

変形加工の内部組織モデリングとシミュレーション

柳本 潤*

1. はじめに

鉄鋼製品の機能を規定する要因をあえて2つ挙げるとすれば、「材料内部組織により規定される機械的特性」と「製品の形状寸法精度」ということになる。この2つの要因を同時に満足する製品の製造が、鉄鋼技術者・研究者に課せられた課題であることに疑問を挟む余地は少ない。一方、材料内部組織の創成に関わる諸問題は金属材料学、製品の形状寸法精度に関わる諸問題は機械工学と、それぞれ異なった学問体系（あるいは技術体系と言った方が良くかもしれない）を基礎として発展してきている。そのため、上述した2つの要因をバランス良く両立させることは技術・ヒトどちらの面から見ても容易では無く、長らくの間、両者の融合の重要性が指摘されつつも、現実には両者が完全には固溶せず、析出した状態での技術開発が継続していた面も少なからずあるように思われる。

理論面でも両者の乖離は少なからず存在しており、材料内部組織創成に関わる理論は「物理冶金学・計算材料学」、製品形状寸法に関わる理論は「圧延理論」として長年にわたり研究されてきた。ところが、「材料内部組織により規定される機械的特性」と「製品の形状寸法精度」の両立を今後さらに積極的に進めるためには、これら2つの要因を統合した理論体系が必要である。FEMを核とした内部組織予測技術は、統合理論完成への里程票となる可能性を秘めており、今後の発展が期待されている。

本稿では、FEM解析を核とした、熱間・冷間加工時の内部組織予測技術について、今後の展望を交えながら述べる。

2. FEMを核とした内部組織予測技術

2.1 FEMによる加工プロセスシミュレーションの現状

圧延加工をはじめとする塑性加工を対象としたFEM（有限要素法）は、連続体力学・塑性力学により得られる方程式系をもとにした数値解析技術である。圧延については、主に材料の弾性変形を無視した剛塑性FEMについて研究が進められており、現在ではほとんど全ての熱間圧延加工時の3次元塑性流動の解析が可能である¹⁾。例えば、**図1**に示した「棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システム」²⁾はパソコン上で動作し、500要素程度による3次元変形解析に必要な時間は高々10~30分と十分

実用に耐える状況にある。冷間圧延加工については、材料の弾性変形を考慮した弾塑性構成式を有限変形理論と組み合わせて定式化せざるを得ないため、格段に高度な理論的考察が必要であり計算時間も長く、2次元圧延解析の計算時間は約1~2時間程度である³⁾。**図2**に、共回転定式化による圧延解析例を示す。圧延加工時の材料温度・ロール温度の解析も進められており、塑性変形との連成解析事例も報告されている⁴⁾。

Graphical user interface

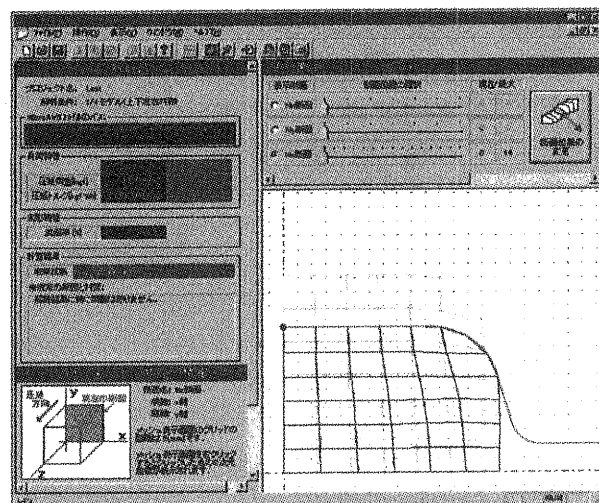


図1 棒鋼・線材圧延3次元FEM解析システム

圧延加工プロセスシミュレーションの現状は上述の通りであるが、少なくとも熱間圧延を対象とする限り十分に（完璧では無いが）実用化されていると言って過言ではない。これが、次のステップ、すなわち材料組織変化を含めた理論解析手段へと発展するのは当然の成り行きである。事実、FEMを核とした内部組織予測技術に関わる研究は1990年代に入り急速に顕在化してきたが、この動きは同時に、材質制御手段そのものの変革を駆動する要因となることが期待されている⁵⁾。

2.2 内部組織予測技術の階層構造と材料ゲノム

さて、FEMを利用した内部組織予測技術には、マクロパラメータである加工条件とミクロパラメータである加工後の材質とを結びつけることが要求される。まずスケールの視点から見た内部組織予測技術の構成を**図3**に

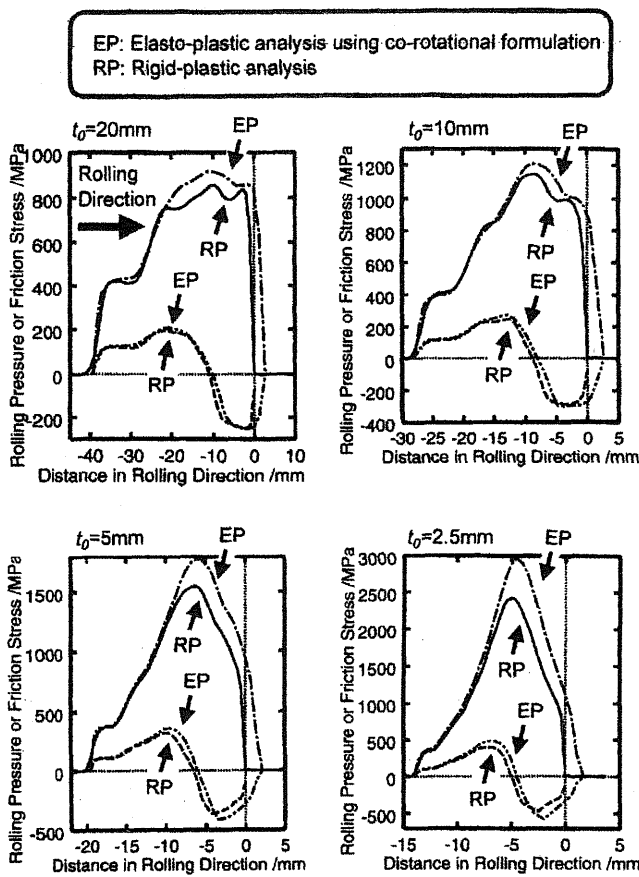


図2 共回転定式化に基づく有限変形弾塑性 FEM による
 圧延プロセスシミュレーション例
 (圧延圧力分布)

示す。内部組織予測手法は、大きく分けて下記の3つの段階に分けることができる。

- 第1段階 (マクロスケール) : FEM による塑性変形解析
- 第2段階 (ミクロスケール) : 内部組織変化についての現象論的理論
- 第3段階 (ナノスケール) : 結晶塑性理論・分子動力学・Phase Field 法

マクロスケールを対象とした第1段階においては、プロセスパラメータと塑性流動・温度分布が、FEM により解析される。ミクロスケールを対象とした第2段階では、第1段階により得られた塑性流動・温度分布を境界条件としつつ、材料内部の転位密度分布・結晶粒径分布が解かれるが、その際、対象とする金属材料の再結晶 Kinetics、回復速度等が必要となる。金属材料の再結晶 Kinetics、回復速度等はミクロスケール以下の材料の内部状態により支配される。これを詳細に解明することを目的とするのが第3段階、すなわちナノスケールを対象とした結晶塑性理論・分子動力学・Phase Field 法ほかの各種理論である。

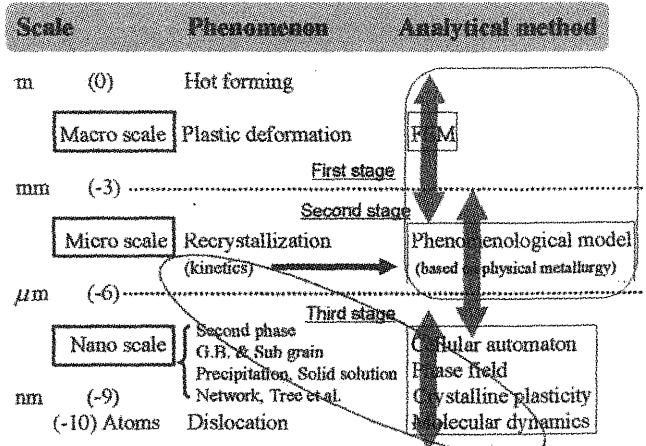


図3 内部組織予測手法の構成(スケールの視点から)

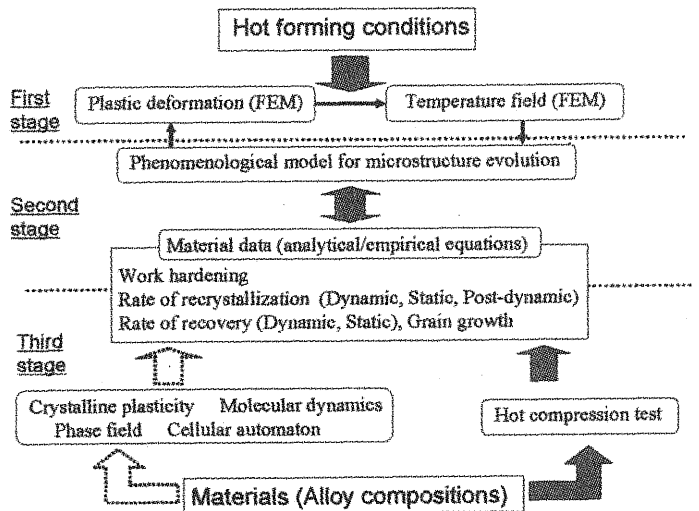


図4 内部組織予測手法の構成(運用の視点から)

FEM を核とした内部組織予測技術は現在、加工中・加工後冷却時の材質変化に力点を置いているため、以上の分類には、あるいは粗雑すぎるとの印象を持たれるかもしれない。計算機支援による組織制御という観点からは、金属材料内部に発生している多様な現象を、その素過程をたどりつつ明らかにすることも重要であり、事実、数多くの重要な研究が行われている⁹⁾。このことを踏まえつつもあえて上述の3段階にて整理した理由は、第2段階に位置する「内部組織変化を対象とした現象論的理論」を明示することにある。実際、この第2段階はFEM によるマクロな視点からの塑性変形解析を材料科学と関連付け、加工条件パラメータと材料パラメータ双方の要因を含めた内部組織予測技術として統合化するためには不可欠な段階であり、マクロパラメータである加工条件因子を、材料内部のミクロ以下のスケールでの内部状態と関連づけるための、接着剤の役割を果たしている。

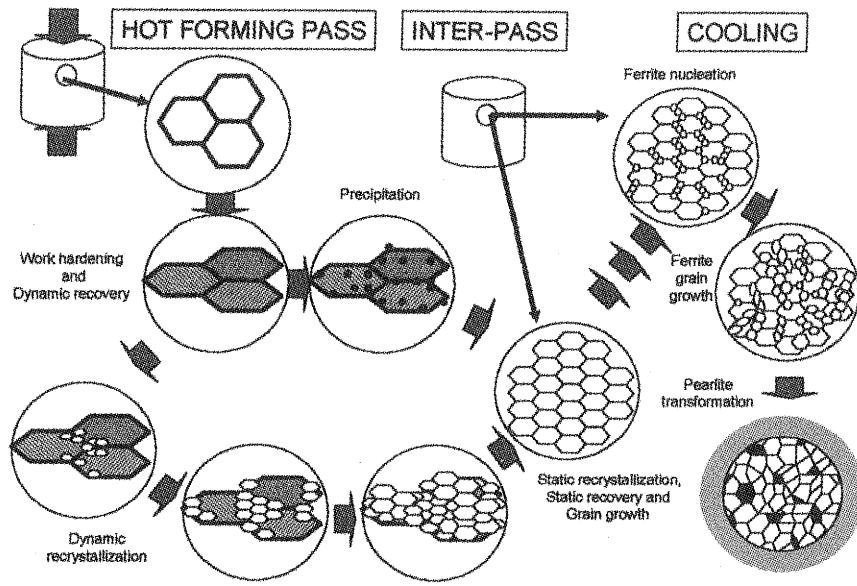


図5 熱間加工時の内部組織変化

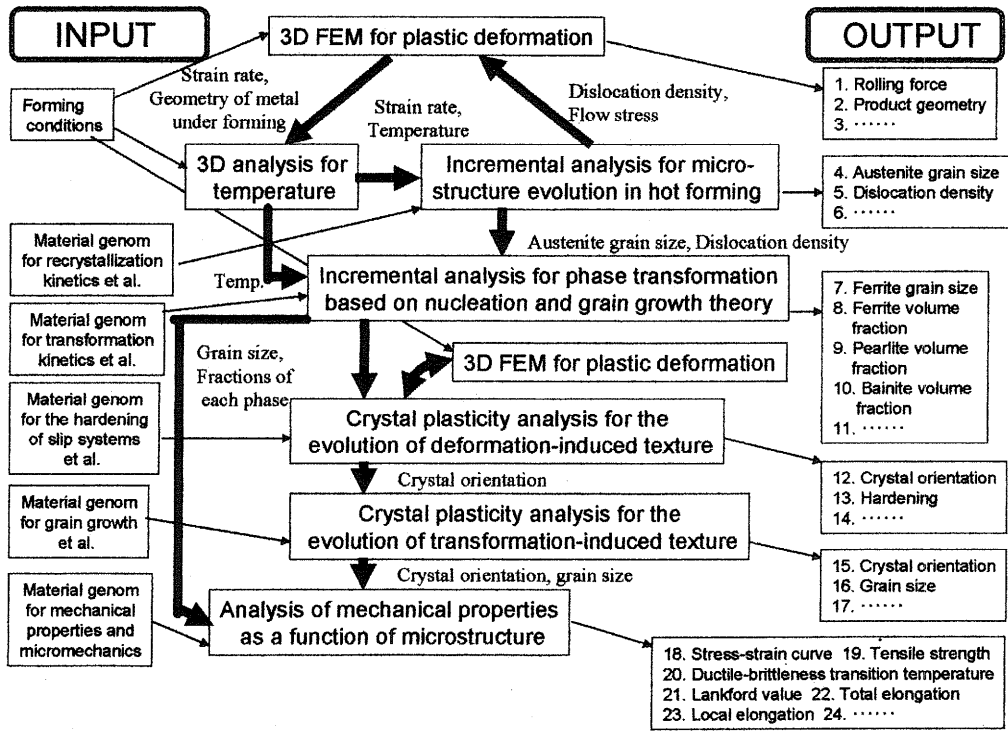


図6 FEMを核とした内部組織予測手法の構成

図4に、運用という観点から内部組織予測技術を改めて整理した結果を示す。図4には熱間加工中の組織変化について示してあるが、加工後冷却時の組織変化についても内部組織予測技術の基本構造は変わらない。材料側より見れば材料すなわち合金組成が、加工側から見れば加工条件が基本となる条件因子である。合金組成の変化に伴う再結晶 Kinetics、回復速度等の変化は、先に述べた第3段階に相当する理論もしくは熱間圧縮実験により解明され、これをもとにした回帰式が内部組織予測のた

めの材料データ（これを材料ゲノムと呼ぶことにする）として利用される。一方、加工条件に応じた結晶構造変化や転位密度変化は、FEMによる塑性変形・温度分布解析（第1段階）と結晶構造変化を対象とした現象論的モデル（第2段階）とを連成させることにより解くことができる。材料種別に対応した材料ゲノムは、この連成解析の境界条件となる。

FEMを核とした内部組織予測が可能となりつつある現在、多様な鋼種を対象として適用をはかって行く上で

問題となりつつあるのが、材料ゲノムの不備である。現在、C-Si-Mn系、一部のマイクロアロイ系については研究事例が報告されており、FEMを核とした内部組織予測においてもこれらを材料特性として利用しているが、他の大多数の鋼種については系統的かつ定量的に表示されたデータが無い場合が多い。第3段階として先に分類した各種の理論を利用することにより、合金組成の変化に伴う材料ゲノムが明示されるのが理想の姿であるが、現状では不足している部分を実験で補充するしかない。また、厚板TMCPについて従来得られている知見をもとに、マイクロアロイ系元素の材料ゲノムに及ぼす影響について今一度、系統的かつ定量的に検討してみる必要性も高い。

2.3 FEMを核とした内部組織予測技術の特徴

厚板TMCPならびに制御圧延技術の研究開発と連動して、数多くの内部組織予測モデルの開発が行われており、現在でも内部組織予測モデルの主要な部分を占めていることは周知の通りである^{8,9)}。本節では、FEMを核とした内部組織予測技術の特徴を、従来型の内部組織予測モデルとの相違を踏まえつつ述べる。図5には熱間加工の際の結晶構造変化を、図6には、熱間加工より始まり冷間加工に至る、内部組織予測手法の構成を示す。ここでは、結晶構造変化を対象とした内部組織予測手法と、その結果を基にした材質（機械的特性）の予測手法が含まれる。

塑性加工の変形・温度を対象としたFEM解析には種々の特徴があるが、内部組織予測に関係する要因としては、1)塑性流れ・温度の3次元解析が可能であること、2)広範囲の塑性加工プロセスを対象とする汎用性を持たせることができること、の2点を上げることができる。従ってFEMを核とした内部組織予測には、1)に対応した特徴として、変形域内部で複雑に変化する温度、ひずみやひずみ速度の分布を反映できることが、2)に対応した特徴としては、厚板以外の圧延加工全般や他の熱間加工（押出し加工、鍛造加工）への適用が可能であること、がある。

1)については、例えば圧延加工の場合、流れ線に沿って流れる材料が受ける温度とひずみ速度の変化を、転位密度の変化や結晶粒径分布の変化に適切に反映させる必要がある。前節にて述べた、結晶構造変化についての現象論的モデル（第2段階）¹⁰⁻¹²⁾は、異なるスケールを連結するという役割と同時に、FEMにより得られる変形・温度分布を、材質変化に正確に反映させる役割を担っており、現在、繰り返し再結晶や部分再結晶、加工硬化粒からの変態といった場合に対応した材質変化の解析が可能な状況にある。また、2)に関連しては、既にFEMを核にした内部組織予測技術により、棒線材圧延・形鋼

圧延時の材質変化が予測されている。今後は、鋼管圧延、押出し、熱間鍛造への適用が進むであろう。

さらに、冷間加工時の結晶方位変化すなわち集合組織形成過程の解析には、結晶塑性理論が有効なツールとなりえる。FCCについて数多く研究されてきた結晶塑性理論を、鉄系材料すなわちBCCに拡張することが重要な課題である。また、冷間圧延後の焼鈍についても連続的に解析しなければならない。これについては、潜在硬化則に含まれる材料定数が材料ゲノムとなるが、信頼できるデータが存在していないというのが、現状の姿である。

3. 解析事例

FEMによる2次元板圧延解析を利用した内部組織予測は、1980年代末に既に国内で開始されている^{13,14)}。これらは、FEMを核とした内部組織予測技術の先駆けをなす研究ではあったが、再結晶による組織変化過程が単純化された形式で導入されていたために（すなわち第2段階の欠落により）、FEMによって計算されるひずみ速度・温度の分布を正確に材質変化に反映させていたとは言い難い。

加工中に繰り返し発生する動的再結晶、多パス加工時に発生する再結晶、ならびにこれらが混在する状態についての解析が行われたのは、1990年代に入ってからである。Karhausenらは、再結晶に伴う結晶粒径変化を副組織数の増加として捉え、加工中時々刻々変化するひずみ速度・温度に伴う結晶粒径・降伏応力を解析する手法を提案した¹⁰⁾。これは、2.2節にて述べた「第2段階」を対象としたモデルの先駆けをなしており、さらにFEMとの連成により、板圧延¹⁵⁾、鍛造¹⁶⁾時の組織変化の解明に利用されている。棒線材圧延・形鋼圧延時の組織変化についても解析が行われており、オーステナイト相での結晶粒径変化^{17,18)}や、フェライト→パーライト変態後の組織変化¹⁹⁾が取り扱われているが、ここでは、転位密度を媒介とした増分形内部組織解析モデル^{11,12)}が「第2段階」で利用されている。図7は、4パス棒鋼圧延時のフェライト粒径分布を、変態点到達時のオーステナイト粒径分布・転位密度分布と対比して示す¹⁹⁾。圧延前オーステナイト粒径分布は均一（80ミクロン）、3ロールミルによる4パス圧延後の合計減面率は52%であり、各パスの圧延条件はあえて断面内ひずみ分布がつきやすいスケジュールとしてある。焼鈍組織（転位密度 $10^8/cm^2$ ）より高い転位密度が残留している部分についてはフェライト粒径がより微細化されていること、中心部で見られる粗大なオーステナイト粒がフェライト粒径分布としても残留すること、が示されている。なお、FEM解析を核とした内部組織予測技術の精度はオーステナイト相およびフェライト相について検討されており、実用上十分であることが判っている²⁰⁾。

a) Austenite grain size at A_{e3} temperature (μm) b) Dislocation density at A_{e3} temperature (cm^{-2}) c) Ferrite grain size after cooling (μm)

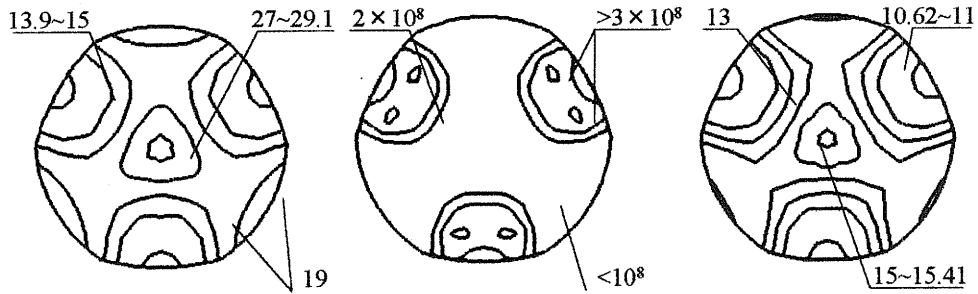


図7 4パス棒鋼圧延直後のオーステナイト粒径と冷却後のフェライト粒径

FEM を核とした内部組織予測技術は、従来熱間加工を主な対象としてきたが、今後は冷間加工への適用が課題である。これを実現するためには、冷間圧延加工時の集合組織形成過程の理論化等、今後検討が進められねばならない。集合組織形成過程に関連して数多くの研究が行われているが、FEM をはじめとする力学解析を直接利用し、内部組織予測技術に結びつけた研究事例は未だ少ない²⁾。図8は、BCC 結晶の圧延集合組織形成過程の解析例である。

4. まとめ

FEM 解析を核とした内部組織予測技術について述べた。萌芽期にあるこの技術は、単なる理論に違い無いのではあるが、「形状」と「機能 (内部組織/機械的特性)」を対象としている以上、単なる変形解析より、鉄鋼技術開発に密接に結びつくことが期待され、必要とされる。今後は、プロセスの拡大、材料ゲノムの取得などが、重要な研究課題となる。

あくまでも理論はツールであるから、FEM 解析を核とした内部組織予測技術は鉄鋼技術開発の第一線にて利用されなければならない。FEM 解析を核とした内部組織予測技術が、革新的鉄鋼製造プロセスの開発に向け、技術者の想像力を刺激し実質的な結果を提示する「ツール」として利用されていくことを願っている。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、天田金属加工機械技術振興財団 1995 年研究開発助成を受けた。同財団の助成に対し、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山田健二: 第 169/170 回西山記念講座テキスト, (1998), 53.
- 2) 浅川基男・宮澤英之・木内 学・柳本 潤: 平 11 春塑加講論, (1999), 183.
- 3) 圧延の有限要素法による理論解析の実際, (1998), 121, 日本鉄鋼協会圧延理論部会
- 4) 関 和典・山田健二・濱渦秀一・木内 学・柳本 潤: 平 11 春塑加講論, (1999), 185.
- 5) 矢田 浩: 塑性と加工, 40-467(1999), 1130.
- 6) 計算機支援による組織制御の最前線, (1998). 日本鉄鋼協会材料の組織と特性部会
- 7) 三田尾真司・山本定弘: 高機能鉄鋼製品のための材料・

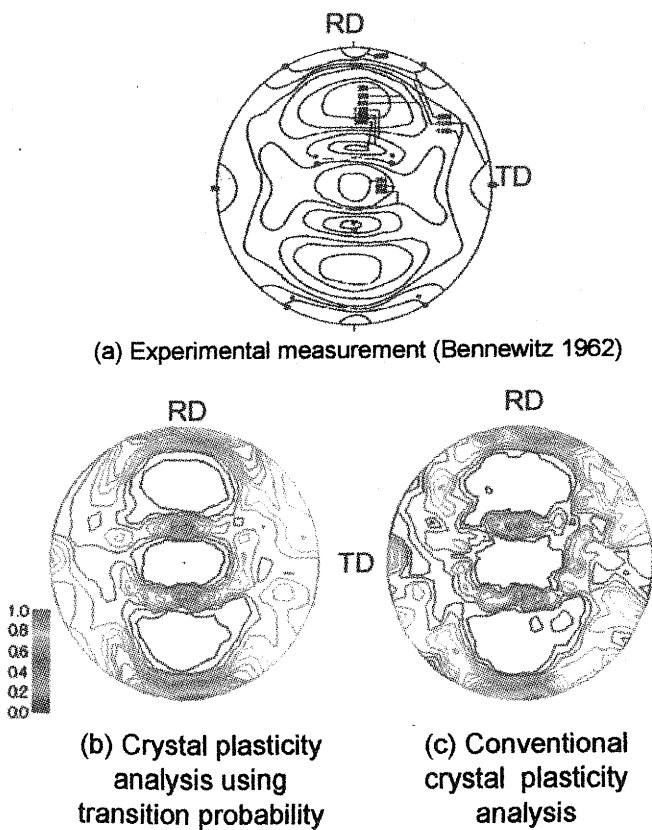


図8 BCC 結晶への結晶塑性理論の適用例

- プロセス技術, (1999), 日本鉄鋼協会創形創質工学部
会
- 8)大内千秋: 塑性と加工, 40-467(1999), 1135.
 - 9)Sellars, C. M. and Beynon, J. H.: *ISIJ International*, 32-3(1992), 359.
 - 10)Karhausen, K. and Kopp, R.: *Steel Research*, 63-6(1992), 247.
 - 11)Yanagimoto, J., Karhausen, K., Brand, A.J. and Kopp, R.: *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 120-2 (1998), 316.
 - 12)Yanagimoto, J. and Liu, J.: *ISIJ International*, 39-2(1999), 171.
 - 13)濱渦秀一・山田健二・菊間敏夫・瀬沼武秀・矢田 浩: CAMP-ISIJ, Vol.1(1988), 482.
 - 14)難波茂信・北村 充・嶋田雅生・勝亦正昭・前田恭志・服部重夫: CAMP-ISIJ, Vol.2(1989), 676.
 - 15)Karhausen, K. and Kopp, R.: Proc. 1st International Conference on Modelling of Metal Rolling Processes, (1993), 66.
 - 16)Kopp, R., Karhansen, K. and Schneiders, R: Proc. 4th International Conference on Technology of Plasticity, (1993), 1203.
 - 17)Yanagimoto, J., Ito, T. and Liu, J.: *ISIJ International*, 40-1(2000), 65.
 - 18)柳本 潤・劉 金山: 平 11 春塑加講論, (1999), 187.
 - 19)柳本 潤・劉 金山: 50 回塑加連講論, (1999), 339.
 - 20)柳本 潤・木内 学・杉山 澄雄・柳田 明・Lopez, O.: 49 回塑加連講論, (1998), 95.
 - 21)前田恭志: 塑性と加工, 40-467(1999), 1164.
 - 22)矢田 浩・瀬沼 武秀: 塑性と加工, 27-300(1986), 34.
 - 23)Ouchi, C., Okita, T., Ichihara, T. and Ueno, Y.: *Trans. ISIJ*, 20(1980), 833.