

## 水や煙の流れのシミュレーション

千葉則茂(岩手大) 村岡一信(盛岡短大) 中川滋雄(東北大)

溪流などの複雑な水流, 煙のたなびき, 炎のゆらめきなど, 流れは自然現象に広く現れるため, その動きの表現はCGによる自然景観のシミュレーションにも重要な役割を果たす.

本報告では, “流体粒子” や “渦場” の行動モデルによる水流, 煙, および炎などの動きのシミュレーション法を提案する.

### Realistic Motion Simulation of Current and Smoke

Norishige Chiba Kazunobu Muraoka Shigeo Nakagawa  
Iwate University Morioka Junior College Tohoku University

Image synthesis with realistic motion simulation of natural phenomena, such as a current in a mountain stream, a trail of smoke, and a flicker of fire, plays an important part in CG simulation of natural scenes.

This paper presents behavioral models of particles and eddies for simulating realistically the motion of current, smoke, fire, and so on.

## 1. はじめに

溪流などの複雑な水流、樹木の風による揺らぎ、煙のたなびき、炎のゆらめきなど、流れは自然現象に広く現れるため、その形の表現はCGによる自然景観のシミュレーションにも重要な役割を果たす。これまで、打ち寄せる波などのシミュレーションが報告されているが[Fou86][Pea86][PB87]、溪流などの“砕け波”が中心となる流れのシミュレーションは報告されていない。また、煙突からたなびく煙の形をフーリエ級数により表現するという方法が報告されているが[西田87]、周囲に障害物のあるような環境でのシミュレーションは難しそうである。

一方、ある種の単純な行動規則をもつ個々の構成要素によりさまざまな自然現象を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][雨川89]、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。数式モデルが開発されている物理学的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。

流れを支配する基礎方程式はナビエ・ストークスの方程式である。この方程式は非線形偏微分方程式であり、解析的に解くことは困難であるため、計算流体力学の分野では、このナビエ・ストークスの方程式の数値シミュレーションが活発に行われている[流体87][情報88]。しかしながら、さほど“複雑でない”流れでも、スーパーコンピュータと難解な数値解析法を駆使しており、CGにとってはこの接近法は高価過ぎるといえよう。

筆者らは、溪流などの複雑な水流に対しては、“流体粒子”と呼ぶ仮想的な流体の塊の(流体力学でいう流体粒子を意味しているわけではないことを断わっておく)、また、煙のたなびき、炎のゆらめき、樹木の風による揺らぎなどの乱流性の強い流れには“渦”の行動モデルによりシミュレーションを行うことを考えている。

本論文では、まず筆者らがこれまでに行った2次元の水流、および3次元の水流のシミュレーション例とともに、その“流体粒子”の行動モデルを示す。次に、2次元の煙の流れや炎のゆらめきのシミュレーション例とともに、“渦”の

行動モデルを示す。

## 2. 複雑な水流のシミュレーション

### 2.1 流体粒子の行動モデル

ここでは、“流体粒子”と呼ぶ仮想的な流体の塊の集合として考え、流体粒子どうし、また、流体粒子と障害物との関係を記述する粒子の行動モデルを考える。(以下で用いる用語には流体力学でのそれと同じものもあるが、定義は必ずしも流体力学のものに従っていないことを注意しておく。)流体粒子の行動モデルに期待される行動の性質としては以下のようなことが考えられる。

- ・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けられている。例えば、一般に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、障害物の後方の流れや、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、その表現が大切であるといえよう。

現在検討中の行動モデルは以下のような知覚と行動ルールをもつ。

#### (1)知覚

自分を中心とした球領域内を知覚する。

#### (2)ルール

現在の速度が計算時間の刻み毎に以下のように更

新される。

(a)圧力勾配に応じた速度変化を受ける。

(b)重力による速度変化を受ける。

(c)粘性を媒介とした、他の流体粒子との速度差に応じた速度変化を受ける。

(d)障害物との衝突は弾性衝突とする。

ルール(a)と(b)は粒子の移動と空隙へのなだれ込みを、(a)と(d)は障害物の回避を、(a)と(c)は層流性を、(a)、(b)、(d)は乱流性を実現するためのものである。

知覚の球領域をCとし、その半径をRとする。時刻iでのC内の流体粒子jの速度を $v_j$ 、考えている粒子をoとし、oとjの距離を $r_j$ 、jからoへ向か

う単位ベクトルを $n_j$ 、 $\alpha$ と $\beta$ を定数とすると、時刻 $i+1$ では、速度 $v_o$ は以下のように更新される(図2.1)。ただし、 $\beta$ は流体の粘性の大きさに関係した係数である。

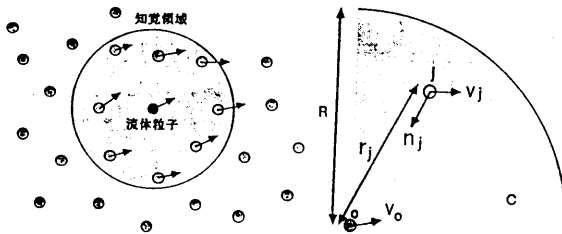


図2.1 流体粒子の行動モデル

$$v_{oi} = v_{oi} + v_{pi} + v_{vi} + v_{gi}$$

但し、 $v_{pi} = \alpha \sum_j n_j / r_{ij}^2$ 、  
 $v_{vi} = \beta \left\{ \sum_j w(r_{ij})(v_j - v_{oi}) \right\} / \sum_c w(r_{ij})$ 。

$v_{pi}$  は圧力勾配に応じた速度変化分であり、粒子分布の均一化を実現するためのものである。 $v_{vi}$  は粘性を通じて受けるところの、他の流体粒子との速度差に応じた速度変化分である。気体や水では、粘性はほとんど無視できるが、計算の時間解像度の不足によるエイリアスの除去のために残してある。また、 $w$ は重み関数であり、 $\sum_c w(r_{ij})$ 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、 $C$ 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、

$$w(r_{ij}) = \exp(-\gamma(r_{ij}/R))$$

を用いている。 $\gamma$ は $r_{ij}=R$ のときに、 $w$ が実質的に0とみなせる大きさにとる。 $R$ 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。

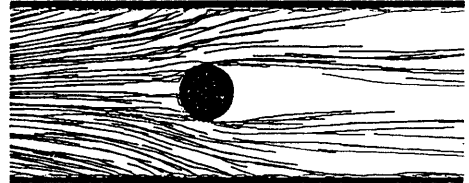
## 2.2 水流のシミュレーション

図2.2に、2次元水流のシミュレーション例を、粒子の軌跡として表示する。(d)は両わきから水を流し込んだ場合のシミュレーションである。黒く示されている部分が壁面または障害物であり、流体粒子はこれに衝突すると完全弾性衝突

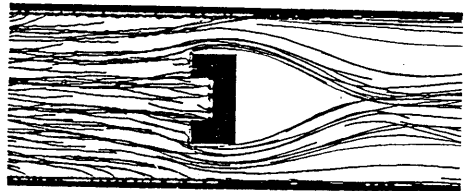
するように速度変化する。

以上の例において、流体粒子の障害物の回避はそれらしくシミュレーションできているが、乱流性についてはいまだ不十分であるといえよう。また、障害物の後方に粒子の存在しない部分が生じているが、これは、流れを3次元として重力の影響を考慮すれば、なだれこみが生じて解決されることと思われる。

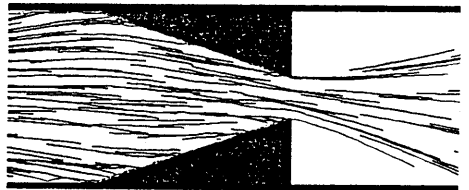
現在は、図2.3に示すような3次元水流のシミュレーションを試みている。



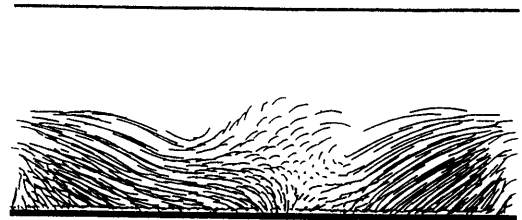
(a)円形障害物



(b)コの字形障害物



(c)狭路



(d)なだれ込み

図2.2 2次元水流のシミュレーション

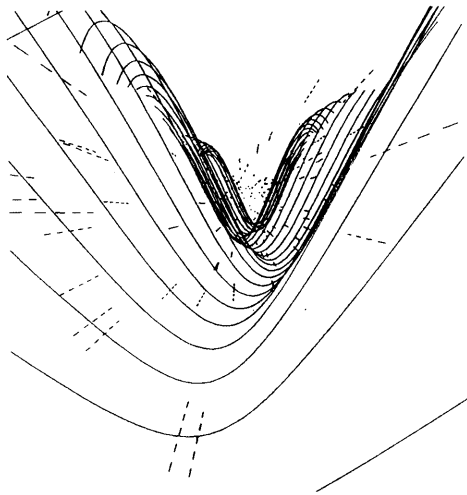
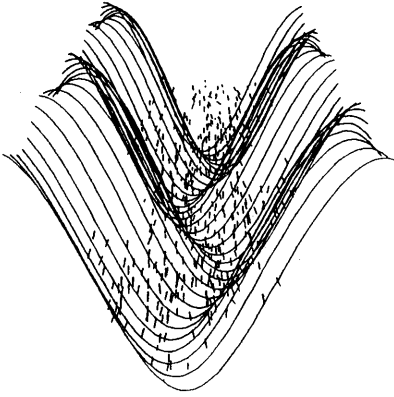


図2.3 3次元水流のシミュレーション

### 3. 煙や炎のシミュレーション

#### 3.1 渦と煙の粒子の行動モデル

本研究で行った煙の流れのシミュレーションの概要は次のようである。

概要：

- ・シミュレーションは2次元平面上で行っている。
- ・煙は濃度として表現する。
- ・常時、濃度一定の煙が存在する煙の発生源

を配置する（この発生源は“受動的”で、風により煙が掃き出されたときにのみ煙が生成されるものである）。

- ・大小数個の渦により乱流の渦場を生成する（図3.1参照）。
- ・渦場により煙の濃度移動（流れ）を行う。
- ・渦の発生、成長、消滅、移動により渦場を刻々と更新する。
- ・渦の発生は、渦の半径、回転速度、回転方向をランダムに与える（図3.1参照）。

・渦はランキン渦とする（図3.2参照）。ランキン渦とは、渦の速度分布が、剛体を回転させたときの剛体中の速度分布と、回転する剛体のまわりにできるポテンシャル渦の速度分布をあわせたものとなっている。マクロ的にみて台風の渦とランキン渦とが酷似していることから、ここでは乱流である風は大小さまざまなランキン渦からなるとした。



図3.1 “渦場”

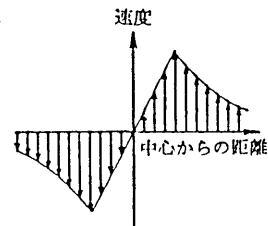


図3.2 ランキン渦

煙の濃度の移動は以下のように行う。

煙の濃度の移動：

・各計算クロックにおいて、すべての煙（2次元平面上で濃度をもった点：煙の粒子ともいうことにする）について、その点の渦場の速度に応じて、濃度のある割合で移動させる。

・煙は障害物と弾性衝突し、完全反射するものとする（障害物回避）。

・煙の粒子どうしは流体粒子とどのように互いに反発力を受けるものとする（拡散効果）。

・濃度がある値以下となったら、その煙の粒子を消滅させる（計算の効率化）。

渦場の更新は、渦の発生、成長、消滅、さらに渦の移動からなる。渦場の更新は次のように行う。

渦場の更新：

・渦中心の渦場の速度に応じて、移動させる。  
・障害物については、煙の粒子と同様、弾性衝突するものとする。

・渦の強さを計算クロックごとに減衰させる。  
・渦の強さがある値以下となった渦は消滅させる。

・発生はランダムにある確率で発生させる。

### 3. 2 煙のシミュレーション例

図3.3に煙突の煙、図3.4に煙草の煙のシミュレーション例を示す。図3.5, 3.6にそれぞれのシミュレーションのための渦の配置を示す。斜線の入っている円が位置が固定されている渦を表している。他の円は上で述べた行動モデルに従うものである。また、煙突では左から右へ、煙草では下から上へ一定の速度成分を加えている。図3.7に障害物回避する様子を示す。

これらのシミュレーションは、ビデオによるアニメーションとして観察を行い評価を行っている。

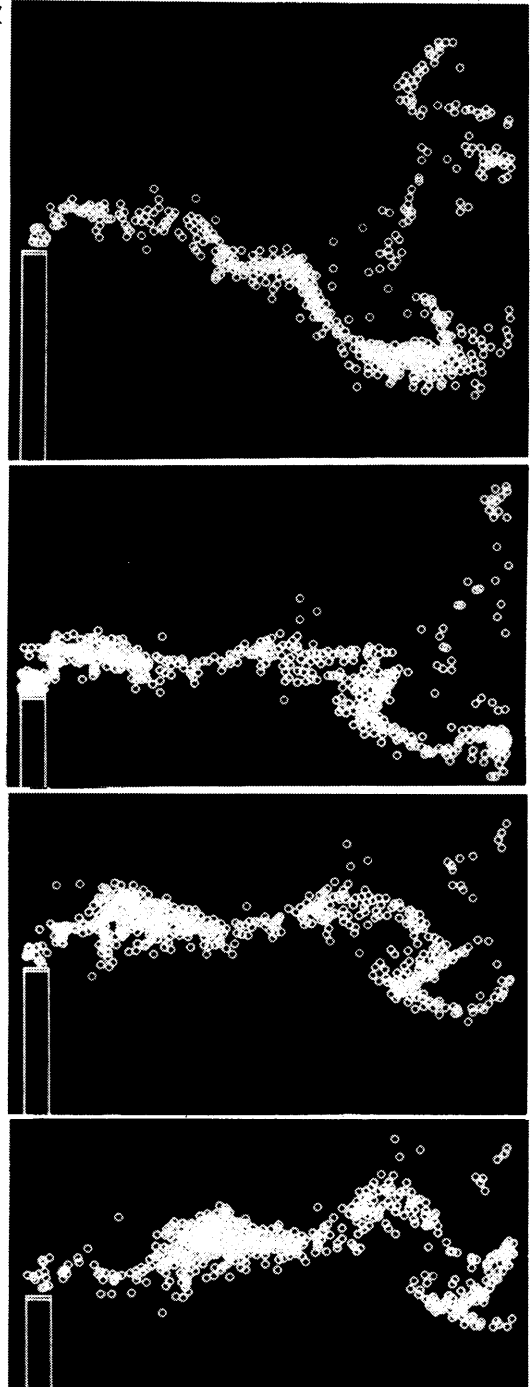


図3.3 煙突の煙のシミュレーション

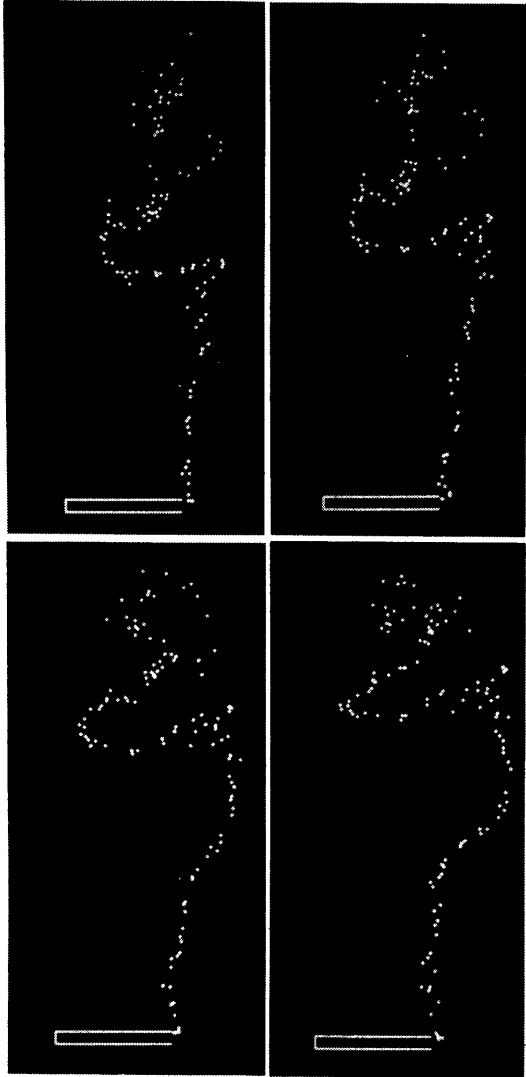


図3.4 煙草の煙のシミュレーション

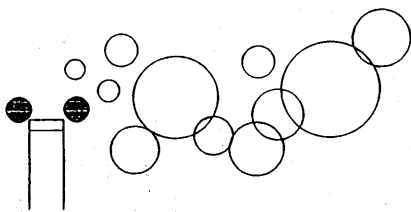


図3.5 煙突の周りの渦の配置

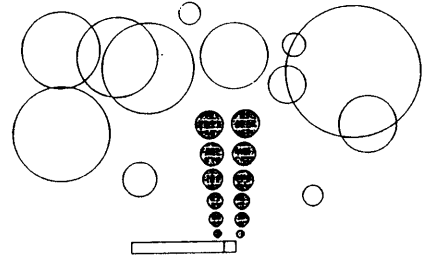


図3.6 煙草の周りの渦の配置

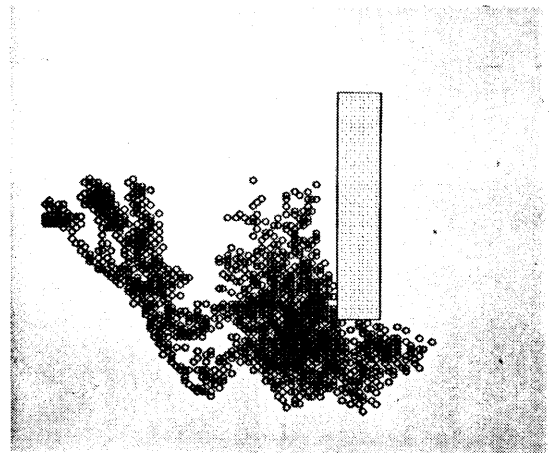
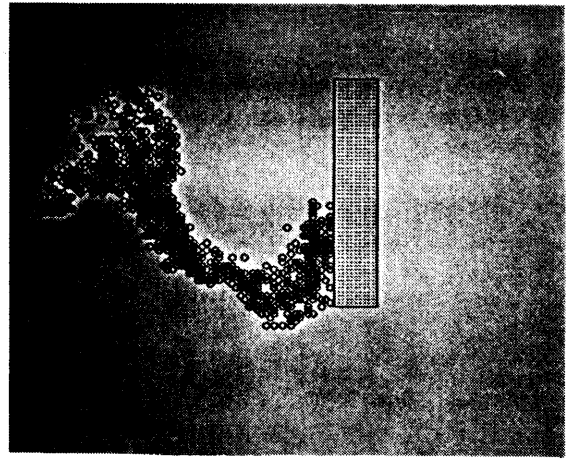


図3.7 障害物回避（続く）

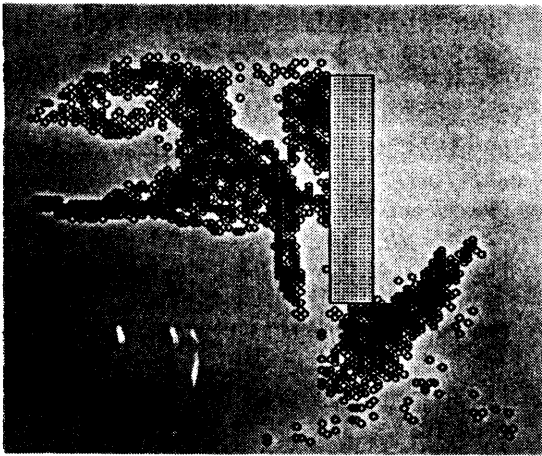
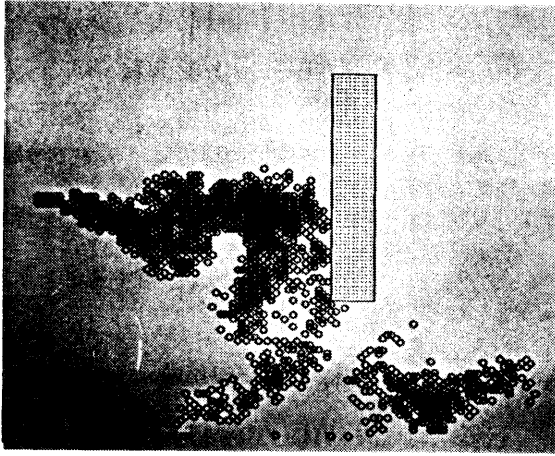


図3.7 障害物回避

### 3.3 炎のシミュレーション

図3.8に炎のシミュレーション例を示す。粒子に対する周りからの圧力に応じて、強い方（温度が高いであろうと考えられるので）から白、黄、赤で粒子を表示している。また、圧力の強さに応じて、上昇力を加えている。また、圧力があるしきい値より小さくなったら（すなわち、他の粒子とかなり離れたら）、火は消えるとしている。図3.9に炎のための渦の配置を示す。

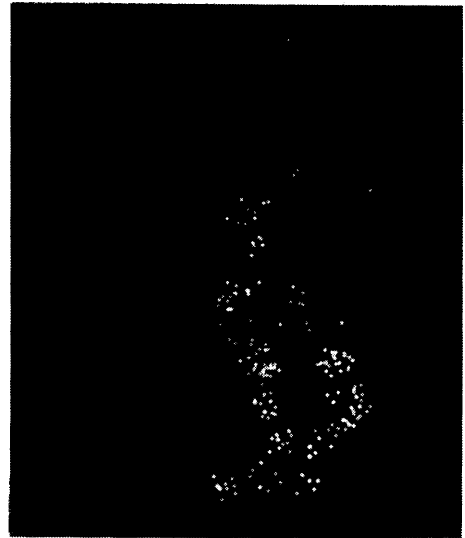
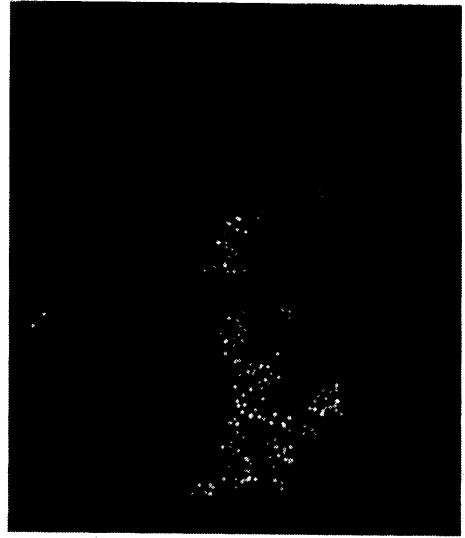


図3.8 炎のシミュレーション（続く）



図3.8 炎のシミュレーション

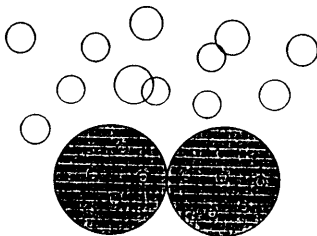


図3.9 炎のための渦の配置

#### 4. おわりに

本論文では、水流のシミュレーションを行うための、流体粒子の行動モデルを示した。また、それによるいくつかのシミュレーション例を示し、流体粒子の行動モデルによる水流のシミュレーションの可能性を示した。

さらに、煙や炎の渦場によるシミュレーション法を示した。本方法についてはビデオでの観察によりその有効性を確認している。

現在は3次元の水流のシミュレーションを行いモデルの評価を行っている。煙や炎についても3次元でのシミュレーションに拡張することが重要となる。

#### 参考文献

- [流体87] 日本流体力学会, 流体力学ハンドブック, 丸 善, 1987
- [情報87] 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
- [Fou86] Computer Graphics, Vol. 20, No. 4, pp. 75-84, 1986
- [Pea86] Computer Graphics, Vol. 20, No. 4, pp. 65-74, 1986
- [PB87] acm Trans. on Graphics, Vol. 6, No. 3, pp. 191-214, 1987
- [Ree83] Computer Graphics, Vol. 17, No. 3, pp. 359-376, 1983
- [内木86] 第2回NICOGRAPH論文集, pp. 197-206, 1986
- [Rey87] Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 25-34, 1987
- [Hau88] The Visual Computer, pp. 332-347, 1988
- [中川88] 第4回NICOGRAPH論文集, pp. 104-109, 1988,
- [雨川88] 第4回NICOGRAPH論文集, pp. 98-103, 1988,
- [西田87] 大気中の不均質微粒子の表示法, 情報処理学会第35回全国大会, pp. 2307-2308