

博士学位論文

非周期的空間充填と XPBD を用いた弾性凝集体の  
プロセスモデル

西暦 2023 年 1 月

甘 暁 博

## 目次

第1章：序論 .....	- 3 -
1.1 本研究の背景と目的 .....	- 3 -
1.2 本論文の構成 .....	- 5 -
第2章：関連研究 .....	- 6 -
2.1 食品のCG, XPBD, プロシージャルモデリング .....	- 6 -
2.2 米の観察と構造 .....	- 9 -
2.3 炊飯の過程 .....	- 13 -
2.4 空間充填 .....	- 15 -
第3章：提案手法の概要 .....	- 16 -
3.1 水分量を考慮した炊き立てご飯のプロシージャルアニメーション .....	- 18 -
3.1.1 米粒のプロシージャルモデル化 .....	- 19 -
3.1.2 水分率を考慮したプロシージャルシェーダー .....	- 24 -
3.2 構成オブジェクトの空間充填 .....	- 26 -
3.2.1 フルシミュレーションで利用するシンプルな空間充填 .....	- 26 -
3.2.2 非周期的空間充填法 .....	- 27 -
3.3 XPBDによる凝集体シミュレーション .....	- 34 -
第4章：実験結果 .....	- 36 -
第5章：応用例・イクラ .....	- 44 -
第6章：まとめと今後の課題 .....	- 49 -
謝辞 .....	- 51 -
参考文献 .....	- 52 -
発表論文 .....	- 55 -

# 第 1 章：序論

## 1.1 本研究の背景と目的

ゲームや映画などのデジタルコンテンツの制作において、石積みや山積みのような非周期的な多数の物体が積みあがった状態をモデル化する必要がある場合が存在する。このような場合、様々な手法が提案されている。例えば、ノイズを利用したテクスチャリング関数や変位マッピング技術 (Displacement Mapping) を用いたテクスチャ生成により、非周期的な繰り返しを持つオブジェクトの見た目を生成する手法がある。しかしながら、これらの手法は基本的に 2 次元のテクスチャを生成する技術であるがゆえに、米の山や果物の山のような 3 次元の凝集体を生成することはできない。また、手作業によるモデリングを行うことも不可能ではないが、どうしても誰かが丁寧に積み上げたような不自然さが出てしまう。

3次元の凝集体を生成する場合、既存の手法の中で最もリアルであるが最も計算コストが高いと考えられるのが、物理シミュレーションによる凝集体生成である。ユーザが指定した形状 (例えば茶碗などの器のモデル) と凝集体を生成する要素 (例えば米粒のモデル) を入力として、多数の要素を重力などの外力によって器に落下させ、安定状態に達するまで配置計算を繰り返し行う。しかしながら、安定状態に達するまでには膨大な計算コストを必要とし、さらには振動現象による不安定状態が永遠に続くような場合もある。

そこで、外力による運動シミュレーション部分を必要最小限に止めた上で、凝集体を生成するための位置ベースによる配置計算を行うことによって、計算コストを削減しながらリアルな凝集体を生成する手法を開発することを本論文の目的とし、炊きたてのご飯やイクラなどの弾性力を伴った食材を表現対象として、アーティストの手作業に頼らず、モデリングからシェーディングまでを含めたリアルな弾性凝集体を手続き的に生成する手法を提案する。

はじめに、凝集体を生成するために Sakurai らの手法[1]に基づき、非周期的空間充填法を用いて凝集体の構成要素オブジェクト (米粒、イクラなど) を配置する。その後、Extended Position Based Dynamics (XPBD) [2]を用いて、物体の摩擦力や弾力性を考慮した再配置計算を行う。

凝集体の構成要素としての個々の物体のモデリングに関しては、低解像度モデル

をベースとして、パラメータを使い分けることで様々な形状を生成できるプロシージャルモデリング手法を提案する。このモデリング手法の詳細は表現する物体によって異なるが、手続き的な処理によって様々な形状を生成できる汎用性のある手法である。例えば米の場合、米粒の電子顕微鏡画像を参照して生成した低解像度のポリゴンモデルをベースモデルとして、ベースモデルの表面に粒子を充填してボリュームデータを作成し、レベルセット法を用いて表面再構築処理を行う[3]。これにより、多孔質構造を考慮した様々な形状の米粒モデルを生成することが可能となる。

シェーディングに関しては、水分量を考慮した曲率依存反射関数 (Curvature-Dependent Reflectance Function : CDRF) [4]を用いた Sub-Surface Scattering (SSS) [5]プロシージャルシェーダーを提案する。

本提案手法は、長時間の動力学ベースの物理シミュレーションを行うことなく、空間充填と XPBD を用いた位置ベースのシミュレーションにより、凝集体構成要素個々の物体形状をプロシージャルにモデリングし、弾性体の凝集体を生成する数学的アプローチを提供する。具体的には、炊きたてのご飯やおにぎり、寿司のシャリ、および茶碗に盛られた大量の米粒、さらにはご飯の上に盛られたイクラや夏の風物詩であるかき氷などを表現対象として、各種エンターテインメントコンテンツやレストランでのメニューサムネイル画像、およびメニュー作成プロセスなどに利用できる手法を提供する。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章は序論である。研究の背景と目的について述べる。デジタルコンテンツの制作において、石積みや山積みのような非周期的な物体を生成するため、物理シミュレーションによる凝集体生成が最もリアルだが、計算コストが高い。本論文は、XPBDを用いた位置ベースによる配置計算によって計算コストを削減し、細かい柔らかいものの弾性凝集体を手続き的に生成する手法を提案する。

第2章では、関連研究について述べる。食品の3Dモデル化の既存手法と、リアルな凝集体を生成するための既存研究に関して述べる。また高速作成するために使用した空間充填の既存研究に関して述べる。

第3章では、本論文で提案する手法の概要と筆者による第一フェーズの研究について述べる。第一フェーズの研究で開発した炊き立てご飯を表現対象とする研究を紹介する。そこでは、XPBDによって凝集体シミュレーションを行うアルゴリズムに関して述べる。リアルな凝集体を生成するために提案するアルゴリズムの第二フェーズ部分である。凝集体を生成するために使用した非周期的空間充填法について述べる。そして第5章ではそれを基にした汎用化手法（本研究の第二フェーズ）に関して説明する。

第4章では、日本料理の米をプロシージャルに制作する手法を提案したフルシミュレーションの研究により、非周期的空間充填のステップを追加した場合の結果を比較し、米粒の多いご飯のフォトリアルな描画が可能であることが示された。しかし、計算時間が長く、シミュレーションの結果を得るためには大量のメモリが必要であることが問題点である。図により、提案手法を使用した例が示されている。

第5章では、これまでに述べたアルゴリズムによってシミュレーションされた応用例について述べる。

第6章では、本論文を総括し、今後に残された課題について述べる。

## 第 2 章：関連研究

### 2.1 食品の CG, XPBD, プロシージャルモデリング

Schwartz らは、ドーム状の構造物の周囲に 151 台のカメラを配置し、ガントリークレーンに 8 台のプロジェクターを搭載した装置を構築し、食品の写真測量によるモデリング方法を提案した[6]。151 枚の画像を同時に撮影することで、対象物を動かさずに複雑な形状を撮影し、高解像度の点群データを得ることを可能とした。反射率取得では、カメラの内蔵フラッシュを光源として順次発光させ、すべてのカメラで同時に HDR 画像を取得する。取得した形状に画像を投影し、任意の方向の反射率を合成することで、双方向のテクスチャ関数を推定することができる。しかしながら、大規模な撮影装置を必要とするため、誰でも簡単に再現できる手法ではない。

ピクサー・アニメーション・スタジオの研究[7-9]では、料理の Computer Graphics (CG) をより自然かつ正確に再現するために、弾性体シミュレーションと剛体シミュレーションの両方を用いて体積保存則を守りながら粒状体を再現し、SSS シェーダでシェーディングを行っている。しかしながら、再現された料理の CG は、ポリゴンやパーティクルを大幅に削減した解像度の低いモデルデータを使用した上でテクスチャマッピングによって表現力を上げようとしたものであり、さらには実施した弾性体・剛体シミュレーションも技術的に新規性があるものではない。また、SSS を考慮したシェーダは、本論文で提案する水分量を考慮したものではない。

食品用のシェーダを構築する場合、例えばブドウのように皮から実まで異なる質感を持つ半透明材料では、光学パラメータを正確に設定することが難しい。Yang らは、単一の入力写真から異種半透明材料用の逆レンダリングアプローチを提案している[10]。特定の異種透光性材料の物体の単一画像が与えられると、Yang らのアプローチはフラクタルブラウン運動を組み合わせた 3 次元シンプレックスノイズを用いて材料分布を初期化し、ヒストグラムマッチング法を用いてノイズのカラーパターンを設定する。カラーパターンをマッチングさせたノイズの値に基づいて、光学パラメータが一樣でないボリュームデータを初期化し、モンテカルロ光線追跡法を用いて特定の照明条件下でレンダリングする。ここでは、レンダリング結果と入力写真との差が最小になるように、光学パラメータを近似する反復処理を行う。その結果、最適な異種光学系パラメータを持つボリュームデータが得られ、異なる照明

条件下で任意の形状モデルのレンダリングに利用することができる。しかしながら、本論文で再現する「炊きたてご飯」は不均質な半透明材料ではないため、Yang らのアプローチのような計算量の多い方法の採用は適していない。

CG における動力学シミュレーションには、力による運動力学の物理シミュレーションによる解法が一般的である。内力、および外力が蓄積され、ニュートンの運動の第二法則に基づいて加速度が計算される。次に時間積分法を用いて速度を更新し、最終的にオブジェクトの位置を更新するというものである。これに対し、Matthias らは動力学モデルによるシミュレーションではなく、位置ベースのシミュレーションを行うことで、速度の計算を回避する手法 (Position Based Dynamics: PBD) を提案している[11]。PBD 手法では、シミュレーション中にオブジェクトを直接操作できるため、衝突やアタッチメントの制約が大幅に簡略化され、アニメーションシーンを直接かつ即座に制御することが可能になる。しかし、PBD の挙動はシミュレーションのタイムステップと反復回数に依存することが知られている[12]。そこで、Miles らは、弾性ポテンシャルエネルギーを定義する制約を導入することで、反復回数と時間ステップに依存する剛性の問題に対処する拡張 PBD (XPBD) 法を提案した[12]。位置ベースの手法は、高速かつ安定的であるため、CG の分野では広く普及している。位置ベースの手法は高速で安定した制御が可能であるため、インタラクティブな環境での使用に適している。位置ベースの手法は一般的に動力学シミュレーション手法ほど正確ではないが、視覚的な妥当性を提供する。そのため、これらの手法の主な応用分野はバーチャルリアリティ、コンピュータゲーム、および映画の特殊効果など幅広いエンターテインメントコンテンツである。

プロシージャルモデリングとは、コンピュータグラフィックスにおいて、ルールセットから 3D モデルやテクスチャを作成する技術の総称である[13]。L-Systems, フラクタル, ジェネレーティブモデリングは、シーンを生成するためのアルゴリズムを適用するためプロシージャルモデリングの技術である[14]。ルールセットはアルゴリズムに組み込まれる場合、パラメータによって設定可能としている場合、およびルールセットが評価エンジンから分離されている場合がある。出力は手続き型コンテンツと呼ばれ、ユーザが手動で編集することができる。プロシージャルモデリングは多くの場合、データベース自動拡張を示し、より少ないルール数から大きなシーンを生成することができる。採用されたアルゴリズムが毎回同じ出力を生成する

場合、その出力を保存する必要はない。多くの場合、同じランダムシードでアルゴリズムをスタートさせれば十分である。

コンピュータ上のすべてのモデリング技術は、ある時点でデータを管理・保存するアルゴリズムを必要とするが、プロシージャルモデリングはユーザ入力によってモデルを編集するのではなく、ルールセットからモデルを作成することに重点を置いている。一般的な 3D モデラーで 3D モデルを作成するのが困難な場合や、より専門的なツールが必要な場合に、プロシージャルに基づいたモデリングが適用されることが多い。都市[13]や惑星[14]、建物[15]、および植物[16]などがその例である。

米とは、稲の果実である籾から外皮を取り除いた粒状の穀物である。日本を含む東アジア、東南アジア、および南アジアでは一般的に主食として食されている。主にインディカ米、ジャポニカ米、香り米、およびもち米の 4 種類がある[17]。それぞれの米には次のような特徴がある。ジャポニカ米では形状は円粒で加熱時の粘りが大きい。日本はほぼジャポニカ米を生産している。インディカ米では長粒で加熱時の粘りは小さい。香り米では強い香りを持つ品種であり、主に東南アジアが生産している。もち米は加熱時に強い粘性を生じるという特性を持つ。本論文では、日本産の米を対象に研究を行っている。特に説明がない場合、米の種類はジャポニカである。

## 2.2 米の観察と構造

米粒をモデリングする際、炊き立て米飯の粘弾性などを考慮しなければアニメーション化は不可能であるため、米粒の物理的構造を理解することは重要である。

富田らは、走査型電子顕微鏡（SEM）を利用して米飯断面の観察を行った[18]。この実験では、いくつかの米のサンプルを用意し、それらを水につけて浸漬する。その後、炊き終わったご飯を急速凍結して、真空冷凍乾燥し、SEMで内部構造を観察することで、浸漬時間がサンプルごとに異なる場合でも、米の内部構造を調べる実験となる。

図 2.2.1 において、表層部は緻密な構造でありながら内部は多孔質構造で構成されることが明らかとなった。浸漬時間 0 分においては、米胚乳細胞のサイズは  $50\sim 100\mu\text{m}$  であり、アミロプラスト構造は  $5\sim 10\mu\text{m}$  の粒子が多数存在していた。アミロプラスト構造は、デンプン粒を含む細胞小器官であり、細胞内に存在する。一方、浸漬時間 120 分においては、アミロプラスト構造は観察されず、代わりに多孔質構造が大部分で確認された。多孔質構造は、均一なサイズの孔を有することが特徴であった。また、多孔質構造の孔の大きさ（直径）は、浸漬時間に応じて変化することが明らかとなった。具体的には、浸漬時間 0 分においては、孔の大きさは  $0.5\mu\text{m}$  以下であり、20 分後には  $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 、60 分後には  $1\sim 2\mu\text{m}$ 、120 分後には  $1\sim 5\mu\text{m}$  と増大したことが観察された。断面中心部においては、浸漬時間 0 分においては胚乳細胞の境界が明瞭であり、20 分と 60 分でも胚乳細胞が確認できたことが明らかとなった。

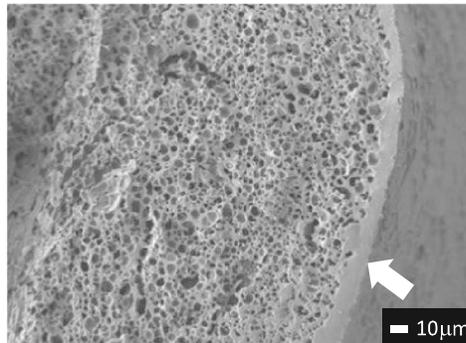


図 2. 2. 1 10°C 浸漬 120 分の米飯の断面表層部観察像（×500）

その結果、米飯の表層部は緻密層であり、内部は多孔質構造であることが明らかとなった。また、図 2.2.2 に示したように、10°C 浸漬後の米の吸水率について調査した結果、浸漬後 20 分までは有意に吸水量が増加し、以降はわずかに増加する傾向が観察された。吸水時間の短い順に、0 分では吸水不足、20 分では急速吸水、60 分では十分に吸水、120 分では平衡状態という 4 つの吸水状態が確認された。さらに、各浸漬条件での炊飯後の含水

率についても調査を行い,その結果を表1にまとめた.

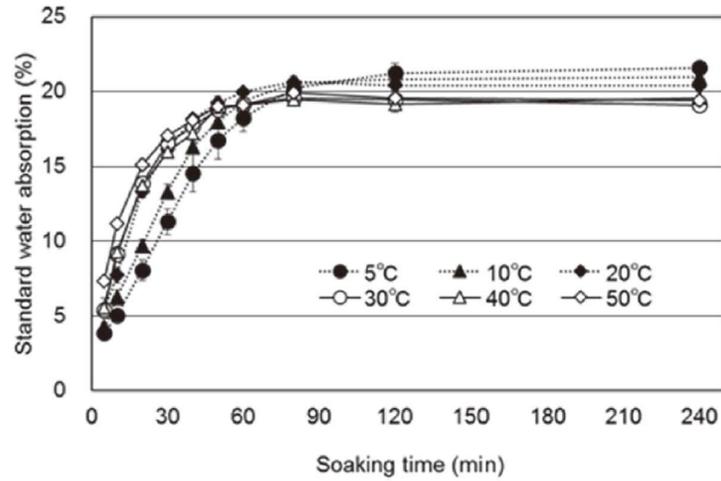


図2. 2. 2 浸漬時間（分）を変えた場合の米の標準吸水率 [18]

多孔質構造の広がりは, 0分は表面から約100  $\mu\text{m}$ , 20分と60分は200  $\mu\text{m}$  以上, 120分では中心まで広がっていた. また, 孔の平均面積は浸漬時間とともに増大した (表1).

表1. 多孔質構造の孔の平均面積

測定項目	浸 漬 時 間 (分)			
	0	20	60	120
平均面積 ( $\mu\text{m}^2$ )	0.02	0.06	1.31	4.72

次は破断強度試験で測定したデータである。

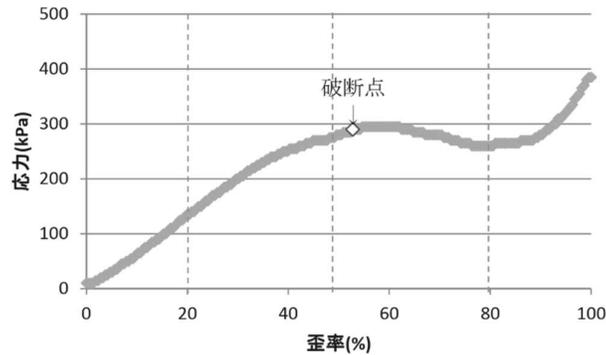


図 2. 2. 3 破断強度試験で得られる応力歪曲線の例. 白抜きの点が破断点

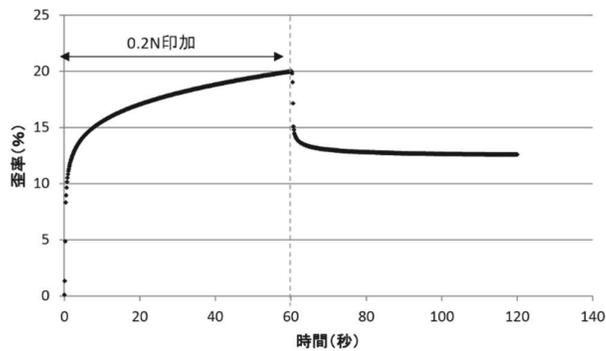
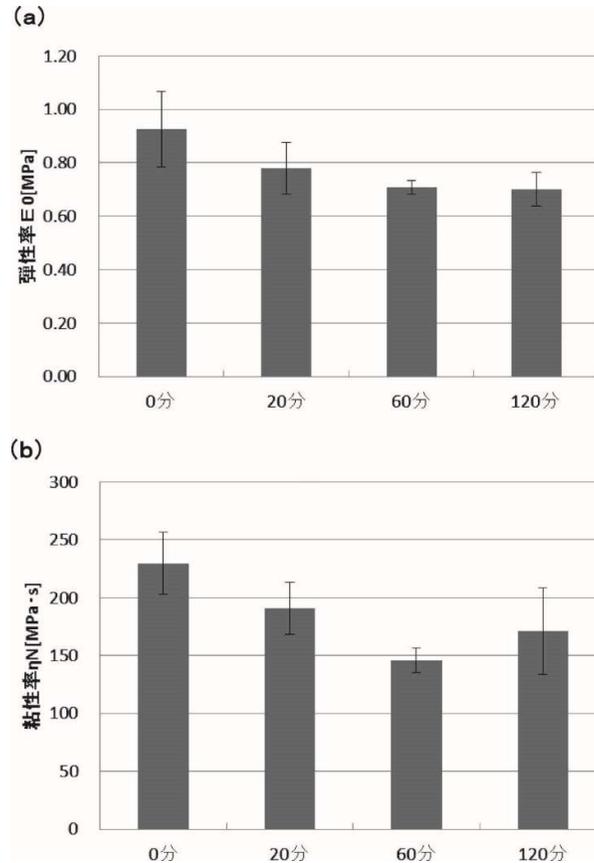


図 2. 2. 4 クリープ試験で得られる歪時間曲線の例 (10 粒平均)

一粒法[19]による破断強度試験では、図 2.2.3 のような応力歪曲線を得ることができる。歪率がそれぞれ 20%、破断点 (50%前後)、80%の破断エネルギー (積算応力×接触面積) が表 4 である。歪率 20%は緻密層を含めた表層付近を、歪率 80%は表層破断後の米飯内部の評価を想定している。どの歪率も 0 分に比べて、浸漬することで破断エネルギーは減少した。分厚い緻密層が観察された 120 分では、20 分や 60 分よりも破断エネルギーが増加し、特に破断点では 0 分とほぼ同じ値になった。次に、クリープ試験では図 2.2.4 のような変位曲線を得ることができ、0.2N 印加下での変位の時間変化及び印加終了後の変位の時間変化から得られた値を図 2.2.5 (a), (b) にそれぞれ示す。図 2.2.3 のグラフから、0.2N 印加時の歪率は約 25%であり、破断荷重前の弾性変形領域内での変化であるため、米飯表層の弾性率や粘性率を評価して

いる。弾性率は浸漬時間とともに減少し、粘性率も破断と同様に浸漬 60 分までは減少した。



弾性率と粘性率は、0. 2N 印加時（破断荷重前の弾性変形領域）及び除圧後の変位の時間変化から算出

図 2. 2. 5 クリープ試験によって得られた (a) 弾性率, (b) 粘性率 (10 粒平均,  $n=4$ )

### 2.3 炊飯の過程

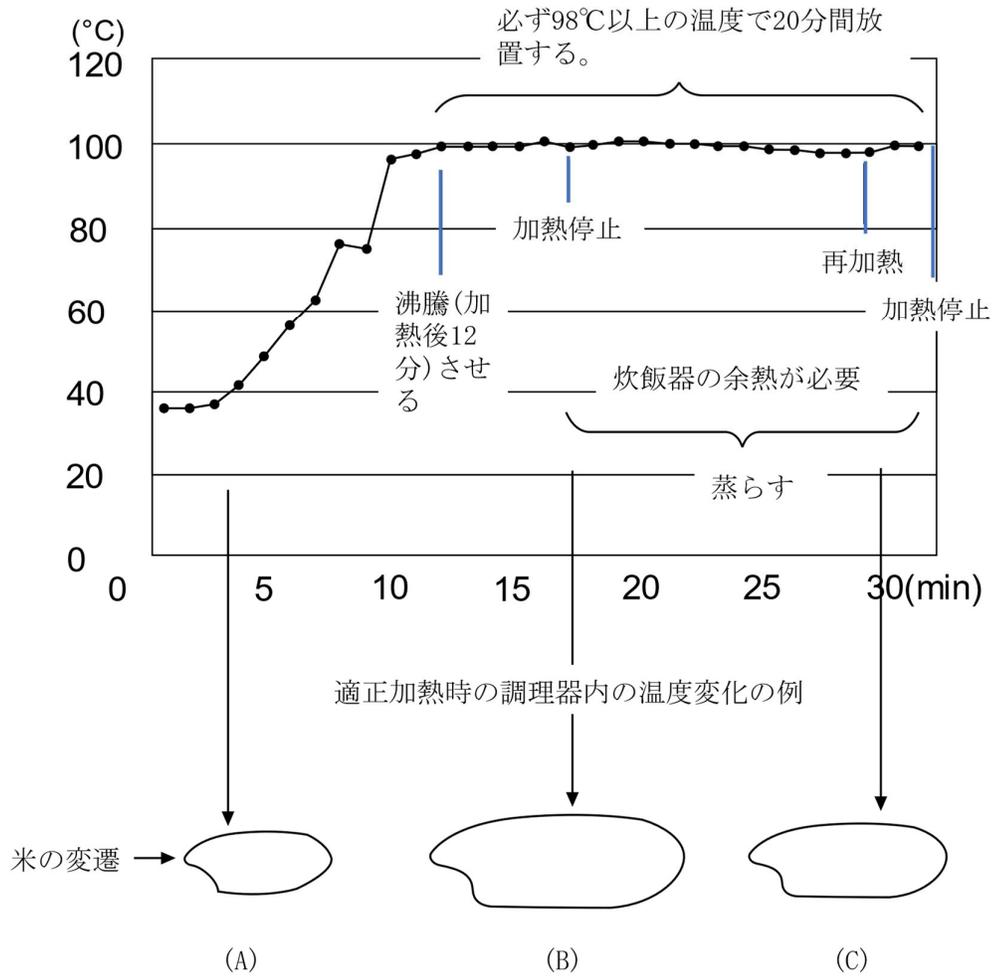
日本の炊飯スタイルには、最適な量の炊飯水で浸漬し、水分がなくなるまで加熱すること、すなわち水分が蒸発して穀物に吸収されるまで加熱することが含まれている。穀物の浸漬中に細胞内に水分が吸収されることは、穀物の炊飯時に貯蔵されているデンプンのゲル化に関係している。一般に、デンプンのゲル化は、米の生理的特性と吸湿性に依存し、炊飯後の食感に影響を与え、これは米の食味に最も重要な要因の一つである[20][21][22]。

美味しいごはんは加熱後の沸騰時間に大きく左右される。沸騰時間は、図 2.3.1 のように早い沸騰加熱過程、適切加熱過程、沸騰遅れ加熱過程の三段階に分けられる[23]。加熱の段階で吸水し膨張する。そして、余熱により水分が少し放出して米粒が縮む。ご飯を炊く過程に関しては、日本が最も研究していると言っても過言ではない。

「早い沸騰加熱過程」は、加熱後 4~7 分に沸騰し、沸騰後 98°C 以上 20 分間を継続する場合を指す。

「適正加熱過程」は、図 2.3.1 のように加熱後 8~15 分に沸騰し、98°C 以上 20 分間を継続する場合であり、厳密に言えば早い沸騰加熱過程であっても適切な余熱を得られれば美味な場合もあり、これも適正炊飯といえることから、標準沸騰加熱過程と表現した方が実験的には適していると考えられる。

「沸騰遅れ加熱過程」は、加熱し始めてから 20 分前後でようやく沸騰した後 98°C 以上 20 分間を継続する場合であり、米の量に対して火力が弱いので沸騰が遅れる。ここでも「早い沸騰」に合わせ、遅れた沸騰と表現したいところであるが、日常用語として使われている「沸騰遅れ」と表現した。



- (A) 加熱のはじまり。米の内部，組織には無関係の亀裂があり，水が入り込んでいる。
- (B) 周囲の水を吸収し，米は最大限に膨張する。
- (C) 余熱で余分な水分が抜け，ご飯が焼けて固まる。

図 2. 3. 1 適正炊飯過程のモデル[23]

## 2.4 空間充填

空間充填とは、3次元空間に物体や粒子を、空間の利用率を最大化するように充填することである。化学、物理、材料科学など様々な分野で、ある空間内に分子や粒子を詰め込むことを「空間充填」と呼ぶ。

化学では、分子の構造を可視化するために空間充填モデルがよく使われている。このモデルは、分子内の原子を適切な大きさの球体として表現し、それらを密に詰め込むことで実際の分子の構造をシミュレートする。化学の研究者は、空間充填モデルを用いることで、溶解度や反応性といった分子の物理的・化学的特性に関する知見を得ることができる。[24]

物理学では、固体、液体、気体など、さまざまな状態の物質の特性を研究するために、空間充填の概念が使用される。これらの状態における粒子の詰め方によって、その性質や振る舞いの多くが決定される。例えば、固体中の粒子の集まり方は、その密度、強度、その他の機械的特性を決定する。[25]

材料科学では、空間充填は、望ましい特性を持つ材料を設計し最適化するために使用される。例えば、ある空間内の粒子や繊維の詰めを調整することで、材料の空隙率を制御することができる。これにより、材料の機械的特性、熱的特性、電気的特性に影響を与えることができる。[26]

空間充填の研究では、さまざまな構成での粒子の充填を記述する数学的モデルやアルゴリズムを開発する。これらのモデルを検証し、さまざまな充填配置の特性を研究するために、コンピュータシミュレーションがしばしば使用される。

### 第3章：提案手法の概要

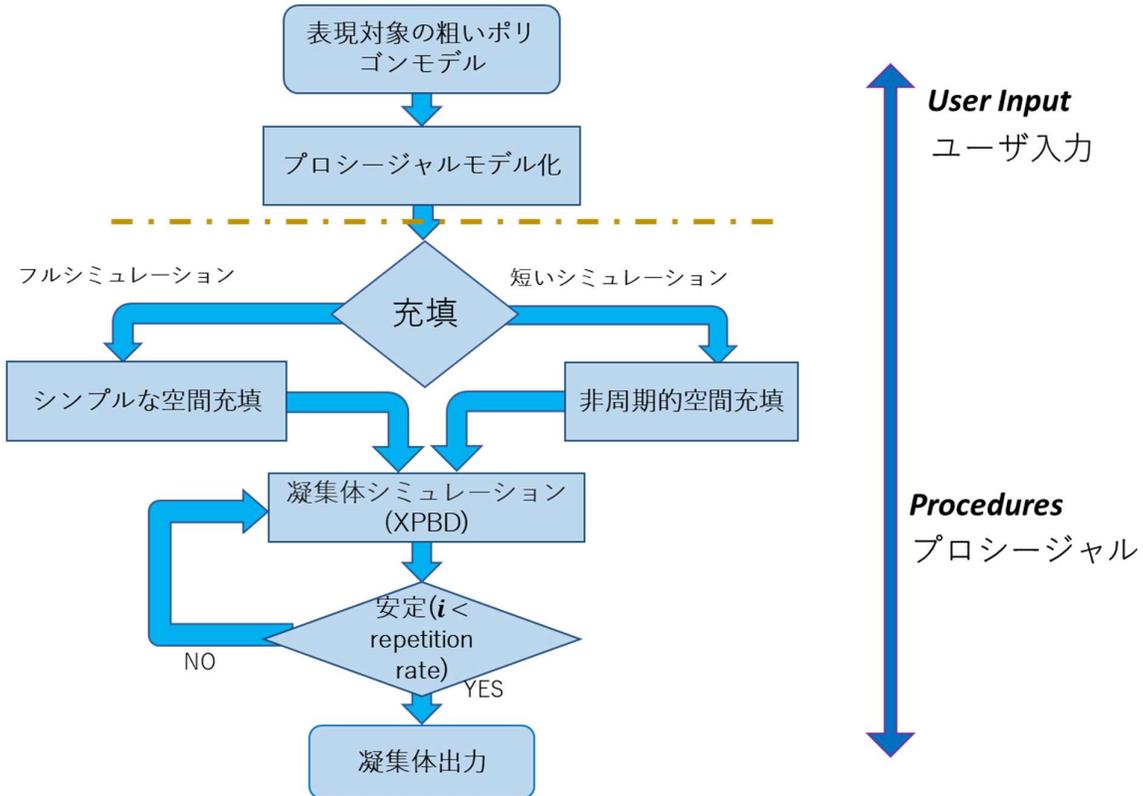


図3.1 提案手法のフロー図

本論文では、凝集体を形成する食材などの自然な表現を目指し、アーティストの手作業に頼らず、モデリングからシェーディングまでプロシージャルに画像やアニメーションを生成する手法を提案する。

各ステップの概要は以下の通りである。まず、表現対象の粗いポリゴンモデルを用意し、参考として既存研究の対象物に関する物理パラメータを使用して、プロシージャルなモデリングに変換する。

次は、非周期的空間充填法を用いて構成オブジェクト（米粒、イクラ、かき氷など）を配置し、凝集体を生成する。そして、XPBDを用いて、オブジェクトの摩擦力や弾性を考慮した再配置を計算する。

個々の構成要素のオブジェクトのモデリングには、低解像度モデルをベースに、パラメータを変化させることで様々な形状を生成できる手続き的モデリング手法を提案する。このモデリング手法の詳細は、表現するオブジェクトによって異なるが、

手続きのな処理によって様々な形状を生成できる点で汎用的である。ここで、低解像度モデルはユーザ入力として使用する。出力は図 3.1 に示すようなフローで生成される。

シェーディングには、水分量を考慮した CDRF (Curvature Dependent Reflectance Function) を用いた SSS (Sub-Surface Scattering) プロシージャルシェーダーを使用する。

本手法は、XPBD を用いた空間充填と位置ベースのシミュレーションにより、個々の物体形状をプロシージャルにモデル化し弾性体の凝集体を生成する際に、長時間のダイナミクスベースの物理シミュレーションを必要としない数学的アプローチを提供するものである。

なお、本手法の元となる、図 3.1 に示したようなフローにおいては、表現対象の粗いポリゴンモデルを用意する、プロシージャルモデリング化、XPBD 法、およびプロシージャルシェーダーは筆者の第一フェーズの研究で開発を行った。第一フェーズはフルシミュレーションと呼ばれ、第一フェーズの研究に関する詳細は、次節で説明する。第二フェーズは非周期的空間充填法による短いシミュレーションと呼ばれ、第二フェーズ研究で追加したものである。

### 3.1 水分量を考慮した炊き立てご飯のプロシージャルアニメーション

フルシミュレーションの研究では、「炊き立てのご飯」を目的にし、CG アニメーションで再現する手法を提案する。炊き立ての米飯（ご飯粒）の物理的性質として扱うのは、形状、密度、屈折率、透過率、および反射率である。これらのデータをもとに、炊かれた大量の米飯が盛られたご飯の質感と形状を写實的に描画することを目的とする。電子顕微鏡写真をもとに、解像度の粗い米粒ポリゴンモデルを作成し、多孔質構造を考慮した形状の異なる米粒モデルを作成する。次に、多数の炊き立ての米粒を XPBD (eXtended Position-Based Dynamics) に水分率を考慮した拘束条件を付加した粉粒体シミュレーションを行う。これで炊き立てのご飯の柔らかさを表現できる。また任意な形の米構造物を作成することができる。最後に SSS (Sub-Surface Scattering) にも水分率を考慮するため、曲率依存反射関数 (Curvature-dependent reflectance function : CDRF) によるプロシージャルシェーダーによって陰影付けを行う。水分率の違いによって、異なる米粒の表現ができる。先行研究の提案手法によって、大量の米粒が茶碗に盛られた炊き立てご飯やおにぎり、寿司のシャリなどが写實的に表現可能となる。

### 3.1.1 米粒のプロシージャルモデル化

米粒をモデル化する場合、炊飯米の粘弾性を考慮しないとアニメーションができないため、米粒の物理構造を理解することが重要である。富田らは、SEM を用いて、割れた米の断面を観察した[18]。その結果、米の表層は緻密で、内部は多孔質であることがわかった (10°C, 120 分浸漬, 図 2.2.1)。

本論文では、多孔質構造体を作成するために、あらかじめ米粒の形をしたポリゴンモデル (ベースモデル, 図 3.1.1.1) を複数用意した。これらのベースモデルの長さや厚みは、ユーザが自由に編集することができる。また、ユーザが希望する 3D ポリゴンモデルを米粒モデルとしてパイプラインに供給することも可能である。そして、ベースモデルの表面と内部に球体をランダムに生成する(図 3.1.1.2)。この球体をボクセル化し、ボリュームデータに変換することで、米粒の多孔質構造を再現する。ランダムに生成される球体の数や半径は、ユーザが制御することができる (多孔質構造のパラメータ化)。

体積データへの変換の最初のステップでは、オープンソースの `binvox` ユーティリティ[30]を使用して、球体が配置されたメッシュをボクセル化する。ポリゴンモデルがボリュームメトリックテクスチャ  $M$  に変換されると、同じサイズの第 2 のボリュームメトリックテクスチャ DFM が、各ボクセルでボリュームメトリックテクスチャ  $M$  内の最も近い境界ボクセルへの距離を計算した結果を含み、以下の式で評価されたものを生成する[31]。

$$DFM[i, j, k] = \min\{\delta([i, j, k], [i', j', k']): M[i', j', k'] = 0\}, \quad (5)$$

ここで、 $[i, j, k]$  と  $[i', j', k']$  は  $(i, j, k)$  と  $(i', j', k')$  の空間位置を表すそれぞれのテクスチャのセル、 $\delta$  は二つのセル間の距離を計算する関数でマンハッタン距離またはユークリッド距離として算出される。上記の評価式から、オブジェクトの境界から遠いエントリは、近いエントリよりも高い値を得ることができる。新しいボリュームテクスチャ DFM は、パイプラインの様々な段階で必要とされる離散的な距離フィールドとして機能する。

実際に炊きたてのご飯がふっくらとしているのは、吸水や物理的変形など複雑な

過程を経た多孔質構造によるものである。山崎らの研究[32]によれば、精米した米粒の浸漬時間が長くなっても、米粒の変化はごくわずかで、実際には米粒同士がくっつき、米全体の体積は増加しない。炊飯後の米粒の体積変化については、具体的な研究がないため、見た目で判断し、以下の式で体積変化を表す。

$$[x, y, z] = P[r, s, t], \quad (6)$$

ここで、 $[x, y, z]$ は変更後のボクセルエントリー、 $P$ はリアルに見せるために各米粒にランダムに与える 1~1.5 のパラメータ、 $[r, s, t]$ は変更前のボクセルエントリーである。

ボリュームデータにより多孔質構造を生成した後、レベルセット法[33]により再ポリゴン化する (図 3.1.1.3)。図 3.1.1.4 は、自動生成された形状および大きさの異なる米粒のポリゴンモデルである。

プロシージャル化になっているので、4 種類の米の中から認識しやすい 3 種類を選び、ベースモデルを調整し、図 3.1.1.5 のようにシミュレーションを行うことが可能になる。インディカ米は膨張しにくく、ジャポニカ米と香り米は炊飯後に大きく膨張することがわかる。例としては、入力パラメータは以下の通り、インディカ米のベースモデルの長さを 1.8 倍に、膨張のパラメータを 1.2 にする、ジャポニカ米のベースモデルの長さをそのままにし、膨張のパラメータを 1.5 にする、香り米のベースモデルの長さを 0.7 倍にし、膨張のパラメータを 1.5 にする。ユーザはパラメータを変えることでいろんな米の再現はできる。ベースモデルを他の対象物にすると簡単にプロシージャルモデリングができる。

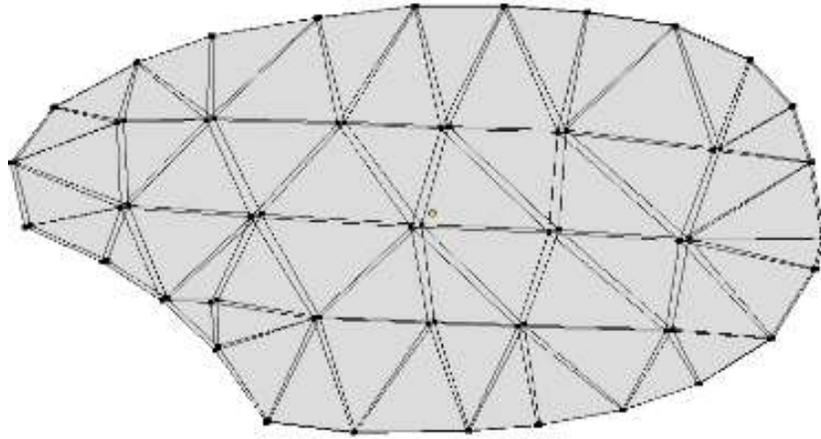


図3. 1. 1. 1 米粒のベースモデル例

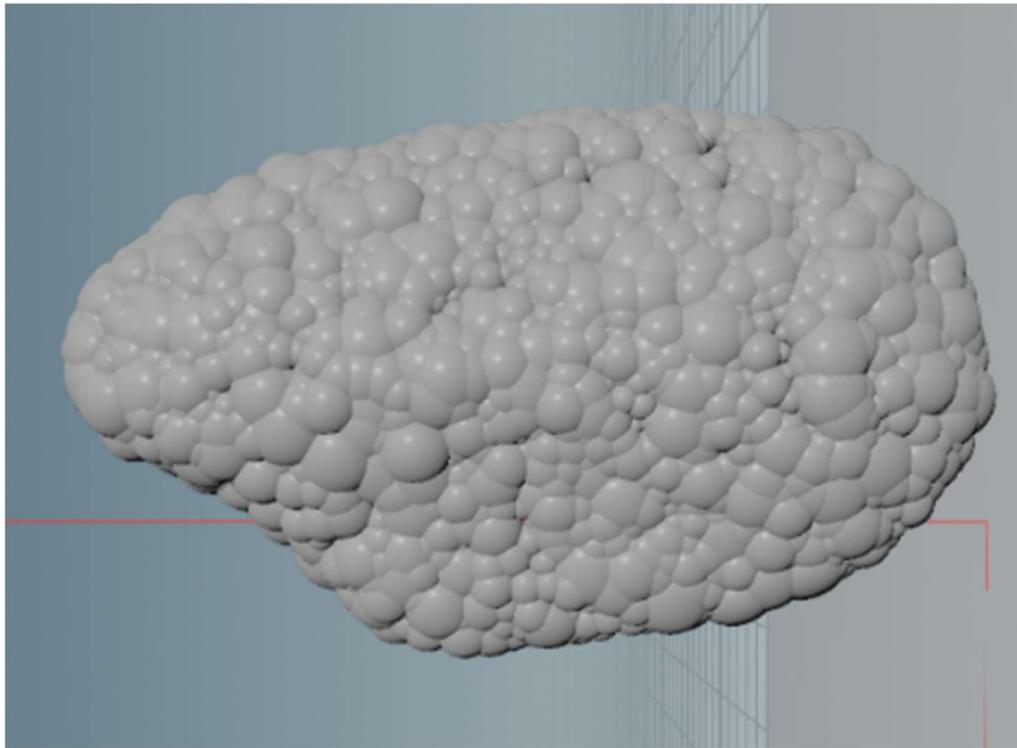


図3. 1. 1. 2 ベースモデルへの球体の配置

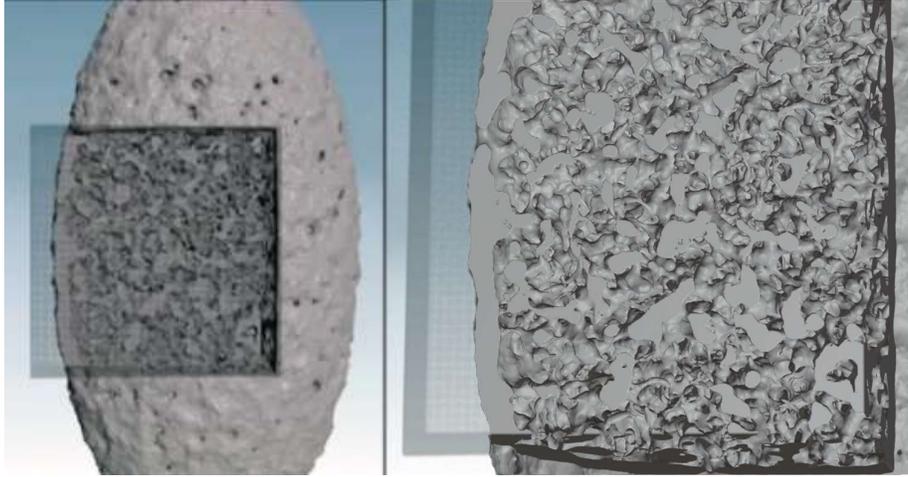


図3. 1. 1. 3 プロシージャ型米モデル（多孔質構造）の断面図の例



図3. 1. 1. 4 自動生成された米粒のポリゴンモデル

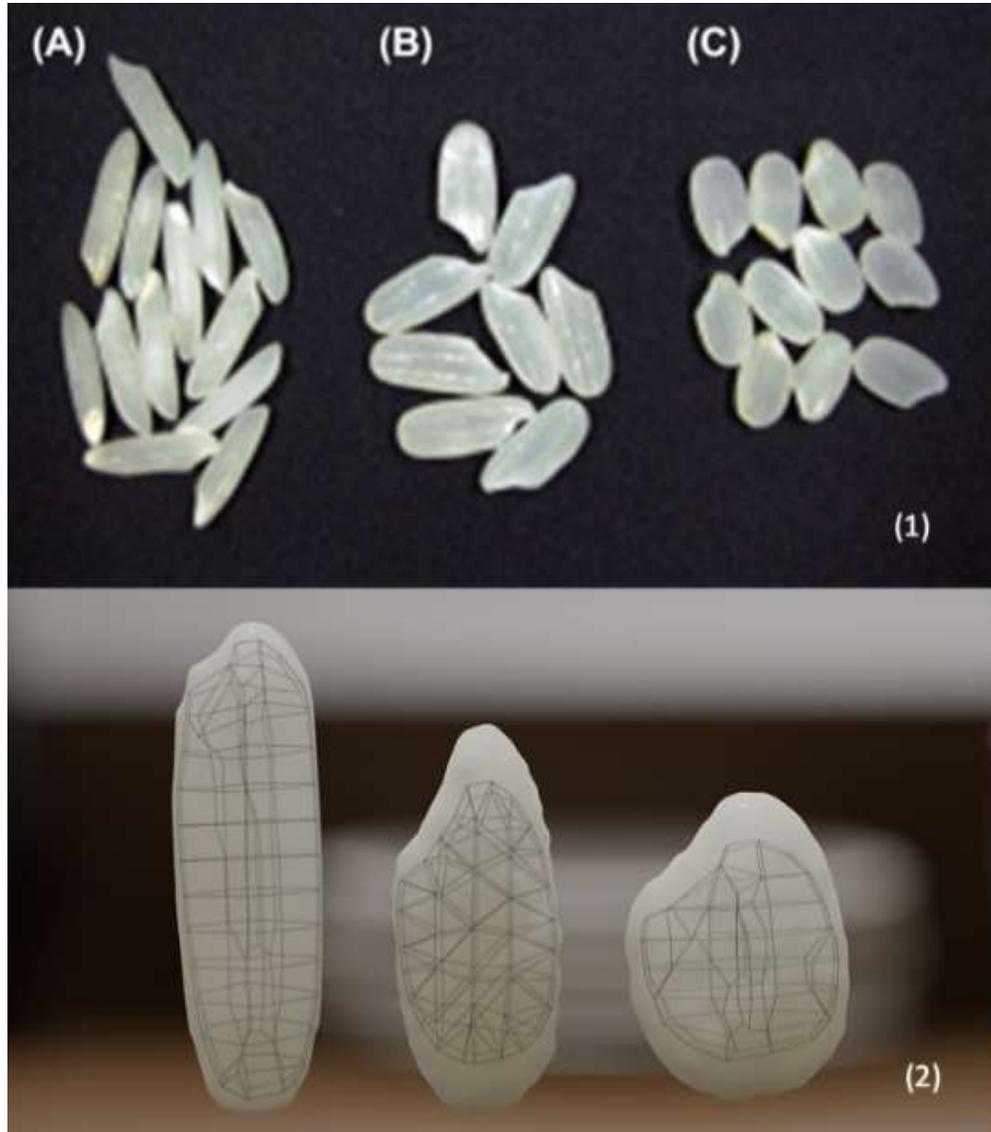


図3. 1. 1. 5 (1)(A)インディカ米, (B)ジャポニカ米, (C)香り米の実写画像.  
(2) 左から順に本手法によるインディカ米, ジャポニカ米, 香り米のシェーディング  
の例. ワイヤーフレームは修正後のベースモデル.

### 3.1.2 水分率を考慮したプロシージャルシェーダー

シェーダには、SSS(Sub-Surface Scattering)を用いている。Sub-Surface Scattering (SSS) のシミュレーションは、大理石、牛乳、人肌などの半透明な素材をリアルに再現するために最も効果的な手法の一つであり、この手法を用いることで、半透明な素材のシミュレーションを高速化することが可能となる。SSS に関するこれまでの研究では、Jensen ら[34]が開発した手法により、シミュレーションが大幅に高速化されることが確認されている。また、Kubo ら[4]は、曲率依存反射率関数 (CDRF) を用いて表面散乱をシミュレートすることで、より高速なレンダリング手法を開発した。本論文では、CDRF における光散乱の強さを表すパラメータ  $\sigma_0$  を、式 (8) に示す両対数関数から求めている。

CDRF  $f_r$  は、入射光  $L_i$  とガウス関数  $g(\theta, \sigma)$  の畳み込みにより、以下のように定義される。

$$f_r(\theta, \kappa) = (L_i * g)(\theta), \quad (7)$$

ここで、 $\theta$  は光の方向と法線ベクトルのなす角、 $\kappa$  は曲率である。入射光  $L_i$  とガウス関数  $g(\theta, \sigma)$  は、次式で与えられる。

$$L_i(\theta) = \max(\cos(\theta), 0), \quad (8)$$

$$g(\theta, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(\kappa)^2}} \exp\left\{-\frac{\theta^2}{2\sigma(\kappa)^2}\right\}, \quad (9)$$

ここで、 $\sigma(\kappa)$  は物質内の散乱強度を表し、半径  $\sigma(\kappa)$  に反比例すると仮定している。したがって、 $\sigma(\kappa) \approx \frac{\sigma_0}{\kappa} = \sigma_0 \kappa$  となる。得られたデータセット  $f_r$  との RMS 誤差を最小にするために、 $\sigma_0$  は式 (8) の水分量を考慮した両対数関数から求められる。

図 3.1.2.1 は、水温が 5°C のときの米粒の吸水量を考慮した CDRF によるレンダリング結果の違いを示している[21]。

炊き立てご飯やおにぎりなどお米関連のレンダリング画像は 5. 2 節に載る。

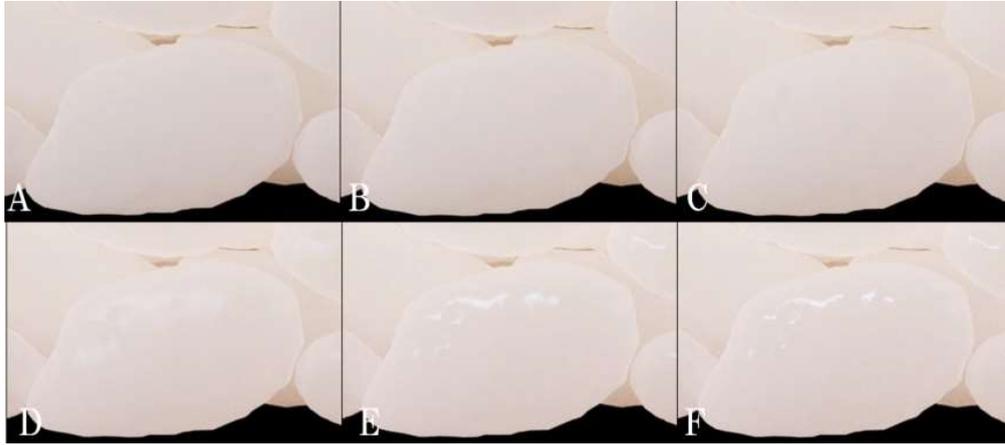


図3. 1. 2. 1 吸水率 (%) の違いによるレンダリング結果の違い (A~F, 0%から24%へ線形に増加, 水温 5°C)

## 3.2 構成オブジェクトの空間充填

本論文で使用する空間充填法を説明する。3.2.1節はシンプルな空間充填を説明し、3.2.2は非周期的空間法の説明である。

### 3.2.1 フルシミュレーションで利用するシンプルな空間充填

ここでは同じ物体を充填対象とした研究である。すべての物品が同じサイズ・形状である場合に用いられる方法である。この方法は、物品を空間に効率的に充填し、可能な限りスペースを有効活用することができる。図 3.2.1.1 に示したように、同一サイズ物品の空間充填法では、物品を同じ向きで並べ、空いているスペースに詰め込んでいくことで充填する。

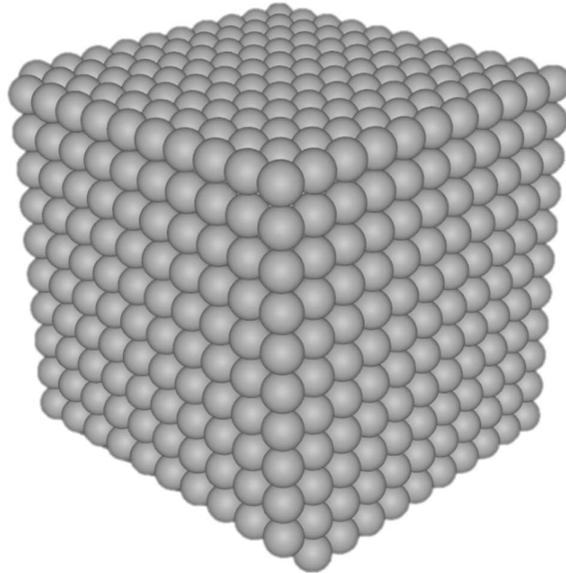


図 3. 2. 1. 1 シンプルな空間充填

### 3.2.2 非周期的空間充填法

まず、非周期的空間充填法の概要を説明する。詳細は 4.1 節から 4.5 節に記述する。

図 4.1 は、任意の要素からなる凝集体や自由形状を生成するプロシージャルモデリング手法に基づく本手法で作成した結果のイメージ図である。

大量の凝集体を生成するために、まず図 4.2 (a), (b) のユーザ入力による要素と凝集体を生成したい形状を用意する。図 4.2 では、米粒はユーザ入力要素、ワイヤフレームは凝集体を生成したい形状の例を示している。ここでのアイデアは、Sakurai らの研究[1]に由来している。各ステップと非周期的空間充填法の結果を図 4.3, および図 4.4 に示す。このステップでは、物理パラメータは一切考慮せず、このステップのみで凝集体が生成される。図 4.3 の (a) は自動配置後の結果であり、重なりが多いことがわかる。(b) は重なりを検出し、それを解消する処理を行った結果である。

各要素の重なりを減らすために、図 4.5 に示すステップで凝集体を配置している。図 4.5 における赤い点線は簡略化された一次元モデルであり、ユーザが提供する距離  $r$  に応じて要素が点線に写されている。図 4.5 (a) と (b) は 4.2 節と 4.3 節で、図 4.5 (c), (d), および (e) は 4.5 節と 4.6 節において詳細を記述する。

本手法は、凝集体の形状や構成要素を 3 次元ポリゴンメッシュとして指定する。3 次元ポリゴンメッシュは、凝集体の形状と構成要素を指定するために使用される。ここでは、構成要素を閉じたメッシュで定義し、構成要素間の重なり領域を定量化する。

非周期的空間充填の限界として、図 4.6 (a) に示すように不自然な繰り返しパターンが現れることがある。図 4.6 (b) に示すように本論文による手法を用いると、より自然な米の分布である非周期的な米を生成することが可能である。

最後に、XPBD による凝集体シミュレーションを行う。このステップの詳細な説明は、第 3 章 3 節に記載する。XPBD シミュレーションでは、下向きの重力だけでなく、摩擦や粘着性などさまざまなユーザ入力データを考慮する。



(a) 炊き込みご飯

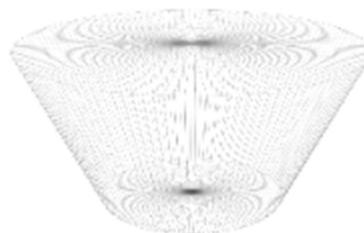


(b) バニーライス

図 4. 1 提案手法で生成された弾性凝集体

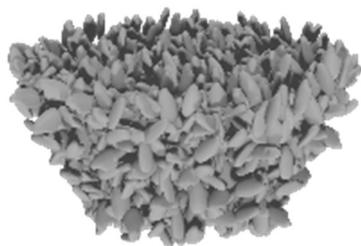


(a) 要素

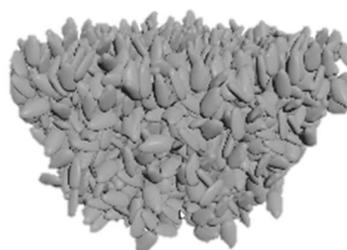


(b) 凝集体形状

図 4. 2 ユーザ入力例

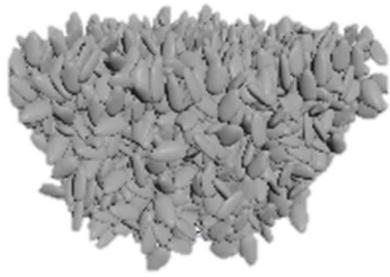


(a) 配置後



(b) 微調整後

図 4. 3 配置処理の結果（重なりある）と微調整後の結果（重なりを無くす）

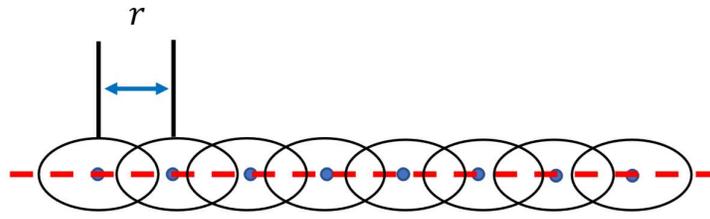


(a) 配置・微調整後

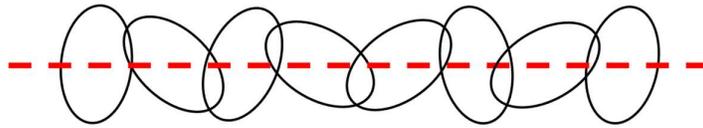


(b) シミュレーション後

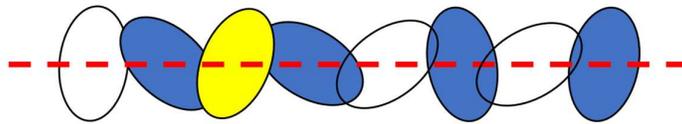
図 4. 4 凝集体出力結果



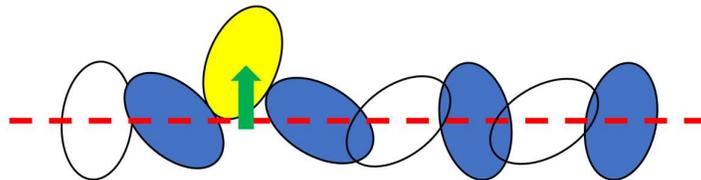
(a) 配置



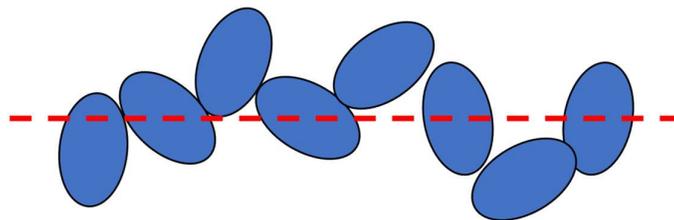
(b) 回転



(c) 重なりを定量化

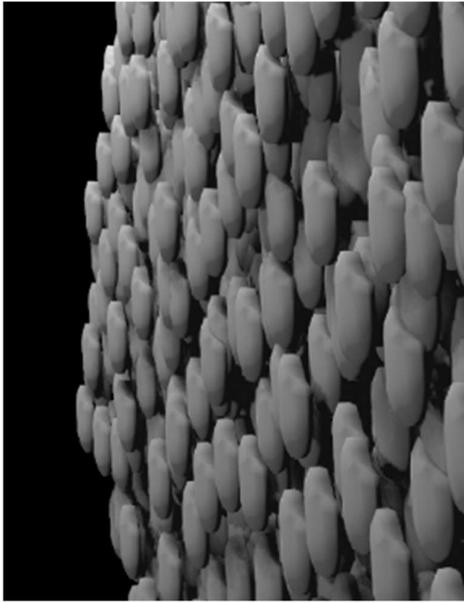


(d) 微調整

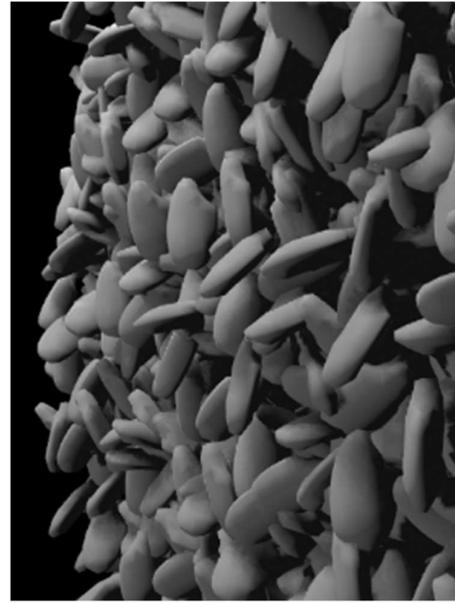


(e) 重なりのない凝集体

図 4. 5 配置方法の概略図



(a)



(b)

図 4. 6 周期的な空間充填の限界例

### 3.2.2.1 配置

このステップでは、ユーザから与えられた形状に要素を配置する。ここで、各要素の距離  $r$  は、ユーザによって与えられる。そして、この距離  $r$  を用いて与えられた形状を均等に分割し、要素の中心点を決定する。次に、均等に分割された点に要素をコピーして配置する。

均等に分割された点には番号  $P_{num}$  が割り当てられ、後述の 4. 3 節で使用される。距離  $r$  が小さく、成分が重なる可能性がある場合は、4. 4 節で説明するように重なりを解消する。

### 3.2.2.2 回転中心

重なりを減らすための手法の一つとして、回転の中心を幾何学的な中心とすることがある。各要素の回転方向を決定するために、ローカル  $uvw$  座標系を使用する。異なるランダムな方向を生成するために、点番号  $P_{num}$  にローカル座標系で指定された角度範囲内の乱数を割り当てる。すなわち、各要素はローカル座標系でユーザが指定した範囲内でランダムに回転されることになる。

### 3.2.2.3 複数種類要素の配置

各要素は 4. 2 節で説明したように 1 回配置され、4. 3 節で説明したようにランダムに回転される。これにより、ユーザから提供された要素は、組み合わせて凝集体を形成する。ユーザは各成分の比率を指定することができる。点番号  $P_{num}$  を利用して、ユーザが提供した複数要素の割合をパラメータとし、ランダムに各点に要素を配置する。

### 3.2.2.4 重なりを定量化する

この方法は、法線に沿った平行移動の最小距離  $t$  を  $[0, rC_{refine}]$  の範囲内で決定し、重なりを少なくするものである。図 4. 5 (d) の緑色矢印は、法線方向に移動することを示している。この範囲は、次式で与えられるコスト関数  $c(t)$  を最小化することによって得られる。

$$c(t) = a \left( \max_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x} + t\mathbf{n} + \mathbf{p}) \right) + t, \quad (1)$$

$$a(h) = \begin{cases} h + rC_{\text{refine}} & \text{if } h > 0 \\ 0 & \text{otherwise (no overlap),} \end{cases}$$

ここで、 $X$ は成分の全ての頂点 $x$ の集合、 $f(\mathbf{x})$ は式(2)で得られる陰関数である。表面法線 $\mathbf{n}$ とポアソン円盤分布[35]の点 $\mathbf{p}$ が使用される。コスト関数の第1項は最大重なり量を計算し、重なりを避けるためにペナルティ値 $[0, rC_{\text{refine}}]$ を付加する。

本手法は、3次元モデルの奥行きを計算するのに有効な手法である陰的モデリング[31]により成分の重なりを定量化し、球関数の内軸を用いてモデル内部を表現する[36]。

本手法では、得られた内軸を用いて陰関数を計算する。陰関数 $f(\mathbf{x})$ は次式で与えられ、 $\mathbf{x}$ がモデル内部にあるとき正の値を返す。

$$f(\mathbf{x}) = \max_{\mathbf{g} \in \mathbf{G}} g(\|\mathbf{x} - \mathbf{p}_f\|) - \mathbf{T}, \quad (2)$$

$$g(d) = \begin{cases} r_f - d & \text{if } d < r_f \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

ここで、 $\mathbf{T}$ はオフセット値、 $\mathbf{G}$ は $g(d)$ の集合で、それぞれ中心 $\mathbf{p}_f$ 、半径 $r_f$ の球の関数で示される。

### 3.2.2.5 重なった要素の削除

配置処理後、式(1)で与えられるコスト関数の値が小さくても、曲率の高い面では部品が他の部品と衝突してしまうことがある。これを回避するために、本手法では以下の条件を満たす場合に部品を取り除き、空間を確保する。

$$c(t) < D, \quad (3)$$

ここで、 $D$ はユーザが与える閾値パラメータであり、 $D$ を0とした場合、各部品は

オフセット値 $T$ で指定された等値面上で他の部品と接触している。

### 3.3 XPBD による凝集体シミュレーション

本章では、炊きたての大量の米粒をお茶碗に盛る場合や、おにぎりのようにぎゅっと握って粒状にしたものを例にし、XPBD を用いて弾性体の粒状物凝集体シミュレーションを行う手法に関して述べる。

弾性体の粒状物凝集体は、粒と粒の間を占める物質も含めた凝集体であると考えられる。すなわち、個々の粒は弾性体であり、凝集体としては流体（液体）のような挙動をする。

Position-Based Dynamics (PBD) [11] は、ゲームやインタラクティブなアプリケーションにおいて変形可能な弾性体のリアルタイムシミュレーションによく用いられる手法であり、最近では映画や医療シミュレーションにも利用されている。しかし、PBD は弾性体に対する拘束がシミュレーションのタイムステップや反復回数に影響されるという問題がある。これは、弾性体と剛体の相互作用を計算する場合に特に問題となる。例えば、炊きたてのご飯をお茶碗に盛るシーンの場合、ご飯粒がお茶碗に接触する部分のシミュレーションが誤動作することがある。

そこで本論文では、拡張 PBD: XPBD アルゴリズムに、水分量を考慮した制約を追加したシミュレーション手法を提案する。本手法は、弾性ポテンシャルエネルギーの概念に対応する新しい拘束方程式を導入することで、繰り返しや時間ステップに依存する剛性の問題を解決する。これにより、力に依存した効果に対応できる拘束力の推定値が得られる。

XPBD アルゴリズムは、以下のステップで構成されている。

- 1 予測位置 $\tilde{x}$ を求める。
- 2 修正位置 $x_0$ を $\tilde{x}$ で初期化する。
- 3 乗数 $\lambda_0$ を 0 に初期化する
  - 3.1 while ( $i < \text{反復率}$ )
  - 3.2  $\Delta\lambda$ を求める
  - 3.3  $\Delta x$ を求める
- 4  $\lambda_{i+1} = \lambda_i + \Delta\lambda$ で更新
- 5  $x_{i+1} = x_i + \Delta x$ で更新する。

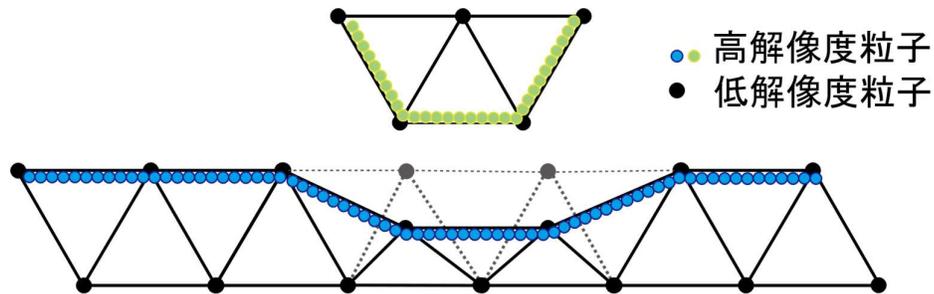
6 位置 $x^{n+1} = x_i$ を固定する.

7 速度によって間接的に得られる.  $v^{n+1} = 1/\Delta t(x^{n+1} - x^n)$

これにより, PBD とほぼ同じ計算コストで, より制御性の高い結果を得ることができる (詳しくは参考文献[11]を参照されたい).

ソフトボディのシミュレーションでは, メッシュの解像度を下げることでシミュレーション計算の 1 回の反復計算コストを下げるだけでなく, 視覚的に満足のいく結果を得るために必要な反復の回数も減らすことができる.

Müllerら[37]は, 視覚的なディテールをあまり失うことなく, 動的メッシュの解像度を下げる方法を提案した. ソフトボディのシミュレーションにおいて最も重要なディテールは, 小さなしわである. この方法は, しわの形成がソフトボディの大域的な動的挙動から分離できるという観察に基づいている. したがって, 衝突処理を含む複雑な動的シミュレーションは, 低解像度のメッシュで行なわれる. しわの形成は, 動的メッシュに付属する高解像度メッシュで処理される (図 3.3.1 参照). 例として, 図 3.1.1.1 に低解像度モデル, 図 3.1.1.4 に高解像度モデルを示す. 詳細なアルゴリズムについては, 文献[37]を参照されたい.



高解像度メッシュ (青と緑の粒子) が, 低解像度ダイナミックメッシュ (黒の粒子) を受容する際, 青と緑の頂点がダイナミックメッシュに対して境界線上に留まるように制限している.

図 3. 3. 1 動的メッシュのアルゴリズム

## 第4章：実験結果

この実験は、非周期的空間充填を行わない場合と、非周期的空間充填のステップを追加した場合の結果を比較するために実施したものである。

フルシミュレーションの研究では、日本料理の代表的な食材である米を、モデリングからシェーディングまでプロシージャルに制作する手法を提案した。提案する手法は、以下の通りである。

1. あらかじめ作成した低解像度ポリゴンモデルをベースとして、ベースモデルの表面にパーティクルを充填してボリュームデータを作成し、レベルセット法を用いて再浮上させ、多孔質構造を考慮した形状の異なる米粒モデルを作成する。

2. XPBD に水分を考慮した制約を加えることで、炊きたての米粒を大量に器に盛ったり、おにぎりのような「粒状体」に成形する状況をシミュレーションした。

3. SSS は、水分量を考慮した曲率依存反射関数（CDRF）を用いたプロシージャルシェーダーによりシェーディングされた。

提案手法は、炊きたてご飯、おにぎり、寿司、茶碗に盛られたご飯など、米粒の多いご飯のフォトリアルな描画が可能であり、様々なコンテンツに応用できる。ただ非常に計算時間が長かったことは問題点である。例えば図4. 1に示したように、フルシミュレーションで作成した寿司のシャリはシミュレーションするには4h53m42s使用した。現在行った研究で提案した短いシミュレーション法を使用し、米粒の数が2倍のおにぎりを作成するには21m47sまで減った。



図4. 1 フルシミュレーションの結果図、寿司のシャリ

図4. 2は茶碗に盛られたご飯、要素は米粒で、凝集体の形は茶碗である。比較用に下に実写真も追加した。米粒は曲がりにくく設定するため、Bend Stiffness を10

とした。

図 4.3.1 はご飯のおにぎりをフルシミュレーションした例である。要素は米粒で凝集体の形は横に倒れた円柱である。図 4.3.2 は短いシミュレーションした例である。この結果から、短いシミュレーションでも有用な情報が得られることがわかる。

図 4.4 はライスバニーのレンダリング画像である。要素は米粒で、凝集体の形はスタンプォードバニーに指定した。左上はオリジナルモデルで、右と下のライスバニーはスタンプォードバニーと球体との差を求めたモデルである。ご飯に近い断面図を示すために行った操作である。

最もメモリを消費したシナリオは、お茶碗に盛られたご飯で、12GB のメモリを使用した。シミュレーションとレンダリングに使用した PC のスペックは以下の通りである。Windows 10 Pro 64bit, CPU : Intel® Core™ i9-9900X @ 3.50GHz, メモリ : 128GB, GPU : NVIDIA Quadro P2200. 計算時間（非周期的空間充填シミュレーションと短時間位置ベースシミュレーション, レンダリング時間は含まず）を表 2 に示す。位置ベースシミュレーションは CPU のみを使用した。

表 3 は本研究で使用したパラメータの一覧である。



茶碗に盛られたご飯のシミュレーション例（上）実際のご飯の写真（下）

図4. 2 盛られたご飯のシミュレーション例（フルシミュレーション）



図4. 3. 1 おにぎりのシミュレーション例 (フルシミュレーション)

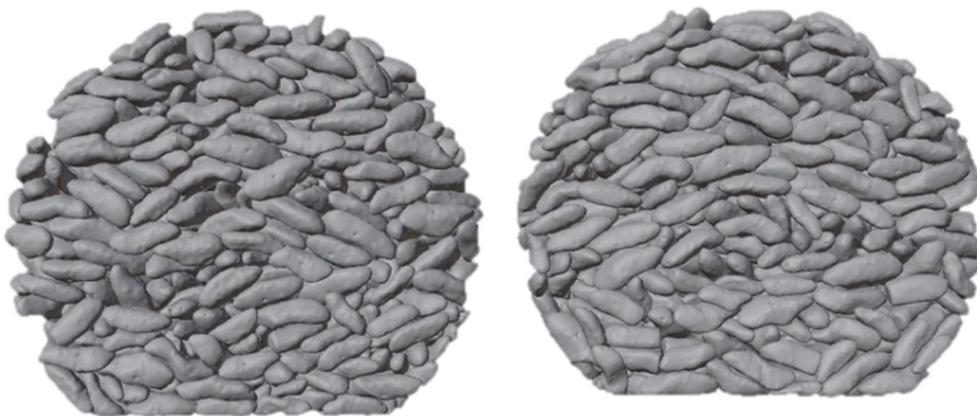
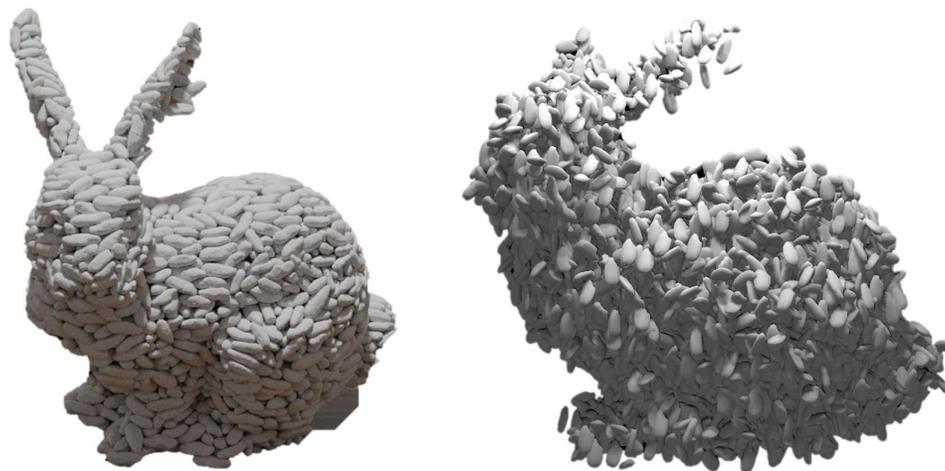


図4. 3. 2 両方法の比較 左：フルシミュレーション 右：短いシミュレーション



図4. 4 ライスバニーのシミュレーション例 (フルシミュレーション)



a)フルシミュレーション b)非周期的空間充填を行う場合

図 4. 5 出力結果の比較

図 4. 5 に示したように、両出力とも、要素は米粒、指定空間はバニー、要素数は 5111 個と同じであった。ただし、4. 5 の b) は非周期的空間を行ったあとの結果図である。非周期的空間充填の結果を基に、シミュレーションを行った場合にフルシミュレーションの結果と非常によく似ている。非周期的空間充填を加えないフルシミュレーションの計算時間は 12 時間 32 分 50 秒、非周期的空間充填を加えた非周期的空間充填法による短いシミュレーションの計算時間は 1 時間 12 分 56 秒であった。非周期的空間充填法による短いシミュレーションでは、フルシミュレーションと劣っていない結果を得ながら、計算時間が大幅に短縮された。なお、Sakurai らの研究では数値情報が提供されていないため、結果は画像のみからの比較となる。

Sakurai らの研究よりはまだ時間がかかるが、Sakurai らの研究では物理シミュレーションの段階がないため、リアルさを出すためには本提案手法の物理シミュレーション段階が不可欠で、相対的に時間が長くなっている。最終結果は図 4. 6 に示したように、左は本論文の提案手法によって自動生成したライスバニーの一部であり、右は Sakurai らが自動生成したおにぎりである。Sakurai らの結果図と比べると、本論文で提案した手法による結果のほうが外見的には自然に見えると考えられる。断面から見るとお米の堆積もリアルに近く、違和感がない。



図 4. 6 関連研究での最終結果の比較図

表 2 計算時間, 要素数, 頂点数

	時間 (s) フルシミュレーション	時間 (s) 短いシミュレーション	要素数	頂点数
図 5 . 1 4 茶碗に盛られた ご飯	3867	2,041	2,000	1,840,000
図 5 . 1 5 おにぎり	2567	1307	3,064	2,818,880
図 5 . 1 6 ライスバニー	8,561	4,376	5,111	4,702,120
図 5 . 1 7 イクラ丼	null	65	310	746,062

表3 本研究で使⽤したパラメータ

属性	Min	Max
<i>Physical Parameters</i>		
Mass	0	1,000
Thickness	0	1,000
Length	0	1,000
Width	0	1,000
Hight	0	1,000
Stiffness	0	100,000
Bend Stiffness	0	10
Damping Ratio	0	1
Friction	0	1
Static Threshold	0	1
Dynamic Scale	0	1
Capture Radius	0	1
Clumping	0	1
Number of Points	0	50,000
Distance r	0	1,000
Overlap Threshold	0	10
<i>Color parameters</i>		
Base Color R	0	256
Base Color G	0	256
Base Color B	0	256
Subsurface	0	1
Subsurface Radius	0	256
Subsurface Color R	0	256
Subsurface Color G	0	256
Subsurface Color B	0	256
Metallic	0	1
Specular	0	1
Roughness	0	1
Anisotropic	0	1
Anisotropic Rotation	0	1
Clearcoat	0	1
Clearcoat Roughness	0	1
IOR	0	3
Transmission	0	1
Emission	0	1
Emission Strength	0	1

## 第5章：応用例・イクラ

本章では、ここまで述べてきたアルゴリズムによって生成されたシミュレーション例を示す。

イクラは、魚卵を意味するロシア語「ikura (и к р а)」から派生した日本語の外来語である。狭義にはイクラを指すが、広義にはマスの卵も含まれる。

イクラにはさまざまな種類があるが、日本で最もよく食べられているシロザケ (chum salmon) の卵を使ったイクラを例にとると、シロザケは太平洋サケの中でも最も貴重とされている魚卵である。図5. 1に示すように、既存の研究によってイクラは3mm から5mm の大きさで、鮮やかな明るいオレンジ色から淡い赤色の色調をしている[25]。イクラは比較的柔らかく繊細質で、寿司などで食べると美食で珍重される[26]。

卵黄は脂質で構成されており、N. Shiraiらの研究によれば(表4)、イクラの全質量の $14.5 \pm 0.7\%$ を占めていることがわかる[27]。



図5. 1 イクラの写真

表4 イクラ, タラコ, トビコ, カズノコの脂質成分

	Ikura	Tarako	Tobiko	Kazunoko
Total lipid content (g/100 g tissue)	14.5 ± 0.7	3.7 ± 0.4	3.2 ± 0.2	3.0 ± 0.3

卵の大きさは 3mm から 5mm で、鮮やかなオレンジ色から淡い赤色をしている。

図 5. 2 に示すように、簡略化したイクラの構造において、オレンジ色の部分がイクラの卵黄である。脂質は卵白より密度が低いため、シミュレーション行くと重力と反対方向に動く。卵黄は脂質で構成されており、N. Shirai らの研究[27]によれば、イクラの全質量の 14.5±0.7% を占めるとされている。イクラの大きさは 3~5mm とし、計算の都合上、卵黄と卵白は同じ密度であると仮定する。

このデータを用いて、以下のような式で卵黄の 3D モデルを生成することができる。

$$\begin{cases} V_i = \frac{4}{3}\pi r_i^3 \\ \rho_i = \frac{M}{V_i} \\ V_o = \frac{L \cdot M}{\rho_i} \end{cases} \Rightarrow r_o = \sqrt[3]{\frac{3}{4}V_o} = \sqrt[3]{\frac{3LM}{4\rho_i}}, \quad (10)$$

ここで、 $V_i$  はイクラ 1 粒の体積、 $V_o$  は卵黄の体積、 $r_i$  はイクラ 1 粒の半径、 $\rho_i$  と  $M$  はそれぞれイクラの密度と質量である。球体の体積の式から、卵黄の半径  $r_o$  を求めることができ、 $L$  は卵黄係数である。大きさと卵黄係数の 2 つのパラメータを変更するだけで、他の種類のイクラを生成することができる。

これらの式で算出された半径を用いて生成されたベースモデルを図 5. 3 に示す。このベースモデルを構成要素として、凝集体を生成する。卵黄は黄色球体を表す、大きな黒い球体は卵黄を覆い、卵膜を表す。中に卵黄以外の空間を卵白に指定する。シミュレーション開始すると卵黄が密度低いため重力と反対の方向へ移動する。

次に、凝集体の形状を決定する。ここでは、日本の伝統的な料理であるイクラをたっぷりのせたご飯、すなわちイクラ丼を生成したいと思う。図 5. 4 に示すように、丼の 3D モデルを用意し、黄色の枠が決定した凝集体の形状である。図 5. 5 に示したように、シミュレーション結果は非常にリアルな凝集体を作成できた。図 5.

7に示したように，さらにシェーダを加えて実物に見えるぐらい結果ができた．

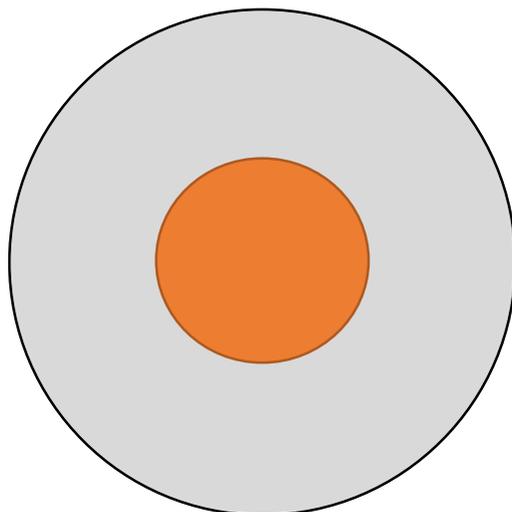


図5. 2 3次元モデルの構造（三視図同様）

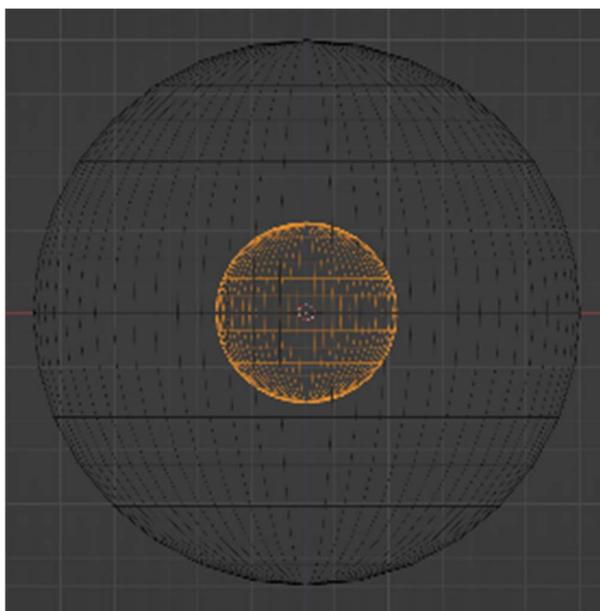


図5. 3 生成したイクラベースモデルのワイヤーフレーム

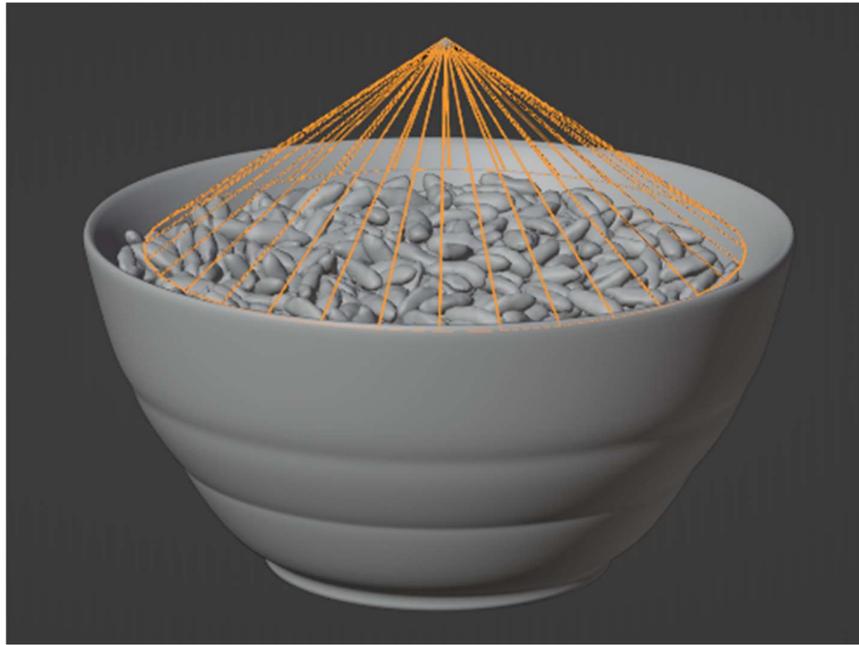


図5. 4 凝集体の形状



図5. 5 イクラ丼の生成結果



(上) イクラ丼のレンダリング画像 (下) レンダリング画像ズームアップ

図5. 6 イクラ丼のシミュレーション例

## 第6章：まとめと今後の課題

本論文では、炊き込みご飯、いくら丼、かき氷といった代表的な日本食を例に、非周期的空間充填と XPBD を用いた弾性凝集体のプロシージャモデリングについて述べた。

以下に、各章で示した手法とその特徴についてまとめる。

第1章では、研究の背景と目的について述べた。

第2章では、関連研究について述べた。食べ物の3Dモデル化の手法から探る、プロシージャルモデリングまでたどり着いた。そして、一番重要なところは再現したい対象物の物理パラメータが必要のため、物理構造や性質に関する研究を述べた。また高速作成するために使用した空間充填の既存研究に関して述べた。

第3章では、本論文で提案する手法の概要と研究のフルシミュレーションとなる炊き立てご飯を表現対象とする研究、すなわちプロシージャルに米粒をモデリングする手法、および XPBD によって凝集体シミュレーションを行うアルゴリズムに関して述べた。研究の非周期的空間充填法による短いシミュレーションとなる非周期的空間充填法について詳細な説明を述べた。いくつかのステップがあり、各ステップの方法は説明図によって述べた。

第4章では、炊き立てご飯を例にして、提案手法の応用について述べた。プロシージャルモデリングの段階でベースモデルに適用するパラメータを変更することで、違う種類のお米やイクラを再現できた。例えばお米のベースモデルの縦長さを伸ばし、膨張を少なくすることでインドのお米の再現が可能になった。縦長さと膨張のパラメータを調整し、香り米、日本の米、インドの米だけでなく、たくさんのお米の可能性を示した。

第5章では、本研究で提案手法の応用例として、イクラのプロシージャルな作り方を述べた。

まとめとして、本論文では、より速く、よりリアルな凝集体を生成する手法を提案した。本手法は、自動生成後に短時間の物理シミュレーションを行うことで作業時間を短縮し、よりリアルな凝集体は、単純にアニメーションを作成するなど、アーティストに様々な選択肢を与えることができる。現段階では、非周期的な空間充填と物理シミュレーションの両フェーズを同時に実現することに成功しているが、

また，本論文による手法では，ピーマン，ブドウ，イクラ，米，豆腐などの柔らかいものを大量に再現することができる．今後は，生成時間の短縮と物理シミュレーション段階の簡略化により，より高速な生成方法の開発を目指す．

## 謝辞

本論文の執筆にあたり，終始懇切なる御指導，御鞭撻を賜わり，常に暖かい御激励を頂きました，東京工科大学大学院 メディアサイエンス専攻 菊池司教授に，深く感謝の意を表します。

研究の軌道修正として，八戸工業大学工学部工学科 システム情報工学コース 伊藤 智也教授と，東京工科大学大学院 メディアサイエンス専攻 戀津 魁助教と，竹島 由里子教授から定期的に指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Sakurai, K., & Miyata, K., Modelling of Non-Periodic Aggregates Having a Pile Structure. *Comput. Graph. Forum* 33(1) pp. 190–198, 2014.
- [2] Macklin, M., Müller, M., & Chentanez, N., XPBD: positionbased simulation of compliant constrained dynamics. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Motion in Games (MIG '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 49–54, 2016.
- [3] Kimmel, R., *The Osher—Sethian Level Set Method*. In: *Numerical Geometry of Images*. Springer, New York, NY, 2004.
- [4] Kubo, H., Dobashi, Y., & Morishima, S., CurvatureDependent Reflectance Function for Interactive Rendering of Subsurface Scattering. *International Journal of Virtual Reality*, 10(1), pp. 45–51, 2011.
- [5] Kubo, H., Dobashi, Y., & Morishima, S., Curvaturedependent reflectance function for rendering translucent materials. In *ACM SIGGRAPH 2010 Talks (SIGGRAPH '10)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 46, 1, 2010.
- [6] Schwartz, C., Weinmann, M., et al. Capturing Shape and Reflectance of Food, *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2011 Sketches*, Article No. 28, pp. 1–2, 2011.
- [7] Cho, H., Dressing and Modeling Food, *ACM SIGGRAPH 2007 courses*, pp. 7–21, 2007.
- [8] Xenakis, A., & Tomson, E., Shading Food: making it tasty for Ratatouille, *ACM SIGGRAPH 2007 courses*, pp. 22–33, 2007.
- [9] Gronsky, S., Lighting Food, *ACM SIGGRAPH 2007 courses*, pp. 34–44, 2007.
- [10] Yang, J., & Xiao, S., An Inverse Rendering Approach for Heterogeneous Translucent Materials, *Proceedings of the 15th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, Vol. 1, pp. 79–88, 2016
- [11] Muller, M., Heidelberger, B., et al., Position Based Dynamics, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 18, No. 2, pp. 109–118, 2007.
- [12] Bender, J., Muller, M., et al., A survey on position-based simulation methods in computer graphics, *Computer Graphics Forum*, pp. 1–25, 2014.
- [13] Ebert, D.S., Musgrave, F.K., Peachey, D., Perlin, K., & Worley, S., *Texturing and*

- modeling: a procedural approach, 3rd ed. San Francisco, CA USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 2002.
- [14] David S.Ebert; F.Kenton Musgrave; Darwyn Peachey; Ken Perlin; Steven Worley. Texturing & Modeling: A Procedural Approach. Morgan Kaufmann.; 2003.
- [15] Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., & Van Gool L., Procedural Modeling of Buildings, ACM Trans Graph; 25 (3): pp. 614–623, 2006.
- [16] Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A., The Algorithmic Beauty of Plants, New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc.; 1990.
- [17] Glaszmann, J.C., Isozymes and Classification of Asian Rice Varieties, Theoretical and Applied, Genetics, Vol. 74, pp. 21–30, 1987.
- [18] 富田春雄, 坂本薫, John Henderson, 竹森利和, “浸漬時間の違いによる米飯の構造とテクスチャーの関係”, 日本調理科学会誌, Vol.48, No.1, pp18-25, 2015.
- [19] 中村 澄子, 鈴木 啓太郎, 原口 和朋, 大坪 研一, 物性測定のための米一粒による炊飯方法の開発, 育種学研究, 2007, 9 卷, 2 号, p. 63-66, 2021.
- [20] Okabe, M. (1979). Texture measurement of cooked rice and its relationship to the eating quality. *Journal of Texture Studies*, 10, 131–152.
- [21] Ramesh, M., Bhattacharya, K. R., & Mitchell, J. R. (2000). Developments in understanding the basis of cooked-rice food structure1(2014) 164–170169 texture. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40, 449–460
- [22] Rousset, S., Pons, B., & Martin, J.-F. (1999). Identifying objective characteristics that predict clusters produced by sensory attributes in cooked rice. *Journal of Texture Studies*, 30, 509–532.
- [23] 今中 鏡子, 加藤 集子, 川野 純子, 田方 真由美, 畠山 敏慧, 炊飯米の形態学的研究 : 加熱過程の差, 品種による差, 炊飯量の差における炊飯米粒組織の観察, 広島文化短期大学紀要, Journal Article, 1348-3587, 広島文化短期大学, 2006.
- [24] Michael O’Keeffe, Maxim A. Peskov, Stuart J. Ramsden, and Omar M. Yaghi, The Reticular Chemistry Structure Resource (RCSR) Database of, and Symbols for, Crystal Nets. *Accounts of Chemical Research* 2008 41 (12), 1782-1789
- [25] Bader, R.F.W., Matta, C.F. Atoms in molecules as non-overlapping, bounded, space-filling open quantum systems. *Found Chem* 15, 253–276 (2013).

- [26] Aftab Alam, S. N. Khan, Brian G. Wilson, and D. D. Johnson, Efficient isoparametric integration over arbitrary space-filling Voronoi polyhedra for electronic structure calculations, *Phys. Rev. B* 84, 045105
- [27] Hui, Y.H., *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering*, Vol. 4, CRC-Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [28] Sakagami, N., *Sushi Master: An Expert Guide to Sourcing, Making and Enjoying Sushi at Home*, Quarry Books, Beverly, 2019.
- [29] Shirai, N., Higuchi, T., & Suzuki, H., Analysis of Lipid Classes and the Fatty Acid Composition of the Salted Fish Roe Food Products, Ikura, Tarako, Tobiko and Kazunoko, *Food Chemistry*, Vol. 94, No. 1, pp. 61–67, 2006.
- [30] Nooruddin, F.S., & Turk, G., Simplification and repair of polygonal models using volumetric techniques, *IEEE Trans. Vis. Computer Graphics*, Vol. 9, No. 2, pp. 191–205, 2003.
- [31] Bloomenthal, J., & Wyvill B., *Introduction to Implicit Surfaces*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1997.
- [32] 山崎 妙子, 福場 博保, 加工玄米と精白米の混合炊飯に及ぼす加水量の影響, *調理科学*, Journal Article, 調理科学研究会, 1985.
- [33] Osher, S., Fedkiw, R., & Piechor, K., Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces, *ASME, Appl. Mech. Rev.* May 2004; 57(3): B15.
- [34] Jensen, H.W., & Buhler, J., A Rapid Hierarchical Rendering Technique for Translucent Materials, *ACM Trans. Graph.* Vol. 21, No. 3, pp. 576–581, 2002.
- [35] Wei, L.-Y., Parallel Poisson Disk Sampling, *ACM Transactions on Graphics* 27, 3 (August 2008), 20, pp. 1–2, 2008.
- [36] Amenta, N., Choi, S., & Kolluri, R.K., The Power Crust, In: *Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications (SMA '01)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, 2001.
- [37] Müller, M., & Chentanez, N., Wrinkle Meshes, In: *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, SCA '10*, Eurographics Association, Vol. 8, No. 21, pp. 85–92, 2010.

## 発表論文

### 学術論文

[1] Xiaobo Gan, Tomoya Ito, Tsukasa Kikuchi, Procedural Animation of Freshly Cooked Rice Based on Water Content-Aware XPBD and CDRF Shader, American Journal of Computer Science and Technology. Vol. 4, No.1, 2021, pp.19-27.

Doi: 10.11648/j.ajcst.20210401.13

[2] X Gan, T Ito, Y Takeshima and T Kikuchi, Modelling of Aggregates using Aperiodic Space-Filling and Physical Simulation, Journal of Physics: Conference Series (JPCS). Vol. 2224, 012040.

Doi: 10.1088/1742-6596/2224/1/012040

[3] Xiaobo GAN, Kai LENZ, Tomoya ITO, Yuriko TAKESHIMA, Tsukasa KIKUCHI, Procedural modeling of elastic aggregates based on aperiodic space filling and XPBD Simulation, International Journal of Asia Digital Art and Design Association, 2022, Volume 26, Issue 4, Pages 65-74,

Doi: [https://doi.org/10.20668/adada.26.4\\_65](https://doi.org/10.20668/adada.26.4_65)

### 国際会議発表（査読付き）

[1] 2021年12月3-6日

2nd International Symposium on Automation, Information and Computing (ISAIC 2021) Beijing(Online)

「Procedural Animation of Freshly Cooked Rice Based on Water Content-Aware XPBD and CDRF Shader」

[2] 2022年1月4-6日

International Workshop On Advanced Image Technology (IWAIT 2022) Hongkong (Online)

「Modelling of Aggregates using Aperiodic Space-Filling and Physical Simulation」

[3] 2022年11月26-27日

ADADA+CUMULUS 2022 International Conference for Asia Digital Art and Design 2022 (Online Conference)

「Procedural Modeling of Elastic Aggregates based on Aperiodic Space-Filling and XPBD Simulation」

学会口頭発表

- [1] 2019年11月2-4日 NICOGRAPH 2019 ポスター発表  
「炊き立て米飯のプロシージャルアニメーションに関する研究-Procedural Animation of Freshly Steamed Rice」
- [2] 2019年12月1-2日 VC ワークショップ 2019  
「炊き立て米飯のプロシージャルアニメーションに関する研究」
- [3] 2020年1月22日 令和2年度芸術科学会「東北支部研究会」  
「炊き立て米飯のプロシージャルアニメーションに関する研究」
- [4] 2020年11月2日 NICOGRAPH 2020  
「水分率を考慮したXPBDとCDRFによる炊き立て米飯のプロシージャルアニメーション」