

人工循環器系による機械システムの
自己修復・自己維持機能に関する研究
Self-repairing and self-maintenance functions
based on artificial circulatory system

2017年2月

長濱 峻介

Shunsuke NAGAHAMA

人工循環器系による機械システムの
自己修復・自己維持機能に関する研究
Self-repairing and self-maintenance functions
based on artificial circulatory system

2017年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
総合機械工学専攻 知能機械学研究

長濱 峻介

Shunsuke NAGAHAMA

摘要

本研究では、循環系を中心とした自己保存の機能をロボットに組み込むことで、自立的に活動可能な機械システムを目指す。機械システムの自己保存の機能とは何かを考えたとき、「自己修復機能」「自己維持機能」「自己充足機能」の3つの機能が必要であると考えている。自己修復機能は、導線、センサ、構造部材などに故障が生じた際に、それらを自動的に修理し機能を復帰させる機能のことである。生物でいえば、創傷治癒にあたる。自己維持機能は、ベアリングなどの摺動部の潤滑や、モーターの温度の調節等適切に行う機能のことである。生物でいえば、ホメオスタシスの機能にあたる。自己充足機能は、エネルギーや材料の自己補充の機能にあたる。生物でいえば、有機物の摂取によるエネルギー生産および身体を構成する物質の生産することであり、代謝の機能にあたる。本研究では、これらの機能を生物が血液循環系を中心として実現していることに着目し、機械システムに循環系を組み込むことで統一的な自己保存の機能の実現を目指す。血液循環系は細胞のためのシステムであり機械システムで使用するためには、細胞と循環系により実現される機能を機械に落とし込む必要がある。組織の修復において重要なのは、(1) 修復に必要な物質（血小板やアミノ酸など）を損傷箇所に運ぶこと、(2) その物質を使って組織を任意の形状（損傷前の状態）に再構成すること、である。これを機械システムに置き換えると、(1) 修復に必要な材料（金属などの構成物質）を破損箇所に運ぶこと、(2) その材料を任意の形状（破損前の状態）に再構築すること、となる。(1)に関しては、循環系を使えば材料を運ぶことは可能であるので、容易に実現できる。問題は(2)であり、従来の修復の研究では循環系に組み込める手法がほとんど無い。そこで、本研究では機械システム内で修復を行うために、(1)『場』を利用した修復手法、(2)境界面での反応を利用した表面の保護手法の2つを提案する。『場』を利用した修復手法では、磁場などの『場』を使って運搬されてきた材料の配列を制御することで、任意の形状を再構築する。境界面での反応を利用した修復手法は、摩耗などの境界面で生じる破損を修復する手法で、境界面に物質を供給することで修復を大行う。どちらの手法も詳細は後述する。本研究ではこれらの手法をベースに電気系部品（導線やセンサ）の修復と、機械系部品（構造部材、摺動部）の修復を行った。また、同じ経路を流れている物質が反応しないように運ぶことやシステムを不安定にし得る老廃物を除去することなど、循環系システムを備え

ているからこそ必要な技術がある。本研究では、カプセルを用いて物質を運搬する手法と老廃物を除去する手法を提案する

1. 『場』を利用した修復手法（電気系部品および機械系部品の修復）

自己修復を実現するためには、(1) 破壊後に元の形態・機能を回復するための指針となる要素（設計図）、(2) 欠損箇所への材料供給により破壊箇所を埋めることの2点が重要であると考えた。本研究では、供給された材料を設計図に基づき再配列することで、破壊前の形態・機能の回復を実現する手法を提案する。本研究では、設計図として『場』（磁場）を用い、材料には強磁性の粉体、材料供給には人工循環器システムを用いる。『場』に材料を供給することで、材料は『場』の形状に合わせて凝集し、形（実体）を作る。本研究において、まずは『場』として磁場を用いる。材料としては磁場が作用する強磁性体の粉体を用い、材料の供給は水力輸送で行う。まずは、導線、センサ、構造部材の修復を行った。MPW(Magnetic Powdery Wire)の研究では、断線させた導線に本手法を適用することで、導電率が回復することを確認した。MPS(Magnetic Powdery Sensor)の研究では、破壊状態（センサ部が無い状態）から粉体を供給することで、センサ部が回復することを確認した。構造部材の修復では、亀裂を入れた構造部材に本手法を適用することで、構造部材の靱性値が亀裂の入った状態の材料と比較すると大きくなることを確認した。

2. 境界面での反応を利用した表面の修復手法（機械系部品の修復）

機械システムの材料の摩耗は機械強度を低下させ、また摺動面の表面を荒くする要因となる。摩耗は、物体と物体が接触する箇所で生じ、基本的には材料のバルクではなく表面で生じる。そこで本研究では、摺動している材料の表面へ溶液系から物質供給を行い、摩耗箇所の修復を行う手法と触媒反応を利用して表面に被膜を再形成し続け表面を保護する手法を提案する。(1) ボールジョイントのように摺動する機械部品の材料や、(2) 腱駆動機構（アクチュエータ）の腱を対象に手法を構築した。(1)では、材料をメッキ溶液に浸漬し、金属皮膜を表面に形成し続ける機構を開発した。この機構では、摩耗により失われた材料をメッキ溶液から供給することで補填する。その後、摺動させることで補填した箇所を平坦化する。実験の結果、メッキにより傷を埋めることが可能なことを確認し、またメッキ後の摺動により表面が平坦化することを確認した。(2)では、腱母材（ダイニー

マ)の表面に触媒を担持した腱と、その触媒と反応することで皮膜を形成する液体樹脂を使用した。液体樹脂中で触媒を担持した腱を摩耗すると、表面の皮膜がはがれる。その皮膜が剥がれた際に、腱に担持した触媒面があらわれ、皮膜を再形成する。実験の結果、通常の腱と比べると本手法の腱は耐摩耗性が向上していることを確認した。

3. システム維持に関わる技術

循環系を備えたシステムでは、そのシステムの安定的な運用のために、(1) 損傷部や潤滑などの必要な箇所に物質を安定的に輸送する技術(物質の運搬)、(2) 溶液状態の恒常性を維持する技術(老廃物除去)、(3) 循環系中の物質を分離する技術(排泄)が必要になると考えられる。物質を安定的に運搬する技術としては、物質のカプセル化を行い循環系中で任意の場所に運搬し、フィルタを用いて分離する手法を構築した。運搬対象の物質をカプセル化することで、循環系中で反応したり混合したりしてしまうことを防ぐ。また、内包する物質ごとにカプセルのサイズを調整することで、フィルタ部でサイズの違いを利用して任意の物質を捕捉することができる。また、循環器系を備えたロボットでは、システム運用上で生じる老廃物を除去する必要がある。本研究では、吸着剤のカプセル化により循環系中の老廃物を除去する手法を提案した。粒径の大きいカプセル化した吸着剤に老廃物を吸着することで、回収を容易にした。回収のために孔径の大きいフィルタ(ミリメートルオーダー)を用い、さらにフィルタ部で旋回流を発生させることでカプセルが孔に詰まるのを防ぐ。最終的には、そのカプセルを回収することで老廃物を除去する。除去後は吸着剤入りカプセルを再び入れることで、再び老廃物の除去が可能となる。吸着剤入りカプセルと旋回流によりフィルタの目詰まりを防止するフィルタシステムを製作し、不純物(食紅)の吸着実験を行い、不純物が除去できることを確認した。

結言と将来展望

本研究では、人工循環器システムによる自己修復機能に関する研究および自己維持(システム維持)に関する研究を行った。自己修復機能の研究では、『場』(磁場)に沿って材料を配列されることによる導線、センサ、構造部材の修復の技術を開発した。また、摺動面での電解析出や触媒反応による樹脂形成を利用した摺動面の修復手法を開発した。自己維持に関する研究では、カプセル化を用いた潤滑油などの物質の運搬技術、および吸着剤

を内包したカプセルと旋回流フィルタを用いた不純物の除去機構を開発した。今後は、自己修復機能、自己維持機能を有する要素技術の幅（例えば、皮膚の修復や冷却など）をより広げ、要素技術の特徴に応じて全体設計の一部を変更しながら、自己保存の機能を有する機械システムを実現する。最終的には、物質の取入れから排出までの一連の流れを、自律・自立的に行うことが可能な機械システムで実現する。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	生物の自己保存の機能	3
1.3.1	創傷治癒	3
1.3.2	細胞更新	5
1.3.3	ホメオスタシス	6
1.3.4	人工臓器と細胞	6
1.3.5	進化と自己保存	7
1.4	機械の自己保存の機能	7
1.4.1	機械システムの自己保存の必要性	7
1.4.2	機械システムの自己保存の実現	8
1.4.3	機械システムの自己保存に関わる従来研究	8
1.4.3.1	自己修復機能の従来研究	8
1.4.3.2	自己維持機能の従来研究	9
1.4.3.3	自己充足機能の従来研究	9
1.5	循環系と機械システムの自己保存	10
1.6	本論文の構成	10
第 2 章	人工循環器システムを用いた自己修復・自己維持機能の設計論	13
2.1	人工循環器システムに必要とされる機能	13
2.2	自己修復・自己維持に関わる従来研究	14

2.2.1	構造部材	14
2.2.2	導線	15
2.2.3	センサ	16
2.2.4	アクチュエータ	16
2.2.5	関節部品	17
2.3	目標とするシステムと本研究で行う領域	17
2.3.1	生物と機械の対応図	19
第 3 章	電気系部品の修復	25
3.1	概要	25
3.2	提案手法	25
3.3	Magnetic Powdery Wire(MPW)	26
3.3.1	MPW の概要	26
3.3.2	実験	27
3.3.3	実験結果	30
3.3.4	考察	33
3.3.5	MPW に関するまとめと将来展望	36
3.4	Magnetic Powdery Sensor (MPS)	36
3.4.1	MPS の概要	36
3.4.2	実験	37
3.4.3	実験結果	40
3.4.4	考察	42
3.4.5	MPS に関するまとめと将来展望	43
3.5	生物とのアナロジーについて	44
3.6	3章のまとめ	44
第 4 章	機械系部品の修復	45
4.1	概要	45
4.2	溶液系による摩耗の修復機構	45

4.2.1	摩耗の種類	46
4.2.2	一般的な摩耗抑制手法	46
4.2.3	本研究での提案	47
4.3	触媒反応を利用した手法	47
4.3.1	摩耗修復方法の提案	47
4.3.2	腱駆動機構について	47
4.3.3	耐摩耗性向上・自己修復に関する先行研究	48
4.3.4	提案手法	49
4.3.5	評価実験	50
4.3.6	実験結果	57
4.3.7	考察	59
4.4	電解析出を利用した手法	62
4.4.1	摺動部の摩耗	62
4.4.2	摩耗修復の要求仕様	64
4.4.3	提案手法	65
4.4.4	修復性能評価試験	68
4.4.4.1	密着力の評価実験	69
4.4.4.2	平滑能の評価実験	71
4.4.4.3	摩擦係数の評価実験	75
4.4.4.4	考察	77
4.4.5	摺動部における修復性能評価	79
4.4.5.1	実験目的	79
4.4.5.2	実験方法	79
4.4.5.3	実験結果	79
4.4.5.4	考察	80
4.5	構造部材の修復手法	81
4.5.1	損傷の問題	82
4.5.2	構造部材修復の提案手法	83

4.5.3	提案手法のロボットに対する適用	85
4.5.4	評価実験	86
4.5.5	材料の厚さ決定	86
4.5.6	提案手法による破損箇所堆積実験	88
4.5.7	提案手法による修復性能の評価	91
4.5.7.1	黄銅サンプル	92
4.5.7.2	PEEK サンプル	92
4.5.8	実験結果	94
4.5.8.1	黄銅での引張試験	94
4.5.8.2	PEEK での引張試験	94
4.5.9	考察	96
4.5.9.1	修復後の材料の物性	96
4.5.9.2	脆性材料に対する銅の析出による修復	97
4.5.9.3	電気めっきにより析出させる材料	97
4.6	生物とアナロジーについて	98
4.7	4章のまとめ	99
第5章	システムの状態維持	101
5.1	概要	101
5.2	カプセルを用いた物質の運搬手法	101
5.2.1	カプセル化	101
5.2.2	運搬	103
5.2.3	分離	103
5.2.4	開発したシステム	103
5.2.4.1	カプセル製作装置	103
5.2.4.2	運搬用管路およびポンプ	105
5.2.4.3	カプセル分離機構	106
5.2.4.4	前分離機構 (Predivider)	106
5.2.4.5	後分離機構 (Postdivider)	107

5.2.5	実験結果	109
5.2.5.1	運搬性能評価	109
5.2.5.2	分離性能評価	110
5.2.6	考察	111
5.2.6.1	運搬性能評価	111
5.2.6.2	分離性能評価	112
5.3	カプセルの取得量を変更する手法	112
5.3.1	分離機構の問題	112
5.3.2	提案手法	114
5.3.3	実験	114
5.3.3.1	実験装置	115
5.3.4	実験結果	118
5.3.5	考察	118
5.4	吸着剤のカプセル化による老廃物除去	119
5.4.1	提案手法	120
5.4.2	実験	120
5.4.3	実験結果	121
5.4.4	考察	121
5.5	生物とのアナロジーに関して	123
5.6	5章のまとめ	123
第6章	結言	125
6.1	本研究の成果	125
6.2	人工循環器システムに関する今後の展望	127
6.3	要素技術に関する今後の研究展開	130
6.4	システム修復工学の提案	132
参考文献		135

目次

1.1	Contents	12
2.1	Corresponding view between living things and machines	21
2.2	Element technology developed in this thesis	23
3.1	System overview	27
3.2	Neodymium magnet	27
3.3	Iron powder (200 mesh)	27
3.4	Magenetic Powdery Wire overview	28
3.5	Magnet powdery wire without iron powder	28
3.6	Magnet powdery wire with iron powders	29
3.7	Electric circuit for experiment	29
3.8	Broken MPW (disconnected)	30
3.9	Self-repaired MPW (connected)	30
3.10	Bent tube	30
3.11	1 [kHz] input square wave and the response	31
3.12	100 [kHz] input square wave and the response	32
3.13	Results of self-repairing experiment (frequency: 1 [kHz])	32
3.14	Results of bending experiment (frequency: 1 [kHz])	33
3.15	Equivalent circuit model of MPW	34
3.16	Transient response of MPW	34
3.17	Comparison of experimental results with theoretical values	35

3.18	Self-organized wire	35
3.19	Schematic view of Magnetic Powdery Sensor	37
3.20	Magnetic Powdery Sensor before adding iron powder (Above) and after adding iron powder (Below).	38
3.21	A pressed MPS. The diameter of sensing area increases.	38
3.22	Electric circuit for measuring resistance change of MPS.	39
3.23	Artificial circulatory system for MPS	40
3.24	A characteristic curve of the MPS	41
3.25	Variation of resistance change	41
3.26	A voltage change by the MPS repaired	42
4.1	The Example of tendon drive robot (AnthropomimeticRobot)	48
4.2	Repairing coating method	50
4.3	Process of coating test	51
4.4	Supporting the catalyst on a wire	52
4.5	Coating formation	52
4.6	Strength test process	53
4.7	Front view of abrasion machine	54
4.8	Top view of abrasion machine	54
4.9	The result of pretest	55
4.10	Abrasion test	55
4.11	Process of repairing test	56
4.12	Coated wire	57
4.13	Coated wire(optical microscope)	58
4.14	Coated wire(SEM)	58
4.15	The result of tensile test(True stress of fracture)	58
4.16	The result of repairing test	59
4.17	Repairing test (more than once)	60
4.18	Comparison between heating condition and no heating condition	62

4.19	Bearing	63
4.20	Damage by type	64
4.21	Balljoint	65
4.22	Human joint	66
4.23	Plating	68
4.24	Soldering test sample (top view)	70
4.25	Soldering test sample (side view)	70
4.26	Soldering test sample (schematic)	70
4.27	Tensile test (setting)	70
4.28	Tensile testing machine	70
4.29	Peeling Sample	71
4.30	Breaking Sample	71
4.31	Experimental setup (abrasion)	72
4.32	Experimental setup (observation)	72
4.33	Electroplated sample picture	73
4.34	Result for surface quality test	73
4.35	Result for scratch test	74
4.36	Healed sample picture	75
4.37	Friction measuring machine	76
4.38	Result for the friction test (Plating for 1hour)	77
4.39	Result for the friction test (Plating for 3hours)	77
4.40	Plating for 1h	78
4.41	Plating for 3h	78
4.42	Process of repairing abrasion	80
4.43	Process of experiment	80
4.44	Abrasion testing machine	81
4.45	Experimental setup	81
4.46	Result of repairing experiment	81

4.47	Cracked metal breaks by force	82
4.48	Crack growth and brake (left), Crack repaired (right)	83
4.49	Setting of proposed method	84
4.50	Process of proposed method	84
4.51	Proposed method in robot	85
4.52	Repairing step in robot	86
4.53	The list of experiments	87
4.54	Experiment to define thickness of material	87
4.55	Fe powder attracted to the crack of sample	88
4.56	Overview of experiment to define thickness of materia	88
4.57	Structure of sample (overview)	89
4.58	Damaged sample	89
4.59	Fe powder trapped on damaged area of material	89
4.60	Setting of coating	90
4.61	Damage place filled sample	91
4.62	Setup of tensile machine	92
4.63	Sample of brass	93
4.64	Sample of PEKK	93
4.65	Comparison of toughness (Brass)	95
4.66	Comparison of toughness (PEEK)	96
4.67	Load-stroke curve of Brass samples	97
4.68	Load-stroke curve of PEEK samples	98
4.69	Zinc coating	98
5.1	Encapsulation by orifice method using double nozzle	102
5.2	Capsules filled with colored lubricating oil	102
5.3	Encapsulation apparatus	104
5.4	System Diagram of encapsulation apparatus	104
5.5	Closeup of double nozzle	105

5.6	Circulation system overview	105
5.7	Developed pump	106
5.8	Schematic diagram of capsule divider	107
5.9	Schematic diagram of capsule divider in a tube	107
5.10	Capsule divider overview	108
5.11	Predivider	108
5.12	Postdivider	109
5.13	Flow rate vs. the average number of capsules remained after circulation	110
5.14	Change in the number of capsules trapped at postdivider in collection time	111
5.15	Change in the number of capsules trapped at postdivider in discharge time	111
5.16	Circulation path in robot's body	113
5.17	Material distribution problem	113
5.18	Changes in the amount of capsule transportation due to flow rate changes	114
5.19	Capsules measurement by ImageJ	115
5.20	Overall view of experimental device	116
5.21	Branch exit	116
5.22	Filter (pore diameter is 5.5 [mm])	118
5.23	Capsules	118
5.24	Relationship between flow ratio and acquisition rate	119
5.25	Capsule flow entering the transportation path without colliding with the filter (20% flow rate ratio)	120
5.26	Alginate capsule including absorbents	121
5.27	Overview of experiment	121
5.28	Capsules trapped in filter part	122
5.29	Result for removing impurities experiment	122

6.1	Total system	128
6.2	Total system detail	129
6.3	Animal-like system and plant-like system	133

表目次

4.1	Details of chemical agents	52
4.2	Plating Solution	67
4.3	Result for adhesion test	71
4.4	Result for Surface Quality (average of 4 samples)	73
4.5	Result for scratch depth	75
4.6	Average of the result for friction experiment	78
4.7	Average of Toughness (Brass samples)	95
4.8	Average of Toughness (PEEK samples)	96

第1章

序論

1.1 研究背景

動物などの生物は多細胞で構成される極めて複雑なシステムを、損傷した際に自分自身で組織の再生・治癒をすることができている（修復機構）。また、劣化した細胞を更新し、システムを常に正常な状態に保つ（恒常性維持機構）。本研究は、この生物の修復機構および恒常性維持機構に着想を得て、インフラや機械システムでの修復機構および恒常性維持機構を実現し、恒久的に動作可能な社会システムの実現を目指す。

生物の根底ある原則として多くの生物に見られるのは、個として環境適応を行い、種として存続をするということである。個としての環境適応とは、「自己保存 (Self-preservation)」と呼ばれるもので、外部環境および内部環境の変動に対して何らかの働きかけを行い適応することで、個を生かすことをいう。種としての存続とは、「自己複製 (Self-replication)」と呼ばれるもので、自分の遺伝子を引き継いだ子孫を残し、種を存続させることをいう。生物の身体のメカニズムには、この自己保存と自種保存の原則を実現するための仕組みが備わっている。

ここで「原則を実現するための仕組み」とは何かを考えてみる。「自己保存」を実現するために、生物は次の3つの系を有している。(1) 物質代謝を中心とした系（生存系）、(2) 神経、筋肉の活動を中心とした系（動作系）、(3) 細胞間の情報伝達、内分泌系、神経系を中心とした系（制御系）である[1]。生存系は、物質（有機物）を取り入れ自然治癒や身体を動かすためのエネルギーなどに使用可能な形に変換し生命の維持を行うことを担う系である（化学系）。器官系でいえば、消化系、呼吸系、循環系が生存系にかかわり

がある。動作系は、筋肉を動かすことにより、内臓の動きや手足による外部環境とのインタラクションなどを担う系である（機械系）。器官系でいえば、循環系や呼吸系、消化系、排出系、感覚系、神経系、運動系、骨格系が動作系にかかわる。制御系は、細胞の協調や運動の統合などを担う系である（情報系）。器官系でいえば、内分泌系や神経系が制御系にかかわる。生物はこれら3つの系を活用して、「自己保存」を行っている。また、「自己複製」の実現は、主に生殖系で行われる。

「自己保存」には上記の3つの系が関わっているが、生存系（化学系）、動作系（機械系）、制御系（情報系）の中で、生存系が従来のロボットでは考慮されていないことがわかる。動作系や制御系に関しては、機械に置き換えればモーター、センサとその制御器であり、一般的なロボットにおいても導入されている。また、自己保存の原則に基づいたロボットをテーマとした WAMOEBa の研究[2]やサイバー・ローデントの研究[3]でも対象としているのは、主に動作系と制御系である。生存系を機械システムにおいて研究している例はほとんどないが、人間に依存せずに活動し続けることが可能なシステムの構築のためには、生存系の機能が重要な役割を果たすと考えられる。そこで本研究では生存系にあたる機能をロボットに付与する方法を考えた。

1.2 研究目的

生存系を機械システムに組み込むことを本研究の大目的としたとき、そのすべてを本論文中で研究するのは困難である。そこでその糸口として、本研究では生存系の特徴である「物質を取り入れる」という点に着目した。前述したように、生物は物質を取り入れ、それを細胞が使用可能な形に変換することで、生命の維持を行う。変換された物質は、細胞へ溶液系を介して、運搬され細胞で消費される。この「変換」→「運搬」→「消費」のプロセスと、消費により生じた老廃物を「除去」することが大局的に生存系を表現していると考えられる。人間を含めた動物において主にこのプロセスで重要な役割を担っているのは、消化系と循環系である。消化系は主に物質の変換の部分を担当し、循環系は物質の運搬、消費、除去の部分に大きくかかわる。消化系に関しては、2012年に「バイオリアクター」と「食料の摂取機構」を開発した。コンセプトは、摂取した有機物を電気エネルギーに変換して機械システムを動かすことである。しかしながら、世界的にもこれらの技術はまだ発達段階

階のため、機械システムを動かすだけのエネルギーを得ることが困難であった。そこで本研究では循環系に着目し、その機能を機械システムにおいて利用できるかの検証を行う。

生存系で循環系のかかわる機能のうち、機械システムにおいて必要であると考えられる機能は「自己治癒」と「自己維持」と考えた。自己治癒は、機械システムが破損したときに破損をその場で修復する機能である（「自己修復機能」とする）。自己維持は、機械システムの状態を良好な状態に保つことである（「自己維持機能」とする）。本研究では、生物の有する循環系の機能を人工循環器系システムにより実現することを目的とし、自己保存の機能を有する機械システムの実現への足がかりとする。

1.3 生物の自己保存の機能

以下で生物の自己保存の代表的な機能に関して紹介する。

1.3.1 創傷治癒

生命は、自律していると同時に、自立した存在である。もし細胞を大きく傷つけられた際に、人間は病院などで治してもらうこと可能だが、他の生命に関しては自分自身で治療ができない場合、死に至る。つまり淘汰されることとなり、これは自己保存の失敗を意味する。自然環境下で生きている限り、生命は常に損傷するリスクがありながら活動することになる。たいていの生命には、細胞が傷ついたとしても備わっている創傷治癒の機構により、細胞の機能を損傷前の状態に戻す。

ここでは、ロボットとの対応を取り、皮膚（外装）、筋肉・腱・靭帯（アクチュエータ）、骨（構造部材）、感覚受容器（センサ）、神経（導線）の治癒の機序についてまとめる。

1. 皮膚の治癒[4, 5, 6]

皮膚が損傷するとまず出血する。出血すると、まず血小板により血栓（血小板プラグ）ができる（1次止血）。次いで、血漿タンパク質で水溶性のフィブリノーゲンがトロンビンにより繊維状で不溶性のフィブリゲンに変化する。フィブリノーゲンは、血栓の周りに集まり網目構造を形成し、その網目に赤血球を取り込み凝固し血餅が形成する（2次止血）。止血が終わると、炎症反応がはじまる。止血直後の血塊の中には、病原菌が存在する。好中球やマクロファージは、ヒスタミンやブラ

ディキニンなどの炎症性物質の働きで透過性が上がった毛細血管の中に侵入し病原体を殺す。その後、線維芽細胞や血管内細胞が傷口に集まり、線維芽細胞は膠原繊維（コラーゲン）を生産し、血管内細胞はそのコラーゲンの土台に血管を新生する。血管が新生されると、栄養素や酸素がそこに流れ込み、再びコラーゲンを生産し、さらに血管が新生される。この工程を繰り返し、さらにコラーゲンが他の物質とともに架橋構造を取ることによってだんだんと強度が上がる（瘢痕組織が形成）。そして、2～3週間ほどで皮膚が形成されていく。また、これらの工程は、グロースファクターなどの因子によりコントロールされている。

2. 筋の治癒[7, 8, 9]

筋が損傷すると、細胞膜が破壊される。膜の破壊により、平常時のように Ca^{+} の流入をコントロールできなくなり、 Ca^{+} が流入し筋繊維内の Ca^{+} の濃度が上がる。筋肉は Ca^{+} により収縮が起こるので、濃度上昇により過収縮の状態になる。 Ca^{+} 依存性中性プロテアーゼにより筋は分解され、筋繊維は壊死する。その後、好中菌やマクロファージによる壊死した筋の貪食が起こる。壊死細胞の貪食にともない、修復の要である衛星細胞（サテライトセル）が活性化される。衛星細胞は分化・増殖後に融合し、筋繊維になる。

3. 腱・靭帯の修復 [10, 11, 12, 13, 14]

腱の周囲には血管が少なく、一般的に再生能力の低い組織であると考えられている。腱が損傷すると、線維芽細胞が増殖し線維性タンパク質を合成する結果、コラーゲン繊維が形成される。このコラーゲン繊維が力に沿って配向することでリモデリングされ、腱が修復する。

靭帯が断裂すると、出血し皮膚同様に血腫が形成する。血腫中のマクロファージや血小板などが産出するグロースファクターによって未分化間葉系細胞がつくられる。その細胞が線維芽細胞に分化した後、コラーゲン繊維が結合して組織が修復する。

4. 骨の治癒[15, 16, 17]

骨は、骨折すると、血管の損傷により漏れ出た血液が血腫を形成する。免疫細胞（好中球やマクロファージなど）や破骨細胞が内出血した血液や骨の断片、壊死し

た骨を取り除く。その後、血腫は肉芽細胞にゆっくりと置き換わっていく。軟仮骨が形成され、肉芽細胞、骨の周囲から繊維組織や軟骨芽細胞に置き換わり、血管が新生する。軟仮骨はカルシウムを含んでいない柔らかい組織である。間葉系前駆細胞が増殖および仮骨に移動し、線維芽細胞や軟骨細胞に分化し、細胞外マトリックスを形成し、ゆっくりと血腫が置き換わっていく。軟仮骨が骨折箇所をつなぐと、硬仮骨の生成が始まる。仮骨の石灰化が始まり、線維性骨に置き換わっていく。表面侵食とリモデリングにより、線維性骨は層状骨に置き換わる。そして骨は回復する。

5. 神経の治癒

脳神経に関しては、一般的に人間のものは再生しないとされる。一方、犬やカエルなどの動物は、神経が切れても再接続することができる。T. C. Sung らは、タンパク質 p45 を過剰発現するトランスジェニックマウスが脊髄を損傷した際に、ニューロン生存率が増加していること、皮質脊髄路の繊維の収縮が減少していること、そして機能回復の改善を示すことを発見した[18]。

6. 感覚器の治癒

嗅覚に関わる嗅覚ニューロンに関しては、1～2か月ごとに上皮にある基底細胞が失われたニューロンを補充している[19]。聴覚に関わる聴覚有毛細胞に関しては、基本的には再生しないが、発生過程において有毛細胞の分化を促す遺伝子調節タンパク質を指令している Atoh1 遺伝子をコピーしたウイルスを使うことで、部分的に治癒した例がある[20]。

1.3.2 細胞更新

細胞は絶えず失われ、新しい細胞が細胞分裂により生まれている（細胞更新）。各器官の細胞更新の有無をまとめると以下のようなになる。

1. 更新有り・・・皮膚の細胞細胞（表皮、角膜）、消化管、造血組織、リンパ組織、結合組織細胞、平滑筋細胞など
2. 更新無し・・・神経細胞、心筋細胞、目や耳の感覚細胞、セルトリ細胞など

このように、多くの組織は細胞更新が行われる。

表皮は、紫外線、外部との接触（機械的刺激）、異物（細菌など）などの外部刺激から体内の細胞を保護するのに必要な組織である。常に外部刺激にさらされているので、更新頻度も比較的多い。皮膚の細胞は皮膚の底の方から生まれる（結合組織との境界にある幹細胞が、皮膚にの機能に分化した細胞を生み出し供給する）。皮膚の表面にあるのは、ケラチンを主成分とした扁平な固い層であり、古い細胞である。この細胞は死んで垢となるため、幹細胞が新しい細胞を供給することでバランスをとる。

古くなった細胞は自らで死ぬ機構があり、アポトーシス (apoptosis) と呼ばれる。核の凝縮・断片および細胞の収縮・断片化が起こり、最終的にはマクロファージに取り込まれ除去される。

1.3.3 ホメオスタシス

体温や血糖値、pH、血圧、イオン濃度、老廃物などの内部環境のバランスを一定に保ちつづける仕組みである。内分泌系や自律神経系によりバランスが調節される。例えば、体温の調整では、体を震わせて熱をつくったり、病気のときは免疫機能が働くことにより体温は上げる。また、汗をかいたり、血管径を広げることで体温が下がる。

1.3.4 人工臓器と細胞

人工臓器の研究は多く行われており、人工心臓、人工血管、人工腎臓、人工すい臓、人工肝臓、人工肺などが開発されている。これらの人工臓器は、血糖値や pH、老廃物の量、酸素濃度などの調節を行っている。また、損傷した組織の再生のための足場 (scaffold) としての利用も近年行われており、人工臓器を足場として細胞を集合させ組織を再生する試みもなされている。しかしながら、人工腎臓におけるフィルタによる透析や人工肺におけるガス交換、人工心臓による血液循環などは機械で行うことができるが、組織の再生や人工肝臓における代謝を人工的に行うことは困難であるため、生物の細胞の力を利用してそれらの機能は実現している。このように人工的に酸素や糖、血液などの物質の交換は比較的簡単に実現できるが、細胞の有する再生機能や代謝の機能を人工的に実現することは困難である。本研究で実現しようとしている自己修復機構は生物の細胞の機能にあたる部分

であり、その機能をいかに人工的に機械システム上で実現するかが重要である。

1.3.5 進化と自己保存

進化という観点でみると、生物は単細胞生物から始まり多細胞生物となった。生物が、単細胞生物や器官分化の行われていない初期の多細胞生物であった頃は、細胞膜を通して、海の中から栄養素やイオンを直接取り入れ、老廃物も海の中へ直接放出すれば、生命活動が成り立っていた。他種との生存競争で淘汰されないために、陸上などのより多様な環境で活動することや他種に先駆け栄養を得ることができる身体構造に身体を変化させる必要性が生じ、生物の身体構造は複雑化していった。それに伴い、身体の隅々まで栄養素や酸素を運搬し細胞へ供給することや、細胞の活動により生じた老廃物を運搬し除去することに、血液循環器系システムによるサポートは必須となっていった。つまり、細胞が集合して成り立っているが故に、身体のシステムを複雑化させるためには、その複雑さを支えるシステムも同時に必要となってしまうということである。また、ある環境に対応しようとした際には、その身体構造を変化させる必要があるということも意味する。

1.4 機械の自己保存の機能

上記したように、生物の自己保存の機能は、循環系などの器官や細胞の機能などによって実現されている。そしてこれらは、進化の過程で人間などの動物は高度な運動能力や情報処理能力を得るために身体を複雑化したことに由来し、その複雑化した身体を維持するために得られた形質である。

1.4.1 機械システムの自己保存の必要性

一方、現在の機械を見てみると、基本的な構造は数百年前と変わらず、人の手による定期的なメンテナンスや故障時には修理が必要になる。従来通りの環境（例えば工場などの産業用途）で活動する機械であれば、基本的には人が近くにいるので修理やメンテナンスは人の手ですれば良いかもしれない。しかしながら、もし産業の自動化が進み、機械システムの数が膨大になった場合は本当に従来通り人の手により修理やメンテナンスを行うことで対応できるとは限らない。また、宇宙や海底、原発、農業などの分野で機械システム

が自律的に活動したときに、故障により動かなくなることは業務に影響を与えると考えられる。このように、人の手による修理やメンテナンスを前提とした従来システムでは将来的に機械システムが活動領域を広げる際に限界があることが想定される。これらのことから、生物のような自己保存の機能をロボットに組み込むことによる自立的に活動可能な機械システムは、工学的にも有用なものであると考える。

1.4.2 機械システムの自己保存の実現

機械システムの自己保存の機能とは何かを考えたとき、「自己修復機能」「自己維持機能」「自己充足機能」の3つの機能が必要であると考えている。自己修復機能は、導線、センサ、構造部材などに故障が生じた際に、それらを自動的に修理し機能を復帰させる機能のことである。機能の復帰において、例えば導線であれば導電率や強度、構造部材であれば寸法や強度、センサであればセンシング機能や強度など、修復対象部材によって修復されたといえる状態は異なる。生物でいえば、創傷治癒の機序にあたる。自己維持機能は、ベアリングなどの摺動部の潤滑や、モーターの温度の調節等を適切に行う機能のことである。生物でいえば、ホメオスタシスの機能にあたる。自己充足機能は、エネルギーや材料の自己補充の機能にあたる。生物でいえば、有機物の摂取によるエネルギー生産および身体を構成する物質の生産することであり、代謝の機能にあたる。これらの機能を機械システムに組み込むことで、機械システムの自己保存を実現する。

1.4.3 機械システムの自己保存に関わる従来研究

以下で、機械システムにおける代表的な自己保存の機能に関わる研究の事例を紹介する。

1.4.3.1 自己修復機能の従来研究

従来研究では、大別すると2つのアプローチがある。一つは、機械ユニット（基本構成要素）をつくり、機械システムをそのユニットで構成するという試みである。村田らは、電磁力により結合することが可能な機械ユニットを構築し、2次元平面上でのユニットの集合をコントロールできるシステムを開発した[21]。ユニットはそれぞれCPUを有し、独立に結合・解放の制御ができる。また接続したCPU間では通信ができ、情報交換を行うことが可能である。一部のユニットが欠けた際は、ほかのユニットがその箇所に入り込

み修復を行う。この研究は、集合をコントロールすることにとどまっておらず、導線、センサ、アクチュエータ、構造部材などの機能を実現できたわけではない。また、吉田らは、モーターと磁石を有するモジュール型ロボット MTRAN を製作し、それらのロボットが集合することで自己組み立て・自己修復を実現する手法を構築した[22]。これらの研究は、ロボットを交換しているだけであり、コストの問題や本質的には自己修復をしていない問題がある。もう1つのアプローチとして、故障した部品があったとしても、ロボットの動作としては故障する前と同じことができるようにするという研究がある。基本的には、ロボットに冗長性を持たせておき、一部が破損してもほかの部位で代替するという手法である。A.Cully らは、6足歩行のロボットの1つの足が故障した際に、ロボットが複数の動作を試し動作が成功できる歩き方を見つける手法を構築した[23]。また、小林らは、腱駆動ロボットアームの腱が破断した際に、冗長な腱により張力補償を行い、関節トルクや関節剛性を破断前と変わらない状態で制御可能な手法を構築した[24]。これらの手法は、本質的には修復ではなく、冗長性が失われるとロボットが動けなくなる。

1.4.3.2 自己維持機能の従来研究

WAMOEB-2の研究では、ハードウェアモニタリング（及び制御）機能を内部ハードウェア（バッテリー電圧、回路温度、モータ電流等の検出センサとモーター等の電源スイッチ）により行い、モーターや回路温度やバッテリー消費などの調節を機械システム自身の評価関数に基づき行った。また、一般的な自動車やパソコンなどのシステムでも、オイルの循環やファンによる内部の温度管理や潤滑は行われている。

1.4.3.3 自己充足機能の従来研究

ECOBOT は、太陽電池やバッテリーの代わりに、0.7V 50mW の出力の微生物燃料電池 (MFC)48 個からなる「胃」を持っている[25]。MFC には、下水汚泥から採取したバクテリアが含まれている。バクテリアは、食物を糖に分解し、生化学エネルギーを電気に変換してロボットの電源となる。バクテリアによる食物の分解と、燃料電池に空気中の酸素を供給することで電気に有機物が電気に変換される。ECOBOT の実験では、EcoWorld と呼ばれる糞やペースト状にされたナメクジなどの昆虫や水が存在する空間が用意され、温度などが管理された環境で7日間動作させる実験を行った。糞はフェロモンによりひき

つけられ植物のように栄養を得る。またペースト状のナメクジが入った餌箱から餌を補給することも行っている。現時点では、MFCで動くロボットはわずかな時間しか動作せず、時折エネルギーを供給してやらなければならない。Energetically Autonomous Tactical Robot(EATR)は、アメリカ国防総省の機関 DARPA によるアメリカ軍のための開発プロジェクトの一環で開発されたロボットである[26]。活動に必要な植生バイオマスを自ら探し出し、カッターやマニピュレーター、シュレッダーなどを用いて破碎し、燃料補給を行う自律型ロボットである。取り入れた燃料をエンジンで燃焼させ電気を取り出し動くというコンセプトのロボットである。また、S. Wilkinson によって開発された Gastrobots は砂糖のキューブを自立的に取得して、MFC によって電気に変換して動作するロボットである[27]。

1.5 循環系と機械システムの自己保存

機械システムの自己保存の機能に関しては、まだまだ多くの課題があり、また「自己修復機能」「自己維持機能」「自己充足機能」の3つの機能を統一的に実現する手法を構築することを目指した研究はない。一方、動物はそれらの機能を備え、地球上のあらゆる場所で活動している。先述した生物の自己保存の機能のように、動物の場合、それらの機能は血液循環系が重要な役割を担っている。そこで本研究では、それらの機能を統一的に扱う仕組みとして動物の血液循環系に着目し、人工循環器システムを組み込むことによる機械システムの自己保存の機能を実現することを目指す。

1.6 本論文の構成

第2章では、人工循環器システムを用いた自己修復・自己維持機能の設計論に関して述べる。電気系部品（導線やセンサなどの）や機械系部品（ベアリングや構造部材など）の要素技術に関して、自己修復および自己維持機能に関わる研究・技術に関してまとめる。そして、これらの要素技術の研究もまた統一的に自己修復や自己維持を実現しようとしたものではないことや、これらの手法が抱える問題点である再修復が不可能である点や人の手による接触が必要な点に関して議論する。また、生物の血液循環系がそれらの機能を統一的に実現していることを述べ、機械システムにおいて自己保存の機能を実現するために

は循環系に着目した新しいアプローチが必要であることを述べる。

第3章では、電気系部品の修復手法に関する研究をまとめる。循環系を用いた電気系部品の修復に着目し、磁界を設計し強磁性体を配列させる手法を利用した、修復する導線である MPW と修復するセンサである MPS の開発に関して述べる。

第4章では、機械系部品の修復手法に関する研究をまとめる。循環系を用いた機械系部品の修復に着目し、摺動部に生じる摩耗を修復する手法と構造部材の損傷を修復する手法の構築に関して述べる。

第5章では、システムの状態維持に関する研究をまとめる。システム維持に必要な技術に着目し、循環系を構築する上で必要になると考えられる物質の運搬技術と老廃物の除去技術に関する研究について述べる。

第6章では、本研究により得られた成果と将来展望についてまとめる。図 1.1 に本論文の構成をまとめる。

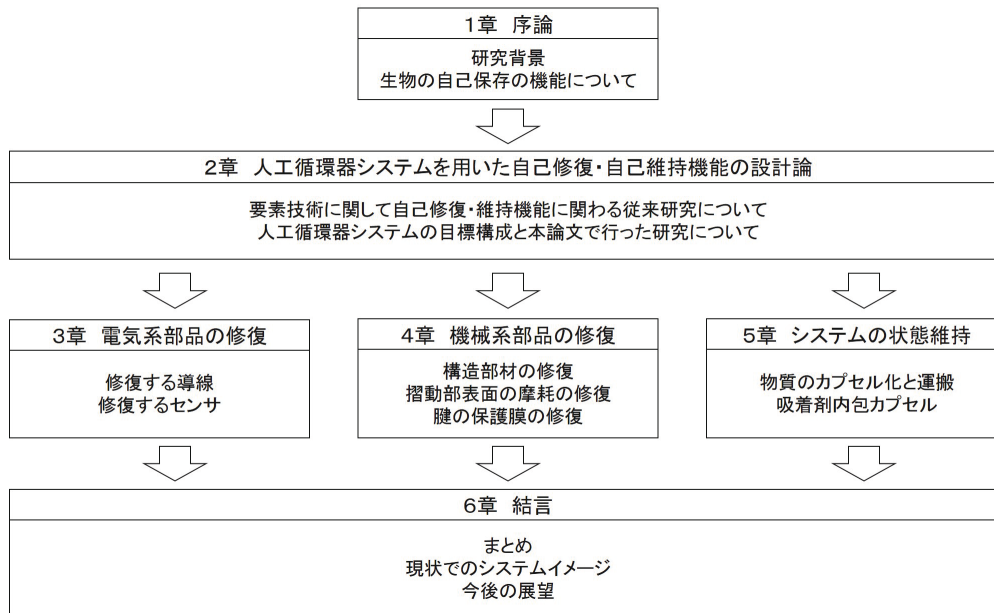


図 1.1 Contents

第2章

人工循環器システムを用いた自己修復・自己維持機能の設計論

2.1 人工循環器システムに必要とされる機能

本研究では，人工循環器システムの開発を行い，生物の血液循環器システムのような自己修復・自己維持機能を機械システム上で実現することを目的としている。

機械システムの一例としてロボットを見てみると，様々な部品でできていることが分かる。主な要素部品は，導線，センサ，アクチュエータ，構造部材，外装，関節部品（ベアリングやボールジョイント），パソコン・マイコン・増幅器（トランジスタ）などである。これらの部品は大別すると，機械系と電気系に分けられる。機械系部品としては，アクチュエータ，構造部材，外装，関節部品，その他ねじなどの部品が挙げられる。電気系部品としては，導線，センサ，トランジスタ，その他抵抗などの部品が挙げられる。

ロボットが，正常な状態で活動し続けるためには，上記の機械系部品，電気系部品を常に正常な状態にする必要がある。つまり，人工循環器システムは，機械系・電気系部品が破損した際には修復して機能の復旧を行い，またそれらの部品のメンテナンス（冷却や潤滑など）を常に適切に行うことができる必要がある。

ロボットには様々な部品が存在し，その形状や機能は部品に応じて異なっている。その形状や機能に応じて，自己修復・維持の実現手法は異なると考えられ，部品の種類に応じた修復・維持機構を開発する必要がある。

2.2 自己修復・自己維持に関わる従来研究

以下に従来行われてきた修復および維持（メンテナンス）に関する研究の事例を紹介する。

2.2.1 構造部材

自己修復材料全般に適用できる話ではあるが、構造部材の修復手法は4つに大別できる。材料中にカプセルを埋め込む手法、材料中にキャピラリー構造を入れる手法、光や熱などの刺激を加える手法、分子鎖の再結合を利用した手法である。以下でそれぞれの手法の例を紹介する。

材料中にカプセルを埋め込む手法は、材料の生成時に修復剤を封入したマイクロカプセルと材料によっては触媒を分散させて混入しカプセルが割れることで修復する手法である。White らイリノイ大学の研究グループは尿素ホルムアルデヒドポリマーを膜材とするマイクロカプセル内に液状のジシクロペンタジエン (DCPD) を封入し、それら及び Grubbs 触媒 (ルテニウムベース) 粒子をエポキシ樹脂中に分散させた[28][29]。

材料中にキャピラリー構造を入れる手法は、材料を構成するキャピラリー内に修復剤を一種類もしくは二種類入れ、キャピラリーの破壊の際の修復剤の硬化を利用して材料を修復する手法である。White らは生物の毛細血管をモデルとしネットワークを組んだ修復剤入り繊維を入れたエポキシ樹脂を開発した[30]。これにより、繊維ネットワーク全体で修復剤を共有するようになり枯渇の問題を解決できると述べた。また、2014年には White らは別々のゲル化剤 (bis-acylhydrazine-terminated poly(ethylene glycol), tris[(4-formylphenoxy) methyl ethane] を注入した二種類の細管を平行方向に埋め込んだ自己修復プラスチックを開発した[31]。

光や熱などの刺激を加える方法は、熱や光といった外部からエネルギーを与えることで状態を転移させる手法である。熱を利用しての修復は、中尾らの SiC 粒子の高温酸化時の体積膨張を利用した亀裂修復を行うセラミック[32]や、Chen らの亀裂が入っても一定温度以上にした後再び冷却することで何度でも修復される高分子材料[33]等が挙げられる。前者は 1200 °C の高温が必要であるが、セラミックガスタービンでの使用を想定して

おり環境条件に合った自己修復材料であると言える。後者は Diels-Alder 反応を利用した修復で、115 °Cで修復に 30 分、40 °Cで 6 時間と比較的低温の温度条件を満たす手法があれば安定して利用し続けることの可能な自己修復材料であると言える。光を利用しての修復は、Urban らのオキセタンとキトサンを共有結合したものをネットワークに組み込んだポリウレタン[34]や、山本らのアゾベンゼン誘導体を液晶に溶解したゲル材料[35]等が挙げられる。両者とも紫外線照射によって自己修復が行われる。前者は太陽光を浴びると損傷によって生じたオキセタン環のフリーラジカルと紫外線によって生じたキトサン鎖のフリーラジカルの再結合が生じることで架橋反応による修復が行われる仕組みとなっている。二度目の同箇所の修復が限定的になるが 30 分程度で修復がされるのが特徴である。後者は光異性化反応を起こすアゾベンゼン誘導体によりゾルーゲル転移を生じさせ傷をゾル状態の材料によって埋める仕組みとなっている。

分子鎖の再結合を利用した手法は、外部エネルギーを与えずとも分断された分子のネットワークを再構築して接着し修復する手法である。分子運動性を利用するためゲルやエラストマーといった柔らかい材料に見られる。今任らの研究では自発的に結合組み換えを行う特殊な分子骨格を高分子のネットワークに導入することで化学的刺激なしで自己修復する化学ゲルを開発した[36]。切断しても接触させて室温で静置すると、数時間で結合・修復し、24 時間後には元の力学特性の 90[%] 以上の回復を示した。切断後数日が経過しても修復活性が衰えず、長期安定性についても確認されている。Odriozola らによる研究の方では化学的刺激なしで自己修復する熱硬化性ポリ(ユリアーウレタン) エラストマーを開発した[37]。こちらも切断してから密着させて室温で静置し 2 時間で 80[%]、24 時間で 97[%] まで力学特性を回復させている。自己修復材料に関する研究はほかにも多くある[38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47]。

2.2.2 導線

Ye Shi らは、自己集合する超分子ゲルとナノ構造されたポリピロールからなるハイブリッドゲルを開発した[52]。金属-配位子超分子の動的集合/分解特性とポリピロールゲルの導電性の性質を合わせた、高導電率 (12Sm^{-1}) なゲルである。Zn-tpy 超分子の溶液を破損箇所に注ぐことで、圧縮に対する強度および電気伝導率の回復する。Moore らはカ

プセルを材料に埋め込む手法を応用して自己修復する電気回路を作製した[53]。この回路はガリウム-インジウム合金の液体金属を封入した 10[μm] サイズのマイクロカプセルが回路上の金線にコーティングされている。電気回路に傷が生じた場合は液体金属が亀裂に流れ込み導電性を回復させるという仕組みとなっている。古志らは、誘電泳動力による金ナノ粒子の電場トラッピングを用いた自己修復金属導線を開発した[54]。断線した金の導線は、金ナノ粒子のトラップによる自己修復機能によって導電率が回復する。E. Palteauらは、自己修復ポリマーでつくられたマイクロチャンネルと、そこに注入された液体金属により構成される導線を開発した[55]。完全に切断された後に、接触させることで自己修復ポリマーが再結合し、機械的および電氣的に自己修復することができる伸縮性の導線である。

2.2.3 センサ

Young. J. Song らは、光重合性樹脂中での UV 照射により形成されるストレインセンサ導波路を開発した[57]。2つのマルチモード光ファイバを有し、紫外 (UV) 波長範囲の光波を介して導波路が形成され、赤外線 (IR) 波長範囲内で導波管を透過する電力を計測することによってひずみを計測する。センサが故障した際、導波路は UV 樹脂を通り、2つの光ファイバの間の隙間を再びブリッジする。T. P. Huynh らは、センサの構成部品 (基板、電極、および検出層) のすべての部分が自己修復可能である、曲げられ伸縮可能な自己修復センサデバイスを開発した[58]。基板に sh-ctr-PU, 電極に sh- μ Ag-PU, 検出層に ethoxyphenylthiol がカップリングされた AuNP フィルムを用いており、それぞれが特定の条件以下であれば修復が可能であるため、システム全体としても修復能力を有する。

2.2.4 アクチュエータ

Cheng-Hui Li らは、配位錯体によって架橋されたポリ (ジメチルシロキサン) ポリマー鎖のネットワークを有する高伸張性、高誘電率、自己修復可能なゲルを開発した[59]。このゲルは鉄原子を中心に結合しており、強い結合であるピリジル-鉄錯体の結合、弱い結合であるカルボキシアミド-鉄錯体の結合からなっている。破断時は弱い結合が破壊され、強

い結合は破壊されず鉄原子が残るため、破断面を接触させ-20℃で冷やすことで弱い結合が回復しゲルの修復が可能となる。誘電体であるため高電圧を印加することで、3.6%程度の収縮をする。S. Huntらは、シリコンオイルで飽和したシリコンスポンジを用いた自己修復性誘電アクチュエータを開発した[60]。切断時にシリコンオイルが切断箇所を充填することで、誘電体の構造を保つ。

モーターなどの維持機構としては、水冷や空冷による冷却が多くみられる。

2.2.5 関節部品

一般的にベアリングや軸など摺動部の摩耗の修理などは、電解メッキや溶接などで肉盛りをしてから切削・研磨する。また、潤滑油を塗布することにより、摩擦を低くして摺動性を保つ。

2.3 目標とするシステムと本研究で行う領域

自己修復機能を有する機械・電子部品は、従来研究にも存在する。しかし、上記のほぼすべての手法が、一度だけしか部品の修復ができなかったり、破断面を接触させる必要があるという特徴を有している。本研究では、人工循環器システム中に修復に必要な物質を流すことにより、これらの問題を解決する。一度だけしか部品の修復ができないシステムが多い原因としては、破損箇所を修復した際にカプセルやキャピラリー中の修復剤を使い切ってしまうたり、カプセルやキャピラリーも一緒に硬化してしまうことがある。これらの手法は、カプセルやキャピラリーが破損して修復剤が漏れだすことで修復が行われるので、上記の問題が起きる。接触させる必要があるシステムとしては、ポリマー鎖の再結合により修復が行われるシステム全般がそのような問題を抱えている。再結合をするためには、破断面を接触させる必要がある。つまりこれらの手法全般において、大きな傷（体積を大きく奪われるような傷）の自己修復はできないということが言える。また、H. R. Williamsらは、FMECAによる分析を行い、自己修復を工学的に実現するのであれば、すべてのリスクを考慮するべきであるという主張をしている[61]。ポンプにて修復剤を流すシステムを想定した際の故障モードを考察し、ポンプの破壊や配管の漏れ、修復剤の凝固不良などの故障要因とその影響の大きさを分類した。修復機能を入れることでそれらの故

障をするリスクも増すため、そのリスクを考慮してシステムを評価すべきと述べている。

一方、動物の血液循環系システムは1章で述べたように、肌や骨などの部位の治癒や、身体の恒常性を常に維持に大きく関わっている。また、例えば人間であれば心臓（ポンプ）も通常は80年以上は壊れることなく動き続けることや、ケガをした際の治癒機構も正確に働き何度ケガをしたとしても治癒できることなどの特徴を有している。その結果、大きな損傷や病気がない限りは、動物の身体は血液循環系により維持され続ける。本節では、動物（特に人間）の血液循環系の機能をまとめ[49, 50]、機械システム（ロボット）との対応をとる。

1. 創傷治癒

動物の各部位の創傷治癒に関しては1章にて述べている。各プロセスにおいて、止血の部分では血小板、肉芽細胞の形成や細胞分裂においては細胞の材料となるアミノ酸、細胞分裂のためのエネルギー源としてグルコースが必要となる。

2. 栄養素の運搬

細胞が活動するためには様々な栄養素が必要になる。生物は、タンパク質、脂質、多糖を外部から取り入れ消化する。消化によりそれらの物質は単量体に分解され、タンパク質はアミノ酸、脂質は脂肪酸とグリセロール、多糖は単糖（グルコース）に変換される。これらの単量体は、細胞質内での解糖反応、ミトコンドリアを経て、ATP（アデノシン三リン酸）に変換される。ATPは、筋収縮や細胞分裂、能動輸送、解糖などに必要な化学エネルギーである。脂肪酸やグルコースは血流により運ばれ細胞に供給され、ATPが合成される。

3. 情報伝達物質運搬

細胞間の情報伝達の手法は大別すると、内分泌型、傍分泌型、神経型、接触型がある。そのうちの内分泌型でシグナル分子として使われているのがホルモンである。ホルモンは内分泌細胞で生産され、標的細胞の受容体に血流により運ばれる。アドレナリン、コルチゾール、エストラジオール、グルカゴン、インスリン、テストステロン、チロキシンなどがホルモン類のシグナル分子である。これらの分子は、血圧や心拍数、代謝、グルコース合成、脂質分解などの細胞の活動を調節している。

4. 熱の運搬

体温は細胞の生体反応の活性に大きくかかわるため、常に一定に保たれる。血液は、肝臓や筋肉などで生じた熱を表皮などに運搬する役割を有する。また、血管の伸縮や血流の調節などにより熱の放出を制御し、体温を適切に保つ。

5. 潤滑

関節の潤滑には、軟骨と滑液が必要である。滑液は、関節包にある滑膜から生産される。滑膜は血管が豊富に通っており、滑膜細胞は血液中のグルコースやアミノ酸から滑液を生産する。軟骨には血管がないため、軟骨細胞などはこの滑膜から栄養素などを取り込む。

6. 免疫白血球は、好中球，好酸球，好塩基球，単球などからなり，生体中に侵入した細菌などの病原微生物を殺菌する役割や寄生虫を殺す役割を担う。

7. 老廃物運搬

細胞の活動により生じた老廃物（二酸化炭素，尿素窒素、クレアチニン、尿酸など）を運搬する。腎臓で濃縮し尿としての排出，皮膚から汗としての排出，肺での二酸化炭素と酸素の交換などにより老廃物を外部に排出する。

8. 気体の運搬

酸素は，ATP の生産などの生体反応全般に関わる重要な気体である。酸素は，直接血液中に溶けた状態および赤血球中のヘモグロビンと結合した状態で血液とともに循環している。

2.3.1 生物と機械の対応図

これらの血液の機能をまとめロボットの部品に対応させたものが，図 2.1 である。硬骨は構造部材に対応し，軟骨は摺動部に対応させた。これは，大きな力を受けるのは生物においては硬骨であり，機械システムにおいては構造部材が力を受ける部品であるからである。また，生物の各関節には摺動するために低摩擦の軟骨があり，これは機械システムにおいてはボールジョイントやベアリングなどの摺動部品に対応していると考えられる。腱・靭帯・筋には，アクチュエータに対応させた。これは，生物の腱・靭帯・筋のすべてが動くことに関連した部位であり，機械システムにおいてはその役割をモーターや腱駆動，油圧などのアクチュエータが対応していると考えたからである。表皮には外装に対応

させた。生物の表皮が細胞などを外部の刺激から守るため役割を担っており、機械システムにおいては外装が電気部品などを外の刺激（水や光など）から守っているといえるため、これらに対応させた。感覚器は、センサに対応させた。これは、生物における目（光の受容器）、耳（音の受容器）、鼻（においの受容器）、肌の機械受容器（触覚の受容器）などは、機械システムにおけるセンサに対応していると考えたからである。神経は、導線・CPUに対応させた。これは生物の情報伝達を担うのが神経であり、機械システムにおいては導線・CPUがその役割を担っているからである。

生物は、上述したように循環系からのグルコースやアミノ酸などの物質供給を起点として、治癒や状態維持、エネルギー供給を行うことができ、自立したシステムである。本研究でも生物の循環系と同様なシステムを機械システムに組み込むことで、自己保存の機能を備えた自立して活動可能なシステムの実現を目指す。そして、従来の自己保存の機能に関係する自己修復・自己維持の研究および技術では考慮されていない『統一的な自己保存の機能』を、循環系を志向した自己修復・維持機構を開発していくことで実現する。

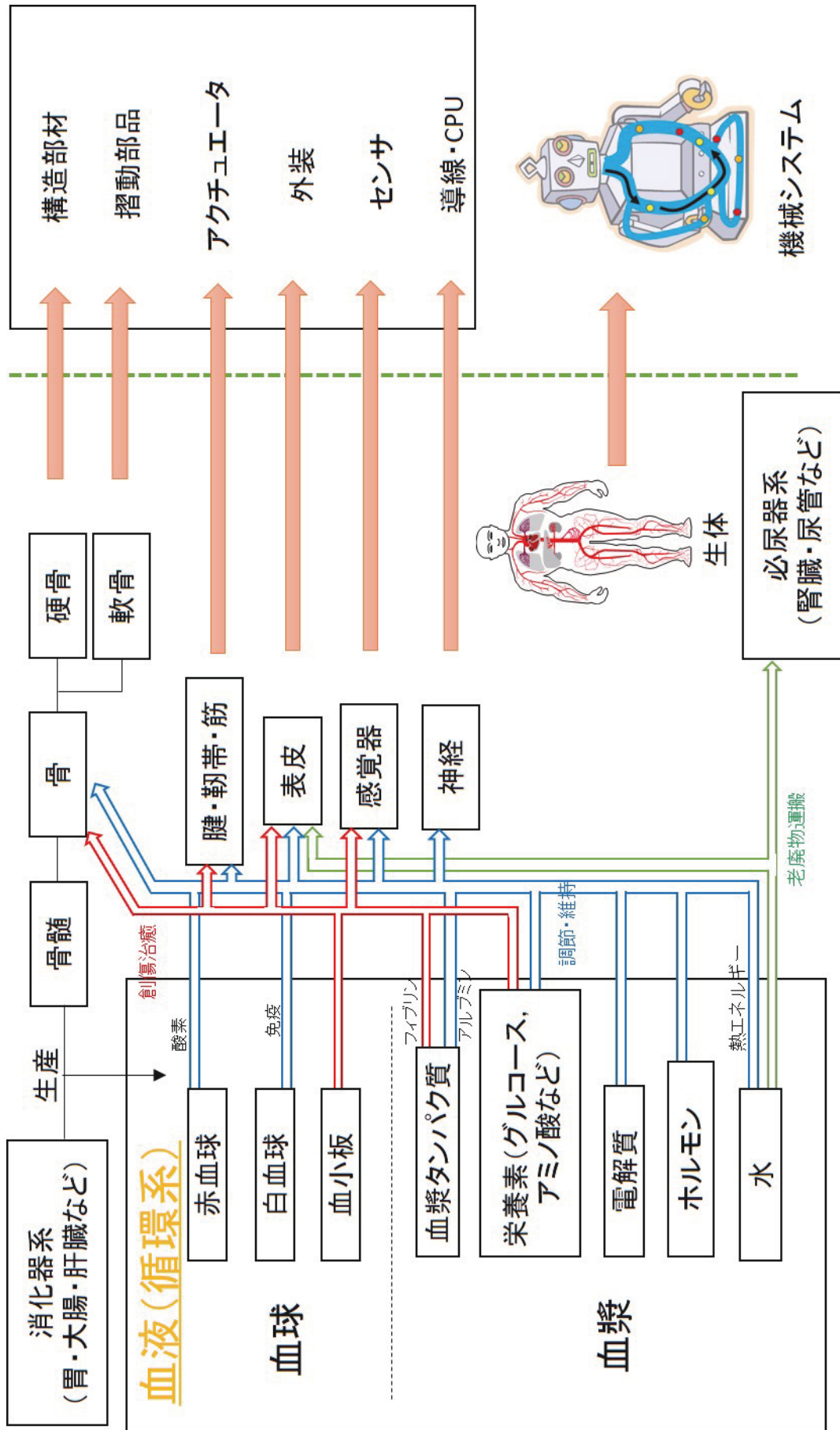


図 2.1 Corresponding view between living things and machines

血液循環系は細胞のためのシステムであり機械システムで使用するためには、細胞と循環系により実現される機能を機械に落とし込む必要がある。組織の修復において重要なのは、(1) 修復に必要な物質（血小板やアミノ酸など）を損傷箇所に運ぶこと、(2) その物質を使って組織を任意の形状（損傷前の状態）に再構成すること、である。これを機械システムに置き換えると、(1) 修復に必要な材料（金属などの構成物質）を破損箇所に運ぶこと、(2) その材料を任意の形状（破損前の状態）に再構築すること、となる。(1) に関しては、循環系を使えば材料を運ぶことは可能であるので、容易に実現できる。問題は(2)であり、これは材料をどのように材料を加工するのかという問題であり、機械システム内で行うことは難しい。

そこで、本研究では機械システム内で修復を行うために、以下の修復を利用することとした。

1. 『場』を利用した修復手法
2. 境界面での反応を利用した修復手法

『場』を利用した修復手法では、磁場などの『場』を使って運搬されてきた材料の配列を制御することで、任意の形状を再構築する。境界面での反応を利用した修復手法は、摩耗などの境界面で生じる破損を修復する手法で、境界面に物質を供給することで修復を行う。

本研究では、上記の修復手法に基づき、電気系部品の修復として導線およびセンサの破壊を対象とし、機械系部品の修復として構造部材の損傷、摺動部の摩耗、腱駆動機構のワイヤ（アクチュエータ）を対象とした。

また、将来的に循環器系を用いるときに問題となるのが、同じ経路を流れている物質が反応しないように運ぶことである。本研究では、カプセルを用いて物質を分別する手法を構築する。またカプセルを用いた運搬手法を応用して、循環系中の老廃物を除去する手法の構築も行った。

図 2.2 に本論文で研究する要素技術を掲載する。

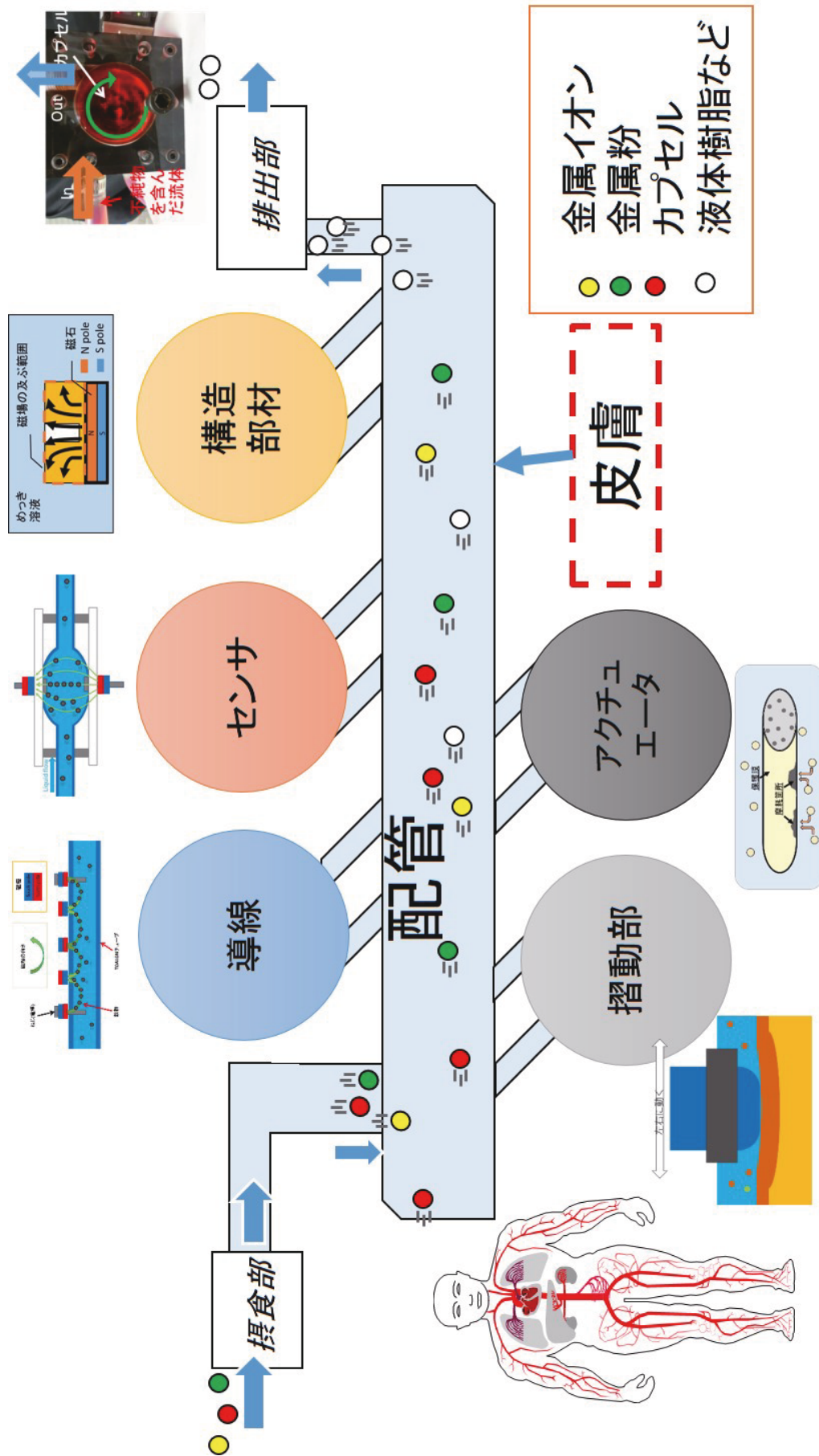


図 2.2 Element technology developed in this thesis

第3章

電気系部品の修復

3.1 概要

電気系部品は、過電流などの電氣的な要因による故障もあるが、部品へ繰り返し負荷や衝撃力が加わることによる機械的な要因によっても破壊されうる。本研究では、導線やセンサが断線したりセンサ部が破壊された状態になったとしても、破損箇所に物質供給をすることで自己修復する技術を開発した。

3.2 提案手法

自己修復を行う際に考える必要があるのは、「破壊された状態からどのように元の形態・機能を回復するか」という点である。多くの自己修復に関する研究でみられる手法は、あらかじめ材料内に封入しておいた修復剤が材料の破壊の際に漏れ出し凝固することで破壊箇所を塞ぐ手法や、破壊後に破断面を接触させることで再結合させる手法である。しかし、それらの手法では複数回の破壊や大きな破壊があった場合や、破断面の接触がなかった場合は修復することができず、本当の意味での自己修復は実現できないと考える。自己修復を実現するためには、(1) 破壊後に元の形態・機能を回復するための指針となる要素(設計図)、(2) 欠損箇所への材料供給により破壊箇所を埋めることの2点が重要であると考えた。(1)を生物に置き換えるとモルフォゲンのような再生や発生の際に形態形成を制御する要素であり、(2)はタンパク質、糖類、脂質などの組織を形成するのに必要な栄養素を運搬し供給することである。本研究では、供給された材料を設計図に基づき再配列することで、破壊前の形態・機能の回復を実現する手法を提案する。

本研究では、設計図として『場』(磁場)を用い、材料には強磁性の粉体、材料供給には人工循環器システムを用いる。『場』とは磁場、電場、濃度場などであり材料の凝集形態を制御可能なものが当てはまる。『場』は構造物の形態・機能の情報の保存の役割を担う。その『場』に材料を供給することで、材料は『場』の形状に合わせて凝集し、形(実体)を作る。本研究において、まずは『場』として磁場を用いる。材料としては磁場が作用する強磁性体の粉体を用い、材料の供給は水力輸送で行う

具体的には、磁場により粉体をトラップし、修復が可能な導線、センサなど電気部品を構築する。磁場の構造をあらかじめアプリケーションに応じて設計しておくことで、粉体を供給した際に導線、センサなど機能を分化させることができる。破壊の際は、磁場に粉体を供給することで、また元の状態に戻る。本研究では、この原理に基づき、修復する導線 Magnetic Powdery Wire (MPW) と修復するセンサー Magnetic Powdery Sensor (MPS) の開発を行った。

3.3 Magnetic Powdery Wire(MPW)

3.3.1 MPW の概要

Magnetic Powdery Wire (MPW) は磁界への強磁性体のトラップを利用して修復する導線である。強磁性体が磁界にトラップされた際に磁界に沿って整列する。磁界どうしが接続されるように磁石を配置することで、トラップされた強磁性体も互いに接触した状態となり電気が流れる状態になる。破壊(磁性体の脱落)の際には、循環系により運ばれた強磁性体が再び磁界にトラップされ導通するようになる。

図 3.1 は、Magnetic Powdery Wire (MPW) のシステム構成の概要図である。このシステムはチューブ、ギアポンプ、マグネット、そして混合液で構成されている。混合液は 100 [ml] のエタノール ($\geq 99.5\%$) と 30 [g] の金属粉(図 3.3)を成分としている。MPW ユニットのネオジウム磁石 (265 [mT], 図 3.2) とねじ (SUS304) で構成されている(図 3.4, 図 3.5)。ねじは電極と磁石の固定のために使われている。ギアポンプは、TG-85E-PU-EB4-KA24V (TSUKASA Co. Ltd.) を使用し、鉄粉の混ざった混合液を MPW ユニットに送液するために使われる。送液をすると MPS ユニットの部分で、鉄粉が引き付けられる。鉄粉は磁場に沿って配向し導線を形成する(図 3.6)。本研究では、こ

の MPW に対して 3 つの実験を行った。

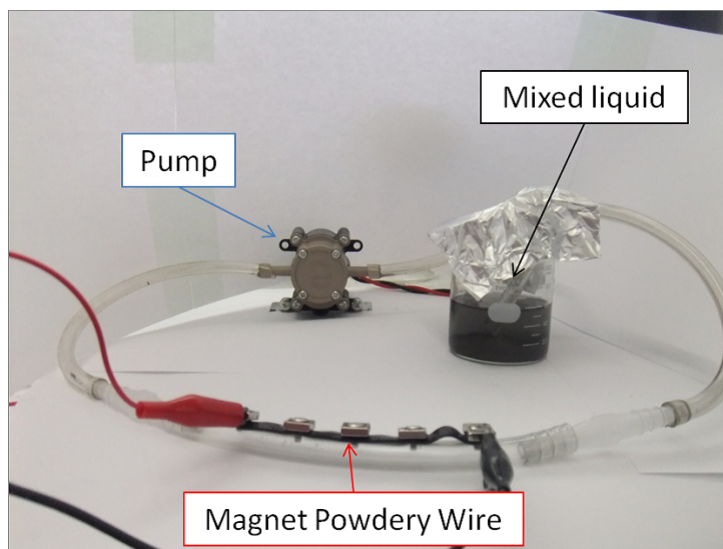


図 3.1 System overview



図 3.2 Neodymium magnet



図 3.3 Iron powder (200 mesh)

3.3.2 実験

実験を行い MPW の評価を行った。信号伝達実験、自己修復実験、曲げ実験の 3 つの試験を行った。信号伝達実験では、本手法で構成した導線が、どの程度導通するかを確かめた。ファンクションジェネレータによってパルス波を MPW が組み込まれた計測回路に流し、その応答を確認した。チューブに鉄粉を敷き詰めただけでは、抵抗が非常に大きくほとんど導通しなかった。これは、粉体が拘束されていないことにより、粉体どうしが接触をしていない箇所が出やすいことに起因していると考えられる。この実験では、磁場により鉄粉を配列することで、粉体どうしが密に接触し電気が流れるようになるかを確認

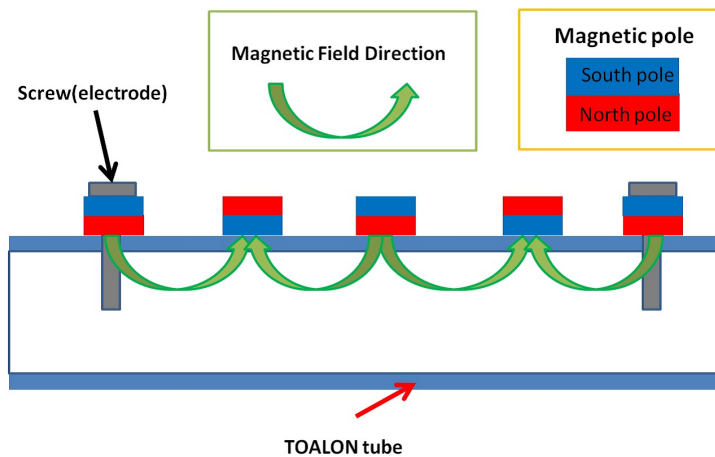


図 3.4 Magnetic Powdered Wire overview. The north pole of the magnet is red, and the south pole is blue. Green arrows show the direction of the magnetic field. Grey objects denote screws. Magnets are set up alternately in opposite directions. The mixed liquid is transferred from the tank, and only iron powder is attracted to the magnet and aligns along the magnetic field.



図 3.5 Magnet powdered wire without iron powder. Magnets of MPW are arranged with a spacing of approximately 2.5 [cm] and fixed on a tube with screws, which also have the role of electrodes.

した。自己修復実験では、MPW の磁石を取り除くことで断線状態にした。その後、磁石を再び MPW に設置し、ポンプを駆動し粉体を送り込んだ。この実験では、粉体の供給により断線していた MPW が再び導通するようになるかを確認した。最後に曲げ実験を行った。もしロボットの中で使用することを考えた際にロボットが動いて導線が曲がるということは頻繁にあることであるため、MPW を曲げた際に導通するかを確かめた。すべての実験は、常温 (26 °C) で行われ、ポンプは 24[V] で駆動した。ポンプ駆動時、流速はおよそ 270 [ml/min] であった。

1. 信号伝達実験

まず、MPW ユニットに鉄粉を加えた (図 3.6)。その後、回路 (図 3.22) にそのユ

ニットを組み込んだ。パルス信号はファンクションジェネレータ (FG120, 横河電機) によって生成され、回路に流した。その後、オシロスコープ (WaveJet 314A, LeCroy) を用いて、MPW のパルス信号に対する応答を確認した。入力した信号は、デューティ比が 50% の矩形波である。信号の周波数は 1 [kHz] と 100 [kHz] の 2 種類を入力した。入力電圧は 5 [V] とした。



図 3.6 Magnet powdery wire with iron powders

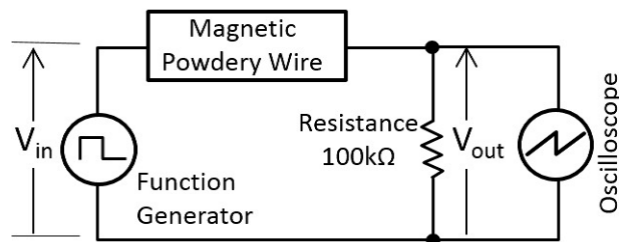


図 3.7 Electric circuit for experiment

2. 自己修復実験

MPW は、金属粉が液体にある限り、修復し続ける導線である。そのため、断線状態にするのは難しい。この実験では、磁場を取り除き鉄粉を MPW から除去することで、断線状態を再現した。最初に、MPW 上の磁石を取り除いた。その後、ポンプを数分駆動し駆動し MPW 上の鉄粉を取り除き、MPW を断線状態にした (Fig 3.8)。その後、磁石を最初の場所に戻し磁場を回復させ、ポンプを駆動した。その後、導線が修復する様子 (Fig 3.9) や MPW を通った信号の応答の波形をオシロスコープで確認した。



図 3.8 Broken MPW (disconnected)



図 3.9 Self-repaired MPW (connected)

3. 曲げ実験

自己修復実験の後、曲げ実験を行った。MPW を曲率半径が 4 [cm] になるまで曲げた (図 3.10)。その後、その形状を維持したまま、パルス信号を MPW に加えた。信号伝達実験同様に、パルス信号に対する応答を確認した。

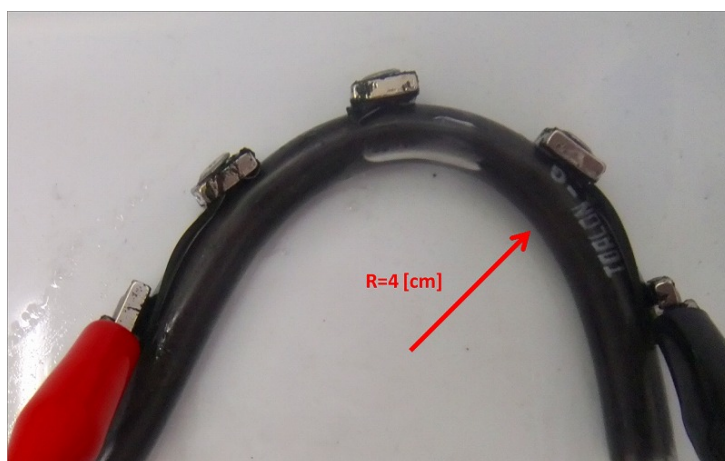


図 3.10 Bent tube

3.3.3 実験結果

1. 信号伝達実験

図 3.11 は 1[kHz] のパルス波が MPW を通った後の出力波形である．図 3.12 は 100[kHz] のパルス波が MPW を通った後の出力波形である．図 3.11 の出力波形は，一見すると矩形波となっている．しかしながら，図 3.12 が示すように，100[kHz] のパルス波に対する応答は LR 回路のような時間遅れが見られる．1 [kHz] の出力波形を拡大してみても，この現象は確認できた．

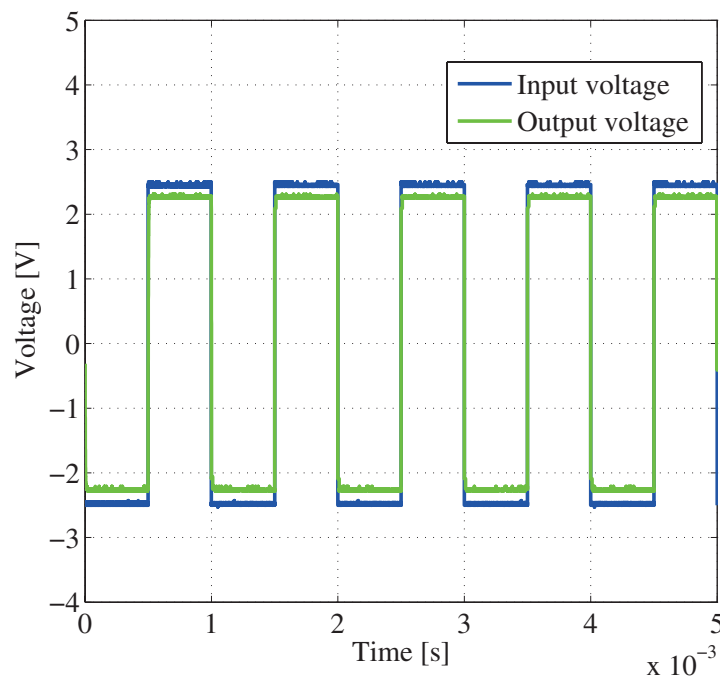


図 3.11 1 [kHz] input square wave and the response

2. 自己修復実験

図 3.8 と図 3.9 を比較すると，導線が再接続していることが確認できる．図 3.13 に，応答電圧の波形変化の様子を示す．MPW の破断状態では，応答の電圧値が入力信号に対して極端に小さくなっており，信号が適切に送られていないことが確認できる．一方，修復後の MPW では電圧値は修復前の状態と同程度に回復していることが確認できる．

3. 曲げ試験

曲げた状態でも，大きな電圧降下がなく信号が伝達できることが確認できる (図 3.14)．

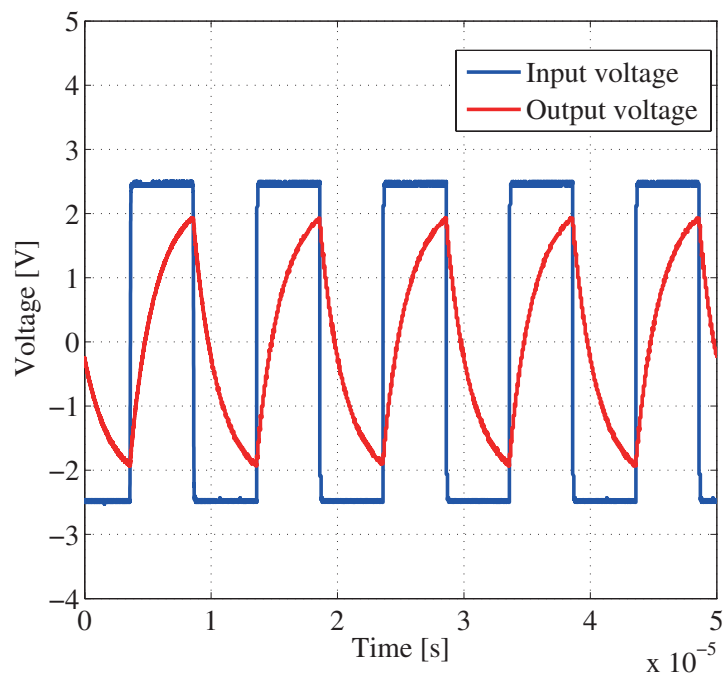


図 3.12 100 [kHz] input square wave and the response

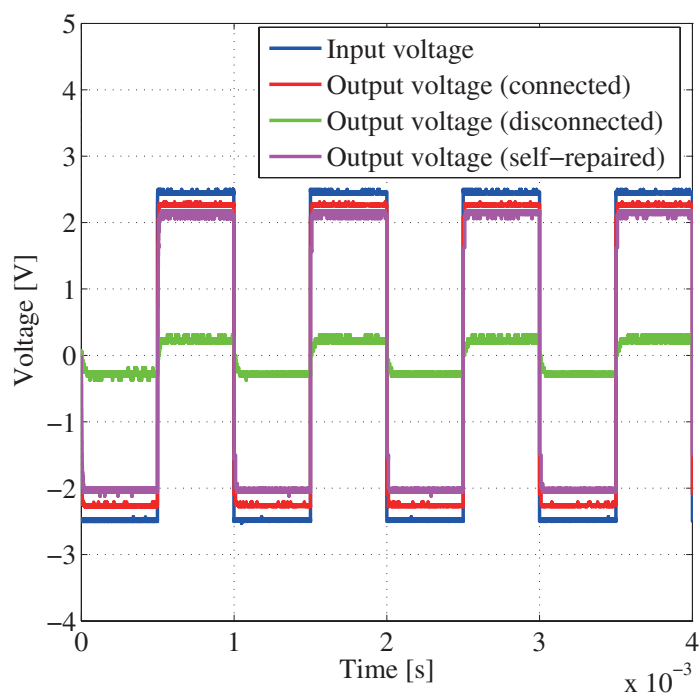


図 3.13 Results of self-repairing experiment (frequency: 1 [kHz])

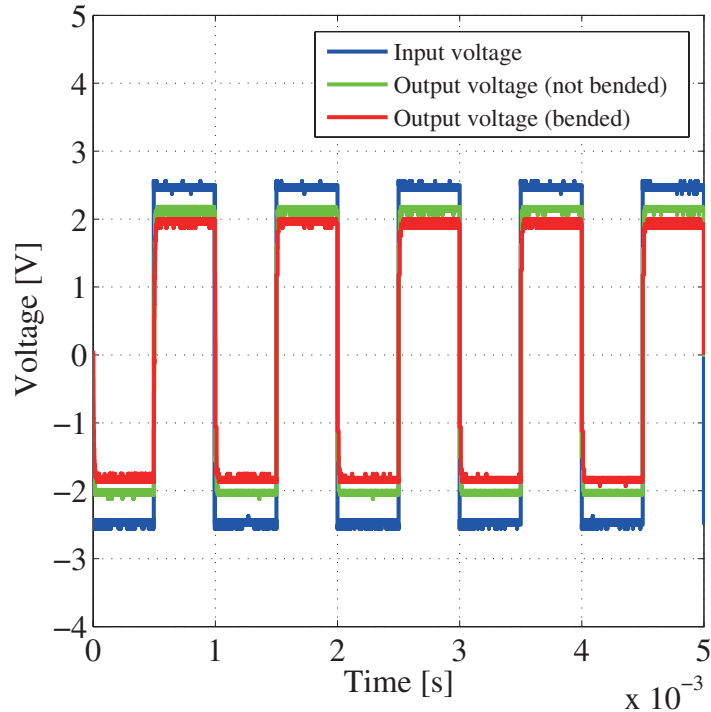


図 3.14 Results of bending experiment (frequency: 1 [kHz])

3.3.4 考察

1. 信号伝達実験

MPW を通して，パルス信号を伝送しても大きな電圧降下はなかった．しかしながら，電圧の立ち上がりと立ち下り時間に時間遅れがあることを確認した．その波形の特徴から，磁場の影響を受けてコイルのような性質を MPW は持っている仮説を立てた．そこで，インダクタンスを以下の手法で推定した．まず MPW の抵抗値を電圧計を用いて計測した．抵抗値は，13 [k Ω] であった．まず MPW を LR 回路モデルと仮定した (図 3.15)．時定数 (T_L) を 図 3.16 から計測し，時定数は 2.3 [μ s] であった． $T_L = L/(R + R_{Internal})$ の式より，MPW のインダクタンスは 260 [mH] であると算出された．その後，LTspice IV を用いてシミュレーションした MPW の LR 回路モデルの応答特性と，実際に実験によって得られた応答特性の比較を行った (図 3.17)．この結果，時定数に関しては，算出したものよりも実際の値の方が小さかった．これは，算出したインダクタンスが実際の値よりも

大きいか、もしくは MPW のモデルがより複雑であることを示唆している。

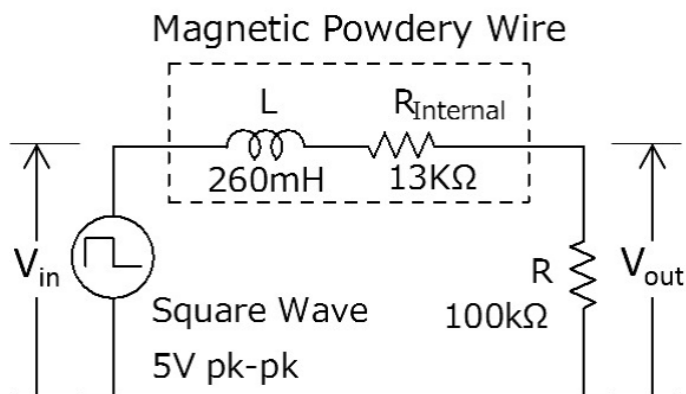


図 3.15 Equivalent circuit model of MPW

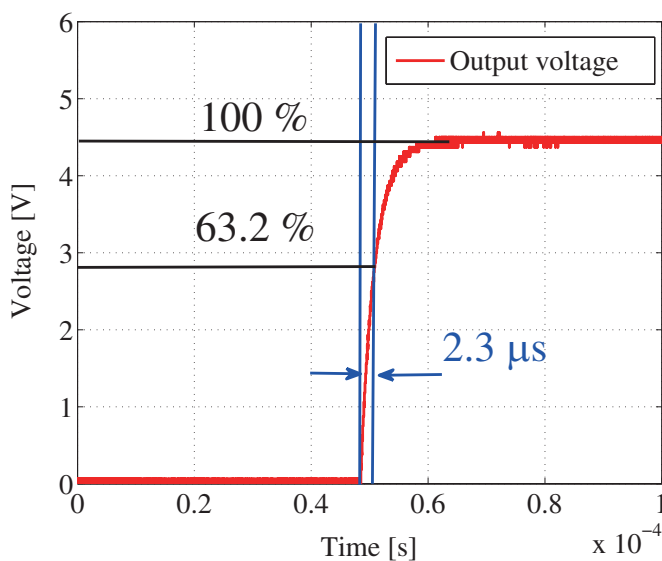


図 3.16 Transient response of MPW

2. 自己修復実験

導線は破断後に修復された。しかしながら、修復が困難である箇所があることが分かった。このことは、導線生成実験を行った際に明らかとなった。この実験ではまず MPW を粉体をつけない状態の MPW ユニットの流路に置いた。その後、ポンプを駆動して混合液を MPW ユニットに送液した。この実験により、導線を形成していない状態から、粉体供給により導線を形成することが可能かを確かめ

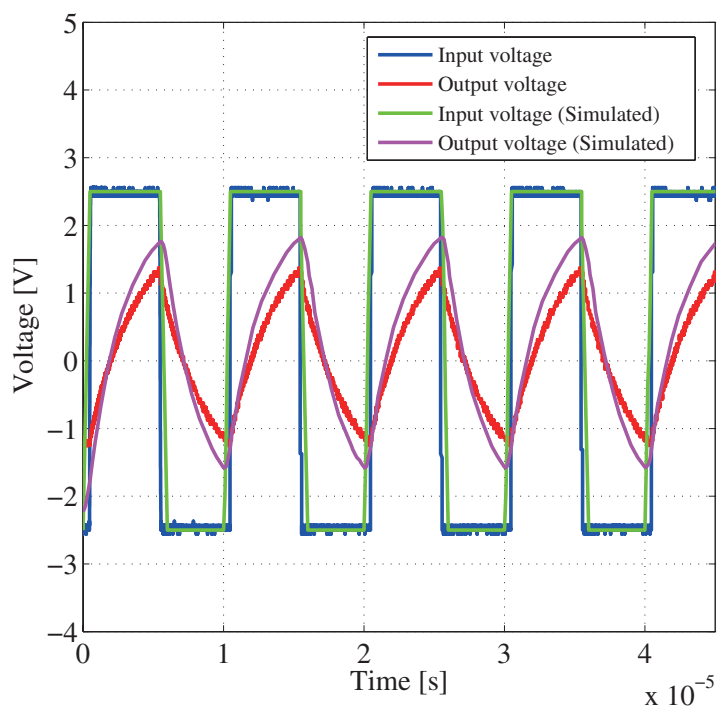


図 3.17 Comparison of experimental results with theoretical values

た。実験の結果，MPW の末端部分（下流部分）では，金属粉が磁場に吸着されず断線状態になることが確認された（図 3.18）。これは，上流で吸着された金属粉が流れの抵抗となって，ポンプの出力が下流まで金属粉を運搬するには不十分であったため起こった現象である。つまり，流路の直径を大きくするなどの流路設計，MPW の磁界強度を小さくすることによる導線の細線化，ポンプの出力を上げることによる流量の増加などにより対応できると考えられる。

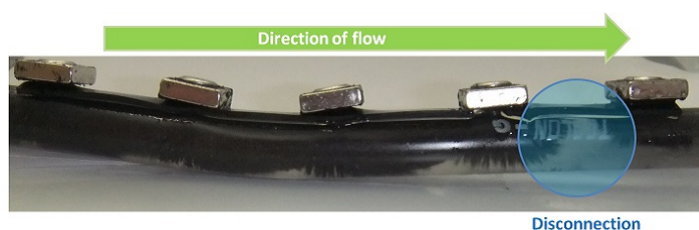


図 3.18 Self-organized wire

3. 曲げ試験

MPW を曲げた状態にしても，信号伝達は可能であることを確認した。しかし

ながら、磁場の影響が及ぶ範囲の上限や干渉などが原因で、一定の曲率以上に曲げると断線することも確認している。ロボットに MPW を組み込む際は、ロボットに動きを考慮して MPW の設計を変更する必要がある。

3.3.5 MPW に関するまとめと将来展望

磁界の形状に基づき導線を構築する MPW に関する3つの実験を行った。実験の結果、MPW は信号を伝達することが可能で、ポンプを用いた金属粉体の供給により修復が可能であり、かつ一定以下の曲率であれば曲げても断線しないことを確認した。さらに、信号伝達実験では、MPW がコイルのような性質も有していることを確認した。

将来的には、流路設計、磁場強度の設計、ポンプ出力を上げることにより修復性能を上げる。またコイルのような性質について詳細な調査を行う。また MPW の導電性の向上のために、鉄粉ではなくニッケル粉やコバルト粉、もしくは粉体表面を金や銀でメッキした強磁性体を使用することも検討する。抵抗値が大きかった理由としては粉体間の電気的な接触抵抗があると考えられるため、粉体どうしの結合により導電性を向上させる。磁場の設計によっては MPW の細線化ができると考えられ、一本の流路に複数の導線を配置することも可能であるため、磁場の設計も行う。

3.4 Magnetic Powdery Sensor (MPS)

3.4.1 MPS の概要

MPS は、磁場と金属粉から成る接触式変位計測センサーである。Fig.3.19 は MPS の概要図である。Fig.??は MPS の概要図である。中心に磁石の固定された2つの ABS プレートが平行に配置されている。プレート間の距離は 7 [mm] から 23 [mm] まで移動でき、磁界の方向は変位方向と平行である。プレート間に強磁性体の金属粉（今回は鉄粉）を供給することで、MPS はセンサとなる。金属粉は、磁場にトラップされ磁界の向きに沿って整列し、センサ部を構築する (Fig.3.20)。2つのプレート間の距離が変化すると、磁石の距離が変化により磁力線のつながりが変化し金属粉が移動する。その結果センサ部の直径が変化する (Fig.3.21)。そして、この変化に応じてセンサ部の抵抗値が変化

する。結果として、プレート間距離の変化に応じて抵抗値が変化するため、抵抗値の変化を計測することでプレート間距離が計測できる。

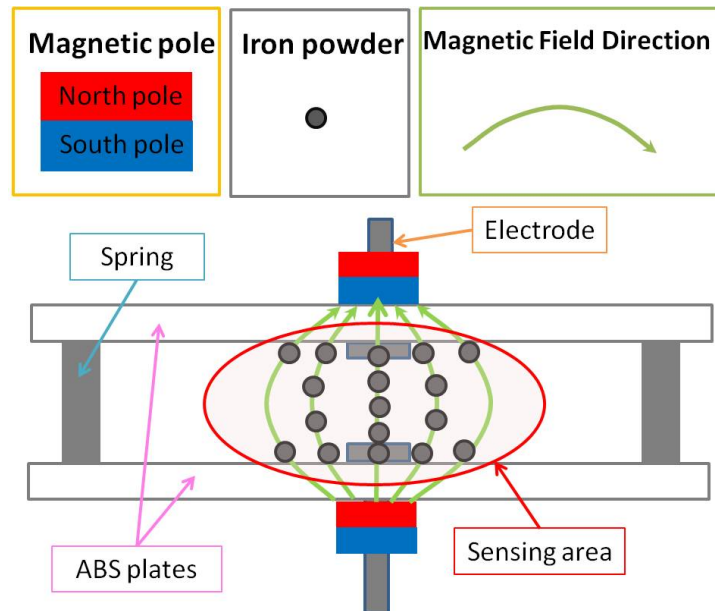


図 3.19 Schematic view of Magnetic Powdery Sensor. The north pole of the magnet is indicated in red and the south pole in blue. Green arrows show the direction of the magnetic field. Grey round objects are iron powder particles. Two magnets are set up in the same direction. The electrodes are SUS304 screws. Sensing area comprises iron powder and magnetic field.

MPS の最大の特徴は、センサ部の修復が可能であるという点である。先述したように、MPS のセンサ部は金属粉で構築されている。一般的なセンサであれば、センサ部が壊れると計測が不可能になる。しかしながら、MPS の場合は、磁場が破壊されなければセンサ部に金属粉を供給することで、破壊されたとしてもセンサの機能を回復することが可能である。先行研究である MPW では、ポンプと金属粉を含んだ混合液を使用して、金属粉の供給を行った。MPS でも同様の方法で、金属粉の供給を行い修復をする。

3.4.2 実験

変位実験、繰り返し変位実験、修復実験の3つの実験により MPS の評価を行った。変位実験では、プレート間距離の変位に応じて抵抗値がどのように変化するかを確認した。クランプでプレート間距離を変化させた際の MPS での電圧降下の値の変化をオシロスコープ (Picoscope2205, Pico Technology) で計測し、電圧降下の値から抵抗値を算出

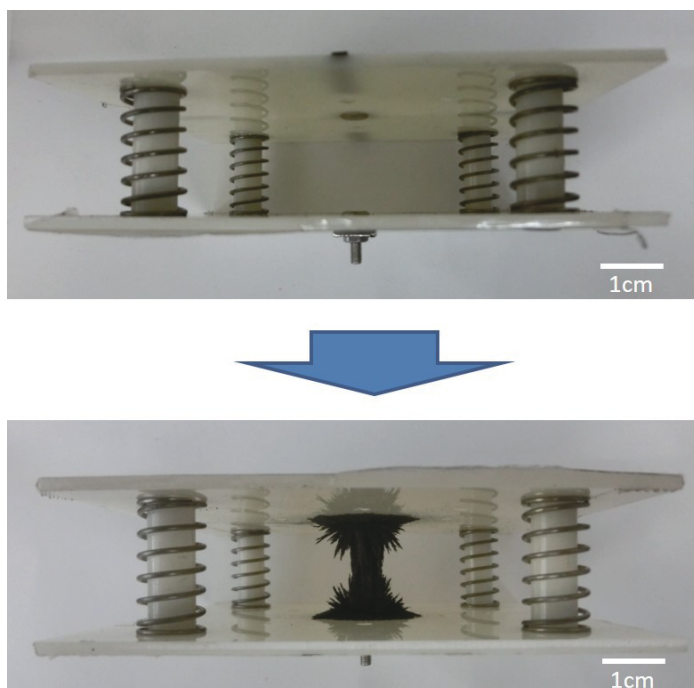


図 3.20 Magnetic Powdery Sensor before adding iron powder (Above) and after adding iron powder (Below).

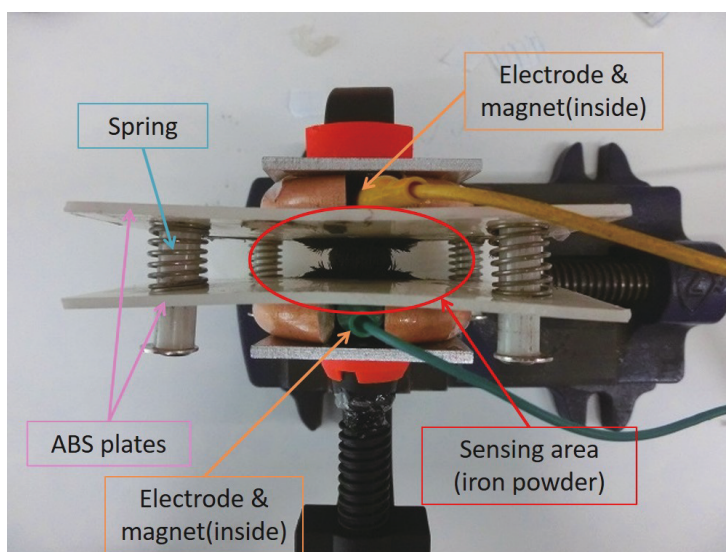


図 3.21 A pressed MPS. The diameter of sensing area increases.

した。プレート間距離はノギスにより計測した。センサ部構築の際は、金属粉 (#200 鉄粉, 協和純薬工業株式会社) は 8.0[g] 使用した。繰り返し変位実験では、変位の再現性を確認するために、繰り返し変位を与えた際の抵抗値の変化を計測した。修復実験では、粉体がトラップされていない MPS に対してロータリーポンプ (WP200, WELCO) を用いて粉体をセンサ部に運搬した際の導電率を計測することで、修復性能を評価した。ポンプには 200V 交流電圧を周波数 30 [Hz] で印加した。周波数はインバーター (FREQROL D-700, MITSUBISHI) によって制御した。

1. 変位実験

計測用の回路 (図 3.22) を構築し、5 V の電圧を安定電源装置 (PWR800L, KIKUSUI) を用いて印加した。MPS のプレート間の距離をクランプを用いて変化させ、ノギスを用いてプレート間距離の計測を行った。プレート間距離を 3 mm ずつ縮めた際の抵抗値の変化を計測した。

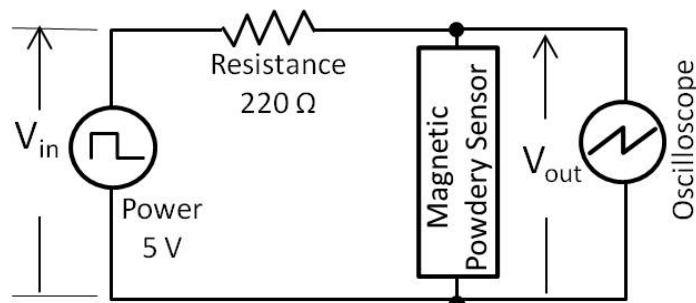


図 3.22 Electric circuit for measuring resistance change of MPS.

2. 繰り返し変位実験

変位実験ののち、MPS から金属粉を取り除き、新しい金属粉を供給しセンサ部を構築した。その後、変位実験と同様の試行を 3 回繰り返した。プレート間距離に応じた抵抗値の変化を計測した。

3. 修復実験

繰り返し変位実験ののち、MPS から金属粉を取り除いた。MPW と同様、MPS は金属粉が流体中に存在している限り修復し続け、破壊することが困難である。そこで、MPS 中に粉体がない状態を破壊状態とした。その後、循環器 (図 3.23) に

MPS を設置した。ポンプを駆動し、エタノールと金属粉で構成された混合液をタンクから MPS に補給した。金属粉が供給されることで MPS の導電率は回復していくため、その様子を観察した。導電率の回復を観察するために計測用の回路 (図 3.22) を構築し、電圧の変化を計測した。

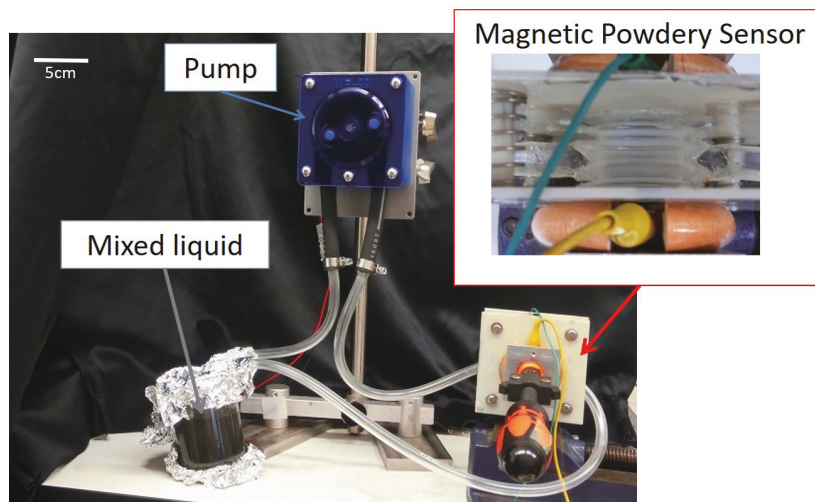


図 3.23 Artificial circulatory system for MPS. Mixed liquid is composed of ethanol ($\geq 99.5\%$, 200 ml) and iron powder (20 g). The pump is ac-pulse driven.

3.4.3 実験結果

1. 変位実験

図 3.24 は MPS の変位応答特性のグラフである。抵抗値が変位に応じて線形に変化していることが分かる。抵抗値は $138 [\Omega]$ から $83 [\Omega]$ まで変化した。

2. 繰り返し変位実験

図 3.25 が示すように、一回目の変位を与えた際は、前述した変位実験同様に抵抗値の変化は変位に対して線形に変化した。しかしながら、2回目、3回目の変位に対しては、変位に対して抵抗値の変化はしているものの線形ではなくなっていた。

3. 修復実験

図 3.26 に、破壊状態と修復後の状態の電位差を示す。破壊状態では電位差は 5

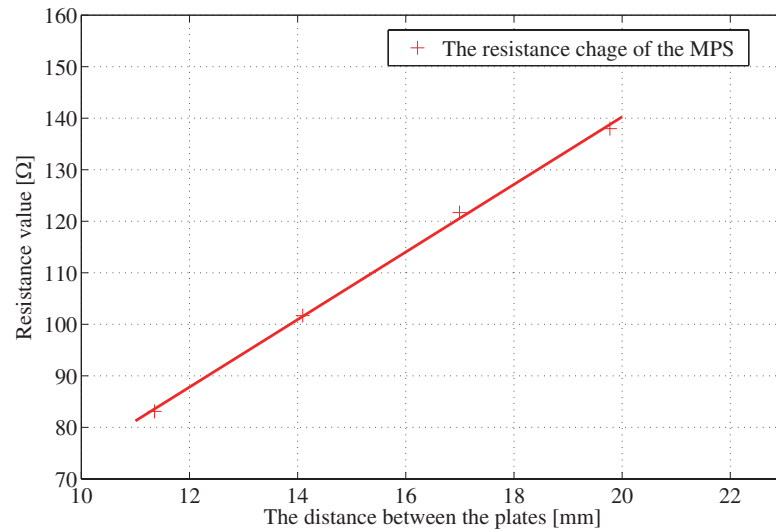


図 3.24 A characteristic curve of the MPS. The resistance value was decreased as the distance of the plates was reduced. The value was linearly changed.

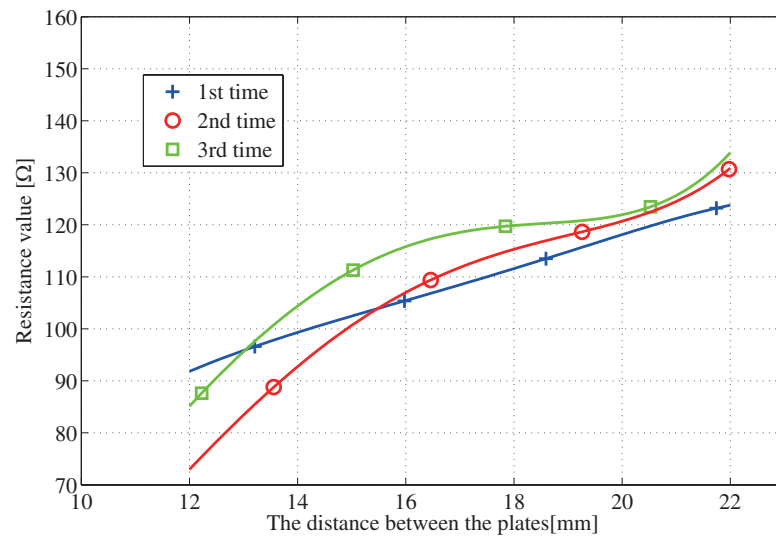


図 3.25 Variation of resistance change. The resistance value was decreased as the distance of the plates was reduced. The first time, the change was linear. When the experiment was repeated twice, the change was not linear.

[V]である。ポンプを駆動し、金属粉がMPSに運搬されると回路がだんだんと導通していく。最終的には、導通し電圧降下が起こり、破壊前は約1.8[V]~2.5[V]程度（大気中）であった電位差に対し、3[V]程度まで金属粉体の供給により導電率が回復した。

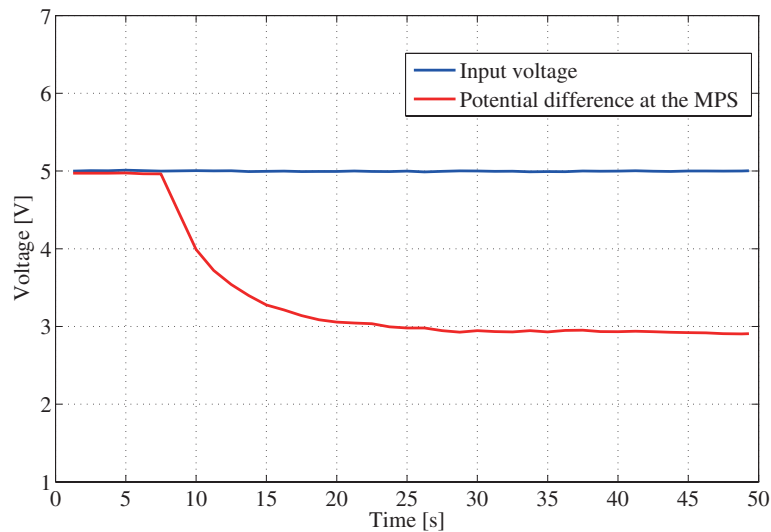


図 3.26 A voltage change by the MPS repaired. At first, the MPS was disconnected because there was no iron powder between the plates. When iron powder was supplied to the sensing area, the MPS showed increased conductivity, and the current began to flow.

3.4.4 考察

1. 変位実験

変位実験において、変位に対して曲線状に抵抗値が変化すると考えていた。一般的に抵抗値は断面積に反比例し、長さに比例するからである。図 3.21 が示すように、プレート間の距離が縮まることでセンサ部の直径は大きくなっている。しかし、図 3.24 では抵抗値は線形に変化している。この性質は、変位の計測を容易にすると考えられる。

2. 繰り返し変位実験

一方で、繰り返し変位実験を行った結果、現在のところ線形性を再現することが

難しいことがわかった。1 回目の変位に関しては、変位実験同様に変位に対して線形に抵抗値が変化している。一方で、2 回目、3 回目に関しては、非線形の変化がみられる。これは、変位させた際の振動などにより金属粉が脱落したことや、プレート間距離を最も小さくした際に磁石付近に金属粉が取られてしまったことに起因すると考えられる。

MPS を実用する上では、計測の精度を上げるために抵抗変化の再現性は向上される必要がある。しかしながら、1 回目の測定では、抵抗変化の線形性が確認できている。MPS の性質を調査することで、測定の精度を上げることが可能な条件を探す必要がある。

3. 修復実験

人工循環器システムによる粉体の供給により MPS が修復されることを確認した。人工循環器による流体の流れは余分な金属粉を取り除くことが可能であるため、MPS の計測値を安定させるのにも寄与すると考えられる。

3.4.5 MPS に関するまとめと将来展望

自己修復する接触式変位センサーである MPS に対して、変位実験、繰り返し変位実験、修復実験の 3 つの実験を行った。変位実験では、プレート間の距離に応じて抵抗値が線形に変化することを確認した。繰り返し変位実験では、1 回目の変位に関しては変位実験同様に抵抗値は変位に対して線形に変化することが、2 回目、3 回目になると線形ではなくなるということを確認した。修復実験では、人工循環器システムにより MPS が修復することを確認した。

課題としては、繰り返し変位を与えた際でも MPS の変位に対する抵抗値の線形に変化するようにすることである。これは MPS にトラップしている金属粉の量に変動がなければ実現できると考えられる。

また、150 μm の鉄粉 (鉄粉, 和光純薬株式会社) と 3~5 μm (純鉄, 株式会社高純度化学研究所) の成分や粒径の異なる鉄粉で実験を行った際、これらの抵抗値が 40 M Ω 以上となり、ほとんど導通していない状態であることを確認した。なぜこのような違いが出たのかを、成分と粒径の条件の違いなどによる導電率の違いを調査する。

3.5 生物とのアナロジーについて

ほ乳類などの動物は組織が損傷した際に、瘢痕による治癒が多く損傷した組織が元の状態に完全に戻るわけではない。一方、イモリやプラナリアなどの動物は、ほ乳類などとは異なり四肢や、眼のレンズ、心臓などの一部が失われたとしても、それらを再生し組織を損傷前の状態と同じ状態に戻すことができる[63]。これには、生物の構造を制御する因子であるモルフォゲンが大きく関わっていると考えられる。モルフォゲンは細胞に位置情報を与えるものであり、その濃度勾配を制御することにより生物の構造を制御するといわれている。本研究で行った MPW と MPS の修復手法もまた磁場の方向を制御することにより様々な構造を実現できる可能性があり、この「場」に基づいた修復・再生機構は生物とのアナロジーがあると考えられる。

3.6 3章のまとめ

本章では、磁界を設計し強磁性体を配列させる手法を利用して、修復する導線である MPW と修復するセンサである MPS の開発を行い、その評価を行った。MPW に関しては、提案した断線状態から導電率が回復することを確認した。MPS に関しては、変位に応じて抵抗が変化することを確認し、また修復実験により導電率が回復することを確認した。本論文中では、強磁性体として鉄を使っていることから MPW の導電率が低かったが、強磁性体を金や銀などでコーティングした材料を使うことで導電率の向上が可能であると考えられる。また、MPS に関しては、変位に対する抵抗値の変化が安定しない現象が見られたが、これは強磁性体が磁場から脱落してしまったことが原因であると考えられるため、強磁性体どうしを柔らかい素材を介して接合することで解決できると考えている。例えば、本研究室で開発した修復する温度応答性ゲルである導電性 HPNIPAAm で強磁性体を包み込むことで、磁場へのトラップ後に温度を低温にすることで接合する手法などが考えられる。磁場の設計次第では、導線やセンサ以外の電気部品も実現できると考えられるため、今後は磁場の設計と新たな電気部品への応用を考えていきたい。

第4章

機械系部品の修復

4.1 概要

ベアリング，ボールジョイントやワイヤ，構造部材など力を受ける部品は，摩耗や損傷により機械部品としての性能を十分には発揮できなくなり，摩耗や損傷をした状態で機械を運転し続けると，機械の動作不良や破壊が起きる．本研究では，摩耗や損傷状態にある機械系部品を修復する手法を提案する．これらを修復するために考えるべきとしては，摩耗や損傷により生じた材料の脱落や傷をいかにして埋めるかということである．理想的には元の状態同様な状態まで機械部品の摩耗や傷を埋めることができれば，摩耗や損傷の影響を無くすることができるはずである．そこで本研究では，循環系からの物質供給を利用して摩耗や損傷した箇所への材料の充填をすることにより，機械部品が摩耗・損傷した状態から回復する手法を提案する．本論文では，摺動部の摩耗と構造部材の損傷に焦点をあて，それぞれの修復機構を提案する．

4.2 溶液系による摩耗の修復機構

機械システムが動作すると，材料の表面どうしが接触しながら摺動し，材料表面で摩耗が生じる．摩耗は機械の動作大きな影響を与え，摩耗が進展すると機械システムに動作不良や破壊が起きる．摩耗によって摩擦面では摩耗粉が生じ，材料の小片が脱落する．小片が脱落すると，材料表面に傷が入った状態になり，その結果機械の強度や摺動に影響を与える．本章では，摩耗による材料の損傷を抑える手法を溶液系で実現する手法を提案する．

4.2.1 摩耗の種類

摩耗は、「摩擦による固体表面の逐次減量現象」とされており、機械的負荷のかかった摩擦面での摩耗粉の脱落により体積が減少する現象である[65]。様々な要因（機械的な因子、物理化学的な因子など）が複合して摩耗に影響を与える。以下では、摩耗の種類をメカニズムで大別する。

1. アブレシブ摩耗

硬い材料や硬い粒子（摩耗粉が硬化した粒子など）が軟らかい材料を削ることにより生じる摩耗である。他の摩耗と比較すると摩耗量が多いのが特徴である。

2. 凝着摩耗

金属面に存在する微小な凹凸どうしが接触することにより生じる。材料どうしがくっつき、摺動により発生するせん断力によって材料の一部が表面から切り離され、一方の表面に材料が移動する。その工程を何度も繰り返しているうちに、摩耗粉となり材料から脱落し摩耗が生じる。

3. 疲労摩耗

転がり軸受や車輪などの円形の物体が接触している点では、Hertzの接触応力が生じる。その応力は材料表面ではなく、ある深さのところまで最大応力となるため、その箇所を起点として材料に亀裂が入る。その亀裂が大きくなった結果、材料が剥離し摩耗する。

4. 腐食摩耗

材料周辺の液体や気体の雰囲気に応じた表面での化学反応により生じた生成物に起因する摩耗である。

4.2.2 一般的な摩耗抑制手法

摩耗を抑制する手法としては、一般的には材料表面を潤滑することである。潤滑油やグリースにより材料表面に油膜を形成することで、摺動面が直接接触することを防ぐ。潤滑油やグリースへの耐摩耗剤や極圧剤の添加により、高温時に材料表面に潤滑膜や吸着膜が

形成されるため、摩耗をさらに抑制することが可能である。

4.2.3 本研究での提案

本研究では、循環系での修復を前提として溶液系からの物質供給により、摩耗により失われた材料を補填し耐摩耗性を向上させる手法を提案する。摩耗では材料の脱落が起きるので、どのように脱落した材料を表面上に再度形成するかを、摩耗状態からの修復のために考える必要がある。つまり、循環系により物質供給をした際に、それらの物質を摺動部の表面上にどのように析出させるかが重要である。本研究では、触媒反応を利用した手法と、電解析出を利用した手法を構築し、摩耗状態から修復する手法を提案する。

4.3 触媒反応を利用した手法

4.3.1 摩耗修復方法の提案

本研究では腱駆動機構の問題点の中でもワイヤの摩耗に焦点を当て、長期間摩耗を修復できる摩耗修復方法の提案を行う。

4.3.2 腱駆動機構について

腱駆動機構とは、ワイヤを介して動力を伝える機構のことで、アクチュエータを駆動部分から離して設置できることが大きな利点として挙げられる。このため、ロボットのアームやハンド部分の軽量化が図れ、ロボットはより高速な動作にも対応できるようになる。また、人間の手のような柔軟性のあるアームやハンドを再現することができるため介護支援や生活補助など人間とより密接した環境下で利用されるロボットに対して適応されることが期待されている。

前述したとおり腱駆動機構には、高い応答性や軽量化、柔軟性といった様々な利点があるが、いくつかの問題点も抱えている。まず、制御の問題が挙げられる。ワイヤを介してロボットを操作しなければならないため、より複雑な制御が要求される。また、使用するワイヤが摩耗してしまい断線や張力維持ができなくなってしまうといった問題もある[64]。一般的に摩耗に対してはワイヤの取り換えによって対処するがメンテナンス作業には多大な時間と労力を費やしてしまい、その間ロボットは使用できなくなってしまう。腱

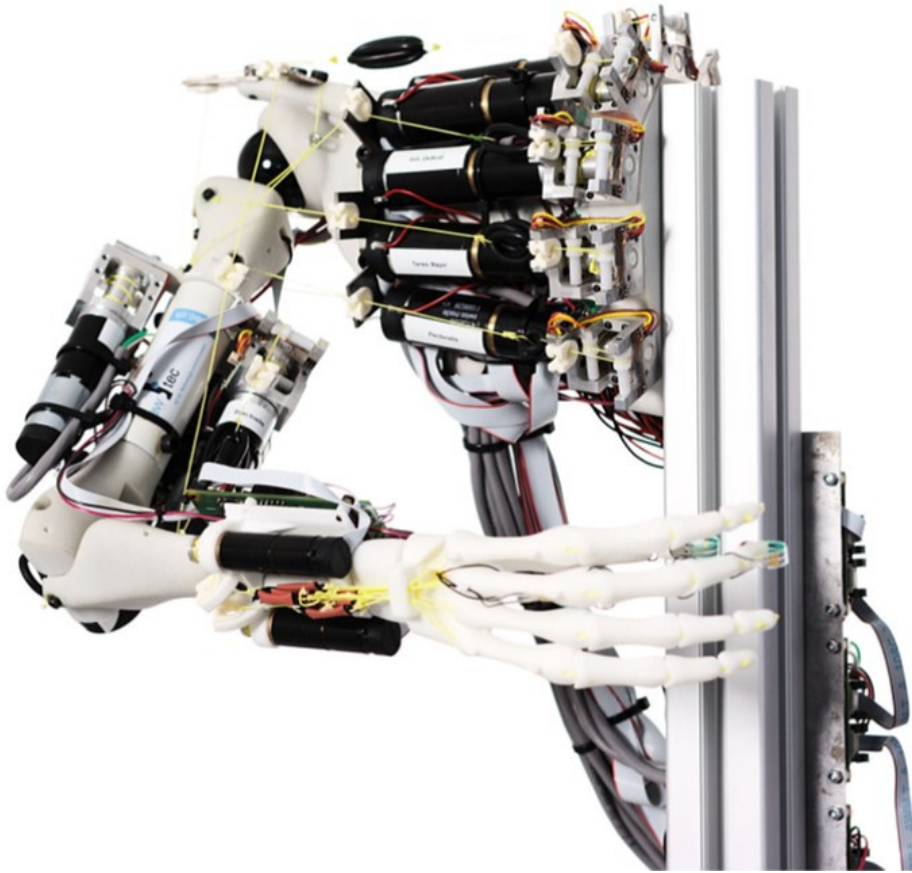


図 4.1 The Example of tendon drive robot (AnthropomimeticRobot) [70]

駆動機構を実用化するためには、以上のような問題点を解決する必要がある。

4.3.3 耐摩耗性向上・自己修復に関する先行研究

腱の摩耗の解決策として (1) 腱を摩耗に対して強くすること (耐摩耗性向上) ,(2) 摩耗箇所を修復すること (自己修復) の 2 つの手法が挙げられる。ここで耐摩耗性向上, 自己修復に関する先行研究を以下に挙げる。

Haipeng Zheng らは、光学物品に再修復可能なコーティングを施す研究を行った[71]。ゾル-ゲル法により厚さ $3.5[\mu\text{m}]$ から $10[\mu\text{m}]$ 程度のコーティングを光学物品に行い、耐摩耗性を向上させることに成功している。加熱処理を行うことでコーティングを修復することも可能でコーティングをより長時間保つことができる。

また、車の塗料に分子の結合を促す分子を加えることで柔軟性と弾性を持たせ、爪傷や洗車傷程度の擦り傷を抑制する技術が開発された[72]。この塗料による塗装は従来のクリ

ア塗装と比べて塗膜が破壊されにくく、また特別なメンテナンスも必要としない。

4.3.4 提案手法

腱の耐摩耗性を長期間維持し、摩耗箇所を何度も再修復可能な修復方法の開発を行う。先行研究のゾル-ゲル法や車の塗料を用いた手法を用いた場合、一度膜が剥がれてしまうと摩耗を防げなくなってしまうため今回想定するような長時間の摩耗には対応できないと考えられる。そこで、本研究ではコーティングをするための物質を継続的に腱に供給することで、連続した修復が可能な修復手法を提案する。

本研究で問題とする腱の摩耗は、腱をロボットに張るための通し穴の部分やプーリの部分で生じるものであり、ロボットの活動に伴い長時間をかけて徐々に腱が摩耗されていくことが考えられる。このような腱の摩耗に対する修復方法の要件として以下の二つことが挙げられる。

1. 長時間を通して継続的に修復できること
2. 摩耗箇所のみを選択的に修復できること

これらの要件を満たす修復方法を提案し、評価実験によって修復機能と要件を果たしているかを評価する。

上記に基づき、本研究で提案する摩耗修復方法は、触媒を担持した腱母材と液体樹脂の反応を利用して保護膜を再形成し続ける手法である。図 4.2 に示すように腱の周りに修復剤が流れており腱にはその修復剤に作用する触媒が担持されている、腱に含まれる触媒が周りの修復剤と反応することで腱の周りに保護膜を形成される。形成された保護膜は、腱自体が摩耗してしまうのを防ぎ、膜が摩耗により破壊された際には摩耗箇所から露出した触媒が再び周りの修復剤と反応するため、新たな保護膜を形成することが可能である。

この修復方法では、保護膜を腱に継続的に展開することにより長時間の修復が可能である。また、摩耗によって保護膜が剥がれた部分にのみ再修復が行われるため、摩耗箇所のみを選択的に修復することができる。以上のことから前述した要件を満たす修復方法であると考えた。

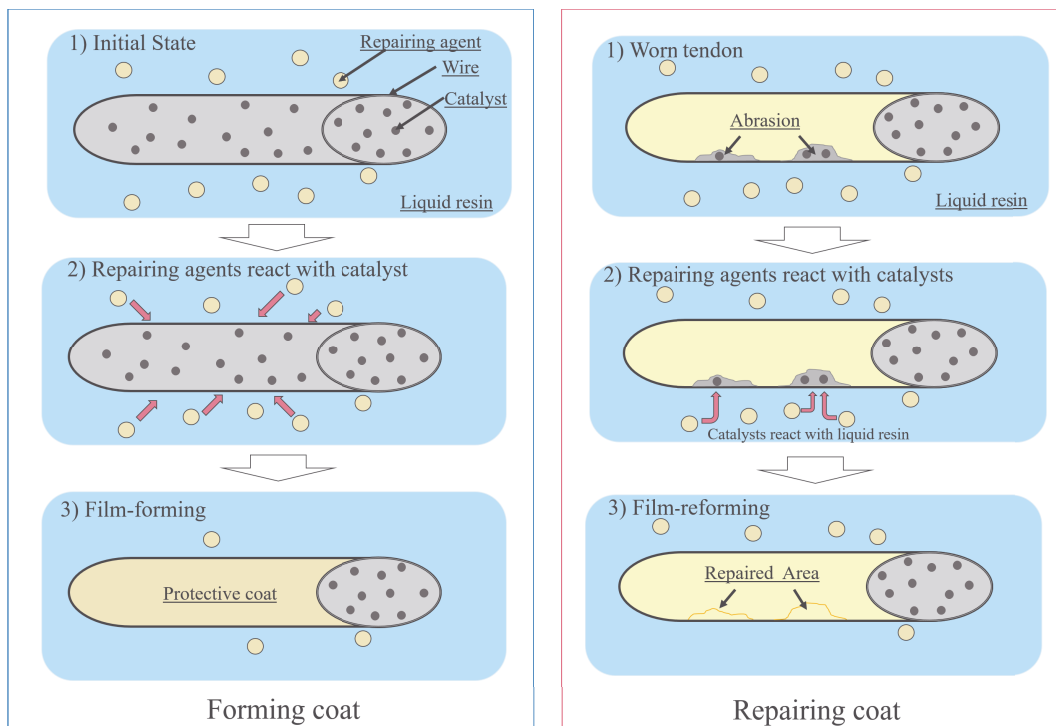


図 4.2 Repairing coating method

4.3.5 評価実験

修復機構の評価を行うために、以下の3つの評価実験を行った。

1. コーティング実験
2. 強度試験
3. 再修復実験

(1) コーティング実験では、使用するワイヤと触媒、修復剤の材料選定も兼ねて、触媒担持処理をしたワイヤを修復剤に浸すことによってコーティングが形成されるのかを確認する実験を行った。(2) 強度試験では、コーティングしたワイヤとしていないワイヤとで摩耗試験後の引張強度を比較し、コーティングによる耐摩耗性の違いを確認する実験を行った。(3) 再修復実験では、コーティングが摩耗によって剥がれてしまった後に再び修復できるかどうかを確認する実験を行った。

1. コーティング実験

触媒担持処理をしたワイヤにコーティングができるのかを確認した。実験手順を図 4.3 に示す。触媒担持，コーティング生成は，以下に示す方法で行った。

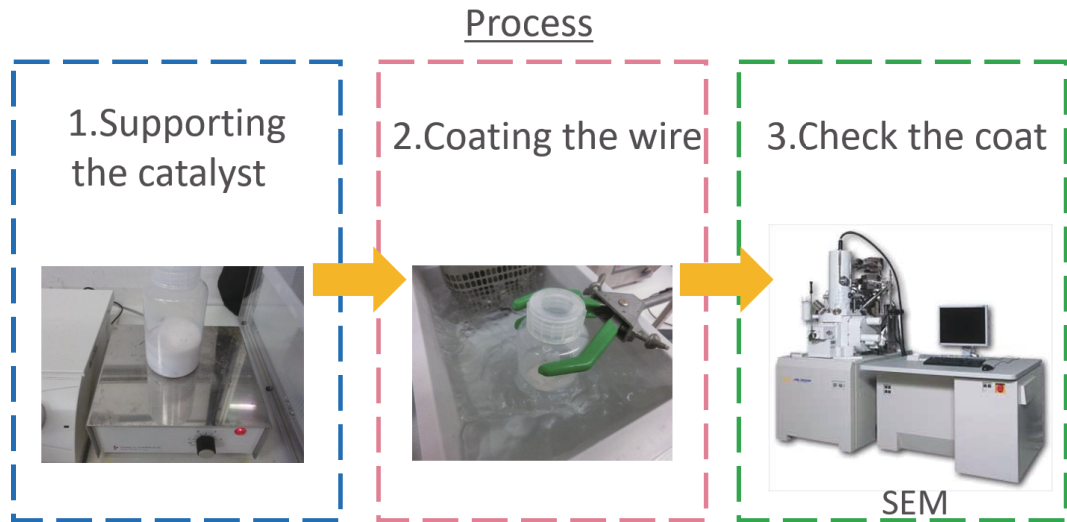


図 4.3 Process of coating test

(a) 触媒担持

一般的に繊維に触媒を固定化させる方法には，繊維の製造段階で触媒を混ぜ込む練り込み法と，浸漬法などにより繊維に触媒を担持するバインダー法の2通りの方法がある。本研究では，後者のバインダー法を用いてワイヤに触媒を担持させた。担持方法としては，6号のダイニーマのワイヤを触媒（信越シリコーン Cat PM-4PS-2）に浸し，攪拌機を用いて15時間攪拌させた。攪拌後はワイヤを触媒中から取り出し1時間常温乾燥させ，触媒担持を行った。

(b) コーティング生成

触媒を担持させたワイヤを修復剤（信越シリコーン POLON MF-49）の溶液に入れてワイヤをコーティングする。反応促進のため，恒温水槽で70[°C]まで加熱をしながら，2時間コーティングを行った。また，表 4.1 に使用した薬品をまとめる。

2. 強度実験

触媒担持によってワイヤの耐摩耗性が向上することを確認する。実験手順を図 4.6 に示す。触媒担持をしたサンプルとしていないサンプルをそれぞれ摩耗試験機

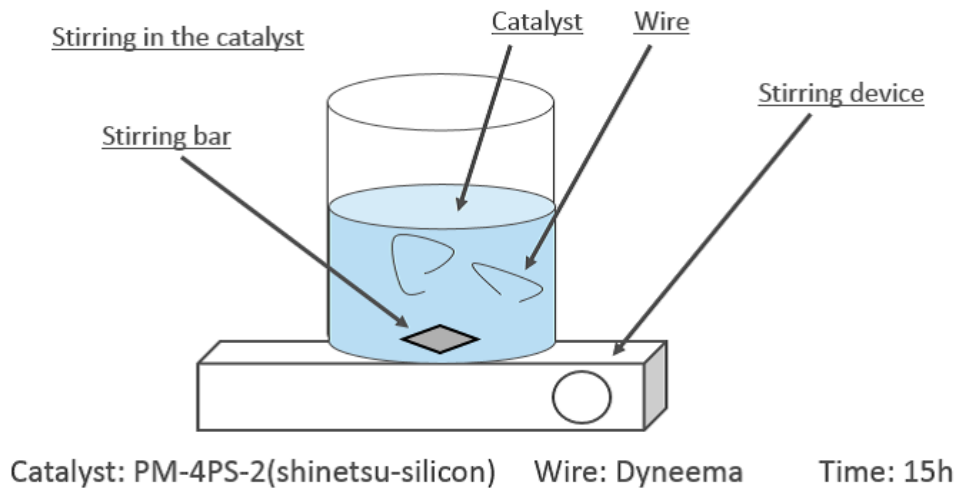


図 4.4 Supporting the catalyst on a wire

表 4.1 Details of chemical agents

Name	Purpose	Ph	Ionicity	Appearance
Polon-MF49	MainAgent	3.5	Nonionic	CreamyWhiteLiquid
Cat-PM-4PS-2	Catalyst	5.0	Nonionic	CreamyWhiteLiquid

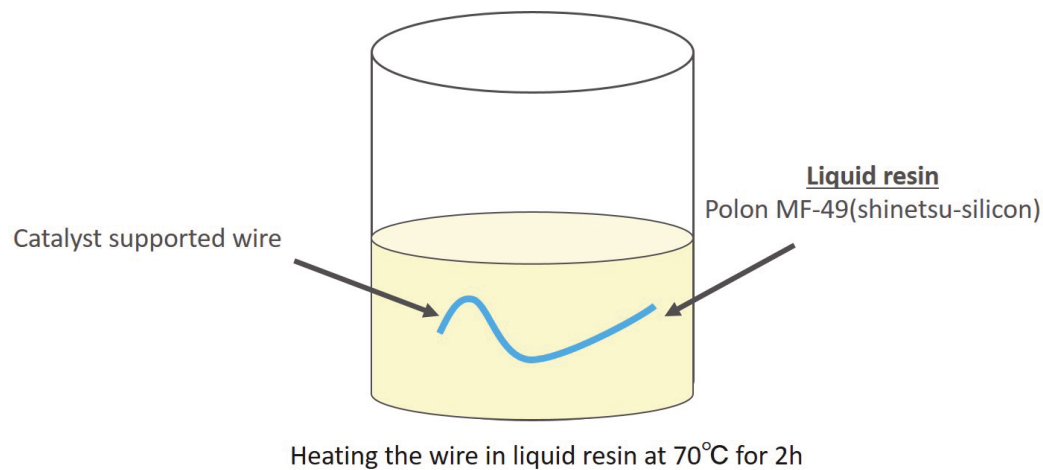


図 4.5 Coating formation

で摩耗させ、引張試験により引張強度を比較することで評価を行った。触媒担持については、コーティング実験と同様の方法を用いた。また、摩耗試験については、専用の摩耗試験機を製作しワイヤを摩耗させた。製作した摩耗試験機については以下で説明する。

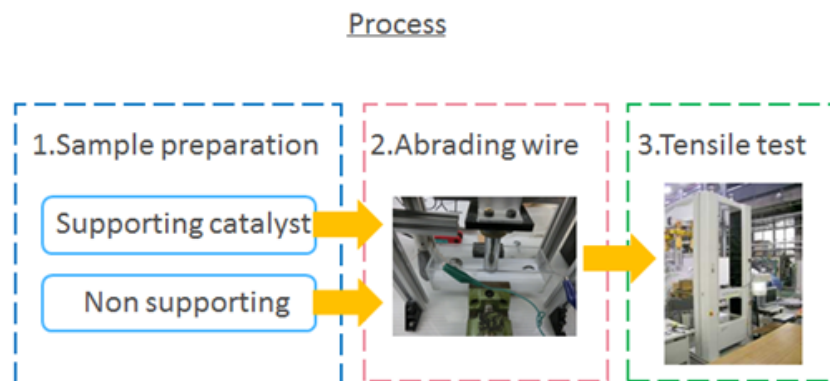


図 4.6 Strength test process

(a) 摩耗試験機

摩耗試験を行うために図 4.7, 図 4.8 に示す摩耗試験機を製作した。摩耗試験機の特徴としては、溶液（修復剤）を入れるためのアクリルケースがあり、その溶液中でワイヤを張りながら摩耗試験が行えることである。摩耗は、研磨紙（粒度 P1000）を巻いた円筒ブレード（直径 20[mm]）を、中心の移動量 20[mm]、速度 10[mm/s] で往復させることにより行われる。また、修復剤の反応促進のためにニクロム線（100V-300W）で溶液を加熱する機能も有する。

(b) 摩耗試験機の評価

製作した摩耗試験機によって溶液中のワイヤを摩耗できるのか確かめるプレ実験を行った。純水で満たしたケースの中で 6 号のダイニーマのワイヤを荷重 1.88[N]（10 号のおもり 1 つ分）で 1 時間 20 分摩耗させた。この結果を図 4.9 に示す。

このプレ実験の結果、製作した摩耗試験機によって溶液中のワイヤを十分に摩耗できることを確認した。

(c) 摩耗試験

前述した摩耗試験機を用いて摩耗試験を行った。試験の様子を図 4.10 に示

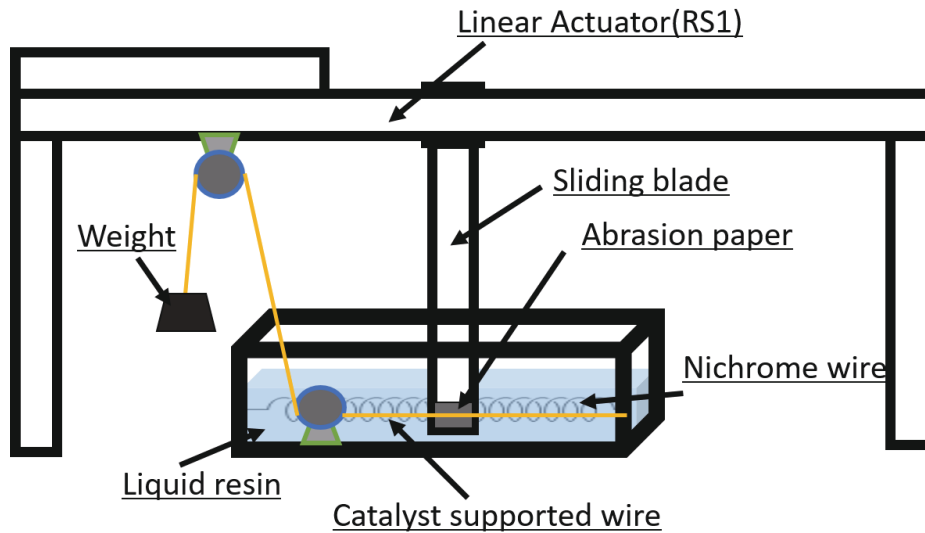


図 4.7 Front view of abrasion machine

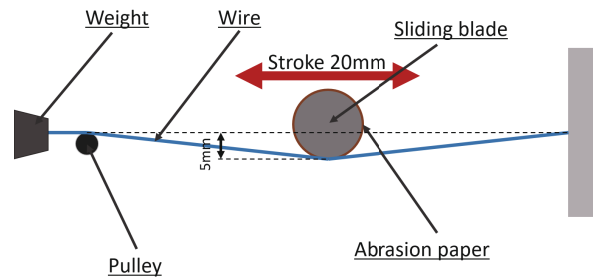


図 4.8 Top view of abrasion machine

す。実験手順としては、荷重 1.88[N] をかけてワイヤを張った後に修復剤をアクリルケースに流し込み、ニクロム線に電圧 15[V] をかけて 15 分間修復剤を加熱した。その後ニクロム線による加熱を続けながら円筒ブレードを往復させて 1 時間 20 分摩耗を行った。

3. 再修復実験

コーティングの再修復性を評価するために実験を行った。実験手順を図 4.11 に示す。下記の 4 つの段階でそれぞれワイヤの表面を光学顕微鏡で観察しコーティングが再修復されていることを確認した。また複数回下記のプロセスを繰り返した際の膜の形成の様子も確認した。尚触媒担持、コーティング生成の方法については前

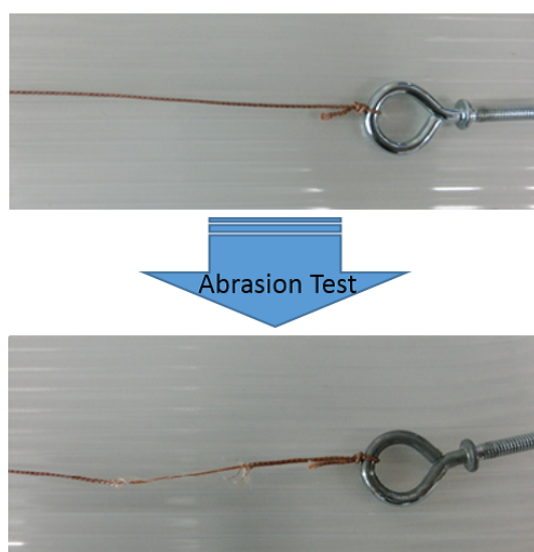


図 4.9 The result of pretest

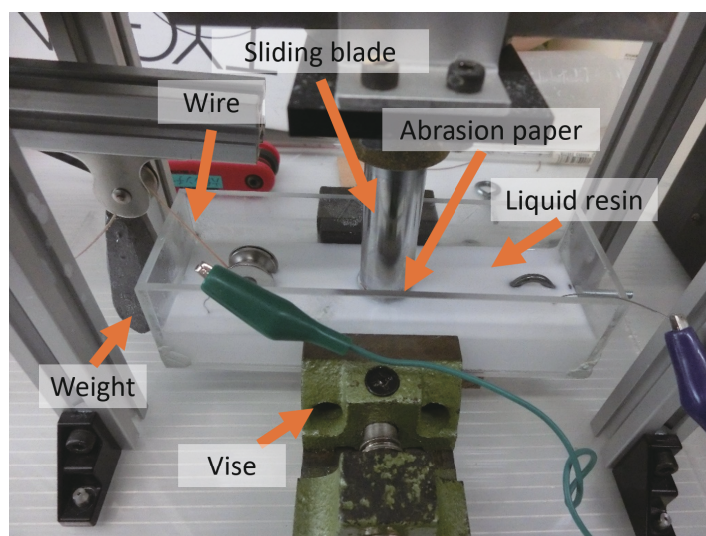


図 4.10 Abrasion test

述の実験と同様に行った。

- (a) 触媒担持後
- (b) コーティング生成後
- (c) コーティング剥離後
- (d) 再コーティング後

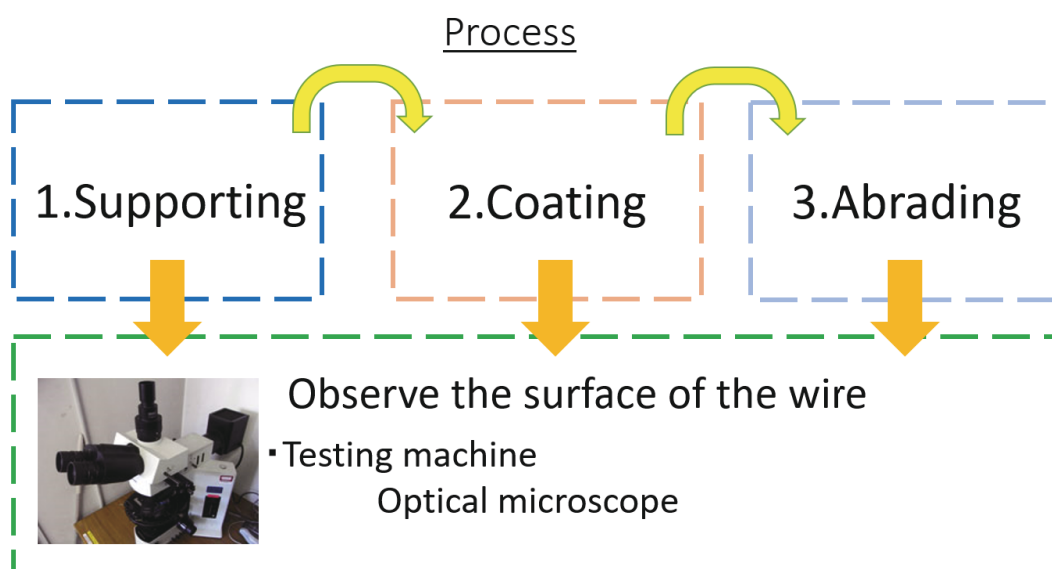


図 4.11 Process of repairing test

4.3.6 実験結果

(1) コーティング実験, (2) 強度試験, (3) 再修復実験の実験結果を以下に示す.

1. コーティング実験

コーティングをした後のワイヤの表面を光学顕微鏡と SEM を用いて観察した. コーティング前後の比較写真を図 4.12 に光学顕微鏡による表面観察画像を図 4.13 に, SEM でワイヤ表面を観察した画像を図 4.14 にそれぞれ示す. 図 4.12 よりコーティング処理を行ったワイヤの表面に白い樹脂膜が付着していることを確認した. また, 図 4.13 の光学顕微鏡での表面観察結果からワイヤの表面に約 $150 \mu\text{m}$ 程の膜が形成されていることがわかる. 図 4.14 の SEM の観察結果からも樹脂膜が表面に生成されていることが確認できた. 以上の観察結果からワイヤの表面にシリコンのコーティングがされていることが確認できた.

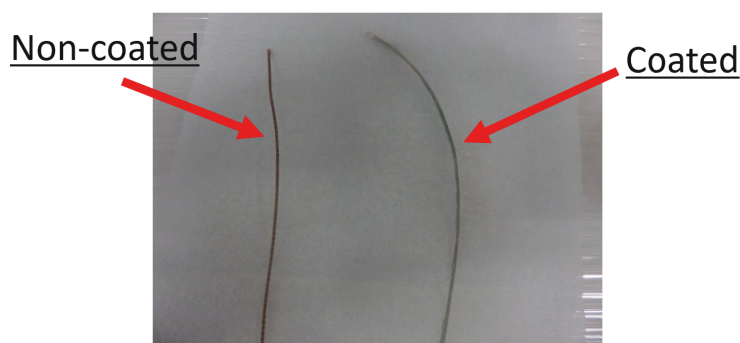


図 4.12 Coated wire

2. 強度実験

破断点におけるストロークと試験力から真破断応力を求めた結果を図 4.15 に示す. 図 4.15 より触媒を担持させた試料において真破断応力が大きくなっていることからコーティングによって耐摩耗性が向上したことがわかる. しかしながら, 摩耗前の真破断応力は約 $600[\text{MPa}]$ であることから, 摩耗によりワイヤが損傷を受けていることを確認した.

3. 再修復実験

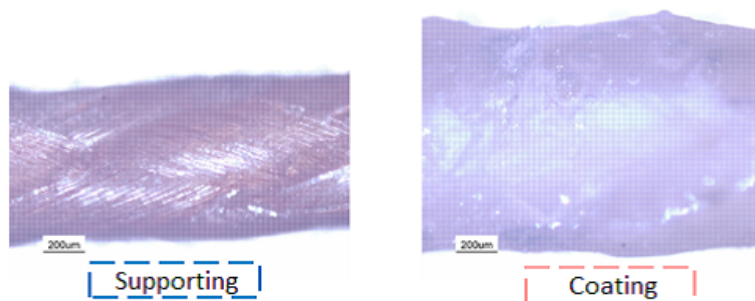


図 4.13 Coated wire(optical microscope)

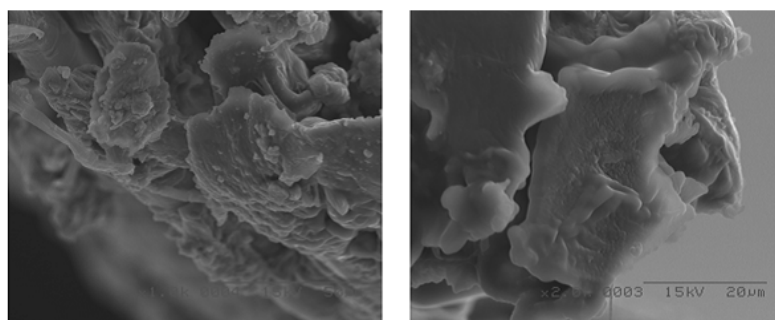


図 4.14 Coated wire(SEM)

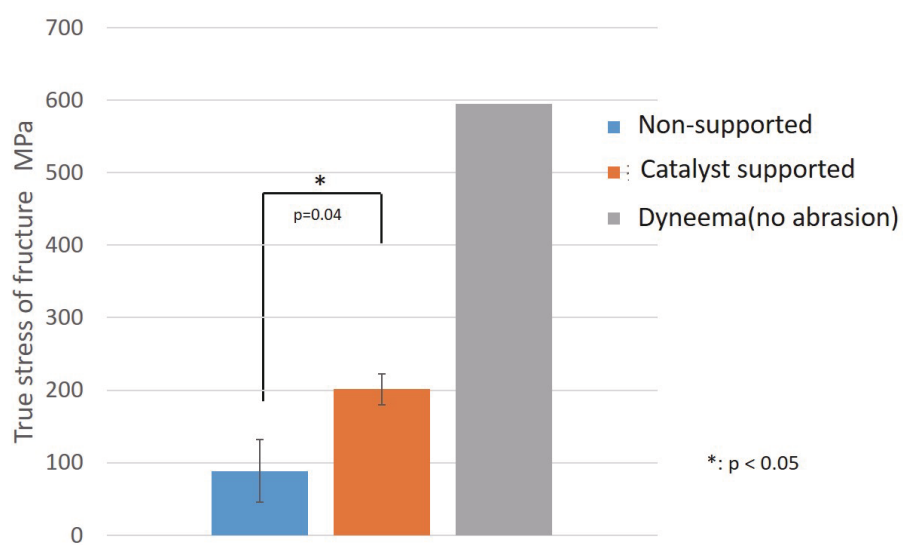


図 4.15 The result of tensile test(True stress of fracture)

(1) 触媒担持後 (2) コーティング後 (3) コーティング剥離後 (4) 再修復後のワイヤ表面の観察結果を図 4.16 に示す。図 4.16 よりコーティングの剥離後に再びコーティングを再生成できていることからコーティングの再修復性を確認できた。また、図 4.16 より膜厚を計測したところ Coating の条件で約 $150 \mu\text{m}$ 、Repairing の条件で約 $125 \mu\text{m}$ となりわずかに再修復後のコーティングの膜厚が薄くなっていることを確認した。また、複数回の再修復実験の結果 (図 4.17) から 2 回目の修復以降は、膜がほとんど再形成していないことを確認した。

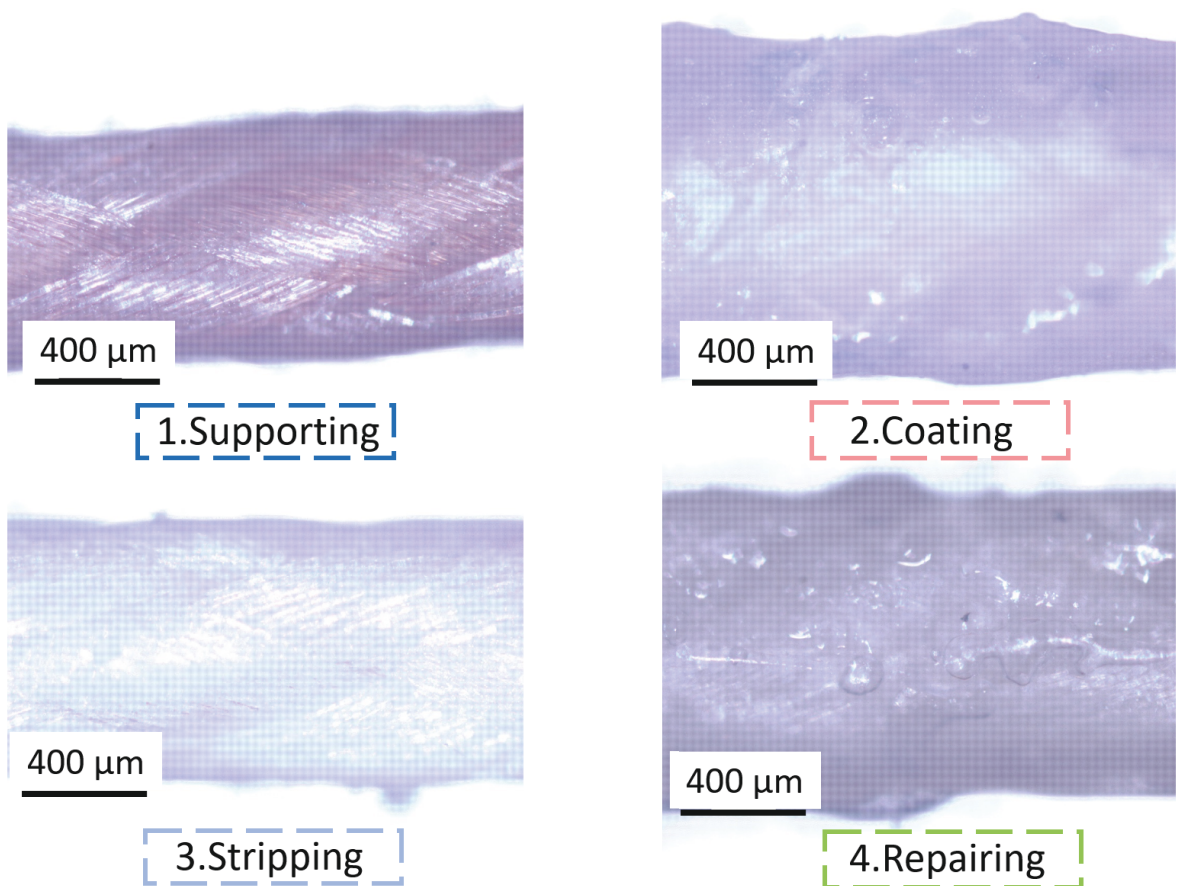


図 4.16 The result of repairing test

4.3.7 考察

1. 強度実験

強度実験では、提案手法の導入により耐摩耗性が向上することを確認した。しか

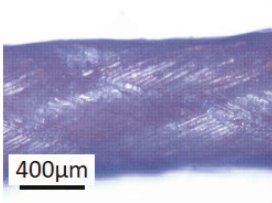
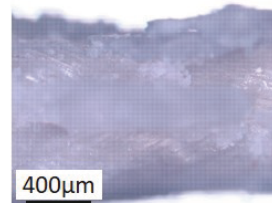
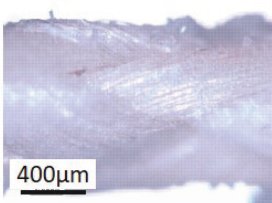
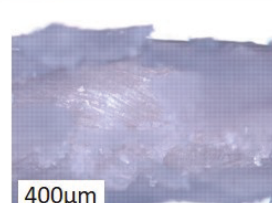
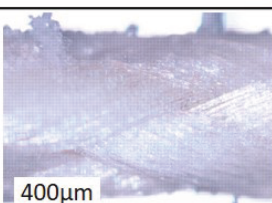


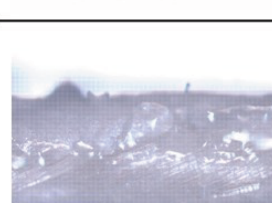

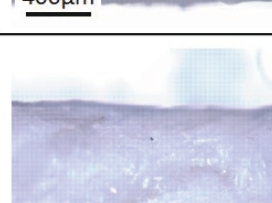
Number of repairs	Peeled	Diameter [μm]	Coated	Diameter [μm]
Initial state	 400μm	800	 400μm	1096
1 st repair	 400μm	991	 400μm	1043
2 nd repair	 400μm	922	 400μm	922
3 rd repair	 400μm	835	 400μm	835
4 th repair	 400μm	817	 400μm	835

図 4.17 Repairing test (more than once)

しながら、繊維（ワイヤ）の内部に浸透した液体樹脂がサンプルの強度を引き上げたとも考えられる。そこで、あらかじめ液体樹脂と触媒を反応させ膜を形成した後、加熱しながら摩耗試験を行ったサンプルと加熱なしで摩耗試験を行ったサンプルを製作し、引張り強度の比較実験を行った。加熱しない場合は、液体樹脂が触媒と反応しづらくなるため被膜が再形成しなくなる。摩耗は、ワイヤの外側で行われているため、この実験により提案手法により摩耗箇所の保護が行われるかが確認できる。摩耗の条件などは先述した実験と同じである。図 4.18 に実験結果を示す。加熱しながら摩耗したサンプルのほうが、加熱しないで摩耗したサンプルよりも強度が大きいことがわかる。この結果より、提案手法により外部の摩耗に対してワイヤの抵抗力を大きくできることが確認できた。

提案手法で形成される膜は、液中と大気中では様態が異なることが予想される。おそらく溶液中では、液体樹脂と触媒での生成物は柔らかい物質であると考えられる。この柔らかい物質が母材であるダイニーマが摩耗される代わりに破壊されることで母材が保護されたと考えられる。これは金属の摺動面の保護法で用いられることのある耐摩耗剤による吸着膜形成に近いものであると推測される。

2. 再修復実験

再修復実験では、膜の再形成回数が限定的であることが確認された。これは、本実験で母材とした材料がダイニーマであったことに起因すると考えられる。ダイニーマは超高分子量ポリエチレンでありその表面には水酸基などの官能基が存在しない。つまり、表面が修飾が難しく、今回のように浸漬法で触媒を担持したとしても、弱い状態で担持されており脱落しやすい状態だったと考えられる。バインダー分子などを介して触媒を担持するか、ほかのフェノール樹脂など表面に水酸基を有するエンジニアリングプラスチックを用いるなどして触媒を強固に担持することができれば、膜の再形成回数を増やすことができると考えられる。

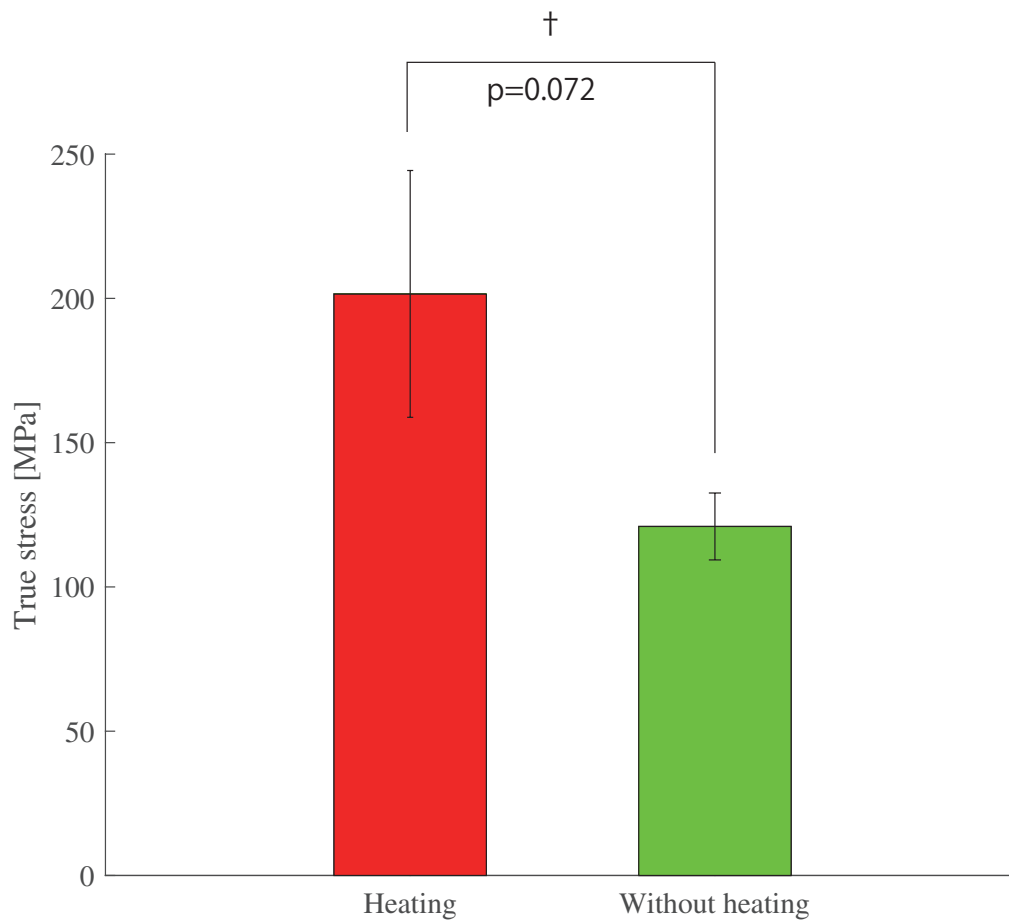


図 4.18 Comparison between heating condition and no heating condition

4.4 電解析出を利用した手法

4.4.1 摺動部の摩耗

本章では、使用されている主な摺動部品としてベアリングとボールジョイントについて紹介し、それらの課題について述べる。また、摺動部の修復に関して要求項目を挙げ、3つの修復手法を提案し、検討する。

1. ベアリング

図 4.19 に示すベアリングは、回転運動を伝達する部品として、現在様々な機械製品に使用されている。グリースや潤滑油を封入することにより摩擦を低減すること

などにより、近年は素材表面の開発により摩耗に強く長寿命なベアリングについて研究もされているが、摩耗による動作不良は長期間の稼働により必ず生じる。ベアリングの損傷項目としてフレーキング、ピーリング、かじりなどが挙げられるが、それらの根本的な原因は摩耗である。また、大きく磨り減った際には摩耗が直接の原因にもなる。図 4.20 にフレーキング、ピーリング、かじり、摩耗した際のベアリングの写真を示す。

フレーキングとは、軸受が荷重を受けて回転した際に内輪、外輪と転動体の接触面がうろこ状にはがれる現象のことである。原因として、過大荷重や異物の混入による摩耗が挙げられる。ピーリングとは、軽微な摩耗を伴ったくもり面を有することである。原因として、潤滑剤の不適や異物混入が挙げられ、ピーリングからフレーキングに進行する可能性もある。かじりとは、すべり面に生ずる微小焼き付きの集成によって起こる損傷のことである。原因としては、過大荷重や精度不良が挙げられ、微小な摩耗から焼き付きに繋がる。摩耗とは、摩擦によって軌道面がすり減ることである。異物の侵入や潤滑不良が原因として挙げられる。以上から、摩耗はベアリングの損傷と大きく関係しているといえる。



図 4.19 Bearing [66]



図 4.20 Damage by type: (a)Flaking, (b)Peeling, (c)Galling, (d)Wearing [67]

2. ボールジョイント

図 4.21 に示すボールジョイントは車のサスペンションの部品に使われることが多いが、ロボットアームの関節部品として使用されることも少なくない。ベアリングが 1 軸の回転運動のみを伝えるのに対しボールジョイントは 3 自由度を持つため、旋回運動を行いたいときなどに採用される。ベアリングと同様に摩擦が起きるため、摩耗が故障の要因となる可能性が高い。

4.4.2 摩耗修復の要求仕様

摺動部に用いられる部品として主に使用されているベアリングとボールジョイントを挙げ、それらの故障原因は摩耗であることを述べた。そこで、本研究で想定する摺動部をボールジョイントに設定し、要求仕様を提案する。ボールジョイントを採用した理由には、ベアリングが複雑な構造のために表面を修復する際に凝着する危険性があることや、生物の関節がよりボールジョイントに近い形であることが挙げられる。

ロボットの摺動部 (ボールジョイント) の修復に関して要求仕様を提案するために、生物の一例として人間の関節修復について述べる。人の関節の概略図を図 4.22 に示す。人間の関節には軟骨などが備わっており、滑液の循環によって関節全体に栄養を与えてい



図 4.21 Balljoint [68]

る。加齢とともに軟骨は磨り減り，骨同士が接触することで炎症が起こり痛む。そこで，注射などで外部からグルコサミンを摂取することで軟骨内でクッションの役割を果たすコンドロイチン硫酸やヒアルロン酸の生成に働く。このように，外部からの物質摂取 (グルコサミン) により循環液 (滑液) から修復部 (軟骨) へ栄養を与え，修復される。

以上の事柄から，ロボットの摺動部修復に関して要求仕様を設定した。

- 表面を覆い，摩耗部分を平滑化させられること
- 修復するための液は外部から取り込んだ物質により組成されるため，液の調整に細かい条件が要らないこと
- 修復した膜と母材に十分な密着力があること

以上の項目を満たすと考えられる修復手法として，めっき手法，自己組織化膜生成手法，電解重合の三つの手法が考えられる。

4.4.3 提案手法

これらの提案手法から，本研究ではめっき手法を採用した。自己組織化膜は摩耗の修復においては薄すぎる点，導電性高分子の膜は密着力が弱かった点からそれぞれ修復手法か

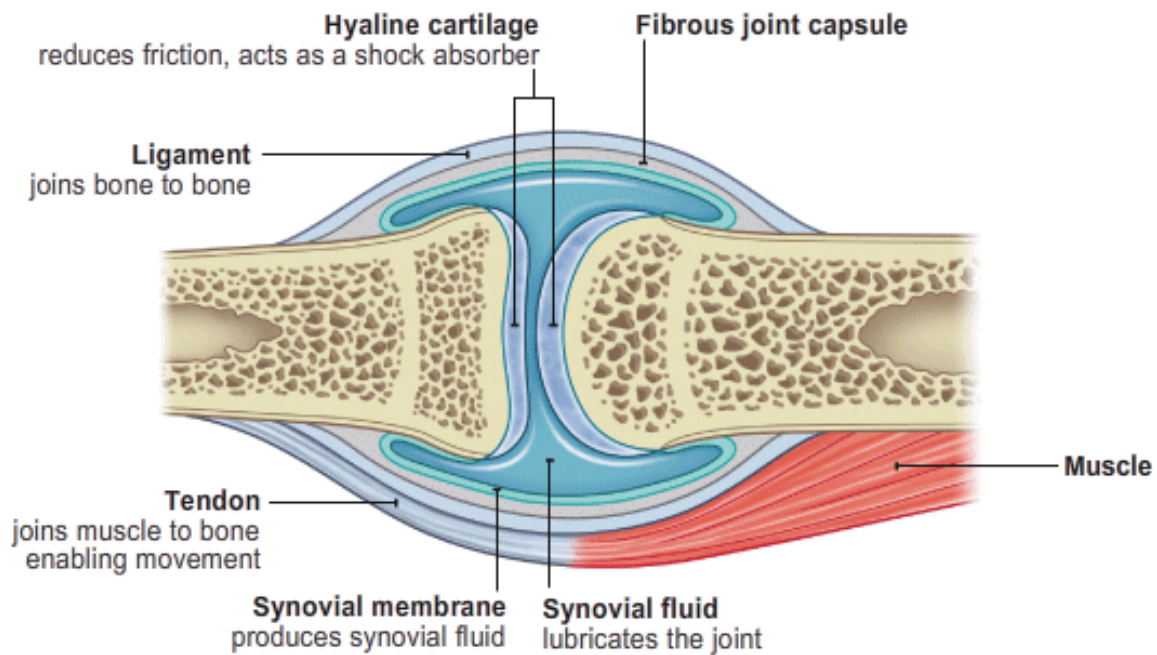


図 4.22 Human joint [69]

らは除外した。また、めっき手法の中でも電気銅めっきを中心に実験を行うこととした。無電解めっきには主にニッケルめっきが挙げられるが、無電解ニッケルめっきを行うには多種の薬品が必要であることと、めっき浴の pH と温度の管理がシビアであることから、ロボット内で行う修復には不向きである。また、電気めっきの中でも、銅めっきは使用する薬品が2種類であり、めっき浴の pH や温度管理がほとんど必要ないため、本研究では電気銅めっきによる修復を行い、手法の評価を行った。

以下に、本研究で行った電気銅めっきの製造工程について記載する。

めっき浴として、普通めっきと光沢めっきの二種類を使用した。光沢めっきの際には光沢剤として奥野製薬のトップルチナ 2000MU とトップルチナ 2000A を使用した。以下に建浴方法を述べる。

1. 容器 (ビーカーなど) に必要量の 8 割程度の水道水を入れる。少量の塩素イオンが必要であるため、純水ではなく水道水を使用する。
2. 硫酸銅五水和物を入れて攪拌する。
3. 攪拌しながら少しずつ硫酸を入れる。
4. 光沢剤を使用する場合は、光沢剤を入れる。

5. 水道水を足し，必要量にあわせる．

また，めっき液の組成を表 4.2 に示す．

表 4.2 Plating Solution

Reagent	Volume
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	200 [g/L]
H_2SO_4	50 [g/L]
トップルチナ 2000MU(光沢剤)	0.5 [% (v/v)]
トップルチナ 2000A(光沢剤)	0.05 [% (v/v)]

銅板と真鍮板を対象として銅めっきを施した．それぞれの板について，めっきの前に行う処理方法を述べる．

- 銅板

95[%] 硫酸に浸し，皮脂汚れが取れたら純水に浸す．

- 真鍮板

銅板と同様の前処理を行うと，亜鉛成分が溶け出してしまうため，有機溶剤を使用した．アセトン，エタノール，純水の順に浸す．

電気銅めっきにおいて，陽極では $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ ，陰極では $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$ の反応が起こる．陽極に銅を用いると，その銅が溶け出すことで銅イオンをめっき溶液に補給し，陽極はやがてなくなる．また，その際に陽極から陽極泥という固体が沈殿する．陽極に白金を用いると，めっき溶液中の銅イオンは陰極で消費されるのみで，補給されないためやがて液中の銅イオンはなくなりめっきが出来なくなるが，陽極泥の沈殿はない．本プロジェクトにおけるロボットは，外部から物質を取得しそれを体内で循環させることを前提に考えているため，めっき溶液の循環により銅イオンは補給される．したがって，陽極泥が出ず，溶けてしまうことのない白金電極を使用するシステムを想定した．図 4.23 に，陽極として白金箔を貼った樹脂棒，陰極として銅板を使用している写真を示す．

めっきを設定時間行った後，めっき溶液から陰極を取り出す．取り出したまま放置すると表面に付着しためっき溶液が乾燥して結晶化してしまい表面が荒れるため，取り出したらすぐに純水ですすぐ．また，純水から出して放置すると銅が酸化し黒くなるため，プロ

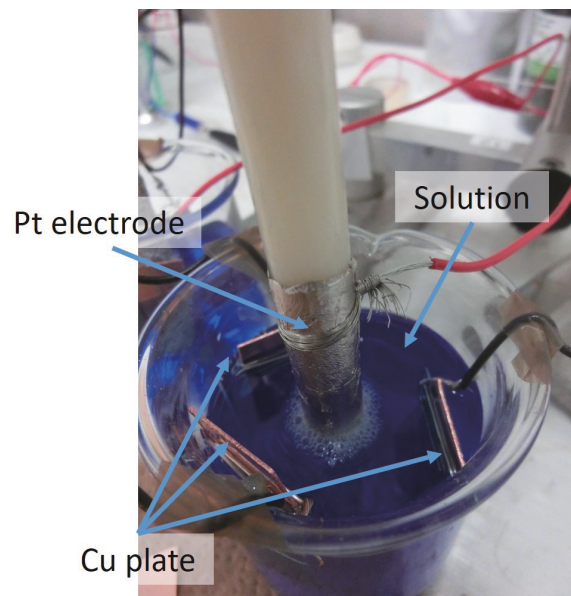


図 4.23 Plating

ワーで十分に水分を飛ばす。

4.4.4 修復性能評価試験

摺動部の修復における電気銅めっきの有効性を評価するため、まず電気銅めっきの性能評価を行う必要がある。修復性能試験において、以下の評価項目を提案した。

- 密着力

めっきに十分な密着力がない場合、修復後の摩擦によりすぐ剥がれてしまい修復機構として機能しない。そこで、システムに組み込んだ際に十分な密着力があるか試験を行った。ここではボールジョイントを想定しており、摺動面はせん断方向に動くため、せん断方向の密着力を調べることにする。

- 平滑能

摩耗部の修復を行った際に、表面にできた凹凸が平滑化されれば、修復が行われたといえる。以下の二つの試験により、平滑能を確認した。

1. 表面性状

この実験では、細かな傷を付けた金属板に対しめっき前後の平均表面粗さを比較し、改善の有無を確認する。

2. 傷の補填

この実験では、銅板に一本の大きな引っかき傷をつけ、めっき時間によって傷の深さがどの程度埋まっているかレーザー顕微鏡やデジタル輪郭形状測定器にて測定する。

- 摩擦係数

めっき前後で摩擦力を測定し、めっきによる摩擦低減性を確認する。

これらの評価項目を満たすことが出来れば、めっきによる修復は可能であるといえる。

これらの評価項目を満たすことを確認した後、摺動部に実際組み込んでもめっきによる修復が有効か確認しなければならない。そこで摩擦と修復を同時に行う試験を行い、修復処理を施さず摩擦させた場合と比較する。修復を施した銅板における摩擦量と、修復を施さなかった銅板における摩擦量を比較し、めっきによる修復は有効である事が示す。

4.4.4.1 密着力の評価実験

JIS H8504 を参考にした試験を行った。

1. 銅板に銅めっきをした。

銅板の大きさは約 20×30[mm]、陽極には樹脂丸棒に白金箔を巻いたものを使用した。めっき時は電圧値 3[V]、電流値 1[A] と設定し電流を 30[min] 流した。

2. めっきされていない銅板と、先ほどめっきした銅板をはんだで接着した。接着する方法の詳細を下記する。

- (a) めっきされていない銅板にフラックスを塗り、ヒートガンで熱した

- (b) はんだが溶けるくらいの温度になったら、はんだを広げながら溶かした

- (c) めっきした銅板にフラックスを塗った

- (d) はんだを付けた銅板とめっき銅板を重ねてクリップで留め、ヒートガンで両銅板を熱した

- (e) はんだが溶けたらヒートガンを止め、はんだが固まったらクリップを外した

3. 万能試験機（島津製作所、オートグラフ AG-I 250kN）でせん断方向に引っ張りを行った。

図 4.24, 4.25, 4.26 にはんだ付けした銅板の写真, 概略図を示す. また, 図 4.27, 4.28 に引っ張り試験を行っている際の写真を示す.

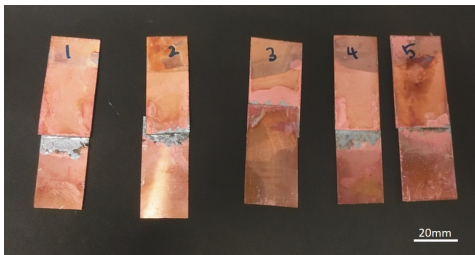


図 4.24 Soldering test sample (top view)

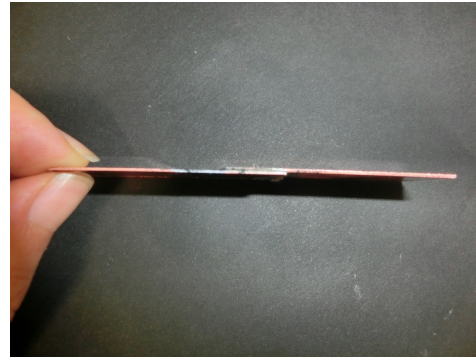


図 4.25 Soldering test sample (side view)

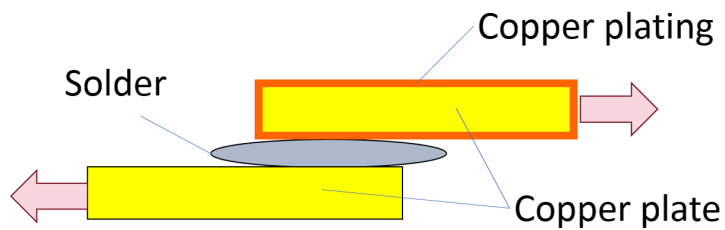


図 4.26 Soldering test sample (schematic)

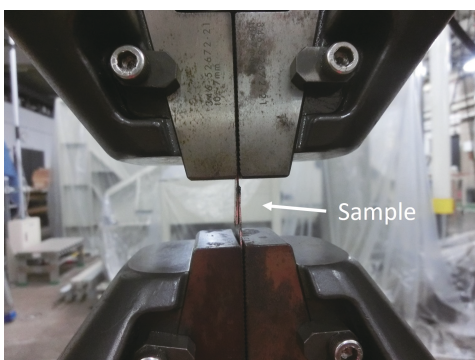


図 4.27 Tensile test (setting)



図 4.28 Tensile testing machine

6 サンプル行った結果を示す.

試験片によって, はんだ付け部分が剥がれたものと試験片の銅板自体が破断したものに分かれたが, どちらの場合もめっきが剥がれることはなかった. はんだ付け部分が剥がれ

た試験片の写真を図 4.29 に、銅板が破断した試験片の写真を図 4.30 に示す。

また、オートグラフにて測定した試験力を 6 つの試験片分まとめた表を表 4.3 に示す。最も応力が高く $10.13[\text{N}/\text{mm}^2]$ となったサンプルは図 4.30 であり、銅板が破断してしまった物である。したがって、せん断方向の応力が $10 [\text{N}/\text{mm}^2]$ を超えるような負荷がかかってめっきは剥がれないことが分かった。真鍮の許容せん断応力は $10.78[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、銅の許容せん断応力は $12.74[\text{N}/\text{mm}^2]$ である。したがって、めっきの密着力は許容せん断応力に匹敵するため、十分であると言える。

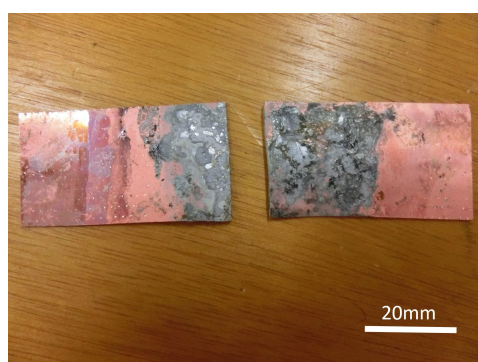


図 4.29 Peeling Sample



図 4.30 Breaking Sample

表 4.3 Result for adhesion test

Sample number	Max shearing stress $[\text{N}/\text{mm}^2]$
1	5.95
2	8.64
3	7.67
4	8.70
5	10.1
6	8.58

4.4.4.2 平滑能の評価実験

- 表面性状の評価実験

以下の工程で表面性状を評価する実験を行った。

1. めっき前の銅板に傷をつける

CNC フライス (PRO SPEC, PSF240-CNC) に # 320 の紙やすりを貼り付けた $\phi 30$ のアジャスターを取り付けた. 30×150 [mm] の銅板に対し 1 [mm] 程度押し込み, ジョグ送りで銅板に傷を付けた.

2. 傷つけた面の表面性状を観察する

レーザー顕微鏡 (Keyence, VK9510) を使用し, 倍率 200 倍で観察した.

3. 銅めっきを行う

陽極に白金箔を貼った樹脂棒を使用し, 3 [V] の電圧を印加による光沢剤めっきを $60, 180$ [min] 行ったサンプルをそれぞれ 4 サンプルずつ製作した.

4. めっき面の表面性状を観察する

同様にレーザー顕微鏡で観察した.

図 4.31 に銅板に傷を付けている様子, 図 4.32 にレーザー顕微鏡で表面性状を測定している様子を示す.

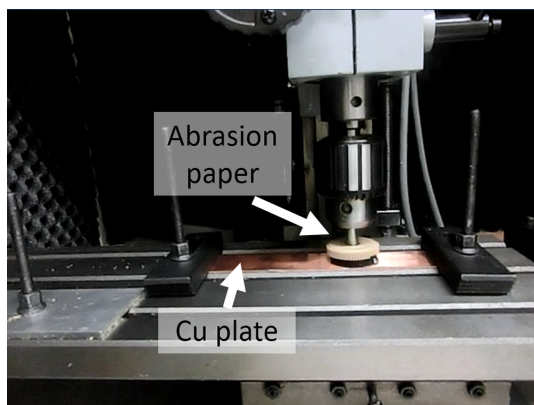


図 4.31 Experimental setup (abrasion)

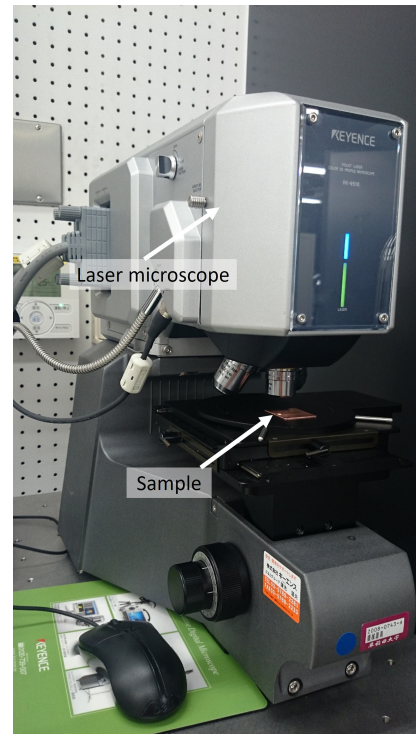


図 4.32 Experimental setup (observation)

1 サンプルについて, 表面を傷つけた直後, めっきを 60 [min] 施した後, めっきを 180 [min] 施した後の写真を図 4.33 に示す. また, レーザー顕微鏡の測定結果とし

て4サンプルのグラフを図4.34に、平均値を表4.4に記す。全体的にめっき時間が増えるほど表面性状は減少している傾向が見れたため、小さい傷における平滑能を確認できた。

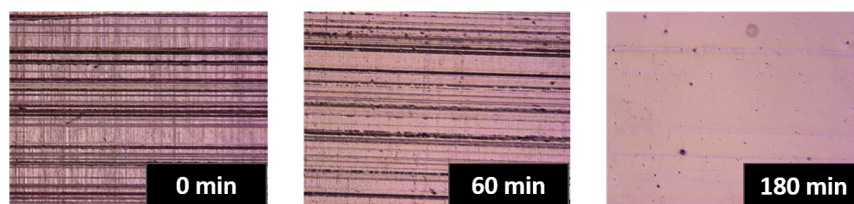


図 4.33 Electroplated sample picture

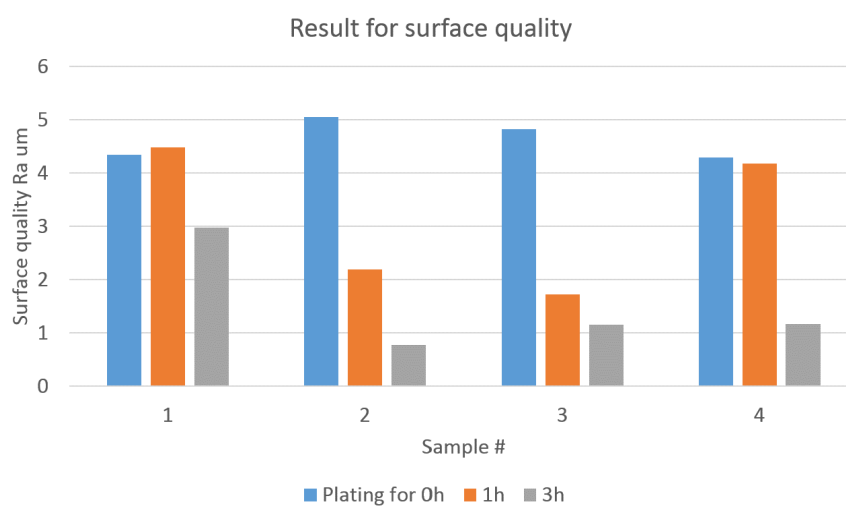


図 4.34 Result for surface quality test

表 4.4 Result for Surface Quality (average of 4 samples)

Plating time [min]	Surface Quality (Ra) [um]
0	4.63
60	3.15
180	1.52

- 傷の補填の評価実験

以下の工程で傷の補填の評価実験を行った。

1. めっき前の銅板に傷をつける

CNC フライスにポンチを取り付け、均一に傷をつけた。

2. 傷深さ測定を行う

レーザー顕微鏡 (倍率 200 倍) にて傷深さを測定した。

3. 銅めっきを行う

陽極に白金箔を貼った樹脂棒を使用し、電圧値 3[V] で光沢剤めっきを 60, 180, 1440[min] 行ったサンプルを 5 つずつ製作した。

4. めっき面の傷深さ測定を行う

同様にレーザー顕微鏡で測定した。

レーザー顕微鏡で撮った 1 サンプルの画像を図 4.36 に示す。

実験結果として 5 サンプルの修復率を図 4.35 に、平均値を表 4.5 に示す。修復率の計算は、 $(\text{修復率}) = ((\text{めっき前傷深さ}) - (\text{めっき後傷深さ})) \div (\text{めっき前傷深さ}) \times 100$ として計算した。表より、めっき時間が長いほど傷深さが埋まっていることが分かる。

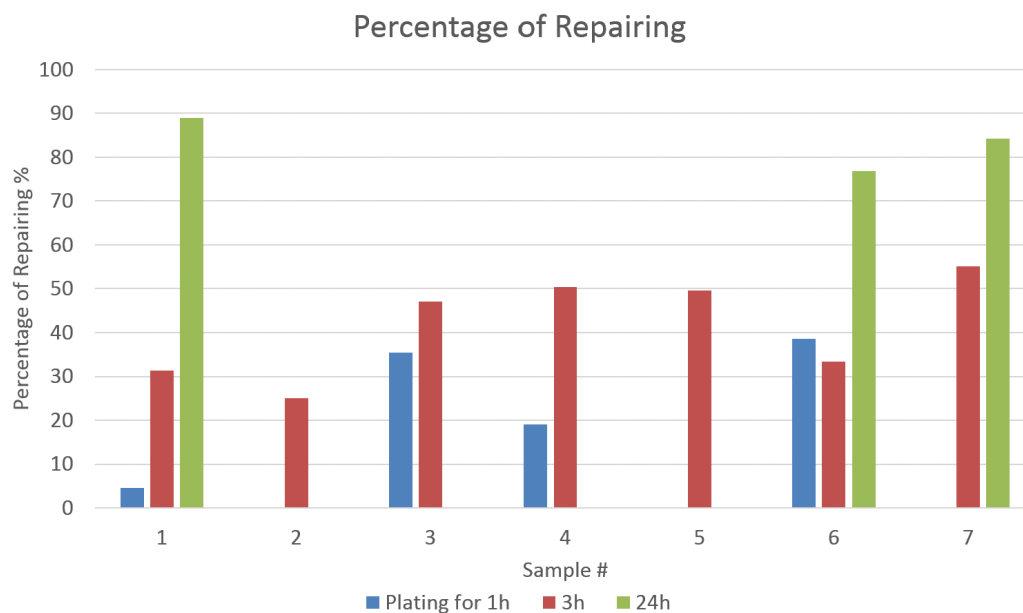


図 4.35 Result for scratch test

表 4.5 Result for scratch depth

Plating time [min]	Repairing rate [%]
0	0
60	9.45
180	11.41
1440	69.61

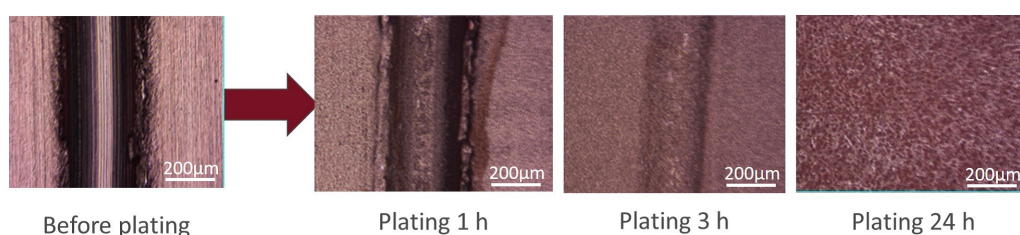


図 4.36 Healed sample picture

4.4.4.3 摩擦係数の評価実験

以下の工程で摩擦係数を評価する実験を行った。

1. 30×150[mm] 銅板を用意する
2. めっきを行う

銅板に光沢剤めっきをあらかじめ 60[min] 施した。

3. 銅板に傷をつける

表面性状の試験と同様に、CNC フライスに # 320 の紙やすりを貼り付けたφ 30 のアジャスターを取り付けた。30×150[mm] の銅板に対し 1[mm] 程度押し込み、ジョグ送りで銅板に傷を付けた。

4. 摩擦試験を行う

摩擦試験機 (新東科学株式会社, ミューズ 94i-II) を使用し, 最大静止摩擦係数を測定した。スライダーに 10~15[mm] 四方の傷ついていない銅板を両面テープで貼り付け, その表面をエタノールで拭いた。傷に対し直角に装置を配置し, 測定した。銅板上における任意の 5 箇所について測定し, 最後に全体の平均値を算出しそ

の銅板の最大静止摩擦係数とした。

5. 傷ついた銅板にめっきを行う

光沢剤めっきを 60, 180[min] で行った。陽極には白金箔を貼った樹脂棒を使用し、電圧値は 3[V] とした。

6. 再度摩擦試験を行う

同様に摩擦試験機を使用し計測した。

図 4.31 のセッティングで銅板に傷をつけた。また、図 4.37 に摩擦計測時の写真を示す。



図 4.37 Friction measuring machine

実験結果として、1 時間めっきを行ったサンプルについて図 4.38 に、3 時間めっきを行ったサンプルについて図 4.39 に示す。また、めっき時間 1[h], 3[h] について、それぞれの全体の平均値を表 4.6 に示す。

以上より、3 時間めっきを施したサンプルについては全て摩擦係数が低減していることが確認できた。しかしながら、1 時間めっきを施したものについては、ひとつを除き摩擦係数が大きくなるという結果が得られた。これは、光沢剤が作用するまでに時間がかかるという仮説が立てられる。図 4.40, 4.41 にめっきを 1 時間施した銅板と 3 時間施した銅板を示す。写真からも確認できる通り、1 時間めっきを行った銅板はくすんだ光沢を持っており、3 時間めっきを行った銅板は撮影したカメラを反射するほどの光沢を持っている。これらから、光沢剤が作用するまでに時間がかかるが、作用すれば光沢もきちんと出て摩

擦係数も軽減されることが確認された。

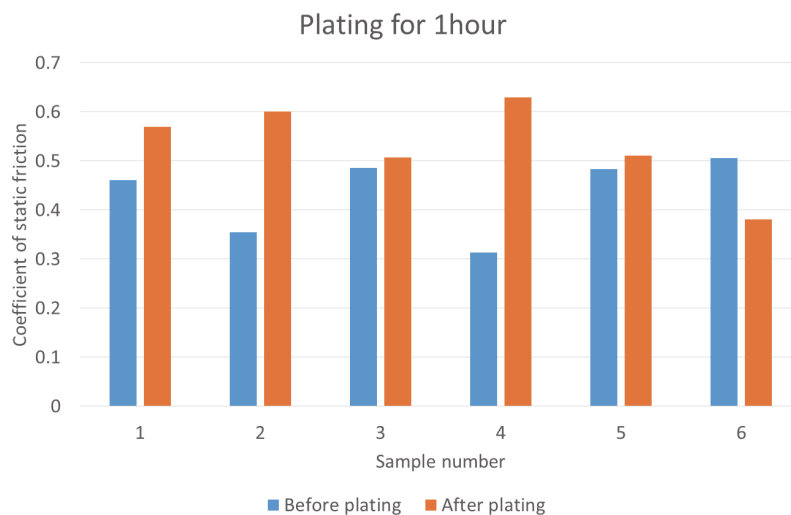


図 4.38 Result for the friction test (Plating for 1hour)

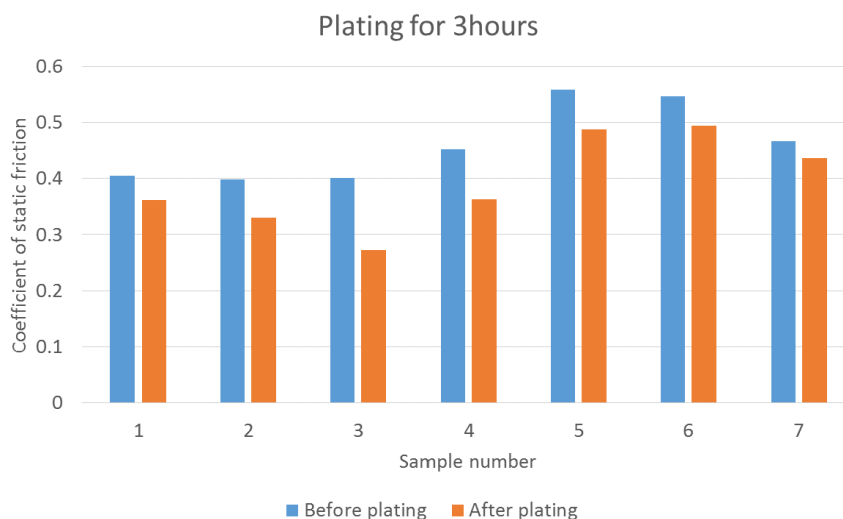


図 4.39 Result for the friction test (Plating for 3hours)

4.4.4.4 考察

電気銅めっき手法が摩耗の自己修復機構に有効であるか評価を行い、以下のような結果と結論を得た。

- 密着力：銅，真鍮の許容せん断応力に匹敵する程度のせん断応力を受けても剥がれ

表 4.6 Average of the result for friction experiment

Plating time [h]	Coefficient of static friction before plating	Coefficient of static friction after plating
1	0.434	0.533
3	0.461	0.392

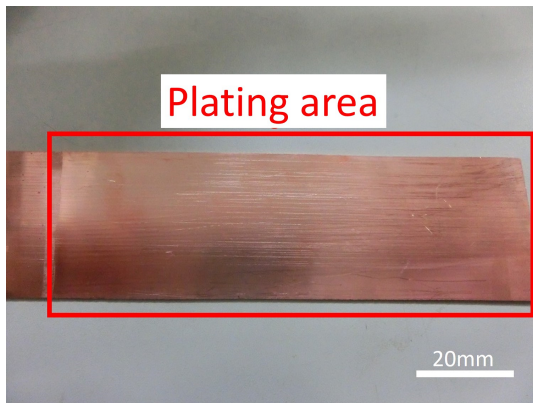


図 4.40 Plating for 1h

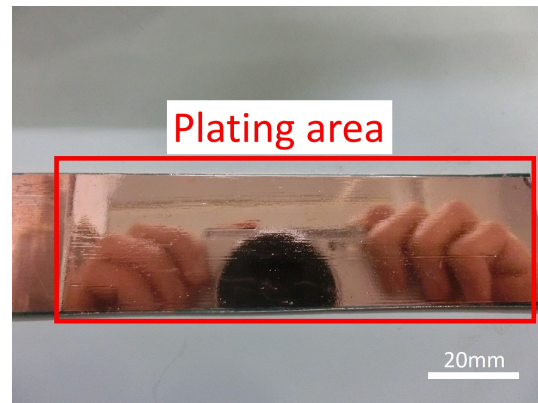


図 4.41 Plating for 3h

なかったため、十分な密着力を持つといえる

- 平滑能：表面性状，傷の補填試験ともめっき時間が増えるごとに改善されるという結果を得たため，平滑化作用を持つといえる
- 摩擦：めっき前後を比較した際に，十分にめっきした後に摩擦係数が低減したため摩擦低減性を持つといえる

以上より，提案された全ての評価項目を満たすことを確認した．したがって，電気銅めっき手法は摺動部の摩耗に対し修復性能を持つことが示された．

しかしながら，摺動部に組み込んでもめっき手法に修復性能があることが確認されなければ，摺動部の摩耗部分自己修復機構として機能を果たすとは言えない．したがって，摺動部の摩耗を意識した条件下において修復性能の評価を行わなければならない．

4.4.5 摺動部における修復性能評価

4.4.5.1 実験目的

めっきを摺動部の自己修復機構として評価するために、摺動による摩耗とめっきによる修復を同時に行う評価実験を行った。図 4.42 に本提案による摩耗の修復のプロセスを示す。摩耗は材料が表面から脱落する現象であるため、まず電解析出により金属イオンを摩耗箇所へ析出させ肉盛りをする。その後、肉盛りをした箇所を摺動により平坦化することで、摩耗を修復する。

4.4.5.2 実験方法

図 4.43 に摩耗実験のプロセスを示す。プロセスの詳細は以下で説明する。

1. 摩耗処理：セラミックス製のナット、不溶電極（ポリカーボネートのワッシャに白金箔を貼り付けたもの）、おもり、シャフトを含むアタッチメントを単軸ロボット（ミスミ，RS102）に取り付ける。めっき溶液中の銅板に対し、垂直に荷重をかけながら往復運動を一定時間させた。おもりを含むアタッチメント全体の重さは 1251[g]、速度は 100[mm/s] とし、ストローク 20[mm] で 24 時間動作させた。
2. 修復処理：2.5[V] の電圧を 24 時間印可して、銅イオンの電解析出を行った。メッキ液の組成は水 200 [ml]，CuSO₄ 40 [g]，H₂SO₄ 8 [g]，光沢剤 トップルチナ 2000MU 1[ml]，トップルチナ 2000A 0.2[ml] とした。
3. 平坦化処理：24 時間、アタッチメントを摺動させ、電解析出させた表面を平坦化した。

それぞれの処理での表面粗さをレーザー顕微鏡を用いて計測を行った。

実験装置について、CAD 図を図 4.44 に、実験写真を図 4.45 に示す。

4.4.5.3 実験結果

図 4.46 に実験の結果を示す。摩耗直後と平坦化後は、表面粗さは最も小さいという結果になった。メッキ（肉盛り）直後は、表面粗さが大きくなった。

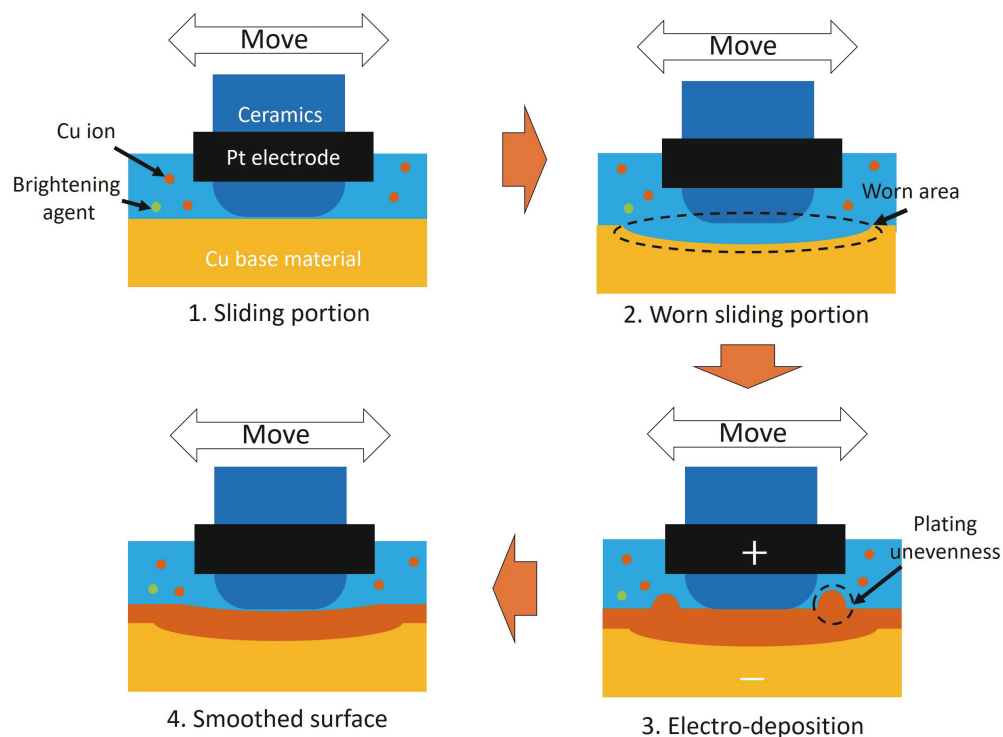


図 4.42 Process of repairing abrasion

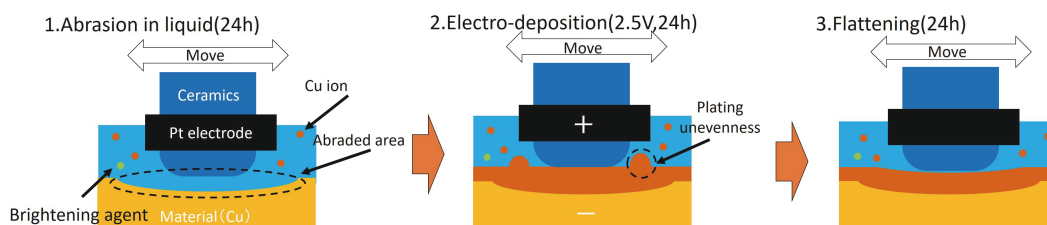


図 4.43 Process of experiment

4.4.5.4 考察

摩耗直後と平坦化後の表面粗さには優位差がなかったことから、2条件間の表面粗さに差はなかった。しかしながら、平坦化後のサンプルはメッキ直後のサンプルを経たサンプルであるため、金属が電解析出することで摩耗により失われた材料の補填が行われている。そのため、提案手法により摩耗箇所を金属で補填ができ、かつ平坦化ができたため、材料自体の摩耗を修復できたといえる。

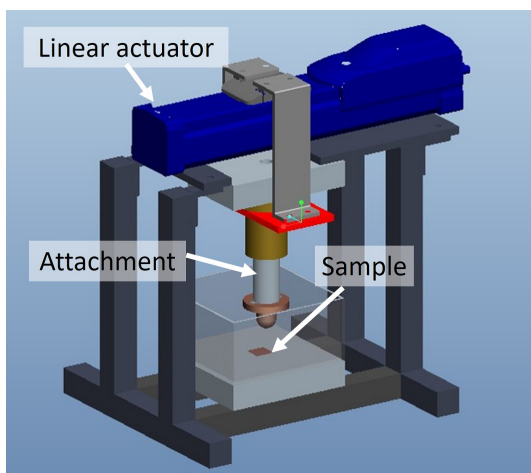


図 4.44 Abrasion testing machine

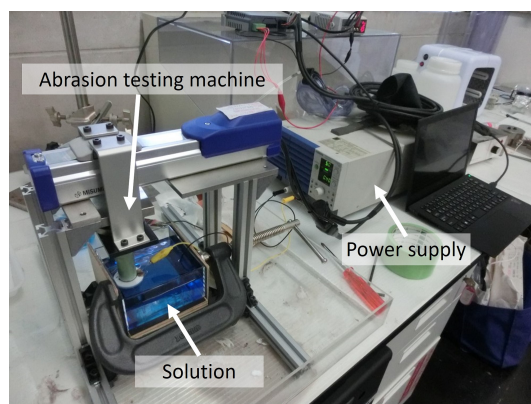


図 4.45 Experimental setup

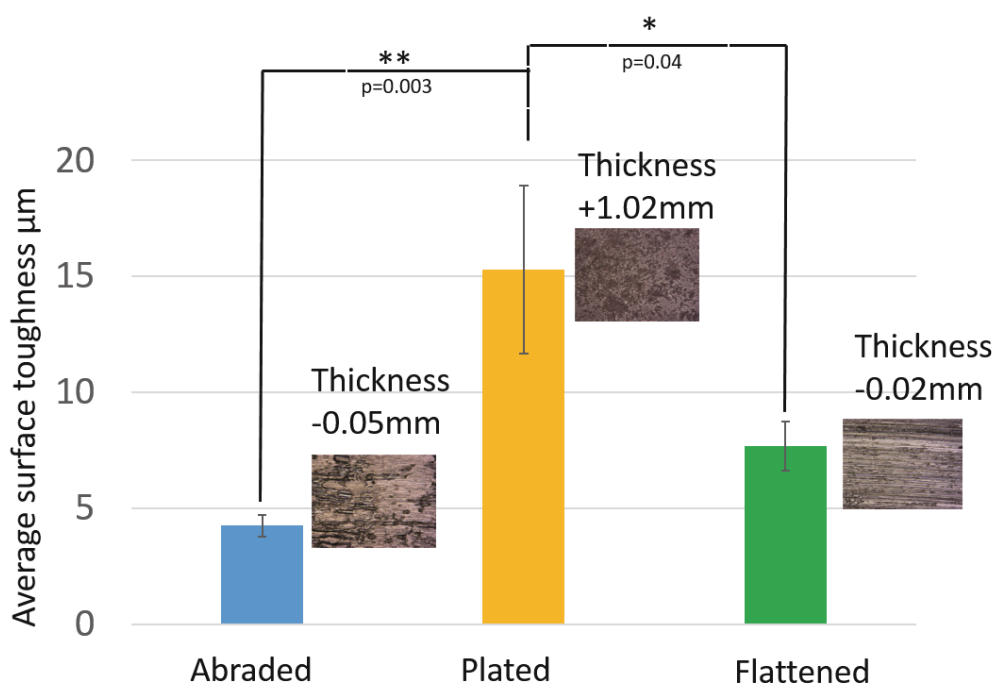


図 4.46 Result of repairing experiment

4.5 構造部材の修復手法

本研究では構造部材に亀裂などの損傷が発生することの問題点を述べ、損傷の修復手法の提案を行う。

4.5.1 損傷の問題

損傷とは、過度の負荷や衝撃による亀裂や腐食による材料の減肉等であり、材料の強度を低下させる。例えば、図 4.47 のように亀裂の入った材料は本来の材料強度よりも小さな外力によって破断してしまう。また腐食による減肉も、荷重を支える面積の低下をもたらす。

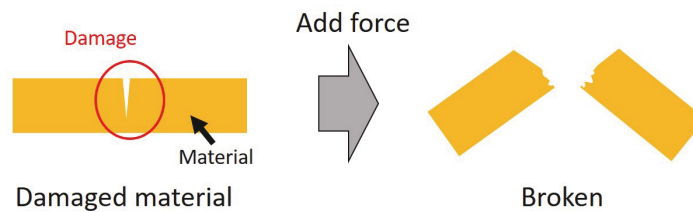


図 4.47 Cracked metal breaks by force

一例として亀裂が発生した際の材料の破断について述べる。

図 4.48 の右図のように材料に長さ a 、亀裂先端の曲率半径が ρ の亀裂が入った状態で F の外力が加わっていたとする。その際の亀裂先端に発生する最大応力を σ_{max} と応力集中係数 K は (式 4.2) と (式 4.2) で示すことができる。

$$\sigma_{max} = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)\sigma_n \quad (4.1)$$

$$K = \sigma_{max}\sqrt{\pi a} \quad (4.2)$$

で表すことができる。材料ごとの定数として破壊靱性値 K_c がある。この値よりも応力拡大係数が大きいと線型弾性破壊と呼ばれる破壊が発生して亀裂が進展する。線形弾性破壊の条件式を以下に示す。

$$K \geq K_c \quad (4.3)$$

図 4.48 の左図のような状況では、破断が進展してしまうが、図 4.48 の右図のように亀裂箇所を埋め、その後に固めることにより、亀裂長さ a と亀裂先端の曲率半径 ρ がほとんど 0 になる。したがって、応力集中係数 K は小さくなり亀裂がない状態での応力 σ_n と

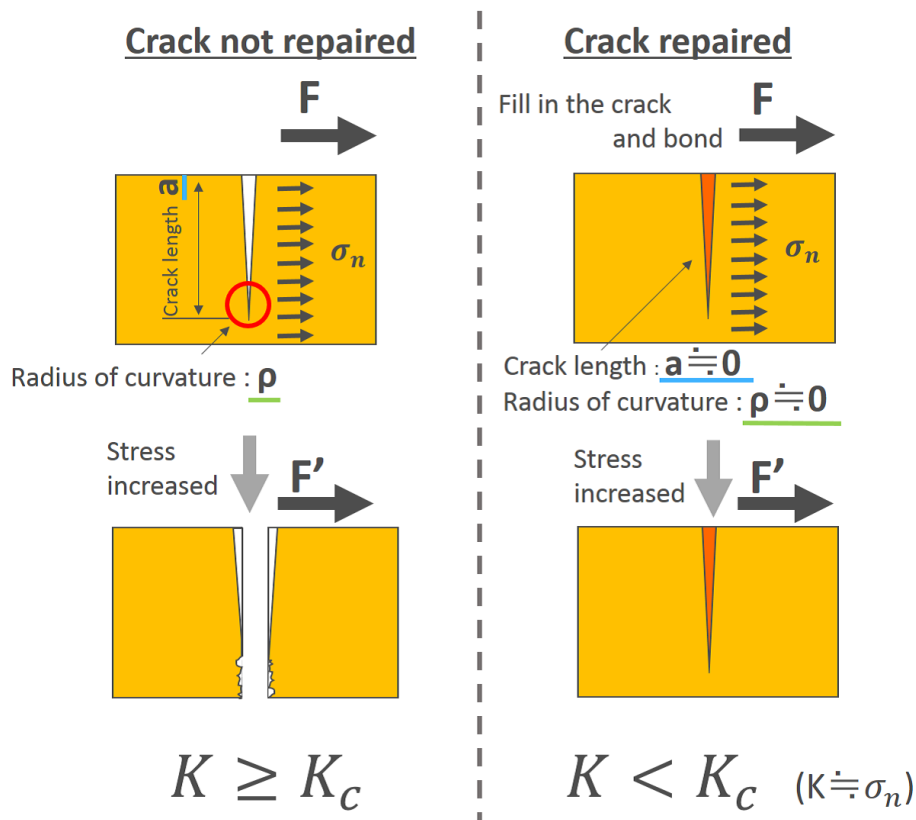


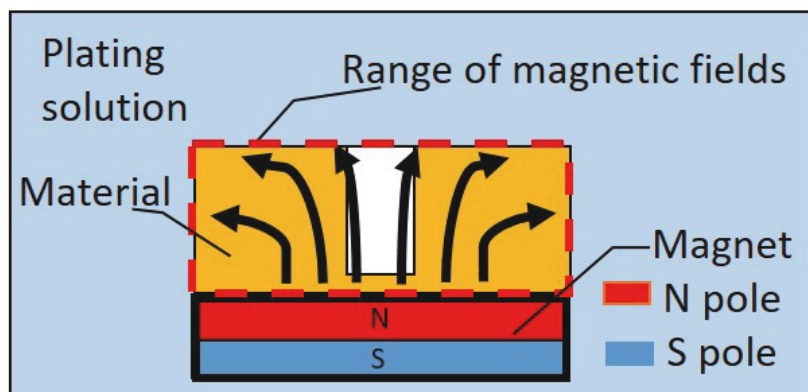
図 4.48 Crack growth and brake (left), Crack repaired (right)

ほぼ等しくなるため、破断応力以下であれば破断は起こらなくなる。これは、腐食による減肉などの損傷に関しても同様で、損傷箇所を材料で埋めることで、強度の回復が可能であると考えられる。

4.5.2 構造部材修復の提案手法

損傷を修復するための要求仕様を、損傷箇所を埋めて固めることとした。そうすることで、応力集中係数を下げ、材料が修復されるとかंगाえられる。要求仕様を満たすために本研究では、磁場によって強磁性体粉末を吸着させた後に、電気めっきを行い、吸着させた粉末表面と材料表面に金属を析出させて損傷箇所を埋める手法を提案する。図 4.49 および図 4.50 を参考にしながら提案手法の詳細を述べる。

図 4.49 に提案手法による修復手法を行う際の初期状態について述べる。導電性の材料を修復対象材料とし、材料の背面に磁場が材料内部にのみ収まるように設計した磁石を配置した構造を用意する。そのような構造を有する材料をめっき液に浸しておく。



Select the proper thickness material and magnet as magnetic fields attract to powder inside the material

図 4.49 Setting of proposed method

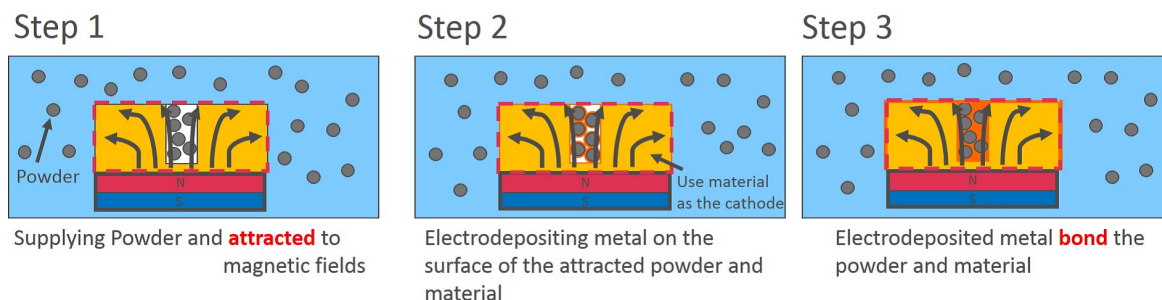


図 4.50 Process of proposed method

図 4.50 に提案手法による手順を示す。まず、めっき液の中に鉄粉を混ぜてめっき液を通して修復対象材料の箇所まで送る。送った鉄粉は磁場により修復対象材料の損傷箇所に吸着する (Step1)。修復対象材料をカソード電極として、電気めっきを行って材料に吸着した粉末の表面と材料の表面に金属を析出させる (Step2)。電気めっきを行い、金属を析出させて最終的に粉末と修復対象材料を固定化することで損傷箇所を埋めて修復する (Step3)。この手法の特徴は場を用意することで、適切な形状に修復を行えるという点である。

4.5.3 提案手法のロボットに対する適用

本研究で提案する手法を実際にのロボットに適用する場合には、いくつかの前提条件が必要となる

- 修復対象の材料が流体 (めっき液) に浸されている。
- 強磁性体粉末を供給するために流体 (めっき液) がポンプにより循環している。
- 修復対象材料の内側に磁石が埋め込まれている。

これらの条件を満たすために、ロボットの構造部材は円柱形になっており、その内部に円形の磁石が埋め込まれており、磁石による磁場が修復対象材料内部にのみ粉末を引きつけるのに必要な磁場が発生している状態である必要がある。構造部材の材質は電気めっきの際にカソード電極として活用できるように導電性の材料を用いる。また、構造部材はチューブの中に入っている。チューブの中は流体 (めっき液) で満たされており、チューブの中の流体がポンプによって循環されている。チューブの内側には電気めっきを行うためのアノード電極が配置されている。この電極の材料は電気めっきによって溶けないもの、具体的には白金などのイオン化傾向の高い材料である。システムの配置に関して図 4.51 に示す。

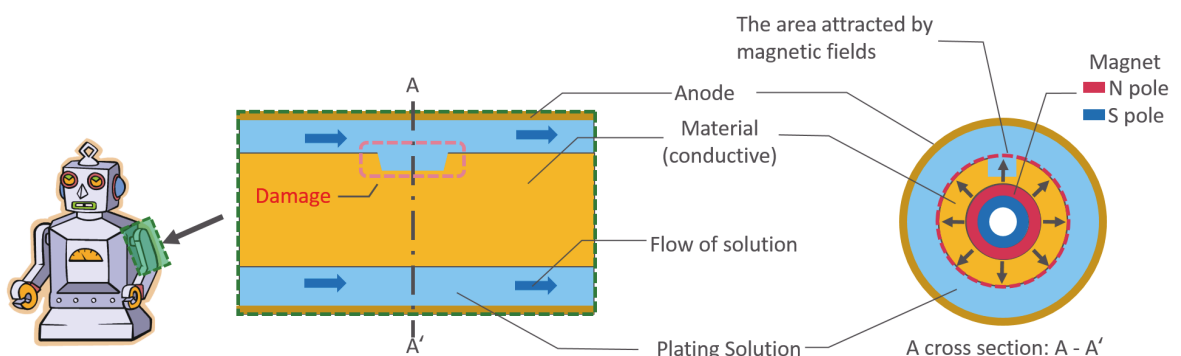


図 4.51 Proposed method in robot

図 4.51 に示したように、構造部材表面に損傷が発生した場合を想定して、修復プロセスを図 4.52 で説明する。図 4.50 と同様に、循環している流体と共に強磁性体の粉末が供給され、その粉末が損傷箇所を埋めた後に金属電着を行くことで、亀裂箇所に吸着した鉄粉

と修復対象材料が堆積した金属で固められて、損傷箇所が修復する。

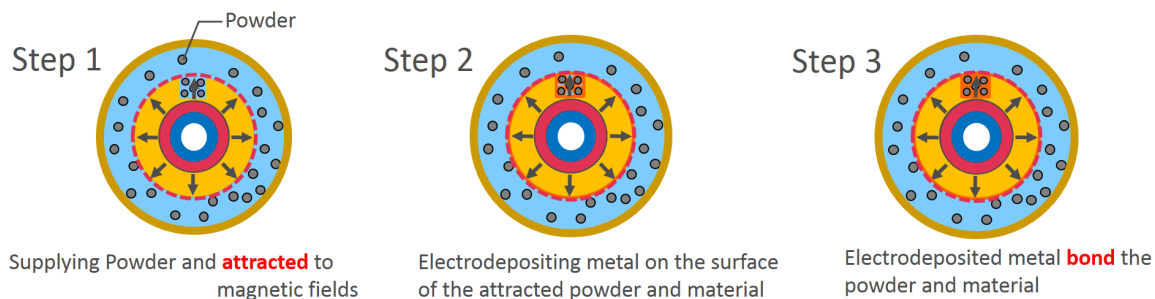


図 4.52 Repairing step in robot

4.5.4 評価実験

実験の評価を行うために、以下の手順で評価を行った

1. 材料厚さの計測実験
2. 提案手法による亀裂箇所堆積実験
3. 提案手法による修復機能の評価

本研究では、提案手法により構造部材が修復可能であることを示すことを目的としている。そのため、評価実験においては実際にロボットに組み込むような、円形材料は使用しない。その代わりに単純な板状の形状の材料に対して提案手法により修復を行い、修復性を評価する。板状の材料で修復性能が確認できれば微視的に見れば平面の集合体である円柱材料においても提案手法が有効であることを示すことができる。また、実際にロボットシステムに組み込める可能性を示すこともできる。

4.5.5 材料の厚さ決定

材料の厚さを決定する必要がある。そこで、以下の図のように亀裂の入った黄銅材料に厚さ 0.5[mm] の黄銅の板を重ねて厚さを調整する。鉄粉 50mesh(粒径 0.3[mm]) を材料の裏にネオジウム磁石 (10[mm] × 10[mm] × t0.5[mm], 53[mT], Magfine) を配置した材料に振りかけて、純水に浸して余分な鉄粉を除いた後に、黄銅の亀裂箇所以外の表面に付着している鉄粉を確認して、黄銅の亀裂箇所以外には鉄粉が付着しないような厚さを調べ

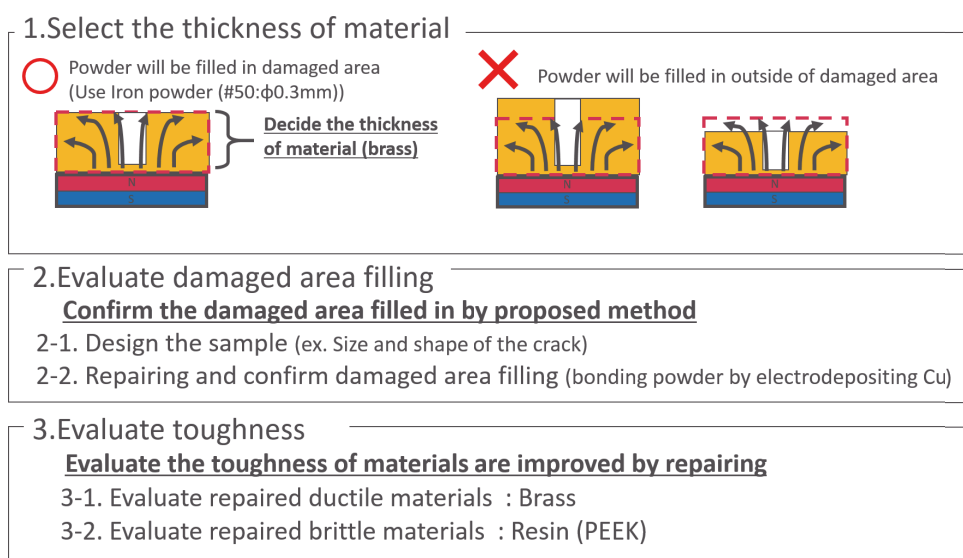


図 4.53 The list of experiments

た. 図 4.54 および図 4.55 に実験の様子を示す.

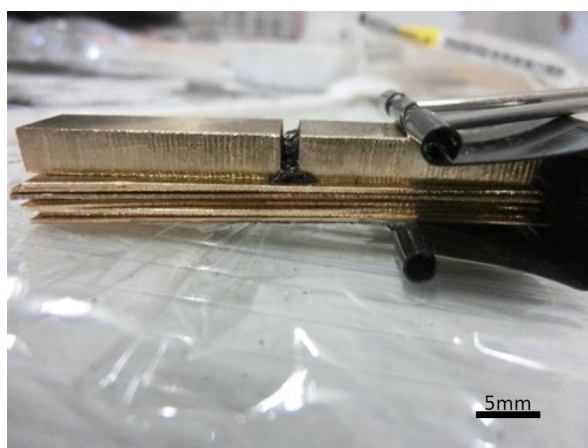


図 4.54 Experiment to define thickness of material

この実験の結果, 適切な磁石表面と材料表面との距離は 8[mm]~8.5[mm] であることが分かった. この値を基に今後の修復実験では磁石表面と材料表面との距離を 8[mm] として修復を行う.

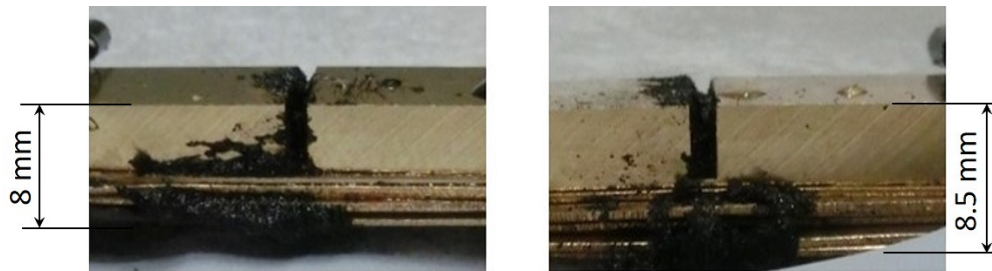
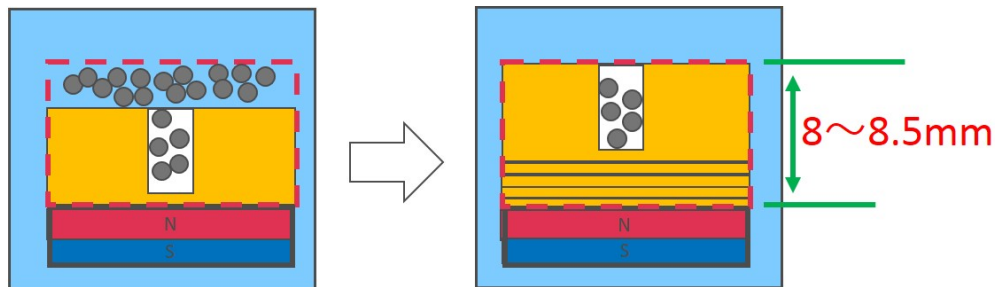


図 4.55 Fe powder attracted to the crack of sample



● : Iron powder (#50:Φ0.3mm) Adjust the thickness of plate

図 4.56 Overview of experiment to define thickness of materia

4.5.6 提案手法による破損箇所堆積実験

必要な材料厚さを調べたので、実際に提案手法を用いて、損傷箇所に堆積できるかどうかを調査した。まず修復対象材料として厚さ 5[mm] の黄銅板 (C2801, Misum, 12 × 60[mm]) を用意する。この板の中央部分に、幅 1.5[mm]、深さ 4.5[mm] の凹みをエンドミルで加工し、材料を損傷させた。また、材料表面と磁石の表面の距離は 8~8.5[mm] と決定したため、その距離を再現するために黄銅板の背面に厚さ 3[mm] のアクリルの板を取り付け、その裏に実験 1 と同様のネオジウム磁石を両面テープで貼付け、更にアクリル板と黄銅版を結束バンドで締めて実験サンプルとした。図 4.57 および図 4.58 に、実験サンプルの模式図と実際のサンプルを示す。

用意したサンプルに 100mesh (粒径 1.75[mm]) の鉄粉を振りかける。その後、磁石が上に来るように材料を持つことで、吸着力が不十分な鉄粉を落とし、純水に浸して十分に磁場に吸着されていない鉄粉を洗い流した。図 4.59 に実際に黄銅板サンプルに鉄粉を付

着させ余分な鉄粉を除いたサンプルを示す。

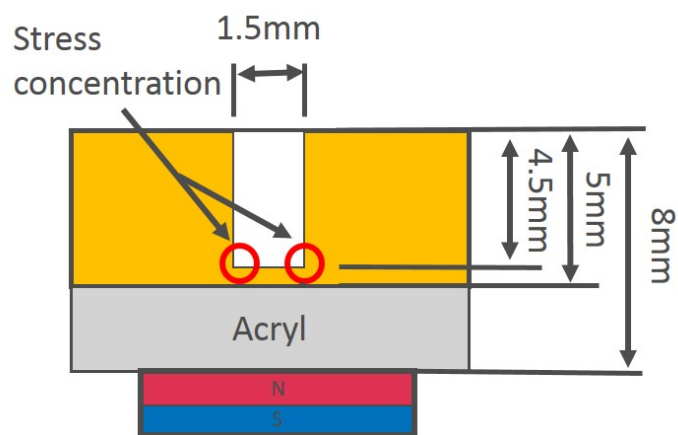


図 4.57 Structure of sample (overview)

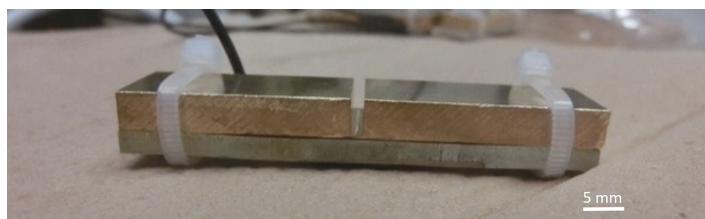


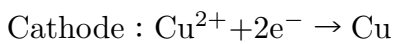
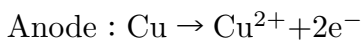
図 4.58 Damaged sample



図 4.59 Fe powder trapped on damaged area of material

図 4.59 に示したサンプルをめっき溶液に浸して、修復対象材料である黄銅板をカソード電極，純銅板をアノード電極として 1.5[V] で 18 時間の間，電気銅メッキを行った。今

回の実験ではポンプによるめっき液の供給を行わないため、めっき液の濃度が均一となるように純銅板をアノード電極として用いた。使用する純銅板とサンプルはめっきの前処理として、アセトンで拭いた後に10%硫酸溶液に30分浸したものを使用した。めっき液の組成は硫酸銅(II)・5水和物が200[g/L]、硫酸が30[mL/L]である。めっきの様子と、修復を行った結果を図4.60と図4.61)に示す。電気めっきをによりアノード電極の純銅板が溶解しカソード電極に銅イオンを供給する。電気めっきの際の反応は、



である。

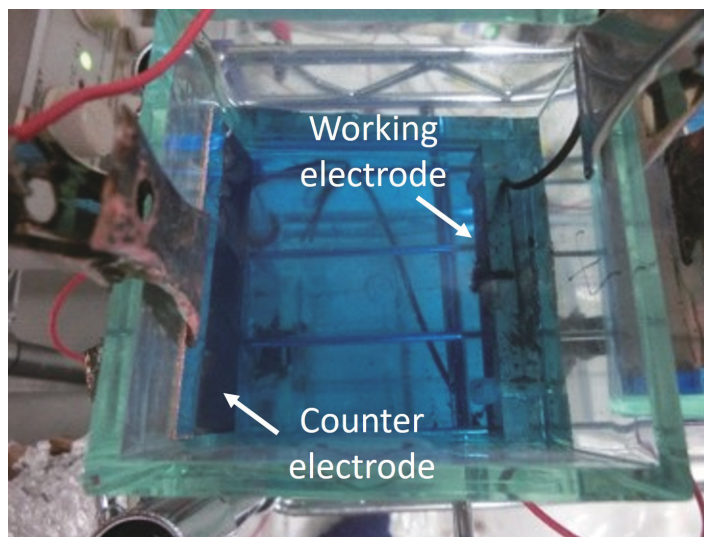


図 4.60 Setting of coating

実験の結果、提案手法によって材料の損傷箇所が埋められていることが分かる。参考として、サンプルに鉄粉を付着させずに、提案手法と同じ条件でめっきのみを行ったサンプルと比較すると、めっきのみ行ったサンプルは傷形状が残ったままである。そのため、めっきのみで損傷箇所を埋めようとする、提案手法と比較して時間がかかることが明らかである。また、損傷箇所が埋まるまでめっきを行った場合、金属メッキはカソード電極であるサンプル全体に均一に堆積するため、損傷箇所以外の箇所に堆積する金属の量も多くなり、修復後のサンプルは修復前と比較して、損傷箇所の幅、もしくは深さ分だけ厚くなったものになると予想される。したがって提案手法の方が損傷箇所を埋める能力を有し

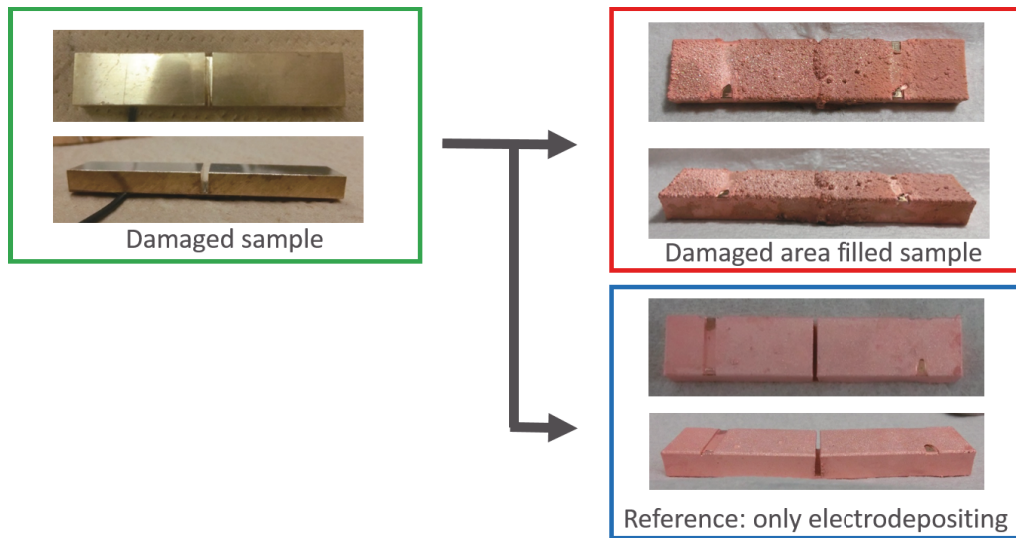


図 4.61 Damage place filled sample

ており、めっきを行ったサンプルと比較しても修復能力が高いことが分かる。

4.5.7 提案手法による修復性能の評価

提案手法によって、実際に損傷箇所が埋まることが確認できた。次に、実際に提案した修復手法によって修復が行われているかどうかについて実験を行った。オートグラフによって引張試験を行い、破断までの荷重-変位曲線を取得する。その曲線が囲む面積を靱性として計算して修復前後で比較を行う。亀裂が埋められ、固められているならば、応力集中係数が小さくなり、破壊靱性値に至るまでのより多くのエネルギーを吸収できるはずである。また、めっきによる固定化で材料の断面積が増すことによって、破断強度が変化する可能性も考えられる。今回の手法ではめっきにより固定化された部分の断面積を求めることが困難なので、破断までに吸収されるエネルギーとして評価することで、修復できたかどうかを比較することができる。修復する材料は延性破断する材料として黄銅板、脆性破壊する材料として導電性 PEEK(ポリエーテルエーテルケトン, Misumi) の 2 種類を用意した。修復は鉄粉を付着させた後に電気銅メッキを行うものとした。用意したサンプルに関して説明する。

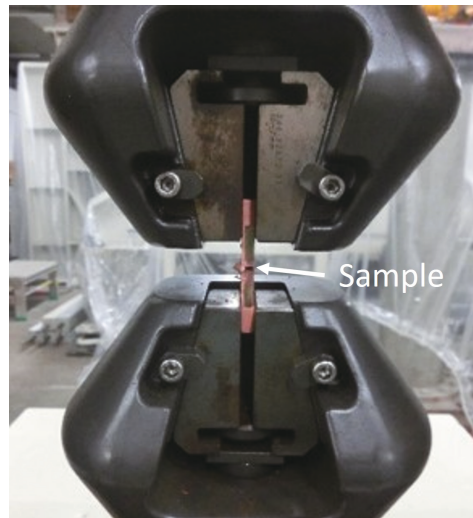


図 4.62 Setup of tensile machine

4.5.7.1 黄銅サンプル

厚さ 5[mm] の黄銅の板 (12 × 60[mm]) に対して、幅 1.5[mm]、深さ 4.5[mm] の傷を付け、厚さ 3[mm] のアクリル板を取り付けたものをサンプルとして用意し、それぞれ 3 種類の処理を行った。サンプルとして傷を付けた状態のままのサンプル (Damaged sample) と、鉄粉を付着させずに電気銅めっきを 1.5[V] で 18 時間行ったサンプル (Plated sample)、傷をつけたサンプルに対して提案手法による修復として電気銅めっきを 1.5[V] で 18 時間行ったサンプル (Repaired sample)。以上の 3 種類のサンプルを用意して、それぞれのサンプルを引っ張り試験により評価した。用意したサンプルを図 4.63 に示す。

それぞれのサンプルに対して、引張試験を行い得られた荷重-変位曲線の面積を求め、靱性値として、それぞれ比較を行った。

4.5.7.2 PEEK サンプル

高分子である PEEK の導電性グレードの材料 (Misum, 型番: PKCA) に対しても電気銅めっきによる提案修復手法の修復性能について評価した。厚さ 5[mm] の PEEK の板 (10 × 50[mm]) に対して、幅 2[mm]、深さ 4[mm] の傷を付け、厚さ 3[mm] のアクリル板をサンプルとして用意し、それぞれ 2 種類の処理を行った。傷が入ったサンプル (Damaged sample) と、鉄粉を積層させるのを 2 回に分けて提案した修復手法を用いて電

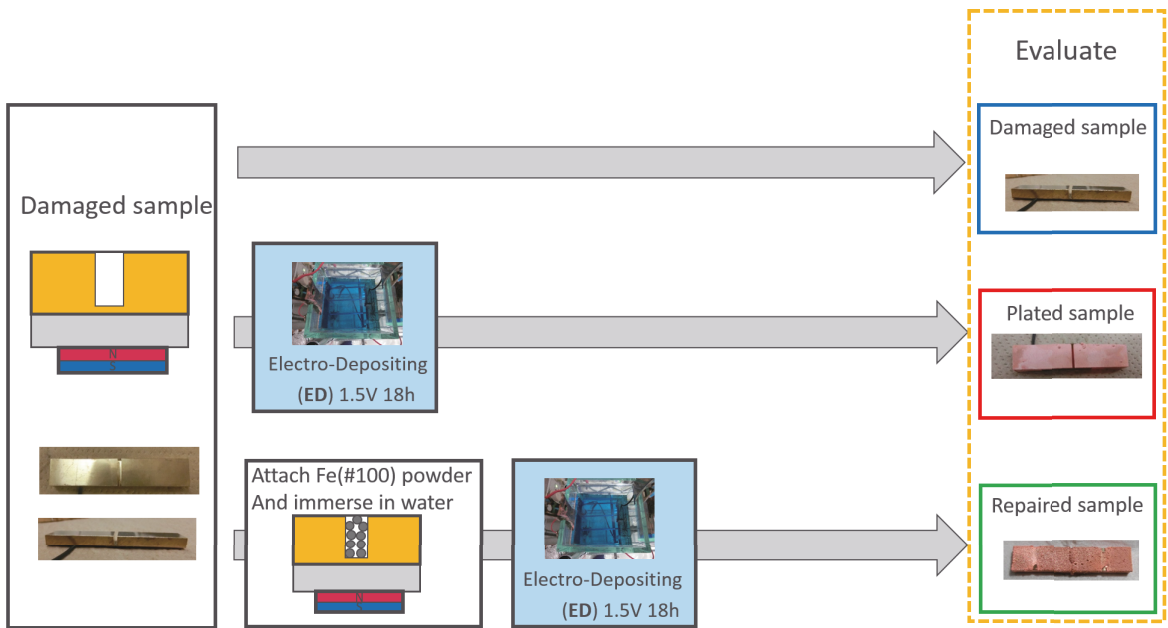


図 4.63 Sample of brass

気銅メッキを 1.5[V] で 18 時間のサイクルを 2 回行ったサンプル (Repaired sample) の 2 種類を用意して、それぞれのサンプルを引っ張り試験により評価した。用意したサンプルを図 4.64 に示す。

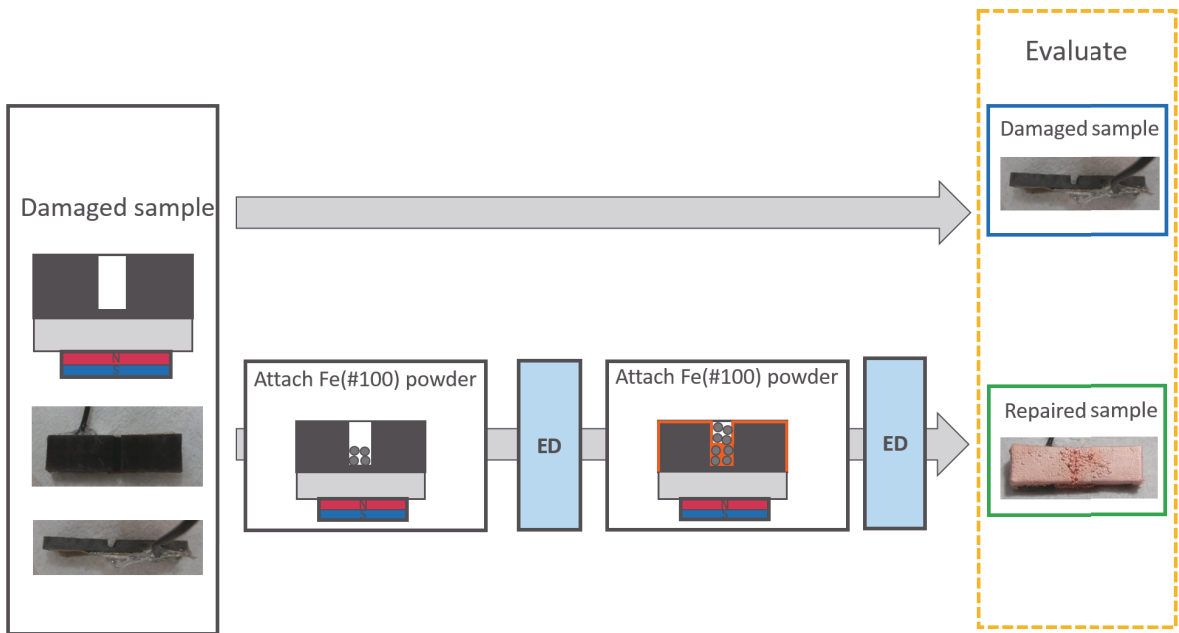


図 4.64 Sample of PEKK

それぞれのサンプルに対して、引張試験を行い得られた荷重-変位曲線の面積を求め、韌性値として、それぞれのサンプル間での比較を行った。2回に分けて提案手法による修復を行ったサンプルは、実際にロボットシステムに組み込まれた際の修復プロセスを参考に決定した。実際のロボットシステムに提案手法を組み込む際には鉄粉は一度に亀裂箇所には吸着せず、一定の量が少しずつ亀裂箇所に堆積しながら電気めっきにより固められ修復が行われることが予想される。そのため、本研究では提案修復手法を2回行うことで、実際のシステムにおける修復に実験内容を近づけた。

4.5.8 実験結果

修復性能評価試験の結果を示す。

4.5.8.1 黄銅での引張試験

実験条件で指定した3サンプルにおいて、黄銅サンプルに対して引張試験を行い韌性値の比較を行った。図4.65に、損傷を与えたのみのサンプルと、めっきのみを行ったサンプルと提案手法により修復を行った3種類のサンプルの韌性値の平均値を比較した棒グラフを示す。エラーバーは標準偏差であり、サンプル数はそれぞれ損傷を与えたのみサンプルが $n=4$ 、めっきのみを行ったサンプルが $n=2$ 、提案手法によって修復を行ったサンプルが $n=3$ である。それぞれのサンプルの韌性値に対して Turkey 法を用いて多重検定を行った結果、亀裂のみのサンプルと提案手法による修復したサンプル間と、めっきのみを行ったサンプルと提案手法により修復したサンプル間において $P<0.05$ となり有意差が認められた。したがって、本提案手法により亀裂したサンプルが修復されたと言える。具体的なそれぞれのサンプルにおける韌性値を表4.7に示す。しかしながら、損傷前のサンプルの韌性値は616[J]であり、修復後の韌性値が3.14[J]であったことから、黄銅の韌性値は回復したがその効果は小さいということを確認した。

4.5.8.2 PEEK での引張試験

実験条件で指定した2種類の PEEK サンプルに対して引張試験を行った。図4.68に、損傷を与えたのみのサンプルと、2回に分けて、損傷箇所を鉄粉で埋めて、電気銅メッキによって固めて修復を行った2種類のサンプルの韌性値の平均値を比較した棒グラフを

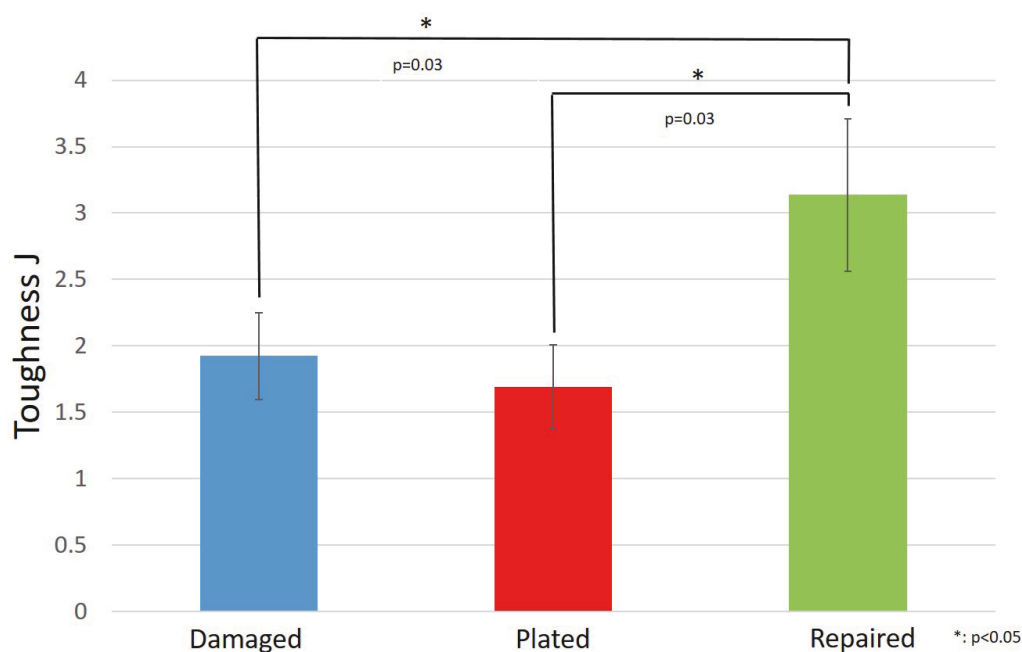


図 4.65 Comparison of toughness (Brass)

表 4.7 Average of Toughness (Brass samples)

Sample	Average of Toughness[J]
Cracked	1.92
Plated	1.76
Repaired	3.14

示す。エラーバーは標準偏差であり、サンプル数はそれぞれ亀裂のみサンプルが $n=3$ 、2回に分けて提案手法による修復を行ったサンプルが $n=3$ である。2つのサンプルの靱性値に対して t 検定を行った結果、亀裂のみのサンプルと提案手法による修復したサンプル間において $p<0.01$ となり有意差が認められた。したがって、本提案手法により損傷したサンプルが修復されたと言える。具体的なそれぞれのサンプルにおける靱性値を表 4.7 に示す。損傷前のサンプルの靱性値は $5.67[\text{J}]$ 程度であり、修復後のサンプルの靱性値は $2.68[\text{J}]$ であったため、50% 程度の回復が見られた。

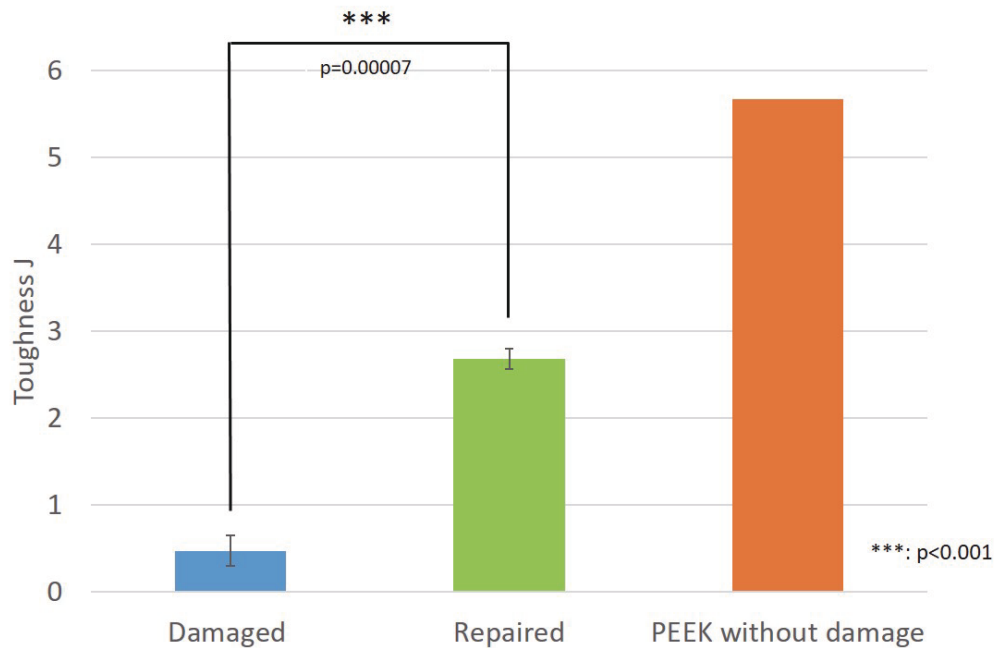


図 4.66 Comparison of toughness (PEEK)

表 4.8 Average of Toughness (PEEK samples)

Sample	Average of Toughness[J]
Cracked	0.476
Repaired	2.68

4.5.9 考察

4.5.9.1 修復後の材料の物性

修復後の材料の特性が安定していないという問題がある。図 4.67 に黄銅材料において、PEEK 材料に行ったものと同様の手法で 2 回に分けた、提案手法による修復を行った材料の荷重-変位曲線を示す。各サンプルの間で曲線の形に大きなばらつきがある。これは現在 2 回に分けた修復を行う際、1 層目に堆積させる鉄粉の高さが異なっているために発生していると考えられる。

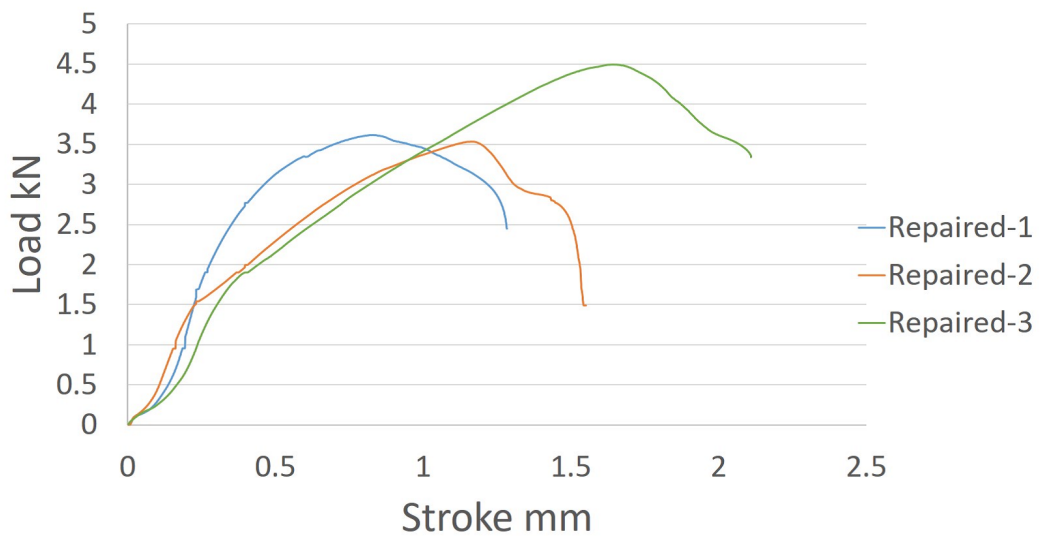


図 4.67 Load-stroke curve of Brass samples

4.5.9.2 脆性材料に対する銅の析出による修復

本実験では修復性能試験において延性破壊する材料である黄銅と、脆性破壊する材料である PEEK の 2 つを用意した。これらに対して、延性破壊する材料である銅の析出を行い修復したところ黄銅材料に対しては、単純に最大荷重の上昇が見られたが、PEEK では破断するまでに荷重のピークが 2 回見られた。これは最初に析出した銅が延性破壊しその後、PEEK が脆性破壊したものだと考えられる。今回は、修復の際の靱性値比較のデータとしてはサンプル寸法が異なるため用いなかったが、図 4.68 に示すように、損傷が入ったサンプルのグラフと、修復を行ったサンプルとではグラフの形が異なっている。

4.5.9.3 電気めっきにより析出させる材料

本研究では、実験に銅メッキを使用した。亜鉛メッキによる修復実験も行っていた。しかし亜鉛メッキを用いて修復を行った場合、鉄粉と母材が離れてしまい傷の部分が修復出来なかった。むしろ、鉄粉を吸着させた部分は鉄粉が凝集したのみで修復対象材料表面にはメッキされなかった。このことにより、銅メッキの何らかの特徴が鉄粉と修復母材を吸着していると考えられる。以下に亜鉛めっきで提案修復手法を用いた黄銅板の画像を示す。

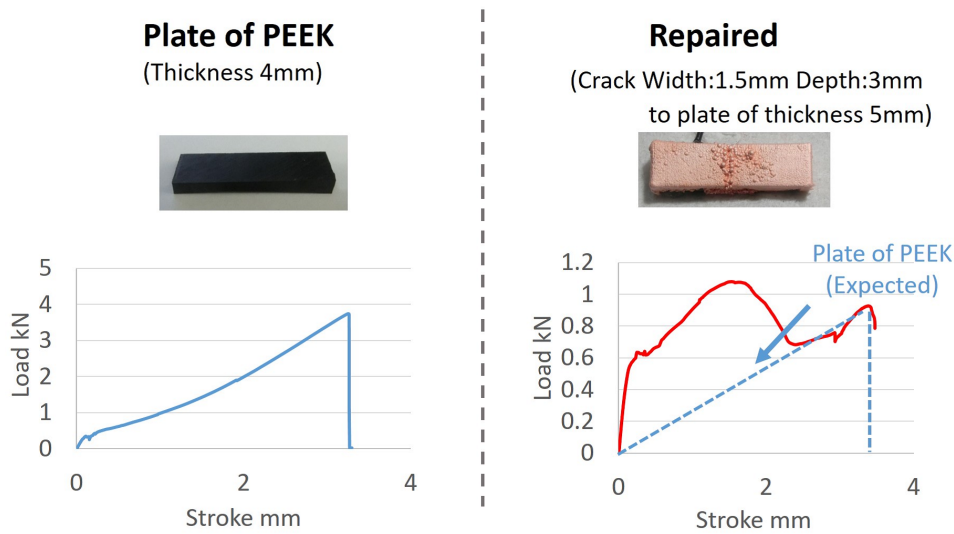


図 4.68 Load-stroke curve of PEEK samples



図 4.69 Zinc coating

4.6 生物とアナロジーについて

生物における多くの治癒は、血液からの材料供給（血小板、フィブリンなど）や線維芽細胞からのコラーゲンの供給を受けて癒痕組織を形成することに由来する[4]。つまりは、物質供給を受けてそれらを結合させることで、治癒を行っている。本研究における摩耗修復機構もまた、物質（液体樹脂、金属イオン）を供給した後、それらを触媒や電解析出により結合することにより膜を再形成したり摩耗箇所を充填したりしている。また、損傷箇所の修復機構に関しても、同様に金属粉の供給および金属イオンの電解析出による結合により靱性値の回復をしている。これらの機構は、生物における物質供給およびそれらの結合とのアナロジーがあると考えられる。

4.7 4章のまとめ

本章では、摺動部に生じる摩耗を修復する手法と構造部材の損傷を修復する手法の構築を行った。摩耗の修復では、触媒反応を利用して摩耗箇所を充填する手法の構築と、電解析出により摩耗箇所を充填する手法の開発を行った。触媒反応を利用した手法では、今回のターゲットであった腱駆動用の腱（ダイニーマ）の耐摩耗性を向上させることができたが、形成した膜をはがす実験（再修復実験）を行った際に2~3回しか膜が再形成されなかったことから、現在のところ修復回数に上限があることも確認した。今後は、腱の材料を触媒が担持しやすい材料に変更したりするなどして、より修復が行いやすいような仕組みを研究する。電解析出により摩耗箇所を充填する手法では、摺動させながら銅を材料表面に析出させる手法を構築した。提案手法により、摩耗箇所を充填することができ、かつ摺動により材料の表面をならし表面性情が改善することを確認した。今後は、ロボットアームなどの実際の機械の関節で本手法を運用するための設計を行う。構造部材の損傷を修復する手法では、磁界への強磁性体のトラップと電解析出による強磁性体どうしの接合を利用して損傷箇所を充填することで、損傷した材料と比べると材料（黄銅および導電性PEEK）の靱性値が向上することを確認した。今後は、CFRPなどの材料にも本手法を導入し、衝撃力などによる材料の破壊を前提とした設計論の構築などを行っていく。

第5章

システムの状態維持

5.1 概要

人工循環システムならではの問題として、(1) 安定的に物質を運ぶ必要性、(2) 循環系中の老廃物を除去する必要性がある。(1)に関しては、多くの種類の物質が循環系中を流れているため、もしその物質どうしが化学反応などをしてしまったら、システムが不安定になると考えられる。そのため、その現象を避けるための技術が必要となる。(2)に関しては、循環系システムを備えたシステムが活動することにより生じた老廃物を除去しなくては、常に老廃物が循環することになりいずれ飽和し、システムが正常に運用できなくなることが想定される。そのため、循環している液中の老廃物を取り除く技術が必要になる。本研究ではカプセルとフィルターを用いてこれらの技術を実現する。

5.2 カプセルを用いた物質の運搬手法

運搬する物質を薄膜で包みカプセル化したうえで管路を循環させ利用部位に送り届けることとした。これにより運搬物質ではなくカプセルの物性（大きさ、比重、磁性など）によって物質を区別することができるので、運搬路からの取出しが容易となる。

5.2.1 カプセル化

本研究では運搬対象の物質を膜で包みカプセルとして運搬する手法を提案する。ここでカプセルに求められる特徴として以下が挙げられる。

- カプセル壁が運搬対象物質を反応しないこと
- 中身の運搬対象物質が漏れ出ないこと
- 後から中身を取り出せること
- 異なる物性 (大きさ, 比重, 磁性など) のカプセルを製作可能であること

カプセルを製作する手法としては, 同心二重ノズルを用いた液中硬化被覆法 (オリフィス法) を用いることとした. 同心二重ノズルの内層から芯物質, 外層からアルギン酸ナトリウムを流し, 塩化カルシウム水溶液に滴下することでカプセル化を行う. 本手法を選定した理由としては多様な疎水性の物質を封入可能であり, 作製方法によりカプセルの物性 (大きさ, 比重, 磁性など) を容易に変化させられるためである. 運搬物質の種類ごとにカプセルの物性を変化させることで物質の識別を可能とする. 例えば油は大きなカプセル, エタノールは小さなカプセルに封入し, 大きさによって区別するといった具合である.

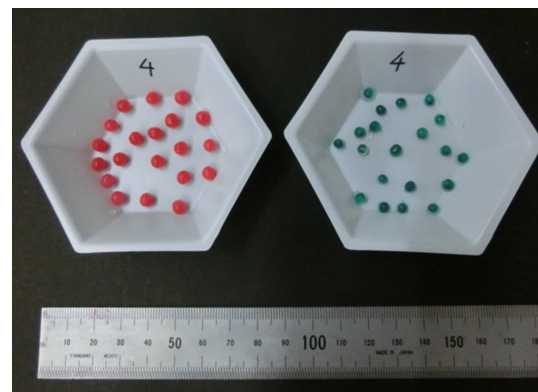
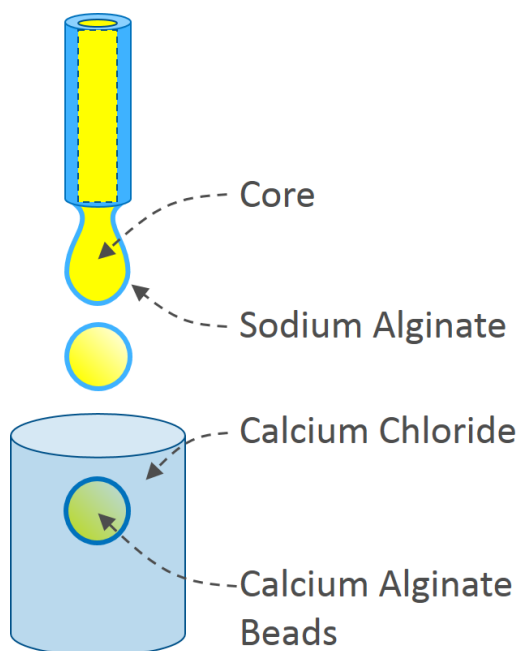


図 5.2 Capsules filled with colored lubricating oil

図 5.1 Encapsulation by orifice method using double nozzle

5.2.2 運搬

管を用いて物質を運搬する場合、物質の運搬方法は大きく2種類ある。輸送対象に直接力や圧力を加えて動かす方法と、輸送するための流体（キャリア流体）を用いて対象物質を間接的に運搬する方法である。前者の例としては水道管における水が挙げられる。また、後者の例としては、粉末を運搬する際に空気を管に流し、その空気の流れに乗せて粉末を運搬するという手法が挙げられる。前者は管を輸送対象で満たしておく必要があるのに対し、後者はキャリア流体が管路に満ちていれば輸送対象で管を埋め尽くす必要が無いという特徴がある。今回のシステムでは管全体をカプセルで埋め尽くすことは困難であることから、キャリア流体を用いて対象部位へ運搬することとした。さらに、キャリア流体はカプセルを乾燥させないための役割もかねている。

5.2.3 分離

本研究で用いるカプセル化手法を用いれば、カプセルの粒径、比重、磁力を変更することが可能である。したがって、利用部においてカプセルを識別する際はこれらの物性を利用することができる。

本研究ではその中でも最もシンプルで、しかも多くの種類を作ることのできる粒径を利用して分離することとした。

5.2.4 開発したシステム

上記手法を実装した装置を開発した。以下にそれぞれの詳細を述べる。

5.2.4.1 カプセル製作装置

同心二重ノズルを用いた液中硬化被覆法によりカプセル化を行う装置を製作した。図 5.3 に全体図、図 5.4 に模式図を示す。

カプセル化は以下の手順により行った。

1. アルギン酸ナトリウム (Sodium Alginate 300~400cP, 和光純薬工業株式会社)2[g]と純水 100[ml] をビーカーに入れ、マグネチックスターラーを用いて3時間攪拌

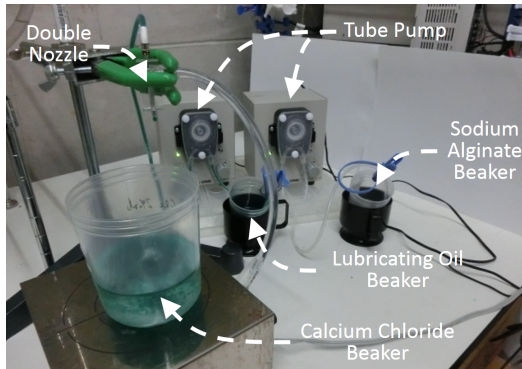


図 5.3 Encapsulation apparatus

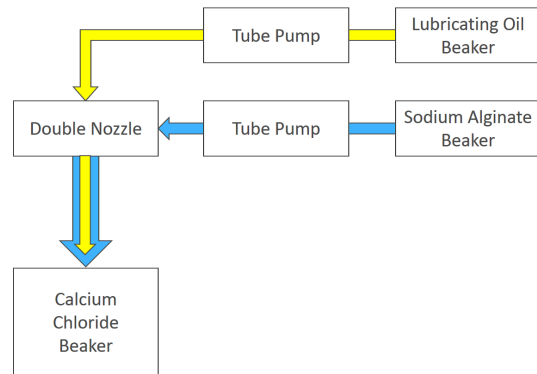


図 5.4 System Diagram of encapsulation apparatus

- し, 2[wt%] アルギン酸水溶液を調製する
2. 万能油 100ml に油性絵具を小さじ 1 杯入れ, 攪拌する
3. 図 5.3 のように製作装置を組み立てる
4. 2[wt%] アルギン酸水溶液 100[ml] と着色済み万能油 100[ml] をそれぞれチューブポンプにセットする. 吐き出し速度を調製し, 万能油がアルギン酸水溶液で包まれるように設定する. (図 5.5)
5. チューブポンプからアルギン酸水溶液と着色済み万能油を流し, 10[wt%] カルシウム水溶液 (200[ml]) に滴下する
6. 15 分以上待つ
7. 網杓子を用いてカプセルを取出し水に移す
8. 水に浮いたカプセルを取出し, 保存容器に入れる
9. 乾燥しないように保存溶液に純水を注水する

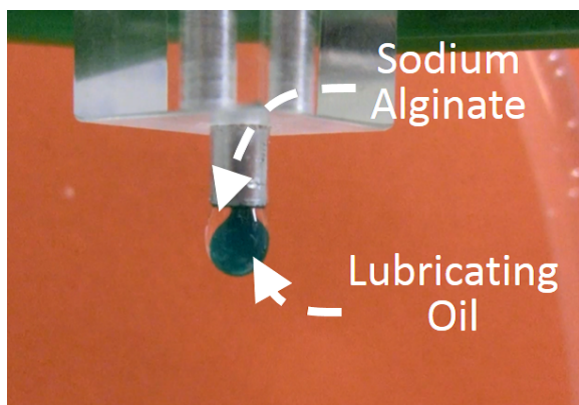


図 5.5 Closeup of double nozzle

5.2.4.2 運搬用管路およびポンプ

運搬用管路およびポンプを以下に示す。運搬用管路は内径 15mm, 外径 20mm のシリコンチューブ (モノタロウ製) を用いた。ポンプは遠心ポンプを用いた。ポンプ部分は株式会社工進のポンスター (PSK-540X) を利用し, 動力部分はパナソニックの可変速タイプユニットモータ (MUSN990GL) を組み合わせた (図 5.7)。

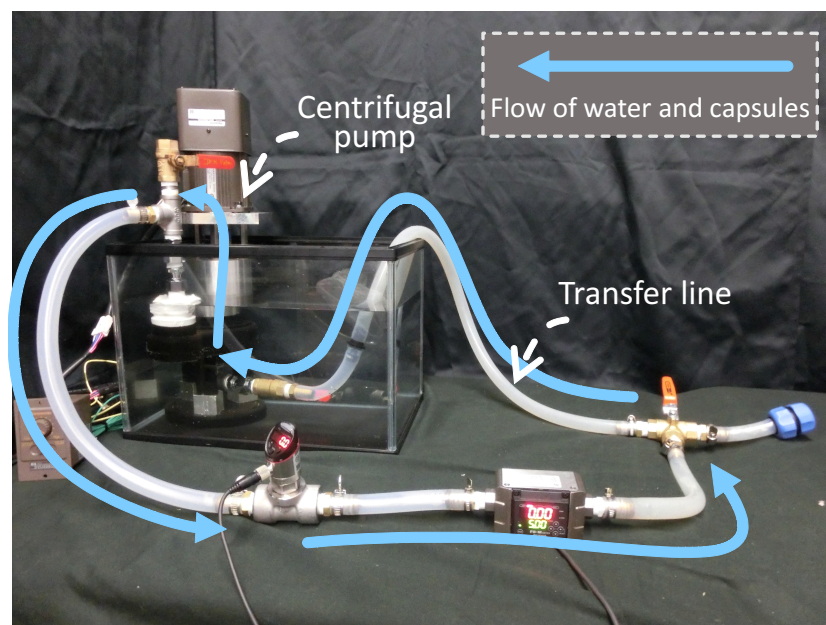


図 5.6 Circulation system overview



図 5.7 Developed pump

5.2.4.3 カプセル分離機構

輸送液からカプセルの分離はフィルタを用いて行う。フィルタには複数の穴が開いており、穴径以上のカプセルはせき止め、それ未満のカプセルおよび輸送液は透過する。粒径が一定の範囲内にあるカプセルのみを取り出すため、分離機構はフィルタを2つ直列に設けた形で構成した(図 5.8)。これにより第1フィルタ径未満、第2フィルタ径以上のカプセルを取得する。以下に模式図を示す。

以下に実際に製作したカプセル分離機構を示す。

カプセル分離機構は前分離機構 (Predivider) と後分離機構 (Postdivider) により構成される。第1フィルタは Predivider にあり、第2フィルタは Postdivider にある。それぞれの機構について述べる。

5.2.4.4 前分離機構 (Predivider)

Predivider は図 5.9 における、第1フィルタの役割を果たす。運搬路に続く管路と取得部へ続く管路を有する Y 字型の構造となっている(図 5.11)。これにより、フィルタ径以上のカプセルは取得部へ行かずに運搬路を流れていく。

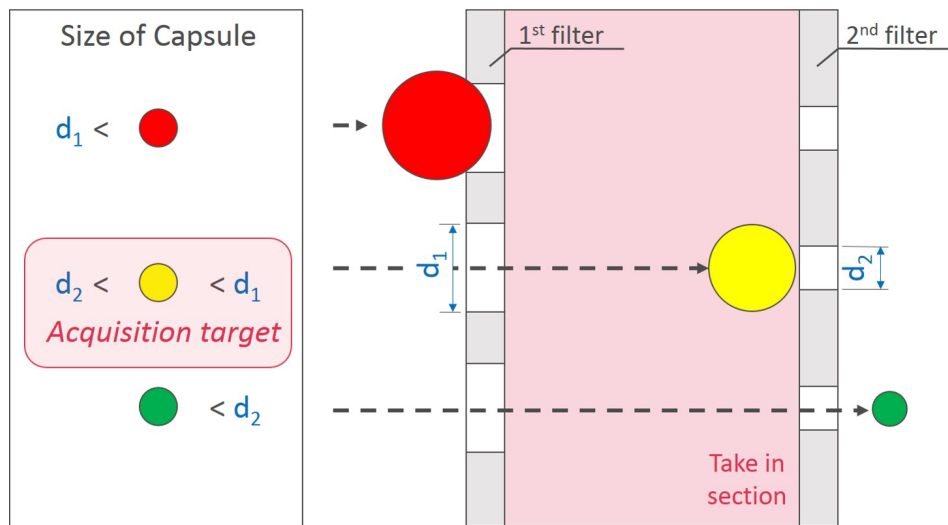


図 5.8 Schematic diagram of capsule divider

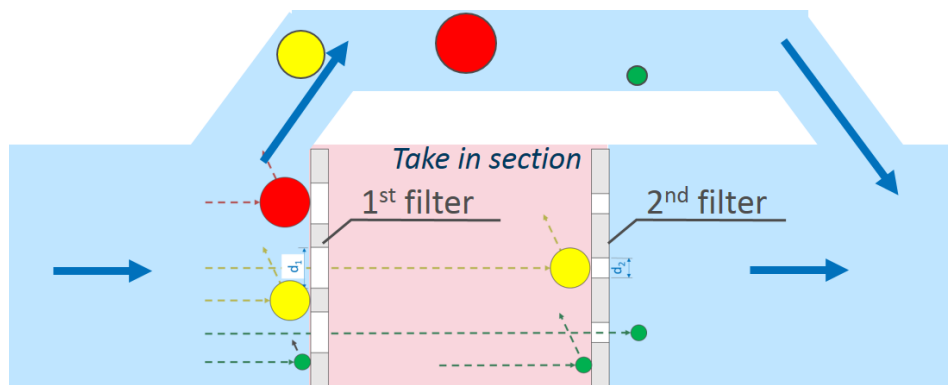


図 5.9 Schematic diagram of capsule divider in a tube

5.2.4.5 後分離機構 (Postdivider)

Postdivider は図 5.9 における、第 2 フィルタの役割を果たす。入口とフィルタ穴が垂直になっており、流入したキャリア流体には出口に行く流れ (奥方向) と周囲に沿って回転する流れ (水色の矢印) が生じる。フィルタ径未満のカプセルはフィルタを通り抜けて出口へ向かうが、フィルタ径以上のカプセルは手前部位で回転を続ける。これにより目的とする粒径のカプセルのみを Postdivider 内に留まらせ続ける。

しかしながら、運搬路に対象カプセル未満のカプセルが存在していた場合、出て行くものと入ってくるものがあるため、Postdivider 内に取得対象のカプセルとそれ未満の大き

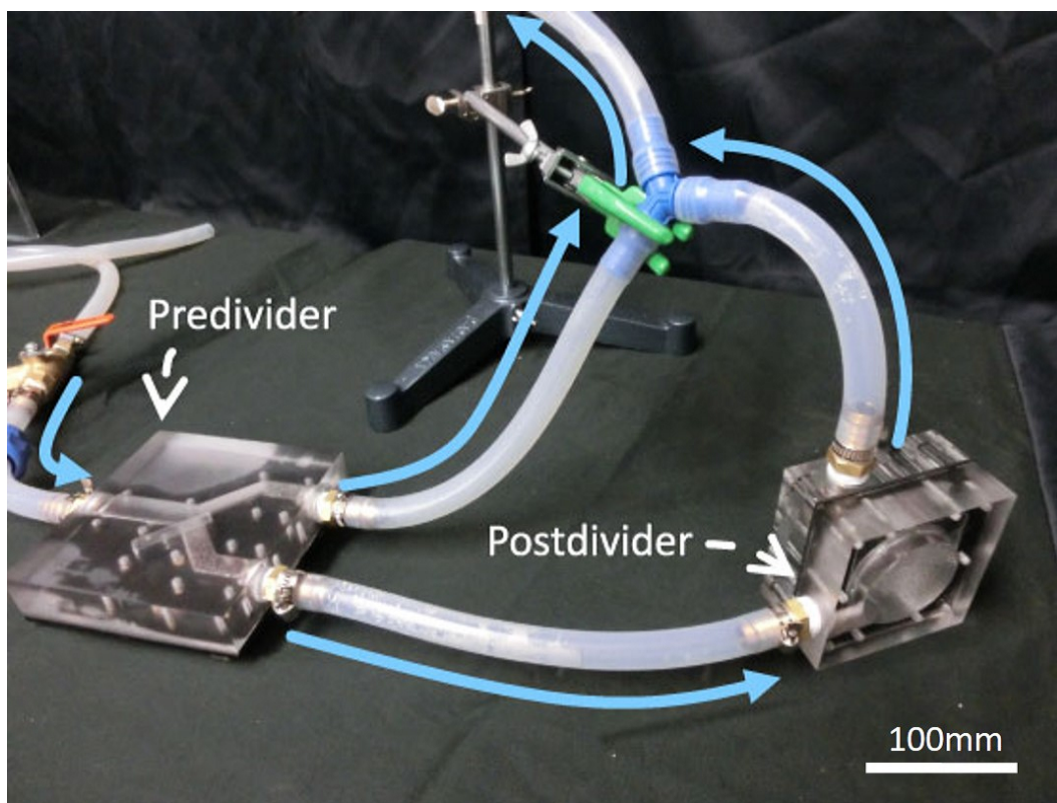


図 5.10 Capsule divider overview

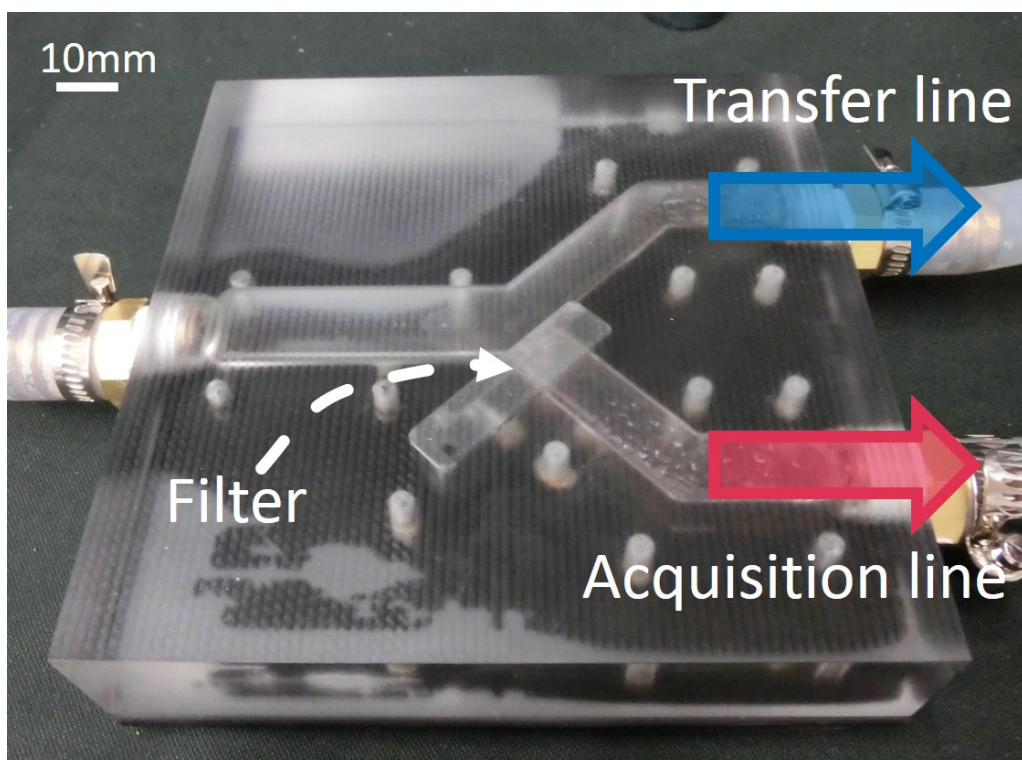


図 5.11 Predivider

さのカプセルが混在してしまう。したがって、目的とするカプセルを取得するときは入口からキャリア流体のみを流し、非対象カプセルを Postdivider から追い出す必要がある。

以上をまとめると、運用時は以下 2 フェーズで運用する。

- 取得フェーズ： カプセルを取り込み、対象カプセルの個数を増やす
- 排出フェーズ： キャリア流体のみを取り込み、非対象カプセルの個数を減らす。

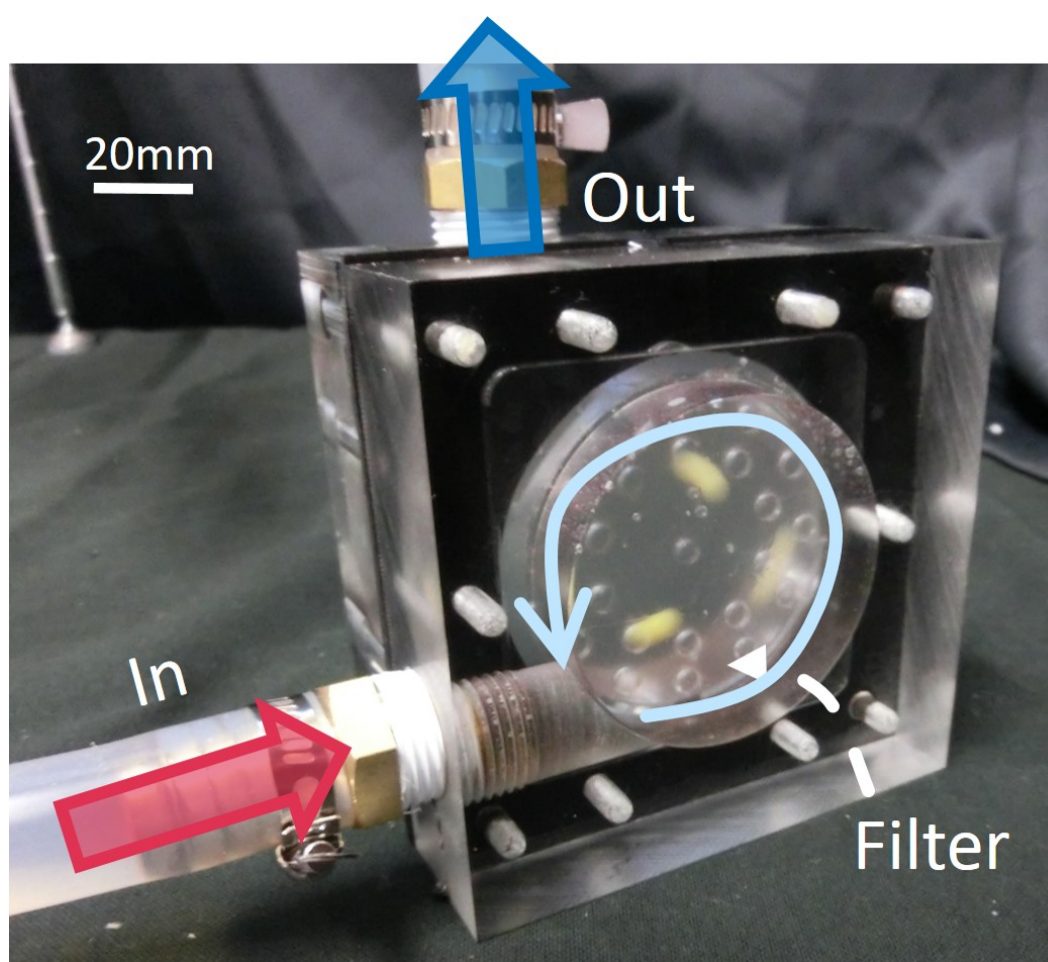


図 5.12 Postdivider

5.2.5 実験結果

5.2.5.1 運搬性能評価

図 5.13 に流速を変化させたときのカプセル残存数を示す。流れが速いとカプセルの破損率が増加することを確認した。

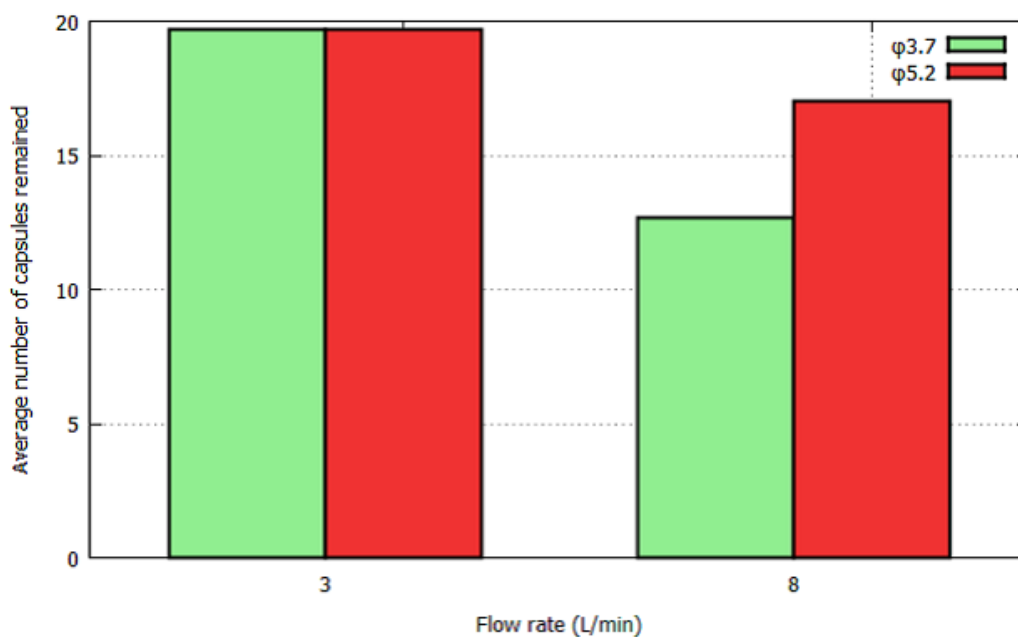


図 5.13 Flow rate vs. the average number of capsules remained after circulation

5.2.5.2 分離性能評価

取得フェーズおよび排出フェーズにおけるポリエチレン球の個数をそれぞれ図 5.14 と図 5.15 に示す。黄球 (中球) が取得対象, 赤球 (大球) および青球 (小球) が非取得対象である。

両フェーズにおいて, 取得対象よりも大きい赤球は Predivider にてはじかれているため, Postdivider 中の個数は 0 であった。

取得フェーズでは取得対象である黄球の個数は単調増加しており 4 分 30 秒 経過時点で管路中に投入した全ての黄球を回収した。非取得対象である青球の個数は増減を繰り返していた。

排出フェーズでは取得対象である黄球の個数は不変であった。一方青球の個数は単調減少し, 45 秒経過後に Postdivider 中の青球の個数は 0 となった。

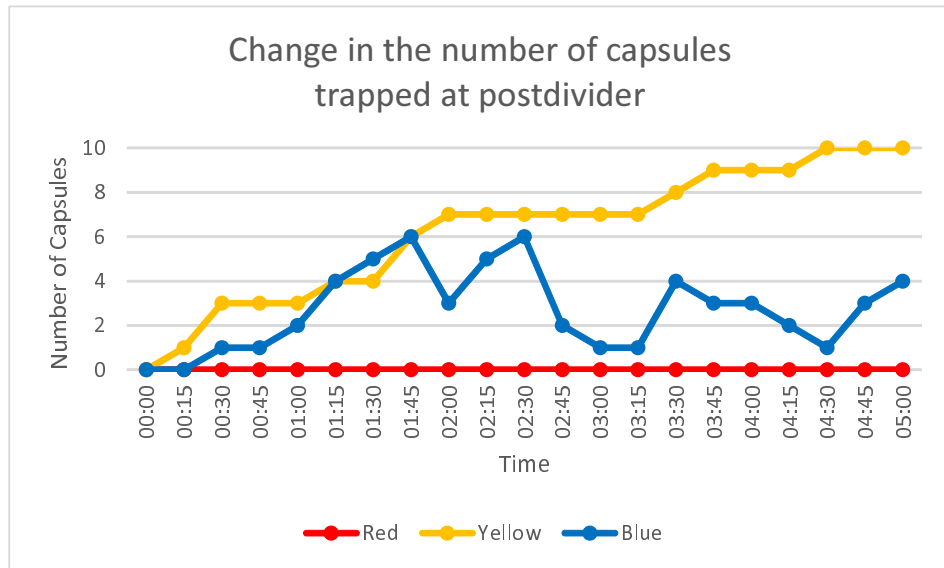


図 5.14 Change in the number of capsules trapped at postdivider in collection time

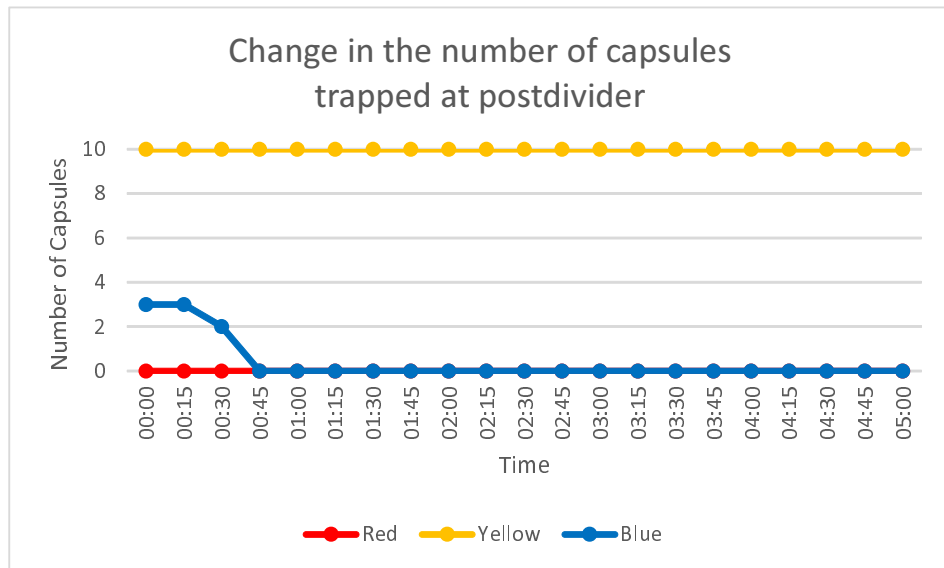


図 5.15 Change in the number of capsules trapped at postdivider in discharge time

5.2.6 考察

5.2.6.1 運搬性能評価

運搬機能評価では流量が大きいほどカプセルの残存率が低くなった。

これは二つの要因が考えられる。圧力と移動距離の増加である。今回は輸送液の循環に遠心ポンプを用いたため流量を増加させる際はポンプ出力を上げ、圧力を高める必要があ

る。そのため流路中のカプセルにより大きな圧力がかかり、カプセル破損率の増加に繋がったと考えられる。またポンプ稼働時間がいずれの流量でも等しいため、流量の増加に伴いカプセルの移動距離も増加している。そのためカプセルが壁面などにぶつかり破損率が上がってしまったことが考えられる。

5.2.6.2 分離性能評価

分離性能評価により取得対象を選択的に分離機構で取り出すことができることを確認した。赤球は Predivider のフィルタ径よりも大きいため Postdivider には全く進入しなかった。黄球は Predivider のフィルタ径よりも小さく Postdivider のフィルタ径よりも大きい。そのため取得部に進入するが出て行かないので Postdivider における個数は単調増加した。一方青球はいずれのフィルタ径よりも小さいため、Postdivider に入って出て行く。そのため結果に示すように増加と減少を繰り返した。

Postdivider におけるポリエチレン球個数であるが、小さい球のほうがフィルタを通過しやすいため変動が大きかった。また、黄球に関しては Postdivider での取得個数が増加するにつれ、増加率が下がる傾向があった。これは、運搬路中の黄球の総数が減り、エチレン球が取得部に向かう確率が下がっていくためである。

5.3 カプセルの取得量を変更する手法

5.3.1 分離機構の問題

この人工循環器システムはロボットの体内の物質を必要とする各部位に上述の分離機構を設け、分離機構によって循環路からそれぞれに適切な量の物質を取得することを想定している。分離機構はその部位の必要とする物質のみを循環路から取り出しそれ以外の物質は弾くことが出来る。しかしながら、ロボットの中の全ての部位がそれぞれ異なる種類の物質を必要とする訳ではなく、機能・目的が同じ部位が複数あればそれらが必要とする物質は同種である。よって、複数の分離機構で同種の物質(カプセル)を取得できる必要がある。例えば図 5.16 のように部位 A~H に物質を供給するシステムを考える。物質はロボットの摂取部(図では管路最上部)から循環路に入り、流れの方向(図では黒矢印)に運ばれていく。部位 A・C・E・H は同じ機能を持つ部位であり黄色の物質を必要とする。

ここで、分離機構の取得率、つまり「分離機構の分岐前の管路を通過したカプセル数に対する分離機構の取得路側に入ったカプセル数の比率」が全ての分離機構で同一であったと仮定すると、循環路に入ったカプセルは、流れ方向において近い位置の分離機構に比べ、遠い位置の分離機構は「分離機構の分岐前の管路を通過したカプセル数」が減るため取得量が少なくなることになる。例えば図 5.16 の部位 A・C・E・H の取得率が 50 % とすると 80 個のカプセル分の物質を摂取した時、部位 A では 40 個のカプセルを取得できるが、部位 H では 5 個しか取得できないことになる (図 5.17)。これではロボットの全体に適切に物質を供給することが出来ない。

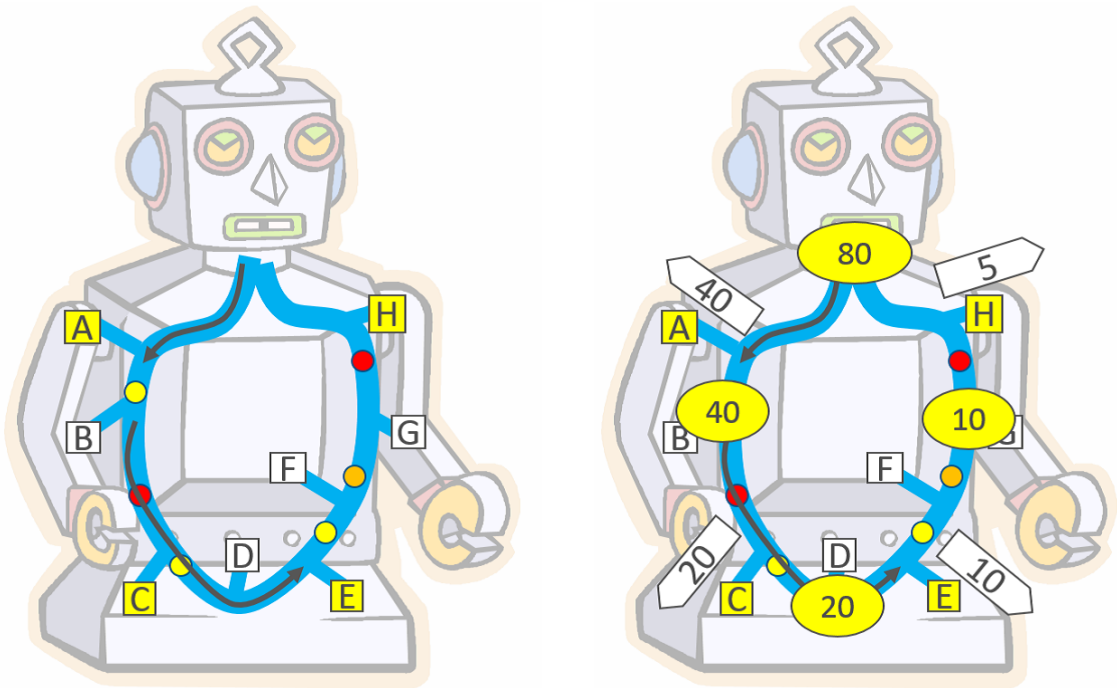


図 5.16 Circulation path in robot's body 図 5.17 Material distribution problem

また、例えば先程の部位 A・C・E・H が破損が生じた際修復材を用いて自己修復を行うといった機能を持つ場合では、その部位の平常時と破損時の自己修復材の必要量が大きく異なる。よって、分離機構の取得率が常に一定であったと仮定すると、部位 H が自己修復を行う必要が出てきたとき部位 A・C・E が不必要に修復材を取得してしまい、部位 H に必要量の修復材を取得させるために循環路に大量の修復材を入れ続けなければならない。これも適切な物質の供給が出来ているとは呼べない。

以上より、この人工循環器システムの分離機構は適切な量を取得するために取得率を変

えることが出来なければならない。

5.3.2 提案手法

取得率を調整するという事はすなわち分離機構の取得路に入るカプセル数の割合を調整するという事である。そこで、本研究では、取得路に入る輸送液の流れを調整することでその輸送液で運搬されるカプセルの動きも影響を受けるため、取得路の流量比によって取得率が調整できると仮定した。この流量比とは「本路流量に対する取得路流量の比率」の事である。つまり、取得路の流量比が小さい時は取得路に入るカプセル数も少なく、流量比が大きい時は取得路に入るカプセル数も多くなると考えた(図 5.18)。本提案が有効かどうか確かめるため、次章で述べる実験を行った。

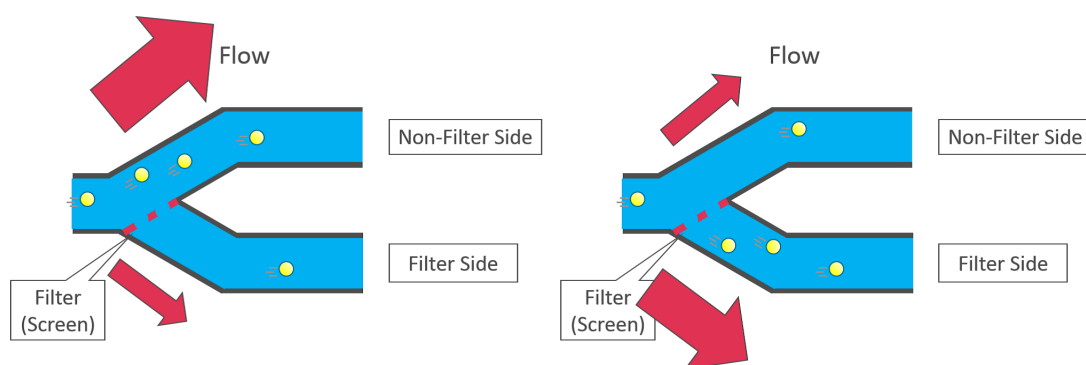


図 5.18 Changes in the amount of capsule transportation due to flow rate changes

5.3.3 実験

製作した分離機構の取得路の本路に対する流量比がカプセルの取得量にどのように影響するかを、実際にカプセルを流すことで調査した。

実験は以下のように行った。

1. 実験装置の管路に呼び水を行う。ポンプ・分離機構を傾けたりして出来るだけ空気を抜く
2. ポンプを回し流量計が現在の流量が表示できているか、安定しているか確認する
3. 本路の流量計が 5L/min 程度となるようにスピードコントローラを調整する

4. 各分岐路出口の高さを変え、圧力差を生じさせることで取得路の流量比を変更する。この時、本路流量が 5L/min 程度を保つよう随時スピードコントローラを調整する
5. 出口の先にそれぞれ網を取り付けてあることを確認し流路の入口から 100 個のカプセルを投入する
6. しばらくポンプを回し続け、網に全てのカプセルが回収されたら白トレーにカプセルをあける
7. トレーのカプセルの写真を撮り、ImageJ を用いてカプセル数をカウントし取得率を求める (図 5.19)
8. 3 回 5.~7. を行い、平均値および標準偏差を計算する
9. 流量比条件を変え、4. に戻り再び行う

今回は流量比は 20,40,60,80 % の 4 種類の条件で行った。



図 5.19 Capsules measurement by ImageJ

5.3.3.1 実験装置

今回作成した実験装置はポンプ、流量計、分離機構をそれぞれ内径Φ 15 のチューブにて直列に繋げたものである (図 5.20)。ポンプにより水槽内の水を管路に送り、分離機構を通して水槽上部にある分岐路の出口から水槽へ水を吐き出す仕組みとなっている。流量計は分離機構に入る前 (本路) の部分と分離機構の取得路側の部分にそれぞれ繋げている。分岐路出口にはカプセル回収のためにカプセルの径よりも十分に小さいメッシュの網が取り付けられている。また、分岐路出口のチューブは両開クランプにより固定してあり、クラン

プの位置を調整することによりそれぞれの路の出口の高低を変更できるようになっている (図 5.21).

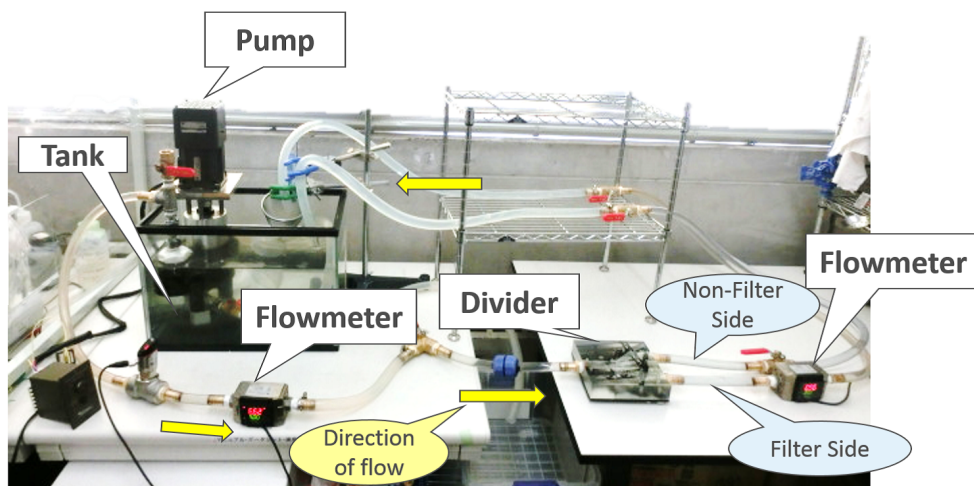


図 5.20 Overall view of experimental device



図 5.21 Branch exit

- ポンプ

ポンプは KOSHIN 製簡易汚物用水中ポンプ ポンスター PSK-53210 を用いた.

このポンプは直径 10mm までの粒径物が通過可能な構造をしているため、その径までのカプセルをポンプ内に流すことが出来る。実際に今回使用するカプセルを流したところ、インペラ部分に詰まったり破壊されることなく循環させることが出来た。ただし、製品購入時にポンプに使われていた誘導モータでは流量のコントロールが上手くいかなかったため、誘導モータを外し代わりに Panasonic 製可変速タイプユニットモータ MUSN990GL をオルダム形カップリングで接続して用いた。このユニットにはワンタッチ接続のスピードコントローラがついており、速度設定が容易に行うことが可能である。このモータにてポンプを駆動させたところ、本実験装置では最大 7L/min 程度の流量を出力することが確認出来た。

- 流量計

管路に接続する流量計もカプセルに影響のない構造でなければならない。そのため、カプセルを破損する可能性が高い羽根車式や計測部管径が狭いコリオリ式の流量計は使用できない。そこで、流量計にはキーエンス製電磁式流量センサ FDM5AY を使用した。この流量計の接続部は完全貫通構造であるため通常の管と同様に扱うことが可能である。接続口径は Rc3/8, 定格流量範囲は 0.25~5L/min(表示可能範囲は 0.15~10L/min) であり、今回は表示分解能は 0.01L/min, 応答時間は 0.5s とした。

- フィルタ

本実験では分離機構内のフィルタにはΦ 5.5mm の円孔を 6 箇所開けたものを使用する (図 5.22)。

- カプセル

本実験では緑色に着色した潤滑油を閉じ込めたカプセルを用いることとした。分離機構は径の大きさにカプセルを選択するための装置であるが、今回は取得率を見えるためフィルタ径未満のカプセルのみを使うこととする。

カプセルの写真から画像処理ソフトウェア ImageJ を利用して粒径を計測し使うカプセルがフィルタ径未満であるか確認した。計測した結果、粒径の平均は 4.71mm であり、標準偏差は 0.16mm であった。これより、上述のフィルタ径 (Φ 5.5mm) よりもカプセルが小さくフィルタを通過可能であることが分かる。

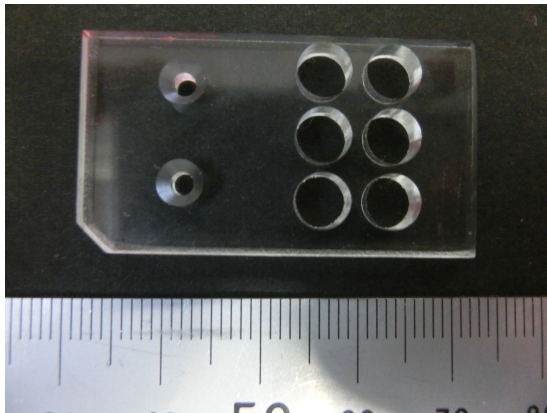


図 5.22 Filter (pore diameter is 5.5 [mm])

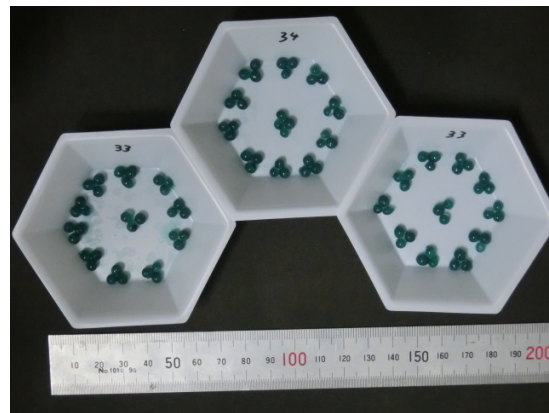


図 5.23 Capsules

5.3.4 実験結果

流量比と取得率の関係を図 5.24 に示す。なお、取得率とは「分離機構の分岐前の本路を通過したカプセル数に対する分離機構の取得路側に入ったカプセル数の比率」のことであり、流量比とは「本路流量に対する取得路流量の比率」のことである。この図より、取得率は流量比の増加に従い増加する単調増加の傾向があることが分かる。また、この関係は比例関係となっている訳ではなく、20%および40%では殆どカプセルを取得出来ていないことが確認できる。そして、3回ずつ同流量比条件で実験を行ったが、各流量比での取得率の標準偏差(ばらつき)は殆どなかった。よって、今回の条件で流量比を変化させれば取得率を調整することは可能であることが分かる。

5.3.5 考察

取得率の調整は可能であったが、結果の図 5.24 は、40%以下では取得量が非常に低く、60%から取得率が20%程度に達することを考えると、平常動作時にも一定量の物質供給が必要な部位が存在する人工循環器システムでは常に取得路の流量比を高くする必要がある、ということになる。これでは流量比の調整をして取得量調整をするにも流量比の調整可能幅が狭まってしまい安定なシステムとして実現しづらい、また、複数物質を流すことを考えると取得対象以外の物質は全て運搬路に流れることが決まっていることから無駄が多いようにも感じ取れる。よって、流量比と取得率の関係を今回の結果より改善、具体的

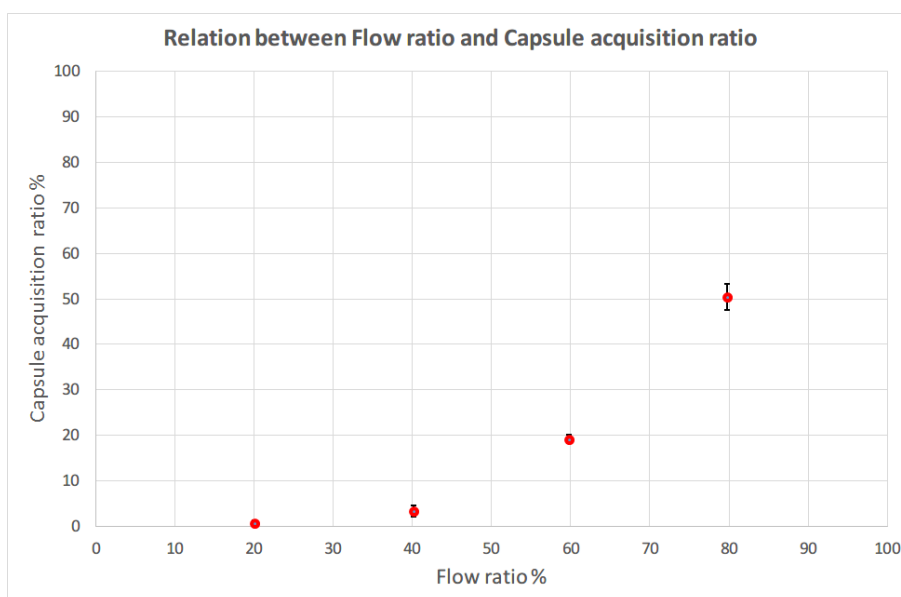


図 5.24 Relationship between flow ratio and acquisition rate

には低流量比でもある程度の取得率となり，更に言えばより比例関係のような扱いやすいものとするにはどうすべきかを考察する。

各流量比条件での分離機構部分のカプセルの流れの様子を撮影した．20 %および 40 %の流量比条件での分離機構での分離の様子を観察したところ図 5.25 のようにフィルタに衝突しないで運搬路に入るカプセルが多数生じていたのを確認した．分離機構はフィルタにカプセルを衝突させ穴に入ったカプセルを通過させる構造なので，フィルタにカプセルをある程度衝突させることが重要である．よって，この直接運搬路に向かう流れの量が多いことが取得量が非常に低い原因であると考えられる。

よって，改善のためにはこの直接向かう流れの量を調整することも分離機構では必要であることが分かる．今回の出口圧力による流量比調整だけではなく他の調整も検討する必要があることが分かる．考えられる対策として，分離機構の構造 (例えば分岐路の形・フィルタの位置) を変え衝突しやすくする，本路の流速を上げる，両分岐路の流速比の調整を行なうといったことが有効である可能性がある。

5.4 吸着剤のカプセル化による老廃物除去

カプセルとフィルタの技術を応用して，循環液中から老廃物を取り除く機構を構築した。

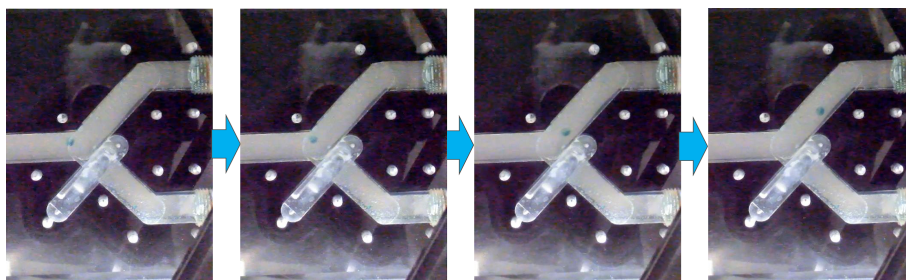


図 5.25 Capsule flow entering the transportation path without colliding with the filter (20% flow rate ratio)

5.4.1 提案手法

吸着剤を含有したカプセルに老廃物を吸着し、フィルタ部で回収する手法を提案する。吸着剤をカプセル化することによりフィルタでの回収を容易にし、カプセルに含有する吸着剤を変更することにより様々な物質を吸着することが可能となる。老廃物の除去のプロセスとしては、まずカプセルに老廃物を吸着することで老廃物を溶液中からカプセルに取り込む。その後、そのカプセルをフィルタ部でトラップすることで排出を容易にする。本研究では、提案手法の実現のために、(1) 老廃物をカプセルに吸着可能であるかの確認、(2) カプセルをフィルタを用いてトラップし続けることが可能かの確認を行った。

5.4.2 実験

活性炭を吸着剤として含むアルギン酸塩カプセルを作製した (図 5.26)。まず、純水 (51g) にアルギン酸ナトリウム (0.56g) を加え水に溶解するまで攪拌し、活性炭 (TAIKO S タイプ、フタムラ) 2.0g を添加した。この溶液を 2wt%CaCl 溶液に滴下し、30 分間浸漬した。それらを溶液から取り出した後、10wt%CaCl 溶液に浸漬した。このプロセスにより、活性炭を含有したカプセルを得た。

その後、循環系を構築した (図 5.27)。循環系に水 (約 1200ml) を充填し、除去対象として食品着色料 (0.16g) を加えた。フィルターには、カプセルのトラップのために Postdivider を使用した。活性炭 (11.7g) を投入口から循環系に投入した後、ポンプを駆動した。3 日間駆動し続け、溶液を 24 時間毎にサンプリングした。サンプリングした溶

液の紫外可視吸収スペクトル（V-630, JASCO）を測定することで、老廃物が除去されているかを確認した。

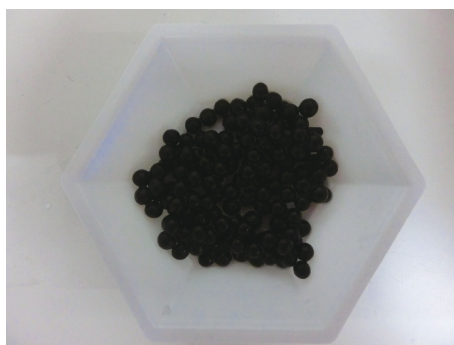


図 5.26 Alginate capsule including absorbents

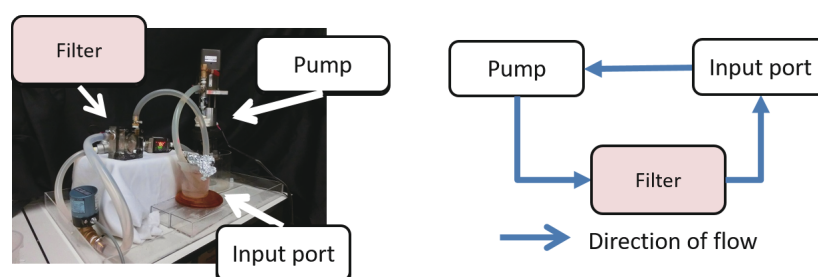


図 5.27 Overview of experiment

5.4.3 実験結果

カプセルはフィルターが詰まることなく、フィルター部に3日の間トラップされ続けた（図 5.28）。また、図 5.29 に紫外可視吸光吸収スペクトルを示す。初期状態（0時間）の時と比較すると72時間後には520[nm]付近のピークが小さくなっていることが確認できる。この結果から、本システムは液体から除去対象を除去できたことがわかる。

5.4.4 考察

今回は活性炭を用いて、溶液中の食紅を取り除く実験を行った。カプセルは旋回流によって目詰まりすることなく、トラップされ続けた。一方で、旋回流フィルタに使用しているフィルタの孔数が少ないと、配管抵抗が大きくなり目詰まりを起こす現象が見られ

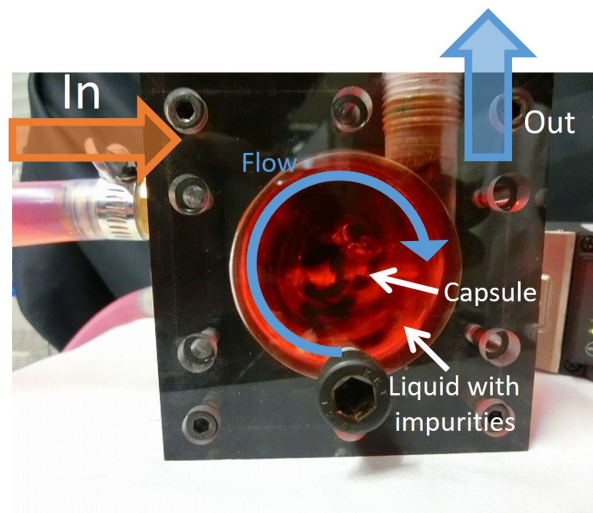


図 5.28 Capsules trapped in filter part

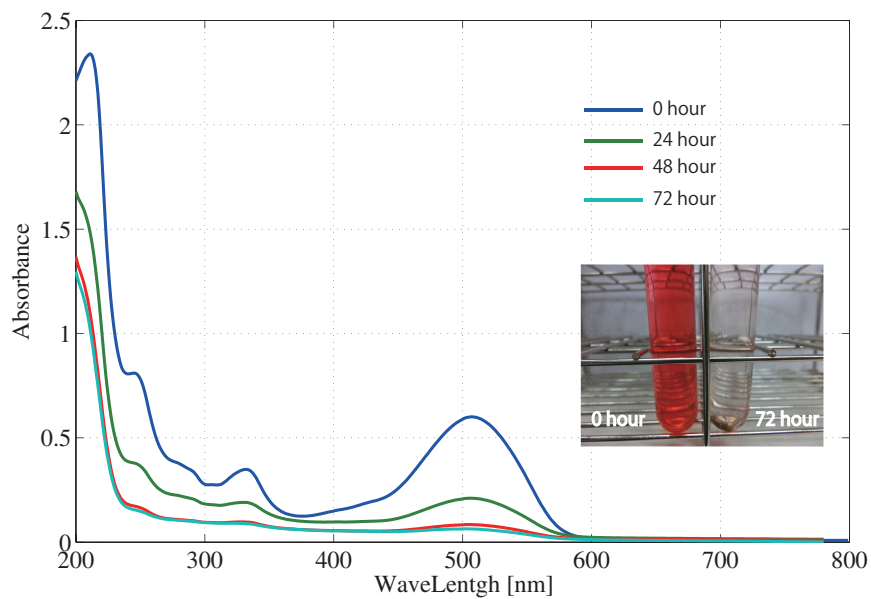


図 5.29 Result for removing impurities experiment

た。一度目詰まりを起こすと、配管抵抗がさらに大きくなり流量が落ち、旋回流が生まれない現象もみられた。旋回流フィルタでカプセル化した物質をトラップする際は、カプセルの大きさに応じて適切な孔径のフィルタを選定する必要があると考えられる。今後は、循環系に流れているシステムを不安定にする物質をターゲットとして吸着剤を選定する。

5.5 生物とのアナロジーに関して

血液循環系の役割として、栄養素や酸素を身体のいたるところにある細胞に万遍なく供給することがある[73]。また、例えば走っているときは足の筋肉に栄養素や酸素が多く必要になるので、優先的に足にそれらの物質を供給できるように血管径を調節する機構も有している。本研究で扱った物質を選択的にトラップする技術と流量を調節することは、生物における循環系から運ばれてきた物質を選択的に取り込むことと、流量調節を工学的に実現したものであると考える。また、溶液中の不純物除去に関しても、生物においては白血球やリンパ球などの免疫系が担っているものを、本研究で吸着剤を内包したカプセルにより実現した。吸着剤の種類を変えることで除去対象を変更できるため、抗原（標的）によって作用させる細胞や分子を変更している生物の免疫系と同様のことができる可能性がある。

5.6 5章のまとめ

本章では、循環系を構築する上で必要になると考えられる技術の構築を行った。カプセルによる運搬に関しては、流速を過度に上げなければ本提案手法のアルギン酸カプセルにオイルなどの物質を内包させ、運搬できることを確認した。また、フィルタシステムを用いることで、大きさによる選別が可能となり、任意の大きさのカプセルをトラップ可能であることを確認した。老廃物の吸着実験では、循環系中に濾過用のカプセルとそれをトラップするフィルタシステムを配置することで、循環系の流体中から老廃物を取り除くことができることを確認した。

第6章

結言

6.1 本研究の成果

本研究では、「自己修復機能」「自己維持機能」「自己充足機能」を統一的に実現するために、生物の循環系に着想を得たシステムの構築を行った。自己修復機能に関しては、循環系による導線、センサ、摺動部、構造部材、アクチュエータの修復技術の開発を行った。自己維持機能に関しては、循環系中での物質の運搬技術や老廃物除去技術の開発を行った。以下に本研究で得られた成果を示す。

第1章では、生物の自己保存の機能と、自己保存の機能に関連する機械システムに関する従来研究の整理を行い、統一的な自己保存の機能を機械システムで実現しようとしている研究はないことを指摘した。

第2章では、電気系部品（導線やセンサなどの）や機械系部品（ベアリングや構造部材など）の要素技術に関して、自己修復および自己維持機能に関わる研究・技術に関してまとめた。これらの要素技術の研究もまた統一的に自己修復や自己維持を実現しようとしたものではないことや、これらの手法が抱える問題点である再修復が不可能である点や人の手による接触が必要な点を指摘した。そして、生物の血液循環系がそれらの機能を統一的に実現していることを述べ、機械システムにおいて自己保存の機能を実現するためには循環系に着目した新しいアプローチが必要であることを述べた。

第3章では循環系を用いた電気系部品の修復に着目し、磁界を設計し強磁性体を配列させる手法を利用して、修復する導線である MPW と修復するセンサである MPS の開発を行い、その評価を行った。MPW に関しては、提案した断線状態から導電率が回復するこ

とを確認した。MPS に関しては、変位に応じて抵抗が変化することを確認し、また修復実験により導電率が回復することを確認した。

第4章では循環系を用いた機械系部品の修復に着目し、摺動部に生じる摩耗を修復する手法と構造部材の損傷を修復する手法の構築を行った。摩耗の修復では、触媒反応を利用して摩耗箇所を充填する手法の構築と、電解析出により摩耗箇所を充填する手法の開発を行った。触媒反応を利用した手法では、今回のターゲットであった腱駆動用の腱（ダイニーマ）の耐摩耗性を向上させることができたが、形成した膜をはがす実験（再修復実験）を行った際に2~3回しか膜が再形成されなかったことから、現在のところ修復回数に上限があることも確認した。

第5章ではシステム維持に必要な技術に着目し、循環系を構築する上で必要になると考えられる技術の構築を行った。カプセルによる運搬に関しては、本提案手法のアルギン酸カプセルにオイルなどの物質を内包させ、運搬できることを確認した。また、フィルタシステムを用いることで、大きさによる選別が可能となり、任意の大きさのカプセルをトラップ可能であることを確認した。老廃物の吸着実験では、循環系中に濾過用のカプセルとそれをトラップするフィルタシステムを配置することで、循環系の流体中から老廃物を取り除くことができることを確認した。

また、本研究で行った修復手法に関しては、生命の修復機構とのアナロジーが見られる。本研究では、循環系から物質（金属粉、イオン、液体樹脂）を供給した後に、磁場、電場、触媒反応を用いて物質に機能（導線、センサ、膜、関節表面、構造部材）を付与する手法を構築した。一方、生物は細胞が損傷した際に、アミノ酸などの栄養素を細胞が取り込み失われた細胞に分化させる。最初は何の機能も持たない材料（アミノ酸や金属粉など）を機能を持った要素に変換するという点においてアナロジーがあると考えられる。また、MPW や MPS で行った修復手法は、生命のモルフォゲンによる発生・再生機構を模している。生物はモルフォゲンの濃度場を制御することにより形態を制御しているという定説 [74, 75] があり、本提案の手法は磁場の制御により形態を制御しているという点で類似している。

6.2 人工循環器システムに関する今後の展望

現在開発した要素技術でトータルのシステムを考えると図 6.1 のようなシステムになると考えられる（図 6.2 は拡大図）。各要素部品は，循環系に接するように配置され，物質供給を受けることで修復や潤滑，冷却などを行うことが可能となる。全体を皮膚で覆うことで循環系のシールを行う予定であるので，要素技術としてまだ開発していない皮膚の修復機構の開発を行う。また，統一的な自己保存の機能の実現が目的であるので，要素技術どうしが干渉する（循環系中で反応してしまうなどの不具合が生じる）ようであれば，全体設計を考慮して要素技術に関しても仕様を変更していく。最終的には，人工循環器システムによる自己保存の機能を実現することで，機械システムおよびインフラの長寿命化や人間や動物のモデルの構築を行う。

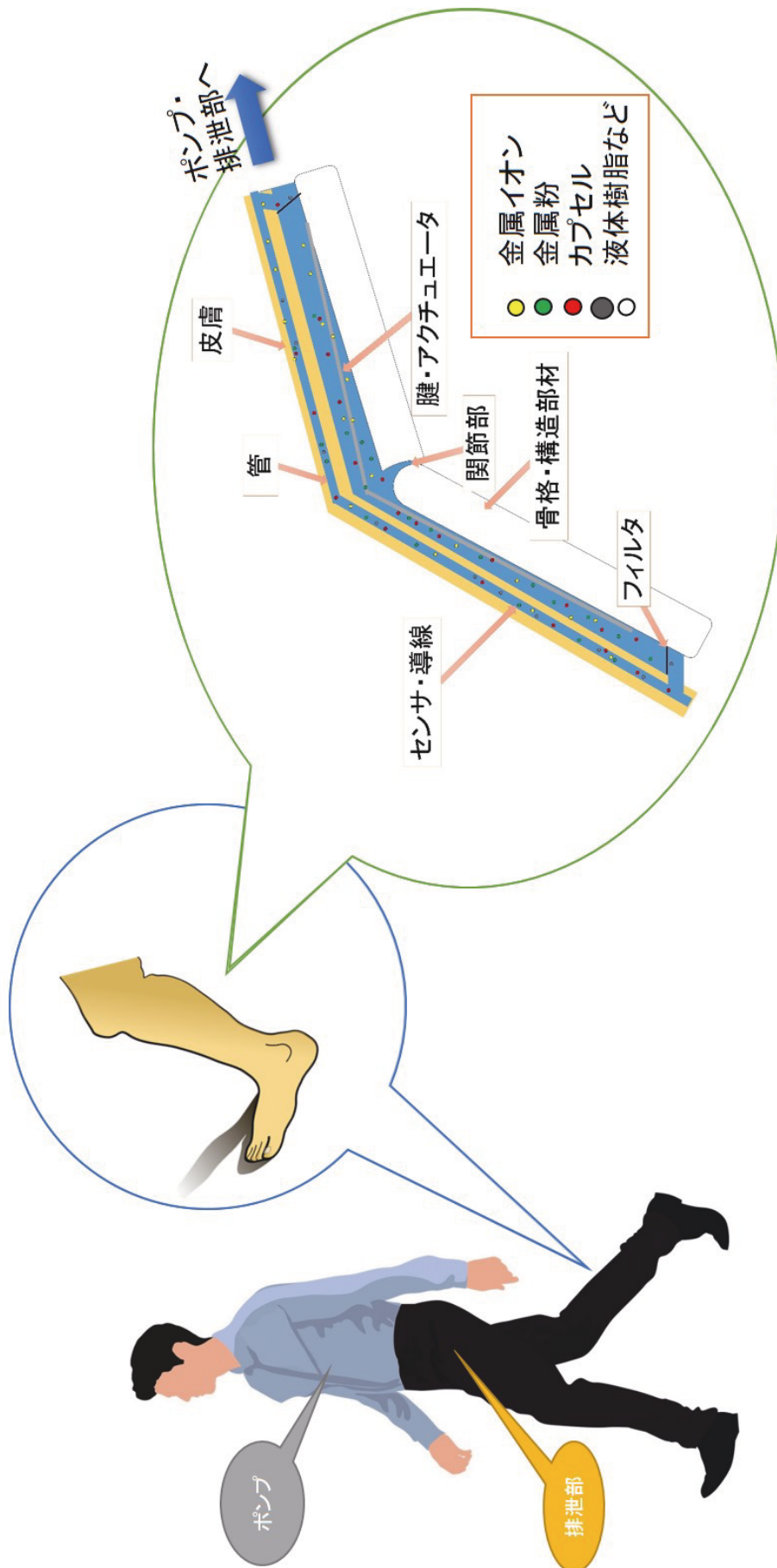


図 6.1 Total system

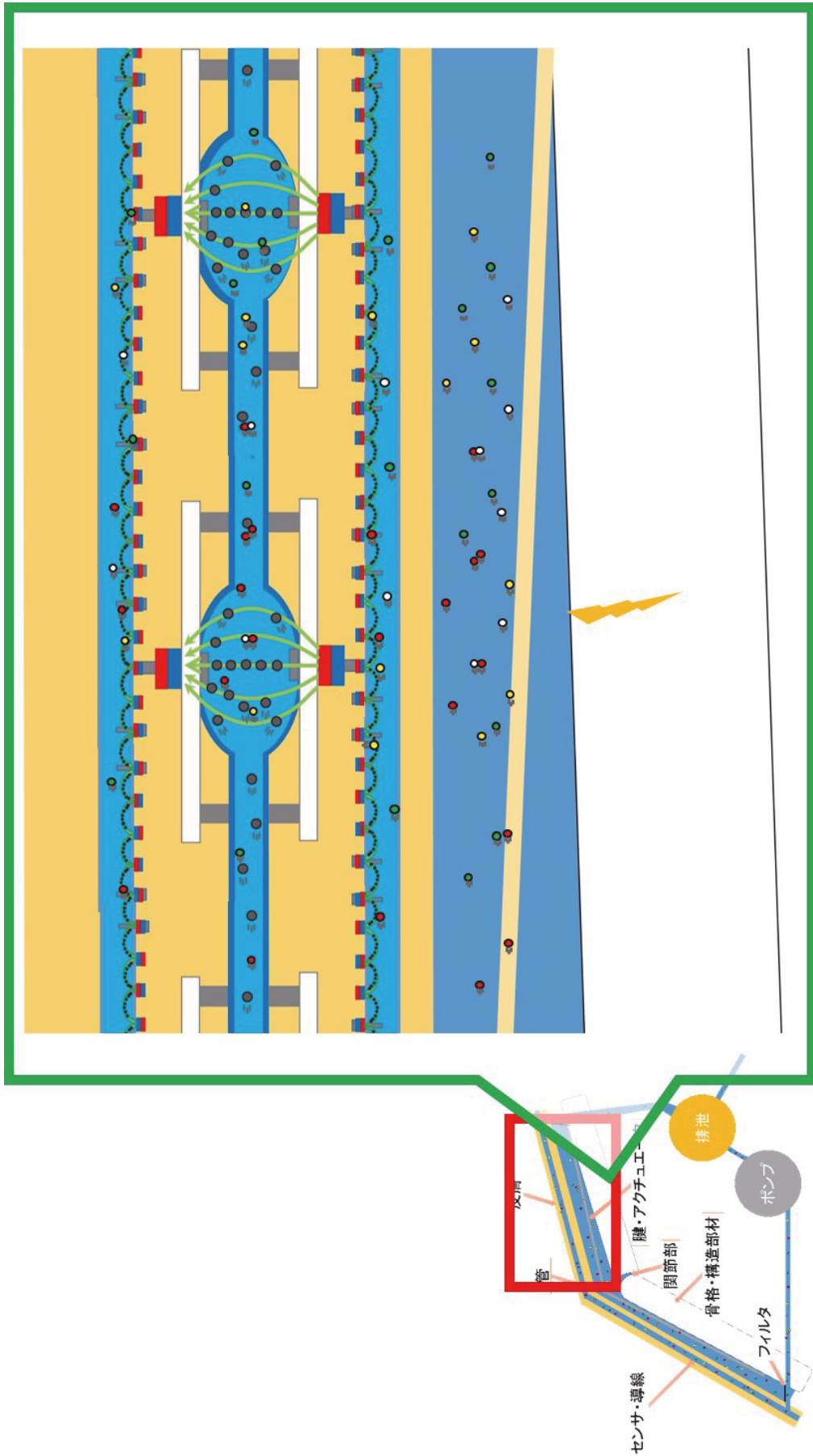


図 6.2 Total system detail

6.3 要素技術に関する今後の研究展開

1. 自己修復機能に関して

- 血液を模した修復機構

生物の血液による治癒のメカニズムでは、凝固・線溶のメカニズムが関わる。凝固に関しては血管が傷ついた際に、血小板が刺激（ずり応力や血小板活性因子）を受け、凝集したところにフィブリンが絡みつくことで起こる。この機構に関しては、刺激応答性高分子を使用することで DDS システムのように修復剤を運搬することにより実現できると考える。将来的には、配管の錆などを pH の変化で感知するなどして選択的に傷を修復する技術の構築を目指す。線溶に関しては、凝固により生じた血栓を溶かす役割があり、血栓による血管の詰まりを防止するためにこの機構が備わっている。この機構は、凝固により生じた余分な箇所を削る作業に相当し、機械でいえば加工の作業にあたると思われる。元の状態に修復するためには、この工程も必要であると考えられるため、線溶系にあたる機構も工学的に実現していく。

- 細胞に似た材料による修復

架橋構造により高強度なハイドロゲルが近年開発されている。ゲルの主成分は水であり、生物の構成材料とのアナロジーが見られる。ゲルは生物特有の柔らかさを備えた材料であり、生物固有の柔らかさの中にある強さと修復機構を再現しうる材料であると考えられる。

- 「場」に基づいた再生・修復機構

ほ乳類などの治癒は主に癒痕によるものであり、機能が完全に回復するというわけではない。例えば、心臓に関していえば、マウスの場合には心臓が傷害を受けた後に線維芽細胞が傷害箇所にて線維細胞を形成してしまうため心臓の機能が低下する。一方で、イモリなどの動物の場合には傷害箇所では心筋細胞が増殖し、心臓の機能が回復する。ヤモリなどの損傷部位の修復は、「再生」であり、再生医療の分野でも着目されている。再生に必要な位置情報を与える因子はモルフォゲンと呼ばれ、濃度場により生物の身体構造を制御しているとされてい

る。この機構を工学的に実現できれば、機械システムや社会インフラの自立的な修復や再生が可能となると考える。現在、本研究で使っている場は構成要素が金属であるため磁場としているが、構成要素を高分子などに変更すれば場を濃度場に拡張することも可能である。細胞を用いずに、場によって構造を制御することは、生物の再生に対する構成論的なアプローチといえ、複雑に相互作用しあう生命現象をモデルとして説明する糸口となると考える。

2. 自己維持機構に関して

- 液体を内包した機械システム

本研究のシステムは液体を機械システム中で循環させることで、システムの修復や維持を行う。液体を流しているため、冷却や潤滑効果が期待できる。ただ、機械システム中（特に関節の多いロボットアームなど）に液体を流すためには、管路の配置や液体のシール手法などを考慮した従来にはない機械の設計が必要になるため、その設計論を構築していく。

- システムの更新技術

自己修復機能は、外的要因（接触や衝撃、振動など）により生じる損傷から復帰するために必要な機能である。一方で、万物は経年や動作による劣化も生じる。損傷したわけではなく劣化した部品の状態を回復させる技術に関しても研究を行う必要がある。

- 循環系を運用するための技術の開発

循環系の運用により生じた老廃物をシステムの外に除去する機構、修復を促進する機構、流体中から選択的に物質を取り出す機構や、触媒反応を円滑にするための pH や温度調節を行う機構等の開発を行っていく。

3. 自己充足機能に関して

- 物質の自己充足

今後のシステムを考えたとき、身体を動かすための物質と身体を修復・維持するための物質はすべて循環系により運ばれることが望ましい。循環系という系を介して、エネルギー供給、修復、維持を統一的に行うことが本研究のシステムの最終的な目的であるからである。つまり、従来の機械のような電気で駆

動するアクチュエータやセンサなどではなく、筋肉や感覚神経細胞（イオンチャンネル）のように ATP などの物質で駆動する素子が必要になると考える。これらの開発により WAMOEBA はエネルギー、修復、維持に必要な物質を摂取することにより、それらを体内で分配して活動し続けることが可能になる。最終的には、すべてのインフラや機械を統一的な規格で自律・自立的に長期的に運用するシステムが構築できると考える。

6.4 システム修復工学の提案

修復・維持機構を大別すると、『自己による修復・維持』、『他者による修復・維持』がある。すべてを自己で修復・維持することが理想であるが、そのようなことが実現できるかは未知である。また、医学の発展により人間の寿命が延びたように、自己修復だけでなく他者による修復や維持（メンテナンス）を考慮することは人工物の長寿命化につながる。

自己による修復・維持に期待されることは、即時的な修復と長期間の機能の維持をスタンドアローンで行うことである。他者による修復・維持に期待されることは、複雑な機構の修復・維持や大きな損傷の修復である。「他者」とは人ではなく、ロボットなどの人工物である。そして、技術のレベルやシステムの種類（環境や複雑さなど）に応じて自己による修復・維持と他者による修復・維持のバランスを考える必要がある。

ここで人工物の分類に植物的システムと動物的系统という概念を導入する (図 6.3)。これは、システムの規模と複雑さ、およびその役割に応じた分類であり、明確な切り分けは存在しない。植物的システムは、規模が大きく、細部の構造が複雑でなく、比較的動きが少ないものである。パイプラインなどのインフラなどは規模が大きく、また大きいが故に細部に複雑な機構を入れることができないので、植物的システムに近い分類がなされる。動物的系统は、規模が小さく、細部の構造が複雑であり、比較的動きが多いものである。ロボットや車などの機械は、規模が小さく、様々な機能や動作を実現するために細部の構造が複雑であるため、動物的系统に近い分類がなされる。

植物的システムに近い分類のシステムは、構造が複雑なものが少なく、規模が大きいため、自己による修復・維持の比率を大きくすることが望ましい。また、動物的系统に近い分類のシステムは、構造が複雑であり、規模が小さいため、他者による修復・維持の

比率を大きくすることが現実的である。

恒久的な社会基盤の実現のためには、人間の手を煩わせないインフラ、機械の存在が不可欠になっていくことが予想される。そのためには、自己による修復・維持および他者による修復・維持の両方の側面で、人工物の修復・維持を考える必要がある。そして、修復・維持を「両方の側面」で考えていくことを行う学問として、(体系的)システム修復工学を提唱する。この工学では、ハードウェア面およびソフトウェア面での損傷や故障を体系的に修復し、人間の手の介入なしに社会システムを運用し続けることを目的とする。ハードウェア面では、本論文の人工循環器システムや自己修復材料などを利用した損傷・故障箇所の修復やメンテナンス(自己による修復・維持)や、ロボットなどによる損傷・故障箇所の修復やメンテナンス(他者による修復・維持)に関する研究を行う。ソフトウェア面では、ロボットの位置や力覚などのセンサのキャリブレーションおよびハードウェアの状態に応じたプラントモデルの補正などを、自己状態推定(自己による修復・維持)や位置やトルク値を相対的に補正することが可能な補正用リファレンス(他者による修復・維持)により実現する研究を行う。この工学を通して、ハードウェアおよびソフトウェアの損傷や故障からの復旧およびメンテナンスを、自己および他者による修復・維持の両方の側面から考え実現する技術体系を構築していきたい。

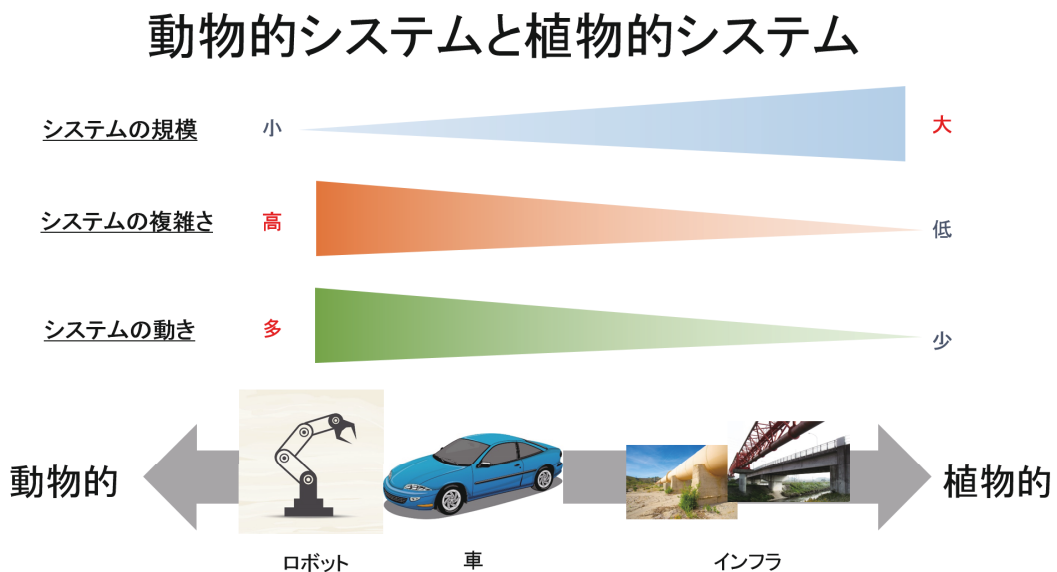


図 6.3 Animal-like system and plant-like system

参考文献

- [1] 富田 忠雄, 高井 章, 生命維持機能の生理学—生きていくための体の働き, 昭和堂, 2005.
- [2] Ogata,T. and Sugano,S., Emotional communication between humans and the autonomous robot which has the emotion model, Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.4, pp.3177-3182, 1999.
- [3] 内部 英治, 銅谷 賢治, サイバーローデントプロジェクト, 日本神経回路学会誌 Vol. 14, No. 4, pp.293-304, 2007.
- [4] Paul Martin, Wound Healing—Aiming for Perfect Skin Regeneration, SCIENCE, Vol.276(4), 1997.
- [5] Stephan Barrientos, Olivera Stojadinovic, Michael S. Golinko, Harold Brem, Marjana Tomic-Canic, Growth factors and cytokines in wound healing, WOUND REPAIR AND REGENERATION, Vol.16 (5), pp.585-601, 2008.
- [6] Werner.S, Grose.R, Regulation of wound healing by growth factors and cytokines, PHYSIOLOGICAL REVIEWS, Vol.83 (3), pp. 835-870, 2003.
- [7] Tero AH Jrvinen, Markku Jrvinen, Hannu Kalimo, Regeneration of injured skeletal muscle after the injury, Muscles, Ligaments and Tendons Journal, 3 (4), pp.337-345, 2013.
- [8] Desmouliere, Alexis A, Tissue repair, contraction, and the myofibroblast, Wound repair and regeneration, Vol.13(1), pp.7-12, 2005.
- [9] G. Gabbiani,The myobroblast in wound healing and brocontractivediseases, Journal of Pathology, Vol. 200(4), pp.500-503, 2003.
- [10] P. Sharma and N. Maffulli, Biology of tendon injury: healing, modeling and

- remodeling, *Journal of Musculoskeletal Neuronal Interact*, 6(2), pp.181-190, 2006.
- [11] Peacock EE Jr, Madden JW, Trier WC., Postoperative Recovery of Flexor Tendon Function, *Am J Surg.*, Vol.122(5), pp. 686-692, 1971.
- [12] N Maffulli, H Moller, and C Evans, Tendon healing: can it be optimised?, *Br J Sports Med.*, Vol.36(5), pp.315-316, 2002.
- [13] 鶴池 政明, 上勝也, 損傷した腱・靭帯の治癒過程, 大阪体育大学紀要, 第 32 卷, pp. 149 - 157, 2001.
- [14] Takashi Marui, Christopher Niyibizi, Helga I. Georgescu, Min Cao, Karl W. Kavalkovich, Rebecca E. Levine, Savio L-Y, Woo Effect of growth factors on matrix synthesis by ligament fibroblasts, *Journal of Orthopaedic Research*, Vol.15(1), pp.18-23, 1997.
- [15] Ito.K, Perren.SM, Biology and biomechanics in bone healing. In:Ruedi.Tp, Buckley.Re,Moran.CG, *AO Principles of Fracture Management* 2nd edition, Davos, Switshzerland, AO Publishing, pp.8-31, 2007.
- [16] Street, John J, Vascular endothelial growth factor stimulates bone repair by promoting angiogenesis and bone turnover, *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, Vol.99(15), pp.9656-9661, 2002.
- [17] Bruder, S P SP, Mesenchymal stem cells in bone development, bone repair, and skeletal regeneration therapy, *Journal of cellular biochemistry*, Vol.56(3), pp.283-294, 1994
- [18] Tsung-Chang Sung, Zhijiang Chen, Sandrine Thuret, Marcal Vilar, Fred H. Gage1, Roland Riek, Kuo-Fen Lee, P45 Forms a Complex with FADD and Promotes Neuronal Cell Survival Following Spinal Cord Injury, *PLOS ONE*, Vol.8(7), 2013.
- [19] Bruce Alberts, Julian Lewis, Martin Raff, Peter Walter et al., 細胞の分子生物学 第5版, ニュートンプレス, 2010.
- [20] Izumikawa M, Minoda R, Kawamoto K et al, Auditory hair cell replacement and hearing improvement by Atoh1 gene therapy in deaf mammals, *Nature Med*,

- 11, pp.271276, 2005.
- [21] 村田 智, 黒河 治久, 小鍛 治繁, 自己修復する機械-分散ユニット構成による自己組立-, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 2, pp.254-262, 1995.
- [22] Eiichi Yoshida, Satoshi Murata, Akiya Kamimura, Kohji Tomita, Haruhisa Kurokawa and Shigeru Kokaji, A Motion Planning Method for a Self-Reconfigurable Modular Robot, Proceedings of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001.
- [23] Antoine Cully, Jeff Clune, Danesh Tarapore, Jean-Baptiste Mouret, Robots that can adapt like animals, NATURE, Vol. 521, pp.503-507, 2015.
- [24] Hiroaki Kobayashi, Kazuhito Hyodo and Daisuke Ogane, On Tendon-Driven Robotic Mechanisms with Redundant Tendons, The International Journal of Robotics Research, pp. 561-571, 1988.
- [25] Ioannis Ieropoulos, John Greenman, Chris Melhuish and Ian Horsfield, EcoBot-III: a robot with guts, Proc. of the Alife XII Conference, pp.733-740, 2010.
- [26] ENERGETICALLY AUTONOMOUS TACTICAL ROBOT (EATR) PROJECT, <http://www.roboticstechnologyinc.com/index.php/EATR>
- [27] Sturart Wilkinson, “Gastrobots” —Benefits and Challenges of Microbial Fuel Cells in Food Powered Robot, Applications, Autonomous Robots, Vol.9, pp.99-111, 2000.
- [28] White,S.R., Sottos,N.R., Geubelle,P.H., Moore,J.S., Kessler,M.R., Sriram,S.R., Brown,E.N. and Viswanathan,S., Automic healing of polymer composites, NATURE, Vol.39(5), pp.1703-1710, 2004.
- [29] Brown,E.N., Sottos,N.R. and White,S.R., Microcapsule induced toughening in a self-healing polymer composite, Materials Science,Vol.409,pp.794-797, 2001.
- [30] Toohey,K.S., Sottos,N.R., Lewis,J.A., Moore,J.S. and White,S.R., Self-healing materials with microvascular networks, Nature Materials, Vol.6, pp.581-585, 2007.
- [31] White,S.R., Moore,J.S., Sottos,N.R., Krull,B.P., Santa Cruz,W.A. and

- Gergely,R.C.R., Restoration of Large Damage Volumes in Polymers, Science, Vol.344, pp.620-623, 2014.
- [32] Nakao,W., Takahashi,K. and Ando,K., Self-healing of Surface Cracks in Structural Ceramics,Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications, Eds,S.K.Ghosh,WILEY-VCH, pp.183-217, 2009.
- [33] Chen,X., Dam,M.A., Ono,K., Mal,A., Shen,H., Nutt,S.R., Sheran,K. and Wudl,F., A Thermally Re-mendable Cross-Linked Polymeric Material, Science,Vol.295, pp.1698-1702, 2002.
- [34] Ghosh,B. and Urban,M.W., Self-Repairing Oxetane-Substituted Chitosan Polyurethane Networks Science, Vol.323, pp.1458-1460, 2009.
- [35] Yamamoto,T. and Yoshida,M., Viscoelastic and Photoresponsive Properties of Microparticle/Liquid-Crystal Composite Gels: Tunable Mechanical Strength along with Rapid-Recovery Nature and Photochemical Surface Healing using an Azobenzene Dopant, Langmuir, Vol.28(22), pp.8463-8469, 2012.
- [36] Imato,K., Self-Healing of Chemical Gels Cross Linked by Diarylbibenzofuranone-Based Trigger-Free Dynamic Covalent Bonds at Room Temperature, Angewandte Communications, Vol51, pp.1138-1142, 2012.
- [37] Odriozola,I., Catalyst-free room-temperature self-healing elastomers based on aromatic disulfide metathesis, Materials Horizons, Vol.1, pp.237-240, 2013.
- [38] Bauer,S., Bauer-Gogonea,S., Graz,I., Kaltenbrunner,M., Keplinger,C. and Schwdiauer,R., 25th Anniversary Article A Soft Future From Robots and Sensor Skin to Energy Harvesters, Advanced Material., Vol.26, pp.149-162, 2014.
- [39] Jonkers,H.M., Self-healing concrete: A biological Approach, Self-healing materials (an alternative approach to 20 centuries of materials science), S. van der Zwaag (editor), Springer Series in MATERIALS SCIENCE, pp.195-204, 2007.
- [40] Dry,C., Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability, Cement Concrete Res.30,

- pp.1969-1977, 2000.
- [41] Dry,C., Factors Affecting Self Repairing of Composites, JSME/ASME International Conference on Materials and Processing 2002, Vol.1, pp.343-351, 2002.
- [42] Pang,J.W.C. and Bond,I.P., A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility, Composite Science and Technology, Vol.65, pp.1791-1799, 2005.
- [43] Zavada,S.R., McHardy,N.R., Gordon,K.L. and Scott,T.F., Rapid Puncture-Initiated Healing via Oxygen-Mediated Polymerization, ACS Macro Letters, Vol.4(8), pp.819-824, 2015.
- [44] Chen,X., Dam,M.A., Ono,K., Mal,A., Shen,H., Nutt,S.R., Sheran,K. and Wudl,F., A Thermally Re-mendable Cross-Linked Polymeric Material, Science, Vol.295, pp.1698-1702, 2002.
- [45] 山口政之, 前田梨花, 自己修復性高分子材料の設計, 未来材料, Vol.11 No.1, pp.18-23, 2011.
- [46] Sun,T.L., Kurokawa,T., Kuroda,S., Ihsan,A.B., Akasaki,T., Sato,K., Haque,Md.A., Nakajima,T. and Gong,J.P., Physical hydrogels composed of polyampholytes demonstrate high toughness and viscoelasticity, Nature Materials, Vol.12, pp.932-937, 2013.
- [47] 田中基嗣, 生物に学ぶ自己修復材料, 日本機械学会年次大会 (2011), 日本機械学会, pp.W021004-1 - W021004-6, 2011.
- [48] Regina Frei, Richard McWilliam, Benjamin Derrick, Alan Purvis, Asutosh Tiwari, Giovanna Di Marzo Serugendo, Self-healing and self-repairing technologies, Int J Adv Manuf Technol, 69: 1033, 2013.
- [49] 小澤 澯司, 福田 康一郎 (編), 標準生理学 第7版, 医学書院, 2011.
- [50] 坂井 建雄, 橋本 尚嗣, ぜんぶわかる人体解剖図, 尚美堂出版, 2010.
- [51]
- [52] Ye Shi, Ming Wang, Chongbo Ma, Yaqun Wang,, Xiaopeng Li and Guihua Yu, A Conductive Self-Healing Hybrid Gel Enabled by Metal – Ligand Supramolecule

- and Nanostructured Conductive Polymer, *Nano Lett.*, 15, pp.6276 – 6281, 2015.
- [53] Blaiszik, B.J., Kramer, S.L.B., Grady, M.E., McIlroy, D.A., Moore, J.S., Sottos, N.R. and White, S.R., Autonomic Restoration of Electrical Conductivity, *Advanced Materials*, Vol.24, pp.398-401, 2012.
- [54] Tomoya Koshi and Eiji Iwase, Self-healing metal wire using electric field trapping of metal nanoparticles, *Japanese Journal of Applied Physics* 54, 06FP03, 2015.
- [55] Etienne Palleau , Stephen Reece , Sharvil C. Desai , Michael E. Smith , and Michael D. Dickey, Self-Healing Stretchable Wires for Reconfigurable Circuit Wiring and 3D Microfluidics, *Adv. Mater.*, vol.25(11), pp.15891592, 2013.
- [56] Ye Shi, Chongbo Ma, Lele Peng, Guihua Yu Conductive “Smart” Hybrid Hydrogels with PNIPAM and Nanostructured Conductive Polymers, *Advanced Functional Materials*, Volume 25, Issue 8, pp. 12191225
- [57] Young J. Song and Kara J. Peters, Self-repairing, interferometric waveguide sensor with a large strain range, *Appl. Opt.* 51, pp.6886-6895 , 2012.
- [58] Tan-Phat Huynh and Hossam Haick, Self-Healing, Fully Functional, and Multiparametric Flexible Sensing Platform, *Advanced Materials*, Vol.28 (1), pp.138143, 2016.
- [59] Cheng-Hui Li, Chao Wang, Christoph Keplinger, Jing-Lin Zuo, Lihua Jin, Yang Sun, Peng Zheng, Yi Cao, Franziska Lissel, Christian Linder, Xiao-Zeng You and Zhenan Bao, highly stretchable autonomous self-healing elastomer, *Nature Chemistry*, 8, pp.618624 , 2016.
- [60] Stacy Hunt, Thomas G. McKay, and Iain A. Anderson, A self-healing dielectric elastomer actuator, *Appl. Phys. Lett.*, 104, 113701, 2014.
- [61] H. R. Williams, R. S. Trask, A. C. Knights, E. R. Williams and I. P. Bond, Biomimetic reliability strategies for self-healing vascular networks in engineering materials, *J. R. Soc. Interface*, 5, pp.735-747, 2008.
- [62] Adrian Bejan and Sylvie Lorente, Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering, *Journal of Applied Physics* 100,041301, 2006.

- [63] 田村 宏治, 阿形清和, どうやったら体のパーツを自動再生させられるか?, 実験医学, Vol.32(1), pp.2-7, 2014.
- [64] 川添 強, 浦 晟, 中嶋 明, ワイヤロープのトライボ損傷挙動, 長崎大学工学部研究報告, Vol.28(51), pp.135-138, 1998.
- [65] 長谷亜蘭, 摩耗メカニズムの研究事例と動向, 表面技術, Vol.65, No.12, pp.556-561, 2014.
- [66] NSK ベアリング入門, <http://www.jp.nsk.com/company/introduction/index.html>, (2016年12月20日)
- [67] (a)NTN, <http://juco.in/page41.html>, (2016年12月20日), (b)NTN ピーリング, <http://www.ntn.co.jp/japan/products/care/damage/peeling.html>, (2016年12月20日), (c)NTN かじり, <http://www.ntn.co.jp/japan/products/care/damage/bite.html>, (2016年12月20日), (d)NTN 摩耗, <http://www.ntn.co.jp/japan/products/care/damage/wear-out.html>, (2016年12月20日) .
- [68] WORLD IMPORT TOOLS, <http://www.worldimporttools.com/products/detail.php>, (2016年12月20日) .
- [69] TES The largest network of teachers in the world, <http://npskeletal3.wikispaces.com/articulations>, (2016年12月20日) .
- [70] Michael J ¨antsch, Steffen Wittmeier, Konstantinos Dalamagkidis, Alexander Panos, Fabian Volkart and Alois Knoll, Anthrob A Printed Anthropomimetic Robot, 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.342-347, 2013.
- [71] Haipeng Zheng, Optical article containing self-healing and abrasion-resistant coatings, US9016858 B2, 2015-4-28
- [72] 資料で見る 75 年の歩み 技術開発 材料, https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/materials/details.html, (2017年1月9日) .
- [73] 坂井 建雄, 岡田 隆夫, 人体の構造と機能 [1] 解剖生理学, 医学書院, 2013.
- [74] L. Wolpert, Positional information and the spatial pattern of cellular differenti-

ation, J. Theor. Biol., Vol.25, pp.1-47, 1969.

[75] F. Crick, Diffusion in embryogenesis Nature, Vol.225, pp.420-422, 1970.

謝辞

研究テーマの立ち上げ，および本研究を進めるにあたり，懇切なるご指導とご激励を賜りました早稲田大学 菅野重樹教授に心より感謝の意を表します。

また，本論文をまとめるにあたり，有益な御教示，御助言を賜りました早稲田大学 梅津光生教授，岩田浩康教授，大谷淳教授，尾形哲也教授，高西淳夫教授 に謹んで深く感謝いたします。さらに，藤江正克名誉教授をはじめ多くの総合機械工学科の先生にも御助言を賜りましたこと，深く感謝申し上げます。

最後に，私の研究生活を支えてくださった家族，そして優秀な学生達に感謝します。

研究業績

論文

- Development of a dipping wire method to improve the abrasion resistance of a plastic wire, Proceedings of IEEE ROBIO2016, pp.743-748, 2016年12月、Shunsuke Nagahama, Junichi Tanabe, Shigeki Sugano
- Method to obtain only targeted substances from an artificial circulatory system、2015 IFToMM World Congress Proceedings, pp.91-95, 2015年12月、Shunsuke Nagahama, Shotaro Iida, Hiroki Yoneyama, Shigeki Sugano
- The Development of Magnetic Powdery Sensor, Proceedings of IEEE SENSORS2014, pp.783-786, 2014年11月、Shunsuke Nagahama, Yousuke Kimura, Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano
- Signal transmission with magnetic powdery wire in a pipeline, Proceedings of IEEE ROBIO2013, pp.1113-1118, 2013年12月、Shunsuke Nagahama, Shotaro Iida, Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano
- Finding and Utilizing Self-preserving Functions in Blood Pulsation - Development for Ethanol Based Artificial Circulation System-, Proceedings of IEEE ROBIO2012, pp.1034-1039, 2012年12月、Chyon Hae Kim, Yuki Nishi, Shunsuke Nagahama, Shigeki Sugano

講演

- 自己修復機能を有する導電性 HPNIPAAm ゲルの開発、SI2016, 2016年12月、長濱峻介, 右田かよ, 菅野重樹
- 触媒担持ワイヤを用いた腱駆動における腱の修復方法の提案、ROBOMECH2016, 2016年6月、田辺潤一、長濱峻介、菅野重樹
- 金属の電着による摩耗修復機構の提案、ROBOMECH2015, 2015年5月、右田かよ, 長濱峻介, 木村洋介, 菅野重樹
- 人工循環器系による物質供給を利用したロボットの自己修復・自己維持システムの

-
- 提案、第 24 回バイオメカニズムシンポジウム、2015 年 7 月、長濱峻介、菅野重樹
- 物質供給により修復する Magnetic Powdery Sensor の開発、第 35 回バイオメカニズム学術講演会、pp.59-62、2014 年 10 月、長濱峻介、木村洋介、金天海、菅野重樹
 - 機械システムの摺動部における摩耗箇所の修復手法の提案、第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、pp.634-637、2014 年 12 月、木村洋介、右田かよ、長濱峻介、金天海、菅野重樹
 - Magnetic Powdery Wire の自己修復性能と信号伝達特性の評価、第 26 回自律分散シンポジウム、pp.77-80、2014 年 1 月、長濱峻介、飯田翔太郎、金天海、菅野重樹
 - 物質を利用して自己修復，メンテナンスを行う機械システムのための物質輸送手法の提案、ROBOMECH2014、3A1-K02、2014 年 6 月、米山大樹、長濱峻介、飯田翔太郎、菅野重樹
 - 糖質を摂取する自己充足可能なロボットのための小型食物粉碎システムの提案、ROBOMECH2013、1A2-B03、2013 年 6 月、木村洋介、長濱峻介、金天海、菅野重樹
 - 循環器系システムにおける拍動による自己修復促進とフィルタの目詰まり抑制、RSJ2012、1I2-8、2012 年 9 月、長濱峻介、西佑樹、金天海、菅野重樹
 - 生体の働きを模擬した多機能一体型循環器系システムの開発、ROBOMECH2012、2012 年 6 月、長濱峻介、西佑樹、金天海、菅野重樹