

2023年度 卒業論文

ベナール対流のCG表現手法に関する研究

指導教員：渡辺 大地 教授

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト

学籍番号 M0A20031

石森 晃太郎

2024年2月

2023年度 卒業論文概要				
論文題目 ベナール対流のCG表現手法に関する研究				
メディア学部 学籍番号：M0A20031	氏名	石森 晃太郎	指導 教員	渡辺 大地 教授
キーワード	ベナール対流、粒子法、ナビエ・ストークス方程式、SPH法、味噌汁			
<p>ゲームにおいて水の表現は非常に重要な役割を果たしている。特に近年のオープンワールドゲームでは水の表現技術が高く評価されている作品が多い。水の描画技術に関する研究は数多くされてきたが、自然現象の表現に関する研究はあまりされていないと感じた。そこで、本研究では水に関する身近な自然現象として味噌汁のベナール対流を表現する手法を提案する。ベナール対流は流体の上面と下面に温度勾配が生じることで発生する自然現象であり、雲の発生や太陽の粒状斑などの要因になっている。ベナール対流を表現するためには非常に複雑な計算をしなければならないが、本研究の目的はゲームで使用するベナール対流を表現することであるため、単純なアルゴリズムで疑似的なベナール対流を表現することを目指す。提案手法では粒子一つ一つに力を加え、上昇・下降させることで流体の表面に模様を浮かび上がらせる。粒子が存在する領域を分割し、それぞれの場所で粒子を上昇・下降させることで疑似的な対流を発生させることができると考えた。</p> <p>提案手法を用いて流体を動かした結果、下降する粒子の数よりも上昇する粒子の数が多の場合に味噌汁の表面のような模様を表現することができた。提案手法では複雑な計算を行っておらず、粒子の加速度を変更するだけで味噌汁のベナール対流を表現することができたため、本研究の目的である「単純なアルゴリズムでベナール対流を表現する」を達成することができたと言える。</p>				

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	論文構成	2
第 2 章	ベナール対流について	3
2.1	熱の伝達方法について	3
2.2	ベナール対流とは	5
2.3	ベナール対流ができるまで	6
2.4	ベナール対流の例	7
第 3 章	関連手法	9
3.1	流体シミュレーションについて	9
	3.1.1 ナビエ・ストークス方程式について	10
3.2	SPH 法について	10
	3.2.1 密度について	11
	3.2.2 圧力項について	11
	3.2.3 粘性項について	11
	3.2.4 流体作成手法について	11
第 4 章	提案手法	14
4.1	実装方針	14
4.2	粒子について	14
4.3	提案手法	15
第 5 章	評価と分析	19
5.1	実装環境	19
5.2	実装結果	19

5.3	d の値を変更した場合	21
5.4	考察	24
第 6 章	まとめ	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目次

2.1	放射の様子	3
2.2	伝導の様子	4
2.3	対流の様子	4
2.4	ベナール対流の様子	5
2.5	熱伝導の様子	6
2.6	対流が発生する様子	7
2.7	味噌汁のベナール対流	8
3.1	粒子の境界範囲と存在範囲	12
3.2	ペナルティ法	12
3.3	使用する流体	13
4.1	使用する容器と水面	15
4.2	領域の分割	15
4.3	拡張した境界線	16
4.4	外向きの対流の様子	16
4.5	内向きの対流の様子	17
4.6	容器の中身の様子	18
4.7	対流が発生する仕組み	18
5.1	外向きのベナール対流 ($d = 0.1$)	20
5.2	内向きのベナール対流 ($d = 0.1$)	20
5.3	外向きのベナール対流 ($d = 0.2$)	21
5.4	外向きのベナール対流 ($d = 0.25$)	21
5.5	外向きのベナール対流 ($d = 0.3$)	22
5.6	外向きのベナール対流 ($d = 0.4$)	22
5.7	内向きのベナール対流 ($d = 0.2$)	23

5.8	内向きのベナール対流 ($d = 0.25$)	23
5.9	内向きのベナール対流 ($d = 0.3$)	23
5.10	内向きのベナール対流 ($d = 0.4$)	24

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

ゲームにおいて水の表現は非常に重要な役割を果たしている。物語の要所で水を背景にしたシーンが登場する「ファイナルファンタジー X」[1]では、当時としては最高峰の水の表現によって多くのプレイヤーの記憶に残る名作となった。「モンスターハンター 3rd」[2]では水中で大型モンスターと戦うことが可能となり、システム面では賛否が分かれていたものの水の表現の評価は高かった。近年人気を集めている「原神」[3]は美しいグラフィックが高く評価されている作品であり、水中探索が実装されたことで水の表現がさらに評価されるようになった。水の描画技術だけではなく水中の泡や飛沫、波などの表現も高く評価されている。水の表現は現在までに様々な研究がされたことによって飛躍的に進化し、近年のゲームではどの作品も高い水準で表現されている。しかし、水の描画技術に関する研究と比べると、自然現象の表現に関する研究は少ない。自然現象の表現に関する研究としては、雲のシミュレーション [4] や水害のシミュレーション [5] などが挙げられる。これらの自然現象をゲーム内でリアルに表現することができれば、プレイヤーのゲーム体験の向上につながる。本研究では水に関連した自然現象の中でも、「ベナール対流」を単純なアルゴリズムで表現する手法を提案する。ベナール対流は雲の発生や太陽の粒状斑の発生などに深く関係している自然現象である。本研究ではベナール対流の最も身近な例として「味噌汁」を研究題材として扱う。

ベナール対流は流体の上面と下面に温度勾配を作り出した際に生じる規則的なパターンを伴って発生する対流のことである。流体の表面には蜂の巣のような形の模様が浮かび上がる。この現象を表現するためには非常に複雑な計算をする必要があるが、提案手法では単純なアルゴリズムを用いて疑似的なベナール対流を表現することを目指した。実装結果としては、上昇・下降する粒子の数を不均一にすることで味噌汁の表面の様子を表現することができたため、研究目的を達

成ることができたと言える。

1.2 論文構成

本論文は、全 6 章にて構成する。まず、第 2 章ではベナール対流の基本情報を述べる。第 3 章では関連手法を紹介し、第 4 章で提案手法について述べる。第 5 章では実行結果と考察を述べ、第 6 章でまとめと今後の展望を述べる。

第 2 章

ベナール対流について

2.1 熱の伝達方法について

熱力学は自然現象を表現するためには避けては通れない学問である。熱力学を用いた CG 表現の関連研究としては藤澤ら [6] が行った水解現象のアニメーションや三嶋ら [7] による熱伝播を考慮した水滴の表現などが挙げられる。熱の伝達方法は、主に「放射」「伝導」「対流」の 3 種類である。

放射とは、熱源から発生した熱が電磁波として伝わる現象である。例としては太陽からの熱が伝わる様子が挙げられる。放射の特徴として、電磁波を遮る物体があるとその先には熱が伝わらないというものがある。図 2.1 は放射の様子を示す模式図である。

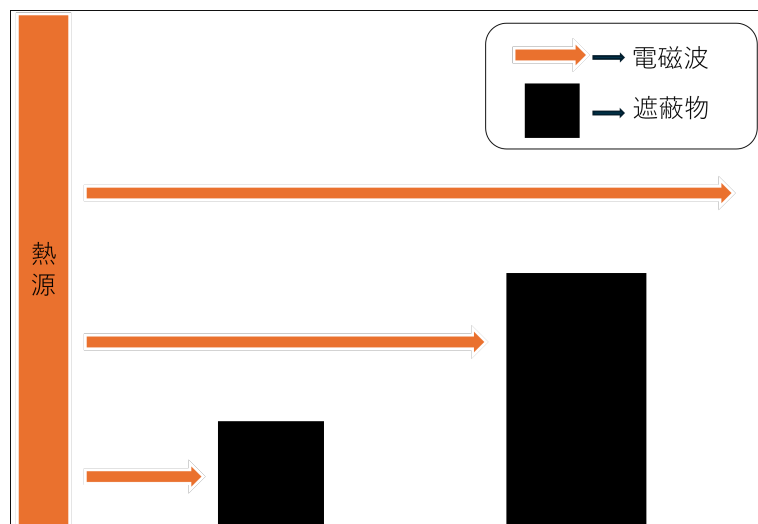


図 2.1 放射の様子

伝導とは、物と物が接触した際に接触面から熱が伝わる現象のことである。伝導において熱が伝わる方向は高温側から低温側である。例としては熱い飲み物が入ったカップに入れた金属のス

プーンが熱くなることなどが挙げられる。熱の伝わりやすさは物質によって異なり、金属が熱を伝えやすいことが知られている。図 2.2 は伝導の様子を示す模式図である。



図 2.2 伝導の様子

対流とは、空気や流体そのものが動くことで熱が伝わる現象のことである。例としては水を温めた際に徐々に全体が温まることなどが挙げられる。液体や気体の温度が上がると密度が小さくなるため上昇し、温度が下がると密度が大きくなるため下降する。そこに液体や気体の流れ込むことで循環するのである。ベナール対流はこの対流の一種である。図 2.3 は対流の様子を示す模式図である。

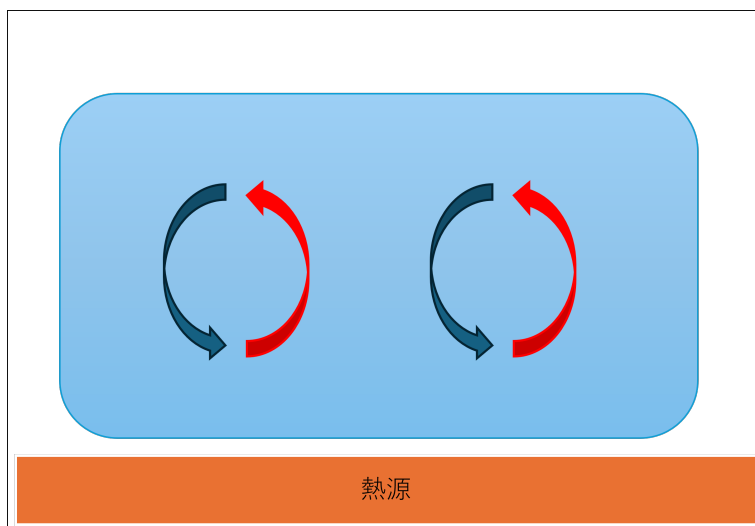


図 2.3 対流の様子

2.2 ベナール対流とは

ベナール対流とは、流体の下面を加熱、または上面を冷却することで生じる温度勾配によって発生する、規則的なパターンの対流のことである。図 2.4 はベナール対流の様子を示す模式図である。

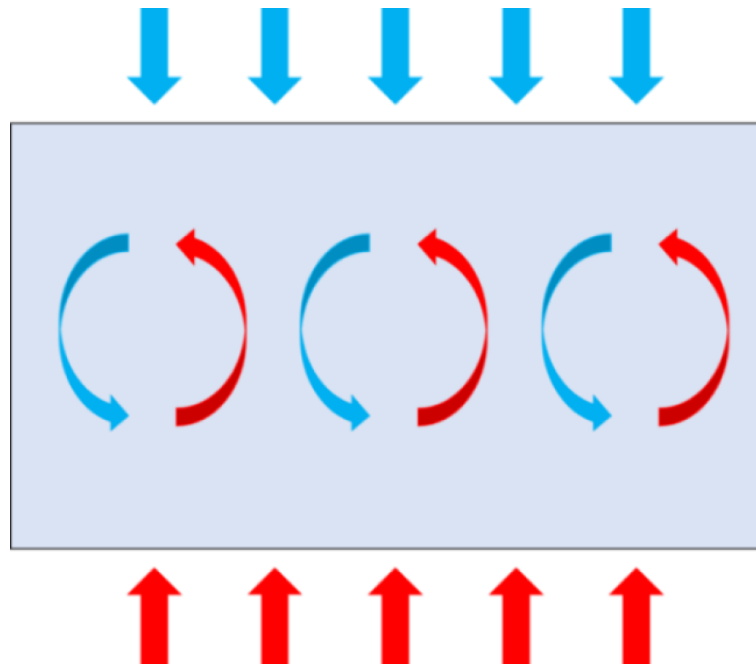


図 2.4 ベナール対流の様子

熱対流のうち、浮力の影響を強く受けたものがベナール対流と呼ばれている。この現象は、1900年にフランスの物理学者である Benard が初めて実験的な研究を行った。その後 1916年に Rayleigh によって現象の解析が行われ、その際に現象を支配する無次元数としてレイリー数が導入されたことによって研究が盛んに行われるようになった。ベナール対流と類似した現象としては、マランゴニ対流が挙げられる。マランゴニ対流とは、流体が表面張力の影響を強く受けた際に発生する熱対流のことである。表面張力は温度が高いほど小さく、温度が低いほど大きくなる。したがって、液体表面に温度差がある場合は高温側から低温側に液面が引っ張られる。マランゴニ対流は「ワインの涙」のような興味深い自然現象の要因となっているが、本研究では表面張力の影響は無視し、浮力のみを使ったベナール対流を実装する。

2.3 ベナール対流ができるまで

先述した通り、ベナール対流とは流体の上面と下面の温度勾配が大きいときに発生する自然現象のことである。流体下部が熱され、上部が冷やされた際、最初は下から上への熱伝導によって熱が運ばれる。図 2.5 は熱伝導の様子を示す模式図である。

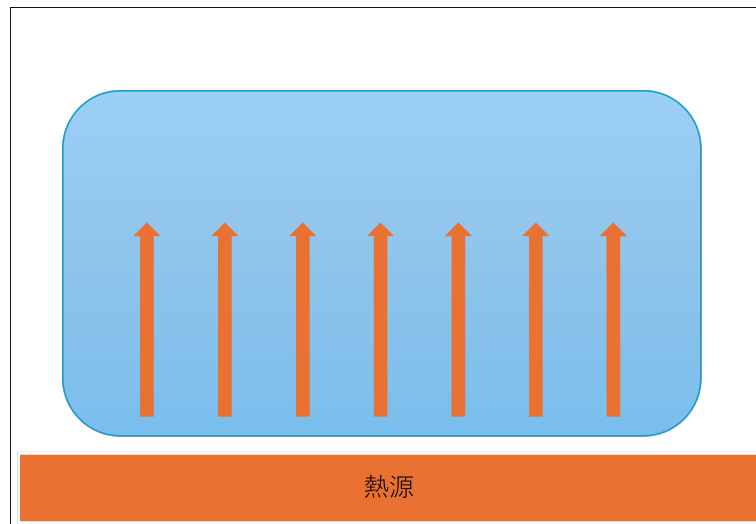


図 2.5 熱伝導の様子

そのまま加熱し続けると、下側にある流体の密度が小さくなり、浮力が生じる。その後レイリー数が一定の値を超えたところで対流が発生する。図 2.6 は対流が発生する様子を示す模式図である。

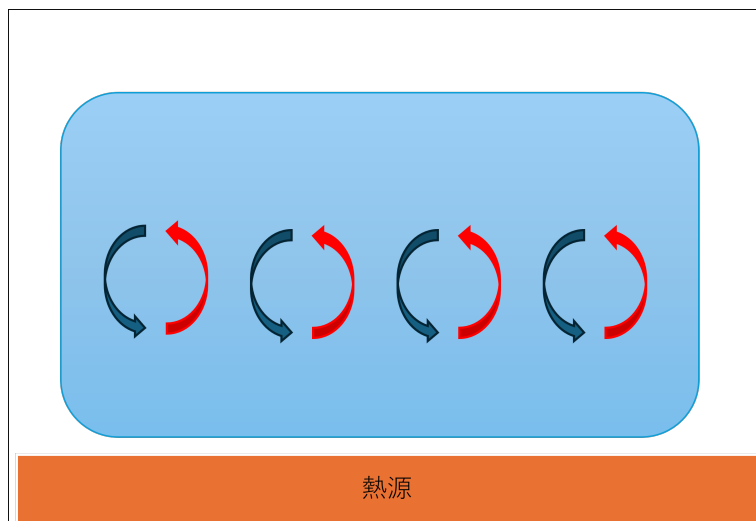


図 2.6 対流が発生する様子

その結果規則的なセル状の模様が浮かび上がるのである。

2.4 ベナール対流の例

ベナール対流による自然現象の例としては、巻積雲をはじめとする雲の発生や、太陽の粒状斑などが挙げられる。特に気象の分野においては雲の発生に関わる現象であるため、研究が盛んに行われている。ベナール対流による雲に関する研究としては、神田ら [8] による積雲の成長過程の数値的計算や、楠元ら [9] によるユーザの意図を反映した雲の生成などがある。しかし、これらの自然現象でベナール対流の様子を直接観測することは難しい。そこで、私たちの身近な例として、味噌汁の内部で発生するベナール対流に注目する。普段の食卓に並ぶ味噌汁に目を向けると、表面に楕円のような模様を観測することができる。これこそがベナール対流によるものである。熱い味噌汁を器に注いだ際、器の底は温度が高く、表面では蒸発が起こることによって温度が下がるため、温度勾配が生じる。この温度勾配によってベナール対流が発生し、味噌汁の表面に模様が浮かび上がるのである。図 2.7 は味噌汁の表面に発生する模様である。



図 2.7 味噌汁のベナール対流

第 3 章

関連手法

3.1 流体シミュレーションについて

流体シミュレーションは様々な分野に応用することができるため、多くの研究がされてきた。例としては、大場ら [10] による地形変化に伴う水のシミュレーションや水谷ら [11] による炎の形状制御、平江ら [12] による保存型浅水方程式を用いたシミュレーションなどが挙げられる。流体シミュレーションの手法としては、「格子法」「粒子法」の 2 つが主に使用されており、この 2 つの手法の大きな違いは、「計算点が動いているかどうか」という点である。格子法は対象領域を格子で細かく分割して解析する手法であり、計算点は固定である。流れの速度や圧力などの値を変化させることで、あたかも流体が動いているかのように見せる手法である。格子法における計算は、隣接するセルを参照して行う。それぞれのセルが周りのセルを参照して計算するため、全体を見ると波が移動しているように見えるのである。格子法のメリットとしては、動的にメッシュを変更することができるという点が挙げられる。任意の領域の格子を変更することができるため、細かい計算が可能になっている。しかし、物理的な正確さには欠けるというデメリットもある。

粒子法は粒子一つ一つに速度や圧力などの値を与え、実際に流体を移動させる手法である。流体自体が移動するため、計算点は常に動くという特徴がある。粒子法における計算は、互いの粒子の相互作用による圧力や速度の変化で行う。粒子法のメリットとしては、水面や飛沫の表面に適している点が挙げられる。これらの表現は格子法では計算が困難であるため、粒子法に分があるといえる。しかし、粒子法には数値的な安定感に欠けるというデメリットもある。

以上のように、格子法と粒子法は互いに得意な領域が異なるため、実装したいものに合わせて使い分ける必要がある。本研究では味噌汁の表面に発生するベナール対流を表現することを目的としているため、それに適した粒子法を用いて基盤となる流体を作成する。なお、鈴木ら [13] のような格子法と粒子法を組み合わせた手法も存在するが、本研究では使用しないものとする。

3.1.1 ナビエ・ストークス方程式について

流体の動きを表現するためには、ナビエ・ストークス方程式（以下 NS 方程式とする）と呼ばれる式を使用する。NS 方程式とは、流体の運動を記述する 2 階非線形微分方程式であり、主に流体力学で用いられる。式 (3.1) は一般的に用いられる NS 方程式である。

$$\rho \left\{ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f} \quad (3.1)$$

しかし、NS 方程式は複雑すぎるため、一般解を求めることができていないどころか、一般解が存在しているのかも分かっていない。そのため、ほとんどの場合は数値解析によって近似的に解を求める。流体シミュレーションにおける NS 方程式は、用いる手法によって形が異なる。式 (3.2) は本研究で用いる粒子法における NS 方程式である。

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla \cdot \nabla \vec{u} + \vec{g} \quad (3.2)$$

この方程式の左辺は粒子の加速度、右辺第 1 項は圧力、第 2 項は粘性力、第 3 項は重力を表している。この方程式を解くことで流体の動きを表現することができる。しかし、先述した通り NS 方程式は微分方程式であるため、コンピューターで解くことはできない。そのため、SPH 法と呼ばれる重み関数を用いた手法で近似し、解を求める。

3.2 SPH 法について

SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) とは、主に流体力学で用いられる微分方程式の数値解析手法の一つである。粒子一つ一つに影響範囲を与えることで、他の粒子との距離が近いほど大きな影響を受け、一定以上離れた粒子からは影響を受けないようにしている。SPH 法を用いた研究には、間淵ら [14] によるリアルタイム火炎シミュレーションや漆原ら [15] による仮想液体を用いた AR システムの開発などがある。SPH 法を用いるメリットとしては、並列化が容易であるという点が挙げられる。これにより、GPU を使った大量の粒子の計算が可能になっている。粒子法における NS 方程式では、密度、圧力項、粘性項の離散化を行う必要がある。そのためそれぞれの重み関数を使用して計算を行う。

3.2.1 密度について

密度の離散化をする際には、重み関数として式 (3.3) を用いる。

$$W_{poly6}(\vec{r}, h) = \frac{315}{64\pi h^9} \begin{cases} (h^2 - \|\vec{r}\|^2)^3 & (0 \leq \|r\| \leq h) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3.3)$$

3.2.2 圧力項について

圧力項の離散化をする際には、重み関数の勾配として式 (3.4) を用いる。

$$\nabla W_{spiky}(\vec{r}, h) = -\frac{45}{\pi h^6} \begin{cases} (h - \|\vec{r}\|)^2 \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|} & (0 \leq \|r\| \leq h) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3.4)$$

3.2.3 粘性項について

粘性項の離散化をする際には、重み関数のラプラシアンとして式 (3.5) を用いる。

$$\nabla^2 W_{visc}(\vec{r}, h) = \frac{45}{\pi h^6} \begin{cases} h - \|\vec{r}\| & (0 \leq \|r\| \leq h) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3.5)$$

以上の重み関数を使用することで流体の動きを表現する。

3.2.4 流体作成手法について

本研究で使用する流体は、既存の流体作成手法 [16] を基に作成する。既存手法では粒子に与えたパラメータを基に粒子の位置、速度、加速度を計算して求めている。その後前進オイラー法によって粒子の位置を更新することで流体の動きを表現している。粒子の位置を更新する前に加速度を変化させることで外力による粒子の移動を表現することができる。既存手法では粒子の位置を更新する前に加速度に重力用の値を加算するとともに、ペナルティ法を用いてそれぞれの粒子の境界との衝突判定を行っている。ペナルティ法とは、境界部分からはみ出した粒子に対して、はみ出した分だけ強い力で押し返すという手法である。既存手法では境界部分からはみ出した距離に 3000 をかけた値を加速度に加えることでペナルティ法を実現している。本研究で使用する粒子

の存在範囲は立方体の領域であり、その内部にペナルティ法による球状の境界範囲を設定している。図 3.1 は粒子の存在範囲と境界範囲を示す模式図である。

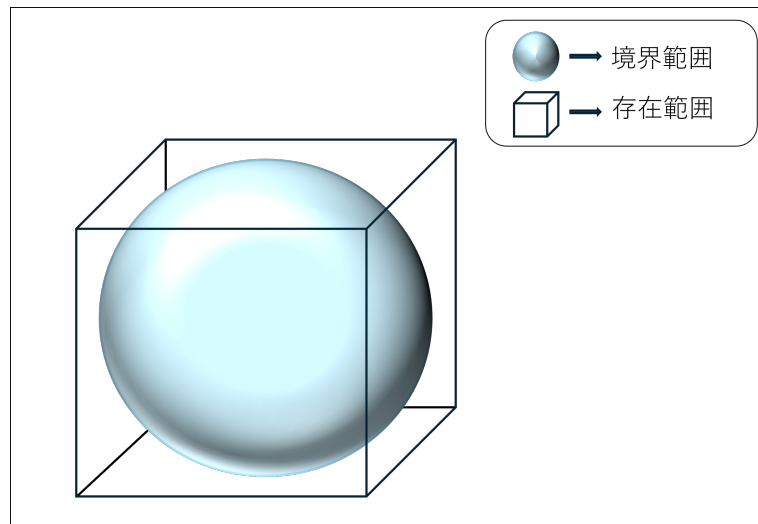


図 3.1 粒子の境界範囲と存在範囲

粒子の存在範囲の中心と粒子位置の距離を計算し、一定以上離れている場合には力を加えるという方法で流体を実装した。力の向きは境界面から球の中心方向であり、力の大きさは既存手法と同様に境界部分からはみ出した距離に 3000 をかけた値を使用する。本研究ではこの流体を基にベナール対流を表現する。図 3.2 はペナルティ法の模式図、図 3.3 は本研究で使用する流体である。

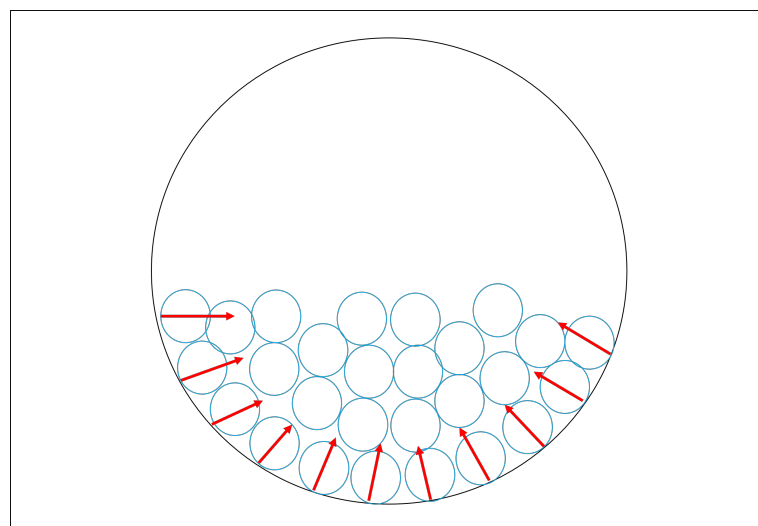


図 3.2 ペナルティ法



図 3.3 使用する流体

第 4 章

提案手法

4.1 実装方針

味噌汁におけるベナール対流を表現するためには、温度勾配によって粒子が上昇・下降を繰り返す様子を表現する必要がある。物理法則に基づいてこの現象を表現するためには竹村 [17] や黒田 [18] の研究のような複雑な計算が必要となる。しかし、本研究で提案する手法はゲームで使用することを前提としているため、物理法則に基づくベナール対流ではなくリアルタイム性を重視した疑似的なベナール対流の表現を目指す。

4.2 粒子について

本研究で使用する流体の粒子は、味噌の粒子を表現しており、この味噌粒子を動かすことでベナール対流を表現する。そのため味噌粒子とそれが溶けている水は別々に表現する。粒子の位置情報を基にジオメトリシェーダーで粒子ひとつひとつのビルボードを作成し、そこに 3D テクスチャを張り付けることで大量の粒子を表現する。3D テクスチャの α 値を下げることで半透明にし、表面を見たときに味噌汁に見えるようにした。また、水の表現に関しては厚さを限りなく薄くした半透明の円柱を使用するため、味噌粒子のみを動かすことで味噌汁を表現する。図 4.1 は使用する容器のスクリーンショットである。

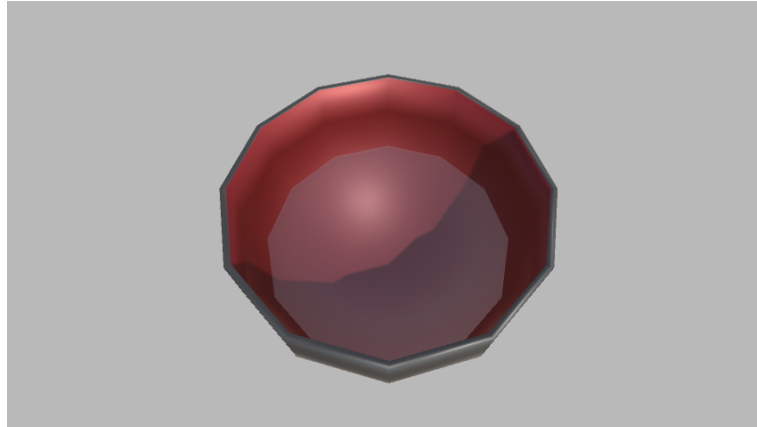


図 4.1 使用する容器と水面

4.3 提案手法

ベナール対流の表現に使用する味噌の粒子はペナルティ法によって球状の空間に存在している。まずは粒子の存在範囲を 6×6 の領域に分割する。図 4.2 は分割した領域を示す模式図である。。

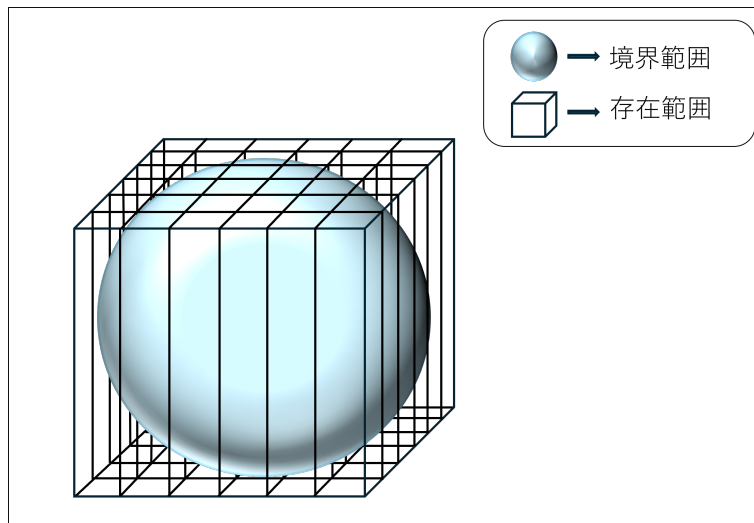


図 4.2 領域の分割

分割したそれぞれの境界線から任意の数値 d だけ離れた部分とそれ以外の部分に分割する。 d の値を変更することで表面の様子に変化が生じる。なお拡張した領域が重なった場合は全ての粒子が同じ方向してしまうため、対流が発生しない。そのため d の値は領域が重ならない範囲に限定する。図 4.3 は拡張した境界線を示す模式図である。

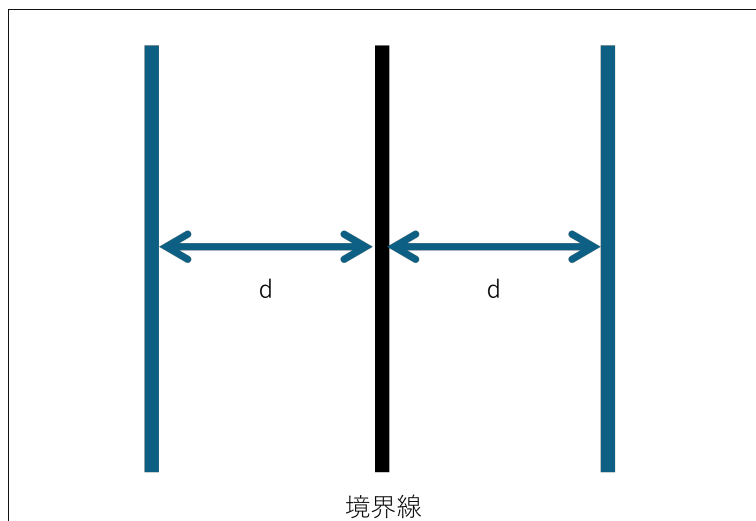


図 4.3 拡張した境界線

境界部分に存在している粒子とそれ以外に存在している粒子に加える力の向きを変えることで、疑似的な対流を生み出す。 d の値を変更すると上昇・下降する粒子の割合が変わり、粒子同士が互いに力を与えているため表面では複雑に動いているように見える。

境界部分に存在する粒子を上昇させ、それ以外の部分の粒子を下降させた場合、境界部分を中心に外向きの対流が発生する。図 4.4 は外向きの対流が発生している様子を示す模式図である。

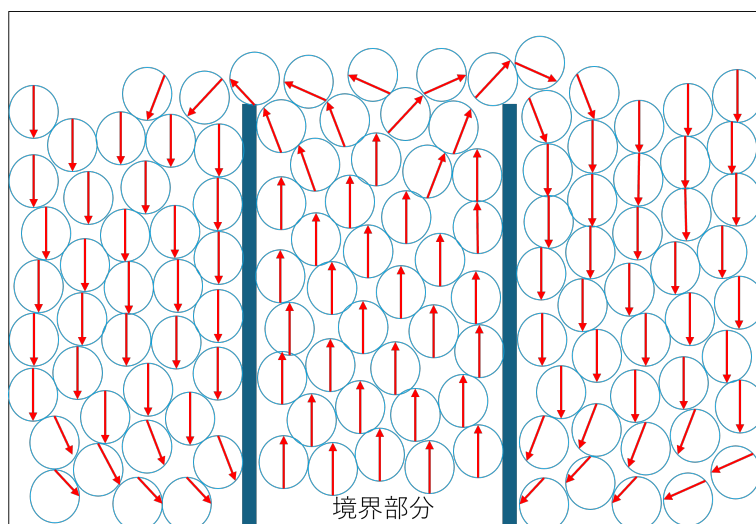


図 4.4 外向きの対流の様子

境界部分に存在する粒子を下降させ、それ以外の部分の粒子を上昇させた場合、境界部分の中

心に内向きの対流が発生する。図 4.5 は内向きの対流が発生している様子を示す模式図である。

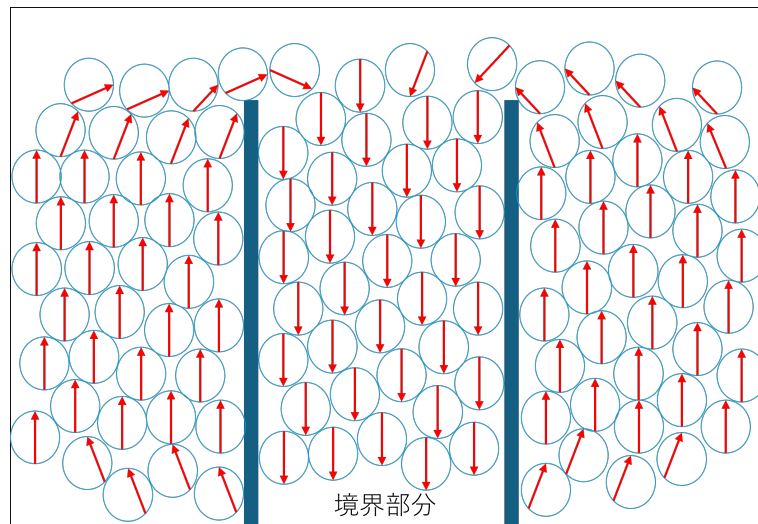


図 4.5 内向きの対流の様子

粒子の上昇、下降に関しては、NS 方程式を用いて計算した加速度に任意の値を加えることで表現する。粒子の加速度の y 成分には常に重力用の固定値として -10 を毎フレーム加算しているため、上昇させる粒子は 15 、下降させる粒子は -5 を毎フレーム加算する。結果的に上昇させる粒子は 5 、下降させる粒子は -15 を毎フレーム加算することで粒子を移動させる。また、水面よりも上にある粒子は -10 、水面から一定以上離れた粒子は 20 を毎フレーム加算する。図 4.6 は容器の中身を横から見た模式図であり、水面からの距離が 0.5 以内に全粒子が存在している。味噌粒子全体が水面付近に集まるため、少ない粒子数でも表面では密度が高く見える。

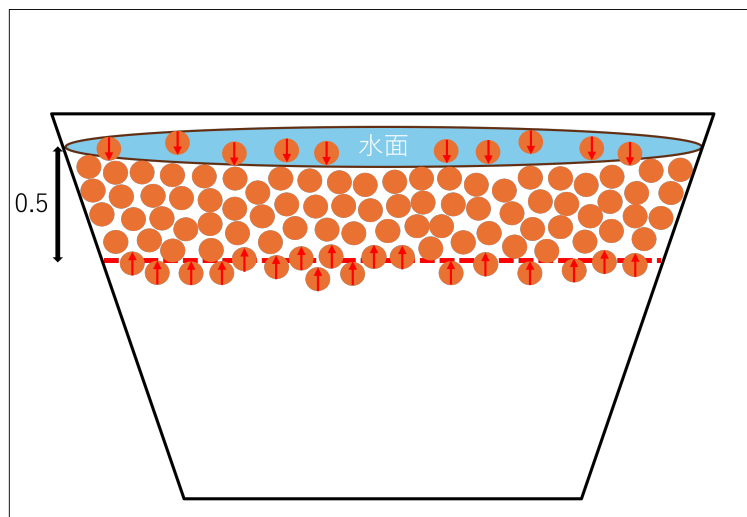


図 4.6 容器の中身の様子

また、本来は粒子の上昇・下降のみでは対流を発生させることはできないが、図 4.6 のような手法を用いることで水面・水面から 0.5 付近の粒子は他の粒子に押し出されて境界線の外に出る。これによりそれまで上昇していた粒子は下降し、下降する粒子は上昇するため対流が発生する。図 4.7 は対流が発生する仕組みを示す模式図である。

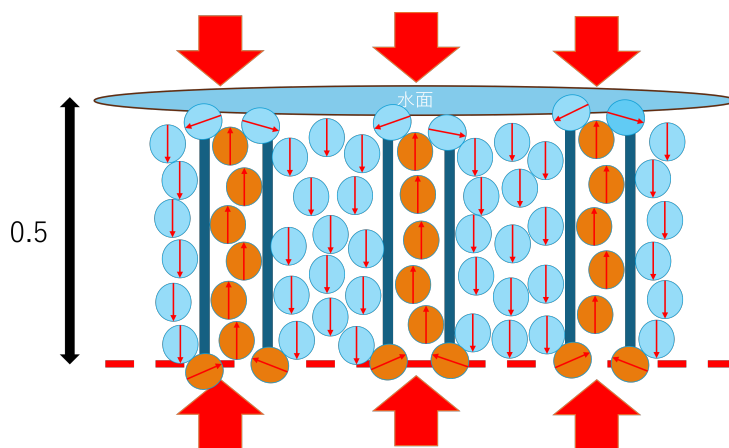


図 4.7 対流が発生する仕組み

以上のような手法を用いて味噌汁のベナール対流を表現する。

第 5 章

評価と分析

5.1 実装環境

第 4 章で述べた手法を用いて、Unity 上でベナール対流を実装した。使用した Unity のバージョンは 2020.3.27f1 である。なお、使用するのは半径 3 の球状の空間であり、境界部分を決める変数 d によって上昇・下降する粒子の割合が変わる。 d の初期値は 0.1 であるため、境界線から土 d の領域が境界部分である。実装および検証に用いた PC のスペックを表 5.1 に示す。

表 5.1 実行環境

OS	windows10
CPU	AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor
メモリー	16GB
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti

5.2 実装結果

8192 個の粒子を用いて実行した結果、実行速度は 15.2 ms であった。境界部分に存在する粒子を上昇、それ以外の部分を下降させた場合、図 5.1 のような表面が表現できた。



図 5.1 外向きのベナール対流 ($d = 0.1$)

この手法で実装した味噌汁の表面には、実際の味噌汁にはない境界部分の線がはっきりと浮かび上がっている。特に味噌粒子が少なくなっている容器の縁に近い部分は線がはっきりしてしまっている。

境界部分に存在する粒子を下降、それ以外の部分を上昇させた場合、図 5.2 のような表面が表現できた。



図 5.2 内向きのベナール対流 ($d = 0.1$)

この手法では実際の味噌汁の表面に近い模様を表現することができた。しかし、味噌汁の表面の模様が規則的に配置されているため、実際の味噌汁のような不規則な模様を表現することはできなかった。

5.3 d の値を変更した場合

境界部分の大きさを決定する d の値を変化させた結果、味噌汁の表面の様子に変化が生じた。

外向きの対流を発生させる手法の d の値を変化させた結果が図 5.3、図 5.4、図 5.5、図 5.6 である。

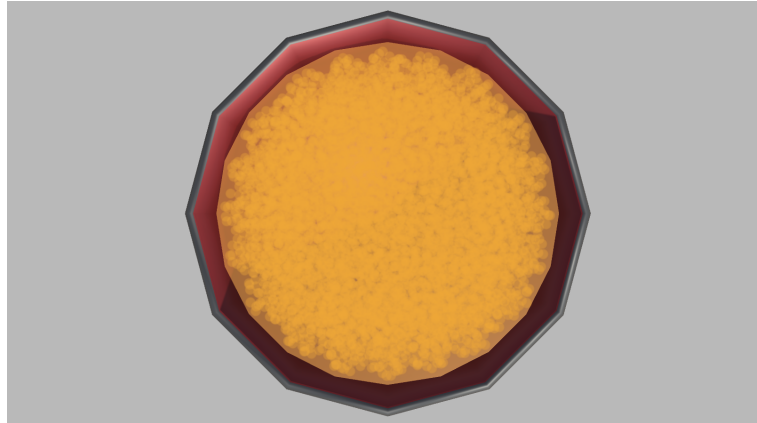


図 5.3 外向きのベナール対流 ($d = 0.2$)



図 5.4 外向きのベナール対流 ($d = 0.25$)



図 5.5 外向きのベナール対流 ($d = 0.3$)



図 5.6 外向きのベナール対流 ($d = 0.4$)

d の値を大きくするにつれて内向きの対流を発生させた際の表面の様子に近づき、 d を 0.3 にした際には内向きの対流とほとんど同様の表面が表現できた。なお、 d を 0.4 にした際には表面に模様が発生しなかった。

内向きの対流を発生させる手法の d の値を変化させた結果が図 5.7、図 5.8、図 5.9、図 5.10 である。



図 5.7 内向きのベナール対流 ($d = 0.2$)



図 5.8 内向きのベナール対流 ($d = 0.25$)

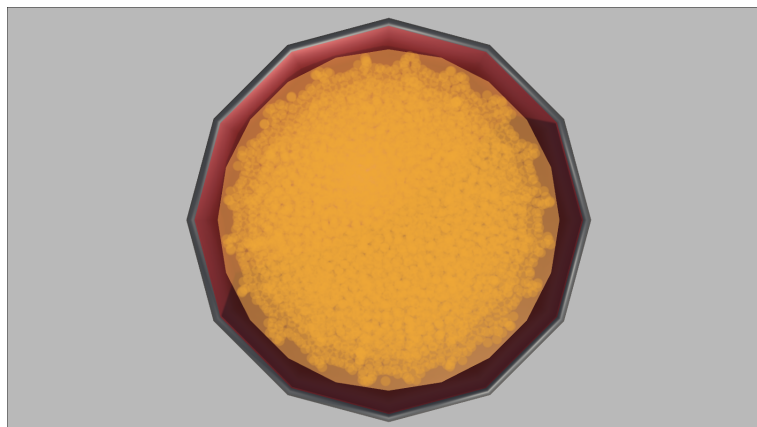


図 5.9 内向きのベナール対流 ($d = 0.3$)

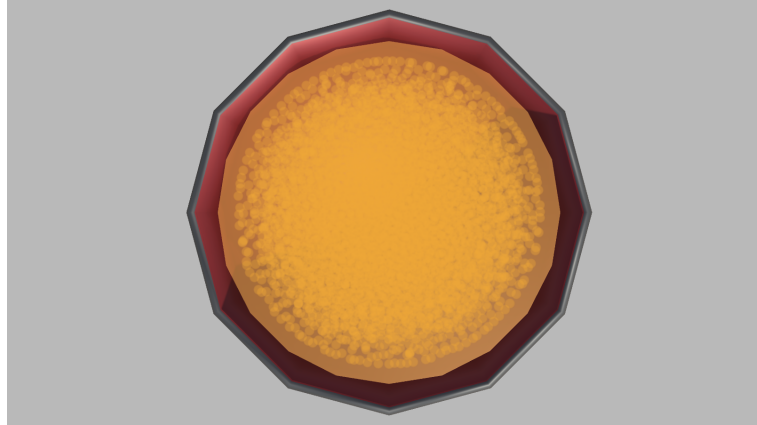


図 5.10 内向きのベナール対流 ($d = 0.4$)

外向きの対流と同様に、 d の値を大きくするにつれて外向きの対流を発生させた際の表面の様子に近づき、 d を 0.3 にした際には外向きの対流とほとんど同様の表面が表現できた。また、内向きの対流でも d を 0.4 にした際には表面に模様は発生しなかった。

5.4 考察

外向きの対流の d 値を増加させ、境界部分の範囲を広げたことで上昇する粒子が増え、下降する粒子が減ったことで味噌汁の表面の模様を表現することができた。逆にもともときれいな模様を表現できていた内向きの対流の d 値を増加させ、上昇する粒子の数を減らして下降する粒子の数を増やした結果、境界線がはっきり見える模様になってしまった。以上の結果から、上昇する粒子の数を下降する粒子の数よりも多くすることで味噌汁のベナール対流を表現することができることがわかった。本手法では粒子を上昇、下降させることでベナール対流を表現しており、上昇する粒子が作る模様のほうがはっきりと見えるため、境界部分が狭い状態で粒子を上昇させると人為的に引いた境界線が強調されてしまうことが要因だと考える。

第 6 章

まとめ

ベナール対流は巻積雲の発生や太陽の粒状斑などの様々な自然現象の要因となっている。ベナール対流に関する研究としては、主に雲の表現に関するものが多かった。本研究ではベナール対流の様子を観察しやすい身近な例として、味噌汁の表面にできる模様に着目した。ベナール対流を表現するためには非常に複雑な計算をする必要があるが、本研究はゲームで使用することを前提としているため、単純なアルゴリズムを用いて疑似的なベナール対流を表現することを目指した。本手法ではナビエ・ストークス方程式を用いて作成した流体の粒子一つ一つに力を加え、温度勾配によって対流が発生する様子を再現した。粒子の上昇・下降を制御することで疑似的なベナール対流を表現したため、味噌汁の内部の様子までは表現することはできなかったが、表面に関しては実際の味噌汁の表面に生じる模様を表現することができた。本手法を用いた結果、境界線を拡張する d の値を 0.1 にした内向きのベナール対流が最も味噌汁の表面を表現するのに適していることがわかった。また、提案手法では複雑な計算を行わずにベナール対流を表現できたため、本研究の目的である「単純なアルゴリズムでベナール対流を表現する」を達成できたと言える。

今後の展望として、本手法では流体の表面に規則的な模様ができるだけであったため、実際の味噌汁のような不規則で複雑な模様を表現できるよう改良したいと考えている。本手法は粒子の上昇・下降の割合を変更することで表面にできる模様が変化することがわかったため、分割した領域ごとに割合を変更することで実現できると考えた。また、本研究で使った流体は粒子数が約 8000 個の時点で頻繁にアプリケーションが落ちてしまったため、流体の生成手法の見直しが必要だと考えた。SPH 法の高速化の手法としては、高田ら [19] によるベルリスト法を併用したものや仲田ら [20] による ShallowWater モデルを併用したものなどがあるため、これらを参考に改良したい。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、多くのご指導やアドバイスをしてくださった方々に感謝しています。渡辺先生には、1年次のフレッシューズゼミから始まり、4年間で本当に多くのことを学ばせていただきました。渡辺先生の授業の中で学んだことはもちろん、個別に乗っていただいた際にも親身になってアドバイスをくださったおかげで大きく成長できました。特に自分が今後の進路で悩んでいる際にいただいたアドバイスのおかげで悔いのない進路選択をすることができました。本当に感謝しています。

阿部先生には卒研が始まって以来、多くのアドバイスをいただきました。自分では思いつかないことや見落としていた点を的確に指摘していただき、視野が広がりました。特に卒論提出や最終発表間際には何度も添削をしていただき、そのおかげで論文を完成させることができました。阿部先生からのアドバイスがなければ自分の論文は完成しなかったと思います。本当にありがとうございました。

研究室の同期たちとは直接顔を合わせる機会は少なかったですが、中間発表や紅華祭の展示などの際には様々なアドバイスをもらいました。同期にももらったアドバイスのおかげで新たな発見をすることもできました。ありがとうございました。

最後になりますが、コロナ禍での入学となった自分たちを支えてくださった大学職員の皆様、家族、友人のおかげで充実した大学生活を送ることができました。本当にありがとうございました。味噌汁を見たときに自分のことを思い出していただけると嬉しいです。

参考文献

- [1] スクウェア・エニックス. Final fantasy X. <https://www.jp.square-enix.com/game/detail/ff10/>. 参照: 2023.12.20.
- [2] CAPCOM. モンスターハンター. <https://www.monsterhunter.com/ja/>. 参照: 2023.12.20.
- [3] HOYOVERSE. 原神. <https://genshin.hoyoverse.com/ja/>. 参照: 2023.12.20.
- [4] 宮崎玲, 土橋宣典, 西田友是. 上昇気流・ベナール対流に基づく雲のセルダイナミクスシミュレーション. 情報処理学会第 62 回全国大会, pp. 177–178, 2001.
- [5] 廣川雄一, 西川憲明, 山田武志, 印南潤二, 浅野俊幸. 浸水シミュレーション予測による浸水徒歩距離の検討. 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 10, pp. 1672–1682, 2019.
- [6] 藤澤誠, 三浦憲二郎. 熱力学に基づく水解現象のアニメーション. 情報処理学会論文誌, Vol. 47, No. 8, pp. 2746–2753, 2006.
- [7] 三嶋道弘, 川崎洋. 物体表面の熱伝播を考慮した時間経過により変化するテクスチャ合成手法. 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 209, No. 7, pp. 1–8, 2017.
- [8] 神田学, 日野幹雄. 相変化が熱対流のマーキングに及ぼす影響 (積雲の成長過程). 水工学論文集, Vol. 36, pp. 501–506, 1992.
- [9] 楠元克敏, 土橋宣典, 山本強. 流体解析に基づくユーザの意図を反映したセル状の雲の生成法. 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 7, No. 3, pp. 223–224, 2008.
- [10] 大場誉幸, 佐藤周平, 土橋宣典. 地形の変化に伴う水シミュレーションの変形に関する考察. 研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学, Vol. 184, No. 9, pp. 1–5, 2021.
- [11] 水谷圭佑, 佐藤周平, 土橋宣典, 山本強. 流体シミュレーションによる炎の形状制御. 研究報告グラフィックスと CAD, Vol. 155, No. 8, pp. 1–3, 2014.
- [12] 平江陽香, 森島茂生, 安東遼一. 保存型浅水方程式を用いた流体シミュレーションの検討. 第 85 回全国大会講演論文集, No. 1, pp. 945–946, 2023.
- [13] 鈴木拓郎, 堀田紀文. 粒子法と格子法を結合した土石流シミュレーション. 砂防学会誌,

Vol. 71, No. 2, pp. 13–21, 2018.

- [14] 間淵聡, 藤代一成, 大野義夫. SPH ベースリアルタイム火炎シミュレーション. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 10, pp. 2965–2972, 2011.
- [15] 漆原航平, 高井昌彰, 飯田勝吉, 高井那美. SPH 法を用いた流体シミュレーションによる仮想液体 AR システムの開発. 研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学, Vol. 184, No. 8, pp. 1–5, 2021.
- [16] IndieVisualLab. *UnityGraphicsProgramming*. IndieVisualLab, 2017.
- [17] 竹村和人. 2次元ベナール・レイリー型対流の数値シミュレーション. 学部卒業論文, 神戸大学理学部地球惑星科学科, 2008.
- [18] 黒田美紀. ベナール・レイリー型対流の線形論に関する考察. 学部卒業論文, 神戸大学理学部地球惑星科学科, 2010.
- [19] 高田貴正, 新田知生, 大野和彦. SPH 法による流体解析の GPU 上での高速化. ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム論文集, Vol. 2017, pp. 26–35, 2017.
- [20] 仲田拓也, 藤澤誠, 三河正彦. SPH 法と shallow water モデルによる高速な流体シミュレーション. 研究報告グラフィックスと CAD, Vol. 158, No. 1, pp. 1–7, 2015.