

平成12年度

マイクロマシン技術への  
多分野萌芽技術の適用に関する研究

〔 本 編 〕

平成13年 3 月

財団法人 マイクロマシンセンター



平成12年度 マイクロマシン技術への多分野萌芽技術の  
適用に関する研究

〔 本 編 〕

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

# 本 編 目 次

## [本 編]

はじめに .....	H 1
調査研究の実施方法 .....	H 2
第1章 ウェアラブルエネルギーに関する調査研究.....	1
1. 1 諸 言.....	3
1. 2 ウェアラブルエネルギーの必要性.....	5
1. 2. 1 ウェアラブルエネルギーの応用.....	5
1. 2. 2 環境情報マイクロシステム.....	6
1. 2. 3 ウェアラブルエネルギーと環境問題.....	9
1. 2. 4 ウェアラブルエネルギーの目指す方向.....	12
1. 3 各種エネルギーのウェアラブル化の可能性とその実例.....	15
1. 3. 1 燃料電池.....	15
1. 3. 1. 1 燃料電池の原理と現状技術.....	15
1. 3. 1. 2 燃料電池の効率.....	18
1. 3. 1. 3 可搬形燃料電池.....	20
1. 3. 1. 4 マイクロ燃料電池.....	21
1. 3. 2 マイクロリアクタ.....	26
1. 3. 3 自動発電.....	28
1. 3. 3. 1 機械式発電機の最適設計とウェアラブル化の実例.....	28
1. 3. 3. 2 熱電発電機.....	36
1. 3. 4 電力伝送.....	41
1. 3. 4. 1 無線IDタグと周辺技術 .....	41
1. 3. 4. 2 体内埋め込み形人工臓器の給電技術.....	46
1. 3. 5 蓄 電.....	49
1. 3. 5. 1 電気2重層キャパシタを用いる蓄電システム.....	49
1. 3. 5. 2 全固体薄膜電池.....	54
1. 3. 6 熱機関 .....	56
1. 4 結 言.....	65
第2章 マイクロチャンネルの応用技術に関する調査研究.....	67
2. 1 緒 言.....	69
2. 2 マイクロチャンネルヒートシンク.....	71
2. 2. 1 マイクロチャンネルと熱抵抗.....	71

2. 2. 2	マイクロチャンネルの伝熱特性の基本	73
2. 2. 3	マクロな系の整理式の適用可能性について	76
2. 3	マイクロチャンネルの伝熱・流動特性（単相、気液二相）	80
2. 3. 1	単相（気相または液相のみ）時の伝熱および流動特性	80
2. 3. 2	二相（液相が沸騰する）時の伝熱および流動特性	88
2. 4	マイクロチャンネルヒートシンクの最適設計	97
2. 4. 1	マイクロチャンネル冷却の特徴（水冷、空冷）	97
2. 4. 2	最適化設計の必要性及び指針	101
2. 4. 3	最適化設計例	103
2. 4. 4	まとめ	105
2. 5	伝熱特性量を評価するための物理量の計測	108
2. 5. 1	はじめに	108
2. 5. 2	流量測定	108
2. 5. 3	流速測定	109
2. 5. 4	温度と伝熱量の測定	120
2. 5. 5	圧力損失測定	122
2. 6	流動抵抗低減法の紹介	125
2. 6. 1	流動抵抗低減法の概要	125
2. 6. 2	界面活性剤による乱流域の低減効果	126
2. 6. 3	超撥水性による層流域の低減効果	127
2. 6. 4	気液二相流の流動様式に及ぼす壁濡れ性の効果	131
2. 7	伝熱促進技術	134
2. 7. 1	はじめに	134
2. 7. 2	伝熱面積の拡大	134
2. 7. 3	熱伝達率の増加	134
2. 7. 4	相変化の利用	138
2. 7. 5	振動流の利用	140
2. 7. 6	希薄化について	141
2. 7. 7	マイクロ化による熱伝導異方性	142
2. 8	事例紹介	144
2. 8. 1	中性子発生ターゲットの冷却	144
2. 8. 2	レーザー・ダイオード・アレイの冷却	145
2. 8. 3	マイクロチャンネルの写真	148
2. 9	結言	150

第3章	マイクロ流路における流体现象の解明とマイクロマシン技術への適用に関する	
	研究調査	151
3.1	緒言	153
3.2	マイクロ流体システムの基礎	154
3.2.1	はじめに	154
3.2.2	マイクロスケールでの流体の特徴	154
3.2.3	マイクロ流体効果の利用事例	156
3.3	測定・評価技術	168
3.3.1	マイクロセンサを用いた流体計測	168
3.3.2	マイクロ構造体回りの流れ	168
3.3.2.1	マイクロ構造体回りの流れ	168
3.3.2.2	キャピラリ中の流れ	168
3.3.2.3	マイクロミキサのミキシング性能	172
3.4	マイクロ流体デバイス	174
3.4.1	はじめに	174
3.4.2	マイクロバルブ	174
3.4.3	マイクロポンプ	181
3.4.4	マイクロミキサ	185
3.5	マイクロ流体デバイスの応用	192
3.5.1	はじめに	192
3.5.2	マイクロチップ・ナノチップテクノロジーとは	192
3.5.3	キャピラリーアレイ電気泳動のマイクロチップ化	193
3.5.4	マイクロチップ技術と質量分析計との結合	198
3.5.5	おわりに	198
3.6	欧州報告におけるマイクロシステムテクノロジーの研究状況	200
3.6.1	はじめに	200
3.6.2	MEMS2001への投稿状況	200
3.6.3	ドイツ政府によるマイクロシステムテクノロジー (MST) の研究サポート 状況 (Prof. Korvinkへのインタビュー)	202
3.6.4	フライブルク大学 マイクロシステム技術学科 (IMTEK : Institute for Microsystem Technology, Albert Ludwigs University Freiburg, Germany)	203
3.6.4.1	フライブルク大学とIMTEK	203
3.6.4.2	組織・構成	204
3.6.4.3	教育	206

3. 6. 4. 4 研究	206
3. 6. 4. 5 おわりに	208
3. 6. 6 スイスのマイクロテクノロジー	208
3. 6. 7 まとめ	208
3. 7 結 言	209
第4章 マイクロマシン技術と宇宙開発技術の融合化に関する調査研究	211
4. 1 緒 言	213
4. 2 ナノスペースクラフトのシステム概念	215
4. 2. 1 ナノスペースクラフトとは	215
4. 2. 2 ナノスペースクラフトの狙い	215
4. 2. 2. 1 サイズの小ささ	215
4. 2. 2. 2 分散・協調システム系としての側面	216
4. 2. 2. 3 空間的広がりを獲得する	216
4. 2. 3 惑星探査のためのナノスペースクラフト	217
4. 2. 4 大型衛星の遠隔モニターのためのナノスペースクラフト	221
4. 2. 5 Aerospace Corporationのシリコンサテライト	224
4. 2. 6 磁気圏マッピングのためのナノスペースクラフト編隊	226
4. 2. 7 スウェーデンの6 kgのオーロラ観測衛星Munin	228
4. 2. 8 サリー大学の6.5kgの衛星SNAP-1飛翔実験	230
4. 2. 9 ナノスペースクラフトの開発指針	230
4. 3 宇宙機搭載用MEMSセンサへの要求性能	232
4. 3. 1 姿勢制御系センサの概要	232
4. 3. 2 地球センサ	234
4. 3. 3 太陽センサ	239
4. 3. 4 恒星センサ	243
4. 3. 5 電波 (RF) センサ	245
4. 3. 6 磁気センサ	247
4. 3. 7 チューンド・ドライ・ジャイロ (TDG)	248
4. 3. 8 フローテッドレート積分ジャイロ (FRIG)	250
4. 3. 9 レートジャイロ (RG)	254
4. 3. 10 リングレーザジャイロ (RLG)	255
4. 3. 11 ファイバー・オブティックス・ジャイロ (FOG)	258
4. 3. 12 加速度センサ	259
4. 3. 13 GPS受信機	263

4. 4	マイクロスラスタ	266
4. 4. 1	はじめに	266
4. 4. 2	各種のマイクロスラスタ	266
4. 4. 2. 1	Physical jet thruster	267
4. 4. 2. 2	Chemical jet thruster	271
4. 4. 2. 3	Solid propellant thruster	275
4. 4. 2. 4	Electrical thruster	278
4. 4. 2. 5	マイクロスラスタの実用性の検討	282
4. 4. 2. 6	東北大学と宇宙科学研究所とによるデジタルマイクロスラスタの研究	285
4. 4. 2. 7	おわりに	288
4. 5	熱制御系へのMEMSの応用	292
4. 5. 1	熱環境	292
4. 5. 2	衛星温度の制御	293
4. 5. 3	衛星内部の熱制御	295
4. 5. 4	熱制御素子	295
4. 5. 5	衛星の小型化と熱制御	298
4. 5. 6	新たな熱制御機器・システム	300
4. 5. 6. 1	マイクロルーバ	300
4. 5. 6. 2	放射率制御面 (Variable Emittance Thermal Control Surfaces)	302
4. 5. 6. 3	マイクロヒートパイプ	303
4. 5. 6. 4	マイクロチャンネル熱交換器	303
4. 5. 6. 5	ループヒートパイプ	303
4. 5. 6. 6	積層型ナノサテライト	306
4. 5. 6. 7	Deep Space Systems Technology Programにおける熱制御技術	306
4. 5. 7	まとめ	309
4. 6	宇宙用部品	311
4. 6. 1	スイッチ及びリレー	311
4. 6. 1. 1	宇宙応用のためのマイクロマシンリレー (オムロン)	311
4. 6. 1. 2	通信システム用MEMs RFマイクロリレー (Rockwell Science Center)	311
4. 6. 1. 3	マイクロ波/ミリ波応用MEMスイッチングデバイス (Sarnoff Corporation)	313
4. 6. 1. 4	ナノサテライト通信システムのためのMEMSベースRFスイッチ (Hughes Space and Communications Company)	314
4. 6. 1. 5	MEMSリレーを用いたデジタルロジック (UC, Berkeley)	315

4. 6. 2	フィルタ	317
4. 6. 3	ポンプ	317
4. 6. 3. 1	宇宙探査用真空ポンプとしてのMEMSクヌッセンコンプレッサ (JPL)	318
4. 6. 3. 2	新規なマイクロマシンバルブレスマイクロポンプ (南洋大学)	318
4. 6. 4	その他	321
4. 7	宇宙用MEMSの耐環境性と信頼性	324
4. 7. 1	部品の認定と品質保証	324
4. 7. 1. 1	部品の認定	324
4. 7. 1. 2	宇宙環境と部品設計	328
4. 7. 2	宇宙用機器の環境試験	331
4. 7. 2. 1	環境条件	331
4. 7. 2. 2	環境試験	333
4. 7. 3	MEMSの信頼性保証	338
4. 7. 3. 1	工程認定	339
4. 7. 3. 2	製品認定	345
4. 7. 3. 3	受入試験	346
4. 7. 3. 4	業者認証	351
4. 8	小惑星表面探査ロボット ミネルバ	358
4. 8. 1	はじめに	358
4. 8. 2	MINERVAの移動メカニズム	359
4. 8. 2. 1	微小重力環境に適した移動メカニズム	359
4. 8. 2. 2	MINERVAのホップ方式	360
4. 8. 2. 3	無重力実験による検証	360
4. 8. 3	MINERVAプロトタイプモデル	361
4. 8. 4	MINERVAによる小天体表面の探査	363
4. 8. 5	おわりに	364
4. 9	結 言	366
第5章	マイクロ飛翔技術とマイクロマシン技術の融合化に関する調査研究	367
5. 1	緒 言	369
5. 2	機 体	370
5. 2. 1	無人航空機 (UAV) の需要	370
5. 2. 2	近年のUAV開発	372
5. 2. 3	UAVの民間利用	374



5. 2. 4	マイクロ無人航空機 (MAV)	375
5. 2. 5	昆虫の飛行に学ぶ	380
5. 3	推進力とアクチュエータ	384
5. 3. 1	ジェットによる推進機構	384
5. 3. 2	はばたきを用いた飛翔機構	389
5. 3. 3	飛翔機構へのエネルギーの供給方法	393
5. 4	マイクロ飛行システムのためのセンシング技術	402
5. 4. 1	視覚センサ	403
5. 4. 2	レーザスキャナ	413
5. 4. 3	赤外線センサ	414
5. 4. 4	加速度センサ	416
5. 4. 5	GPS	419
5. 4. 6	超音波センサ	422
5. 5	結 言	426