

気流を考慮した印刷機における紙の運動解析

Paper Sheet Behavior Analysis Associated with Surrounding Air in Printing Press

技術本部 杉原正浩*¹ 足立武司*²

三原製作所 鈴木節夫*³

菱研テック株式会社 渡部洋八郎*⁴

製紙機械・印刷機械では、生産速度の高速化と紙の軽量化に伴い、周囲の気流と連成して運動する紙の挙動を安定化することが重要となっている。本研究では、流体中で運動する紙の挙動を解析するベースコードを構築するとともに、流体中で変形した紙に作用する抗力・揚力の計測を行った。さらに、上記の計測結果とベースコードを用いて、直接計測が困難な付加質量を含む慣性力項をモデル化し、空気中での紙挙動を数値的にシミュレーションすることが可能となった。この結果、従来実験に依存していた前記機械における紙挙動を、数値解析により予測することが可能となった。

The speed of paper machine and printing presses has dramatically increased. In such machine, paper travel may be destabilized due to surrounding air flows. We conducted basic studies on thin, low-stiffness paper sheets associated with surrounding fluid. Numerical analysis taking into effect paper stiffness, aerodynamics and inertia was developed using a multihinged model. Aerodynamic forces such as drag and lift acting on deformed sheets, were measured experimentally. Inertia terms, including added mass, acting on paper sheets were also evaluated by measuring the fall of thin sheets to show that added mass depends on the sheet aspect ratio. Based on the above results, several factors affecting paper sheets in paper machine and printing presses were predicted using our proposed method.

1. ま え が き

近年、印刷機械、製紙機械など紙を取扱う装置では、生産速度の高速化と紙の軽量化、薄膜化が進んでいる。高速下で安定した紙及び印刷物の生産を行うためには、生産プロセスにおける紙運動を予測した装置設計を行うことが必要である。このため、過去に空気中における低剛性薄膜の運動予測に関して様々な研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。しかしながら、気流と連成した紙の運動・変形を予測するためのデータが不十分であったことから、これまで実機における紙挙動を数値解析により予測するには至っていなかった。

本研究では、実機上で見られる紙の基本運動時に発生する流体力を要素実験により求め⁽⁴⁾、これを用いて実機上での紙挙動を解析するシミュレーションを構築した。また、このシミュレーションを用いて枚葉印刷機における紙挙動の解析を行い、実機における紙挙動をおおむね数値計算により予測できることを確認した。

2. 基礎方程式

空気中で運動する紙の運動方程式は、次式(1)で示される⁽¹⁾。

$$(m_s + m_a) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2(m_s + m_a) V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + [(m_s + m_a) V^2 - T] \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F_a + F_0 \quad (1)$$

ただし、

- m_s : 紙質量
- m_a : 付加質量
- V : 紙移動速度
- w : 紙変位
- EI : 紙剛性
- T : テンション

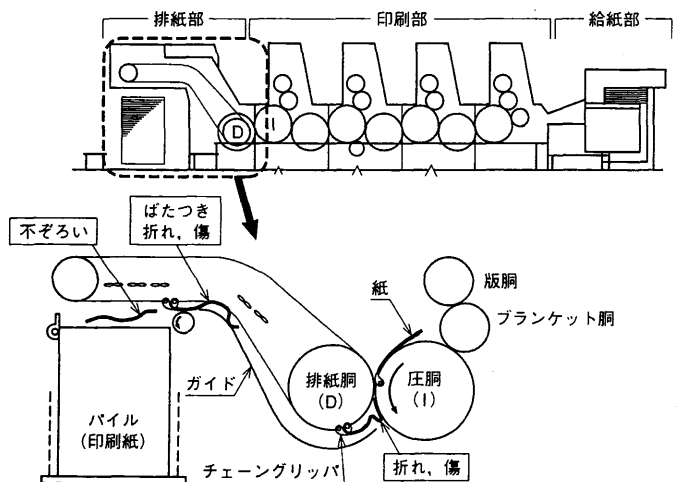


図1 枚葉印刷機構成概要 本研究対象の実機構成及び課題となる現象を示す。

Outline of sheet offset press

F_a : 空気力

F_0 : 外力

式(1)において、右辺第1項の流体力には、抗力、揚力及び紙が壁面近傍で運動する際に壁面との間の流体を排除、もしくは周囲流体を流入することによって生じる排除抵抗力が含まれている。また、第2項の外力には、浮力、遠心力が含まれている。

図1に枚葉印刷機の構成と課題となる現象の概要を、また表1に実機上で見られる紙の基本運動を、それぞれ示す。本研究ではこれらの基本運動に関し、式(1)右辺第1項の流体力の計測を行った後、式(1)左辺中の付加質量 m_a を含む項のモデル化を行った。

3. 実験条件及び方法

本研究では、各流体力を把握する実験を、水槽及び風洞を用い

*¹ 広島研究所紙・印刷機械研究推進室 工博
*² 長崎研究所主管 工博

*³ 製紙・紙工機械技術部製紙機械設計課
*⁴ 開発室主管

表1 紙の基本運動と作用力
Basic motions and forces

運動形態	作用力				
	抵抗力	付加質量力	排除抵抗力	重力	遠心力
自由落下	○	○	—	○	—
片持ち自由振動	○	○	—	○	○
回転運動	○	○	—	○	○
着地引はがし	○	○	○	○	—
フラッタ	○	○	○	○	○

表2 実験条件一覧
Test conditions

項目		条件		
揚力・抵抗力測定	供試風洞	最大風速	25 m/s	
		乱れ強さ	0.3% (6m/s時)	
	供試薄膜	材質	ポリカーボネート	
		厚さ	0.1 mm	
		EI	1.9×10 ⁻⁴ Pa·m ⁴ /m	
		アスペクト比	1.4	
	ブロックage比	6.2%		
実験レイノルズ数	8.0×10 ⁴ 1.2×10 ⁵	供試薄膜長及び平均流速に基づく。		
落下挙動	測定法		ストロボ撮影画像解析	
	供試薄膜	材質	アルミ, ポリカーボネート	
		厚さ	0.3 mm (アルミ板) 0.1 mm (ポリカーボネート)	
		アスペクト比	1, 2, 3	
	ブロックage比	4.5%以下		

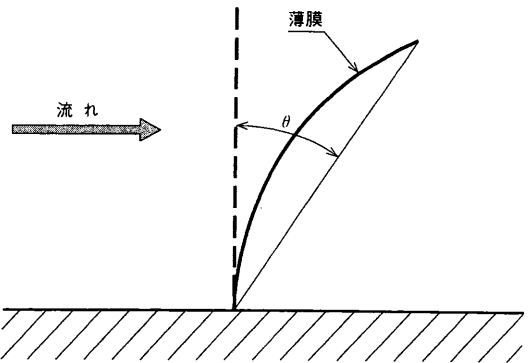


図2 平均傾斜角の定義 平均傾斜角の定義を示す。
Definition of inclination angle

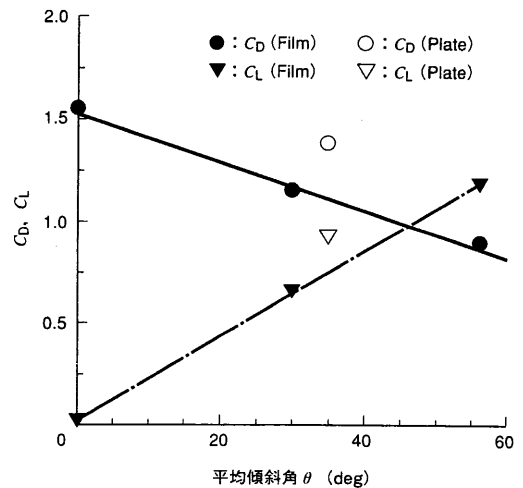


図3 平均抵抗力及び揚力係数測定結果 気流で変形した薄膜に作用する平均抵抗力及び揚力係数を示す。
Drag and lift coefficient of thin membrane

て行った。これらの実験条件を、表2に示す。ここで、本研究で対象としている枚葉印刷機では、透気性の低いコート紙⁽⁵⁾が多く用いられる。そこで各流体力を把握するための供試体には、紙と同等の曲げ剛性を有し寸法安定性の高いポリカーボネート製の薄膜を使用した。また、気流により変形した薄膜に作用する空力特性の測定は、上記ポリカーボネート薄膜を2枚張合せた間に表面圧力を取出すための微細孔を設けた供試体を用いて行った。なお後述の薄膜変形時における平均傾斜角 θ は、図2に示すように平均傾斜線と称する薄膜前縁とと後縁を結んだ直線と、主流方向が直交する場合を $\theta=0$ deg とし、平均傾斜線が薄膜前縁を中心として主流方向に回転する場合を $\theta>0$ と定義した。一方、薄膜に作用する付加質量 m_a は直接計測ができないため、薄膜の落下速度履歴を計測し、これをモデル化することによって後述のシミュレーションに反映した。なお、このモデル化を行う際には、前述の流体力計測結果と、薄膜が壁面近傍で運動する際の排除抵抗力を考慮している。

4. 実験結果

4.1 抵抗力及び揚力特性

図3に、薄膜の平均傾斜角 θ に対する平均抵抗力係数 C_D 及び平均揚力係数 C_L の計測結果を示す。なお C_D 及び C_L は次式(2)で定義する。

$$C_D = \frac{\int \Delta P \cos \theta(x) dx}{1/2 \rho_a V^2} \tag{2}$$

$$C_L = \frac{\int \Delta P \sin \theta(x) dx}{1/2 \rho_a V^2}$$

ただし、

- ΔP : 薄膜表裏差圧
- $\theta(x)$: 局所薄膜角度
- V_a : 流体近寄り速度
- ρ_a : 流体密度

図3中、“Film” と示したプロットは薄膜表面の圧力分布計測結果から求めた抵抗力及び揚力係数を、一方“Plate” と示したプロットは薄膜に0.2 mm厚のアルミ板を張付けて変形を抑制した場合の各係数を、それぞれ示している。

図3に示したように、薄膜に作用する揚力及び抵抗力はおおむね薄膜の平均傾斜角 θ とともに直線的に変化する傾向を示す。また、薄膜が変形する場合と変形を抑制した場合の結果を比較すると、薄膜が変形する場合に作用する揚力及び抵抗力が若干低い値をとるようである。

4.2 落下挙動

次に、薄膜の自由落下挙動及び壁面に近付いた場合における挙動を計測した結果について示す。

図4は、薄膜が壁面から無限遠にある場合の落下速度の変化を示したものである。

なお図中の V_{ter} 及び H は下記の式(3)で定義し、 x は落下開始位置からの距離を示している。

$$H = x(V=0.9V_{ter}) \tag{3}$$

ただし、

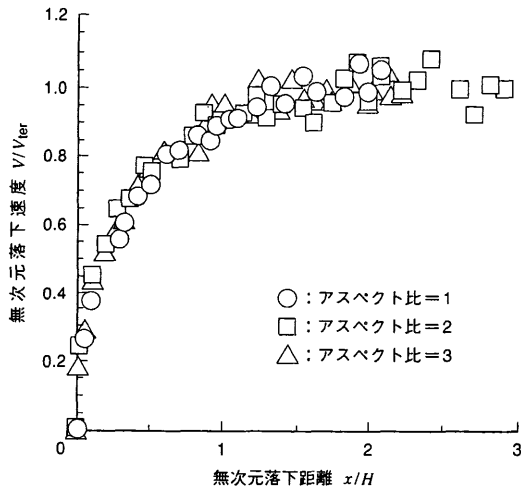


図4 自由落下挙動測定結果 壁面から無限遠にある場合の自由落下挙動を示す。
Free fall behavior of thin membrane

$$V_{ter} = \sqrt{\frac{2\rho_s g \delta}{C_D \rho_a}}$$

ρ_s : 薄膜密度
 δ : 薄膜厚さ

図4に示したように、薄膜は落下開始後次第に加速し、 x/H の増加に伴って $V/V_{ter}=1$ に漸近する傾向を示す。またアスペクト比の影響は、落下開始から終端速度に至るまでの間における加速度の差及び H の差となって現れるが、図4に示したように x/H 及び V/V_{ter} で無次元化することによってアスペクト比によらず整理できるようである。なお、供試薄膜の材質及び寸法を変化させた実験を行った結果、同一アスペクト比の供試薄膜では材質及び寸法による顕著な落下挙動の差は見られなかった。

一方、薄膜が壁面に近付いた場合における落下挙動計測結果を、図5に示す。図中横軸に示した h は壁面から薄膜までの距離を、また a は薄膜の代表長さを、それぞれ示している。図5に示したように、薄膜は壁面に近付くと次第に減速する傾向を示す。またアスペクト比の影響は、減速開始後 $0.5 > h/a > 0$ の領域に現れている。このアスペクト比に対する依存性は、壁面近傍における排

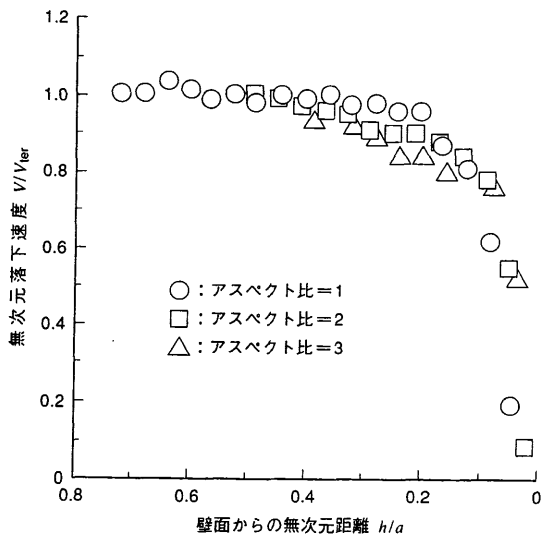


図5 壁面近傍での落下挙動計測結果 壁面近傍で運動する薄膜の落下挙動を示す。
Falling behavior of thin membrane at near wall region

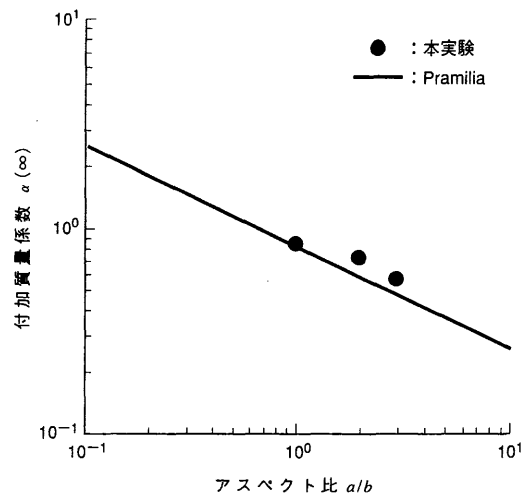


図6 自由落下時の付加質量係数 壁面から無限遠にある場合の付加質量係数を示す。
Added mass coefficient in free falling process

除抵抗力によるものと考えられる。なお壁面近傍の薄膜落下挙動においても、供試薄膜の材質及び寸法による落下挙動の差は見られなかった。

ここで、薄膜が壁面から無限遠にある場合における付加質量の逆解析を試みる。この場合、式(1)に示した薄膜の運動方程式は、式(4)及び(5)のようになる。

$$(m_s + m_a) \frac{\partial V}{\partial t} = -C \frac{1}{2} \rho_a V^2 ab + g(\rho_s - \rho_a) \delta ab \quad (4)$$

$$C = 2 \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \frac{g \delta}{V_{ter}^2} \quad (5)$$

ただし、

g : 重力加速度
 a : 薄膜代表長さ
 b : 薄膜幅

式(4)及び(5)から、薄膜に作用する付加質量 m_a は実験から求めた落下速度 V 、薄膜寸法 ab と、薄膜の密度 ρ_s 及び周囲流体の密度 ρ_a を代入することによって求められることが分かる。

薄膜に作用する付加質量係数 $\alpha_{(\infty)}$ を式(6)で定義し、図4に示した結果から付加質量係数 $\alpha_{(\infty)}$ を求めた結果を、図6に示す。

$$m_a = \alpha_{(\infty)} \rho_a ab \quad (6)$$

図中の実線は、Pramilia⁽⁶⁾による結果を示したものである。図6に示したように、本実験結果から求めた付加質量係数 $\alpha_{(\infty)}$ はおおむね Pramilia による結果と一致したものとなっている。

5. 実機現象解析

これまでに示した実験結果から、薄膜に作用する流体力と付加質量の影響を含んだ加減速時における慣性力をモデル化して、式(1)を数値的に解くシミュレーションを構築した。以下、シミュレーションによる解析結果を示す。

図7は、図1中での排紙部最終段階で紙を積重ねる際に見られる紙の基本運動として、傾斜静止状態から自由落下する紙の挙動を二次元計算したものである。計算条件は、紙アスペクト比1、坪量 81 g/m^2 、 $EI = 8.1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^4/\text{m}$ で初期傾斜角は 30 deg 、出力タイムステップは 50 ms である。

自由落下開始後、紙は紙面左方向に滑りながら落下速度を増し、同時に傾斜角を減じていく。その後、紙の傾斜角度が反転して紙

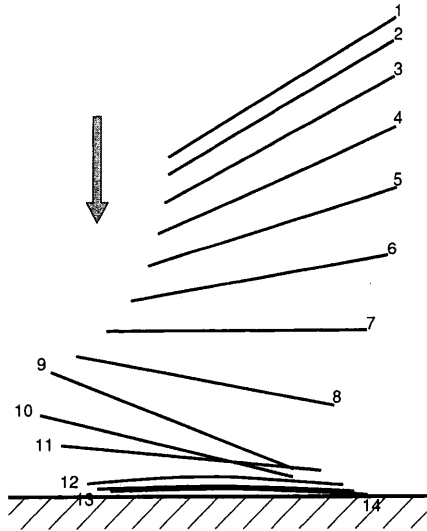


図7 自由落下挙動解析 揺らぎながら自由落下する紙が着地するまでのシミュレーション結果を示す。
Simulation results of falling sheet

面右下がりの状態に転ずる。この傾斜方向の反転によって紙表面上の圧力分布形態が変化し、紙の滑り方向も紙面右方向へと反転する。本計算では、紙の横滑り方向が反転した辺りから壁面の影響が現れ始め、紙の落下速度は次第に遅くなる。同時に傾斜角が減少し、次第に水平姿勢に近づいていく。このように、紙が空気中で揺らぎながら落下する様子を数値計算により求めることが可能となった。

次に、図8に図1中の排紙部ガイド板に沿った領域の紙挙動を計算した結果を示す。計算条件は、通紙速度3 m/s、紙アスペクト比1.4、紙剛性 $EI=1.6 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^4/\text{m}$ 、紙坪量83 g/m²で、ガイド板面と紙前縁との距離は30 mmとし、紙の通気性及びチェングリッパから生じる後流の影響は無視している。また本計算では、第4章に示した実験データから平均傾斜角 θ に対する薄膜上圧力係数分布の近似モデルを作成し、これを計算中の薄膜表面に作用させている。

図8に示したように、紙前縁はチェングリッパにつかまれた状態で紙面右下からガイド板に沿って直線的に左上に向け斜めに上昇する。この領域では、紙は重力と移送に伴う揚力の影響を受けて若干紙後端が垂下がった形状をとりながら移送される。曲率部に入ると、紙は遠心力の作用によりガイド板面から離れる方向に振出される挙動を示す。このとき、紙には下記の流体力が作用する。

- 振出しに対して紙とガイド板面との間に発生する負圧
- 壁面近傍における付加質量力
- 振出し運動に対する抗力
- 振出しにより移送方向に対して紙が迎え角を持つことで発生するガイド板面向き揚力

図8に示した結果では、上記のような流体力が作用することにより紙の振出しが抑制されている。このように、本計算では紙に剛性、壁面との間の負圧、抗力、揚力及び付加質量力を作用させ

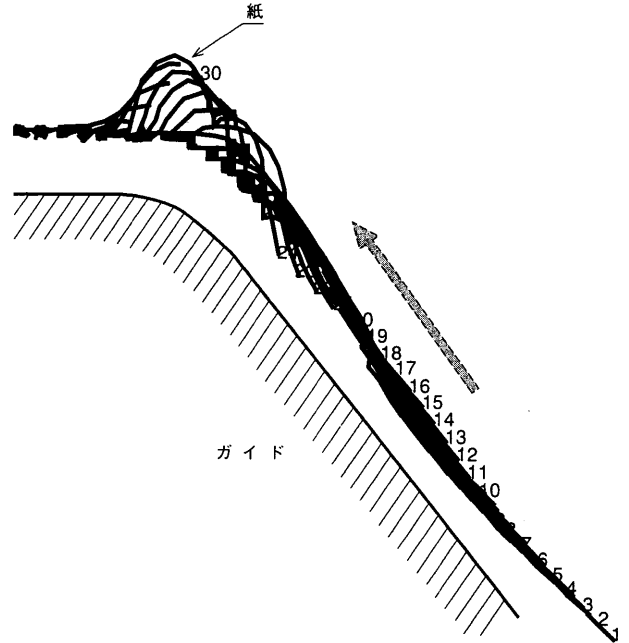


図8 排紙部の紙挙動解析結果 曲率部を通過する際における紙挙動をシミュレーションした結果を示す。
Calculation results of paper sheet behavior in delivery part

ることによって、曲率部通過時における紙後縁挙動を実現象に近いものとすることができた。

以上に示したような解析技術を構築した結果、排紙部ガイド板と紙の間への空気流入面積、印刷速度及び紙種等の条件に対する紙挙動を予測することが可能となった。これにより、高速下における紙の不安定挙動対策などが十分行えるようになった。

6. ま と め

紙に作用する流体力を実験的に把握し、これを用いたシミュレーションを構築することで、実機における複雑な紙挙動を数値計算で予測することが可能となった。今後は本研究成果を実機設計に活用し、高速でより安定した紙挙動が得られる製紙・印刷機械の開発に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- (1) Chang, Y. B. et al., Aerodynamics of Moving Belts, Tapes and Webs, ASME Symposium on DYNAMICS OF AXIALLY MOVING CONTINUA, (Sep. 1991)
- (2) Terzopoulous, D. et al., Elastically Deformable Models, Computer Graphics, Vol. 21 No. 4 (1987) p. 205
- (3) 渡部ほか, 紙のフラッタに関する解析, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (1996) p.263
- (4) 杉原ほか, 薄膜に作用する流体力の評価, 日本機械学会流体工学部門 第1回流体工学トークイン (I) 講演論文集 No.97, 62 (1997) p.I-J-2
- (5) 渡部ほか, 走行紙のローラ上での浮上量予測, 三菱重工技報 Vol.27 No.2 (1990) p.100
- (6) Pramilia, A., Sheet Flutter-An Analytical and Experimental Study, Tampere, Univ. of Tech. Dept. Mech. Eng. Appl. Mech. Rep. 30 (1985)