

布シミュレーションの評価法 (第1報)

— 評価方法の検討 —

Evaluation method for dynamic cloth simulation (I)
— Consideration of evaluation method —

田川和義¹⁾, 林宏卓¹⁾, 木島竜吾²⁾

Kazuyoshi TAGAWA, Hirotaku HAYASHI and Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 工学研究科

(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1, {tagawa,01hayashi}@kzm.info.gifu-u.ac.jp)

2) 岐阜大学 工学部

(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1, kijima@info.gifu-u.ac.jp)

Abstract : The aim of our study is to realize accurate cloth simulation that can generate various dynamic deformations which exist in our daily lives. For this, we need an evaluation system of cloth simulation, however, until now no evaluation system has been proposed. In previous work, evaluation was done in the atmosphere and errors in the simulation were hidden. This made it difficult to find out what the differences were between real and virtual. In this paper, evaluation experiments in a vacuum are proposed.

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

1. はじめに

アパレル業界では、既製服生産における衣服の試作行程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。

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かった。簡単な数値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。

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い

かった [29].

筆者らは布挙動の新たな評価法として真空を用いた評価実験を提案し、空気抵抗がほとんど無い真空内での布挙動をリファレンスとして、布シミュレーションアルゴリズムの再検討を行っている [30]. 最終的には現実にある複雑な布挙動を扱っていくため、本研究ではシミュレーションを「杖」として物理モデルの向上を図っていく。すなわち最初は簡単な挙動について実物とシミュレーションとの間で評価を行い、順に複雑度を上げながらシミュレーションの精度を上げていく、段階的な接近手法をとることにする。

本論文では、高精度な布挙動シミュレーションを実現するにあたり、まずは布モデルの各要素について繊維工学分野での先行研究を調査し、粘性およびその他考慮すべき物性を検討・モデル化する。その後これらを評価するための、実物とシミュレーションとの間での比較実験の方法を検討する。

2. 布の各種力学特性とそのモデル化

これまでの布シミュレーションでは、布の静的な力学特性（応力と歪み、モーメントと曲率の関係）についてはある程度の考慮（多くは非線形・ヒステリシスを無視した線形解析）がなされている。しかし、粘性など動的な特性については十分に検討されておらず、布の粘性やヒステリシスによるエネルギーロスは空気抵抗の粘性項のみでしか考慮されていない。また繊維工学分野においても、応力緩和特性やクリープ特性を把握する多くの研究 [31] に比べ、動的な特性を把握するための研究 [32] はほとんどなされていないのが現状である。

以下では繊維工学分野での研究にて既知となっている布の力学特性について述べ、高精度な布の動的挙動計算を行うにあたって考慮すべき力学特性について述べる。なお、布は大きく織物と編物に分けられるが、本研究では初歩段階として、最も構造が単純である平織物に限定して考えることにする。

2.1 曲げ特性

繊維工学での布の曲げ特性に関する先行研究により、既知となっている項目を以下にあげる。

- (1) 布の曲げ静特性（モーメント-曲率の関係をゆっくりとした一定変形速度にて計測）は、図 1(a) に示すように、原点から出発し、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となること [33].
- (2) 曲がった布の断面は図 1(b) に示すような構造となり、このときの曲げ回復モーメントは、布を構成する糸の曲げ回復力（弾性成分）と、縦糸・横糸間の接触部（図 1(b) 太線部）および糸内部の繊維間の摩擦力（ヒステリシス成分）から成ること [34].
- (3) 図 2 に示すように、最大曲率を変化させながら計測した各ヒステリシスループは、ほぼ同一形状の曲線から構成されること。

- (4) 振動リード法（加振周波数を変化させながら布を曲げ微小振動させ、このとき自由端の振幅が極大となる振動数から粘弾性係数を求める手法）から得られる布の曲げ粘性は非常に小さいこと [35].

(4) より、高精度な曲げ挙動計算を実現するにあたって考慮すべき物性は、曲げ剛性の非線形および履歴特性であり、粘性についてはほぼ無視してもよいと考えられる。また (3) の特徴を利用した曲げヒステリシスモデルとして、繊維工学の分野では鮑らにより Rate モデルを応用した布の曲げヒステリシスモデルが提案されており、これを利用した布の振動解析等が報告されている [36]. 布の曲率を K とすると、曲げ回復モーメント M は、

$$M(K) = DK - D_1 \exp\{-\alpha(K_0 + K)\} + M_0 \quad \left(\frac{dK}{dt} > 0\right) \quad (1a)$$

$$M(K) = DK + D_1 \exp\{-\alpha(K_0 - K)\} - M_0 \quad \left(\frac{dK}{dt} < 0\right) \quad (1b)$$

で表される。図 2 に示す実線のグラフは曲率範囲 $\pm 2.5 (K_0 = 2.5)$ の近似例であり、 D, D_1, α の係数は最適化法により求めた。 $M_0 = \frac{1}{2} D_1 \{1 + \exp(-2\alpha K_0)\}$ である。他の曲率範囲におけるヒステリシスループについては、(3) の特徴から、これを中心軸（図 1(a) の線分 HI）に沿って平行移動したものを利用することにする。

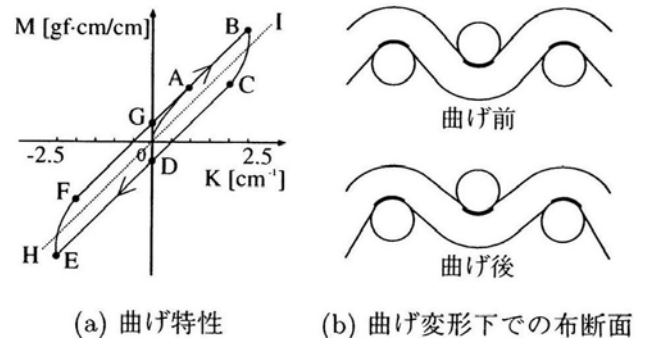


図 1: 曲げ特性と曲げ変形下での布断面

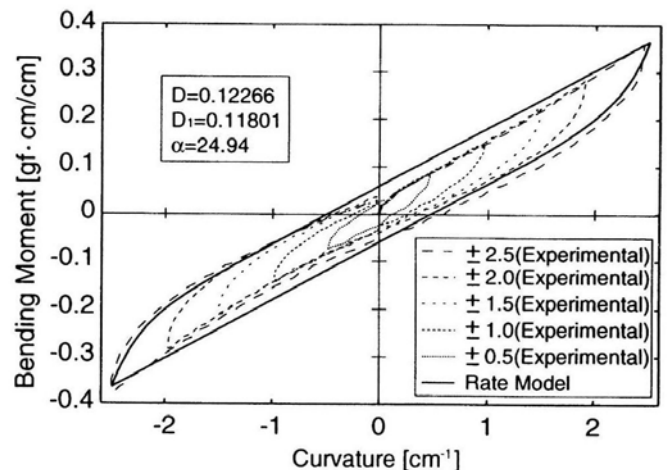


図 2: 各最大曲率での曲げ特性。

2.2 引張り特性

繊維工学の分野での布の引張りに関する先行研究により、既知となっている項目を以下にあげる。

- (1) 布の引張り静特性（引張り回復力-伸び率の関係をゆっくりとした一定変形速度にて計測）は、図3(a)に示すように、原点から出発し、点Aから点Cまで順にたどり原点に戻る非線形、ヒステリシスをもつカーブとなること [33].
- (2) 布が引張られているとき、布断面は図3(a)に示すような構造となり、このときの引張り回復力は、糸の引張り回復力および圧縮回復力（弾性成分）と、糸内部の繊維間摩擦および糸同士の摩擦（ヒステリシス成分）から成ること [31].
- (3) 各変形速度（20, 200, 2000%/min）での曲げ剛性の違い（粘性成分）はほとんどないこと [32].
- (4) 引っ張り試験を連続して繰り返し行ったとき、図3(a)の点線に示すようなループを描き、応力緩和特性がみられること [31].

本研究では、まずは最初の段階として布の曲げ挙動計算の精度を検証することとし、大きな引張り力が生じない評価実験（伸び率が最大0.3%程度）を行うことにする。図4に示した引張り特性（実測値）での0~0.3%の伸び率範囲では、ヒステリシスや応力緩和をほぼ無視できると考え、本研究では上側カーブを近似した4次関数を用いることにする。

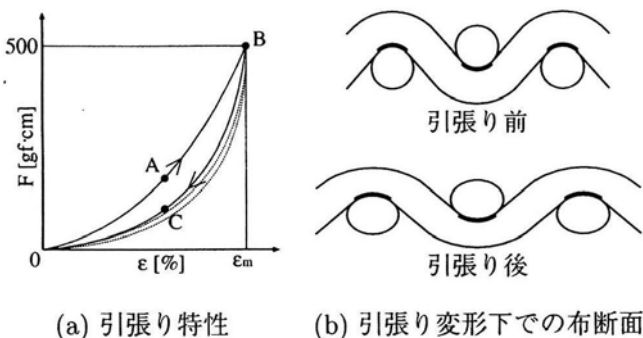


図3：引張り特性と引張り変形下での布断面

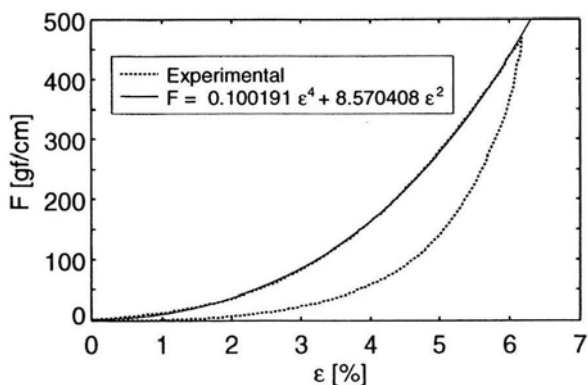


図4：引張り特性.

3. 評価方法の検討

布シミュレーション（特に曲げ挙動計算）を評価するための、実物とシミュレーションとの間での比較実験の方法を検討する。

3.1 曲げ剛性の評価

まずは曲げ剛性（非線形性・ヒステリシス）を評価する。図5(a)に示すような、布の自重による曲げ減衰振動実験を考える。これは布の上端部分、すなわち固定端（把持部）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。真空中にて実験を行うため空気抵抗はほとんど無く、上記のように布には粘性がほとんど存在しない。またこのとき布の引張り方向の力は、布の自重による慣性力のみであり非常に小さいと考えられるため、引張りのヒステリシスや粘性の効果も無視することができると考えられる。よって、振動の減衰の要因は曲げヒステリシスによるエネルギーロスであり、振幅の減衰の様子から布の曲げヒステリシスモデルを評価できる。また振動周波数から、布の曲げ剛性を評価できる。これまで繊維工学の分野でも布の曲げ減衰振動を計測した例 [37, 38, 34] はあるが、真空中で行った例はなかった。

3.2 曲げ粘性および力伝搬を含めた曲げ計算の総合評価

図5(b)に示すような、巻き上げ挙動を考える。この実験では高速（約0.05秒）で布を巻き上げるため、布の曲げ粘性が関わる試験である。引張りも多少は関わるが、シミュレーションを用いて最大伸び率を求めたところ、最大でもせいぜい0.3%であった。したがって曲げ粘性計算を評価することができると考えられる。また速い現象であるため、引張りバネによる力伝搬も同時に評価できる。

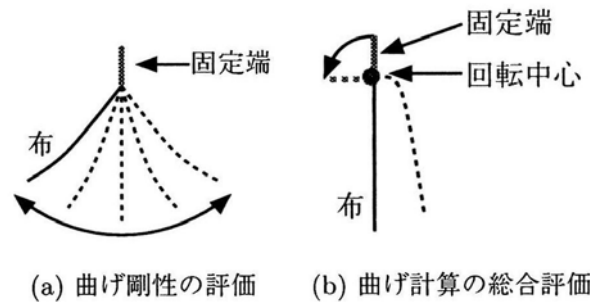


図5：曲げ挙動計算の評価実験

4. まとめ

本論文では、高精度な布挙動シミュレーションを実現するにあたり、まずは布モデルの各要素について繊維工学分野での先行研究を調査し、粘性およびその他考慮すべき物性を検討・モデル化した。その後これらを検証するための、実物とシミュレーションとの間での比較・評価方法を検討した。続けて次報にてシミュレーション手法および実験結果を報告する。

参考文献

- [1] Jerry Weil: The Synthesis of Cloth Objects, SIGGRAPH86, pp.49-54(1986).
- [2] Xavier Provot, Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior, Graphics Interface '95, pp.147-154(1995).
- [3] Nadia Magnenat Thalmann, Martin Courchesne, Pascal Volino, Simulating Deformable Clothes for Fashion Industry, VSMM95, 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, SIGGRAPH98, pp.43-54(1998).
- [6] Mathieu Desbrun, Peter Schröder, Alan Barr, Interactive Animation of Structured Deformable Objects, Graphic Interface'99, pp.133-144(1999).
- [7] Kwang-Jin Choi, Hyeong-Seok Ko, Stable but Responsive Cloth, SIGGRAPH02, pp.604-611(2002).
- [8] Demetri Terzopoulos, Elastically Deformable Models, SIGGRAPH87, 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, 織学誌, 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, SIGGRAPH94, 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, 信学論, 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, J. Text. Inst., 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, J. Text. Inst., 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, Text. Res. J., 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, 織学誌, 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, 織機誌, Vol.28, No.12, pp.T146-T152(1975).
- [18] Peirce, F. T., The Geometry of Cloth Structure, J. Text. Inst., Vol.28, pp.45-97(1937).
- [19] Grosberg, P., The Mechanical Properties of Woven Fabrics, Text. Res. J., Vol.36, pp.204-211(1966).
- [20] B. Olofsson, Study of Inelastic Deformations of Textile Fabrics, J. Text. Inst., 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, Text. Res. J., 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, Text. Res. J., Vol.60, pp.285-292(1990).
- [24] Fengjun Shi, Jinlian Hu, Modeling the Creasing Properties of Woven Fabrics, Text. Res. J., 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, 織学誌, Vol.50, No.2, pp.92-9(1993).
- [26] P. Potluri, J. Atkinson, I. Porat, Large Deformation Modelling of Flexible Materials, J. Text. Inst., 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, 吳小玲, 振動リード法における環境気体圧力の影響, 織機誌, 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] 田川和義, 林 宏卓, 木島竜吾, 布シミュレーションと真空実験による評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.3, 印刷中 (2003).
- [31] 丹羽雅子, 川端季雄, 河合弘迪, 被服材料の力学的性能に関する研究, 織機誌, Vol.20, No.12, pp. T317-328(1967).
- [32] 平井恒夫, 仙波卓弥, 茨木信彦, 織物設計への応用について, 織機誌, Vol.35, No.6, pp. T87-96(1982).
- [33] 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).
- [34] 松平光男, 張 如全, 布の曲げ振動における減衰特性, 織機誌, Vol.49, No.12, pp.T324-T332(1996).
- [35] 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).
- [36] 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, 織学誌, Vol.52, No.2, pp.69-75(1996).
- [37] 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, 家政誌, Vol.32, No.5, pp.390-395(1981).
- [38] 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, 織学誌, Vol.51, No.7, pp.333-337(1995).