

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－英国研究交流）

1. 研究課題名：「Co 基ホイスラー合金を用いた高品位トンネル接合の作製と高周波発振の実証研究」

2. 研究期間：平成21年12月～平成25年3月

3. 支援額： 総額 14,251 千円

4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

|              | 氏名        | 所属        | 役職       |
|--------------|-----------|-----------|----------|
| 研究代表者        | 三谷誠司      | 物質・材料研究機構 | グループリーダー |
| 研究者          | 猪俣浩一郎     | 物質・材料研究機構 | 名誉フェロー   |
| 研究者          | 介川裕章      | 物質・材料研究機構 | 研究員      |
| 研究者          | 葛西伸哉      | 物質・材料研究機構 | 主任研究員    |
| 研究者          | 新関智彦      | 物質・材料研究機構 | 外来研究員    |
| 研究者          | Z. C. Wen | 物質・材料研究機構 | 博士研究員    |
| 参加研究者 のべ 7 名 |           |           |          |

相手側（研究代表者を含め6名までを記載）

|              | 氏名           | 所属    | 役職       |
|--------------|--------------|-------|----------|
| 研究代表者        | A. Hirohata  | ヨーク大学 | Lecturer |
| 研究者          | K. O' Grady  | ヨーク大学 | 教授       |
| 研究者          | J. Sagar     | ヨーク大学 | 大学院生     |
| 研究者          | V.K. Lazarov | ヨーク大学 | 研究員      |
| 研究者          | M. Hazenber  | ヨーク大学 | 大学院生     |
| 研究者          | L. Lari      | ヨーク大学 | 研究員      |
| 参加研究者 のべ 6 名 |              |       |          |

## 5. 研究・交流の目的

高品位のCo基ホイスラー合金薄膜（ $\text{Co}_2\text{FeAl}$ 、 $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ 、 $\text{Co}_2\text{FeSi}$ 等）、および、それらを用いた強磁性トンネル接合素子の作製を行う。特に、スピントルクとそれによって生じる磁化ダイナミクスに焦点をあて、素子の低抵抗化とナノピラー化に注力する。ホイスラー合金の有する大きなスピン分極率と低磁気ダンピングという優れた特性を引き出すことによって、スピン注入磁化反転の低電流化や高出力・高効率の高周波発振素子の実現を目指す。

また、本研究ではホイスラー合金に関する基礎的評価が極めて重要であるため、その主要な手段となる精緻な磁気測定と原子レベルの構造解析において強みを有するヨーク大学グループとの研究交流を行う。共同研究を通じた密な連携がきっかけとなる、将来の若手研究員の人事交流も期待する。

## 6. 研究・交流の成果

### 6-1 研究の成果

英国側チームの精緻な磁気特性の評価と原子レベルでの透過電子顕微鏡観察により、Co基ホイスラー合金の基礎的評価を行った。 $\text{Co}_2\text{FeSi}$ 薄膜のHAADF-STEM観察によって、 $\text{L}_2\text{L}_1$ 規則

構造の実空間での解析が行われ、また、MgO/Co<sub>2</sub>FeSi界面のミスフィット転位の定量化もなされた。このミスフィット転位に関しては、Co<sub>2</sub>FeSi薄膜の磁化反転における活性化体積が、結晶粒径ではなくミスフィット転位密度と相関を有していることを見出した。

これらの材料と磁気特性に関する基盤的成果に基づき、高周波発振のための強磁性トンネル接合のナノピラー素子の作製を行った。十分なスピントルクが得られるようにトンネル抵抗の低減を図り、また、強磁性トンネル接合の磁化状態をスピントルクでコントロールできるように、結晶磁気異方性の影響の小さいナノピラー構造を形成した。印加電流と外部磁場により磁化状態の相図を調べたところ、平行および反平行磁化のbistableな状態や磁化の不安定領域が見られた。スピン注入磁化反転も実現され、Co<sub>2</sub>FeAlホイスラー合金をスピン注入層とした場合に7.1MA/cm<sup>2</sup>という比較的良好な磁化反転の臨界電流密度(J<sub>co</sub>)が得られた。磁気ダンピング定数の評価も行った。高周波発振の周波数ドメインでの定量測定については、スピントルクによる高周波発振現象自体の複雑さが最近議論されているため今後の課題としたが、世界に先駆けてホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合素子においてスピン注入磁化反転を実現し、その磁化状態の相図なども明らかにした。ホイスラー合金トンネル接合における高周波発振に直結する成果である。ホイスラー合金のメリットを明確にするためには、低抵抗ナノピラー素子に加工した際のTMR（トンネル磁気抵抗効果）比および磁気ダンピングの改善が課題であることが分かった。

## 6-2 人的交流の成果

複数の研究プロジェクトの合流による大規模な国際シンポジウム1回、若手研究者や大学院生を中心としたワークショップ2回を開催した。その他に英国側大学院生が2度日本側研究機関に滞在して相当量の共同実験を行った。また、英国側からのインターン生の受け入れも行い、国際会議の度に打合せを持った。このように密な研究交流を行い、国内で行う共同研究と同レベルの関係性を構築した。磁化反転の活性化体積とミスフィット転位密度の相関を見いだしたことは、日本側の高品位エピタキシャル薄膜作製技術が電子顕微鏡観察等を得意とする英国側にうまく移転された結果であり、異なる専門性を有するチーム間での知識や技術のやり取りが有効に行われたことを示している。また、電子顕微鏡による構造解析に関して、日本側若手研究員が英国側の専門家と活発な交流を行い、本プロジェクトの遂行に寄与したばかりか、本研究の範囲外の共同研究にも発展している。今後も新たな共同研究をいつでも開始できる状況にある。このように若手を中心に交流が進んだことから、将来の人材の行き来も期待できる。

## 7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

相手側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

| 論文<br>or<br>特許 | ・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年<br>・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、<br>出願番号、出願人、発明者等                                                                                                                                                                                  | 備考        |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 論文             | S. Mitani, Spin-transfer magnetization switching in ordered alloy-based nanopillar devices, <i>J. Phys. D: Appl. Phys.</i> <b>44</b> , 384003-1-8 (2011).                                                                                                               |           |
| 論文             | H. Sukegawa, Z.C. Wen, K. Kondou, S. Kasai, S. Mitani and K. Inomata, Spin-transfer switching in full-Heusler Co <sub>2</sub> FeAl-based magnetic tunnel junctions, <i>Appl. Phys. Lett.</i> <b>100</b> , 182403-1-5 (2012).                                            |           |
| 論文             | J. Sagar, H. Sukegawa, L. Lari, V.K. Lazarov, S. Mitani, A. Hirohata, and K. O'Grady, The effect of interfaces on magnetic activation volumes in single crystal Co <sub>2</sub> FeSi Heusler alloy thin films, <i>Appl. Phys. Lett.</i> <b>101</b> , 102410-1-4 (2012). | 相手側との共著論文 |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                         |           |
|                |                                                                                                                                                                                                                                                                         |           |