

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 氏 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 大森 俊洋                          |
| 所属機関                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 東北大学 大学院・工学研究科・金属フロンティア工学専攻・助教 |
| 研究題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 鉄系超弾性インバー合金の研究                 |
| <p><b>1. 研究の目的</b></p> <p>現在、実用的な超弾性合金は、Ti-Ni がほぼ唯一であるが、加工が困難なため形状に制約があり、コストも高い点はその普及を妨げている。また、超弾性合金は変形応力が温度に敏感なために温度変化に対して不安定で、作動温度範囲が狭いことも応用の制限を生んでいる。</p> <p>最近、鉄合金(Fe-Mn-Al-Ni 合金)において、応力の温度依存性がゼロに近い特異な超弾性効果(超弾性インバー効果)を見出した。安価な鉄を主体として特殊な合金元素を含まず、加工性に優れるために 1 桁以上の低コストが見込まれる。また、応力の温度依存性が既存合金より 1 桁小さく温度変化に対して安定であり、広い温度幅での利用可能性があるため、超弾性合金の利用範囲を著しく拡大させることが期待できる。</p> <p>本研究では、本合金で超弾性が得られる現象を解明して鉄系超弾性合金における基礎学理的研究を行うとともに、最適な合金を得るための設計とマイクロ組織の制御を行うことで、実用的に利用できる優れた新規超弾性合金の開発を行った。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                |
| <p><b>2. 研究の内容(手法、経過、評価など)</b></p> <p>(1) 鉄系超弾性合金のマイクロ組織観察と合金設計</p> <p>Fe-Mn-Al-Ni 合金はナノサイズの NiAl(<math>\beta</math> 相)が析出した材料であり、これがマルテンサイト変態や超弾性特性に大きく影響を及ぼしている。NiAl が析出しない場合、外場(温度や応力)に応じて変態が不可逆な非熱弾性型マルテンサイト変態であったが、適量の Ni を添加して NiAl をナノ析出させることで可逆的な熱弾性型のマルテンサイト変態となった。透過型電子顕微鏡 TEM による観察の結果、NiAl の析出に伴い、マルテンサイト変態の monoclinic angle が小さくなっていることがわかり、このことにより母相との整合性が高くなり、変態に必要な弾性エネルギーが小さくなったために変態が熱弾性型になったと考えられる。このような熱弾性型マルテンサイト変態を得ることで、超弾性などの形状記憶特性が得られるようになった。</p> <p>(2) 超弾性向上のためのマイクロ組織制御</p> <p>良好で安定な超弾性を得るためにはマイクロ組織と超弾性の関係を明らかにする必要がある。そこで、様々な加工熱処理を検討し、結晶配向や結晶粒径などの組織制御を行った。</p> <p>マルテンサイト変態の変態歪量は方位依存性が強いことが現象論計算によりわかったため、結晶配向の制御は超弾性特性の発現に極めて重要である。本合金は低温で <math>\alpha + \gamma</math> の二相、高温で <math>\alpha</math> 単相となる。図 1 は <math>\alpha + \gamma</math> 二相温度域である 900℃で熱処理し、冷間伸線加工した後に 1200℃で <math>\alpha</math> 単相化した時の結晶方位の測定結果である。伸線方向に <math>\langle 110 \rangle</math> 方位を配向させることができた。また、右の正極点図から、<math>\langle 110 \rangle</math> 繊維集合組織が形成されていることがわかる。<math>\gamma</math> 相が析出しない、あるいは析出量が少ない場合はこのような強い集合組織の絵形成がみられず、二相組織であることが重要であることがわかった。</p> |                                |

## 2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

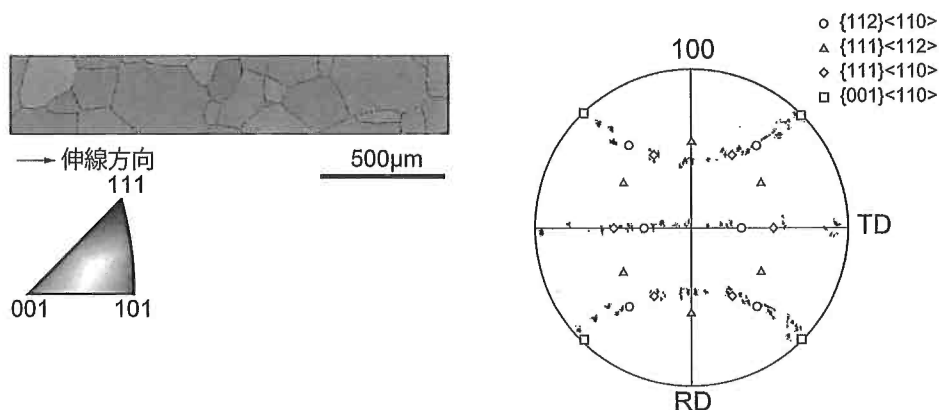


図 1. Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金線材の EBSD 結果(左図:方位カラーマップ, 右図:100 正極点図)

### (3) 超弾性特性の評価

上記の集合組織が形成された線材を用いて、比結晶粒径  $d/D$  ( $d$ :平均結晶粒径、 $D$ :線径)を変化させて超弾性試験を実施した。図 2 は一例である。 $d/D$  が 0.41 と小さいとき、すなわち、結晶粒が線の内部に3次的に分布している状態では、ほとんど超弾性特性が発現しない。一方、 $d/D=2.19$ と大きく、結晶粒が線径を貫通している状態(バンブー構造)では、顕著に超弾性が得られた。以上より、Fe-Mn-Al-Ni 合金においては、比結晶粒径の依存性が極めて強く、特にバンブー構造とすることで優れた超弾性が得られることがわかった。

マルテンサイト変態の誘起応力は $(1-d/D)^2$ にほぼ比例して低下していた。 $(1-d/D)^2$ は、線の断面積積に対し、表面に接していない結晶粒の割合である。変形において、3次的に配置された結晶粒が互いに拘束し合うことで、マルテンサイト変態を阻害して塑性変形を起こし、 $d/D$ が大きくなるほど誘起応力が高くなったと考えられる。そのため、バンブー構造では超弾性も単結晶に近い特性が得られると説明できる。これらの超弾性挙動は、 $(1-d/D)^2$ に対して Taylor モデル、Sachs モデルの間を連続的に変化していることが解析により判明した。

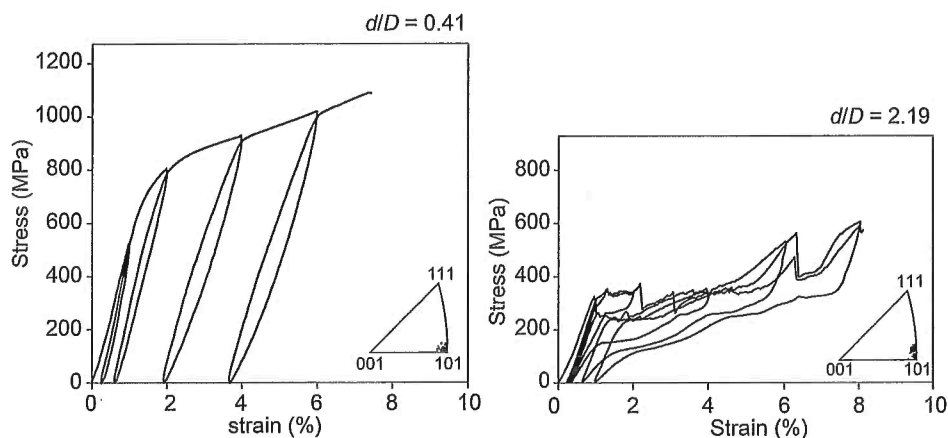


図 2. Fe-34Mn-15Al-7.5Ni 合金線材の超弾性試験(左図:比粒径  $d/D=0.41$ , 右図: $d/D=2.19$ )

### 3. 研究の結論、今後の課題

本研究により、Fe-Mn-Al-Ni 超弾性合金について以下のことが明らかになった。

(1) Fe-Mn-Al-Ni 合金は、Ni を含まない場合と Ni 量が少ない場合は  $\beta$  相が析出せず、適量の Ni 量を添加することで  $\beta$  相がナノ析出することがわかった。このとき、マルテンサイト相の monoclinic angle が低下し、熱弾性型マルテンサイト変態になることがわかった。

(2)  $\alpha + \gamma$  二相域で熱処理し、冷間加工することで、 $\alpha$  単相にした際に再結晶集合組織が形成される。線材の場合、強い  $\langle 110 \rangle$  繊維集合組織が形成される。

(3) Fe-Mn-Al-Ni 合金の超弾性挙動は比結晶粒径に大きく依存する。結晶粒径が線径を貫通するようなバンブー構造において、顕著に超弾性を得ることができる。また、マルテンサイト変態誘起応力は比結晶粒径が大きいほど、低くなる。これらの挙動は、変形時の結晶粒間の拘束により説明をすることができる。

以上より、Fe-Mn-Al-Ni 合金における基礎的な合金設計指針と超弾性を得るための組織制御法を確立することができた。今後、線形や板厚をスケールアップし、同様に材料特性が得られるかを検証する必要がある。また、高温域における熱的な安定性や超弾性の安定性を調査する必要があると考えられる。

#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

##### 4. 1. 社会的価値

温度変化に曝される自動車部品、特殊温度環境の航空宇宙材料、医療機器等において、機能性を備えた新素材としての展開が期待できる。近年、超弾性合金を制震部材に利用しようとする研究が、米国・欧州・日本などの建築土木分野の研究者により盛んに行われている。これは、超弾性の原点復元能力により、地震動による変形から建造物を守るものである。しかし、Ti-Ni 合金の高コストで、穴あけ・ねじ切りなどの加工が困難な特性が実用化の障害となっており、これまで、歴史的建造物への適用に限られている。低コスト鉄系超弾性合金は土木建築部材としての魅力が高く、米国や日本の建築・土木研究者との共同研究を検討している。大断面部材であるため、大規模な超弾性の利用が見込まれる。

##### 4. 2. 学術的価値

一般に、粗な構造(bcc 構造等)は稠密構造(fcc 構造等)より大きな格子振動エントロピーを有し、高温においてより安定化するため、殆どの同素変態では冷却に伴い粗(bcc)⇒密(fcc)な構造変態となる。鉄は例外的に密(fcc)⇒粗(bcc)変態を示し、鉄鋼材料の高強度化に広く利用されている。この変態は bcc 相が磁気エネルギーにより低温で安定化されるためと説明されている。鉄における bcc, fcc 構造は熱力学的に安定性が拮抗していることから、合金元素の添加によって磁気エネルギーを制御すれば、常温、常圧下でも bcc⇒fcc 変態が出現するはずであることに着目し、熱力学計算を行うことで bcc⇒fcc 変態を発見した。このことは、超弾性合金のみならず、各種鉄合金の研究において重要な知見である。

##### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

T. Omori, M. Okano, R. Kainuma, Effect of grain size on superelasticity in Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy wire, APL Materials 1 (2013) 032103.