

特集

大型プロジェクト(2)

地球資源衛星の研究開発/超先端加工技術の研究開発

R & D of the Earth Resources Satellite/  
R & D on the Super-Fine Processing Technologies

中島一郎\*  
Ichiro Nakajima

「地球資源衛星」の研究開発

1. 資源探査とわが国

地球に存在する天然資源。産業革命以来、われわれの産業・社会生活にとって一日も欠くことのできない石油や石炭などの化石資源。文明の基礎となった鉄や銅をはじめとする各種の金属。こうした貴重な地下資源を探し当て掘り出すことは、現代の文明の水準を維持し続け、さらに発展させていくための基礎となる活動と言えよう。先進国はもちろんのこと、これからの発展をめざす国々がこうした価値ある資源の探査に大きな努力を払うのも当然のことである。

わが国はこうした資源には概して恵まれていない。高度の工業を維持するのに必要な多くの重要な資源は外国からの輸入に頼っている。石油の99.8%、鉄鉱石の99.7%、石炭の84.1% (いずれも84年、通産省調査) を輸入に依存している。こうした状況にあるわが国にとって、海外の資源開発とその確保、海外資源の状況把握は重要な意味を持つ。

2. 資源探査の手法

地下資源の探査は広域の概査から段々に有望な地域をしぼりこんで精密な探査を行う段階的な手法を取っていく。既存のデータをもとにあたりをつけた地域に対しては、まず、航空機を使った探査が実施される。航空機には光学センサ・レーダー(つまり電磁波センサ)・磁気センサ・重力センサ等の各種のセンサが搭載されている。航空機は精密な航空装置の助けを借りて対象地域の上空を余さず走査し、必要な情報を収集する。探査中の航空機は位置はもちろんのこと、機体の姿勢・速度などを細かく制御していくことになる。また、精密機器であるセンサやデータ処理装置

表1 資源探査用の各種のセンサ

探査手法	センサ	搭載対象			
		衛星	航空機	地上	船舶
リモートセンシング	可視・近赤外センサ	○	○	○	○
	中間赤外センサ	○	○	○	○
	熱赤外センサ	○	○	○	○
	レーザー高度計		○	○	
	ルミネッセンス・センサ		○	○	
	合成開口レーダー	○	○		
	マイクロ波散乱計	○	○		
	マイクロ波放射計	○	○		
物理探査	磁気探査		○	○	○
	重力探査		○	○	○
	放射能探査		○	○	○
	電気探査		○	○	○
	地震探査			○	○
地下学探査	各種ガス・センサ			○	○

〔機械振興〕84年4月号より(一部修正)

の嫌う振動・熱などの環境の整備も必要だ。

こうして得られた航空機探査データは持ち帰られてコンピュータなどで解析され、次の段階の地上探査をする上での貴重なデータになる。地上探査では、地面の電気的抵抗値を測定したり、爆薬を用いて小規模な人工地震を発生させ、地震波がどのように伝播するかを測定する。こうした手法は航空機探査に比較すると対象面積当たりのコストが高い。したがって航空機探査や既存のデータを用いてできる限り地域のしぼりこみを実施しておくことが探査の経済性にとって重要になる。こうした探査の後にはよいよ資源埋蔵の可能性が高くなるとボーリング調査になる。

3. 衛星と探査

こうしたこれまでの一連の探査のうちの最初の段階である航空機探査よりもさらに前の段階として人工衛星を利用しようというのが、地球資源衛星の計画。これまでにこの種の衛星としては米国のランドサット衛星があったが、これは主として農業生産の状況など地上の植栽の把握に重点を置いており、地下資源を重点

\* 通商産業省工業技術院総務部研究開発官  
〒100 東京都千代田区霞ヶ関1-3-1

とする衛星はこれが世界初ということができる。

人工衛星は高度数百km以上のところを周回しており、高いものではたとえば通信の中継や気象観測に利用されている静止衛星のように高度3万6千kmをほぼ24時間で一周するものもある。衛星の周回速度は、それによる遠心力と衛星に働く引力とがバランスする値だから、衛星と地球の中心との距離で決まり、高度が低いほど速度は速くなる。地上に近いところではこの速度は毎秒約8 km、静止衛星では毎秒約3 km、天然の衛星である月の場合は約1 kmに過ぎない。地上の様子を遠隔探査する場合は用途に応じて適当な高度を選択する必要がある。高度が低いと近くから探査できるため地上での幾何学的な分解能（地上分解能）の高い探査ができるかわりに、広い幅にわたっての同時測定には限界がある。逆に、高度が高いと広い範囲の同時探査が可能になるが地上分解能は限られてくる。米国のランドサット衛星は高度約千kmで地上分解能が30m、わが国の資源衛星については分解能を20m以下とするため、

高度を約560 kmとしている。

4. 光学センサー

この地球資源衛星は通産省と科技庁の共同開発プロジェクトとなっている。通産省は衛星に搭載される探査用のセンサー機器系を開発、科技庁は傘下の宇宙開発事業団において、衛星の本体（バス）の開発を進め、同時に打ち上げに必要なロケットの製作・打ち上げを担当。センサーとしては、可視・赤外域の光学センサーと、合成開口レーダーを搭載する。

可視・赤外光学センサーは複数の波長帯で地上を写真撮影するものと考えてよい。具体的には、半導体光学センサーと走査用のCCD（電荷結合素子）を4096個の1次元のアレイにしたものを開発。ここから得られる信号を地上に送信する。アレイの方向と衛星の飛行方向とは直交しており、衛星の飛行速度（毎時約7 km）でセンサーが地上を走査していくことになる。4096個のアレイは地上で幅75kmの地域を走査するので、地上

表2 光学センサシステムの基本性能

項目	観測基本性能		備考		
観測波長域	中心波長(μm)   バンド巾(μm)		バンド巾は、ピーク感度の半値巾とする。また、中心波長はバンド巾の中心の波長とする。		
	バンド1	0.56   0.08			
	" 2	0.66   0.06			
	" 3	0.81   0.10			
	" 4	0.81   0.10			
	" 5	1.655   0.11			
	" 6	2.065   0.11			
	" 7	2.19   0.12			
	" 8	2.335   0.13			
分解能	18.3 m × 24.2 m (但し、バンド4については 19.0 m × 25.1 m)		衛星進行直角方向×衛星進行方向 (瞬時視野角 32.2 μrad) (撮像周期 3.46 msec) (視野角 7.5°)		
走査巾	75 km (但し、バンド4については78 km)				
立体視 ベースハイト比	0.3		バンド3（衛星直下視）及びバンド4（前方視）による。 (立体視角度 15.33°) 高入力及び低入力レベルの規定は以下のとおりとする。		
S / N					
量子化ビット数 出力データレート	高入力レベル(dB)	低入力レベル(dB)	高入力レベル (W/㎡・str・μm)	低入力レベル (W/㎡・str・μm)	
	バンド1	36 以上	23 以上	324	64.8
	" 2	35	22	250	50.0
	" 3	36	23	248	49.6
	" 4	36	23	239	47.8
	" 5	34	21	33.3	6.66
	" 6	31	18	17.8	3.56
	" 7	29	16	13.7	2.74
	" 8	25	11	10.8	2.16
量子化ビット数	6				
出力データレート	60 Mbps		30 Mbps × 2 ch		

分解能は飛行方向に直交する方向で18.3mになる。飛行方向の分解能は4096個の素子のデータをどのくらいの繰り返し周波数で走査するか依存する。飛行方向と直交方向で分解能が等しいことが望ましいが地上での画像処理をほどこすことにより、多少の差異は修正が可能。今回の開発計画では飛行方向の分解能は直交方向の1.5倍。

光学センサーの波長帯は対象とする岩石の反射特性をもとに決定することが必要。この分野は研究が進められている段階でもあり、現状で決定版があるわけではない。できる限り有効なデータをとるため今回の衛星では別表のような波長帯を選択している。この中で中間赤外域では受光量が微弱であることから、効率のよいセンサー素子をどのようにして構成するかが大きな問題となる。こうしたセンサー素子は冷却の必要性があるが、衛星搭載機器の場合、重量・消費電力の関係から冷却装置の能力にも限界がある。ERS-1では循環冷却機を開発することにより、80kまでセンサーを冷却し、Pt-Si素子によるセンサーを採用する計画。

このほか、地表面の凹凸を観測するための立体視機能を実現することになっている。具体的には衛星の直下を見る光学系その他、直下に対して約15度斜めの方向を見る光学系を設定、この両方のデータを地上で処理して立体視を実現する予定。

5. 合成開口レーダー

もうひとつのセンサー系が合成開口レーダー。マイクロ波を地上に向けて発射、その反射波を受信するアクティブ型のセンサー。観測時間帯が昼間に限られ、雲や降雨の影響も受ける光学センサーに比較して、昼夜間を通じて観測でき、多少の雲や降雨にはわずらわされず観測できるのが合成開口レーダーの特色。また、地上でデータをコンピュータ処理することにより、地表面の凹凸を立体的に見えるような画像を得ることも可能。ただし光学センサーと違って波長はひとつなのでカラー画像はとれない。

レーダーの性能はアンテナの開口面が大きいほど高くなるが、衛星や航空機に搭載する場合はスペースや重量の制限から開口面の大きさに限界がある。このため小さな開口面のレーダーを移動させ、その間に得られるデータから一種の相関関数をとる演算をほどこすことにより、大きな開口面のレーダーのものと同等の結果を得ることができる。いわば衛星の軌道面に沿った大きな開口面のレーダーと考えることができ、その意

表3 合成開口レーダシステムの基本性能

項目	観測基本性能	備考
観測周波数	1275MHz	水平偏波送受信
中心周波数	15MHz	
帯域幅	H-H直線	
波長	35°	
オフナディア角	18m×18m	レンジ方向×アジマス方向 (アジマスマルチルック数3)
分解能	75km	
走査幅	-20.5dB以下	
雑音等価後方散乱係数	14dB以上	
S/A	3	
量子化ビット数	60Mbps	30Mbps×2ch
出力データレート		

ミッション送信機システムの基本性能

項目	基本性能	備考
搬送波周波数	f <sub>1</sub> : T, B, D f <sub>2</sub> : T, B, D	8025~8400MHzのうち2波 暫定値 f <sub>1</sub> : 8.15GHz f <sub>2</sub> : 8.35GHz
データ伝送速度	60Mbps/1波	
変調方式	QPSK	
占有周波数帯幅	50MHz/1波以下	
偏波	右旋円偏波	
実効放射電力(EIRP)	θ=0° : 32dBm以上 θ=66.1° : 47dBm以上	θ=0°は衛星直下点 方向を示す

ミッション記録装置の基本性能

項目	基本性能	備考
記録/再生データレート	60Mbps	
記録/再生時間	各20分以上	
ビット誤り率	1×10 <sup>-6</sup> 以下	
総テープ走行時間	最大2,000時間	総記録/再生時間
起動/停止回数	最大20,000回	

味で合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar) と呼ばれる。

ERS-1の合成開口レーダーのアンテナは飛行方向に8枚の板を並べたもので、長さは12m。合成開口レーダーは反射波の遅延時間とドップラー効果による周波数遷移を利用するため、電波の発射方向は直下でなく斜め方向(この角度がオフナディア角)になる。合成開口レーダーではできあがった画像で標高の高い地点が前に倒れ込む特有の性質がある。この画像の歪みを小さなものにするためにはオフナディア角を大きくする必要があるが、そうすると電波の往復の行程が長くなるとともに、反射係数も小さくなるため、受信信号が微弱となりSN比が小さくなる。オフナディア角の決定は利用者側と開発者側の間で大きな議論になったが、結局、35度とすることとなった。

6. データの記録と送信

光学センサー及び合成開口レーダーで取得されたデータはデータ・レコーダーに一時記録される。レコーダーとしては宇宙用として現在最も実績の高い米国Odetics社のものを採用することとなっている。データ記録のレートは毎秒60メガビット。記録再生時間は20分間以上に設計している。

地上へのデータ転送は鳩山の宇宙開発事業団の受信設備等で実施する。転送レートは毎秒60メガビット。この衛星の寿命は姿勢制御用の燃料の容量で決まるが約2年の予定。この間に地球の全陸地を探索してデータを取得するためには、天候等の都合で何度か繰り返し同一地域のデータを取得する必要も考えあわせると、鳩山受信局一つでは無理がある。ERS-1は北極と南極を通る面内を周回する極軌道衛星なので、一周ごとに通過する極域あるいはその近傍の高緯度地域に受信局を設置することが有利。このため、現在、北欧等での受信の可能性について検討中。また、米国の航空宇宙局(NASA)がこの衛星のデータについて興味を示しており、アラスカのフェアバンクス受信局でのデータ受信について関係者間で協議中。

このようにして得られたデータは地上のコンピュータ等で処理され各種の目的のために役立てられることになる。大量のデータを高速で処理し、蓄積するための研究も地質学・コンピュータ技術・センサー技術等の異種分野の専門家による協力体制で実施されつつある。

## 7. スケジュールと予算

ERS-1の打ち上げの今のところ91年春に予定されている。通産省の分担するセンサー系の本格的な研究開発は大型プロ制度により、85年1月に着手された。現在、地上試験用モデル(EM=Experimental Model)の製作中。EMは88年半ばまでに完成の予定。製作の担当は資源リモートセンシング技術研究組合(理事長は関本日本電気社長)。この組合には、衛星メーカーの他、資源開発関係企業、データ処理関係団体等が加入している。これと並行して実際に打ち上げる実機(PFM=Proto Flight Model)の製作が86年末から開

始されており、打ち上げを目指して作業は急ピッチで進められている。

これまでに大型プロで計上された研究開発費は製作関係の委託費が6,086百万円、国立研究機関による基礎的研究費が396百万円。87年度の予算(政府案)は、それぞれ、3,000百万円と、188百万円。

## 「超先端加工システム」の研究開発

### 1. 90年代の処理・加工

「超先端加工システム」プロジェクトは90年代の半ばごろからの実現をめざす新しい処理加工技術の研究開発で、大型プロジェクト制度で今年度からスタートするもの。同制度の24番目のプロジェクトとなる。

90年代に必要な処理加工技術については各種のものがあろうとは思われるが、この研究開発プロジェクトのなかでは、2つのキーポイントを設定して計画を策定している。まず第一は、エキシマレーザーとイオンビームという新しい手段を用いること。エキシマレーザーは紫外線領域での発振を特徴とする新しいタイプのレーザー。基礎的な研究の段階を終わり、実用目的に沿った装置と応用技術の開発が待たれている。

イオンビームについては既に多くの応用分野を持つ技術ではあるが、取り扱えるイオンの種類、エネルギーの範囲等の拡大と、物体表面での反応の解明の進歩に伴って、新しい応用分野が開けようとしている。

第二のポイントは、こうした新しい手段を用いて主として表面の処理加工を行う点。機械的な切削・研磨等の形状加工ではなく、表面の処理をすることにより、改質・成膜や微細構造の製作等を行う。この過程では表面の物質の組成の変更もあり得る。

表4 世界の地球観測衛星

衛星名	Landsat-4, 5	SPOT-1	MOS-1	Landsat-6	ERS-1	ERS-1	Radersat	Landsat-7
国名	米国	フランス	日本	米国	ESA	日本	カナダ	米国
用途	陸域観測	陸域観測	海洋観測	陸域観測	海洋観測	資源探査	海洋探査	陸域観測
打ち上げ時期	4号1982, 7号1984, 3	1986, 2 (Ariane)	1987, 2予定 (N-II)	1988未予定 (Shuttle)	1989, 2予定 (Ariane-3)	1991, 2予定 (H-1)	1990初予定 (Shuttle)	1993予定 (Shuttle)
高度	705 km	832 km	909 km	705 km	785 km	約570 km	1,000 km	705 km
重量	2,000 kg	1,750 kg	750 kg	?	2,160 kg	1,400 kg	6,575 kg	?
寿命	2年	2年	2年	5年	2年	2年	5年	5年
走査幅	TM 185 km MSS 185 km	60 km	MSSSR 100 km VTIR 1500 km	TM 185 km	SARモード80km	SAR 75 km OPS 75 km	SAR 500 km MSS 417 km	SAR 500 km MSS 417 km
合成開口レーダ	-	-	-	-	Cバンド(V-V) 30mor100m	Lバンド(H-H) 18 m	Cバンド(V-V) 28 m	-
光学センサー	可視近赤外域 TM 6b, 30m MSS 4b, 80m 熱赤外域 TM 1b, 120m	可視近赤外域 カラー 3b, 20m バンクロー 1b, 10m	可視近赤外域 MSSSR 4b, 50m VTIR 1b, 900m 熱赤外域 VTIR 2b, 2, 7m	可視近赤外域 TM 6b, 30m 熱赤外域 TM 1b, 120m バンクロー 15m	-	可視近赤外域 3b, 18m×24m 短波長赤外域 4b, 18m×24m 立体視有	MSS(可視域) 4b, 30m AVIIRR(可視 ~熱赤外) 5b, 1300m	可視~短波長域 6b, 30m 中間~熱赤外域 4b, 120-60m バンクロー 15m
データレコーダ	搭載せず	50Mbps	搭載せず	85Mbps	100Mbps	60Mbps	T, B, D	85Mbps

(注) b.: バンド数

表5 衛星打ち上げ計画表

打上年度	N-II	H-I	H-II
60年度 夏期			
"    冬期	BS-2b		
61年度 夏期		TF	
"    冬期	MOS-1		
62年度 夏期		ETS-V	
"    冬期		CS-3a	
63年度 夏期		CS-3b	
"    冬期		未定	
64年度 夏期		GMS-4	
"    冬期			
65年度 夏期		BS-3a	
"    冬期		ERS-1	
66年度 夏期		BS-3b	
"    冬期			TFI
67年度 夏期			ETS-VI
"    冬期			未定

注1. 夏期は8月頃, 冬期は2月頃。  
 2. BS: 放送衛星, CS: 通信衛星, GMS: 気象衛星,  
 ETS: 技術試験衛星, TF: テストフライト

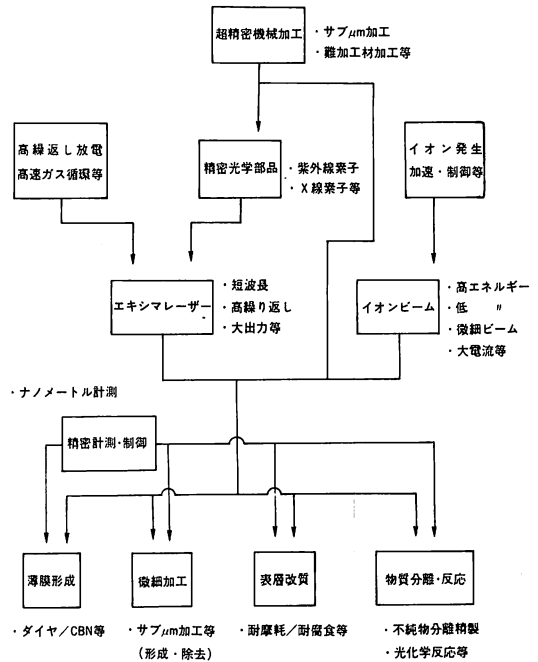
2. 開発計画

プロジェクトが最終的に研究開発目標として設定しているのは表7のようなもの。まず新しい手段であるエキシマレーザーとイオンビームについての研究開発が先行する。

エキシマレーザーの研究開発は2つの方向に沿って実施の予定。第一はエキシマレーザーの特色である短波長性の追求。現在、最もよく知られたものは、希ガスのXeとハロゲンの塩素で構成するもの。発振波長は308nm, ArとFでは193nm。微細構造の製作の目的のためには波長は短いほどよい。短波長レーザーとしては平均出力1kW, 寿命 $10^9$ パルスのArFレーザーを実現する。ただしこれらの仕様を同時に満足するものでなくてもよい。

第二は大出力のもの。超先端加工は切削・切断等のマクロな意味での形状加工をめざすものではなく、熱エネルギーで加工をする炭酸ガス・レーザー等のよう

表6 超先端加工システムの概念



に20~30kW級の出力は当面必要もない。しかし、経済的な処理加工のためには、ある程度のエネルギーが必要であり、この意味で出力が大きいものを開発する必要がある。本計画での目標はXeClレーザーで平均出力2kW。また、エキシマレーザーはパルス発振であり、照射時間を稼ぐためには、この発振周波数を高くすることが重要。これに関する計画目標は5kHz。

3. イオンビーム

イオンビーム技術については、応用目的に沿って多種類のものを開発の予定。

まず、大面積の表面改質を効率的に進めるのに適したものとして、大電流化技術を研究開発する。窒素・酸素等のガス・イオンで1A, 各種金属イオンで100

表7 「超先端加工システム」の研究開発基本方針(目標参考値)

<p>1. 大出力エキシマレーザー技術</p> <p>(1) 短長波大出力エキシマレーザー                      寿命: <math>10^9</math>ショット(波長: 0.193 μm)                      平均出力: 1kW (波長: 0.193 μm)</p> <p>(2) 高繰返し大出力エキシマレーザー                      パルス繰返し数: 5kHz                      2kW</p> <p>2. 高密度イオンビーム技術</p> <p>(1) 高集束イオンビーム                      ビーム直径: 0.01 μm以下</p> <p>(2) 大電流イオンビーム                      電流: ガスイオン 1A以上                      金属イオン 100mA以上</p>	<p>(3) 広域・高エネルギーイオンビーム                      エネルギー: 100eV以下, 4MeV以上</p> <p>(4) 複合イオンビーム                      ビーム種3元複合化</p> <p>3. 超精密機械加工技術                      形状精度: 0.1 μm/m以内 (相対精度<math>10^{-7}</math>)                      表面粗さ: 切削 0.01 μmrms 以内                      研削・研磨 0.005 μmrms 以内</p> <p>4. 計測・評価技術                      上記仕様の1桁上を目標とする。</p>
--	---

表8 研究開発年度別計画図

開発項目	年度	61	62	63	64	65	66	67	68
I 超先端加工装置技術	1. 短波長レーザー技術の研究開発	調査	要素技術開発	試作・試験		中	製作	改良	試験
	2. 大出力高繰返エキシマレーザー技術の研究開発					閉			
	3. 高集束広域エネルギーイオンビーム技術の研究開発					評			
	4. 大電流高エネルギーイオンビーム技術の研究開発					価			
	5. 超精密機械加工装置技術の研究開発								総
II 超先端加工技術	1. 超先端加工技術の研究開発	調査	要素技術開発	最適化試験			試作・試験	改良	試験
	2. 発電施設用部材高度加工技術の研究開発								価
III 支援技術	調査		基本設計				詳細設計	製作	試験
IV トータルシステム技術	調査		概念設計					総合試験	

mAの電流値を目標とする。これは、たとえば大型の金属製品の表面の窒化処理等を経済的に進める等の応用が考えられるもの。また、ガラスやセラミックス等の上にダイヤや各種半導体の薄膜を形成するなどの応用分野の研究開発も予定されている。

イオンのもつエネルギーについてもバラエティに富んだものを計画。3 MeV以上のエネルギーを持つものを無線周波数の四重極加速器で実現の予定。また、クラスター・イオンビーム技術で一原子当たり数十eV以下の極低エネルギーのビームを作りだし、対象表面に数原子層の超薄膜を形成することも計画している。

微細構造の製作用には直径0.01μ以下の細い径のビームを作り出す技術の研究開発を行う。電子ビームではこの程度の細いビームも実用化されてはいるが、電子は物質内での移動度が高く、打ち込まれた対象物質内で拡散・にじみを生じるため、にじみの小さいイオンでの微細ビーム技術の本格開発が待たれている。

4. 精密機械加工技術と支援技術

超先端加工では新しい処理技術としてエキシマレーザーとイオンビームを採用しているが、これらの技術を用いて処理加工を行う前処理段階として、対象の表面を精密に形状加工・平滑化しておく必要がある。また、エキシマレーザーの発振波長である紫外線領域の光学系は石英や蛍石などの難削材を使用し、その精度も波長の1/4以下という厳しい制限がある。

こうした加工のための精密機械加工として、形状精度0.1μ/m、表面粗さが切削で0.01μ、研磨で0.005μ以内のものを開発することを目標としている。

こうした処理加工を支援する技術として、計測・評価技術が重要になることはいうまでもないが、本計画では上記機械加工の精度の1桁上の計測技術を確立する。

5. 応用分野の研究開発

超先端加工の応用分野は、情報関連の精密機器、宇宙・航空・原子力等の先端機械システム技術分野、エネルギー分野等広範なものとなると期待される。本プロジェクトでは、具体的応用分野ではなく、応用のための基礎となると考えられる表面改質・成膜・表面微細加工等の基本応用技術の確立を図ることとしている。

対象となる物質は、金属(鉄・非鉄)、セラミックス、ガラス、高分子、半導体等。当面は、これらの上にダイヤモンドや金属の薄膜を生成することや、金属の表面を改質する研究開発を開始の予定。将来はエキシマレーザーやイオンビームの開発状況を見つつ、さらに応用分野の基礎技術の開発テーマを増やす計画。

6. スケジュールと予算

超先端加工プロジェクトは、昨年後半に委託研究開発を担当する企業を公募、審査の結果、18社3団体が委託先として選定された。これらの企業等は昨年12月に研究組合を設立。(一部企業はあとから参加予定。)この研究組合が本年1月から研究開発に着手する。

国立研究所の実施する基礎的分野については通産省傘下の5試験研究機関が参加する予定。

プロジェクトの研究開発機関は93年度末までの7年3カ月、87年度予算(政府案)は、委託研究開発費が967百万円、国立研究所の研究開発費が154百万円、