

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏 名	涌井 桐哉	学籍番号	2131170
論 文 題 目	スマートフォンによるマイクロマグネティクスのゲーミフィケーション		
<p><b>要 旨</b></p> <p>マイクロマグネティクスとは磁性体内部に現れる磁気モーメントの動力学を扱う物理学の一分野であり、ハードディスクのヘッドや MRAM (磁気抵抗メモリ)のシミュレーションなどに応用される。マイクロマグネティクスのシミュレーションでは磁気モーメントと呼ばれるミクロな磁石が可視化され磁界の影響を受けて変化するが、計算が複雑なため初学者には何が起きているか理解が難しい。従ってゲーミフィケーションを行うことによって初学者の理解を促進させることを考えた。</p> <p>本研究では、個人ごとに使えることや直観的な操作を重要視し、スマートフォンでマイクロマグネティックシミュレーションのゲームをプレイすることを想定し、入力としてジャイロセンサや画面のタッチを用いた。また能動的にプレイすることやプレイヤーの成長を可視化すること等を重要視するゲーミフィケーション 6 要素に則り「ゲームオーバーにならないよう外部磁界を操作し、磁気モーメントたちを特定の方向に向かせる」というコンセプトでゲーム化を行った。ゲーム作成後、5名の被験者に20分程のゲームプレイ及びテスト・アンケートの回答をしてもらい、プレイヤーのマイクロマグネティクスの理解度を測るとともに作成したゲームがどれほどゲーミフィケーション 6 要素に則ったものかを評価した。</p> <p>この結果マイクロマグネティクスの理解は促進され、コンセプトは被験者全員に受け入れてもらうことができたが、ジャイロセンサによる操作性の問題や画面の情報量の多さに依るゲームの難化など、実装部分の改善点が多く挙げられた。</p> <p>更に高速フーリエ変換による静磁界計算の高速化も目指し、PC とスマートフォンの性能差を改善することを試みた。GPU と CPU 間の比較及び三次元化ができなかったためゲームに適用することはできなかったが、CPU を用いて一次元で中精度のシミュレーションを高速化可能であることを示した。</p>			

令和4年度 修士論文

スマートフォンによるマイクロ  
マグネティクスゲーミフィケーション

電気通信大学 情報理工学研究科  
情報・ネットワーク工学専攻  
コンピュータサイエンスプログラム

学籍番号 2131170

氏名 涌井 桐哉

指導教員 成見 哲

副指導教員 寺田 実

令和5年1月30日

## 概要

マイクロマグネティクスとは磁性体内部に現れる磁気モーメントの動力学を扱う物理学の一分野であり、ハードディスクのヘッドや MRAM (磁気抵抗メモリ) のシミュレーションなどに応用される。マイクロマグネティクスのシミュレーションでは磁気モーメントと呼ばれるミクロな磁石が可視化され磁界の影響を受けて変化するが、計算が複雑なため初学者には何が起きているか理解が難しい。従ってゲーミフィケーションを行うことによって初学者の理解を促進させることを考えた。

本研究では、個人ごとに使えることや直観的な操作を重要視し、スマートフォンでマイクロマグネティックシミュレーションのゲームをプレイすることを想定し、入力としてジャイロセンサや画面のタッチを用いた。また能動的にプレイすることやプレイヤーの成長を可視化すること等を重要視するゲーミフィケーション 6 要素に則り「ゲームオーバーにならないよう外部磁界を操作し、磁気モーメントたちを特定の方向に向かせる」というコンセプトでゲーム化を行った。ゲーム作成後、5 名の被験者に 20 分程のゲームプレイ及びテスト・アンケートの回答をしてもらい、プレイヤーのマイクロマグネティクスの理解度を測るとともに作成したゲームがどれほどゲーミフィケーション 6 要素に則ったものかを評価した。

この結果マイクロマグネティクスの理解は促進され、コンセプトは被験者全員に受け入れてもらうことができたが、ジャイロセンサによる操作性の問題や画面の情報量の多さに依るゲームの難化など、実装部分の改善点が多く挙げられた。

更に高速フーリエ変換による静磁界計算の高速化も目指し、PC とスマートフォンの性能差を改善することを試みた。GPU と CPU 間の比較及び三次元化ができなかったためゲームに適用することはできなかったが、CPU を用いて一次元で中精度のシミュレーションを高速化可能であることを示した。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>4</b>
1.1	研究背景	4
1.2	目的	5
1.3	本論文の構成	5
<b>2</b>	<b>マイクロマグネティクス</b>	<b>7</b>
2.1	原子磁気モーメントの運動	7
2.2	LLG 方程式の数値解法	8
2.3	実効磁界の計算	11
2.4	異方性磁界	12
2.5	交換磁界	12
2.6	静磁界	13
<b>3</b>	<b>フーリエ変換</b>	<b>17</b>
3.1	フーリエ変換とは	17
3.2	逆フーリエ変換	17
3.3	離散フーリエ変換 (DFT)	17
3.4	高速フーリエ変換 (FFT)	18
<b>4</b>	<b>GPU と GPGPU</b>	<b>22</b>
4.1	GPU	22
4.2	GPGPU	22
4.3	OpenCL	23
<b>5</b>	<b>先行事例・既存研究</b>	<b>24</b>
5.1	ゲーミフィケーションとは	24
5.2	先行事例	25
5.3	既存研究	26
<b>6</b>	<b>李による MMS システム</b>	<b>27</b>
6.1	システムの概要	27
6.2	シミュレーションプログラムの流れ	28
6.3	可視化プログラムの流れ	29

<b>7</b>	<b>MMS の FFT による高速化</b>	<b>30</b>
7.1	PC とスマートフォンの計算速度 . . . . .	30
7.2	畳み込み演算 . . . . .	31
7.3	速度の評価 . . . . .	32
7.4	精度の評価 . . . . .	33
<b>8</b>	<b>MMS のゲーム化</b>	<b>34</b>
8.1	概要 . . . . .	34
8.2	機能の詳細 . . . . .	35
8.3	ゲーム画面の構成 . . . . .	39
8.4	ゲームの遊び方 . . . . .	41
8.5	6 要素との関連 . . . . .	41
<b>9</b>	<b>評価</b>	<b>43</b>
9.1	テストとアンケートの内容 . . . . .	43
9.2	テストの結果 . . . . .	48
9.3	アンケートの結果 . . . . .	53
<b>10</b>	<b>おわりに</b>	<b>55</b>
10.1	まとめ . . . . .	55
10.2	今後の課題 . . . . .	55

# 1 はじめに

## 1.1 研究背景

マイクロマグネティクスとは物理学の一分野であり、磁性体内部に現れる原子磁気モーメントの動力学を扱う学問である。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、また磁力の大きさとその向きを表すベクトル量である(図1)。これを可視化したものがマイクロマグネティックシミュレーション(以下MMSと表記)であり、磁性体内部でどのように原子磁気モーメントが変化しているかを見ることができる。ただし、何故そのような方向に原子磁気モーメントが向くのかを理解するには、特に初学者にとって難しい。その理由は、原子磁気モーメントは原子の数だけ発生し相互作用するためである。したがってMMSをゲーミフィケーションし、その中で段階的なシミュレーションを行うことで理解を深めることができると考えた。

また、シミュレーションは一般的に潤沢な計算資源を持つPCで行うのが一般的だが、本研究はシミュレーションだけでなくゲームとしての側面も持つため、スマートフォンでプレイすることを想定している。総務省の調査研究結果[2]によるとコロナ禍において最も利用されたデバイスはスマートフォンであった(図2)。また、ゲームをプレイするときのデバイスとしてスマートフォンの方がPCよりも2.4倍ほど多く利用されていた[3]。したがってスマートフォンでプレイ可能にすることによって多くの人にプレイしてもらうことが期待できる。

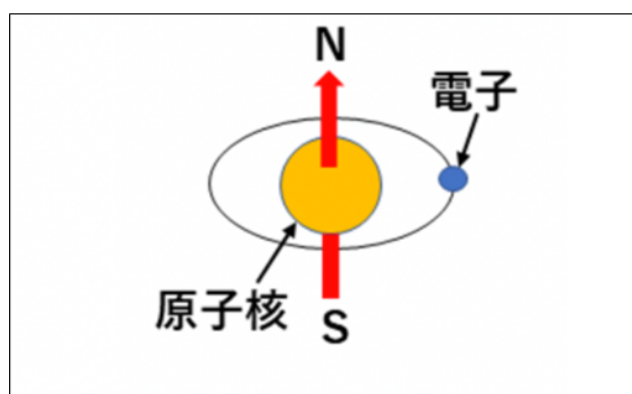


図1: 原子磁気モーメントの発生 [1]

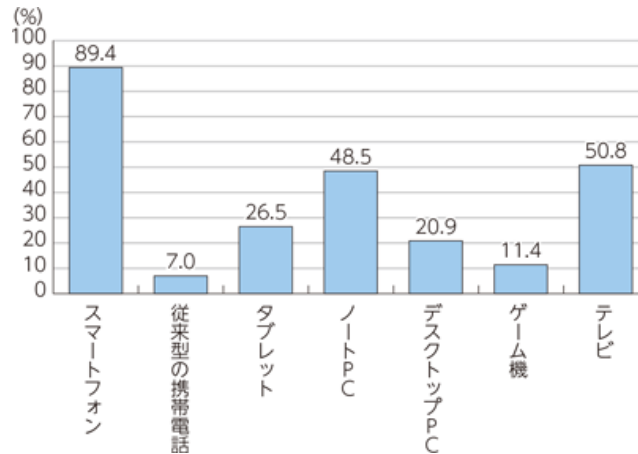


図 2: 端末の利用状況 [2]

## 1.2 目的

本研究の目的は MMS の理解を直観的にできるようにし、MMS を楽しみながら学べるようにすることである。マイクロマグネティクスを知らない高校生や大学生をターゲットとし、ゲーミフィケーションによってマイクロマグネティクスの学習の入口のハードルを下げたいと考えた。さらにスマートフォンで快適にプレイできるよう、シミュレーションの高速化を目指す。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

### 1. はじめに

本研究の背景と目的について述べる。

### 2. マイクロマグネティクス

マイクロマグネティクスとマイクロマグネティックシミュレーション (MMS) について述べる。

### 3. フーリエ変換

並列計算の高速化に役立つフーリエ変換について述べる。

### 4. GPU と GPGPU

並列計算に役立つ GPGPU の仕組みや技術について述べる。

## 5. 先行事例・既存研究

本研究に関連する先行事例や既存研究について述べる。

## 6. 李による MMS システム

本研究のベースとなった既存研究について簡単に述べる。

## 7. MMS の FFT による高速化

マイクロマグネティクスシミュレーションの高速化の方法を述べ、速度・精度の評価を行う。

## 8. MMS のゲーム化

マイクロマグネティクスシミュレーションのゲーム化の方法について述べる。

## 9. 評価

ゲーム化に関する評価と考察を行う。

## 10. おわりに

本研究のまとめと今後の課題について述べる。



## 2 マイクロマグネティクス

この章で理論的背景や数式を記述するにあたり，仲谷の論文 [4] を参照した。

### 2.1 原子磁気モーメントの運動

磁界内において磁石のような性質を示す物質を磁性体という。磁性体内部には磁区といういくつかの領域があり，一つの領域内にある原子磁気モーメントは同方向を向いている。そこに外部から磁界が印加されることによって全ての磁区の原子磁気モーメントの方向が変化し (図 3)，磁性を示す (これを磁化という)。このとき，原子磁気モーメントの運動は Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式 (以下 LLG 方程式と表記) で表される。

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

ここで  $\vec{M}$  は磁気モーメント， $\dot{\vec{M}}$  は  $\vec{M}$  の時間微分， $M$  は飽和磁化 (磁性体内部の全磁気モーメントが同一方向を向いた時の大きさ)， $\vec{H}$  は磁気モーメントに影響する実効磁界， $\gamma = 1.76 \times 10^7$  [rad/(s · OE)] は磁気回転比と呼ばれる定数， $\alpha$  は Gilbert の損失定数と呼ばれる無次元定数である。

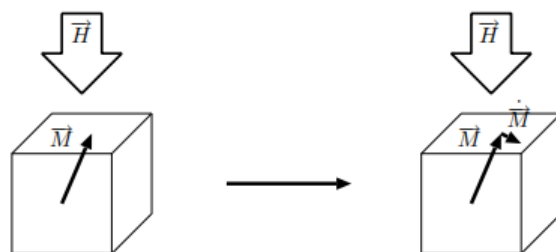


図 3: 原子磁気モーメントの運動 [5]

## 2.2 LLG 方程式の数値解法

LLG 方程式に空間的, 時間的離散化を適用し数値シミュレーションを行う.

### 2.2.1 空間的離散化

磁気モーメントの運動は位置によって異なるので, 計算領域を直方体格子状 (セル) に区切り, 各セルについて個別に磁気モーメントの運動を求めることにする. 各セルの中心に磁気モーメントを1つ位置して, そのセルでの磁気モーメントを代表させる. これを空間的離散化という (図 4).

### 2.2.2 時間的離散化

LLG 方程式は微分方程式であるため, 微分を差分として近似を行う. しかしこのままだと両辺に  $\dot{\vec{M}}$  の項があるため, 式変形を行い左辺に統一する. さらに,  $\vec{M} = M \cdot \vec{m}$  とし磁気モーメントの正規化を行う.

$$\dot{\vec{m}} = \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} ((\vec{m} \times \vec{H}) + \alpha((\vec{m} \cdot \vec{H})\vec{m} - \vec{H})) \quad (2)$$

本研究では MMS は三次元で行うため, 式 (2) をベクトル成分ごとに書き出すと以下のようになる.

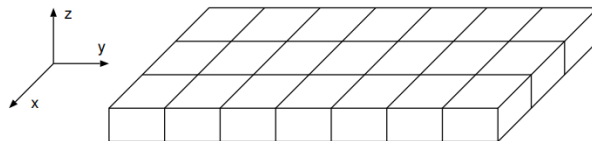


図 4: 計算領域の離散化 [5]

$$\begin{aligned}\dot{\vec{m}}_x &= \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} ((m_y H_z - m_z H_y) + \alpha((\vec{m} \cdot \vec{H})m_x - H_x)) \\ \dot{\vec{m}}_y &= \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} ((m_z H_x - m_x H_z) + \alpha((\vec{m} \cdot \vec{H})m_y - H_y)) \\ \dot{\vec{m}}_z &= \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} ((m_x H_y - m_y H_x) + \alpha((\vec{m} \cdot \vec{H})m_z - H_z))\end{aligned}\quad (3)$$

## Euler 法

オイラー法は微分方程式を数値計算するための解法の一つであり、Taylor 展開から導かれる。一般に  $f(x)$  がある狭い範囲で微分可能とすると、微小変化  $dx$  だけ移動した  $f(x+dx)$  の Taylor 展開は以下のようなになる ( $f^{(n)}(x)$  は  $f(x)$  の  $n$  階微分を表す)。

$$f(x + dx) = f(x) + f^{(1)}(x)dx + \frac{1}{2!}f^{(2)}(x)dx^2 + \frac{1}{3!}f^{(3)}(x)dx^3 + O(dx^4)\quad (4)$$

式(4)において第二項で打ち切り、第三項以降を無視すると以下の式が得られ、これを用いた数値計算の解法をオイラー法という。

$$f(x + dx) = f(x) + f^{(1)}(x)dx\quad (5)$$

これを式(2)に適用すると、次のようになる。時刻  $t$  における磁気モーメント  $\vec{m}$  の値を  $\vec{m}(t)$  とすると、時刻  $t + dt$  における磁気モーメントの値  $\vec{m}(t + dt)$  は次の漸化式で計算できる。

$$\vec{m}(t + dt) = \vec{m}(t) + \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} ((\vec{m} \times \vec{H}) + \alpha((\vec{m} \cdot \vec{H})\vec{m} - \vec{H}))dt \quad (6)$$

式(6)を使って計算を行うと第二項により  $\vec{m}$  の大きさが1ステップの計算ごとに増大する。したがって1ステップの計算の後に  $\vec{m}$  の各成分を  $\vec{m}$  の絶対値で割り、 $\vec{m}$  の大きさを1に戻す操作を行う。この操作を再正規化 (Re-Normalization) という。計算を進めていくには、再正規化を考慮に入れた次のアルゴリズムを用いる。

1.  $t = 0$  とし、磁気モーメントの初期値  $\vec{m}(0)$  を与える。

2. 以下の (a), (b), (c) を行う。

$$(a) \vec{m}(t + dt) \leftarrow \vec{m}(t) + \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} ((\vec{m} \times \vec{H}) + \alpha((\vec{m} \cdot \vec{H})\vec{m} - \vec{H}))dt$$

$$(b) \vec{m}(t + dt) \leftarrow \vec{m}(t + dt) / |\vec{m}(t + dt)|$$

$$(c) t \leftarrow t + dt$$

3. 平衡状態になるまで2.を繰り返す。

しかしながら Euler 法は1次精度であり、シミュレーションの時間が長くなると理論値との誤差が無視できないほど増大してしまう。したがって、多くの数値計算シミュレーションでは次の Runge = Kutta 法を用いる。

## Runge = Kutta 法

4次のルンゲクッタ法では次のアルゴリズムを用いる。

$$\begin{aligned} m(t + dt) &= m(t) + dt(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6 \\ k_1 &= f(t, \vec{m}(t)) \\ k_2 &= f(t + dt/2, \vec{m}(t) + k_1 \cdot dt/2) \\ k_3 &= f(t + dt/2, \vec{m}(t) + k_2 \cdot dt/2) \\ k_4 &= f(t + dt, \vec{m}(t) + k_3 \cdot dt) \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.3 実効磁界の計算

式 (1) における実効磁界は複数の磁界が組み合わさったものであり、以下の 4 つに分けられる。

### 外部磁界

外部から印加される磁界。

### 異方性磁界

磁気モーメントの磁気異方性を磁界として表したもの。磁性体内部ではエネルギーに差があり、磁気モーメントの向きやすい方向（磁化容易方向）と向きにくい方向（磁化困難方向）が発生する。これを磁気異方性という。本研究で用いるシミュレーションでは X 軸の正の方向を磁化容易方向としている。

### 交換磁界

隣り合う磁気モーメントの間に発生する交換相互作用（交換エネルギー）を磁界として表したもの。磁気モーメントの向き、すなわち電子の回転方向が異なるもの同士では大きくなり、同じもの同士では小さくなる。

### 静磁界

磁気モーメントはそれ自体が小さな磁界であるため、他の磁気モーメントと影響を及ぼしあう。この磁気モーメントによる磁界を静磁界という。4 つの磁界の計算をする上で最も時間がかかる部分がこの静磁界計算であり、高速化のため一般的には高速フーリエ変換を用いて計算される。

以上 4 つの磁界を合わせたものが実効磁界であり、実効磁界と外部磁界、異方性磁界、交換磁界、静磁界をそれぞれ  $\vec{H}$ ,  $\vec{H}_{EXT}$ ,  $\vec{H}_A$ ,  $\vec{H}_E$ ,  $\vec{H}_D$  とするとその関係性は以下で表される。

$$\vec{H} = \vec{H}_{EXT} + \vec{H}_A + \vec{H}_E + \vec{H}_D \quad (8)$$

式 (8) の各磁界の項は，エネルギーを磁界に換算することにより求める．磁気エネルギー密度を  $\epsilon$  とすると，実効磁界は以下の式で表される．

$$\vec{H} = \frac{d\epsilon}{d\vec{M}} \quad (9)$$

以下では式 (9) に基づき異方性磁界，交換磁界，静磁界の離散化を考える．

## 2.4 異方性磁界

磁気異方性エネルギー，異方性定数，磁気モーメントとその飽和磁化をそれぞれ  $\epsilon_A$ ,  $K$ ,  $\vec{M}$ ,  $M$  とすると以下の式が成り立つ．なお，ここでは異方性磁界は X 軸の正の方向を向いているとする．

$$\epsilon_A = K(1 - M_z^2)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_A &= -\frac{d\epsilon_A}{d\vec{M}} \\ &= \left( \frac{2K}{M^2} M_z, 0, 0 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

## 2.5 交換磁界

交換エネルギーと交換定数，磁気モーメントとその飽和磁化をそれぞれ  $\epsilon_E$ ,  $A$ ,  $\vec{m}$ ,  $M$  とすると以下の式が成り立つ．

$$\begin{aligned} \epsilon_E &= A(\nabla\vec{m})^2 \\ &= A\left(\frac{\partial m}{\partial x}, \frac{\partial m}{\partial y}, \frac{\partial m}{\partial z}\right)^2 \\ &= A\left(\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial z}\right)^2\right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
\vec{H}_E &= \frac{d\epsilon_E}{d\vec{M}} \\
&= \frac{2A}{M} \left( \frac{\partial^2 \vec{m}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{m}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{m}}{\partial z^2} \right) \\
&= \frac{2A}{M} \left( \left( \frac{\partial^2 m_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 m_x}{\partial z^2} \right), \left( \frac{\partial^2 m_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial z^2} \right), \left( \frac{\partial^2 m_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 m_z}{\partial z^2} \right) \right)
\end{aligned} \tag{12}$$

## 2.6 静磁界

磁気モーメントを求める点は、各計算セルの中心部に配置する。1つの計算セル内では、磁気モーメントはすべて同じ方向を向くと仮定する。これによって、計算領域内に現れる磁荷はすべて、計算セルの表面に現れることになる。1つの計算点での静磁界は、計算領域内のすべての磁荷が、今考えている計算点に作り出す静磁界の和として求めることができる。次に、直方体セルの表面に現れる磁荷が作り出す静磁界を求める。

計算領域内の1つの計算セルと磁界観測点との関係は図5で表される。計算セルの各面は  $x-y$ ,  $y-z$ ,  $x-z$  面にそれぞれ平行であるとし、面密度  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ ,  $\pm M_z$  で磁荷が分布しているものとする。これら6つの面を、 $y-z$ 面に平行な面、 $x-z$ 面に平行な面および  $x-y$ 面に平行な面に分け、それぞれの面に現れる磁荷が観測点に作る静磁界を求める。まず  $y-z$ 面に平行な右側の面を考える。観測点から  $(x_1, y_1, z_1)$  離れたこの面上の微小領域が観測点に作り出す磁界は、以下の式で表される。

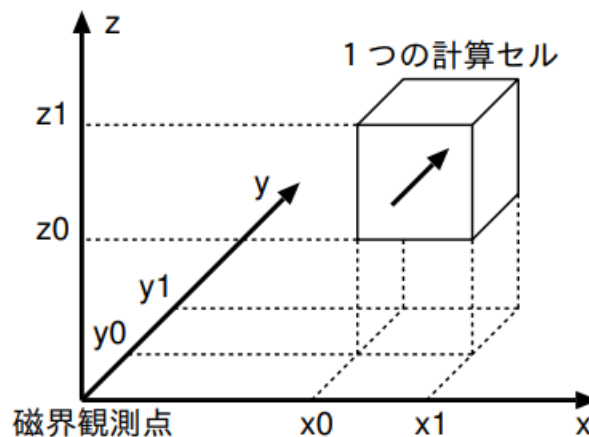


図 5: 静磁界の計算 [5]

$$\Delta H_x = -\frac{M_x x_1}{r^2} \frac{\Delta y \Delta z}{r}$$

$$\Delta H_y = -\frac{M_y y_1}{r^2} \frac{\Delta y \Delta z}{r}$$

$$\Delta H_z = -\frac{M_z z_1}{r^2} \frac{\Delta y \Delta z}{r}$$

$$r = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$$

対象とする面上の磁荷が観測点に作り出す磁界は、これらの微小領域が作り出す磁界を、面にわたって積分することで求められる。

$$\begin{aligned} H_x &= \int_{z_0}^{z_1} \int_{y_0}^{y_1} \Delta H_x \\ H_y &= \int_{z_0}^{z_1} \int_{y_0}^{y_1} \Delta H_y \\ H_z &= \int_{z_0}^{z_1} \int_{y_0}^{y_1} \Delta H_z \end{aligned} \quad (13)$$

同様に、 $y-z$ 面に平行な左側の面上の磁荷が観測点に作り出す磁界を求める。その後同様の操作を  $x-z$ 面に平行な2つの面、 $x-y$ 面に平行な2つの面で行い、それぞれをまとめると、計算セル上の磁荷が観測点に作り出す磁界は、以下の式で表される。



$$\begin{aligned}
H_x &= q_{xx} \cdot mx + q_{xy} \cdot my + q_{xz} \cdot mz \\
H_y &= q_{xy} \cdot mx + q_{yy} \cdot my + q_{yz} \cdot mz \\
H_z &= q_{xz} \cdot mx + q_{yz} \cdot my + q_{zz} \cdot mz
\end{aligned} \tag{14}$$

ここで、 $q_{xx}, q_{xy}, q_{xz}, q_{yy}, q_{yz}, q_{zz}$  は静磁界係数である。今回の計算では、各計算セルは同じ大きさであり、同じ間隔で規則的に並んでいるために、計算セルが他の計算点に作り出す静磁界を求めるために使う静磁界係数は、これらの点の間隔だけで決まる。このことより、x 軸、y 軸、z 軸方向の粒子の個数をそれぞれ  $NX, NY, NZ$  とすると、ある計算点の静磁界は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
H_x(i, j, k) &= \sum_{i'=1}^{NX} \sum_{j'=1}^{NY} \sum_{k'=1}^{NZ} [q_{xx}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot mx + q_{xy}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot my \\
&\quad + q_{xz}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot mz] \\
H_y(i, j, k) &= \sum_{i'=1}^{NX} \sum_{j'=1}^{NY} \sum_{k'=1}^{NZ} [q_{xy}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot mx + q_{yy}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot my \\
&\quad + q_{yz}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot mz] \\
H_z(i, j, k) &= \sum_{i'=1}^{NX} \sum_{j'=1}^{NY} \sum_{k'=1}^{NZ} [q_{xz}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot mx + q_{yz}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot my \\
&\quad + q_{zz}(i' - i, j' - j, k' - k) \cdot mz]
\end{aligned} \tag{15}$$

ここで  $i, j, k$  は粒子のインデックスであり、粒子数を  $N$  とすると  $N = NX * NY * NZ$  である。これにより、一つの粒子が受けた他の粒子からの静磁界の値を計算する。

すべての計算点で静磁界を求めるには静磁界係数が必要となる。静磁界係数は以下の式を用いた。

$$\begin{aligned}
q_{xx}(I, J, K) &= M \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \arctan \left( \frac{(J + j - \frac{1}{2})(K + k - \frac{1}{2})dydz}{r_{ijk}(I + i - \frac{1}{2})dx} \right) \\
q_{yy}(I, J, K) &= M \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \arctan \left( \frac{(I + i - \frac{1}{2})(K + k - \frac{1}{2})dxdz}{r_{ijk}(J + j - \frac{1}{2})dy} \right) \\
q_{zz}(I, J, K) &= M \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \arctan \left( \frac{(I + i - \frac{1}{2})(J + j - \frac{1}{2})dxdy}{r_{ijk}(K + k - \frac{1}{2})dz} \right) \\
q_{xy}(I, J, K) &= M \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \log \left( \left( K + k - \frac{1}{2} \right) dz + r_{ijk} \right) \\
q_{xz}(I, J, K) &= M \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \log \left( \left( J + j - \frac{1}{2} \right) dy + r_{ijk} \right) \\
q_{yz}(I, J, K) &= M \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \log \left( \left( I + i - \frac{1}{2} \right) dx + r_{ijk} \right) \\
r_{ijk} &= \sqrt{(I + i - \frac{1}{2})^2 dx^2 + (J + j - \frac{1}{2})^2 dy^2 + (K + k - \frac{1}{2})^2 dz^2}
\end{aligned} \tag{16}$$

静磁界の計算に必要な計算量を見積もる。計算領域全体にある計算点は  $N$  個あり、各計算点における静磁界を求めるには  $N$  に比例する回数の乗算が必要であるので、計算量は計算点の個数の 2 乗 ( $N^2$ ) に比例する。

## 3 フーリエ変換

### 3.1 フーリエ変換とは

フーリエ変換 (Fourier Transform, FT) はデータ解析手法の一つであり、実数  $t$  の非周期関数  $f(t)$  を周波数  $\omega$  の関数  $\mathcal{F}(\omega)$  に変換する方法のことである。具体的には以下の数式で表される。なお、周期  $2\pi$  の関数の場合積分区間は  $[0, 2\pi]$  となる。

$$\mathcal{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (17)$$

これによって多くの関数を様々な周波数の正弦波（もしくは余弦波）の和で表すことが可能となり、それぞれの波がどの程度の割合で存在しているかを解析することができる（スペクトル解析）。

### 3.2 逆フーリエ変換

フーリエ変換して得られた周波数関数  $\mathcal{F}(\omega)$  を元の関数  $f(t)$  に戻すための手法を逆フーリエ変換といい、以下の数式で表される。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (18)$$

ただし、場合によってはフーリエ変換の式に  $\frac{1}{2\pi}$  が付いていたり両方の式に  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$  が付いているなど、いくつかの流派があることに注意されたい。

### 3.3 離散フーリエ変換 (DFT)

フーリエ変換とは一般的に連続関数に適用される手法であるが、シミュレーションで取得する離散的データにも応用することができ、これを離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform, 以下 DFT) という。例えば、得られた離散的データの配列  $x = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$  を DFT して複素数配列  $X = (X_0, X_1, \dots, X_{N-1})$  を求めるとき、以下の数式で表される。

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi kn}{N}} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (19)$$

しかし、これをそのまま数値計算で使用すると「 $N$  個の総和を  $N$  回計算する」ことになり、計算量は  $O(N^2)$  と時間がかかってしまう。したがってアルゴリズムを改良し、より高速な DFT を行う必要がある。

### 3.4 高速フーリエ変換 (FFT)

DFT をより高速に行う手法を高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, 以下 FFT) という。フーリエ変換にはオイラーの公式  $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$  が使われており、虚数には三角関数と同様に周期性が存在する。

#### 3.4.1 回転因子

以下の数式は  $N = 4$  のときの DFT を表したものである。行列内の虚数をガウス平面上に配置すると図 6 のようになり、単位円上を点が  $-\frac{\pi}{2}$  ずつ回転していることが分かる。このとき  $W_4 = e^{-i\frac{\pi}{2}}$  を回転因子という。

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-i\frac{2\pi}{4}} & e^{-i\frac{4\pi}{4}} & e^{-i\frac{6\pi}{4}} \\ 1 & e^{-i\frac{4\pi}{4}} & e^{-i\frac{8\pi}{4}} & e^{-i\frac{12\pi}{4}} \\ 1 & e^{-i\frac{6\pi}{4}} & e^{-i\frac{12\pi}{4}} & e^{-i\frac{18\pi}{4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (20)$$

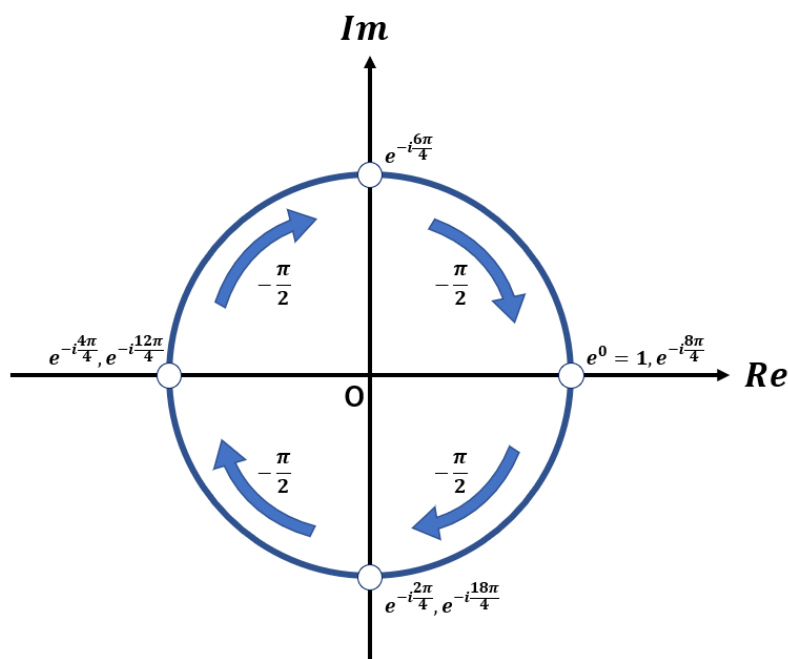


図 6: 回転する虚数

### 3.4.2 ビットリバース

先述の回転因子と虚数の周期性を用いて式を変換すると以下のようなになる。

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W_4 & -1 & W_4^3 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & W_4^3 & -1 & W_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (21)$$

このとき  $X_0, X_1, X_2, X_3$  の式をある法則に従って並び替えると以下のような規則性のある式となる。

$$\begin{cases} X_0 = x_0 + x_1 & + x_2 + x_3 \\ X_2 = x_0 - x_1 & + x_2 - x_3 \\ X_1 = x_0 + x_1 W_4^1 & + x_2 + x_3 W_4^3 \\ X_3 = x_0 - x_1 W_4^3 & + x_2 - x_3 W_4^1 \end{cases} \quad (22)$$

上記はデータ数  $N = 4$  のときの例であるため  $X_1$  と  $X_2$  が入れ替わっている程度だが、 $N = 8, 16, 32, \dots$  と増えていくほど複雑化していく。この入れ替わりの法則こそビットリバースであるが、一般的にビットリバースとは0と1を反転させることであり、例えば11001をビットリバースしたものは00110となる。しかし、FFTにおけるビットリバースとは”右から読むこと”を指す。従って11001をビットリバースしたものは10011となる。(図7)

一般的	通常 11001	ビットリバース 00110
FFT	通常 11001	ビットリバース 11001

図7: ビットリバースの比較

ビットリバースした値を求めるには、非負整数  $x$  を2進数表現を使って以下のように

表す. ここで  $c_k = 0, 1$  ( $0 \leq k \leq n$ ) はその桁の数である.

$$x = c_0 + c_1 2^1 + \dots + c_{n-1} 2^{n-1} + c_n 2^n \quad (23)$$

このときビットリバーズした結果  $x_{rev}$  は以下のように表される.

$$x_{rev} = c_n + c_{n-1} 2^1 + \dots + c_1 2^{n-1} + c_0 2^n \quad (24)$$

この手順は以下のように表すことができる.

*for*  $i = n$  *to* 0

1.  $x$  の剰余 (mod2) を求める.
2.  $x$  の剰余と  $2^i$  の積を  $x_{rev}$  に加算

このようにして任意の非負整数に対してビットリバーズした値を求めることが出来る.

### 3.4.3 バタフライ演算

FFT で最も特徴的な部分がバタフライ演算である. 図 8 は  $N = 2$  におけるバタフライ演算を図式的に表したもので,  $x_n, X_n$  はそれぞれ FFT 適用前と適用後のデータである.  $N = 2$  において  $X_0, X_1$  に代入された値はそれぞれ+と-を反転させたものになっている. また, 図 9 は  $N = 4$  におけるバタフライ演算を図式的に表したもので, 図 8 と類似した演算が左右で合計 2 回行われており, 特に右側の上下部分は図 8 と同じ形となっている. なお,  $x_1, x_2$  の繋がっている先がそれぞれ  $X_2, X_1$  となっており, これはビットリバーズを行っているためである.

一般的に, FFT を行う際はデータ数が  $2^n$  に制限される. その理由はバタフライ演算を行う度に計算対象が半分になっていくからである. 例えば,  $N = 8$  の場合 8 個でバタフライ演算をした後, 二分割し  $N = 4$  のバタフライ演算を 2 セット行い, また二分割し  $N = 2$  のバタフライ演算を 4 セット行うという風に計算される. 従って  $2^n$  のデータ数に対して  $n$  回のバタフライ演算が発生し, 加減算は  $2^n$  行われるためデータ数を  $N = 2^n$  とすると FFT の計算量は  $O(N \log N)$  となる.

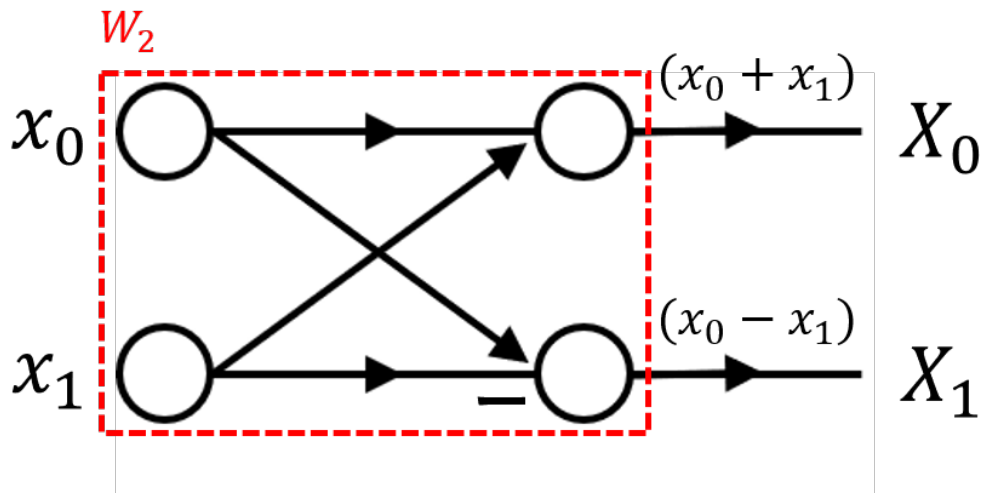


図 8:  $N = 2$  におけるバタフライ演算

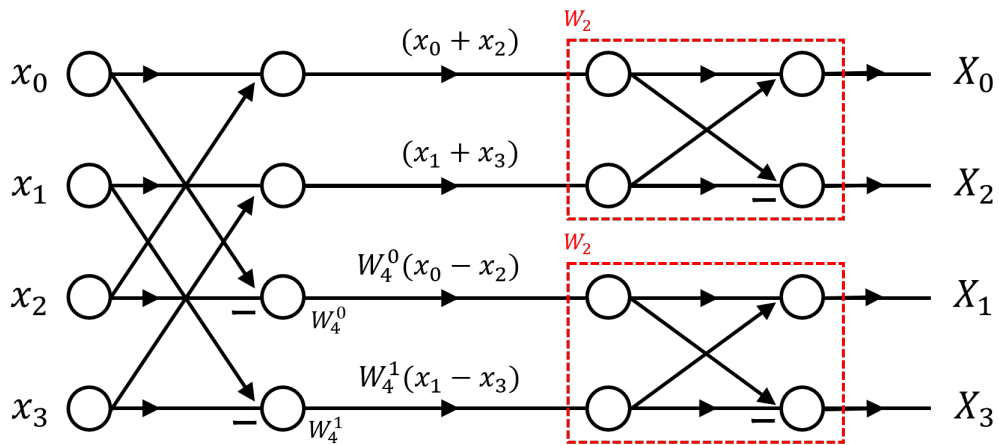


図 9:  $N = 4$  におけるバタフライ演算

## 4 GPU と GPGPU

### 4.1 GPU

Graphics Processing Unit (グラフィックス プロセッシング ユニット, 以下 GPU と表記) はリアルタイムレンダリングに特化した並列プロセッサである。GPU はリアルタイムレンダリングの大量かつ同じような計算に特化し, パイプラインの並列構造になっている。最近の高性能な GPU は頂点処理とピクセル処理のためのプログラマブルシェーダーユニットだけではなく, 人工知能のための TENSOR コアやレイトレーシングのための RT コアなども搭載されている。

GPU は主に NVIDIA, AMD, ARM などのブランドがある。GPU で描画をするのに, OpenGL, Ditect3D, VLUKAN などグラフィック API を利用することができる。これらの API により, GPU に命令を送ったり shader プログラムを送ったりすることで GPU をコントロールできる。

### 4.2 GPGPU

#### 4.2.1 概要

近年, GPU はリアルタイム 3DCG の処理だけではなく, 数値的な計算にも利用されており, GPGPU(General-purpose computing on graphics processing units) と呼ばれている。

GPGPU を利用するには, CUDA, Compute shader, OpenCL などいくつかの実現方法があり, 表 1 にそれぞれの特徴をまとめた。本研究では, Compute shader を用いて MMS を高速化している。Attila ら [6] 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。

表 1: GPGPU API の比較

	CUDA	Compute Shader	OpenCL
ドライバインストール	必要	不要	必要
GPU ベンダー制限	NVIDIA	なし	なし



## 4.2.2 CUDA

CUDA(Compute Unified Device Architecture)[7] は NVIDIA 社が開発した GPGPU を行うための最も古い並列計算プラットフォームである。そのため、関連する資料が多く、数値計算などのライブラリも充実している。CUDA を使用する際は、レンダリングパイプラインについての知識は不要でレンダリングと独立した計算リソースとして使える。

しかし、CUDA は NVIDIA の GPU だけしかサポートしていないという欠点がある。さらに、CUDA はいろいろなコマンドがあり、自由度が高いが、コーディングの仕方によって速度差が出やすい。また、描画プログラムと連携するためには、`cuda_gl_interop` で連携プログラムを構築する必要がある。

## 4.2.3 Compute Shader

コンピュータシェーダー (Compute Shader)[8] は、グラフィック API で GPGPU を行うテクノロジーである。Compute Shader はレンダリングパイプラインの前段階に存在している。Direct3D, OpenGL, Metal, Vulkan などのグラフィック API にそれぞれ異なるものが導入されている。

Compute Shader はグラフィック API(OpenGL, Direct3D など)に含まれているため、使用するときには他の GPGPU ツールのようにあらかじめ実行環境を構築する必要がなく、グラフィック API を呼び出すだけで利用できる。

さらに、Compute Shader はすでにゲームエンジンの一部となっているため、Unity からは C#スクリプトを駆使すれば Compute Shader と連携することができる。

## 4.3 OpenCL

本研究では用いていないが、OpenCL も GPGPU を実現する 1 つの方法である。OpenCL は CPU, GPU, FPGA などのデバイスで利用可能かつマルチプラットフォーム対応の並列計算プログラミングモデルである。主に科学的計算や画像処理などの場面でハイパフォーマンスコンピューティングのために利用される。シミュレーション可視化で使う場合にもグラフィック API と連携し描画できる。

## 5 先行事例・既存研究

ここではゲーミフィケーションに関連した先行事例や、本研究に関連する既存研究を紹介する。

### 5.1 ゲーミフィケーションとは

ゲーミフィケーションとはゲーム化すること、つまり既存の物事にゲーム的要素を加えることにより、能動的に人を行動させる仕組みのことである。人は楽しいことに関しては自分から進んで取り組むが、そうでないことに関しては取り組むことが難しい場合がある。したがってゲーミフィケーションとはこれを改善するモチベーションマネジメント手法なのである。特に学習はモチベーションの維持が課題であるため、ゲーミフィケーションと組み合わせることは効果的だと考える。

また、日本ゲーミフィケーション協会は「ゲーミフィケーション6要素」としてゲーミフィケーションに必要な以下6つの要素を列挙している [9]。

#### 能動的な参加

ゲームの実装を工夫することにより継続的な参加を促す。

#### 称賛を演出

ゲームクリア時に賞賛のエフェクトや効果音等を出すことによりユーザーのやる気を引き出す。

#### 即時のフィードバック設計

ユーザーが画面操作をした際、すぐにフィードバックされるように設計することによってユーザーに快感や安心感を与える。

#### 独自性の歓迎

厳然たるルールに則りつつ独自の攻略法を見つけ出したり、工夫して目標を達成できるゲームは魅力的である。

#### 成長の可視化

ユーザーの頑張りがレベルなどに可視化されることによって、ユーザーが自身の成長を確かめることが出来る。

#### 達成可能な目標設定

最初は簡単に、そしてユーザーの成長度合に合わせてゲームの難易度が上がるようにする。

## 5.2 先行事例

ここではビジネスや教育におけるゲーミフィケーションの事例をいくつか取り上げる。

### 5.2.1 ビックラポン!

回転寿司屋のくら寿司は『ビックラポン!』という施策を導入している [10]。顧客は寿司の皿 5 枚で 1 回ガチャポンを回すことができ、くら寿司限定のアイテムを手に入れることができる。5 枚刻みでガチャポンを回せるようにすることで顧客の心理に働きかけ、売り上げの向上に繋がった。

### 5.2.2 NIKE+ GPS

Nike 社は 2010 年に iPhone 向けアプリケーション「Nike+ GPS」をリリースした [11]。これはランニングをゲーム化した例であり、ユーザーは自分のランニングを地図で視覚的に確認したり目標の設定及び達成、情報の共有などを行い、ランニングに対するモチベーションを維持することを目指す。また、運動情報の収集に iPhone の加速度センサを用いており、ゲーミフィケーションとスマートフォンをつなげる一例である。

### 5.2.3 大学教育におけるゲーミフィケーション

岸本ら [12] は東京工科大学メディア学部の講義において、ゲーミフィケーション要素を採り入れた複数のスタイルの授業形態をデザイン・実施した。その後、受講生への事後アンケートを通じて「授業への集中度・学習意欲の変化、授業に盛り込まれたゲーミフィケーション要素の理解度」について調査した。その結果、9 割を超える受講生より「授業に集中できた」「学習意欲が高まった」といった回答を得るとともに、ゲーミフィケーション要素の活用ポイントについてもほぼ企図したとおりの理解を得たことを確認することができたと述べている。

### 5.2.4 スタディサプリ

スタディサプリはリクルートマーケティングパートナーズが提供する、オンライン動画学習サービスである [13]。スタディサプリは「課題をこなすと獲得できるコインを使って、モンスターを育成する」というゲーミフィケーションの要素を取り入れている。また、2016 年に東京都渋谷区立小・中学校で行ったアダプティブラーニング実証実験の結果 [14] によると、小・中学校の半数以上の生徒が学習意欲が上がったと回答した。

## 5.3 既存研究

### 5.3.1 Foldit

Foldit[15] はワシントン大学で開発され 2016 年にリリースされた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である。同学の Firas ら [16] はプレイヤーの解答の中に当時未発表であったアルゴリズムと酷似し、過去の方法を凌駕するものがあったと報告した。ゲーミフィケーションによってプレイヤーの理解だけでなく分野の発展も促進した一例である。科学的シミュレーションをゲーミフィケーションの対象としている点で本研究と類似している。

### 5.3.2 FFT を用いた高速化

Samuel ら [17] は Nvidia 社製の GPU を用いて FFT(高速フーリエ変換) と通常の計算で静磁界の計算を行い、その速度の差を比較した。GPU は CUDA という Nvidia 社の開発した言語で GPGPU に最適化されており、FFT を用いた場合最大で約 54 倍高速化できることが分かった。CUDA は Nvidia 社以外の GPU に適用できない欠点があるが、Compute Shader ではその制約が無い。

### 5.3.3 Unity を用いた MMS の可視化

李 [18] はゲームエンジン Unity の Compute Shader という機能を用いて MMS の高速化を行った。Compute Shader は CUDA と同様 GPGPU の機能だが CUDA と違い GPU のベンダーの制限が無い。本研究ではユーザーインターフェース (UI) の改良とゲーミフィケーション、高速化を目指した。

## 6 李によるMMSシステム

本研究では李 [18] の作成した MMS をベースに開発するため、李の作成した MMS システムについて述べる。

### 6.1 システムの概要

李の作成した MMS システムでは磁気モーメント数や外部磁界の大きさといった様々なパラメータを変更して MMS を行うことができ、そのシステムはシミュレーションプログラムと可視化プログラムの 2 つに大別される。シミュレーションプログラムでは離散化された LLG 方程式にしたがって磁気モーメントの計算を CPU もしくは Compute Shader(GPU) で行い、可視化プログラムでは計算結果を元に磁気モーメントの向きや色を決定し、陰影付けされた三次元の矢印ポリゴンとして画面に表示する (図 10)。

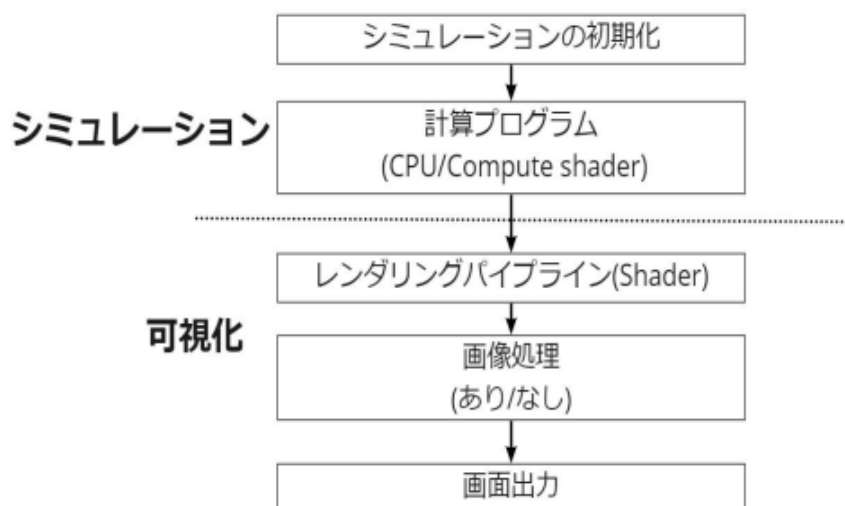


図 10: システムの構成 [18]

## 6.2 シミュレーションプログラムの流れ

計算プログラムにおいて、まずはシミュレーションと関連するパラメータを初期化してからシミュレーション計算ループを始める。CPU あるいは GPU で LLG 方程式の数値計算を行い、それぞれの粒子の計算結果を算出する。そして、4 次ルンゲクッタ法を利用するため、1 フレームの計算では、4 回の LLG 方程式を計算する必要があり、4 回の計算結果をそれぞれ  $K_1, K_2, K_3, K_4$  とする。最後の計算結果  $m$  はルンゲクッタ法により得られる。

計算点数を  $N$  とすると静磁界の計算量の影響で、メインループの計算量は  $O(N^2)$  となる。静磁界の計算は、等間隔のグリッド上にあることから FFT(fastFourier transform) を用いて高速に計算できる。本研究では一次元のみではあるが FFT を実装し CPU で高速化を行った。

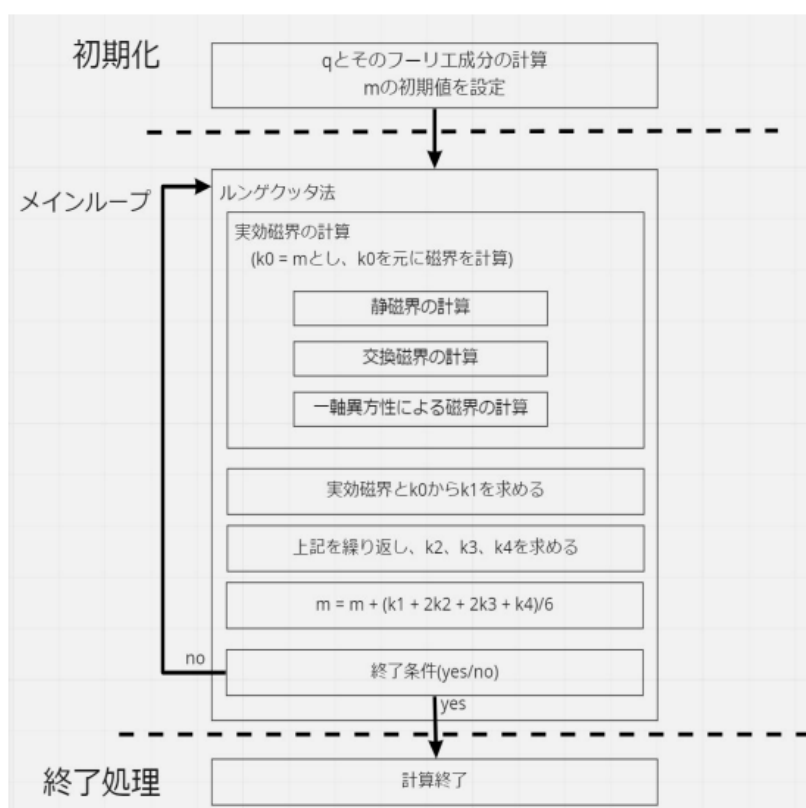


図 11: シミュレーションの流れ [18]

### 6.3 可視化プログラムの流れ

可視化プログラム(図 12)において, まずはシミュレーションプログラムで計算された結果の数値(以下 VEC と表記)をレンダリングパイプラインに渡す. レンダリングパイプラインでは VEC と変換行列の積から矢印ポリゴンの向きを, VEC の色空間処理で色を計算する. その後 Phong シェーディングを用いて矢印ポリゴンに陰影付けをし, ディスプレイに表示する. なお, 本研究では画像処理の部分をカットしている.

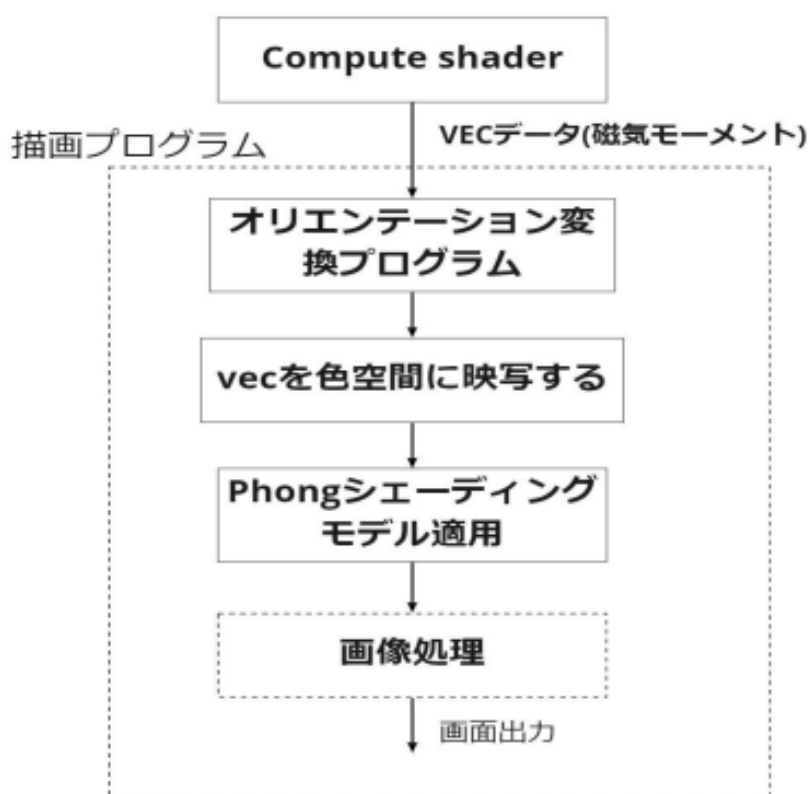


図 12: 可視化の流れ [18]

## 7 MMS の FFT による高速化

### 7.1 PC とスマートフォンの計算速度

本研究で開発したゲームは PC とスマートフォンの両方でプレイすることができるが、それぞれに内蔵されている CPU や GPU の性能は大きく異なるため、PC で快適にプレイできるとしてもスマートフォンでは快適にプレイできない可能性がある。したがって両デバイス間でどれほど性能差があるのか調査するため、表 2 に記載したデバイスを用いて MMS のアプリケーションを実行し、その FPS を比較した (図 13)。なお、FPS は一般的に 60~150 で十分であるため、200 を上限とした。

図 13 において、まず両デバイス間でおよそ 140FPS も差が出ているのが分かる。次に PC の CPU と GPU を見ると、磁気モーメント数 216 を超えたところで差が開き、GPU がほぼ横ばいであるのに対して CPU は対数に対して直線的に落ちているのが分かる。またスマートフォンも同様に比較すると、磁気モーメント数 125 を超えたところで差が開くも対数に対して直線的に落ち、最後は CPU も GPU も同程度の FPS となっている。

改めて本実験によって PC とスマートフォン間で大きな性能差があることが分かり、特筆すべきはスマートフォンでは GPU で計算する方が遅くなるという結果である。磁気モーメント数が 200 を超えたあたりからスマートフォンでは大きく性能が下がることが分かったが、初心者がマイクロマグネティクスの入り口として本ゲームをプレイする分には申し分の無い性能と言える。しかし、マイクロマグネティクスの様相は磁気モーメント数が多いほど複雑多彩になっていくため、本ゲームをより高度なプレイヤー向けに拡張する場合、特に CPU での計算の高速化は避けられない。

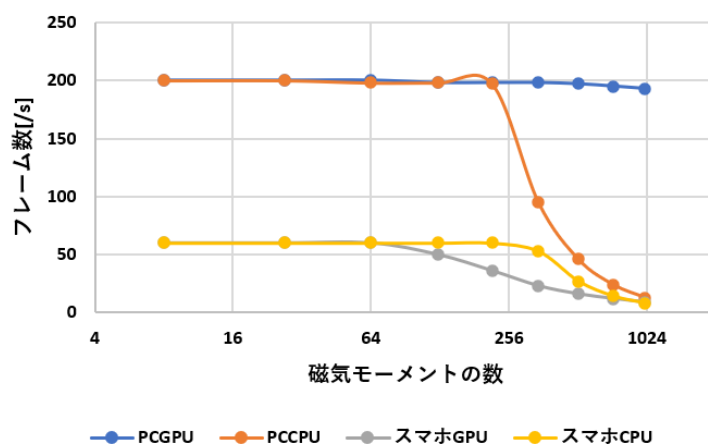


図 13: PC とスマホの性能比較



表 2: PC とスマートフォンの各プロセッサ

	CPU	GPU
PC	Intel(R) Core(TM) i7-10700K	NVIDIA GeForce RTX 2060
スマートフォン	Kryo 485	Adreno 640

## 7.2 畳み込み演算

静磁界計算における式 (15) は以下のように一般化することができる。

$$A(i) = \sum_{j=0}^{N-1} C(j-i)B(i) \quad (i = 0, \dots, N-1) \quad (25)$$

ここで、 $N$  は 2 の累乗の数とし、 $A$ 、 $B$  はそれぞれ長さ  $N$  のベクトル、 $C$  は長さ  $2N - 1$  のベクトルとする。この演算は畳み込み (英: Convolution) 演算と呼ばれており、 $A(0), \dots, A(N-1)$  をすべて求めるために必要な計算時間は  $O(N^2)$  である。

次に、 $B$ 、 $C$  が、周期  $N$  の周期関数であると仮定する。周期性より  $B$  は長さ  $N$  のベクトルで表される。このとき、式 (15) の演算は FFT を用いて、以下の手順により計算できる。

1. 静磁界係数  $q_{xx}$ ,  $q_{yy}$ ,  $q_{zz}$ ,  $q_{xy}$ ,  $q_{xz}$ ,  $q_{yz}$  (実数) に FFT を行い、複素数化する。
2. 各磁気モーメント  $\vec{m}$  の成分  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  (実数) に FFT を行い、複素数化する。
3. 以下のように複素数の範囲で式 (15) の計算を行う。

$$A(i)_{Re} = B(i)_{Re} * C(i)_{Re} - B(i)_{Im} * C(i)_{Im}$$

$$A(i)_{Im} = B(i)_{Re} * C(i)_{Im} + B(i)_{Im} * C(i)_{Re} \quad (i=0, \dots, N-1)$$

4. 求めた静磁界 (複素数) に逆 FFT を行い、実数化する。

以上の工程によって静磁界を高速に求めることができる。しかし、本研究で用いる MMS は三次元であるため、適用する FFT も三次元である必要がある。本研究では三次元に拡張した FFT を実装することができなかつたため、一次元の FFT の評価を行うこととする。

### 7.3 速度の評価

ここではPCとスマートフォンでのMMSにおいて、FFTでどれほど高速化できたかを比較し、その結果を示す。

図14は磁気モーメント ( $128 \leq N \leq 8096$ ) の運動を様々な方法で計算・比較し、そのFPSをまとめたものである。PCGPU, PCCPUはPCのGPUやCPUで直接法で計算し、PCCPUFFTはCPUでFFTの計算をしたものである。またスマホGPU, スマホCPU, スマホCPUFFTも同様である。なお、本来であればGPUでFFTの計算をしたPCGPUFFTとスマホGPUFFTも比較対象として入れるべきだが、Compute Shaderに適用させることができなかつたため割愛する。

PCCPUとPCCPUFFTを比較するとFFTでの高速化が如実に表れており、PCGPUには届かずともその約半分程のFPSにまで迫っていることが分かる。また、 $N = 256$ 以降からスマホCPUとスマホCPUFFTでも差が現れ、FFTによって高速化されたことが分かる。加えて $N = 512$ 以降からスマホCPUFFTがPCCPUよりもFPSが高くなっており、FFTを用いることによって高速化していないPCのCPUの計算性能を凌駕できることが分かった。

なお、本研究で使用したFFTのアルゴリズムは一般的であるCooley-Tukey法というものであるが、これより演算量が少ないとされる素因数FFTやSplit-Radix FFTなどのアルゴリズムを用いて計算する方が望ましい。FFTで高速化したものの $N = 1024$ 以降からはやはりFPSが減少しているため、前述したアルゴリズムで実装してFPSを減少させないことが重要である。

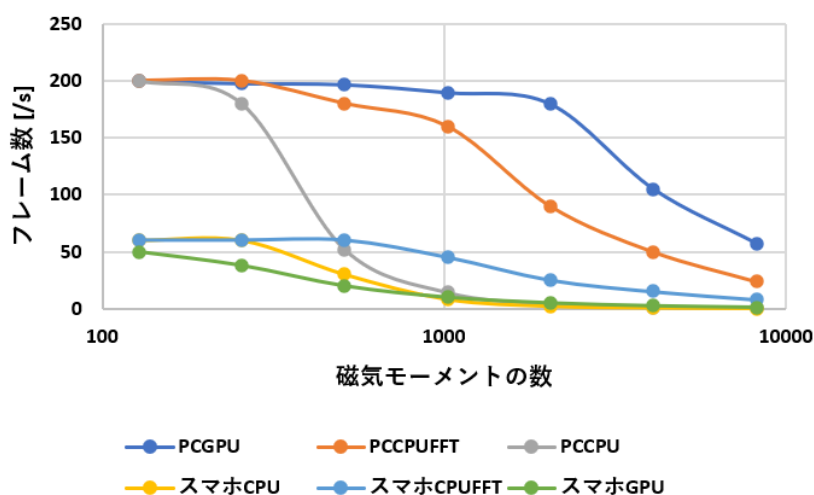


図14: 直接法とFFT間の速度比較

## 7.4 精度の評価

ここでは直接法とFFTを用いた計算法での静磁界にどれほどの差があるのかを比較し、その結果を示す。

図15は磁気モーメント ( $N = 128$ ) の運動が収束するまで静磁界を計算し、その誤差を比較したグラフである。ErrAll, ErrX, ErrY, ErrZはそれぞれ静磁界の平均誤差、X成分の平均誤差、Y成分の平均誤差、Z成分の平均誤差である。ErrXは最初の10フレームは誤差が上下しているが、その後は1~2%程度に収まった。ErrYは12フレーム~24フレームにおいて最大40%もの誤差が出てしまっているが、その後はErrX同様1~2%程度に収まった。しかしながらErrZについてはErrXやErrYとは比較にならないほどの誤差が生じてしまったため、静磁界の平均誤差ErrAllが最終的に20%もでてしまった。静磁界計算は館[5]の論文を参考にしたが、記載されているCUDAのFFTライブラリを正確に再現できなかったことが誤差増大の原因だと考えられる。

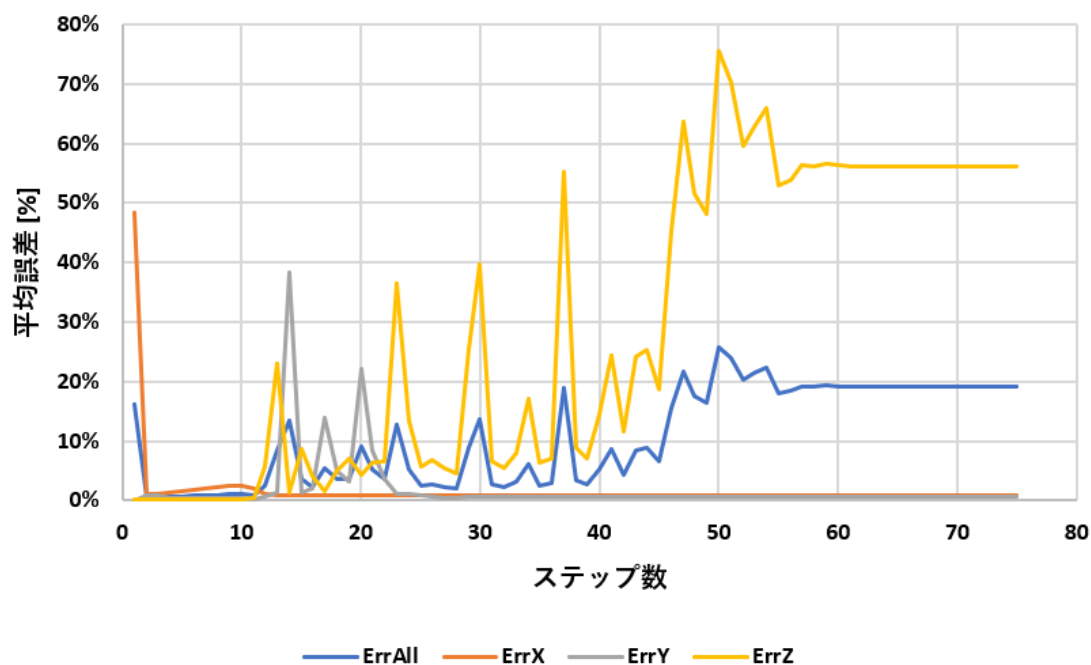


図 15: 直接法とFFT間の平均誤差

## 8 MMS のゲーム化

### 8.1 概要

本研究では李の作成した MMS[18] にゲーミフィケーションを施し、「あっち向けてホイッ!」というゲームを作成した。操作画面は図 16 のように遷移する。プレイヤーは「初めての方へ」でマイクロマグネティクスに関する基礎的な知識を学び、「オプション」で詳細な設定を行うことができる。その後ゲームがスタートすると図 17 のような画面に遷移し、プレイヤーは 4 つの磁界のうちの 1 つである外部磁界を操作して磁気モーメントたちを特定の方向に向け、スコアを稼ぎつつ、マイクロマグネティクスについて理解を深める。

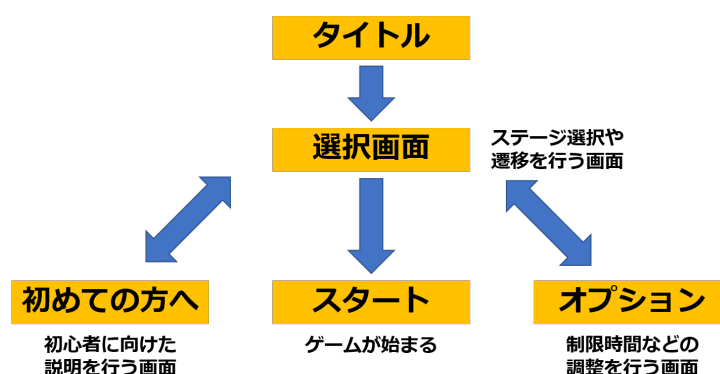


図 16: ゲーム操作におけるフローチャート

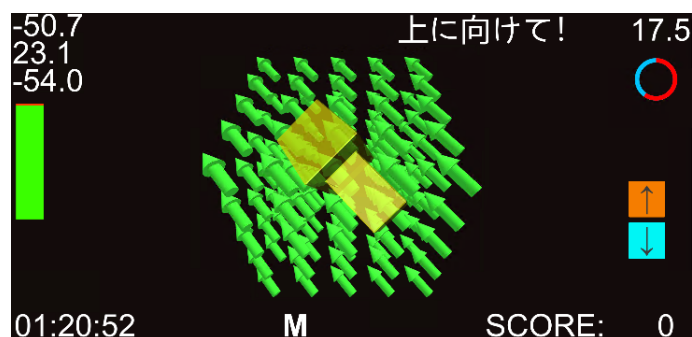


図 17: ゲーム画面

## 8.2 機能の詳細

以下にそれぞれの画面における操作方法を説明する。

### 8.2.1 タイトル

タイトル画面(図 18)ではPC用とスマートフォン用のボタンを用意しているが、これはそれぞれのデバイスでゲームの操作方法が異なるからである。PCではキーボードとマウスで操作をし、スマートフォンではタッチとジャイロセンサで操作をする。

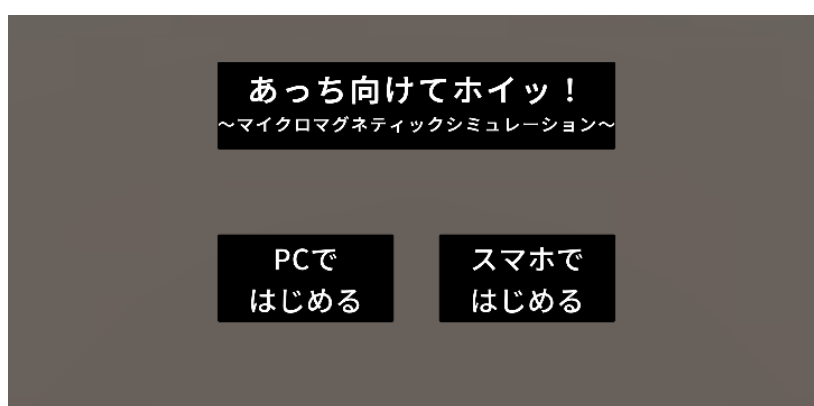


図 18: タイトル画面

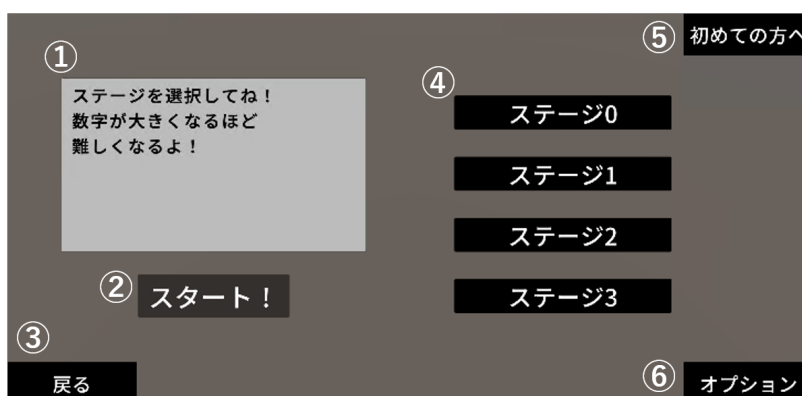


図 19: ステージ選択画面

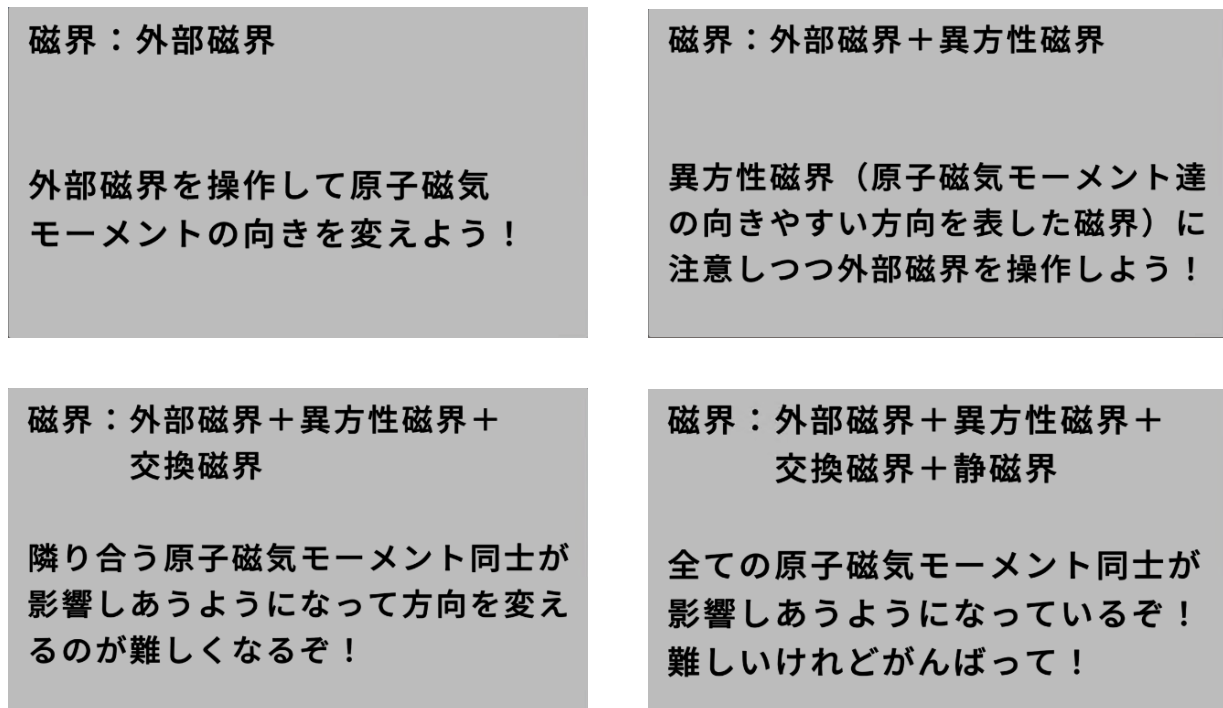


図 20: 各ステージ選択後の説明

## 8.2.2 ステージ選択

ステージ選択画面(図 19)は以下の構成になっている。ステージ 0 は「外部磁界」、ステージ 1 は「外部磁界＋異方性磁界」、ステージ 2 は「外部磁界＋異方性磁界＋交換磁界」、ステージ 3 は「外部磁界＋異方性磁界＋交換磁界＋静磁界」となっており、数字が大きくなるごとに有効な磁界が増え、ゲームの難易度が上がっていく。またステージ選択後、図 20 のようにステージの説明テキストが変化する。

### ①ステージの説明

ステージ選択後、そのステージに関する簡単な説明を行う。

### ②スタートボタン

ステージ選択後に押すとゲームを開始する。

### ③戻るボタン

タイトル画面に戻る。

### ④ステージ選択ボタン

ステージ 0～3 まで存在し、それぞれで実効磁界が異なる。

### ⑤初めての方へボタン

ボタンを押すと画面が遷移し、マイクロマグネティクスや本ゲームの操作方法に関する簡単な説明を見ることができる。

### ⑥オプションボタン

ボタンを押すと画面が遷移し、磁気モーメントの数やゲームのルールに関する部分を調整することができる。

## 8.2.3 初めての方へ

ここでは図 21 のようにマイクロマグネティクスに関する基礎的な知識を見ることができる。画面中央下にある左右方向の三角ボタンを押下して、テキストを図 22 のように変化させることができる。

## 8.2.4 オプション

オプション画面 (図 23) では磁気モーメントの数やゲームの制限時間などのパラメータ設定を行うことができる。

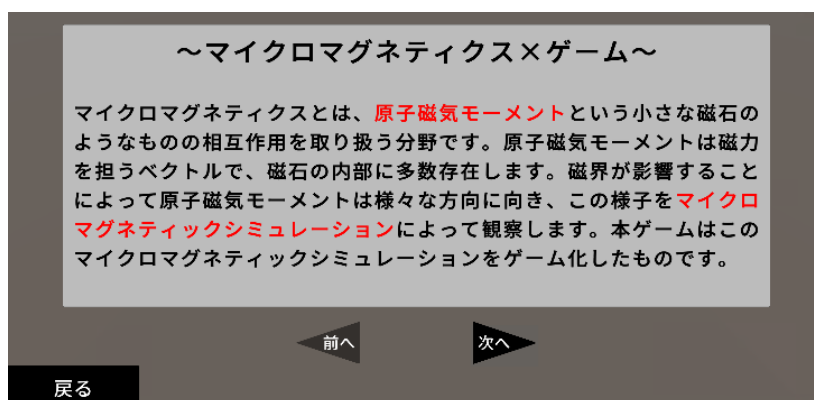


図 21: 初めての方への画面

### ～磁界の種類～

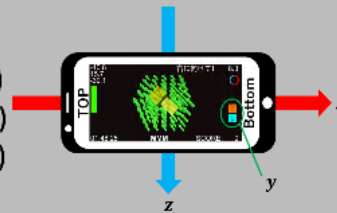
本ゲームには**外部磁界**、**異方性磁界**、**交換磁界**、**静磁界**の計4つの磁界が存在します。外から加える外部磁界と違い、残り3つの磁界は原子磁気モーメントの持つ一軸異方性（特定の方向に向きやすくなる）、交換相互作用（隣接する原子磁気モーメントの方向の差異で発生するエネルギーによる作用）、磁性（自身が磁界を発生させる）といった性質から発生する磁界です。

### ～ステージについての説明～

ステージは0から3まであり、**磁界の数**によって分けられています。ステージ0では原子磁気モーメントの相互作用を考慮せずに、外部磁界のみで遊ぶことができ操作のコツをつかむことができます。ステージ1からは数字が増える毎に原子磁気モーメントの性質による磁界の影響が増えていき、**難易度が上昇**していきます。ステージ3をクリアできるようになった時には、きっとマイクロマグネティクスについての理解が深まっていることでしょう！

### ～操作方法～

外部磁界の各成分を操作します。  
X成分：↑↓キー(PC) / 傾き (スマホ)  
Y成分：←→キー(PC) / ボタン(スマホ)  
Z成分：W S キー(PC) / 傾き (スマホ)



### ～座標軸の方向～

軸の方向は次の通りです。  
X成分：左と右方向  
Y成分：下と上方向  
Z成分：奥と手前方向

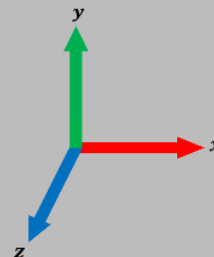


図 22: 各説明の画面





図 23: オプション画面

## 8.3 ゲーム画面の構成

ゲーム画面 (図 24) は以下のような構成になっている。

### ①外部磁界

ユーザーが直接操作する磁界。PC では矢印キー (↑↓←→) と W キー, S キーで, スマートフォン版では傾きと画面上のボタンで操作する。

### ②磁気モーメント

プレイヤーが間接的に操作する対象。本ゲームではこの磁気モーメントの塊を特定の方向に向くよう調整することが求められる。

### ③外部磁界のベクトル成分

外部磁界の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  成分の数値。これに従って①の方向が変化する。

### ④HP(HenryPoint)

③の絶対値が大きくなるほど減少していく。HP が 0 になるとゲーム終了となる。

### ⑤残り時間

ゲームをプレイできる残りの時間。0 秒になるとゲーム終了となる。

### ⑥残機

ミッションを失敗することができる残り回数。図 24 の場合 3 回失敗するとゲーム終了となる。

### ⑦スコア

ミッションを達成するとスコアを獲得できる。得られるスコアはミッションの方向を向いている磁気モーメントの数に依る。

### ⑧円形ゲージ

ミッションを達成しているか否か判別するためのゲージ。(ミッションの方向を向いている磁気モーメント数)/(全磁気モーメント数)\*100 = 60% 以上でミッション達成となる。

### ⑨ミッション表示時間

次のミッションに切り替わるまでの残り時間。この時間が0になる前にミッションを達成する必要がある。ミッションが進むごとにそのミッションの表示される時間は短くなる。

### ⑩ミッション

ここに表示されるミッションに従ってプレイヤーは外部磁界を操作し、磁気モーメントをミッションの方向に向ける。

### ⑪Y成分操作ボタン

このボタンで外部磁界のY成分を操作する。

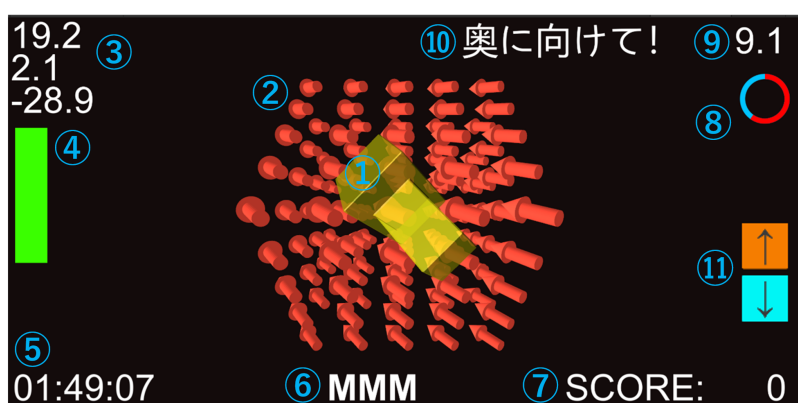


図 24: ゲーム画面

## 8.4 ゲームの遊び方

本ゲームではプレイヤーが外部磁界を操作し、ミッションに従って磁気モーメントをその方向に向けるゲームである。また、ゲーム終了には3つの条件があり、それぞれ「残り時間が0となる」、「HPが0になる」、「ミッションを $n(1\sim 3)$ 回失敗してしまう」である。HPは「ヘンリーポイント」の略であり、外部磁界を大きくするほど消費されていくゲージである。従ってプレイヤーはHPを減らさないよう外部磁界を適切な大きさに保ちつつ、ミッションを達成して時間切れになるまでスコアを稼ぐ必要がある。

ステージは4つ用意されており、数字が大きくなるほど磁界が増え難易度が増していく。ステージ0は外部磁界のみが磁気モーメントに影響するため、操作に慣れることができる。できれば比較的容易に磁気モーメントの向きを変えることができる。しかし影響する磁界が増えてくると相対的に外部磁界の影響力は減少してしまうため、磁気モーメントを任意の方向に向けるにはより大きな外部磁界が必要となる。

最後のステージ3ではステージ2までよりも大きな外部磁界を必要とするため、ミッションが切り替わった後に外部磁界の大きさがそのままだと外部磁界と磁気モーメント両方の方向転換に間に合わないため、ステージ3では外部磁界がミッションごとにリセットされる仕様にした。

## 8.5 6要素との関連

本ゲームがゲーミフィケーション6要素をどのように取り入れているかを以下に示す。

### 能動的な参加

ルールが複雑にならないよう、かつ適切な縛りを付けて飽きないように工夫し、プレイヤーが遊びたくなるように設計を行った。

### 称賛を演出

スコアポイントによってプレイヤーのランクをS～Eまで算出し、激励や称賛を行う演出を作成した。また、次のランクまでのスコアを算出し表示しプレイヤーのやる気ができるようにした。

### 即時のフィードバック設計

ジャイロセンサによって外部磁界のベクトル成分を適切なスピードで変化させ、それに合わせて磁気モーメントたちが変化するようにした。

### **独自性の歓迎**

ミッションを失敗できる回数が設定されているため、それを利用し敢えて「今のミッションを無視して次のミッションに備える」というような戦略を行うなど、プレイヤーが様々な戦略を取れるようなゲームとなっている。

### **成長の可視化**

スコアを表示することによってプレイヤーがどれほど外部磁界及び磁気モーメントの操作が上達したかを数値として見るができる。

### **達成可能な目標設定**

ステージ別に難易度が分かれているため、プレイヤー自身のレベルに合わせて遊ぶことができる。

## 9 評価

### 9.1 テストとアンケートの内容

本研究ではゲームを評価するため、数人の被験者に作成したゲームを20分ほどプレイしてもらい、その後「マイクロマグネティクスに関する理解度とゲーミフィケーション度を測るテスト及びアンケート」を実施した。

図25-28はマイクロマグネティクスに関する理解度を測るテストの前提・質問事項である。このテストは「ゲームを通してプレイヤーがマイクロマグネティクスをどの程度理解することができたかを調査する」ことを目的としたものである。

また、ゲーミフィケーション度を測るアンケートの質問事項は以下の通りである。このアンケートは「ゲームがどの程度ゲーミフィケーションの各要素を満たしているかを調査する」ことを目的としたものである。これらの質問に対して、リッカート尺度(5段階)を用いた5つの選択肢「非常にそう思う」、「ややそう思う」、「どちらとも思わない」、「あまりそう思わない」、「全くそう思わない」の中から1つ選び回答する形式とした。

1. (能動的な参加) 能動的に遊びたくなる工夫が為されていた
2. (称賛を演出) 成功を褒めてやる気が出る演出があった
3. (即時のフィードバック設計) 画面やデバイス、キーボードを操作したときの外部磁界のベクトル成分や磁気モーメントの方向転換が適切な早さであった
4. (独自性の歓迎) 試行錯誤をして自分なりの攻略法を考えることができる工夫が為されていた
5. (成長の可視化) プレイヤーの操作の上達やマイクロマグネティクスに関する知識の獲得が数値となって見えた
6. (達成可能な目標設定) 自身の上達度に合わせて難易度ごとに遊ぶことができた

図1. デフォルト状態の磁気モーメント (Z軸正の方向)

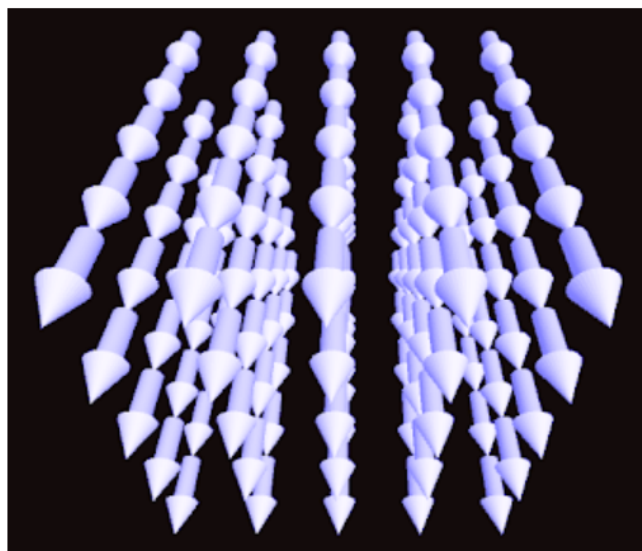


図2. 軸方向

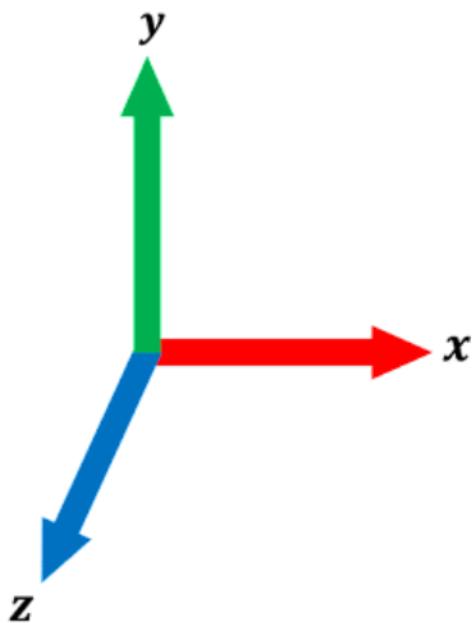
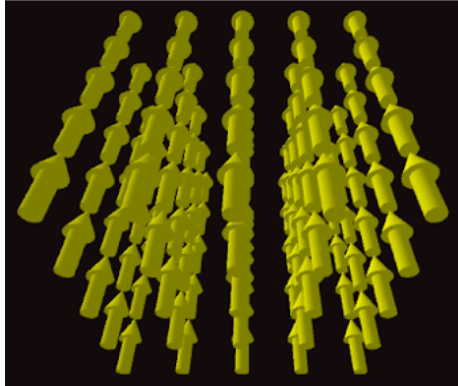


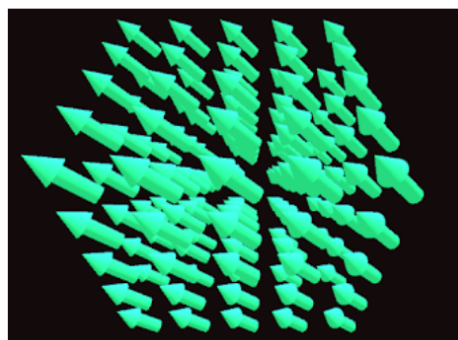
図 25: 前提事項

問1 図1.の状態外部磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態にな \* 10ポイント  
 った。このとき外部磁界のベクトル成分として適切なものはどれか？



- (100, 0, 0)
- (0, 100, 0)
- (0, 0, 100)
- (-100, 0, 0)
- (0, -100, 0)
- (0, 0, -100)

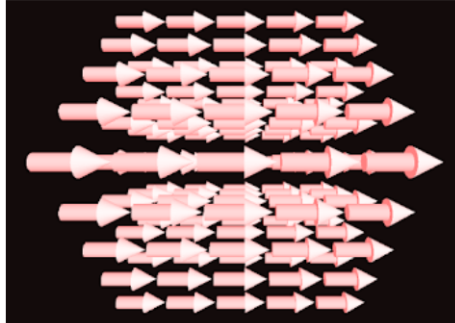
問2 図1.の状態外部磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態にな \* 10ポイント  
 った。このとき外部磁界のベクトル成分として適切なものはどれか？



- (0, -100, 100)
- (100, 0, -100)
- (-100, 100, 0)
- (0, 100, 100)
- (100, 0, 100)
- (100, 100, 0)

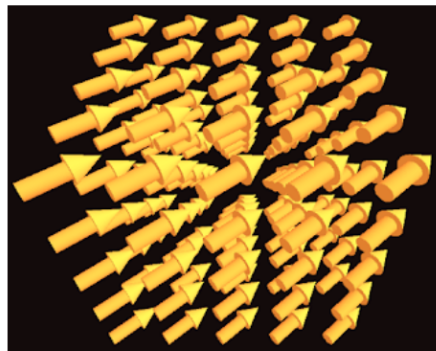
図 26: 質問事項その 1

問3 図1. の状態で異方性磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態に \* 10ポイント  
 になった。このとき異方性磁界のベクトル成分として適切なものはどれ  
 か？



- (100, 0, 0)
- (0, 100, 0)
- (0, 0, 100)
- (-100, 0, 0)
- (0, -100, 0)
- (0, 0, -100)

問4 図1. の状態で外部磁界と異方性磁界を与え十分な時間経過後、以 \* 10ポイント  
 下の状態になった。このとき実効磁界(=外部磁界+異方性磁界)のベク  
 トル成分として適切なものはどれか？



- (0, 100, 100)
- (0, -100, 100)
- (100, 0, 100)
- (100, 0, -100)
- (100, 100, 0)
- (-100, 100, 0)

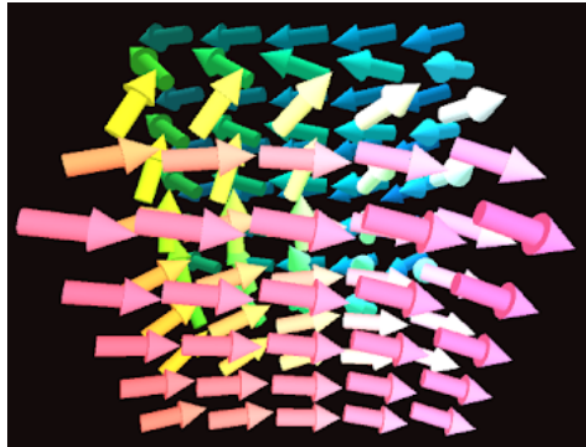
図 27: 質問事項その 2



問5 異方性磁界を有効にしたとき磁気モーメントの運動にどのような \* 20 ポイント  
変化が起きるか？

- 動かしやすいになる
- 変化はない
- 動かしづらくなる

問6 図1. の状態で実効磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態にな \* 15 ポイント  
った。このとき実効磁界の内容として適切なものはどれか？



- 外部磁界
- 外部磁界 + 異方性磁界
- 外部磁界 + 異方性磁界 + 交換磁界
- 外部磁界 + 異方性磁界 + 交換磁界 + 静磁界

問7 問6の状態ではZ軸の正の方向に磁気モーメントを向けたい場合、どうすれば \*  
良いか？

回答を入力

図 28: 質問事項その 3

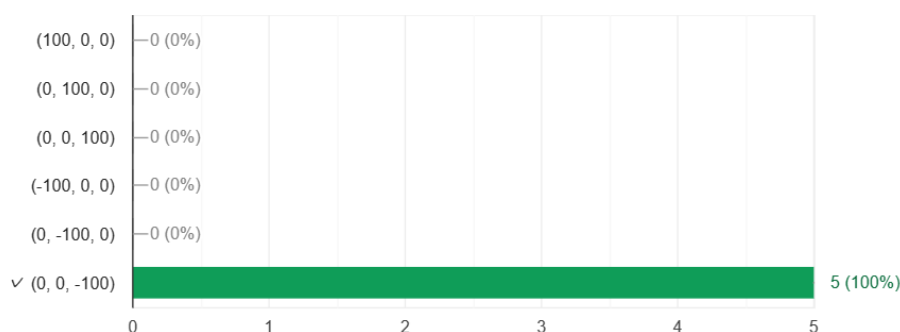
## 9.2 テストの結果

前述した全7問のうち選択肢問題が6問，記述式が1問であったが，選択肢問題は被験者5人が5問以上正答する結果となった．記述式問題は類似した解答があるものの，被験者全員とも完答には至らなかった．

ここからは問題ごとに結果を見る．問1，問2はどちらも外部磁界の問題である．この2問はプレイヤーが外部磁界についての理解度を問う問題であった．図29を見るとどちらも被験者全員が正答しているため，外部磁界が磁気モーメントに与える影響を全員が理解したと考えられる．

問1 図1.の状態 で外部磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態になった。このとき外部磁界のベクトル成分として適切なものはどれか？

正解 5/5 件



問2 図1.の状態 で外部磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態になった。このとき外部磁界のベクトル成分として適切なものはどれか？

正解 5/5 件

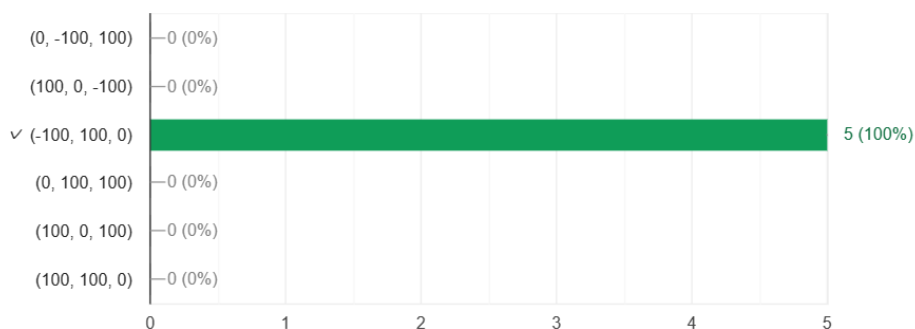
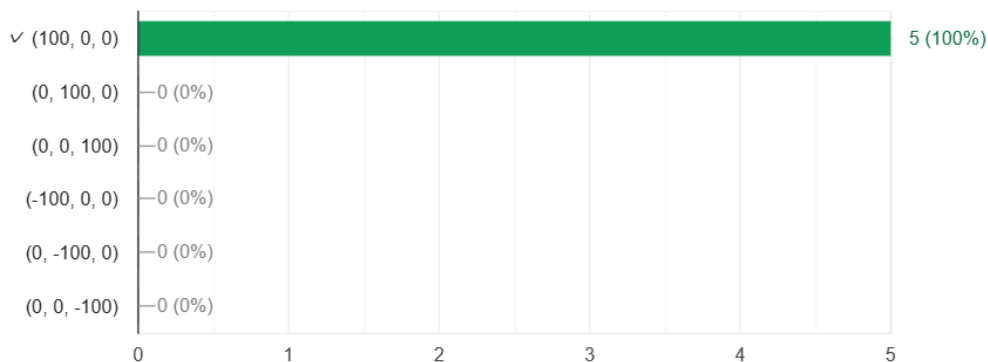


図 29: 問 1, 問 2 の正答率

問3 図1. の状態で異方性磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態になった。このとき異方性磁界のベクトル成分として適切なものはどれか？

正解 5/5 件



問4 図1. の状態で外部磁界と異方性磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態になった。このとき実効磁界(=外部磁界+異方性磁界)のベクトル成分として適切なものはどれか？

正解 4/5 件

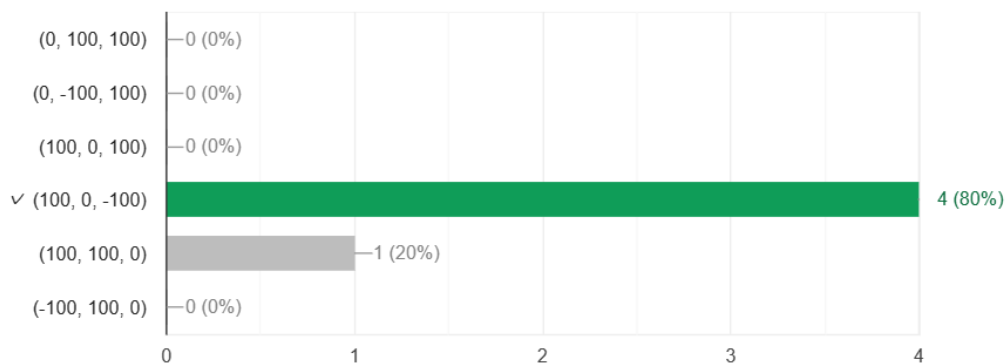


図 30: 問 3, 問 4 の正答率

問 3, 問 4 は異方性磁界に関する問題である。問 3 では異方性磁界単体の、問 4 では外部磁界と合わせた実効磁界の磁気モーメントに対する影響力の理解度を問う問題だった。図 30 を見ると問 3 は被験者全員が正答しているため、異方性磁界単体の理解ができていると考えられる。一方、問 4 は 4 名が正答し、1 名が誤答する結果となった。外部磁界はプレイヤーが自由にベクトルの大きさを変えることができるが、異方性磁界は磁性体によって違いはあるが定数的扱いとなるため、外部磁界を大きくすると異方性磁界の影響

力は小さくなる。したがって異方性磁界がどのように磁気モーメントに影響を及ぼすか分かりづらくなってしまった可能性が挙げられる。

問5は交換磁界に関する問題である。交換磁界は隣り合う磁界同士で働く力であり、互いの向いている方向が異なるほど力が働くようになっている。図31を見ると被験者全員が正答しているが、ゲーム開始時は全ての磁気モーメントが同方向を向いているため交換磁界が小さい。従って「あまり交換磁界の影響を実感できなかったが、恐らく相互作用が増えていくほど動かしづらくなる」という推測で解答している可能性がある。本ゲームはMMSの直観的理解を目指し作成したが、より実感を伴って理解してもらうべく「Z軸の正と負の向きを向いた磁気モーメントを交互に配置する」などの工夫を施す必要があると分かった。

問6、問7は静磁界に関する問題である。静磁界によって磁気モーメントの様相が大きく変化するため問6の正答率は高くなると予想したが、実際の正答率は4割(5名中2名)と低い結果となった。考えられる原因として、ジャイロセンサによる操作の困難性が挙げられる。最大で20分程のプレイ時間を設定した理由はゲーム性を確認するためである。例えば1時間プレイしてもゲームが上達しない場合はゲームが難しすぎるものが考えられ、プレイヤーが継続してゲームをしようと思わなくなってしまう。従って20分程の制限を設けたが、正答率が低い結果を見るとプレイヤーが序盤で躓いて最後のステージまでプレイ出来なかったり、ステージごとの違いを理解しながらプレイすることができなかった可能性が考えられる。

問5 交換磁界を有効にしたとき磁気モーメントの運動にどのような変化が起きるか？



正解 5/5 件

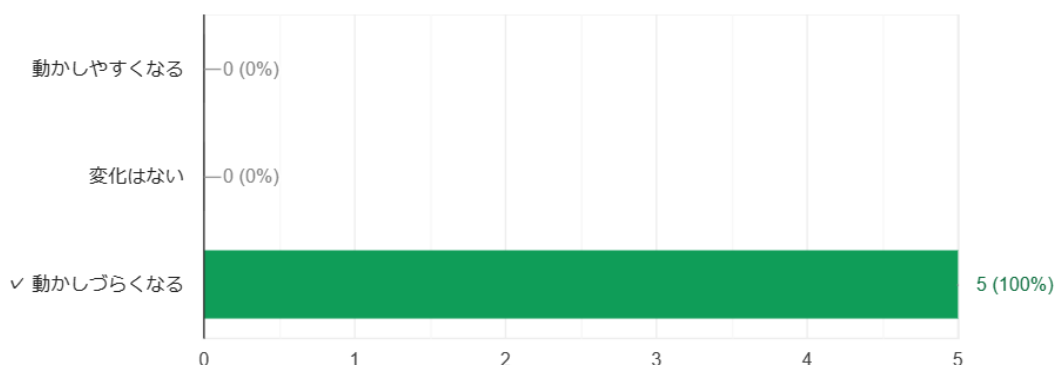
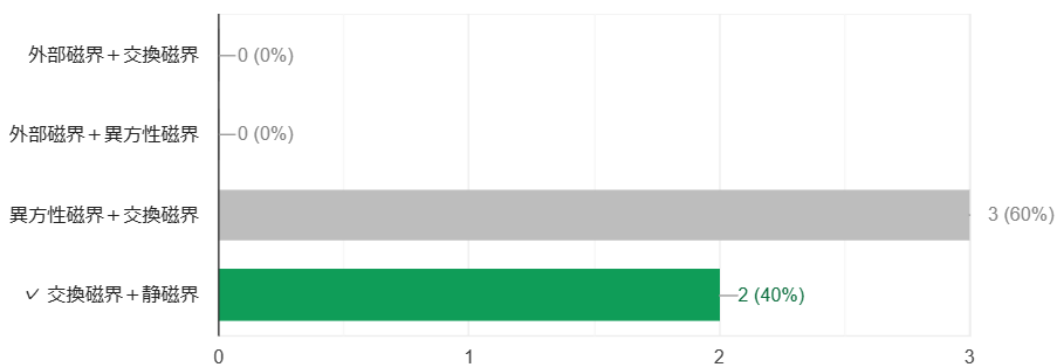


図 31: 問 5 の正答率

問6 図1. の状態で実効磁界を与え十分な時間経過後、以下の状態になった。このとき実効磁界の内容として適切なものはどれか？

正解 2/5 件



問7 問6の状態でZ軸の正の方向に磁気モーメントを向けたい場合、どうすれば良いか？

5件の回答

Z軸正の方向に強い実行磁界を与える

z軸の正の方向に向けて外部磁界を与え続ける

Z軸正・X軸負の方向に外部磁界を加える

(0,0,100)のベクトル成分の外部磁界を与える。

外部磁界を上方向に向けてから手前方向に向ける

図 32: 問 6 の正答率, 問 7 の解答

その影響は問7にも見られ、問7の模範解答は「外部磁界をZ軸の正方向に強く向ける」だが、惜しい解答はあるものの完答できた被験者はいなかった。ステージ0～ステージ2までとステージ3では磁気モーメントの向きを変えるための外部磁界の大きさが明らかに異なり、またゲーム内では「初めての方へ」というページを用意し、マイクロマグネティクスに初めて触れる人にゲームをプレイする上で必要な説明を行ったつもりであった。しかし、いきなり磁気モーメントの向きを変えるためのハードルが上がり過ぎたり、「初めての方へ」のページで情報が不足していたり文字情報が多すぎてあまり読まれないため正答率が低迷した可能性が考えられる。

ステージ3の難易度を下げる方法として交換磁界の無効化が考えられる。静磁界が有効な場合磁気モーメントたちが様々な方向に向くため、ステージ2よりも交換磁界が強くなる。従ってステージ3は「外部磁界+異方性磁界+静磁界」として磁気モーメントを動かしやすいし、ステージ4を新しく作り「外部磁界+異方性磁界+交換磁界+静磁界」とすることで急な難易度の変化を改善することができると思う。

「初めての方へ」も1ページごとの情報量を減らしページ数を増やすことで可読性を上げられると思う。

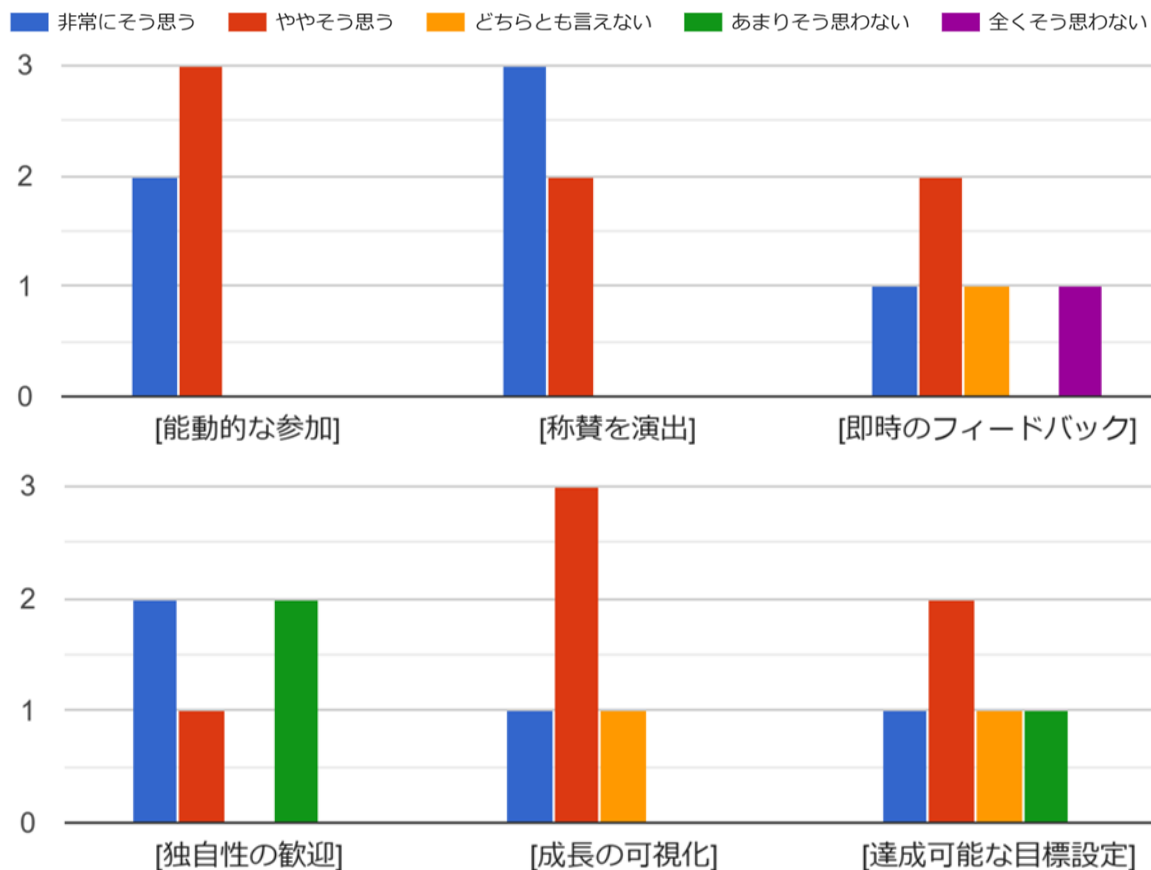


図 33: ゲーミフィケーション6要素のアンケート結果

### 9.3 アンケートの結果

ここまでマイクロマグネティクスを理解度を測るテストの結果を見てきたが、ここからはゲーミフィケーション6要素のアンケート結果を個別に見る。図33は被験者5名に本ゲームがどれほどゲーミフィケーション6要素を満たしているかアンケートを取り、それをグラフ化したものである。

「能動的な参加」及び「称賛を演出」の2項目では被験者全員から肯定的な評価をもらうことができた。つまり操作性の問題はあるものの、ゲームのルールは被験者に受け入れてもらうことができ、ランク付けをすることで被験者のやる気を出すことができた。

「即時のフィードバック」の項目では先の二項目と比べて肯定的な評価は少なくなり、否定的な評価もなされてしまった。これには大きく分けて二つの原因があると考えた。一つ目は「外部磁界の変化の速度」である。外部磁界の各成分はスマートフォンを傾けたり画面上のボタンを押すことで変化するが、変化する速度がプレイヤーには遅く感じてしまった可能性がある。例えばPCとスマートフォンではフレームレートに大きな差があるため、PCで遊んだときには速く変化してもスマートフォンでは遅く変化することがあり、更にはスマートフォン同士でもフレームレートの差が生じることがある。従ってゲームの開始前にフレームレートを算出して、それを元に適切に外部磁界を変化させられるようになるシステムを作ることが必要だと考えた。二つ目は「磁気モーメントの変化の速度」である。本研究ではFFTによる静磁界計算の改善も進めたが、ゲームに適用するには至らなかった。従って本ゲームにFFTを適用させて高速に静磁界計算を行って磁気モーメントの変化の速度を上げることが必要である。

「独自性の歓迎」では評価が二分する結果となった。つまり人によって戦略を立ててプレイできるかどうか分かれるゲーム性であったということである。恐らく二分化された原因に操作性が挙げられる。ジャイロセンサによる操作が難しいと言う被験者がいた一方で、操作に慣れ楽しいと言う被験者もいたため、操作性に慣れることができたか否かで独自性に対して異なる感じ方をするのではないかと考えた。

「成長の可視化」においては肯定的な評価がなされた。ゲームであるならばスコア化は必須ともいえるため、ミッション切り替わり時にその方向を向いていた磁気モーメントの数だけスコアに加算する方式とした。成功するほど加算され失敗しても減算されることは無いため、プレイヤーにはストレスフリーで分かりやすい上達度の指標になったのではないかと推測する。

「達成可能な目標設定」では評価がバラバラになった。特に「外部磁界のリセット機能のあるステージ3の方がステージ0よりプレイしやすかった」という意見が複数人から出たため、難易度が逆転してしまう結果となってしまった。従ってステージ3に限らず、

全てのステージで外部磁界のリセットをできるように「オプション」画面に「外部磁界のリセット」項目を追加するとより遊びやすくなると考えた。

また、アンケートの感想に「ゲーム画面は情報量が多いので音があると分かりやすい」という意見があった。従って残り時間を音声で知らせたり、ミッションを達成時もしくは未達成時に効果音を流すなどするとよりゲームをプレイしやすくなるのではないかと気づくことができた。

最後に、ここまでに多くの改善点を挙げたが、それと同じく被験者から「難しかったが、だからこそゲーミフィケーションを行う意義を感じられた」「操作は直観的だった」「楽しかった」など肯定的意見もいただいた。ゲーミフィケーションは「能動的に楽しむ」を実現するための概念なので、被験者に楽しんでもらえたのならゲーミフィケーションとしては成功したのではないかと考えられる。



## 10 おわりに

### 10.1 まとめ

本研究では初学者のマイクロマグネティクスの理解促進を目的としゲーミフィケーションを行い、PC とスマートフォンの性能差の改善を目的とし高速フーリエ変換を用いた CPU/GPU による静磁界計算の高速化を試みた。ゲーミフィケーションにおいては多くの課題を発見したものの、「プレイヤーを楽しませる」というゲーミフィケーションで最も重要な目的を達成できた。高速化においては GPU およびゲームに適用することができなかったが、CPU で次元ではあるが高速化に成功し高精度でシミュレーションすることができた。

### 10.2 今後の課題

本研究では李 [18] の MMS にゲーミフィケーションを施し、また李の研究の課題であった FFT の実装を一部達成した。しかしながら本研究の今後の課題は多くある。

一つ目は FFT の改善及びゲームへの適用である。本研究では次元の FFT を実装したものの静磁界計算が一部正しく計算されていなかった。また、本研究では Cooley-Tukey 法で FFT を計算したが、素因数 FFT や Split-Radix FFT など別のアルゴリズムでも実装し速度を比較する必要がある。

次に、ゲームの改善である。ゲームのコンセプトは被験者に受け入れられたが、操作性の問題や実装部分での問題がテスト・アンケート結果から数多く見つかった。また、本研究で作成したゲームは初学者向けに作成したものであり、Foldit のように今存在しているその分野の難しい問題を解決するようなものではない。すなわち、本ゲームの対象者を初学者だけでなく上級者まで拡張する余地がある。

## 謝辞

ゲームの原案を下された友人 M 君, ゲームの UI 部分の多くを実装して下さった同研究室の植田君並びにマイクロマグネティクスや FFT に関するサンプルコード・論文の提供をしていただいた仲谷教授に感謝いたします.

## 参考文献

- [1] 地質調査総合センター, “キュリー温度と磁性鉱物,”  
<https://www.gsj.jp/Muse/kids/read/FullscreenBookBlock/chijigyakuten.html>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [2] 総務省, “令和 3 年版 情報通信白書,”  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/index.html>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [3] 4gamer, “男女比, 平均年齢, 掛け持ち——ログデータから明かされるゲームアプリの姿。JOGA「オンラインゲーム・マーケティングセミナー」をレポート,”  
<https://www.4gamer.net/games/999/G999905/20180702011/>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [4] Y.Nakatani, Y.Uesaka and N.Hayashi, “Direct Solution of Landau-Lifshitz-Gilbert Equation for Micromagnetics”, *J.J.A.P.*, vol.28, no.12, pp.2485-2507, DEC. 1989
- [5] 舘 真仁, “GPU を利用したマイクロマグネティクスシミュレーションの高速化,” 電気通信大学電気通信学部情報工学科仲谷研 卒業論文, 2009
- [6] Attila Kákay, Elmar Westphal, and Riccardo Hertel, “Speedup of FEM Micromagnetic Simulations With Graphical Processing Units,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol.46, no.6, pp. 2303-2306, JUNE. 2010
- [7] NVIDIA, “CUDA,”  
<https://www.nvidia.com/en-gb/geforce/technologies/cuda/>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [8] Unity, “コンピュートシェーダー,”  
<https://docs.unity3d.com/ja/2018.4/Manual/class-ComputeShader.html>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [9] 日本ゲーミフィケーション協会, “ゲーミフィケーション 6 要素,”  
<https://www.jgamifa.jp/6elements>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)

- [10] くら寿司, “楽しみ方ガイド,”  
<https://www.kurasushi.co.jp/fan/howto.php>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [11] “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,” <https://nike.jp/nikebiz-archive/news/other100910.html>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [12] 岸本 好弘, 三上 浩司, “ゲーミフィケーションを活用した大学教育の可能性について,” [http://www.kishimotolab.org/pdf/gu\\_essay.pdf](http://www.kishimotolab.org/pdf/gu_essay.pdf)  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [13] リクルート, “スタディサプリ,”  
<https://studysapuri.jp/>  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [14] リクルートマーケティングパートナーズ, “スタディサプリを活用した東京都渋谷区立小・中学校でのアダプティブラーニング実証実験結果のご報告,”  
[https://www.recruit-mp.co.jp/news/release/2017/0428\\_3204.html](https://www.recruit-mp.co.jp/news/release/2017/0428_3204.html)  
(最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [15] Foldit, <https://fold.it/> (最終アクセス日: 2023 年 1 月 26 日)
- [16] Firas Khatiba, Seth Cooperb, Michael D. Tykaa, Kefan Xub, Ilya Makedonb, and Zoran Popovićb and David Baker, “ Algorithm discovery by protein folding game players, ” *PNAS*, vol.108, no.47, pp.18949–18953, November 11, 2011
- [17] Samuel W. Yuan and H. Neal Bertram, “ Fast Adaptive Algorithms for Micromagnetics, ” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol.28, no.5, pp. 2031-2036, SEPTEMBER, 1992
- [18] 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,” 電気通信大学情報理工学研究科成見研 修士論文, 2022