

京都大学	博士（工学）	氏名	Ashif Equbal
論文題目	Deformation Mechanisms of Single Crystals of FCC Medium Entropy Alloys (面心立方構造を有する中エントロピー合金単結晶の塑性変形機構)		

(論文内容の要旨)

本論文は、面心立方構造を有する CrFeCoNi 四元系および FeCoNi 三元系等原子量中エントロピー合金単結晶を作製し、10~1273 K の広汎な温度範囲で圧縮および引張試験を行い、降伏応力、引張延性、活動変形モード、変形・転位組織の温度依存性などを実験により系統的に調査し、中エントロピー合金単結晶の変形機構の解明を行った結果を取り纏めたものであり、5 章からなっている。

第 1 章は序論であり、本研究の研究背景および研究方針について纏められている。三種以上の構成元素が等原子量に近い組成で形成された高/中エントロピー合金は、従来の合金では見られない特異な性質を持つことが知られている。中でも、面心立方(FCC)構造を有する五元系 CrMnFeCoNi 高エントロピー合金やその派生合金である三元系 CrCoNi 中エントロピー合金は、温度の低下とともに、降伏強度と破断伸びが同時に増大する特異な性質を示し、次世代の実用構造材料としても注目されている。しかし、高/中エントロピー合金がこのような優れた力学特性を示す理由については未だに判明されていない部分が多い。本研究は、FCC 構造を有する中エントロピー合金 CrFeCoNi および FeCoNi 単結晶の塑性変形挙動を調査することで、この種の合金の力学特性を支配する要因を考察し、更なる高強度・高靱性を付与するための合金設計指針を提案することを目的とするものである。

第 2 章では、面心立方構造を有する CrFeCoNi 四元系等原子量中エントロピー合金単結晶の変形機構を調査する方法とその結果が纏められている。単一すべり方位を有する CrFeCoNi 単結晶は、室温以下で特に強い降伏強度の温度依存性を示し、温度低下とともに強度が著しく増大する。しかし、50 K 以下では温度低下とともに生じる強度の増大の程度は減少し、いわゆる慣性効果が発現する。室温以上では降伏強度は温度上昇とともに緩やかに減少するが、1073 K を越えると応力-歪曲線にはセレーションが現れ、ポルトヴァン・ル・シャトリエ効果により緩やかな強度の逆温度依存性が発現する。いずれの温度でも活動すべり系は、他の面心立方金属と同様に{111}<110>すべり系である。各温度で転位が運動する活性化体積を評価した結果、これら中エントロピー合金に見られる強い強度の温度依存性は多くの FCC 固溶体と同様に転位運動の熱活性過程によるもので、高/中エントロピー合金が示す高強度は固溶強化に起因することを解明した。積層欠陥エネルギーは比較的 low、引張変形を行うと、液体窒素温度で双晶変形が発生する。双晶変形の発生は、主すべりによる 70% もの大歪みが生じてから共役系で発現する。一方、室温で引張変形を行うと、変形双晶は発生せず、液体窒素温度に比べると破断伸びはかなり小さい。このことから、変形双晶は低温ほど発現しやすく、その発現により引張延性を向上させることができることを明らかにした。

第3章では、面心立方構造を有する FeCoNi 三元系等原子量中エントロピー合金単結晶の変形機構を調査する方法とその結果が纏められている。単一すべり方位を有する FeCoNi 単結晶は、室温以下で特に強い降伏強度の温度依存性を示し、温度低下とともに強度が増大する。しかし、その増大の仕方は四元系等原子量中エントロピー合金と比較すると遥かに小さく、外挿により求められる絶対零度での降伏応力も遥かに小さい。すなわち、Cr の添加が強度の向上には効果的であることを明らかにした。50 K 以下での慣性効果、1073 K 以上での強度の逆温度依存性は同様に発現する。いずれの温度でも活動すべり系は、他の面心立方金属と同様に{111}<110>すべり系であり、活性化体積評価から、この中エントロピー合金の強度の温度依存性も転位運動の熱活性過程によるもので、固溶強化が主たる強化機構であることを解明した。積層欠陥エネルギーは比較的高く、引張変形を行っても室温、液体窒素温度のいずれでも変形双晶は発生しない。そのため、引張延性もそれ程高くないことを明らかにした。

第4章では、強度の温度依存性の原因となる転位運動の熱活性化解析および絶対零度での強度を決定する材料因子について考察し、その結果を纏めている。他の面心立方構造を有する五元系、四元系および三元系等原子量高/中エントロピー合金単結晶の実験結果も合わせて考察すると、平均二乗原子変位により固溶強化の程度が予測できることも確認した。また、平均二乗原子変位はCr 添加によって効果的に増加し、強度の向上に効果的であることを解明した。一方、積層欠陥エネルギーが双晶変形の発現を支配し、引張延性を決定することが明らかとなったが、変形双晶の活動開始応力と積層欠陥エネルギーには必ずしも相関関係があるわけではなく、変形双晶の活動を支配する因子の解明に向けて更なる研究が必要である。Cr の添加は平均二乗原子変位を増加させ強度を向上させるだけでなく、積層欠陥エネルギーを低下させ、変形双晶の活動を容易にさせるため、高/中エントロピー合金系では、Cr 添加量が高いほど高強度・高靱性に優れた力学特性が発現しやすく、構造材料として有望であると提案した。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、将来の合金設計についての提言を行っている。

氏名	Ashif Equbal
----	--------------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、面心立方構造を有する CrFeCoNi 四元系および FeCoNi 三元系等原子量中エントロピー合金単結晶の力学特性について系統的に調査を行った結果を取り纏めたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. いずれの合金でも室温以下で強い降伏強度の温度依存性を示し、温度低下とともに強度が著しく増大する。転位運動の活性化体積評価は、これら中エントロピー合金に見られる強い強度の温度依存性は多くの FCC 固溶体と同様に転位運動の熱活性過程によるもので、高/中エントロピー合金が示す高強度は固溶強化に起因することを解明した。
2. CrFeCoNi 四元系合金では積層欠陥エネルギーが比較的 low、引張変形を行うと、液体窒素温度で双晶変形が発生する。FeCoNi 三元系合金では積層欠陥エネルギーは比較的高く、室温、液体窒素温度のいずれでも変形双晶は出現しない。変形双晶の出現は引張延性を大きく向上させることを解明した。
3. 五元系、四元系および三元系等原子量高/中エントロピー合金単結晶の実験結果も合わせて考察すると、平均二乗原子変位により固溶強化の程度が予測できる。Cr の添加は平均二乗原子変位を増加させ強度を向上させるだけでなく、積層欠陥エネルギーを低下させ、変形双晶の活動を容易にさせるため、高/中エントロピー合金系では、Cr 添加量が高いほど高強度・高靱性に優れた力学特性が発現しやすく、構造材料として有望である。これは、高性能高/中エントロピー合金の設計において特筆すべき成果である。

以上のように本論文は、面心立方構造を有する CrFeCoNi 四元系および FeCoNi 三元系等原子量中エントロピー合金単結晶の変形機構の詳細を示したもので、学術的のみならず実用的にも高く評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年8月3日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。