

博士論文

単一空気入力で流れ方向を制御可能な 柔軟送風・吸引器の開発

金沢大学大学院自然科学研究科
機械科学専攻

人間・機械創造研究室 博士後期課程

学籍番号 2124032005

氏名 野尻 晴太

主任指導 渡辺 哲陽 教授

提出年月 2024年 1月 7日

目次

第1章 緒言.....	1
第1.1節 研究背景.....	1
第1.2節 関連研究.....	3
第1.2.1項 1自由度の流体制御による多機能ソフトロボット.....	3
第1.2.2項 吸着グリップ.....	4
第1.2.3項 摩擦可変機構.....	5
第1.3節 研究目的.....	5
第2章 FDR デバイス.....	6
第2.1節 機能要件.....	6
第2.2節 構造.....	6
第2.3節 作成方法.....	8
第2.4節 仕組み.....	9
第3章 FDR デバイスの解析.....	11
第3.1節 フラップゲートの制御.....	11
第3.2節 設計パラメータの調査.....	13
第3.2.1項 フラップゲートの寸法.....	13
第3.2.2項 ノズル断面積.....	18
第3.2.3項 シリコーンの硬さの影響.....	18
第3.2.4項 設計パラメータに関するまとめ.....	19
第4章 FDR デバイスの摩擦可変能力.....	20
第4.1節 実験方法.....	20
第4.2節 実験結果.....	21
第5章 FDR デバイスのアプリケーション.....	23
第5.1節 障害物除去および物体把持.....	23
第5.1.1項 実験方法.....	23
第5.1.2項 実験結果.....	25
第5.2節 曲面をもつ物体の把持.....	27
第5.2.1項 実験方法.....	27
第5.2.2項 実験結果.....	28
第5.3節 凹凸のある表面をもつ物体の把持.....	29
第5.3.1項 実験装置.....	29
第5.3.2項 実験結果.....	30
第5.4節 ロボットの指表面としての応用.....	31
第5.4.1項 送風による精密リリース.....	32

第 5.4.2 項 吸引による指から指への物体輸送	34
第 5.4.3 項 送風による乾燥機能	35
第 5.5 節 ウェアラブルデバイスとしての応用	36
第 6 章 結言	39
参考文献	40
付録	45

第1章 緒言

第1.1節 研究背景

近年、少子高齢化社会における介護者不足を背景に、介護作業の代替が可能な生活支援ロボットの実現への要求が高まっている。生活支援ロボットが、移乗介助や歩行介助、更衣の介助などの物理的な介助を行う場合、人と直接接触しながら支援を行う必要がある。しかし、生活支援ロボットが人と接触する場合、人を傷つけるリスクがある。そのため、生活支援ロボットは、人と安全に接触しつつも、適切な力で身体を支持することが重要である。

身体に力を加えるロボットの表面部位は、接触の安全性の観点から、やわらかい素材で構成されることが望ましい。また、ロボットが、人と接触して体重を支えるためには、密着度や摩擦力を大きくする必要がある。一方で、ロボットが人と離れる場合、不快感や擦れによるダメージを軽減するために密着度や摩擦力の低減が必要となる。そこで本研究では、ロボットの表面部位での密着度や摩擦力を調節できるやわらかいデバイスを開発する。

これらの機能を実現するため、本研究では、吸引と送風に着目した。吸引機能は物体を保持するのに有効である[1]–[3]。吸着力が、接触法線力として加わり、摩擦力を増大させる。送風機能は、空気を対象物に吹き付けることで接触法線力を減少させ、摩擦力を減少させる[4]。また、送風機能は、日常生活の場面で想定される物体表面のほこりや濡れを除去することにも役立つ。通常、圧力源は空気の供給か吸引のいずれかしか提供できないため、送風と吸引をそれぞれ達成するには、2種類の圧力源が必要になる。しかし、二つの圧力源をロボットシステムに組み込むと、ロボットシステムのサイズや重量が大きくなる。日常の生活環境において、ロボットは人の存在や障害物により可動域の制限を受ける。そのため、ロボットシステムは、サイズを抑えるために最小限の部品（圧力源や電磁弁、またそれらをつなぐ配管・配線など）で構成されることが望ましい。

そこで、本研究では、薄さとやわらかさを備え、一つの空気源から供給する空気の流量制御のみで、送風と吸引の切り替えが可能なデバイスを開発した（図1）。ここではこれを Flow-direction reversal (FDR) デバイスと呼ぶ[5]。FDR デバイスを実現するために、本研究ではエアジェット[6]–[8]に着目した。エアジェットはノズルなどから噴出された高速の空気の流れである。エアジェットは、周囲の空気を、巻き込み、吸引する。一方で、排気口が塞がれると、空気は反対側に

流れ、出力口から放出される。これらの吸引と放出の機構を FDR デバイスに組み込むことで、流量制御だけで流れ方向の反転を実現した。流れの反転は、フラップゲートと呼ばれる機構で実現される。フラップゲートは FDR デバイスと一体で製作される。このゲートは通常は閉じており、流れを遮断している。また、入力した空気圧によって本体が膨張することで開く。膨張する大きさは内部の空気圧によって制御でき、さらにその空気圧は入力流量によって制御される。ゲートの開閉量は入力流量によって制御される。したがって、流れの反転、すなわち吸引と送風の強弱は、入力流量によって制御できる。FDR デバイスのもう一つの特徴は、シリコン製のボディのため、薄く柔軟性があることである。それにより、吸引機能は、曲面でも粗い表面でも作動する。したがって、FDR デバイスは、ロボットやマニピュレータの丸みを帯びた表面に取り付けることができる。本研究のように 1 自由度 (1-DOF) の流量制御のみで送風と吸引が可能なことに加え、やわらかく薄いデバイスとして実現した前例はない。

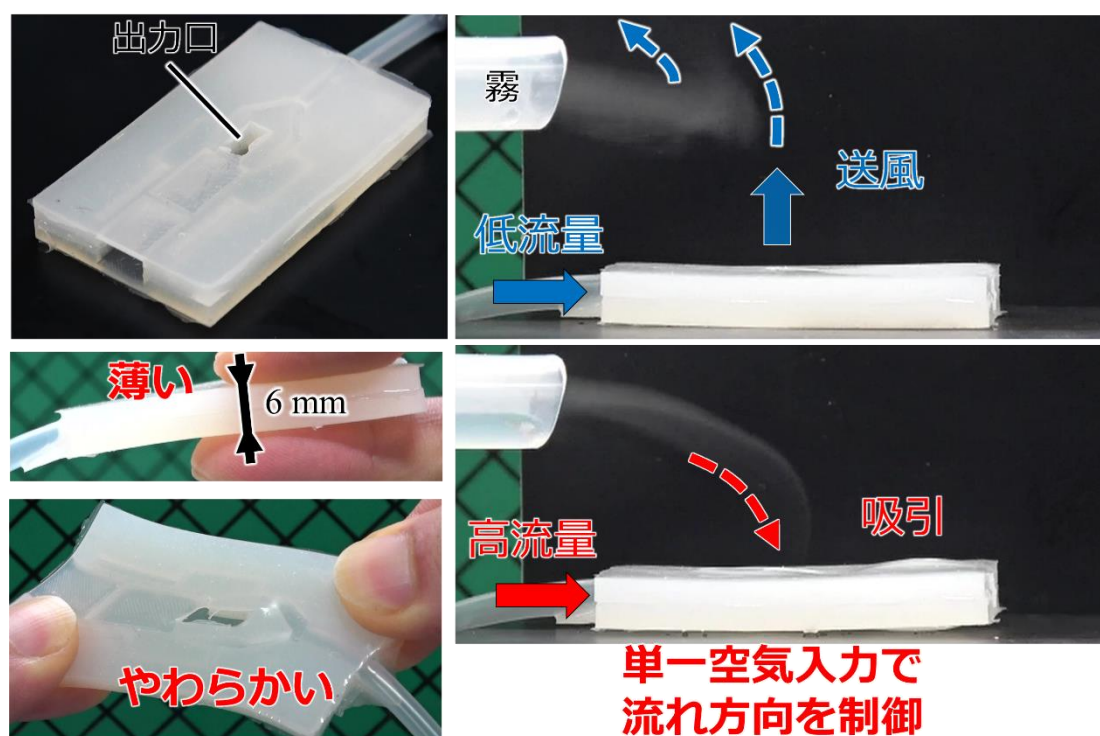


図1 単一空気入力で送風と吸引の切り替えが可能な流れ方向反転装置 (Flow-directional reversal (FDR) デバイス)

第1.2節 関連研究

第1.2.1項 1 自由度の流体制御による多機能ソフトロボット

やわらかい素材で構成されたロボットは、ソフトロボットと呼ばれる[9]–[12]。ソフトロボットの多くは空気圧で駆動される[10][12]。これらは流路に入力される空気が、構造を変形させ、この変形が移動や把持、弾性エネルギーの貯蔵など様々な機能を実現する。ロボットに入力される空気は、一般的に電磁弁により制御される[13]–[16]。しかし、必要な電磁弁の数は、流路の切り替えの数とともに増加し、システム全体のサイズやコストが増加する[1]。この問題に対して、1自由度の流体制御によって、異なるまたは複数の機能を実現する技術が大きな注目を集めている。これらの方法は、二つのタイプに分類することができる。一つは周期的な運動を生成する方法である[17]–[24]。Miyakiらは、チャンバの内圧を周期的に切り替えることで進行波を発生させる空気圧式ソフト移動ロボットを開発した[17]。Tsukagoshiらは、空気の供給をオン・オフすることで周期的に伸縮するアクチュエータを開発した[18]。Prestonらは、単一の一定圧力源でソフトアクチュエータに周期的な運動を生成する装置を提案し、転がり動作を行うロボットに応用した[19]。Taniらは、空気入力による変形を利用して流路を切り替え、周期運動を発生させるアクチュエータを開発した[20][21]。Kitamuraらは、声帯を模倣し、自励振動を発生させるソフトアクチュエータを提案した[22]。Vasiosらは、流体の粘性を利用したソフトアクチュエータを開発し、単一の空気圧制御で複数のチャンバを順次膨らませることに成功した[23]。Rothemundらは、双安定に設計された膜で流路を切り替えるソフトエラストマバルブを開発した[24]。二つ目のタイプは、単一の流体制御で複数のアクチュエータの中から特定のアクチュエータを選択的に駆動する方法である[25]–[27]。Nappらは、複数のチャンバの圧力を、漏れのある逆止弁で接続し、単一の圧力源を使用して設定する方法を提案した[25]。Nishimuraらは、空気圧式ソフトロボットハンドと摩擦低減システムの流路を入力流量の大きさに応じて切り替えるシステムを開発した[26]。Ben-Haimらは、流体の粘性と弾性チャンバの双安定性を利用し、選択されたチャンバのみが膨張するようにチャンバを切り替えることを提案した[27]。しかし、単一の流体制御を用いた流れ方向の反転は試みられていない。そこで本研究ではこの問題に取り組む。開発されたFDRデバイスは、複数のアクチュエータが単一の流量制御装置によって駆動される二つ目に分類される。

第1.2.2項 吸着グリッパ

従来の吸着グリッパ[2][3][28]では、吸引カップ内に負圧が維持されているため、吸引を停止しただけでは把持物を解放することができない。そのため、対象物をリリースするためには、吸引カップ内に空気を吹き込む必要がある(図2)。したがって流路を切り替えるための電磁弁が必要となる。そのため、従来の吸引グリッパでは、エアチューブに加え、バルブを操作するための電気ケーブルが少なくとも1本必要である。FDR デバイスは、ロボットシステムに設置される配線の本数を減らすことに貢献できる。

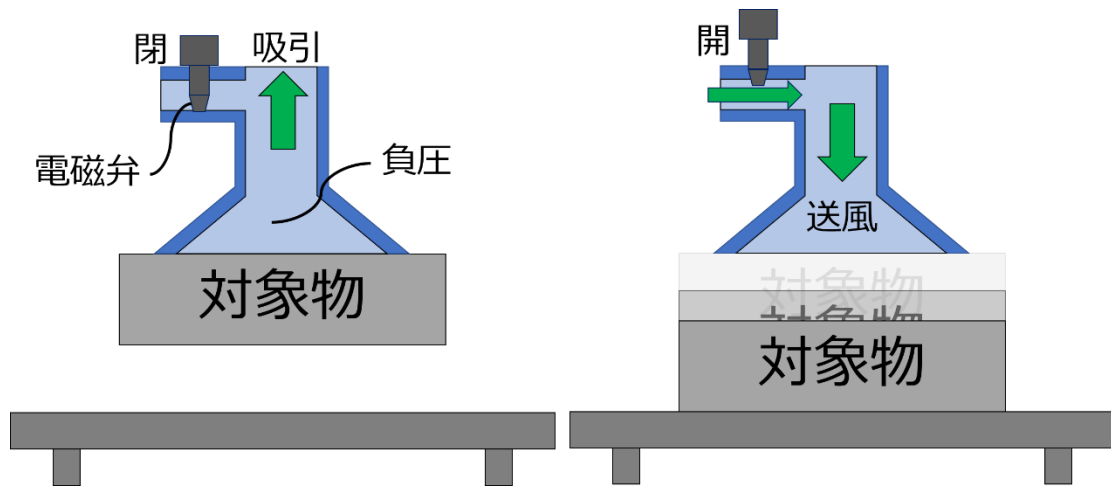


図2 従来の吸着グリッパによる対象物の吸引およびリリース

第1.2.3項 摩擦可変機構

接触面の摩擦を変化させるロボット機構がいくつか開発されている。その方法は、摩擦を増加させるか減少させるかのいずれかである[26], [29]–[37]。これまでに単一の作動システムを用いて摩擦を増加または減少させる試みはなされていない。本研究では、送風と吸引を切り替えることができる FDR デバイスを用いて、摩擦の増加と減少の両方を達成することを目的とする。

第1.3節 研究目的

本研究の目的は、人の日常生活を支援するロボットのための、単一空気入力で制御可能な薄くやわらかい送風吸引器（FDR デバイス）を開発し、生活支援ロボットの表面が送風と吸引機能を持つことの有効性を実験的なアプリケーションを通して実証することである。第2章では、FDR デバイスの構造や仕組みについて説明する。第3章では、フラップゲートが FDR デバイスにかかる圧力で制御されることを明らかにするとともに、フラップゲートの設計パラメータについて調査する。第4章では、送風と吸引により摩擦可変が可能であることを実証する。第5章では、FDR デバイスのアプリケーションを紹介し、有効性を実証する。まず、エンドエフェクタやロボットハンドの指先に搭載し、FDR デバイスの接触のサポート機能が、凹凸面や曲面を持つ物体や、ほこりや濡れがある物体に対して有効であることを実証する。次に、密着度の向上に有効であることを示すため、筋電センサを組み込んだウェアラブルデバイスとしての応用を検討する。第6章では、本研究を総括し、結論を述べる。

第2章 FDR デバイス

第2.1節 機能要件

FDR 装置の機能要件は以下の通りである：

1. 人間の皮膚に近いショア硬度 A10 での柔軟性[38]を持つこと
2. 90 度以上に曲げることができ、ロボットハンドの指先のような他のデバイスに簡単に取り付けられる 6mm 以下の厚みであること
3. 単一の流量制御で送風と吸引の実現できること

第2.2節 構造

FDR デバイスの構造を図 3 に示す。FDR デバイスは平面的な流路を持つ。入力口からの供給された空気は、二つのノズルを通過し、排気口から排出される。この流路は、図 3 中に黄色で強調されている。出力口は、送風と吸引のために二つのノズルの近くに設置されている。送風と吸引を切り替えるためのキーマカニズムは、フラップゲートと膨張室である。まず、ノズル出口と排気口の間にはフラップゲートが設置されている。これらは、流路に対して垂直な 2 枚の片持ち状の壁で構成されている。一方は上側に、もう一方は下側に設置されている。図 3 で下側のフラップゲートが青く強調されている。フラップゲートの幅は流路と同じで、その両側にスリットが設けられている。次に、膨張室はフラップゲートの両側にある。これらは図 3 中に赤色で強調されている。膨張室は、細い流路を介して Y 地点でノズル内とつながっている。

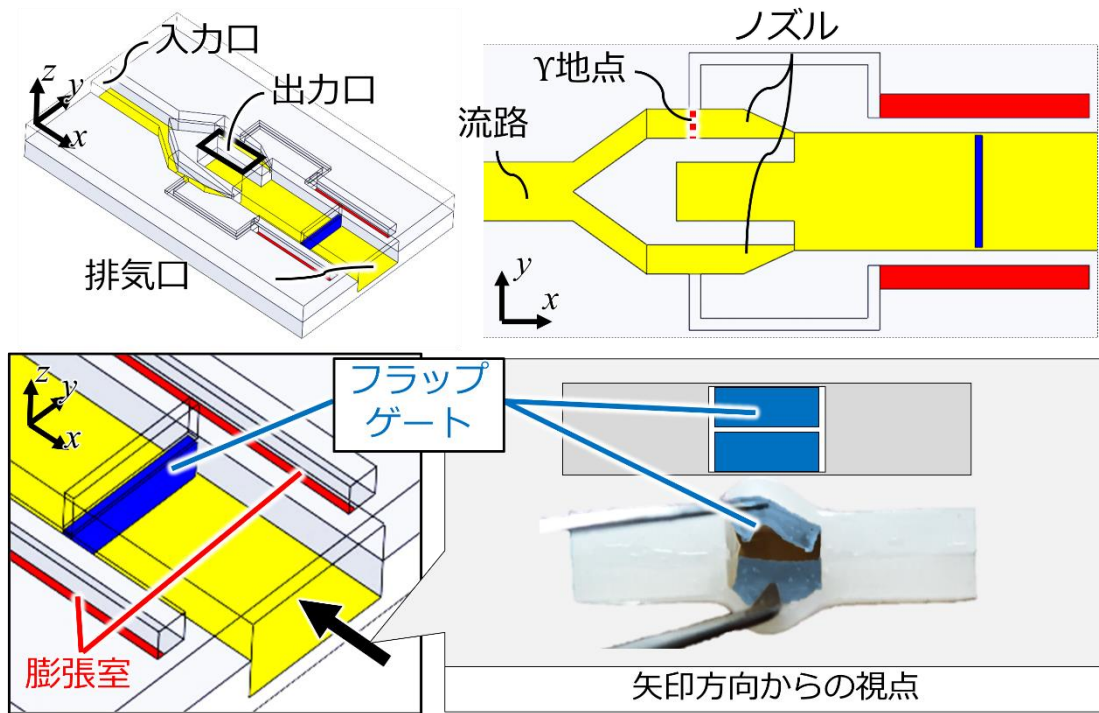


図3 FDR デバイスの構造

第2.3節 作成方法

FDR デバイスのボディ全体は、ショア硬度 A 10 のシリコーン（Smooth-on, Dragon Skin 10 medium）で構成されている。図 4 はその製作過程を示している。FDR デバイスは上部の下部のパーツから成り、それぞれの型にシリコーンを流し込んで作成される。これらの型は 3D プリント（Raise 3D, Pro3）で作成した。フラップゲート部分を除き、上部パーツと下部パーツをシリコーン（Smooth-on, Dragon Skin 10 medium）で接着した。ここでフラップゲートを片持ち状の構造にするため、フラップゲートの上端は接着しなかった。各パーツを接着後、フラップゲートと流路の内壁の間にスリットを入れた。また、FDR デバイスの寸法を図 5 に示す。

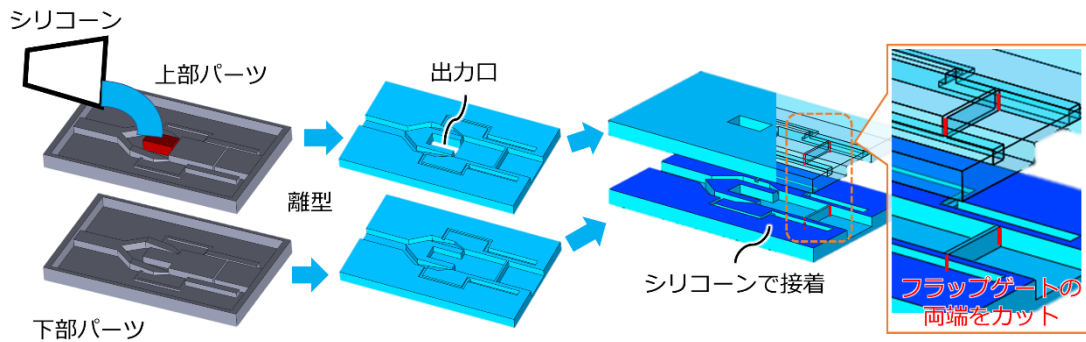


図4 FDR デバイスの作成方法

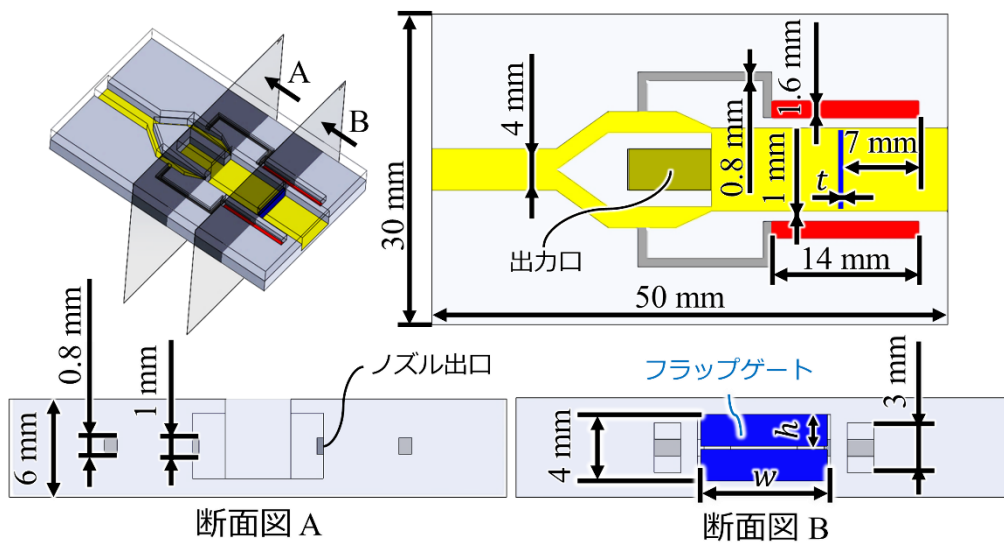


図5 FDR デバイスの寸法

第2.4節 仕組み

ここでは、FDR デバイスが空気の入力のみで送風と吸引の切り替えをどのように実現するのかを説明する。FDR デバイスのノズル出口から排気口までの空気の入力流量の高低による流れの様子を、それぞれ図6 (a) および (b) に示した。空気はノズルを通過し、その速度はベルヌーイの原理に従って増加する。ノズルを通過した空気は、流路の側壁に沿ってエアジェットとして放出される。さらに、ノズル出口から排気口までの流れは、入力流量により変化する。この入力流量に応じた流れの変化は膨張室とフラップゲートにより実現される。

まず、入力流量は膨張室の膨張量を決定する。これは次のようなメカニズムによるものである。まず、入力流量に応じて、ノズル内の圧力が決まる。次に、ノズル内のY地点の圧力が膨張室に加わるため、膨張室は膨張する。したがって、膨張室の膨張量は入力流量によって制御される。

さらに、膨張量によりフラップゲートの開口面積が決定される。入力流量が小さいとき膨張量は小さいため、フラップゲートの開口面積は小さい (図6 (a))。その結果、空気は排気口からはわずかしか排気されず、大部分が出力口から放出される。これが、送風のメカニズムである。

一方で入力流量が大きいとき膨張量は大きくなる。すなわち、フラップゲートの両側の壁が流路内に突出する。その結果、フラップゲートの上壁と下壁がそれぞれ流路の上側と下側に押し付けられるため、フラップゲートの開口面積が大きくなる (図6 (b))。フラップゲートは開いたまま維持され、これによりエアジェットは排気口に向かって流れる。出力口で空気が巻き込まれると、エアジェットが発達する。このとき、出力口の空気が吸引される。また、噴流の巻き込みが乱れると、吸引能力が低下する。つまり、噴流は排気口をスムーズに流れる必要があり、そうでないと吸引力が低下する。そのため、高流量のエアジェットをフラップゲートに衝突させて開く方式では、吸引力が極端に低下してしまう。また、大流量の空気でフラップゲートを弾性変形させ、開いた状態を維持する必要があることも、吸引力が低下する原因である。そこで本研究では、膨張室の膨張を利用し、噴流の乱れを最小限に抑えてフラップゲートを開く方法を提案する。

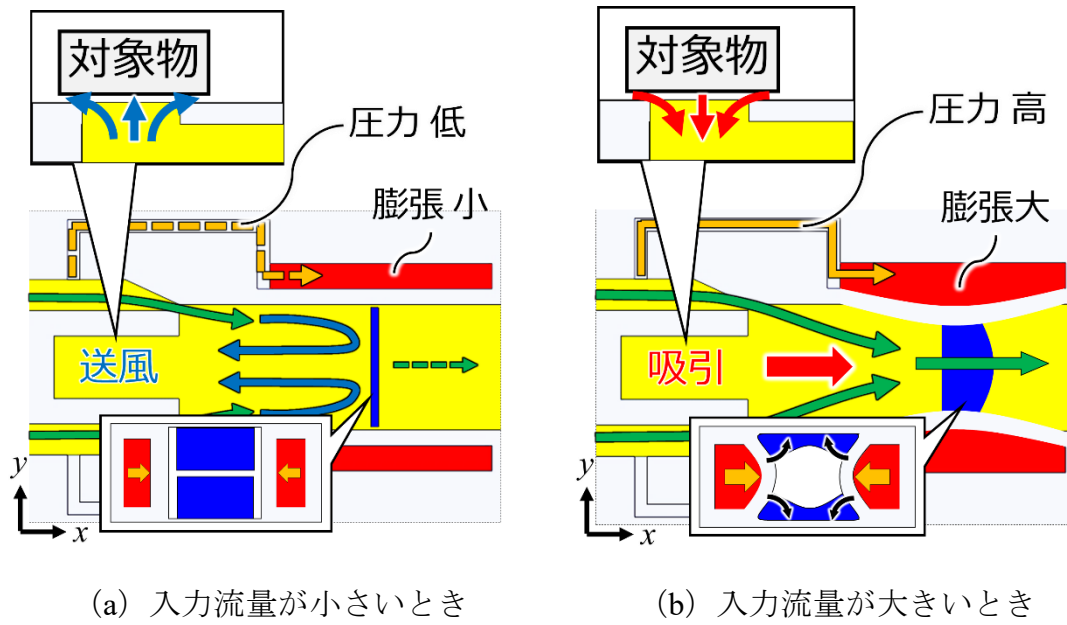


図6 空気の入力流量の大きさによる流れの様子

第3章 FDR デバイスの解析

第3.1節 フラップゲートの制御

第 2.4 節において、フラップゲートの開閉の制御が送風と吸引の切り替えに重要であることを説明した。ここではフラップゲートの開口面積が入力流量によって制御できることを説明する。ベルヌーイの定理および連続の式より、Y地点での圧力 p と入力圧力 p_{in} の関係は、次式で与えられる。

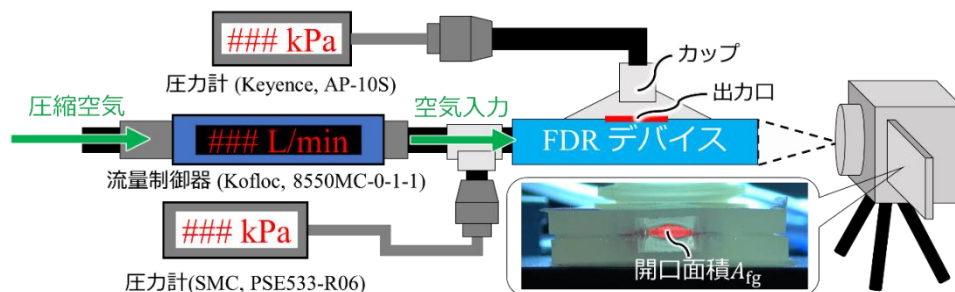
$$p = \frac{\rho}{\rho_{in}} p_{in} + \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \rho \left(\frac{q_{in}}{A_{in}} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{A_{in}}{2A} \right)^2 \right) \quad (1)$$

ここで q_{in} は入力流量、 ρ_{in} と A_{in} はそれぞれ入力口での空気の密度と断面積、 ρ と A はY地点での空気の密度と断面積、 γ は空気の比熱比である。膨張室はY地点と接続されているため、膨張室内の圧力は p と等しい。したがって、式 (1) は膨張室内の圧力と p_{in} の関係を表す。ここで、FDR デバイスは $A_{in} = 2A$ となるように設計されている。さらに、Y地点での分岐による損失と密度の変化が十分小さい ($\rho \cong \rho_{in}$) と仮定すると、式 (1) は次のように表せる。

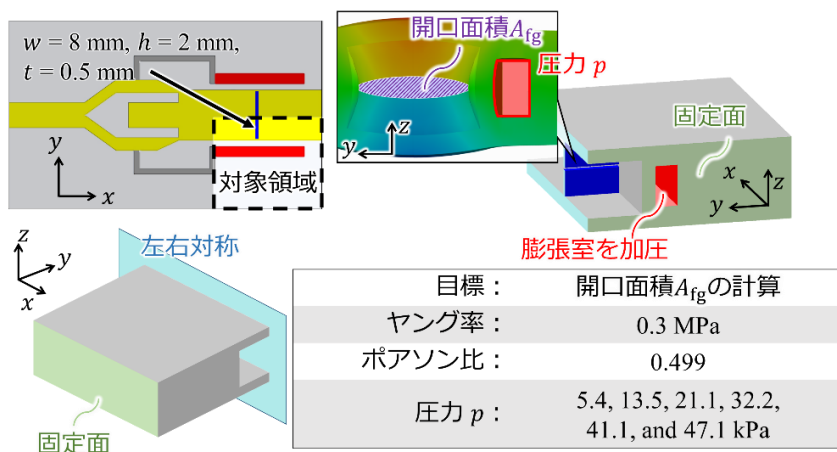
$$p \cong p_{in} \quad (2)$$

また、膨張室内の圧力 p によりフラップゲートの開口面積 A_{fg} が制御され、 p_{in} は q_{in} の増加にともなって、単調増加する。したがって、ここでは p_{in} と A_{fg} の關係に着目し、これらの關係を様々な q_{in} に対して実験的に調査した。ここでは q_{in} を 5 から 30 L/min まで 5 L/min ずつ増加させた。また、このとき、 $p_{in} = 5.4, 13.5, 21.1, 32.2, 41.1, 47.1$ kPa である。図 7 (a) に実験装置を示す。 q_{in} は流量制御器により制御される。また p_{in} を圧力計により計測した。フラップゲートの状態はカメラを用いて計測し、画像処理を用いて、 A_{fg} を算出した。実験を各条件に対して 3 回ずつ行った。また、FEM (finite element method) 解析を行い、 p ($\cong p_{in}$) と A_{fg} の關係を調査した。図 7 (b) に FEM 解析で用いたモデル、および解析条件を示す。なお、FEM 解析には ANSYS を用いた。ここでは入力を p 、出力を A_{fg} として解析した。文献[39][40]によれば、変形が小さい場合 (伸びが 400%以下)、シリコンの変形は線形な弾性変形とみなすことができる。そこで、線形弾性領域で解析した。また、 q_{in} を変化させながらフラップゲート付近の流路内の圧力を測定したところ、最大で 0.7kPa (p_{in} の 6%に相当) であった。そこで、膨張室の外側 (フラップゲートを含む流路沿い) の圧力は大気圧 (0kPa) と仮定した。図 7 (c) は p に対する A_{fg} の実測値と理論値の關係を表す。これより、 A_{fg} の実測値と

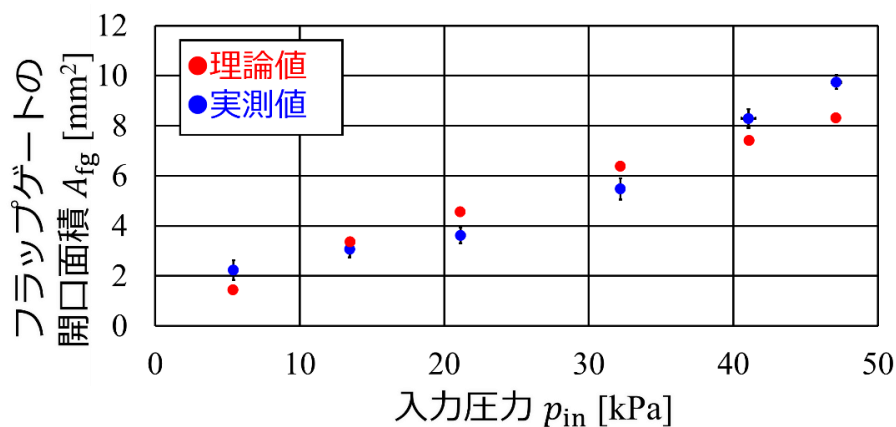
理論値が近く、 p すなわち p_{in} により A_{fg} を制御できることがわかる。さらに、 p_{in} は q_{in} により決定されるため、 A_{fg} は q_{in} により制御できる。



(a) 実験装置



(b) FEM 解析のモデルと拘束条件



(c) 結果

図7 入力流量 q_{in} を変化させて入力圧力 p_{in} (膨張室の圧力 p)を変化させたときのフラップゲートの開口面積 A_{fg} の実測値と理論値の比較。

第3.2節 設計パラメータの調査

ここでは、FDR デバイスの送風および吸引能力に関わる設計パラメータについて調査する。なお、そのほかの寸法は第3.1節の解析が有効であるように決定した。

第3.2.1項 フラップゲートの寸法

第2.4節および第3.1節では、フラップゲートは送風と吸引を切り替える重要な役割を担うことを説明してきた。そこで、フラップゲートの幅 w 、厚さ t 、高さ h が出力口の空気圧（送風と吸引）に与える影響を実験的に調査した。表1に、ここで変化させた設計パラメータを示した（図5を参照）。実験装置は図7(a)に示したものを使用した。FDR デバイスの出力口はカップで完全に覆われている。カップに圧力センサが取り付けられており、出力圧力 p_{out} が計測される。ここでは w 、 t および h を変えたときの A_{fg} と p_{out} を調査した。なお、 w を変えることは、フラップゲートが含まれる流路の幅を変えることを意味する。ここでは、 q_{in} は0から30 L/minまで毎秒0.1 L/minで増加させた。その間、 p_{in} と p_{out} を計測し続けた。また、 A_{fg} は、 $q_{in} = 5, 10, 15, 20, 25$ 、および30 L/minのときの値を計測した。ここでは実験を各条件で3回ずつ行った。なお、 $p_{out} > 0$ の場合は放出を表し、 $p_{out} < 0$ の場合は吸引を表す。また、 p_{in} は q_{in} の増加に対して単調に増加する。

図8は、 p_{in} と p_{out} の関係、および p_{in} と排気口の断面積 A_{ex} に対するフラップゲートの開口断面積の比 A_{fg}/A_{ex} の関係を示している。 w を変えた場合に注目すると、 w が小さいほど p_{out} が大きくなる。すなわち、送風能力が高くなる。また、 t を変えた場合、 t が大きいほど送風能力が高くなる。フラップゲートは片持ち状の構造であるため、 w が小さく、 t が大きい場合、フラップゲートの曲げ剛性が大きくなる。したがって、曲げ剛性が大きいほど、送風能力が高くなる。 h を変えた場合、高さが低いほど、送風から吸引に切り替わるときの p_{in} が小さくなる。 h が小さくなると、 A_{fg}/A_{ex} が増加する。これにより p_{out} が減少するため、送風と吸引の切り替わるときの p_{in} が減少する。また、フラップゲートの曲げ剛性も送風と吸引の切り替わりの圧力に寄与する。フラップゲートの曲げ剛性が小さいほど、これらが切り替わるときの p_{in} は小さくなる。

吸引状態 ($p_{out} < 0$) に注目すると、すべての場合で A_{fg}/A_{ex} が大きいほど、 p_{out} は小さくなった。これは、 A_{fg}/A_{ex} が吸引能力に寄与していることを意味する。すなわち、フラップゲートの開口面積が大きいほど、吸引能力は高くなる。

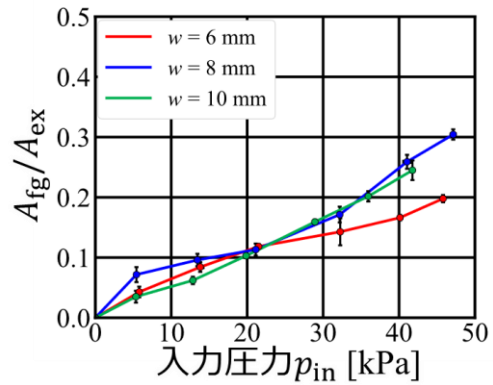
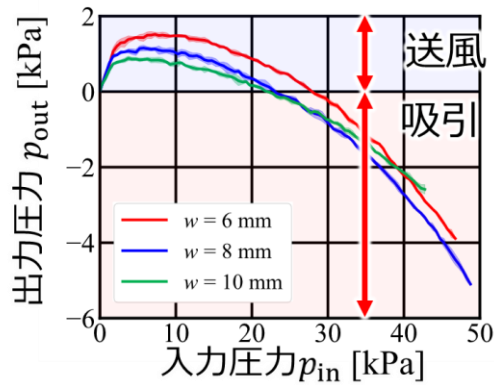
ここで、 w を変えた場合に p_{in} が大きいとき ($p_{in} > 40$ kPa), タイプ C ($w = 10$ mm) のほうが、タイプ A ($w = 6$ mm) より、 A_{fg}/A_{ex} が大きいにも関わらず、 p_{out} は、タイプ C のほうが大きくなった。すなわち、吸引能力はタイプ A のほうが高かった。この原因を調査するために、吸引状態での FDR デバイス内の流れを観察する実験を行った。実験装置を図 9 に示す。FDR デバイスを透明なアクリル板の上に置き、出力口のない側がアクリル板に接するようにして、大気中の空気を吸引できるようにした。吸引中に注射器で赤色の水滴を、出力口にゆっくりと滴下した。FDR デバイスは半透明であるため、水滴の動きをアクリル板の下からカメラで観察した。これにより、赤い水滴がどの方向に動くかとどこに集まってゆくかを観察した。

図 10 に $q_{in} = 30$ L/min におけるタイプ A, B, C の内部の流れの観察結果を示す。タイプ B と C では、水滴は流路の中央に集まっていることが観察された。これは、逆流が発生していることを意味する。流路内を流れるエアジェット周りでは逆流が起こることがある[6][41][42]。この現象は、再循環と呼ばれ、周囲の空気がエアジェットの発達に十分な空気を供給できない場合に、エアジェットが下流から空気を巻き込むことで発生する。FDR デバイスの吸引はエアジェットが周囲の空気を巻き込むことで達成されるため、エアジェットが下流からの空気を巻き込んだ場合、その分の吸引は発生しない。したがって、再循環は吸引能力を低下させる。図 10 に示すように、再循環の大きさはタイプ A, B, C の順に大きくなった。エアジェットに囲まれた再循環では、流路が広いほど、再循環の領域が大きくなりやすい[41]。これが、タイプ C の吸引能力が低かった原因であると考えられる。再循環の大きさは、流体现象の複雑さのため実験的に確認する必要がある。また、 $q_{in} = 20$ L/min における内部の流れの観察も行った。このときも、タイプ A, B, C のすべてで吸引状態であり、同様の現象を確認した。

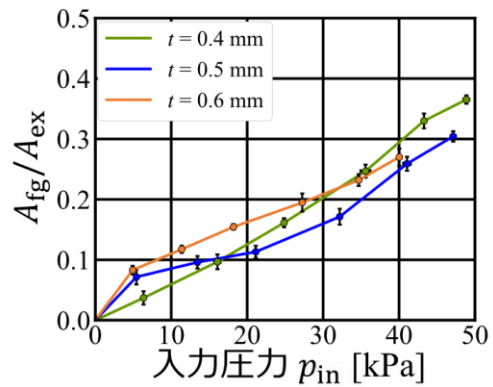
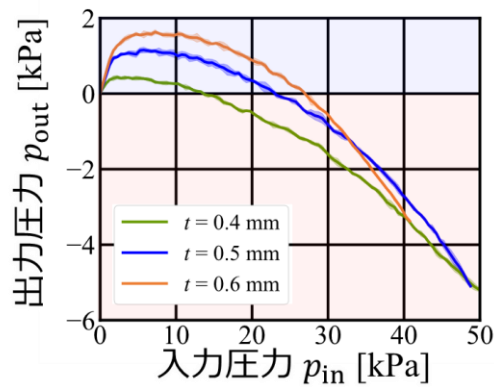
表1 FDR デバイスの設計パラメータ

タイプ	硬さ (Shore A)	ノズル断面積 A_{ne} [mm ²]	フラップゲートの寸法			
			w [mm]	t [mm]	h [mm]	
A	10	0.4	6	0.5	2	
B*			8			
C			10			
D			8	0.4		
E				0.6		
F				0.5		1.8
G						1.9
H						2
I				0.32		
J				0.48		
K	20	0.4	8	0.5	2	
	30					

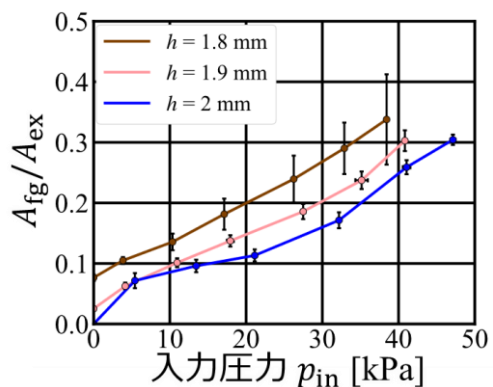
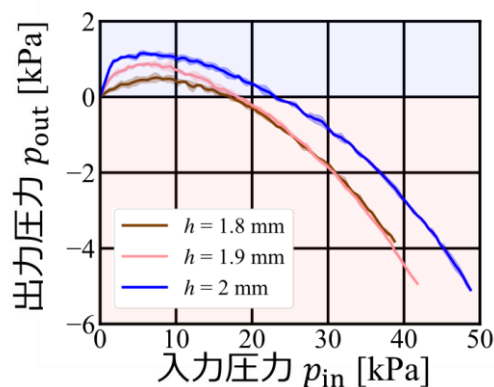
*基準はタイプBのパラメータ値とする。タイプBと異なる値は赤で表示されている。



(a) 幅 w を変更した場合 (タイプ A, B, C)



(b) 厚み t を変更した場合 (タイプ B, D, E)



(c) 高さ h を変更した場合 (タイプ B, F, G)

図8 入力圧力 p_{in} と出力圧力 p_{out} の関係, および p_{in} と A_{fg}/A_{ex} (排気ポートの断面積に対するフラップゲートの開口断面積の比) の関係.

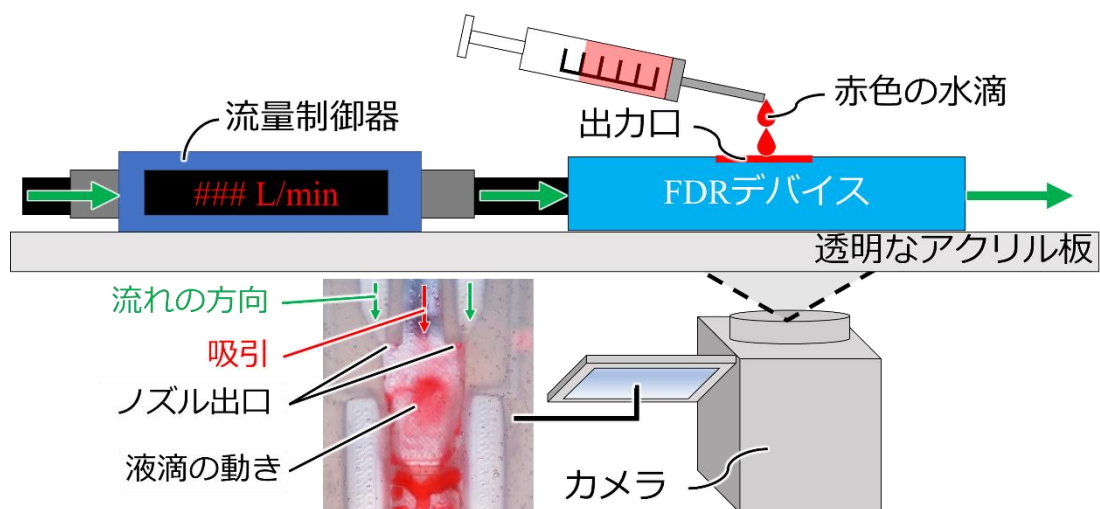


図9 内部の流れの観察装置

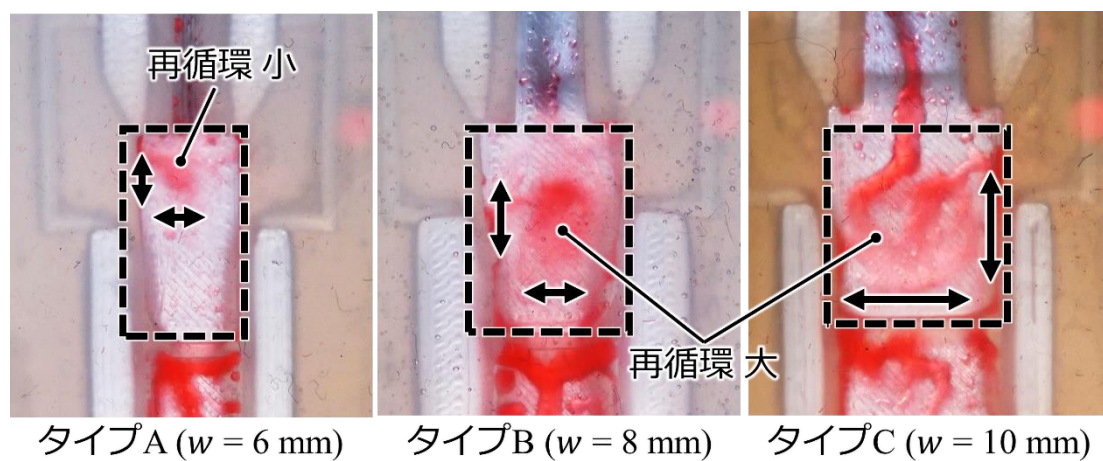


図10 内部の流れの観察結果

第3.2.2項 ノズル断面積

ここでは、ノズルの断面積 A_{ne} の影響を調査した。図7 (a) に示した実験装置を使用し、 A_{ne} を変えた場合 (タイプ H, I) の p_{out} を計測した。(タイプについては表1を参照)。ここでは、 q_{in} は0から30 L/minまで毎秒0.1 L/minで増加させた。また、実験を各条件に対して3回ずつ行った。図11に p_{in} と p_{out} の関係を示す。 A_{ne} を小さくすると、 p_{out} が小さくなった。すなわち吸引能力が高くなった。また、送風と吸引が切り替わるときの p_{in} が小さくなった。これは、 A_{ne} が小さくなるほど、ノズルから出るエアジェットの流速が上昇し、圧力が低下したためである。

第3.2.3項 シリコンの硬さの影響

ここでは、FDR デバイスを構成するシリコンの硬さの影響を調査した。図7 (a) に示した実験装置を使用し、硬さを変えた場合 (タイプ J, K) の p_{out} を計測した。(タイプについては表1を参照)。ここでは、 q_{in} は0から30 L/minまで毎秒0.1 L/minで増加させた。また、実験を各条件に対して3回ずつ行った。図12に p_{in} と p_{out} の関係を示す。硬いシリコンを用いて、FDR デバイスの剛性を高めた場合、送風能力が高くなった。また、送風と吸引の切り替えに必要な p_{in} も増加した。この傾向は、フラップゲートの厚さや幅を変えて曲げ剛性を高めた場合と類似していた。

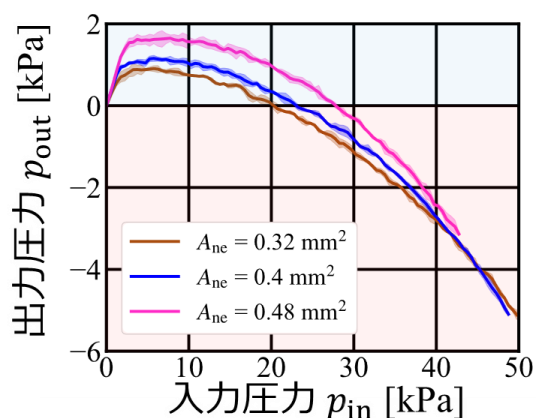


図11 ノズル断面積を変えた場合
(タイプ B, H, I)

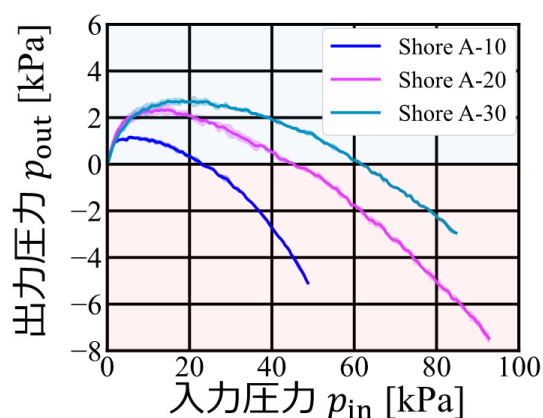


図12 材料の硬さを変えた場合
(タイプ B, J, K)

第3.2.4項 設計パラメータに関するまとめ

以上の設計パラメータの調査から，下記の通りである．

- フラップゲートの開口面積と排気口の断面積の比 A_{fg}/A_{ex} やノズル断面積 A_{ne} は，主に吸引能力に寄与する．
- フラップゲートや FDR デバイス自身の曲げ剛性は，主に送風能力に寄与する．
- フラップゲートの開きやすさは送風から吸引に切り替わるときの入力圧力を変える．

これらの設計パラメータは，望ましい吸引能力，送風能力，および送風から吸引に切り替わるときの入力圧力を得るために適切に選択されるべきである．

第4章 FDR デバイスの摩擦可変能力

FDR デバイスの送風と吸引機能は、摩擦可変機構として利用することができる。そこで q_{in} を変えて、FDR デバイス上で物体を滑らせたときの摩擦力を計測し、摩擦可変能力を評価した。

第4.1節 実験方法

摩擦力の計測装置を図 13 に示す。FDR デバイスは、出力口を上に向けて、テーブルに固定されている。FDR デバイスの出力口は、布と水袋からなるおもりで完全に覆われている。これは、接触面全体にかかる圧力をできるだけ均一にするためである。なお、水袋と布は一体となって動くようにクリップで留められている。また、布地は一般的に吸引しにくく、吸引能力を評価するのに有効であるため、おもりの接触面として布地を選択した。おもり全体（布地、水袋、クリップ）の重さは 16.0 gf (= 0.157 N), 100 gf (= 0.981 N), 200 gf (= 1.96 N) の 3 種類を用いた。おもりは、紐を介してロードセルにつながっている。さらに、このロードセルは直動ステージ (IMADA, RF34) に取り付けられており、移動できる。これにより、おもりを FDR デバイス上で滑らせた。このとき、おもりをけん引しているときにロードセルで計測される力を摩擦力とした。ここで、最大静止摩擦力 f_s と動摩擦力 f_k を定義する。ここでは、滑りが発生する直前を動画から特定し、そのとき計測された力を f_s とした。また、FDR デバイス上を移動しているときの平均の摩擦力を f_k とした。なお、移動速度は 1 mm/sec とした。また、この実験ではタイプ B の FDR デバイスを使用した。 q_{in} は流量制御器 (KOFLOC, 8550MC-0-1-1) を用いて制御した。ここでは、 q_{in} が 0 L/min (基準), 10 L/min (送風状態), 20 L/min (吸引状態), 30 L/min (吸引状態) の場合に対してそれぞれ 3 回ずつ実験を行った。

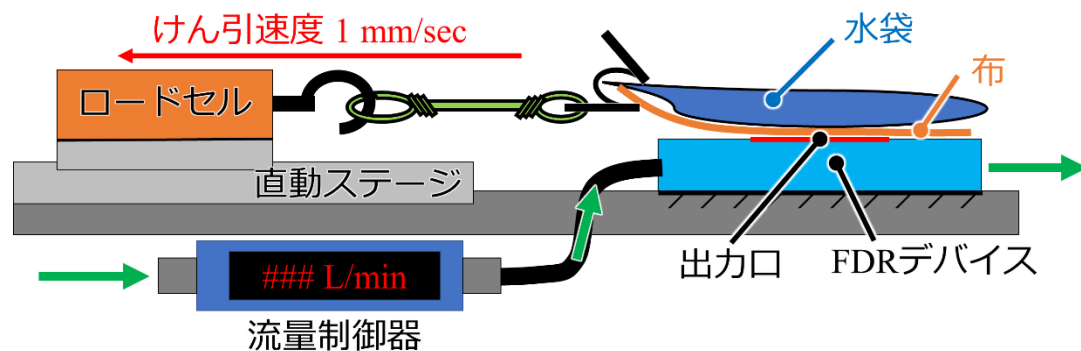


図13 摩擦力の計測装置

第4.2節 実験結果

図14に各 q_{in} に対する摩擦力(f_s , f_k)の平均値を示す。基準の状態($q_{in} = 0$ L/min)と比較すると、おもりの重さに関わらず、送風状態では摩擦力が減少した。一方で吸引状態では増加した。また、吸引能力が高いほど、摩擦力は大きくなった。吸引機能は接触荷重を増加させ、より大きな摩擦力に寄与し、送風機能は接触荷重を減少させ、より小さな摩擦力に寄与する。これがFDRデバイスにおける摩擦変化のメカニズムである(図6)。そのため、物体の重さに比例して、摩擦力が増加した。この結果から、FDR装置は流量制御のみで摩擦の増加と減少の両方を実現できることが示された。また、FDRデバイスが布地の吸い込みが可能なことも示された。

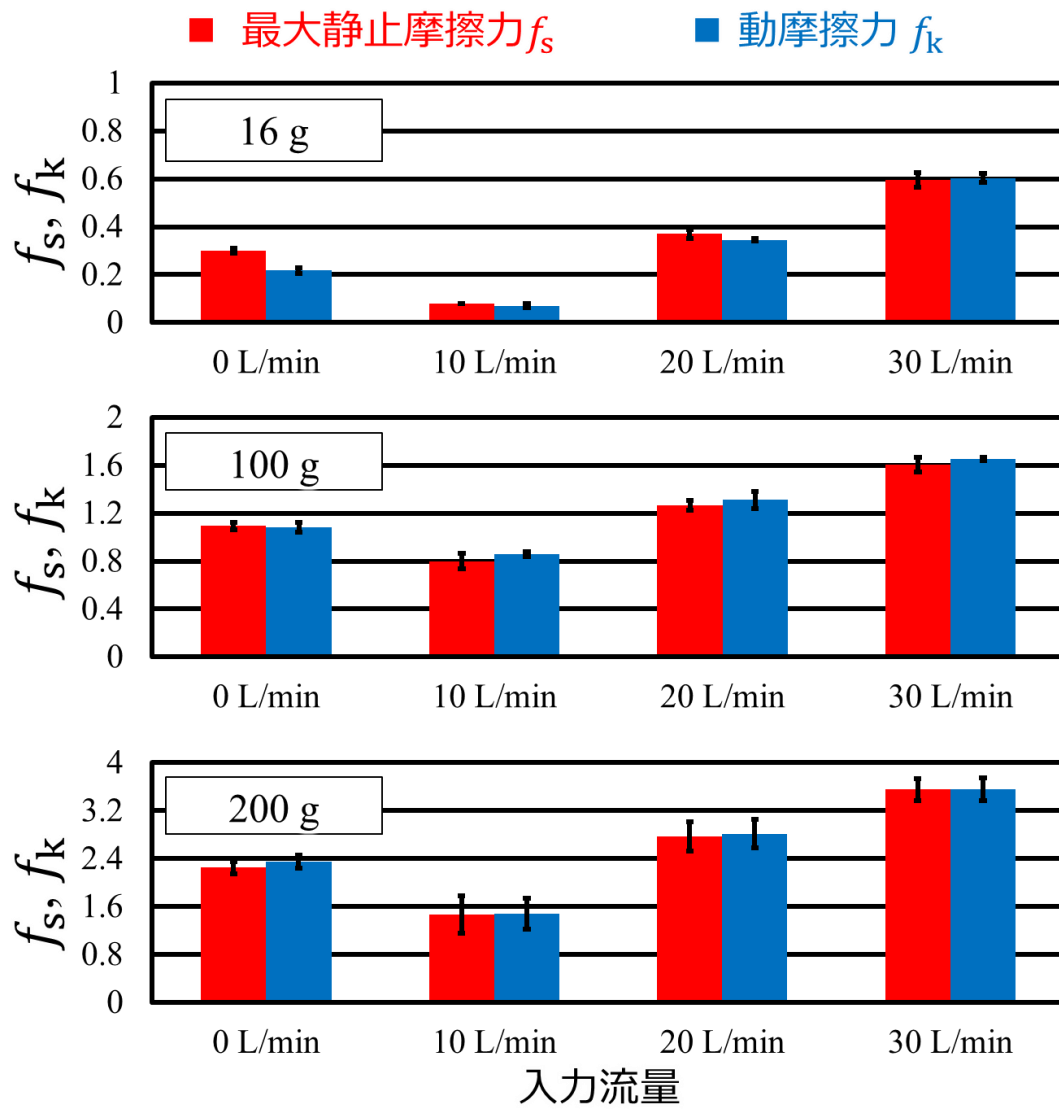


図14 各入力流量に対する摩擦力

第5章 FDR デバイスのアプリケーション

ここでは、FDR デバイスの送風と吸引機能の応用方法について、実験的なタスクを通して検討する。

第5.1節 障害物除去および物体把持

ここでは、送風と吸引をそれぞれ軽量の障害物の除去と物体の把持に応用する。この実験の目的は次の二つである。

- FDR デバイスが軽量の障害物（ほこり）の除去とシート状の物体の把持に使用できることを実証する。
- 物体が FDR デバイスのやわらかい表面に付着したとき、その物体をリリースするために送風が有効であることを実証する。

第5.1.1項 実験方法

実験装置を図 15 に示す。FDR デバイスは自動ステージ (IMADA, RF34) に取り付けられており、出力口を下に向けて、水平から 45 度の角度で取り付けられている。また、把持対象物は、静電気の発生を防ぐため、導電性ゴムシートの上に置かれている。さらに、その上に、障害物としてナイロンの糸くずを散らした。図 16 にこの実験で使用した把持対象物を示す。把持対象物はポリプロピレン (PP) シート (厚さ 0.25mm)、紙片 (厚さ 0.2mm)、不織布シート (厚さ 0.3mm) の 3 種類とした。なお、大きさは、30×30mm とした。

実験の手順は次の①から⑤の通りである。

- ① 送風を開始する ($q_{in} = 10 \text{ L/min}$)。
- ② 送風により障害物を吹き飛ばせるように、FDR デバイスを対象物の端に触れる位置まで移動させる。
- ③ 出力口が対象物に接触するまで降下させ、吸引を開始する ($q_{in} = 30 \text{ L/min}$)。
- ④ 対象物を吸引により把持するために、FDR デバイスを上昇させる。
- ⑤ 対象物をリリースするために、流量の入力を停止する。

もし、⑤の操作が終了した時点で、対象物をリリースできなかった場合は再び送風を開始する ($q_{in} = 10 \text{ L/min}$).

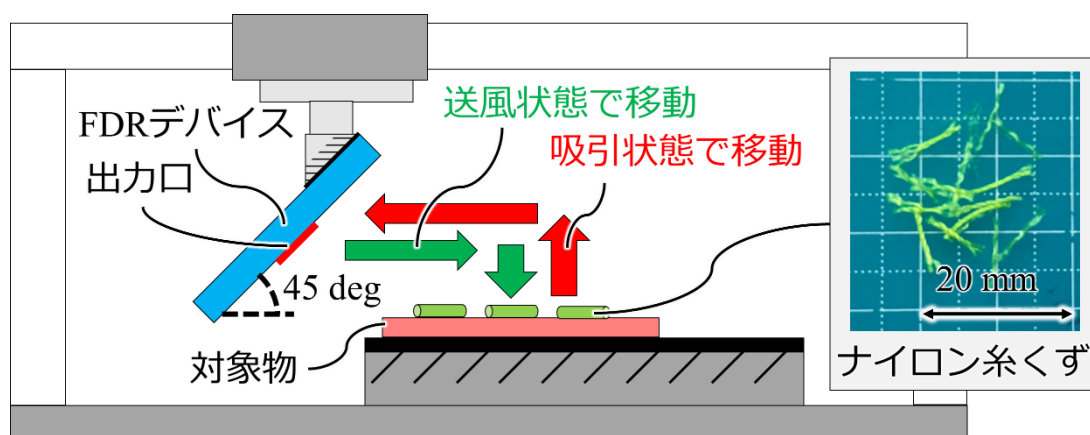


図15 障害物除去および物体把持の実験装置

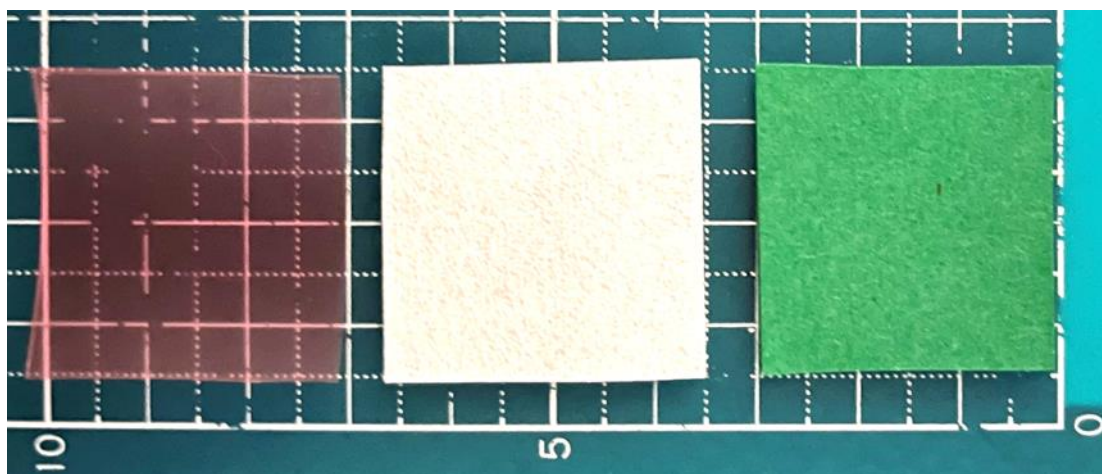


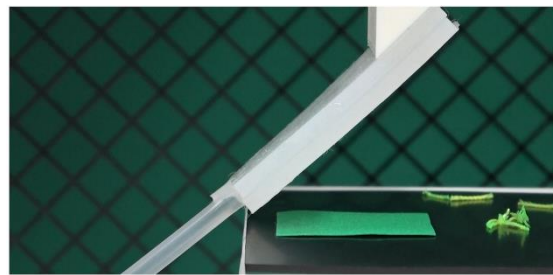
図16 把持対象物：左から、把持対象物はポリプロピレン (PP) シート，不織布シート，紙.

第5.1.2項 実験結果

図 17 から図 19 に示した結果より、これらすべての対象物に対して、障害物の除去、および物体の把持、およびリリースに成功した。ただし、PP シートの場合のみ、⑤の操作が終了したとき、PP シートが FDR デバイスに貼りついたままとなった。ここで、再び送風を開始したところ、リリースに成功した (図 19 (c))。以上の結果からこのタスクへの FDR デバイスの有効性が実証された。



(a) 障害物除去



(a) 障害物除去



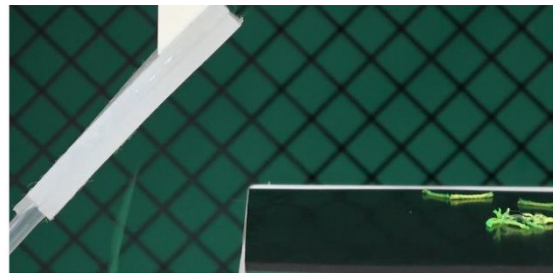
(b) 吸引による対象物の把持



(b) 吸引による対象物の把持



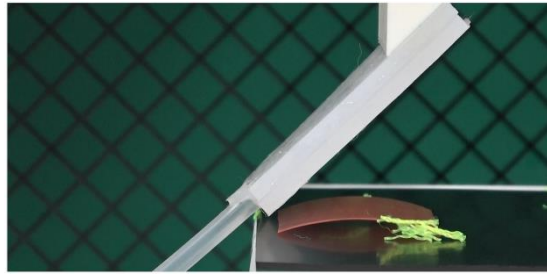
(c) 吸引停止による物体のリリース



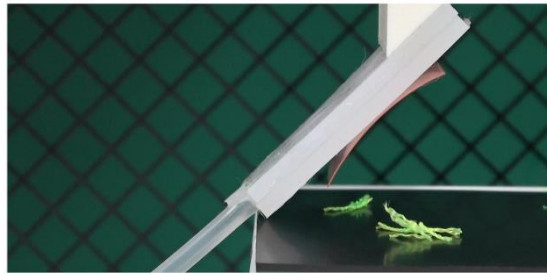
(c) 吸引停止による物体のリリース

図17 不織布の実験結果

図18 紙の実験結果



(a) 障害物除去



(b) 吸引による対象物の把持



(c) 物体のリリース（送風により達成）

図19 PP シートの実験結果

第5.2節 曲面をもつ物体の把持

FDR デバイスが薄くやわらかいため、曲面に取り付けることが可能である。そこで、曲面上に取り付けても動作し、曲面を持つ対象物の把持にも有効であることを実証する。

第5.2.1項 実験方法

ここでは、FDR デバイスを曲面上に取り付け、紙コップの側面を把持するタスクを行った。図 20 に実験装置を示す。FDR デバイスは曲率半径 40 mm の曲面に取り付けられている。さらに、それは自動ステージ (IMADA, RF34) に取り付けられている。FDR デバイスは吸引状態 ($q_{in} = 30 \text{ L/min}$) となるように空気が供給される。この状態で紙コップの側面へ出力口を近づけ、把持できるかを確認する。なお、紙コップの把持位置の直径は 47 mm、重さは 2.4 g であった。

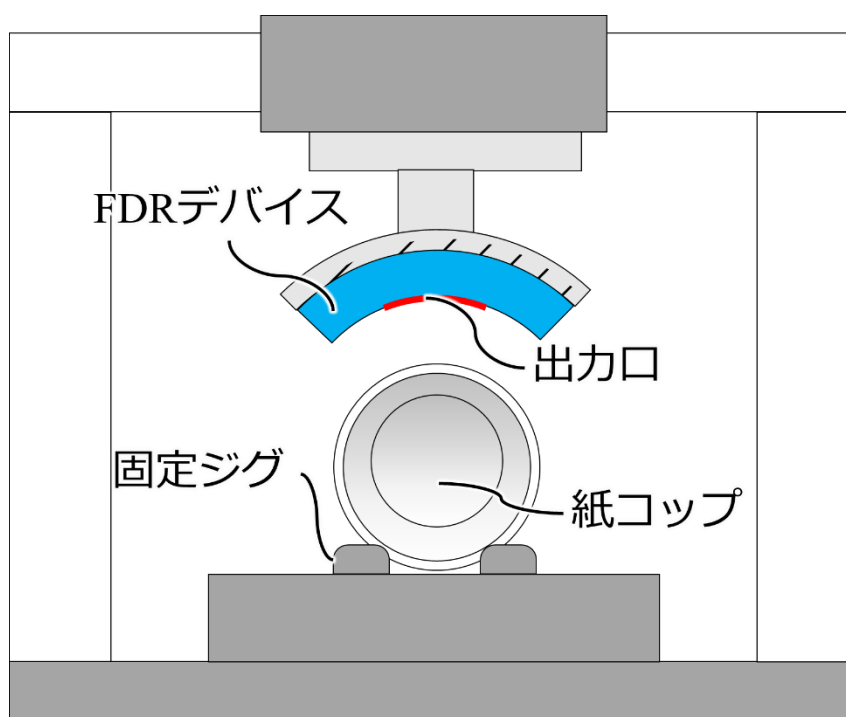


図20 曲面上での動作および曲面を持つ対象物の把持実験装置。

第5.2.2項 実験結果

図21に示すように、FDRの柔軟性と薄さにより、曲面上でも作動し、曲面を持つ物体のピックアップに有効であることが実証された。

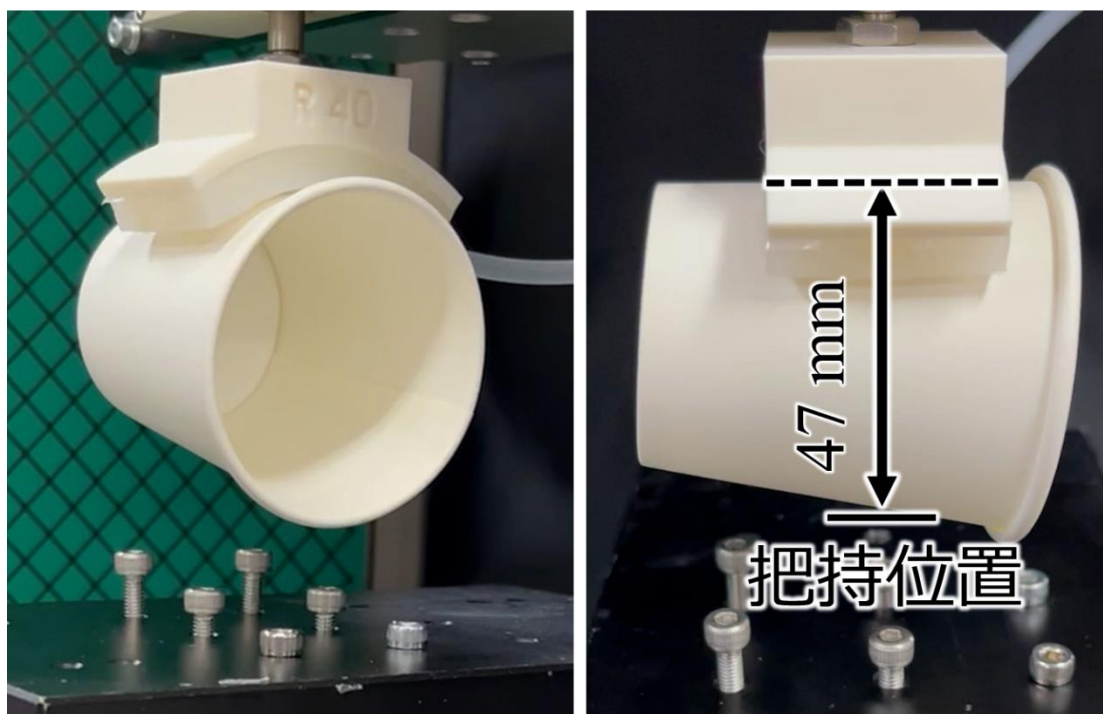


図21 曲面上での動作および曲面を持つ対象物の把持実験の結果.

第5.3節 凹凸のある表面をもつ物体の把持

ここでは、FDR デバイスが凹凸のある面に対しても吸引が有効であることを確認する。

第5.3.1項 実験装置

図 22 に実験装置を示す。FDR デバイスは、出力口を下に向けて、自動ステージ (IMADA, RF34) に取り付けられている。その下に、凹凸のある対象物として、気泡緩衝材をおいた。なお、大きさは、 60×60 mm とした。また、FDR デバイスには 30 L/min で空気を供給し、吸引状態とした。

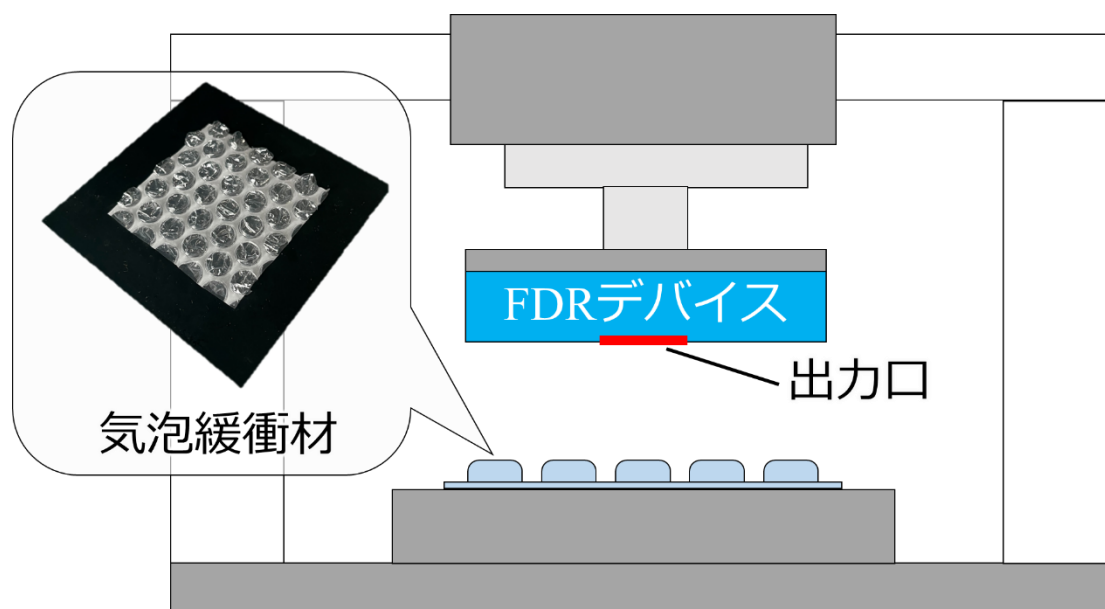


図22 凹凸のある対象物に対する把持実験の装置

第5.3.2項 実験結果

図23に示すように、凹凸のある面の把持に成功した。したがって、FDRデバイスの吸引は凹凸のある面に対しても有効であることが示された。

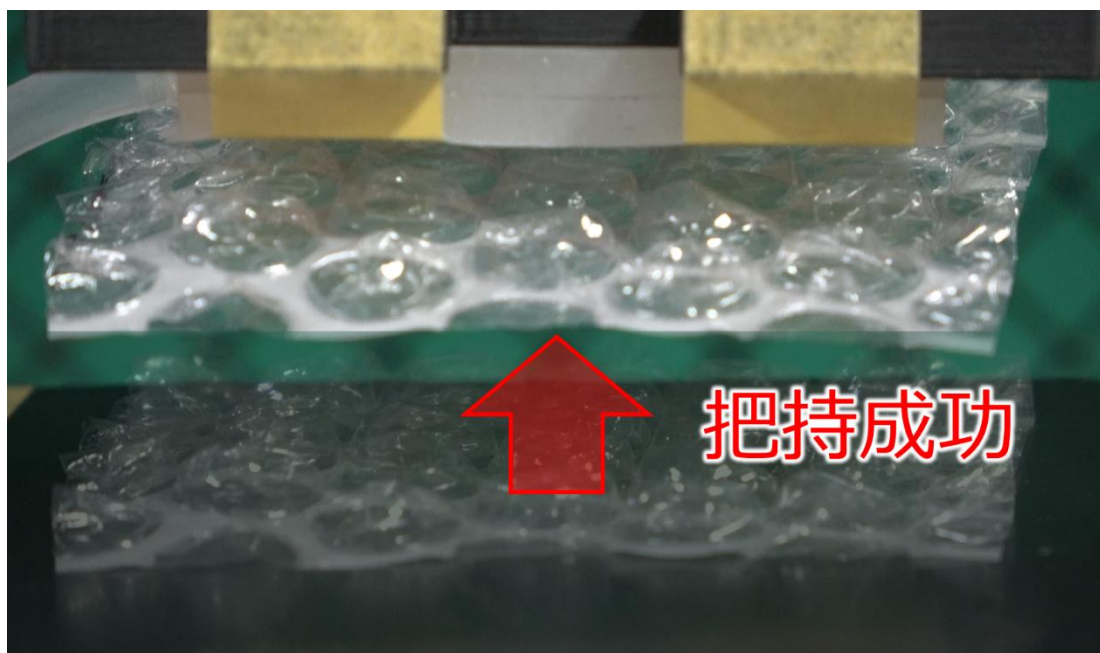


図23 凹凸面の把持の様子

第5.4節 ロボットの指表面としての応用

FDR デバイスをロボット指の表面として使用することで、送風と吸引機能により、物体の把持とリリースを容易にすることができる。さらに FDR デバイスの薄さとやわらかさはロボット指への装着を容易にする。ここでは、図 24 に示すように平行グリッパ[43]の各指表面に FDR デバイスを搭載した。

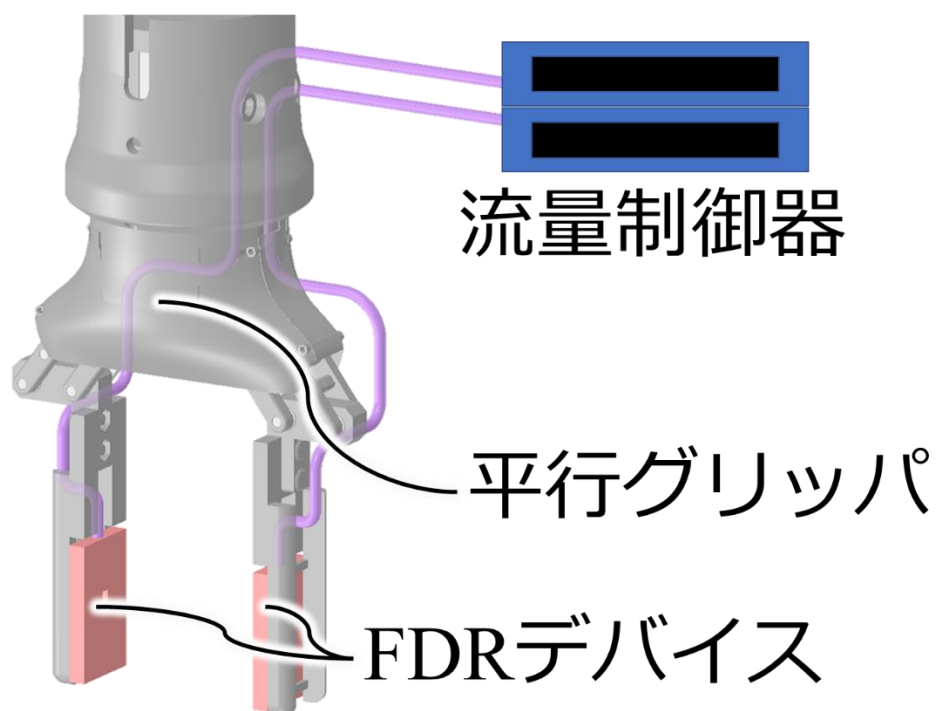


図24 FDR デバイスを搭載した平行グリッパ

第5.4.1項 送風による精密リリース

第4章で示したように、ロボットの指表面に取り付けられたFDRデバイスは摩擦可変機構として機能する。吸引機能による摩擦の増加は把持の安定性を向上させる。また、空気圧の制御により摩擦力を徐々に減少させることで、指の開き幅を変えずに対象物をリリースすることができる。これにより、指の開き動作や、指表面への対象物の付着による不確定要素を排除し、把持姿勢を維持したまま正確な配置を実現できる。また、やわらかい指の表面は物体の形状にフィットし、把持の安定性を高めるが、摩擦が大きいため、把持した物体をリリースすることを困難にする[26]。したがって、対象物の精密なリリースは、指の表面がやわらかい場合に特に有効である。その有効性を実証するために、図24の平行グリッパを用いて、物体(紙箱, 重さ22g)を把持し、リリースする実験を行った。各指のFDRデバイスはそれぞれ流量制御器に接続されている。まず、グリッパは2本の指を使って対象物を把持した(図25(a))。その後、吸引から送風に変えながら、指の開き幅を変えずに物体をリリースした(図25(b))。比較のために、送風を行わずに物体をつまんで置く実験を行った(図25(c))。この場合、指を開いてリリースすると、物体の位置が乱れた。この結果から、摩擦を変化により安定した把持と精密なリリースを容易にすることにおいて、FDRデバイスの有効性が実証された。

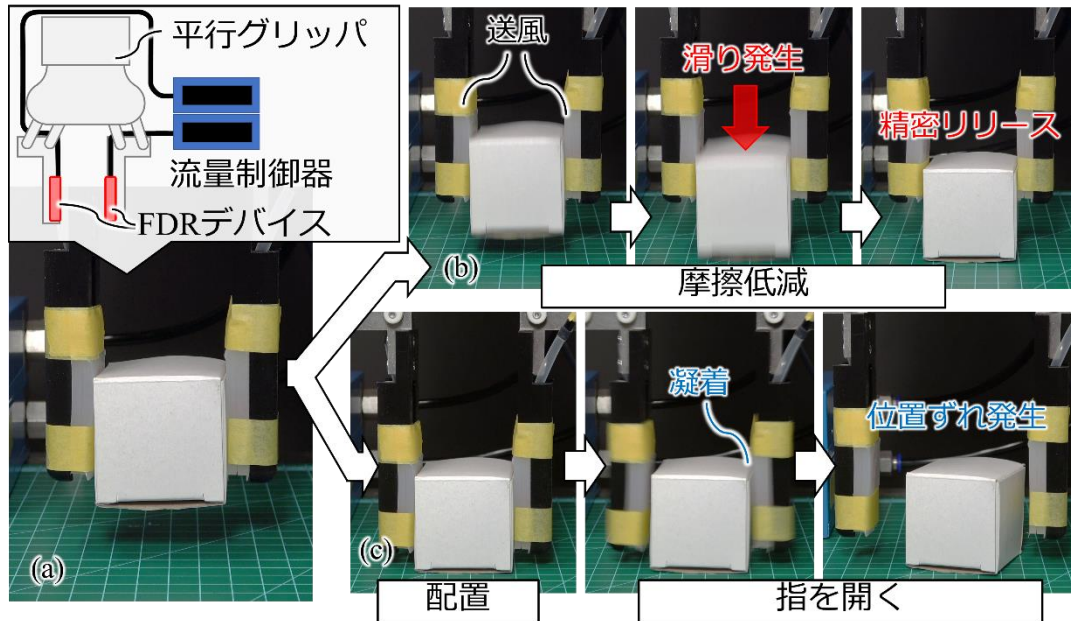


図25 各指表面に FDR デバイスを搭載したグリッパによる紙箱の把持とリリース：(a) 実験セットアップ，(b) 送風によるリリース，(c) 指を開くことによるリリース。

第5.4.2項 吸引による指から指への物体輸送

FDR デバイスの吸引は片指だけで物体を把持することを可能にする。これを利用することで、グリップの開閉だけで、指から指へ物体を輸送する操作が可能となる（図26）。これは、グリップの位置を変えることなく物体を輸送できるため、ロボットアームや自動ステージなどの動きを最小化するのに役立つ。これは、周囲に障害物のある環境や、人やロボットとの共同作業など周囲に動くものが存在している環境での作業に有効である。

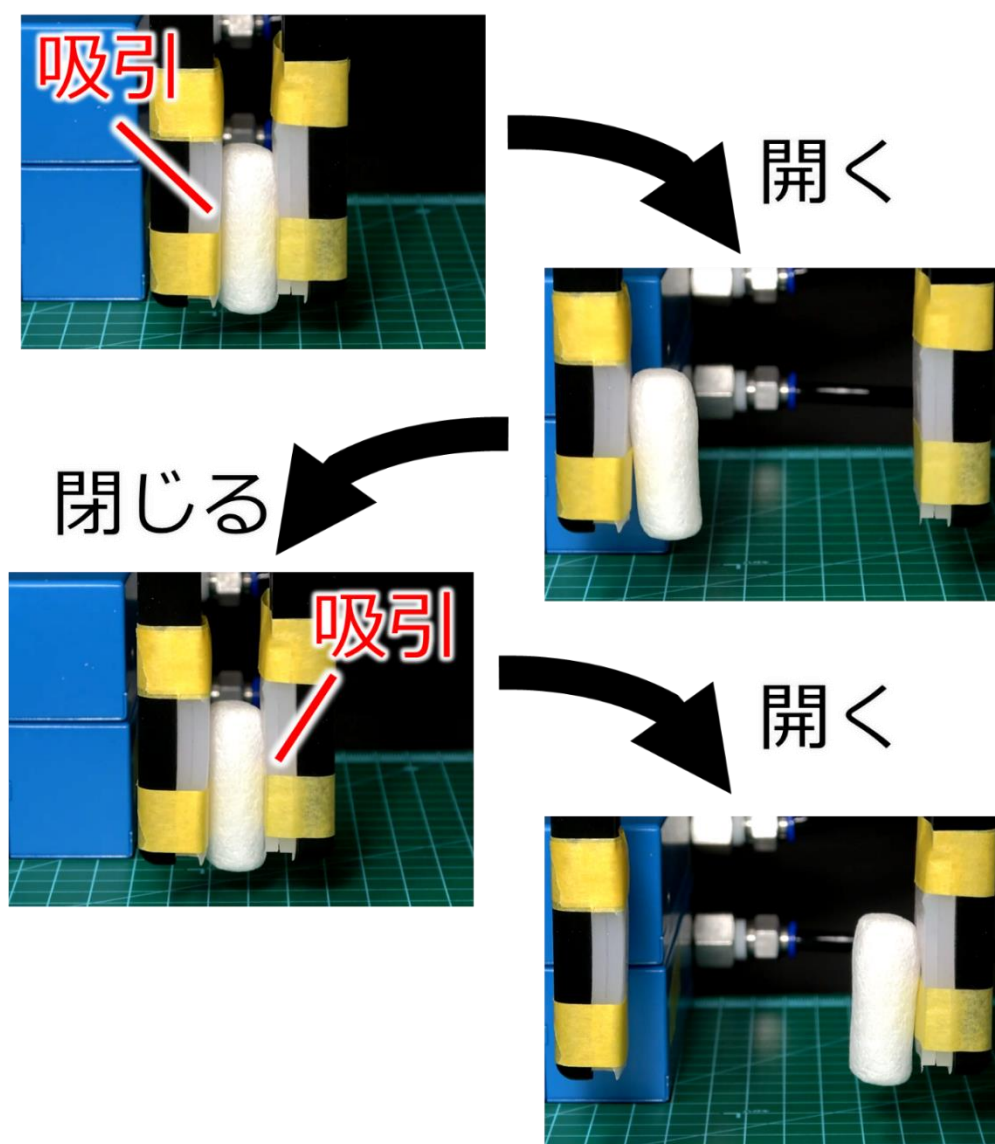


図26 吸引を利用した物体の指から指への移動操作の様子

第5.4.3項 送風による乾燥機能

第5.1節では、把持対象物の表面が覆ったほこりでおおわれている想定であったが、実空間の作業では、対象物の表面が、濡れている場合も想定される。表面の濡れは、把持の妨げになる場合がある。FDR デバイスの送風機能は、このような水気の除去にも有効であると考えられる。そこで、FDR デバイスの送風機能により、水気の除去ができるかを検証した。図27 (a) に実験装置を示す。まず、キムワイプに水 (0.51 g) を含ませ、秤の上に置いた。これを、図24の平行グリッパではさみ、各FDR デバイスに入力流量 10 L/min を供給し、10 分間送風した。実験の結果、含水量は 0.07 g となり、水気が除去されていることを確認した (図27 (b))。また、比較のために、送風せずに行ったところ含水量は 0.47 g であった (図27 (c))。したがって、FDR デバイスの送風が水気の除去にも有効であることが示された。

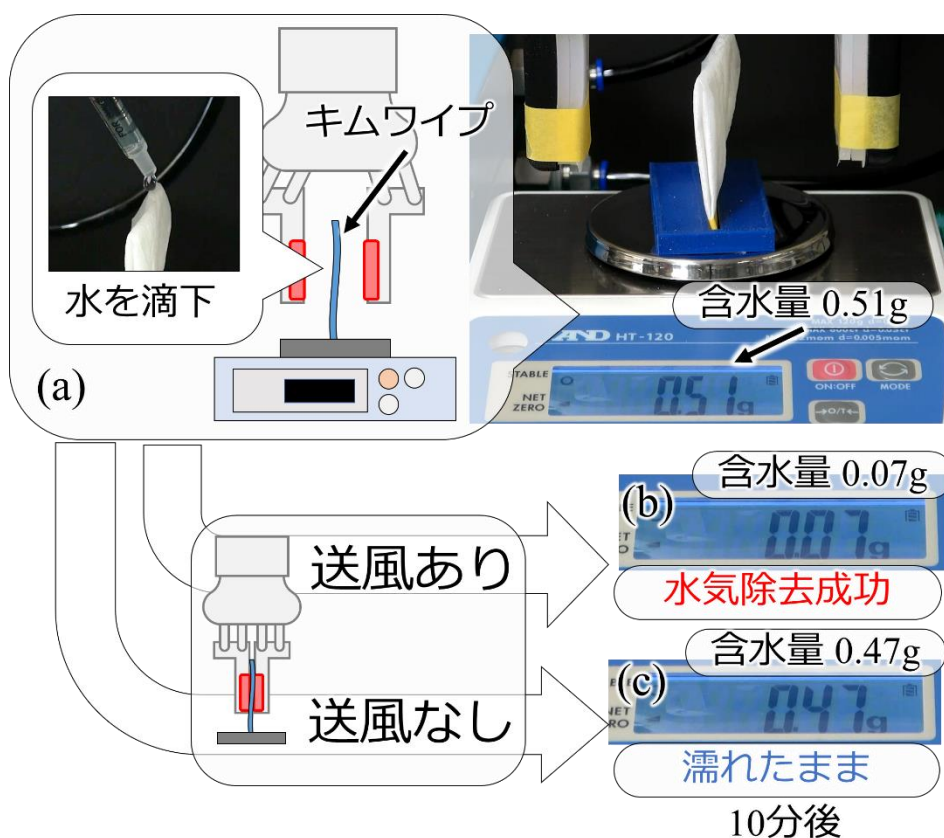


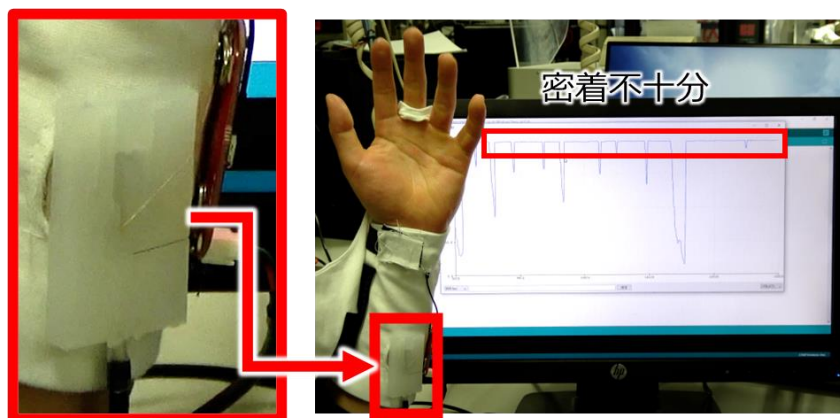
図27 送風を利用した把持対象物の乾燥実験：(a) 実験のセットアップ，(b) 送風ありでの含水量，(c) 送風なしでの含水量。

第5.5節 ウェアラブルデバイスとしての応用

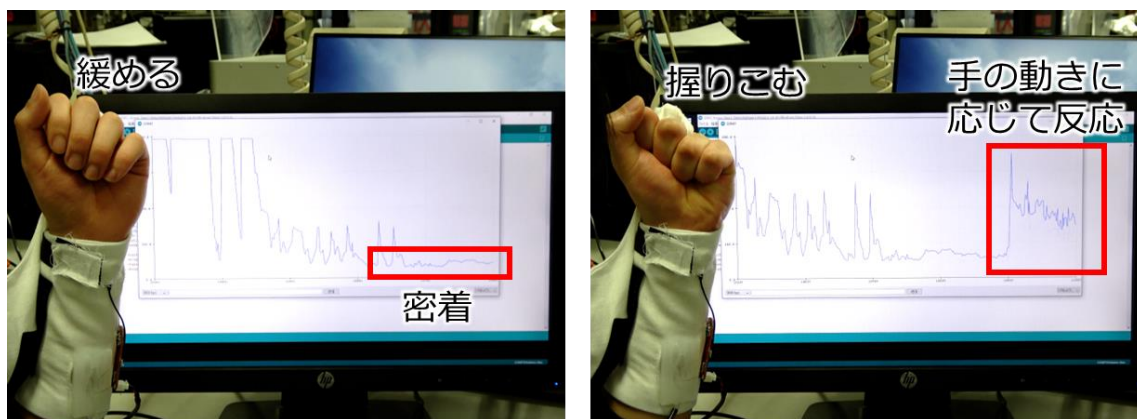
ここでは、FDR デバイスが皮膚との密着度の向上に有効であることを示すため、FDR デバイスと筋電センサ（Advancer Technologies 社、MyoWare）を組み込んだアームカバーを作成した（図 28）。このアームカバーは、図 28 に示すように腕に巻きつけられる。FDR デバイスの吸引により密着度を向上させやすくするため、FDR デバイスの出力口の周りにひだを取り付けた。このひだは、皮膚との接触面側に導電糸（FUJIX Ltd., Smart-X）で構成した電極を持つ。これらの電極は、筋電センサの基盤部と接続されている。筋電センサのリファレンス電極は手首に取り付けた。この筋電センサでは、センサからの信号が大きい方に振り切っているとき、電極が皮膚と十分に密着できていないことを意味する。図 29 (a) は吸引を使わないときの筋電センサの出力である。この場合、出力は常に大きい状態となった。したがって、電極が皮膚と密着できていないことがわかる。次に、FDR デバイスに 30 L/min の空気を供給して吸引状態とした。このとき、図 29 (b) に示すように、信号が小さくなり、密着度が高くなったことがわかる。さらに、この状態で、手のひらを握りこんだり緩めたりを繰り返すとそれに応じて、信号が得られることを確認した。したがって、筋肉の動きにともなう、ずれも防止できていることがわかる。以上より、FDR デバイスが皮膚との密着度の向上に有効であることが実証された。



図28 FDR デバイスおよび筋電センサ内臓アームカバー



(a) 吸引を行わないとき



(b) 吸引を行ったとき

図29 実験結果

第6章 結言

本研究では、単一の流量制御で送風と吸引を切り替えることが可能な、薄くやわらかい FDR デバイスを開発した。FDR デバイスは、エアジェットで周囲の空気を巻き込み、フラップゲートで流れを反転させることで送風と吸引が可能となる。フラップゲートが閉じると送風となり、開くと吸引となる。そして、フラップゲートの開閉は、その付近に設置された膨張室の膨張によって制御される。さらに、膨張量は入力空気の圧力によって決定される。この圧力は入力流量で決まるため、送風と吸引の切り替えは、入力空気の流量制御で実現される。構造全体をシリコンで構成することで、薄さとやわらかさを実現した。また、フラップゲートの幅、厚み、高さなどの設計パラメータを導入し、送風と吸引能力に寄与することを実証した。

さらに、FDR デバイスが送風と吸引を利用した摩擦可変機構として機能することを実証した。その機能は、平行グリッパの指に搭載し、安定した把持と精密なリリースを容易にするために有効であることを実証した。また、送風機能は、濡れた対象物を乾かすのにも有効であり、対象物の表面を把持に適した状態にするのにも有効であることを示した。

また、FDR デバイスが軽い障害物に覆われた物体を把持するのに効果的であることも実証した。そこでは FDR デバイスは送風によって障害物を除去し、吸引によって物体を把持することに成功した。さらに、送風は物体のリリースにも効果的であることを実証した。また、FDR デバイスの柔軟性と薄さにより、これを曲面に取り付けても動作することを実証した。これにより、FDR デバイスは曲面を持つ対象物の吸着にも有効であることを実証した。また、FDR デバイスは凹凸のある表面も吸着できることを実証した。今後は、FDR デバイスの小型化、対象とする作業に応じたエネルギー効率などの設計パラメータの最適化、提案した FDR デバイスを用いた物体操作や人支援システムなどのロボットシステムの開発により、応用範囲の拡大を図る予定である。

参考文献

- [1] H. Tsukagoshi and Y. Osada, “Soft Hybrid Suction Cup Capable of Sticking to Various Objects and Environments,” *Actuators*, vol. 10, no. 3, p. 50, Mar. 2021, doi: 10.3390/act10030050.
- [2] S. Ross, O. Korostynska, L. E. Cordova-Lopez, and A. Mason, “A review of unilateral grippers for meat industry automation,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 119, pp. 309–319, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.tifs.2021.12.017.
- [3] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, “Soft Robotic Grippers,” *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 29, p. 1707035, Jul. 2018, doi: 10.1002/adma.201707035.
- [4] W. P. Weston-Dawkes, I. Adibnazari, Y.-W. Hu, M. Everman, N. Gravish, and M. T. Tolley, “Gas-Lubricated Vibration-Based Adhesion for Robotics,” *Adv. Intell. Syst.*, vol. 3, no. 7, p. 2100001, Jul. 2021, doi: 10.1002/aisy.202100001.
- [5] S. Nojiri, T. Nishimura, K. Tadakuma, and T. Watanabe, “Flexible and Slim Device Switching Air Blowing and Suction by a Single Airflow Control,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 2637–2644, May 2023, doi: 10.1109/LRA.2023.3254465.
- [6] N. Rajaratnam, *Turbulent Jets*, 1st ed. Elsevier Science Ltd., 1976.
- [7] J. H. Keenan and E. P. Neumann, “A Simple Air Ejector,” *J. Appl. Mech.*, vol. 9, no. 2, pp. A75–A81, Jun. 1942, doi: 10.1115/1.4009187.
- [8] B. M. Tashtoush, M. A. Al-Nimr, and M. A. Khasawneh, “A comprehensive review of ejector design, performance, and applications,” *Appl. Energy*, vol. 240, pp. 138–172, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.185.
- [9] K. Suzumori, K. Fukuda, R. Niiyama, and K. Nakajima, Eds., *The Science of Soft Robots*. in Natural Computing Series. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. doi: 10.1007/978-981-19-5174-9.
- [10] J. Walker *et al.*, “Soft Robotics: A Review of Recent Developments of Pneumatic Soft Actuators,” *Actuators*, vol. 9, no. 1, p. 3, Jan. 2020, doi: 10.3390/act9010003.
- [11] F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, X. Chen, and G. M. Whitesides, “Soft Robotics for Chemists,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 50, no. 8, pp. 1890–1895, Feb. 2011, doi: 10.1002/anie.201006464.
- [12] K. Suzumori, “New Robotics Pioneered by Fluid Power,” *J. Robot. Mechatronics*, vol. 32, no. 5, pp. 854–862, Oct. 2020, doi:

- 10.20965/jrm.2020.p0854.
- [13] Keiko Ogura, S. Wakimoto, K. Suzumori, and Yasutaka Nishioka, “Micro pneumatic curling actuator - Nematode actuator -,” in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, IEEE, Feb. 2009, pp. 462–467. doi: 10.1109/ROBIO.2009.4913047.
 - [14] K. Suzumori, S. Endo, T. Kanda, N. Kato, and H. Suzuki, “A Bending Pneumatic Rubber Actuator Realizing Soft-bodied Manta Swimming Robot,” in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Apr. 2007, pp. 4975–4980. doi: 10.1109/ROBOT.2007.364246.
 - [15] S. Kurumaya, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Exoskeleton inflatable robotic arm with thin McKibben muscle,” in *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, IEEE, Apr. 2018, pp. 120–125. doi: 10.1109/ROBOSOFT.2018.8404907.
 - [16] R. Niiyama, X. Sun, C. Sung, B. An, D. Rus, and S. Kim, “Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design,” *Soft Robot.*, vol. 2, no. 2, pp. 59–70, Jun. 2015, doi: 10.1089/soro.2014.0023.
 - [17] Y. Miyaki and H. Tsukagoshi, “Self-Excited Vibration Valve That Induces Traveling Waves in Pneumatic Soft Mobile Robots,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 4133–4139, Jul. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2978455.
 - [18] H. Tsukagoshi, K. Terashima, and Y. Takai, “A Self-propelled Catheter Capable of Generating Travelling Waves with Steering Function by Mono-Line Drive,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, May 2018, pp. 38–43. doi: 10.1109/ICRA.2018.8461159.
 - [19] D. J. Preston *et al.*, “A soft ring oscillator,” *Sci. Robot.*, vol. 4, no. 31, Jun. 2019, doi: 10.1126/scirobotics.aaw5496.
 - [20] K. Tani, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Proposal and Prototyping of Self-Excited Pneumatic Actuator Using Automatic-Flow-Path-Switching-Mechanism,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 3058–3065, Apr. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2974448.
 - [21] K. Tani, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Pneumatic Soft Actuator Using Self-Excitation Based on Automatic-Jet-Switching-Structure,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 4042–4048, Jul. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2985622.
 - [22] E. Kitamura, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, “Self-excitation pneumatic soft actuator inspired by vocal cords,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 331, p. 112816, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.112816.

- [23] N. Vasios, A. J. Gross, S. Soifer, J. T. B. Overvelde, and K. Bertoldi, “Harnessing Viscous Flow to Simplify the Actuation of Fluidic Soft Robots,” *Soft Robot.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2020, doi: 10.1089/soro.2018.0149.
- [24] P. Rothemund *et al.*, “A soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators,” *Sci. Robot.*, vol. 3, no. 16, Mar. 2018, doi: 10.1126/scirobotics.aar7986.
- [25] N. Napp, B. Araki, M. T. Tolley, R. Nagpal, and R. J. Wood, “Simple passive valves for addressable pneumatic actuation,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, May 2014, pp. 1440–1445. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907041.
- [26] T. Nishimura *et al.*, “Soft Robotic Hand With Finger-Bending/Friction-Reduction Switching Mechanism Through 1-Degree-of-Freedom Flow Control,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 7, no. 2, pp. 5695–5702, Apr. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3157964.
- [27] E. Ben-Haim, L. Salem, Y. Or, and A. D. Gat, “Single-Input Control of Multiple Fluid-Driven Elastic Actuators via Interaction Between Bistability and Viscosity,” *Soft Robot.*, vol. 7, no. 2, pp. 259–265, Apr. 2020, doi: 10.1089/soro.2019.0060.
- [28] “SMC- New Products.” <https://www.smcworld.com/newproducts/en-jp/zxp/> (accessed Feb. 03, 2023).
- [29] K. P. Becker, N. W. Bartlett, M. J. D. Malley, P. M. Kjeer, and R. J. Wood, “Tunable friction through constrained inflation of an elastomeric membrane,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, May 2017, pp. 4352–4357. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989502.
- [30] A. J. Spiers, B. Calli, and A. M. Dollar, “Variable-Friction Finger Surfaces to Enable Within-Hand Manipulation via Gripping and Sliding,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 4116–4123, Oct. 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2856398.
- [31] S. Nojiri, K. Mizushima, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, “Development of Contact Area Variable Surface for Manipulation Requiring Sliding,” in *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, IEEE, Apr. 2019, pp. 131–136. doi: 10.1109/ROBOSOFT.2019.8722754.
- [32] S. Nojiri, A. Yamaguchi, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, “Sensing and Control of Friction Mode for Contact Area Variable Surfaces (Friction-variable Surface Structure),” in *2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, IEEE, May 2020, pp. 215–222. doi:

- 10.1109/RoboSoft48309.2020.9116019.
- [33] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea, “Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electroadhesion Based on Multifunctional Polymer Actuators,” *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 231–238, Jan. 2016, doi: 10.1002/adma.201504264.
- [34] P. Glick, S. A. Suresh, D. Ruffatto, M. Cutkosky, M. T. Tolley, and A. Parness, “A Soft Robotic Gripper With Gecko-Inspired Adhesive,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, Apr. 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2792688.
- [35] Q. Lu, A. B. Clark, M. Shen, and N. Rojas, “An Origami-Inspired Variable Friction Surface for Increasing the Dexterity of Robotic Grippers,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 2538–2545, Apr. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2972833.
- [36] K. Mizushima, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, “Deformable fingertip with a friction reduction system based on lubricating effect for smooth operation under both dry and wet conditions,” *Adv. Robot.*, vol. 33, no. 10, pp. 508–519, May 2019, doi: 10.1080/01691864.2019.1608299.
- [37] Y. Golan, A. Shapiro, and E. Rimon, “Jamming-Free Immobilizing Grasps Using Dual-Friction Robotic Fingertips,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 2889–2896, Apr. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2972883.
- [38] A. Chanda, “Biomechanical Modeling of Human Skin Tissue Surrogates,” *Biomimetics*, vol. 3, no. 3, p. 18, Jul. 2018, doi: 10.3390/biomimetics3030018.
- [39] C. M. Buffinton, K. J. Tong, R. A. Blaho, E. M. Buffinton, and D. M. Ebenstein, “Comparison of mechanical testing methods for biomaterials: Pipette aspiration, nanoindentation, and macroscale testing,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 51, pp. 367–379, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jmbbm.2015.07.022.
- [40] L. Marechal, P. Balland, L. Lindenroth, F. Petrou, C. Kontovounisios, and F. Bello, “Toward a Common Framework and Database of Materials for Soft Robotics,” *Soft Robot.*, vol. 8, no. 3, pp. 284–297, Jun. 2021, doi: 10.1089/soro.2019.0115.
- [41] D. F. Elger, S. J. Taylor, and C. P. Liou, “Recirculation in an Annular-Type Jet Pump,” *J. Fluids Eng.*, vol. 116, no. 4, pp. 735–740, Dec. 1994, doi: 10.1115/1.2911843.
- [42] L. Xiao, X. Long, X. Li, Q. Zeng, and X. Yang, “Numerical investigation on the recirculation in annular jet pumps,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 6, pp. 1603–1609, Jun. 2013, doi: 10.1007/s12206-013-0406-2.
- [43] T. Nishimura, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, “1-Degree-of-Freedom

Robotic Gripper With Infinite Self-Twist Function,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*,
vol. 7, no. 3, pp. 8447–8454, Jul. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3187823.

付録

実験装置について

図 30 (a) に本研究で使用した流量制御器 (KOFLOC, 8550MC-0-1-1) を示す. この流量制御器は, 外部入力用端子を持ち, 直流電圧 (0~5 V) を入力することで, 流量の設定や計測が可能である. そこで, 図 30 (b) に示すアナログ入出力ターミナル (CONTEC, AIO-160802GY) を用いて, 流量制御器に信号を入力し, 流量を制御した. また, このアナログ入出力ターミナルには, 二つの圧力計を接続した. 実験では, このアナログ入出力ターミナルを制御し, 流量の制御およびセンサ出力の取得を行った. 図 31 にこれらの接続方法を示す. 流量制御器の端子番号 3 (信号入出力 COM), 端子番号 6 (外部設定入力信号) および端子番号 7 (流量出力信号) は, それぞれアナログ入出力ターミナルのアナロググランド (AGND), アナログ出力信号 (AO01), アナログ入力信号 (AI01) に接続した. 圧力計 AP-10S の出力信号線とグランド端子は, それぞれ AI05 と AGND に接続した. また, 圧力計 AP-10S の出力信号線とグランド端子は, それぞれ AI07 と AGND に接続した. ただし, この圧力計 AP-10S は電流出力であるため, 図 31 のように抵抗器を使用した.



(a) 流量制御器



(b) アナログ入出力ターミナル

図30 流量制御で使用した機器

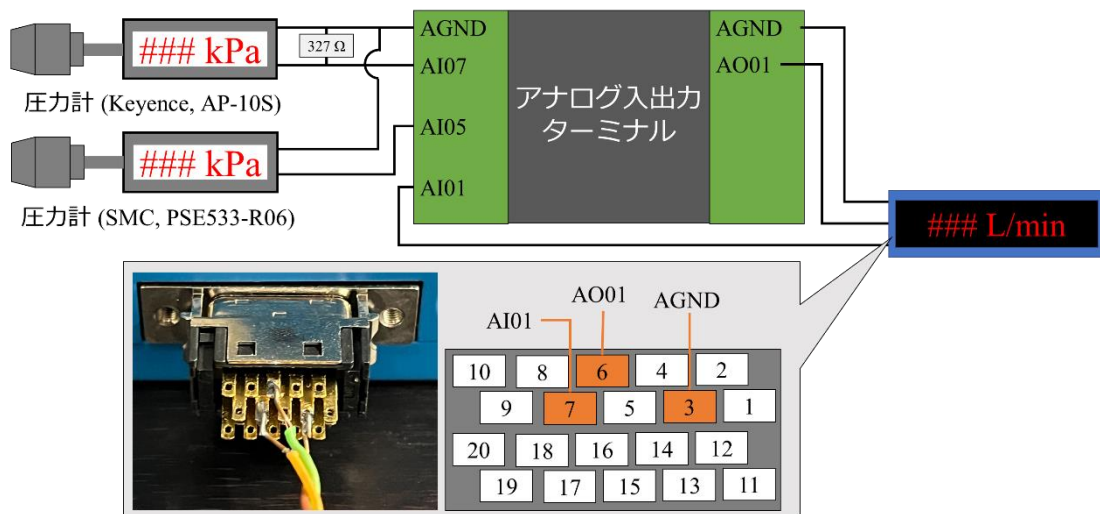


図31 アナログ入出力ターミナルと流量制御器および圧力計の接続方法

フラップゲートの開口面積計測のための画像処理

ここでは、フラップゲートの開口面積の計測方法について説明する。図7 (a) に示すように、フラップゲートの状態は、カメラを用いて撮影した。これにより得られる画像に対して、画像処理ソフト **ImageJ** で画像処理を行った (図 32)。まず、開口部とそれ以外の領域を分けるため、二値化処理を行った。ここでは、開口部の判別を目視で行った。次に、判別された開口部のピクセル数を計測した。また、FDR デバイスの高さと幅のピクセル数を、それぞれ基準高さとして基準幅として計測した。これらから、1 ピクセルあたりの大きさ $[\text{mm}^2]$ を求め、 $A_{\text{fg}}[\text{mm}^2]$ を計算した。さらに、 A_{fg} と設計上の排気口の断面積 $A_{\text{ex}}[\text{mm}^2]$ を用いて、開口断面積比 $A_{\text{fg}}/A_{\text{ex}}$ を計算した。

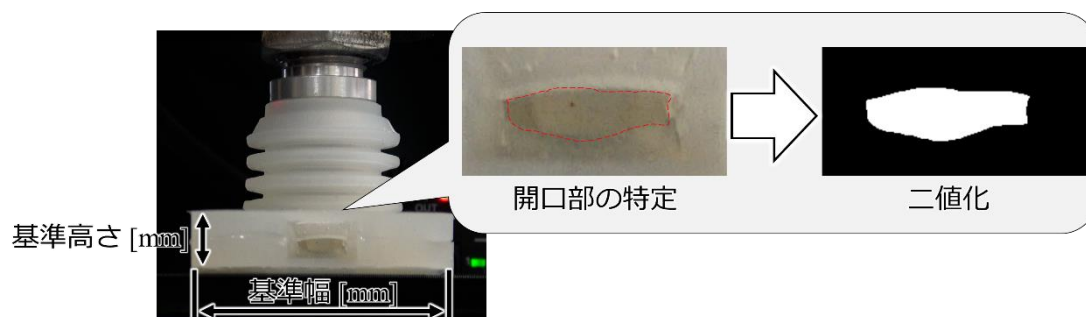


図32 フラップゲートの開口面積の計測における画像処理