

氏 名（本籍）	とう ま けん 當 摩 建 （新潟県）
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 4 4 9 号
学位授与年月日	昭和 4 9 年 3 月 2 6 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 （博士課程）金属材料工学専攻
学位論文題目	金属の高温変形における摩擦応力と内部応力の効果
論文審査委員	（主査） 教授 諸住正太郎 教授 辛島 誠一 教授 須藤 一 教授 木村 宏 助教授 吉永日出男

## 論 文 内 容 要 旨

### 要 旨

近年、各種高温材料の開発が一段と要望されてきたが、それに伴って高温における材料の挙動、とくに変形機構について知見を確立する必要に迫られている。金属の高温変形機構については、これまでも主として種々の条件下でのクリープ変形についての研究結果に基づいた考察が行われており、大別して次の2つの説が提唱されている。その1つは転位同士の長範囲の相互作用による内部応力が変形応力を支配するという考えであり、他の1つは転位の運動に対する摩擦的な抵抗が変形応力にかなりの寄与をなしているという考え方である。しかし、これらの対立的な2

つの説はそれぞれ、最近の実験事実と矛盾する面があったり、実験的に立証するのがむずかしい面があって、どちらかの説によって一義的に金属の高温変形機構全般を説明することはできない。それゆえ、本研究ではまず関連のある従来の研究結果を検討し、変形応力中に含まれる内部応力と摩擦応力を正確に分離して測定する必要があるとの結論に達した。そして、実効内部応力を求める一方法としての dip test (応力急減テスト) に対して新しく外挿法を適用すべきであることを提案し、その方法を用い各純金属および固溶体合金について内部応力を精密に測定した。

つぎに、それらの結果を純金属型と合金(固溶体)型の両変形機構とに関連させ、これら両型の変形機構における内部応力の寄与を評価した。さらにひずみ速度急変試験により変形の律速機構について基礎資料を得るとともに変形組織の観察も行い、最後に、金属の高温変形機構について新しい解釈を提唱している。本論文は全編9章よりなる。

第1章は序論であり、金属の高温変形機構についての従来の理論的および実験的研究について概説するとともにそれらについて種々の問題点を指摘し、本研究の目的を明らかにしている。

第2章では、変形応力を占める内部応力の割合を正しく評価するための基本的な条件について検討し、dip test法によって得られる変形停滞応力が求めようとしている実効内部応力と等しくなるときは、

- 1) Al-Mg合金の高温変形の場合のように運動転位速度が有効応力に比例すると考えられる場合。
- 2) 実効内部応力が附加応力のほぼ100%を占める場合に限られることを明らかにしている。

第3章では、従来の dip test法には変形停滞応力の評価に問題があることを指摘し、その実験上の欠陥を補う方法についての提案を行っている。すなわち、従来の方法では応力の dip 後の変形停滞の判定に少なくとも数秒以上の時間をかけているが、高温では内部応力を緩和する方向に急速に転位の再配列が起こると考えられ、このような方法では変形中の真の実効内部応力が求められているとは考えられない。ところで、dip testを行った結果、dip量と応力停滞時間との間には密接な関係があることが明らかにされたが、真の変形停滞応力は応力停滞時間の開始点と終了点とをそれぞれ時間ゼロ(dip開始時間)に外挿した値であると考えられる。以下の測定にはこの外挿法を採用し変形中の実効内部応力を求める。

第4章では、前章における提案に基づき、純金属として $\alpha$ -鉄、バナジウムなどの体心立方金属とアルミニウム、銅などの面心立方金属および稠密立方金属の $\alpha$ -チタン、また典型的な合金型の代表としてAl-Mg合金の変形停滞応力を測定し、次の結果を明らかにした。体心立方金属と面心立方金属では変形停滞応力が変形応力のほぼ100%となり、この場合には第2章の検討の結果得られた条件2)より明らかなように dip testで内部応力が正しく求められ、変形停滞応力が内部応力と一致する。すなわち、これらの純金属では実効内部応力が変形応力のほぼ100

%を占める。しかし稠密六方金属の $\alpha$ -チタンでは変形停滞応力がこの条件をまんぞくせずかつ1)の条件も満たしていないと考えられるからdip testでは正しい内部応力が求められないことになる。これらの純金属に対し、第2章の1)の条件を満たすと考えられるAl-Mg合金では摩擦応力が変形応力の数10%に達する。

第5章では、ひずみ速度急変試験を行い、バナジウム、アルミニウムおよび銅などの純金属とAl-Mg合金について、転位組織などの内部構造があまり変化しない状態での変形応力とひずみ速度との関係を調べ、次の結果を得ている。すなわち、

(1) 純金属の場合

- i) ひずみ速度急変に伴う応力変化 $\Delta\sigma$ はひずみ量に強く依存し、変形初期の加工硬化率の高いところではほとんど観察されないくらい小さく、変形量が増し、加工硬化率が減少するにつれて大きくなり、定常変形に入ると一定値に飽和する。
- ii) 温度が高くなるにつれて $\Delta\sigma$ は変形初期から大きくなり、一定値に飽和するまでのひずみ量も減少する。

(2) Al-Mg合金の場合

- i) 摩擦的応力が非常に大きいことを反映して $\Delta\sigma/\sigma$ の値が純金属の中で最も大きいバナジウムの場合に比べてもさらに数倍も大きい。
- ii) ひずみ速度急変に伴う応力変化より応力指数 $n$  ( $\dot{\epsilon} \propto \sigma^n$ )を求めると、変形応力に占める内部応力の寄与を無視するならば、 $n = 2$ となるが、実測した内部応力の寄与を考慮すると $n = 1$ となり、転位の溶質雰囲気引きずり運動から期待される値と一致する。

第6章においては高温変形組織の電子顕微鏡観察を純金属のバナジウムとAl-Mg合金について行い、次の結果を得ている。

(1) 純金属のバナジウムでは

- i) 転位分布はひずみ量と温度に依存し、比較的低い温度では加工硬化率の大きい変形初期では均一性が比較的よいが、変形が進むにつれて悪くなり、セルを形成するようになる。このセル形成が始まる変形量は温度が高くなるにつれて減少する。
- ii) 変形温度が高くなるにつれて定常変形組織のセル壁は整理されて副結晶粒界を形成するようになる。副結晶粒内には転位は極めてわずかしか観察されない。
- iii) 変形応力のひずみによる変化は転位密度の変化と対応するが、ひずみ速度急変テストの際の応力変化 $\Delta\sigma$ は転位分布の不均一性に対応する。すなわち、転位がセル壁または副結晶粒界を形成するにつれて $\Delta\sigma$ が大きくなる。

(2) Al-Mg合金では

- i) 典型的な変形組織は広い視野で見るとバナジウムに比べて転位の均一性が著しくよく、

副結晶粒界は結晶中にごくわずかしか観察されない。

ii) しかし、詳細に観察すると全く均一に分布しているわけではなく、数本の転位が非常に接近しているものが多く観察される。

iii) 定常変形における転位密度は温度によらず変形応力のはぼ 1.7 乗に比例する。

第 7 章では、前章までの結果をもとに、純金属における高温変形機構について新しい提案を行っている。すなわち、純金属では変形応力に占める摩擦力の寄与が無視できるほど小さく、変形応力はセル境界および副結晶粒界の転位に対する運動抵抗で決まるとの前章までの結論に基づいて、これらの障害物の運動転位に対する抵抗が場所的に変動していること、転位障壁の回復による転位の再活性化を考えることにより前章までの実験結果および関連する従来の実験結果を矛盾なく説明できることを示している。

第 8 章では Al-Mg 合金のように摩擦力の大きな合金でも第 4 章で測定されたような摩擦応力と同程度高い内部応力が生ずるが、この原因について理論的に明らかにすると共に、この事実がこの合金の高温変形に溶質雰囲気による抵抗の効果が非常に大きいことをなんら否定するものではなく、むしろこのような摩擦応力が非常に大きい場合でも内部応力が無視できない程度生じていることを認識すべきであることを指摘している。

第 9 章は総括である。

## 審 査 結 果 の 要 旨

金属の高温変形についてはいろいろな機構が提唱されているが、いずれも実験的根拠が不十分で未だ十分信頼するに足るものがない。著者は、従来の研究結果を詳細に検討した結果、変形応力に占める内部応力と摩擦応力の割合が正確に分離測定されておらず、そのため変形機構の実験的検証に問題があるとの結論に達した。このような立場から、本論文は、内部応力を正しく求めるための方法を提示し、その方法による実験結果を基にして高温変形に対する新しい考え方を提案したもので、全編9章よりなる。

第1章は序論であり、従来の理論的および実験的研究について概説し、問題点の指摘を行っている。

第2章では、現在広く用いられている dip test (応力急減試験)法で求められる変形停滞応力が実効内部応力と一致するための条件を明らかにし、この方法の適用限界を示している。

第3章では、従来の dip test法で行われている変形停滞応力の評価法に欠陥があることを指摘し、正しい変形停滞応力を求めるための外挿法を新たに提案している。

第4章では、前章での提案に基づき、各種純金属と典型的な合金型の変形挙動を示す Al-Mg 合金について変形停滞応力を測定し、面心立方および体心立方の純金属では実効内部応力が変形応力のほぼ 100% であるのに対して合金の摩擦応力は変形応力の数 10% に達することを明らかにしている。

第5章では、ひずみ速度急変試験を行い、転位構造などの内部構造があまり変化しない状態での変形応力とひずみ速度との関係を調べ、変形の律速機構に関する基礎資料を得ている。

第6章においては、高温変形組織の電子顕微鏡観察を行い、純金属と合金における転位分布に明瞭な差異のあることを示している。

第7章では、前章までの実験結果を基に純金属における高温変形機構について新しい提案を行っている。すなわち、変形応力はセル壁などの転位障壁が運動転位におよぼす抵抗によって決まると考え、障壁抵抗の場所的変動と回復による転位の運動に対する抵抗の低下とを考慮することにより、実験結果がよく説明できることを示している。

第8章においては、摩擦力の大きな合金の変形挙動が、転位のまわりに形成される溶質雰囲気引きずり効果と林転位の相互作用を考慮することによって理解できることを示している。

第9章は総括である。

以上要するに、本論文は、新しい理論的検討と実験上の工夫を行って金属および合金の高温変形における内部応力を正確に評価し、関連する実験や観察を加えて、これらの結果を矛盾なく説明できる変形機構の提案を行ったもので、その知見は金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。