

多方向加工による均一微細フェライト粒組織の形成

鳥塚 史郎*・井上 忠信*・長井 寿*

Uniform Formation of Fine Grained Ferrite Structure through Multi-directional Deformation

Shiro TORIZUKA, Tadanobu INOUE and Kotobu NAGAI

Synopsis : A multi-directional deformation thermo-mechanical treatment simulator was designed and developed to verify the prediction by the FE-analysis on the effect of bi-directional deformation which can introduce a large plastic strain widely in a specimen. Using this simulator, both uni-directional and bi-directional deformations were performed for a 0.16%C–0.4%Si–1.4%Mn steel with a prior austenite grain size of 300 μm at 1073K at a strain rate of 1/s. The microstructure was composed of polygonal ferrite and intragranular Widmanstätten ferrite in the uni-directional deformation specimen. On the other hand, the half thickness of the specimen was composed of fine polygonal ferrite in the bi-directional deformation specimen. This region corresponds well to the region having a plastic strain of more than 2. The uniform formation of the fine polygonal ferrite due to the wide introduction of the large plastic strain was verified for the bi-directional deformation.

Key words : multi-directional deformation; plastic deformation; thermo-mechanical treatment simulator; ferrite; grain size; low carbon steel.

1. 緒言

筆者らは前報において¹⁾、多方向非同時加工（以下、多方向加工）の際のひずみ分布の数値解析を行い、1方向加工では局在化する大塑性ひずみを材料内の広い領域に導入できることを示した。大塑性ひずみの導入は微細フェライト(α)粒組織の形成に有効である。例えば、オーステナイト(γ)に対しAe3点以下の過冷状態でほぼ2以上の塑性ひずみを与えると、ひずみによらずに変態によって生成する微細 α の粒径($\leq 4 \mu\text{m}$)はほぼ一定となる^{2,3)}。したがって、塑性ひずみ2以上を材料内に広範囲に与えることのできる多方向加工は、平均粒径4 μm 以下の均一微細 α 粒組織を得るための有効な方法であると考えられる。

ところで、塑性ひずみの組織形成に及ぼす影響を科学的に検討するためには、高性能な加工熱処理装置（シミュレータ）が必要である。従来、加工熱処理シミュレータとして、いくつかの装置が開発され実用化されているが⁴⁻⁷⁾、いずれも1方向圧縮型の加工熱処理シミュレータであり、多方向の加工熱処理はできない。多方向加工を行う方法として鍛造機があるが、温度、ひずみ、パス間時間を正確に制御することは難しい。したがって、前報で論じた多方向加工の数値解析結果を実証するためには、新たな多方向圧縮型の加工熱処理シミュレータの開発が必要である。

数値解析を物理的に再現するために、多方向圧縮型加工熱処理シミュレータは以下の基本性能を満たさなくてはならない。

(1) 試験片を90°異なる方向から加工するための機構

(2) 加工パス間で加工硬化状態を維持するためのパス間時間の短時間化

(3) 試験片被加工部全体の温度均一制御

(4) ひずみ、ひずみ速度の制御

本研究では、上記の性能を満たす多方向圧縮型加工熱処理シミュレータを設計・製作し、その性能を確認した。さらに、開発したシミュレータを用いて、低炭素鋼の多方向加工を行い、数値解析結果の妥当性を実証した。

2. 多方向圧縮型加工熱処理シミュレータ

2.1 基本設計

2.1.1 試験片を90°異なる方向から加工するための機構

試験片を異なる方向から加工するためには、概念的には加工用のアクチュエータが2組必要である。しかし、2組のアクチュエータの設置は構造的に複雑となり避けたい。したがって、Fig. 1に示すように、試験片を回転することによって、多方向加工を可能にした。

2.1.2 加工硬化状態を維持するためのパス間時間の短時間化

(1) 目標最小パス間時間

γ の再結晶開始を避けるために加工パス間時間を短縮する必要がある。大内ら⁷⁾によれば、0.13C–1.3Mn鋼では、加工温度1173K、ひずみ0.25、ひずみ速度10/sの条件における γ の静的再結晶開始時間は加工後0.5–1sである。したがって、本装置では加工と加工の間に回転をはさんだパス間時間を0.5s以下に抑えることを目標とした。

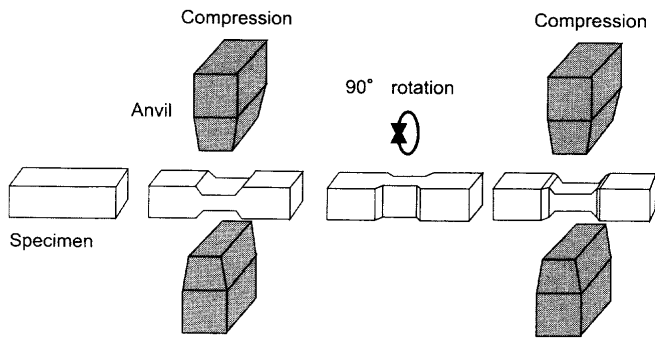


Fig. 1. Schematic illustration of multi-directional deformation. Multi-directional deformation is realized by a combination of compression and specimen rotation.

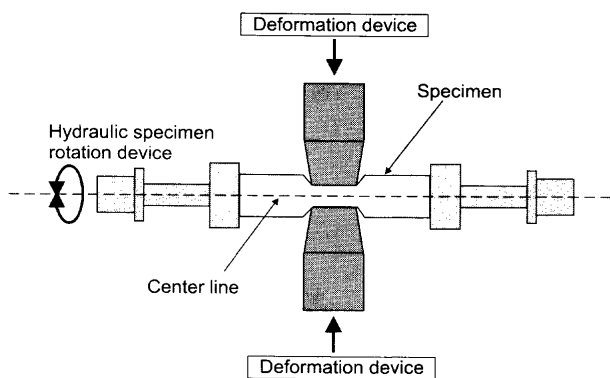


Fig. 2. Schematic illustration of simultaneous compression system. Upper and lower hydraulic actuators compress a specimen simultaneously. The center line of the compressed specimen is in accordance with the rotational axis of the rotational device.

(2) パス間時間短時間化機構

従来の加工熱処理シミュレータは1軸圧縮型であり、そのパス間時間は加工機構である油圧アクチュエータの駆動速度のみに依存するので、パス間時間0.1s以下も可能である⁵⁾。今回は、加工と加工の間に試験片を回転する必要があり、パス間時間は、油圧アクチュエータの移動速度よりはむしろ、試験片の回転に要する時間に依存する。

加工-回転-加工のパス間時間を短縮する方法として採用したのが上下同時加工である。Fig. 2に示すように、試験片の上下に加工機構を相対させ、上下から同時に加工を行う。試験片は対称的に加工され、試験片中心線が不変となる。そうすると、試験片の回転軸を試験片の中心線とすることが可能になり、試験片を回転機構に直結することができる。これによって、回転に必要な時間をできるだけ短縮し、加工とのタイミングを合わせることによって、パス間時間の短時間化が図れる。

加工機構には、ひずみやひずみ速度を正確に制御するために、油圧サーボアクチュエータを用いた。試験片を回転するための機構としては、Fig. 2に示すように試験片

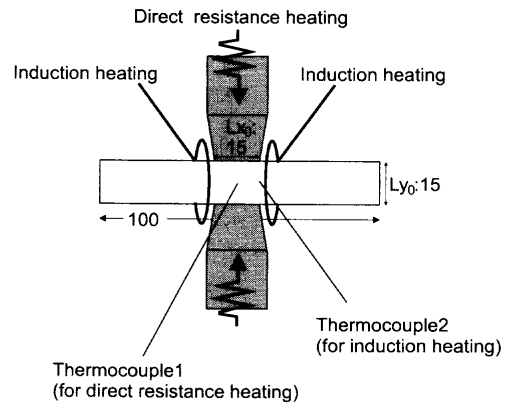


Fig. 3. Schematic illustration of heating system.

チャック自体を油圧で駆動することとした。加工用のアンビル幅は試験片の厚さと同じ15mmとした。

2.1.3 温度制御

(1) 被加工部全体の許容温度差

被加工部全体の温度差は、従来の一軸圧縮型加工熱処理シミュレータと同等性能の20Kとした。

(2) 加熱機構

従来の小型試験片を用いた一軸圧縮型加工熱処理シミュレータの加熱機構は、高周波加熱⁵⁾か直接通電加熱⁹⁾である。ここでは、 $\phi 8 \times 12$ mmの円柱⁵⁾、または、被加工部長さ5 (全長15~20) \times 厚さ12 \times 幅15 mmの直方体⁹⁾を用いている。今回用いた試験片は、全長100、被加工部長さ(Lx_0)15 \times 厚さ(Ly_0)15 \times 幅(Lz_0)15 mmと大きく、試験片の均熱、特に試験片長手方向の温度分布の均一化のために、直接通電加熱と高周波加熱を併用した。Fig. 3に示すように、直接通電加熱制御用熱電対は試験片被加工部の中央部に、高周波加熱制御用熱電対は被加工部の端 (アンビルの端) に取り付け、それぞれが同一温度となるように独立に制御するようにした。すなわち、2ヶ所の温度を制御することによって均熱の確保を図った。また、Fig. 3に示すように加工アンビル自体が電極となり、アンビル自身も発熱するため加工時の接触抜熱がない利点もある。

2.1.4 多方向圧縮型加工熱処理シミュレータの設計・製作

以上の多方向圧縮型加工熱処理シミュレータの基本設計をまとめたものがFig. 4で、加工機構、試験片保持回転機構、加熱機構、および図示していないが、計測制御機構からなる。この基本設計のもと、Fig. 5の多方向圧縮型加工熱処理シミュレータを製作した。本装置の性能をTable 1にまとめた。なお、不活性ガスおよび水による冷却機構、レーザーによる膨張収縮測定機構も備えている。

2.2 多方向圧縮型加工熱処理シミュレータの性能評価

2.2.1 パス間時間

100 \times Ly_0 : 15 \times Lz_0 : 15 mmのアルミニウム試験片をひずみ速度1/sで Ly : 7.5 mmまで圧縮し、直ちに試験片を90°回転

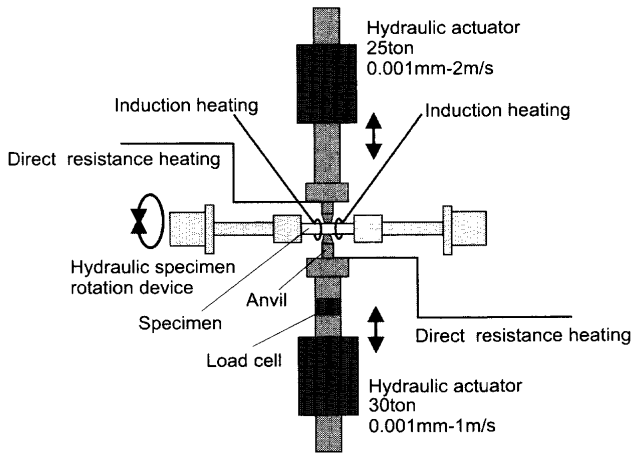


Fig. 4. Basic design of multi-directional deformation thermo-mechanical treatment simulator.

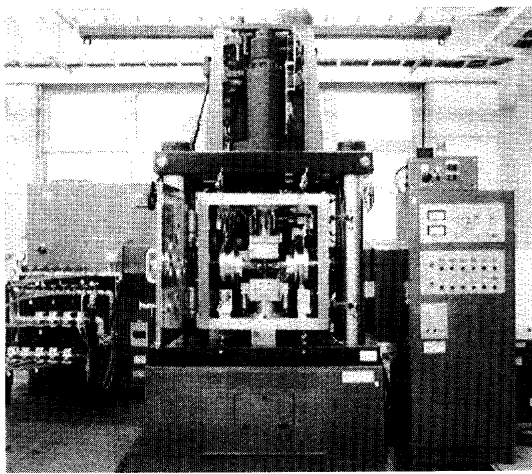


Fig. 5. Appearance of multi-directional deformation thermo-mechanical treatment simulator.

Table 1. Specification of multi-directional deformation thermo-mechanical treatment simulator.

Deformation mode	uni-direction and bi-direction
Maximum force	250 KN
Actuator velocity	0.001 mm/s - 20m/s
Maximum stroke	40 mm
Minimum interpass time	0.5 s (bi-direction deformation)
Maximum temperature	1673 K
Maximum number of successive compressions	more than 10
Specimen rotation angle	0, 45, 90, 135
Cooling media	Water, Ar, He, N ₂

し、続けて、 L_z : 7.5 mmまで圧縮した際の加工時間-荷重曲線をFig. 6に示す。パス間時間が0.45sであり、目標値の0.5sを達成している。

2.2.2 温度制御

被加工部の温度分布を測定するため、低炭素鋼試験片(3.1節に詳述)にFig. 7に示すように、制御用の他にモニター用熱電対(Type-K)を2ヶ所(③, ④)装着し、制御用2ヶ所(①, ②)と合わせて、被加工部の温度分布を測定した。モニター用熱電対の装着位置はアンビル中央直下

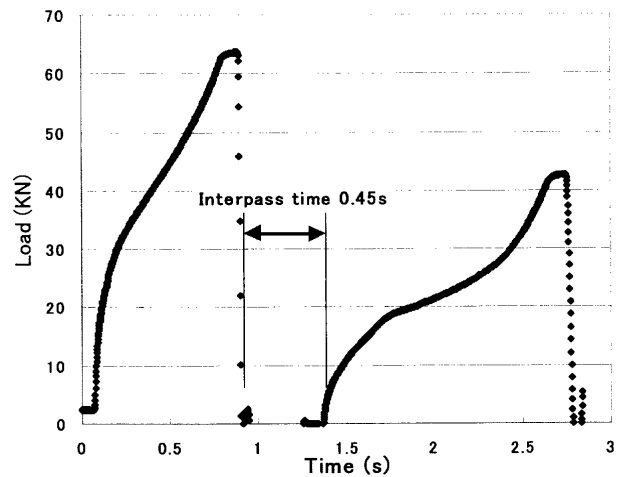


Fig. 6. Time-load curve of bi-directional deformation. An Al specimen with length of 100 mm, thickness L_y of 15 mm and width L_z of 15 mm was compressed to L_y : 7.5 mm, rotated by 90° and compressed to L_z : 7.5 mm at room temperature with a strain rate of 1/s. Interpass time was preset to 0.5 s.

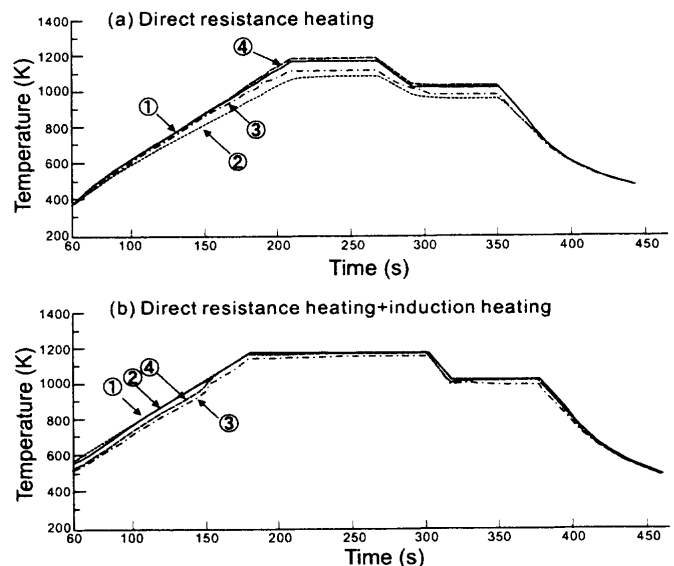
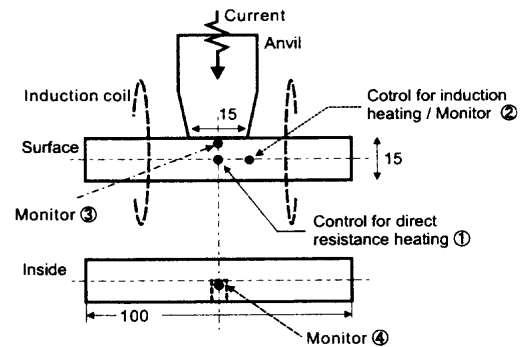


Fig. 7. Heating curve of a specimen which was heated by (a) direct resistance heating or (b) both direct resistance heating and induction heating.

1.5 mm (③) と試験片内部の中央部 (④) である。Fig. 7に示す温度履歴は、試験片を1173Kに加熱し、60-120s保持後1023Kに冷却して60s保持し、冷却した場合の結果である。

Table 2. Chemical composition of the steel used (mass %).

C	Si	Mn	P	S	N
0.16	0.4	1.43	0.01	0.004	0.003

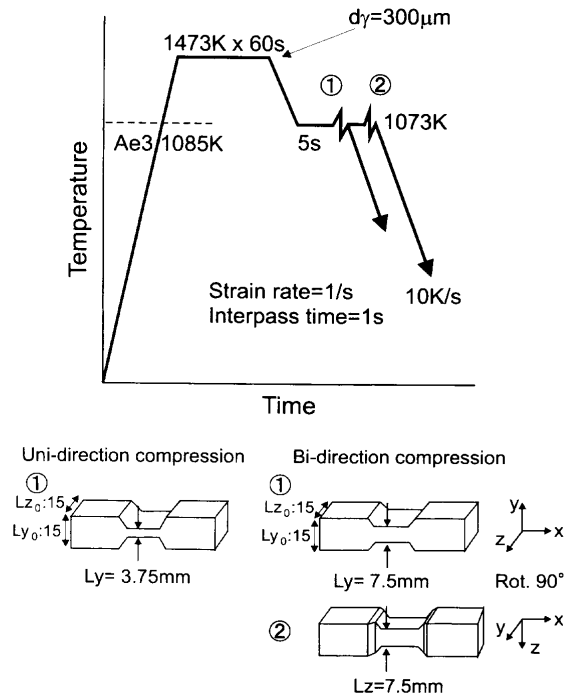


Fig. 8. Thermo-mechanical treatment condition of uni- and bi-directional compression.

加熱機構を直接通電のみとした場合(Fig. 7(a))は、試験片長手方向に90Kの温度差がある。また、アンビル直下も60K低く、逆に試験片中央部(内部)は20K高かった。一方、直接通電と高周波加熱を併用した場合(Fig. 7(b))は、アンビル直下1.5mmが20K低いのみで、あとの3ヶ所はほぼ同一温度であった。したがって、直接通電と高周波加熱の併用によって被加工部の温度差20K以下を得ることができた。

3. 低炭素鋼の多方向加工

3.1 実験条件

市販の25mm鋼板から $100 \times Ly_0 : 15 \times Lz_0 : 15\text{mm}$ の直方体の試験片を切りだして用いた。実験鋼の化学組成をTable 2に示す。この試験片に対して、Fig. 8に示す加工熱処理を行った。試験片を1473Kに加熱後60s保持し γ 粒径を $300\mu\text{m}$ に調整した後、10K/sで1073Kまで冷却し5s保持した後、ひずみ速度1/sにて1方向(1パス)および2方向(2パス)の圧縮加工を行った。Fig. 8に示すように、1方向加工の場合は $Ly : 3.75\text{mm}$ となるまで圧縮する。2方向加工の場合は $Ly : 7.5\text{mm}$ まで圧縮した後、90°回転し、 $Lz : 7.5\text{mm}$ まで圧縮する($Ly : 7.5\text{mm} \rightarrow Lz : 7.5\text{mm}$)。アンビル下部の体積変化 V/V_0 (V : 加工後の体積、 V_0 : 加工前の体積 $= 15^3\text{mm}$)は、1方向加工で $V/V_0 = 40\%$ 、2方向加工で $V/V_0 =$

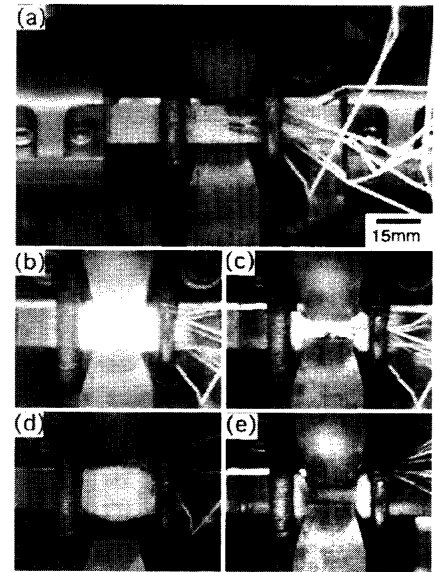
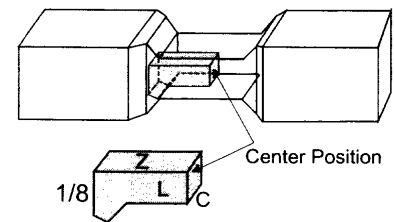
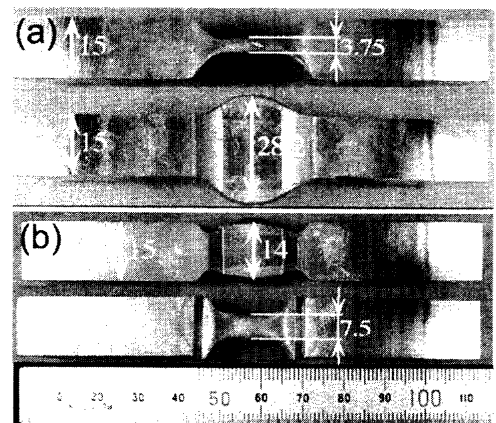
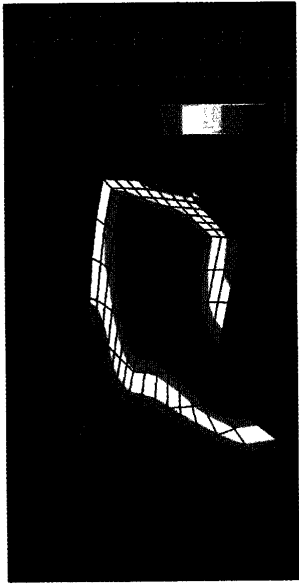
Fig. 9. Series of photographs of bi-directional compression; (a) before testing, (b) heating at 1473K, (c) the specimen compressed to $Ly : 7.5\text{mm}$ at 1073K, (d) rotation by 90° and (e) the specimen compressed to $Lz : 7.5\text{mm}$ at 1073K and cooling.

Fig. 10. Observed area of microstructure in a tested specimen.

Fig. 11. Appearance of (a) the specimen compressed to $Ly : 3.75\text{mm}$ in uni-direction and (b) the specimen compressed to $Ly : 7.5\text{mm}$, rotated by 90° and compressed to $Lz : 7.5\text{mm}$ in bi-direction.

43%とほぼ同じである。2方向加工の場合のパス間時間は1sで、この間に試験片を90°回転した。加工後試験片をアンビルに接触したままで冷却した。773Kまでの平均冷却速度は9K/sであった。 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態が冷却中に生じるように、加工温度はきわめて過冷度の小さい1073Kとした。Ther-



(a)

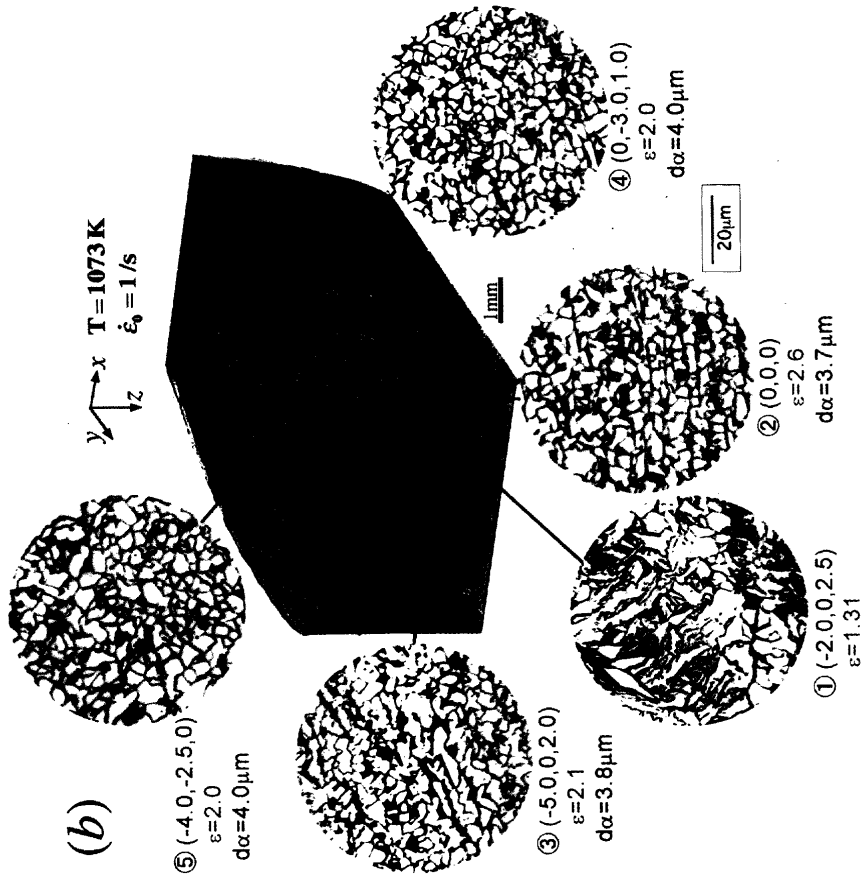
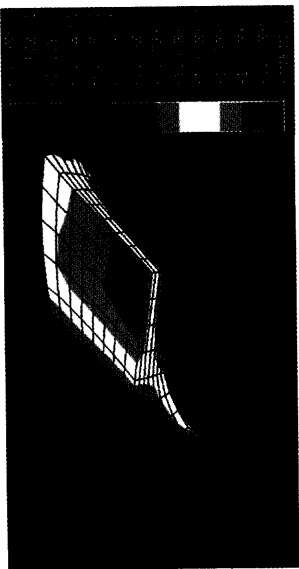


Fig. 13. (a) Contour of equivalent plastic strain and (b) 3-D section microstructure after bi-directional compression. A specimen was compressed to L_y : 7.5 mm, rotated by 90° and compressed to L_z : 7.5 mm with interpass time of 1 s at 1073K with a strain rate of 1/s. Cooling rate was 9K/s. Magnification of microstructure at some sites is shown with the numerically obtained equivalent plastic strain ϵ and experimentally measured ferrite grain size d_α .



(a)

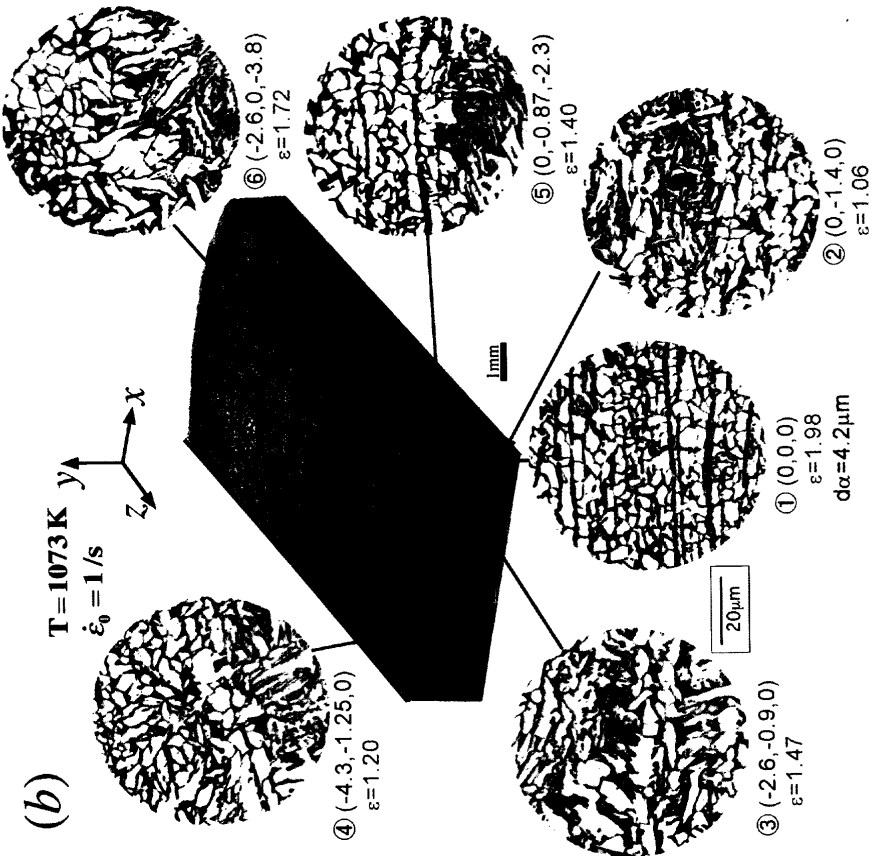


Fig. 12. (a) Contour of equivalent plastic strain and (b) 3-D section microstructure after uni-directional compression. A specimen was compressed to L_y : 3.75 mm at 1073K with a strain rate of 1/s. Cooling rate was 9K/s. Magnification of microstructure at some sites is shown with the numerically obtained equivalent plastic strain ϵ and experimentally measured ferrite grain size d_α .

mo-calcにより計算した本鋼のAe3点は1085Kである。なお、アンビルと試験片間はカーボン潤滑を用いた。加工の連続写真をFig. 9に示すが、90°異なる方向から2方向加工できたことを示している。加工後の試験片をFig.10に示すように切断し、組織観察を行った。

3・2 結果および考察

3・2・1 1方向加工

Fig.11(a)に1方向加工(L_y : 3.75 mm)した試験片の外観写真を示す。数値解析結果¹⁾とほぼ同様の形状をしている。

Fig.12(a), (b)に、塑性ひずみの等高線図と組織のL面、C面、Z面を撮影し組合わせた3次元写真を示す。Fig.12(a)の等高線図に示すように、塑性ひずみは試験片のアンビル接触部の0.7から試験片中心部の2.0まで分布している¹⁾。Fig.12(b)に組織を示す。詳細観察を行った位置を座標で表す。試験片の中心部を(0, 0, 0)とし、そこからの(x, y, z)方向の距離(mm)で示した。組織については主相である α にのみ注目し、第2相については論じない。例えば、L断面の塑性ひずみ1.06の位置②(0, -1.4, 0)、塑性ひずみ1.47の位置③(-2.6, -0.9, 0)および塑性ひずみ1.20の位置④(-4.3, -1.25, 0)では、組織はウィッドマンステッテン α とポリゴナル α からなっている。また、C断面の塑性ひずみ1.40の位置⑤(0, -0.87, -2.3)、Z断面の塑性ひずみ1.72の位置⑥(-2.6, 0, -3.8)でも、ポリゴナル α とウィッドマンステッテン α が観察される。一方、塑性ひずみ1.98の位置①(0, 0, 0)の試験片中心部では、組織はほぼポリゴナル α からなる。しかし、試験片中心部近傍においてもウィッドマンステッテン α が完全に消滅しているわけではなく、ウィッドマンステッテン α のコロニーが散見される。位置①のポリゴナル α の平均粒径(公称粒径)は4.2 μm であった。

3・2・2 2方向加工

Fig.11(b)に2方向加工(L_y : 7.5 mm \rightarrow L_z : 7.5 mm)された試験片の外観写真を示す。1方向加工の場合と同様に、数値解析結果¹⁾とほぼ同様の形状をしている。

Fig.13(a), (b)に塑性ひずみの等高線図と組織の3次元写真を示す。Fig.13(b)のL断面の塑性ひずみ1.31の位置①(-2.0, 0, 2.5)ではウィッドマンステッテン α 主体の組織が観察される。一方、塑性ひずみ2.1の位置③(-5.0, 0, 2.0)およびC断面の塑性ひずみ2.0の位置④(0, -3.0, 1.0)、塑性ひずみ2.6の位置②(0, 0, 0)の試験片中心部ではウィッドマンステッテン α は観察されず、ポリゴナル α のみからなる組織である。Z面においても、塑性ひずみ2.0の位置⑤(-4.0, -2.5, 0)はポリゴナル α のみからなっている。ウィッドマンステッテン α はL, C断面の表面からおおよそ中間の位置でなくなり、そこから中心にかけてはポリゴナル α のみからなる組織となる。この領域を赤線で囲んだ。ポリゴナル α 組織の領域は試験片厚さの1/2となる。これを、Fig.13(a)の塑性ひずみ分布と比較すると、塑性ひずみがおおよそ2.0以上の領域に相当していることがわかる。また、②~

⑤における平均 α 粒径は、それぞれ、3.7 μm , 3.8 μm , 4.0 μm , 4.0 μm と均一微細である。

Fig.12とFig.13を比較すると、1方向加工した試験片では、ほぼポリゴナル α のみからなる領域が試験片中心部近傍であったのに対し、2方向加工した試験片では全板厚の約1/2の領域に拡大していることがわかる。2方向加工による均一微細 α 生成域の拡大は、塑性ひずみほぼ2.0以上の領域と一致していた。以上、開発した多方向圧縮型加工熱処理シミュレータによって、前報¹⁾の妥当性を実験的に検証した。

4. 結言

多方向加工によって、大塑性ひずみを試験片内に広範囲に導入できるという数値解析結果¹⁾を検証するため、多方向圧縮型加工熱処理シミュレータを開発し、100 \times L_y ; 15 \times L_z ; 15 mmの低炭素鋼試験片に多方向(2方向)加工を施した。具体的には、 γ 粒径を300 μm とした後、1073Kで L_y : 3.75 mmとなるまで圧縮する1方向加工と L_y : 7.5 mmまで圧縮した後、90°回転し、 L_z : 7.5 mmまで圧縮する2方向加工を行い、その後の変態によって生成する組織を比較検討した。

(1) 試験片回転型の多方向圧縮型加工熱処理シミュレータを開発し、温度、ひずみ、ひずみ速度を制御しつつ90°異なる方向から加工を行う多方向加工を可能にした。

(2) 1方向加工では微細ポリゴナル α のみからなる領域は試験片中心部近傍であった。しかし、2方向加工によって、均一微細ポリゴナル α からなる領域が試験片の全板厚1/2程度まで拡大することが確認された。これは、数値解析で予測された塑性ひずみ2.0以上の領域と一致していた。すなわち、90°異なる2方向から非同時に加工することによって、微細 α 生成に有効な大塑性ひずみを広範囲に導入できることを検証した。

本研究を進めるにあたり、多方向圧縮型加工熱処理シミュレータの操作に関し、富士電波工機(株)大石明生氏に多大なご協力をいただいた。また、組織観察については、野沢智子氏、土谷悦子氏に多大なご協力をいただいた。

文 献

- 1) T.Inoue, S.Torizuka and K.Nagai: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 793.
- 2) S.Torizuka, O.Umezawa, K.Nagai, K.Tsuzaki, S.Genda and Y.Kogo: Proc. Int. Conf. on Solid-Solid Phase Transformation'99 (JIMIC-3), ed. by M.Koiwa et al., JIM, Sendai, (1999), 1533.
- 3) S.Genda, Y.Kogo, S.Torizuka, T.Inoue and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 1361.
- 4) O.Pawelski, U.Rudiger and R.Kasper: *Stahl Eisen*, **97** (1977), 533.
- 5) C.Ouchi and T.Okita: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **22** (1982), 543.
- 6) H.Yada, N.Matsuzo, K.Nakajima, K.Watanabe and H.Tokita: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23** (1983), 100.
- 7) T.Okita and M.Niikura: *Nippon Kokan Tech. Rep.*, **101** (1984), 117.
- 8) C.Ouchi: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 2081.
- 9) S.Torizuka, O.Umezawa, K.Tsuzaki and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1380.