

# スマートフォンで遊ぶマイクロマグネティックシミュレーション

涌井 桐哉<sup>1,a)</sup> 植田 武<sup>1</sup> 成見 哲<sup>1,b)</sup>

**概要:** マイクロマグネティクスは原子レベルの磁気の相互作用を取り扱う分野であり、磁気抵抗メモリの開発等に応用されている。シミュレーションにおいては、外部磁界、交換エネルギーによる磁界、静磁界など複数の効果を考慮するため、現象の理解が難しいという問題がある。本研究では、GPUを用いたシミュレーションをスマートフォンで動作させ、加速度センサ等で体を使いながら操作するゲームを開発することで、難解な現象を楽しく学ぶことを目指した。

## 1. はじめに

近年、MRAM (磁気抵抗メモリ) の開発が盛んに行われている [1]。MRAM は次世代のメモリと呼ばれており、将来的に HDD (ハードディスクドライブ) や SSD (ソリッドステートドライブ) に取って代わる可能性がある。HDD は大容量である一方処理速度は SSD に劣り、また内部の物理的駆動部分があるため劣化がしやすい。一方 SSD は HDD より高速な処理が可能だが、HDD と同様の容量を求めるととても高価になってしまい、かつデータの書き込み回数の上限が決まっているため寿命が短い。しかしながら、MRAM はどちらの弱点も克服し、大容量、高速であり上限なくデータの書き込みが可能となる。

マイクロマグネティクスとは物理学の一分野であり、磁石内部に現れる原子磁気モーメントを取り扱う学問である。原子磁気モーメントは原子中の電子の回転運動によって発生し、磁力の大きさとその向きを表すベクトル量である。MRAM の内部では磁化の方向によって '0' と '1' を決めるため、原子磁気モーメントの動きを知ることは MRAM の仕組みを知るために必要不可欠である。

原子磁気モーメントの動きを知るための方法としてシミュレーションがあり、これをマイクロマグネティックシミュレーション (MMS) と呼ぶ。MMS では原子磁気モーメントの変化を再現しており、種々のパラメータを入力することによって様々な応答を観察することが出来る。

しかし、通常のシミュレーション結果をムービーとして

見ただけではその仕組みを理解することは難しい。この問題を MMS のゲーミフィケーションによって解決する。

ゲーミフィケーションとは、一見ゲームには向かないものにゲーム性を持たせることを指す言葉であるが、藤田 [2] は「ゲームのメカニズムを非ゲーム分野に応用し、デジタルテクノロジーを用いユーザのエンゲージメントとモチベーションを高め行動変容を促すシステム」と定義するなど、定義に幅が存在する。この定義を具現化した例として「Nike+ GPU」[3] というアプリケーションがあり、フィットネスとゲーミフィケーションを掛け合わせユーザーの健康促進を図った。また、Foldit[4] というタンパク質の構造予測を行うコンピュータパズルゲームのように科学分野をゲーム化した例も存在し、プレイヤーの解答の中に当時の研究手法に匹敵するほどのものがあつたと報告されている [5]。本研究では MMS をゲーム化し、ユーザーに楽しみながら MMS について理解を深めてもらう。

## 2. マイクロマグネティックシミュレーション (MMS)

MMS における原子磁気モーメントの動きは Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式で表され、その概要は以下の通りである。

$$\dot{\vec{M}} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}) + \frac{\alpha}{\|\vec{M}\|}(\vec{M} \cdot \dot{\vec{M}}) \quad (1)$$

ここで  $\vec{M}$ ,  $\dot{\vec{M}}$ ,  $\vec{H}$  はそれぞれ原子磁気モーメント、 $\vec{M}$  の時間微分、磁界を表し、 $\gamma$  と  $\alpha$  はそれぞれ磁気回転比、損失定数と呼ばれる定数である。これを図示したものが図 1 である。式 (1) の第 1 項と第 2 項はそれぞれ図 1 の赤・青のベクトルに対応しており、赤が歳差運動を、青が減衰

<sup>1</sup> 電気通信大学  
The University of Electro-Communications  
a) w2131170@edu.cc.uec.ac.jp  
b) narumi@cs.uec.ac.jp

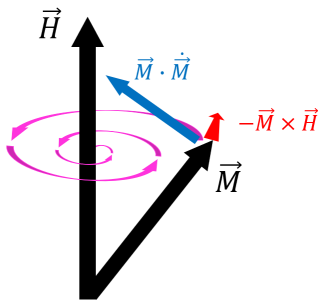


図 1 LLG 方程式の図解

運動を表している。

LLG 方程式における磁界は外部磁界, 異方性磁界, 交換磁界, 静磁界の 4 つで構成される。以下にその性質について述べる。

### 2.1 外部磁界

外部磁界とは任意に印加できる磁界である。本研究ではパラメータ入力の一つとして外部磁界の各成分を指定する。後述する磁界はどれも原子磁気モーメントの性質による磁界だが, 外部磁界はそうではないため, 自由に決定できる。

### 2.2 異方性磁界

異方性磁界とは原子磁気モーメントの「磁気異方性」に基づく磁界である。原子磁気モーメントには向きやすい方向と向きにくい方向があり, これを磁気異方性という。異方性磁界は磁気異方性を磁界として表したものである。

### 2.3 交換磁界

交換磁界とは隣り合う原子磁気モーメント同士の「交換相互作用」による磁界である。隣り合う原子磁気モーメントが同じ向きだとこの作用によるエネルギー (以下交換エネルギー) は小さくなるが, 異なる向きだと正反対の向きに近づくほど交換エネルギーは増大する。

### 2.4 静磁界

静磁界とは原子磁気モーメント自身が作る磁界である。そのため原子磁気モーメントは自身以外の原子磁気モーメントから影響を受けるため, 通常の計算方法だと原子磁気モーメントの数を  $N$  とした場合計算時間のオーダーは  $O(N^2)$  となる。

## 3. Unity での MMS

我々はこれまで Unity というゲームエンジンを用いて図 2 のようなシステムを作り, MMS を可視化した [6]。また, 今回行ったゲーミフィケーション部分について述べる。

### 3.1 MMS の概要

図 3 は MMS の画面である。左上には現在の状態が, 右

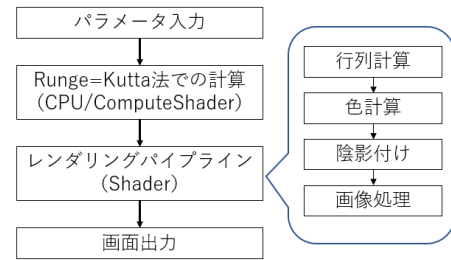


図 2 Unity での MMS のシステム

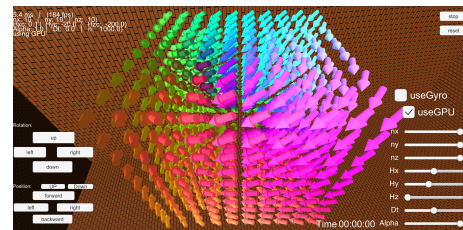


図 3 MMS の様子

上には STOP/RESET ボタンが, 左下にはカメラ操作に関する UI が, 右下にはパラメータ入力の UI がある。画面中央には原子磁気モーメントが格子点状に並べられており, パラメータを変更することによって様々な様相が観察できる。

### 3.2 GPGPU

GPGPU (General-Purpose computing on GPU) とは GPU を描画処理以外の目的に使用するという意味を表す言葉であり, 主に並列計算のことを指す。Attila 氏ら [7] の研究によると GPU1 台で並列計算を行っても CPU8 台での並列計算に対し最大 4 倍の速度を出すため, GPGPU は MMS に対し有効であることが分かる。

我々の MMS では既に Unity の ComputeShader (以下 CS) [8] を用いて GPU による加速が行われている。CS の他にも GPGPU 専用の言語として Nvidia 社が開発した CUDA 言語 [9] があるが, これは Nvidia 社の GPU にしか適用できないという欠点が存在する。一方 CS は GPU のベンダーに制限が無い。

### 3.3 ゲーミフィケーション

MMS をゲーム化する上で注目するのは磁界である。外部磁界は文字通り外から与えられるものなのでプレイヤーにコントロールさせる。残り三つの磁界の効果はどの程度なのかを分離して理解するのは難しいため, 少しずつ磁界の計算を複雑にしていくことでプレイヤーの理解を助ける。

プレイヤーは画面中央の外部磁界を操作し, 原子磁気モーメントの方向を変化させる (図 4)。左上には外部磁界の成分, 左下には HP (HenryPoint, 体力ゲージを表す) と制限時間, 右上にはミッションが表示されている。ゲームオーバーの条件として「時間切れになる」, 「ミッション

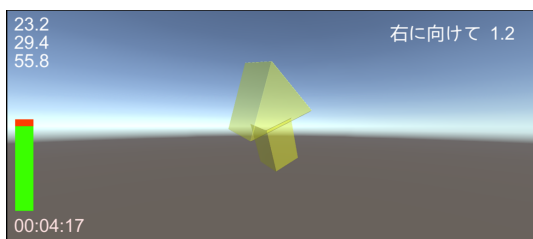


図 4 ゲーム画面

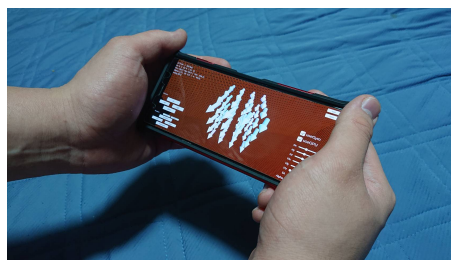


図 5 デモの様子

を 3 回失敗する」, 「HP が 0 になる」の 3 つを設定した。HP は外部磁界のノルムとの差をとって減少する。このような設定にした理由は少ないエネルギーで原子磁気モーメントの方向を変えることが MRAM の開発に役立つと考えたからである。

図 4 の UI や 3D モデルを図 3 に統合し、ゲームとする。ゲームでは以下の 4 つのレベルを順に挑戦する。

### 3.3.1 Level0

Level0 では外部磁界のみを考える。これによって原子磁気モーメントの方向が外部磁界の方向と一致するため、本ゲームの操作に慣れるのに最適な難易度となっている。

### 3.3.2 Level1

Level1 では Level0 の磁界に異方性磁界を加える。これによって原子磁気モーメントが異方性磁界の影響を受けて方向が転換しづらくなる点をユーザーに感じてもらう。しかし異方性磁界は Z 軸方向のベクトルとして設定しているため、その点を留意すればさほど手間取らずに原子磁気モーメントの方向を変えることが出来ると考える。

### 3.3.3 Level2

Level2 では Level1 の磁界に交換磁界を加える。これによって隣り合う原子磁気モーメント同士が互いに影響を及ぼすようになり、ますます原子磁気モーメントの方向を転換させることが難しくなる。

### 3.3.4 Level3

Level3 では Level2 の磁界に静磁界を加える。自身以外の全ての原子磁気モーメントから影響を受けるため、原子磁気モーメントの方向を転換するのに時間を要する。

## 4. デモについて

スマートフォンでの MMS は図 5 のようになる。スマートフォンのジャイロセンサを用いて外部磁界の入力を行うことが出来る。原子磁気モーメントに影響を与える磁界の数はステージによって変わるため、様々な応答が観察出来る。

## 5. おわりに

### 5.1 まとめ

本研究では Unity を用いて MMS のゲーミフィケーションを行い、ユーザーが原子磁気モーメントの動きを理解できるよう助ける。

## 5.2 今後の課題

既存研究の多くは高速フーリエ変換を用いて静磁界計算の高速化を行っている [10] が、本研究では通常の方法で計算を行っているため、これを改善して高速化する。また、MMS のゲームを通じてユーザーが原子磁気モーメントの動きを理解できたか調査を行う。

## 参考文献

- [1] 野澤哲生: MRAM がついに表舞台に、2024 年に市場が 2000 億円規模へ、日経クロステック / 日経エレクトロニクス (オンライン), 入手先 (<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01267/00017/>) (参照 2022-07-25).
- [2] 藤田美幸: ゲーミフィケーションにおけるユーザの動機づけとエンゲージメントの関連, 日本情報経営学会誌, Vol. 38, No. 3, pp. 83–92 (2018).
- [3] ナイキジャパン広報本部: ナイキが新しい NIKE+ GPS アプリケーションを発表ユニークな方法でランナーをモチベートする新しい iPhone 向けアプリケーション地図機能やルートの記録をし、300 万人のコミュニティにつながる, NIKE JAPAN (オンライン), 入手先 ([https://nike.jp/nikebiz-archive/news/other\\_100910.html](https://nike.jp/nikebiz-archive/news/other_100910.html)) (参照 2022-07-25).
- [4] Chan, F.: Solve Puzzles for Science, University of Washington (online), available from (<https://fold.it/portal/>) (accessed 2022-07-25).
- [5] Khatib, F., Cooper, S., Tyka, M. D., Xu, K., Makedon, I., Popović, Z. and Baker, D.: Algorithm discovery by protein folding game players, *PNAS*, Vol. 108, No. 47, pp. 18949–18953 (2011).
- [6] 李 嘉慶: Unity によるマイクロマグネティクスシミュレーションのリアルタイム可視化, 修士論文, 電気通信大学大学院情報理工学研究科 (2022).
- [7] Kákay, A., Westphal, E. and Hertel, R.: Speedup of FEM Micromagnetic Simulations With Graphical Processing Units, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 46, No. 6, pp. 2303–2306 (2010).
- [8] Unity: コンピュータシェーダー, Unity (オンライン), 入手先 (<https://docs.unity3d.com/ja/2021.3/Manual/class-ComputeShader.html>) (参照 2022-07-25).
- [9] NVIDIA: CUDA Toolkit - Free Tools and Training, NVIDIA (online), available from (<https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>) (accessed 2022-07-25).
- [10] Yuan, S. W. and Bertram, H. N.: Fast Adaptive Algorithms for Micromagnetics, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 28, No. 5, pp. 2031–2036 (1992).