

## 布挙動のシミュレーションと真空実験による評価

田川 和義<sup>\*1</sup> 林 宏卓<sup>\*1</sup> 木島 竜吾<sup>\*1</sup>

Dynamic Cloth Simulation and its Evaluation Experiments in Vacuum

Kazuyoshi Tagawa<sup>\*1</sup>, Hirotaaku Hayashi<sup>\*1</sup> and Ryugo Kijima<sup>\*1</sup>

**Abstract** – In spite of many dynamic cloth simulation methods have been proposed in computer graphics and textile engineering field, there are no quantitative evaluation method for comparing real and virtual with various dynamic deformations that can be seen our daily life. Therefore dynamic cloth simulation method have been improved based on subjective evaluations. In this paper, the evaluation experiments in vacuum is proposed and several result of experiment is evaluated and discussed.

**Keywords** : cloth simulation, deformable model, spring-mass network, virtual fashion

## 1 はじめに

## 1.1 VRにおける柔軟体の変形計算

仮着想衣形状計算や手術シミュレーションなど, VRにおいても柔軟体の変形計算がしばしば用いられるが, コンピュータの処理能力の都合から, 簡易的な計算アルゴリズムによる実装がなされることが多い. しかしコンピュータの高速化に伴い, より高精度な変形計算が可能となりつつあり, このためには各計算対象物体に応じた, 精密な物理モデルおよび算法を考案しなければならない.

本論文では, 柔軟体のうち最も身近な存在である, 布(衣服)を対象とする. アパレル業界では, 衣服のプロトタイプングだけは未だデジタル化されておらず, 最後のボトルネックとなっている. これはデザインの確認という目的に対し, 現実のプロトタイプと等価なシミュレーションが必要だからである. 以下, この布シミュレーション手法の評価の現状と, 新たに提案する評価法について述べる.

## 1.2 布シミュレーション手法の評価の現状

図1に示すように, 布のシミュレーション手法は, これまでCGと繊維工学との両分野で研究がなされてきた.

CG分野では, 主にゲームや映画などのCGアニメーションへの応用を目的とした, 布のシミュレーション手法の研究がなされており, 多くの手法の開発がなされてきた. Weilによる, 懸垂曲線を当てはめることにより布らしい形状を生成する, 幾何学ベースの手法[1]や, Provot, Thalmann, Eberhardtらによる, 質点・バネ・ダンパに離散化したパーティクルシステムを用

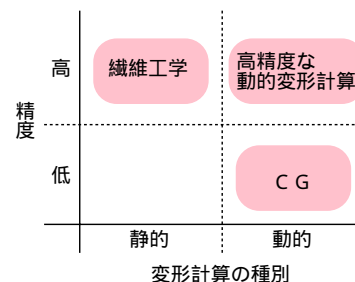


図1 布変形計算手法の研究領域と分類

Fig.1 Research field and classification of cloth simulation method

いたもの[2, 3, 4], Baraff, Desbrun, Choiらによる, これに陰的解法(後退オイラー法)を適用した, 大きな時間ステップをとることができる高速な変形計算手法[5, 6, 7]や, Terzopoulos, 今岡, Breen, 坂口らによる, エネルギー最小化を利用したもの[8, 9, 10, 11]などがあげられる. また, 金属板の変形問題を布に適用したものとして, CollierらやYuらによる, シェルの理論に基づくもの[12, 13]もある. これらは, どうしても計算方法の詳細な部分にのみ注意が行きがちであり, 多くが見た目での評価程度しかなされていない. 簡単な数理モデルが利用された初期の段階では, 実物との印象の違いが大きかったため, 主観的な評価による恣意的な改良であっても十分であった. しかし計算手法の進展により, 実物との差が小さくなるにつれて, 主観的な評価ではより高度な接近は困難となりつつある. 一部の研究では, 定量的な評価がなされてはいるが, 多くは静止(釣り合い)状態での評価[14, 15]しかなされていない. 動的状態の評価を行うにしても, 簡易的な手法で空気のシミュレーションを行っている[16]ため, 相違の原因が布と空気のどちらの側にあるのか, 特定は難しい.

<sup>\*1</sup>岐阜大学

<sup>\*1</sup>Gifu University

そこで繊維工学の分野を調べてみると、この分野でも糸や布モデルに関して古くから研究がなされてきており [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]、レーザー変位計等による精密な評価 [25, 26] もなされている。しかし、1) 布周辺の空気抵抗の影響を避け、なおかつ、2) 解析的に解くことができる布挙動でなければならない、という古典的な制限から、布の動きが定常的で微小な振動のみに限られたモデル [27, 28] や、静止状態もしくは非常にゆっくりとした準動的状態での、ごく単純な布の曲げ問題のみを扱うことができる片持ち梁を布に適用したモデル [26] など、定常的もしくは単純な布の挙動しか扱うことができない。

我々の目的は、現実にある多様な布の挙動を生成可能な、高精度な布の動的変形計算を実現することである。このためには系統立った評価法が必要となるが、このような評価法ははまだ提案されておらず、十分な評価がなされていなかった [29]。

### 1.3 本論文で提案する評価・改良方法

そこで本論文では、布挙動の新たな評価法として、真空を用いた段階的接近法を提案する。これまで布シミュレーションの評価実験は空気中にて行われていたが、空気は布の動きを鈍らせるため、布自体のシミュレーションが多少違っていても、空気抵抗がこれを覆い隠してしまっていた。このため、この違いや原因を、CG の分野で行われている主観的な評価で見いだすことは、もはや困難であった。また繊維工学で行われている精密な評価にしても、空気の影響を避けるために、定常的もしくは単純な挙動に限定した実験しか行われていなかった。

本研究では空気の影響を無くした真空中にて、図 2 に示すような、布の変形計算アルゴリズムを見直すための実験を段階的に行い、比較・評価の結果から、布自体の動的変形計算における各要素を順に改良しつつ、精度保証を行っていく。最終的には、現実にある多様な布の挙動を生成可能な、高精度な布の動的変形計算を実現することを目標とする。

ステージ 1 は、布の曲げ減衰振動の実験である。上端部分（把持点付近）の布の曲げ剛性が支配的な曲げ運動であり、動的な変形の中でも最も単純な挙動である。真空のため空気抵抗はほとんど無く、また布には粘性がほとんど存在しないため [30]、減衰のカーブから布の曲げヒステリシスモデルを評価できる。また減衰の振動周波数から、布の曲げ剛性を評価できる。繊維工学の分野でも布の曲げ減衰振動を計測した例 [31, 32, 33] はあるが、真空中で行った例はない。ステージ 2 は、ステージ 1 と同様に曲げ変形の実験であるが、撃力によって曲げ変形を行うため、引張り剛性に関わる試験である。ステージ 3 は、曲げと引張りに

加えて、せん断力も働く変形の実験である。このようにして、布シミュレーションの各要素モデルを段階的に評価・改良していく。

布の動的変形には空気の流れが大きく関わっており、空気流のシミュレーションができない限り現実の布シミュレーションは難しいが、本研究では布の内力と空気抵抗力を分離し、まずは布自体のシミュレーション手法の確立を目標とする。

本論文では、まずは繊維工学で提案されている、鮑らの曲げヒステリシスモデル [34] を組み込んだ布のシミュレーション手法を簡単に説明する。その後、曲げおよび引張りを評価するために、このうちの 2 種類の実験を行った結果を述べ、実物と計算結果との比較結果から、布変形計算アルゴリズムの精度を確認し、また本評価によってはじめてははっきりと確認できる相違点について考察を行う。

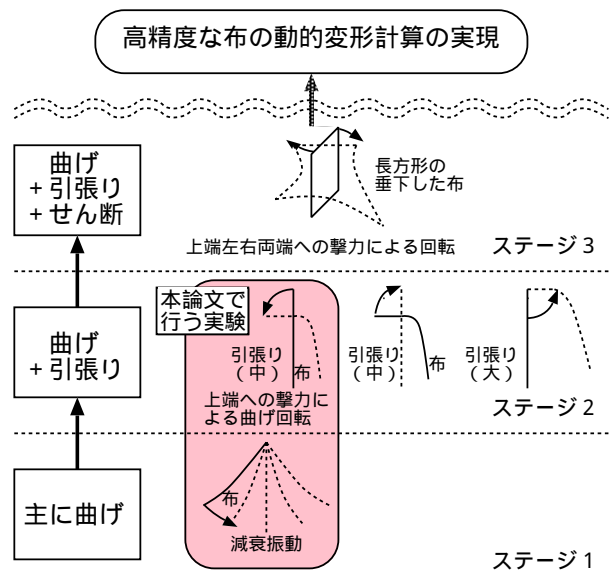


図 2 真空を用いた段階的接近法の実験例  
Fig. 2 Example of experiments for realizing accurate cloth simulation

## 2 布のモデルと数値計算手順

### 2.1 布のモデル

布・フィルムのような薄柔軟体の力学特性の計測試験法としては、KES(Kawabata's Evaluation System for fabric)[35] が一般的である。本研究では、この試験法を利用した計測試験機(株式会社カトーテック製、KES-FB1/2)を用いて、布の各種力学特性の計測を行う。以下、この試験法にて計測される各力学特性について説明をする。

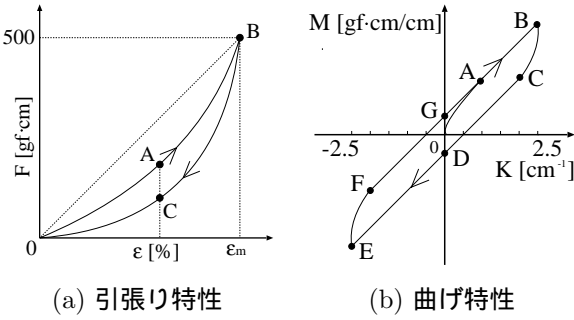
#### a) 引張り特性

引張り特性とは、ある伸び率  $\varepsilon$  だけ伸びた布に、どれだけ引張り回復力  $F$  が生じるのかを示す。図 3(a) に示すように、点 A を通って最大荷重 500gf・cm まで

引張り (点 B), その後点 C を通って回復する. 非線形で, なおかつヒステリシスをもつカーブを描く.

b) 曲げ特性

曲げ特性とは, 布がある曲率  $K$  で曲がっているときに, どれだけの曲げ回復モーメント  $M$  が生じるのかを示す. 引張り特性と同様, 図 3(b) に示すように, 原点からスタートし, 点 A から順に点 G までたどる. 非線形, ヒステリシスをもつカーブを描く.



(a) 引張り特性 (b) 曲げ特性

図 3 一般的な布のヒステリシス曲線  
Fig. 3 Typical hysteresis curves of fabric

2.2 変形計算手順

本研究では, 布をいくつかの質点・ばねに離散化したパーティクルシステムを用いて, 布の動的変形計算を行う. 各質点に接続されたばねの合力を求め, 数値積分により質点の座標を更新する. 以下, それぞればねに生じる力の計算法, および数値計算手順について述べる.

a) 引張り回復力

引張り回復力の計算は, 図 4(a) に示すように, 隣接する質点間 (縦系・横系方向) をつなぐ構造ばねを用いて行う. 図 4(b) に示すような, 隣接する 2 つの質点  $P_i, P_j$  があるとき, 質点  $P_i$  に生じる引張り回復力  $F_{tensile}$  は, 以下の式で表される.

$$F_{tensile} = T\left(\frac{l-l_0}{l_0}\right) l_0 \mathbf{L}_{ij} \quad (1)$$

ただし,  $l$  は現 (計算) 時点でのばねの長さ,  $l_0$  はばねの初期長,  $\mathbf{L}_{ij}$  は  $P_i$  から  $P_j$  に向かう単位方向ベクトルである.  $T(\varepsilon)$  は伸び率 - 引張り回復力の関数であり, 本論文で行う実験では大きな引張り力は生じないため, ヒステリシスを無視し, ループ上側の曲線を 4 次関数で近似したものを用いる.

b) 曲げ回復力

曲げ回復力の計算は, 図 5 に示すように, 隣接する 3 つの質点間  $P_i, P_j, P_k$  をつなぐ巻きばねを用いて行う.  $P_i$  に生じる曲げ回復力  $F_{bend}$  は, 以下の式で表される.

$$F_{bend} = M(K) \frac{l}{w} \mathbf{N}_i \quad (2)$$

ただし,  $K$  は 3 点  $P_i, P_j, P_k$  を通る外接円の半径  $R$  の逆数 (すなわち曲率),  $w$  はこれらの質点が支配す

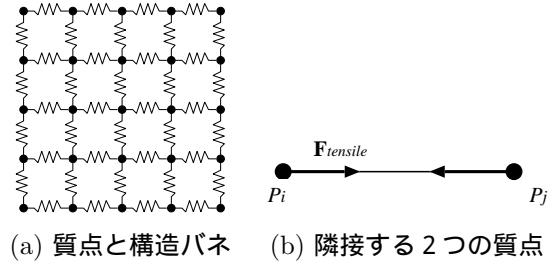


図 4 引張り回復力の計算  
Fig. 4 Calculation of tensile force

る布の幅,  $l$  は  $P_i$  と  $P_j$  間の距離,  $\mathbf{N}_i$  は線分  $P_i P_j$  に垂直な単位法線ベクトルであり, その向きは曲げを回復する方向とする.  $M(K)$  は曲率 - モーメントの関数であり, ヒステリシスモデルとして鮑らの Rate モデルを試みたが, 曲率 0 を中心としたヒステリシスループしか表現できないため, 以下に示す改良したモデルを用いた.

$$M(K) = DK - D_1 \exp\{-\alpha(K_0 + K)\} + M_0 \quad \left(\frac{dK}{dt} > 0\right) \quad (3a)$$

$$M(K) = DK + D_1 \exp\{-\alpha(K_0 - K)\} - M_0 \quad \left(\frac{dK}{dt} < 0\right) \quad (3b)$$

$K_0$  は KES 計測試験で計測を行った際の最大曲率であり, 通常 2.5 である.  $M_0$  は,

$$M_0 = \frac{1}{2} D_1 \{1 + \exp(-2\alpha K_0)\} \quad (4)$$

である. 本研究では, 原点以外の曲率周りのヒステリシスについても, このループ形状と一致すると仮定し, このループをヒステリシスの中心軸に沿って平行移動することで, 各曲率周りのヒステリシスループとして利用した.

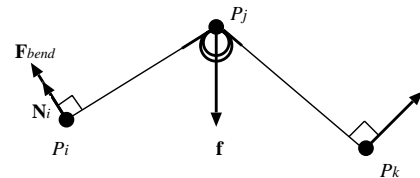


図 5 曲げ回復力の計算  
Fig. 5 Calculation of bending force

また中央の質点  $P_j$  には, 両端の質点に加えた曲げ回復力の合力の逆ベクトル  $\mathbf{f}$  を与える.

2.3 数値計算手順

本研究では, Euler 法と呼ばれる数値積分法により各質点の運動を求める. まず全てのばねに働く力を求め, 各質点に働く力の合力を計算する. その後, 以下の式で次時刻における各質点の座標を求める.

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^n + \mathbf{v}_i^n dt \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{v}_i^n + \mathbf{F}_i^n \frac{dt}{m_i} \quad (6)$$

ここで  $m_i$  は質点  $i$  の質量,  $\mathbf{x}_i$  は質点  $i$  の位置ベクトル,  $\mathbf{v}_i$  は質点  $i$  の速度ベクトル,  $\mathbf{F}_i$  は質点  $i$  の力ベクトル,  $dt$  は時間刻み幅である. 添え字の  $n$  は現時刻を,  $n+1$  は次時刻を示す.

### 3 真空実験による評価

#### 3.1 実験内容

図6に示す真空実験装置内にて, 図7に示すような2種類の真空実験を行い, 布挙動のシミュレーションの評価を行う. いずれも, 長方形(縦糸方向:100mm+把持領域 20mm× 横糸方向:50mm, 毛 90%・ナイロン 10%)の布を用いる. (a)は, この布の上端(固定端側)を鉛直に把持・固定して垂下させ, さらにその下端(自由端側)を変位して把持し, その後これを解放して自重により曲げ運動を与える. 引張りがほとんど発生しない, 曲げ剛性が支配的な減衰振動の実験である. (b)は, 垂下した布の上端に, 撃力による回転を与える実験であり, (a)に比べて複雑な曲げ挙動となる上に, 引張り力も作用する. なお (a)の布の下端(自由端側)は, 把持のために布自体の縦糸を3箇所2本ずつ, 1cmほど長く残しておいた.

布はあらかじめ, 撮影側手前の辺を着色しておき, これを真横からビデオカメラにて1/60秒間隔での撮影を行った. (a)については, これと同時にレーザー変位計を用いて, 減衰振動における振幅の変化を計測した. (b)については, 回転角度をロータリーエンコーダにて計測し, 4次関数と直線で近似した関数を求め, これを用いることによりシミュレーション側でもほぼ同様の回転を与えた.

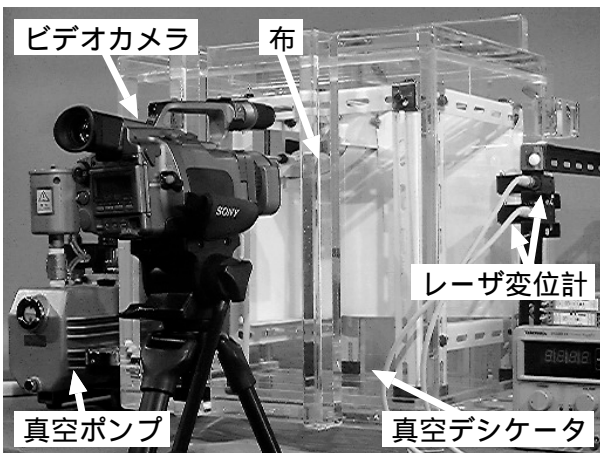


図6 実験装置  
Fig. 6 Experimental equipment

図8に, 様々な曲率範囲にて, KES計測試験機で計測した布の縦糸方向の特性(引張り特性・曲げ特性)を

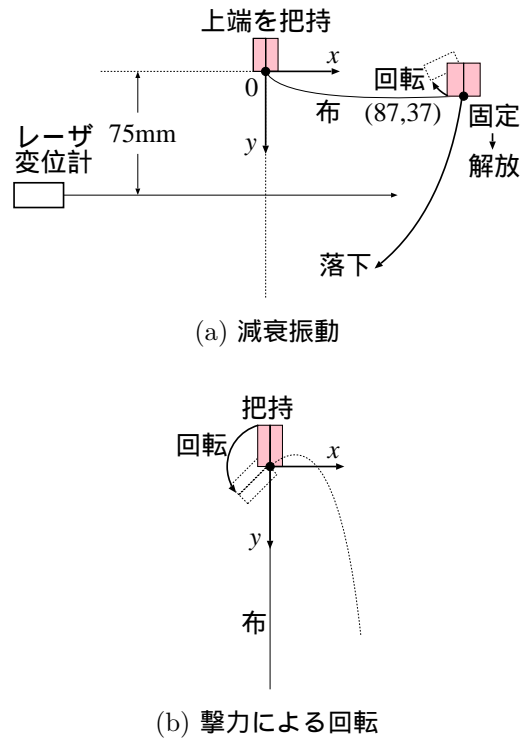
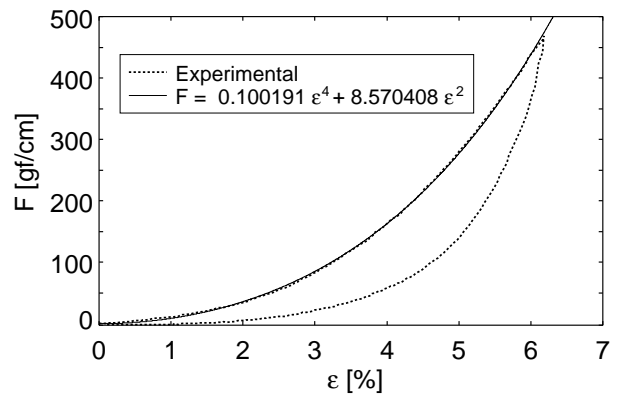
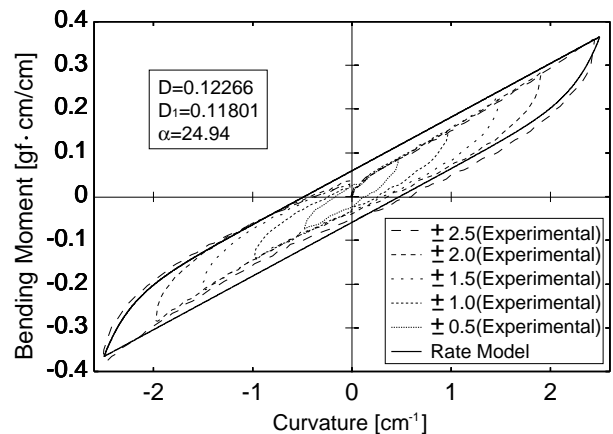


図7 実験内容  
Fig. 7 Detail of experiments



(a) 引張り特性



(b) 曲げ特性

図8 布の力学特性  
Fig. 8 Physical properties of the cloth



波線で示す．布は湿度によって特性が変わるため，繊維工学では通常 65% 程度の一定湿度環境下にて計測を行うが，本実験ではあらかじめ布をシリカゲル中に 1 日置いておき，絶乾状態にしてから計測を行った．質量は  $2.03 \times 10^{-2} \text{g/cm}^2$  であった．真空装置として，アクリル製の真空デシケータおよび真空到達度  $10^{-5} \text{Pa}$  の真空ポンプを用いた．

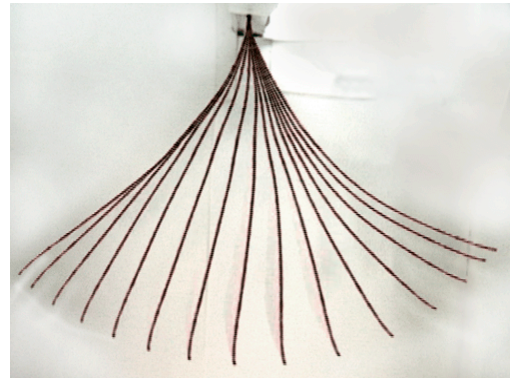
シミュレーションでの布モデルとして，奥行き方向（図 7 での紙面に垂直な方向）を無視し，減衰振動では 5mm，撃力による回転では 2.5mm ごとに分割した直線状の 2 次元モデルを用いた．布の力学特性を図 8 に実線で示す．引張り特性として，上側のループを 4 次関数で近似したものを，曲げ特性として，2 章で述べた Rate モデルを用い，非線形・ヒステリシス共に考慮したシミュレーションを行った．残留空気の抵抗と布中のごくわずかな粘性は計測が難しいため，実物と計算結果が良く合うように粘性係数を調節し，速度に比例する粘性抵抗を加えた．シミュレーションの時間刻み幅は 0.1 マイクロ秒とした．Xeon 2.0GHz の PC-AT 互換機を用いて計算を行った．ただし並列計算は行っていない．

### 3.2 実験結果と考察（減衰振動）

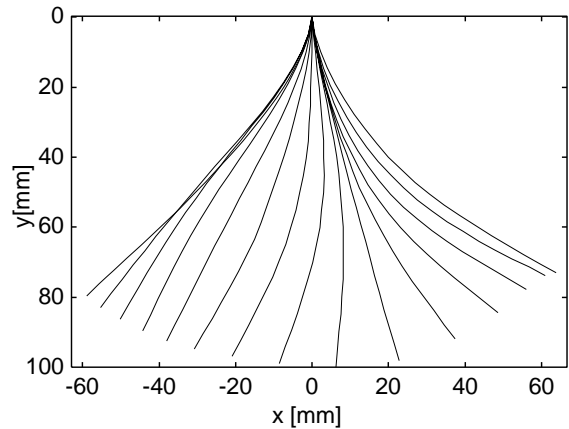
図 9 に実験結果を示す．布の下端を  $x$  軸の正の位置から解放し，その後 2 往復した後の，正の位置から負の位置に移動する過程である．良好な一致を得ているが，実物の布の最下点付近は，布を取り付けてから空気を抜くまで 30 分ほど把持し続けた際の，布の癖がそのまま残っている．図 10 にレーザー変位計を用いて計測した，振幅の変化の様子を示す．こちらも良好な一致を得ているが，時間が経過するにつれて周期のずれが見受けられる．この原因として，把持点付近では布を構成する糸が拘束され自由に動けないことにより，見かけの曲げ剛性が高くなってしまふことが原因と考えている．なお，シミュレーションに要した時間は 210 秒であった．

### 3.3 実験結果と考察（撃力による回転）

図 11 に実験結果を，図 12 に回転角の実測値，および 4 次関数と直線にてフィッティングしたグラフを示す．布上端の把持部最下点を実物の回転中心としているが，わずかなずれでも布の形状に影響を与えるため，実物と計算結果が良く一致するようにシミュレーション側の回転中心を調節したところ，最下端部の最後の跳ね上げを除いて，実物とシミュレーションは良好な一致を得た．回転中心の移動量は，鉛直上 ( $y$  軸負) 方向へ，少し大きめである 2.8mm であった．この原因として回転軸の遊びが考えられるが，これを考慮しても少し大きすぎる値である．減衰振動で見受けられた，把持点付近での布の見かけの曲げ剛性の増加が，この



(a) 実物



(b) シミュレーション

図 9 減衰振動  
Fig. 9 Dumped swing

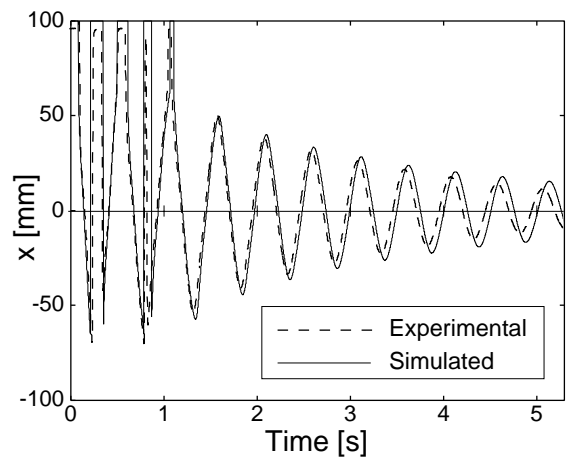


図 10 減衰振動における振幅の変化  
Fig. 10 Relationship between time and amplitude

実験でも同様に発生しているものと考えている。なお、シミュレーションに要した時間は155秒であった。

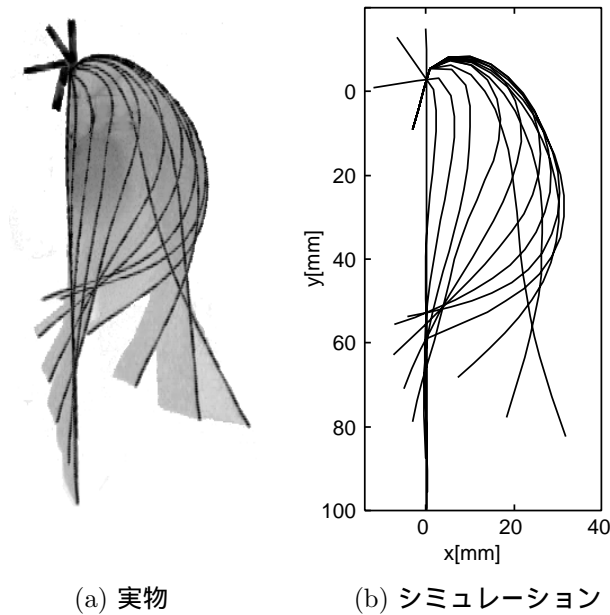


図 11 撃力による回転

Fig. 11 Rotation by impulsive force

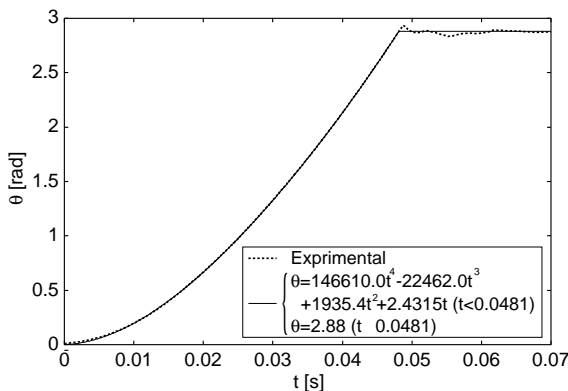


図 12 時刻  $t$  と回転角度  $\theta$  との関係

Fig. 12 Relationship between time  $t$  and angle  $\theta$  of rotation

#### 4 まとめ

以下本論文をまとめる。

- (1) 布挙動の新たな評価法として真空実験を提案し、さらに真空を用いた段階的接近法として、5種類の実験案を考案した。
- (2) このうちの2種類の実験を行い、曲げヒステリシスを考慮したシミュレーションと良好な一致を得た。
- (3) わずかに残る相違点として、布の癖と、把持による見かけの曲げ剛性の増加を指摘した。これらは本論文で主張している高度な接近法をもって、はじめてはつきりと確認できるレベルの現象であるため、当初の意図に沿った結果の例である。

(4) シミュレーションの精度が高いことを、主観的ではなく、高い信頼性を持って確認できた。

今後さらに続けて実験を行い、布シミュレーションの改良を行っていく。

#### 謝辞

本研究の一部は笹川科学研究助成による補助を受けた。また、本研究は岐阜大学バーチャルシステムラボラトリにおいて行われた。関係者の方に感謝する。

#### 参考文献

- [1] Jerry Weil: The Synthesis of Cloth Objects, Proceedings of SIGGRAPH'86, Vol.20, No.4, pp.49-54(1986).
- [2] Xavier Provot: Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior, Proceedings of Graphics Interface '95, pp.147-154(1995).
- [3] Nadia Magnenat Thalmann, Martin Courchesne, Pascal Volino: Simulating Deformable Clothes for Fashion Industry, Proceedings of International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp.58-66(1995).
- [4] Bernhard Eberhardt, Andreas Weber, Wilfgang Strasser: A Fast, Flexible, Particle-System Model for Cloth Draping, Computer Graphics in Textile and Apparel, pp.52-59(1996).
- [5] David Baraff, Andrew Witkin: Large Steps in Cloth Simulation, Proceedings of SIGGRAPH'98, pp.43-54(1998).
- [6] Mathieu Desbrun, Peter Schröder, Alan Barr: Interactive Animation of Structured Deformable Objects, Proceedings of Graphic Interface'99(1999).
- [7] Kwang-Jin Choi, Hyeong-Seok Ko: Stable but Responsive Cloth, Proceedings of SIGGRAPH'02(2002).
- [8] Demetri Terzopoulos: Elastically Deformable Models, Proceedings of SIGGRAPH'87, pp.205-214(1987).
- [9] 今岡春樹, 岡部秀彦, 赤見 仁, 渋谷 惇夫, 相坂 登, 松田 亮治: 二次元を例とした変形予測法, 繊維学会誌, Vol.44, No.5, pp.229-237(1988).
- [10] David E. Breen, Donald H. House, Michell J. Wozny: Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles, Proceedings of SIGGRAPH'94, pp.365-372(1994).
- [11] 阪口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫: 仮想服飾環境 PARTY - 動的変形可能な布のための数値計算法 -, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-D-II, No.5, pp.912-921(1994).
- [12] J.R. Collier, Bilie J. Collier, Gina O'Toole, S.M. Sargand: Drape Prediction by Means of Finite-element Analysis, Journal of Textile Institute, Vol.82, No.1, pp.96-107(1991).
- [13] W.R. Yu, T.J. Kang, K. Chung: Drape Simulation of Woven Fabrics by Using Explicit Dynamic Analysis, Journal of Textile Institute, Vol.91, Part 1, No.2, pp.285-301(2000).
- [14] L. Gan, N.G. Ly, G.P. Steven: A Study of Fabric Deformation Using Nonlinear Finite Elements, Textile Research Journal, Vol.65, No.11, pp.660-668(1995).

- [15] Bittino A., Laurentini A., Scalbrin S.: Quantitatively Comparing Virtual and Real Draping of Cloth, VSCG2001(2001).
- [16] 山崎華恵, 今岡春樹: 布の動的変形予測における風の影響, 繊維学会誌, Vol.52, No.6, pp.284-292(1996).
- [17] 川端季雄, 丹羽雅子: 弾性と繊維間摩擦を持つ糸の大たわみ変形の理論的解析, 繊維機械学会誌, Vol.28, No.12, pp.T146-T152(1975).
- [18] Peirce, F. T.: The Geometry of Cloth Structure, Journal of Textile Institute, Vol.28, pp.45-97(1937).
- [19] Grosberg, P.: The Mechanical Properties of Woven Fabrics, Textile Research Journal, Vol.36, pp.204-211(1966).
- [20] B. Olofsson: Study of Inelastic Deformations of Textile Fabrics, Journal of Textile Institute, Vol.58, No.6, pp.221-241(1967).
- [21] Abbott, G. M., Grosberg, P., and Leaf, G. A. V.: The Mechanical Properties of Woven Fabrics, Textile Research Journal, Vol.41, pp.345-358(1971).
- [22] Huang, N. C.: Finite Biaxial Extension of Completely Set Plain Woven Fabrics, J. Appl. Mech., Vol.46, pp.651-655(1979).
- [23] T.G. Clapp, H. Peng: Bukling of Woven Fabrics, Textile Research Journal, Vol.60, pp.285-292(1990).
- [24] Fengjun Shi, Jinlian Hu: Modeling the Creasing Properties of Woven Fabrics, Textile Research Journal, Vol.70, No.3, pp.247-255(2000).
- [25] 鮑力民, 高寺政行, 篠原 昭, 曲げヒステリシスを考慮した織物の振動解析, 繊維学会誌, Vol.50, No.2, pp.92-9(1993).
- [26] P. Potluri, J. Atkinson, I. Porat: Large Deformation Modelling of Flexible Materials, Journal of Textile Institute, Vol.87, Part 1, No.1(1996).
- [27] M. Horio, S. Onogi: Forced Vibration of Reed as a Method of Determining Viscoelasticity, J. Appl. Phys., Vol.22, No.7, pp.977-981(1951).
- [28] 朱承興, 石川左武郎, 吉田幸吉, 小形信男, 柳川紹明, 呉小玲: 振動リード法における環境気体圧力の影響, 繊維機械学会誌, Vol.40, No.9, pp. T81-T97(1987).
- [29] 庭屋晴夫: 着装シミュレーションと実験の定量的比較検討, 第15回繊維連合研究発表会講演要旨集, pp.191(2002).
- [30] 小野木重治: 織物の粘弾性と風合い, 繊維と工業, Vol.5, No.5, pp.286-290(1972).
- [31] 泉加代子, 丹羽雅子: 婦人洋装用薄手布の振動特性に関する研究, 家政学会誌, Vol.32, No.5, pp.390-395(1981).
- [32] 森川善富: 回転棒に支持された綿布の自由減衰振動時の振動特性の計測, 繊維学会誌, Vol.51, No.7, pp.333-337(1995).
- [33] 松平光男, 張如全: 布の曲げ振動における減衰特性, 繊維機械学会誌, Vol.49, No.12, pp.T324-T332(1996).
- [34] 鮑力民, 高寺政行, 篠原 昭: 曲げヒステリシスを考慮した布の大たわみの挙動解析, 繊維学会誌, Vol.52, No.2, pp.69-75(1996).
- [35] 川端季雄, 風合い評価の標準化と解析 第2版, 日本繊維機械学会, (1980).

[ 著者紹介 ]

田川 和義 (正会員)



1996年岐阜大学工学部電子情報工学科卒業。1998年岐阜大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。現在岐阜大学大学院工学研究科電子情報システム工学専攻博士後期課程在学中。柔軟物体のシミュレーションに関する研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会, ACM, 電子情報通信学会, 繊維学会, 画像電子学会, ヒューマンインタフェース学会, グラフィックスとCAD研究会各会員。修士(工学)。

林 宏卓 (学生会員)



2001年岐阜大学工学部応用情報学科卒業。同年, 岐阜大学大学院工学研究科応用情報学専攻博士前期課程入学。現在に至る。日本バーチャルリアリティ学会会員。

木島 竜吾 (正会員)



1964年生まれ。1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD), 岐阜大学工学部助手を経て, 現在, 岐阜大学工学部応用情報学科助教授。日本バーチャルリアリティ学会, ACM, 計測自動制御学会等の会員。博士(工学)。

(2003年5月6日受付)