

フレキシブル組織制御を目的とした熱間変形加工

Hot forming technology with flexible control of microstructure

柳 本 潤

Jun YANAGIMOTO

熱間変形加工技術の開発や研究の現場では、材料工学と機械工学の融合の必要性が旧来より指摘されてきたが、近年特にこの重要性が強く認識されるに至っている。本稿では、材料の機械的特性に代表される機能を自在に制御することを目的とした熱間変形加工について、関連した課題を取り上げ解説する。

1. はじめに

変形加工には、「形状の創成」と「組織の創出」という二つの課題がある。これらの課題を同時に解決する、あるいは同時に最適化する研究や技術が、変形加工研究者が目的とし、変形加工が必要とする開発の本流と見て差し支えない。このことが、変形加工を材料工学と機械工学の境界領域に位置する技術分野・学問分野としてきた要因であり、変形加工に関連する技術・研究を困難としてきた要因でもあった。

長らくの間、塑性変形誘起による組織生成について、主に材料工学の立場から多くの研究が行われており、また機械工学的な立場においても、塑性変形と材料組織の同時制御が重要な課題であると認識されている。ごくおおまかに言うならば、前者は「シーズ探求」を核とした研究が主体であり、後者は「生産加工・製造としての具現化」が研究の主体であるといった違いはあるものの、両者の目的とするところは同一、すなわち、材料工学と機械工学の融合による素材・製品製造技術の革新、別な言葉で言えば、「形状の創成」と「組織の創出」の一元化による革新的な素材・製品製造技術の開発、であると考えて差し支えない。本稿にて取り上げる、熱間変形加工によるフレキシブル組織制御は、まさに材料工学と機械工学の融合なくしては実現され得ない課題である。

2. フレキシブル組織制御と熱間変形加工

現在、素形材の材料組織の創成と制御は合金成分設計と熱処理（場合によっては加工熱処理）との組み合わせによ

って行われている。熱処理条件は合金成分と密接に関係しているため、まずは合金成分が材料組織を決定する主たる要因である。合金成分を制御し得る最小ロットは精錬時のロットで決まるが、現在例えば鉄鋼材料の精錬に利用されている転炉は約200トンの容量がある。従って材料組織の制御が可能な単位数量（または最小数量）は、200トンということとなり、フレキシブル組織制御を実現するためには、まずこの壁を打破しなければならない。200トンより小さな単位毎に熱処理条件を可変し、様々な特性を持つ素材を造り分けることも不可能ではないが、現在は、熱処理工程の短縮ないしは省略が求められているのも事実である。熱間加工条件の変更によって自在に材料組織を制御する事ができるということは、合金成分単位を基本とした200トン単位での組織制御を、加工ロット単位（例えば熱間圧延であれば10トン）とすることができるとに繋がる。従って、フレキシブル組織制御を熱間変形加工により実現することは、当然熱間変形加工そのものを抜本的な変革を促すのみならず、素形材製造法そのもの、加えて素形材を利用する2次加工にも大きく影響することになる。

熱間変形加工において操作可能な加工条件には、塑性変形と温度がある。フレキシブル組織制御を実現するためには、両者について多岐に亘る検討が必要ではあるが、塑性変形については塑性変形誘起による組織変化の積極的な利用が、温度についてはその制御性（時定数と精度）の改良が、最低でも必要となってくる。加えて両者と材料組織変化との相互作用についての理論体系の整備も、必要であろう。

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

3. 強加工による組織制御

強加工による組織微細化，サブミクロン結晶粒の実現について盛んに検討が進められている。一方，圧延加工による「強加工」の実現については古くから検討が行われており，例えば押し込み圧延¹⁾といった1パス圧下率80%以上の圧延方法が既に提案されている。強圧下圧延と変態点直上への温度制御との組み合わせによる組織調整は，微細組織生成・制御には有効であるが，より強加工が可能であるが故に組織制御幅が広く取れ，フレキシブル組織制御に適した変形加工として，熱間押し出しがある。

熱間押し出し-熱間圧延の直結化によって実現できる変形加工の一案を Fig. 1 に示す。熱間押し出し-制御水冷-熱間圧延がこの加工法 (Direct Extrusion - Controlled Cooling and Rolling On Demand: DECCROD) を構成する3要素であり，熱間押し出し-制御水冷部分は主に材料内部組織の創成を，熱間圧延は主に最終製品寸法への創り込みを分担する。溶融ガラス潤滑による熱間押し出しは現在ステンレス・シームレス鋼管の製造²⁾に利用されており，圧延と比較して1パスでの加工度をより大きく取ることができる特徴がある。押し出しにらびに圧延により生ずる塑性ひずみは，それぞれ断ひずみが存在しない理想的な条件について，以下の式により与えられる。

$$\epsilon\text{-Rolling} \approx 2 \left\| \ln(1-r) \right\| / \sqrt{3} \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon\text{-Extrusion} \approx \ln \rho \dots\dots\dots (2)$$

ただし r は圧下率， ρ は押し出し比である。Fig. 2 に押し出し比と圧下率との関係を示す。実験室レベルでも比較的容易に実現できる押し出し比 $\rho = 9$ の条件は圧下率 $r = 0.085$ (8.5%)，鋼管の押し出しに利用されている押し出し比 $\rho = 50$ の条件は圧下率で $r = 0.965$ (96.5%) に相当している。Fig. 3 は押し出し製品の外観，Fig. 4 は 1200°C での押し出し後，大気中放冷した試験片の F/P 組織写真である。圧延より遙かに大きい加工を与えることができる熱間押し出しでは，押し出し比や押し出し直後の制御冷却条件を変化させることによる内部組織の制御範囲も当然広い。また，後続する圧延加工にて，形状の修正・最終創り込みや平坦度修正 (板製品の場合)，あるいは2相域圧延を行うことにより，単なる熱間押し出し製品に比較して遙かに高い精度での形状の創り込み，付加的な材質の創り込みができるかもしれない。

DECCROD プロセスの特性は今後検討が進められるべきであり，と同時に DECCROD プロセスには数多くの基礎研究課題が含まれている。既に述べた，a) 熱間押し出し (1

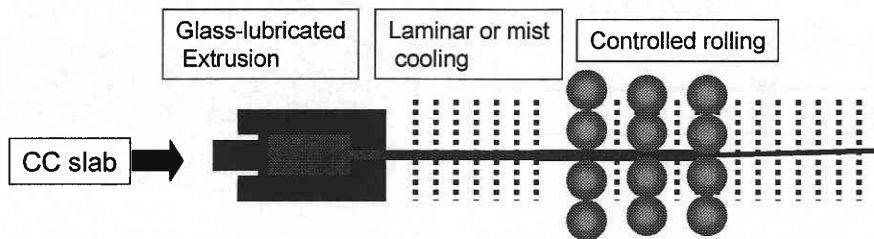


Fig. 1 Schematic illustration of DECCROD (Direct Extrusion - Controlled Cooling and Rolling On Demand) process.

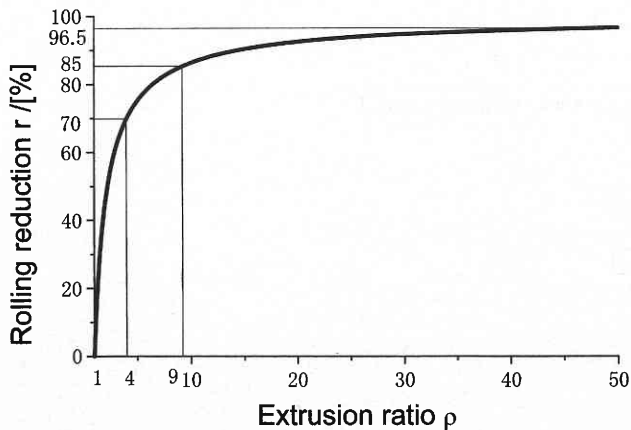


Fig. 2 Relationship between extrusion ratio and rolling reduction.

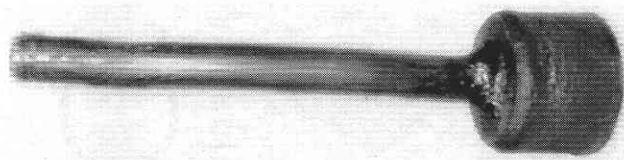


Fig. 3 Extruded product.

パス強加工)による組織制御幅や、b) 強加工オーステナイト粒の制御冷却による組織変化、以外にも、例えば、c) 熱間押しによる鑄造組織(CC材)の改質、d) 押し半製品の圧延による形状修正、などが今後検討されなければならない。

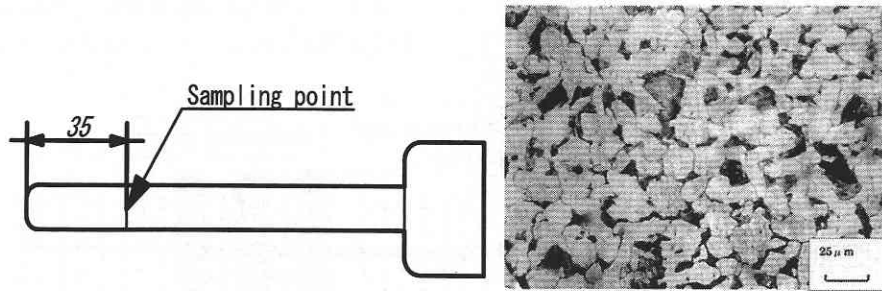
加えて、温度の精密な制御を可能とするための加熱方式や、変形加工によるフレキシブル組織制御の理論化も重要な課題である。これらについては章を改めてやや詳しく述べる。

4. 精密温度制御のための通電加熱

現在、素材の昇温は主に雰囲気加熱により間接的に行われる。雰囲気加熱の利害得失については改めて詳しく論ずるまでも無いが、ことフレキシブル組織制御を考慮に入れた上での、温度の制御精度、ならびに設備配置に関して言えば必ずしも十分とは言えない。現在の熱間変形加工ラインには、雰囲気加熱炉からの抽出以後素材を昇温する設備は無いに等しい。変形加工によるフレキシブル組織制御を効果的に行うためには、強加工の付与と同時に素材の温度

履歴の精密制御が必要であることが容易に想像できるが、そのためにはインライン加熱による素材の昇温を欠かすことが出来ない。

インライン加熱方式としては、誘導加熱と通電加熱とがあるが、加熱温度の均一性の観点からは通電加熱方式が優れている。通電加熱においては抵抗値に温度依存性があるため、自己温度補償機能により温度の均一性が自動的に補償される³⁾。また、電流密度を制御することにより、昇温速度の自在な制御も可能である。Fig. 5は、通電加熱圧延の概要である。仮にロールへの給電が可能でありロールの電気抵抗を素材の電気抵抗より十分低くすることができるならば、圧延と温度制御を同時に実施することが可能である。従って、直接通電加熱圧延を、Fig. 1の熱間圧延ラインに適用することは、DECCRODプロセスの温度制御性を大いに向上させることになる。無論、回転しているロールへの給電方式、素材とロール・導線の電気抵抗差としてのどの程度が必要か、など解決されるべき基礎研究課題も多い。



Sampling point. Ferrite-Pearlite structure.
Fig. 4 Ferrite-Pearlite structure of extruded product after air cooling.

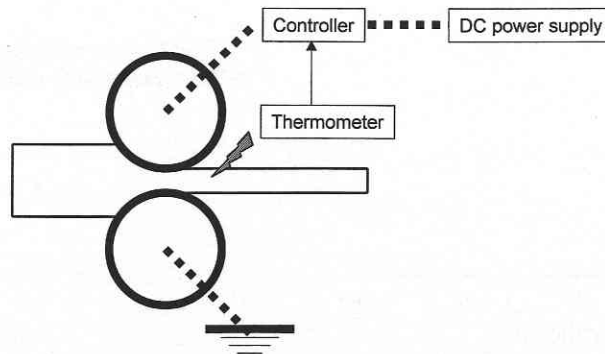


Fig. 5 Hot rolling with in-line electric resistance heating.

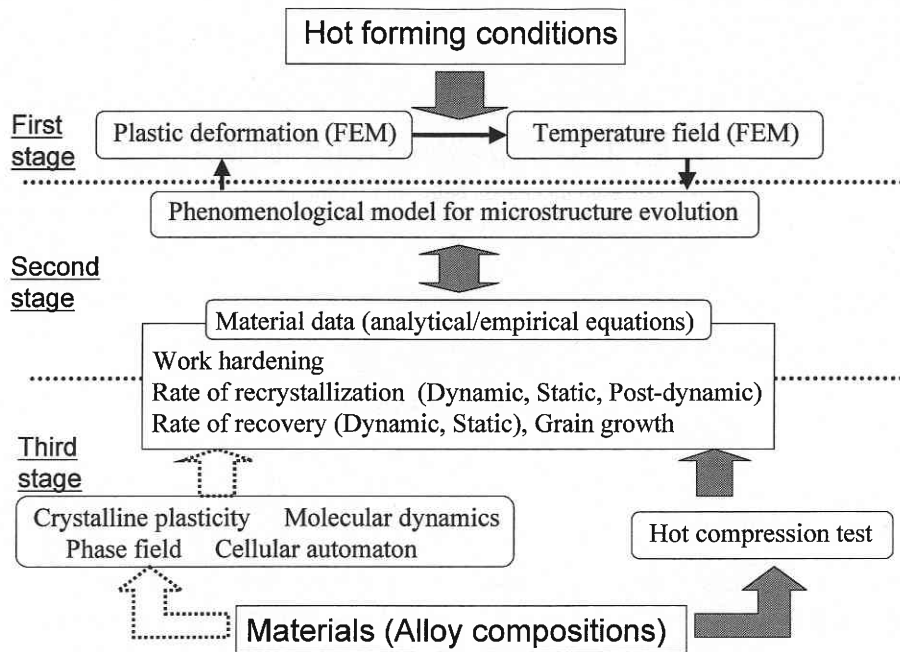


Fig. 6 FE-based analysis for the evolution of microstructure.

5. フレキシブル組織制御のための熱間変形加工理論

フレキシブル組織制御のための変形加工理論には、1) 素材の塑性変形、2) 素材に発生する温度分布、3) 素材内部組織変化、を同時に解明することが求められる。現在可能となりつつある FEM を核とした材料内部組織解析⁴⁾が改良され、この用途に用いられることになろう。

Fig. 6 は、FEM を核とした材料内部組織解析についてまとめたものである。既に指摘されていることではあるが、これを実用化する上での最大の障害は、素材の高温再結晶挙動・回復挙動などを定量的に記述した、「材料機能発現機構」の不十分さである。と同時に、フレキシブル組織制御の実現には、鑄造組織の改質、もしくは鑄造にまで遡った内部組織制御が必要かもしれない。とすれば、凝固-加工-熱処理の一貫メタラジーが必要となってくる。

6. ま と め

フレキシブル組織制御を目的とした熱間変形加工について、基本構想を述べると共に今後検討されるべきテーマを抽出した。フレキシブルな組織制御の変形加工による実現の必要性に異論を挟む余地は少ないが、実現するために取るべき手段、すなわち変形加工法はいくつかの候補が上げられると思う。今後の研究を期待したい。

(2000年7月3日受理)

参 考 文 献

- 1) 特公昭 53-24172.
- 2) 古堅ほか：鉄と鋼，85-11 (1999)，801.
- 3) 柳本ほか：平 12 春塑加講論 (2000)，229.
- 4) 柳本：ふえらむ，5-8 (2000)，561.