

論文内容要旨 (和文)

2014 年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 小泉 隆行



論 文 題 目 巨視的材料試験を応用した金属材料の強化機構解明に関する研究

金属材料は輸送機器及び建築・機械などの構造用材料としての需要が非常に高く、今後も様々な分野での利用拡大が想定される。近年の地球環境保護の観点に基づく、省エネルギー・省資源化に伴う環境調和型社会を実現するためには、軽量・高強度などの性能を有する素材を開発する必要がある。構造用金属材料に対して要求される性能は年々厳格化しており、極限的な性能を引き出すためには、材料の支配的な強化機構を解明して、その知見を製品開発へ応用することが重点課題となる。従来、材料科学分野における金属材料の強化機構に関する研究は、顕微鏡観察を主たる手段としてきており、巨視的な材料試験・計測の結果から材料内部で起こっている現象を推定しようとする方法は積極的に行われてこなかった。本研究では、未だ不明な点が多くある金属材料の強化機構の解明に向けて、巨視的な材料試験から内部加工組織（転位組織、集合組織、双晶群など）と機械的性質の因果関係を明らかにする方策について検討する。

自動車などの部材に用いられる金属薄板は座屈の影響で単軸圧縮試験が不可能であることから薄板用単軸圧縮試験法を開発した。A6063-T6でのバルク形状試験片と積層試験片による圧縮試験結果の比較、A1050及びA6061-T6での引張圧縮特性の差異に関する検証を通じて、本圧縮試験法が高精度の試験結果を取得できることを実証した。開発した圧縮試験をもとに、冷間圧延によって内部組織に異方性を有すると考えられるひずみ硬化りん青銅板（C5191-H）に対して、異なる条件下での焼鈍を行い、その引張圧縮特性について調査した。納入材では圧延方向で圧縮側の応力レベルが引張側よりも大きく低下し、引張圧縮特性に大きな差異が生じた。圧延直角方向では圧縮側が引張側を上回り、応力レベルは引張・圧縮側どちらも圧延方向の結果を相対的に上回った。納入材に低温焼鈍（200°C, 1.5 h）を実施することで、納入材よりも応力レベルは全体的に低下するが、各試験片切り出し方向に対する引張圧縮特性の差異は全体的に近づいた。納入材に完全焼鈍（650°C, 1.5 h）を実施することで、圧縮側が引張側の応力レベルを終始上回り、引張圧縮特性に明確な差異が生じた。全方向において圧縮側が引張側の応力レベルを上回ったのは完全焼鈍条件の場合のみであった。低温焼鈍材は納入材よりも強度が僅かに低下するが、試験片面内における引張圧縮特性の差異は大きく改善され、工業材料として一般的に利用しやすい状態になることを明らかにした。

続いて、次世代の構造用金属材料として期待される超微細結晶粒材での粒界効果について検討するため、万能試験機を用いて荷重軸方向への連続反転負荷が実施できる試験法の開発を行い、Equal angular channel pressing (ECAP) 法で作製された平均結晶粒径が184 μmから3.6 μmの純アルミニウム丸棒材でのバウシinger効果について系統的に調査した。この結果、結晶粒径と材料強度の間には強い相関が観察されず、結晶粒径とバウシinger効果の間にも強い相関が観察されなかった。強ひずみ加工まま材においては、結晶粒界が転位運動の障壁として作用する効果は大きくないことが明らかにされた。さらに、超微細結晶粒を有する純アルミニウムの降伏強度に及ぼす結晶粒径の影響について、ECAP加工を用いて連続的に粒径を微細化した試料群と、最初に8

パスのECAP加工後、焼鈍によって粒径を段階的に粗大化した試料群を用いて、材料強度とX線回折測定によるバルク平均の転位密度について系統的な調査を実施した。実験データの解析結果をもとに、降伏強度から転位関連強化寄与分を定量化して差し引いた結果、観察された粒径関連強化の程度は従来のHall-Petchの関係から外挿される量と一致していた。また、ECAP加工まま材を低温焼鈍することによって、粒径に起因する強化量が増加することが明らかにされた。

本研究成果から、これまで不明な点が多かった材料強化機構の一部について有効な知見を得るに至り、巨視的な材料試験から内部加工組織による機械的性質を検討するための方策について有効性が示された。これにより、従来の材料科学分野での主体的な研究方法である顕微鏡による微視的な観察による知見が、必ずしも巨視的な力学的特性に支配的な影響を与えない場合があることを示唆した。金属材料の強化機構の解明へ向けた研究を効率的に実施するためには、本方策をもとに巨視的な材料強度を支配する強化因子について検討し、その後、マイクロピラー圧縮試験等を通じて微視的な考察を行うことが有効であると考えられる。加工や焼鈍、純金属や合金など、様々な組み合わせに応じて巨視的な材料強度を支配する強化因子は変化すると推察される。今後は、広範かつ系統的な実験研究を実施してデータベースの構築を行うことで、次世代の構造用金属材料に対する開発指針や数値シミュレーションに用いる材料モデルの確立に大きな影響をもたらすと考えられる。本研究がそのきっかけになることを期待する。

論文内容要旨 (英文)

2014 年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 小泉 隆行



論 文 題 目

Research on elucidation of strengthening mechanisms of metallic material utilizing macroscopic material tests

In this study, to clarify the strengthening mechanism of metallic materials that still has many unknown points, we examined a method to elucidate relationships between the mechanical properties and internal material structure from observations in macroscopic material tests.

First, we developed an in-plane compression test method for sheet metals. As an example, tension-compression asymmetry of cold rolled phosphor bronze sheet (C5191-H), was investigated. Tension and compression tests were performed using a universal testing machine and the developed compression test method. We carried out monotonic tension and compression tests on the as-received material and low temperature annealed samples (200°C, 1.5 h) in rolling direction (RD), in a direction 45° relative to RD, and transverse direction (TD) to verify the strength differential effect (SDE). For both the samples, significant difference between monotonic tension and compression tests results were observed.

Secondly, the Bauschinger effect in ultrafine-grained pure aluminum rods (A1070) was investigated. The samples were produced by multipass equal-channel angular pressing (ECAP). Uniaxial tensile and compressive tests, which were followed by reversal of the loading direction at a prestrain of 1%. The influence of the grain size on the intensity of the Bauschinger effect was investigated. The main results of our experimental study are as follows: A strong correlation between the grain size and the material strength was not observed. A strong correlation between the grain size and the intensity of the Bauschinger effect was also not observed. Finally, we investigated the effects of the grain size on the yield strength of aluminum using a group of samples with grains successively refined by equal-channel angular pressing (ECAP) and another group of samples produced by 8 ECAP passes and subsequently annealed step by step to produce coarser grains. It was found that for the as-ECAP-processed samples, the degree of the grain size-related strengthening relative to the observed yield strength was consistent with an extrapolation of the conventional Hall-Petch relation, and marked extra strengthening, which was clearly related to the grain refinement, appeared after annealing.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 29 年 8 月 9 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

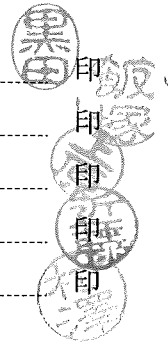
主査 黒田 充紀

副査 飯塚 博

副査 上原 拓也

副査 近藤 康雄

副査 村澤 剛



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	機械システム工学専攻		氏名 小泉 隆行
論文題目	巨視的材料試験を応用した金属材料の強化機構解明に関する研究		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成 29 年 7 月 26 日～ 平成 29 年 8 月 8 日
論文公聴会	平成 29 年 8 月 8 日	場 所	工学部 6 号館 315 室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	平成 29 年 8 月 8 日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

本研究は、未だ不明な点が多くある金属材料の強化機構の解明に向けて、巨視的な試験・計測の結果から内部で生じている現象を同定するという独自のアプローチ法の開発を目的としている。学位論文では、第 1 章で背景と目的を述べ、第 2 章では、これまでの多くの板材の力学挙動に関する研究が事実上引張試験のみに頼ってきた現状を改善すべく、高精度な薄板用単軸圧縮試験法を開発している。第 3 章では、板材の引張強度と圧縮強度の差異から、内部加工組織（転位組織・集合組織）と焼鈍後に現れる双晶群（結晶学的に方向性がある）が機械的性質に及ぼす影響を調査する方法を、事例（りん青銅使用）を通して提案している。第 4 章では、著しい高強度を示す微細結晶粒材料（アルミニウム）に対して、精密な反転負荷試験を実施し、バウシinger 効果（反転直前の降伏応力に対して反転直後のそれが低下する現象）を詳細に調べ、微細結晶粒材料内の粒界が既往の研究で指摘されているような転位運動の強い障害とはなっていない可能性を指摘している。第 5 章では、微細結晶粒材料の降伏強度を、X 線回折測定による巨視的転位密度値を用いて、転位強化寄与分と粒径強化寄与分へ分解することを試みている。微細結晶粒材料の降伏強度の内訳としては、転位強化が支配的であり、粒径強化は既知の Hall-Petch 直線の外挿で見積られる量と同程度であることを示している。これらは従来の微細結晶粒材料の強化機構に関する知見への再考を迫る新しい結果である。第 6 章では本論全体を総括し、本研究で開発した巨視的力学挙動の観察から材料内部で生じた現象を同定する方法の有効性と将来性を強調している。

金属材料の強化機構の解明に対して、材料科学分野では顕微鏡観察を主たる研究手段としてきており、巨視的な力学試験・計測結果から内部で生じた現象を同定するという方法には新規性・独創性が認められる。最初の章では、研究背景、着想に至った経緯、研究目的が十分な文献調査に基づいて適切に述べられ、続く 4 つの章で示される実験研究の記述についても、根拠となる詳細なデータ提示から、結論を導くに至るデータ解析法、表現方法は適切である。最後の章では、設定した研究テーマに沿った現時点での結論と今後の展望が明確に示されている。全体の構成・体裁も適切である。以上より、本論文は、学位論文審査基準に照らして、これを満たしていることが確認でき、合格と判定することが妥当である。なお、本論文においては、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ない。

最終試験の結果の要旨

学位論文公聴会では、約 50 分間の論文内容の発表を行い、続いて約 30 分間の質疑応答を行なった。論文申請者は、学位論文の内容を網羅的かつ明解に発表した。審査委員からは、研究の位置づけ、研究手法の妥当性、過去の知見と異なる（新規性に関わる）点についての見解、今後の展開の方向性等について専門性の高い試問がなされた。申請者は、全ての質問に自身の持つ知識に基づいて明解に解答または自らの見解を示した。本最終試験を通して、申請者が、学術的・技術的問題を自ら捉えてその意味を理解し、調査分析と定式化により仮説を検証する能力、問題解決に革新的な方法を適用し、自ら独創性を発揮する能力を身につけていることを確認した。よって合格と判断することが妥当である。