

動的再結晶時の流動応力の逆解析

東京大学生産技術研究所 柳本研究室

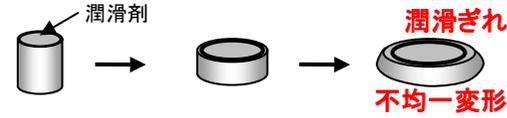
Chair for Hyper-functional Forming
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Prof. Dr.-Eng. Jun Yanagimoto



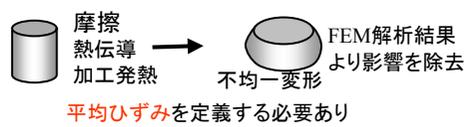
研究背景

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理論が必要とされる。その理論解析を行う上で必要な材料機能発現機構を導く実験手法として**圧縮試験**があげられる。**摩擦、熱伝導の影響**により温・熱間流動応力の測定には多くの困難が伴う。

ラスティガエフ試験(オイルチャンバを設ける)



温度連成FEM補正(等温変形抵抗)



逆解析法

過去に提案されている方法は流動応力に**物理的意味**がない。

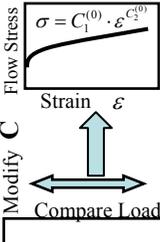
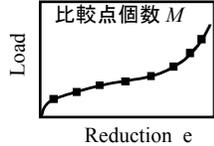
本研究では、流動応力を**内部組織変化**を含んだ形で表現できる構成式を提案し、圧縮試験から**単軸の流動応力**を逆解析を用いて同定する手法を示しその妥当性及び、適用性を検討する

提案手法

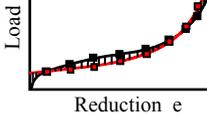
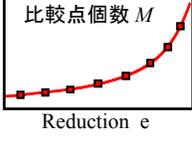
流動応力を関数表示し測定荷重と解析荷重を比較し、一致するように応力関数中パラメータを直接変更する。

初期応力 $\sigma_0 = \sigma(\varepsilon, \mathbf{C}^{(0)})$ $\mathbf{C} = C_\alpha$ $\alpha = 1, \dots, N$ $N: \mathbf{C}$ の個数

比較ステップ<i>の測定荷重 $P^{*<i>$



比較ステップ<i>での解析荷重 $P^{<i>$



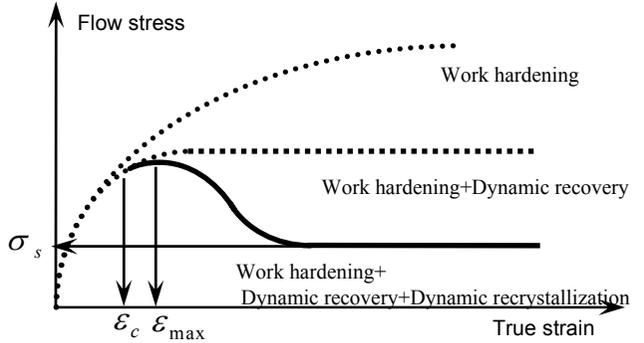
誤差を最小にするCを求める
・最小2乗法・最適化法

$$\phi(\mathbf{C}) = \sum_{i=1}^M (P^{*<i>} - P^{<i>}(\mathbf{C}))^2 = \sum_{i=1}^M \{f(C_\alpha)^{<i>}\}^2 \quad \alpha = 1, \dots, N$$

改定Levenberg-Marquardt法(拘束条件を導入)より修正量 $\Delta \mathbf{C}$ を求める

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

流動応力構成式



$$\bar{\sigma} = F_1 \bar{\varepsilon}^n \quad (\bar{\varepsilon} \leq \varepsilon_c)$$

$$\bar{\sigma} = F_2 \exp [a(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_{\max})^2] + F_3 \quad (\bar{\varepsilon} \geq \varepsilon_c)$$

ε_c : 動的再結晶臨界ひずみ

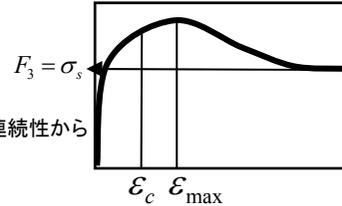
F_3 : 動的再結晶定常応力

ε_{\max} : 最大応力ひずみ

$\varepsilon = \varepsilon_c$ での σ と $\dot{\sigma}$ の1次、2次微分の連続性から

$a, F_2, \varepsilon_{\max}$ は従属変数となる

$F_1, n, \varepsilon_c, \varepsilon_{\max}, F_3$ が独立の4変数となる



解析結果

S20C 直径8mm 高さ 12mm, 8mm, 16mm (Aspect ratio 1.5, 1.0, 2.0)

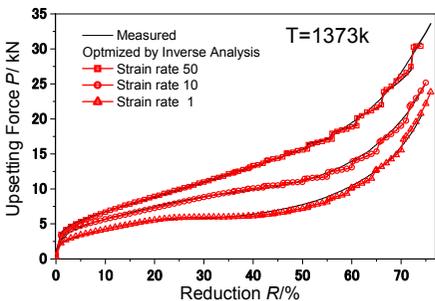


Figure 測定荷重と解析荷重

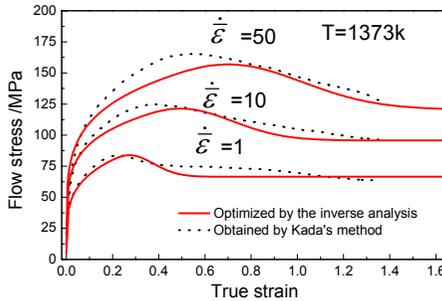


Figure 逆解析により得られた流動応力

Table determined parameters in flow curve (S20C)

Strain rate, $\dot{\varepsilon}$ (Aspect ratio)	F_1	n	ε_c	ε_{\max}	F_3	Error*
1	115.67	0.229	0.189	(0.271)	66.59	2.70%
10 (1.5)	104.75	0.184	0.325	(0.491)	70.96	1.97%
10 (1.0)	106.05	0.192	0.315	(0.495)	66.63	1.50%
10 (2.0)	106.14	0.189	0.315	(0.472)	70.79	1.77%
50	103.80	0.197	0.458	(0.700)	72.55	1.81%

不均一変形の影響を取り除くことが出来た試験片のアスペクトを変更しても同様の結果を得ることが出来た。

動的再結晶率の流動応力曲線からの推定法

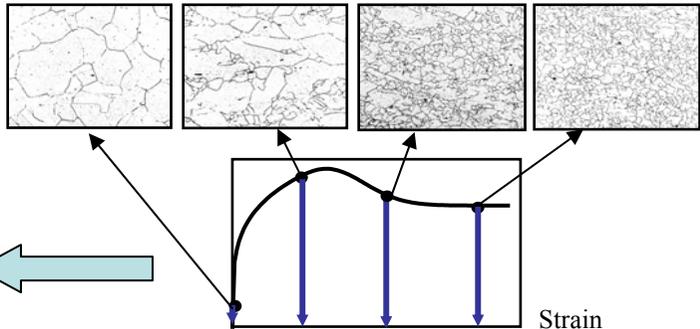
東京大学生産技術研究所 柳本研究室

Chair for Hyper-functional Forming
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Prof. Dr.-Eng. Jun Yanagimoto



背景

変形と内部組織を解析できる実用的な解析モデルは、生産品の形状と機械的を制御するうえで強く必要とされている。加工中の内部組織変化を解析するには、動的再結晶のKineticsが必要となる。しかしこのKineticsは異なるひずみ量、温度で加工後に急冷された、凍結された組織観察から求められている。そのため、ほとんどの鋼種において定式化されていない。よって本研究では動的再結晶Kineticsをより簡便・正確に短時間・少ない試験数で推定する方法を提案する。



流動応力曲線(再結晶による応力低下)から動的再結晶のKineticsを求める。

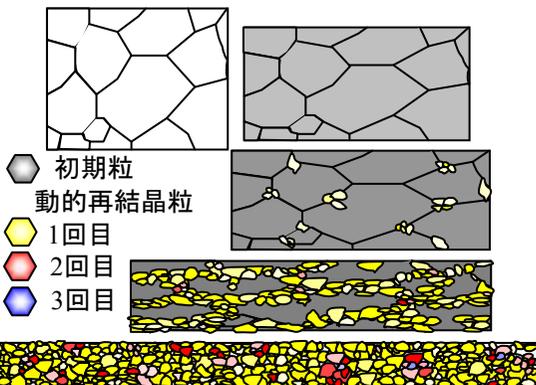
動的再結晶

動的再結晶粒は個々に異なる転位密度を持つ

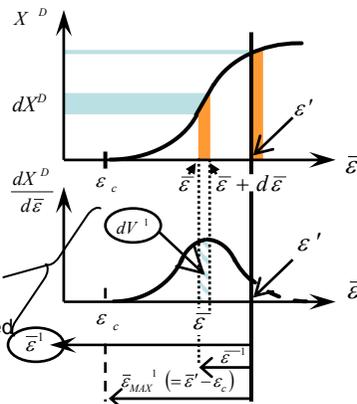
仮定

結晶粒はすべて同じひずみを受ける。

あるひずみ $\bar{\epsilon}$ で再結晶した粒は ϵ' のとき $\bar{\epsilon}' - \bar{\epsilon}$ のひずみを受ける

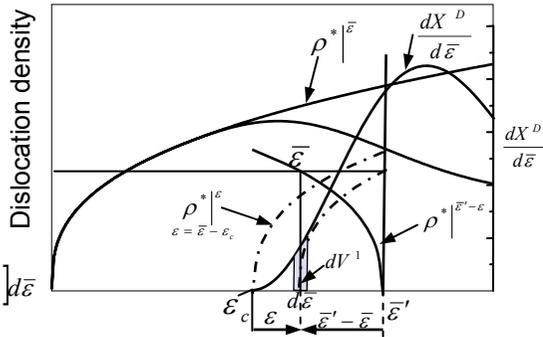


Avrami plot expresses strain distribution of recrystallized structure



(Derivative of Avrami plot)

$dV^1 \leftrightarrow \bar{\epsilon}^{-1}$ relationship: strain distribution of dynamically recrystallized structure



推定法

動的再結晶後の転位密度 $\rho = (1 - X^D)\rho^*|\epsilon + X^D\rho_0$

$\rho^*|\epsilon$ 加工硬化・動的回復による転位密度 ρ_0 動的再結晶粒の転位密度

X^D 動的再結晶率 $X^D = 1 - \exp[-G^D(\bar{\epsilon} - \epsilon_c)^p]$

$\bar{\sigma} \propto \sqrt{\rho}$ を用いて $\rho^*|\epsilon$ を求めることができる

$$dV^1 = \frac{dX^D}{d\bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon} = Gp(\bar{\epsilon}_{MAX}^{-1} - \bar{\epsilon}^{-1})^{p-1} \exp[-G(\bar{\epsilon}_{MAX}^{-1} - \bar{\epsilon}^{-1})^p] d\bar{\epsilon}^{-1}$$

$$\rho_0 X^D = \int_{\epsilon_c}^{\bar{\epsilon}'} \rho^*|\epsilon' - \bar{\epsilon} dV^1 = \int_{\epsilon_c}^{\bar{\epsilon}'} \rho^*|\epsilon' - \bar{\epsilon} \frac{dX^D}{d\bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon} = \int_{\epsilon_c}^{\bar{\epsilon}'} \rho^*|\epsilon' - \bar{\epsilon} Gp(\bar{\epsilon}_{MAX}^{-1} - \bar{\epsilon}^{-1})^{p-1} \exp[-G(\bar{\epsilon}_{MAX}^{-1} - \bar{\epsilon}^{-1})^p] d\bar{\epsilon}^{-1}$$

あるひずみにおいて G^D を用いて求められた転位密度 ρ と測定転位密度 $\bar{\sigma}^2$ が一致するような G^D を求める

推定結果

$$\bar{\sigma} = F_1 \bar{\epsilon}^{-n} \quad (\bar{\epsilon} \leq \epsilon_c)$$

$$\bar{\sigma} = F_2 \exp\left[a\left(\bar{\epsilon} - \frac{\epsilon_{max}}{\sqrt{X}}\right)^2\right] + F_3 \quad (\bar{\epsilon} \geq \epsilon_c)$$

$$\epsilon' = 2\epsilon_c$$

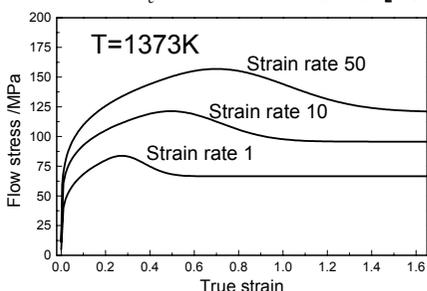


Figure 流動応力

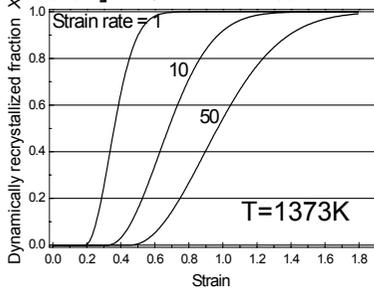


Figure Avrami プロット

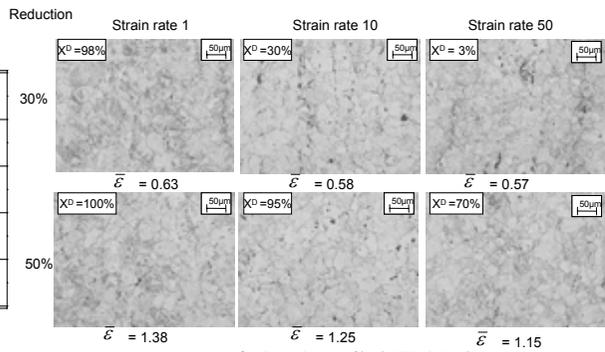


Figure 凍結組織 X^D 推定再結晶率

内部組織制御変形加工のための材料ゲノム取得法

東京大学生産技術研究所 柳本研究室

Chair for Hyper-functional Forming
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Prof. Dr.-Eng. Jun Yanagimoto



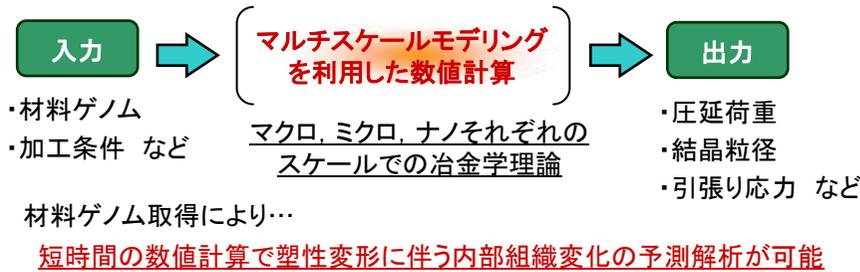
研究の背景

現在の鉄鋼材料の変形加工には、「塑性変形制御による形状の作成」と「内部組織制御による機械的特性の向上」とが同時に求められる。つまり、変形加工プロセス中の内部組織最適化（塑性変形に誘起される内部組織変化の制御）を可能とする技術開発が必要とされている。

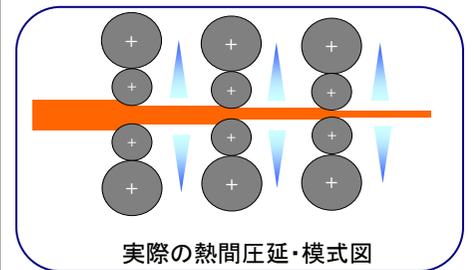
一方、材料ゲノムとは一種の材料データベースのようなもので、正確な材料ゲノムを得ることができれば、マルチスケールモデリングを利用して短時間の数値計算で塑性変形加工に誘起される内部組織変化の解析が可能となる。

材料ゲノム (Material Genome) とは

= 一種の材料データベース



熱間加工シミュレート試験



シミュレート試験の目的

様々な熱間圧延プロセスを
実験室レベルで再現

塑性変形加工 ↔ 内部組織変化

関係の具現化
材料ゲノム取得へ

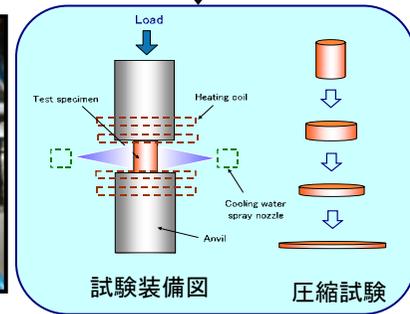
高ひずみ速度付与試験機



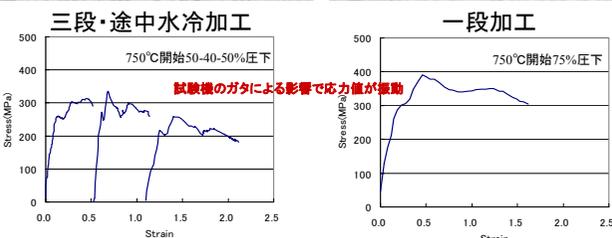
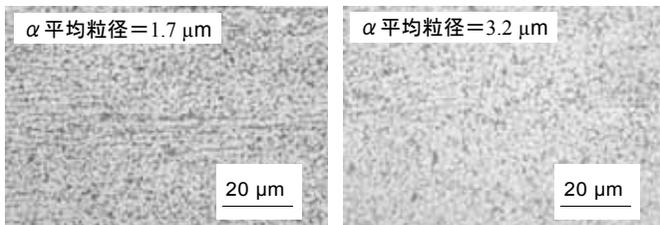
外観



チャンバー内部



実験結果



結晶粒微細化

熱延では結晶組織微細化（機械的特性向上）にオーステナイト(γ)相からのフェライト(α)変態を利用

高ひずみ速度加工 … α変態の駆動力向上
多段加工(ひずみの蓄積)
途中冷却 …… 変態後の粒成長の抑制

まとめ

・熱間加工でのフェライト結晶粒微細化には「多段加工によるひずみの蓄積」と「加工発熱の除去」が有効であると確認できた。
・信頼のできる材料ゲノムの取得のためには、試験機のカタを抑制し、より正確な応力-ひずみ曲線を取得しなければならない。