

研究解説

変形加工による組織制御とデジタル・ローリング・プラットフォーム

Microstructure Control in Metal Forming and Digital Rolling Platform

柳本 潤*
Jun YANAGIMOTO

1. はじめに

金属素材・金属素形材の製造には、満足すべき3つの主要な機能がある。第1は寸法形状、第2は表面性状、第3は製品の機械的特性である。これらを同時に適正な水準に保ちつつ素材・素形材を製造することが従来より求められ続けており、今後この要求はますます強まることが容易に想像できる。また、素材・素形材の製造を支える学問・科学技術もこの動きに対応せざるを得ない状況が強くなりつつある。

変形加工は、金属素材・金属素形材の製造において最下流に位置している。ここにおいても当然、先に述べた「形状」「表面」「機械的特性」を満足させつつ、社会に素材を供給することが求められ続けてきており、このことが、技術開発ならびに学問・科学の発展を駆動する要因となってきた。厚板圧延の制御圧延技術は、この典型例である。低温脆性を維持するための結晶構造制御・結晶粒微細化と、これを実現するための圧延技術の開発が1970年代以後盛んに行われ、現在はTMCP (Thermo Mechanical Control Process) 技術として厚板の製造ほかに利用されている¹⁾。TMCP技術は、厚板圧延機、厚板圧延における形状制御、冷却制御、など数多くの圧延技術開発と、冶金技術との融合によって生み出された。ここでいう冶金技術とは、変形加工に伴う結晶組織の変化を金属学的に明らかにしようとするを目的としており、加工熱処理学として興味ある学問分野を構成している²⁾。

変形加工による内部組織制御を支える学問領域は、加工熱処理学の一部と考えることはできるものの、その対象とする範囲はより広く、金属材料学にはじまりこれを製造プロセスとして実現するための機械技術とも深い関わりがある。形状・表面と内部組織・機械的特性を同時に創りこむためには、金属材料学と機械工学・生産工学との密接な連

携が不可欠である。しかし、異なる学問領域・技術分野を対象とする境界領域の探査・追及には、困難も多い。たとえば、技術開発の核となる理論について言えば、金属材料学に属する物理冶金学と、機械工学に属する連続体力学とを融合した理論体系が必要となるが、本来は両者の基盤とする理論や考え方はまったく異なっていることに注意しなければならない。

「形状」「表面」「機械的特性」を同時に満足する「高次機能加工学」を対象とする理論は、近年めざましい発展を遂げている。素材・素形材加工においてこの動きを駆動している要因(ニーズ)は、先に述べた、現実の製造技術に課せられている要求である。この理論化の可能性を高めている要因(シーズ)は、まず第1に加工プロセス理論の進展、第2に物理冶金学理論の進展、第3にこれらを連結するマルチスケールモデリングの進展であろう。本稿では、素材・素形材の高次機能加工を目的とした、変形加工組織制御を理論に焦点をあてつつ解説する。さらに、多様な金属材料について組織制御理論を適用する上での問題点を指摘し、解決するための手段である「デジタル・ローリング・プラットフォーム」を提案する。

2. 変形加工組織制御のための理論

変形加工中の金属素材には、多様な冶金現象が発生しており、結晶粒径に代表される内部組織が変化する。金属材料の強度、応力-ひずみ関係、一様伸び、局部伸び、脆性、疲労強度などの機械的特性は、金属材料の内部組織に依存した、いわゆる構造敏感性の特性である。社会に供給させる素材のすべては、使用状況に依存して定まる特性を有していなければならない。金属組織はこの特性を満たすように創りこまれていなければならない。金属材料の内部組織を規定する要因は、第1に合金組成(成分)、第2に加工プロセス条件(変形量と温度)である。したがって、成分設計と加工プロセス設計とを両立させねばならず、このことが、組織制御理論への要求を高めている。

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

Figure 1 は、再結晶温度以上の熱間加工において金属材料に発生する、内部組織変化を鉄系材料の念頭に置きつつ模式的に示している。変形加工中には、加工硬化、動的回復、動的再結晶が、加工パス間では静的回復、静的再結晶が発生しており、さらに加工中、加工パス間において、合金元素炭化物・窒化物の析出、炭素の析出、粒成長が発生している。さらに冷却の過程に経る相変態では、フェライト析出（フェライト核生成、フェライト粒成長）、さらにパーライト、ベイナイトが生成し、以上の拡散変態に加え無拡散変態（マルテンサイト変態）が起こる。以上の冶金現象の結果として形成される内部組織を適正に保つことが組織制御の要諦であるが、これには加工プロセス条件と合金成分が深く関わっている。熱間加工においては拡散速度が速く、原子拡散に起因する以上の冶金現象が内部組織の形成状況を支配しているが、室温近くの加工（冷間加工）ではこれとは異なるメカニズムによって、金属材料の内部構造が変化している。これを Figure 2 に示す。転位論が教えるとおおり、マクロな視点で観察される塑性変形は、原子

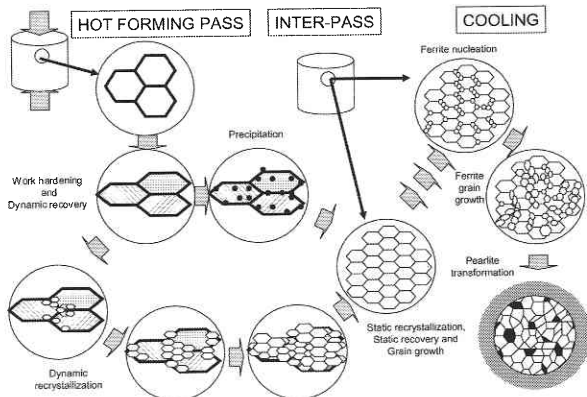


Figure 1 Microstructure Evolution in and after Hot Forming.

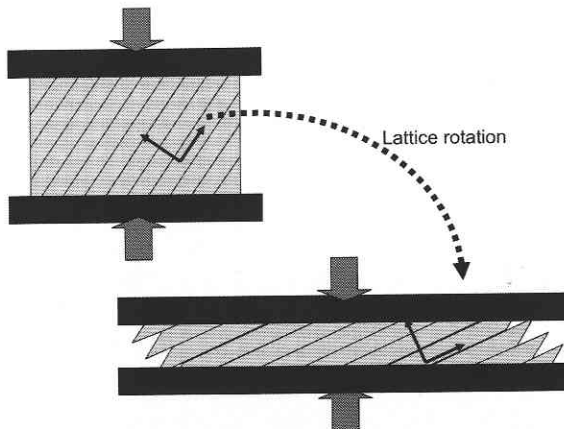


Figure 2 Plastic Deformation as an Amount of Slips.

間でナノスケールで発生する微小なすべりの集積である。塑性変形はすべりであって、圧縮変形も Figure 2 にて示したとおり、多数のすべり（せん断）変形の集合である。Figure 2 は 50 年以上前に G. I. Taylor が提唱した回転機構であってマクロスケール視点で表示してあるが、このようなすべりが多結晶粒の内部に多数存在しているはずである。さて、すべり変形の結果、結晶が Figure 2 に示されている通り回転する。つまり塑性変形はすべり変形の集積であって、その結果結晶が回転しているわけである。変形加工によって結晶が回転し、当初ランダムな方位を持っていた結晶がある特徴を持って集合し特定の方位を向くことが多い。このようにして形成される集合組織は、素材・素形材の機械的特性のひとつである異方性を支配する要因である。なおこの異方性は、2次加工であるプレス加工において、深絞り性などに大きく影響を及ぼし、素材・素形材の製造において創りこまれるべき重要な項目の一つとなっている。

内部組織や機械的特性は、製造される素材・素形材の特性を支配する重要な要因であり、実験室スケールの金属材料研究面からも興味を引く課題を多く含んでいる。ところが、インダストリアルスケールでの製造においては当然、製品の形状寸法精度をも満足した製品を製造しなければならない。Figure 3 に示す形鋼は、建設構造材料を主な用途としており、当然形状寸法精度の要求が課せられている。と同時に、強度、じん性が全断面内で保障されるべしとの要求が高まっている。構造強度はその構造を構成している

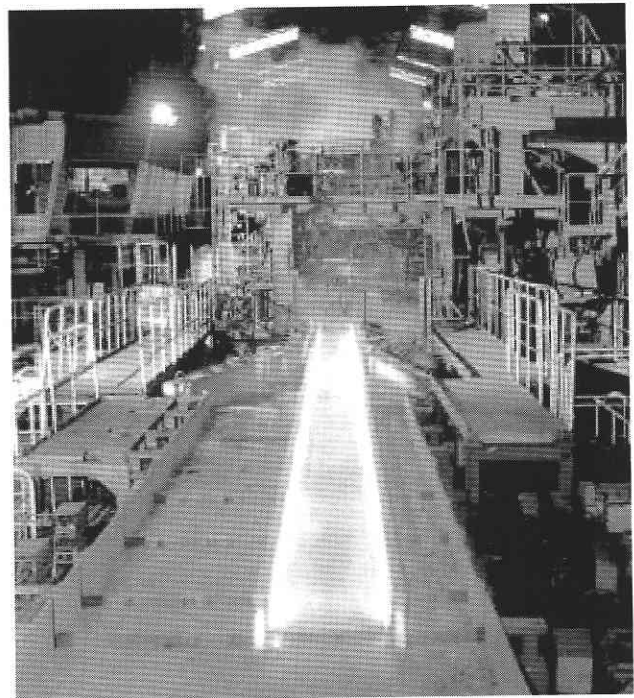


Figure 3 Hot Rolling of H-beam for the Use of Construction.

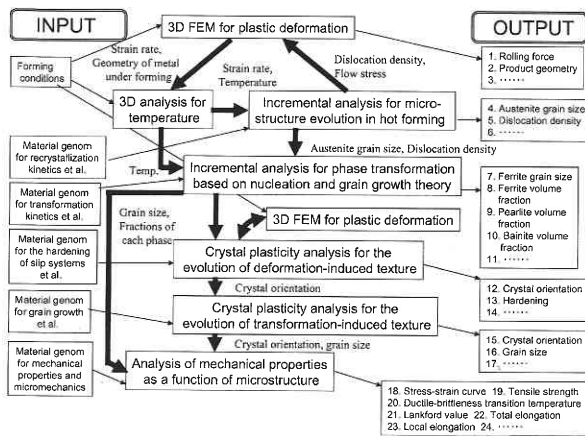


Figure 4 Scheme of Analysis for the Microstructure Evolution.

最も弱い部分を基点として不健全な状態（たとえば破壊）に至るのであるから、この要求は技術動向としては納得のいくものである。とはいっても、複雑な加工パスを経る圧延において、寸法形状精度と内部組織を適正に保つ加工条件を、加工対象となる素材それぞれについて見出すのは容易ではない。実験に基づくトライ&エラー・アプローチでは、最適な加工条件を見出すのは不可能である。

内部組織制御のための理論は、最適な加工条件を見出すためのツールである。熱間加工に始まり冷却変態を経て、冷間加工・焼鈍、機械的特性の予測を含めた、内部組織制御理論の構成を Figure 4 に示す。多数のモジュールで構成されているが分類すれば、1) マクロプロセスシミュレーション・モジュール、2) ミクロ組織変化シミュレーション・モジュール、3) 材料ゲノム、である。マクロプロセスシミュレーションについては、1990年代以後3次元化、高速化・高精度化が進み、実用に耐え得るツールとして現在は広く利用されている。ミクロ組織変化シミュレーションは現在、世界の主要大学において精力的に研究が進められており、今後10年間程度の間には飛躍的な発展が期待できるであろう。材料ゲノムとは、Figure 4 に示されている通り、再結晶、変態の Kinetics などの、温度と変形速度に依存した冶金学的変化を、種々の材料について解きほぐしたデータベースである。この材料ゲノムはミクロ組織変化の材料物性を与えるものであるから、データベースというよりは材料物性変化を与える理論式の集合体というべきである。材料ゲノムはごく一部の材料（たとえば中炭素鋼）についてしか得られておらず、現在、Figure 4 に示した理論を幅広く多様な金属材料に展開する上でのボトルネックとなりつつある。

3. デジタル・ローリング・プラットフォーム

IT 社会の急速な進展に伴い、社会の各所で変化が生じ

つつある。製造技術の分野ではたとえば SCM (Supply Chain Management) の進展や、部品の Internet 発注、部品産業と組み立て産業の CAD 共有化ならびに IT chain の成立、などがある。全体の傾向を大雑把にいうならば、需要に応じた即応生産がキー技術となっている感があるが、素材・素材産業においては意外にこれは重い課題である。鉄鋼産業は、IT 化が最も早くから進んだ産業である。鉄鋼製品は基本的には受注生産品であるから、発注から納入までの生産タスクの在庫管理を含めた一元化や、高炉の制御、圧延機の制御、省人化などへの IT 利用は現在も高いレベルにある。ところが、客先が求める製品「強度・・・、延性・・・」の要求にしたがって新製品を納入するまでのサイクルは、1ヶ月を切る状況に現在は無い。多数の在庫を持つことが許される状況には現在は無いので、短納期が不可能な原因を根本から改革する必要性は高い。

短納期が不可能な理由には、大きく分けて2つの理由がある。第1の理由は、客先の要求である機械的特性と形状寸法を満足するための、加工条件設計と合金成分設計に時間がかかりすぎることである。実際には、適切な加工条件設計と合金成分設計は、現在ほとんど不可能であるというべきであろう。Figure 4 に示した理論は、このための手段となりえるのである。第2の理由は、鉄鋼材料の製造法そのものに起因している。成分調整は転炉によって行われるが、過去30年間生産性とコスト低減を狙った結果転炉は大型化し、結果として成分調整ができる最小単位であるロットは大きくなった。現在、ロットは100トンから300トンといった重量であり、少量多品種の生産に対応できる設備の構成とはなっていない。したがって、ある程度のボリュームをまとめて生産タスクを組むことにならざるを得ず、短納期は事実上不可能である。以上のことは、生産量の多い汎用鋼材ではかなり緩和されているが、付加価値の高い鋼材についての問題ははなはだ大きく、極端な場合、少量の受注には応えられない場合がある（余談ではあるが、筆者在独中に特殊鋼板を少量手配しようとしたとき、最小発注単位が100トンであるといわれ断念せざるを得なかった経験がある）。転炉容量単位の成分設計に加え、Figure 1 にて示した再結晶、変態などを駆使して機械的特性を自由に付与できるようになれば、たとえば鋼板1コイル単位、すなわち10トン単位での納入が可能となり、鋼材製造のフレキシビリティが格段に向上するはずであるが、ここでも Figure 4 に示した理論がキー技術となる。以上述べたとおり、いずれの問題から考えても、Figure 4 に示した理論体系、すなわち、デジタル・ローリング・プラットフォームが必要となるわけである。

デジタル・ローリング・プラットフォームの構成要素は、既に述べたとおり、基盤となるマクロ・ミクロ理論と、材料ゲノムである。Figure 5 に示したとおり、基盤となる

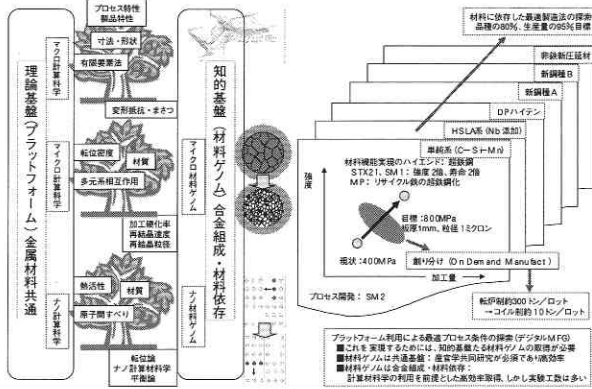


Figure 5 Digital Rolling Platform on Theoretical Basis and Material Genom.

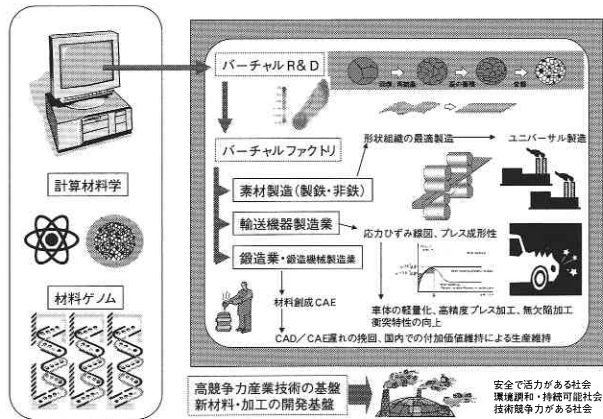


Figure 7 Role of Digital Rolling Platform in Future.

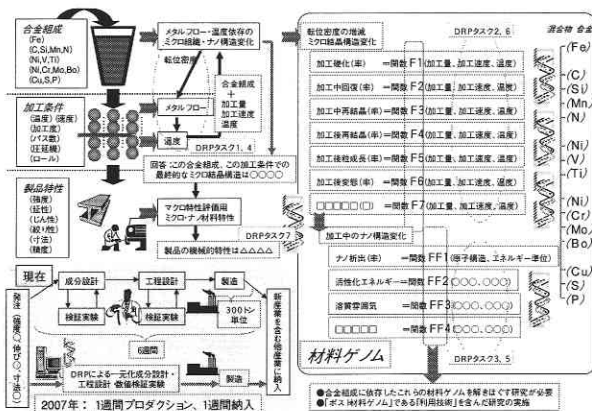


Figure 6 Material Genom.

マクロ・ミクロ理論は、鉄系・非鉄系金属材料に共通する部分も多いと考えられる。この理論にはまた、材料ナノテクを対象とした理論が新たに加わるかもしれない。いずれにせよ、理論基盤は金属材料共通に、プラットフォームとして機能すべきであろう。材料ゲノムはおそらく、金属材料学に関わる最も重要な知的基盤の一つだろう。材料ゲノムは単なるデータベースではなく、理論式の集合であってその変数は、金属材料を構成する合金組成である。ここには、ミクロ材料ゲノムとナノ材料ゲノムがあって、ナノ計算材料学と実験により得られたデータの回帰によってあらゆる金属材料について解読するのが目標である。材料ゲノムの理論化の視点でデジタル・ローリング・プラットフォームを説明した図が、Figure 6である。また Figure 7に、デジタル・ローリング・プラットフォームの効果の一例を示している。

デジタル・ローリング・プラットフォームの実現には、計算材料学・理論の一層の進展は勿論のこととして、材料ゲノムの取得が鍵を握っている。このような研究は、民間企業1社で対応ができるような性質のものではなく、サプライヤ、ユーザにまたがる各社と、大学・国研の密接な協力が必要であろう。

4. ま と め

内部組織制御に始まり、デジタル・ローリング・プラットフォームにいたる研究の流れについて、私見を交えつつ解説した。金属材料研究の歴史は長く、そもそも機械工学を専攻する筆者が解説すべきテーマであるのか迷う点もあった。金属材料研究が実験室から製造現場に近づくにあたり、必ず通過する段階が「高次機能加工」である。まさに異分野の融合領域であるこの分野には、学問として興味を引くテーマが山積している。今後の発展が大いに期待される分野であると同時に、挑戦的な学問分野であるということができよう。

(2002年4月5日受理)

参 考 文 献

- 1) Ouchi, C.: ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 6, pp. 542
- 2) Tamura, I: Trans. ISIJ, Vol. 27 (1987), pp. 763