

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

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 ₆₀	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)	マイクロマシンと細網内皮系 (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

平成4年度 大型工業技術研究開発事業
新エネルギー・産業技術総合開発機構委託

マイクロマシン技術の研究開発
(発電施設用高機能メンテナンス技術開発)

成果概要

平成5年4月

財団法人マイクロマシンセンター

目 次

1	研究の目的と範囲	1
1.1	研究の目的	1
1.2	研究の範囲	1
2	研究の概要	3
2.1	マイクロカプセルの研究開発	3
2.1.1	マイクロ発電機の研究	3
2.1.2	信号発振機構の研究	6
2.1.3	ステアリング機構の研究	9
2.1.4	探傷機構の研究	11
2.1.5	位置検出の研究	13
2.2	マザーマシンの研究開発	16
2.2.1	本体ドライブ機構の研究	16
2.2.2	マイクロ光学機構の研究	18
2.2.3	連結機構の研究	21
2.2.4	クランプ機構の研究	25
2.2.5	群制御の研究	27
2.2.6	マイクロバッテリーの研究	28
2.3	無索検査モジュールの研究開発	30
2.3.1	伸縮型移動機構の研究	30
2.3.2	光エネルギー供給の研究	33
2.3.3	マイクロ視覚の研究	38
2.3.4	機能連結の研究	43
2.3.5	協調制御の研究	45
2.3.6	マイクロ光分析の研究	48
2.4	有索作業モジュールの研究開発	51
2.4.1	管状マニピュレータの研究	51
2.4.2	光駆動作業機構の研究	54
2.4.3	移動・運動機構の研究	56
2.4.4	光発電・昇圧機構の研究	58
2.4.5	高出力動力源の研究	61
2.4.6	環境認識機構の研究	64
2.5	トータルシステムの研究	66
2.5.1	メンテナンスシステムの研究	66
2.5.2	マイクロマシンシステムの研究	66
3	研究の結果	67

平成4年度大型工業技術研究開発制度

新エネルギー・産業技術総合開発機構委託

マイクロマシン技術の研究開発 (マイクロマシン技術の研究開発) 成果概要

平成5年4月

財団法人 マイクロマシンセンター

目 次

1 研究の目的と範囲	1
1.1 研究の目的	1
1.2 研究の範囲	1
2 研究の概要	2
2.1 マイクロマシン技術の医療応用に関する調査研究	2
2.1.1 調査研究の目的	2
2.1.2 マイクロマシン技術の医療への応用	3
2.1.3 技術課題の抽出	13
2.1.4 特許及び海外調査	28
2.2 行動型制御の研究	40
2.3 人工筋肉の研究	44
2.4 駆動及びサスペンションの研究	46
3 研究の結果	52

マイクロマシンの基礎技術の研究

— その 1 —

平成 6 年 3 月

財団法人 マイクロマシンセンター

目 次

(調査研究概要)

第1章 調査研究の目的	G 3
第2章 調査研究の実施方法	G 4
第3章 調査研究成果の要約	G 8
3. 1 マイクロマシン表面への水分子吸着とトライボロジ特性	G 8
3. 2 マイクロマシンに働く粘性力の評価と応用	G 9
3. 3 医療用アクチュエータ材料	G 11
3. 4 生体適合性高分子材料の分子設計	G 13
3. 5 マイクロマシンのための先導設計	G 15
3. 6 マイクロマニピュレーションシステム	G 17
3. 7 アクチュエータ・機構システム	G 20
3. 8 形状記憶合金アクチュエータシステム	G 22

(本 編)

第1章 マイクロマシン表面への水分子吸着とトライボロジ特性	3
1. 1 緒言	5
1. 2 固体表面の諸特性とマイクロトライボロジー	7
1. 2. 1 マイクロトライボロジーについて	7
1. 2. 2 マイクロトライボロジーへのSPMの応用	11
1. 2. 3 マイクロトライボロジーにおける表面改質技術	16
1. 3 化学的立場から見たマイクロマシンのトライボロジー	29
1. 3. 1 はじめに	29
1. 3. 2 潤滑油薄膜のトライボロジー特性	29
1. 3. 3 ナノ薄膜のトライボロジー	30
1. 3. 4 液晶による潤滑	33
1. 3. 5 分子配向と分子構造	35
1. 3. 6 摩擦面における化学反応	37
1. 3. 7 新生面の化学的性質	38
1. 3. 8 ま と め	42
1. 4 分子動力学法を用いた固体接触界面現象の解析	45

1. 4. 1	緒言	45
1. 4. 2	分子動力学法を用いた極微小切削機構の解析	45
1. 4. 3	計算機実験と切削実験との整合性	49
1. 4. 4	工具・被削材界面での材料挙動	52
1. 4. 5	極微小切削における切くず生成の限界とバニシング	58
1. 4. 6	結言	65
1. 5	マイクロマシンにおける水分子吸着	67
1. 5. 1	マイクロマシンと表面現象	67
1. 5. 2	実験装置ならびに実験方法	68
1. 5. 3	実験結果及び考察	76
1. 5. 4	今年度のまとめ	94
1. 6	マイクロマシンのトライボロジーとエキソ電子放射	98
1. 6. 1	エキソ電子放射とマイクロマシン	98
1. 6. 2	エキソ電子の放射モデル	99
1. 6. 3	電界刺激エキソ電子放射	100
1. 6. 4	エキソ電子放射サイトの観察	101
1. 6. 5	エキソ電子放射の実用化に向けて	108
1. 7	結言	111
第2章 マイクロマシンに働く粘性力の評価と応用		
2. 1	緒言	115
2. 2	微小振動子に作用する流体力の評価法と実験	116
2. 2. 1	はじめに	116
2. 2. 2	橢型マイクロアクチュエータに作用する流体力	116
2. 2. 3	微小なカンチレバーに作用する流体力	123
2. 2. 4	機械振動場を利用して動くマイクロロボットに及ぼす流体力の影響	125
2. 3	流体力を用いて泳ぐ生物のメカニズム	128
2. 3. 1	はじめに	128
2. 3. 2	流体から受ける力	128
2. 3. 3	微小生物の蛇行運動	128
2. 3. 4	蛇行運動	133
2. 3. 5	パドリング	133

2. 3. 6	ジェット推進	133
2. 3. 7	扇ぎによる運動	135
2. 4	飛翔	139
2. 4. 1	グライドと羽ばたき飛行	139
2. 4. 2	揚力・抗力について	140
2. 4. 3	レイノルズ数と抗力係数の関係	142
2. 4. 4	飛翔時のエネルギー供給・制御について	147
2. 5	流体力の計測	149
2. 5. 1	はじめに	149
2. 5. 2	流体力の計測実験	149
2. 5. 3	実験結果と考察	155
2. 6	結言	162
2. 6. 1	流体力のまとめ	162
2. 6. 2	マイクロロボットの課題	162
第3章	医療用アクチュエータ材料	167
3. 1	緒言	169
3. 2	医療用アクチュエータ材料の研究	170
3. 2. 1	微小機構の物理学（人工筋肉設計の理論的基礎）	170
3. 2. 2	高分子ゲルアクチュエータの設計と応用	180
3. 2. 3	高分子電解質膜のアクチュエータへの応用	186
3. 2. 4	形状記憶合金を用いたマイクロマシン	207
3. 3	医療用マイクロマシンの研究	213
3. 3. 1	仮想現実空間技術とVideo assisted surgery	213
3. 3. 2	能動内視鏡の設計	221
3. 3. 3	分散型人工心臓の基本構想と基礎的実験	228
3. 3. 4	医療用マイクロマシンの表面加工と修飾	234
3. 3. 5	アクチュエータ・センサ材料へのタンパク吸着の解析	248
3. 4	医療用マイクロマシン研究への企業としての取り組み	264
3. 4. 1	株式会社アイシンコスモス研究所	264
3. 4. 2	住友電気工業株式会社播磨研究所	270
3. 4. 3	三菱電線工業株式会社	276

3. 5	結 言	283
第4章 生体適合性高分子材料の分子設計		
4. 1	緒 言	287
4. 2	タンパク質の吸着を回避する材料	290
4. 2. 1	緒 言	290
4. 2. 2	タンパク質の吸着とマイクロマシンに与える影響	290
4. 2. 3	タンパク質の新しい吸着過程解析法	297
4. 2. 4	タンパク質の吸着を抑制する高分子の分子設計	303
4. 2. 5	結 語	309
4. 3	血小板の吸着を回避する材料	311
4. 3. 1	緒 言	311
4. 3. 2	材料表面への血小板吸着のメカニズム	311
4. 3. 3	血液内で用いられるマイクロマシン	312
4. 3. 4	血小板の吸着を回避する材料の分子設計	313
4. 3. 5	マイクロマシン表面への血小板の吸着を回避する材料の固定	319
4. 3. 6	結 語	321
4. 4	細網内皮系を回避する材料	324
4. 4. 1	緒 言	324
4. 4. 2	細網内皮系 (RES) を回避するためのドラッグキャリア設計	325
4. 4. 3	ウイルスをモデルにしたキャリアシステム設計	328
4. 4. 4	高分子ミセル型抗がん剤	332
4. 5	組織反応を回避する材料	339
4. 5. 1	緒 言	339
4. 5. 2	材料の組織反応	339
4. 5. 3	組織反応を回避する材料の設計	340
4. 5. 4	組織中で機能を示す材料システムとその波及効果	348
4. 5. 5	結 語	353
4. 6	細胞・組織に吸着・脱着制御できる材料	358
4. 6. 1	緒 言	358
4. 6. 2	温度に応答して構造を変化する高分子	358
4. 6. 3	外的刺激で機能変化するPIAAm-酵素複合体	362

4. 6. 4	親水性－疎水性を変化させる表面	364
4. 6. 5	培養細胞の接着・脱着の制御	365
4. 6. 6	微粒子の温度モジュレーション	368
4. 7	現在使用されている埋め込み型人工臓器（補足資料）	374
4. 7. 1	緒言	374
4. 7. 2	現在実用化されている植え込み型人工臓器	374
4. 7. 3	結語	380
4. 8	結言	385
第5章 マイクロマシンのための先導設計		
5. 1	緒言	389
5. 2	光熱駆動型マイクロアクチュエータの設計	390
5. 2. 1	はじめに	390
5. 2. 2	光熱駆動型マイクロアクチュエータ	391
5. 2. 3	圧力上昇のメカニズム	393
5. 2. 4	高応答性実現のための設計指針	400
5. 2. 5	アクチュエータの試作	404
5. 2. 6	試作されたアクチュエータの応答性の検証	406
5. 2. 7	光熱駆動型マイクロポンプ	408
5. 2. 8	まとめ	410
5. 3	血流を利用したカテーテル誘導メカニズムの設計	411
5. 3. 1	はじめに	411
5. 3. 2	血管内拍動流再現装置	412
5. 3. 3	血管内パイロットシステム	413
5. 3. 4	性能実験	417
5. 3. 5	臨床的観点からの今後の展望	419
5. 3. 6	先導設計と異分野コラボレーション	426
5. 4	人工衛星のマイクロ化設計	432
5. 4. 1	衛星設計の現状	432
5. 4. 2	研究の目的	432
5. 4. 3	先導設計のマイクロ人工衛星への応用	433
5. 4. 4	スピン衛星の熱制御系におけるスケール効果	434

5. 4. 5	まとめ	440
5. 5	光造形法に基づくマイクロマシンの設計・製作	440
5. 5. 1	マイクロマシンの先導的設計と光造形加工	440
5. 5. 2	マイクロ光造形法概論	441
5. 5. 3	微細加工へのアプローチ	446
5. 5. 4	機械システム製造へのアプローチ	448
5. 5. 5	今後の課題	452
5. 5. 6	まとめ	454
5. 6	結言	455
第6章	マイクロマニピュレーションシステム	459
6. 1	緒言	459
6. 1. 1	研究の背景	459
6. 1. 2	研究の現状	460
6. 1. 3	研究の目的	464
6. 2	微細作業システムの要求機能	467
6. 2. 1	微細作業の特徴	467
6. 2. 2	微細作業システムの要求機能	468
6. 3	微細作業システムの基本構成	471
6. 3. 1	マニピュレータ	472
6. 3. 2	作業台	475
6. 3. 3	顕微鏡	477
6. 4	マイクロハンドリングシステム	477
6. 4. 1	構成	478
6. 4. 2	制御システム	478
6. 5	作業実験	486
6. 5. 1	マイクロエアタービンの組立	486
6. 5. 2	マイクロ鳥居の組立	491
6. 5. 3	マイクロ五重の塔の組立	495
6. 5. 4	作業システムの評価・考察	498
6. 6	結言	500

第7章	アクチュエータ・機構システム	503
7.1	緒言	503
7.2	アクチュエータの駆動原理	503
7.3	半導体マイクロマシーニング	504
7.4	各種マイクロアクチュエータとその応用例	509
7.4.1	静電アクチュエータ	509
7.4.2	電磁アクチュエータ	520
7.4.3	圧電アクチュエータ	521
7.4.4	熱バイモルフアクチュエータ	523
7.4.5	形状記憶合金アクチュエータ	526
7.4.6	熱膨張アクチュエータ	526
7.5	静電アクチュエータの構造設計の検討	531
7.5.1	くし歯形アクチュエータ	531
7.5.2	くし歯形アクチュエータの支持構造	531
7.5.3	アクチュエータの試作およびその特性	532
7.5.4	まとめ	537
7.6	圧電アクチュエータの構造設計の検討	539
7.6.1	はじめに	539
7.6.2	駆動機構に関する検討	540
7.6.3	まとめ	549
7.7	論文抄訳	549
7.8	結言	611
第8章	形状記憶合金アクチュエータシステム	615
8.1	緒言	615
8.2	形状記憶合金アクチュエータの原理	616
8.2.1	形状記憶合金の伸縮特性	616
8.2.2	形状記憶合金アクチュエータの設計原理	617
8.3	形状記憶合金細線アクチュエータ	621
8.3.1	形状記憶合金(TiNi)細線の力学特性 z	623
8.3.2	TiNi細線リニアアクチュエータの位置制御系の構成	626
8.3.3	TiNi細線リニアアクチュエータの位置制御系の数学モデル	628

8. 3. 4	TiNi細線リニアアクチュエータの位置制御実験	632
8. 3. 5	TiNi細線リニアアクチュエータの力制御系及び制御実験結果	636
8. 3. 6	TiNi細線リニアアクチュエータについてのまとめ	637
8. 3. 7	TiNi細線利用の他の形状記憶合金(SMA)アクチュエータシステム	638
8. 4	形状記憶合金薄板アクチュエータ	658
8. 4. 1	座屈タイプ	658
8. 4. 2	スパイラルタイプ	665
8. 5	形状記憶合金薄膜アクチュエータ	679
8. 5. 1	はじめに	679
8. 5. 2	形状記憶合金(TiNi)成膜法	679
8. 5. 3	形状記憶合金薄膜の熱処理と力学特性	682
8. 5. 4	形状記憶合金薄膜の制御	693
8. 5. 5	可逆形状記憶合金薄膜の熱処理と変形特性	697
8. 5. 6	可逆形状記憶合金薄膜の制御	701
8. 5. 7	応用例	703
8. 6	形状記憶合金アクチュエータの評価	709
8. 7	結 言	711

マイクロマシンの基礎技術の研究

— その 1 —

平成 7 年 3 月

財団法人 マイクロマシンセンター

目 次

[概要編]

第1章 調査研究の目的	G 3
第2章 調査研究の実施方法	G 4
第3章 調査研究成果の要約	G 9
3. 1 マイクロ伝熱・流れ特性	G 9
3. 2 マイクロ機構の動的計測手法	G 10
3. 3 マイクロ部品の寸法計測手法	G 12
3. 4 医療におけるマイクロ計測手法	G 14
3. 5 マイクロデバイスの組立手法	G 17
3. 6 集積化機能デバイス構築法	G 19
3. 7 医療用マイクロマシンの機能材料	G 21
3. 8 センサ材料の特性	G 23
3. 9 エネルギー供給手法	G 25
3. 10 マイクロマシンCAD技術	G 27
3. 11 マイクロ運動機構の制御手法	G 29

[本編目次紹介]

第1章 マイクロ伝熱・流れ特性	3
1. 1 緒言	5
1. 1. 1 熱流体现象のマイクロ場への応用	5
1. 1. 2 マイクロスケール場における熱伝導と熱伝達	7
1. 2 マイクロスケール伝熱・流動に関する分子動力学	22
1. 2. 1 分子動力学法	22
1. 2. 2 液体中の衝撃波の微細構造	25
1. 2. 3 気体界面の分子構造	28
1. 2. 4 固体表面上の気体分子の挙動と反射モデル	31
1. 2. 5 二原子分子の衝突過程と分子衝突モデル	37
1. 3 マイクロスケール熱伝導	45
1. 3. 1 熱伝導概論	45
1. 3. 2 金属薄膜	51

1. 3. 3	非金属薄膜	53
1. 3. 4	超伝導薄膜	57
1. 3. 5	界面接触熱抵抗	60
1. 3. 6	まとめ	63
1. 4	マイクロチャネル伝熱および流動	65
1. 4. 1	マイクロチャネルにおける単相流動と伝熱	66
1. 4. 2	マイクロチャネルにおける気液二相流動と伝熱	75
1. 4. 3	マイクログループ蒸発	84
1. 5	マイクロヒートシンク	92
1. 5. 1	マイクロヒートシンクの概要	92
1. 5. 2	マイクロヒートシンクの性能	94
1. 6	マイクロヒートパイプ	100
1. 6. 1	マイクロヒートパイプの概念形成	100
1. 6. 2	マイクロヒートパイプ熱輸送性能のモデル	101
1. 6. 3	計算および実験の結果と応用	126
1. 6. 4	マイクロヒートパイプの応用例	146
1. 7	マイクロドリームパイプ	154
1. 7. 1	振動制御型熱輸送管(ドリームパイプ)の原型と特徴	154
1. 7. 2	振動制御型熱輸送管の作動原理	157
1. 7. 3	振動制御型熱輸送管における実効温度拡散率	160
1. 7. 4	振動制御型熱輸送管の最適化	161
1. 7. 5	振動制御型熱輸送管によるマイクロ熱輸送デバイスの可能性	166
1. 8	マイクロ冷凍機	170
1. 8. 1	マイクロ冷凍機の歴史	170
1. 8. 2	マイクロ冷凍機の応用例	171
1. 8. 3	熱交換器	172
1. 9	結言	175
第2章 マイクロ機構の動的計測手法		177
2. 1	緒言	179
2. 2	マイクロ機構の動的計測法の分類と問題点	180
2. 2. 1	マイクロ計測における一般的な問題点	181

2. 2. 2	変位振動測定	182
2. 2. 3	運動精度測定	191
2. 2. 4	力測定	203
2. 3	マイクロ機構の動的計測手法の具体例	205
2. 3. 1	変位振動測定の事例と問題点	205
2. 3. 2	力・トルク測定の事例と問題点	222
2. 4	今後の課題	231
2. 4. 1	高速現象測定の際の問題	231
2. 4. 2	非接触計測の要求	231
2. 5	結言	231
第3章	マイクロ部品の寸法計測手法	233
3. 1	緒言	235
3. 2	マイクロ部品の寸法測定の必要条件	237
3. 2. 1	はじめに	237
3. 2. 2	寸法測定の必要条件	237
3. 2. 3	形状測定の必要条件	238
3. 2. 4	測定環境と手法	241
3. 2. 5	おわりに	241
3. 3	マイクロ部品の形状測定の実施例と問題点	243
3. 3. 1	はじめに	243
3. 3. 2	画像合成による光学顕微鏡の長焦点深度化	243
3. 3. 3	マイクロ部品の形状測定	252
3. 3. 4	まとめ	255
3. 4	光計測を利用したマイクロ部品の形状測定	257
3. 4. 1	はじめに	257
3. 4. 2	形状計測の概論	257
3. 4. 3	形状対象としてのマイクロ部品	259
3. 4. 4	幾何光学的計測手法	261
3. 4. 5	波動光学的方法（干渉法）	266
3. 4. 6	光学的方法の問題点	272
3. 4. 7	おわりに	273

3. 5	マイクロマシン形状計測のための駆動要素	276
3. 5. 1	P Z Tの応用技術	276
3. 5. 2	走査型トンネル顕微鏡と原子間力顕微鏡のための大ストローク走査部	286
3. 5. 3	チューブスキャナ	290
3. 5. 4	多次元干渉計の構成	291
3. 5. 5	一体構造平行ばねの特性評価	296
3. 5. 6	結論	299
3. 6	S E Mによるマイクロ部品の形状測定	300
3. 6. 1	はじめに	300
3. 6. 2	トポグラフィS E Mの現状	300
3. 6. 3	トポグラフィS E Mの問題点と将来対策	318
3. 7	形状測定基準の高精度化	319
3. 7. 1	はじめに	319
3. 7. 2	ナノメートルレベルの分解能を持つ2次元光点変位センサ	320
3. 7. 3	直線基準としてのレーザビームの安定性	324
3. 7. 4	直進運動の高精度測定	326
3. 7. 5	レーザビーム直線基準による高精度形状測定	328
3. 7. 6	まとめ	333
3. 8	結言	334
第4章	医療におけるマイクロ計測手法	337
4. 1	緒言	339
4. 2	微小循環の実時間観察	342
4. 2. 1	内外の動向	342
4. 2. 2	新しい原理の観察方法の考案	343
4. 2. 3	C C Dを利用した微小循環観察用プローブの開発	344
4. 2. 4	プローブの性能評価	346
4. 2. 5	考察	348
4. 3	医療における体内超音波プローブの現状と将来	349
4. 3. 1	体外超音波プローブから体内超音波プローブへ	349
4. 3. 2	現在の細径超音波プローブ	351

4. 3. 3	細径超音波プローブの臨床応用	352
4. 3. 4	細径超音波プローブへの要望と将来展望	355
4. 4	マイクロメカニカルセンサの医療応用	357
4. 4. 1	はじめに	357
4. 4. 2	ダイヤフラム型圧力センサ	357
4. 4. 3	高機能カテーテル	367
4. 4. 4	まとめ	368
4. 5	光ファイバセンサ	371
4. 5. 1	緒言	371
4. 5. 2	光ファイバセンサ	371
4. 5. 3	増幅化と微小化技術	374
4. 5. 4	医療への応用	376
4. 5. 5	結語	376
4. 6	シリコンプロセスによる培養神経回路網刺激電極アレイ	378
4. 6. 1	はじめに	378
4. 6. 2	電極アレイのファブリケーション	378
4. 6. 3	細胞培養と電気生理学的計測装置	381
4. 6. 4	神経突起の成長誘導	381
4. 6. 5	電気刺激と活動電位測定	381
4. 7	液性情報、神経系情報のマイクロセンサ開発とその人工臓器制御への応用	387
4. 7. 1	緒言	387
4. 7. 2	液性系情報検出のためのマイクロセンサの開発	387
4. 7. 3	神経系情報計測のためのマイクロセンサ(電極)の開発	390
4. 7. 4	結言	394
4. 8	センサ表面への生体高分子吸着の動態解析と制御	395
4. 8. 1	はじめに	395
4. 8. 2	タンパク吸着におよぼす電界の影響	395
4. 8. 3	結言	404
4. 9	STMによる有機物、生体高分子の解析	405
4. 9. 1	STMによる有機物、生体高分子観察の現状	406
4. 9. 2	STMによる液晶およびDNA観察	407

4. 10	シリコン発光素子の開発とその医療応用	414
4. 10. 1	はじめに	414
4. 10. 2	Si _{1-x} Ge _x /Si 量子井戸 (quantum well[QW]) の発光	416
4. 10. 3	おわりに	425
4. 11	生体用マイクロセンサのファブリケーション	427
4. 11. 1	はじめに	427
4. 11. 2	半導体圧力センサ付きカテーテルの構造と原理	427
4. 11. 3	圧力センサのファブリケーション	429
4. 11. 4	ファブリケーションにおける問題点	429
4. 11. 5	まとめ	429
4. 12	生体適合性材料における血液・組織反応の計測	431
4. 12. 1	はじめに	431
4. 12. 2	現状の生体適合性評価方法	431
4. 12. 3	抗血栓性のリアルタイム評価法	434
4. 12. 4	まとめ	435
4. 13	結言	437
第5章 マイクロデバイスの組立手法		439
5. 1	緒言	441
5. 1. 1	研究の背景	441
5. 1. 2	従来の研究	442
5. 1. 3	本研究の位置付け	444
5. 2	超微細作業	447
5. 2. 1	超微細作業世界の特徴	447
5. 2. 2	ハンドアイシステムの必要性	449
5. 3	超微細作業ハンドアイシステム	452
5. 3. 1	システムへの要求機能	452
5. 3. 2	システム構成	457
5. 4	ナノハンドアイシステムの構築	460
5. 4. 1	ナノハンドアイシステム	460
5. 4. 2	ソフトウェア構成	470
5. 5	作業実験	474

5. 5. 1	マニュアル操作による金属球並べ	474
5. 5. 2	オープンループによる文字描画目的	477
5. 5. 3	ビジュアルサーボによる細線描画(1)	479
5. 5. 4	ビジュアルサーボによる細線描画(2)	484
5. 6	結言	487
第6章 集積化機能デバイス構築法		489
6. 1	緒言	491
6. 2	能動カテーテル	492
6. 3	能動カテーテルの設計と製作	495
6. 3. 1	アクチュエータの駆動方式	495
6. 3. 2	共通3線式システムと通信・制御用集積回路	500
6. 3. 3	リンクの一括加工プロセス	503
6. 3. 4	組立プロセス	507
6. 4	能動カテーテルの製作結果	513
6. 5	結言	518
第7章 医療用マイクロマシンの機能材料の調査研究		519
7. 1	諸言	521
7. 2	高分子微粒子の作製	523
7. 2. 1	緒言	523
7. 2. 2	既存の高分子の微粒子化	525
7. 2. 3	重合による微粒子の作製	526
7. 2. 4	微粒子を改造する重合(シード重合)	531
7. 2. 5	官能基変換および機能成分導入による表面改質	535
7. 2. 6	結言	537
7. 3	磁性粒子化とその応用	541
7. 3. 1	緒言	541
7. 3. 2	磁性細菌粒子の特性	541
7. 3. 3	磁性粒子を固定化担体とした高感度免疫測定	543
7. 3. 4	磁性粒子をリポソームに導入したドラッグデリバリーシステム	547
7. 3. 5	磁性粒子をプローブとしたミオシンの運動制御	549

7. 3. 6	結言	552
7. 4	温度応答性界面の設計	554
7. 4. 1	はじめに	554
7. 4. 2	温度に応答する高分子ゲル	554
7. 4. 3	温度に応答する界面	562
7. 5	ナノパーティクルの医療応用	570
7. 5. 1	緒言	570
7. 5. 2	パーティクル・ボンバードメント法	570
7. 5. 3	マイクロプロジェクタイトル用パーティクルの可能性	571
7. 5. 4	パーティクルの検討	574
7. 5. 5	パーティクルガンの展望	578
7. 5. 6	結言	580
7. 6	機能性微粒子の医療応用とデリバリーデバイス	582
7. 6. 1	はじめに	582
7. 6. 2	機能性微粒子応用診断	583
7. 6. 3	機能性微粒子応用治療	584
7. 6. 4	機能性微粒子デリバリーデバイス	585
7. 6. 5	デリバリーデバイスの将来	591
7. 6. 6	まとめ	591
7. 7	粒子の生体内移動時における強度	593
7. 7. 1	緒言	593
7. 7. 2	細胞	593
7. 7. 3	赤血球	596
7. 7. 4	白血球	605
7. 8	細胞認識機能を有するナノスフィア的设计	610
7. 8. 1	緒言	610
7. 8. 2	実験方法	612
7. 8. 3	結果と考察	613
7. 8. 4	結論	621
7. 9	結言	623

第8章 センサ材料の特性	625
8.1 結言	627
8.2 金属材料	628
8.2.1 ひずみセンサへの応用	629
8.2.2 温度センサへの応用	634
8.2.3 磁気センサへの応用	639
8.3 半導体材料	644
8.3.1 圧力センサ	645
8.3.2 温度センサ	652
8.3.3 赤外線センサ	653
8.3.4 可視光センサ	658
8.3.5 放射線センサ	663
8.3.6 磁気センサ	664
8.4 セラミック材料	670
8.4.1 圧力センサ	670
8.4.2 温度センサ	673
8.4.3 赤外線センサ	678
8.4.4 磁気センサ	680
8.4.5 ガスセンサ	681
8.4.6 湿度センサ	684
8.5 有機センサ材料	688
8.5.1 圧力・超音波センサ	688
8.5.2 温度センサ	695
8.5.3 光センサ	700
8.5.4 まとめ	703
8.6 結言	704
第9章 エネルギー供給手法	705
9.1 緒言	707
9.2 マイクロ波によるエネルギー供給	710
9.2.1 はじめに	710
9.2.2 マイクロマシンに対するマイクロ波エネルギー供給	711

9. 2. 3	配管内マイクロ波エネルギー供給の現状技術	715
9. 2. 4	電力変換素子	720
9. 3	光エネルギー供給	726
9. 3. 1	はじめに	726
9. 3. 2	現状技術	726
9. 3. 3	開発課題	730
9. 4	超音波エネルギー供給	734
9. 4. 1	はじめに	734
9. 4. 2	現状技術	735
9. 4. 3	開発課題	736
9. 5	マイクロバッテリー	739
9. 5. 1	はじめに	739
9. 5. 2	電子機器用電池の一般的トレンド	739
9. 5. 3	1次電池	740
9. 5. 4	2次電池	743
9. 5. 5	マイクロマシンに適した電池	745
9. 5. 6	おわりに	747
9. 6	電磁誘導を利用したエネルギー供給	749
9. 6. 1	はじめに	749
9. 6. 2	スケール効果	749
9. 6. 3	これまでの研究および商品例	750
9. 6. 4	おわりに	757
9. 7	流体力を利用したエネルギー供給	759
9. 7. 1	レイノルズ数	759
9. 7. 2	揚力と抗力	760
9. 7. 3	スケールダウンが粘性力、慣性力に与える影響	760
9. 7. 4	空気の粘性による減衰効果	761
9. 7. 5	スケールダウンによる揚力係数、抗力係数の変化	763
9. 7. 6	流体駆動型マイクロ発電機	767
9. 8	その他のエネルギー供給法	770
9. 8. 1	機械振動の場を利用した選択的エネルギー供給	770
9. 8. 2	超磁歪素子を利用した非接触駆動アクチュエータ	776

9. 8. 3	光圧電素子PLZTを用いた光アクチュエータ	777
9. 8. 4	光熱効果を利用したカンチレバーの共振	778
9. 8. 5	フォトメカニカル効果の利用	778
9. 8. 6	イオンdrag力を利用したマイクロソーラポート	779
9. 8. 7	高分子ゲル・アクチュエータ	780
9. 8. 8	熱雑音の場が有するエネルギーの利用	781
9. 9	結言	784
第10章	マイクロマシンCAD技術	785
10. 1	緒言	787
10. 2	文献サーベイ	788
10. 3	マイクロ人工衛星の先導設計	796
10. 3. 1	先導設計とは	796
10. 3. 2	研究の目的	796
10. 3. 3	先導設計のアプローチ	796
10. 3. 4	先導設計の定式化	798
10. 3. 5	設計モデル	799
10. 3. 6	シミュレーテッド・アニーリング法	800
10. 3. 7	先導設計支援システム	801
10. 3. 8	マイクロ人工衛星	801
10. 3. 9	マイクロ人工衛星の先導設計結果	806
10. 3. 10	結論	809
10. 4	光造形法に基づくマイクロマシンの設計製作	810
10. 4. 1	はじめに	810
10. 4. 2	光造形法とマイクロマシン	810
10. 4. 3	加工分解能を高めるための指針	812
10. 4. 4	可動部の実現と評価	819
10. 4. 5	今後の課題とその解決のための指針	821
10. 4. 6	まとめ	821
10. 5	マイクロ光造形のためのCAEに関する基礎研究	822
10. 5. 1	序論	822
10. 5. 2	マイクロ光造形法	823

10. 5. 3	固化した光硬化性樹脂の力学モデル	826
10. 5. 4	固化した光硬化性樹脂の粘弾性の実測とモデル化の検証	832
10. 5. 5	マイクロ光造形法のための有限要素法解析プログラム	837
10. 5. 6	結論	839
10. 6	血管内手術のためのレーザ光を用いた離脱	840
10. 6. 1	はじめに	841
10. 6. 2	離脱の方法と材料	841
10. 6. 3	伝熱計算	842
10. 6. 4	カテーテル先端の離脱実験と離脱チップの接合強度	843
10. 6. 5	終わりに	846
10. 7	マイクロマシン設計支援環境のためのモデリング技術	849
10. 7. 1	マイクロマシンの対象モデリング	849
10. 7. 2	機能要素の検索	850
10. 7. 3	モデルを介した物理知識の利用	851
10. 7. 4	ネットワークを介した製造プロセス知識の共有	853
10. 7. 5	関連する研究	854
10. 7. 6	まとめと今後の展望	855
10. 8	結言	857
第11章	マイクロ運動機構の制御方法	859
11. 1	緒言	861
11. 2	これまでの超音波モータ	862
11. 2. 1	クサビ型超音波モータ	862
11. 2. 2	進行波型超音波モータ	866
11. 2. 3	超音波モータの適用例	869
11. 2. 4	超音波モータの問題点	871
11. 3	マイクロ超音波モータ	872
11. 3. 1	マイクロ超音波モータの基本構造	873
11. 3. 2	マイクロ超音波モータの適用例	874
11. 4	マイクロ超音波モータの新しい制御方法	876
11. 4. 1	2パラメータPWM制御	876
11. 4. 2	位置制御	892

11. 5	位置センサー体型マイクロアクチュエータについての考察	897
11. 6	結言	899

マイクロマシンの基礎技術の研究

— その 1 —

平成 8 年 3 月

財団法人 マイクロマシンセンター

目 次

[概要編]

第1章 調査研究の目的	G3
第2章 調査研究の実施方法	G4
第3章 調査成果の要約	G9
3.1 熱流体现象におけるマイクロ場拘束効果	G9
3.2 マイクロ部品の寸法計測手法	G11
3.3 医療におけるマイクロ計測手法	G13
3.4 集積化機能デバイス構築法	G18
3.5 マイクロデバイス加工技術	G20
3.6 医療用マイクロマシンの機能材料	G21
3.7 マイクロバイオセンサ用機能材料	G23
3.8 バイオミメティック駆動機構とその制御	G25
3.9 システム制御技術	G27

[本編目次紹介]

第1章 熱流体现象におけるマイクロ場拘束効果	3
1.1 緒言	5
1.2 熱放射における場の拘束効果	8
1.2.1 はじめに	8
1.2.2 不透明な固体壁におけるふく射の放射・吸収	8
1.2.3 半透明物体の表面から放射されるふく射	12
1.2.4 ふく射伝播の波動光学的表現	14
1.2.5 二つの異なる媒質界面での電磁波の挙動	19
1.2.6 物体のふく射物性（反射率、吸収率、放射率）	21
1.2.7 薄膜光学	23
1.2.8 まとめ	30
1.3 対流熱伝達における場の拘束効果	32
1.3.1 微小スケールでの熱流動と希薄気体効果	34
1.3.2 マイクロチャネル	36
1.3.3 その他のマイクロ流れ	47

1. 3. 4	熱流動のマイクロデバイス	48
1. 4	蒸発場における場の拘束効果	58
1. 4. 1	気液界面における蒸発熱伝達率の概要	58
1. 4. 2	メニスカス近傍における蒸発現象の概要	60
1. 4. 3	マイクログループ蒸発	64
1. 4. 4	マイクログループ蒸発に関する実験	65
1. 5	多孔質における場の拘束効果	69
1. 5. 1	多孔質マイクロ構造体の製作例	69
1. 5. 2	多孔質における長さ尺度	73
1. 5. 3	多孔質体の熱伝導	77
1. 5. 4	多孔質体内の流れ	80
1. 5. 5	多孔質体内熱流動の基礎方程式	84
1. 5. 6	多孔質体内の強制対流熱伝達	87
1. 6	気泡核生成駆動型マイクロアクチュエータ	97
1. 6. 1	均一な温度場における気泡生成条件	97
1. 6. 2	気泡核生成による力の発生	98
1. 6. 3	気泡核生成駆動型マイクロアクチュエータの構造	100
1. 7	半導体素子における熱制御技術	105
1. 7. 1	半導体素子における基本的熱制御技術とその最近の動向	105
1. 7. 2	Oscillatory Air Flow Cooling(OAFC)	112
1. 7. 3	Manifold Microchannel Heat Sink(MMCHS)	116
1. 7. 4	Compact Thermosiphon Assisted Cooling(CTSAC)	119
1. 7. 5	Self-Excited Oscillation Controlled Heat Transport Dwice Assisted Cooling(SEOCHTDAC)	123
1. 7. 6	Impinging Liquid Jet Boiling Cooling(ILJBC)	125
1. 8	結言	133
第2章	マイクロ部品の寸法計測手法	137
2. 1	緒言	139
2. 2	マイクロ部品の形状測定におけるプローブの適正選択	141
2. 3	表面形状と素子機能との関連	147
2. 4	萌芽的手法の現状と適用限界	156

2. 4. 1	画像合成による長焦点光学顕微鏡	156
2. 4. 2	光応用計測	158
2. 4. 3	光リング式三次元非接触形状センサ	164
2. 4. 4	マイクロ三次元測定器	177
2. 4. 5	原子間力プローブ搭載三次元測定器	181
2. 5	異なる手法による計測データの比較	185
2. 5. 1	はじめに	185
2. 5. 2	触針式三次元粗さ形状測定器	185
2. 5. 3	トポグラフィSEMによる三次元表面粗さの解析	186
2. 5. 4	画像合成による長焦点顕微鏡	195
2. 5. 5	走査型レーザ顕微鏡	203
2. 5. 6	光リング式三次元非接触形状センサ	208
2. 5. 7	まとめ	209
2. 6	内部形状、閉塞部分の測定	210
2. 6. 1	マイクロマシンの形状の特性	210
2. 6. 2	CTによる形状計測への応用	210
2. 6. 3	X線散乱による微細構造の評価	215
2. 7	結言	218
第3章 医療におけるマイクロ計測手法		221
3. 1	緒言	223
3. 2	人工心臓におけるマイクロ計測	224
3. 2. 1	はじめに	224
3. 2. 2	人工心臓における計測の目的とその条件	224
3. 2. 3	制御のための計測	225
3. 2. 4	評価のための計測	228
3. 2. 5	故障予知、診断のための計測	231
3. 2. 6	人工心臓用計測の問題点	231
3. 3	医療および生体計測・制御用小型バイオテレメトリシステム	233
3. 3. 1	はじめに	233
3. 3. 2	小型バイオテレメトリシステム	223
3. 3. 3	終わりに	243

3. 4	細径超音波プローブの子宮癌進展度診断への試み	245
3. 4. 1	産婦人科における超音波画像診断	245
3. 4. 2	細径超音波プローブ	245
3. 4. 3	細径超音波プローブの子宮癌進展度診断への応用	248
3. 4. 4	細径超音波プローブへの要望と将来展望	253
3. 5	神経系活動のマイクロ計測と電極作成に対する マイクロマシニング技術の応用	256
3. 5. 1	神経系活動計測用マイクロデバイス開発とその社会的背景	256
3. 5. 2	マイクロニューログラム法	256
3. 5. 3	神経再生型電極	258
3. 5. 4	MULTICHANNEL ELECTRODE ARRAY	261
3. 5. 5	生体電極の応用と問題点	263
3. 6	内視鏡による脊髄の観察と脊髄誘発電位計測	265
3. 6. 1	内視鏡による脊髄へのアプローチ	265
3. 6. 2	国内外での脊髄内視鏡の利用	268
3. 6. 3	内視鏡下の脊髄インターベンション	268
3. 6. 4	脊髄神経における神経インターフェース	275
3. 7	光活性電位測定型センサー	277
3. 7. 1	はじめに	277
3. 7. 2	LAPSの測定原理	277
3. 7. 3	LAPSの既往研究	284
3. 7. 4	課題	288
3. 7. 5	終わりに	289
3. 8	Si系ナノ材料の医学計測応用	292
3. 8. 1	はじめに	292
3. 8. 2	波長領域の分類	292
3. 8. 3	可視光領域	295
3. 8. 4	近赤外領域	307
3. 8. 5	遠赤外領域	334
3. 8. 6	終わりに	338
3. 9	微小電極を用いたDNA診断	340
3. 9. 1	はじめに	340

3. 9. 2	細胞操作の一般的手法	340
3. 9. 3	DNA診断の方法	341
3. 9. 4	まとめ	344
3. 10	大動脈内バルーンポンプにおけるマイクロ計測手法	345
3. 10. 1	大動脈内バルーンポンプにおける応用	345
3. 10. 2	半導体圧力センサ付きカテーテルの構造と原理	345
3. 10. 3	カテ先血圧センサによる大動脈圧計測	346
3. 10. 4	カテ先血圧センサの有用性	348
3. 10. 5	まとめ	351
3. 11	ガスセンサの医療計測への応用	352
3. 11. 1	はじめに	352
3. 11. 2	匂い計測法	353
3. 11. 3	代謝生成物	357
3. 11. 4	マイクロ計測手法実現の可能性	360
3. 12	結言	367
第4章	集積化機能デバイス構築法	369
4. 1	緒言	371
4. 2	能動カテーテル	372
4. 2. 1	既存のカテーテルの限界と能動カテーテルの必要性	372
4. 2. 2	マイクロマシニングによる能動カテーテル	372
4. 2. 3	能動カテーテルの動作特性	381
4. 3	連続紫外線レーザを用いた高速CVDによるマイクロアセンブリ	385
4. 3. 1	緒言	385
4. 3. 2	技術的背景	385
4. 3. 3	実験装置	386
4. 3. 4	結果と考察	388
4. 3. 5	能動カテーテルへの応用	391
4. 3. 6	まとめ	392
4. 4	能動カテーテルのための通信・制御用集積回路	393
4. 4. 1	緒言	393
4. 4. 2	能動カテーテル及び通信・制御用集積回路の構造	395

4. 4. 3	バスシステム及びプロトコール	398
4. 4. 4	通信・制御用の集積回路	401
4. 4. 5	SWAアクチュエータの駆動	404
4. 4. 6	まとめ	408
4. 5	結言	409
第5章	マイクロデバイス加工技術	411
5. 1	緒言	413
5. 2	マイクロ加工技術の現状調査	413
5. 2. 1	はじめに	413
5. 2. 2	バルクマイクロマシニング	414
5. 2. 3	表面マイクロマシニング	420
5. 2. 4	エッチング形状の型取り	422
5. 2. 5	エッチングした基板の拡散接合	425
5. 2. 6	金属・樹脂のマイクロマシニング	425
5. 2. 7	マイクロマシン用CADとデータベース	427
5. 2. 8	まとめ	428
5. 3	マイクロ加工技術における緊急課題	431
5. 3. 1	結晶方位依存性エッチングのデータベース	431
5. 3. 2	薄膜材料の機械的特性計測法の提案	441
5. 4	結言	453
第6章	医療用マイクロマシンの機能材料	505
6. 1	緒言	507
6. 2	温度応答性ミセルのマイクロマシンとしての可能性	508
6. 2. 1	はじめに	508
6. 2. 2	温度応答性ミセルのマイクロマシンとしての可能性	508
6. 2. 3	温度応答性高分子	512
6. 2. 4	温度応答性ブロック共重合体の合成	513
6. 2. 5	温度応答性ミセルの評価	514
6. 2. 6	終わりに	518
6. 3	磁気ビーズによる細胞、微生物、蛋白、核酸の分離	521

6. 3. 1	はじめに	521
6. 3. 2	磁気ビーズによる分離の原理	521
6. 3. 3	磁気ビーズによる細胞の分離	522
6. 3. 4	磁気ビーズを用いた固相化DNAシーケンシング(DNA Sequencing) ...	525
6. 3. 5	Oligo(dT)25結合磁気ビーズによるmRNAの分離	527
6. 3. 6	磁気ビーズによる細胞分離法の臨床医学への応用	529
6. 3. 7	終わりに	530
6. 4	分子システムとしての磁性粒子と パーティクル・ボンバードメント法の展望	531
6. 4. 1	分子システム	531
6. 4. 2	磁性微粒子	532
6. 4. 3	パーティクル・ボンバードメント法による ドラッグデリバリーシステム	536
6. 4. 4	マイクロマシンとしてのミトコンドリア	538
6. 4. 5	終わりに	544
6. 5	結言	548
第7章 マイクロバイオセンサ用機能材料		551
7. 1	諸言	553
7. 2	バイオセンサ	554
7. 2. 1	バイオセンサの原理	554
7. 2. 2	バイオセンサの構成	556
7. 2. 3	生体材料の固定化	559
7. 2. 4	センサ用有機材料	564
7. 2. 5	高分子修飾電極	566
7. 2. 6	酵素電極	567
7. 2. 7	微生物電極	568
7. 2. 8	印刷材料を用いたバイオセンサの作製	570
7. 3	マイクロバイオセンサ	573
7. 3. 1	マイクロマシン	573
7. 3. 2	マイクロマシン技術	576
7. 3. 3	微小フロー型化学分析システム	579

7. 3. 4	マイクロ酵素固定化カラムの製作	580
7. 3. 5	電気化学フローセルの製作とその特性の検討	588
7. 3. 6	マイクロ酵素固定化カラム-電極を用いるセンサーシステム	597
7. 3. 7	マイクロGOD・PODカラム-電極を用いるセンサー	603
7. 3. 8	マイクロ固定化酵素充填型リアクター 電極を用いるセンサーの開発	610
7. 3. 9	結論	615
7. 4	マイクロ酵素電池	624
7. 4. 1	はじめに	624
7. 4. 2	生物電池	624
7. 4. 3	マイクロ酵素電池とマイクロバイオセンサー	629
7. 5	結言	635
第8章	バイオミメティック駆動機構とその制御	637
8. 1	緒言	639
8. 2	外骨格型アクチュエータと制御	641
8. 2. 1	昆虫の外骨格構造	641
8. 2. 2	外骨格構造の有効性	643
8. 2. 3	ラージスケールモデル	644
8. 2. 4	マイクロスケールモデル	649
8. 2. 5	外骨格型アクチュエータの制御	654
8. 3	飛行の機構と制御	656
8. 3. 1	昆虫の飛行	656
8. 3. 2	大型動物の翼について	657
8. 3. 3	小型昆虫の飛行	660
8. 3. 4	飛行型マイクロロボット	667
8. 3. 5	翼以外で応用可能なメカニズム	669
8. 4	昆虫の神経系と行動の制御	671
8. 4. 1	昆虫の行動	671
8. 4. 2	昆虫の本能行動と神経系	673
8. 4. 3	昆虫の匂い源探索行動のアルゴリズムと神経司令・制御	678
8. 5	リカレント・ニューラルネットワークによる行動の発現	691

8. 5. 1	カイコガのフェロモン源への定位行動	691
8. 5. 2	フリップ・フロップ機構とニューラルネットワーク	692
8. 5. 3	フェロモン源に定位するロボット	702
8. 5. 4	遺伝アルゴリズムで最適化したRNN	706
8. 5. 5	まとめ	712
8. 6	ナノサテライトへの応用	714
8. 6. 1	ナノサテライトのコンセプト	714
8. 6. 2	宇宙用MEMS部品の設計と製作	716
8. 6. 3	バス機器とミッション機器	717
8. 6. 4	課題	718
8. 7	結言	720
第9章	マイクロマシンの制御手法	721
9. 1	緒言	723
9. 2	マイクロマシン制御のシステム制御論的考察	725
9. 2. 1	はじめに	725
9. 2. 2	システム制御理論の発展	726
9. 2. 3	生体に学ぶ巧みな制御方式	730
9. 2. 4	おわりに	741
9. 3	非線形動力学から見たマイクロマシン制御	743
9. 3. 1	はじめに	743
9. 3. 2	非線形動力学	743
9. 3. 3	生体運動の制御機構	745
9. 3. 4	CPGによる運動パターン生成に関する総論	748
9. 3. 5	ヒトの歩行運動を生成する神経筋骨格系モデル	751
9. 3. 6	おわりに	755
9. 4	マイクロマシンの「場」指向制御	758
9. 4. 1	はじめに	758
9. 4. 2	生命的自立性と「場」	758
9. 4. 3	リズムの相互引き込みに基づく「場」指向制御	765
9. 4. 4	応用例1：グループ編成マルチロボット	770
9. 4. 4	応用例2：荷物運搬マルチロボット	775

9. 4. 5	まとめ	801
9. 5	マイクロマシンのシナジェティック制御	783
9. 5. 1	はじめに	783
9. 5. 2	例題としての群ロボット系による輸送問題	784
9. 5. 3	ベナール対流とレイリー数	785
9. 5. 4	群ロボット系の設定	789
9. 5. 5	シミュレーション結果および考察	795
9. 5. 6	終わりに	801
9. 6	故障に対する適応性という観点から見たマイクロマシンの制御	802
9. 6. 1	はじめに	802
9. 6. 2	システムの果たすべき機能と要素の関係からの分類	803
9. 6. 3	各システムと操作者とのインターフェース	804
9. 6. 4	まとめと今後の研究への提言	823
9. 7	結言	824

平成8年度

マイクロマシンの基礎技術の研究

〔 本 編 〕

平成9年3月

財団法人 マイクロマシンセンター

本 編 目 次

[概 要 編]

第 1 章 調査研究の目的	G1
第 2 章 調査研究の実施方法	G2
第 3 章 調査成果の概要	G5
3. 1 マイクロ機構の動的計測法に関する調査研究	G5
3. 2 マイクロデバイスの組立手法に関する調査研究	G8
3. 3 医療用マイクロマシン材料に関する調査研究	G12
3. 4 バイオセンサ材料に関する調査研究	G15
3. 5 インテリジェント材料のマイクロマシンへの適用に関する調査研究	G17
3. 6 バイオミメティック駆動機構とその制御に関する調査研究	G20
3. 7 マイクロマシンの制御手法に関する調査研究	G23

[本 編]

はじめに	(9)
調査研究の実施方法	(10)
第 1 章 マイクロ機構の動的計測法に関する調査研究	1
1. 1 緒 言	3
1. 2 変位の動的計測	5
1. 2. 1 光応用測定	5
1. 2. 2 画像応用測定	9
1. 2. 3 まとめ	14
1. 3 力の動的計測	16
1. 3. 1 はじめに	16
1. 3. 2 AFM応用測定	16
1. 3. 3 ピエゾセンサ	19
1. 3. 4 バイオ関連	24
1. 3. 5 その他の原理による力計測	28
1. 3. 6 マイクロトライボロジ関連研究	30
1. 3. 7 まとめと今後期待される計測法	40
1. 4 トルクの動的計測	43

1. 5	温度の動的計測	50
1. 5. 1	はじめに	50
1. 5. 2	放射温度計の測定原理および仕様	52
1. 5. 3	アルミニウム面の放射率測定および温度補正データベースの作成	53
1. 5. 4	測定方法	54
1. 5. 5	測定結果	56
1. 5. 6	ロータ翼表面温度測定	58
1. 5. 7	測定結果	59
1. 6	圧力の動的計測	70
1. 7	特徴的な動的計測法	72
1. 7. 1	はじめに	72
1. 7. 2	静電アクチュエータとその応用可能性	72
1. 7. 3	薄膜形状記憶合金の利用可能性	75
1. 7. 4	超音波による物性測定	77
1. 8	WWWによる情報収集	80
1. 8. 1	はじめに	80
1. 8. 2	アメリカ・カナダの状況	80
1. 8. 3	ヨーロッパにおける拠点	84
1. 8. 4	まとめ	91
1. 9	結 言	92
第2章	マイクロデバイスの組立手法に関する調査研究	93
2. 1	緒 言	95
2. 2	微細作業	97
2. 2. 1	微細作業の定義	97
2. 2. 2	微細作業の必要性	99
2. 2. 3	微細作業に関する研究	100
2. 2. 4	微細作業の特徴	106
2. 2. 5	微細作業実現のための手段	108
2. 3	微細作業システム構成法	112
2. 3. 1	微細作業システムに対する要求機能	112
2. 3. 2	微細作業システムに対する制約条件	116

2. 3. 3	微細作業システムの構成法：集視構成	117
2. 4	電子顕微鏡内作業システムの構築	122
2. 4. 1	全体構成	122
2. 4. 2	顕微鏡部	127
2. 4. 3	マニピュレータ部	128
2. 4. 4	作業台部	131
2. 4. 5	ヒューマンインターフェース	132
2. 4. 6	制御システム	136
2. 5	微細作業のモデル化	139
2. 5. 1	微小体に働く力	139
2. 5. 2	微小体に働く微小力の測定	147
2. 5. 3	電子顕微鏡内における静電力	150
2. 5. 4	電子顕微鏡下における微細作業の力学モデル	163
2. 6	微小物のハンドリングの実現	169
2. 6. 1	微小な対象物の把持・離脱	169
2. 6. 2	微細作業におけるハンドリングスキル	172
2. 6. 3	接触面積減少法	174
2. 6. 4	接触面積置換法	184
2. 6. 5	ハンドリングスキルのまとめ	189
2. 7	結 言	191
2. 7. 1	本調査研究のまとめ	191
2. 7. 2	今後の展開	193
第3章	医療用マイクロマシン材料に関する調査研究	195
3. 1	緒 言	197
3. 2	セグメント化ポリウレタンの化学修飾	200
3. 2. 1	不活性なタンパク質の選択的吸着を目的とした表面修飾	200
3. 2. 2	生体成分の吸着及び粘着抑制を目的とした表面修飾	201
3. 2. 3	生理活性分子の固定化によるSPUの血液適合性改善	203
3. 2. 4	血液適合性ポリマーの被覆	206
3. 2. 5	両親媒性ポリマーのブレンドによるSPUの表面改質	206
3. 3	リン脂質ポリマーの血液適合性	208

3. 4	新しい高分子添加材としてのMPCポリマー	212
3. 4. 1	脂肪族のハードセグメントを持つSPUに対する添加材としてのMPCポリマー	213
3. 4. 2	芳香族のハードセグメントを持つSPUに対する添加材としてのMPCポリマー	218
3. 5	SPU/MPCポリマーブレンド膜の血液適合性	222
3. 6	医用エラストマーに力学的変形を連続的に負荷する装置の試作と医療用マイクロマシン材料評価への応用	226
3. 6. 1	試作装置の概要	226
3. 6. 2	連続的歪み負荷時のMPCブレンド膜のin vitro特性試験	228
3. 7	SPU/MPCポリマーブレンドの加工性	232
3. 8	結 言	233
第4章	バイオセンサ材料に関する調査研究	235
4. 1	緒 言	237
4. 2	メディエーター	239
4. 2. 1	生物における電子伝達	241
4. 2. 2	ヘテロシステムメディエーター	242
4. 2. 3	導電性有機塩の電極利用	243
4. 2. 4	修飾酸化還元酵素	243
4. 2. 5	最後に	244
4. 3	固定化生体触媒(Immobilized biocatalyst)	246
4. 3. 1	固定化生体触媒の意義	246
4. 3. 2	固定化生体触媒の歴史	247
4. 3. 3	固定化法の概略	248
4. 3. 4	バイオリアクターとバイオセンサー	252
4. 3. 5	バイオリアクターの各種工業への応用	253
4. 3. 6	マイクロバイオセンサーの例	261
4. 4	環境用バイオセンサーへの応用	264
4. 4. 1	緒 言	264
4. 4. 2	リン酸測定用バイオセンサー	265
4. 4. 3	シアン測定用バイオセンサー	270

4. 5	リン酸測定用化学発光検出型バイオセンサーの開発	281
4. 5. 1	化学発光検出型バイオセンサー	281
4. 5. 2	化学発光検出型バイオセンサー改良法の検討	289
4. 6	シアン測定用微生物センサーの開発	300
4. 6. 1	微生物センサー	300
4. 6. 2	フロー型シアン測定用微生物センサーの開発	306
4. 6. 3	河川水測定用微生物シアンセンサーの開発	313
4. 6. 4	化学発光検知型酵素シアンセンサーの開発	325
4. 7	小型酸素電極を用いるBODセンサー	339
4. 8	結 言	343
第5章	インテリジェント材料のマイクロマシンへの適用に関する調査研究	345
5. 1	緒 言	347
5. 2	マイクロマシンの現状と将来展望	350
5. 2. 1	マイクロマシンの現状	350
5. 2. 2	マイクロマシン用材料に要求される特性および材料の加工/ 組立プロセス	358
5. 2. 3	マイクロアクチュエータ	362
5. 2. 4	レーザートラッピングとマイクロマシン	373
5. 3	マイクロマシン用インテリジェント材料	381
5. 3. 1	金属材料	381
5. 3. 2	セラミックス材料	392
5. 3. 3	半導体材料	402
5. 3. 4	有機材料	412
1.	ペプチド集合体	412
2.	ポリマーネットワーク	422
5. 3. 5	生体材料	433
1.	インテリジェントバイオマテリアル	433
2.	生体内マイクロマシン用アクチュエーターとしてのインテリジェント 材料	443
5. 3. 6	エネルギー関連材料	450

第6章 バイオミメティック駆動機構とその制御に関する調査研究	459
6.1 緒言	461
6.2 昆虫の行動	463
6.2.1 昆虫の行動と神経系	463
6.2.2 昆虫の筋肉	464
6.2.3 昆虫の飛翔運動	469
6.2.4 昆虫の歩行運動	477
6.3 空気圧アクチュエータとフルイディスクを利用した飛行機構	483
6.3.1 蝶を規範とした翅の研究	483
6.3.2 空気圧アクチュエータ	487
6.3.3 フルイディスクを用いたはばたき制御	490
6.3.4 今後の課題	500
6.4 論理回路によるマイクロロボット制御	502
6.4.1 昆虫を規範とした運動制御	502
6.4.2 論理回路による6足歩行制御	503
6.4.3 論理回路で駆動可能な静電マイクロアクチュエータ	506
6.4.4 論理回路で制御可能なマイクロシステム	511
6.5 複眼センサにおける振動網膜システム	515
6.5.1 視覚認知の生物学的なアプローチ	515
6.5.2 網膜振動センサによる障害物回避	519
6.5.3 反射的な「ジグザグ」行動による障害物回避のシミュレーション	521
6.5.4 実機による実験	523
6.5.5 複眼センサの小型化	526
6.6 シミュレーションによる行動の研究	535
6.6.1 行動	535
6.6.2 人工生命 (Artificial Life)	535
6.6.3 遺伝アルゴリズム	537
6.6.4 ロボット工学におけるシミュレーションの役割	539
6.6.5 昆虫の生体機能を利用したロボット	540
6.6.6 CGアートやコンピュータゲームにおける生物行動の シミュレーション	541
6.7 結言	545

第7章	マイクロマシンの制御手法に関する調査研究	547
7.1	緒言	549
7.1.1	はじめに	549
7.1.2	調査研究活動方針	549
7.2	自律移動ロボットの障害物回避とマイクロマシンの環境認識	551
7.2.1	はじめに	551
7.2.2	障害物回避動作計画システム	553
7.2.3	実験	561
7.2.4	まとめ	568
7.3	分散マイクロマシンの信号処理	570
7.3.1	はじめに	570
7.3.2	制御対象とするマイクロマシン	570
7.3.3	MEMSの制御	572
7.3.4	信号の伝達手法	574
7.3.5	信号の種類	574
7.3.6	分散型マイクロ運動システムの例—分散型マイクロ搬送システム	575
7.3.7	おわりに	578
7.4	ソリトンとマイクロマシンの信号伝達	579
7.4.1	はじめに	579
7.4.2	回路構成	579
7.4.3	信号波形のシミュレーション	581
7.4.4	おわりに	583
7.5	群ロボットにおける相転移現象の誘発	584
7.5.1	はじめに	584
7.5.2	液晶概説	585
7.5.3	問題設定	585
7.5.4	衝突した時の確率密度関数の時間発展	586
7.5.5	衝突しない時の確率密度関数の時間発展	588
7.5.6	確率密度関数の時間発展	588
7.5.7	液晶配向モデルの導入	589
7.5.8	シミュレーション	591
7.5.9	おわりに	592

7. 6	超精密作業ミニロボット群による共同作業の計測と制御について	593
7. 6. 1	はじめに	593
7. 6. 2	研究の背景	593
7. 6. 3	基本構想	595
7. 6. 4	小型の精密移動機械	597
7. 6. 5	微細加工と精密測定を試み	599
7. 6. 6	まとめ	610
7. 7	個体発生過程を用いた大規模システムの一創発的生成法	611
7. 7. 1	はじめに	611
7. 7. 2	これまでの研究	611
7. 7. 3	個体発生過程の概要	612
7. 7. 4	提案する手法	615
7. 7. 5	シミュレーション結果	621
7. 7. 6	まとめおよび今後の課題	623
7. 8	結 言	625

平成9年度

マイクロマシンの基礎技術の研究

〔 本 編 〕

平成10年3月

財団法人 マイクロマシンセンター

本 編 目 次

[概要編目次紹介]

第 1 章 調査研究の目的	G 1
第 2 章 調査研究の実施方法	G 2
第 3 章 調査研究成果の概要	G 6
3. 1 マイクロマシン材料および部品の特性評価法に関する調査研究	G 6
3. 2 生物のエネルギー利用法に関する調査研究	G 8
3. 3 生物における群制御と信号伝達に関する調査研究	G10
3. 4 微粒子組立による 3 次元マイクロ構造物製作手法に 関する調査研究	G12
3. 5 高分子インテリジェント材料のマイクロマシンへの適用に 関する調査研究	G15
3. 6 化学分析／センサー技術 (μ -TAS) に関する調査研究	G17
3. 7 マイクロマシンと光の融合技術に関する調査研究	G20
3. 8 分子機械のマイクロマシンとしての利用性に関する調査研究	G22

[本 編]

はじめに

調査研究の実施方法

第 1 章 マイクロマシン材料および部品の特性評価法に関する調査研究	1
1. 1 緒 言	3
1. 2 マイクロ部品の形状・寸法計測手法に関する調査	5
1. 2. 1 はじめに	5
1. 2. 2 マイクロ部品の寸法・形状計測の問題点 1)	5
1. 2. 3 マイクロ部品の形状測定装置用探針の製作	7
1. 2. 4 おわりに	15
1. 3 各種マイクロマシン用材料の特性評価法に関する研究	18
1. 3. 1 マイクロ塑性成形加工特性の評価法と変形特性	18
1. 3. 2 超塑性マイクロ成形加工特性の評価法	21
1. 3. 3 超塑性材料の微細成形特性評価法の提案	23
1. 3. 4 おわりに	31

1. 4	マイクロ可動部品の設計手法とその評価法に関する調査	34
1. 4. 1	はじめに	34
1. 4. 2	マイクロ可動部品（アクティブヒンジ）の提案	38
1. 4. 3	アクティブヒンジのたわみ角解析	40
1. 4. 4	アクティブヒンジの製作および実験	44
1. 4. 5	実験結果および検討	45
1. 4. 6	おわりに	46
1. 5	リソグラフィー技術によるマイクロセンサの製作と評価法に関する調査	48
1. 5. 1	はじめに	48
1. 5. 2	熱を利用した情報の検出	48
1. 5. 3	主な熱式センサの動作と構造	48
1. 5. 4	熱式センサの性能評価	52
1. 5. 5	熱式センサ（ボロメータ、サーモパイル）の実際	54
1. 6	マイクロ3次元測定機用のナノプローブに関する調査	68
1. 6. 1	はじめに	68
1. 6. 2	レーザトラッピングの基本原理	69
1. 6. 3	光放射圧シミュレーション	71
1. 6. 4	位置検出プローブの基本原理	73
1. 6. 5	位置検出プローブの基礎実験	75
1. 6. 6	おわりに	84
1. 7	結 言	86
第2章 生物のエネルギー利用法に関する調査研究		
2. 1	緒 言	91
2. 2	昆虫内の酸素輸送	93
2. 2. 1	はじめに	93
2. 2. 2	気管系の構造	93
2. 2. 3	一般的なガス輸送メカニズム（拡散輸送）	98
2. 2. 4	特殊な呼吸メカニズム	100
2. 2. 5	筋組織内の酸素分圧の計測	104
2. 3	生体における外界からのエネルギー獲得	111
2. 3. 1	はじめに	111

2. 3. 2	光合成による光エネルギー獲得機構	111
2. 3. 3	バクテリアの鞭毛モータにおけるエネルギー獲得機構	113
2. 3. 4	生体エネルギー獲得機構のマイクロマシンへの応用	118
2. 4	生物とマイクロマシンのエネルギー変換	120
2. 4. 1	生物のエネルギー消費	120
2. 4. 2	マイクロマシンのエネルギー消費	124
2. 4. 3	まとめ	127
2. 5	生物の運動機構とエネルギー利用	129
2. 5. 1	はじめに	129
2. 5. 2	生物の運動機構	129
2. 5. 3	まとめ	136
2. 6	結 言	138
第3章	生物における群制御と信号伝達に関する調査研究	139
3. 1	緒 言	141
3. 2	昆虫の感覚器とコミュニケーション	143
3. 2. 1	昆虫の五感	143
3. 2. 2	昆虫の感覚器と中枢情報処理の特性	143
3. 2. 3	昆虫の感覚器官	147
3. 3	昆虫の音響信号の多様性について	160
3. 3. 1	昆虫の空圏の情報通信の特徴	161
3. 3. 2	昆虫の交信信号の特徴	163
3. 3. 3	発音する昆虫の生理的特徴	166
3. 3. 4	昆虫の振動信号の作出方法	167
3. 3. 5	音の環境と微気象	170
3. 3. 6	音響信号の通信チャンネルにおける障害の克服	172
3. 3. 7	信号の複雑性の適応的過程	174
3. 4	昆虫の社会構造維持のための情報伝達の諸相	176
3. 4. 1	多様な伝達様式とその分類	176
3. 4. 2	情報の調節	183
3. 4. 3	情報の保存 —学習と記憶—	185
3. 4. 4	単純な原理によるシステム全体の制御	185

3. 5	社会性昆虫における分業構造・血縁, 巣仲間, 異物の識別および 情報化学物質によるコロニー(群)の制御機構	189
3. 5. 1	巣仲間・血縁識別の仕組みと, 「仲間識別関与」 情報化学物質による群の制御	190
3. 5. 2	異物に対する特異的な行動と, 「異物識別関与」 情報化学物質による群の制御ー異	196
3. 5. 3	働き蜂の分業および仕事の転換ー幼若ホルモン(JH)による 個体の制御から群の制御へ	197
3. 5. 4	情報化学物質による群内・個体間に認められる社会性秩序の 制御機構	200
3. 6	昆虫とマイクロマシン	207
3. 6. 1	昆虫が示唆するマイクロマシンの群制御	207
3. 7	動物個体群に見られる群れ形成について議論 ～その工学的応用への展望～	212
3. 7. 1	記述的な群れ形成理論	214
3. 7. 2	top-down指向の群れ形成理論	216
3. 7. 3	Collectionism的解釈	221
3. 7. 4	Collectionism的解釈の限界	225
3. 7. 5	ロボティクスへの応用に向けて	231
3. 8	生物に学ぶロボットの群制御	235
3. 8. 1	複数のロボットによる協調作業	235
3. 8. 2	生物型自律システム	240
3. 8. 3	生物型自律システム	242
3. 8. 4	画像処理への昆虫の群制御の応用	243
3. 8. 5	カオスの応用	244
3. 9	結 言	247
第4章	微粒子組立による3次元マイクロ構造物製作手法に 関する調査研究	251
4. 1	緒 言	251
4. 2	微粒子組立技術とその問題点	252
4. 2. 1	微粒子による構造物製作手法	252

4. 2. 2	微粒子組立技術の現状	256
4. 2. 3	微粒子組立技術の問題点	262
4. 3	微粒子に作用する付着力の理論	265
4. 3. 1	微小寸法領域における力	265
4. 3. 2	微粒子に作用する付着力	265
4. 3. 3	付着力理論の実際の現象への適用	271
4. 3. 4	付着力理論の問題点	274
4. 3. 5	実環境下付着力測定の必要性	280
4. 4	付着力測定システムの構築	282
4. 4. 1	付着力測定システムの要求機能	282
4. 4. 2	付着力測定システムの構成	284
4. 4. 3	キャリブレーションの方法	292
4. 4. 4	付着力測定システムの特性	298
4. 4. 5	静電力測定によるシステムの性能評価	302
4. 5	微粒子に作用する付着力の測定	307
4. 5. 1	電子顕微鏡下の金属微小球に作用する付着力	307
4. 5. 2	電子顕微鏡下の高分子微小球に作用する付着力	316
4. 5. 3	微粒子に作用する付着力のまとめ	332
4. 6	結 言	333
第5章	高分子インテリジェント材料のマイクロマシンへの適用に 関する調査研究	335
5. 1	緒 言	337
5. 2	超分子系のマイクロマシンへの適用可能性	340
5. 2. 1	超分子構造を有する高分子の設計コンセプト	340
5. 2. 2	分子ピストン機能を有するロタキサン、ポリロタキサン	342
5. 2. 3	生体内分解機能を有するポリロタキサン	346
5. 2. 4	IPN構造からなる生体内分解性ヒドロゲルの設計と そのインテリジェント機能	353
5. 3	高分子アクチュエータ材料のマイクロマシンへの適用可能性	360
5. 3. 1	高分子アクチュエータ材料	360
5. 3. 2	導電性高分子の酸化還元で作動するアクチュエータ	361

5. 3. 3	気体分子の吸脱着で作動するアクチュエータ	366
5. 3. 4	空気中で電場駆動するフィルムアクチュエータ	370
5. 3. 5	高分子圧電アクチュエータ	371
5. 3. 6	高分子静電アクチュエータ	373
5. 4	高分子ソフト材料のマイクロマシンへの適用性	378
5. 4. 1	機能性高分子ソフト材料（高分子ゲル）の生体模倣材料への展開	378
5. 4. 2	酵素包括高分子ゲルを用いたエネルギー変換系の構築	379
5. 4. 3	ゲルの膨潤・収縮速度制御	382
5. 4. 4	化学反応により自律振動する高分子ゲルの設計と構築	386
5. 5	高分子インテリジェント材料の2次元加工化	396
5. 5. 1	2次元加工化の手法	396
5. 5. 2	交互吸着法による2次元組織化膜の作製と機能	397
5. 5. 3	球状高分子シュガーボールの機能とその2次元組織化	398
5. 5. 4	ポリロタキサンの生化学的機能と2次元加工化	401
5. 6	高分子インテリジェント材料の3次元加工化	411
5. 6. 1	高分子の3次元加工化の現状	411
5. 6. 2	親水性高分子鎖の高分子微粒子上への3次元加工化	411
5. 6. 3	高分子微粒子の3次元加工化	417
5. 7	結 言	427
第6章	化学分析／センサー技術（ μ -TAS）に関する調査研究	429
6. 1	緒 言	431
6. 2	マイクロ化学分析システム（ μ TAS）の分類	434
6. 2. 1	モノリシックタイプ μ TAS	434
6. 2. 2	ハイブリッドタイプ μ TAS	436
6. 3	Microfluidicsとその応用デバイス	441
6. 3. 1	Microfluidics	441
6. 3. 2	Microfluidics応用デバイス	442
6. 4	マイクロ流体制御素子（Micro Flow Control Devices）	446
6. 4. 1	機械式マイクロ流体制御素子	446
6. 4. 2	非機械式マイクロ流体制御素子	453
6. 5	μ TASの製作技術	460

6. 5. 1	はじめに	460
6. 5. 2	無機材料を流路壁に用いたマイクロチャネル形成法	461
6. 5. 3	有機材料を流路壁に用いたマイクロチャネル形成法	470
6. 5. 4	メタル材料を流路壁に用いたマイクロチャネル形成法	475
6. 5. 5	おわりに	478
6. 6	μ TASの応用	481
6. 6. 1	環境分析システムへの応用	481
6. 6. 2	キャピラリー電気泳動分析	481
6. 6. 3	ゲノム分析、DNAチップ	499
6. 6. 4	生物学への応用	510
6. 7	結 言	525
第7章	マイクロマシンと光の融合技術に関する調査研究	527
7. 1	緒 言	529
7. 2	光MEMSの最近の開発例	533
7. 2. 1	MEMSファブリ・ペロー干渉計の応用	533
7. 2. 2	マイクロ光スイッチ	547
7. 2. 3	光スキャナとチョッパー	565
7. 2. 4	ポリシリコンの3次元構造を用いた光学素子	574
7. 2. 5	マイクロレンズと可変焦点ミラー	577
7. 2. 6	LIGAプロセスで製作した光学的要素	581
7. 2. 7	ディスプレイ	583
7. 2. 8	マイクロ光ディスク	587
7. 2. 9	走査型近接場光学顕微鏡 (NSOM)	588
7. 2. 10	光学式マイクロエンコーダー、および光学式変位センサー	589
7. 2. 11	MEMS構造を持った集積化導波路センサー	591
7. 3	最近の国際会議にみる光マイクロマシンの動向	611
7. 3. 1	マイクロマシンの光技術への応用国際会議	611
7. 3. 2	IEEE MEMS 98 国際ワークショップ	616
7. 3. 3	1997年固体センサ&アクチュエータ国際会議, シカゴ (Transducers 97)	626
7. 4	まとめ	631

第 8 章	分子機械のマイクロマシンとしての利用性に関する調査研究	633
8. 1	緒 言	635
8. 2	細胞レベルでの分子機械性のサーベイ	636
8. 2. 1	機械的応力に応答する細胞	637
8. 2. 2	細胞工学的マニピュレーション	645
8. 2. 3	生体細胞成分の再構築	658
8. 2. 4	生体組織の人工構築	668
8. 3	蛋白レベルでの分子機械性のサーベイ	676
8. 3. 1	蛋白質レベルの観察手法	676
8. 3. 2	蛋白質分子運動のメカニズム	683
8. 3. 3	脂質薄膜の構造と動力学	687
8. 4	遺伝子レベルでの分子機械性のサーベイ	693
8. 4. 1	遺伝子 DNA の転写	696
8. 4. 2	DNA による機能の実現	698
8. 4. 3	遺伝子の利用法 — 治療への応用 — その 1	705
8. 4. 4	遺伝子の利用法 — 治療への応用 — その 2	708
8. 5	結 言	719

平成10年度

マイクロマシンの基礎技術の研究

〔 本 編 〕

平成11年 3 月

財団法人 マイクロマシンセンター

本 編 目 次

[本 編]

調査研究の目的	G 1
調査研究の実施方法	G 2
第 1 章 高精度アSEMBル技術の調査研究	3
1. 1 緒 言	3
1. 2 電顕環境下における自動アSEMBリ作業	5
1. 2. 1 高精度アSEMBリに関連する従来の研究	5
1. 2. 2 微小物体の一般的な力学的特徴	9
1. 2. 3 電顕環境下における微小物体の挙動	17
1. 2. 4 電顕環境下における微細作業自動化の基本戦略	21
1. 2. 5 実験システム構成	24
1. 3 電顕環境下における対象物位置自動計測手法	30
1. 3. 1 電顕環境下における対象物位置自動計測手法の概要	30
1. 3. 2 走査電顕画像処理による画面内位置計測	35
1. 3. 3 工具先端接触検知による深さ方向位置計測	48
1. 4 電顕環境下における微小物体操作手法	55
1. 4. 1 微小物体操作の力学	55
1. 4. 2 高信頼度・高精度物体操作手法の提案	63
1. 4. 3 高信頼度・高精度物体操作手法の有効性検証実験	69
1. 5 結 言	75
1. 5. 1 本調査研究のまとめ	75
1. 5. 2 今後の展望	77
第 2 章 高精度マイクロ加工技術と微小機構の運動計測法の調査研究	81
2. 1 緒 言	81
2. 2 微細加工における相対精度とその向上法	83
2. 2. 1 マイクロ加工における問題点	83
2. 2. 2 各種加工原理	88
2. 2. 3 被加工材料の影響	88
2. 2. 4 各種加工法の特徴	94

2. 2. 5	加工特性の総括	132
2. 3	微小材料の機械的特性評価	136
2. 3. 1	主な計測手法と測定パラメータ	136
2. 3. 2	計測手法例の紹介	136
2. 3. 3	まとめ	144
2. 4	微小物体の3次元運動計測法	150
2. 4. 1	画像処理法の原理	150
2. 4. 2	問題点と解決方法	156
2. 4. 3	効果の評価	159
2. 4. 4	まとめ	165
第3章	多数のマイクロ機能要素で構成されるシステムに関する調査研究	171
3. 1	緒言	171
3. 1. 1	マイクロ機能要素を多数集めて作るマイクロマシン	171
3. 1. 2	自律分散マイクロマシン	172
3. 1. 3	多数のマイクロ要素からなるシステムやデバイスの例	175
3. 2	分散搬送システム	180
3. 2. 1	物体に作用するマイクロアクチュエータアレイ	180
3. 2. 2	マイクロアクチュエータアレイによる搬送システム	181
3. 2. 2. 1	搬送メカニズム	181
3. 2. 2. 2	マイクロ搬送システムの構成例	183
3. 2. 3	二次元アレイモジュールの分散制御	185
3. 2. 3. 1	自律分散システム	187
3. 2. 3. 2	その他の概念	188
3. 2. 4	セル・オートマトンを利用した搬送制御	189
3. 2. 4. 1	セル・オートマトンの適用	189
3. 2. 4. 2	発展ルールの進化的検索	190
3. 2. 5	展望	192
3. 3	群マイクロロボット	194
3. 3. 1	群ロボットへの期待	194
3. 3. 2	群ロボットの理論的背景	195
3. 3. 2. 1	パターン形成の理論 自己組織化の理論	195

3. 3. 2. 2	ボトムアップ的方法論	196
3. 3. 2. 3	最近の展開 創発システム	197
3. 3. 3	様々な群知能発現モデルとそのシミュレーション	198
3. 3. 3. 1	シナジェティックスによる群制御	198
3. 3. 3. 2	能動機能素子集団としての解析	199
3. 3. 3. 3	群機能の発現	200
3. 3. 3. 4	対流パターンを生成する群ロボット	201
3. 3. 3. 5	免疫系をモデルにした群ロボット制御	203
3. 3. 4	ロボット開発	205
3. 3. 4. 1	CEBOT	205
3. 3. 4. 2	MARS	206
3. 3. 4. 3	自己組立てするユニット機械	207
3. 3. 5	実際の群ロボットによる実験例 群機能に対する構成要素数の 効果	208
3. 3. 6	展 望	211
3. 4	機能紐状システム	213
3. 4. 1	はじめに	213
3. 4. 2	医療用多関節マイクロカテーテル	213
3. 5	流体、音響制御用分布システム	218
3. 5. 1	流体とマイクロマシン	218
3. 5. 2	分布マイクロマシンによる流体抵抗の低減	219
3. 5. 3	飛行機の姿勢制御	222
3. 5. 4	円形ジェットのマイクロアクチュエータによる制御	224
3. 5. 5	分布アクチュエータによる音響制御	227
3. 6	アレイ化マイクロ光学システム	231
3. 6. 1	はじめに –マイクロマシンの光学応用デバイス–	231
3. 6. 2	マイクロミラーアレイとレンズアレイ	232
3. 6. 3	マイクロレンズアレイ	239
3. 6. 4	アダプティブオプティクス・空間光モジュレータ	240
3. 6. 5	光インタコネクション	244
3. 6. 6	光検出器アレイ	248
3. 6. 7	本節のまとめ	249

3. 7	アレイ化アクチュエータ	253
3. 7. 1	人工筋肉アクチュエータ	255
3. 7. 2	分散型静電マイクロアクチュエータ	264
3. 7. 3	スクラッチ駆動アクチュエータアレイ	269
3. 8	結 言	279
第4章 生物の運動メカニズムと制御の調査研究		283
4. 1	緒 言	283
4. 2	生物の協調運動のメカニズムと制御	284
4. 2. 1	はじめに	284
4. 2. 2	ミミズの蠕動運動	285
4. 2. 3	チョウやガの幼虫の腹這い	287
4. 2. 4	ムカデの這行	289
4. 2. 5	ヒトデの起き直り行動と相互制御神経回路モデル	291
4. 2. 6	ヒルの遊泳行動と巡回性抑制神経回路モデル	292
4. 3	多自由度機構を持つ機械	296
4. 3. 1	はじめに	296
4. 3. 2	近年の研究	296
4. 3. 3	多自由度機構のアクチュエーション	301
4. 3. 4	多自由度機構の制御	302
4. 3. 5	多自由度機構の利点	307
4. 3. 6	多自由度機構の欠点	308
4. 3. 7	まとめ	308
4. 4	マイクロテレメトリシステム	310
4. 4. 1	生体信号の計測	310
4. 4. 2	マイクロテレメトリシステムの構成	313
4. 4. 3	小型FM送信機	315
4. 4. 4	マイクロテレメトリシステムの評価と今後の展開	319
4. 5	マイクロテレメトリシステムによる昆虫の飛行の解析とマイクロフライト のメカニズムと制御への応用	324
4. 5. 1	はじめに	324
4. 5. 2	昆虫の飛行について	325

4. 5. 3	マイクロテレメトリによる筋電位の測定	332
4. 5. 4	マイクロフライトへの応用	345
4. 6	結 言	350
第5章	微小管路における流れと流体抵抗低減化技術の調査研究	355
5. 1	緒 言	355
5. 2	マイクロマシンにおける微小管路の応用	356
5. 2. 1	流体移動デバイス	356
5. 2. 2	計測デバイス	360
5. 2. 3	作用デバイス	363
5. 2. 4	その他のデバイス	370
5. 2. 5	マイクロマシンにおける微小管路の応用のまとめ	371
5. 3	インクジェットプリンタにおける微小管路の流動形態と損失	374
5. 3. 1	はじめに	374
5. 3. 2	インクジェット方式とノズル形状	375
5. 3. 2. 1	連続噴射型インクジェット技術とノズル	375
5. 3. 2. 2	DOD型インクジェット技術とノズル	380
5. 3. 3	ノズル内流れの流動形態と圧力損失	384
5. 3. 3. 1	Hertz方式連続噴射型インクジェットプリンタ用ノズル	384
5. 3. 3. 2	Sweet方式連続噴射型インクジェットプリンタ用ノズル	388
5. 3. 4	むすび	389
5. 4	微小管路内壁の超はっ水コーティング法	392
5. 4. 1	超はっ水コーティング方法	392
5. 4. 2	微小管路内壁の超はっ水コーティング方法	397
5. 4. 3	超はっ水コーティングの非接触シールとしての応用	398
5. 5	超はっ水材料の物理的性質とその応用	404
5. 5. 1	はじめに	404
5. 5. 2	超はっ水材料の開発	404
5. 5. 3	超はっ水材料の着雪防止アンテナへの応用	408
5. 5. 4	まとめ今後の動向	414
5. 6	超はっ水性円管の抵抗減少効果	416
5. 6. 1	円管内壁で滑りを伴うニュートン流体の管摩擦係数の解析	416

5. 6. 2	超はっ水性円管の圧力損失と速度分布	417
5. 6. 3	結 言	422
5. 7	微小管路における高分子溶液の抵抗減少効果	424
5. 7. 1	高分子溶液の層流微小管路流れ	424
5. 7. 2	乱流域における高分子溶液の抵抗低減効果	427
5. 8	結 言	430
第 6 章	高次複合構造実現のための加工・集積・結合・組立技術に関する調査研究	433
6. 1	緒言	433
6. 2	大変形弾性ヒンジを用いたマイクロメカニズムに関する調査研究	435
6. 2. 1	はじめに	435
6. 2. 2	運動変換機構の提案	435
6. 2. 2. 1	数の総合に基づく機構形式の決定	435
6. 2. 2. 2	運動変換機構の理論解析式	436
6. 2. 3	運動変換機構の理論解析および実験	439
6. 2. 3. 1	理論解析	439
6. 2. 3. 2	実験および検討	440
6. 2. 4	運動変換機構の入出力変位・力特性	441
6. 2. 5	運動変換機構の半導体製作プロセスとマイクロモデルの試作	444
6. 2. 6	最近の国際会議における本分野の動向調査	445
6. 2. 7	おわりに	453
6. 3	大変形弾性ヒンジを用いたマイクロアクチュエータに関する調査研究	456
6. 3. 1	はじめに	456
6. 3. 2	駆動原理	457
6. 3. 3	形状・寸法	459
6. 3. 4	高分子材料を用いた楕円形静電リニアアクチュエータの試作	460
6. 3. 5	実験および結果	462
6. 3. 6	最近の国際会議における本分野の動向調査	464
6. 3. 7	おわりに	466
6. 4	シリコンの結晶異方性エッチングによる 3次元構造形成に関する 調査研究	469
6. 4. 1	はじめに	469

6. 4. 2	シリコンの結晶異方性エッチング特性の測定・評価	470
6. 4. 3	結晶異方性エッチングプロセスシミュレーションシステムの開発	472
6. 4. 4	エッチング面粗さの結晶方位依存性	482
6. 4. 5	最近の国際会議における本分野の動向調査	488
6. 4. 6	おわりに	497
6. 5	平面からの折り曲げによる3次元マイクロ機構の製作に関する調査研究	501
6. 5. 1	はじめに	501
6. 5. 2	折り紙構造を用いた3次元構造	501
6. 5. 3	ローレンツ力を用いた平面の立体組み立て	505
6. 5. 4	自己組み立てによる平面の折り曲げ	508
6. 5. 5	残留応力の差による薄膜の反りを利用した3次元構造	511
6. 5. 6	形状記憶合金薄膜を用いた3次元構造の組み立て	513
6. 5. 7	おわりに	515
6. 6	結言	518

第7章 化学・生化学分析／合成システムおよび物理化学反応システムの

	マイクロ化に関する調査研究	521
7. 1	緒言	521
7. 2	マイクロフルイディクスとその応用デバイス	523
7. 2. 1	はじめに	523
7. 2. 2	マイクロフルイディクスの研究	523
7. 2. 2. 1	マイクロスケールの流体シミュレーション技術	523
7. 2. 2. 2	低レイノルズ数領域の流れ	525
7. 2. 2. 3	微小流路内の血液の流れ	530
7. 2. 3	マイクロ流体制御素子	532
7. 2. 3. 1	マイクロバルブ	532
7. 2. 3. 2	マイクロポンプ	535
7. 2. 4	非機械式流体制御方式	538
7. 2. 4. 1	流路抵抗温度変化	538
7. 2. 4. 2	表面張力	539
7. 3	マイクロシステムの作製技術	544
7. 3. 1	はじめに	544

7. 3. 2	マイクロチャネル作製法	545
7. 3. 2. 1	マイクロチャネルの分類	545
7. 3. 2. 2	無機材料マイクロチャネル	545
7. 3. 2. 3	有機材料マイクロチャネル	546
7. 3. 2. 4	メタル材料マイクロチャネル	551
7. 3. 3	マイクロチャネル以外のコンポーネントと製作プロセス	551
7. 3. 3. 1	概要	551
7. 3. 3. 2	材料・プロセス	551
7. 3. 3. 3	コネクタ	553
7. 3. 3. 4	ミキサ	554
7. 3. 3. 5	フィルタ	554
7. 3. 3. 6	検出部	557
7. 3. 3. 7	DNAチップ製作法	558
7. 3. 4	おわりに	559
7. 4	バイオ研究への応用	567
7. 4. 1	DNA解析の理論とマイクロチップ・ナノチップ技術開発の戦略	568
7. 4. 2	キャピラリー電気泳動およびキャピラリーアレイ電気泳動の マイクロチップ化	570
7. 4. 3	PCR等の反応と分離の集積化	576
7. 4. 4	マイクロチップ技術と質量分析計との結合	580
7. 4. 5	DNAチップ	581
7. 4. 6	新たな応用分野	581
7. 4. 7	実用化にむけた動き	582
7. 5	合成反応への応用	595
7. 5. 1	遺伝子増幅 (PCR) 反応への応用	595
7. 5. 2	コンビナトリアルケミストリへの応用	604
7. 5. 3	その他の合成反応への応用	614
7. 6	物理化学反応を目的としたマイクロリアクタ	621
7. 7	結 言	623
第 8 章	生物における刺激応答機能とマイクロマシンへの適用に関する調査研究	627
8. 1	緒 言	627

8. 2	原形質流動	630
8. 2. 1	原形質流動とは	630
8. 2. 2	シャジクモ類における原形質流動の機構	632
8. 2. 3	原形質流動の分子機構	633
8. 2. 4	シャジクモの脱膜モデル	635
8. 2. 5	原形質流動の活動電位による制御	639
8. 2. 6	シャジクモ類細胞を用いたミオシン運動の解析	647
8. 2. 7	花粉管におけるアクトミオシン系	651
8. 2. 8	植物のアクチン・ミオシン系	653
8. 2. 9	参考：骨格筋における収縮機構	654
8. 3	傾性反応	657
8. 3. 1	傾性反応 (Nastic response) とは	657
8. 3. 2	傾性反応を引き起こす環境刺激	657
8. 3. 3	傾性反応に関連した植物細胞の構造と生理機能	658
8. 3. 4	環境刺激受容機構	660
8. 3. 5	植物の運動機構	661
8. 3. 6	いろいろな傾性反応	668
8. 3. 7	その他の膨圧運動	682
8. 3. 8	おわりに	682
8. 4	気孔開閉	685
8. 4. 1	マイクロマシンとしての気孔開閉	685
8. 4. 2	気孔の役割の諸相	685
8. 4. 3	気孔開閉のメカニクス	687
8. 4. 4	孔辺細胞におけるイオン輸送	689
8. 4. 5	気孔開口におけるシロ糖の役割	693
8. 4. 6	気孔開閉における細胞小器官の働き	695
8. 4. 7	気孔閉鎖	699
8. 4. 8	植物ホルモンアブシジン酸 (ABA) による気孔閉鎖	702
8. 5	屈性	709
8. 5. 1	屈性とは	709
8. 5. 2	屈性の種類と特性	709
8. 5. 3	屈性機構の解析	713

8. 5. 4	環境シグナルの受容	717
8. 5. 5	環境シグナルの変換・伝達	723
8. 5. 6	環境シグナルに対する応答	728
8. 5. 7	おわりに	732
8. 6	結 言	738
第9章	マイクロ化効果利用機能システムに関する調査研究	743
9. 1	緒 言	743
9. 2	アトミックマニピュレーション	745
9. 2. 1	緒 言	745
9. 2. 2	STM装置の概略	746
9. 2. 3	電界イオン顕微鏡の原理	747
9. 2. 3. 1	電界イオン化 (Field Ionization)	748
9. 2. 3. 2	電界蒸発 (Field Evaporation)	749
9. 2. 3. 3	結像機構	751
9. 2. 3. 4	像解釈	753
9. 2. 4	アトミックマニピュレーションの操作例	753
9. 3	表面電子物性の計算機シミュレーション	780
9. 3. 1	第一原理による電子状態の計算	780
9. 3. 1. 1	基本的な近似法	780
9. 3. 1. 1 (a)	概説	780
9. 3. 1. 1 (b)	多粒子系の波動関数	780
9. 3. 1. 1 (c)	断熱近似と平均場近似	786
9. 3. 1. 2	バンド理論の骨組み	787
9. 3. 1. 2 (a)	逆格子	787
9. 3. 1. 2 (b)	Blochの定理	788
9. 3. 1. 2 (c)	Brillouin域	790
9. 3. 2	計算理論と計算方法	791
9. 3. 2. 1	密度汎関数法 (Density Functional Theory ; DFT)	791
9. 3. 2. 1 (a)	基礎理論	791
9. 3. 2. 1 (b)	Kohn-Shamの理論	794

9. 3. 2. 1 (c)	局所密度近似 (Local Density Approximation ; LDA)	797
9. 3. 2. 2	擬ポテンシャル法	798
9. 3. 2. 2 (a)	基礎理論	798
9. 3. 2. 2 (b)	ウルトラソフト擬ポテンシャル	800
9. 3. 2. 3	BB-VBプログラム	801
9. 3. 2. 3 (a)	プログラムの構成	801
9. 3. 2. 3 (b)	計算方法	803
9. 3. 3	AIバルク及び(001)清浄表面の計算	807
9. 3. 3. 1	AIの擬ポテンシャルの構築とバルクの計算による評価	807
9. 3. 3. 2	AI(001)清浄表面の電子状態	815
9. 3. 3. 2 (a)	スーパーセルと収束の確認方法	816
9. 3. 3. 2 (b)	緩和構造と表面電子状態	819
9. 3. 3. 2 (c)	表面状態	824
9. 3. 3. 2 (d)	清浄表面の近接場	826
9. 3. 4	吸着・表面欠陥と表面電子状態	828
9. 3. 4. 1	AI(001)表面への酸素吸着と表面電子状態	828
9. 3. 4. 1 (a)	酸素の擬ポテンシャルとスーパーセル	828
9. 3. 4. 1 (b)	酸素吸着によるAI(001)表面電子状態の変化	832
9. 3. 4. 1 (c)	酸素吸着表面の近接場	835
9. 3. 4. 2	点欠点と表面ステップ	838
9. 4	結 言	842