

動的再結晶 Kinetics の流動応力曲線からの推定法

—材料ゲノム取得法の研究— 2 —

Novel Approach to Determine Kinetics for Dynamic Recrystallization by Using Flow Curve

— Novel Approach to Acquire Material Genome-2 —

柳 田 明*・柳 本 潤*

Akira YANAGIDA and Jun YANAGIMOTO

1. はじめに

形状の創成と内部組織の創出は、熱間加工に課せられた重要な問題である。これらの2項目を同時に最適化するためには、熱間加工中の内部組織変化を塑性変形と同時に解析し得る材料データ（材料ゲノム）が必要とされる。筆者らは流動応力を内部組織変化（動的再結晶）を含んだ形で表現できる構成式を提案し、圧縮試験での荷重-変位曲線より単軸の流動応力を逆解析を用いて同定する手法を示し、その妥当性を示した¹⁾。静的組織変化は、2段圧縮試験の結果をもとにした軟化率により求められる²⁻⁴⁾。一方、動的組織変化は、水冷による組織凍結を行い、組織観察^{5,6)}から求められている。この方法による動的再結晶 Kinetics の定量化は、試験条件ごとに多くの試験数を必要とする。そのため、異なる組成の各種合金材料について、個々に動的再結晶率を定量化することは困難な課題となる。本報では静的組織変化と同様に、組織観察を行うことなく、流動応力曲線から動的再結晶率を直接推定する方法を新たに提案し、S 20 C に適応した結果を報告する。

2. 動的再結晶率の求め方

2.1 構成式

既に提案した、動的再結晶形材料の流動応力式を式 (1) に示す。

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= F_1 \bar{\epsilon}^n & (\bar{\epsilon} \leq \epsilon_c) \\ \bar{\sigma} &= F_2 \exp[a(\bar{\epsilon} - \epsilon_{\max})^2] + F_3 & (\bar{\epsilon} \geq \epsilon_c) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

F_1, n, ϵ_c, F_3 はパラメータであり、すべて温度の関数であるが、一定の試験条件温度下では定数とみなすことができる。 $\bar{\epsilon} = \epsilon_c$ での $\bar{\sigma}$ と $\bar{\sigma}$ の1次、2次微分の連続性より

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

a, F_2, ϵ_{\max} は従属定数となる。 ϵ_c は動的再結晶臨界ひずみである。

2.2 推定法

流動応力と内部組織変化は図1に示すように強く結びついている。動的再結晶開始後、加工硬化+動的回復の曲線より応力値は低下する。この応力低下は動的再結晶による転位密度の減少に起因している。動的再結晶による転位密度変化は次式で表される。

$$\rho = (1 - X^D) \rho^* + X^D \rho_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ρ^* は加工硬化+動的回復による転位密度変化を表し、焼鈍された結晶粒が受けた塑性ひずみ ϵ の関数である。 $\bar{\epsilon} < \epsilon_c$ での応力曲線と応力と転位密度の関係式 $\bar{\sigma} \propto \sqrt{\rho}$ を用いて計算することができ、 $\epsilon_c < \bar{\epsilon} < 2\epsilon_c$ の範囲まで外挿出来るとする。 ρ は平均転位密度である。 ρ_0 は動的再結晶した結晶粒の転位密度である。 X^D は動的再結晶分率であり、一般に Avrami の式で表現され式 (3) で表される。

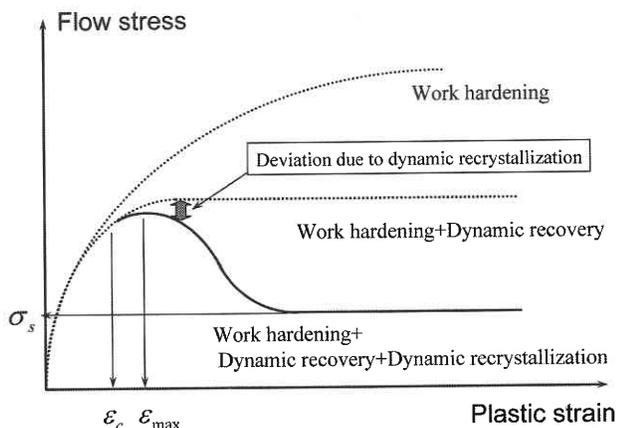


図1 熱間加工時の応力曲線の模式図

研 究 速 報

$$X^D = 1 - \exp[-G^D(\bar{\epsilon} - \epsilon_c)^p] \dots\dots\dots (3)$$

G^D は動的再結晶速度, ϵ_c は動的再結晶臨界ひずみ, p は材料定数である. しかし, 実際には動的再結晶部の転位密度は加工硬化・動的回復による影響を受けて変化するので式 (2) をそのまま用いることは出来ない.

動的再結晶粒の転位密度は再結晶直後では焼鈍状態と等しくなるが, 即座にひずみを受け, 加工硬化と動的回復が起る. 式 (2) の $\rho_0 X^D$ は式 (4) のように書くことが出来る.

$$\begin{aligned} \rho_0 X^D &= \int_{\epsilon_c}^{\bar{\epsilon}'} \rho^* \Big|_{\bar{\epsilon}-\bar{\epsilon}} \frac{dX^D}{d\bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon} \\ &= \int_{\epsilon_c}^{\bar{\epsilon}'} \rho^* \Big|_{\bar{\epsilon}-\bar{\epsilon}} G^D p (\bar{\epsilon} - \epsilon_c)^{p-1} \exp[-G^D(\bar{\epsilon} - \epsilon_c)^p] d\bar{\epsilon} \dots (4) \end{aligned}$$

$(dX^D/d\bar{\epsilon})d\bar{\epsilon}$ は任意のひずみ $\bar{\epsilon}$ から $\bar{\epsilon} + d\bar{\epsilon}$ の間に動的再結晶した分率となり⁷⁾, 微小ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}$ で再結晶した結晶粒はひずみが $\bar{\epsilon}'$ となった時点での転位密度は図 2 に示す通り, 加工硬化 + 動的回復のみによる転位密度の変化 $\rho^* \Big|_{\bar{\epsilon}-\bar{\epsilon}}$ を $\bar{\epsilon}'$ から逆方向にたどった値 $\rho^* \Big|_{\bar{\epsilon}'-\bar{\epsilon}}$ となる.

式 (4) により, 動的再結晶部の転位密度を得ると, $\bar{\epsilon}'$ での平均密度 ρ 及び転位密度変化 $\rho^* \Big|_{\bar{\epsilon}'-\bar{\epsilon}}$ は圧縮試験により求めることが出来るので式 (2) を解くことが可能となる.

式 (4) は動的再結晶 1 回までの範囲では厳密解である⁷⁾ ので, 繰り返し再結晶の影響を受けない最大ひずみ $\bar{\epsilon}' = 2\epsilon_c$ を用い, 材料定数 $p = 2.0$ として G を求める.

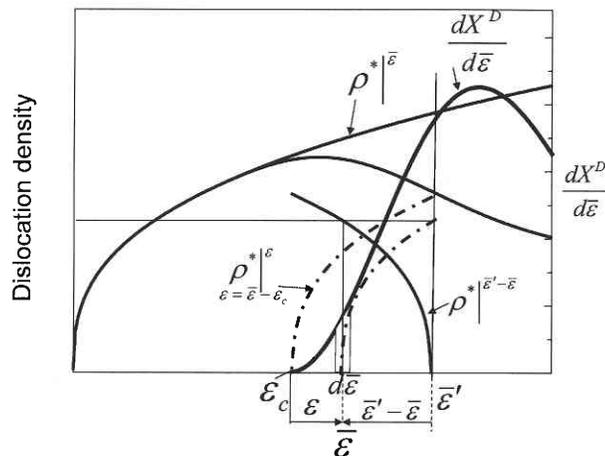


図 2 動的再結晶粒の転位密度変化

3. 推 定 結 果

3.1 流動応力曲線

供試材として S 20 C (0.19 % C, 0.2 % Si, 0.4 % Mn) を用いた. 直径 8 mm, 高さ 12 mm の円柱試験片を用いて圧縮試験を行った. 加工温度は 1373 K, ひずみ速度は 1, 10, 50 [1/s] の 3 条件とした. 熱処理条件を図 3 に示す. この熱処理により加工前のオーステナイト粒径は約 80 μm になる. 逆解析¹⁾ により流動応力曲線, すなわち式 (1) の定数パラメータを求めた. 得られた応力曲線, パラメータをそれぞれ図 4, 表 1 に示す.

3.2 再結晶率推定結果

各ひずみ速度で推定された再結晶速度 G^D を表 2 に示す. 矢田らの式⁵⁾ で 1373 K にて初期粒径 80 μm で計算した結

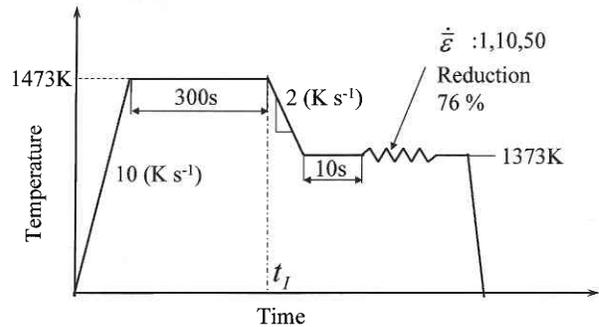


図 3 熱処理条件

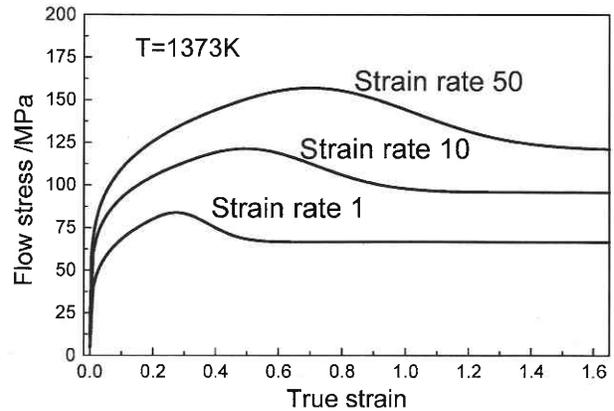


図 4 逆解析により得られた流動応力曲線

表 1 同定されたパラメータ

Strain rate, $\dot{\epsilon}$	F_1	n	ϵ_c	ϵ_{max}	F_3	Error*
1	115.67	0.229	0.189	(0.271)	66.59	2.70%
10	104.75	0.184	0.325	(0.491)	70.96	1.97%
50	103.80	0.197	0.458	(0.700)	72.55	1.81%

* Average error in upsetting force between analysis and experiment.

果も表2に示した。動的再結晶率の変化を図5に示す。

再結晶速度はひずみ速度が大きくなると遅くなる傾向が見られた。矢田らの式では再結晶速度に与えるひずみ速度の影響は小さいが、本手法による推定では大きな影響が見られた。

3.3 組織観察との比較

推定された動的再結晶 Kinetics を評価するために、凍結組織との比較を行った。異なるひずみ (圧下率) での組織写真を図6に示す。本手法を用いて推定された動的再結晶率を図6の写真中に記した。組織観察点は試験片中央である。加工直後に試験片の中心部まで急冷することは難しいので図6に示した凍結組織はポストダイナミック、静的再結晶のような静的復旧の影響を含んでいると考えられる。

ひずみ速度が1.0の場合、凍結された組織は異なる圧下

率30%と50%ほぼ同一な組織となっており同様に微細化された結晶がみられる。提案した手法により推定された動的再結晶率はどちらの圧下率においても再結晶がほとんど完了した値となっている。ひずみ速度10の場合は圧下率が30%と50%の場合、動的再結晶率が異なるように見える。圧下率50%の組織がひずみ速度1の場合の組織とよく似た組織になっている。推定された値は圧下率30%

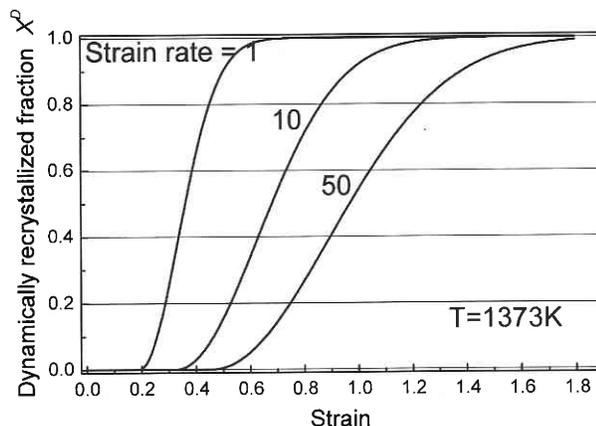


図5 動的再結晶率変化

表2 推定された動的再結晶 Kinetics

Strain rate	ϵ_c	G	Yada's equation ⁵⁾	
			ϵ_c	G
1	0.189	23.55	0.161	3.95
10	0.325	5.50		3.14
50	0.458	2.66		2.67

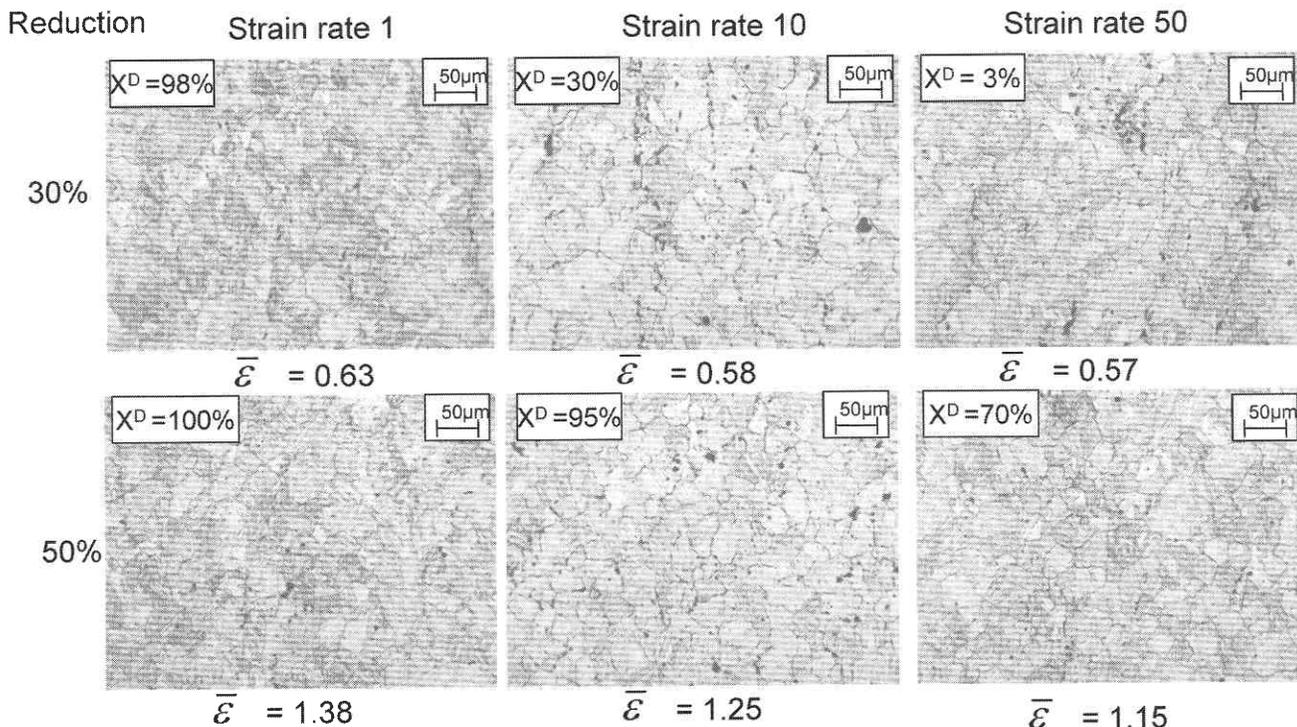


図6 組織凍結写真 (左上の値は推定された再結晶分率)

研 究 速 報

時 X^D は 30 % , 圧下率 50 % の時はほぼ再結晶が完了した値となっている。ひずみ速度 50 の場合, 凍結組織と推定された値は 10 の場合と同様な傾向が見られた。

推定された動的再結晶率 X^D と凍結組織から得られた値を定量的に評価することは冷却速度の影響などがあり容易ではないが, 圧縮試験から得られた流動応力のみから求められた動的再結晶 Kinetics は金属内部で起こっている冶金学的変化の概要を明らかにすることができる。

4. ま と め

流動応力曲線から動的再結晶 Kinetics を推定する方法を提案した。この手法は逆解析より求められた応力曲線及び, 動的再結晶粒の転位密度発展方程式の厳密解基本としている。凍結組織と比較した結果, よく似た傾向を示すことが分かったが, 組織凍結時の組織変化の影響を考慮しなけれ

ばならない。本手法では組織観察を必要としないので少ない時間, 実験数で動的再結晶 Kinetics を求めることができる。

(2003年9月3日受理)

参 考 文 献

- 1) 柳田, 柳本, 生産研究 55-6 (2003), 56-58.
- 2) Djaic, R.A.P., J. of Iron and Steel Inst. 210 (1972), 256-261.
- 3) Ohuchi, C., Okita, T., Ichihara, T. and Ueno, Y., Trans. ISIJ 20 (1980), 833-841.
- 4) McQueen, Mat. Sci. Eng. A 101 (1988), 149-160.
- 5) 瀬沼, 矢田, 松村, 二村, 鉄と鋼, 70-15 (1984), 2112-2119.
- 6) W. Roberts., Boden, H. and Ahlblom, B., Met. Sci. 13 (1979), 195-205.
- 7) Yanagimoto, J., Karhausen, K., Brand, A. J., Kopp, R., Trans. ASME, 120 (1998) 316-322.