

## GPU を用いた粒子ベース氷塊融解シミュレーションの高速化

内田 英行<sup>†</sup> 上田 悟史<sup>†</sup> 岩崎 慶<sup>‡</sup> 吉本 富士市<sup>‡</sup>和歌山大学大学院システム工学研究科<sup>†</sup> 和歌山大学システム工学部<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

近年 CG による自然現象のシミュレーションは盛んに研究されており、氷塊融解シミュレーションも重要な研究の 1 つである。藤澤らは、熱力学に基づいた氷塊融解シミュレーションの手法を提案した[1]。しかしグリッドベースによる手法のため、重力を考慮したときの倒壊、分離などへの対応が難しい。森本らは、融解による氷塊の倒壊、分離を表現するために粒子ベースでシミュレーションする方法を提案した[2]。これらの従来手法は伝熱計算を CPU で行うため、シミュレーションに時間を要する。

そこで本論文では、粒子ベースによる氷塊融解シミュレーションの際の熱伝導、熱伝達、熱放射の 3 つの伝熱計算を、GPU を用いて高速化する手法を提案する。

## 2. GPU を用いた伝熱計算

## 2.1 氷への伝熱

氷塊融解シミュレーションで考慮すべき伝熱として、熱伝導、熱伝達、熱放射の 3 つが挙げられる。本研究において、熱伝導は氷塊内部における伝熱、熱伝達は空気から氷への伝熱、熱放射は熱源から氷へ赤外線などの熱線として伝達される伝熱のことを指す。

## 2.2 熱伝導

## 2.2.1 熱伝導計算

熱伝導は、以下の式を用いて計算される。

$$\frac{dT_i}{dt} = a \sum_{i \neq j} [(T_j - T_i)w(r_{ij})] \quad (2.1)$$

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 < r \leq r_e) \\ 0 & (r_e < r) \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、 $a$  は熱拡散率、 $T_i$  は注目している粒子  $i$  の温度、 $T_j$  は粒子  $i$  の周囲の粒子  $j$  の温度、 $w$  は重み関数、 $r_{ij}$  は粒子  $i$  と粒子  $j$  の粒子間距離、 $r_e$  は相互作用を考慮する最大距離である。

Acceleration of Particle-based Simulation of Ice Melting on the GPU.

<sup>†</sup>Hideyuki Uchida, Satoshi Ueda, Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

<sup>‡</sup>Kei Iwasaki, Fujiichi Yoshimoto, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

## 2.2.2 近傍粒子探索

式(2.2)により相互作用する各粒子の重みを計算する際、近傍粒子を探索する必要があるが、総当たりで探索すると粒子数  $n$  の 2 乗のオーダーの計算コストがかかってしまう。そこでシミュレーション空間を 3 次元格子で分割し、そのデータを GPU 上で保持することで探索を効率化する[3]。これにより近傍粒子探索の計算コストを粒子数  $n$  のオーダーに削減できる。

## 2.3 熱伝達

空気から氷への熱伝達は以下の式で表される。

$$Q = h \frac{n_{\max} - n_{\text{near}}}{n_{\max}} A(T_f - T_w) \quad (2.3)$$

ここで  $h$  は熱伝達率、 $A$  は氷粒子の表面積、 $n_{\max}$  は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、 $n_{\text{near}}$  は隣接している粒子の数、 $T_f$  は氷の温度、 $T_w$  は空気の温度である。3 次元の場合、密度が最大となるように配置した場合であり、 $n_{\max} = 12$  となる。 $n_{\text{near}}$  は熱伝導の際の近傍粒子探索の結果を参照することで求める。

## 2.4 熱放射

## 2.4.1 フォトンマッピング法による熱放射計算

熱源から放射される熱エネルギーは、一定のエネルギー量を有するフォトンが射出されると考える。表面積  $H$  の熱源から放出されるフォトン数を  $N$  とし、 $e$  を放射率とすると、フォトン 1 つあたりの熱エネルギー  $E_p$  は以下となる。

$$E_p = \frac{e\sigma T^4 H \Delta t}{N} \quad (2.4)$$

ここで  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K]$  はステファン-ボルツマン定数である。物体表面でのフォトンの反射、吸収は、吸収率  $\alpha$  と  $[0,1]$  の一様乱数  $\xi$  を用いて以下のように決定する。

$$\xi \leq \alpha: \text{吸収} \quad \xi > \alpha: \text{反射} \quad (2.5)$$

熱源からの射出方向と、物体表面での反射方向  $(\theta, \phi)$  は、ランバートの法則に従い、 $[0,1]$  の一様乱数  $\xi_\theta, \xi_\phi$  を用いて以下の式で計算される。

$$\begin{aligned} \theta &= 2\pi\xi_\theta \\ \phi &= \cos^{-1}(\sqrt{1-\xi_\phi}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

## 2.4.2 フォトンの交差判定

フォトンマッピング法による熱放射計算では、各氷粒子について交差したフォトンの数をカウントする必要がある。これにはフォトンと氷粒子の交差判定を行わなければならないが、射出したすべてのフォトンに対して行う必要があるため計算コストが高い。そこで、GPUを用いて各フォトンの交差判定を並列計算することにより高速化を図る。

まず図 2.1(a)のように、熱源の後方から氷粒子の方向へカメラを向け、スクリーンの各ピクセルについて、スクリーンと最も近い氷粒子との距離  $l$  を計算する。そして求めた距離  $l$  をスクリーンの各ピクセルに保存する。次にテクスチャを 1 枚用意し、交差判定の並列計算を可能にするために、フォトン 1 個とテクスチャの 1 ピクセルとを対応づける。各フォトンについて熱源からのフォトンの射出方向  $(\theta, \phi)$  を決め、各フォトン  $\Delta d$  分進める。そして各フォトンに対応するスクリーンに投影し、スクリーンとフォトンとの距離  $d$  を計算する。フォトンとスクリーンとの距離  $d$  と、対応するピクセルに保存された氷粒子とスクリーンの距離  $l$  を比較し、差が閾値  $\varepsilon$  未満ならば交差したとみなして判定を終了し、交差した位置をテクスチャに格納する。差が閾値  $\varepsilon$  以上ならば交差していないとみなし、再びフォトン  $\Delta d$  分進めて交差判定を続ける(図 2.1(b))。

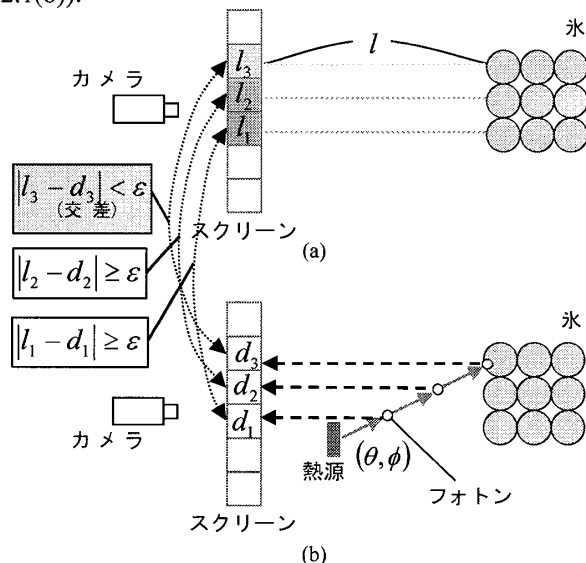


図2.1: フォトンと氷粒子の交差判定

すべてのフォトンについて交差判定を終えたら、次は各氷粒子についてフォトンの交差回数を得る必要がある。そこで 2 次元テクスチャを用意し、テクスチャの 1 ピクセルと氷粒子とを対応させる。そして各氷粒子のフォトンの交差回数を、対応するそれぞれのピクセルに格納する。これにより、熱放射計算の際に各氷粒子のフォトンの交差回数を参照することができる。

## 3. 結果

提案した手法で実験を行った。計算環境は CPU が Core2 Quad Q6600 2.4GHz, メモリが 3.0GB, GPU が nVIDIA GeForce 8800 GTX である。GPU を用いて提案手法によりシミュレーションを行った場合と、CPU のみを用いた場合のフレームレートを表 3.1 に示す。結果例として、粒子数 4,096( $16^3$ )個の立方体の氷塊融解シミュレーションの結果画像を図 3.1 に示す。また、複雑な形状の氷塊の例として Stanford bunny を用いた結果を図 3.2 に示す。氷の温度  $-3^{\circ}\text{C}$ , 空気の温度  $17^{\circ}\text{C}$ , 熱源の温度  $100^{\circ}\text{C}$  とし、熱拡散率  $a$  は 0.214, 熱伝達率  $h$  は 0.004, 吸収率  $\alpha$  は 0.1 としている。

表 3.1: 立方体の氷塊融解シミュレーション

氷の粒子数	フォトンの数	GPUを用いた場合(提案手法)	CPUのみを用いた場合(従来手法)
4,096( $16^3$ )	16,384	185.0 fps	7.00fps
262,144( $64^3$ )	1,046,576	9.0 fps	0.08fps



図 3.1: 粒子数 4,096( $16^3$ )個の立方体による結果例

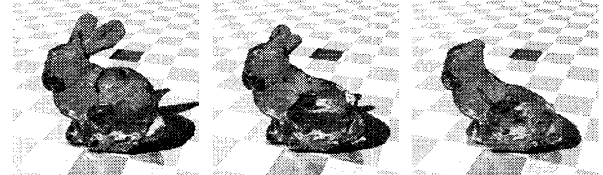


図 3.2: 粒子数 25,167 個の Stanford bunny による結果例

## 4. まとめ

本論文では粒子ベースによる氷塊融解シミュレーションを、GPU を用いて高速化する手法を提案した。熱伝導、熱伝達、熱放射の各伝熱計算を、GPU を用いて並列的に処理することで高速化を図った。その結果粒子数 4,096 個の立方体の氷塊融解シミュレーションを約 185fps で計算でき、CPU のみを用いた場合に比べて約 26 倍の高速化が実現した。今後の課題は氷塊融解後の水を考慮したシミュレーションなどが挙げられる。

## 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, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.8, pp.2746-2753, 2006.
- [2] 森本和範, 岩崎慶, 高木佐恵子, 吉本富士市: 氷塊融解の粒子ベースビジュアルシミュレーション, 情報処理学会第 69 回全国大会, 6Y-7, 2007.
- [3] 原田隆宏, 田中正幸, 越塚誠一, 河口洋一郎: グラフィックスハードウェアを用いた個別要素法的高速化, 日本計算工学会論文集, 20070011, 2007.