

光－スピン波変換技術の開発

低環境負荷技術チーム（課題番号：167102）

研究期間：平成28年7月27日～平成31年3月31日

研究代表者名：笠原健司

研究員名：江口智士，田尻恭之，中山和之，武藤梨沙

1. はじめに

現在、世界の発電量における約7割が化石燃料に依存しているが、化石燃料資源の枯渇に対する懸念から、化石燃料に頼らない新発電技術の開発や、電気機器のそもそもの電力消費を抑える低消費電力化技術の開発が盛んに研究されている。新発電技術の中で、最も注目されている技術の一つとして太陽光発電が挙げられるが、最近ではシリコン（Si）などの無機物を利用した発電用パネルが一般にも普及し始めているものの、Siを用いた発電パネルは大面積化にコストがかかるという欠点がある。そこで、より大面積化が容易な有機物を用いた発電パネルの研究が活発化してきている。

一方で、消費電力が非常に少ない情報伝達技術として、スピン波の利用が注目されている。スピン波とは、強磁性体中に揃えられた磁化が何らかの方法により局所的に歳差運動させられると、その歳差運動が静磁相互作用によって周りの磁化に波として伝わっていく現象のことである。情報の伝達に電荷の移動を伴わないことからジュール熱による損失がないのが特長である。しかしながら、現在、スピン波の励起には、アンテナに高周波電流を流すことより発生する交流磁場が一般的に用いられており、この際に発生するジュール熱によって多くの電力が消費されてしまっているというのが現状である。ごく最近、S.Cherepovらは、マルチフェロイック材料の圧電効果とNi薄膜の磁歪効果を組み合わせることにより、交流電圧でスピン波を励起することに成功しており、交流電流による励起に比べて大幅な低消費電力化が期待できると報告している。[APL104, 082403(2014).]もし、マルチフェロイック材料が持つ電気磁気効果のみでスピン波を励起することができればより応用範囲が広がるだろうと期待されている。そこで本研究では、光をスピン波に変化する技術の基礎となる要素技術の開発に

取り組んだ。

2. 金属マグネティック結晶（MC）を用いたスピン波の伝搬制御（研究代表者：笠原健司）

【研究の目的・方法】

近年、シリコン集積回路技術との整合性の高さから、金属MCへの関心が高まっている。一般的に強磁性金属材料はスピン波（マグノン）の伝搬長が短いため（10 μm オーダー）、ほとんどの金属MCの研究では、その限られた長さの中になるべく多くの周期構造を詰め込んでおり、周期構造の周期は0.1～1 μm 程度となっている。しかし、このように短い周期では、アンテナ法で励起・検出できるような長い波長のスピン波に明瞭な効果を与えることは難しく、より短い波長のスピン波にアクセスできる手法を用いる必要がある。このような理由から、金属MCにおけるスピン波のバンド構造の調査法として、より短い波長のスピン波を励起・検出できる光を用いたBrillouin Light scattering (BLS) 法が最もよく用いられているが、金属MCの電子デバイスへの応用を考えた場合、金属MCがスピン波の伝播特性に与える効果を電氣的な手法のみで調査できる方が望ましい。本研究では、周期的な溝構造を有したパーマロイ（Py）MCを作製し（図2.1）、アンテナとベクトルネットワークアナライザ（VNA）を駆使した電氣的な手法により、金属MC中のスピン波の伝播特性について調査を行なった。さらに、詳細な調査のためOOMFとMATLABを用いたマイクロマグネティックシミュレーションも行った。

【研究成果】

図2.2(a)に比較用の無構造PyストライプのMSSW信号スペクトルを示す。実験結果のスペクトルにのみ微

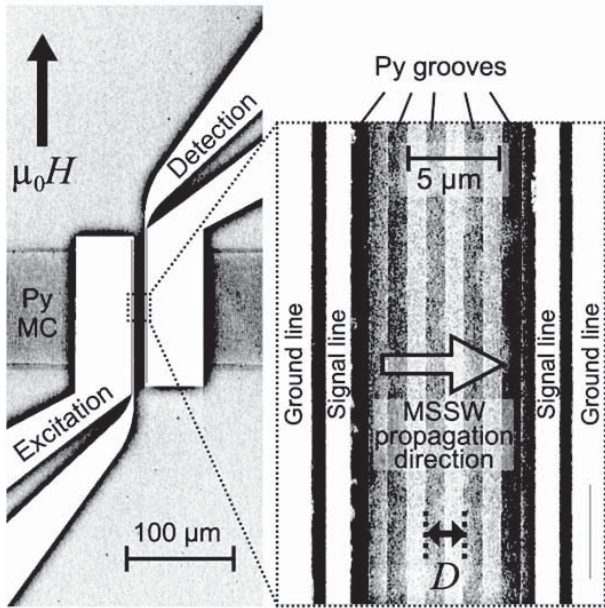


図 2. 1. Py MC の走査型電子顕微鏡写真.

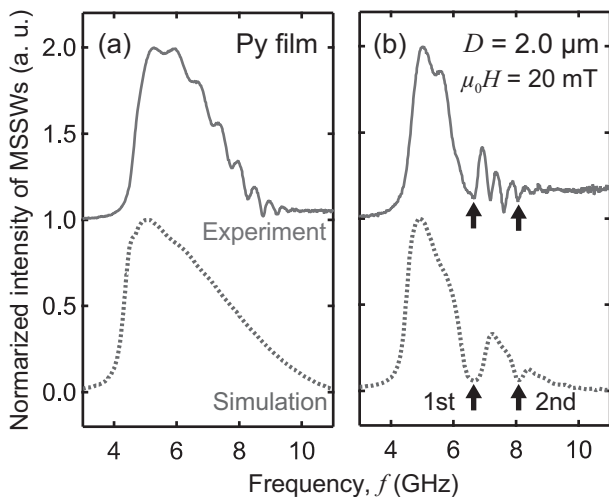


図 2. 2. (a) 無構造 Py 導波路と (b) Py MC における MSSW スペクトル. 実線と破線は、それぞれ実験と計算結果を示している.

小さな振動が観測されているものの、両スペクトルとも周波数 $f = 5$ GHz で最大となる非常によく似た形状のスペクトルを示した。すなわち、OOMMF と MATLAB を組み合わせた計算手法は、MSSW スペクトルの実験結果を詳細に調査する手段として非常に有効であると判明した。次に格子定数 $D = 2.0 \mu\text{m}$ の Py MC における MSSW スペクトルの実験結果（実線）および計算結果（破線）を図 2. 2 (b) に示す。どちらのスペクトルも特定の周波数（6.6 と 8.1 GHz）において、無構造 Py サンプルでは見られなかった MSSW 信号の減衰（ディップ）が観測された。このディップは、詳細なマイクロマグネティックシミュレーションの結果からマグノニックバンドギャップによるスピン波伝搬の減衰を示していることがわかっており、我々は初めて電気的手法のみを用いて金属 MC のマグノニックバンドギャップを観測す

ることに成功した。この成果は、金属 MC の電子デバイスへの応用を加速させる画期的な成果である。（業績 1）今後は、アンテナの構造を工夫するなどして、詳細な分散関係を調査する予定である。

【研究業績】

- [1] K. Shibata, **K. Kasahara**, and T. Manago, “Electrical detection of magnonic band gaps for metallic one-dimensional magnetic crystals”, Appl. Phys. Express **12**, 053002 (2019).
- [2] T. Manago, M. M. Aziz, F. Ogrin, and **K. Kasahara**, “Influence of the conductivity on spin wave propagation in a Permalloy waveguide”, J. Appl. Phys. **126**, 043904 (2019).
- [3] **K. Kasahara**, S. Wang, T. Ishibashi, and T. Manago, “Magneto-optical images of submicron-size Bi-substituted YIG patterns prepared by electron-beam irradiated metal-organic decomposition”, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 060906 (2019).
- [4] K. Shibata, **K. Kasahara**, K. Nakayama, V. V. Kruglyak, M. M. Aziz, and T. Manago, “Dependence of non-reciprocity in spin wave excitation on antenna configuration”, J. Appl. Phys. **124**, 243901 (2018).
- [5] **K. Kasahara** and T. Manago, “Preparation of epitaxial yttrium-iron garnet micropatterns using metal-organic decomposition with electron-beam irradiation”, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 110303 (2017).
- [6] **K. Kasahara**, M. Nakayama, X. Ya, K. Matsuyama, and T. Manago, “Effect of distance between a magnet layer and an excitation antenna on the nonreciprocity of magnetostatic surface waves”, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 010309 (2017).

3. 準周期構造を有したマグノニック結晶の研究 (研究員：中山和之)

研究の目的・方法

準周期的な配列を持つマグノニック結晶を用いて特異な界面状態（エッジ状態）を実証・解明しロバストかつ低コストなスピン波デバイスの開発を目指す。具体的には一次元準周期配列の代表的な構造であるフィボナッチ格子を持つような人工磁気構造体、準周期マグノニック結晶を作製する。量子ホール効果と類似の数学的構造をもつことから、エッジ状態は界面のラフネスに対して、強固でロバストな性質を持つことが期待される。研究対象として金属強磁性体であるパーマロイ (Py)、ニッケル (Ni) などを用い、ストライプ・グレーティング構造に関する設計・数値計算を行った。本研究によって強磁

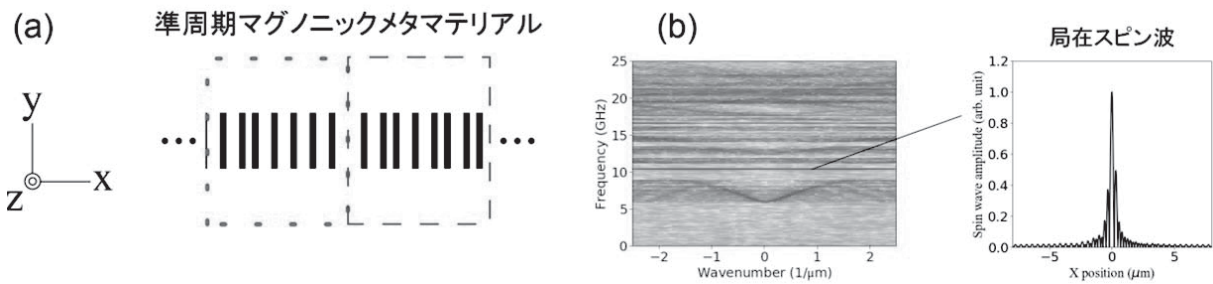


図 3. 1 (a)準周期メタ材料の構造 (b)バンド構造とスピン波の局在状態

性膜の質や人工構造体の作製精度に対する制約の少ない、スピン波デバイスの実現が可能となり、スピントロニクス、マグネトニクスなど、スピン波を利用する幅広い研究分野への波及効果を与えることが期待される。

研究成果

本研究で取り組んだ準周期マグネトニクスメタ材料 (QMM) の構造設計とその解析結果を報告する。ここでは Py と Ni を材料としたストライプ構造に関する結果を示す。図 3. 1 (a) に我々の考案する QMM を示す。QMM は準周期構造体であり、□, ■ はそれぞれ Fibonacci 格子の二つの元に対応している。今の場合 □ : Py, ■ : Ni であり、各ユニットの幅は生成に用いる準周期配列に応じて 100nm もしくは 200nm となる。この構造の特徴として赤点線 (左) と青破線 (右) で囲まれた二つの領域は異なる準周期配列を持ち、それらを接合することで QMM を構成している点にある。準周期配列は近年注目を集めているトポロジカル物質と同様な性質を持っており、スピン波の局在状態が発現することが期待される。磁性体中のスピン波の低エネルギー励起状態をよく記述する式として Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式が知られている。我々は LLG 方程式を 100mT の磁場のもと数値的に解くことで、図 3. 1 (b) で示されるような横軸波数 (1/μm) 縦軸周波数 (GHz) とした時のバンド構造を求めた。図中の 9 GHz-12GHz 近傍の禁制帯の中に、フラットなバンドを持つモードが確認できる。このモードを可視化したものを図の右側に示す。QMM の接合界面にスピン波の局在状態が発現していることが分かる。本研究で考察したストライプ構造の QMM は電子線描画装置で十分作製できるサイズであり、スピン波の周波数帯も標準的なベクトルネットワークアナライザで十分検出可能である。今後は本研究で提案・解析した構造を作製し、実験的な観測をすすめる計画である。

成果の発表リスト

【論文】

[1] K. Shibata, K. Kasahara, K. Nakayama, V. V. Kruglyak, M. M. Aziz, and T. Manago, "Dependence

of non-reciprocity in spin wave excitation on antenna configuration", Journal of Applied Physics **124**, 243901 (2018).

[2] H. Kurosawa, S. Ohno, K. Nakayama: Theory of the optical-rectification effect in metallic thin films with periodic modulation, Phys. Rev. A **95**, 033844 (2017).

【著書】

[1] 中山和之, "準周期磁気構造体を利用したスピン波制御", 磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術 (4 節), 技術情報協会 (2018).

【国際会議発表】

[1] K. Nakayama, S. Tomita, R. Kawasaki, K. Kasahara, N. Hosoi, H. Yanagi, T. Manago, "Spin-wave Localization with Quasi-periodic Magnonic Metamaterials", The 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials' 2018), Aalto University, Espoo, Finland, August 2018.
 [2] K. Shibata, K. Kasahara, K. Nakayama and T. Manago, "Antenna Configuration Dependence of the Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Wave", SPINTECH 9, Fukuoka, Japan, 2017/6/7 (4-8).

【国内学会発表】

[1] 中山和之, 富田知志, 川崎連, 笠原健司, 細糸信好, 柳久雄, 眞砂卓史, "準周期接合界面におけるマグノン状態の研究", 第79回応用物理学会 秋季学術講演会, 2018年.
 [2] 中山和之, 富田知志, 川崎連, 笠原健司, 細糸信好, 柳久雄, 眞砂卓史, "準周期グレーティングによる静磁表面波の局在化", 日本物理学会 第73回年次大会, 2018年.
 [3] 川崎連, 中山和之, 富田知志, 笠原健司, 眞砂卓史, 細糸信好, 柳久雄, "磁性体準周期グレーティング構造の作製とスピン波測定", 第65回応用物理学会 春季学術講演会, 2018年.

[4] 中山和之, 富田知志, 笠原健司, 諏訪智巳, 細糸信好, 柳久雄, 眞砂卓史, “フィボナッチ格子を持つマグノニック結晶のスピン波特性”, 第78回 応用物理学会 秋季学術講演会, 2017年.

[5] 中山和之, 富田知志, 笠原健司, 児玉俊之, 細糸信好, 柳久雄, 眞砂卓史, “準周期構造を利用したスピン波制御”, 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年.

4. 有機物太陽電池の実現に向けた光合成メカニズムの解明 (研究員: 武藤梨沙)

研究背景

化学燃料に代わる次世代エネルギー源として, 環境にやさしいバイオエネルギーが注目されている. しかし, 低コストで環境負荷を抑えたバイオエネルギーの生産方法は未だ確立されていない. 光合成は光エネルギー (太陽光) を化学エネルギー (ATP や NADPH など) に高効率で変換するシステムであり, その変換効率はほぼ100%である. 有機物太陽電池の開発には, この光合成システムを理解する必要がある.

研究成果

光合成は, 葉緑体内にあるチラコイド膜で行われる. チラコイド膜中には, 光合成膜タンパク質である光化学系II複合体, シトクロム複合体, 光化学系I複合体が局在しており, 光化学系II複合体で発生した電子は光化学系I複合体まで到達し, 光化学系I複合体からは電子伝達タンパク質であるフェレドキシンへと受け渡される. フェレドキシンは, フェレドキシン-NADP⁺還元酵素へと電子を渡し, NADP⁺からNADPHへと変換する. このNADPHは生体内の様々な箇所還元力として働く. 光化学系I複合体からフェレドキシンへの電子伝達経路を明らかにすることは, 効率的な太陽電池の開発につながる. そこで, 核磁気共鳴法とX線結晶構造解析を用いて, 光化学系I複合体-フェレドキシンの構造解析を行った. 光化学系I複合体とフェレドキシンには鉄-硫黄クラスターがあり, この鉄-硫黄クラスター間を電子が移動する. 光化学系I複合体-フェレドキシン超複合体では, フェレドキシンとの相互作用部位とは離れた部位が構造変化をすることで, この鉄-硫黄クラスター間の距離を変化し, 効率的に電子を受け渡す仕組みがあることが示唆された (業績1, 2, 4). 次に, 有機物太陽電池に適した試料作製に取り組んだ. 高効率を目指すには, 純度の高い試料が必要となる. 純度の評価には, 高速原子間力顕微鏡を用いた. ホウレンソウからのチラコイド膜精製法を検討した結果, 夾雑物の多かった試料 (図4.1) から夾雑物が少なく, 膜へのダメージもほとんどないチラコイド膜を精製することに成功し

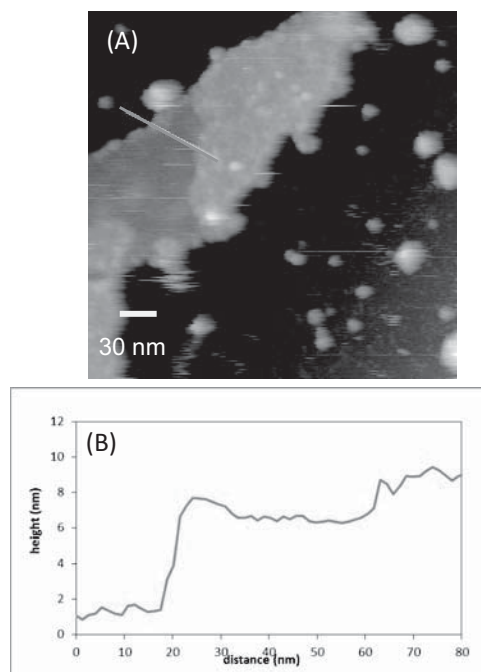


図4.1 (A) AFM image of typical grana membrane. (B) Height profiles of the AFM image in Fig. 1A.

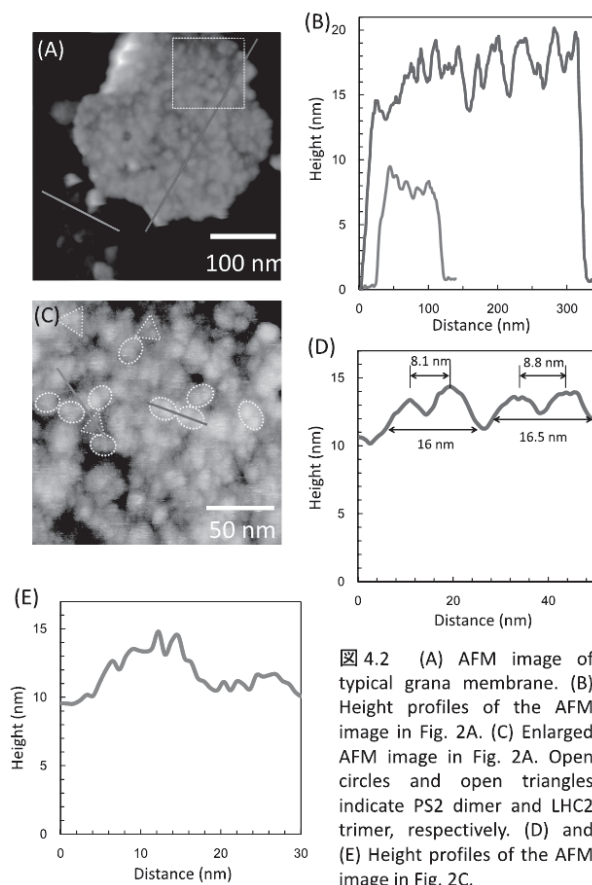


図4.2 (A) AFM image of typical grana membrane. (B) Height profiles of the AFM image in Fig. 2A. (C) Enlarged AFM image in Fig. 2A. Open circles and open triangles indicate PS2 dimer and LHC2 trimer, respectively. (D) and (E) Height profiles of the AFM image in Fig. 2C.

た(図4.2)。また、このチラコイド膜中には光化学系II複合体や光捕集タンパク質である光捕集タンパク質複合体IIを観察することができた(業績5)。

[業績]

論文

1. Kubota-Kawai H., Mutoh R., Shinmura K., Sétif P., Nowaczyk M. M., Rögner M., Ikegami T., Tanaka H., Kurisu G., X-ray structure of an asymmetrical trimeric ferredoxin-photosystem I complex. *Nature Plants*, 4(4): 218-224. (2018.4)
トビックス
2. 武藤梨沙, 河合(久保田)寿子, 池上貴久「光化学系I-アナログフェレドキシン複合体の構造解析」, *生物物理*, Vol. 59, No. 1 (通巻341号), 32-34 (2019)

学会発表

3. Nakaniwa, T.*, Mutoh, R., Fushimi, K., Yasuda, A., Mizoguchi, T., Tamiaki, H., Azai, C., Tanaka, H., Itoh, S., Oh-oka, H., Kurisu, G., "X-ray structure of the type-I reaction center from *Heliobacterium modesticaldum* at 3.2 Å resolution", 第56回日本生物物理学会年会, 岡山大学, 2018年9月(招待講演)*共同第一発表者
4. 武藤梨沙, 河合(久保田)寿子, 村木則史, 池上貴久, 栗栖源嗣, 「ガリウム置換フェレドキシンと光化学系1複合体の構造解析」, 第19回若手NMR研究会, グリーンピアせとうち, 2018年8月(招待講演)
5. Mutoh, R., Iida, T., Yamamoto, D., "The dynamics of photosystem 2 and light-harvesting complex 2 in spinach grana membrane revealed by high-speed AFM", 第55回日本生物物理学会年会, 熊本大学, 2017年9月

5. マルチフェロイックナノ粒子の粒径効果

(研究員: 田尻恭之)

研究背景

数ナノメートルサイズの粒子(ナノ粒子)では、粒子の体積に対する表面部分の割合がかなり大きくなり、バルクでは無視することが出来た表面の影響が大きくなる。よって、表面効果や有限サイズ効果が顕著になることから、磁性体ナノ粒子はバルク結晶と異なる特有な磁性が出現する。特に、強相関電子系物質は結晶構造、物性、電子状態の相関が強いために様々な要因が絡み合い、特異なサイズ効果の出現が期待される。本研究は強相関電子系物質でありマルチフェロイック物質として知

られている DyMn_2O_5 を研究対象に選定した。そのナノ粒子を合成し、結晶構造と磁性およびそれらの相関を明らかにすることを目的として研究を進めた。

研究成果

本研究では、粒子サイズ分布が小さくかつ非凝集系のナノ粒子を合成するために、直径が数nmの一次元細孔を有するメソ多孔体SBA-15の細孔中で DyMn_2O_5 ナノ粒子を合成した。ナノ粒子は凝集することがないため粒子間相互作用等を見捨てる事が可能となり、独立系として取り扱うことができ各粒子の振る舞いを観測することが可能である。本研究では、約7~20nmの粒子サイズを持つナノ粒子の合成に成功した。図5.1に合成したナノ粒子のTEM観察像を示す。図中の黒い粒状のものが各ナノ粒子を示しており、挿入図に示すように粒子サイズ分布が小さく凝集していないことがわかる。放射光を用いた粉末X線回折実験を行い、ナノ粒子の結晶構造解析を行った。以下のことが明らかになった。ナノ粒子の格子定数は約12nm以下でサイズ依存性を示し、ナノ粒子の格子定数はバルクと異なる。その格子定数の変化は、ナノ粒子の結晶構造(ユニットセル)がバルクから異方的にひずんでおり、その異方的なひずみはサイズに依存することがわかった。一方、約12nm以上のナノ粒子の格子定数はサイズ依存性を示さず、バルク結晶と同様である。

合成したナノ粒子の磁気測定(磁化率の温度依存性、磁化過程)を行い、磁気サイズ効果を明らかにした。図5.2に5および15Kにおける保磁場のサイズ依存性を示す。保磁場は粒子サイズに依存し、約12nm以下で急激に減少する。この約12nmで急激に変化する振る舞いは、結晶構造のサイズ依存性と同様である。磁化の温度依存性においても同様に約12nmで急激にパラメータが変化する振る舞いが観測された。このように、 DyMn_2O_5 ナノ粒子は結晶構造と磁性の間に強い相関を持つことが

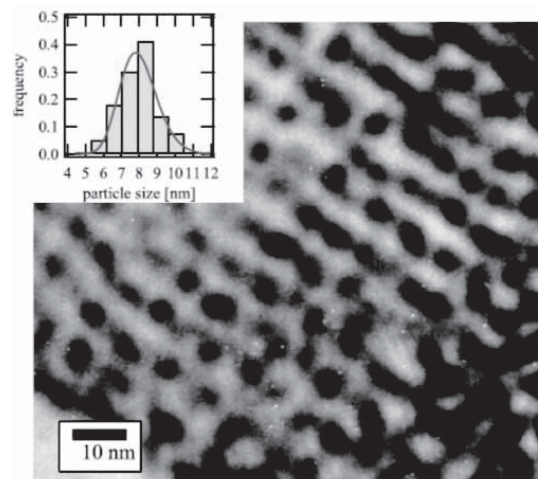


図5.1. DyMn_2O_5 ナノ粒子 (8.5nm) のTEM像

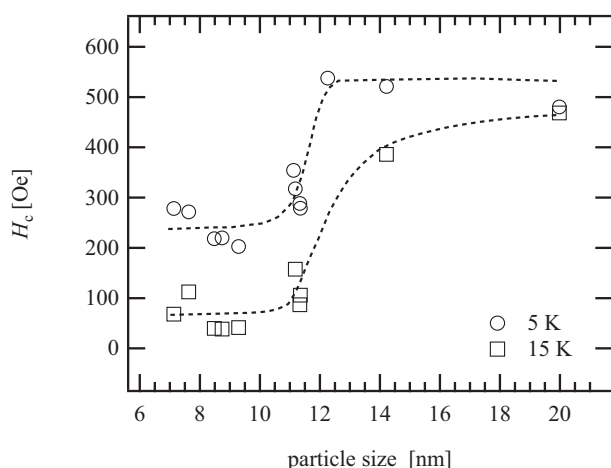


図5.2. DyMn₂O₅ナノ粒子 (11.1nm) の5, 15Kの保磁場のサイズ依存性

判明した。結晶構造のひずみが磁気相互作用、磁気異方性の変化を誘起したものと考えられる。また、DyMn₂O₅ナノ粒子において、粒子サイズの減少による表面効果の顕在化に伴い粒子表面に現れたスピン状態が支配的になっていることを明らかにした。

【業績】

(学術論文)

- T. Tajiri, M. Mito, H. Deguchi, A. Kohno, "Magnetic properties of GdMnO₃ nanoparticles embedded in mesoporous silica" *Physica B: Condensed Matter* **536**, 111 (2018).
- T. Tajiri, H. Deguchi, M. Mito, K. Konishi, S. Miyahara, A. Kohno, "Effect of size on the magnetic properties and crystal structure of magnetically frustrated DyMn₂O₅ nanoparticles" *Phys. Rev. B* **98**, 064409 (2018).
- T. Tajiri, K. Sakai, H. Deguchi, M. Mito, A. Kohno, "Size effects on magnetic property and crystal structure of Mn₃O₄ nanoparticles in mesoporous silica" *IEEE Transactions on Magnetics* **55**, 2300204 (2019).

(国内学会発表)

- 田尻恭之, 美藤正樹, 出口博之, 香野淳, "希土類マンガ氧化物 GdMnO ナノ粒子の磁気サイズ効果" 日本物理学会第72回年次大会 (2017).
- 堺幸司, 田尻恭之, 重松裕一, 出口博之, 美藤正樹, 香野淳, "スピネル型遷移金属氧化物 Mn₃O₄ナノ粒子における磁気サイズ効果" 日本物理学会第72回年次大会 (2017).
- 田尻恭之, 高橋和雅, 出口博之, 美藤正樹, 香野淳, "スピネル型マンガ氧化物 Mn₃O₄ナノ粒子の電子スピン共鳴とサイズ効果" 日本物理学会第74回年次大会 (2019).

(国際会議発表)

- T. Tajiri, M. Mito, H. Deguchi, A. Kohno, "Magnetic properties of GdMnO₃ nanoparticles embedded in mesoporous silica" International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2017), Prague, Czecho (2017).
- T. Tajiri, K. Sakai, H. Deguchi, M. Mito, A. Kohno, "Size effects on magnetic property and crystal structure of Mn₃O₄ nanoparticles in mesoporous silica" The 21st International Conference on Magnetism (ICM 2018) San Francisco, USA (2018).

Hadoop+Hive を用いた天体データの格納法に関する研究 (研究員: 江口智士)

研究背景

世の中には、信頼性の低い「パソコン」を何万台も束ねて分散並列処理に使用することを可能にする「Hadoop」というフレームワークが存在する。Hadoopではハードウェアが故障することが前提になっており、ひとつのデータを複数のノード (=パソコン) に保存する機能や、あるノードで失敗した処理を別のノードで自動的に再実行する機能を提供する。従ってHadoopはクラウド・コンピューティングと非常に相性が良く、Hadoopが予めインストールされたインスタンス (仮想化されて計算機資源の単位) が Amazon Web Service (AWS) の一部として提供されている。さらに、従来のリレーショナル・データベース・マネージメント・システム (RDBMS) で標準的に使用されているSQL言語とよく似た文法で、Hadoop上のデータを管理・集計できる「Hive」というアプリケーションが存在する。そこで本研究では、AWSで提供されている「m3.xlarge (4コアCPU・15GB RAM) +Hadoop+Hive インスタンス」を利用して、簡易的な天文データ・アーカイブを実装した。なお、HiveのエンジンにはTezを指定した。

研究成果

Hiveのデータベース・テーブルの実体は、HDFS (Hadoop上の分散ファイル・システム) 上に置かれた巨大な Character Separated Values (CSV) ファイルである。データを処理する際はこのファイルを頭から順番に読み込むことになる。このままでは分散並列処理の恩恵を受けられないので、適当なデータ単位に分割する必要がある。この作業を「パーティショニング」と呼び、このときHDFS上には、「パーティションとして指定したテーブル要素」の「値」ごとにフォルダが作成され、その下にCSVファイルが作成されて行く。従って、パーティショニングの善し悪しで各検索クエリの性能が決ま

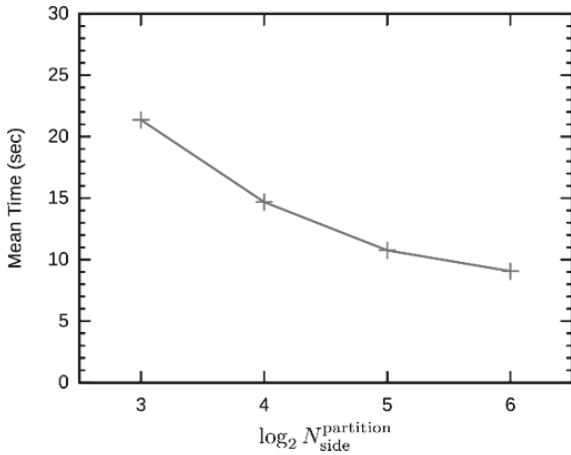


図 6. 1. 分割パラメータ $N_{\text{side}}^{\text{partition}}$ と検索時間の平均値の関係

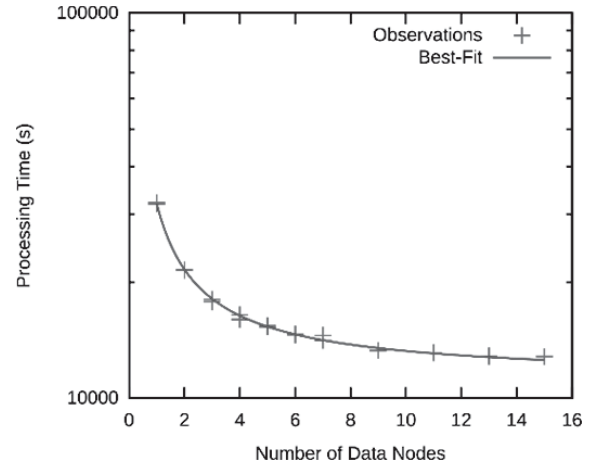


図 6. 2. データ・ノードの数と応答時間の関係

る。そこで、

1. 「2 MASS Catalog Server Kit」に付属の全天カタログ (174GB, 470, 992, 970行) をテスト・データとし、
2. 天球を等立体角で分割する HEALPix というアルゴリズムを用い、
3. 分割のパラメータ $N_{\text{side}}^{\text{partition}}$ を $2^3, 2^4, \dots$ と変えながら、
4. 検索の中心座標をランダム (球面上の点として等確率) に、検索の半径を $5'' \sim 5'$ の範囲でランダム (一様確率) に指定したとき、
5. 検索対象とすべき HEALPix ID の列を併せて指定した場合、

6. $N_{\text{side}}^{\text{partition}}$ の値に応じて検索時間がどう変化するかを調べた。この際 AWS のデータ・ノード数は 3 つに固定しており、この数を増やしても実質使用されるデータ・ノード数に変化はなかった。また、天球全体の分割数 $N^{\text{partition}}$ と分割のパラメータ $N_{\text{side}}^{\text{partition}}$ との間には $N^{\text{partition}} = 12 (N_{\text{side}}^{\text{partition}})^2$ の関係がある。結果は図 6. 1 のようになった。 $N_{\text{side}}^{\text{partition}}$ を大きくするほど検索時間は短くなったが、 $N_{\text{side}}^{\text{partition}}$ が 2^7 を超えると、AWS 上の取り込みに失敗した。Hive にはデータを CSV 形式で保存する他に、Optimized RowColumnar (ORC) 形式というバイナリ形式でファイルを保存することができる。ORC 形式ではデータは列方向に束ねて圧縮したもので、現在考えているような単純なデータ検索において威力を発揮すると考えられる。

ORC 形式に変更することによる性能向上を評価するため、パーティショニングしていない状態の 2 MASS Catalog Server Kit のデータを使い、先ほどと同様にして検索にかかる時間を測定した。CSV 形式では約 750 秒掛かっていた処理が、60 秒以下まで短縮された。以上から、Hive を天体データベースとして使用する場合、

- データ形式として ORC 形式を使用する
- $N_{\text{side}}^{\text{partition}} = 2^6$ の HEALPix でテーブルをパーティ

ショニングする

ことが有効であると結論した。以後この条件で調査を行った。

続いて、天文学で天体カタログの次によく使用される画像データを Hive で処理する方法について検討した。天文学の画像データとはいわゆる「天体写真」のことで、FITS という標準形式で配布される。望遠鏡の光学設計により FITS 画像中の各画素と天球座標の対応関係が異なるため、「様々な望遠鏡で取得した画像を重ねて表示・比較する」という現実のユースケースを想定すると、すべてを天球座標で保管するのが合理的であると考えられる。そこで、天文学で使用する各種座標変換を行う「WCSLIB」を用いて FITS 画像を天球座標に引き戻し、その結果をさらに分割パラメータが $N_{\text{side}} = 2^{20}$ の HEALPix メッシュに変換し、それを Hive テーブルに格納することにした。

テスト・データには、「JVO ALMA Archive」で公開されている ALMA 望遠鏡の観測データのうち、ファイル・サイズが最も大きい 4 つの FITS ファイル (合計 43 GB) を使用した。現状では WCSLIB は AWS では動作しないので、江口所有のワークステーションで HEALPix メッシュへの座標変換を行い、同じ環境で ORC 形式の Hive テーブルに変換した。完成した Hive テーブルを AWS の Hive クラスタに読み込ませた。この際 HEALPix メッシュへ変換した際に合計のファイル・サイズが 670GB まで膨れ上がったが、ORC 形式で圧縮することで 25GB まで縮小した。

AWS のデータ・ノード数を 1 ~ 15 の間で変化させ、手順 4 と 5 と同じ方法でランダムな座標検索を行い、その応答時間を測定した。性能 (並列度) の評価の指標として「Amdahl の法則」

$$T_{\text{parallel}} = \left[(1-p) + \frac{p}{N} + \alpha \right] T_{\text{single}}$$

を用いた。ここで T_{single} はプログラムの並列化を行わないときの処理時間、 T_{parallel} は並列化したときの処理時

間, N はプログラムの並列化数, p は並列化の割合, α は並列化に伴うオーバーヘッドを表す. 結果は図 6. 3 のようになり, $p=0.65$, $\alpha=0.00$ を得た. 特別なプログラムの最適化を行わずすべてを Hive (あるいは Hadoop) に任せても, 6 割以上の並列化を達成できた. いっぽうで, 今のままではデータ・ノード数を 10 以上にしても, 性能向上が見込めないことがわかった. 実用的なシステムとして機能させるためには, データ構造についてさらなる検討が必要である.

論文発表

1. “Compton thick absorber in type 1 quasar 3C 345 revealed by Suzaku and Swift/BAT.” S. Eguchi, MNRAS, 468, 4529 (2017) (査読あり)
2. “Pre-feasibility Study of Astronomical Data Archive Systems Powered by Public Cloud Computing and Hadoop Hive.” S. Eguchi, arXiv, arXiv: 1611.06039 (2016) (査読なし)

学会発表

1. 「天文データ・アーカイブをクラウド・コンピューティングにより安価に構築する方法の検討」, 江口智士, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 兵庫県立大学姫路工学キャンパス, 姫路市, 2018 年 9 月 (ポスター発表)
2. 「『すざく』および Swift/BAT で明らかになった 1 型クエーサー 3C345 の光学的に非常に分厚い吸収体」, 江口智士, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌市, 2017 年 9 月 (口頭発表)
3. “Pre-feasibility Study of Astronomical Data Archive Systems Powered by Public Cloud Computing and Hadoop Hive.” Eguchi S., ADASS XXVI, Stazione Marittima, Trieste, Italy, 2016 October (ポスター発表)