

## 火星移動科学探査車（ローバー）用掘削機の開発

河 島 信 樹\* ・ 齊 藤 顕 次\*\*  
小 島 雅 樹\*\* ・ 安 達 嗣 雄\*\*

(1993年10月15日受理)

## Development of a Drilling Machine on Mars Rover

By

NOBUKI KAWASHIMA, KENJI SAITO, MASAKI KOJIMA AND TUGUO ADACHI

**Abstract:** An experimental study has been made on a drilling machine on board Mars rover for scientific exploration of Mars with a special emphasis on fabricating a model and testing. The major objective of Mars exploration is set to search for water and organic material in underground of Mars. An engineering model of a drilling machine to be on board and used for the sample collection in an extensive scientific exploration of Mars surface and underground has been fabricated. As a drilling machine, [auger boring] has been adopted. Though it cannot drill hard rocks, it is simple and easy to operate, because it does not require any liquid for lubrication and cooling. No particular effort has been done yet to reduce the weight and size. It has a capability of 1.5 meter boring, requiring 1.15 kW electric power. The auger bit is surrounded with a metal cylindrical casing and the collected soil is stored in the space between the auger bit and the casing. A drilling test was performed using a simulated Mars soil. It has a layered structure, and between each layer, a thin sheet having different color is inserted. The simulated soil has been drilled and collected preserving the layer structure. It has been verified that the sample can be collected with a vertical resolution of about 20 cm.

### はじめに

アポロ計画という人類の大きな偉業に続いて、世界の宇宙開発は、スペースシャトルの実

---

\* 宇宙科学研究所

\*\* 西松建設(株)

現を経て、宇宙ステーションと続いている。この世界の宇宙開発の大きな流れの究極のターゲットは、火星の有人探査である。その前段階の大きなステップとして、火星の移動科学探査車（ローバー）による火星表面や内部の探査がある。

現在、火星有人探査に向けての世界の動向は、しかしながら大変厳しい。ソ連の崩壊にともなう宇宙開発の世界的なかげりがある上に、本年8月の米国の Mars Observer の火星軌道投入直前で消息を断つという失敗が、大きなインパクトを与えている。本来なら、これをベースにして次の火星ローバーでの表面探査へ続くものと期待されていただけに残念である。ロシアの Mars 94 も、現在のロシアの情勢では実現は厳しそうである。

一方、わが国の宇宙開発をみると、宇宙開発全体も宇宙科学研究についても米国と比較して、10分の1以下の予算である。この比率は、わが国の現在の経済力からいって決してバランスのとれたものではない。しかし、人々は、「ボイジャー計画は素晴らしかったですね。」とはいってくれても、「なぜ、日本であのような素晴らしいことができないのですか。」といってくれる人は少ない。米国やソ連のように、国民のなかに、宇宙開発で世界のリーダーシップをとるべきだという強い意識が、日本人にはないのである。これまで宇宙開発を支えてきたものが、米ソの軍事的な対立を基盤にしていたことから、ある程度仕方がなかったともいえる。

ただ、わが国の宇宙開発が相対的に規模が小さいというこのような問題点を宇宙開発を支える側に一方的に押し付けるのは正しくないであろう。宇宙開発を実行する側にも責任がある。少なくともこれまで、ボイジャー計画のような素晴らしいことをやっていないのである。確かにわが国の宇宙科学研究は、限られた経費のなかで米国に比べて相対的によい成果をだしているといえる。国際的にも評価されている。これまでは、少なくとも宇宙科学研究はそれで成功してきたといえる。しかし、21世紀にかけても、このままでよいのであろうか。野球でいえば、これまでは、シングルヒットで点数をかせいできた。しかし、人々はそろそろ、ホームランを期待している。

火星移動科学探査車（ローバー）は、そのような意味で、宇宙開発において世界のリーダーシップをとることができるミッションの一つである。ただ、その実現に対しては、決して甘い見通しはもてない。現状の延長で考える限り、このようなミッションを強行するとなると、他の宇宙科学の分野の研究を数年以上ストップすることになろうし、また、それをしないで宇宙科学研究の大幅な拡張は、宇宙科学以外で周辺の科学者の支持を得るのが難しい。最近の巨大科学に対する他の科学分野からの風当りは、大変厳しい。宇宙科学のような大きな経費をかけなくても立派な研究が行われている分野は沢山あるからである。

しかし、それだからといって、このような大きなミッションは、21世紀にかけても「米国などに任せておけ」では、なんとも寂しい。少なくとも基礎研究を積み重ねて、その基盤をわが国にも確立しておくべきである。この研究はそのような意図で始められたものである。当面すぐには実現しないかもしれない。しかし、基礎研究を通して、いつでも本格的に立ち上げられるように準備しておくことは、重要である。火星の移動科学探査車（ローバー）には、技術的にも科学研究としても、多くのこれまでの宇宙開発にない新しい側面をもっており、多くの研究者を基礎研究の段階からひきつける力をもっているのが大きな魅力である。

本報告は、火星移動科学探査車（ローバー）に搭載する掘削装置の開発研究を宇宙科学研

究所搭載機器基礎開発研究と西松建設(株)技術研究所からの委託研究のなかで行われた掘削機の試作・実験について述べたもので、この成果が、さらに大きな研究の発展への礎になることを期待する。

## 第1章 探査の重要性と科学目的

火星探査の重要性とその目的については、宇宙探査における火星探査をどのように位置づけるかによって様々に変わってくる。

### (1) 火星の起源（太陽系の起源）としての位置づけ

惑星探査の科学目的のもっとも重要なものの一つは、太陽系の成立ちを解明することである。

火星は、水星、金星、地球とともに地球型惑星として位置づけられ、その最外郭に位置している。

火星の地球との類似点、相違点を明確にし、また他の地球型惑星との比較から、太陽系の起源の謎を探る。

### (2) 地球外生命の探査としての位置づけ

地球外生命の探査は、人類の宇宙探査における興味をなかで、もっとも大きなものといっても過言ではない。残念ながら、すでにバイキング1、2号の探査で、火星にすぐに簡単に生命が見いだされる可能性は非常に少なくなった。バイキングでは、生命の根元となる有機物すら見いだすことはできなかったのである。しかしながら、バイキングが探査したのは、火星のわずか2観測点であり、広い火星全体からみるとまだごく一部を探査したに過ぎない。これだけのことから、火星に現在とはともかく過去にも生命がなかったというのは早計である。

これからの地球外生命の探査としての位置づけでの火星探査の主目的は、生命の根源をなす有機物の探査にある。

とくに、バイキングでは、行われなかった地下探査が、主要な目的になる。

そして、有機物と切っても切れない関係にある水の探査も重要である。

### (3) 火星環境の調査としての位置づけ

火星探査のなかで、火星の環境の調査は、これまでのバイキングを中心とした調査で、かなりよく知られている。しかしながら、今後の火星の有人探査を照準においた探査において、大気組成、気圧、温度、湿度、風、気候、雲、霜、砂嵐等の環境に関してさらに多くのデータを取得して、季節変化、日変化、場所による変化、年変化などの基本的なデータベースを確立することは重要である。

### (4) 地球外の資源探査としての位置づけ

将来の人類の生活圏を拡大するという観点から、火星は、人間が宇宙に発展する重要な基地になりうる。火星自身が、恒久的な人類の第2の地球になるためには、重力、環境とともにその規模が小さいことから、それほどの重要性をもっているとは言えない。しかしながら、本格的な第2の地球を太陽系のなかに作る際には、火星の資源は、非常に重要である。

資源の探査としては、広範囲な探査と、地下探査が重要になる。その意味から、移動

探査車の重要性は大きい。

(5) 火星有人探査に向けて

火星探査の当面の最大の関心は、火星への有人飛行である。火星の科学探査のために有人が必要かどうかの議論は、アポロ計画のときと同様に結論が分かれるものであり、その後のロボット技術の進歩をみると、科学探査のためのみの議論からは有人探査は、必ずしも有利ではないが、しかし、火星有人飛行は、宇宙開発における一つの大きなシンボリックな目標でもある。火星有人飛行は、科学目的からの必要性の議論を越えて必ず実現する。

そのために、火星探査車による探査で行うべき探査は、有人飛行の着陸点の選択を初め、有人探査のために基盤を築く上で重要な意義を持っている。

## 第2章 探査の目的

火星探査の重要性は、第1章にのべたように、多岐にわたるが、具体的に検討するためには、あらゆる目的を包含するものでは、作業が分散して、密度が薄くなるおそれがある。目的を明らかにし、限定した目的で成果を上げることは、実際のミッションの運用に当ってはさらに重要なものになる。

探査の目的として、ここでは、下記の2つを主たるものとしてとりあげる。

1. 火星の地下に水があるか？
2. 火星の地下に有機物を見いだすことができるか？

この2つの目的を達成するために、探査の方法として、

火星の地下探査を主目的とする
----------------

こととして、それに適した探査装置及び移動探査車の概念構成、運用計画を明確にすることが必要である。

## 第3章 探査の具体的な方法

### 3.1 探査場所の選択

探査場所の選択は、探査の目的を、

- (1) できるだけ広い領域を探査する
- (2) Pin point 的に探査の対象を絞っておこなう

のいずれに重点をおくかによって、かなり違ってくる。一応、探査場所の選択は、今後の火星探査の結果に依存するところが多い。

### 3.2 探査の方法

第2章に述べたように、今回の検討の主眼は、地下探査である。

地下探査の方法として、

- (1) 直接機械的に掘削して試料を採取し、分析する。
- (2) 電磁波を用いた電磁計測ならびに人工地震および自然の地震の観測による Sounding 法で機械的掘削のできない深い領域の探査を行う。

人工地震は、着陸船から適当な距離離れた掘削点に火薬を仕掛ける方法，ならびにリレー衛星から火薬を搭載したペネトレータを打ち込む方法などがある。

観測点の設定は，

着陸船

移動科学探査車

科学観測モジュール 3 個

である。

移動科学探査車には，掘削装置，試料分析装置，電磁計測探査装置等のミッション機器を搭載する。

科学観測モジュールは移動科学探査車が自然の地震観測に最も適した地点に配置する。地震観測のためには3個の観測点が必要であるが，予備の観測点を準備する。

各科学観測モジュールは，同時に気象観測点としても機能する。

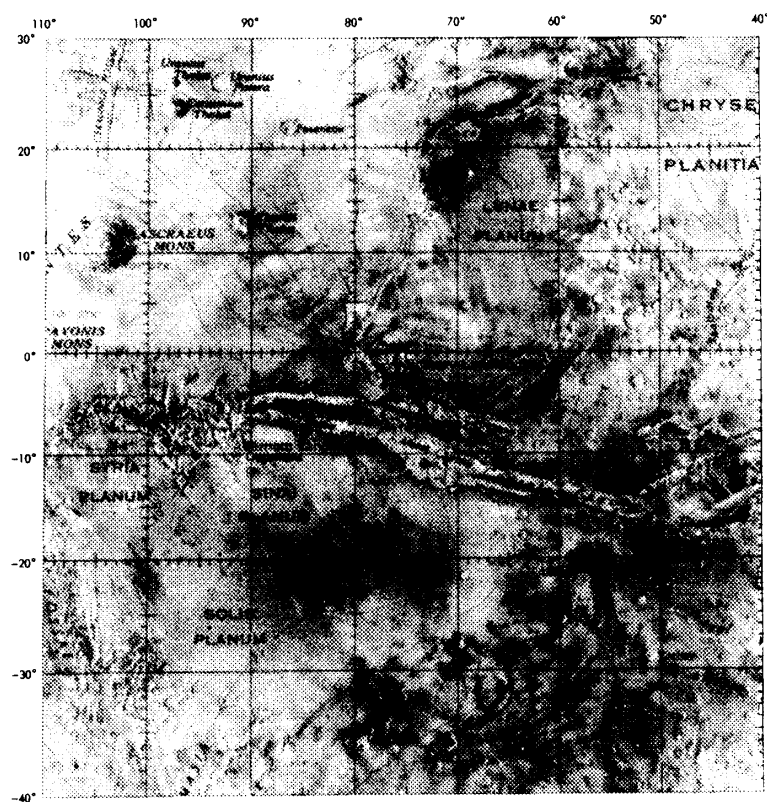
電磁計測では，探査の初期は着陸船を基点にするが，着陸点からの距離が離れると別の基点を設定する必要がある。可動の電磁計測基点を複数個搭載し，これを移動させながら，基点として使用する。

試料の分析は，試料分析部で行う。この他に，遠隔探査機で使用されている通常の非破壊探査方式の標準的な探査装置も搭載する。

表3.2-1 Frank Miles and Nicholas Booth (Ed)  
Race to Mars (MacMillan London Ltd. 1988)

Proposed manned landing sites on Mars			
GEOLOGICAL TYPE	CANDIDATE SITE	REASONS FOR CHOICE	PROBLEMS WITH SITE
Young volcano	Olympus Mons (18°N, 133°W)	The youngest and tallest Martian volcano; youngest recognized lava flows emanate from it.	Elevation of 17 miles (27km) is so high that sufficient aerobraking could not be achieved.
Middle-aged volcanoes	West of Olympus Mons (20°N, 150°W)	Area close to middle-aged volcanoes, covered with their lava flows.	These volcanoes are as high as Olympus and cause the same problem with aerobraking.
Ancient cratered terrains	Argyre Basin (49°S, 43°W) Isidis Basin (15°N, 270°W)	Both sites are large, multi-ringed impact crater basins, among the most ancient craters on Mars.	The multiple rings of the basins are mountain chains, dangerous to land on or to negotiate.
Layered regions	Candor Chasma (6°S, 75°W)	Exhibits layered terrain in walls of the Valles Marineris canyon system, providing clues to the canyons' origins.	A complex site that would require many weeks of systematic study, traversing difficult terrain—2.5 miles (4km) deep in places.
Polar regions	Chasma Boreale (85°N, 110°W)	Region between residual ice cap and layered terrain, important for climatic studies.	Difficult site to reach because of high latitude.
Hemisphere boundary	Mangala Vallis (10°S, 150°W)	Equatorial site dissected by ancient channels.	Perhaps the most accessible site.
Equatorial channels	Kasei Vallis (21°N, 80°W)	Channels created by catastrophic flooding in past.	To gain a systematic picture long traverses would be needed.
Ancient crust	Nilosyrtis Mensa (32°N, 290°W)	'Fretted' terrain, showing possible sections of ancient Martian crust.	Difficult terrain to negotiate; again, long traverses needed for systematic surveys.
Ancient volcano	Amphitrites Patera (60°S, 300°W)	Evidence for ancient volcanism, with eruption of ashlike material.	Difficult site to reach because of high latitude; limited scientific objectives.

## 第一着陸点



## 第二着陸点

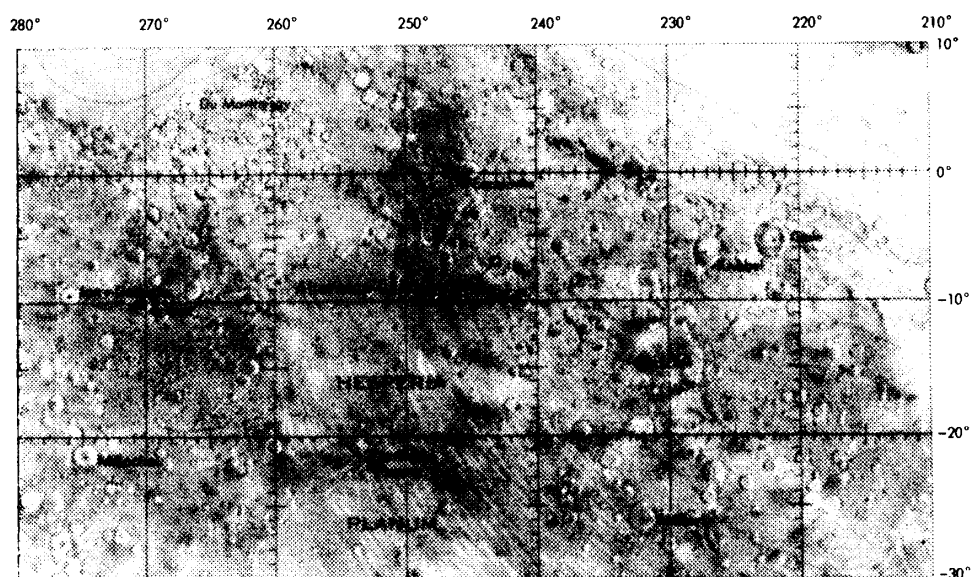


図3.2-1 Kerry Marks Joels  
The Mars One Crew Manual (Ballantine Books Inc.)

以下に、(1)の具体的な探査の方法を記述する。

### 3.3 Boring（掘削・試料採取）

地下探査の目的は、火星の地下に水があるか否か、有機物があるか否かを調査することにある。

この調査を実施するためには、ボーリング（Boring）※によって地中に穴を掘り、その穴の中に水及び有機物の探査装置を挿入して調査をするか、あるいはボーリングによって深度別に試料を採取して水及び有機物の調査を行うことのいずれかが考えられる（図3.3-1 参照）。

ここではボーリングによって深度別に試料を採取して水及び有機物の調査を行うことにする。

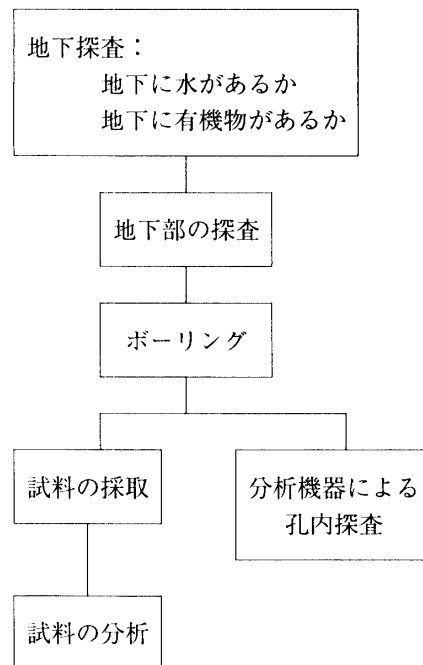


図3.3-1 地下探査の手順

現段階で探査の深度を設定することは難しい問題であり、ボーリング装置の能力と探査場所の地質構造によって定まることになるが、実現可能なものとして目標深度を5 mに設定する。しかし、このように深度を設定しても、ボーリング装置によって掘ることのできない程の硬い層が、地表のごく浅い部分に存在する場合は、この層の存在深さが探査深度の限界値となる。

従って、このような硬い層以深に水及び有機物の存在の可能性がある場合は地下探査の目的を満足することができないことになり、ボーリング装置の能力を向上させなくてはならない。

しかしながら、ボーリング装置の仕様はこのような硬い層の力学特性を明らかにしなければ

※ Boring は Drilling と同義語であるが、Boring は土質調査用に開発されたボーリングに適用され、Drilling は資源開発用に開発されたボーリングに適用されている。

ば決めることができず、実際にはこのボーリング装置を搭載する探査車の仕様・能力によって制約を受けるものであるから、与えられた仕様条件において『このボーリング装置ではこの程度の硬さの地層を掘ることができる。』という形の表現でボーリング装置の性能を明らかにすることになる。

硬い層の存在をあらかじめ地表から知ることができれば、地下探査に極めて有利であり地層の概略構造を知るためにも地表探査装置を搭載することが必要である。

ボーリングポイントとなる試料採取の場所（平面的な位置、深度）の決定は、探査地域、探査深度、試料の量を含むサンプリング計画を作成して行うことになる。

試料の採取を伴うボーリングには、

- (1) コアボーリング
- (2) オーガボーリング

の2種類が考えられる（図3.3-2参照）。

#### (1) コアボーリング

土または岩からコアサンプルを採取しながらボーリング孔を作る方法である。ボーリング

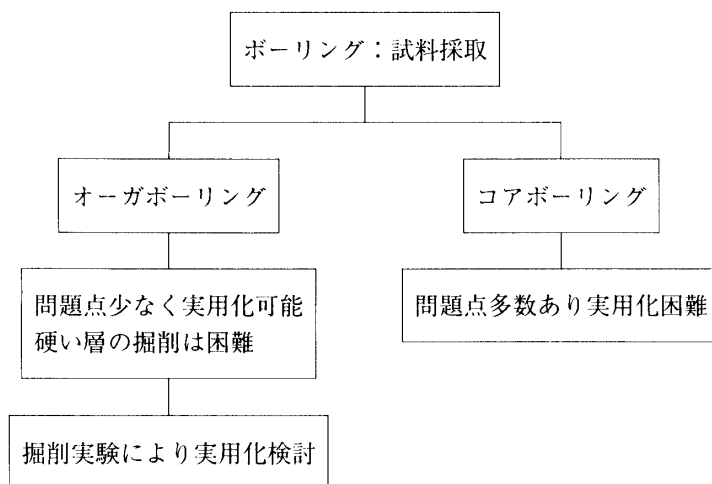


図3.3-2 試料採取を伴うボーリング方法

装置としては通常、ロータリ式ボーリング機械を使用し、環状のビットに回転力と推進力とを与えてコア状のサンプルを形成する。ボーリング孔径は未固結試料を考慮して60mm 以上となる。コアボーリングの概念図を3.3-3 に示す。

#### (2) オーガボーリング

スパイラルオーガに回転力と推進力とを与えながら地中に圧入してボーリングする方法であり、先端のビットで土を削り、削り取った土をスパイラル状の羽が保持し地上に引き上げる掘り具をオーガと呼ぶ。オーガの径は50～60mm 程度が考えられる。動力機でオーガに回転力を与えるオーガの例を図3.3-4 に示す。

表3.3-1 にコアボーリングとオーガボーリングの比較を示す。

オーガボーリングはコアボーリングに比較して硬い層の掘削は困難であるが、コアボーリ



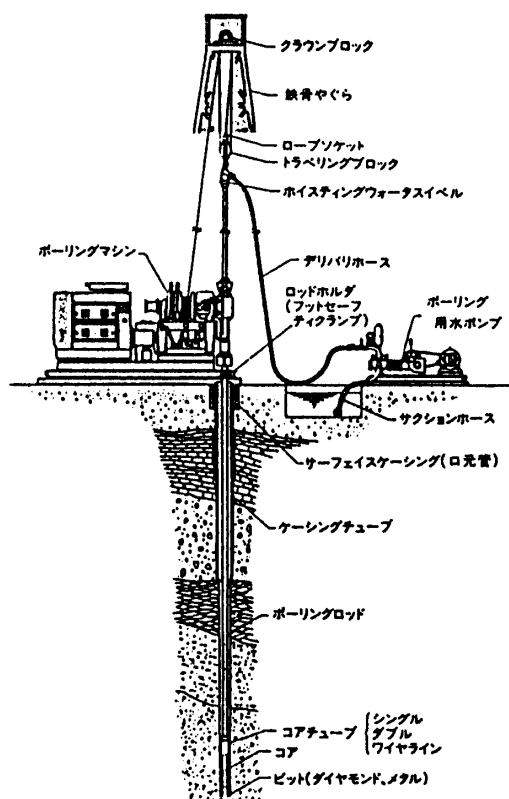
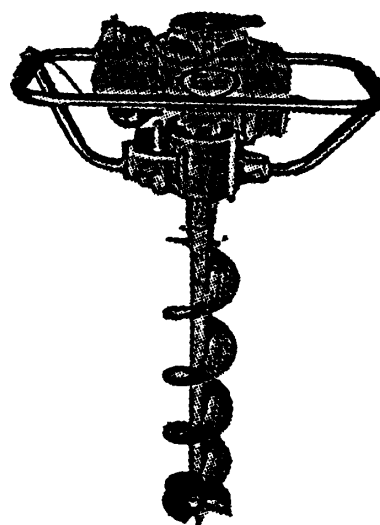


図3.3-3 コアボーリング概念図

図3.3-4 パワーヘッドオーガの例  
（「土質調査法」による）

ングより問題点は少なく、何等かの方法で解決できるものであると考えられるので、地下探査のための試料採取の方法としてオーガボーリングを用いることにする。

References に上げた文献をもとに想定した、火星の地表付近の模式地質柱状図を図3.3-5 に示す。

火星の表層部分に固結層の存在が想定され、また角礫岩、溶岩が数メートル以内に存在することも予想されるので、オーガボーリングの掘削能力を明らかにすることが必要である。

オーガボーリングの掘削能力によっては最低探査深度 5 m を確保できないこともありうる。

表3.3-1 コアボーリングとオーガボーリングの比較

	コアボーリング		オーガボーリング	
	問題点	対策	問題点	対策
掘削時	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 礫が動くとボーリングが不能.</li> <li>・ ビットの冷却と掘り屑の排出のため何らかの流体が必要.</li> <li>・ 砂地盤ではロッドの締め付け現象が生じるので回転のために大きなトルクが必要.</li> <li>・ ロッドの接続・切り離しは無人操作では複雑になるので機械の全長を大きくする.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 気体によるビットの冷却と掘り屑の排出.</li> <li>・ 掘削深度5mに対して全長6m以上になる.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 動かない礫にあたるとボーリングが不能.</li> <li>・ ロッドの接続・切り離しは無人操作では複雑になるので機械の全長を大きくする.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 掘削深度5mに対して全長6mになる.</li> </ul>
試料採取時	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ コアバレルを回収する時、外管が孔壁の崩れを押える二重管の挿入・回収の装置が必要.</li> <li>・ 砂質土と岩石とで兼用できる採取試料のキャッチング装置の開発が必要.</li> <li>・ コアバレルの回収とリセットの無人化方法とその装置の開発が必要.</li> <li>・ コアバレルから無人による試料の取り出し方法とその装置の開発が必要.</li> <li>・ 回収した試料の深度同定方法の開発が必要.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全長に制限がなければ可能.</li> <li>・ コアバレルの改造・考案により可能.</li> <li>・ 装置は複雑になるが開発は可能.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ オーガの先端部に詰まる孔底試料の回収は不確実.</li> <li>・ オーガに保持された試料の深度同定が極めて困難.</li> <li>・ 孔内から排出される試料の回収方法とその装置の開発が必要.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ オーガピッチを緩く</li> <li>・ オーガ回転を速く</li> </ul>
機械装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 摩耗したビットの無人交換方法とその装置の開発が必要.</li> <li>・ ビットの回転と給圧を自動的に制御する装置の開発が必要.</li> <li>・ 孔内異常時の判断、待避の自動的方法とその装置の開発が必要.</li> <li>・ 自動化のため制御が複雑、故障のリスクが大.</li> <li>・ 自動化の機能が多く機械的に重量、寸法が大.</li> <li>・ 模擬地盤での実験は容易でない.</li> <li>・ 掘削装置の回収が不能の場合の本体離脱方法とその装置の開発が必要.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ オーガの回収が不能の場合の本体離脱方法とその装置の開発が必要.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ オーガを逆転して引き上げる.</li> </ul>
長所・短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 乱さない試料の採取が可能.</li> <li>・ 装置全体の重量、寸法が大きくなる.</li> <li>・ 機械全体の消費電力が大きい.</li> <li>・ 硬い層の掘削が可能.</li> <li>・ 実用化にあたり容易に解決できない問題点が多い.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 乱した試料が採取される.</li> <li>・ 装置全体が軽量で小さい.</li> <li>・ 消費電力が小さい.</li> <li>・ 硬い層の掘削は困難.</li> <li>・ 問題点が少なく何らかの解決方法がある.</li> </ul>	

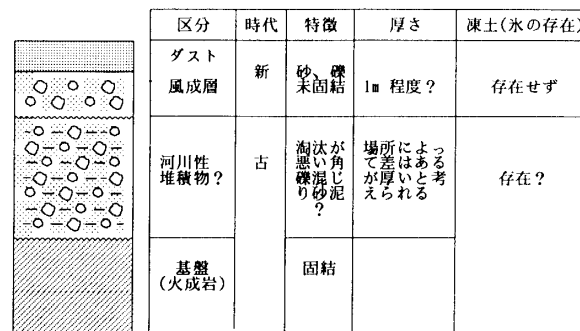


図3.3-5 火星の地表付近の模式地質柱状図 (想定図)

## 第4章 火星ローバー用掘削機の試作

オーガボーリングによって火星の試料採取が可能かどうかを確認するために掘削深度1.5mのオーガボーリング装置を試作した。模擬地盤によりその採取状況と採取能力を明らかにするのが目的である。

図4.4-1 にオーガボリング装置の試作実験機を示し、表4.4-1 にその仕様を示す。

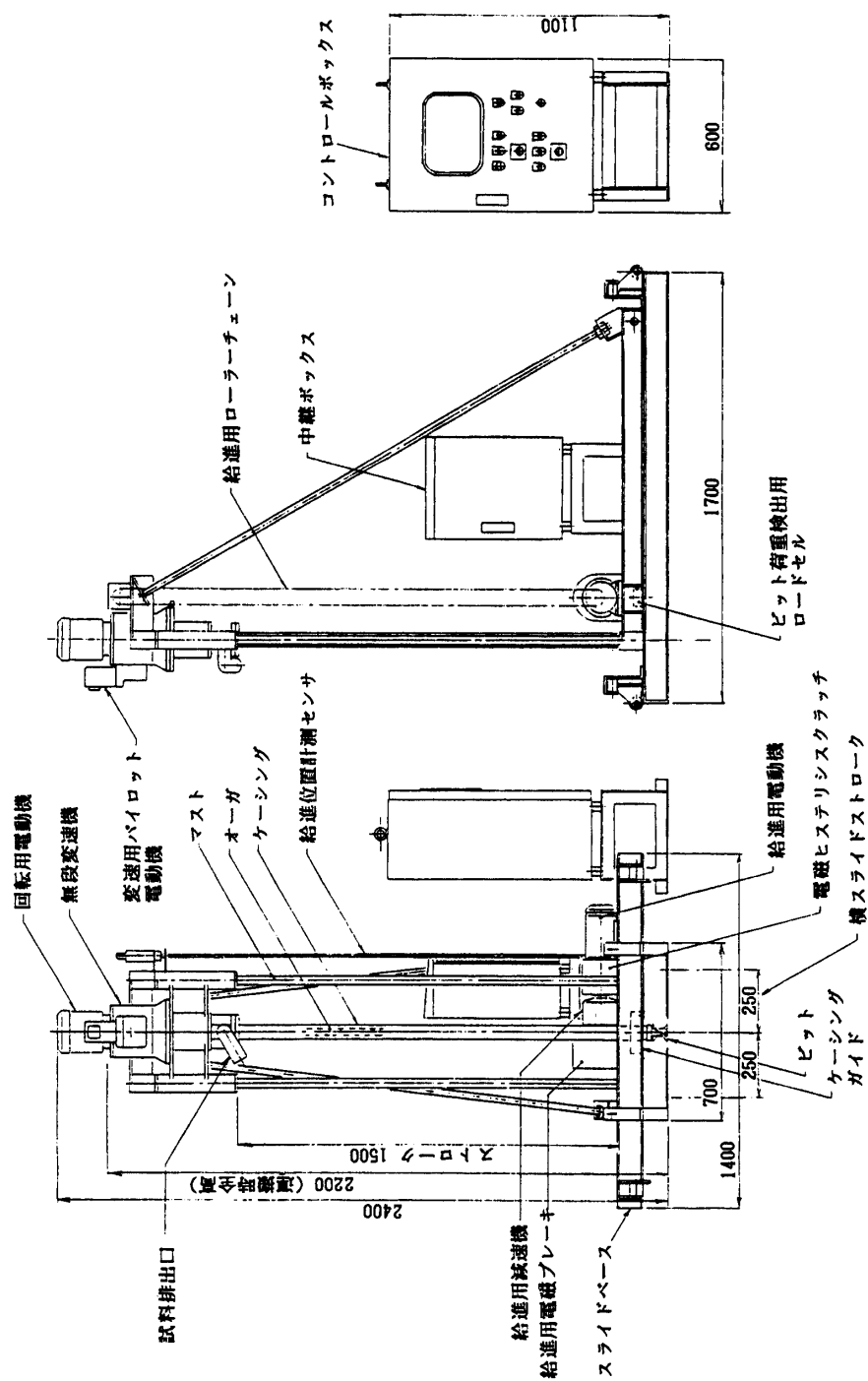


図4.4-1 試作実験機

表4.4-1 試作実験機の仕様(1)

名称	火星移動探査車搭載用ボーリング装置実験機
メカニズム	マイコン制御による電動ロータリ・パワースイベル
ボーリング方式	ケーシング式偏心オーガビットによる無水サンプリング (孔径60mm 掘削深度1.5m)
パワースイベル	
ロータリスピード	0～833rpm 無段変速
ロータリトルク	7.0～0.7kgf・m
モーター出力	0.75kW (4P 50Hz)
給進装置	
給進機構	電動機とチェーンの組合せ
自己制御機構	下降時のスリップ及び上昇時のトルクリミット制御 は電磁ヒステリシスクラッチによる
給進力	最大 178kgf
給進速度	最大 8 m/min
ストローク長	1,500mm
モーター出力	0.4kW (4P 50Hz)
給進位置検出装置	磁歪形変位センサ
ビット荷重検出装置	ロードセル
制御	
制御盤	分離形 (本体側中継箱から約 5 m)
電源	3 相 200V 50Hz
運転モード	手動, 自動
表示ランプ	回転方向 (正回転, 逆回転) 給進方向 (上昇, 停止, 下降) 運転モード (手動, 自動) 回転異常 給進異常

実験機の掘削ビットとオーガ及びケーシングの寸法を図4.4-2に示す。

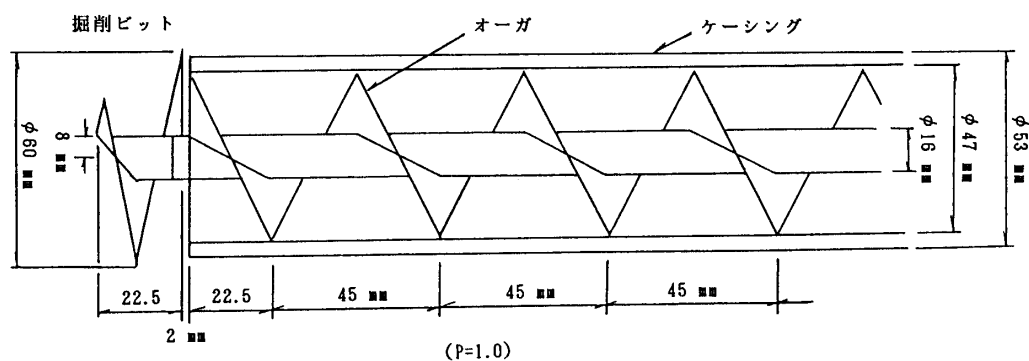


図4.4-2 掘削ビットとオーガ及びケーシング

表4.4-1 試作実験機の仕様(2)

指示計	回転用モーター負荷電流計 ビット回転速度計 ビット荷重計（ロードセル検出） 掘削深度計（給進位置計）
警報	ロータリトルク異常 給進（上昇時）異常
データ外部出力	（下記項目の計測結果を 0～10V の直流信号で外部に出力） 回転用モーター負荷電流 ビット回転速度 ビット荷重 掘削深度（給進位置）
スライドベース	スライドストローク（X-Y） 中心から左右各250mm-軌条長 簡易レールクランプ
寸法	
（掘削時本体）	全高 2,400mm 全幅 1,400mm 全長 1,700mm
（コントロールボックス）	高さ 1,100mm 幅 600mm 長さ 400mm
重量（計算重量）	
本体	約 260kg
コントロールボックス	約 45kg

この実験機は実際の探査車搭載のボーリング装置と異なり、オーガボーリング方式の基本的な機能のみを装置したもので、その掘削機構は次のとおりである。

掘削ビットと一体になって回転するスパイラルの羽を持つオーガがケーシングの中にある。ケーシングは回転せずにマストに沿ってスライドする給進装置に固定されている。

オーガは同じ給進装置に固定された回転駆動装置に連結されて、ケーシングの中で回転し、給進装置がマストに沿って下降するにつれて、掘削ビットがかき揚げた試料をケーシングの中に取り込む。掘削終了後、給進装置を上昇させて、掘削ビットとケーシングを孔外に引き上げ、オーガを逆回転させて試料を排出させる。

ケーシングガイドで掘削ビットが初めて地盤に貫入するときの横揺れ現象を防止する。また、ケーシングで掘削途中の穴曲がりや掘削試料の外部地層との接触混合を防ぐ。

掘削ビットの外径はケーシングの外径よりもわずかに大きくなっており、ケーシングは孔壁からの抵抗を受けずに降下できる。掘削ビットの刃先は中心線より 8 mm 偏心しており、

写真4-1 試作実験機

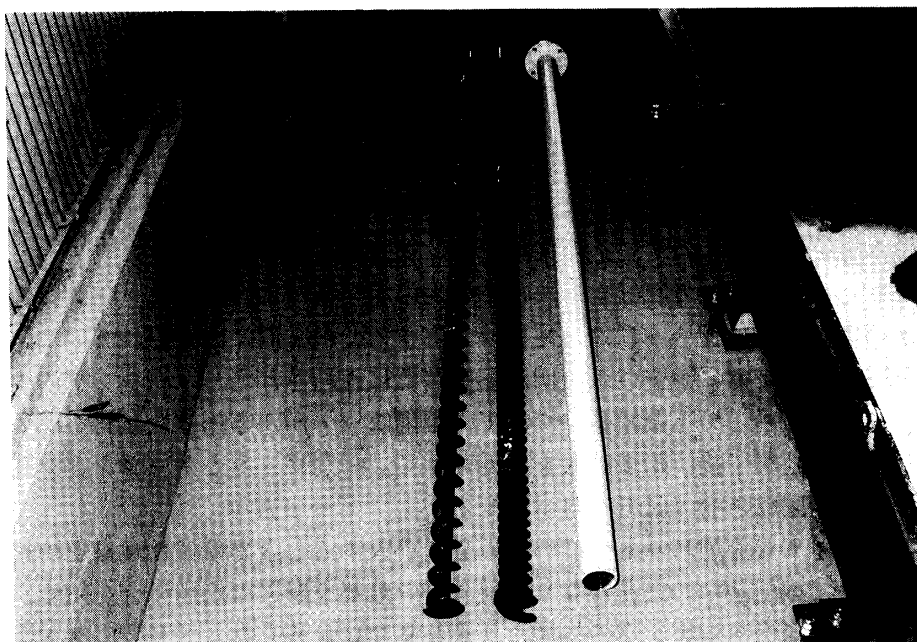
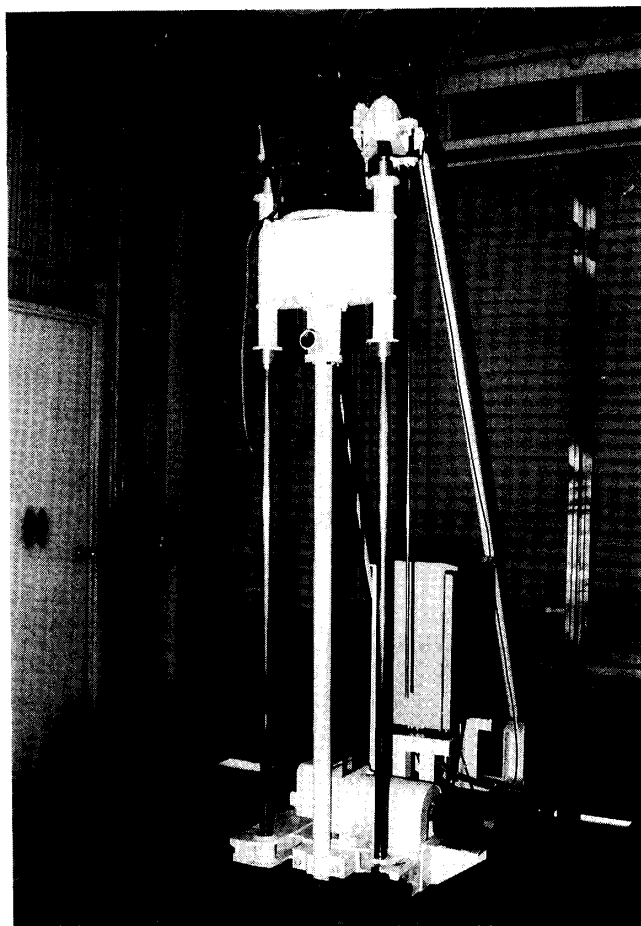


写真4-2 オーガとケーシング

その直径を超える大きな礫があっても偏心運動により礫を動かして先に進むことができる。ケーシングとオーガ軸との間隙（16mm）より大きな礫は中に入ることができず、掘削ビット周辺の緩んだところに取り残される。

試作実験機及びオーガとケーシングの写真を写真4-1，写真4-2に示す。

## 第5章 試作した掘削機と模擬地盤による掘削実験

### 5.1 模擬地盤

地下探査においてボーリング装置による掘削の対象となる地盤について、次のようなことを想定した。

- (1) 地表には風成の未固結堆積物が存在する。
- (2) 風成堆積物には水が含まれていない。
- (3) 風成堆積層の下位の地層には永久凍土が存在する。
- (4) 礫は角礫である。

模擬地盤による実験機の掘削・試料採取能力の検討には上記の想定を念頭において、次の6つの実験を計画した。

実験1：砂地盤に対して実験機の初期設定を変化させたときの掘削・試料採取能力の実験

実験2：砂地盤，ダスト地盤，砂礫地盤に対して実験機の実験条件（初期設定と運転条件）を同一にした実験

実験3：上層をダスト層，下層を砂層とする地盤及び上層を砂層，下層を砂礫層とする地盤に対する実験

実験4：固結地盤に対する実験

実験5：凍土に対する実験

実験6：砂地盤内にコブル（粒径75mm～30cm）を埋め込んで、掘進時にボーリング装置が障害物に遭遇したときを想定した実験

#### (1) 模擬地盤の材料

模擬地盤の作製に使用した3種類の材料の粒度分布を図3に示す。

#### (2) 模擬地盤の作製方法

空気乾燥した地盤材料を土槽内に敷きならした後、層厚20cmごとに振動プレートで締め固めた。地盤に着色するために、粉末の着色剤（青，赤，黄，緑）を1cmの厚さに、層厚40cmごとに地表面から青，赤，黄，緑の順に散布した。

実験終了後に地盤の密度及びスウェーデン式サウンディング試験により強度を測定した。「実験3」における模擬地盤の土層構成を図5.1-2に示す。

#### (3) 掘削能力の検討

次の項目を計測して実験機の掘削能力を検討した。

- |          |              |
|----------|--------------|
| ・オーガの給進力 | ・オーガの掘進速度    |
| ・オーガの回転数 | ・回転用電動機の負荷電流 |

#### (4) 試料採取能力の検討

オーガによって採取された着色剤混入材料の量から採取試料の品質を検討した。

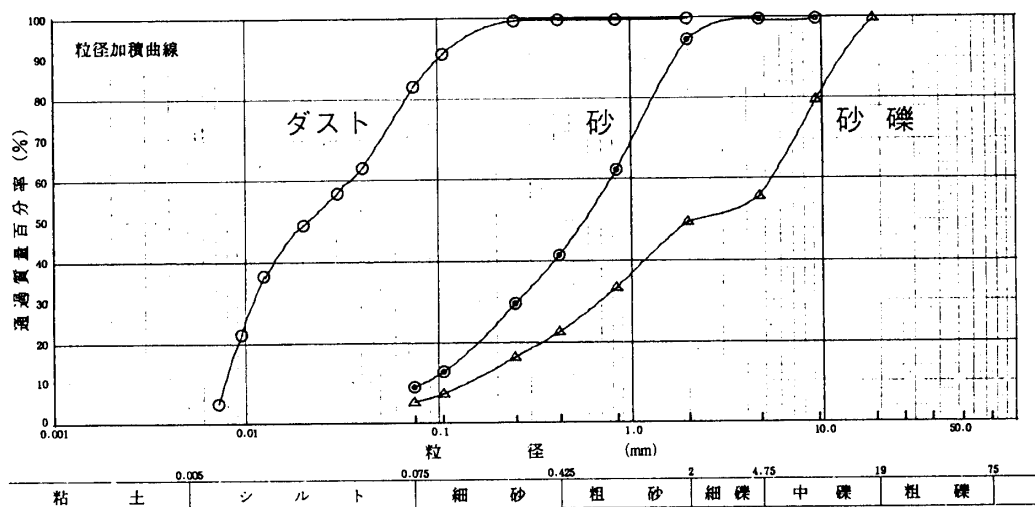
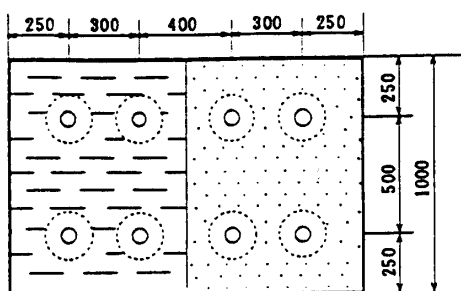
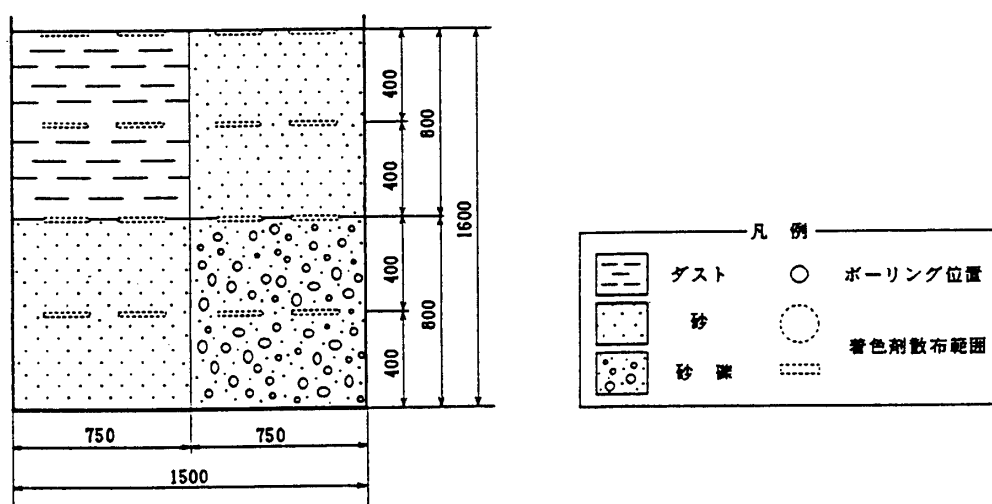


図5.1-1 地盤材料の粒度分布



模擬地盤平面図



模擬地盤断面図

図5.1-2 模擬地盤構成



## 5.2 掘削実験結果と考察

試作実験機による「実験3」の掘削実験結果を次に示す。

作製した模擬地盤のスウェーデン式サウンディング試験結果を図5.2-1に示す。

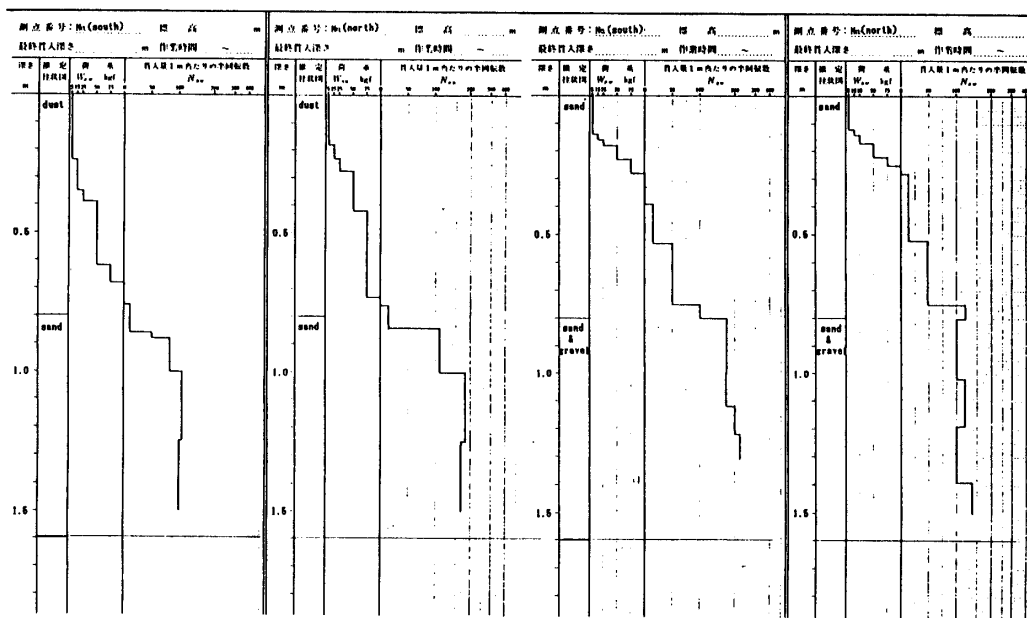


図5.2-1 スウェーデン式サウンディング試験結果

この試験結果からそれぞれの地盤の強度をN値に換算するとダスト層/砂層の地盤の下部にある砂層は $N=7\sim16$ 、砂層/礫層の地盤にある上の砂層は $N=1\sim4$ 程度である。

砂地盤においては、上層にある砂地盤と下層にある砂地盤とでは強度に大きな差が生じている。

### (1) 掘削能力の検討

掘削はオーガの回転数を段階的に変化させて行った。オーガの回転数、給進力及び掘進速度の計測結果を表5.2-1、5.2-2に示す。

※ N値とは、標準貫入試験用サンプラー（外径5.1cm、内径3.5cm、長さ81.0cm）を、重量63.5kgfのハンマーを75cm自由落下させて30cm打ち込むのに要する打撃数をいう。

表5.2-1（ダスト層＋砂礫層）における回転数、給進力及び掘進速度

模擬地盤構成土層	ダスト層（密度 $1.28\text{Mg/m}^3$ ）				砂層（下層）（密度 $1.79\text{Mg/m}^3$ ）				
回転数(rpm)	10	20	30	40	10	20	30	40	40
給進力(kgf)	50	60	40	20	200	190	160	20	-5
掘進速度(cm/s)	0.30	0.50	0.62	0.92	0.20	0.33	0.43	0.70	0.03
掘進速度比※	0.8	0.7	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	

表5.2-2 (砂層+砂礫層)における回転数, 給進力及び掘進力及び掘進速度

模擬地盤構成土層	砂層 (上層) (密度1.62Mg/m <sup>3</sup> )					砂礫層 (密度1.99Mg/m <sup>3</sup> )				
回転数 (rpm)	10	20	30	40	40	20	30	40	40	40
給進力 (kgf)	65	70	90	15	-5	65	70	25	20	35
掘進速度 (cm/s)	0.18	0.37	0.52	0.72	0.05	0.22	0.22	0.22	0.03	0.22
掘進速度比※	0.5	0.5	0.5	0.5		0.3	0.2	0.1		0.1

※ オーガの回転数と掘削ビットのピッチから決まる掘進速度と計測した掘進速度との比

オーガの回転数が40rpm で給進力が低下している。上層の砂層では給進力が下層の砂層の半分程度に低下しており、上層と下層の強度の差によって生じたものと考えられる。

砂層では2～3 cm/min の掘進速度で給進力が負の値を示し、掘削ビットが地盤に引き込まれる状態を表している。

オーガの回転数、掘進速度を適切に選択することによって、密度の大きくない緩いダスト層、砂層および砂礫層を小さな給進力によって掘削することは可能である。

## (2) 試料採取能力

作製した模擬地盤の密度と試料の採取率（掘削ビットによって削られた試料の体積とケーシング内に取り込まれた試料の体積との比）を表5.2-3に示す。

表5.2-3 試料の採取率

模擬地盤の 構成土層	試料採取率 (%)					
	ダスト層+砂層 (下層)			砂層+砂礫層 (上層)		
	10	20	30rpm	10	20	30rpm
ダスト層	55	55	45			
砂 層	82	87	84	48	54	53
砂 礫 層				93	133	102
掘削深さ (cm)	142	143	118	138	115	111
試料採取長倍率※	1.48	1.47	1.56	1.48	2.13	1.79

※ 模擬地盤表面試料排出時のケーシング貫入深さとケーシング先端から排出口までの長さとの比

上層に位置する砂層の採取率が下層より低いのは、上層の密度が下層より低く、地盤内の土粒子の拘束力が下層より弱いことによるものと思われる。オーガの形状から定まる試料の採取率（掘削ビットの断面積とケーシングの有効断面積との比）は52%である。採取率が100%を超えるものは、掘削にともなって孔壁の崩壊が生じて、孔壁の崩壊により取り込む試料の体積が増加する。

試料採取長倍率が1.0より大きいことは、地盤内での試料の採取長さより、ケーシング内のオーガの体積と試料の攪乱によって、ケーシング内に充填されている試料の長さが長いことを示している。試料採取長倍率は、掘削機が掘削時にケーシングの上部から試料を排出せずに掘削できる深さをあらわす指標となるもので、試料採取長倍率が1.5の場合、深さ1mの試料を採取するためには、1.5m (1m×1.5) の長さのオーガが必要であることを意味する。掘削時にケーシングの上部から試料を排出しながら掘削する場合には、1.5m の長さのオーガで深さ1.5m 分の試料を採取することは可能である。

ケーシングより試料を取り出す方法には、前述のケーシングの上部に設けられた試料排出口から掘削中に試料を排出させる方法（上部排出法）と、掘削終了後、オーガを逆回転させて下方より試料を排出させる方法（逆転落下法）とがある。また掘削終了後、実験機よりケーシング毎取り外して横に寝かし、手動によりオーガを回転させて試料を排出させることも可能である（横臥逆転法）。

本実験機では地盤内のある層の試料をかき乱さずに採取することは不可能であり、採取試料の深度同定には、試料採取にともなう生じる試料の攪乱の検討が必要である。採取した着色剤混入試料から層厚1cmの着色剤層の拡散範囲を計算すると表5.2-4 のようになる。

表5.2-4 着色剤層（層厚1cm）の拡散範囲の計算

試料採取方法	上部排出法			逆転落下法					横臥逆転法	
回転数 rpm	10	20	30	20	30	20	10	20	30	30
着色	青	青	青	赤	黄	黄	緑	緑	赤	黄
混入試料	ダスト	砂	砂	砂	ダスト	砂	砂礫	砂	砂	砂礫
拡散層厚 cm	28	36	24	30	12+13	16	14	18	22	6
最終掘削までの着色剤層の移動距離 cm		169		70	33	30	17	18	66	26

表中の拡散層厚は層厚1cmの着色剤層が試料採取によって拡散する範囲を地盤の層厚に置き換えた値を意味する。

上部排出法よりも逆転落下法の方が拡散層の厚さも薄く、試料の採取方法として好ましいが、横臥逆転法の方がより優れているといえる。逆転落下法で回転数30rpmの場合の例は、黄色の着色剤が上層のダスト層と下層の砂層の境界に散布されており、地盤によっては拡散が上部の層に及ぶ可能性のあることを示している。

試料の排出方法をうまく選択することによって、試料の拡散の程度を20cm以下の層厚にすることは可能であるといえる。

以上まとめとして、試作実験機による模擬地盤の掘削実験によって次のことが明らかになった。

- (1) オーガボーリング方式で、粒径0.007～16mm にいたるダスト、砂、砂礫の緩い地盤の掘削は可能である。
- (2) 試料採取にともなう生じる試料の拡散は、排出方法を工夫することによって20cm以

下の層厚にすることが可能である。

本方式による効率の良い掘削の方法と質の高い試料の採取方法の研究開発が今後の課題である。

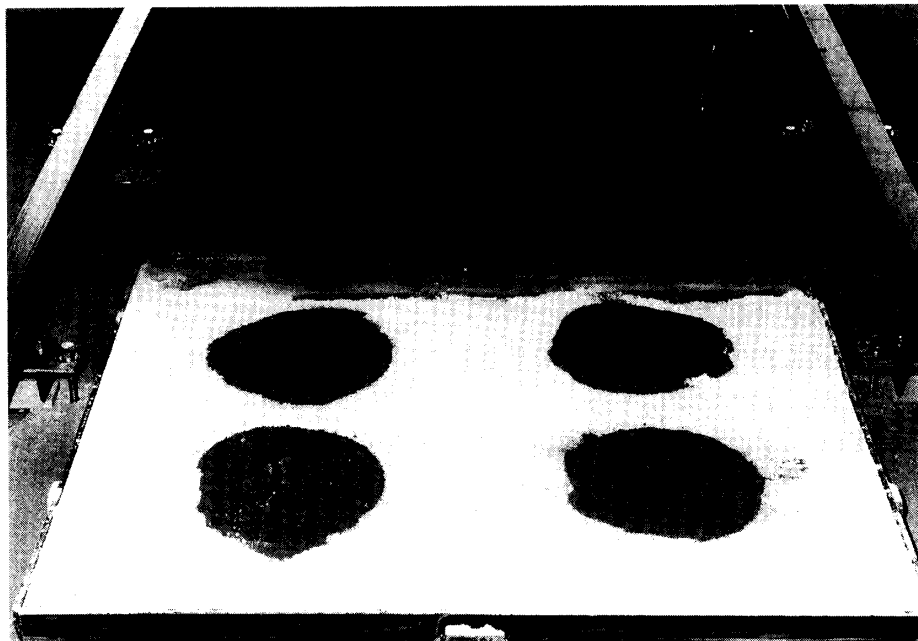


写真5-1 「実験3」の模擬地盤

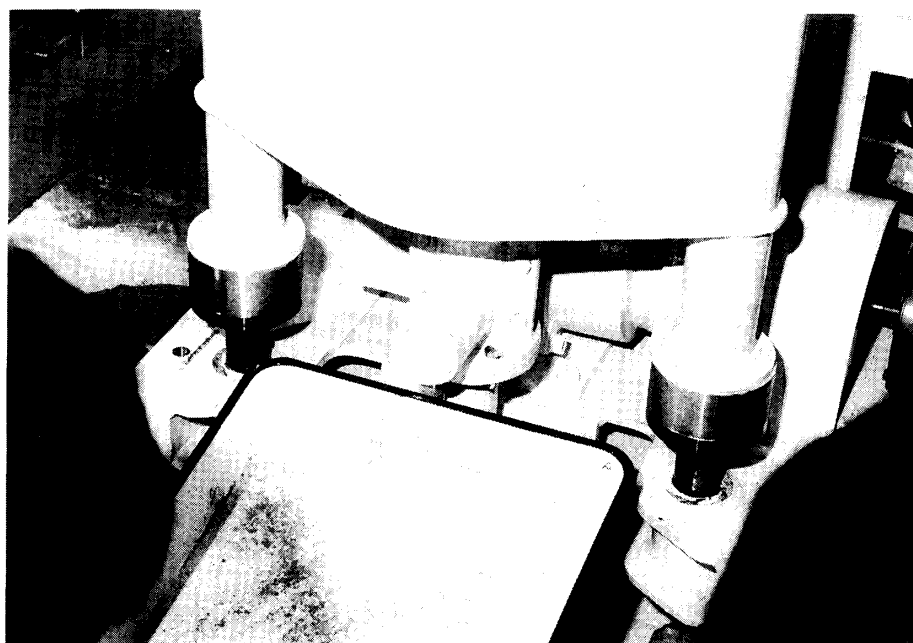


写真5-2 上部排出口より試料排出

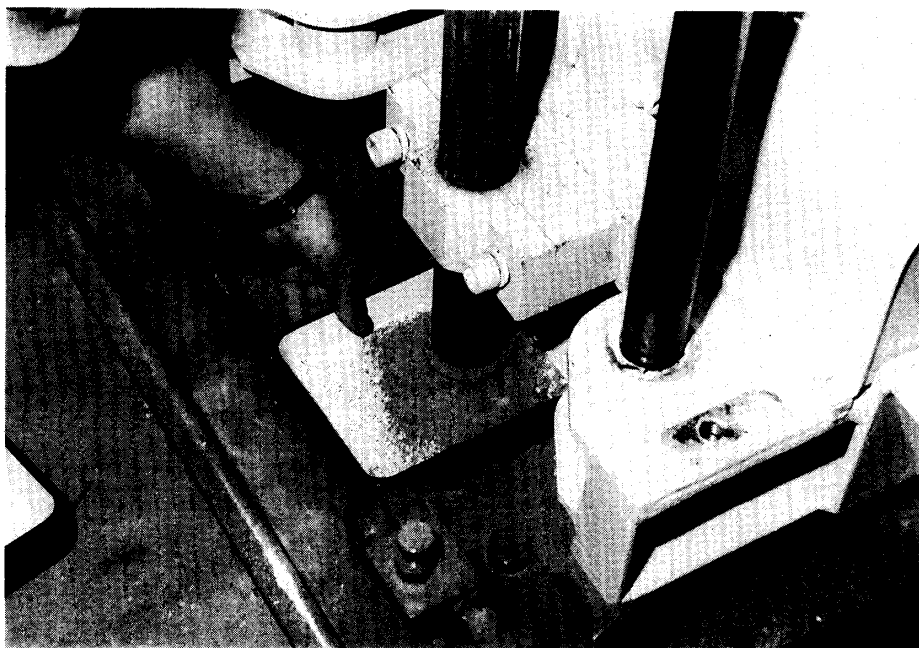


写真 5-3 逆転落下により試料排出



写真 5-4 横臥逆転により試料排出

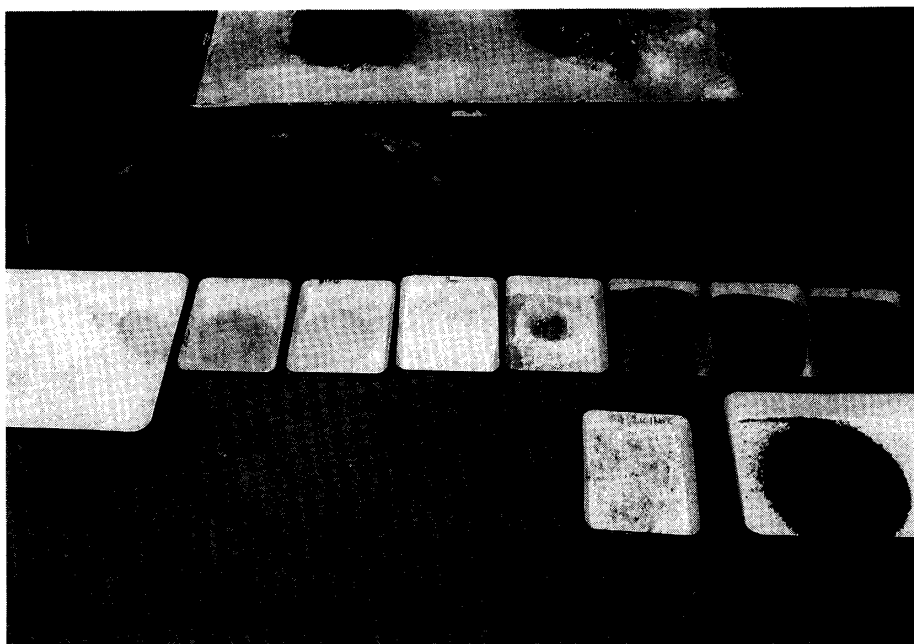


写真5-5 排出された試料例

## 第6章 掘削装置の技術的問題点と開発項目

前章に示したように、試作した掘削深度1.5mの掘削装置は良好に作動し、必要な試料のサンプリングが可能であることが示された。当面の開発目標は、この掘削深度をいかに伸ばすかということである。最終の目標として5m、努力目標として10mを目指しており、今後、掘削深度を伸ばすことが技術課題の大きなものとなる。その際に2つの選択が考えられる。

一つは、単純に現在の一本のオーガを用いるもので通すのか、もう一つは「継ぎ足し」を考慮するのか、である。前者は、システムとしては単純であるが、現在の打ち上げロケットの大きさ、移動探査車自体の大きさなどを勘案すると、10mを実現することは難しい。一本のオーガでは、5mまではロケットや移動探査車とのインターフェースという点から可能である。掘削深度10mを実現するには、「継ぎ足し」の技術のほかに「切り離し」の技術が必要とするが、これにはロボット作業を必要とし、特に掘削という複雑な作業のなかでの「継ぎ足し部」にかかる歪みを、いかに取り除くかが課題であろう。

掘り出した試料が、確かに掘削の深さに応じて取り出し得ることは前章に示したが、具体的にこれを分析装置までいかにして搬送するか、またそのあとで、それぞれの解析装置に適した試料として、いかに準備するか、解析装置の開発そのものを含めて、具体的な解析装置の試作と試験が必要である。この場合、試料の処理方法は掘削装置と一体として考えるべきであろう。

### References

- Joerls, K.M., The mars One Crew Manual (Ballantine Books Inc.)
- N. Kawashima, I. Nakatani, J. Kawaguchi, K. Saito, M. Kojima and N. Fujii, Development/Drilling Test of Auger Boring Machine on Board Mars Rover for Mars Exploration: Missions, Technologies and design of Planetary Mobile Vehicles, p. 337–343 (1992)
- Miles, F. and N. Booth (ed). Race to Mars (macMillan London Ltd.) (1988)
- Sharp, R.P. and M.C. Malin, Surface geology from Viking landers on Mars: A second look Geological Society of America Bulletin, v. 95, p. 1398–1412 (1984)