

令和 6 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

軟磁性材料の高強度・高延性化に向けた 欠陥磁気物性の計測と設計

令和 7 年 5 月

国立研究開発法人物質・材料研究機構

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人物質・材料研究機構が令和4年度から令和6年度にかけて実施した「軟磁性材料の高強度・高延性化に向けた欠陥磁気物性の計測と設計」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

軟磁性材料は磁場の掃引方向に応じた磁化挙動の履歴差(磁気ヒステリシス)が小さいことを特長とする磁性材料である。磁気ヒステリシスは磁壁の易動度と密接に関係するが、転位をはじめとする格子欠陥は磁壁の易動度を低下させ磁気ヒステリシスを増大させる。そのため転位が多量に導入される塑性変形下では磁気ヒステリシスは大きくなり、低磁気ヒステリシスと高強度・高延性の両立は原理的に困難とされる。本研究では、軟磁性材料における低磁気ヒステリシスと高強度・高延性の両立を実現することを最終目標とし、その数値目標を『引張強さ×破断伸び $\geq 30 \text{ GPa}\%$ かつ保磁力 $\leq 0.1 \text{ kA/m}$ 』と設定する。この最終目標達成に向けて、『転位移動の障害となるが磁壁移動の障害にはならない』強磁性転位の設計を行う。そのための要素課題として以下の課題を挙げる。

- ① 転位内強磁性の直接観察
- ② 転位内強磁性の磁束分布・磁束密度の定量評価
- ③ 転位内強磁性発現のための電子状態理解
- ④ 転位強磁性化のための材料設計指針の確立
- ⑤ 力学特性と磁気ヒステリシスの相関の調査
- ⑥ 強磁性転位組織発展における磁氣的相互作用の影響の解明

これら6つの課題について実験・理論両面から取り組む。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

I. 基盤の実験研究：電子線ホログラフィー法による転位内磁気秩序の実空間イメージング

FeAl 合金中に導入した転位について電子線ホログラフィー観察を行い、転位周辺に局在する強磁性の磁束の実空間イメージングに成功した。空間分解能・位相分解能両面において世界最高レベルの性能を実現しており、当初の計画通りの達成度を実現した。

II. 基盤的理論研究：第一原理計算による電子状態解析と材料設計

FeAl の部分転位対を計算対象としたが、転位構造が複雑なため計算コストが大きく十分なアウトプットが得られなかった。VASP ではなくオーダーN法などコストを圧縮する方法も検討したが電子構造上の制約があり FeAl は応用に適さないことが判明した。当初の達成目標には達していないが、現在までに部分転位対ではなく特徴的な構造ユニットのみを抽出したより簡便な欠陥構造を計算対象とし計算を実施している。

III. 応用的材料研究：強度特性と磁気ヒステリシスの相関および転位組織観察

FeAl 二元系に対し欠陥の磁気相図を決定し、転位の単位長さ辺りの磁化の評価を行った。転位の強磁性化のメカニズムを磁気環境効果と短範囲規則度の観点から説明することに成功した。保磁力の歪量依存性については十分なデータが取れていないが、『変形するほど磁化が増大する』材料の提示とそのメカニズムの理解までを達成している。スピングラス温度以下ではこの強磁性転位の易動度が低下し、降伏応力が増大することを見出した。これは従来にない発見であり、強度特性と磁気物性の相関をあらわに示す成果となった。

当初の想定になかった成果として、極低温域で極めて大きな擬弾性を得ることに成功した。Fe 基で高強度かつ巨大擬弾性という前例のない性能の発見であり、低温技術への応用上も有望な材料と考えている。以上のような成果から、本項目では当初の想定以上の進展・成果創出が見られた。

IV. プロジェクトの総合的推進

特に I、III で当初の想定通り・想定以上の成果を得ることができ、概ね満足な進捗が得られたと考えている。成果の一部は学会発表・新聞掲載等の形で発信を行っているが、特許化のための請求範囲の決定を進めている都合上論文としてのアウトプットが遅れている。この点については可及的速やかに今後取り組んでいく。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

上述の①～⑥の課題に対し、本研究では以下の3つの実施項目を立案した。なお、これらの項目は互いに独立したアプローチであるため、いずれかが十分な成果が得られなかったとしても残

りの研究がうまくいけば最終目標達成のための十分な知見を得ることができるよう企図した。以下に各項目に対する進捗および成果について報告する。

I. 基盤の実験研究：電子線ホログラフィー法による転位内磁気秩序の実空間イメージング

バルク結晶を用いた系統的な磁気物性探索を経て、観察に最適な合金系と組成を決定した。電子線ホログラフィー観察については液体ヘリウムの供給制限により実験回数が制限されたが、転位近傍に局在する磁束の観察に成功し、学術的インパクトの大きい結果を出すことができた。動的回折効果の影響についての検討がまだ十分ではないが、欠陥に局在する磁気物性を直接的に観察・観測した世界初の成果であり、本研究課題の核となるエビデンスを得るに至った。

II. 基盤的理論研究：第一原理計算による電子状態解析と材料設計

材料探索において電子状態解析を援用した。一方、格子欠陥近傍の磁気モーメントの理論的解析については、モデル構造のサイズを計算コストに見合うレベルにまで小さくする過程において、実際とは異なる環境・原子配列を対象とせざるを得なかった。このため定量的な評価に耐える情報は得られなかったが、定性的な検討を指導し材料探索において大きな役割を果たした。

III. 応用的材料研究：強度特性と磁気ヒステリシスの相関および転位組織観察

I, IIの結果をもとに単純ながらも豊かな物性を示す合金候補を選定し強度と磁気物性の相間について系統的に調査した。変形を加える程自発磁化は増大することを見出し、単位長さ辺りの転位の磁化や欠陥の磁気相図の決定を行った。塑性変形を加え格子欠陥密度が増大した状態であっても磁気ヒステリシスは未変形時に比べほとんど変化しないことを確認し、本研究課題で着想した欠陥の磁性とヒステリシスの相関について狙い通りの結果を得た。さらに低温域では従来の想定になかった巨大な擬弾性応答の創出に成功し、当初の想定になかった『巨大形状回復を示す軟磁性材料』という新たな機能性材料の創出に至った。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

研究遂行の中で当初の想定になかった擬弾性現象を見出した。本計画の当初の範疇では『不可逆な塑性変形を導入しても軟磁特性が低下しない材料』の創製が目標であったが、擬弾性効果により『大きな変形を加えても可逆的に形状回復可能な軟磁性材料』の創製が実現した。擬弾性の発現について温度域の制約はあるもののその回復歪は10%を超える極めて大きな応答であり、また誘起される応力も大きいことから、当初計画の趣旨であるセーフティクリティカルな観点からも優位性の高い材料機能の創出となった。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

加工してもヒステリシスが大きくならない軟磁性材料の創製とそのメカニズムの理解に向けた多くの知見を得ることができた。セーフティクリティカルな観点からこのような材料設計の視点は今後ますます重要になると考えられ、産業分野への実装を通して実効的な貢献を果たしていきたい。

また学術的な側面においては、格子欠陥近傍に局在する磁性の実空間観察に成功し、イメージング技術の発展に貢献した。材料設計において欠陥の存在はしばしば忌避されるが、逆に欠陥を活かした材料設計も可能であることを示し、そのための足掛かりとなる技術の確立につながった。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

本研究成果は2025年春期(第176回)講演大会にて基調講演として発表した。また成果の一部は特許として出願を検討中である。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

特になし

5. 2 経費の効率的執行

特になし

6. まとめ、今後の予定

本研究期間3年間の中で大卒となる研究目標は達成できたと自負している。また一連の取り組みの中で世界初となるイメージングの実現や想定になかった力学応答の発見など多くの新しい技術・知見を得ることができ、今後の研究発展の見通しを一気に広げることができた。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
雑誌論文	5件
学会発表	6件
展示	該当なし
図書	1件
プレス	1件
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項

該当なし