

# マイクロマシンの基礎技術の研究

## — その 2 —

平成 8 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 本編 (その2)

発行 財団法人マイクロマシンセンター

東京都千代田区神田司町2-2

新倉ビル5階

電話：03 (5294) 7131

# 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 熱流体現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 熱流体現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 Device 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	マイクロマシン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ー電極を用いるセンサーシステム .....	597
7. 3. 7	マイクロGOD・PODカラムー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	おわりに	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