

氷塊融解の粒子ベースビジュアルシミュレーション

森本 和範[†] 岩崎 慶^{††} 高木 佐恵子^{††} 吉本 富士市^{††}

[†]和歌山大学大学院システム工学研究科 ^{††}和歌山大学システム工学部

1 はじめに

CG の分野において、物理法則に基づいて自然現象をシミュレーションする研究がさかんに行われている。氷解現象は、われわれの身近に存在する自然現象の 1 つであり、映画や CM などの多くの分野で利用されている。氷解現象のシミュレーション手法の 1 つとして、シミュレーション領域をグリッド分割し、熱伝導、熱伝達を計算する手法がある[1]。しかし、この手法では、重力を考慮していないため、融解による形状変化よっての物体の倒壊、倒壊による分離をシミュレーションできない。

グリッドベースでは、差分法や有限要素法によって、重力を考慮し物体の倒壊、倒壊による分離をシミュレーションする方法がある。しかしながら、これらの方法では、移流項に起因する数値拡散が生じる可能性がある。

一方、物体を粒子の集合で表現し、物体の運動を粒子の運動として離散化して計算する粒子ベースのシミュレーション方法がある[2]。この方法では、移流項が現れないので数値拡散が生じないという特徴がある。

そこで本稿では、粒子ベースを用いて、熱伝導、熱伝達を考慮する。また、[1]と同様に、従来、照明計算に用いられるフォトンマッピング法を用いて、熱放射を計算する。融解による物体の倒壊、倒壊による分離には、弾性体に対する動的解析のための陽的な粒子計算アルゴリズム[2]を用いる。各粒子に重力、粒子同士の相互作用力を考慮することによって、物体の倒壊、分離をシミュレーションする。

2 粒子ベースによる伝熱理論

本稿では、氷に対する伝熱として、熱伝導、熱伝達および熱放射の 3 つを考慮する。

2.1 熱伝導

熱伝導は固体(あるいは静止している流体)内部における伝熱である。熱伝導は、以下のフーリエの微分方程式を用いて計算される。

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 a は熱拡散率であり、 T は温度である。式(1)は、非定常熱伝導における温度分布の時間変化速度の大きさを表している。すなわち、熱拡散率の値が大きいほど温度変化は早くなる。

粒子ベースにおけるフーリエ微分方程式は、以下のように定式化することができる。

$$\frac{dT}{dt} = a \sum_{i \neq j} [(T_j - T_i)w(r)] \quad (2)$$

$$w(r) = \begin{cases} r_e - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ r & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 T_i は注目している粒子の温度、 T_j は周りの粒子の温度、 w は重み関数、 r は粒子間距離である。この重み関数を用いて、微分方程式を離散化する。粒子間距離がパラメータ r_e より短い場合のみ、粒子間で相互作用することになる(図 1)。

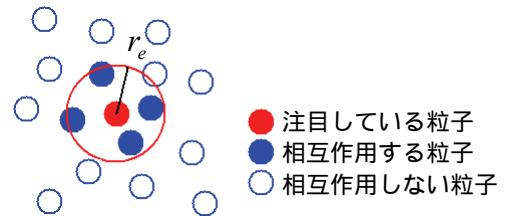


図 1: 粒子間相互作用

2.2 熱伝達

熱伝達は、運動している気体または液体から固体へ、あるいは固体から気体または液体に熱が伝わる伝熱形式である。表面積 A 、密度が最大になるように配置した場合の 1 つの粒子の周りに存在する粒子の数 n_{\max} 、隣接している粒子の数 n 、固体の温度 T_w 、流体の温度 T_f であるとき、流体から固体への熱伝達は以下の式で表される。

$$Q = h \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}} A (T_f - T_w) \quad (4)$$

ここで、 h は熱伝達率であり、熱の伝わりやすさを表す。空気と接している面積は、隣接している粒子の数が少なくなると、大きくなる。

*Particle-based Visual Simulation of Ice Melting

[†]Kazunori Morimoto Graduate

School of Systems Engineering, Wakayama University

^{††}Kei Iwasaki, Saeko Takagi, and Fujiichi Yoshimoto

Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

2.3 熱放射

熱放射は，炎から熱放射線によって熱エネルギーが移動する場合のように，熱エネルギーが中間物体には無関係に，赤外線や可視光線を含む電磁波である熱線として伝達される伝熱形式である．

熱源からの放射エネルギーを，連続量としてではなく，一定のエネルギー量を有する光子が射出されると考える．表面積 H の熱源から放出される光子数を N とすると，光子 1 つあたりの熱エネルギー E_p は以下となる．

$$E_p = \frac{\varepsilon\sigma T^4 H\Delta t}{N} \quad (5)$$

ここで， ε は放射率， σ はステファン-ボルツマン定数である．熱源から放射された光子が粒子に衝突すると，粒子に光子の熱エネルギーが格納される．

3 粒子に働く力

粒子に働く力の計算方法は[2]のアルゴリズムを用いる．粒子に働く力 F は，粒子間に相互作用する力 f_i ，重力 f_g ，外力 f_e によって以下の式で表される．

$$F = f_i + f_g + f_e \quad (6)$$

粒子間に相互作用する力 f_i は，近傍の粒子同士が垂直とせん断の 2 種類のばねと，圧力によって接続されている力となる(図 2)．

$$f_i = f_n + f_s + f_p \quad (7)$$

ここで， f_n は垂直ばね力， f_s はせん断ばね力， f_p は圧力である．

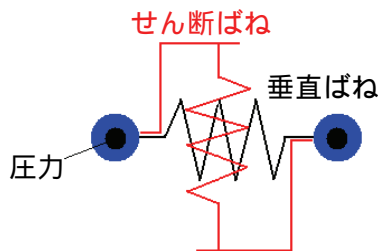
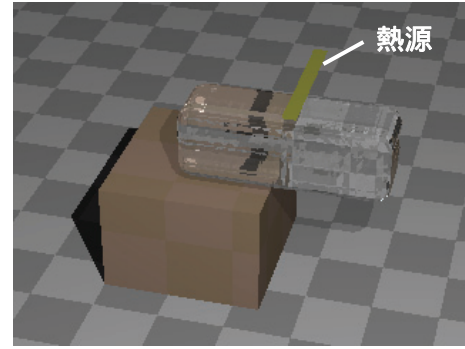


図 2: 粒子間に相互作用する力

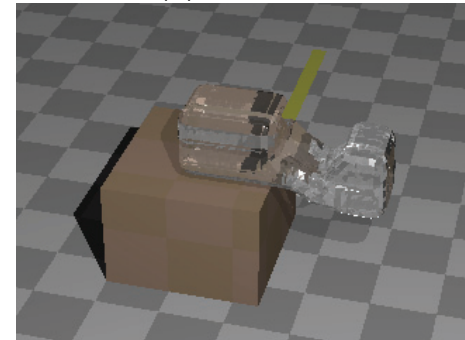
4 結果とまとめ

本手法によるシミュレーションの結果を図 3 に示す．使用した計算機は CPU Pentium4 3.4GHz で 1.0GB のメモリを搭載している．

図 3(a) は初期状態である．図で示した位置に熱源を設定した．熱源からの熱放射によって，熱源の下にある氷塊の領域が溶けているのが，図 3(b) より確認できる．また，溶けている部分が，熱伝導，熱伝達により，滑らかになってい



(a) 初期状態



(b) 25 タイムステップ



(c) 50 タイムステップ

図 3: 熱源による氷塊の融解および分離

るのも確認できる．さらに図 3(c) から，溶けて細くなった部分が折れて分離し，落下しているのが確認できる．計算には，1 ステップあたり，約 2 秒かかった．

本稿では，粒子ベースによる，熱力学に基づいた融解現象と，融解による氷塊の分離，倒壊をシミュレーションする方法を提案した．

今後の課題として，氷解後の水のシミュレーションおよびレンダリング，氷解後の水が氷塊に及ぼす影響の考慮などがあげられる．

参考文献

- [1] 藤澤誠，三浦憲二郎: 熱力学に基づく氷解現象のアニメーション，Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2004 予稿集，pp. 1-6，2004．
- [2] 越塚誠一: 粒子法，丸善，2005．