

# A Study on Non-Photorealistic Rendering Technique for Visualization of Dyeing Cloth

森本, 有紀  
九州大学大学院芸術工学府

<https://doi.org/10.15017/10322>

---

出版情報 : 九州大学, 2007, 博士 (芸術工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

## 第四章

physics ベースによる染色モデル

## 本章の概要

本章では physics ベースの染色モデルについて述べる。本章では分子の拡散を定義した Fick の法則に基づき、拡散方程式を用いて染料拡散モデルを提案する。また、布構造の指定には第三章と同じように糸の幅で区切った cloth cell を用いているが、拡散計算においては更に細分化した diffusion cell を用いている。布と染料のレンダリングでは第三章の手法に加えて実写の布画像を用いた方法を提案する。

### 4. 1 モデルの概要

ここでは本システムの概要を述べる。以下に染料拡散処理の手順を示す。

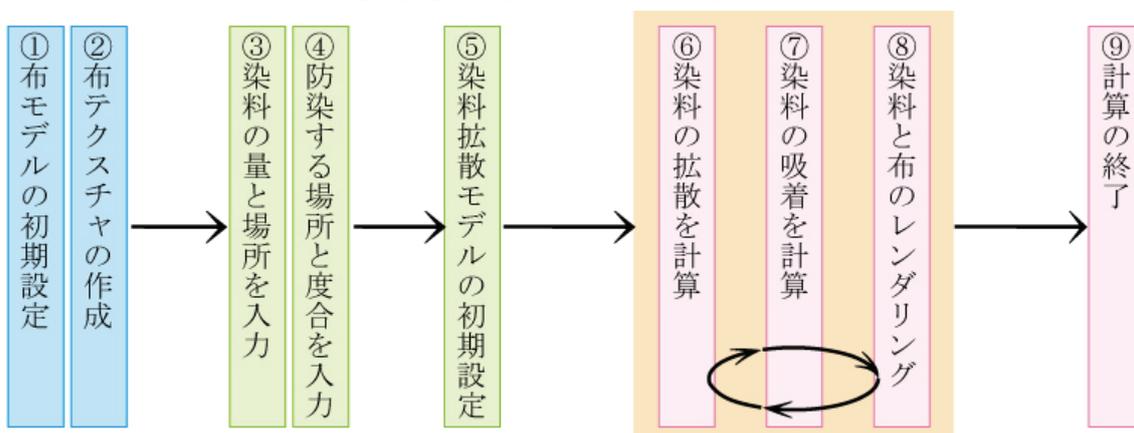


図4-1 physicsベースによる染色モデルの流れ

①では布モデルに関する初期設定を行う。表4-1に布モデルの要素を示す。縦・横それぞれの糸幅とその隙間の大きさを設定し、織構造の種類を設定する。このとき、織構造の種類はユーザがGUI操作で自由に定義することが可能である（4. 2を参照）。

②ではレンダリングの際に用いる布テクスチャの読み込みを行う（4. 4. 2を参照）。

③では与える染料の量と場所を指定する（3. 5. 2と同様）。

④防染する場所と度合いについての設定を行う（4. 3. 3を参照）。

⑤では各diffusion cellでの要素の設定を行う。表4-2にdiffusion cellが持つ要素を示す。

⑥ではFickの第二法則に基づいて物理的な定義に基づき染料の拡散を計算する（4. 3. 2を参照）。

⑦では染料の吸着を計算する（4. 3. 2を参照）。

⑧では染料と布のレンダリングを行う（4. 4を参照）。⑥⑦⑧は一連の処理として繰り返し行われる。

⑨では任意のタイムステップで計算を終了する（3. 1を参照）。

表4-1 布モデルの初期設定要素

項目	説明
縦糸の幅	Pixel単位で設定
横糸の幅	Pixel単位で設定
織構造の種類	GUI操作で自由に織布構造を定義

表4-2 各diffusion cellが持つ要素

項目	変数	単位	説明
染料の濃度	$c, s$	割合	横糸、縦糸における実際保有している染料の濃度
位置	$i, j$		横糸、縦糸層内での平面的な位置
拡散係数	$D_c, D_s$	mm <sup>2</sup> /h	横糸、縦糸における染料の拡散しやすさ
吸着率	$D_{ab}$	割合	繊維への拡散中の染料の吸着しやすさ
飽和量	$V_{max}$	mm <sup>2</sup> /h	保有できる染料量の限界値 ( $\Delta d$ と糸の幅により決定)
時間の離散間隔	$\Delta t$	h	1タイムステップに経過する時間
空間の離散間隔	$\Delta d$	mm	隣のdiffusion cellまでの距離
空間の離散間隔	$\Delta x$	mm	x軸方向の隣のdiffusion cellまでの距離
空間の離散間隔	$\Delta y$	mm	y軸方向の隣のdiffusion cellまでの距離
圧力	$P_c, P_s$	割合	横糸、縦糸における圧力
疑似表面張力	$\epsilon$	割合	染料の移動に必要な最小限の染料濃度

#### 4. 2 布の織構造モデルと設定のための GUI

本モデルの布の織構造モデルは appearance ベースによる染色モデル（第三章）で述べたものとほぼ同じであるが、本モデルでは布構造を表す cloth cell と染料拡散モデルにおける計算空間としての diffusion cell という二種類のセルを定義する（図4-2）。

cloth cell は、布を構成する一本一本の糸に基づいて定義を行うためのセルである。cloth cell は縦糸か横糸か、上糸か下糸か、それぞれの糸の幅と位置、その他拡散に関する物理的な属性の情報を持っている。レンダリングの際には 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ことができる。

diffusion cell は cloth cell を更に分割して細かくした、拡散が起こる単位である。染色を詳細に表現するためには糸よりも小さな解像度で拡散を行う必要がある。これに

よって染色を時系列でアニメーションにした際の不自然さ（3.5.1）をなくし、滑らかな染色アニメーションを実現する。

布データを作るには、まず縦糸と横糸の大きさに従って cloth cell を定義し、それを布の大きさの分だけ並べ、縦糸と横糸の二層分を用意する。縦糸、横糸の大きさは任意に与える。

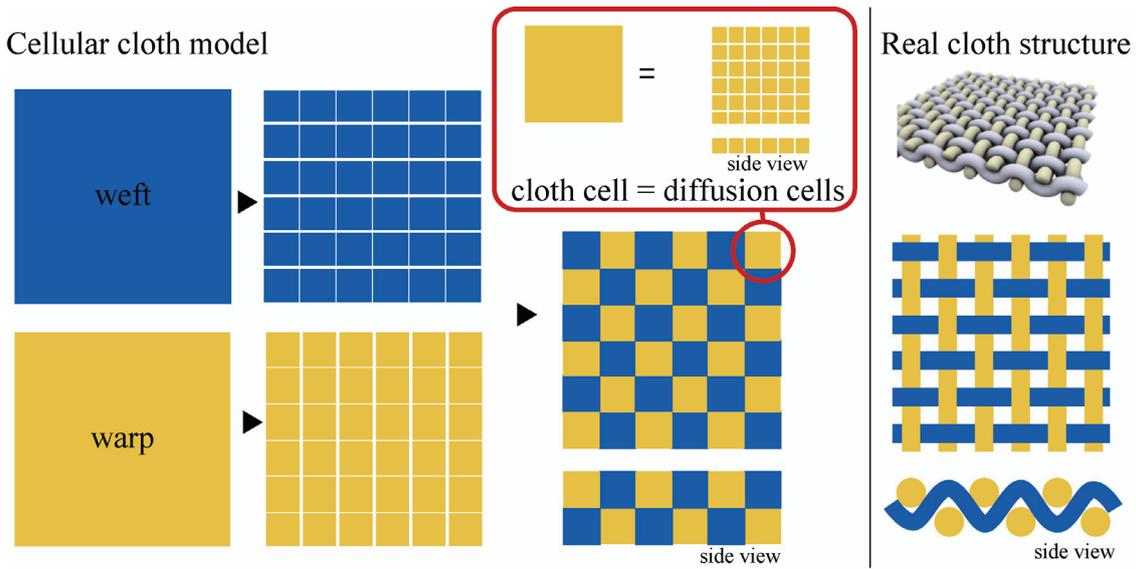


図4-2 布のセルモデル（平織りの例）

次にユーザは簡単なインターフェースを用いて布の織構造を指定する。図4-3はその説明のための例である。まず、最初に①ではまず指定したい織布の最小パターンの縦・横それぞれの要素数を入力する。綾織り・三つ綾なら縦3×横3の要素数なので、図中の右側にある control ダイアログの Object>Struct の Weave Width (横)、Weave Height (縦) をそれぞれ3にする。すると②のように3×3の要素を持ったインターフェースが作られる。この四角い要素をクリックすると③のように色が変わる。赤は横糸を表し白色は縦糸を表す。クリックして図4-4のような設定したい布構造の最小の織パターンを作ることができる。次に、“define texture” ボタンを押すと③で指定したパターンを繰り返し配置し、図4-5のような布全体の織構造を作る。更に、それに基づいてレンダリングを行い、④のようにでき上がった布画像が表示される。

尚、レンダリング方法については3.4もしくは5.6に記すテクスチャを作る方法が用いられる。繊維の方向は横糸層なら x 方向、縦糸層なら y 方向の2方向のみで定義する。ちなみに、本論文での染色シミュレーションの実験はすべて diffusion cell を 1\*1(pixel)としている。

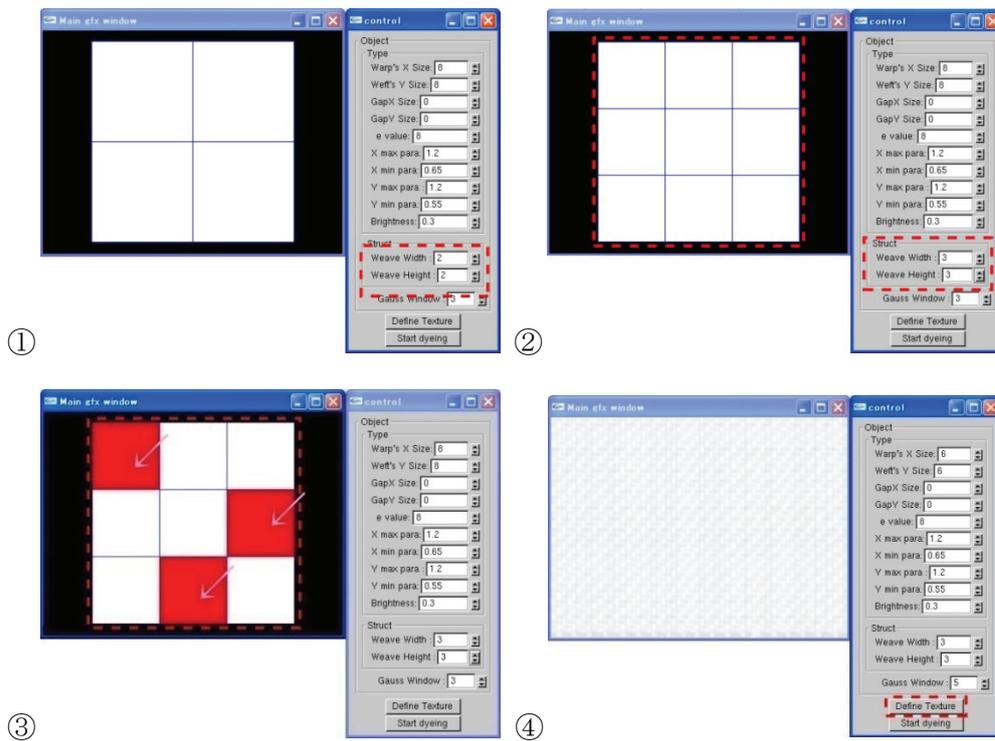


図 4-3 布構造を設定する GUI

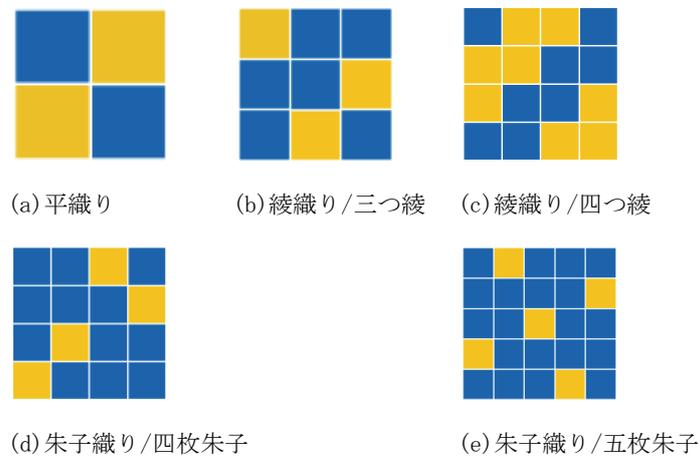


図 4-4 代表的な織構造の最小単位の例

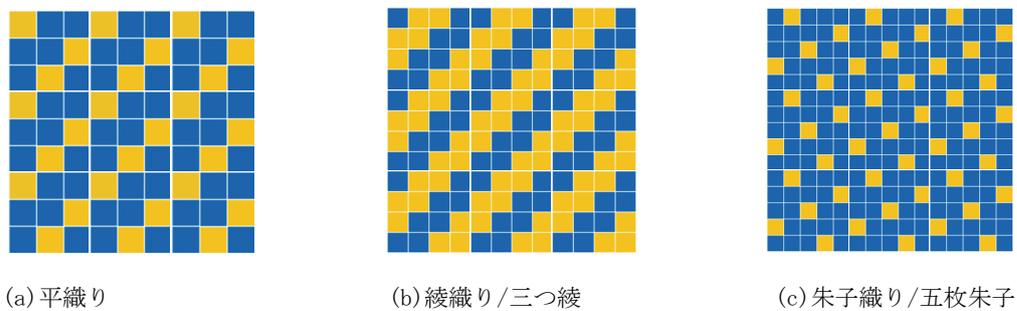


図 4-5 布構造の最小単位を並べたもの

## 4. 3 拡散と吸着

### 4. 3. 1 染料拡散の定義と特徴

染色で用いる染料はコロイド溶液の特性を持っているので、染料分子は重力の影響を受けない。また、本研究では浸染の染色工程に従ってあらかじめ濡らした布における染色を仮定し、水への重力の影響は微小であるとして、無視する。よって、diffusion cell では上下の高さの関係は考慮せずに計算を行うことができるため、diffusion cell を実際の布の3次元構造に従って構成しない。3次元に配置する場合、糸方向に染料が流れやすいという特徴を表現するために糸の隣接関係の情報が必要である。しかし、本モデルでは重力を考慮しないことにより、縦糸と横糸の異なる層間での染料輸送においてその上下関係は必要ない。よってシンプルに処理することができる。diffusion cell の上下の位置関係が考慮されるのはレンダリングのときのみである。

既存の水彩画などの NPR の研究では、水と色素の成分を別々に用意している場合が多いが、我々の拡散モデルでは繊維を染料に浸した状態を仮定しているため、濃度は色素の量を表し、色素のない部分は水で満たされていると考える。また、乾燥した布への拡散は同じモデルを使って、擬似的に表現する。その場合染料のない部分は水ではなく空気によって占められていると仮定し、更に表面張力を考慮するために一定値以下の染料の濃度では拡散が起こらないこととする。

この染料拡散の定義と特徴は第五章の physics ベースによる染色モデルのパラメータ化でも同様である。

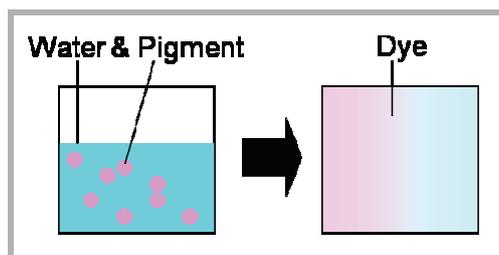


図4-6 染料と水の分離型モデルと一体型モデル

### 4. 3. 2 染料の拡散と吸着

布の中での染料の拡散モデルは並進拡散下での分子の移動を表す Fick の第二法則[12]による式に基づく。物質の濃度を $\varphi$ とすると、式4-1のように表される。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial d^2} \quad (4-1)$$

これを差分化すると式4-2ようになる。

$$\varphi_{i,j}^{t+1} = \varphi_{i,j}^t + \Delta t D \frac{(\varphi_{i+1,j}^t - \varphi_{i,j}^t) - (\varphi_{i,j}^t - \varphi_{i-1,j}^t)}{\Delta d^2} \quad (4-2)$$

この式は一次元の拡散方程式である（式4-2の拡散方程式の差分式の作り方については付録2を参照）。物質の濃度 $\varphi$ を横糸及び横糸層での染料濃度 $c, s$ に置き換え、異なる層との染料の移動を考慮すると式4-3ようになる。この式は染料の拡散は糸の指向性を強く反映するため糸それぞれにおける一次元の拡散を基本としている。加えて、交差して密着している隣接糸方向にも拡散が起こると考えることができる。よって、式4-2を周囲3近傍のセルとの拡散の移動を示すように式4-3へと変形する。

$$c_{i,j}^{t+1} = c_{i,j}^t + \Delta t \left\{ D_1 \frac{(c_{i+1,j}^t - c_{i,j}^t) - (c_{i,j}^t - c_{i-1,j}^t)}{\Delta x^2} + D_2 \frac{(s_{i,j}^t - c_{i,j}^t)}{\Delta y^2} \right\} \quad (4-3)$$

これによって、縦糸と横糸の織り込みを表現することができる。図4-7は拡散方程式に従った計算空間を表すものである。図中の青いセルが横糸、黄色いセルが縦糸を表す。実際の計算では $x$ 及び $y$ は同じ値にしている。

吸着については、一定の吸着率 $D_{ab}$ を定め、それに基づいて1ステップ毎に各diffusion cellにおいて( $D_{ab}$ \*染料の量)を固定する。

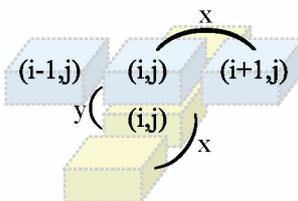


図4-7 三近傍の拡散方程式の計算空間（図中の青色のセルは横糸、黄色のセルは縦糸を表す。）

### 4. 3. 3 拡散の制限

防染による染色模様を表現する場合、絞り染めのように布の一部を圧迫することによってその部分に染料が輸送されないようにする。ここではそのような圧力を考慮する方法に

ついて述べる。

圧力を考慮する場合、染料と同じように画像などの 2 次元データの入力によって圧力のかかる場所、その度合いを求める。しかし、この 2 次元データの入力による圧力分布がはっきりとした境界線を持っている場合、その結果 (図 4-8 (e)) は実際の染物 (図 4-9 (c)) に比べて不自然なものとなる。そこで、加圧部を指定する画像の色素の値を画像の平滑化処理 (ここではガウシアンフィルタ) によってなだらかにし、それに基づいて圧力の値を決める。

図 4-8 はこの具体的な手順を説明するものである。図中の (a) は染料を与え続ける部分、(b) は圧力を加える部分を示した画像である。(b) に対してガウシアンフィルタによる処理を行ったものが (c) である。(b) (c) の画像の RGB 値の平均値を 0.0~1.0 の間の値に正規化する。このとき、圧力が最も強い部分は 0.0、最も弱い部分は 1.0 と定義する。この処理は拡散係数への影響を行いやすくするために行う。すると、それぞれの圧力画像に対して、染料拡散の全く起こらない部分は (d) (f) 中の赤い部分のようになり、次に染料拡散が起こりにくくなる部分は青い部分、圧力によって染料拡散が全く制限されない部分は白い部分で表される。緑部分は染料が与えられる部分であり、これらの条件下での染料拡散の結果はそれぞれ (e) (g) のようになる。(g) は比較的、実際の染色に近い自然な表現となっている。

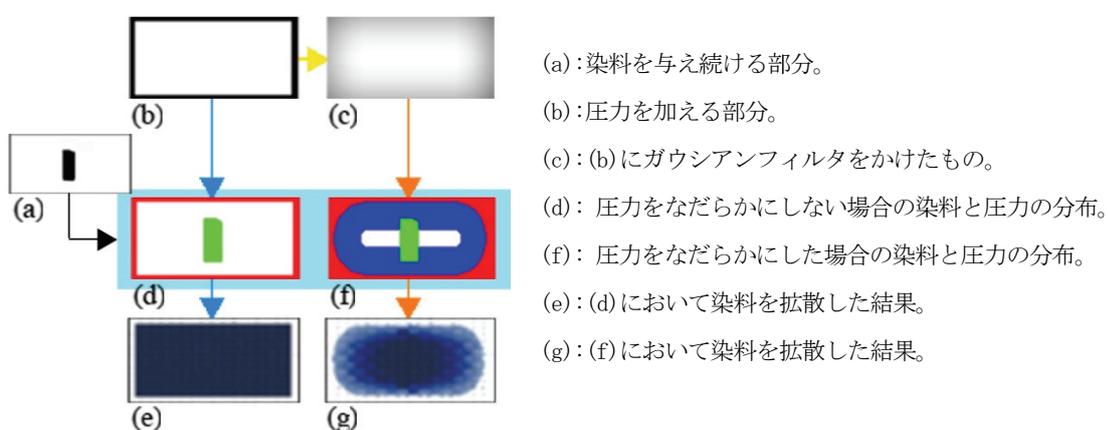


図 4-8 圧力の値をなだらかにする処理



(a) 染物の下絵

(b) 下絵に従って板を使って防染

(c) でき上がった染物

図 4-9 板染め (防染技法の一つ) の過程

拡散方程式 3-1 では布内の拡散係数は一定のものとして定義されているが、我々は布という素材の中での拡散係数は一定ではない方がより自然であると考え、拡散係数  $D_c$ ,  $D_s$  の値は各セルによって異なる値を与えている。圧力の有無や度合いも拡散の度合いに影響する要素と考える。そこで本手法では拡散係数の値を次のように設定する。

$$D_1 = \left( \frac{D_{c_{i+1,j}} + D_{c_{i-1,j}} + D_{c_{i,j}}}{3} \right) \left( \frac{P_{c_{i+1,j}} + P_{c_{i-1,j}} + P_{c_{i,j}}}{3} \right), \quad D_2 = q \left( \frac{D_{s_{i,j}} + D_{c_{i,j}}}{2} \right) \left( \frac{P_{s_{i,j}} + P_{c_{i,j}}}{2} \right) \quad (4-4)$$

$q$  は 0~1 の値のパラメータであり、異なる層への染料の拡散を制限する。これによって拡散の指向性を表現することができる。また、拡散係数の値 (近傍の  $D_c$ ,  $D_s$ ) はそのピクセルが属するセルの糸の幅に比例して決める。このような場合、拡散の速度はそれぞれ糸の幅によって異なる。他にも拡散係数は繊維の密度の偏りなどにも左右されるのでそのような偶発的な拡散係数の変化はセル毎にランダムな要素を取り入れることによって表現する。

他にもこの処理では圧力が高いほどそのピクセルに入り込む染料は少ないことを反映するために、染料濃度の飽和量を圧力に比例した値として設定している。また、そのことによって圧力  $P$  が 0.0 の場合染料はピクセルに全く染み込まないと仮定している。

染めむらの原因となる拡散係数のばらつきは繊維の密度の偏りや染料の粒子の偏りなどによって生じる。一本一本の糸毎に起こる密度の違いを表現するために、我々の拡散モデルでは糸毎に乱数を使って拡散係数を変えて表現している。

#### 4. 3. 4 乾燥した布への染料拡散表現

布に染み込んだ染料の輪郭部は、染色を行ったときの布の乾湿の状態によって異なる。水によってあらかじめ布が湿っている場合には輪郭部はなだらかであるが、乾燥している場合には輪郭部は比較的是っきりとしたものとなる。これは染料の表面張力などによるものと考えられる。本手法で使用する拡散方程式は湿った布に対する染料の拡散を仮定しているが、この場合、染料の濃度を染料の量とみなし、隣のピクセルが保有している染料の量が 0.0 である場合、染料を一定値  $\epsilon$  以上保有していなければ染料の拡散が起こらない、という条件を与えることで乾いた布への染料の広がりを表現することができる (4. 5. 1 を参照)。

## 4. 4 染料と布のレンダリング

### 4. 4. 1 染料の量による色の決定

染み込みモデルによって各ピクセルの染料の量が決まると、その量に応じて色を決める。色は実際に染料を用いて生成した染みの色データから決定する。実際の画像から最も明度の高い部分と低い部分の色データを取り出し、線形補間で間の色を決定する。必要であれば明度の中間値の部分のデータも取り出して補間を行う。線形補完の方法は3.4.1と同様である。

### 4. 4. 2 実写布画像を用いたレンダリング

実写の布画像を本モデルの染料拡散モデルに適用するには、拡散シミュレーションに用いる布の織り構造情報を実写の布画像と一致させる必要がある。そこで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(※)。この実写の布画像から縦・横糸の領域を判定する過程の画像を図4-10に示す。また、図4-11に縦・横糸の領域判定を行ってシミュレーションにおける縦・横糸の位置を一致させたもの(a)と、これを行わなかったもの(b)を示す。(a)では染色モデル内で適当な糸の幅を定めてシミュレーションを行っているため、布画像の糸の位置や幅と染料の染み込む位置が一致していない。これに対して(b)ではそれらの問題が解決されている。このように縦糸と横糸の領域を指定することにより、実際の布画像を用いて染色シミュレーションを行うことができる。

しかしこの手法では縦糸と横糸の判別画像を作る作業が大変である上に、正確に判別できているかが定かでない(図4-12)。また、同層(縦糸もしくは横糸の層)内での隣接糸との境目が判別できない、cloth cellを使うことができない、というデメリットもあり、これらの改善は今後の課題である。

※このときに筆者はこれらの縦糸と横糸を判別する画像を用意する際、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雑把に指定した後、手作業で縦・横糸の細かい判別を行った(図4-10)。

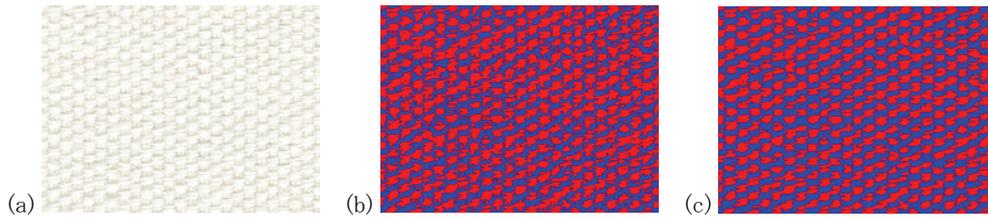


図4-10 実写の布画像内での縦糸・横糸領域の判別

- (a) 実写の布画像
- (b) 画像処理ソフトの色域指定による選択によって縦・横糸の色から領域を判別した画像
- (c) (b)の判別画像を手作業で修正した画像（赤領域が横糸で青領域が縦糸を示す）



- (a) 縦・横糸の領域の判別がうまくいっていない場合
- (b) 縦・横糸の領域の判別がうまくいった場合

図4-11 縦・横糸の領域の判別処理の比較



- (a) 実写の布画像
- (b) (a)において縦・横糸の領域を判別した画像

図4-12 布画像内での縦糸・横糸領域の判別があまりうまくいかない場合

## 4. 5 実験と結果

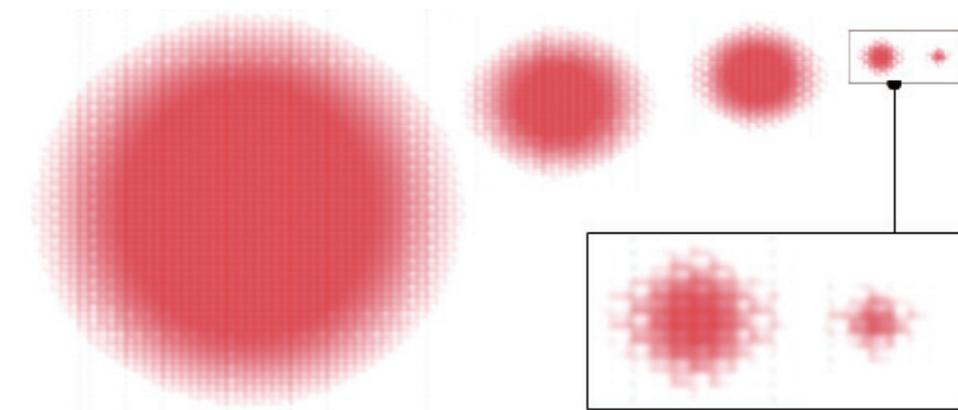
### 4. 5. 1 染色の特徴表現

染料の量による染みの形の違い・まだら・すじ 与える染料の量を少しずつ変えて染色のシミュレーションを行った。図4-13はその結果画像である。左に行くほど与える染料の量が多く、右に行くほど少ない。染料の量が多いほど染みの形は丸くなり、染料の量が少ないほど染みの形はひし形のような形に近づく。これらのことから、布における染料拡

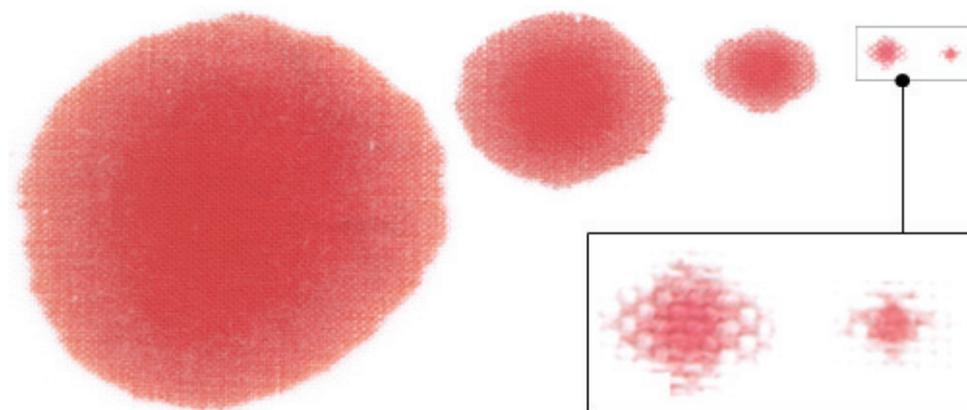
散の指向性を表現することができることがわかる。また、染みの周辺部のまだらの特徴がよく出ている。糸によって染まりにくい部分ができるすじも表現されている。このようなまだらやすじの表現においては第三章で提案した appearance モデルよりも改善されたモデルになったと言える。

図4-14には本モデルによる染みと実際の染みの拡大画像とまだらを見分けやすいようにそれぞれのコントラストを強調した画像を示す。まだらが一つの cloth cell 毎にできているところが、比較対象との類似点としてあげられる(※)。しかし、拡大したときの布の質感表現などは不十分である。

※cloth cell は実際の画像の中では一つの糸目に相当する。



(a) 本モデルによる出力結果



(b) 実際の染み

図4-13 染料の量を変えての実験

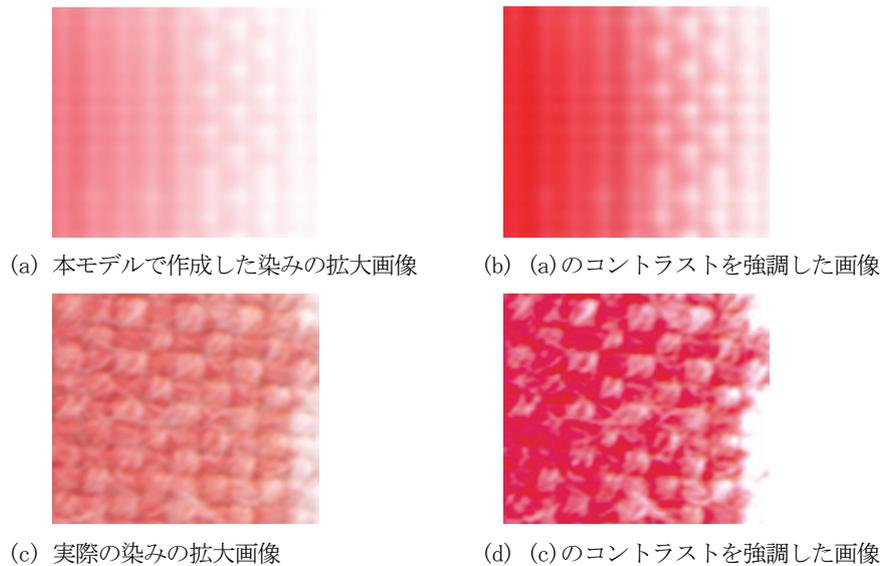


図4-14 コントラストを変えてまだらを比較

**織布構造の違い** 図4-15に織構造の違いを表現して作成した布テクスチャを示す。このように織構造の違いをテクスチャとして表現できるようになった。しかし、織構造の染料の拡散モデルへの影響はシステムの中で考慮していない。染料の拡散は糸によって影響を受けているので、織構造を考慮して染料拡散をシミュレートすることは重要な課題と言える。第五章ではその課題に取り組んでいる。

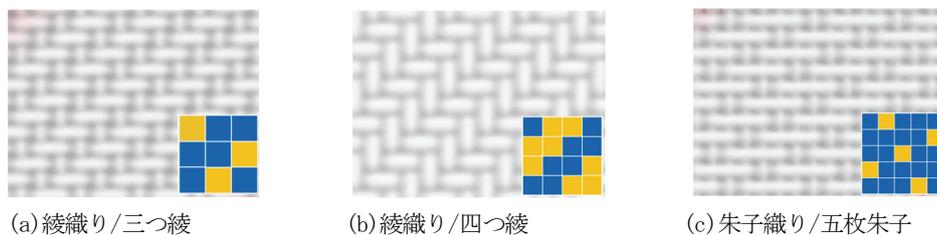


図4-15 織布構造の違いの表現

(それぞれの右下の図は織構造の最小の単位を表現しており、黄色が縦糸、青色が横糸を示している)

**乾湿の実験** 図4-16に(a)(c)は本モデルによって作成した染み、(b)(d)は実際の染みを示す。(a)(b)は乾燥した布に対して作った染み、(c)(d)はあらかじめ湿った布に対して作った染みである。(a)(b)では染料の量が少ない部分では拡散が止まり、輪郭がはっきりしているのに対して(c)(d)では染みの輪郭がぼやけているという特徴を共通して観察できる。また、(a)(c)は4.4.2で紹介した実写の布画像を用いたレンダリングを用いており、違和感のない結果画像を得られている。

なお、このときの実験の値を表4-3に示す。表中のCase(a)は図4-16(a)、Case(c)は図4-16(c)を表している。例としてCas(a)では半径30pixelの円内のセルに飽和量の

2倍の染料を与え、拡散係数  $D$  は平均  $0.3(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度とすると、空間の離散間隔  $\Delta d$  は  $0.8(\text{cm})$ 、時間の離散間隔  $\Delta t$  は  $0.5(\text{s})$ で拡散半径の広がり止まり始めるまでに2800回のタイムステップが必要であった。実時間で考えると23分程度である。そのときの半径は約48pixelであった。

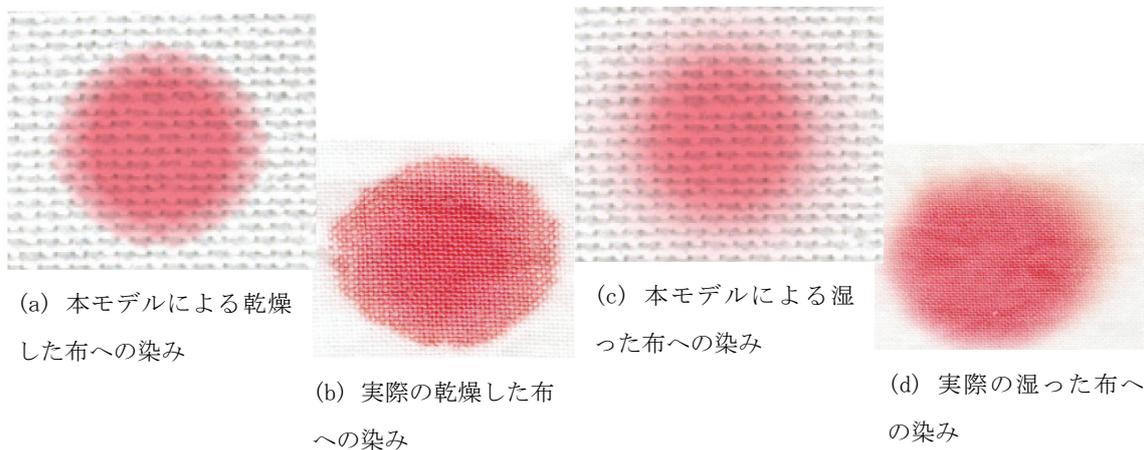


図4-16 乾燥している布、あらかじめ湿っている布に対する染料拡散の表現比較

表4-3 乾燥した布、湿った布に対する染料の滴下実験に関するプロパティ

Properties	Case (a)	Case (c)
$\epsilon$	0.5	0.0
$D_c, D_s$	0.2~0.35	0.2~0.35
$\Delta d$	0.8	0.8
$\Delta t$	0.5	0.5
$A$	0.0001	0.0001
Result	Case (a)	Case (c)
染みの初期半径	30 pixels	30 pixels
結果画像の半径	48 pixels	58 pixels
総タイムステップ	2800回	2000回
計算時間	4分	3分

(Case(a)は図4-16(a)、Case(c)は図4-16(c)を表している)

#### 4. 5. 2 染色技法の表現

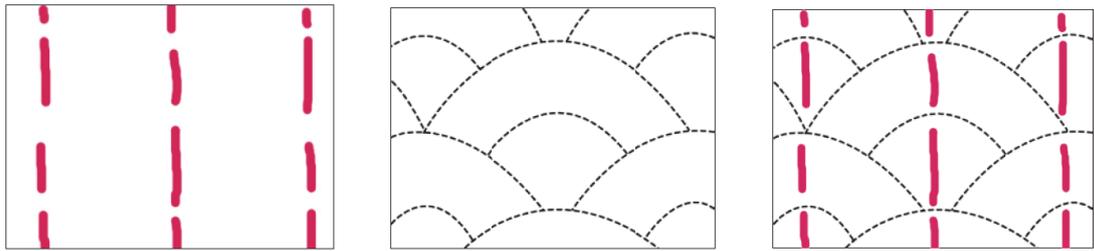
**圧力による防染の実験** 図4-17に防染模様のシミュレーションの入力画像と結果画像、そして実際の防染模様の画像を示す。はっきりとした(a)の入力画像に対して結果画像(b)は少しぼやけている。実際の染物(c)でもぼやけたグラデーションが防染部分の輪郭付近にできている。



図4-17 圧力考慮による防染模様の表現

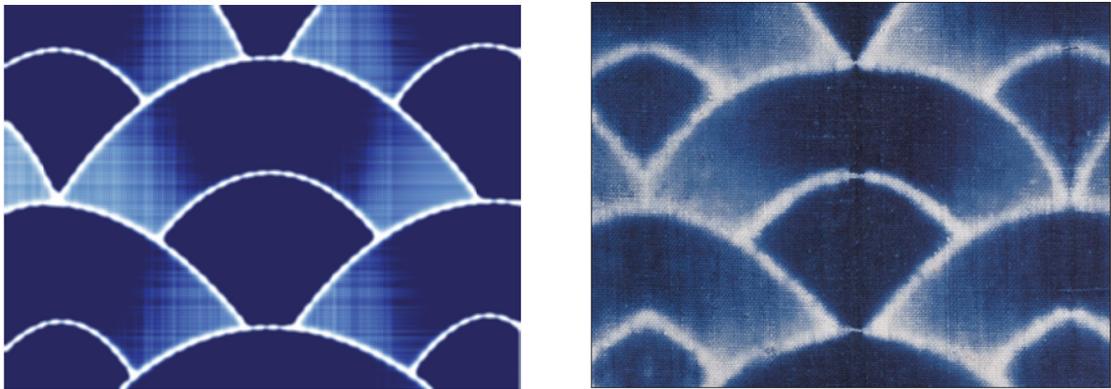
- (a) 圧力を加える部分と強さを示す入力画像      (b) (a)を入力としたときの染色モデルの結果画像  
(c) (b)と比較するための実際の防染模様の画像

**青海波模様の実験** 図4-18は圧力による簡単な染色技法のシミュレーションを行うための入力画像である。そして、これらを用いてシミュレーションを行った結果が図4-19の(a)であり、(b)は比較のための実際の染物画像である。この模様は青海波と呼ばれる日本の伝統的模様である。拡散シミュレーションの中で糸毎に拡散係数を変化させることによって、すじの特徴がよく表れている。また、染料の浸透現象はよく再現できていると言える。ただし、染料の量が飽和量に近い部分を見るとすじやまだらなどが見られず、均一に染まっている。これは、染料飽和部分では拡散係数の微妙な違いが表れにくいからである。図4-20は実際の青海波模様の作り方である。これは布を折り畳んだ後に模様を縫い、染料につけるといものだが、最終的には図中(c)の赤線で示したところに染料が与えられる。図4-18(a)における染料の配置が線状になっているのは、これを2次的に表すためである。また、図4-18の(b)も同じく図4-20(c)の青色部分を表している。点線で表されているのは波縫いで縫われているためである。このように、本モデルでは実際の3次元的な布の扱いを2次元の入力に直さなければならない。この解決のためには3次元的な布の扱いをシミュレートするシステムを作ることが考えられる。



(a) 赤は染料を与える部分 (b) 布を圧迫する部分 (c) 染料と圧力の分布を示したもの

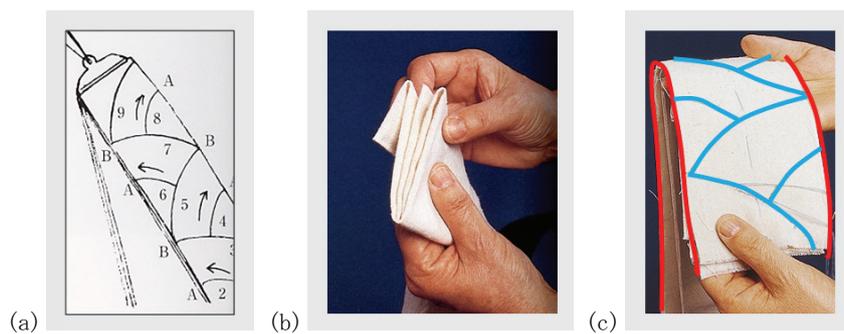
図4-18 圧力による簡単な染色技法のシミュレーションの入力画像



(a) 図4-17を用いて生成した結果画像

(b) 実際の青海波模様の染物

図4-19 圧力による簡単な染色技法のシミュレーション結果画像と比較



(a)

(b)

(c)

図4-20 実際の青海波模様の作り方

(a) 青海波模様の作り方

(b) 実際の青海波模様作成過程で布を折り畳んでいるところ

(c) (b)で折り畳んだ布を(a)に従って縫ったもの

(青色の線は縫っている箇所、赤色の線は実際に染料が与えられる部分)