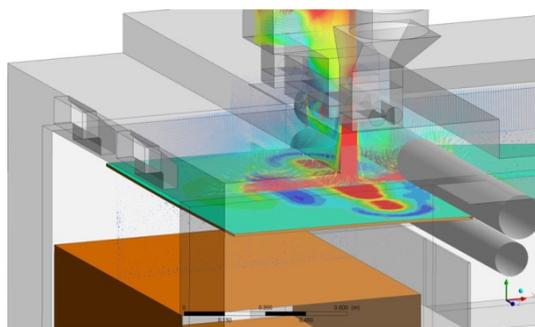


# 製函機の製品信頼性向上に貢献する CFD-MBD 双方向連成解析技術の構築

Construction of CFD-MBD Co-Simulation Technology  
to Improve Product Reliability of Cardboard Machine



中川 篤\*<sup>1</sup>  
Atsushi Nakagawa

アロウラ ロヒット\*<sup>2</sup>  
Rohit Arora

高田 智成\*<sup>1</sup>  
Tomoshige Takata

金澤 宏幸\*<sup>3</sup>  
Hiroyuki Kanazawa

赤木 朋宏\*<sup>4</sup>  
Tomohiro Akaki

本報では、当社グループ製品の製函機における高速運転時の段ボールシート挙動を正確に予測・解析するために、製函機内の流れ場を CFD (Computational Fluid Dynamics) で再現した。更に MBD (Multi Body Dynamics) で段ボールシートの弾性変形及び運動をモデル化し、CFD と MBD の双方向連成解析モデルを構築した。これにより製函機内部における段ボールシートの飛翔挙動を試作レスで予測可能となり、シート挙動を安定化させる最適制御の検討が可能となった。

## 1. はじめに

近年のeコマースの拡大などに伴う物流量の増大により、段ボール箱の需要が高まっている。当社グループでは、1955 年より段ボール箱を作る製函機の製造を手掛けており、世界トップレベルの生産性能を有する製函機の開発を行っている。高速生産を阻害する要因の1つとして、段ボールシートの搬送時に製函機内部で紙詰まりを起こすリスクがある。高速搬送を安定的に行うためには段ボールシート挙動の正確な予測が必要であり、搬送中の段ボールシートに作用する力を算出する必要がある。そこで、製函機内の流れ場を CFD (Computational Fluid Dynamics) で再現した。さらに、解析精度上、重要なパラメータである段ボールシートの変形、姿勢及び運動については、MBD (Multi Body Dynamics) でモデル化し、それらの双方向連成解析モデルを構築した<sup>(1)</sup>。本報では、製函機のシート積み上げ工程について、CFD と MBD との双方向連成解析を実施した結果について報告する。

## 2. 解析モデル・境界条件

### 2.1 製函機構成と解析対象

製函機の構成を図1に示す<sup>(2)</sup>。給紙部に投入された板状段ボールを搬送し、表面に文字を印刷する工程に始まり、溝切り・罫線入れ、のり付け、折り曲げ、計数・積み上げの工程を経て加工される。本報では世界最高速度である毎分 400 枚<sup>(3)</sup>の段ボール生産が可能な高速製函機 EVOL における、計数・積み上げ工程のカウンタエゼクタ部<sup>(4)</sup>を解析対象とする。カウンタエゼクタ部は図2に示すように、搬送されてきた段ボールシートがローラー間を通過し、空中に放出され、ブローアにより流れを吹くことで段ボールシートの積み上げ安定化を図っている。また、放出された段ボールシート先端の跳ね返りを少なくするため、フロントストップ部に衝突する構造となっている。その後、積層された段ボールシートの上に乗る、エレベータによって下方へ移動する。

\*1 総合研究所 流体研究部

\*2 総合研究所 機械研究部

\*3 総合研究所 機械研究部 主席研究員 技術士(機械部門)

\*4 総合研究所 機械研究部 主席研究員

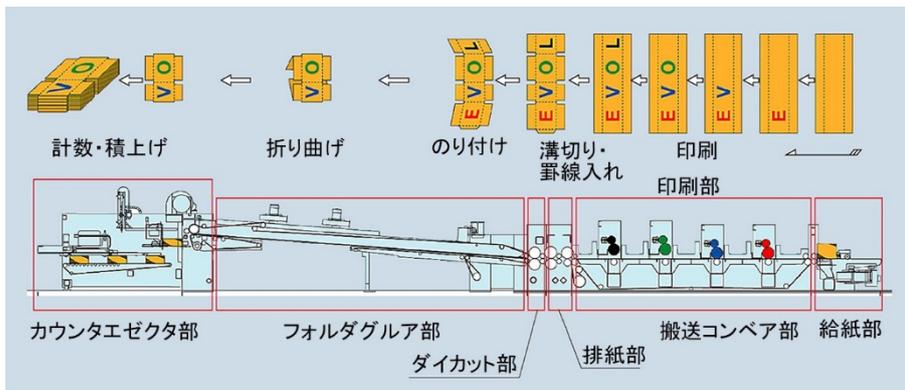


図1 段ボールの製造工程と製函機内部概略

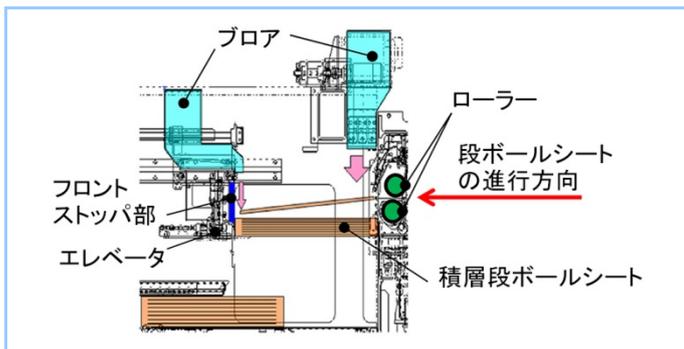


図2 カウンタエゼクタ部概略

## 2.2 解析モデル

図3に解析モデルを示す。本報では段ボールシートがローラー間を通過して、空中に放出されるまでを評価した。そのため、CFD では搬送されてくる段ボールシート、フロア及びエレベータを模擬している。MBD では接触を考慮するため、ローラーやフロントストップ部も模擬している。解析条件は実機運転状態を模擬し、表1に示す条件とした。

表1 解析条件

	CFD	MBD
ソルバー	ANSYS Fluent Ver.18.2	MSC ADAMS 2018
モデル	Realizable k-ε	—
時間刻み	0.0002 [s]	0.001 [s]
連成時間刻み	0.002 [s]	
境界条件	入口:速度(フロア) 出口:圧力(側面, 底面)	段ボール:弾性体 ローラー:摩擦

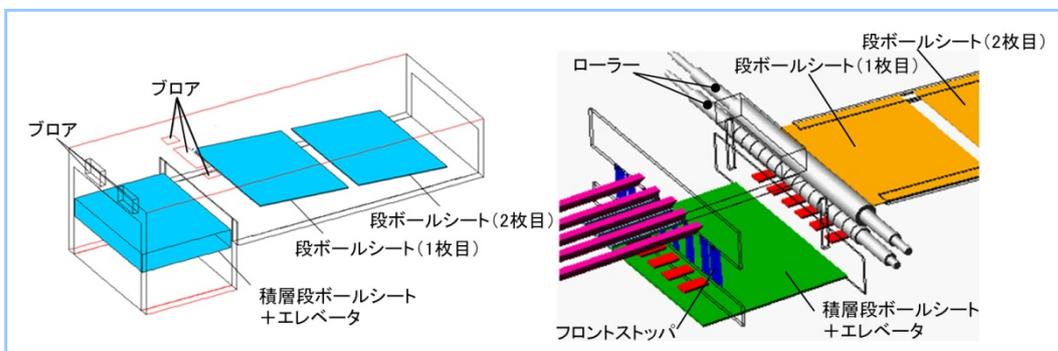


図3 解析モデル概略

## 2.3 連成解析概要

ソルバーはCFDでANSYS Fluent, MBDでMSC ADAMSを用い、異なるソフトウェア間での双方向連成解析を行った。また、連成解析は相互にデータ授受を行うインハウスツール<sup>(6)</sup>を用いて

おり、CFD から MBD へは段ボールシート表面の流体力を、MBD から CFD へは段ボールシートの位置と変位情報を授受し、段ボールシートの変形まで考慮した CFD 解析を可能としている。CFD では MBD によって段ボールシート位置を時々刻々更新するが、その際、Fluent に内蔵されているリメッシュ法を用いて、段ボールシート位置を更新している。

連成解析手法は図4に示す通りで、次の①～⑦の工程を繰り返して解析を実行する。この方法により双方向連成解析を可能としている。

- ① 初期位置で CFD 実行
- ② 連成境界面の流体力を出力
- ③ MBD へ流体力をマッピング
- ④ 物体の姿勢及び移動量を MBD で計算
- ⑤ 連成境界面の変位を出力
- ⑥ CFD へ移動量をマッピング
- ⑦ CFD 内でメッシュを移動させて CFD 実行

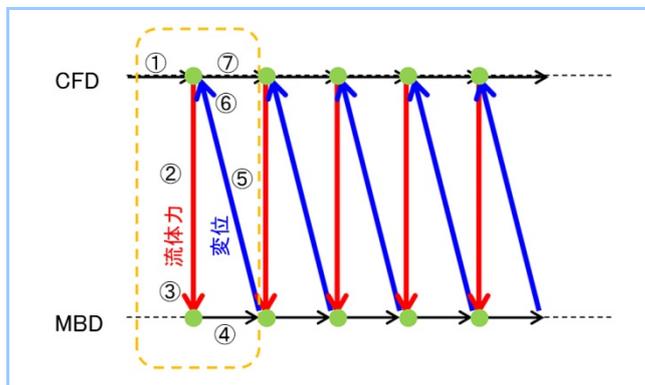


図4 連成解析の流れ

### 3. 解析結果・検証

#### 3.1 双方向連成解析結果

構築した双方向連成解析インハウスツールを用いて、時刻的に変化する段ボールシート位置を考慮した製函機内の流れ場について評価を行った。図5にブロー無しの場合の中央断面での段ボールシート位置と速度ベクトル図を時系列で示した様子を示す。なお、速度ベクトルは後述のブロー有の場合のブロー流速で、時間は段ボールシートの姿勢が水平になる時刻で、それぞれ無次元化した。図5から、ローラー間を搬送されてきた段ボールシートが積層段ボールシート上方まで搬送されてくる様子が分かる。その間、積層段ボールシートはエレベータによって下方へ移動していく。また、時刻  $t=0.4T$  には右肩下がりに搬送されてきた段ボールシートが、時刻  $t=T$  では弓なりに弾性変形している様子が確認できる。 $t=0.7T$  のとき、段ボールシート下面と積層段ボールシートの間に循環渦ができる。この渦によって下向きの力が作用し、段ボールシートの先端が下がり水平になっている。この連成解析結果より、循環渦が段ボールシートの姿勢安定性に寄与していることが分かった。

#### 3.2 ブロー効果の確認

図6に時刻  $t=0.7T$  における中央断面での速度ベクトル図のブロー有無による比較を示す。ブロー無の場合と比較して、流れ場と段ボールシートの姿勢に違いが生じていることが確認できる。ブローがある場合、シート上面に沿って先端・後端側に向かう流れが形成される。また、段ボールシート先端側ではシート下方に流れが回り込み積層段ボールに衝突して、3.1 節で述べた循環渦が強化される。この流れによって、段ボールシートの下面に下方向へ力が作用し、段ボールシートの先端が下方を向いている。

これらの結果より、ブロー風によって段ボールの飛行姿勢を制御することにより、後続の段ボールシートが衝突することを防ぐことができ、安定的な紙搬送が行えることを確認できた。

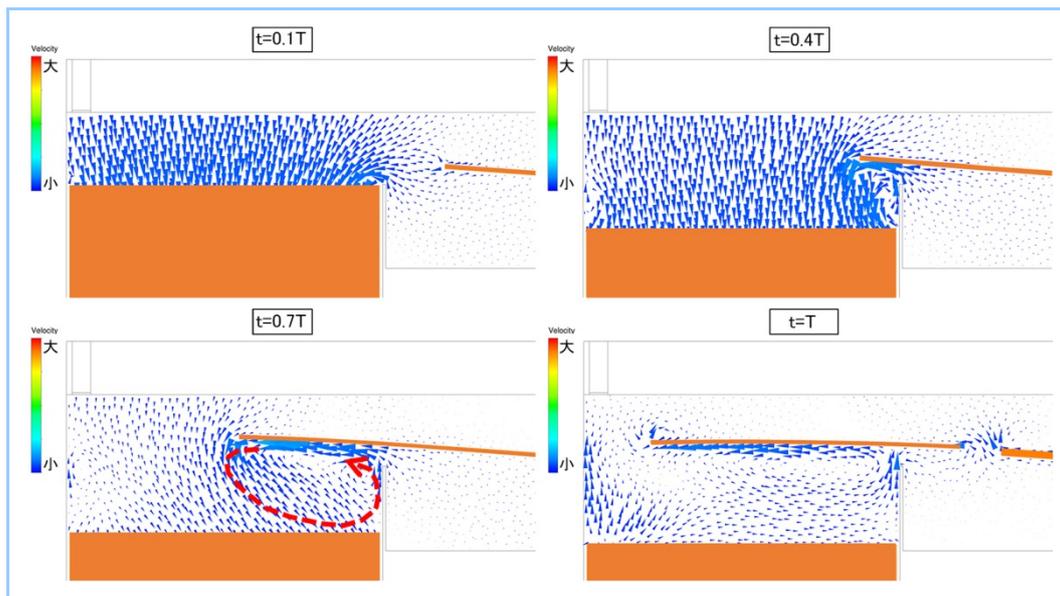


図5 中央断面での段ボールシート周りの流れ場の時系列変化

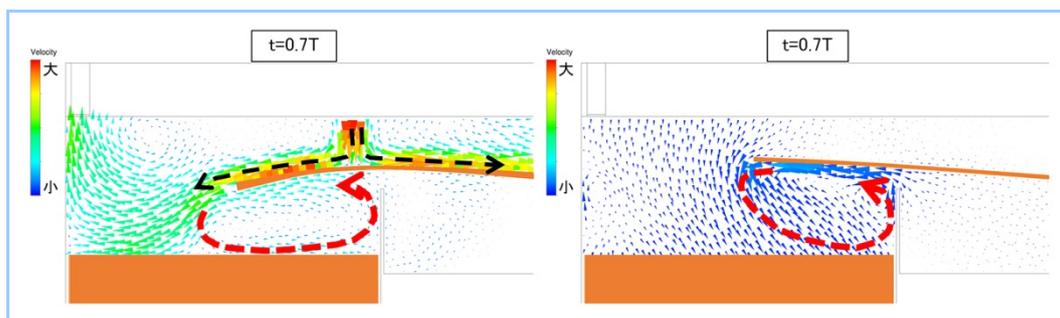


図6 t=0.7Tにおける中央断面流速(ブロー有無による比較)

### 3.3 検証

解析結果の検証のために、実機内部の撮影動画から段ボールシート的位置を割り出し、解析結果と比較した。図7はローラー間から放出された段ボールシート位置の解析結果と試験結果を示している。図7に示す通り、ブロー有無で飛行時の姿勢と到達点高さの関係が実機挙動と整合が取れる結果が得られた。これにより、構築した双方向連成解析技術が実機検討に適用可能であることを確認できた。

	連成解析結果と試験結果の比較	撮影動画
ブロー有		
ブロー無		

図7 解析と実験の結果比較

## 4. まとめ

当社グループの製品である製函機における、高速運転時の段ボールシート挙動を精緻に解析可能な CFD と MBD の双方向連成解析モデルを構築した。製函機内の流れ場について評価し、段ボールシート下面の循環渦が姿勢安定性に寄与していること、ブロー風により後続の段ボールシートの衝突防止できることが確認できた。これにより、当社グループ製品の製函機 EVOL は安定的な紙搬送が行えることを確認した。また、段ボールシートの実機挙動と解析結果との比較から、飛翔時の姿勢と到達点高さの関係が実機挙動と整合が取れる結果が得られた。

これらの結果から、解析によりカウンタエゼクタ部における段ボールシートの飛翔挙動を試作レスで予測可能となり、世界最高速レベルの段ボールシートの安定生産に必要な制御技術の机上検討が可能となった。また本解析モデルを活用して、運転方法の検討やパラメータスタディによる最適な設定値の導出が可能となった。

今後は、本製品の更なる高速搬送化へ向けた検討及び最適条件のパラメータスタディを実施し、製品の性能向上を図っていく。

## 参考文献

- (1) 中川ほか, 製函機の性能向上のための CFD-MBD 双方向連成解析技術の構築, 日本機械学会第 99 期流体工学部門講演会 (2021)
- (2) 仁内邦男ほか, 進化を続ける段ボール製函機 “EVOL”, 三菱重工技報 Vol.46, No.1 (2009), p. 61-64
- (3) 三菱重工印刷紙工機械(株), 高速製函機”EVOL100-400 枚/分機”, 三菱重工技報 Vol.53, No.4 (2016), p.18-22
- (4) 三菱重工印刷紙工機械(株), 大サイズ段ボール箱を高速生産できる EVOL 広幅機, 三菱重工技報 Vol.51, No.3 (2014), p.74-77.
- (5) Arora, R. et al., FEA and CFD simulation code coupling for fluid-solid interaction with large motion and non-linear deformation, The 9th Asian Conference on Multibody Dynamics (2018)