

U-Net image segmentation for statistical analysis of granular FePt recording media and automated dataset generation

N. Kulesh, A. Bolyachkin, I. Suzuki, Y. K. Takahashi, and H. Sepehri-Amin
National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

Progress in the development of next-generation heat assisted magnetic recording (HAMR) media strongly depends on the optimization of existing processing technology for further decrease of grain sizes while maintaining a large coercivity in FePt granular media. Thus, current target areal density of 4 Tb/in² requires L1₀-FePt granular media with an average grain size of 4-5 nm with standard deviation (SD) below 15 %^{1,2}. These requirements imply the precise and fast analysis of microstructural data; *e. g.* transmission electron microscopy (TEM) images. In this work, we propose an automated method combining segmentation using convolutional neural network with the U-Net architecture and computer vision algorithms for fast acquisition of all relevant statistical information from TEM images. We demonstrate that the workflow capable of processing an arbitrary number of images in a highly uniform way can be useful for generating a high-quality dataset for further analysis by machine learning algorithms. As proof of concept, we considered a series of FePt-C granular films for which a dataset was generated, combined with sputtering conditions and magnetic properties, and analyzed by machine learning.

Samples of FePt-C granular films were deposited in several stages onto MgO(001) substrates by magnetron sputtering at elevated temperatures. The U-Net model was built using Keras and TensorFlow Python libraries and was trained using 1200 images and corresponding manually segmented masks obtained by cutting 10 TEM images acquired on the area of 300 × 300 nm². The U-Net model was further used for automatic segmentation of 70 large TEM images (sample image with recognized grains marked with colors is shown in Fig. 1 a). The obtained binarized images were used for measuring area of each grain, estimating diameter, distance to the center of the nearest grain, and roundness parameter. As a result, average values of each parameter together with SDs were extracted. In Fig. 1 b, a comparison of the two histograms of grain diameters obtained from manually and automatically segmented images are shown. Using the automatically generated dataset, simple regressor models for predicting coercivity and microstructural parameters were built and used for finding an optimal set of sputtering conditions leading to the desired combination of coercivity and grain size. The proposed approach can be useful for fast and unbiased microstructure analysis of FePt granular media. At the end of the talk, we will discuss how machine learning assisted microstructure analysis can be beneficial for optimization of the processing parameters toward realization of desired microstructure in the L1₀-FePt granular media for HDDs with an areal density of 4 Tb/in².

References

- 1) D. Weller et al. IEEE Trans. Magn. 50 (2014) 3100108
- 2) K. Hono *et al.* MRS Bull. 43 (2018) 93-99

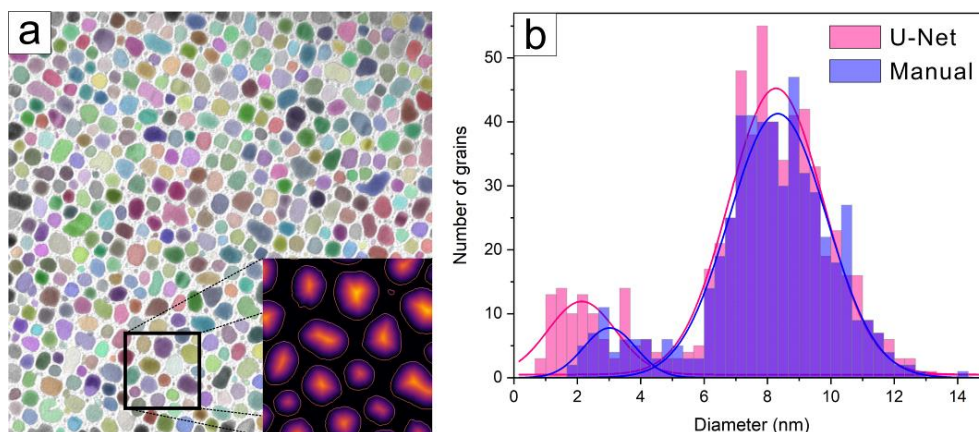


Figure 1 (a) TEM image with recognized grains highlighted with colors. The inset shows Euclidian distance map used for estimating distances between centers of neighboring grains. (b) Distributions of estimated grain's diameters extracted from TEM images segmented manually and by the U-Net model.

単位胞解析による L1₀ 型 FePt 基薄膜中の 磁性結晶粒への軽元素固溶の評価

○岩動 大樹¹, 田中 元人¹, 齊藤 節¹, タム キム コング², 小川 智之¹, 齊藤 伸¹

(1. 東北大学, 2. 田中貴金属工業)

Evaluation of light atomic element dissolved in magnetic grains
with unit cell analysis for L1₀-typed FePt based films

○Daiki Isurugi¹, Gento Tanaka¹, Takashi Saito¹, Kim Kong Tham², Tomoyuki Ogawa¹, and Shin Saito¹

(1. Tohoku Univ., 2. TANAKA KIKINZOKU KOGYO K. K.)

はじめに 熱アシスト磁気記録媒体の記録層では、室温で高い一軸結晶磁気異方性エネルギーを有する L1₀ 型 FePt 相が有力な候補材料であり、C や BN を粒界材 (Grain boundary material: GBM) として用いたグラニューラ薄膜の実用開発が進められている。我々はグラニューラ薄膜の飽和磁化 (M_s) が GBM の融点と相関し、C や BN 等の融点の高い GBM を用いたグラニューラ薄膜では M_s の低下が著しいことを指摘した¹⁾。この原因は成膜時に FePt と GBM との分離が不十分な状態で析出凝固が起きるため、GBM を構成する軽元素 B、C、N が磁性結晶粒内に残存してしまっていることが考えられ、固溶量の評価が求められる。しかしながらシングルナノメートル膜厚のグラニューラ薄膜であって、しかも磁性結晶粒内に存在する軽元素について定量評価することは容易ではなく、これまでほとんど議論されてこなかった。今回我々はグラニューラ薄膜中の L1₀ 型 FePt 相の単位胞体積が、格子中に固溶した軽元素量に敏感な指標となる傍証を得たので報告する。

評価の方法と評価結果 Fig. 1 は、L1₀ 相の単位胞を解析するための格子定数のグラフである。 c を縦軸、 a を横軸にとると、軸比 c/a の等値線は右上がりの直線 (破線)、単位胞体積 (a^2c) は右下がりの曲線 (記載範囲ではほぼ直線: 実線) として描かれる。このグラフ上に様々なプロセス条件で作製される FePt 基薄膜の L1₀ 相の格子定数 (a, c) をプロットすれば、単位胞変化に関する情報が得られる。一例として Fig. 1 には基板温度を 250 - 630 °C まで変化させてスパッタ成膜した FePt 合金薄膜中の FePt 相の格子定数をプロットした。試料の層構成は FePt-30 vol.%BN (5 nm)/MgO (5 nm)/a-Co₆₀W₄₀ (80 nm)/Sub. である。試料中の FePt 結晶粒は c 軸配向していたため、In-plane X 線回折による(200)面ならびに Out-of-plane X 線回折による(002)面からの回折線のブラッグ角から格子定数 (a, c) を算出した。プロットによると合金薄膜の (a, c) のプロットは基板温度を上げて作製するほど右下にシフトし (a : 増加, c : 減少)、 c/a が低下していくことがわかる。これは添え書きした規則度の向上とも対応している。一方これらの試料の単位胞体積は、成膜時の基板温度に依らず 55.55 Å³ で一定値を示している。これは FePt 合金薄膜では規則-不規則の構造変化の過程で単位胞体積はほとんど変化しないことを示している。Fig. 2 には、基板温度 550°C のもと Ar ガスに N₂ ガスを添加して成膜した FePt 合金薄膜中の L1₀ 相の格子定数 (a, c) を示した。窒素流量比を 0 から 50% まで増加させると、(a, c) のプロットはグラフ中で上側にシフトし (c : 増加)、 c/a が 1 に近づいていくことがわかる。一方この場合の単位胞体積は 55.55 から 56.89 Å³ まで増大している。添え書きした規則度の減少も考え合わせると、N₂ ガスの添加成膜では、添加窒素量の増加にともない窒素が FePt 結晶粒内に固溶してしまい、Fe と Pt の規則配列の形成を妨げている描像が伺える。講演では、FePt 合金薄膜に加え FePt-GBM グラニューラ薄膜について、N₂、H₂、NH₃ 等のガスを用いてガス添加成膜やガス雰囲気ポストアニールを施した試料の解析結果についても紹介する。

参考文献 1) S.Saito et al., *J. Appl. Phys.*, **59**, 045501 (2020).

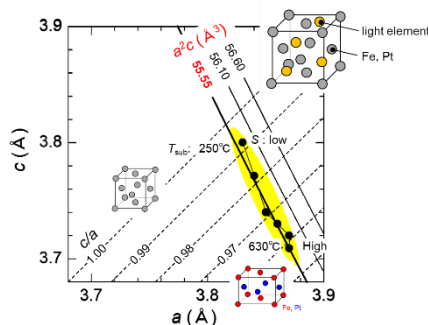


Fig. 1 Variation of the lattice constants a and c of the L1₀ phase in FePt alloy films deposited at different temperatures.

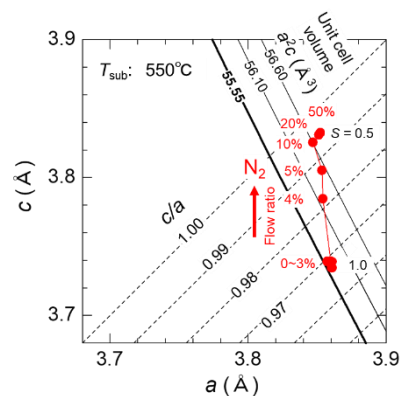


Fig. 2 Variation of the lattice constants a and c of the L1₀ phase in FePt alloy films sputtered with N₂ gas.

急速昇降温熱処理と微細加工を併用した 規則配置された $L1_0$ -FePt 微粒子群作製への検討

清水雄太¹, 吉川大貴², 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Fabrication of regularly arranged $L1_0$ -FePt fine particulate with
combination of rapid thermal annealing and microfabrication

Yuta Shimizu¹, Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.,

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに 垂直磁気異方性を有する FePt ナノ磁性体の微粒子化, またその規則配置・粒径の低分散化を含むパターン化は次世代高密度磁気記録媒体, 高機能磁気デバイス作製における基盤要素技術である. 我々は熱酸化 Si 基板上に積層した Pt / Fe 連続二層膜に対して短時間の急速昇降温熱処理 (RTA : Rapid Thermal Annealing) を行い分離, 凝集, $L1_0$ 規則合金化を一工程の熱処理で可能とする微粒子作製手法を報告している¹⁾. 更に本 RTA に電子線リソグラフィ (EBL) による微細加工を併用した手法も検討・報告している²⁾. 通常連続二層膜への RTA では粒径, 磁気特性分散の大きな微粒子群が形成される. しかし, RTA と微細加工を併用する本手法では, 各粒子体積の低分散化とともに分離・凝集プロセスの多様性を強く限定できると考えられる. 本研究では微細加工により孤立二層膜タイルの体積を限定し, 微細加工体積による熱処理後形成粒子数, 粒子形状について検討する.

実験方法 リフトオフ法にて Si 基板上に総積層膜厚 3.75 nm の Pt / Fe 孤立二層膜タイル群を RTA 前初期構造として作製した. 本構造は Fig.1 に示す微細加工タイル一辺長 L を 50 ~ 200 nm, 周期 P を $L + 100$ nm の 150 ~ 300 nm となるように描画を行い, Fe を 1.64 nm, Pt を 2.11 nm, DC マグネトロンスパッタリングにて積層し作製した. この試料に対して到達真空度 $< 1.0 \times 10^{-3}$ Pa の雰囲気下で, 昇温速度約 120 °C/sec., 到達温度 590 °C の急速昇温後, 降温速度 -140 °C/sec. の急速降温にて RTA を実施した. この試料に対して走査型電子線顕微鏡 (SEM) による観察し形成された粒子形状, 粒子数を評価する.

実験結果 一つのタイルから一つの微粒子形成可能な臨界タイルサイズの有無, また粒子サイズを評価するために SEM を使用した. Fig.2 に示すように $L < 110$ nm では1タイルあたりの形成粒子数は概ね1個であるが, $L \geq 110$ nm 付近から複数粒子の形成を確認した. これより分離が発現するタイルサイズの臨界点は 100 ~ 110 nm 近傍であることを示した. また, タイルサイズの増加に伴い1タイルあたりの平均形成粒子数は線形に増加することを確認し, 孤立二層膜体積の増加と形成粒子数に相関があると確認できる. 粒子サイズ評価からは Fig.2 に示すように $L < 100$ nm ではタイルサイズの増加とともに単調な平均粒子直径の増加が確認され, 複数粒子が形成された範囲では平均粒子直径が約 60 nm で飽和する. この RTA を用いた形成粒子サイズに対する臨界現象の存在により粒子数のタイルサイズ依存性が生じているものと考えられる. 一方, EBL の電子線散乱により RTA 前初期構造が設計よりも約 10 ~ 20 nm 程度肥大化する傾向が確認されるものの, RTA の凝集効果により描画面積の約 60% に凝集した. これにより, RTA を併用する本形成手法において描画配列周期を維持したまま加工サイズよりも微小な構造を形成できる可能性も示した.

謝辞 本研究の一部は, 情報ストレージ研究推進機構の助成により行った.

参考文献

- 1) Y. Itoh, T. Aoyagi, A. Tsukamoto, K. Nakagawa, A. Itoh and T. Katayama : Jpn. J. Appl. Phys., **43**, 12, 8040(2004).
- 2) T. Naeki, K. Miyoshi, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto : "T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)", **3**, 1 - 6 (2019).

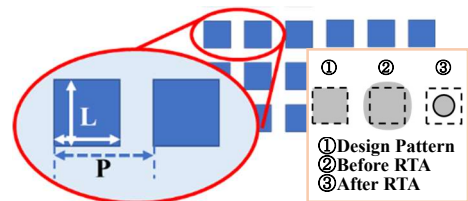


Figure1 Design tile pattern and Stepped microstructure

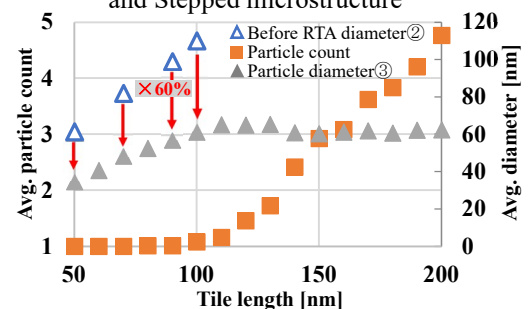


Figure2 Tile length characteristics

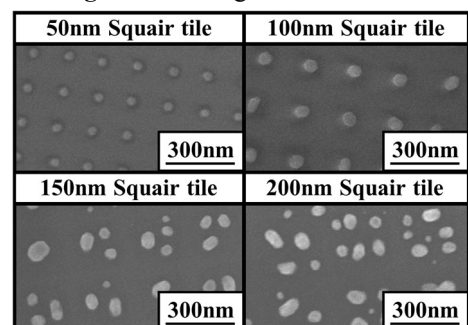


Figure3 Observation of nano particle shape by SEM.

脳神経構造可視化ツールを用いた分散ストレージ Ceph のデータアクセス性能の評価検討

川田悠貴, 田中陽一郎
(東北大)

Evaluation study of data access performance of distributed storage Ceph, using a brain neuronal structure visualization tool

Yuki Kawada, Yoichiro Tanaka
(Tohoku Univ.)

はじめに ストレージシステムの巨大化に伴うデータアクセス性能の向上が課題となっている。本実験では、大容量の回転ストレージデバイス(HDD)とレイテンシーの短いフラッシュデバイス(SSD)を組み合わせた大容量ストレージシステムの高性能化、高効率化に向け検討を行う。本実験で用いた分散ストレージシステム Ceph[1]は、柔軟なアクセス方式、優れた拡張性、高信頼性を持つオブジェクトストレージであり、ストレージ基盤としての活用が期待される。

実験方法 分散ストレージ Ceph を Compute Node-1 上のディレクトリにマウントし、ニューロンデータ(約 472GB)を格納した。Compute Node-2 上の脳神経構造可視化ツールを用いて初期表示のための一部データを Ceph クラスタから読み込み、データ通信量を測定した。ストレージデバイスとして NL-HDD を Storage Node-1, 2 に各 10 台, SATA SSD を Node-1, 2 に各 4 台, Node-3 に 1 台用いた。

実験結果 ①データ, メタデータの配置デバイスによる比較を行った。データの配置デバイス(HDD または SSD)による性能差は大きい, メタデータの配置デバイスによる影響は見られなかった。②データを HDD に配置し, 内部メタデータ(DB)/内部ジャーナル, Write-ahead ログ(WAL)に SSD を用いた場合の比較を行った。DB/WAL とメタデータをどちらも SSD に配置した場合のみ, 平均通信時間が約 3.5%短縮した。どちらか一方のみ SSD に配置した場合, SSD を用いなかった場合は, 性能の差がほとんど見られなかった。③データレプリカの数による比較を行った。レプリカ数を 1 から 2 に変更した場合, 平均通信時間はデータを HDD に配置したとき約 3.4%, SSD に配置したとき約 2.0%長くなった。レプリカは冗長性の確保とストレージデバイス同士の状態監視に使用されるため, 分散読み出しのようなメリットは得られなかった。

まとめ 性能評価の結果, データの配置デバイス, レプリカ数によるデータアクセス性能の差異を確認した。データを HDD と SSD に配置した時の性能差はベンチマークの性能差に比べ小さく, HDD にデータを配置した場合, データのシーケンシャル利用と分散配置により SSD との性能差を縮小することができた。メタデータおよび DB/WAL の配置デバイスと使用環境のデータアクセス性能への影響の詳細検討, データ保全のためのレプリカとアクセス性能のトレードオフの解消が今後の課題である。

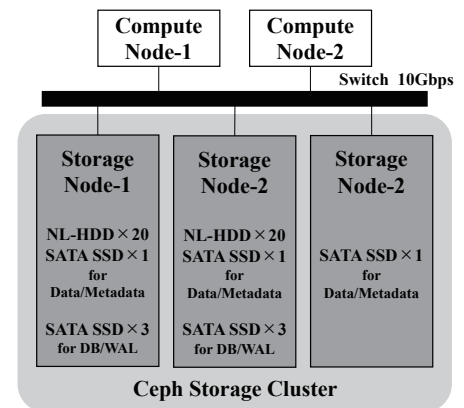


Fig.1 System Configuration

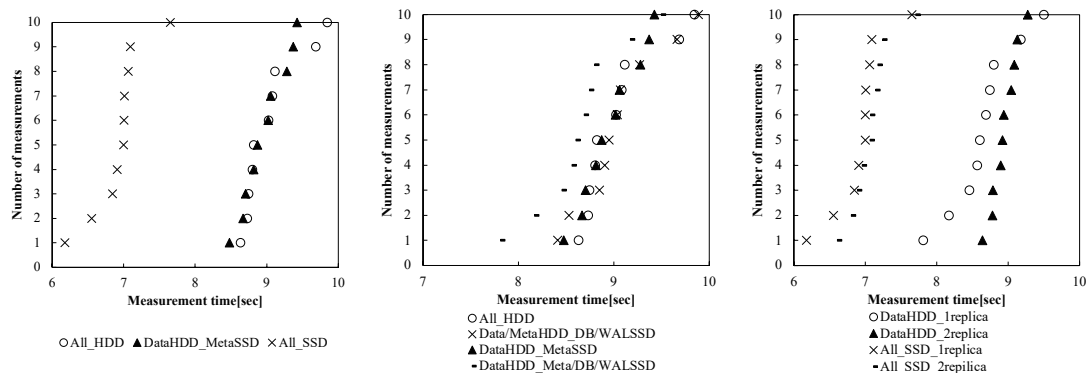


Fig.2 (From the left) ①Difference by data & metadata placement ②Difference when DB/WAL SSD is used
③Difference by number of replications

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費・基盤研究(B)JP20H02194, 東北大通研共同プロジェクト R02A33, 東北大 AI Yotta の助成を受けたものです。ニューロンデータをご提供頂いた MIT 坂東洋介博士、脳神経構造可視化ツールを提供頂いたキオクシア株式会社に感謝します。

参考文献 [1] S.A.Weil, S.A.Brandt, E.L.Miller, D.D.Long, and C.Maltzahn, "Ceph: A scalable, High-performance distributed file system," Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation, Nov.2006