

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	Tseng Chih-Hsiang
論文題目	Unconventional Spin Torques in <i>g</i> -wave Altermagnet CrSb (<i>g</i> 波交替磁性体CrSbにおける非従来型スピントルクに関する研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、近年注目を集めている交替磁性体という新しい磁気秩序に着目し、強磁性体と反強磁性体の特性を併せ持つ物質群がスピントロニクス分野にもたらす新たな可能性を、体系的に明らかにした研究である。交替磁性体の出現は、強磁性体および反強磁性体とは本質的に異なる新規の磁気秩序を提示するものであり、物性物理学およびスピントロニクス分野において新たな研究領域を切り拓いている。 数ある交替磁性体候補の中でも、CrSbは有望な材料として注目されている。代表的な交替磁性体であるRuO₂がd波スピン対称性を有し二つのノード面を示すのに対し、CrSbはg波交替磁性体に分類され、より複雑なノード構造を有する。CrSbは約1 eVという大きなスピン分裂エネルギーと約705 Kの高いネール温度を示す金属的交替磁性体であり、低抵抗率および優れた熱安定性の観点からスピントロニクス応用に対する高い潜在性を備えている。しかしながら、交替磁性体特性の観測には高品質なエピタキシャル薄膜が不可欠であるにもかかわらず、CrSbに関するエピタキシャル成長および薄膜物性に関する実験的報告は極めて限られている。 本論文は大きく二つの部分から構成されている。第一部では、2元同時スパッタリング法を用いて、複数の基板上におけるg波交替磁性体CrSbのエピタキシャル成長を実現し、その成長機構および成膜条件について詳細な検討を行っている。MgO、LaAlO₃、Al₂O₃基板を用いた系統的な成膜実験の結果、MgO基板上では格子不整合や吸着原子移動度の不足に起因する非エピタキシャル成長や組成ずれが生じることが明らかとなった。一方、LaAlO₃(110)基板上ではCrSb(1-100)配向の高品質エピタキシャル薄膜が形成され、X線回折測定および走査透過電子顕微鏡観察により、高い結晶性、良好な格子整合関係、平坦な界面構造が確認された。また、サファイア基板上ではCrSb(11-20) // Al₂O₃(11-20)のエピタキシャル関係が得られるものの、大きな格子不整合のためWバッファ層が必要であることが示された。磁気輸送特性評価からは、基板依存の磁気信号の違いが観測され、界面欠陥の影響についても議論がなされている。 第二部では、第一部で得られたエピタキシャル薄膜を用いて、g波交替磁性体CrSbにおける非従来型スピントルク生成の実験的検証を行っている。磁場角度依存スピントルク強磁性共鳴測定により、CrSbに由来するダンピングライクトルク成分が明確に観測され、スピン偏極の三次元成分が定量的に評価された。その結果、通常のスピンホール効果では説明できない有限のx偏極スピン成分の存在や、結晶方位に依存したy偏極成分の符号反転が明らかとなった。特にCrSb(1-100)配向薄膜では、スピントルク生成効率が-0.1に達し、重金属材料に匹敵する高効率なスピン流源となり得ることが示された。さらに第一原理計算および対称性解析を通じて、観測されたスピントルクが交替磁性体特有のスピン分裂起源ではなく、結晶空間対称性に由来する結晶学的スピントルクであることが示された。理論計算結果は実験結果と良い一致を示しており、交替磁性体における新たなスピントルク機構の理解を深める成果となっている。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、近年注目を集める交替磁性体という新規磁気秩序に基づき、物性物理学およびスピントロニクス分野における基礎および応用の両面から重要な課題に取り組んだ、独創性と完成度の高い研究である。特に、これまで実験的研究例が極めて限られていたg波交替磁性体CrSbを対象とし、エピタキシャル薄膜の成長から物性評価、さらに理論的解析に至るまでを一貫して実施している点は高く評価できる。

材料創製の観点においては、複数の基板を用いた系統的な成膜実験を通じて、CrSbエピタキシャル薄膜成長の最適な条件および制約要因を明確にしている。特にLaAlO₃(110)基板上において高品質なCrSb(1-100)配向薄膜を実現し、X線回折および走査透過電子顕微鏡を用いた詳細な構造評価により、その高い結晶性と良好な界面構造を実証した点は、今後の交替磁性体研究の基盤構築として重要な成果である。また、基板依存性やバッファ層効果に関する検討も丁寧になされており、材料開発研究としての完成度は極めて高い。

物性研究の観点では、得られたエピタキシャル薄膜を用いて、g波交替磁性体CrSbにおける非従来型スピントルク生成を実験的に明確に示している。磁場角度依存スピントルク強磁性共鳴測定により、結晶方位に強く依存したスピン偏極成分を定量的に評価し、従来のスピンホール効果では説明できない特異なスピントルク挙動を明らかにした点は、交替磁性体に固有の輸送現象の理解を大きく前進させる成果である。特に、重金属材料に匹敵する高いスピントルク生成効率を実証したことは、スピントロニクス応用の観点からも高い意義を有する。

さらに、第一原理計算および対称性解析を通じて、観測されたスピントルクの起源が交替磁性体特有のスピン分裂に起因するものではなく、結晶空間の対称性に由来する結晶学的スピントルクであることを理論的に示している。実験結果と理論解析結果との整合性は良好であり、交替磁性体において当該トルクを実験的に検証した初めての研究として、学術的独創性は極めて高い。

以上のように、本論文は、交替磁性体という新たな磁気秩序に基づく材料開発、物性解明、理論的理解を高い水準で統合した研究であり、当該分野の発展に大きく寄与する成果を含んでいる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な学術的価値を有するものと認める。

また、令和8年1月16日に実施した論文内容およびそれに関連する事項についての試問において、申請者は研究内容を的確に説明し、専門分野に関する十分な知識と高い研究遂行能力を有していることが確認された。以上の理由により、試問の結果を含め、本論文を博士（理学）の学位論文として合格と判定する。

なお、本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えて、その内容を要約したものを公表することを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降