

周辺気体の温度場を考慮した ドライアイスから発生する霧のビジュアルシミュレーション

小林 唯斗¹⁾ (非会員)

戀津 魁²⁾ (正会員) 伊藤 智也³⁾ (正会員) 竹島 由里子²⁾ (正会員) 菊池 司²⁾ (正会員)

¹⁾ 東京工科大学大学院 ²⁾ 東京工科大学 ³⁾ 八戸工業大学

Visual Simulation of Fog Generated from Dry Ice Considering the Temperature Field of the Surrounding Gas

Yuito Kobayashi¹⁾

Kai Lenz²⁾ Tomoya Ito³⁾ Yuriko Takeshima²⁾ Tsukasa Kikuchi²⁾

¹⁾ Graduate School of Media Science, Tokyo University of Technology

²⁾ Tokyo University of Technology ³⁾ Hachinohe Institute of Technology

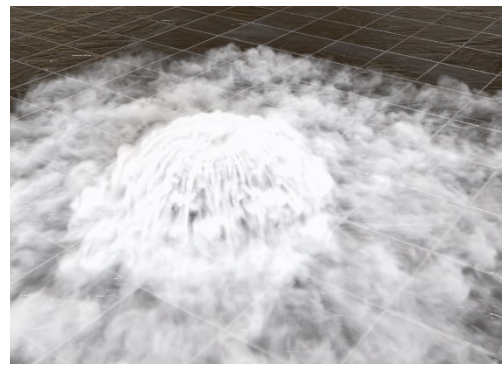
¹⁾g3122025af@edu.teu.ac.jp, ²⁾{lenzk, takeshimayrk, kikuchitks}@stf.teu.ac.jp ³⁾tomoya@hi-tech.ac.jp

アブストラクト

本論文では、ドライアイスの水などの液体に入れた際に生じるような、発生量の多い霧のビジュアルシミュレーション法を提案する。本論文で提案する手法は、霧の発生源となるシミュレーションソースと霧のコリジョンとなる器をポリゴンモデルで作成し、シミュレーションソースに対して上下方向にアニメーションさせたノイズを加えることで、ドライアイスが水の中へ投げた際に生じるような気泡の上昇運動を再現する。作成したソースに対して、格子法を用いた流体シミュレーションを行うことで、ドライアイスの霧を生成する。この際、速度場の生成には本論文で提案する独自の浮力方程式を用いる。霧の消失表現は飽和水蒸気量を基に相転移の式を利用して密度を制御することで再現する。本手法により、ドライアイスから発生した霧が器から溢れ出る表現などを効率よく再現することが可能となった。

Abstract

This paper proposes a visual simulation method for fog with a large amount of dry ice, such as that produced when dry ice is added to a liquid such as water. The proposed method uses a polygonal model of a simulation source and a vessel that serves as a fog collision and adds noise animated in the vertical direction to the simulation source to reproduce the upward motion of bubbles, as would occur when dry ice is thrown into the water. A lattice-based fluid simulation is performed on the created source to generate a dry ice mist. The original buoyancy equation proposed in this paper is used to generate the velocity field. The disappearance of the fog is reproduced by controlling the density using the phase transition equation based on the saturated water vapor content. This method can efficiently reproduce, for example, fog generated from dry ice overflowing from a vessel.



(a) (<https://i.ytimg.com/vi/BsO1B-FWD6I/hqdefault.jpg> より) (b)

図1. ドライアイスから発生する霧の実写 (a) と成果画像例 (b)

1. はじめに

本論文では、周辺気体の温度場を考慮したドライアイスから発生する霧のビジュアルシミュレーション法を提案する。

図1 (a) に示すドライアイスから発生する霧は、現代においても未だ深く解明されていない現象の一つであり、研究事例も少ない。しかし、ドライアイスは日本において教育、食品輸送、工業、映像、舞台演出など、様々な分野で用いられており、とても需要のある物体である。特にドライアイスを液体に入れた際に生じるような発生量の多い霧はドライアイス特有の現象であり、演出性が非常に高いものである。そのため本現象をビジュアルシミュレーションすることが可能となれば、エンターテイメントなどの分野において非常に有益である。例えば、ホラー系の映像やゲームでの不気味な雰囲気演出、ファンタジー系の映像における幻想的なエフェクト、また冷凍食品のCMで冷気を強調する場面など、様々な活用方法がある。

通常、このような下方向に流れる霧をエンターテイメント目的で作成する場合は、高温気体を前提としたシミュレーションプリセットなどを用い、力の加わる方向を上下反転させるような手法が一般的である。しかしこの方法は実際の環境要因を考慮していない簡易的な手段のため、実際のドライアイスの霧のようなリアルな表現にすることは困難である。例えば従来の手法として、上述した3DCGソフトウェアに標準搭載されているプリセットを用いる方法や、密度の初期値を高くすることで下方向に流れる霧をシミュレーションする方法がある。これにより、空間上に配置した発生源から下方向に霧が発生する表現が可能である。しかしこの方法では、発生源が器の中にあるような場面において、霧が器から勢いよくあふれ出し、すばやく下方向に流れる表現を行うことができない。対して実際は水が入った器などにドライアイスを投じるなどして霧を発生させた場合、霧が器から溢れるはずである。

本研究ではこれらの問題を解決するために、発散場や温度場を考慮した霧のシミュレーション手法を提案する。霧の発生源となるシミュレーションソースとコリジョンとなる器はポリゴンモデルで作成し、器の内側からドライアイスの霧が発生するような表現を行う。ドライアイスが水の中へ投じた際に生じるような気泡の上昇運動については、シミュレーションソースに

アニメーションさせたノイズを加えることで再現を試みる。その後作成したソースに対して、一般的に煙などの気体をシミュレーションする際に採用される格子法を用いて流体シミュレーションを行い、霧の生成を行う。シミュレーションを行うにあたり、速度場の生成には本論文で提案する独自の浮力方程式を用いる。霧の消失表現については飽和水蒸気量を基に密度を制御することで再現する。

本手法により、これまでの空間上に配置した発生源から下方向に霧が流れる表現に加えて、霧が器から溢れ出る表現がパラメータ変更のみでリアルかつ効率よく再現可能となる。なお、本論文は筆者らが NICOGRAPH 2022 にて発表した論文 [1] を更に発展させ、霧の消失箇所を追加したものである。

2. 関連研究

2.1 流体シミュレーションに関する研究事例

3DCGにおいて写実的な炎、水、雲、煙などの自然現象は、流体シミュレーションの支配方程式であるナビエ・ストークス方程式を解くことで表現される。この手法は本来、数値流体力学の分野で活用されていた技術であるが、1996年にFosterとMetaxasがこの手法をCG分野に応用し、格子法による研究成果を発表した [2]。この研究がCG分野における流体シミュレーションの発端である。その後1999年にStamがStable Fluids [3] を発表し、オイラー法とラグランジュ法を混合させたセミラグランジュ法を流体シミュレーションに取り入れた。2001年、Fedkiwら [4] はこれまでの研究を応用することで、様々な流体の自然現象を高品質な映像として表現することが可能となった。

実現象の特性を考慮した自然現象のシミュレーション例として、宮崎らは流体シミュレーションによる効率的な雲のビジュアルシミュレーション手法 [5] を提案した。シミュレーション時に山の地形を考慮することで、斜面上での雲の生成や消滅シミュレーションも可能となった。これにより、実際に山の付近で発生するような雲のビジュアルシミュレーションの品質が向上した。また、同著者らは相転移や断熱冷却を含んだ雲のシミュレーションモデル [6] も提案している。この研究では、蒸気、雲、温度、速度場の相互作用を考慮したモデルによって雲のシミュレーションを行い、煙のシミュレーションでは含まれない相転

移や断熱冷却による影響を再現している。このモデルにより、従来の雲のシミュレーションよりも現実的な積乱雲のシミュレーションが可能となった。これらの手法は雲の発生要因を考慮することで現実的なシミュレーションを行っているが、疑似的な手法よりも結果がリアルな反面、計算負荷が高い。同様にドライアイスの霧を厳密にシミュレーションする場合は、実際の霧の成分である氷微粉末と水の粒子による混相流のシミュレーションを行う必要があるが、宮崎らの論文には混相流やそれらの代替手法について示されていない。これについては3章で後述する。混相流の計算は負荷が非常に高いため、本研究では発散場と浮力を制御する手法で霧のシミュレーションを行う。しかしながら宮崎らの手法は有益であるため、本研究では文献[6]の相転移の手法を霧の消失に応用し、従来のドライアイスの霧の生成手法よりもさらにリアルな結果を作成可能にする。

佐々木らは酸素との反応を考慮した炎のシミュレーション手法[7]を提案した。これまでの研究では炎のシミュレーションを扱う際、燃焼の過程については全く考慮されていなかったため、実際の現象と比較するともっともらしさにやや欠けていた。そこで酸素供給によって燃焼が激しくなるなどの炎特有の挙動について着目し、研究を行った。燃料と酸素の化学反応を考慮するため、炎は計算負荷などの理由から粒子法、計算領域内の均一な空気は格子法を用いて計算する。実験結果として、着火から鎮火までの過程及び燃焼点周囲の酸素濃度の増減によって炎の挙動が変化する様子が確認でき、炎の形状と色をインタラクティブに制御することが可能となった。これによって炎の燃焼過程を再現することが可能になり、炎のビジュアルシミュレーションの品質が向上した。この研究では炎の特徴に着目した手法が提案されているが、本論文で提案するようなドライアイスの特徴による昇華の急激な体積膨張の様子について生成可能であることは示されていない。

流体の流れの制御手法として、松原らはペイント操作を用いた炎の流れのガイドに関する実験について発表した[8]。煙のシミュレーションでは速度場と密度場を扱うが、それらに加えて炎の温度場を扱い、温度による浮力を考慮して流れを生成する。ペイントシステムではマウスポインタを用いて入力となる速度場を生成し、係数によって速度の大きさを調節する。この研究によって、直感的に速度場を生成することが可能であると同時に、温度による浮力を考慮した炎のシミュレーションが可能になった。しかし、この研究ではペイント手法を用いて速度場を制御する手法を提案しているが、本論文で提案するような上昇気流から急激な下降気流に変化するような流れ場までをリアルに生成可能であることは示されていない。

機械学習を用いたアプローチとして、Xieらは敵対的生成ネットワーク（以下、GAN）を用いた煙の高解像度化手法を提案した[9]。従来の生成モデルよりも煙などの流体の挙動を生成することに特化し、速度や渦度など物理量を扱うことで現実的かつ創造的な煙の制御を可能としている。これによって入力された低解像度の煙の画像から、リアルな煙の高解像度画像の生成が行えるようになった。このGANを用いた学習モデルによる流体の生成は時間的な連続性が保たれるという利点があるが、本論

文で提案するような上昇気流から急激な下降気流に変化するような流れについては示されていない。またこの生成モデルの3次元ネットワークの学習は、現状非常に計算時間が長い。本論文ではドライアイスの霧を疑似的に再現する手法を用いることで、計算負荷を抑えつつ高い品質でシミュレーションを可能にする。

2.2 3DCG で作成されるドライアイスの霧

既存の3DCGソフトウェアに実装されている流体ソルバを用いてアーティストがドライアイスの霧をシミュレーションした例がいくつか存在している[10,11]。これらのシミュレーションは写実的でもっともらしい結果になっているが、これらは汎用的な流体ソルバを用いてアーティストが試行錯誤によって疑似的に作成したものであるため、品質はアーティストの技術力による影響度が高い。また実際のドライアイス水を水中に投じた際に発生する霧の現象と比較すると、結果が異なる箇所がある。これには、霧の詳細な流れや勢いなどが該当する。そしてこれらのシミュレーションでは、霧の発生源が器の内側にある状態が考慮されていない。ドライアイスはそのまま配置されているときに発生する霧と水中に投じた際に発生する霧で大きく挙動が変化する性質がある。本研究ではドライアイス特有の物理的特性を考慮し、浮力の制御によってシミュレーションを行うため、実際の現象に近い動きを容易に再現できる。これにより、本研究手法を用いることでアーティストの技量によらず、一定の品質を保つことが可能である。

3. ドライアイスの霧

3.1 ドライアイスとは

ドライアイスとは、固体の二酸化炭素である[12]。常温常圧下では融解せず、固体から直接気体に状態変化する性質を持っている。このような変化を昇華と呼ぶ。図2は昇華の様子を図に表したものである。また表1にドライアイスの物理的性質を記載する。

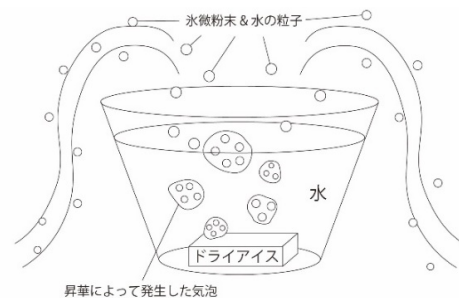


図2. ドライアイスが水中で昇華する様子

表1. ドライアイスの物理的性質

分子量	44.01
密度 (kg/l)	約1.56
昇華点 (°C)	-78.9
昇華熱 (kJ/kg)	573

3.2 発生する霧について

ドライアイスから発生する霧は様々な表現方法があるが、本論文では一律して霧と表現し、物体の燃焼によって発生するような高温気体を煙と表現する。図3はドライアイスを水に投じた際に霧が発生している様子である [13]。

インターネット上で「ドライアイス」「煙」「霧」などのキーワードを用いて検索をすると、霧の正体は水の粒子であるなどの文献が複数見つかる [14,15]。しかし松川の研究 [16]によると、水に投じたドライアイスから生じる霧の正体は固体の氷微粉末であると推定している。これらのことから、ドライアイスから発生する霧の正体は今なおはっきりと証明することができていないと言える。しかしながら様々な文献から、氷微粉末あるいは水の粒子などの気体以外の物質が混在していると推定することができる。しかし、実際の現象を厳密に再現するためには混相流のシミュレーションが必要になり、計算負荷が高くなってしまふ。そこで本研究では、格子法を用いて单相流の浮力を制御することで、疑似的に霧の挙動を再現することとする。



図3. ドライアイスを水に投じた際に発生した霧の様子 (YouTubeより引用 [13])

3.3 霧と煙の挙動の違い

3.3.1 浮力について

重力が発生している地点において、気体が周辺の気体と密度が異なる場合、浮力 (Buoyancy) が生じる。気体の浮力を温度差に比例する力で近似するブシネスク近似によって、浮力は次の式 (1) のように示される [17]。

$$Buoyancy = g\rho\beta(T - T_e) \quad (1)$$

ここで、 g は重力 (m/s^2)、 ρ は気体の密度 (g/l)、 β は体膨張係数、 T は温度 (K)、 T_e は周辺温度 (K) を表す。体膨張係数 β は1K当たりの密度変化率を表し、次の式 (2) によって定義される [17]。

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (2)$$

β は常圧気体の場合、温度 T の逆数と近似できるため、次のような式 (3) で示すことができる [17]。

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (3)$$

本手法では、温度や質量をパラメータとして浮力を制御することで、ドライアイスから発生する霧を再現している。

3.3.2 気体の質量と挙動について

表2は各気体の質量と気体の成分をまとめたものである。

本論文において、煙は物体の燃焼によって発生するような高温気体であるとした。煙の主成分である炭素原子の質量は12 g/molであり、高温気体は空気中の常温気体と比較すると低密度となるため、煙の挙動は上昇する傾向がある。一方ドライアイスの主成分である二酸化炭素の分子量は44 g/molであり、ドライアイスから発生する霧は非常に低温のため空気中の常温気体と比較すると高密度となる。また個体である氷微粉末と液体である水の粒子も混在していることから、空気中の霧の挙動は下降する傾向がある。なおこれらは常温常圧下を前提とし、空気の質量は28.8 g/molとする。

表2. 各気体の成分と質量

	主成分	質量 (g/mol)
煙	炭素	12
ドライアイス	二酸化炭素	44
空気	窒素 (約80%), 酸素 (約20%)	28.8

4. 提案手法

4.1 概要

本論文では、下記のような手順でシミュレーションを行う。

はじめに、ドライアイスを入れるための器と発生源となるモデル (以下、ソースモデルと呼ぶ) を作成する (図4)。この器は、霧のコリジョンとして使用する。その後ソースモデルにノイズを加え、ドライアイスの水の中へ投じた際に生じるような気泡の上昇運動を再現する。

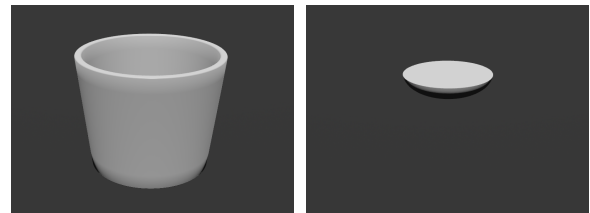
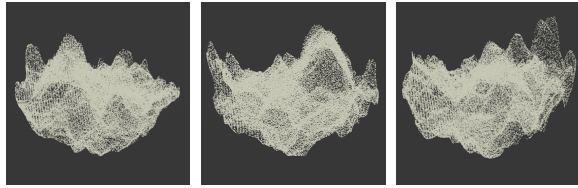


図4. 器 (a) と霧の発生源となるソースモデル (b)

4.2 シミュレーションソース

ドライアイスの水の中へ投じた際に生じるような気泡の上昇運動を再現するため、作成したソースモデルをモデル内に整理するような点群に変換した。その後、この点群に対して上下方

向にアニメーションさせたWorleyノイズ [18]を適用させることで、水中の炭酸ガスのような挙動を表現した (図5)。



(a) 1フレーム目 (b) 12フレーム目 (c) 24フレーム目
図5. シミュレーションソースのノイズアニメーション

このソースにラスタライズ処理をしてボリュームデータに変換し、格子法で流体シミュレーションを行う。

4.3 シミュレーション

作成したシミュレーションソースに対して流体シミュレーションを行う。なお、本手法では格子の中心に圧力、格子の表面に流速を定義するStaggered格子を用い、移流計算では数値拡散の抑えられているMacCormack法 [19], 境界条件は滑りなし条件を採用している。流体シミュレーションの支配方程式であるナビエ・ストークス方程式は次の式 (4) で示される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2 u + f \quad (4)$$

ここで、 u は流体速度、 f は外力、 p は圧力、 ρ は流体密度、 ν は粘性係数を表す。各項については左辺第1項からそれぞれ、時間微分項、移流項、圧力項、粘性項、外力項で構成される。このナビエ・ストークス方程式は、密度と粘性係数が一定であると仮定し、非圧縮性流体を対象とする。非圧縮性流体の質量保存を表す連続式は次の式 (5) のように表す。

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (5)$$

本手法では温度や質量の値をパラメータで指定することにより、浮力 F_b の値を制御することを目的とする。本論文で提案する計算手法は次の式 (6) で示す。

$$F_b = g\rho\beta(T - T_e)D_s A \quad (6)$$

本手法は第3章で示した浮力式 (1) に対し、項を追加するものである。ここで、 D_s は発散調節変数、 A は浮力調節係数を表す。なお、周辺温度 T_e は一様であると仮定する。

式 (1) を用いてドライアイスの霧のシミュレーションを行った場合、下方向へ流れる力が弱く、実際のドライアイスの霧のような挙動にはならない。これは第3章で述べたように、実際のドライアイスの霧には氷微粉末や水の粒子が混在する上、主成分である二酸化炭素の質量は常温空気中の質量よりも重い。しかし格子法を使用した流体解析において、速度場の計算は密度が均一な気体として近似することが一般的である。そのため

3DCGソフトウェアに標準搭載されている格子法の流体ソルバでは混相流を扱うことができない。したがって、従来の浮力計算ではドライアイスの霧特有の質量が考慮されず、式 (1) のみを用いた場合ではドライアイスの霧の急な下降表現が困難である。

そこで本手法の浮力調節係数 A を式 (1) に乗算することで浮力が強くなり、ソースモデルから発生した霧の下方向に流れる力を強くすることで解決を図る。

しかし本研究で用いたソースモデルのように、ソースが器状のコリジョンの内側に存在する場合、下方向の力が強くなりすぎてしまうことで器から霧 (Fog) が溢れなくなってしまう。図6は浮力を強めたことによって霧が器から溢れなくなってしまう様子を表したイメージ図であり、矢印はベクトル場の向きを表すイメージである。

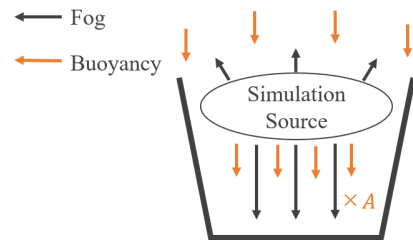


図6. 浮力調節係数 A による浮力増加

これは本研究の場合、格子法で流体解析を行っていることで、同じソースから発生した霧同士の衝突による相互作用が発生しないためと考えられる。

そこで本手法では、発散 (Divergence) によるシミュレーションソースからの湧き出しを行うことで器から霧が溢れなくなってしまう問題を解決する。図7は湧き出しの力 (Gush Out) によって霧が器から溢れる様子を表したイメージ図である。

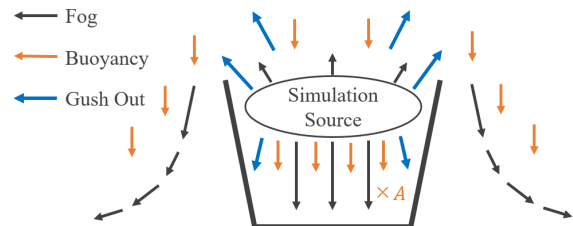


図7. 湧き出しによって霧が器から溢れる様子

また、発散の湧き出しは次の式 (7) によって示される。

$$\nabla \cdot u > 0 \quad (7)$$

通常であれば、流体シミュレーションを行う場合非圧縮性であることがコンセプトとなる。しかし本手法ではドライアイスの昇華による体積膨張を考慮し、視覚的にドライアイスの霧の再現性を高めるため、ソースの発散場に対してソースの密度値 ρ_{source} と発散調節変数 D_s を乗算した値を毎フレーム加算している。発散調節変数 D_s は以下の式 (8) で示す。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = D_s \rho_{source} \quad (8)$$

よって、式 (6) に式 (8) を代入することで、以下の式 (9) が得られる。

$$F_b = g\rho\beta(T - T_e) \frac{\nabla \cdot \mathbf{u}}{\rho_{source}} A \quad (9)$$

式 (9) により、本手法は浮力を算出する際に発散場を考慮していることがわかる。これによって本手法では、発散場が大きくなるほど浮力が大きくなる関係性を構築することができた。

4.4 霧の消失

シミュレーションによって発生した霧が消失する様子については、空気中の飽和水蒸気量 [20] を基に密度を制御することで再現した。飽和水蒸気量 $W_{max}(t)$ は次の式 (10) で示される

$$W_{max}(t) = \frac{217 \times e(t)}{T} \quad (10)$$

式 (10) を解くためには飽和水蒸気圧 $e(t)$ を代入する必要がある。飽和水蒸気圧は Tetens [21] の近似式によって算出でき、以下の式 (11) で求められる。

$$e(t) = 6.1078 \times 10^{\left(\frac{7.5t}{t+237.3}\right)} \quad (11)$$

求められた飽和水蒸気量を水蒸気との相転移の式 [6] に代入し、次の式 (12) および式 (13) を求めて密度を更新することで霧の消失を表現する。

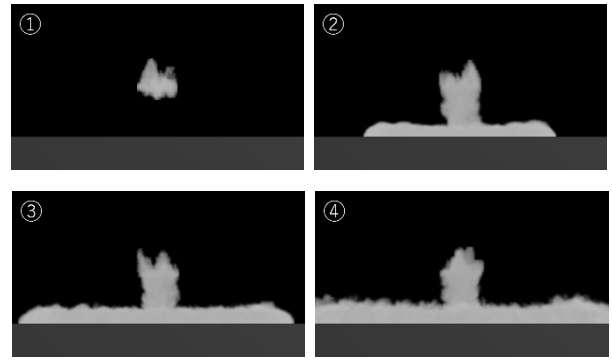
$$\rho^* = \rho + \Delta t \alpha (W_{vap} - W_{max}) \quad (12)$$

$$W_{vap}^* = W_{vap} - \Delta t \alpha (W_{vap} - W_{max}) \quad (13)$$

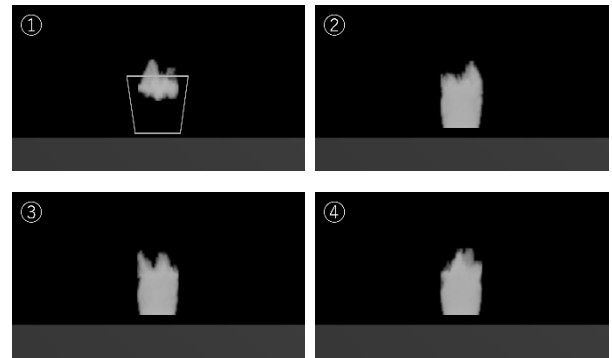
ここで、 α は相転移率を表し、ユーザーが定義した任意の値をとる。 W_{vap} は水蒸気量を表し、本研究では初期値を定義して変数として扱う。また ρ^* と W_{vap}^* はそれぞれ更新後の密度および水蒸気量である。

5. 結果

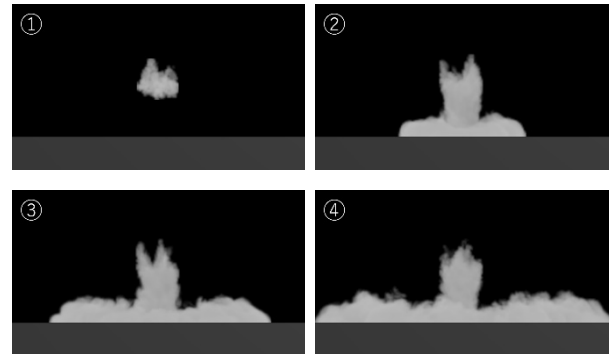
本章では、提案手法の有効性を検証するために、従来手法との比較を行う。また、提案手法におけるパラメータが結果画像にどのような影響を与えるのかについても検証する。上述した提案手法のシミュレーション結果を以下の図8-13に示す。なおこれらの提案手法によるシミュレーションにおいて、周辺温度 T_e は 298 K、図8の (c) 以外は浮力調節係数 A の値を全て 19 で統一し、周辺温度は一律なものとした。



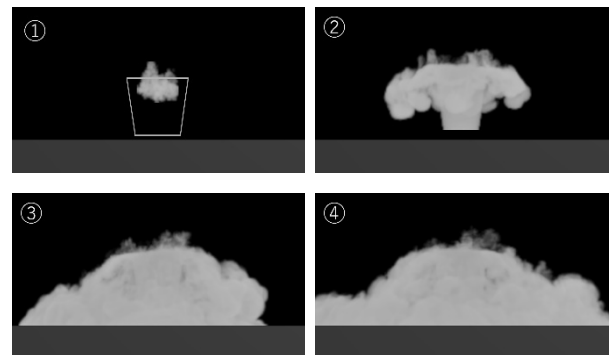
(a) 従来手法：器なし



(b) 従来手法：器あり



(c) 提案手法：器なし



(d) 提案手法：器あり

図8. 従来手法と提案手法の比較

5.1 従来手法との比較

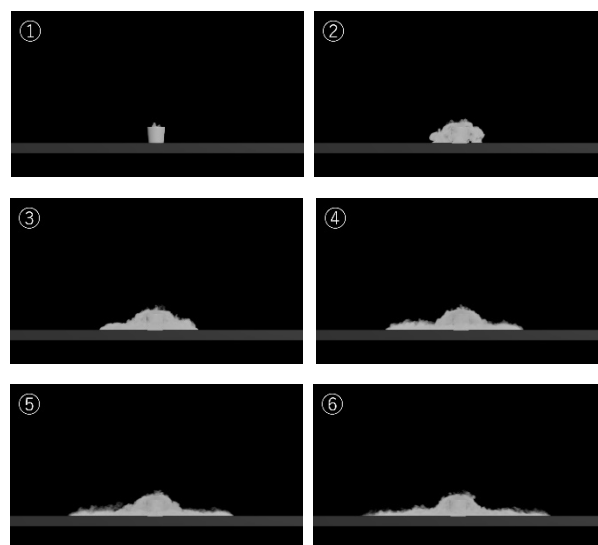
本手法の有効性を検証するため、従来手法と提案手法の結果比較を行った。図8は (a) と (b) が従来手法、(c) と (d) が提案手法を用いた結果である。ここで、従来手法は発散場や実際のドライアイスと周辺温度による温度場を扱わない手法のことを指す。(a) と (c) が器のコリジョンなし、(b) と (d) が器のコリジョンありの結果であり、(b) と (d) は器内部の挙動を見るため画像①のみ器の形状と位置を表示させている。なお、霧の衝突を正しく行うため器の形状は表示よりもやや内側に膨張させている。シミュレーションソースは、全て画像①のように地面から離れた空間上に配置している。提案手法は器の有無によってパラメータを調整しており、(c) は発散調節変数 D_s を0.01、浮力調節係数 A を119に、(d) は発散調節変数 D_s を0.1、浮力調節係数 A を19としている。(a) と (c) から、器がない場合のシミュレーションは従来手法を用いても可能であると言える。しかし (b) と (d) に着目すると、提案手法である (d) では霧が器から溢れて流れているのに対し、従来手法である (c) では霧が溢れずにいる。これは、従来手法のような発散場を扱わない手法の場合、霧がすばやく下降するようにパラメータを調節すると、霧を器の中から溢れさせるのが困難になるためである。しかし実際のドライアイスを器の中の水に投じるなどして発生した霧は、その発生量の多さによって本来器から溢れるものである。提案手法では、発散調節変数 D_s と浮力調節係数 A のパラメータを変更するだけで器の有無の対応が可能であり、ドライアイスの霧についてシミュレーションを行う際は本手法の方が既存手法よりも有効である。

5.2 ソースの温度の比較

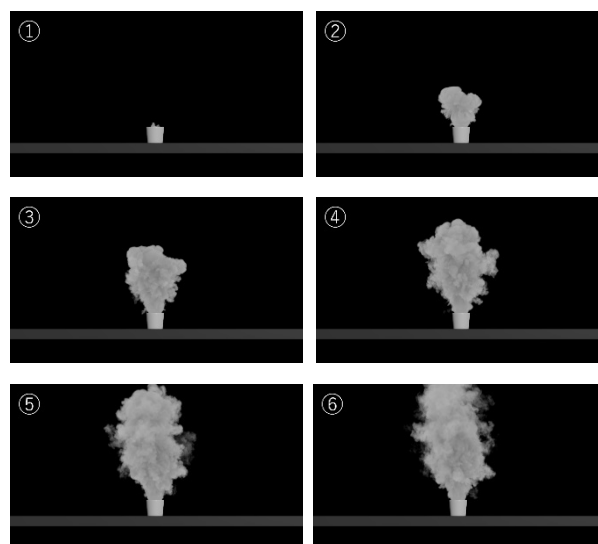
ソース温度の違いによって、霧の挙動がどのように変化するかを調べたのが図9である。(a) ではソース温度を194 Kに、(b) では周辺温度 T_e と同じ値に、(c) では323 Kに設定し、霧の挙動を比較している。(a) では画像②から霧が下方向に向かって流れていることが確認できる。(b) と (c) では画像②から霧が上方向に向かって流れていることが確認できる。(b) では温度差による浮力が生じないため発散の勢いによって霧が上昇する様子が確認でき、(c) では温度差によって (b) よりも霧が強く上昇している様子が確認できる。これにより、霧の挙動はソース温度と周辺温度によって制御が可能であることが分かる。

5.3 発散調節変数の比較

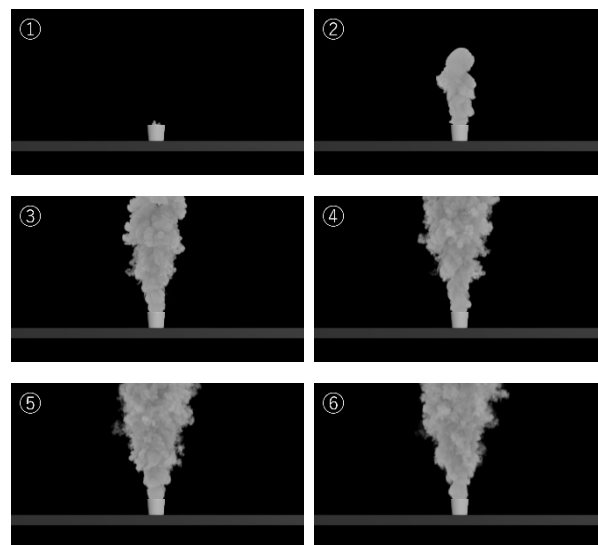
発散調節変数 D_s の違いによって、霧の溢れ方がどのように変化するかを調べたのが図10である。(a) では発散調節変数 D_s を0、(b) では0.5、(c) では1.0に設定し、霧の挙動を比較している。(a) では発散や浮力による影響がなく、シミュレーションソースのノイズによる影響が最も分かりやすい結果となっている。(b) と (c) ではどちらも画像②から霧が下方向に流れたあと水平に広がっているが、(c) は (b) と比較して勢いが強くなっていることが分かる。発散調節変数 D_s の値を大きくするほど、湧き出しによる霧の流出量が増加するため、霧の発生量を増加させながら流れる勢いを強くすることが可能である。



(a) ソース温度 T : -79°C (194 K)

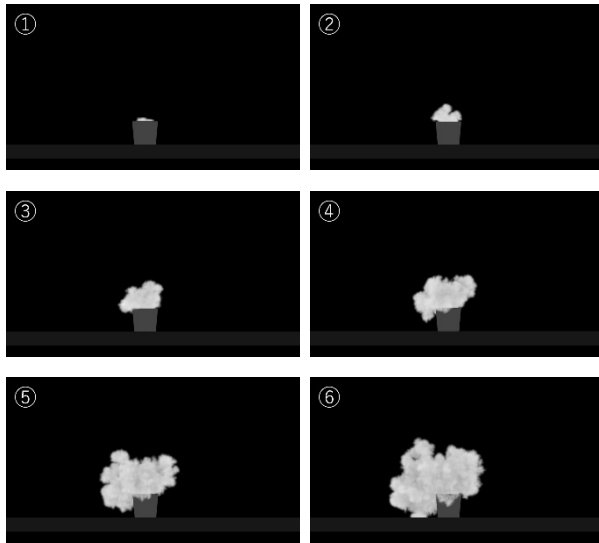


(b) ソース温度 T : 周辺温度 T_e と同じ

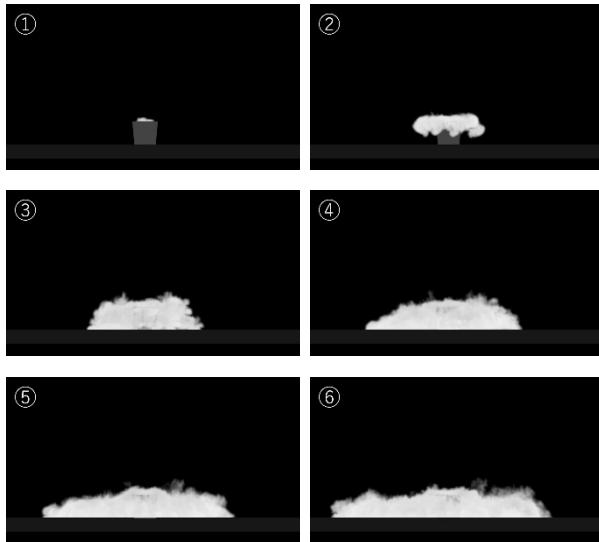


(c) ソース温度 T : 50°C (323 K)

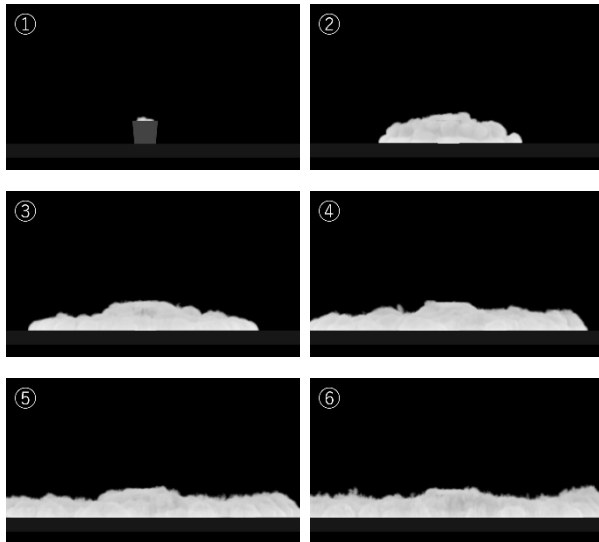
図9. ソースの温度の比較



(a) 発散調節変数 $D_s : 0$



(b) 発散調節変数 $D_s : 0.5$



(c) 発散調節変数 $D_s : 1.0$

図10. 発散調節変数の比較

5.4 相転移率の比較

図11では、ユーザー定義の相転移率 α によって霧の消失量がどのように変化しているかについて調べるため、各数値のシミュレーション結果を比較した。(a)は相転移率 α を0に設定し、飽和水蒸気量を基にした密度変化がない状態である。(b)は相転移率 α を0.2、(c)は0.4に設定し、画像③から霧の末端の密度が変化していることが確認できる。(b)と(c)の結果から、相転移率 α の値を高くするほど霧の消失が強まり、周辺温度の影響によって霧が消失する様子を表現可能であることが確認できた。

5.5 器を複雑な3次元形状に変更した結果

本研究では、これまで器のコリジョンを単純な円筒形状としていたが、本手法の汎用性を調べるために器の形状を変更してシミュレーションを行った。複雑な3次元形状を器として扱い、霧が問題なく流れるかを確認したのが図12である。3次元モデルは形状の複雑さと霧の視認のしやすさを考慮して、色を変更したStanford Bunnyを用いた。(a)がモデルの前方、(b)がモデルの後方から見た図である。これら(a)と(b)から、他の複雑な3次元形状を器として用いた場合でも問題なくシミュレーションを行えていることが分かる。特に(b)に着目すると、モデルの形状に沿って霧が流れていることが確認できるため、器の形状が複雑な場合でも本手法が有効であると言える。

5.6 成果画像例

これまでのシミュレーション結果から得られた知見を基に作成した成果画像例が図13である。

本手法を用いて成果画像例のようにドライアイスから発生する霧を再現する場合は、ソース温度 T を194 K、発散調節変数 D_s と相転移率 α の数値をそれぞれ0.1に設定することで作成することができる。また浮力調節係数 A の値を変更することで、浮力と発散場の増加関係を調節することが可能である。

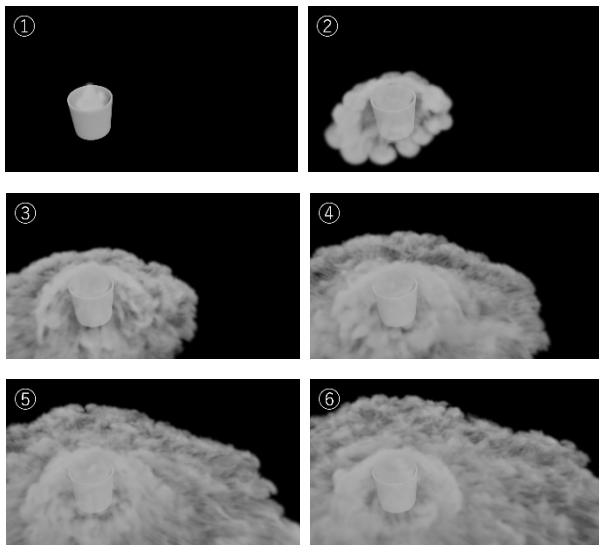
なお、シミュレーション結果の動画は下記URLにて公開している。動画内では紙面の都合上載せることのできなかったフィールドの検証も含まれているので、映像についてはこちらを参照されたい。

「 <https://vimeo.com/831523163> 」

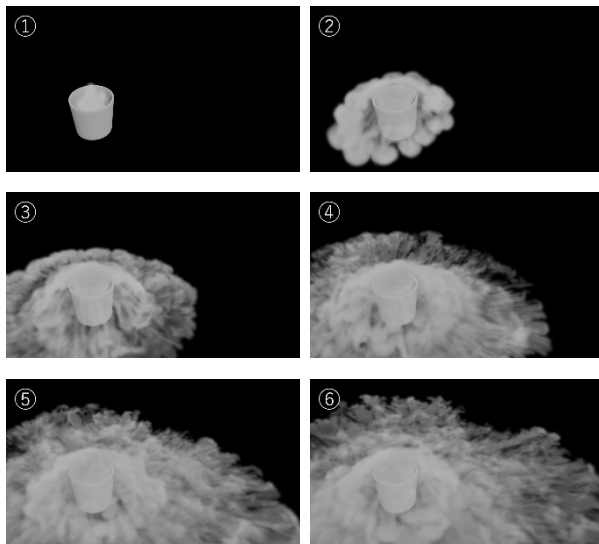
シミュレーションとレンダリングを行うにあたり、使用したマシンの構成は以下の表3に示す。なお、GPUはレンダリングのみに使用し、シミュレーションはCPUのみで行っている。

表3. 実行環境

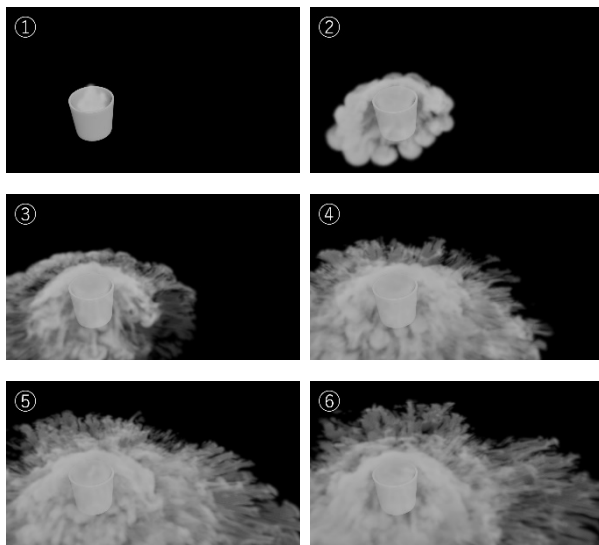
CPU	Intel(R) Core (TM) i9-12900K CPU @ 3.20GHz
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060
RAM	128GB
OS	Windows 11 Pro (64bit)
Software	Houdini 19.5.493



(a) 相転移率 $\alpha : 0$

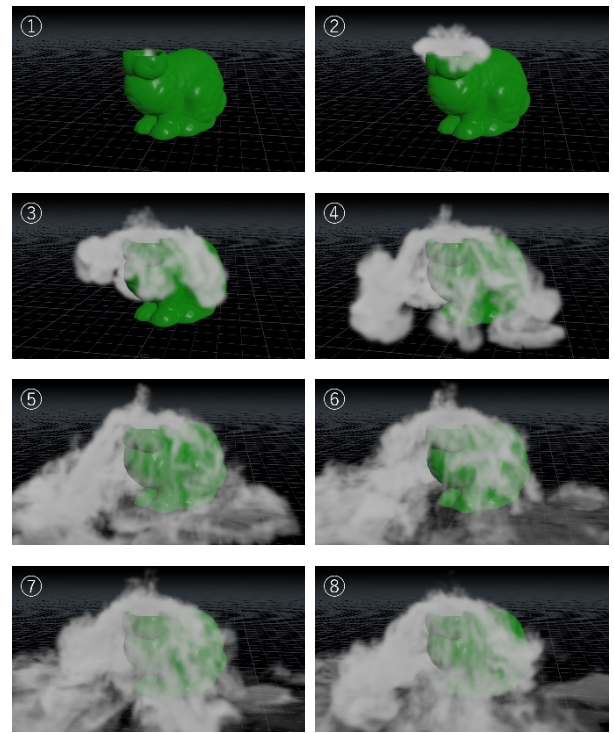


(b) 相転移率 $\alpha : 0.2$

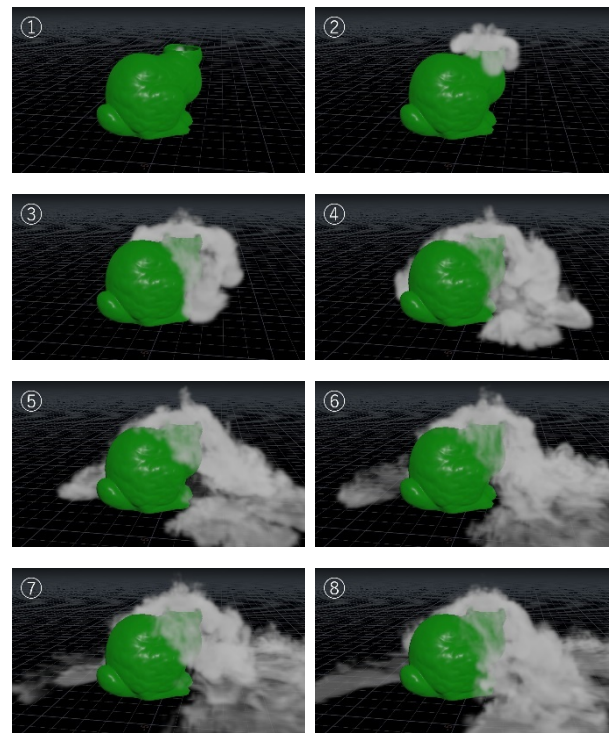


(c) 相転移率 $\alpha : 0.4$

図11. 相転移率の比較



(a) Stanford Bunny 前方



(b) Stanford Bunny 後方

図12. 器を他の3次元形状に変更した結果

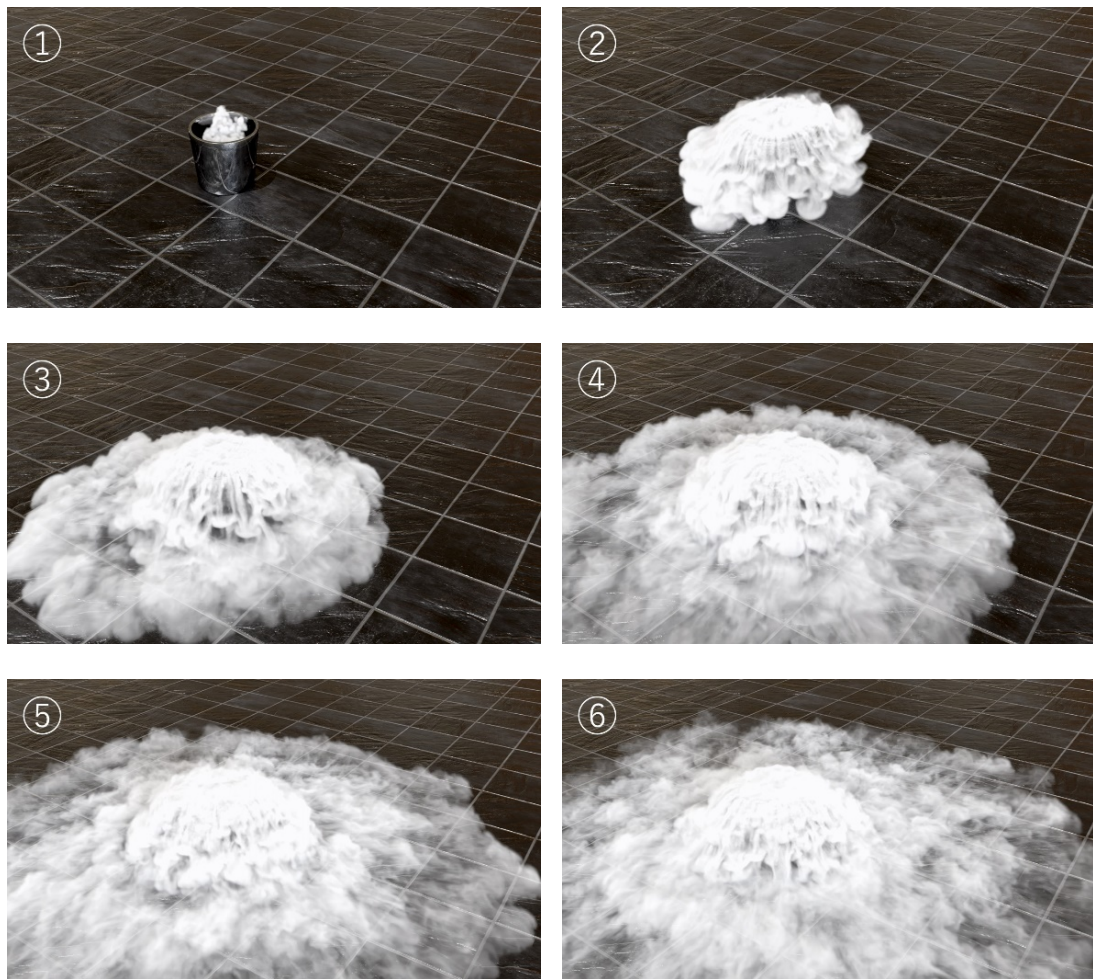


図13. 本手法を用いた成果画像例

図13のシミュレーション時間およびレンダリング時間については以下の表4の通りである。なお、本研究では密度場が存在している付近のみに格子を生成するSparse処理を採用している。そのため、格子数が動的に変化することから、平均格子数を掲載する。

表4. 計算時間

フレーム数	300
平均格子数	17,519,810
シミュレーション時間	1時間31分45秒
レンダリング時間	8時間16分2秒

6. まとめと今後の展望

6.1 考察

本論文では実際の環境温度及びドライアイスの霧の温度や質量を想定した疑似的な値を計算に用いることで、ドライアイスから発生する霧をシミュレーションによって再現する手法を提案した。流体シミュレーションを行う際に実際の温度をパラメータとして扱うことで、より手軽に実際の現象を再現しやすくなった。浮力を計算する際に発散場を考慮したことで、霧の

流れが下方方向に働く力を調節すると同時に湧き出しの量をコントロールすることが可能となった。本手法により、従来の煙などのシミュレーション手法では困難であった、器の内側から発生した霧が即座に下方方向へ流れる挙動をリアルに表現することが可能である。またシミュレーションソースにノイズを適用する際、本研究ではWorleyノイズを使用して炭酸ガスの挙動を再現した。しかしこのノイズの選択は、筆者らの主観によって成果映像の見た目を重視したものである。他の異なるノイズを使用することにより、霧の挙動のパリエーションを増やすことができるため、シミュレーションの試行錯誤も容易である。そして本研究の手法はドライアイスから発生する霧のみならず、高温の煙を対象とした場合でも温度や質量を考慮してシミュレーションを行うことができる。

しかしながら本論文での再現対象は、ドライアイス水を水などの液体に入れた際に生じるような、発生量の多い霧についてのみである。そのためドライアイス空気中に置いた際に生じるような、視覚的に密度の低い霧のシミュレーションについては考慮していない。このようなドライアイスの表面によって空気中の温度が下がり、飽和水蒸気量が下がったことによって可視化される霧の再現については、値を調節したうえでシミュレーションの試行錯誤が必要となる。

6.2 今後の展望

本研究によって、ドライアイスから発生する霧の再現はある程度の品質で可能となった。しかし実際にドライアイスから発生する霧と比較すると、見た目として完璧に再現することはできていない。CG分野でのビジュアルシミュレーションは数値的な正確さよりも見た目が重視される傾向があるため、今後は更に見た目がリアルになるよう手法を改善及び進化させていく必要がある。

本研究の目的はドライアイスを水などの液体に入れた際に生じる霧の再現であるが、今回はシミュレーション時に液体との干渉について考慮していない。そのため、実際の現象のようにドライアイスが液体と反応する様子をシミュレーションする場合は、手法を改めなければならない可能性がある。

ドライアイスの昇華によって発生する昇華熱は霧の挙動において重要な要素の一つと考えているが、現時点では詳細に考慮することができていない。また霧の消失箇所を実装した水蒸気との相転移も現時点では簡易的で温度場の更新は未実装であるため、これらの実装も今後の展望となる。

本手法では霧の質量を考慮するため、浮力調節係数 A を用いて浮力計算に取り入れた。しかし将来的にはこれらの要素も含めて式 (1) の ρ に考慮することで、よりリアルな霧の表現が可能になると考えている。

参考文献

- [1] 小林 唯斗, 菊池 司, 周辺気体の温度場を考慮したドライアイスから発生する霧のビジュアルシミュレーション, NICOGRAPH 2022 Conference Track Full Paper, F-06, 2022.
- [2] N. Foster, D. Metaxas, "Realistic Animation of Liquids," *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 58, No. 5, pp. 471-483, 1996.
- [3] J. Stam, "Stable Fluids," *Proc. of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 121-128, 1999.
- [4] R. Fedkiw, J. Stam, H. W. Jensen, "Visual Simulation of Smoke," *Proc of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 15-22, 2001.
- [5] 宮崎 玲, 土橋 宜典, 西田 友是, アダプティブグリッド法を用いた効率的な雲のビジュアルシミュレーション, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-D-2, No. 9, pp. 1814-1822, 2004.
- [6] R. Miyazaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "Simulation of Cumuliform Clouds Based on Computational Fluid Dynamics," *Eurographics Short Presentations*, 2002.
- [7] 佐々木 浩幸, 藤澤 誠, 三河 正彦, 燃焼過程を考慮した炎のシミュレーション, 情報処理学会研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学, Vol. 49, No. 4, pp. 1-7, 2018.
- [8] 松原 凜太郎, 佐藤 周平, 高尚策, 唐 政, ペイント入力を用いた炎の流れのガイドに関する一実験, NICOGRAPH 2022 Conference Track Short Paper, S-13, 2022.
- [9] Y. Xie, E. Franz, M. Chu, N. Thuerey, "tempoGAN: A Temporally Coherent, Volumetric GAN for Super-Resolution Fluid Flow," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1-15, 2018.
- [10] J. Lyddon, "Dry Ice Simulation v1," Online video, Vimeo, 2016-01-18, <https://vimeo.com/152166561> (2023-05-19 参照).
- [11] A. Zhu, "Fluffy Dry Ice Volumetric Fog in UE4," Online video, YouTube, 2020-02-13, <https://youtu.be/9IMJaTkUzNg> (2023-05-19 参照).
- [12] 清水 鐵男, ドライアイス, 有機合成化学協会誌, Vol. 48, No. 8, pp. 766-767, 1990.
- [13] CHOICE DJ, "What is Dry Ice ? - First Dance Smoke for Weddings by CHOICE DJ," Online video, YouTube, 2018-01-03, <https://youtu.be/1mD1X-H6Fwk> (2023-01-26 参照).
- [14] NIIGATA-SCIENCE-MUSEUM, 白いもくもくの正体は?, 「科学館日記」新潟県立自然科学館 -スタッフコラム-, 2019-08-02, <https://sciencemuseum.jp/cp-bin/wordpress/2019/08/02/白いもくもくの正体は?/> (2023-01-26 参照).
- [15] 株式会社 埼玉ロジテック ドライアイス事業部, ドライアイスに水にいれると出る白い煙の正体は?, 2020-01-21, <http://sailogi-dryice.com/dryice/white-smoke-dryice/> (2023-01-26 参照).
- [16] 松川 利行, 水に投じたドライアイスで生じる白煙の正体について—氷微粉末(個体)である—証明—, 啓林館サイエンスネット, Vol. 34, pp. 2-7, 2008.
- [17] 小林 健一, 第 9 回 自然対流熱伝達, 2021-03-08, <http://www.isc.meiji.ac.jp/~re00079/HT.2020/20200706.html> (2023-01-26 参照).
- [18] S. Worley, "A Cellular Texture Basis Function," *Proc. of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 291-294, 1996.
- [19] A. Selle, R. Fedkiw, B. Kim, Y. Liu, J. Rossignac, "An Unconditionally Stable MacCormack Method," *Journal of Scientific Computing*, Vol. 35, No. 2, pp. 350-371, 2008.
- [20] Electrical Information, 飽和水蒸気量を『計算』で求める方法を分かりやすく解説!, <https://detail-infomation.com/the-amount-of-water-vapor/> (2023-01-26 参照).
- [21] O. Tetens, "Über Einige Meteorologische Begriffe," *Zeitschrift für geophysik*, Vol. 6, pp. 297-309, 1930.

小林 唯斗



2022 年東京工科大学メディア学部卒業。現在、同大学大学院 バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻修士課程 在学中。現在、流体シミュレーション分野の研究に従事。

戀津 魁



2017 年東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科博士課程修了。博士（メディアサイエンス）。2014年より理化学研究所情報基盤センター センター技師を経て、2018年より東京工科大学助教。Webアプリによるデジタルライゼーション研究に従事。

伊藤 智也



2004 年岩手大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程単位取得退学。2004 年八戸工業大学工学部システム情報工学科助手。同年、博士（工学）を取得。2022 年より同大学教授、現在に至る。コンピュータグラフィックスによるビジュアルシミュレーションとCGの応用技術、ゲーム開発技術に関する研究に従事。芸術科学会、情報処理学会、日本デジタルゲーム学会 会員。

竹島 由里子



1999 年お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士課程修了。博士(理学)。お茶の水女子大学大学院人間文化研究科助手、東北大学流体科学研究所助手、日本原子力研究所博士研究員、2005 年より東北大学流体科学研究所助手・助教・講師を経て、2015 年より東京工科大学准教授、2018年より同教授。科学技術データの可視化に関する研究に従事。

菊池 司



1999 年岩手大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了。博士（工学）。2000年拓殖大学工学部工業デザイン学科助手。2004年同大学専任講師。2007年から2008年まで韓国・高麗大学客員教授。2009年拓殖大学工学部工業デザイン学科（現デザイン学科）准教授、2014年東京工科大学メディア学部准教授、2018年4月同教授、現在に至る。コンピュータグラフィックス、Procedural Animation、Procedural Simulation、およびコンテンツデザイン、コミュニケーションデザイン分野の研究に従事。ACM、芸術科学会、情報処理学会、画像電子学会、他会員。