

電総研における宇宙関連技術の研究の流れ Overview of Space Technology Researches at ETL

幸坂 紳	町田 和雄	戸田 義継
S. KOSAKA	K. MACHIDA	Y. TODA
岩崎 晃	本多 武夫	川田 正國
A. IWASAKI	T. HONDA	M. KAWADA

This paper presents historical overview of space technology researches at Electrotechnical Laboratory. Firstly, the road map of the researches are described together with MITI's space projects. Secondly, the past research on the electric propulsion systems that were boarded on the Engineering Test Satellites (ETS-III and IV) is reviewed. Thirdly, the space robotics researches concerning a space manipulator, a free-flying robot and a precise space telerobotic system boarded on the ETS-VII are summarized. The paper also provides a brief overview of the researches on the remote sensing technology, micro gravity utilization technology, space energy technology utilizing solar power, and cryocooler technology, from the past to the present.

§ 1 はじめに

当所で宇宙技術の研究が開始されてから30年余り経過した。これは我が国の宇宙開発の期間ともほぼ一致する。宇宙の技術分野は未だ発展途上にある。宇宙開発の原点を1957年の人工衛星スプートニク1号の打ち上げとすれば、43年経ったばかりであり、将来も続くであろう長い宇宙開発の歴史から振り返れば、この期間は黎明期と位置づけられるであろう。しかし、この間、宇宙開発は急速に発展した。

アポロ計画は人類を月に送り込むことに成功し、人類の世界観を大きく変えた。技術的に見ても、現在の宇宙システム開発の基礎はここで築かれたと言える。その後、人工衛星の高さを利用した、通信・放送、気象、地球観測、測位など、情報分野での利用が進み、社会システムの一部としての役割を担うまでになってきた。これは宇宙の位置利用と呼ばれている。さらに、スペースシャトルの運航が恒常化した80年代中頃からは、宇宙の微小重力環境を新しい材料、医薬品などの創成やサイエンスの場として利用することも盛んに

なってきた。この流れは90年代も続き、国際宇宙ステーションの建設が行われつつあり、本格的な宇宙環境利用の時代が訪れようとしている。

21世紀にはこのような宇宙の利用がさらに進み、宇宙インフラストラクチャの多様化、大規模化が進む一方、位置利用の分野では本格的な商用化が始まるものと見られる。また、宇宙の位置利用、環境利用の次に来ると言われている、「宇宙の太陽エネルギー利用」の段階に入ることも予測されている。さらに、宇宙開発の最も根源的なドライビングフォースとしてのフロンティアの探査、開発は21世紀に入っても絶えず続けられるであろう。

当所の宇宙技術の研究は、これまで「電子技術と総合性」をバックボーンとして、宇宙開発と利用の流れを予測しつつ先行的に研究し、いくつかの分野で先導的役割を果たしてきた。本資料は、宇宙特集の出版にあたり、これまでの当所の宇宙技術の研究の経緯と成果を紹介するとともに、研究の流れを俯瞰し今後の方向を考える際の参考とする目的でまとめた。研究の詳細説明は避け、主要論文を参考文献として末尾にあげた。

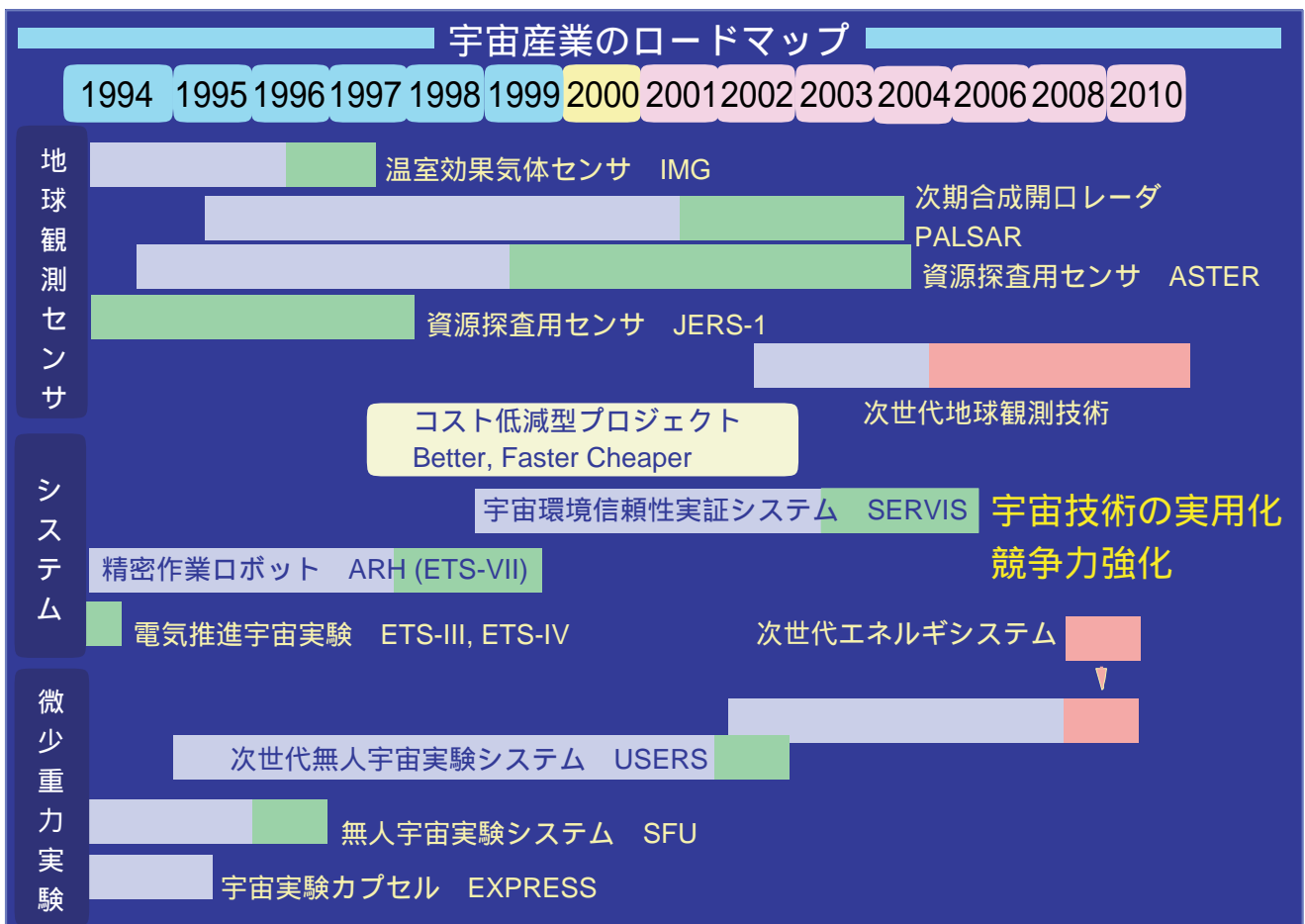
§ 2 ロードマップ

当所の宇宙技術研究は、我が国の宇宙開発とほぼ期を一にして、1968年より開始された。当時の真空技術研究室で培われた真空技術をベースに、我が国初の大規模スペースチャンバを開発したのが始まりである。以後、特別研究「電気推進システムに関する研究」において、イオンエンジン、パルス型プラズマエンジンの研究を実施し、ともに宇宙空間での動作実験に成功する成果を収めた。その後、これらの衛星搭載機器の開発で得た技術ポテンシャルを生かし、宇宙環境利用時代の到来に先行して宇宙用マニピュレータの研究に着手する一方、1985年からは通産省が行う地球資源探査衛星(J-ERS1)のミッション機器の開発のため、大型プロジェクト「資源探査用観測システムの研究開発」において、赤外センサとその冷却技術、ならびにマイクロ波センサ技術について研究を行うとともに、衛星搭載センサの開発支援を行った。

その後、これらを継承・発展させ、宇宙ロボットと

次世代リモートセンシング技術の研究を行うとともに、1990年初頭からは、宇宙環境利用の世界的趨勢に呼応して、宇宙エネルギー技術と微小重力利用技術を加えて、研究を推進することとなった。現在、当所の宇宙技術の研究は、この4本の柱を中心に展開されている。

これらの研究は我が国の宇宙開発関連機関との連携・協力はもとより、通産省の宇宙プロジェクトと密接な関係をもって行われてきた。下図に通産省の宇宙プロジェクトと当所の研究のロードマップを示す。通産省の宇宙プロジェクトは、これまで地球資源観測システム、および、宇宙環境での先端材料の創成を目指した無人宇宙実験システムの開発、利用を大きな柱として継続的に進められてきた。また、最近、我が国の宇宙産業の国際競争力強化を目的とし、高信頼性民生品の宇宙転用のための実証試験システムの開発が推進されている。当所はこれらのほとんどのプロジェクトの支援を行ってきた。次章以降に各研究の流れを要約する。



§ 3 電気推進システムの研究

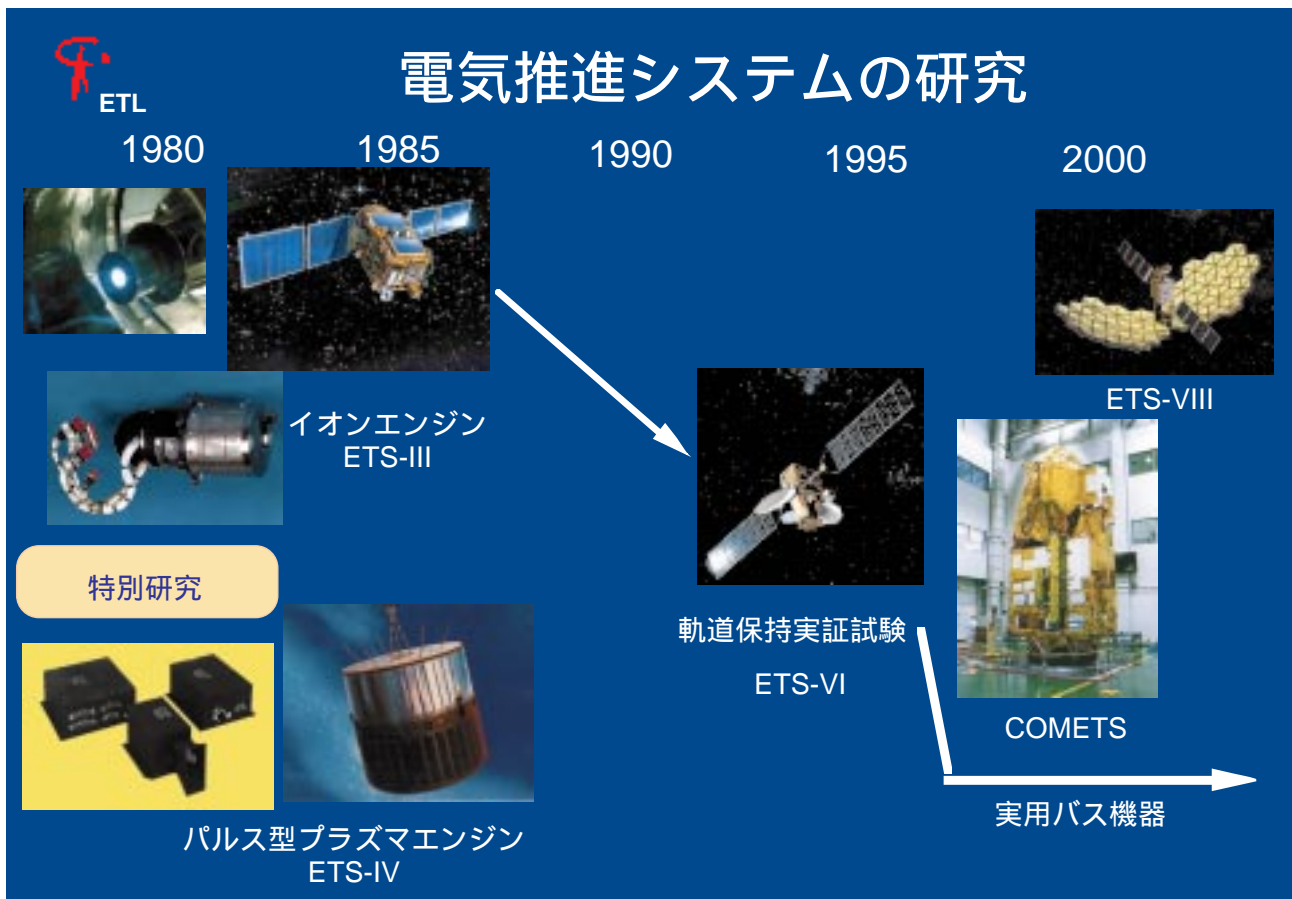
この研究は既に終了しているが、当所の宇宙技術研究の原点であり、また、基礎研究から始め、衛星搭載機器の開発、宇宙実験まで遂行した点で特筆すべき研究でもあり、概要を紹介する。

電気推進は電気エネルギーを用いて荷電粒子を加速し推力を得るロケットで、推力は小さいが、燃費に当たる比推力が化学推進に比し一桁高く、推進剤重量を格段に少なくできる利点を有し、各国で様々な方式のものが研究されてきた。当所では、イオンエンジンとパルス型プラズマエンジンの基礎技術の確立を目標とし、1970年頃より研究を開始した。

イオンエンジンに関しては、電子の衝突により推進剤を電離し、高電圧を印加したグリッド電極により生成イオンを抽出・加速し推力とする、電子衝撃型を対象とした。静止衛星の南北方向軌道保持への利用を念頭に、推進剤として水銀を用いたビーム径5cmのエンジン本体と、それに電力を供給して動作制御する電力制御器、およびシステム化の研究を行った。その後、技術試験衛星III型(ETS-III)に搭載し動作試験を行う計画

を航空宇宙技術研究所と共同で宇宙開発委員会に提案し(1975年)、宇宙実験を目指し搭載機器の開発研究を実施した。衛星は1982年に打ち上げられ、米国に次ぐイオンエンジンの宇宙空間動作試験に成功した。この成果を受け、宇宙開発事業団では大型静止衛星の軌道保持用イオンエンジンの開発を進め、技術試験衛星VI型(ETS-VI:1994年打上)での実証試験を経て、実用化に至っている。この研究は、国立研究所の成果を受け、実用宇宙機器に至った代表例となっている。

パルス型プラズマエンジンは、静止衛星の東西方向の位置制御と姿勢制御への利用を念頭に、高圧コンデンサー(数 μ F)に蓄えた電力(2kV)のパルス状放電(数 μ s)により、燃料のテフロンをプラズマ化と数kAの放電電流による自己加速を行って、推力を発生する方式を対象とした。1981年に打ち上げられたETS-IVに搭載して、地上で測定したパルス状推力(3mg \cdot s)の実証、高圧放電の衛星への電磁干渉が防止できたことなど宇宙空間動作試験に成功した。このエンジンは小型で微小推力による制御性が優れていることが特徴で、近年、マイクロサテライトへの応用が期待されている。



§ 4 宇宙ロボット技術の研究

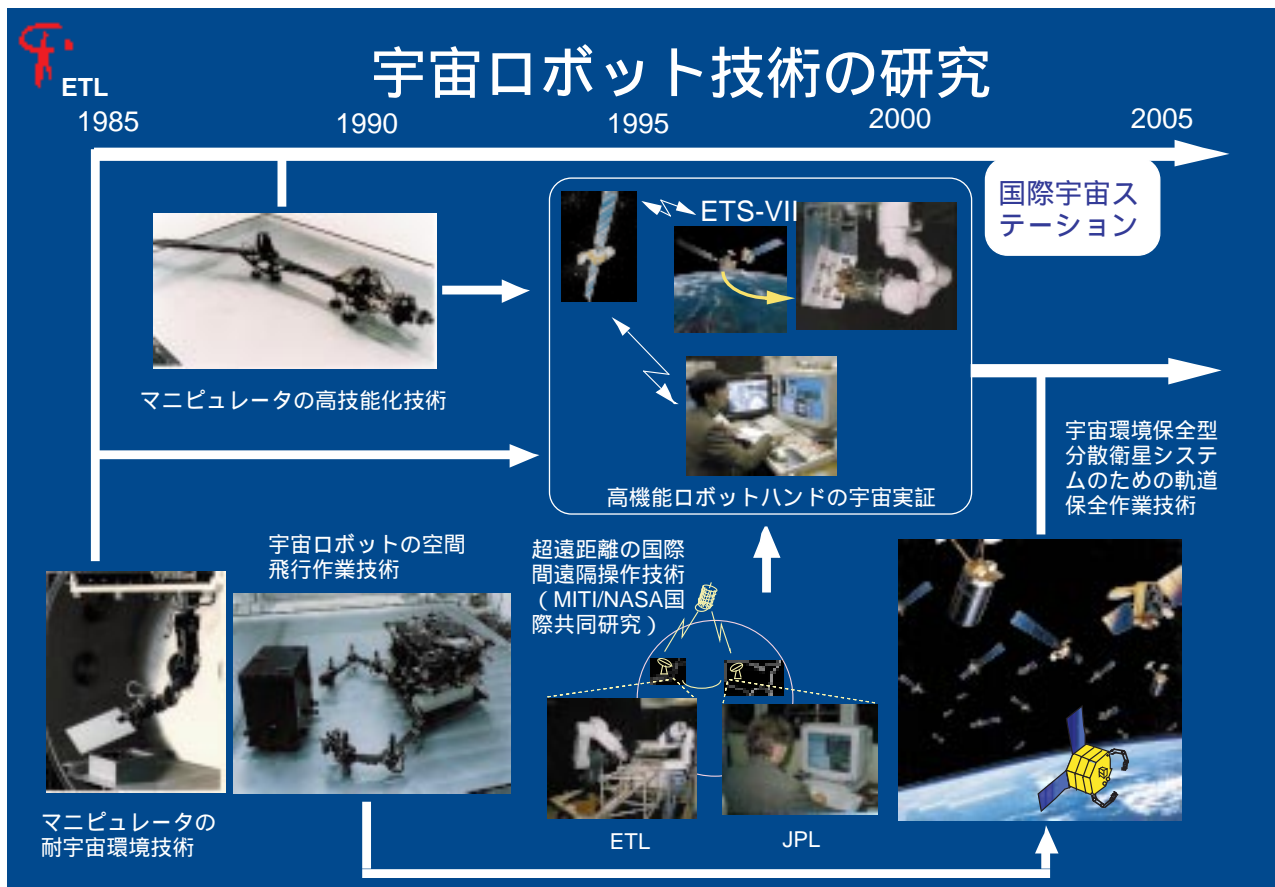
当所の宇宙ロボットの研究は1982年から始まった。当時、宇宙への大量輸送手段であるスペースシャトルが運行され始め、宇宙基地をはじめとする宇宙環境利用でロボットが不可欠になるものと考え、着手した。第一期は特別研究「宇宙用マニピュレータの研究(1982～1987)」で、過酷な宇宙環境で使用できる遠隔操作マニピュレータ技術の確立を目標とした。シャトルのクレーン型に対し、人間の腕相当の小型マニピュレータの開発技術を得ようとしたものである。この研究では、超高真空環境で働く小型マニピュレータを開発し、我が国の宇宙ロボット開発の機運と基礎を築いた。この技術は、その後、宇宙ステーション計画において、日本実験棟に搭載するマニピュレータシステム(JEMRMS)の開発にNASDAとの共同研究を通して活用され、また、ETS-VII搭載の高機能ハンドシステムに応用された。

第二期は「宇宙用テレオペレータ技術の研究(1988～1992)」で、宇宙空間を飛行しながら作業するロボット技術の確立を目標とした。ここでは、無重力を模擬

した2次元エアフロアで動作する自由飛行型宇宙ロボットを研究開発し、世界に先駆け、故障衛星を回収するミッションの地上実証実験に成功した。また、NASAとの国際共同研究「超遠距離テレロボットの相互操作技術の研究(1992～1994)」を行い、太平洋を挟み、当所からJPLのロボットを操作し、模擬宇宙構造物を組み立てる実験に成功した。

第三期は「無重力作業技術の研究(1993～1998)」で、軌道上で精密作業を行うためのテレロボット技術の研究、および、ロボットが3次元無重力空間で自在に運動するための制御技術の研究を行った。ここでは、三指多重センサハンドを用いたセンサ融合テレロボティクス的手法を研究し、1997年11月に打ち上げられた技術試験衛星VII型(ETS-VII)において世界初の無人宇宙機による精密作業の実証試験に成功した。

これらの成果は、現在、重要技術競争特別研究「宇宙情報通信システムの軌道上保全技術の研究(1998～2002)」に引き継がれ、多数の小型衛星群による宇宙情報通信システムを宇宙環境を保護しながら構築するための保守・診断用ツールへの利用を目指し、新たな研究の展開を図っている。



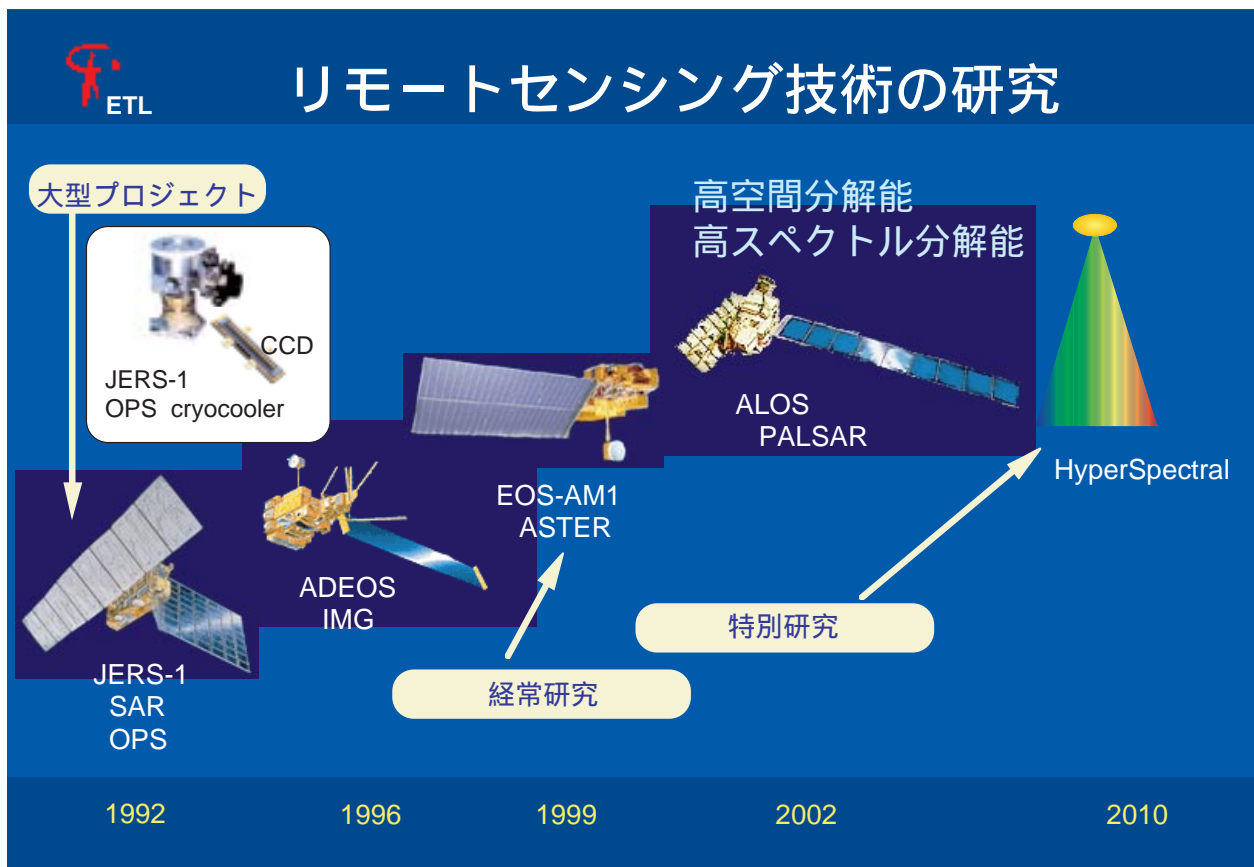
§ 5 リモートセンシング技術の研究

当所のリモートセンシング技術の研究は、1977年から始まった。当時は、米国のLANDSATの打ち上げが定常化すると共に、SKYLABを用いた地球観測が行われる等、人工衛星を用いたリモートセンシングがその第1歩を踏み出したところであり、我が国の宇宙利用ならびに、宇宙産業の一つの大きな柱として研究が開始された。

最初は、調査研究という形で始められ、資源の乏しい我が国が新たな地下資源の探索に有効ということから、大型プロジェクト「資源探査用観測システムの開発研究」として、当所の宇宙、電子デバイス、光電波、情報処理技術などを統合した研究が、InSb短波長赤外センサ素子、機械式冷凍機、100GHz帯放射計、フラクタル画像処理について、1985年から1988年まで行われた。大型プロジェクトの成果は資源探査用観測システム研究開発機構(JAROS)に引き継がれ、1992年の地球資源衛星(JERS-1：ふよう)の打ち上げとして開花した。

この後、特別研究「赤外センサの高度化の研究」、「アレーアンテナ制御技術の研究」(1988～1992)、「地球観測用大規模ラジオメータの研究」(1993～1998)、および経常研究において、よりアドバンスなセンサーの基礎技術の研究を行った。これらの成果を基に、1996年に打ち上げられた地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)の温室効果気体センサ(IMG)、1999年打ち上げの極軌道プラットフォーム(EOS-AM1)の資源探査用将来型センサ(ASTER)、2002年打ち上げ予定の陸域観測技術衛星(ALOS)のフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ(PALSAR)の開発をサポートしてきた。

最近になって、小型群衛星を各種宇宙利用のプラットフォームとして使用する提案がなされ、地球観測においても、高空間分解能と、広い領域の観測を、両立させ得るとの見込みがとれることから、1999年から特別研究「分散融合型地球観測システムに関する研究」を開始した。ここでは、プラットフォームとしての群小型衛星の運用技術ならびに、高スペクトル分解能を持つ次世代センサーシステムの研究を行っており、2010年頃の実用システムへの適用を目標としている。



§ 6 微小重力利用技術の研究

微小重力環境下では対流が抑制されるため、大型結晶の育成や新規材料の合成が期待されている。このような実験は、1973年米国による「スカイラブ計画」に端を発し、スペースシャトルなどを用いた材料科学実験に引き継がれている。日本においても、第1次材料実験（FMPT：1992）を皮切りに、宇宙実験が進められている。21世紀初頭に向けて、宇宙ステーションや回収カプセル型衛星など、軌道上の環境を利用し、新素材や医薬品を開発しようとする実験プログラムが目白押しである。当所においても、材料プロセス制御技術、その観察技術の開発、熱・物質移動過程の解明などの研究を行った。

「国際協力による微小重力環境下での物理・科学及び生体現象の解明に関する研究（1987～1991）」においては沸騰現象を明らかにするために、ミュンヘン工科大学との共同研究により、航空機（カラベル）を用いて微小重力実験を行い、加熱面と気泡の間の液膜が重要な役割をすることを見いだした。本研究は、小型ロケット実験（TR-1A 1号機：1991）における実験に発展した。

結晶成長に関しては、第1次国際微小重力実験室（IML-1：1991）で、有機化合物の拡散を利用して有機

超伝導体として期待される結晶の成長を行い、高品質の結晶を得ている。「微小重力利用技術の研究（1990～1992）」および「無重力プロセス技術の研究（1993～1998）」においては、結晶成長過程を解明するための研究が行われた。その成果は、小型ロケット（MASER：1990）を用いた結晶成長可視化実験および回収カプセル衛星（EXPRESS：1995）におけるゼオライト結晶成長実験に生かされ、プロジェクトに中核的な立場で参画した。

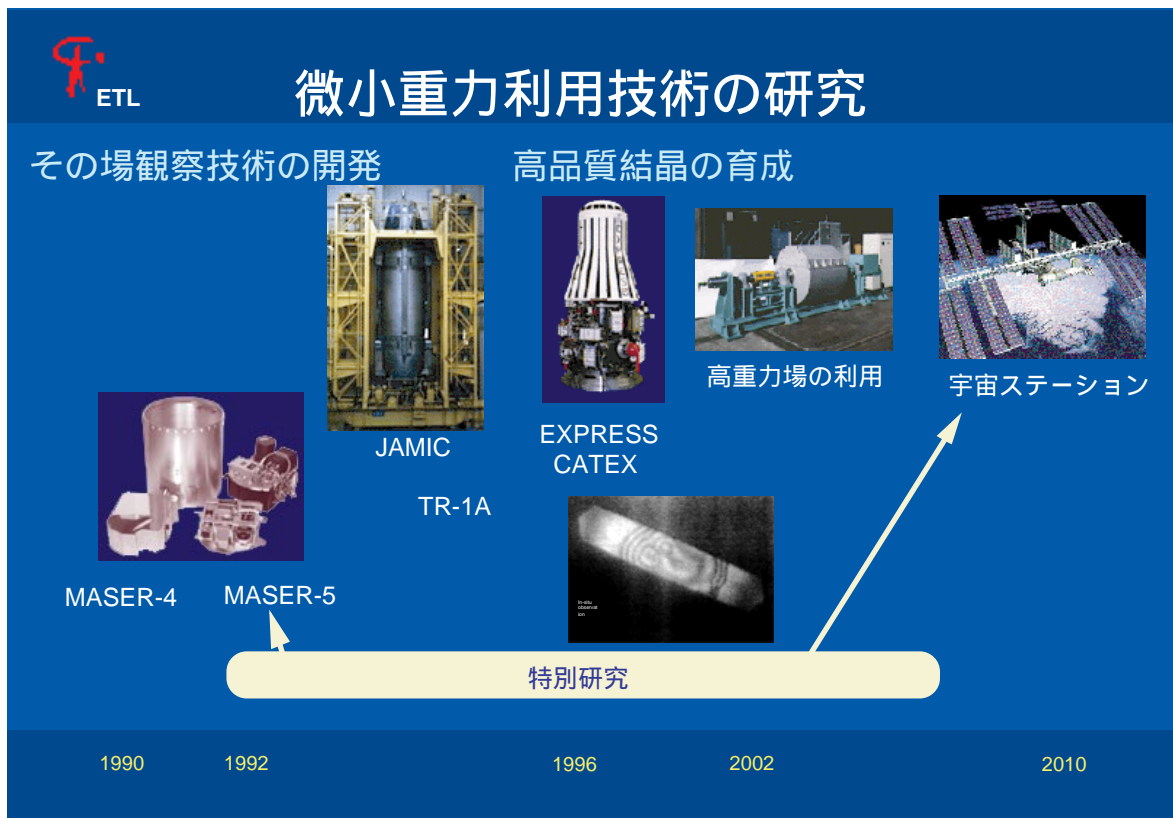
一方、スペースシャトルや小型ロケットを利用した微小重力実験は機会が限られており、頻繁に実験ができないのが問題であった。「短時間微小重力を利用した材料生成に関する基盤技術開発（1992～1996）」においては、稼働を開始した上砂川や土岐の落下実験設備を利用して、スプレー噴霧の冷却効果を調べるとともに、短時間に起こる結晶核発生の検出を試みた。

以上の研究を引き継ぎ、「宇宙材料創製技術の研究（1999～）」においては重力加速度をパラメーターとした、材料生成過程の研究を進めている。

IML-1、TR-1Aの実験は、宇宙開発事業団との共同研究によるものである。

MASERの実験は、機械システム振興協会、航空宇宙工業会の支援によるものである。

EXPRESSの実験は、USEFおよび新エネルギー・産業技術総合開発機構のプロジェクトである。



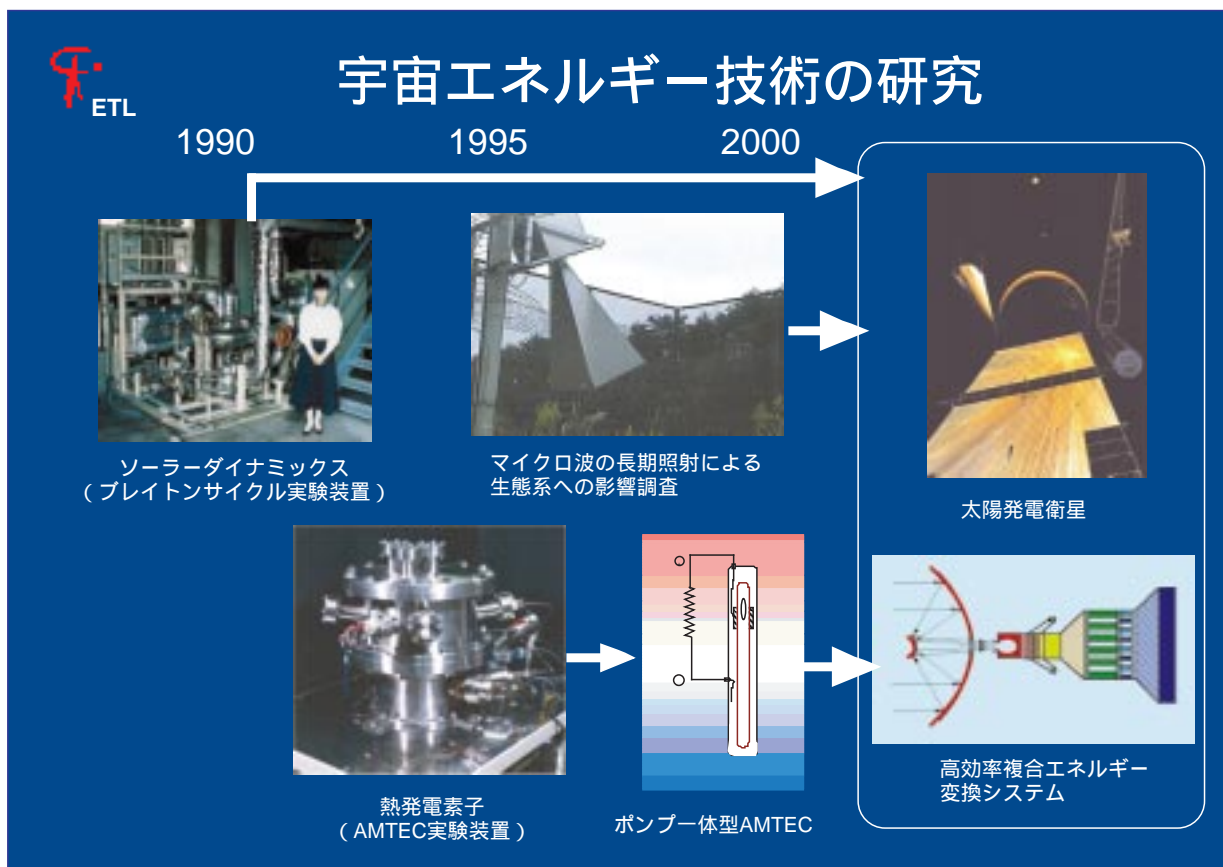
§ 7 宇宙エネルギー技術の研究

宇宙ステーションや月面基地など、宇宙開発・利用の進展に伴い、将来の宇宙活動におけるエネルギー需要は大きく増大する。宇宙では発電規模の増大に伴う太陽熱発電の優位性が報告されている。当所では、従来から地上での太陽熱エネルギー利用の開発研究が行われてきたが、宇宙用としての適性が考えられるため、それに特化した形で集熱・蓄熱・放熱・熱流制御・熱電変換・マイクロ波送電などの技術開発が1985年頃から始められた。

初期には、特別研究「熱流制御機器の研究、および電力用マイクロ波伝送技術の研究(1985～1987)」で、高温潜熱蓄熱技術やヒートポンプ型熱流制御機器の開発、マイクロ波送電の研究を行い、次に「熱環境制御技術の研究(1988～1992)」において、宇宙空間に液滴粒子のベルトを作り大容量の熱を排熱する液滴ラジエタの要素技術研究や、コンポジット潜熱蓄熱材料の開発・試験・評価を進めた。さらに、「高効率宇宙熱発電の研究(1993～1998)」で、回転部分の無い発電方

式であるアルカリ金属熱電変換(AMTEC)の基礎研究や小型一体型レシーバの試作・加熱試験、微小重力環境場での2成分熱媒体の伝熱特性の研究などを行ってきた。また、これと並行して、将来の太陽発電衛星(SPS)のマイクロ波送電の生態系への影響評価を行うため、マイクロ波の植物への長期照射試験を経常研究で行っている。

現在は、特別研究「宇宙用熱発電技術に関する研究(1999～)」において、当所独自の考案によるポンプ一体型アルカリ金属熱電変換方式の無重力対応ユニットセルの実現を目指すと共に、混合系媒体を用いた宇宙用熱制御技術の研究を行っている。AMTECは熱源に制限はなく、高温域や低温域の発電要素をカスケードする事で総合効率を上げる事ができ、集熱(光)用展開面積は小さくなり、各種損失や障害を少なくできる。また、太陽が蝕などの場合には、高温蓄熱器が熱エネルギーを、発電後には電池等に化学エネルギー等として貯蔵し、常時電力を安定供給できるようにシステム化する事が可能であり、大口の熱需要には、対応するステージ(蓄熱器等)から直接熱を供給し、光(熱) - 電気 - 熱と言う変換損失を減らす事も可能となる。

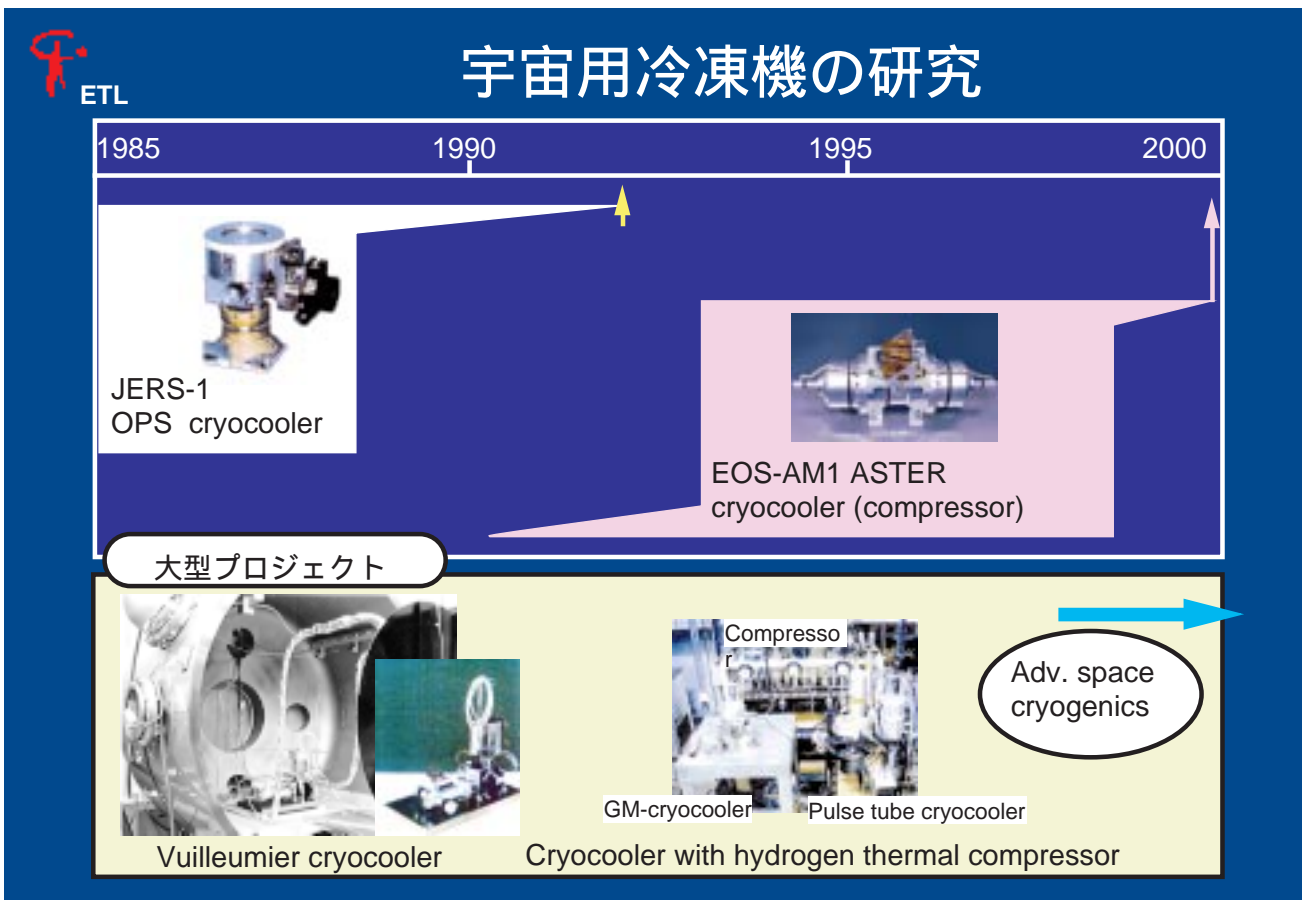


§ 8 宇宙用小型冷凍機の研究

当所の宇宙用冷凍機の研究は、地球観測センサの高感度、高性能化のための冷却器の開発を目的として着手された。まず、大型プロジェクト「資源探査用観測システムの研究開発（1985～1988）」において「センサ冷却系の研究」として、ニーズ指向と将来型冷凍機の研究を行った。前者では、地球資源衛星1号（JERS-1）の光学センサOPSの冷凍機の開発に先立ち、その原形となった小型スターリング冷凍機（80K, 1W）を真空環境下で連続運転及び断続運転をそれぞれ2000時間実施し、開発課題を抽出した。後者は長寿命化と低振動化が期待されるヴィルミエ冷凍機を対象にした研究であり、国内で最初に開発に成功した。引続き実施した耐久性試験によって冷凍機の特徴を実証するとともに、宇宙環境を模擬したスペースチャンバを利用した真空試験において、将来の宇宙用冷凍機として実用の可能性を明らかにした。

次いで、特別研究「熱環境制御技術の研究（1988～1992）」において、大型衛星の排熱を利用した低温発生の可能性について、要素技術の研究を行った。作動ガスには水素を用い、水素吸蔵合金を利用した圧縮器を開発することにより、国内で最初に60 Kレベルの水素冷凍機を完成させた。さらに、1992年から現在まで、水素冷凍機の圧縮器の小型・軽量化を実現し、水素パルス管冷凍機の研究を經常研究で実施している。長寿命で高信頼性が要求される宇宙用小型冷凍機の研究では、冷凍機技術の高度化と評価技術の確立を目指している。

また、これらと並行して、地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS：1996年打上）に搭載されたマイケルソン・フーリエ干渉分光方式の温室効果気体センサ（IMG）の冷凍機、および極軌道プラットフォーム（EOS-AM1：1999年12月打上）に搭載された資源探査用将来型センサ（ASTER）用の長寿命冷凍機（50000時間）について、通産省の開発の支援を行ってきている。



参考文献

[電気推進システム関連]

- 1) 町田和雄, 村上寛, 工藤勲, 中山勝矢: イオンエンジンシステムの最適化, 計測自動制御学会論文集, Vol.12, No.2, (1975)
- 2) 工藤勲, 町田和雄, 村上寛, 中山勝矢: イオンエンジン用パワーコンディショナーシステム, 電気学会誌, C96-4, (1976)
- 3) 町田和雄, 中村嘉宏, 東久雄, 工藤勲, 平田正紘, 金子重彦: Development of Ion Engine System (Flight Model), 13th ISTS, (1982)
- 4) 工藤勲, 町田和雄, 戸田義継, 村上寛: Electromagnetic Noise from an Ion Engine System, J. of Spacecraft & Rocket, Vol.20,1,(1983)
- 5) 町田和雄, 戸田義継, 村上寛, 工藤勲: 衛星搭載型イオンエンジン制御装置の設計と製作, 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.6, (1983)
- 6) 戸田義継, 村上寛, 平田正紘, 工藤勲, 町田和雄: イオンエンジンシステムの長時間試験, 日本航空宇宙学会誌, Vol.32, No.370, (1984)
- 7) M.Hirata and H.Murakami: Electromagnetic Noise Measurement Study of Pulsed Plasma Engine, AIAA-81-0722, (1981) pp.109-116
- 8) M. Hirata, H.Murakami, M.Ono and K.Nakamaru: A Space Test of a Pulsed Plasma Engine, 13-th ISTS, (1982)
- 9) M.Hirata and H.Murakami: Impulse Measurement of a Pulsed-Plasma Engine on Engineering Test Satellite-IV, J.of Spacecraft and Rockets, Vol.21, No.6, (1984) pp.553-557
- 5) 町田和雄, 戸田義継, 岩田敏彰, 飯倉省一, 小松督: 3自由度パラレル機構と宇宙用スマート効果器への応用, 日本ロボット学会誌, 12,1(1994) pp.105-111
- 6) 町田和雄, 戸田義継, 岩田敏彰, 福田靖, 鳥生英俊: Sensor-based Proximity Operation of an Astronaut Reference Flying Robot, Advanced Robotics, 9,6, (1995) pp.653-673
- 7) 岩田敏彰, 町田和雄, 戸田義継: Adaptive Control Using Resolved Acceleration Scheme for Flying Robot, Trans. of JSASS, 38, 122, (1996) pp.323-337,
- 8) 町田和雄, 戸田義継, 村瀬雄一, 駒田聡: 宇宙精密作業のためのテレロボット構造と技法, 日本航空宇宙学会誌, 45, 520, (1997) pp.295-302
- 9) 町田和雄, 平井成興, 脇田優仁, 岩田敏彰, 荻本健二, 木多見昌弘, 氏家博輝: 超遠距離ロボットによる宇宙構造物組立に関する実験的研究, 日本航空宇宙学会誌, 46, 528, (1998) pp.46-55
- 10) 町田和雄, 三上龍男, 秋田健三: 衛星搭載用精密作業テレロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 17, 4, (1999) pp.577-586
- 11) 町田和雄, 戸田義継, 村瀬有一: 「ひこぼし」搭載多重センサロボットハンドの宇宙における性能, 計測自動制御学会論文集, 35, 12, (1999) pp.1583-1590
- 12) 町田和雄, 戸田義継, 森谷正義, 津田直純, 秋田健三: センサ融合テレロボティクスの宇宙における精密作業実験, 日本ロボット学会誌, 18, 3, (2000)

[宇宙ロボット技術関連]

- 1) 戸田義継, 町田和雄, 岩田敏彰, 井上正夫, 山田克彦, 田中健一: 宇宙用小型マニピュレータの試作研究, 日本航空宇宙学会誌, 35, 401, (1987) pp.294-302
- 2) 岩田敏彰, 町田和雄: Lubrication Method and Durability of Gears for Space Application, Japanese J. of Tribology, 34, 4, (1989) pp.428-439
- 3) 町田和雄, 戸田義継, 岩田敏彰: Graphic Simulator Augmented Teleoperation System for Space Applications, J. of Spacecraft and Rockets, 27, 1, (1990) pp.64-69
- 4) 戸田義継, 岩田敏彰, 町田和雄: 宇宙用自由飛行テレロボットの研究...地上実験モデルの試作, 日本航空宇宙学会誌, 40, 467, (1992) pp.652-659
- 1) Y.Kato, K.Komiyama, and I.Yokoshima: A New Millimeter-wave Radiometer using Frequency Division Scheme, Proc. of International Symposium on Noise and Clutter Reduction (ISNCR89), (1989)
- 2) H. Fujisada, M. Nakayama and A. Tanaka: Compact 128 Focal Plane Assembly for Thermal Imaging, Proc. SPIE, Vol.1341, (1990) pp.80-91
- 3) H. Fujisada: High Sensitive Thermal Videocamera with Self-scanned 128 InSb Focal Plane Array, Proc. SPIE, Vol.1450, (1991) pp.665-676,
- 4) K.Komiyama: High Resolution Imaging by Supersynthesis Radiometer(SSR) for the passive Remote Sensing of the Earth, Electronics Letters, Vol.27, No.4, (1991)
- 5) K.Komiyama, Y.Kato, and T.Iwasaki: Collective -Processing Correlator System for Imaging Radiometer of Thinned Arrays, Electronics Letters Vol.28, No.8, (1992)

- 6) K.Komiyama, Y.Kato and T.Iwasaki: Interferometric Antenna Array with Six Antennas and A Collective-Processing Correlator for Microwave Radiometry, Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS'93), (1993) pp.1438-1440
- 7) K.Komiyama: Preliminary Experiment of One-dimensional Imaging by Supersynthesis Radiometer, Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS'98), (1998)

[微小重力利用技術関連]

- 1) 村上 他: Microgravity annealing system for thin-film superconductors, Rev.Sci.Instrum, Vol.64, No.6, (1993) pp.1536-1540
- 2) A. Iwasaki, M. Hirata, I. Kudo, T. Sano, S. Sugawara, M. Ito and M.Watanabe: In-situ measurement of crystal growth of rate of zeolite, Zeolites, Vol.15, (1995), pp.308-314
- 3) A. Iwasaki, I. Kudo, Y. Arai, T. Kawai, T. Watanabe and H. Takei: Visualization of solidification process in kinetics control system with interferometry, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.9 (1995), pp.537-542
- 4) A. Iwasaki, M. Hirata, I. Kudo and T. Sano: Visualization of the (010) face of silicalite crystal, Zeolites, Vol.16, No.1, (1996), pp.35-41
- 5) A. Iwasaki, I.Kudo and T. Sano: Feasibility of optical observation technique for zeolite crystal growth in space, Journal of Space Technology and Science, Vol.11, No.2, (1997), 9.
- 6) A. Iwasaki and T. Sano: Dissolution of silicalite crystal, Zeolites, Vol.19, (1997), pp.41-46
- 7) A. Iwasaki, H. Kaneko, Y. Abe and M. Kamimoto: Investigation of electrochemical hydrogen evolution under microgravity condition, Electrochimica Acta., Vol. 43, No.5-6, (1998), pp.509-514
- 8) A. Iwasaki and T. Sano and Y. Kiyozumi: Effect of additives on the growth behavior of silicalite crystal, Microporous and Mesoporous Materials, Vol.25, (1998), pp.119-126

[宇宙エネルギー技術関連]

- 1) 田中耕太郎, 阿部宣之, 金成克彦, 野村修身: Space Solar Receiver for Closed Brayton Cycle Power Systems, Proc. ISES Solar World Congress 1989 Kobe (1989)
- 2) 阿部宣之, 田中耕太郎, 野村修身, 金成克彦, 高橋義夫, 神本正行: Development of Advanced Space Solar Dynamic

Receiver, Proc. 26th IECEC 1,(1991) 291-296

- 3) 神本正行: 太陽熱発電用複合潜熱蓄熱材料の開発, 高圧ガス 30,(1),(1993) pp.62-65
- 4) 細川俊介, 川田正国, 岩崎晃, 工藤勲: 液滴ラジエタにおける液滴回収過程の観察, 日本航空宇宙学会誌 41, 474,(1993) pp.385-390
- 5) J.Stravb, J.Winter, G.Picker, M.Zell, 阿部宣之: Bubble Growth Experiments at JAMIC Drop Shaft, Microgravity Sci. Technol. 6,(4),(1993) pp.229-238
- 6) 田中耕太郎, Roger M. Williams, Mark L. Vnderwood, Margaret A. Ryan: Thermal Designing on Wick Return AMTEC Cells, New Energy Systems & Conversions1,(1993), pp.721-725
- 7) 加藤雅也, 阿部宣之, 森康彦, 長島昭: Spray Cooling Characteristics under Reduced Gravity, AIAA J. of Thermophysics and Heat Transfer 9,(2),(1995) pp.378-381
- 8) 工藤勲: 宇宙発電とマイクロウェーブガーデン, EMC, 8,(3),(1995) pp.24-28
- 9) 田中耕太郎, 根岸明, 本多武夫, 藤井孝博, 増田俊久, 野崎健: アルカリ金属熱電変換の研究, 電子技術総合研究所研究報告, 第973号 (1995)

[宇宙用冷凍機関連]

- 1) 川田正国, 工藤勲, 吉村秀人: 小形ヴィルミエ冷凍機の研究(簡易モデルによる冷凍機の性能計算), 日本機械学会論文集(B編)(1995) pp.704-712
- 2) 川田正国, 工藤勲, 吉村秀人: 小形ヴィルミエ冷凍機の研究(性能試験結果と計算結果との比較), 日本機械学会論文集(B編)(1995) pp.713-721
- 3) M. Kawada and H. Fujisada: Long-life Cryocooler Development Program for ASTER, Cryocoolers 8 (1995) pp.35-46
- 4) M. Kawada, H. Fujisada, H. Akao, M. Kobayashi, K. Kawajiri, A. Nishimoto and O. Nishihara: Performance of long-life Stirling cycle cryocoolers for ASTER instrument, SPIE, 3221 (1997) pp.220-229
- 5) 川田正国: 小型冷凍機の宇宙への応用, 設計工学, 34, 3 (1999) pp.75-80

(2000.2.16受付)

本資料における衛星の図は, NASDA, USEF, JAROS, NASAのパンフレット等から引用した。