

鉄鋼材料の再結晶粒の微細化に及ぼす予加工方法の影響

研究代表者 東京電機大学 客員教授 吉野 雅彦

共同研究者 岡山理科大学 准教授 寺野 元規

共同研究者 東京科学大学（旧東京工業大学） 大学院生 高野 悠太郎

1. 緒言

超微細粒金属材料は強度、靱性、耐食性、加工性など多くの優れた特性を有するため、種々の金属材料について超微細粒組織の効率的な製造技術が求められている。超微細粒材料は、高い強度と耐食性を始め様々な機能創出が可能であり、医療用機器や微細デバイスの材料として有用と考えられている¹⁾³⁾。超微細粒材料の製造プロセスとしては種々の方法が検討されているが、基本的には強ひずみ加工と熱処理を組み合わせ、核生成を促進することで緻密で微細な結晶組織を形成させる方法がとられる⁴⁾⁵⁾。多くの場合圧延加工が用いられるが、より効果的な製造方法を開発するため、ECAP（Equal-Channel Angular Pressing）、HPT（High Pressure Torsion）、ARB（Accumulative Roll-Bonding）など、様々な強ひずみ加工法が検討されている。

これまでの研究では、組織変化に及ぼす予加工の影響は、主として相当塑性ひずみ、あるいはひずみに起因する転位密度によって評価されてきた。しかし、加工方法の違いによる影響を定量的に比較検討した例はほとんどない。研究者らは、結晶粒の微細化は塑性ひずみの大きさだけでなく、変形様式にも依存すると考え、先行研究において、板圧延により垂直ひずみが付与された圧延試験片と、切削によりせん断ひずみが付与された切屑試験片について、焼鈍後に形成された静的再結晶粒径を比較した。その結果、切屑試験片では圧延試験片よりも再結晶粒がより微細かつ均一であり、せん断ひずみが結晶粒微細化に有利であることが示された⁶⁾⁷⁾。

そこで本研究では、再結晶粒の微細化に及ぼす予加工方法の影響を明らかにすることを目的とし、圧縮ひずみとせん断ひずみによる微細化効果の違いを定量的に比較することを目指す。このためには、加工により材料に付与されたひずみの評価と、静的再結晶により生成した結晶粒径の定量的評価が重要である。本研究では、Hencky ひずみに基づく加工量評価法および深層ニューラルネットワークを用いた三次元結晶粒径分布推定法を提案し、加工方法の違いによる再結晶粒微細化効果について検討する。

2. 切削加工および圧延加工による再結晶実験

本章では加工方法の違いが再結晶組織の違いに及ぼす影響を調べる為の実験方法および結果について説明する。

直径 80 mm の純鉄丸棒を供試材として使用し、図 1 に示す手順で加工実験を行った。すなわち、旋削により平剣バイトを半径方向へ一定速度で送ることで二次元切削を行い、

切屑試験片を作製した。また、同じ丸棒からワイヤ放電加工 (WEDM) により厚さ 3 mm, 幅 10 mm, 長さ 30 mm の板状試験片を切り出し、室温で大圧下率の板圧延を施して圧延試験片を作製した。さらに、500～550℃の範囲で 4 分間の焼鈍を行い、焼鈍後の組織を SEM・EBSD 装置により分析した。実験条件を表 1 に示す。

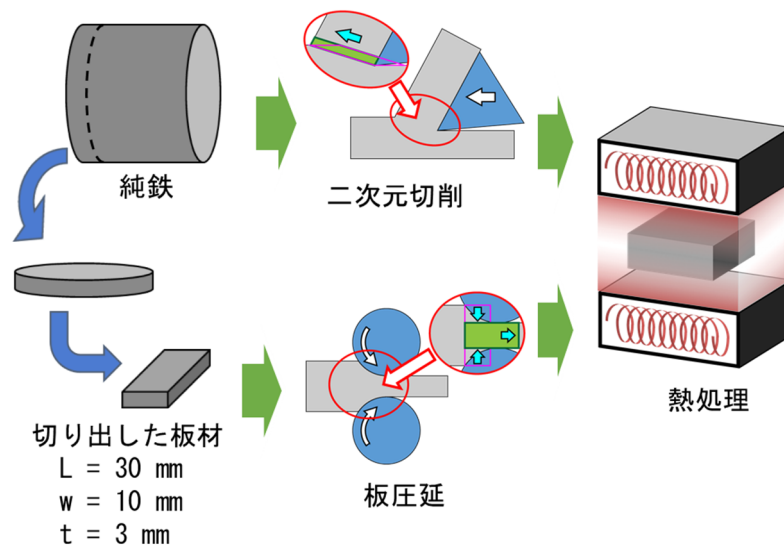


図 1 実験手順の概要

表 1 加工実験の条件

加工法	加工条件	値
切削	切削速度 V_c , m/min	80, 100, 140, 180, 250
	すくい角 α°	0, 5, 10
	切取り厚さ t_1 , mm	0.04
	潤滑	有, 無
	加工パス数	1
圧延	圧下率 r_d , %	0.3～0.9
	ロール径, D mm	40
	潤滑	無

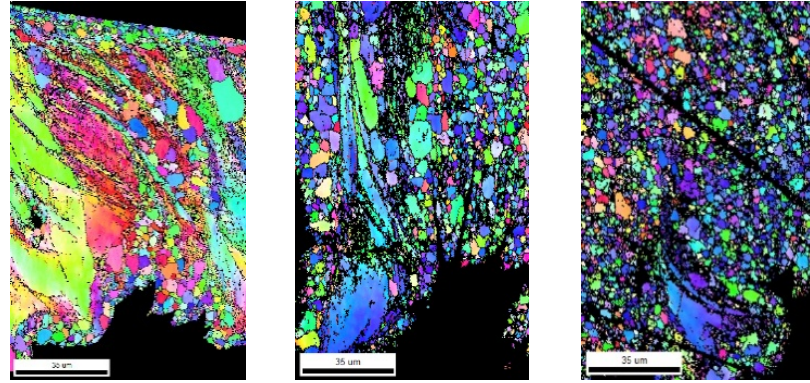
図 2 は、切削速度 $V_c = 80 \text{ m/min}$ で切削した切屑試験片を焼鈍した際の IPF マップの一例である。図中には切屑に加わった公称せん断ひずみ γ を併記した。公称せん断ひずみ γ は単純せん断面モデルに基づく次式で算出した。

$$\gamma = -\{\cot \phi + \tan (\phi - \alpha)\} \quad (1)$$

ここで、 α は工具すくい角、 ϕ はせん断角である。せん断角 ϕ は、切取り厚さ t_1 および切屑

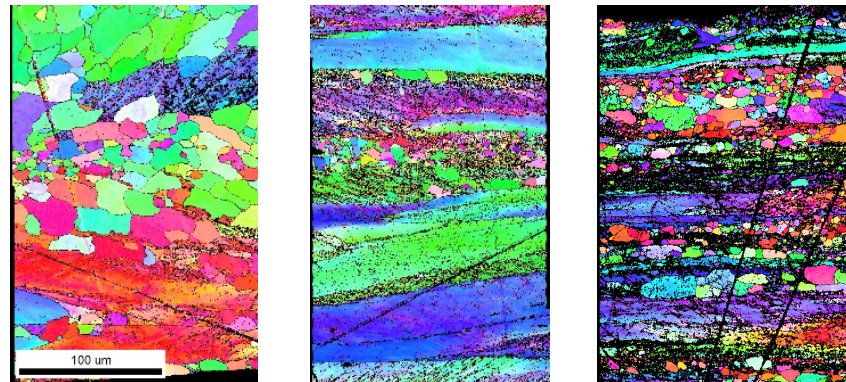
厚さ t_2 から次式で求めた。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(t_1/t_2)\cos \alpha}{1-(t_1/t_2)\sin \alpha} \right) \quad (2)$$



すくい角：	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 0^\circ$
せん断ひずみ：	$\gamma = 3.125$	$\gamma = 3.422$	$\gamma = 10.878$

図2 焼鈍した切屑試験片の IPF マップ (切削速度 $V_c = 80 \text{ m/min}$, 潤滑あり)



圧下率：	$\frac{\Delta h}{h_1} = 0.7$	$\frac{\Delta h}{h_1} = 0.8$	$\frac{\Delta h}{h_1} = 0.9$
伸びひずみ： ε_x	$\varepsilon_x = 2.333$	$\varepsilon_x = 4$	$\varepsilon_y = 9$

図3 焼鈍した圧延試験片の IPF マップ

図2より、すくい角 $\alpha = 10^\circ$ の場合、せん断ひずみ γ は約3であり、比較的粗大な再結晶粒が観察される。一方、すくい角 $\alpha = 0^\circ$ の場合には、せん断ひずみ γ は約10に達し、組織全体に微細な再結晶粒が生成していることが確認できる。

これに対し、図3は圧延試験片を焼鈍した際の IPF マップの例である。図中には圧下率 $\Delta h/h_1$ および公称ひずみ ε を示す。圧下率 $\Delta h/h_1 = 0.7$ の場合、未再結晶粒が多く残存してお

り、再結晶粒はわずかしは見られない。しかし、圧下率 $\Delta h/h_1 = 0.9$ の場合は細かい再結晶粒が生成しており、圧下率の増大に伴い再結晶粒数は増加し再結晶粒径が減少していく傾向が確認できる。

3. 材料に加わった塑性ひずみ量の評価法

本章では、切削加工と圧延加工で付与される塑性ひずみを、数学的に整合した指標で比較するため、Hencky ひずみに基づく相当塑性ひずみ評価法を導入する。これにより両加工法において付与されたひずみ量を共通の尺度で定量比較できることを示す。

図2および図3で用いた公称ひずみは、微小変形の評価には有効であるが、塑性加工における大変形では数学的不整合が顕在化し、変形が材料に及ぼす影響を正しく評価することができない。そのため圧延のように引張ひずみや圧縮ひずみが生じる塑性変形については、一般的に対数ひずみが用いられる。対数ひずみはひずみ速度を時間で積分することにより得られるひずみであり、数学的整合性がある。一方、切削では、せん断面において切屑に大きなせん断塑性ひずみが生じる。しかし、せん断ひずみについては単純に対数ひずみを求めることはできないため、切屑に生じる塑性ひずみ量を正しく評価することは困難である。この問題に対して、尾中はHencky ひずみを用いて大変形せん断ひずみを評価する方法を提案している⁸⁾。そこで本研究では、尾中の方法に従い、切削および圧延による相当塑性ひずみ量を算出し比較する。

Hencky ひずみ h_L は次式で定義される。

$$h_L \equiv \ln U \quad (3)$$

ここで U は変形勾配テンソル $\mathbf{F}$ の右極分解によって得られるストレッチテンソルであり、回転テンソル $\mathbf{R}$ を用いて次式のように表される。

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{U} \quad (4)$$

板圧延では、厚さ方向に圧縮、圧延方向に伸びが生じるため、変形勾配テンソル $\mathbf{F}$ は次式で表される。

$$\mathbf{F} = \mathbf{U} = \begin{bmatrix} h_2/h_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & h_1/h_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで h_1 は圧延前板厚、 h_2 は圧延後板厚である。

したがって Hencky ひずみテンソルは

$$h_L = \begin{bmatrix} -\ln(h_1/h_2) & 0 & 0 \\ 0 & \ln 1 & 0 \\ 0 & 0 & \ln(h_1/h_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

となり、これはよく知られた対数ひずみと一致する。これを用いると、相当塑性ひずみ ε_{eq} は

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2))} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (7)$$

と表される。

一方，切削加工ではせん断面において単純せん断変形が生じる。このとき変形勾配テンソル $\mathbf{F}$ は

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

で与えられる。ここで γ は式(1)で求められる公称せん断ひずみである。

この変形勾配テンソル $\mathbf{F}$ より，右コーシー・グリーンテンソル $\mathbf{C}$ は

$$\mathbf{U}^2 = \mathbf{F}^T \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \gamma & 0 & 1 + \gamma^2 \end{bmatrix} \equiv \mathbf{C} \quad (9)$$

となる。両辺の対数をとることにより

$$\ln \mathbf{U}^2 = \ln \mathbf{C} \quad (10)$$

$$\ln \mathbf{U} = \frac{1}{2} \ln \mathbf{C} \equiv \mathbf{h}_L \quad (11)$$

のように Hencky ひずみ $\mathbf{h}_L$ が $\mathbf{C}$ で表される。次いで $\mathbf{C}$ を対角化テンソル $\mathbf{P}$ を用いて次式のように変換する。

$$\mathbf{C} = \mathbf{P} \mathbf{C}_d \mathbf{P}^{-1} \quad (12)$$

なお $\mathbf{C}_d$ および $\mathbf{P}$ は以下のように表される。

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} \frac{A}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{A} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{P} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 2 & 0 & -(\sqrt{\gamma^2 + 4} + \gamma) \\ 0 & A & 0 \\ (\sqrt{\gamma^2 + 4} + \gamma) & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$A = \sqrt{2}(\gamma^2 + 4)^{1/4} \sqrt{\gamma^2 + 4} + \beta \quad (15)$$

式(11)～(15)を式(3)に代入すると Hencky ひずみテンソルが以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_L &\equiv \ln \mathbf{U} = \frac{1}{2} \ln(\mathbf{P} \mathbf{C}_d \mathbf{P}^{-1}) = \mathbf{P} \left\{ \frac{1}{2} \ln(\mathbf{C}_d) \right\} \mathbf{P}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{-\gamma}{2\sqrt{\gamma^2+4}} \ln \left(\frac{2+\gamma^2+\gamma\sqrt{\gamma^2+4}}{2} \right) & 0 & \frac{1}{\sqrt{\gamma^2+4}} \ln \left(\frac{2+\gamma^2+\gamma\sqrt{\gamma^2+4}}{2} \right) \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{\gamma^2+4}} \ln \left(\frac{2+\gamma^2+\gamma\sqrt{\gamma^2+4}}{2} \right) & 0 & \frac{\gamma}{2\sqrt{\gamma^2+4}} \ln \left(\frac{2+\gamma^2+\gamma\sqrt{\gamma^2+4}}{2} \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

これより切削加工における相当塑性ひずみは次式のように求まる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{2+\gamma^2+\gamma\sqrt{\gamma^2+4}}{2} \right) \quad (17)$$

表 2 に、式(7)および式(17)に基づき算出した図 2 および図 3 の実験における相当塑性ひずみを示す。両加工法において相当塑性ひずみはほぼ同程度のレベルにあることが分かる。すくい角 $\alpha = 0^\circ$ の工具による切削加工では、1 回の切削で約 2.8 程度のひずみを付与できるのに対し、圧延加工で同程度のひずみを付与するには 90% の圧下率が必要であり、このためには複数の圧延パスを繰り返す必要がある。すなわち、切削加工は圧延加工に比べ効率的に塑性ひずみを材料に付与できる加工法であるといえる。

表 2 公称ひずみと Hencky ひずみにより計算した相当塑性ひずみの比較

	切削によるせん断ひずみ			圧延による圧縮ひずみ		
実験条件: すくい角, 圧下率	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\frac{\Delta h}{h_1} = 0.7$	$\frac{\Delta h}{h_1} = 0.8$	$\frac{\Delta h}{h_1} = 0.9$
公称ひずみ γ, ε	3.125	3.422	10.878	0.7	0.8	0.9
相当塑性ひずみ ε_{eq}	1.419	1.508	2.765	1.390	1.858	2.658

4. DNN による三次元結晶粒径分布の推定法の開発

本章では、再結晶粒微細化効果をより適切に評価するため、二次元観察データから三次元結晶粒径分布を推定する深層ニューラルネットワーク (DNN) の開発について述べる。

一般に、粒径微細化の程度は試料断面の顕微鏡観察から測定した平均粒径に基づいて評価される。しかし結晶粒構造は三次元であり、さまざまな粒径の結晶粒が混在するため、二次元の断面の平均粒径のみから粒径微細化を評価することは適切ではない。断面の平均粒径よりも、三次元結晶粒径分布に基づいて微細化効果を評価する方が情報量の点で優っており、結晶粒微細化の評価には適していると考えられる。

しかし、金属結晶の三次元構造を直接観察することは不可能である。多数の連続断面の組織画像から三次元結晶構造モデルを構築する方法も知られているが、多大な労力を要するため、組織評価に実際に適用するのは困難である。また断面画像から材料中の結晶の立体像を推定する AI システムも報告されている⁹⁾。しかし本研究で必要なのは個々の試験片の結晶の立体像ではなく、多数の実験に依拠した統計的データである。そこで本研究では、簡便な三次元結晶構造モデルに基づき、試験片断面の顕微鏡組織画像から三次元結晶粒径分布を直接推定する深層ニューラルネットワーク (DNN) システムを開発した^{10)・12)}。本 DNN は、試験片断面で観察される二次元粒径分布ヒストグラムを入力し、三次元粒径分布ヒストグラムを出力するものである。

この DNN の学習には、以下の方法で作成した教師データを用いた。まず、全ての結晶粒は球形と仮定し、一辺 2100 の立方体内に結晶粒が重ならないようランダムに配置して、充填率が 30~35% となるまで結晶粒を充填し、三次元結晶モデルを作成した。結晶粒径分

布には、正規分布、 Γ 分布、 δ 分布、正規分布と Γ 分布の複合分布、および正規分布二つの複合分布の計 5 種類の分布関数を採用した。それぞれの分布パラメータを系統的に変化させることにより、合計 10,000 通りの結晶モデルを作成した。

次に、図 4 に示すように、作成した三次元結晶モデルを $x \cdot y \cdot z$ 軸に垂直な面で切断した際に得られる結晶粒断面の円の直径を幾何学的に算出した。切断面は各方向について 10 分割した位置に設定し、各面上の断面粒径分布を求めた。結晶粒径範囲は 0 から最大粒径までを 100 区間に分割し、各区間に属する結晶の頻度をヒストグラムとして表した。ただし、大きな結晶粒は個数が少なくても断面に占める割合が大きく、逆に小さな結晶粒は個数多くても断面に占める割合が小さいため、結晶粒数のみでは組織への寄与を正しく表現できない。そこで、二次元分布では各粒の断面積に粒数を掛けた値、すなわち面積分率をヒストグラムの頻度とした。同様に三次元粒径分布については、各粒の体積に粒数を掛けた値、すなわち体積分率を頻度とした。

以上の方法により、合計 300,000 組の教師データを作成し、これらを 216,000 組の訓練データ、54,000 組の検証データ、30,000 組のテストデータに分割して学習を行った。

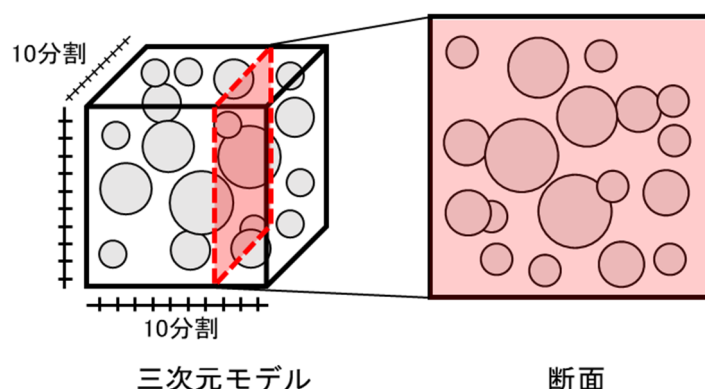


図 4 二次元粒径分布データの作成方法

図 5 に DNN システムの構成を示す。入力層および出力層はそれぞれ 100 個のノードから構成されており、入力層のノードに二次元分布のヒストグラムの頻度を入力すると、出力層のノードに三次元分布のヒストグラムの頻度が出力される。入力層と出力層の間には 3 層の中間層を設けた。各中間層は線形層と ReLU 層から成る。中間のノード数はグリッドサーチ法により最適化し、第一層 256 個、第二層 128 個、第三層 128 個とした。

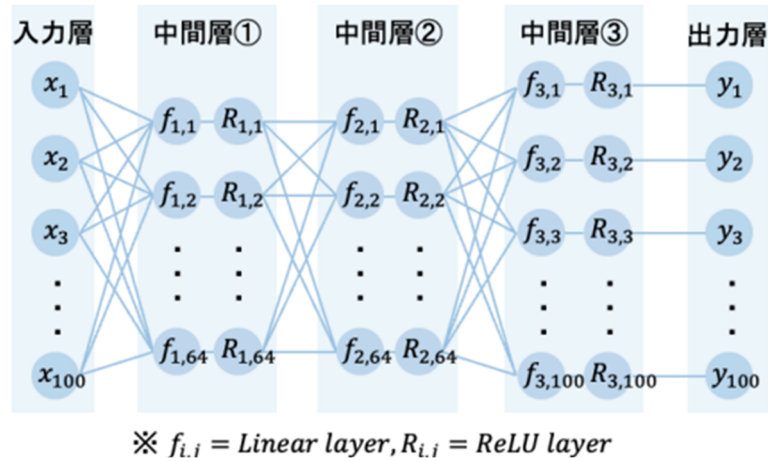


図5 DNN システムの構成

図6に、作成した三次元結晶モデルの粒径分布とDNNで推定した三次元粒径分布の例を示す。DNNにより推定した三次元粒径分布は、元の分布と概ね一致していることが分かる。他の例についても同様に良好な一致が確認されており、本システムにより三次元粒径分布を推定可能であると判断した。

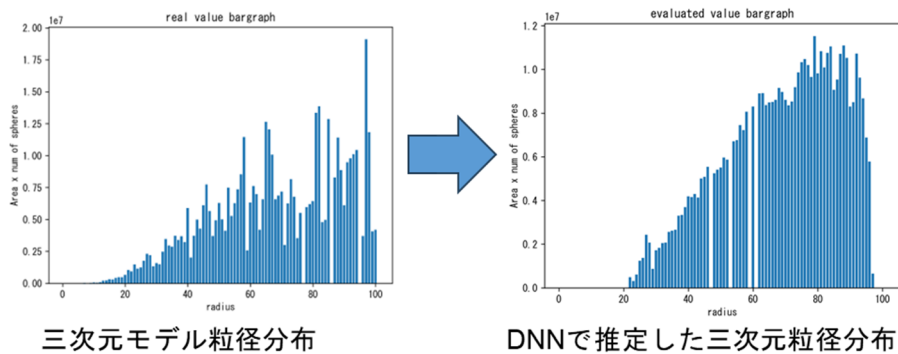


図6 DNN に学習させた結晶粒径分布の例布

なお本研究で開発した三次元粒径分布推定システムは、結晶粒をすべて「球」とする単純な結晶モデルに基づいており、物理的妥当性に課題が有ることは否めない。しかし一般に用いられる「平均粒径」が、試験片断面で観察される結晶粒断面積の平均値に相当する「円」を仮定した指標であることと比較すると、本システムは立体的な構造を仮定し、さらに結晶粒径分布を考慮している点において、結晶構造の特徴をより詳細に表現できていると考えられる。本システムの信頼性の向上のためには、結晶モデルの改善、推定精度の向上、および推定システムの妥当性の検証が必要であるが、これらは今後の課題とする。

5. 加工法の違いが再結晶粒微細化に及ぼす影響

本章では、開発した DNN システムを用い、加工方法の違いによる再結晶粒径の微細化効果の違いを検討する。

図 7 に、本 DNN システムを用いた切屑試験片の三次元粒径分布推定例を示す。上段のグラフは顕微鏡写真から得られた二次元粒径分布、下段は DNN により推定した三次元粒径分布である。二次元粒径分布では分布の特徴が明瞭ではないが、三次元粒径分布では複数のピークが確認され、その位置は加工条件により大きく変化していることが分かる。図 8 は圧延試験片の例である。加工条件によって二次元粒径分布が異なること、また図 7 の切屑試験片とも異なる分布をしていることが判る。

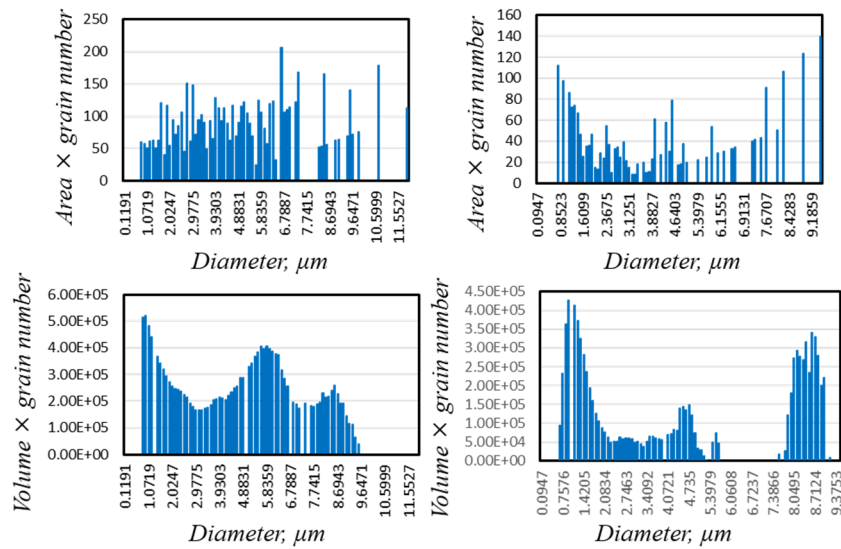


図 7 切屑試験片の三次元粒径分布の推定例

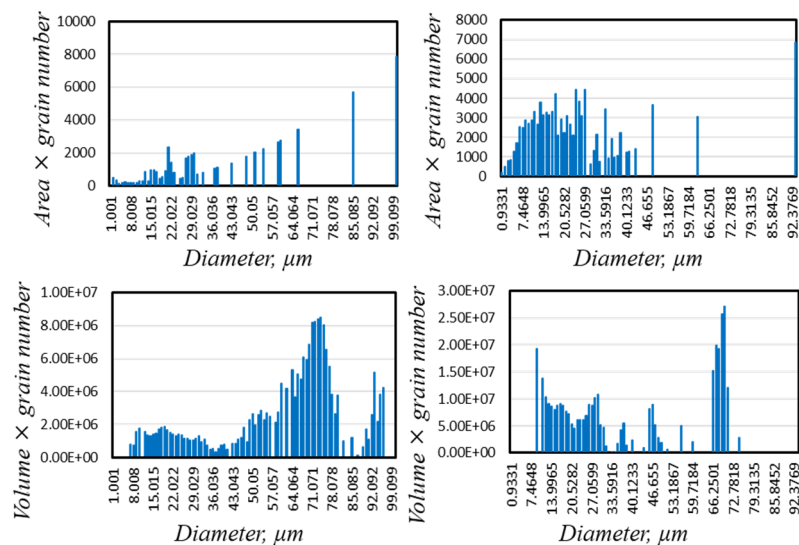


図 8 圧延試験片の三次元粒径分布の推定例

切屑試験片, 圧延試験片のどちらについても三次元粒径分布に複数のピークが見られる。これは結晶粒は粗大結晶粒群と微細結晶粒群に大別されることを示唆しており, これは再結晶メカニズムを反映した現象であると考えられる。そこで三次元粒径分布の特徴を定量的に評価するため, 三次元粒径分布が二つのガウス分布の重ね合わせ, すなわち混合ガウス分布で表されると仮定し, 各ガウス分布の平均値・標準偏差・混合係数は, 最尤法により推定した。図 9 に, 三次元粒径分布を混合ガウス分布で近似した例を示す。

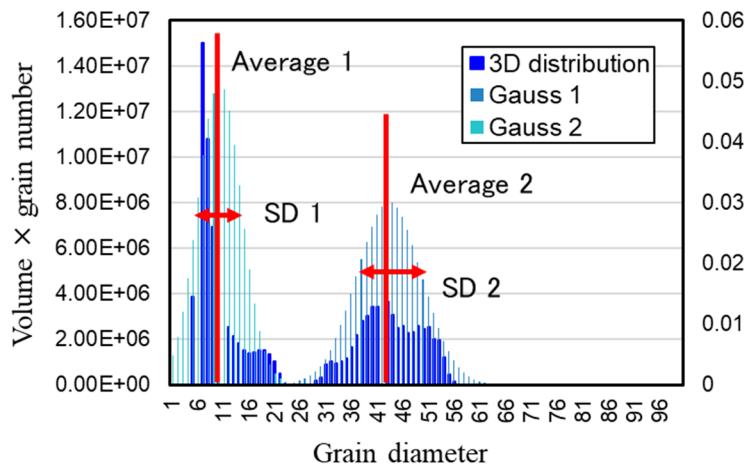


図 9 三次元粒径分布を混合ガウス分布で近似した例

図 10 に, 圧延試験片および切屑試験片について, 予加工により付与された相当塑性ひずみに対する(a)第 1 ガウス分布 (微細粒側) の平均値, (b)第 2 ガウス分布 (粗大粒側) の平均値, の変化を示す。縦軸には平均粒径の対数値を, 横軸には相当塑性ひずみの逆数の二乗 ε_{eq}^{-2} をとった。青色が切屑試験片, 赤色が圧延試験片の結果を表し, それぞれについて近似直線を示す。この図より相当塑性ひずみが同じでも, 切屑試験片の平均粒径は圧延試験片の平均粒径より小さいことが明らかである。切削加工の方が圧延加工に比べて高い再結晶粒微細化効果を有することが分かる。

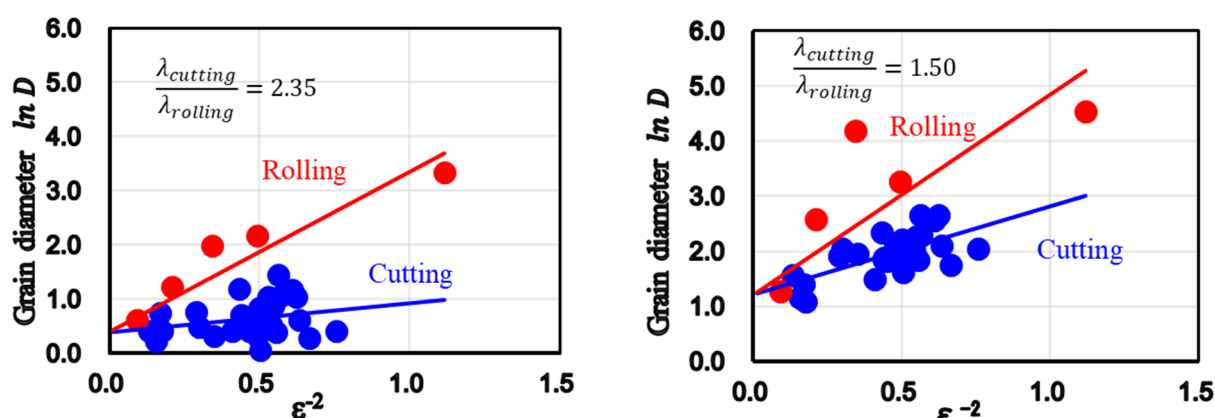
研究者は既報¹³⁾において, 相当塑性ひずみ ε_{eq} が再結晶核生成に影響すると仮定し, 核生成・粒成長機構に基づき, 再結晶粒平均径 D と予加工相当塑性ひずみの関係として次式を提案した。

$$\ln D = \frac{1}{3} \ln \left(\frac{6V_0}{\pi} \right) + \frac{16 \pi E_b^3}{9 RT} \frac{1}{\lambda^2} \frac{1}{\varepsilon_{eq}^{-2}} \quad (18)$$

ここで λ は再結晶粒微細化効果に関与するパラメータであり, 近似直線の傾きは $1/\lambda^2$ に比例する。図 10 の結果から λ の比を求めると, 第 1 平均値で約 2.3, 第 2 平均値で約 1.5 となり, 切削加工による再結晶粒微細化効果は, 圧延加工の約 1.5~2 倍大きいと考えられる。 λ の違いがせん断ひずみと圧縮ひずみの違いに直接起因するかどうか, また定量的な因

果関係については断定できないが、加工方法の違いが再結晶粒の微細化に影響することは明らかである。

考えられる要因としては、切削加工では全ての結晶粒が比較的均一なせん断変形を受け、再結晶核の発生源となる緻密なサブグレインが均一に形成されたのに対して、圧延加工では結晶粒の変形は結晶ごとにばらつき、不均一なサブグレインが生じたことが挙げられる。このような加工方法の違いによるミクロな変形組織の違いが再結晶粒生成に影響し結晶粒径分布の差異が生じたと考えられる。他にも、加工中の温度上昇や摩擦の影響も考えられるが、それらの詳細な検討は今後の課題とする。



(a)第1 ガウス分布（微細粒側）の平均値

(b)第2 ガウス分布（粗大粒側）の平均値

図 10 予加工により付与された相当塑性ひずみに対する平均値の変化

6. 結言

- 1) 再結晶粒の微細化に及ぼす予加工方法の影響を明らかにするために、圧延および切削により作製した純鉄の試験片を熱処理し、EBSDによりその組織の分析を行った。
- 2) 圧延と切削により試験片に付与されるひずみを数学的に整合した指標で評価するために、Hencky ひずみによる相当塑性ひずみを導入した。
- 3) 再結晶粒微細化効果を適切に評価するため、試験片断面で観察される二次元結晶粒径分布から三次元結晶粒径分布を推定するDNNシステムを開発した。
- 4) 開発したDNNシステムを用い、圧延試験片および切削試験片の三次元粒径分布を求めた。それらの三次元粒径分布を粗大結晶粒群と微細結晶粒群よりなる混合ガウス分布で表したところ、どちらの結晶粒群の平均値についても、切削加工による再結晶粒微細化効果は圧延よりも大きいことが示された。
- 5) 本研究により、加工様式が再結晶粒径分布に本質的な影響を及ぼすことが、定量的に示された。

謝 辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の技術研究助成により実施し、重要な成果を得ることができました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Yuri Estrin et al.,: Mechanical Strength and Biocompatibility of Ultrafine-Grained Commercial Purity Titanium, BioMed Research International, Volume 2013, Article ID 914764, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/914764>
- 2) Kaveh Edalati et al.,: Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances, Materials Research Letters, 2022, VOL. 10, NO. 4, 163–256, <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779>
- 3) Ruslan Z. Valiev, Yuri Estrin, Zenji Horita, Terence G. Langdon, Michael J. Zehetbauer, Yuntian Zhu, Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later, JOM, 68, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1820-6>
- 4) 鳥塚 史郎: 超微細粒鋼の研究開発と実用化に向けて, Sanyo Technical Report Vol.23 (2016) No.1
- 5) 辻伸泰: 鉄鋼材料の結晶粒超微細化, 鉄と鋼 Vol. 88 (2002) No. 7
- 6) Fumihisa Nagashima, Yuki Nakagawa and Masahiko Yoshino, Influence of Severe Plastic Deformation on Static Recrystallization Microstructure of Pure Iron, Metals 2020, 10, 1320; doi:10.3390/met10101320
- 7) Fumihisa Nagashima, Yuki Nakagawa and Masahiko Yoshino, Numerical Analysis of Subgrain Formation during Metal Cutting and Rolling Based on the Crystal Plasticity Theory, the International Journal of Materials Forming, (2022) 15:9, <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01652-0>.
- 8) 尾中 晋: Hencky ひずみによる巨大ひずみ加工量の評価, 日本金属学会誌第 74 巻第 3 号(2010)165-170.
- 9) Steve Kench, Isaac Squires , Amir Dahari & Samuel J. Cooper: MicroLib: A library of 3D microstructures generated from 2D micrographs using SliceGAN, Scientific Data | (2022) 9:645 | <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01744-1>
- 10) 吉野雅彦, 高野悠太朗, 安部歩夢, 李原: ニューラルネットワークによる三次元結晶粒径分布の推定—静的再結晶組織に及ぼす予加工方法の影響—, 第 75 回塑性加工連合講演会講演論文集,(2024), pp.283-284.
- 11) 吉野雅彦, 李原, 安部歩夢: 純鉄の強剪断加工が静的再結晶組織の 3 次元粒径分布に及ぼす影響, 第 74 回塑性加工連合講演会講演論文集, pp.241-242. (2023)
- 12) YOSHINO Masahiko, Recrystallized Grain Refinement Method by Combination of

Cutting and Heat Treatment, The 11th International Conference on Leading Edge Manufacturing Technology, in 21st Century (LEM21), 2025

- 13) 吉野雅彦, 永島史悠, 中川佑貴: 塑性変形様式が多結晶粒内の微細変形組織に及ぼす影響, 第72回塑性加工連合講演会, 23-24 (2021)