

複雑な水流のシミュレーション

中川 滋雄* 千葉 則茂** 斎藤 伸自*

*東北大学 **岩手大学

山岳を流れる溪流や、岸壁に打ち寄せる砕け波のように複雑な運動をする水流は、自然景観のシミュレーションにおいて重要な役割を果たす。筆者らはこのように複雑な運動をする流体をその要素である小さな流体の粒子の集合として捉え、その粒子の行動を記述し実行するという手法により2次元の流れのシミュレーションを行った。

本報告では、3次元流れに拡張したシミュレーションの方法と、そのシミュレーション例について述べる。

Realistic Behavioral Simulation of Complex Current

Shigeo Nakagawa* Norishige Chiba** Nobuji Saito*

*Department of Electrical Communications,
Faculty of Engineering, Tohoku University,
Sendai, 980, Japan

**Department of Computer Science,
Faculty of Engineering, Iwate University,
Morioka, 020, Japan

Image synthesis with realistic motion simulation of complex current, such as a current in a mountain stream or breaking wave crest, plays an important part in CG simulation of natural scenes. We simulated motion of 2D-current by employing a behavioral simulation technique with many particles.

In this paper, we present a 3D version of the behavioral simulation.

1. はじめに

溪流や海の波などの複雑な水流の運動、樹木の枝葉の風による揺らぎ、煙突から流れる煙のたなびき、そして焚火・ろうそくなどの炎のゆらめきなど、「流れ」は自然現象として我々の目の前に広く現れる。「流れ」を支配する流体の運動は一般にナビエ・ストークスの方程式として知られる基礎方程式で記述され、これを数値解析的な手法により解く計算流体力学の研究分野が、計算機の能力の向上とともに、近年非常に進展してきている[流体87][情報88]。しかし現時点では、3次元流れのシミュレーションにおいては、規模の小さな3次元流れにおいてもスーパーコンピュータ等の高速な計算機の利用が前提とされている。また、溪流のように流れの境界面形状が時間的に変化し、特に“砕け波”のように境界面において流体が切断されるような流れについては、取扱いが困難である。さらにそれを利用する側の観点からは、流体力学に関する知識や、非線形偏微分方程式を取り扱うための、高度な数値解析法を駆使する専門的能力が要求されることになる。しかしながら、自然景観を構成するさまざまな自然現象を同時にシミュレーションしなければならないというCGの立場からは、より容易かつ計算コストの安価なシミュレーション法が期待されよう。

一方、さまざまな自然現象を、ある種の単純な行動規則をもつ個々の要素で構築することによりシミュレーションしようという試みも活発に行われてきており[Ree83][内木87][Rey87][Hau88]、このような行動モデルによるシミュレーションの有効性が急速に認識され始めている。数式モデル与えられている自然現象に対してさえも、その簡便さと実行可能性のみならずリアリティさにおいても少しも遜色がないといえよう。さらに、数式モデルの離散化という過程を経ることなく、またそのような知識をもたずとも経験的に行動モデルを構築することにより、直接的にシミュレーションできるという利点もある。

筆者らは、行動モデルによる手法に基づき、溪流などの複雑な水流のシミュレーション法の開発を目指している。すなわち、仮想的な小さな流体のかたまりを“流体粒子”と呼び、その簡明な行動モデルを定めることにより、その集合である「流れ」全体の運動のシミュレーションを試みている。

本報告では、流れの行動モデルとともに、2次元および3次元の水流のシミュレーション例を示す。さらに、今後の課題について述べる。

2. “流体粒子”の行動モデル

ここでは“流体粒子”どうしの間、また“流体粒子”と障害物との関係性を記述する行動モデルを考える。「流体粒子」とは、連続体としての流体の運動を無数の微小部分に分けて質点系として取り扱う際に用いられる用語であるが、ここではある行動規則にしたがうモデルとして定義しておく。この“流体粒子”の規模は、「流れ」の現象を記述するための解像度を求めるのに十分な大きさであればよい。

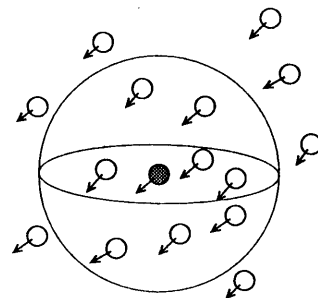
“流体粒子”の行動モデルに期待される行動としては、以下のような性質が考えられる。

- ・空間へのなだれ込み
- ・障害物や壁面の回避
- ・層流性と乱流性

流体の運動は、大きく層流と乱流に分類されている。ここでは、実際の流れを観察するときに理解される範囲で“層流”と“乱流”とを定義しておくことにする。すなわち、流線の時間変化がゆるやかな流れ(の部分)、例えば、大河の安定した流れや蛇口からゆるやかに流した水流が層流であり、不規則に乱れるもの、例えば、障害物の後方の乱れや、吹き荒れる風などは乱流であると解釈しておく。そうすると、自然現象に多くみられる流れの形には、乱流性が大きく寄与しており、その表現が重要であるといえよう。

2. 1. 知覚

“流体粒子”は他の粒子の存在を知覚するが、その範囲は自分を中心とするある一定半径の内部に限られる。すなわち3次元では知覚範囲はある半径の球の内部となる[図1]。



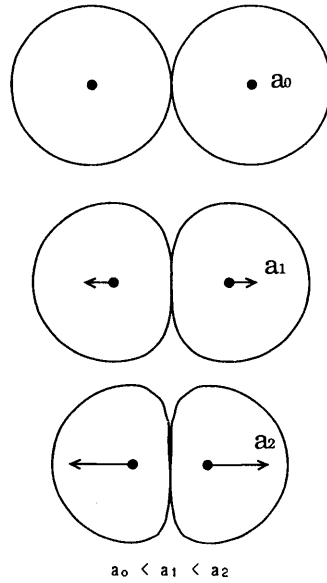
[図1] “流体粒子”の知覚範囲

2. 2. 行動規則

“流体粒子”は空間に分布する質点として定義され、一個一個が位置座標および速度ベクトルの情報をもつ。“流体粒子”は知覚範囲内部にある他の粒子のもつ情報から、以下に述べる行動規則にしたがって速度の変化分を決定し、一計算ステップ時間の経過後に一斉にその位置と速度を更新する。

2. 2. 1. 圧力勾配に応じた速度変化

“流体粒子”はある一定の体積をもつと仮定されるため、なるべく他の“流体粒子”とは接近しないように行動する。そのため他の“流体粒子”との距離に反比例する大きさで、互いに反発する方向の力を受ける〔図2〕。これは計算ステップ時間が単位時間であるとする、圧力勾配による速度の変化であると考えられる。



〔図2〕 圧力勾配による速度変化

2. 2. 2. 粘性に応じた速度変化

“流体粒子”は周囲の速度の場にしたがうようにはたらく速度の変化を受ける〔図3〕。これは粘性を媒介とするような速度の変化であると考えられる。速度場ベクトルを計算する際に、ある“流体粒子”との単純な速度ベクトル差は、その間の距離に応じて重みづけされて加算される。これは自分に対する影響が近いものほど強く、また遠いものほど弱くと想定することによる〔図4〕。

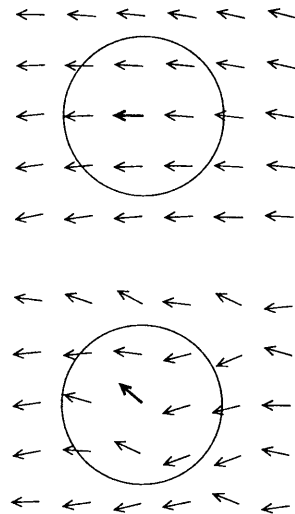
2. 2. 3. 重力による速度変化

“流体粒子”は重力加速度を受ける。これにより、粒子間で互いに反発する要因に対して、粒子が互いに接近するための要因として期待できる。

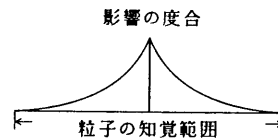
2. 2. 4. 障害物との衝突

“流体粒子”は壁面によって囲まれた流路の中を移動してゆく。壁面などの障害物との衝突が検知されるときには、“流体粒子”はその障害物に対して完全弾性衝突するように行動するものとする〔図5〕。

知覚範囲の球領域を S とし、その半径を R とする。時刻 $[t]$ における“流体粒子” o の速度ベクトルを v_o とし、



〔図3〕 粘性に応じた速度変化



〔図4〕 距離に応じた重みづけ

S 内部の他の“流体粒子” j の速度ベクトルを v_j 、 o と j の距離を r_j 、 j から o へ向かう単位ベクトルを n_j 、 α と β を定数とすると、時刻 $[t+1]$ では、速度 v_o は以下のように更新される。ただし、 α は圧力勾配による速度変

化を支配する係数、 β は流体の粘性に関わる係数である。

$$v_o[t+1] := v_o[t] + a_p + a_v + a_g$$

$$a_p = \alpha \Sigma_j n_j / r_j$$

(圧力勾配による速度変化)

$$a_v = \beta \{ \Sigma_j w(r_j) (v_j - v_o) \} / \Sigma_s W(r_j)$$

(他の流体粒子との速度差による速度変化)

$$a_g = \text{const.}$$

(重力加速度)

w は重み関数であり、 $\Sigma_s W(r_j)$ はシミュレーションの空間解像度に応じた正方格子点のうち、 S に属するすべての格子点 j についての重みの総和である。

w として、現在は、

$$w(r_j) = \exp(-\gamma(r_j/R))$$

を用いている。 γ は $r_j=R$ のときに、 w が実質的に0とみなせる大きさととる。 R は、シミュレーションの時間解像度に応じて発生するエイリアスの除去の効果を表すと考えられる。すなわち、時間変分が大きいほど大きくとるとよい。

3. シミュレーション

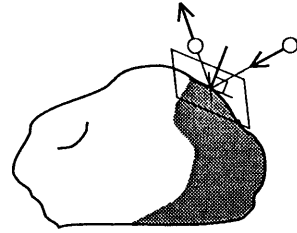
3. 1. “流体粒子”

“流体粒子”は位置座標と速度ベクトルおよび状態を保持する変数の構造体とした。更新の前と後用にこの構造体の配列を2つ使用し、一方から他方を更新する手続きを繰り返した。

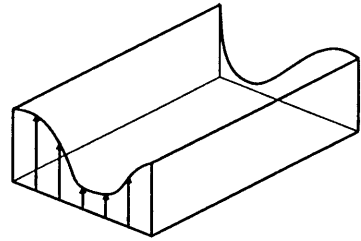
今回行ったシミュレーションでは、川底状の流路に障害物を配置し、一方の端から次々に粒子を生成させた。粒子は流路を移動し、もう一方の端に到達すると消去される。

3. 2. 障害物処理

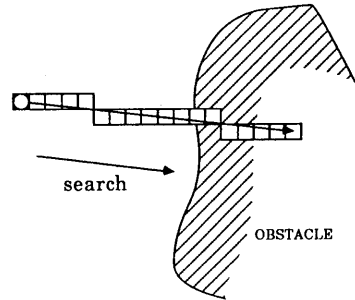
障害物および流路は 1024×512 の平面格子点上に高さの一意関数(デジタル地形モデル)として与え、更新後に粒子が貫通するときには粒子を完全弾性反射させる[図6]。その際に障害物の法線ベクトルが必要となるが、これは地形データにSobel演算子を適用してあらかじめ求めておく。また同時に粒子と障害物の交点座標が必要であるが、これを求めるために、速度



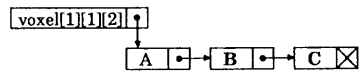
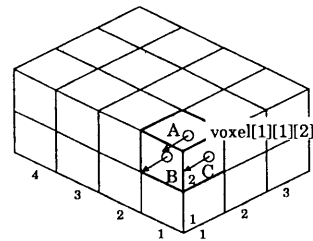
[図5] 障害物との衝突



[図6] デジタル地形モデル表現による流路



[図7] 速度ベクトルに沿った障害物との交点の探索



[図8] 空間の分割と粒子のリスト

ベクトル上を空間座標に増分値を加えながら探索してゆく方法をとった [図7]。

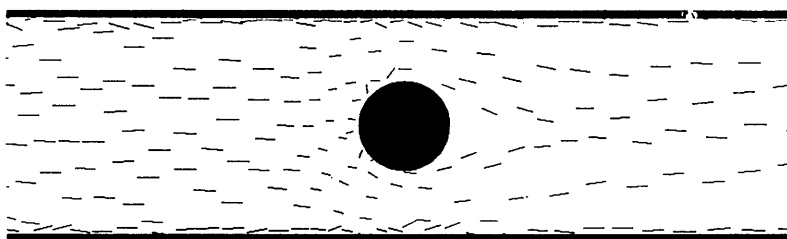
3. 3. 近傍粒子の探索

このシミュレーションにおいて処理の時間がかかるのが近傍の粒子を探索する手続きであるが、これを単純に全粒子について距離を算出して近傍かどうかを判定すると、 n 個の粒子に対して $O(n^2)$ の時間計算量となる。この高速化のために、まず空間を粗い立体格子に

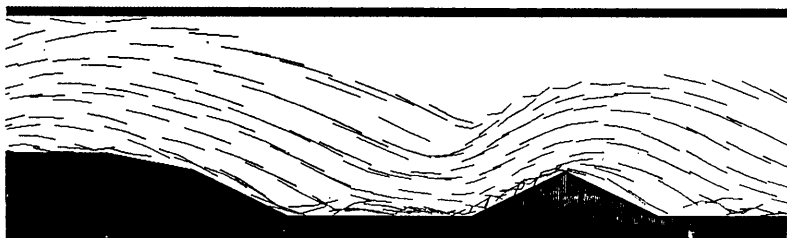
分割し、各格子に含まれる粒子を3次元ポイント配列につなぎながらリストに登録してゆく前処理を行う [図8]。近傍粒子の探索時には探索範囲に引っかかるポイントを求め、知覚範囲に入る可能性のある粒子のリストを作成する。探索範囲に入る粒子の数は平均すれば定数となるため、この方法による時間計算量は $O(n)$ としてよい。シミュレーションの空間解像度を上げると粒子数が飛躍的に増大するため、計算量を減らすこのような手法が必要となる。

4. シミュレーション例

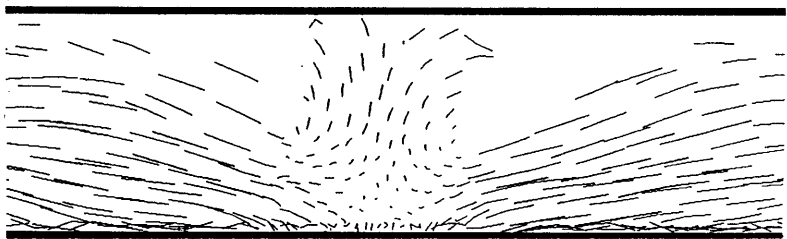
4. 1. 2次元のシミュレーション例



粒子の速度ベクトルによる表示 (重力なし)



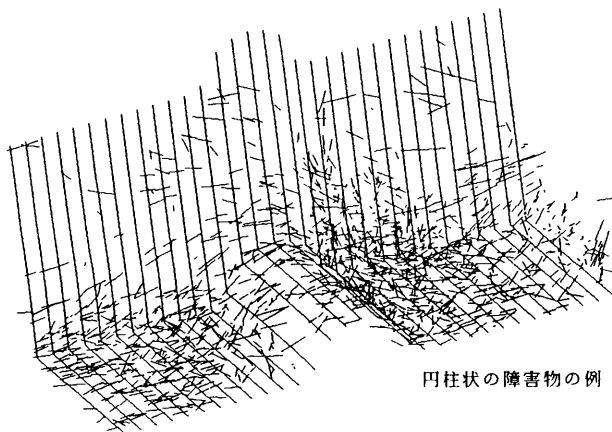
溪流のような川底の例 (重力あり)



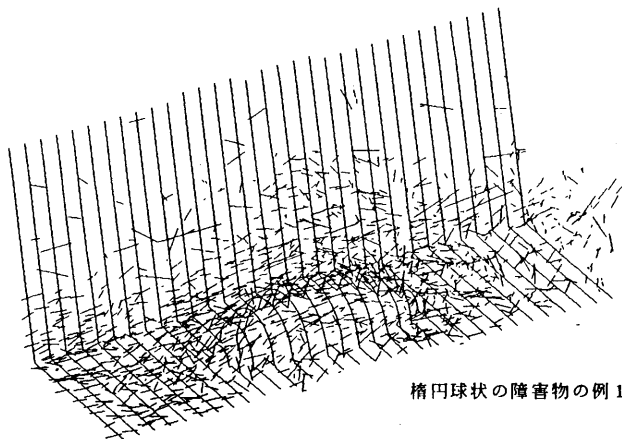
粒子が両端から生成する例 (重力あり)

4. 2. 3次元のシミュレーション例

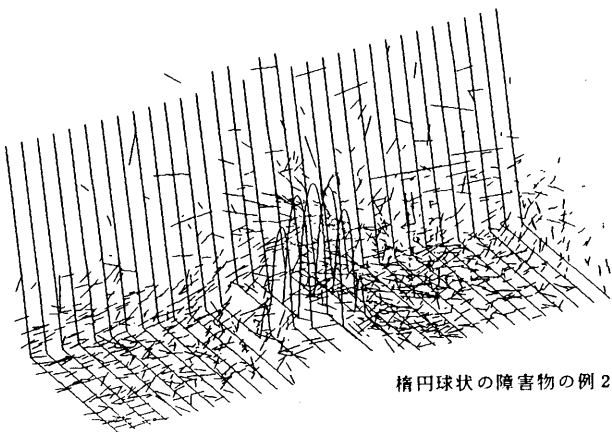
障害物の形状の異なる3種の3次元シミュレーション例を示す。図では右端から粒子が発生し、左端で消滅している。見やすくするため手前側にある壁面は表示していない。粒子数は約1000個である。



円柱状の障害物の例



楕円球状の障害物の例1



楕円球状の障害物の例2

4. 3. シミュレーションの評価

2次元のシミュレーションについては、「流れ」の層流性のある程度満たす結果を得ることができた。しかし、円柱状障害物まわりの流れについては、実際の流体においては円柱後方に乱流が生じているはずであるが、このシミュレーションでは粒子のそのような動きは確認できず、乱流領域においてモデルの限界が生じている。3次元のシミュレーションでは粒子が多少乱雑に運動してはいるが、障害物を回避しながら移動しており、やはり層流性の強い流れについては実現できていると考えられる。障害物を乗り越えた粒子が落下している部分では、“砕け波”のように粒子が水流の表面から離れ、再び重力によって落下している。3次元のシミュレーションについては、水流の動きの時間的な変化も重要であるため、アニメーション表示への評価も必要である。

4. 4. 使用機材

東芝 AS4110ワークステーション

5. 今後の課題と結論

今後の課題として、

- ・複雑な水流としての性質をより満足する行動モデルの開発、
- ・“流体粒子”の形状定義および描画法の開発、
- ・シミュレーションの高速化、

が残されている。とくに形状定義と描画の方法についていくつかアイデアを述べる。

5. 1 形状定義法

“流体粒子”は質点として与えられるため、流体としての形状の定義が必要となる。現在、

- ・分布関数（メタボール）法、
- ・多角形パッチを粒子の表面に定義する方法、
- ・“流体粒子”をボクセル空間上に配置し、高き値を積分する方法、

などの方法を検討中であるが、筆者らは分布関数法

による形状定義が最も有望であると考えている。

“流体粒子”を核とした分布関数を用い、合成分布関数の等濃度面によって流体境界面を定義する。粒子数が増大すると処理時間がかかるため、「流体の表面を構成する」粒子を抽出するための前処理が必要であろう。ある“流体粒子”が流体の内部に存在するとき、粒子から見ることのできる全天球は他の粒子によって完全に覆い尽くされている状態になる。このため、粒子からの天球の可視領域を求めるアルゴリズムを利用することによって、その粒子が流体の表面にあるか内部にあるかを決定できる。

「流れ」の現象は、人間の眼には流線の動きの変化として認識されることが多いと思われる。このため、水流の形状定義は、“流体粒子”の速度ベクトル（線分）を核として分布関数法を適用する方法、また流線自体を核として分布関数法を適用するなどの方法も有効であると考えられる。これらの方法は時間に関するアンタイエイリアシングの効果（モーションブラー）を与えることが考えられる。これらの手法のいずれが良いのかは検討課題である。

5. 2. 形状描画法

形状描画の方法についても、水流という透明体を表現しなければならないため、光線追跡を行う必要があるだろう。このとき、溪流であれば川底には光線の屈折・反射による無数の明暗のパターンが生じ、これを忠実に再現して形状描画することは単純な光線追跡法では不可能であり、拡張した形状描画法が必要であろう。また、とくに溪流や砕け波においては、水面にあらわれる白い水泡の表現が重要であると思われる。これは流路の段差の直後に現れ、短時間で消滅する性質をもつ。この表現については、次のような条件を満たす“流体粒子”が自らの周囲に白色のトレーサー粒子を放出することである程度可能であろう。

- ・水面に存在し、空気と接触している。
- ・速度に短時間で急激な変化が生じた。

これは段差の直後などの乱流の生じている領域で、しかも空気と水の攪拌が行われている場所において水泡が生じていることより想像されるものである。トレーサー粒子は生成された後にある一定時間の経過後に消滅するようにしておく。

5. 3. 結論

“流体粒子”の行動モデルを定義することにより、3次元流れのシミュレーションを行った。それにより、渓流などの複雑な水流の特徴を満たす流れのシミュレーションへの可能性を示した。

6. 参考文献

- [Ree83] Computer Graphics, Vol. 17, No. 3,
pp. 359-376, 1983.
- [内木86] 第2回NICOGRAH論文集, pp. 197-206, 1986
- [流体87] 日本流体力学会, 流体力学ハンドブック,
丸善, 1987.
- [Rey87] Computer Graphics, Vol. 21, No. 4,
pp. 25-34, 1987.
- [情報88] 情報処理学会研究報告 87-NA-23,
特集: グリッドジェネレーション, 1987.
- [Hau88] The Visual Computer, pp. 332-347, 1988.