

2005年度 卒業論文

水分の吸収を考慮した  
布のシミュレーション

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 3DCG コンポーネントプロジェクト

学籍番号 M0102424

若尾 洋平

2005年度 卒業論文概要

論文題目

水分の吸収を考慮した  
布のシミュレーション

メディア学部

学籍番号：M0102424

氏名

若尾 洋平

指導  
教員

渡辺 大地講師

キーワード

クロスシミュレーション、スプリングモデル、繊維、液体浸透

近年のコンピュータ技術の発達によって、様々なコンテンツにおいてコンピュータグラフィック（CG）による表現を目にする機会が多くなってきた。CG化において複雑な形状、動きをするものをシミュレーションによって求める研究が盛んに行われている。その中でも布のシミュレーション（クロスシミュレーション）はアパレル産業への利用や、映画やゲーム等映像表現の魅力向上においてもきわめて重要な分野である。既存の研究では、繊維の変形の性質に着目し、伸びや曲げを表現することや自然なしわを表現することなど様々な布の性質を表現する研究がなされてきた。布の重要な性質として水分を吸収することが挙げられるが、既存の研究ではこの点は考慮されていない。本研究では水分の吸収を考慮した布の動きをシミュレーションする。本論では、布が水に浮いている状態から、吸水によって徐々に沈む様子の表現を目的とする。本論の手法では布をスプリングモデルによって表現し、粒子に体積、面積、質量を設定し、浮力と水の抵抗を計算した。水中にある粒子は吸水によって時間経過ごとに質量を増加するものとし、質量の増加量は繊維の液体浸透の理論を用いて計算した。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	論文構成	2
第2章	水分吸収	3
2.1	布の水分吸収	3
2.2	吸水のメカニズム	3
2.3	水中で布に働く作用	5
2.3.1	重力	5
2.3.2	浮力	5
2.3.3	抵抗	6
第3章	吸水する布のモデル化	7
3.1	布のモデル	7
3.2	空気中での作用	9
3.3	水中での作用	10
第4章	動作検証	12
第5章	まとめ	19
	謝辞	20
	参考文献	21

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 はじめに

近年のコンピュータ技術の発達によって、様々なコンテンツにおいてコンピュータグラフィック（CG）による表現の需要が増えてきている。現実では困難である大規模な自然現象や建造物の爆破をCGで代用したり、架空のキャラクターを作成して作品に魅力を持たせる等、主に映画やゲームで利用されている。

そんな中で注目されているもののひとつに、衣服に代表される布のCG化がある。常に変形を生じる複雑な布の形状をひとつひとつ入力してCG化するのは極めて困難である。そこで、布のモデルを作成し、シミュレーションによってその形状を求めるという方法が提案された。布のシミュレーション（クロスシミュレーション）は映画 [1]、ゲーム [2] 等の映像表現に利用される他に、バーチャルファッションショーや衣服の形状の予測等、服飾業界での利用 [3][4] も期待されている。

既存の研究として、布の幾何学的な性質に着目してしわを表現する方法 [5] や、力学的な性質に着目して、曲げ、伸びを表現する研究 [6] 等がなされてきた。また、これらのモデルを併合して利用する研究もなされている [7]。

現在の布シミュレーションにおいて布の性質として水分を吸収するということは考慮していないが吸水は布の重要な性質のひとつである。例えば布を水面に落としたとき、素材や加工にもよるが布はしばらく浮いている。そして吸水が進む

につれて徐々に沈んでいく。現実の事象として、衣服を着たまま水に落ちる、衣服が雨に濡れる、布で何かを拭き取る等、布が吸水する状況は日常的にあり、吸水を考慮することにより、CG化における布の水に対する動きの表現の向上が期待できる。

そこで、本研究では水分を吸収する布の動きのシミュレーションを提案する。本論においてはその中でも水に浮いている状態から吸水することによって徐々に沈んでいく様子の表現を目的とする。素材としては、一般的に衣服にも使われている綿繊維を想定した。繊維の液体浸透の理論を参考にし、水と接触している時間で布の質量を変化させ、浮力と水の抵抗を考慮し計算を行った。以上の手法をもって布の動きのシミュレーションを行い、実際に布が水に沈む様子と比較し手法の有効性を検証した。

## 1.2 論文構成

本論文では、第二章で繊維の水分吸収の理論と布が水中で受ける力を述べる。第三章で具体的に布が受ける力や吸水をモデル化する。、第四章では本論での手法を用いた場合と用いなかった場合のシミュレーションを実際の布動きと比較する。第五章で結果と今後の展望について述べる。

# 第 2 章

## 水分吸収

本章では繊維の水分吸収の理論と、布が水中で受ける力について述べる。

### 2.1 布の水分吸収

布の水分を吸収する反応として吸水と吸湿がある [8]。

繊維を空気中に放置すると、親水性官能基が水分子を引き付ける場となり、繊維と空気との界面の水分の濃度が大気中の水分の濃度より高くなる。この現象を吸着という。次に吸着された水分子は、繊維内部まで侵入し繊維に溶け込んだ状態になる、これを吸収と呼ぶ。この 2 つの機構を纏めて吸湿と呼び、水分含有率で表している。

布を水に浸したときに水分が内部に収着するとともに、繊維間空間を占める空気が水に置換される。これが吸水である。吸水性は吸湿性と異なり、繊維の集合状態により大きく左右される。繊維の種類、糸の撚り、布の構造、仕上げに大きく影響され、吸水量の他に吸水速度でも評価されることも多い。繊維における吸水の性質を吸水性と呼ぶ。

### 2.2 吸水のメカニズム

布は繊維集合体のひとつの形であり、繊維を束ねた糸を径、緯に規則的に並べ、交差させて組織体とした物である [9]。布を構成している最小要素として、繊維の

水分吸収の観点から布の吸水表現を考える。

繊維の液体の吸収に関しては主に紙の分野で古くから多くの研究がなされている。液体の吸収を理論的に扱うのは難しく、様々な手法が提唱されている。具体的な液体の浸透の理論やその推移については江前敏晴等の解説 [10] を参照した。以下その詳細について述べる。

水の吸収のメカニズムとして次の4つが働いていることが提唱されている。

1. 空孔内での蒸気の拡散輸送
2. 空孔内での液体の毛管輸送
3. 空孔内での表面拡散
4. 繊維内部での液体の移動

管状の物体の内部に液体があるとき、壁面とのかねあいでは液面は水平ではなく傾きを持っている場合がある。液体は表面張力によって縮まろうとするので、壁面付近の液体が縮まる力によって結果的に液面が移動する。この現象は毛細管現象、毛管現象と呼ばれ、2はこの現象による液体の輸送を表している。

1の蒸気の拡散や3の表面から水蒸気が拡散する速度は一般に Fick の法則として知られている。これは、たとえば水蒸気が乾燥空气中を拡散していく速度は水蒸気の濃度勾配に比例するという法則である。綿繊維などへの水の吸収ではこれらの拡散によって浸透が進むもので古くからブルス (Buras) の式が適用されている。

$$\frac{q}{Q} = 1 - \exp\left(\frac{-I}{Q}t\right) \quad \text{or} \quad -\ln\left(1 - \frac{q}{Q}\right) = \frac{I}{Q}t \quad (2.1)$$

ここで、 $q$  は時間  $t$  における吸水量、 $Q$  は平衡状態での吸水量、 $I$  は初期の吸水速度である。この式は Fick の法則から導かれたものであり、高吸水性タオル等はこの式に従うことがわかっている。本研究で扱う布は綿繊維のタオルを想定しているので、この Bras の式に従って吸水が進むものとする。

## 2.3 水中で布に働く作用

### 2.3.1 重力

地球上の物体には全て重力がかかる。物体の質量を  $m$ , 重力加速度を  $g$  とすると重力の大きさ  $f_g$  は

$$f_g = mg \quad (2.2)$$

となる。

### 2.3.2 浮力

重力場に置かれた水中にある物体はその表面に深さに応じた圧力を受ける。圧力は物体の表面に対して垂直に働くが、深いところでは大きく浅いところでは小さく働くので、合力は上向きに働く。この力を浮力といい、その作用点を浮心という。浮力の大きさと浮心の位置は、水中の物体の大きさと形による。

仮に長方体の物体が浮力を受けていると考える。物体の上面での流体の圧力を  $p$ 、下面の圧力を  $p_0$ 、高さを  $h$ 、液体の密度を  $\rho$  とすると以下のような関係になる。

$$p = p_0 - \rho gh \quad (2.3)$$

ここで  $g$  は重力加速度である。物体の上下面積を  $S$  とすると上向きに  $S p_0$ 、下向きに  $S p$  の力が働き、合計

$$S(p_0 - p) = \rho ghS \quad (2.4)$$

の上向きの力が働くことになる。ここで、物体の体積  $V = hS$  なので、以下のような式になる。

$$S(p_0 - p) = \rho gV \quad (2.5)$$

つまり、物体に働く浮力はその物体が押しのけた体積と同じ体積の水の質量と等しい。



### 2.3.3 抵抗

水中を移動する物体は様々な要因で抵抗力を受ける。抵抗には大きく分けて、慣性抵抗と粘性抵抗がある。慣性抵抗は水中を移動する物体が高速である場合に支配的であり、粘性抵抗は低速であるときに支配的である。本論では布が水に着水し、徐々に沈む様子を表現するので、粘性抵抗のみを考える。半径  $a$  の粒子が水中に置かれたときに水から受ける抵抗力  $D$  の大きさは以下の式で表される。

$$D = 6\pi a\eta v \quad (2.6)$$

ここで、 $\eta$  は水の粘性率である。

## 第 3 章

# 吸水する布のモデル化

### 3.1 布のモデル

まず、水に沈める布のモデルを考える。Breen ら [11] は布を粒子の接続で表現し、粒子の相互作用で布の力学的特性を表現することを提案した。本論においても粒子の接続により布を表現し、粒子が受ける力から布の動きを計算した。

図 3.1 に示すように粒子を等間隔に格子状に配置し、それぞれを繋ぐことにより布を表現する。

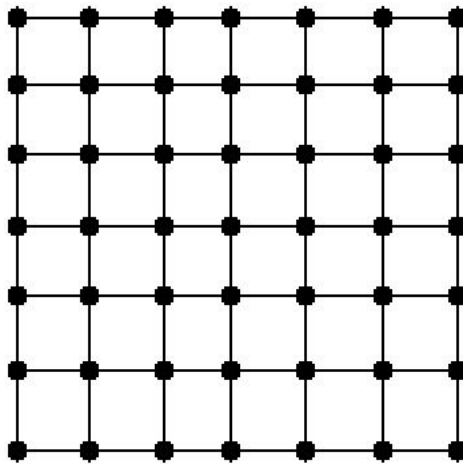


図 3.1: 布の表現

布の力学的特性は非常に複雑であるが、特徴的な点として図 3.2 に示す伸び、剪

断、曲げに対する力を考える。剪断とは、ある物質内の任意の平行面に関して、それぞれの面に反対方向に力を作用させた場合に発生する変形である。

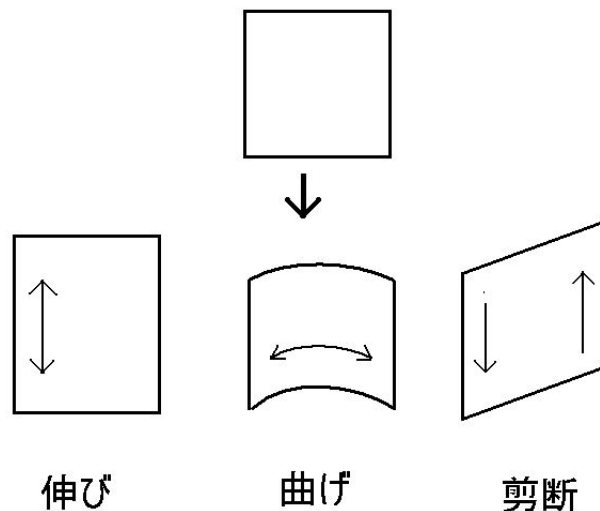


図 3.2: 変形

布の特性として剪断、曲げに対しては許容的であり、伸びにくい。この伸びに対する力を張力とする。本論では、伸びにくいという性質をバネによって近似するスプリングモデルを利用した。既存のクロスシミュレーションの研究でもスプリングモデルはしばしば利用されている [12][6][13]。スプリングモデルで粒子間に働く力としては、バネが元に戻ろうとする張力と粒子間の速度差に比例して働く減衰力（ダンピング）がある。張力のみを粒子間の力とした場合、粒子は振動運動を続け布の動きとしては不自然な物となるので、減衰力を設定する必要がある。布の変形においては伸びに対する力が支配的なことから、単純な旗のような 1 枚の布ならばスプリングモデルのみでもある程度布らしく見せることができる。

図 3.3 に示すように各粒子は隣接する周囲 8 つの粒子と相互作用するものとし、空気中においては重力と粒子間の力を考慮し、水中においては更に浮力と水の抵抗を考慮する。粒子はそれぞれ、質量、速度、体積を持つものとする。それらの合力から次のタイムステップで粒子の座標を決定した。

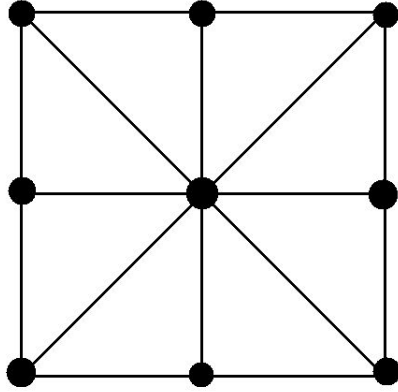


図 3.3: 粒子の接続

## 3.2 空気中での作用

空気中で粒子に働く力について述べる。

バネによる張力は粒子間の距離が自然長よりも長いときのみ働くものとする。隣接する粒子を  $P_{ij}$ 、 $P_{kl}$  とし、位置ベクトルを  $\vec{r}_{ij}$ 、 $\vec{r}_{kl}$ 、粒子間の自然長を  $l$  とするとフックの法則により粒子  $P_{ij}$  に働く張力  $\vec{T}$  は以下の式で表される。

$$\vec{T}_{ij}(k, l) = \begin{cases} k_s (|\vec{r}_{ij} - \vec{r}_{kl}| - l) \frac{\vec{r}_{ij} - \vec{r}_{kl}}{|\vec{r}_{ij} - \vec{r}_{kl}|} & (|\vec{r}_{ij} - \vec{r}_{kl}| > l) \\ 0 & (|\vec{r}_{ij} - \vec{r}_{kl}| \leq l) \end{cases} \quad (3.1)$$

粒子間に働く減衰力について述べる。ダンピング係数を  $k_d$ 、隣接する粒子  $P_{ij}$ 、 $P_{kl}$  の速度ベクトルを  $\vec{v}_{ij}$ 、 $\vec{v}_{kl}$  とすると、粒子  $P_{ij}$  に働くダンピングによる力  $\vec{D}_{ij}(k, l)$  は以下の式で表される。

$$\vec{D}_{ij}(k, l) = -k_d (\vec{v}_{ij} - \vec{v}_{kl}) \quad (3.2)$$

地球上の物体には全て重力がかかる。粒子  $P_{ij}$  の質量を  $m_{ij}$ 、重力加速度のベクトルを  $\vec{g}$  とすると粒子  $P_{ij}$  に働く重力  $\vec{F}_g(i, j)$  は以下の式で表される。

$$\vec{F}_g(i, j) = m_{ij} \vec{g} \quad (3.3)$$

### 3.3 水中での作用

以下本研究における粒子が水中にあるときに働く作用として、浮力と水の抵抗や吸水について述べる。

水中にある物体は浮力を受ける。物体が受ける浮力は物体が押しのかけた体積と同じ体積の水の質量に等しい。ここで粒子  $P_{ij}$  の体積を  $V_{ij}$  とすると水の密度は 1 なので、粒子  $P_{ij}$  に働く浮力は以下の式で表される。

$$\vec{F}_b(i, j) = -M_{ij} \vec{g} \quad (3.4)$$

水中で移動する物体は抵抗力を受ける。抵抗を受ける方向は粒子の速度ベクトルの逆方向とする。粒子の半径を  $r$ 、水の粘度を  $\eta$  とすると、粒子  $P_{ij}$  における抵抗力  $F_r(i, j)$  は以下の式となる。

$$\vec{F}_r(i, j) = 6\pi a\eta v \quad (3.5)$$

以上より時刻、粒子  $P_{ij}$  における合力  $F_{total}$  は以下の式となる。

$$\begin{aligned} \vec{F}_{total} = & \vec{F}_r(i, j) + \vec{F}_b(i, j) + \vec{F}_g(i, j) \\ & + \sum_{k=l-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} (1 - \delta_{ik}\delta_{jl}) \vec{T}_{ij}(k, l) + \sum_{k=l-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} (1 - \delta_{ik}\delta_{jl}) \vec{D}_{ij}(k, l) \end{aligned} \quad (3.6)$$

ここで  $\delta_{mn}$  はクロネッカーのデルタであり、次式で表される。

$$\delta_{mn} = \begin{cases} 1 & (m = n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases} \quad (3.7)$$

時刻  $n$  における粒子  $P_{ij}$  の座標、速度、質量をそれぞれ  $r_{ij}^n$ 、 $v_{ij}^n$ 、 $m_{ij}^n$  とおく。粒子にかかる力を  $F_{ij}^n$  とすると、その座標、速度を次の式によって更新する。

$$\overrightarrow{v_{ij}^{n+1}} = \overrightarrow{v_{ij}^n} + \frac{\overrightarrow{F_{ij}^n}}{m_{ij}^n} t \quad (3.8)$$

$$\overrightarrow{r_{ij}^{n+1}} = \overrightarrow{r_{ij}^n} + \overrightarrow{v_{ij}^n} t \quad (3.9)$$

Bras の式より、水中に存在する時間  $n$  における吸収量  $q$  は以下の式で表される。

$$q = Q \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-I}{Q}n\right) \right\} \quad (3.10)$$

ここで、 $Q$  は平衡状態での吸水量、 $I$  は初期吸水速度である。この値を粒子が吸水した質量として加える。粒子  $P_{ij}$  の時間  $n$  における質量を  $m_{ij}^n$  とすると吸水による質量の増加は以下の式で表される。

$$m_{ij}^{n+1} = m^n + q = m_{ij}^n + \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-I}{Q}n\right) \right\} \quad (3.11)$$

これで 1 タイムステップの計算を終了する。

# 第 4 章

## 動作検証

本研究でのシミュレーションは、2章で述べた手法を3DCGグラフィックツールキットであるFK System[14]を用いて実装を行った。吸水速度の速い布を実際に水に落としたときの動きと、本論の手法を採用した場合と採用しなかった場合の動きを比較する。また、吸水速度の遅い布についても、同様にして比較を行った。各検証の画像は1から順に時間の経過を表している。



図 4.1: 1



図 4.2: 2



図 4.3: 3



図 4.4: 4

画像の1~4の時間として1分程度が経過している。吸水速度が早い布の場合、水面へ着水時に短時間浮いた後、吸水の進んだ部分から落ちていった。また、水面に対して布の面が垂直に近いほど早く落ちていった。



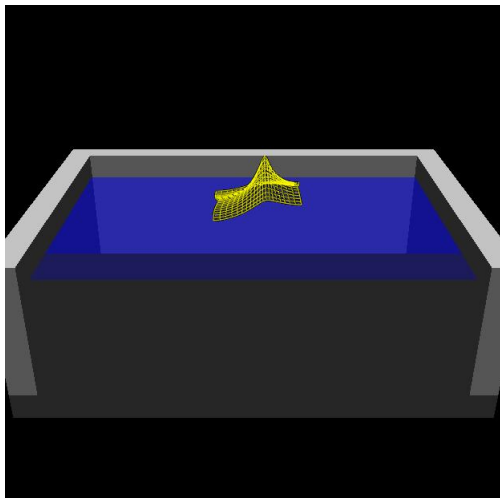


図 4.5: 1

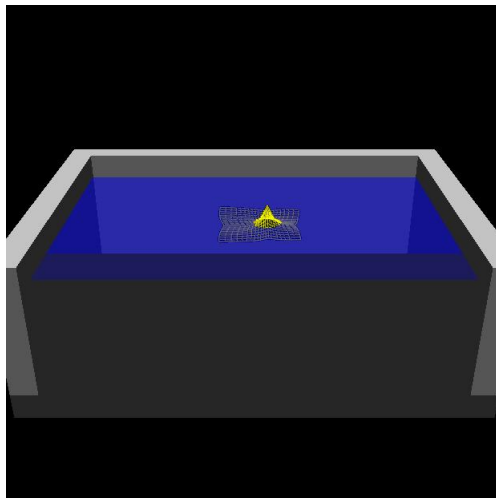


図 4.6: 2

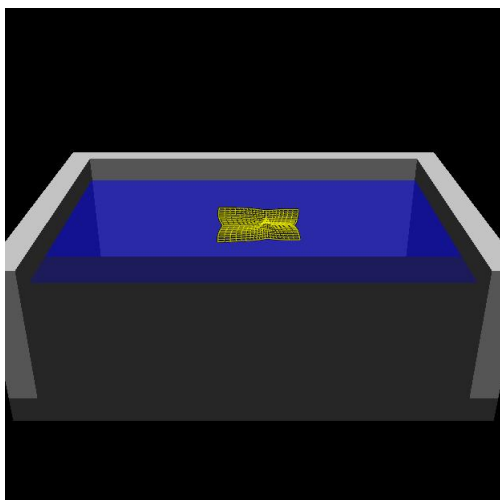


図 4.7: 3

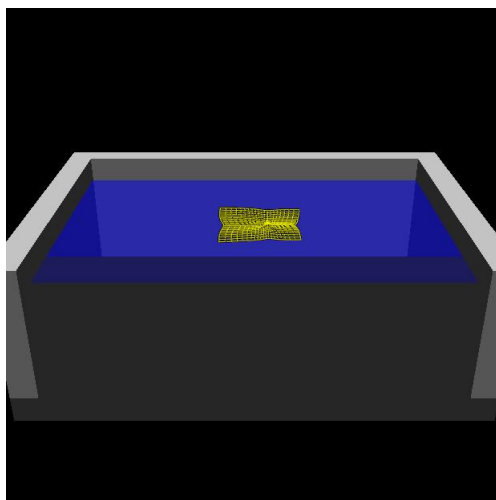


図 4.8: 4

水分の吸収を考慮せず、点を受ける重力 < 点を受ける浮力としてシミュレーションを行った場合、水面で静止し続ける結果となった。実際の布と比較して、不自然な動きであるといえる。

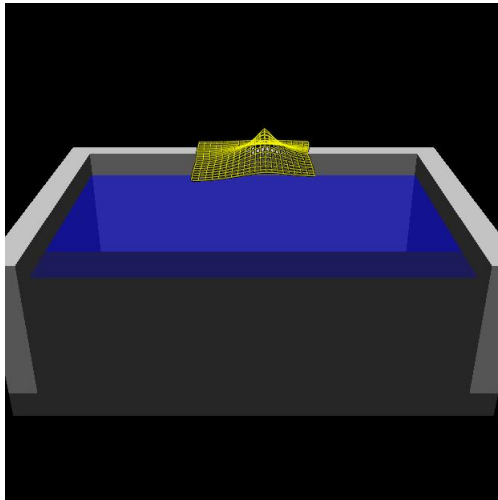


図 4.9: 1

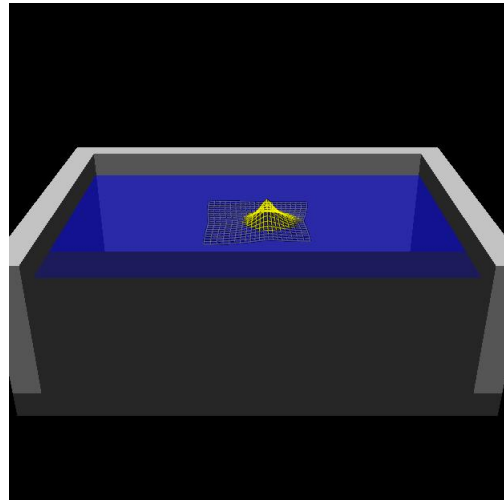


図 4.10: 2

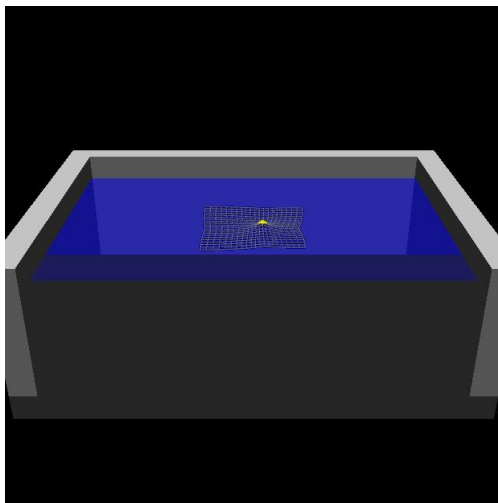


図 4.11: 3

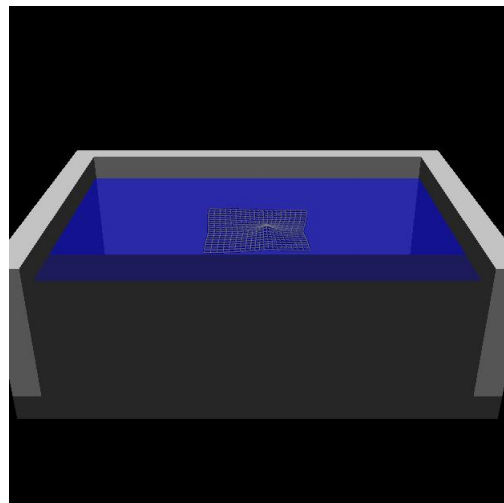


図 4.12: 4

水分の吸収を考慮せず、点が受ける重力  $>$  点が受ける浮力としてシミュレーションを行った場合、水面に着水時に減速し、沈んでいった。実際の布に見られるような水面上に浮かぶ動きは見られなかった。

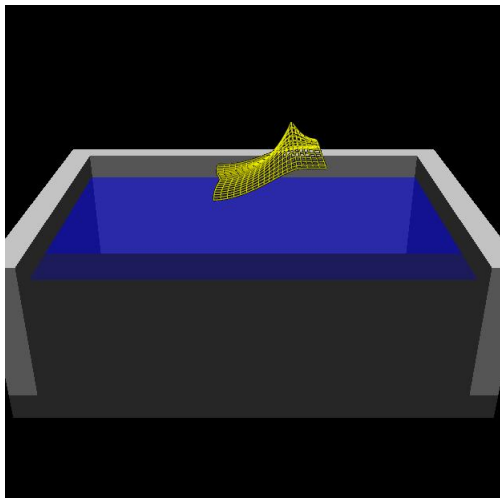


図 4.13: 1

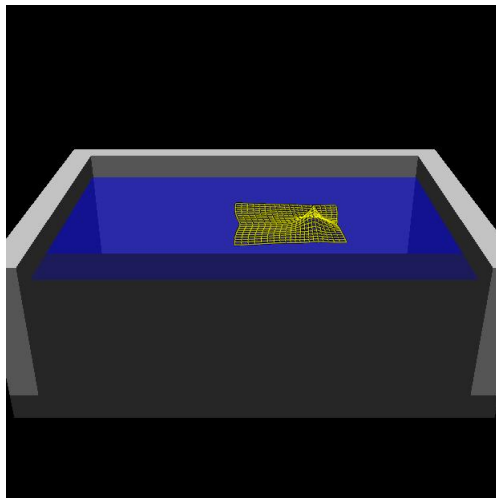


図 4.14: 2

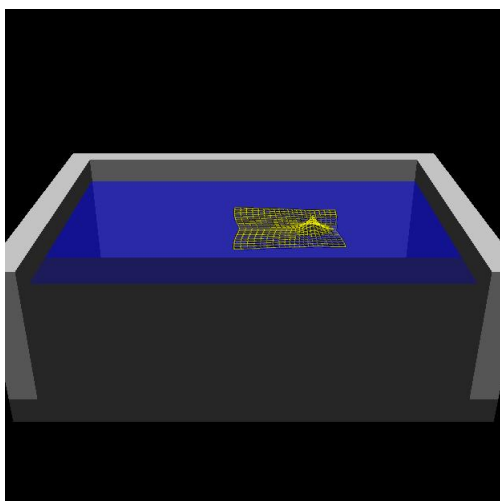


図 4.15: 3

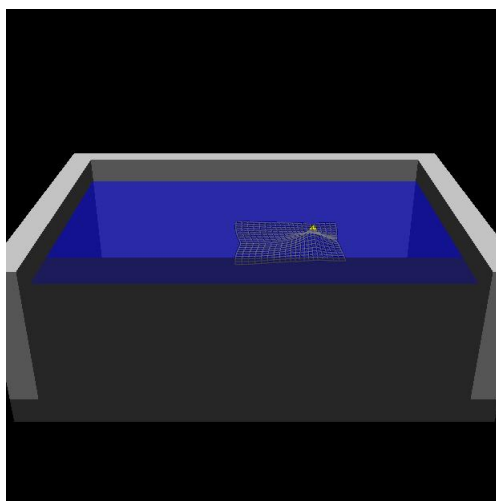


図 4.16: 4

水分の吸収を考慮しシミュレーションを行った場合、実際の布に見られるような水面上に浮かび、吸水した部分から徐々に沈むような動きとなった。この点においては水分の吸収を考慮しない場合に比べ、実際の布に近い動きになった。だが、水面に対して布の角度が垂直に近づくほど早く落ちるような動き等は見られなかった。



図 4.17: 1



図 4.18: 2



図 4.19: 3



図 4.20: 4

吸水が遅い布の場合、水面へ着水後、長時間浮いている状態になった。その後徐々に沈んでいった。画像の1~4の間の時間として、5分以上時間が経過している。

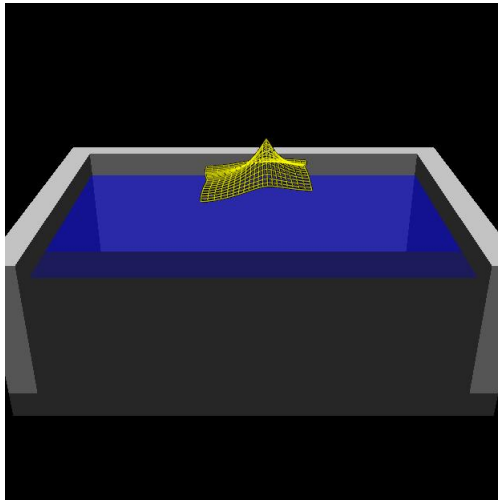


図 4.21: 1

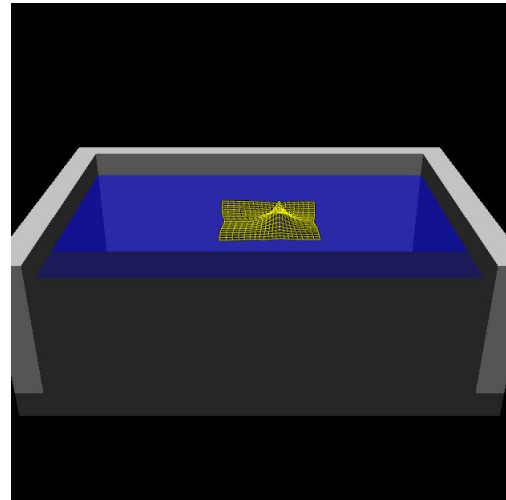


図 4.22: 2

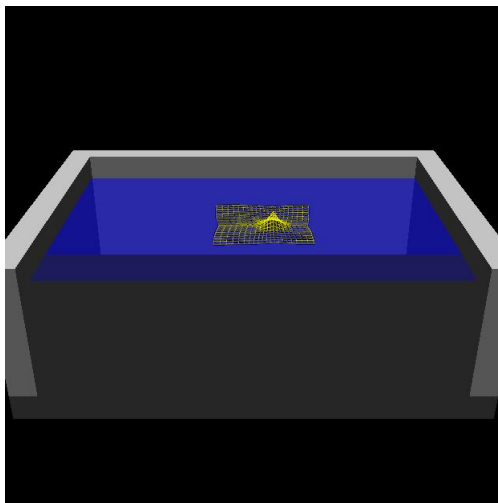


図 4.23: 3

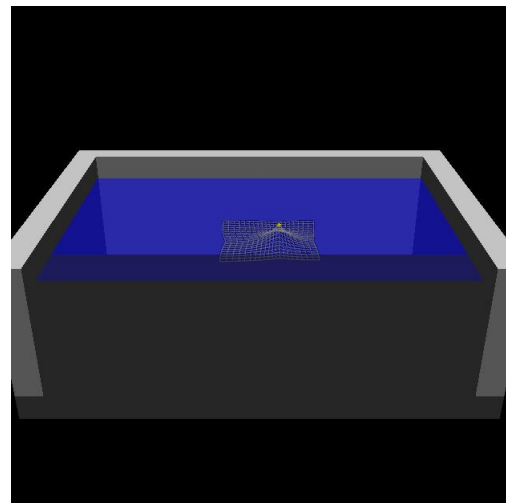


図 4.24: 4

水分の吸収を考慮し、吸水速度を遅くにとってシミュレーションを行った場合、水面上で長時間静止した後、徐々に沈んでいった。水面上に浮いている時間という観点なら実際の布に近い結果といえる。

## 第 5 章

### まとめ

本研究では水分の吸収による布の動きの変化を布のモデルの質量を増加させることにより表現した。既存手法よりも、水面に浮かんでいる状態から徐々に水に沈む布の動きの表現を向上することができた。しかし、水分を吸収することによって変化する動きを十分に表現できたとは言えない。本論では布が進行方向に対して投射断面積が小さいほど早く進むことを表現できなかった。これは、本来は布の形状によって水からの抵抗が変化することによるものと思われる。本論では、水の抵抗は粒子ごとに受けるものとして計算したが、布の形状による抵抗の変化を考慮したモデル化が必要となる。その他、吸水によって繊維の強度が変わること等も挙げられる。

今後の展望として、布の吸水表現の他にも、吸水した布が空気中で見せる変化を考慮することによる表現の向上が期待できる。例として、他の物体に張り付きやすくなる、乾燥する、空気の透過が減少すること等が上げられる。これらの要素をシミュレーションに反映させることによって、水中と空気中を行き来するような場面でより有効な手法となるだろう。

# 謝辞

本論文を締めくくるにあたり、ご指導いただき適切な助言を頂きました、本校メディア学部の渡辺大地講師および和田篤氏（電気通信大学）をはじめ、助言を下されたすべての方々に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] ”日経サイエンス 2002 年 9 月号”,  
<http://www.nikkei-bookdirect.com/science/page/magazine/0209/starwars.html>
- [2] European Computer Trade Show 2003 現地レポート”,  
[http://www.watch.impress.co.jp/game/docs/20030829/ects\\_02.htm](http://www.watch.impress.co.jp/game/docs/20030829/ects_02.htm)
- [3] 尾下真樹 牧之内顕文,”実時間衣服シミュレーションによる仮想試着システムの実現”, グラフィックスと C A D 合同シンポジウム 2003,2003
- [4] Nadia MAGNENAT-THALMANN , Fabien DELLAS , Christiane LUIBLE and Pascal VOLINO MIRALab, C.U.I.,”From Roman Garments to Haute-couture Collection with the Fashionizer Platform”
- [5] Pascal VOLINO, Nadia MAGNENAT THALMANN,”Fast Geometrical Wrinkles on Animated Surfaces.”
- [6] K.-J. Choi and H.-S. Ko., ”Stable but responsive cloth”,In SIGGRAPH Conference Proceedings, pages 604-611, 2002
- [7] Young-Min Kang and Hwan-Gue Cho,”Bilayered Approximate Integration for Rapid and Plausible Animation of Virtual Cloth with Realistic Wrinkles”,Computer Animation 2002, p. 203
- [8] ”宇都宮大学教育学部家政教育教室”,<http://venice.mine.utsunomiya-u.ac.jp/>



- [9] 繊維学会, ”やさしい繊維の基礎知識”, 日刊工業新聞社, 2004
- [10] 江前敏晴, ”塗工原紙の液体吸収性について”, 紙パ技術タイムス 36(4), 1-8, 1993
- [11] D. E. Breen, D. H. House, and P. H. Getto, ”A Physically-based particle model of woven cloth”, Visual Computer, Vol. 8, 264-277, 1992.
- [12] 竹内統, ”コンピュータ・グラフィクスのための布のシミュレーション”, 東京大学, 2001
- [13] PROVOT, X. 1995. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In Graphics Interface '95, 147?154.
- [14] FK Toolkit System, <http://www.teu.ac.jp/media/earth/FK/>.