

逆解析を利用した流動応力曲線の測定法

—材料ゲノム取得法の研究— 1 —

Flow Curve Determination for the Metal under Dynamic Recrystallization Using Inverse Analysis

— Novel Approach to Acquire Material Genome-1 —

柳 田 明*・柳 本 潤*

Akira YANAGIDA and Jun YANAGIMOTO

1. は じ め に

変形加工のプロセスシュミレーションとして、3次元 FEM 解析は 1990 年代に入り実用化され、各種の塑性加工における変形・温度の状態を定量的に把握することができるようになった。1990 年代後半には、塑性変形によって誘起される再結晶、連続変態時の組織形成過程、などの内部組織解析理論がでそろってきた。ここで解析に必要とされる材料データは「材料ゲノム」と呼ばれる。金属材料の各種合金成分について計算材料学もしくは実験によって求められる。その実験手法として圧縮試験があげられる。しかし、温・熱間流動応力の測定には多くの困難を伴う。例えば摩擦の影響を取り除くためラスティガエフ試験法¹⁾のように試験片両端面にオイルチャンバを設けて工具との摩擦を除去する方法があるが圧下量 50% 程度しか適応することができない。

加田ら²⁾は温度連成有限要素法を用いて摩擦力、加工発熱、熱移動を取り除くことにより等温の変形抵抗を求めているが、ひずみ、及びひずみ速度の不均一性が生じるため結果としてこの方法では、試験片全体の平均ひずみに対する平均変形抵抗を求めているにすぎない。

これらの緒問題に対して、これまでに流動応力を、逆解析により求める研究例³⁻⁵⁾が報告されているが、流動応力に、物理的な意味がない。よって本研究では、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、その妥当性及び、適用性を検討する。

2. 流動応力曲線の測定法

2.1 逆解析

今回提案した流動応力の測定法の概要を図 1 に示す。流動応力式は一般に次のように記述することが出来る。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(C, \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \dots\dots\dots (1)$$

ここで C は流動応力式中の係数パラメータである。 $\bar{\epsilon}$ 、 $\dot{\bar{\epsilon}}$ 、 T はそれぞれ相当ひずみ、相当ひずみ速度、温度である。

流動応力は、温度連成有限要素法から各圧下量(ステップ) $\langle i \rangle$ での荷重 $P^{(i)}(C)$ と、圧縮試験での荷重 $P^{*(i)}$ を一致させることにより得ることができる。すなわち、誤差関数 Φ (目的関数) を流動応力式中のパラメータ C に関して最小化することにより得ることができる。

$$\Phi(C) = \sum_{i=1}^M (P^{*(i)} - P^{(i)}(C))^2 \equiv \sum_{i=1}^M (f^{(i)}(C))^2 \dots\dots\dots (2)$$

M : 比較個数, $f(C)^{\langle i \rangle}$: 残差関数

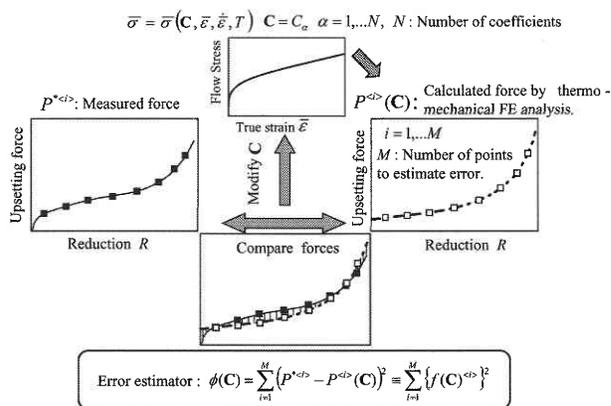


図 1 提案手法の概要

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

Φ を最小にする \mathbf{C}^* は、ペナルティ項 (パラメータ \mathbf{C} の拘束条件) を導入した改定 Levenberg-Marquardt 法^{6,7)} を用いる。次式より修正量 $\Delta \mathbf{C}^{(k)}$ を求め、反復計算を行う。

$$[\mathbf{J}^T(\mathbf{C}^{(k)})\mathbf{J}(\mathbf{C}^{(k)}) + \lambda^{(k)}\mathbf{I} + \mathbf{H}^{(k)}]\Delta \mathbf{C}^{(k)} = -\mathbf{J}^T(\mathbf{C}^{(k)})\mathbf{f}^{(l)}(\mathbf{C}^{(k)}) + \mathbf{B}^{(k)} \dots (3)$$

$\mathbf{J}_{i\alpha} = \partial f^{(i)}(\mathbf{C}) / \partial C_{\alpha}$: ヤコビアン行列, $\lambda^{(k)}$: マルカート数, \mathbf{I} : 単位行列である。ペナルティ項により導入にされた \mathbf{B} , \mathbf{H} は以下のようなになる。

$$\mathbf{B}_{\alpha} = -\frac{\partial}{\partial C_{\alpha}} \left(\sum_{\beta=1}^B \frac{W_{\beta}}{\kappa_{\beta}(\mathbf{C})} \right) \mathbf{H}_{\alpha\gamma} = \frac{\partial^2}{\partial C_{\alpha} \partial C_{\gamma}} \left(\sum_{\beta=1}^B \frac{W_{\beta}}{\kappa_{\beta}(\mathbf{C})} \right)$$

$1 \leq \alpha \leq N$ and $1 \leq \gamma \leq N$, N : 応力式中のパラメータ数, W_{β} : 重み, κ_{β} : 拘束関数, B : 拘束数である。

2.2 温度連成有限要素法

変形解析はラグランジェ未定乗数法剛塑性有限要素法を用いた。摩擦係数は、解析と実験の試験片形状が一致する値を求め $\mu = 0.2$ とした。

温度解析は式 (4) に示す軸対称熱伝導方程式を用い、試験片だけでなく工具部の解析も行った。工具部の温度解析には、試験片の表面の座標が塑性流動により半径方向に移動するので、ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法を用いた。

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{K}{r} \left(r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \dots (4)$$

ρ, c, K はそれぞれ密度, 比熱, 熱伝導率である。 v_r は半径方向の試験片の工具接触面での速度である。 \dot{Q} は加工による発熱量である。すべてのエネルギーが熱に変換されるとすると $\dot{Q} = \bar{\sigma} \dot{\epsilon}$ となる。 Galerkin 法による定式化, 時間に関する離散化には、クランク・ニコルソン差分式を用いている。境界条件としては、大気への熱伝達・放射, 工具への熱伝導を考慮する。

2.3 動的再結晶形流動応力の定式化

これまでに多くの流動応力の定式化が提案され、逆解析に用いられている³⁻⁵⁾ が、動的再結晶を扱ったものは少ない。動的再結晶を内部状態変数にて表現した例⁵⁾ もあるが、定常応力を表現することができない。図 2 に熱間加工時の流動応力曲線の模式図を示す。定式化された流動応力は動的再結晶の開始に従い加工硬化率が減少し、再結晶の進行とともに定常応力値に漸近しなければならない。よって以下のような定式化を提案する。

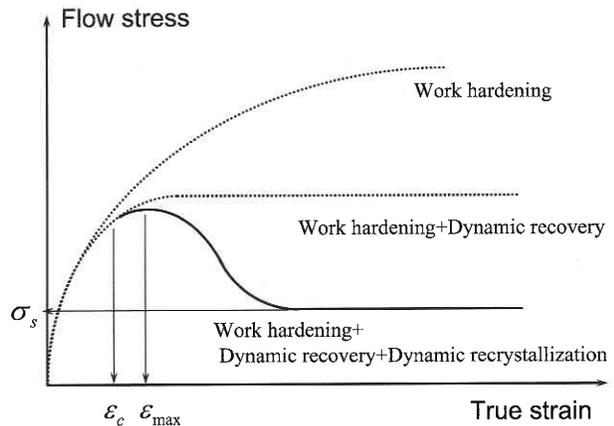


図 2 熱間加工時の応力曲線の模式図

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= F_1 \bar{\epsilon}^n & (\bar{\epsilon} \leq \epsilon_c) \\ \bar{\sigma} &= F_2 \exp[a(\bar{\epsilon} - \epsilon_{\max})^2] + F_3 & (\bar{\epsilon} \geq \epsilon_c) \end{aligned} \dots (5)$$

式 (5) は等温条件でひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1$ のときの値とし、基準値として用いる。 ϵ_c は動的再結晶臨界ひずみであり、相当ひずみがこの値より小さい場合は加工硬化 + 動的回復がおり、指数則を用いた。 ϵ_{\max} は最大応力値をとるひずみである。 F_3 は動的再結晶時の定常応力 σ_s を表す。 a, F_2, ϵ_{\max} は従属定数で $\bar{\epsilon} = \epsilon_c$ での応力, 応力の 1 次微分, 2 次微分の連続性より求めることができる。

本手法では、圧縮試験時の温度, 変形の不均一を許している。そのため、温度, ひずみ速度の依存性に関しては試験条件 (基準応力) まわりの局所的範囲においては式 (6) が成立すると仮定した。

$$\bar{\sigma}^* = \bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon}^m \frac{\exp(A/T)}{\exp(A/T_0)} \dots (6)$$

ここで T_0 は参照温度であり、ここでは初期試験温度とした。ひずみ速度依存指数 m , 温度依存指数 A は過去の文献⁸⁾ より $m = 0.13, A = 3414[\text{K}^{-1}]$ とした。これらの値は仮定した値であり、種々の温度, ひずみ速度からの結果より回帰を行うことができる。

3. 適 応 例

3.1 実験条件

試験片は S 20 C (0.19 % C, 0.2 % Si, 0.4 % Mn) を用いた。試験片寸法は高さ 12 mm, 直径 8 mm である。潤滑は金型との間に厚さ 0.2 mm の雲母板をひいた。試験温度 T_0 は 1373 K である。熱処理条件を図 3 に示す。

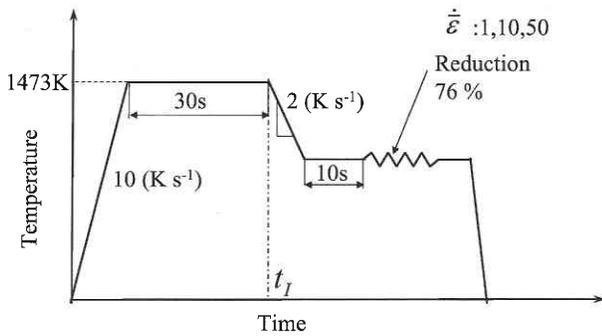


図3 熱処理条件

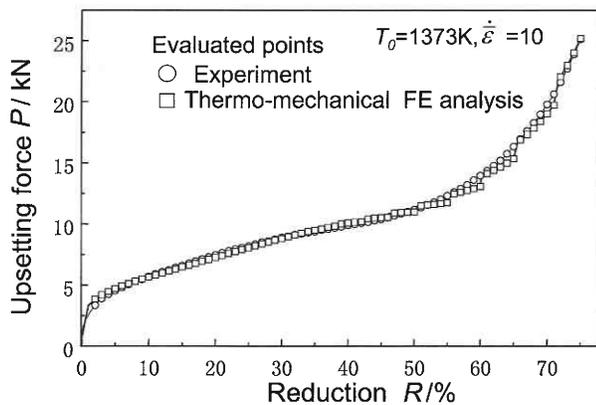


図4 解析荷重と測定荷重の変化

3.2 パラメータ同定結果

誤差関数を求めるための荷重比較は圧下率2%から1%ごとに行った。逆解析により得られた荷重と測定荷重の一例を図4に示す。図4より、解析荷重において、フォールディングの影響により急激に増加する個所が見られるが解析結果と測定荷重はよく一致していることが分かる。

逆解析により得られた流動応力を図5に示す。表1にパラメータ同定結果を示す。表1より定常応力をあらわす F_3 がひずみ速度によらずほぼ同一値を取っている。このことは仮定したひずみ速度依存性が試験速度1~50において成立することを示唆している。 ϵ_{max} がひずみ速度が大きくなるに連れて大きくなることなど物理的にも妥当な結果が得られた。 ϵ_c はひずみ速度の依存性が無いとする説⁹⁾があるがそれとは異なる結果となった。

4. ま と め

動的再結晶を表現できる流動応力構成式を提案し、実験

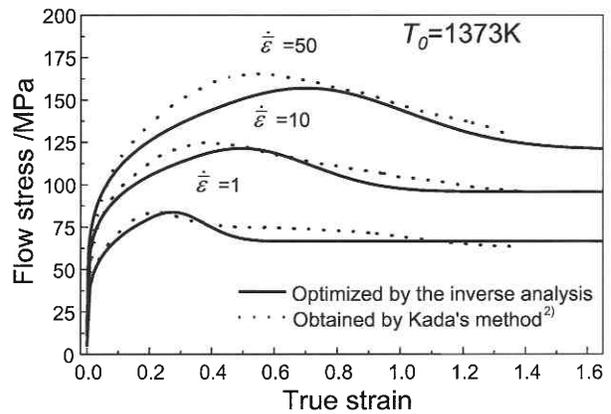


図5 逆解析により求められた流動応力

表1 パラメータ同定結果

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.

での実測荷重とFEMでの荷重を比較し、逆解析により直接、流動応力を求めた結果、良好な結果を得ることが出来た。今後、内部組織と流動応力式の関係組織観察により求める予定である。

(2003年9月3日受理)

参 考 文 献

- 1) Reiss, W. and Pohlant, K., Experimental Techniques, 10-2 (1986), 20.
- 2) 加田, 三木, 小坂田, 日本機学会論文, C 66-628 (1998), 4914-4919.
- 3) 道野, 田中, 北岡, 塑性と加工, 37-421 (1996), 219-224
- 4) Pietrzyk, M., Kusiak, J., Proc. NUMIFORM'95, eds, S.-F Shen and P. Dawson, Ithaca, (1995) 277-282.
- 5) Pietrzyk, M., Kusiak, J., Kawalla, R. and Pricher, H., J. of Mat. Proc. Techn. 60 (1996), 445-451.
- 6) D. W. Marquardt: J. Soc. Indust. Appl. Math., 11 (1963), 431-440.
- 7) V. Ravi and Jenings, A. A., Soil. Sci. Soc. Am. J., 54 (1990) 13-19.
- 8) 美坂, 吉本, 塑性と加工 8 (1967) 414-422.
- 9) 瀬沼, 矢田, 松村, 二村, 鉄と鋼, 70-15 (1984), 2112-2119.