

# マイクロマシンの基礎技術の研究

## — その 2 —

平成7年3月

財団法人 マイクロマシンセンター



マイクロマシンの基礎技術の研究

発行 財団法人マイクロマシンセンター

東京都港区三田三丁目12番16号

電話：03(5443)2971

# 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 <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> /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ティ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	終わりに	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	終わりに	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