
シート類の運搬シミュレーション

Numerical Simulation of a Deformed Sheet in a Handling Path

竹平 修*

Osamu TAKEHIRA

要 旨

複写機、プリンターやファクシミリなど、オフィス機器内部を運搬するシートの挙動を予測する計算機シミュレーションプログラムを開発した。シートは進行方向に垂直な幅方向で一様に変形すると仮定して、2次元のはり弾性体として扱い、幾何学的非線形と摩擦を含んだ接触を考慮した有限要素法による定式化を用いた。シミュレーションによる解析結果は、平面的なシートばかりでなく、最初から巻癖のあるロール紙の実機内部での運搬挙動とかなり良く一致する事を確認した。この技術は、シート類の運搬経路に対する従来からの設計手法を革新する第一歩となる。

ABSTRACT

A new computer simulation program is developed which can predict a dynamic behavior of sheet in a handling path through office machinery, such as copier, printer and facsimile. The sheet is modeled as a 2-dimensional elastic beam on the assumption that it deforms uniformly in width being perpendicular to the forward direction. A finite element method is used for basic formulation considering the geometrical non-linearity and the friction of contact. Using this program, deformations for a flat sheet as well as for a rolled paper having a initial curl are simulated and those results show the remarkable agreements with the experimental observations obtained in the real machinery. This technique will be able to renovate the present process of designing a sheet handling path.

* 研究開発本部 中央研究所 基盤技術研究センター

Advanced Research Department, Research and Development Center, Research & Development Group

1. 背景と目的

複写機、プリンターやファクシミリといったシート類への情報記録機器は、画像入力から出力までの作像技術と、シート類を供給し所定位置へ定期的に送る運搬技術が必要不可欠である。作像方法はバラエティに富み、さまざまな物理現象を用いている事もあり、学会における活動も盛んな分野である。一方、シート類の運搬には静電気力や空気の吸引力などを用いた方式もあるが、今も昔もローラーやベルトによる摩擦方式がほとんどの機器に使われている。これは、簡易で製造コストが低いことや、安定した運搬が可能なシート類の特性値が、広範囲に設定できる事などが理由である。長い間使われている技術であるため、一般的には学術的バックグラウンドにより確立されていると思われるであろう。しかし、企業における現場では、設計者個人の経験と勘、作り込みなどトライ＆エラーによる職人技に頼っているのが実状であり、学会レベルでの研究活動^{1, 2, 3)}も必ずしも盛んとは言い難く、ようやく学会誌に特集⁴⁾が組まれたり、産学協同研究協議会が活動し始めている。

しかし、時代の変化はこの分野にとってますます厳しい状況となっている。全ての機器は更なる小型化が望まれているが、それを達成しようとするに運搬に許される空間が狭まる事となり、よりシート類に変形を強いる。デジタル技術の発展でネットワーク環境下での使用が増えると、以前にも増して運搬ミスの少ない信頼性が求められてきた。さらに、高解像度のカラー画像を作るためには、作像技術ばかりでなく高精度の運搬技術も必要である。また、地球環境問題に関連しオフィスにおける紙の消費を抑制するため、両面への記録が推奨されている。これによりシート類の初期形状のバラツキの増大と、片側記録後に力学的特性の変化が余儀なくされ、よりタフな運搬技術が求められるようになっている。競合との価格競争も激しく、開発コストの低下と開発期間の短縮も満足し上記課題に対処するには、従来の設計手法では限界に近づきつつあり、理論的な解析技術を用いた設計手法が求められている。

シート類の運搬現象は以下の2つに大別される。第一にローラーなどによる摩擦駆動現象である。ローラーは主にゴム材が使用されているが、変形しつつシートと接触し摩擦力が界面で作用し合う。界面ですべりが生じなければローラー

表面の速度でシートが移動するが、現実には数%のすべりが生じる。また、この量はシートの別箇所にも作用する摩擦力などの抵抗力によっても変化し、マクロ的に見ればトラクション現象と言える。また、ミクロ的に見ると、圧力分布を持ち両者が接触する界面でどのようにすべりが発生しているのか、あるいは、経験的なクーロン摩擦則を各箇所でも適用してよいのか、新たな摩擦原理を導入すべきかといった、難解な問題が潜んでいる。第二に、上流側のローラーから下流側のローラーへと受け継がれるまでの、シートの変形挙動である。シートを運搬するために、案内板にて運搬経路が形成される。シートは案内板と接触して抗力と摩擦力を受け変形するが、接触箇所の位置、数とそれぞれの接触力が明示的でない。ましてや、搬送ガイドの形状は無数に考えられ、解析的な解を求めるのはほぼ不可能である。従って、有限要素法(Finite Element Method : FEM)などの数値解析法を用いてシミュレーションを行わざるを得ない。ところが、上記のごとく、接触問題は明示的な境界条件が設定されない非線形問題であり、さらに、シート類の変形は大きな面外変位を示す幾何学的非線形問題でもある。この二つの非線形問題を効率的に解く事は非常に難解なことである。このように、シート類の運搬はシンプルそうに見えるが実はかなり複雑な現象であることが、学術的な研究対象とならなかった一因でもであろう。

この二つの現象のうち、まずシート類の変形を予測する解析技術を構築するため、計算機シミュレーションプログラムを開発した。汎用的な商用プログラムを使用しなかった理由は、シート類の運搬経路の設計を支援するリコー独自のコンピュータシステムへと展開していくためである。ただし、開発したプログラムでは、搬送方向に沿ったシート面に垂直な2次元レイアウト面内におけるシートの変形に限定している。さらに計算モデルにはいくつかの制約があるものの、解析結果は充分実用的レベルにあった。そこで、本稿において用いた計算モデルや計算手法の概略と、設計現場での解析事例などを紹介する。計算手法に関する詳細な定式化は、紙面の関係上記載するのが困難であるため、本稿末に挙げた文献を参照願いたい。

2. 技術

2-1 計算モデル及び手法

2-1-1 シート類の幾何学的非線形問題⁵⁾

変位場の基礎方程式は有限要素法にて定式化した。既述したような2次元の変形を扱うのに最も簡単な、はりとしてシート類をモデル化した。連続体を有限な領域に分割するが、最小単位は要素と呼ばれ、その両端には節点と呼ばれる計算点(この箇所解が求まる)が設けられる。この要素の変形前後の様子をFig.1に示す。

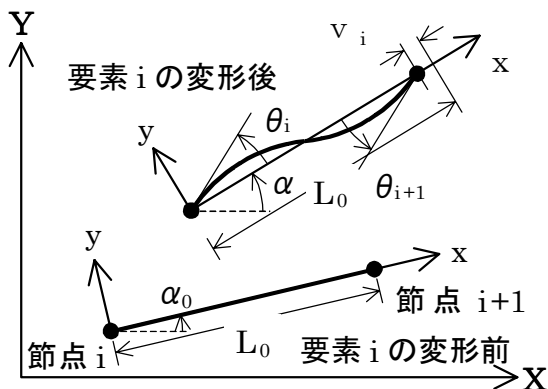


Fig.1 Motion of the beam element and its local co-ordinate axes shown in global co-ordinate system.

幾何学的非線形とは、剛体変位を多く含んだ変形問題と捉える事ができる。すなわち物体の微小領域における応力-歪関係を観測する座標系が初期位置から大きくずれる事を意味する。全体方程式の解法にはNewton-Raphson法を用いており、外力との釣合いを満足させるための内部応力は、常に要素に埋め込まれた局所座標系で評価した。この座標系の取り方⁶⁾はFig.1に示すように、節点iを原点とし節点i+1に向う直線をx軸に、これに90度反時計回りをy軸とした。局所座標系におけるx軸が全体座標系のX軸からの角度を変形前後でそれぞれ α_0 、 α とすればその差 $\alpha - \alpha_0$ が剛体回転となる。

2-1-2 過渡的動解析手法^{5, 7)}

シート類の挙動を過渡的に予測するため、Houbolt法を用いた。この手法は着目節点の時系列変位に3次のLagrange補間公式を適用し、次ステップの変位、速度、加速度の漸化式を作る。一般的な非線形解析では、反復解法における収束判定を行っており、ある程度誤差を含む解を認めている。このため本来は生じない速度や加速度変動が、大きな高周波振動成分として発生する。Houbolt法の採用は、補間による高周波振動成分の減衰効果を期待したからである。また、一般のHoubolt法は等時間ステップを前提とするが、不等間隔への拡張¹⁰⁾を行い使用した。

2-1-3 摩擦を考慮した接触解析手法

接触解析が難解である事は既に触れた。さらに、節点において非接触、固着接触、すべり接触の3つに状態が分類され、それぞれ別の条件式が必要となる。全体の方程式は力学問題における通常の釣合いと、上記条件式が加わったいわゆる混合形式となり、節点変位と接触力が未知変数になる。解析アルゴリズムは、ラグランジュの未定乗数法をベースとし、接触境界を節点が突抜けている距離が加算された添加型ラグランジュ乗数⁹⁾を用いた。摩擦はクーロン摩擦則に従い、摩擦係数は固着とすべりで同一と仮定している。

シートと接触する案内板は、静止剛体とし(実際の機器では弾性変形したり、移動する物もある)、直線と円弧形状及びその組合わせに限定した。案内板の端部と要素との接触も考慮した定式化も行っている。

2-1-4 シートの運搬駆動条件とローラーの扱い

ローラーによるシートの運搬駆動条件は、変動のない強制条件とした。すなわち、すべらずに一定の角度に支持されてシートは移動する。上流側のローラーにて運搬される様子をFig.2に示す。ローラーとシートの接触部から移動線の矢印方向と逆側を運搬駆動領域、この領域内にある節点を駆動節点とする。駆動節点は移動線上で強制変位(=運搬速度×時間ステップ)を与えた。下流側ローラーでは移動線の矢印方向側が運搬領域となる。このような条件設定から、下流・上流ローラーにて挟まれる運搬経路に分割限定し解析の対象領域とした。もちろん、片側あるいはまったくローラーが関

与しない領域でも解析可能である。

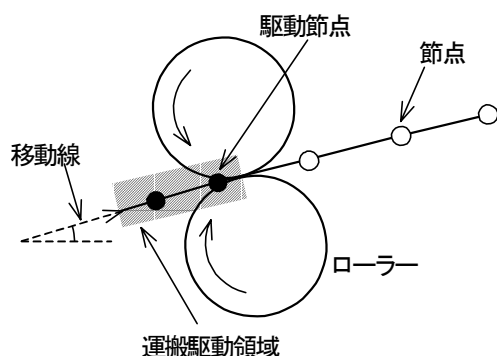


Fig.2 Definition of the region in which nodes are given a constrained displacement instead of a driving force from feed rollers.

また、簡単のためローラーは非回転とし、摩擦係数がゼロとなる円弧状の案内板と見なした。

2-2 シート類の力学的特性値

2-2-1 ヤング率

はりのヤング率は(1)式⁸⁾で示される。

ここで、E：ヤング率，L：はり長さ， ρ ：密度，t：厚さ， f_r ：共振周波数，m：振動モードによって決まる定数を表す。共振周波数は短冊状試料の実測値を，厚さはマイクロメーターによる複数枚の平均値を，密度は測定した重量から定規による平面寸法値と前述した厚さから換算した。(1)式にこれらを代入し，ヤング率を求めた。

$$f_r^2 = \frac{m^4 t^2}{48 \pi^2 L^4 \rho} E \dots\dots\dots (1)$$

2-2-2 減衰特性

減衰に関しては明確な理論がない。そこで、上述した共振周波数測定で求めた共振曲線のバンド幅(Δf)が，共振周波数と(2)式のような直線関係にあったため，新たにモデル式として(3)式を導出し¹⁰⁾用いた。

$$\Delta f = \alpha + \beta f_r \dots\dots\dots (2)$$

$$[C_e] = 2\pi\alpha[M_e] + \frac{1}{2}\beta[Cr_e] \dots\dots\dots (3)$$

ここで， $[C_e]$ ：要素減衰マトリックス， $[M_e]$ ：要素質量マトリックス， $[Cr_e]$ ：要素臨界減衰マトリックスである。

2-2-3 シートの初期カール

シートが平面でなく，カールと呼ばれる巻癖がついている場合，案内板やローラーに対するシート先端の当接角度が急峻となり，シート詰まりなど運搬ミスの発生確率が増大する。そのため，初期カールを考慮した計算機シミュレーションの実施が，非常に有効となる。ここでは，簡易的に初期カールを設定するため，はり要素の節点に一定の曲げモーメントを外力として負荷し続ける方法を用いた。

簡単な一例として，ファクシミリで使用されるロール紙による曲げモーメントの設定方法を示す。解析対象とする運搬経路内では，一様に巻癖がついていると考えられる。これは各要素の両端(節点)には逆向きで等しい曲げモーメントが負荷される事と等しい。要素の中間に位置する節点では曲げモーメントは打消され，結果として紙先端に位置する節点にのみ曲げモーメントが残る。この曲げモーメント値を算出するためにFig.3に示すカール形状の測定を行った。任意の長さを切出し，先端からの長さLの位置で水平に全固定となるように，水平な支持台上で治具にて固定する。ロール紙先端の支持台からの高さHを測定する。次に，開発したプログラムで静的変位解析を行い，この条件を満足する曲げモーメントを推定¹¹⁾すれば良い。

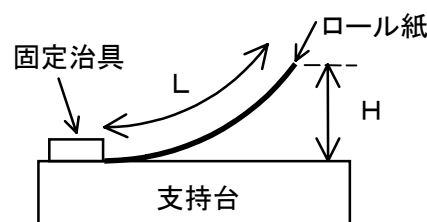


Fig.3 Measurement of a quantity of rolled paper's initial curl.

2-3 解析事例

2-3-1 複写専用紙の力学特性

本稿にて示した方法で測定し，算出した複写専用紙の特性値をTable 1に示す。ここに示した各種実験とシミュレーションは全てこの紙を使用している。

Table 1 Values of paper properties for inputting to numerical simulation.

厚さ (μm)	89.0
密度 (kg/m^3)	7.97×10^2
ヤング率 (N/m^2)	6.26×10^9
減衰特性 α	2.77×10^{-2}
減衰特性 β	6.65×10^{-2}
カールA曲げモーメント (Nm/m)	4.59×10^{-3}
カールB曲げモーメント (Nm/m)	1.13×10^{-2}

初期カール用の曲げモーメントは、直径約100mm程度に巻き取られたロール紙を測定した値である。このうちカールAとはロールの中で直径80mmとなる辺りから、カールBとは直径40mmの巻芯近傍から切出した試料を用い、Fig.3による実験で長さ90mmの時、高さがそれぞれ約33mm、65mmとなった(Fig.5参照)。また、Table 1には単位幅あたりの曲げモーメントの値を示した。

2-3-2 レジストローラー前の変形

複写機などでは、サイズの異なるシートを使用可能にするため、給紙用カセットを複数装備しているのが一般的である。そのため、それぞれの給紙カセットから繰出されるシートにとって、画像をシートへ移す転写部までの運搬経路長、経路形状や関与したローラーの数などが異なってくる。従って、転写部へ到達したシートの姿勢、すなわち先端の到達時刻や平行度などがばらつく原因となる。そこで、転写部直前に位置する通称レジストローラーにてこれを補正している。その方法は、上流側ローラーにて運搬されたシートの先端を回転停止しているレジストローラーの挟持部に突き当て、さらに上流側ローラーでシート後端を繰出すことである。ただし、この動作によってシートは面外に大きな変位を発生するため、この変形を許容する運搬経路が必要となる。もし、不正な変形が起ると、折れやしわなどシートヘダメージを与えてしまう。

この変形の解析例をFig.4示す。上から順に実機器内部、平面モデル実験、シミュレーションによる結果である。実機器内部の観察は側板に穴を開け、ハイスピードカメラにより行った。平面モデルとは、実機器の平面レイアウト図上に案内板をアルミ板で、ローラーをアルミ円柱で置換えた運搬経路モデルを指し、幅10~20mm程度の短冊紙にて変形確認を

行った。どれも紙先端の到達後に後端を8mm送出した時の変形状態を示し、初期カールのない紙を用いた。実機器では側板を全て取り除く事は不可能なため、一部の紙端部しか観察できなかったが、平面モデルと併せて比較しても、十分にシミュレーションにより紙の変形予測が可能である事が確認できた。

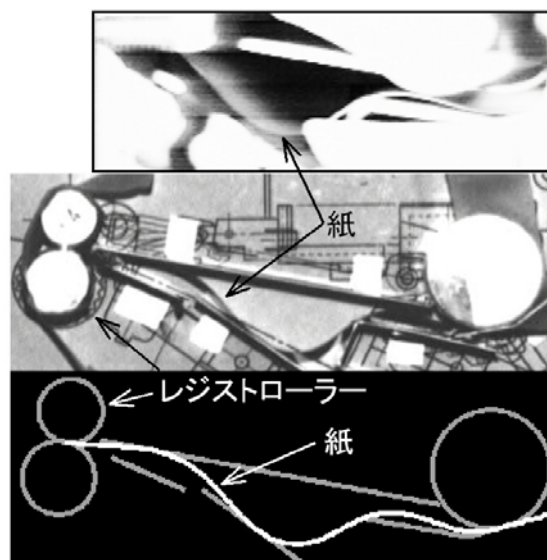


Fig.4 Deformed paper in the upper handing path before REGIST ROLLER.

2-3-3 初期カールの違いによる紙の運搬挙動

初期カールの違いによる紙の搬送挙動の差異を解析した。紙はTable 1に示した紙種のロール製品で、カールAとカールBを初期カールとして用いた。Fig.5には使用した運搬経路概略と、2種類のカール形状を示す。

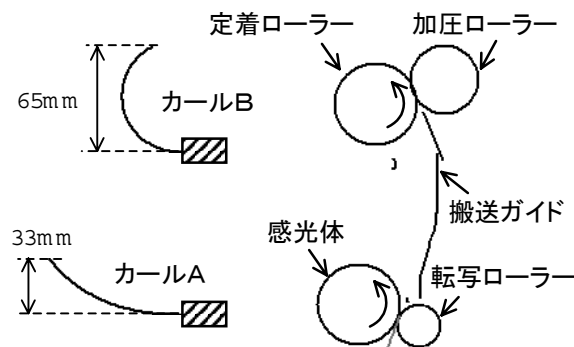


Fig.5 Outline of a handling path and each shape of two rolled papers in different initial curls.

運搬経路は電子写真方式の転写部(Fig.5下部)から定着部(Fig.5上部)までで、紙は下から上方向へと運搬される。感

光体上にはトナーと呼ばれる粉体による画像が形成されており、転写ローラーと挟持された箇所では電界によって紙へと転写される。定着ローラーは内部にハロゲンヒーターが配置され、約180℃前後に加熱されており、加圧ローラーとで挟持することでトナーを溶融し紙へと圧着する。感光体や定着ローラーの直径は30mmで転写部と定着部のそれぞれの挟持箇所は約73mm離れている。

この運搬経路を有する実機器へ2種類の初期カールを持つロール紙の運搬挙動をハイスピードカメラで観察し、シミュレーションによる解析結果と比較した。Fig.6は紙先端がほぼ定着部へ到達した時刻の様子で、右からカールAでのシミュレーション、カールAでの実機器内挙動観察、カールBでの実機器内挙動観察、カールBでのシミュレーションの各結果である。Fig.7はFig.6からさらに30msec.経過後の様子を示した。経路中間辺りから定着部手前までは部材に隠れて観察できない箇所もあるが初期カールによる運搬挙動の差異が良くわかる。Fig.6ではどの場合でも、経路中間辺りから紙先端までに、初期カールの左側凸湾曲形状が残っている。しかし、Fig.7のカールAでは紙先端がスムーズにローラー挟持部へ進入し、それにつれて右側凸の湾曲に変わって運搬された。これに比べカールBでは、共に初期カールの左側に凸な湾曲形状が強く残った。シミュレーションではローラーの回転を考慮していないため紙先端は停留したが、実機器ではそれでも紙先端がローラー挟持部へ進入し運搬されるに至った。しかし、紙先端がローラー挟持部へ進入し難い挙動となっており、大きな湾曲が残ることで未定着なトナー画像が定着ローラーや部材と擦れることで不良画像が発生するなど、安定性が著しく悪かった。

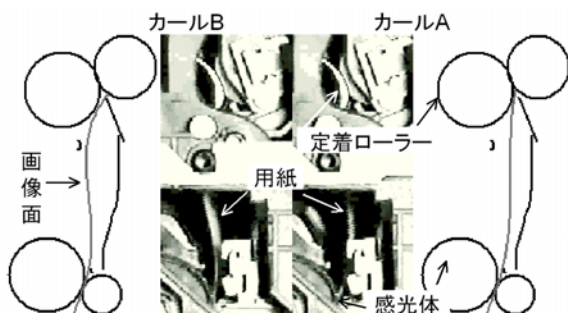


Fig.6 Rolled papers deformations at just before time that their tops are nipped between fuser rollers.

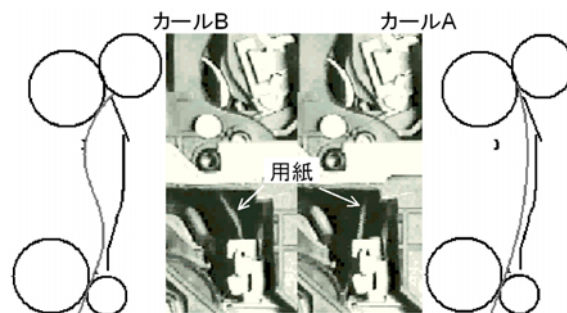


Fig.7 Rolled papers deformations at 30msec. later from Fig.6.

このように、開発した数値シミュレーションプログラムによって、初期カールの違いによる実機器内部でのシート類の搬送挙動の差異が明瞭に予測可能であることがわかった。また、本稿で紹介することができなかったが、実験では測定困難な、搬送ローラーが受ける抵抗力や、ガイドへの接触抗力と摩擦力¹⁰⁾が予測できる。

3. 成果

幾何学的非線形と摩擦を含む接触問題を有効的に解くアルゴリズムを考案した。はりとモデル化したシート類の力学特性を測定し、その値を開発したプログラムによるシミュレーションに使用する事で、シート類の運搬経路内における2次元的な変形挙動をを予測することが可能な事を示した。

この事は、経験や勘に頼っていた従来の設計手法の一部が、理論的な検討による数値へ置き換え可能な事を意味している。これにより確実な技術蓄積と継承、ならびに試作数の減少による開発コストの低減と開発期間の短縮など、シート類の運搬経路設計の革新へ向け、その第一歩を踏み出すことができた。

4. 今後の展開

本文中に示した通り、まだまだ制約条件が多い。例えば、案内板を移動可能な弾性体とすることや、3次元的な変形モデルへの拡張などで、考慮すべき条件を順次追加していく。また、冒頭に触れたように、ローラーなどによる摩擦駆動におけるすべりを考慮した解析の実現は、高画質化のためにも重要で、すべり自体の発現メカニズム解明と併せて研究していく必要があるなどと、課題は多い。

謝辞

本研究にあたり、プログラム開発へのご協力、実験結果のご提供や、有意義なご助言と議論をしてくださった、画像システム事業本部の関係者各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 奥名，西垣戸，椎名：用紙ガイドの摩擦抵抗を考慮した用紙挙動解析，機械学会論文集(C編)，60，575(1994),pp.2279-2284
- 2) 関本，鶴飼：情報機器における紙の挙動シミュレーション，日本機械学会第72期全国大会講演論文集(IV)，No.940-30,(1994),pp.694-696
- 3) 吉田：ばね-質量梁モデルを用いた紙葉類の動的変形解析，日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集(IV)，No.96-1,(1996),pp.612-613
- 4) 岡山，他：特集 柔軟媒体の送りとトライボロジー，トライボロジスト，42，5(1997),pp.321-380
- 5) 鷲津，他共編：有限要素法ハンドブックⅡ応用編，初版，培風館，(1983)
- 6) T.Belytschko，L.W.Glaum：Applications of Higher Order Corotational Stretch Theories to Nonlinear Finite Element Analysis，Computers & Structures，10(1979),pp.175-182
- 7) 吉田，原田：有限要素法による非線形動解析の時間積分スキームに関する一検討，構造工学における数値解析シンポジウム論文集，第14巻，(1990),pp.245-250
- 8) 藤井：超低周波領域内に於ける紙の粘弾性について，紙パ技協誌，18，58(1956),pp.30-34
- 9) J.H.Heegaard，A.Curnier：An Augmented Lagrangian Method for Discrete Large-Slip Contact Problems，Int. J. Numer. Methods Eng.，36(1993),pp.569-593
- 10) 竹平，藤原：はり要素を用いた有限要素法による紙搬送シミュレータの開発と複写機への適用，第3回計算工学講演会論文集，(1998),pp.1039-1042
- 11) 竹平：ロール紙搬送挙動の数値計算解析，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'99講演論文集(CD-ROM),2P2-82-020