

エアアシスト給紙機構における搬送用紙と空気の複雑な挙動を解明するシミュレーション技術の活用

Advanced Simulation Technology for Innovating Air-Assisted Paper-Feed Mechanism

中本 秀一

澤田 有弘

服部 俊介

手塚 明

■ NAKAMOTO Hideichi

■ SAWADA Tomohiro

■ HATTORI Shunsuke

■ TEZUKA Akira

印刷機械など自動紙送り機器のいっそうの性能向上には、搬送用紙と見えない空気との複雑な相互作用による挙動の把握が課題となっている。なかでも、用紙の束に空気を吹き付けながら用紙を一枚ずつ取り出すエアアシスト給紙機構は、空気制御を含めた給紙機構のち密な設計が必要であり、対象が空気であることから実験だけによる試行錯誤的な開発には限界がある。

東芝は、独立行政法人 産業技術総合研究所（以下、産総研と略記）の最先端シミュレーション技術に注目し、この機構への適用可能性検証を目的に共同研究を行った。その結果、実験だけでは得られなかった知見の導出に結び付き、シミュレーション導入の有効性を確認できた。

Further improvements in the performance of automated paper handling machines such as printers and mail sorting machines are required by gaining a better understanding of the complex coupling behavior between air and the conveyed media. In particular, there is a need for detailed feed unit design taking air flow control into consideration for the development of an air-assisted paper-feed unit, which is a mechanical unit to pick up one sheet of paper from a bundle of papers with the assistance of wind blown on the side of the bundle. However, it is difficult to identify desirable design directions through trial-and-error experiments alone.

Toshiba and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) have been engaged in joint research aimed at determining the potential application of advanced fluid-structure interaction simulation technology developed by AIST to the development of an air-assisted paper-feed unit. We have confirmed the effectiveness of such numerical simulations and obtained findings that were unobtainable in past experiments.

1 まえがき

エアアシスト給紙機構は、積層された用紙の束から用紙を一枚ずつ取り出す際、用紙束の側面に空気を吹き付けながら用紙を取り出す機構である。送風により用紙間に空気層を形成し、密着した用紙の分離を促して用紙間の摩擦力や初期密着力の軽減を図る。この機構は金融機器や、郵便物区分機、印刷機など様々な紙送り機器で用いられ、フィードミスや2枚取りなどの取出し不良を大幅に低減している。

しかし、この機構は柔軟な用紙と見えない空気の複雑な相互作用を扱うため、用紙の挙動を把握することが難しい。設計パラメータが膨大になるなか、実際の開発は試作機で試行錯誤を繰り返しながら地道に性能を向上していく方法が取られているが、経験則の蓄積による開発には限界がある。更なる性能向上には、現象の理解や挙動の把握に不可欠な制御・設計パラメータの絞込みや抽出を可能とする先進的シミュレーション技術が必須と言われてきたが、この問題を取り扱える商用ソフトウェアは存在しない。

東芝は、産総研が開発を進めてきた最先端の流体構造連成シミュレーション技術に注目し、エアアシスト給紙機構の挙動把握解析への適用可能性検証を目的に共同研究を行った。産総研はこれまでの解析技術を更にエアアシスト給紙機構の

挙動把握に特化させた開発を行い、当社は用紙挙動を解析するための境界条件などの提示、実験で得た知見に基づく空気流入モデルの開発、及び解析結果を設計知見へ反映することの可能性評価を行った。

ここでは、まず、当社で新たに開発したエアアシスト給紙機構と実験による動作検証について述べ、次に産総研で実施した非定常空気流解析込みの複数枚用紙挙動シミュレーションとその評価結果について述べる。

2 エアアシスト給紙機構

2.1 概要

エアアシスト給紙機構は、用紙が密着している場合や大判の用紙に対して特に有効で、既に各種の装置で実用化されている。しかし空気を吹き付けるだけでは、空気は積層された複数の用紙間のうち流路抵抗が低い場所に流れていき、密着力が大きい用紙間には入りにくく、捌（さば）き効果としては不完全である。そこで当社は、図1に示すような新方式の機構を開発した⁽¹⁾。

従来の機構からの改良点は、空気吹付けに加えて用紙に物理的な捌き力を与える偏心ローラを加えた点である。偏心ローラの目的は、空気吹付けにより部分的に捌けた用紙に対

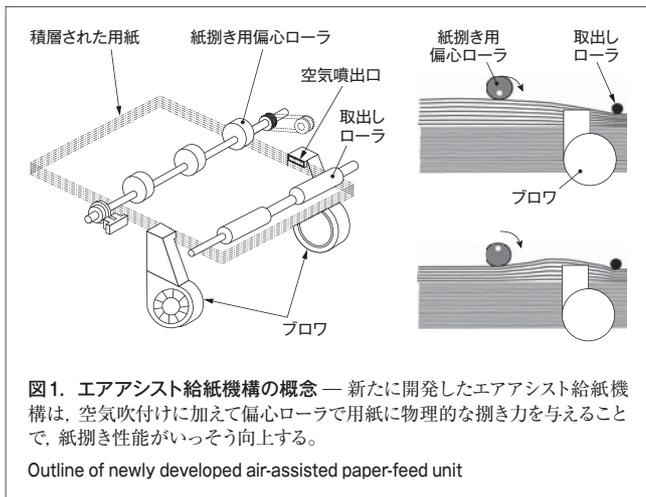


図1. エアアシスト給紙機構の概念 — 新たに開発したエアアシスト給紙機構は、空気吹付けに加えて偏心ローラで用紙に物理的な捌き力を与えることで、紙捌き性能がいろいろ向上する。

Outline of newly developed air-assisted paper-feed unit

し、更に手で捌くような運動を与えることであり、これにより紙捌き性能の向上が見込まれる。

2.2 基礎検証実験

新方式の機構を図2に示す。この機構の効果を検証するため、基礎検証実験として、用紙の束から100枚の用紙を取り出した際の、重ね送り回数、スキュー角度の標準偏差、及び通

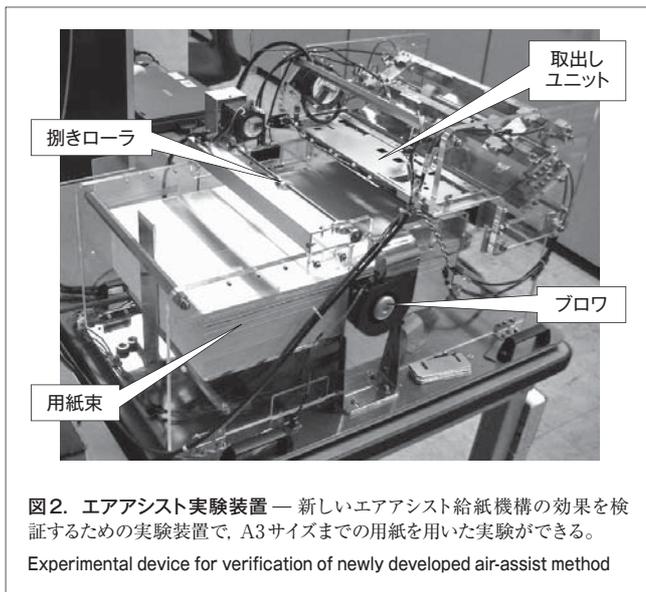


図2. エアアシスト実験装置 — 新しいエアアシスト給紙機構の効果を検証するための実験装置で、A3サイズまでの用紙を用いた実験ができる。

Experimental device for verification of newly developed air-assist method

表1. エアアシスト実験結果

Results of experiments on newly developed air-assist method

紙種 (サイズ)	実験条件	重ね送り回数 (回)	スキュー角度標準偏差 (°)	通過時間間隔標準偏差 (ms)
普通紙 (A4)	空気吹付けなし	0	0.14	5
コート紙 (A3)	空気吹付けなし	28	0.15	372.9
	空気吹付けあり	10	0.17	67.4
	空気吹付けあり + 捌きローラ	0	0.14	8

過時間間隔の標準偏差を測定した。その結果を表1に示す。ここで、コート紙は表面に顔料などを塗布し平滑性を向上させた用紙で、普通紙はコピー機などで一般に推奨される用紙である。

まず、A4サイズの普通紙を100枚取り出したところ、新方式の機構では重ね送りは発生せず、通常条件ではまったく問題なかった。次に、厳しい条件下での動作を検証するため、A3サイズのコート紙で、用紙間に水をミスト状にして吹き付けた後密着させた束を用いて取出し実験を行った。その結果、重ね送り回数は、空気吹付けなしでは28回、空気吹付けありでは10回、更に空気吹付けあり+捌きローラでは0回を達成したことから、この機構の捌き効果が確認できた。

基礎検証実験で得られた知見を以下に述べる。

- (1) 密着した用紙は、用紙の端になんらかの作用が加わり少しでもすき間ができると、そこから一気にはがれる傾向があり、そのきっかけとして空気吹付け及び捌きローラが有効に機能することがわかった。また、空気吹付けだけでもある程度の効果は得られるが、偏心ローラによる力の作用により、用紙間にせん断力が作用して用紙がほぐれる効果が助長されるためと考えられる。更に、偏心ローラによって用紙の一部を上から押さえることで、用紙間の容積を制限し、内圧が高まることによって紙が分離するため、捌き効果が高まるという現象も見られた。
- (2) 通過時間間隔はどれだけスムーズに用紙を取り出せているかを示しており、密着した用紙を取り出そうとした場合、引きはがす時間にはばらつきが生じる。この結果も、空気吹付けなしから、空気吹付けあり、空気吹付けあり+捌きローラになるにつれてばらつきが小さくなり、スムーズに用紙を取り出せていることがわかる。空気を吹き付けることで用紙が暴れ、スキュー角度がばらつくことも考えられたが、結果的にスキュー角度の標準偏差は三つの条件でいずれも同程度に収まっており、風量を適切に選べば用紙が暴れて取出しに悪影響を及ぼすことがないこともわかった。

2.3 開発の課題

この機構で扱う現象は、空気流と柔軟な物体の複雑な非線形連動現象であるため、実際の製品を設計するうえで挙動予測が困難であるという課題がある。少しでも寸法やすき間の変化があると空気の流れが変わり、用紙の挙動も大きく変わって現象の把握が難しい。また、紙種や、大きさ、風量、吹付け位置、吹付けパターンなど設計パラメータが多く、実験的手法では制御も含めた最適設計が難しい。

実機を開発するにはシミュレーションの援用が不可欠であるが、積層状態の用紙間への空気流入や空気流入後の複数枚の用紙挙動をシミュレーションする必要がある、従来の手法では不可能であった。

3 気流解析込みの用紙挙動シミュレーション技術

今回産総研は、これまで行ってきた固定計算点（以下、メッシュと記す）に基づく流体構造連成解析技術の研究⁽²⁾⁻⁽⁴⁾を基に、エアアシスト給紙機構固有の現象である用紙束への空気の流入と、空気流入後の複数の用紙挙動にポイントを絞り応用研究^{(5), (6)}を行った。その内容を以下述べる。

3.1 シミュレーション技術開発の背景

用紙のような柔軟で厚さが薄いシェル媒体と非定常空気流との相互作用による挙動を把握するには、次の要件を満たすシミュレーション手法が必要になる。

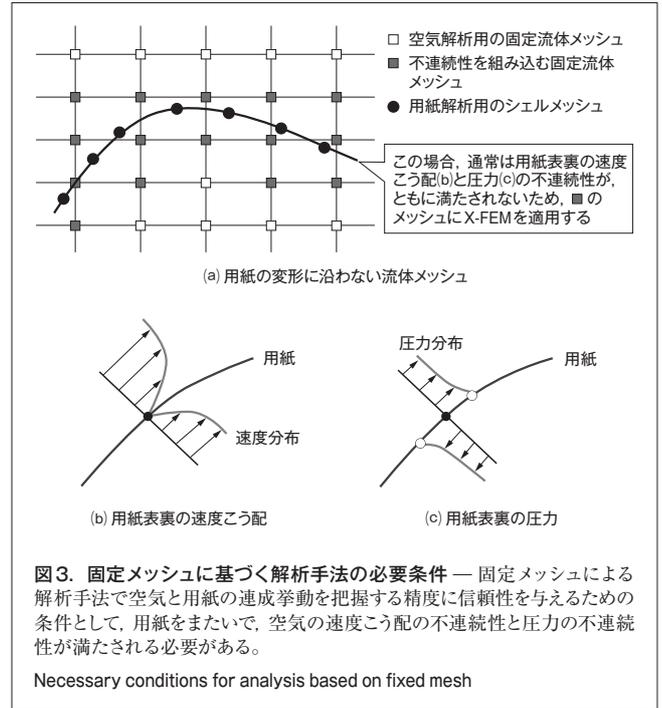
- (1) 用紙に生じる動的な変形を解析でき、物性や形状などの条件変化に柔軟に対応できる用紙挙動解析手法
- (2) 送風条件などを考慮して複雑な非定常空気流を解析できる流体解析手法
- (3) 用紙の変形と空気の流れが密に連動する非定常現象を破たんや失敗なく解析できる(1)と(2)の連成解析手法

これらの要件を部分的に満たし、現在もっとも解析の信頼性が高いシミュレーション手法としては移動流体メッシュ法に基づく流体シェル強連成解析手法⁽²⁾がある。しかし、この手法はエアアシスト給紙機構の用紙挙動の解析には適していない。なぜなら、この解析手法では用紙の変形とともに動的に流体領域用のメッシュを移動させる必要があり、用紙間の動的な接触や非接触などの状態変化を取り扱えないなどの限界があるためである。

一方、用紙の変形といっしょに流体メッシュを動かさず固定したままにしておく固定メッシュによる解析手法もあるが、現在提案されている手法では解析精度が著しく劣化するという問題がある^{(3), (4)}。産総研は以前から、固定メッシュに基づく流体シェル連成解析の高精度化の研究開発を行っており⁽³⁾⁻⁽⁶⁾、この手法を応用すれば、用紙の大変形や大移動、更には接触や非接触などへの適用可能範囲が大幅に拡大し、エアアシスト給紙機構の挙動の把握に役立ち、製品開発の一助になると考えた。以下にこの手法の解説及び産総研が適用した事例について述べる。

3.2 固定流体メッシュに基づく解析手法の要件

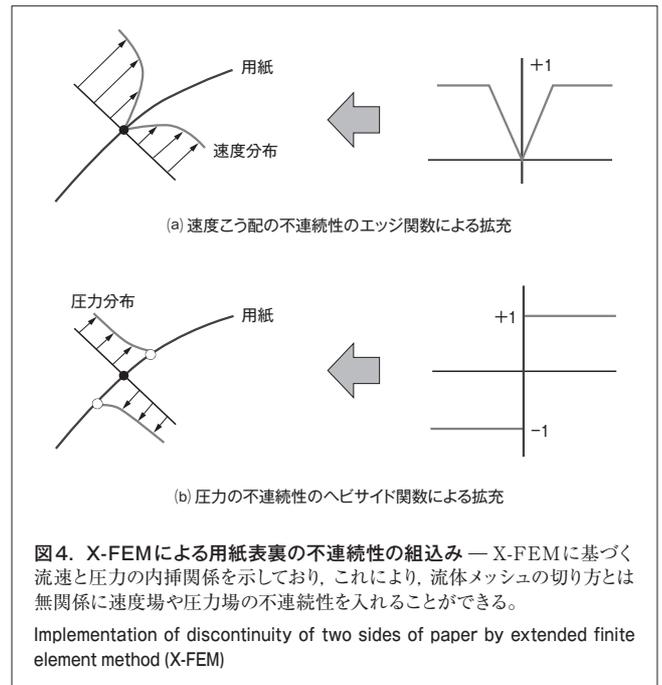
固定メッシュによる解析手法で空気と用紙の連成挙動を把握する精度に信頼性を与えるためには、**図3**に示すように用紙をまたいで、空気の速度こう配の不連続性と圧力の不連続性が満たされる必要がある⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。これは、前者が用紙の表裏で空気の流れ場が独立に成長できることを保証し、後者が空気から用紙へ作用する力が用紙の表裏で独立に定義できることを保証するためである。しかし、現存する固定メッシュ解析手法は、両方の条件を満たす手法が提案されていない、若しくは複雑な幾何学的処理を必要とするなどの理由で、移動流体メッシュによる手法に比べ解析精度が劣っていた。産総研が



開発した手法は、前述の二つの条件を満足するものであり、次節で述べる。

3.3 X-FEMに基づく用紙間空気流入モデル

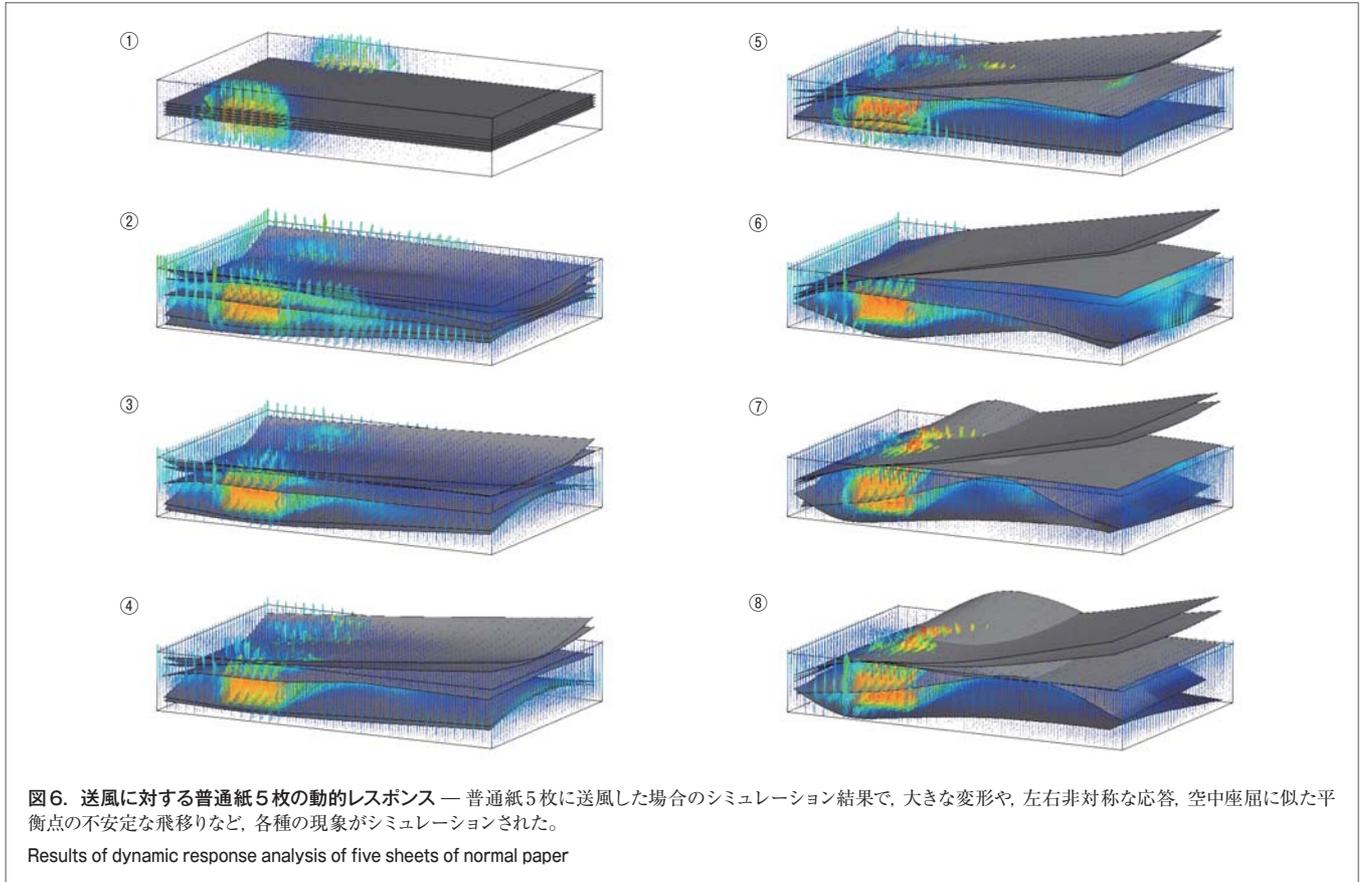
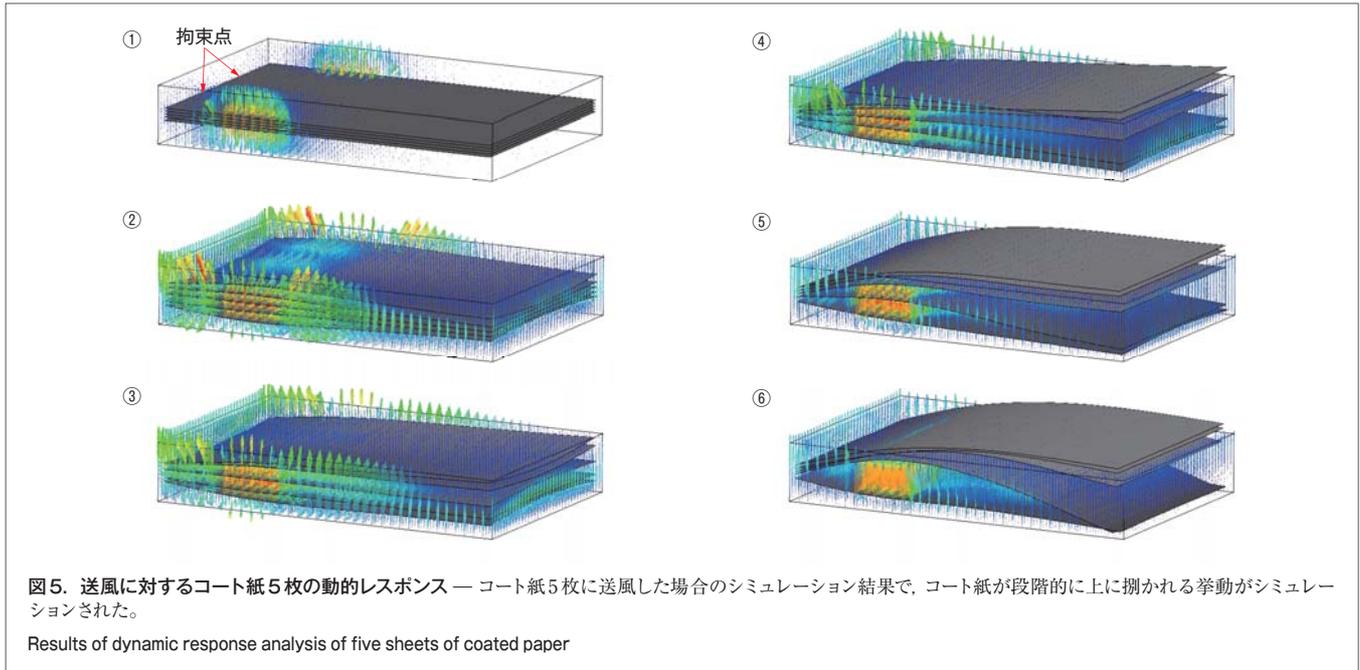
産総研が開発した手法は、用紙をまたいだ空気流動の独立性を確保するため、**図4**に示すように流体メッシュの切り方は無関係に、速度場や圧力場の不連続性を入れることのできる拡張型有限要素法 (X-FEM) を解析手法に導入している^{(7), (8)}。これにより、用紙をまたいで空気の速度と圧力を不連続に



き、3.1節で述べた用紙の変形に沿った移動メッシュによる解析手法と同等な離散化が行えるようになり、理論的にはその手法に匹敵する解析精度が得られる。

これらX-FEMに基づく流速と圧力の拡充関係(図4)から

今回の解析手法では、用紙をまたぐ流速のこう配と圧力のジャンプ量(用紙の表裏での差)を新たな節点値(未知量)として内挿に付与することで、用紙をまたぐ空気流動の内挿に用紙をまたぐ不連続性を与えている。この付与は、図4に示すよう



に、流速に対してはエッジ (Edge) 関数、圧力に対してはヘビサイド (Heaviside) 関数による内挿関数の修正を用紙をまたぐ流体要素内で行うことで実現される。

3.4 エアアシスト機構への応用

産総研が開発してきた前述の手法を用いて、エアアシスト機構の実機の現象把握につながる解析を行った。解析モデルは実寸のものを構築し、積層された5枚のA4サイズ用の紙に空気を吹き付けた場合の解析を行い、2種の用紙物性 (普通紙とコート紙) での挙動の違いについて比較する。

シミュレーション結果を図5、図6に示す。図はそれぞれ番号順に時間進行する。また、用紙は左端に存在する取出しローラによって押さえられている。この状態を再現するため、用紙の左端の2点を拘束する境界条件を与えている。

図5は、コート紙5枚に送風した場合で、コート紙が段階的に上に捌かれる挙動がシミュレーションされた。

一方、図6は普通紙の場合で、全体的に安定したコート紙の挙動とは異なり、大きな変形や、左右非対称な応答、座屈に似た平衡点の不安定な飛移りなど、各種の現象がシミュレーションされた。下側の用紙も、空気流の影響で湾曲した円筒形状に変形し、最初は幾何剛性によって自重が支持されている。その後、中央付近の用紙の不安定挙動により、空気流入の流路が大きく変動するなどの挙動も見られた。

これらの挙動は実機での挙動と大きな違和感はなく、設計や傾向把握に活用できる見込みを得た。ただし、用紙間などの接触にかかわる現象に対する計算モデルの開発と組込みは今回の共同研究では未実施であるため、現状では用紙間で貫通が生じるシミュレーション結果が得られており、残された課題の一つである。また、数値解析の一般的な性質として、用紙どうしが完全に固着しているケースの解析には用紙間引力の定義など、実験から求めた境界条件の設定が必須となる。なお、この解析で扱った事例は2.2節の基礎検証実験の結果とは一致していないが、今後、捌きローラの荷重条件を加味し、より現実の系に近づけることは技術的に十分可能である。

4 あとがき

ここでは、当社と産総研が行ったエアアシスト給紙機構におけるシミュレーション技術の開発に関する共同研究の内容について述べた。産総研が以前から開発を進めてきた固定メッシュに基づく流体シェル連成解析手法を応用した結果は、動画でより鮮明にわかるが、実機の観測だけによる挙動把握限界を超える結果を提示している。今後、エアアシスト給紙機構の制御も含む最適設計及び高信頼設計において極めて期待できる手法であることが確認できた。

今回の事例も含め実際の機器開発でシミュレーション結果をどのように設計知見に活用していくかは、当社の研究部門と

製品開発部門が連携して取り組む課題である。当社は、エアアシスト給紙機構の高信頼設計及び、最適形状設計、最適制御設計のために、引き続き数値シミュレーションから有効な知見を引き出し、有効な開発手法を確立していく。

文献

- (1) 東芝. 紙葉類分離装置および紙葉類分離方法. 特開2009-107758. 2009-05-21.
- (2) Sawada, T.; Hisada, T. Fluid-structure interaction analysis of the two-dimensional flag-in-wind problem by an interface-tracking ALE finite element method. *Computers & Fluids*. **36**, 1, 2007, p.136 - 146.
- (3) Sawada, T., et al. "X-FEM for the FSI based on discontinuous interpolations on level set interfaces". proceedings of APCOM'07-EPMESC XI. Kyoto, Japan, 2007-12, APACM; EPMESC. 2007, 論文番号MS20-2-3. (CD-ROM).
- (4) 澤田有弘, ほか. "流体構造連成問題の界面非適合メッシュによる完全な離散化~X-FEMによる界面不連続条件の拡充~". 日本計算工学会 計算工学講演会論文集. **13**, 1, 2008, p.5-8.
- (5) 澤田有弘, ほか. "境界適合メッシュを必要としない拡張有限要素型FSI解析システムの開発". 日本計算工学会 計算工学講演会論文集. **14**, 2, 2009, p.769 - 772.
- (6) Sawada, T.; Tezuka, A. High-order Gaussian quadrature in X-FEM with Lagrange-multiplier for fluid-structure coupling. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2010. Published online, DOI: 10.1002/flid.2343.
- (7) Legay, J., et al. An Eulerian-Lagrangian method for fluid-structure interaction based on level sets. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. **195**, 2006, p. 2070 - 2087.
- (8) Belytschko T., et al. Arbitrary discontinuities in finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. **50**, 4, 2001, p.993 - 1013.



中本 秀一 NAKAMOTO Hideichi

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務。
メカトロ機器及びロボット技術の研究・開発に従事。日本
ロボット学会会員。
Mechanical Systems Lab.



澤田 有弘 SAWADA Tomohiro, Ph.D.

独立行政法人 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究
部門研究員, 博士 (科学)。非線形ダイナミクス現象を伴う
次世代CAE技術の研究に従事。
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology



服部 俊介 HATTORI Shunsuke

研究開発センター 機械・システムラボラトリー参事。
紙送り機器をはじめとするメカトロ機器の研究・開発に従事。
日本機械学会, 精密工学会会員。
Mechanical Systems Lab.



手塚 明 TEZUKA Akira, D.Eng.

独立行政法人 産業技術総合研究所 評価部審議役, 工博。
設計, 製造, 及びCAEに関わる研究マネージメントに従事。
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology