IIEEJ 論文

拡散・吸着理論に基づいた染色技法のためのビジュアルシミュレーションモデル

森 本 有 紀† 鶴 野 玲 治††(正会員) 高 橋 時市郎††† (正会員)

†東京電機大学，††九州大学，†††UEI リサーチ

Diffusion-Adsorption Theory-Based Visual Simulation Model for Dyeing Techniques

Yuki MORIMOTO†, Reiji TSURUNO†† (*Member*), Tokiichiro TAKAHASHI††† (*Member*)

†Tokyo Denki University, ††Kyushu University, †††UEI Research

〈あらまし〉 本稿では，布の織り構造や糸・染料の要素に基づいて物理的に染色をシミュレーションする手法を提案する．本手法では横糸と縦糸の上下 2 層のセルを用いた布モデル内において，Fick の第 2 法則に基づき，染料の拡散を表現する．拡散係数は染色物理の理論に基づいて布繊維の多孔度や拡散経路の屈曲率などの染料や布のパラメータから算出し，布の織構造の違いや拡散の異方性などによる染色の特徴を表現する．染料の繊維への吸着には吸着等温式を考慮するモデルを提案する．また，簡単な染色技法を考慮するために，染料の拡散を防ぐ防染技法のシミュレーションを行う．結果画像からは本手法により染色独特の多くの特徴を表現できることがわかる．

キーワード：染色, 拡散, 非写実的表現

<Summary> This paper describes the method to simulate and visualize dyeing based on weave patterns, the physical factors of threads and dye. We use a Fick's second law for diffusion. We calculate the diffusion coefficient by the porosity, tortuosity and so on based on physical chemistry of dyeing. We describe the cloth model as the 2-layered cellular model. We apply the traditional adsorption isotherms to calculate dye adsorption to fibers. Also our model includes a simple dyeing technique to make dyeing patterns by interrupting diffusion. We can see our method can capture many of the characteristics of dyeing from our result images.

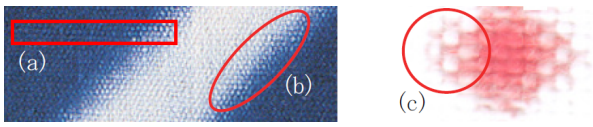
Keywords: dyeing, diffusion, non-photorealistic rendering

1. はじめに

染色は世界各地で古くから行われてきた繊維を着色する方法である．紙への液体の拡散とは異なり，布の構造に影響をうけたかすれや色むらなどの特徴が見られる (**図 1**)．染色を表現するためには，布という織構造を持った繊維に対する液体の浸透現象のモデルを扱う必要がある．そのために布構造や材質，染料，そして染色技法を考慮したシミュレーションの枠組みを提案する．本手法により図 1 に示すような染色の特徴であるかすれ・にじみ・まだらなどを表現し，模様染め技法を表現する．

2. 染色について

染色は布を着色するために，繊維に染料を定着する処理である．染色の要素として，布，染料，染色技法の 3 つがあげられる．それぞれの要素に多くの種類がある[1]．一般的な布は縦糸と横糸が織られてできている．また，糸は繊維を縒ることによってできている．染料は布の中で，布を構成する糸の繊維に沿って拡散する．つまり，糸の指向性は染料の拡散へ強く影響する．織の構造は織組織と呼ばれ，縦糸と横糸を交互に浮き沈みさせて織る平織がよく知られている．織組織に加え，糸と糸の間隔や繊維の密度なども染色に影響する．糸や繊維の間隔が狭いと，染料の移動が阻害される[2)〜5)]．ま



(a) すじ (b) にじみ (c) まだら

図 1 染色の特徴
Fig. 1 Some characteristics of dyeing

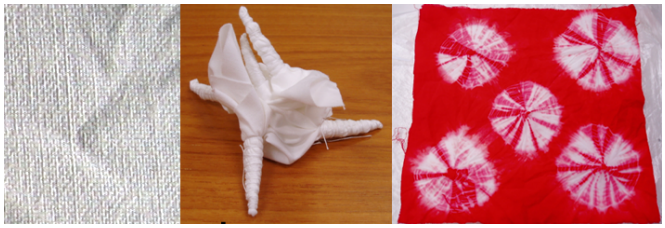


図 2 染色工程の例 (左) 実際の布 (中) 絞り染め技法によって縛られた布 (右) 染料に浸しできあがった模様

Fig. 2 Outline of the real dyeing process (left) A real cloth (center) the tied cloth (right) the tie-dyed cloth (right)

た，染料は布の中で移動しながら，繊維や染料の種類・状態によって，繊維に定着することが知られている．

染色技法では，布への染料の侵入を防ぐ防染技法によって模様を作る方法などが一般的である．防染の例として，布に糊を塗った場所だけ染料が侵入しない糊置きや，布を糸で縛る絞り染めなどがある．防染を行った上で，布に染料を与える．ここでも，布に筆や刷毛で任意の場所に染料を与える方法や，布を染料に浸す方法などがある．**図 2** に染色工程の例を示す．この場合，まず布を準備し，次に布を糸で縛ることで圧迫する．次に染料に縛った布を浸し，最後に乾かして布を広げると染色模様が得られる．

本研究では，布の中での染料の移動を染色理論に基づいてモデル化する．本手法は上述した防染や染料付与を考慮することができる．

3. 関 連 研 究

CG(Computer Graphics) において絵画調の表現を扱う NPR(Non-Photorealistic Rendering) の分野では，画材のシミュレーションやストローク描画技法の研究などが進められている．そのような研究対象として紙への色の染み込みを表現した水彩画や水墨画の研究などがある．Curtis ら[6]は，水彩絵具を想定し，かすれ，重ね塗り，染み込み，にじみなどの表現を提案している．Cho らは吸収性の高い紙への色素の拡散を想定した格子ボルツマン法を用いて計算し，GPU(Graphics Processing Unit) を用いて描画をリアルタイムに表現する手法を提案している[7]．また，Kunii ら[8]は墨絵の表現において Fick の法則に基づき，陰解法によって拡散の計算を行い，様々な繊維の方向や時間に沿って変化する墨の濃度を考慮した拡散係数を用いて拡散を表現している．染色でもこのような拡散係数の違いは重要である[9]．

そこで本研究では染色物理の理論に基づき，拡散係数を求めるためのパラメータを定義する．既存の色素拡散モデルは主に支持体が紙である．紙はランダムに散らばった繊維によって構成され，その構造は 2 次元で表現されることが多い．しかし，布は糸によって構成される織りの構造があり，その構造を 2 次元モデルで表現することはできない．また，既存の色素拡散手法は染色のように布や紙を圧迫した場合などを考慮していない．

吸着等温式は染色物理では染料の繊維への吸着を表すものである．これを考慮し，Xu ら[10]は水彩画や墨絵表現のための汎用モデルを提案した．彼らは絵具の繊維への浸透や吸着について，吸着等温式を用いてシミュレーションを行った．この研究では吸着について 1 種類の吸着等温式を用いるのに対し，本研究では染色でよく観察される代表的な 3 種類の吸着等温式をモデル化し，それらの結果画像への影響を比較する．

Toon らは多孔性物質における流体のシミュレーション手法を提案した[11]．これは，透水性を考慮した流速を計算するダルシーの法則を考慮した SPH 法によるものであり，更に多孔性物体の変形を適用した．しかしながら本手法では，染色過程においては布を予め濡らしておくことから，浸透現象ではなく拡散を用いる．

布を支持体とした描画表現の研究としてはろうけつ染めや油絵の表現手法がある．Wyvill らは与えた蝋の範囲から距離によって蝋のヒビをシミュレートし，ろうけつ染めの表現を行っている[12]．その結果，実際のろうけつ染めの特徴を捉えたろうけつ染め風画像を数秒で作り出すことができる．また，Drago ら[13]は油絵における柔軟な布のカンバスの表現を行っており，布の劣化や重力による変形を考慮しながら布を構成する縦糸と横糸の浮き沈みを定式化し，数種類のカンバスの織り布構造を 3 次元モデルで再現している．しかし，これらの研究では布繊維内での染料の拡散は考慮していない．

既存の布の質感表現研究では BRDF などを用いた光の反射特性を表現したものなど[14)〜16]があるが，本研究では光の反射モデルについては扱わない．Adabala は布の糸を構成する更に細い繊維の幅やその縒りの強さをパラメータとして与えることによって糸目単位のテクスチャを作り，WIF(Weaving Information File) に基づいてマッピングを行うことで布を表現している[17]．本研究ではこの手法を参考にし，レンダリングを行う．

4. 染色モデル

本研究における染色モデルでは，まず事前計算として布の構造を定義し，布の屈曲度や多孔度などの値を設定する．次に染料の付与を染料の初期分布として与える．次に染料の吸着，拡散，レンダリングを順に行う処理を 1 ステップとして，繰り返し計算を行う．レンダリングは，拡散・吸着の計算結果と布のテクスチャを用いて行う．以下，4.1 節では布構造モデル，4.2 節では染料の拡散及び吸着モデル，4.3 節ではレンダリングについて述べる．

4.1 布構造モデル

布はセルによって表現する (**図 3**)．本研究では 2 種類のセルを定義する．1 つは布を構成する糸単位でパラメータを設定するための cloth cell である．cloth cell は縦糸/横糸，上糸/下糸などの属性，及びそれぞれの糸の幅を定義する．レンダ

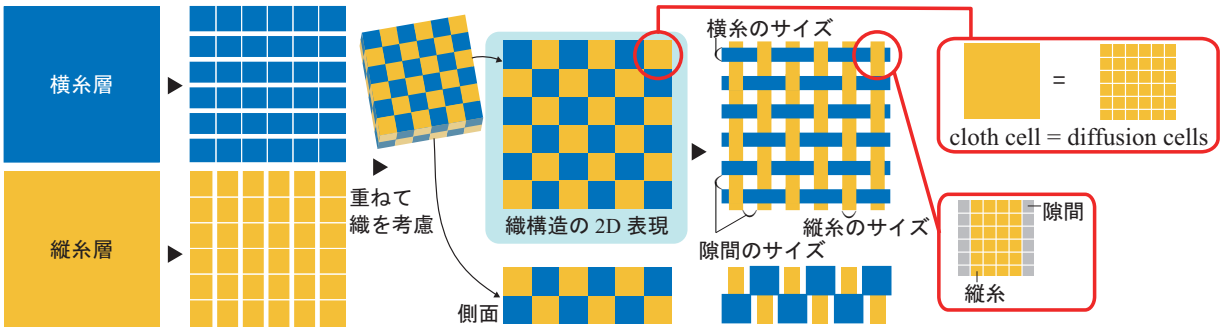


図 3　布モデル (平織の例)
Fig. 3　The example of our cloth model with plain weave

リングの際には cloth cell で定められた位置情報によって交差する糸毎にテクスチャをマッピングする．もう 1 つのセルは拡散計算を行うために cloth cell を更に分割した diffusion cell である．染色を詳細に表現するために糸よりも小さな解像度で拡散を行う．

布データを作るには，まず縦糸と横糸の大きさにしたがって cloth cell を定義し，それを布の大きさの分だけ隙間の大きさを空けて並べ，縦糸と横糸の 2 層分用意する．縦糸，横糸，隙間の大きさは任意に与える．次にユーザは図 3 中の「織構造の 2D 表現」のような GUI で織構造を定義し，それに基づいて 2 層のどの部分が上糸か下糸かを定義する．繊維の方向は横糸なら x 方向，縦糸なら y 方向の 2 方向のみで定義される．

4.2　染料拡散・吸着モデル

(a) 染料の拡散

染料の拡散モデルは布内での染料の拡散が重要な浸染技法の一般的な染色工程に習い，水で湿らせた布での染料の拡散を物理的要素に基づいて表現する．拡散は Fick の第 2 法則 (式 (1)) を用いて定義する [18]．

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial \phi}{\partial z}\right) \qquad (1)$$

ここで ϕ は染料の濃度，t は時間，x, y, z はそれぞれ x, y, z 方向の位置，D は拡散係数を表す．本研究では式 (1) を式 (2) のように離散化する．

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\phi_{i,j,e}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta d}\Bigg\{ & D_{i+1/2,j,e}\frac{\phi_{i+1,j,e}-\phi_{i,j,e}}{\Delta d} \\ & + D_{i-1/2,j,e}\frac{\phi_{i-1,j,e}-\phi_{i,j,e}}{\Delta d} \\ & + D_{i,j+1/2,e}\frac{\phi_{i,j+1,e}-\phi_{i,j,e}}{\Delta d} \\ & + D_{i,j-1/2,e}\frac{\phi_{i,j-1,e}-\phi_{i,j,e}}{\Delta d} \\ & + D_{i,j,(e+a)/2}\frac{\phi_{i,j,a}-\phi_{i,j,e}}{\Delta d}\Bigg\}\end{aligned} \qquad (2)$$

このとき i, j は x 及び y 方向の位置，e は横糸層，a は縦糸層，Δd は離散距離である．本式は横糸層の計算だが，縦糸層の場合は式中の e と a が逆となる．D は diffusion cell の間で定義されるため，$D_{i+1/2}$ と表す．拡散は同一層の中で隣接する 4 近傍と異なる層で隣接する 1 つの，あわせて 5 近傍処理によって行う (**図 4**)．図 4 において，上段は横糸層，下段は縦糸層，色のない diffusion cell は糸繊維のない隙間を表す．

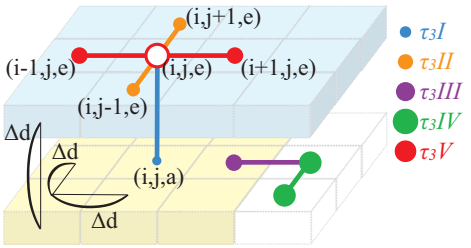


図 4　染料拡散の計算空間と τ_3 の概念図
Fig. 4　Connection between diffusion cells with tortuosity

拡散方程式を式 (2) のように変形すると，拡散を着目セルと近隣セルそれぞれの間の移動量と考えることができるので，境界処理や指向性を持った拡散係数による計算に適している．本稿での結果生成には，このように計算した濃度の差分を前の時間の濃度に加算する陽解法を採用した．陰解法でも計算することが可能である．

染料の拡散は diffusion cell 単位で行う．本稿の結果画像では diffusion cell とピクセルの大きさを一致させて計算を行った．各 diffusion cell には拡散に必要な要素 (縦糸層/横糸層，繊維/隙間，上糸/下糸，位置，多孔度，屈曲度) が設定されている．多孔度は糸における繊維中の隙間の割合を示すものであり，屈曲度は繊維間の染料の拡散経路のねじれを示すものである．屈曲度 T の定義は (繊維の通る 2 点間の直線の長さ÷実際の長さ) であり，拡散係数と同じく diffusion cell 間で定義される．屈曲度の値が大きいほど繊維のねじれが小さく，小さいほどねじれが大きい．本研究では屈曲度を 3 つの要素に分けて考える．1 つは糸の縒りによるもの (τ_1)，1 つは織り布の構造による糸の浮き沈みによるもの (τ_2)，そして隣接する diffusion cell 間の繊維方向及び多孔度の違いによるもの (τ_3) である．それぞれの値は 0 以上 1 以下の任意の値で与えられる．τ_1 はそれぞれの糸毎に設定する．τ_2 は着目する diffusion cell と隣接セルとの関係において，同じ層に属し，繊維が存在し，且つ，上下の位置が異なる場合，任意の値を与える．τ_3 は diffusion cell 間での繊維方向の違

いや多孔度の違いによって 5 つの場合 ($\tau_3 I$：異なる層に属する，$\tau_3 II$：同一層に属し糸と垂直方向に隣接，$\tau_3 III$：繊維と隙間，$\tau_3 IV$ ：隙間と隙間， $\tau_3 V$：同一層に属し糸方向に隣接) において値を設定する．図 4 はこれらの説明図である．それぞれの屈曲度の要素が重なるほど屈曲度は小さくなると考えられるので，最終的な屈曲度 T は全ての diffusion cell において，

$$T = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tag{3}$$

として求める．

拡散係数は Weisz-Zollinger モデル[9]を参考にし，式 (3) を用いて定式化したものが式 (4) である．

$$D = D_0 PT(\phi_0/\phi) \tag{4}$$

このとき，P は多孔度，ϕ は染料の濃度，ϕ_0 は平衡状態の染料の量，D_0 は水中拡散係数である．多孔度は 0〜1 の範囲で定義する繊維内の空隙率であり任意の値を与える．また，D_0 の値は式 (5) を用いて理論的に求めることができる[19]．

$$D_0 = 3.6\sqrt{76/M} \tag{5}$$

このとき M は染料の分子数である．染色の特徴の 1 つである染めむらは拡散係数のばらつきによって起こる．我々の拡散モデルでは縦糸と横糸の多孔度及び屈曲度を任意に与えた後，乱数によって糸毎に微小なばらつきを与えている．

(b) 染料の吸着

等温下における染料濃度による染料の繊維への吸着量を表す式を吸着等温式という．本手法では代表的な 3 つの型を考慮する．これらの吸着等温式は染料や繊維の種類や状態によって異なるが，本手法においては好みの結果を得るために任意の吸着等温式を採用するものとした．

染料の吸着の計算手順としては，まず染料濃度によって吸着できる限界量を計算し，吸着する染料を制限する．その上で，繊維内での染料拡散と吸着による染料の移動量を計算し，吸着量として蓄えると同時に，その diffusion cell の拡散量を減らす．以下，詳細を述べる．

繊維に吸着できる飽和量 V_d は，多孔度による繊維の割合を $(1-P)$ で表せるため，式 (6) により定める．

$$V_d = (1-P)V_{max} \tag{6}$$

このとき V_{max} は diffusion cell に保有できる染料の最大値である (**図 5**)．また，染料の繊維への吸着 (定着) については，染色物理に基づいた吸着等温式によって染料濃度からタイムステップ毎の吸着の限界量 A_d を計算する．**図 6** (a”)(b”)(c”) は代表的な 3 つの吸着等温式である分配則・フロインドリッヒ型・ラングミュア型の濃度に対する吸着量の振る舞いを表す[20),21)]．(b”) フロインドリッヒ型の場合，式 (7) によって定義する．

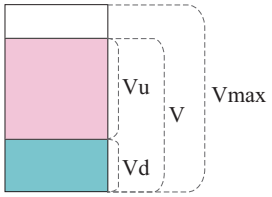


図 5 Diffusion cell における拡散及び吸着の飽和量の関係
Fig. 5 The relation of the capacities of diffusion and adsorption of diffusion cell

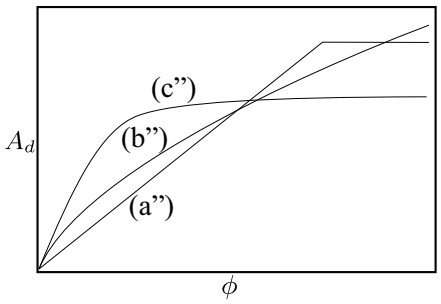


図 6 吸着等温式の振る舞い
Fig. 6 Behavior of some typical adsorption isotherms

$$A_d = k\phi^b \tag{7}$$

このとき k は実験によって求められる定数であり b は 0.1〜1.0 の間の定数である．(a”) 分配則は式 (7) の $b = 1$ の場合である．(c ”) ラングミュア型の場合式 (8) によって定義する

$$A_d = \frac{V_d K_L \phi}{1 + K_L \phi} \tag{8}$$

このとき K_L は平衡定数を表し，ϕ の影響力の重みを付ける．実際の吸着量は任意の吸着係数 D_{ab} により，拡散と同様に式 (2) にしたがって求める．吸着し繊維と化学結合した染料は容易に脱着しないことから，吸着量が V_d 及び A_d を超えない限りは吸着が起こる一方向の拡散として計算する[7]．防染技法を考慮するためには体積率のパラメータ $B(0 < B < 1)$ を定義する．diffusion cell が保有できる染料の量 V は，吸着せずに拡散している染料の飽和量 V_u と V_d，そして体積率 B を用いて式 (9) のように定義される (**図 5**)．

$$V_u = V_{max} P(1-B), \qquad V = V_u + V_d \tag{9}$$

これにより防染部分に染料が入り込まず，染色模様を表現することができる．これは Curtis らの紙面の height field を用いた顔料飽和量を決める方法に似ているが，本手法では多孔度をパラメータとして加え，防染による模様染めのために使用する．実際の染色では，この圧力の分布は作り手の意図によって作られるが，本研究では体積率を示す画像を入力し，入力画像の画素値を正規化したものを，一致する diffusion cell の体積率 B として用いる．

染色で用いられる染料はコロイド溶液の特性を持っているので，布が水平に置かれ濡れているのであれば染料は重力の

影響は無視できると考えられる．したがって diffusion cell では上下の位置関係は考慮せずに計算を行うことができるので 3 次元空間に配置する必要がなく，糸の隣接関係を考えるのが容易である．本研究で上下の位置関係の違いが考慮されるのはレンダリングのときのみである．

4.3 染料と布のレンダリング

求めた染料濃度からレンダリングする方法，及び，2 種類の布表現方法を述べる．

4.3.1 染料の濃度による色の決定

各 diffusion cell における染料の色は，染料拡散モデルで求めた染料の濃度に応じて HSV 色空間での線形補間によって決める．色の値は実際に染色した布から最も明度の高い部分と低い部分の色の値を用いる．また，明度の中間値のデータを追加して補間を行う．最終的に染料の色と布テクスチャの値は乗算することによってレンダリングを行う．布テクスチャ情報は以下の 2 つの方法のいずれかを用いる．

(a) 布テクスチャの生成によるレンダリング

布のテクスチャを逆正接関数 arctan を用いたアルゴリズムによって糸単位で生成し，cloth cell 毎に糸の陰影テクスチャをマッピングする．テクスチャの生成には，糸の縒りの強さや表面の凹凸の度合いを考慮した糸の陰影テクスチャ生成手法[17]を用いる．

(b) 実写布画像を用いたレンダリング

実写の布画像を染料拡散モデルに適用する．そのため，拡散シミュレーションに用いる布の織り構造情報と実写の布画像を一致させる．まず実写の布画像の中で縦・横糸の位置を指定する画像をそれぞれ用意し，位置指定を行う．縦糸と横糸の領域を指定する画像を作るには，画像処理ソフトで色域指定によって縦糸や横糸の領域を大まかに指定した後，手作業で縦・横糸の細かい判別を行う (**図** 7)．図 7 では，赤色が横糸領域，青色が縦糸領域を示す．染色計算に使う縦糸及び横糸層の計算空間では，このレンダリング方法を用いる場合，隙間の設定はなく，各層は繊維のみで構成する．次に，縦糸及び横糸の領域に合わせて，縦糸層または横糸層の染料の表示を行う．

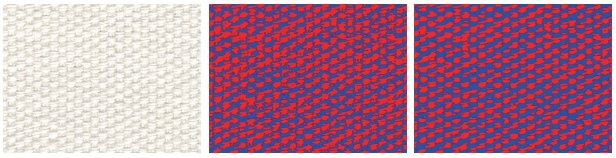


図 7　実写布画像の縦糸・横糸領域の判別　(左) 実写の布画像 (中) 色域指定による縦糸・横糸領域の判別結果 (右) 更に手作業で修正した結果

Fig. 7　The image to detect weft and warp areas (left) a photograph of cloth (center) weft and warp areas extracted as similar colors of the photograph (right) a result modified to remove noises manually

5. 結　　果

結果と考察について述べる．

5.1 シミュレーション条件

シミュレーションに用いたパラメータ及び計算要素数などを**表** 1 に示す．r は 0.5〜1.0 の糸毎にランダムな値であり，**図** 9 及び**図** 11(b) ではシミュレーション中，初期の染料量の供給を維持する．図 9, 図 11, **図** 14 を除き，全ての結果画像はタイムステップ 5,000 回の拡散処理を行っている．図 9 はタイムステップ 50,000 回の拡散処理を行い，6 分程度の計算時間を要した．計算環境は Intel Pentium 4(3.4GHz) CPU に 256MB RAM を搭載したデスクトップ PC で行った．プログラムの実装には C++を用いた．

5.2 多孔度・屈曲度・吸着系数の効果

図 8 に多孔度・屈曲度・吸着係数に様々な値を与えてシミュレーションを行った結果を示す．図 8(a) は他の結果との比較のために用意した布や染料による影響の少ない染色シミュレーションの結果である．図 8(b) では吸着率が高いために多くの染料が初期の分布付近に残っている．図 8(d) で見られるまだらの特徴は屈曲度 $\tau_3 V$ の値の調節に加え，布を 2 層モデルにしなければできない表現である．布の 2 層モデルが染色表現に対して有効であるといえる．図 8(e) は多孔度及び屈曲率をランダムに変えた場合の処理結果である．また，図 8(f) は体積率をランダムに与えた結果画像であり，同じ設定で糸の幅を狭くしたのが図 8(g) である．図 8(g) では，すじの特徴が見られる．図 8(e) と図 8(f),(g) を比較すると，体積率の変化の方が見た目に顕著な影響を及ぼすことがわかる．

6. 吸着等温式の影響

図 9 において，(a) は吸着等温式を分配則型，(b) はフロインドリッヒ型，(c) はラングミュア型を用いて計算を行った結果である．図の上段が拡散及び吸着量を表示しているのに対して，下段では吸着量のみを可視化している．これらの比較により吸着理論によって拡散結果に顕著な違いが起こることがわかる．図 9(b) では広範囲にで染料の拡散と吸収が起こっている．図 9(c) では染料濃度が低いときの吸着率が高いため，初期の染料分布付近に拡散が留まっている．このような染色の見かけ上の違いに影響する要素を吸着理論に基づき，考慮することができた．

6.1 織りの種類による違い

図 10 は織り布の種類を変えてシミュレートした結果である．図 8(d) と同様に $\tau_3 V$ の値を小さくすると顕著にまだらの特徴が現れる．その際，織り布構造が異なると視覚的な違いが明確に表れる．

表 1　図 8 から図 14 で用いたパラメータの値
Table 1　Parameters from Figs. 8 to 14

共通の値を用いた要素											
D_0, Δt, Δd				1.93 (mm^2/h), 0.0005 (h), 0.05 (mm)							
τ_2, $\tau_3 IV$				0.47 (ratio), 1 (ratio)							
初期染料量，染料の分布範囲				1.0V，直径 30(pixels) の円内 ※							
その他の要素	$\tau_3 I$	$\tau_3 II$	$\tau_3 III$	$\tau_3 V$	τ_1	P	D_{ab}	吸着等温式	織構造	diffusion cell 数	糸, 隙間の幅
図 8(a)	1	1	1	1	1	0.5	0	分配則	平織	200×200×2	8,2 (pixel)
図 8(b)	1	1	1	1	1	0.5	$0.01D_0$	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 8(c)	0	0.05	1	0	1	0.5	0	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 8(d)	.005	0.005	0.005	1	1	0.5	0	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 8(e)	1	1	0	1	$0.5r$	0.5	0	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 8(f)	1	1	0	1	1	$0.5r$	0	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 8(g)	1	1	0	1	1	$0.5r$	0	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 9(a)	1	1	1	1	1	0.5	$0.01D_0$	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 9(b)	1	1	1	1	1	0.5	$0.01D_0$	フロインドリッヒ	平織	200×200×2	8,2
図 9(c)	1	1	1	1	1	0.5	$0.01D_0$	ラングミュア	平織	200×200×2	8,2
図 10(a)	0.01	0.01	0.01	1	1	0.5	0	分配則	平織	200×200×2	8,2
図 10(b)	0.01	0.01	0.01	1	1	0.5	0	分配則	綾織	200×200×2	8,2
図 10(c)	0.01	0.01	0.01	1	1	0.5	0	分配則	繻子織	200×200×2	8,2
図 11(b)	1	1	0	1	1	$0.5r$	0	分配則	平織	800×600×2	4,1
図 14(左)	0.002	0001	0	1	1	0.5	$0.01D_0$	ラングミュア	平織	400×300×2	6,0
図 14(中)	0.002	0.001	0	1	1	0.5	$0.01D_0$	ラングミュア	平織	400×300×2	判別画像適用

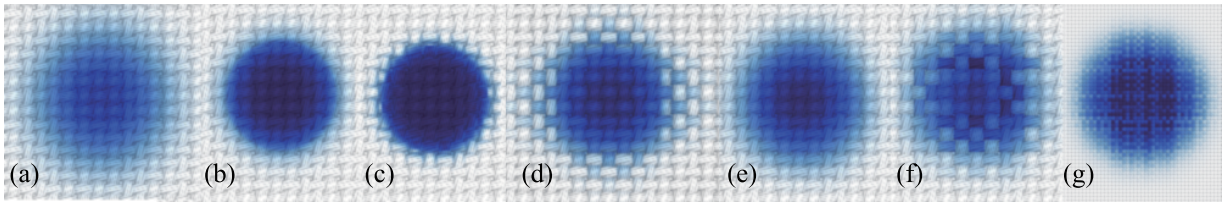


図 8　パラメータ (T，P，D_{ab}) 変化による染色シミュレーション結果の比較
Fig. 8　Computer generated dye stains with various parameters including T, P, D_{ab}

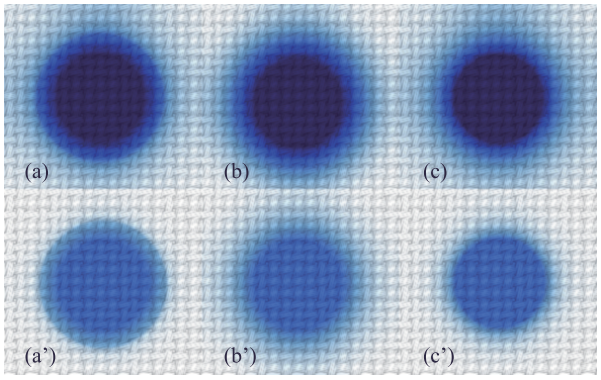
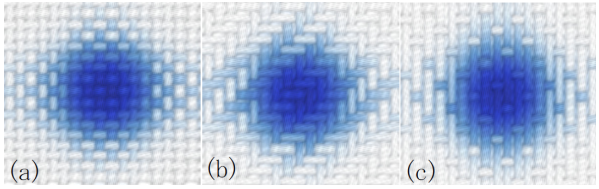


図 9　異なる吸着等温式を用いたシミュレーション結果の比較
Fig. 9　Comparison of simulations with some adsorption isotherms



(a) 平織　(b) 綾織　(c) 繻子織

図 10　異なる布構造へのシミュレーション結果の比較
Fig. 10　The differences between dye stains on different weave patterns

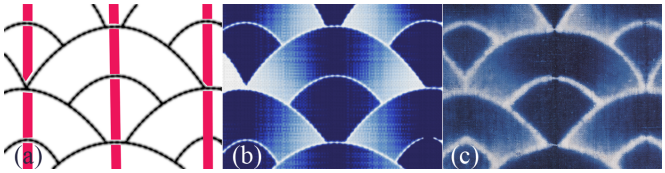


図 11　染色技法のシミュレーション
Fig. 11　Simulation of a simple dyeing technique

6.2　絞り染め技法のシミュレーション

図 11 は簡単な絞り染め技法をシミュレーションした際の入力と結果の比較を示す．図 11 において，染料の分布を (a) の縦線，防染部分を (a) の扇形の形状で与えると (b) のような結果画像が得られる．(c) は実際の染物である．**図 12** にタイムステップ毎の結果を示す．染料の初期分布は全て同じである．体積率を画像で入力することにより，防染技法による模様表現を行うことができる．他に**図 13** に様々な織りやパラメータを設定したシミュレーション結果を示す．

6.3　布のレンダリングによる違い

図 14 は布のレンダリングに実写の布画像を用いた比較である．図 14 において，左から，縦糸・横糸の領域がシミュレーションと布テクスチャで一致していない場合，縦糸・横糸の領域がシミュレーションと布テクスチャで一致している場合，それぞれの拡大図，一致する縦糸・横糸領域を示す．図

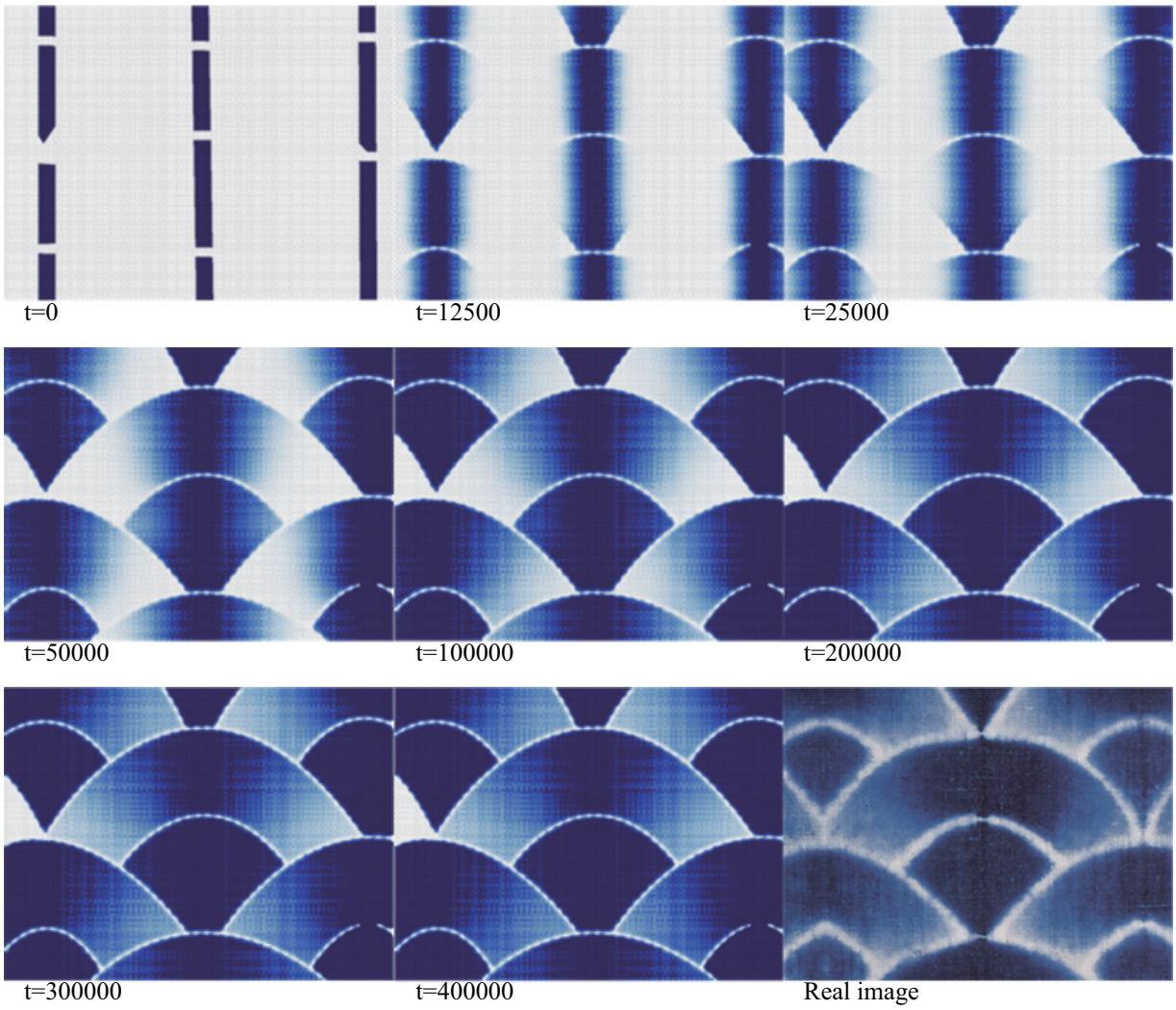


図 12　タイムステップ毎の青海波模様のシミュレーション
Fig. 12　The simulation of seikaiha along the time step

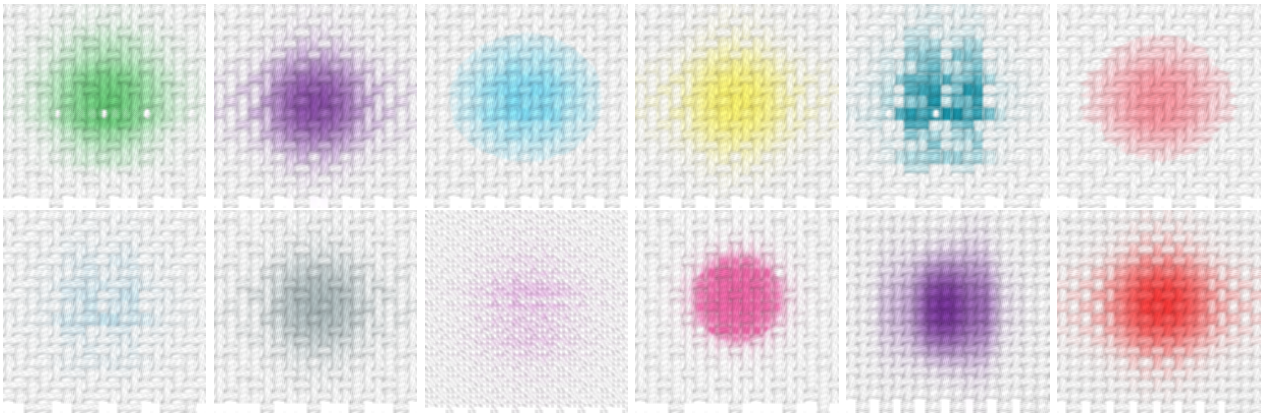


図 13　様々なパラメータ及び織り構造による染料移動の結果
Fig. 13　The results using a variety of weaves and parameters

14 左図では，シミュレーションでの縦糸・横糸の大きさや位置を布テクスチャと一致させていない．そのため，染料の広がり方が糸に沿っておらず不自然である．同右図では，提案手法によりシミュレーションとレンダリングの縦・横糸領域が一致しており，より自然な結果となっている．ただし，色域指定がうまくいかない場合があるので，今後手法の改良が必要である．図 14 以外の結果では布テクスチャの生成を行い，レンダリングした．

6.4　今後の課題

本手法によるシミュレーションと実際の染色の時間経過による比較は現状では非常に困難である．理由の 1 つとして，

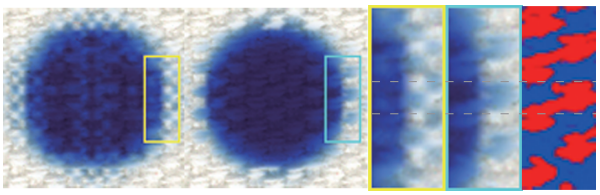


図 14　実写布画像を用いた結果画像の比較
Fig. 14　A comparison of the results using a photograph of a cloth

本手法で想定している染色環境は予め濡らした布や布を染料につけた状態であるが，実際に濡らした布へ染料を滴下するとマーブリングなどで見られるような，水面での複雑な流れが起き，染料付与の初速度や布の細かい皺にも敏感に影響され，理想的な拡散を撮影することが難しい．また，実際の染色では意図したデザインを行うため，このような複雑な移流を扱うことはなく，本研究の対象外である．しかしながら，染色で起こりうる範囲で，実際の染色とシミュレーションの環境を一致させることは重要である．今後，実際の染色パラメータを簡単にシミュレーションに取り込み，計算機内での見かけのシミュレーションに留まらず，実際の染色シミュレーションへの発展を行いたい．

7. む す び

本稿では 2 層の布構造モデルを用い，染色理論に基づき布や染料のパラメータを考慮した染色のシミュレーションモデルを提案した．本モデルによって，織り布構造を考慮し，屈曲度，多孔度，飽和量などの設定によって布への液体拡散の特徴を捕らえることができることを実際の染色との比較によって確認した．また，防染技法による染色模様の表現手法を提案し，任意の 2 次元データの入力による直感的な染色技法をシミュレーションすることができた．

今後の課題として染色表現の発展を行うと同時に，複雑な染色模様生成のための染色ツールや 3 次元における布のモデリングなどの付加が考えられる．

謝　　辞

研究を行うにあたり，議論及び助言を頂いた田中正幸氏に深く感謝する．本研究の一部は，日本学術振興会の支援を受けて実施されたものである．

参 考 文 献

1) 青柳太陽, 模様染の伝統技法, 理工学社 (1992).
2) 黒木宣彦, 染色理論化学, 槇書店 (1996).
3) 沖津文幸, 絞りの括りと染め, 理工学社 (1994).
4) 榊原あさ子, 日本伝統絞りの技, 紫紅社 (1999).
5) Y.I. Wada, Memory on Cloth:Shibori Now, Kodansha International (2002).
6) C.J. Curtis, S.E. Anderson, J.E. Seims, K.W. Fleischer, D.H. Salesin:“Computer-Generated Water- Color”, Proc. of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.421–430 (1997).
7) N.S.-H. Chu, C.-L. Tai:“Moxi: Real-Time Ink Dispersion in Absorbent Paper”, ACM Trans. on Graphics, Vol.24, No.3, pp.504–511 (2005).
8) T.L. Kunii, G.V. Nosovskij, V.L. Vecherinin:“Two-Dimensional Diffusion Model for Diffuse Ink Painting”, International Journal of Shape Modeling, Vol.7, No.1, pp.45–58 (2001).
9) S.-H. Bae, H. Motomura, Z. Morita:“Diffusion/Adsorption Behaviour of Reactive Dyes in Cellulose”, Dyes and Pigments, Vol.34, No.4, pp.321–340 (1997).
10) S.Xu, H. Tan, X. Jiao, F.C.M. Lau, Y. Pan:“A Generic Pigment Model for Digital Painting”, Computer Graphics Forum, Vol.26, No.3, pp.609–618 (2007).
11) T. Lenaerts, B. Adams, P. Dutré:“Porous Flow in Particle-Based Fluid Simulations”, ACM Trans. on Graphcs, Vol.27, No.3, pp.49:1–49:8 (2008).
12) B. Wyvill, K.V. Overveld, S. Carpendale:“Rendering Cracks in Batik”, Proc. of the 3rd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR ’04), pp.61–149 (2004).
13) F. Drago, N. Chiba:“Painting Canvas Synthesis”, Visual Computing, Vol.20, No.5, pp.314–328 (2004).
14) N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann, G. Fei: “Visualization of Woven Cloth”, Proc. of the 14th Eurographics Workshop on Rendering (EGRW’03), pp. 178–185 (2003).
15) S.H. Westin, J.R. Arvo, K.E. Torrance:“Predicting Reflectance Functions from Complex Surfaces”, Proc. of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH’92), pp.255–264 (1992).
16) Y.-Q. Xu, Y. Chen, S. Lin, H. Zhong, E. Wu, B. Guo, H.-Y. Shum: “Photorealistic Rendering of Knitwear Using the Lumislice”, Proc. of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH’01), pp.391–398 (2001).
17) N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann:“A Procedural Thread Texture Model”, JGT, Vol. 8, No. 3, pp.33–40 (2003).
18) A. Fick:“On Liquid Diffusion”, Journal of Science, Vol.10, pp.31–39 (1855).
19) R.V.D. Berg:“Human Exposure to Soil Contamination: A Qualitative and Quantitative Analysis Towards Proposals for Human Toxicological Intervention Values (Partly Revised Edition)”, RIVM Rapport, (1994).
20) I. Langmuir:“The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids. Part i. Solids”, Journal of the American Chemical Society, Vol.38, No.11, pp.2221–2295 (1916).
21) T. Vickerstaff, The Physical Chemistry of Dyeing, Oliver and Boyd (1954).

(2014 年 1 月 16 日 受付)
(2014 年 4 月 25 日 再受付)

森　本　有　紀
2008 年 九州大学芸術工学府修了．同年 東京大学にて日本学術振興会特別研究員，2009 年 独立行政法人理化学研究所にて研究員，2011 年 財団法人九州先端科学技術研究所にて研究員，2012 年 東京電機大学未来科学部講師．コンピュータグラフィクスに関する研究に従事．

鶴　野　玲　治　（正会員）
1987 年 大阪府立大学大学院修了 (情報科学専攻)，1993 年博士 (工学)．1987 年 近畿大学，1992 年 九州芸術工科大学，2003 年より九州大学大学院芸術工学研究院准教授．CG，特にシミュレーション系の NPR を含むモデリングとレンダリングの研究に従事．画像電子学会，ACM，Eurographics，情報処理学会，芸術科学会，芸術工学会など会員．

高　橋　時市郎　（正会員）
1977 年 新潟大学工学部卒業．同年 電電公社入社．NTT 基礎研究所，ヒューマンインタフェース研究所，サイバーソリューション研究所において，パタン認識，コンピュータグラフィックス，学習科学の研究開発に従事．2003 年より東京電機大学工学部教授．2007 年同大未来科学部教授．ビジュアルコンピューティングの研究に従事．現在に至る．2010 年より同大産官学交流センター長．2013 年より UEI リサーチ客員研究員．博士 (工学)．