

平成 26 年度

学位論文

排泄ロボットと  
臀部密着型トイレシステム  
の開発

---

指導 小林 宏 教授

東京理科大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

所 晃史



## 目次

<b>第1章 序 論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	2
1.1.1 研究の経緯	2
1.1.2 宇宙における排泄	2
1.1.3 介護現場における排泄	5
1.2 研究の目的	9
1.3 本論文の概要と構成	12
<b>第2章 排泄ロボットの開発</b>	<b>15</b>
2.1 人間の排泄メカニズム	16
2.1.1 人間の排泄メカニズム	16
2.1.2 排泄の生理	18
2.2 排泄ロボットの開発	20
2.2.1 排泄ロボットの概要	20
2.2.2 排泄関係器官の製作	22
2.3 排泄ロボットの動作機構	24
2.3.1 肛門括約筋の動作機構	24
2.3.2 恥骨直腸筋の動作機構	26
2.3.3 直腸の動作機構	27
2.3.4 腹圧の動作機構	28
2.4 システム構成	30
2.5 排泄ロボットの動作制御	30
2.6 各機構の調整	33
2.6.1 各機構への入力気圧値	33
2.7 排便動作実験	35
2.7.1 模擬便の製作	35
2.7.2 動作実験 I	36
2.7.3 動作実験 II	38
2.8 まとめ	40
<b>第3章 宇宙用トイレシステムの開発</b>	<b>41</b>
3.1 宇宙用トイレシステムの概要	42
3.1.1 密着部の構造	43
3.1.2 開閉機構部の構造	45
3.2 検証実験の概要	46
3.3 使用器具について	46
3.3.1 装着型トイレ	47

3.3.2 吸着型トイレ.....	47
3.3.3 ボトル型トイレ.....	48
3.4 検証実験結果.....	48
3.4.1 開閉機構の検証.....	49
3.4.2 吸着機構の検証.....	50
3.4.3 検証実験のまとめ.....	50
3.5 臀部形状と排泄動作について.....	51
3.6 臀部の形状計測方法.....	51
3.6.1 3次元形状計測器について.....	51
3.6.2 計測時の姿勢について.....	53
3.6.3 測定環境について.....	53
3.7 形状計測データ処理.....	54
3.7.1 データ処理の流れ.....	55
3.8 形状計測結果.....	56
3.8.1 距離マップ.....	56
3.8.2 動作範囲.....	58
3.8.3 変位量.....	61
3.9 まとめ.....	63
<b>第4章 介護用トイレシステムの開発.....</b>	<b>65</b>
4.1 介護用トイレシステムの概要.....	66
4.2 肛門検出システムの開発.....	67
4.2.1 介護用トイレシステムの製作.....	67
4.2.2 肛門検出システムの概要.....	68
4.2.3 赤外線サーモカメラ.....	69
4.2.4 処理方法.....	72
4.2.5 肛門検出システムの評価実験.....	74
4.3 介護用トイレシステムの改良.....	76
4.4 移動機構.....	78
4.4.1 移動機構の概要.....	78
4.4.2 移動機構の構造.....	78
4.5 トイレユニット.....	79
4.5.1 トイレユニットの概要.....	79
4.5.2 トイレユニットの各部構造.....	80
4.6 清拭の評価実験.....	84
4.6.1 実験概要.....	84
4.6.2 模擬臀部.....	85
4.6.3 模擬便.....	85
4.6.4 実験方法.....	86
4.6.5 評価方法.....	87
4.6.6 実験結果.....	89
4.7 排泄ロボットを使った検証実験.....	91
4.8 まとめ.....	92
<b>第5章 結論と今後の課題.....</b>	<b>95</b>
5.1 結論.....	96
5.2 今後の課題.....	99



謝 辞 .....	103
参考文献.....	107
主論文を構成する論文.....	111
研究業績.....	113



# 第1章 序 論

---

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 研究の経緯

本研究は、JAXA(宇宙航空研究開発機構)が2010年度に公募を行った、国際宇宙ステーション(ISS)／「きぼう」日本実験棟を利用した実験の募集テーマである「「きぼう」を利用した社会的課題解決テーマのフィジビリティスタディ提案募集」の一つとして行われた「全体位対応の節水型排泄支援装置の開発」として開始した研究テーマである<sup>(1)</sup>。本研究テーマでは、社会的課題として高齢者の排泄介護を視野に入れ、宇宙においても問題がある排泄の課題を解決する排泄支援装置（トイレシステム）の開発を行なった。ここではまず、宇宙船内で生じる排泄時の問題を解決し、実用性のある宇宙用のトイレシステムを開発と、トイレシステムの検証実験を行うデモ装置で、人間の代わりに排泄を行う排泄ロボットの開発を行なった。その後、それまでに得られた知識や技術など利用・応用し、排泄介護を支援する介護用の新しいトイレシステムの開発を開始し、現在に至る。

本章では、1.1.2で宇宙について、そして1.1.3に介護現場について、それぞれ排泄に関わる背景を述べ、また、現在販売や研究開発が行われている排泄介護にかかわる支援機器を紹介する。

#### 1.1.2 宇宙における排泄

宇宙開発の進歩により、宇宙飛行士の宇宙での滞在時間は長くなり、国際宇宙ステーションでは3～6ヶ月の長期滞在が可能となった<sup>(2)</sup>。この長期滞在において「排泄」は不可欠なものであるが、後述する様々な問題が存在する<sup>(3)(4)</sup>。かつて米国で行われていたアポロ計画(1969～1972)やスカイラブ計画(1973～1979)では、人類が宇宙へ挑戦する初期段階であったため、宇宙船にトイレは存在しなかった。そのため、アポロではFig. 1-1に示した排泄物収容バッグと、Fig. 1-2に示した集尿用装具を使用し、また、スカイラブではFig. 1-3に示した排便採取用具と、Fig. 1-4に示した採尿器具を使用して、排泄物を蓄積させて処理を行っていた<sup>(5)</sup>。一方、旧ソ連のソユーズ宇宙船やミール宇宙ステーション(1986～2001)ではFig. 1-5に示すような地上のトイレの形を模倣した施設があり、尿は吸引して貯蔵し、固形物は気流で遠心装置に取り込み液体を分離する方式であ



Fig. 1-1 Fecal Collection Assembly, Appollo 11



Fig. 1-2 Urine Collection, Appollo 11



Fig. 1-3 Bag, Fecal Collection, Skylab



Fig. 1-4 Urinal Assembly, Skylab

った．これが現在の宇宙用トイレの原型である．米国のスペースシャトル(1981～)や国際宇宙ステーション(2000～)にはこれと同じ排泄物の吸引方法で，姿勢や固定などを考慮した宇宙用トイレが設置されている(Fig. 1-6, Fig. 1-7)<sup>(5)(6)</sup>．もう一つの宇宙用トイレの形式としてダイパー(おむつ)がある．これはシャトル打ち上げ時や船外活動時用の宇宙服内部に着用されている(Fig. 1-8)．

打ち上げ前の宇宙飛行士の姿勢は仰向けであり，時には長時間その姿勢のまま待機することを要求される．そして血流の関係から排尿が頻繁になりダイパーでの対応が必要となっている．一方，軌道上での船外活動でも同様にダイパーが用いられており，長時間の船外活動時の不可欠な装備である．使用後は船内で脱衣し，ダイパーは固形排泄物として収容保管している．国際宇宙ステーションでは，尿や固形排泄物はプログレス宇宙船に搭載し，大気圏に突入させ飛行船ごと燃やして処理を行っている．

以上のように現在，宇宙での排泄は宇宙用のトイレやダイパーを使用することによって行っているが，様々な問題が存在している．

まず，宇宙での微小重力環境において，排泄時，排泄物に十分な初速を与えることができない場合，自由落下をしないため皮膚に付着したままになってしまう．排泄物はそのとき体調や摂取した飲食物によって物性が大きく変化する．日本人の場合，でんぷん質を多く含む食物をとるため，便の量や含有水分が多く粘性が高い．国際宇宙ステーシ



<http://airandspace.si.edu/collections/> より

Fig. 1-5 Human Waste Disposal Unit, Mir Space Station



<http://www.nasa.gov/> より

Fig. 1-6 Space station toilet



<http://www.nasa.gov/> より

Fig. 1-7 Toilet compartment, International Space Station



<http://airandspace.si.edu/collections/> より

Fig. 1-8 DACT, Disposable Absorption Containment Trunk, Space Shuttle

ョンでは手袋がトイレに用意されており、排泄物を手作業で取り外している。また、微小重力環境では、排泄物の重量・質量による体内の器官への信号発信が減少し排泄の欲求が低下するといわれており、排泄時に腹圧を上げる感覚も薄れてしまうこともあるため、排泄の時期を逃してしまい、健康障害になる可能性が低くはない。

次に、宇宙船や宇宙ステーションという狭く閉鎖された空間内では、臭気や騒音が問題となる。宇宙用トイレでは臭いが拡散しないように必ず排気ファンを使用する必要がある。しかし、このファンの音がかなりの騒音となっており、就寝中に狭い船内で安眠が妨害される過酷な環境となっている。

現在、国際宇宙ステーションで使用されている宇宙用トイレでは、排気ファンの騒音以外にも問題がある。排泄物の回収方法について、尿はバキュームクリーナーの原理で Fig. 1-9 のようなホースで吸引を行うが、固形排泄物の便はトイレの便座下にある直径約 10cm 程度の管に入れる必要がある。この開口部が小さい管に上手く排泄物を入れるために、使用者は自分で肛門の位置を合わせなくてはならず、訓練をして憶える必要がある。訓練時は管の底にカメラが取り付けられたトイレシミュレータ(Fig. 1-10)を使用している。もし操作ミスをした場合、排泄物は遊離・浮遊してしまうことがあり、これ



Fig. 1-9 Urine funnel



Fig. 1-10 Toilet simulator

を収集する清掃作業は手間がかかってしまい、時間が失われ、ミッションに影響を与えてしまうと言われている<sup>(7)(8)</sup>。

また微小重力環境では、様々な人体への影響が生じることが報告されている<sup>(9)</sup>。骨量減少・尿路結石<sup>(10)(11)</sup>や筋萎縮・筋力低下<sup>(12)</sup>などであり、これらは地上で長期間寝たきりの患者に生じる廃用症候群に似た身体変化である<sup>(13)</sup>。排泄には姿勢や腹圧、重力が大きく影響しており<sup>(14)(15)</sup>、宇宙飛行士は微小重力の中、衰えた筋肉で姿勢を維持しながら、腹圧のみで排泄を行わなければならない。

### 1.1.3 介護現場における排泄

#### a) 排泄介護の現状

超高齢化社会に突入した日本は、2013年に65歳以上の高齢者人口は3,190万人となり、総人口に占める割合(高齢化率)は25.1%となった<sup>(16)</sup>。また介護現場では、介護や支援が必要と認定された要支援・要介護の高齢者が2013年度に約560万人、高齢者人口の約17.7%となっている。そのなかで、自ら移動することが困難であり、また食事や排泄に介護が必要である要介護3以上の高齢者は約200万人いると報告されている<sup>(17)</sup>。

近年、内閣府が行った平成25年度特別世論調査の「介護ロボットに関する特別世論調査」<sup>(18)</sup>において、介護経験がある人に介護で苦労したことを複数回答してもらった結果、排泄(排泄時の付添いやおむつ交換)が62.5%、入浴(入浴時の付添いや身体の洗浄)が58.3%、食事(食事の準備、食事介助)が49.1%となっており、排泄の介護が最も多かった。そのほかの調査においても、排泄介護は介護者・被介護者ともに身体的にも精神的にも大きな負担となっていることが報告されている。村上ら<sup>(19)</sup>の行った介護職員へのアンケート調査では、排泄介護で身体的負担を感じている者が70%、精神的負担を感じている者は50%になっている。



介護者の身体的負担として、車椅子から便座への移乗動作や、立位保持等の介助があげられ、これらは腰痛や筋肉痛といった症状を引き起こす可能性がある。また、眞野<sup>(20)</sup>は、被介護者で自立しての移乗や立位が困難な者にとって、トイレまでの移動・移乗は転倒の危険があり、身体的には骨折や捻挫などの外傷、精神的には転倒による恐怖感等により、日常生活動作(ADL)が低下してしまい、QOL(生活の質)に著しい影響をおよぼすと述べている。介護者の精神的(心理的)負担の要因には、衣服の着脱や排泄後の清拭などの介助を行わなければならないことの他に、菊池ら<sup>(21)</sup>の調査では経済的余裕がないことが関連しているという結果となった。これにはオムツが関係している。特に寝たきりの被介護者の場合、排泄をトイレで行わず、オムツの利用者数が多くなっている。排泄物を取り除かず長時間おむつをしていると蒸れてしまい、皮膚を傷つけることがあるため、オムツの交換は1日6~7回行われている。その消費量からオムツにかかる費用が高額となり経済的負担となっている。さらに、オムツ交換時の臭い<sup>(22)</sup>は、被介護者にとって他の人に嗅がれるという精神的苦痛となっているという問題も指摘されている。またオムツ交換に限らず、被介護者は、排泄のための立位保持、衣服の上げ下ろし、清潔動作などの排泄援助を、異性に頼みたくない、援助自体を受けたくないなどの葛藤があることが吉本<sup>(23)</sup>の調査で明らかとなっている。

以上のように、排泄介護は様々な問題を抱えており、これらの負担を軽減することは、快適に生活をするうえで非常に重要なことである。

### b) 排泄介護の支援機器

介護現場の排泄ケアを支援するシステムや装置の研究開発は、さまざまなかたちで行われている。経済産業省は平成25年度からロボット介護機器の開発を支援するために「ロボット介護機器開発導入促進事業」を開始するなど、近年ますますロボット介護機器に関心が高まっている。

排泄介護において、行われる介助・支援は、ベッドあるいは車椅子からトイレへの移乗介助、トイレまで移動する際の移動支援、排泄物を処理するなどの排泄支援がある。

移乗介助を行う機器としては、Fig. 1-11 に示す株式会社モリトーが販売している「つるべ」のように、スリングシート(体を保持する布状のシート)に乗せた被介護者の体を、吊り具で持ち上げてベッドから車椅子やポータブルトイレに移動させるものがある。また同様にスリングシートを使い、体を持ち上げて移乗を行う装置として開発が行われ



ている、株式会社安川電機の「移乗アシスト装置」(Fig. 1-12)や、マッスル株式会社の「ロボヘルパーSASUKE」(Fig. 1-13)があり、これらによって、移乗時の介護者の身体への負担は軽減される。

被介護者が一人で移乗をする場合、安田ら<sup>(24)</sup>が開発した自立支援型移乗介助ロボット「愛移乗くん」(株式会社アートプラン)(Fig. 1-14)では、ベッドサイドに置かれた装置に被介護者が前傾姿勢(おんぶの姿勢)で乗り、装置が昇降・回転することで、ベッドから車椅子またはポータブルトイレに移乗できる。同様なものに、株式会社今仙技術研究所の「i-PAL(アイ・パル)」があり、スリングシートを使わない、立ち上がりの補助を行うことができる。

パナソニックプロダクションエンジニアリング株式会社の離床アシストベッド「リシヨネ」(Fig. 1-15)は、ベッドの一部が分離し、変形して車椅子として使用できるので、体を持ち上げるといった動作をすることなく自然に移乗できるので、介護者だけでなく利用者の負担も少なくなる。

本間ら<sup>(25)(26)(27)</sup>は、補助があれば立ち上がることができる要介護高齢者を対象とした排泄介護支援ロボット「トイレアシスト」(Fig. 1-16)の研究開発を行なった。被介護者が車椅子から立ち上がった姿勢を保持している間に、車椅子と可動トイレの位置を自



Fig. 1-11 Care lift



Fig. 1-12 Assist device



Fig. 1-13 Robohelper



Fig. 1-14 Aijyou-kun



Fig. 1-15 Resyone



Fig. 1-16 Toilet-assist

動的に取り換えることで、介護者が被介護者を車椅子からトイレへ移乗させる際の身体的負担がなくなり、より安全に移乗が行える。

上野ら<sup>(28)</sup>の自走式排泄支援システムでは、自走式便器のロボットが PC からの無線操作で利用者の元に移動してくれるほか、自動で排泄物を処理、また排泄物をモニタリングすることで疾患の早期発見が可能となる。この装置は自室などからトイレへの移動をなくしているため、被介護者の転倒などの危険を取り除ける。湯川ら<sup>(29)(30)</sup>の家庭用介護システムは、寝たきりの被介護者の入浴、排泄などを介護する一連のシステムであり、その中の排泄については、車椅子の下に収納できるサイズに可変できる簡易トイレを乗せた移動ロボットを使い、排泄後、自動で居宅のトイレに移動し、簡易トイレの清掃を行ってくれる。

排泄支援を行う装置として、TOTO 株式会社の排泄支援ロボット「ベッドサイド水洗トイレ」(Fig. 1-17)がある。これは、簡単な工事で居室内のベッド横などに後付可能な水洗トイレで、設置後も必要に応じて移動できるほか、汚物は屋外へ圧送して排水処理されるため、従来のポータブルトイレを使用した場合に必要な汚物の処理を行う必要がない。

Fig. 1-18 に示す、株式会社エヌウィックの「マインレット爽」のような、寝たきりの高齢者を対象とした自動排泄物処理装置は数多く開発されている。これは寝たきりの高齢者に装着することで、尿・便を感知し、吸引、局部の洗浄、除湿まで全て自動で行ってくれる。そのためおむつを使用する必要がなくなり、被介護者にとっては、おむつ内に排泄する不快感がなくなることに加え、介護者にとっては、おむつ交換による負担がなくなり、交換時の身体的・精神的負担が軽減される。しかしながら、これら自動排泄物処理装置には、漏れが発生するなどの報告もされている<sup>(31)</sup>。



Fig. 1-17 Bedsidetoilet



Fig. 1-18 Automated Handling System for Excretion

以上のように排泄介護で利用されている支援機器には様々なものが存在するが、車椅子を使用している方や、寝たきりの被介護者が利用することを前提としている。特に高齢者の場合、長期間にわたる車椅子の使用や寝たきり状態が続くと、筋力などの身体機能や精神活動の低下といった廃用症候群を発症する危険があり、QOLの低下につながる可能性がある。廃用症候群の発症を防ぐためには、体を動かし筋力の回復を促すことが重要であるが、既存の支援機器でそのような機能を備えたものは少ない。また、排泄を支援する機器については、自立して排泄が行え、人に頼ることなく用を足すことができることで、プライバシーを保護するなど人間の尊厳を守るような機器が必要である<sup>(32)</sup>。

## 1.2 研究の目的

本研究は、1.1 節で述べたように、排泄の課題を解決する排泄支援装置（トイレシステム）の開発を目的に、宇宙船内の新しいトイレシステムおよび実験デモ装置である排泄ロボットの開発のために研究を開始し、現在は排泄介護支援のためのトイレシステム開発を行なっている。これまでの経緯や、排泄ロボットが宇宙用トイレシステムの宇宙実験デモだけでなく、介護用トイレシステムの検証実験に適用できること、および、宇宙用トイレシステム開発で用いた技術、知識を介護用でも用いたことから、本論文は次の3項目で構成する。

- a) 人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータ・排泄ロボットの開発
- b) 宇宙船での排泄問題を解決する宇宙用トイレシステムの開発
- c) 排泄介護を支援する介護用トイレシステムの開発

各項目について、以下に詳細を述べる。

### a) 人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータ・排泄ロボットの開発

宇宙実験のデモ装置として、また宇宙用、介護用それぞれのトイレシステムの検証実験のため、人間の代わりに排泄動作を行う排泄シミュレータ・排泄ロボットの開発を行なう。

本装置は、人間の排泄時に関わる大きく関わる器官を再現し、排泄の動作を模擬させ

る．体内の器官を再現することで，宇宙実験時では，微小重力環境が器官に与える影響を考慮した検証を行なうことができる．また，様々な状態の模擬便を用意することで，便秘などの状況を再現することができる．

人間の代わりに排泄物(模擬便)を排出する装置として，シリンダとシリンダを制御する制御ボックス，そして土台からなる吐出装置が製作されているが<sup>(33)</sup>，これは便器内に模擬便を付着させ，自動洗浄の性能を評価試験するためのもの，人間の排泄動作を再現してはいない．排泄に関わる器官を再現した研究として，肛門管の開閉を行う筋肉である肛門括約筋の代わりとして使用する，人工肛門括約筋の開発が行われている<sup>(34)(35)</sup>．これは人工臓器として実際に体内に埋め込んで使用するもので，排泄動作のシミュレータとは異なる目的で製作されている．

排泄動作を行う上で関わる直腸や肛門など骨盤周辺の器官は，解剖学的に形状が解析されているほか<sup>(36)(37)</sup>，直腸の動きは Defecography(排便造影)によりある程度解明されている<sup>(38)</sup>．しかしながら，これら形状と動作の両方を再現したシミュレータの開発は行われていない．そのため，排泄ロボットを開発することで，著者らが研究，開発を行っているトイレシステムのみならず，様々なトイレの研究・開発への活用が期待できると考える．

### b) 宇宙船での排泄問題を解決する宇宙用トイレシステムの開発

1.1.2 で述べたとおり，宇宙船内すなわち微小重力環境下での排泄問題として，排出された排泄物が皮膚に付着したままになることや，遊離・浮遊してしまい収集に手間がかかること，また，排泄物の臭いの問題やその臭いを排気するための排気ファンが騒音となることが問題となっている．これらの問題は，宇宙飛行士の身体面・精神面に負担となっていると考えられる．そこで本研究は，これらの宇宙環境における問題を解決する機構・方法を提案し，快適に排泄が行える新しいトイレシステム(宇宙用トイレシステム)の開発を行なう．ここでは，臭いの問題の解決案として，トイレ装置を臀部に密着して排泄することで，排泄物の臭いを外気に出さずに回収する「臀部密着型」のトイレシステムを提案，また排泄物（便）が皮膚に付着したままとなる問題については，トイレ装置の機構で物理的に取り除く方法を考えた．これらのシステム，方法は，地上の介護現場でも活用できると考えられる．「臀部密着型」による臭いの拡散防止は地上でも利用できるものであり，排泄物を取り除く除去方法は，排泄後の臀部洗浄として利用

でき、装置による洗浄によって介護者が被介護者のお尻を拭く作業がなくなると考えられる。

また、開発したトイレの使用試験を行った結果、人間の臀部形状を考慮する必要性があると判明したため、臀部形状の計測を行う。

宇宙環境での排泄と地上の介護現場での排泄には類似した問題があることから、宇宙用トイレシステムの開発が地上へ利用・応用でき、本研究では後述の介護用トイレシステムに一部の機構や臀部形状の計測結果を活用している。

### c) 排泄介護を支援する介護用トイレシステムの開発

本開発では、前術で述べた宇宙用トイレシステムの開発により、得られた知識や技術、機構を活用することで、1.1.3 で述べたような介護現場の排泄介護において、介護者・被介護者が抱えている負担を軽減するための支援装置として、介護用トイレシステムを開発することが目的である。ここでは、b) で述べたように、宇宙用トイレシステムでも利用した「臀部密着型」による臭いの拡散防止と、装置による臀部の洗浄を考慮したトイレシステムを製作し、検証を行う。

さらに本研究室では、Fig. 1-19 に示すような「自立生活サポートシステム」の開発を行っている<sup>(39)</sup>。本装置はベッドで寝た状態の被介護者に装着することで、ベッドから体を持ち上げて(Fig. 1-19(b))、回転して立ち上がった状態にすることができ、さらに下肢につけた装具により足を動かして、歩行動作を行わせることができる(Fig. 1-19(c))。被介護者の体は装置が支えているため、移乗の際の介護者への負担はなくなり、また被介護者は装置による自立歩行が可能となる。



Fig. 1-19 Support System



このサポートシステムとトイレシステムを連携した一連の介護システムにより、ベッドからの「起き上がり介助」を支援し、「歩行補助」を行うことで、介護者の身体的負担はほとんどなくなり、また、被介護者自身が歩行を行なって体を動かすことでADL(日常生活動作)を維持、または向上させることができる。そして、自立して排泄が行えることで、プライバシーを保護できる。これらにより、要介護者のQOL向上が可能となる。

### 1.3 本論文の概要と構成

本論文は、『排泄ロボットと臀部密着型トイレシステムの開発』と題し、5章より構成される。本論文の内容について、概要と構成を以下に述べる。

第1章では、まず本研究の経緯として、宇宙船内で実用性のある新しいトイレシステムの開発と、宇宙実験のデモ装置としての排泄ロボットの開発、そして介護用のトイレシステムの開発を行なっていること述べる。次に、宇宙における排泄と介護現場における排泄の現状と問題点を説明し、現在販売や研究開発が行われている介護支援装置について説明する。そして、本研究で扱う「排泄ロボット」、「宇宙用トイレシステム」そして「介護用トイレシステム」の開発についての目的を明確にする。

第2章では、人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータである排泄ロボットの開発について述べる。本装置は人間の排便に関わる骨盤部周辺の器官やそれらの形状・動作を再現した原寸大の人体部分モデルである。まず、人間の排泄について、排泄に関わる器官の構成と、排泄時の動作について説明する。そして排泄ロボットの構造と排泄に関わる器官を再現し製作した各部分や、動作を再現する機構、システム構成、そして制御について紹介する。最後に、動作の検証のために行った、模擬便を使った排泄ロボットの排便動作実験について述べる。

第3章では、宇宙船での排泄問題を解決するための宇宙用トイレシステムの開発について述べる。便が皮膚に付着したままとなることや臭いなどの問題を解決する機構・方法を提案し、臀部に密着させて使用する装着型トイレと、装置の密着性を向上させることを目的に、吸引器を使った吸着機構も製作したので、それぞれの構成や機能について説明し、検証実験について述べる。検証実験の結果、装置の問題点が明らかになり、人間の臀部形状を考慮する必要がある事がわかったため、3D スキャナを使った臀部の形状計測を行ったので、その方法と結果を紹介する。

第4章では、排泄介護を支援する新しい介護用トイレシステムの開発について述べる。本装置は、利用者が便座に座った後、自動で排泄物を収容するトイレユニットを臀部に密着させることで、臭いが拡がることを防ぎ、確実に排泄物を回収できることに加え、排泄後は肛門の汚れを装置によって清拭することで、体が不自由な方にも自立した排泄を行うことができる。ここではまず、肛門の位置を特定するための、赤外線サーモカメラを用いた肛門検出システムの詳細と、その検出精度を確認した評価実験について述べる。また、介護用トイレシステムの構造や各機構について説明し、機能の一つである泡を使った洗浄方法について、模擬臀部を使った清拭実験を行うことで、泡の有効性を明らかにする。

最後に第5章では、結論として本研究で得られた成果の総括を行い、今後の研究課題を示す。

以上の本論文における構成を Fig. 1-20 に示す。

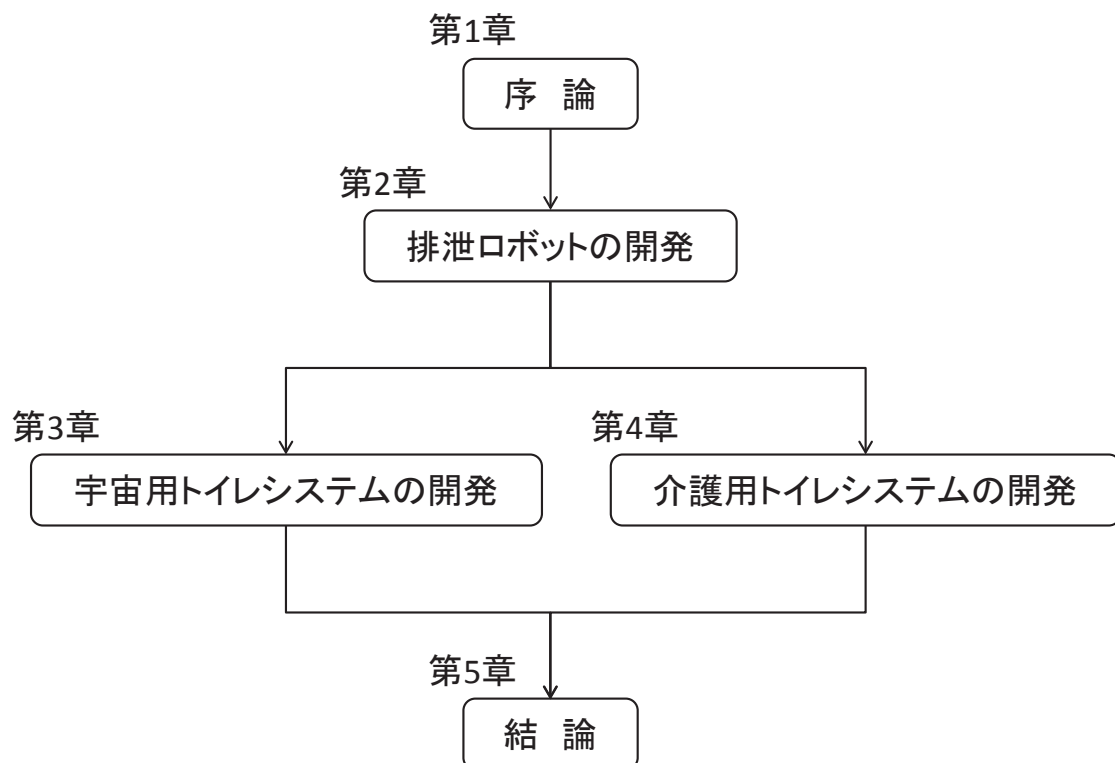


Fig. 1-20 Framework of this thesis





## 第2章 排泄ロボットの開発

---

### 2.1 人間の排泄メカニズム

本章で述べる排泄ロボットは, 1.1 節で述べたように, 宇宙での実験デモ装置として, そして, 本研究で開発する宇宙用, 介護用トイレシステムの検証実験を行うための, 人間の代わりに排泄を行うロボットである. その為, 人間と同サイズのロボットとし, また人間の排泄器官を再現することで, 宇宙船内すなわち微小重力環境下での排泄において, 体内の器官がどのような影響があるか確認できるようにする.

そこで, まず人間の排泄メカニズムについて述べる.

#### 2.1.1 人間の排泄メカニズム

人間の排泄に関わる直腸周辺の器官構造を Fig. 2-1 に, 骨盤底の筋肉を Fig. 2-2 に, 直腸の断面を Fig. 2-3 に示す. 直腸(Rectum)の上に連なる S 状結腸(Sigmoid colon)は結腸の一部であり, 排泄物である便を直腸に送る役割を持つ. S 状結腸全体は腹膜に覆われており, また直腸は上部の前面が腹膜に覆われている. 直腸の下には肛門管(Anal canal)があり, 便はこの管を通して肛門から体外に排出される. 直腸の長さは 15~20cm となっており, また肛門管の長さは性差があり, 男性は 3~4cm, 女性は 2~3cm と男性のほうが女性に比べ長くなっている. この肛門管の周りには肛門括約筋(Anal sphincter)があり, 内肛門括約筋(Internal anal sphincter)と外肛門括約筋(External anal sphincter)に分かれている. また, 直腸などの骨盤内の臓器は, 骨盤底の筋肉, 筋膜, 結合組織によって下から支えられており, 骨盤底の筋肉には, 骨盤隔膜(Diaphragma pelvis)を構成する肛門挙筋(Levator ani)と尾骨筋(Coccygeus), そして尿生殖隔膜(Diaphragma urogenitale)をつくる深会陰横筋(Transversus perinei profundus)がある(Fig. 2-2). これらの筋肉は, あわせて骨盤底筋群と呼ばれている. 肛門挙筋はさらに腸骨尾骨筋(Iliococcygeus), 恥骨尾骨筋(Pubococcygeus), 恥骨直腸筋(Puborectalis)から成る. 恥骨直腸筋は Fig. 2-1(b)のように, 恥骨(Pubis)の後ろ表面から起始し, 直腸を取り囲むようにスリング(吊り帯)を形成している. 直腸の断面形状は, Fig. 2-3 のように S 字状になっており, 内部には上直腸横ヒダ(Superior transverse rectal fold), 中直腸横ヒダ(Middle transverse rectal fold), 下直腸横ヒダ(Inferior transverse rectal fold)という 3 つの恒久的な横ヒダがある. 肛門から 5~8cm 離れた位置にある中直腸横ヒダから肛門管と直腸の境までの直腸最下部は直腸膨大部

(Rectal ampulla)と呼ばれ、S 状結腸から送られた便はこの部分に蓄えられる。

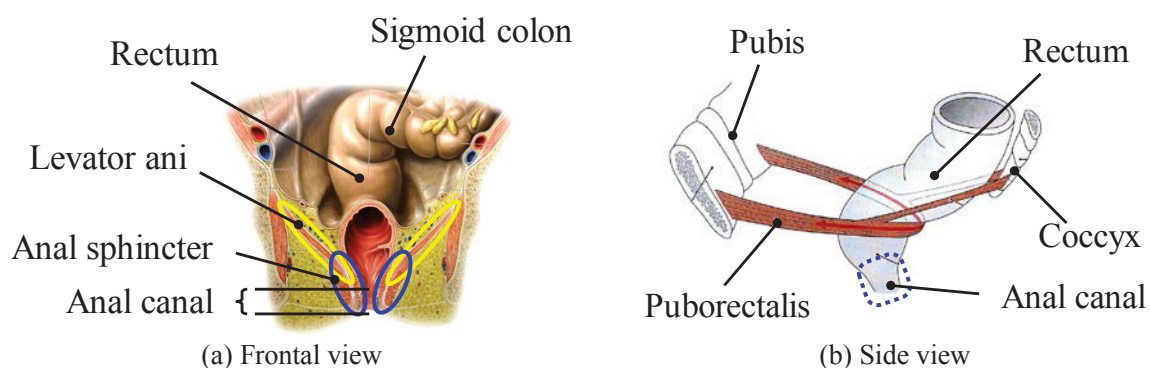


Fig. 2-1 Organs' layout around rectum<sup>(40)</sup>

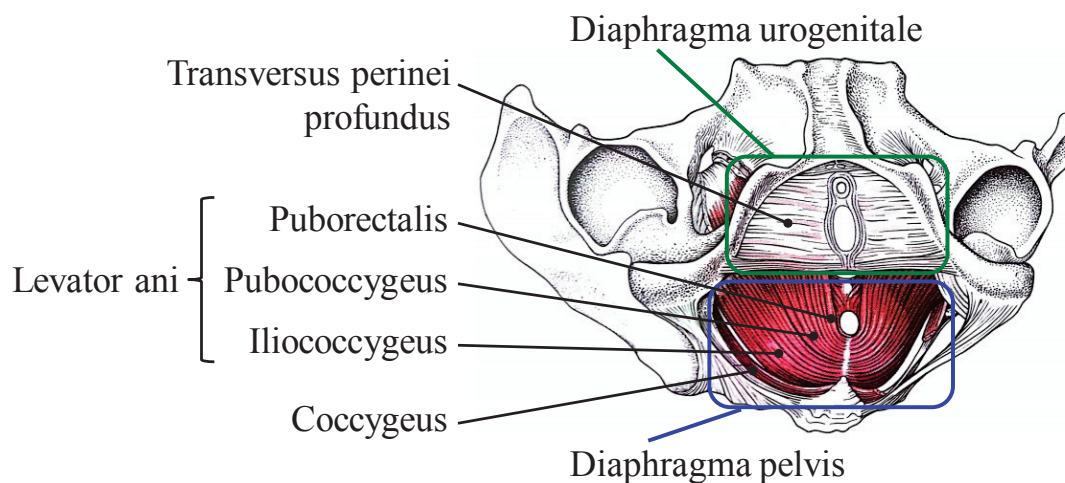


Fig. 2-2 Pelvic floor (female)<sup>(41)</sup>

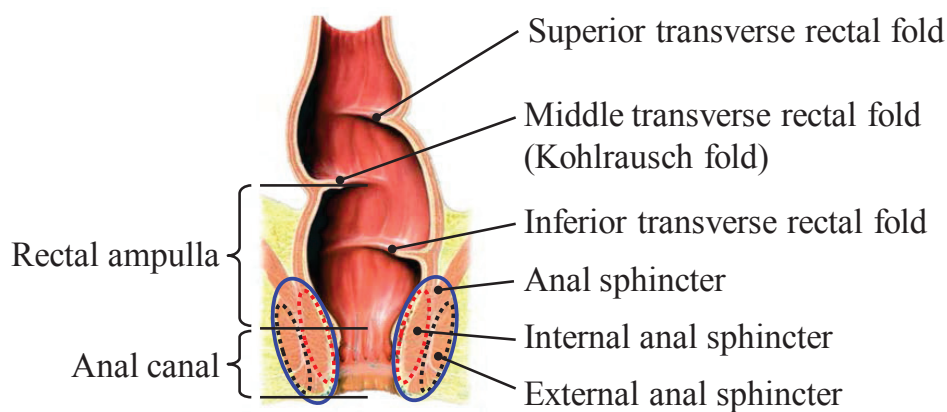


Fig. 2-3 Profile section of rectum<sup>(40)</sup>

### 2.1.2 排泄の生理

人間の排便メカニズムの詳細については未だに解明されていない部分もあるが、一般的には Fig. 2-4 に示すような運動とされている。以下に詳細を述べる。

安静時では、不随筋である内肛門括約筋の収縮により、肛門管は閉じられた状態になっている(Fig. 2-4(a)(i), (b)(i)). 便が腸の蠕動運動により直腸に運ばれると、直腸の最も拡張する直腸膨大部に蓄えられる(Fig. 2-4(a)(ii), (b)(ii)). この直腸膨大部が充満し、内壁にある伸展受容器が刺激されると(Fig. 2-4(a)(iii), (b)(iii)), 排便衝動(便意)が生じて直腸が収縮する(Fig. 2-4(a)(iv), (b)(iv)). この時、不随筋である内肛門括約筋は反射的に弛緩するが、随意筋である外肛門括約筋を意識的に収縮させることにより便の排出が抑制され、便が一時的に保持された状態になる(Fig. 2-4(a)(v), (b)(v)). また、同じ随意筋である恥骨直腸筋を収縮させることで直腸が下から持ち上がり、肛門管の手前で直腸が屈曲して、便の漏れを防止する。直腸と肛門管との間の角度は、直腸肛門角と呼ばれ、恥骨直腸筋が収縮することにより  $90^\circ$ 前後になる。この直腸肛門角は身体の姿勢によっても変化し、立位時や臥位時のように身体がまっすぐな状態では角度が  $90^\circ$ 前後になるため、便の排出を防止する状態になる(Fig. 2-5(b)).

排便の準備が整い、身体を屈めて、排便を抑制していた外肛門括約筋と恥骨直腸筋を弛緩させると、肛門管が拡張し、また直腸肛門角が  $135^\circ$ 前後になって直腸が直線化して(Fig. 2-5(a)), 直腸内の便が肛門側に降りやすくなる。ここで、腹圧をかける(息む)ことにより腹膜が下がり、直腸を押し付けることによって便の排出がおこる(Fig. 2-4(a)(vi), (b)(vi), Fig. 2-6).

この時、肛門挙筋などの骨盤底筋群の支えが重要であり、腹圧で押し下げられた腹膜と下支えの骨盤底筋群のあいだで直腸が押しつぶされる(Fig. 2-6)。そのため、この骨盤底筋が弱いと直腸などが全体的に下がってしまい、腹圧がかかっても直腸の下部分にまで力がかからず、便がうまく排出されなくなってしまう。排便後は、弛緩していた内肛門括約筋や恥骨直腸筋など肛門挙筋が再び収縮して肛門管は閉じられ、直腸は弛緩して安静時の状態に戻る。

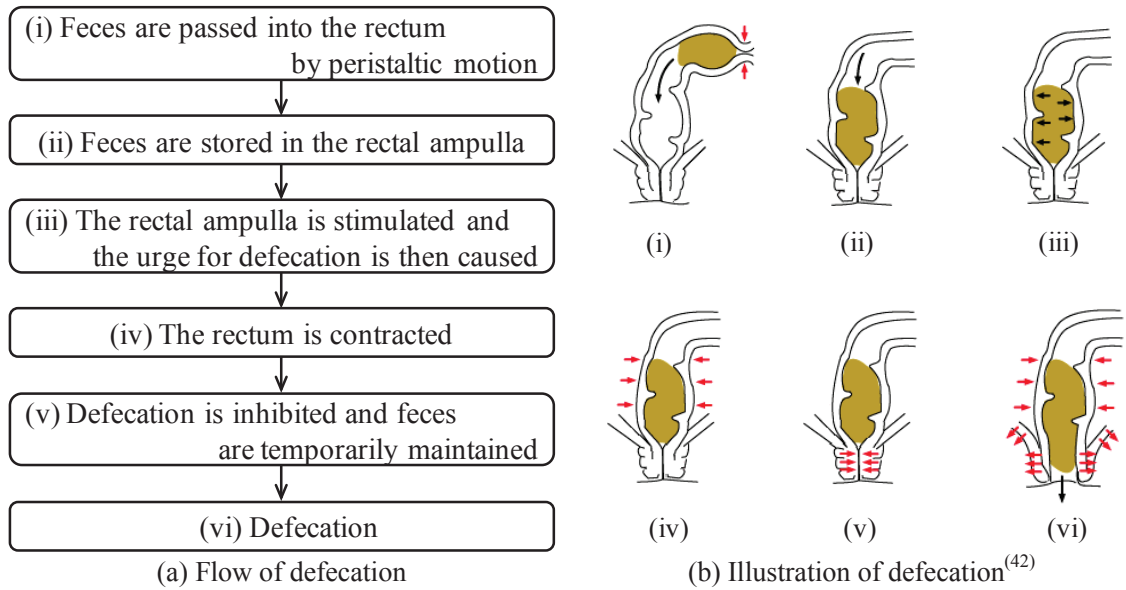


Fig. 2-4 Mechanism of defecation

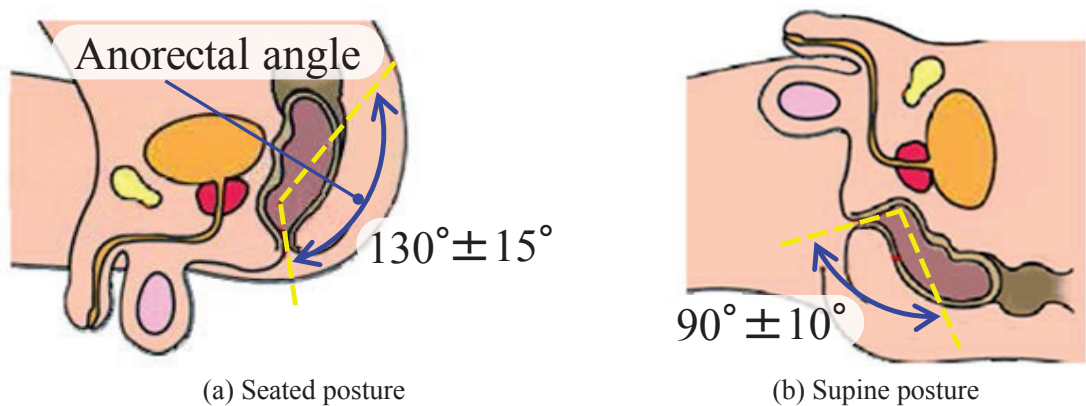


Fig. 2-5 Relationship between posture and anorectal angle<sup>(43)</sup>

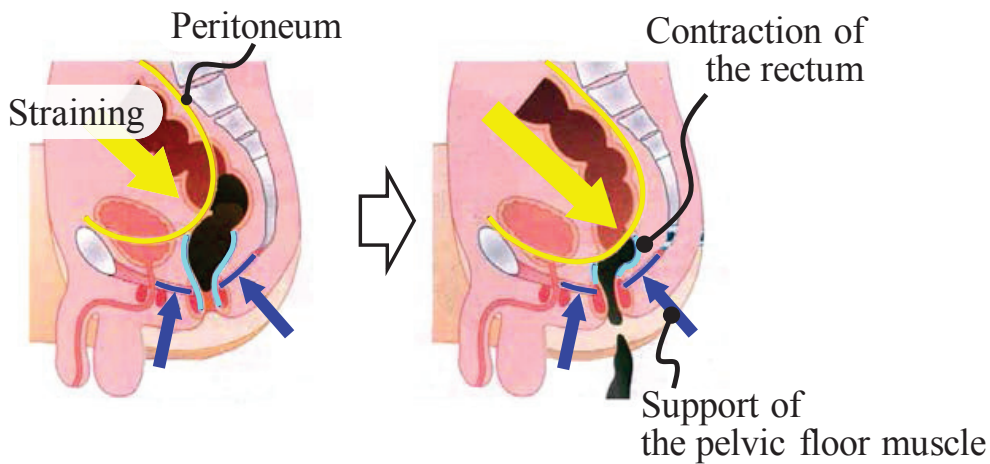


Fig. 2-6 Act of defecating<sup>(44)</sup>

便意に関連したパラメータに、直腸内に柔らかいバルーンを挿入し、このバルーンに空気を注入したときに生じる感覚を聴取する「直腸感覚」がある。この測定から、通常30～50ml 空気を注入すると違和感を感じ始め、およそ空気量が200～300ml になると便意を感じ、そして堪えられる最大の注入量は250～350ml 程度であることがわかっていく。また、これと同様に直腸肛門内を測定するもので、肛門括約筋の収縮力がある。こちらはセンサをいったん直腸内に挿入したのち、これを引き抜いている間の圧を測定する。力を入れない安静時と肛門を意識的に閉めたときの圧をそれぞれ測定した結果は、安静時がおおよそ40～100mmHg、随意収縮時はおおよそ80～200mmHg となっている。安静時の測定値は内肛門括約筋の収縮力を、また、随意収縮時の測定値は外肛門括約筋の収縮力が反映している<sup>(44)</sup>。

## 2.2 排泄ロボットの開発

### 2.2.1 排泄ロボットの概要

2.1 節で述べた排泄のメカニズムを参考に、宇宙実験デモ用の排泄シミュレータである排泄ロボットを開発した。Fig. 2-7 にロボットの構成を、また仕様を Table 2-1 に示す。排泄ロボットは、人間の排便に直接関わる骨盤部周辺の器官(骨盤、骨盤底筋群、恥骨直腸筋、S 状結腸から肛門管までの直腸部、そして腹膜)やそれらの形状・動作を再現した原寸大の人体部分モデルである<sup>(43)</sup>。

2.1 節より、人間の排泄において大きく関わる器官として「直腸」「肛門括約筋」「恥骨直腸筋」そして「腹圧」があり、これらの動きによって排泄物である便の保持と、排泄時に便の排出が行われている。そのため、例えば体位を変えた場合に、排泄で影響があるのはこれらの器官であると考えられる。そこで、以上の4つの器官について動作機構を製作し、それらを制御することで排泄の動作を行わせることにした。

排泄ロボットの外観は、Fig. 2-7(a)のように腰周辺部分のみのクリアトルソーをアルミフレームの土台にのせた構成となっており、クリアトルソーの内部に再現した器官を人間の同様な位置に配置している(Fig. 2-7(b)(c))。またクリアトルソーを取り付ける時の角度により、Fig. 2-8 に示すような、座位状態や仰臥位の状態に姿勢を変えることができる。



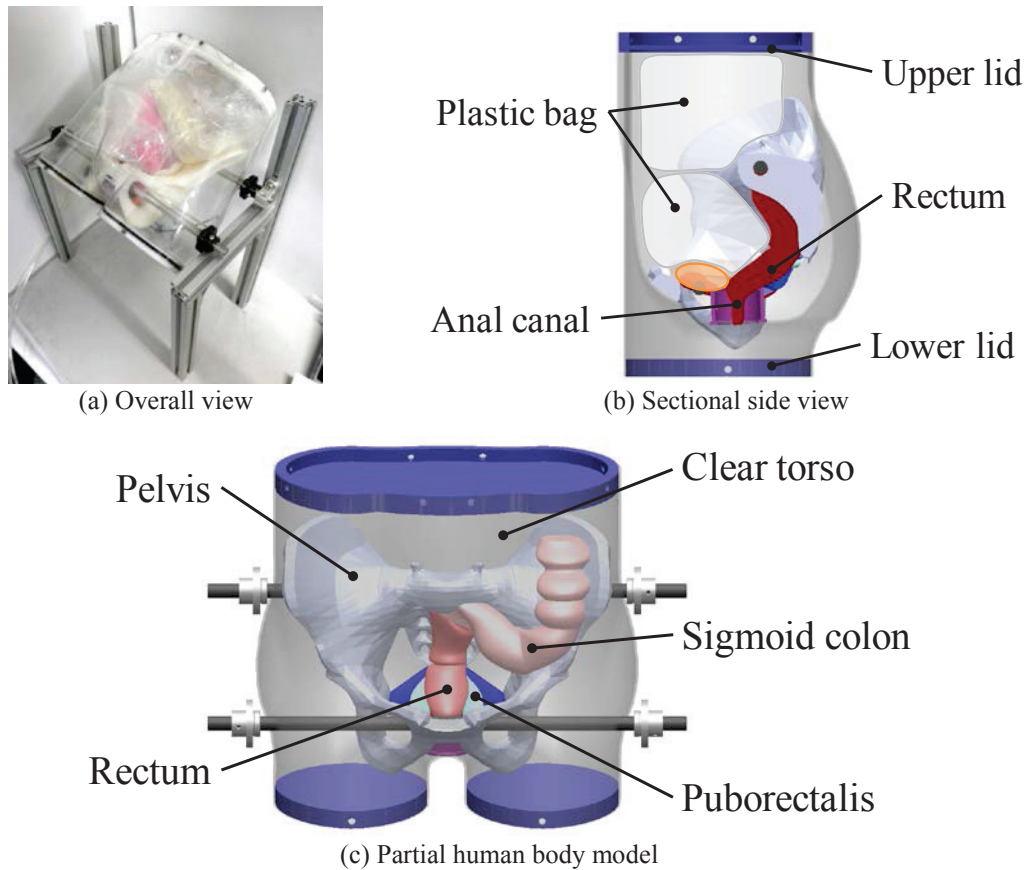


Fig. 2-7 Robotic Defecation Simulator

Table 2-1 Specification of Robotic defecation simulator

Name	Robotic defecation simulator
Dimensions	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Main : H290×D200×W400 mm</li> <li>▪Base : H500×D230×W400 mm</li> </ul>
Weight	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Main : 3.4 kg</li> <li>▪Base : 2.0 kg</li> </ul>
Simulated organ	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Pelvis</li> <li>▪Rectum</li> <li>▪Anal canal</li> <li>▪Sigmoid colon</li> <li>▪Levator ani</li> <li>▪Anal sphincter</li> <li>▪Puborectalis</li> <li>▪Peritoneum</li> </ul>
Drive source	Compressed air
Actuator	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪McKibben type actuator(for Puborectalis and Rectum)</li> <li>▪Rubber tube (for Anal sphincter)</li> <li>▪Plastic bag (for Abdominal pressure)</li> </ul>
Control	PC, Electro-pneumatic regulator
Movement	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Closing anus (Anal sphincter) : to prevent feces from rectum</li> <li>b. Raising rectum (Puborectalis) : to adjust anorectal angle to <math>90 \pm 10</math> degrees</li> <li>c. Contracting rectum (Rectum)</li> <li>d. Straining (Abdominal pressure) : to adjust pressure within the rectum to <math>75.0 \text{ cmH}_2\text{O}</math></li> </ul>

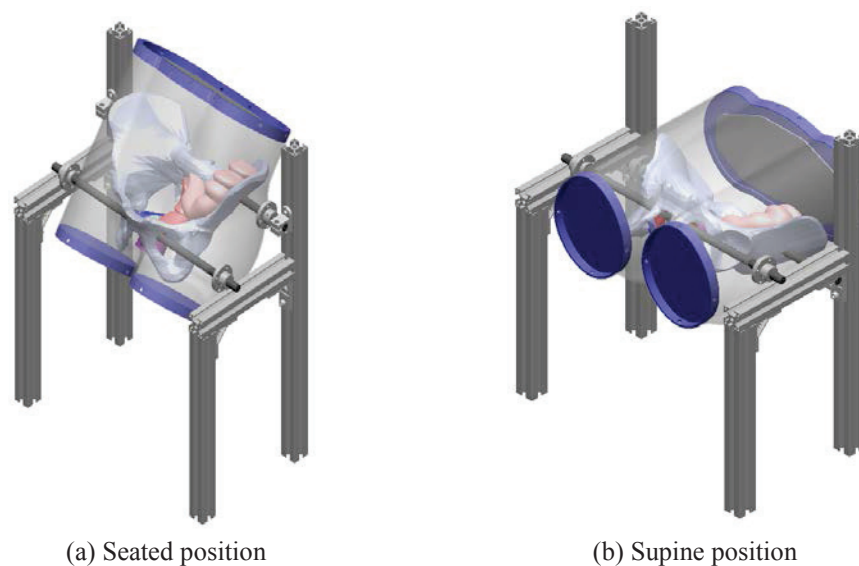


Fig. 2-8 Position change

以下に再現した器官や動作機構の詳細を述べる。

## 2.2.2 排泄関係器官の製作

### a) 骨盤と骨盤底筋群の製作

骨盤の製作は、3D 形状データの Human Pelvis 3D Model(Flat Pyramid : 成人女性モデル, H220mm×W270mm×D135mm)をもとに、3D-CAD で形状を再現した(Fig. 2-9). 次に、この形状データから、3D プリンタ(Stratasys 社 : Dimension BST 768)により ABS 樹脂で造形した(Fig. 2-10).



Fig. 2-9 Human Pelvis 3D Model

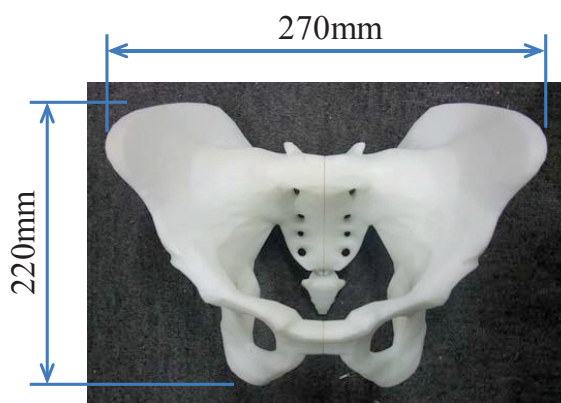


Fig. 2-10 Pelvis



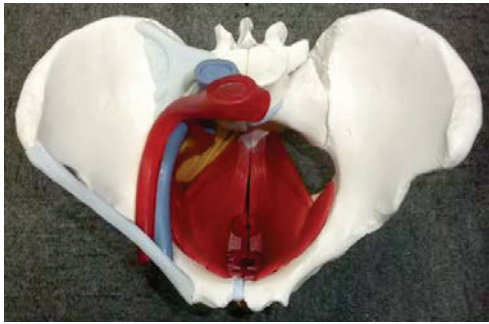


Fig. 2-11 Pelvis model

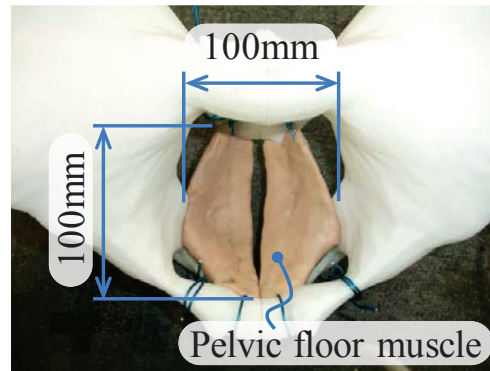


Fig. 2-12 Pelvis floor muscle

直腸を下から支える骨盤底の骨盤底筋群は、Fig. 2-11 に示す女性の骨盤モデル(日本スリービー・サイエンティフィック株式会社：女性骨盤、内臓・骨盤底筋付、6 分解モデル)を参考に、オープン樹脂粘土(ダイセルファインケム株式会社：スーパースカルピー)により一体で成形して、ABS 製の骨盤に取り付けている(Fig. 2-12). 大きさは、H100mm×W100mm×D100mm となっており、骨盤に収まるようにした。

#### b) S 状結腸・直腸・肛門管の製作

S 状結腸、直腸、肛門管は連続した大腸の部位であり、S 状結腸は直腸へと繋がり、直腸は肛門管で終わる。これらの器官の製作に際して、まず人体の解剖学的知見<sup>(40)(41)</sup>および大腸モデル(株式会社京都科学：大腸内視鏡トレーニングモデル)を参考にして形状寸法を決定し、3D-CAD により一体型の形状を再現した。この CAD モデルから 3D プリンタで型を作り、ウレタン樹脂(株式会社エクシールコーポレーション：人肌のゲル原液 硬度 5)を流し込んで成型した。Fig. 2-13 に示すように、この器官の全長は 450mm で、下から 30mm の部分が肛門管部、そこから 170mm までが直腸部、残りの部分が S 状結腸部である(Fig. 2-13(a)). また 2.1.1 で述べたように、直腸の内部には 3 つの横ヒダがあるため、肛門管から 70mm の位置に中直腸横ヒダを設け、そこを基準として上下 20mm の所に上直腸横ヒダと下直腸横ヒダを設けた(Fig. 2-13(b)).

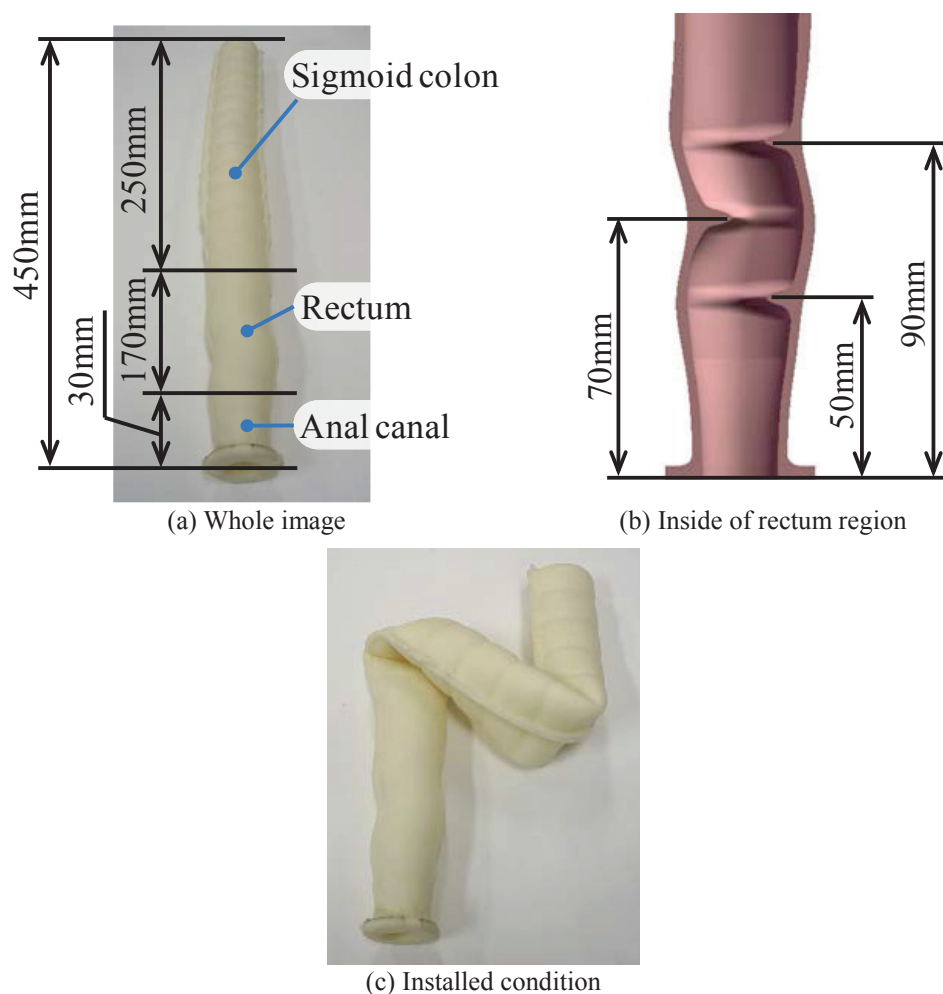


Fig. 2-13 Imitated all-in-one organ of anal canal, rectum, and sigmoid colon

## 2.3 排泄ロボットの動作機構

2.1 節で述べた人間の排泄メカニズムから、排泄ロボットの動作機構の設計を行った。ここでは、2.1.2 で述べた人間の排泄動作を参考にして、肛門括約筋、恥骨直腸筋、直腸、そして腹圧の動作を再現した。以下に各動作機構の詳細について述べる。

### 2.3.1 肛門括約筋の動作機構

肛門括約筋の弛緩・収縮運動を再現し、肛門管の開閉を行う。2.1.2 で述べたように、肛門括約筋は、不随筋の内肛門括約筋と随意筋の外肛門括約筋に分かれており、安静時は内肛門括約筋が収縮して肛門管を閉じているが、便意が生じると内肛門括約筋は弛緩して、代わりに外肛門括約筋が収縮することで肛門管を閉じた状態を維持している。そ

して、排便時は、内外両方の括約筋が弛緩して、肛門管が開いた状態になる。このように、肛門管は排便時以外では閉じており、排便時にのみ開くため、排泄ロボットでは、内肛門括約筋と外肛門括約筋を一体の肛門括約筋として再現することで、構造および制御を簡略化している。

この肛門括約筋の運動を再現する機構は Fig. 2-14 と Table 2-2 に示すとおりで、肛門管の周りを環状のゴムチューブで囲い、さらにその外側を ABS 樹脂製の円筒状のケースで覆った構造になっている。

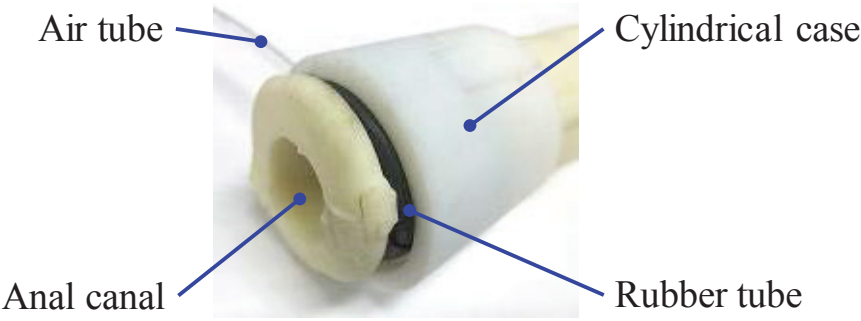


Fig. 2-14 Anal sphincter

Table 2-2 Control mechanism of anal sphincter

Flaccid	Contractile
<p>Cylindrical case Rubber tube</p> <p>Anal canal Air tube</p>	<p>Compressed air</p>
<p></p>	<p></p>

ここで、ゴムチューブ内に空気を送り込むとゴムチューブが内側に膨らむため、その内側にある肛門管を閉じることができる。また、ゴムチューブ内の空気を抜くことにより、肛門管を開くことができる。

### 2.3.2 恥骨直腸筋の動作機構

恥骨直腸筋の弛緩・収縮運動を再現して直腸肛門角の角度を調節し、排便の抑制または促進を行う。この恥骨直腸筋の運動を再現する機構を Fig. 2-15 に示す。直腸を取り囲むように、恥骨から圧縮空気により収縮する McKibben 型人工筋肉<sup>(45)</sup>を2本繋げてスリング(吊り帯)を形成する。この人工筋肉に圧縮空気を送り、収縮させて直腸下部を恥骨方向に持ち上げることで直腸肛門角が約  $90^\circ$  になり、便の排出が抑制される。反対に、人工筋肉内の空気を抜いて緩めることにより直腸肛門角が鈍角化(約  $135^\circ$ )し、便が排出され易くなる。

本研究では、この動作を実現するため、経験的に直径 12.7mm (0.5 インチ)、長さ 150mm の McKibben 型人工筋肉を採用した。本機構と後述の直腸の動作機構で使用している McKibben 型人工筋肉は、空気圧で圧縮するアクチュエータであり、軽量性、柔軟性、コンプライアンス性に優れている。構造は Fig. 2-16 に示すように、非常に簡素であり、ゴムチューブの外側をナイロン製の繊維コードで網状に編んだスリーブで覆い、片側を密閉して、もう片方はゴムチューブに外部から空気を供給するための空気供給用チューブを取り付けた構成になっている。空気が供給されてゴムチューブ内の圧力が上昇すると、ゴムチューブは半径方向に膨張し、このとき生じる円周方向の張力が繊維コードにより軸方向に変換され、伸縮力が生じる。

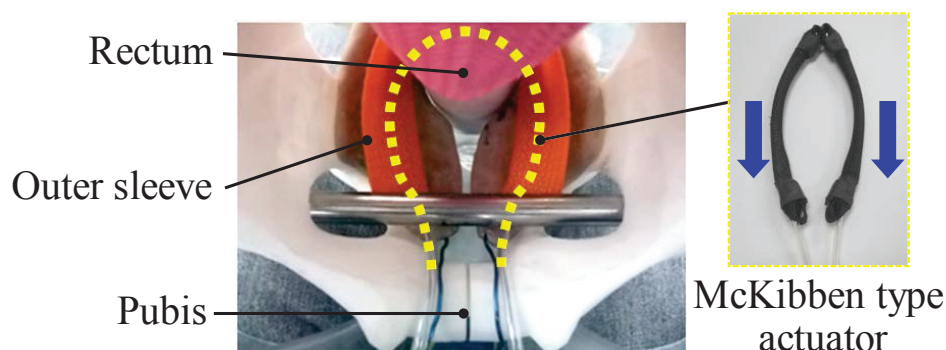


Fig. 2-15 Control mechanism of puborectalis muscle (Top view)

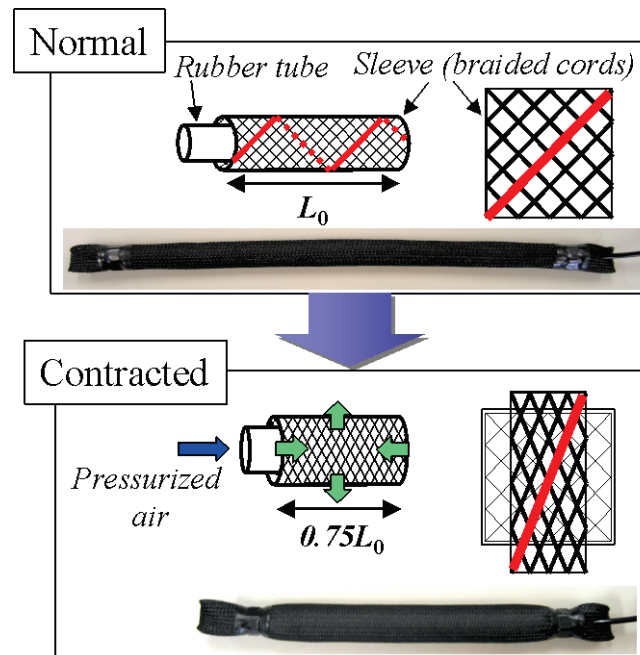


Fig. 2-16 Structure of McKibben artificial muscle

### 2.3.3 直腸の動作機構

直腸の収縮運動を再現し、便の排出を促す。この直腸の収縮動作を再現する機構を Fig. 2-17 に示す。2.2.2 で製作した直腸部の外側を、ナイロン製の繊維コードを格子状に編んだ円筒状のスリーブで覆った構造になっている。このスリーブの一端を、2.3.1 で説明した ABS 樹脂製の円筒状のケースに固定し、もう一端に 2 本の McKibben 型人工筋肉を取り付けている。ここで、この人工筋肉の另一端を Fig. 2-17(b)のようにクリアトルソー上部に固定することで、収縮時に直腸部のスリーブを上方向へ引っ張ることができる。スリーブは、Fig. 2-18 に示すように軸方向に引っ張ると半径方向に収縮するため、その内側にある直腸もそれに伴って収縮するようになっている。本研究では、スリーブを引っ張ることで直腸部が最も細く縮んだ状態(直径約 35mm)を収縮時とした。McKibben 型人工筋肉は、経験的に直径 12.7mm (0.5 インチ)、長さ 150mm のものを採用した。

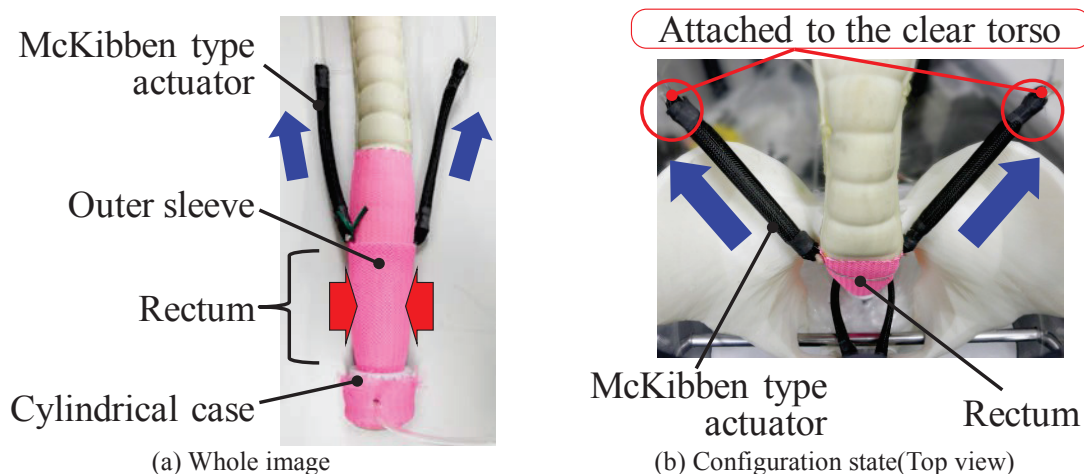


Fig. 2-17 Control mechanism of rectum

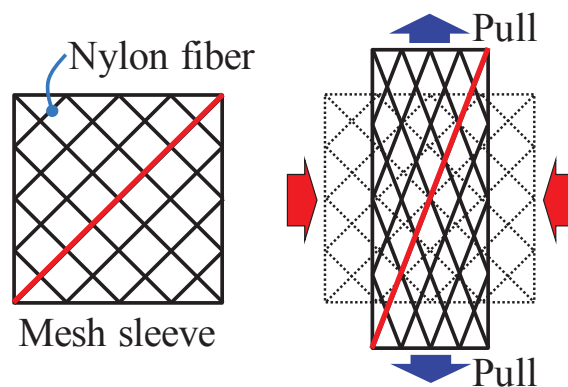


Fig. 2-18 Sleeve

#### 2.3.4 腹圧の動作機構

腹圧をかける(息む)ことによって腹膜を下げ、直腸を押しつけて便の排出を促す。この腹膜の運動を再現する機構の外観を Fig. 2-19 に、構造を Fig. 2-20 示す。

人間の腹膜は様々な器官を覆っており、複雑な形状をしている。この形状の再現は難しいため、クリアトルソー内に、エアチューブを取り付けたビニール製の袋を、トルソー内の上部(Fig. 2-19(i), Fig. 2-20(i))とその下の直腸前方部分(Fig. 2-19(ii), Fig. 2-20(ii))の2か所に配置した。このときS状結腸部分はこの二つの袋の間に位置する(Fig. 2-19(iii)). 2つのビニール袋は、エアチューブから空気を供給することで Fig. 2-20 に示すようにクリアトルソー内で膨らみ、下部の袋が自身の膨らみと、上部の袋から押し下げられることとで、直腸を押しつける。



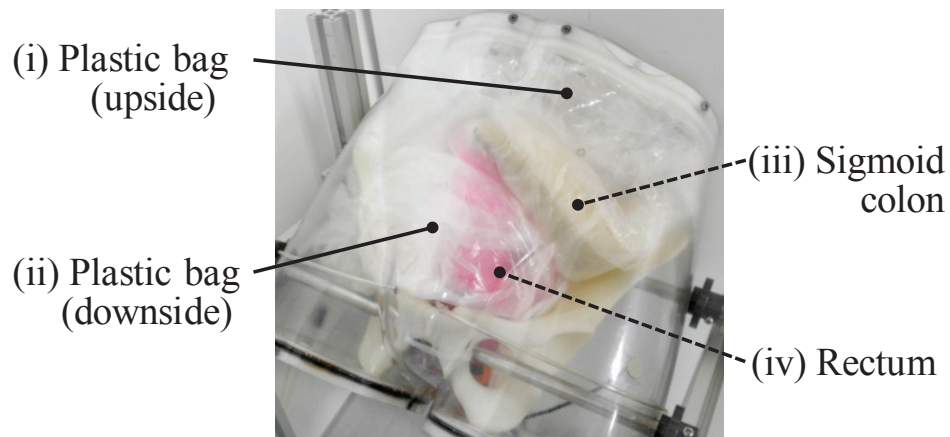
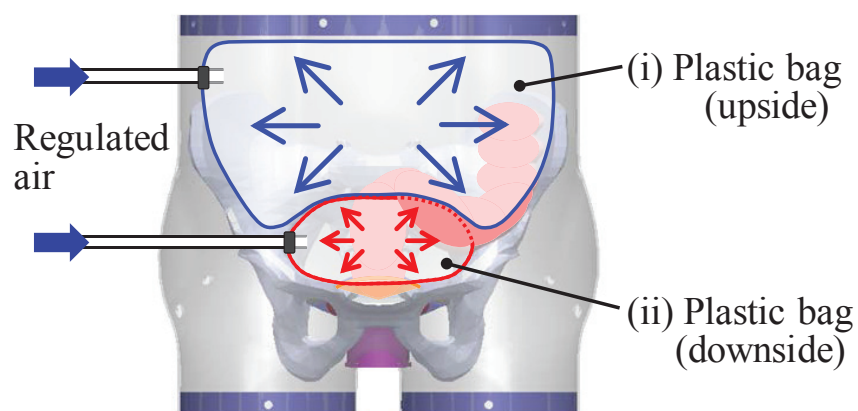
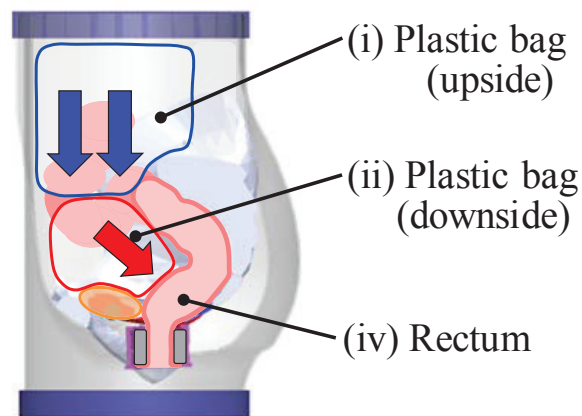


Fig. 2-19 Overall view



(a) Front view



(b) Sectional side view

Fig. 2-20 Control mechanism of abdominal pressure



## 2.4 システム構成

Fig. 2-21 に排泄ロボットのシステム構成を示す。本システムでは、コンプレッサで圧縮空気を生成し、電空レギュレータ(設定圧力範囲：0.005–0.5MPa)に送っている。電空レギュレータでは、制御 PC からの指令値に応じて気圧値を調整し、各動作機構のアクチュエータであるゴムチューブや McKibben 型人工筋肉、ビニール袋に空気を供給する。なお、本システムでは、排泄動作をシーケンス制御で行う。各要素への入力気圧値については、2.6 節で詳細を述べる。

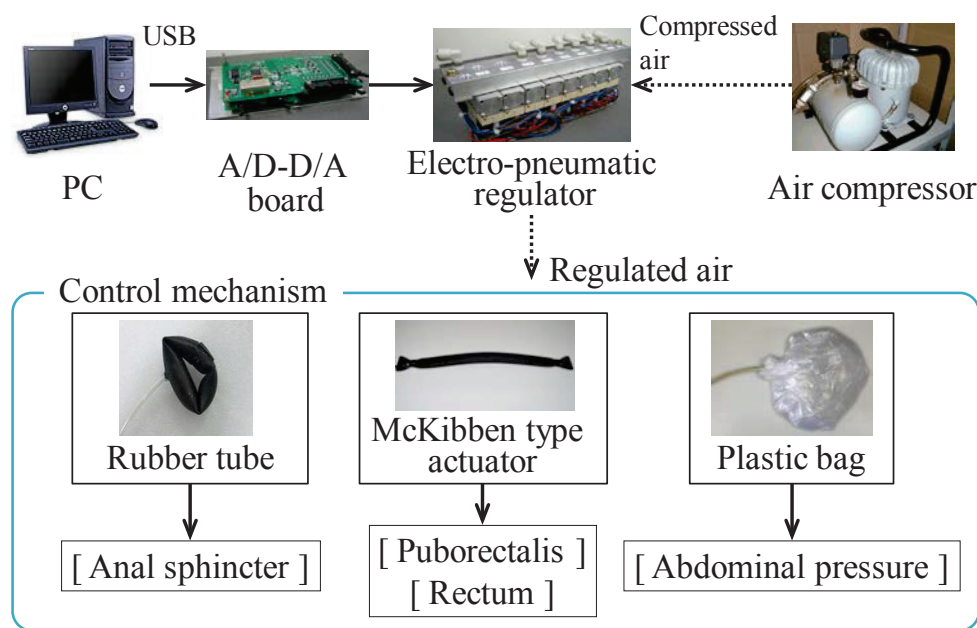
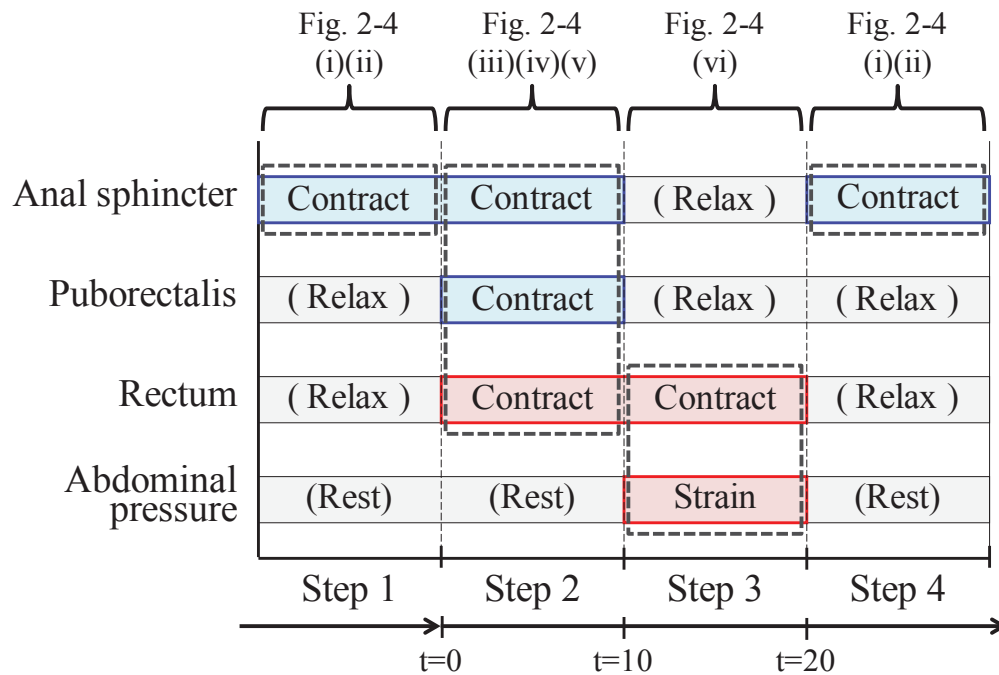


Fig. 2-21 System configuration

## 2.5 排泄ロボットの動作制御

Fig. 2-4 を参考に、肛門括約筋の動作機構(2.3.1)、恥骨直腸筋の動作機構(2.3.2)、直腸の動作機構(2.3.3)、腹圧の動作機構(2.3.4)の 4 つの動作機構を協調させて制御することにより、人間の排便動作を再現する。各動作機構の動作パターンを生成するにあたり、まず、各器官や筋肉の動作特徴の観点から、人間の一連の排便動作を以下の 4 つの段階に分類した。このとき、4 段階を図示すると Fig. 2-22 のようになる。



段階1：Fig. 2-4(i)(ii)に相当し、内肛門括約筋の働きにより肛門管が閉じられ、便が直腸膨大部に溜められている状態である。排泄ロボットでは、内肛門括約筋と外肛門括約筋が一体となった肛門括約筋の収縮により肛門管を閉じる。

段階2：Fig. 2-4(iii)(iv)(v)に相当し、便意が生じて直腸が収縮するが、外肛門括約筋の収縮により肛門管が閉じ、恥骨直腸筋の収縮により直腸が持ち上がるため、便の排出が一時的に抑制された状態となる。排泄ロボットでは、肛門括約筋の収縮動作により肛門管が閉じた状態を維持し、直腸の機構で直腸を収縮させる。同時に、恥骨直腸筋の収縮動作で直腸を持ち上げる。

段階3：Fig. 2-4(vi)に相当し、外肛門括約筋と恥骨直腸筋が弛緩することで肛門管の拡張と直腸の直線化が行われ、腹圧をかけて腹膜が直腸を押すことによって便が排出される状態となる。排泄ロボットでは、肛門括約筋と恥骨直腸筋の機構をそれぞれ弛緩させ、腹膜機構で直腸を押すことで排便を行う。

段階4：段階3から段階1への回復期間であり，内肛門括約筋が収縮して肛門管が閉じ，直腸が収縮していない安静時の状態(Fig. 2-4(i)(ii))に戻る．排泄ロボットでは，動作している直腸と腹膜の機構の動作を終了し，肛門括約筋の収縮動作で肛門管を閉じ，初期状態に戻る．

このスケジュールにもとづいて作成した動作ファイルを実行することでシーケンス制御を行い，Fig. 2-23 に示すように段階1~4までの動作を実行する．

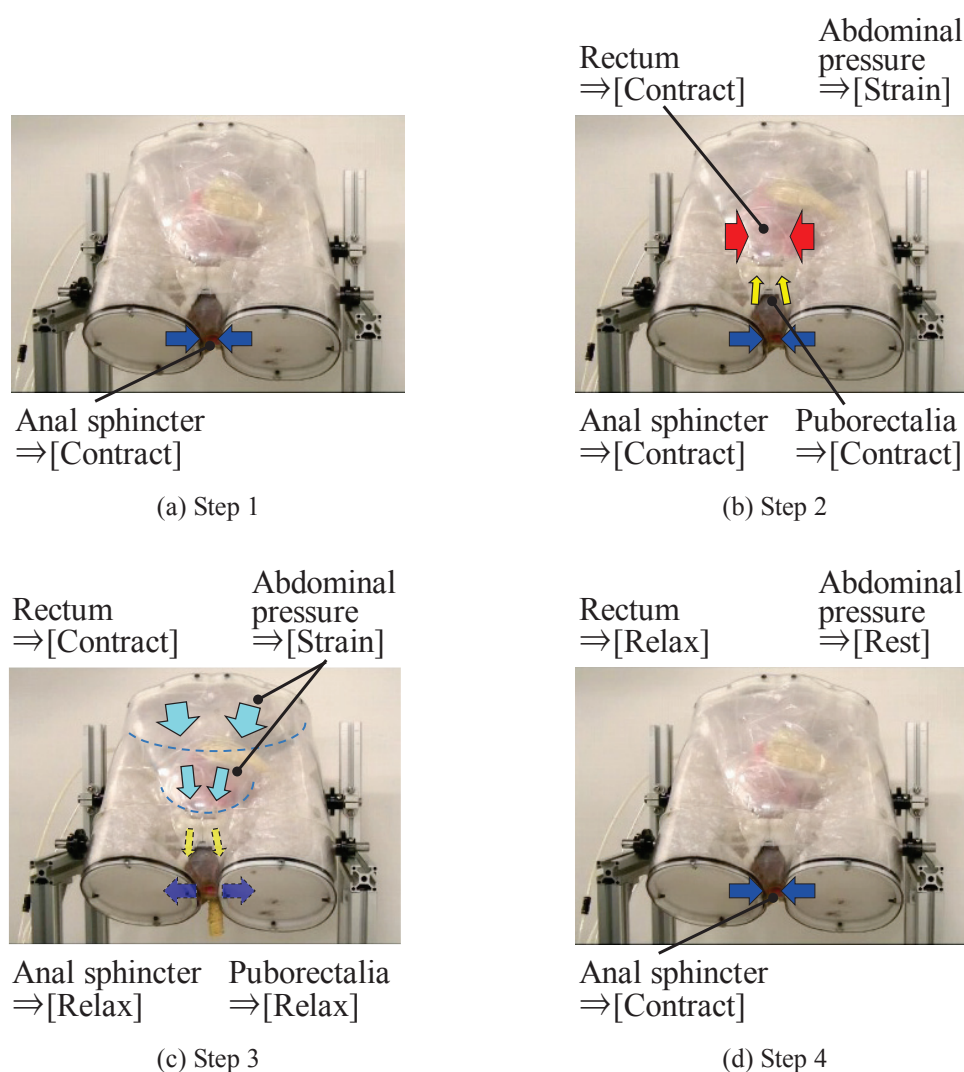


Fig. 2-23 Act of defecating (Artificial stool : Type3)

すなわち、段階1を初期状態とし、段階2を10秒間実行した後、段階3の動作を行し10秒間動作を続け、その後段階4に移行することで初期状態に戻り動作終了となる。このとき、段階2の動作時間は、直腸と恥骨直腸筋の収縮動作が完了して漏れがないか確認するための時間、段階3の動作時間は、腹圧の機構でビニール袋がトルソー内で十分に膨らみ、直腸の押し付けが完了する(腹圧による便の排出が完了する)時間となっている。

## 2.6 各機構の調整

### 2.6.1 各機構への入力気圧値

Table 2-3 に各機構への入力気圧値を示す。各値は、機構の変位量を元に、経験的に決定した。ゴムチューブで動作する肛門括約筋の機構への入力気圧値は、肛門が開いている弛緩時は0MPaで、収縮時は肛門が隙間なく閉じる0.17MPaとした。恥骨直腸筋用のMcKibben型人工筋肉への入力気圧値は、直腸肛門角が鈍角化(約135°)している弛緩時は0.10MPa、約90°となる収縮時は0.50MPaとした。また、直腸の機構の場合は、弛緩時が0MPaで、収縮時が0.50MPaとした。この時、恥骨直腸筋と直腸の機構で使用している人工筋肉は、0.10MPaで約16mm、0.50MPaで約32mm収縮する。

Table 2-3 Input value of control mechanism

Control mechanism	Actuator	Value of air pressure (MPa)	
		Relax	Contract
Anal sphincter	Rubber tube	0.0	0.17
Puborectalis	McKibben type actuator	0.1	0.5
Rectum	McKibben type actuator	0.0	0.5
		Rest	Strain
Abdominal pressure	Plastic bag	0.0	0.02

腹圧については、人間の実測値を参考にした。人間の腹圧計測法は基本的には間接的

なもので、胃の中にセンサを入れて胃内圧を測定する方法<sup>(46)(47)</sup>、生理用食塩水または蒸留水を適量入れた状態の膀胱内圧を測定する方法<sup>(48)</sup>、直腸内の圧力を測定する方法<sup>(49)(50)</sup>などがある。その中から、排泄ロボットにおいても測定が可能な直腸内圧を測定した文献<sup>(49)</sup>を参考に、ロボットの直腸部分で圧力測定を行い、コンプレッサからの圧縮空気の圧力を調整して、人間とほぼ同程度の圧力になるように設定した。以下に人間の直腸内圧と排泄ロボットの直腸内圧測定時の詳細を示す。

### a) 人間の直腸内圧

人間の直腸内圧を測定した例はいくつか報告されているが、本研究では文献<sup>(50)</sup>を参考にした。対象者は直腸や肛門、排便時に異常を認めない成人女性(10名)で、測定結果は  $75.0 \pm 36.4 \text{ cmH}_2\text{O}$  (平均値  $\pm$  標準偏差) であった。この値から、排泄ロボットの直腸内圧設定値を  $75.0 \text{ cmH}_2\text{O}$  (約  $7.35 \text{ kPa}$ ) とした。

### b) 排泄ロボットの直腸内圧測定

エアチューブ(直径  $4 \text{ mm}$ )の一端にプレッシャーセンサ(パナソニック: ADP5101)を、他端にデジタルマルチメータを設置し、その値を読み取ることで圧力を測定する。本研究では、プレッシャーセンサを直腸内の肛門から  $70 \text{ mm}$  の位置に配置し、肛門括約筋の機構で肛門管を閉じた状態にした後、腹圧の機構により腹圧を発生し、その際の直腸内圧を測定した。

直腸内圧は、腹圧の機構に送る空気圧をレギュレータで制御し、デジタルマルチメータで数値を見ながら a) で述べた設定値  $75.0 \text{ cmH}_2\text{O}$  (約  $7.35 \text{ kPa}$ ) になるように調整した。その結果、腹圧の機構の気圧値は、腹圧をかけていない安静時は  $0 \text{ MPa}$ 、腹圧をかけるいきみ時は  $0.02 \text{ MPa}$  となった。

## 2.7 排便動作実験

開発した排泄ロボットの各機構を制御し、模擬便を使用した排泄動作を実施することで、各機構の動作確認を行う。また、模擬便は性状が異なるものをいくつか用意し、動作の違いを検証する。

### 2.7.1 模擬便の製作

模擬便は、便器の洗浄性評価用に開発されたもの<sup>(51)(52)</sup>を参考に製作した。材料は米みそ、オクタン酸、水、ヒュームドシリカ(日本アロエジル：アロエジル 200)で、ヒュームドシリカは調粘剤として使用しており、この量を変えることで様々な性状の便を再現した。

便の種類はブリストル排便スケール<sup>(53)</sup>より、その性状から次の7段階に分けることができる。

タイプ1：兎糞状便【硬く兎糞状の(排便困難な)便】

タイプ2：硬い便【短く固まった硬い便】

タイプ3：やや硬い便【水分が少なく、表面がひび割れている便】

タイプ4：普通便【表面がなめらかで、適度な軟らかさの便】

タイプ5：やや軟らかい便【水分が多く、やや軟らかい半分固形の便】

タイプ6：泥状便【形のない泥のような不定形の便】

タイプ7：水様便【水様で固形物を含まない液体状の便】

タイプ1と2が便秘時の便で、タイプ6と7が下痢時の便となっており、タイプ3～5が正常な便となっている。

排泄ロボットの動作実験では、この中からタイプ1：兎糞状便，タイプ3：やや硬い便，タイプ5：やや軟らかい便，の硬さが異なる3つの固形の便と，液体状のタイプ7：水様便の合計4種類を製作し，排便させることで排便動作確認を行った．Fig. 2-24 にブリストル排便スケールを参考に製作した模擬便を示す．また模擬便の製作は次のとおりである．まず，容器にみそとオクタン酸を入れてよく混ぜた後，純水を入れて塊がなくなるまでよく攪拌する．このとき重量比は，みそ 50%，オクタン酸 2.3%，水 47.7%となっている．攪拌後，約30分以上置いてから，製作する模擬便の性状に合わせて Table 2-4 に示した配合量のシリカを入れ，むらなく混ぜ合わせる．なお，Table 2-4 に示した配合量は，みそ，オクタン酸，水の合計が 100g の場合に添加する量である．





Type 1	Type 3	Type 5	Type 7
			
Separate hard stool	Slightly hard stool	Soft stool	Watery stool

Fig. 2-24 Artificial stool

Table 2-4 Composition list of an artificial stool

Bristol stool scale	Type 1	Type 3	Type 5	Type 7
Fumed silica (g)	1.5	3.5	6.0	9.0

### 2.7.2 動作実験 I

Fig. 2-22 で示した動作を実行させ，製作した4種類の模擬便を排出させた．実験では，まず段階1の動作を実行して肛門を閉じ，S状結腸側から模擬便を入れ，直腸部分に溜めておくことで，直腸内を便で充満した状態にする．このとき排泄ロボットに入れる模擬便の量は，人間の1日に排泄される標準的な量の 200g とした．その後，動作ファイルを実行させることで段階2~4までの動作を実行させた．性状の異なる4つのタイプの模擬便について排便実験を行った様子を Fig. 2-25 に示す．また段階3を10秒間動作さ



せそのとき排出された模擬便の量を Table 2-5 に示す。

肛門括約筋と恥骨直腸筋の収縮運動により排便抑制を行う段階2では、どのタイプの模擬便でも便が排出されなかった。一方、直腸の収縮運動と腹膜の運動で排便が行われる段階3では、タイプ3, 5, 7では模擬便が排出されたが、最も硬いタイプ1では排出を確認できなかった。

タイプ1の模擬便は、水分が少ない硬い状態の便で、表面に水気がないため、腹圧で直腸が押されても直腸内を滑らず、その場で押しつぶされていた。このタイプ1の便は便秘時の状態のもので、人間の場合でも排出が困難な便であるため、排泄ロボットの動作機構で、人間の排便状況を再現できたと考えられる。

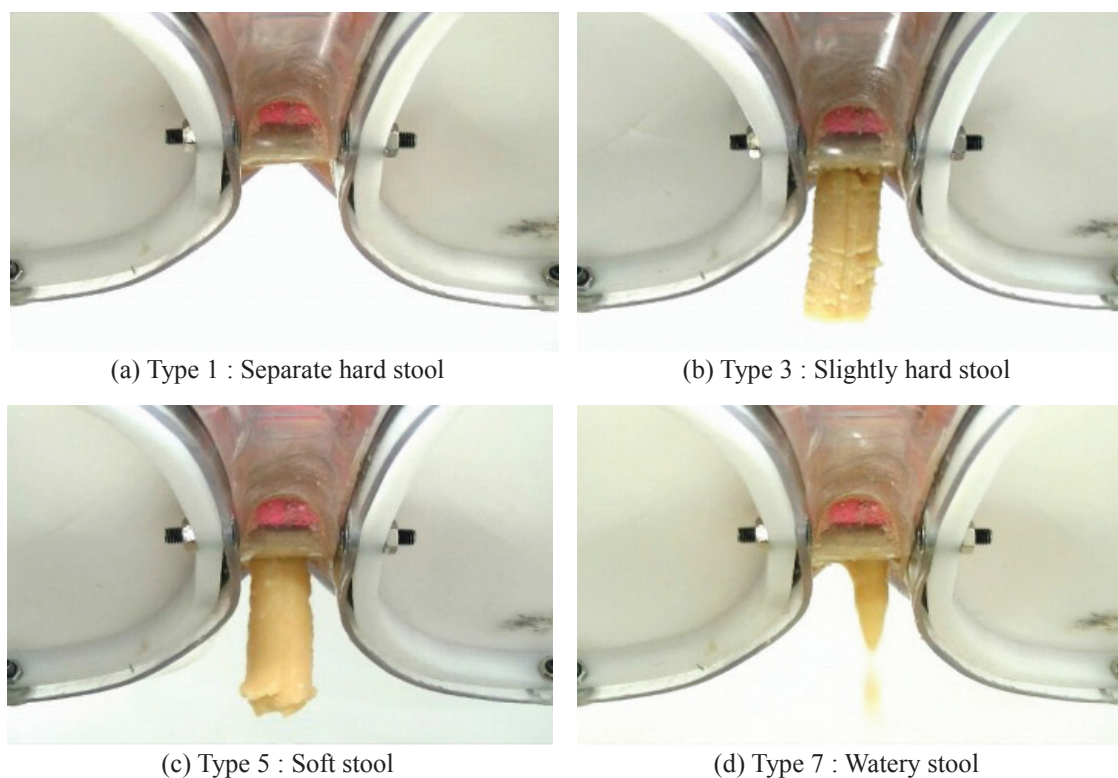


Fig. 2-25 Evacuation of artificial stool

Table 2-5 Artificial stool output

Bristol stool scale	(a) Type 1	(b) Type 3	(c) Type 5	(d) Type 7
Stool output (g)	0.0	53.5	65.7	105.3

Table 2-5 に示した模擬便の排出量について、排泄ロボットには 200g の模擬便を入れていたが、各タイプの排出量は、タイプ 1 は排出されず 0g、やや硬いタイプ 3 が約 54g、軟らかいタイプ 5 が約 66g、液体状のタイプ 7 が約 105g となった。便を排出する段階 3 の動作は 10 秒間であり、腹圧の動作による直腸の押し付けは十分にできていたが、多くの便が排出されなかった。

そこで原因を検証するため、各動作機構について次のような動作確認を行った。

### 2.7.3 動作実験Ⅱ

まず肛門括約筋について、模擬便を入れた後、他の動作機構を使用しなかった場合、模擬便がどのようなになるか確認をした。液状であるタイプ 7 は重力の影響で排出されたが、他の固形便であるタイプ 1, 3, 5 は直腸内に留まって、出てくることはなかった。

恥骨直腸筋のみ動作した場合、便の排出を抑制できるか確認したところ、タイプ 1, 3, 5 は上述同様、直腸内に留まり保持できていた。タイプ 7 に関しては、多少液体の漏れが確認されたが、便の排出は抑制されていた。

次に直腸の動作を確認したところ、肛門が開いた状態でも直腸内に残るタイプ 1, 3, 5 について、直腸のみ動作した場合、便の多くが Fig. 2-26(a)のように上方向の S 状結腸側に移動し、肛門側にはあまり移動せず、体外にまで排出されなかった。

また、腹圧の動作機構についても、便の動きはほぼ同様で、腹圧で押された直腸内の

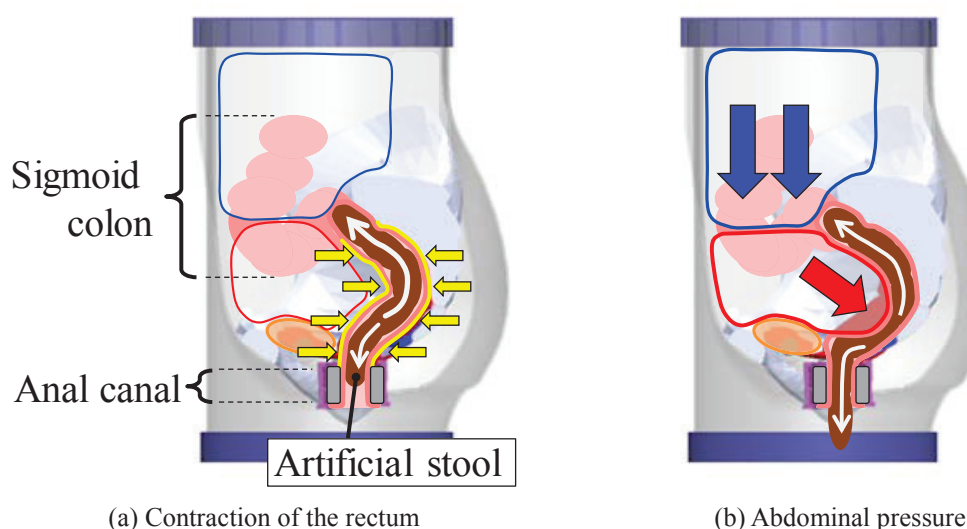


Fig. 2-26 Movement of artificial stool

便は, Fig. 2-26(b)に示すように肛門側とS状結腸側の双方に押し出されていた. ただし, 腹圧の場合は十分な圧が発生していたため, タイプ1を除いて模擬便はある程度体外に排出されていた.

以上の結果から, 肛門括約筋と恥骨直腸筋の動作機構により, 直腸内の便の排出を抑制して, 一時的に保持する排便抑制動作は実現できたと考えられる. しかし, 直腸と腹圧の動作機構により便の排出を行う排便動作については, 直腸内の便がしっかりと排出されなかったため, 動作の実現が不十分であるという結果となった.

実験の結果から, 今後, 排便動作を実現させるためには, 次のような改良が必要であると考えられる. 2.2 節で述べたように, 人間の場合, 直腸に便が溜まり便意が生じたときに直腸が収縮し, その後腹圧をかけて排便を行っている. しかしながら, 現状の排泄ロボットの機構のように, 直腸全体が均等に収縮した場合, Fig. 2-26 に示したように上下に移動してしまい, 下方の肛門から便があまり排出されなくなってしまう. そのため, この直腸が収縮するときに上のS状結腸側に便が移動しないよう, Fig. 2-27 に示すように直腸の上部分が閉じるように大きく縮まっていると考えられる. この場合, 肛門管が開くと, 便は肛門側へ押し出され, さらに腹圧をかけた場合でも, 便がS状結腸側に移動しないため, 便の排出は促進される. 従って, 今後は人間の直腸の動きについてさらに調査をし, 上述のような動作をするか確認を行い, その動きを実現するために直腸の動作機構を改良していく必要がある.

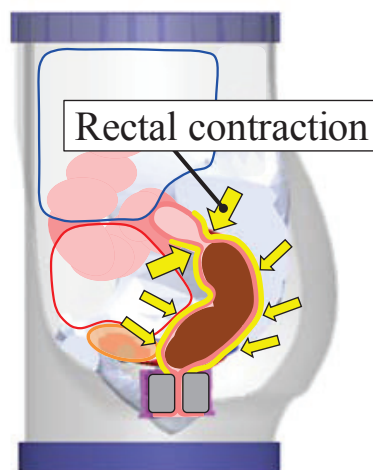


Fig. 2-27 Prospective move of rectal contraction

### 2.8 まとめ

本章では、人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータである排泄ロボットの開発を行なった。本装置は人間の排便に関わる骨盤部周辺の器官やそれらの形状・動作を再現した原寸大の人体部分モデルである。

まず解剖学的知見から、人間の排泄機構について調査し、排泄に関係する器官や筋肉の構造や動作について確認した。そこから、排泄に大きく関わる器官として「肛門括約筋」、「恥骨直腸筋」、「直腸」、そして「腹圧」の4つの器官について、動作を機構により再現することで、便が漏れないようにする排便抑制動作と、便を排出する排便動作を排泄ロボットで行わせることにした。腹圧については、文献より人間が息んだ時の直腸内圧を参考に、排泄ロボットでも直腸内の圧力を測定し調整した。排泄の動作は、4つの段階に分けて制御し、模擬便を使った動作実験で各機構の動作確認を行った。模擬便は4種類の硬さの異なるもの(タイプ1: 兎糞状便, タイプ3: やや硬い便, タイプ5: やや軟らかい便, タイプ7: 水様便)を製作し、それぞれ排便動作で排出を行った。実験の結果、最も硬いタイプ1の便が排出されず、またその他の便についても、排出量が直腸内に入れた量に比べ、半分以下であり、十分に排出が行われなかった。

そこで要因を調べるために、各動作機構をそれぞれ動かし確認を行った。まず肛門括約筋と恥骨直腸筋の動作機構では、便の排出の抑制が行われ再現ができていた。しかし、直腸と腹圧の動作機構については、便排出時に直腸内の模擬便が、肛門側のみではなくS状結腸側である上方向にも移動してしまっていることが分かった。そのため、直腸の動作機構について改良案を思案した。

今後は改良案をもとに、排泄ロボットの動作機構を改良することで、より人間に近い排泄動作を再現でき、宇宙実験デモ装置として利用できると考える。また、本装置を活用することで、宇宙実験を行う宇宙用トイレシステムと、介護用トイレシステムの検証を行っていく。さらに、著者らが開発したトイレシステム以外の、他のトイレ開発においても、検証に利用できると思われる。

## 第3章 宇宙用トイレシステムの 開発

---

### 3.1 宇宙用トイレシステムの概要

第1章で述べたように、宇宙船内の排泄では、排泄物の便が皮膚に付着したままになることや、臭気、排気ファンの騒音といった問題がある。これら排泄時の問題を解決する新しいトイレシステムとして、装置を臀部に密着させて使用する「臀部密着型」の装置で、また付着した便を取り除く機構を取り入れたトイレを開発した。これらの機構は、地上の介護現場でも活用できると考えられる。本章では、宇宙での使用を前提とし、姿勢の維持が難しい微小重力環境でも利用できるよう、全体位対応した体に取り付けて使用する装着型トイレの開発を行なった。

装着型トイレのコンセプトは、上述のとおり、装置を臀部に密着して排泄を行うことで、排泄物を外気に出すことなく直接回収することができ、臭いの拡散も防ぐことができる。また付着便を取り除く方法として、ローラで排泄物を入れる収納袋の口を閉じると同時に、ローラを肛門に触れながら閉じるようにすることで、皮膚に付着した便を取り除けるようにする。このコンセプトをもとに、臀部に密着させる密着部と、ローラの開閉を行う開閉機構部に分けて設計を行なった。

装着型トイレの外観を Fig. 3-1 に、構成を Fig. 3-2 に、そして使用を Table 3-1 に示す。本装置は、体に装着することで排便を行う採便器であり、密着部(Contact part)と開閉機構部(Opening and closing mechanism)から成り、装置の大きさは、122mm×165mm×197mm(=幅×奥行×高さ)である。



Fig. 3-1 Overall view of Wearable toilet

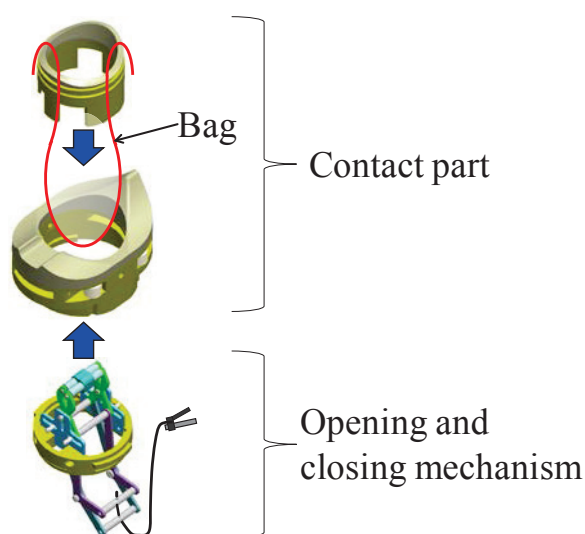


Fig. 3-2 Configuration of Wearable toilet



Table 3-1 Specification of Wearable toilet

Name	Wearable toilet (Toilet system for space)
Dimensions	H197×D165×W122 mm
Weight	730g
User	Astronaut / Cosmonaut
Method of wearing	Wearing the device to sling belt over shoulder and to position it to anus in order to stool into the bag
Function	<ul style="list-style-type: none"> <li>• To prevent odor dispersion with the device close to buttock</li> <li>• To open and close the bag, and to remove feces attached buttock with rollers</li> </ul>
Interface	Control lever

使用時は、まず便を回収するための収納袋を、開閉機構を開いた状態にして密着部に取り付ける(Fig. 3-3(a)). その後、密着部中央にある穴に肛門の位置を合わせながら、ベルトを肩に掛け、装置を体に固定する。このとき装置と臀部を密着させることで、排泄物を外に出すことなく捕獲し、臭気の拡散を防ぐ(Fig. 3-3(b)). 排便後は、開閉機構で収納袋を閉じ、装置を体から外して、便の入った収納袋を取って処理をする(Fig. 3-3(c)).

### 3.1.1 密着部の構造

密着部は、実際に人の皮膚に密着する上部と、開閉機構との接続部分および装置と体を固定するベルトの取り付け部分である下部から成る本体部品と、袋を取り付けるための円筒状部品(Cylindrical part)に分かれる。密着部の構成を Fig. 3-4, Fig. 3-5 に示す。

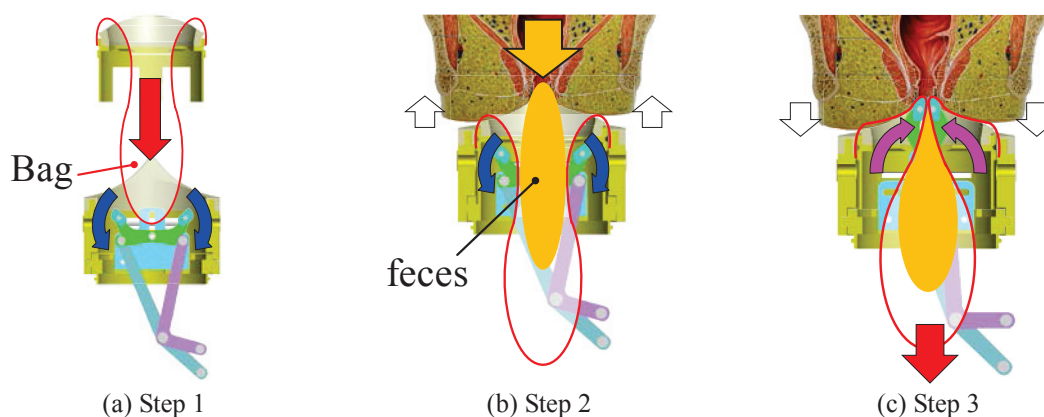


Fig. 3-3 Usage of Wearable toilet



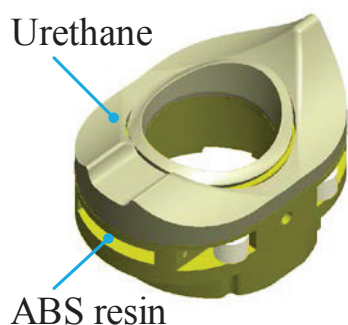


Fig. 3-4 Overall view of contact part

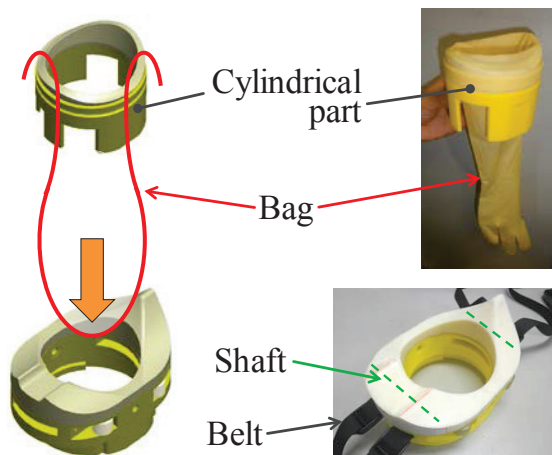


Fig. 3-5 Configuration of contact part

上部は皮膚に触れるため、柔らかいウレタン樹脂で製作している。製作はまず CAD 上で上部の設計を行い、その形状からウレタン樹脂を流し込む型を作る。型は 3D プリンタ(Stratasys 社 : Dimension BST 768)を使用し、CAD で設計を行ったものを ABS 樹脂によって造形した。ウレタン樹脂には、人肌のゲル原液 硬度 5(株式会社エクシールコーポレーション)を使用している。

上部の形状について、試作段階では Fig. 3-6 に示すように前後両端に突起部分を設けており、肛門に大きく被せるように成形したが、使用した際に、前方の突起が尿管を押さえつけてしまい、排尿しにくくなっていた。そのため、前方の突起を Fig. 3-7 のように形状変更を行っている。

密着部の下部は、上部の型と同様に 3D プリンタで造形した ABS 樹脂製の部品であり、前後にはベルトを通すためのシャフト(φ4mm, 長さ 80mm)を取り付けている。

上部と下部は接着してあり、中央には直径 95mm の穴をあけている。この穴に円筒状部品を挿入して配置することで収納袋を取り付ける(Fig. 3-5)。円筒状部品は、大きさが外径 94mm, 内径 73mm, 高さ 75mm であり、本体部中央の穴に入るようになっている。構造は本体部品と同様に上側がウレタン樹脂製、下側が ABS 樹脂製になっており、製作方法も同様である。

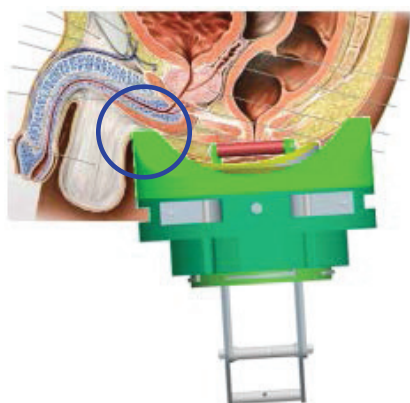


Fig. 3-6 Configuration issue

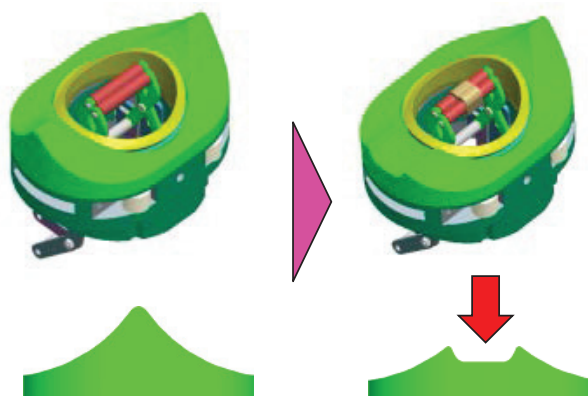


Fig. 3-7 Change in configuration

### 3.1.2 開閉機構部の構造

開閉機構部の構成を Fig. 3-8 に示す。開閉機構部は、左右のローラ(Roller)により、装置に取り付けた収納袋の袋口を開閉する。2本のシャフト(Shaft)が左右にスライドすることで開閉しており、初期状態はシャフトがバネによって一番内側に移動して、閉じた状態にしてある(Fig. 3-9(a), Fig. 3-10(a))。ローラの開閉には自転車用のブレーキレバー(Brake lever)を用い、レバーを握ることでワイヤーが引かれ、下方の板が連動して動き、シャフトが外側方向にスライドすることで、ローラが開いた状態になる(Fig. 3-9(b), Fig. 3-10(b))。排泄時は、装置装着後にレバーを握り、開いた状態にして使用し、排泄後はレバーを放すことで袋口を閉じて、袋内の便が外に出ないようにする。また、ローラが肛門に触れながら開閉することで、肛門に付着した便をローラで挟み、取り除けるようにした。シャフトは前後にあるプレート(Plate)に空けた溝穴をガイドとして左右にスライドしている。前後のプレートは密着部と接続するための土台部(Base)に取り付けている。土台部は外径 106mm の円盤型で、ABS 樹脂で製作しており、密着部と接続する部分である。密着部と開閉機構部の取り外しが可能であるため、排泄後、収納袋を開閉機構部で閉じた状態にしたまま回収することができる。

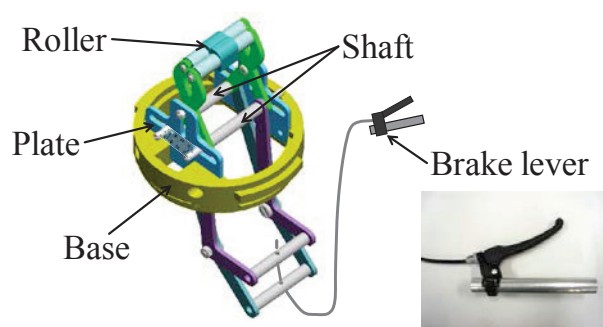


Fig. 3-8 Configuration of opening and closing mechanism

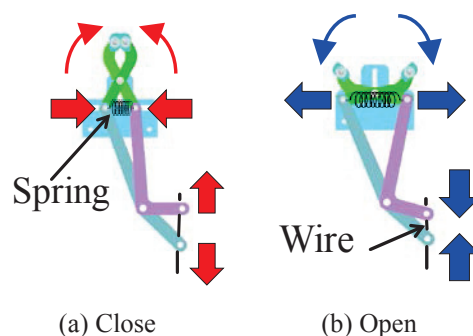


Fig. 3-9 Opening and closing mechanism 1



(a) Close



(b) Open

Fig. 3-10 Opening and closing mechanism 2

### 3.2 検証実験の概要

開発した装着型トイレを使用して排泄を行い、開閉機構の機能や使用感を確認する検証実験を行った。また新しい機能として、吸引装置を使い、臀部を器具に吸着させることで、密着性を向上させる「吸着機構」の検証についても、同様に実験を行った。

開閉機構の検証は、3.1 節で述べた装着型トイレを使用し、吸着機構については、吸引器とボトルをつないだ吸着型トイレを製作し、吸着があるときとないときとの比較を行うため、吸引器をつないでいないボトル容器のみのボトル型トイレを用意し、実際に排泄を行うことで検証する。

### 3.3 使用器具について

本実験では収納袋として、Fig. 3-11 に示す伸縮性のあるラテックス性のゴム手袋を使用した。また各トイレを使用する際、座位状態を維持し排泄を行うため、Fig. 3-12 のようにアルミフレームを組んだ実験用のいすを準備した。



Fig. 3-11 Latex glove



Fig. 3-12 Aluminum frame chair

各トイレ装置について以下に述べる.

### 3.3.1 装着型トイレ

装着型トイレの概要は, 3.1 節で述べたとおりである.

### 3.3.2 吸着型トイレ

吸着型トイレは, Fig. 3-13 に示すように, プラスチック製のボトル容器(Bottle, 高さ 300mm, 直径 170mm)と吸引器(Suction machine, シースター株式会社: 低圧接続吸引器)(Fig. 3-14)をチューブで繋げており, 容器内を減圧することができる. 容器と吸引器の間には圧力計(株式会社妙徳: デジタル表示付圧力センサ MPSR33RCNGAT)を設置し, 圧力を確認しながら使用できるようにした. 容器の口には, 底があけて円筒状にしたカップ(Cup)を取り付けており, そのカップに収納袋としてゴム手袋を被せ, 排泄を行う.

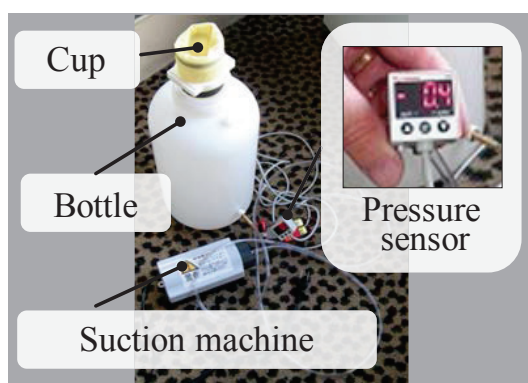


Fig. 3-13 Overall view of Suction type toilet



Fig. 3-14 Suction machine

カップは外径 65mm, 内径 60mm で底をあけた状態の高さは 95mm である。カップの先端には 3D プリンタで製作した ABS 樹脂製の部品を取り付けており, 臀部に密着しやすいよう, 表面形状を曲面にし, 臀部の谷間を考慮した突起を後方つけてある(Fig. 3-15).

使用方法は, まず肛門をカップ口に合わせて臀部に密着させ, 吸引器を起動し, 吸引を開始する(Fig. 3-16(i)). その後ボトル容器内が減圧され, カップに被せた収納袋であるゴム手袋が膨らみ, 臀部を吸着させる(Fig. 3-16(ii)). このときの, 吸着型トイレと臀部の密着性向上および, 排泄促進効果を検証する。



Fig. 3-15 Contact cup

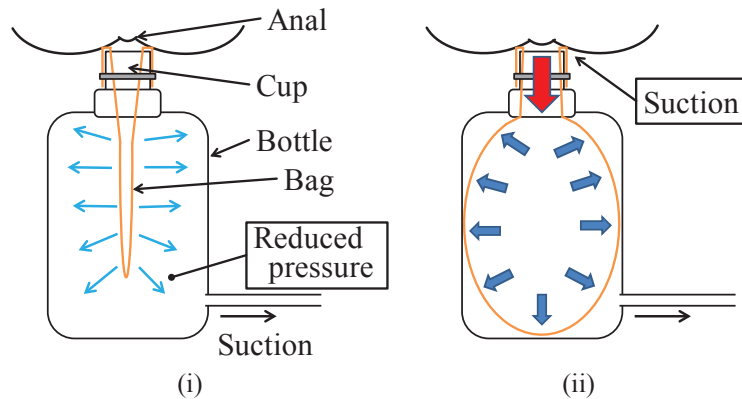


Fig. 3-16 Suction system

### 3.3.3 ボトル型トイレ

ボトル型トイレは, Fig. 3-17 に示すように, 吸着型トイレから吸引器と圧力計を取り外したもので, 代わりに装着型トイレと同様ベルトで体を固定するために, ベルトの固定具(Fig. 3-18)を取り付けた。

## 3.4 検証実験結果

Fig. 3-19 に検証実験時の様子を示す。装着型トイレを使用して開閉機構を検証し, また吸着型トイレとボトル型トイレをそれぞれ使用し, 比較することで吸着機構を検証した。

以下にそれぞれの検証結果と, 実験によって明らかになった問題点を述べる。

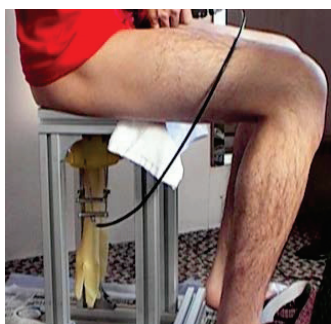




Fig. 3-17 Bottle type toilet



Fig. 3-18 Attaching part of belt



(a) Wearable toilet



(b) Bottle type toilet

Fig. 3-19 Verification experiment

### 3.4.1 開閉機構の検証

装着型トイレを使用した結果、開閉機構による袋口の開閉が確認できた。また Fig. 3-20 のように排便後、閉じられた袋口の表面に便が付着しており、これによりローラは肛門に触れながら開閉していることが確認できた。そのため、宇宙環境などで便が肛門に付着したままでも、開閉機構によりローラで挟んで便を取り除くことができると思われる。一方で、装着型トイレはベルトにより体に固定して使用しているが、このとき体の状態を変えるとベルトが緩み、密着部が臀部から離れ、装置がぶら下がった状態になってしまうなど、装着面に関して不安が残る結果となった。またベルトを強く締め、装置を臀部にしっかり押し付けて密着させた場合、開閉機構のローラが臀部に押さえつけられ、閉じにくくなることもあった。現状のローラは Fig. 3-9 に示すように上に凸の弧を描く軌道で開閉をしているので、臀部の形状に合わせた動作をする必要があると考えられる。

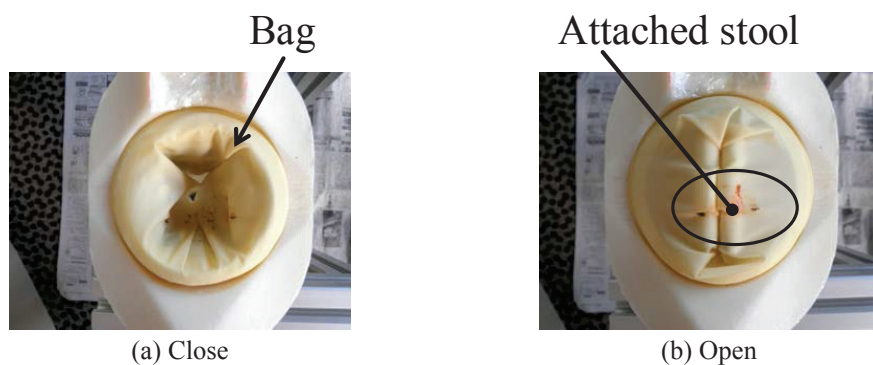


Fig. 3-20 Attached stool

### 3.4.2 吸着機構の検証

吸着型トイレとボトル型トイレをそれぞれ使用し、比較することで吸着機構の機能を確認した。

ボトル型トイレは、装着型トイレ同様ベルトで体に取り付けたが、カップを肛門に密着させた際、強く押し付けると、骨盤の坐骨部分に当たり痛みがあった。

吸着型トイレでは、カップの口と臀部を密着させた後、減圧を開始した。圧力計で 5kPa から臀部が引っ張られている感覚がし、圧が安定してきた 8kPa で排便を行った。便は利用者自身が息まなければ、出ることはなかったが、排便時、吸引なしのボトル型トイレよりスムーズに排出できた感覚があったため、吸引による排便促進効果がある可能性が示唆された。

装置との密着性については、吸着によって向上したように感じられたが、体を動かしてしまうと、装置と臀部との間に隙間ができ、袋内に空気が入ってしまい、吸着の効果がなくなってしまった。これは吸引力が十分ではない可能性がある他に、臀部に密着するカップの先端形状が臀部形状に合っていなかったため、隙間が生じやすかったためだと考えられる。そのため、ボトル型トイレの問題を含め、臀部に密着させるカップの口径や先端の形状について、検討する必要がある。

### 3.4.3 検証実験のまとめ

上述の検証結果から、装着型トイレや吸着機構の改良を行い、開閉機構が臀部にひっかからずに動作させる、また臀部の形状に合わせて、密着させる部分の形状を検討するためには人間の臀部の形状を調べる必要があることが分かった。この臀部形状を調べる



ことで、開閉機構の軌道や臀部との密着部分を新たに設計でき、装着型トイレや吸着機構が実用的に利用できると思う。

### 3.5 臀部形状と排泄動作について

前述のとおり、本研究では人間の臀部形状は重要な要素であると考えられる。この臀部の形状について、第2章で述べたとおり人間は排泄時、息むことで腹膜を直腸に押し付け、便を排出しているが、このとき Fig. 3-21 に示すように直腸下の肛門やその周辺部分も押し下がるため、臀部の形状が変化している。そこで息んだ時の臀部形状と肛門周辺の動きについて計測を行った。

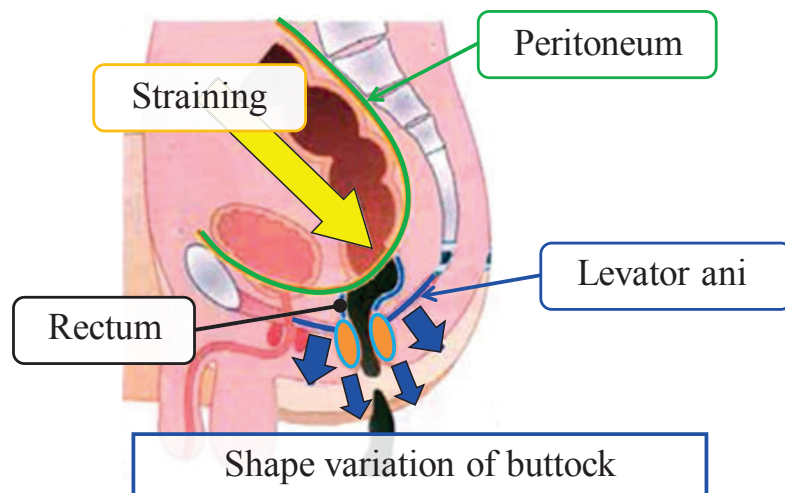


Fig. 3-21 Shape variation of buttock

### 3.6 臀部の形状計測方法

形状計測には非接触ハンディ 3D スキャナ(Artec Group : Artec MHT)を使用し、対象である臀部表面の形状データを習得する。計測対象者には便意を感じた状態で、排泄時と同じように息んでもらい、臀部の形状が変化しているところを計測した。

#### 3.6.1 3次元形状計測器について

形状計測で使用した 3D スキャナ「Artec MHT」の外観を Fig. 3-22 に、仕様を Table. 3-1 に示す。本計測器は、15 フレーム/秒のスピードで対象物(被写体)を計測し、フレーム

ごとの 3D 画像から、自動的に 3D メッシュモデルを製作する。計測方式は、Structured light 3d reconstruction 方式という光学的手法を採用しているため、レーザー光を使った計測器と異なり、目や肌に対して安全に使用できる。ただし一定かつ安定した光源が必要であり、対象物の表面が透明である場合や、非常に黒いものの場合など、スキャンができないものもある。本研究の計測では、排出された便をスキャンすることができなかった。



Fig. 3-22 Artec MHT

Table. 3-2 Product specification

Name	MHT	Working distance	0.4～1.0 m
3D resolution, up to	0.5 mm	Exposure time	0.0002 s
3D point accuracy, up to	0.1 mm	Video frame rate, up to	15 fps
3D accuracy over distance, up to	0.15% over 100 cm	Calibration	no special equipment required
Linear field of view, HxW @ closest range	214×148 mm	Data acquisition speed, up to	288,000 points/s
Linear field of view, HxW @ furthest range	536×371 mm	Output formats	OBJ, STL, PLY, WRML, ASCII
Angular field of view, HxW	30×21°	Processing capacity	40'000'000 triangles /1GB RAM
Texture resolution	1.3 mp	Dimensions, HxDxW	180×187×260 mm
Colors	24 bpp	Weight	1.6 kg
Light source	flash bulb (no laser)	Power consumption	12 V, 40 W

### 3.6.2 計測時の姿勢について

計測を行う際、洋式便座に座るような(a)座位状態の他に、(b)四つん這い状態と(c)仰向け状態での計測も行った。これにより普段と異なる重力状況での様子を計測することで、微小重力下の宇宙飛行士や、介護現場の寝たきり患者などの状況を模擬し、(a)座位との比較を行う。各姿勢において、脚は(a)座位と同様の膝、腰を90°に曲げた状態にした。各姿勢とその時の臀部の様子を Fig. 3-23 に示す。

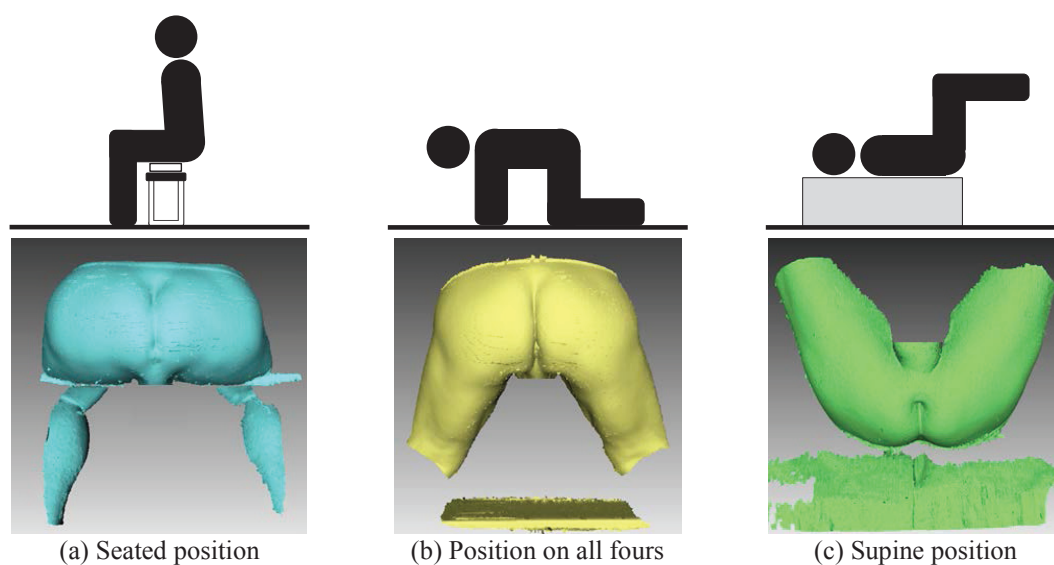


Fig. 3-23 Posture

### 3.6.3 測定環境について

測定環境について Fig. 3-24 に示す。3D スキャナの測定距離は0.4～1.0mである。今回、排泄時に肛門が押し出される様子を計測するため、肛門を中心にその周りが映る距離を検討した結果から、スキャナと測定対象物との距離を0.7mとした。スキャナで撮影されているフレームの映像は、スキャナにつなげられてPC画面でリアルタイムに確認することができたため、画面を確認しながら計測対象者には位置を調整してもらった。

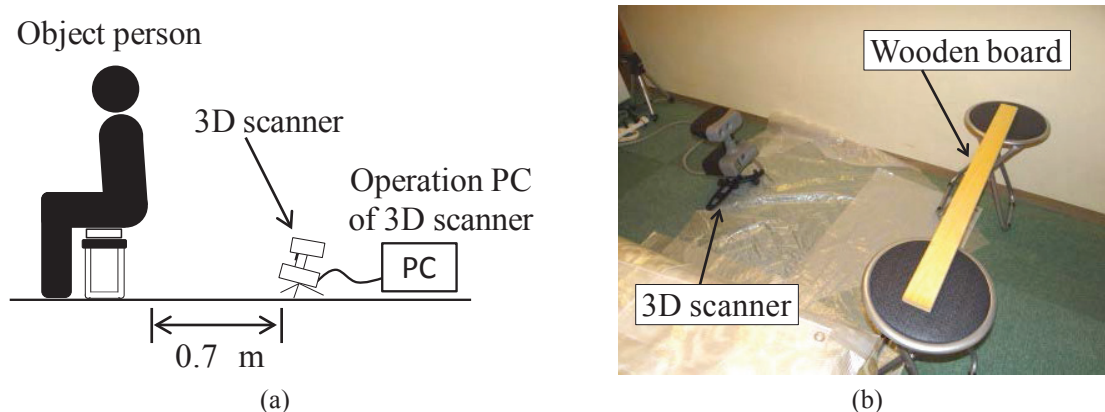


Fig. 3-24 Metering experiment environment

測定距離 0.7m の場合、PC 画面には臀部の幅約 200mm の部分が映し出されている。座位を撮影する場合、2 つの折りたたみ椅子で支えられた木材(900×60×18mm=長さ×幅×厚み)に、肛門が見えるような姿勢で座ってもらった。3D スキャナは床に設置し、上に傾けてアングルを調整した。四つん這いの場合、測定対象者の臀部に合わせて、3D スキャナのスタンドの高さを調整した。仰向けの場合、測定対象者にベッドで寝た状態になってもらい、腰・膝が 90°になるよう脚を動かし手でおさえてもらい、その状態の臀部位置に合わせて、3D スキャナを配置した。測定対象者は、便意がある状態で、排泄するときと同様に息んでもらう。そのため、実際に排泄をしても排泄物を処理できるよう、床にはビニールシートを敷いている。

本測定ではプライバシーの面を考慮し、測定開始から終了まですべて測定対象者一人が行っている。測定の協力者はスキャナの配置などの準備を行った後、部屋から退出してもらい、測定が終了するまで別室で待機してもらった。測定対象者は、まず測定姿勢になり、手元においた操作用 PC の画面を見ながら、スキャナの測定範囲に肛門とその周辺部分が映るように姿勢を移動する。姿勢を維持しながら PC 操作でスキャニングを開始し、排泄を行うように息んでもらう。息んだ状態から安静状態に戻った後、PC 操作でスキャニングを終了し、データを保存する。今回、2 名の計測対象者に、各姿勢について 1 回ずつ測定してもらい、合計 6 つのデータを習得、データ処理を行った。

### 3.7 形状計測データ処理

3D スキャナでスキャンして得られた複数枚のフレームから、肛門が出ていない安静時のものと、息んで最も肛門が押し出されている突出時のものを抽出し、その 2 つを比

較することで、実際に押し出された肛門と肛門周辺の形状、動作範囲、押し出された変位量を調べた。以下に具体的なデータ処理方法を述べる。

### 3.7.1 データ処理の流れ

データ処理の流れを Fig. 3-25 に示す。3D スキャナを使用した(i)スキャンを行い、(ii)習得したフレームデータから、肛門が出ていない安静状態のもの(Fig. 3-26(a))と、息んで肛門が突出した状態(Fig. 3-26(b))のフレームデータ(表面データ)を抽出する。抽出した2つのデータを Fig. 3-26(c)のように(iii)位置合わせすることで、肛門とその周辺部分がどの程度変化したか(iv)距離比較を行う。(iii)位置合わせと(iv)距離比較は3D スキャナ専用のソフトウェアによって処理を行わせる。(iv)距離比較の処理を行うことによって、Fig. 3-27 のような距離マップが出力される。各姿勢について距離マップを作成し、その特徴を比較する。作成した距離マップをもとに肛門、肛門周辺の動作範囲、動作変位量を調べるため、(v)座標点を出力し、グラフ化する。

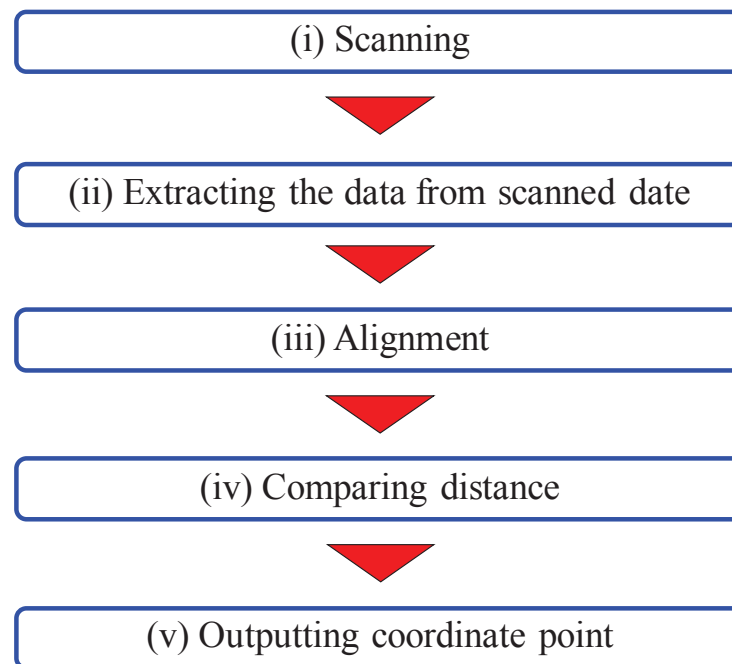


Fig. 3-25 Process flowchart

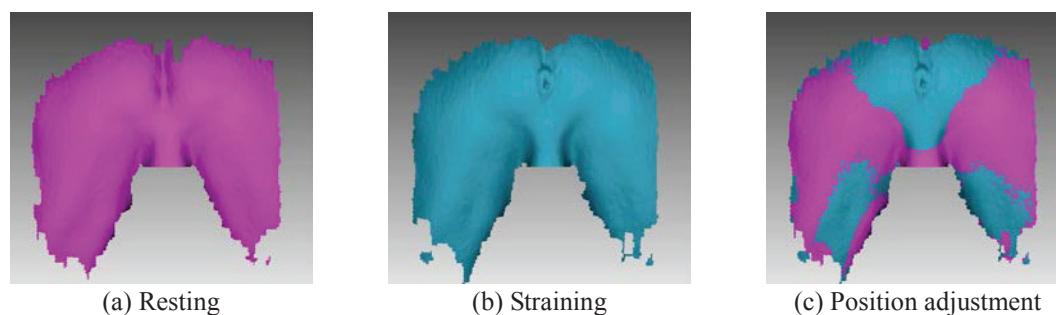


Fig. 3-26 Frame data

### 3.8 形状計測結果

計測して習得したデータをデータ処理して得られた、各姿勢の距離マップ、動作範囲、動作変位量について、それぞれの結果を以下に述べる。

#### 3.8.1 距離マップ

距離マップは3D スキャナ専用ソフトウェア上で出力できるもので、これは表面データ間の距離の大きさによって色分けした図である。マップの色は、青色(負の距離)から赤色(正の距離)へ変わり、緑色は差がゼロに近いことを表している。この色はソフトウェア中の「スケール誤差(mm)」の値を変えることで、距離のスケールを調整し、この値を超えるすべての値は、負の場合は水色、正の場合は黄色で表示される。今回の測定では、各姿勢において動作範囲や動作した臀部の形状を見るため、スケール誤差を1.0mmとし、図中の黄色い部分が息むことによって変化し、突出した動作部分とした(Fig. 3-28)。またスケール誤差の違いを見るため、Fig. 3-29 にはスケール誤差 3.0mm の図を示す。

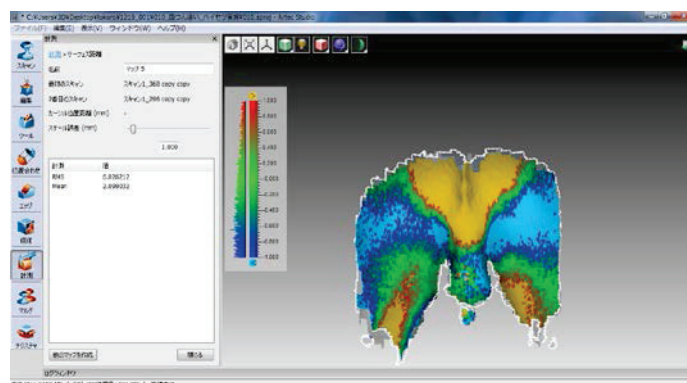


Fig. 3-27 Measuring tools – Surface distance map



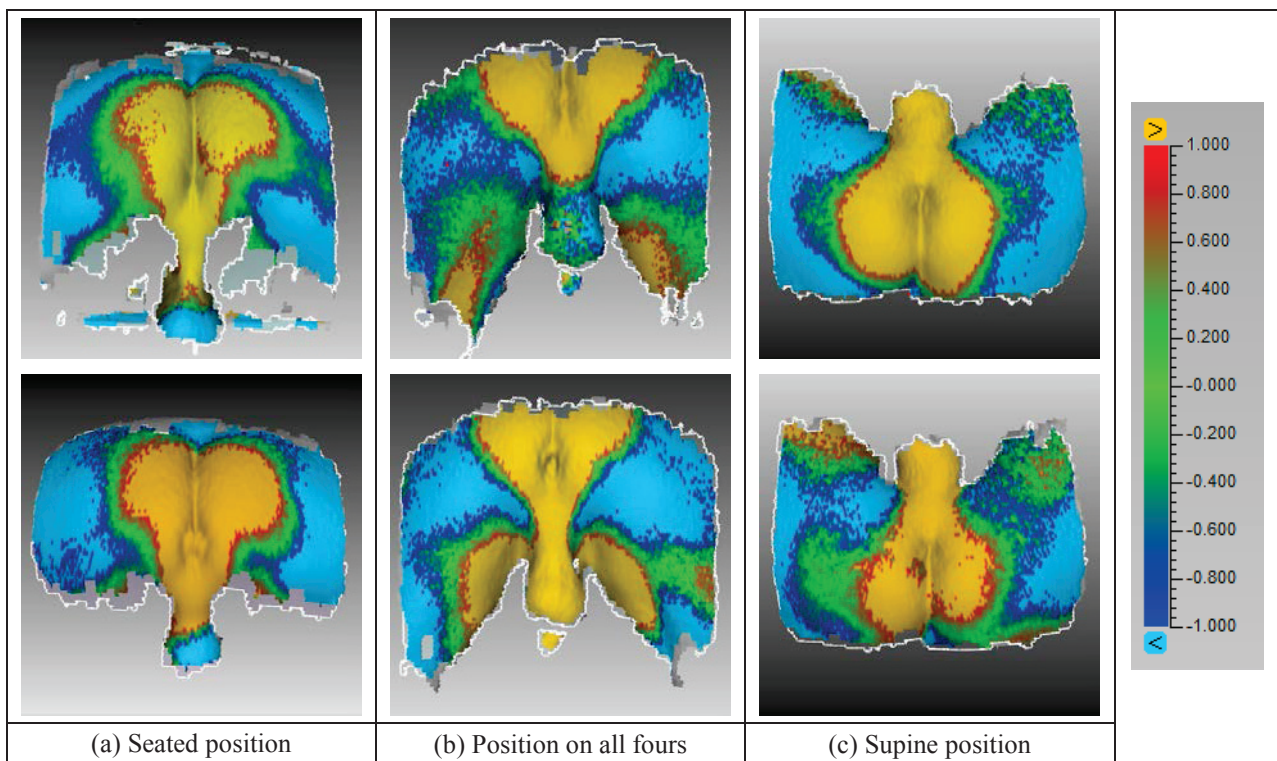


Fig. 3-28 Distance map (scale : 1.0mm)

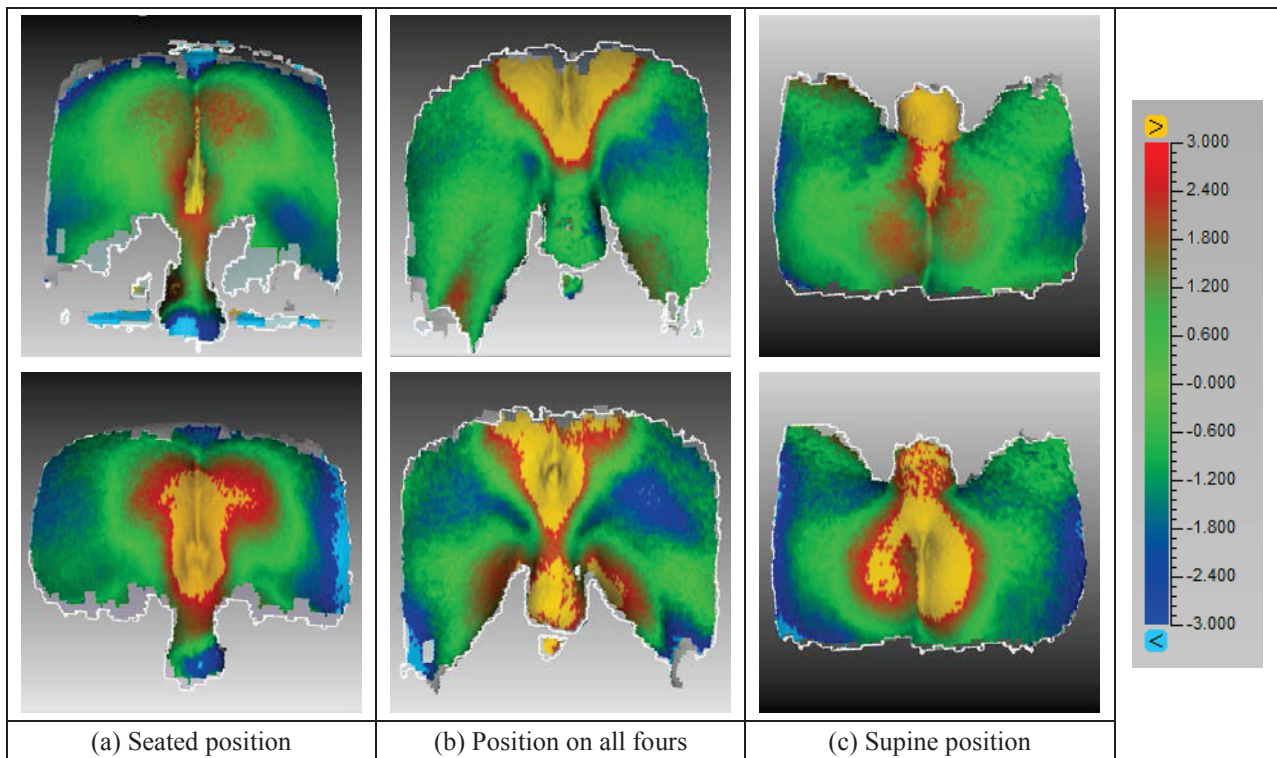


Fig. 3-29 Distance map (scale : 3.0mm)



## 3.8.2 動作範囲

距離マップにより各姿勢での臀部の動作部分を表すことができた。3D スキャナ専用ソフトウェアでは表面データ上の任意の点座標を出力することができるため(Fig. 3-30), 色の違いから臀部が動作して変化した範囲を調べ, 座標で表示した。

動作範囲の測定では, 距離マップでスケール誤差が 1.0mm の図(Fig. 3-28)を使用し, 赤色と緑色の境界線上の点座標を出力して, グラフ化することにした。なお, グラフ化する際の座標設定は, Fig. 3-31, Fig. 3-32 のように肛門の位置を座標の原点とし, 臀部を正面から見たときの背中方向 (Fig. 3-32(a)上方向) を Y 軸方向, 右手方向を X 軸方向, そして肛門が押し出される方向を Z 軸方向とした。

点座標を出力し, グラフ化した結果を Fig. 3-33 に示す。今回, 姿勢別に表示をし, 姿勢ごとの特徴があるか比較をした。

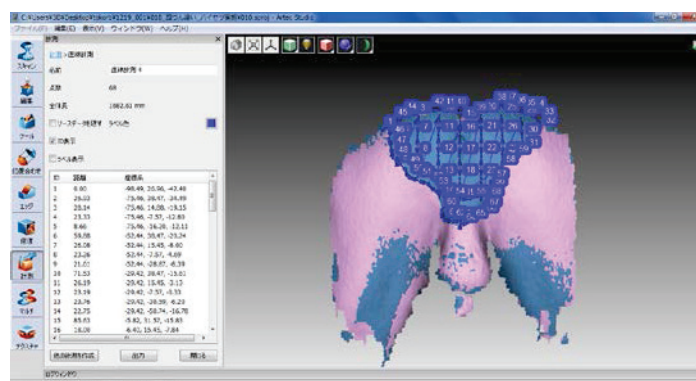


Fig. 3-30 Measuring tools – Linear distance

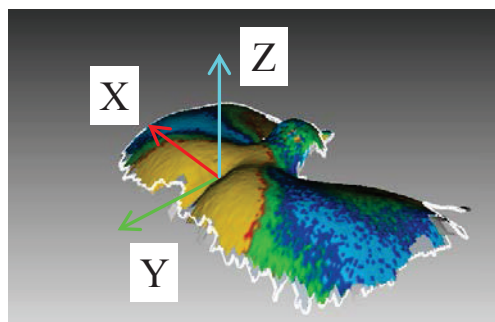
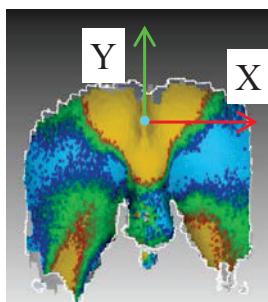
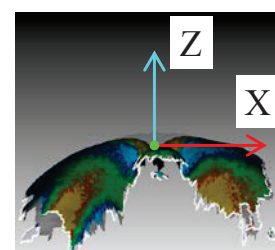


Fig. 3-31 Coordinate setting 1



(a) Front view



(b) Bottom view

Fig. 3-32 Coordinate setting 2

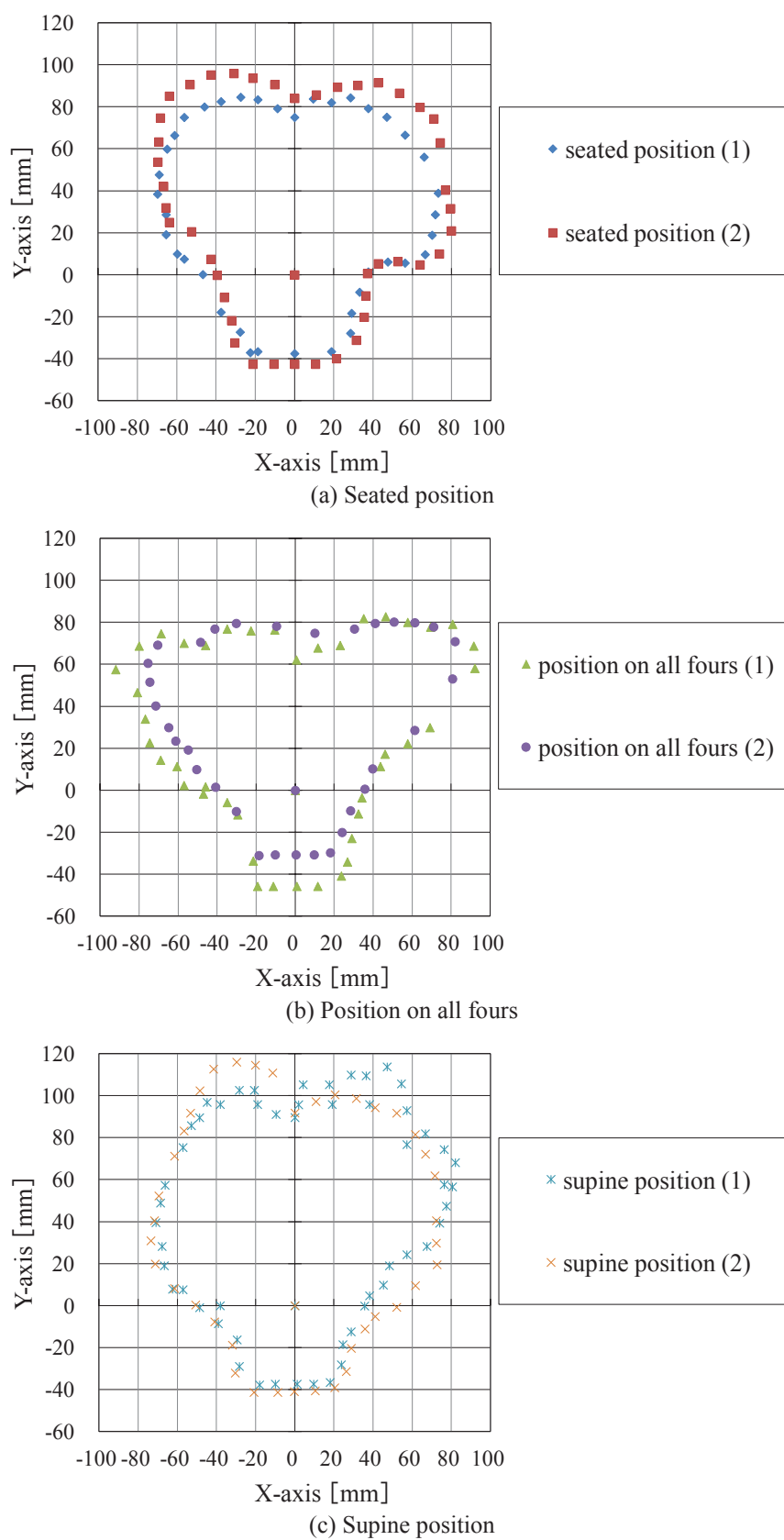


Fig. 3-33 Motion boundary point 1

Fig. 3-33 より，動作範囲の横幅は約 160mm になっている．縦幅を見ると(b)四つん這い状態では他の姿勢に比べ，上部分が押しつぶされたようになっているが，これは測定時，対象者の姿勢と 3D スキャナの角度の関係上，臀部の上部分をスキャンすることができなかったためである．Fig. 3-28(b)の距離マップにおいても，上部分に赤色や緑色の部分がなくなっている．四つん這いの上部分以外は，どの姿勢でも同じような形状に点がプロットされている．そこですべての姿勢のグラフを一つにしたものを Fig. 3-34 に示す．

Fig. 3-34 より全体の特徴として，臀部の背中側(図の上側)中央と，腹側(図の下側)左右がへこんだ形状になっている．ここで Fig. 3-35 の人間の骨盤底の形状，特徴を見てみると，肛門をほぼ中央にして，背中側中央には尾骨が，腹側左右には坐骨があることがわかる．これらの特徴から，臀部が押し出された時の動作範囲の形状は，骨盤底の形状に影響していると考えられる．そのため，臀部の動作範囲は骨盤の大きさによって決まる可能性が示唆される．

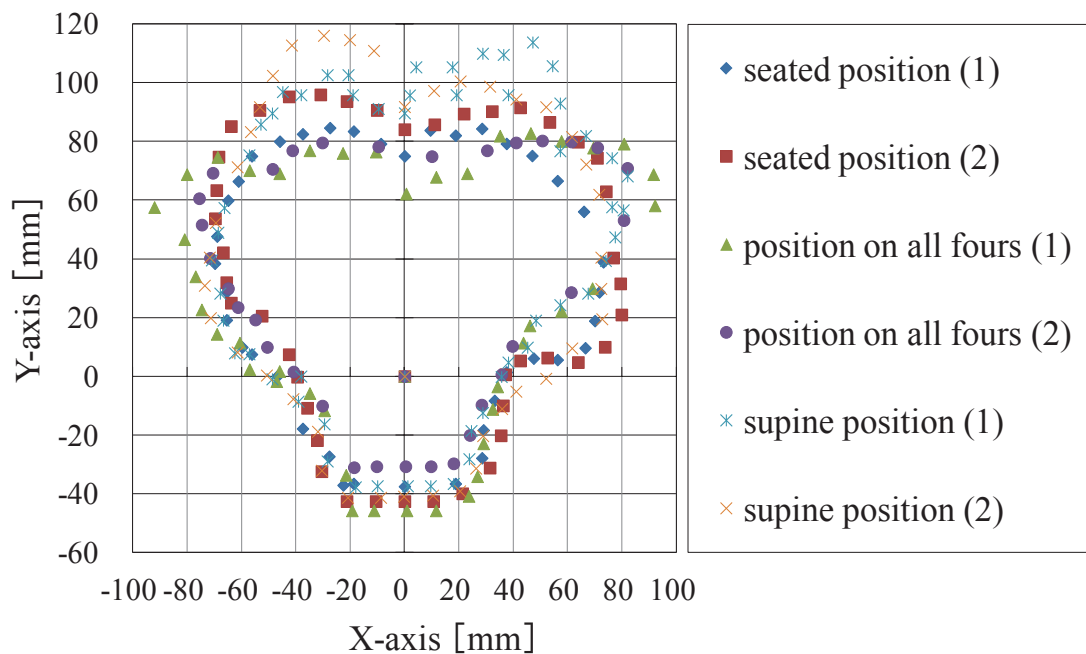


Fig. 3-34 Motion boundary point 2

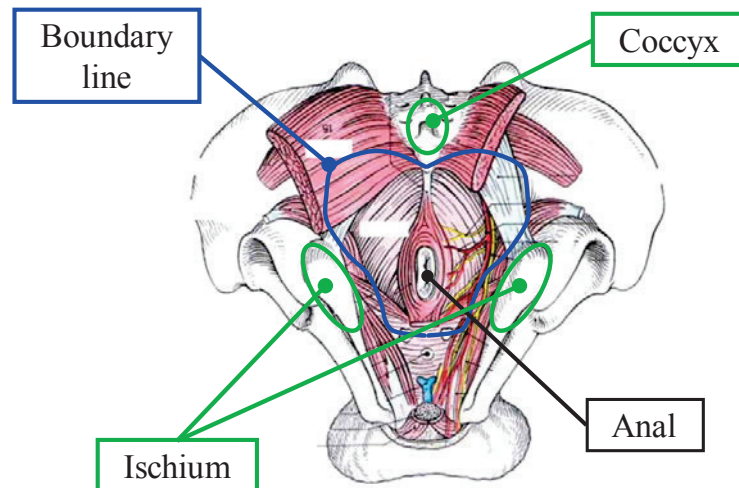


Fig. 3-35 Pelvic floor

### 3.8.3 変位量

変位量は、安静状態から突出した状態になるまでに押し出された量であり、その特徴は距離マップにより知ることができた。3D スキャナ専用ソフトウェアにより、距離マップ上のカーソル位置での表面距離が画面に表示される。そこで、Fig. 3-36 のように 20mm×20mm の格子を並べたグリッドを設定し、各交点上の座標と距離を出力することで、各点での変位量を調べた。調べた結果を動作範囲の測定時同様、Fig. 3-31, Fig. 3-32 のように座標を設定し、グラフ化した。グラフを Fig. 3-37 に示す。

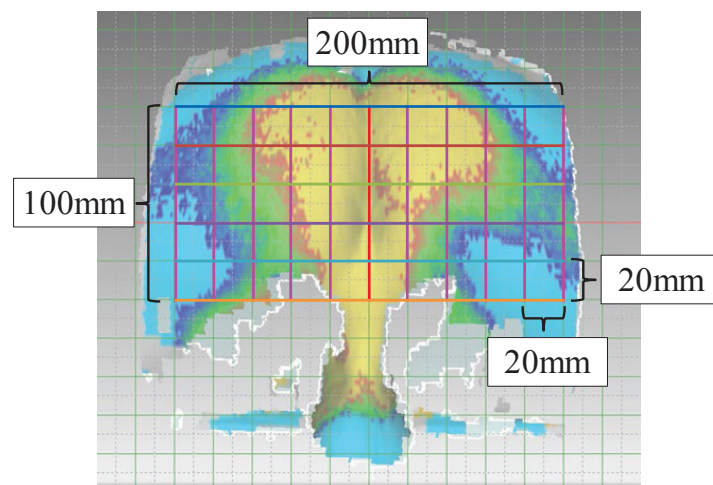
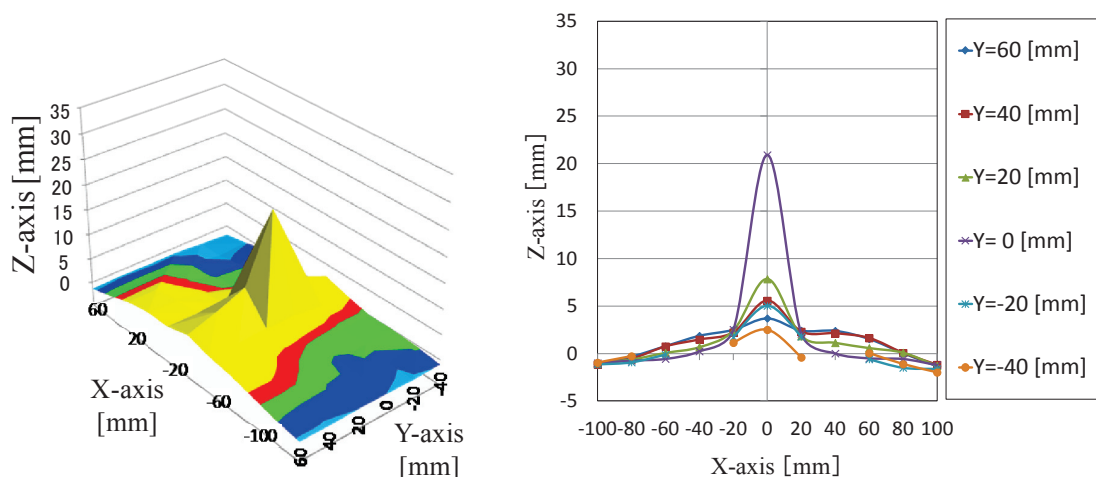
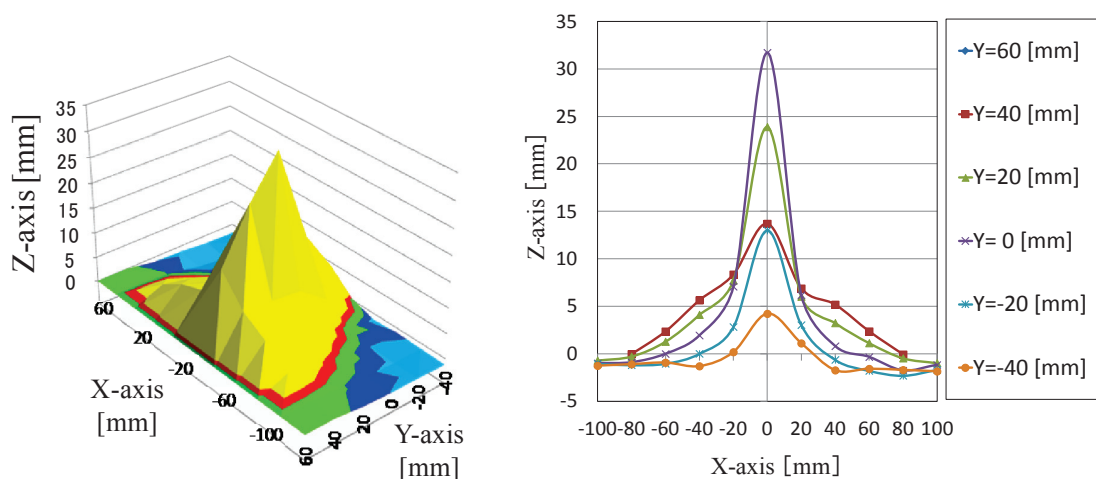


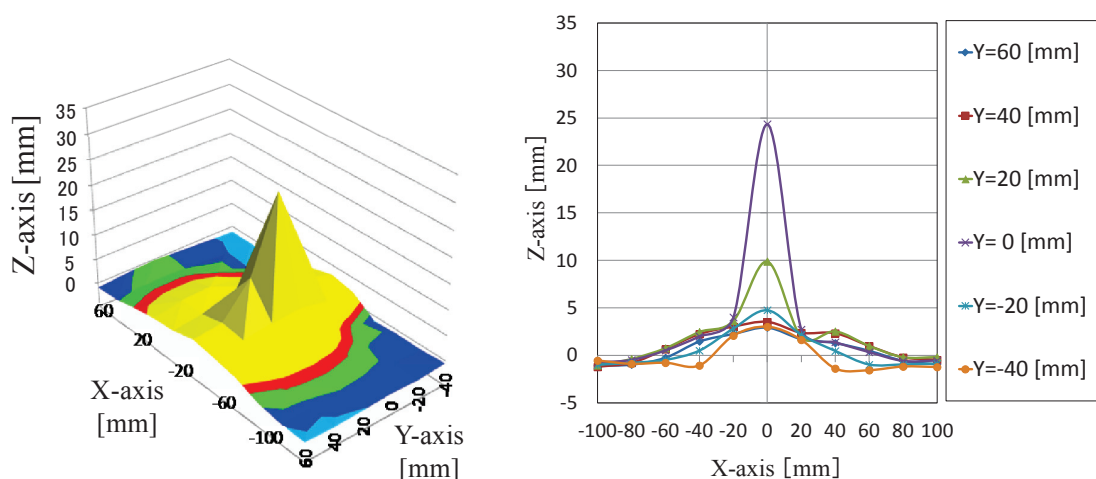
Fig. 3-36 Grid square



(a) Seated position



(b) Position on all fours



(c) Supine position

Fig. 3-37 Motion displacement

Fig. 3-37 より、変位量を見てみると、いずれの姿勢でも肛門部分が最も大きく変化している。(b)四つん這いは他の姿勢に比べ変位量が大きく、最も大きく変化したところで31.7mmとなっている。(a)座位と(c)仰向けの場合、最大変位量はそれぞれ(a)20.9mm, (c)24.4mmであり、肛門周辺は動作しているが変位量は小さくなっている。(a)座位については、椅子に座っている状態であるため、肛門が重力方向である下を向いており、この姿勢になった時点で臀部は重力によって下がり、変化していると思われる。したがって、(a)座位は測定前にすでに臀部が変化した状態であるため、息んでもあまり変化がなかったと推測される。(b)四つん這いは、(a)座位のように重力による変化はないため、息みによってのみ変化した量となっている。(c)仰向けに関しては、(b)四つん這い同様、重力の影響がないため、息む前から変化はしていないと考えられるが、変位量は小さくなっている。これは寝た状態である(c)仰向けは腹圧がかけにくい姿勢であり、息んだ時の力が直腸などに効率よく伝わっていないためだと考えられる。

### 3.9 まとめ

本章では、宇宙船内の排泄時に生じる問題を解決する宇宙用トイレシステムとして装着型トイレを開発し、その検証実験を吸着型トイレとボトル型トイレと共に行なうことで、開閉機構と吸着機構について検証を行った。検証により、開閉機構のローラが臀部に押され閉じなくなる、吸着機構では臀部に吸着した密着部分が体を動かすと外れてしまうなどの問題点が出てきた。そのため各機構について、臀部の形状を考慮する必要がある事がわかった。

そこで臀部の形状・動作の計測を、3D スキャナを利用して行い、データ処理を行った。重力の方向を考慮し、座位、四つん這い、仰向けの3つの姿勢について計測を行い、それぞれ3次元的な形状・動作のデータを取得して、比較をすることで特徴を確認した。息みにより臀部が押された時の動作範囲・動作形状は、姿勢に関係なく骨盤底の形状、すなわち尾骨と坐骨の位置に影響していた。押し出された量である変位量について、まず座位状態は、重力によって息む前から臀部が押し出されている可能性があり、変位量は小さかった。また仰向け状態も変位量が小さく、これは寝た状態のため、息んだ時に腹膜を直腸に押し付けるのが難しいためだと考えられる。そして四つん這い状態は、重力による変化がないため、息みによる変化が大きく出ていた。以上の結果から、各姿勢での臀部形状の動作について、特徴を確認することができた。



以上の形状計測で得られた臀部の形状データを使い、臀部形状を考慮した密着部分を設計することが可能となった。そのため、装着型トイレと吸着機構に新たに設計した密着部分を適用することで、開閉機構や吸着が実用的に利用できるようになると考えられる。また、これらの形状データや密着部分の設計は「臀部密着型」のトイレシステムを作るうえで、重要なものであるため、後述の介護用トイレシステムの開発においても、活用している。

## 第4章 介護用トイレシステムの 開発

---

### 4.1 介護用トイレシステムの概要

第1章で述べたように、介護現場において排泄介護には様々な問題があり、介護者・被介護者双方の負担となっている。そこで、負担を軽減するなどの介護支援を行う装置として、本研究室では、起き上がり介助、歩行補助を行う「自立生活サポートシステム」と、排泄の支援を行う「介護用トイレシステム」の開発を行なっている。本章では、介護用トイレシステムについて述べる。

介護用トイレシステムでは、第3章で扱った宇宙用トイレシステムと同様に、器具を臀部に密着させることにより臭いの拡散を防ぎ、確実に便を回収する「臀部密着型」のトイレシステムとした。しかしながら、介護現場では宇宙用トイレシステムのようにベルトで装着する形式の場合、介護者が被介護者に取り付ける必要があり、その取り付け作業が負担となる可能性がある。そこで介護用では、自動で器具を臀部に密着させることにした。このとき、利用者の肛門位置を知る必要があるため、今回、赤外線サーモカメラを利用した肛門検出システムの開発を行なった。

また宇宙用トイレシステムでは、臀部に付着した便を取り除く機構を製作したが、同様な考えで、介護用トイレシステムでは、自立した排泄を支援するための機能として、排泄後の肛門の洗浄を自動で行なう清拭機構を製作し、排泄物を回収するトイレユニットに搭載した。さらに、皮膚に付着した便を拭き取りやすくすることを目的に、泡を使用して肛門や付着した便を濡らす方法を提案し、その検証を行うため、清拭機構と同様にトイレユニットに泡生成機構を取り入れた。

本トイレシステムでは、トイレユニットに取り付けた袋の中に排泄をしてもらい、排泄完了後に袋を取り出し、おむつなどと同様な処理方法でごみとして廃棄することを想定しており、水洗トイレのように排泄物の処理で水を使用しない。さらに泡を利用した洗浄方法で、水で汚れを洗い流す温水洗浄便座（ウォシュレット、シャワートイレなど）と異なり、水をほとんど使用せずに洗浄ができる。そのため、汚水の処理をすることや給排水管の設置をする必要がない、節水型のトイレとなっている。

本章では、4.2 節に製作した介護用トイレシステムの概要を述べ、肛門の位置を特定する肛門検出システムの概要と検証実験について述べる。4.3 節では、改良を行ったトイレシステムの概要と、清拭機構や泡生成機構などを取り入れたトイレユニットの構造について述べ、最後に泡を使用した洗浄について行った清拭実験について説明する。

## 4.2 肛門検出システムの開発

### 4.2.1 介護用トイレシステムの製作

介護用トイレシステムの外観を Fig. 4-1 に示す．本システムは、アルミフレームの土台に、AC モーターで前後に移動する便座部分が配置されている．便座部分は、使用者が座る便座、排泄物の回収を行うトイレユニット、トイレユニットを移動させるための移動機構、そして肛門位置を検出するための赤外線サーモカメラで構成している．

本装置は、壁に埋め込むなど普段は装置全体を収納することを想定しており、使用前は便座部分をしまった状態にすることで、景観にも配慮したいと考えている．使用時は Fig. 4-2 のように、便座部分を前に出し、使用者が座った後、赤外線サーモカメラによって臀部を撮影して、肛門検出システムにより肛門の位置を特定する．その後、移動機構によりトイレユニットがその肛門位置に移動して臀部に密着する．排泄時は密着したトイレユニット内に取り付けた袋に排便してもらい、排泄後、泡により臀部の清拭を行う．排泄物の入った袋は、トイレユニット内のヒートシーラーで密閉することで、臭いを外気に拡散しないようにした．使用後は袋を回収し、便座部分を移動させて壁に収納する．袋の処理は、おむつなどと同様の方法でごみとして廃棄する．

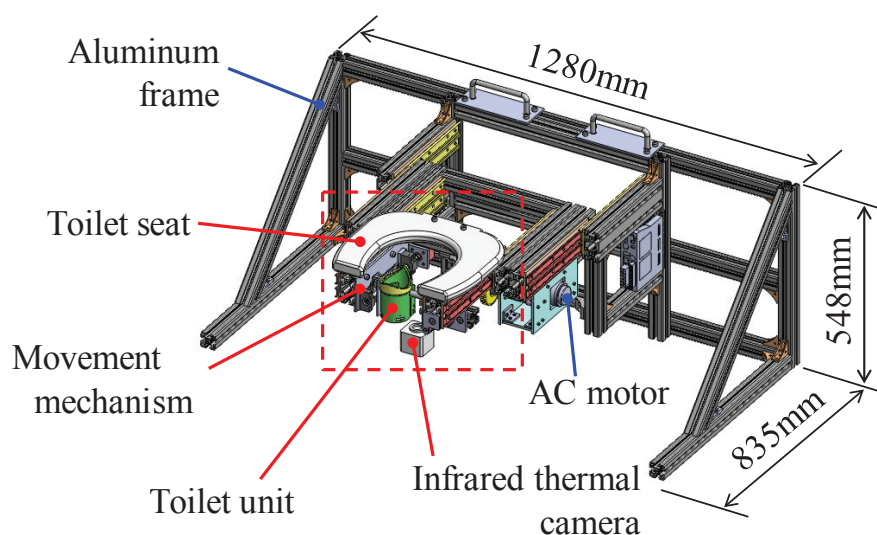


Fig. 4-1 Mechanical structure of toilet system for caring(test model)

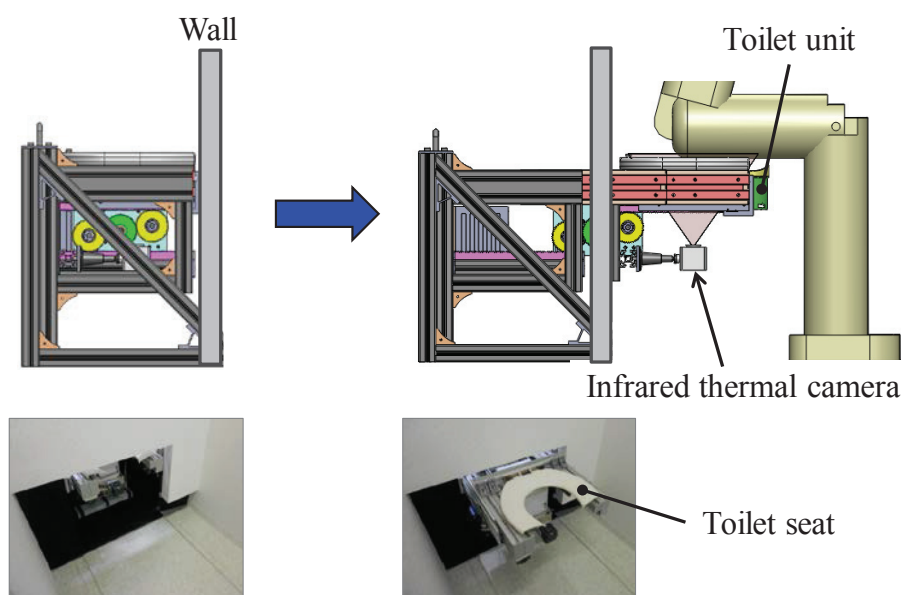


Fig. 4-2 Operation of the toilet system for caring

#### 4.2.2 肛門検出システムの概要

人間の体内の温度は、肌などの表面の温度よりも高く安定しており、体内温度(中核温)と呼ばれる。しかし、体の表面であってもこの体内の温度を反映している箇所があり、それらは脇下や口腔、耳内や直腸など体温計で検温する箇所である。肛門は直腸直下にあるため、体内の温度に近く、肛門周囲の臀部の表面温度よりも高温な部分となっている。そこで、この温度差に着目し、赤外線サーモカメラで臀部を測定した温度データから肛門を識別し、その位置を特定することにした。

Fig. 4-3 に肛門検出システムの構成を示す。赤外線サーモカメラで測定した温度データを USB 経由で PC に送り、そのデータを処理して肛門位置の特定を行う。そして特定した位置からトイレユニットの移動距離を算出し、算出結果を移動機構のステッピングモータを制御する PIC にシリアルケーブル RS-232C を経由して転送する。その後、ステッピングモータによりトイレユニットを肛門の位置まで移動させる。移動機構の構造は Fig. 4-4 に示すような一軸アクチュエータで、ステッピングモータ(MERCURY MOTOR : ST - 42BYG020)とボールねじ、移動ステージから成り、モータとボールねじはカップリングでつながれている。移動ステージにはトイレユニットを取り付けており、ステッピングモータが回転することで、移動ステージがボールねじの軸方向に移動することができる。

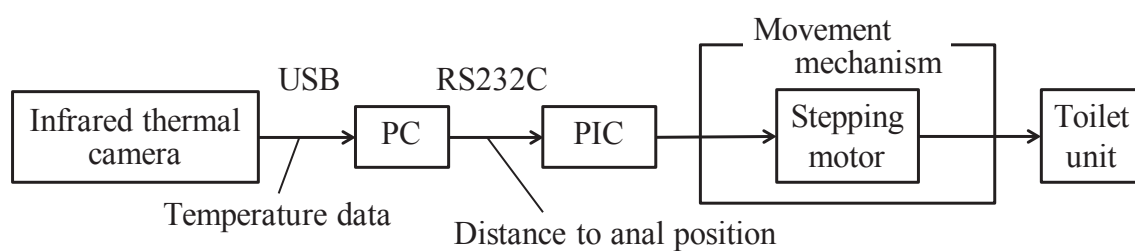


Fig. 4-3 System configuration

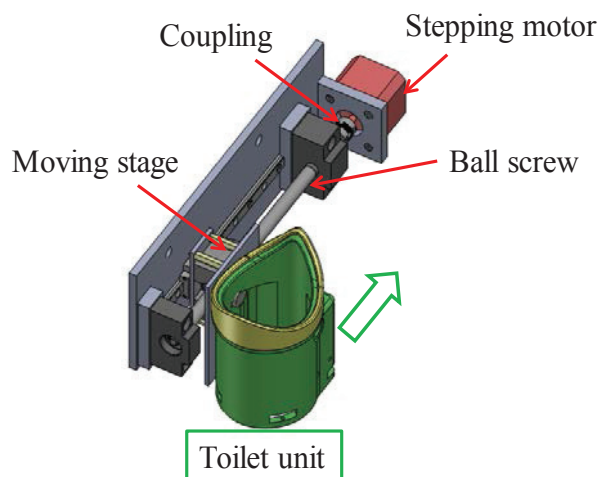


Fig. 4-4 Movement mechanism(Proto type)

#### 4.2.3 赤外線サーモカメラ

本システムでは小型熱画像センサ TP-L0260UN(株式会社チノー)を赤外線サーモカメラとして使用した。センサの外観を Fig. 4-5 に、仕様を Table 4-1 に示す。センサは赤外線検出素子としてサーモパイル素子を搭載した熱画像センサである。パソコンと USB 接続することで温度データの送信が行え、専用のアプリケーションソフトにより、センサから出力された温度データを、パソコン上で熱画像化して表示することもできる。

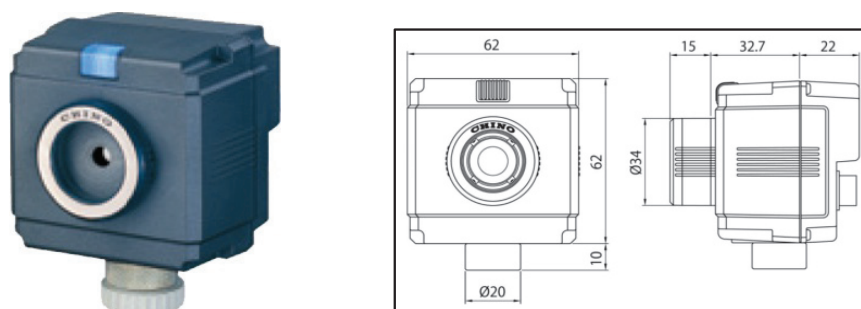


Fig. 4-5 Overview of the infrared thermal camera (TP-L0260UN)



Table 4-1 Characteristics of the infrared thermal camera

Term (and character)	Specification
Detection element	Thermopile element 47×48pixels
View angle	60°×60°
Filming range (R)	1.363m×1.392m in the case of 1m distance
Width of view per pixel (W)	29 mm in the case of 1m distance
Range of temperature	-20℃～300℃
Resolution	0.5℃ in the case of 100℃ black body

センサの画素は  $47 \times 48 = 2256$ 、測定視野角は  $60^\circ \times 60^\circ$ 、空間分解能は  $21.8 \text{ mrad}$  となっている。このセンサによって測定できる測定面の大きさは、Fig. 4-6 に示すように測定面までの距離(測定距離:  $D$ )が  $1.0 \text{ m}$  の時に、測定面の縦幅が  $1363 \text{ mm}$ 、横幅が  $1392 \text{ mm}$ 、そして1画素当たりの視野幅( $W$ )は  $2.9 \text{ mm}$  である。測定面と測定距離の関係を式(1)、(2)に示す。

$$R = 1.363D \quad (1)$$

$$W = \frac{R}{47} \quad (2)$$

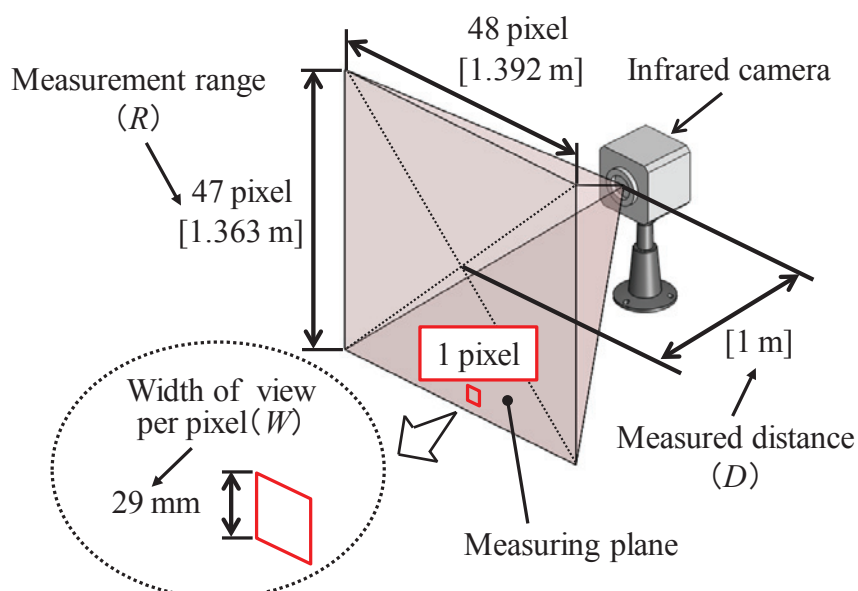


Fig. 4-6 View range of the infrared thermal camera

Fig. 4-7 にトイレシステムを側面から見たときの赤外線サーモカメラの配置を、Fig. 4-8 に出力される臀部の熱画像の例を示す。赤外線サーモカメラは便座の下にあり、便座から見える臀部全体が測定できるような測定視野を確保できる位置にカメラを配置した。このとき、赤外線サーモカメラの位置は便座上面からの距離、すなわち測定距離  $D$  が 150mm、測定範囲は上式(1)、(2)より  $204.45\text{mm} \times 208.80\text{mm}$ 、一画素当たりの視野幅  $W$  は 4.35mm となる。

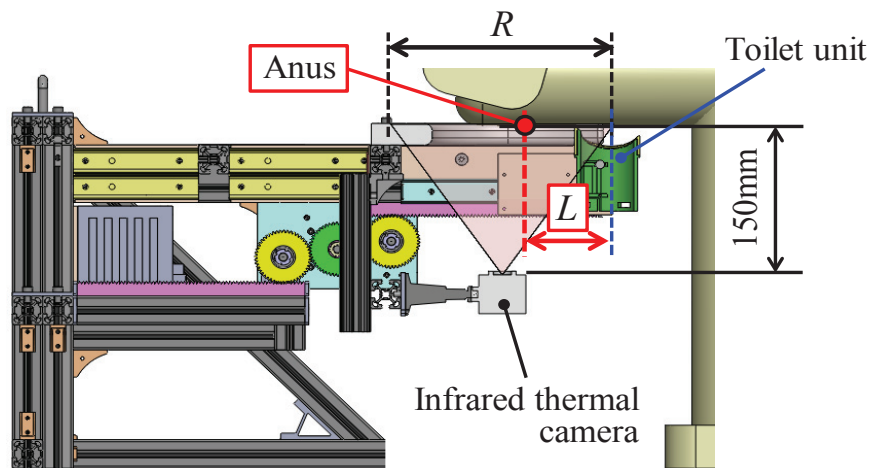


Fig. 4-7 Configuration of the infrared camera (sectional side view)

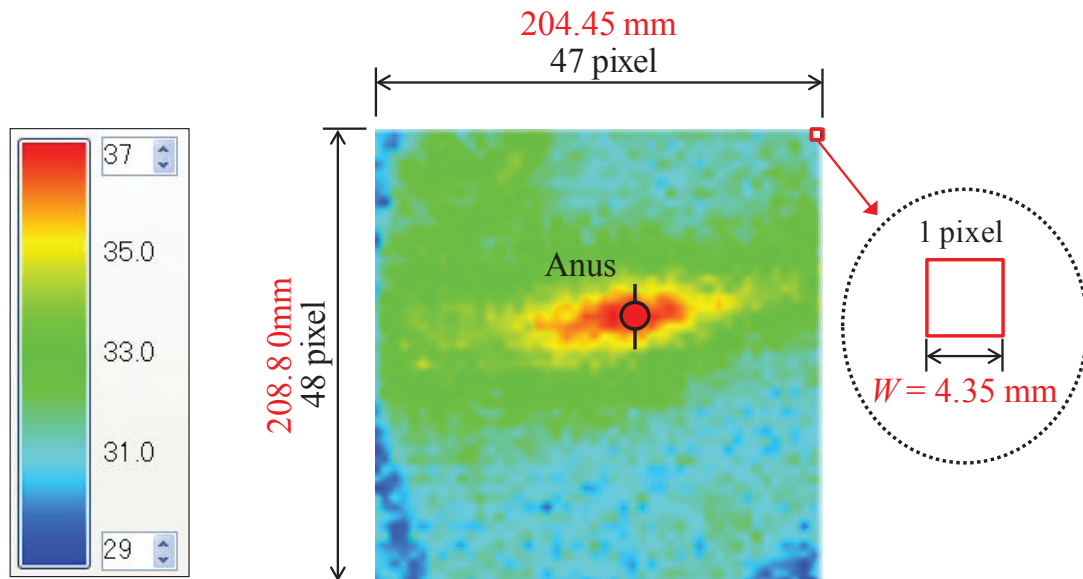


Fig. 4-8 Infrared thermal image of buttocks

## 4.2.4 処理方法

赤外線サーモカメラによって取得した温度データは、赤外線サーモカメラ付属の専用ソフトウェアにより、各画素の温度値を表示した CSV ファイル形式で PC 内に保存される。CSV ファイルは画素数に対応した 47 列×48 行分の温度データが保存されている (Fig. 4-9(a))。このとき赤外線画像は Fig. 4-9(b)のように表示され、左上を原点( $x=0$ ,  $y=0$ )とし、右下が( $x=47$ ,  $y=46$ )の座標系で温度データは表示される。

この温度データから周囲より高温になっている肛門の位置を検出するため、プログラムにより Fig. 4-10 のような処理を行う。次にその詳細を述べる。

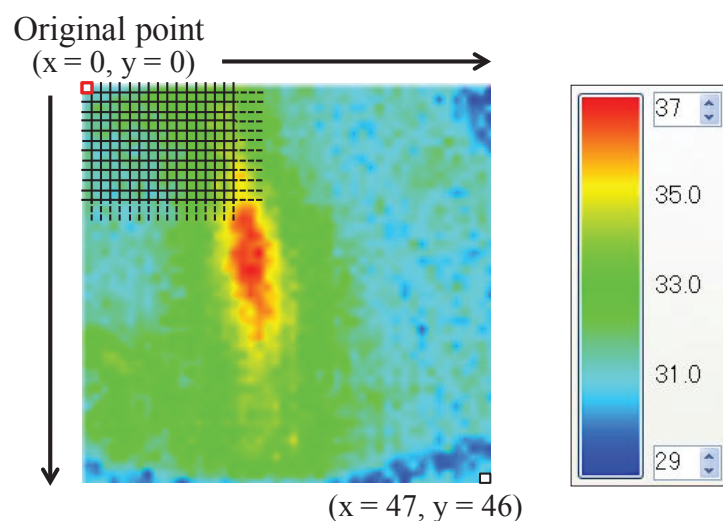
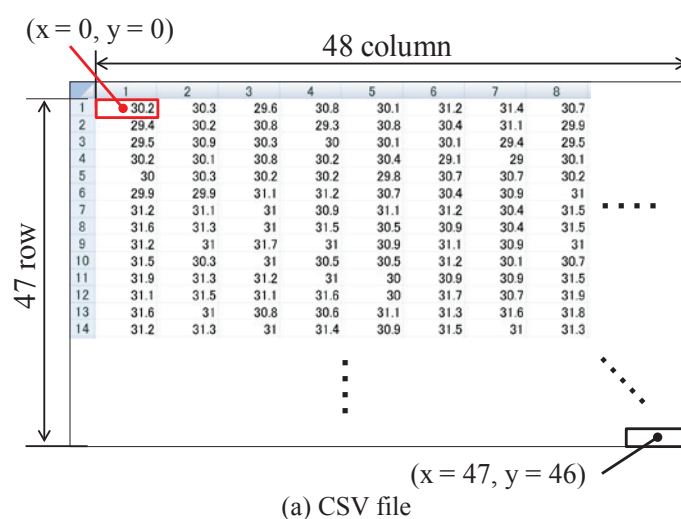


Fig. 4-9 Temperature data

CSV ファイルで保存された  $47 \times 48$  の温度データから、 $7 \times 7 (= 30.45\text{mm} \times 30.35\text{mm})$  の領域を選択し、範囲内の平均温度を算出する(Fig. 4-10(i)). この領域のサイズは、人間の肛門直径が  $30 \sim 40\text{mm}$  程度<sup>(54)</sup>であることから、経験的に採用した. 次に、この  $7 \times 7$  の領域を 1 列または 1 行ずつ移動させながら、同様に平均温度を算出していき(Fig. 4-10(ii)), 得られた平均温度のデータ ( $42 \times 41 = 1722$  個)から、最も平均温度が高い領域を見つける(Fig. 4-10(iii)). 見つけた  $7 \times 7$  の領域の中央の座標を出力し、その点を肛門位置とした(Fig. 4-10(iv)). 最後に出した座標点とトイレユニットの初期位置との距離  $L$ (Fig. 4-7)を算出し、PIC へ転送することで、移動機構のステッピングモータを動作させ、トイレユニットを肛門位置まで移動させる.

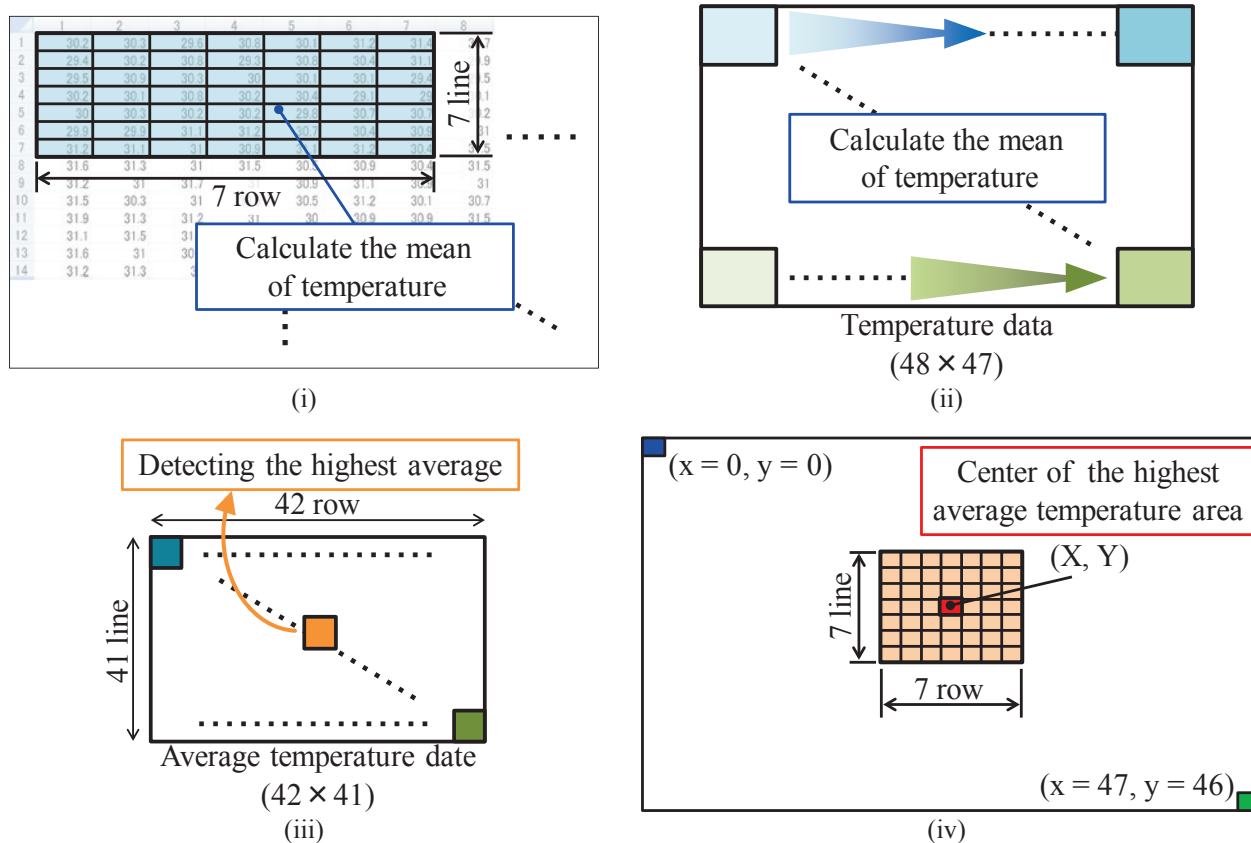


Fig. 4-10 Anal position detection process

## 4.2.5 肛門検出システムの評価実験

## a) 実験方法

肛門位置検出システムの検出精度と、移動機構によるトイレユニットの移動制御精度を確認するため、次のような実験を行った。

まず Fig. 4-11(a)に示すように、便座の中心軸線上にワイヤーを取り付ける。被験者が便座に座った後、赤外線サーモカメラで臀部を撮影し、肛門位置を算出する。そして被験者は触診で自身の肛門位置を探し、その肛門の位置に細いテープをワイヤー上に貼り付ける(Fig. 4-11(c)). 便座の前方端から肛門の位置であるテープまでの距離  $L_0$  を測定し、この  $L_0$  と処理によって検出した肛門位置  $L$  を比較する。

またトイレユニットの移動制御には PID 制御法を適用している。目標位置として  $L_0$  を指定し、トイレユニットが移動した時の位置  $l$  (Fig. 4-11(c))と  $L_0$  の位置を比較した。

本実験を 10 回繰り返して行い、それぞれの精度を確認する。

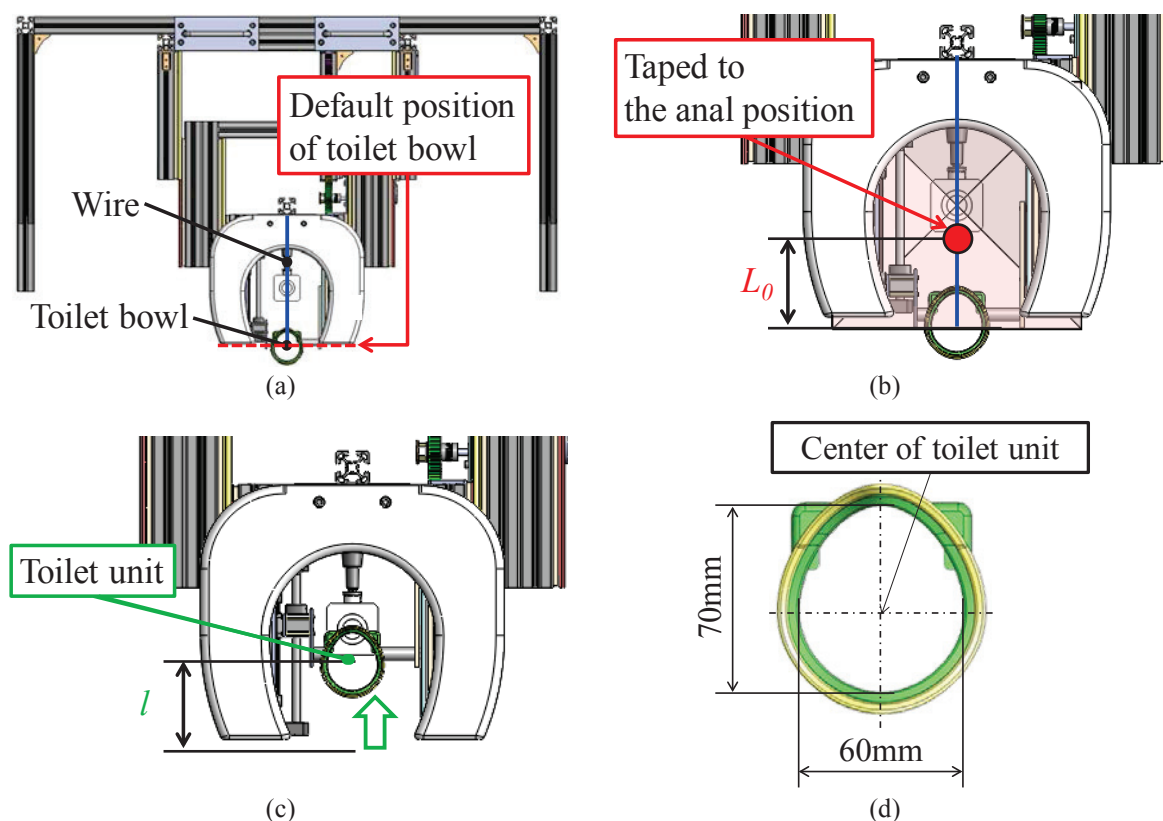


Fig. 4-11 Estimation experiment

## b) 結果と考察

Table 4-2 に肛門検出システムで算出した位置  $L$  と、実際の肛門の位置  $L_0$  とを比較した誤差を示す。誤差の範囲が-5.2mm から+5.1mm であった。1 ピクセルが 4.35mm であることから、最大誤差の 5.2mm は約 1.2 ピクセルと同等である。このようなシステムにおいて、どの程度の精度が期待されるか確証できないが、画像の解像度が高くなると誤差が小さくなることは明確である。この観点から、要求される精度に応じて、画像の解像度を選択する必要がある。本実験においては、トイレユニット形状は試験的に Fig. 4-11(d)に示すような楕円形(縦 70mm, 横 60mm)をしており、その中に肛門が納まれば良い。また肛門が開いた時の直径は 30~40mm と言われるため、最大誤差である 5.2mm は許容内であると考えられる。

Table 4-3 には目標位置  $L_0$  と制御によってトイレユニットが移動した位置  $l$ , そしてそれらの誤差を示す。このときの誤差範囲は-5.2mm から+5.0mm であり、最大誤差は 5.2mm であるため、前述同様、誤差は許容であると考えられる。さらに  $L$  と  $l$  を比較した場合、その差は最大 0.1mm であるため、移動制御の精度は問題ないと思われる。以上より、今回提案した検出および制御方法は、開発したトイレシステムにおいて、十分に容認できるものであることが確認できた。

Table 4-2 The anal position extraction result

Position of anus ( $L_0$ ) [mm]	Extracted position ( $L$ ) [mm]	Error [mm]
74.0	78.3	+4.3
80.0	78.3	-1.7
95.0	100.1	+5.1
98.0	95.7	-2.3
104.0	108.8	+4.8
109.0	108.8	-0.2
114.0	108.8	-5.2
122.0	126.2	+4.2
126.0	130.5	+4.5
130.5	130.5	+0.0



Table 4-3 Toilet unit control result

Target position ( $L_0$ ) [mm]	Controlled position ( $l$ ) [mm]	Error [mm]
74.0	78.2	+4.2
80.0	78.2	-1.8
95.0	100.0	+5.0
98.0	95.7	-2.3
104.0	108.8	+4.8
109.0	108.8	-0.2
114.0	108.8	-5.2
122.0	126.1	+4.2
126.0	130.5	+4.5
130.5	130.5	+0.0

トイレユニットの形状は後述の 4.5.2 にて変更を行っているが、その形状・サイズは本実験で使用したものより大きく、縦 100~110mm、横 125~135mm となっているため(Fig. 4-17)、現状の精度でも十分であると考える。

### 4.3 介護用トイレシステムの改良

上述 4.2 節より、肛門検出システムの開発を行ない、自動でトイレユニットを肛門の位置まで移動させ、密着できるようになった。そこで次に、自立した排泄を行うための、自動で肛門を洗浄する清拭機構を導入したトイレユニットを製作し、それに合わせて介護用トイレシステムの改良を行った。

Fig. 4-12 に改良後の介護用トイレシステムの外観を、そして仕様を Table 4-4 示す。土台であるアルミフレームや、便座部分を前後移動させる AC モーターなどの配置は 4.2.2 の改良前のものと同じであるが、便座部分にあるトイレユニットおよびその移動機構の設計変更を行った。

使用方法については、便座を出し、肛門検出システムで肛門位置にトイレユニットを密着させるところまでは同様で、その後、まず肛門に泡を付着させて、そしてトイレユニ

ット内に取り付けた袋に排便してもらい、排泄後に、再度泡を付着させてから臀部の清拭を行う。また排泄物の入った袋は、トイレユニット内のヒートシーラーで密閉することで、袋を取り外して処理を行うときも臭いを外気に拡散しないようにした。

以下に設計変更を行った移動機構とトイレユニットについて述べる。

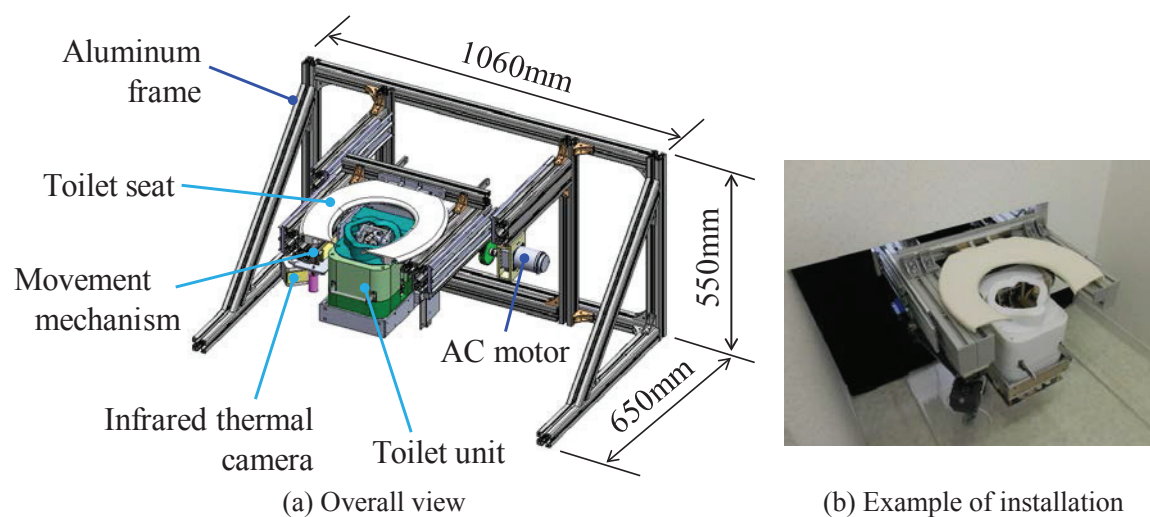


Fig. 4-12 Mechanical structure of toilet system for caring

Table 4-4 Specification of toilet system for caring

Name	Toilet system for caring
Dimensions	H550×D650×W1060 mm
Assumption of usage	Using a combination of "Independent support system"
Assumed user	Bedridden elderly
Assumed circumstance	Setting up the system in the wall
Function	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪To pull out and store the toilet seat in the wall</li> <li>▪To detect location of anus</li> <li>▪To move the unit to the anal position automatically</li> <li>▪To automated wash the anus using foam</li> </ul>
Electrical source	100V
Actuator	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪AC motor (for moving toilet seat)</li> <li>▪DC motor (for pump former)</li> <li>▪Stepping motor (for movement mechanism, and wiping machine)</li> </ul>
Other instrument	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Infrared thermal camera</li> <li>▪Heat sealer</li> </ul>
Interface	Controller

## 4.4 移動機構

### 4.4.1 移動機構の概要

移動機構は、トイレユニットを肛門の位置まで運び、臀部に密着させるための機構である。移動機構の初期位置は、トイレユニットが便座の後方で、座面から約 70mm 下方の位置に配置しており、赤外線サーモカメラが 4.2 節で述べたように、臀部を撮影できるように便座の下に配置されている。移動機構の動きを Fig. 4-13 に示す。

4.2 節で述べた肛門検出システムによって算出した値が PIC に送られると、トイレユニットを乗せた土台が、肛門の位置まで移動する。このとき赤外線サーモカメラは横に移動し、トイレユニットに干渉しない位置まで運ばれる(Fig. 4-13(a))。その後、トイレユニットを臀部に密着させるため、上方向に移動をする(Fig. 4-13(b))。

排泄が終了し、処理が終わった後は、同様の経路をたどり、下降、後進をして初期位置に戻る。

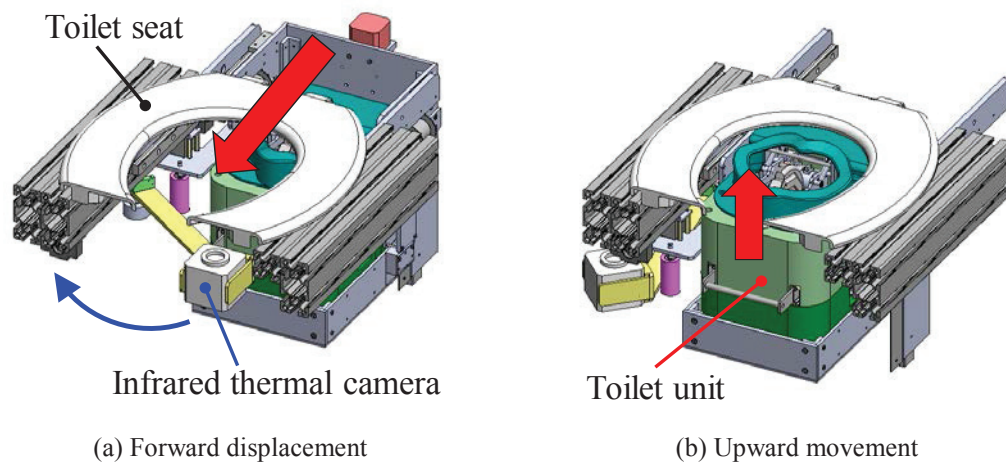


Fig. 4-13 Operation of movement mechanism

### 4.4.2 移動機構の構造

移動機構の構造を Fig. 4-14 に示す。本機構にはトイレユニットを乗せる土台(Movable stage)があり、その台を上下・前後に移動させるアクチュエータを設置している。どちらのアクチュエータも構造は同じであり、ステッピングモータ(MERCURY MOTOR : ST-42BYG020)とボールねじを使った一軸アクチュエータで、上下移動用は土台の背面に、前後移動用は土台の側面側にそれぞれ配置した(Fig. 4-14(b))。また、赤外線サーモ

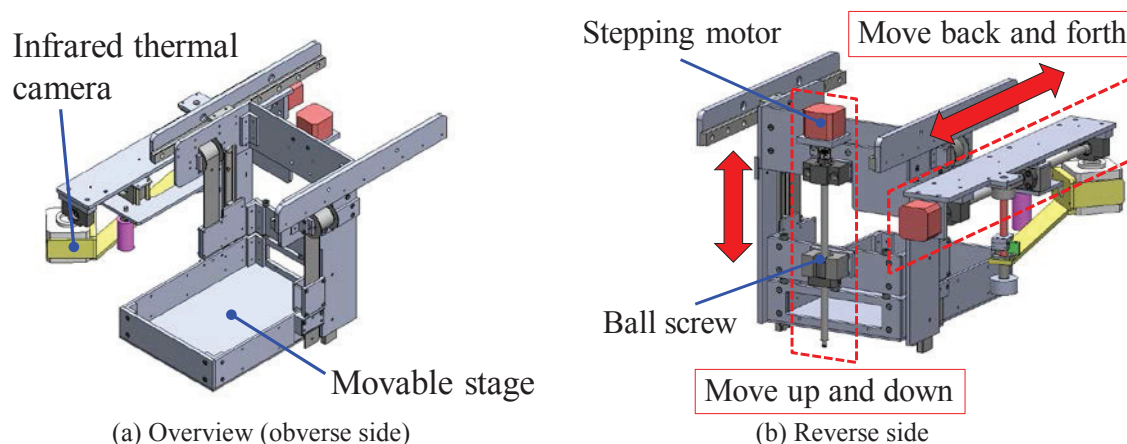


Fig. 4-14 Mechanical structure of the movement mechanism

カメラは前後移動用のアクチュエータ側に設置し Fig. 4-13(a)に示すように、土台の前後移動に追従して横方向に移動するようになっている。

## 4.5 トイレユニット

### 4.5.1 トイレユニットの概要

Fig. 4-15 にトイレユニットの全体構成を示す。本ユニットは、密着部(Fitting cover), 熱圧着部(Heat sealer), 清拭機構部(Wiping machine), 泡生成機構部(Foam maker), そして本体ケース(Toilet unit case)から成る。ユニットの内部には骨格となるフレームがあり、清拭機構部と熱圧着部、泡生成機構部を固定、周りを ABS 樹脂で製造した本体ケースで覆われており、上部分に臀部への密着部を配置している(Fig. 4-15(b))。使用する際には、まず排泄物を収容するためのビニール製の袋をユニットの中に取り付け、肛門の汚れを拭き取るためのウエットティッシュを清拭機構部の清拭部に両面テープで貼り付けておく。そして使用者がトイレシステムの便座に座った後、肛門検出システムと移動機構によりトイレユニットを臀部に密着させる。密着後、排泄する前に泡生成機構部から送られた泡を肛門に付着させる。袋内に排泄した後、再び泡を肛門に付け、清拭機構によりウエットティッシュを付けた清拭部を肛門の下から押し当てるようにして動かし、汚れをウエットティッシュに付着させながら拭き取る。このとき、臀部をこすらないように拭くことで、皮膚が傷つかないようにしている。清拭完了後、ユニット前方にある取手を引いて袋の口を熱圧着により閉じる。使用後は排泄物の入った袋をユニット

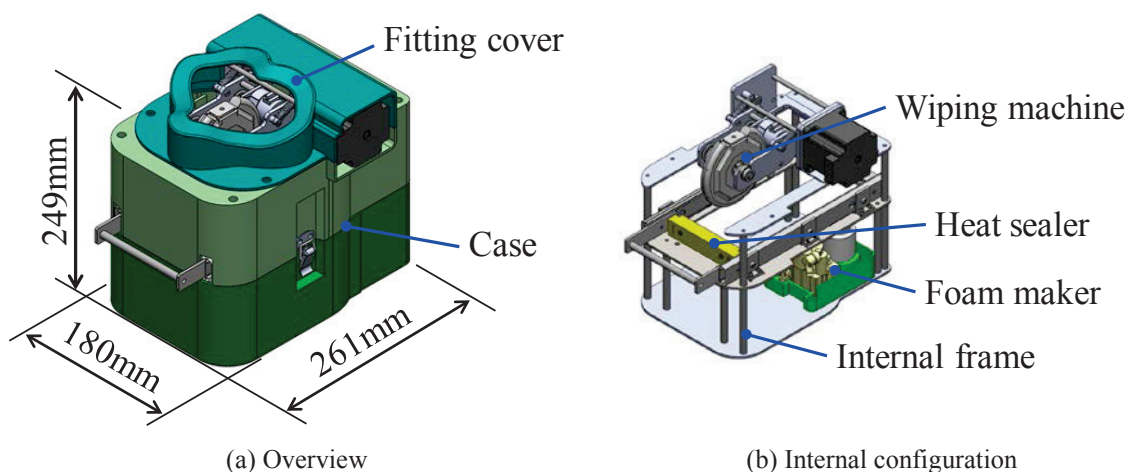


Fig. 4-15 Mechanical structure of the toilet unit

から取り出し、清拭部のウェットティッシュを清拭部から剥がして回収し、おむつなどと同様の方法でゴミとして廃棄する。

以下にトイレユニット各部の詳細について述べる。

#### 4.5.2 トイレユニットの各部構造

##### a) 密着部

密着部は臀部に密着させる部分で、排泄時に臭気が外気に拡散することを防ぐ。そのため密着部の形状は人間の臀部形状に合わせる必要がある。そこで3次元形状測定器 (Artec Group : Artec MHT) を用いて人間の臀部を測定し、得られた表面形状データをもとに設計を行った。

3.5 節でも述べたように、人間は排便時に息み、腹圧で直腸を押すことで便を排出している。このとき直腸がある程度下がるため、肛門周辺の臀部も押されて形状は変化しており、変化する臀部の範囲は骨盤の形状(坐骨、尾骨の位置)に影響している。臀部形状が大きく変化した場合、密着部がずれるなどして臭いが漏れる可能性がある。そこで排便時の臀部形状変化に対応させるため、骨盤の形状を参考に設計を行った。

骨盤の形状は Fig. 4-16 に示すように男女で違いがあり、男性の骨盤に比べ、女性の骨盤は尾骨が後方にあり、坐骨の間隔が広がっている。これらの違いを考慮して密着部を、Fig. 4-17 に示すように男性用と女性用の2種類製作した。



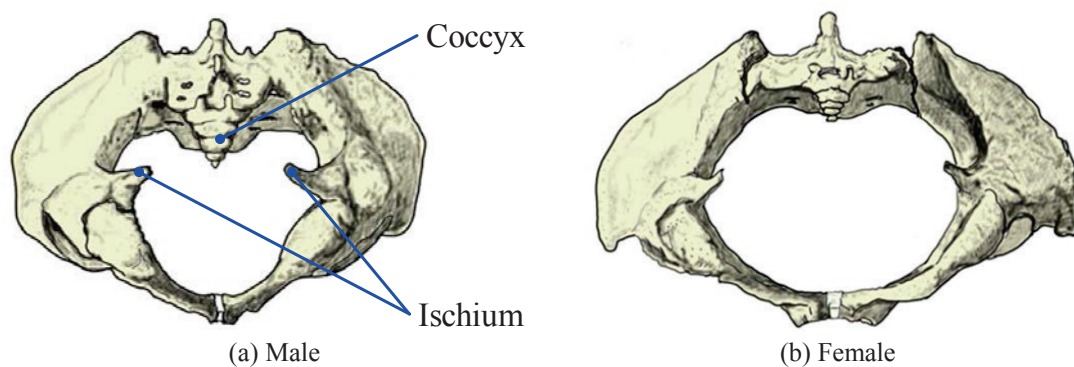


Fig. 4-16 pelvic floor

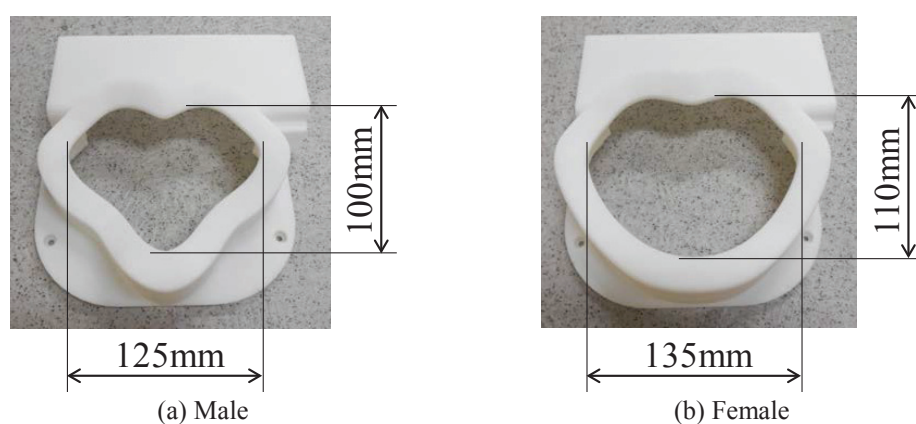


Fig. 4-17 Fitting cover

製作は設計した CAD データをもとに、3D プリンタ(Stratasys 社: Dimension BST 768, 材料: ABS 樹脂)で造形し、皮膚に触れる上面は軟らかいシリコン樹脂で覆う。

## b) 熱圧着部

熱圧着部は、排泄物回収用の袋(ビニール製)の口をヒートシーラーで熱圧着して閉じ、袋からの臭気の漏れを防ぐ。構成は Fig. 4-18(a)に示すように、ヒートシーラー、移動用スライドレール、取手から成る。取手を引き、袋の口をヒートシーラー部分で挟むことで、スイッチが入り、袋を密封できる(Fig. 4-18(b))。これにより、排泄物の入った袋を処理するときも、臭いが拡がることを防げる。



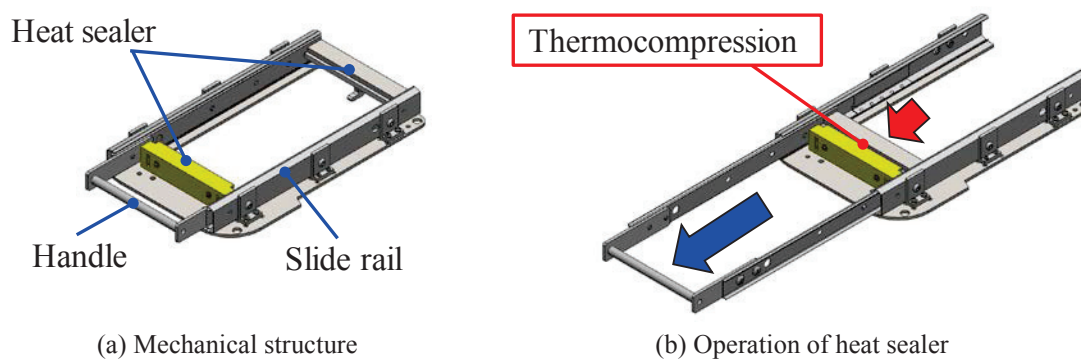


Fig. 4-18 Heat sealer

### c) 清拭機構部

清拭機構部は、本機構に取り付けたおしり拭き用のウェットティッシュを押し付けることで肛門の汚れを拭き取る機構で(Fig. 4-19(a)), 体が不自由な方でも介護者の手を借りることなく、装置によって臀部の清拭が可能になることを目的としている。また、後述の泡生成機構部から送られた泡を排泄の前後で肛門に付着させることで汚れを取れやすくする(Fig. 4-19(b)). トイレシステム使用后, 汚れたウェットティッシュを処理し, 新しいものに交換する。

本機構部の構造を Fig. 4-20 に示す。ウェットティッシュを取り付け、実際に肛門に触れて汚れを拭き取る清拭部、清拭部を回転させる回転機構部、そして清拭部をリンク機構で上下に移動させるための上下機構部から成る。

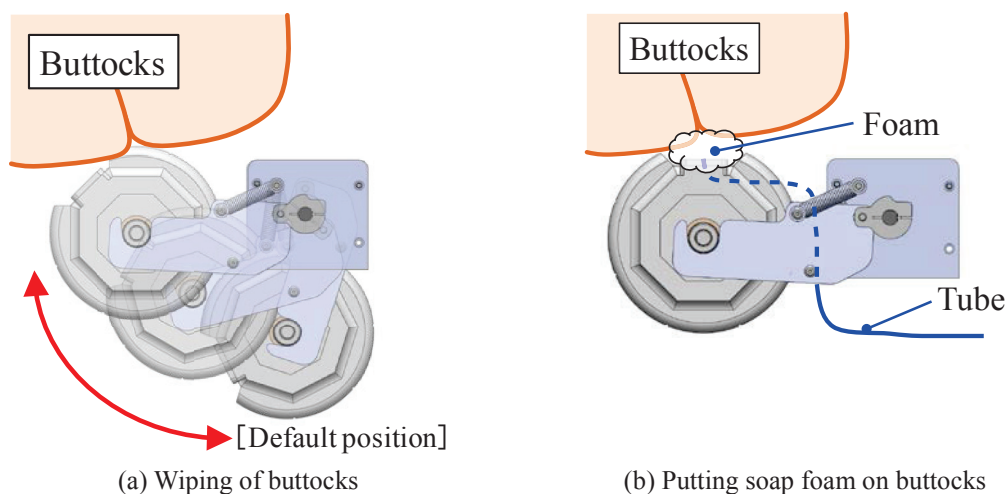


Fig. 4-19 Operation of wiping machine

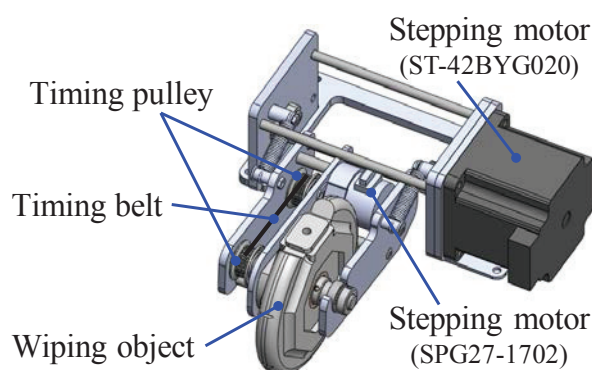


Fig. 4-20 Mechanical structure of wiping machine

清拭部は、回転機構部により、回転することで肛門との接触面を変え、1枚のウェットティッシュで複数回清拭を行う。泡を出して肛門に付着させる平らな面が一か所あり、それ以外は清拭する面で、その面の断面は半円形状となっている。今回、接触面の大きさを縦30mm×横20mm程度として、汚れを拭き取った面が再び臀部に接触しないよう回転角度を調整し、1枚のウェットティッシュで最大7回清拭できるようにした(Fig. 4-21(b))。回転機構部は、タイミングプーリ、タイミングベルト、そしてステッピングモータ SPG27-1702(日本電産コパル株式会社)から構成した。

また、上下機構部は動力にステッピングモータ ST-42BYG020(MERCURY MOTOR)を使用している。清拭部の初期位置は下に下がった位置で(Fig. 4-19(a))、泡を付着させるまたは清拭を行う際に、上下機構で上に移動する。清拭時、清拭部が押す力は約4Nとなっている。泡付着後あるいは清拭後に、初期位置に戻り、回転機構で次の面に切り替える。

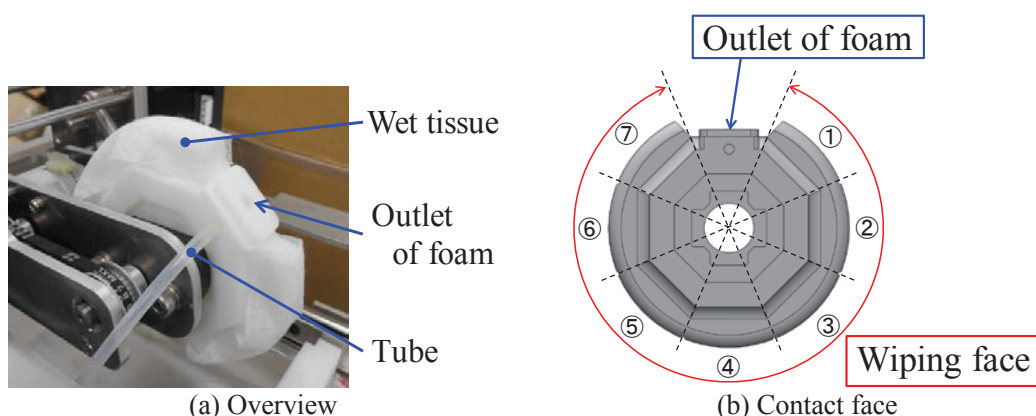


Fig. 4-21 Wiping object

清拭部は 3D プリンタにより ABS 樹脂で製作した円盤状のもので、泡生成機構につながるチューブを取り付けてある。円盤の側面にウエットティッシュを両面テープで貼り付け、側面には一か所、泡の出すための穴があり、泡を細かくするためにフィルターを貼り付けている。

### d) 泡生成機構部

泡生成機構部の構成を Fig. 4-22 に示す。泡生成機構部には、ハンドソープ使われている電動式のポンプがあり、モータ駆動で空気とボトルに入った液状清拭剤を、チューブを通して清拭部に送る。送られた空気と清拭剤が混ざり、清拭部のフィルターを通ることで細かい泡を作る出す(Fig. 4-22)。1 回の動作で約 1ml 分の泡を出すことができ、この泡を清拭機構部の清拭部から出し、肛門に付着させる。

排泄前に肛門に泡を付着させることで、皮膚表面を湿らせ、泡で覆い、便が付着しても剥離しやすく、また便を出やすくする。さらに排泄後にも泡を付けることで、付着した便についても、泡で湿らせることで水溶させ、吸水性のあるもの(ウエットティッシュ)で汚れを吸着させやすくする。

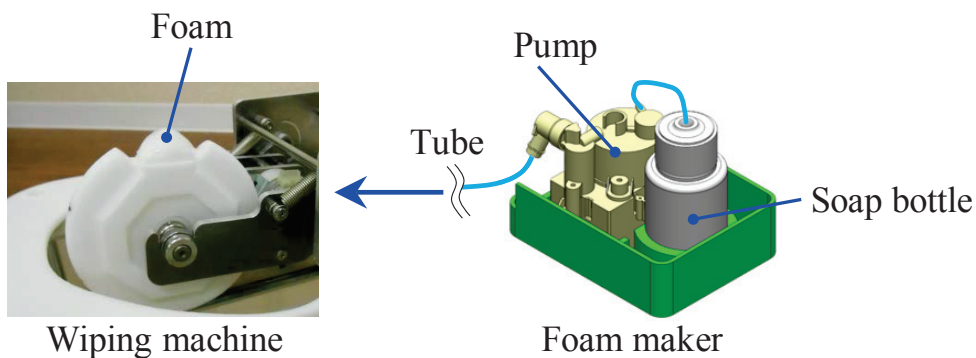


Fig. 4-22 Mechanical structure of foam maker

## 4.6 清拭の評価実験

### 4.6.1 実験概要

トイレユニットでは、肛門に泡を付着させ、清拭部を押し当てることで汚れを取り除

く．そこで，泡の有無による汚れの除去具合を比較することで，泡の有効性の評価を行った．本実験では，人間で実際に利用する前に，人間の臀部形状を模擬した模擬臀部と臀部に汚れを付けるために模擬便を使用して実験を行った．人間の代わりにこれらのモデルを使うことで，いつでも実験ができ，清拭の状況や汚れの状態を確認することが容易に行える．

以下に，模擬臀部と模擬便について述べる．

#### 4.6.2 模擬臀部

Fig. 4-23 に模擬臀部を示す．模擬臀部は，ウレタン樹脂で造形した臀部部分と ABS 樹脂製の土台から成る．臀部部分は，人間(成人男性)の臀部を非接触ハンディ 3D スキャナ(Artec Group : Artec MHT)を使用し，得られた表面形状データをもとに製作した．形状データから臀部の型を 3D プリンタ(Stratasys 社:Dimension BST 768)により製作し，ウレタン樹脂(株式会社エクシールコーポレーション：人肌のゲル原液 硬度 5)で造形した．サイズは，肛門を中心に直径 176.0mm，厚さ 10.0mm とし，トイレユニットの密着部(男性，Fig. 4-17(a))より大きくして，余分な部分はカットした．肛門部分は模擬便を押し出した時に便の直径が人間と同様の約 30mm になるよう穴を開け，また肛門管の代わりとなる筒を内側に作り，模擬便を通せるようにした．土台部分は模擬臀部をトイレユニットの密着部に固定するためのもので，臀部の型と同様に 3D プリンタで製作した．

#### 4.6.3 模擬便

模擬便については，第 2 章の動作実験でも使用したものを使用した．製作方法は 2.7.1 に述べたとおりで，便の状態については，本実験ではブリストル排便スケールの 7 段階のうち 4 番目「普通便」(表面がなめらかで，適度な軟らかさの便)にしている(Fig. 4-24)．このときの各材料の配分量は，みそ 50.0g，オクタン酸 2.3g，水 47.7g のとき(合計 100g)，調粘剤であるヒュームドシリカは 5.0g となっている．

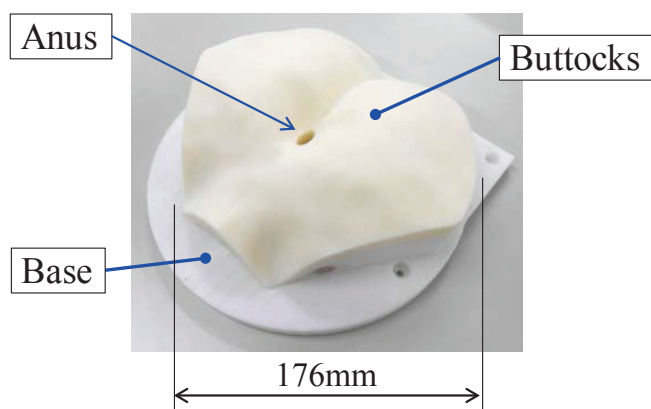


Fig. 4-23 Artificial buttocks



Fig. 4-24 Artificial stool (Type 4)

#### 4.6.4 実験方法

実験の様子を Fig. 4-25 に示す．まず模擬臀部をトイレユニット・密着部に取り付け，肛門部分から模擬便を押し出し，最後に肛門を閉じることで，肛門周辺に模擬便が付着した状態(肛門が汚れている状態)にする．このとき，模擬便は約 2g 付着させた．その後，トイレユニットの清拭機構部によって清拭動作を行い，汚れを拭き取る．清拭動作完了後，清拭機構側と模擬臀部側，両方の状態を確認し，汚れの取れ具合などを見ることで評価を行う．

今回，泡を使わない場合(泡なし)と泡を使った場合(泡有り)で実験を行い，汚れの取れ具合から清拭機構と泡の有効性の評価を行った．泡なし，泡有りでの手順の違いを以下に示す．

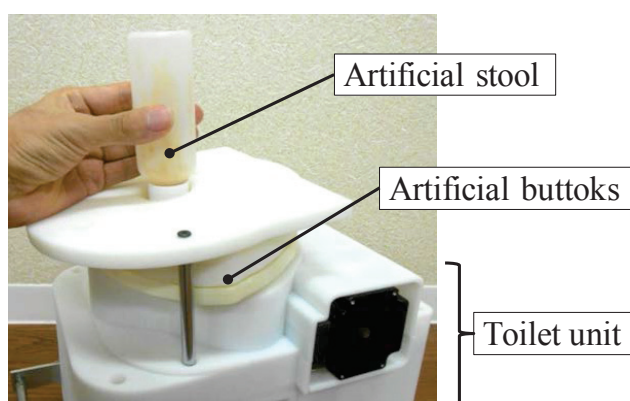


Fig. 4-25 Experimentation

・泡を使わない場合(泡なし)：

①模擬便を排出(汚れを付ける) - ②清拭動作を実行 - ③清拭完了

・泡を使った場合(泡有り)：

①肛門に泡を付着 - ②模擬便を排出(汚れを付ける) - ③再び泡を付着 -  
- ④清拭動作を実行 - ⑤清拭完了

上述のとおり、泡を使った場合は、模擬便を排出させる前後で泡を付けることで、肛門および付着した模擬便に泡が付くようにしている。

清拭機構部の清拭動作で行う、模擬臀部の拭き取り回数については、事前に清拭の実験を行ったところ、泡の有無にかかわらず 28 回以上清拭を行っても、それ以降ウェットティッシュに汚れが付かなかったため、本実験では「1 枚のウェットティッシュで拭き取れる回数 7 回」×「ウェットティッシュ 4 枚分」の合計 28 回まで清拭することとした。実験は、泡を使わない場合と使った場合、それぞれ 5 回ずつ行い、清拭完了後の状態確認では、清拭機構部側では汚れを拭き取ったウェットティッシュの状況を、模擬臀部側では密着部内の臀部表面を確認し、次項で述べる評価を行った。

#### 4.6.5 評価方法

清拭による汚れの除去性能を評価するにあたって、汚れを拭き取った回数(清拭回数)を比較することにした。また事前に動作確認を行った際、模擬臀部に付着させた汚れ(模擬便)を清拭機構部で拭き取らせたときに、汚れが十分に取れず、臀部側で押し広げてしまい、汚れの面積が広がる場合があった。そこで今回、汚れの除去性能を見るもう一つの要素として、清拭完了後に臀部に残った汚れの面積を見ることにした。

清拭完了後の清拭機構側にあるウェットティッシュの状態の例を Fig. 4-26 に、模擬臀部側の状態例を Fig. 4-27 に示す。これらの画像から(1) 清拭回数と、汚れの面積から求めた(2) 汚れの残留率を調べた。以下にそれぞれの値の詳細を述べる。



(1) 清拭回数：汚れを拭き取った回数

清拭完了後、清拭部に取り付けたウェットティッシュを確認し、28回清拭したうち、Fig. 4-26 (i)~(vi)に示すような模擬便の汚れが付いていた回数を調べる。

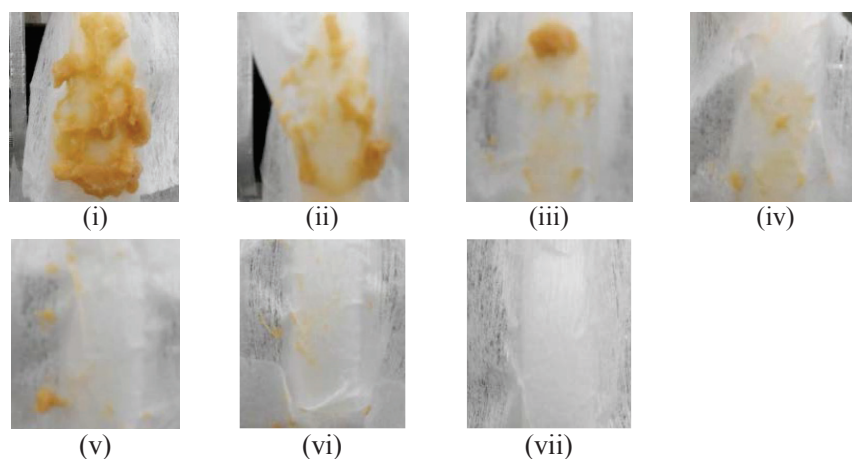


Fig. 4-26 Wet tissue after wiping (from 1 to 7)

(2) 汚れの残留率：臀部に付着したままの模擬便による汚れの面積

清拭完了後の臀部を、Fig. 4-27 のように正面から撮影し、その写真画像(画像サイズ：640×480 pixel)から、密着部を取り付けた状態で見える臀部全体の面積と、模擬便で汚れている部分の面積を調べ、臀部全体に対する汚れ部分の割合を調べる。

今回、模擬臀部の写真画像から、密着部(Fig. 4-27：外側の白い部分)を切り取り、Fig. 4-28(a)に示すような残った部分を臀部全体とし、次にその臀部全体から、肛門周辺の汚れている部分を Fig. 4-28(b)のように切り抜き、汚れ部分として、それぞれの切り出した画像の pixel 数を面積とした。

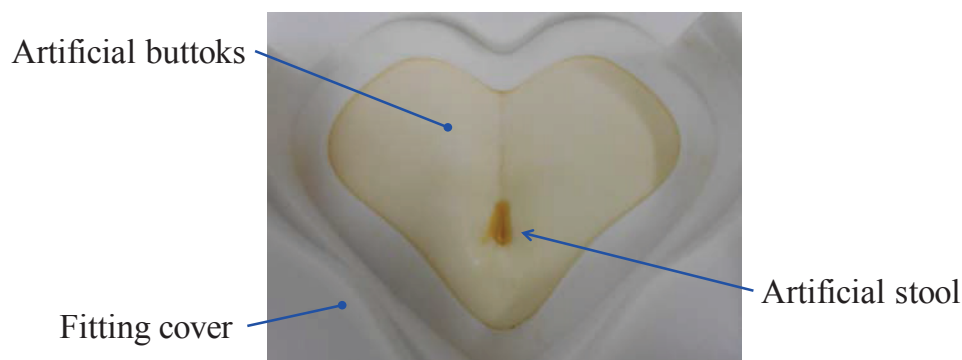


Fig. 4-27 Artificial buttocks after wiping

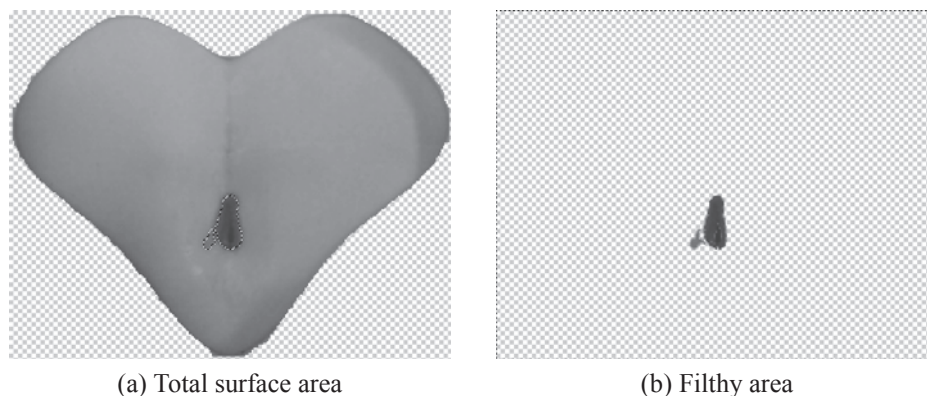


Fig. 4-28 Picture processing

#### 4.6.6 実験結果

Table 4-5 に泡を使わない場合(No.1~5)と使った場合(No.6~10), それぞれ 5 回ずつ, 合計 10 回実験を行ったときの, (1)清拭回数と, 臀部の汚れ部分の面積および臀部全体の面積, そしてその面積から求めた(2)汚れの残留率の結果を示す. また, Fig. 4-29 のグラフには, 横軸を(1)清拭回数, 縦軸を(2)残留率としたときの関係を示す.

Table 4-5. Number of wipes and Residual percentage

		(1) Number of wipes [times]	(2) Residual percentage		
Experimental run number			Filthy area [pixel]	Total surface area [pixel]	[%]
without foam	No.1	11	707	35149	2.01
	No.2	5	500	35185	1.42
	No.3	21	1339	34870	3.84
	No.4	17	2189	35506	6.17
	No.5	26	2508	34947	7.18
	Average	16.0	-	-	4.12
with foam	No.6	7	437	35644	1.23
	No.7	10	743	35457	2.10
	No.8	8	806	32226	2.50
	No.9	4	300	34741	0.86
	No.10	3	293	35597	0.82
	Average	6.4	-	-	1.50

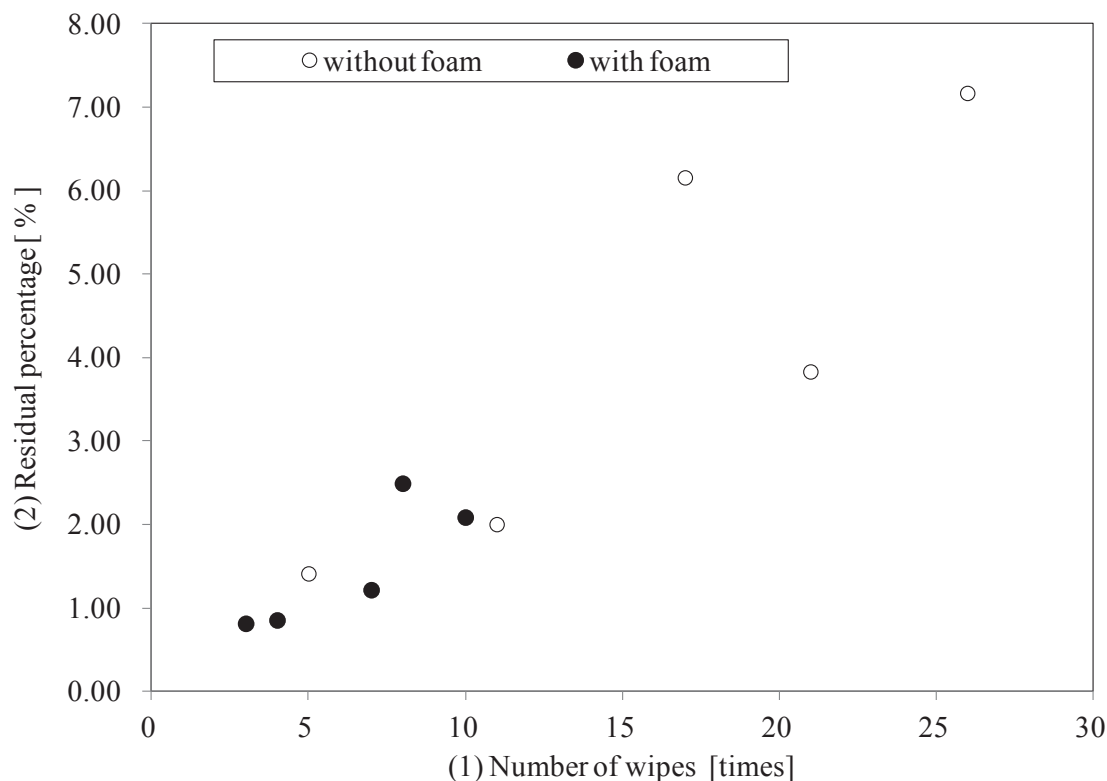


Fig. 4-29 Number of wipes and Residual percentage

泡を使わない場合、清拭回数は平均 16.0 回で、残留率の平均値は 4.12%となった。No.2 のように清拭回数が 5 回で汚れの残留率が 1.42%と、ウェットティッシュに汚れが付き、拭き取れている回数が少なくても、ある程度汚れを取り除いている場合がある。一方、No.5 のように清拭回数 26 回と多く拭き取っていても、残留率が 7.18%と十分に汚れを取り除いていない場合があった。これは清拭部でウェットティッシュを汚れに押し付けても、汚れがほとんどティッシュ側に吸着せず、臀部に付着したまま取り除くことができなかったためだと思われる。

これに対して泡を使った場合、清拭回数は平均 6.4 回、残留率は 1.50%となっており、どちらも泡を使わない場合に比べて値が半分以上となっている。これは、泡を使用することで、汚れが取れやすくなり、しっかりと拭き取れるようになったと考えられる。また泡を使った場合においても、No.10 のように清拭回数が少なく、かつ残留率が少ないものと、No.7 のように比較的清拭回数が多く、残留率も多くなっている場合があるが、Fig. 4-29 のグラフを見ると、泡を使わない場合の値のばらつきに比べ、泡を使った場合の値はばらつきが小さくなっており、清拭回数と残留率が共に少なくなっていることがわかる。

以上のことから、排便の前後で肛門に泡を付着させることで、少ない拭き取り回数でも十分に汚れを取り除くことができることがわかる。これらは、4.5.2 d) で述べたように、泡を付けることによって、肛門が泡で覆われ、便が剥離しやすくなることに加え、便が水溶して、ウェットティッシュに汚れが吸着させやすくなったからだと考えられる。

#### 4.7 排泄ロボットを使った検証実験

第2章で開発した排泄ロボットを使用し、実際の使用を想定した介護用トイレシステムの検証実験を行った。ここでは、使用者が介護用トイレシステムの便座に座り、肛門検出システムで肛門位置を特定、トイレユニットを移動させて臀部に密着させる。その後、まず泡を肛門に付着させ、排便をし、再度泡を付けて清拭を行うまでの動作を再現し、検証を行う。

排泄ロボットの臀部部分には、4.6.2 と同様のウレタン製の模擬臀部を取り付けた。また実験時、肛門位置を検出させるために、肛門部分の温度を高くする必要があるが、今回実験前に温めた粘土を肛門部分に取り付けておくことで、位置を特定することにした。この粘土は、排泄ロボットの排便動作時に模擬便と共に落ちるようにしている。

排泄ロボットを介護用トイレシステムに配置したときの図を Fig. 4-30(a)に、トイレユニットを排泄ロボットの臀部に密着させたときの正面図を Fig. 4-30(b)に示す。排泄ロボットは、トイレシステムの便座部分に追加で取り付けしたアルミフレームに固定した。また実験時は、排便や清拭の動作を確認するために、トイレユニットの本体ケースを外し、ユニット内部を見られるようにした(Fig. 4-30(b))。

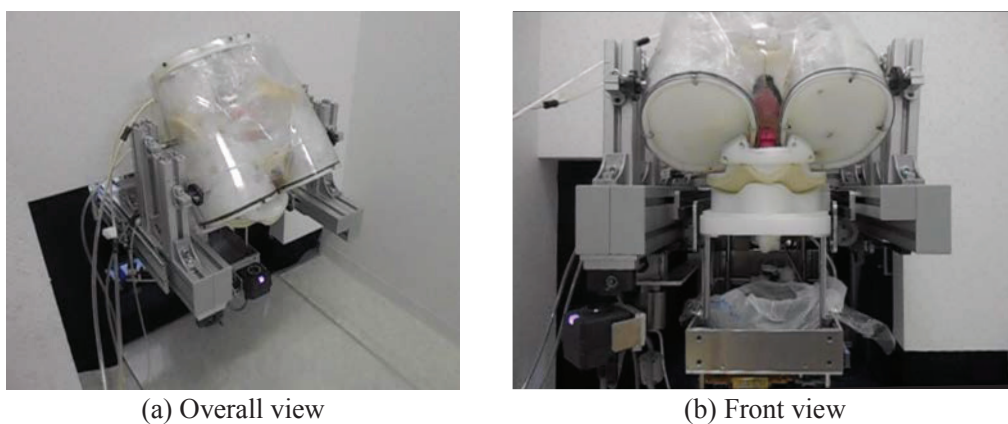


Fig. 4-30 Toilet system for caring and Robotic defecation simulator

検証実験を行ったところ、介護用トイレシステムは問題なく、肛門位置にトイレユニットを移動し、臀部に密着、そして排便前後の泡付けと清拭機構によって、肛門の便を取ることができた。しかしながら、排泄ロボットの取り付けの際、少しでも臀部の角度が異なると、臀部とトイレユニットの密着部との間に隙間が見られた。この状態だと臭いが漏れてしまうため、この密着部分についても、今後詳細な検証を行う必要があることがわかった。

### 4.8 まとめ

寝たきりの高齢者でも自立して排泄を行なえる介護用トイレシステムの開発を行なった。本トイレシステムは、排泄物を収容するトイレユニットを利用者の臀部に密着させることで、臭いが拡がることを防ぎ、確実に排泄物を回収できることに加え、肛門の清拭も行うことができる。

まず、肛門の位置を特定する必要があるため、肛門とその周りの温度差を利用して、赤外線サーモカメラを用いた肛門検出システムを開発した。そして、トイレユニットを肛門位置まで運ぶ移動機構により、自動でトイレユニットを臀部に密着させることを可能にした。トイレユニットでは、臀部との密着部の形を、骨盤の形状の違いから男女別に製作し、また排泄物を入れる袋を熱による圧着で密閉できるようにした。

次に、自動で肛門を洗浄する清拭機構を製作、おしり拭き用のウェットティッシュを押し付けることで肛門の汚れを拭き取れるようにした。さらに、泡を肛門に付着させることで、汚れを取れやすくなるなどの効果があると考え、泡生成機構を導入して排泄の前後に泡を付着できるようにした。この清拭機構と泡を使った肛門の洗浄方法について、模擬臀部および模擬便を使用した清拭実験を行い、泡の有効性の評価を行った。清拭実験では、模擬臀部の肛門に模擬便による汚れを付着させ、清拭機構による清拭動作を行って汚れを拭き取らせた。そして、汚れを拭き取った清拭回数と模擬臀部に残った汚れの残留率を調べ、泡を使わない場合と泡を使った場合とで比較を行ったところ、泡を使った場合の方が、清拭回数と残留率がともに小さくなっており、少ない拭き取り回数でしっかりと汚れを拭き取っていることが分かった。これは泡によって、便が剥離しやすくなり、また水溶してウェットティッシュに吸着しやすくなったからだと考えられる。

また、排泄ロボットを使った介護用トイレシステムの検証実験を行ったところ、肛門検出システムによる肛門位置の特定から、ユニットの移動、そして清拭機構と泡による

肛門の洗浄までの動作が問題なく機能することを確認できた。しかし、臀部とトイレユニットの密着部分に隙間ができる場合があり、今後密着性について詳しく検証を行う必要がある。





## 第5章 結論と今後の課題

---

## 5.1 結論

1.1 節で述べたように、本研究は、社会的課題として高齢者の排泄介護を視野に入れ、宇宙においても問題がある排泄の課題を解決する排泄支援装置（トイレシステム）の開発を行なう宇宙実験の研究テーマとして開始した。そのなかで、宇宙船内での新しいトイレシステムの開発と、その実験を行うためのデモ装置として排便ロボットの開発から始まり、それまでに得られた知識や技術などを活用して、排泄介護を支援する介護用のトイレシステムの開発を行なった。そこで、まず 1.1.2 では、宇宙船内での排泄について述べた。微小重力環境下であるために便が皮膚に付着したままとなることや、閉鎖された環境であるため臭いや排気ファンの騒音が問題となっていることを示した。1.1.3 では、介護現場の排泄介護について、介護者と被介護者にかかる様々な負担について述べ、また現在発売や研究が行われている排泄介護を支援する機器を紹介し、これらの機器は負担軽減につながるが、被介護者の自立を支援するものではないことを示した。

以上を踏まえて、本研究は、以下の3つの項目に分けることができる。

- a) 人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータ・排泄ロボットの開発
- b) 宇宙船での排泄問題を解決する宇宙用トイレシステムの開発
- c) 排泄介護を支援する介護用トイレシステムの開発

以下にそれぞれの内容についてまとめる。

### a) 人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータ・排泄ロボットの開発

第2章では、人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータである排泄ロボットの開発を行なった。本装置は人間の排便に関わる骨盤周辺の器官やそれらの形状・動作を再現した原寸大の人体部分モデルである。

まず人間の排泄機構について調査し、排泄に関係する器官や筋肉の構造、動作について確認した。そこから、排泄を行う際に重要な役割がある肛門括約筋、恥骨直腸筋、直腸、そして腹圧の動きをそれぞれ動作機構により再現することで、便が漏れないようにする排便抑制動作と、便を排出する排便動作を排泄ロボットで行わせることにした。腹

圧については、文献より人間が息んだ時の直腸内圧を参考に、排泄ロボットでも直腸内の圧力を測定し調整を行った。排泄ロボットの動作は、4つの段階に分けて制御し、模擬便を使った動作実験で動作確認を行った。模擬便は4種類の硬さの異なるものを製作し、それぞれ排便動作で排出を行った。実験の結果、最も硬い便が排出されず、またその他の便についても、動作によって排出された量が、直腸内に入れた量の半分程度、あるいは半分以下であり、十分に排出が行われなかった。そこでその要因を調べるために、各動作機構をそれぞれ動かし状況の確認を行った。まず肛門括約筋と恥骨直腸筋の動作機構では、肛門から便が漏れることなく、便排出の抑制ができていた。しかし、直腸と腹圧の動作機構については、便排出時に直腸内の模擬便が肛門側のみではなく、S状結腸側である上方向にも移動しており、半分以上の便が腸内に残っていることが分かった。そのため、便排出時に便がS状結腸側に移動しないよう、直腸上部から収縮するような改良案を思案した。

#### b) 宇宙船での排泄問題を解決する宇宙用トイレシステムの開発

第3章では、宇宙船内の排泄時に問題となっている、便が皮膚に付着したままとなることや臭いなどの問題から、それらを解決する機構・方法を提案し、新しいトイレシステムの開発と使用実験を行なった。

装置を臀部に密着させて臭いの拡散を防止する方法と、ローラで袋を閉じ、皮膚に付着した便を取り除く開閉機構を提案し、体に取り付けて使用する装着型トイレの製作を行ない、使用実験を行った。また装置を臀部に取り付ける際、密着性を向上させるために、吸引器を使った吸着機構を提案し、装着型トイレ同様、使用実験を行った。使用実験により、ローラの開閉で付着した便を取り除けることや、吸着感を確認できたが、一方で、開閉機構のローラが臀部に押され閉じなくなる、臀部との密着部分が皮膚に吸着していても、体を動かすと簡単に外れてしまうなどの問題点が出てきた。そのことから、本装置において臀部の形状を考慮する必要がある事がわかった。

そこで、臀部の形状・動作の計測を、3D スキャナを利用して行い、データの取得を行った。座位、四つん這い、仰向けの3つの姿勢について計測を行い、それぞれ3次元的な形状・動作のデータを取得し、比較をすることで特徴を確認した。息むことで臀部が押された時の動作範囲、動作形状は、姿勢に関係なく骨盤底の形状、尾骨と坐骨の配

置に影響していた。そして押し出された量である変位量については、まず重力によって息む前から臀部が押し出されていると予想される座位状態と、息んで腹膜を直腸に押し付けるのが難しい仰向け状態は、肛門部分のみ大きく変化し、その他も部分に変位量が小さくなっていた。四つん這い状態は、重力による変化がないため、息みによる変化が大きく出ていた。このとき、肛門部分は約 30mm 変化しており、息みによる臀部形状の動作を確認することができた。

### c) 排泄介護を支援する介護用トイレシステムの開発

第4章では、排泄介護を支援する新しい介護用トイレシステムの開発を行なった。本トイレシステムでは、利用者が便座に座った後、自動で排泄物を收容するトイレユニットを臀部に密着させることで、臭いが拡がることを防ぎ、確実に排泄物を回収できることに加え、排泄後は肛門の汚れを装置によって清拭することで、体が不自由な方にでも自立した排泄を行うことができる。

ユニットを臀部に密着させる際に、そして肛門を清拭する際に、肛門の位置を特定する必要があるため、肛門とその周りの温度差を利用して、赤外線サーモカメラを用いた肛門検出システムを開発し、その検出精度を確認する評価実験を行った。実験の結果、誤差の最大は 5.2mm であった。これはカメラの画素の 1.2pixel 程度であり、また検出システムによって臀部に密着させる器具のサイズは 100~110mm×125~135mm であるため、十分に許容であると考えられる。この肛門検出システムと、トイレユニットを肛門位置まで運ぶ移動機構により、自動でトイレユニットを臀部に密着させることを可能にした。

トイレユニットでは、臀部との密着部の形を、3章の臀部形状計測の結果を参考に設計し、骨盤の形状の違いから男女別に製作した。また排泄物を入れる袋を熱による圧着で密閉できるようにした。次に、自動で肛門を洗浄する清拭機構を製作、おしり拭き用のウェットティッシュを押し付けることで肛門の汚れを拭き取れるようにした。さらに、泡を肛門に付着させることで、汚れを取れやすくなるなどの効果があると考え、泡生成機構を導入して排泄の前後に泡を付着できるようにした。この清拭機構と泡を使った肛門の洗浄方法について、模擬臀部および模擬便を使用した清拭実験を行い、清拭機構と泡の有効性の評価を行った。清拭実験では、模擬臀部の肛門に模擬便による汚れを付着させ、清拭機構で汚れを拭き取らせた。そして、汚れを拭き取った清拭回数と模擬臀部に残った汚れの残留率を調べ、泡を使わない場合と泡を使った場合とで比較を行った。

その結果、泡を使わなかった場合の清拭回数は平均 16.0 回、残留率が平均 4.12%となり、泡を使った場合の清拭回数は平均 6.4 回、残留率が平均 1.5%となった。したがって、泡を使った場合の方が、清拭回数と残留率がともに小さくなっており、少ない拭き取り回数でしっかりと汚れを拭き取っていることが分かった。これは泡によって、肛門表面を覆うことで、便が皮膚から剥離しやすくなり、また便が水溶してウェットティッシュに吸着しやすくなったからだと推測される。以上のことにより、清拭機構による汚れの拭き取りと、泡の有効性を確認することができた。

また、排泄ロボットを使った介護用トイレシステムの検証実験を行い、肛門検出システムやトイレユニットの移動機構、そして清拭機構をひとつとおり動作させ、問題なく機能することを確認した。

## 5.2 今後の課題

各項目における今後の課題を以下に述べる。

### a) 人間の排泄機構を模擬した排泄シミュレータ・排泄ロボットの開発

第2章において、直腸内の模擬便が十分に排出できなかったことから、直腸部分の動作について改良案を思案した。そこで今後はその改良案をもとに、排泄ロボットの動作機構を変更することで、排便動作の再現性を高めていく。

また、第3章の使用実験において、人間の臀部が排泄時に動作しており、開発しているトイレシステムでは臀部の形状を考慮した設計が必要であることが分かった。現状、排泄ロボットは直腸などの体内の器官について再現を行ったが、外側の臀部形状などは再現していない。上述のように、トイレの開発において臀部の形状が重要な要素であることが確認されたので、今後再現していく必要がある。第4章の清拭実験で用いた模擬臀部は、臀部表面の形状を再現しているが、排泄時に腹圧で変化する動作はできない。この模擬臀部に第3章で得られた動作範囲や変位量のデータを用いた動作機構を作ることで、排泄時の臀部の動作を再現することが可能であると考えられる。

以上のような改良を行うことで、排泄ロボットをより人間に近い動作を再現することで、新しいトイレの検証・評価に活用できるようにしていく。



### b) 宇宙船での排泄問題を解決する宇宙用トイレシステムの開発

第3章において、宇宙船内での使用を想定したトイレシステムの開発を行なったが、現在では行っておらず、その技術や知識について、介護用トイレシステムに引き継ぐかたちで今後も研究を進めていく。

宇宙用トイレシステムでの、装置を臀部に密着させる方法は、介護用トイレシステムに引き継いでいるが、第3章の実験においてに同様に検証を行った吸着機構については、現在利用していない。検証実験では、密着性の向上や排便の促進について、どちらも主観的なものでしか評価が行なえず、また密着部分が臀部形状を考慮したものではなかったため、十分な検討が行えていない。

臀部の形状計測の結果より、臀部形状に合わせた密着部の製作が可能となり、介護用トイレシステムで実際に利用している。そこで今後は、その密着部を使用することで、吸着機構の検証をさらに行っていく。そして臀部との密着性を向上させることにより、目的である臭いの漏れを防ぐことができるか、また排便の促進効果があるかどうか確認を行う。排便の促進効果については、筋力が衰え、強く息むことができないなど、排泄が困難な高齢者などの排泄支援になることが期待できるため、介護用にも活用できると考える。

### c) 排泄介護を支援する介護用トイレシステムの開発

第4章において、清拭機構と泡を使った清拭実験を行ったが、今回、泡の量の検証を行っておらず、その使用量で汚れの取れ具合が変わってくる可能性があるため、検証を行っていく必要があると考える。これにより、清拭回数や残留率をさらに減らせる可能性がある。また今回の清拭実験は、模擬臀部を使った実験であったため、最終的には実際に人間が使用した場合についての検証を行っていく。また本トイレシステムでは、トイレユニットを臀部に密着させ、排泄後に熱圧着機構で袋を密閉することで臭いの拡散を防ぐことを想定している。しかしながら、排泄ロボットを使った検証実験で、現状の密着部でも臀部との間に隙間ができる場合があった、そのため、この密着させるときの密着性や臭いの漏れなどに関する検証についても行っていく。

現状のトイレシステムは、排泄物の大便の処理を行うことができるが、尿の処理については対応していない。尿の場合、男女による違いがあるので、それらを十分に考慮し

た開発を行なっていく必要がある。本研究では肛門の位置を特定することができるため、その位置から相対的に陰部の場所を割り出し、尿収納用の容器を取り付けるなどの処理方法を検証していく。

1.2 節でも述べたが、本装置は自立生活サポートシステムと合わせて使うことで、ベッドからの起き上がり介助、歩行補助、そして排泄支援まで行うことを想定している。そのため今後は、自立サポートシステムを含めた実証実験を行うことで、有効性を確認していく。これにより、介護用トイレシステムと自立生活サポートシステムを合わせた、総合的な排泄介護支援装置の研究開発を行なっていく、たとえばほとんど寝たきりの方でも、装置によって体を動かして、トイレに行くことができるようにしていく。

そして最終的には、生きている限り寝たきりになることなく、正しい姿勢で歩行をし、座って排泄ができることで、QOL を高め、人間の尊厳を維持できるようになると考える。



## 謝 辞



ここに一篇の学位論文をまとめることができました。本研究を進めるにあたりましては、数多くの方々に有形・無形のご厚情を賜りました。皆様方への感謝の気持ちを込め、ここに謝辞を述べさせていただきます。

まず、本研究の機会を与えてくださり、終始懇切なるご指導ならびにご鞭撻を賜りました東京理科大学工学部第一部機械工学科 小林宏 教授に深甚なる謝意を表します。先生は常日頃から精力的に活動され、そのスケジュールは正に多忙の一言でありました。そのような状況でも、私が問題に直面したときは何度も相談に乗ってくださり、数多くの研究の手掛けや進め方などをご教授くださいました。未熟で成長の遅い私を辛抱強くご指導してくださったことは、研究の励みとなりました。先生は常に“実用化”を第一に考えておられましたが、私もその姿勢に倣い、実用的なモノを世に送り出せるようにこれからも研究活動に精進していきたいと思いをします。

橋本卓弥先生には、研究上の助言や、研究以外のことでも様々な場面で気にかけていただきました。いつも頼りにさせていただいていたことは言うまでもありません。心より感謝いたします。

シー・エス・ピー・ジャパン株式会社 吉田哲二氏をはじめ、ハイセツソリューション研究会の委員の岸友三氏、浅井信義氏、福井寛氏、山崎義樹氏の皆様には、本研究を様々な方面で携わっていただきました。氏らのご協力無くして本研究は成しえませんでした。氏の多大なるご協力に心より感謝申し上げます。

他にも、小林研究室のメンバー全員には何らかの形で世話になりました。深く感謝いたします。

最後になりましたが、博士後期課程にまで進学する機会を与えてくださり、あらゆる場面で温かく見守り続けてくれた父、母には深く感謝いたします。

本研究の成果が皆々様のご期待に沿うものかどうか甚だ疑問ではありますが、ここに重ねて厚く謝意を表し、本論文の結びとさせていただきます。

2015 年 2 月  
所 晃 史





# 参考文献

- (1) JAXA|宇宙航空研究開発機構, “利用テーマの募集:「きぼう」での実験 - 宇宙ステーション・きぼう広報・情報センター”,  
<<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/participation/application/>>, (2010).
- (2) JAXA|宇宙航空研究開発機構, “国際宇宙ステーション(ISS)”,  
<<http://iss.jaxa.jp/iss/index.html>>, (2010).
- (3) 吉田哲二, 山崎義樹, 浅井信義, 小林宏, “宇宙発! スーパートイレを求めて”, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2A03 (2009).
- (4) JAXA|宇宙航空研究開発機構, “きぼう利用フォーラム 国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟 東京講演会”,  
<[http://kiboforum.jaxa.jp/partnership/seminar/081216\\_4.html](http://kiboforum.jaxa.jp/partnership/seminar/081216_4.html)>, (2010).
- (5) “National Air and Space Museum Object Collections”, Smithsonian National Air and Space Museum, <<http://www.nasm.si.edu/collections/>>, (2010).
- (6) 小口美津夫, “トイレのすべて 1)宇宙船のトイレと排水処理〈宇宙でのリサイクル〉”, 建築設備と配管工事, Vol.48, No.14 (2010), pp.34~38.
- (7) マイク・ミュレイン, 金子浩訳, “ライディング・ロケット(上)”, 化学同人, (2008).
- (8) 吉田哲二, 岸友三, 浅井信義, 小林宏, 所晃史, 福井寛, 山崎義樹, “緊急用宇宙トイレのフーズビリティースタディ(FS)について”, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2B10 (2011).
- (9) 大島博, “有人宇宙飛行と宇宙医学”, 学術の動向, Vol.10, No.9 (2005), pp.33~39.
- (10) LeBlanc, A., Schneider, V., Shackelford, L., West, S., Oganov, V., Bakulin, A. and Voronin, L., “Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight”, J Musculoskelet Neuronal Interact, Vol.1, No.2 (2000), pp. 157-160.
- (11) Lang, T., LeBlanc, A., Evans, H., Lu, Y., Genant, H. and Yu, A., “Cortical and Trabecular Bone Mineral Loss From the Spine and Hip in Long-Duration Spaceflight”, J Bone Miner Res, Vol.19, No.6 (2004), pp.1006-1012.
- (12) Rhatigan, JL., Robinson, JA. and Sawin, CF., “Explorationrelated research on ISS : Connecting Science Results to Future Missions NASA/TP 213166”, NASA (2005).
- (13) 大島博, 水野康, 川島紫乃, “宇宙飛行による骨・筋への影響と宇宙飛行士の運動プログラム”, 日本リハビリテーション医学会誌, Vol.43, No.3 (2006), pp.186-194.
- (14) 桑原裕子, 今井美香, 吉田豊他, “排泄時のいきみ負荷が循環動態と直腸内圧に及ぼす影響 - 重力方向の異なる坐位と仰臥位における時系列解析 -”, 宇宙利用シンポジウム発表論文集, Vol.26 (2010), pp.132-133.
- (15) 上野義雪, “排便姿勢と力みやすさに関する基礎実験”, 学術講演梗概集. E, 建築計画, 農村計画, (1991), pp.643-644.

- (16) 内閣府, “平成 26 年版高齢社会白書”, (2014), pp.2-6.
- (17) 厚生労働省, “平成 26 年度 厚生労働白書”, (2014), pp.231.
- (18) 内閣府, “介護ロボットに関する特別世論調査(平成 25 年 8 月)”,  
<<http://www8.cao.go.jp/survey/tokubetu/tindex-h25.html>>, 2013-9-30.
- (19) 村上賢一, “藤澤宏幸, “立位保持補助装置開発前のアンケート調査およびトイレ動作所要時間データの集計結果”, 東北文化学園大学リハビリテーション学科紀要, Vol.3, No.1 (2007), pp.41-48.
- (20) 眞野行生, “高齢者の歩行障害と転倒の要因”, *Journal of Clinical Rehabilitation*, Vol.7 (1998), pp.243-247.
- (21) 菊池有紀, 薬袋淳子, 島内節, “在宅重度要介護高齢者の排泄介護における家族介護者の負担に関連する要因”, 国際福祉医療大学紀要, Vol.15, No.2 (2011), pp. 13-23.
- (22) 板倉朋世, 光田恵, 棚村壽三, “高齢者のおむつ交換時における排泄物の臭気特性に関する研究”, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.625 (2008), pp.335-341.
- (23) 吉本和樹, “施設で排泄援助を受ける高齢者の体験”, 日本老年看護学会誌, Vol.13, No.1 (2008), pp.57-64.
- (24) 安田寿彦, 渡辺正, 伊丹君和, 酒井一昭, “自立支援型移乗介助ロボット開発小史”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演概要集 (2013), 1P1-E08.
- (25) 本間敬子, 松本治, 小野栄一, 李秀雄, 山田陽滋, 堀本幹夫, 鈴木貴弘, 金平徳之, 鈴木利明, 塩澤伸一郎, “排泄介護総合支援ロボット「トイレアシスト」の研究開発”, バイオメカニズム学会誌, Vol.32, No.4 (2008), pp.195-201.
- (26) Homma, K., Yamada, Y., Matsumoto, O., Ono, E., Lee, S., Horimoto, M., Suzuki, T., Kanehira, N., Suzuki, T. and Shiozawa, S., “A proposal of a method to reduce burden of excretion care using robot technology”, in *Proc. 2009 IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot. (ICORR)*(2009), pp. 621–625.
- (27) 本間敬子, 山田陽滋, 松本治, 李秀雄, 小野栄一, “介護支援ロボットの実証試験における倫理審査と被験者保護について：排泄介護総合支援ロボット「トイレアシスト」の事例報告”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2 (2010), pp.181-190.
- (28) 上野創造, 今井陽介, 早坂智明, 大久保眞彦, 石川拓司, 山口隆美, “自走式排泄支援システムの開発”, 福祉工学シンポジウム講演論文集, (2008), pp.176-177.
- (29) 湯川俊浩, 大日方五郎, “生活支援機能を搭載した電動車椅子の開発”, 自動制御連合講演会講演論文集, Vol.51, No.412 (2008), pp.194-197, 2008.
- (30) Yukawa, T., Nakata, N., Obinata, G. and Makino, T., “Assistance System for Bedridden Patients to Reduce the Burden of Nursing Care (First report – Development of a multifunctional electric wheelchair, portable bath, lift, and mobile robot with portable toilet)”, 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2010), (2010), pp.132-139.
- (31) Fujimoto, T., Hashimoto, T., Sakaki, H., Higashi, Y., Tamura, T., Tsuji, T., “Automated handling system for excretion”, *Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Vol.4 (1998), pp.1973-1976.

- (32) 小嶋高良, 安部信行, 太田勝, 栗原, 伸夫, “高齢社会に適応する排泄用具に関する市場調査報告”, 八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要, Vol.6 (2008), pp.35-41.
- (33) 川本早高, 山本透, 神田橋, “自動洗浄便器の防汚性評価法”, 松下電工技報, Vol.55, No.4 (2007), pp.104-109.
- (34) W. Douglas Wong, M.D., Linda L. Jensen, R.N., David C. C. Bartolo, M.S., F.R.C.S., David A. Rothenberger, M.D. , “Artificial anal sphincter”, Diseases of the Colon & Rectum, Vol.39, No.12 (1996), pp.1345-1351.
- (35) 羅雲, 高木敏行, 山家智之, 天江新太郎, 神山隆道, 松木英敏, “形状記憶合金を用いた完全埋込型人工肛門括約筋の開発と実用化”, 日本 AEM 学会誌, Vol.12, No.2 (2004), pp.100-105.
- (36) 寺本龍生, “機能からみた肛門管の解剖,生理”, 日本消化器外科学会雑誌, Voi. 23, No. 8, pp. 2147-2150, 1990.
- (37) K. F. Noakes, I. P. Bissett, A. J. Pullan, and L. K. Cheng, “Anatomically Based Computational Models of the Male and Female Pelvic Floor and Anal Canal,” Proc. of the 28th IEEE EMBS Annual Int. Conf., pp. 3815-3818, 2006.
- (38) N. Okamoto, “Correlations of Anatomical Parameters in Dynamic Pelvic CT and Conventional Defecography for Patients with Rectal Prolapse,” The Keio J. of Medicine, Vol.57 (2008), pp.205-210.
- (39) 原田祐維, 小林 宏, “臥位から歩行を可能にする自立支援サポートシステムの開発”, 第 14 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2013(SI2013)講演概要集, (2013), 3J2-4.
- (40) Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M. and Wesker, K., trans. Sakai, T., Otani, O., “PROMETHEUS Lernatlas der Anatomie: Hals und Innere Organe”, (2008), pp.150-203.
- (41) Kahle, W., Leonhardt, H. and Platzer, W., trans. Ochi, J., “Taschenatlas der Anatomie für Studium und Praxis”, (1990), pp.20-375.
- (42) 肛門 JP, “肛門について”, <<http://www.koumon.jp/aboutkoumon/aboutkoumon.htm>>, 2010-01-25.
- (43) 矢崎化工 kaigo-web, “排便のメカニズム” <<http://www.kaigo-web.info/kouza/maeuke/>>, 2010-01-25.
- (44) 西村かおる, “疾患・症状・治療処置別 排便アセスメント&ケアガイド”, 学研, (2009), pp.8-27.
- (45) Chen, D., Kobayashi, H. and Koyama, Y., “Study on Deformation of a McKibben Type Actuator”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.75, No.759 (2009), pp.54-61.
- (46) 鈴木正保, 上野裕一, “ラジオピルを用いた腹腔内圧測定”, 日本体育大学紀要, Vol.14, No.2 (1985), pp.55-58.
- (47) 東玲子, “努責方法と腹腔内圧 -30° 半座位において-”, 日本看護研究学会雑誌, Vol.14, No.2 (1991), pp.61-68.

- (48) 磯田晋, 沖田将人, 坂本哲, 相馬民太郎, 井元清隆, 鈴木伸一, 内田敬二, 小菅宇之, 高梨吉則, “破裂性腹部大動脈瘤術後の腹腔内圧モニタリングによる病態把握”, 日本心臓血管外科学会雑誌, Vol.33, No.5 (2004), pp.314-318.
- (49) 河一京, “直腸肛門内圧同調 Videodefecography による排便機能障害の検討 — Rectocele を中心に”, 日本大腸肛門病学会雑誌, Vol.48, No.4 (1995), pp.289-300.
- (50) 天野信一, “直腸肛門内圧からみた Rectocele の病態”, 日本大腸肛門病学会雑誌, Vol.53, No.10 (2000), pp.962-968.
- (51) 川本早高, 山本透, 神田橋毅, “自動洗浄便器の防汚性評価法”, 松下電工技報, Vol.55, No.4 (2007), pp.104-109.
- (52) 川本早高, 田中清隆, 北村仁史, 模擬便, 特開 2007-315974 号 (2007).
- (53) O'Donnell, L J., Virjee, J. and Heaton, K W., Detection of pseudodiarrhoea by simple clinical assessment of intestinal transit rate, British Medical Journal (International Edition), Vol.300, Issue 6722 (1990), p.439.
- (54) 松田直樹, 舟山裕士, 高橋賢一, “肛門伸展張力計の開発”, 日本大腸肛門病学会雑誌, Vol.59, No.8 (2006), pp.427-430.

# 主論文を構成する論文

---

## 学術論文

- (1) Koushi TOKORO, Takuya HASHIMOTO and Hiroshi KOBAYASHI, “Development of Robotic Defecation Simulator”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.3, pp.377-387, 2014.6.20.
- (2) 所 晃史, 小林宏, “自動泡洗浄付き介護用トイレシステムの開発とその評価”, 日本機械学会論文集, (掲載決定)

## 国際会議

- (3) Koushi Tokoro, Takuya Hashimoto, and Hiroshi Kobayashi, “Development of New Toilet System”, Proceedings of the 1st Annual IEEE Healthcare Innovation Conference of the IEEE EMBS, pp.105-108, 2012.11.7-9.
- (4) Koushi TOKORO, Keisuke FUJIHARA, and Hiroshi KOBAYASHI, “Development of Anal Position Detecting System for New-Toilet system”, Proceedings of the 2013 7th International Conference on Sensing Technology (ICST 2013), pp. 52-55, 2013.12.3-5.





# 研究業績

## 学術論文

- (1) Koushi TOKORO, Takuya HASHIMOTO and Hiroshi KOBAYASHI, "Development of Robotic Defecation Simulator", Journal of Robotics and Mechatronics Vol.26, No.3, pp. 377-387, 2014.6.20.
- (2) 所 晃史, 小林宏, "自動泡洗浄付き介護用トイレシステムの開発とその評価", 日本機械学会論文集, (掲載決定)

## 国際会議

- (3) Koushi Tokoro, Takuya Hashimoto, and Hiroshi Kobayashi, "Development of New Toilet System", Proceedings of the 1st Annual IEEE Healthcare Innovation Conference of the IEEE EMBS, pp. 105-108, 2012.11.7-9.
- (4) Koushi TOKORO, Keisuke FUJIHARA, and Hiroshi KOBAYASHI, "Development of Anal Position Detecting System for New-Toilet system", Proceedings of the 2013 7th International Conference on Sensing Technology (ICST 2013), pp. 52-55, 2013.12.3-5.

## 国際会議 / 口頭発表

なし

## 国際会議 / ポスター発表

- (5) 所 晃史, 小林宏, "挿入型トイレと排泄ロボットの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演概要集, 1A1-D28, 2010.
- (6) 所晃史, 小林宏, "新型トイレシステムと排泄ロボットの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演概要集, 2A2-U08, 2012.
- (7) 所晃史, 小林宏, "新型トイレシステムと排泄ロボットの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演概要集, 2P1-C11, 2013.
- (8) 所晃史, 小林宏, "新型トイレシステムの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演概要集, 1A1-B03, 2014.

**その他の研究業績**

(9) 特許（登録 1 件）

特開 2011-055956 号，「挿入型排便器」，小林宏，橋本卓弥，所晃史，金森洋史，  
2011.03.24（特願 2009-207321 号，2009.09.08）。