

FLIP と $1/f$ ノイズによる水中砂塵のプロシージャルアニメーション

田中健大¹⁾, 古屋 匠²⁾, 菊池 司³⁾

¹⁾ 拓殖大学大学院, ²⁾ 東京工科大学メディア学部, ³⁾ 東京工科大学

¹⁾ padagt@yahoo.co.jp, ²⁾ m011237351@edu.teu.ac.jp, ³⁾ kikuchitks@stf.teu.ac.jp

Procedural Animation for Sand Ascending in Water using FLIP and $1/f$ Noise

Kenta TANAKA¹⁾, Takumi FURUYA²⁾, Tsukasa KIKUCHI³⁾

¹⁾ Graduate School of Engineering, Takushoku University,

²⁾ School of Media Science, Tokyo University of Technology, ³⁾ Tokyo University of Technology

¹⁾ padagt@yahoo.co.jp, ²⁾ m011237351@edu.teu.ac.jp, ³⁾ kikuchitks@stf.teu.ac.jp

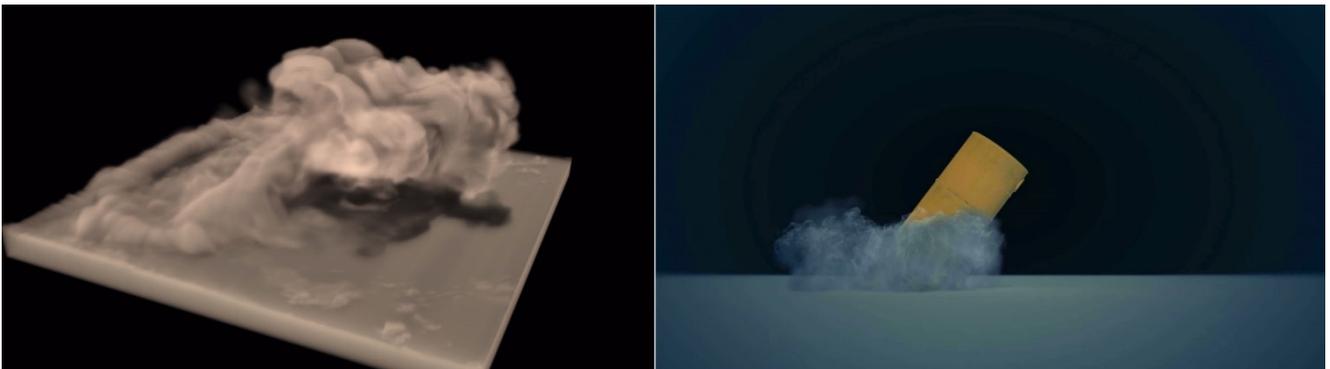


図 1 水中で舞い上がる砂塵の拡散現象. 左: 本論文で提案する手法によるシミュレーション結果. 右: アニメーションに応用した例

アブストラクト

本論文では, 水中で舞い上がる砂塵の拡散現象のプロシージャルアニメーション法を提案する. 砂塵を舞い上げる水流の流体シミュレーションは FLIP 法を用いて行い, 「粗砂」「中砂」「細砂」をそれぞれ表現するための 3 種類の速度場を生成する. さらに, 複雑な水流の変化によって影響を受ける砂の運動, およびそれぞれが粒径や形の異なる砂と水との干渉による独特の運動を再現するために, FLIP のパーティクルに対して, xyz の 3 軸に $1/f$ ノイズによる回転や外力を加える. これにより, 突発的な水流や水との干渉を再現する運動の詳細度を増すことが可能となる. レンダリングには, パーティクルベースボリュームレンダリングを用いることにより, 密度計算のコストを削減しながら水中で舞い上がる砂塵の拡散現象を映像化する.

本手法により, 砂塵の特徴的な運動や海流の外力としての効果と水と砂の干渉現象, および物体と砂塵が干渉しながら舞い上がる様子などを効率よく視覚的に再現することが可能となる.

Keywords: 砂塵シミュレーション, プロシージャルアニメーション, FLIP, $1/f$ ノイズ

Abstract

In this paper, we propose a procedural animation method of diffusion phenomenon of sand ascending in water. In first step, we create velocity field of sand ascending in water using the FLIP method. And it is a three types of "for coarse sand," "for the medium sand", "for the fine sand," based on the classification method of Geotechnical Society criteria. Next, we combine the noise based simulation to represent a unique movement by interfering with the sand movements and various sand and water are affected by changes in the complex water flow. In our method, we can add the details of motion by adding particles individually to a noise in

order to reproduce the like interference with water. And we can reduce the calculation cost of the density by using the particle volume rendering.

Our simulation method, it is possible to efficiently visualize the sand ascending in water.

Keywords: Sand Simulation, Procedural animation, FLIP, *1/f* noise

1. はじめに

本論文では、水中で舞い上がる砂塵の拡散現象のプロシージャルアニメーション法を提案する(図1, 図2)。水中で舞い上がる砂塵の拡散現象は、水深が深くなればなるほど観測、および撮影は困難となる。そのため、本現象をプロシージャルアニメーションすることが可能となれば、エンターテインメント分野で有益であるだけでなく、海における地質学研究や生物学研究の分野での可視化においても有益である。

本論文では、砂塵を舞い上げる水流の流体シミュレーションは Zhu と Bridson が提案した FLIP (Fluid-Implicit-Particle) [1] を用いて行う。生成する速度場は、地盤工学会基準の分類方法に基づいて「粗砂」「中砂」「細砂」をそれぞれ表現するための3種類とし、映像生成時に最終的に合成するものとした。さらに、複雑な水流の変化によって影響を受ける砂の運動、およびそれぞれが粒径や形の異なる砂と水との干渉による独特の運動(ゆらゆら揺れ動く様子など)を再現するために、FLIPにおけるナビエ・ストークス方程式の移流項計算に利用したパーティクルに対して、xyzの3軸に *1/f* ノイズによる回転や外力を加える。これにより、突発的な水流や水との干渉を再現する運動の詳細度を増すことが可能となる。このパーティクルに対しパーティクルベースボリュームレンダリング [2] を行うことにより、密度計算のコストを削減しながら水中で舞い上がる砂塵の拡散現象を映像化する。

本手法により、砂塵の特徴的な運動や海流の外力としての効果と水と砂の干渉現象、および物体と砂塵が干渉しながら舞い上がる様子などを効率よく視覚的に再現することが可能となる。



図2 水槽での砂塵拡散現象観察実験

2. 関連研究

Zhu と Bridson によって提案された FLIP [1] は、流体の運動を記述するナビエ・ストークス方程式に基づき、粒子の挙動を移流部と圧力計算部に分解する。移流項は粒子を速度場に沿って Lagrange 法で計算し、圧力項は粒子の速度を格子にマッピングして Euler 法を用いて計算する。本論文で提案する手法においても、流体計算部分は FLIP を用い、水中特有の砂塵の動きを表現するために *1/f* ノイズによる回転や外力項を加えるものとした。

Ye Fan らは、オブジェクトの変形問題に Euler 法と Lagrange 法を併用する手法を提案している [3]。本手法では、Euler 法で問題となる時間ステップの制限を Lagrange 法を用いることで軽減し、最小二乗法で動きを補間することによって衝突検知も可能としている。本手法は、弾性、および弾塑性オブジェクトが対象のシミュレーションの際、Euler 法の移流項によって誘導される時間ステップの制限を減少させつつ、大きな変形に関しては Euler 法の堅牢性を保持し、プラスチック材料のようなシミュレーションを可能とし、流体以外の材料のための Euler 法シミュレーションとして、有用性が示されている。しかしながら、FLIP のような Euler 法と Lagrange 法によるハイブリッドシミュレーション法ではなく、流体の速度場に応用可能であることは示されていない。

砂の CG シミュレーションに関しては、Rahul Narain らが「お互いにくっつくことはなく粒子が離れる」、および「摩擦と圧力が連成している」という流体とは異なる性質の砂を、Lagrange 法によって砂の粒ひとつひとつの運動を計算しながら、内部への応力を Euler 法によって計算するという手法を提案し、砂のマクロ的な動きを連続体として表現することに成功している [4]。しかしながら、本論文で提案する水中で砂が舞い上がるようなシーンが表現できることは示されていない。また、Iván Alduán らは、SPH 法に摩擦と凝集モデルを導入し、固体と液体の特性を持つ粒状素材(湿った砂など)のシミュレーションを可能としている [5]。この手法では、シミュレーション空間を格子分割することなく、任意の境界条件を適合させることを可能としている。しかしながら、計算コストが非常に高いこと、凝集計算を持続させることができないことなどが問題点として挙げられている。また、本論文で扱う液体の中で舞い上がる砂のような再現はできていない。

水中での剛体落下シミュレーションに関しては、Weissmann と Pinkall らが動力学を考慮したモデルを提案している [6]。この手法では、慣性テンソルと質量を入れ替えるキルヒホッフ応力テンソルによって、流体シミュレーションを行うことなく流体と剛体の相互作用をモデル化している。本手法によって、リア

ルタイムに水中剛体の挙動を計算可能とし、ゆらゆらと水中を漂いながら落下する剛体を表現している。しかしながら、水中を舞い上がり、水流の影響を受けながら沈下していく砂のような表現は成されていない。

Zhang らは各種流体ソルバーにおいて、移流項計算で発散してしまう渦度を追加する手法を提案している [7]。Zhang らは IVOCK (Integrated Vorticity of Convective Kinematics) と呼ぶ新しい方程式を提案し、ベクトルポテンシャルにマルチグリッド V サイクルを用いることによって移流前後のカール渦度誤差を補正した。そして、IVOCK を semi-Lagrangian 法や FLIP に適用した例を示し、圧力項には影響を与えずに移流項のエラーのみを修正することが可能であることを示した。本論文で利用した FLIP には IVOCK は適用していないが、より詳細な渦度成分を表現可能となる可能性はあると思われる。

3. 提案手法の概要

本論文で提案する手法は、下記のようなワークフローになる。

はじめに、砂塵を舞い上げる水流の流体シミュレーションは FLIP [1] を用いて行う (図 3)。その際、後述の「粗砂」「中砂」「細砂」をそれぞれ表現するための 3 種類の速度場を別々に計算し、最終的に映像生成時に合成するものとする。すなわち、3 種類の速度場の相互干渉は本論文では扱わない。

次に、FLIP における移流項計算に利用したパーティクルに対して xyz の 3 軸に $1/f$ ノイズによる回転や外力を加えることにより、砂の運動にさらなるディテールを付加する (図 4)。

このパーティクルにもとづいてパーティクルベースボリュームレンダリング [2] を行うことにより、水中で舞い上がる砂塵の拡散現象を映像化する。

以下の章において、提案手法の詳細を記す。

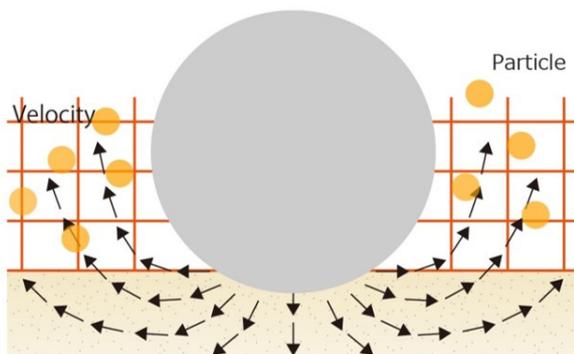


図 3 FLIP による流体シミュレーション

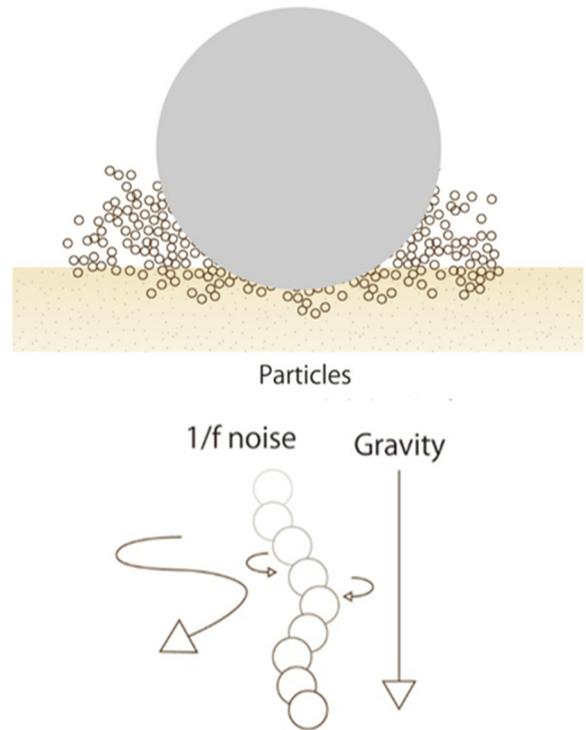


図 4 $1/f$ ノイズによる運動のディテール追加

4. 水中で舞う砂塵

本章では、本論文で表現対象として取り上げる砂と水中での拡散現象に関して述べる。砂とは、日本工業規格 (JIS) による分類と地盤工学会基準の分類によって、粒径によってその呼び方が分類されている。また、水中での拡散現象と気体中の拡散現象は微視的なスケールでは本質的な違いはない。上記の詳細を以下に述べる。

4.1 砂に関する基本調査

砂とは、直径が 2 mm から 0.075 mm の堆積粒子のことで、これより荒いものは礫と呼ばれ、これより細かいものはシルトと呼ばれる。

砂を含めた多くの堆積粒子は、岩石が風雨にさらされて壊れた (風化作用) かけらからできている。一般にははじめは大きなかけら (礫) だったものが、河川によって下流に運ばれる途中でさらに細かく砕かれ、細かいものほどより遠くまで運ばれる。上流の河川では大きな礫が多く、中流・下流と下るにつれて細かい礫から砂へと進化していく。シルトは淡水と海水の会合部分で粘土が凝縮することで形成され、主に 100m 以深の海底に多く見られる。

粒径による分類は、日本工業規格 (JIS) による分類と地盤工学会基準の分類の 2 種類に分けられるが、本論文では後者である地盤工学会基準の分類方法を基にする [8] (表 1)。

表1 地盤材料の粒径区分とその呼び名

粒 径(mm)									
0.005	0.075	0.25	0.85	2	4.75	19	75	300	
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨石
細粒分		粗粒分					石分		

4.2 砂塵の拡散現象

拡散現象は、多くの粒子からなる系が熱平衡に到達しようとするときに必ずみられる一般的な現象であり、熱拡散や原子拡散などによって日常的によく目にする事が可能である。ここでは、粒子が熱平衡になるまで流れ続け、やがて流れは止まる。

系が熱平衡状態にあつて粒子の流れがみられない場合でも粒子は完全に静止しているわけではなく、有限温度では粒子は微視的なスケールで不断の運動を繰り返して、その結果、時々刻々その居場所を変えている。このことは気体の分子運動を考えれば明らかであるが、液体や固体でもその本質は変わらない。しかしながら、粒子間の束縛が強くなるにつれて、その移動距離が小さくなっていく。さらに、熱的なゆらぎによって粒子にどのような運動が生ずるか、さらには、1個の粒子の運動を追跡することではなく、多くの粒子の運動の統計的性質が問題となる [9]。

水中での砂塵の拡散現象は、海底に堆積した砂が魚などのオブジェクトの衝突などによって海底面に急激な外力が加わり、それによって発生する乱流によって砂が舞い上がることで発生する。

本論文では、水中の乱流を伴う流体を表現するため、Zhu と Bridson が提案した FLIP [1] を用い、水中特有の抵抗、および外力による砂塵が舞う運動のディテールは、砂に割り当てたパーティクル個々の運動を制御することで実現する。

5. FLIP による流体シミュレーション

本論文では、水中の乱流成分を伴う速度場を生成するため、FLIP を用いて計算する。FLIP では、流体の運動を記述するナビエ・ストークス方程式 (式 (1)) に基づき、粒子の挙動を移流部分と圧力計算部に分解する。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 t は時間、 ρ は流体の密度を表す定数、 p は圧力、 \mathbf{f} は外力を表す。左辺は流体の速度場の時間変化を表し、右辺はそれぞれ移流項と圧力項と外力部分を示す。粘性項は、移流計算時に数値拡散として自動的に取り込まれるので、式からは省いた [10]。FLIP は移流項を粒子を使ってラグランジュ的に、圧力項を格子を使ってオイラー的に解く。すなわち、FLIP はラグランジュ法とオイラー法の利点を組み合わせたハイブリッドな手法と言える。

ラグランジュ表記では、移流項は以下のように表される。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = 0 \quad (2)$$

すなわち、流速値を持った粒子を流れに沿って移動させるだけで計算可能であり、圧力項は格子法で離散化するため、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法などの完全な粒子法と比べて行列のバンド幅が小さく、高速に圧力場を求めることが可能である。なお、圧力項において法線の向きでの圧力勾配がゼロ $\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0$ のノイマン境界条件を与えたポアソン方程式を解くことによって、障害物などとの干渉を計算することも可能である。

FLIP において、流体領域は粒子の集合で表現される。FLIP シミュレーションの流れは、以下ようになる (図5)。まずはじめに、圧力項を計算する。圧力項は①粒子の流速場を格子に転写して、②いったん格子上で圧力を計算する。粒子での圧力勾配は③格子で計算された圧力の勾配を粒子位置で補間して求める。移流項は圧力項の後で計算する。移流項は④粒子の位置で格子の流速を補間し、その流速に従って粒子位置を移動して計算する。FLIP によって生成された速度場の速度ベクトルを線描したものと、パーティクルをレンダリングした結果を図 6 に示す。

FLIP シミュレーションの詳細に関して、本論文での記述は割愛する。文献 [1] および [10] に詳細が記述されているので、そちらを参照されたい。

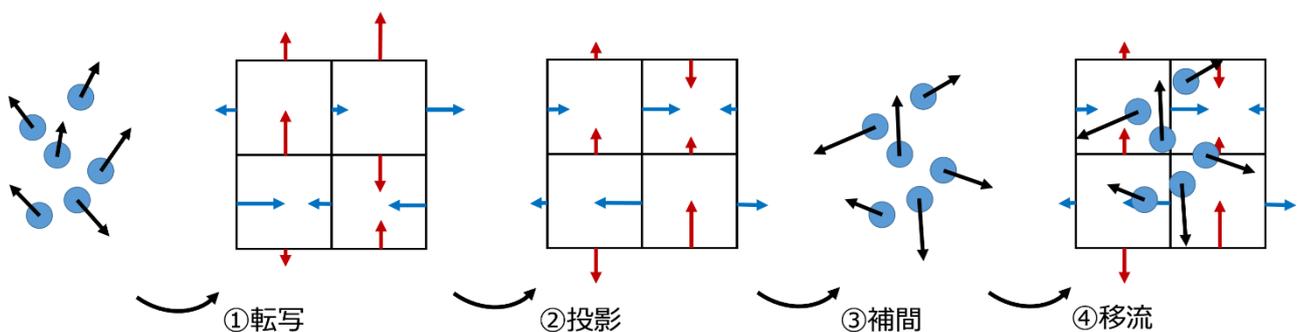
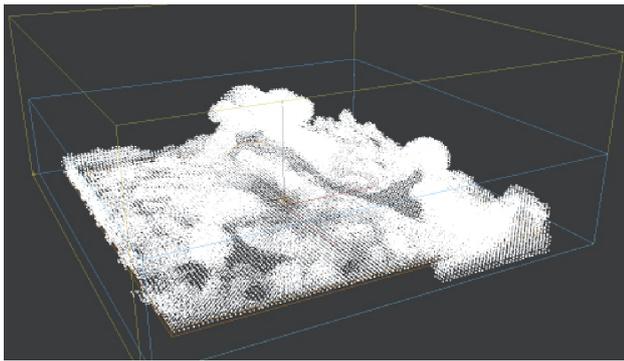
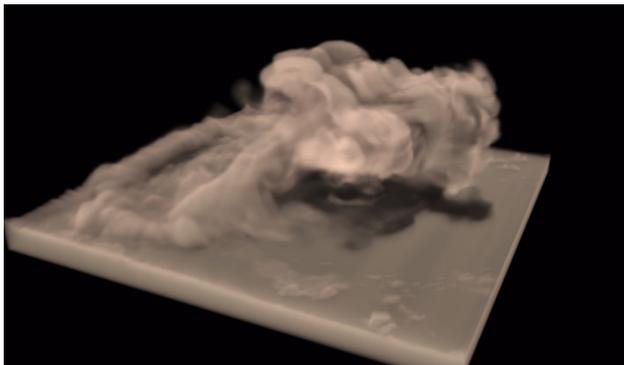


図5 FLIP シミュレーションの流れ



(a) 速度場の速度ベクトル線描



(b) レンダリング結果

図6 FLIPで生成した速度場の例

6. 砂 (3種) の速度場生成

水中での砂塵の舞い上がり方、および砂の挙動を観察し、それを水中での速度場を生成 (パラメータ調整) の参照映像とするため、以下のような実験を行った。

先に述べた地盤工学会基準の分類方法 (表1) をもとに、粗砂 (2mm)、中砂 (0.5mm)、および細砂 (0.2mm) の粒径の異なる3種類の砂を用意し (図7)、1種類ずつ別々の水槽に敷き詰めたあと、水槽を水で満たした (図8)。そして、水を入れてある程度の重さを持った状態のペットボトルを一定の強さ (実験実行者の手で行っている) で、厳密に一定の強さとは言えないことを断っておく) で水槽底に沈んでいる砂層を叩き、砂の舞い上がり方を観察 (撮影) した (図2, 図9)。観察実験はそれぞれの粒径で5回行い、計測した結果は図10(b)、図11(b)、および図12(b)の線色の違いで示した。撮影はCanon EOS Kiss X5を使用し、映像サイズ640×480、30fpsで行った。

観察実験の結果、粒径2mmの粗砂は砂自体の重さがあるため、また水との接触する面が多いため砂自体があまり舞い上がらない。舞い上がった部分を映像をもとに計測すると、ペットボトルの周囲約10mmの範囲の砂が舞い上がり、舞い上がる高さは平均約35mm (6回の衝突) であった。また、ペットボトルの衝突から3f~4fで最高到達点に達し、その後10f~13fで堆積した (図10)。

粒径0.5mmの中砂は、2mmの粗砂に比べると高く舞い上がり、舞い上がる砂の量も多くなった。舞い上がった砂はペットボトルの動きによって引き起こされた水流の影響を受けなが

ら落下した。舞い上がる砂は、ペットボトルの周囲約20mmの範囲で、舞い上がる高さは平均約60mmであった。また、ペットボトルの衝突から4f~6fで最高到達点に達し、その後14f~18fで堆積した (図11)。

粒径0.2mmの細砂は、舞い上がる高さ・砂の量ともに他の砂と比べて多い。また、舞い上がった砂、および沈殿している砂ともにペットボトルの動きによって起こった水流の影響を受け、ペットボトルが衝突した周囲だけでなく、少し離れたところからも砂が舞い上がる様子が観察された。さらに、一部の砂は、沈殿するまでかなりの時間を要する場合があった。舞い上がる砂は、ペットボトルの周囲約70mmの範囲で、舞い上がる高さは平均約100mmであった。また、ペットボトルの衝突から9f~11fで最高到達点に達し、その後28f~32fで堆積した (図12)。

以上の観察実験より、粗砂、中砂、および細砂では砂の舞い上がり方と運動に大きな違いがあることがわかった。そこで本論文では、FLIPによる速度場を3種類別々に生成したあと、映像生成時に合成するものとした。すなわち、映像上で合成しただけにすぎず、速度場の相互干渉を再計算することはないものとした。

観察実験を撮影したものを参照映像として、図13に粗砂、中砂、および細砂の速度場をFLIPによってシミュレーションした例を示す。図13では、パーティクルそのものを点描している。なお、本シミュレーションには表2に示す構成のPCを使用し、シミュレーション、およびレンダリングに必要な時間とパーティクル数は、粗砂、中砂、細砂それぞれ、表3、表4、および表5に示す通りであった。なお、表中に式(1)中には含まれていない動粘性係数 ν が存在する。これは、式(1)では粘性項は移流計算時に数値拡散として自動的に取り込まれるので、式からは記載を省いて簡略化した形で示したからであり、実際のシミュレーションにおいては移流計算時に粘性項 $\nu \nabla^2 \mathbf{u}$ の計算も必要となるため、表中には実際にシミュレーション計算で利用した動粘性係数 ν を示した。

図13より、粒径の異なる砂の舞い上がり方の違いや堆積するまでの時間の違いなど、砂塵の特徴的な運動が表現可能であることがわかる。

表2 速度場生成に使用したPCの構成

使用 PC	HP Workstation z820
プロセッサ	Intel(R) CPU E5-26400 @ 2.50GHz 2.50
OS	Windows 7 (64bit)
メモリ	24 GB
Graphics card	NVIDIA Quadro 4000

表3 粒径2mmの粗砂の速度場シミュレーション

フレーム数	32
動粘性係数 ν	0.018
流体密度定数 ρ	0.1
パーティクル数	1,000,000
シミュレーション時間	約 2分 20秒
レンダリング時間	約 3分 15秒

表4 粒径 0.5 mm の中砂の速度場シミュレーション

フレーム数	50
動粘性係数 ν	0.005
流体密度定数 ρ	0.05
パーティクル数	2,000,000
シミュレーション時間	約 3 分 45 秒
レンダリング時間	約 5 分 30 秒

表5 粒径 0.2 mm の細砂の速度場シミュレーション

フレーム数	100
動粘性係数 ν	0.002
流体密度定数 ρ	0.01
パーティクル数	4,000,000
シミュレーション時間	約 10 分 20 秒
レンダリング時間	約 20 分 00 秒

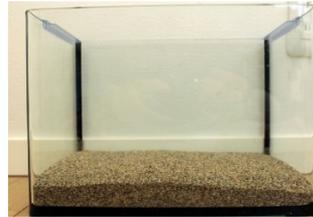


図8 観察実験のセッティング



図9 観察実験を撮影した例



(a) 粒径 2 mm の粗砂



(b) 粒径 0.5 mm の中砂



(c) 粒径 0.2 mm の細砂

図7 観察実験に使用した砂

7. $1/f$ ノイズによる砂塵運動の詳細度追加

FLIP シミュレーションに使用しているパーティクルに対して、海流による突発的な水流や水との干渉を再現する $1/f$ ノイズを、式 (1) の外力 f として加える。これにより、砂塵の運動にさらなるディテールを付加する。 $1/f$ ノイズは「自然界に存在するノイズ」として様々な分野で利用され、CG でも $1/f$ ノイズをシミュレーションに利用する研究例は数多く存在している [11, 12].

熊谷らの研究 [13] では、扁平率の異なる 2 楕円球の流体力学的相互作用を解明するために、楕円球群の運動に対する Oseen 速度場重ねあわせ法による数値計算法を開発しているが、楕円球自体の回転を考慮していないため、単純な並列配置にも対応できない。そのため、複雑で多数の粒子の運動を表現しなければならない本論文での砂塵表現に応用することはできない。

本論文では、以下のような手順でパーティクルに $1/f$ ノイズを付加して砂塵のシミュレーションを行う。

- (1) 第 6 章で述べた 3 種類の速度場を、FLIP シミュレーションによって生成する。
- (2) 水流の突発的な揺らぎ（海流や波の引き戻しなど）が生じた際には、外力 f を任意で加える。
- (3) また、個々の粒子と水との干渉による回転運動を再現するため、x 軸、y 軸、z 軸それぞれに $1/f^\beta$ ノイズによる回転移動量をタイムステップ毎にを加える（図 14）。

ここで、 $1/f^\beta$ ノイズとは、パワースペクトルが周波数の β 乗に反比例しているノイズであり、 $\beta=0$ で白色ノイズとなる。 $1/f$ ノイズの大きさと β の値の組み合わせにより、様々な 3 次元ベクトル場を構成することが可能となる。

本手順によりシミュレーションした結果を図 15 に示す。本シミュレーションでは、 $|1/f| = 2.0$ 、 $\beta = 1.0$ とした。図 15 では回転運動が観察しやすいように粒子を薄い四角形のプレーンで置き換え、粗砂を赤いプレーン、中砂を緑のプレーン、細砂を青いプレーンで表している。さらに、図 15 に示したシミュレーション結果を後述のパーティクルベースボリュームレンダリングしたものを図 16 に示す。本論文で採用するパーティクルベースボリュームレンダリングでは、シミュレーションに利用しているパーティクルから色データを生成するため、パーティクル自体の運動が映像に反映されることが図 16 よりわかる。なお、図 16 では特に粗砂の形状と運動が観察しやすいよ

うにパーティクル色のスカラ値を大きくした。そのため、後述の図 17 に示した最終成果映像とは見え方が若干異なることを断っておく。

8. パーティクルベースボリュームレンダリング

前述の砂塵運動の詳細度追加のために使用したパーティクルを利用して、パーティクルベースボリュームレンダリング (PBVR : particle-based volume rendering) を行う。

小山田らが提案した PBVR [2] では、パーティクル生成とパーティクル投影という 2 つの処理ステップから構成されているが、本研究では粒子生成は第 5 章、および第 6 章で述べたパーティクルシミュレーションの段階で完了しているため、パーティクル投影だけで画像を得ることができる。

前述のシミュレーションによって生成されたパーティクルの投影処理では、Z-バッファアルゴリズムを使って視点に最も近いパーティクルの投影像を残し、それらを使って画素値を計算する。最終的に残ったパーティクルについてはカラーマッピングとシェーディング計算が行われる。カラーマッピングは色伝達関数を使って、パーティクル位置で補間計算されたスカラデータを色データに変換する。シェーディング計算は下記式 (3) に従って、パーティクル位置で補間計算された勾配ベクトルと光源ベクトルより陰影を計算し、これに色データを乗算する。

$$I = k_a + I_L k_d (\vec{L} \cdot \vec{G}) + I_L k_s (\vec{E} \cdot \vec{R})^s \quad (3)$$

ここで、 \vec{L} は光源の方向を示す方向ベクトル、 \vec{G} は法線ベクトル、 \vec{E} は視線ベクトル、 \vec{R} は反射方向ベクトルを表し、 I_L は入射光の強度、 k_a 、 k_d 、 k_s 、 s はそれぞれ、環境光、拡散反射光、鏡面反射光、光沢に関する係数である。

PBVR を用いることにより、シミュレーション空間の密度関数を計算することなく画素値を得ることが可能となる。

9. シミュレーション結果

本論文の提案手法によってシミュレーション、および映像作成を行った例を、図 17 に示す。シミュレーション、およびレンダリングと映像生成に使用した環境とパラメータは、表 2 と同様である。

なお、本映像は以下の URL にて公開している。

<https://youtu.be/hBCCxENm6j4>

ここで示したシミュレーション結果は、NICOGRAPH 2015 [14] にて発表したものからシミュレーション手法を FLIP 法に改良し、改めて生成したものである。

シミュレーション結果 (図 17) より、水深の深い海底でのシーンにおいて、砂塵の特徴的な運動や物体と砂塵が干渉しながら舞い上がる様子などが表現可能であることがわかる。

10. まとめと今後の課題

本論文では、水中で舞い上がる砂塵の拡散現象のプロシージャルアニメーション法を提案した。砂塵を舞い上げる水流の流体シミュレーションは FLIP 法を用いて行い、「粗砂」「中砂」「細砂」をそれぞれ表現するための 3 種類の速度場を生成した。そして、映像生成時に最終的に合成するものとした。さらに、複雑な水流の変化によって影響を受ける砂の運動、およびそれぞれが粒径や形の異なる砂と水との干渉による独特の運動を再現するために、FLIP のパーティクルに対して、xyz の 3 軸に $1/f$ ノイズによる回転や外力を加えた。これにより、突発的な水流や水との干渉を再現する運動の詳細度を増すことが可能となった。このパーティクルに PBVR を行うことにより、密度計算のコストを削減しながら水中で舞い上がる砂塵の拡散現象を映像化した。

本手法により、砂塵の特徴的な運動や海流の外力としての効果と水と砂の干渉現象、および物体と砂塵が干渉しながら舞い上がる様子などを効率よく視覚的に再現することが可能となった。

今後の課題としては、海底の砂に混入しているであろう異物の表現、舞い上がった砂塵に干渉する魚などの影響、および深海自体の表現手法などが挙げられる。

参考文献

- [1] Yongning Zhu and Robert Bridson, “Animating Sand as a Fluid”, ACM Trans. Graph. Volume 24 Issue 3, (July 2005), 965-972. 2005.
- [2] 小山田耕二, 坂本尚久, “粒子ボリュームレンダリング—理論とプログラミング—”, コロナ社, 2010.
- [3] Ye Fan, Joshua Litven, David I. W. Levin, and Dinesh K. Pai, “Eulerian-on-Lagrangian Simulation”, ACM Trans. Graph. Volume 32 Issue 3, Article 22, 2013.
- [4] Rahul Narain, Abhinav Golasm and Ming Lin, “Free-Flowing Granular Materials with Two-Way Solid Coupling”, ACM Trans. Graph. -Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2010, Volume 29 Issue 6, Article 173, 2010.
- [5] Iván Alduán and Miguel A. Otaduy, “SPH Granular Flow with Friction and Cohesion”, SCA '11 Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 25-32, 2011.
- [6] Weissmann, S., Pinkall, U., “Underwater Rigid Body Dynamics”, ACM Trans. Graph. Volume 31 Issue 4, Article 104 (July 2012), 7 pages. 2012.
- [7] Zhang, X., Bridson, R., Greif, C., “Restoring the Missing Vorticity in Advection-Projection Fluid Solvers.”, ACM Trans. Graph. 34, 4, Article 52 (August 2015), 8 pages. 2015.
- [8] 地盤工学会基準, “地盤材料の工学的分類方法”, JGS0051-

2009.

[9] 深井 有, “拡散現象の物理”, 朝倉書店, 1988.

[10] 三谷 純, 五十嵐悠紀, 岩崎 慶, 徳吉雄介, 吉澤 信, 高山健志, 岡部 誠, 向井智彦, 山田醜田, 辛 孝宗, 井尻 敬, 梅谷信行, 安東遼一, 原田隆宏, “Computer Graphics Gems JP 2012 コンピュータグラフィックス技術の最前線”, 株式会社ボーンデジタル, 2012.

[11] 高橋 孝彰, 藤本 忠博, 千葉 則茂, “滝のノイズベースアニメーション”, 芸術科学会論文誌, Vol.4, No.2, pp.68-76, 2005.

[12] M.Abdukadir, T.Fujimoto, M.Geni and N.Chiba, “An Efficient Hybrid Method for Animating the Growth of Large-Scale Cumulus-Type Cloud”, The Journal of the Society for Art and Science, Vol.6, No.4, pp179-196, 2007.

[13] 熊谷輝雄, 清水正樹, “粘性流体中での楕円球群の自由落下について”, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集 (2), pp.451-452, 2004.

[14] 田中健大, 古屋 匠, 菊池 司: “水中砂塵表現のためのSemi-Lagrange とパーティクルによるハイブリッドシミュレーション法”, NICOGRAPH 2015 Conference Track Full Paper, F-08, 2015.



田中健大

2011 年 拓殖大学工学部工業デザイン学科卒業。2013 年, 同大学院工学研究科工業デザイン学専攻博士前期課程修了。現在, 株式会社オムニバス・ジャパン 勤務。CG クリエイター。在学中は, CG によるプロシージャルアニメーション技術に関する研究に従事。



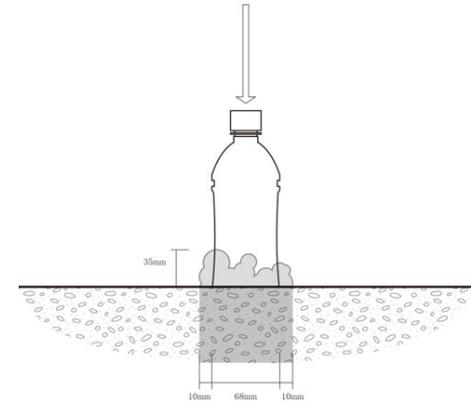
古屋 匠

2012 年東京工科大学メディア学部入学。CG を中心に, コンテンツ制作について幅広く勉強し, 卒業研究ではCGでの流体シミュレーションに関する研究に従事。2016 年 東京工科大学メディア学部卒業。現在, Integral Vision Graphics に所属し, 3DCG の制作業務に従事。

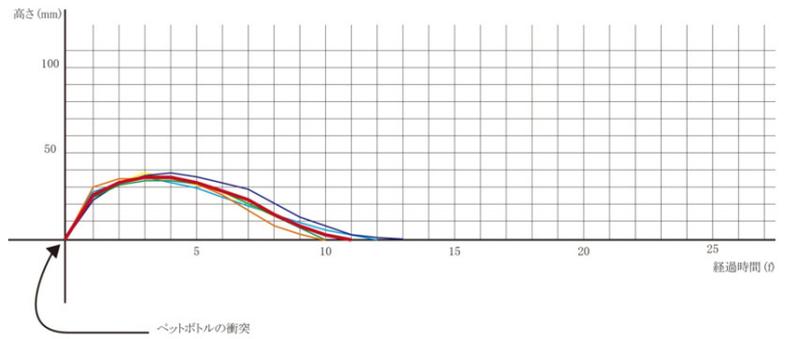


菊池 司

1999 年岩手大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2000年拓殖大学工学部工業デザイン学科助手。2004年同大学専任講師。2007年から2008年まで韓国・高麗大学客員教授。2009年拓殖大学工学部工業デザイン学科(現デザイン学科)准教授, 2014年東京工科大学メディア学部准教授, 現在に至る。コンピュータグラフィックス, Procedural Animation, Procedural Simulation, およびコンテンツデザイン, コミュニケーションデザイン分野の研究に従事。ACM, 芸術科学会, 情報処理学会, 画像電子学会, 他会員。



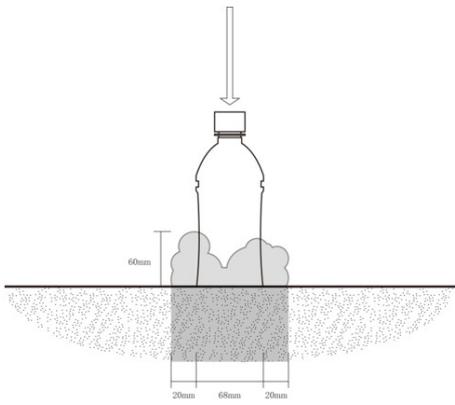
(a) 粒径 2 mm の粗砂の衝突実験映像から計測したもの



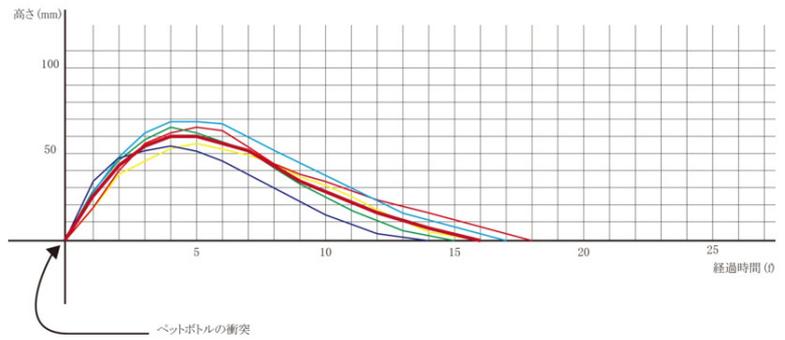
(b) 粒径 2 mm の粗砂の衝突実験映像から計測した結果のグラフ

(縦軸は高さ mm, 横軸は時間 f)

図 10 粒径 2 mm の粗砂の衝突実験結果



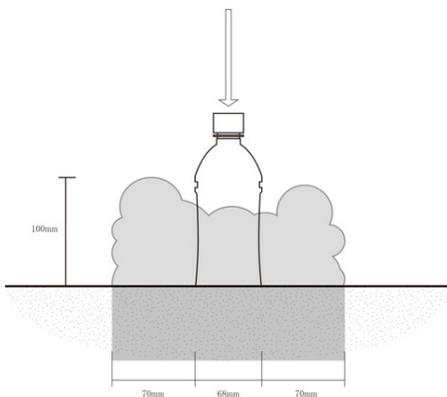
(a) 粒径 0.5 mm の中砂の衝突実験映像から計測したもの



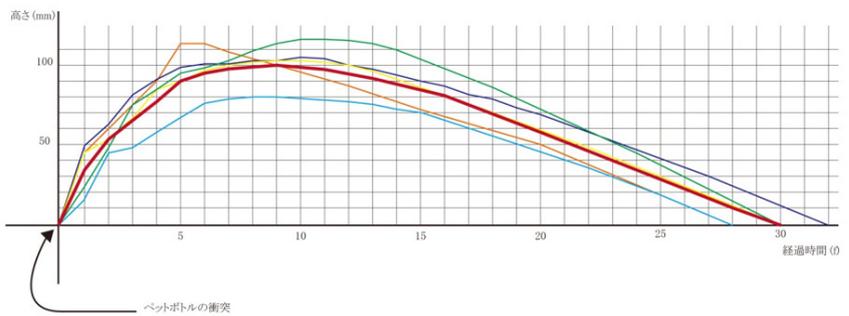
(b) 粒径 0.5 mm の中砂の衝突実験映像から計測した結果のグラフ

(縦軸は高さ mm, 横軸は時間 f)

図 11 粒径 0.5 mm の中砂の衝突実験結果



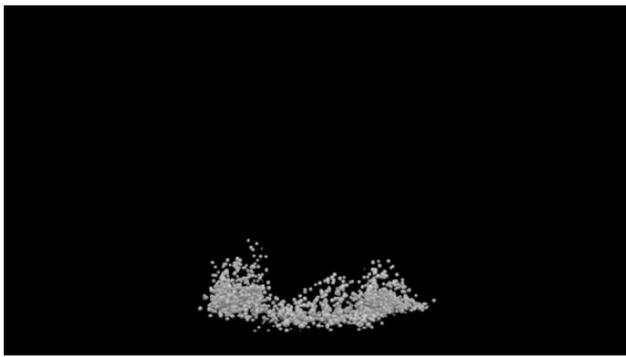
(a) 粒径 0.2 mm の細砂の衝突実験映像から計測したもの



(b) 粒径 0.2 mm の細砂の衝突実験映像から計測した結果のグラフ

(縦軸は高さ mm, 横軸は時間 f)

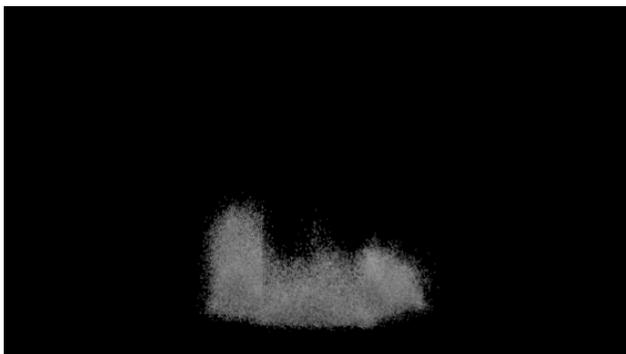
図12 粒径 0.2 mm の細砂の衝突実験結果



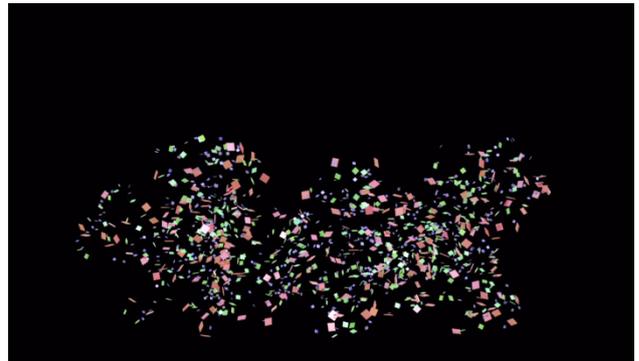
(a) 粒径 2 mm の粗砂の速度場生成例



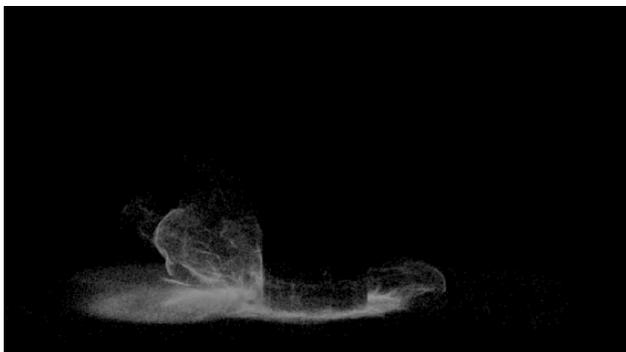
(a) シミュレーションステップ t



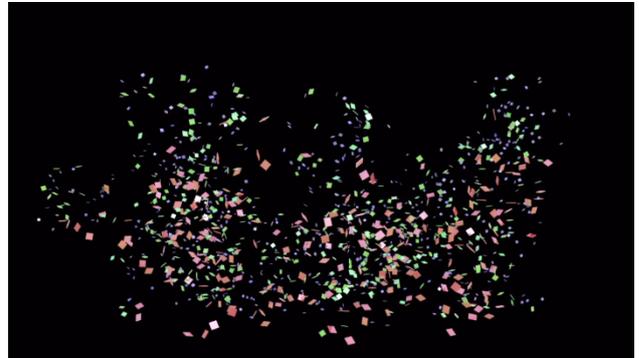
(b) 粒径 0.5 mm の中砂の速度場生成例



(b) シミュレーションステップ $t+\Delta t$



(c) 粒径 0.2 mm の細砂の速度場生成例



(c) シミュレーションステップ $t+\Delta t$

図13 Semi-Lagrange 法による 3 種類の速度場生成例

図15 パーティクルによる砂塵の運動シミュレーション例 (赤いプレーンは粗砂, 緑のプレーンは中砂, 青いプレーン細砂を表す)

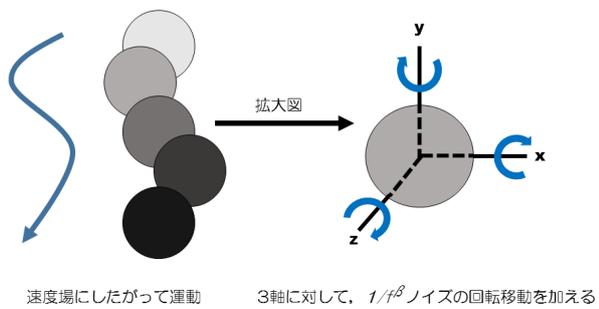


図14 パーティクルの回転運動



図16 図15をパーティクルベースボリュームレンダリングした例



(a)



(b)



(c)



(d)

図 17 映像生成例