

システム技術開発調査研究

4-R-15

# マイクロマシンシステムに関する 基礎技術の調査研究

平成5年3月

財団法人 機械システム振興協会

委託先 財団法人 マイクロマシンセンター

## 序

わが国経済の安定成長への転換に伴い、機械情報産業をめぐる経済的・社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、住宅、医療、福祉、教育等直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人機械システム振興協会では、日本自動車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、システム開発事業・新機械システム普及促進事業等を通商産業省のご指導のもとに実施しております。特に、システム開発事業を効果的に推進するためには、システム開発に先行して基礎的な調査研究を行う必要がありますので、当協会に総合機械システム調査開発委員会（委員長、東京大学教授 中島 尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発調査研究事業として各種の調査研究を民間の調査機関等に委託し、実施しております。

この「マイクロマシンシステムに関する基礎技術の調査研究」は、上記事業の一環として、当協会が、（財）マイクロマシンセンターに委託して実施した研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえにおいて、本研究成果が一つの礎石として、役立てば幸いです。

平成5年3月

財団法人 機械システム振興協会

# 目 次

## 序

### (調査研究概要)

I 調査研究の目的	G3
II 調査研究の実施方法	G4
III 調査研究成果の要約	G9
III.1 産学共同研究の進め方に関する調査	G9
III.2 技術動向及び産学共同研究課題に関する調査	G15

### (本 編)

第I編 産学共同研究の進め方に関する調査	5
----------------------	---

第1章 産学共同研究の実態調査・意識調査	5
----------------------	---

1.1 産学共同研究制度の概況	5
1) 産学共同研究の制度の現状	5
2) 課題・問題点	11
3) 海外の産学共同研究事例	11
1.2 産学共同研究の概況	11
1) アンケート	11
2) ヒアリング	43

第2章 産学共同研究の進め方のモデルの策定	45
-----------------------	----

2.1 マイクロマシン産学共同研究に対する指針	45
2.2 共同研究契約のひな型	46

第3章 まとめ	47
---------	----

第II編 技術動向及び産学共同研究課題に関する調査	57
---------------------------	----

第1章 マイクロ理工学(トライボロジー)	57
----------------------	----

1.1 はじめに	57
1.2 クラシカルなトライボロジーとマイクロトライボロジー	62
1.2.1 トライボロジーの歴史	62
1.2.2 マイクロトライボロジー	66
1.2.3 モレキュラーダイナミックス(MD)	69
1.3 マイクロマシンとトライボロジー	73
1.3.1 マイクロマシンにおけるトライボロジー研究	73
1) マイクロマシンの動特性	74
2) 摩擦試験	77
1.3.2 Siのマイクロトライボロジー	77
1.4 メソロライボロジー	83
1.5 マイクロマシンのためのトライボロジー研究	91
1.5.1 固体表面への水分子吸着	91
1) 緒言	91
2) B E T理論と吸着等温線	92
3) 実験装置	98

4) 実験結果および考察	102
5) 今後の研究課題	109
1.5.2 二硫化モリブデンのトライボロジー	109
1.5.3 エキソ電子の放出	115
1) 緒言	115
2) S F E E 放射機構	116
3) 実験装置	120
4) 実験結果	121
(a) 温度特性	121
(b) 不純物	124
(c) 吸着物	125
(d) 欠陥	126
5) 今後の課題	128
1.5.4 フラーレン C <sub>60</sub>	129
1.5.5 DLC (Diamond-Like Carbon) とダイヤモンド	129
1.6 総括	133
(参考文献)	134
第2章 マイクロ理工学 (機械力学)	141
2.1 微小機構とスケール効果	141
2.1.1 はじめに	141
2.1.2 微小物体に働く力のスケール効果	142
2.2 微小3次元機構と外骨格構造	149
2.2.1 マイクロマシニング技術	149
2.2.2 昆虫の外骨格構造	150
2.2.3 外骨格をモデルとした微小機構	151
2.3 微小機械の飛翔と跳躍による移動機構	155
2.3.1 はじめに	155
2.3.2 翅と飛翔	156
2.3.3 翼のアスペクト比と飛行形式との関連性	161
2.3.4 直接飛行筋による飛行と関節飛行筋による飛行	162
2.3.5 小型昆虫の飛行	163
2.3.6 飛行の際のスケール効果	167
2.3.7 マイクロロボットの飛行の可能性	169
2.3.8 跳躍	170
2.4 微小機械の行動制御機構	173
2.4.1 はじめに	173
2.4.2 昆虫をモデルとした制御	173
2.4.3 ロボットの群制御	174
2.4.4 従来の研究	174
1) 生物の行動のモデル化	174
2) 自律型マルチロボットシステム	176
3) 自己組織化・自律分散システム	177
4) マイクロロボットの制御	178
2.4.5 まとめ	179
2.5 微小機械へのエネルギー供給機構	179
2.5.1 外部からワイヤレスでエネルギーを供給する必要性	179
2.5.2 微小光電変換器	182
2.5.3 イオンドラッグ力を利用したマイクロソーラポート	184
2.5.4 PLZTを用いた光アクチュエータ	186

2.5.5	光熱効果を利用したカンチレバーの共振	188
2.5.6	フォトメカニカル効果を利用したアクチュエータ	189
2.5.7	高分子ゲルアクチュエータ	190
2.5.8	超磁歪アクチュエータを利用した管内移動マイクロロボット	191
2.5.9	電磁誘導を利用したエネルギー供給	193
2.5.10	振動場を利用した選択的エネルギー供給	195
2.5.11	熱雑音の場のエネルギーを利用したアクチュエータ	199
2.5.12	音波を利用したエネルギー供給	200
2.5.13	本節のまとめ	202
	(参考文献)	203
第3章	材料技術 ((1)産業用マイクロアクチュエータ材料)	213
3.1	緒言	213
3.2	マイクロアクチュエータとマイクロ材料学	214
3.2.1	マイクロアクチュエータの分類	215
3.2.2	マイクロアクチュエータ用材料の分類	216
3.3	マイクロアクチュエータ材料学の基礎	217
3.3.1	アクチュエータ用薄膜の作製法と材料特性	217
3.3.2	物性評価	221
3.4	SMAマイクロアクチュエータの材料学基礎	221
3.4.1	SMAの熱処理条件と材料特性の関係の解明	222
	1) 特性計測における前提条件	222
	(1) 試料	222
	(2) SMA試料の形態	222
	(3) 測定時の最大ひずみ量	223
	2) 測定方法	223
	3) 測定試料	224
	4) 測定条件	225
	5) 測定結果と新しい表現方法「4変数特性図」	225
	6) 物性の熱処理温度依存性	231
3.4.2	相変態から見たSMA材料特性の考察	232
	1) 温度-応力相図の作成	232
	2) 相変態とSMAコイルばね特性	235
3.4.3	SMAの繰り返し熱サイクルと特性変動	236
	1) トレーニング処理の検討	236
	2) 繰り返し熱サイクルによる変態熱挙動の変化	236
3.4.4	本節のまとめ	238
3.5	SMA薄膜のマイクロ材料学	238
3.5.1	従来研究の問題点	238
3.5.2	TiNi薄膜の試作条件と結晶構造	239
	1) 基盤温度の影響	239
3.5.3	アモルファスTiNiの結晶化	239
	1) 通電フラッシュ焼鈍の試み	239
	2) 電気炉内焼鈍条件と結晶化	240
	3) 合金組成と変態特性	240
3.5.4	まとめと展望	241
	(参考文献)	241
3.6	形状記憶合金マイクロアクチュエータの設計	241
	(参考文献)	244
3.7	マイクロアクチュエータ材料に関する参考文献リスト	244



3.7.1	マイクロアクチュエータ全般に関する参考文献（単行本）	245
3.7.2	形状記憶合金アクチュエータに関する文献	245
3.7.3	圧電アクチュエータに関する文献	246
3.7.4	超磁歪アクチュエータに関する文献	246
3.7.5	マイクロアクチュエータ薄膜に関する文献	247
3.7.6	その他の新原理マイクロアクチュエータに関する文献	247
第4章	材料技術（(2)医療用マイクロアクチュエータ材料）	249
4.1	医療用マイクロマシンとマイクロアクチュエータ	249
4.2	医療用マイクロアクチュエータの条件	251
4.3	医療用マイクロアクチュエータの種類とその材料	254
4.3.1	形状記憶合金・樹脂アクチュエータ	254
1)	用語解説	254
2)	形状記憶合金（SMA）	254
3)	形状記憶樹脂	258
4)	研究課題	260
	（参考文献）	264
4.3.2	高分子ゲルアクチュエータ	265
1)	高分子ゲルの刺激応答特性	265
2)	高分子アクチュエータの特性	270
3)	高分子アクチュエータの特徴	271
	（参考文献）	273
4.3.3	静電力アクチュエータ	274
1)	静電力アクチュエータの原理	274
2)	静電力アクチュエータの実例	274
3)	静電力アクチュエータの材料と生体適合性	277
4)	今後の課題	278
	（参考文献）	278
4.3.4	電磁力アクチュエータ	279
	（参考文献）	281
4.3.5	光アクチュエータ	282
	（参考文献）	283
4.3.6	圧電アクチュエータ	283
1)	圧電高分子材料を用いたバイモルフ型アクチュエータ	283
2)	圧電セラミックスを用いた縦型アクチュエータ	284
3)	今後の課題	286
	（参考文献）	286
4.3.7	熱アクチュエータ	287
1)	熱アクチュエータの事例	287
2)	今後の課題	289
	（参考文献）	289
4.3.8	振動アクチュエータ	289
1)	はじめに	289
2)	設計の方針	290
3)	振動アクチュエータ（人工サルコメア）の構造とその作動原理	290
4)	振動アクチュエータをマイクロ化した時の解析結果	292
5)	このモデルを今後どう発展させるか？	293
4.4	表面修飾による生体適合性の付与	294
4.4.1	マイクロマシンの表面加工	294
4.4.2	バイオコロイドの表面吸着・固定・接着制御	296

4.4.3	高分子表面の微細加工化学の開発	297
	1) 表面光化学	297
	2) フェニルアジド光化学の原理	298
	3) 光化学を用いる表面微細加工技術	299
	4) 化学修飾表面の生体適合化	300
4.4.4	細胞集積技術	301
	1) 細胞接着と組織構築	302
	2) 選択的接着能を利用する細胞の微細パターン化	302
4.4.5	蛋白質の微細パターン化	307
	(参考文献)	307
4.5	マイクロアクチュエータの用途	308
4.5.1	人工臓器	308
	1) はじめに	308
	2) 人工臓器の臨床応用の現状	308
	3) 人工臓器の問題点	310
	4) マイクロマシン技術の導入により人工臓器の概念はどう変わるか	311
4.5.2	生体内検査・手術	315
	1) 生体内へのアプローチからみた生体内検査・手術の方法	315
	2) 現在の生体内検査・手術の限界	316
	3) マイクロマシン技術の可能性	317
	4) 極細径内視鏡	318
	5) 極細径レーザー内視鏡	319
	6) 血管内視鏡視下レーザー血管形成術	319
	7) 経皮的僧帽弁レーザー形成術	321
	8) 現在の極細径レーザー内視鏡の問題点	323
	9) 極微細な遠隔操作を可能にする手術器械の不足	323
	10) 内視鏡視野の問題	324
	11) 血管内アプローチシステム	324
	12) マイクロアクチュエータに関する検討課題	325
	13) 参考文献	325
4.5.3	マイクロマシンシステムにおける立体視	325
	1) はじめに	325
	2) マイクロサージェリーシステム	327
	3) 立体視下におけるマイクロサージェリー	327
	4) マイクロサージェリーにおける立体視の今後の問題点	328
4.5.4	人工筋肉	329
	(参考文献)	332
第5章	材料技術 ((3)医療用生体適合材料)	333
5.1	血液中で機能を示す材料	336
5.1.1	血液成分吸着の回避	336
	1) 緒言	336
	2) 血液適合性高分子の分子設計	337
	3) タンパク質の吸着抑制型血液適合性高分子	339
	4) 医療器械の生体内長期使用の例	342
	(参考文献)	343
5.1.2	血栓形成の回避	344
	1) 緒言	344
	2) 材料表面における血栓形成反応	345
	3) 血液適合性材料の分類	346

4)	血小板活性化と遊離 $Ca^{2+}$ 濃度変化	349
5)	血小板の細胞質内遊離 $Ca^{2+}$ 濃度の測定	350
6)	材料表面との接触による血小板内遊離 $Ca^{2+}$ 濃度変化	351
7)	結語	359
	(参考文献)	360
5.1.3	細網内皮系の回避	363
1)	マイクロマシンの細網内皮系 (RES)	363
2)	様々な形態の薬物運搬システムにおける RES 回避	365
3)	マイクロマシンへの展望	368
	(参考文献)	369
5.1.4	流体力学的血栓形成の回避	370
1)	血液中のせん断 (せん断速度) の影響	370
2)	毛細血管内での流れの影響	375
3)	血栓形成の回避	375
	(参考文献)	378
5.2	組織中で機能を示す材料	380
5.2.1	軟組織での材料	380
5.2.1.1	皮下組織での相互作用	380
1)	緒言	380
2)	炎症における活性酵素とその消去機構	381
3)	材料・組織・器官の活性酵素による分解・障害	383
4)	異物による肉芽腫炎症の発症	386
5)	結語	389
	(参考文献)	389
5.2.1.2	材料に対する生体の免疫応答	391
1)	緒言	391
2)	細網内皮系組織と大食細胞・樹状細胞の応答	392
3)	T 依存性抗原と T 非依存性抗原	395
4)	ポリエチレングリコール系の免疫応答	397
5)	ポリジメチルグリコール系の免疫応答	398
6)	多糖類の免疫応答	400
7)	その他の合成高分子の免疫応答	402
8)	マイクロマシン医療応用の展望と材料免疫的側面から見た課題	403
	(参考文献)	406
5.2.2	硬組織での材料	411
1)	緒言	411
2)	骨組織用高分子材料	414
3)	歯質接着性材料	414
	(参考文献)	418
5.2.3	生体内分解性高分子のマイクロマシンへの応用	418
1)	緒言	418
2)	高分子材料の生体内分解性と DOS 用材料としての応用	420
3)	生体内分解性制御によるターゲティング療法	425
4)	生理活性物質の薬物送達システム	426
5)	生体内分解性高分子によるインテリジェント製剤	427
6)	結語	430
	(参考文献)	430
	(資料 1)	433
	(資料 2)	434



第6章 設計技術（設計手法）	435
6.1 はじめに	435
(1)スケール効果	435
(2)新しい原理の駆動方法	435
(3)加工法	435
6.2 スターリング・エンジンの縮小に伴うスケール効果の影響	436
6.2.1 はじめに	436
6.2.2 エンジンの特性計測	436
1) 特性計測実験装置	436
2) 圧力変動幅計測	438
3) エンジンの外部仕事	439
4) 慣性負荷の効果検証	439
5) 特性評価のまとめ	440
6.2.3 作動ガス圧力計算によるディスプレイサ改善案	440
1) シリンダ内温度分布シミュレーション	440
2) ディスプレサ改善案	441
6.2.4 本節のまとめ	442
(参考文献)	443
6.3 環境のエネルギーを利用したカテーテル誘導マイクロマシン	443
6.3.1 はじめに	443
6.3.2 血管内移動マイクロマシンの形状取と操作方法	444
6.3.3 数値解析による流体力の計算	444
6.3.4 10倍寸モデルによる移動量の測定実験	446
6.3.5 10倍寸モデルによる分岐管の実験	448
6.3.6 実物大モデルによる実験	449
6.3.7 本節のまとめ	452
(参考文献)	453
6.4 光造形法によるマイクロマシン製造技術	453
6.4.1 はじめに	453
6.4.2 光造形法と加工精度	454
6.4.3 シミュレーション	457
6.4.4 実験	462
6.4.5 本節のまとめ	468
(参考文献)	468
6.5 マイクロマシンの設計技術	468
6.5.1 はじめに	468
6.5.2 仕様の明確化と目標の設定	469
6.5.3 概念設計	471
6.5.4 基本設計	472
6.5.5 詳細設計	473
6.5.6 本節のまとめ	473
(参考文献)	473
6.6 まとめ	474
第7章 制御技術（制御手法）	475
7.1 研究開発動向	475
7.1.1 制御系要素の開発	475
1) アクチュエータ	475
2) エネルギー源と信号伝達方法	481
3) 変位変換機構	482

4) センサ	483
5) 加工・組立	484
7.1.2 マイクロマシンの制御法	485
1) 寸法効果と制御法	486
2) 各制御要素の特性と制御法	489
3) マイクロマシンの構成と制御法	489
7.2 研究開発の代表例	495
7.2.1 要素技術	495
1) 静電型アクチュエータ	495
2) SMAアクチュエータ	498
3) 圧電素子	501
4) フレキシブルマイクロアクチュエータ	502
7.2.2 マニピュレータ	504
1) SMA	505
2) 圧電素子	507
3) フレキシブルマイクロアクチュエータ	510
7.2.3 移動機械	512
1) SMA	512
2) 圧電素子	512
3) フレキシブルマイクロアクチュエータ	514
7.3 研究開発課題の抽出	517
7.3.1 制御技術における研究開発の動向	517
7.3.2 移動形マイクロマシンの研究開発動向	519
7.3.3 マイクロマシンの研究課題と既成の研究分野との関連	510
7.3.4 運動制御におけるマイクロアクチュエータの望ましい構造と機能	522
7.3.5 産学協同研究課題の整理	523
(参考文献)	524
7.4 文献調査	526