

## 論文の内容の要旨

研究題目 熱間流動応力の測定法とそれに基づく内部組織変化の定量化法に関する研究

氏名 柳田 明

素材・素形材に求められる要求は高まっており、その要求を満たすには「形状寸法」「内部品質」を一元化した製品・製造プロセスの開発が必要となってくる。形状と内部組織は相反することが多くこの 2 つを同時に満たすことは難しい。鉄鋼材料に関しては従来の加工熱処理に比較して、塑性変形を活用し、被加工材の内部組織を改善しようとする動きがあり、研究開発が行われている。この塑性変形を利用した組織制御技術は実験的手法による現象の解明と理論解析技術の開発を基盤とする。厚板圧延のような一部の加工プロセス・加工条件において、組織制御技術は実用化されているが、汎用的に用いられているとは言えない。その理由としてプロセス条件と材質予測技術が明確に分離されていないものが多かったこと、用いられる材料データがプロセス(加工法)固有のデータであることが挙げられる。前者に関しては内部組織モデルの一般定式化が行われることにより、個々の分離が可能となり、プロセスシミュレーション技術と材質予測技術が明確に分離された。しかし、後者に関しては、この 2 つの技術に用いることができる材料データの不足とその取得法が統一化されていないという問題が依然として残っている。

よって、本研究では、塑性加工時の負荷特性に大きな影響を与え、加工プロセス設計に必要とされる熱間加工時の流動応力を高精度に取得する方法の開発、その流動応力を用いて内部組織変化を推定する方法を提案した。また、現状において、定量モデル化されていない低温・強加工時のフェライト変態モデルに関する定式化を行い、熱間加工から相変態に至るまでの試験手法および、それに基づく内部組織変化の定量化法を示した。

以下のように論文を構成した。

第 1 章では、研究の背景として流動応力、再結晶 Kinetics などの材料データ取得の意義を現状のプロセスシミュレーション、および内部組織変化の解析技術を介して示し、ならびに 1950 年から 1980 年代に行われた研究結果より流動応力の概論を示した。

第 2 章では、流動応力を取得する従来の材料試験法についての比較検討を行った。その結果データ取得に最適な試験方法として、円柱圧縮試験を用いることとした。圧縮試験は工具との摩擦のため、不均一変形が生じるため、数値解析による補正が行われるが、高圧縮域のデータを補正するには不十分であるため、高精度測定手法の必要性が示された。冶金学的データを取得する試験方法についても同様に検討し、その問題点を示した。内部組織変化の表示法に関して従来の知見をまとめ、定量モデル式を決定した。

第 3 章では、熱間圧縮試験において避けることのできない変形と温度の不均一分布の影響を取り除くために、FEM を利用した逆解析を用いて流動応力を求める手法を示した。FEM 解析に必要な応力式として、動的再結晶を表現できる内部組織変化を含んだ応力構成式を新たに提案した。初期温度分布、加工発熱、工具への熱移動などの熱間圧縮試験中の現象を再現するため、変形・温度・磁場の連成解析可能な FEM コードを作成した。提案した応力構成式と FEM を組み合わせ、実測荷重と解析荷重を一致させることにより、等温、単軸の流動応力を求めることが出来た。この方法で得られた流動応力は、これまでに提案されている FEM 解析による補正法で求められる試験片内の平均的なひずみに対する平均的な流動応力のような物理的な意味が曖昧な応力とは異なり、試験片内部の冶金現象を反映したものであり、材料固有の値として求められるものである。

第 4 章では、3 章で求められた流動応力を元に、温度・ひずみ速度の依存項を含む流動応力統合式を提案し、その定数パラメータを回帰する手法を示した。本手法では逆解析を用いていることにより、基準応力式でひずみ速度の影響が分離されているため、回帰が容易である特徴を有する。この応力統合式は圧延のみならず、鍛造加工のような広範囲の温度分布を持つ熱間プロセスに適用できる。

第 5 章では、流動応力曲線から動的再結晶 Kinetics を推定する方法を提案した。この手法は逆解析より求められた応力曲線及び、動的再結晶組織の転位密度発展方程式の厳密解基本としている。推定された動的再結晶率 と凍結組織から得られた値を定量的に評価することは冷却速度の影響などがあり容易ではないが、凍結組織と比較した結果、低温(900°C)ではよく似た傾向を示すことが分かった。このことから、組織凍結が困難な高温・高ひずみ

速度の動的再結晶速度を求めるのに有効であると言える。また本手法では組織観察を必要としないので少ない時間、実験数で動的再結晶 Kinetics を求めることができる

第 6 章では、軟化率の冶金学的な検討を行い、熱間状態では静的回復が短時間で起こり、軟化率 0.3 程度までは回復の影響であることが確認された。2 段試験において、逆解析を用いる優位性としては、等温に補正された流動応力を用いるので、保持時間中の温度変化の補正が可能であること、加工初期の遷移領域の応力値から直接求めるのではなく、関数で求められた流動応力から求めることによって、測定誤差を軽減することができること、残留ひずみ率を求めることが出来るなどが挙げられる。また、これまで検討されることがなかった不均一変形の影響について、残留ひずみ率を予ひずみ・温度の関数として、冶金ひずみの加算測を仮定し、逆解析により再結晶速度を求めることで温度・ひずみの不均一分布が軟化率に及ぼす影響の検討が可能となった。不均一変形により、軟化初期では軟化率は高変形域の影響で均一変形と比べ、高くなり、終了時では、低ひずみ域の軟化が遅れるため、低い値となると推定されるがその差は小さいことが確認された。残留ひずみ率から転位密度を媒介とした軟化率を求め、凍結組織から得られた再結晶分率と試験片内部の分布を含めて比較した結果、両者は良い一致を示した。

第 7 章では、低温・強加工時の組織形成理論の導出とその構築に必要な試験を行った。3～6 章での成果を利用し、試験片に付与されたひずみ・温度履歴から、変態前の状態を検討した。変態試験から低温(Ar3 変体点近傍)では粒内からフェライトが生成されることを確認し、結晶粒内の核生成サイトの増加がフェライト粒の微細化の主因子であることが認められた。組織観察に基づき粒内の転位やセル上組織から核生成する理論モデルを導出した。計算モデルとして運用するにあたり、成長速度などの定数パラメータの決定は組織観察に基づいており、現象論的なモデルではあるが、粒内核生成による、高ひずみ速度、強加工プロセスに適用できる組織形成モデルを作成した。また、ラボ圧延機で得られた結晶粒径を比較した結果、従来の古典的核生成理論からなるモデルと比べ、微細粒となる領域での精度が格段に向上した

第 8 章は結論である。