

氏名	奥山 彫夢		
授与学位	博士(工学)		
学位記番号	博甲第154号		
学位授与年月日	平成29年3月17日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項		
学位論文題目	第2相粒子を含む分散強化型2相合金中の転位蓄積と巨視的加工硬化特性の結晶塑性解析		
論文審査委員	主査	教授	大橋 鉄也
		教授	南 尚嗣
		教授	柴野 純一
		准教授	佐藤 満弘
		准教授	大津 直史

## 学位論文内容の要旨

本論文は、分散強化合金の巨視的加工硬化特性を結晶塑性解析の手法を用いて検討したものである。

分散強化合金とは、一般的に母相となる材料に比べ硬質な第2相を分散させた合金である。硬質な第2相が母相結晶中に分散すると、結晶のすべり変形を担う運動転位は第2相粒子により抵抗を受ける。そのため単相の場合に比べすべり変形を開始するために必要となるせん断応力が大きくなり降伏強度が増加する。これはOrowan機構と呼ばれ多くの研究がなされている。また粒子が分散する結晶中を転位が運動していくと、粒子の周りにOrowanループと呼ばれる転位ループを残す。この転位ループは、更なるすべり変形の為の運動転位に対する抵抗となるため加工硬化すると考えられている。一方である程度変形した分散強化合金中の微視組織のTEM像からは、Orowanループの他にも母相中に多くの転位が蓄積している様子が観察できる。そこで本研究では、これまで分散強化合金の加工硬化に関して考慮されていなかった母相中に蓄積する転位について注目し、結晶塑性解析の手法を用いて検討を行った。

解析の対象は、九州大学の土山らによって実験的に研究された硬質粒子分散鋼 (VC steel) とした。本研究の数値解析により得られた結果と実験結果を比較することで、用いた加工硬化モデルの妥当性を検討した。また軟質粒子分散鋼 (Cu steel) についても同様に検討を行った。

本研究で用いた結晶塑性解析は、すべり系の活性化条件となる臨界分解せん断応力 (CRSS) の決定に拡張Bailey-Hirschモデルを導入している。拡張B-Hモデルでは、微視組織の寸法効果を表す項が導入されており、本研究では分散強化合金の代表寸法として粒子の平均間隔を導入した。また加工硬化に寄与するSS転位密度の増分の決定に関する転位の平均自由行程は、林立転位密度に依存するモデルであるが、本研究では粒子の平均間隔にも依存するモデルとした。

VC steelを想定した粒子一つを含む解析モデルで公称ひずみ5%まで引張変形させた結果、実験と解析結果で良く一致する降伏応力が得られた。しかし解析結果の加工硬化率は実験に比べ高い結果であった。そこで転位の平均自由行程に寄与する要因を検討した結果、粒子の平均間隔の2から3倍程度の値を転位の平均自由行程とすることで実験と良く一致する加工硬化率が得られた。粒子の平均間隔の2から3倍は、粒子が不規則に分布する結晶中の転位の運動に関するForamaとMakinの研究で見られる転位の運動の様子が当てはまるものであった。

上述の結果は、単純化の為に主すべり系のみが活動する条件であったため、2次すべり系の活動について検討した。主すべり系と2次すべり系の変形前のCRSSを同じ値で数値解析を行ったところ、2次すべり系は母相の広い範囲で活発に活動していた。そのため母相の広い範囲で主すべり系に対する林立転位密度が増加し、平均自由行程が粒子の平均間隔よりも短い値となる。つまりSS転位密度の増加率が高くなり、公称ひずみ2%程度から線形的な高い加工硬化率を示し実験と一致しない結果となった。この時、2次すべり系の活動により蓄積する転位密度を、実験により観察された結果と比較したところ、数値解析結果の2次すべり系の転位密度は高すぎるということがわかった。そこで2次すべり系の活動が主すべり系より困難な場合として、2次すべり系のCRSSを主すべり系のそれより高い値を設定し解析を行った。すると加工硬化率が実験と良く一致する結果となった。

Cu steelについての解析結果は、次のとおりである。降伏応力は実験と解析結果でほぼ一致する結果となったが、加工硬化率は実験に比べ著しく高い結果となった。結果の詳細を見たところ、Cu粒子は母相と同程度塑性変形していた。すなわちCu粒子によって生ずる母相の運動転位に対する抵抗は、ほとんどないことが考えられる。また実験の組織観察においてもCu粒子は大きく変形しており、母相に蓄積する転位の数はVC steelに比べ少ない。そこで母相の転位の平均自由行程は、粒子の平均間隔の15倍として解析を行ったところ実験とほぼ一致する加工硬化率が得られた。これは母相を運動する転位が粒子を切って進むことで、粒子の分散間隔ごとにはほとんど転位が蓄積しない描像である。

分散強化合金の巨視的な力学特性を結晶塑性解析の手法を用いて検討した結果、拡張Bailey-Hirschモデルに粒子の平均間隔を導入することで降伏応力が実験結果と良く一致することがわかった。またSS転位密度の増分に寄与する転位の平均自由行程に粒子の平均間隔を基本とする値とし、母相結晶中での転位の運動距離に当てはまるような数値係数を掛けると、加工硬化率が実験結果と良く一致することがわかった。

## 論文審査結果の要旨

金属材料の高強度化手法の一つとして微細な析出相を母相中に分散させる分散強化法があり、広範に利用されている。本論文はBCC鉄の母相中に母相よりも硬質なVC（炭化バナジウム）粒子または、母相よりも軟質なCu（銅）粒子が分散した合金の数値モデルを構築し、外力負荷の下における塑性すべりと転位の蓄積を結晶塑性解析の手法で検討したものであり、特に微視組織の寸法因子について従来にない段階まで研究を進めた。

論文は最初、塑性すべりに要する臨界分解せん断応力に分散粒子の平均間隔（第1の寸法因子）を含む項を導入すると分散強化合金の降伏応力が再現されることを確認した。分散粒子の体積分率依存性などについても計算し、既存の実験結果と良く整合する結果を得た。次に材料の加工硬化特性に関与する寸法因子は第1の寸法因子とは異なるものであることを指摘し、転位の蓄積に関する既存の研究を基礎にして第2の寸法因子を提案した。これを用いて加工硬化特性を計算したところ、VC粒子分散鋼およびCu粒子分散鋼の場合ともに、共同研究先（九州大学）で得られた実験結果とよく一致した。これら2つの寸法因子は分散強化合金組織中の転位の運動と蓄積に関する物理描像に定量性を与えるものであり、結晶塑性解析理論の展開に新たな可能性を付与した。

すなわち、本論文は分散強化合金の降伏応力および加工硬化特性を結晶塑性解析手法によって予測する手法を構築したもので、機械工学分野のみならず材料工学分野における学術的価値も高く、博士後期課程学位論文としての価値が十分であると認められる。