

神奈川工科大学

健康福祉支援開発センター

研究報告

第 16 号

2019 年度

目次

- ・脳血液循環に関する分野融合的研究

- 活動時の中大脳動脈血流波形、脳組織血流、血圧の同時測定-

- 脳血管構築の流体力学的特徴と脳血管病変との関連-

臨床工学科 松尾崇

臨床工学科 渡邊紳一、ロボット・メカトロニクス学科 高尾秀伸

機械工学科 岩永正裕、臨床工学科 西村宗修

- ・空気圧を用いた繰り返し使用可能な衝撃吸収機構を有する防具の開発

ロボット・メカトロニクス学科 吉満俊拓

脳血液循環に関する分野融合的研究
-活動時の中大脳動脈血流波形、脳組織血流、血圧の同時測定-
-脳血管構築の流体力学的特徴と脳血管病変との関連-

研究者名：

研究代表者 臨床工学科 松尾 崇
研究分担者 臨床工学科 渡邊 紳一
研究分担者 ロボットメカトロニクス学科 高尾 秀伸
研究分担者 機械工学科 岩永 正裕
研究分担者 臨床工学科 西村 宗修

1. 研究の目的

脳は血液循環に関連する疾患（脳動脈硬化、くも膜下出血、脳内出血、脳梗塞や循環障害性の脳病変など）が好発する器官である。そして、それぞれの病変はある決まった部位に発生しやすいという部位特異性が知られている。この発生部位特異性を解明することは、脳血管病変の理解や治療に大きく貢献すると期待される。

脳血液循環の部位特異性を明らかにすることを目的として、本研究では次のテーマを実験的に研究する。

- (1) 運動、活動時においてヒトの脳血管内血流波形（血流速の時間的変化）を正確に計測する。
- (2) 脳血管内血流波形と血圧の連続測定を行い、両者の相関を調べる。
- (3) 血管の幾何学的形態の部位別特徴を血行力学的に解析する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

(2-1) 脳血管内血流波形の計測

超音波による脳血管内血流測定は臨床では広く行われているが、安静時や手術時のデータ取得に重点がおかれている。しかし、我々は脳の血流を変動させる要因（姿勢の変化、運動・作業、環境の変動など）を常に受けながら生活している。このような脳血流の変動を理解することなしには、脳循環の特性や血管病変の発生を理解できないと考えられるが、能動的動作時の脳血流測定は世界的にみても研究が少ない。

我々は本プロジェクトにおいて、超音波ドップラ検出器の取り付け法を改良した結果、運動や動作時においても中大脳動脈（MCA）での血流速を安定に測定することができた。さらに血流波形の流体力学的解析法（最低・最高・平均血流速の時間変化、流速の変動度、抵抗指数など）を適用し、血行力学的な特徴を明らかにしてきた。

(2-2) 脳血管の幾何学的形態の部位別特徴

脳は血液循環に関連する疾患（脳内出血、脳梗塞や循環障害性の脳病変など）が好発する器官である。そして、それぞれの病変はある決まった部位に発生しやすいという部位特異性が知られている。脳血液循環の部位別特徴を明らかにする有力な方法の 1 つは、血管の幾何学的形態を血行力学的に解析することである。

このためには、脳血管の幾何学的量（各血管の直径、長さ、分岐角度など）を詳細に

かつ正確に計測する必要がある。数ミリから数ミクロンの広範囲な径をもつ血管の計測は、従来より困難で労苦の多い測定であった。3次元の複雑な形態（直径、長さ、分岐角度）の計測については、近年のコンピュータの発達により、より短時間でかなり正確なデータが得られるようになった。

我々は重点配分の援助を受けて、顕微鏡的血管形態データを集め解析できる機器を整備してきた。また、血管の幾何学的形態を血行力学的に解析する新しい方法を提案した。今後、血管構築の血行力学的特徴と循環障害性病変の発生要因とを結びつける研究が必要である。

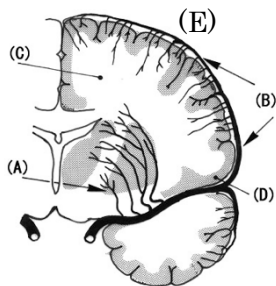
3. 期待される効果

(3-1) 脳血管障害との関連

脳には、安静時、全血液量の約15%が心臓から送られている。この大量の血流は脳血管障害の原因の1つと考えられている。くも膜下出血の主要因である脳動脈瘤の発生については、脳底部動脈での血流特性と瘤発生要因の関連が指摘されている。よって、ヒトが活動している時（運動時やいろいろな作業時）の脳血流速度に関するデータは、生理学的に重要な知見をもたらすだけでなく、血管障害などの病因を考える上でも重要である。

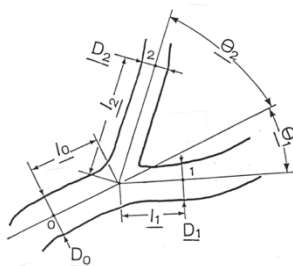
(3-2) 脳血管病変発生の部位特異性

脳血管は大きく分けて、左図（A）の領域に分布する穿通枝と、（B）の脳表面に分布する皮質枝に分けられる。穿通枝は脳底の大きな動脈から直接細い枝として脳実質にはいる。穿通枝の支配する部位には、高血圧性脳出血の好発部位（被殻、視床）がある。またその隣の淡蒼球は一酸化炭素中毒による循環障害性病変の好発部位である。皮質枝は、脳表面で順次2分岐をくり返し、次第に細い血管となっていく、その後脳実質に直角に入っていく。（C）の白質領域の血管は、皮質枝がさらに奥に延びた血管に支配される。この部位は、低血圧や低酸素などによる循環障害性病変が起きやすいとされる。同じ皮質枝でも、脳底に近い部分（D）に血液を供給する血管と頭頂（E）の血管では、肉眼的に走行の大きな違いが見られる。本研究では、このような脳病変好発部位の血行力学的特徴を定量的に評価し、部位別の違いを明らかにする。これにより脳病変好発との関連を明らかにすることができる。



4. 研究の経過及び結果

(4-1) 脳血管の鋳型標本（動物）の流体力学解析



血管分岐における直径指数の評価：

血管の径 D とそこを流れる血流 Q の間にはべき乗の関係があることが知られている。

$$Q \propto D^n \quad (1)。$$

この関係を左図の分岐点で当てはめると、

$$D_0^n = D_1^n + D_2^n \quad (2)。$$

という式が得られる。

n は直径指数と呼ばれ、各分岐点において直径を測ることによって求めることができる。直径指数は、各分岐点で血流が2本の分枝にどのように分配されるかを表し、臓器循環を特徴づける量である。

直径指数を求めるために、重点配分の援助により、デジタルマイクロスコープ（キーエンス社製）のコントローラおよびレンズを新しくして、被写界深度の深い血管形態計測ができるようになった。得られた血管画像と計測の様子を図1に示す。

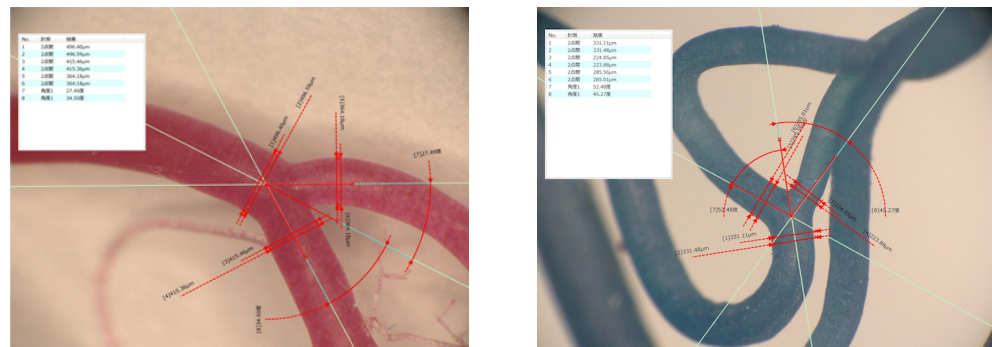


図 1

血管の色の違いは注入した樹脂の色の違いによる。分岐点に於いて主管、2本の分岐管の直径、および分岐の角度を計測した。

目的の直径指数 n を求めるために (1), (2) 式を次のように変形した。

$$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^n = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^n}, \quad \left(\frac{D_2}{D_0}\right)^n = \frac{1}{1 + \frac{1}{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^n}} \quad (3)$$

直径比 (D_1/D_0) と (D_2/D_1) および (D_2/D_0) と (D_2/D_1) の関係をグラフにとり、最小二乗法で n を求めた結果を図2に示す。 n の値は D_1 に対して 2.94、 D_2 に対して 2.96 であった。

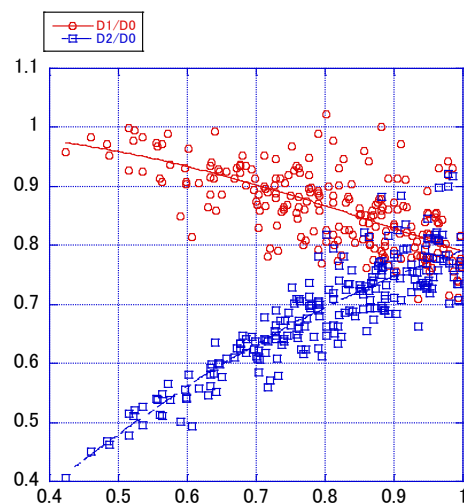


図 2

どちらも3に近い数値となっており、今回の結果ではMurrayの法則の $n=3$ に近い値となった血管径と流量の関係では上記1)式の関係が成り立つ場合、平均流速を v とすると、

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 v \quad (4)$$

であるから、

$$v \propto D^{n-2} \quad (5)$$

が成立する。 n が3の場合は流速 v は直径 D に比例し、 n が2の場合流速は径によらず一定となる。脳の場合は流速は直径にほぼ比例することが今回明らかになった。

(4-2) 血管走行の流体力学的評価法：

基幹動脈（内頸動脈, 中大脳動脈など）から末梢の毛細血管までの幾何学的データに対し、以下の血行力学的解析を行った。

1本の血管での圧力降下 ΔP は、ハーゲン・ポアズイユの法則により、 D , l , をそれぞれ血管の直径、長さとし、 η を血液の粘性として次式で表される。

$$\Delta P = \frac{128\eta l Q}{\pi D^4} \quad (6)。$$

ここで流量 Q は直径 D の関数として $Q = qD^n$ （1式）で与えられる。

以上の式を使って基幹動脈から毛細血管までの連続した血管ルートにおける、血管抵抗および血圧変化を算出した。結果の一部は昨年度報告した。

(4-3) 脳血管内血流測定と血圧測定結果の比較

超音波ドップラーによる活動時の脳血波形の計測は今年度は行わなかった。以前に、荷物の保持姿勢が異なった場合に、脳血管内血流速と血圧（指先血圧）の測定を行った。これらの結果を今回総合的に解析した。1例を図3に示してある。

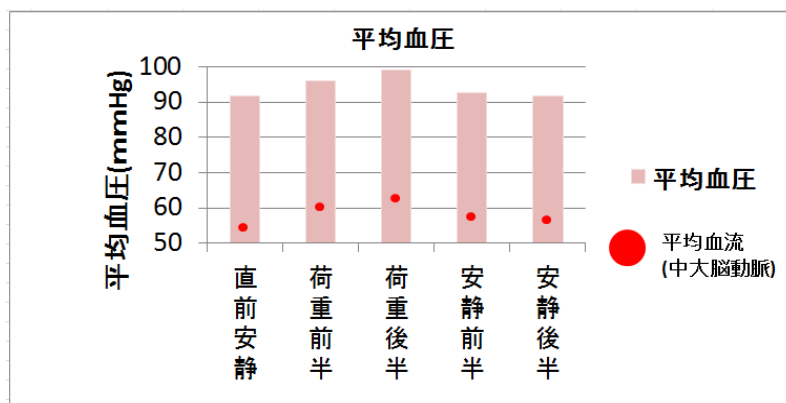


図3

この結果は、15kg重とかなり重い荷重を、手で胸部付近に支えたときの結果である。

血圧、血流速ともに荷重を負荷している間増加することが分かる。5kg 重の軽い負荷の場合や、同じ重さの荷物をリュックで背負った場合は、血圧、血流速ともに、安静時と比較して有意な変化は見られなかった。

以上より、荷重負荷に対する血圧、脳血流の変化は、保持姿勢に影響されることが明らかになった。

5. 今後の計画

今回の研究で、脳血管の幾何学的形態（血管構築）の解析について、これまでの方法よりあいまいさの小さい解析方法を提案した。今後、脳のいろいろな部位に適用し、脳血管構築の部位特異性を定量的に解明していく。また、いろいろな臓器の血管構築に本解析法を適用し、臓器ごとの血液循環の特徴と臓器の機能との関係を明らかにする。

これまでの研究で、姿勢変換や動作時に脳血流波形を測定する方法がほぼ確立できたとと言える。今後、血管内血流と血圧、脳組織血流との相関を調べる研究へと発展させる予定である。これに加えて、宇宙環境での脳血流の研究へと領域を広げる可能性が出てきた。脳循環の変化は、宇宙飛行および宇宙滞在において極めて重要であり、本研究で得られている中大脳動脈血流波形は、循環系に対する重力の影響に関して新しい知見をもたらす可能性がある。

また超音波によって得られる血流波形は、血管内血流のモデル実験やコンピュータシミュレーションの参照データとして重要である。我々は、日常的な運動・動作によっても血流波形が大きく変化することを報告してきた。この点は、これまでの血管病変（動脈瘤、動脈硬化）発生や血管内治療の血流モデル実験で見過ごされてきた。生体内での血流波形を正確に模擬した脳血流のモデル研究は、今後取り組むべき課題の1つと考えられる。

6. 研究成果の発表

項目 4-3 の結果は、2020 年 5 月（於：江別市）日本バイオレオロジー学会 43 回年会で発表予定であったが、COVID-19 の影響により中止された。

項目 4-1, 4-2 の結果は、2020 年 6 月（於：小樽）形の科学シンポジウムで発表予定であったが、COVID-19 の影響により中止された。2020 年 11 月に予定されている形の科学シンポジウムで発表予定である。

項目 4-1, 4-2, 4-3 の結果は、The 2nd Joint Meeting of ESCHM-ISCH-ISB 2020（9 月、福岡）にて 2 題発表予定であったが延期となった（期日未定）。（国際バイオレオロジー学会、国際臨床血液レオロジーと微小循環学会、ヨーロッパ臨床血液レオロジーと微小循環学会の合同学会）

2020 年 12 月までに、4-3 に結果を論文として投稿する予定である（人間工学会または生理人類学会）。

空気圧を用いた繰り返し使用可能な衝撃吸収機構を有する防具の開発

研究者名：ロボットメカトロニクス学科 吉満俊拓

1. 研究の目的

交通災害時の衝撃を緩和し、被害者の身を守ることができる防護機器が求められている。そこで、交通災害時など、エアバッグで防げない鋭角な衝撃から防護が可能かつ、衝撃を緩和・分散させ、防護機器の非動作時は体の動作を妨げない程度の柔軟性があり、動作時のみ硬化・展開し被害者の身体を保護するシステムを開発する。

本研究の防具は複数回使用を前提とした構造であり、衝撃を検知した場合のみ防護機器を展開・外殻部を硬化することで身体を保護する。安全確認後は防具のエアバッグ部から空気を排気し・外殻部を軟化させることで速やか日常動作に復帰できる。

本研究のように複数回利用・再利用可能で軽量な身体保護機器は現在存在せず、他に類を見ない研究であり、自転車やオートバイ運転者の転倒時の被害軽減、高齢者の転倒によるけがの防止に大変有効である。

2. 研究の必要性及び従来の研究

山岳救助や地震・土砂災害の現場での救助活動は、傾斜地や家屋の倒壊などによる瓦礫などが散乱していて足場が不安定な場所である。このような状況では、大型機械での救助は困難であり、救助ロボットは救助者を発見することはできるが最終的な救助は人の手で行わなければならない。

足場が不安定かつ救助活動を行うスペースが狭い災害現場では、落下物による怪我・疲労による捻挫、転倒等の救助活動時の負傷が救助活動の妨げとなる。

3. 期待される効果

本研究は自転車やオートバイ運転者の転倒時の被害軽減、高齢者の転倒によるけがの防止を目的としている。

再利用可能な空気圧式プロテクタは他に類似研究がなく、真空圧と高圧気体双方を用い空気圧工学・真空工学など異なる分野をまたがる研究である。

自転車やオートバイ運転者の転倒時の被害軽減、高齢者の転倒によるけがの防止に極めて高い効果があり、QOLの向上に貢献できる研究であると考える。

4. 研究の経過及び結果

屋外で安全かつ持続的に使用可能なシステムを目指し、本年度の研究目的として

- ① 衝撃吸収能力の評価
- ② 作動用真空エネルギー発生装置の開発

の2点について研究を行った。

① プロテクタ耐久実験

高さ 900mm の角材 4 本立て、距離センサ（KEYENCE LK-500）を中心に設置する。距離センサから 300mm の部分に幅 80mm の四角い穴の開いた台座を設置する。また、台座から 500mm の高さに直径 60mm の穴の開いたアクリル板を設置したもので実験を行う。

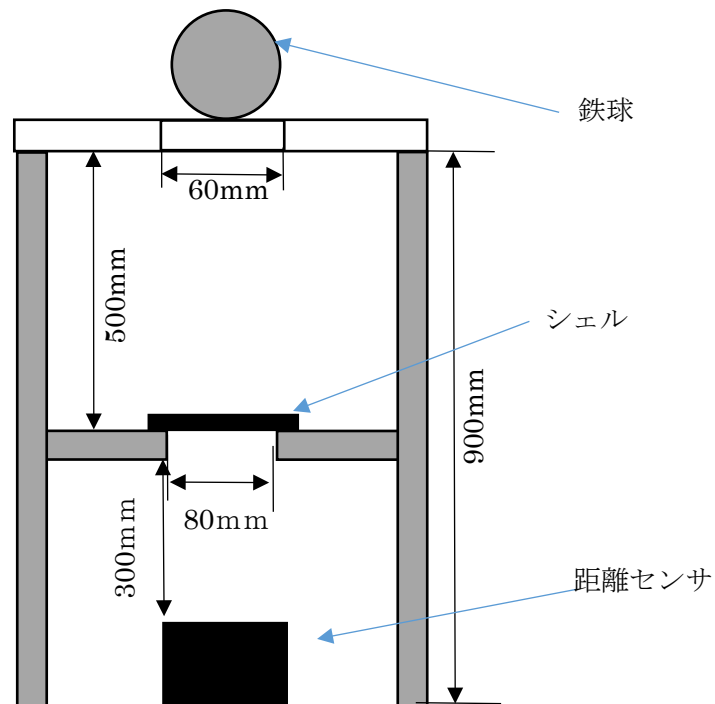


図1 耐久試験実験概要図

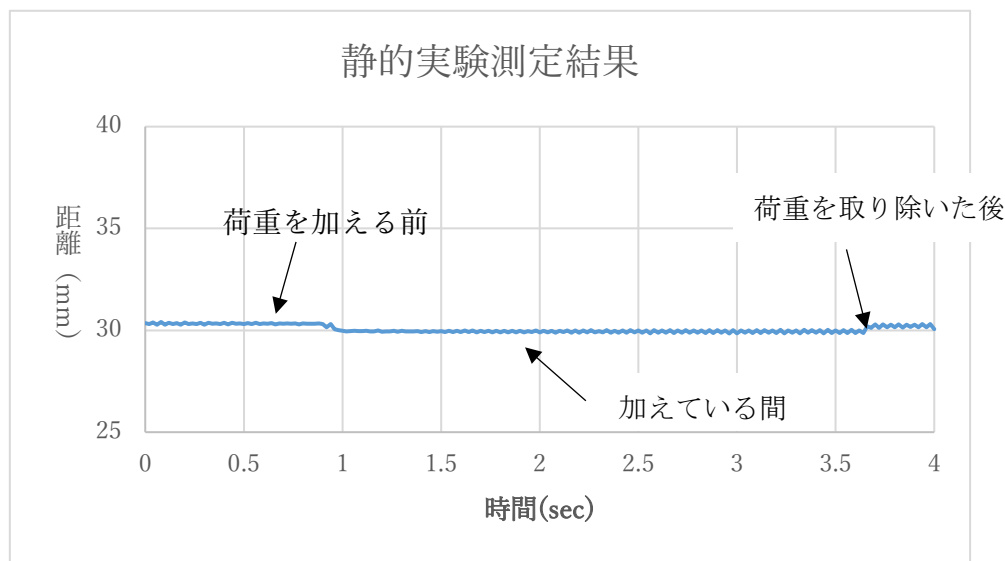


図 2 静的荷重実験結果

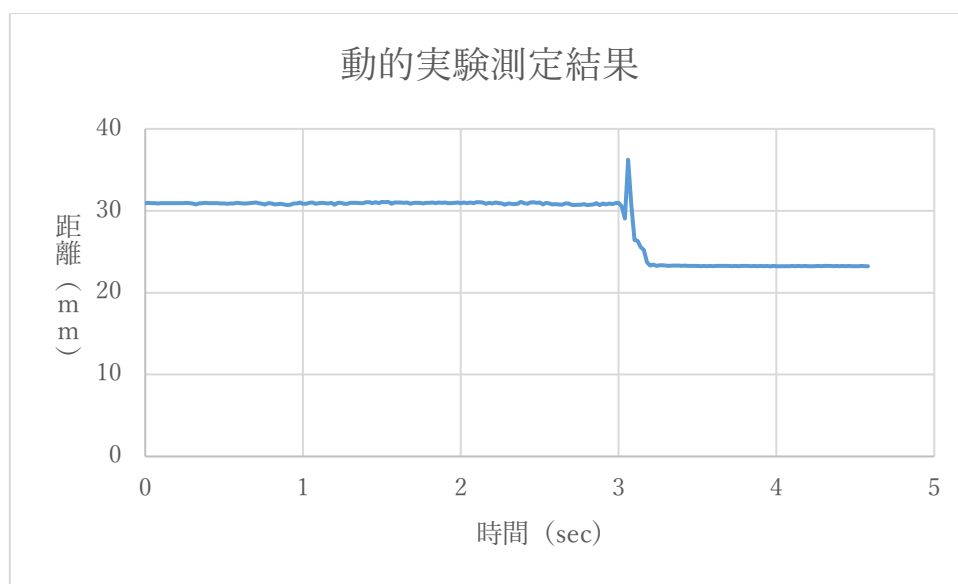


図 3 動的荷重実験結果

表 1 プロテクタ耐久実験 (1)

静的衝撃実験 (1)								
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	概
荷重前	0	0	0	0	0	0	0	0
荷重中	-0.37	-0.41	-0.36	-0.31	-1.08	-0.2	-0.42	-0.1
荷重後	-0.11	-0.14	-0.2	-0.1	-0.52	-0.2	-0.42	0.01

変移量 (mm)

表 2 プロテクタ耐久実験 (2)

	静的衝撃実験 (2)							
	0°	2.5°	5°	7.5°	10°	12.5°	15°	板°
荷重前	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
荷重中	-0.66°	-0.66°	-0.76°	-0.96°	-2.3°	-1.60°	-0.71°	-0.3°
荷重後	-0.17°	-0.05°	0°	-0.44°	-0.54°	-1.6°	-0.46°	0.08°

変移量 (mm)

②

本装置を装着し使用する屋外アシストスーツは降坂時に膝関節へ加わる衝撃力を吸収するパッシブ式のアクチュエータを有している。従来方式では流量制御用にサーボモータによりスピードコントローラの開度を制御することで衝撃力を吸収していた。スピードコントローラは絞り機構により流出速度を制御しているがそのエネルギーは抵抗として散逸し利用することができない。そこで、流量制御としてスピードコントローラではなくエジェクタを用いることで降坂時の衝撃力吸収を行うと同時に降坂時のエネルギーをタンク内圧力が大気圧から真空圧とすることで、回生を行うものである。

このシステムを開発することにより、本プロテクタの動作に必要な不可欠な真空圧源を屋外で持続的に使用可能とするものである。

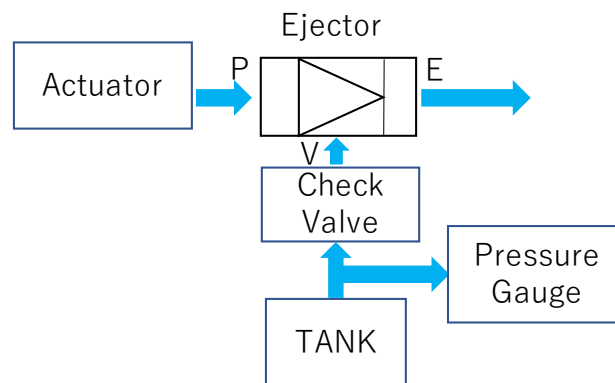


図 4 Energy regeneration system

5. アクチュエータ衝撃力吸収実験

エジェクタによるエネルギー回生はエジェクタサイクル回路⁴⁾があるが、本研究では、真空発生機構の絞りによりシリンダの高速移動時の速度制御おこないつつエジェクタにより生み出された真空圧を回生エネルギーとしてアクチュエータの駆動に活用するものである。その有効性を確認するため、サイズの異なるエジェクタによるシリンダ速度—負荷実験・シリンダ動作—真空圧実験の2種を行いその有効性を確認した。実験結果を Fig4,5 にしめす。

エジェクタのノズルによる流量制御が働き、エジェクタの有効面積が小さく、シリンダ速度が速いほど負荷が大きくなった。エネルギー回生実験として、小型圧力容器(容量 18.0cc)をエジェクタに接続しシリンダの往復回数と圧力容器内の圧力を測定した。結果よりエジェクタの有効面積が小さいほど高い圧力降下を起こすことができた。

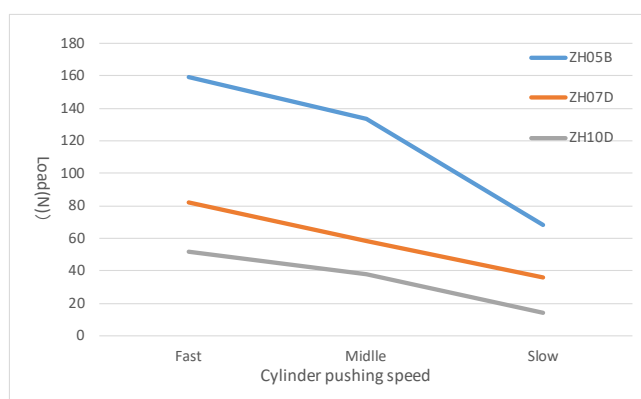


図 5 Actuator load experiment

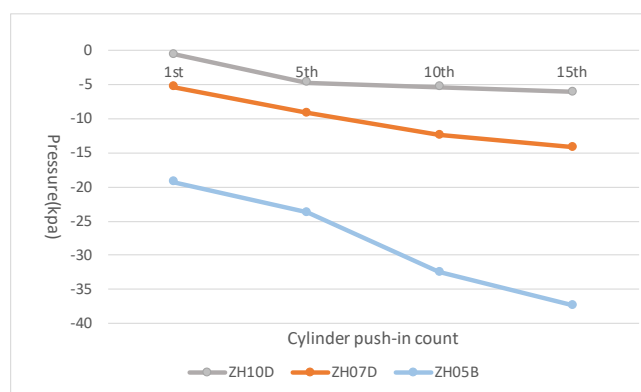


図 6 Ejector vacuum pressure experiment

5. 今後の計画

身体防護装置のトリガーとして、

- ① 使用者の転倒を事前に検知し展開するセンサシステム
- ② 上方からの落下物などに対して、使用者が能動的に作動させるスイッチシステムの 2 方法について研究開発をおこなう。

6. 研究成果の発表

- ・フルードパワーシステム学会 2019 年秋季講演会発表

- ・身体防護装置：特許出願、単独（吉満俊拓）、特願 2019-009977 出願