

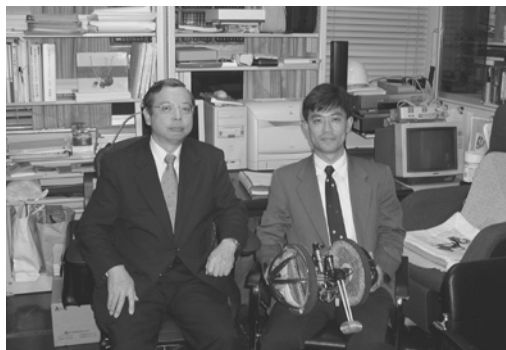


In Laboratory Now

研究室訪問 3

フルードパワーで人助け

北川・塚越 研究室～機械制御システム専攻



北川 能 教授

塚越 秀行 助教授

北川・塚越研究室で発明された Dry-ice Power Cell は保冷剤として身近なドライアイスで、1t の重量物を 1 秒で 20cm 程度持ち上げるパワーを発生する画期的な圧力源だ。工場などで圧力生成に從來から使用されていたコンプレッサと異なり、電気もタンクも不要で、音もほとんどなく、しかも片手で持ち運べる程度の軽さで、このような大流量の圧力エネルギーを生成できるのが特徴だ。

今回この新しい流体による駆動系（フルードパワー）をもとにして、私達の生活に役立つ様々なロボットを開発している研究室を訪れた。



流体による駆動系

私達が普段から使っている自転車や自動車の足回りを見ていただきたい。自転車はペダルを回してチェーンにより車輪を駆動させている。自動車ではエンジンを回転させシャフトを用いて動力をタイヤに伝える。自転車や自動車だけでなく多くの機械は機能や構造の都合により動力を伝達する機構となっている。昔から動力源から出力先に効率よく所望の出力を行うために、チェーンやシャフトだけでなく様々な駆動機構の研究がなされてきた。この記事では機械の形状や性能を大きく左右する機構のなかでも今後大きな発展が期待される流体を用いた機構、フルードパワーに関する研究を紹介する。

この機構は予め流体に圧力を加え、その加圧流体をシリンダに代表されるアクチュエータ（圧力エネルギーを機械エネルギーに変換する装置）に流し込むことで動力に変換する。その力は（圧

力） \times （受圧面積）として算出され、たとえ小さい面積でも高圧をかけることで大きな力を生成できる。また、水や油などの圧縮しにくい流体を作動流体として用いることで、速い応答速度を実現できる。このような特長を利用して、これまで

車のブレーキや油圧ジャッキ、パワーショベルなどの建機、ロケットの噴射口の駆動など多方面に使われてきた。しかしその一方で、流体を加圧させるための装置（ポンプやコンプレッサ）や、高圧の加圧流体を安全に保持する容器が必要であり、装置全体が大型化する傾向があった。

また、柔軟に形を変える性質を持つ流体を用いていながら、シリンダのような硬い容器を介して駆動させていたために、その長所を十分生かされていなかった。

今回訪れた北川・塚越研究室では圧力源の携帯化を実現し、シリンダのような直線的な動きに限らない流体の柔軟性を生かした「柔らかい動きをする」アクチュエータの開発を目指している。

それに加え、このようなフルードパワー・アクチュエータの制御に欠かせない制御弁や制御手法に関する研究も行われている。そして、流体の柔軟性を生かして体を動かす助けとなる装着型流体制御システム（ウェアラブル・フルードパワー）や、災害現場の狭い隙間に入り生存者救助の支援をするレスキューロボットの開発にも研究領域を展開している。これからその一部を紹介しよう。



ウェアラブル・フルードパワー

脳卒中により安静・臥床が強いられて生じる関節拘縮・筋力低下など二次的障害の防止や高齢者の寝たきり防止策として、リハビリやトレーニングといった外力を与え定期的に適度な運動を行うことが有効であることが知られている。

これらのサービスを受けるには、リハビリ治療所やトレーニングセンターに通う必要があり、一

部の人しか十分なサービスを受けられないのが現状である。そこで、研究室では流体の柔軟性を活かして、より多くの人がリハビリやトレーニングを行えるようにする運動支援機の開発に着手してきた。その実現にはアクチュエータとともに、装着できる圧力源の開発も不可欠である。ここでは、この二つに関して探ってみることにした。

軽量、小型の圧力源 ～ Dry-ice Power Cell ～

従来のポンプは気体のまま保存していたため容積も圧力も大きくなり、容器を頑丈に作らなければならなかった。そこで北川先生は固体が気化すると体積が約 750 倍にもなることを利用し、保存のときには固体で持ち運び、使用時に気化させればよいと考えて、CO₂ の三重点を利用した装置 Dry-ice Power Cell を考案した (図 1)。

固体・液体・気体の三つが共存した状態を三重点とよび、その温度と圧力は物質ごとに固有の値をとる。CO₂ の場合 -56℃、4.2 気圧である。密閉容器に十分な量のドライアイスを入れると、周囲からの熱により固体は気体に昇華して圧力が上昇するが、その圧力が 4.2 気圧に達すると今度は固体の液化が始まる。そのとき、容器内は固相・液相・気相の三相が共存した三重点の状態となり 4.2 気圧に保たれる (図 1 グラフ)。この三重点の状態を作り出すことで 4.2 気圧もの実用的な圧力を確保しつつ、長寿命な空圧源となるのだ。

三重点の状態では気体を外部放出させると容器内の圧力は下がるが、その分液体の CO₂ が気化し平衡状態になろうと圧力を補う向きに変化する。このとき、気化熱により温度が下がろうとするが、液体の一部が凝固することにより凝固熱を放出するため温度は下がらず三重点に落ち着く。これを繰り返すことで圧力の低下なく 4.2 気圧で連続的に気体を放出することが可能となるのである。このような複雑な機構を実現するための装置として図 1 のような装置を開発した。

CO₂ 容器は外部との熱交換を促進するために断熱壁を介して吸熱用のフィンで覆われており、容器がその内部で上下するようになっている。容器内の圧力を圧力スイッチで、検出し容器の上下を

三重点状態の制御

ガスの過放出*により圧力が下がると、圧力スイッチ (A) によってバルブ (B) が駆動する。シリンダ (C) に容器内の高圧 CO₂ が送られピストンが下がり、連動して圧力容器 (D) も下降する (右図)。CO₂ は断熱材の貼られてない底部分から熱を吸収して気化し、容器内の CO₂ は再び三重点での平衡状態に戻る。

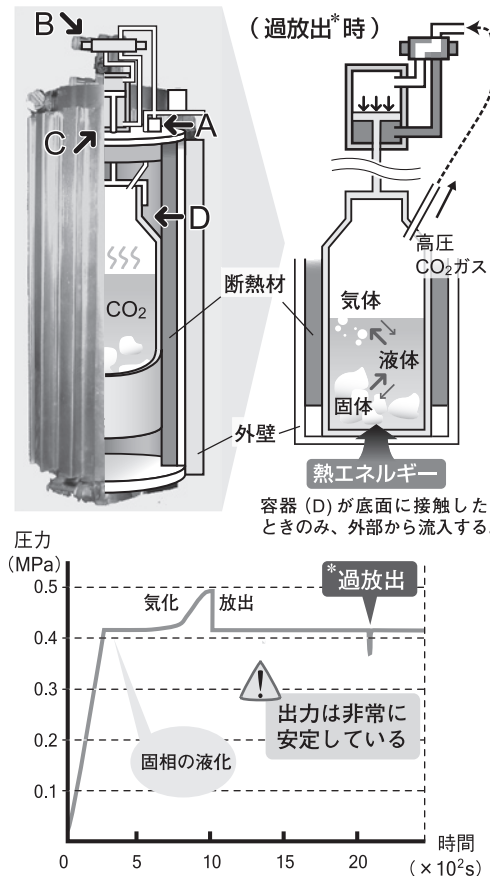


図 1 Dry-ice Power Cell

制御する。この上げ下げを行うことで容器とフィンとの接触状態が変わり、容器内への熱量を制御している。この容器自体の重量は460gで、ドライアイス積んでも約1kgという軽量でありながら、4.2気圧の気体を標準状態換算で226L、実に浴槽一杯分も放出するのだ。これは歩行補助

器具用として開発されたものだが、それ以外にも様々な空圧装置の小型携帯化に期待されている。

また、このDry-ice Power Cellは容器の内圧がせいぜい4.2気圧しかかからないため、強固な耐圧容器を要さずペットボトルでも十分耐えられ、これを利用した簡易型も作られている。

身に付けるアクチュエータ ～ WTA ～

研究室では圧力源の開発に続いて、装着時の体への負担や着心地までも考慮した装着型アクチュエータの開発も行っている。ここでは軽さと柔軟性を確保すべくシリンダではなくチューブを膨らまし、その変位を出力とする手法がとられた。大きな力を得るために、チューブの素材として高い内圧でも耐えられるようほとんど伸縮しないウレタンを用いた。そして出力変位を大きくするためにチューブに熱を加えながら潰し、冷却して形状を記憶させる偏平チューブを開発した(図2)。さらにこれを螺旋状に巻くことにより、体にも巻きつけられ、身体に適合した形をとりつつ変位が大きくなるようにした。

Wound Tube Actuator (WTA) と名付けられ

たこのアクチュエータをDry-ice Power Cellで駆動させるとアクチュエータ重量80gで80Wも出力でき、私達の手では押さえきれないほどの力(約200N)を発生させられる。そして、このWTAの片側だけを固定することで湾曲させることもできる(図2①)。このような装置は指などには適しているが変位が小さいために、肘やひざといった大きな関節には不向きであった。そこで、WTAを平板で挟みその平板間にワイヤを通すことで大きな変位を確保し関節を曲げる方法がとられている(図2②)。すでに研究室では指、肘、肩、手首、腰の動作支援装置を開発した。図2②写真では実際に脳卒中患者に装着してもらい、着け心地をヒアリングしている時の様子である。

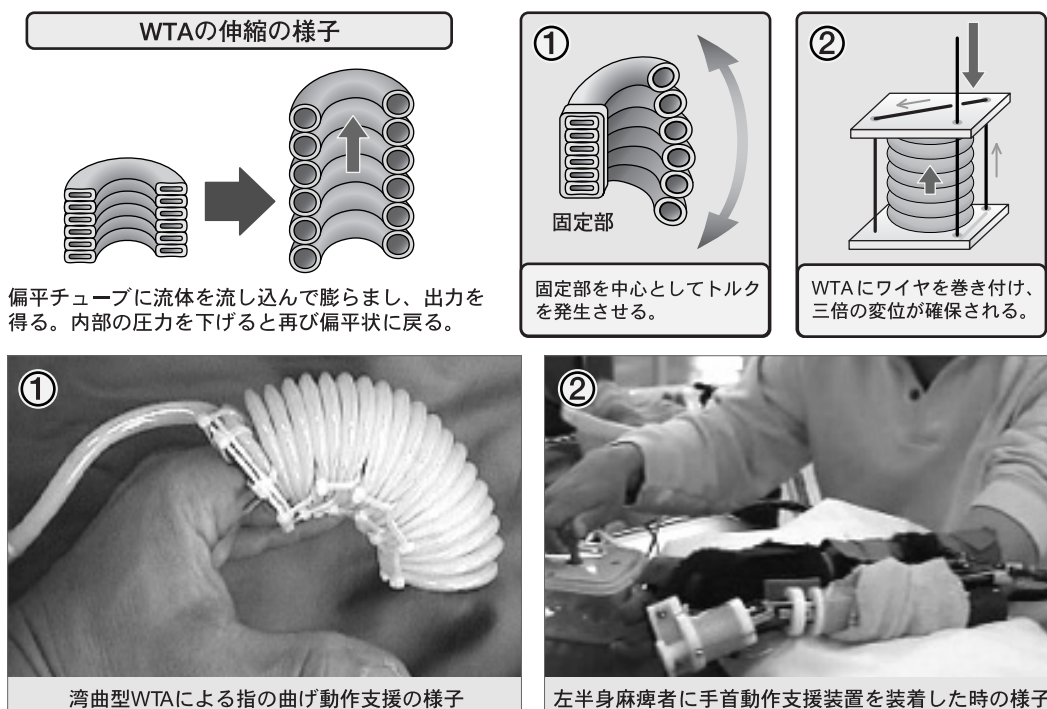


図2 WTA (Wound Tube Actuator)



災害時に働く機械

私達の生存を根底から揺るがしうる大規模な災害や事故は世界のいたるところで起き、その都度私達に不安を抱かせる。そこで近年災害や事故において要救助者の早期発見や二次災害軽減のためにロボットを用いようとする動きが活発になってきている。そのような中発足した国際レスキューシステム研究機構と連携して北川・塚越研究室ではレスキューロボットの研究を行っている。有事の際にはライフラインが寸断されたり、被災地へ

の交通手段が断たれていたりしている場合がある。そのため、補助機器と同じくエネルギー供給源の存在しない状況で長時間駆動でき、人が持ち運べる程度に軽量であることが求められる。

またそれに加え大きな出力が得られ、修理などを考え比較的機構が単純であるということも重要視されており、このようなことを考慮して北川・塚越研究室では様々なレスキューロボットを開発している。

ジャンピングロボット

倒壊した建造物の下敷きになった要救助者の生存は早期発見にかかっている。しかし、災害時にはいたるところで人が踏み入ることができない状況が生じる。先生方は瓦礫が散らばった劣悪な環境でも要救助者を効率よく発見するため、ジャンピングロボットを開発した(図3写真)。

このジャンピングロボットは探索用のカメラだけでなく救助隊員が重宝するマイク、それに要救助者に応答を求めるためのスピーカーが搭載されているのである。このジャンピングロボットはこれら必須機材を載せつつも最大1,000mmもの障害物を越えられるのだ。この驚異的なジャンプ力を生むのが圧縮空気である。

当然モータは跳躍のような瞬発力が要求されるような出力には不向きである。そこで気体の大きな圧縮率と瞬間的な膨張を利用してシリンダで地面を蹴り驚異的なジャンプ力を実現する。

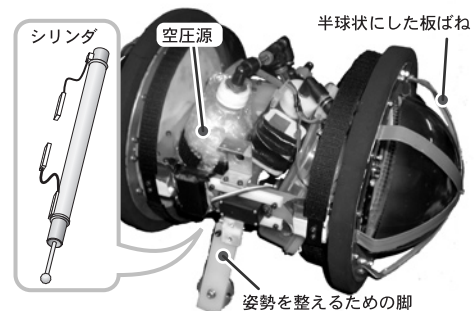
このジャンピングロボットをより高く跳ばす工夫としてまずシリンダの改良が行われた。シリンダがあまりに太くて短すぎると、わずかに伸びるだけで体積の変化率が大きくなるため、急激な圧力の低下や助走距離を満足に確保できないといった問題点が生じる。逆に細くて長いと跳躍に求められる圧力が大きくなりポンベの圧力を大きくしななければならない。先生方は最適なシリンダ径と長さの計算方法を求め、それに基づき改良を行うことで一号機では600mm程度であった跳躍距離を1,000mmにまで引き上げることに成功した。

跳躍距離を上げる改良は本体の軽量化という面でも行われている。この機体は二つの車輪により

前後進や旋回をする。旋回では各車輪を別々に動かす必要があり二つの動力源が必要となるが、それでは重量が増す。そこで、特殊なシャフトを用いて一つのモータでの旋回を可能とした。

それ以外にも過酷な環境で耐えられるような工夫が随所にみられる。半球上になった車輪はいかなる向きからの着地でも姿勢を整え二つの車輪が

ジャンピングロボットの構造



ジャンピングロボットによる瓦礫踏破の連続写真

図3 ジャンピングロボット

地面に接地できるような体勢を取れるようになっていのである。さらに車輪には、踏破能力向上のための爪や、軽量を保ったままフレームの強度を上げるなど様々な改良が行われている。

現在、このジャンピングロボットは通常の気体のポンペを背負っているが Dry-ice Power Cell

を用いたとしたら数回しか飛べなかったものが理論上数十回もの跳躍が可能になるという。

探索ロボットは一台で稼動するよりも数多くロボットを稼動させたほうが効率は格段に上がる。このロボットは低コストを実現させたため、大量に運用することが可能となったのである。

Bari-bari-I, II

研究室では倒壊した建造物の下にいる要救助者を発見するだけでなく救助体制が整うまで生命を確保して、円滑に救助を行う助けをするロボットの研究も行っている(図4)。倒壊した建造物を重機で片付けようとする複雑に重なりあった周囲の瓦礫を崩してしまい下にいる要救助者に大きな負荷が掛かる。できるだけ周囲の瓦礫を動かさず、要救助者に到達し、体にかかる負荷を軽減すべくジャッキアップを行い空間を確保しなければならない。そのような要求を満たすべく開発されたロボットがこの Bari-bari-II である。これは全高 250mm という薄さでありながら、500kg もの重量を 750mm 持ち上げることを可能としたものであり、地面と瓦礫との差が 30mm 程度あれば進行可能である。大きな特徴はタイヤやキャタピラを持たず、前面の段差に障害物を引掛け、徐々に持ち上げていくことで、瓦礫を踏破するという点である。前進のときはフレーム内側を油圧ジャッキにより持ち上げることで、フレーム外側を自由にして前進させ、次に内側を縮め内側の負荷を取り除いた状態にすることで内側のフレームを前進させるということを繰り返す。この機構のおかげでタイヤやキャタピラでは走行困難な重さが掛かった状態や布の上での走行を可能とし、段差も踏破でき走行とジャッキアップという二つの機能を一つの機構で実現できたのだ(図4右下)。

Bari-bari-I は油圧ジャッキを鉛直方向に配置していたが、これだと持ち上げ幅が小さく変化させることができないという欠点があり、様々な段差の克服も困難であった。そこでジャッキを斜めに配置するという改良を加えることにより上げ幅

を大きく且つ可変にすることができ、これらの問題を解決し、様々な段差も克服したのである。

北川・塚越研究室では以上の二つ以外にも土砂崩れで地中に埋もれた人を発見する機械として、先端から空気と水を混合した流体を噴射することで地中を掘り進む機械を開発している。また、WTA をホースに複数個取り付け柔軟性を持ちつつも湾曲運動を行えるようにし、瓦礫の間の僅かな隙間を自由自在に移動でき、要救助者の探索と生存に最低限必要なものを提供する能動ホースの開発なども行っている。北川・塚越研究室はフルードパワーの特徴を活かし様々な面で私達を助ける機械の開発を行っている研究室なのである。

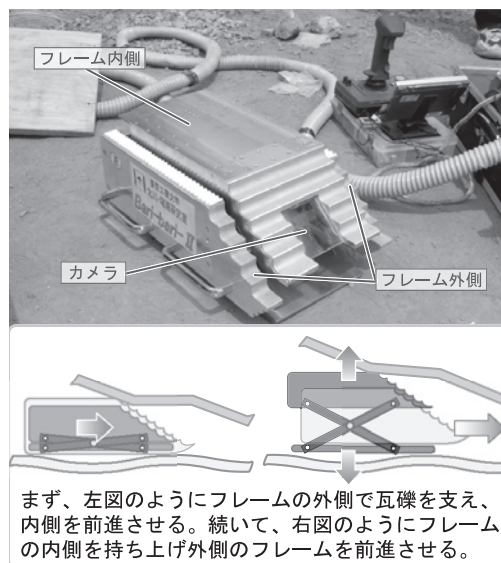


図4 Bari-bari-II

研究室では実際に様々なロボットを動かして頂き、記事を書く上で参考になっただけでなく、私の見知を広めることもできました。

最後になりましたが、お忙しい中重度なる訪問を快く迎えて下さった先生方に、深く御礼申し上げます。(三浦 弘道)