

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04686

研究課題名(和文) 磁気コンプトン散乱による、ネオジウム磁石のスピン・軌道磁化の定量解析

研究課題名(英文) Quantitative analysis of spin and orbital magnetic moments in a neodymium magnet by magnetic Compton scattering

研究代表者

辻 成希 (Tsuji, Naruki)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・回折・散乱推進室・研究員

研究者番号：90573113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ネオジウム磁石の、スピンと軌道モーメントの定量解析およびその保磁力を測定することが本研究での目的である。また、スピン・軌道モーメントおよびその保磁力の温度依存性(高温)を測定することも本研究での目的としている。そこで、磁気コンプトン散乱を用いてスピン磁気モーメントの保磁力の測定を行い、さらにその深さ依存性を測定することにより、表面付近において、加工の際の表面劣化により、保磁力が低下することを観測した。また、磁石の中心部分では、反磁界の影響で保磁力が若干低下することも明らかにした。また、スピン磁化の温度依存性の測定を行い、全磁化測定とは異なる温度依存性を示すことを観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高性能磁石は、ハイブリット自動車や電気自動車などのモータとして使用されるため、さらに高性能な磁石を開発することが求められている。その開発には、磁石の磁気状態を詳細に観測することが必要不可欠であり、本研究では、磁石の詳細な磁気状態観測を行う方法を開発し、ネオジウム磁石の磁気状態観測を行った。本研究での成果が、高性能磁石の開発に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to quantitatively analyze the temperature dependence of the spin and orbital magnetic moments and coercivity of neodymium magnets. We measured the coercivity of the spin moment using magnetic Compton scattering and its depth dependence. As a result, we observed that the coercivity decreased near the surface due to surface degradation by mechanical cutting and polishing. We also found that the coercivity decreased slightly at the center region of the magnet due to the demagnetizing field. We also measured the temperature dependence of the spin magnetization. It showed a different temperature dependence from the total magnetization measurement measured by the VSM.

研究分野：磁性、放射光

キーワード：磁性 磁気コンプトン散乱 ネオジウム磁石 保磁力

1. 研究開始当初の背景

全消費電力量の約 10%がモーターにより損失されており、より高効率なモーターの設計が喫緊の課題となっている。そのためには、高性能な永久磁石が必要不可欠であり、現状ではネオジウム磁石が用いられている。モーターに用いる際、動作温度は、200 程度だが、ネオジウム磁石の主成分である Nd₂Fe₁₄B の高温性能は不十分であるため、異方性磁界が極めて高い Tb や Dy を添加することにより、保磁力を増大させ高温性能を担保している。Tb は保磁力向上効果が最大であるが、その資源量が極めて少ないため市販されている実用磁石では Dy を添加している。しかし、Dy も希少金属であり、また生産地も偏在しているため、Dy フリーの高性能磁石の開発が待望されている。ネオジウム磁石の磁性は、Fe の 3d 電子と Nd の 4f 電子が主役を担っており、大きな磁化は、3d 電子が、強い磁気異方性は 4f 電子が担っている。ネオジウム磁石の磁性については、既に定性的なモデルが構築されているにも関わらず、更に高性能な磁石開発に至っていないのが現状である。また、脱 Dy、あるいは省 Dy の高性能磁石の開発指針として、結晶粒を微細化すること、粒界拡散法などが提案されており様々な研究が行われている。これらの方法は保磁力をいかに高くするかを突き詰めた方法である。しかし、基本的なことであるはずの、スピン・軌道モーメントの定量性やその保磁力、またその温度依存性(高温)に着目した研究はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、複雑にスピンと軌道が結合するにも関わらず、これまで未解明なネオジウム磁石のスピン・軌道磁気モーメントの定量性と保磁力を明らかにし、また、その温度依存性を、磁気コンプトン散乱を用いて明らかにすることである。また、磁気コンプトン散乱は、高エネルギー X 線(182 keV)を利用するため、X 線の深い侵入長を有しているため、測定位置を限定することにより磁化と保磁力の深さ依存性を測定できるため、この深さ依存を計測するシステムを構築し、計測を行い、磁化と保磁力の深さ依存性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

試料は、商用のネオジウム磁石を用いて行った。磁化測定は、振動試料型磁力計(VSM)を用い、最高 400 までの温度で測定を行った。磁気コンプトン散乱は、SPRing-8 BL08W で行った。入射 X 線エネルギーは 182.6 keV で、散乱角は 178° であった。検出器には、10 素子半導体検出器を用いた。磁場は ±2.5T の範囲で、試料の c 軸方向に印加して行った。磁気コンプトン散乱の磁気効果の磁場依存性からスピン選択磁化曲線を求めた。また、VSM から求めた全磁化とスピン磁化との差分から軌道磁化を求めた。測定は、最高 400 までの範囲で行った。磁化と保磁力の深さ依存測定は、X 線の縦方向を、スリットを用いて 10 μm まで絞って測定位置を限定し、試料を Z 軸方向にスキャンすることにより求めた。

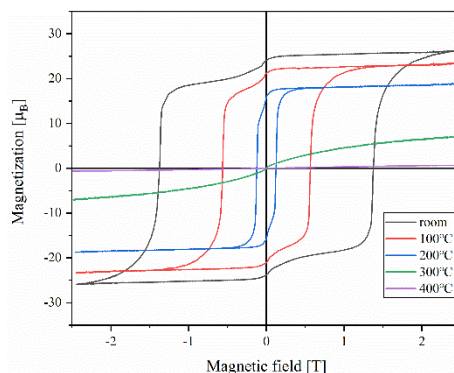


Fig. 1 磁化測定

4. 研究成果

Fig. 1 に、VSM で測定した磁化測定の結果を示す。室温において、飽和磁化が 26.2 μ_B で、保磁力が、1.37 T であり、温度上昇に伴いそれぞれ小さくなることわかる。また磁化率の逆数の温度依存性を得ることにより、キュリー温度が約 300 であることがわかった。Fig. 2 に、磁気コンプトン散乱によって得られた室温でのスピン磁化曲線を示す。スピン磁化測定では、スピン飽和磁化が、18.7 μ_B で、保磁力が 1.21 T である。飽和磁化における、VSM とスピン磁化の差は、軌道磁化に相当し、軌道磁化は、7.58 μ_B であった。保磁力に関しては、室温では大きく異なっているが、他の温度では、有意な変化は観測できていない。この原因として、異なる実験手法で得られた磁化の差分であるため、試料の測定結晶方位の違いを観測している可能性もあるが、現時点では、原因の特定には至っていない。Fig. 3 に、全磁化、スピン磁化、軌道磁化の温度依存性を示す。キュリー温度である 300 で軌道磁化が消失していることがわかった。一方でスピン磁化に関しては、300 を超えても有限の磁化を有しており、常磁性状態での磁化は、全てスピンの担っている。

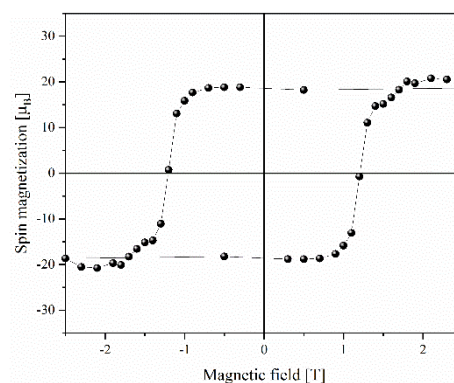


Fig. 2 スピン磁化曲線

ることがわかった。

Fig. 4 にスピン磁化曲線の深さ依存性を示す。中心部分が0になるようにz軸をプリセットしてある。磁石の表面付近では、機械加工などによる表面劣化の影響を受けて、保磁力と角型比の低下が観測されている。一方で、飽和磁化には変化がない。Fig. 5 に保磁力の深さ依存性を示す。表面付近では、保磁力が低下しており、表面から少し内部に入った部分で最大の保磁力を示し、その後内部に向けて低下することがわかった。この保磁力の深さ依存性は、以下のような原因で起きると考えられる。表面付近は、表面劣化により保磁力が低下し、その後表面劣化の影響が緩和することにより保磁力が増大し、さらにその後、磁石中で発生する反磁場の影響により保磁力が低下すると考えられる。

以上から、スピンと軌道の温度以前性は異なっている可能性があることがわかった。また、保磁力の深さ依存性は、一定ではなく場所により大きくことなっていることがわかった。

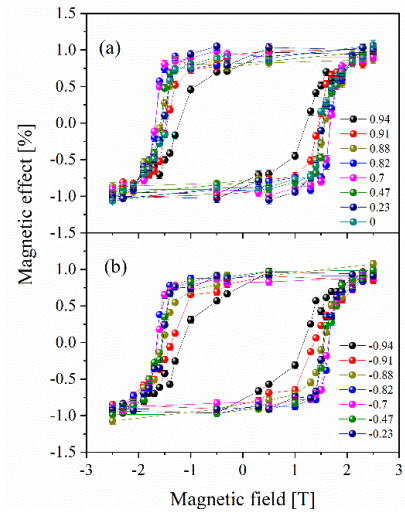


Fig. 3 スピン磁化曲線の深さ依存性

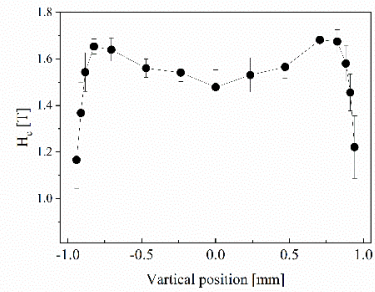


Fig. 4 保磁力の深さ依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsuji Naruki, Sakurai Hiroshi, Sakurai Yoshiharu	4. 巻 116
2. 論文標題 Depth dependence of spin-specific magnetization hysteresis loops measured by magnetic Compton scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 182402 ~ 182402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0007398	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------