

特 集 4  
研 究 解 説

## 熱間加工時の変形抵抗・組織変化の予測手法

Incremental Formulation for the Prediction of Flow Stress and  
Microstructural Change in Hot Forming

柳 本 潤\*

Jun YANAGIMOTO

素形材加工においては、被加工材に塑性変形が付与されると同時に内部組織の創り込みが行われる。塑性変形制御技術と内部組織制御技術とを組み合わせることにより形状・材質の自由な創り込みを可能とする加工技術（創材加工技術）の開発が、今後ますます重要度を増すと考えられる。本解説では、熱間加工時に生じる内部組織の変化および対応して生じる変形抵抗の変化に対する、転位密度を媒介とした増分形解析手法について述べる。

### 1. 緒 言

塑性加工中の被加工材には、金型・ロール等により塑性変形が付与されると同時に内部組織の変化が生じる。塑性加工プロセスの最適化に際しては、付与される塑性変形が第1に考慮されるべきであるが、ついで加工中の内部組織変化が考慮されるべき重要な要因である。

特に熱間塑性加工時の被加工材内部組織の変化は、変形抵抗の変化を通じて加工荷重に代表される巨視的な塑性変形特性に直接影響を及ぼし、さらに加工後の被加工材の機械的特性（強度、延性、靱性など）を支配する。これらを精度よく予測するためには、まず一連の熱間塑性加工における被加工材温度の変化・被加工材の受ける塑性変形を的確に把握し、続いて温度・変形履歴に対応して生じる内部組織の変化を正確に求めなければならない。有限要素法（FEM）に代表される数値解析技術を適用することにより、被加工材温度の変化および被加工材の受ける塑性変形の解明は現在可能となりつつあり、温度・変形履歴に対応して生じる内部組織変化の理論的な解明が、現在最も重要な課題となっている。

素形材の熱間加工プロセスは、加熱・加工・冷却の3要素プロセスの組み合わせとしてとらえることができる。各要素プロセスにおいて生じる被加工材内部組織の変化は、表1に示す現象の組み合わせとして生じ<sup>1)</sup>、これらの現象は被加工材の合金組成に依存して発現のしかたが複雑に変化する。これら3個の要素プロセスのうち、加工時に生じる内部組織変化が最も重要であるが、これらは被加工材の

- 1) Soaking or Reheating process
  - $\alpha \rightarrow \gamma$  transformation
  - Grain growth in heating
- 2) Hot forming process
  - Dynamic events:
    - Work hardening
    - Dynamic recovery
    - Dynamic recrystallization
    - Grain growth of dynamically recrystallized grain
  - Static events:
    - Postdynamic recrystallization
    - Static recovery
    - Static recrystallization
    - Grain growth of statically recrystallized grain
- 3) Cooling process
  - $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation
  - Grain growth in cooling

表1 素形材熱間加工時に生じる内部組織変化

塑性変形時に生じる「動的」な現象と、塑性変形を受けた後に残留する応力・ひずみにより引き起こされる「静的」な現象とに大別することができる。

動的な現象のうち加工硬化および動的回復は、塑性変形を受ける被加工材には必ず生じているが、動的再結晶は塑性変形に対応し増殖した転位が再結晶を開始させるのに必要な駆動力を超えない範囲では起こらない。造船用厚板・ラインパイプ用厚板等の低温強度・低温靱性が要求とされる鋼材では、70年代よりTMCP (Thermo Mechanical Control Process) による内部組織制御が行われてきたが、TMCPでは圧延温度が低くパス間時間も比較的長いいため動的再結晶は生じず、内部組織制御はNb等の添加による静的再結晶の抑制ならびに加工硬化オーステナイトから

\*東京大学生産技術研究所 第2部

フェライトへの変態の促進によるフェライト粒の微細化により行われてきた。したがって、Sellers<sup>2),3)</sup>, Roberts<sup>4)</sup>らにより厚板圧延 (TMCP) を対象として開発された内部組織予測モデルは、静的な現象 (主に静的再結晶) により引き起こされる内部組織変化の予測を主な目的としていた。

熱間鍛造・熱間圧延 (薄板圧延, 棒線材圧延) のように 1 パスで被加工材に付与されるひずみが大きい場合、パス間時間が短いためにひずみの累積効果が大きい場合には、動的再結晶が生じる。矢田・瀬沼らは、オーステナイト鋼を対象とした一連の熱間高速多段圧縮実験を行い<sup>5)</sup>, 熱間加工時に生じる動的および静的な内部組織変化を実験式群としてまとめている<sup>6)~10)</sup>。Karhausen らは熱間圧縮実験結果をもとに動的および静的な内部組織変化を実験式群としてまとめ、熱間圧延・熱間鍛造時の内部組織の予測を行っている<sup>11)~14)</sup>。これらの内部組織予測技術は、一方では熱間薄板圧延加工の様にオンライン組織制御への応用が考えられているが、他方 FEM 解析等により得られるひずみ・ひずみ速度・温度と組み合わせることにより、被加工材内部の組織分布を予測し最適加工条件を見いだし得るオフライン解析システムとして実用化することも重要である。FEM 解析等との複合化をはかり熱間加工時の内部組織変化を予測しようとする試みは、上述の Karhausen ら<sup>11)~14)</sup>に加え、浜渦ら<sup>15)</sup>, 難波ら<sup>16)</sup>, Pietrzyk ら<sup>17)</sup>等により行われている。

上述のように、熱間加工時の内部組織変化の予測に関しては、現在各所にて研究が行われているが、以下の3項目が今後解決すべき問題として残されている。

- 1) 従来開発されてきた内部組織予測モデルのすべてが経験式・実験式に基づいており、鋼種・合金組成が変化すると異なる実験式が必要であり、さらに、求めるべき実験定数の数が多すぎるため、数多くの鋼種・合金組成ごとにこれらを求めるのには膨大な労力が必要であること
- 2) 従来開発求められてきた実験式は必ずしも FEM 解析等により求められる応力場・ひずみ速度場・温度場およびその履歴を反映するのに都合のよい形式 (増分形式) とはなっていないこと
- 3) 材質予測技術にはいまだ一般的な手法・モデルが存在していないこと

言うまでもなく最も本質的な問題は 3) であり、物理冶金学の視点から今後検討が進められねばならない。FEM 解析等と内部組織予測技術との複合化をはかる上では、3) よりむしろ 2) が重要な問題であり、さらに、2) の問題の解決に際しては、必要な実験方程式群の整理・削減および簡略化すなわち 1) の問題を避けて通ることはできない。

本解説では、動的再結晶・加工硬化および動的回復が生

じる場合を例にとり、FEM 解析等の結果求められるひずみ速度場・温度場およびその履歴をもとに、変形抵抗および内部組織の変化を求めるための増分形解析手法の転位密度を媒介とした定式化について述べる。さらに、内部組織変化に増分形解析を適用するために必要な実験方程式群を示し、等ひずみ速度・等温変形ならびにひずみ速度・温度が変化する場合を対象とした若干の解析結果を示す。

## 2. 動的再結晶・加工硬化・動的回復が生ずる場合の変形抵抗・組織変化

加工硬化と動的回復および動的再結晶が生ずる場合の応力-ひずみ関係は、図 1 のように模式的に表すことができる。動的再結晶が生じない場合には、応力は塑性ひずみの増大とともに単調に増加し、加工硬化による転位密度の増加と動的回復による転位密度の減少とが釣り合った応力値で飽和する。さらに動的再結晶が生ずる場合には、動的再結晶の開始とともに一旦応力が減少し、その後加工硬化による転位密度の増加・動的回復による転位密度の減少・動的再結晶による転位密度の減少が釣り合った応力値で飽和する。本章では、加工硬化・動的回復・動的再結晶それぞれに対応した転位密度の変化および内部組織の変化、およびそれらを解析する手法について説明する。

### 2.1 転位密度と変形抵抗との関係および加工硬化が生ずる場合の転位密度の変化

金属材料の塑性変形は転位の運動の累積の結果として生じていることは周知の事実である。多結晶金属材料の塑性変形に必要な応力は、a) 可動転位の運動に必要な応力、b) 転位の増殖・転位間の相互作用による抵抗、c) 結晶粒界による抵抗、の和としてとらえることができる<sup>6), 9)</sup>。高温では a) および c) による影響は小さくなることが知られており、多結晶金属材料の塑性変形に必要な応力は、転位の増殖・転位間の相互作用による抵抗 (内部応力  $\sigma^I$ ) のみを考えればよい<sup>9)</sup>。一般に、転位の面密度  $\rho$  と内部応力  $\sigma^I$  との間には  $\sigma^I = K\sqrt{\rho}$  の関係があり<sup>18)</sup>, さらに

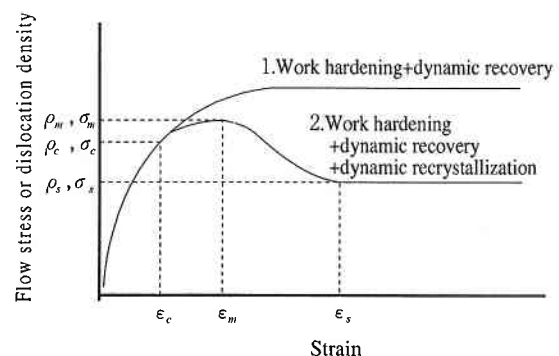


図1 熱間加工時の応力とひずみとの関係

転位の平均面密度とひずみとは比例関係にあるものと仮定すると、結局、高温での降伏応力  $\bar{\sigma}$ 、塑性ひずみ  $\bar{\varepsilon}$ 、転位の平均面密度（以下単に転位密度と呼ぶ） $\rho$  相互の関係は、次式により表される。

$$\bar{\sigma} = a\sqrt{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho = c\bar{\varepsilon} \dots\dots\dots (2)$$

式(1)(2)より  $\rho$  を消去することにより加工硬化領域での応力とひずみとの関係が得られる。

## 2.2 加工硬化と動的回復が同時に生ずる場合の転位密度の変化

高温では、加工により導入された転位の消失、すなわち動的回復が起きる。動的回復は時刻  $t$  の関数であるから、加工硬化と動的回復が同時に生じる場合の転位密度は、ひずみと時間の関数として表現できる。したがって、転位密度の全微分は、

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial \bar{\varepsilon}}\right) d\bar{\varepsilon} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) dt \dots\dots\dots (3)$$

と表すことができる<sup>9)</sup>。動的回復による単位時間あたりの転位密度の変化は、その時点での転位密度に比例するものと仮定する<sup>9)</sup>。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -b\rho \dots\dots\dots (4)$$

式(2)(4)を(3)に代入し差分形で表示すると、時間増分と転位密度増分との間の関係式が得られる。

$$\Delta\rho^{(n)} = \left(c\bar{\varepsilon}^{(n)} - b\rho^{(n)}\right)\Delta t^{(n)} \dots\dots\dots (5)$$

ただし  $\langle n \rangle$  は時間ステップを表す。  $b, c$  は結晶粒径・温度・ひずみ速度の関数である。

## 2.3 動的再結晶による転位密度・内部組織の変化

1) 限界ひずみ  $\varepsilon_c$ 。塑性変形に対応し増殖した転位が必要な駆動力を超えると、動的再結晶が起こる。動的再結晶は結晶粒界より発生し粒内に向けて進行することが実験より明らかになっており<sup>1)</sup>、したがって、結晶粒界での転位密度  $\rho^G$  と限界転位密度  $\rho_c$  との間に

$$\rho^G \geq \rho_c \dots\dots\dots (6)$$

なる関係が満足された場合、動的再結晶が生ずると考えることができる。熱的活性化過程との仮定のもとでは、限界

転位密度  $\rho_c$  は温度  $T$  の関数であるが、式(5)より結晶粒界の転位密度  $\rho^G$  を理論的に求めることはできず、また、結晶粒界の転位密度を直接測定するのは困難なので、動的再結晶の発生限界は次式のごとくひずみに関する関係式として与える。

$$\bar{\varepsilon} \geq \varepsilon_c \dots\dots\dots (7)$$

限界ひずみ  $\varepsilon_c$  は一般に結晶粒径・温度・ひずみ速度の関数であると考えられる<sup>11)</sup>。

2) 動的再結晶率  $X^D$  およびその速度形 未再結晶部からの動的再結晶率  $X^{D(0 \rightarrow 1)}$  は次式のごとく Avrami 形の関係式として与えられる。

$$X^{D(0 \rightarrow 1)} = 1 - \exp\left[-G(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_c)^p\right] \dots\dots\dots (8)$$

$G$  は再結晶の進行速度を表す。(8)式の数値形は次式により表される。

$$\frac{dX^{D(0 \rightarrow 1)}}{dt} = \dot{\varepsilon} G p (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_c)^{p-1} \exp\left[-G(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_c)^p\right] \dots\dots\dots (9)$$

現在の未結晶部の体積率  $A^0$  に対する動的再結晶速度の比  $\dot{x}^{D(0 \rightarrow 1)}$  は以下の式により表される。

$$\dot{x}^{D(0 \rightarrow 1)} = \frac{1}{A^0} \frac{dX^{D(0 \rightarrow 1)}}{dt} = \dot{\varepsilon} G p (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_c)^{p-1} \dots\dots\dots (10)$$

上式の導出には、 $A^0 = 1 - X^{D(0 \rightarrow 1)}$  なる関係式を用いた。上式を一般化することにより、 $N$  回再結晶した材料の現在の体積率  $A^N$  に対する動的再結晶速度  $\dot{x}^{D(N \rightarrow N+1)}$  を求めることができる。

3) 動的再結晶部の取り扱い 解析の対象とする領域内の各点について FEM 解析等により求められるひずみ速度・温度およびこれらの履歴をもとに、以上に示した式を利用し動的再結晶・加工硬化・動的回復に起因する変形抵抗および内部組織の変化を求めることができる。従来これらの変化を求める増分解析の手法として、2種類の方法が提示されている。

- a) 材料内部を未結晶部 (Original structure) と動的再結晶部 (Sub-structure) に 2 分割する。2 回目以後の動的再結晶の解析を省略し Sub-structure 数の増大を防ぐかわりに、動的再結晶部の転位密度もしくは定常応力を実験式により求める<sup>9)</sup>。
- b) それぞれの時間増分毎に生じる第 1 回目の動的再結晶部をおのおの別々の Sub-structure とし、2 回目以後の動的再結晶により動的再結晶部より新たに生ずる部分についても、新しい Sub-structure とする。ひずみ・結晶粒径等の履歴量は、各 Sub-structure ごとに

記憶する<sup>11)</sup>。

方法 a) はオンライン組織制御のためにモデルとしては有効だと思われるが、塑性変形および温度分布に対応した転位密度・内部組織の変化の履歴を解析するには必ずしも適しておらず、また定常応力（または転位密度）に関する実験式を必要とするという問題がある。方法 b) は言うなれば内部組織変化の直接シミュレーションであり、結晶粒径分布なども含めた厳密な解析が可能であるが、解析の際に用いる増分ステップの総数を  $M$  とすれば Sub-structure の総数は  $2^M$  個にまで達する可能性がある。したがって Sub-structure の数を削減するために、増分ステップの大きさもしくは Sub-structure として考えるために必要な最小の体積率に関する制限を設ける必要があり、さらに、ひずみ・結晶粒径等の履歴量は各 Sub-structure ごとに記憶しておかなければならないため、大きな記憶容量を必要とする。

従来方法 a) と方法 b) の本質的な相違は、動的再結晶により生ずる Sub-structure の取り扱い方法にある。ここでは、方法 a) と方法 b) 双方の長所を有し、さらに FEM 等により求められるひずみ速度場・温度場の履歴を考慮するのに適した増分形解析手法を新たに提案する。

まず、個々の Sub-structure は動的再結晶した回数が同じ粒の集合であるとする。すなわち、Sub-structure 0 (Original structure), Sub-structure 1, Sub-structure 2, ..., Sub-structure  $N$ , ... はそれぞれ、未結晶粒、1 回動的再結晶した粒、2 回動的再結晶した粒、...,  $N$  回動的再結晶した粒、... の集合であるとする。各 Sub-structure  $N$  の転位密度  $\rho^N$  および結晶粒径  $d^N$  はそれぞれの Sub-structure  $N$  ごとの平均値で考える。以後右肩上の添字  $N$  は Sub-structure  $N$  についての値であることを意味し、添字  $\langle n \rangle$  は時間ステップを表すものとする。時刻  $t^{\langle n \rangle}$  での温度およびひずみ速度を  $T^{\langle n \rangle}$ ,  $\dot{\epsilon}^{\langle n \rangle}$ , 増分時間を  $\Delta t^{\langle n \rangle}$  とする。

4) 動的再結晶速度の求め方 ひずみ増分は、すべての Sub-structure 共通に次式により表される。

$$\Delta \bar{\epsilon}^{\langle n \rangle} = \dot{\epsilon}^{\langle n \rangle} \Delta t^{\langle n \rangle} \dots \dots \dots (11)$$

Sub-structure  $N$  のひずみは  $N$  回目の再結晶が開始した時点からのひずみ増分を累積して求めるものとし、これを  $\bar{\epsilon}^{\langle n \rangle}$  とする。  $N$  回再結晶した材料からの  $N+1$  回目の動的再結晶速度  $\dot{X}^{D(N \rightarrow N+1)\langle n \rangle}$  は、式 (10) を一般化した式 (12) により求めることができる。

$$\begin{aligned} \dot{X}^{D(N \rightarrow N+1)\langle n \rangle} &= A^{N\langle n \rangle} B^{N\langle n \rangle} \dot{\epsilon}^{D(N \rightarrow N+1)\langle n \rangle} \\ &= A^{N\langle n \rangle} B^{N\langle n \rangle} \dot{\epsilon}^{\langle n \rangle} G^{N\langle n \rangle} p(\bar{\epsilon}^{\langle n \rangle} - \epsilon_c^{N\langle n \rangle})^{p-1} \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

ただし、 $A^{N\langle n \rangle}$  は時刻  $t^{\langle n \rangle}$  における  $N$  回再結晶した材料 (Sub-structure  $N$ ) の体積率、 $B^{N\langle n \rangle}$  は Sub-structure  $N$  全体に対し  $N+1$  回目の再結晶に必要な限界ひずみ  $\epsilon_c^{N\langle n \rangle}$  を超える部分がしめる割合、 $G^{N\langle n \rangle}$  は Sub-structure  $N$  からの再結晶の進行速度である。

$B^{N\langle n \rangle}$  は Sub-structure  $N$  への再結晶の履歴を表す量であるため、本来は陽な形で求めることはできない。この履歴を厳密に求めるためには、各時間増分ごとの再結晶の履歴を厳密に求めなければならないが、このためには各時間増分ごとに再結晶部を新たな Sub-structure として考慮すること、すなわち前節にて述べた方法 b) を用いることが必要になる。ここでは計算を簡略化するため、 $N$  回目の動的再結晶の履歴が式 (8) のひずみを変数とした Avrami 形の方程式と相似であると仮定し、 $B^{N\langle n \rangle}$  を次式にて近似する。

$$B^{N\langle n \rangle} \approx \frac{X^{D(N-1 \rightarrow N)\langle n \rangle} |_{\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}^{N\langle n \rangle} + \epsilon_c^{N-1\langle n \rangle} - \epsilon_c^{N\langle n \rangle}}}{X^{D(N-1 \rightarrow N)\langle n \rangle} |_{\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}^{N\langle n \rangle} + \epsilon_c^{N-1\langle n \rangle}}} \dots \dots (13)$$

式 (13) の意味を図 2 に示す。Sub-structure  $N-1$  より Sub-structure  $N$  への動的再結晶率は Sub-structure  $N-1$  のひずみ  $\bar{\epsilon}^{N-1\langle n \rangle}$  に対して図 2 中の曲線で与えられるものとする。時刻  $t^{\langle n \rangle}$  での Sub-structure  $N-1$  の限界ひずみを  $\epsilon_c^{N-1\langle n \rangle}$  とすれば、Sub-structure  $N$  の再結晶開始時点からのひずみの累積値  $\bar{\epsilon}^{N\langle n \rangle}$  と Sub-structure  $N-1$  のひずみ (再結晶開始時点からの累積値)  $\bar{\epsilon}^{N-1\langle n \rangle}$  との間に、以下の近似的な関係を仮定することができる。

$$\bar{\epsilon}^{N-1\langle n \rangle} \approx \bar{\epsilon}^{N\langle n \rangle} + \epsilon_c^{N-1\langle n \rangle} \dots \dots \dots (14)$$

従って、Sub-structure  $N-1$  より Sub-structure  $N$  への動的再結晶の履歴 (図 2 中の曲線) が、

ア) ひずみを変数とした式 (8) の関係式に相似であり、さらに、

イ) Sub-structure  $N-1$  の初期体積率およびひずみがそれぞれ 1.0, 0.0 である、と仮定して規格化すると、Sub-structure  $N$  の現在の体積率は、

$$V_1 = X^{D(N-1 \rightarrow N)\langle n \rangle} |_{\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}^{N\langle n \rangle} + \epsilon_c^{N-1\langle n \rangle}} \dots \dots \dots (15)$$

と表される。また、Sub-structure  $N$  の再結晶開始時点からのひずみの累積値が、現在のひずみ値より Sub-structure  $N$  の限界ひずみ  $\epsilon_c^{N\langle n \rangle}$  を減じた値  $\bar{\epsilon}^{N\langle n \rangle} - \epsilon_c^{N\langle n \rangle}$  であった時に既に Sub-structure  $N-1$  より Sub-structure  $N$  へ動的再結晶していた部分は、現在のひずみが  $N+1$  回目の動的再結晶への限界値を超えていると考えることができる。Sub-structure  $N$  の再結晶開始時点からのひずみ

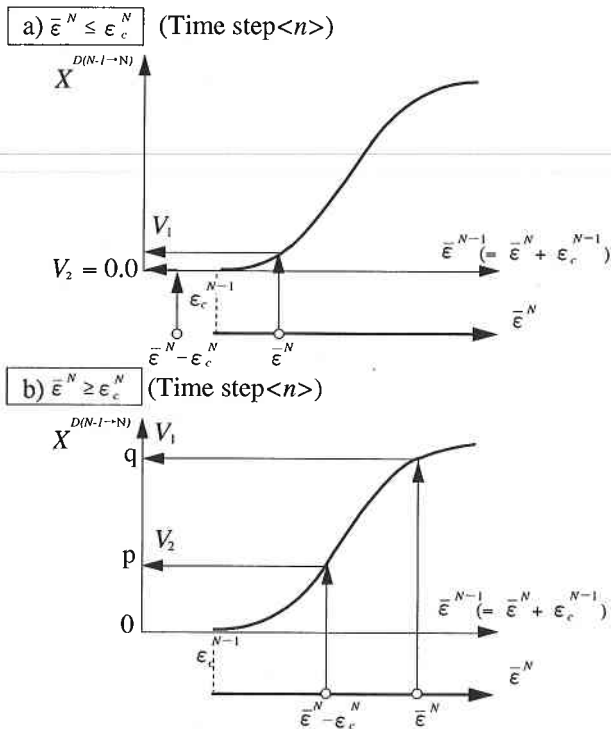


図2 限界ひずみを超える部分のしめる割合の近似方法

の累積値が現在のひずみ値より限界ひずみ  $\epsilon_c^{N(n)}$  を減じた値  $\bar{\epsilon}^{N(n)} - \epsilon_c^{N(n)}$  であった時に、すでに Sub-structure  $N-1$  より Sub-structure  $N$  へ動的再結晶していた部分の体積率は、上記ア)イ)の仮定を用いると式(15)と同様に、

$$V_2 = X^{D(N-1 \rightarrow N)(n)} |_{\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}^{N(n)} + \epsilon_c^{N-1(n)} - \epsilon_c^{N(n)}} \dots (16)$$

と表され、式(15)と(16)の比(図2中では  $\overline{op}/\overline{oq}$ )、すなわち式(13)により  $B^{N(n)}$  を近似的に表すことができる。なお、式(13)(15)(16)中の動的再結晶率  $X^D$  は一般に温度・ひずみ速度・結晶粒径などの関数であるが、たとえば各 Sub-structure の平均温度・平均ひずみ速度・平均結晶粒径等を用いて近似的に計算することができる。

式(13)~(16)を式(12)に代入し増分時間  $\Delta t^{(n)}$  を乗じることにより、各 Sub-structure  $N$  より動的再結晶する体積率の増分を求めることができる。

$$\Delta X^{D(N \rightarrow N+1)(n)} = \dot{X}^{D(N \rightarrow N+1)(n)} \Delta t^{(n)} \dots (17)$$

5) 増分解析の進め方 図3にフローチャートを示す。FEM解析等により求められる各時間ステップ  $\langle n \rangle$  (時刻  $t^{(n)}$ ) での温度およびひずみ速度  $T^{N(n)}$ ,  $\dot{\epsilon}^{(n)}$  増分時間を  $\Delta t^{(n)}$  および現時点での各 Sub-structure  $N$  のひずみ  $\bar{\epsilon}^{N(n)}$  をもとに、式(17)を用いて動的再結晶する体積率の増分を

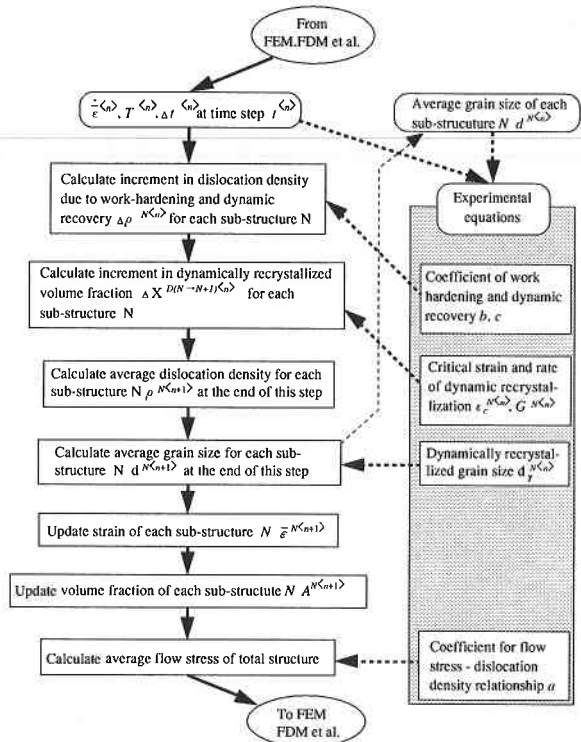


図3 フローチャート

各 Sub-structure ごとに求める。同時に、各 Sub-structure  $N$  の動的再結晶しない部分の転位密度の増分は、式(5')により表される。

$$\Delta \rho^{N(n)} = (c^N \dot{\epsilon}^{(n)} - b^N \rho^{N(n)}) \Delta t^{(n)} \dots (5')$$

各 Sub-structure  $N$  の時間ステップ  $\langle N \rangle$  終了時の平均転位密度は、次式により表される。

$$\rho^{N(n+1)} = \frac{1}{A^{N(n+1)}} \times \left\{ A^{N(n)} (\rho^{N(n)} + \Delta \rho^{N(n)}) - \Delta X^{D(N \rightarrow N+1)(n)} \rho^{N(n)} \right\} \dots (18)$$

上式では、Sub-structure  $N-1$  からの再結晶により新たに加わった部分の転位密度は0であり、Sub-structure  $N+1$  への再結晶により消失した部分の転位密度は、その時点での平均転位密度に等しいことを仮定している。時間ステップ  $\langle N \rangle$  終了時の各 Sub-structure の体積率は、次式により表される。

$$A^{N(n+1)} = A^{N(n)} + \Delta X^{D(N-1 \rightarrow N)(n)} - \Delta X^{D(N \rightarrow N+1)(n)} \dots (19)$$

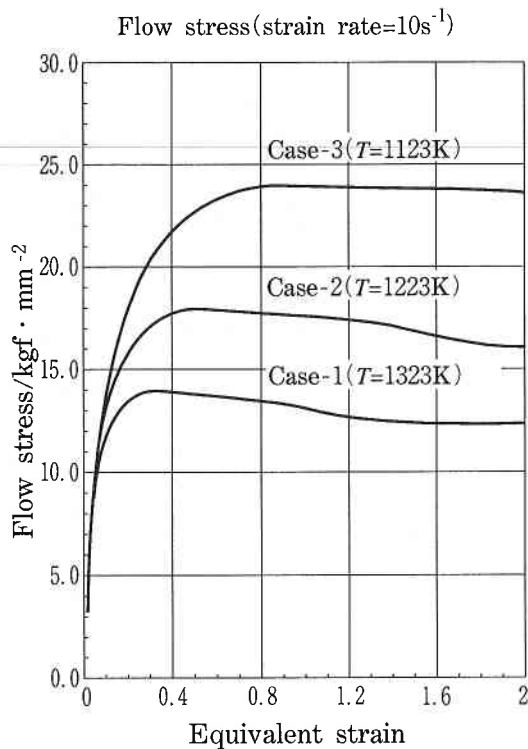


図 4 加工温度の変化にともなう変形抵抗の変化 (等温, 等ひずみ速度の場合)

時間ステップ  $\langle N \rangle$  終了時の各 Sub-structure の平均粒径は, 次式により表される.

$$d^{N\langle n+1 \rangle} = \frac{1}{A^{N\langle n+1 \rangle}} \times \left\{ A^{N\langle n \rangle} d^{N\langle n \rangle} - \Delta X^{D(N \rightarrow N+1)\langle n \rangle} d^{N\langle n \rangle} + \Delta X^{D(N-1 \rightarrow N)\langle n \rangle} d_r^{N-1\langle n \rangle} \right\} \quad (20)$$

ただし  $d_r^{N-1\langle n \rangle}$  は, Sub-structure  $N-1$  から動的再結晶した粒の直径であり, 動的再結晶部の粒成長は無視されている. 時間ステップ  $\langle n \rangle$  終了時の各 Sub-structure のひずみは, 次式により表される.

$$\bar{\varepsilon}^{N\langle n+1 \rangle} = \bar{\varepsilon}^{N\langle n \rangle} + \Delta \bar{\varepsilon}^{N\langle n \rangle} \quad (21)$$

ひずみの累積は, これは Sub-structure  $N$  への再結晶開始時点より行うものとする. 各 Sub-structure  $N$  の体積率および平均転位密度をもとに, Total structure についての平均転位密度は式 (22) により計算でき, さらにこれを式 (23) の転位密度と変形抵抗との関係に代入することにより, 時刻  $t^{\langle n \rangle}$  での平均変形抵抗  $\bar{\sigma}^{\langle n+1 \rangle}$  が計算できる. この平均変形抵抗を FEM 解析に用いることにより, 内部組織変化にともなう変形抵抗変化が, 塑性変形挙動に及ぼす影響を正確

に評価することができる.

$$\rho^{\langle n+1 \rangle} = \sum_{N=0}^{N=N_{max}} A^{N\langle n+1 \rangle} \rho^{N\langle n+1 \rangle} \quad (22)$$

$$\bar{\sigma}^{\langle n+1 \rangle} = a \sqrt{\rho^{\langle n+1 \rangle}} \quad (23)$$

図 3 中に, 以上に述べた解析を実行するのに必要となる実験式群をまとめた. 図 1 にて示した最大応力・定常応力いずれについても実験式を必要とせず, これらの値は内部組織・転位密度についての増分解析の結果として求めることができる. 実験により定めるべき方程式群は,

- a) 転位密度と変形抵抗の関係式 (式 (1) または式 (23))
- b) 加工硬化時の転位密度とひずみとの関係式 (式 (2))
- c) 動的回復にともなう転位密度の変化を与える関係式 (式 (4))
- d) 動的再結晶発生限界を与える限界ひずみ (式 (7))
- e) 動的再結晶率を与える関係式 (式 (8))
- f) 動的再結晶粒の粒径 (式 (20) 中の  $d_r^{N-1\langle n \rangle}$ )

であり, これらは合金組成が異なる金属それぞれに対応して, 一般にひずみ・ひずみ速度・温度・結晶粒径等を変数とした関係式により与えられる.

### 3. 変形抵抗・内部組織変化の解析事例

第 2 章にて示した解析手法は, 任意のひずみ速度・温度分布に対応した変形抵抗・内部組織変化に関する結果を与える. 本章では, 等ひずみ速度・等温変形およびこれらが変化する場合についての若干の解析例を示す.

#### 3.1 解析に用いた実験方程式群

熱間低炭素鋼を対象とし, 実験方程式群としてはとりあえず瀬沼・矢田らにより求められたものを用いた<sup>6), 9)</sup>. 用いた実験式的具体形を以下に示す.

$$\bar{\sigma} = 1.58 \times 10^{-4} \sqrt{\rho} \quad (1)$$

$$b = 9850 \bar{\varepsilon}^{0.685} \exp\left(\frac{-8000}{T}\right) \quad (2)$$

$$c = 0.85 \times 10^{11} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{d}}\right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_c = 4.76 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{8000}{T}\right) \quad (7)$$

$$G = \frac{0.693}{\varepsilon_{0.5}^2}, p = 2, \quad \varepsilon_{0.5} = 1.144 \times 10^{-3} d^{0.28} \bar{\varepsilon}^{0.05} \exp\left(\frac{6420}{T}\right) \quad (8)$$

$$d_r = 22600 Z^{-0.27} \quad (20')$$

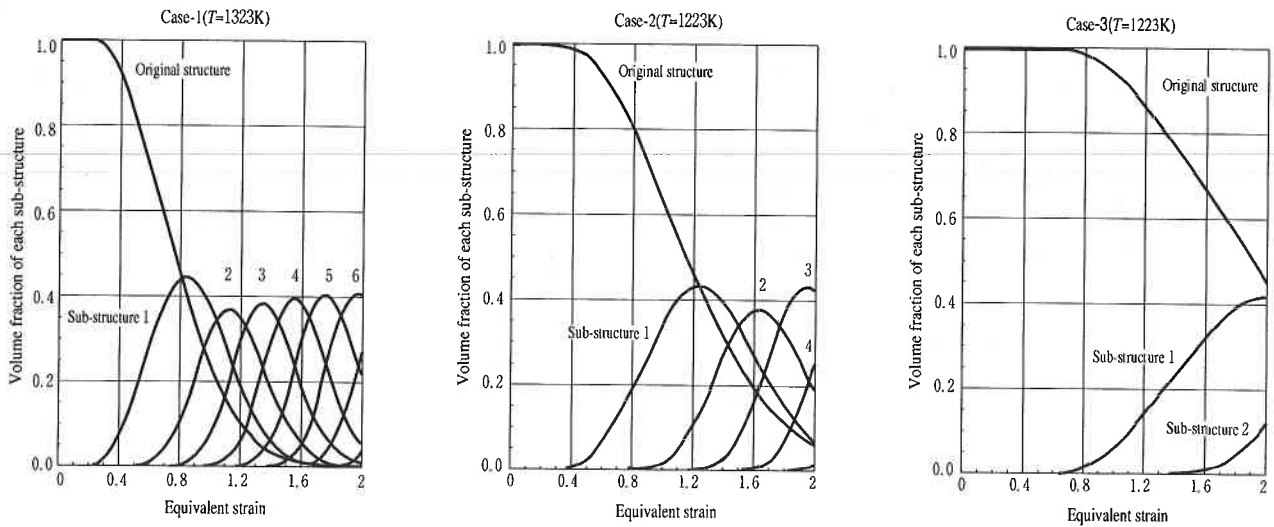


図5 各 Sub-structure の体積率の変化 (等温, 等ひずみ速度の場合)

平均転位密度, 変形抵抗, 温度, ひずみ速度の単位はそれぞれ  $[cm^{-2}]$ ,  $[kgf/mm^2]$ ,  $[K]$ ,  $[S^{-1}]$  である. 式 (3'), (8') 中の  $d$  は粒径であり, (20') 中の動的再結晶粒径も含め, 単位は  $[\mu m]$  である. 式 (20') 中の  $Z$  は Zener-Hollomon のパラメータであり, 次式により表される.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots (24)$$

ただし  $Q$  は活性化エネルギーであり, 以下の計算では 266  $[kJ/mol]$  とした.  $R$  はガス定数 ( $R=8.314 [J/mol K]$ ) である. 転位密度と変形抵抗の関係式 (1') 中の係数は, 同一著者の文献中の 2 種類の値の中間値<sup>6),9)</sup>を用いた.

3.2 等温・等ひずみ速度の場合の変形抵抗および動的再結晶率

ひずみ速度を  $10 [s^{-1}]$  に固定し, 加工温度を  $850^{\circ}C$  ( $1123K$ ),  $950^{\circ}C$  ( $1223K$ ),  $1050^{\circ}C$  ( $1323K$ ) と変化させた場合の均一圧縮加工についての解析結果を示す. 加熱温度は  $1100^{\circ}C$  であり, 初期結晶粒径は加熱温度をもとに簡易式<sup>10)</sup>により求めた.

図4は解析の結果得られた変形抵抗-ひずみ曲線である. 加工温度が高いほど変形抵抗は減少し, 小さいひずみ値で定常応力に達する傾向にあるが, これは, 加工温度の上昇にともない動的回復の影響が大きくなることと, 動的再結晶が促進されることに起因している. 図5は, 各 Sub-structure の体積率の変化をひずみに対してプロットしたものであり, 加工温度の上昇にともない動的再結晶が促進されること, さらに, 動的再結晶が繰り返し発生することにより変形抵抗が定常応力に達すること (たとえば加工温度  $1050^{\circ}C$  でひずみ 1.2 以上の場合), が示されている. こ

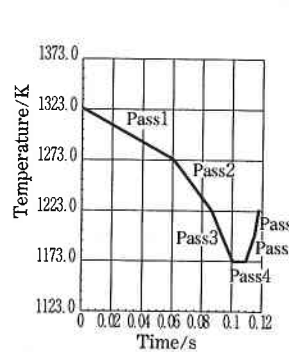


図6 加工温度の変化

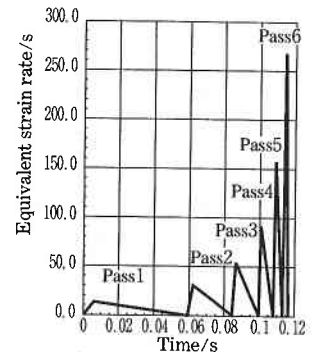


図7 ひずみ速度の変化

これらの結果は, 従来行われてきた実験的研究により得られた定性的傾向とよく対応しており, さらに, 図4に示した変形抵抗-ひずみ曲線は同一条件下での実験結果<sup>6)</sup>と定量的にもよく一致している.

3.3 加工温度・ひずみ速度が変化する場合の変形抵抗・内部組織の変化

加熱温度  $1100^{\circ}C$ , 初期板厚  $25.5mm$  より合計 6 パス (各パスの公称圧下率 30%, ひずみ 0.4) で最終板厚  $3.0mm$  まで圧下する場合を想定した加工温度・ひずみ速度分布を用い, 変形抵抗・内部組織の変化を解析した結果を以下に示す. いうまでもなく加工温度・ひずみ速度の変化は, 本来 FEM 等を用いて求めるべきであるが, ここでは図6に示す加工温度変化および図7に示すひずみ速度変化を仮定して解析を行っている. 図7に示すひずみ速度変化は, 1) 最終パス出口の板速度は  $10m/s$ , 2) 各パスのロールギャップ内での板速度は各パス入出口での板速度の平均,

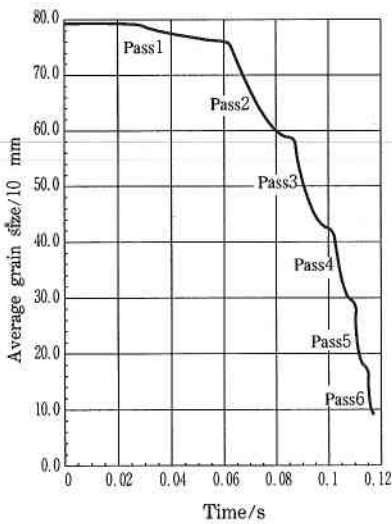


図 8 平均結晶粒径の変化 (温度, ひずみ速度が変化する場合)

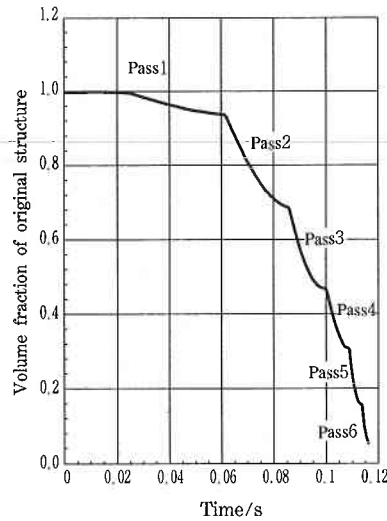


図 9 未結晶粒の体積率の変化 (温度, ひずみ速度が変化する場合)

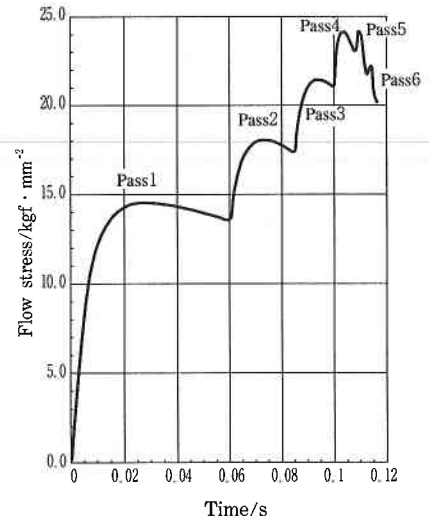


図 10 変形抵抗の変化 (温度, ひずみ速度が変化する場合)

と仮定し, さらに各パスロールギャップ内でのひずみ速度分布については, 上述の仮定により求められる各パスの平均ひずみ速度の2倍が接触弧の入口側10%の地点で発生するとして求めたものである. また, 本来パス間にて生じる静的再結晶・静的回復などの影響は無視している. 増分解析ステップ数は3888, 各ステップの増分時間は0.00003秒である.

図 8 に平均結晶粒径の変化を示す. 圧延の進行にともない結晶粒が微細化される様子がとらえられている. ただし本計算条件では最終パス終了後も完全に再結晶が終了しておらず, 図 9 に示されているように約6%の未結晶粒 (Original structure) が残存している. この主な原因は第 4 パスの圧延温度が低いことにあり, 本パスおよび前後パスの圧延温度を上げることにより, 完全な再結晶組織を得ることが可能であることが, 本モデルによる計算の結果明らかとなっている. 図 10 に変形抵抗の変化を示す. パス間での静的回復の影響を無視しているため正確な計算結果とは言えないが, 圧延の進行にともなう変形抵抗の変化がとらえられている様子がわかる.

#### 4. 結 言

熱間加工時の変形抵抗・内部組織変化を理論的に解明するための増分形解析モデルを, 転位密度を媒介とし, さらに Sub-structure の取り扱い方法に近似を加えつつ定式化した結果, ならびに若干の解析事例を示した. 本モデルでは Sub-structure を再結晶回数が同じである結晶粒の集合であると仮定しているが, 通常の熱間加工において発生する再結晶回数は多くとも十数回程度であるため, きわめて短時間かつ小記憶容量での数値解析が可能である. さらに

本モデルは転位密度を媒介として定式化されているため, パス間での残留ひずみ等の影響も残留転位密度を介して正確に考慮することができる.

本解説では加工硬化・動的回復および動的再結晶が生じる場合のみを対象としたが, 現在静的再結晶・静的回復さらに変態等が生じる場合についても同様の定式化を行っており, これらを併せることにより熱間加工時の一貫した材質予測が可能となろう. (1994年 8月16日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 田村: 鉄と鋼, 74-1(1988), 18.
- 2) Sellers, C.M.: Proc. Intn'l. Metal Working & Forming Process, (1970), 3.
- 3) Beynon, J.H. et al.: *ISIJ International*, 32-3(1992), 359.
- 4) Roberts, W. et al.: Proc. Intn'l. Conf. Techn. & Appl. HSLA Steel, (1983), 67.
- 5) Yada, H. et al.: *Trans. ISIJ*, 23(1983), 100.
- 6) 瀬沼ほか: 鉄と鋼, 70-10(1984), 1392.
- 7) 瀬沼ほか: 鉄と鋼, 70-15(1984), 2112.
- 8) 矢田ほか: 鉄と鋼, 70-15(1984), 2128.
- 9) 矢田ほか: 塑性と加工, 27-300(1986), 34.
- 10) 矢田: 第131・132回西山記念講座テキスト(1989), 149.
- 11) Karhausen, K. et al.: *Steel Research*, 63(1992), 247.
- 12) Karhausen, K. et al.: Proc. 13th Riso Intn'l. Symp. on Mater. Sci., (1992), 291.
- 13) Kopp, R. et al.: Proc. 4th ICTP, (1993), 1203.
- 14) Karhausen, K. et al.: Proc. 1st Intn'l. Conf. Modeling of Metal Rolling Process, (1993), 66.
- 15) 浜渦ほか: *CAMP-ISIJ*, 1(1988), 482.
- 16) 難波ほか: *CAMP-ISIJ*, 2(1989), 676.
- 17) Pietrzyk M. et al.: Proc. NUMIFORM'92, (1992), 749.
- 18) 日本金属学会編「転位論」, (1957), 143. 丸善.
- 19) 矢田: 文献10), 155.