

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 :

第五章

physics ベースによる染色モデルのパラメータ化

本章の概要

本章では第四章で述べた physics ベースによる染色モデルに染色理論に加えて、パラメータ化した染料や布の要素を考慮し、発展させたモデルを提案する。

5. 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。

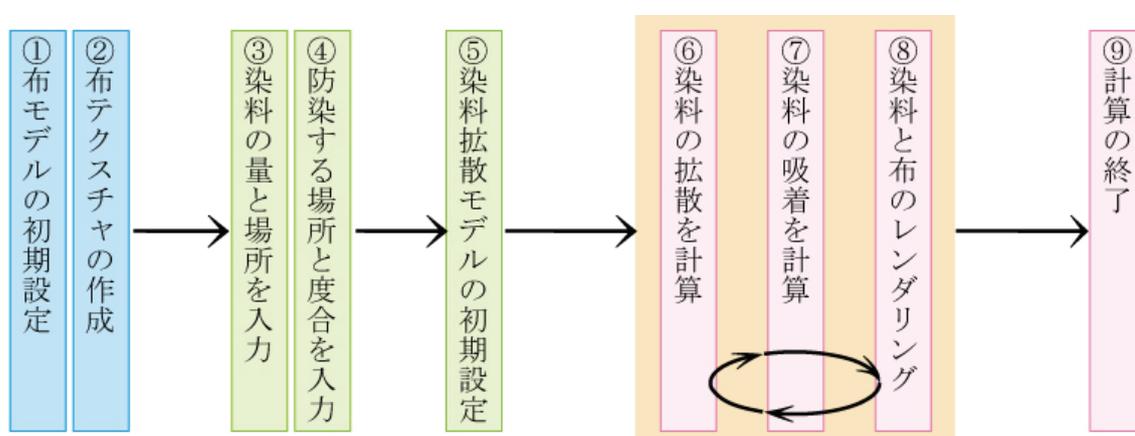


図5-1 染色理論を用いてパラメータ化したphysicsベースのモデルの流れ

- ①では布モデルに関する初期設定を行う。表5-1に布モデルの要素を示す。前章までの内容に“隙間”の要素が加えられている(5.2)。
- ②では布テクスチャを作成する(5.6)。
- ③では与える染料の量と場所を設定する(3.5.2と同様)。
- ④では防染する場所とその度合いを入力する(5.5)。
- ⑤ではdiffusion cellの初期設定などを行う。初期設定する要素は表5-2に示す。
- ⑥では染料の拡散を計算する(5.3)。
- ⑦では染料の吸着を計算する(5.4及び5.5)。
- ⑧では染料と布のレンダリングを行う(5.6)。⑥⑦⑧の一連の処理は繰り返し行う。
- ⑨では⑥⑦⑧を繰り返した後、これらの計算を任意のタイムステップで終了する(3.1)。

表5-1 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
縦糸間の隙間の幅	Pixel単位で設定
横糸間の隙間の幅	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5-2 拡散に必要な要素

項目	変数	単位	説明
染料の濃度	φ	割合	実際保有している染料の濃度
位置	i, j, k		縦糸、横糸層内での位置 ($k=e$ のとき横糸層、 $k=a$ のとき縦糸層)
拡散係数	D	mm ² /h	染料の拡散しやすさ
水中拡散係数	D_o	mm ² /h	水中での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
繊維内空隙の体積率	B	割合	V_u の値を決めるために画像などで与える値
屈曲度	T	割合	繊維中の拡散経路のねじれの度合い
多孔度	P	割合	繊維中の空隙率
最終的な飽和量	V	割合	保有できる染料量の限界値 (算出した値)
拡散飽和量	V_u	割合	保有できる拡散中の染料濃度の限界値
吸着飽和量	V_d	割合	保有できる吸着濃度の限界値
飽和量	V_{max}	割合(100%)	保有できる染料量の限界値 (理論値)
時間	t		
位置	x, y, z		3次元空間での位置
時間の離散間隔	Δt	H	1タイムステップに経過する時間
空間の離散間隔	Δd	Mm	隣のdiffusion cellまでの距離
吸着の限界値	A_d	割合	吸着等温モデルによる染着量の限界値
染料の分子数	M	g/mol	染料の種類によって異なる分子数
平衡状態の染料の濃度	φ_0	割合	染料の吸着と脱着が平衡状態であるときの染料濃度

5. 2 布の織構造モデル

布の織構造モデルは4. 2に記したモデルに隙間の要素を加えたものである(図5-2)。縦糸・横糸の幅に加えて、隙間の幅を設定し、糸と糸の間に隙間を作る。diffusion cell は縦糸・横糸・隙間のどれかの性質を持ち、隙間の部分には布テクスチャはマッピングされない。また、これらの性質によって diffusion cell の持つ繊維の密度なども異なり、染料拡散の計算にも影響を与える。

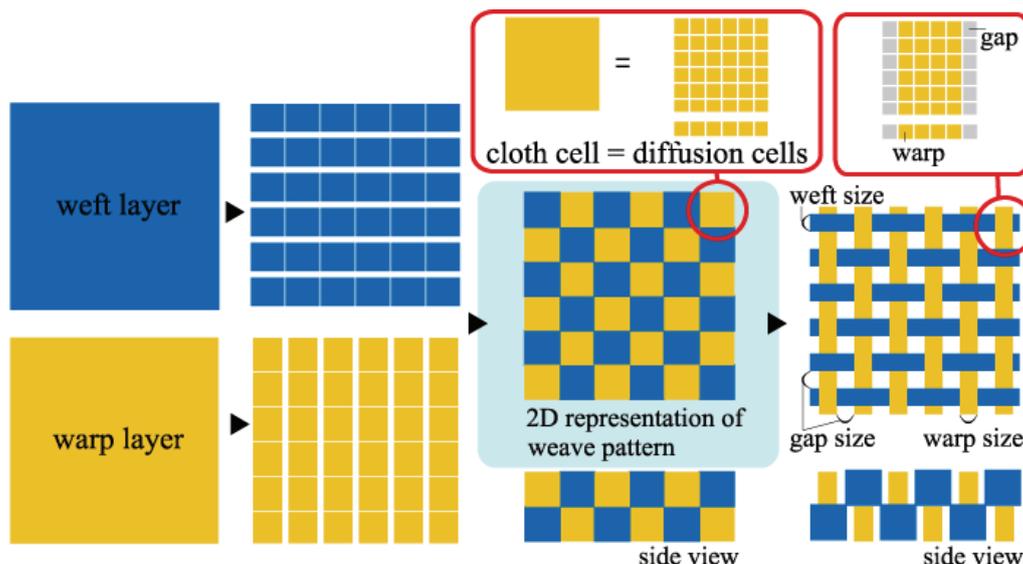


図5-2 隙間を加えた布の構造モデル

5. 3 拡散

5. 3. 1 染料の拡散

本モデルの染料拡散の定義と特徴は4. 3. 1と同じである。

本節では第四章で提案した拡散式よりも更に数学的に安定した差分式を提案する。染料の拡散はFickの第二法則を用いて定義する。Fickの法則[12]は式5-1で表される。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (5-1)$$

これは3次元の拡散方程式である。 φ は物質の濃度、 t は時間、 x, y, z は3次元空間での位置、 D は拡散係数を表す。本研究では式5-1を式5-2のように離散化する(式5-2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)。

$$\varphi_{i,j,e}^{t+1} = \varphi_{i,j,e}^t + \frac{\Delta t}{\Delta d} \left\{ D_{i+\frac{1}{2},j,e}^t \frac{\varphi_{i+1,j,e}^t - \varphi_{i,j,e}^t}{\Delta d} - D_{i-\frac{1}{2},j,e}^t \frac{\varphi_{i,j,e}^t - \varphi_{i-1,j,e}^t}{\Delta d} + D_{i,j+\frac{1}{2},e}^t \frac{\varphi_{i,j+1,e}^t - \varphi_{i,j,e}^t}{\Delta d} - D_{i,j-\frac{1}{2},e}^t \frac{\varphi_{i,j,e}^t - \varphi_{i,j-1,e}^t}{\Delta d} + D_{i,j,e+a}^t \frac{\varphi_{i,j,a}^t - \varphi_{i,j,e}^t}{\Delta d} - 0 \right\} \quad (5-2)$$

このとき $\varphi_{i,j,k}^t$ は時間 t のときの位置 i, j, k における濃度である。 D はセルとセルの間で定義されるため、 $D_{i+1/2,j,e}$ などと表す。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5-3)。拡散方程式を式5-2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を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。またこの式では理論的に質量が保存される。

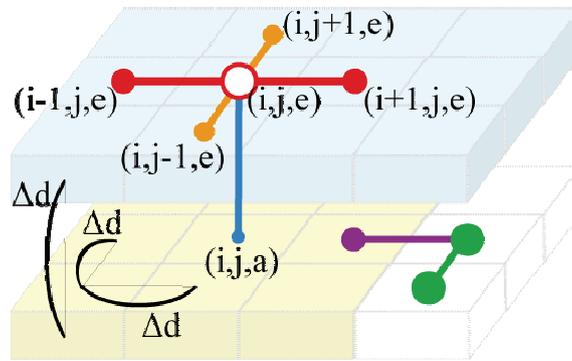


図5-3 染料拡散の計算空間と τ_3 の説明

5. 3. 2 拡散係数の求め方

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)を設定している。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、屈曲度は繊維のねじれを示すものである。屈曲度 T は次に示す式5-3と定義され、拡散係数と同じく diffusion cell 間で定義される。

$$\text{屈曲度 } T = (\text{繊維の通る二点間の直線の長さ} \div \text{実際の長さ}) \quad (5-3)$$

この定義では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三つの要素に分けて考える。一つは糸の縊りによるもの(τ_1)、一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 間の繊維方向の違いによるもの(τ_3)である。それぞれの値は0.0以上1.0以下の任意の値で与えられる。 τ_2 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、かつ、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率の違いによって5つの場合に分けられる。これは図5-3において5つの色分けされた線によって例が示されている。5つの色線は diffusion cell 間の拡散経路が以下のような場合を表している。

青色 (τ_3 I : 異なる層に属する)

橙色 (τ_3 II : 同一層に属し糸と垂直方向に隣接)

紫色 (τ_3 III : 繊維と隙間)

緑色 (τ_3 IV : 隙間と隙間)

赤色 (τ_3 V : 同一層に属し糸方向に隣接)

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ので、最終的な屈曲度 T はすべての diffusion cell において

$$T = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \quad (5-4)$$

として求める。拡散係数は Weisz-Zollinger モデル[37]を参考にし、式5-3の定義に従って定式化したものが次に示す式5-5である。

$$D = D_0 P T \left(\frac{\varphi_0}{\varphi} \right) \quad (5-5)$$

このとき、 φ_0 は平衡状態の染料の量である。多孔度は0.0~1.0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。 D_0 の値は式5-6[38]を用いて理論的に求めることができる。

$$D_0 = 3.6 \sqrt{\frac{76}{M}} \quad (5-6)$$

このとき M は染料の分子数である。染色の特徴の一つであるすじ(2.4を参照)は拡散係数のばらつきによる染めむらによって起こる。そこで拡散モデルでは縦糸と横糸の多孔度・屈曲度の値を任意の範囲の乱数として設定し、糸毎に起こるすじを表現している。

5.4 吸着

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線によって染料濃度から吸着量を計算し、吸着量の限界量 Ad をタイムステップ毎に計算する。本研究の実験では、以下の代表的な三つの吸着等温線[40]を用いた染料拡散結果の比較を行っている。

分配則 : 式 5-7、図 5-4 (a'')

フロインドリッヒ : 式 5-8、図 5-4 (b'')

ラングミュア : 式 5-9、図 5-4 (c'')

吸着量は任意の吸着係数 D_{ab} を与え、拡散と同様に式 5-2 に従って求める。吸着した染料は容易に脱着しないことから[8]、吸着量が V_d, A_d を超えない限りは吸着のみが起こる一方のプロセスとして計算する。式 5-9 の K_L は平衡定数であり、この場合、染料平衡時の染料と水の存在比を表す。

$$A_d = k\varphi \quad (5-7)$$

$$A_d = k\varphi^b \quad (5-8)$$

$$A_d = \frac{V_d K_L \varphi}{1 + K_L \varphi} \quad (5-9)$$

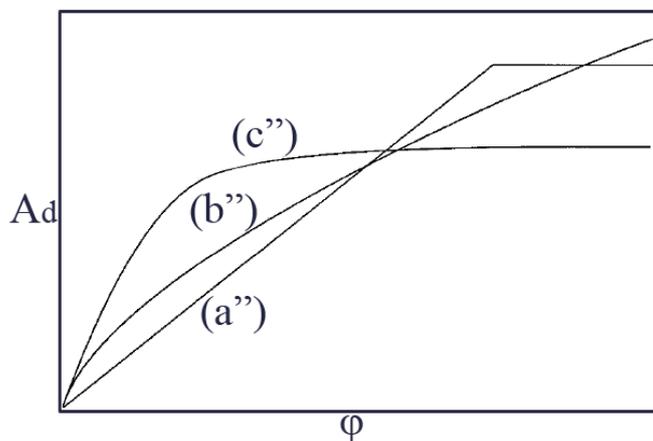


図 5-4 吸着モデル

5. 5 拡散と吸着の制限

第四章のモデルではまだらやすじを表現するために、拡散係数の値を操作する。しかし、その方法では染料が飽和した diffusion cell でのすじやまだらの表現が難しい。そこで、本モデルではまだらやすじ、そして防染などを表現する仕組みを各 diffusion cell での拡散量を制限するものとして統合して記述する。防染を表現する場合、その制限の度合いと制限する場所を任意に指定できれば実際の防染のように自由に染色模様を表現することができ、まだらやすじは多孔度の操作によって表現することができる。また、染色化学の平衡論を取り入れ、吸着量を制限する。

繊維に吸着できる限界量を V_d として多孔度による繊維の割合から式 5-10 のように定める。

$$V_d = (1 - P)V_{max} \quad (5 - 10)$$

このとき V_{max} は diffusion cell に保有できる染料の量の最大値である。吸着速度は一方通行の拡散としてみなして 1 タイムステップの吸着量を計算し、吸着の限界量 Ad または V_d を超えたときには吸着を行わないものとする。

他に布を圧迫、もしくは糊や蝋で繊維内の空隙を塞いで防染し模様を作るために体積率のパラメータ $B(0 < B < 1)$ がある。その圧力に応じて 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 を用いて式 5 - 11 のように定義される。

$$V_u = V_{max}P(1 - B), \quad V = V_u + V_d \quad (5 - 11)$$

これによって圧迫された部分には染料が入り込まず、防染による染色技法の模様を表現することができる。

これは Curtis らの布の height field を用いた顔料の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している部分が異なる。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、本研究では入力した画像の RGB の平均値を正規化し、0.0~1.0 の値にしたものを体積率 B として用いることによって任意の模様を作成する。

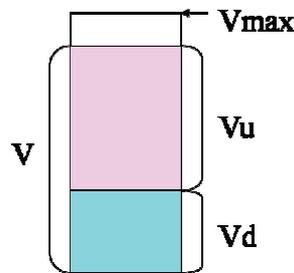


図 5 - 5 1つの diffusion cell での拡散と吸着の配分

5. 6 染料と布のレンダリング

染料拡散モデルによって計算された染料の濃度を用いて各 diffusion cell の基本色を決定する方法は 4. 4. 1 と同様である。

布のレンダリング方法は Abadara らの手法[23]を用いる。この手法は arcsin 関数を使った図形を並べることによって 2 次元的に一本一本の糸のテクスチャを表現し、その糸のテクスチャを布の織構造に従ってマッピングすることによって布を表現するものである。こ

の手法では、それぞれの糸を形成する繊維の幅やそれらの繊維が縞られている強さ、そしてノイズの度合いなどによって様々な糸テクスチャを作ることができる。

本研究ではこの手法を用いて糸のテクスチャを作成し、cloth cell に基づいてそれらをマッピングすることによって布のテクスチャを作る。最終的に染料の色と布テクスチャの値を乗算することによってレンダリングを行う。また、布の色が明るいほど光の反射率が高く、陰影がつぶれるので染料による色の明るさに応じてテクスチャの明るさを変化させる。

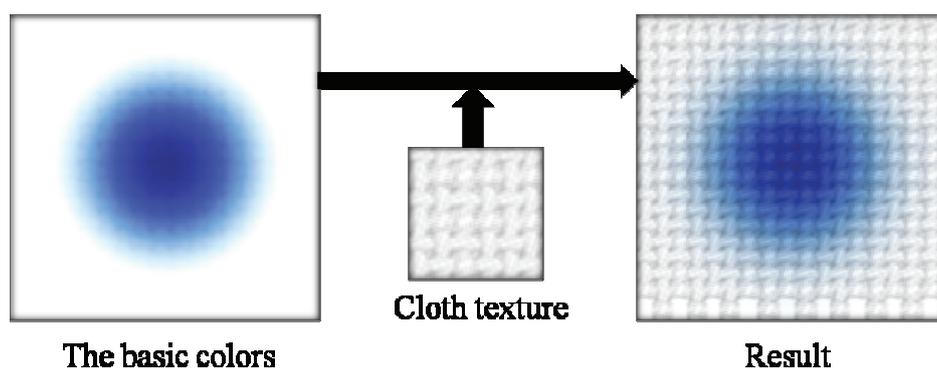


図 5-6 染料と布の可視化

5. 7 結果と考察

本モデルを用いた染色風画像についての実験と考察を述べる。この節で示す図 5-7 から 5-11 のパラメータ値は表 5-3 及び表 5-4 に示す。

5. 7. 1 染色の特徴表現

パラメータの変化による実験 図 5-7 では多孔度・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から特徴的なものをあげている。図 5-7 (a) は布の織構造などの影響がほとんどない値の設定でシミュレーションした結果であり、他の結果画像との比較のために示す。図 5-7 (b) は吸着率を大きくした場合の結果である。(a) と比べて染料の拡散が中心部分に留まっている。図 5-7 (c) では繊維内及び、糸と隙間の染料移動を起りにくい設定にしているために糸と糸の間の隙間だけで拡散が起り、現実にはあまり見られない結果となっている。図 5-7 (d) や (f) のようなまだらは布を二層モデルにした上で、屈曲度 α によって二層間の拡散を起りにくくしたときに現れる。よって、まだらの特徴を表現するためには布の二層構造による染色の表

現が有効であるといえる。図5-7(e)では糸毎に屈曲度 τ をランダムに設定して拡散を行っているが、ほとんどその影響は見られない。しかし、同じように糸毎に多孔度 P をランダムに設定した(f)では結果画像に比較的大きな影響があることがわかる。多孔度は体積率を操作するパラメータとなっており、diffusion cell の染料保有量を変化させるものである。このことから屈曲度によって拡散係数を操作するよりも多孔度によって体積率を操作した方が見た目への影響が大きいことがわかる。図5-7(g)は(f)と同じパラメータ設定で糸の大きさだけ小さくしてある。(g)ではすじの特徴が観察できる。つまり、多孔度の操作によってすじを表現しやすくなることがわかる。

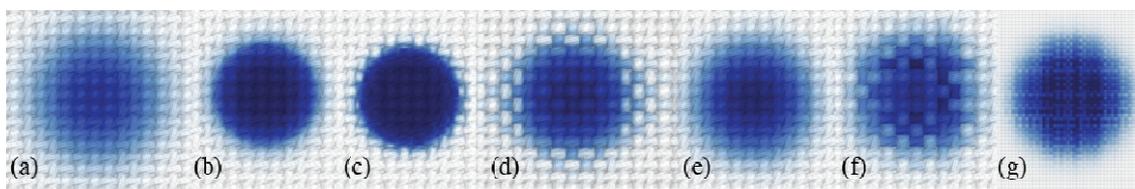


図5-7 屈曲度・多孔度・吸着係数による染色の変化

織布の種類による実験結果 図5-8は織り布の種類を変えて、図5-7(c)のような小さな τP の値を用いてシミュレートした結果である。織り布構造を変えると視覚的な違いが明確に表れる。よって布の織構造を考慮することは染色のビジュアルシミュレーションにおいて重要な要素であると言える。

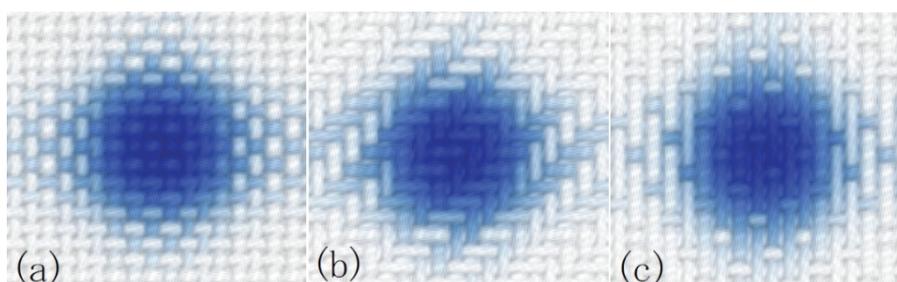


図5-8 種類の異なる織構造への染料拡散の違い

吸着モデルの違いによる実験結果 図5-9(a)では吸着量を分配則、(b)ではフロインドリッヒ型、(c)ではラングミュア型の吸着等温線に従って計算を行った。これらの比較により吸着等温線の理論によって拡散結果に違いが起こることがわかる。フロインドリッヒモデルでは広範囲にわたって染料の拡散と吸収が起こっている。ラングミュアでは染料濃度が低いうちの吸着率が高いため、初期の染料分布部分付近に拡散が留まっている。(a') (b') (c') は(a) (b) (c)の吸着した染料の量のみを表している。

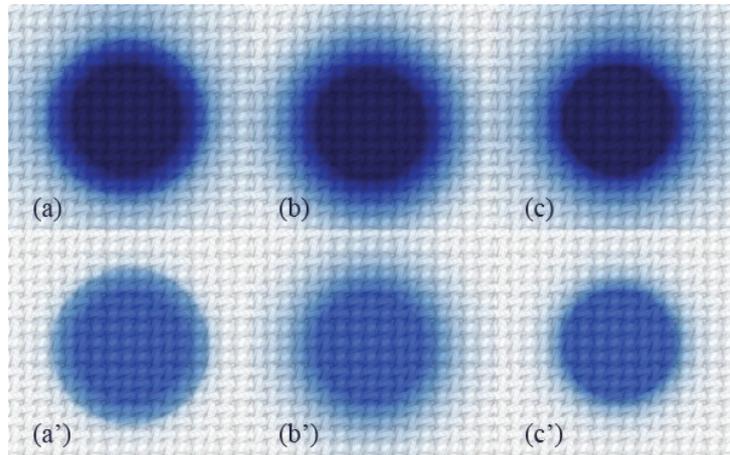


図5-9 吸着モデルによる染色シミュレーションの結果の比較

5. 7. 2 染色技法の表現

ここでは4. 5. 2と同様に絞り染め技法による青海波模様をシミュレーションしている。体積率を画像で入力することにより防染模様を表現する。結果画像を拡大して見ると(図5-10)染料の量が飽和している部分でもすじの特徴が表現できており、第四章の課題が一つ解決されている。図5-11はシミュレーションの結果を時間ステップ t に沿って示したものである。

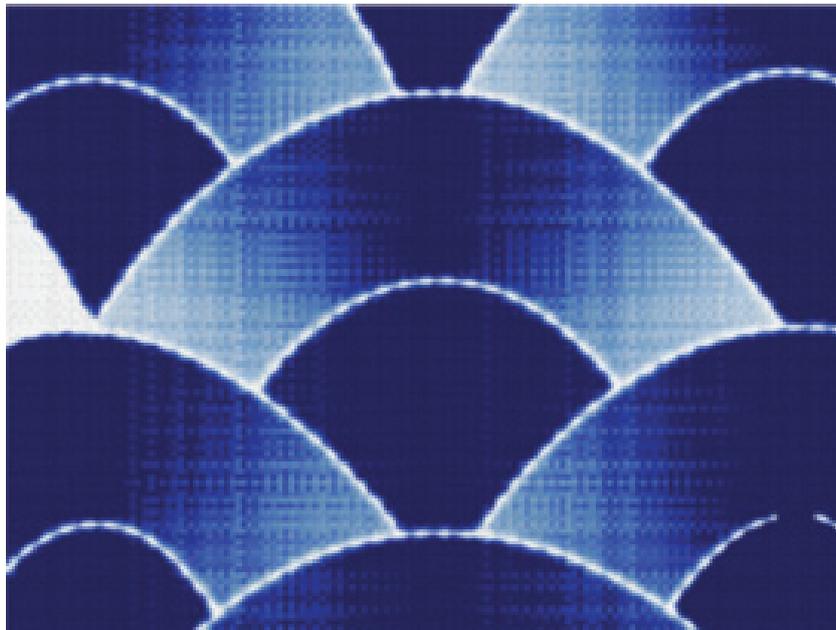


図5-10 圧力による簡単な染色技法のシミュレーション結果画像の拡大図。

(図5-11中の $t=400000$ の結果画像の拡大図)

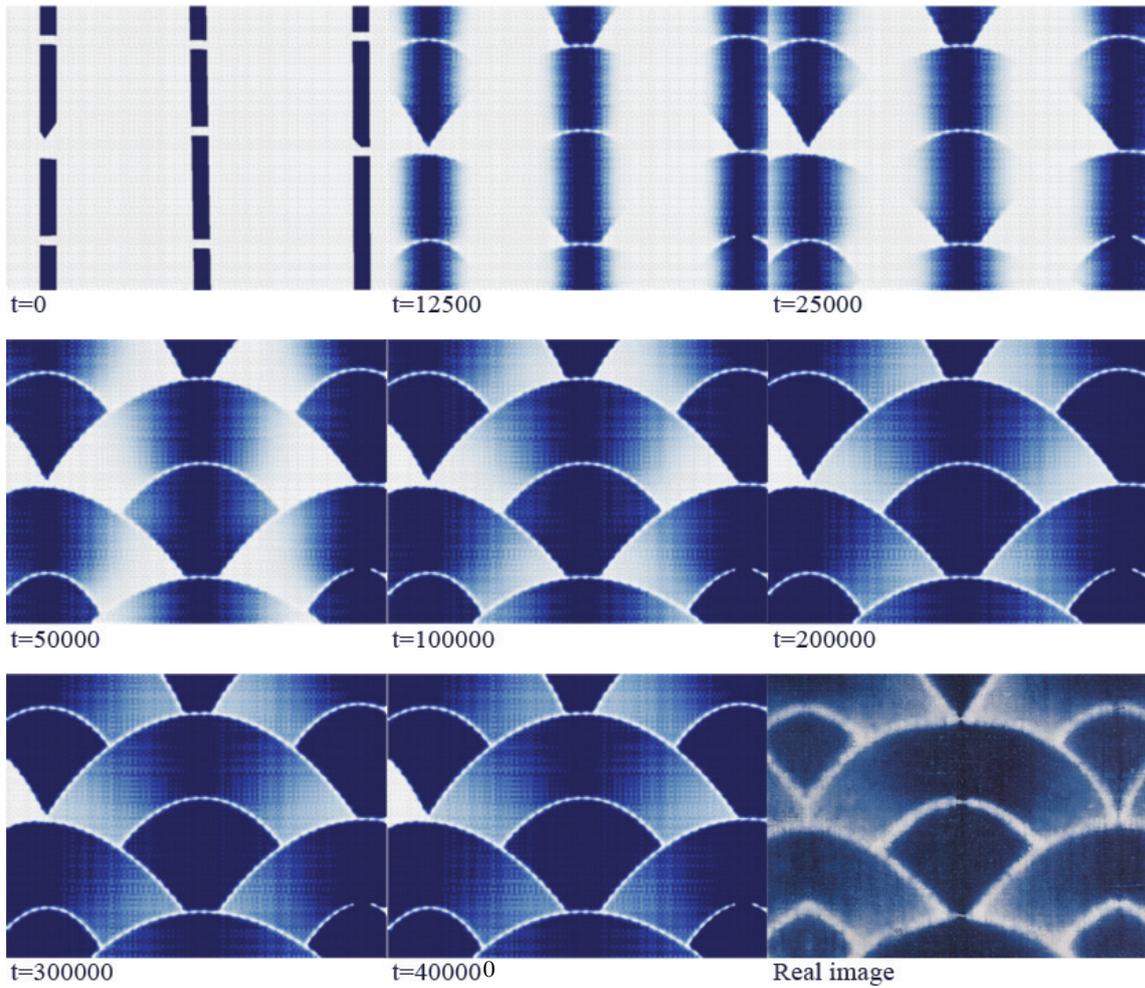


図5-11 圧力による簡単な染色技法のシミュレーション結果画像
 (画像の下の t はタイムステップ数、Real image は比較のための実際の染物画像。)

表 5-3 図 5-7 から 5-11 で用いたパラメータ (共通の要素)

共通の要素	値	
糸の幅	8 (pixels)	※1
隙間の幅	2 (pixels)	※2
D_0	1.93 (mm ² /h)	
Δt	0.0005 (h)	
Δd	0.05 (mm)	
τ_2	0.47 (割合)	
$\tau_3 IV$	1.0 (割合)	
染料の分布	半径 30 pixels の円状	
与える染料の初期量	1.0V	※3
計算空間内の diffusion cell の数	200*200*2	※4

※1: 図 5-7 (g) では糸の幅は 2 pixels。

※2: 図 5-7 (g) では隙間の幅は 1 pixels。

※3: 図 5-9、図 5-10、図 5-11 ではその後も 1 タイムステップ毎に染料の初期量を与える。

※4: 図 5-10、図 5-11 では 400*300*2 の diffusion cell を用いて計算している。

表 5-4 図 5-7 から 5-11 で用いたパラメータ (図毎に値が異なる要素)

図	$\tau_3 I$	$\tau_3 II$	$\tau_3 III$	$\tau_3 V$	τ_1	P	a	吸着	織構造
5-7(a)	1	1	1	1	1	0.5	0	分配	平織り
5-7(b)	1	1	1	1	1		0.01D ₀		
5-7(c)	0	0.05	1	0	1		0		
5-7(d)	0.005	0.005	0.005	1	1		0		
5-7(e)	1	1	0	1	0.5r		0		
5-7(f)	1	1	0	1	1		0		
5-7(g)	1	1	0	1	1		0		
5-8(a)	1	1	1	1	1	0.5	0.01D ₀	分配	平織り
5-8(b)									綾織り
5-8(c)									朱子織
5-9(a)	1	1	1	1	1	0.5	0.01D ₀	分配	平織り
5-9(b)									フロ
5-9(c)									ラン
5-10	1	1	0	1	1	0.5r	0	分配	平織り
5-11									

[補足]表中の分配は分配則、フロはフロインドリッヒ、ランはラングミュアの吸着モデルを指す。綾織りは三つ綾、朱子織は朱子織りの五枚朱子である。r は 0.5~1.0 の間のランダムな値で、糸毎に異なる。