度のバラツキ、すなわち全体的な偏析の分布は 2 回加熱の方が小さいことがわかる。他方、濃化部の面積は 1 回加熱の方が小さい。これらより 2 回加熱法は偏析を抑制・均質化できたため、絶対的な元素分布幅が狭くなり、濃化面積がやや大きく評価されたと理解できる。このことは Fig. 3 に示した面分布図からも 2 回加熱材の方が全体に均一化する傾向であることから明らかである。したがって、ある領域内の面積分率といったマクロ的な評価によれば大差はないが、微細組織形成に影響を及ぼすセミマクロ偏析の観点においては 2 回加熱が有効であると考えられる。

Fig. 6 Segregation of Cr content against number of heat charges

4.3 偏析に及ぼす強圧下の効果

3.2 節では同じ寸法の素材を用い、圧下比が同一であっても圧延条件の変更により偏析を低減できることがわかった。その面分布図から得られた結果に加え、圧下比を 23 と大きくし 2 回加熱を適用した、3.1 節に示した、材料の偏析を EPMA 分析で得た強度分布を用いる本評価法で整理した。その結果を Fig. 7 に示す。同図より、1 回加熱法でも強圧下を行うことにより 2 回加熱で圧下比が大きい結果とほぼ同等の効果を得られた。また強圧下法は通常圧延条件に比べ、濃化を示す面積率が小さく、全体の分布幅も狭い。したがって強圧下法は、偏析低減に有効であると考えられる。

Fig. 7 Segregation of Cr contents for different rolling schedules

5. 考 察

5.1 偏析の熱間加工性に及ぼす影響

偏析は Cr や Mo などの濃化現象であり、これを圧延や加熱条件を変更することにより低減可能であることを説明した。これらの元素が偏析すると、高温環境下の金属組織がある温度に対して異なる。Table 1 に示した成分および EPMA により得られた濃化量として Cr のみ 1% 濃化した成分を仮定し、熱力学計算ソフト JMat Pro 10.2 にて高温の相状態を計算した。これを Fig. 8 に示す。

Fig. 8 Relationship between temperature and phase ratio

Cr はフェライト形成元素であることが知られており、この濃化により高温のフェライト域が広がり、フェライトからオーステナイトへの変態温度が偏析の多い成分では低下したと言える。言い換えれば偏析部においては周囲の組織に対してフェライトが多くなり、その結果、熱間加工時には組織差に起因して加工性の劣化を招く。この現象は 13% Cr ステンレス鋼の熱間ねじり試験でも報告されている²²⁾。

そこで一定の大きさの断面積を有する素材に対しても加工性を評価可能な手法として、加藤らの提案したテーパレット圧延法²³⁾を用い加工性を調査した。ここで素材寸法は小径側 35 mm、太径側 43 mm、長さ 200 mm とした。加工温度 1250 °C の限界圧下率を Fig. 9 に示す。限界圧下率が高い程、加工性は良好であることから、今回の実験範囲では偏析の少ない強圧下材は熱間加工性が良好であることを確認した。実際の製造においても偏析に起因した加工性劣化に伴う現象が強圧下材に比べ従来材では 9 倍の頻度で生じており、偏析拡散が重要であると考えられる。

Fig. 9 Critical reduction ratio

5.2 圧延条件の偏析拡散に与える組織的な影響

圧延条件の差異について、ロール間隙比 Ld/Hm を用い、圧延スケジュールを比較した。この検討にあたっては接触

弧長 Ld をロール半径 R と圧下量 Δh の積の平方根, 平均板厚 Hm は (入側板厚 $\times$ 2+出側板厚) / 3 で与えた. この計算結果を Fig. 10 に示す.

Fig. 10 Difference in roll gap ratio between conventional and heavy reduction schedules

同図より従来圧延法では 0.2~0.3 程度であったロール間隙比が, 強圧下法の適用により最大で 0.7 となっていることがわかった. 板厚内部へのひずみの浸透は, 再結晶を伴う組織微細化を介してせん断帯の関与が推定されている²⁴⁾. このせん断帯を有効に利用し, 材料中心での変形を大きくするには, Hill によるすべり線場解析²⁵⁾を工具と材料の接触長および板厚の比で整理・比較すると, ロールと素材の接触弧長が板厚と同等もしくはそれ以上である必要がある. 圧下により十分なひずみの浸透効果を得るには, さらに板厚項を小さくする, あるいは強圧下を行うことによりロール間隙比を大きくすることがせん断帯の傾きをより圧延方向と平行に近づけ, 変形域を長くできる²⁶⁾ため有効であると考えられる. また欠陥圧着の視点から, 素材表面の流動応力を内部に比べ高めることで中心へひずみを浸透させ得るとの報告²⁷⁾もある. すなわち偏析の拡散には一定以上のロール間隙比, 具体的には本材料の断面が大きく温度分布も付きやすいことを考慮すると今回の条件では 0.5 を超える領域の圧延条件がひずみ浸透に必要であると考えられる.

5.3 材料中心のひずみと鋼種による影響の可能性

そこで次に解析により, ひずみの定量化を図った. ロール間隙比の差が大きくなっている圧延前半の条件について FEM 解析により完全に密と仮定した材料中心のひずみを求めた. 相当塑性ひずみのコンター図を Fig. 11 に, 同図中, 矢印で示した材料中心における最大相当塑性ひずみの比較を Fig. 12 に示す. ロール間隙比の検討から明らかのように, その指標が大きい条件ではひずみがおおよそ 0.13 であるが, 小さい条件では 0.02 程度とほとんど塑性変形していないことが認められた.

加工による偏析拡散は加熱による現象とは異なり, 空孔を介して, あるいは大きな元素であれば加工により生じた核生成サイトからの再結晶により半ば強制的に拡散が生じている²⁸⁾と推察される. このモデルによるならば, 強圧下でひずみを導入し, かつ, やや温度が低下しても加工を加え続けることでひずみ, すなわち転位が導入されて再結晶が促進され, その結果として偏析の拡散がなされている可能性がある. 再結晶挙動については, 同じフェライト組織からなるステンレス鋼である SUS430 鋼について平野らが検討しており²⁹⁾, ひずみを 0.4 とした場合, 1100 °C では 10

秒程度のパス間時間で再結晶が生ずると報告している. しかしながら Fig. 10 に示した解析において本条件ではひずみは 0.18 であり SUS430 が再結晶を生ずる 0.4 に対して小さい値である.

Fig. 11 Analytical results of equivalent plastic strain for heavy reduction (left) and conventional rolling (right) schedule

Fig. 12 Maximum equivalent plastic strain at center of thickness for conventional and heavy reduction rolling schedules

そこで本材料の特性を把握するため, 富士電波工機製サーメックマスターを用い, 高温環境で単軸圧縮を行った. 試験は直径 ϕ 8 mm, 高さ 12 mm の円柱試験片を用い, 誘導加熱により 1250 °C に加熱, 300 s の均熱を行った後, 所定の加工温度まで 4 °C/s で降温, 到達して 5 s 保持後に単パスあるいは 2 パスの圧縮を実施した. この際, 加工するダイと試験片の摩擦による影響を避けるため, 雲母板をはさんだ. ひずみは単パスの場合, 0.7 程度まで, 2 パス加工の場合は 1 パス目・2 パス目ともひずみを 0.2 とし, 流動応力曲線を得た. ひずみ速度は本実験の加工条件を考慮し, 1, 10 および 40 s⁻¹ にて実施した.

単軸圧縮における 1000 °C および 1100 °C での加工結果を Fig. 13 に示す. 同図より, 動的回復あるいは動的再結晶が生じた場合に出現する応力低下は観察されなかった. そこで回復挙動をさらに詳細に調べるため, 複数回加工を行った場合の軟化率を調査した. ひずみ速度を 10/s, パス間時間を 1 s とした時の加工温度と軟化率の関係を Fig. 14 に示す. 軟化率の測定には strain recovery 法³⁰⁾を使用した. これより A213-T91 材は与えた初期ひずみの 2 パス目における軟化率が小さく, 明らかに回復挙動を示さない傾向にあることがわかった. すなわち偏析が残存しやすい材料中心に一定のひずみを与えることができれば, 蓄積により実質的なひずみが増加して結晶を生じせしめることを示唆しており, この挙動が強圧下法に有効に作用したものと思わ

れる。

以上より強圧下法では圧延初期から材料中心において再結晶が起こり, そのために偏析も拡散したものと考えられる。したがって, 偏析拡散は金属学的な変化とも密接に関係していると推察され, 今後の再結晶挙動と偏析拡散の検討が必要である。

Fig. 13 Flow stress curves at elevated temperature

Fig. 14 Temperature dependence of softening ratio

6. 結 言

大型の試験鋼塊を用い, 実現可能な圧延条件で圧下量や加熱条件を変更することで偏析に及ぼす影響を調査した。今回の実験範囲で得られた結果を EPMA によって得られた元素分布, 特に Cr について偏析部の X 線強度範囲ならびに濃化域面積をパラメータとして整理し, 偏析拡散挙動のメカニズムについて推察した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 鋼塊と製品の断面積比率で示される圧下比を大きくすることにより偏析拡散が減少する。加えて強圧下の適用により偏析は同様に減少する。
- 2) 強圧下を表現可能なマクロ的な圧延指標であるロール間隙比と材料の圧下比を考慮することで偏析拡散を評価できる。
- 3) 強圧下は材料中心までひずみを浸透させることで再結晶挙動に影響を及ぼし, これが偏析に関係する可能性がある。

参 考 文 献

- 1) Ståhlberg, U., Keife, H., Lundberg, M. & Melander, A.: J. Mech. Work. Technol., **4** (1980), 51-63.
- 2) Nakasaki, M., Takasu, I. & Utsunomiya, H.: J. Mater.

- Process. Technol., **177**-1-3 (2006), 521-524.
- 3) Wang, A., Thomson, P. F. & Hodgson, P. D.: J. Mater. Process. Technol., **60** (1996), 95-102.
- 4) Katsumura, T., Iguchi, T., Kimura, H. & Yanagimoto, J.: Mater. Trans., **55**-12 (2014), 1834-1840.
- 5) Kawawa, T., Sato, H., Miyahara, S., Koyano, T. & Nemoto, H.: Tetsu-to-Hagané, **60**-5 (1974), 486-500.
- 6) Ogibayashi, S.: Sanyo Tech. Rep., **19**-11 (2012), 2-14.
- 7) Isobe, K.: Tetsu-to-Hagané, **98**-8 (2012), 405-414.
- 8) Miyazaki, M., Isobe, K. & Murao, T.: Nippon Steel Tech. Rep., **394** (2012), 48-53.
- 9) Moore, J. J. & Shah, N. A.: Int. Met. Rev., **28**-6 (1983), 338-356.
- 10) Beckermann, C.: Int. Met. Rev., **47**-5 (2002), 243-261.
- 11) Ota, T., Okamoto, K., Nakamura, S. & Shinko, S.: Tetsu-to-Hagané, **52**-13 (1966), 1851-1859.
- 12) Kim, K., Park, S. & Bae, C.: Met. Mater. Int., **20**-2 (2014), 207-213.
- 13) Ward, R. G.: J. Iron Steel Inst., **203** (1965), 930-932.
- 14) Kamio, A., Tezuka, H., Choi, J. C. & Takahashi, T.: J. Jpn. Inst. Light Met., **35**-5 (1985), 255-260.
- 15) Kamio, A., Tezuka, H., Choi, J. C. & Takahashi, T.: J. Jpn. Inst. Light Met., **35**-3 (1985), 133-139.
- 16) Fujiwara, T. & Obata, E.: Denki-seiko, **33**-2 (1962), 106-116.
- 17) Sakasegawa, K. & Yamagishi, Y.: Tetsu-to-Hagané, **59**-13 (1973), 1643-1667.
- 18) Kunitomo, T., Hidaka, M., Kobayashi, S., Sakamoto, E. & Masuyama, Y.: Nippon Kokan Tech. Rep., **74** (1977), 49-58.
- 19) Yanagimoto, J., Kiuchi, M., Nakamura, M. & Kurahashi, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **32**-367 (1991), 1000-1006.
- 20) Inouye, K.: Tetsu-to-Hagané, **41**-5 (1955), 506-515.
- 21) Misaka, K. & Yoshimoto, Y.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **8**-79 (1967), 414-422.
- 22) Mimino, T., Kinoshita, K., Hattori, K. & Matsushita, A.: Tetsu-to-Hagané, **53**-7 (1967), 834-837.
- 23) Kato, K.: Bulletin of Metall. Soc. Osaka Univ., **10** (1969), 46-55.
- 24) Nakaura, Y., Watanabe, A. & Ohori, K.: J. Jpn. Inst. Light Met., **57**-2 (2007), 67-73.
- 25) Hill, R.: The mathematical theory of plasticity, (1950), 227-228, 256, Oxford University Press.
- 26) Kasai, D., Komori, A., Ishii, A., Yamada, K. & Ogawa, S.: Tetsu-to-Hagané, **101**-6 (2015), 319-328.
- 27) Ding, J., Zhao, Z., Jiao, Z. & Wang, J.: Appl. Thermal Eng., **98** (2016), 29-38.
- 28) Hotta, S., Murakami, T., Narushima, T., Iguchi, Y. & Ouchi, C.: ISIJ Int., **45**-3 (2005), 338-346.
- 29) Hirano, N., Fujiwara, M., Yoshida, H. & Isogawa, S.: Denki Seiko, **76**-2 (2005), 87-94.
- 30) Rao, K. P., Prasad, Y. K. D. V. & Howbolt, E. B.: J. Mater. Process. Technol., **77**-1-3 (1998), 166-174.