

博士論文

大災害時人命救助ロボットの研究

平成 27 年（2015 年）12 月

長岡技術科学大学

大学院工学研究科 博士後期課程

生物統合工学専攻

佐橋 拓

学籍番号：08513485

指導教官：塩野谷明

目次

第一章 緒論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 災害診療支援システムの概要.....	2
1.3 研究の目的, 本論文の構成.....	4
【第1章の参考文献】.....	5
第二章 人命救助ロボットの概念 -旧型機を通して-	7
2.1 既存の災害用ロボット.....	7
2.1.1 クローラ型ロボット.....	7
2.1.1.1 Quince (クインス).....	7
2.1.1.2 PackBot.....	8
2.1.1.3 T-52 援竜.....	9
2.1.1.4 KOHGA3.....	10
2.1.2 ホイール型ロボット.....	11
2.1.2.1 FRIGO-M.....	11
2.1.2.2 R-Crank.....	12
2.1.2.3 MATOI.....	13
2.1.3 飛行型ロボット.....	13
2.1.3.1 4チルトロータ UAV.....	14
2.1.4 二足歩行・多足歩行ロボット.....	14
2.1.4.1 ASIMO.....	15
2.1.4.2 S-One.....	16
2.1.4.3 LS3.....	17
2.1.5 その他のロボット.....	17
2.1.5.1 能動スコープカメラ.....	17
2.2 人命救助ロボット旧型機 (試作1号機) の概要.....	18
2.2.1 人命救助ロボットの必要性.....	19
2.2.2 双帯対向クローラの利点.....	21
2.2.3 バイタルセンサプローブ.....	22
2.2.4 実物大試作機の仕様.....	24
2.3 仮想運用手順.....	26
2.4 発現した問題点.....	27
2.5 まとめ.....	29

2.5.1	レスキューロボット群における人命救助ロボットの位置付け	29
2.5.2	人命救助ロボット開発に必要な研究項目	30
2.5.3	人命救助ロボットの独自性	32
	【第2章の参考文献】	33
第三章	現行機 子機入渠型人命救助ロボット (2号機) の概要	38
3.1	子機入渠型人命救助ロボットの構成	38
3.2	運用手順	39
3.3	キャリア・ユニット	41
3.4	ブルーダ・ユニット	42
3.4.1	CSP 機構 (クラッシュシンδροーム発症阻止機構)	43
3.4.2	アルキメデス螺旋駆動体の歴史	46
3.4.3	アルキメデス螺旋駆動体の特徴, 利点, 問題点	48
3.4.4	アルキメデス螺旋駆動体の運動特性	50
3.4.5	アルキメデス螺旋駆動体に関する先行研究	51
	【第3章の参考文献】	52
第四章	キャリア・ユニット性能評価	54
4.1	キャリア・ユニット縮尺模型の概要	55
4.2	ラグの高さ・間隔を変えた瓦礫こじ開け機構の実験	57
4.2.1	実験方法	57
4.2.2	実験結果	60
4.2.3	考察	64
4.3	定量的解析システムを用いたキャリア・ユニットの解析	65
4.3.1	解析システムの構成	65
4.3.2	直進運動の実験	67
4.3.2.1	直進運動の解析	67
4.3.2.2	直進運動の実験結果	69
4.3.2.3	直進運動の考察	70
4.3.3	旋回運動の実験	71
4.3.3.1	旋回運動の実験・解析方法	71
4.3.3.2	旋回運動の実験結果	73
4.3.3.3	旋回運動の考察	73
4.4	有限要素法 (FEM) による強度解析	74
4.4.1	基本的概念	75
4.4.2	実験方法	75
4.4.3	実験結果	78
4.4.4	考察	80

4.5	キャリア・ユニット実験のまとめ	81
	【第4章の参考文献】	82
第五章	ブルーダ・ユニット性能評価	84
5.1	塩ビ製ロッドを使用した走行実験	84
5.1.1	完成前ブルーダ・ユニット縮尺模型第1号の問題点とその改善	84
5.1.2	ブルーダ・ユニット縮尺模型第1号の概要	86
5.1.3	螺旋羽根の巻き数を変えた砂利走行実験	88
5.1.3.1	実験方法	88
5.1.3.2	実験結果	91
5.1.3.3	考察	92
5.1.3.4	結論	93
5.1.4	螺旋羽根の材質と高さ、本体の負荷を変えた砂利走行実験	93
5.1.4.1	実験方法	94
5.1.4.2	実験結果	100
5.1.4.3	考察	116
5.1.4.4	結論	120
5.1.5	螺旋羽根の材質と高さ、本体の荷重を変えた雪上走行実験	120
5.1.5.1	実験方法	120
5.1.5.2	実験結果	121
5.1.5.3	考察	126
5.1.5.4	結論	128
5.1.6	塩ビ製ロッド実験のまとめ	128
5.2	アルミ製ロッドを使用した走行実験	129
5.2.1	ブルーダ・ユニット縮尺模型第2号及びアルミロッドの概要	129
5.2.2	砂利走行予備実験	133
5.2.2.1	実験方法	133
5.2.2.2	実験結果	136
5.2.2.3	考察	137
5.2.2.4	結論	137
5.2.3	瓦礫走行実験開始時に生じた問題とその対処	137
5.2.4	瓦礫モデル走行実験	138
5.2.4.1	実験方法	138
5.2.4.2	実験結果	139
5.2.4.3	考察	140
5.2.4.4	結論	140
5.2.5	鋭利な螺旋羽根での砂利走行実験	140

5.2.5.1	実験方法.....	141
5.2.5.2	実験結果.....	141
5.2.5.3	考察.....	142
5.2.5.4	結論.....	144
5.2.6	露地走行実験.....	144
5.2.6.1	実験方法.....	144
5.2.6.2	実験結果.....	145
5.2.6.3	考察.....	146
5.2.6.4	結論.....	146
5.2.7	各フィールド実験結果の比較.....	146
5.2.8	トラバース運動による走行実験.....	148
5.2.8.1	実験方法.....	148
5.2.8.2	平行移動による瓦礫走行実験結果.....	149
5.2.8.3	瓦礫縦走行との比較.....	150
5.2.8.4	平行移動による砂利走行実験結果.....	150
5.2.8.5	砂利縦走行との比較.....	152
5.2.9	アルミ製ロッド実験のまとめ.....	153
5.2.9.1	縦走行全体についての考察と結論.....	153
5.2.9.2	トラバース走行全体についての考察と結論.....	155
5.2.9.3	今後の展望.....	155
	【第5章の参考文献】.....	157
第六章	クラッシュ症候群発症阻止機構.....	159
6.1	クラッシュシンドロームの機序と診断.....	159
6.2	下肢静脈の駆血及び測定方法.....	161
6.2.1	駆血対象の選定.....	161
6.2.2	駆血方法.....	162
6.2.3	計測上の問題点と解決方法.....	165
6.2.4	血流計.....	167
6.3	予備実験.....	169
6.3.1	実験方法.....	170
6.3.2	実験結果.....	172
6.3.3	考察.....	175
6.3.4	結論.....	176
6.4	実物大 CSP 機構試作模型を用いた下肢駆血実験.....	176
6.4.1	実験方法.....	178
6.4.2	実験結果.....	180

6.4.3 考察.....	185
6.4.4 結論.....	187
6.5 まとめ.....	189
【第6章の参考文献】	190
第七章 まとめ	192
7.1 結果の総括	192
7.1.1 キャリア・ユニットに関する研究結果の総括.....	192
7.1.2 ブルーダ・ユニットに関する研究結果の総括.....	192
7.1.3 子機入渠型人命救助ロボットに関する研究結果の総括	193
7.2 総括的考察および今後の課題.....	194
7.2.1 キャリア・ユニットに関する総括的考察および今後の課題.....	194
7.2.2 ブルーダ・ユニットに関する総括的考察および今後の課題.....	195
7.2.3 子機入渠型人命救助ロボットに関する総括的考察および今後の課題	197
研究業績	199
公表論文.....	199
参考論文.....	199
発表業績.....	199
災害 ME 研究 特許申請及び査定済特許目録	207
謝辞.....	208

第一章 緒論

1.1 研究の背景

我が国日本は地震大国として世界に知られている。世界の 0.25% という小さな領域に、1995 年から 2004 年までに発生したマグニチュード 6.0 以上の地震回数は、全世界の 22.2% に及ぶ。

日本の歴史で確認できる最も古い地震は、日本最古の歴史書である「日本書紀」に出てくる推古 7 年、416 年の「允恭天皇の大和河内地震」であるが、そこには特に被害の記載はなく、ただ“地震（なみ、若しくはなみふると読む）”と書かれているだけで、これを正確な史実とする確証はない。それ以降の書物にも数多くの地震をはじめとする災害とその被害に関する記載が登場している。この小さい国土に 4 つのプレートがひしめき合い、主要なもので 98、近海を含めると 2,000 を超えるとされる活断層を有している。また地震による津波に関しても、国土面積当たりの海岸線延長が米国の約 45 倍に及ぶ、総延長約 35,000km の海岸線が津波防護を困難にしている。 1-1) 1-2) 1-3) 1-4) 1-5)

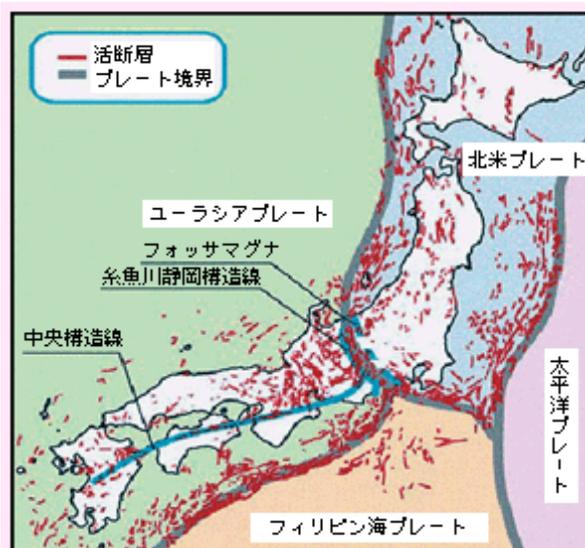


Fig.1-1 日本のプレートと活断層
参考文献 1-1, pp5, 図表 I-1-2-3 より転載

「天災は忘れたころにやってくる」この警句は地球物理学者にして随筆家である寺田寅彦より常に聞いていた教えを、教え子である中谷宇吉郎が師の名言

として残したものである¹⁻⁶⁾が、近年では忘れる間もなくたて続けに発生している。遡れば近年だけでも1995年1月17日兵庫県南部地震にはじまり、2004年10月23日新潟県中越地震、2007年7月16日新潟県中越沖地震、2008年6月14日岩手・宮城内陸地震と、地震災害だけでも枚挙に暇がない¹⁻⁷⁾。そして2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による被害が最も記憶に生々しい災害であろう.. これらの大きな人的・経済的被害から学び、次に来るであろう震災に対し、万全の対策をとるべく努力することが、工学、とりわけ災害工学の使命であると考えらる。

地震大国であると同時に科学技術立国でもある日本において、産業ロボットをはじめとするロボット関連技術の市場規模は、2012年時点で5975億円と全世界の57%に及ぶ¹⁻⁸⁾。しかしその双方の特徴を活かすことが出来るレスキューロボットに関して、日本で産業化・量産化されたロボットは未だ皆無である。

こうした状況を受け、「レスキューロボットコンテスト」¹⁻⁹⁾や「ロボカップレスキュー」¹⁻¹⁰⁾、さらには産学官を巻き込んだ「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」¹⁻¹¹⁾（通称大大特）などが発足・実施され、若い技術者の育成や技術の向上に切磋琢磨されている。しかしその現状でも未だ産業化・量産化に至っていないのは、単にレスキューロボットが若い技術であるからだけではなく、災害という多様な障害を生みやすい状況、運用者（実験室段階では研究者だが、その次にはレスキュー隊、さらにその先は一般市民が運用に携わるであろう）のニーズに必ずしもシーズが答えられていない、もしくは被害を体験しないと気付けない潜在的なニーズをシーズが掴みきれていない現状があると考えられる。さらには、実地試験段階においては、災害がランダムに発生する事象であることも、遅延の大きな要因であろう。

また、東北地方太平洋沖地震以降、多くの研究者に研究されるようになったレスキューロボットではあるものの、その中でも必要であることは容易に想像されながら、工学はもとより医学、さらには法学にまたがる知識と研究が必要とされるため、災害医療用ロボットの研究はほとんど行われてこなかった。

1.2 災害診療支援システムの概要

災害時の診療は、通常時診療とは異なる問題を抱える。まず、発災直後は被災地近辺の病院の収容人数をはるかに超える数の患者が一時に押し寄せるが、現地の医師の数は限られており、また医師を始め医療従事者の多くも被災者である場合も多く、マンパワーが極度に不足し、同時に医療機器や薬剤も不足する。またライフラインが途絶することで、平時診療で使用している電子機器が使えず、さらには揺れによる転倒や落下で医療機器が使用できなくなり、前時

代的な診療を余儀なくされる。災害診療医はこのような野戦病院的な診療を強いられている。その医療従事者にかかる身体的・精神的ストレスは想像するに余りある。

福本一朗(平成 26 年度までの指導教官)は、地震の災害診療での経験¹⁻¹²⁾ 1-13)を基に、災害現場という極限状態であっても医師のスムーズな診療を可能とし、実用に足る災害 ME 開発を行う災害 ME 研究会を立ち上げている。

ここでの目的を達成するべく、災害診療支援システムを考案した (Fig1-3).¹⁻¹⁴⁾ 1-15) 1-16)

災害時の診療を 4 つのフェイズに分類し、それぞれ高抗堪化、情報収集・評価、被災者探索、救助のフェイズに適したデバイスの研究を行ってきた。

例えば本論文の研究対象である人命救助ロボット (Fig1-2 右下) は、一番深いフェイズである“救助”のフェイズに属するが、災害時このデバイスが単独で存在しては救助不能であると考え。“救助”を行うためには、“被災者探索”を行い、そこに確実に被災者が埋もれているのかを確認する必要がある。さらに“被災者探索”や“救助”後の患者には“情報収集・評価”を行うデバイスが不可欠である。またこれらのデバイスが発災直後の揺れやそれに伴う火災・水害の影響で故障したり、ライフラインの途絶で使用不可となる可能性もある。“高抗堪化”，つまり災害で生じる障害に耐え、諸機能を維持できる耐久性を持たなければならない。しかもこれらのデバイスは、“基本理念”である常在戦場の精神と災害弱者の援護に基づいて設計・運用されなければならない。つまり、常に災害の中にあることの想定を生活の常とし、健常者のみならず災害弱者の保護を前提に作らなければ、実際の災害現場で運用者自身も災害弱者となりうる可能性を考慮すれば、使用に耐えうるデバイスにはならないと考える。

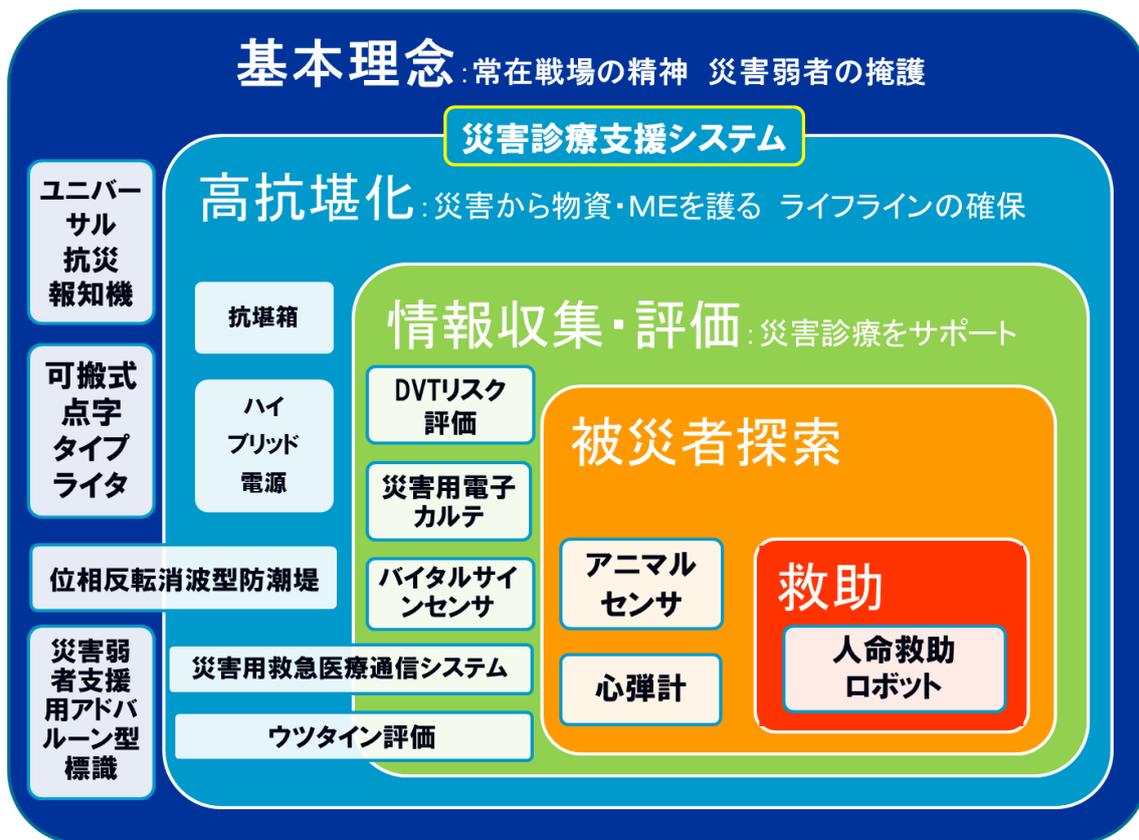


Fig.1-2 災害診療支援システムの概要図

上記のように、デバイス同士がサポートし合うことで、多様な困難を抱えやすい災害時においても使用可能なデバイスを、システムとして運用することで災害診療を支援しようというのがこの災害診療支援システムである。なお本論文の人命救助ロボットはこのシステムを構成する一デバイスに過ぎず、単独での運用であらゆる状況での救助が可能であることを想定したものではない。

1.3 研究の目的，本論文の構成

本論文は、瓦礫の中を進み、瓦礫に挟まりクラッシュシンドロームを発症する可能性のある被災者の発症を阻止しつつロボット筐体内に収容し救助を行う“人命救助ロボット”の研究を目的とする。

第1章緒論の後、第2章では旧型機である“双帯対向クローラ型人命救助ロボット”（試作1号機）を通し人命救助ロボットの概念を紹介する。第3章では、試作1号機の問題点を洗い出し改善を施した2号機“子機入渠型人命救助ロボット”開発のためのコンセプトデザインを行い、第4、5章で2号機を構成することになるキャリア・ユニット、ブルーダ・ユニットの縮尺模型を用いた実験

を示す。第 6 章ではブルーダ・ユニットに搭載するクラッシュシンドローム発症阻止機構の実物大実験装置による、下肢血管駆血の可能性について検証する。第 7 章のまとめでは、人命救助ロボットについて、現在までに行った研究、これから行うべき研究、今回の研究で生じた新たな問題や研究課題をまとめた。

そして災害医療の最大の目標であるところの「Preventable Death（適切な医療対応が成されれば、救命できた可能性のある死）の極小化」¹⁻¹⁸⁾ に、貢献するための方向性を示す。

【第 1 章の参考文献】

- 1-1.国土交通省 編：“国土交通白書 2006”，株式会社ぎょうせい，pp3-27，2007
- 1-2.山と溪谷社（編）：“新版 自然災害ハンドブック”，山と溪谷社，pp14-15，2011
- 1-3.内閣府 編：“平成 17 年度版防災白書”，国立印刷局，pp27-29，2007
- 1-4.内閣府 編：“我が国で発生する地震”，内閣府 HP 内防災情報のページより，
<http://www.bousai.go.jp/jishin/pdf/hassei-jishin.pdf>，最終アクセス日 2014/11/23
- 1-5.北原糸子，松浦律子，木村玲欧 編：“日本歴史災害事典”，吉川弘文館，pp124-130，2012
- 1-6.佐橋昭：“差し迫る巨大地震の備えと寺田寅彦の指南”，安全安心社会研究 第 4 号，長岡技術科学大学安全安心社会研究センター，pp71-81，2014
- 1-7.気象庁：“日本付近で発生した主な被害地震(平成 18 年～平成 26 年 7 月)”，気象庁 HP 各種データ・資料ページより
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html>，最終アクセス日 2014/9/20
- 1-8.経済産業省：“2012 年 ロボット産業の市場動向調査結果概要”，経済産業省 HP ロボット産業市場動向調査結果を公表しますのページより，
<http://www.meti.go.jp/press/2013/07/20130718002/20130718002.html>，最終アクセス日 2014/9/20
- 1-9.レスキューロボットコンテスト実行委員会：“レスキューロボットコンテスト公式ウェブページ” <http://www.rescue-robot-contest.org/>，最終アクセス日 2014/9/20
- 1-10. ロボカップ日本委員会：“ロボカップレスキュー”，ロボカップジャパンオープン 2014 ページより，
<http://www.robocup-japanopen.org/rescue.html>，最終アクセス日 2014/9/20
- 1-11. 国際レスキューシステム研究機構，他 編：“平成 14 年度成果報告 大都

市大震災軽減化特別プロジェクトⅢ 被害者救助等の災害対応戦略の最適化

4. レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発, pp14-19, 2003

1-12. 福本一朗: “越沖震災柏崎避難所巡回診療報告”, 新潟県中越沖地震災害調査団報告書(速報版), 長岡技術科学大学新潟県中越沖地震災害調査団, pp57-59, 2007

1-13. 佐橋昭, 内山尚志, 織田豊, 福本一朗: “大災害時高抗堪性 ME 機器システムの研究”, 電子情報通信学会技術研究報告, 106 (81), pp17-20, 2006

1-14. 佐橋昭, 佐橋拓, 内山尚志, 福本一朗: “被災地を孤立させない災害医療支援システムの研究”, 第 29 回日本生体医工学会甲信越支部大会講演論文集, pp3-4, 2009

1-15. 佐橋昭, 内山尚志, 織田豊, 寺島正二郎, 福本一朗: “新潟中越地震に学ぶ災害時避難所診療支援システムの研究”, 日本集団災害医学会誌, 11 (2), pp132, 2006.

1-16. 福本一朗, 佐橋昭: “災害時避難所救急診療支援装置の研究”, 生体医工学, Vol.45 特別号, pp201, 2007

1-17. 石井昇: “災害医療の評価(上)”, EMERGENCY CARE 2007 新春増刊, メディカ出版, pp97-102, 2007

第二章 人命救助ロボットの概念 -旧型機を通して-

本章では、人命救助ロボット試作 1 号機を解説する。当ロボットが瓦礫に潜る災害医療用ロボットという特殊な機能を有すべきであるとの考えに至った経緯やその概念、当ロボットが持つ特徴などを示す。そして数多あるレスキューロボットと人命救助ロボットのコンセプトを比較し、その独自性を示す。試作 1 号機は現在実験を行っている 2 号機の旧型機にあたる。

2.1 既存の災害用ロボット

本節では、様々な機関で研究されている、もしくは実験的に配備されているレスキューロボットをいくつかピックアップし、駆動体の形態毎に分類して紹介する²⁻¹⁾。

2.1.1 クローラ型ロボット

当人命救助ロボットのキャリア・ユニットにも採用している、おそらく最もポピュラーな駆動形態である。無限軌道を装備した装軌車両は 20 世紀初頭、イギリスのリチャード・ホーンズビー&サンズ社が開発し、その後その特許権をホルト・キャタピラ社（後のキャタピラー社）に譲渡され、実用化された²⁻²⁾。戦車としては 1916 年 9 月 15 日第一次世界大戦時のソンム会戦において初めて登場し、²⁻³⁾ それ以降の開発競争と戦場での経験により大きく進化した。現在も重機に利用されるなど、豊富な実地試験データを有している。災害時運用で想定される瓦礫上走行に関しても、戦車などの前例がある為、軍事機密の壁があるものの実地試験データが蓄積されていると言ってよいだろう。現在レスキューロボットとして最も進化し、最も実用に近い駆動形態であろう。

2.1.1.1 Quince (クインス)

おそらく、国産のクローラロボットで最も実績を残した災害用ロボットである。

東北大学、千葉工業大学、国際レスキューシステム研究機構らの手により開発されたロボットである。サブクローラを利用しての階段の昇降、3D マッピングが可能なカメラなどの機能を有している。先の東北地方太平洋沖地震の際、千葉工業大学の未来ロボット技術研究センターの福島対応プロジェクトチームが中心となり、原発に対応できるよう改良、福島第一原発の原子炉建屋内に入り調査を行った。初期の作戦失敗や一号機がケーブル切断により建屋内に取り残されるなどマイナス面ばかりがセンセーショナルに報道されたが、二号機三

号機は一号機の問題点を克服し、成果を残している。高い走破性能を持つ純日本製レスキューロボットである。 2-4) 2-5)



Fig2-1 Quince の概観

東北大学 田所研究室で著者撮影（撮影日 2014/6/25）

2.1.1.2 PackBot

日本では掃除ロボットで有名なアメリカ iRobot 社が開発した Multi-Mission（多目的、とはいえ主に軍用）ロボットである。DARPA（The Defense Advanced Research Projects Agency：国防高等研究計画局）の依頼を受け開発された。名が示す通り兵士がバックパックで背負える軍用ロボットを目指したもので、軽量（オプションにもよるが 18kg 程度から）にして頑丈である。戦場の様々な状況に対応できるよう豊富なオプションを選択し、簡便に換装可能なモジュール構造が特徴である。この点だけでも今後のレスキューロボット開発に大いに参考になるだろう。福島第一原発に最初に投入されたロボットであり、2 台一組で計 30 回の調査を行った。 2-6)

また同社大型ロボット 710 Warrior も原発での作業に導入された。



Fig2-2 iRobot 510 Packbot の概観

iRobotHP より転載 <http://www.irobot.com/us/learn/defense/packbot.aspx>

最終アクセス日 2014/8/31

2.1.1.3 T-52 援竜

2本のアームが特徴的な, テムザックと九州工業大学などが共同開発したロボット. 現在は小型化し, 無線 LAN 経由で遠隔操作が可能な T-53 も存在する. 2本のアームを持つ重機寄りのロボットは, この他にも日立建機の「ASTACO NEO」が有名. 2-7) 2-8)



Fig2-3 T-52 援竜 2006 年 2 月本学でのデモンストレーションの様子
PCwatch 2006/2/2 の記事「テムザック“援竜”，新潟県で雪害対策性能テスト」より転
載. <http://pc.watch.impress.co.jp/docs/2006/0202/tmsuk.htm>

最終アクセス日 2014/8/31

2.1.1.4 KOHGA3

京都大学 松野研究室が研究開発を行っているレスキューロボットである。メインのクローラとサブクローラではなく，前後二つずつ独立して稼働する 4 つのクローラを持つ。高い走破性をもち，KOHGA2 はロボカップ世界大会レスキュー走破性部門で優勝も果たしている。また最新の KOHGA3 は東日本大震災の折，八戸市の体育館で調査も行っている。2-9) 2-10)

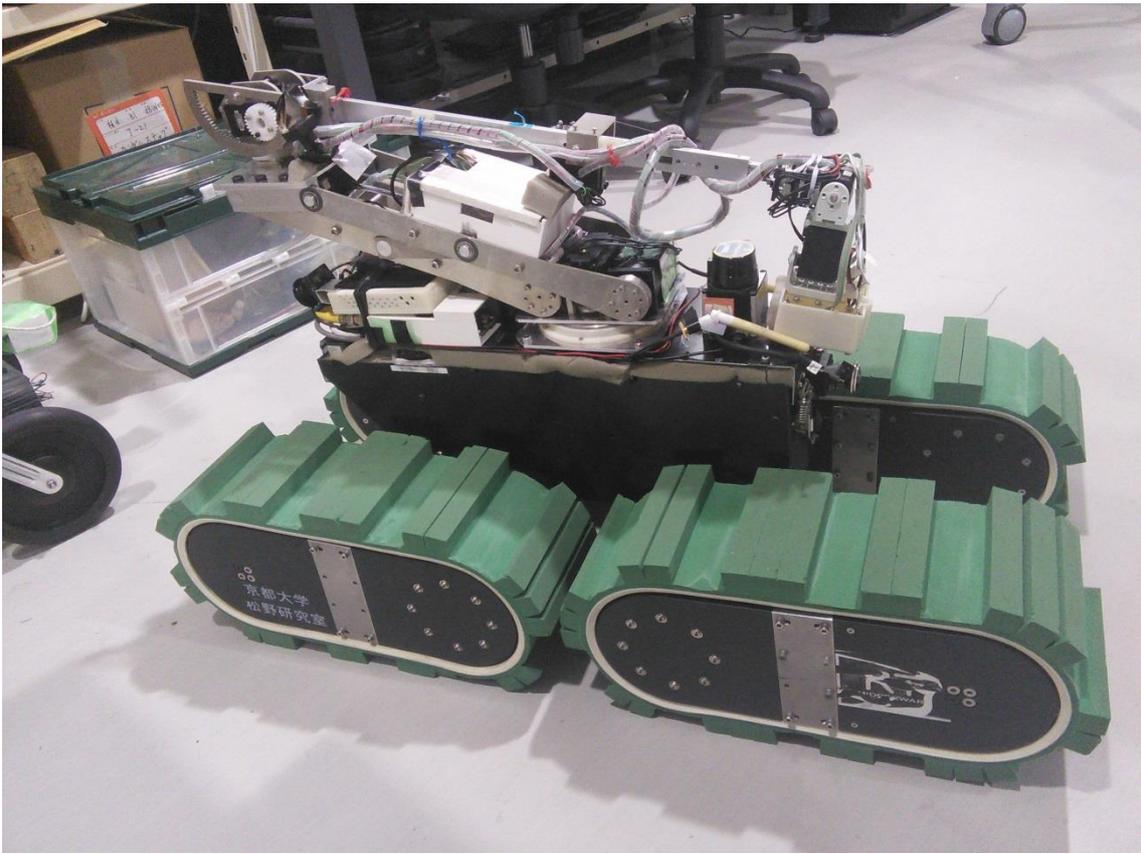


Fig2-4 KOHGA3 の概観

京都大学 松野研究室で撮影（撮影日 2014/8/14）

2.1.2 ホイール型ロボット

平時用としては最も歴史が長い駆動体である。起源は紀元前 5 千年前の古代メソポタミアまで遡るため、ある意味最も実用されてきた駆動体である。ただ災害時用としては、段差や瓦礫の乗り越え性能がクローラと比して低く、超信地旋回のような小回りも利きにくいなどの問題点もあった。しかし様々なアイデアの出現により、弱点を克服しつつある駆動体でもある。

2.1.2.1 FRIGO-M

消防庁消防研究センターと三菱電機特機システムの共同開発の消防用偵察ロボット。ホイールに分類したが、クローラベルトも装着可能で、それぞれの駆動体の特性を利用可能。高い抗堪性と現場で機能を取捨選択できる拡張性も備える。従来は消防用であるが、災害現場での活躍も期待できる。2-11)



Fig2-5 FRIGO-M の概観

三菱電機特機システム株式会社 HP より転載

<http://www.melos.co.jp/products/tokusetu.html> 最終アクセス日 2014/9/8

2.1.2.2 R-Crank



Fig2-6 R-Crank の概観

東工大 山田晋太郎等の第 32 回ロボット学会発表論文, 「クランク車輪型移動機構を用いた不整地汎用移動プラットフォーム “R-Crank” の開発」より転載

東工大 広瀬研究室が研究・開発を行っている, 前後のホイールを橋渡しする

ようにクランクレッグを装備したロボット。単純な機構ながら高い走破性能を有しており、従来のホイールでは不得手であった超信地旋回や車輪の直径の 1/2 以上の段差の昇降も可能である。一モデル前の“Crank Wheel”はクランクレッグが 4 本の比較的複雑な仕様だったが、2 本でも同程度の踏破性能を保っている。 2-12)

2.1.2.3 MATOI



Fig2-7 MATOI の概観

日刊工業新聞社 ロボナブル HP より転載

<http://www.robonable.jp/news/2012/02/matoi-0210.html> 最終アクセス日 2014/9/8

京都大学 松野研究室が、岡山大学、名工大の協力を得て開発中の移動ロボットプラットフォームである。原発の屋外を遠隔操縦および自律走行で放射線量などを測定するモニタリングロボットを目指している。駆動体は SegwayRMP-400 を利用し、航続性、機動性に優れる。また 90kg 以上の高いペイロード（積載量）を有する。 2-13)

2.1.3 飛行型ロボット

飛行型、とりわけヘリコプター型モニタリングロボットは、これまで災害地での有効活用を期待されながらもあまり利用されてこなかった。その理由としては短い航続時間、操縦者に求められる高いコントロールスキル、低いペイロードと安定性、無線操縦の信頼性などが挙げられる。しかし特に近年マルチロ

ータータイプ（マルチコプター）の登場以降，その高い安定性と簡便な操作により一気に災害用モニタリングロボットとしての転用と研究が増えた．災害現場のファーストレスポンド（初期対応機）として大いに，そして急激に注目される分野となった．²⁻¹⁴⁾

しかし 2015 年 4 月 22 日の，いわゆる「首相官邸無人機落下事件」以降，従来は自律もしくは遠隔操作の移動機械全般を指す「ドローン」という名称と共に，その悪名が拡大した機械でもある．さらに人の生活空間に進入しやすい機械であるため，安全性の問題も取りざたされている．技術的進歩を妨げないためにも，迅速かつ明確な法整備と，その法に則った技術的改善が急務である．

2.1.3.1 4 チルトロータ UAV



Fig2-8 4 チルトロータ UAV の概観

東工大 大瀬戸篤司等の第 32 回ロボット学会発表論文，「4 チルトロータ UAV の位置姿勢独立飛行制御」より転載

東北大学の内山研究室で研究を行っている UAV（無人航空機 Unmanned Aerial Vehicle）．推進器そのものの方向をモータで動かすことで，従来のクアッドコプター（4 枚羽根のヘリコプター）では不可能だった位置と姿勢の独立制御を可能にし，また安定性も向上している．²⁻¹⁵⁾

2.1.4 二足歩行・多足歩行ロボット

「ロボット」という単語を聞いて，日本人が想像する最もロボットらしい駆動体である．災害用ロボットに携わられていない多くの人々は，災害用ロボットというと人型ロボットが瓦礫の中を進む姿を想像するだろう．そして過去に

は『極限作業ロボットプロジェクト』という旧通産省主導で 150 億円ほどの予算で行われたビックプロジェクトもあった。ただし要素技術の向上は得られたものの、期待された成果には及ばなかった²⁻¹⁶⁾。工学関係者の扱うロボットと、大衆の考えるロボットとの乖離は、過去のマンガやアニメで登場し、活躍した空想上の人型ロボットが原因でもある。²⁻¹⁷⁾

しかし災害現場とは発災直前までヒトが生活していた環境である。人型ロボットは災害地、特に原子炉事故などの建屋内においての作業に最も適した形状ともいえる。また現在において人型（そして多足歩行）ロボットは決して空想の産物ではない。これまでの失敗も含めソフトウェア、ハードウェア共に技術的な進化を遂げているロボット工学により、現実味を帯び始めている。特に豊富な軍事予算を継続的に捻出できる米国においては、DARPA を中心に目覚ましい発展を遂げている。

2.1.4.1 ASIMO

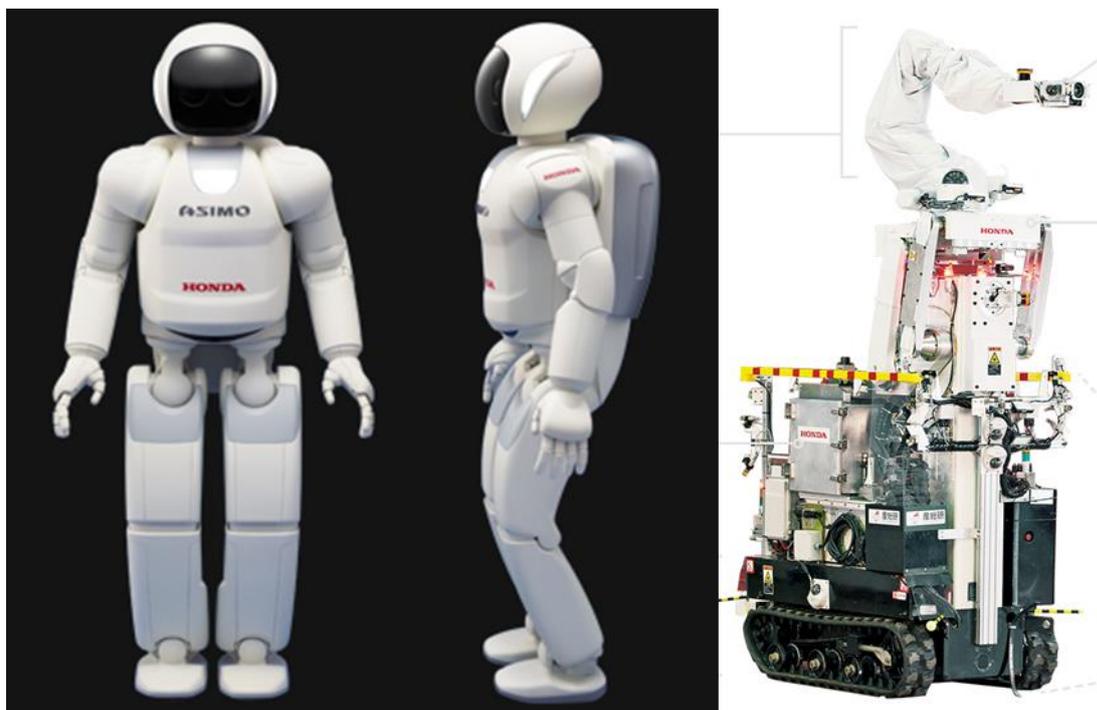


Fig2-9 3代目 ASIMO (左) と高所調査用ロボット (右) の概観
本田技研工業 HP, ホンダロボティクスより転載 最終アクセス日 2014/9/15
http://www.honda.co.jp/robotics/?from=top_pulldown

本田技研工業製の、おそらく日本で最も有名な、実在する二足歩行ロボットである。1986 年以前より開発が始まり、E シリーズ、P シリーズを経て現在の ASIMO としては 3 代目が最新型である。²⁻¹⁸⁾

福島第一原発事故の際、東電はもとより一般市民からも事故現場への投入を

打診された機体である。だが ASIMO はもともとオフィスなどの安定した足場での運用が大前提のロボットの為、投入は見送られた。しかし本田技研工業は原発対応ロボットの開発を決定し、東電・産総研の三社協力の許、バルブ開閉用作業アームロボットを開発²⁻¹⁹⁾した。その後要求される状況が変更したため、高所調査用ロボットに仕様変更し、現在稼働中である。ちなみに高所調査用ロボットのアームは ASIMO の足首の機構が採用されている。²⁻²⁰⁾

2.1.4.2 S-One

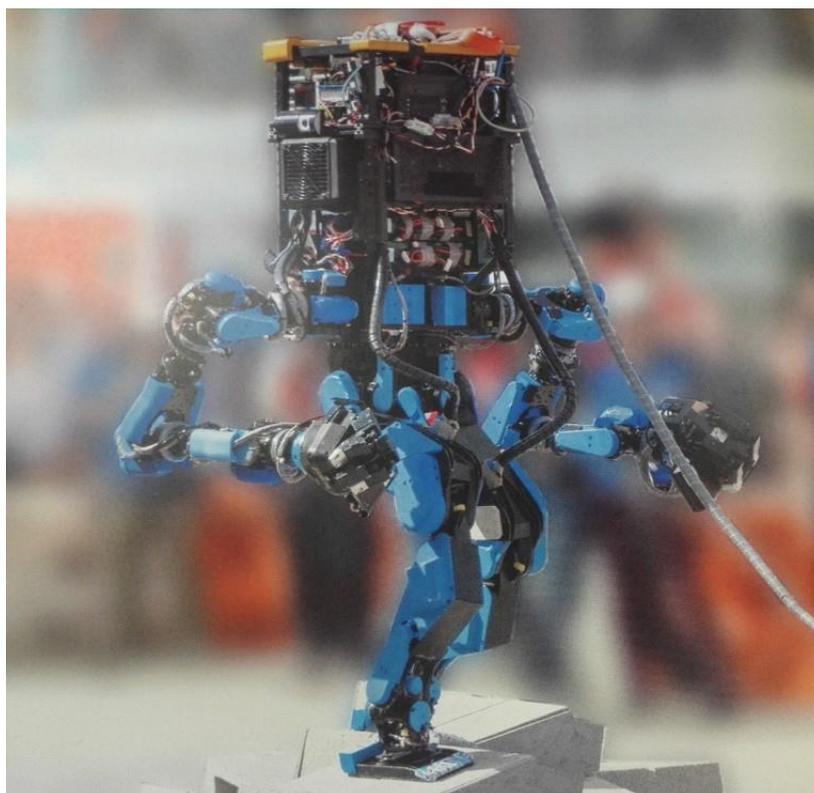


Fig2-10 SCHAFT 社製 S-One の概観

Raymond Sheh : “Watch for Robots 2 Response Robots Standing Tall” , Snapfish, pp16, 2014 より転載

2013 年年末に行われた DARPA ロボティクスチャレンジの予選において、2 位以下を大きく離し 1 位となった東京大学発ベンチャー企業「SCHAFT」製のロボット。二足歩行に限定し、しかも要求されたタスクが膨大かつ複雑であったため多くのチームが苦戦をする中での快挙である。現在彼らはアメリカ Google 社に買収されており、2015 年 6 月に行われる決勝への出場を辞退している。現在彼らの高い技術は秘匿されており、ホームページも閉鎖された。²⁻²¹⁾

2.1.4.3 LS3



Fig2-10 LS3 の概観

CNETNewsHP, 2012/9/11 の記事「軍用 4 足歩行ロボ「LS3」、前方の人について歩くことも--新たなビデオが公開」より転載

<http://japan.cnet.com/news/service/35021583/> 最終アクセス日 2014/9/16

LS3 (=Legged Squad Support System) はボストンダイナミクス社が DARPA と US Marines の資金提供を受けて製作. 400 ポンド (約 181kg) のペイロードを有し, 1 度の燃料補給で 20 マイル (約 32km) の歩行が可能である. あらかじめ指定された場所にセンサや GPS を使って進んだり, 先行する人物を追尾することもできる. 資金提供先からもわかるようにあくまでも軍用ロボットであるが, 被災地に物資を届ける場合にも有効に機能するだろう. ²⁻²²⁾

2.1.5 その他のロボット

どの駆動体にも属さないロボットを以下に示す.

2.1.5.1 能動スコープカメラ

工業用ビデオスコープのケーブル表皮全体に繊毛振動駆動原理によるアクチュエータを実現したものである. ごく狭い瓦礫の空隙 (3cm 程度) の奥深くの検査を行うことが出来る. 通常ファイバースコープと異なり推進機能を有しているため, 極めて狭い箇所において検査可能なエリアを拡大するだけでなく, その奥にある広い空間を検査することも出来る. 実際の災害現場でもその有効性を証明された, 数少ない災害対応機器である. ^{2-23) 2-24)}



Fig2-11 能動スコープカメラの概観
 東北大学 田所研究室で著者撮影（撮影日 2014/6/25）

2.2 人命救助ロボット旧型機（試作 1 号機）の概要

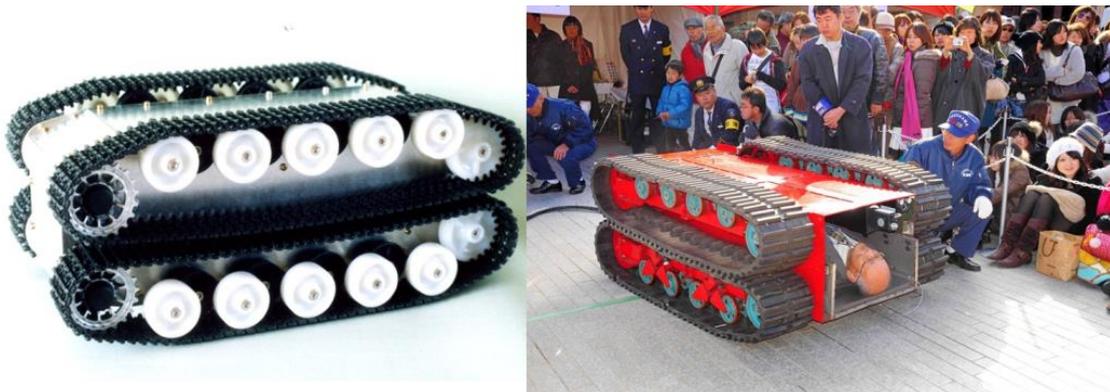


Fig2-12 人命救助ロボット試作 1 号機の概観
 （左が縮尺モデル，右が実物大試作機）

災害診療を工学的なシステムでサポートすることを目的とした「災害診療支援システム」で唯一「救助」を担当するデバイスである。災害 ME 研究会と榊

プロジェクトアイの共同で人命救助ロボットを立案・設計し、試作機を作り上げた。(Fig.2-12) 本節はその試作1号機の概要を説明する。

本人命救助ロボットの研究において、キャリア・ユニットの目的に沿った下部クローラや、バイタルサイン用カメラを除く状況確認用カメラ、またそれらの制御やユーザーインターフェイスの研究は行っていない。これらに関しては、すでに国内外で多くの研究者が研究を行っている分野である。今後はそれらの中からもっとも人命救助ロボットに適したものを選択し、適応化を行う予定である。このように下部クローラやカメラに限らず、本来であればロボット工学の門外漢である我々が、人命を救うロボットを製作するという目的を果たすためには、多くの研究者の協力が不可欠である。今までの研究や学会・展示会参加は研究者の協力を募るためのデモンストレーションという側面もあった。

2.2.1 人命救助ロボットの必要性

1995年1月17日兵庫県南部地震や、2004年10月23日新潟県中越地震に起因する災害において、多くの方が瓦礫や土砂による圧死・窒息死で亡くなられた。中でも犠牲者の多かった兵庫県南部地震での震災、阪神・淡路大震災を例に挙げると、全死者数6,434名の内、8割以上の方が倒壊物による圧死・窒息死で亡くなっている (Fig.2-13)。²⁻²⁵⁾

しかしこの圧死・窒息死者の中に、かなりの数のクラッシュシンドローム (Crush Syndrome, 挫滅症候群, 以下CS) が死因となった死者が含まれている。その発症の機序や詳しい説明は本論の「6.1 クラッシュシンドロームの機序と診断」に示すが、簡潔に説明すると、瓦礫等に四肢(特に下肢)を一定時間以上圧迫された被災者が、救助の為に瓦礫除去によりCSを発症し、最悪の場合死に至る。救出時は意識があり、その直後絶命するケースが多いため、Smiling Death²⁻²⁶⁾と別称されている症状である。単純に瓦礫を取り除く救助が発症の原因となる症状である²⁻²⁷⁾。

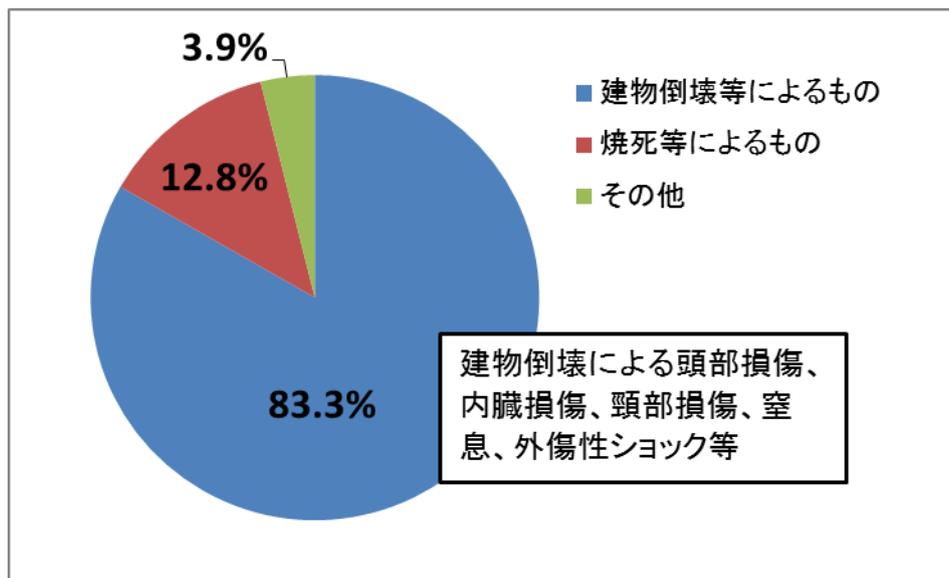


Fig.2-13 兵庫県南部地震における死因分布
兵庫県監察医、「神戸市内における検死統計」（平成7年）より改変

Table.2-1 挫滅症候群に対する治療

1.低容量の補正と腎保護	2.高カリウム血症対策	3.血液透析の適応も考慮
① 大量輸液(生理食塩水) 尿量200～300ml/hrを維持するように1～1.5L/hr(10～15ml/kg/hr/)の輸液を行う。ときに12L/day程度の大量輸液になりうる ② 炭酸水素ナトリウム(メイロン®)による尿のアルカリ化(尿pH6.5以上を目安に) ③ 輸液にもかかわらず上記尿量が維持できない場合、マンニトールを点滴に加える(ただし尿量20ml/hr以下の場合禁忌) 1～2g/kg/day(体重60kgでは5g/hr)を加える(20%マンニトール50ml=10g相当)	① 炭酸水素ナトリウム(メイロン®) ② グルコン酸カルシウム製剤(カルチコール®) ③ ポリスチレンスルホン酸ナトリウム(ケイキサレート®)もしくはポリスチレンスルホン酸カルシウム(カリメート®)の注腸または経口投与(30～60g) ④ GI療法 5gのブドウ糖に1単位のインスリンの輸液を点滴静注する(例:10%ブドウ糖500ml+レギュラーインスリン10単位) ※血糖が測定できる環境下で実施する	

「増補版 DMAT 標準テキスト」（日本集団災害医学会著，へるす出版，2012）p 252 の表より作成

現在，この症状を回避する唯一の方法は，DMAT（災害派遣医療チーム）が対応することになっている．DMAT は医師，看護師，業務調整員（救急救命士，

薬剤師，コ・メディカル，事務官など）などでチームを組んで発災直後から原則 48 時間以内の緊急医療対応（治療だけでなくドクターヘリなどを利用した患者の移送なども）を行う医療チームである，一定の訓練を受けた医療従事者集団²⁻²⁸⁾である DMAT が，CSM（Confined Space Medicine 瓦礫の下の医療）として，Table.2-1 にあるような点滴をはじめとする薬物投与や気道確保などの手当てを行いつつ救出することになっている²⁻²⁹⁾。しかし余震の頻発する中，瓦礫に潜ることは非常に危険である。たとえ DMAT に所属する医療従事者が一定の訓練を受けているとはいえ，レスキュー隊でも困難な瓦礫への侵入は非現実的である。

丸川征四郎は著作「経験から学ぶ大規模災害医療—対応・活動・処置」において，CSM について「災害現場で医療に従事する者は，現場で供給すべき医療および行うべきでない医療を熟知し，実行する能力を持たねばならない」という言葉で述べられてはいるものの，「わが国ではいまだ CSM に対する教育プログラムの構築，実践は成されておらず，実際の活動に対する認証制度すら不透明である。」としており，CSM の訓練は推奨するが，その実施には懐疑的であった²⁻³⁰⁾。最新の DMAT の訓練プログラムである「日本 DMAT 隊員養成研修」においても，4 日間あるプログラムの 3 日目に，座学と共に実践訓練 1（実践訓練 2 も同日行う）として CSM 訓練の時間が割いているのみ²⁻³¹⁾である。これだけの訓練で実地における CSM を行うことは不可能と思われる（資格を取った後にも訓練として実践的な研修を定期的に行っている。しかしこれらの受講は必須ではなく任意である）。実際，日本 DMAT が発足して 9 年が経とうとしているが，CSM の実施は 2005 年 4 月 25 日の JR 福知山線脱線事故の一例のみで，自然災害時における実施例は一件もない。これは DMAT の隊員たちの問題ではない。CSM そのものが隊員の安全を担保不可能な手技であることが問題である。つまり“震災時の CS”に対処する現実的な手段は，現状存在していない。

そこで，救助者の安全を確保しつつ要救助者の CS 発症を阻止し，瓦礫外まで要救助者を保護・搬送し，双方ともに安全な場所で十分な治療を受けてもらうための唯一の工学的手段として，人命救助ロボットを考案した^{2-32) 2-33) 2-34) 2-35)}。

2.2.2 双帯対向クローラの利点

「2.1 既存の災害用ロボット」で紹介したロボット群のように，これまで多くの災害用ロボットの研究がおこなわれてきた。しかし瓦礫の中を進むことを前提にしたロボットは，東北大学の能動スコープカメラや東工大の蒼龍シリーズ²⁻³⁶⁾以外はほぼ存在しない。さらに人を収容するほどの大きさをもつ瓦礫内進入口ロボットは全く存在しない。大型のロボットに瓦礫の下を進ませるためには，通常のクローラ機構では問題があると判断した。そこで双帯対向クローラ

を考案した.

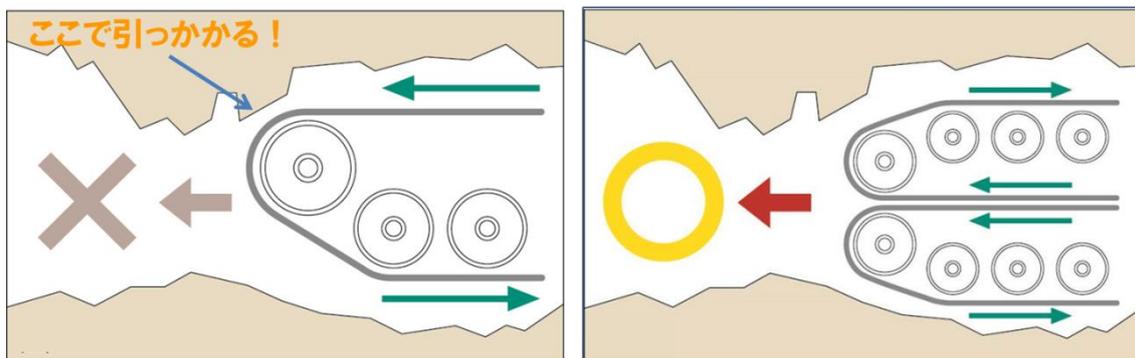


Fig.2-14 瓦礫侵入における双帯対向クローラのアドバンテージ

通常のクローラでは、その回転方向の制限から、上部に瓦礫があった場合問えてしまう。その問題の解決策として、下部クローラに上部クローラを重ね、逆方向に対向して回転させることで、上部瓦礫が引っかからず、推進力に利用できるのではないかと考えた。(Fig.2-14)

2.2.3 バイタルセンサプローブ

本人命救助ロボットが災害現場で投入される前には、今から侵入する瓦礫の中に、生きている人がいることを確認するべきである。その手法も、従来の探査法の他に「心弾計」の考案と研究も行っている。ただし瓦礫に侵入後も、筐体内に被災者を収容し・血管圧迫などの施術する以上、要救助者のバイタルサイン*の測定は不可欠である。それらの計測を行うのが、バイタルセンサプローブである。

柔軟に曲がるアームの先端に、近赤外カメラ、マイク/スピーカ、赤外線発光LEDを備えたプローブである。近赤外カメラで状況確認と血流測定、マイク/スピーカで声掛けとそのレスポンスを捉える事で発話が可能かを調べる意識レベルの確認(刺激を伴わない)²⁻³⁷⁾と心拍の測定、LEDで照明の役目を担っている。(Fig.2-15)

近赤外カメラは、ヘモグロビンが同波長の光のみを吸収する特性を利用し、近赤外光780nmを照射することで血管を映像上に浮き立たせる。拍動による血管径の増減を映像解析することで測定するものである。

* バイタルサイン (Vital Sign) : 生命兆候と訳され、人が生きていることの兆候を示すもの指す。具体的には、血圧・脈拍・呼吸速度・体温などを測定する。

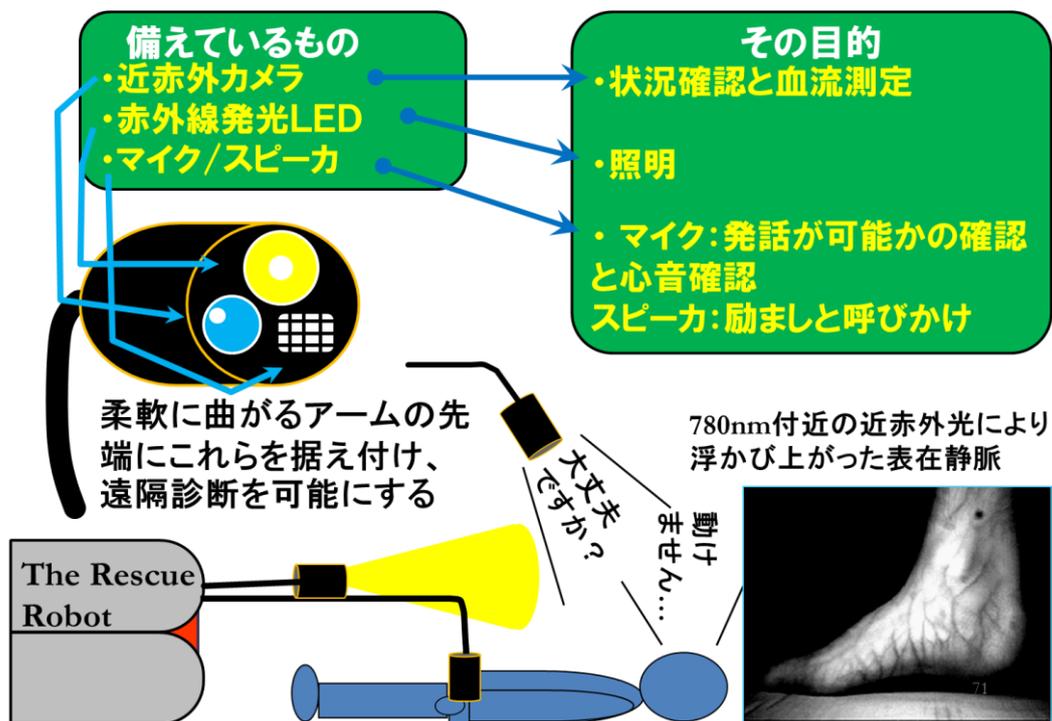


Fig.2-15 バイタルセンサプローブの概要



Fig.2-16 試作型バイタルサインプローブの概観

Fig.2-16 に見るように、実物大試作機に搭載可能なバイタルサインプローブを製作済みである。各パーツそれぞれ機能するが、バイタルサイン計測には程

遠く、特に赤外線 LED とカメラは血管を撮影する機能を有していない、あくまでもデモンストレーション用である。実用化の際には過去に行ってきた DVT(深部静脈血栓症) スクリーニング研究^{2-38) 2-39)} で得たノウハウを基に設計し、工業用ファイバースコープのプローブをベースに小型化したプローブを製作する予定である。

2.2.4 実物大試作機の仕様

2007年9月、「人命救助ロボット開発(実物大試作機)」が、経済産業省の「平成19年度中小企業・ベンチャー挑戦支援事業のうち実用化研究開発事業」の交付が決定され、およそ半年の期間で製作を行うこととなった。一度決定しかかった製造会社がキャンセルする等、トラブルも多く完成も危ぶまれた。しかし縁あって引き受けて下さる製作会社に巡り合った。実質の製作期間が4か月無く、製作会社である株式会社ノースウエストには多大な迷惑と苦労をお掛けしたが、甲斐あって翌年3月末の期間終了に間に合った(Fig.2-17, 2-18)。以下はその実物大試作機の仕様を示す。

【実物大試作機の仕様】

全長：1.92m

全幅：1.33m

全高：0.76m (ゴムクローラ)

重量：329kg (車重のみ。操作パネル、ケーブル含まず)

動力：CVVF 制御 (定電圧可変周波数制御) モータ 2基 (Fig.2-19)

バッテリー：DC12V×6基=72V (バッテリーは操作パネル側に搭載)

操作系：10mの有線ケーブルの先にある操作パネルによる遠隔操作。(Fig.2-20)

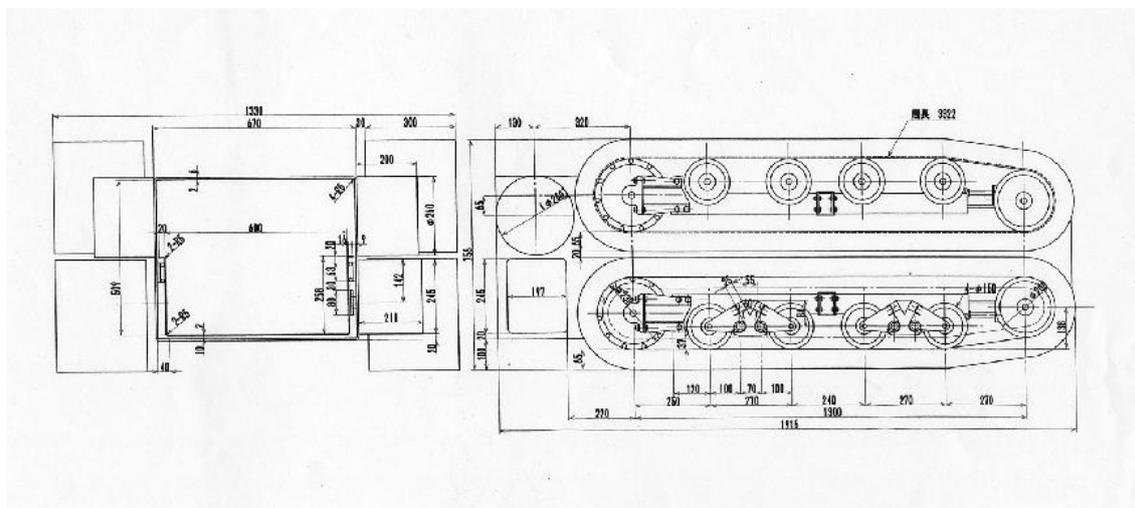


Fig.2-17 キャリアロボット 2D-CAD, 正面図 (左), 左側面図 (右)



Fig.2-18 人命救助ロボット実物大試作機および操作パネルの概観



Fig.2-19 モータ機構概観

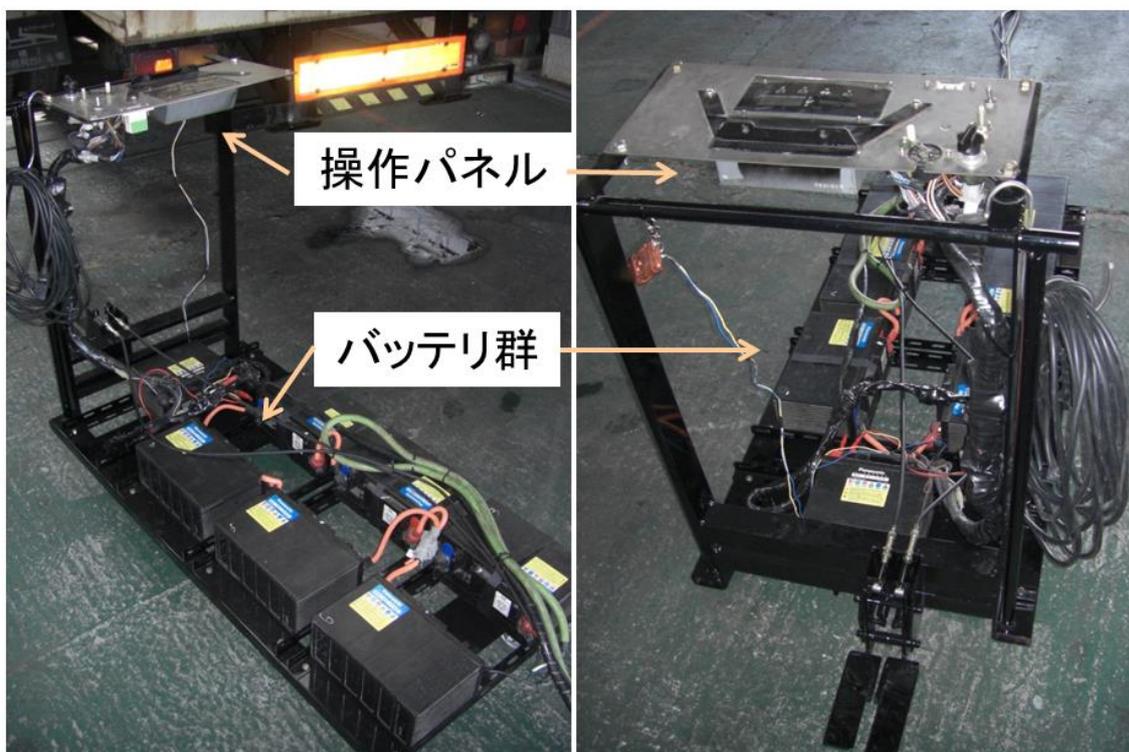


Fig.2-20 操作パネル兼バッテリーキャリア概観

次に、試作 1 号機の制限仕様の想定を示す。

- 収容可能人数：1 名
- 最低運用者数：3 名
- 搭乗者数：遠隔操作の為、車内には 0 名
- 運用するフィールド：倒壊した木造平屋建ての日本家屋（主にその屋内）
- 瓦礫こじ開け能力：なし（2 号機以降は搭載）
- 車体が維持または移動可能な上部クローラへの堆積瓦礫重量：1,000kg
- 被災者収容方法：カフ機構による遠隔操作での収容
- 運用者に要求される操作熟練度：運用においては一定期間の訓練が必要（将来的には AED のように、マニュアル通りやれば一般市民でも容易に運用できるようになるのが理想だが、現時点での目標ではない）
- 運用資格：医師免許を持つ責任者が運用現場で指揮する。操作者は救急救命士が望ましい。 2-40) 2-41) 2-42)

2.3 仮想運用手順

人命救助ロボットが、全ての機能を発揮できるほど完成した場合、本ロボットがどのような手順で救助を行うのか、試作 1 号機の機能を前提に想定した

(Fig.2-21).

- 1) ロボットが入れるだけの隙間を人の手で開けて進入し、瓦礫の中をこじ開けながら進み、被災者の元までたどり着く.
- 2) 患部圧迫物を取り除くと同時に、カフを被災者に穿かせる. カフを炭酸ガスにより急激に膨張させることで患部を圧迫, クラッシュシンドローム発症を阻止する.
- 3) 被災者をロボット筐体内のコンテナに収容する.
- 4) 瓦礫より脱出. 被災者・救助者ともに安全な場所で, 十分な治療を施していただく.

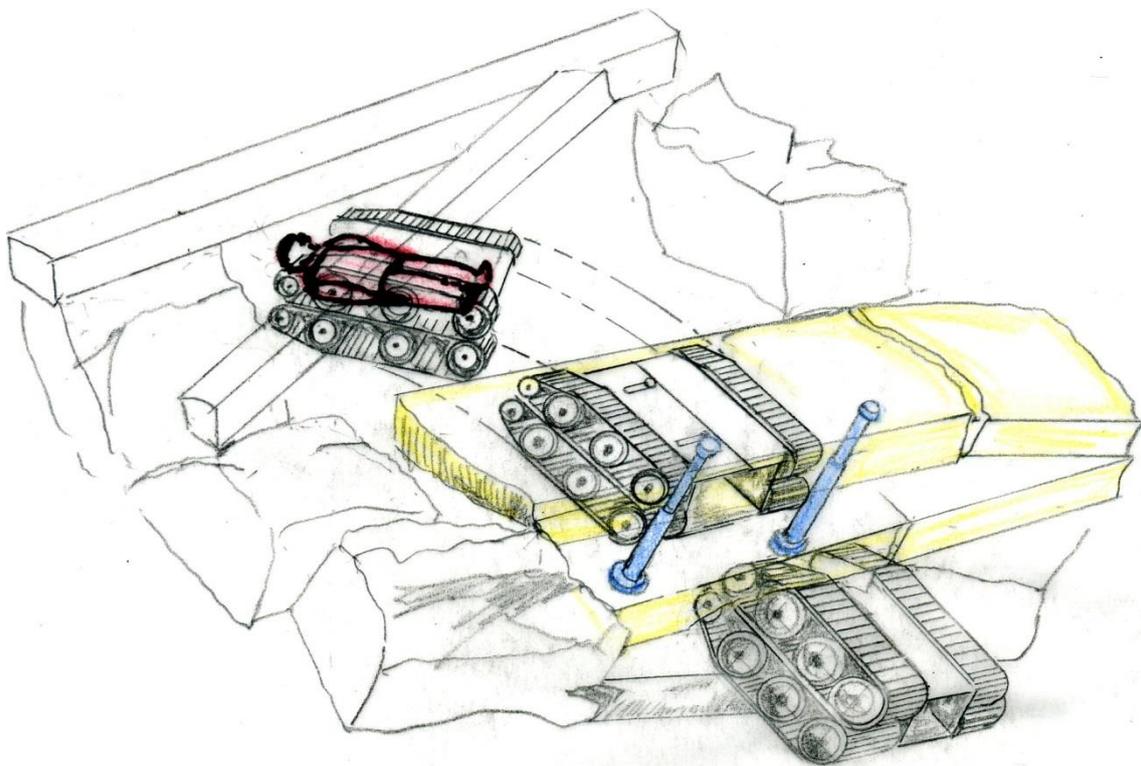


Fig.2-21 発案者が発案当時に描いたコンセプトデザイン画

2.4 発現した問題点

上記の実物試作機は、急遽製作した経緯もあり、十分な機能を有しているとは言えなかった。特に被災者を筐体内に収容する機構に関しては、人を乗せる台（スライダ）が電動で前後するのみで、乗り込むには健常な人間が意識清明なまま自ら乗り込むしか方法がなかった。

しかしこの試作機を製作することで、現状の当ロボットが内包する問題点を浮き彫りにすることが出来た。

- 1) コンテナ, クローラを含む筐体全般の強度向上
- 2) 耐水・耐火処理
- 3) 瓦礫こじ開け機構の搭載
- 4) 下肢圧迫物除去機構の搭載
- 5) 被災者救いこみ機構の改善
- 6) クラッシュシンドローム回避機構の改善
- 7) 確実な退路の確保
- 8) バイタルサインプローブの完成, より柔軟に可動するプローブへの変更
- 9) ユーザビリティの向上
- 10) クローラの制御・移動性能の向上
- 11) 操作パネル兼バッテリーキャリアの瓦礫乗り越え及び制振機能

現行機の改良や機能追加で達成可能なものもあるが, 特に 3) ~7) は改良のみでは対応不可能であり, 全体的なデザイン変更の必要性が生じた.

2.5 まとめ

2.5.1 レスキューロボット群における人命救助ロボットの位置付け

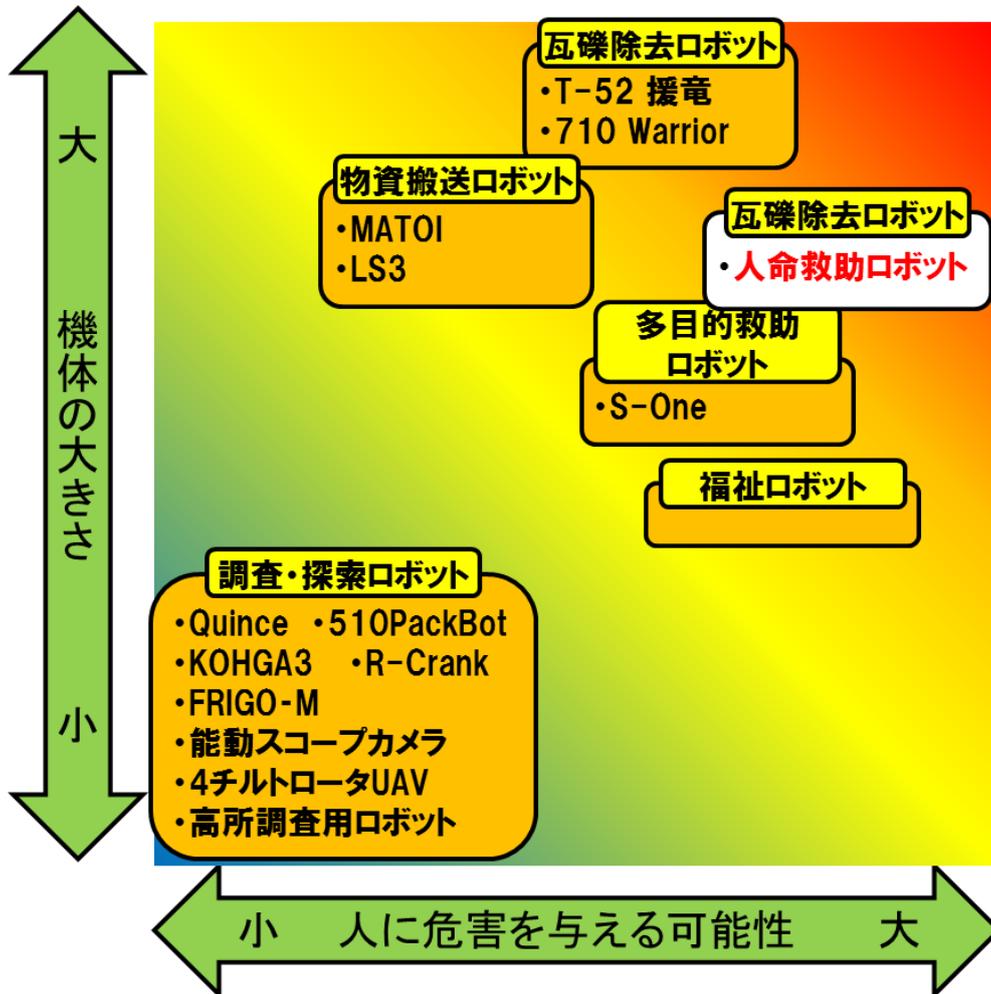


Fig.2-22 第二章で紹介した災害用ロボットの目的別分類

「2.1 既存の災害用ロボット」で示したロボット以外にも、災害用ロボットは数多く存在する。Fig.2-22 に示すように、現在の災害用ロボットは小型で、ヒトが容易に進入できないエリアの状況確認を行う調査・探索ロボットが主流となっている。災害医療ロボットに関しては、当人命救助ロボットが唯一の研究である。

レスキューロボットの大半が小型の調査ロボットであるのには理由がある。状況確認ならば大型であることはデメリットとなる。これは幾度か救助関係者に聞き取りを行った際に何度も伺った、「今から入る場所がどのような状況なのか、そこに確実に生きている人が何人いるのかを知りたい」という彼らのニーズにも沿うものである。つまり大型で、調査ではなく直接人を救助しようとい

う私たちの人命救助ロボットは、そのプレゼンを見たレスキュー隊の方々には奇異に映ったと思われる。

しかし既存のいかなる救助隊でも災害発生（＝阻血状態開始）1時間以内の救助以外にCSへの対応策が存在しない以上、人命救助ロボットのニーズは間違いなく存在する。私たちに必要なのは、使用者が「本当にこんなものが使えるのか？」「こんな事を機械に任せていいのか？」という不安や疑いを晴らす、確実な救助が行うことのできるロボットの開発を行う事である。

2.5.2 人命救助ロボット開発に必要な研究項目

当人命救助ロボットに要求されている能力を端的に表せば、「瓦礫をこじ開け、瓦礫の中を進み、被災者のCS発症を阻止し、被災者を筐体内に收容して瓦礫を脱出する」事である。この前提を踏まえた上で以下のTable2-2~2-4に、人命救助ロボット（2号機）開発に必要なと考える研究項目をユニット毎に列挙した。2号機やその各ユニットについては第三章において詳しく解説する。

Table.2-2 キャリア・ユニット開発に必要な研究項目

キャリア・ユニット				
クローラ		こじ開け機構		全体
瓦礫内進入に適した	クローラの幅	瓦礫こじ開けに適した	クローラの幅	実験機の作製
	リブ(=ラグ)の高さ		リブの高さ	瓦礫排除用ローラの設計
	リブの形状		リブの形状	ローラの開発・実験
	リブの間隔		リブの間隔	トンネルの設計・試作・実験
	リブの材質		リブの材質	
	転輪の数		上昇機構の設計	2号機へのFEM解析
	転輪の配置		上昇機構に必要なこじあげ能力の検討	上部瓦礫の押しつぶしに対する耐荷重性強化
	悪路踏破実験			
車軸の耐荷重性強化		切削機構の考案・実験		状況確認用照明・カメラの数・種類・配置の検討
サスペンションの導入		排障器の考案		

以上の表内で、赤字は本論文内で研究に着手した項目であり、橙色は本論文内で触れていないが研究を行っている項目である。

Table.2-3 ブルーダ・ユニット開発に必要な研究項目

ブルーダ・ユニット				
螺旋駆動部		CSP機構及びスクーパ機構		全体
瓦礫乗り越えに適した	螺旋ロッドの設計	C S 発 症 阻 止 の た め の	駆血位置の検討	圧迫物除去リフトの設計・実験
	螺旋ロッドの作製		駆血方法の検討	
	螺旋羽根の仰角		駆血指標の選定	排障器の設計・設置
	螺旋羽根の高さ		CSP機構の製作	状況確認用照明・カメラの数・種類・配置の検討
	羽根先端の材質		圧迫圧力の検討	
	ロッドの径		圧迫材の形状	バイタルセンサカメラの考案・実験
	螺旋羽根の間隔		圧迫材の材質	
			臨床実験	ブルーダ・ユニットの一連動作を再現可能な縮尺模型を用いた実験
各悪路条件での踏破実験		スクーパの考案・設計		
サスペンションの導入検討・設計		スクーパの実験		実物大実験機での収容及び駆血実験

Table.2-4 2号機全体としての開発に必要な研究項目

全体として
救助者の免責を明記した災害時特別措置法制定を促す呼びかけ
当ロボットを実際に運用していただく予定のDMATの隊員に対する宣伝活動
ブルーダ・ユニットのキャリア・ユニットコンテナ内への収容及び固定機構の検討・実験
ブルーダ・ユニットが容易に上記コンテナ内を通り抜けるためのランプ(ラダー)の考案
操作が簡便な、そして誤操作が起きにくいユーザーインターフェイスの考案
瓦礫内被災者探索機器の搭載もしくは効率的な連携方法の検討
操作パネル兼バッテリーキャリアの移動性能向上及び制振化
抗堪性を高めるための全体的な強度向上
耐熱・耐火・耐水(必要であれば耐放射線)処理
縮尺模型を試作した上での各ユニット連携実験
一連の救助作業を再現可能な実物大実験機の作製
災害訓練用施設を利用した瓦礫モデルを用いた模擬救助実験

本研究テーマに対し、必要である多くの研究が未着手である。しかし、特にキャリア・ユニットのクローラや状況確認用カメラなどは、多くの研究者がそ

の最先端の研究を行っているものであり、この後研究協力をお願いする事で補完可能な研究であると考ええる。本研究の必要性を訴え協力を促すためにも、まだ誰も研究を行っていないものから優先的に研究を行っている、そして人命救助ロボットに「瓦礫をこじ開け、瓦礫の中を進み、被災者のCS発症を阻止し、被災者を筐体内に収容して瓦礫を脱出する」事が求められている以上、その目的に沿った研究もまた優先順位を高くして研究を進めている。

2.5.3 人命救助ロボットの独自性

多くのレスキューロボットがそうであるように、当人命救助ロボットも様々な技術・機能をそのロボットの目的達成の為に複合的に利用した機械である。しかし多くのロボットが、その研究者が得意とする分野を軸にロボットを構築したものであるのに対し、当人命救助ロボットは、「CSの現実的対策が必要である」というニーズの基となっている。

また、「1.2 災害診療支援システムの概要」で示したように、当ロボットは災害診療支援システムの中で運用されることが前提として考案されたものである。これは、目指すべき目的を設定したのちにその目的に沿う機械や機能を集めるのではなく、あらかじめシステムで総合的に運用されることを前提に各機器を考案・設計したものである。これにより、多様な困難を抱えやすい災害に柔軟に対応可能となると考える。また余計な機能の重複も減ることで、コストや軽量化も図りやすくなる。

さらに、災害医療ロボットがこれまでほとんど研究がおこなわれてこなかった最大の理由として、作り上げるまでに必要な知識の多様さが挙げられる。医療行為を行うロボットであることから、医学と工学の知識が必要であることはもちろん、運用を想定する段階以降においては法学の知識も身につけなければならない²⁻⁴⁰⁾ ²⁻⁴¹⁾ ²⁻⁴²⁾ ²⁻⁴³⁾ (Fig.2-22)。

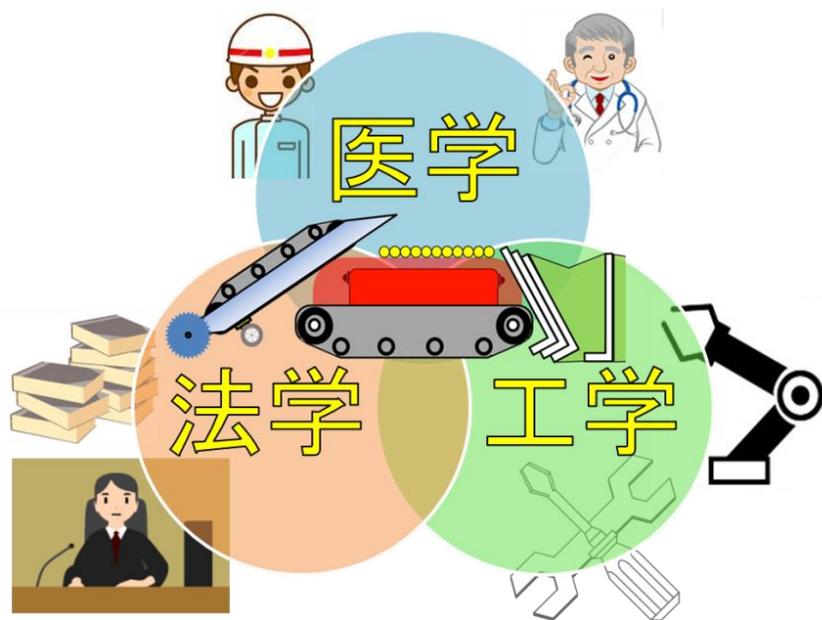


Fig.2-22 人命救助ロボットの独自性のイメージ図

しかし、この多岐に亘る知識が必要なのは、なにも当人命救助ロボットに限ったものではない。調査・探索を行うロボットにおいても、そのロボットが研究室から出た時点で法的な知識は不可欠なものとなっている事は、多くの研究者が経験している。そのため現在「ロボット法学会」²⁻⁴³⁾がその設立に向けて研究会を行っている。また、レスキューロボットであつても将来的に人の生活に溶け込むロボットであることを製作者が望む場合、心理学、精神医学、環境工学、人間工学、宗教学、文化人類学など、多岐に亘る知識とそれに沿った配慮が今後必要となるだろう。当人命救助ロボットは、多方面の知識を必要とする。つまり多くの人の助力を得なければ製品として成立しないという、現代においてのものづくりに倣った研究テーマであると考える。

【第2章の参考文献】

- 2-1.井上武雄：“災害とロボット 一大震災から見えてきたロボットのあり方―”，オーム社，2014
- 2-2.Martin J. Dougherty：“図解 世界戦車大全”，原書房，pp5-45，2010
- 2-3.坂本明：“世界の戦闘車両図鑑”，学研，pp18，2013
- 2-4.田所諭：“災害対応ロボットと福島第一原発事故（特集 震災復興を支える技術への挑戦）”，日本設計工学会誌，48(12)，pp539-545，2013
- 2-5.小柳栄次：“災害対応ロボット Quince の実用化と課題（特集 災害対応ロボット）”，ロボット，206，日本ロボット工業会，pp26-32，2012

- 2-6. Brian M. Yamauchi : “PackBot: a versatile platform for military robotics”,
Unmanned Ground Vehicle Technology VI, SPIE, pp228, 2004
- 2-7. 久米康歳 : “災害救助活動を目的としたレスキューロボット「T-53 援竜」の
概要について”, ロボット , 187, 日本ロボット工業会, pp38-43, 2009
- 2-8. 藤田志朗, 須藤大策 : “大型レスキューロボットの開発 : T-52 援竜”, 建設
の施工企画, 681, pp40-44, 2006
- 2-9. 宮中斉, 和田紀彦, 亀川哲志, 五十嵐広希, 松野文俊 : “組み替え可能なユ
ニット構造をもつレスキューロボット KOHGA2 の開発”, ロボティクス・
メカトロニクス講演会講演概要集 2006, 日本機械学会,
"2P2-D28(1)"-"2P2-D28(4)", 2006
- 2-10. Erico Guizzo : “Japan Earthquake: More Robots to the Rescue” IEEE
Spectrum 2011/3/18 記事,
<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/japan-earthquake-more-robots-to-the-rescue>, 最終アクセス日 2014/10/3
- 2-11. 天野久徳, 岡田隆光, 福島徹, 矢野寛 : “消防防災用ロボットベース
FRIGO-M の開発と試験配備による評価”, ロボティクス・メカトロニクス
講演会講演概要集 2008, 日本機械学会, "2P2-A11(1)"-"2P2-A11(4)", 2008
- 2-12. 山田晋太郎, 佃武典, 堀米篤史, 福島 E. 文彦, 鈴木康一, 広瀬茂男 :
“クランク車輪型移動機構を用いた不整地汎用移動プラットフォーム
“R-Crank” の開発 “, 第 32 回ロボット学会学術講演会予稿集 DVD, 日本
ロボット学会, 3D2-02, 2014
- 2-13. らいふすてーじ編集部 編 “ACADE 見 IC 最前線で活躍する「レスキュー
ロボット」 工学研究科 松野文俊教授”, らいふすてーじ 2011 年度 2 月
号, pp2-3, 2012
- 2-14. 井上公, 内山庄一郎, 鈴木比奈子 : “自然災害調査研究のためのマルチ
コプター空撮技術”, 防災科学技術研究所研究報告 第 81 号, 防災科学技術
研究所 編集委員会, pp61-98, 2013
- 2-15. 大瀬戸篤司, 安孫子聡子, 檜崎翔太, 久野温, 近野敦, 内山勝 : “4 チル
トロータ UAV の位置姿勢独立飛行制御” , 第 32 回ロボット学会学術講演
会予稿集 DVD, 日本ロボット学会, 3M1-01, 2014
- 2-16. 高野政晴 : “極限作業ロボットプロジェクト”, 日本ロボット学会誌, 9
(5), pp.614-618, 1991
- 2-17. 広瀬茂男 : “大衆工学としてのロボット”, 日本ロボット学会誌, 21 (2),
pp138-140, 2003
- 2-18. 岸宣仁 : “ロボットが日本を救う”, 文藝春秋, pp27-63, 2011
- 2-19. NHK : “NHK スペシャル「ロボット革命 人間を超えられるか」”,

2013/3/17 21:00～21:49 放送, 2013

- 2-20. HONDA HP : “「高所調査用ロボット」東京電力 福島第一原子力発電所で稼働を開始”, Honda-Robotics ページより,
http://www.honda.co.jp/robotics/high-access_survey_robot/, 最終アクセス日 2014/10/4
- 2-21. Robonews : “DARPA ロボティクス・チャレンジ第2日. 来年の決勝戦へ進む8チームが決定”, Robonews 2013/12/21 記事より,
http://robonews.net/2013/12/21/drc_day2/, 最終アクセス日 2014/10/4
- 2-22. Boston Dynamics : “LS3 - Legged Squad Support Systems”, Boston Dynamics HP より, http://www.bostondynamics.com/robot_ls3.html, 最終アクセス日 2014/10/4
- 2-23. 若菜和仁, 石倉路久, 昆陽雅司, 田所諭 : “能動スコープカメラのための柔軟性を有する直動アクチュエータの開発” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2011, 日本機械学会, "2A2-J08(1)"-"2A2-J08(4)", 2011
- 2-24. 畑崎計成, 伊崎和也, 昆陽雅司, 田所諭 : “繊毛振動駆動機構を用いた能動スコープカメラの開発 : 第2報 : レスキュー用スコープカメラへの機構の搭載と性能評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2007, 日本機械学会, "2P1-L04(1)"-"2P1-L04(4)", 2007
- 2-25. 内閣府 : “防災対策の充実” , 内閣府 平成18年度税制改正要望ページより, http://www.cao.go.jp/yosan/soshiki/h18/zei/zei_bousai.html, 最終アクセス日 2014/10/5
- 2-26. Deborah Bauers : “Crush Syndrome Symptoms and Treatments”, LivingHealthy360 2011/7/11 記事,
<http://www.livinghealthy360.com/index.php/crush-syndrome-symptoms-and-treatments-9549/>, 最終アクセス日 2014/10/5
- 2-27. 佐土原聡, 岡西靖, 東大志, 古屋貴司 : “災害時の救援技術高度化に関する研究”, 地域安全学会梗概集 , (10), pp63-66, 2000
- 2-28. DMAT 事務局 : “DMAT とは?”, 日本 DMAT HP より,
<http://www.dmat.jp/DMAT.html>, 最終アクセス日 2014/10/5
- 2-29. 日本集団災害医学会 : “増補版 DMAT 標準テキスト”, へるす出版, pp250-253, 2012
- 2-30. 丸川征四郎 : “経験から学ぶ大規模災害医療—対応・活動・処置”, 永井書店, pp157-159, 2007
- 2-31. DMAT 事務局 : “研修プログラム”, 日本 DMAT HP より,
<http://www.dmat.jp/program.html>, 最終アクセス日 2014/10/5

- 2-32. 佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・織田豊・福本一郎:「大災害時瓦礫の下にもぐる人命救助ロボットの基礎研究」,第13回日本集団災害医学会大会抄録, pp406, 2007
- 2-33. Taku SAHASHI, Akira SAHASHI, Yutaka ODA, Hisashi UCHIYAMA, and Ichiro FUKUMOTO: “A basic study of automated medical rescue robot under natural disaster” , The 9th Asia Pacific Conference on Disaster Medicine 2008.11 Seoul WC2008/11/2 program book, 2008
- 2-34. 佐橋拓, 佐橋昭, 内山尚志, 福本一郎: “瓦礫に潜り, クラッシュシンドローム回避機構を有する人類救助ロボットの研究”, 第29回日本生体医工学会甲信越支部大会講演論文集, pp1-2, 2009.
- 2-35. 佐橋拓, 佐橋昭, 内山尚志, 福本一郎: “災害時避難所を孤立させない災害診療支援システムの研究”, 第15回日本集団災害医学会総会・学術集会抄録集, pp351, 2010
- 2-36. 高山俊男, 広瀬茂男, 新井雅之: “瓦礫内推進連結クローラ走行車「蒼龍 III 号機」の開発” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2003, 日本機械学会, pp100, 2003
- 2-37. 篠原幸人, 小川彰, 他: “付録 表 1 Japan Coma Scale (JCS)”, 脳卒中治療ガイドライン 2009, 日本脳卒中学会, pp341, 2009
- 2-38. 佐藤貴浩, 中嶋優, 鈴木仁, 他: “生体電気インピーダンスを用いた DVT スクリーニング装置の構築に関する基礎研究”, 第29回日本生体医工学会甲信越支部大会講演論文集, pp33-34, 2009
- 2-39. 佐藤貴浩, 佐橋拓, 佐橋昭, 福本一郎: “生体電気インピーダンス法を用いた DVT スクリーナの基礎研究” , 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2011 抄録集, pp219-222, 2011
- 2-40. 佐橋拓, 佐橋昭, 内山尚志, 福本一郎: “災害時の ME 運用における医療責任の基礎研究”, BME 学会, 信学技報, 110 (52), pp1-6, 2010
- 2-41. 佐橋拓, 内山尚志, 佐橋昭, 福本一郎: “災害用人命救助ロボットの研究開発と運用上の責任”, 日本ロボット学会, 日本ロボット学会学術講演会予稿集 (DVD), 3G1-7, 2010
- 2-42. 佐橋拓, 内山尚志, 佐橋昭, 福本一郎: “災害ME運用における法的責任についての研究 — 人命救助ロボット運用の想定を例に —”, 第16回日本集団災害医学会総会, プログラム・抄録集, pp483, 2011
- 2-43. Taku Sahashi, Akira Sahashi, Hisashi Uchiyama, Ichiro Fukumoto: “A study of operational liability of the Medical Rescue Robot under disaster”, 2011 IEEE/SICE International Symposium on System

Integration, SI INTERNATIONAL 2011 Proceedings, F4-4, 2011 長場
景子：“「ロボット法学会」設立準備研究会がスタート”，日経テクノロジー
online 2015年10月15日の記事より，
<http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/101300706/?rt=nocnt>，最終アクセス日
2015/11/1

第三章 現行機 子機入渠型人命救助ロボット

(2号機) の概要

「2.4 発現した問題点」で明らかになった問題点を解決するため、大幅なデザイン改良を施した2号機を考案した。これは試作一号機を製作した上で展示会や学会に参加し、頂戴した意見 (Table.3-1) から得た改善を施すためでもある。、現在縮尺模型を用いて実験を行っている人命救助ロボットが2号機「子機入渠型人命救助ロボット」である。^{3-1) 3-2) 3-3) 3-4)}

Table.3-1 2号機のアイデアとして採用した質疑とその対応

	頂戴した質疑	質疑により発覚した問題点への対応
1	本ロボットの運用で被災者に危害が生じた場合、誰が責任を取るのか？	本論文では触れていないが、小生の研究の一環として法律を学び、一定の回答を得た。
2	ロボットが瓦礫に入り、立ち往生した場合、レスキュー隊の進入路まで塞いでしまうのでは？	簡易ではあるものの、ロボットの侵入経路にトンネルを設営し、ロボットの退路と人の出入りが可能な状態にする。
3	瓦礫をこじ開ける機構と、被災者の患部の圧迫物を除去する機構が同じでいいのか？	瓦礫こじ開け機構と圧迫物除去機構を独立させ、それぞれの目的に特化させる。
4	1,000kgを最大こじ開け能力としているが、一階建ての日本家屋の梁を支える場合、1,000kgを超えないか？	瓦葺きだと無理。しかもこじ開け機構にそこまでの重量をこじ開けられないので、機構の先端に丸鋸を装備し、こじ開け物の重量を減らす。
5	救助対象が車体に対し横向きに倒れていたら救助できないのか？	全ての状況への対応は出来ないが、二段階膨張式カフ機構は要救助者の体位に係らず救助可能な機構を目指す。

現状、ユニット毎の小型実験機とクラッシュシンドローム発症阻止機構 (Crush Syndrome Preventer, 以下 CSP 機構) の実物大カフ機構部分しか実験機がなく、全体像が見え辛い為、完成した場合を予想し本ロボットが目指す将来像を以下に示す。

3.1 子機入渠型人命救助ロボットの構成

2号機としてデザインした「子機入渠型人命救助ロボット」は、異なる機能を

有した二つのユニットで構成される。瓦礫除去及び瓦礫内進入，退路確保を目的とした「キャリア・ユニット」，患部圧迫物除去，被災者収容，瓦礫からの退去を目的とした「ブルード・ユニット」である。一つのロボットとして運用することが前提であるものの，これらユニットに期待されるそれぞれの目的に沿った機構を有し，その機能を特化させることでより確実な救助を目指した (Fig.3-1)。

機能特化の例としては，同じ瓦礫除去機構であっても，大きな瓦礫をパワフルにどけるキャリア・ユニットのこじ開け用上部クローラと，被災者に最も近づき，圧迫物を除去する繊細な動きが要求されるブルード・ユニットの圧迫物除去リフトなどである。それぞれのユニットの機能については後に解説する。

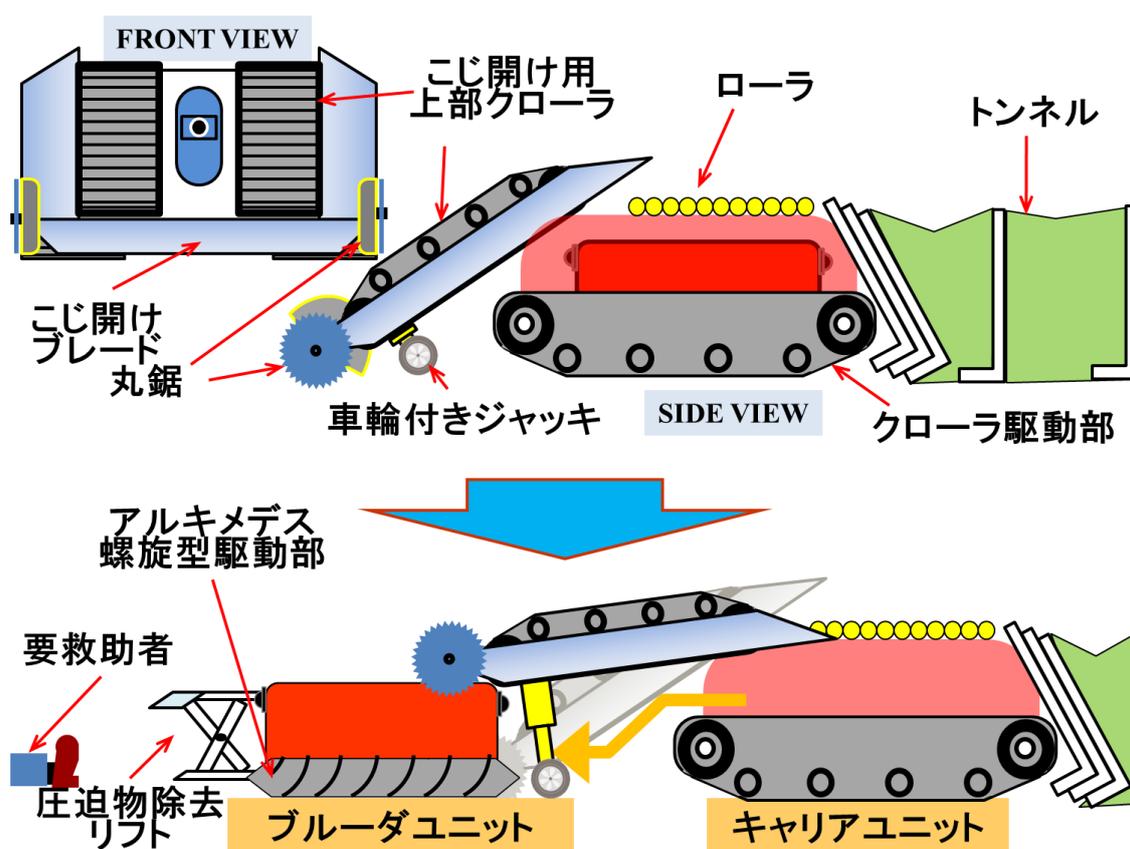


Fig.3-1 子機入渠型人命救助ロボットのコンセプトデザイン

3.2 運用手順

子機入渠型人命救助ロボットの運用手順は以下のようなになる。(Fig.3-2)

- ①キャリア・ユニットが瓦礫をこじ開け，トンネルを設置しつつ被災者近辺まで瓦礫内を進入する。

- ②キャリア・ユニットのコンテナ内のブルーダ・ユニットを出車。患部圧迫物を除去と同時に被災者を CSP 機構で収容，CSP 処理を行う。
- ③被災者収容後，ブルーダ・ユニットはキャリア・ユニットのコンテナ及びトンネルを通り，瓦礫より脱出する。
- ④瓦礫外で待機している医療チームの透析や輸液の準備が整い次第カフを減圧することで任務を完了する。

ちなみに任務完了後瓦礫内に残っているキャリア・ユニットはその場に放置する。生存者が全員瓦礫外に出れば重機で掘り出すことも可能だろう。

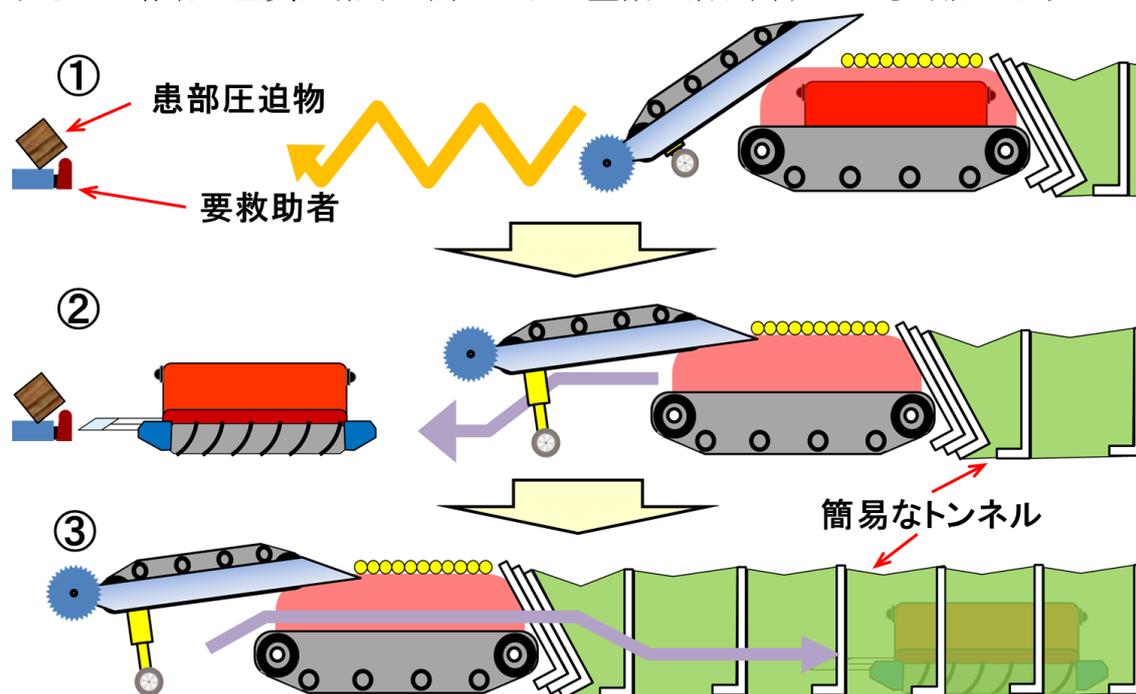


Fig.3-2 子機入渠型人命救助ロボット運用想定図

3.3 キャリア・ユニット

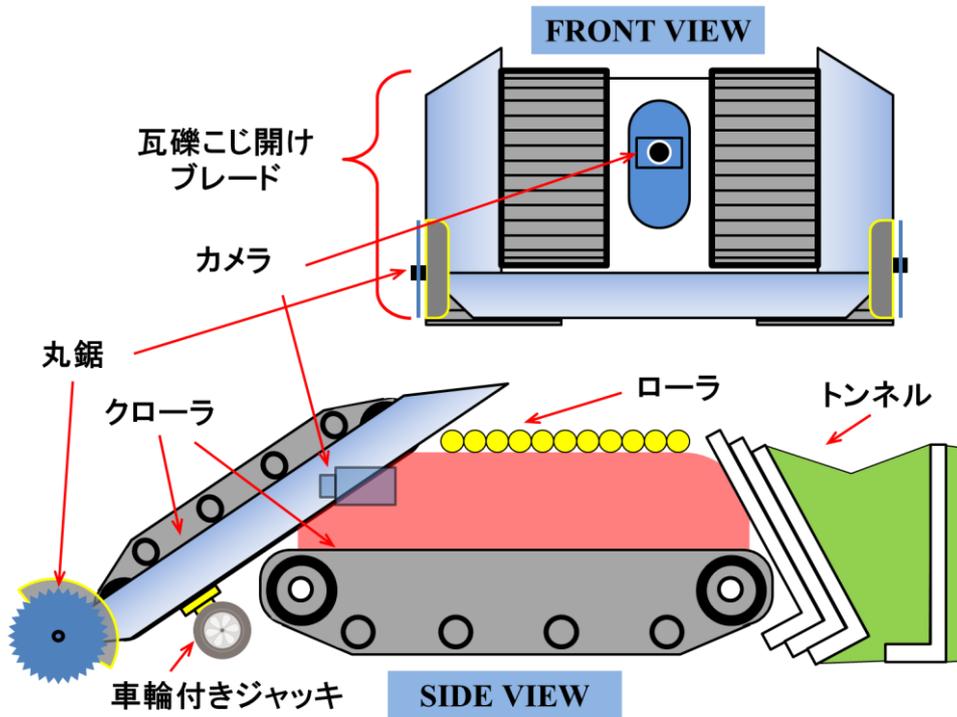


Fig.3-3 キャリア・ユニットの概観 その1

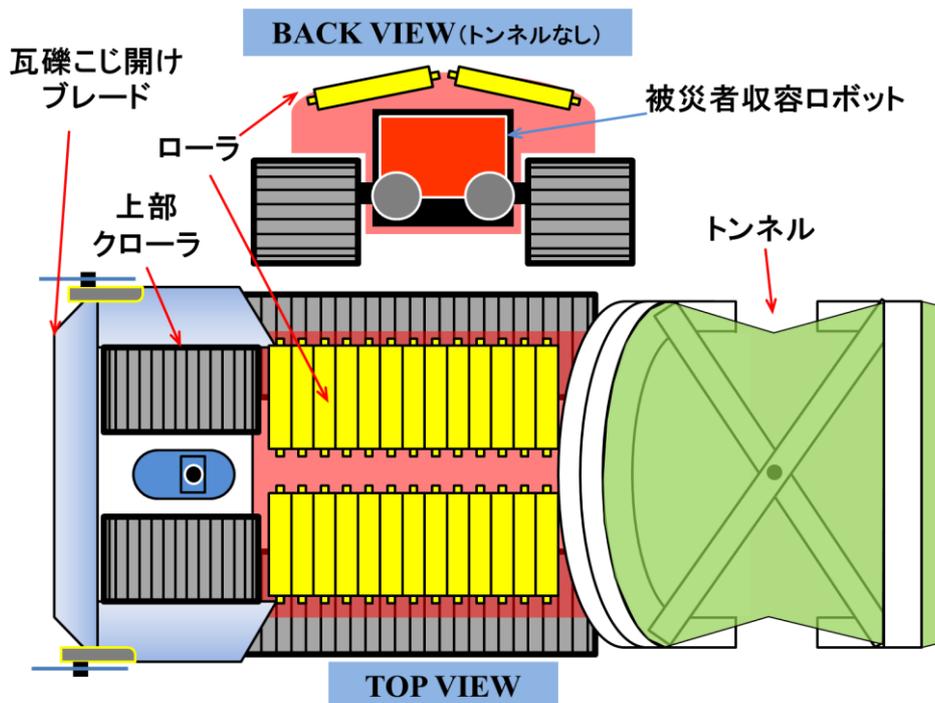


Fig.3-4 キャリア・ユニットの概観 その2

キャリア・ユニットは、倒壊家屋への進入と被災者までの到達、そしてブルーダ・ユニットの退路確保を目的としたユニットである (Fig.3-3, 3-4)。

駆動体としてはクローラを使用している。クローラに関しての歴史は古く、その走行性能に関しての文献も多く存在する³⁻⁵⁾。しかし本論文内においては瓦礫内走行に関するクローラの形状や性能の最適化などに関する研究は保留にしている。

概観は先に示した試作 1 号機に似ているが、キャリア・ユニットに比してパワフルな運用が要求されるため、ある程度の繊細さを犠牲にしても高い出力をもったモータを使用する必要がある。また、内部に人を収容可能なブルーダ・ユニットを抱える為、1号機よりもサイズアップする。

1号機との見た目の大きな差異としては、上部クローラが斜め前にせり出したような形状になったことだ。下部クローラと対になった上部クローラを廃止し、そのかわりに瓦礫こじ開けブレード及び瓦礫こじ開け用上部クローラを設けたためである。これにより、「4.2 ラグの高さ・間隔を変えた瓦礫こじ開け機構の実験」にて後に定義するが、1号機より低い初期進入口から侵入が可能となる。ユニット上部にかぶさる瓦礫は機体の前進と共に動力の無いローラで機体後方に送られる。このこじ開け機構の形状と併せて、トンネルの敷設も行いながら進むことから、当ユニットは上下が狭窄した空間においてはほぼ後退が出来ず、前進と方向転換のみで運用する予定である。

トンネルは、折り畳み式のテントのように、強靱な布と軽量の素材のフレームで構成する。ロボットの運用距離が最大 10mなので、最長で 8~9mまでトンネルを展開・敷設しながら前進するため、収納時の小型化に努める。

瓦礫こじ開け機構の最大こじ開け重量は 1 t (可能であれば 2 t まで性能強化する) だが、瓦を満載した屋根の梁など重すぎるものは持ち上がらないので、瓦礫の重量を小さくするための丸鋸も搭載予定である。薄い鉄板等の瓦礫を切断できるよう丸鋸にしたが、チェーンソー等その他切削機械も検討対象である。

3.4 ブルーダ・ユニット

患部圧迫物の除去及び被災者の収容と、CSP 機構による CS 発症の阻止、瓦礫外までの被災者の搬送を目的としたユニットである (Fig.3-5)。イメージとしては、試作 1 号機の被災者収容コンテナに駆動体を搭載することで、独立して移動できるようにしたものである。被災者の収容を前提としているため、スピードやパワーよりも繊細で確実な動作が求められる。「3.4.3 アルキメデス螺旋駆動体の特徴、利点、問題点」でも触れるが、駆動体にアルキメデス螺旋方式を採用した最大の理由も、人体を収容するために最も適していると仮定した結

果である。

以下において、まず当ユニットで最も重要な機構である被災者収容機構とその機構の一部である CSP 機構について説明し、その後アルキメデス螺旋駆動体について解説を行う。

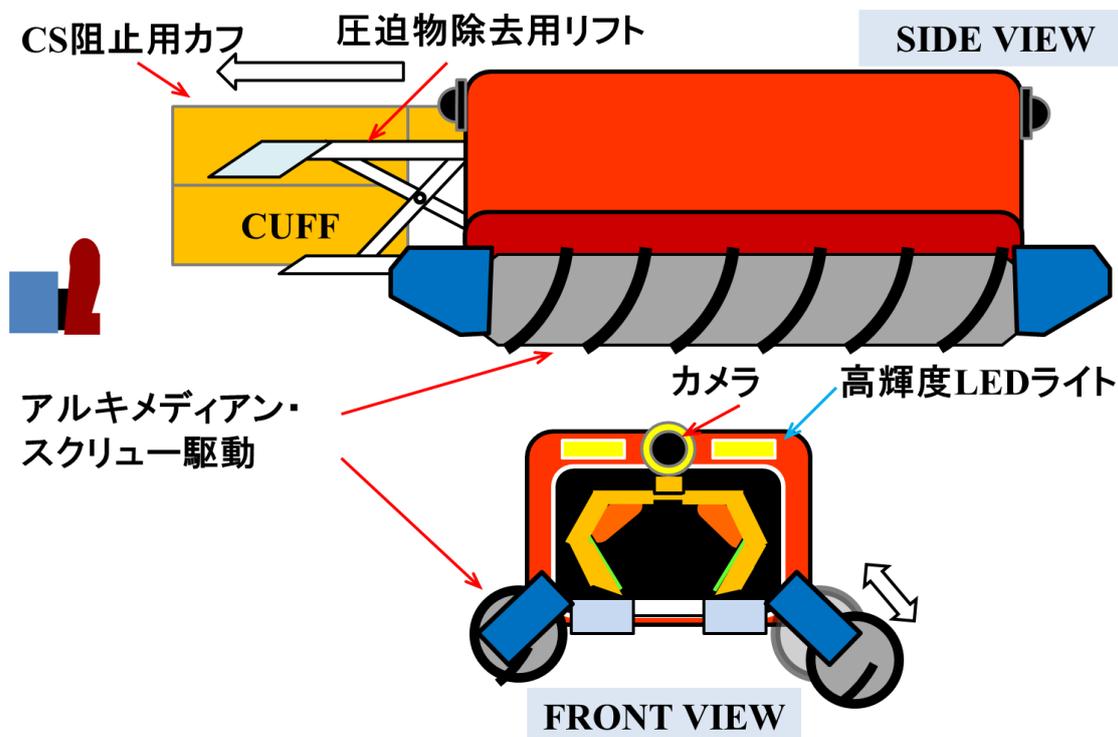


Fig.3-5 ブルーダ・ユニットの概観

3.4.1 CSP 機構（クラッシュシンドローム発症阻止機構）

クラッシュシンドローム（Crush Syndrome, 以下 CS）発症の機序は、「6.1 クラッシュシンドロームの機序と診断」にて詳しく述べる為割愛するが、当機構は CS の発症を工学的手法により阻止または遅延させることを目的とした研究テーマである。試作 1 号機に搭載する予定だったズボン型カフ（Fig.3-6 左）は、ショックパンツからアイデアを得たものである（Fig.3-6 右）。しかしそもそもショックパンツは失血などにより血圧が急激に下がった患者の出血性ショックを防ぐため、下肢を圧迫することで下肢の血液を体幹に集中させることを目的としたものであり^{3-6) 3-7)}、下肢の静脈の再灌流阻止を目的とした当方の機構とは、その効果が正反対に働く医療機器である。しかしその圧迫箇所を下肢全体ではなく四肢の根元に集中させれば当方の目的にも使用できるのではと考えられた機構であった。しかしそのズボン型という形状から、意識の無い被災者に穿かせる場合、足側からのみのアプローチで、その体位は仰臥位のみ、骨

折などの損傷を伴っていた場合は不可という非常に限られた条件でのみ成立する機構であった。

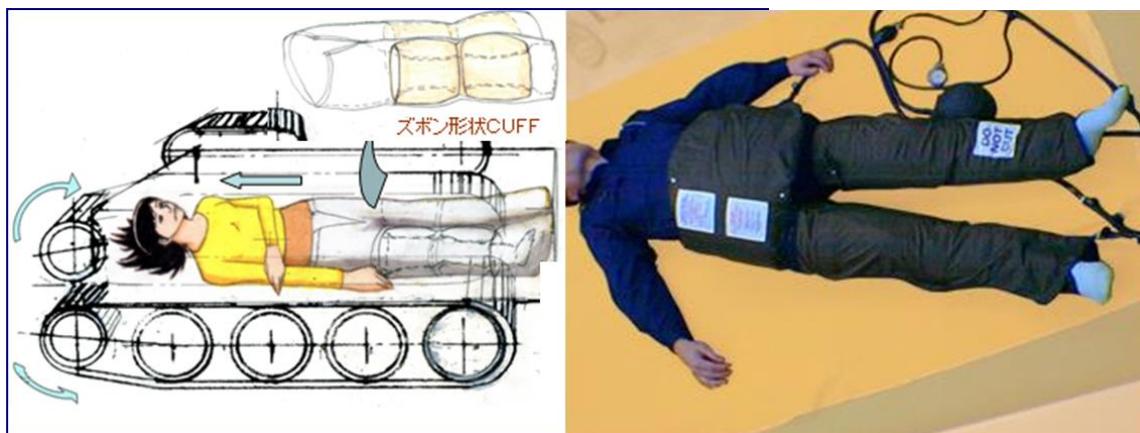


Fig.3-6 発案当初のカフ機構想定図（左）とショックパンツ（右）

（右）Yahoo ブログ：“ショックパンツ…” 救急隊のつぶやき，2006/6/13 の記事より転載，<http://blogs.yahoo.co.jp/makerunaqqtai/4719723.html>，最終アクセス日 2014/11/1

上記の問題を解決するべく，考案したのが「二段階膨張式カフ機構」(Fig.3-7)である。

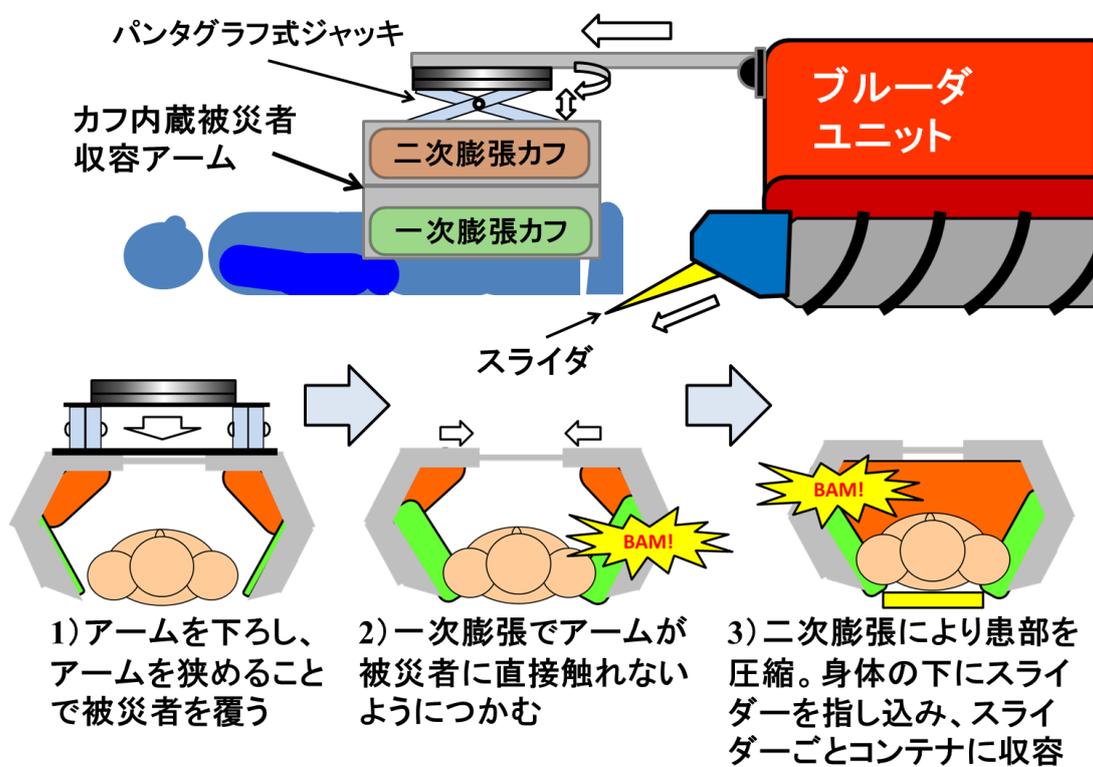


Fig.3-7 二段階膨張式カフ機構

ズボン型カフのようにカフを履かせるのではなく、アームで被災者を掴むような動作で掬い上げる方式を採用した。アームやバケットの形状こそ違うが、その動きは重機のバケットの一つであるクラムシェルバケット (Fig.3-8) や、プライズゲームのクレーンゲームの動きに似ている。ただし確保対象が人体である以上、掴むわけではなく、あくまで掬い上げる (SCOOP) ことを目的としている。そのため、この被災者掬い上げ機構 (以下スクーパ) のバケット先端の形状は、レスキュー隊が使用するスクープストレッチャー (Fig.3-9) を参考にデザインする予定である。

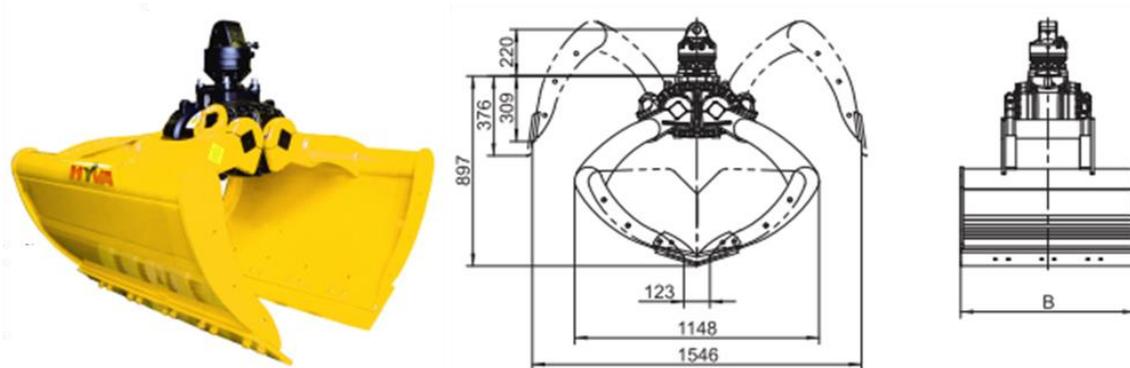


Fig.3-8 クラムシェルバケット(Hyva社, H 605U HPX)の概観

HYVA社 “GRABS AND ROTATORS -Attachments for truck mounted crane-” (同社カタログ) , Hyva Group, pp28,2012

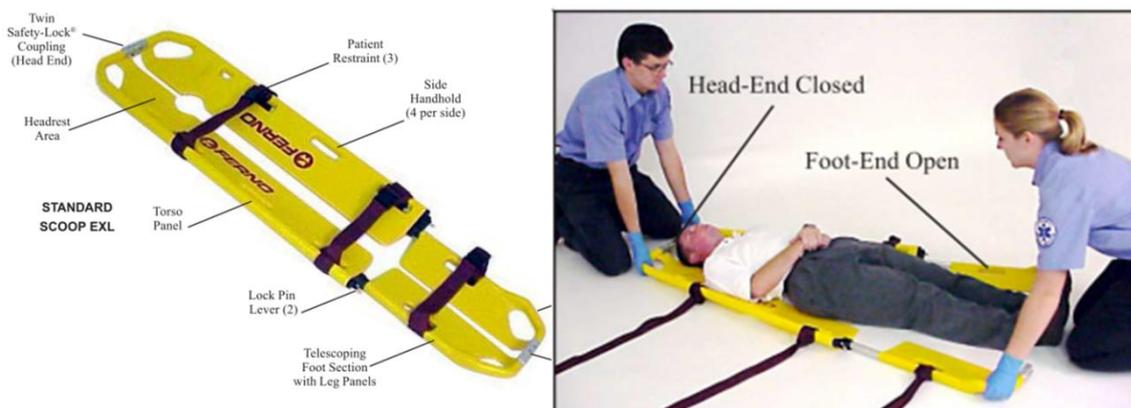


Fig.3-9 スクープストレッチャー FERNO EXL 65 の概観

FERNO社 “Scoop EXL Stretcher Series Users’ Manual”, Ferno-Washington, Inc., pp7-11,2006

スクーパのアームをパンタグラフ式ジャッキで上下、及び Z 軸を中心に回転 (ヨーイング) させられる機能を持たせることで、仰臥位、伏臥位、車体に対

する被災者の向きも足裏を中心に 90° ($\pm 45^\circ$) の範囲で対応可能とする予定である。その際は CSP 機構のカフの形状及び機能が重要となるだろう。また、現状のデザインでは側臥位や足を大きく曲げた状態の被災者の収容も不可である。

二段階膨張式カフ機構は目的別にカフを 2 つに分けている。一次膨張カフはスクーパのアーム先端が可能な限り人体に接触しないための保護用カフとして膨張し、次に下肢の CSP として二次膨張カフにて大腿静脈の駆血を行う。この方法については、「6.2 下肢静脈の阻血方法」にて詳しく解説する。

3.4.2 アルキメデス螺旋駆動体の歴史

アルキメデスの螺旋 (Archimedes' screw), アルキメディアン・スクリューは、紀元前 3 世紀, 古代ギリシャの発明家, 数学者, 天文学者, 物理学者として高名なアルキメデスの発案によるものとされ, そのスクリューを利用した排水施設は日本の佐渡金山においても利用されていた³⁻⁸⁾。(Fig.3-10)



Fig.3-10 承応 2 年 (1653) より佐渡金山で使用された水上輪 (すいしょうりん, 左) とその構造 (右)

“史跡佐渡金山 事前学習資料”, 株式会社 ゴールデン佐渡, pp5 より転載

アルキメデス螺旋を駆動体として利用した歴史としては, 船舶の駆動体として Thomas.J.Wells が 1841 年アメリカで特許を取得しており³⁻⁹⁾, また農耕作業車としてスイス出身のアメリカ人 Jacob Morath の手によりデザインされ, 1899 年に特許取得されている³⁻¹⁰⁾。(Fig.3-11)

その後, 旧ソヴィエト連邦軍の戦車「ZIL-29061」や, 日本においては砕氷船「ガリンコ号」(Fig.3-12 右)³⁻¹¹⁾に採用されるなど, タイヤやクローラのような一般への普及は少ないものの, 雪, 氷, 泥濘など悪路走破性能の高さ故に根強く採用されてきた。

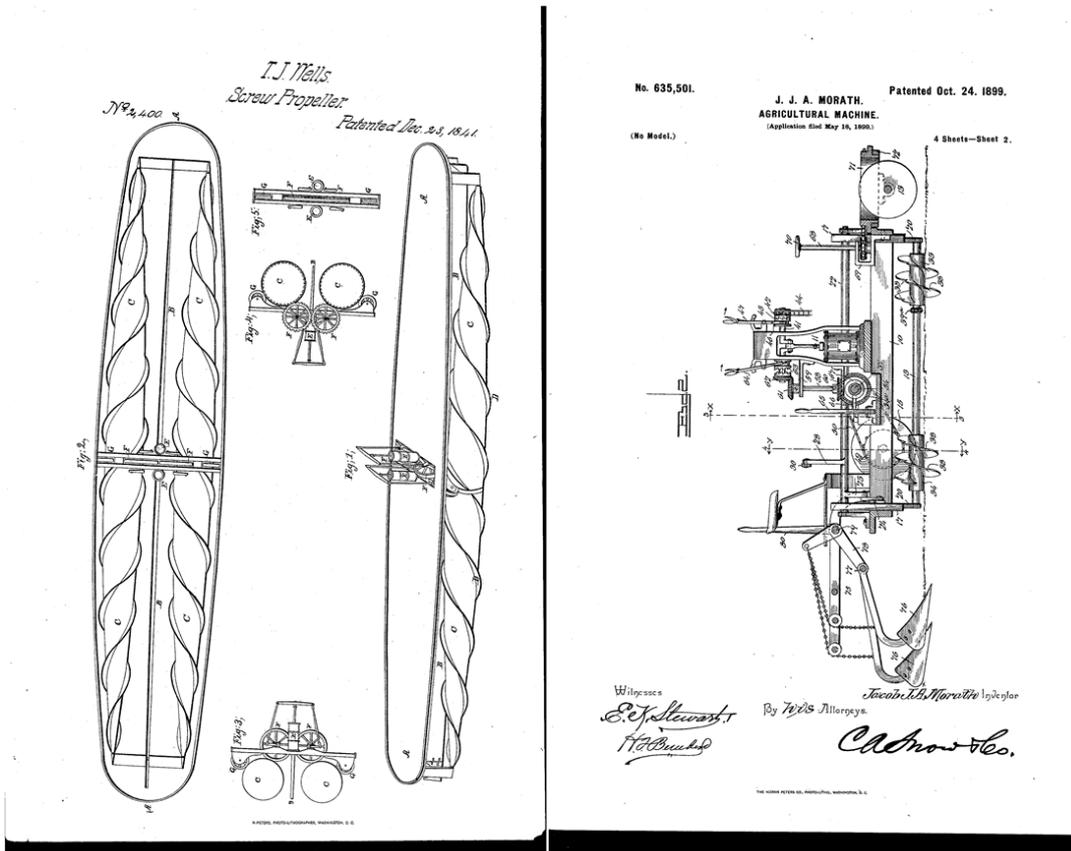


Fig.3-11 Wells の蒸気船（左）と Morath の農耕作業車
 左右共に特許申請資料より転載，（参考文献 3-9，3-10）

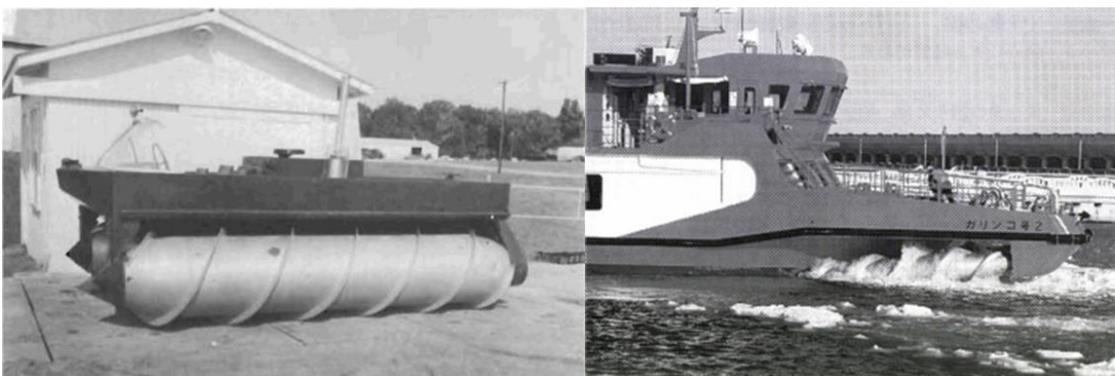


Fig.3-12 Marsh Screw Amphibian (MSA, 左) とガリンコ号 2 の船首 (右)
 (左) 参考文献 3-11, pp13, Figure5 より転載
 (右) 参考文献 3-10, pp586, 写真 2 より転載

Table.3-2 において，螺旋駆動体のおおまかな年表を示す。

Table.3-2 螺旋駆動体の歴史

螺旋駆動体の歴史		
登場した年	運用した路面	内容
1804	水上	N.Y.のノースリバーでColonel John Stevensの螺旋駆動蒸気船が登場
1841	水上	Thomas J Wellsが“buoyant spiral propeller”で特許取得
1899	土、泥	Jacob Morathが螺旋駆動の農耕作業車の特許取得
1920年代後半	雪、土	The Fordson snowmobileが登場する
1960年代	雪、土、泥、水上	以降70年代にかけて、旧ソ連による螺旋駆動戦闘車両の開発が始まる。LFM GPI-72、PVT-84、RVB GPI-02、Zil-19062など
1987年	氷海	ガリンコ号が流水砕氷観光船としてオホーツク海クルーズを開始
2001年	雪、土、泥、水上、アスファルト	The Snowbird 5が、pontoon(浮台)の損傷によりベーリング海峡横断を断念
2002年	同上	The Snowbird 6が、ベーリング海峡横断成功
2003年	瓦礫	東工大広瀬氏、レスキュー用ヘビ型ロボットの研究を発表

Jon T. Freeberg “A Study of Omnidirectional Quad-Screw-Drive Configurations for All-Terrain Locomotion” A thesis of Master of Science in Mechanical Engineering , University of South Florida, pp3-5, 2010 から抜粋，加筆したもの。

3.4.3 アルキメデス螺旋駆動体の特徴，利点，問題点

アルキメデス螺旋駆動体は悪路走破性が高く，特に雪，砂，泥，沼など軟質な路面において高い走破性を示す．その反面，スクリューのフリンジ（円筒に対し螺旋状に巻きついている帯．以降“螺旋羽根”と表記する）がある以上，硬質な路面，特に長距離走行が不得手である事が知られている³⁻¹²⁾ ³⁻¹³⁾．多くの先行研究者が螺旋駆動体を“*All-terrain vehicle*”，つまり全地形対応車両と銘打っているが，そのメインの活動範囲は，Fig.3-13 が示すように水上と硬質な路面の間である．つまり活動範囲は軟質な路面に限定されており，当然のことながら同駆動体の活動フィールドとして瓦礫を対象とした研究は行われていない．

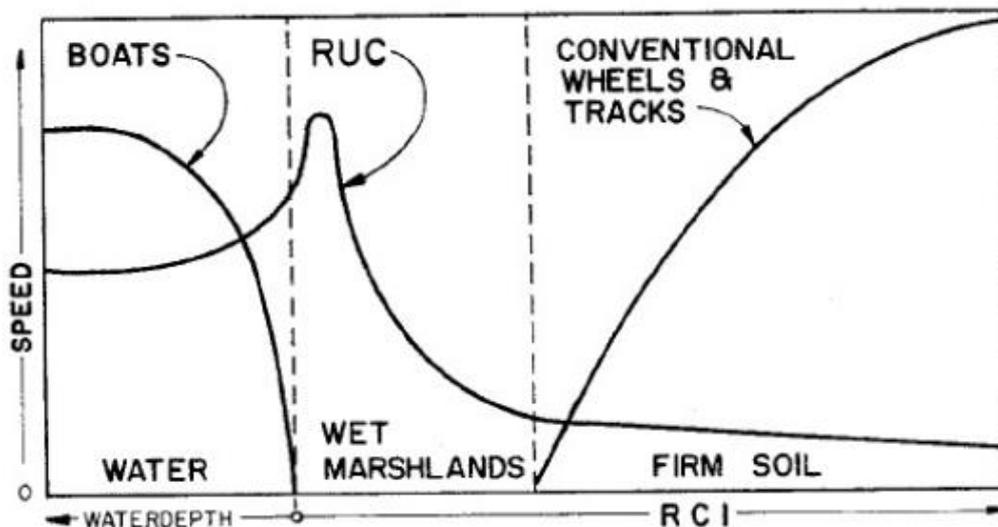


Fig.3-13 各駆動体の速度と地形の硬度の関係

図内の RUC は Riverine Utility Craft であり，本論文の螺旋駆動体にあたる．ちなみに図内の RCI は Rating Cone Index（コーン指数）であり，数値が高いほど硬い（踏み固められた）土であることを示す．またこのグラフにおいて土のコーン指数が高くてスピードは 0 になっていないことで，硬質な路面が不得手であっても走行不能ではないことがわかる．参考文献 3-13, pp3, Figure 1 より転載

Table.3-3 において，発案当初に想定した利点と問題点を示す．

Table.3-3 アルキメデス螺旋駆動体が有する利点と問題点

	利点	問題点
①	悪路に強い	エネルギー効率が悪い
②	水上でも移動可能	接地面が螺旋羽根であるため、硬質な路面や長距離移動に不向き
③	他の駆動体に比して構造が単純であり、信頼性が高い	キャリア・ユニットのクローラと駆動方式が異なる為、操作系が統一しにくい
④	被災者収容時に有効である平行移動(トラバース)ができる	螺旋駆動体の瓦礫踏破に関する先行研究が無い
⑤		螺旋ロッドの形状が複雑なため、試作が困難

利点として，③と④は特に他の駆動体にはほぼ見られない特徴であり，本駆動体を採用したきっかけでもある．問題点に関して，①，②の問題は，運用距離が長くて数十mを予定しているブルーダ・ユニットに関しては問題とならず，

③～⑤は、当方の工夫次第で克服可能と判断した。

3.4.4 アルキメデス螺旋駆動体の運動特性

車体前進方向に対し、並列に 2 本の螺旋ロッドを並べた当ブルーダ・ユニットの挙動を、Fig.3-14 に示す。クローラ駆動体の特徴である超信地旋回³⁻¹⁴⁾は不可能であるが、信地旋回は可能である。

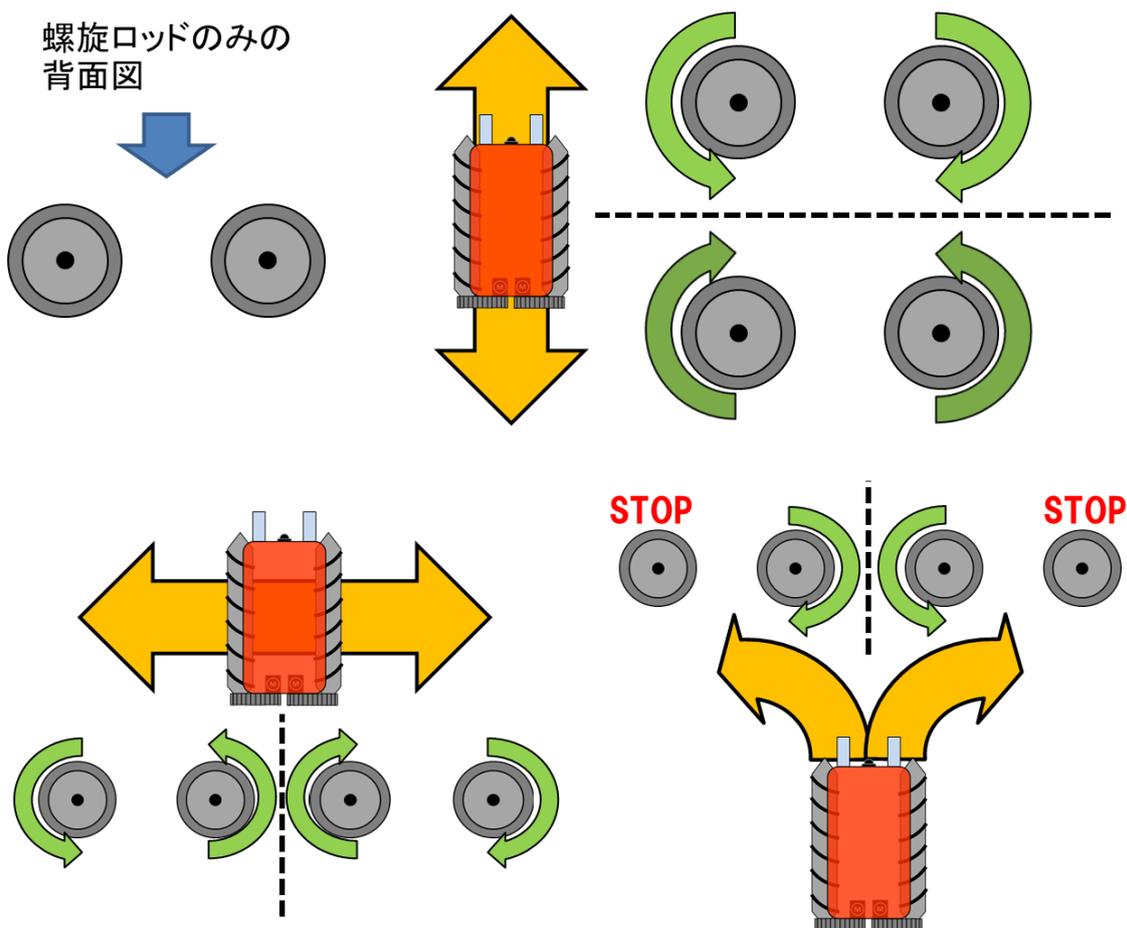


Fig.3-14 ユニットの移動と螺旋ロッドの回転方向の関係
前後移動（上図）、トラバース（平行）移動（下左図）、信地旋回（下右図）が可能。

以下に、「2.1 既存の災害用ロボット」で記載した駆動体を中心に、その各駆動体が有する旋回等の移動特性を比較する。（Table.3-4）

Table.3-4 各駆動体が有する旋回等の移動性能比較

★: 旋回軸

	(通常)旋回	信地旋回	超信地旋回	トラバース
挙動イメージ				
ホイール*	可	不可	不可	不可
クローラ	可	可	可	不可
螺旋	可	可	不可	可
2足/4足歩行	可	可	可	可
オムニホイール	可	可	可	可

*: あくまで前輪もしくは後輪が左右一对の駆動軸を有する場合であり、左右のホイールが異なる駆動軸を有していれば、ホイールでも信地、超信地旋回が可能である。

トラバース (Traverse, 車体前進方向に対しての平行移動) は、オムニホイール、2足/4足歩行でも可能であるが、現在のところ悪路に対応可能なオムニホイールは存在せず、機構の複雑さと瓦礫内という狭窄空間での使用から、2足/4足歩行も適さないと判断した。

3.4.5 アルキメデス螺旋駆動体に関する先行研究

沼地への適正に限定されるものの、螺旋駆動体の先行研究に関しては、Cole や Dugoff 等の論文に詳しく記載されている。3-15) 3-16)

螺旋ロッドの円柱の底を底辺とした角度であるリード角に関しては、コールの研究によりリード角 $20^\circ \sim 40^\circ$ で比較した結果、 20° が最も高いけん引性能を有していることが解っている。この結果を踏まえ、スピードよりもトルクを重視すべき本研究では螺旋ロッドの製作のしやすさを考慮し 20° に近い角度を有する 3 種類のロッドを、そのロッドに対する螺旋の巻き数というパラメータで表現した。ただし螺旋ロッドの仕様表にはその巻き数に対応するリード角も併記している (Table5-2, 5-36)。ちなみにロッドの直径 ϕ と隣り合う螺旋の間隔 l 、リード角 β の関係は、

$$\tan\beta = \frac{l}{\pi\phi}$$

で表される。

次に、ロッドの長さ・直径比だが、Dugoff の研究により $6 : 1$ が有効であるとの結果が出ている。当論文内では螺旋の開始位置から終了位置までのロッド長

を「有効長」と示しているが、巻き数によって若干のばらつきがあるものの 5.3 : 1 ~ 5.8 : 1 の比率で作製した。

ブレードの厚さについては、特に言及されている研究は無いものの、Freeberg は泥濘を進むその特性から十分な厚さを持ってその強度向上を図っている³⁻¹³⁾。瓦礫フィールドを対象とした本研究においては別の問題が生じたが、それについては「5.2.3 瓦礫走行実験開始時に生じた問題とその対処」において詳しく述べる。

過去の螺旋駆動体が対象とした路面だが、先に示した 1961 年の Cole (University of Birmingham)³⁻¹⁵⁾、1967 年の Dugoff (Stevens Institute of Technology)³⁻¹⁶⁾ 等、1977 年の Rush (U.S.Army)³⁻¹²⁾ らは水辺(泥濘, 水上)が対象であった。2003 年の広瀬(東工大)³⁻¹⁷⁾ 等、2007 年の里村(電通大)³⁻¹⁸⁾ らの研究により、ヘビ型螺旋駆動体による不整地走行の研究が行われた。2011 年、永岡(東北大学)³⁻¹⁹⁾ ³⁻²⁰⁾ 等による研究は、砂地走行(最終目標は月面)の実験を行っている。2本の螺旋ロッドを平行に配した移動体による、瓦礫走行の研究は、これまで行われていない。

【第 3 章の参考文献】

3-1. Taku Sahashi, Akira Sahashi, Hisashi Uchiyama, Ichiro Fukumoto :

“Study and Development of the Rescue Robot preventing Crush Syndrome of earthquake victims.” ICINCO2011, Final Program and Book of Abstract of ICINCO2011 and SIMULTECH 2011, pp55, 2011

3-2. 佐橋拓, 嶋田大和, 佐橋昭, 福本一郎 : “災害時瓦礫の下の被災者救助を目的としたロボットの研究開発”, 第 21 回魚沼シンポジウム抄録集, pp7, 2012

3-3. Taku Sahashi, Akira Sahashi, Hisashi Uchiyama, Ichiro Fukumoto:

“Study and Development of the Rescue Robot to accommodate victims under earthquake disasters.” Lecture Notes in Electrical Engineering 174, Informatics in Control, Automation and Robotics, Springer, pp89-100, 2012

3-4. 佐橋拓, 藤木智之, 嶋田大和, 岡田卓暁, 佐橋昭, 福本一郎 : “瓦礫に埋もれた要救助者を発見・救助するシステムの基礎研究”, 安全工学シンポジウム 2013 講演予稿集, pp352, 2013

3-5. 田中孝, 笈田昭 : “車両・機械と土系の力学 –テラメカニクス–”, 学文社, 1993

3-6. 高橋英夫, 武澤純, 福岡敏雄, 真弓俊彦 : “救急医学と EBM (<特集>救急医療における最近の進歩)”, 日本外科学会雑誌, 100(7), pp449-454, 1999

- 3-7. 真弓俊彦, 山田浩二郎, 中島義仁, 福岡敏雄, 榊原陽子, 高橋英夫, 武澤純 :
 “外傷患者に対するショックパンツの使用は生命予後を改善するか”, 日本
 救急医学会雑誌, 10(11), pp 667-676, 2009
- 3-8. 佐々木潤之介 : “日本における在来技術と社会”, 国連大学 人間と社会の開
 発プログラム研究報告, pp11-23, 1979
- 3-9. T. J. Wells “Improvement in the manner of constructing and of
 propelling steamboats” 米国特許, 公告番号 US2400 A.
- 3-10. J. J. A. MORATH, “Agricultural machine.”, 米国特許, 公告番号
 US635501 A.
- 3-11. 高山鉄章, 橋田安弘 : “流氷観光船ガリンコ号2 —新形式アルキメディ
 アンスクリュウ砕氷船—”, 日本船用機関学会誌, 33 (8), pp584-590, 1998
- 3-12. Edger S. Rush, William E. Willoughby “Evaluation of the Marsh
 Screw Amphibian (MSA)”, Technical Report A-77-1 Evaluation of
 Herbicide Application Platforms for use in Aquatic Plant Control,
 Aquatic Plant Control Reserch Program, pp5-30, 1977
- 3-13. Jon T. Freeberg “A Study of Omnidirectional Quad-Screw-Drive
 Configurations for All-Terrain Locomotion” A thesis of Master of Science
 in Mechanical Engineering, University of South Florida, 2010
- 3-14. 伊藤信孝, 鬼頭孝治, 白捷 : “履带式車両の旋回性の評価について-1-超
 信地旋回と信地旋回”, 農業機械学会誌, 56(6), pp11-16, 1994
- 3-15. Cole, B. N. : “Inquiry into Amphibious Screw Traction”, Institution of
 Mechanical Engineers, Proceedings, 175(19), pp919-940, 1961
- 3-16. Howard Dugoff, I. Robert Ehlich : “Model tests of bouyant screw rotor
 configurations”, Journal of Terramechanics, 4(3), pp9-22, 1967
- 3-17. 広瀬茂男, 松野文俊 : “レスキュー用ヘビ型ロボットの開発 : 形態設計
 とその制御”, 日本機械学会誌, 106(1019), pp769-773, 2003
- 3-18. 里村章悟, 原正哉, 福島宏明, 他 : “ねじ推進ヘビ型ロボットのモデリ
 ングと制御”, 日本ロボット学会誌, 25(5), pp779-784, 2007
- 3-19. 永岡健司, 久保田孝 : “螺旋スクリュ推進機構と土との相互力学モデル”,
 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2011,
 "1A2-K05(1)"-"1A2-K05(4)". 2011
- 3-20. 永岡健司, 久保田孝 : “砂地におけるスクリュ推進システムの移動性能” ,
 「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 2011(12), pp301-304, 2011

第四章 キャリア・ユニット性能評価

本章では、キャリア・ユニットに関する研究を紹介する。

瓦礫こじ開け機構は試作 1 号機ではその採用を見送っていた。その理由として、「2.2.4 実物大試作機の仕様」の制限仕様で示したように、本ロボットの運用フィールドを軸組工法による平屋建て日本家屋に設定したためである。この場合、地震により家屋が倒壊したとしても屋根と梁が残っており、初期進入口はレスキュー隊のサーキュレーターソー（丸鋸）やチェーンソーによる開口作業で開けることができるため、上部クローラ以上のこじ開け機構は不要なのではないかと考えたためである。しかし、梁を潜り終えた先にも様々なものが倒れ、崩れ、行く手をふさぐことが想定される以上、どうしても瓦礫こじ開け機構の搭載は不可避であろうと判断し、2号機への搭載を決定した。

ちなみに、軸組工法は最も一般的な家屋の建築方法であり、兵庫県南部地震で倒壊した家屋のほとんどは、現在よく見られるようになった2×4（ツーバイフォー）など近代的で比較的頑丈な家屋ではなく、この軸組工法により建築された、つまり古い一階建ての日本家屋であった。これらは土台の腐食や白蟻の被害により、さらに倒壊しやすくなってもいた⁴⁾ (Fig.4-1)。今後の地震においても被害が想定される家屋である。



Fig.4-1 新潟県中越地震で倒壊した軸組工法の一階建て家屋
地震により瓦が落ちているが、屋根や梁が残っているのが確認できる。
(長岡市消防本部の御厚意により提供いただいた画像。許可なく転載を禁じる)

以下に，キャリア・ユニットの縮尺模型を用いた瓦礫こじ開け機構の実験を示す．

4.1 キャリア・ユニット縮尺模型の概要

Fig.4-2, Table.4-1 に本研究で用いる縮尺模型を示す^{4-2) 4-3) 4-4)}．1号機同様の上下二段のクローラに加え，新たに設けた瓦礫こじあげ用クローラより構成されている．また，寸法は実物の約1/10となっている．操縦方法は試作1号機と同様に有線操縦となっており，Fig.4-3 に示す動作が可能である．



Fig.4-2 こじあげ機構を備えたキャリア・ユニットの1/10縮尺模型
瓦礫モデルとしての木板（図右）をこじ開け機構で持ち上げる様子．

Table.4-1 キャリア・ユニット縮尺模型

サイズ [mm]	全体	106W × 308D × 105H	
	車体のみ	106W × 165D × 80H、クローラ高35	
	こじ開け機構	106W × 172D × 80H	
		最大こじ開け高95、最小こじ開け高18	
重量[g]	2,330		
速度	最高1.2m/s(平坦地での実測値)		
動力	ギヤボックス 使用部位	上部クローラ 下部クローラ 各1個 こじ開け機構	回転式上昇機構 1個
	ギヤボックス	タミヤ ツインモーター ギヤボックス	タミヤ 4連クランク ギヤボックス
	使用モータ	タミヤ FA-130 × 2個	タミヤ FA-130 × 1個
	ギヤ比	1:114.7	1:114.7
	トルク (DC3.0V最大効率時)	809gf・cm × 2	809gf・cm
	回転数 (無負荷回転数)	115rpm	115rpm
バッテリー	単1型アルカリ乾電池 × 2本、3.0V		

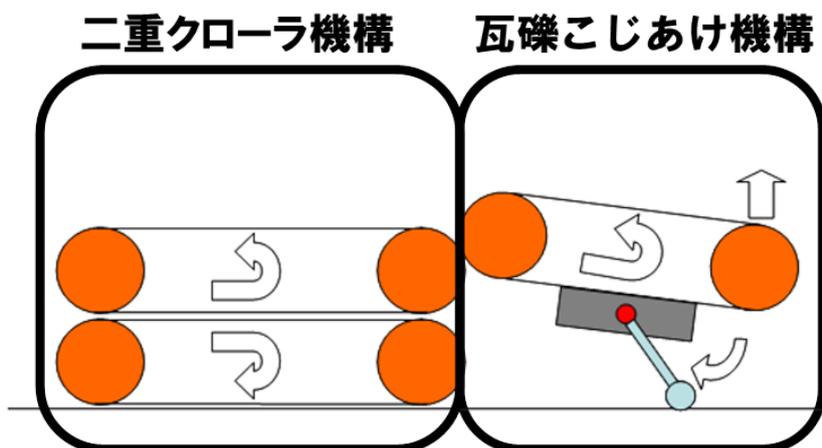


Fig.4-3 キャリア・ユニット模型の可動範囲

瓦礫こじあげ機構にあるクローラの運動で、本体の上部クローラ側に瓦礫を移動させる。

瓦礫こじ開けプロセスは以下に示すものを考えた。

- ① 瓦礫こじ開け用クローラの推進力を利用し、前方にある瓦礫を筐体上部に移動させる。

- ② 筐体の上部クローラにより瓦礫の中を蹴りながら進む。
- ③ 被災者のもとに到達後，瓦礫こじあげ機構を上昇する．その後，ブルーダ・ユニットを出車し，CS 発症阻止，被災者収容へと移行する．

4.2 ラグの高さ・間隔を変えた瓦礫こじ開け機構の実験

4.2.1 実験方法

実験では，上記瓦礫こじ開けプロセスに従い，瓦礫こじ開け用クローラの推進力を用いて瓦礫を模型上部に移す作業を行うことで性能を検証した．実験で使用する瓦礫は新潟県中越地震にて倒壊した家屋モデルを基に縮尺比 1/10 で設計，作製した (Fig.4-4, Fig.4-5) 4-5) 4-6) 4-7) 4-8) 4-9) 4-10)．瓦礫はテーブル上で無作為に置き，このときに生じる地面から木材までの隙間の高さを初期進入口 d と定義した (Fig.4-6)．



Fig.4-4 日本家屋の3次元モデル (縮尺比率 1/10)
新潟県中越地震にて倒壊した家屋 (小千谷市) を基に設計.

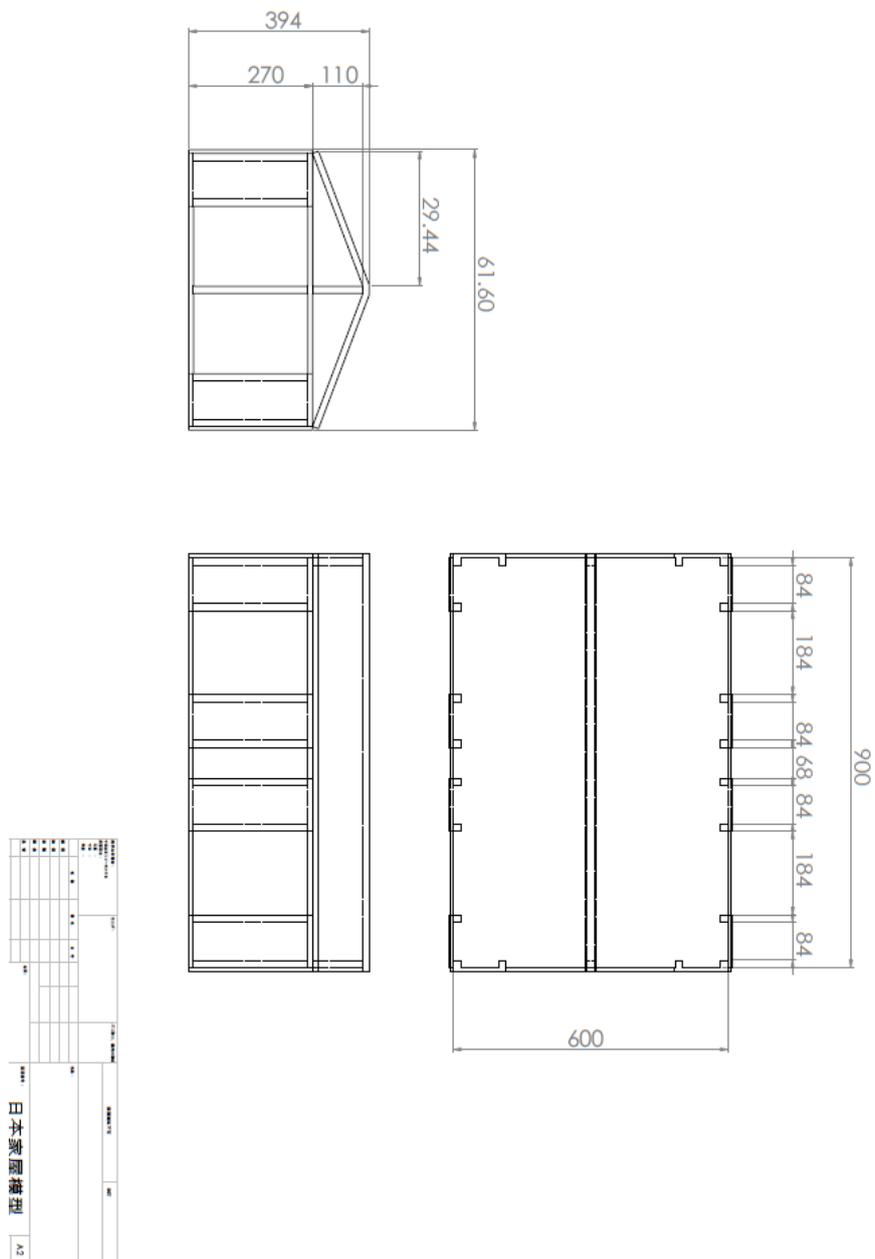


Fig.4-5 日本家屋の2次元モデル (単位 : mm)
 (米 SolidWorks 社製, SolidWorks 使用)
 Fig.4-4 を平面図にしたもの.

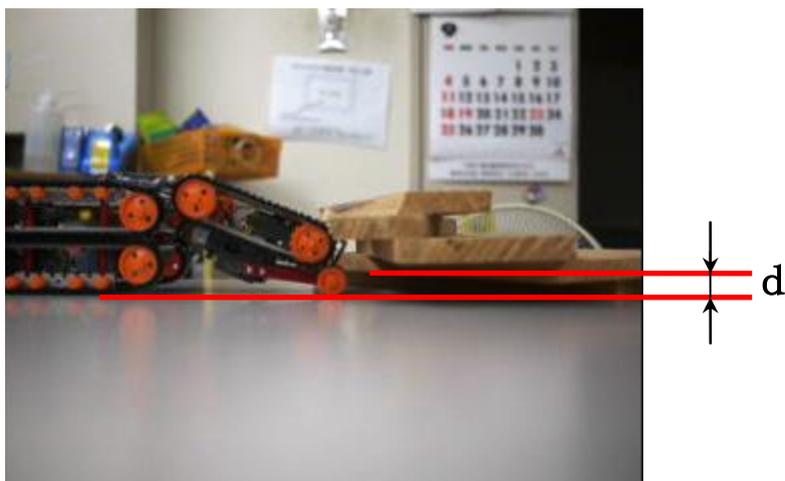


Fig.4-6 初期進入口 d の定義

初期進入口 d を，実験を行う前にスケールで測定した．

今回は条件として，瓦礫こじあげ用クローラベルト（タミヤ製，「たのしい工作シリーズ No.100 トラック&ホイールセット」）のラグ形状（Fig.4-7）を変更し，違いを検討した．設計した 2D-CAD を Fig.4-8，実際に作製したものを Fig.4-9，Fig.4-10 に示す．本実験では「①ラグ高さを固定し，ラグ間隔を変更」「②ラグ間隔を固定し，ラグ高さを変更」し，進入能力を比較した．ラグの仕様変更はバンポン（材質：ポリウレタン，住友 3M 製）を両面から固定することで行った．実験は瓦礫こじあげを 5 回成功するまで繰り返し行った．進入能力はこじあげ成功時の平均値と定義し，実験終了後，各条件のこじあげ成功率を算出した．

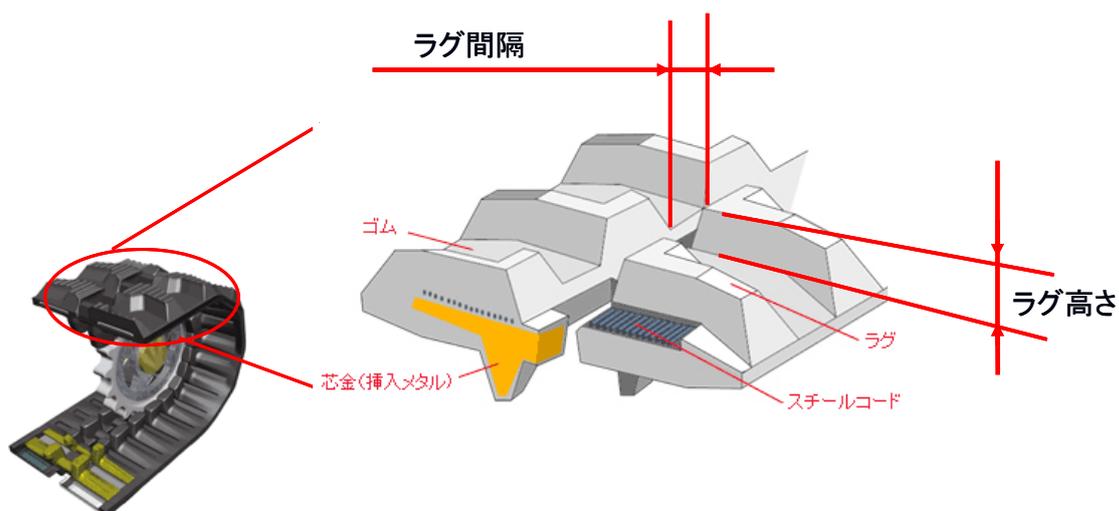
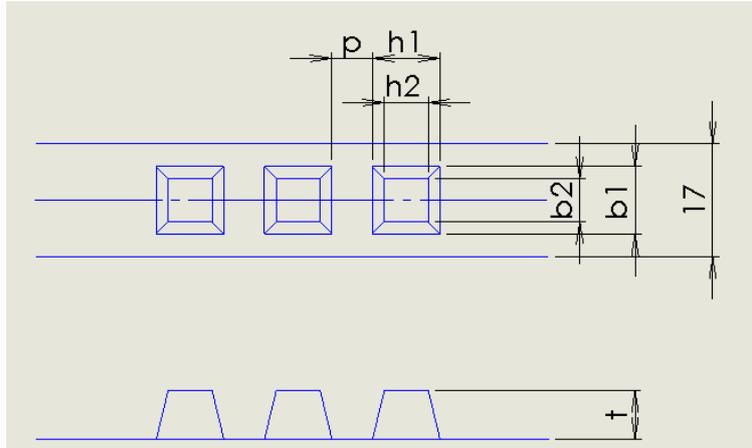


Fig.4-7 クローラベルトの構造

Dongil Rubber Belt Japan 株式会社：ゴムクローラページより転載・改変，
http://www.drj.co.jp/01_product/product_01.htm，最終アクセス日 2014/11/6



	h1	h2	b1	b2	p	t
ラグA	10.00	6.50	10.00	6.50	6.00	7.30
ラグB	2.00	2.00	12.00	12.00	4.00	4.30
ラグC	10.40	6.02	10.40	6.02	6.00	6.30

Fig.4-8 ラグの 2D-CAD (単位: mm)

図中の p がラグ間隔, t がラグ高さである.



Fig.4-9 ラグ高さの違い



Fig.4-10 ラグ間隔の違い

4.2.2 実験結果

Fig.4-11 にこじ開け動作の典型例を示す. こじ開け機構の無い機体では機構

の仕様上、上部クローラより低い進入口では、瓦礫内部には入ることは出来なかった。しかし、模型実験の結果より、瓦礫こじあげ機構を加えることで、下部クローラが位置する低い進入口であっても、瓦礫こじあげが可能となることを確認出来た。Table.4-2 にこじあげの成功率を示す。結果より、ラグの高さにより成功率が減少していることが明らかとなった。

Fig.4-12, Fig.4-13 にラグ間隔、ラグ高さを変更したときに進入可能となった初期進入口を示す。縦軸は進入に成功した初期進入口を示している。ラグ高さ 7.3mm において、間隔を広げることで進入可能となる初期進入口は増加傾向を示しており、ラグ間隔 4mm で $31.8 \pm 3.0\text{mm}$ 、ラグ間隔 8mm では $34.1 \pm 7.5\text{mm}$ 、ラグ間隔 16mm では $40.3 \pm 7.1\text{mm}$ となった。しかし、ラグ高さ 6.3mm においては正反対の傾向が表れており、ラグ間隔 4mm では $41.3 \pm 2.6\text{mm}$ 、ラグ間隔 8mm では $40.3 \pm 7.1\text{mm}$ 、ラグ間隔 16mm では $27.6 \pm 4.3\text{mm}$ となった。ラグ間隔を固定し、ラグ高さを変更した時にも同様の傾向が見られており、ラグ高さを高くすることにより狭い進入口に入り込める場合と進入が困難となる場合があった。

ラグ間隔を 8mm で固定した場合は高くすることで増加傾向が見られており、ラグ高さ 4.3mm において $31.8 \pm 3.0\text{mm}$ 、ラグ高さ 6.3mm において $34.1 \pm 7.5\text{mm}$ 、ラグ高さ 7.3mm では $40.3 \pm 7.1\text{mm}$ となった。ラグ間隔 16mm においては正反対の傾向が表れており、ラグ高さ 4.3mm において $31.8 \pm 2.6\text{mm}$ 、ラグ高さ 6.3mm において $24.8 \pm 6.6\text{mm}$ 、ラグ高さ 7.3mm では $21.6 \pm 2.6\text{mm}$ となった。

Table.4-2 瓦礫こじ開けの成功率

	ラグA	ラグB	ラグC
こじあげ成功率[%]	41.7	83.3	62.5

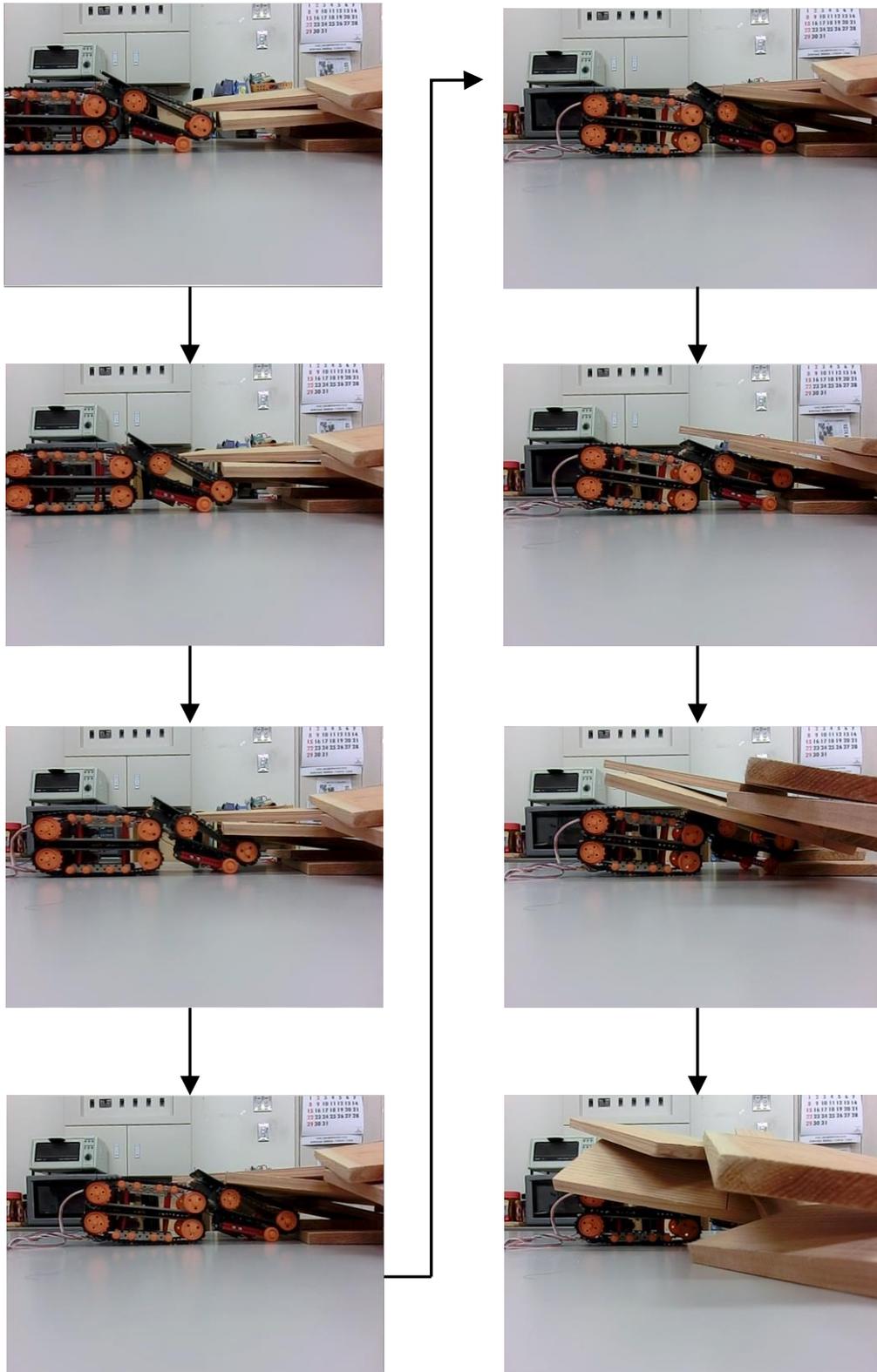


Fig.4-11 瓦礫こじあげ動作典型例

考案したこじ開けプロセスの通り，こじ開け機構で瓦礫を後部本体側に移動可能であることが確認できた。

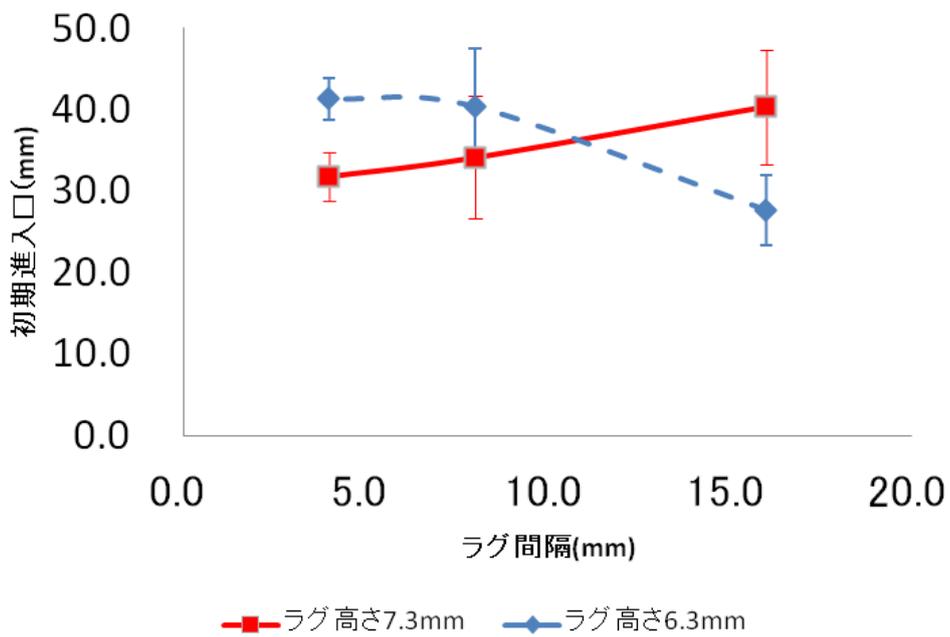


Fig.4-12 初期進入口（ラグ間隔変更）

間隔を広げることで、低い進入口からこじあけられる傾向が見られた
 また、逆にこじあけが不可能となり高い初期進入口を要する場合も見られた

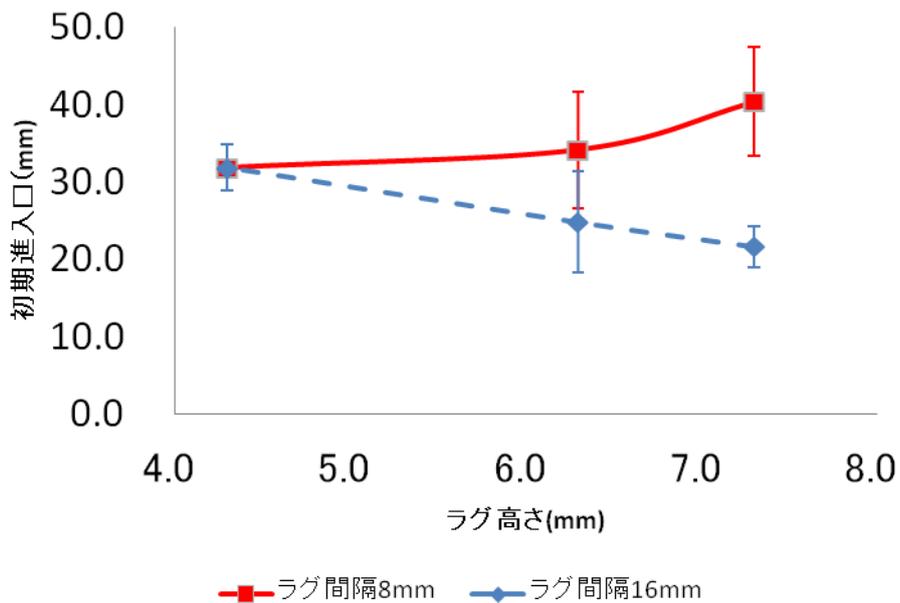


Fig.4-13 初期進入口（ラグ高さ変更）

高さ変更の場合も間隔変更と同じ挙動が確認された

4.2.3 考察

今回の実験においてこじ開けが容易に行えた（より低い初期進入口から進入できた）原因としてラグ高さ，ラグ間隔を変更したことによる木材の接触面積増加が考えられる（Fig.4-14）．ラグ間隔に関しては，ラグ間隔は広げることで，ラグ全体が木材に接触しやすくなる．これにより，力を直に伝えることが出来たために瓦礫をこじあける性能が高くなったと考えられる．ラグ高さに関しては，ラグを高くすることでラグ1本の接触面積が増加する．そのため，木材を後部に移動させる機能がより効果的に発揮されたと考えられる．

また，予想に反し正反対の傾向が見られた理由として，瓦礫こじあけ機構下部にある上昇機構の干渉が挙げられる．今回採用した瓦礫こじあけ機構の構成ではクローラベルトと上昇機構が接触し，問える場合があった（Fig.4-15）．また，ラグの高さを大きくすることは見掛け上の径の大きさ（スプロケットの径+ラグ高さ）が大きくなるため，干渉を避けるためには瓦礫こじあけ機構はより上部に位置する必要がある．上部にある場合，狭い部分に対する瓦礫こじあけが行えないことに繋がることと考えられる．それに伴い，進入可能となる初期進入口も増加したと思われる．ラグ間隔を広げたことによる初期進入口増加傾向もラグ高さが高いときに現れている．そのため，ラグ高さが瓦礫をこじあける動作において重要な役割を担っていると考えられる．

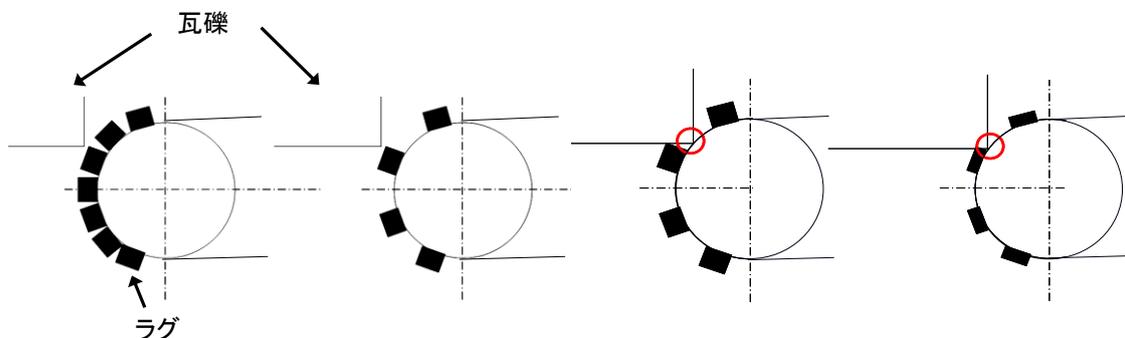


Fig.4-14 間隔，高さによる接触面積の違い

間隔が大きい場合は瓦礫に接触しやすくなる．ラグが高いとラグの接触面積が増加する．



Fig.4-15 上昇機構と瓦礫こじ開け機構の接触例

クローラベルトに接触することでこじ開け用クローラの回転が妨げられる場合があった。

4.3 定量的解析システムを用いたキャリア・ユニットの解析

4.3.1 解析システムの構成

キャリア・ユニット縮尺模型の能力を数値で示すため、Fig.4-16に示す定量的解析システムを作製し、検証を行った⁴⁻¹¹⁾。システムは、実験フィールドとしてアクリル板で構成された水槽 (Fig.4-17)、デジタルカメラ (CASIO 製, EX-ZR100)、倒壊家屋瓦礫モデル、キャリア・ユニット縮尺模型より構成される。また、カメラ固定のため、レゴブロックによる専用の撮影台を製作した。撮影台上部にはL字にブロックを取り付けており、カメラを安定して設置させることが可能である。また、水槽内はアルミアングルを設けており、このアングルを定量測定スタート位置とした。

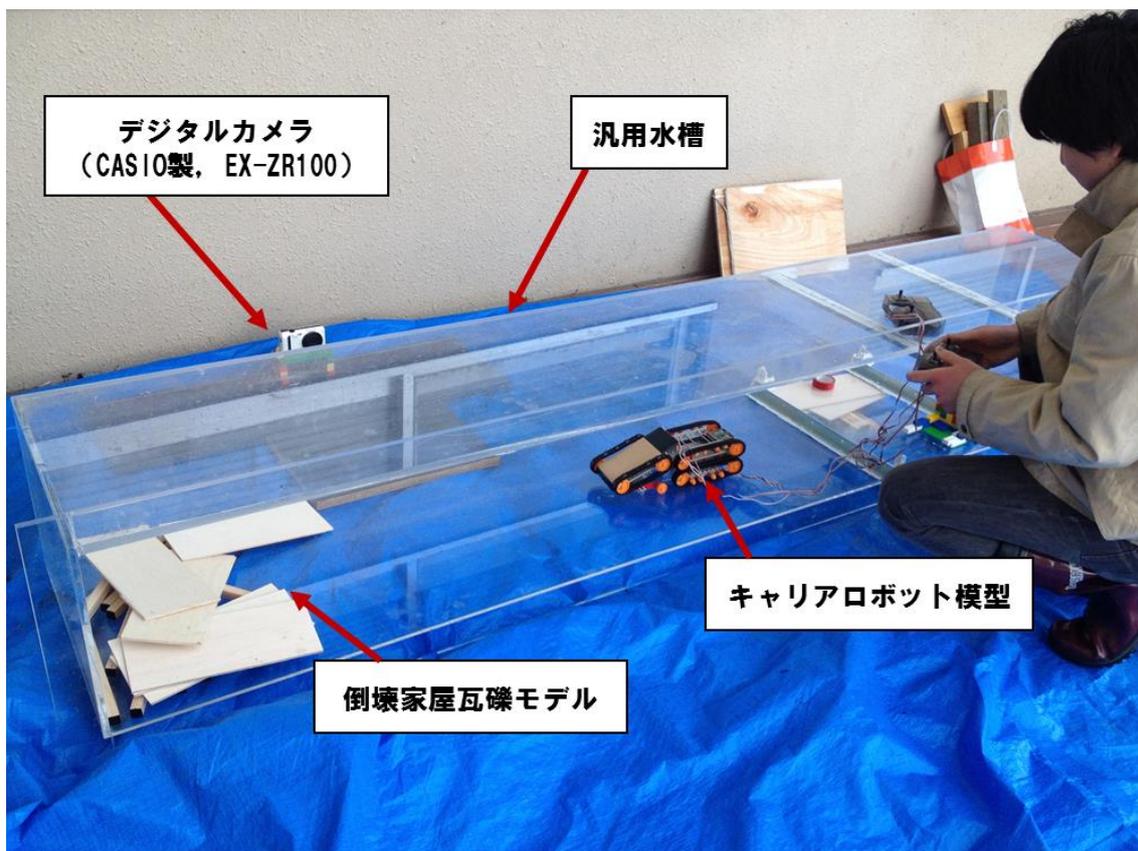


Fig.4-16 走行性能定量解析システムの構成
 カメラ撮影方向側に操縦者が待機し，撮影開始と同時に模型を動作させる。
 この状態でキャリア・ユニットの直進速度を調べた。

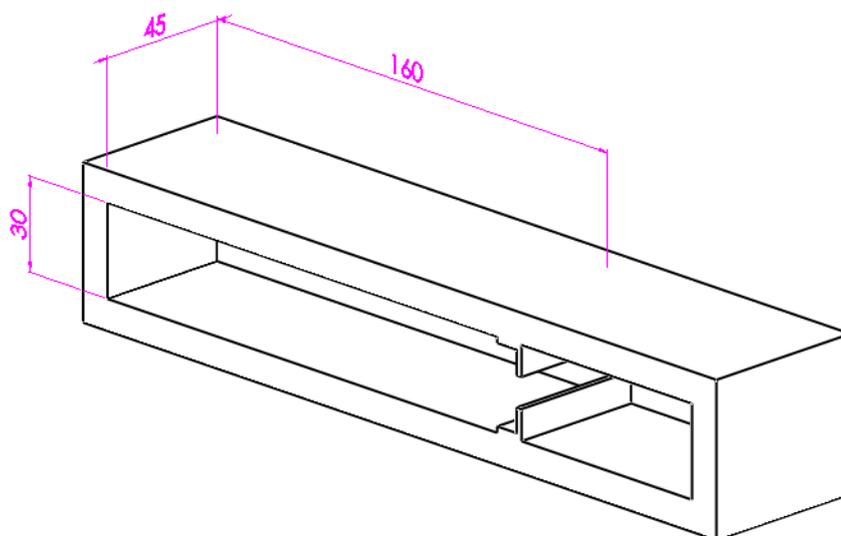


Fig.4-17 走行性能定量解析用水槽の3D-CAD
 解析範囲は幅45cm，長さ165cm，高さ30cmとなっている。

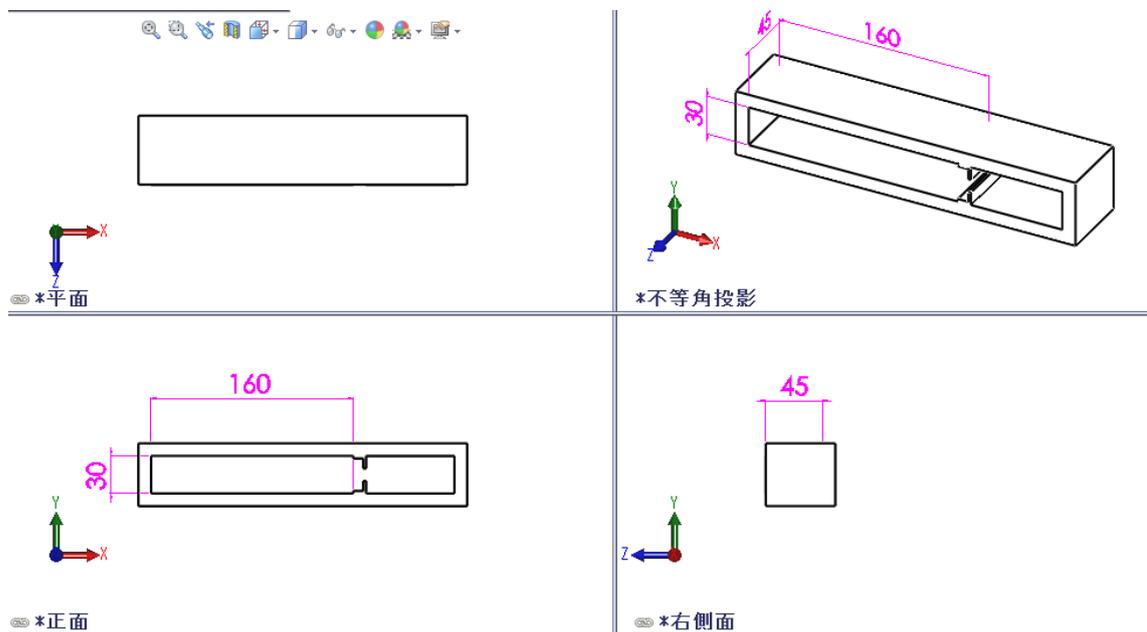


Fig.4-18 第三角法にて Fig.4-17 を表示した水槽

4.3.2 直進運動の実験

水槽内のフィールドにおいて、キャリア・ユニットの①直進運動能力、②旋回運動能力の測定を行った。以下に詳細な方法を示す。

4.3.2.1 直進運動の解析

Fig.4-16 に示した状態で動画撮影 (10fps) を行い、撮影した動画を運動解析ツール「運動くん」により解析した⁴⁻¹²⁾。運動解析ツールでは、Fig.4-19 に示すように下部スプロケット径の中心点にプロットをし、キャリア・ユニットの寸法定義を行った。この時、実物大の寸法に相当する 180cm を定義することで、実物大における能力を検討することが可能である。寸法定義後に 5 フレームごとに後部スプロケットに対してプロットを行い、座標(x,y)を導出した Fig.4-20。この座標を使用し、速度の解析を行った。本研究では実験フィールドの路面条件としてアクリル、木材、デコラ (高圧メラニン樹脂)、砂利、雪の路面状況を設定⁴⁻¹³⁾ ⁴⁻¹⁴⁾ ⁴⁻¹⁵⁾ し、各路面条件の比較をした (Fig.4-21)。



Fig.4-19 キャリア・ユニット寸法の定義

キャリア・ユニット縮尺模型下部にある直線により撮影した動画の寸法定義を行っている。

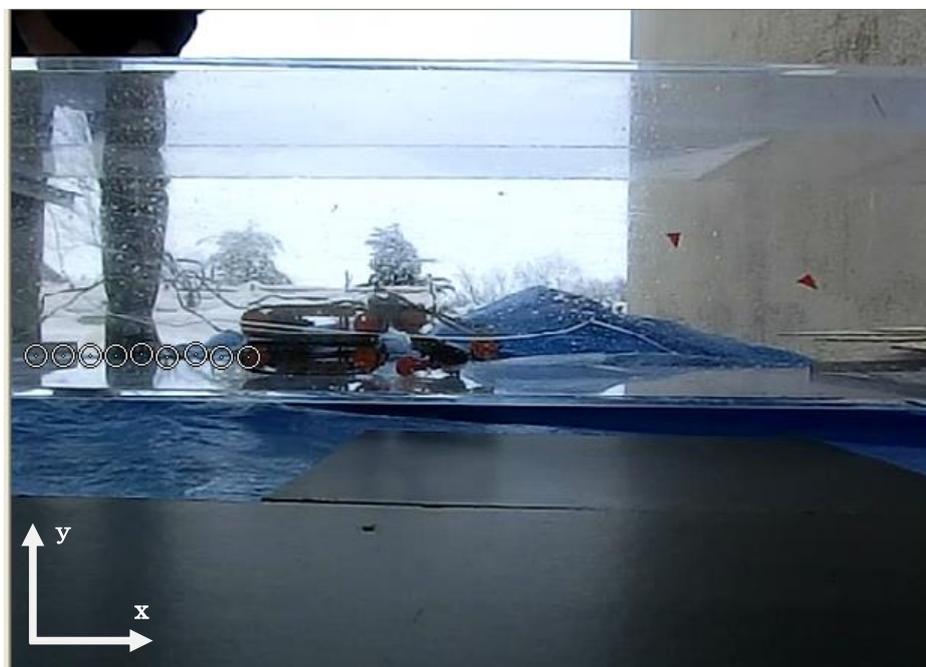


Fig.4-20 プロットによる位置情報検出

プロット（左側円形部）より座標 (x,y) を求め、速度を求める。左下端が原点となる。

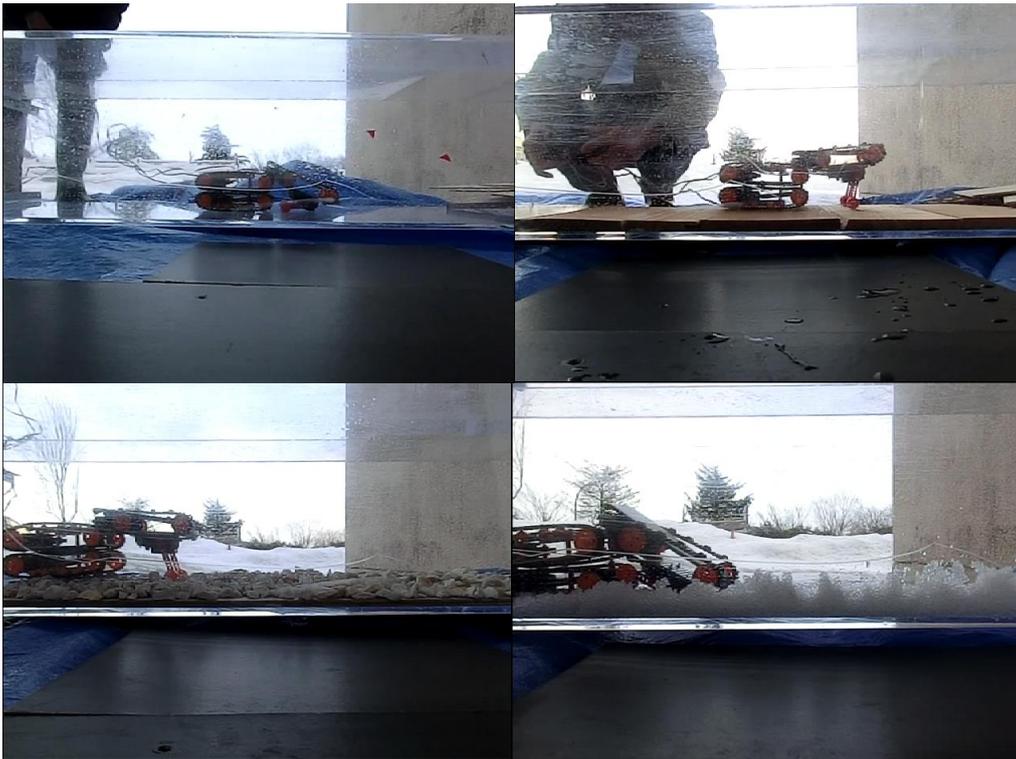


Fig.4-21 水槽（実験フィールド）内部の路面状況
 左上：アクリル，右上：木材，左下：砂利，右下：雪

4.3.2.2 直進運動の実験結果

Fig.4-22 に各条件における直進速度解析結果を示す．縦軸はプロットより導出した直進速度である．材質による速度の違いが表れており，速度はアクリル上で 80.63cm/s ，木材で 115.25cm/s ，デコラでは 121.88cm/s となった．また，砂利，雪の上ではこじあげ機構下部にある上昇機構が間えることにより走行不可となり，速度計測を行うことが出来なかった (Fig.4-23)．

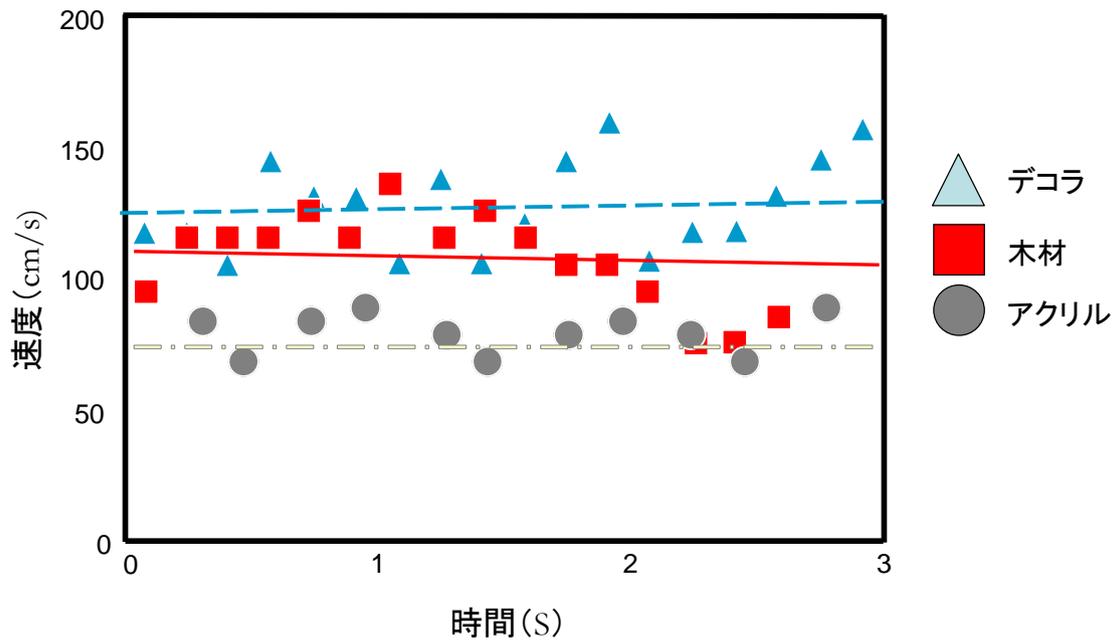


Fig.4-22 各路面条件における直進速度

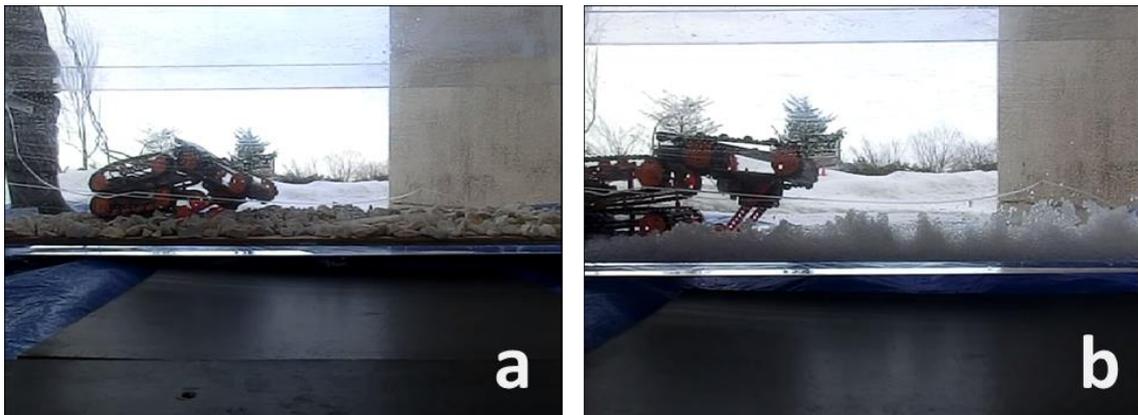


Fig.4-23 直進運動失敗例 (a が砂利, b が雪)

どちらも上昇機構のスタックにより途中で運動が止まってしまった。

4.3.2.3 直進運動の考察

路面条件により速度の違いが生じた原因として、静止摩擦係数の違いが関連すると思われる。各材料の静止摩擦係数はデコラ=0.20、木材=0.26、アクリル=0.38である⁴⁻¹⁴⁾。静止摩擦係数の増加は運動エネルギーの散逸に繋がるため、それに伴い速度が低下したと考えられる。また、走行不能となった雪の静止摩擦係数は0.08である。本実験の結果では静止摩擦係数の低い路面では速度上昇の傾向が見られているが、ある一定の値からロボットの走行が困難であると考えられる。

砂利では上昇機構が不整地より構成される起伏部分に問えることで走行が中断されていた。今回構成した上昇機構は瓦礫こじあげ機構を上下に動かすことに特化しており、キャリア・ユニットの推進力として利用できるような機構ではなかったため、上昇機構が路面に突き刺さったりスタックした場合脱出が困難であった。そのため、起伏形状のある砂利で走行が中断されたと考えられる。

4.3.3 旋回運動の実験

4.3.3.1 旋回運動の実験・解析方法

Fig.4-16 に示した定量解析システムでは側面のみ撮影となり旋回運動の計測には使用できないため、新たに Fig.4-24, 4-26 に示すような解析システムに変更した。基本構成は直進運動解析と同様だが、測定開始位置と定義したアルミアングルとデジタルカメラを平行に設置している。また、水槽の幅の中心と撮影台の中心を一致させている。路面全体を撮影するため、カメラを下方に傾斜させている (Fig.4-25 右)。

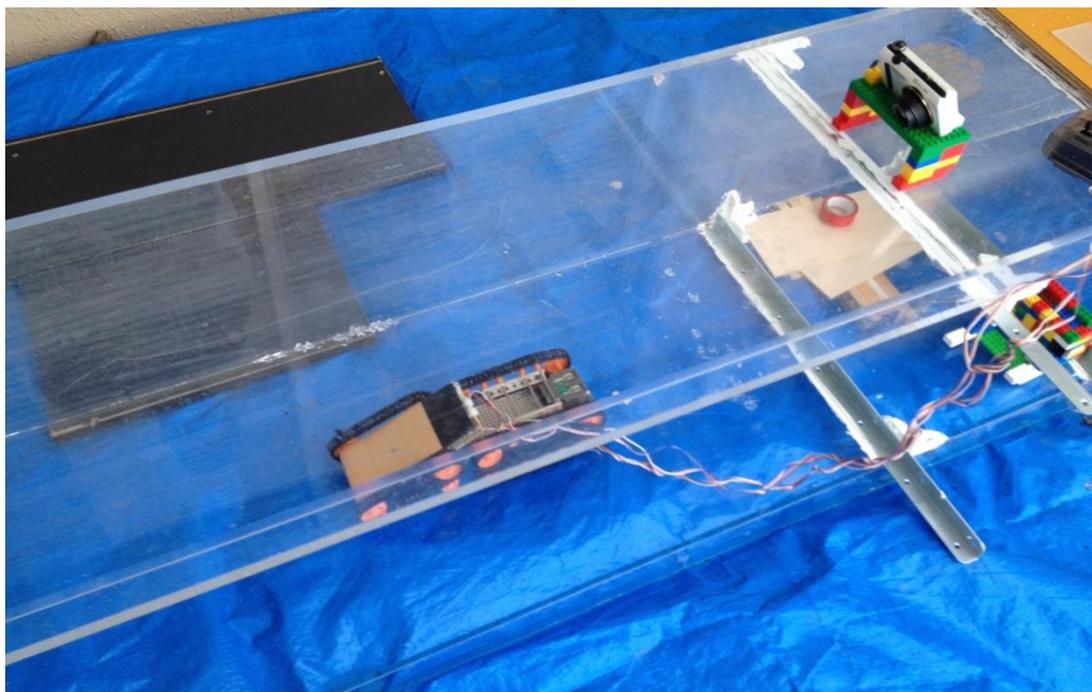


Fig.4-24 旋回運動測定システムの構成
デジタルカメラの位置をアルミアングルに合わせている。

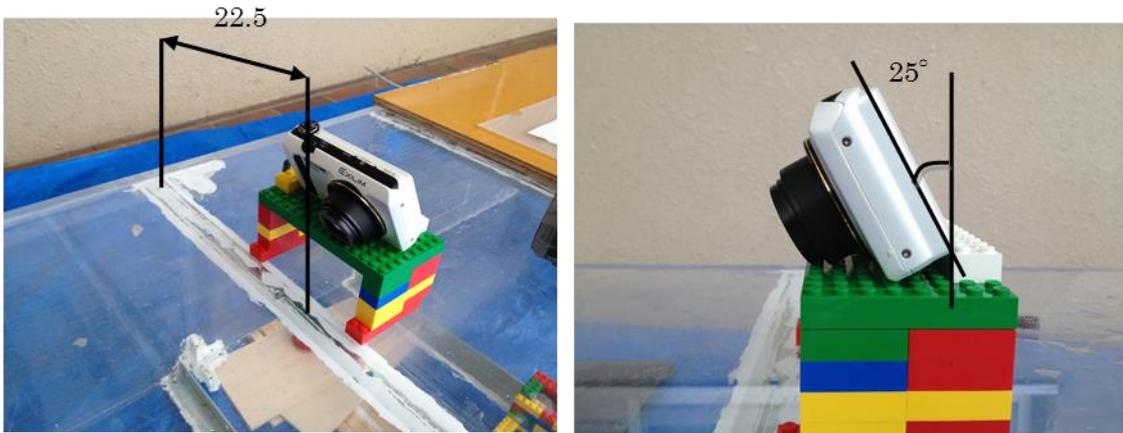


Fig.4-25 デジタルカメラの設置位置 (単位 cm)
全幅 45cm の中間である 22.5cm に台を置いている (左).

以上の条件で撮影を行い、キャリア・ユニットの旋回速度および位置の変化を測定した。旋回方法として、片側のクローラのみを動かし旋回する「信地旋回」(Fig.4-26, a) と一方を後退、もう一方を前進させる「超信地旋回」(Fig.4-26, b) の能力を検証した^{4-16) 4-17)}。本研究ではクローラを回転し、ロボットの進行方向を前方から後方(車体方向を 180° 旋回)に変えるまでの時間を旋回時間と定義し、比較を行った。旋回は各条件で5回ずつ行い、旋回時間の計測は撮影した動画に基づき、運動解析ツール「運動くん」を用いて小数点第2位まで計測した。

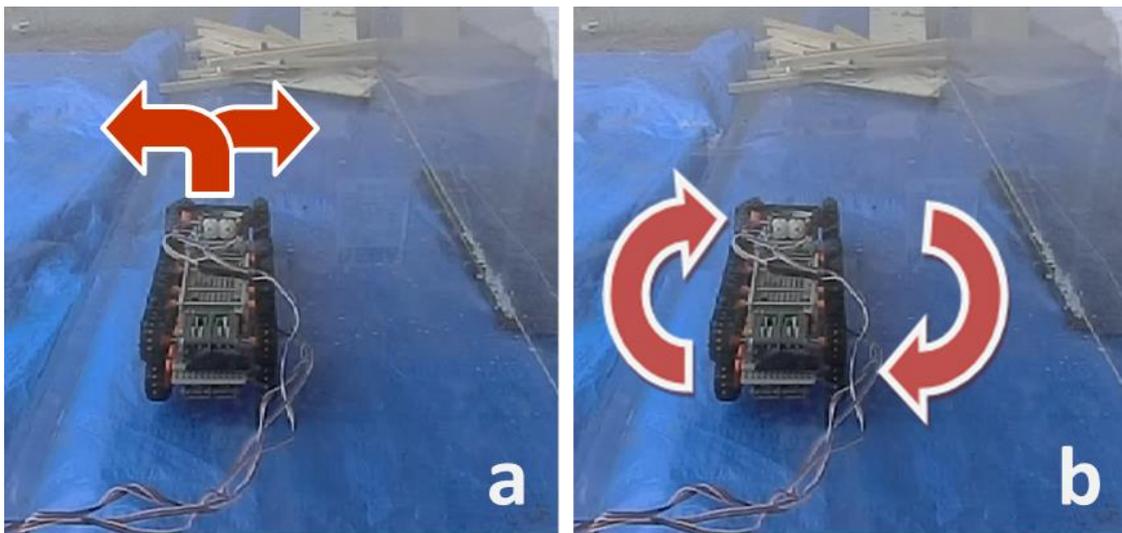


Fig.4-26 計測した旋回運動

4.3.3.2 旋回運動の実験結果

Fig.4-27 に旋回時間の計測結果を示す。縦軸は各条件の平均を示している。両者の間には有意な差 ($p<0.05$) があることが確認出来た。

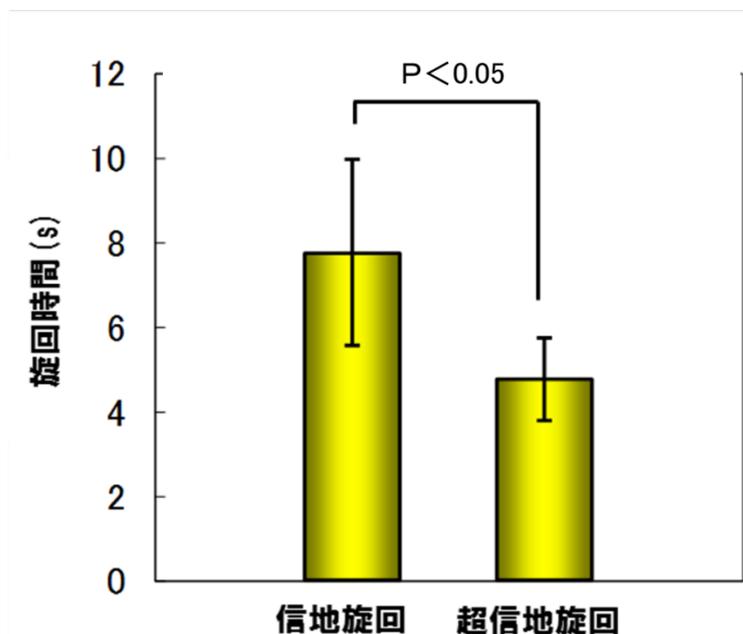


Fig.4-27 旋回時間の比較

4.3.3.3 旋回運動の考察

撮影動画より超信地旋回は信地旋回と比較し、小回りが可能となることが確認出来た (Fig.4-28, Fig.4-29)。信地旋回では動いていないクローラは旋回時の中心となるため、このような差が出たと考えられる。この結果より、超信地旋回が被災者救出における有効な旋回運動であることが示唆された。

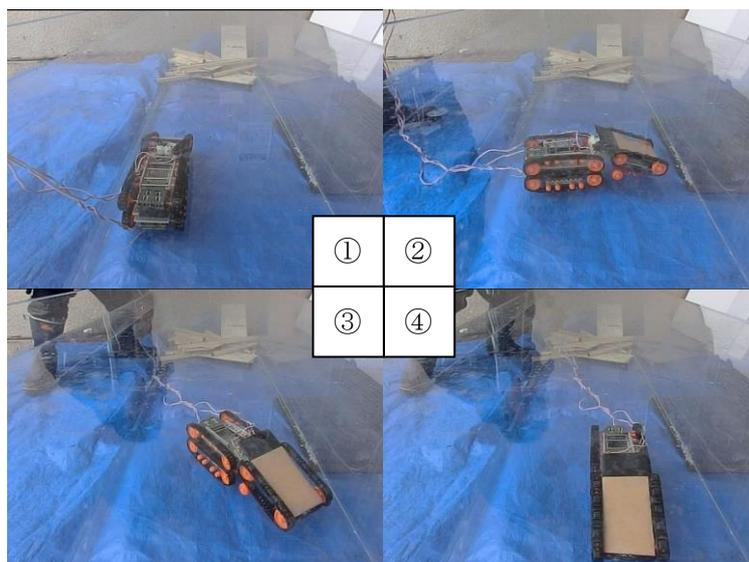


Fig.4-28 信地旋回の典型例（時計回り）
動かさないクローラを軸とする大きな回転となった。

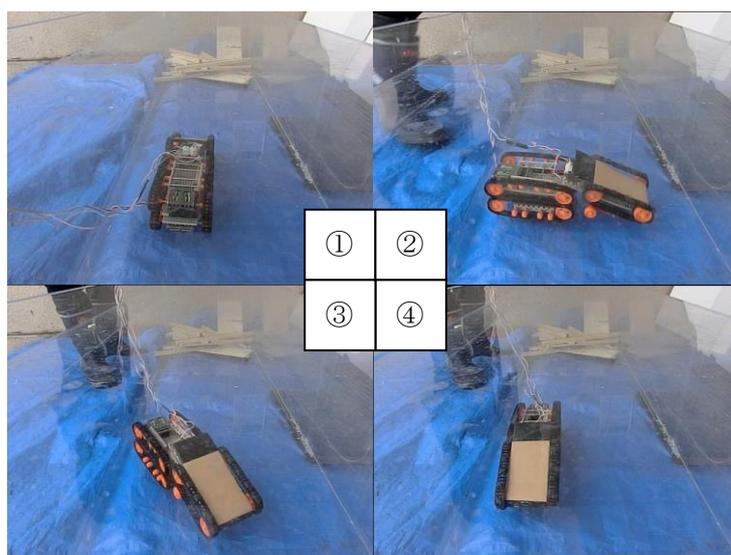


Fig.4-29 超信地旋回の典型例（時計回り）
旋回開始地点に留まり，素早い旋回運動を行った。

4.4 有限要素法（FEM）による強度解析

本節では 3D モデルを用い，強度解析を行った．本実験の検証対象は，当時まだデザインが確定していなかった 2 号機（子機入渠型）ではなく，すでに実物大モデルが存在していてサイズや重量，材質が確定していた試作 1 号機（実物大試作機）をモデルに行ったものである．その形状や目的がキャリア・ユニット

トに近似的であるとの理由から，本章本節に掲載した．

4.4.1 基本的概念

，有限要素法（Finite Element Method ，以下 FEM）による強度検証を行った． Fig.4-30 に FEM による解析方法を示す．

FEM は以下の手法で解析を行う．

- ① 複雑な形状や性質を持つ物体を単純な形状の小部分（要素）として分解する
- ② その 1 つひとつの要素の特性を方程式により近似的に表現する
- ③ 各要素の方程式を組み合わせ，全ての方程式が成立する解を求めることで挙動（本研究ではロボット本体に加わる変位）を予測する

ちなみに FEM は，本研究で行う構造解析以外にも熱伝導解析，流体解析，音響解析，電磁場解析など多くの理工学分野に応用されている手法である．

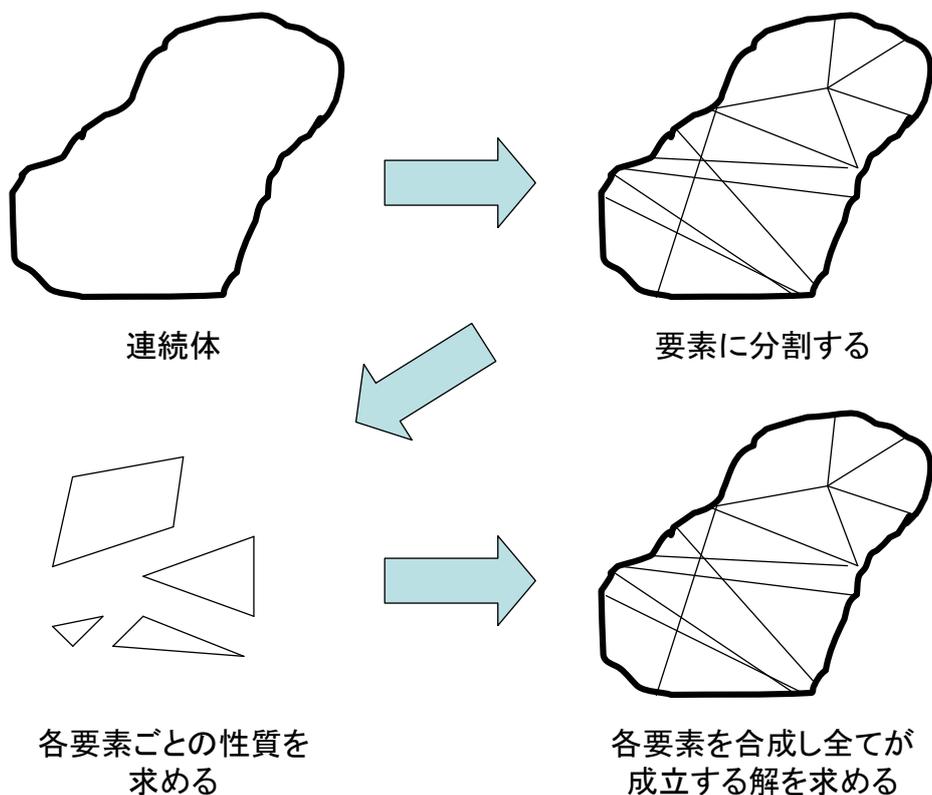


Fig.4-30 FEM の基本概念

本研究における連続体は試作 1 号機の筐体およびクローラである．

4.4.2 実験方法

Fig.4-31 に FEM で使用する 3D モデルを示す．このモデルは実物大試作機の 2D-CAD に従い設計しており，寸法は実物大試作機に即している．このモデル

に対し, Fig.4-32 に示すメッシュ分割を行った(米 SolidWorks 社製, SolidWorks Simulation 使用). 材料として筐体は鋼 (鋳鋼), クローラベルトをゴムとし, 解析には以下の値を採用した.

鋼 : ヤング率 $E=2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$, ポアソン比 $\nu=0.28$

ゴム : ヤング率 $E=6.1 \times 10^6 \text{Pa}$, ポアソン比 $\nu=0.49$

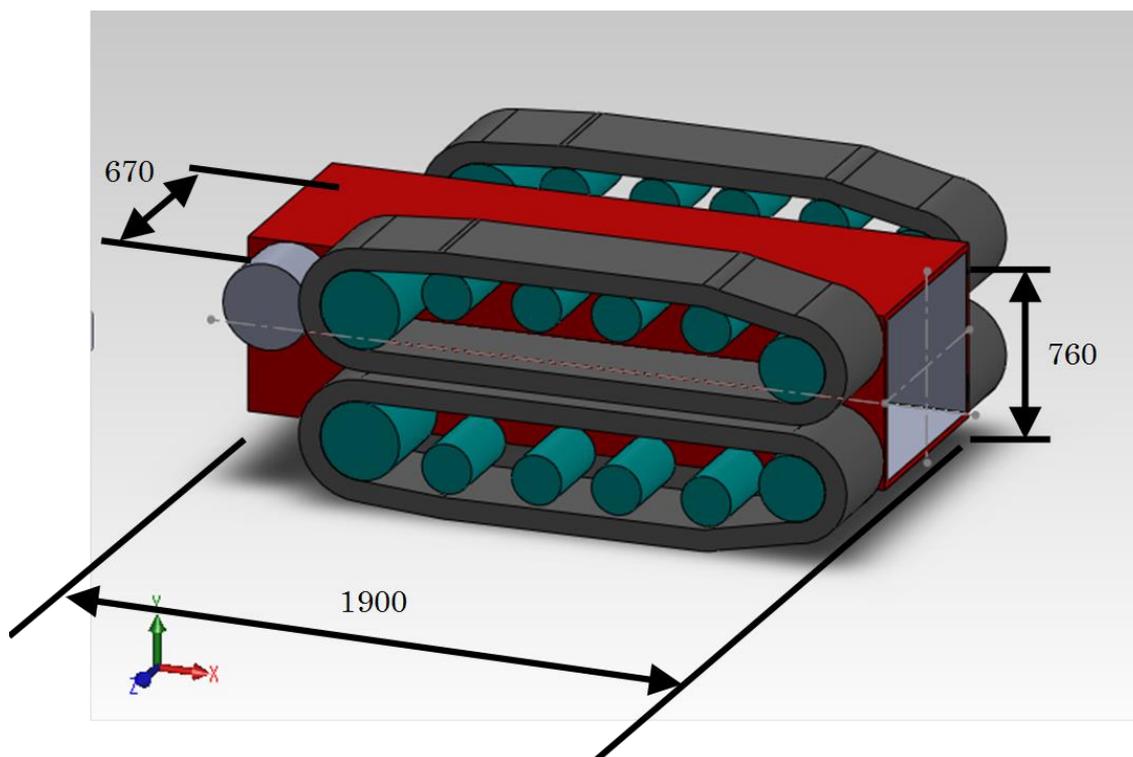


Fig.4-31 実験で使用する FEM モデル (単位 : mm)

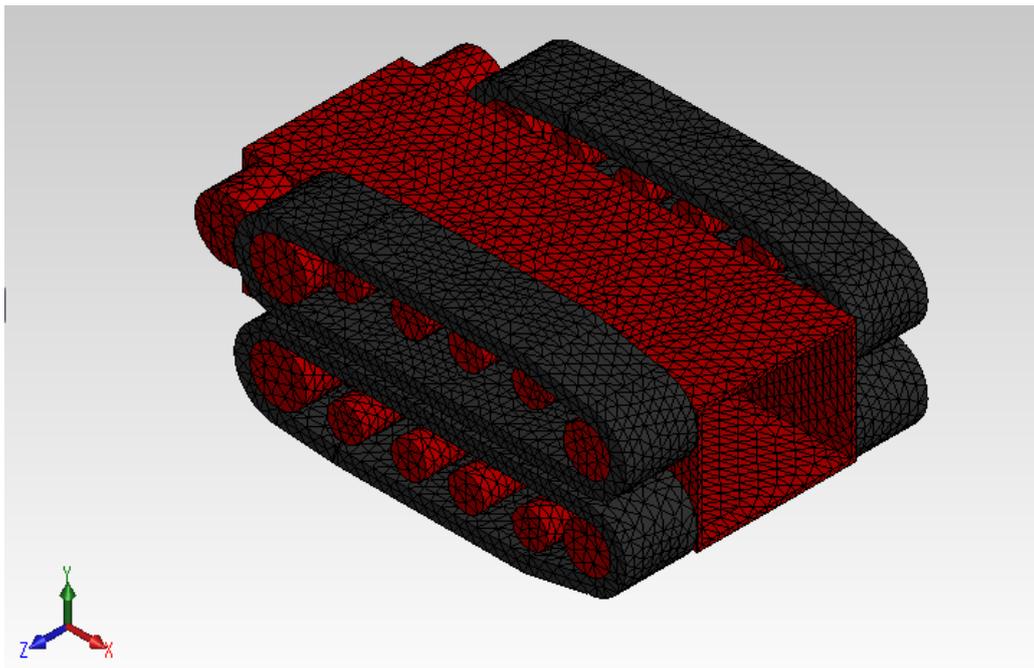


Fig.4-32 メッシュ化を行った FEM モデル

メッシュ数：61013，ロボットの各部品を三角形の集合体と捉えたもの。

荷重は Fig.4-33 に示すように，キャリアロボット筐体上部およびクローラベルト上部に等分布に加わっていると仮定した．荷重の大きさは木造平屋 1 階建ての最大荷重である 0.7t/m^2 とした[†]．この解析でキャリアロボットに加わる応力，変位，安全率を調べた．

安全率（Factor of Safety）とは，設計上，許容できる最大応力である「許容応力」を算出する際に必要な値（許容応力＝基準の強さ／安全率）であり⁴⁻¹⁸⁾，仮定した荷重の見積もりや材料強度のばらつきを考慮して設定する値のことである．安全率が大きければキャリアロボットは十分な強度を持つが，開発コストが大きくなる．本来，安全率は技術者の経験的判断に基づき最適な値を設定

[†] この数値の根拠を示す文献は無いが，木原隆明氏（応力解析専門）にヒアリングする機会を得て入手した情報である．ただしこの数値には以下の条件がある．

- ① 水平な瓦礫を持ち上げる（こじ開ける）場合．
- ② 屋根，壁は粉々のまま瓦礫の上に乗っていると仮定．つまり最大重量ではあるが，重量の分布は均等．
※ただし，垂直面は壊れても水平面は無事な場合が多いので，あくまでも仮定の話である．
- ③ 一階部分の床材は含まない．

また，瓦礫を持ち上げる高さや，持ち上げる作用点の構造（材質・形状など）によっても大きく数値が変わる為，あくまでも目安である．

以上の条件を無視して数値のみが独り歩きする事を木原先生も危惧されていたため，二次利用の際にはくれぐれも留意されたい．

するものであるが，人命救助ロボットの開発が初期段階であること，現在のキャリアロボットにおける妥当な値を示すために，今回は FEM より導出した．

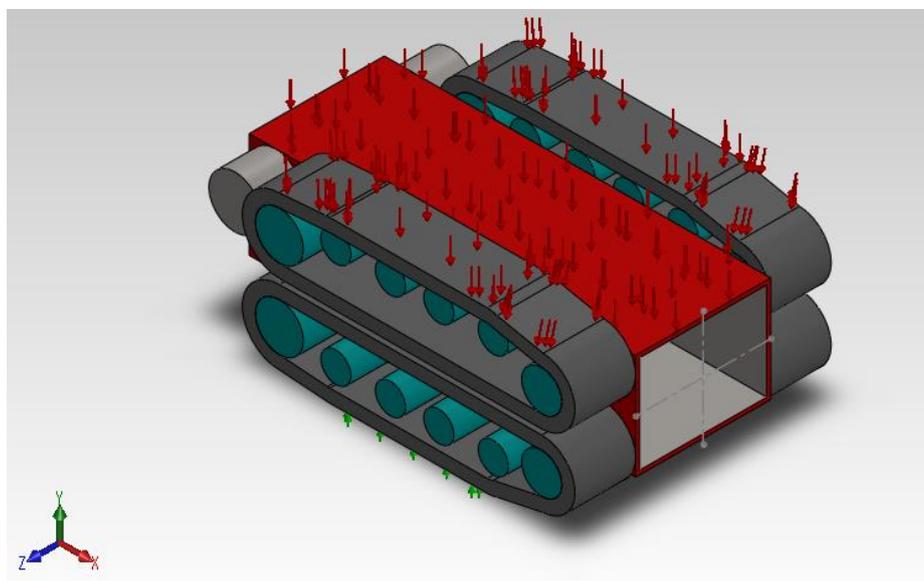


Fig.4-33 荷重を加えた FEM モデル

上部に家屋荷重に相当する圧力，下部には重力を考慮した荷重を加えている．

4.4.3 実験結果

Fig.4-34 に応力解析結果を示す．応力は主に被災者収容ロボットを格納する部分に重点的に加わっており，最大の荷重はおよそ 4.0×10^6 Pa となった．

Fig.4-35 に変位解析結果を示す．変位は全体としての変化が低く，最高でも 3mm だった． Fig.4-36 に安全率の結果を示す．安全率は全体においてほぼ一様となっており 155.14 となった．

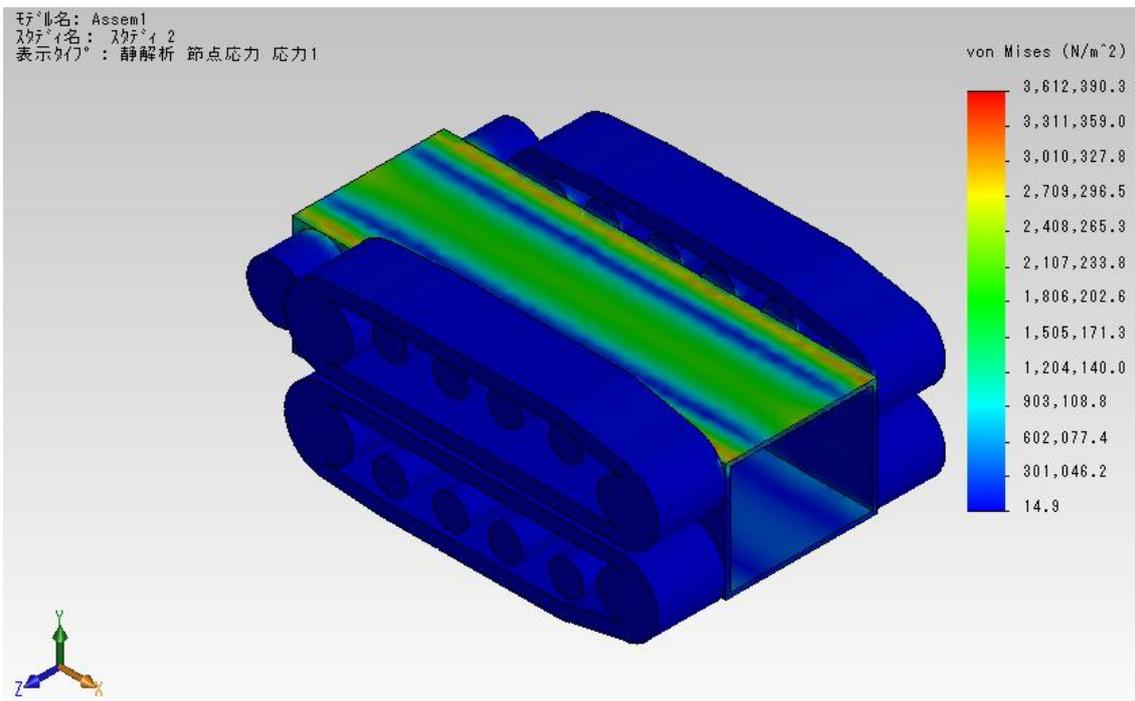


Fig.4-34 FEM による荷重分布結果
 ロボット筐体の左右端に最大で 4.0×10^6 Pa 荷重が加わっていた。

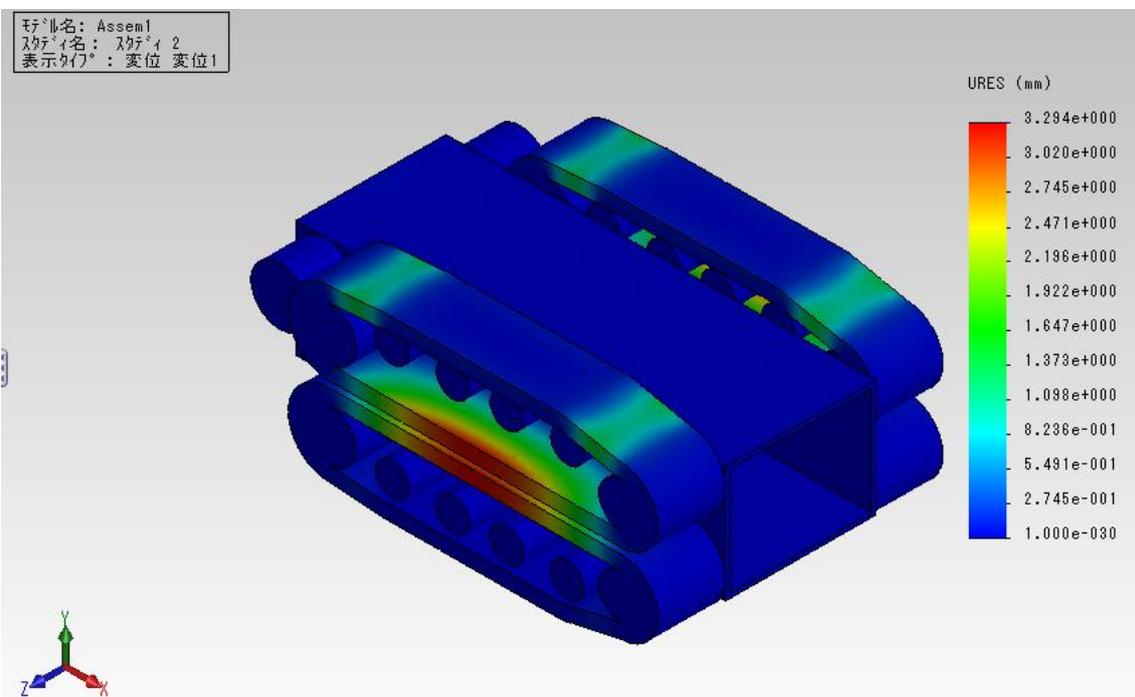


Fig.4-35 FEM による変位分布結果
 変位は最高でも 3mm であった。

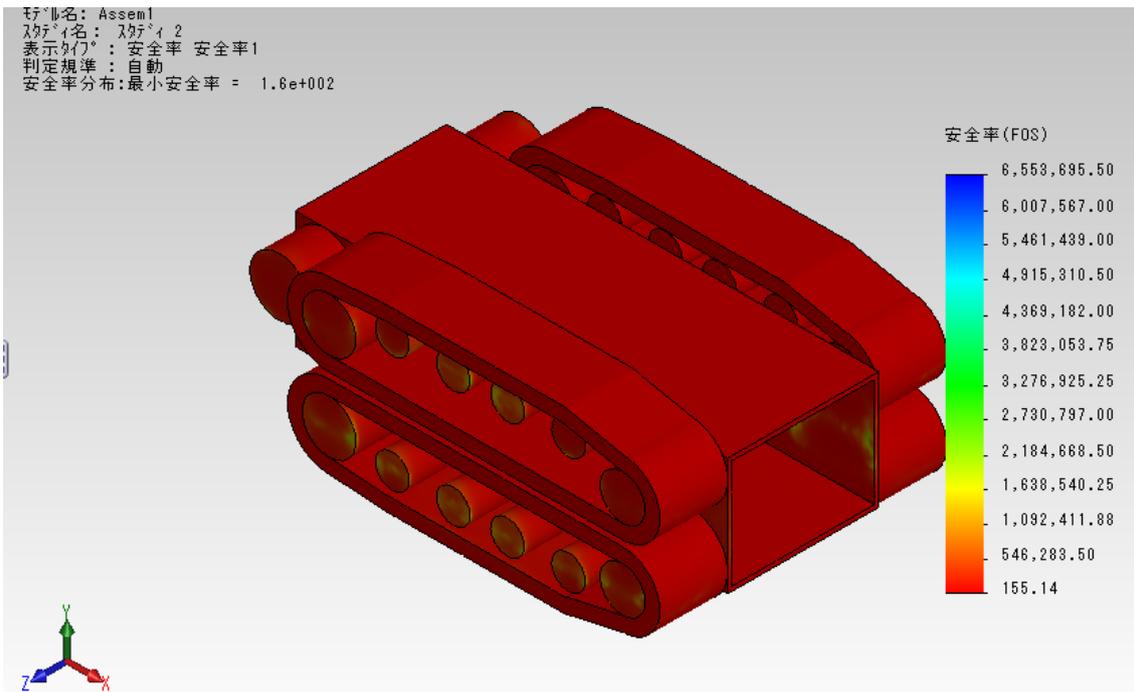


Fig.4-36 FEM による安全率分布結果
 全体の安全率にほぼ変化はなく、値は一様となった

4.4.4 考察

ここで、最大応力を基準強度とし、許容応力を計算すると、 $2.6 \times 10^4 \text{ Pa}$ となる。即ち単位面積当たり 2.6t まで耐えられることになるため、「5.4.3 実験結果」にて示した条件により、1階家屋に留まる能力は十分となった。

また、最も荷重のかかる車軸の曲げ応力度と曲げによるせん断応力度を計算すると、先ほどの最大荷重 $4.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ の場合、上部クローラにおけるの曲げ応力度は $9.42 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、せん断応力度は 4.71×10^8 となった（構造を簡略化し、直径 30mm のシャフト 5 本（左右両側で計 10 本）のみで荷重を支えていると想定した場合）⁴⁻¹⁹⁾。鋼（SS400）の許容曲げ応力度は $1.56 \times 10^8 \text{ Pa}$ 、許容せん断応力度は $9 \times 10^7 \text{ Pa}$ であるため⁴⁻²⁰⁾、曲げ、せん断共に許容応力度を超過していることが解った。この荷重でも車軸が曲がらないためには、車軸の直径を 120mm（せん断のみ考慮した場合は 70mm）にするか、車軸を支持している部位を曲げに強い構造にするなど、応力を分散する方法を考案しなければならない。

さらに安全率に関しても、車両における安全率の例として航空機 1.5、自動車 1.6、クレーン 8~10、クランクシャフト 40 となっており⁴⁻²¹⁾。直接的に人命にかかわる部材に関しては 10 以上と定められている。これらの値と比較しても非常に大きな値となるため、許容応力、基準強度を維持しながら低い安全率を示

す筐体とする必要があることが考えられる。

4.5 キャリア・ユニット実験のまとめ

本章では災害時人命救助ロボットのキャリア・ユニットに関し、瓦礫こじ開け機構、下部クローラ、3Dモデルを用いた実験を行った。得られた結論を以下に述べる。

- ① キャリア・ユニット縮尺模型を用いた瓦礫こじ開け機構実験では二重クローラ時（こじ開け機構の無い1号機）よりも低い進入口より瓦礫をこじ開けることが出来た。しかし、瓦礫こじ開け機構のこじ開けを行うための上昇機構の構造的問題により瓦礫こじ開けが困難となる場合があった。
- ② 下部クローラによる走行実験では路面の材質により走行時間に差が生じた。また旋回実験においても旋回方法で旋回事件に差が生じた。しかし、こちらでも上昇機構の構造的問題により不整地走行が困難となる場合があった。
- ③ FEMによるコンピュータシミュレーションの結果、人命救助ロボットに加わると考えられる応力、ひずみを可視化することが出来た。
- ④ SolidWorks内にある安全率導出を行った結果、現状では安全率を155.14とすることで静止している場合には荷重によって人命救助ロボットが破壊されることはないという結果が出た。しかし、これは直接的に命に係わる部材の安全率である10（以上）を基準にしても、そのおよそ16倍高い値でもある。

縮尺模型を用いた実験よりキャリア・ユニットの瓦礫こじ開け機構は実機に搭載する機構として有効であることが示唆された。しかし、前述したように車軸の強度に問題があることと、キャリアロボット全体の安全率を大きく定める必要があるため、大幅な強度向上策を講じる必要がある。

瓦礫こじ開け能力、走破能力いずれにおいても瓦礫こじ開け機構下部に設けている上昇機構が実験の失敗要因となっていた。原因としては前項で示すように機構には前進後退の制御方法を設けておらず、受動的であることが考えられる。そのため、上昇機構に関しても有線で操縦出来るよう改良を行うなど、上昇機構の改良を第一にすべきと考える。

また、シミュレーションの結果として、導出されたパラメータの基で設計を行えば荷重でつぶされないという結果が導出されたが、現在の人命救助ロボットでは155.14という高い安全率を設ける必要がある。このままの設計では大きなコストがかかる可能性があると考えられる。本研究の結果より導出方法は確認できているため、筐体形状の変更を行った後に改めてFEMを行い、低い安全率とする必要がある。

また、現在の定量解析は砂利、アクリル等を用いた平面で実験を行っている。実際の環境では平面だけではなく傾いた路面もあるため、定量解析システム内部にて傾斜面を製作し能力を検討する必要もあると考える。

さらに、今後のキャリア・ユニット全体の研究としては、ユニット後部に搭載する簡易型トンネルと、こじ開け機構先端に搭載予定の瓦礫切削用丸鋸の設計・製作及び実験も行わなければならない。

【第4章の参考文献】

- 4-1.竹内吉平：“新訂 災害救助”，近代消防社，2(2)，pp111-119，2006
- 4-2.嶋田大和，佐橋拓，佐橋昭，内山尚志，福本一朗：“実験用模型を用いた人命救助ロボット瓦礫こじあけ機構の研究”，p205，生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2012，2012
- 4-3.嶋田大和，佐橋拓，佐橋昭，内山尚志，福本一朗：“模型による人命救助ロボット瓦礫こじあけ機構の研究”，日本ロボット学会第30回記念学術講演会 予稿集 (DVD)，2A3-4，2012
- 4-4.嶋田大和，佐橋拓，佐橋昭，内山尚志，福本一朗：“縮尺模型による災害時人命救助ロボット瓦礫こじ開け機構の研究”，第18回日本集団災害医学学術総会抄録集 W1-1，p690，2013
- 4-5.竹山謙三郎：“耐震法規と耐震設計法の将来” 建築雑誌 Vol.75，No.885，pp333-336，1960.
- 4-6.河合直人：“既存木造住宅の耐震性能と耐震補強効果に関する実験的研究”，独立行政法人 建築研究所，2005
- 4-7.中川肇，長島隆一：“防災意識向上のための木造模型教材の開発”，Memoirs of Akashi National College of Technology No.49，pp 103-107，2006
- 4-8.国土交通省：“日本建築学会 建築基準法令集”，技報堂出版，2007.
- 4-9.清水秀丸：“震動台活用による構造物の耐震性向上研究”，平成17年度大都市大震災軽減化特別プロジェクト II：木造建物実験，pp41-82，2008
- 4-10. 日経ホームビルダー編：“震災に強い家（東日本大震災の教訓[住宅編]）”，日経 BP 社，2011
- 4-11. 鳴川敏喜，小山純市，谷口光太郎，阿部宏和，加藤 大一郎，内野 靖博，高木市教，溝田武人，“ハイビジョンカメラによるゴルフボールの3次元位置計測用追尾システムの研究(ズーム操作による精度向上)”，スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011 講演論文集，pp78-83，2011
- 4-12. 運動の部屋 HP：“運動体解析ソフト「運動くん for Windows」”，<http://www.rikakoubou.com/undoh.html>，最終アクセス日 2014/11/7

- 4-13. 新谷正樹, 高田至郎, 鎌田泰子: “テレビ挙動解析を用いた最大加速度推定方法の提案”, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp393-394, 2005
- 4-14. “エンジニアリングプラスチック=その解説と物性表=”, 化学工業日報社, 1985
- 4-15. “表面処理工学—基礎と応用—”, 日本工業新聞社, 2000
- 4-16. 竹田策三: “建設機械”, 森北出版株式会社, 1978
- 4-17. 安部正人: “自動車の運動と制御 車両運動力学の理論形成と応用”, 東京電機大学出版局, 2008
- 4-18. 独立行政法人 海上技術安全研究所: “2.1 材料強度の基礎知識”, 講義ノート: もの作りのための機械設計工学 HP より,
http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/design/ch02/ch02_01.html, 最終アクセス日 2014/11/9
- 4-19. 小町弘, 吉田裕亮, 金野祥久, 櫻井美千代: “改訂 2 版 機械工学のやさしい知識”, オーム社, pp14-72, 2014
- 4-20. 大西清: “改訂 11 版 JIS にもとづく機械設計製図便覧”, オーム社, (4-1) - (4-15), 2009
- 4-21. 平田宏一, 川田正國: “絵とき 機械強度設計基礎のきそ”, 日刊工業新聞社, 2009

第五章 ブルーダ・ユニット性能評価

ブルーダ・ユニットは、当人命救助ロボットにとって最も重要な役割を持つ機構である、CSP機構を内蔵するスクーパー機構（被災者収容機構）を有したユニットである。今回実験を行ったのは、ブルーダ・ユニットが有する駆動機構であるアルキメデス螺旋駆動体⁵⁻¹⁾⁵⁻²⁾のポリ塩化ビニル（以下塩ビ）とアルミの二つのロッドを使用した走行実験と、CSP機構とその計測を行うための前駆実験である。

5.1 塩ビ製ロッドを使用した走行実験

以降に塩ビ製螺旋ロッドを装備したブルーダ・ユニット縮尺模型の走行実験⁵⁻³⁾⁵⁻⁴⁾を示す。

CSの発症阻止と、被災者収容を最大の目的としているブルーダ・ユニットであるため、その目的に最も即した駆動体を選択する必要があるがあった。様々な駆動体を候補に挙げたが、そのうち「3.4.3 アルキメデス螺旋駆動体の特徴、利点、問題点」に示した特徴を持つアルキメデス螺旋駆動体が最も適していると仮定し、本ユニットに採用した。しかし「3.4.3」の問題点に上げたように、駆動体の挙動や特性を知る為の前駆実験を行うにも、アルキメデス螺旋ロッドは製作が困難であった。そのため簡便に製作可能なロッドを検討した結果、塩ビ管にダクトホースをばらしたものを接着したロッドを製作するに至った。しかし、製作した実験用螺旋ロッド、本体共に一応動くことは出来たものの、実験に耐えうる状態ではなかった。

5.1.1 完成前ブルーダ・ユニット縮尺模型第1号の問題点とその改善

製図し (Fig.5-1)、最初に作製したブルーダ・ユニット縮尺模型⁵⁻⁵⁾⁵⁻⁶⁾⁵⁻⁷⁾⁵⁻⁸⁾⁵⁻⁹⁾ (Fig.5-2)の問題点を以下に示す。この模型は現時点で平行(=トラバース)移動は可能だが、前後移動ができず、またパーツの中には走行の障害となっている部品があった。駆動部の動力を伝えるベルトの耐久性が低く、ベルトの空回りやギアからの脱落が頻繁に生じたため、実験や測定が不可能なものだった。

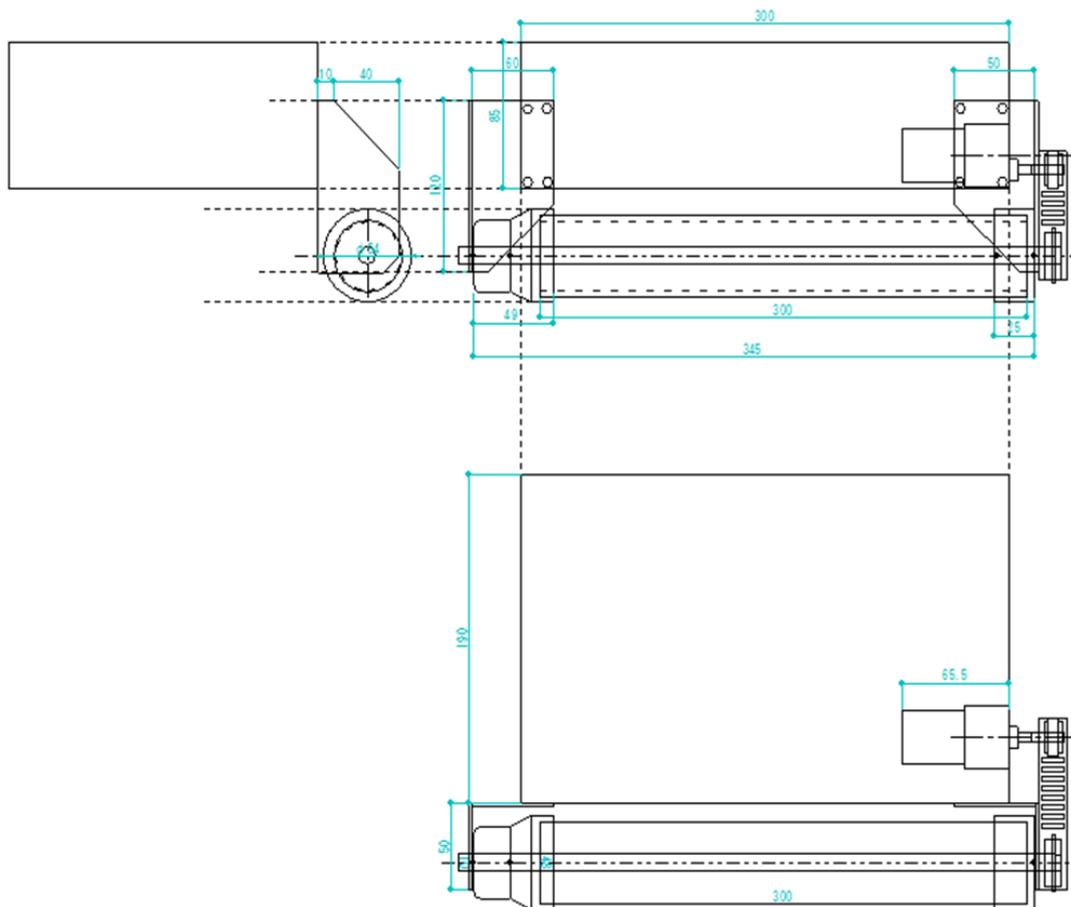


Fig.5-1 キャリア・ユニット縮尺模型 2D-CAD (単位: mm)
 (フリーウェア, JW-CAD 使用), 左上: 正面図, 左下: 左側面図, 右下: 上面図

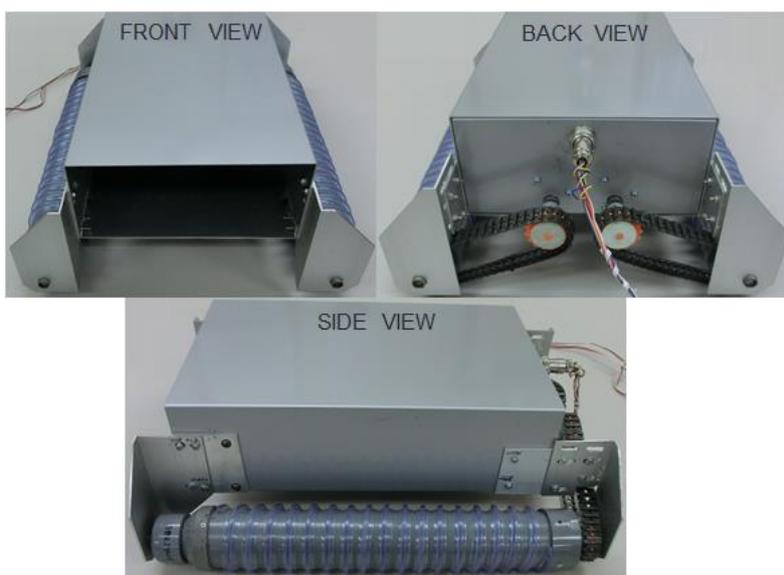


Fig.5-2 製作したばかりのブルータ・ユニット縮尺模型の概観

ブルーダ・ユニット縮尺模型の改良案を以下に示す。

- ① パーツ精度の改善：スクリーロッドの回転の歪みが大きく、走行時にロッドがバタつくことで走行の障害となっていた。そこでパーツの作製に NC 旋盤を使用し、高い精度で作製したパーツを使用することで歪みを抑えた。（Fig.5-3 内の 1.）
- ② ギア・ベルトの換装：ギア・ベルトをゴム製のベルトから金属製のラダーチェーンに換装し、耐久性を改善した。（Fig.5-3 内の 2.）
- ③ ギアの換装：②の変更に伴い、ギアもモータ側スクリー側ともにラダーチェーン専用のギアに換装した。（Fig.5-3 内の 3.と 4.）
- ④ 障害要素の排除：初期の模型では、ロッド固定部の出っ張りが走行の障害となっていたため、スクリー固定部をスクリーの内側に入れることで改善した。（Fig.5-3 内の 5.と 6.）

これらの改良で実験可能な状態となった。

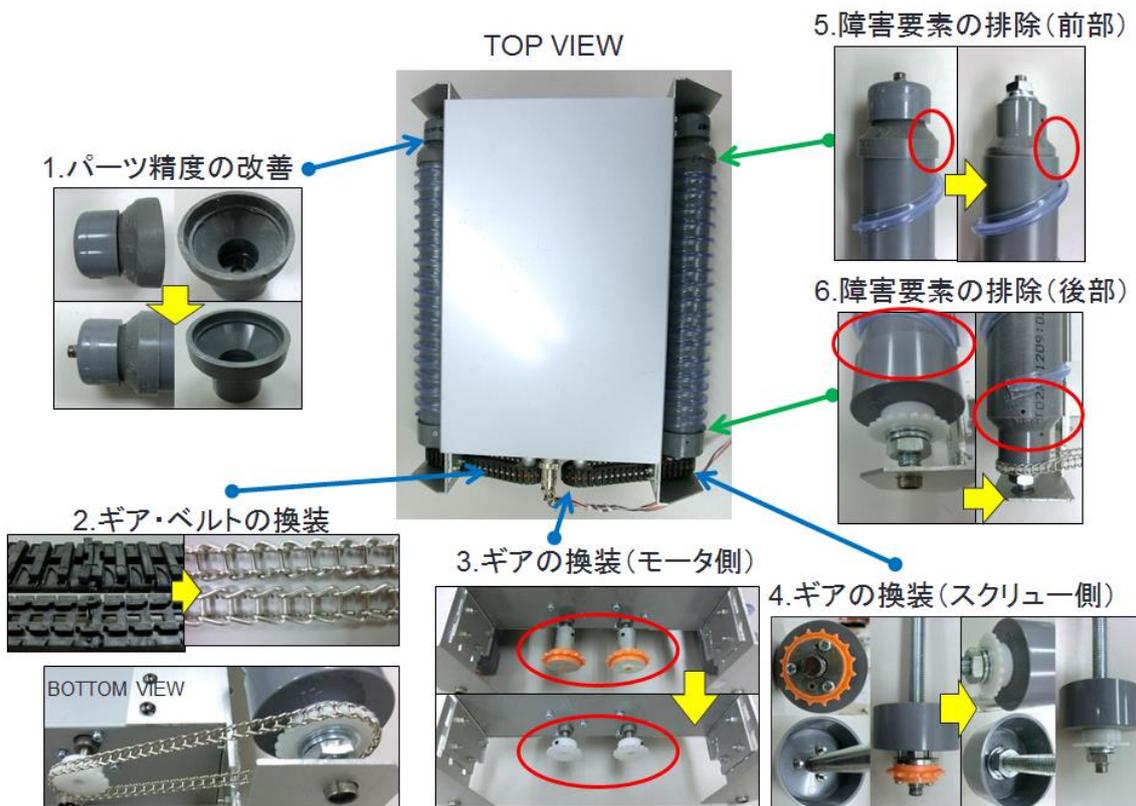


Fig.5-3 ブルーダ・ユニット縮尺模型の改良箇所

5.1.2 ブルーダ・ユニット縮尺模型第1号の概要

完成したブルーダ・ユニット縮尺模型と螺旋ロッドの仕様を Table.5-1, 5-2 に、ユニットの概観を Fig.5-4 に示す。模型のサイズはレスキューロボットコンテストに則り、実物の 1/6 スケールとしている⁵⁻¹⁰⁾。これは大会出場が目的では

なく、この後多くのレスキューロボット研究者に当ロボットの研究・製作に携わっていただく際に部品などを利用しやすい様にサイズを統一する必要性を感じたためである。

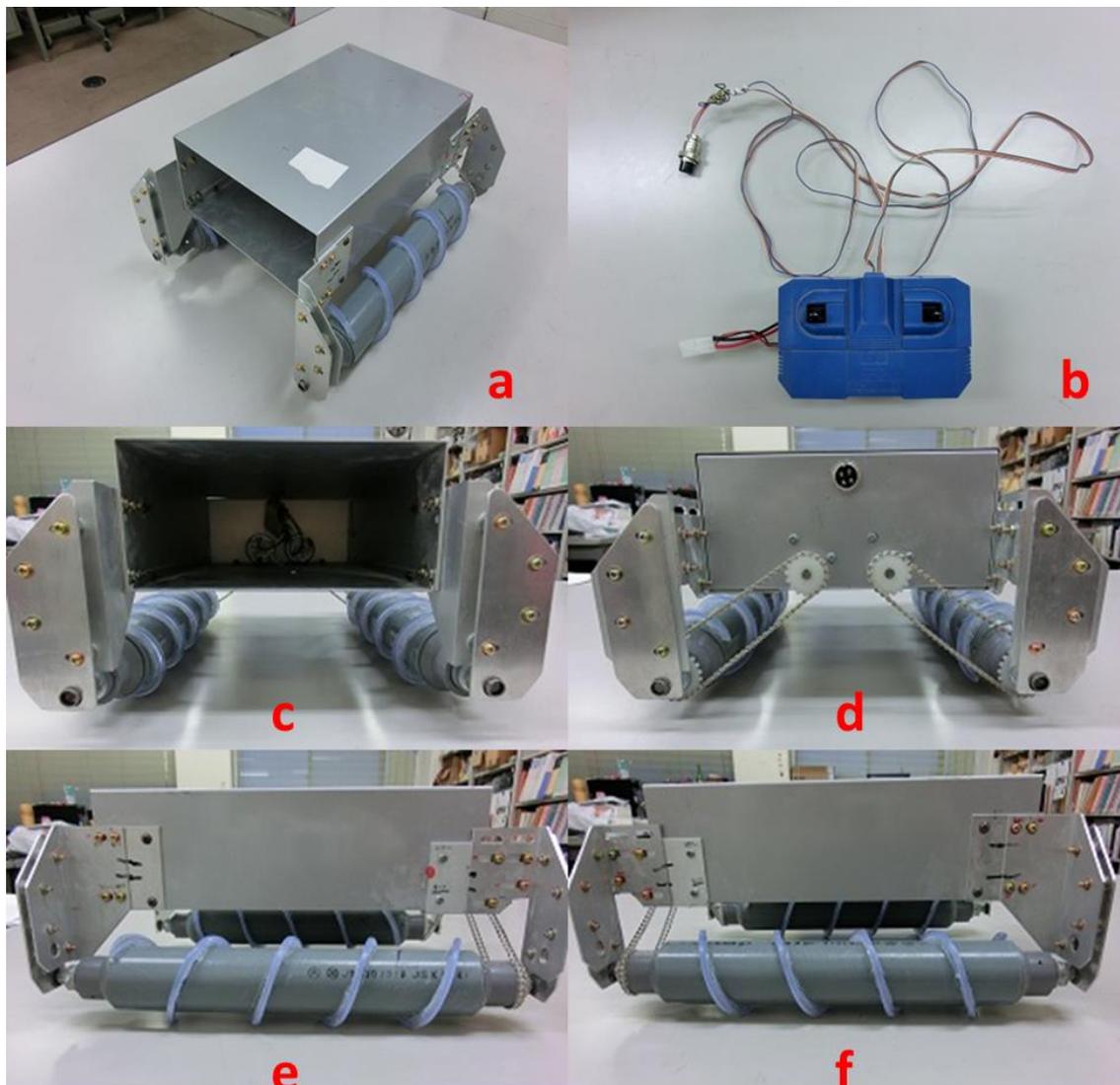


Fig.5-4 ブルーダ・ユニット縮尺模型第1号外観

a ; 概観, b : コントローラ (背面にバッテリーあり), c : 正面図, d : 背面図, e : 右側面図, f : 左側面図

Table.5-1 ブルーダ・ユニット縮尺模型第1号の仕様

サイズ	290W × 345D × 140H [mm]		
重量	2,330 [g]		
材質	外装: アルミニウム、ロッド: 塩化ビニル		
動力	タミヤ ギヤードモータ380K150 × 2個		
	ギヤ比	1:150	
	トルク	10.0kgf・cm × 2 (DC7.2V最大効率時)	
	回転数	121rpm (無負荷回転数)	
バッテリー	Ni-MH, 3900[mAh], 7.2[V]		
ロッド回転数	75.0rpm (無負荷時実測値)		
速度[mm/s] (無負荷時理論値)	4回巻き	5回巻き	6回巻き
	78.1	62.5	52.1

Table.5-2 塩ビ製螺旋ロッドの仕様

ロッド	塩ビ薄肉管 (VU40): 外径48、内径44、全長383、有効長*274[mm]、材質は硬質PVC (ポリ塩化ビニル)
螺旋羽根	帯電防止透明ダクトホースφ50: 標準外径60.2、標準内径50.6[mm] (しかしこれを切り離して使用しているので、あくまで加工前の数値)、材質は硬質PVC

*有効長: ロッドの前後を除く円筒形の部分で、螺旋羽根を巻きつけている部分の長さ。

5.1.3 螺旋羽根の巻き数を変えた砂利走行実験

アルキメデス螺旋のパラメータの違いによる走行への影響を調べるために、複数のロッドを用いた走破測定を行った。同様に、路面の違いによる走行影響を調べるために粒径の異なる砂利を実験フィールドにした上で走破測定を行った。

5.1.3.1 実験方法

測定に用いた螺旋ロッドを Fig.5-5 と Table.5-3 に示し、実験フィールドを Fig.5-6, Fig.5-7 に示す。Fig.5-6 のフィールドは 10mm-15mm の砂利 (以下砂利 (細)) を用い、Fig.5-7 のフィールドは 15mm-20mm の砂利 (以下砂利 (荒)) を用いた。

実験フィールドは900mm×600mmのベニヤ合板の上に894mm×594mmの範囲で砂利を敷いたものを使用した。



Fig.5-5 3種の螺旋ロッド

Table.5-3 スクリューロッドのパラメータ

スクリューロッドの仕様				
巻数	間隔 (ピッチ)	リード角	羽根厚さ	羽根高さ
4回	62.5mm	22.5°	3.0mm	4.0mm
5回	50.0mm	18.4°	3.0mm	4.0mm
6回	41.7mm	15.5°	3.0mm	4.0mm



Fig.5-6 実験フィールド，砂利（細）



Fig.5-7 実験フィールド，砂利（荒）

模型を実験フィールド上で直進させ、10回の走破時間をストップウォッチで測定して区間速度を算出した。その際、走破失敗数を数えて走行回数の合計が

ら走破率を算出した。走破失敗の判定は Fig.5-8 の様に直進させた模型が道をそれて、フィールドを外れてしまう場合を判定とした。砂利の大きさと螺旋ロッドの巻き数を変えて測定し、比較を行った。

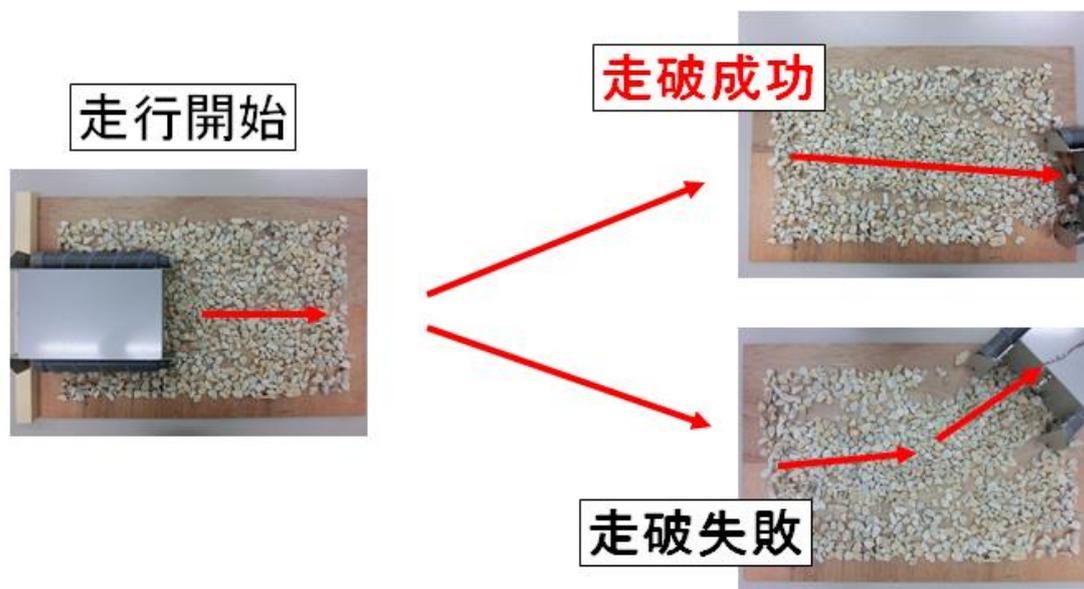


Fig.5-8 走破成功・失敗の判定

5.1.3.2 実験結果

砂利（細）フィールドでの測定結果を Fig.5-9, Table.5-4 に示し、砂利（荒）フィールドでの測定結果を Fig.5-10, Table.5-5 に示す

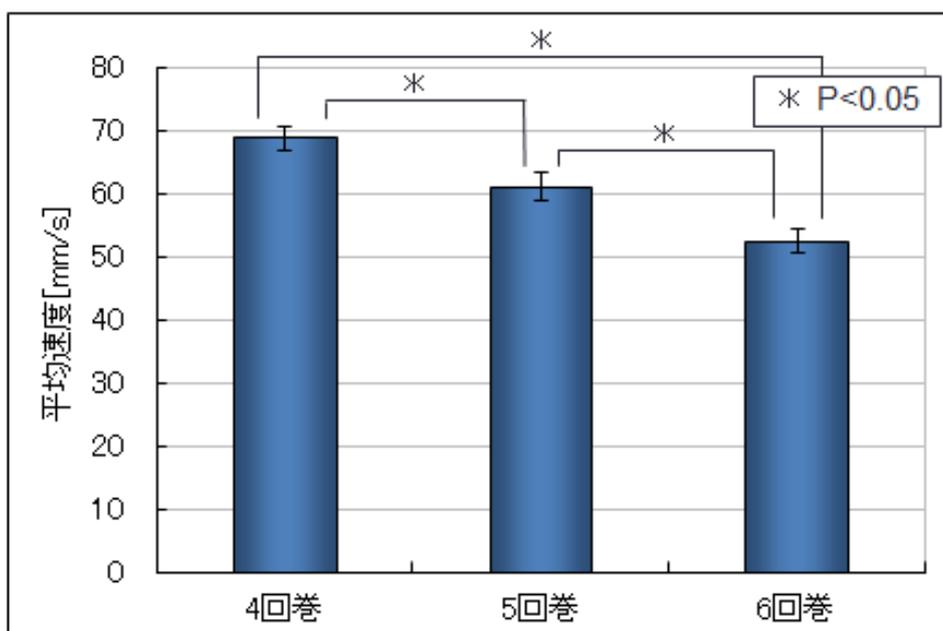


Fig.5-9 砂利（細）フィールドの平均速度

Table.5-4 砂利（細）平均速度と走破率

	4回巻	5回巻	6回巻
平均速度 [mm/s]	69	61	53
走破率 [%]	100	91	100

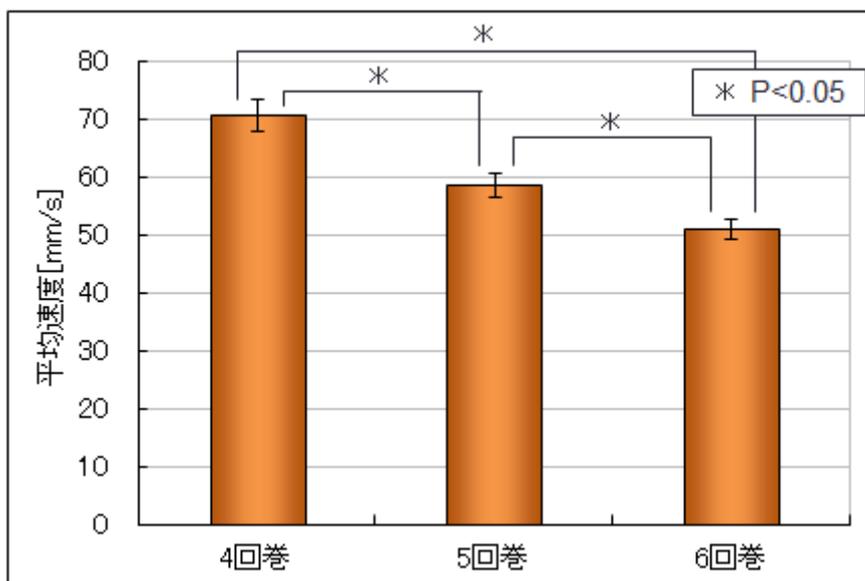


Fig.5-10 砂利（荒）フィールドの平均速度

Table.5-5 砂利（荒）平均速度と走破率

	4回巻	5回巻	6回巻
平均速度 [mm/s]	71	59	51
走破率 [%]	100	83	83

5.1.3.3 考察

粒径の異なる両フィールドとも螺旋羽根の巻き数の違いによる平均速度は t-検定により有意差が認められ、砂利の荒さの違いによって走行安定性が変わる可能性が示された。

次に、砂利の粒径の違いによる速度の比較を Fig.5-11 に示すが、平均速度の有意差はなかった。

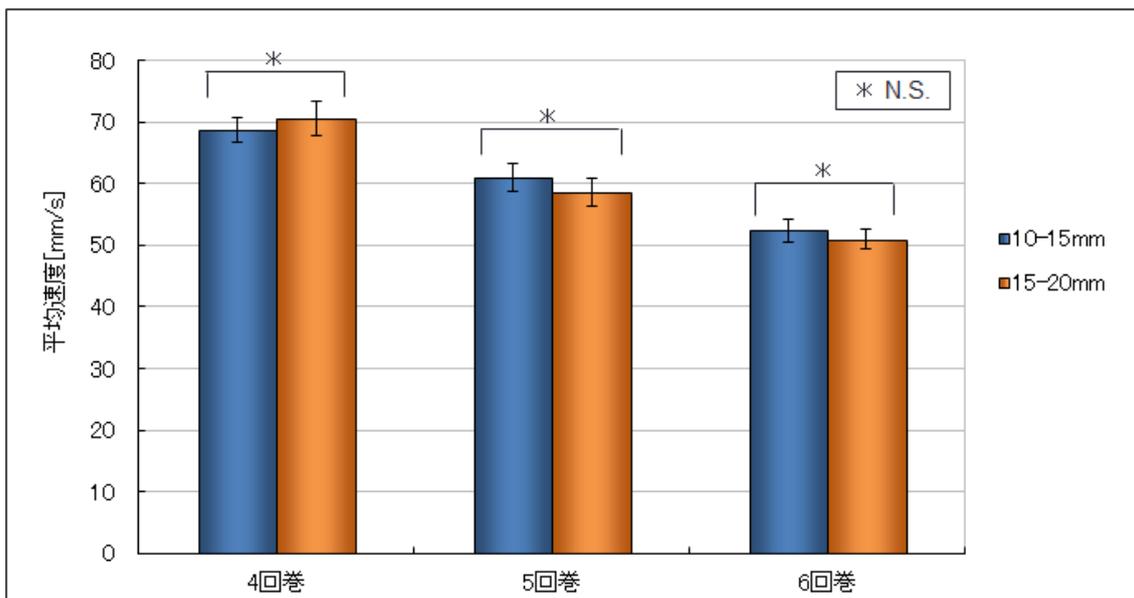


Fig.5-11 2つのフィールドでの平均速度

走破実験の結果より、螺旋羽根の巻き数の違いによる有意差が認められた。次に巻き数毎に実験フィールド（砂利の粒径）の違いによる速度の影響を検証するためt検定を行ったところ、速度に有意差はなかった。このことから、砂利の粒径による速度への影響は少ないと考えられる。また、砂利が大きい場合の走破率が減少しているため、瓦礫の大きさの違いによる走行安定性への影響の可能性を示した。

走行中の様子を見ると、ロッドの軸を固定している筐体部分が走行の障害となっていることが分かった。進行方向と垂直な筐体の金属板が走行中の前後への傾きによって瓦礫に接触し、瓦礫を移動させてしまっており、障害要素が排除しきれていないことが分かった。

5.1.3.4 結論

今回の改良により多くの問題点が改善され、砂利上での走行が可能となったが、コンクリートなど硬質な路面での走行には至らなかった。また、アルキメデス螺旋の走行特性を走破実験により示すことができた。しかしまだ障害要素が排除しきれておらず、排障器の設置など多くの更なる改善点が見つかった。

5.1.4 螺旋羽根の材質と高さ、本体の負荷を変えた砂利走行実験

本実験では前実験である「5.1.3 螺旋羽根の巻き数を変えた砂利走行実験」において高い走破性を示した4回巻きに巻き数を固定した上で、砂利をフィールドとし、螺旋羽根の材質と羽根高さ、負荷（＝荷重）を変えた実験をおこなった。

5.1.4.1 実験方法

5.1.4.1.1. 材質の異なる螺旋羽根

ロッドの材質は全実験同様、硬質塩化ビニールパイプ VU40（外径 48mm×近似的内径 44mm）を用いた。その上で、螺旋羽根先端の材質を以下の 3 種類を用意した。 5-11) 5-12) 5-13)

①帯電防止透明ダクトホース Indus MX-AS（硬質ポリ塩化ビニル，株式会社カクイチ製），

②天然ゴムロール GR（和気産業株式会社製）

③透明ビニールホース TB（ポリ塩化ビニル，プロフレックス株式会社製）

以上の 3 種類の材料を加工し、それぞれの材料に対して 5mm, 7mm, 9mm の螺旋羽根の高さを持つ螺旋ロッドを作製した。螺旋羽根の間隔は 4 回巻きなので Table.5-3 に示してあるように 62.5mm，螺旋羽根の厚さも 3mm である。作成した材質の異なる螺旋ロッドの説明は以下に示す。

① 帯電防止透明ダクトホース（硬質ポリ塩化ビニル）で作製した螺旋羽根

Fig.5-12 に使用した帯電防止透明ダクトホースおよび作製した螺旋羽根の構造を示す。帯電防止透明ダクトホースは硬質ポリ塩化ビニル（比重：1.16～1.35，摩擦係数：0.45，熱伝導率：0.15～0.25，耐熱温度 70～90℃）⁵⁻¹⁴⁾ からできている。ポリ塩化ビニル（PVC）は塩化ビニルの重合から形成され、高い電気絶縁性，吸湿、透湿が少ない，耐薬品に優れ耐酸・耐アルカリ，可塑剤により軟性ができる特性を持つ。Fig.5-13 に帯電防止透明ダクトホースで作製した螺旋ロッドを示す。羽根の先端部分は硬質になっている。

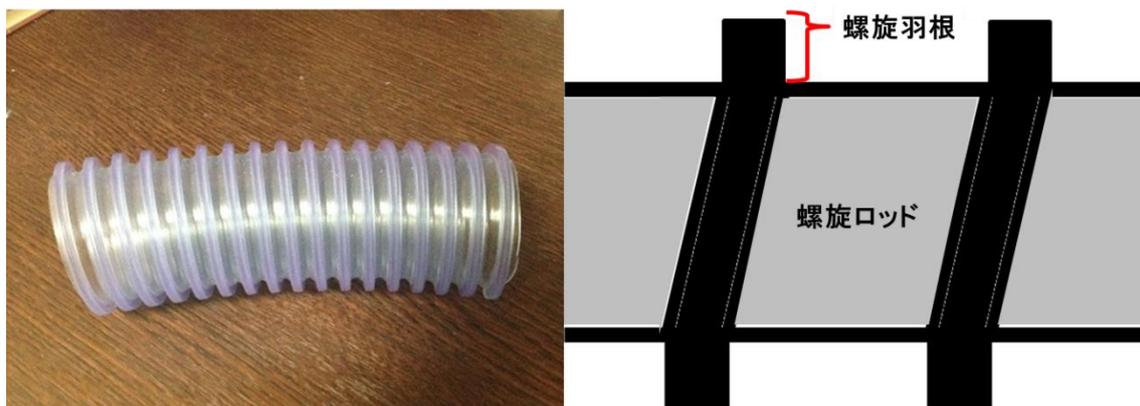


Fig.5-12 帯電防止透明ダクトホース(左)と作製した螺旋羽根の構造図(右)
羽根の接地面は正方形で硬質である。

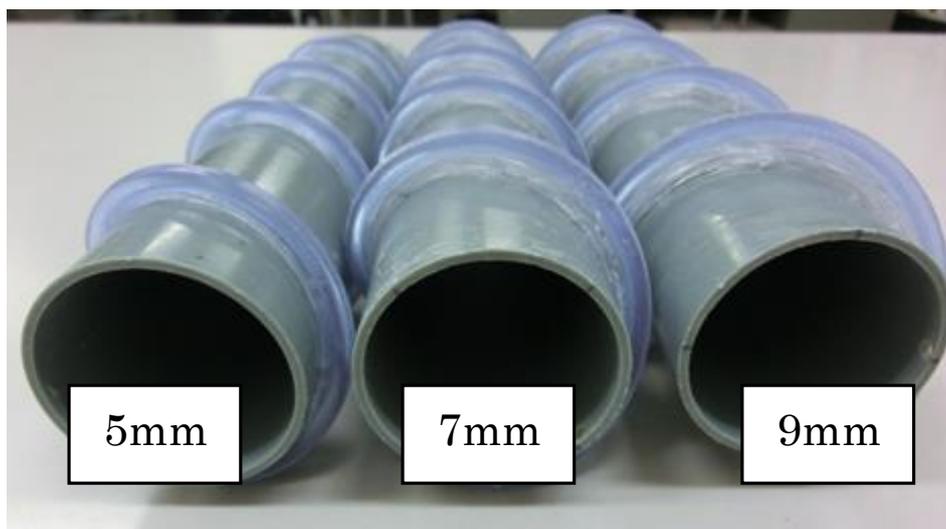


Fig.5-13 帯電防止透明ダクトホースから作製した螺旋ロッド群
高さ調節のため、まず後述する透明ホースを巻き、ダクトホースをその上に巻いた。

② 天然ゴムで作製した螺旋羽根

Fig.5-14 に使用した天然ゴム (比重:0.92, 摩擦係数:1.36, 熱伝導率:0.134, 耐熱温度: $-75\sim 90^{\circ}\text{C}$)⁵⁻¹⁵⁾ および作製した螺旋羽根の構造を示す. 天然ゴムは本来ゴムの持つ弾力性があり, 機械的強度・伸縮性が良い. しかし, 耐熱性・耐油性・耐候性・耐オゾン性には劣る.

Fig.5-15 に天然ゴムロールで作製した螺旋ロッドを示す. 羽根の先端部分は軟質である.

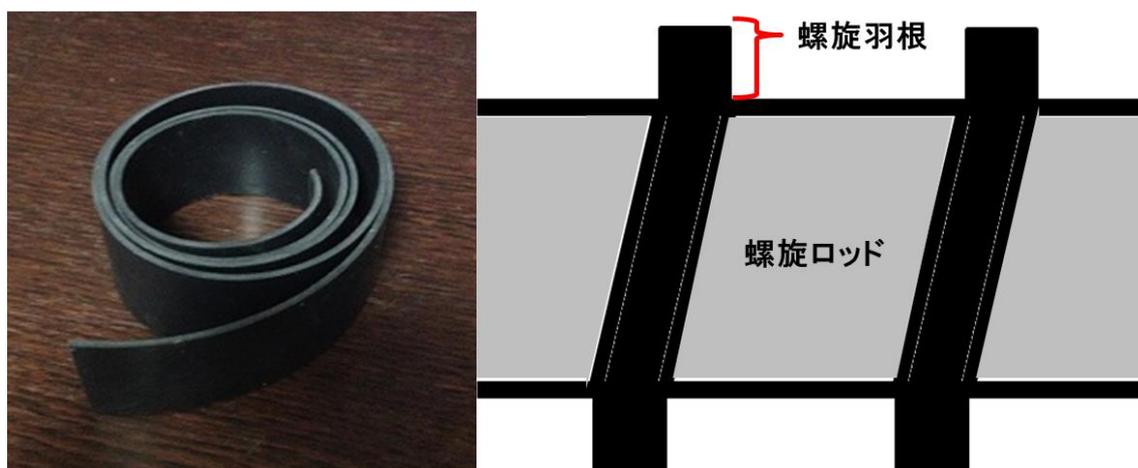


Fig.5-14 使用した天然ゴムロール (左) 作成した螺旋羽根の構造図 (右)
ゴムロールは 1mm 厚の物を使用. 羽根の形状は正方形で軟質である.

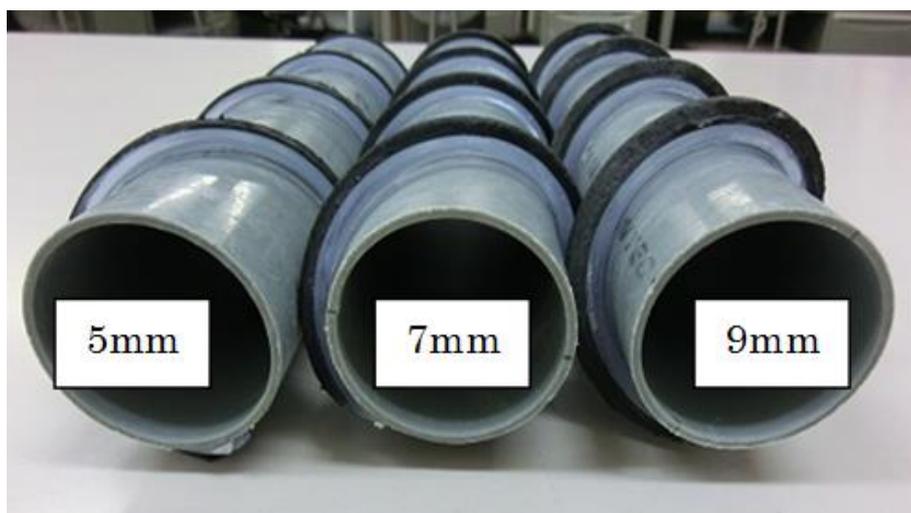


Fig.5-15 天然ゴムロールから作製した螺旋ロッド群
高さ調節のため、まず後述する透明ホースを巻き、天然ゴムをその上に巻いた。

③ 透明ビニールホース（ポリ塩化ビニル）で作製した螺旋羽根

Fig.5-16 に使用した透明ビニールホース（内径φ4×外径φ6[mm]）および作製した螺旋羽根の構造を示す。透明ビニールホースは塩化ビニル（比重：1.16～1.35，摩擦係数：0.45，熱伝導率：0.15～0.25，耐熱温度70～90℃）⁵⁻¹⁵⁾ からできている。塩化ビニル（PVC）は電気絶縁性，吸湿，透湿が少ない，耐薬品に優れ耐酸・耐アルカリ，可塑剤により軟性ができる特性を持つ。

Fig.5-17 に透明ビニールホースで作製した螺旋ロッドを示す。羽根の先端部分は軟質である。

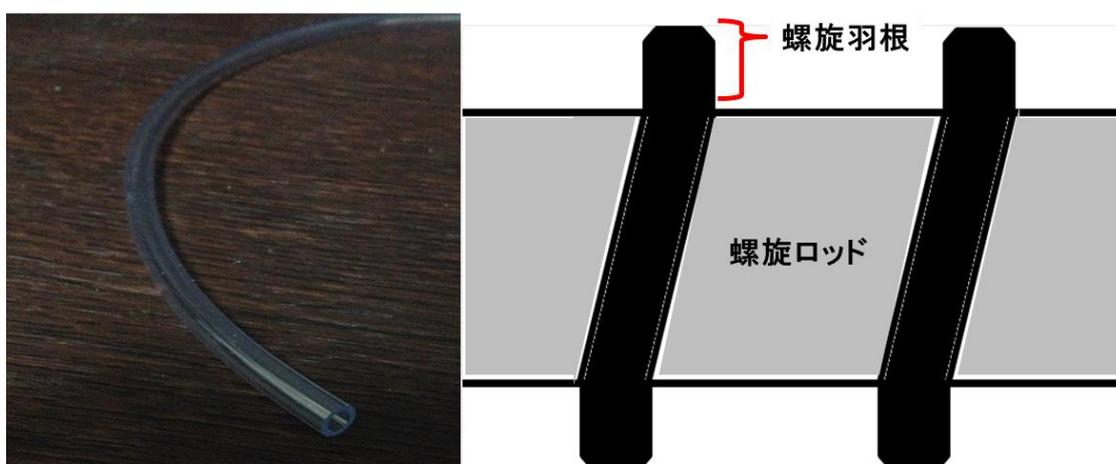


Fig.5-16 透明ビニールホース（左）と作成した螺旋羽根の構造図（右）
羽根部分の形状は角が丸く，軟質である。

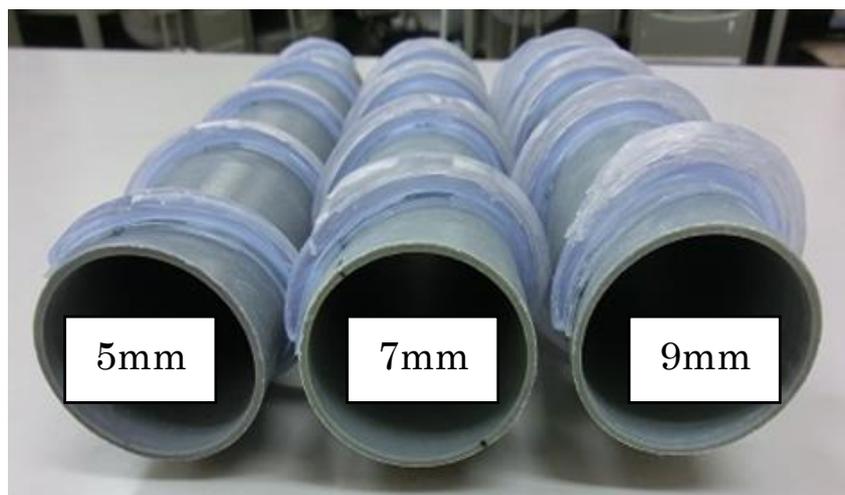


Fig.5-17 透明ビニールホースから作製した螺旋ロッド群
高さ調節の為、まずダクトホースを巻き、透明ビニールホースをその上に巻いた。

5.1.4.1.2. 実験フィールド（砂利）

被災者収容ロボット実験用模型の性能評価として、砂利上での直進運動実験を行った。実験フィールド（Fig.5-18）はベニヤ合板（600W×900D [mm]）の上に砂利を敷き詰めたものより構成されている。砂利は 15kg 分量を 540W×840D [mm]の範囲で均一に敷き詰めた。砂利の粒径は 10～15mm と 15～20mm の 2 種類のものを用意した。（Fig.5-19）

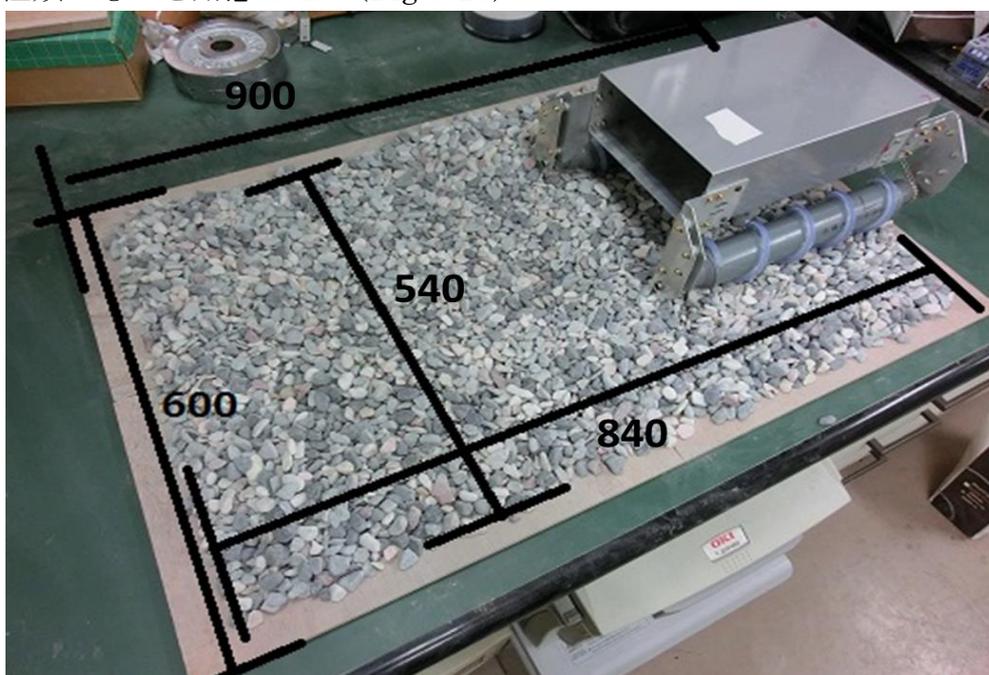


Fig.5-18 砂利上実験のフィールド
被災者収容ロボット実験用模型が砂利上を走行する



(a) 砂利の粒径（細）10～15mm (b) 砂利の粒径（荒）15～20mm

Fig.5-19 砂利上実験のフィールド

作製したすべての螺旋ロッドに対して、走行時間と走行距離をそれぞれ測定した。測定時の指標は Fig.5-20 に示すように、合板に直接目印を始線、終線を引いた。走行速度は（フィールド 420mm/走行時間）より算出した。走破時間の測定は5回行い、ストップウォッチで測定した。走行距離はフィールド 840mm 間の走行できた距離を測定した。走行距離の測定は10回行い、コースアウトした場合は螺旋ロッドとして使用している塩ビパイプの最後方部を基準としてその測定点 d の距離をメジャーで測定した (Fig.5-21)。また、実験結果の検定 (t-検定含む) はマイクロソフトのエクセルを使用し、以下特に表記がない限り二元配置分散分析で検定を行った。また各指標の有意差検定は対応のある t-検定を用いた。有意水準は 5%とした。ちなみにグラフ中有意差がないものは n.s (no significance) と表記し、有意差がある場合は有意確率である p 値で示す。

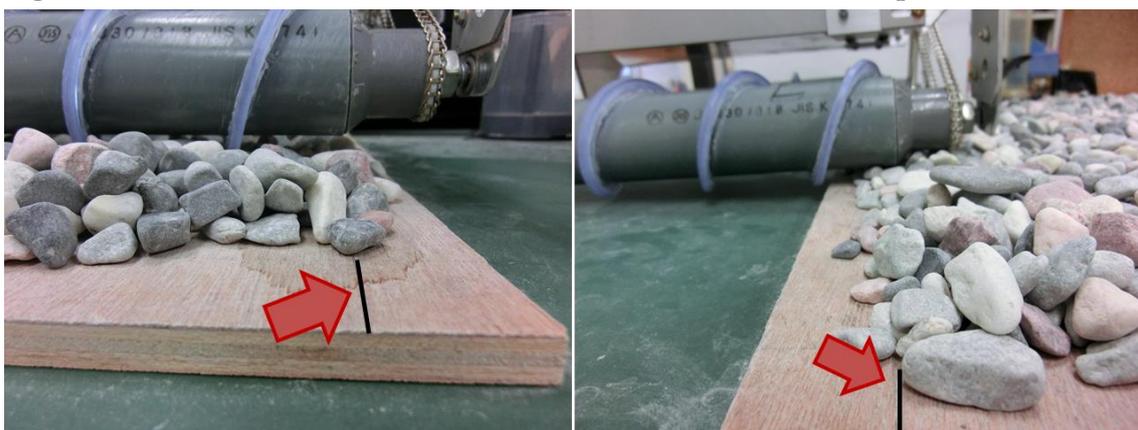


Fig.5-20 実験における指標の定義。始点が左図、終点が左図

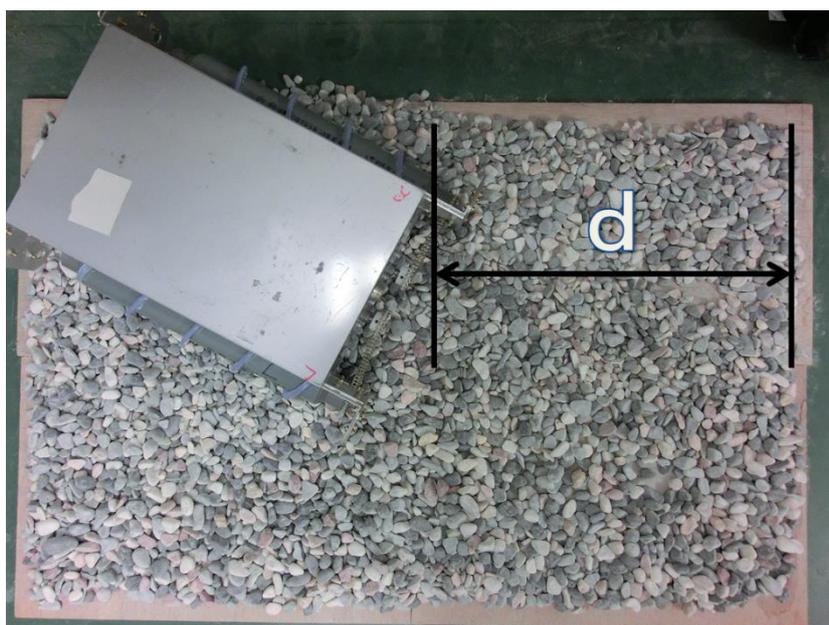


Fig.5-21 走行距離測定点 d の定義

片方のスクリーがフィールドである木板から出るまで走行させ、距離を測定した。

5.1.4.1.3. 負荷 (=荷重)

Fig.5-22 のように模型に負荷 (なし (0.0kg), 2.5kg, 5.0kg, 7.5kg, 10kg) を掛け、平均速度と平均走行距離の比較を行った。

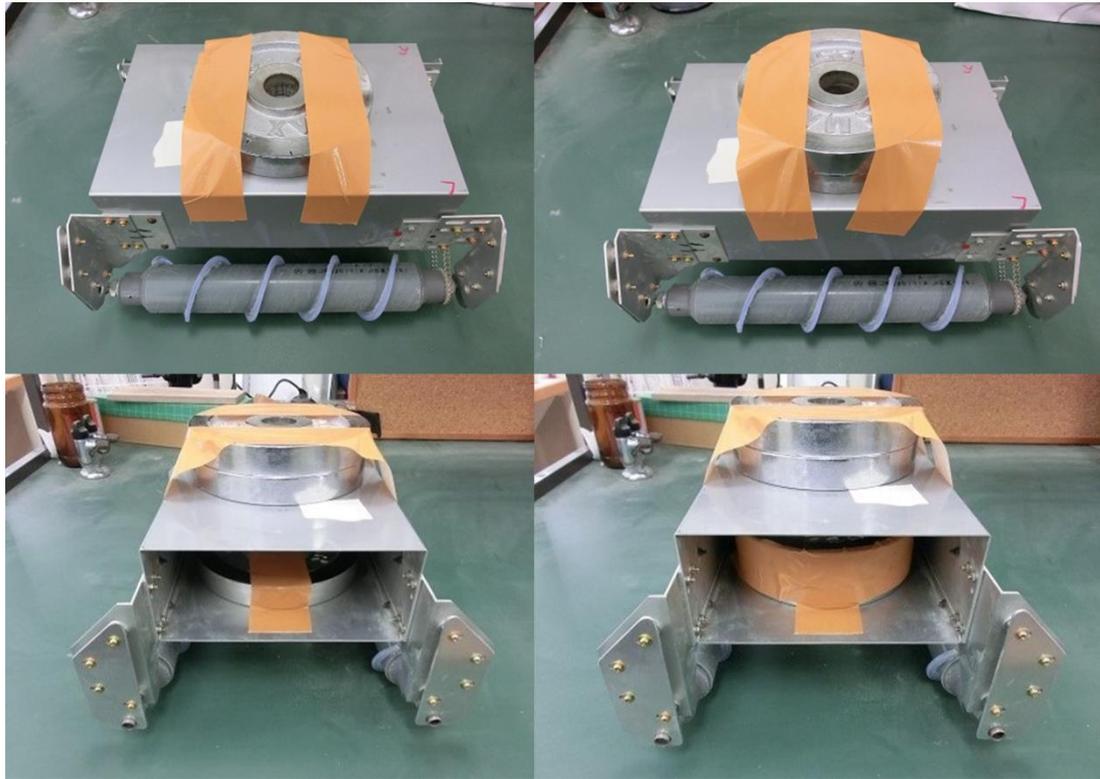


Fig.5-22 負荷を掛けた模型（左上：2.5kg，右上：5.0kg，左下：7.5kg，右下：10kg）

模型の上や筐体内に重りを乗せ、ガムテープで固定した

5.1.4.2 実験結果

まず、本実験ではブルーダ・ユニット縮尺模型にかける負荷を、なし (0.0kg)、2.5kg、5.0kg、7.5kg、10kg としていたが、7.5kg、10kg の負荷をかけると負荷が大き過ぎたため、走行することが困難となった。そのため、模型にかける負荷は、なし (0.0kg)、2.5kg、5.0kg のみの結果を示す。

5.1.4.2.1. 帯電防止透明ダクトホース製螺旋羽根の実験結果

帯電防止透明ダクトホース（硬質ポリ塩化ビニル）で作製した螺旋羽根の実験結果を以下に示す。

砂利 10～15mm での各条件（羽根の高さ、負荷の大きさ）における平均速度および平均走行距離を Table.5-6、5-7、5-8 に示す。また、Fig.5-23、5-24 に各羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の比較をそれぞれ示し、Fig.5-25、5-26 に各条件（羽根の高さ（5mm、7mm、9mm）、負荷（なし (0.0kg)、2.5kg、5.0kg））における平均速度および平均走行距離の変化をそれぞれ示した。

Table.5-6 負荷 0.0kg における実験結果 (砂利 10~15mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	73.9±2.6	79.7±2.2	74.7±2.2
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-7 負荷 2.5kg における実験結果 (砂利 10~15mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	66.0±0.6	63.2±1.0	62.2±1.7
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-8 負荷 5.0kg における実験結果 (砂利 10~15mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	60.8±3.2	60.7±1.6	58.7±2.3
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

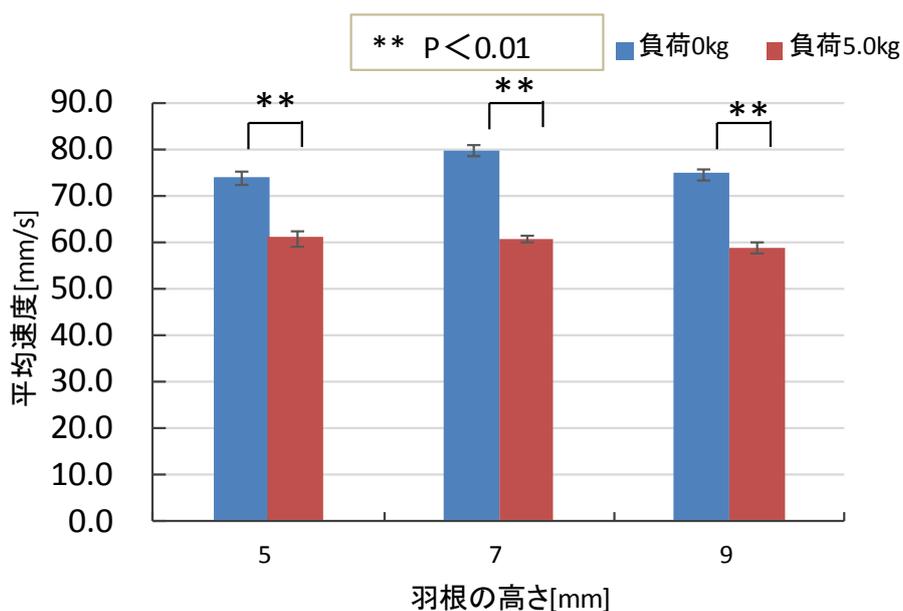


Fig.5-23 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均速度の比較 (砂利 10~15mm)
 負荷をかけると、速度に有意な減少がみられた、

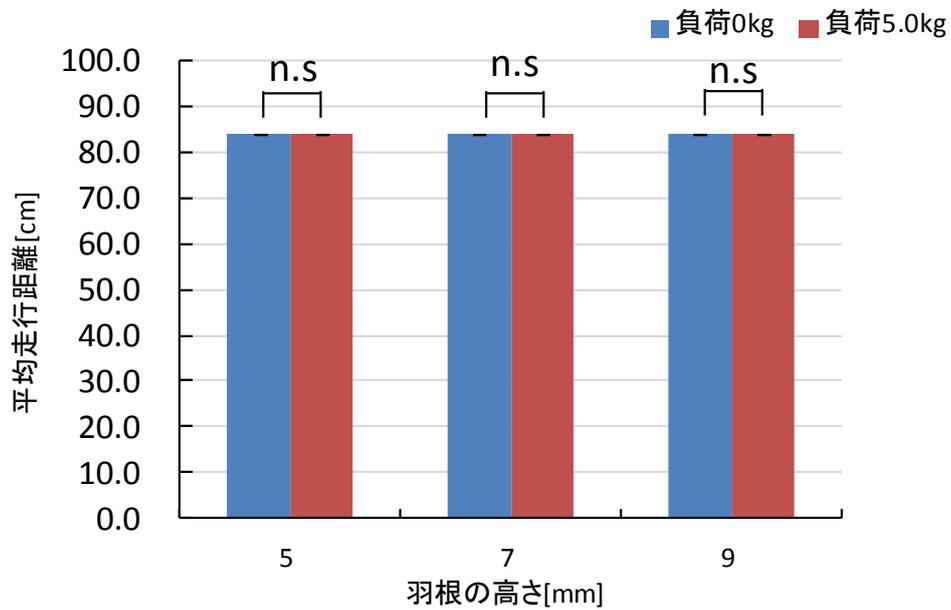


Fig.5-24 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均走行距離の比較 (砂利 10~15mm)
平均走行距離に有意な差はみられなかった。

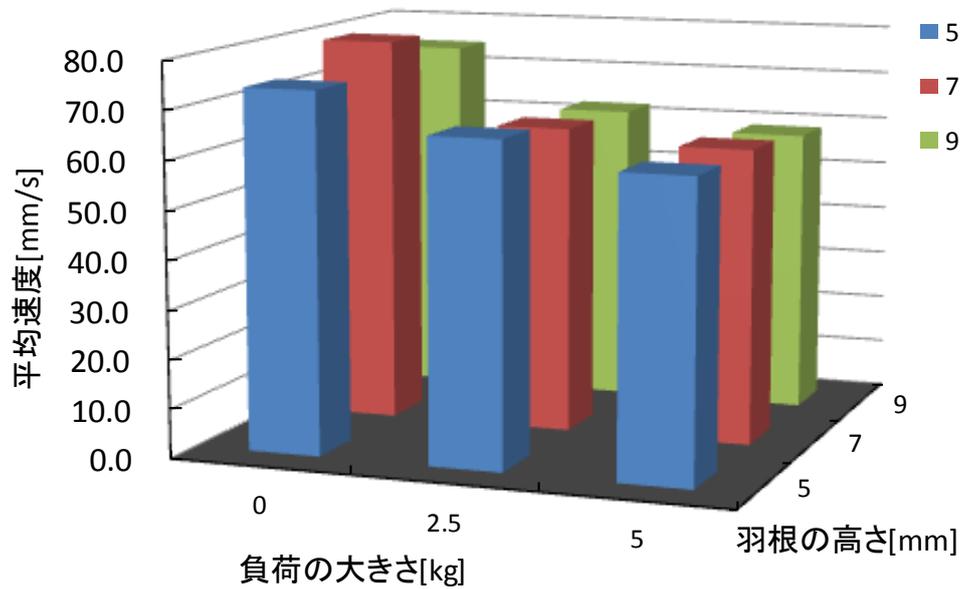


Fig.5-25 各条件における平均速度の比較 (砂利 10~15mm)
各羽根の高さにおいて負荷の増加に伴い、平均速度の減少がみられた。

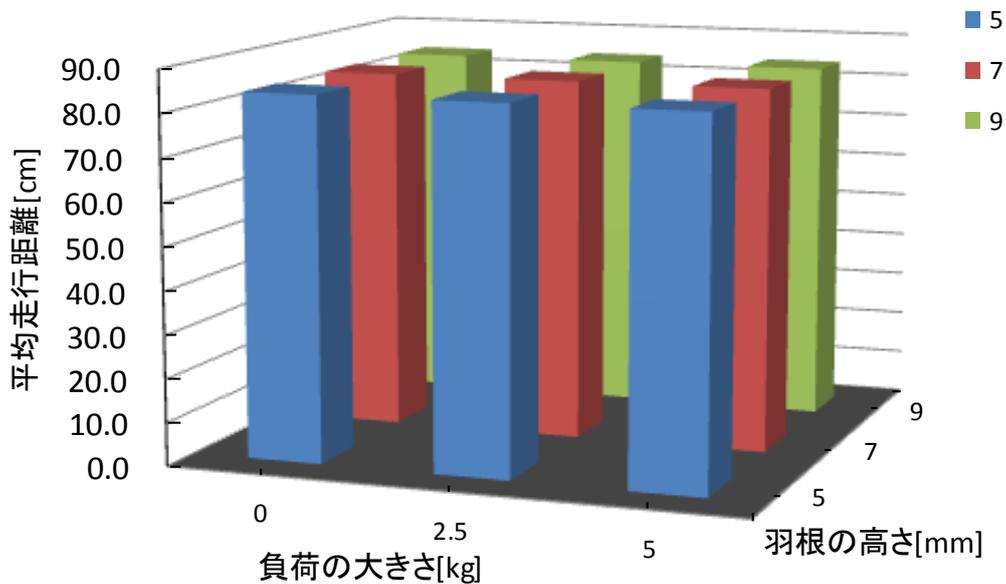


Fig.5-26 各条件における平均走行距離の比較（砂利 10～15mm）
平均走行距離に変化はみられなかった

砂利 15～20mm での各条件（羽根の高さ，負荷の大きさ）における平均速度および平均走行距離を Table.5-10, 5-11, 5-12 に示す．また，Fig.5-27, 5-28 に各羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の比較をそれぞれ示し，Fig.5-29, 5-30 に各条件（羽根の高さ（5mm, 7mm, 9mm），負荷（なし（0.0kg），2.5kg, 5.0kg））における平均速度および平均走行距離の変化をそれぞれ示した．

Table.5-10 負荷 0.0kg における実験結果（砂利 15～20mm）

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	76.0 ± 2.8	80.8 ± 0.4	76.3 ± 1.8
平均走行距離[cm]	84.0 ± 0.0	84.0 ± 0.0	84.0 ± 0.0

Table.5-11 負荷 2.5kg における実験結果（砂利 15～20mm）

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	61.2 ± 2.1	60.9 ± 0.4	63.6 ± 0.7
平均走行距離[cm]	84.0 ± 0.0	84.0 ± 0.0	84.0 ± 0.0

Table.5-12 負荷 5.0kg における実験結果 (砂利 15~20mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	58.6±1.0	60.0±1.9	59.1±1.9
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	82.6±3.1	82.4±3.2

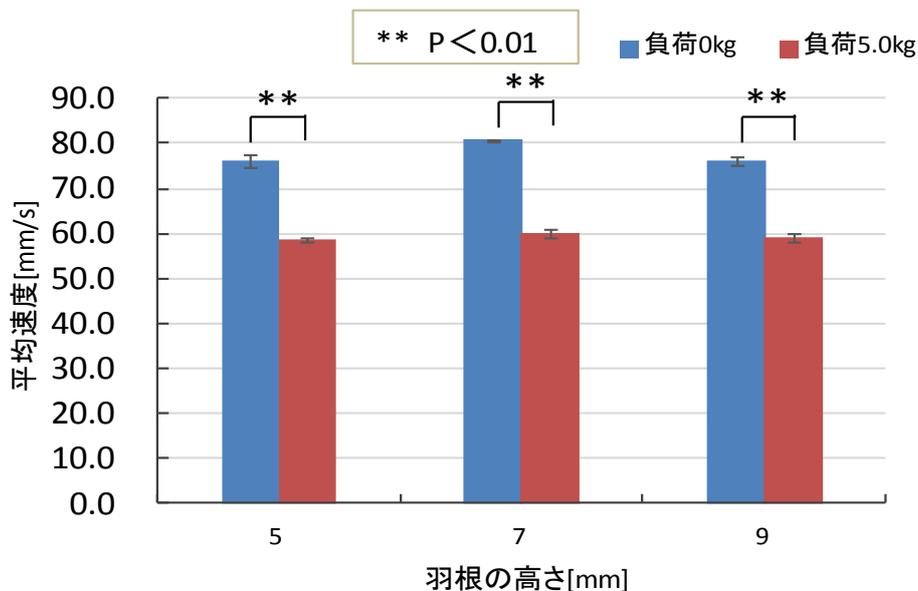


Fig.5-27 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均速度の比較 (砂利 15~20mm)
負荷をかけると、速度に有意な減少がみられた。

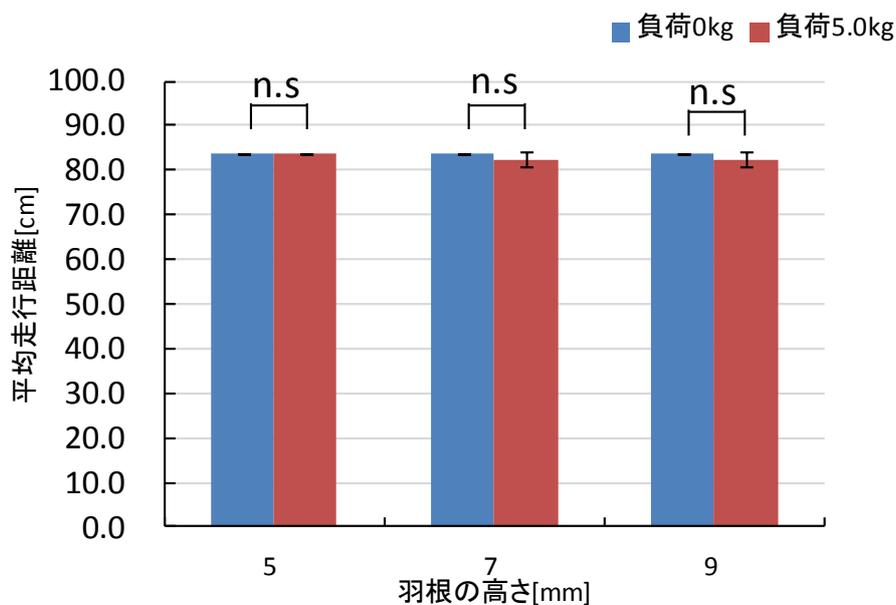


Fig.5-28 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均走行距離の比較 (砂利 15~20mm)
平均走行距離に有意な差はみられなかった

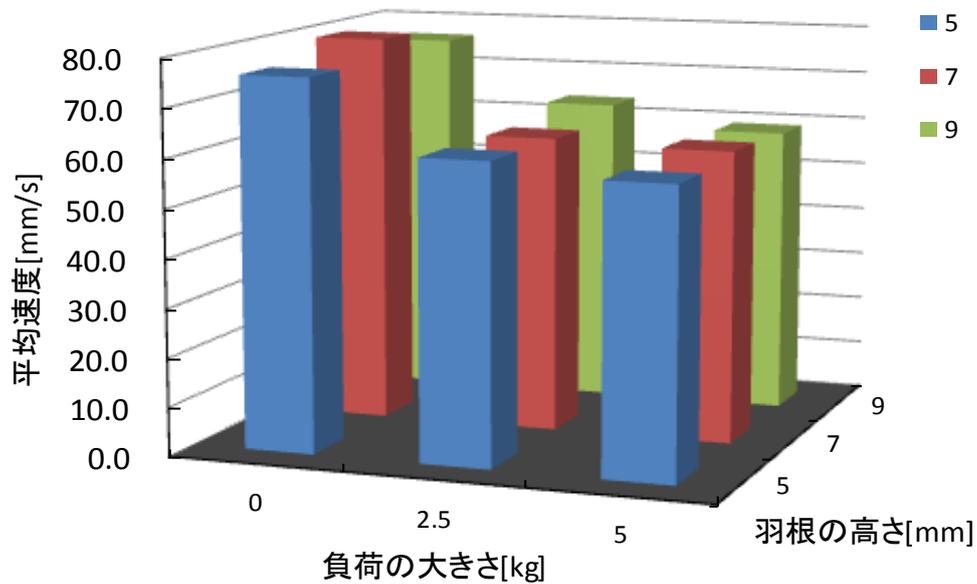


Fig.5-29 各条件における平均速度の比較 (砂利 15~20mm)
 負荷の増加に伴い、平均速度の減少が確認できた。

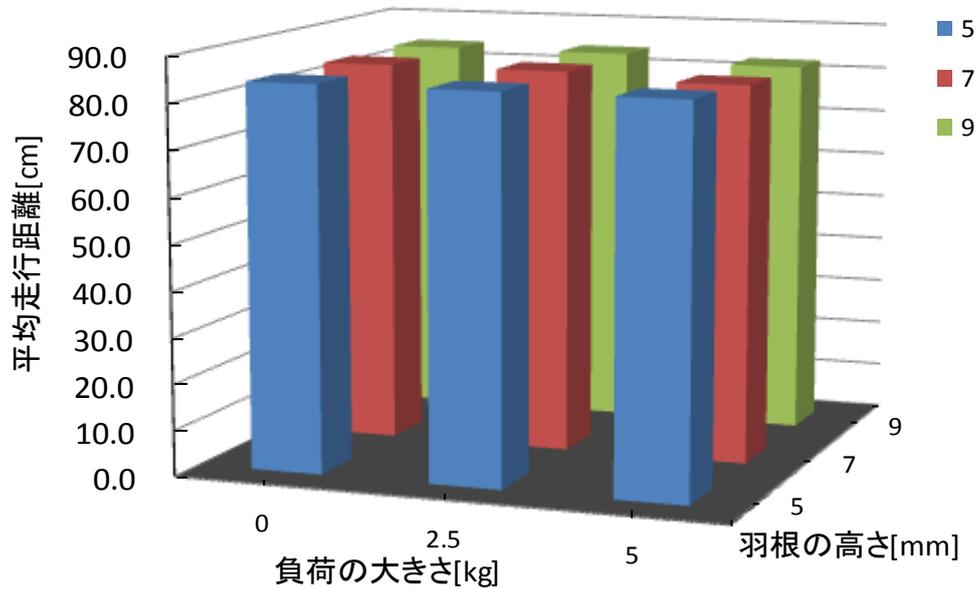


Fig.5-30 各条件における平均走行距離の比較 (砂利 15~20mm)
 平均走行距離に変化はみられなかった。

5.1.4.2.2. 天然ゴム製螺旋羽根の実験結果

天然ゴムで作製した螺旋羽根の実験結果を以下に示す。

砂利 10～15mm での各条件（羽根の高さ，負荷の大きさ）における平均速度および平均走行距離を Table.5-13, 5-14, 5-15 に示す．また，Fig.5-31, 5-32 に各羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の比較をそれぞれ示し，Fig.5-33, 5-34 に各条件（羽根の高さ（5mm, 7mm, 9mm），負荷（なし（0.0kg）, 2.5kg, 5.0kg））における平均速度および平均走行距離の変化をそれぞれ示した．

Table.5-13 負荷 0.0kg における実験結果（砂利 10～15mm）

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	46.1±3.1	51.2±2.9	48.0±2.9
平均走行距離[cm]	43.9±7.6	49.2±8.6	46.7±7.5

Table.5-14 負荷 2.5kg における実験結果（砂利 10～15mm）

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	41.6±2.1	38.3±2.1	43.1±1.2
平均走行距離[cm]	54.9±7.3	53.7±8.4	51.3±7.4

Table.5-15 負荷 5.0kg における実験結果（砂利 10～15mm）

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	39.7±2.0	31.3±0.6	30.3±2.3
平均走行距離[cm]	68.3±6.1	65.1±8.5	53.3±8.5

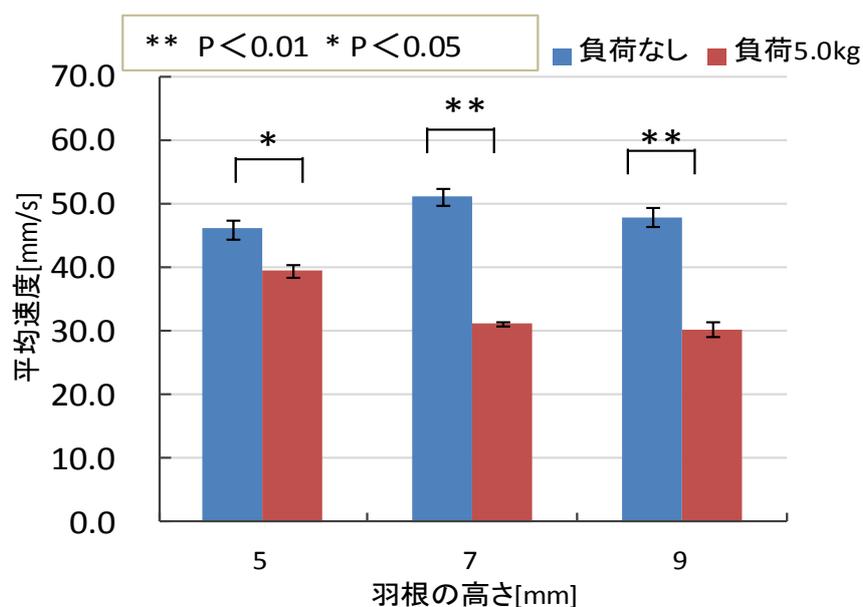


Fig.5-31 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均速度の比較（砂利 10～15mm）
負荷をかけると，速度に有意な減少がみられた．

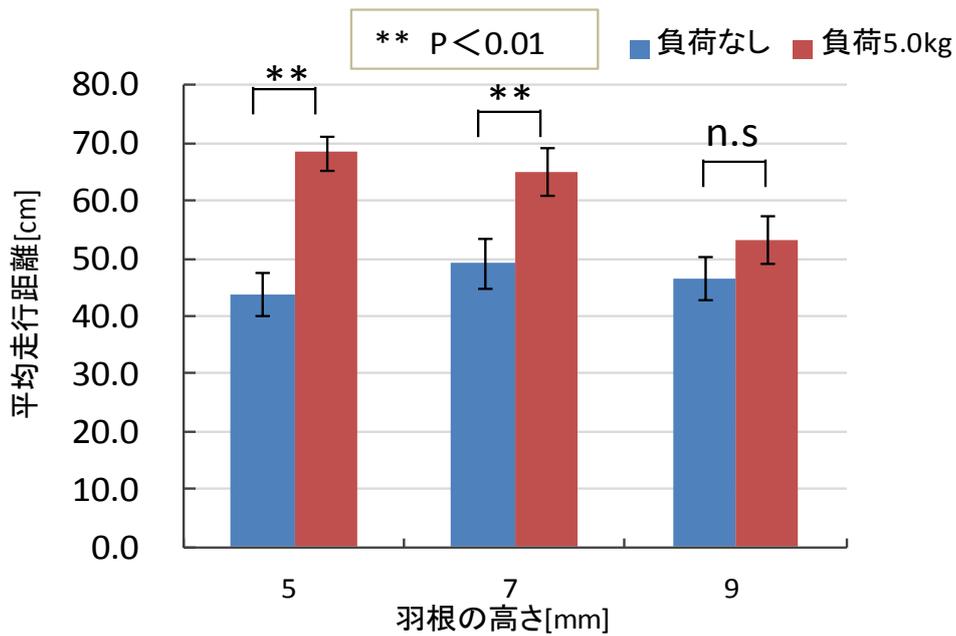


Fig.5-32 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均走行距離の比較 (砂利 10~15mm)
羽根の高さ 5mm, 7mm で平均走行距離の有意な増加がみられた.

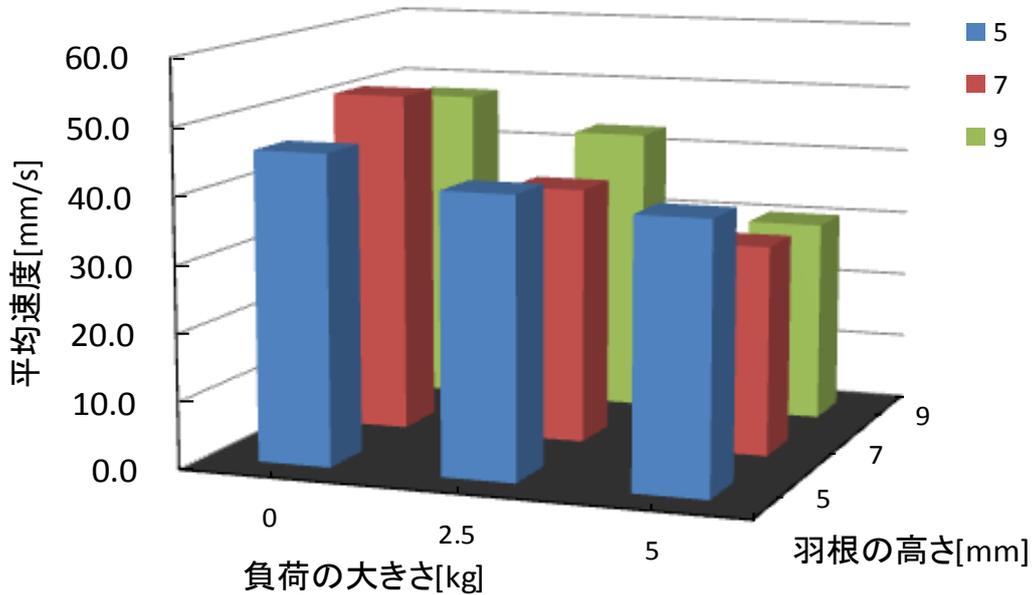


Fig.5-33 各条件における平均速度の比較 (砂利 10~15mm)
負荷の増加に伴い, 平均速度の減少する傾向がみられた.

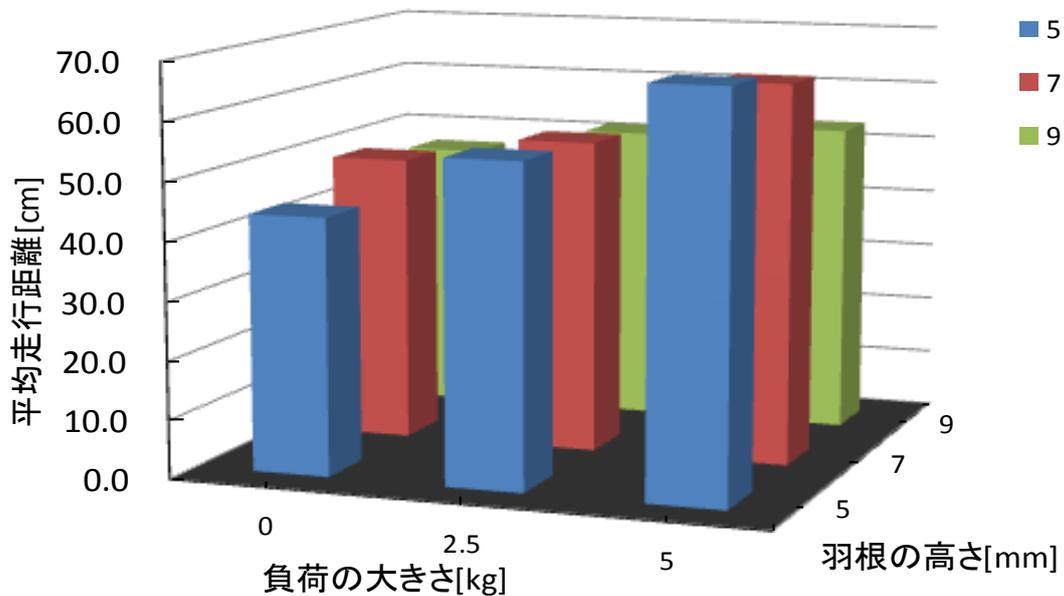


Fig.5-34 各条件における平均走行距離の比較（砂利 10～15mm）

負荷の増加に伴い，平均走行距離が増加する傾向がみられた。

砂利 15～20mm での各条件（羽根の高さ，負荷の大きさ）における平均速度および平均走行距離を Table.5-16, 5-17, 5-18 に示す。また，Fig.5-35, 5-36 に各羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の比較をそれぞれ示し，Fig.5-37, 5-38 に各条件（羽根の高さ（5mm, 7mm, 9mm），負荷（なし（0.0kg），2.5kg, 5.0kg））における平均速度および平均走行距離の変化をそれぞれ示した。

Table.5-16 負荷 0.0kg における実験結果（砂利 15～20mm）

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	39.6 ± 2.8	38.8 ± 3.8	39.7 ± 4.0
平均走行距離[cm]	38.1 ± 9.3	50.9 ± 7.3	42.3 ± 8.8

Table.5-17 負荷 2.5kg における実験結果（砂利 15～20mm）

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	38.2 ± 1.0	36.8 ± 1.4	39.2 ± 2.8
平均走行距離[cm]	42.7 ± 9.6	53.7 ± 8.4	50.2 ± 8.5

Table.5-18 負荷 5.0kg における実験結果 (砂利 15~20mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	35.2±1.4	3.34±2.2	35.2±1.5
平均走行距離[cm]	51.5±8.0	62.2±11	55.8±10

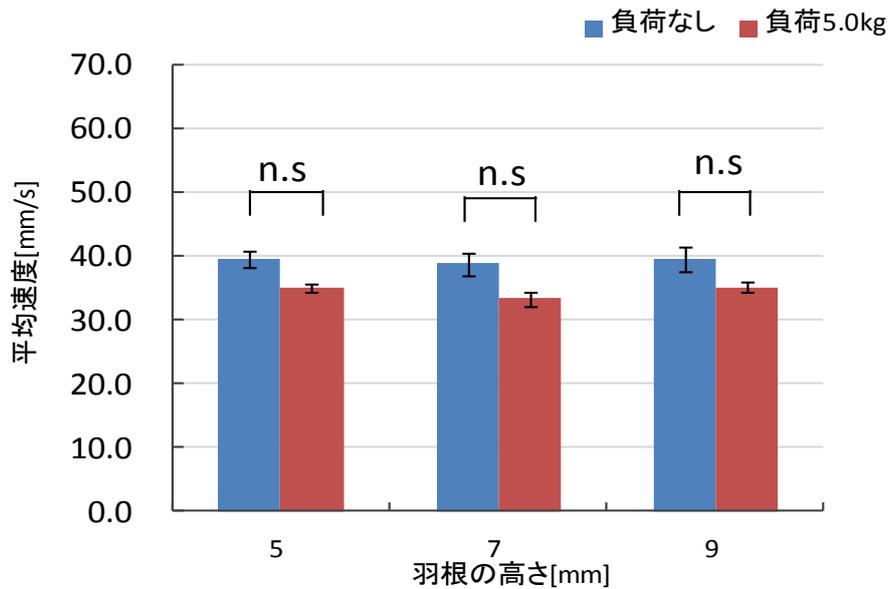


Fig.5-35 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均速度の比較 (砂利 15~20mm)
速度に有意な差はみられなかった

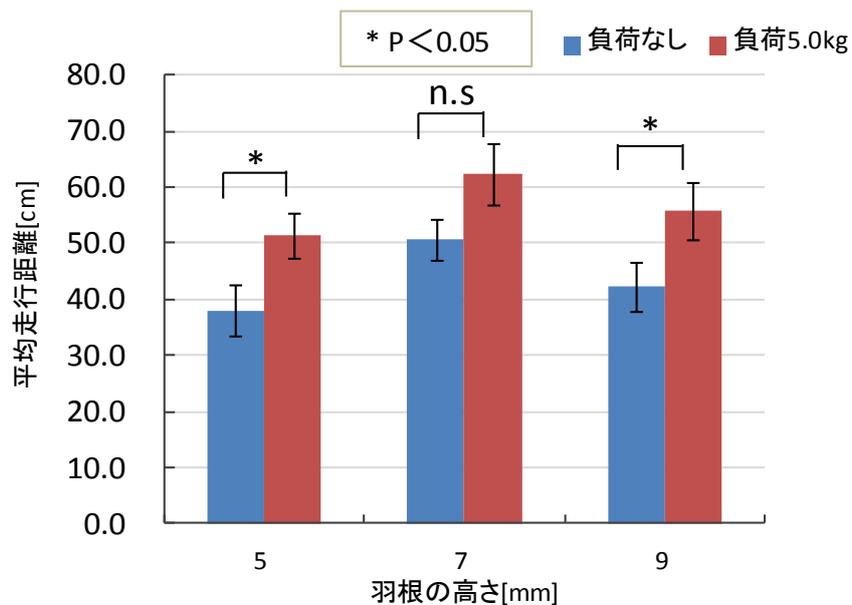


Fig.5-36 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均走行距離の比較(砂利 15~20mm)
羽根の高さ 5mm, 9mm で平均走行距離の有意な増加がみられた.

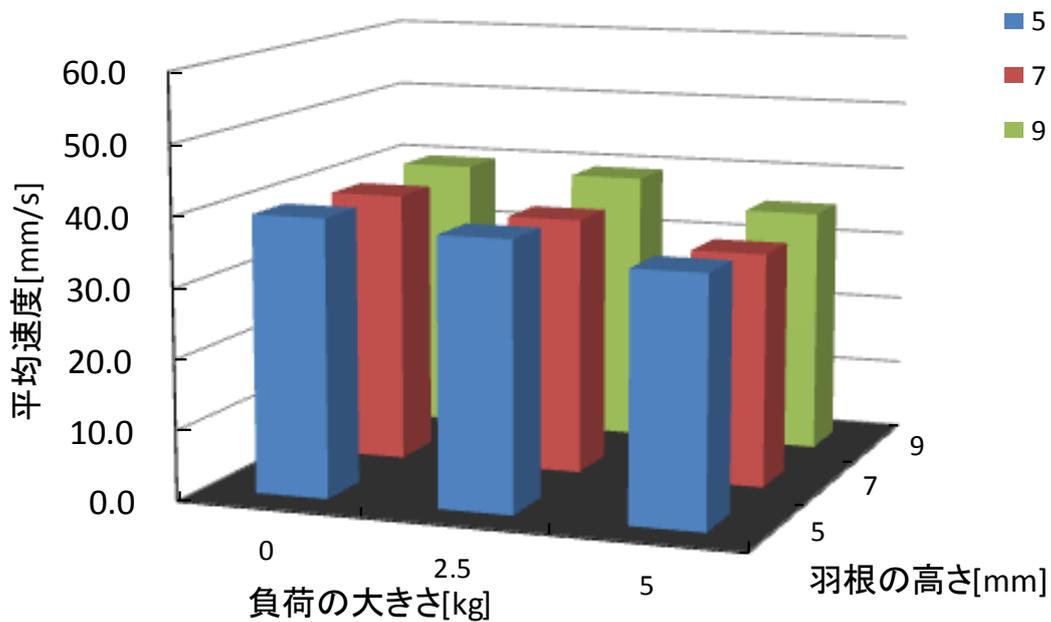


Fig.5-37 各条件における平均速度の比較（砂利 15～20mm）
 負荷の増加に伴い、平均速度の減少する傾向がみられた。

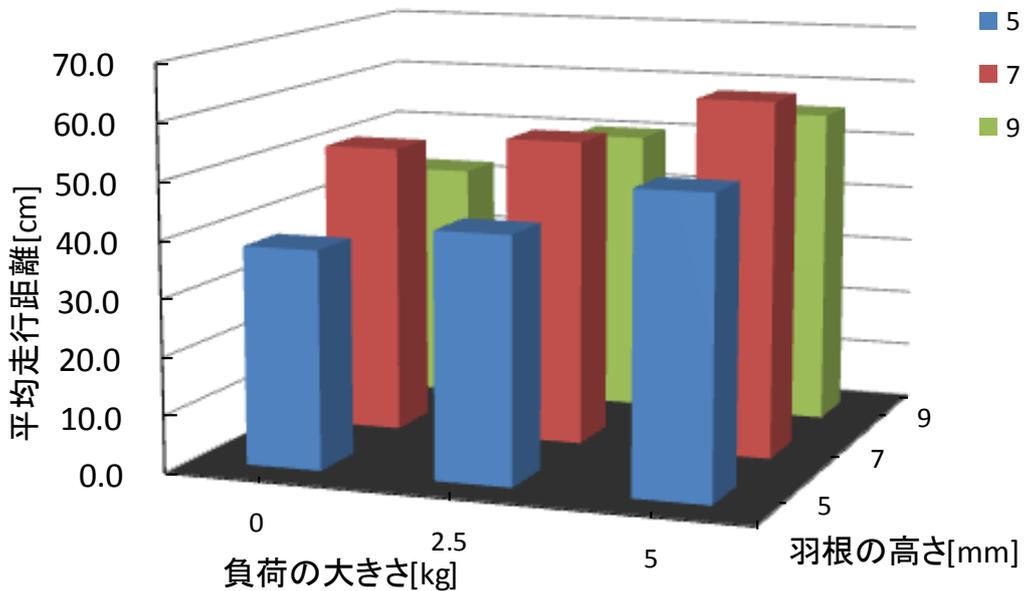


Fig.5-38 各条件における平均走行距離の比較（砂利 15～20mm）
 負荷の増加に伴い、平均走行距離の増加する傾向がみられた。

5.1.4.2.3. 透明ビニールホース製螺旋羽根の実験結果

透明ビニールホース（ポリ塩化ビニル）で作製した螺旋羽根の実験結果を以

下に示す.

砂利 10~15mm での各条件 (羽根の高さ, 負荷の大きさ) における平均速度および平均走行距離を Table.5-19, 5-20, 5-21 に示す. また, Fig.5-39, 5-40 に各羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の比較をそれぞれ示し, Fig.5-41, 5-42 に各条件 (羽根の高さ (5mm, 7mm, 9mm), 負荷 (なし (0.0kg), 2.5kg, 5.0kg) における平均速度および平均走行距離の変化をそれぞれ示した.

Table.5-19 負荷 0.0kg における実験結果 (砂利 10~15mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	52.8±1.8	56.8±1.7	55.2±3.7
平均走行距離[cm]	42.0±8.0	50.1±6.8	45.4±9.5

Table.5-20 負荷 2.5kg における実験結果 (砂利 10~15mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	43.5±2.3	42.3±2.3	47.5±3.5
平均走行距離[cm]	47.6±6.0	56.7±11	54.5±9.7

Table.5-21 負荷 5.0kg における実験結果 (砂利 10~15mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	34.0±2.0	34.2±3.1	32.6±0.8
平均走行距離[cm]	52.2±9.9	60.1±10	56.7±9.2

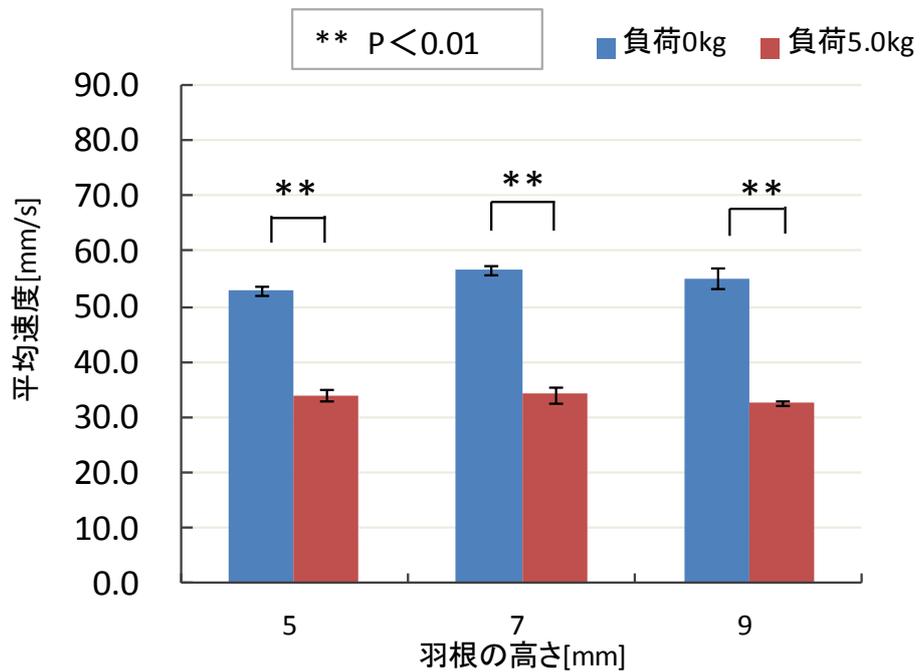


Fig.5-39 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均速度の比較 (砂利 10~15mm)
 負荷をかけると、速度に有意な減少がみられた。

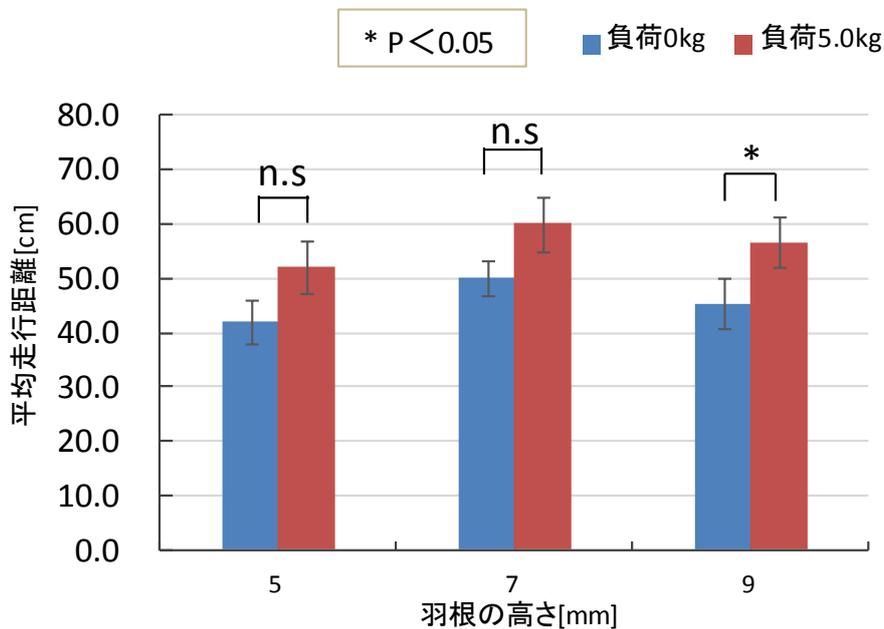


Fig.5-40 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均走行距離の比較 (砂利 10~15mm)
 羽根の高さ 9mm で平均走行距離の有意な増加がみられた。

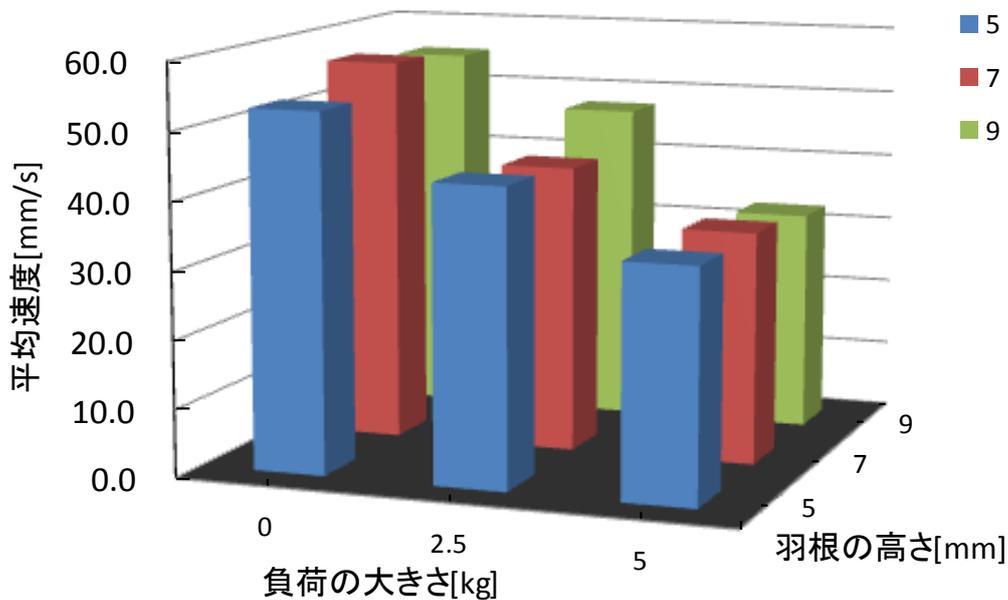


Fig.5-41 各条件における平均速度の比較（砂利 10～15mm）
 負荷の増加に伴い、平均速度の減少する傾向がみられた。

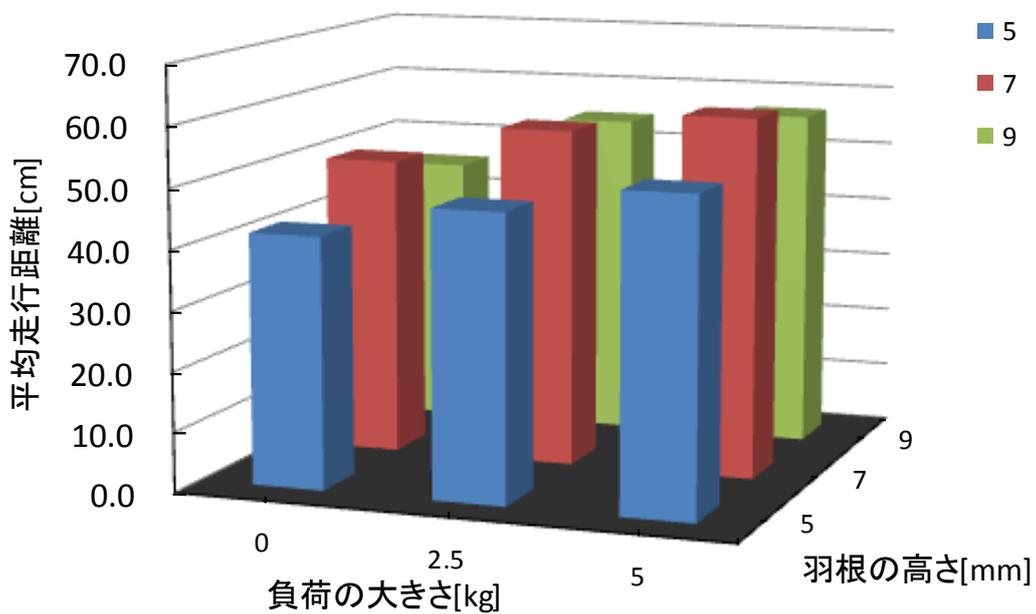


Fig.5-42 各条件における平均走行距離の比較（砂利 10～15mm）
 負荷の増加に伴い、平均走行距離の増加する傾向がみられた。

砂利 15～20mm での各条件（羽根の高さ，負荷の大きさ）における平均速度および平均走行距離を Table.5-22, 5-23, 5-24 に示す。また，Fig.5-43, 5-44

に各羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の比較をそれぞれ示し、Fig.5-45, 5-46 に各条件 (羽根の高さ (5mm, 7mm, 9mm), 負荷 (なし (0.0kg), 2.5kg, 5.0kg) における平均速度および平均走行距離の変化をそれぞれ示した。

Table.5-22 負荷 0.0kg における実験結果 (砂利 15~20mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	52.4±1.1	52.4±0.9	52.7±1.2
平均走行距離[cm]	37.9±7.4	51.0±7.9	42.7±5.3

Table.5-23 負荷 2.5kg における実験結果 (砂利 15~20mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	36.3±0.6	36.2±0.6	37.9±0.6
平均走行距離[cm]	44.5±5.8	52.6±6.5	46.0±4.9

Table.5-24 負荷 5.0kg における実験結果 (砂利 15~20mm)

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	33.5±0.8	33.9±3.3	35.4±1.4
平均走行距離[cm]	51.6±8.7	63.3±11	52.1±8.2

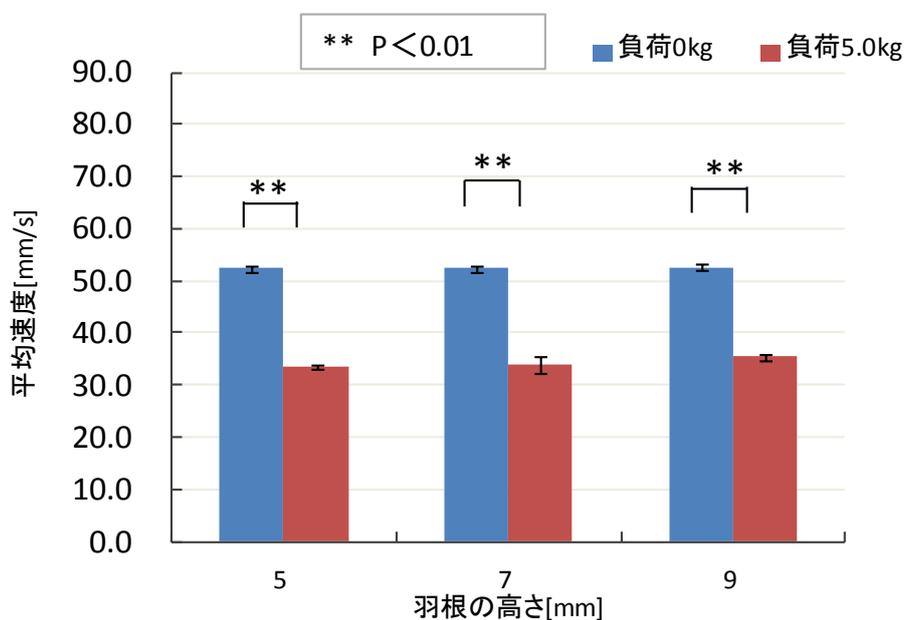


Fig.5-43 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均速度の比較 (砂利 15~20mm)
負荷をかけると、速度は有意な減少を示した。

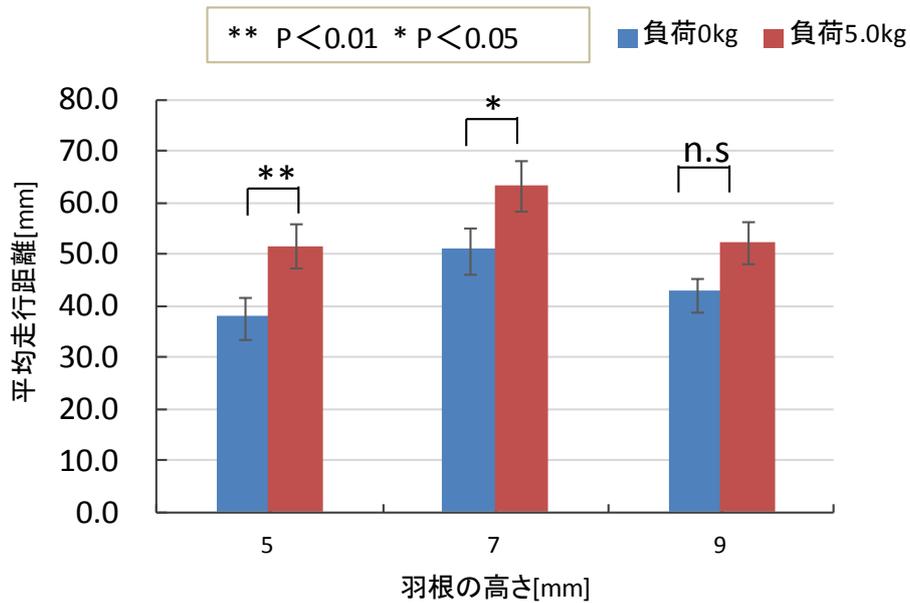


Fig.5-44 負荷 0.0kg と 5.0kg における平均走行距離の比較 (砂利 15~20mm)
螺旋羽根の高さ 5mm, 7mm で平均走行距離の有意な増加がみられた。

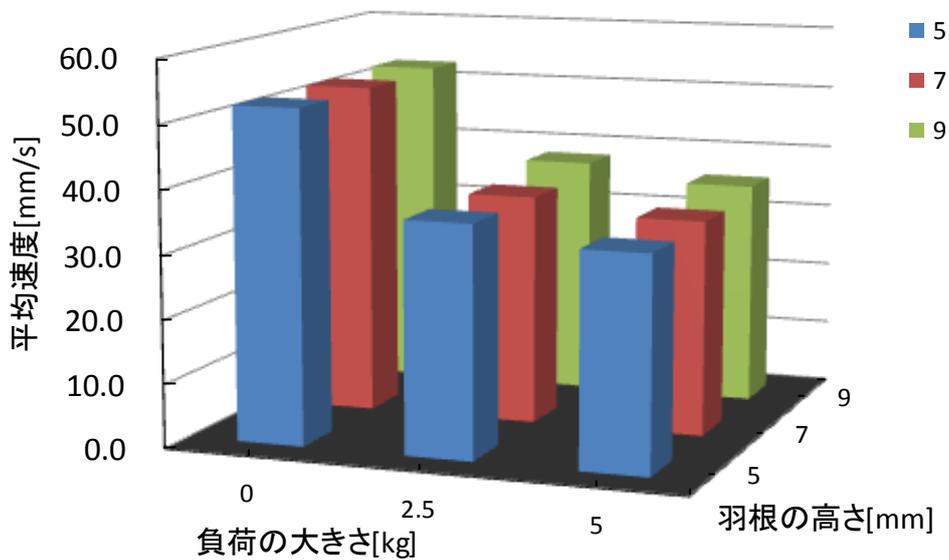


Fig.5-45 各条件における平均速度の比較 (砂利 15~20mm)
負荷の増加に伴い、平均速度の減少する傾向がみられた。

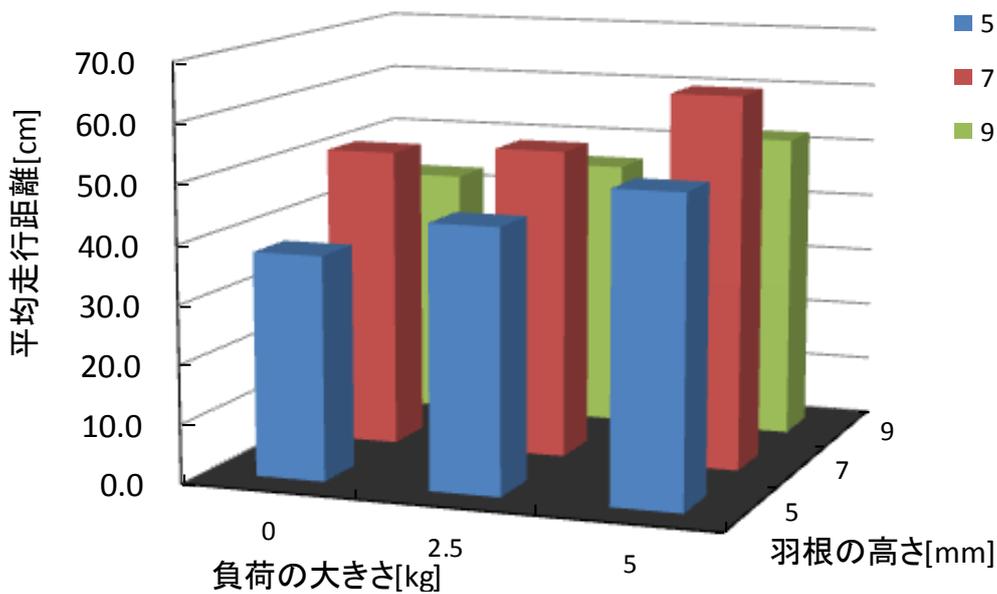


Fig.5-46 各条件における平均走行距離の比較（砂利 15~20mm）
 負荷の増加に伴い，平均走行距離の増加する傾向がみられた。

5.1.4.3 考察

各螺旋羽根の実験結果を総合的に比較すると，羽根の高さ 7mm で最も高い走行性能を持つ傾向がみられた．そこで，各材質の螺旋羽根の高さ 7mm で，平均速度および平均走行距離の比較を行った．平均速度は負荷 0.0kg のもの，平均走行距離は負荷 5.0kg のものを比較した．Fig.5-47, 5-48 に砂利 10~15mm の比較，Fig.5-49, 5-50 に砂利 15~20mm の比較を示す．ちなみに Fig.5-47~5-50 まででは一元分散分析で検定を行った．

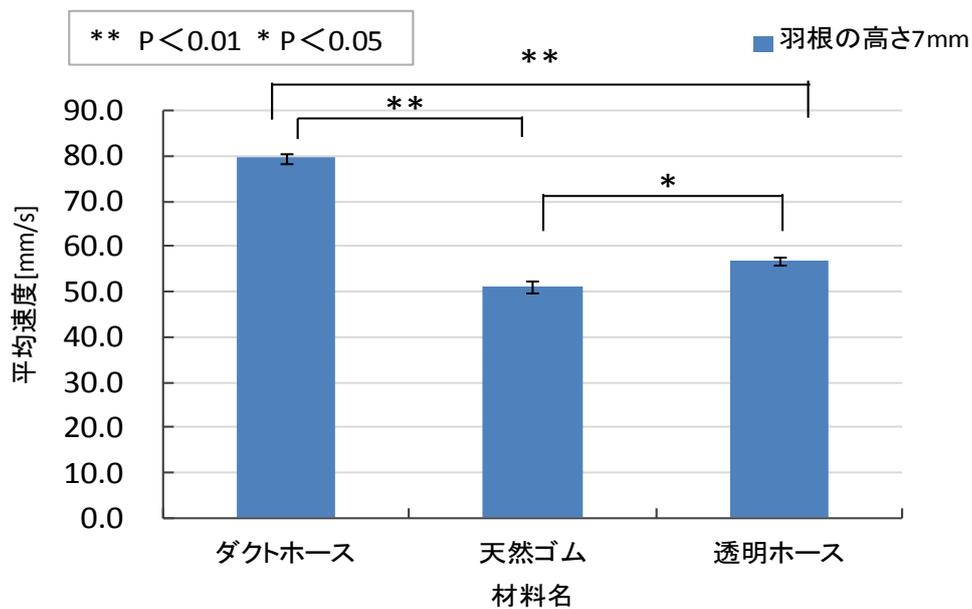


Fig.5-47 各材質の螺旋羽根の速度比較 (砂利 10~15mm)
材質の違いで平均速度に有意な差が確認できた.

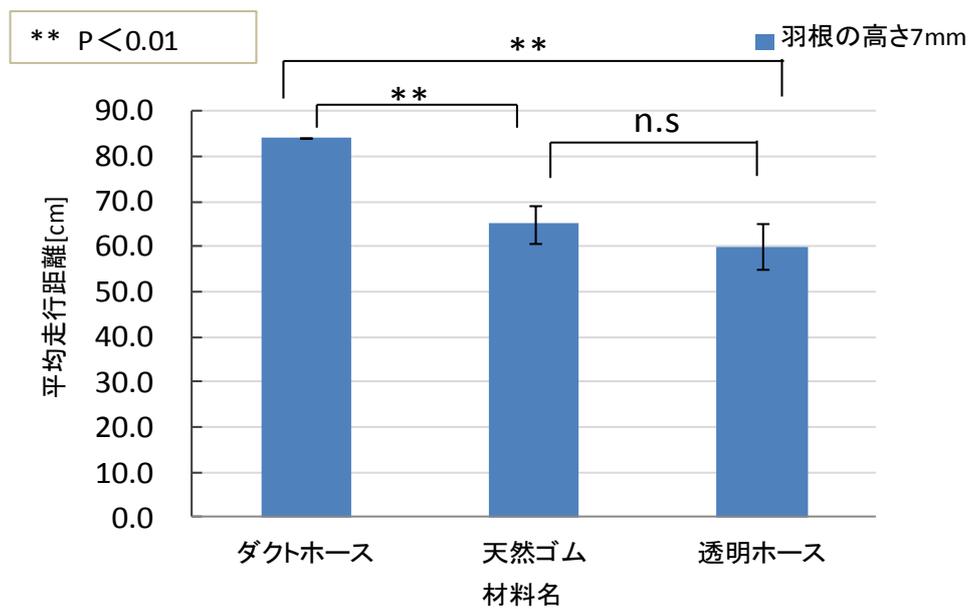


Fig.5-48 各材質の螺旋羽根の距離比較 (砂利 10~15mm)
材質の違いで平均走行距離に有意な差が確認できた.

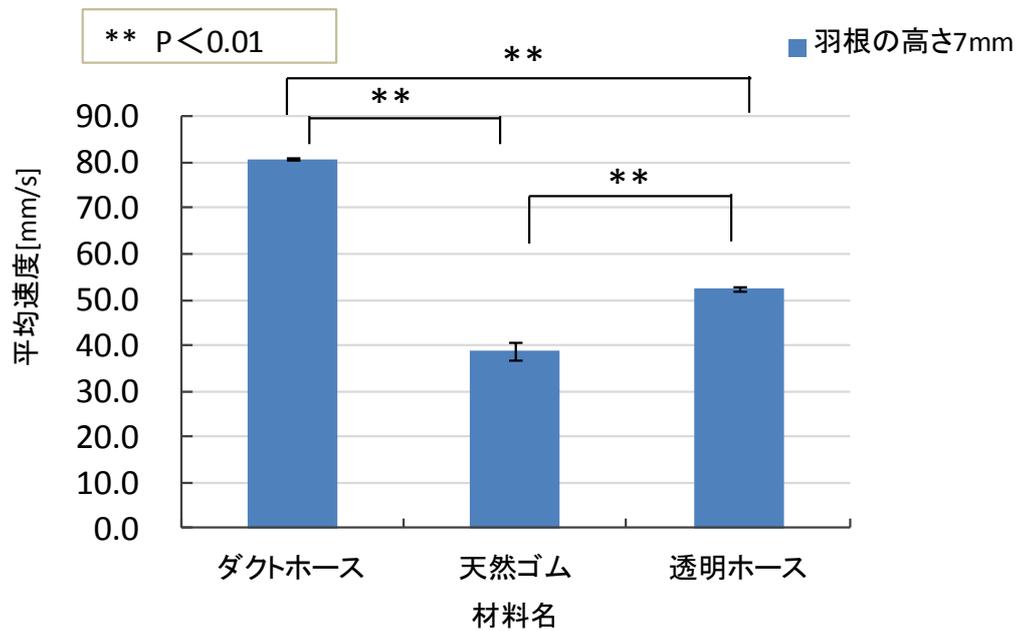


Fig.5-49 各材質の螺旋羽根の速度比較（砂利 15~20mm）
材質の違いで平均速度に有意な差が確認できた。

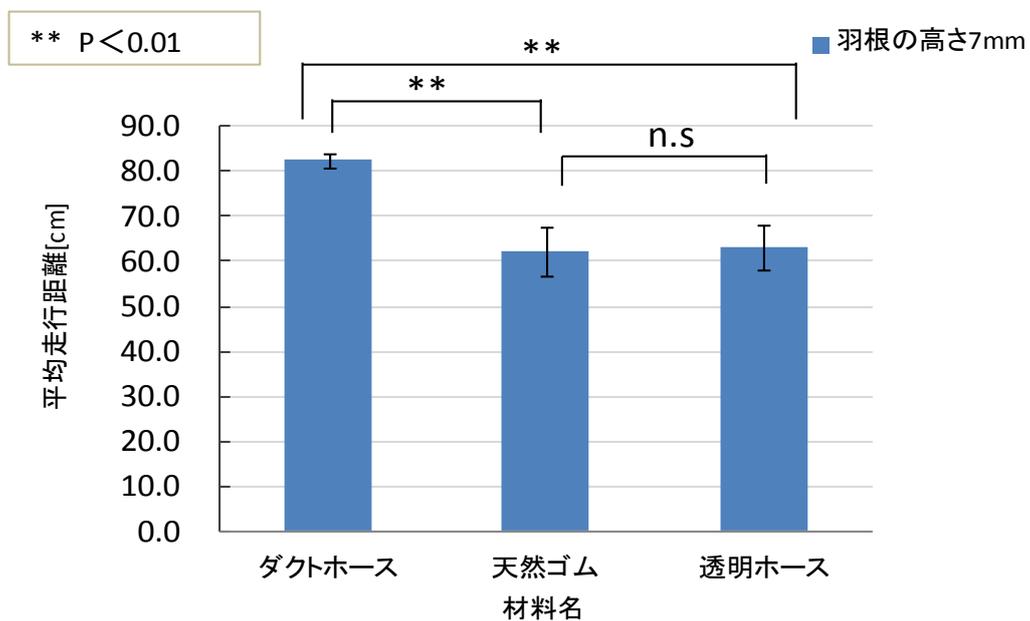


Fig.5-50 各材質の螺旋羽根の距離比較（砂利 15~20mm）
材質の違いで平均走行距離に有意な差が確認できた。

5.1.4.3.1. 平均速度についての考察

作製した各材質の螺旋羽根において、砂利 15~20mm 時の負荷 0.0kg と比較

し、天然ゴム以外のすべての条件で負荷 5.0kg において平均速度に有意な減少がみられた。また、模型にかける負荷（なし (0.0kg), 2.5kg, 5.0kg) の増加に伴い、速度が減少する傾向がみられた。これは模型の車重が重くなったのに対し、モータの出力に変化はないこと、接地面との摩擦力が上昇したことで速度の減少に繋がったと考える。各材質（ダクトホース（硬質ポリ塩化ビニル）、天然ゴム、透明ホース（ポリ塩化ビニル））の比較では、ダクトホース製螺旋羽根が最も速度が速い結果となった。また t-検定の結果でも、ダクトホース製螺旋羽根は、天然ゴム、透明ホース製と比較して有意に高い平均速度を示した。これは材料の摩擦係数の違いによるものだと考えられる。摩擦係数はそれぞれ天然ゴム：1.36、ダクトホース、透明ホース：0.45 である。摩擦による運動エネルギー損失の大きさは摩擦係数に関係するため、それに伴い速度の違いが生じたと考えられる。また、同じ摩擦係数であるダクトホースと透明ホースにも差がみられた。この原因としては、羽根部分の形状の違いによるものだと考えられる。この違いは羽根の先端が角であれば砂利を引っ掛け、路面を蹴って前進出来た場合でも、先端が丸いことで滑ったり砂利を逃がしてしまうことで走行時の障害となる。そのため速度に差が生じたと考えられる。

5.1.4.3.2. 平均走行距離についての考察

ダクトホース製螺旋羽根は、負荷 5.0kg の砂利 15～20mm での 4 トライアルを除いたすべてのトライアルで実験フィールド 840mm を走破した。故に模型に負荷をかけても走行距離に変化はみられなかった。ダクトホースは硬質ポリ塩化ビニルであり、摩擦係数が小さく、円滑性に優れている。そのため、模型に負荷をかけ、砂利と接地面の摩擦が上昇しても砂利上を円滑に走行することができ、走行距離に変化がみられなかったと考える。他の材質の螺旋羽根（天然ゴム、透明ホース）に関しては、模型に負荷をかける事で平均走行距離において有意な増加を示した。これは模型の車重が軽量なため、砂利という不整地において起伏部分の影響を受けやすいことが原因であると考えられる。そのため、模型に負荷を加え車重が増加することで車体の跳ね上がりを低減でき、走行距離の増加に繋がったのではないかと考える。各材質での比較では、平均速度と同様にダクトホース製螺旋羽根が最も高い走行距離を示した。天然ゴム製螺旋羽根との比較から、螺旋羽根部分の硬さの違いによるものと考えられる。天然ゴム、透明ホース製螺旋羽根は羽根部分が軟質であるため、路面の起伏や砂利の形状の影響を受けやすいことが原因になっていると考えられる。従って、接地面である螺旋羽根先端に使用する材料は硬質な素材が有効だと示唆された。また、透明ホースに関しては、上記「5.1.4.3.1. 平均速度についての考察」で述べた原因が、走行距離の低下をも招いたと考察する。

5.1.4.4 結論

模型に負荷をかけると平均速度は減少し、平均走行距離は増加するという結果がみられた。このことより車重を増加させることは有効であることが示された。

螺旋羽根の材質の比較より帯電防止透明ダクトホース（硬質ポリ塩化ビニル）で作製した螺旋羽根が最も高い走行性能を示した。この結果から、先端が硬質で、形状が正方形の螺旋羽根が砂利走破に有効であることが示された。

今実験の結果において螺旋羽根の高さ 7mm において、高い走行性能を示す傾向がみられた。しかし、砂利の粒径の違いや材質の違いによって異なる傾向がみられたり、有意差が生じない場合もあった。

5.1.5 螺旋羽根の材質と高さ、本体の荷重を変えた雪上走行実験

本実験では「5.1.4 螺旋羽根の材質と高さ、本体の荷重を変えた砂利走行実験」と同様に 4 回巻きに巻き数を固定した上で、雪上を実験フィールドとし、螺旋羽根の材質と羽根高さ、さらに負荷（=荷重）を変えた実験をおこなった。

5.1.5.1 実験方法

ブルーダ・ユニット縮尺模型の性能評価として、「4.3.2.1 直進運動の解析」においてキャリア・ユニットでも行った、雪上での直進運動実験を行った。実験フィールド（Fig.5-51）はキャリア・ユニット実験でも使用した汎用水槽（幅 450mm、長さ 1600mm、高さ 300mm）の中に雪を敷き詰めたもので構成している。雪の範囲は幅 450mm、長さ 840mm、厚さ 50.0mm である。幅は水槽の大きさに合わせ、長さは砂利上実験と同じ長さを設けた。雪の厚さは水槽の高さが 300mm しかないため、模型に重りを乗せた状態での高さとして螺旋羽根の高さを考慮し、50mm に仮定した。

雪上実験でも砂利上実験と同様に、模型に負荷（なし（0.0kg）、2.5kg、5.0kg、7.5kg、10kg）を掛け、走行時間と走行距離を測定した。測定時の指標は Fig.5-51 に見るように、赤テープで目印を設けた。走行速度は（フィールド 840mm/走破時間）より算出した。走破時間の測定は 5 回行い、ストップウォッチで測定した。走行距離はフィールド 840mm 間の走行した距離を測定した。走行距離の測定は 10 回行い、コースアウト、水槽壁面に接触した場合、何らかの理由で走行不能となった場合はその時点の塩ビ製螺旋ロッドの最後部を測定点として距離をメジャーで測定した。

実験結果の検定（t-検定含む）はマイクロソフトのエクセルを使用し、以下特に表記がない限り一元配置分散分析で検定を行った。また各指標の有意差検

定は対応のある t-検定を用いた。有意水準は 5%とした。



Fig.5-51 雪上実験フィールド
幅 450mm, 長さ 840mm, 雪の厚さ 50mm



Fig.5-52 実験における始点の定義
始点の目印に螺旋ロッド最後方部を合わせて、測定を行った。

5.1.5.2 実験結果

まず、本実験ではブルーダ・ユニット縮尺模型にかける負荷 (=荷重) を、なし (0.0kg), 2.5kg, 5.0kg, 7.5kg, 10kg としていたが、砂利上での実験同様 7.5kg, 10kg の負荷をかけた場合負荷が大き過ぎたため、模型の動作を行うことができなかった。そのため、模型にかける負荷 (なし (0.0kg), 2.5kg, 5.0kg) のみの結果を示す。

5.1.5.2.1. 帯電防止透明ダクトホース製螺旋羽根の実験結果

各条件 (螺旋羽根の高さ, 負荷の大きさ) における平均速度および平均走行距離を Table.5-25, 5-26, 5-27 に示す。また, Fig.5-53 に各螺旋羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の平均速度の比較を示し, Fig.5-54 に各条件 (螺旋

羽根の高さ（5mm, 7mm, 9mm）、負荷（なし（0.0kg）、2.5kg、5.0kg）における平均速度の変化を示した。

Table.5-25 負荷 0.0kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	64.8±0.6	65.4±1.7	64±0.3
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-26 負荷 2.5kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	60.0±1.1	58.7±0.9	60.8±1.5
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-27 負荷 5.0kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	55.5±0.3	54.3±0.5	55.0±0.5
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

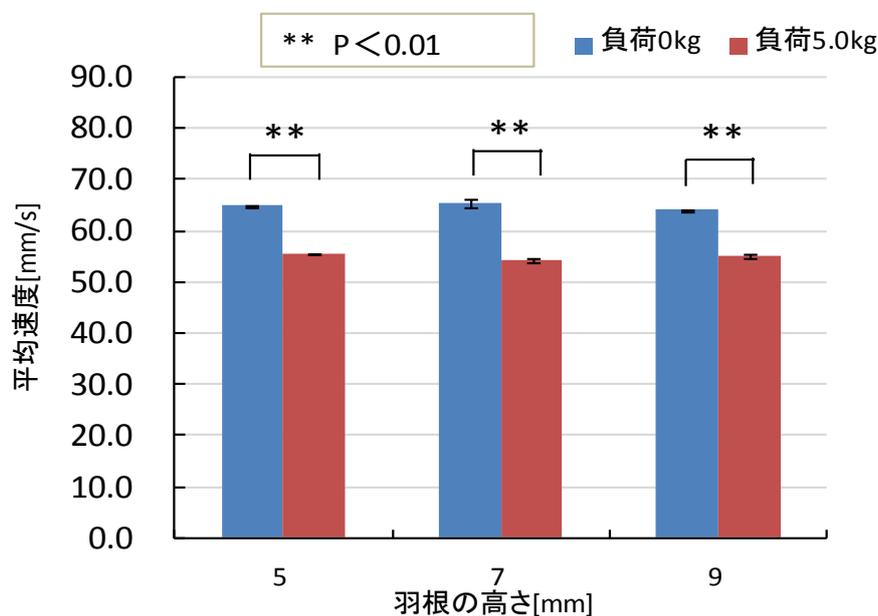


Fig.5-53 負荷の増加に伴う平均速度の変化
負荷の増加に伴い、平均速度の有意な減少がみられた。

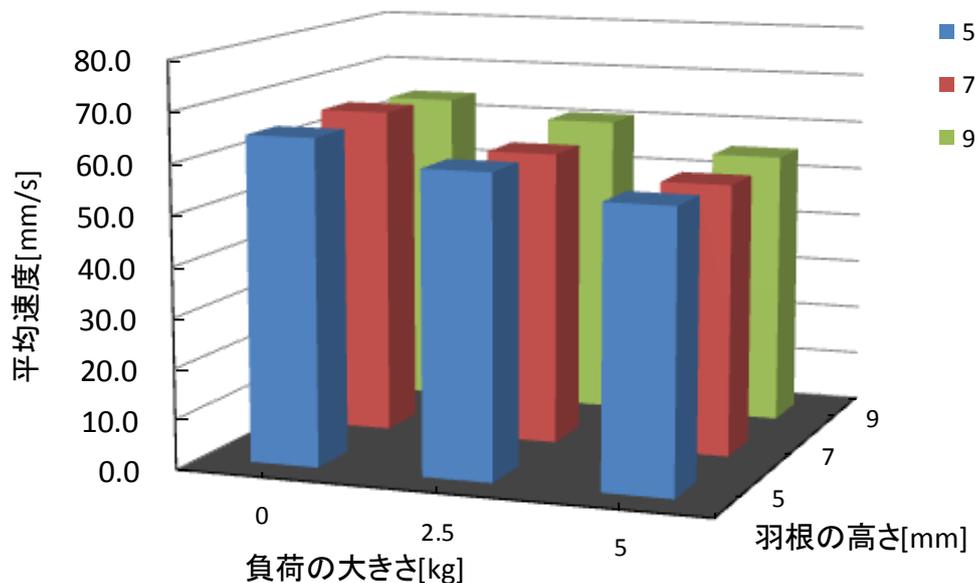


Fig.5-54 各条件における平均速度の比較
 負荷の増加に伴い、平均速度の減少する傾向がみられた

5.1.5.2.2. 天然ゴム製螺旋羽根の実験結果

各条件（螺旋羽根の高さ、負荷の大きさ）における平均速度および平均走行距離を Table.5-28, 5-29, 5-30 に示す。また、Fig.5-55 に各螺旋羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の平均速度の比較を示し、Fig.5-56 に各条件（螺旋羽根の高さ（5mm, 7mm, 9mm）、負荷（なし（0.0kg）、2.5kg, 5.0kg））における平均速度の変化を示した。

Table.5-28 負荷 0.0kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	58.9±1.5	59.5±1.5	59.8±0.9
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-29 負荷 2.5kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	57.7±0.4	57.1±0.5	57.7±0.5
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-30 負荷 5.0kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	51.9±0.7	52.3±1.4	51.8±0.9
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

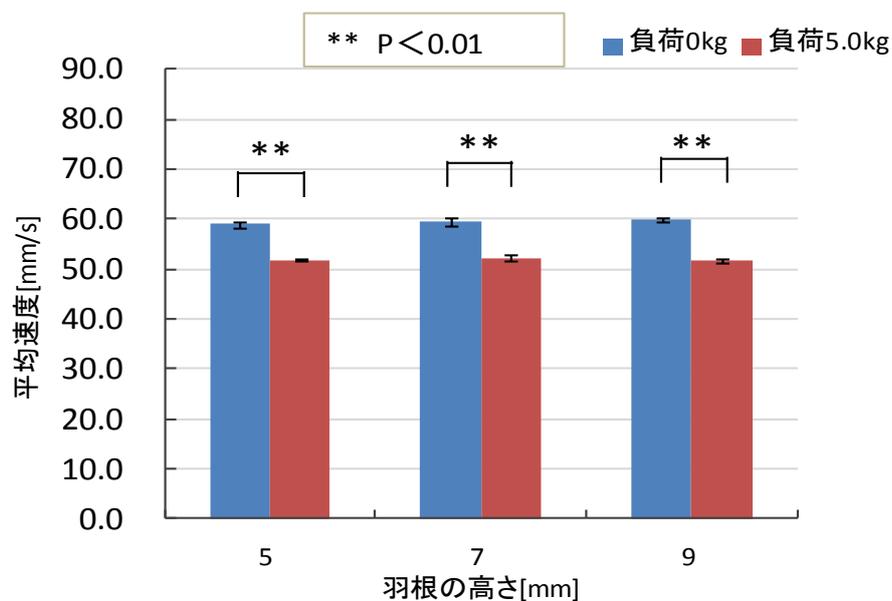


Fig.5-55 負荷の増加に伴う平均速度の変化
負荷の増加に伴い、平均速度の有意な減少がみられた。

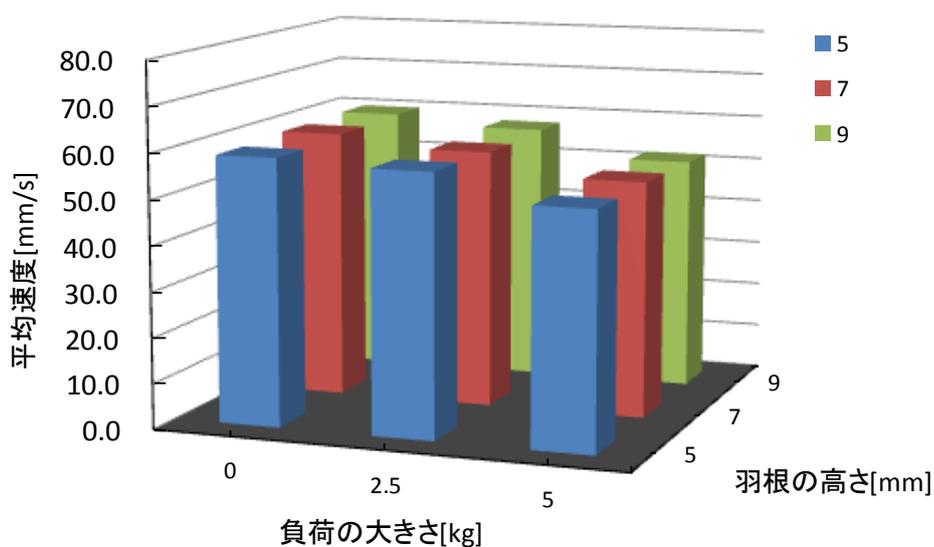


Fig.5-56 各条件における平均速度の比較
負荷の増加に伴い、平均速度の減少する傾向がみられた。

5.1.5.2.3. 透明ビニールホース製螺旋羽根の実験結果

各条件（螺旋羽根の高さ，負荷の大きさ）における平均速度および平均走行距離を Table.5-31, 5-32, 5-33 に示す．また，Fig.5-57 に各螺旋羽根の高さにおける負荷 0.0kg と 5.0kg の平均速度の比較を示し，Fig.5-58 に各条件（螺旋羽根の高さ（5mm, 7mm, 9mm），負荷（なし（0.0kg）, 2.5kg, 5.0kg））における平均速度の変化を示した．

Table.5-31 負荷 0.0kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	63.5±2.8	63.9±1.9	63.9±1.2
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-32 負荷 2.5kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	62.7±0.8	62.6±1.0	62.8±1.4
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

Table.5-33 負荷 5.0kg における実験結果

羽根の高さ[mm]	5	7	9
平均速度[mm/s]	58.8±0.3	58.7±0.6	58.6±0.4
平均走行距離[cm]	84.0±0.0	84.0±0.0	84.0±0.0

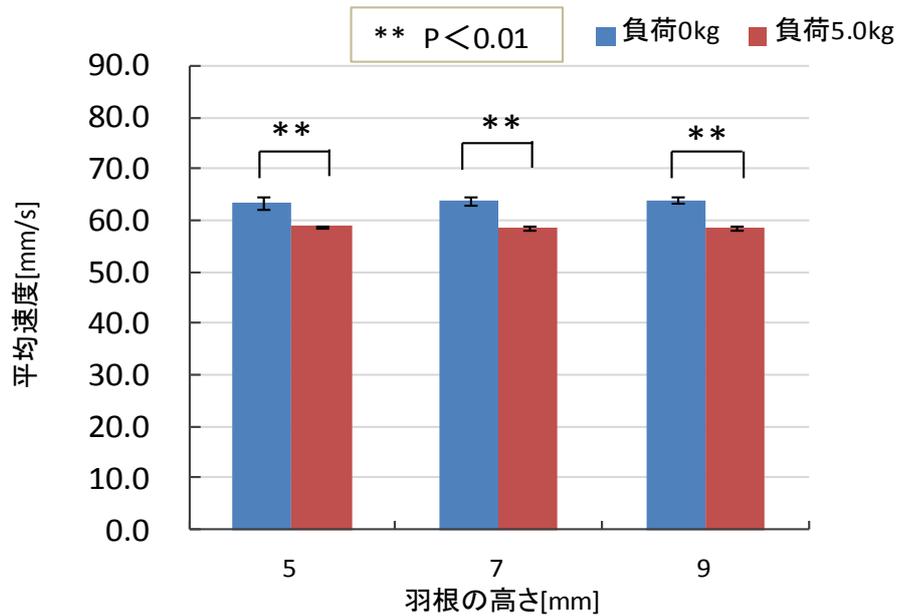


Fig.5-57 負荷の増加に伴う平均速度の変化
負荷の増加に伴い、平均速度の有意な減少がみられた。

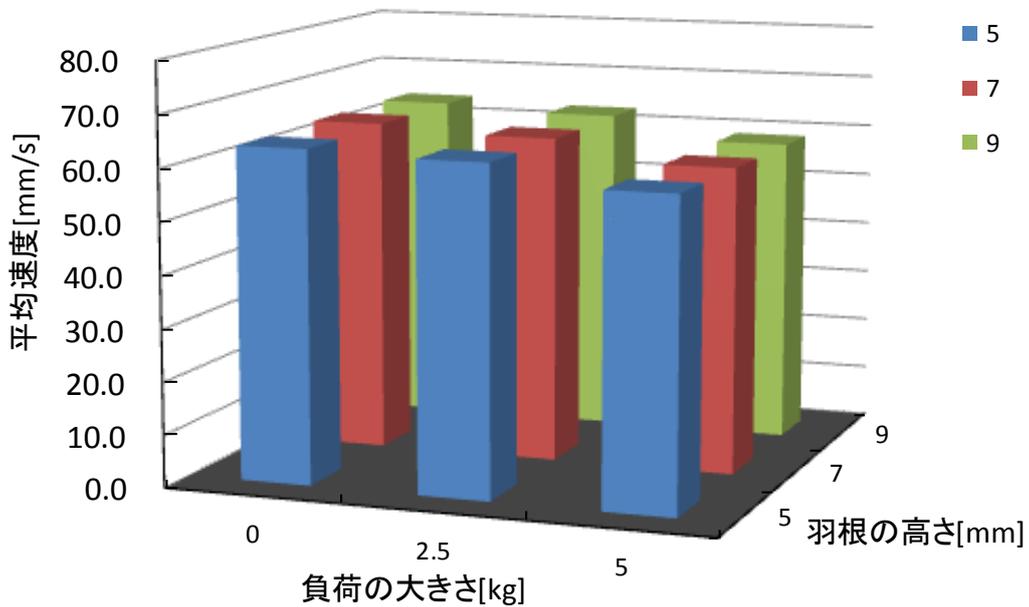


Fig.5-58 各条件における平均速度の比較
負荷の増加に伴い、平均速度の減少する傾向がみられた。

5.1.5.3 考察

各材質の螺旋羽根の平均速度および平均走行距離の比較を行った。比較は各

螺旋ロッドにおいて最も高い走行性能の傾向がみられた羽根の高さ 7mm, 負荷 0.0kg のもので行った. Fig.5-59 に平均速度の比較を, Fig.5-60 に平均走行距離の比較を示す. ちなみに Fig.5-59, 5-60 は一元分散分析で検定を行った.

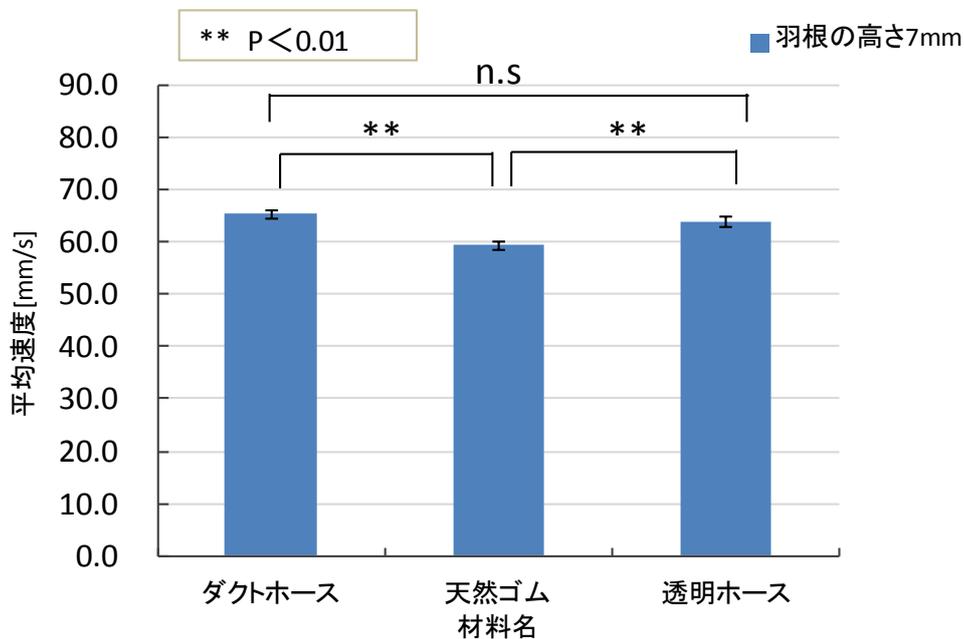


Fig.5-59 各材質の螺旋羽根における平均速度の比較
スクリューの違いで平均速度に有意な差がみられた.

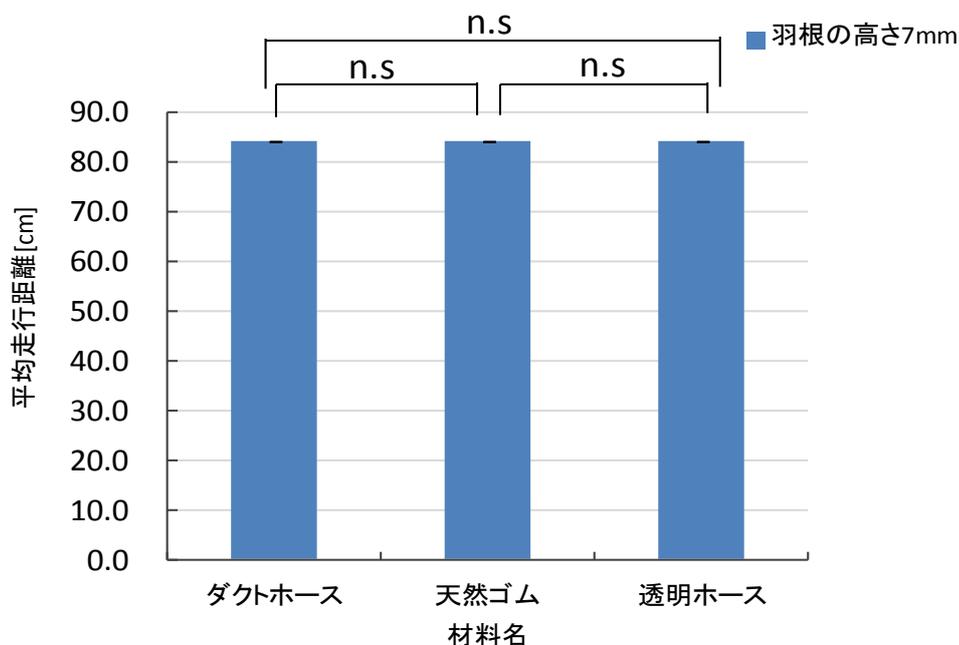


Fig.5-60 各材質の螺旋羽根における平均走行距離の比較
平均走行距離に有意な差はみられなかった.

まず、平均速度の結果について述べる。平均速度は模型に負荷をかけることで速度の有意な減少がみられた。また、各螺旋ロッドで負荷（なし（0.0kg）、2.5kg、5.0kg）を増加させる毎に、速度の減少する傾向がみられた。各材質の螺旋羽根の比較では、天然ゴム製螺旋羽根と比較したところダクトホース、透明ホース製に比して有意に高かった。これらの考察については砂利上実験において「5.1.4.3.1. 平均速度についての考察」で述べたと同様の理由であると考えられる。

次に、平均走行距離の結果について述べる。平均走行距離は各条件（スクリュウに使用した材料の違い、負荷の大きさ、羽根の高さ）とも高い走破性を示し、結果条件の違いによる変化はみられなかった。砂利上走行では起伏部分が存在していることや砂利をかき分けながら走行しているのに対し、雪上では起伏面がないことや起伏部分があった場合でも路面を削りながら走行できる。そのため、アルキメデス螺旋駆動体にとって理想的な走行環境であったと考えられる。

5.1.5.4 結論

今回の実験により、アルキメデス螺旋駆動は雪や砂、泥など螺旋羽根が路面に食い込みやすいフィールドでの走行に適しており、螺旋ロッドの形状や材質に因らず走行できる可能性が示された。

5.1.6 塩ビ製ロッド実験のまとめ

実験結果において螺旋羽根の高さに着目すると、螺旋羽根高さ 7mm で走行性能が最も高くなる傾向が多くみられたが、有意差はなく、砂利の粒径の違いや材料の違いで異なる傾向が見られた。アルキメデス螺旋駆動は羽根部分だけでなく、スクリュウの羽根がないロッド部分も利用し走行していると仮定した場合、実験に用いた砂利の粒径に対して、螺旋羽根の高さ 5mm では羽根部分が低過ぎ、螺旋羽根の高さ 9mm では高過ぎたと考えられる。この結果は今後より大きな粒径の砂利や瓦礫で実験した際、螺旋羽根の材質や路面環境により有効な羽根の高さが異なる可能性を示唆した。どちらにせよ砂利上・雪上実験において螺旋羽根高さは材質や負荷に比して影響が軽微であったと言える。

次に螺旋羽根材質の違いについてだが、今回作製した螺旋ロッドの中で最も走行性能に優れていたのは、帯電防止透明ダクトホースで作製した螺旋羽根である。この材質の螺旋羽根の特徴としては、①羽根部分が硬質、②羽根部分の形状が正方形の2つである。アルキメデス螺旋駆動機構は砂利をかき分けながら走行している。そのため、砂利上の走行には起伏部分の影響を受けにくい正

方型で硬質な螺旋羽根にすることが有効と考える。

次に負荷についてだが、7.5kg以上の負荷はモータの出力に影響し、走行に支障をきたした。ただし5.0kgまでの負荷であれば、走行速度に反比例し走行距離が向上することを示した。これは路面の起伏に対し、車体の跳ね上がりが減ることで、路面との摩擦力を上昇させることが出来たことが原因であると推測する。

本実験では螺旋羽根の厚さ、平面度、羽根先端の温度、表面粗さ、擦る方向などの解析は行っていない。しかし、これらの要因は今後の瓦礫踏破実験を行う上でも重要な要素となる。今後検討するべきものだと考える。

また、今回の実験に使用したロッドの条件では、コンクリートやビニル床タイル（研究室内の床）など硬質な平面に対して走行することができないという問題を改善することはできなかった。この問題も上記の未解析の要因同様、今後検討していかなければならない問題である。

5.2 アルミ製ロッドを使用した走行実験

4~6回巻き螺旋羽根の間隔が異なる3種のアルミ製ロッドを用意し、悪路走破実験を行った。実験フィールドとして、人命救助ロボット、そしてブルーダ・ユニットが活躍しなければならない瓦礫のフィールドを含めた、砂利、瓦礫モデル、土の3種類を用意した。各フィールドにおいて最も走破性の高いアルミ製螺旋羽根の形状を検証した^{5-16) 5-17)}。

5.2.1 ブルーダ・ユニット縮尺模型第2号及びアルミロッドの概要

塩ビ製螺旋ロッド実験に使用したブルーダ・ユニット縮尺模型1号機（以降B1機）を他実験に使用していた都合上、ブルーダ・ユニットの縮尺模型をもう一つ作製した（Fig.5-61, 5-62）。これは瓦礫を乗り越えるためにより大きなモータ出力が必要との観点からの措置でもある。

今回作成したブルーダ・ユニット縮尺模型2号機（以降B2機）の本体は、前回と同じアルミ製である。しかしB1機初期のロッドのバタつきの一因となったロッドの軸受部の精度を向上させるため、加工しやすさと強度を併せ持ったPOM（ポリアセタール）樹脂をNC旋盤で加工したものを使用した。（Table.5-34）

また、瓦礫実験を想定し、軸受部に瓦礫が引っかかることを避けるべく、左右の軸受前方に木製の排障器を装備し、瓦礫が軸受とロッドの隙間に入ってスタックすることを避けるべく、樹脂製のガードを装備した。B1機とB2機の違いをTable.5-35に示す。

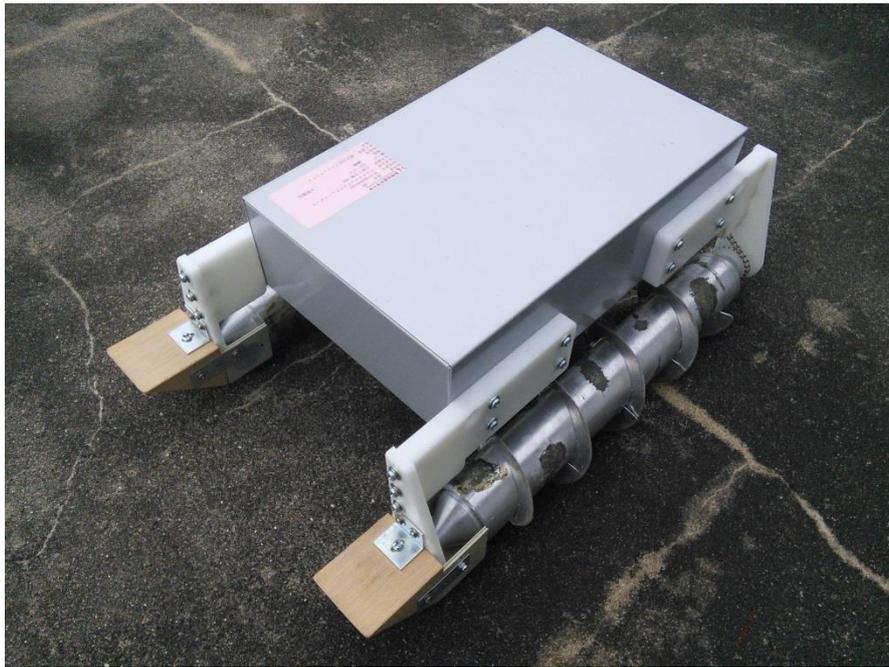


Fig.5-61 ブルーダ・ユニット縮尺模型 2号機 (B2) の概観

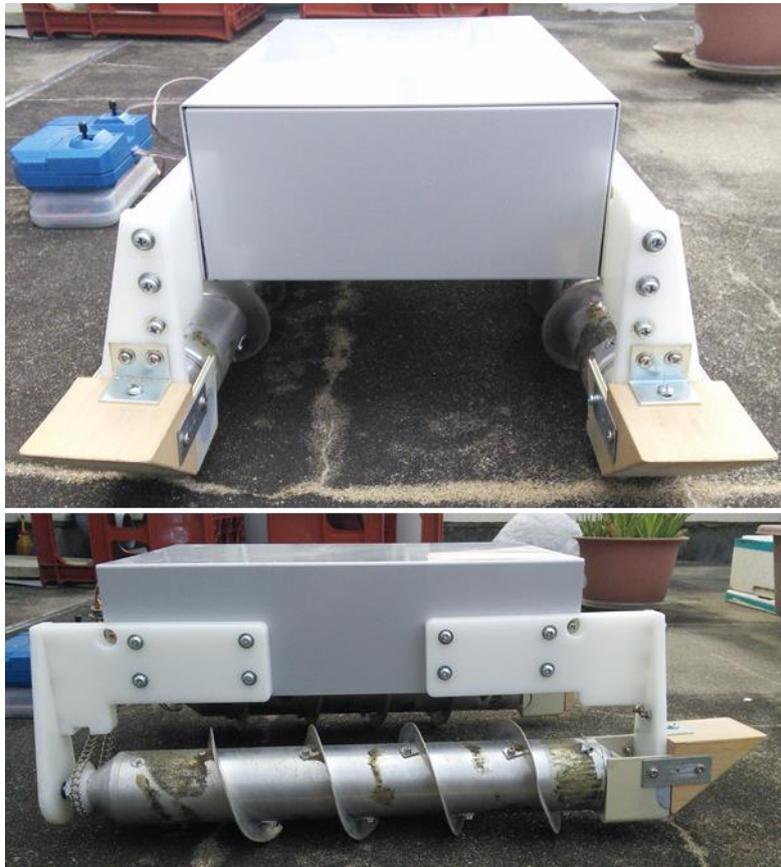


Fig.5-62 B2 の正面図 (上) と左側面図 (下)

Table.5-34 ブルーダ・ユニット縮尺模型第2号 (B2)

サイズ	306W × 450D × 176H [mm]		
重量	5,365 [g]		
材質	外装: アルミニウム、ポリアセタール (POM) ロッド: アルミニウム		
動力	タミヤ ギヤードモータ540K75 × 2個		
	ギヤ比	1:75	
	トルク	12.0kgf・cm × 2 (DC7.2V最大効率時)	
	回転数	221rpm (無負荷回転数)	
バッテリー	Ni-Cd、1700mAh、7.2V		
ロッド回転数	41.3rpm (無負荷時実測値)		
速度 [mm/s] (無負荷時理論値)	4回巻き	5回巻き	6回巻き
	43.5	34.0	29.8

Table.5-35 新旧ブルーダ・ユニット縮尺模型のスペック比較

機体名		B-1機	B-2機
サイズ [mm]	幅	290	306
	奥行	345	450
	高さ	140	176
機体重量[g]		2,330	5,365
外装の主な材質		アルミ	アルミ、POM
動力 (ギヤードモータ)	タミヤ製 380K150 × 2基		タミヤ製 540K75 × 2基
	ギヤ比	1/150	ギヤ比 1/75
	トルク	10.0kgcm × 2	トルク 12.0kgcm × 2
	回転数	121rpm (無負荷時)	回転数 221rpm (無負荷時)
バッテリー		Ni-Cd、1700mAh、7.2V	Ni-MH, 3900[mAh], 7.2[V]



Fig.5-63 B2機の背面図（左）とリモコンボックス（右）

ちなみにモータからロッドへの動力の伝達はB1機同様ラダーチェーンで行った (Fig.5-63左). また, コントローラはタミヤ製4chリモコンボックス (Tam-106) を使用した (Fig.5-63右). これはあくまでも左右各モータの正転・逆転・停止の制御のみであり, スピードコントロールは出来ない.

螺旋羽根は, ギア部や軸受部, 径が異なる部位を除いた有効長300mmの範囲内で, それぞれ4回, 5回, 6回螺旋羽根を巻いたものを左右で面对称なものを2本で1対として計3対用意した. (Fig.5-64, Table.5-36)

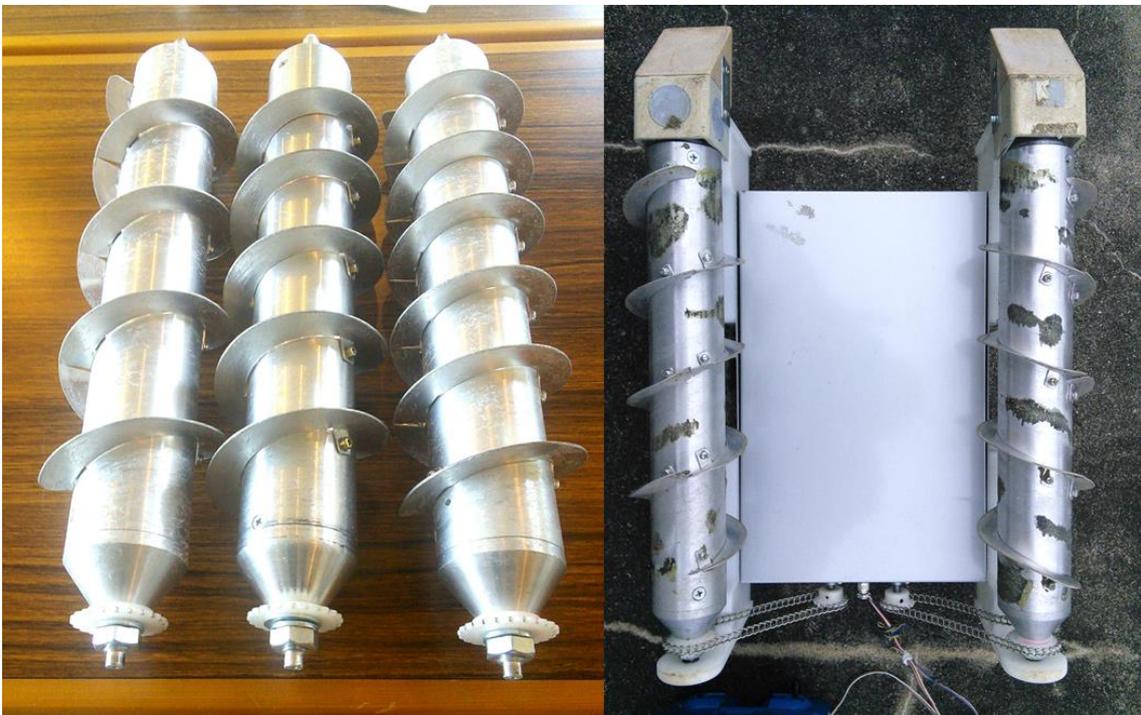


Fig.5-64 3種の螺旋ロッド（左）とロッド装着時の下面図（右）

Table.5-36 螺旋ロッドのスペック

巻き数	4回巻き	5回巻き	6回巻き
サイズ[mm]	48(74)*φ×377L**		
螺旋羽根の高さと厚さ[mm]	13H×1T		
素材	アルミ		
螺旋羽根の間隔[mm]	63.3	49.4	43.3
リード角	22.8°	18.1°	16.0°

*括弧内は 13mm の螺旋羽根を含んだ直径

**ギア部を含んだ長さ

螺旋羽根の高さが 13mm である根拠はない。本実験において羽根高さを変えた実験を行う予定があり、ロッドの製作依頼時に可能であれば 7, 10, 13mm で実験したいと伝えた上で 7mm のものを発注した。しかし誤って 13mm が試作品として出来上がり、その後の時間的、資金的な制約からこの羽根高さで固定してしまったのが理由である。

5.2.2 砂利走行予備実験

モータの出力や螺旋ロッドの材質など多くの仕様が変更になったため、その性能を確認する目的で、これまで実験に使用し、一定のデータ蓄積がある砂利上での走行をもって予備実験とした。

5.2.2.1 実験方法

実験フィールドには木板（合板、900W×1200D×9T [mm]）を使用した（Fig.5-65）。走行する砂利を敷いた面積は同じだが、それを敷く木板がこれまでの塩ビロッド実験で使用してきたものの倍の面積とした。前回までの実験で走破し切った際に模型の前方がフィールドから落ち、その落差分（9mm+砂利）位置エネルギーが距離や速度測定の誤差になっていた懸念があった。その可能性を排除するため、840mm 走行し切っても木板から落ちないフィールドを用意した。

作製したアルミ製螺旋ロッドに対して、走行時間と走行距離をそれぞれ測定した。上記のフィールドに粒径 10~20mm の砂利 15kg 分量を、540W×940D の範囲で砂利を均一に敷き詰めた。測定時の始点終点の指標は油性マジックペ

ンで木板に目印を設けた (Fig.5-66). 走行距離はフィールド 840mm 間の走行できた距離を測定した. 走行距離の測定は 10 回行い, 螺旋ロッドの最後方を基準として測定点 d の距離をメジャーで測定した (Fig.5-67). Fig.5-66 右は実験機が実験フィールドから外れコースアウトした際の測定例である. 走行速度は(フィールド 420mm/走行時間)より算出した. 走破時間の測定は 5 回行い, ストップウォッチで測定した. 実験結果の検定 (t-検定含む) はマイクロソフトのエクセルを使用し, 以下特に表記がない限り一元配置分散分析で検定を行った. また各指標の有意差検定は対応のある t-検定を用いた. 有意水準は 5% とした.

また, 以降のグラフに括弧書きのインフォメーション, 例えば“(砂利/鈍/縦)”と記入するが, それぞれ(実験フィールド/螺旋羽根の鈍鋭/走行方向)を示す. 後のグラフと比較するためである.



Fig.5-65 砂利実験フィールド



Fig.5-66 始点（左）と終点（右）の定義



Fig.5-67 測定点 d の定義

コントローラによる操舵は行わず，840mm の走破以外は，フィールドから脱落，30 秒以上の前進停止時の測定点 d の距離を測定した。

5.2.2.2 実験結果

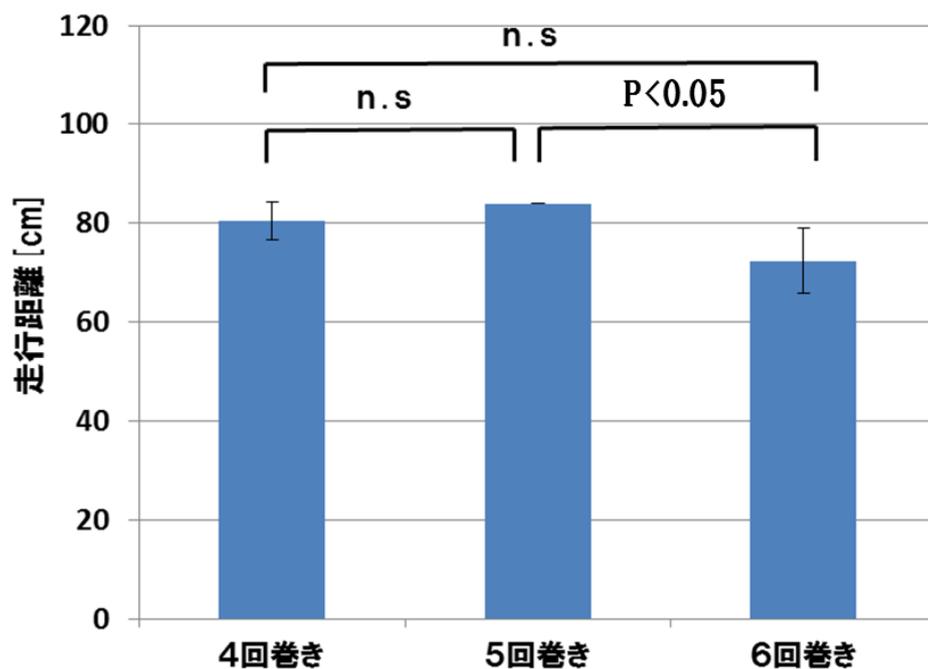


Fig.5-68 予備実験結果 平均走行距離 (砂利/鈍/縦)

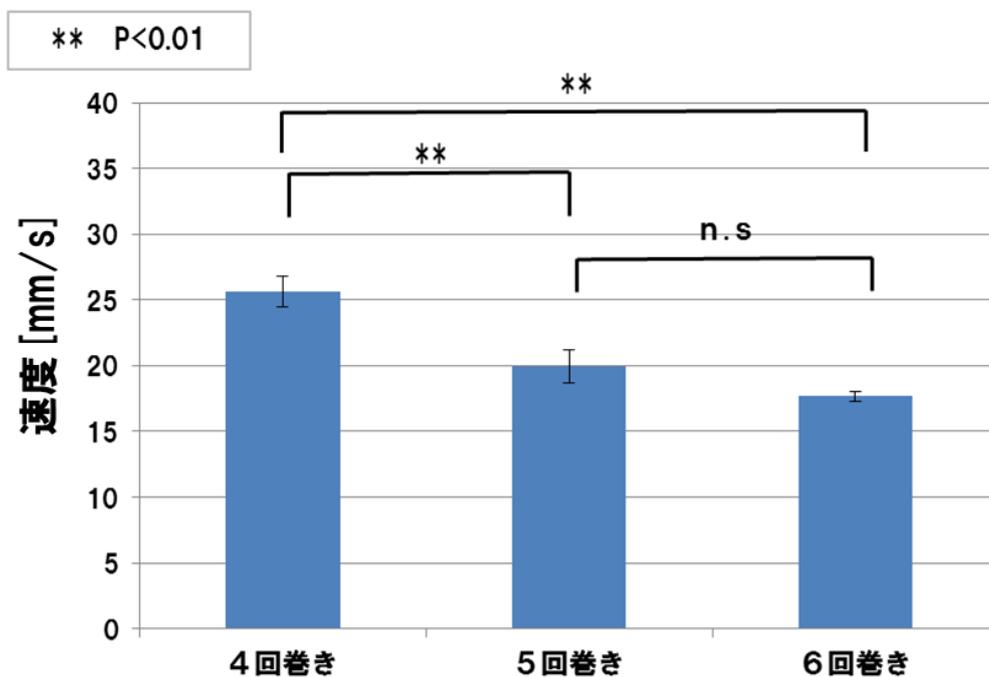


Fig.5-69 予備実験結果 平均速度 (砂利/鈍/縦)

走行距離に関しては 5-6 回巻き間にのみ有意差が生じたが、総じて高い走行距離を示した (Fig.5-68)。また走行速度では、巻き数が増えるに従い平均速度は減少した。また 44 回巻きのみが有意に高い数値を示した (Fig.5-69)。

5.2.2.3 考察

平均走行距離に関しては、螺旋羽根の巻き数を変えた前駆実験である「5.1 塩ビ製ロッドを使用した走行実験」においては、走破率で表していたため、正確な比較ではないが、双方とも高い走行距離、走破性を示した。砂利フィールドがアルキメデス螺旋駆動体の走行に適した路面であることを示している。

また、平均速度に関しても「5.1.3.2 実験結果」の Fig.5-9, 5-10 と同様に螺旋羽根の巻き数に応じて速度が減少している。B1 機と同様の結果を出せる性能をもった機体である事が示された。

5.2.2.4 結論

平均走行距離、平均速度双方の結果から判断するに、B2 機は前駆実験の B1 機と同様な結果を示すことが出来たことで、製造過程で大きな欠陥を抱えた機体ではないことが示され、瓦礫踏破可能な機体となるべく以降の実験を開始するに至った。

5.2.3 瓦礫走行実験開始時に生じた問題とその対処

塩ビ製ロッドを用いた先行実験同様、砂利上では問題なく走行し、計測も行った。次の段階として後述の「5.2.4.1 実験方法」で示す瓦礫モデル上での走行を行ったところ、予想に反し、4~6 回巻き全ての螺旋ロッドで一切前進することが出来なかった。所見としては、平地同様瓦礫上の抵抗が低い足場に乗った際に車体がバタついていたことから、小刻みに車体が浮くことで螺旋ロッドが空転し、推進力を逃がしてしまっているように見て取れた。本ロボットが目的とする運用フィールドが、倒壊した平屋建て日本家屋の屋内瓦礫であるため、目的を果たすために改良を施した。

いくつかのトライアル&エラーを繰り返した末、螺旋羽根先端をグラインダで研磨することで、瓦礫を乗り越えることは出来ないものの、改良前より高い前進力で瓦礫を押し分けられるようになり、計測可能な程度に前進できるようになった。この改良は螺旋羽根の先端が 1mm 厚であるものを、進行方向側の羽根高さ 2mm 分をグラインダで研磨することで先鋭化し、羽根先端の厚さ 0.2~0.5mm にしたものである (Fig.5-70 以降の実験は特に明記しない限りこの厚さの螺旋羽根を使用したものである)。

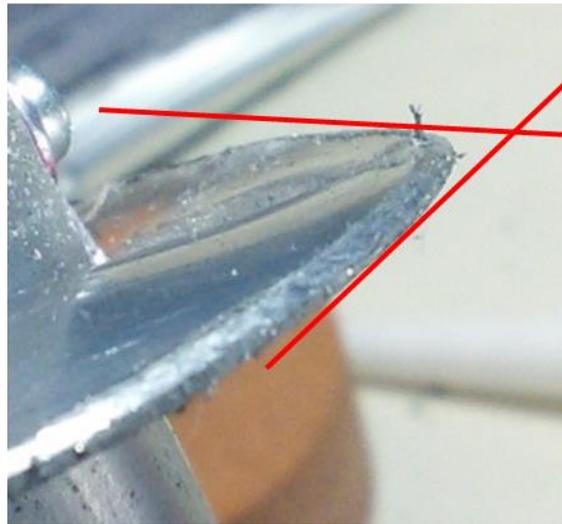


Fig.5-70 先鋭化させた螺旋羽根先端

5.2.4 瓦礫モデル走行実験

本実験フィールドが、ブルーダ・ユニットの運用フィールドに最も近似したフィールドであり、人命救助ロボット研究初の瓦礫走行実験でもある。

5.2.4.1 実験方法

「5.2.2 砂利走行予備実験」の実験フィールド及び砂利の上に、レスコンの規定範囲内⁵⁻¹⁸⁾で屋内瓦礫を想定しアレンジを加えた（網状瓦礫の排除，棒状瓦礫の減少，柵・机モデルの追加など）屋内瓦礫モデル約 2kg をランダムに配置した（Fig.5-71）。瓦礫に 30 秒間えた場合のみコントローラによる操舵で左右に平行移動し，移動した先でさらに 30 秒間動けない場合，またコースアウト，840mm の走破，瓦礫が挟まるなどのトラブルが生じた時点の螺旋ロッド最後部を測定点 d とした。測定方法は砂利走行予備実験時の「5.2.2.1 実験方法」に準拠しているが，速度については平均走行距離が短い為に計測不能であった。



Fig.5-71 瓦礫モデル実験フィールド概観
机と棚のモデルは自宅の実物を計測し，1/6 サイズにした．

5.2.4.2 実験結果

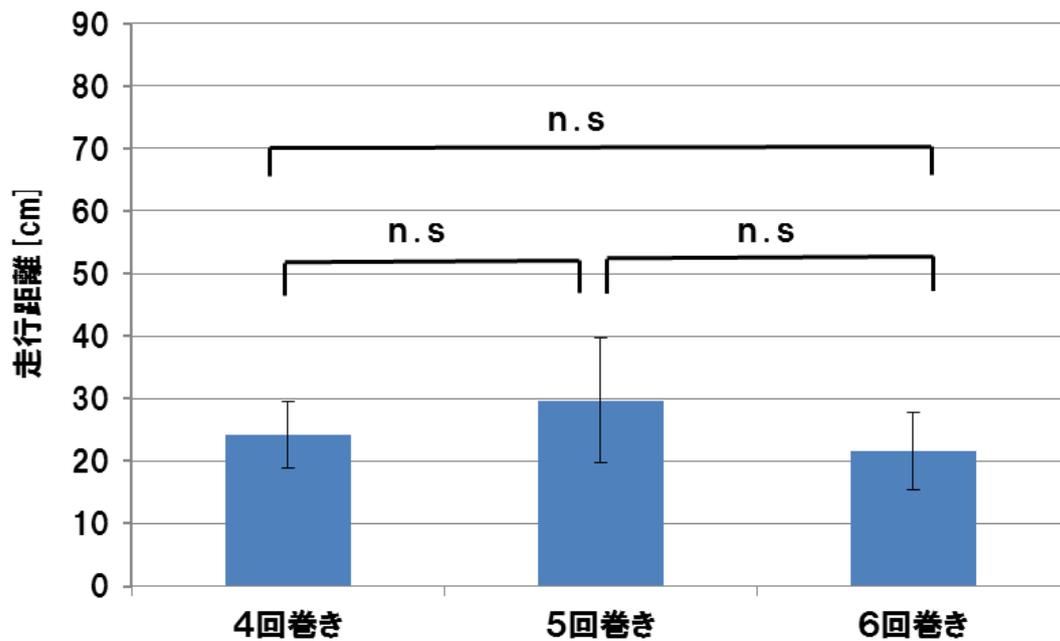


Fig.5-72 瓦礫モデル実験結果 平均走行距離 (瓦礫／鋭／縦)

5回巻きが最も高い走行距離を示したが、有意差はなかった。(Fig.5-72)

5.2.4.3 考察

瓦礫上においても一定距離前進出来た事で実験が可能になったが、その平均走行距離は砂利に比して1/3程度と短くなった。

また、全てのトライアルにおいて、瓦礫を押しのけることは出来ても乗り越えることは一度もできず、瓦礫上での推進力不足が見て取れた。(Fig.5-73)

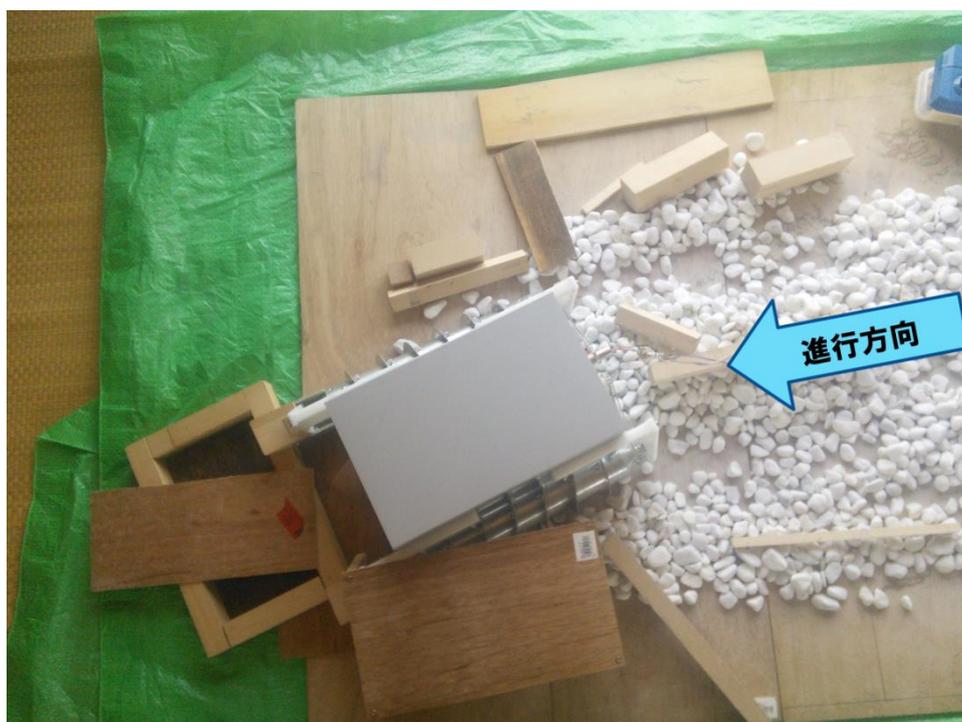


Fig.5-73 瓦礫モデル走行実験後の写真

全トライアル中1回だけ840mm走破した際の様子。
瓦礫を乗り越えず、押しのけている状況が観察された。

5.2.4.4 結論

螺旋羽根先端の先鋭化により、計測可能な程度に前進するようになった。しかし砂利を足場にしないと前進できない現状を考慮すると、この形態のまま使用するにはアルキメデス螺旋駆動体は瓦礫走行に不向きであると判断する。

5.2.5 鋭利な螺旋羽根での砂利走行実験

螺旋羽根先端の先鋭化が、砂利走行に影響あるか否かを検証するため、砂利走行実験を行い、1mm厚の実験結果との比較を行った。

ちなみに、以降は 1mm 厚の加工前螺旋羽根を“鈍”，先鋭化したものを“鋭”と表記する。

5.2.5.1 実験方法

実験フィールドおよび条件は、前回の実験と比較するべく砂利走行予備実験の『5.2.2.1 実験方法』に準拠した。検定は、新旧比のグラフ (Fig.5-76, 5-77) において二元配置分散分析で検定を行った。

5.2.5.2 実験結果

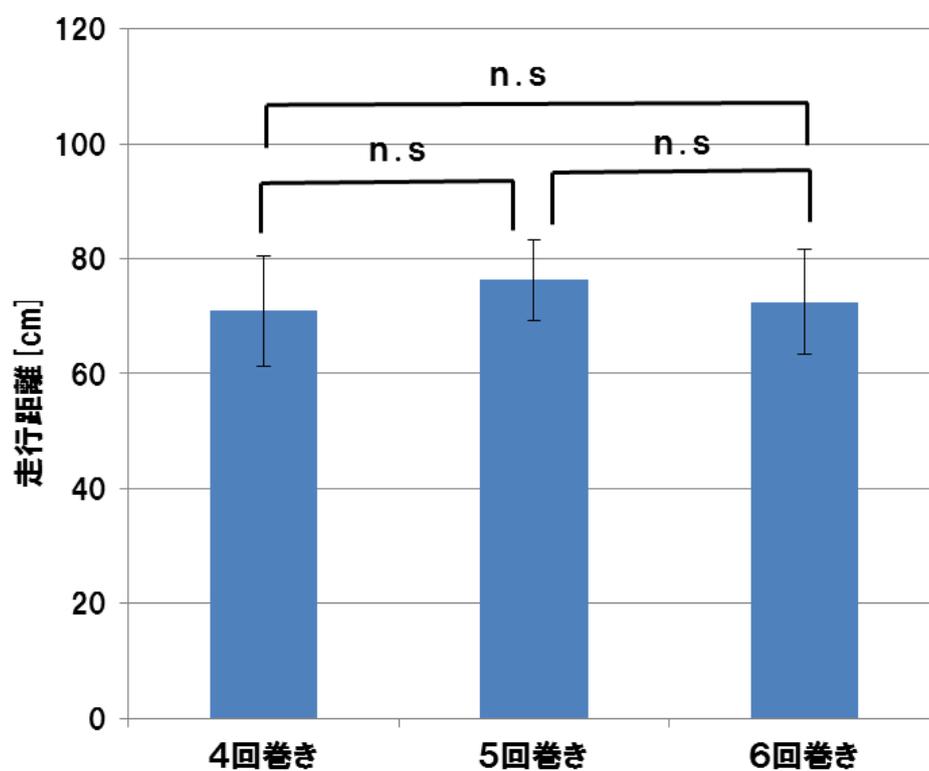


Fig.5-74 砂利走行実験結果 平均走行距離 (砂利／鋭／縦)

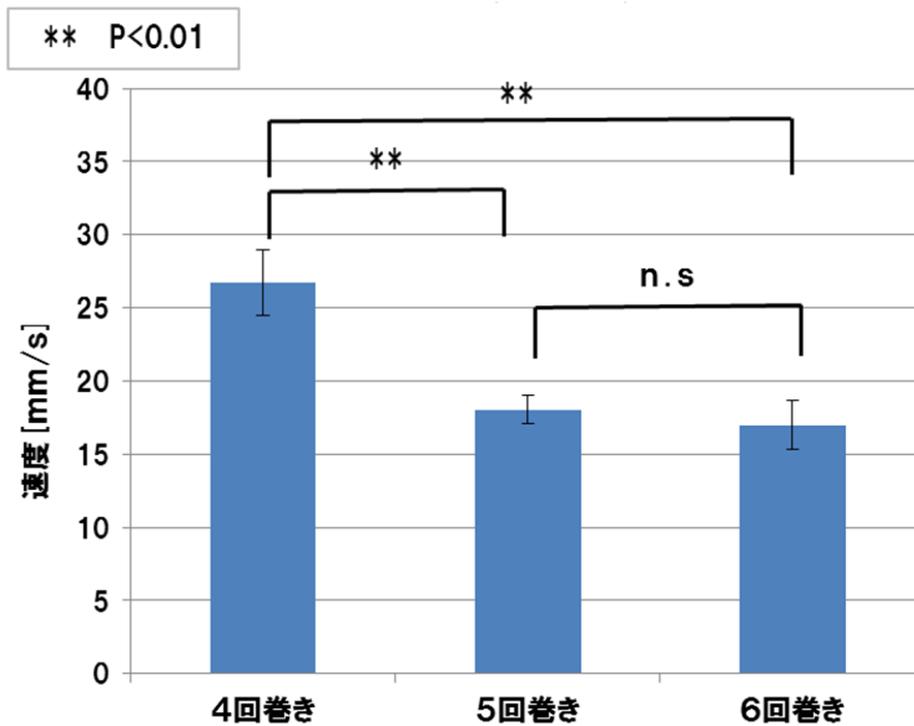


Fig.5-75 砂利走行実験結果 平均速度 (砂利／鋭／縦)

走行距離に関して、5回巻きが最も高い平均走行距離を示したが、巻き数の違いでの有意差はなかった (Fig.5-74). 速度に関しては、巻き数に応じて速度は下がっているが、4回巻きのみ有意に高い結果となった (Fig.5-75).

5.2.5.3 考察

螺旋羽根先端の鈍／鋭の比較を行ったが、平均走行距離に関しては鋭のロッドですべての巻き数で平均走行距離が低下しているが、平均速度共に有意差はなかった. (Fig.5-76, 5-77)

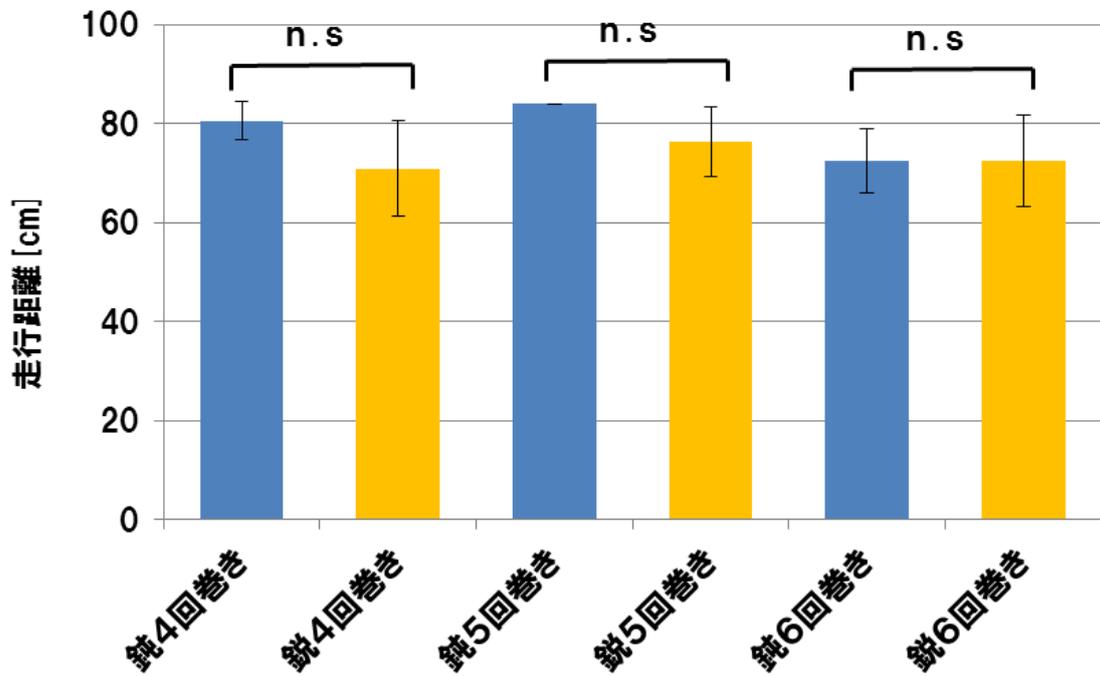


Fig.5-76 砂利走行実験結果 鈍／鋭比較 平均走行距離 (砂利／鋭／縦)

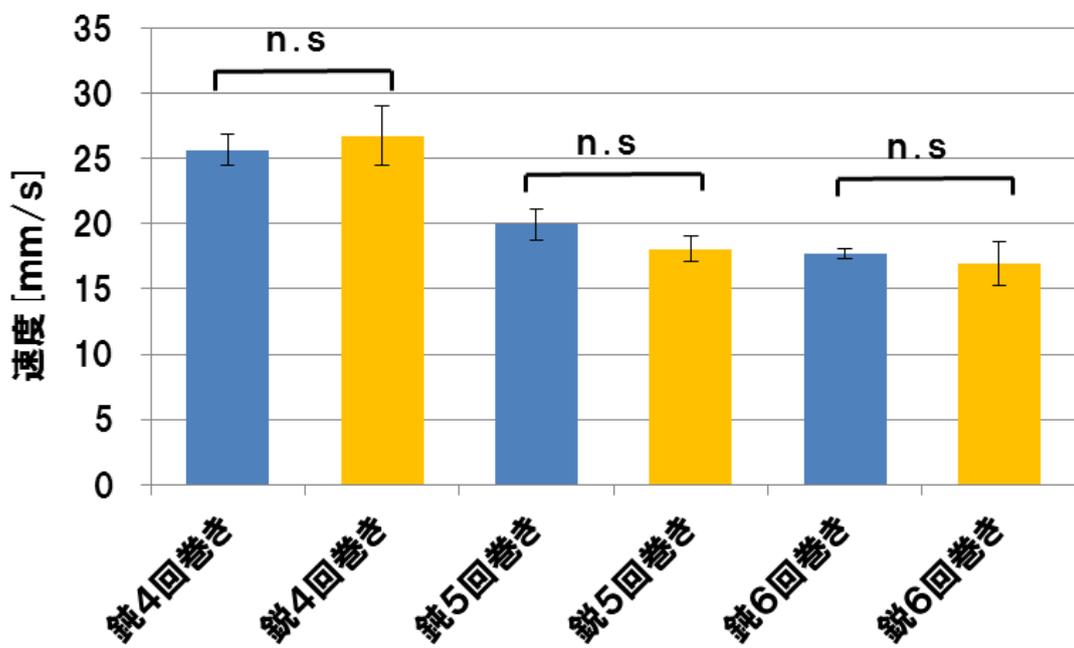


Fig.5-77 砂利走行実験結果 鈍／鋭比較 平均速度 (砂利／鋭／縦)

5.2.5.4 結論

瓦礫モデル実験において、計測可能な状態まで走行性能にした螺旋羽根の先鋭化だが、砂利走行においては影響がなかった。

5.2.6 露地走行実験

これまで実験を行っていなかった悪路条件として、露地（未整地の土上）走行実験を行った。

5.2.6.1 実験方法

実験フィールドは、家庭用農地の土の一部（900W×1200D [mm]）を均し、足で踏み固めたものを使用した。始点、終点の目印は、竹ひごをフィールド両端に見えるように埋めることで対応した。（Fig.5-78）



Fig.5-78 露地走行実験フィールド
黄色い点線内を実験フィールドとした。

計測のたびに土の均しと踏み固めをおこなった。全ての作製した螺旋ロッドに対して、走行時間と走行距離をそれぞれ測定した。コントローラによる操舵は無し。測定方法と測定点 d の定義は砂利走行予備実験の「5.2.2.1 実験方法」に準拠した。

5.2.6.2 実験結果

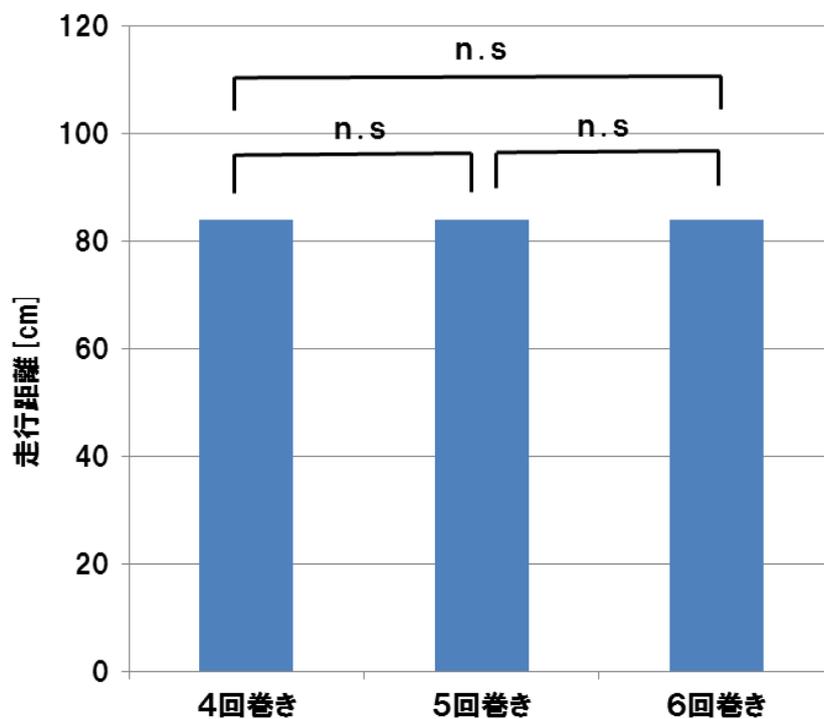


Fig.5-79 露地走行実験結果 平均走行距離 (土/鋭/縦)

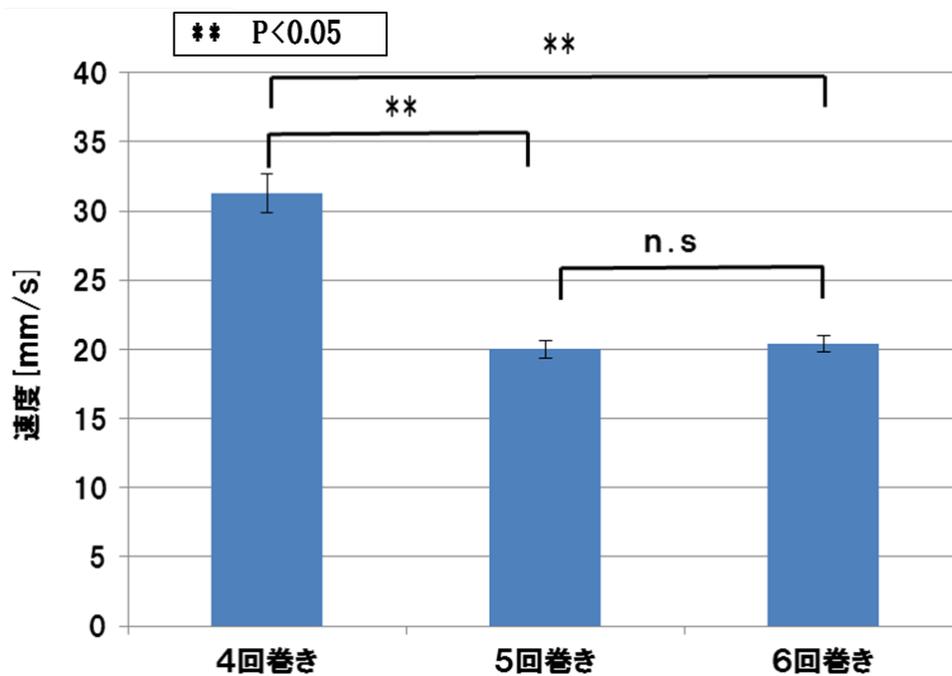


Fig.5-80 露地走行実験結果 平均速度 (土/鋭/縦)

走行距離に関して、全てのトライアルで 840mm を走り抜けた事で、螺旋羽根の巻き数による有意差は無かった (Fig.5-79)。速度に関しては、4回巻きのみ有意に高かった。(Fig.5-80)

5.2.6.3 考察

ギアにカバーを着けていないことにより、土がギアとラダーチェーンに挟まることで空転し、蛇行する場合も見られたが、砂利、瓦礫モデル走行時に見られた車体の跳ねもほぼ見られず問題なく走行し、全てのトライアルで 840mm を走破することが出来た。

平均速度に関しては、4回巻きのみ有意に高く、5回巻き、6回巻きに有意差が無いのはアルミ製螺旋ロッドの平均速度実験すべてに見られた傾向である。

5.2.6.4 結論

走行距離、速度ともに、砂利走行実験の数値を上回っているため、この3種の実験フィールドの中で最もアルキメデス螺旋駆動体に適した路面であると言える。

5.2.7 各フィールド実験結果の比較

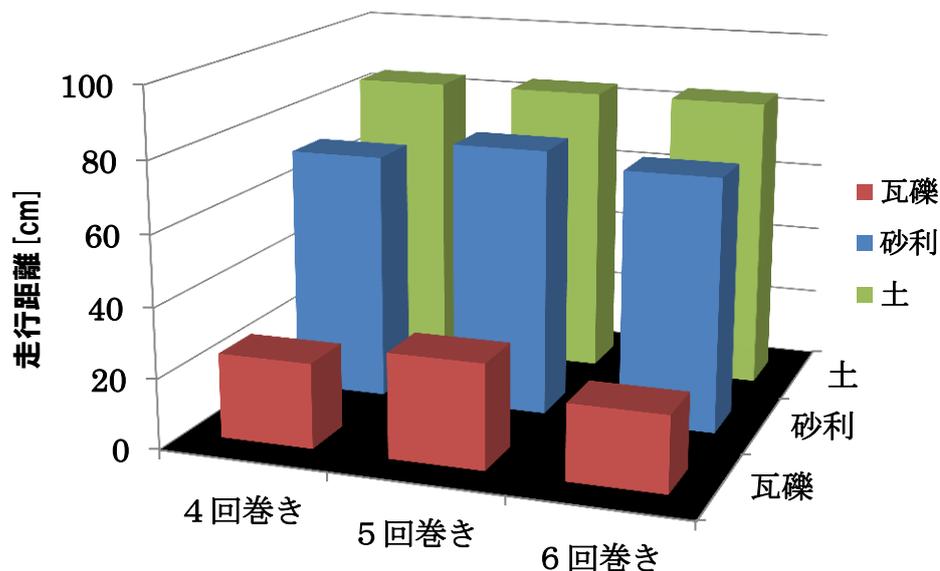


Fig.5-81 各フィールド実験結果比較 [平均走行距離]

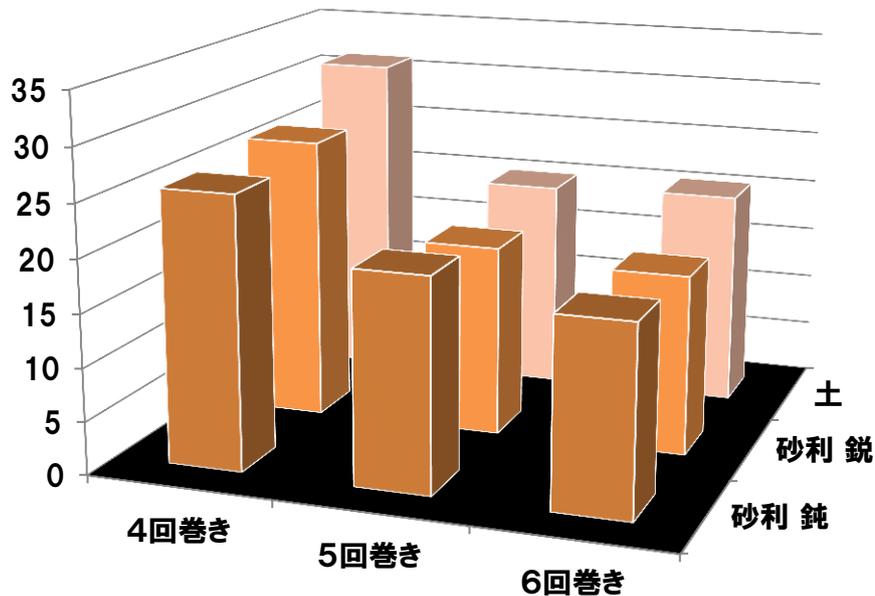


Fig.5-82 各フィールド実験結果比較 [平均速度]

平均走行距離に関して、砂利（鋭）と瓦礫モデルの2つの路面条件で5回巻きが最も高い走破性を示したものの、全ての実験フィールドで螺旋羽根巻き数による有意差は無かった。（Fig.5-81）

次に平均速度についてだが、瓦礫モデルでの速度計測が出来なかったため、上記 Fig.5-81 と比較対象が違うため、平均走行距離のグラフとの比較はできないが、土（露地）、砂利（鋭）、砂利（鈍）での3フィールドで比較すると、露地走行実験が最も高い速度を示した（Fig.5-82）。また、螺旋羽根巻き数に関しては、全てのフィールドで4回巻きのみが有意に高い結果を示した。この結果は、螺旋羽根の間隔に起因すると推察する。ロッド上の螺旋羽根の間隔は、実測値で4回巻きは平均63.5mm、5回巻きは48.0mm、6回巻きは42.0mmであり、その差は4-5回巻き間で15.5mmであるのに対し、5-6回巻き間では6mmと小さくなっている。この間隔は、ロッドが一回転する毎に進む距離となるので、この差が速度に現れたものと考えられる。

また、走行距離、速度共に露地が最も高い数値を示したという結果だが、このフィールドの特徴を他二つのフィールドと比較して考えると、露地フィールドが最も路面の粒子が細かい、つまり軟質な路面であることが挙げられる。この実験結果は、アルキメデス螺旋駆動体が、軟質な路面に強いという既知の事実を示すとともに、螺旋羽根を引っ掛けて前進させるためにも足場が乏しい硬質な路面の走行が不得手な螺旋駆動体の問題点も示している。

現時点で、アルキメデス螺旋駆動体は、硬質な路面である瓦礫走行には適さ

ないと判断する.

5.2.8 トラバース運動による走行実験

上記の実験の合間などで、コントローラによる操作で車体のトラバース (Traverse, 平行移動) を行う毎に、前後移動時には見られない高い走破性を示していた. 特に瓦礫走行実験では前後方向での走行では一切瓦礫を乗り越えることはなかったが、操舵によるトラバース時は幾度となく瓦礫を乗り越えていた. その高い走破性に着目し、前後走行と比較するべくトラバースでの走行実験を行った. (Fig.5-83)



Fig.5-83 瓦礫フィールドでのトラバース移動実験の様子

5.2.8.1 実験方法

実験を行ったフィールドは瓦礫と砂利の 2 種類. 使用したフィールド, 測定方法は『5.2.4.1 実験方法』に準拠したが、速度に関しては、トラバースでは移動速度が速く、ストップウォッチを押すタイミングでの過失誤差が大きくなることを懸念し、420mm から 840mm での測定に変更した. また、停止時の羽根を含まないロッドの最後部を測定点 d と定義した. 瓦礫実験においてもコント

ローラによる操舵は行わず，840mmの走破以外は，フィールドから脱落，30秒以上の前進停止時の測定点dの距離を計測した．検定は，縦横比のグラフ（Fig.5-85，5-88，5-89）において二元配置分散分析で検定を行った．

5.2.8.2 平行移動による瓦礫走行実験結果

縦走行実験時に，速度の計測が出来ず，比較対象が無いため，平均走行距離のみ以下に示す．

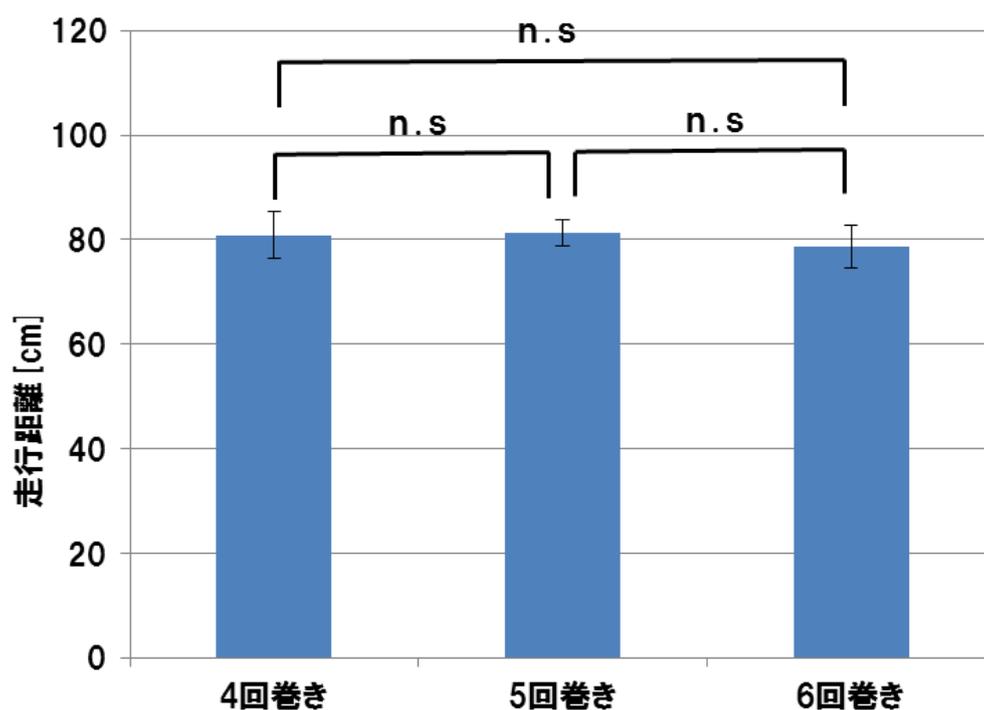


Fig.5-84 瓦礫トラバース走行実験結果 平均走行距離（瓦礫／鋭／横）

瓦礫モデルでの走行距離実験では，高い走破性を示したものの羽根の巻き数での有意差は得られなかった．（Fig.5-84）

5.2.8.3 瓦礫縦走行との比較

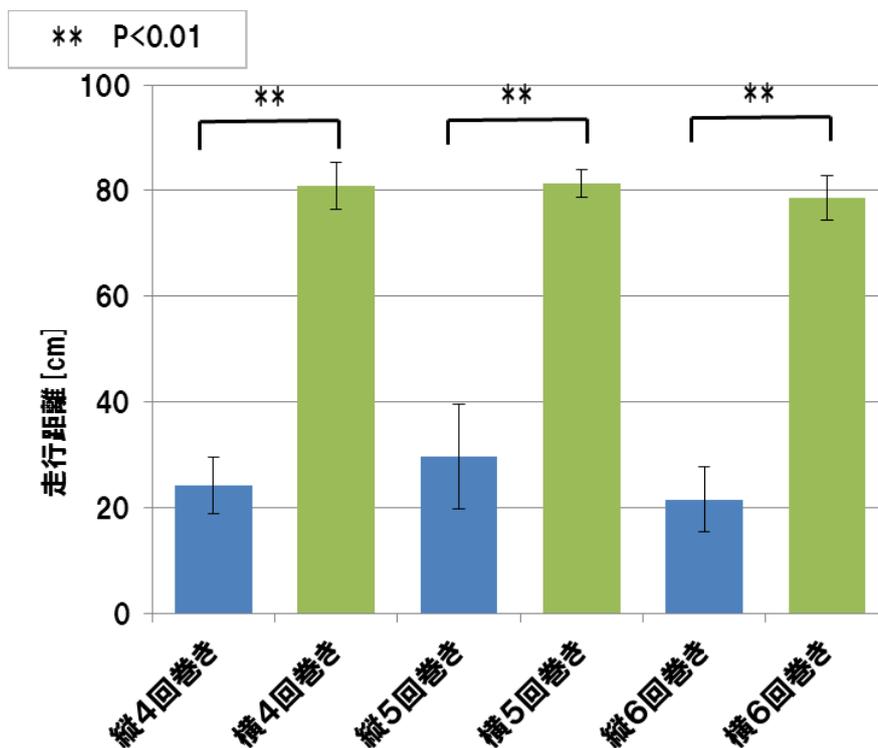


Fig.5-85 瓦礫走行実験 縦／横比較 平均走行距離 (瓦礫／鋭)

トラバース走行時の数値が顕著に高く (Fig.5-85), 縦走行時と比してその平均走行距離はおよそ 3.2 倍の差が生じた.

5.2.8.4 平行移動による砂利走行実験結果

トラバース時の基本的な走行性能を知るため, 砂利上での走行実験も行った.

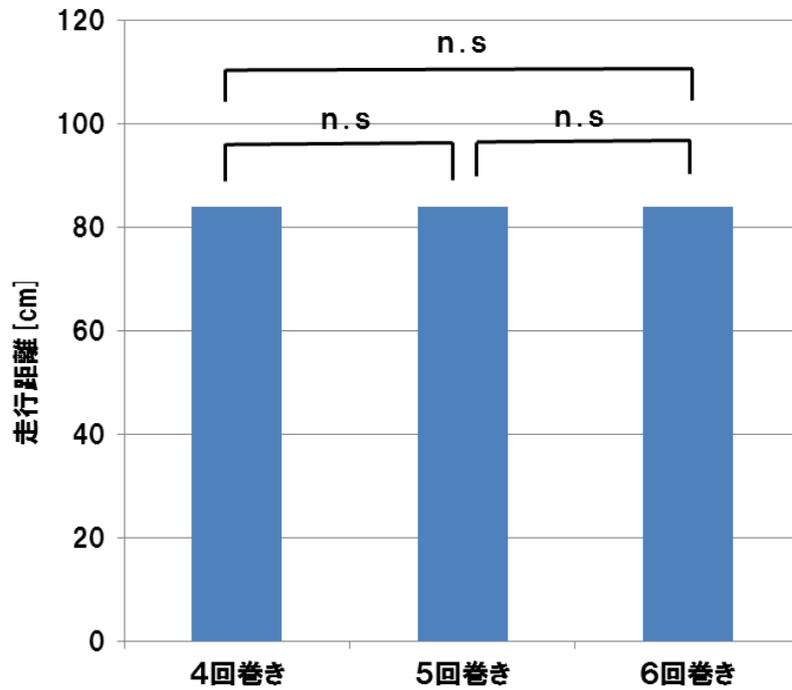


Fig.5-86 砂利トラバース走行実験結果 平均走行距離 (砂利/鋭/横)

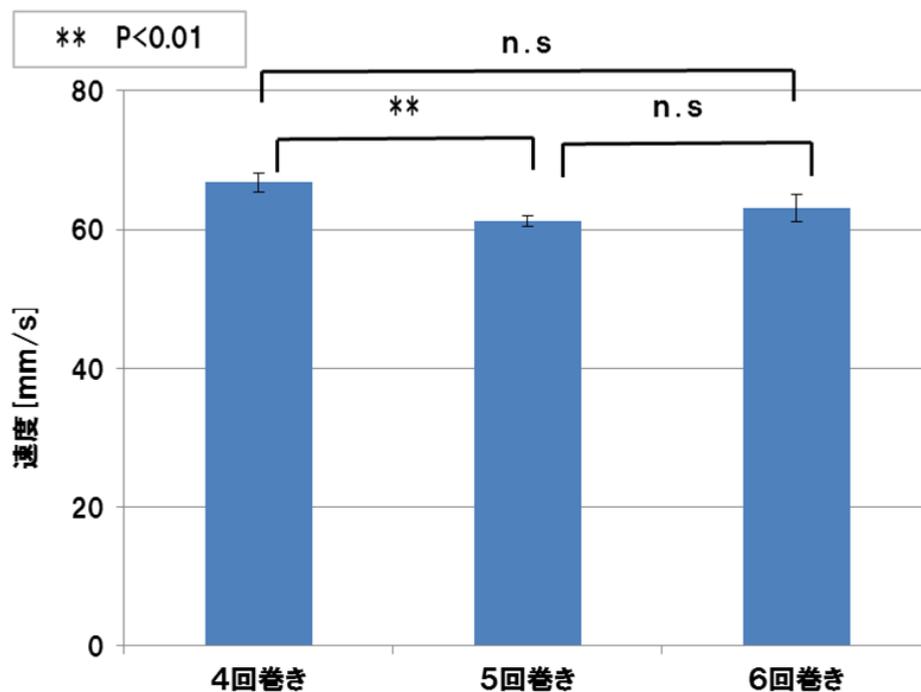


Fig.5-87 砂利トラバース走行実験結果 平均速度 (砂利/鋭/横)

走行距離に関しては、全てのトライアルで問題なく 840mm を走り抜けた事

で、羽根の巻き数による有意差は生じなかった (Fig.5-86). 走行速度に関しては、4-5 巻き間にのみ $p < 0.01$ で有意差が生じた (Fig.5-87).

5.2.8.5 砂利縦走行との比較

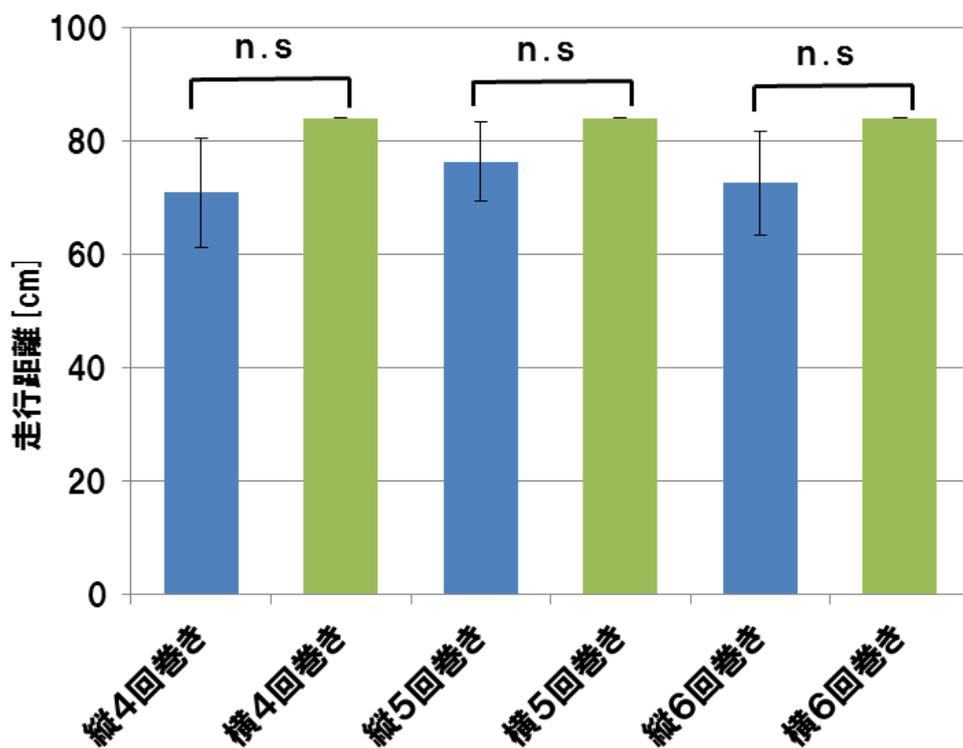


Fig.5-88 砂利走行実験 縦／横比較 平均走行距離 (砂利／鋭)

縦走行時の走行距離の記録と比較したが、砂利上では縦走行においても高い走破性を示していたので、両者間に有意差は生じなかった (Fig.5-88).

** P<0.01

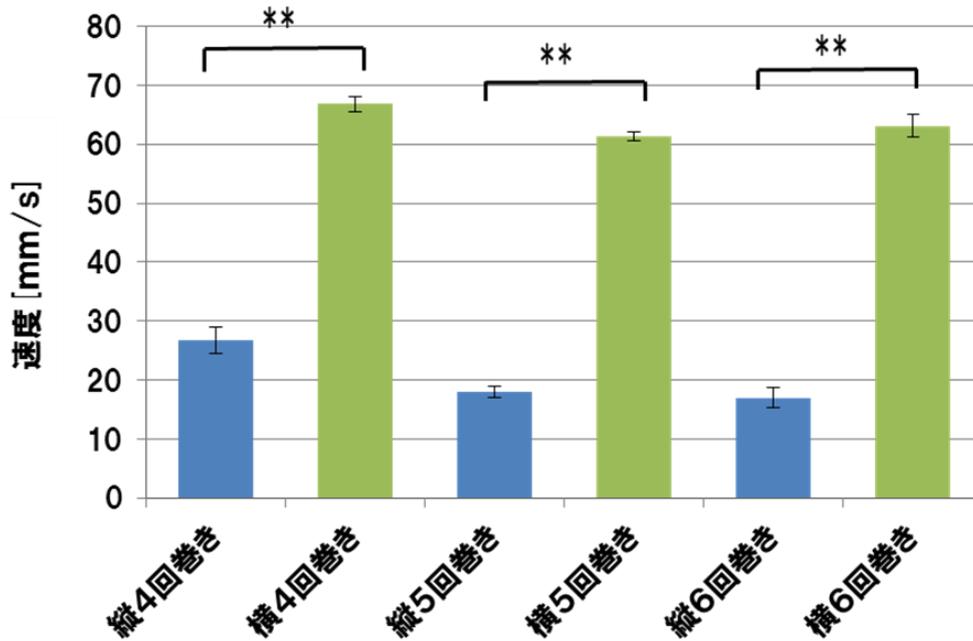


Fig.5-89 砂利走行実験 縦／横比較 平均速度 (砂利／鋭)

平均速度の縦走行時との比較においては、およそ 3.2 倍の差が生じた。(Fig.5-89)

5.2.9 アルミ製ロッド実験のまとめ

5.2.9.1 縦走行全体についての考察と結論

螺旋羽根の巻き数を少なくする、つまり螺旋羽根どうしの間隔を広くすると、速度が上昇した。また平均走行距離に関しては全トライアルを走破した露地走行を除き、5回巻きのロッドが最も高い平均走行距離を示したが、有意差は見られなかった。そこで速度を重視すれば今回の実験においては4回巻きが最も悪路走行に適しているとの判断になる。しかし人命救助ロボットの駆動体に要求される能力として、目的地への到達能力、つまり走行距離が最も重要視されるべきである。その点においてアルミ製ロッドの螺旋羽根の巻き数4,5,6巻間では走破性に相関がないことが示唆された。

瓦礫モデル上走行において、螺旋羽根の先端を鋭利化することにより、走行不能な状態から実験が可能な程度に走行距離が伸びた。しかしながら瓦礫を押しつけながら走行することは可能でも、全てのトライアルで一度も瓦礫を乗り

越えることが出来ず、その走行距離も短いものだった。

「5.1.6 塩ビ製ロッド実験のまとめ」において少し触れたが、塩ビロッド実験終了時は、ロッドの摩擦力を増やすことが硬質な路面を走るうえで重要であると考えていたが、実際瓦礫モデル乗り越えの為の試行錯誤の際、羽根先端にコーキング材を塗布することで螺旋羽根先端の摩擦力を強くしたところ、車体のガタつき（小さな跳ね上がり）が塗布前より大きくなり、砂利上の走行もできなくなった。ロッドの回転力が車体の跳ね上がりに消費され、推進力を得られなくなったためと推察する。これらを勘案すると 5.1.6 で負荷を増やすことで平均走行距離が伸びた理由を「路面との摩擦力を上昇させることが出来たからだ」と推測する。」と述べたが、それは誤りで負荷により路面への螺旋羽根の食い込み高さが増えたことが原因であると推測する。

これらの結果と推測、土という軟質な路面で高い走破性を示したことを合わせて考えると、羽根を深く路面に食い込ませることが出来る螺旋羽根先端の先鋭化が、効果を示したものと推察する (Fig.5-90)。

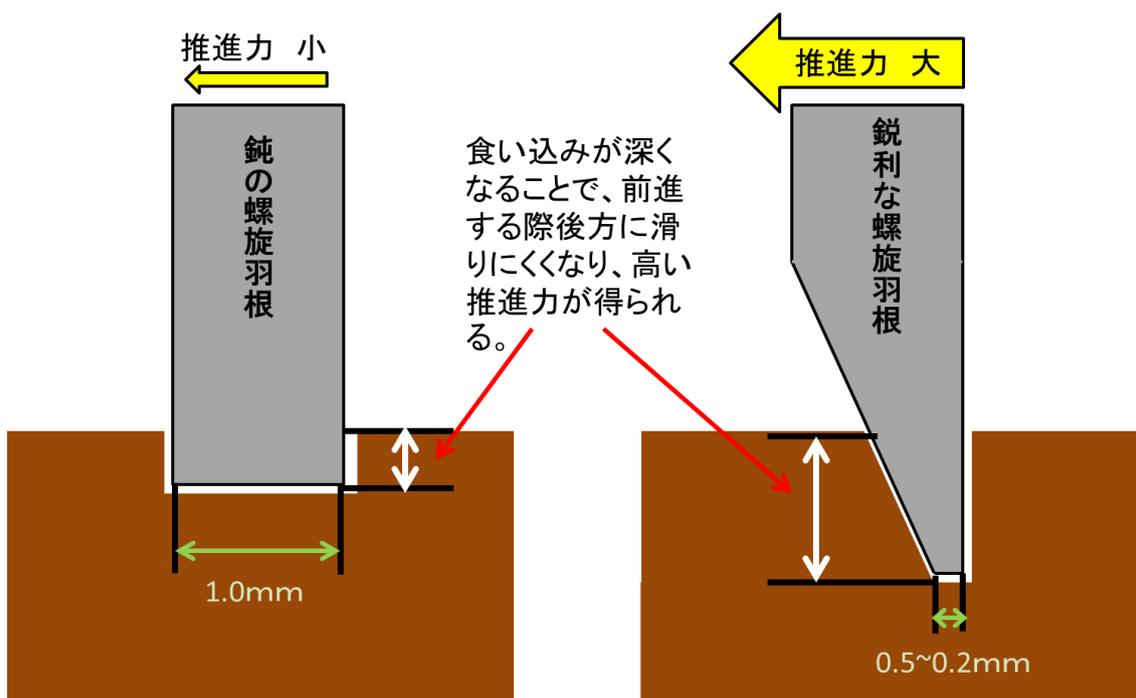


Fig.5-90 鋭利な先端が有効に機能した理由の考察

螺旋駆動体の推進力にとって、走行時のバタつきを抑える螺旋の滑りやすさと、路面の食い込み深さが重要である。

Fig.5-76, 5-77 の、「砂利走行実験結果 鈍／鋭比較」において両者に差が生じなかった理由も、砂利の中に螺旋羽根を食い込ませるには先鋭化せずとも 1.0mm で充分可能であったため、差が生じなかったと推察する。

つまりアルキメデス螺旋駆動体が最も効果を発揮するのは軟質な路面であり、本ロボットの運用が想定される瓦礫フィールド上が基本的に硬質である以上、現状のままの運用では不十分であり、不向きであると結論付けた。

5.2.9.2 トラバース走行全体についての考察と結論

実験を行った瓦礫モデル、砂利の両フィールドにおいて、走行距離、速度共に、トラバースは縦走行に比して高い走破性を示した。特に縦走行時には一度もできなかった瓦礫の乗り越えを高い頻度で行うことのできた瓦礫モデル上での実験結果は、縦走行に比して平均走行距離で 3.2 倍の高い走破性能を示した。これは実験開始当初に意図した結果ではないが、有効に利用されるべきである。

また、トラバースにおいても、螺旋羽根巻き数と走破性に相関が無いことが示唆された。

5.2.9.3 今後の展望

実験開始当初は羽根先端を削ることは想定しておらず、また繰り返し瓦礫等を巻き込むことで羽根が摩耗や変形し、幾度か実験が中断したため。今後は螺旋羽根をアルミからより硬質な金属への換装を予定している。そしてより軟質な泥濘などの路面での走行を視野に入れ、ギア及びラダーチェーンの耐水・耐泥保護と、ロッドそのものの径を大きくした場合の影響も検証したい。

また、マクロな展望として、今後も螺旋駆動体をブルーダ・ユニットの駆動部として使用する場合、トラバースを前提とした、つまり Fig.5-91 に示すロボットのようにロッドを進行方向に対し平行に配置したデザインへと変更する。またはすでに多くの研究者が研究を行っているクローラ（無限軌道）駆動体への変更・または併用（Fig.5-92）も視野に入れた大幅なデザインをする必要があるだろう。

クローラ以外でも、多田隈建二郎らが研究を行っているオムニクローラ⁵⁻¹⁹⁾は、従来のオムニホイールが不得手としている不整地走行においても全方位移動を可能にしている（Fig.5-93）。このオムニクローラがブルーダ・ユニットの駆動体として最適であるかは未確認だが、このような新技術も精力的に検討するべきである。

さらには、通常の移動体が不得意な、軟質な路面での救助活動を目的とした車両への転用も視野に入れている。ロッドを中空にするなどいくつかの対策を講じれば、沼地だけでなく水上も走行可能であるため、沿岸警備艇や震災時沿岸部の災害弱者を避難させる救助艇、東日本大震災のような津波災害対策への転用も期待できるだろう。応用の方法によっては、路面の状況を選ばない災害用 ATV（All Terrain Vehicle：全地形対応車。通常はバギーを指す）となる可

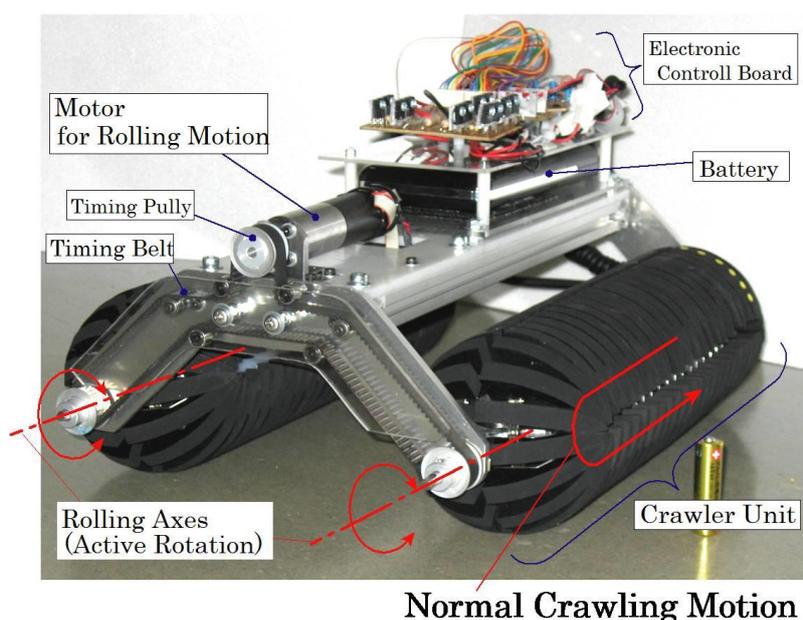
能性を持つ駆動体である。



Fig.5-91 スクリューの平行配置を前提とした移動体 TESH-drive (ロシア)
IdeaConnection HP: “Re-inventing the Screw-Propulsion Vehicle” ページより転載,
<http://www.ideaconnection.com/invention-success/Re-inventing-the-Screw-Propulsion-Vehicle-00249.html>, 最終アクセス日 2014/11/21



Fig.5-92 クローラとスクリューの併用例 Snowbird 6
参考文献 3-12, pp7, Figure 4 より転載



Normal Crawling Motion

Fig.5-93 オムニクローラの概観

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 金子・東森研究室HP より転載

<http://www-hh.mech.eng.osaka-u.ac.jp/robotics/Omni-Crawler.html>,

最終アクセス日 2015/11/5,

【第 5 章の参考文献】

- 5-1.佐橋拓, 佐橋昭, 内山尚志, 福本一郎: “災害時人命救助ロボットのアルキメデス螺旋推進型被災者収容機構の基礎研究”, 日本集団災害医学会誌, 16 (3), pp385 A2-2, 2011
- 5-2.佐橋拓, 佐橋昭, 内山尚志, 福本一郎: “災害時人命救助ロボットのアルキメデス螺旋推進型被災者収容機構の基礎研究”, 第 17 回日本集団災害医学会学術総会, プログラム・抄録集, pp385, 2012
- 5-3.岡田卓暁, 佐橋拓, 佐橋昭, 福本一郎: “アルキメデススクリュウ駆動を用いた人命救助ロボットの研究”, 高専・技科大連携シンポジウム 2013「生体情報処理と高度情報処理」, p273-276, 2013
- 5-4.高野佑資, 岡田卓暁, 佐橋拓, 佐橋昭, 内山尚志, 福本一郎: “人命救助ロボット用アルキメデス螺旋駆動機構の基礎研究”, 第 33 回日本生体医工学学会 甲信越支部大会, p21-22, 2013
- 5-5.住野和男: “やさしい機械設計の考え方・進め方”, オーム社, pp98-112, 2008
- 5-6.機械技術研究会編: “初学者のための機械工作法 (第 3 版)”, 理工学社, pp125-130, 2004

- 5-7.海野邦昭：“絵とき 穴あけ加工基礎のきそ”，日刊工業新聞社，pp22-40，2009
- 5-8.片山昌：“失敗しない被削材・工具材の見方・選び方”，日刊工業新聞社，pp62-83，2007
- 5-9.中尾政之，濱口哲也，草加浩平：“創造設計の技法”，日科技連出版社，pp61-78，2008
- 5-10. レスキューロボットコンテスト公式ウェブページ：“第14回レスキューロボットコンテスト規定(Rev.14-01)”，
<http://www.rescue-robot-contest.org/14th-contest/bosyu/reg.html>，最終アクセス日 2014/11/11
- 5-11. 伊保内賢：“プラスチック入門”，芳山印刷株式会社，pp23-57，1980
- 5-12. 西敏夫：“ゴム材料選択のポイント”，株式会社奥村印刷，pp11-128，1988
- 5-13. 大都化成株式会社：“樹脂お手軽ガイド” ページより，
http://daitokasei.co.jp/dictionary.php?cate_id=24，最終アクセス日 2014/11/13
- 5-14. 塩ビ工業・環境協会：“塩ビ樹脂の基礎物性” ページより，
http://www.vec.gr.jp/enbi/enbi2_2.html，最終アクセス日 2014/11/13
- 5-15. 「砥石」と「研削・研磨」の情報サイト：“ゴムの摩擦係数一覧” ページより，
<http://www.toishi.info/sozai/rubbers/cof.html>，最終アクセス日 2014/11/13
- 5-16. 佐橋拓，藤木智之，嶋田大和，岡田卓暁，佐橋昭，福本一郎：“瓦礫に埋もれた要救助者を発見・救助するシステムの基礎研究”，安全工学シンポジウム 2013 講演予稿集，pp352，2013
- 5-17. 佐橋拓，佐橋昭，内山尚志，福本一郎：“アルキメデス螺旋駆動体の瓦礫等悪路走行特性の研究”，第32回日本ロボット学会学術講演会，講演概要集，pp209，2014
- 5-18. レスキューロボットコンテスト公式ウェブページ：“第14回レスキューロボットコンテスト規定 別添6 Rev14-01 エリア内ガレキ詳細”，
<http://www.rescue-robot-contest.org/14th-contest/bosyu/reg.html>，最終アクセス日 2014/11/20
- 5-19. Kenjiro Tadakuma, Riichiro Tadakuma, Hiroaki Kinoshita, et.al. :
“Mechanical design of cylindrical track for sideways motion”，
Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp161-167, 2008

第六章 クラッシュ症候群発症阻止機構

「2.2.1 人命救助ロボットの必要性」においても述べているが、自然災害に起因するCSの発症に対しては、DMAT (Disaster Medical Assistance Team : 災害派遣医療チーム) が実施するCSM (Confined Space Medicine : 瓦礫の下の医療) をもって対処することになっている^{6-1) 6-2) 6-3) 6-4)}。しかしその実施には問題点が多く、現在のところ現実的な対処法が存在していない。以下ではCS発症の機序を示し、間接止血法である鼠蹊部圧迫法を応用したCSP機構(Crush Syndrome Preventer, クラッシュシンドローム発症阻止機構)による下肢血管駆血実験を行い、その有効性を示す。

6.1 クラッシュシンドロームの機序と診断

「増補版 DMAT 標準テキスト」⁶⁻⁵⁾ (日本集団災害医学会, へるす出版) やCSに関する文献^{6-6) 6-7) 6-8) 6-9)}によると、その病態としては、「骨格筋が長時間圧迫されることによる筋肉の虚血」、そして「圧迫が解除されることによる再灌流障害」の二つの機序による。地震災害を例にすると、瓦礫などにより四肢の血流が阻害され、血液が圧迫位置より先に運ばれなくなる(=虚血する)。それにより、筋肉の細胞膜のナトリウム-カリウムポンプが阻害され、細胞内にナトリウムと水が移動し、細胞外にカリウムが流出する。水が移動することによって血管内は相対的な低容量となり、ショックを呈する。それと同時に虚血により圧迫部分より先の横紋筋が急速に融解、壊死を始める(=横紋筋融解症)。次にCSに配慮しない安易な救助活動での圧迫物除去により再灌流が起こる。すると破れた血管内に筋組織であるカリウム等が漏入し、カリウムであれば全身を巡って高カリウム血症となり、場合によっては心室細動による心停止を起こす。また、虚血細胞からはカリウムだけでなくミオグロビン、クレアチニンキナーゼ(CK: creatine kinase), 乳酸脱水素酵素(LD: lactate dehydrogenase), アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ(AST: aspartate aminotransferase)などの有害物質も血管内に流れ出す。ミオグロビンはミオグロビン円柱の形成⁶⁻¹⁰⁾(血栓の要因)、腎血管の収縮、および尿細管上皮への直接毒性により急性腎不全を引き起こす(Fig.6-1)。

診断のポイントとしては、①重量物に長時間挟圧されたエピソード、②患肢の運動知覚麻痺、③ポートワイン尿(黒~赤褐色の尿, Fig.6-2 左)が挙げられる。一般的に4時間以上の挟圧で発生するが、1時間で発生した報告もあった。皮膚所見は時間経過により皮膚の紅斑、水泡形成、壊死が認められることもある(Fig.6-2 右)が、所見が認められない場合もある。また現場においてはバイ

タルも比較的安定していたり、意識状態も軽い興奮状態から突然死に至るため、挟まれたというエピソードがあればまず CS を疑うことが肝要である。

また重症度に関するパラメータとしては、損傷された骨格筋（＝横紋筋）の容量、合併症の有無、年齢、性別がある。骨格筋の損傷の程度は圧迫の強さと圧迫時間を乗じたものとなり、元来骨格筋の総量が多い若く屈強な男性ほど重篤化しやすい。

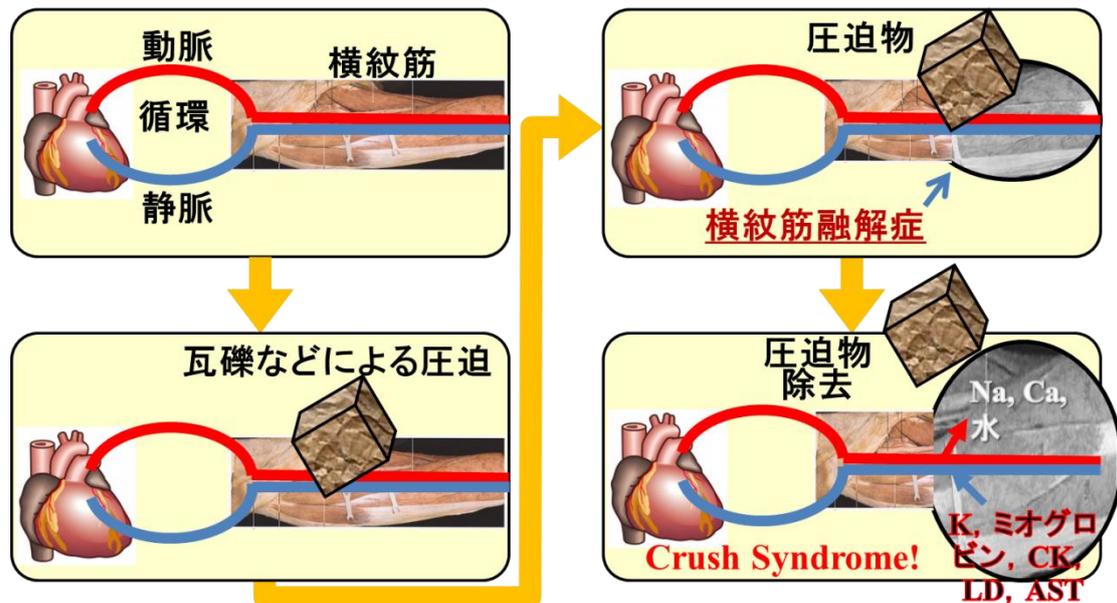


Fig.6-1 CS 発症の機序



Fig.6-2 尿所見（ポートワイン尿，左）と皮膚所見（右）

「増補版 DMAT 標準テキスト」（日本集団災害医学会，へるす出版），pp251，写真VII-1-1 およびVII-1-2 より転載

6.2 下肢静脈の駆血及び測定方法

6.2.1 駆血対象の選定

「集団災害医療マニュアル」⁶⁻¹¹⁾ (吉岡敏治ら, へるす出版) は, 阪神・淡路大震災時の CS に関する臨床データを掲載した貴重な資料を有している. それによると, 病院に搬送され CS 発症の受傷部位が確認できた患者 372 名中 84.4% にあたる 317 名が下肢に受傷しての CS を発症していたため (Fig.6-3). また全身の 30%以上の骨格筋の障害で重症度が高くなることが解っているため

(Fig.6-4), 本研究における CSP 機構のターゲットを下肢に集中することとした.

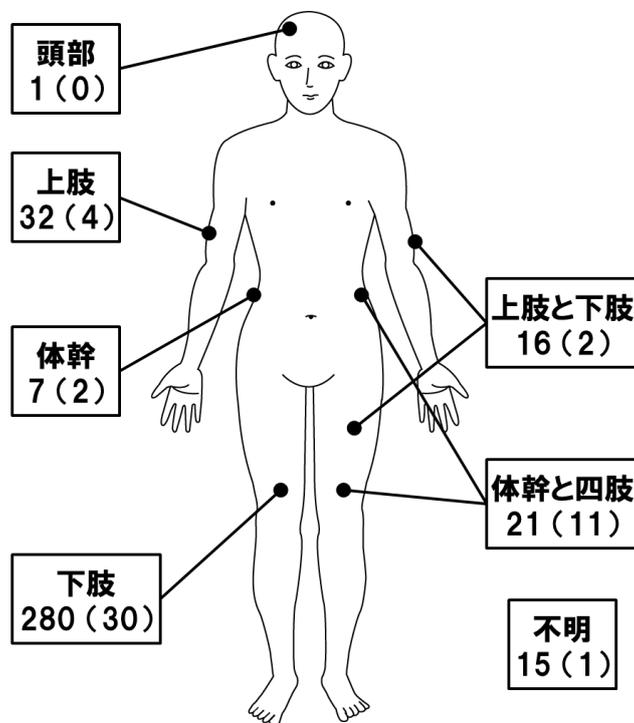


Fig.6-3 受傷部位と予後 (括弧内は死亡数)

「集団災害医療マニュアル」(吉岡敏治ら, へるす出版), 図II-16より改変

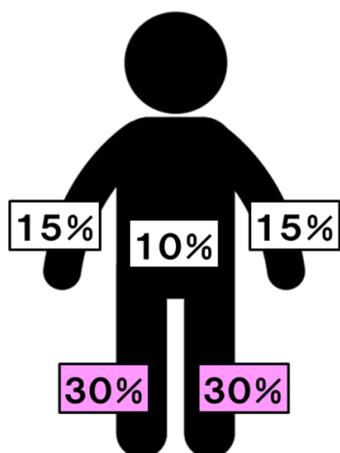


Fig.6-4 成人の骨格筋の体積分布

下肢1本の圧挫でCSが重篤化する可能性を示している。

「増補版 DMAT 標準テキスト」(日本集団災害医学会, へるす出版), 図VII-1-2より改変

また, 駆血位置の選定については「6.2.2 駆血方法」にて詳しく述べるが, 下肢の再灌流を阻害するために, 下肢静脈の内, 大腿静脈の鼠蹊部付近に着目した。理由としては Fig.6-5 にもあるように, 下肢静脈には表在静脈というバイパスが多く, 赤丸で示した大腿動脈の根元を駆血しない限りは, 下肢全体の駆血を行う場合足の付け根を駆血帯で巻いて強く締めて駆血する方法しかないためである。

ちなみに, 本論文内では局所性虚血を“阻血”と呼び, 能動的に阻血を行う行為を“駆血”と区別し呼称する。

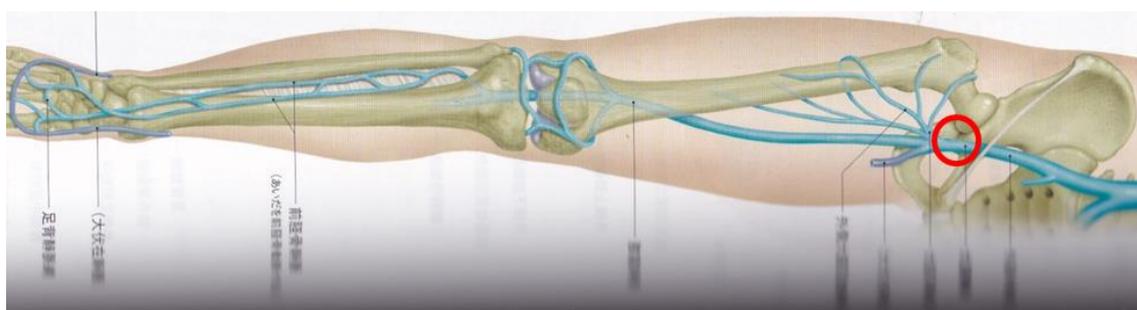


Fig.6-5 下肢静脈 赤丸が阻血位置

「カラー図解 人体の正常構造と機能」(坂井建雄, 河原克雅 編), 日本医事新報社, pp140, 2008

6.2.2 駆血方法

「6.2.1 駆血対象の選定」にも大きくかかわるが, 駆血対象をどのように駆血

すべきかを考えなければならない。救急の現場で行う止血は、以下の3つに分類される。6-12) 6-13)

① 直接圧迫止血法（用手的止血法）

出血に対する処置の基本。出血部位を直接押さえ、生体の止血の機序を待つ方法。駆血を目的とした当ロボットの機構にはそぐわないが、患部を直接圧迫するという点においては有効であろう。

② 間接圧迫止血法（止血点止血法）

直接圧迫止血法では困難な末梢部位の出血の場合、出血部位に近い中枢側の動脈を圧迫することにより出血量を減少させる。

③ 止血帯法

目的は間接圧迫止血法と同様であるが、人の手でなく止血帯（ターニケット、カフ（空気止血帯）、エスマルヒ駆血帯）を用いて止血点を圧迫する手技。

「止血」である以上、出血を止める際の手技であり、純粋な駆血方法ではないが、共通項が多いため列挙した。この他にも、鼻出血の止血法としてベロックタンポン法、SBチューブ法、内視鏡による止血、血管内カテーテルによる止血などがあるが、駆血のターゲットが下肢であるため、また医療施設内での手技であるため除外する、さらに出血面を焼く焼灼止血法や血管を直接糸で結ぶ結紮法、血管を縫う血管縫合、酸化セルロースやゼラチンスポンジ、微繊維性コラーゲンの止血剤の塗布やアドレナリン投与、患部を心臓より高く保持する高位保持などの方法もあるが、これらも患部の開切を要したり患者の状況による薬剤の量、動/静脈注射の必要があるなど手技が複雑であったり、外傷による出血を止めるための手技であったりするので、今回は除外する。

上記の止血法の中から、駆血にも応用可能で、かつ簡便な機構で駆血可能な②間接圧迫止血法と、それを工学的に行うべく③止血帯法を選択した。

救急救命においての止血点である、総頸動脈、腋窩動脈、上腕動脈、橈骨動脈、大腿静脈、膝窩動脈、足背動脈の7点（Fig.6-6）の内、下肢の止血点は、①大腿静脈と②膝窩動脈、③足背動脈の3点であり、出血部位に応じて止血点を選択する6-14) 6-15)。

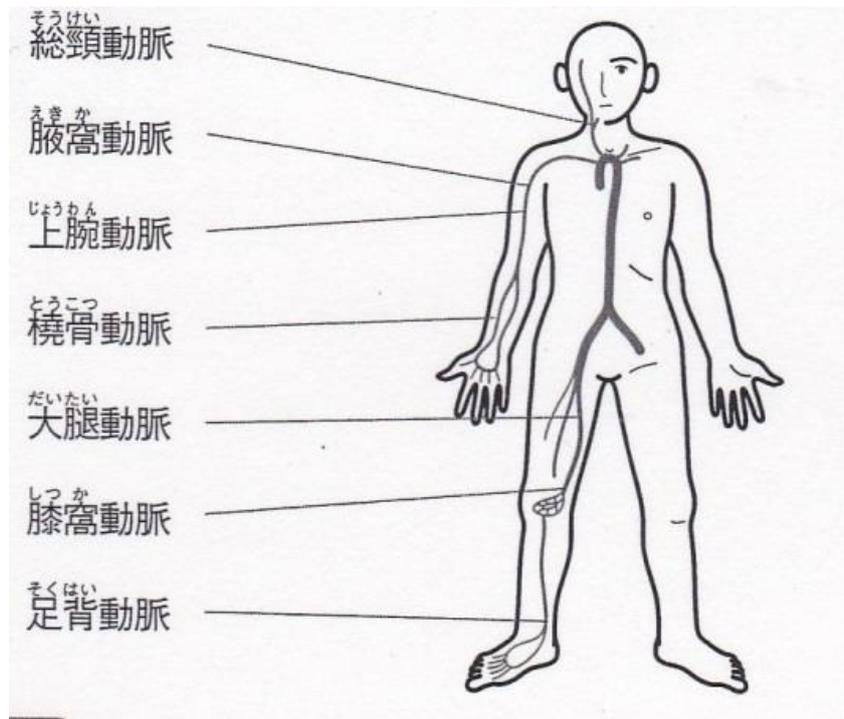


Fig.6-6 下肢静脈 赤丸が阻血位置

「すぐ引ける救急事典」(曾我幸弘, 泰川恵吾 監修), 成美堂出版, pp99 より転載

Table.6-1 駆血点・測定点の比較検討

	人体構造的視点	機構的視点	測定部位として
大腿動脈	◎ <ul style="list-style-type: none"> 下肢に繋がる血管の元であり、この部位を駆血できれば下肢全体を駆血可能。 大腿動脈／静脈が隣接しており、同時に駆血が可能。 	◎ <ul style="list-style-type: none"> 機構化を想定する場合、最も単純な構造にできる圧迫部位である。 有効に駆血可能な圧迫位置が広いので、駆血位置同定のための特殊なカメラを必要としない。 	△ <ul style="list-style-type: none"> 大腿静脈を測定するには最適な部位だが、比較的深部にある為走査深度が深い測定器が必要。 動脈を測定する場合、大腿部より下の部位の駆血は測定不可。
膝窩動脈	○ <ul style="list-style-type: none"> 他の止血点よりも位置の同定が容易。 大腿部が患部だった場合は止血(駆血)不可。 	× <ul style="list-style-type: none"> 比較的自由に動く部位なので、特殊な形状の駆血帯などを考案しなければならず、機構化が困難。 	× <ul style="list-style-type: none"> 駆血機構同様、測定部位の固定が困難。 仰臥位の場合、測定位置の目視が困難。
足背動脈	× <ul style="list-style-type: none"> 後脛骨動脈などのバイパスが存在する。 踝より下の患部のみ対応可能。 	△ <ul style="list-style-type: none"> 膝窩動脈以上に駆血部位の固定が困難。 患部が踝以下に限定されるが、駆血そのものは容易。 	○ <ul style="list-style-type: none"> 静脈の(駆血時の)測定は踝以下に限定される。 動脈であれば下肢のどの駆血点であっても測定可。 大腿駆血の場合、その測定点までの距離が問題。

Table.6-1 は上記3点の止血点を、下肢静脈駆血を行うことを前提に、人体構造的、および機構的視点で比較検討を行ったものである。さらに、測定部位として適しているか否かも検討を行った。その結果、駆血位置としては①大腿動

脈が最も適していると判断し、測定位置としては③足背動脈に最も近く、足の脈拍測定に使用される後脛骨動脈を選択した。駆血位置と測定位置が大きく離れていることがどの程度測定結果に影響するかを確認するべく、予備実験を行うことも決定した。

次に、大腿動脈の止血法として、鼠蹊部圧迫止血法（Fig.6-7）がある。仰臥位もしくは座位の患者の鼠蹊部を上から強く掌で圧迫し、動脈を圧迫することで一時的に下肢の血流を止め、鼠蹊部より先の脚部の出血を止める方法である。



Fig.6-7 鼠蹊部圧迫止血法の実演風景

「1. 救急員養成講習会のアイデア」ページより、工夫工夫実験室 HP,
<http://www.h2.dion.ne.jp/~barnaba/rclong.html>, 最終アクセス日 2014/12/5

この方法であれば、非常に簡単な機構で駆血が可能であり、また「6.2.3 計測上の問題点と解決方法」で示す理由により静脈の駆血も同時に行うことが出来る。それにより当ロボットの目的である大腿静脈の駆血が可能となる為、本手技が可能となる機構の製作を行った。当ロボットに採用した止血法として「止血帯法」を選択したと先に述べたが、鼠蹊部圧迫法は間接止血法であるため、正確には止血帯法ではなく、機械的に行う間接止血法である。

6.2.3 計測上の問題点と解決方法

鼠蹊部圧迫法による大腿静脈の駆血を行う際、検査機器で計測しながら確認する必要があるが、大腿静脈は比較的深部にあるため、大腿静脈そのものの阻

血の確認にはカラードプラモードが使用可能なエコー（超音波検査装置）など、高価な測定器が必要となる。また将来的にはそれだけ大掛かりな医療機器を、ロボットに搭載し、遠隔で操作しなければいけない問題もある。より簡便な方法を模索するべきであると考えた。

これは Table.6-1 に示した駆血点の選定理由の一つでもあるが、大腿静脈と大腿動脈は隣接しており（Fig.6-8）、鼠蹊部圧迫は静脈と動脈を同時に圧迫する手技である。さらに静脈は動脈よりも血管の壁が薄く軟質である⁶⁻¹⁶⁾（Fig.6-9）という特徴から、鼠蹊部を圧迫しての大腿動脈の駆血が成されれば、それと同時に大腿静脈も駆血できていると仮定した。静脈と異なり、動脈は計測方法、計測可能部位共に選択肢が多く、簡便で安価な計測器も多く存在する。

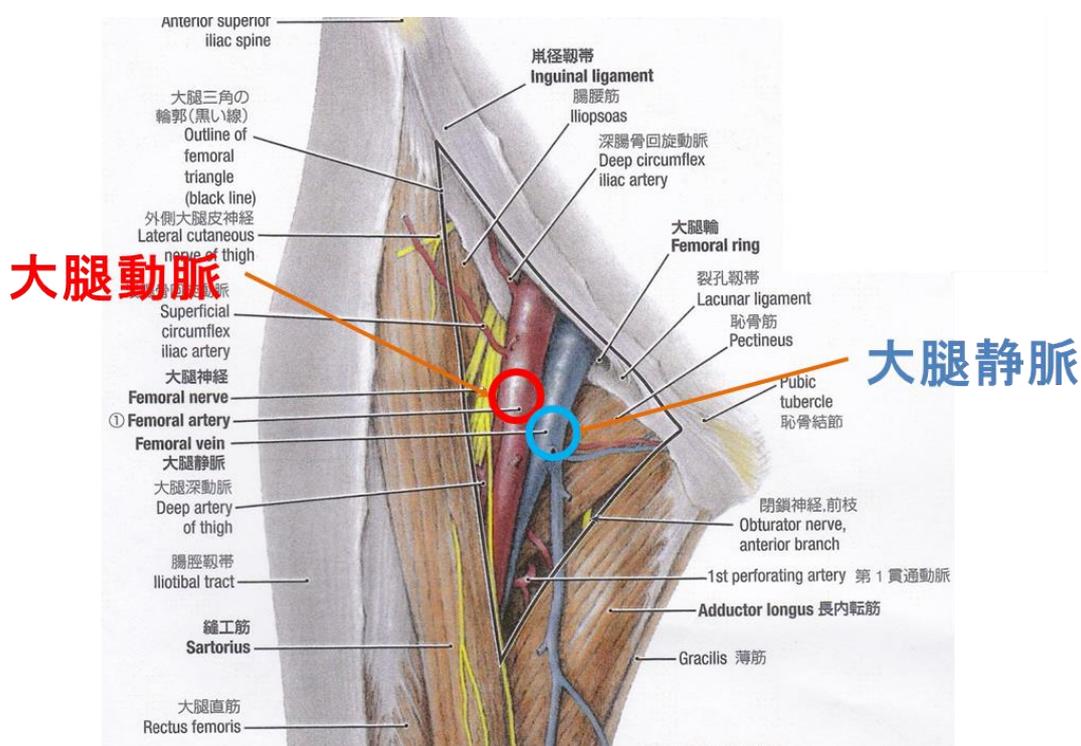


Fig.6-8 大腿静脈と大腿動脈の位置関係

青で示した大腿静脈と、赤で示した大腿動脈が隣接しているのが見て取れる

「第6版グラント解剖学図譜」（Anne M.r. Agur, Arthur Dalley, 坂井建雄 訳），医学書院，pp372，2011より転載

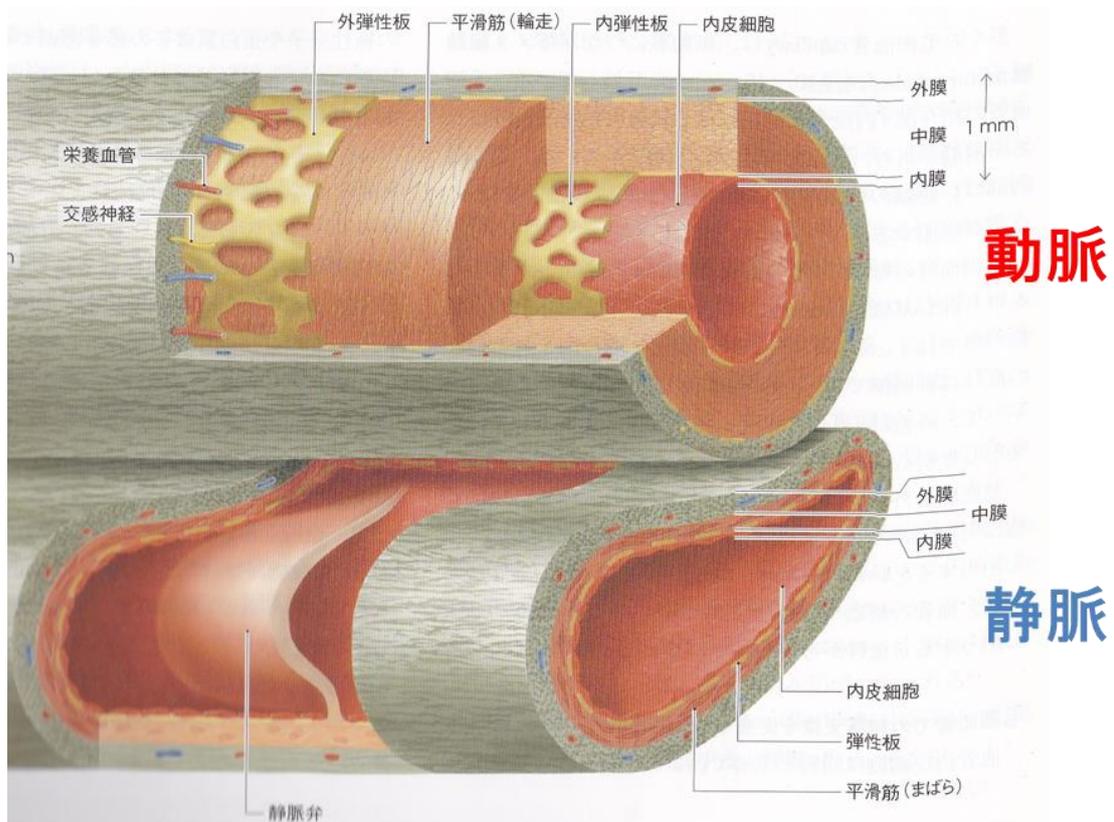


Fig.6-9 動脈（筋動脈）と静脈（伴行静脈）の断面図

動脈は厚い内膜（=平滑筋繊維）の為、壁が厚い様子が見て取れる

「カラー図解 人体の正常構造と機能」（坂井建雄，河原克雅 編），日本医事新報社，pp143，より転載

6.2.4 血流計

測定に使用した血流計は Fig.6-10 に示す単方向血流計 ES-1000SP II である。超音波ドプラ血流計の原理⁶⁻¹⁷⁾ 6-18) 6-19) としては、移動中の物体に一定周波数の超音波を当てると、ドプラの法則に従ってその反射波の振動数が変化する。血管中を流れる血液に超音波を照射しても同様な現象がみられ、血液の平均流速はドプラ周波数とドプラ偏位周波数のスペクトルから求められる (Fig.6-11)。特徴としては、非侵襲的に測定ができること、そしてパルス状の超音波を使えば、狭い空間の血流を測定でき、血管内の流速分布を計測できるなどの利点がある。



Fig.6-10 超音波ドプラ血流計 ES-1000SP II とそのプローブ T8M05S
 PC へのデジタル出力は無く，感熱シリアルドット方式でのプリントアウトの出力のみ
 であり，リアルタイムでの計測が出来ない。

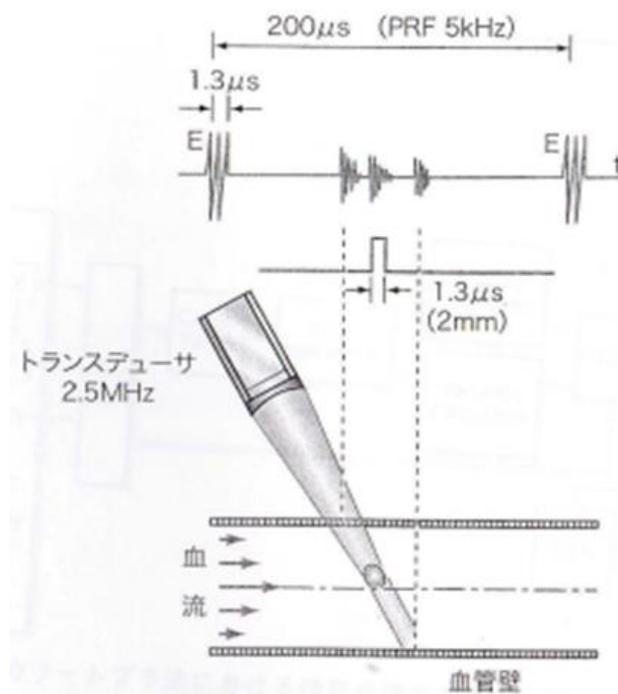


Fig.6-11 超音波ドプラの概念
 “改訂第 5 版 ME の基礎知識と安全管理”，pp195，図 14-5 より転載

使用したプローブは T8M05S (プローブ周波数 8.2MHz, 焦点距離 10mm, 周波数帯域 350±80~2500±500Hz). このプローブの焦点距離だと比較的深部の血管の測定は不可能である. そのため必然的に大腿静脈以外の血管を測定する必要がある.

また, 血流計の性能確認の為にテストを行ったところ, 計測部位は変わらないのに測定結果に大きな差が生じた. これらの原因としては,

- ① プローブの傾斜角が変わった (マニュアルによると血管の方向に対し 60° 指定) ことによる誤差.
- ② プローブの押し当てる強さにより, 計測する血管を圧迫し, 流速が変動した.
- ③ 後脛骨動脈以外の血管を計測してしまった.

などが考えられる. この測定結果をそのまま利用する場合, 実験データの比較が不可能であるため, その対応策として「6.3.1 実験方法」において示す阻血率を定義することとなった.

6.3 予備実験

CSP 機構を用いた実験を行う前に, 鼠蹊部圧迫法での阻血が計測可能であるかどうか, そして測定位置と駆血位置の距離による影響を確認するための予備実験を行った.

6.3.1 実験方法



Fig.6-12 血流計の計測風景

使用した計測器は、上記の超音波ドプラ血流計 ES-1000SP II，プローブは T8M05S, 超音波審査用ゼリーとしては水溶性ゼリー剤 プロゼリー ノーマルタイプ (JFPA 社製) を使用した. また駆血帯として牛革製のベルト (厚さ 4mm, 幅 35mm) を使用した.

計測位置は左足の後脛骨動脈, 具体的には内果の後ろ 30mm 程の位置で, 最も高い脈拍音が拾える位置を探して計測した (Fig.6-12). プローブを当てる位置, 角度, 押し当てる力により計測位置がずれて大きく数値が変動することが解った,

Table.6-2 血流計の実測値と阻血率の標準偏差の比較

	駆血時平均流速[cm/s]	駆血率[%]
平均値	1.38	56.6
標準偏差	0.82	16.4

Table.6-2 の左は, この後に示す CSP 機構実験 20 回分の駆血時平均流速のデータで平均値と標準偏差を計算したものだが, 平均値に対し標準偏差の値が大

きいことが解る。この駆血時の血流計の値を各データの比較に使用するには誤差が大きすぎるため、①駆血しての実験では先に駆血したデータを取得（駆血時流速）。②そのままプローブを押し当てた位置を変えずにベルトを緩めて駆血を解除した状態を再び計測する（解放時流速）。こうすることで、どの程度阻血できているかを以下に示す「阻血率」で判断することとした。Table.6-2の右に示すように阻血率では平均流速に比較してばらつき（標準偏差）が平均値に比して小さくなっていることが解る。

まず、仰臥位（あおむけ）と長座位（足を延ばして座る）の体位の差で血流計に差が生じないことを確認した上で、実験のしやすさから予備実験においては長座位での実験を行った（Fig.6-13）。

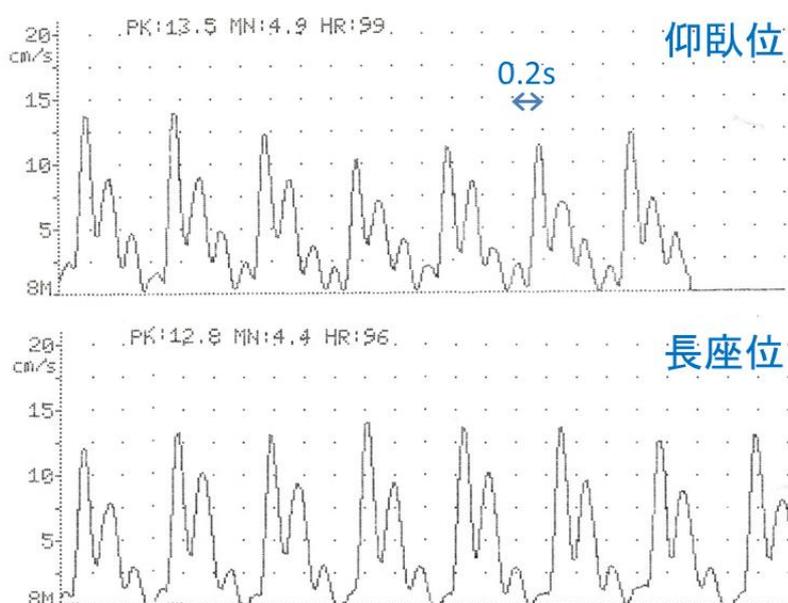


Fig.6-13 足首圧迫時（上）、解放時（下）
長座位で若干流速が上がっているが、微増である。

ちなみに血流計グラフ内でPKは最高流速，MNは平均流速であり，共に最初の三心拍を平均したものであり，HRは脈拍数を表している。また縦軸は流速（cm/s），横軸は時間でありドット間は0.2秒である（Fig.6-11上部に示す）。また，駆血時の平均流速を MN_C ，解放時の平均流速を MN_F ，そして阻血の割合を示す阻血率（Circulation Blocking Rate, CBR）を

$$CBR[\%] = \frac{MN_F - MN_C}{MN_F} \times 100$$

と定義し，数値が高いほどしっかり駆血が出来ているという指標とした。

被験者は小生一名（男性，42才）で行い，まずは後脛骨動脈に最も近い足首

の駆血，次に脛脛，太ももへのベルトによる駆血を行い，最後に掌での鼠蹊部圧迫を行って，部位ごとの流速を測定した。

6.3.2 実験結果

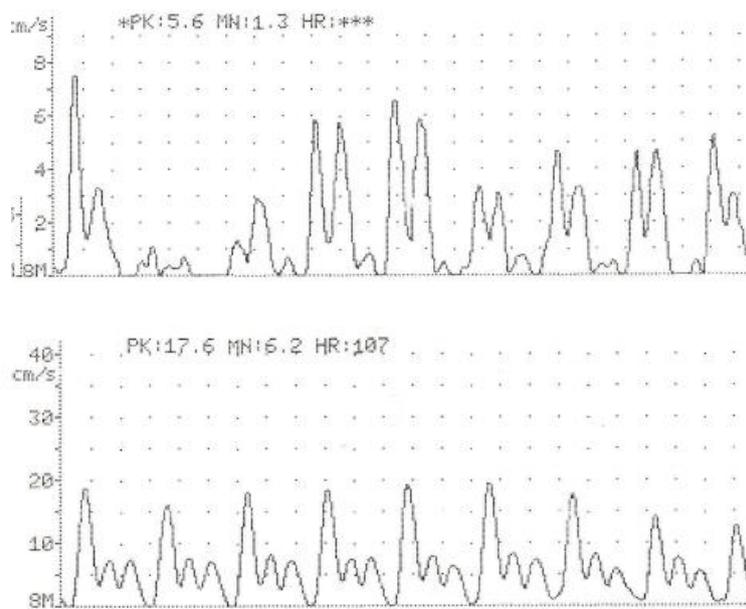


Fig.6-14 足首駆血時（上），解放時（下）の血流計データ
足首，正確には踝より 8cm 上を駆血した．ちなみに上グラフ内の駆血時 HR の***は測定不可を示している．

測定位置に最も近い足首の駆血時での阻血率は 79.0%であった（Fig.6-14）．また駆血時の脈拍が正常に計測できていないことから，ほぼ完全に動脈も阻血できている状態であると言える．

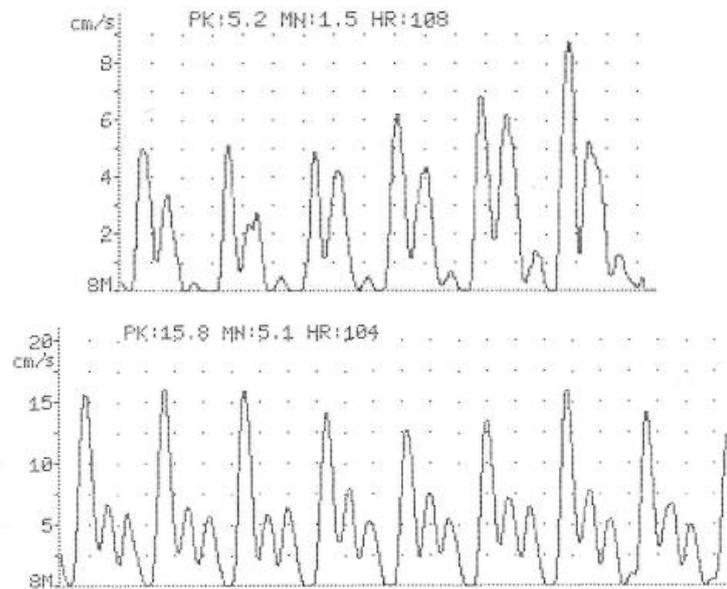


Fig.6-15 脛脛駆血時（上），解放時（下）の血流計データ

次に脛脛の最大径の位置を駆血した．阻血率は70.6%であった（Fig.6-15）．

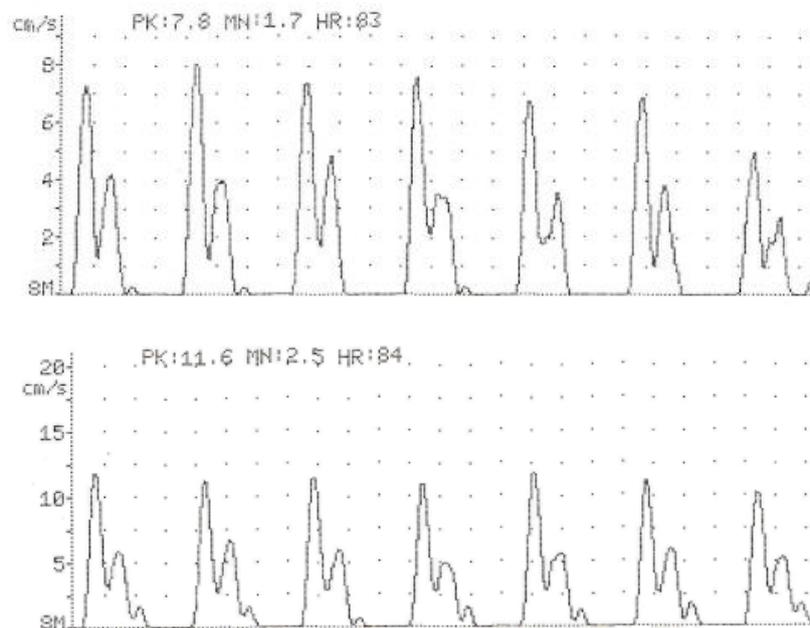


Fig.6-16 太腿駆血時（上），解放時（下）の血流計データ

太腿は，膝上15cmの位置を駆血し，測定を行った．阻血率は32.0%であった．（Fig.6-16）

最後に，掌での鼠蹊部圧迫駆血法（Fig.6-17）による血流計のデータを示す．この鼠蹊部圧迫実験のみ5回行った（Table.6-3）．



Fig.6-17 掌による鼠蹊部圧迫駆血法実験風景

Table.6-3 掌による鼠蹊部圧迫実験データ

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
PK [cm/s]	9.3	16.0	11.7	9.7	5.6
MN _C [cm/s]	2.3	4.0	2.6	2.8	0.7
MN _F [cm/s]	3.6	6.2	5.5	5.1	7.5
CBR[%]	36.1	35.5	52.7	45.1	90.6
HR[b/m]	91	101	102	101	99

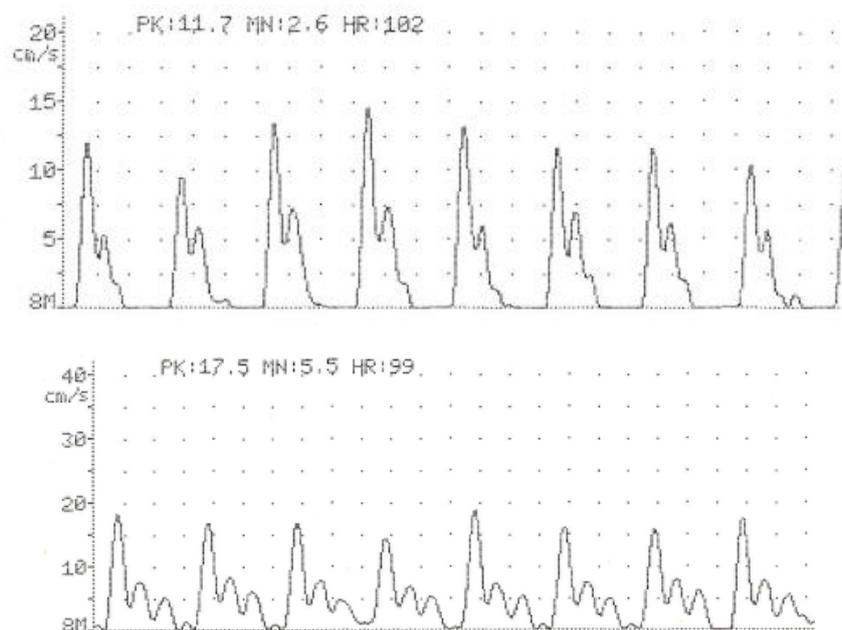


Fig.6-18 鼠蹊部圧迫阻血時（上），解放時（下）の血流計データ例

5回の測定を行い，平均の阻血率は52.0%であった．Fig.6-18は，5回実験の内最も平均値に近い3回目実験の測定データである．

6.3.3 考察

ベルトによる駆血実験では，測定位置である踝から駆血位置が離れるほど，また駆血する部位の径が大きいほど阻血率が悪くなることが確認できた

(Fig.6-19)．径に関しては，径が小さければそれだけ血管を直接駆血できるからであると推測する．また，足首駆血においても若干の流速があったのは，完全駆血が出来ていないか，または体の微妙な動きによって血管内の血液が移動したそのノイズを拾った可能性がある．

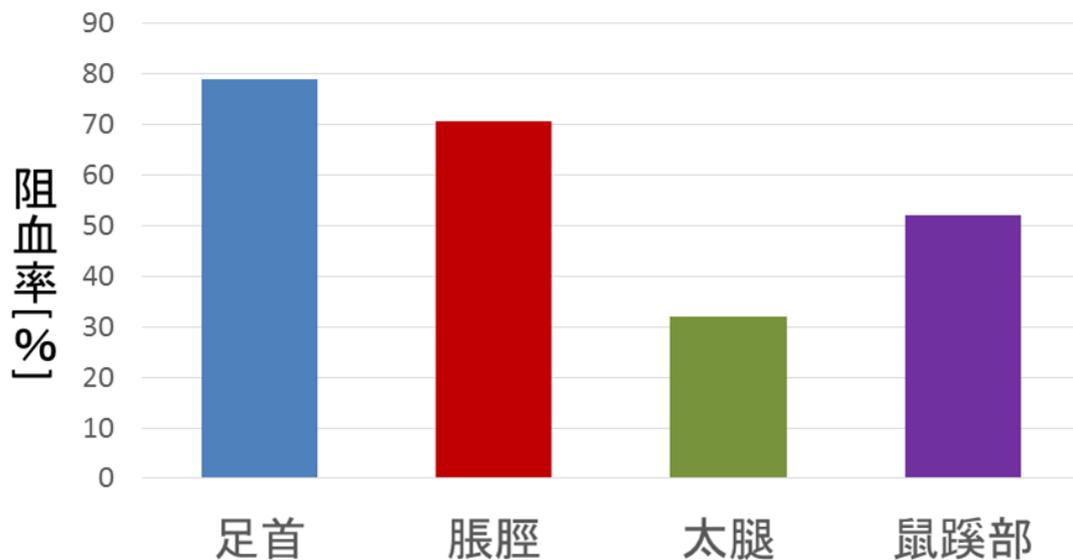


Fig.6-19 駆血位置模式図（上）と阻血率

また鼠蹊部圧迫阻血法に関しては，太腿駆血以上の阻血効果を有することが示された。

6.3.4 結論

上記実験により，鼠蹊部圧迫駆血法は，太腿動脈の完全阻血は難しいものの太腿駆血以上の阻血効果は期待できるため，動脈よりも軟質である太腿静脈に関してかなりの阻血効果を有する可能性を示唆した。これは，鼠蹊部圧迫を CSP 機構で正常に行うことが出来れば CS の発症を阻止もしくは大幅に遅延させられる可能性を示唆しており，以降における CSP 機構実験の重要な予備実験となり得たと考える。

6.4 実物大 CSP 機構試作模型を用いた下肢駆血実験

子機入渠型人命救助ロボットのブルーダ・ユニットに搭載予定の，CSP 機構（Crush Syndrome Preventer，クラッシュシンドローム発症阻止機構）試作模型を作製した。これはコンセプト上の CSP 機構から，スクーパー（被災者収容）機構を排除し，CS 発症阻止が工学的に可能かを実験するための簡易な実物大実験機である。外殻は，床板に合板と，天板と壁面には視認性と硬度を併せ持ったポリカーボネイト板をアルミ製の角パイプで補強し，エアバッグの膨張圧力に耐えうる構造とした。（Fig6-20，6-21）



Fig.6-20 CSP 機構模型外殻の概観

サイズ：610W×600D×400H [mm]

床材：合板木板 9 mm厚

壁及び天板：ポリカーボネイト板 3 mm厚

補強材：アルミ角パイプ

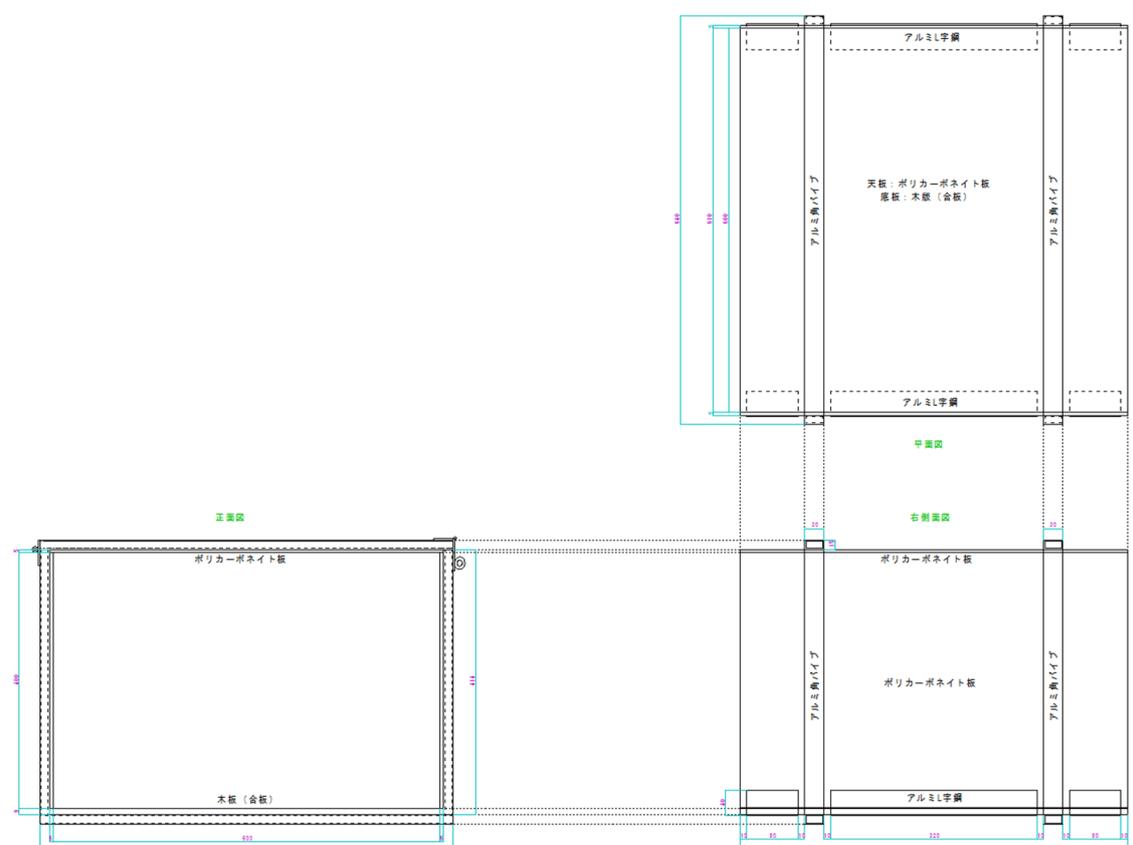


Fig.6-21 CSP 機構模型外殻の設計図

鼠蹊部圧迫機構として、0.2mm厚の塩ビシートで600W×300D×300H[mm]のエアバッグを作製し、そこに発泡ポリスチレン製の圧迫材を接着したものを使用した。圧迫材のベース（Fig.6-22で合板を使用している部分）は最初発泡ポリスチレンの40mm厚板を使用していたが、圧迫時に圧力による変形が確認されたため、また正確な圧迫圧を計測するためFig.6-22の圧迫機構を製作した。



Fig.6-22 鼠蹊部圧迫材の概観（左）とその断面模式図（右）
計測時はこの圧迫機構を裏返しにして使用する。

Fig.6-22で確認できるハの字の圧迫材で鼠蹊部を圧迫する。圧迫圧力の計測用に、小型体重計を取り付けた。圧迫材は位置の微調整が可能なようにマジックテープで接着してある。これらをCSP外殻の天板に接着し、圧迫を行った。ちなみにFig.6-22内で傾倒防止用スペーサーがあるが、これは圧迫材が倒れることで大腿動/静脈に対し垂直に圧迫できなくなる状態を防ぐために一時設置したものが、実験前のテストにおいてむしろ障害となり、なくてもほぼ傾倒しないことが判明したので実験内では撤去している。

また、本実験に当たり健常者を対象とした臨床実験を行うため、本学の「平成26年度第4回生命倫理委員会（平成27年1月19日開催）」における審理により、承認を得た。被験者には本実験の目的と方法、想定される危険性を伝え、安全に十分配慮をした実験を行うことを口頭にて伝えた。

6.4.1 実験方法

CSP機構実験装置の概略図をFig.6-23に、使用したコンプレッサと体重計の

仕様を Table.6-4 示す. 計測機器と計測方法は予備実験である「6.3.1 実験方法」に準拠する. 鼠蹠部は着衣状態のまま圧迫材を押し当て, 圧迫圧測定用体重計の値で 25kg を示した時点で充気を止めて計測した.

体重計の値 25kg の根拠だが, 近年の研究でターニケットによる太腿駆血の場合, 駆血圧力は 250~300mmHg となっている^{6-20) 6-21)}. 圧迫材の人体接触面積 (縦 40mm×横 80mm×2 個) から計算すると, 25kg で 287mmHg となるためである. ちなみに救急の現場では 450 mmHg までの加圧を行うが⁶⁻²²⁾, 本機構もまた救急に相当するものの, あくまで研究室内での実験であるため 250~300mmHg の値を利用した.

被験者は 4 名 (男性 4 名 平均年齢 40.8 歳, Table.6-5), 一人につき 5 回計測を行った. 実験結果の検定 (t-検定含む) はマイクロソフトのエクセルを使用し, 一元配置分散分析で検定を行った. 有意水準は 5%とした.

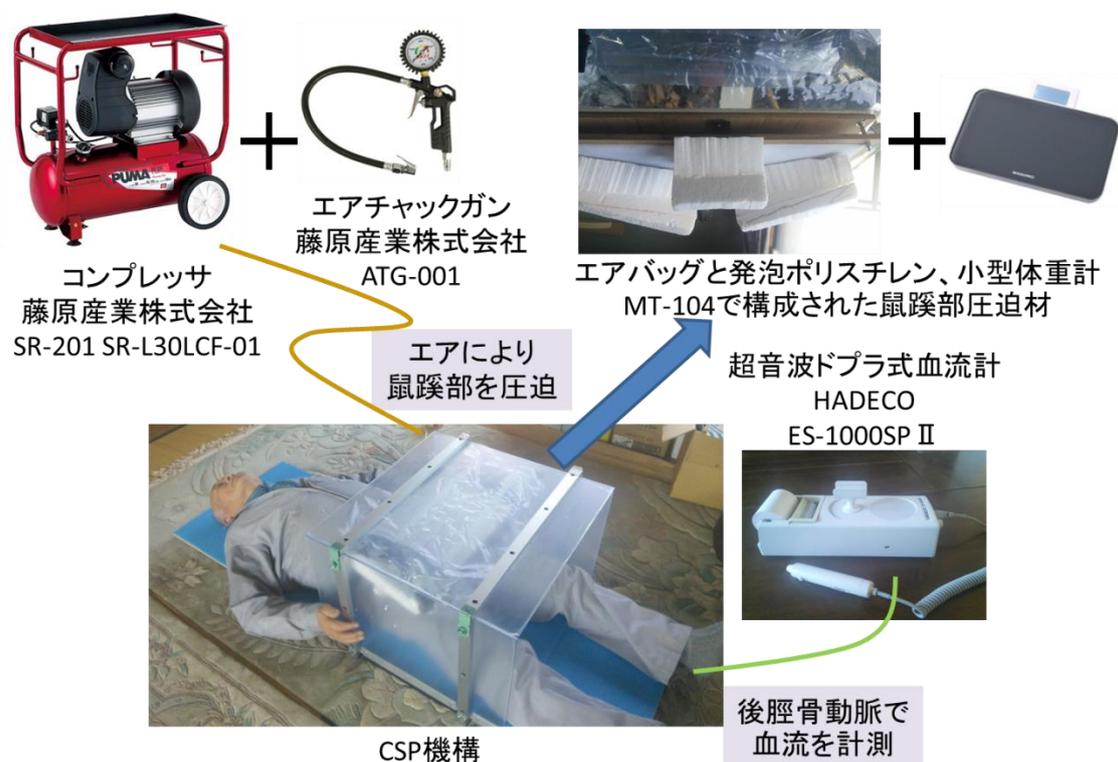


Fig.6-23 CSP 機構実験装置概略図

Table.6-4 コンプレッサ（左）と体重計（右）の仕様

コンプレッサ		圧迫圧計測用体重計	
型番	SR-L30LCF-01	型番	MT-104
製造元	藤原産業株式会社	製造元	マキノトレーディング
空気圧縮方式	往復動ピストン方式	計測範囲	5～150kg
重量	45kg	目盛り	50g単位(100kgまでは)
サイズ	635W×415D×750H[mm]	重量	697g
最高圧力	1.0MPa	サイズ(表示パネル収納時)	232W×142D×26H[mm]
タンク容量	30L		

Table.6-5 被験者の体格

	性別	年齢 (才)	身長 (cm)	体重 (kg)
被験者 A	男性	75	174	80
被験者 B	男性	42	172	122
被験者 C	男性	23	172	81
被験者 D	男性	23	173	50

6.4.2 実験結果

以下に、実験結果を示す。Fig.6-24～6-27 に示すグラフは、各被験者の平均阻血率に最も近似しているトライアルをピックアップして示した。

Table.6-6 CSP 機構による駆血実験 被験者 A

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
PK [cm/s]	6.7	9.3	23.6	14.5	6.9	12.2
MN _C [cm/s]	0.8	1.4	3.1	2.5	1.0	1.8
MN _F [cm/s]	1.5	2.3	4.4	4.3	2.8	3.1
CBR [%]	46.7	39.1	29.5	41.9	64.3	44.3
HR[b/m]	68	68	70	70	73	69.8

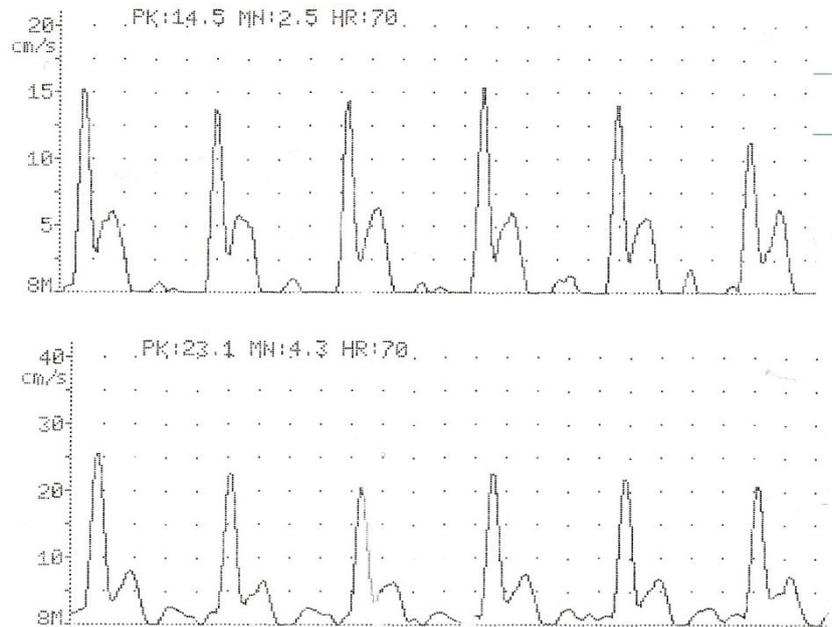


Fig.6-24 CSP 機構での駆血時（上），解放時（下）の血流計データ例
被験者 A（4 回目）

Table.6-7 CSP 機構による駆血実験 被験者 B

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
PK [cm/s]	3.6	9.6	9.1	9.9	9.1	8.3
MN _C [cm/s]	0.4	3.1	2.4	1.8	1.7	1.9
MN _F [cm/s]	3.7	5.3	4.1	5.9	4.8	4.8
CBR [%]	89.2	41.5	41.5	69.5	64.6	61.3
HR[b/m]	92	91	93	91	92	91.8

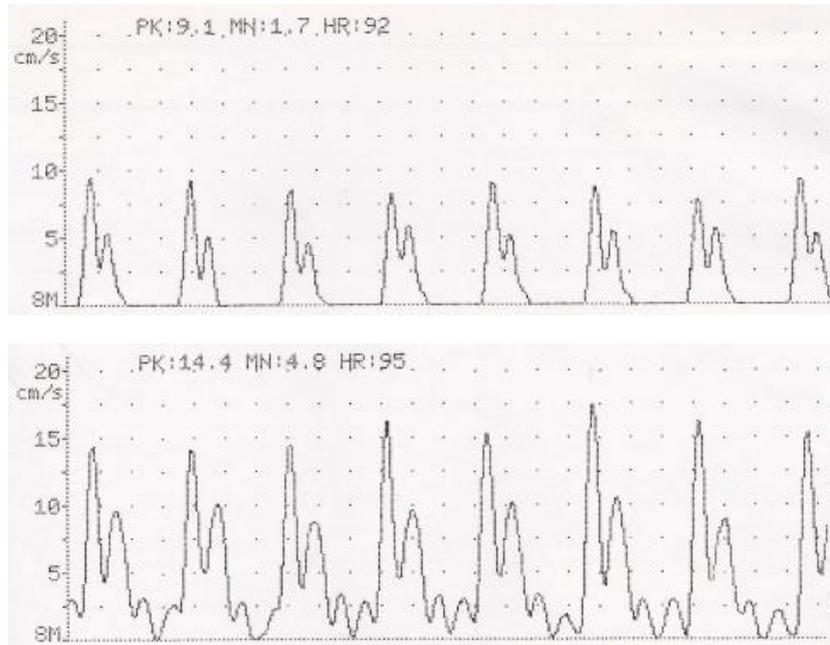


Fig.6-25 CSP 機構での駆血時（上），解放時（下）の血流計データ例
被験者 B（5 回目）

Table.6-8 CSP 機構による駆血実験 被験者 C

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
PK [cm/s]	8.0	10.6	8.7	6.8	3.5	7.5
MN _C [cm/s]	1.2	1.7	1.4	1.0	0.7	1.2
MN _F [cm/s]	2.3	3.1	2.3	2.4	2.6	2.5
CBR [%]	47.8	45.2	39.1	58.3	73.1	52.7
HR[b/m]	60	62	60	57	55	58.8

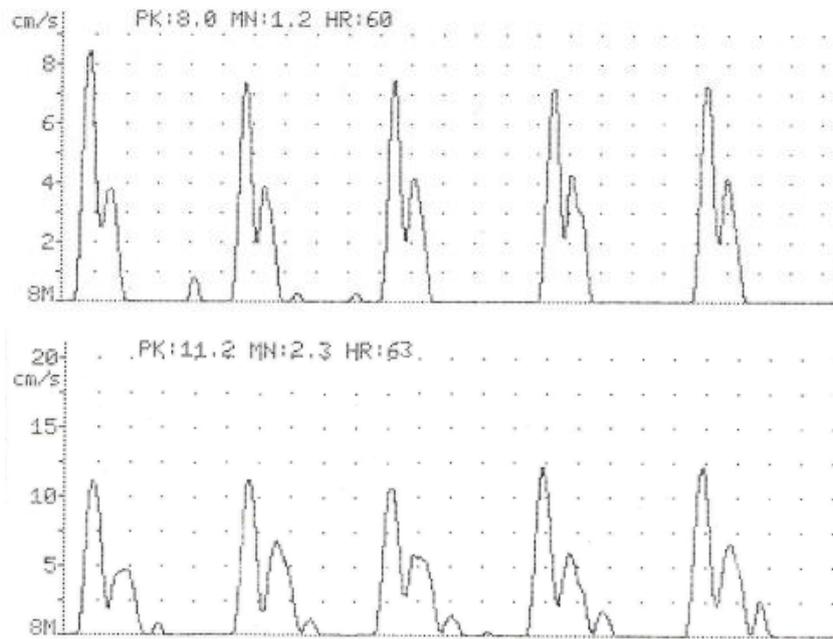


Fig.6-26 CSP 機構での駆血時（上），解放時（下）の血流計データ例
被験者 C（1 回目）

Table.6-9 CSP 機構による駆血実験 被験者 D

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
PK [cm/s]	3.3	6.1	6.1	4.1	5.9	5.1
MN _C [cm/s]	1.0	0.7	0.7	0.3	0.7	0.7
MN _F [cm/s]	2.0	2.0	2.4	2.6	2.1	2.2
CBR [%]	50.0	65.0	70.8	88.5	66.7	68.2
HR[b/m]	68	59	59	51	55	58.4

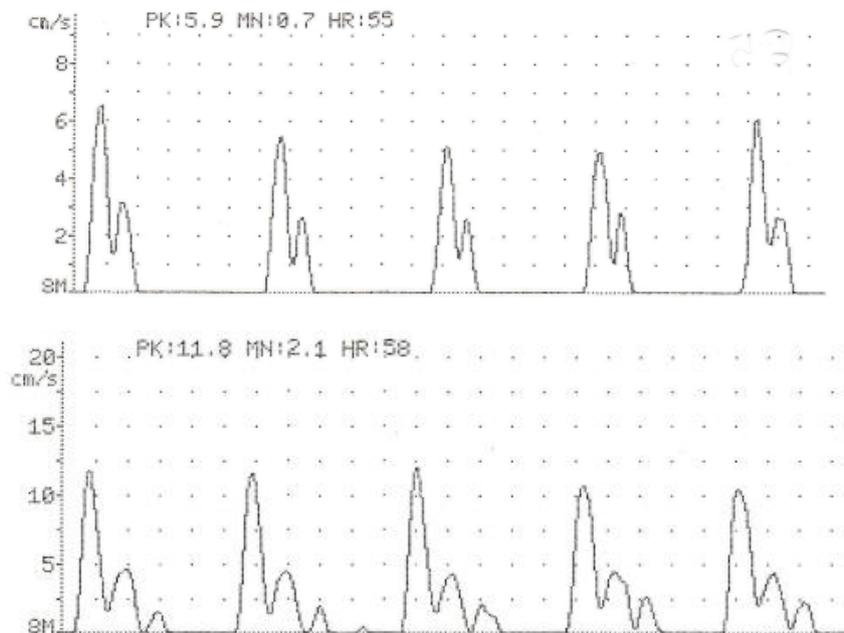


Fig.6-27 CSP 機構での駆血時（上），解放時（下）の血流計データ例
被験者 D（5 回目）

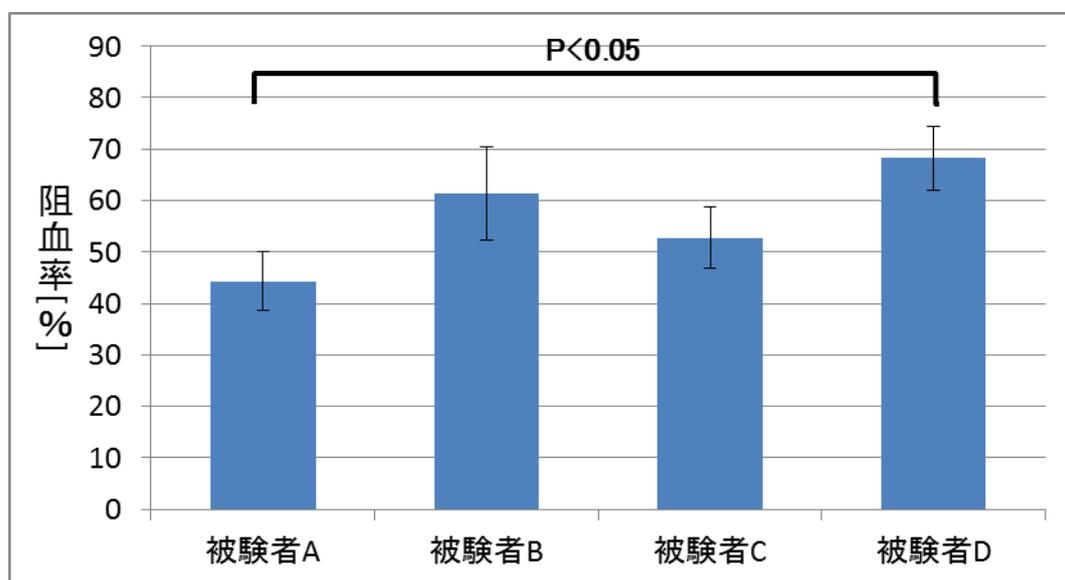


Fig.6-28 CSP 機構実験結果
被験者 A-D 間を除く被験者間での有意差なし

5 回のトライアルの平均阻血率は，被験者 A で 44.3% (Fig.6-24, Table.6-6)，
被験者 B で 61.3% (Fig.6-25 , Table.6-7)，被験者 C で 52.7% (Fig.6-26,
Table.6-8)，被験者 D で 68.2% (Fig.6-27, Table.6-9) となった。 t-検定の結

果，被験者 A-D 間でのみ 5%の有意差が生じたが，それ以外の被験者間での有意差は無かった (Fig.6-28).

6.4.3 考察

CSP 機構による実験結果の阻血率の総平均 56.6%を，先に行った掌による鼠蹊部圧迫実験結果と比較したものを， Fig.6-29 に示す.

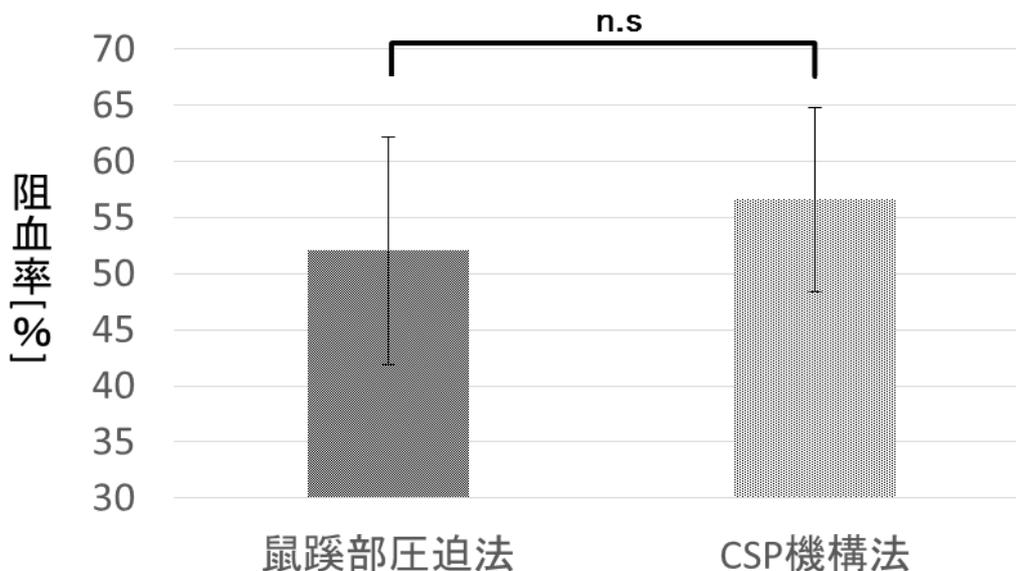


Fig.6-29 掌による鼠蹊部圧迫と CSP 機構の阻血率比較

被験者数と実験回数が違うため (鼠蹊部 5 回×1 人，CSP 機構 5 回×4 人) 比較の結果，足首や脛脛の結果には及ばないものの，掌による鼠蹊部圧迫駆血法よりも高い阻血率を示していることが解る．しかし t - 検定の結果両者間に有意差は無かった．

また，各被験者間で A-D 間を除き有意差は無かったものの，平均の阻血率が各被験者間一定の差が生じた．この原因の一つとして，加齢による動脈の硬化が考えられる．

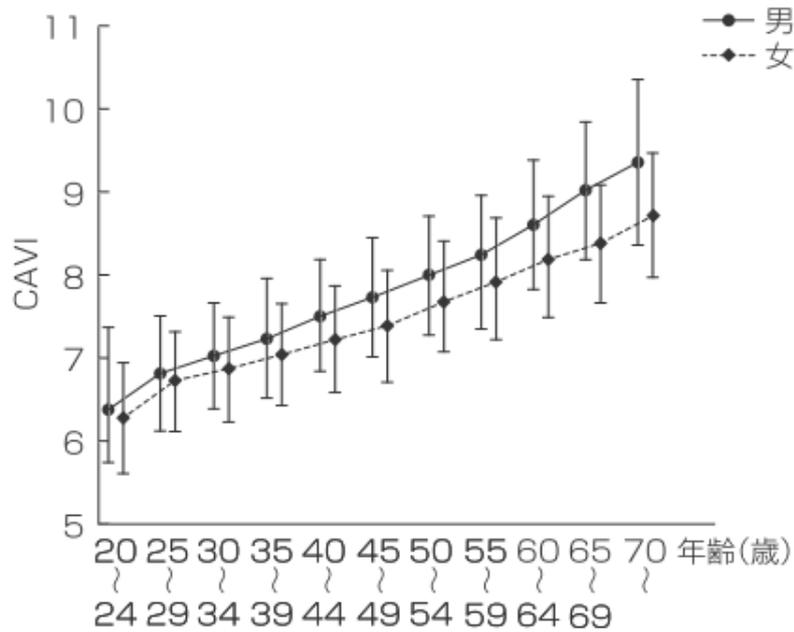


Fig.6-30 CAVI（心臓足首血管指数：cardio-ankle vascular index）における加齢の影響と性差

「4. 血管機能検査—CAVI, PWV, ABI」（島倉淳泰, 高田正信）日本内科学会雑誌, Vol. 102 (2) , pp336, 2013

Fig.6-30は加齢による動脈の硬さの変化を,性別ごとに示したグラフであり, 血圧に依存しない動脈の硬さを計測可能な非観血的動脈硬化指標である CAVI の値（縦軸）が高くなるほど動脈が硬くなっている。

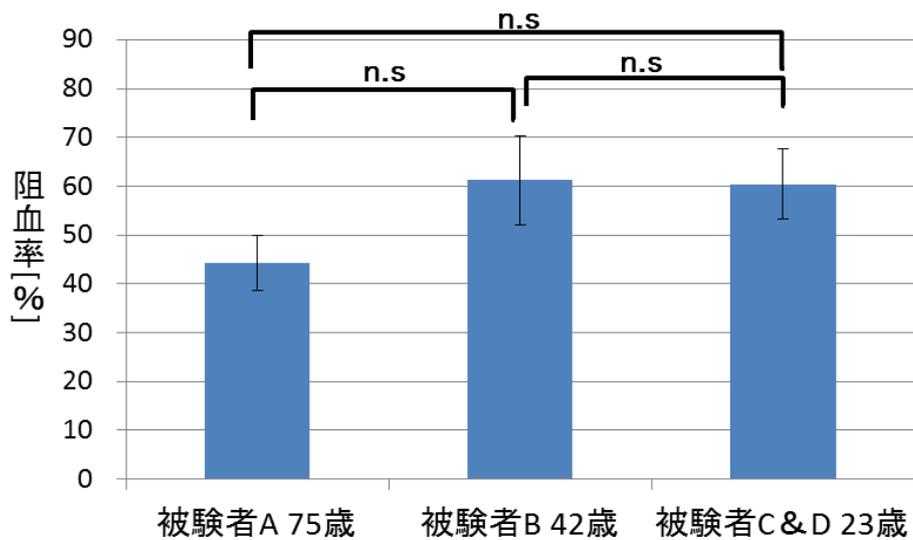


Fig.6-31 年齢別 CSP 機構実験結果

今回の被験者 4 名を年齢別に分け、C,D が同年齢の為、この 2 名の平均値にしてグラフにしてみたが、75 歳の被験者 A のみ平均阻血率が低かったが、B と C・D 間では B の方が平均阻血率が高く、また全ての年齢間で有意差は無かった。(Fig.6-31)

つまり今回の実験においてはこの年齢による動脈の硬さが被験者間の阻血率の違いの要因であるとは言えず、個体差、体調、血圧などその他の要因も十分考慮すべきであると考ええる。

さらに、被験者 C と D は同年齢にも関わらず一定の差が生じた原因としては、体脂肪率の差が考えられる。同じ圧力で圧迫しても、脂肪がクッションとなり圧迫圧に影響が生じた可能性がある。この仮説を証明するためには、同年代で体脂肪率が異なる被験者を対象とした実験を行う必要があるだろう。同様に、圧迫圧力に影響するものとしては、着衣の生地や材質や、厚さそのものも影響することが考えられる。これら数値のばらつきの原因を同定するには、より多くの被験者と、実験回数が必要となるだろう。

6.4.4 結論

今回の実験は、CSP 機構による鼠蹊部圧迫であっても、掌による鼠蹊部圧迫駆血法と同等か、それ以上の阻血効果が期待できる可能性を示した。

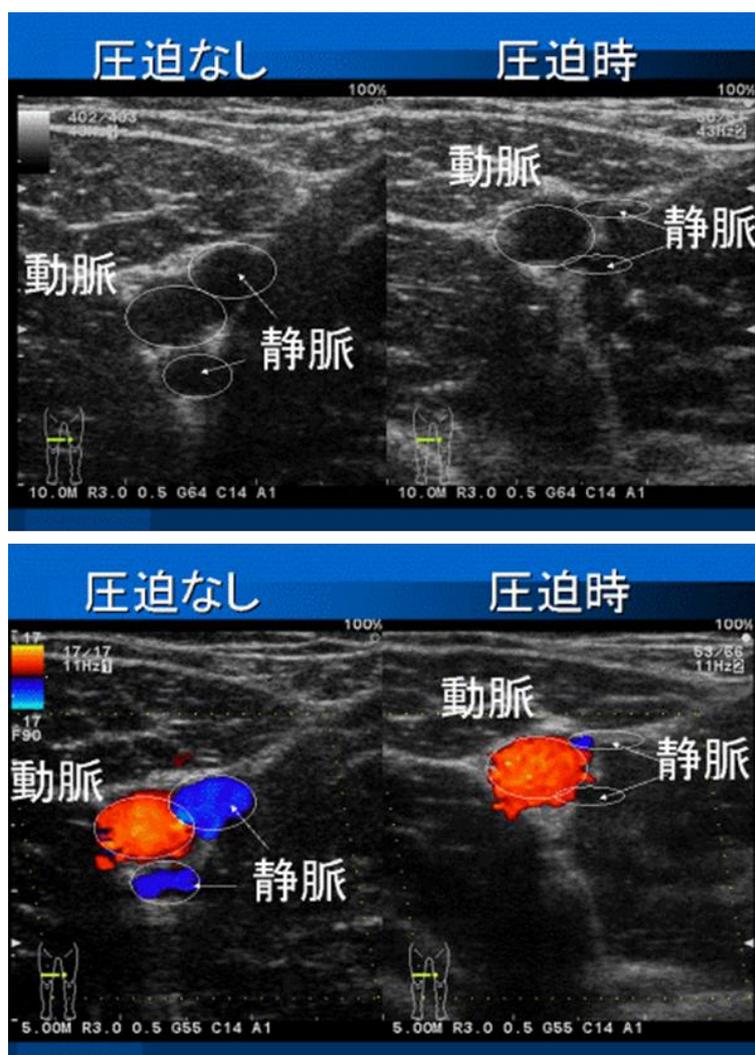


Fig.6-32 大腿動／静脈圧迫時のエコー画像（下はカラードプラモード）
循環器画像技術研究会提供

現在使用している測定器では、当 CSP 機構で大腿静脈の完全阻血が出来ていることを確認することはできない。Fig.6-32 は循環器画像技術研究会より提供いただいた画像であり本実験で得た画像ではないものの、血管の形状や血流量をリアルタイムで観察可能なカラードプラモードが使用できるエコー（超音波検査装置）での、大腿動／静脈の圧迫時と解放時の様子を示している。これによると左図では動脈がほとんど変形していない状況でも静脈がつぶれているのが見て取れ、それに伴い右図では静脈血の流量も極端に減少しているのが見て取れる（下図では青色が静脈の血流を示している）。この図から、本実験において下肢動脈の流速を半減できたという事は、ほぼ静脈の阻血は成されていると想定でき、これによりかなりの発症遅延効果及び症状の軽減効果が期待できる。

また駆血対象者の年齢，性別，体脂肪量によって同じ圧迫圧でも阻血効果に

差が生じる可能性を示した。これには、苦痛を与えない範囲で全ての条件の人を駆血できる最大圧力を模索するか、圧迫中に血液の流速以外の計測を行い、そのデータを見ながら確実な駆血が可能な各人の最少圧力で圧迫する方法を模索しなければならない。

今回指標として血流計による血液の流速を阻血効果確認の指標としたが、血管の位置特定や特定した位置や角度の保持など、比較的計測に慣れと訓練を要することが解った。これでは実験室においては問題ないものの、遠隔操作のロボットに使用する計測器としては不適合であると判断する。より簡便に、そして確実に流速を自動計測できる方法を探るか、別の指標を利用する計測装置を使用するか、検討を行わなければならない。

6.5 まとめ

本実験においての今後の展望を以下に示す。

- ① 鼠蹊部圧迫に適した圧迫材の形状（厚さ、高さ、傾斜角など）、材質、圧迫位置、圧迫圧力を変更した実験を行い、より効果的な CSP 機構による鼠蹊部圧迫駆血を目指す。
- ② 今回は4人という少ない被験者数での実験であったが、その中でも阻血率にばらつきが生じた。そのばらつきが生じた原因を同定するために、年齢、体脂肪量、測定時の血圧、被服の厚みなどの検証項目について、より多くの被験者を対象に駆血実験を行いたい。
- ③ 血流計以外のパラメータを用いた実験については、大腿動脈の拍動（心拍音）を圧迫中の圧迫材から取得する方法を検討したい。駆血実験中、血流計のスピーカからはプローブの押し当て位置と角度を示すために拍動が聞こえているが、阻血時と通常時では、確実に脈拍音のパターンが異なっていた。この脈拍音のパターンの違いを阻血効果の目安に利用する方法を模索し、実験を行えば、より確実に、しかも安価な CSP 機構となる可能性がある。また、DVT（深部静脈血栓症）スクリーナ^{2-38) 2-39)}や「2.2.3 バイタルセンサプローブ」の原理を応用し、近赤外カメラで足背動脈などを非侵襲に撮影し、その血流を計測することが出来れば、阻血指標として活用できるだろう。
- ④ 「6.2.2 駆血方法」においても少し触れたが、止血を行う際簡便であるが効果的な方法として、心臓より高い位置に患部を保持する「高位保持」という手技がある。ただし駆血の場合この手技と逆に心臓より患部を低くする「低位保持」を行うべきであり、コンテナ内に（脚部が心臓より低くなる程度の）傾斜をつけるのも有効なはずである。効果的な傾斜角を実験で検証するべきだ。

- ⑤ 今回はエアバッグを膨張させての加圧を行ったが、この方式だと駆血に必要な膨張に達する前に、エアバッグが割れる可能性を感じ、恐怖する人も多いだろう。そのため血圧や心拍数が上昇する可能性もある。そもそも本 CSP 機構は、閉所恐怖症、風船恐怖症を持つ方には多大な精神的苦痛を与える機構である。閉所恐怖症に対しての対策は機構的に非常に難しいが、風船恐怖症に配慮する意味で、圧迫をエアバッグではなくアクチュエータによる上昇・下降機構を利用したものに変更することも検討すべきであろう。

「6.1 クラッシュシンドロームの機序と診断」にも示したが、CS が最も重篤化しやすい人物は、横紋筋の総量が多い、若く屈強な男性である。若い男性はその分動脈も柔軟であり、本 CSP 機構においても高い阻血効果が期待できるため、CS の対処法として遠隔操作での薬物投与などの方法を模索するのではなく、CSP 機構として鼠蹊部圧迫駆血法を用いたことは、理に適った CS 対処法であったと言えよう。

【第 6 章の参考文献】

- 6-1.安田清, 小林一郎:“災害とクラッシュ症候群”, トリアージ市民公開講座 テキスト用冊子, アサヒカコー株式会社, 2005
- 6-2.嶋津岳士:“震災と外傷・クラッシュ症候群(PGS 第 83 回卒後教育セミナー, 第 113 回日本外科学会定期学術集会)”, 日本外科学会雑誌, 114(臨時増刊号 2), pp375, 2013
- 6-3.吉村晶子, 梶原浩一:“日本における瓦礫救助訓練施設のあり方に関する検討”, 地域安全学会梗概集, (19), pp87-90, 2006
- 6-4.吉村晶子, 加古嘉信, 佐藤史明:“日本における瓦礫救助医療訓練施設に求められる要件に関する研究”, 地域安全学会論文集, (9), pp311-320, 2007
- 6-5.日本集団災害医学会:“増補版 DMAT 標準テキスト”, へるす出版, 2012
- 6-6.杉本侃:“クラッシュシンドローム”, 日本整形外科学会雑誌, 71(7), pp285-291, 1997
- 6-7.淵岡聡, 林義孝, 中川法一, 吉本洋二, 中山朗, 境隆弘, 井上悟:“クラッシュ症候群に対する理学療法と筋力回復の経過について”, 理学療法学 23(2), pp112, 1996
- 6-8.鴻野公伸:“クラッシュ症候群 (特集 輸液・輸血療法の考え方) -- (輸液・輸血療法各論)”, 救急医学, 37(13), pp1725-1729, 2013
- 6-9.重本達弘, 林下浩士, 松尾吉郎, 鍛冶有登, 月岡一馬, 鶴飼卓, 嶋岡英輝:“クラッシュシンドロームにおける血液浄化法の臨床的検討 -阪神大震災 23 例の分析から-” 日本救急医学会雑誌, 7(10), pp633-640, 1996

- 6-10. 弓狩加恵, 津郷幸子, 井川真希, 石橋直美, 吉澤梨津好, 島田典明, 橋本徹: “尿沈渣中にミオグロビン円柱を認めた横紋筋融解症による急性腎不全の症例—顆粒円柱およびろう様円柱に類似するミオグロビン円柱の鑑別の意義—”, 医学検査, 63 (4), pp423-427, 2014
- 6-11. 吉岡敏治, 田中裕, 松岡哲也, 中村顕: “集団災害医療マニュアル”, へるす出版, 2000
- 6-12. 山勢博彰, 山勢善江, 菅原美樹, 他: “系統看護学講座 別巻4 救急看護学 第4版”, 医学書院, pp289-293, 2006
- 6-13. 救急救命士標準テキスト編集委員会 編: “改訂第7版 救急救命士標準テキスト 上巻”, へるす出版, pp374-376, 2007
- 6-14. 和田攻 編: “実践臨床看護手技ガイド 第2版”, 文光堂, pp558-562, 2003
- 6-15. 曾我幸弘, 泰川恵吾 監修: “すぐ引ける救急事典”, 成美堂出版, pp98-101, 2007
- 6-16. 石川朗, 木村雅彦 (編): “理学療法テキスト 内部障害理学療法学 循環・代謝”, 中山書店, pp14-18, 2010
- 6-17. 水口仁: “ドプラ検査の基礎(基礎講座: 超音波)”, 日本放射線技術學會雑誌, 60(2), pp245-250, 2004
- 6-18. 森田久樹, 深田英利, 松尾裕英: “9.超音波ドプラー法による心血流量測定”, 目でみる循環器病学, メジカルビュー社, pp36-39, 1991
- 6-19. (社) 日本生体医工学会 ME 技術教育委員会 監修: “改訂第5版 MEの基礎知識と安全管理”, pp96-101, pp176-179, pp190-207, 2008
- 6-20. Bahattin Tuncali, Ayse Karci, Abdul Kadir Bacakoglu, Binnur Erdalkiran Tuncali, Ahmet Ekin. “Controlled hypotension and minimal inflation pressure: a new approach for pneumatic tourniquet application in upper limb surgery.”, Anesthesia and analgesia, Nov;97(5), pp1529-32, 2003.
- 6-21. Christopher W. Reilly, James A. McEwen, Lise Leveille, Angeliki Perdios, Kishore Mulpuri: “Minimizing tourniquet pressure in pediatric anterior cruciate ligament reconstructive surgery: a blinded, prospective randomized controlled trial.”, Journal of pediatric orthopedics, Apr-May;29(3):pp275-80, 2009.
- 6-22. 島倉淳泰, 高田正信: “4. 血管機能検査—CAVI, PWV, ABI”, 日本内科学会雑誌, 102 (2), pp335-343, 2013

第七章 まとめ

以下に、本論文内において当人命救助ロボットの研究として各ユニット毎に、そして全体として何を行い、どこまで進めることが出来、今後何をすべきかを示していく。

7.1 結果の総括

7.1.1 キャリア・ユニットに関する研究結果の総括

キャリア・ユニットの実験としては、1/10 サイズの縮尺模型を使用し、①瓦礫こじ開け機構のこじ開け実験と、②クローラ駆動体の走行性能実験、③FEMを用いた強度解析を行った。

- ① 瓦礫こじ開け機構に関しては、ラグの高さと間隔のパラメータをそれぞれ変更し実験を行ったところ、高さを高くするほど、また間隔を広げるほど低い初期進入口でこじ開け可能となった結果と、その逆の傾向を示すという矛盾した結果を示した。
- ② クローラ駆動体の走行性能実験に関しては、水槽を使用した定量的解析システムを用い、路面条件を変更しての直進運動と、旋回運動の解析を行った。直進運動に関しては路面にデコラを使用したフィールドが最も高い走行速度を示し、旋回性能に関しては、信地旋回に比して超信地旋回がより速い速度で旋回する事が出来た。
- ③ FEMを使用し、試作1号機の形状・材質を基に応力解析を行ったところ、最大荷重は 4.0×10^6 Pa、この数値を基に許容応力を計算すると、 2.6×10^4 Paとなる。この結果は、単位面積当たり2.6tまで耐えられる事を示している。

7.1.2 ブルーダ・ユニットに関する研究結果の総括

ブルーダ・ユニットの実験としては、1/6 サイズの縮尺模型を使用してのアルキメデス螺旋駆動体の実験として、①塩ビ製螺旋ロッドを使用しての走行実験と、②アルミ製螺旋ロッドを使用しての走行実験を行い、次に健常被験者を対象とした実物大CSP機構を使用した③CSP機構による下肢血管駆血実験を行った。

- ① 塩ビ製螺旋ロッドの走行実験に関しては、実験フィールドを砂利フィールドに固定し、巻き数を4, 5, 6回巻き、つまり螺旋羽根の設置間隔の異なる3種類のロッドを用意し走行実験を行ったところ、4回巻きが平均速度、走

破率ともに有意に高い結果を示した。次に巻き数を4回巻きに固定し、螺旋羽根の高さを5, 7, 9[mm], 材質をダクトホース, 天然ゴム, 透明ホース, 車体にかける負荷(荷重)をなし(0.0), 2.5, 5.0, 7.5, 10.0[kg]を用意し、さらに実験フィールドとして雪上も追加で用意し実験を行った。螺旋羽根の高さに関しては、総合的に判断すると7mmが最も高い走破性を示している。ただし各羽根の高さに有意差がなかったり、砂利の粒径によっては異なる傾向が見られた。螺旋羽根の材質の違いとしては、3種の材質の中で最も硬質なダクトホースが最も高い走破性を示した。次に負荷についてだが、7.5kg以上の負荷はモータ出力に影響したため、走行に支障をきたした。しかし5.0kgまでの負荷においては負荷が増えるごとに平均速度に反比例し、平均走行距離が延びる結果となった。また雪上走行においては総じて高い走破性を示したため、各条件での有意差は見られなかった。

- ② アルミ製螺旋ロッドの走行実験に関しては、アルミ製の螺旋羽根になったことで再び4, 5, 6回巻きの巻き数のロッドを用意した。次に実験フィールドとして砂利, 瓦礫モデル, 露地の3種類の悪路条件を用意し、走破性能の検証実験を行った。またトラバース走行での実験も行った。このアルミ製螺旋羽根では、総じて5回巻きが最も高い走破性を示したが、平均走行距離において有意差は無かった。また実験フィールドに関しては、当ロボットの運用が想定される瓦礫モデルフィールドにおいては短い平均走行距離という結果を示し、路面が最も軟質である露地走行において高い平均走行距離を示した。また、トラバース走行においては、条件に係らず、走行速度, 走行距離共に高い結果を示した。
- ③ CSP機構による下肢血管駆血実験に関しては、まず掌を使った鼠蹊部圧迫駆血法を用いた予備実験を行い、その時の血流を計測した結果、鼠蹊部圧迫法の有効性を示した。次にCSP機構による鼠蹊部圧迫駆血を行ったところ、足首や脛脛をベルトで駆血した際の駆血率には及ばないものの、掌による鼠蹊部圧迫時と同等の阻血効果があることを示した。

7.1.3 子機入渠型人命救助ロボットに関する研究結果の総括

各ユニットに直接関わらない、全体としておこなった研究としては、まず試作1号機が有していた問題点を改善するべく、2号機としての本ロボットを設計した。その中には、各ユニットへの機能振り分け, 瓦礫こじ開け機構, スクーパー機構, CSP機構の考案も含まれる。次に、人命救助ロボットの運用に係る者の法的責任を調査しているが、本論文内では割愛している。

7.2 総括的考察および今後の課題

7.2.1 キャリア・ユニットに関する総括的考察および今後の課題

- ① 瓦礫こじ開け機構に関しては、矛盾した結果の理由が生じた理由として上昇機構の構造的問題が考えられるため、ジャッキ式にするなど改善案が求められる。また、上部クローラの幅、ラグの材質、ラグの形状についての実験や、瓦礫に接触する上部クローラ先端部分のスプロケットの径を小さくすればより低い初期進入口でこじ開けられる可能性がある。今後研究を行わなくてはならない。
- ② クローラ駆動体（下部クローラ）の研究に関しては、走行実験を行ったものの、タミヤ製のクローラ模型そのままを使用しているため、現状新規性は無い。これからはすでに多く行われているクローラの研究と機構の中から、どれが瓦礫内進入に適しているかを選別し、搭載した上で運用フィールドへの適応化に関する改良や実験を行う必要がある。
- ③ FEMによる解析に関しては、現在3Dモデリングを行ったのはあくまで試作1号機なので、2号機（キャリア・ユニット）でのシミュレートも行うべきだろう。また、FEMの解析で、クローラの軸受け部分に荷重が集中することが分かった。この結果を活かすべく、軸受け部の強化を考えなければならない。さらに今回は静止している場合の耐荷重性と安全率を計算したものであるため、こじ開け作業に関するシミュレートも今後は行うべきであろう。

キャリア・ユニット全体としては、敷設式簡易トンネル、こじ開け重量軽減のための切削機構、上部クローラでこじ開けた瓦礫を後ろに送るローラの設計・開発・研究もまだ着手していないので、これから随時行っていかなくてはならない。

Table.7-1は、「Table.2-2 キャリア・ユニット開発に必要な研究項目」として示した研究項目から、今回研究行った項目を省き、代わりに今回の研究で生じた新たな問題や研究項目を追記したものである。

Table.7-1 キャリア・ユニット開発に今後必要な研究項目

キャリア・ユニット				
クローラ		こじ開け機構		全体
瓦礫内進入に適した	クローラの幅	瓦礫こじ開けに適した	クローラの幅	瓦礫排除用ローラの設計
	リブ(=ラグ)の高さ		リブの形状	ローラの開発・実験
	リブの形状		リブの材質	トンネルの設計・試作・実験
	リブの間隔		上昇機構をジャッキ式に変更	瓦礫排除用ローラの設計
	リブの材質			2号機へのFEM解析
	転輪の数		走行に干渉しない上昇機構の設計・試作	上部瓦礫の押しつぶしに対する耐荷重性強化
	転輪の配置		実際の瓦礫に即した瓦礫モデルを用いたこじ開け実験	状況確認用照明・カメラの数・種類・配置の検討
悪路踏破実験	実機の動力、性能を想定した縮尺模型を試作した上での瓦礫進入実験			
車軸の耐荷重性強化		切削機構の実験		
サスペンションの導入	排障器の考案			

以上の Table.7-1~7-3 の表内で、赤字は本論文内での実験で新たに生じた問題点・研究項目を示したものであり、橙色は本論文内で触れていないが研究を行っている項目である。

7.2.2 ブルーダ・ユニットに関する総括的考察および今後の課題

- ① 塩ビ製螺旋ロッドの研究に関しては、すでにアルミ製螺旋ロッドで実験を行える環境にある現状で、あえて塩ビ製ロッドにこだわって行う追加実験は無い。しかしアルミ製ロッドの製造に比して製造・変更が容易であることから、アルミ製ロッド実験の前駆実験としての利用は十分考えられる。
- ② アルミ製螺旋ロッドの研究、というよりはアルキメデス螺旋駆動体全体の考察として、縦走行に関しては、4~6回巻きの範囲での巻き数の違いは、走行速度にこそ影響があるもの走破性(=走行距離)に関して影響は無かった。反して影響が大きかったのは路面への螺旋羽根の食い込み深さであり、今後はそちらに主眼を置いた研究を行うべきであろう。また、車体のバタつき(小さな跳ね)が車体の前進の妨げになっていたことから、サスペンションの導入と研究も積極的に行っていきたい。次にトラバース走行に関しては、トラバースを前提とした、つまり進行方向に対し垂直な方向に螺旋ロッドを配置した推進機構へのデザイン変更、その際の操舵方法も考案するべきである。また、この推進機構を採用しても左右への平行移動を考慮しない設計にしまうと、瓦礫乗り越えは可能であっても、タイヤ駆動と同じ挙動しかでき

ずにアルキメデス螺旋駆動体にした意義を失ってしまう。この形態であってもトラバース移動、つまり従来の縦走行能力の向上は不可欠であると判断する。

- ③ CSP 機構の研究に関しては、0.2mm 厚の塩ビシートのカフと圧迫材による機構で、掌による鼠蹊部圧迫法以上の阻血効果が得られることが解った。また、個人差により必要な圧迫圧に差が生じることもわかった。

これは実験を行ったことで理解できた事だが、血流計による後脛骨動脈の測定は、練習とコツが必要であった。このままロボットへの転用は困難であるため、より簡単な血流計測方法や、血流計以外の阻血の確認方法を選択する必要がある。代替案としては、駆血時の脈拍音パターンの変化に着目した脈拍音解析システムや、近赤外カメラを用いた動脈血流量測定システムなどが研究テーマとして挙げられる。

ブルーダ・ユニット全体としては、CSP 機構実験結果を考慮したスクーパ機構、圧迫物除去リフト、それら 2 つと CSP 機構の迅速・スムーズな連携による被災者収容方法、バイタルセンサプローブの設計・開発・研究をやり残している。とくに迅速・スムーズな被災者収容に関しては、時間的制約がある。血液の体循環に要する時間は 20～30 秒、静脈の再灌流を単純に体循環時間の半分と考えると、圧迫開放から再圧迫までに許容される作業時間は 10～15 秒しかない。ただし勢いのある動脈に比して静脈は流速が遅く、さらに圧迫解放後の血液の粘度や血管の損傷を考慮すると、もう少し猶予があるだろう。さらに CS の重篤な症状を引き起こすだけの量の筋組織が各臓器に流れ着くまでには、さらに時間を要するだろうと考える、これらの推測を補完する研究や症例報告は見あたらないが、どちらにせよ迅速な再圧迫が重要である。

Table.7-2 は、Table.7-1 と同様に「Table.2-3 ブルーダ・ユニット開発に必要な研究項目」に今回の研究で生じた新たな問題や研究項目を追記したものである。

Table.7-2 ブルーダ・ユニット開発に今後必要な研究項目

ブルーダ・ユニット				
螺旋駆動部		CSP機構及びスクーパ機構		全体
トラバースを前提にした	駆動部のリデザイン	C S 発 症 阻 止 の た め の の	圧迫材の形状	駆動体リデザインに伴う 全機構の配置再検討
	操舵法の考案・設計		圧迫材の材質	
	螺旋羽根の 高さ・間隔・厚さ		阻血指標の再検討	圧迫物除去リフトの設計・ 実験
			低位保持に有効な筐体 内傾斜角の検証実験	
	羽根先端の形状・材質		圧迫機構のエアバック から機械式への変更	状況確認用照明・カメラの 数・種類・配置の検討
	ロッドに巻く螺旋羽根の枚数		自動阻血確認機構の考案・ 製作・CSPへの組み込み	バイタルセンサカメラの 考案・実験
	螺旋羽根の仰角		改良CSPの臨床実験	ブルーダ・ユニットの 一連動作を再現可能な 縮尺模型を用いた実験
ロッドの径	スクーパの 設計・製作・実験			
新駆動機構での 悪路踏破実験	CSP機構とスクーパ機構の 連動確認実験	実物大実験機での收容 及び駆血実験		
サスペンションの 導入検討・設計				

7.2.3 子機入渠型人命救助ロボットに関する総括的考察および今後の課題

まず、今後の大まかな目標としては、より多様な災害に対応可能な、高い抗堪性を有し、かつ安価で可搬性に富み、使用しやすい災害MEの開発を目指すべきであろうが、そのどれをとっても限界がある。当人命救助ロボットでもそうであるように、制限仕様を設け、その範囲内で利用者のリスクを軽減する設計を行わなければならない。例えば、当ロボットがたとえ屋内瓦礫でスタックしても、進入口をロボットで塞ぐのではなくそのスタック位置まではトンネルを通過してレスキュー隊が移動できるように、キャリア・ユニットの胴体を空洞にしている。またCSP機構に関しては特に1時間を超える阻血状態は、それ自体が横紋筋融解症を引き起こし、または悪化させる可能性がある。そのため例えば被災者收容後何らかの形で電源消失してしまった場合、一定時間を経過したら（意識がある被災者ならばコンテナ内に搭載している降圧剤などを服用してもらった上で）エアバッグに小さな穴をあけて徐々に減圧をするなどの機構も必要だろう。

また、これは今回の論文内では省いている法的問題に関してだが、メーカーのみならず全ての救助関係者に共通する事として、個人や団体に救助に携わる者

は、その行動で手一杯である。しかし現行法はそういった善意ある行為者を守っているとは言い難い。職業に因らない多くの人間が救助に参加してもらうためにも、救助者の免責を謳った災害時特別措置法の制定を始め、法や政治が行動すべきである。その事に関してできることは、学会や展示会など様々な機会にその重要性を自治体関係者や市民に訴える事であろう。また災害 ME の（国際、国内、業界）規格の作成がなされれば、参入する業者も増えると考える。

Table.7-3 に、Table.7-1.7-2 と同じく「Table.2-4 2号機全体としての開発に必要な研究項目」に今回の研究で生じた新たな問題や研究項目を追記したものを示す。まだ研究は当ロボットが有する機構の各論の段階であり、各ユニット同士の連携に関する実験を行っていない以上、Table.2-4 とほぼ同内容のままである。しかし項目の最後に「日赤主催の救急法講座の受講など、実際の救急を体験し、実情に即した災害 ME の検討」を追記している。これは、当博論の審査会副査である本学斎藤秀俊のご指摘であった。先生は「災害診療は人と人のふれあいである」と仰っている。機器の研究や開発ばかりに集中すると、このような本質から逸れていることに気付かないまま研究を進めてしまう危険性がある。それを失念しないためにも、また救急対応に関する実践的な知識を得るためにも、この項目は近々に実行しなければならない。

Table.7-3 2号機全体としての今後の開発に必要な研究項目

全体として
救助者の免責を明記した災害時特別措置法制定を促す呼びかけ
当ロボットを実際に運用していただく予定のDMATの隊員に対する宣伝活動
ブルーダ・ユニットのキャリア・ユニットコンテナ内への収容及び固定機構の検討・実験
ブルーダ・ユニットが容易に上記コンテナ内を通り抜けるためのランプ(ラダー)の考案
操作が簡便な、そして誤操作が起きにくいユーザーインターフェイスの考案
瓦礫内被災者探索機器の搭載もしくは効率的な連携方法の検討
操作パネル兼バッテリーキャリアの移動性能向上及び制振化
抗堪性を高めるための全体的な強度向上
耐熱・耐火・耐水(必要であれば耐放射線)処理
実機に要求される性能を近似的に再現した縮尺模型を試作した上での各ユニット連携実験
一連の救助作業を再現可能な実物大実験機の作製
災害訓練用施設を利用したの瓦礫モデルを用いた模擬救助実験
日赤主催の救急法講座の受講など、実際の救急を体験し、実情に即した災害MEの検討

研究業績

公表論文

1. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一朗：「震災時人命救助ロボットの研究 ―螺旋駆動体の走破性能評価―」, ライフサポート, ライフサポート学会, 26 (4), pp142-149, 2014年12月
2. 佐橋 拓, 佐橋 昭, 内山 尚志, 塩野谷 明, 福本 一朗「災害時人命救助ロボットに搭載するクラッシュ症候群発症阻止機構の基礎研究 ― CSP 機構を使用した下肢血管阻血とその計測の研究 ―」, バイオメカニズム学会誌, バイオメカニズム学会, 採録決定, 2015

参考論文

1. Taku SAHASHI, Akira SAHASHI, Hisashi UCHIYAMA & Ichiro FUKUMOTO: “Study and Development of the Rescue Robot to Accommodate Victims under Earthquake Disasters”, Jean-Louis Ferrier・Alain Bernard・Oleg Gaskin・Kurosh Madani Edirors, “Informatics in Control, Automation and Robotics”, ICINCO 2011 Revised Selected Papers, ISBN 978-3-642-31353-0, P89-100, 2012 Springer

発表業績

2. 佐橋昭・佐橋拓:『災害時救急診療支援システムの研究開発』名古屋市工業技術グランプリ新技術開発奨励賞受賞 2006.2.23
3. 佐橋昭・佐橋拓:財団法人科学技術交流財団「育成試験」研究助成金 250 万円『災害時診療の孤立化を防ぐ医療データ通信プログラムと電子カルテの開発』(株)プロジェクトアイ採択される,2007.6.8
4. 佐橋昭・佐橋 拓:『狭窄空間を抜けつつ瓦礫の中を進む人命救助ロボット』東海ものづくり創生協議会ロボット技術 (IRT) クラスタ「ロボットビジネスフォーラム in Greater Nagoya」展示&ワークショップセミナープレゼンテーション ,2007.9.11 ミッドランドスクエアミッドランドホール
5. 佐橋昭・佐橋拓:経済産業省「平成 19 年度中小企業・ベンチャー挑戦支援事業のうち実用化研究開発事業」開発助成金 1200 万円『人命救助ロボット』(株)プロジェクトアイ採択される, 2007.9.30
6. 佐橋昭・佐橋拓・内山尚志:京都大学名誉教授, 日本霊長類研究所元所長久保田競先生に『災害ME研究』をプレゼンテーション 2007.12.22 日本福祉大学研究室

7. 佐橋拓・佐橋昭：『狭窄空間を抜けつつ瓦礫の中を進む自走式双帯対向クローラ型人命救助ロボット』経済産業省・文部科学省クラスター関連プロジェクト「ものづくり総合展示会」“Greater Nagoya クラスターフォーラム 2008” 展示&ワークショップセミナープレゼンテーション 2008年1月23日&24日, 名古屋市国際展示場“ポートメッセなごや”
8. 佐橋昭・佐橋拓・内山尚志・織田豊・福本一朗:「大災害時瓦礫の下にもぐる人命救助ロボットの基礎研究」,第3回日本集団災害医学会大会抄録 JADM-3, pp406, 2008.2.11 筑波
9. 佐橋昭・佐橋拓：交流財団平成19年度科学技術コーディネート事業「育成試験成果発表会」『災害診療の孤立化を防ぐ医療データ通信プログラムと電子カルテの開発』成果報告, 2008年3月10日,名古屋銀行会館
10. 佐橋拓：愛知工業大学防災研究発表会で『人命救助ロボットの開発』を発表 2008.6.5 愛知工業大学視聴覚室 300名受講
11. 佐橋拓・佐橋昭・福本一朗：管理監 安全管理局長（消防長）上原美都男消防司監 横浜市救急救命士養成所 横浜市消防訓練センター教育課長横浜市磯子消防署長荒巻照和消防監及び救急救命士へ『人命救助ロボット』プレゼンテーション,意見を聴取 2008.6.19
12. 佐橋拓・佐橋昭：『人命救助ロボット』東海ものづくり創生協議会・中部経済連合会主催 “Venture Expo2008 in Nagoya” 展示&ワークショップセミナープレゼンテーション 2008.7.8,名古屋国際センター
13. 佐橋拓・佐橋昭：中部経済新聞「人命救助ロボット開発へ」掲載 2008年7月22日発行
14. 佐橋拓・佐橋昭：米国領事館（American Consulate Nagoya, Japan） Commercial Consul, Edward Yagi 領事へ『人命救助ロボット』プレゼンテーション, 2008年8月13日
15. 長岡技術科学大学 福本一朗・(株)プロジェクトアイ佐橋昭・佐橋拓『中部財界』誌「中部の新進企業」で『人命救助ロボの開発に挑戦・命をつなぐモノづくり』を掲載, 中部財界, Vol.51, No.9, pp50-51, 2008.9.1
16. 佐橋拓・佐橋昭：中部経済連合会「中経連テクノフェア」『人命救助ロボット』展示 2008.10.8 名古屋栄ビル 12F
17. Taku SAHASHI, Akira SAHASHI, Yutaka ODA, Hisashi UCHIYAMA, and Ichiro FUKUMOTO: “A basic study of automated medical rescue robot under natural disaster”, The 9th Asia Pacific Conference on Disaster Medicine 2008.11 Seoul WC2008/11/2 program book, 2008/11/2to4, Seoul
18. 佐橋拓・佐橋昭：横浜市安全管理局の横浜開港 150 周年記念「新春安全・安心フェスティバル」にて観衆 3 万人を前に『災害救助ロボット』を実演&プレゼンテーション

2009.1.10 横浜市赤レンガパーク

19. 佐橋昭・佐橋拓:『人命救助ロボット』名古屋都市産業振興公社名古屋新事業支援センター大学発ベンチャービジネスグランプリ奨励賞受賞及び式典にてプレゼンテーション 2009.1.15
20. 佐橋拓・佐橋昭:「あいちロボット技術フェスタ」に『人命救助ロボット』展示 2009.2.11 愛知県産業貿易館
21. 佐橋拓・佐橋昭:『あいちロボット技術フェスタ出展(株)プロジェクトアイ人命救助ロボット』NHK TV名古屋で2009年2月11日18時放映(愛知県産業貿易館)
22. 佐橋拓・佐橋昭:『あいちロボット技術フェスタで“人命救助ロボット”』読売新聞掲載 2009.2.12 愛知県産業貿易館
23. 織田豊・佐橋拓・内山尚志・福本一朗:「ウツシュタイン評価を用いた高抗坦性医用機器設計手法の基礎研究」, 第14回日本集団災害医学会学術集会抄録集, pp407, 2009.2.13 神戸国際会議場
24. 佐橋拓・佐橋昭・織田豊・福本一朗:「大災害時瓦礫の下にもぐる人命救助ロボットの研究」, J.J.Dusas.Med., Vol.13, No.3. pp432, 2009.2.14 神戸国際会議場
25. 織田豊・佐橋昭・佐橋拓・鈴木仁・内山尚志・福本一朗:「災害時における高抗坦性を持つ医用機器設計手法の基礎研究」, 生体医工学, Vol.47, Suppl.1, pp235, 24amP4-1-9, 2009.4.24, タワーホール船堀
26. 佐橋拓・佐橋昭・織田豊・内山尚志・福本一朗:「抗坦性を有する災害医療備品保管箱の開発」 生体医工学, Vol.47, Suppl.1, pp235, 2amP4-1-8, 2009.4.24, タワーホール船堀
27. 佐橋 昭・佐橋拓:「新潟県中越地震に始まった災害 ME 研究会」 第100回臨床工学研究会 2009.3.17 長岡技術科学大学マルチメディアセンター
28. 佐橋 昭・佐橋拓:「清須市防災展」にて『人命救助ロボット』の展示とプレゼンテーション, 愛知県清須市庁舎西枇杷島会館2階ホール, 2009.3.29
29. 佐橋拓: Venture Expo 2009 in Nagoya 東海ものづくり創生協議会主催 名古屋国際センターへ『Rescue Robot』を出展&プレゼンテーション 2009年7月7日
30. 佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「瓦礫に潜り, クラッシュシンドローム回避機構を有する人類救助ロボットの研究」, 第29回日本生体医工学会甲信越支部大会講演論文集, pp1-2, 2009.9.26 長岡技術科学大学
31. 佐橋昭・佐橋拓・内山尚志・福本一朗:「被災地を孤立させない災害医療支援システムの研究」, 第29回日本生体医工学会甲信越支部大会講演論文集, pp3-4, 2009.9.26 長岡技術科学大学
32. 佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「災害時避難所を孤立させない災害診療支援システムの研究」, 日本集団災害医学誌, Vol.14. No.3, pp351, 2009.12.31(2010.2.12 第15回日本集団災害医学会抄録集 A1-6, OVTA)

33. 佐橋拓・佐橋昭：新潟国際ビジネスメッセ 2009 へ『人命救助ロボット』を長岡技術科学大学生物系医用生体工学教室で展示 2009年11月5日・6日 新潟インダストリアルプロモーションセンター
34. 佐橋 昭・佐橋拓：あいちの次世代ロボットガイドブックに『人命救助ロボット』掲載 2009年11月19日発行愛知県 次世代ロボット市場化支援事業『次世代ロボットガイドブック』“NEXT GENERATION ROBOTS” p27 愛知県 産業労働部 新産業課情報通信グループ発行 (株)プロジェクトアイ
35. 織田豊・佐橋昭・佐橋拓・鈴木仁・内山尚志・福本一朗:「災害時における高抗坦性を持つ医用機器設計手法の基礎研究」, Vol.14. No.3,pp441, 2009.12.31(2010.2.12 第15回日本集団災害医学会抄録集 K1-1, OVTA)
36. 佐橋 昭・佐橋拓:『命を求めて百里の道』—災害MEシステム開発を求めて— 長岡技術科学大学ランチセミナー2010.2.3
37. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一朗「災害時避難所を孤立させない災害診療支援システムの研究」第15回日本集団災害医学会総会・学術集会抄録集 p351 2010.2.12
38. 織田豊, 佐橋 拓, 内山 尚志, 福本 一朗「抗堪性をもった医用機器の設計手法のための基礎研究」第15回日本集団災害医学会総会・学術集会抄録集 p441 2010.2.12
39. 佐橋 拓「防災工学の視点から見た災害救助活動における医療責任の研究」長岡技術科学大学修士論文 2010年2月23日
40. 佐橋 昭・佐橋拓:『人命救助ロボット』関西文化学術研究都市推進機構新産業創出交流センター「新産業創出交流センター ベンチャー・有力企業 ディレクトリー」へ 2010年3月掲載
41. 佐橋 拓, 「防災工学の視点から見た災害救助活動における医療責任の研究」第106回臨床工学研究会 長岡技術科学大学 2010.3.17
42. 佐橋拓・佐橋昭・福本一朗:「災害時のME運用における医療責任の基礎研究」, MEとバイオサイバネティクス研究会, 信学技報 Vol.110, No.52, pp1-6, 2010.5.21, 富山大学
43. 佐橋 昭・佐橋 拓・内山 尚志・高橋 聡・榛沢和彦・門脇敏・池田 研二・福本 一朗 第49回日本生体医工学会大会オーガナイズドセッション生体医工学会プログラム企画「大自然災害時に人命を守る新しい生体医工学的支援技術の構築を目指して」『大地震に備える災害ME研究』日本生体医工学会会誌第48巻特別号第49回日本生体医工学会大会プログラム・抄録集 p116-p119, 2010.6.25, 会場:大阪国際交流センター
44. 佐橋拓・内山尚志・佐橋昭・福本一朗:「Research and development of rscue robot under natural disaster」, 第49回日本生体医工学会大会 OS-2-2, 「大地震に備える災害ME研究」大自然災害時に人命を守る新しい生体医工学的支援技術のこうちくを目指して, 生体医工学第48巻特別号, pp117, 2010.6.25 神戸
45. 佐橋 昭・佐橋 拓 長岡技術科学大学平成22年度技術開発センタープロジェクト成果報告会 “知の実践” にて「災害診療支援システムの開発—Crush syndromeを回避す

- る Rescue Robot をめざして一」を報告 2010 年 7 月 9 日, 掲載資料集 p27-31, 主催 : 長岡技術科学大学, 会場 : 長岡技術科学大学マルチメディアセンター 2010 年 7 月発行
46. Taku SAHASHI, Akira SAHASHI , Hisashi UCHIYAMA, and Ichiro FUKUMOTO : “Development and management researches of medical rescue robot under natural disasters” , 10th Asia Pacific Conference on Disaster Medicine August 26(Thu) - 28(Sat), 2010 札幌プリンスホテル
 47. 米国 Bearport Publishing Company, Inc が北米サードグレード (8~9 歳) 向けの教材として『人命救助ロボット』を 2010 年に掲載される
 48. 佐橋 拓, 佐橋 昭, 内山 尚志, 福本 一郎 「災害用人命救助ロボットの研究開発と運用上の責任」第 28 回日本ロボット学会 2010.9.22 (水) ~24 (金) 開催, 会場 : 名古屋工業大学
 49. 佐橋 拓 「災害弱者支援用アドバルーン型標識の基礎研究」第 109 回臨床工学研究会 9 月 2 9 日長岡技術科学大学
 50. 佐橋 拓・佐橋 昭 : 日刊工業新聞主催「産学官ビジネスフェア 2010」『人命救助ロボット』展示&ワークショップセミナーにて「災害診療支援システムと人命救助ロボット」講演 Guide book page21&126;2010.10.13to15 ビッグサイト
 51. 佐橋 昭・佐橋 拓・高橋 聡・内山 尚志・福本 一郎 : 「認知症患者に優しい抗災システム 一災害弱者の立場での災害 ME 研究一」日本認知症ケア学会中国地域大会 2010.12.5 開催, 会場 : 米子コンベンションセンター
 52. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一郎 : 「人命救助ロボットを中心とした災害診療支援システムの研究」生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2011 抄録集, pp227-230, 2011.1.30,長岡技術科学大学
 53. 佐藤貴浩・佐橋拓・佐橋昭・福本一郎: 「生体電気インピーダンス法を用いた DVT スクリーナの基礎研究」, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2011 抄録集, pp219-222, 2011.1.30,長岡技術科学大学
 54. 佐橋 拓, 「災害用人命救助ロボットの研究開発と運用上の責任」第 28 回日本ロボット学会 2010.9.22-24, 会場 : 名古屋工業大学にて発表の記事, オーム社 ROBOCO N Magazine 2011 年 1 月号 Page48~49 へ掲載される
 55. 佐橋 拓 「災害ME運用における法的責任についての研究」第 16 回日本集団災害医学会総会・学術集会抄録集 p483 2011.2.12
 56. 佐橋 昭・佐橋 拓 長岡技術科学大学平成 22 年度技術開発センタープロジェクト成果報告会 “知の実践” にて「災害診療支援システムの開発—Crush syndrome を回避する Rescue Robot をめざして一」技術開発センターニュース “知の実践” 「叡智稽損拵」第 9 号 : 長岡技術科学大学技術開発センター 2011.3.25 発行
 57. 佐橋 昭・佐橋 拓・高橋 聡・内山 尚志・福本 一郎 緊急開催「東北地方太平洋沖地震から学び備えるべきこと」第 37 回災害 ME 研究会,2011.3.18,長岡技術科学大学

58. 佐橋 昭・佐橋 拓・内山 尚志・福本 一郎 第 50 回日本生体医工学会パネルディスカッション3「緊急医療のための生体医工学」東北大学田所教授オーガナイザーに、「災害ME研究開発の概要」を5月1日発表 日本生体医工学会会誌「生体医工学」第49巻特別号第50回日本生体医工学会大会プログラム・抄録集 p230~p232,2011.4.29から5.1開催, 会場:東京電機大学
59. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一郎 「避難が困難な災害弱者の位置を知らせるアドバルーン型標識の基礎研究」第50回日本生体医工学会に5月1日発表 日本生体医工学会会誌「生体医工学」第49巻特別号第50回日本生体医工学会大会プログラム・抄録集 p327,2011.4.29から5.1開催, 会場:東京電機大学
60. 佐橋 昭・佐橋 拓 長岡技術科学大学平成22年度技術開発センタープロジェクト成果報告会 “知の実践” にて「災害診療支援システムの開発—Crush syndromeを回避するRescue Robotをめざして—」を報告2010.7.9, 掲載資料集 p27-31, 主催:長岡技術科学大学, 会場:長岡技術科学大学マルチメディアセンター2010年7月発行
61. Taku Sahashi, Akira Sahashi & Ichiro Fukumoto: 「Study and development of the rescue robot preventing Cruch Syndrome of earthquake」, Final Program and Book of Abstract of ICINCO2011 and SIMULTECH 2011, pp55, 2011.7.29, Holland , **Best Paper Award 受賞**
62. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一郎:「災害時人命救助ロボットにおける被災者収容機構の基礎研究」, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 講演概要集,pp141,2011.9.8 芝浦工大
63. 佐橋拓:「災害時人命救助ロボットの基礎研究と今後の展望」第114回臨床工学研究会2011.9.29長岡技術科学大学
64. 嶋田大和・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一郎:「人命救助ロボット瓦礫こじあげ機構の基礎研究」,第31回日本生体医工学会甲信越支部大会口頭発表, 2011.10.29 山梨大学
65. 西村淳・藤木智之・佐橋拓・佐橋昭・福本一郎:「簡易型地震計を用いた被災者救出用心胆波形アルゴリズムの基礎研究」, 第31回日本生体医工学会甲信越支部大会口頭発表, 2011.10.29 山梨大学
66. Taku Sahashi, Akira Sahashi, Hisashi Uchiyama, Ichiro Fukumoto:“A study of operational liability of the Medical Rescue Robot under disaster”2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration,SI INTERNATIONAL 2011 Proceedings, F4-4,2011/12/21,Kyoto U.
67. 佐橋 拓・佐橋 昭・福本 一郎: (独)港湾空港技術研究所「港湾空港技術振興会講演会—東日本大震災から学ぶ技術—」聴講及び海洋研究領域長下迫健一郎工博と津波実験の意見交換2011.11.28 発明会館
68. 藤木智之・佐藤貴浩・西村淳・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一郎:「複数の高感度

- 地震計を用いた被災者発見システムの基礎研究」技大・高専連携シンポジウム 2012.1.23-25 長岡技術科学大学
69. 佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一郎:「災害時クラッシュシンδροームを阻止する人命救助ロボットの基礎研究」技大・高専連携シンポジウム 2012.1.23-25 長岡技術科学大学
 70. 佐橋 拓・佐橋 昭 経済産業省「平成19年度中小企業・ベンチャー挑戦 支援事業のうち実用化研究開発事業」『人命救助ロボットの開発』で助成されたもの事後報告ヒアリング「ピアレビュー」, 中部経済産業局で 2011.10.31 実施.
 71. 藤木智之・佐藤貴浩・西村淳・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一郎:「複数の高感度地震計を用いた被災者発見システムの基礎研究」,p229, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2012, 2012.1.23 長岡技術科学大学
 72. 佐橋昭・佐橋拓・安田匡一郎編集:長岡技術科学大学災害ME研究会「東日本大震災救援個人記録」を刊行 2012.2.14
 73. 嶋田大和・佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一郎 「災害時救助ロボットに用いる瓦礫こじ開け機構の基礎研究」第17回日本集団災害医学会総会に2月21日発表 日本集団災害医学会会誌 第17回日本集団災害医学会総会・学術集会・プログラム・抄録集第16巻第3号 December 2011 p384,2011.2.21~22 開催, 金沢市文化ホール
 74. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一郎 「災害時人命救助ロボットのアルキメデス螺旋推進型被災者収容機構の基礎研究」第17回日本集団災害医学会総会に2月21日発表 日本集団災害医学会会誌 第17回日本集団災害医学会総会・学術集会・プログラム・抄録集第16巻第3号 December 2011 p385, 2011.2.21-22 開催, 金沢市文化ホール
 75. Ichiro FUKUMOTO, Taku SAHASHI and Akira SAHASHI Total Intelligent Life-saving system against earthquake and “Tsunami” --- Disaster Medical Engineering from Protection to Care in Catastrophe-- 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO2012Rome July 28 - 31, 2012 Rome, Italy
 76. 林雯歆・佐藤貴浩・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一郎:「位相反転消波原理を応用した津波防災基礎研究」, p197, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2012, 2012.1.23 長岡技術科学大学
 77. 嶋田大和・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一郎:「実験用模型を用いた人命救助ロボット瓦礫こじあけ機構の研究」, p205, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2012, 2012.1.23 長岡技術科学大学
 78. 西村淳・藤木智之・佐橋拓・佐橋昭・福本一郎:「3つのアルゴリズムを用いた生き埋め被災者検出アルゴリズムの研究」, p221, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2012, 2012.1.23 長岡技術科学大学

79. 西村淳・藤木智之・佐藤貴浩・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「ピリオドグラムを用いた被災者救出用心弾波形アルゴリズムの基礎研究」, 日本集団災害医学会誌, Vol.16, No.3, pp509 L20-1, 2011.12
80. 藤木智之・佐藤貴浩・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「高感度地震計の被災者発見ツールとしての妥当性」, 日本集団災害医学会誌, Vol.16, No.3, p509 L20-2, 2011.12
81. 嶋田大和・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「模型を用いた人命救助ロボット瓦礫こじ開け機構の研究」,日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012.9.18 札幌
82. 嶋田大和・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「模型による人命救助ロボット瓦礫こじあけ機構の研究」, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会 予稿集 (DVD), 2A3-4, 2012/9/18, 札幌
83. 佐橋昭・佐橋拓・安田匡一郎編集:長岡技術科学大学災害ME研究会「東日本大震災救援個人記録【第2号】」を刊行 2012.9.21
84. 佐橋拓:「災害時瓦礫の下の被災者救助を目的としたロボットの研究開発」, H24 年度第 21 回魚沼シンポジウム 特別講演, 抄録集 p7,2012.10.20 北里大学保健衛生専門学院
85. 嶋田大和・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「縮尺模型による災害時人命救助ロボット瓦礫こじ開け機構の研究」, 第 18 回日本集団災害医学学術総会抄録集 W1-1, p690, 2013.1.19 神戸国際会議
86. 藤木智之・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「心弾図を用いた被災者発見システムの基礎研究---被災者感知性能の方向特性--」, 高専・技科大連携シンポジウム 2013 「生体情報処理と高度情報処理」,p251-252, 2013.1.28 長岡技科大 **ポスター発表優秀者**
87. 嶋田大和・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「FEM と 1/10 モデルを用いた人命救助ロボット瓦礫こじ開け機構の研究」, 高専・技科大連携シンポジウム 2013 「生体情報処理と高度情報処理」,p265-272, 2013.1.28 長岡技科大
88. 岡田卓暁・佐橋拓・佐橋昭・福本一朗:「アルキメデススクリュー駆動を用いた人命救助ロボットの研究」, 高専・技科大連携シンポジウム 2013 「生体情報処理と高度情報処理」,p273-276, 2013.1.28 長岡技科大
89. 佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗「避難が困難な災害弱者の位置を知らせるアドバルーン型標識の基礎研究」高専・技科大連携シンポジウム 2013 「生体情報処理と高度情報処理」,p273-276, 2013.1.28 長岡技科大
90. 福本一朗・内山尚志・佐橋拓・佐橋昭:「津波救命システムの基礎研究」, 安全工学シンポジウム 2013 講演予稿集, pp318, 2013/7/4, 日本学術会議
91. 佐橋拓・藤木智之・嶋田大和・岡田卓暁・佐橋昭・福本一朗:「瓦礫に埋もれた要救助者を発見・救助するシステムの基礎研究」, 安全工学シンポジウム 2013 講演予稿集, pp352, 2013/7/4, 日本学術会議

92. 福本一朗・佐橋拓・佐橋昭:「ユニバーサル大災害時避難路報知システムの研究」,FIT3012 第 12 回情報科学技術フォーラム, RO-008,pp111-114,2013.9.4 鳥取大学工学部
93. 福本一朗・佐橋拓・佐橋昭:「ユニバーサル大災害時避難路報知システムの研究」,第 12 回情報科学技術フォーラム FIT 奨励賞受賞,2013.9.6
94. 高野 佑資・岡田 卓暁・佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一朗:「人命救助ロボット用アルキメデス螺旋駆動機構の基礎研究」,第 33 回日本生体医工学会 甲信越支部大会,p21-22, 2013.10.26 信州大学繊維学部
95. 佐橋拓・高野祐資・佐橋昭・福本一朗:「災害救助ロボットのアルキメデス螺旋駆動部を有した被災者収容ユニットの瓦礫走破実験」,53th 生体医工学会大会 O3-01-5,生体医工学 Vol.52 特別号 p159, 2014.6.24 仙台国際会議場
96. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一朗「アルキメデス螺旋駆動体の瓦礫等悪路走行特性の研究」第 32 回日本ロボット学会学術講演会,講演概要集 pp209,2014 年 9 月
97. 小林武司・佐橋拓・佐橋昭・内山尚志・福本一朗:「座減症候群防止を目的とした四肢圧迫による還流阻止のための機構と基礎研究」,第 34 回日本生体医工学会甲信越支部大会演題 10, 2014.10.18 山梨大学工学部
98. 佐橋 拓・佐橋 昭・内山 尚志・福本 一朗「クラッシュ症候群発症阻止機構を用いた下肢血管阻血関する基礎研究」,第 54 回日本生体医工学会大会 プログラム・抄録集,第 53 巻特別号, pp263, 2015/3/9, 名古屋国際会議場

災害 ME 研究 特許申請及び査定済特許目録

1. 福本一朗・佐橋:昭・佐橋:拓「シート型ヒータ内臓凝り治療器」,特許出願(特願 2009-081481)2009.8.25
2. 福本一朗・佐橋昭・佐橋拓:「片手点字タイプライター」,特許出願(特願 2010-163793), 2010.7.21

謝辞

本研究にあたり、医学・工学・法学にまたがるその卓抜した知識で熱心にご指導くださいました福本一朗先生、先生のサポート無くして本論文は成立すらしなかったでしょう。心よりの尊崇と感謝の意を表します。

福本教授退官後、小生の主査を快く引き継いでくださいました塩野谷明教授に心より感謝いたします。この度の学位審査は先生の多大なご尽力なくしては辿り着けないものでした。

小生の博論審査の副査を引き受けてくださいました、本学斎藤秀俊教授、本学中川匡弘教授、新潟工科大学寺島正二郎教授、本学高原美規准教授、本学木村哲也准教授、ご多忙な中お時間を割いていただき本当にありがとうございます。予備審査、本審査において皆様に頂きました厳しくも的確なご意見は、本論文を意義あるものにするために不可欠なご意見でした。重ねて感謝申し上げます。

不慣れな学位論文作成という作業を、特に事務的な手続きに関して影に日向にサポートして下さいました、内山尚志助教に心より感謝いたします。先輩としてのアドバイスを頂戴し、また快く実験に必要な器具の貸与をしてくださいました、北里大学保健衛生専門学院 臨床工学専攻科 学科長 外山竹弥先生、大変お世話になりました。

災害 ME 研究会の皆様、福本研究室修了生の皆様からは貴重なご意見をいただきました。特に在籍している福本研究室の学生の皆様には、被験者となって下さるなど、実験のサポートをご協力いただきました。ありがとうございます。

深谷守様には、機構やロボットの製作代行や、機械製作に不慣れな小生へのアドバイスをいただきました。ありがとうございます。

株式会社プロジェクトアイ 代表取締役 佐橋昭社長には、本論文追い込みを理由に多大なる業務のしわ寄せを被せてしまいました。謝罪と共に感謝いたします。

ここに記して、皆様に心からの感謝を申し上げます。

最後に、本論文作成にあたり、時に支え、時に元気を分けてくれた家族や友人に心よりの感謝を申し上げます。特に妻奈沖美と娘の愛には本当に助けてもらい、支えてもらい、迷惑をかけてしまいました。ごめんなさい、そしてありがとうございます。これからもよろしくお願いします。

なお、本論文内の人命救助ロボットは、『人命救助ロボットの開発』として、経済産業省「平成19年度中小企業・ベンチャー挑戦支援事業のうち実用化研究開発事業」の採択を受け、実物大試作1号機を製作いたしました。