

## 1. はじめに

近年、コンピュータに関する技術の進歩により、ゲームや映画、テレビ番組などの多くの場面でコンピュータ・グラフィックスの使用が見られるようになった。また、コンピュータの処理速度の発達により、布のシミュレーションのように複雑な演算処理を必要とするシミュレーションの多くもリアルタイムで行われるようになってきた。しかしながら、布と似た素材である紙のシミュレーションについては、紙の持つ振る舞いの複雑さからコンピュータ・グラフィックスの分野ではあまり研究が行われていない。本研究では、適用範囲をコンピュータ・グラフィックスの分野に限定し、物理的には正確な表現ではないが、人の目に自然に振る舞う紙のシミュレーションを構築することを目的とする。紙のシミュレーションを行うために、紙と似た素材である布のシミュレーションを応用することが考えられる。そこで、布と紙の性質の違いについて考察する。

## 2. 紙の構造と性質

### 2.1 紙の構造

一般に紙は、パルプと呼ばれる植物繊維とその繊維同士を結びつける結合素材が、図1のように基盤の目状でない複雑なネットワーク構造を持っている異方性の素材であり、その繊維が、布のように織り込まれていないことから不織布と呼ばれている。また、紙の生成過程から、紙は薄い板状の形状になる。こ

れらの構造と形状から、紙の物理特性が成り立っているといえる。

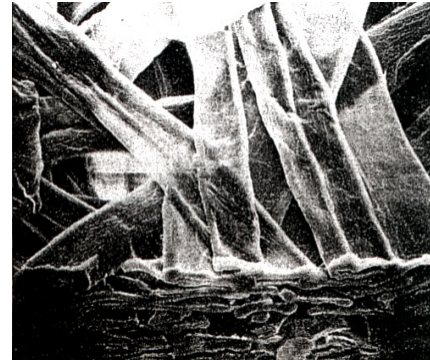


図1. 紙の繊維構造

### 2.2 紙の性質

紙は、前述のような構造や形状から様々な変形に対して、一般素材とは異なる特徴を見せる。

紙は、引っ張りに対して強い変形抵抗を示す素材である。これは、紙が植物繊維とそれらを結び付けている結合素材から成りたっている構造からくるものである。紙を構成する個々の植物繊維の引張り強度は、鋼鉄に匹敵するほどであると言われていたが、接合部の強度は弱く、それが紙全体の強度を支えているために、紙の引張り強度は非常に低くなっている。

圧縮変形では、一般材料は図2(a)のように体積を変化させることによって変形を起こすのに対して、薄い紙では長さ方向に圧縮すると、図2(b)のように容易に座屈を起こしてしまう。座屈を起こすと耐加重能力はなくなるので紙の長さ方向に対する圧縮強度はきわめ

て弱いものと考えられる。

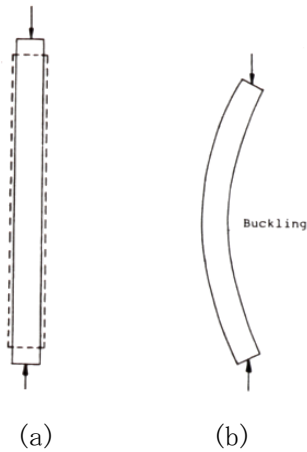


図 2. 圧縮変形

圧縮して曲げを行った際に紙は、図 3 のように、紙面方向に曲げを行った場合に、曲げを行った方向と垂直の方向にハリを持つ性質がある。このことから紙は、曲げを戻そうとする方向に抵抗力を持つ性質があると考えられる。

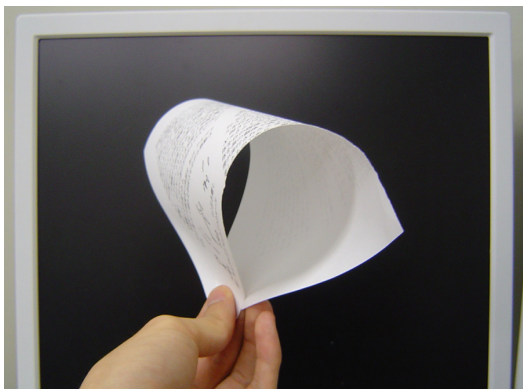


図 3. 紙にハリができる様子

せん断変形では、材料を  $45^\circ$  傾けた状態で互いに直交する圧縮変形と引っ張り変形が同時に起こっているものと考えられる。せん断変形で紙は、紙面の方向に曲がってしまい圧縮変形の抵抗を持たないために、しわを生じさせるような変形を起こす。

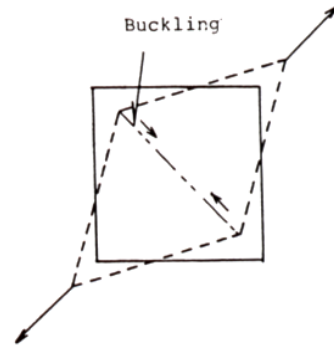


図 4. 紙のせん断変形

以上のことから紙の性質としては、

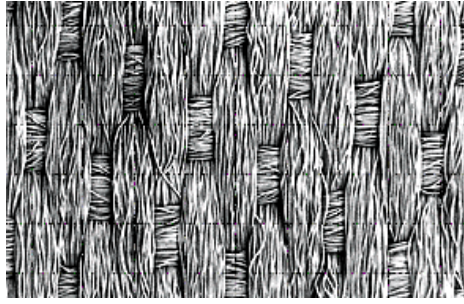
- ・ 縦・横・せん断方向共に変形しにくい
  - ・ 紙面方向に曲がりやすい
  - ・ 曲げと垂直の方向に抵抗力を持つ
  - ・ 低い力で折り目を付けることができる
- ことなどが紙特有の性質として挙げられる。

### 3. 布の構造とシミュレーション

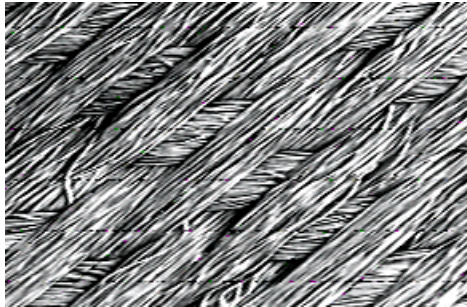
#### 3. 1 布の構造と性質

布は、図 5(a)のように繊維が縦糸と横糸として格子状に編みこまれた構造を持っている。この格子状の構造を図 5(b)のようにせん断方向に変形させることができるので、容易にせん断変形を起こし、除荷を行えば元の形状に戻る弾性変形を起こしている。しかし、縦糸横糸方向には繊維ネットワークが変形を起こせないで、縦糸横糸方向には変形を起こしにくいと考えられる。

また、布も紙と同じく薄い形状を持っているので、圧縮方向に力を加えると容易に座屈を起こしてしまう。そのため、布も長さ方向の圧縮抵抗はないものと考えられる。このことから布は、曲がりやすい性質を持つ。しかし、繊維ネットワークの柔軟さと繊維が編みこまれて構成されているので、繊維同士の結合に紙に見られるような結合素材を持たないことから、折り曲げた際に折り目や破断などは起こしにくい性質を持っているといえる。



(a)



(b)

図 5. 布の繊維構造

### 3. 2 布のシミュレーション

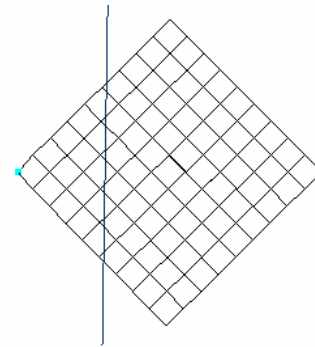
コンピュータ・グラフィックスの分野で行われる布のシミュレーションでは、縦糸、横糸の交差する点に注目し「質点」とする。そして質点間をバネで接続するモデルが一般的に使用されている。この質点バネモデルをすべての質点に作用させることにより、布のネットワーク構造と性質を表現している。また布の性質としては具体的に、

- ・ 縦・横糸方向に伸びにくい
- ・ せん断的変形には伸びやすい
- ・ 曲がりやすい

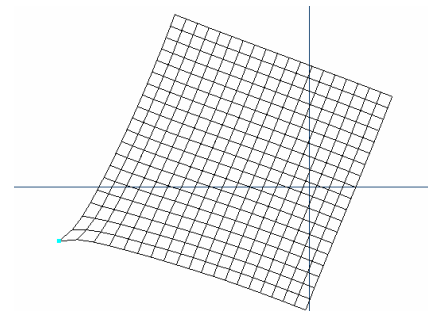
といったことを抽出している。

布のシミュレーションモデルの多くは、質点間の力の計算に陽的な解法を用いるのが一般的である。しかし、陽的な解法による時間積分では、1ステップにおいて要素の変移が隣接する質点のみにしか影響を及ぼさない。そのため布のシミュレーションでは、移動している質点から離れたところにある質点に力の影響が及ぶまでに時間がかかってしまう。

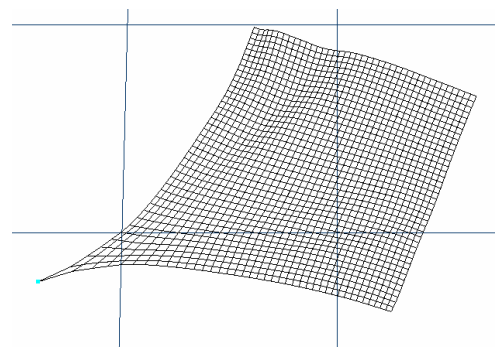
図 6(a)のように質点の数が小数の場合のシミュレーションであれば、見た目には気にならない程度の遅れではあるが、図 6(b) (c)のように質点の数が多き状態でシミュレーションを行うと、質点の数が多くなるに従って、実際に布が伸びる方向であるせん断的な方向だけでなく、実際の布では伸びない縦糸横糸方向にも伸びが起きているように見えてしまう。



(a)



(b)



(c)

図 6. 布のシミュレーション

実際に布の端を引っ張ると、全体も同時につられて引っ張った方向に移動する。これは



物理的な言葉でいうと、布が大きな伝達速度を持つ媒体であるからといえる。

## 5. 布と紙の性質の違い

紙と布の性質で大きな違いは、布がせん断的に容易に変形を生じさせることに対して、紙はせん断的にもほとんど変形を生じさせないという点が考えられる。これは、紙が布と違い格子状の繊維構造を持っていないために、図 5(b)のようにせん断的にその繊維構造をゆがめることができないからである。また、紙も布と同じく大きな速度伝達を持つ媒体であることから、紙の「伸びにくい」という性質は、紙を紙らしく見せるシミュレーションをする際に重要な性質であると考えられる。このことから布のシミュレーションに見られるような陽的な解法による質点バネモデルを紙のシミュレーションに適用したのでは、紙の紙らしい動きを表現できないのではないかと考えられる。

また、紙は図 3 のように紙面方向に曲げる変形を行った場合に、曲げる方向から垂直な方向にハリを持つが、布は、曲げに対する抵抗力が弱いので図 7 のようにハリができずに崩れてしまう。



図 7. 薄い布を曲げた様子

また、紙は布と違い弱い力で破断を起こすという性質がある。これは繊維ネットワーク

が柔軟にせん断的変形を行える布と違い、紙の繊維の結合素材が強い引っ張り変形に耐えきれずに結合を解いてしまうからである。

## 6. まとめ

紙の構造と性質をまとめ、紙と似た薄い素材である布との比較を行い、その性質の同じであるところ異なるところを明らかにした。布と紙は同じ薄い形状を持つ素材であり、その形状からくる性質である「曲がりやすい」ということが同じであった。しかし、布と紙を構成する素材からくる性質は、布と紙では全く異なるということがわかった。今後、紙のシミュレーションを構築するにあたって取り入れるべき性質の考察を行った。

## 参考文献

- 1) 松島成尾, 紙の機能に挑む 提言Ⅲ 紙の力学的構造と機械的および物理的特性, 化繊紙研究会誌 No. 20, (1981), pp59-64.
- 2) Petri Makera, Orthotropic elastic-plastic material model for paper materials, International Journal of solids and structures, (2003)
- 3) 佐藤幹弘, 対話的な布のシミュレーションに関する研究, 日本大学生産工学部第 37 回学術講演会講演概要, (2004), pp23-26.
- 4) 竹内統, コンピュータ・グラフィックスのための布のシミュレーション, 東京大学大学院修士論文 (<http://www.simplex.t.u-tokyo.ac.jp/>), (2000).
- 5) 株式会社 帝人ホームページ, <http://www.teijin.co.jp/>