

## 対流計算を高速化した氷塊融解ビジュアルシミュレーション

上田 悟史<sup>†</sup> 内田 英行<sup>†</sup> 岩崎 慶<sup>‡</sup>和歌山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

自然現象の写実的なアニメーションを生成する研究はコンピュータグラフィックスの分野において重要な研究の一つであり、近年盛んに研究が行われている。さまざまな自然現象の中でも、氷の融解のシミュレーションは多く研究されている[1,2]。松村らは、氷の周囲に外気の流れを計算する外気計算空間を構築することで対流計算を考慮した氷の融解シミュレーションを提案した[3]。藤澤らは氷から水への相転移を考慮した氷の融解シミュレーション手法を提案した[4]。これらの手法はグリッドベースのシミュレーション手法であるため、数値拡散による体積損失が起こる。そのため、氷周囲の薄い水膜や水滴といった表現が難しい。

森本らは、氷塊を粒子の集合で表現し、氷の融解を粒子を用いてシミュレーションする手法を提案した[5]。この手法では氷から水への相転移は考慮されておらず、また計算コストも高い。内田らは、氷から水への相転移を考慮し、シミュレーションを全て GPU 上で処理することによってリアルタイムに氷塊融解をシミュレーションする手法を提案した[6]。この手法は、粒子ベースで計算を行っているため、数値拡散による体積損失が生じないため、氷周囲の薄い膜や、小さな水滴といった表現が可能になった。しかしながら、この手法では氷周囲の空気温度を一定値として近似している。そのため、強制対流や、自然対流、それにより変化する氷の融解をシミュレーションできない。

そこで、氷粒子や水粒子の周囲に空気の流れを計算する空間を構築し、氷粒子や水粒子との伝熱を計算する手法を提案する。氷粒子や水粒子の周囲の空気の速度場や温度場を計算する空間を外気計算空間と呼ぶ。空気の速度・温度及び氷粒子との伝熱計算を全て GPU で処理する手法を提案する。

## 2. 対流計算

氷塊の周囲に設定する外気計算空間はグリッドで表現し、氷粒子や水粒子との相互作用を計算する(図 2.1)。空気は流体として扱い、空気の速度を以下のナビエ-ストークス方程式により計算する。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{R_e} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\mathbf{v} \cdot \nabla = 0 \quad (2)$$

ここで  $\mathbf{v}$  は速度、 $p$  は圧力、 $R_e$  はレイノルズ数、 $\mathbf{f}$  は外力を示す。空気の温度  $T$  は以下の式により計算される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_T \nabla^2 T - (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \quad (3)$$

ここで  $k_T$  は温度の拡散率を示す。

本手法では GPU によって対流計算を行うため、外気計算空間の速度場や温度場をテクスチャとして保持し、外気計算空間の各グリッドセルとテクスチャのピクセルを 1 対 1 に対応させて速度や温度を計算する。

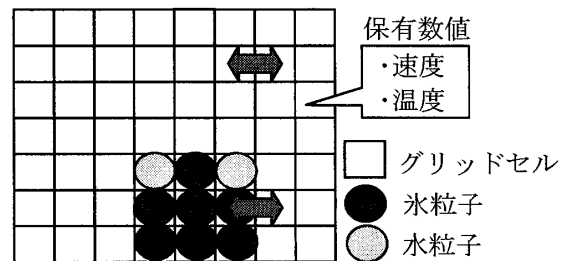


図 2.1: 外気計算空間

## 2.1. 空気から氷粒子・水粒子への伝熱

各氷粒子、水粒子は空気と接する表面積に比例して熱エネルギーを吸収する。各氷粒子が吸収する熱エネルギー  $Q$  は以下の式を用いることで計算する。

$$Q = hAT_{diff} \Delta t \quad (4)$$

$$A = \frac{A_{max}}{n_{max}} (n_{max} - n) \quad (5)$$

ここで  $h$  は熱伝導率、 $A$  は空気と接する表面積、 $T_{diff}$  は氷粒子、水粒子と接している外気との温度差、 $\Delta t$  はタイムステップ、 $A_{max}$  は粒子の表面

Acceleration of Convection Calculation of Ice Melting.

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

積,  $n_{\max}$  は最大近傍粒子数,  $n$  は近傍粒子数を表す. 外気に接する表面積  $A$  は氷粒子, 水粒子の近傍粒子数を数えることで式(5)により計算する.

### 2.2. 氷粒子・水粒子から空気への伝熱

空気から氷粒子, 水粒子に移動した熱エネルギーを空気の熱エネルギーから吸収される. 各グリッドセルから移動した熱エネルギーは前節で述べた氷粒子, 水粒子へ伝達した熱量をもとに計算する. 空気の温度変化は空気を理想気体とみなし, 比熱の変化がないと仮定した上で以下の式を用いて計算する.

$$T_2 = T_1 - \frac{Q_{cell}}{VkC} \quad (6)$$

ここで  $T_1$  は変化前の空気の絶対温度,  $T_2$  は変化後の空気の絶対温度,  $Q_{cell}$  は空気から氷粒子, 水粒子に吸収された熱エネルギー量,  $V$  は空気の体積,  $k$  は空気の密度,  $C$  は空気の比熱である.

### 3. 結果

本手法を用いてシミュレーションを行った例を図 3.1 に示す. 計算環境は CPU が Intel Core i7 2.67GHz, メモリが 3.0GB, GPU が NVIDIA GTS250 である.

対流計算を CPU を用いて行った場合と, GPU を用いて行った場合のシミュレーション速度を表 3.1 に示す. 結果例として粒子数 125,000 個の立方体の氷融解シミュレーションを行い, 対流を考慮し, 矢印方向から強制対流を加えた場合(図 3.1)と, 対流が考慮されていない場合(図 3.2)を比較画像として示す. また, ウサギの氷像が矢印方向からの強制対流により融解するシミュレーション結果を図 3.3 に示す. 結果画像より対流を考慮した場合, 発生した対流の影響により融解速度に差が発生することが分かる.

表 3.1: 対流計算の比較

グリッド解像度	CPU による 計算時間	GPU による 計算時間
64×64×64	23fps	100fps



図 3.1: 矢印方向から強制対流を加えた場合の立方体の氷の融解シミュレーション



図 3.2: 対流を考慮していない場合の立方体の氷の融解シミュレーション



図 3.3: ウサギの氷像の融解シミュレーション

### 4. まとめ

本手法では氷粒子の周囲の空気の流れの計算を GPU で行うことで対流計算の高速化を行った. 対流を考慮することにより, 強制対流や自然対流による融解速度の変化といった表現をすることができる. また, 氷, 水と空気の相互作用を GPU で計算することで CPU-GPU 間のデータ転送による計算コストの増加を防いだ.

今後の課題として, 水蒸気や, 空気中の水分の表現などが挙げられる.

### 参考文献

- [1]青木悦子, 藤代一成, モルフォロジーに基づく氷解現象のビジュアルシミュレーション, Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2000 予稿集, pp.42-46, 2000.
- [2]Losasso, F., Irving, G., Guendelman, E., and Fedkiw, R., Melting and Burning Solids into Liquids and Gases, IEEE TVCG Vol. 12, No. 3 pp.343-352, 2006.
- [3]藤澤誠, 三浦憲二郎, 熱力学に基づいた相転移を伴う氷解現象のアニメーション, 情報処理学会論文誌, vol.48, no.3, pp.1480-1488, 2008.
- [4]松村誠明, 鶴野玲治, 自然対流を考慮した氷解現象シミュレーション, Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2005, pp.105-110, 2005.
- [5]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.
- [6]内田英行, 岩崎慶, 融解後の水を考慮した粒子ベース氷塊融解シミュレーション, 平成 21 年度情報処理学会関西支部 支部大会 E-05 2009.