

| | | | | |
|-------------|---------------------------|------|--------------|-----|
| 氏 名 | し 清 | みず 水 | こう 紘 | じ 治 |
| 授 与 学 位 | 工 | 学 | 博 | 士 |
| 学位授与年月日 | 昭和 5 1 年 3 月 5 日 | | | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 5 条第 2 項 | | | |
| 最 終 学 歴 | 昭和 4 0 年 3 月 | | | |
| | 東北大学工学部機械工学科卒業 | | | |
| 学 位 論 文 題 目 | 実験力学的方法による境界近傍の変形挙動に関する研究 | | | |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 島田 平八 | | 東北大学教授 辛島 誠一 | |
| | 東北大学教授 高橋 裕男 | | | |

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

実用材料の力学的挙動を解明するためには、材料の中に存在している境界（異なった性質を有するものが接している個所）近傍における変形挙動を明らかにすることが重要であり、そのためには境界近傍における応力分布を明らかにすることが基本的な事項であると考えられる。このような観点から、本論文ではまず第一に種々の形状を有する接合材を光弾性モデルで製作し、実験的に応力分布を解析した。

つぎにこのような境界の典型的なものと考えられ、また実用金属材料の変形挙動において重要な役割を果すものである結晶粒界の粒界近傍における変形挙動を解析した。結晶粒界に関する研究は双結晶試験片を用いることが便利であり、また基本的な実験であると考えられるが、従来の双結晶に関する研究は引張軸に対する粒界の角度 θ が 0° のものがほとんどである。しかも、こ

これらの研究の大部分のものは微視的立場からなされており、その重要性にもかかわらず、変形の様子を詳細に調べたものはない。そこで本研究では、純アルミニウムを用いて大きな双結晶を製作し、結晶粒界の角度を種々に変え、光弾性皮膜法、モアレ法および斜め入射法などの実験力学的方法を双結晶に適用して、結晶粒界近傍の変形の様子を全視野的に観察し、変形状態を詳細に、系統的に解析した。さらにモデル実験で得られた諸量と双結晶の変形挙動の比較検討を行ない、実用材料の変形挙動に対してモデル実験の結果を適用することにより、巨視的な立場から解釈しようとする試みを行なった。

第2章 直線境界を有する接合材

第2章では直線境界を有する接合材について解析を行なったが、最初に実験方法などについて述べている。実験方法としては三次元的影響を観察でき、しかも比較的容易に主応力を分離することができる方法として光干渉応力解析法と平面光弾性実験法を併用した。光干渉応力解析法によれば主応力和と主応力差に関する情報が同時に得られるが、主応力差に関する情報が明瞭に得られないので、平面光弾性実験法を併用した。引張荷重あるいは曲げ荷重を受ける場合の応力分布を解析した結果、縦弾性係数の大きい方は変形が促進され、逆に縦弾性係数の小さい方は変形が拘束されていること、接合境界の両端で応力が高くなっていること、縦弾性係数の小さい相の境界近傍において応力の極大点があること、また縦弾性係数の大きい相の境界近傍において応力の極小点があることなどを明らかにした。図1は一例として引張荷重を受けたときの主応力差、主応力和の分布を示したものであるが、この図からも以上に述べたことは知られる。なお図中のA、Bは縦弾性係数の小さい相および大きい相をそれぞれ示す。

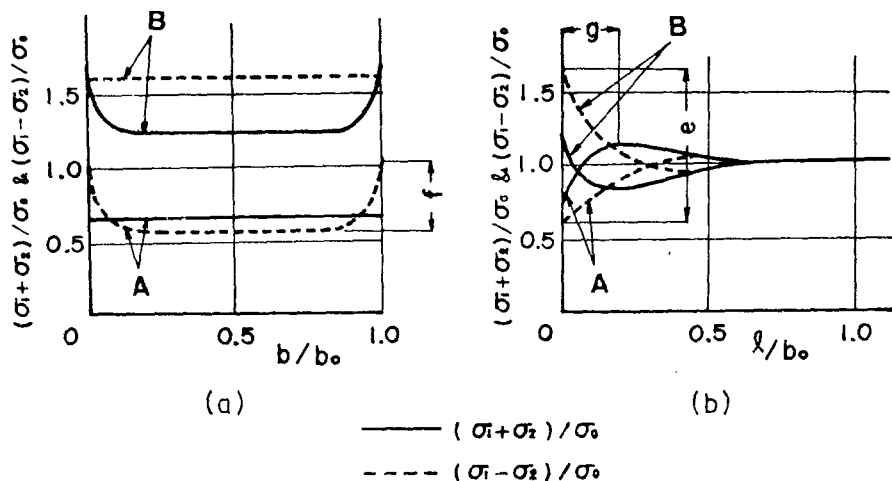


図1 主応力差および主応力和の分布(試験片V-3)

(a)接合境界上における分布 (b)試験片の中心線上における分布

また接合境界近傍における応力分布は弾性定数の差だけでなく、厚さの影響も受けることが示された。さらに材料の弾性定数の影響については、縦弾性係数とポアソン比を同時に考慮した新しいパラメータ ϕ_σ を導入することにより、統一的に整理することができた。なお、このパラメータは全ての接合材の場合に使用された。

第 3 章 斜直線境界を有する接合材

斜めの直線境界を有する接合材のときは、縦弾性係数の大きい相が鋭角になっている部分に高い応力が生じており、引張軸に対する境界の角度 θ が $\theta = 30^\circ$ のときもっとも応力分布の変化が大きく、最大応力も大きくなっている。引張荷重を受ける場合は図 2 に示されているように $\theta = 60^\circ$ 近辺で応力分布の乱れが最小になることを明らかにした。また主応力の最大値と最大せん断応力の最大値はだいたい同じ位置に生じ、両者の値（一様応力に対する比）もほぼ同じであること、試験片全体について見ると最大値は常に縦弾性係数の大きい方にあり、最小値は縦弾性係数の小さい方に存在していること、両成分の弾性定数の差が大きくなると応力の最大値は大きくなり、最小値は小さくなること、試験片の厚さが増大すると程度は小さいが弾性定数の場合と同様な影響を与えることなどを示したが、応力の最大値、最小値に関するこのような事実は他の接合材の場合にも、一部のものを除いてだいたい当てはまることがわかった。

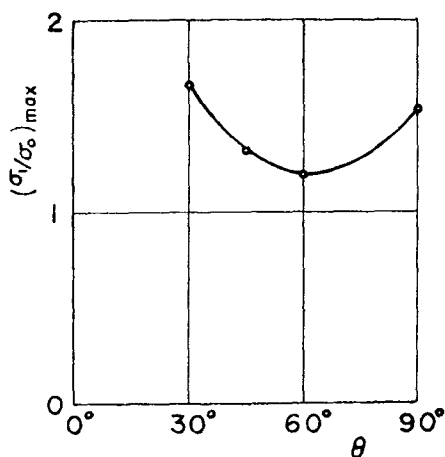


図 2 $(\sigma_1/\sigma_0)_{\max}$ と θ の関係
($t = 6$, $\phi_\sigma = 0.31$)

第 4 章 円弧形境界を有する接合材

第 4 章では円弧形境界を有する接合材の応力分布を解析し、円弧の曲率の影響などを明らかにした。縦弾性係数の大きい相が凹形るとき接合境界両端で応力が高く、形状が逆になると応力分布の様子も逆になっており、試験片の幅を b_0 、円弧の半径を R とすると図 3 に示されているように、 $b_0/2R \div -0.5$ （負の値は縦弾性係数の大きい相が凸形の形状であることを示す。）のとき応力分布の乱れが最小になることを示した。曲げ荷重のときも引張りの場合と同様なことが云えるが、中立軸上で応力が零になるため、縦弾性係数の大きい相が凸形の場合は境界上の応力は平均応力以下となっている。

第5章 円形介在物を有する接合材

第5章では円形介在物を有する接合材を扱っており、試験片の幅の影響を中心に、材料定数、試験片の厚さの影響を明らかにし、さらに無限板の二次元弾性理論解との比較検討を行なった。介在物の縦弾性係数が小さいときはマトリックス側の円孔縁に高い応力が生じ、介在物の縦弾性係数が大きいときは応力分布の様子は逆になるが、前者の方が弾性定数の違いによる影響が大きく、高い応力が生じている。介在物の存在する場合の応力集中係数の表示方法について検討し、介在物とマトリックスの力の分担を考慮に入れて決定する方法が妥当であることを示した。無限板に対する二次元弾性理論解と比較すると、有限板の場合は応力分布の変化が小さくなっており、さらに理論解では一様応力になっている介在物内の応力が有限板の場合には接合境界で少し変化しているなど、理論解との相違点が明らかにされた。図4は試験片の幅の影響を示した一例であるが、試験片の幅とともに応力集中係数の値が変化する様子を示している。 σ'_0 は介在物を除いた試験片の幅に対する平均応力である。

第6章 接合境界近傍の応力分布に関する三次元的考察

直線境界の接合材について散乱光法を適用することにより、三次元的応力分布を観察した。その結果、たとえば試験片の中心線上における主応力差の分布は図1に示された二次元的観察の結果と傾向が同じであることが示され、平面光弾性実験による観察は三次元的分布を厚さ方向に平均化したものに近いことが明らかにされた。

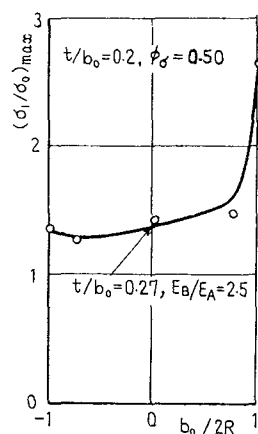


図3 $(\sigma_1/\sigma_0)_{\max}$ におよぼす $b_0/2R$ の影響

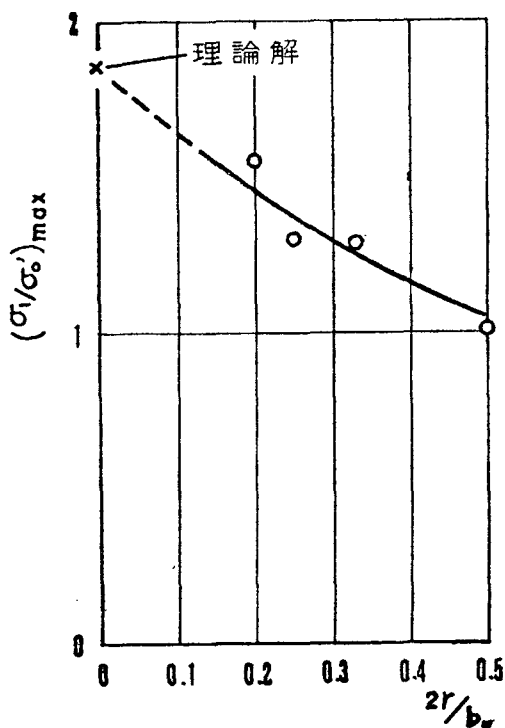


図4 応力集中係数と幅 b_0 の関係 ($\phi_\sigma = -0.43$)

第7章 アルミニウム非等軸双結晶の変形挙動

第7章では任意の結晶方位のアルミニウム双結晶試験片をブリッジマン法で製作し、引張軸に対する結晶粒界の角度 θ を $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ に変え、光弾性皮膜法により降伏直後の変形の様子を観察し、双結晶の全般的な変形挙動を明らかにした。図5は双結晶の変形様式を示したもので、斜線部から変形が進み、番号1, 2の順に進行することを示している。 $\theta = 0^\circ$ の双結晶の変形は一般的には不均一に進行し、変形の様式は三つの型に分類される。 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の場合は $\theta = 0^\circ$ のものよりさらに不均一に進行し、一般的には図6に示されているように粒界で変形が拘束されてひずみが小さくなること以外はモデル実験の結果と傾向が同じである。降伏応力については双結晶の降伏応力を σ_y , 単結晶の応力-ひずみ曲線から単純に合成して得られる降伏応力を σ_m とすると、 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ のときは $\sigma_y / \sigma_m \leq 1$ である。 $\theta = 0^\circ$ のときは試験片の数が少ないのではっきり云えないが、やはり1以下になるようである。一方、容易すべり領域における加工硬化率はほとんどの場合、双結晶の方が成分単結晶の応力-ひずみ曲線を単純に合成したものより大きくなっている。

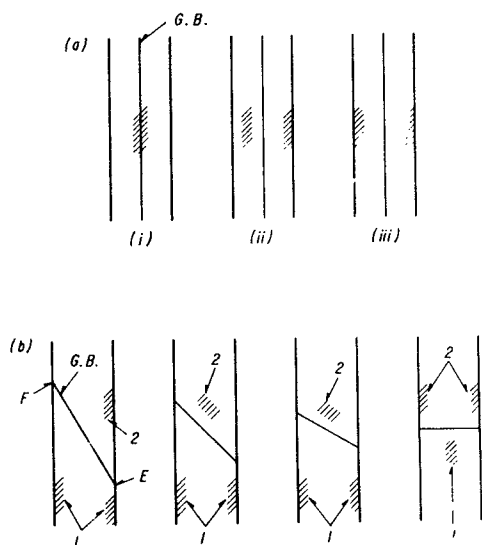


図5 変形様式の模式図

(a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$

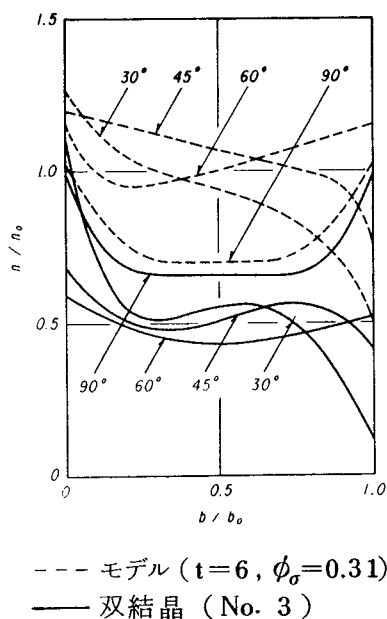


図6 変形の大きい方の境界上におけるひずみ分布

第 8 章 アルミニウム等軸双結晶の変形挙動

第 7 章の非等軸双結晶に関する研究を基礎にして、代表的な二つの方位と考えられる $\langle 111 \rangle$ および $\langle s.f. = 0.5 \rangle$ (一次すべり系の Schmid factor の値が 0.5 になる方位を意味する。) の方位を有する等軸双結晶を種付け法により製作し、光弾性皮膜法、モアレ法および斜め入射法などを用いて変形の様子を系統的に解析した。試験片の結晶方位は図 7 に示すようなものである。A は引張軸を、その他の点は板面法線方向の方位を示す。光弾性皮膜法により全体的な変形を捕える一方、モアレ法により光弾性皮膜法では得ることのできない試験片の回転あるいは特定方向のひずみを、また斜め入射法などにより面外変形を解析した。

一次すべり系の数が多い $\langle 111 \rangle$ のときは一樣変形で粒界の影響が小さくなっているが、 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の場合に粒界を境にして二つの成分単結晶の間に回転が生ずる点が特徴的なことで、その様子は一例として図 8 に示したモアレ縞によく示されている。

双結晶の応力-ひずみ曲線は、この方位の場合は単結晶のそれを単純に合成したものとはほとんど変わらない。一方、一次すべり系の数が少ない $\langle s.f. = 0.5 \rangle$ のときは粒界の影響が大きく、不均一変形になり、特に $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の場合は、一般的には図 8 に示されているように粒界における変形が拘束され著しくひずみが小さくなることが明らかにされた。この方位の応力-ひずみ曲線は単結晶のそれを単純に合成したものとはかなり違っており、 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ のときは $\sigma_y / \sigma_m \div 1$ であるが、 $\theta = 0^\circ$ のときは $\sigma_y / \sigma_m < 1$ となり、その値は λ (双結晶の両成分単結晶のすべり方向あるいはすべり面の相対的角度) に依存することがわかった。

以上のような双結晶の実験から一般的に双結晶の変形の様子をまとめると、つぎのように云える。 $\theta = 0^\circ$ の場合に非等軸双結晶に関する実験から分類された三つの型は一次すべり系の関係

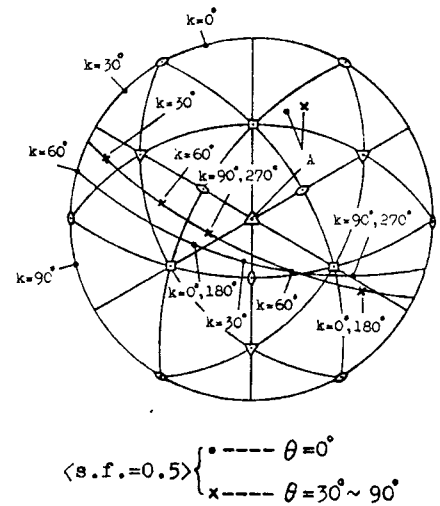


図 7 試験片の結晶方位

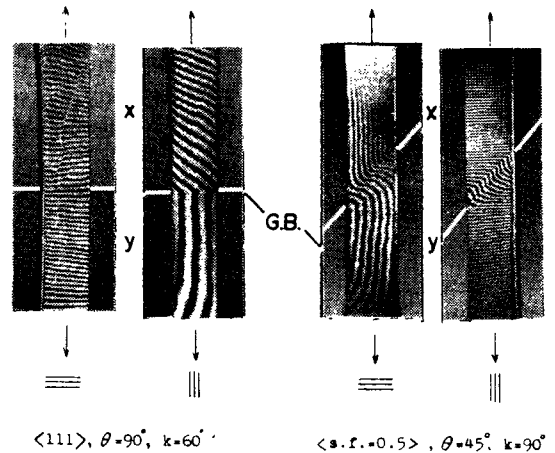


図 8 モアレ縞の一例

により分類することができ、一次すべり系の数が少ない方が粒界の影響が大きい。 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の場合は(i)二つの成分単結晶の一次すべり系の数が多いときは $\sigma_y/\sigma_m \doteq 1$ で、粒界における拘束がなく、回転だけが生ずる。(ii)二つの成分単結晶の一次すべり系の数が少ないときは粒界の拘束が強く、 $\sigma_y/\sigma_m \leq 1$ となり、等軸のとき $\sigma_y/\sigma_m \doteq 1$ 、非等軸のとき $\sigma_y/\sigma_m \leq 1$ である。(iii)一方の成分単結晶の一次すべり系の数が多く、他方のそれが少ないときは粒界における回転も粒界自体の拘束もなく、モデル実験と同じような変形になることを示した。これらの三つの型はUrieらが多結晶体の試験片を用いて示した三つの型に対応しており、成分単結晶のすべり系の相互関係によって分類されることを明らかにした。

さらに光弾性皮膜法とモアレ法を同一面上に同時に適用する方法により、ある一点におけるひずみの勾配が著しい場合には、光弾性皮膜法を用いてひずみの測定を行なうと誤差が生ずることを示した。また、このようなひずみの変化が大きい所では通常のもアレ法では正しいひずみを得ることが難しい場合があり、そのようなときには格子の間隔を拡大投影機を用いて直接測定する必要があることなどひずみ測定法についても言及した。

第 9 章 光弾性モデル実験と AI 双結晶の関連について

第 9 章では光弾性モデル実験の結果を用いてアルミニウム双結晶の変形挙動の解釈を試みた。 $\theta = 0^\circ$ の双結晶の場合は、ひずみ分布の変化が小さいという意味ではモデル実験と対応している。 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の双結晶は一般的には粒界上のひずみ分布はモデル実験の結果と定性的に同じであるが、モデルに比べ双結晶の方は粒界における変形の拘束のために、その分だけひずみが小さくなったような分布をしていること、二つの成分単結晶の応力-ひずみ曲線の違いが大きくなるとますますモデル実験の結果とひずみ分布が似て来ること、Urie らが多結晶体について述べている粒界近傍にひずみの極小点が生ずる現象は応力分布の影響が大きいこと、さらに、アルミニウム双結晶の結晶粒界上におけるクリープ変形の状態はモデル実験の結果を用いるとよく説明できることなどを示した。

$\theta = 0^\circ$ の双結晶の変形挙動、 $\theta = 30^\circ \sim 90^\circ$ の双結晶の粒界における拘束量自体の解析などはモデル実験では解決できないもので、このようにモデル実験の適用にも限界はあるが、上に述べたように種々の現象がモデル実験によってよく説明され、このようなモデル実験を用いた手法は実用材料の変形挙動を解釈するための有効な一つの方法であることが示された。

第 10 章 結 論

第 2 章～第 9 章までの研究結果をまとめて結論とした。

審 査 結 果 の 要 旨

実用金属材料の力学的挙動を解明するためには、結晶粒界や複合材料の境界のような不連続な境界が変形挙動に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。そのためには境界近傍における応力・ひずみ分布を明らかにすることが重要であるが、従来これについて必ずしも明白ではなかった。本論文は、光弾性モデルを用いて各種形状の境界近傍における応力・ひずみ分布を実験力学的方法で求め、またそれらの境界形状と対比する形状を持つアルミニウム双結晶について、結晶粒界近傍の変形挙動を詳細に明らかにすると共に、両者による結果の比較検討を行ったもので、全編10章よりなる。

第1章は緒論で、境界付近の変形に関する従来の研究を概観し、本研究の目的について述べている。

第2章では直線境界を持つ光弾性モデルについて境界近傍の応力・ひずみ分布を光弾性法・光干渉法・モアレ法を用いて求め、境界をはさんで起る変形の促進および拘束の量を明らかにし、境界近傍の応力・ひずみ分布に及ぼす材料の弾性定数の影響を、縦弾性係数とポアソン比を同時に考慮した新しいパラメータ ϕ_0 を提案し、これにより統一的に整理することに成功した。これらの結果は貴重な知見を与えたものである。

第3章より第5章では第2章で用いた手法により、斜直線、円弧形および円形境界近傍における応力・ひずみ分布を明らかにし、それぞれの場合について境界に沿って一様な分布を示す条件を求めている。

第6章では境界近傍の応力の三次元的分布を散乱光法で調べ、二次元的実験結果を三次元的分布へと拡張する近似的適用法について述べている。

第7章では前章までのモデル実験の結果をふまえて、任意の方位を有するアルミニウム非等軸双結晶の変形挙動を光弾性皮膜法およびモアレ法で調べ、全視野に亘って変形の様相を明らかにした。特に引張軸に対する結晶粒界の角度の変化の変形挙動への影響が明白にされている。

第8章では変形に対して代表的方位である $\langle 111 \rangle$ および $\langle \text{Schmid Factor} = 0.5 \rangle$ の方位を有する両成分単結晶が互いに回転関係にあるアルミニウム等軸双結晶について、詳細に結晶粒界近傍の変形を調べ、変形の様相が一次すべり系の相互関係により説明し得ることを示している。

第9章は光弾性モデル実験の結果を用いて、アルミニウム双結晶の変形挙動の解釈を試みたもので、その適用には限界があるが、種々の現象がモデル実験の結果によりよく説明し得ることを示したことは意義が大きい。

第 10 章は結論である。

以上要するに本論文は、光弾性モデルの境界近傍における応力・ひずみ分布およびアルミニウム双結晶の変形挙動を実験力学的方法で調べ、境界近傍の変形挙動を解明して、多くの知見を得たもので、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。