

側鎖結合を考慮した 毛髪の相互作用シミュレーション

今井 翔輝^{1,a)} 出村 佑史¹ 藤澤 誠^{1,b)} 三河 正彦¹

受付日 2022年08月05日, 採録日 2022年08月05日

概要: この論文では, 毛髪と水のような液体及び空気の流れ(風)との相互作用とそれによって生じる塑性変形シミュレーション手法を提案する. 毛髪内部に存在する側鎖結合の作用を位置ベース法の制約条件で再現する手法を用いて, 毛髪が濡れたり乾燥したりするときに起こる形状変形のシミュレーションを行う. また, 変形の原因となる風によるなびきを再現するために渦を制御する乱流シミュレーション手法と, ウェーブレット解析を用いた任意の大きさの渦を強調する手法を組み合わせた手法も提案する. そして, 毛髪と空気・液体をそれぞれ粒子で離散化し, 位置ベース法のアルゴリズムに組み込みそれぞれの物体間の相互作用現象を再現する. 最後に, これらの手法を実装した結果から毛髪と液体・空気それぞれとの相互作用現象のCGによる再現が可能となることを示す.

キーワード: 物理シミュレーション, 毛髪, 流体, 変形

Hair interaction simulation considering side chain bonds

SHOKI IMAI^{1,a)} YUJI DEMURA¹ MAKOTO FUJISAWA^{1,b)} MASAHIKO MIKAWA¹

Received: August 05, 2022, Accepted: August 05, 2022

Abstract: This paper proposes a method for simulating the interaction of hair with liquids such as water and airflow (wind) and the resulting plastic deformation. Using a method that reproduces the offset of side chain bonds inside the hair based on the constraints of a Position Based Dynamics(PBD) method, we simulate the shape deformation that occurs when the hair becomes wet or dry. We also propose a turbulence simulation method that controls vortex in order to reproduce the a hair fluttering that will cause the plastic deformation, and also propose a method that emphasizes specified size vortex using wavelet analysis. Both the hair and air/liquid are discretized by particles and incorporated into a PBD algorithm to reproduce the interaction phenomena. Finally, the results of the implementation of these methods show that the interaction phenomena between hair and liquid/air can be reproduced more realistically.

Keywords: Physics simulation, hair, fluids, deformation

1. はじめに

CGアニメーションにおいて, キャラクター表現をよりリアルにするために毛髪は重要な要素の一つであり, 現実的な動きの再現のために物理シミュレーションが利用されつつある. 毛髪は, 曲げたり伸ばしたりすると元の形状に戻ろうとする弾性体としての性質と, 変形した形状から元

に戻らなくなる性質(塑性変形)を併せ持つ物体である.

塑性変形は, 毛髪内部に無数に存在する側鎖結合の結合状態の変化によって引き起こされる. 塑性変形によって引き起こされる身近な現象には寝癖やパーマ剤の作用によって側鎖結合が切断・再結合を起こすことで毛髪は形状変形する. 側鎖結合の結合状態変化を再現することで, よりリアルな毛髪の形状変形シミュレーションを行うことができ, これを位置ベース法を使って再現する手法も提案されている[1]. しかしながら, 提案されている手法は毛髪が乾燥し

¹ 筑波大学
University of Tsukuba
^{a)} simai63857@gmail.com
^{b)} fujis@slis.tsukuba.ac.jp

たときの結合変化という限定的な状態のみしかシミュレーション出来ておらず、現実には起こりうる結合の切断から再結合までの一連の状態変化を扱っている研究は我々の調べた限りではない。

側鎖結合の結合変化は、水に濡れる、ドライヤーで乾かされるなど他の物理現象との相互作用中に毛髪内部の水分量が変わることで引き起こされるため、空気や水など流体との相互作用の考慮は毛髪をシミュレーションする上で必須となる。さらに、毛髪は軽く他の物理現象の影響を受けやすい物体であるため物理現象ごとに個別に相互作用現象を考える必要がある。

本論文は、既存の側鎖結合のモデルを用いて毛髪と空気や水などの流体との相互作用及びその過程で発生する側鎖結合変化を扱う方法を提案し、現実の毛髪と他の現象の相互作用をよりリアルに再現することを目的とする。本論文の貢献を以下に示す。

- 実験データに基づく液体の吸収と拡散量を用いた毛髪塑性変形時の内部結合率計算手法の提案
- 毛髪の内部結合変化による変形まで考慮した毛髪の濡れから乾燥までの一連の流れのシミュレーションの実現
- 渦の大きさを指定可能な乱流の強調手法の提案

本論文は、毛髪と空気の相互作用手法について著者らが発表したもの [2][3] と液体との相互作用手法について発表したもの [4] をまとめた論文となる。

2. 関連研究

2.1 毛髪のシミュレーション手法

毛髪は軽く細長い物体であるために CG 分野においては質点とバネで離散化してシミュレーションされることが多い [5]。近年では、安定かつ高速なシミュレーションが可能である位置ベース法 (Position Based Dynamics) [6] の登場によって数十万本にも及ぶ本数の毛髪をリアルタイムでシミュレーションすることができるようになっていく。しかしながら、位置ベース法は毛髪の位置のみを計算するため毛髪の形状まで考慮した弾性変形は行うことが出来なかった。この問題を解決するために、梅谷らはゴーストポイントを用いて姿勢情報を保持する手法を提案し [7]、Kugelstadt らはこの手法を四元数を用いることで高速かつ安定に計算できるようにした [8]。我々は、Kugelstadt らの手法を毛髪のシミュレーションに用いる。

2.2 毛髪と液体の相互作用

毛髪は液体と複雑な作用を起こすことが知られている。例えば、毛髪の表面を流れる液体や毛髪の端で水滴として存在する液体、毛髪内部に拡散する液体等が考えられる。早期の研究として、毛髪の重さや剛性係数を変えることで毛髪の濡れ効果を再現する手法が提案されている [9]。し

かしながら、この手法は毛髪のみをシミュレーションしており毛髪と液体の間で起こる作用については全く考慮されていなかった。Rungjiratananon らは、毛髪と液体間の相互作用を SPH 法による流体のシミュレーションと Chain Shape Matching 法 [10] による毛髪のシミュレーションを組み合わせて再現した [11]。Lin らは、この手法で再現できていなかった毛髪と液体間の力の受け渡しを毛髪上に力の計算用粒子を配置することで計算できるようにした [12]。Fei らは毛髪上の薄い流体層を Height Field で計算することで流体の高精細なシミュレーションを行った [13]。

これらの手法は、毛髪と液体が引き起こす現象のほとんどを再現しているが内部結合の作用を考慮しておらず、毛髪が乾いた後は元の形状に戻り塑性変形は考慮されていない。具体的には、水分を含んだことによる変形前の形状と変形後の形状を事前定義し、水分量によってそれらの間を補間する方法を使用しており定義されていない形状へ変形させることは出来なかった。

この問題を解決するために、出村らは Kugelstadt らの手法を拡張し毛髪内部の側鎖結合を水分量によって変化させ毛髪の塑性変形を行うことができる手法を提案した [14]。しかしながら、この研究では毛髪が乾燥することによる側鎖結合の変化のみしか扱っておらず、実際の毛髪が繰り返す濡れと乾燥を一連のサイクルとしてシミュレーション出来ない。我々は、出村らの手法をベースとして毛髪の濡れ、乾燥による形状変形を液体や空気と相互作用しながら一連のサイクルとしてシミュレーションする方法を提案する。

2.3 毛髪と気体の相互作用

液体以外にも毛髪は空気のような気体と相互作用をすることで知られている。例えば、風によって毛髪がなびくことが固有の相互作用として考えられる。先行研究では、航空力学を用いて風が毛髪に与える力を計算する手法 [15] や、三角関数を用いることで波打つような毛髪の動きを制御する手法 [16] が提案されている。これらの手法は、高速である一方毛髪が空気と与える影響を考慮していないために空気の乱れが発生しないという問題がある。空気の乱れは局所的な風力の減衰や渦を引き起こすため、これを考慮することによってよりリアルな毛髪のなびきを再現することができる。

空気中に発生する渦は、PBF (Position Based Fluid) [17] を乱流シミュレーション手法と組み合わせる事によって再現する。本論文では、ウェーブレット解析を使用することで任意の大きさの渦を検出し [18]、Vorticity Confinement [19] を用いて渦を強調する事によって渦 (空気) の影響を受けた毛髪のなびき運動の再現及び制御を行う。

3. 提案手法

提案手法は、毛髪の弾塑性変形シミュレーション、気体や液体等の相互作用する物体のシミュレーション、相互作用シミュレーションの3つに大きく分けられる。気体や液体のシミュレーションは既存手法を利用するため、本論文では毛髪の弾塑性変形シミュレーションとそれぞれの物体との相互作用の再現について主に説明する。

まず、提案手法におけるそれぞれの物体のシミュレーション方法について簡単にまとめる。

毛髪は質点と線分で離散化してシミュレーションする。毛髪の弾性シミュレーションには、位置ベース法を弾性ロッドに適用した手法 [8] を用いる。毛髪の塑性変形は、弾性変形時に元に戻ろうとする位置（静止位置）を変更することで再現する [14]。

静止位置は、毛髪の内部に存在する側鎖結合の結合状態によって変化させる。具体的には、側鎖結合が結合している状態では静止位置の更新は行わず、側鎖結合が切断した状態のときに静止位置の更新を行う。側鎖結合の結合状態は毛髪内部の水分量によって変化させる。

空気や液体は SPH 法を使って粒子として離散化することでシミュレーションする。SPH 法の派生手法である PBF [17] を利用することで、高速かつ安定にシミュレーションを行う。

相互作用は、離散化したそれぞれの物体の粒子のパラメータと PBF のアルゴリズム内で計算した近傍粒子の情報から近似的に計算を行う。本論文では、相互作用のうち、水分量による毛髪の形状変形、渦を利用した毛髪のなびきの制御、粒子間の力の受け渡し、毛髪の乾燥、液体の吸収・拡散、毛束の形成を再現する。

提案手法は、位置ベース法をベース手法として上述した相互作用シミュレーションを組み込んだものとなっている。提案手法全体の流れを図 1 に示す。

4. 毛髪の塑性変形

4.1 毛髪の弾塑性変形

4.1.1 側鎖結合について

毛髪はケラチンと呼ばれるタンパク質を主成分とする物質であり、ケラチンはアミノ酸が繋がったポリペプチドによって構成される [20]。ポリペプチド同士は側鎖結合と主鎖結合と呼ばれる結合によって内部で繋がれており、毛髪の塑性変形はこの側鎖結合の結合状態が変化することによって引き起こされる。側鎖結合には、水素結合、イオン結合、ジスルフィド結合、ペプチド結合といくつかの種類があり結合の切れやすさがそれぞれ異なる。例えば、水素結合は水分を含むことによって切断されるのに対してジスルフィド結合はパーマ剤等の強い薬剤でないと切断されない。

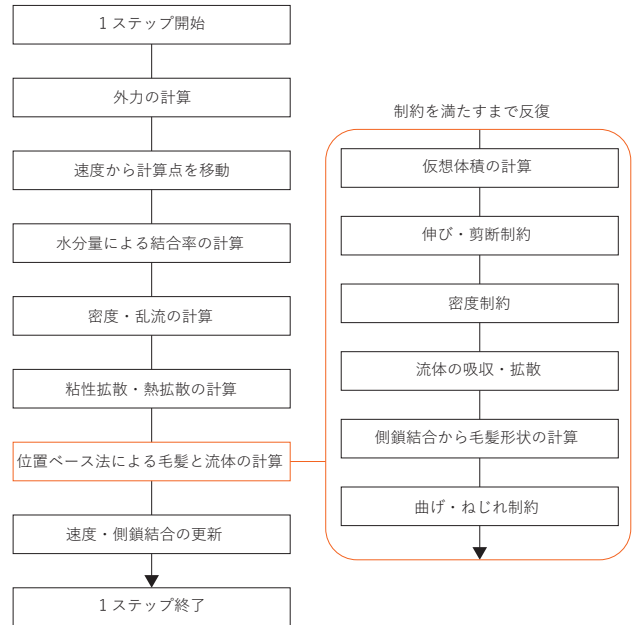


図 1 提案手法全体の流れ

Fig. 1 Overall flow of the proposed method

本論文では、毛髪が濡れたり乾燥したりする事による塑性変形を扱うため水素結合に注目し、これを位置ベース法の制約に組み込むことで実際の毛髪の内部結合変化の再現を行う。

4.1.2 毛髪の弾性変形

毛髪の弾性変形は、Kugelsadt らの位置ベース法を弾性ロッドに適用した手法 [8] を用いる。この手法では、一本の毛髪を複数のノードとそれを接続する線分の集合で離散化する。そして線分は、姿勢情報である四元数 q を持つ。毛髪の形状は線分の長さで姿勢 q によって定義され、伸び・せん断制約と曲げねじれ制約をかけることで毛髪形状を保つ。伸び・せん断制約については本論文では省略するが、詳しくは文献 [6] を参考してほしい。

1つのノードを共有する2つの線分の四元数を q_1, q_2 とすると毛髪の曲げねじれ制約は以下で表される。

$$C(q_1, q_2) = \Omega - s\Omega^* = 0 \quad (1)$$

$$s = \begin{cases} +1 & \text{if } \|\Omega^* - \Omega\|^2 < \|\Omega^* + \Omega\|^2 \\ -1 & \text{if } \|\Omega^* - \Omega\|^2 > \|\Omega^* + \Omega\|^2 \end{cases} \quad (2)$$

ここで Ω は現在の形状、 Ω^* は結合が記憶した元形状を表すベクトルである。 s は位置修正の方向が逆回転方向にならないようにするための係数である。曲げねじれ制約をかけることによって、毛髪は記憶した形状 Ω^* を保つような弾性変形をする。 Ω は毛髪の四元数 Ω のベクトル部を取り出した Darboux ベクトルである。

Ω は離散化された毛髪の線分の四元数 q_1, q_2 を使って以下のように計算される。

$$\Omega = \frac{2}{l_{q_1 q_2}} \overline{q_1 q_2} \quad (3)$$

ここで $l_{q_1 q_2}$ は線分の平均長, $\overline{q_1 q_2}$ は共役四元数を表す.

4.1.3 毛髪の塑性変形

毛髪の塑性変形は, 出村ら [1] が提案した毛髪内部結合の結合率によって毛髪の維持する形状を変化させる手法を用いてシミュレーションする. 毛髪の結合率は, 5.3 項で説明する液体の吸収と拡散量によって変化し以下の式で表す.

$$b_{hyd} = (1 - W)f(T) \quad (4)$$

ここで $W \in [0, 1]$ は 5.3 項の毛髪の水分含有量から計算される水分含水率であり, $f(T)$ は温度 T と水素結合の結合率を表す関数であり 5.2 節にて詳細に説明する. 結合率による形状の更新式は以下となる.

$$\Omega^{rest} = \Omega + b_{hyd}(s\Omega^* - \Omega) \quad (5)$$

$$s = \begin{cases} +1 & \text{if } \|\Omega^* - \Omega\|^2 < \|\Omega^* + \Omega\|^2 \\ -1 & \text{if } \|\Omega^* - \Omega\|^2 > \|\Omega^* + \Omega\|^2 \end{cases} \quad (6)$$

ここで, Ω^{rest} は位置ベース法のアルゴリズムに使用される目標形状 (何も力がかかっていない静止状態での形状), Ω^* は毛髪の内部結合で維持される形状, Ω は毛髪の現在の形状を表す. 回転方向を決めるために, 係数 s を導入する. b_{hyd} が小さい (0 に近い) ほど, Ω^{rest} が現在の形状に近くなり, b_{hyd} が大きいほど, Ω^{rest} が保持される.

式 (5) によって内部結合の切断による弾性変形がシミュレーションできる. しかしながら, この式は内部結合の再結合による塑性変形を扱うことが出来ない. 塑性変形を扱えるようにするために以下の式を用いて内部結合の維持する形状 Ω^* を変化させる.

$$\Omega^* = \begin{cases} \frac{b_{hyd}s\Omega^* + \Delta b_{hyd}\Omega}{b_{hyd} + \Delta b_{hyd}} & \text{if } \Delta b_{hyd} > 0 \\ \Omega^* & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

内部結合の維持する形状 Ω^* は, 再結合が起きているとき ($\Delta b_{hyd} > 0$) のみ更新する.

式 (5) と式 (7) は文献 [1] と同じものであるが, 文献 [1] は乾燥のみしかシミュレーションしていない. すなわち, 毛髪の吸水による乾燥状態から濡れた状態への変化のシミュレーションは考慮されておらず, 結合率の変化を人為的に設定するのみであった. 我々は, 液体の吸収と拡散をシミュレーションすることでこの変化を扱えるようにし毛髪の濡れと乾燥を一連の流れとして再現する. そして, 実験データから結合率の変化を数式としてモデル化し, シミュレーションに用いる.

5. 塑性変形の発生要素

5.1 風によるなびき

毛髪は非常に軽い物体であるため, 空気と相互作用する

ことで大きくバラバラに運動する. そして空気も毛髪との相互作用によって流れが乱されて大小様々な渦を形成する. 本研究では, この様々な大きさの渦が毛髪のなびき運動を発生させていると過程し, この渦を制御することで毛髪のなびき運動を再現する方法を提案する.

5.1.1 力の受け渡し

毛髪と液体 (水), 気体 (空気) の間の相互作用はそれぞれ異なる物理現象であるが, シミュレーションの単純化や計算コストを削減するために本研究では同一の方法で計算する. 具体的には, 毛髪, 水, 空気を全て粒子で離散化し流体シミュレーション (PBF) を用いることで相互作用を異なる密度の流体の混ざり合いとして計算した [21].

しかしながら, この方法では毛髪と液体間で力の受け渡しが不安定化する問題が発生する. これは, 液体の密度と毛髪の密度が異なる上に毛髪粒子はストランド (房) ごとに独立して毎ステップ動くために密度が可変であることが原因であると思われる. この問題を解決するために, Akinci らの仮想体積を計算する手法 [22] を導入し密度計算時の毛髪の質量を毛髪の密度によって変化させることで力の受け渡しを安定化させた.

また, 毛髪を連続体であるとし毛髪粒子同士で密度計算を行うことによって, 本来毛髪の衝突判定を計算することで生まれるボリュームを少ない計算コストで再現した [21].

5.1.2 Vorticity Confinement による渦の強調

毛髪と空気の相互作用は 5.1.1 項で述べたように, それぞれを粒子で離散化して流体シミュレーションで計算する. 図 2 のように, 空気粒子は毛髪と相互作用することで渦を形成する. しかしながら, 様々なスケールの乱流 (渦) は数値散逸によってシミュレーション中に減衰してしまう問題が発生する. これを解決するために, 本研究では Fedkiw らの提案した乱流を強調するために数値散逸によって失われた渦のエネルギーを補填する Vorticity Confinement を使用する [19].

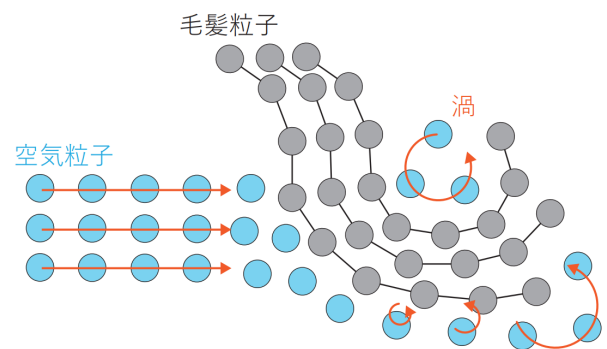


図 2 毛髪と空気の相互作用で発生した渦 ([2] より引用)
Fig. 2 Vortices created by the interaction of hair and air

まず, 流体の渦度 ζ は以下の式で計算される.

$$\zeta = \nabla \times \mathbf{v} \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{v} は流体速度である。渦度 ζ は流体の局所的な回転状態を表すベクトルであり、そのノルム $\|\zeta\|$ は渦の回転速度を、ベクトルの向きは渦の回転軸を表す。SPH 法による物理量の離散化を行うと、粒子 i における渦度 ζ_i は以下のように求められる。

$$\zeta_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \times \nabla K(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j, h) \quad (9)$$

ここで K はカーネル関数であり物理量計算と勾配、ラプラスシアン計算に異なる関数を使う手法 [23] を用いる。

渦の中心を示す単位ベクトル \mathbf{N}_i は $\|\zeta\|$ の勾配ベクトル $\boldsymbol{\eta}_i$ を正規化することで計算できる。

$$\mathbf{N}_i = \frac{\boldsymbol{\eta}_i}{\|\boldsymbol{\eta}_i\|} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\eta}_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \|\zeta\| \nabla K(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j, h) \quad (11)$$

渦の中心を示す単位ベクトル \mathbf{N}_i と渦度 ζ より、粒子 i が渦によって動く方向がわかる。Vorticity Confinement は渦によって粒子が動く方向に人工的に力を加えることで渦を強調する手法であり、粒子 i に加える力 \mathbf{F}_i^{vort} は以下のように求められる。

$$\mathbf{F}_i^{vort} = \rho_i \epsilon^{vort} (\mathbf{N}_i \times \zeta) \quad (12)$$

ここで、 ϵ^{vort} は渦を強調する力を調整する係数である。しかしながら、式 (12) は渦の大きさを考慮していないため発生する渦の大きさに関係なく全ての渦を強調してしまい、制御が難しくなるという問題がある。そこで、本研究では式 (12) に特定の大きさの渦の場所でのみ大きな値を持つエネルギー値 e を導入し、指定した特定の大きさの渦を強調できるように改良した。

$$\mathbf{F}_i^{vort} = \rho_i \epsilon^{vort} e_i(\alpha) (\mathbf{N}_i \times \zeta) \quad (13)$$

ここで、 α は強調する渦の大きさ（渦の半径）、 $e_i(\alpha)$ は粒子 i における大きさ α の渦のエネルギー値を表す。 e を計算するためにウェーブレット解析を用いる。

5.1.3 ウェーブレット解析

我々は、渦の大きさを周波数として扱うことで渦のエネルギー値をウェーブレット解析で計算する。同様の周波数解析手法であるフーリエ変換と比較すると、ウェーブレット解析は空間的に定常でない渦の波形の解析に適している。

大きさ α の渦を検出するために、流体の速度場 \mathbf{v} の周波数 α 成分 $\mathbf{v}(\alpha)$ を求める。速度場 \mathbf{v} のウェーブレット変換式は以下になる。

$$\hat{\mathbf{v}}(\alpha, \beta) = \int \int \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{v} \bar{\phi}(\alpha, \mathbf{p} - \beta) dx dy dz \quad (14)$$

ここで、 α はウェーブレットの拡大縮小量、 \mathbf{p} は位置 $(x, y, z)^T$ 、 β は平行移動量、 $\bar{\phi}$ はウェーブレット関数の複素共役である。ここで、本研究で用いるウェーブレット関数は虚数部を持たないため $\bar{\phi} = \phi$ となる。周波数 α 成分を抽出するために、 α を固定したときに β を連続的に変化させたウェーブレットと速度場の内積を計算する。

提案手法では式 (14) を粒子法で離散化した式 (15) を用いる [18]。粒子 i の位置 \mathbf{p}_i における速度の周波数 α 成分 $\hat{\mathbf{v}}_i(\alpha)$ を以下に示す。

$$\hat{\mathbf{v}}_i(\alpha) = \sum_j \mathbf{v}_j \bar{\phi}(\alpha, \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \quad (15)$$

ここで、粒子 i の周囲の近傍粒子を粒子 j としその位置と速度をそれぞれ $\mathbf{p}_j, \mathbf{v}_j$ とした。式 (15) の周波数成分 $\hat{\mathbf{v}}_i(\alpha)$ から渦のエネルギー値 $\hat{e}_i(\alpha)$ は次のように計算される。

$$\hat{e}_i(\alpha) = \frac{1}{2} m_i \|\hat{\mathbf{v}}_i(\alpha)\|^2 \quad (16)$$

ここで、 m は粒子質量である。求めたエネルギー値を式 (13) に代入する。

ウェーブレット関数 ϕ には三次元に拡張したメキシカンハット関数を使用した。

$$\phi(\alpha, \mathbf{r}) = \frac{2}{\sqrt{15\pi^{\frac{3}{4}}\alpha^{\frac{3}{2}}}} \left(3 - \frac{\|\mathbf{r}\|^2}{\alpha^2}\right) \exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}\|^2}{2\alpha^2}\right) \quad (17)$$

ここで、 $\frac{2}{\sqrt{15\pi^{\frac{3}{4}}\alpha^{\frac{3}{2}}}}$ はスケール値 α が変動してもエネルギー値を一定にするために正規化する係数である。本来であればすべての粒子について畳み込みを行う必要があるが、本研究では計算を高速化するために、距離が 3α 以上離れている影響力の小さな粒子は考慮しないものとした。

ウェーブレット解析で指定した大きさ α の渦を検出し、Vorticity confinement で検出した渦を強調することで、流体シミュレーション中に毛髪が空気中の渦から受ける影響を制御することができる。

5.2 乾燥による塑性変形

側鎖結合の中でも水素結合は最も切断・再結合しやすく、日常生活の中で毛髪の塑性変形の主たる要因となると考えられる。水素結合は水分量や温度の変化によって切断される。温度については、熱そのものによって切断される場合と温度が上がることで毛髪内部の水分量が減少する場合の2つの場合があり、本節では熱による結合率変化のモデル化と熱計算方法について、および水分量の変化による結合率変化のモデル化について説明する。

5.2.1 熱による結合率の変動

毛髪内部に存在する水素結合は、熱せられると切断し冷やされると再結合する性質を持っている。実際の毛髪を用いた熱による水素結合の結合率変化を計測した実験は我々の調べた限りでは無かったため、本研究では毛髪の強度と水素結合の結合率に線形な関係があると仮定し、毛髪の強

度と温度の関係を調査した実験から結合率の推定を行う。

Yuらは、水の中に浸透させた状態の毛髪を配置し異なる温度(20,40,60,80[°C])で引張応力を測定した[24]。本研究では、この実験データを近似した関数 $f(T)$ を定義し結合率の計算に利用する。

$$f(T) = 3.83 \exp(-0.092T) + 0.388 \quad (18)$$

図3は平穩時の環境における降伏点を1に正規化したYuらの実験結果[24]とその近似曲線 $f(T)$ のプロットである。ここで計算した $f(T)$ は、4.1.3の式(4)にて毛髪の水素結合の結合率を計算する時に利用する。

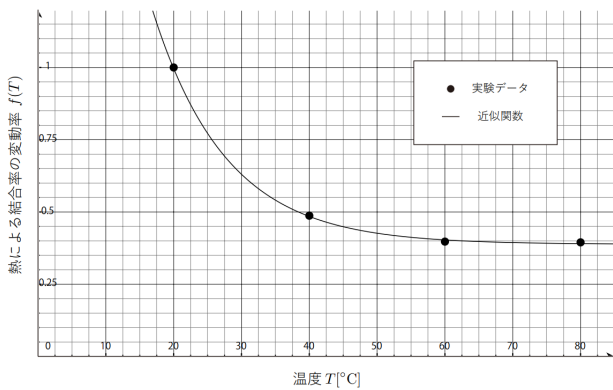


図3 温度と水素結合の結合率の関係を表す $f(T)$ ([2] より引用)

Fig. 3 The relationship between temperature and the rate of hydrogen bonding $f(T)$

5.2.2 熱拡散

5.2.1項にて説明した熱による結合率変化をさせるために、相互作用中に毛髪を温度を変動させる必要がある。本研究では、空気との相互作用中に熱拡散と対流によって空気の熱が毛髪に伝わるようにする。提案手法では、SPH法によって毛髪と空気を離散化し流体として計算しているため対流は明示的に計算する必要はなく粒子間での熱拡散のみを計算する。熱拡散には、複数種類の流体の熱拡散を扱えるHochstetterらの手法を利用する。以下に、粒子 i における熱拡散による温度変化を計算する式を示す。

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{\rho_i c_i} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{4\kappa_i \kappa_j}{\kappa_i + \kappa_j} (T_j - T_i) \nabla^2 K(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j, h) \quad (19)$$

ここで、 T は温度、 c は比熱容量、 κ は熱伝導係数である。

5.2.3 乾燥

毛髪内部の水素結合は、4.1.3項で説明したように毛髪が乾燥することで切断された状態から再結合する。本研究では、人間の毛髪を加熱し水分含有量の変化を計測した実験のデータ[25]を近似することで毛髪の乾燥を計算する。毛髪の水分含有率の熱による変動を近似した式を以下に示す。

$$\frac{dW}{dt} = -\epsilon^{dry} W \max(0, T - T^{rest}) \quad (20)$$

ここで、 $W \in [0, 1]$ は毛髪の水分含有率(十分乾燥している場合を0, 十分水を浸透させた状態を1とする)、 ϵ^{dry} は乾燥速度を調節するパラメータ、 T は現在の温度、 T^{rest} は水分の蒸散が少ない状態の温度、 max は引数のうち大きな値を返す関数である。本研究では、 T^{rest} を25に設定し ϵ^{dry} を0.01とした。式(20)の微分方程式は指数関数として解が得られるので、それにより乾燥による水分量の変化を計算できる。計算した水分含有率 W を式(4)に用いることで結合率を求められる。ただし、式(4)は乾燥による水分含有率の減少のみを扱うものであり、外部の液体からの吸収による増加は考えられていない。吸収については5.3節で説明する。

5.3 液体の吸収・拡散

毛髪内部における液体の拡散は単純な拡散方程式を近似して以下のように求める。

$$\frac{dW_i}{dt} = D \nabla^2 W_i \simeq D \frac{(W_{i-1} + W_{i+1} - 2W_i)}{\Delta x^2} \quad (21)$$

ここで W_i は毛髪粒子 i の水分含有量であり、 D は拡散係数であり拡散量を調節することができる、 Δx は毛髪ストランドの長さである。

毛髪外部から内部への液体の吸収は、近傍の流体粒子から毛髪粒子への水分拡散量として同様に計算する。

$$\frac{dW_i}{dt} = D \sum_{j \in N_f} \frac{(W_j - W_i)}{\Delta x^2} \quad (22)$$

ここで N_f は力の計算用粒子をPBFの近傍粒子探索アルゴリズムに組み込むことで得られる近傍流体粒子の集合であり、 W_j は流体粒子の水分量を表すパラメータであり、流体粒子はすべて水分であるため1として計算する。

5.4 毛束の形成

毛束は、毛髪外部の液体の表面張力によって毛髪同士に吸着するよう力が発生することで形成される。しかしながら、本研究では毛髪外部の液体の表面張力を計算していないためFeiらの提案した表面張力を毛髪に毛束を形成する外力として与える方法が利用できない[13]。したがって、本研究では毛髪粒子の含む水分量によって吸着力を決定するRungjiratananonらの手法[11]を衝突する毛髪間ではなく近傍毛髪粒子に対して適用できるようにした。毛髪粒子 i からその近傍粒子 j へかかる吸着力は、これらの距離が有効半径 r 以下であったときに次のように計算する。

$$F_{ij}^{stick} = \frac{1}{2} k^{stick} (W_i + W_j) (2r - |\mathbf{p}_{ij}|) \frac{\mathbf{p}_{ij}}{|\mathbf{p}_{ij}|} \quad (23)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{ij} = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j$ は毛髪粒子 i と j の間のベクトル、 $W_e \in [0, 1]$ は5.3で計算した毛髪の水分量、 k^{stick} は吸着力係数である。

6. 結果・考察

提案手法の有効性を確かめるために、液体と気体のそれぞれと相互作用するシーンを作成し実験を行った。実行環境は、CPU:Corei7-8700k 3.7-GHz, GPU:GeForce RTX2080 SUPER である。空間に多数の空気粒子を配置する必要があるため気体との相互作用は NVIDIA CUDA を用いて GPU で実装し、液体との相互作用は CPU で実装した。毛髪のレンダリングは、毛髪の反射光を光の入射方向と視線方向から計算する Kajiya-Kay モデルを使用した [26]。毛髪が濡れることによる色の変化は、毛髪の水分量によって毛髪の拡散反射光を小さくすることで簡易的に再現した。

図 4 は毛髪の濡れ、乾燥までの一連の流れをシミュレーションした結果である。(1)の初期状態から、頭部を下方方向に移動させて毛髪が水を表す粒子につかるようにし((2)吸収・拡散)、水を吸収した後上方方向に移動、ロッド形状の個体に巻きつける((3),(4))。その状態で乾燥させることでロッドに巻き付いた形状に塑性変形する((5),(6))フレームレートは 20fps ほどであった。実際にシミュレーションしているストランドの本数は 28 本で、補間を行うことによって見た目上の本数を 700 本に増加させた。液体のパーティクル数は 1331 個である。乾燥は 5.2 項で説明したのではなく毛髪から一律で指定した値の水分量を減らすという簡易的な実装をしており、毛束の形成はこのシーンでは計算していない。

初期形状で記憶されていたカールヘアが、液体を吸収して内部結合が切断されることで起こる弾性変形を再現できた。また、濡れた状態の毛髪をロッドに巻きつけて乾燥させたときに内部結合が再結合することによって巻きつけられたときの形状を記憶し維持する塑性変形も再現できた。この実験では既存手法で出来ていなかった、毛髪の弾性変形と塑性変形の切り替わりという一連の流れをシミュレーションすることが出来た。

図 5 は、渦による流れの制御についての実験結果である。ストランドの本数は 550 本で、空気粒子の最大個数は 200000 個とした。毛髪の塑性変形については考慮せず、側鎖結合の結合状態がシミュレーション中は変化しないものとした。比較用の既存手法として、航空力学を用いた手法 [15] で同じ条件下で実験を行った。

図 6 は、乱流シミュレーションによるなびき運動の制御実験を行った結果である。ストランドの本数と空気粒子の最大個数は図 5 と同条件で実験した。図 6 左上の粒子の可視化にあるように、空気粒子を指定した範囲から出し続けることで風を再現している。なお、図 6 左上は分かりやすいように空気粒子の発生位置と発生範囲を調整したものであり、他の 3 つの図における空気粒子の発生位置や範囲設定とは異なる。図より、 α の値を変えることによって強調する渦の大きさを制御することが出来た。図 5 及び図 6 の

手法ごとの計算時間の比較を表 1 に示す。

図 7 は、空気との相互作用での熱拡散を考慮した毛髪の乾燥シミュレーションの結果である。フレームレートは 180fps ほどであった。ストランドの本数は 949 本で空気粒子の最大個数は 200000 個とした。棒に十分に水分を含んだ状態の ($b_{hyd} = 0$) 毛髪を巻き付けたあとに温風 (80°C) を当てて乾燥させ、冷風 (20°C) を当てた後に棒を外すという手順で実験した。図 7 右は毛髪の温度を可視化したものであり温度が高いと赤色、低いと青色でレンダリングしている。

図 8 は毛束を形成する力をかけた場合とかけなかった場合の比較結果である。フレームレートは 10fps ほどであった。毛髪本数は 60 本で液体のパーティクル数は 1331 個である。毛束が見えにくくなってしまったため、基準毛髪の周りに円形に毛髪を補間する方法に変更してレンダリングを行っている。図の右側は毛髪の水分量を可視化したものであり、水分量が多いと赤くなるようにレンダリングした。

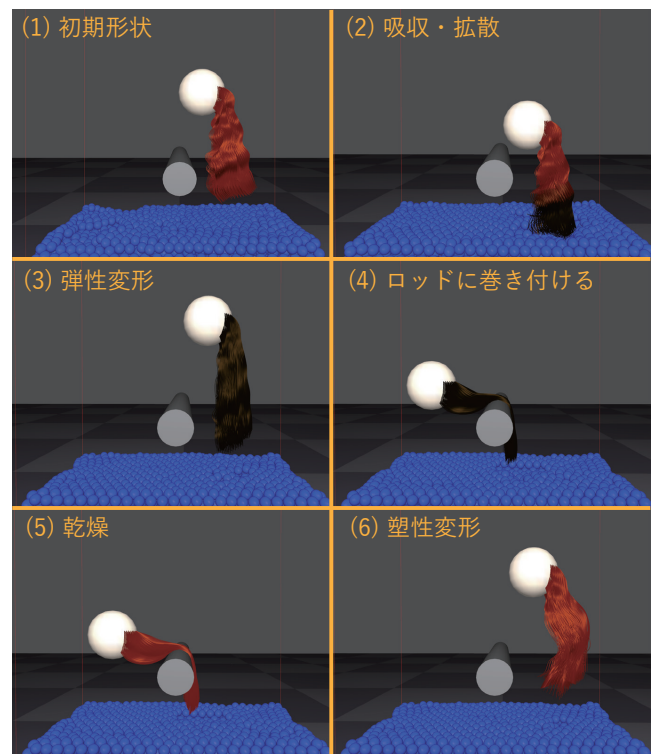


図 4 毛髪の濡れ、乾燥シミュレーション
Fig. 4 Hair wetting and drying simulation

7. まとめと今後の課題

本論文では、毛髪の形状変形に焦点を当てた毛髪と液体の相互作用シミュレーション手法と、渦を考慮した毛髪と空気の相互作用シミュレーション手法を提案した。毛髪内部に存在する側鎖結合を考慮することによって、水分量変化による毛髪の塑性変形及び弾性変形の切り替わりを再現することが出来た。また、任意の大きさの渦を検出し強

表 1 図 5 及び図 6 の実験における計算時間

Table 1 Computational time for the experiments in Fig.5 and Fig.6

シミュレーション手法	既存手法 [15]	乱流制御無	$\alpha = 0.006[m]$	$\alpha = 0.018[m]$
1 ステップの計算時間 [ms]	1.6	4.8	9.3	62.5

調する Vorticity confinement, ウェーブレット解析によって, よりリアルな毛髪のなびき運動の再現及び制御が可能となった. さらに, 毛髪と液体それぞれを粒子で離散化し近傍粒子間でパラメータの計算をすることによって近似的に力の受け渡しや吸収・拡散, 熱伝導と乾燥, 毛束の形成といった固有の相互作用現象の再現が行えた.

5.2 項にて解説した空気との相互作用を考慮した乾燥は図 4 の毛髪と液体の実験に統合できていない. 本論文で提案した毛髪の濡れ, 乾燥の一連の流れのシミュレーションの統合は今後の課題である. また, リアルタイムで計算している毛髪本数が数 10 から 1000 本ほどであり実際の毛髪(約 10 万本)と本数がかけ離れてしまっているため, リアルタイムで扱える本数を多くすることも課題である.

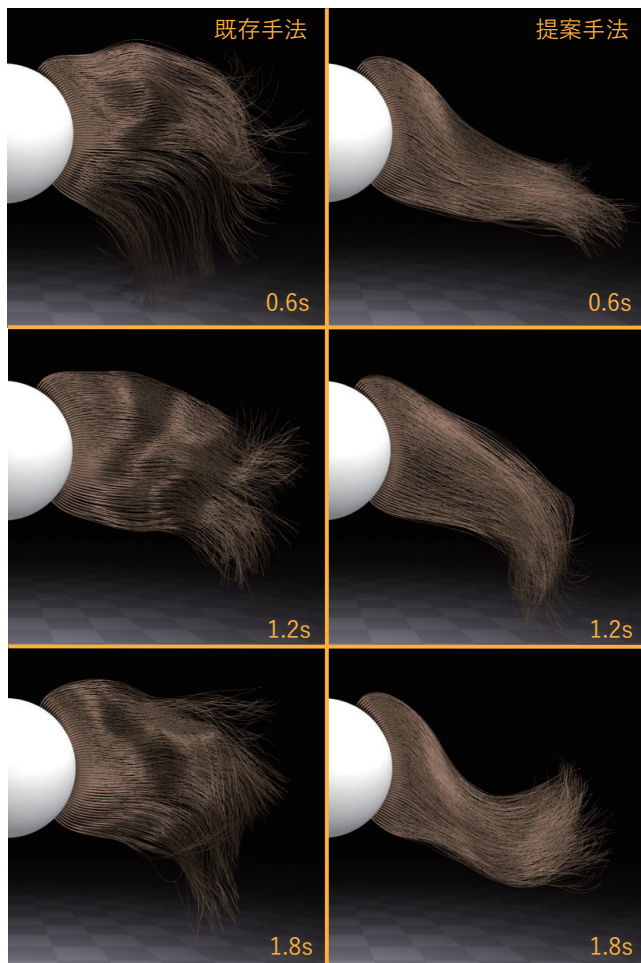


図 5 毛髪のなびき運動の比較

Fig. 5 Comparison of hair wagging motion

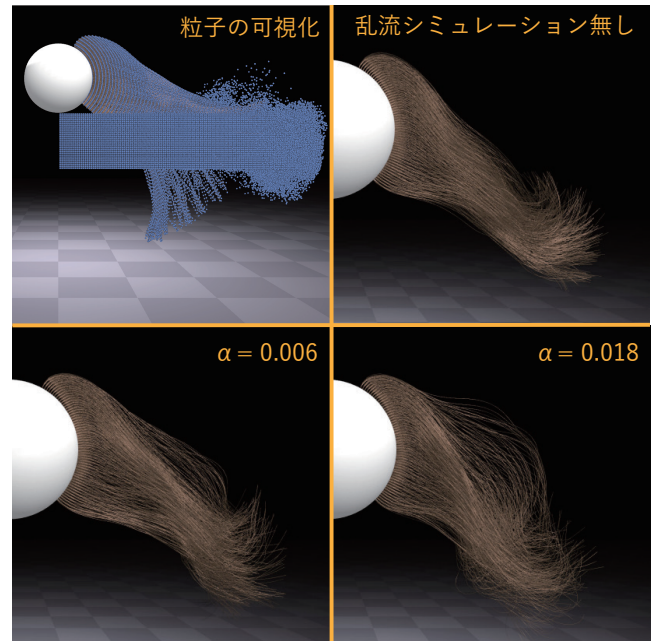


図 6 乱流シミュレーションによるなびき運動の制御

Fig. 6 Controlling Nadir Motion by Turbulence Simulation

参考文献

- [1] 出村佑史, 藤澤 誠, 三河正彦: 側鎖結合を考慮した毛髪の塑性変形シミュレーション, 画像電子学会誌, Vol. 47, No. 4, pp. 447-453 (2018).
- [2] 出村佑史: 流体との相互作用を考慮した毛髪の塑性変形シミュレーション, 修士論文, 筑波大学 (2020).
- [3] Demura, Y., Fujisawa, M. and Mikawa, M.: Particle-based Volumetric Hair Interaction with Turbulent Flow, In Proc. of the 6th IEEEJ International Conference on Image Electronics and Visual Computing, pp. 4A-2:1-4.
- [4] Imai, S., Fujisawa, M. and Mikawa, M.: Position Based Hair Plastic Deformation due to Interaction with Liquid, In Proc. of the 7th IEEEJ International Conference on Image Electronics and Visual Computing, pp. 2B-1:1-2B-1:4 (2021).
- [5] Selle, A., Lentine, M. and Fedkiw, R.: A mass spring model for hair simulation, In Proc. of SIGGRAPH 2008, New York, NY, USA, ACM, pp. 1-11 (2008).
- [6] Müller, M., Heidelberger, B., Hennix, M. and Ratcliff, J.: Position based dynamics, Journal of Visual Communication and Image Representation., Vol. 18, No. 2, pp. 109-118 (2007).
- [7] Umetani, N., Schmidt, R. and Stam, J.: Position-Based Elastic Rods, In Proc. of the 2014 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 21-30 (2014).
- [8] Kugelstadt, T. and Schoemer, E.: Position and Orientation Based Cosserat Rods, In Proc. of the 2016 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 169-178 (2016).
- [9] Ward, K., Galoppo, N. and Lin, M.: Interactive Virtual Hair Salon, Presence, Vol. 16, pp. 237-251 (2007).

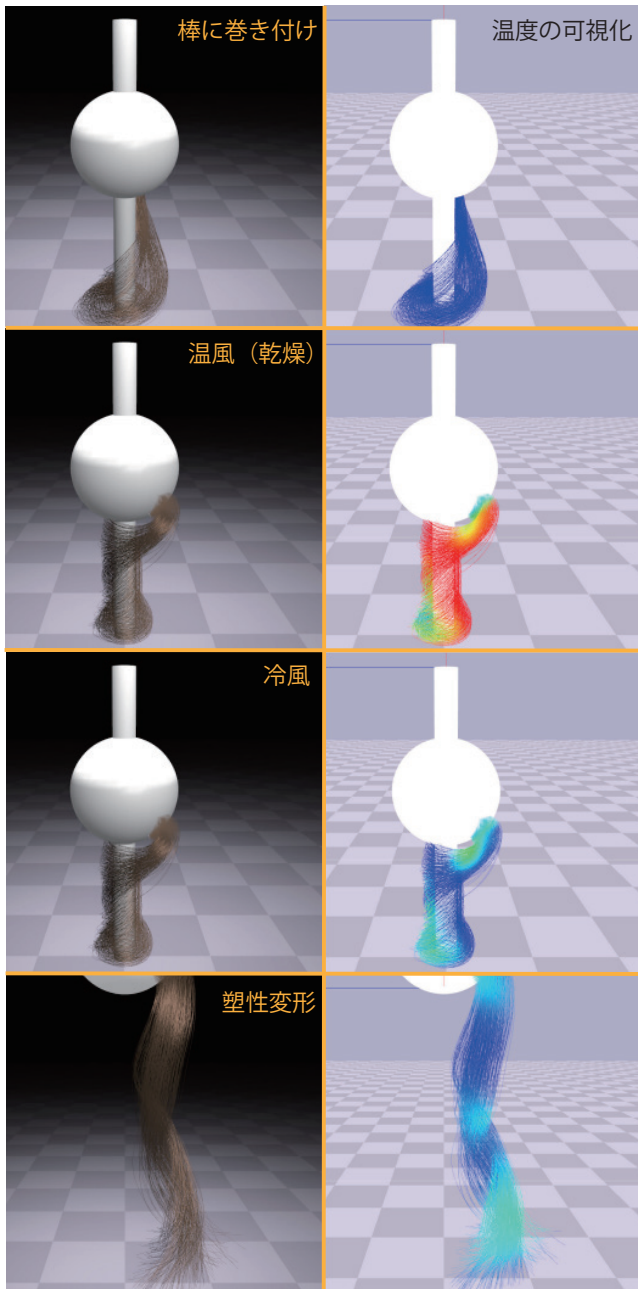


図 7 熱を考慮した毛髪の乾燥シミュレーション
 Fig. 7 Simulation of hair drying considering heat

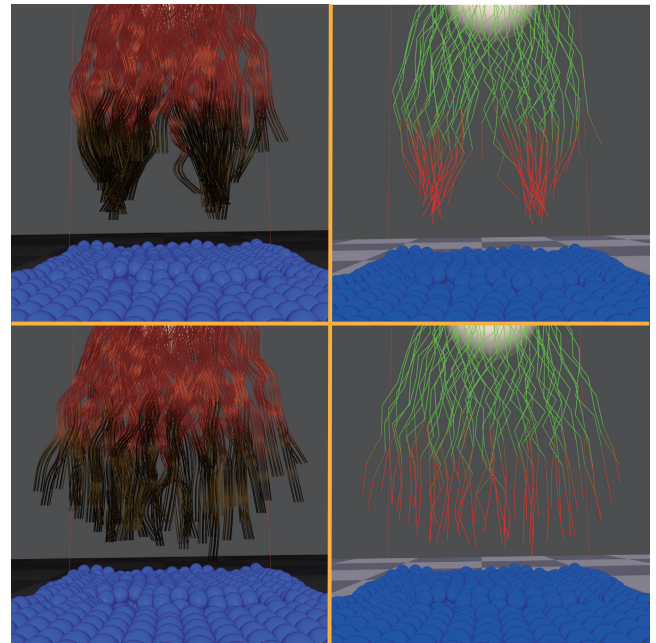


図 8 毛髪の毛束の形成. 毛束を形成する力をかけたもの (上段),
 かけていないもの (下段)
 Fig. 8 Formation of hair bundles. Force applied to form hair
 bundles (top row), not applied (bottom row)

[10] Rungjiratananon, W., Kanamori, Y. and Nishita, T.: Chain shape matching for simulating complex hairstyles, *Computer Graphics Forum*, Vol. 29, No. 8, pp. 2438–2446 (2010).

[11] Rungjiratananon, W., Kanamori, Y. and Nishita, T.: Wetting Effects in Hair Simulation, *Computer Graphics Forum*, Vol. 31, No. 7, pp. 1993–2002 (2012).

[12] Lin, W.-C.: Boundary Handling and Porous Flow for Fluid-Hair Interactions, *Computers and Graphics*, Vol. 52, No. C, pp. 33–42 (2015).

[13] Fei, Y. R., Maia, H. T., Batty, C., Zheng, C. and Grinspun, E.: A Multi-scale Model for Simulating Liquid-hair Interactions, *ACM Trans. on Graphics*, Vol. 36, No. 4, pp. 56:1–56:17 (2017).

[14] Demura, Y., Fujisawa, M. and Mikawa, M.: Hair Simulation Based on Internal Chemical Bonds, *Journal of*

IIEEJ (published in Japanese), Vol. 47, No. 4, pp. 447–453 (2018).

[15] Wilson, K., McAdams, A., Leo, H. and Simmons, M.: Simulating Wind Effects on Cloth and Hair in Disney's Frozen, *ACM SIGGRAPH 2014 Talks*, SIGGRAPH '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2014).

[16] Furukawa, K. and Nakata, S.: Automatic Generation of the Periodic Hair Motion of 3D Characters for Anime Production, *Entertainment Computing – ICEC 2018* (Clua, E., Roque, L., Lugmayr, A. and Tuomi, P., eds.), Cham, Springer International Publishing, pp. 289–292 (2018).

[17] Macklin, M. and Müller, M.: Position Based Fluids, *ACM Trans. on Graphics*, Vol. 32, No. 4, pp. 104:1–104:5 (2013).

[18] Fujisawa, M., Mimura, G., Amano, T., Miyazaki, J. and Kato, H.: A Fast Simulation Method Using SPH and Wavelet for Sub-Particle-Scale Turbulent Flow, *In Proc. of Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (2011).

[19] Fedkiw, R., Stam, J. and Jensen, H. W.: Visual Simulation of Smoke, *SIGGRAPH '01*, Association for Computing Machinery, p. 15–22 (2001).

[20] Robbins, C.: *The Chemical and Physical Behavior of Human Hair*, Springer-Verlag (2002).

[21] Hadap, S. and Magnenat-Thalmann, N.: Modeling dynamic hair as continuum, *Computer Graphics Forum*, Vol. 20, No. 3, pp. 329–338 (2001).

[22] Akinci, N., Ihmsen, M., Akinci, G., Solenthaler, B. and Teschner, M.: Versatile rigid-fluid coupling for incompressible SPH, *ACM Trans. on Graphics*, Vol. 31, No. 4, pp. 62:1–62:8 (2012).

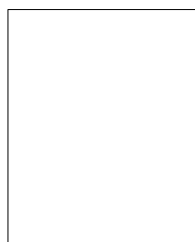
[23] Müller, M., Charypar, D. and Gross, M.: Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications, *In Proc. of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA '03, Goslar, DEU, Euro-

- graphics Association, p. 154-159 (2003).
- [24] Yu, Y., Yang, W., Wang, B. and Meyers, M. A.: Structure and mechanical behavior of human hair, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 73, pp. 152-163 (2017).
- [25] Lee, Y., Kim, Y.-D., Hyun, H.-J., Pi, L.-Q., Jin, X.-H. and Lee, W.-S.: Hair Shaft Damage from Heat and Drying Time of Hair Dryer, *Annals of Dermatology*, Vol. 23, pp. 455 - 462 (2011).
- [26] Kajiya, J. T. and Kay, T. L.: Rendering fur with three dimensional textures, *In Proc. of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques(SIGGRAPH '89)*, ACM, pp. 271-280 (1989).



三河 正彦

1994 年 大阪大学大学院機械工学分野修士課程修了。同年 NTT アクセス網研究所入所。2003 年筑波大学図書館情報学系講師。2006 年 同大学院図書館情報メディア研究科准教授，現在に至る。博士 (工学)。日本ロボット学会，計測自動制御学会，日本知能情報フuzzy学会，IEEE 各会員。



今井 翔輝

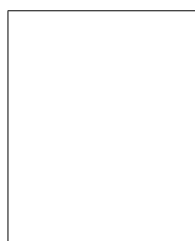
1998 年生。2021 年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。現在，同大学大学院修士課程在学中。現在，物理シミュレーションに関する研究に従事。



出村 佑史

2018 年 筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。学士 (情報メディア科学)。2020 年 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科博士前期課程修了。在学中，物理シミュレーションに関する研究に従事。現在，任天堂株式

会社に勤務。



藤澤 誠 (正会員)

2005 年 静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。2008 年 同博士課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2011 年 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科助教，2021 年同大学図書館情報メディア系准教授，現在に至る。博士 (工学)。CG，物理シミュレーションなどの研究に従事。情報処理学会，画像電子学会，日本 VR 学会，ACM，IEEE CS 各会員。