

## 研究課題別 評価結果

### 1. 評価の概要

対象領域：戦略的国際共同研究プログラム (SICORP) 日独共同研究「ナノエレクトロニクス」

対象期間：2010年4月～2013年3月末日

### 2. 共同研究課題 「先端スピントロニクス材料と伝導現象」

### 3. 日独研究代表者名 (研究機関名・職名は研究期間終了時点)：

日本側研究代表者 安藤 康夫 (東北大学大学院工学研究科 教授)

ドイツ側研究代表者 Claudia Felser (マックス・プランク固体化学物理学研究所 ディレクター)

### 4. 研究実施概要

本課題は、スピントロニクスを現在のエレクトロニクスに比肩する電子技術とする事を目標として開始した。スピンの操作とその伝播に依るオールスピン情報技術を作り上げるために、(1) デバイスに応用可能なスピントロニクス材料の開発と、(2) 新しいスピン伝導現象の開拓とその解明の2領域を設定し研究を行った。具体的にはハーフメタルホイスラー合金に着目して、薄膜や素子の開発を行い、スピンの制御と伝導について理論設計と評価を行った。成果の詳細については添付の報告書参照。

### 5. 事後評価結果

#### 5-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果 (論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本プロジェクト開始以前から、ホイスラー合金がハーフメタルであることは広く議論されていたが、その実験的検証は乏しく、ハーフメタルとしての特性についても疑問視されていた。このような背景の下にホイスラー合金が予測どおりにハーフメタルとして振る舞い、他の物質に優る磁気抵抗性能を示すことが明らかになったのは本プロジェクトの功績である。日本、ドイツそれぞれ多数の論文を発表し、また両国の共著論文が多いことから、研究活動が順調に進行していることがうかがえる。具体的な研究目標は、大きな磁気抵抗効果、スピン注入、マグノン伝播の検出とギルバートダンピングの低減などであるが、それぞれの方面で着実な成果が得られている。今後、ホイスラー合金をスピン流、スピン分極電流源、マグノン伝導体などとして利用し、幅広い応用に発展することが予想される。プロジェクトの研究内容は、極めて優れた成果と評価できる。

ただし、応用に直結する可能性の高いテーマにしては特許の出願数が少ない。今後グローバルな科学技術立国を目指す上で、本プロジェクトのように我が国を代表する研究に集中的に投資が行われる際に、関係各方面が連携して統一的かつ戦略的な研究経営が望まれる。

共著論文数：7

日本側チーム論文数：51

特許出願数：2

#### 5-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト

大きなMR効果が得られることは基礎応用の両面にインパクトを与える。本プロジェクトの研究によって、ホイスラー合金を電極とするTMRジャンクションが室温で300%に達するMR比を示すことが観測された。膜面垂直方向の電流を用いるCPP-GMRにホイスラー合金の電極を利用した場合にも50%以上のMR比が得られることが示されており、抵抗の小さなGMRジャンクションによってパワーの強

いMRヘッドが実現し、磁気記録の性能向上など、社会への大きなインパクトが期待される。実際、日本経済新聞社による、2011年度「技術トレンド調査」で第1位の技術評価を得ていることにも伺われるように、社会的にも十分重要的なプロジェクト成果を上げたと考えられる。

室温で1000%を超えるような大きなMR効果が実現すれば、新しい磁気センサーとして様々の応用が考えられ、さらに大きなインパクトが予想される。その一例は従来のSQUID素子を凌駕する脳磁計への応用であり、既に新しいプロジェクトが発足するにいたっている。

低温で大きなMR効果を示すことはホイスラー合金がハーフメタルであることを証明しているが、現在得られている結果では温度依存性がかなり大きいため、室温でのMR比には顕著な減少が見られる。この温度依存性は界面の特性に関係すると思われ、界面の基礎的研究に新しい重要な課題を提供している。

また、伝送線中のマグノンの伝播を正面から採り上げている点で、従来のスピントロニクス研究と一線を画している。まだ伝播現象の理解を深める段階であり、減衰についても越えるべき困難は大きいですが、電荷の移動を全く伴わない本当のスピントロニクスを目指す姿勢を高く評価する。

### 5-3. わが国の科学技術力強化への貢献（共同研究状況、研究交流活動状況等を含む）

ホイスラー合金を二国間協力のターゲットに選んだことは真に適切であり、目標に関しては焦点を絞った共同研究を進めながら、一方では幅広い交流が実現している。日本とドイツは世界的に見てもホイスラー合金の研究に関して先進的水準にあり、その協力関係によって最先端の成果を挙げるに至った。全日本的に結集された研究チームと、全ドイツ研究チームが連携する形となって研究が推進された。国際交流のキーワードはホイスラー合金であるが、周辺に関連領域への波及効果にも収穫が得られたと思われる。

国際交流の具体的内容は、研究集会を活発に行ったほか、若手の交流の推進にも努めており、その意味でも広い波及効果が期待できる。とりわけ、年に一回研究集会を開くのに併せて、1週間に及ぶschoolを学生向けに開講し、両国の学生が机を並べて学ぶ機会を設けたことは特筆すべきことであり、関係者の若手育成に掛ける並々ならない意欲を感じる。

ホイスラー合金がハーフメタルとしての機能を持つ物質であることが確認できたことが本プロジェクトの成果であり、この成果を基礎として、新しい応用の可能性を探索する研究が基礎と応用両面において始められている。

## 研究課題別 評価結果

### 1. 評価の概要

対象領域：戦略的国際共同研究プログラム (SICORP) 日独共同研究「ナノエレクトロニクス」

対象期間：2013年4月～2015年3月末日

### 2. 共同研究課題 「先端スピントロニクス材料と伝導現象」

### 3. 日独研究代表者名 (研究機関名・職名は研究期間終了時点)：

日本側研究代表者 安藤 康夫 (東北大学大学院工学研究科 教授)

ドイツ側研究代表者 Claudia Felser (マックス・プランク固体化学物理学研究所 ディレクター)

### 4. 研究実施概要

本課題は、スピントロニクスを現在のエレクトロニクスに比肩する電子技術とする事を目標としている。スピンの操作とその伝播に依るオールスピン情報技術を作り上げるために、(1) デバイスに応用可能なスピントロニクス材料の開発と、(2) 新しいスピン伝導現象の開拓とその解明の2領域を設定した。特にハーフメタルホイスラー合金を中心に、薄膜や素子の開発、スピンの制御と伝導について理論設計と評価を行い、当初研究期間 (H22～24) 中に十分な成果が得られたため、さらなる研究の進展を期待して H25～26 に渡り期間延長を行った。成果の詳細については添付の報告書参照。

### 5. 事後評価結果

#### 5-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果 (論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本プロジェクトの当初研究期間内に得られた大きな成果は、ホイスラー合金がハーフメタルであり、他の物質に優る磁気抵抗性能を示すことを明らかにしたことである。延長期間中は実用に耐える定量的性能向上を材料とプロセスの面から追求した。その結果日本、ドイツそれぞれ多数の論文を発表し、また両国の共著論文が多いことから、研究活動は順調に進行したと言える。磁気抵抗効比の増大、スピン注入の高効率化、ギルバートダンピングの低減など、それぞれの方面で着実な成果が得られている。さらに、(逆) スピンホール効果やスピンゼーベック効果などを効率良く発現するため、スピン流、スピン分極電流源、マグノン伝導体などを担う材料としての研究も開始し、今後幅広い応用に発展することが予想される。プロジェクトの研究内容は、極めて優れた成果と評価できる。

ただし、応用に直結する可能性の高いテーマとしては特許の出願数が少ないことが当初期間終了時に指摘され、延長期間中も改善されていない。しかしながら国際共同研究に基づく成果による特許は、法制上の国による相違など、研究者に帰することができない問題もあることから、連携が緊密であればある程却って取得が困難な場合も想定される。一方、実用化に向けた企業との共同研究や別プロジェクトへの展開が多数見られ、特許以外に実用化や技術移転を研究成果として定量的に見積もる評価法も検討すべき課題である。

#### H25～26 の主な業績

共著論文数：17

日本側チーム論文数：79

特許出願数：0

#### 5-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト

実用へ向けた数値的な進歩が見られた。たとえば、トンネル磁気抵抗素子における室温で 400%を越す MR 比、面直通電型巨大磁気抵抗素子における 74%の MR 比などが挙げられる。さらに、MR 比が大きいだけでなく、導通状態における低抵抗化に成功した。これは低損失 MR ヘッドを通じた磁気記録の性能向上や高パワーのスピントルク発振をもたらし、企業との共同研究に至ったものもある。

さらに、伝送路内のマグノン伝播ではダンピング機構の考察や低ダンピング材料の開発、固有モード以外の方向の伝播の確認、また、半導体への室温スピン注入の成功など、スピン流を作る・運ぶといった基本的なプロセスの効率の向上を図った。オールスピンの情報処理装置ははるか先の将来であるとしても、スピンと電流を組み合わせた素子・装置はすでにいくつかの開発競争が進行中であり、電流を扱うのと同じ容易さでスピン流を扱う事を可能にする基礎研究として、本プロジェクトの今後の社会的インパクトは大きいものと推察される。

### 5-3. わが国の科学技術力強化への貢献（共同研究状況、研究交流活動状況等を含む）

日本とドイツは世界的に見てもホイスラー合金の研究に関して先進的水準にあり、その協力関係によって最先端の成果を挙げるに至った。全日本的に結集された研究チームと、全ドイツ研究チームが連携する形は延長期間中も十分に機能し、年に一回研究集会を開くのに併せた 1 週間に及ぶ学生向けの school を継続し続けたことは特筆に価する。

国際交流のキーワードはホイスラー合金であるが、周辺に関連領域への波及効果にも収穫が得られ、この成果を基礎として、新しい応用の可能性を探索する研究が基礎と応用両面において始められている。