

非調質鋼の熱間鍛造における材質予測

石川孝司*

1. はじめに

TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 技術に代表されるように、熱間圧延においては材質制御技術が積極的に導入され、優れた延性を持った高強度鋼板が製造されており、最近では超微細粒組織 (スーパーメタル) の製造技術に関するプロジェクトも進行している。

鍛造加工の分野ではニアネットシェイプさらにネットシェイプへと高精度鍛造品を効率よく製造できるような技術、環境を構築すべく研究が進められている。これには、計算機や有限要素法をはじめとした解析技術の進歩の貢献が大きく、2次元形状部品に対しては材料の塑性変形と熱との連成解析、さらに工具の弾性変形も取り込んだ解析が可能な状況にある。しかし、最近では形状・寸法ばかりでなく低コストで優れた材質の部品製造の要求が高まっており、いわゆるネットシェイプ+ネットプロパティ成形をめざす時代になってきたといえる。コスト、リサイクルの面からも合金成分を変えることなく材質を造り分ける技術に対する期待は大きい。

塑性加工後の材質・性質の予測手法は、熱間圧延・制御圧延の分野で発展してきた¹⁾²⁾。ここではほとんどのモデルがSellers³⁾、矢田ら⁴⁾の研究をもとにしたものであり、結晶粒径などの組織をまず予測し、それをもとに機械的性質を求めるものである。圧延は、変形が定常で単純化できるので、ひずみ、ひずみ速度、温度等を材料内で一様と仮定して予測式は導かれているが、鍛造の場合には変形が非定常でひずみ等が大きく分布するので、取り扱いが単純ではない。しかし、前述のように熱との連成有限要素解析が実用段階に入りつつある現在では、鍛造加工における材質予測も可能になりつつある。そして、材料流動や型への負荷だけを考えるのではなく、加工後の組織、機械的性質もねらいをつけた新たな鍛造の工程設計、プロセス設計手法が完成し、部品全体が均一な、さらに進化して部分的に特性の異なる鍛造品ができるものと思われる (図1)。ここでは、鍛造加工における材質予測技術および組織制御技術の現状と課題について述べる。

2. 材質予測と組織制御の概要

図2は材質予測システムの一例である^{5), 6)}。塑性変形 (ひずみ) と温度の履歴が再結晶 (動的再結晶, 静的再結晶, 粒成長), 変態, 回復, 析出などの組織

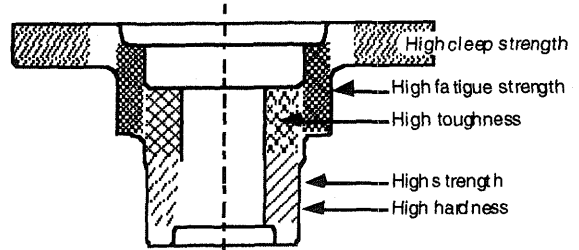


図1 部分的に材質を制御した部品の概念図

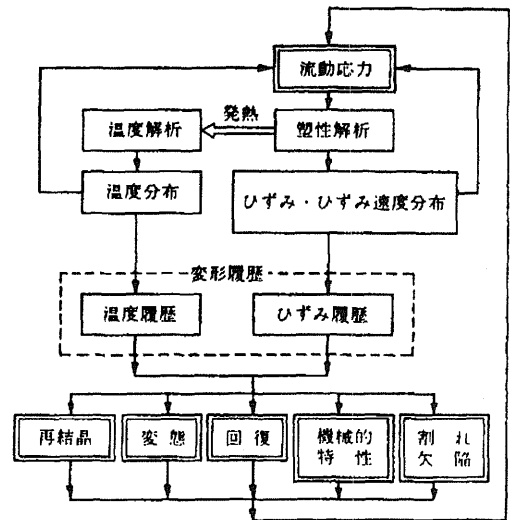


図2 材質・機械的性質予測システム⁵⁾

変化に影響し、結果としてそれが機械的性質に影響する。また、延性が不足する場所では割れなどの欠陥を引き起こすことにもなる。この図からわかるように塑性変形の解析に必要な変形抵抗 (流動応力) は、予測結果の一つとして決められるものであるから、全体が一つの系となる。現在までに鍛造の分野でこの系を統合モデルとしてまともに解析した例は報告されていないが、いろいろな近似や手法を用いて予測しようという努力がなされている。また、材質予測システムをベースとして、非調質鋼の制御鍛造に関する研究も進められている⁷⁾ (後述)。

3. 材質予測の現状

3.1 熱間鍛造における材質予測

Sellers, 矢田らの熱間圧延で提案された基礎式を

ベースとした方法3), 4) について述べる。

図3に示す熱間加工中に生ずる様々な冶金現象を熱間加工シミュレータによる実験結果をもとに定式化し、熱間圧延の材質予測のために提案された予測手法を熱間鍛造に適用しようとするものである。そのまま非定常、不均一変形の鍛造に適用できるかどうかは実験との対応をとりながら確認していく必要がある。

(1) 動的再結晶

Sellers, 矢田らは鉄鋼材料に対して、変形中に材料内部のひずみ(ϵ)がある限界ひずみ(ϵ_c)を越えたとき動的再結晶が生じ、その限界ひずみは次式のようにピークひずみ(ϵ_p)の0.8倍であるとした。

$$\epsilon_p = 4.9 \cdot 10^{-4} \cdot d_0^{0.5} \cdot Z^f \quad (1)$$

$$\epsilon_c = 0.8 \cdot \epsilon_p \quad (2)$$

ここで、 f は0.15から0.175までのC量によって決まる値であり、 d_0 は初期粒径、 Z はZener-Hollomonパラメータである。また、再結晶後の粒径は次式で決定した。

$$d_{dyn} = 22600 \cdot Z^{-0.27} \quad (3)$$

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

そして、動的再結晶の割合を次式で表現した。

$$X_{dyn} = 1 - \exp\left[-0.693 \cdot \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}\right)^2\right] \quad (4)$$

ここで、

$$\epsilon_{0.5} = 1.144 \cdot 10^{-3} \cdot d_0^{0.28} \cdot \dot{\epsilon}^{0.05} \cdot \exp\left(\frac{6420}{T}\right) \quad (5)$$

(2) 静的再結晶

静的再結晶は変形で導入された転位のほとんどが同時に消滅するプロセスであり、多くのモデルで次式のようなAvrami式が採用されている。すなわち、矢田らの式を例にとると再結晶率は

$$X_{st} = 1 - \exp\left[-0.693 \cdot \left(\frac{t - t_0}{t_{0.5}}\right)^{n_r}\right] \quad (6)$$

ここで、

$$t_{0.5} = 2.2 \cdot 10^{-12} \cdot S_v^{0.5} \cdot \dot{\epsilon}^{0.2} \cdot \epsilon^{-2} \cdot \exp(30000/T) \quad (7)$$

$$S_v = \frac{24}{\pi d_0} (0.491e^{\epsilon} + 0.155e^{-\epsilon} + 0.1433e^{-3\epsilon}) \quad (8)$$

であり、 $n_r=2$ とすればよいがモデルによっては初期粒径、ひずみ、温度の関数とするものもある。このときの結晶粒径は、

$$d_{st} = 5 / (S_v \cdot \epsilon)^{0.6} \quad (9)$$

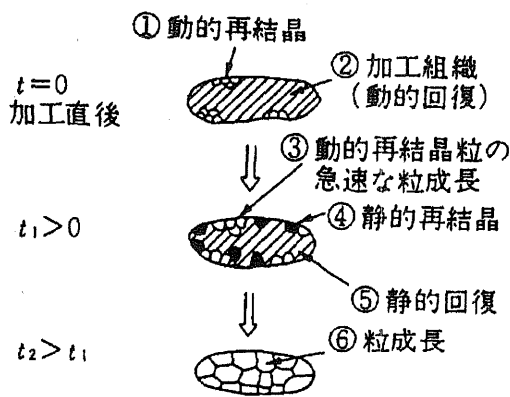


図3 熱間加工における組織変化4)

(3) 粒成長

オーステナイト粒の再結晶により、変形によって導入された内部エネルギーのほとんどを放出するが、組織はまだ準安定状態であるため、高温状態では残留エネルギーにより粒成長する。

$$d^2 = d_{st}^2 + 1.44 \cdot 10^{12} \cdot t \cdot \exp(-Q/RT) \quad (10)$$

(4) 変態

一般に鋼の変態は炭素の拡散に律速される核生成・成長過程と考えられる。変態速度は、変態率を X とすると、核生成速度 I と成長速度 G が時間によらない場合、次式で書ける4)。

$$\frac{dx}{dt} = 4.046(k_1 S)^{\frac{1}{4}} \cdot G^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\ln \frac{1}{1-X}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot (1-X) \quad (11)$$

ここで S は単位体積当たりの核生成サイト、 k_1 は連続冷却実験により決定される定数である。 I と G を温度と成分の関数として表し、任意の冷却経路に対して変態量を計算する。

また、非調質鋼のように析出強化を利用する材料に対しては、析出現象の考慮も必要である。

(5) 計算手順

変形抵抗は別に求めた式を使って、有限要素法により温度、ひずみ、ひずみ速度を計算する。ひずみが限界ひずみを越えた領域には式(3)~(5)を適用して動的再結晶の割合、粒径を計算する。越えない領域は式(6)~(9)により静的再結晶割合、粒径を算出する。この計算は微小時間ごとに行い、残留ひずみは次式で仮定し、再結晶が完了するまで繰り返す。

$$\epsilon_{t+1} = \epsilon(1 + X_{st}) \quad (12)$$

その後、温度と焼入れまでの時間をもとに式(10)より最終的な粒径を計算する。

これら組織と粒径をもとに硬さ、引張強度、変形抵

抗等の機械的性質が求められる。組織から機械的性質の予測はほとんどが回帰式を用いている6)。

柳本らは前述の基礎式を増分形解析手法によりFEMと連成させて解析する手法を開発し8), 熱間圧延や熱間鍛造の材質予測に適用し, 実測との良い一致を得ている。

以上より, 広い範囲の鋼種や加工条件で確認する必要あるが, 熱間圧延の分野で提案された手法が鍛造でも使用できるようである。

3.2 制御鍛造7)

最近自動車部品に多用されている非調質鋼は, 加工後に焼入れ, 焼戻し等の熱処理を行う調質鋼に比べて強度や靱性が劣ることが以前より指摘されている。この問題に対して非調質鋼に加工熱処理9)~14)を適用することによりフェライト・パーライト型非調質鋼(以降F+P型非調質鋼と呼ぶ)は調質鋼なみ, またはそれ以上の特性が得られることが従来の研究により確認されている。著者らのグループは, 鍛造と加工熱処理プロセスを組み合わせた制御鍛造について研究を行い非調質鋼の強靱化を試みた。

制御鍛造とは加工熱処理プロセスの一つであり, これによって機械的性質(引張強度, 降伏強度, 伸び, 絞り, 靱性, 延性)を向上させるものである。制御鍛造の特徴は, 鍛造温度と冷却速度をコントロールすることで(F+P)組織を微細化し機械的性質を向上させる点にある。その概略図を図4に示す。Ar3点以上, 再結晶温度前後の温度域で鍛造を行いその後, 制御冷却して(F+P)組織とする。

(F+P)組織を微細化するためには変態前のオーステナイト粒を微細化すること, および, 転位密度の高い加工硬化オーステナイトから(F+P)変態させること11), 冷却速度を速めること(過冷度を高めること)の3点が最も有効な手法であると考えられる。この間, 組織は鍛造によって微細化された γ 粒界および導入された転位が変態時に核生成サイトとして働き微細なフェライトが生成する。制御鍛造は, これらの現象を利用することによって実現される。簡単な制御鍛造の結晶粒微細化メカニズムを通常の熱間鍛造と比較して図5に示す。

非調質鋼に対する材質予測モデルは, 基本的には3.1節で紹介した予測式を参考にして, 均一圧縮試験により各種パラメータを決定して求め, 基本式にないものは新たなモデルを作成した。それらの予測式をFEM(MARC)に組みこんだ材質予測システムを作成し(図6), 実際の熱間鍛造によりその精度を確認した。図7にその鍛造工程を示した。図8はオーステナイト粒径の予測結果であり, 図9に予測結果と実測結果との比較を示す。ひずみの微小領域(C点)以外, 予測結果は実測値とよく一致している。

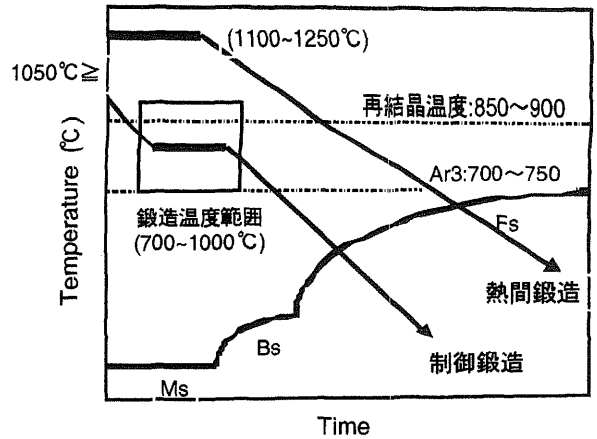


図4 制御鍛造の熱履歴

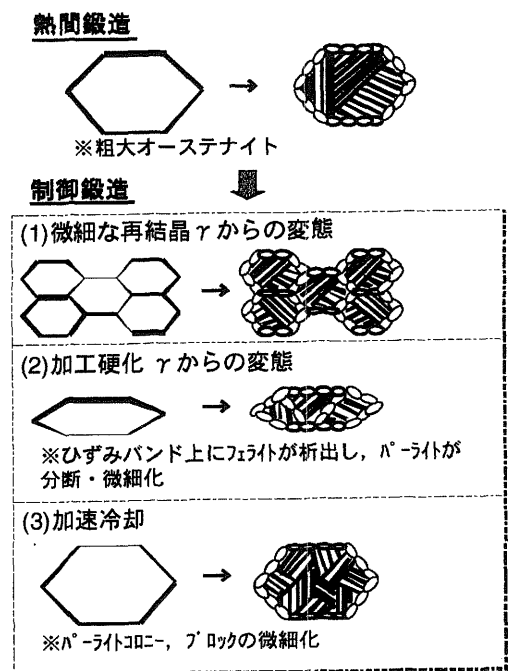


図5 フェライト・パーライト組織の微細化

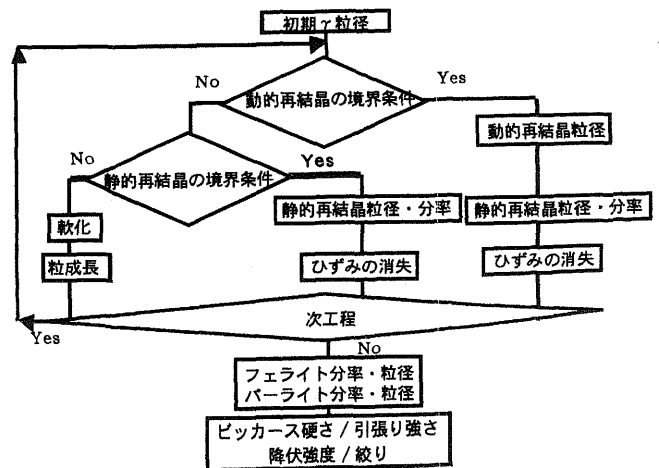


図6 計算のフロー

4. まとめ

材質予測についての考え方を断片的に述べた。それぞれのモデルは適用範囲に制限があり、一般的な統一モデルにするにはまだ努力が必要である。材料面の予測手法の確立が遅れているのは、塑性変形や温度の解析に比べ、冶金現象は影響因子が非常に多いこと、しかも影響の仕方が複雑でなかなか定式化しにくいことなどが主な原因である。ただし、変形が定常で均一変形と仮定できる熱間圧延・制御圧延の分野では研究が進んでおり成果も得られている。今後、ソフトを含めた数値解析環境が急速に進歩していることから、鍛造の分野でも加工時の製品の形状・材料流動・応力分布だけでなく、加工後の機械的性質や組織も設計に組み入れた鍛造統合設計システムの開発が進むものと思われる。それには、加工屋と材料屋が今以上に緊密に情報交換して討議を積み重ねなければならないと考える。

参考文献

- 1) Special Issue : ISIJ Int., 32-3(1992).
- 2) 変形特性の予測と制御部会報告書, (1994), 日本鉄鋼協会.
- 3) C. M. Sellars & J. A. Whitenman : Met. Sci., March-April (1979), 187.
- 4) 矢田浩: 塑性と加工, 28-316 (1987), 413.
- 5) 吉野雅彦, 白樫高洋: 塑性と加工, 33-382 (1992), 1285.
- 6) 品川一成: 塑性と加工, 35-405 (1994), 1169.
- 7) 与語康宏, 石川孝司, 吉田広明: 材料とプロセス (2001)
- 8) J. Yanagimoto, K. Karhausen, A. J. Brand, R. Kopp, Trans. ASME, J. of Manu. Sci. and Eng., 120-2(1998), 316.
- 9) 田村今男: 鉄と鋼, No.1 (1988), 18.
- 10) 牧正志: 鉄と鋼, 81-11 (1995), N547.
- 11) 大内千秋: 塑性と加工, 40-467 (1999), 7.
- 12) 吉田広明・五十川幸宏・石川孝司・大林一也: 平成12年塑加春講論, (2000), 173.
- 13) 吉田広明・五十川幸宏・石川孝司: 51回塑加連講論, (2000), 163.
- 14) 矢田浩: 塑性と加工, 25-286 (1984), 970.

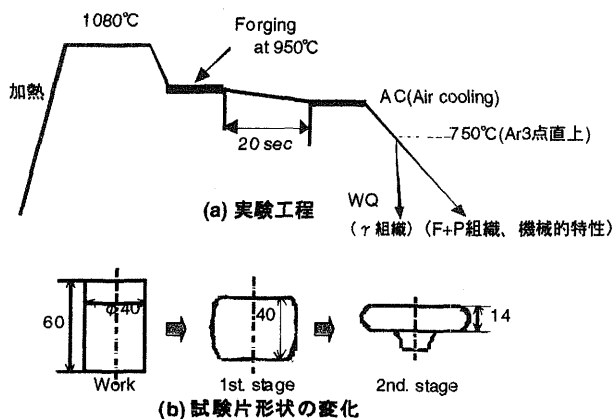


図7 制御鍛造工程

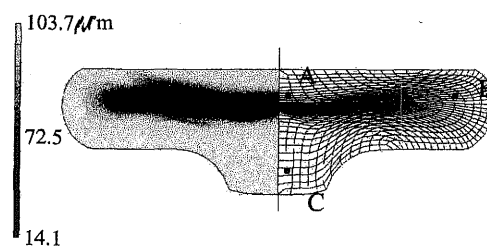
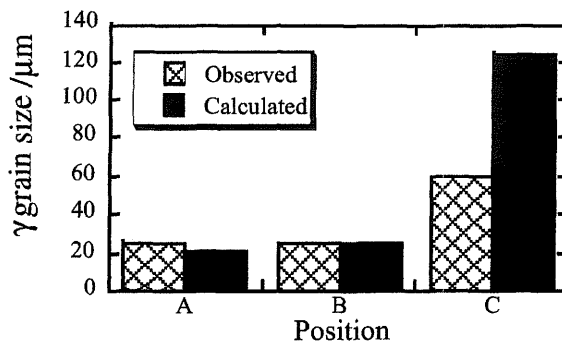
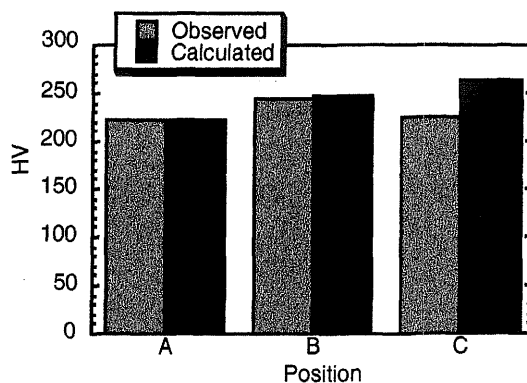


図8 オーステナイト粒径の予測結果と観測点



(a) オーステナイト粒径



(b) 硬さ(HV)

図9 実測結果との比較