

高温変形加工時の内部組織制御と予測

Microstructural Control and Analysis in Hot Forming Processes

柳 本 潤*

Jun YANAGIMOTO

変形加工による素形材プロセッシングにおいては、塑性変形を最適に制御することによる形状の創成と内部組織の創質が同時にはかれねばならない。本解説では、これらを同時に実現するための鍵を握る理論解析手法の現状と今後の課題について述べる。

1. 緒 言

変形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のと同時に内部組織の変化が生じる。特に高温変形加工においては、熱的活性化により被加工材の内部構造変化が促進されるため、塑性変形にともなう再結晶などを利用して内部組織を制御することが可能である。そのため、適正な加工温度のもとで塑性変形を最適に制御しつつ、形状の創成と内部組織の創質が同時に達成されることが高温変形加工の理想とされており、現在は必ずしも容易ではないこの形状創成—内部組織創質同時プロセッシング技術の開発が、除去加工・高分子加工などと同様変形加工の分野全般においても今後強く要請されている。

図1に示されている通り、変形加工における形状創成プロセッシング (Geometrical Processing) と内部組織創質プロセッシング (Microstructural processing) は塑性変形という共通なパラメータを介して相互に関連している。すなわ

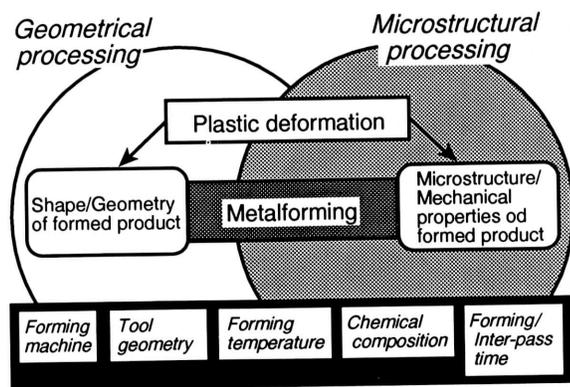


図1 形状創成—内部組織創質同時プロセッシング

*東京大学生産技術研究所 第2部

ち塑性変形は形状の創成と内部組織の創質の双方に重要な役割を果たしているが、見方を変えれば形状の創成と内部組織の創質を同時に満足な水準に保つことができる塑性変形を見出すことは容易ではない。このことが、変形加工による形状創成—内部組織創質同時プロセッシングを対象とした理論解析技術が強く要請されている所以である。本解説では、形状創成—内部組織創質同時プロセッシングを実現するために必要な理論解析技術について、現状と今後への期待を述べる。

2. 形状創成—内部組織創質同時プロセッシングを対象とした理論解析技術

図2に形状創成—内部組織創質同時プロセッシングを対象とした理論解析技術の枠組みを示す。図に示されている通り、これは1) 塑性変形・温度分布を対象とした解析技術、2) 金属材料の合金組成より均一塑性変形にともなう内部組織変化を求めるための解析技術、3) 均一変形にともなう内部組織変化予測式と塑性変形・温度分布より変形加工時の内部組織変化を求める解析技術、の3つの要素解析技術に分類される。以後これらの解析技術の現状について述べる。

2.1 塑性変形・温度分布を対象とした解析技術

塑性変形に関しては有限要素法、温度分布に関しては差分法もしくは有限要素法が広く用いられており、現在は変形—温度連成場の3次元解析に関連する研究が盛んに行われている¹⁾。高温変形加工の主たる対象である圧延、鍛造、押出し何れについても、変形—温度連成場の3次元解析の実用化は目前に迫っているといえることができる^{2)~4)}。図3に、圧延を対象とした変形—温度連成場の解析技術の一例を示す⁵⁾。

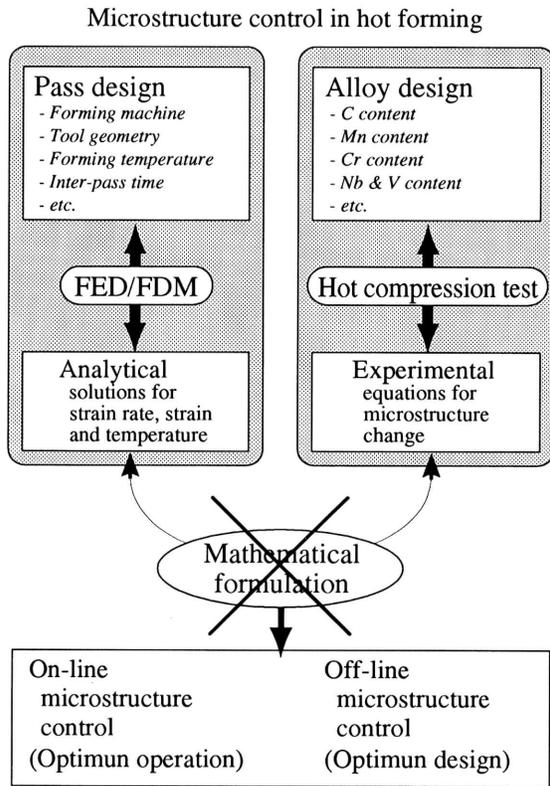


図2 形状創成-内部組織創製同時プロセッシングの理論解析技術

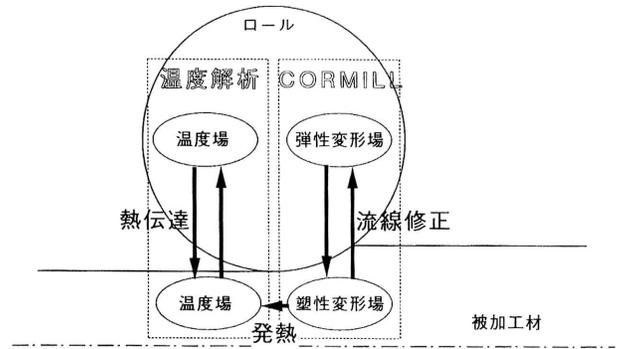


図3 圧延を対象とした変形-温度連成場の解析

2.2 金属材料の合金組成より均一塑性変形にともなう内部組織変化を求めるための解析技術

本解析技術は本来物理冶金学分野に属しており、金属材料の合金組成をもとに、均一塑性変形にともなう動的および静的再結晶の進行速度や加工硬化、静的・動的回復速度などの金属学的な特性が理論的に求められることが要請される。このような理論解析は現在殆ど不可能であるため、単軸圧縮試験の結果をもとに実験式化して利用することが広く行われている⁶⁾。例えば、表1に示す合金組成を有する50CrV4鋼および低炭素鋼の動的組織変化については、以下の式が実験的に求められている。

1) 降伏応力と転位密度との関係

50CrV4鋼：

$$\bar{\sigma} = 4.1488 \times 10^{-5} \dot{\epsilon}^{0.065} \exp\left(\frac{4390}{T}\right) \sqrt{\rho} \quad (1-1)$$

低炭素鋼： $\bar{\sigma} = 1.65 \times 10^{-3} \sqrt{\rho}$ (1-2)

2) 加工硬化係数

50CrV4鋼： $c = 0.90 \times 10^{11} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{d_0}}\right)$ (2-1)

低炭素鋼： $c = 0.85 \times 10^{11} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{d}}\right)$ (2-2)

3) 動的回復係数

50CrV4鋼： $b = 103.35 \dot{\epsilon}^{0.8} \exp\left(\frac{-3000}{T}\right)$ (3-1)

低炭素鋼： $b = 9850 \dot{\epsilon}^{0.685} \exp\left(\frac{-8000}{T}\right)$ (3-2)

4) 動的再結晶発生限界ひずみ

50CrV4鋼： $\epsilon_c = 1.559 \times 10^{-3} d_0^{0.5} Z^{0.087}$ (4-1)

低炭素鋼： $\epsilon_c = 4.76 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{8000}{T}\right)$ (4-2)

5) 動的再結晶速度

50CrV4鋼： $G = \frac{0.693}{\epsilon_{0.5}^p}$, $p = 2.56$,

$\epsilon_{0.5} = 0.9765 (4.883 \times 10^{-4} d_0^{0.5} Z^{0.148} - \epsilon_c)$ (5-1)

低炭素鋼： $G = \frac{0.693}{\epsilon_{0.5}^p}$, $p = 2$,

$\epsilon_{0.5} = 1.144 \times 10^{-3} d^{0.28} \dot{\epsilon}^{0.05} \exp\left(\frac{6420}{T}\right)$ (5-2)

表1 低炭素鋼および50CrV4鋼の合金組成

	C	N	P	S	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	V	O	Fe
50CrV4 steel	0.54	0.01	0.02	0.007	1.05	0.15	0.04	0.36	0.98	0.13	0.01	Bal.
Normal steel	0.05 ~0.4	-	-	-	-	-	-	<0.5	<1.0	-	-	Bal.

6) 動的再結晶粒径

$$50\text{CrV4鋼} : d_d = 619750Z^{-0.3315} \quad (6-1)$$

$$\text{低炭素鋼} : d_d = 22600Z^{-0.27} \quad (6-2)$$

7) 活性化エネルギー

$$50\text{CrV4鋼} : 349 [\text{kJ/mol}] \quad (7-1)$$

$$\text{低炭素鋼} : 266 [\text{kJ/mol}] \quad (7-2)$$

これらの式の単位は $[\text{cm}^{-2}]$, $[\text{MPa}]$, $[\text{K}]$, $[\text{s}^{-1}]$, $[\mu\text{m}]$ である。Z は Zener-Hollomon のパラメータであり、次式により表される。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (8)$$

低炭素鋼については上記の動的組織変化に加え静的組織変化に関する実験式も求められており⁶⁾、また制御圧延用材料 (HSLA 鋼, Nb 鋼など) の静的組織変化に関する実験式も幾つか求められている⁷⁾。しかしながら変形加工に供せられる金属材料は多種多様であって、現在静的もしくは動的内部組織変化に関する実験式が求められている材料はそのうちごく一部に過ぎない。

2.3 均一変形にともなう内部組織変化予測式と塑性変形・温度分布より変形加工時の内部組織変化を求める解析技術

前項にて述べた内部組織変化予測式はあくまでも均一変形を想定し、かつ個別の内部組織変化を対象として実験的に求められる。高温変形加工時に被加工材が受ける塑性変形は極めて不均一性が強くまた温度分布も不均一であるため、前項にて述べた内部組織変化予測式をもとにこの様な不均一な塑性変形・温度履歴に対応した内部組織変化を求めるための理論解析技術が提案されている^{8)~10)}。高温変形加工時の内部組織変化を対象として開発された増分形解析技術^{9), 10)}では、繰り返し動的再結晶や動的再結晶と静的再結晶が混在する組織についても容易に解析が可能であり、また増分形の定式化が採用されているため FEM, FDM などの塑性変形-温度連成解析技術との複合化が容易に行い得るとの特徴がある。図 4 は連続熱間タンデム圧延の降伏応力・平均結晶粒径の変化を、圧下率配分の異なる 2 種類のパススケジュールについて解析した例である¹⁰⁾。

3. 今後解決されるべき課題

前章にて述べた通り、幸いにして 1) 塑性変形・温度分布を対象とした解析技術、および 3) 均一変形にともなう内部組織変化予測式と塑性変形・温度分布より変形加工時の内部組織変化を求める解析技術、については問題が解決されつつある。ところが、2) 金属材料の合金組成より均一塑性変形にともなう内部組織変化を求めるための解析技術については、現在実験的なアプローチ以外に有効な手段が無いために、多種多様な金属材料を対象とした圧縮実験を繰り返し行い蓄積されたデータを実験式化する以外には方法が無い様に思える。この様な実験式の作成は 1 大学、1 企業にて行うには労力がかかりすぎるので、今後は複数の企業による共同研究として実施される必要があろう。

また前章にて述べた解析技術はあくまでも高温変形加工

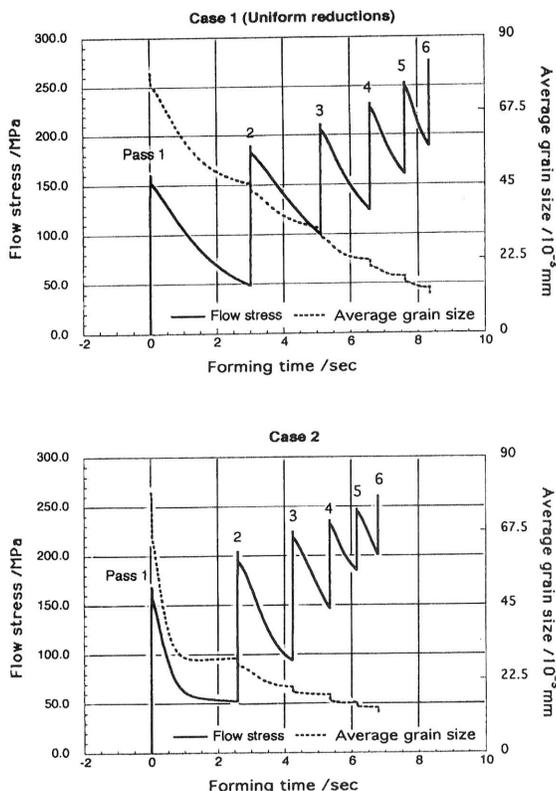


図 4 薄板熱間タンデム圧延時の降伏応力・平均結晶粒径の変化

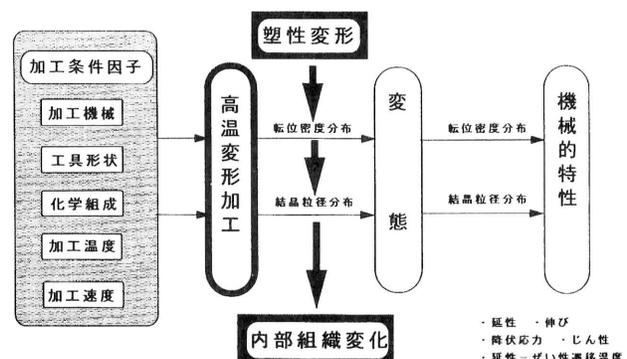


図 5 高温変形加工時および冷却時の内部組織変化

Mechanical properties-Microstructure relationship; Two examples

1. Strength (Yield stress) σ_y

$$\sigma_y = \sigma^I + \sigma^E + \sigma^{GB}$$

σ^I : Internal stress

σ^E : Effective stress

σ^{GB} : Strength of grain boundaries, $\sigma^{GB} \propto \frac{1}{\sqrt{d}}$

2. Ductility-Brittleness transition

temperature νTrs

$$\nu Trs \propto -\frac{1}{\sqrt{d}}$$

Microstructure control in hot forming

Grain refinement (Smaller d)

Better σ_y

Better νTrs

図6 内部組織と機械的特性との関係

時の内部組織変化を対象としていたが、変形加工により製造される素形材の使用環境は通常常温であるから、冷却時の内部組織変化、特に変態時の内部組織変化について理論化を進める必要がある(図5参照)。その際には、高温変形加工時の内部組織変化を定式化するのに用いたのと同じ増分形解析手法を利用することができよう。

さらに、内部組織と機械的特性との関係について検討を

進める必要がある。平均結晶粒径と延性-ぜい性遷移温度あるいは冷間降伏応力との間にはHall-Petchの関係式が成立することが知られており、これが結晶粒微細化の有効性を示すの1つの根拠となっている。しかしながら、図6中に示された式の具体的な係数の値などは各金属材料ごとにことなり、さらにこれらは高温変形加工時・冷却時に材料が受けた履歴にも影響されるものと考えられる。これらを明らかにするための実験的研究が、今後根気よく続けられていく必要がある。

4. 結 言

高温変形加工時の内部組織変化を予測するための理論解析技術の現状と今後への課題を述べた。変形加工における形状創成-内部組織創質同時プロセッシング技術の開発の成否は、いかに信頼性の高い理論解析技術が開発されるのかにかかっている。旧来の加工熱処理の分野より脱出した変形加工における形状創成-内部組織創質同時プロセッシング技術の開発が今後ますます盛んになることを期待している。

(1996年1月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 小森ほか：機論 A, **59**-586 (1993), 2993.
- 2) 柳本ほか：塑性と加工, **36**-414 (1995), 713.
- 3) 森ほか：FEM シミュレーションシステム分科会資料集, **11** (1995), 44.
- 4) 木内ほか：46回塑加連講論 (1995), 287.
- 5) 木内ほか：平7春塑加講論 (1995), 257.
- 6) 矢田ほか：塑性と加工, **27**-300 (1986), 34.
- 7) Beynon, J. H. et al.: *ISIJ International*, **32**-3 (1992), 359.
- 8) Karhausen, K. et al.: *Steel Research*, **63** (1992), 6.
- 9) 柳本ほか：平7春塑加講論 (1995), 325.
- 10) 柳本：46回塑加連講論 (1995), 303.