

## 月面探査ローバワークショップ

### 目次

#### ■月面探査

##### ローバによるクレーター中央丘探査

佐々木晶(東大)..... 1

##### 月面その場における揮発性元素分析の提案

大竹真紀子、杉原孝充、比嘉道也(NASDA)、石原盛男、豊田岐聡(阪大)..... 31

##### AOTFを用いた広角・マクロ分光探査

秋山演亮(東大)..... 39

##### 月極域の氷探査

比嘉道也、大竹真紀子、杉原孝充、春山純一(NASDA)..... 55

#### ■ローバシステム

##### 小型月面ローバの概念検討

足立忠司(日産自動車(株))..... 63

##### 月探査マイクロローバの提案

久保田孝(宇宙研)、黒田洋司(明治大)、國井康晴(中央大)..... 73

##### 小型月面ローバを実現するための課題について

市川誠、吉岡伸人、板垣春昭(NASDA)..... 83

#### ■ローバ技術

##### 各緯度における月表面温度の解析

湯本隆宏(日本飛行機(株))..... 97

##### 月面探査ローバの走行性と掘削に関するテラメカニックス的考察

建山和由(京大)..... 107

##### 月面移動探査用エネルギー伝送システムの概念検討

田中孝治、佐々木進(宇宙研)..... 123

##### 月面ローバの走行経路計画に関する研究

城間直司、油田信一(筑波大)、市川誠、吉岡伸人、飯島純一(NASDA)..... 139

#### ■ローバ展示パネルセッション

##### 単腕型1輪ローバ

広瀬茂男、河上篤史、駄本理一郎(東工大)..... 147

##### ローバの開発コンセプト

市川誠(NASDA)..... 149

##### 月探査ローバ Micro5

久保田孝(宇宙研)、黒田洋司(明治大)、國井康晴(中央大)..... 155

# 「ローバーによるクレーター中央丘探査」

佐々木 晶 月面ローバー研究グループ

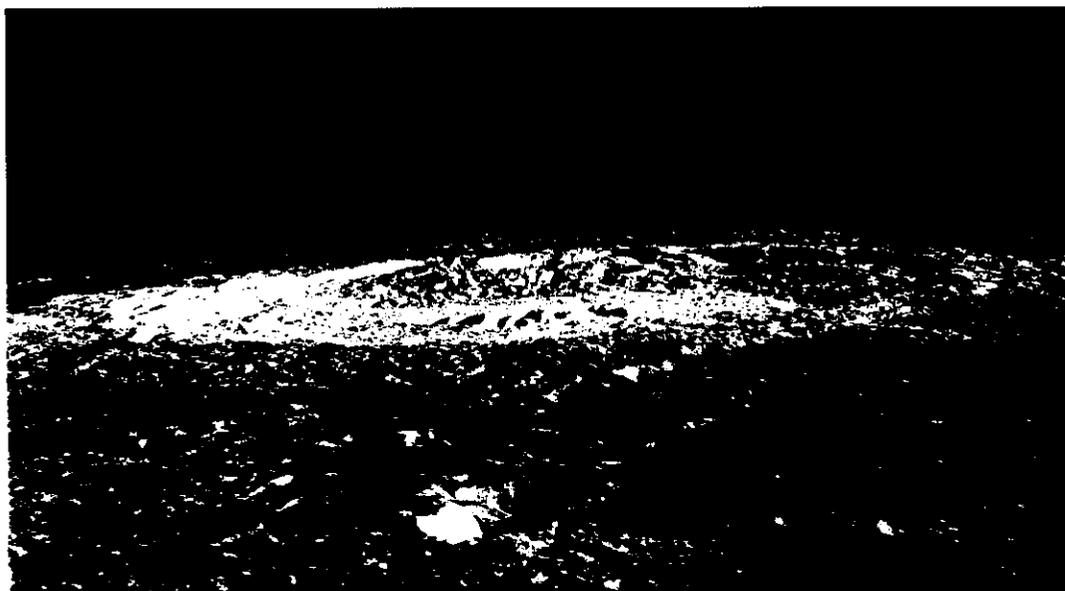
## 中央丘は月の内部への「窓」

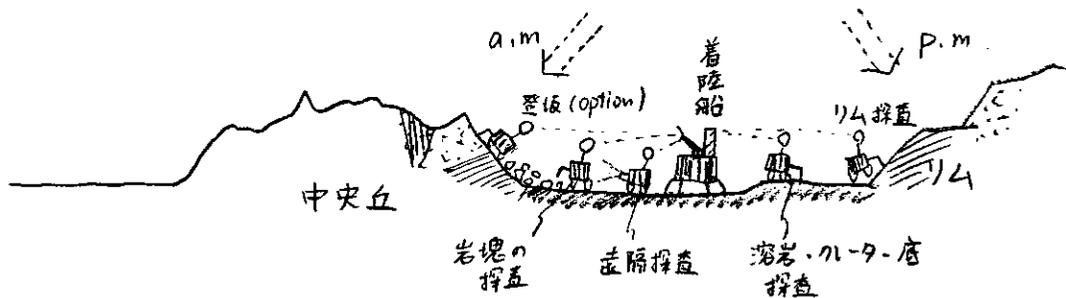
99-11-30

### 参考文献

- Tompkins and Pieters (1999) *Meteoritics & Planetary Sci.* **34**, 25-41.  
Pieters and Tompkins (1999) *J. Geophys. Res.* **104**, 21935-21949.

Copernicus





## クレーター中央丘探査による月内部物質の同定 (佐々木晶)

### 観測計画

- 1 直径50km程度の中央丘 (または中央丘リング) を持つクレーターの、内部平原の中央丘に近い(1km-数km)地点に着陸する。
- 2 クレーター内部平原の (溶岩) 物質の探査を行う。分光カメラのキャリブレーションや、SELENE-Iで得られたリモートセンシング分光データのGroundtruthを得るといった目的もある。
- 3 広角 (望遠) カメラの分光観測により、中央丘の観察を行う。SELENEなどのデータを補完して、岩石探査のターゲット地点を決定する。
- 4 数100mから数kmの移動で中央丘より崩壊・落下している岩石の探査を行い、月内部の岩石種を同定・解析する。異なる種の岩石で構成されている場合もあるため、地点を変えて、数カ所で岩石探査を行う。可能ならば、中央丘斜面に登坂する。
- 5 オプションとして、中央丘とは反対側のクレーターのリム斜面の探査を行う。斜面の下に崩壊・落下している岩石を探査するとともに、斜面の成層構造の撮像を行う。

ローバーが1回の昼の期間だけの探査の場合は、中央丘の東側、もしくは南側に着陸して、まず中央丘を探査。その後、午後→夕方にかけて、リム斜面を探査。

a)調査の目的：

クレーター形成時のリバウンドにより、中央丘には下部地殻やマントル物質が露出。  
クレーター中央丘は月内部へのいわば「窓」  
クレーター中央丘の物質を直接観測することで、月の地下物質の組成を同定し、  
マグマオーシャンからの成層構造形成モデルに制約を与える。

b)観察対象・場所：

マントル組成・下部地殻組成を反映していると考えられる中央丘を持つ50km程度の  
クレーター内部の溶岩平原に着陸。中央丘より崩壊・落下している岩石の探査。可  
能ならば、中央丘斜面の探査も行う。候補地は、Clementine, SELENEの分光データ  
で決定。Olivine-richでマントル物質と思われる場所の探査 (Mg-Fe rich, Ca low  
の下部地殻物質？を反映する場所の探査)。  
クレーター中央丘は、様々な深さの下部物質が露出している可能性が高いため、少  
なくとも2カ所、可能ならば3カ所以上で調査を行う。調査箇所は、事前のリモ  
ートセンシングデータを使い、ほぼ決めておき、着陸後の遠隔分光データも利用して  
最終的に決定する。

c)観測方法、スケール：

岩石の化学組成同定、鉱物組成同定

分光カメラ (岩石scaleでは連続分光。微小scaleでは8-10バンドのフィルターで)  
APXS (主要元素)  
γ線 (主要元素・放射性元素)  
磁性測定

岩石・鉱物の組織を同定

粒度が地下での冷却速度を反映しているはず  
0.1mmの分解能まで観察 (岩石の切断面が好ましい)

クレーター内部での中央丘、リム壁の構造の遠隔観察

広角 (望遠) 分光カメラ

d)調査試料： 地表の岩石試料が中心。ソイル試料も。

## 工学への要求項目

### a) 着陸地点に関する要求：

クレーター内部の平原に着陸。衝突発生溶岩が覆う場合と、溶岩噴出が無い場合とも、直径50km程度のクレーターでは、底面は平坦、着陸への障害は少ない。  
ローバーでの移動距離が短い(数100m)場合は、中央丘の近くに着陸、地表面の状況を事前に調べる必要がある。ローバー移動距離が1km以上可能な場合は、着陸地点と中央丘の間に、ローバー走破の障害となる、割れ目などが存否を確認。

### b) 観測地点に関する要求：

中央丘から崩壊して斜面の下に転がっている岩石を調べる。  
さらに、中央丘斜面を登る。

### c) 移動中の調査必要性：

クレーター内部の溶岩平原の調査も行う。

### d) 移動距離：

観測の主目的（中央丘探査）のためには、着陸地点を選べば1-数kmでよい。リム探査などの副目的を達成するためには、20km程度の移動が必要。

### e) 観測点数： 地点としては、

- 1 着陸点、
- 2 中央丘付近の3-4カ所  
が最小限必要。

他に、リム側、クレーター内部の溶岩に（SELENEの観測から）不均質が予想される場合は、クレーター溶岩内の数地点。

### f) 特殊機構の必要性：

中央丘斜面を登坂する場合は、ローバーの走破性能の向上が必要。

岩石の採取機構

岩石の（掘削）移動機構（特に裏返すことにより宇宙風化作用を受けていない面を調べる）。最大10-20kg程度の岩石を裏返したい

岩石の切断機構：内部組織の観察のため

岩石の表面切除機構：切断が困難な場合でも、風化を受けている表面を剥ぎ取る機構は分光観測のために必要。

## 観測候補地点

Tompkins and Pieters (1999)より

### マントル岩石の露出している可能性の高いクレーター

Copernicus, Crookes, Keeler, Langrenus, Theophilus, Tsiolkovsky

すべて低・中緯度

新しい、表側という条件ではCopernicus, Langrenus, Theophilus

極域のそばでは、あまりよいターゲットは無い。

Clementineでは（暗くなるため）よい分光データが得られていない可能性はある。

SELENEのデータ解析は着陸地点選定には必須。

## 中央丘探査

月では直径数10km以上のクレーターには、中央丘が存在する。  
これは、クレーター形成時に、下層がリバウンドして形成されたもので、  
中央丘には、月の内部の岩石があらわれている。

地上観測やクレメンタインの観測（反射スペクトル）により、中央丘の組成は周囲と異なっていて、海の下にも高地組成の岩石が存在したり、場所によっては、マントル組成を代表するカンラン石を主体とする岩石が露出している可能性が高い。

クレーター内部の溶岩平原に着陸      そして      ローバによる中央丘探査

これまで手にしていない、月内部のサンプルを観察することが可能  
重要なターゲット

マントルを代表するカンラン岩

Mg/Mg+Feの低い斜長石（マグマオーシャンの初生分化）

組成      月の物質分化、マグマオーシャンの進化に重要

鉱物サイズ      冷却史を反映

中央丘を持つ月のクレーター

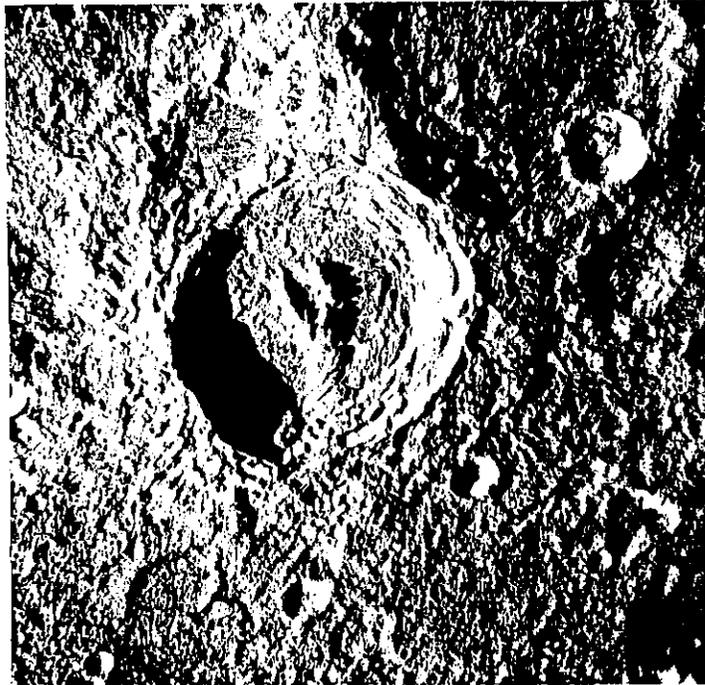


Fig. 2.10 The 75-km diameter crater King on the lunar farside exhibits several aberrant features, the most obvious of which is the distinctive "lobster claw" central peak complex. A massive landslide has formed on the southeast rim (right-hand side) in an area that was topographically high before the impact occurred. A smooth-surfaced pool of impact melt near the top left probably fills a preexisting crater that is mantled by King ejecta. Apollo Hasselblad photo AS16-122-19380 (H).

直径75kmの"King" 中央丘クレーター

(a)

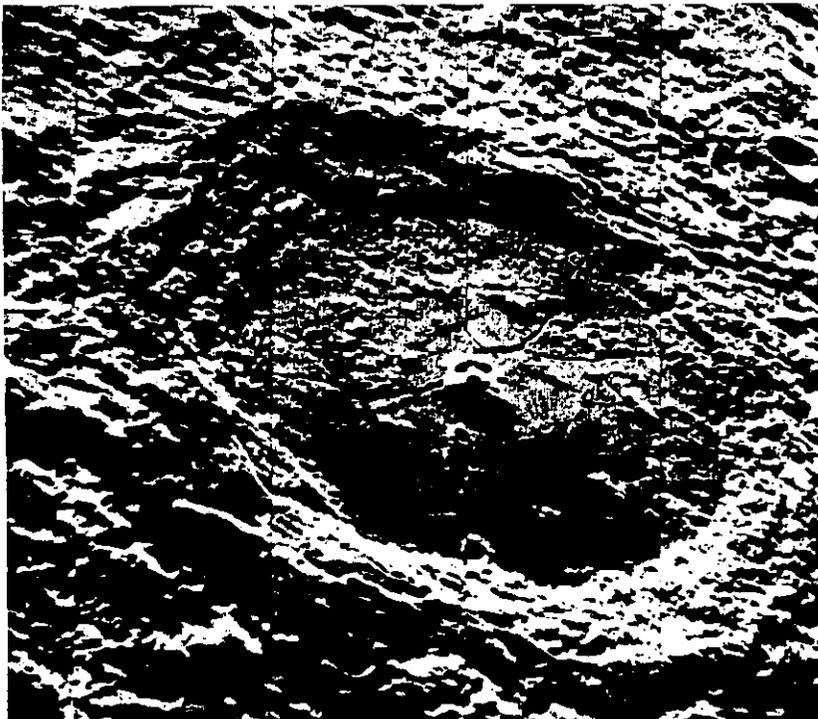


Fig. 8.8 Peak-ring craters on the moon. (a) The 175-km diameter crater Compton on the moon is transitional between central peak craters and peak-rings craters: it possess one of each. Lunar Orbiter Photograph LO 5 181M.

直径175kmの"Compton" ピークリングクレーター

中央丘クレーター、  
 ピークリングクレーター

で 下層の岩石が表面に あらわれる 原理

クレーター 形成の 穴を 埋める べく、 下層が 登り 上がり くる。

ピークリングの場合は、overshootしたものが 崩壊して 形成。

その後の 溶岩で 覆われて いない 部分は 地下の 層の 混合物。

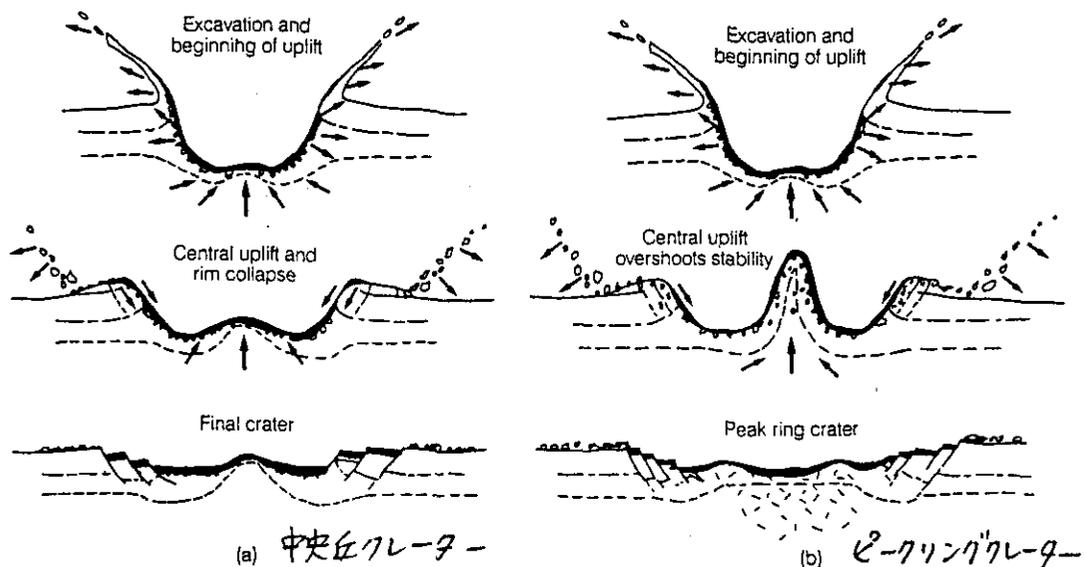
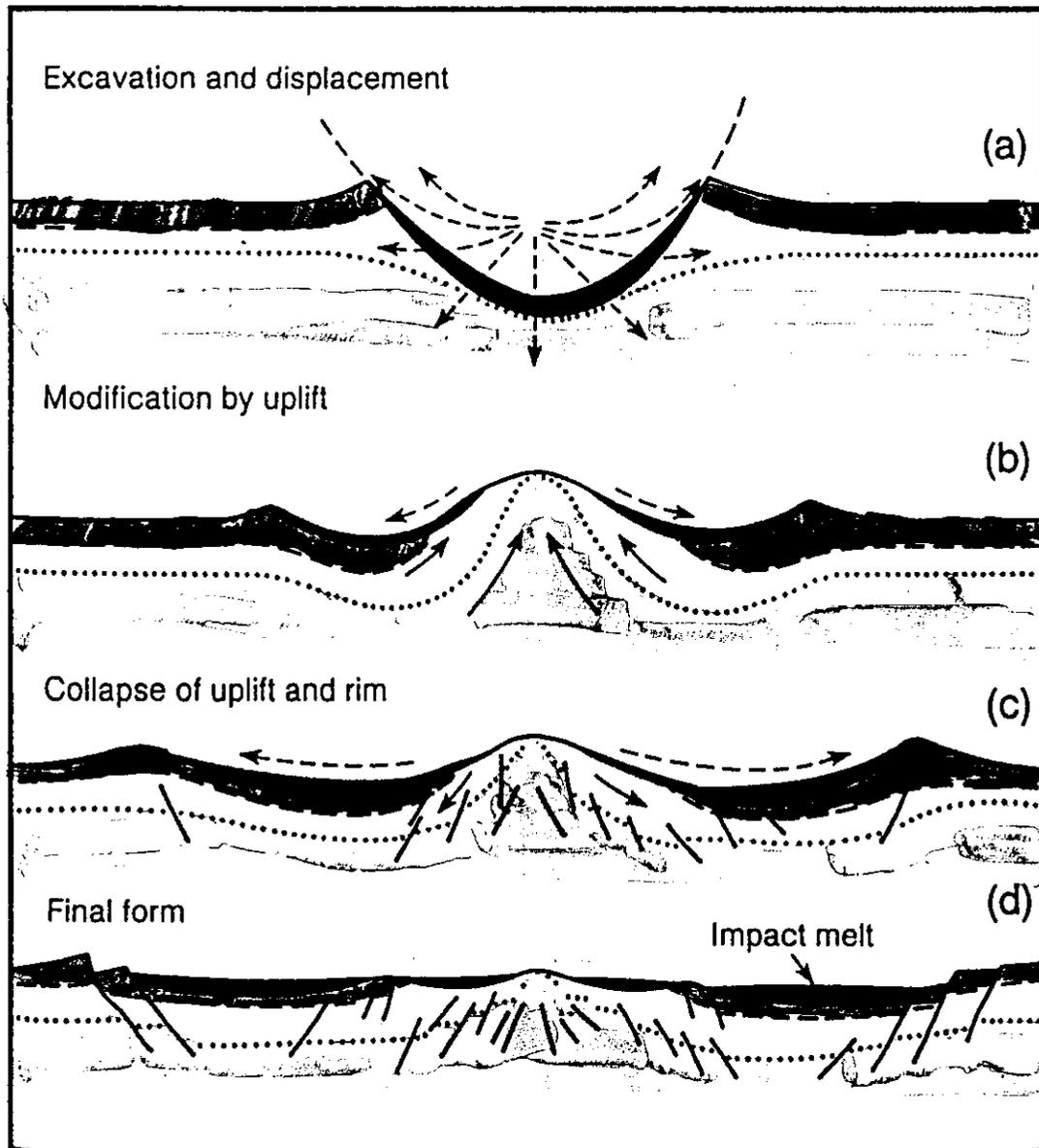
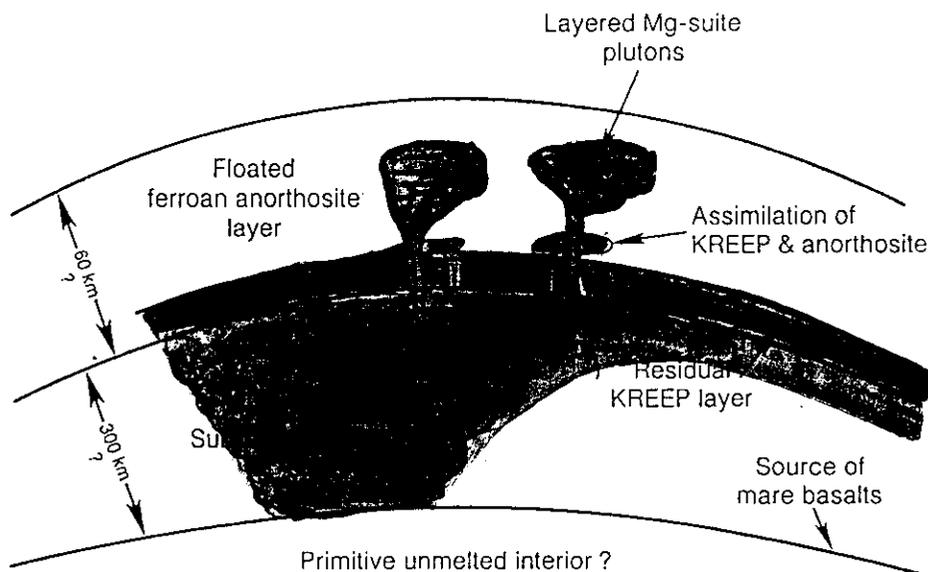


Fig. 8.14 Schematic illustration of the formation of complex craters with either (a) central peaks or (b) peak rings. Uplift of the crater floor begins even before the rim is fully formed. As the floor rises further, rim collapse creates a wreath of terraces surrounding the crater. In smaller craters the central uplift "freezes" to form a central peak. In larger craters the central peak collapses and creates a peak ring before motion ceases.



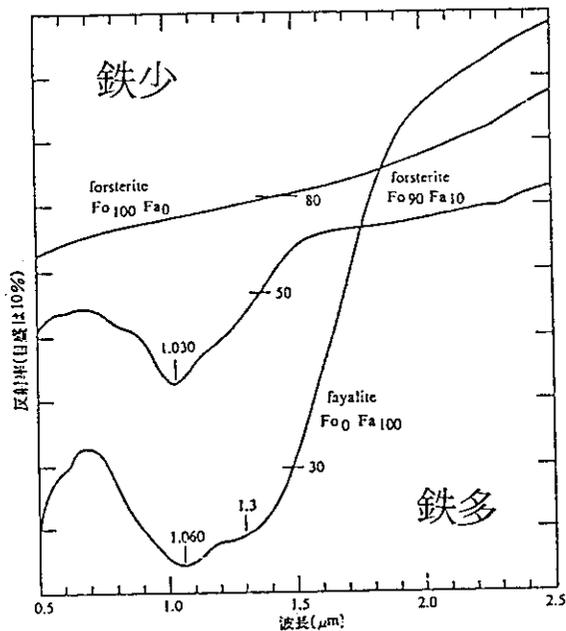
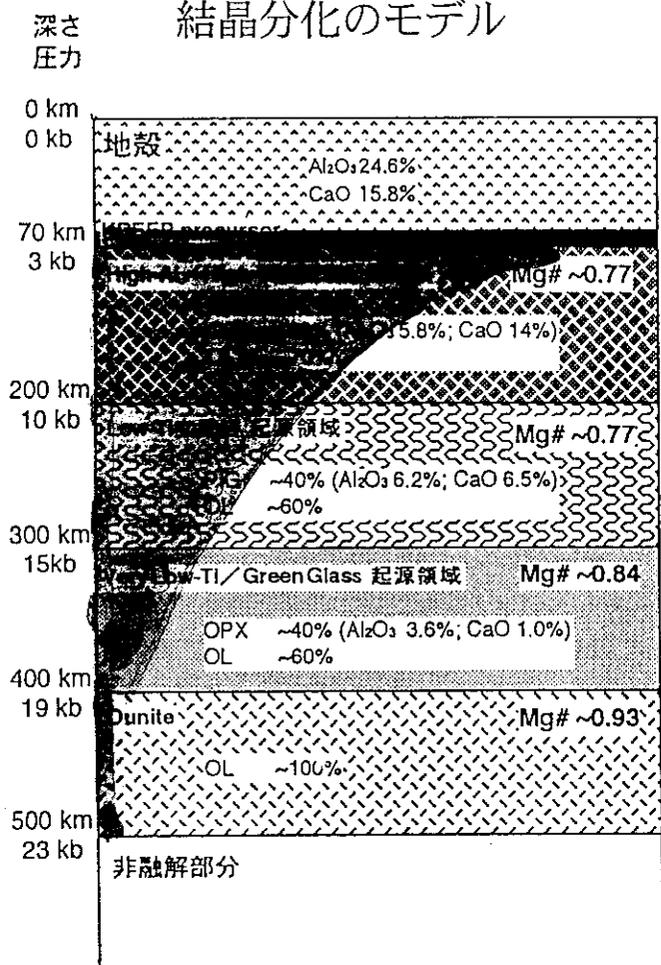
中央丘を持つ衝突盆地の形成モデル。衝突による掘削の後、upliftによって深部物質が中央丘として現われる可能性を示す(Lunar Sourcebook, 1991より)。

# マグマオーシャン説



(Lunar source book より)

## 結晶分化のモデル



## Fe/Mg 比によるかんらん石のスペクトル変化

(Adams, 1975 より)

(奥地・高橋より)

図2：月の内部構造

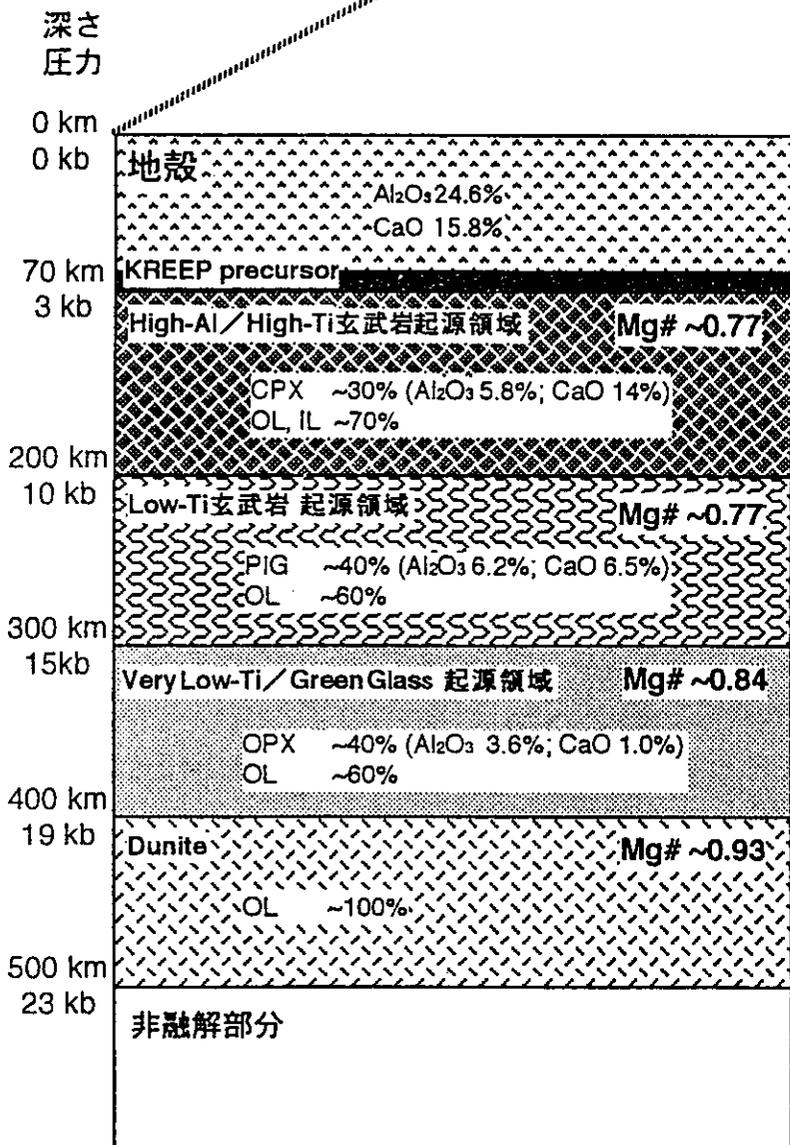
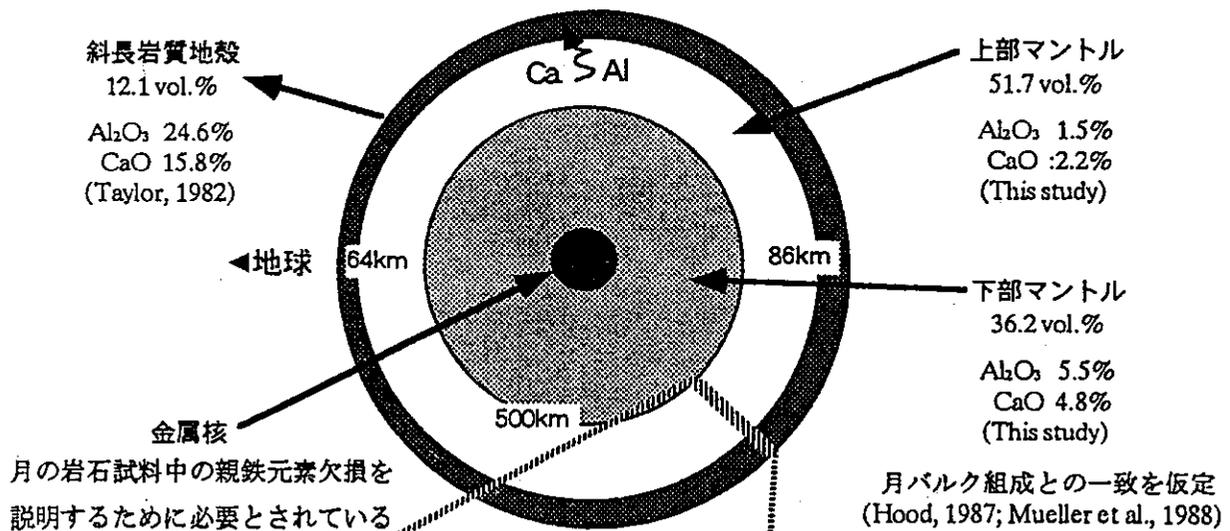
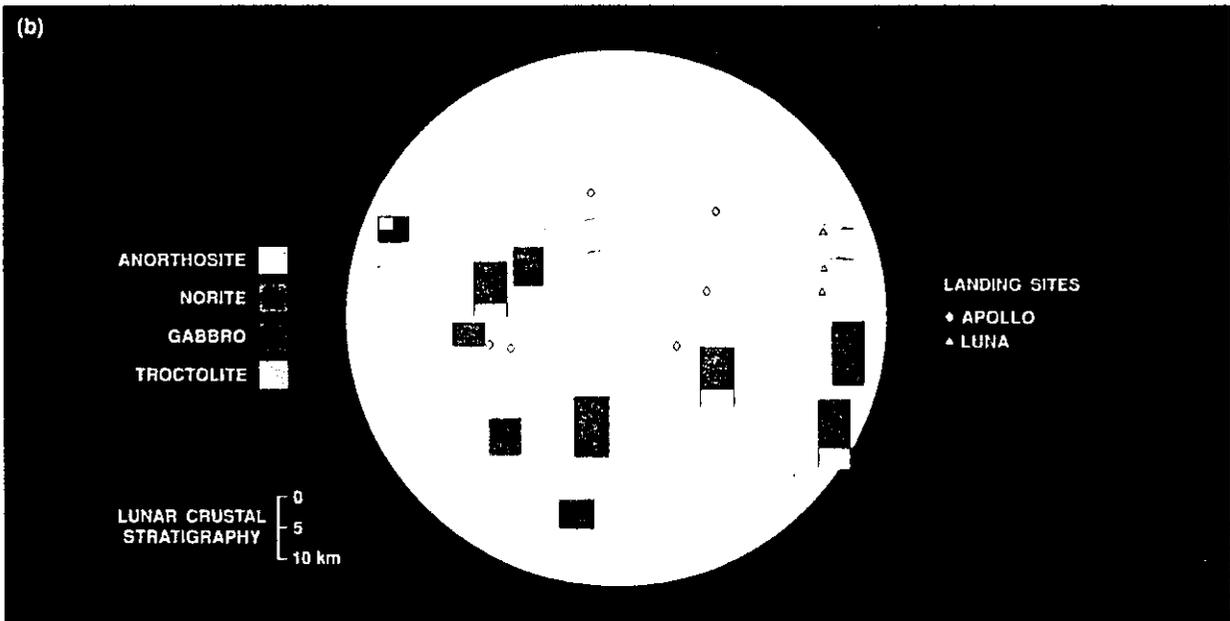
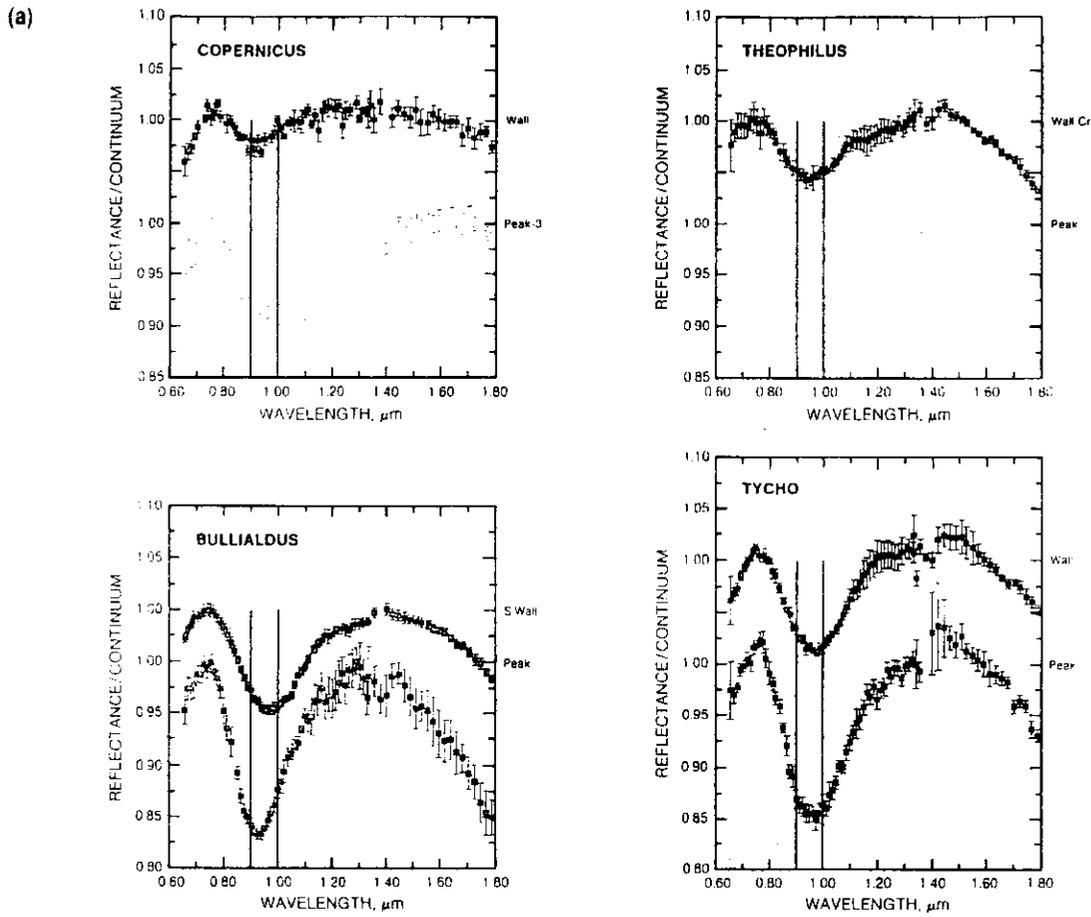


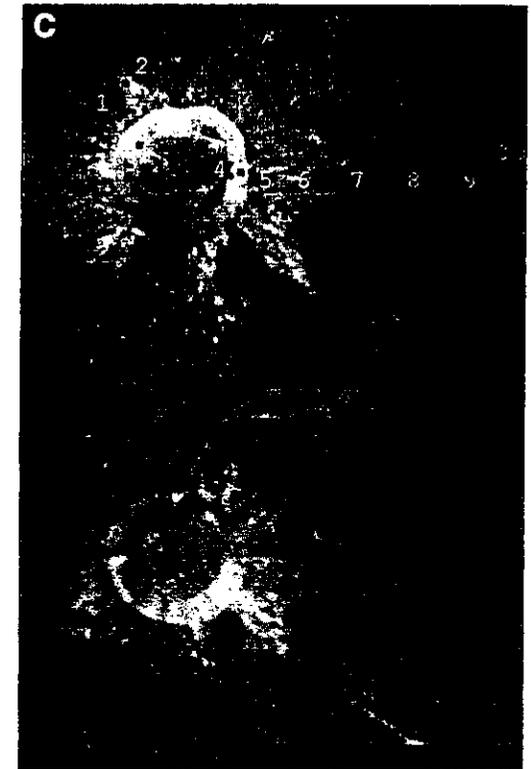
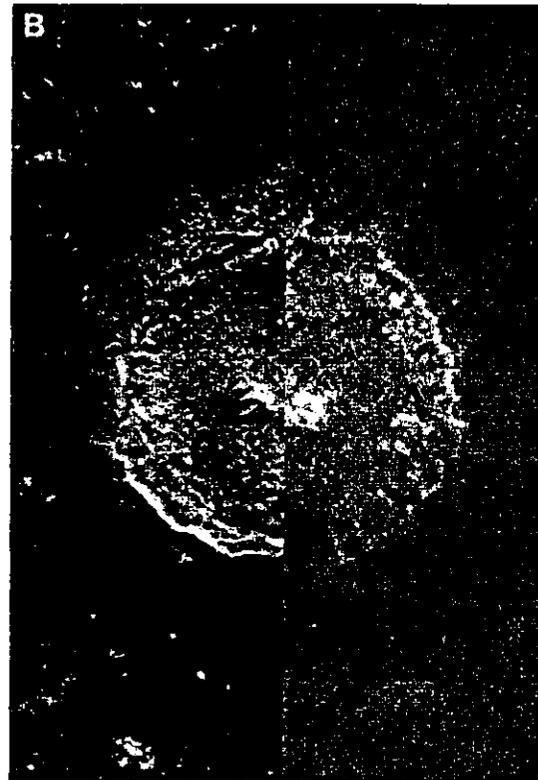
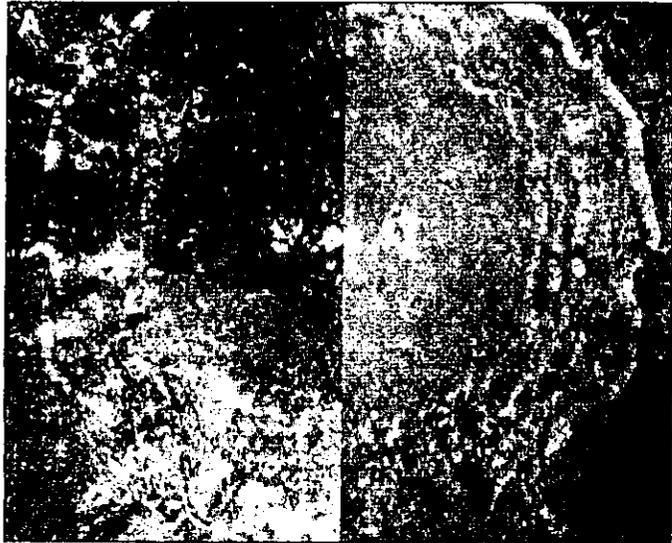
図3：月上部マントルの構造

各層の境界は、海の玄武岩の融解実験に基づき multiple saturation point (複数鉱物の飽和点)の圧力分布より推定した。図中に飽和が確認された鉱物を示す。  
(CPX: augite; OL: olivine; IL: ilmenite  
PIG: pigeonite; OPX: orthopyroxene)  
また最も multiple saturation point に近い実験条件で、玄武岩メルトと共存する輝石の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO 組成の分析値を示した。輝石の量は, Turcotte & Kellogg (1986) の Table 1 より, 玄武岩生成時の Sm/Nd の分別度を計算して算出した。そして輝石以外はかんらん石(Ca, Alを含まない)をマントルの主要構成鉱物と考えて、図の各層ごとに Ca, Al 存在度を計算した。  
また各層のかんらん石の Mg# を、本文中に示した計算法により求め、平均してマントル Mg# ~82 を得た。  
図中のデータは, Longhi et al. (1974); Chen et al. (1982); Green et al. (1971); Kesson (1975) より得た。また BVSP (1981) の Fig 1.2.9.14 と Longhi (1992) の Table 2 を参考にした。

from Okuchi (94)



**Plate 10.9.** (a) Examples of reflectance spectra obtained with Earth-based telescopes for small areas (<5 km in diameter) centered on the wall and on the central peaks of four large impact craters. For all spectra the red, sloped lunar continuum has been estimated (a straight line from about 0.73 to 1.6  $\mu\text{m}$ ) and removed to allow comparison of the superimposed absorption bands. Vertical lines are drawn at 0.9 and 1.0  $\mu\text{m}$  for comparison of the subtle differences between band centers. Identification of the dominant rock type present is determined from the characteristics of the mafic-mineral absorptions near 1.0  $\mu\text{m}$  (see sections 6.2.1 and 6.5). Lunar materials with no measurable mafic mineral absorptions are *anorthositic* (<5% mafic minerals) and are shown in yellow. Materials that exhibit an absorption between 0.9 and 0.94  $\mu\text{m}$  contain a mineralogy with mafic minerals dominated by low-Ca pyroxenes. These materials are *noritic* and are shown in red. On the other hand, areas that exhibit an absorption at longer wavelengths (0.95–1.0  $\mu\text{m}$ ) contain a mineralogy dominated by high-Ca pyroxenes and are called *gabbroic*; these are shown in blue. A few areas have the broad, diagnostic multiple absorption of olivine (at wavelengths >1.05  $\mu\text{m}$ ) and are called *troctolitic*; these are shown in green. (b) This image shows the variation of composition with depth for the lunar highland crust as exposed in large impact craters, and observed spectroscopically using Earth-based telescopes. The map perspective is the same as Fig. 10.1 (showing the Moon as observed from Earth-based telescopes). The depth probed by the craters is estimated as one tenth the crater diameter, and a scale for the estimated compositional stratigraphy implied from several spectra obtained in and around the crater is indicated on the left. Landing sites from which samples have been returned are indicated with small diamonds (Apollo sites) and triangles (Luna sites).



**Fig. 1.** Color composite images with red = 750/415 nm, green = 750/950 nm, and blue = 415/750 nm. **(A)** Copernicus (93 km in diameter). For ease of comparison, the color mosaic is presented as a mirror image of a full-resolution 750-nm mosaic of the eastern half of the crater. **(B)** Tycho (85 km in diameter). For ease of comparison, the color mosaic is presented as a mirror image of a full-resolution 750-nm mosaic of the western half of the crater. **(C)** Giordano Bruno (22 km in diameter). The image is produced from a single frame set from orbit 130; the color composite is shown below the full-resolution 750-nm

image. The numbered areas are locations for spectra shown in Fig. 3C. The uncolored portion of the color composite indicates the relative amount the 415- and 1000-nm frames were shifted to be co-registered with the 750-nm image.

# Tsiolkovsky

PIETERS AND TOMPKINS: CRUSTAL PROCESSES ON THE LUNAR FAR SIDE

21,937

b

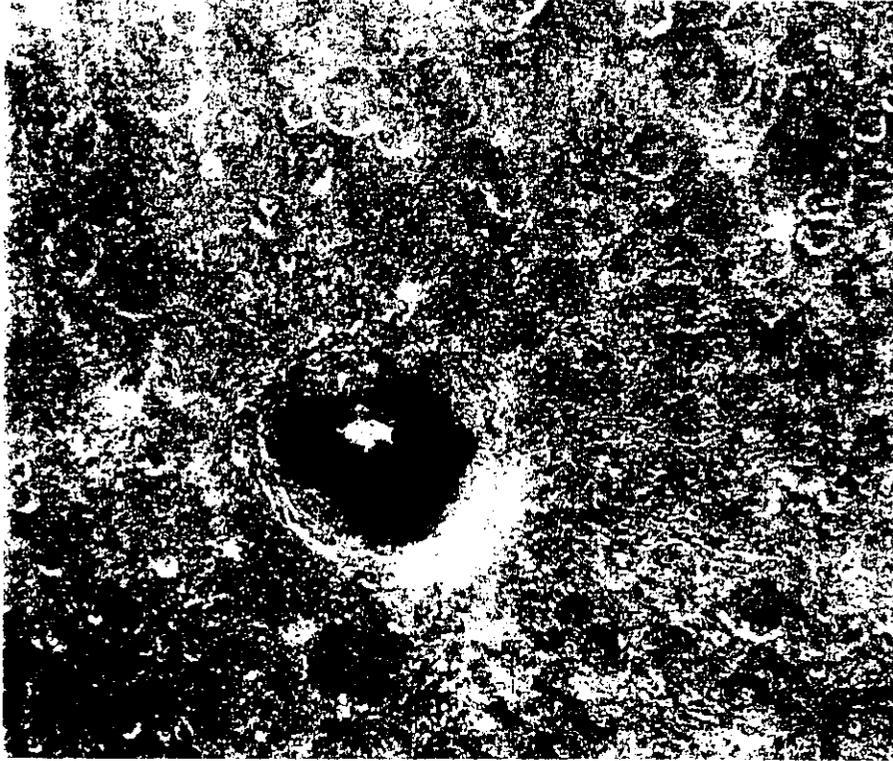
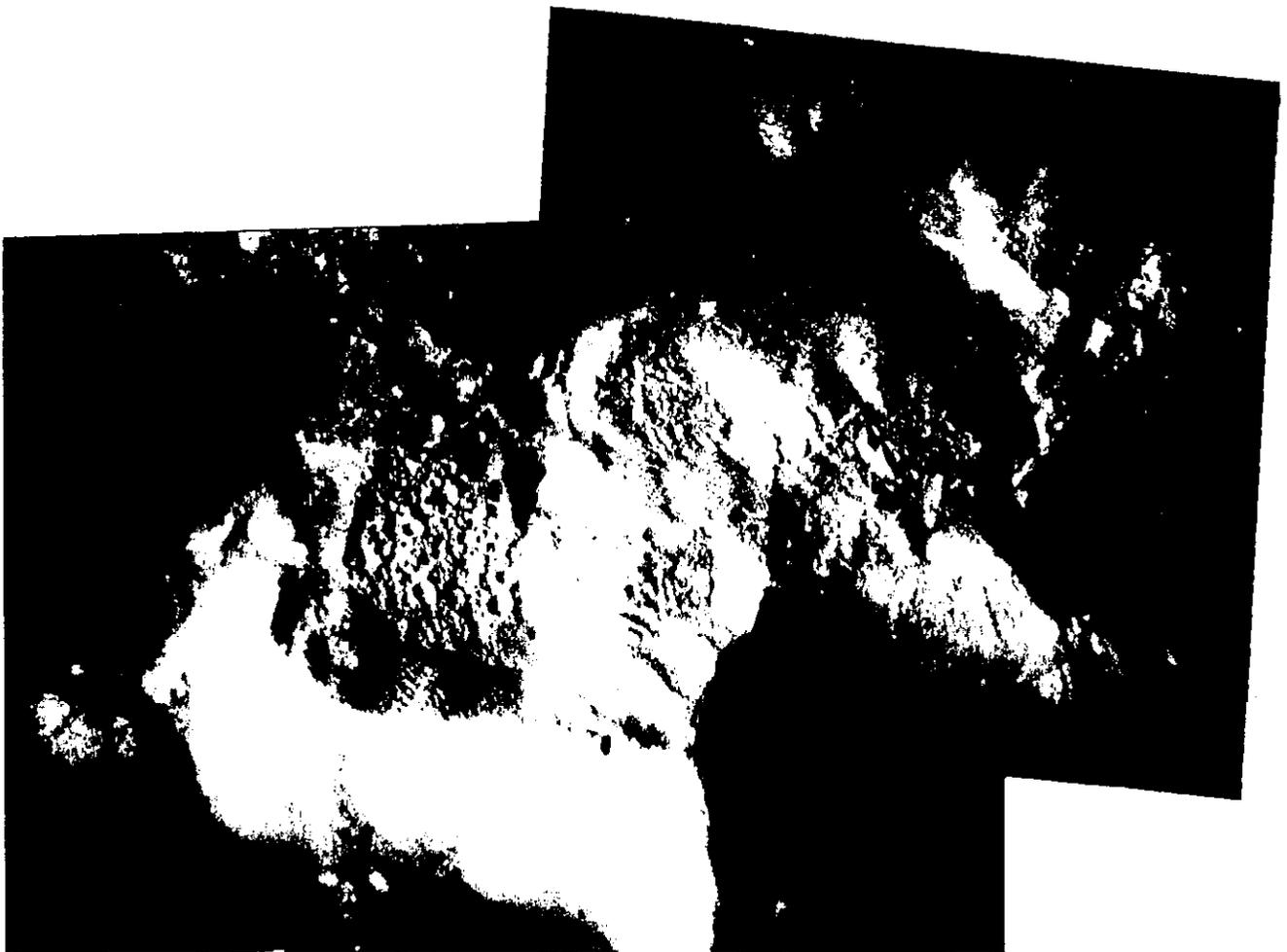
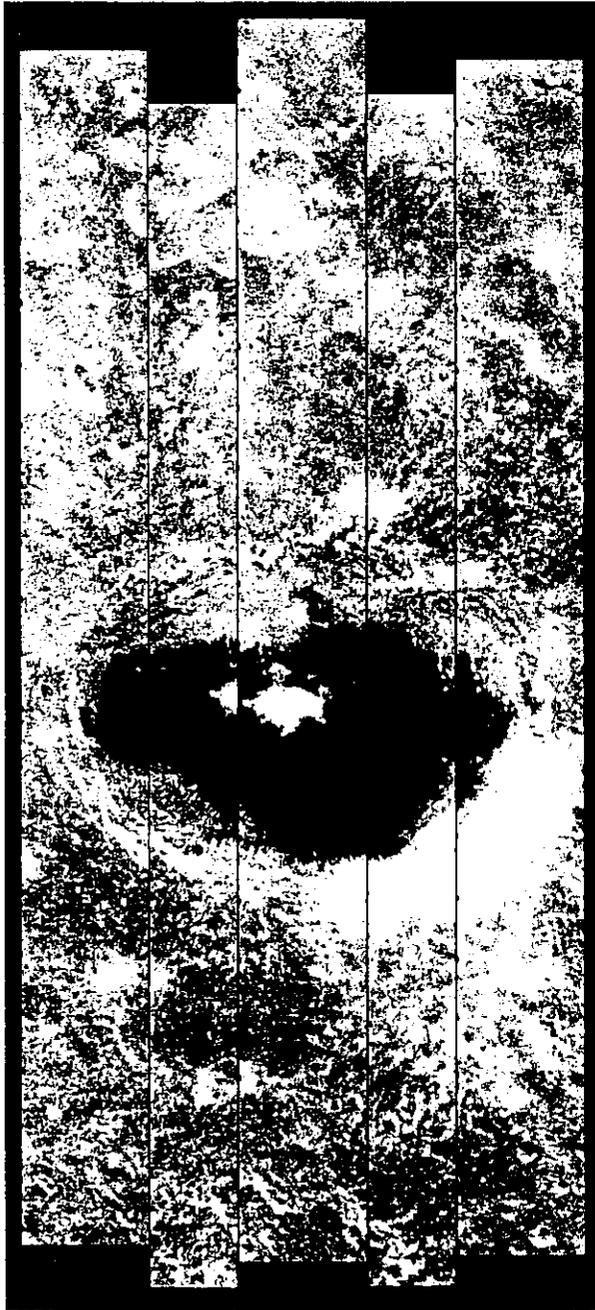
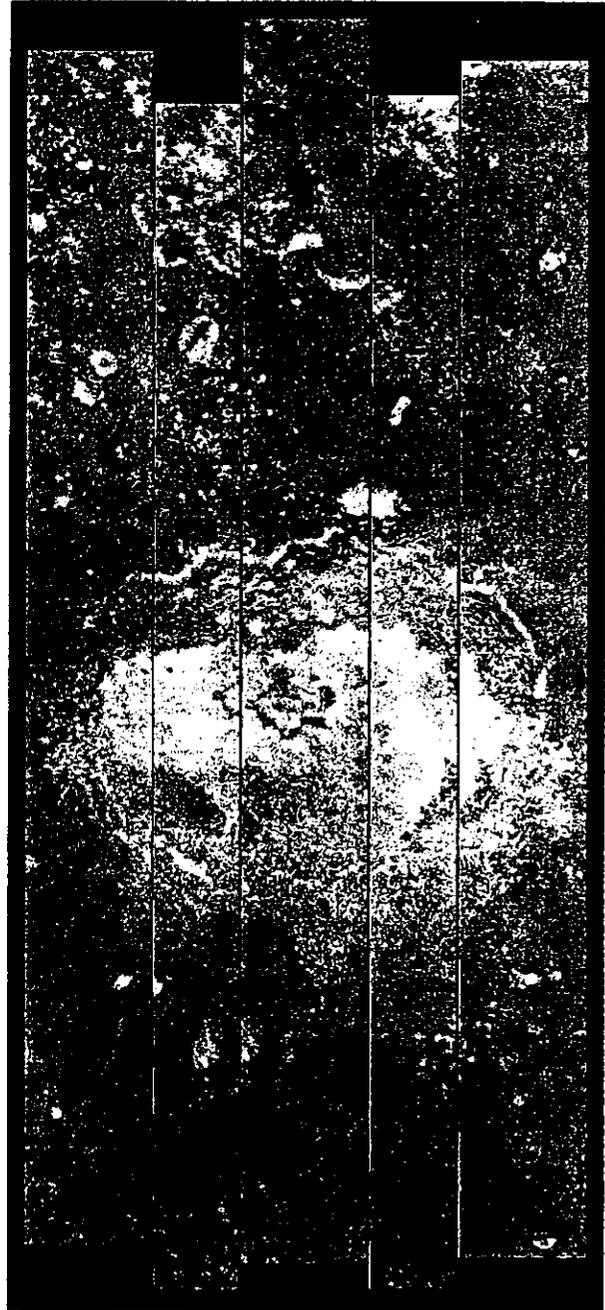


Figure 1b. Clementine 750-nm albedo mosaic of the Tsiolkovsky region.

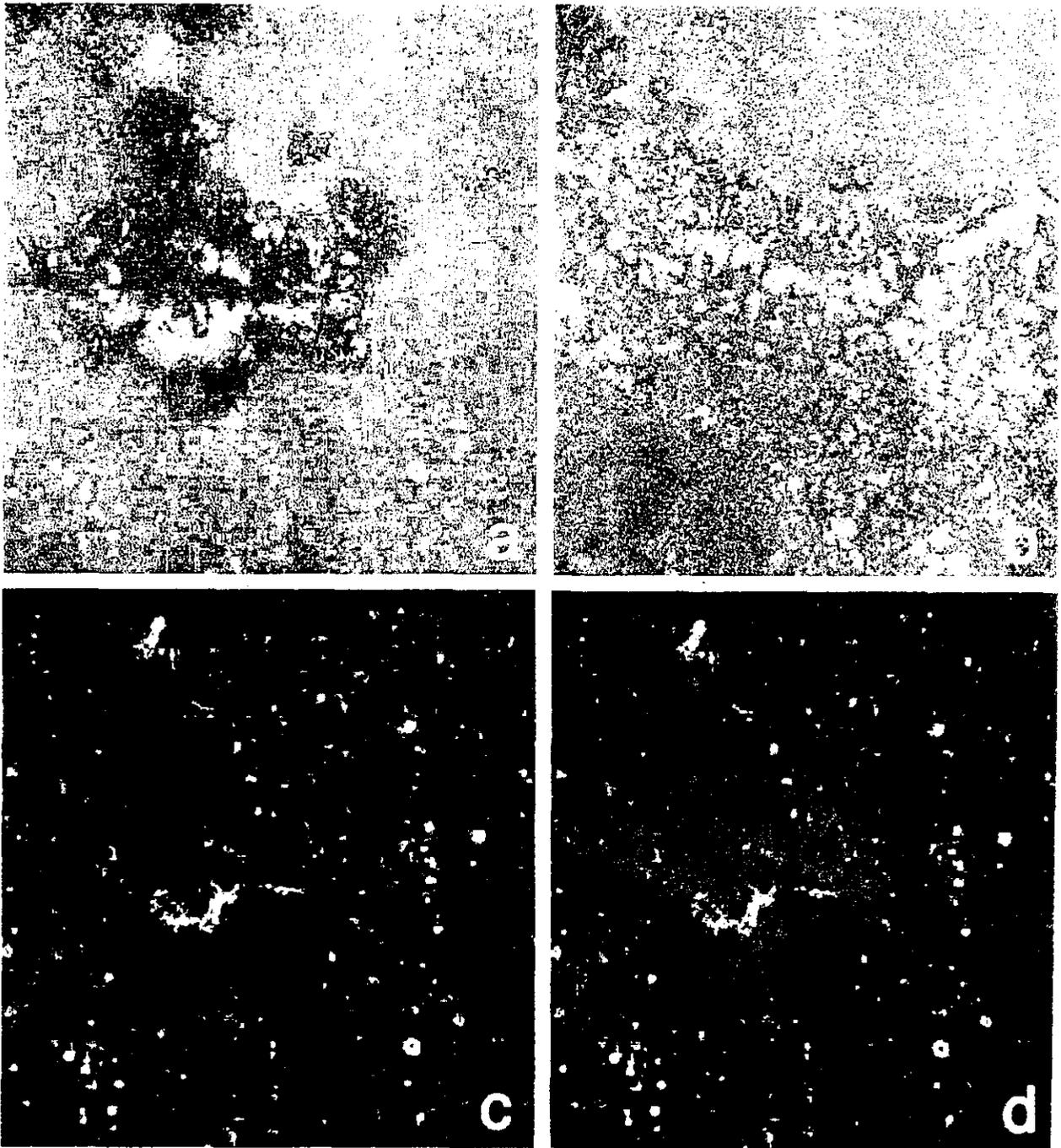




**Figure 4.** Mosaic of five orbits of photometrically corrected reflectance images at 750 nm centered on Tsiolkovsky. The standard geometry is  $i=30^\circ$ ,  $e=0^\circ$ . The orbits used for these data are (left to right) 254, 121, 253, 120, and 252. Fields of view for these orbits are 60 km (254, 253, and 252) and 40 km (121 and 122).



**Plate 1.** Color composite mosaics of the five orbits of Clementine UVVIS data centered on Tsiolkovsky shown in Figure 4. The color assignment is red = 750/415 nm, green = 750/950 nm, and blue = 750 nm. Mature highland soils appear red, anorthosites appear deep blue, and both noritic anorthosites and olivine/troctolites appear turquoise; basaltic soils appear yellow, and fresh basalt appears bright yellow.



**Plate 2.** Color composites of the central peaks and southern rim of Tsiolkovsky. Width of each frame is 60 k. Shown are (a) color composite of the central peaks using the same assignment as shown in Plate 1 (red = 750/4 nm, green = 750/950 nm, blue = 750 nm), (b) color composite of Tsiolkovsky south wall with the same color assignment as in Plate 2a and Plate 1, (c) enhanced color ratio composite of the central peaks combining information in four bands to highlight distinctions between mafic-rich areas (750/900 nm = red, 750/950 nm = blue, 750/10 nm = green), and (d) same as Plate 2c except red = 750 nm (albedo).

Clementine 反射スペクトルによる  
クレ-7- 中央丘の解析  
(Tompkins and Pieters, 99)

典型的な月鉱物の ⇒  
反射スペクトル

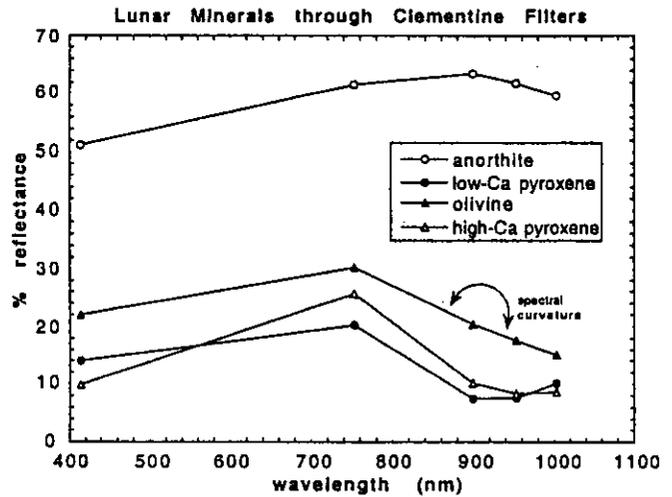
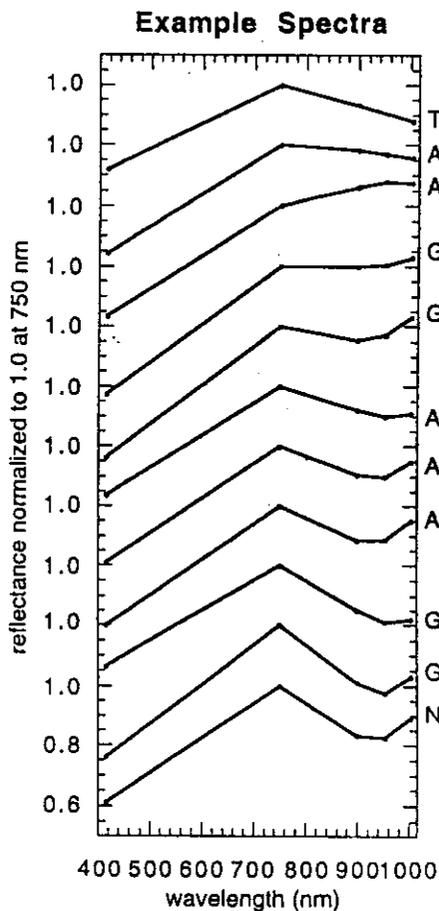


FIG. 3. Lunar mineral spectra of Fig. 2 convolved through Clementine filters. Note the change in wavelength scale. The minerals may be distinguished in the five-color spectra, but spectral differences are more subtle.

Clementine で実測された  
中央丘の反射スペクトル

↓



カンザシ石 Oliv --- マントルに対応  
Plagioclase 斜長石 --- 高地に対応  
Pyroxene 輝石 --- 典型的な「海」に対応

FIG. 7. Example spectra for each central peaks lithologic category. These data have been normalized to 0.75  $\mu\text{m}$  to emphasize the shape and strength of the mafic absorption band. For spectra of rocks that are believed to be comparable to noritic anorthosites, gabbroic anorthosites, and troctolitic anorthosites, mafic mineralogy is ambiguous and is therefore grouped into two general categories correlated to plagioclase abundance ("GNTA1" and "GNTA2").

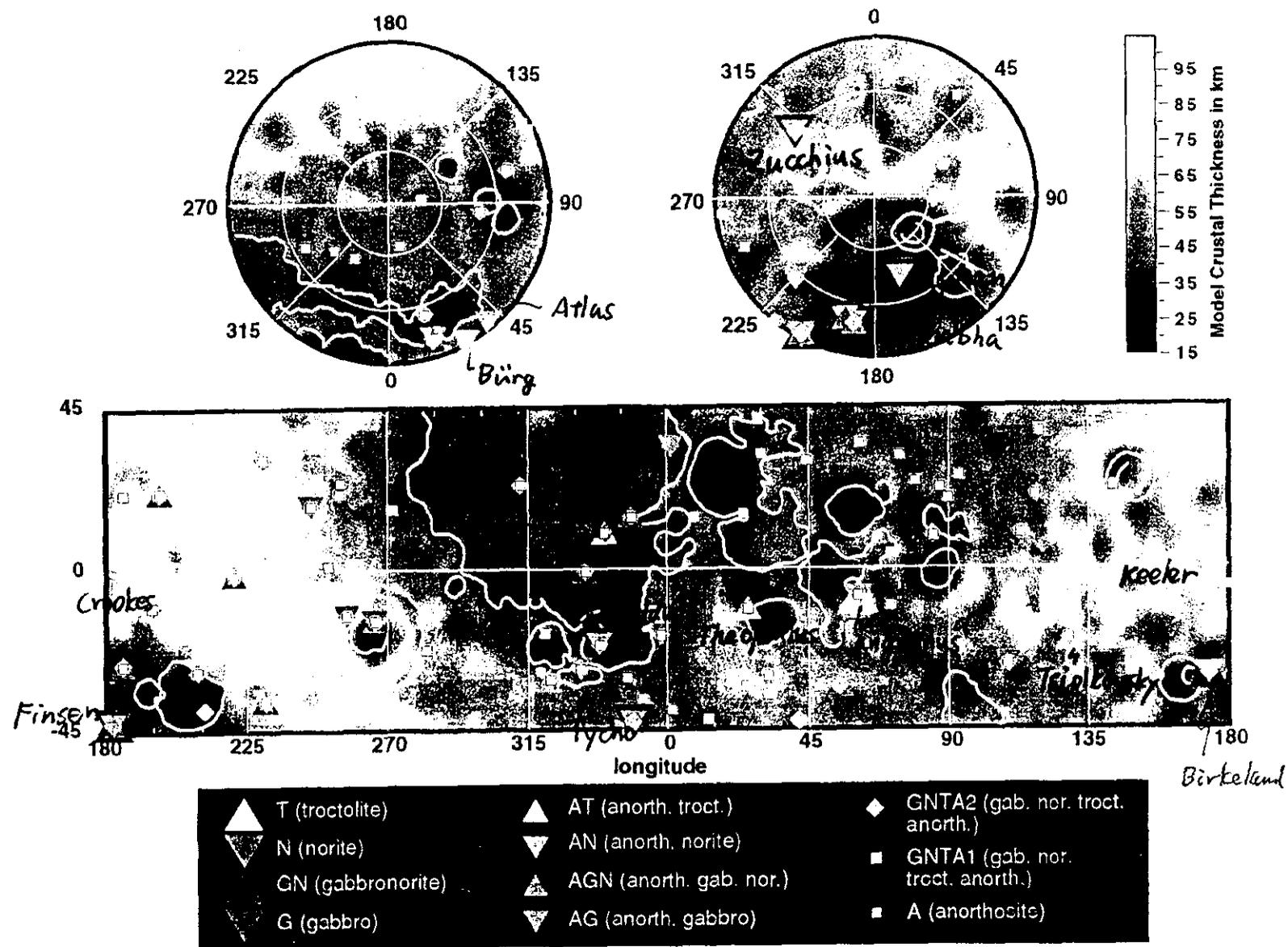


FIG. 9. Map of central peaks lithologies superimposed on the crustal thickness model of Zuber *et al.* (1994). Symbols and colors for non-anorthositic rocks were selected such that a single color is correlated to each identifiable mafic mineral (olivine, high- and low-Ca pyroxene, and an intermediate pyroxene composition), and that the intensity of the color—as well as the size of the symbol—increases with increasing mafic mineral abundance. This scheme indicates the presence, but not the abundance, of multiple lithologies within each crater's central peaks. Global and regional trends in composition are discussed in the text.

TABLE 1. List of impact craters for which the central peaks compositions have been identified, along with compositions.

Crater	Latitude	Longitude	Diameter (km)	Age	Setting	Peak lithologies	Clementine filename
Aitken	17° S	173.5°	118	UI	highland	A, GNTA1, GNTA2	lub1490h.237
Alphonsus	14° S	357°	119	N	basin	A	lub2746h.037
Appleton	40° N	158°		N	highland	A	lub4870m.110
Aristarchus	23.5° N	312.5°	40	C	basin	GNTA1, GNTA2	lub2990l.186
Aristillus	34° N	1.5°	55	C	basin	GNTA2, AN	lub3372m.168
Aristoteles	50° N	17°	87	E	basin	A, GNTA2, AN	lub4489n.294
Arzachel	18.5° S	358°	97	LI	basin	GNTA1, GNTA2	lub2560h.037
Atlas	47° N	39°	87	UI	highland	GNTA1, AG	lub5146n.152
Ball	36° S	351.5°	40	unknown	highland	GNTA1	lub1815f.039
Barringer	28° S	209°	69	N	basin	GNTA1, GNTA2	lub2185g.091
Belyaer	23° N	143°	51	unknown	basin	A, GNTA1	lub3110l.248
Berkner	25° N	255°	95	unknown	highland	A, GNTA1	lub23264l.207
Bernoulli	35° N	61°	47	UI	highland	A, GNTA1	lub3646m.278
Bettinus	64° S	315°	82	unknown	basin	A, GNTA1	lub0943c.052
Bhabha	55.5° S	195°	78	unknown	basin	AGN, AN, GN, G	lub1266d.096
Birkeland	30° S	174°	85	E	basin	GNTA2, AN, GN	lub2343g.104
Borman	39° S	211°	55	LI	highland	GNTA2	lub1951f.090
Bose	55° S	190.5°	94	unknown	basin	GNTA2, AGN, AN	lub1295d.098
Bridgman	43.5° N	137°	94	unknown	highland	A, GNTA1	lub3861n.250
Bullialdus	21° S	338°	61	UI	basin	GNTA1, GNTA2, AN, N	lub2774g.044
Bürg	45.5° N	28.5°	40	C	basin	GNTA2, AN	lub4115n.290
Campanus	28° S	332°	48	LI	basin	GNTA1, GNTA2, AN	lub2460g.046
Cantor	38.5° N	119°	75	UI	highland	A, GNTA1	lub3740m.257
Carpenter	70° N	309.5°	60	C	highland	A, GNTA1	no 1.0 $\mu$ m image lub6202p.318
Compton	56° N	105°	162	LI	highland	A, GNTA1, GNTA2	lub4302o.262
Copernicus	10° N	340°	98	C	basin	GNTA1, GNTA2, AT	lub3706j.043
Crookes	10.5° S	195°	50	C	highland	GNTA1, GNTA2, AT	lub1769h.229
Cyrillus	13.5° S	24°	93	N	basin	A	no 1.0 $\mu$ m image lub2969h.159
Daedalus	05.5° S	180°	100	LI	highland	A	lub3343i.102
Delporte	16° S	121.5°	40	unknown	highland	A	lub1340h.256
Doppel-mayer	28.5° S	319°	65	N	basin	A	lub1694g.183
Eichstadt	22° S	282°	45	unknown	basin	A, GNTA1	lub1469g.197
Einstein	17° N	288°	48	unknown	highland	A	lub3921k.333
Eratosthenes	14.5° N	348.5°	58	E	basin	A, GNTA1, GNTA2, AGN	no 1.0 $\mu$ m image lub2177k.305
Eudoxus	57.5° N	16.5°	67	C	highland	A, GNTA1, GNTA2	lub4225n.294
Fabricius	43° S	42°	78	E	highland	A, GNTA1, GNTA2	lub1829e.152
Finsen	42.5° S	181.5°	87	E	basin	GNTA2, AGN, AN, GN, N	lub1482e.101
Fizeau	58.5° S	224.5°	110	unknown	highland	GNTA2, AN	lub0900d.085
Gassendi	17.5° S	320°	110	N	basin	GNTA1	lub2850h.183
Hahn	31.5° N	74°	84	LI	highland	A, GNTA1	lub4618m.141
Hale	74° S	90°	85	unknown	highland	GNTA1, AN	lub0616b.134
Hayn	64.5° N	84°	87	C	highland	GNTA1, GNTA2	lub4829p.270
Helmholtz	69° S	65.5°	110	unknown	highland	A	no 1.0 $\mu$ m image lub0645c.143
Hercules	47° N	39°	68	E	highland	GNTA1	lub4113n.286
Hubble (Plutarch A)	22.5° N	87°	82	N	highland	A, GNTA1	lub4499l.136
Jackson	22° N	197°	71	C	highland	GNTA1, GNTA2, AGN	lub3047l.228
Joliot-Curie	26° N	93.5°	143	PN	highland	A, GNTA1	lub3078l.228
Keeler	10° S	162°	132	LI	highland	A, AT	lub2977l.266
King	06° N	120.5°	77	C	highland	GNTA2, AGN	lub1831h.241
Kirkwood	69° N	123°	70	E	highland	A	lub2081j.256
Kovalev-skaya	31° N	230.5°	109	UI	highland	A, GNTA1, GNTA2	no 1.0 $\mu$ m image lub4768p.226
La Pérouse	10.5° S	71°	80	unknown	highland	GNTA1, GNTA2	lub3270m.216
Langmuir	36.5° S	231°	85	unknown	highland	A, GNTA1, GNTA2, AGN	lub3285h.140
Langrenus	08.5° S	61°	132	E	basin	GNTA1, AN, T	lub1845f.083
Lansberg	01° S	333.5°	40	UI	basin	GNTA1, GNTA2, AGN	lub1757i.278
Leavitt	46° S	219.5°	80	unknown	highland	A, GNTA1, GNTA2	no 0.95 $\mu$ m image lub3639i.046
Leuschner	01.5° N	251°	42	unknown	highland	A, GNTA1	lub1457e.087
Lindenau	33° S	25°	55	unknown	highland	A, GNTA1, GNTA2	lub3734j.076
							lub1427f.027
							no 1.0 $\mu$ m image

TABLE 1. *Continued.*

Crater	Latitude	Longitude	Diameter (km)	Age	Setting	Peak lithologies	Clementine filename
Lobachev-sky	09.5° N	113°	62	UI	highland	GNTA1, GNTA2	lub2505j.259
Lodygin	18° S	213°	50	unknown	highland	A	lub1355h.222
Lowell	13° S	257°	66	C	basin	GNTA1, GNTA2, AG	lub3145h.074
Lyman	67° N	162°	90	UI	highland	AN, N	lub0802c.108
Mach	18° N	211°	155	unknown	highland	A	lub2956k.223
Manilius	14.5° N	9°	40	E	basin	A	lub2798k.297
Maunder	14.5° S	266°	55	E	basin	GNTA1, GNTA2, AG	lub1685h.203
Maurolycus	42° S	13.5°	137	unknown	highland	A	lub0889e.295
Mendell	51° S	250°	160	unknown	highland	A, GNTA2	lub1564e.076
Miller	39° S	1°	68	unknown	basin	A, GNTA1	lub0707f.168
Millikan	47° N	121°	100	N	highland	A, GNTA1	lub3879n.256 no 1.0 μm image
Morse	22° N	185°	62	E	highland	A, GNTA1	lub4368l.100
Nansen	81° N	95°	116	N	highland	A	lub5178r.266
Neper	09° N	85°	139	N	basin	A, GNTA1, GNTA2	lub2475j.269
Newcomb	30° N	44°	40	E	highland	GNTA1, GNTA2	lub4712l.152
O'Day	31° S	157°	61	C	basin	A, GNTA1, GNTA2	lub2328f.110
Ohm	18° N	246°	64	C	highland	GNTA1, GNTA2, AG	lub2701k.210 lub2732k.210 lub2996l.257
Olcott	20.5° N	118°	67	E	highland	A, GNTA1, GNTA2	no 1.0 μm image
Orlov	26° S	185°	61	unknown	highland	A, GNTA1, GNTA2, AGN	lub2476g.100 lub2507g.100
Paracelsus	23° S	163°	71	unknown	highland	A, GNTA1	lub2538g.108
Philolaus	72.5° N	327.5°	71	C	highland	A, GNTA1	lub4985q.180
Piccolomini	29.5° S	32°	88	UI	basin	A, GNTA1	lub2431g.156
Pitatus	30° S	346.5°	101	N	basin	A, GNTA1	lub2063f.041 lub2094g.041
Pitiscus	51° S	31°	90	unknown	highland	A, GNTA1, GNTA2	lub1501d.156
Plana	42° N	28.5°	44	unknown	basin	A, GNTA1	lub3983n.290
Plinius	15.5° N	23.5°	43	E	basin	A	lub4085k.159
Plutarch	24.5° N	79°	68	E	highland	A, GNTA1	lub4473l.139
Posidonius	32° N	30°	95	UI	basin	A	lub3803m.289
Pythagoras	64° N	297°	130	E	highland	A, GNTA1	lub5027p.059
Robertson	21.5° N	255°	88	C	highland	GNTA1, GNTA2	lub3109l.207 lub3140l.207
Rydberg	47° S	264°	50	E	highland	A	lub1380e.071
Scaliger	27° S	109°	78	UI	highland	A, GNTA1, GNTA2, AG	lub2539g.128
Schjellerup	70° N	157°	68	UI	highland	A, GNTA1	lub5086p.243
Schorr	19.5° S	90°	48	UI	highland	A, GNTA1	lub2691h.135
Scoresby	77.5° N	14°	56	E	highland	GNTA1	lub5542q.295
Sharonov	12° N	173.5°	65	C	highland	A, GNTA1, GNTA2	lub2699k.237
Slipher	50° N	160°	87	UI	basin	A, GNTA1	lub1356h.265
Stevinus	33° S	54.5°	75	C	highland	GNTA2, AG, AGN, AN	lub2264f.148
Stiborius	35° S	32°	45	unknown	highland	A, GNTA1	lub2214f.156
Theophilus	11.5° S	26°	100	E	basin	A, GNTA1, GNTA2, AT	lub3237h.158
Tsiolkovsky	20° S	129°	185	UI	highland	A, GNTA1, GNTA2, AT	lub1420g.253 lub1451h.253
Tycho	43° S	349°	85	C	highland	GNTA2, AG, AGN, G	lub1781e.040
unknown in Korolev	09° S	203°	57	N	basin	A	lub1605i.226
unknown W. of Millikan	46° N	118°	53	unknown	highland	GNTA1	lub4081n.257 no 1.0 μm image
Vavilov	01.5° S	221°	99	C	highland	A, GNTA1, GNTA2, AGN	lub3380i.087
Vitello	30.5° S	323.5°	42	LI	basin	GNTA1, GNTA2	lub0955q.182
Vlaq	53.5° S	39°	98	unknown	highland	A	lub0450d.286
Von Neumann	40.5° N	153°	95	UI	highland	GNTA1	lub4902n.112
White	46° S	190°	45	unknown	highland	GNTA2, AG, AN, GN	lub1770e.094
Wiener	41° N	146°	131	N	highland	A, GNTA1	lub4956n.114
Zucchius	61° S	310°	64	C	basin	GNTA1, GNTA2, AG, G	lub1067c.054

Age: Approximate crater ages are presented where available. Abbreviations: PN = Pre-Nectarian, N = Nectarian, LI = Lower Imbrian, UI = Upper Imbrian, E = Eratosthenian, and C = Copernican.

Setting: As discussed in the text, craters are subdivided based on whether they occur in the highlands or within or near major impact basins.

Peak lithologies: Rock-type abbreviations: A = anorthosite, GNTA1 = gabbroic-noritic-troctolitic anorthosite with 85–90% plagioclase, GNTA2 = gabbroic-noritic-troctolitic anorthosite with 80–85% plagioclase, AN = anorthositic norite, AGN = anorthositic gabbro-norite, AG = anorthositic gabbro, AT = anorthositic troctolite, N = norite, GN = gabbro-norite, G = gabbro, and T = troctolite.

Clementine filename: The Clementine filename for the 750-nm image(s) used for each crater.

## ローバーに搭載が考えられる観測機器

撮像	広角（ローバーnavigationと兼用） 望遠+マクロ（顕微） ステレオ 分光撮像（紫外+可視+近赤） コンパクトな機構が要求される	AOTF, 液晶フィルタ
APXS	元素分析では不可欠 $\alpha$ 線源によるactiveなものは軽量	
$\gamma$ 線分光	K, U, Th（KREEP玄武岩探査）、地下の水の探査 detectorの重量大	
質量分析	揮発性元素（太陽風成分）の加熱分析 H, He, C, N, Oなど 微小領域の元素（同位体）分析 微量元素も可能 Ar測定による年代決定？ ローバー本体に搭載すると重量大	

帯磁率計  
磁力計など

還元鉄の量の見積もり  
非常にlocalな残留磁化の異常

宇宙風化作用の程度

宇宙風化作用：（太陽風の打ち込み後に）微小隕石の衝突の加熱が起きて、  
表面のソイルにサブミクロンサイズの還元鉄生成  
反射スペクトルの変化  
相対的な年代の見積もりが可能

熱伝導率、誘電率

レゴリスの物性

電波探査

内部構造、氷

地震探査

内部構造

（手段として）

岩石切断・研磨  
地下掘削  
サンプリング機器

## 月表面の状況

レゴリス(Regolith) 衝突で粉碎された天体の表面層  
あるいは衝突放出物が積もった層

とくに表面は<mmスケールの微粒子層      ソイル      → ローバ駆動への制約

月だけではなく、小惑星表面にも存在

<1km小惑星では、脱出速度が小さいため、レゴリス層は無いという説もある

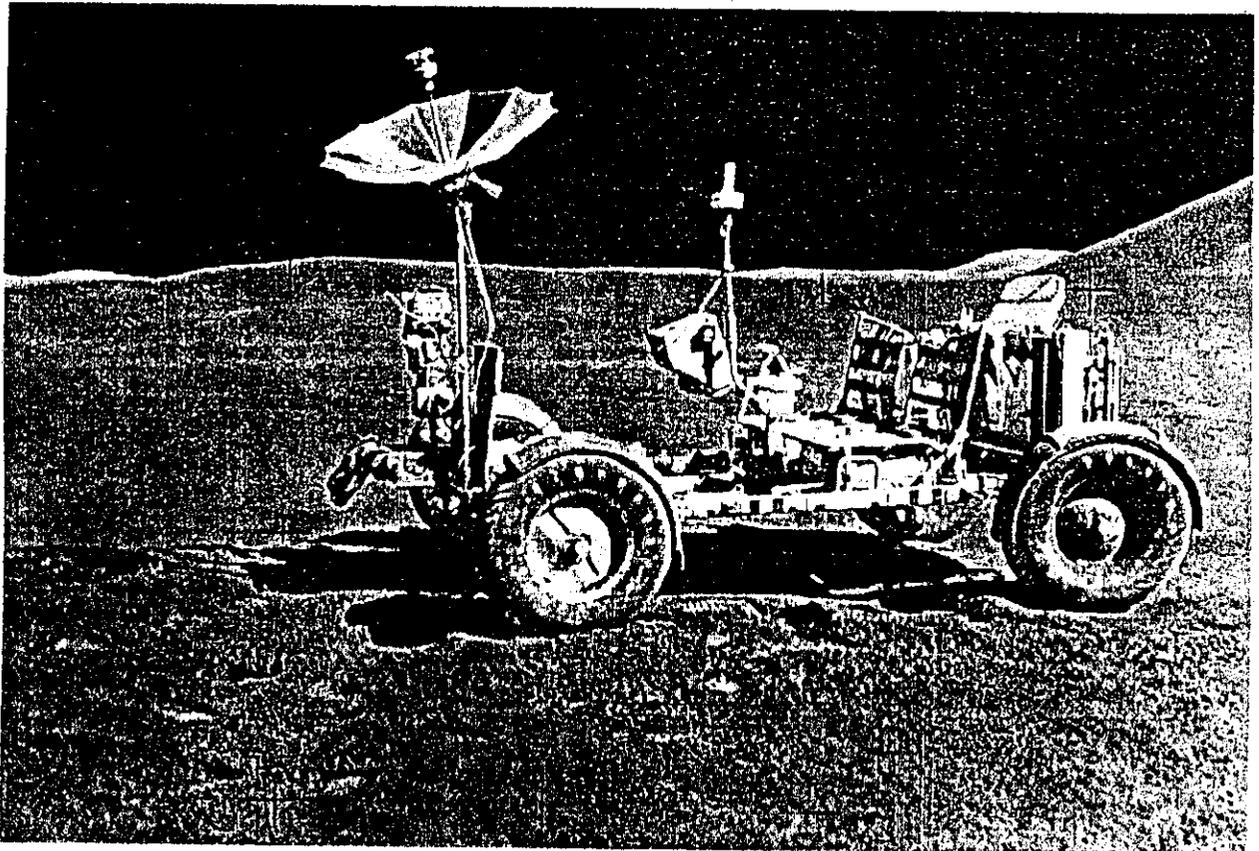
大気のない天体（月・小惑星）の表面は、宇宙風化作用を受けている  
太陽風の打ち込み・微小隕石の衝突による加熱のため、表面のソイルに  
サブミクロンサイズの還元鉄が生成され、反射スペクトルが変化する。  
表層を除去した観察を行いたい

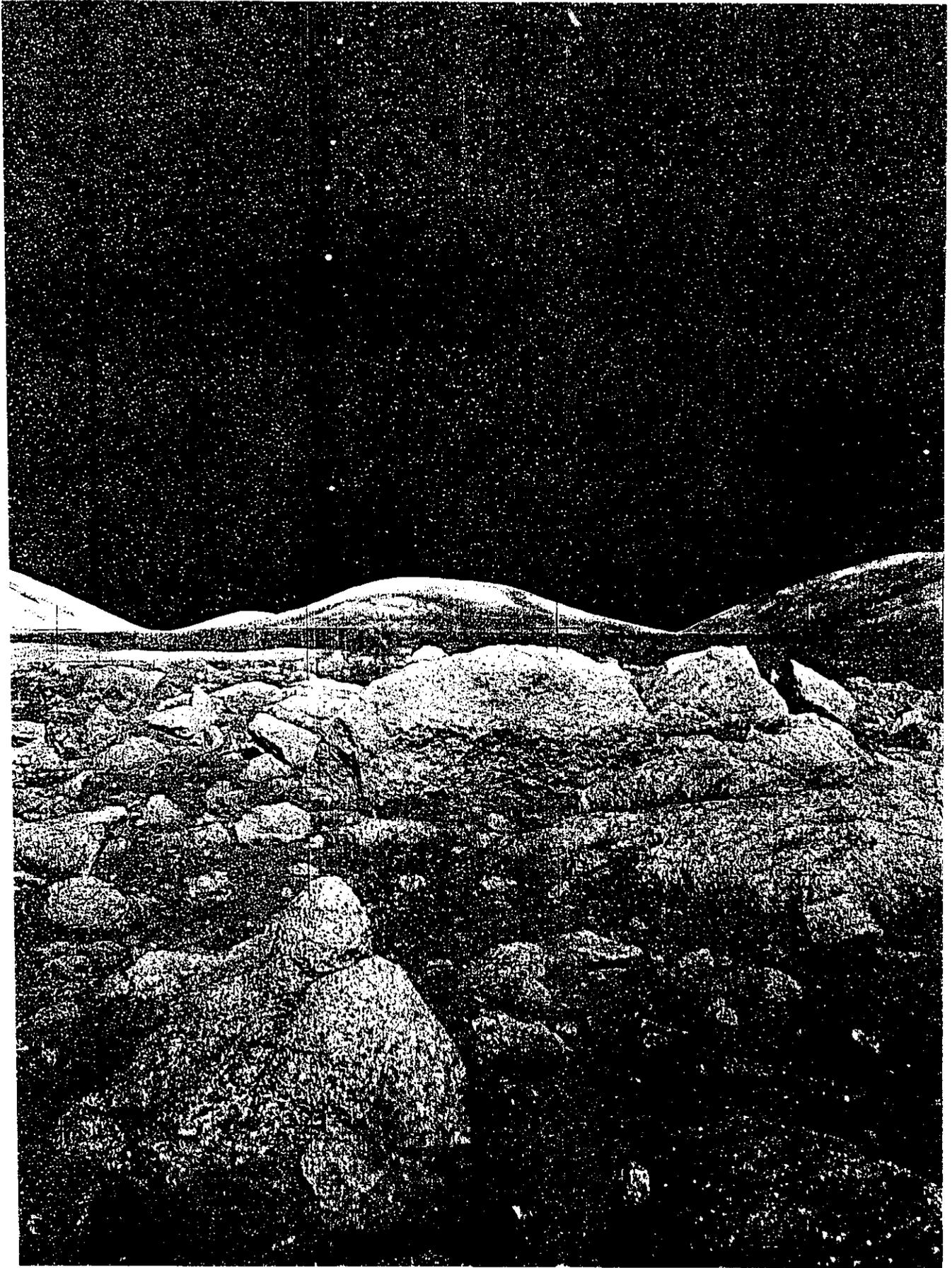
ソイルは混合物なので、平均的な組成になる

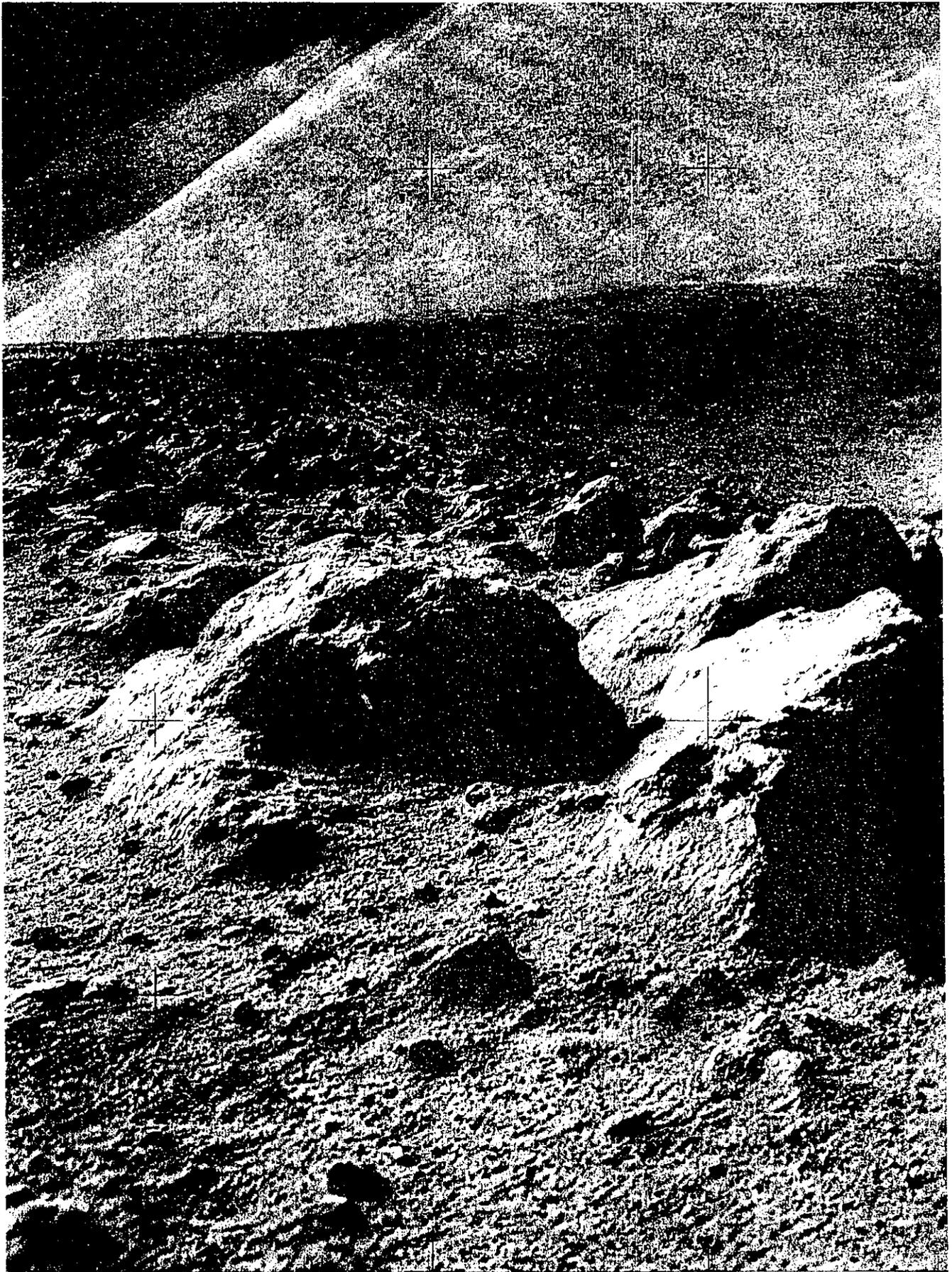
レゴリスソイル中に岩片は存在      岩片を選択して、観察・測定

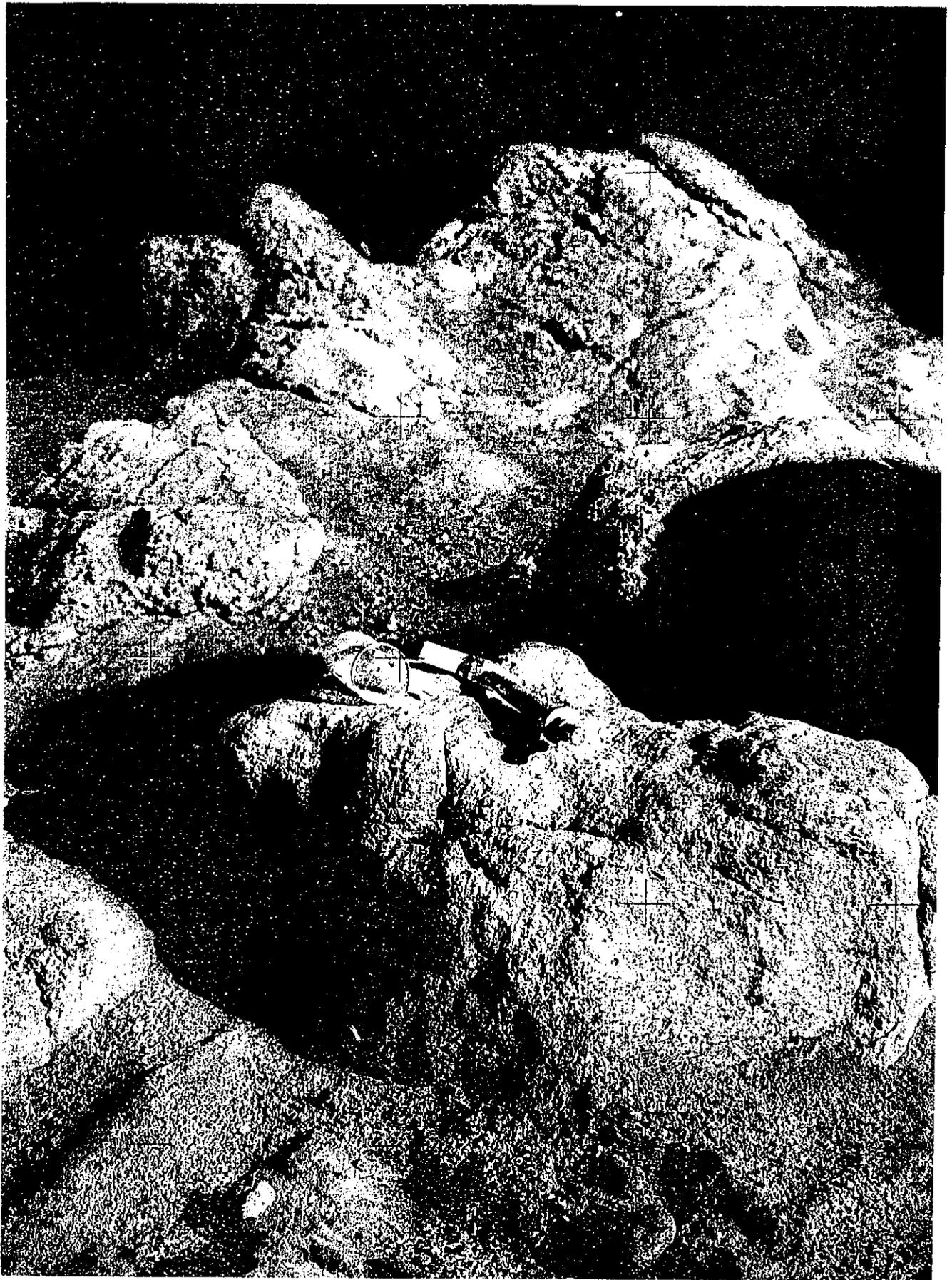
月ではPathfinder着陸点と比較すると岩石はずっと少ない

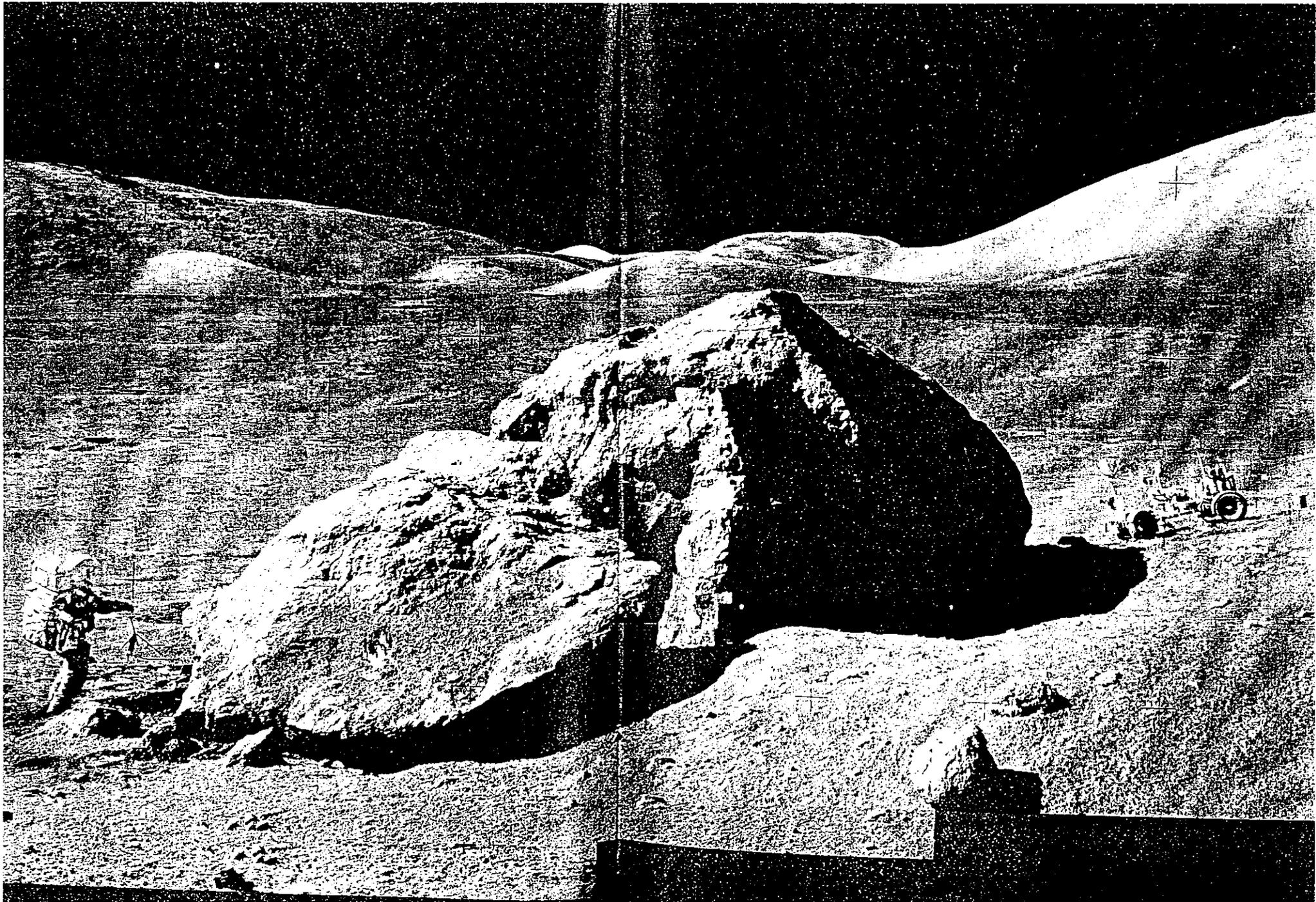
ローバによる移動は比較的楽？



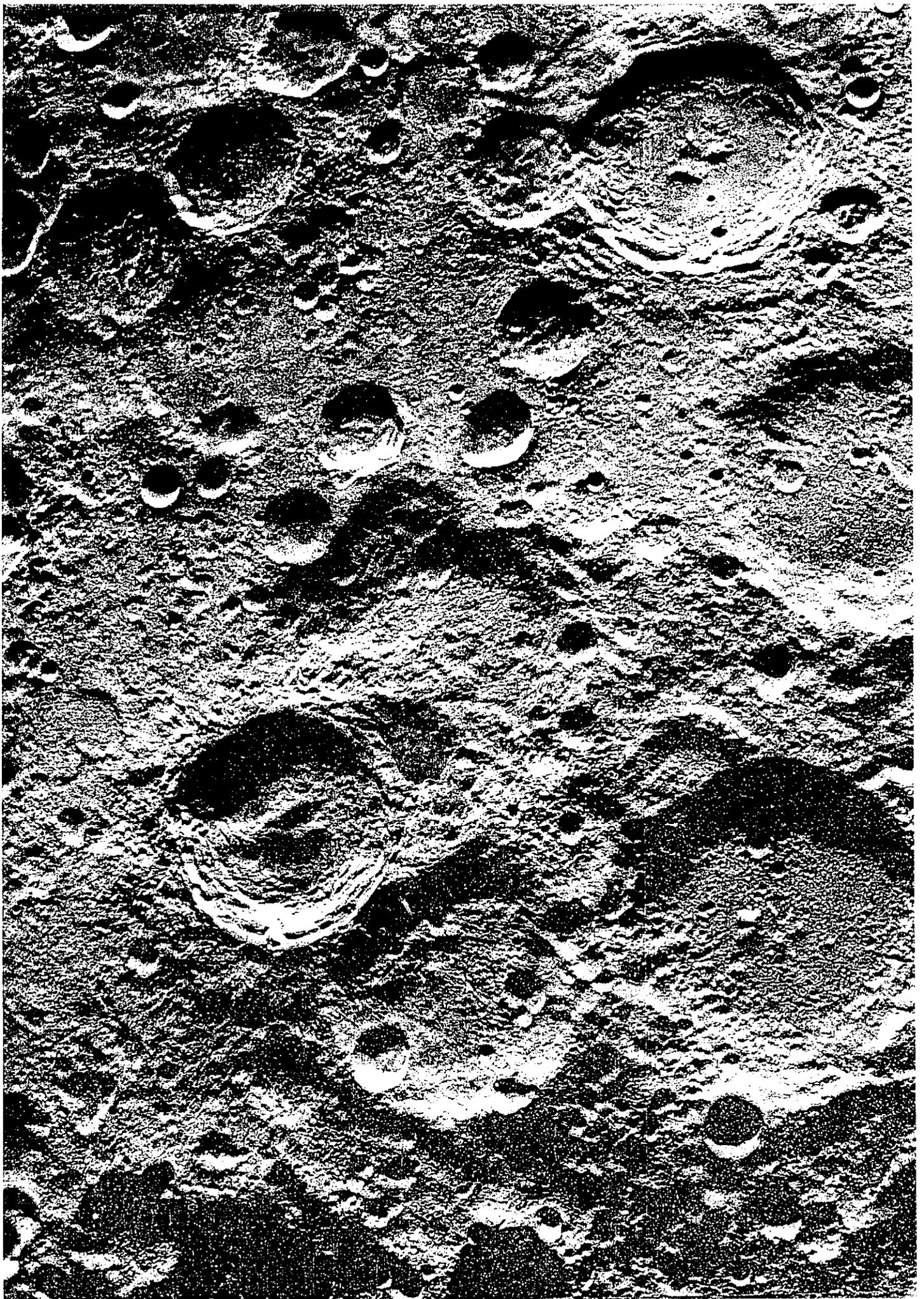










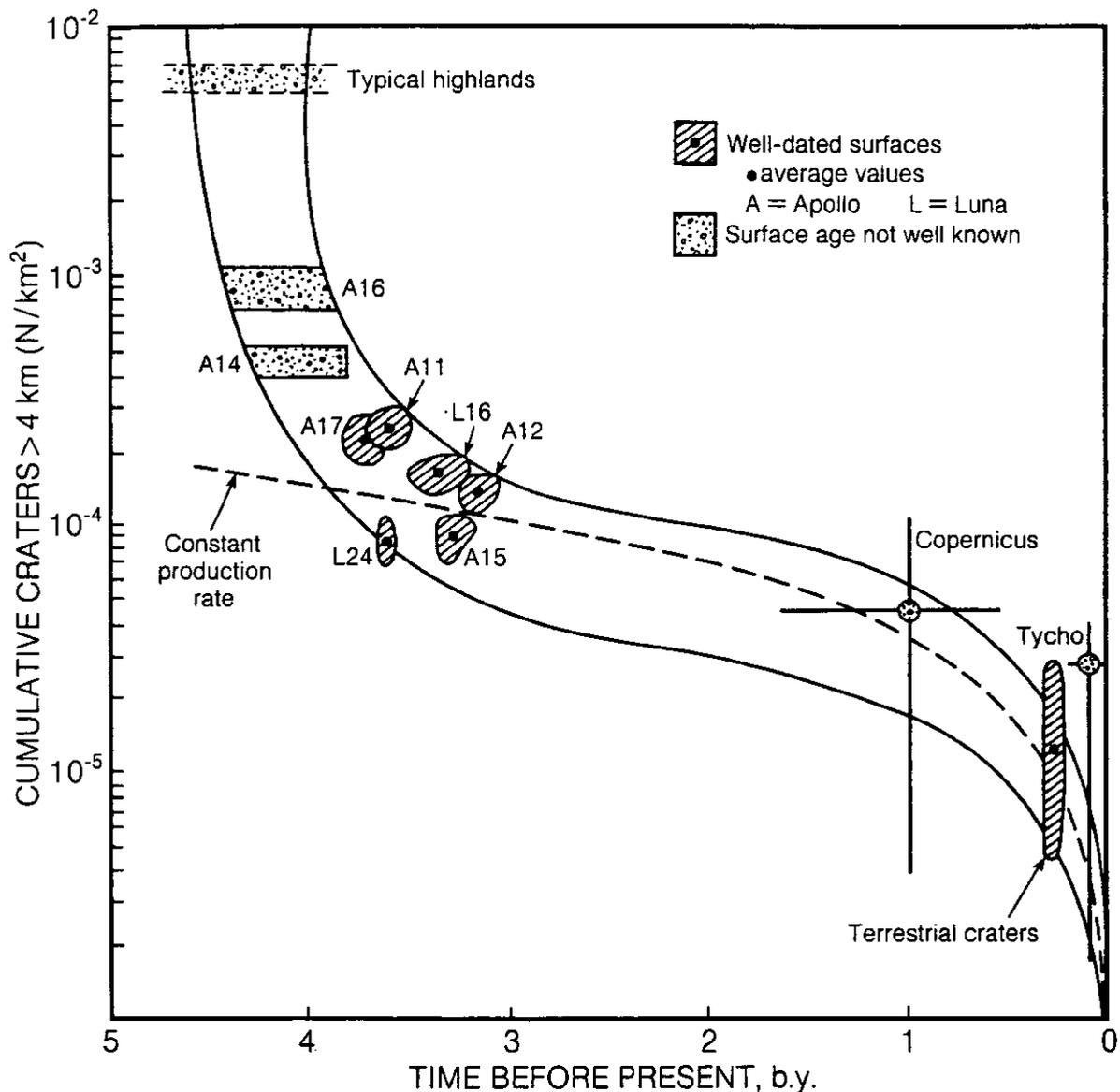


---

## 「月面その場における揮発性元素分析の提案」

○大竹真紀子、杉原孝充、比嘉道也(NASDA)、石原盛男、豊田岐聡(阪大)

---



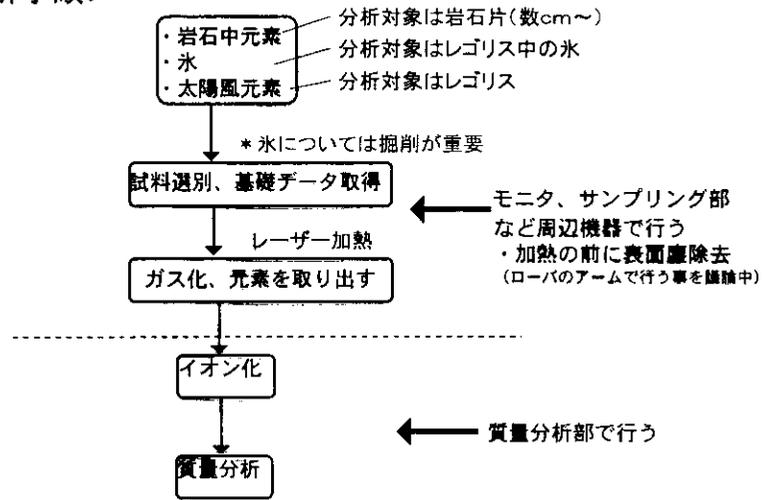
**Fig. 4.15.** Lunar crater production rates through geologic time, as reconstructed from the measurement of crater densities on the lunar surface and from absolute age dating of returned lunar rocks. As indicated in the text, firm correlations may be reconstructed only for (1) the well-characterized basalt surfaces (3.8–3.2 b.y. old) and (2) the contemporary meteorite flux, based on current astronomical observations ( $t=0$ ). The terrestrial cratering rate applies to only the last 200 m.y., and the ages for lunar craters Tycho and Copernicus are inferred from indirect evidence. Cratering activity was clearly very high prior to 3.8 b.y., as indicated by the lunar highland rocks, but details of this bombardment history cannot yet be reconstructed. The absolute production rates refer only to craters  $>4$  km in diameter (and are expressed as number formed per  $\text{km}^2$ ). Note that the inferred crater production rate differs markedly from the curve representing a constant crater production rate around 4 b.y. ago (based on *BVSP*, 1981).

*James*, 1981; *Wilhelms*, 1985). If the sample collection were dominated by impact melts from a few basins, the ages measured would represent chiefly the times of basin formation, regardless of other crater-forming events. In the Apollo sample collections, the oldest basin represented would likely be Nectaris (from Apollo 16), variously interpreted to have formed at 3.8 b.y. (*James*, 1981; *Spudis*, 1984) to  $\sim 3.9$  b.y. ago (e.g., *Wetherill*, 1981). A large number

of basins are younger than Nectaris (*Wilhelms*, 1984) including Serenitatis and Imbrium, impact melts of which are possibly present in the Apollo 17 and Apollo 15/14 sample collections, respectively.

All interpretations involving the presence of numerous samples of basin-related impact melts in the collection and the associated formation ages of 3.8–4.0 b.y. require that several gigantic, basin-forming impactors collided with the Moon up to

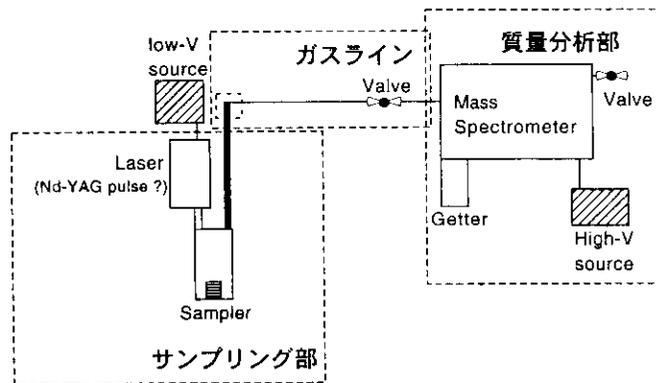
## <質量分析手順>



\* 選別において分光カメラやγ線などの観測機器のデータが得られればより効率のよい分析を行うことができる。

次期月探査シンポジウム 98. 3. 23-24

## 機器構成概念図



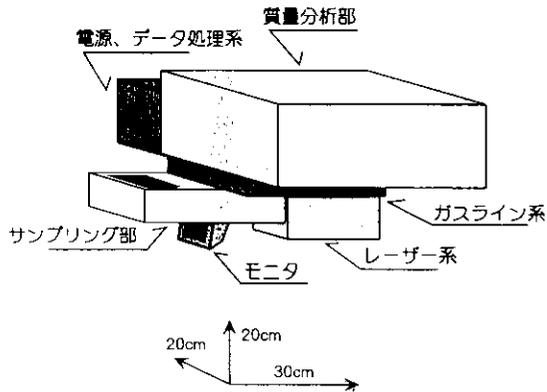
ゲッター位置、バルブ配置などは今後の検討が必要

観測機器全体構成&リソース

ローバーに搭載することを前提に以下のリソースを見積もっている。

- 重量 8kg以内
- ☆質量分析部 3.0kg
  - ☆サンプリング部 + ガスライン系 1.0kg
  - ☆レーザー系 1.0kg
  - ☆モニタ (モノクロCCD) 0.5kg
  - ☆電源、処理系 3.0kg

電力 20W  
大きさ 30×20×20cm

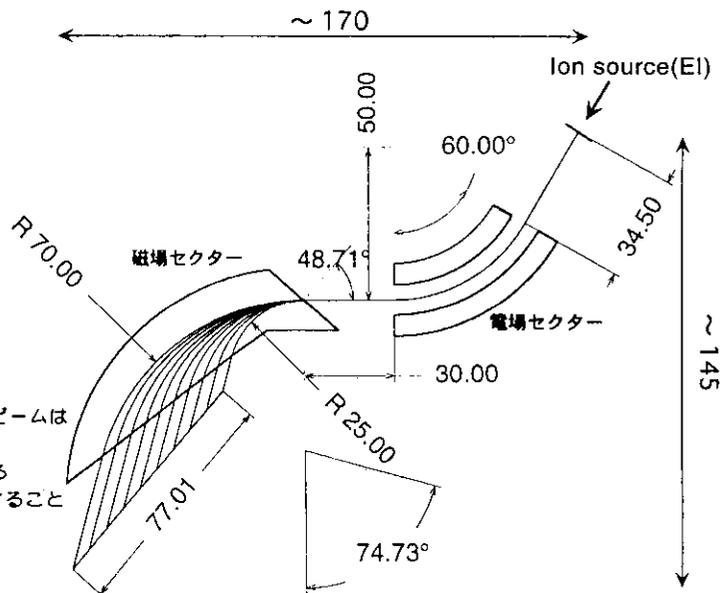


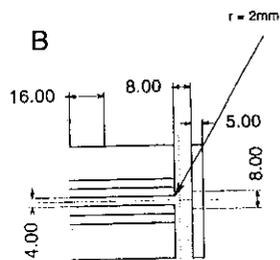
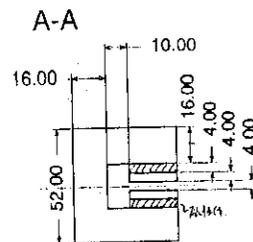
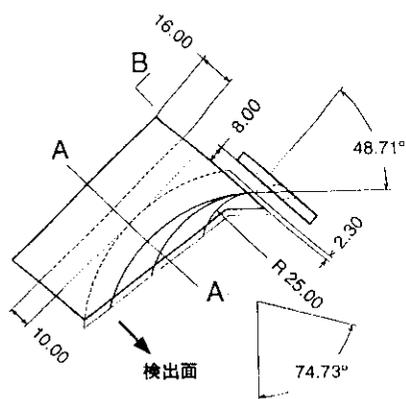
Mattauch-Herzog配置二重収束型  
セクター質量分析計

加速電圧  
m/z 1 - 7: 10 kV  
m/z 7 - 49: 1,428 kV  
質量分解能  
m/dm ≈ 400  
重量  
~3 kg

対象質量範囲は1~50 amu  
(H~Arに対応)

最終的に質量分解されたイオンビームは同一平面上で焦点を結ぶ。  
→ 質量スペクトルが投影される  
これをline or 2Dセンサで検出することにより同位体を同時検出する。  
(MCPを利用して高感度、広いDレンジを達成する)

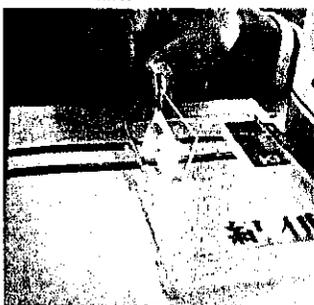




磁場セクター 設計図  
 m/z 1 - 7: 10 kV  
 m/z 7 - 49: 1.428 kV  
 5760 gauss

磁石は永久磁石を用いる。そのため、質量走査は加速電圧を変化させる。  
 磁性体以外はFeで制作。張り付けは接着剤を用いず、機械的に行う予定。

Olivineに照射



Plagioclaseに照射



サンプリングに用いるレーザーはリソース面から見るとNd-YAGパルスレーザーが最も有力。しかし、段階加熱及びガスのサンプリング効率を考慮すると連続発振の方が良いかも知れない。(写真はNd-YAGパルスレーザーによるサンプリングの様子)

パルスレーザーを用いた場合にはレーザー照射時の発光を用いた主要元素の定量同時分析も可能となる (Laser induced emission spectrometry)

## II. 探査候補地

I.のような目標を達成するためには、以下の条件を備えている必要がある。

- ・興味深いイベントが起こっている地域(最新の溶岩流、KREEP)
- ・始源的な物質から分化した物質まで、多用な岩石が存在していること

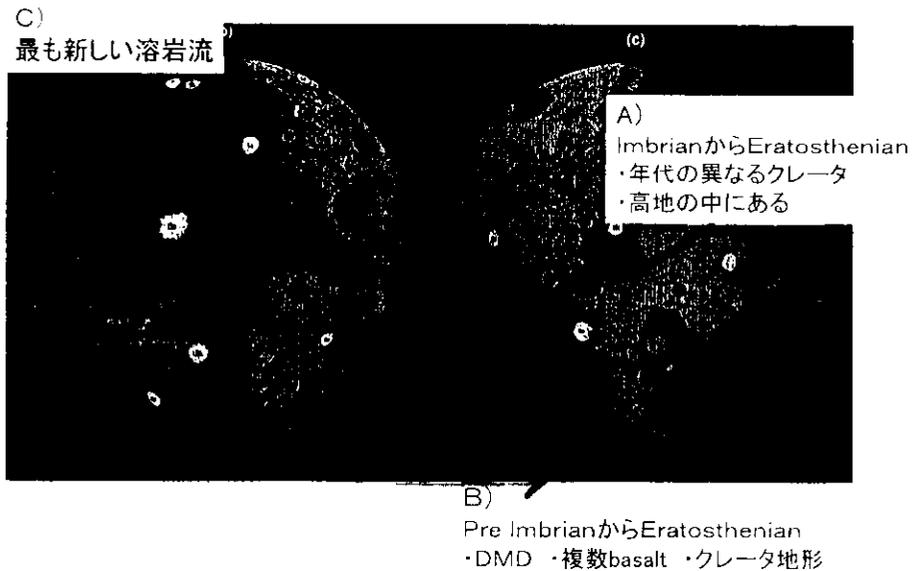
⇒このような条件から、下の様な地域が探査候補地として興味深い。  
また、上のような条件を満たす他の地域がSELENEのデータなど今後発見される可能性もある。

A) エイトケンクレータ(S20,W60:直径約60km)

B) シューティンガークレータの中央リング内(S75,W220:リング直径約120km)

C) ヒリテンベルと周辺(S60,70W)

次期月探査シンポジウム 98. 3. 23-24



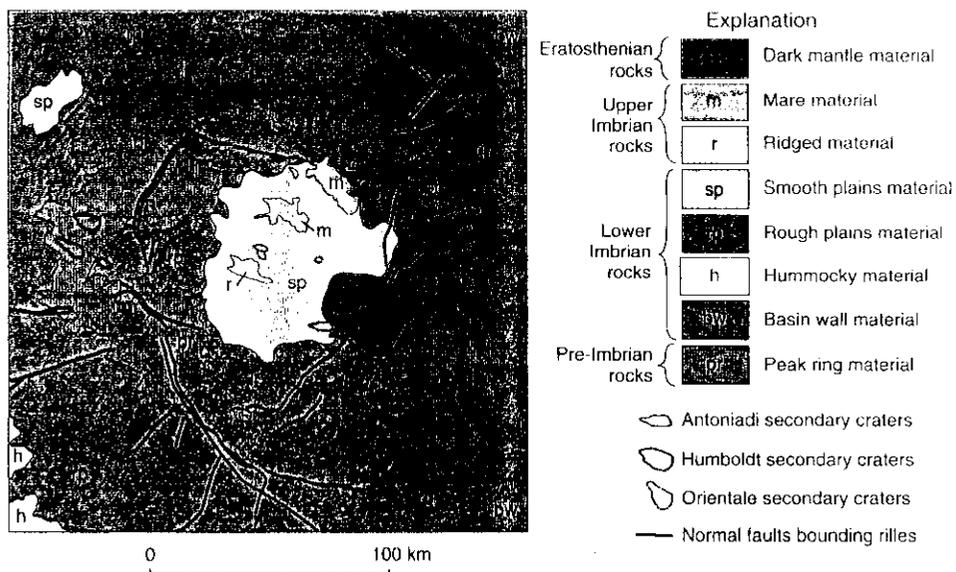


Fig. 3. Geologic map of the inner part of the Schrödinger Basin (area shown is the same as that in Fig. 2).

SCIENCE • VOL. 266 • 16 DECEMBER 1994

## V. 探査期間・探査距離

### <探査期間>

- ・探査期間と科学的成果とはほぼ比例の関係にある。  
最低10ポイント程度の分析は行う必要があると考える。
- ・1回の分析所要時間は数分間(試料選別、下準備や掘削の時間は除く)

以上の点から、探査の期間はローバの走行距離が確保できれば昼間のみでも成果を上げることが可能である。

### <探査距離>

- ・50km程度あれば複数の地質ユニット(中央丘や溶岩流など)にわたって観測が可能であり、科学的にさらに大きな成果があげられるものと期待できる。

## 今後の課題

- サンプルング部（レーザーの決定）、ガスライン（ゲッターの配置、バルブ数及び機構など）の検討
- 年代測定法の確立
- （○ レーザー照射時に発生する発光スペクトルを用いた岩石の主要元素化学組成分析の検討）

# AOTFを用いた 広角・マクロ分光探査

東大地質 D2 秋山演亮

やりたいこと

プリズマアークでの照射が怖い場合は

- ・ 月の石のオンサイト観察  
→ 月における地に足着いた地質調査！

## これまでの月探査計画の流れ (国内のみ)

- Lunar A計画
  - ペネトレータを用いて月のコアサイズの決定
- SELENE計画
  - 軌道上からのリモートセンシング
  - 鉱物分布・地質区分(LISM): 10m-スケール
  - 元素分布(XRS, GRS等): 数km-スケール
  - レーダサウンダー、重力計等による内部探査

## 次期月探査計画(本提案)

- ランダー・ローバーによるmm~cmスケールの物質探査とcm~m-スケールの垂直地質構造探査
  - SELENE計画で得られたリモセンデータを解釈する上で必要不可欠
- そのために二次元分光カメラミッションを提案する
  - LISMの基本技術を転用

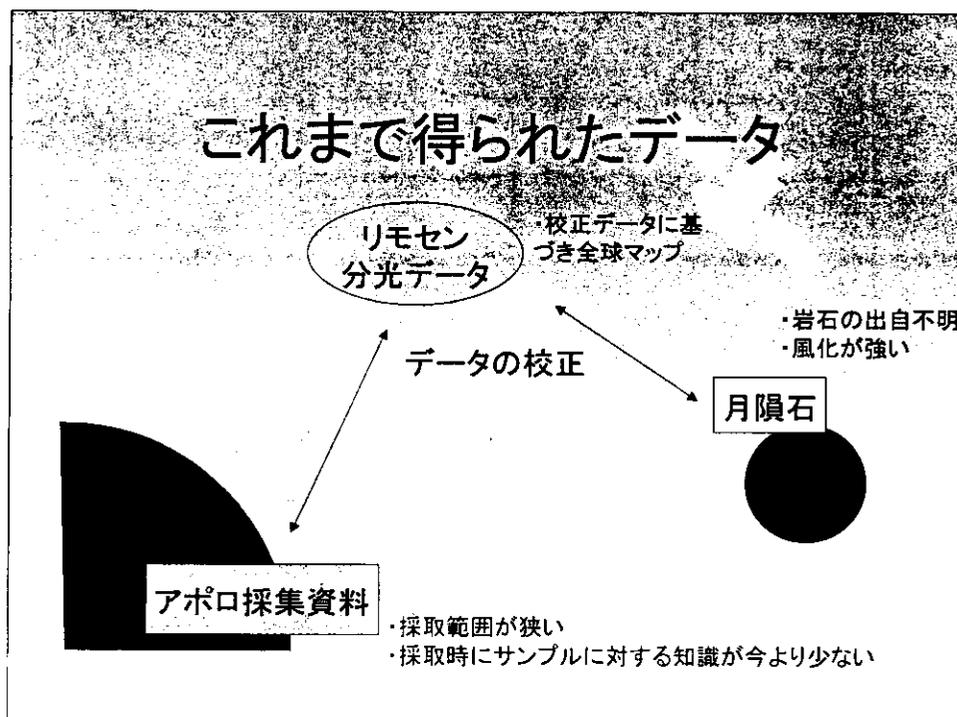
## 観測対象

- 月面地質構造の調査
- 岩石組織の調査
  - 岩石の構造・組成に関する調査
  - ポリミクト角礫岩
- 未知物質の調査
  - ダークマントルマテリアル等
- リモセンデータの校正
- 宇宙風化作用の調査

## 分光調査

- 分光を利用して鉱物を類別、岩石の構造・組成を明らかにする
- レゴリスのコンポーネントの変遷(水平・垂直方向)、垂直方向への分光変化の調査から、周辺地域の元々の岩石分布の調査、リモセンデータの校正を行う
- リモセンデータで見られる境界に関して地上での状態を調査。また、リモセンで得られる平均化された分光データと地上での分光データを比較。リモセンデータに新解釈を与える。
  - 全球マップを書き換える可能性有り
- 宇宙風化作用の程度を調査

## これまで得られたデータ



## 岩石組織の調査

- ・ 組織に関する調査を行い、岩石の起源・進化を明らかにする
- ・ 特にダークマントルマテリアルに関して、火山性のものかどうかの判定が期待できる
- ・ 分光を利用して、化学組成・岩石組織から岩石の一次分類を行う

## ポリミクト角礫岩の調査 (マクロカメラ)

- クレータ内におけるポリミクト角礫岩の分布調査
- ポリミクト角礫岩の組織を調査  
→クレータ生成前の層序構造、ポリミクト角礫岩の出来るメカニズムがわかる

ただしポリミクト角礫岩の調査には  
サンプルの切断が必要

## 月面地質の調査(広角カメラ)

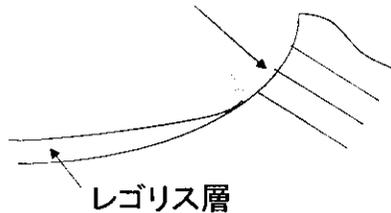
- 溶岩流の広がり、厚さに関する調査  
→真空中に吹き出した溶岩はどのような挙動を示すのか？表面構造によってどのように流れが変わるのか？
- 露頭の分布に関する調査  
→どのような露頭があるのか？

### 月の地質学のはじまり

- フィールドでの火山の研究者、クレータの研究者を組織中

## フローユニット調査に関して

フローユニットの  
堆積が露出



観測にベストな地形

- ローバの走行可能距離は60km程度？
- 丁度その範囲にフローユニットが複数存在する必要有り
- 露頭を調査できることが望ましい(SELENEで発見できるか？)

## その他の調査

- イジェクターの分布などの調査  
→クレータ形成過程に関する検討を行う
- 未知サンプル(これまで分光などによって存在が指摘されながら採集されていない試料)の入手

## 技術と可能な調査の関係

望遠 カメラ	広角 カメラ	マクロ カメラ	顕微 カメラ	分光	切断	研磨	可能な調査
●	●			●			詳細分光調査 ステレオカメラ化して地形図作成
		●		●			岩石表面の詳細分光調査
		●			●		岩石組織の調査 鉱物組成に関する程度わかる
		●		●	●		岩石組織の調査 鉱物組織の調査
			●	●		●	岩石組織・鉱物組織の調査 鉱物内結晶組織の調査

## カメラの種類(\*は搭載を予定)

種類	対象までの 距離	解像度	観測対象
望遠	m~km	cm/pixel	メルトの厚さ・溶岩流の広がり イジェクターブロック
* 広角	m~100m	m~cm/pixel	メルトの厚さ・溶岩流の広がり イジェクターブロック
* マクロ	cm	cm~mm/pixel	ポリミクト角礫岩・ アッシュ、岩石組織
顕微	mm~cm	$\mu$ /pixel	岩石組織、結晶組織

## 広角・望遠カメラの役割

### 広角カメラ

- 化学組成に関して地質ユニットの詳細調査
- ステレオ撮像による地形の詳細調査
- 分光は数バンド程度を予定

### 望遠カメラ

化学組成に関して地質ユニットの詳細調査  
ランダー搭載時に威力を発揮  
分光は数バンド程度を予定

## マクロカメラの役割



1cm

<観測スケール参考資料>  
一の目潟 かんらん岩ノジュール



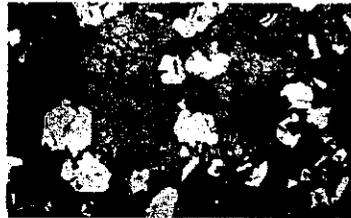
1cm

海砂中のolivine  
東京大学教養学部・自然科学博物館所蔵標本

- 結晶サイズ、分布に関する調査
- サンプル表面研磨が望ましい
- レゴリスの分光観測も可能？
- 分光はAOTFを用いたマルチバンドを予定

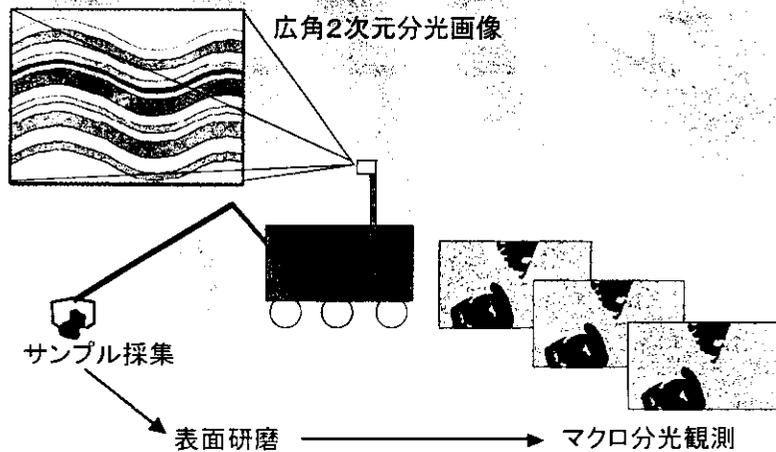
## 顕微カメラの役割

- 岩石組織、結晶組織の調査
- サンプルは表面研磨の必要有り
- 分光はAOTFを用いたマルチバンドを予定

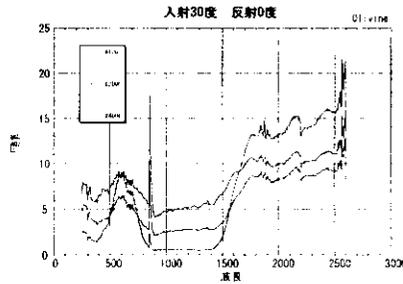
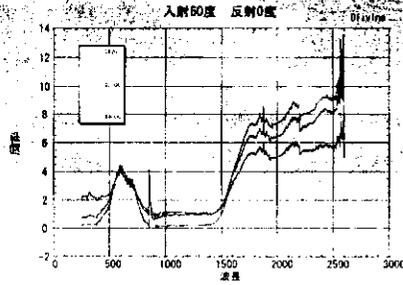
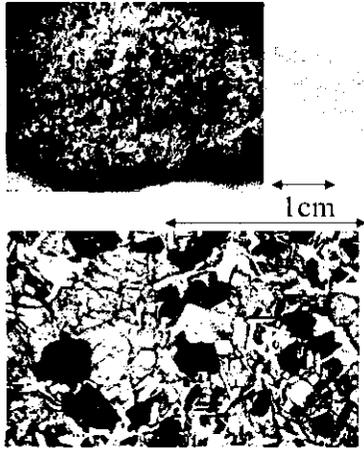


月の石顕微鏡写真  
アポロ11号標本10003,152

## 分光観測模式図

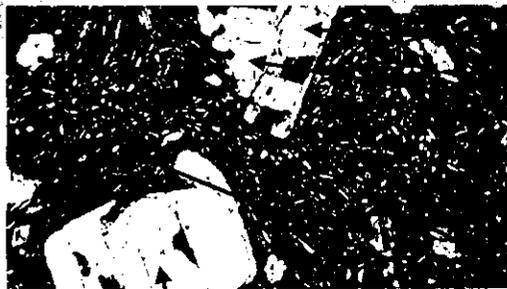


# 表面研磨の必要性



# 溶岩の偏光写真

磐ノ沢溶岩



斜方輝石

普通輝石

石基

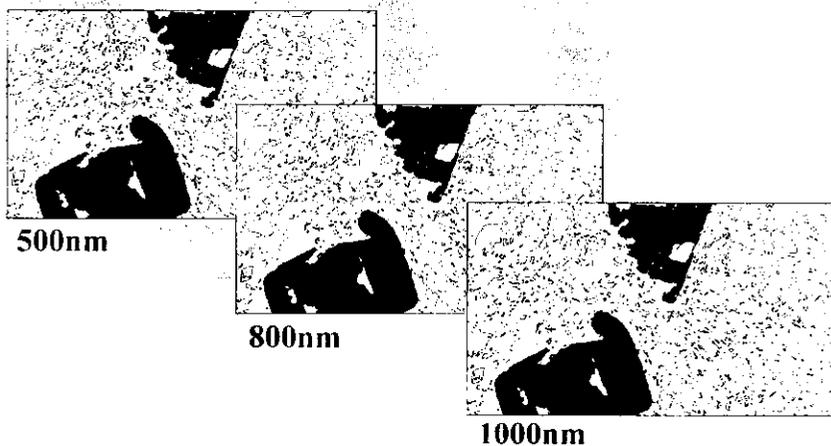
斜長石

火山ガラス

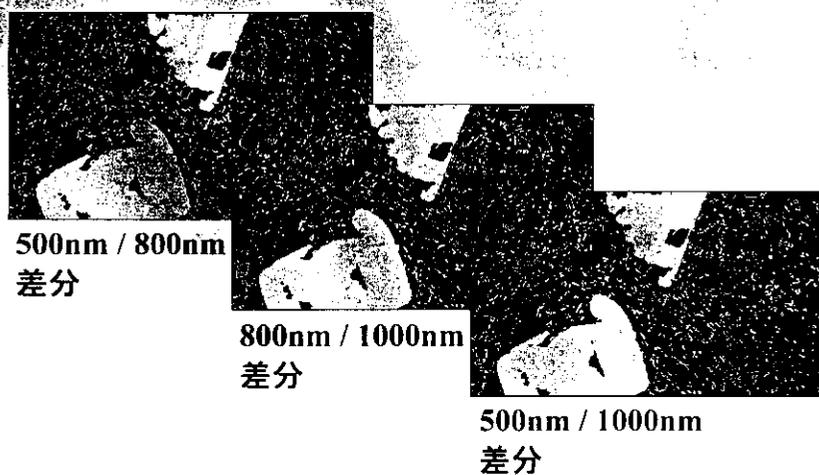
輝石結晶

かんらん石

## 溶岩の(模擬)分光写真mono



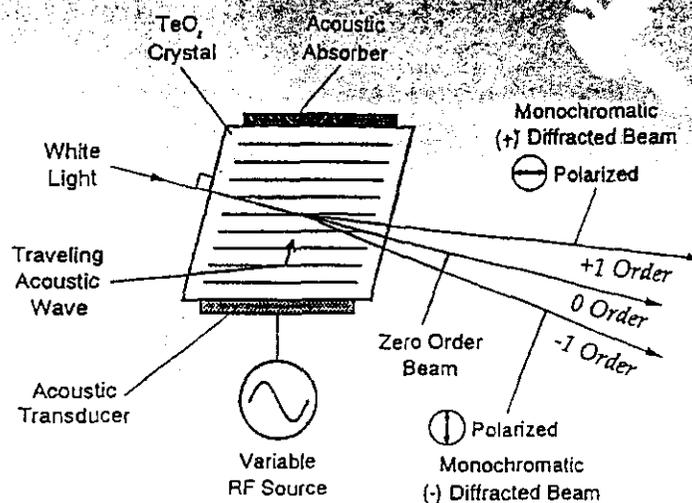
## 溶岩の(模擬)分光写真compare



## AOTE の長所 (Acousto-Optic Tunable Filter)

- 観測波長をいつでも変えることが出来る
- 可動部分がない
- 波長分解能が高い(数nm)
- 装置が小さい(フィルターは1cm角程度)
- イメージングが可能
- ロゼッタミッションで使われる予定
  - 小型・可動部分無し・イメージングが可能等  
が他の分光素子よりも特に優れている点

## AOTEの原理(1)

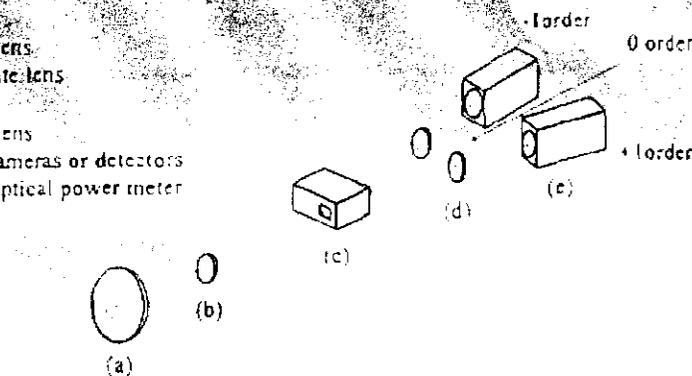


## AOTFの原理(2)

- 二酸化テルル or 石英の結晶に超音波を与えることにより、透過周波数が変化
- 出力は垂直成分・水平成分の分光された2つの偏光光、のこりの光の計3つに別れる(→同時に偏光観測が可能)
- 観測波長域  
二酸化テルル : 0.38-5.5  $\mu\text{m}$ 、石英: 0.2-1  $\mu\text{m}$   
→ 今回の観測では 0.4~1.5  $\mu\text{m}$  程度を予定  
技術的に可能ならば 2.5  $\mu\text{m}$  まで計測し SELENE 搭載の SP のデータとの比較を可能にすることを検討中

## AOTFを用いた分光カメラ例

- (a) object lens
- (b) collimate lens
- (c) AOTF
- (d) image lens
- (e) CCD cameras or detectors of an optical power meter



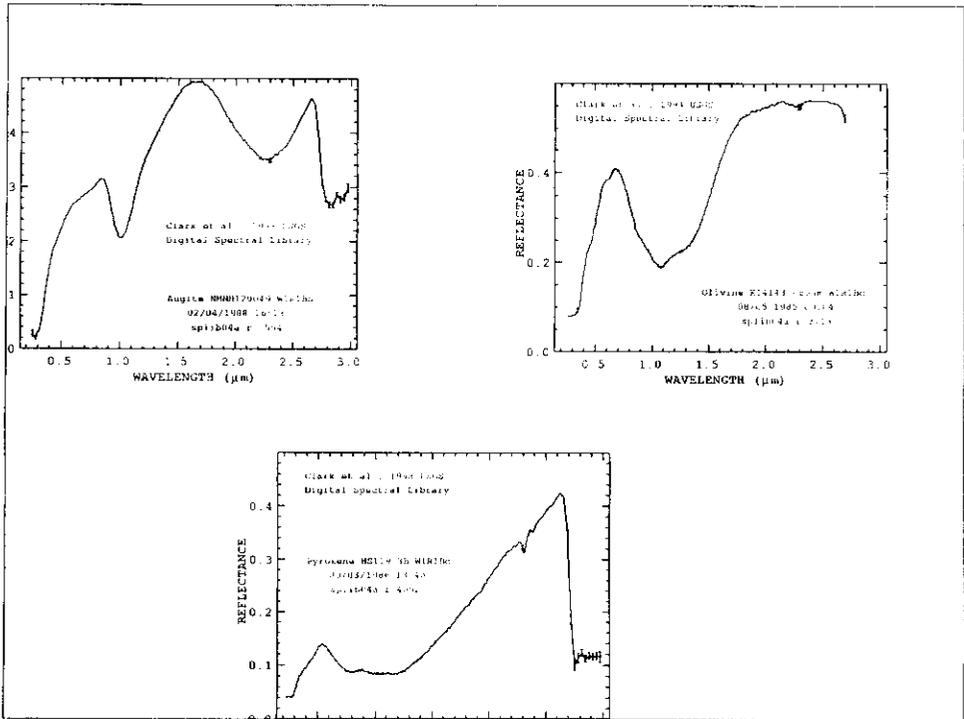
NALで作成された試作器概念図

## 探査候補地点

- 多様な岩石種が見える(分光のパリエーションが多い)ところ
- 未知(分光では存在が確認されているが今までサンプリングされていない)物質があるところ
- クレータの縁
  - 例)シュレディンガー
    - プレインブリアン、ローアーインブリアン、エラステニアン  
の溶岩流が分布
    - ダークマントルマテリアルが存在

## 今後の予定

- マクロ・顕微カメラの構造に関する検討
- マクロ・顕微カメラのフィジビリティ調査
  - 切断、研磨の可能性について
  - マクロ分光による岩石写真データベース作成
  - 地上の溶岩流を用いた実地調査
- AOTF素子の耐宇宙環境性能試験
- AOTFの運用法やデータ解析方の確立
  - 望遠鏡・AOTFを使った月面分光試験



## 月極域の氷探査

比嘉道也, 大竹真紀子, 杉原孝充,  
春山純一(NASDA)

地球型惑星の極域に  
氷(Water Ice)は普遍的に存在するか？

- 大気を持つ地球, 火星の極域には氷が存在する.
- 大気のない惑星水星にも, 極域のクレータ地形による永久陰に, 氷の存在が示唆されている.
- では, 月には氷があるのか？

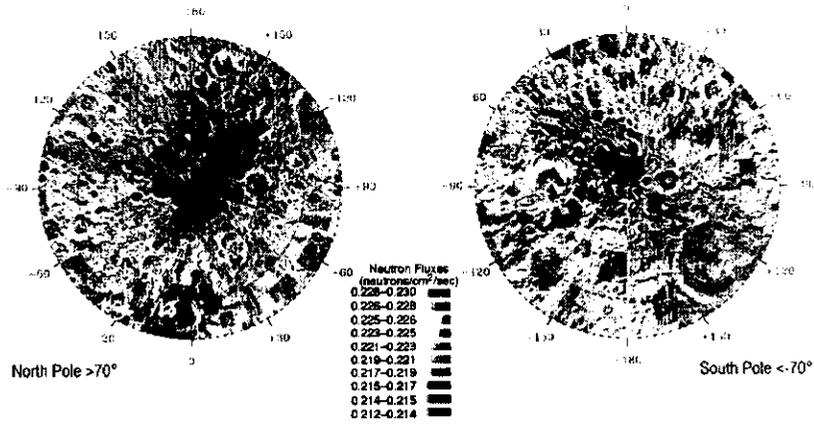
## これまでの観測結果

- 電波観測（氷の分布）
  - Clementine: 氷あり/なし？
  - Arecibo: 氷なし
- 中性子分光観測（水素原子の分布）
  - Lunar Prospector: 氷の水素原子なら, 氷あり
- LPの衝突実験(H<sub>2</sub>O, OHの分光観測)
  - 氷(スペクトルの吸収)なし

## 氷の起源と保持機構

- 起源
  - 彗星, 隕石の衝突
  - 二価鉄(表層鉱物)と水素(太陽風)の還元反応
  - 月内部からの脱ガス
- 保持機構
  - H<sub>2</sub>O分子のmigrationの結果, 永久陰(<100K)にトラップされる
  - 氷1m@T<100Kの蒸発時間~約10億年

# LP-NSの観測結果

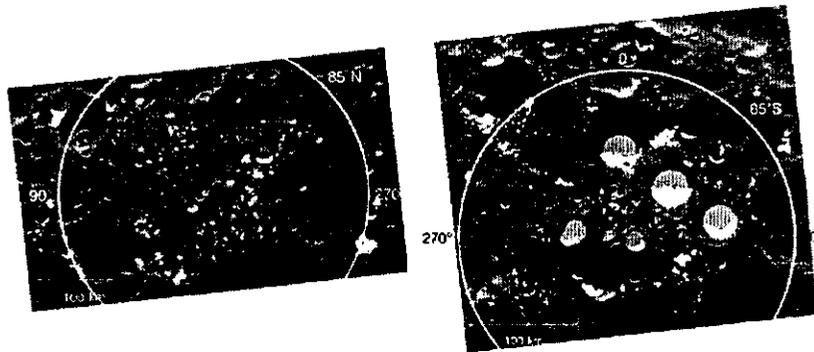


Feldman et al. 1998

# 極の永久陰

North Pole

South Pole



Margot et al. 1999

## Clementine画像



### 氷のその場観測の提案

- その場観測ではじめて、H<sub>2</sub>Oの同定, 垂直分布の測定が可能
- リモセンデータの分解能程度の範囲内で数カ所その場観測を行うことによって(グラントゥールス), リモセンデータの妥当性, 月全体の氷存在量を推定できる.

# 氷探査項目

## 1. 氷は存在するか？

→氷が存在した場合→

## 2. 氷の起源を知るための探査項目

・どんな氷か？

組成 (pure H<sub>2</sub>O ice, 有機物), 同位体比 (D/H,  $\delta^{18}\text{O}$ )

・氷の存在量は？

水平分布, 垂直分布

・氷の存在形態(霜状, 塊, 等)は？

# 観測機器(センサー部)

優先順位	分光計1	分光計2	質量分析器
◎氷の同定	○	○	○
○化学組成	×(△)	△	○
○同位体比	×	×(△)	○
重量	○	△	△

備考1) 分光計1と2の違いは観測波長領域, 1はOHの分子振動領域のみをねらう.

備考2) soil採取と加熱の機構は全ての機器で必要

## ローバーへの要求

- 探査地域\* : 極域(クレータ内, 永久陰)
- 物理環境対策: 極低温, 高真空, 闇
- 観測期間: 1地点以上の観測(<数日)
- 行動範囲\* : 半径約15km以上(ランダーの着陸精度による)
- Soil採取機能: ロボットアーム/ボーリング機能とカメラ
- \* LPの低高度データ(footprint=15-17km)から判断

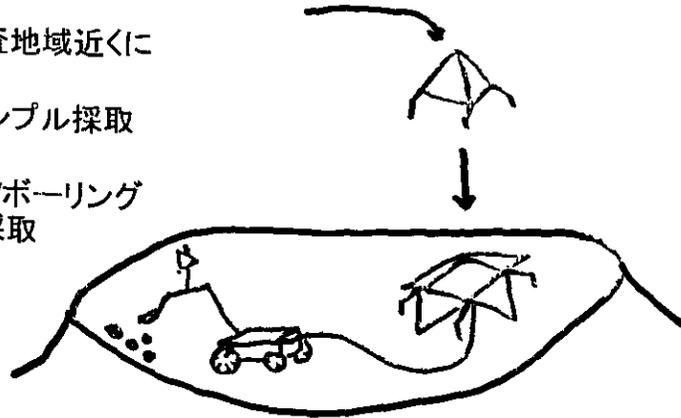
## 観測機器システム

### ○soil採集容器一段階加熱

- |
- | —soil質量変化測定→H<sub>2</sub>O含有量
- | —熱量測定
- |
- | —ガス導入ライン—○H<sub>2</sub>O測定器

# ミッションシナリオ

- 1.ランダーで探査地域近くに  
着陸
- 2.ローバーでサンプル採取  
地点へ移動
- 3.ロボットアーム/ボーリング  
によるsoilの採取
- 4.測定



月面ローバの開発は、ミッションとの整合性を取ることが重要であるが、それ以前に、月面ローバが成立することが必要である。

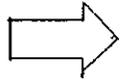
### 月面ローバ成立の基本的要求

- (1) 熱的に死なないこと。
  - (a) 夜間の低温で死なないこと。
  - (b) 昼間の高温で死なないこと。
- (2) 電氣的に死なないこと。
  - ・電力が確保されていること。
- (3) 通信的に死なないこと。
  - ・通信回線が確保されていること。
- (4) 機械的に死なないこと。
  - ・スタックしないこと又は、スタックから脱出できること。

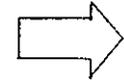
小型月面ローバの重量、電力推定

項 目	重 量 (W)	消 費 電 力 (W)	
		走行時	ミッション時
・ 車体 (含む走行系)	15	15 (7.5)	
・ 操縦センサ	2	10	
・ 搭載電子機器	5	30 (30)	25 (25)
・ バッテリー	13		
・ 熱制御機器	2		
・ アンテナ制御	3	5 (2.5)	
・ ミッション補助機器	5		10 (5)
・ ミッション機器	10		20 (20)
合 計	55 Kg	60W (40W)	55W (45W)

必要最大電力予想  
走行時 : 60W  
ミッション時 : 55W

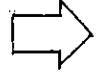


必要発電量  
60W

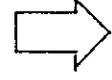


太陽電池面積  
2214 cm<sup>2</sup>  
(直径53cmの円の面積)  
変換効率 20%

搭載電子機器消費電力予想  
走行時 : 40W  
ミッション時 : 45W

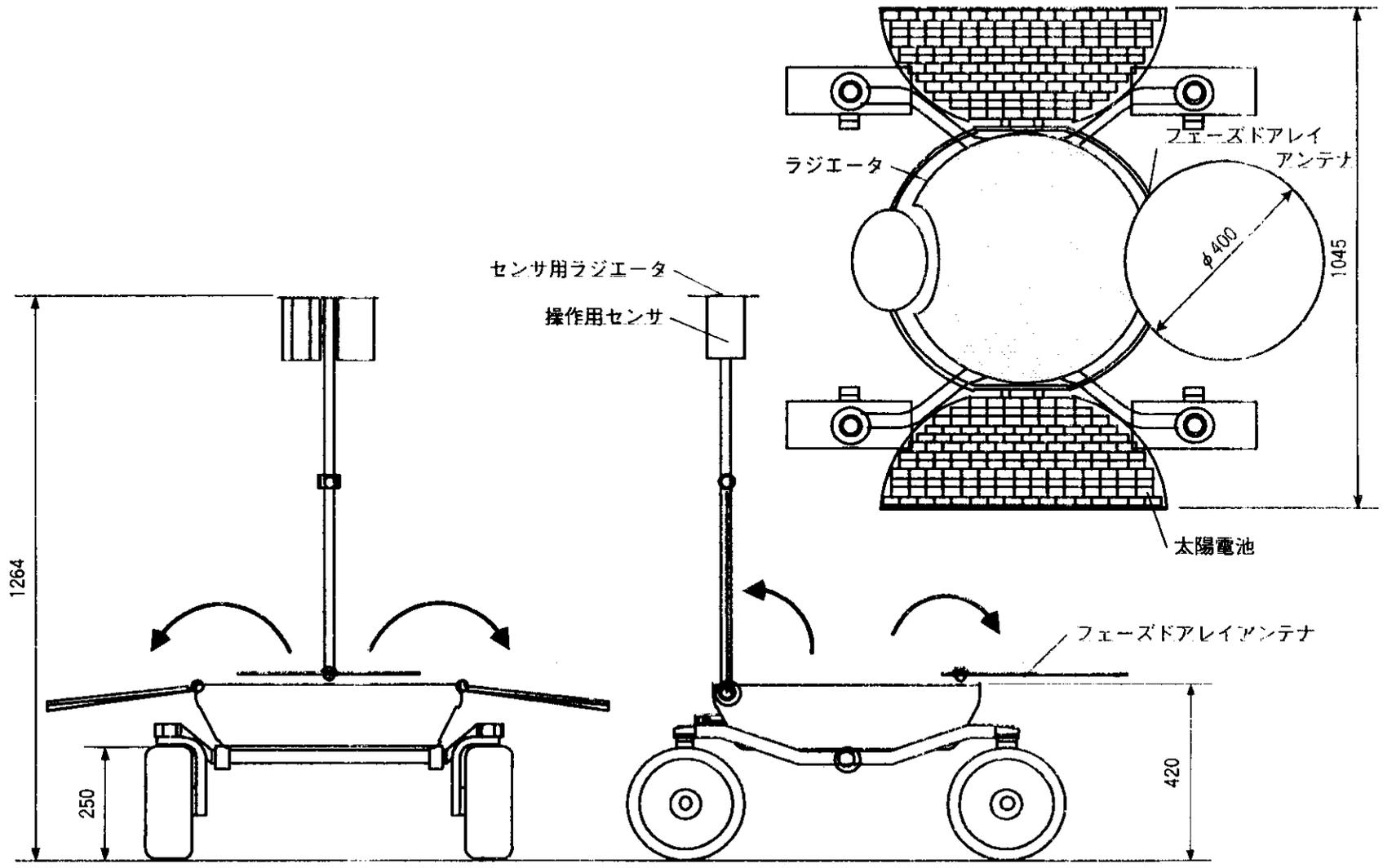


必要冷却熱量  
45W

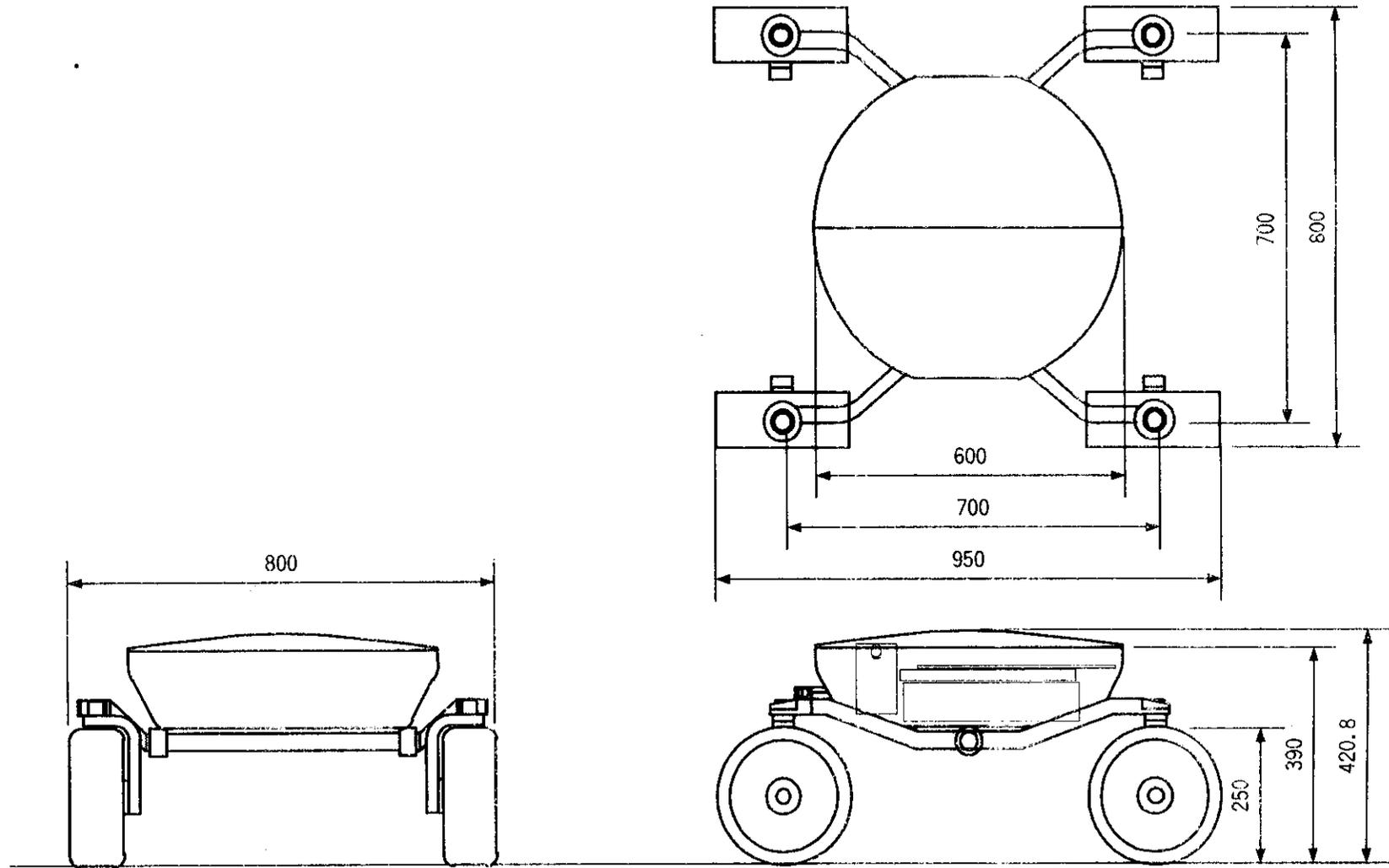


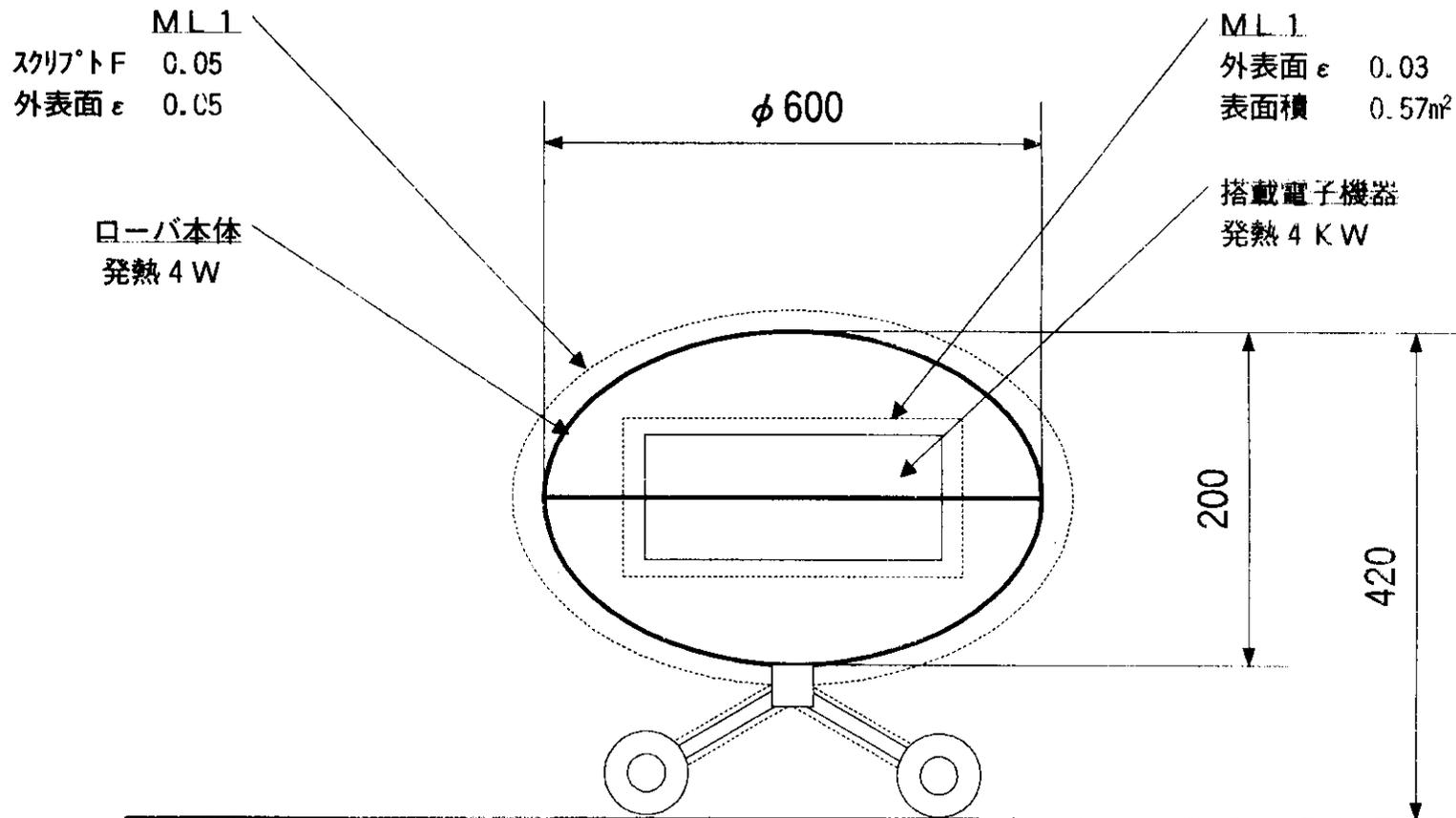
ラジエータ面積  
2328 cm<sup>2</sup>  
(直径54.5cmの円の面積)  
ラジエータ温度 : 45℃

太陽電池及びラジエータ面積の推定



月面ローバ昼間の状況

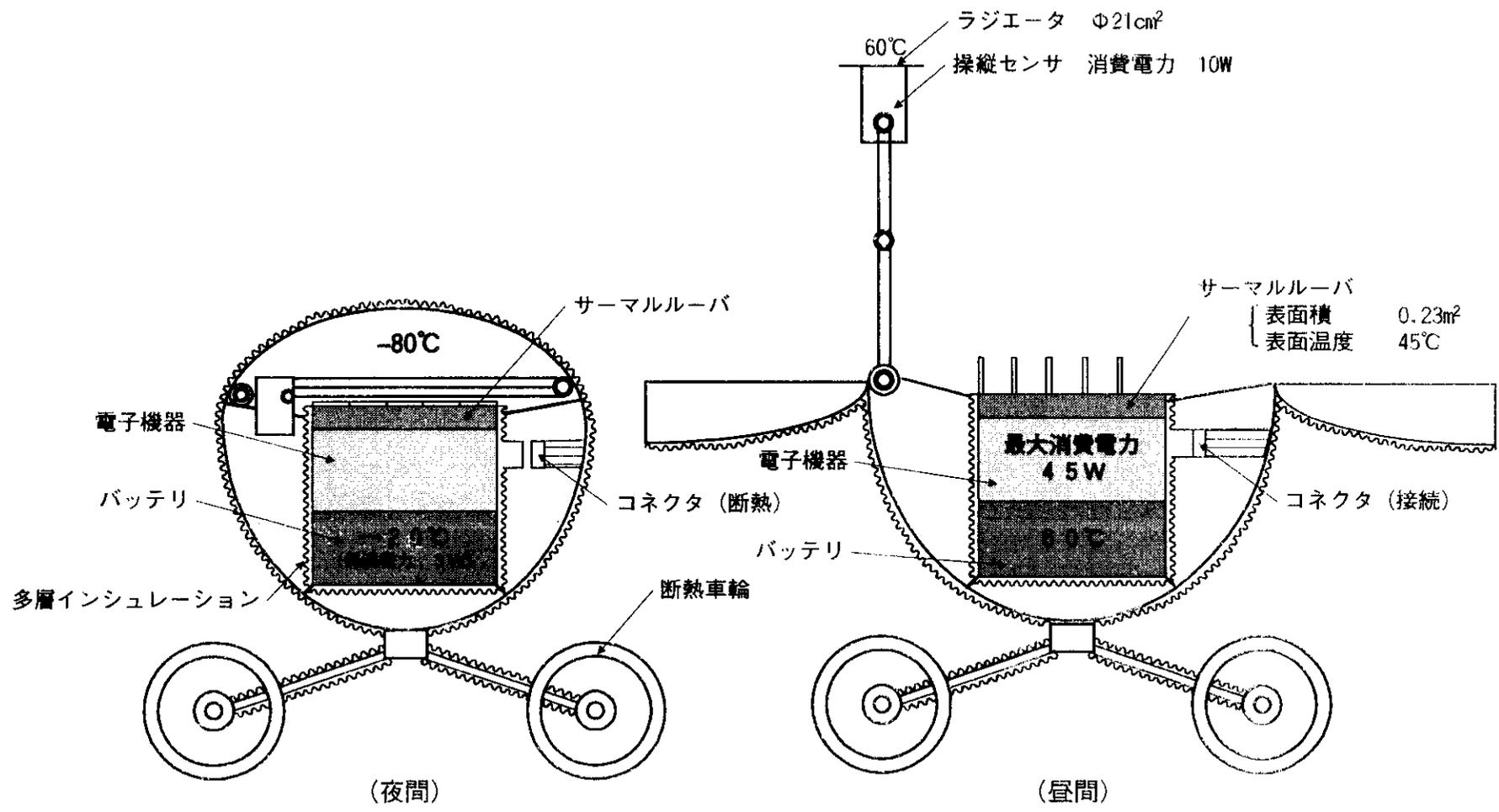




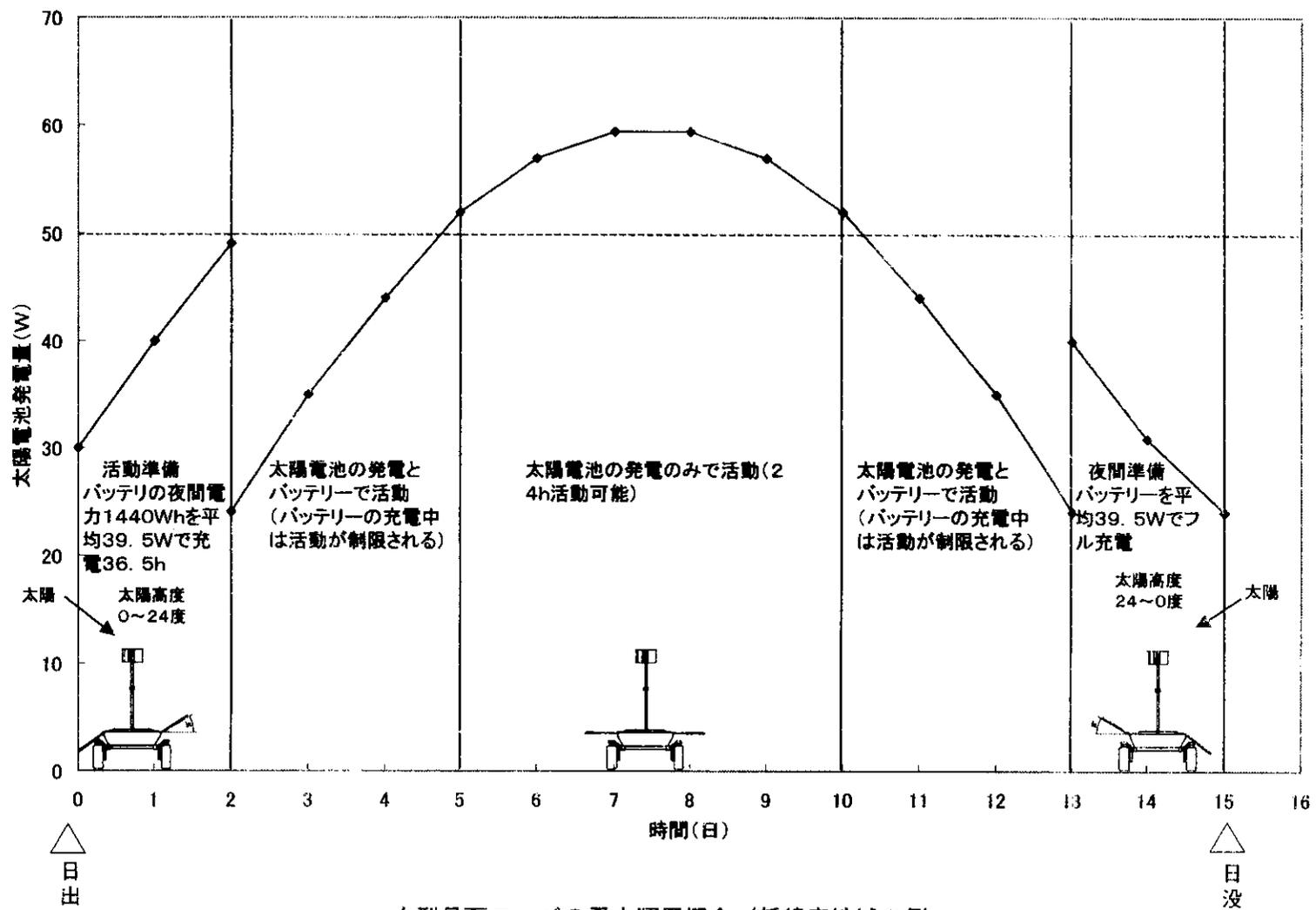
小型ローバ熱解析モデル



# NISSAN

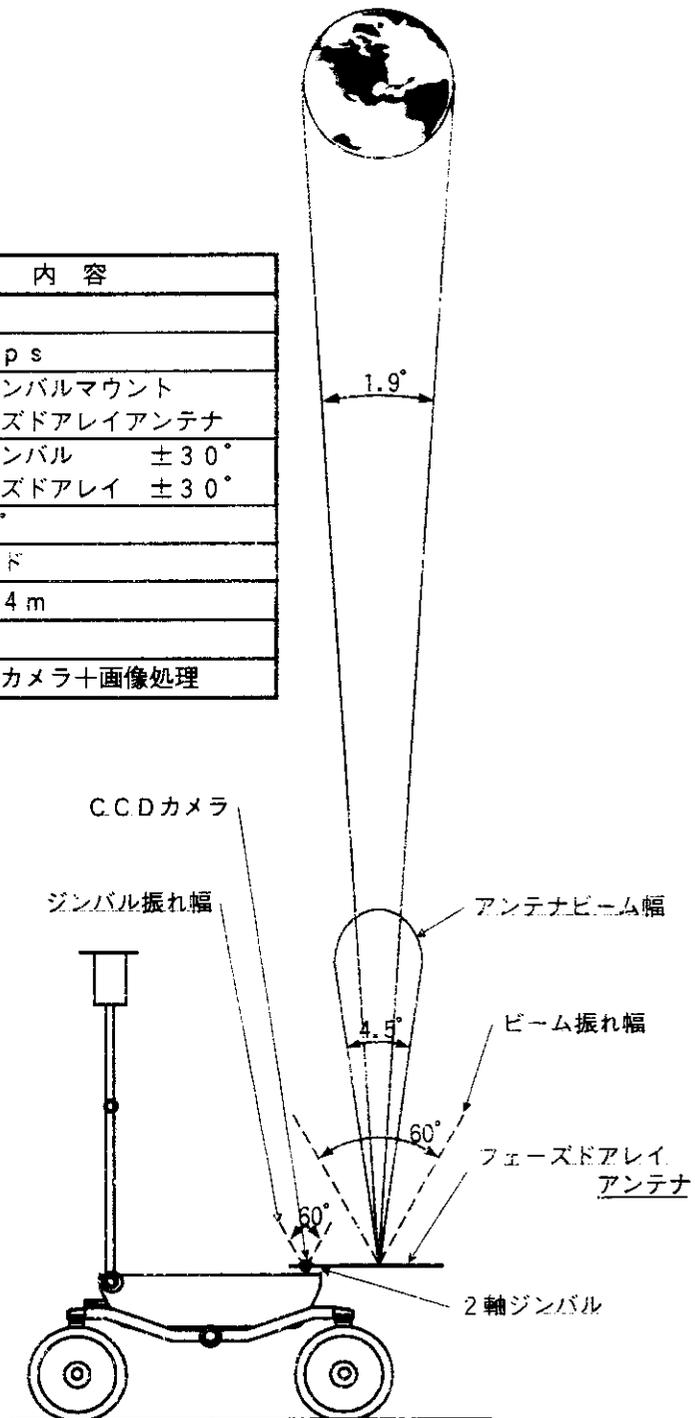


### 小型月面ローバ熱特性概要

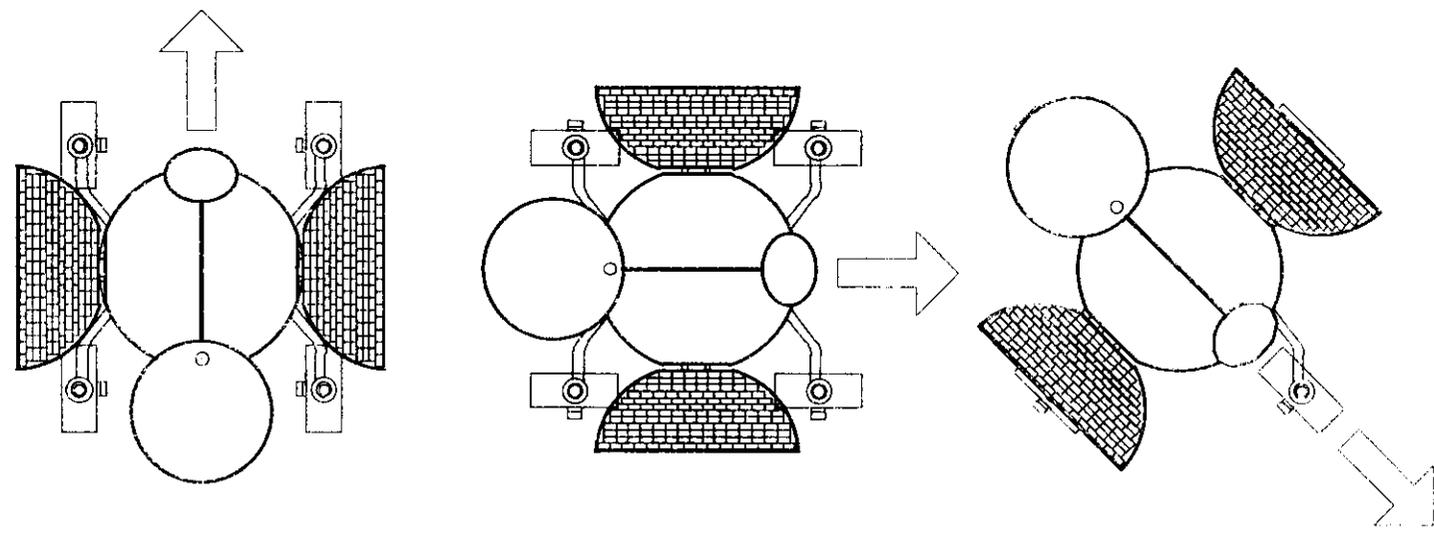
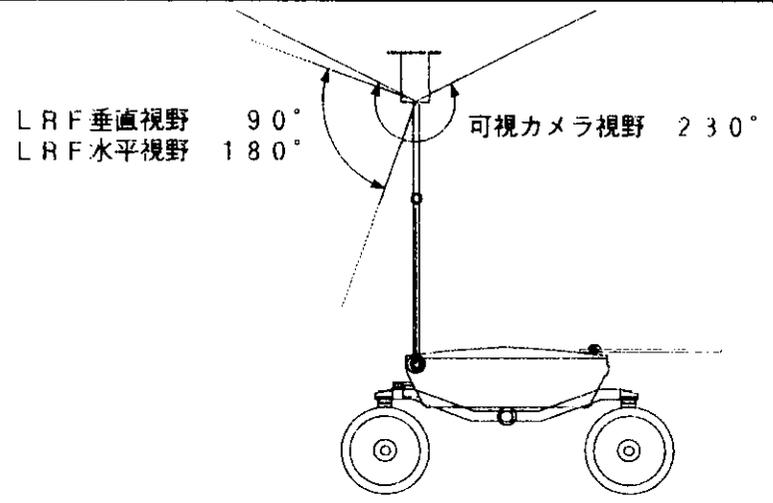


小型月面ローバの電力運用概念 (低緯度地域の例)

項目	内容
受信局	臼田局
通信レート	1 M b p s
アンテナ方式	2軸ジンバルマウント フェーズドアレイアンテナ
ビーム振り角	2軸ジンバル ±30° フェーズドアレイ ±30°
ビーム幅	4, 5°
受信周波数	Xバンド
アンテナ径	Φ0.4 m
送信電力	2 W
地球トラッキングセンサ	CCDカメラ+画像処理



小型月面ローバと地球との通信概要



小型月面ローバ走行様式

## 月探査マイクロローバの提案



久保田(宇宙研)  
黒田(明治大)  
國井(中央大)

### 月の起源と進化

### ローバミッション

- 月の高地、クレータ内などの探査
- クレータ内の中央丘探査
- チャネル地形の探査
- 月の裏側や極地方探査
- 火山活動があった地域の探査
- 南極のクレータ内探査(氷・望遠鏡)
- 小型ペネトレータ、月震計設置

## 月面探査ローバ

### ○移動できる

- ・ 広範囲な探査(移動距離数十km～数百km)
- ・ クレータや断崖など地殻が露頭している地域の探査

### ○月表面に接触している

- ・ サンプル採取、収集、分析
- ・ 地下探査(深さ数十cm～数mの探査)
- ・ 観測機器(望遠鏡、月震計など)の設置

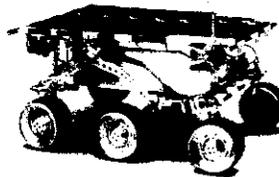
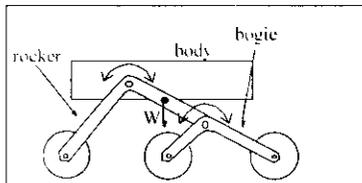
## 月探査ローバ

- ・ 不整地走破性能
- ・ 長距離移動
- ・ 科学観測
- ・ 低消費電力
- ・ 小型軽量

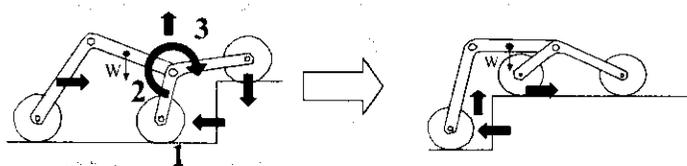
走行メカニズム

軽量マニピュレータ

## Rocker-bogie suspension



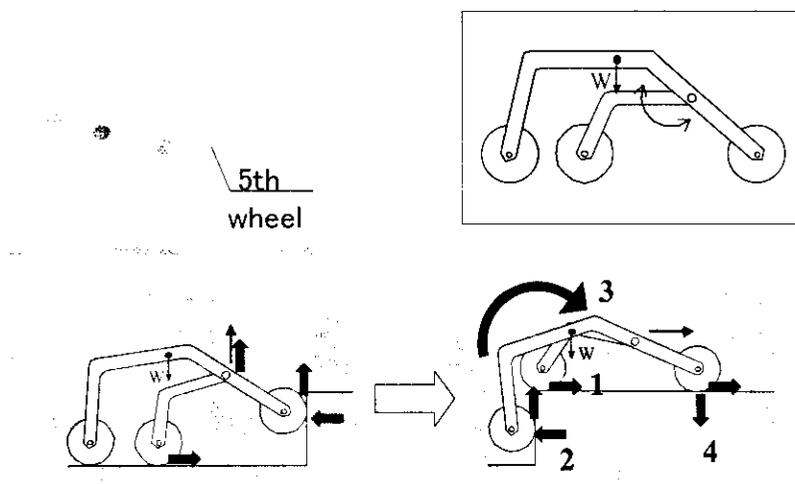
Sojourner



Lever motion helps to climb a step

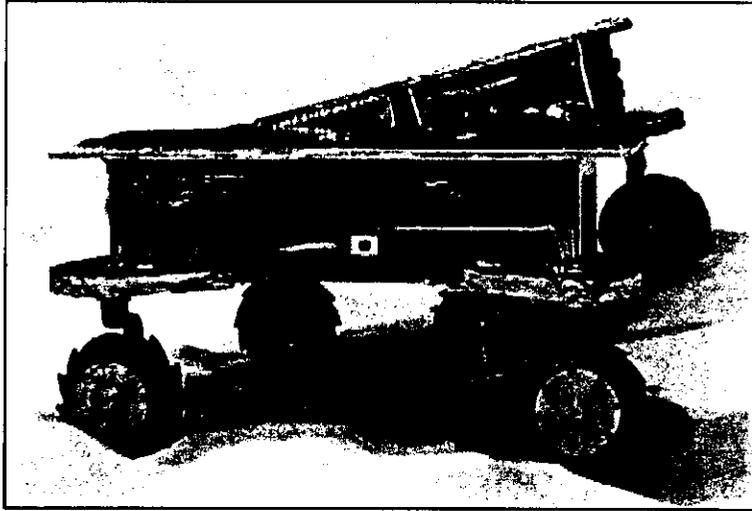
## 新しい走行メカニズム

### PEGASUS (PEntad Grade Assist SUSpension)



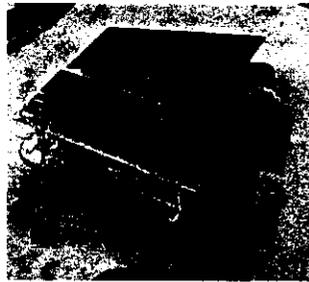
Lever motion helps to climb a step

## *Micro5* (with PEGASUS)



### *Micro5*の緒元

- 55L × 53W × 25H [cm]
- 5輪走行機構
- PEGASUSを搭載
- 走破能力: 段差15cm
- CFRP/KFRPで製作
- 総重量5kg(サイエンス機器を除く)
- 地球上で走行に要する電力が5W以下(1.5cm/s)
- エネルギー源は太陽パネル(27W)とバッテリーを併用



## ララ付きラララ



### マニピュレータの機能・要求

- 位置方向制御(遠方周辺の観測)
- サンプル採取
- 観測機器の試料への接近・接触
- 試料表面からのレゴリス等除去
- 試料の粉碎、切断、研磨
- 掘削

小型・軽量・低消費電力

十分なリンク長・自由度・可搬重量

## マニピュレータの構造

先端において全ての位置姿勢を実現

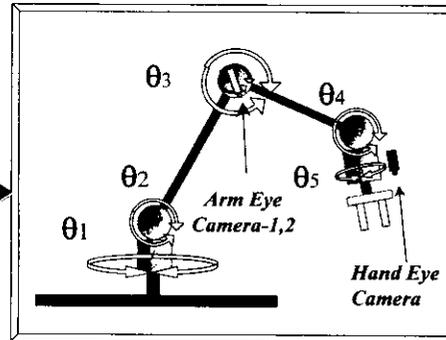
→ 最低6自由度 必要

↓  
対象作業を限定

- {
- ・試料のサンプリング
- ・試料への接近
- ・プローブの地面への挿入
- }

↓  
自由度低減 → 5自由度へ

軽量化 → 容易  
小型化



## マニピュレータの取付け位置

### 全体的リンク長の確保

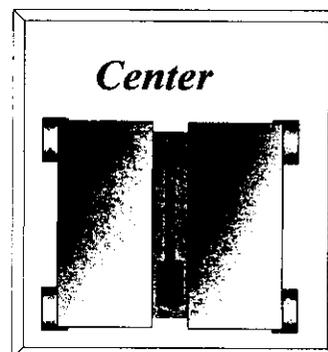
- ・作業空間の確保
- ・遠方の見渡し

### 単純な構造

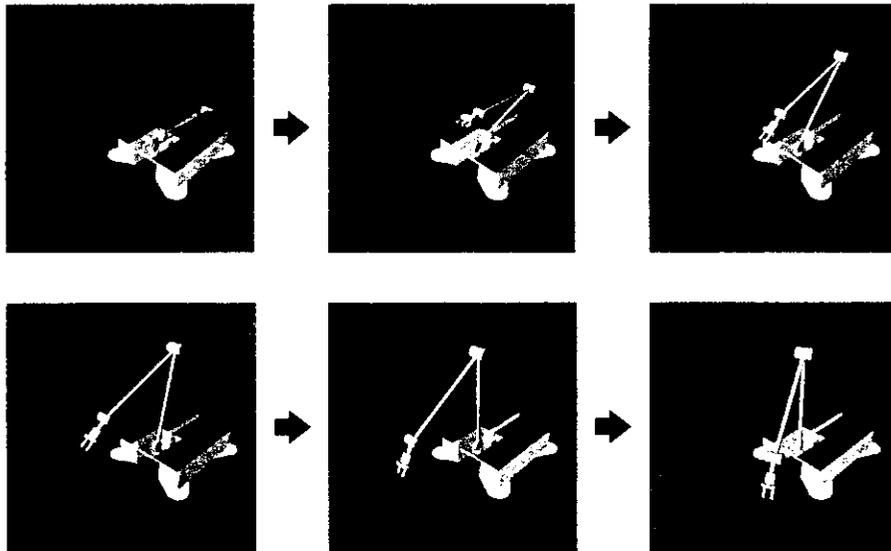
- ・消費電力の低減
- ・重量の軽減

### 重量バランス

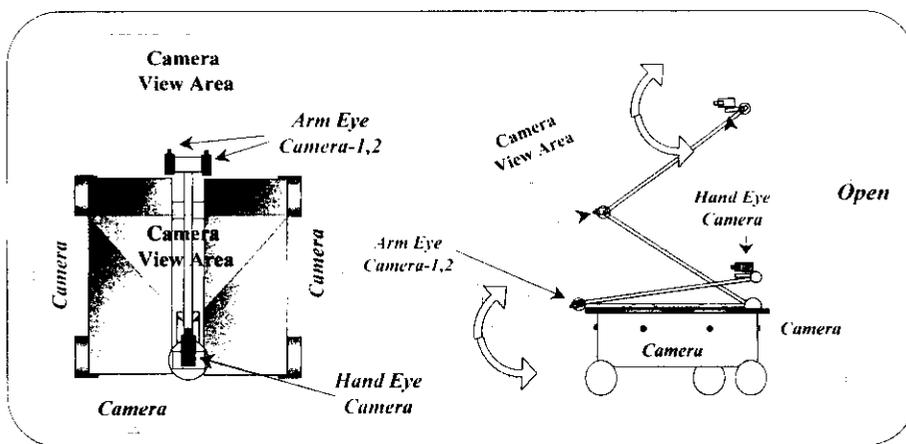
- ・重量の軽減
- ・走破性能の維持



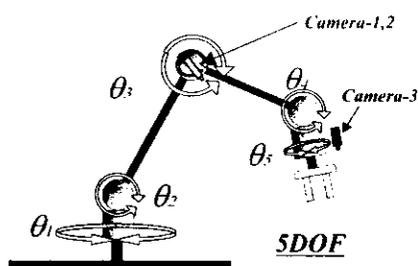
## マニピュレータの展開



## カメラシステム

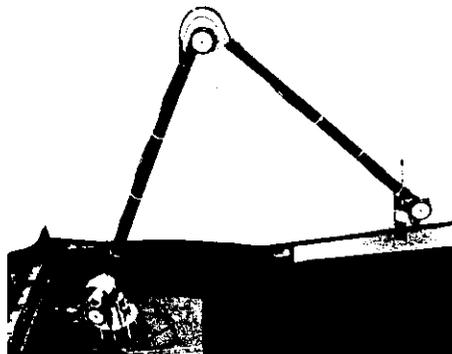


## マイクロマニピュレータ



### 超音波モータ(USM)

- ・大きな静止トルク
- ・小型・軽量



リンク長: 0.92[m]

重量: 1.45[kg]

可搬ペイロード: 0.3[kg]

## マイクロローバによるミッション

月面: 移動速度 0.1[m/s]

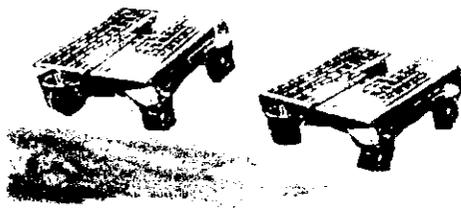
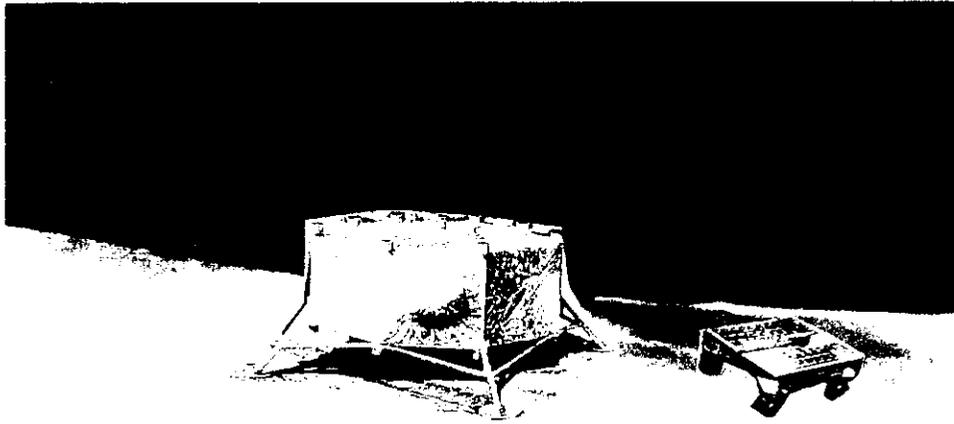
1日10時間、15日間で約50[km]走行可能

### ローバの大型化

- ・長距離走行可能
- ・観測機器、分析機器搭載

### 複数ローバの協調ミッション

- ・協調作業、安全性信頼性向上
- ・探査範囲の拡大、探査期間の長期化



- 探査範囲の拡大
- 探査期間の長期化
- 安全性、信頼性向上
- 協調作業

## 技術課題

- 月表面への高精度軟着陸技術  
数十m以内のピンポイント着陸
- 着陸機からローバが月面へ降りる技術
- 航法誘導制御  
遠隔操縦(テレドライブ法)  
自律行動  
自己位置同定

## 技術課題

- 月面環境適応技術  
熱制御系・レゴリス防塵対策
- 搭載機器小型軽量省電力化技術
- ローバとランダの協調探査・運用など

## まとめ

- 月面探査ローバ
- 新走行システム
- マイクロローバ MICRO5の提案
- マイクロマニピュレータシステム
- ローバ探査ミッション
- 技術課題

## 小型月面ローバを実現するための課題について

### アブストラクト:

ローバの大きさ、重さ、形状などの設計に関わる事項は実施する探査の位置を含むミッションの内容に大きく影響される。また、ローバ単体のみならず、ローバの活動を支援するシステムにも影響を与える。本発表では通信、レゴリスの飛散、掘削等のローバに関わる項目の検討を紹介し、今後の研究の課題について述べる。



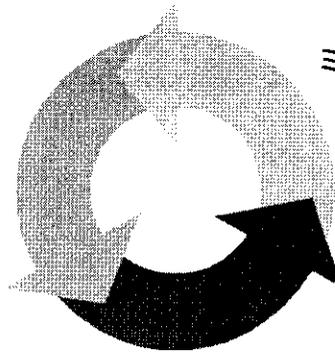
市川誠、吉岡伸人、板垣春昭

## 現状の認識

### ローバ研究

- ・走行系
- ・熱設計
- ・etc...

### ミッション研究



### ミッション支援技術研究

ミッション研究、ローバ研究、ミッション支援技術研究は相互に深く関連する。一方、現在、次期月探査のミッションの内容は検討中であり、ローバに対する要求、また着陸地点も明らかでない。一方、ミッションが決定された段階で技術的に不明確な部分が少ないよう、研究を進める必要がある。

## 内容

耐環境設計に関する事項

走行に関する事項

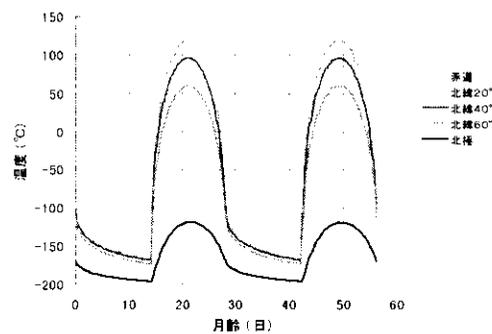
通信に関する事項

その他

- ・ローバの自律制御に関する事項
- ・ローバのポジショニングに関する事項
- ・ランダー、ローバの見通しに関する事項
- ・ランダーからローバが降りる仕組み
- ・ローバ走行とレゴリスの飛散
- ・ミッション支援技術(掘削、ミッション機器交換)

## 熱・エネルギー設計に関するもの

月は赤道域と極域では温度環境が異なる。ミッションを実施する場所に適合する熱設計が必要である。



月の各緯度における表面温度解析結果

## ローバの打上げまでの耐環境設計

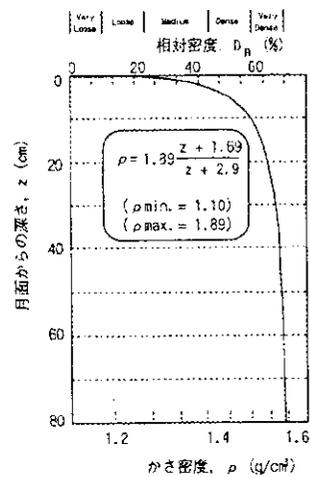
項目	概要
準静的加速度	打上げフェースに重心に作用するロケット機軸方向、機軸横方向の静的加速度と振動加速度の和で規定
正弦波振動加速度	第一段燃焼終了時などにロケットから伝えられる過渡応答や自励振動（正弦波振動加振条件に置き換えて規定）
音響環境、ランダム振動環境	発射時の音響、遡音速時の空力変動によって生じるランダム振動
衝撃環境	火工品（分離ナット等）の動作に伴う衝撃
熱環境	フェアリングの内壁からの熱放射など、衛星でも設計上の制約条件となることは希であり、ローバは更にランダの内部に収容されることから、更に影響は少ない。

## 月表層の構造

月表層の構造が走行性に大きく関連する。



アポロ11号ブーツ跡 (AS11-40-5877)



月面からの深さと地盤のかさ密度の関係

## 移動距離に係わる事項

走行距離 = (計画上の走行経路 ± ランダの着陸精度) ×  $\alpha$

【 $\alpha$  (安全係数) の内訳】

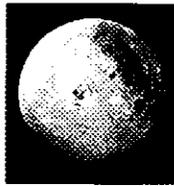
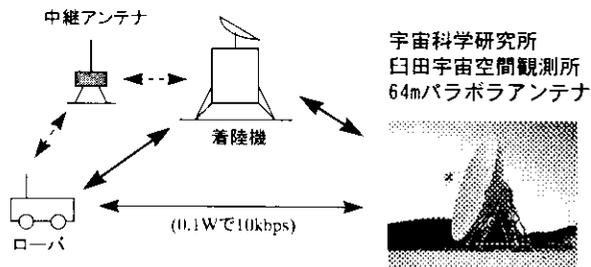
- 1) 事前に認識できない障害物の回避動作に伴うもの
- 2) 月面の凹凸, 車輪のスリップに起因する実走行速度低下
- 3) モータの冷却に必要な休止時間
- 4) 指令により走行可能な時間

## 月の探査地点と通信システム

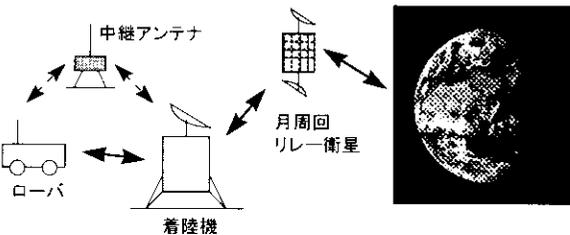
[着陸地点]



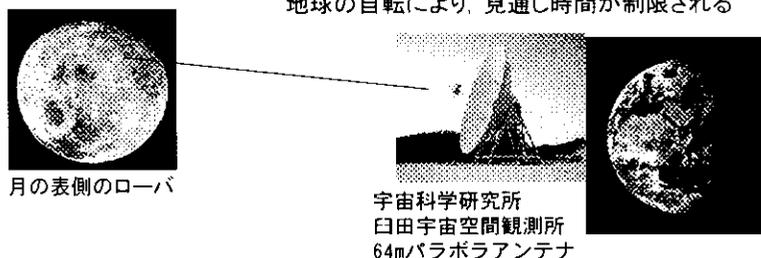
月の表側



月の裏側



## 月の表側での運用(ローバの遠隔操縦)



### 運転方法の例

1. 地上と通信が確保できる時間、遠隔操縦
2. 月面の地形情報を集め、これに基づいた地図から経路データを生成し、月と地球の通信が途絶えたら、そのデータで走行
3. 高度な自律移動機能によりローバが判断して走行

## 月の裏ミッションとリレー衛星

システム構成	概要
1 月軌道周回リレー衛星 (1機)	月の周回軌道をリレー衛星1機を周回させ、月の裏側において、裏側に着陸したランダーとデータ通信を行ない、その内容を月の表側に出た段階で地球へデータを送信し、新たな指令を受けて、月の裏側に入ったらランダーに指令する。月の裏側に入った期間、交信不可能になる。
2 月軌道周回リレー衛星 (3機)	3機の月軌道周回リレー衛星を互に見通しの効く高度に配置して通信リンクを確保し、月の裏側に入ったリレー衛星とランダーのデータの内容を他のリレー衛星を中継して地球と通信を行なう。中継の距離だけ、若干の時間遅れが生じるが、ほぼ、リアルタイムに情報のやりとりができる。
3 ラグランジェポイント (L4, L5) と L2	月の裏側の L2 に1機のリレー衛星、さらに L4 か L5 の地点にリレー衛星を配置し、これらの中継して月の裏側のランダーと交信を行なう。中継の距離だけ、若干の時間遅れが生じるが、ほぼ、リアルタイムに情報のやりとりができる。

## 月周回リレー衛星 1 機の場合

- 月周回リレー衛星（円軌道）の公転速度  $V_c$

$$V_c = V_e / \sqrt{2} \quad (\text{但し, } V_e \text{ は脱出速度})$$

月の脱出速度  $V_e$  は  $2.38 \text{ km/sec}$ , よって  $V_c$  は  $1.683 \text{ km/sec}$

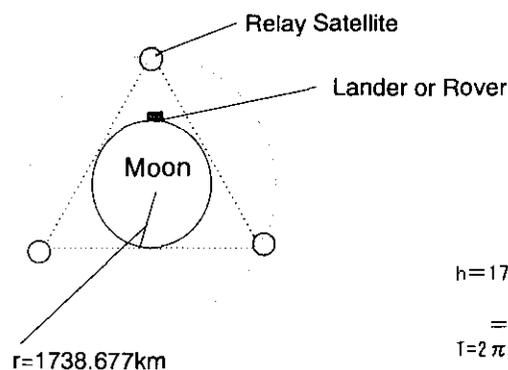
- リレー衛星（高度  $100 \text{ km}$ ）の周回時間

月の平均半径は約  $1738.2 \text{ km}$  である。よってリレー衛星が周回軌道を 1 周するには

$$\begin{aligned} \text{Time} &= 2\pi \times (1738.2 + 100) / 1.683 \text{ km/sec} \\ &= 6,863 \text{ 秒 (1.9時間)} \end{aligned}$$

火星の Sojourner より、時間遅れが大きい！！

## 周回リレー衛星 3 機の場合



3機のリレー衛星で通信ネットワークを構築し、常時、月の裏側と交信可とする。

$$\begin{aligned} h &= 1738.677 / \sin(\theta / 2) \\ &\text{但し, } \theta \text{ は } 60^\circ \\ &= 3477.354 \text{ km} \\ T &= 2\pi \times 3600 / 1.683 = 13,440 \text{ 秒} \end{aligned}$$

大規模なミッションとなるため、ハレー彗星と同様に国際協力で月の裏側を探索できれば素晴らしい。

# CCSDS 211.0 - R - 1

## ■ ローバの電波に関連する重要な動き



### 1.1 PURPOSE

The purpose of this document is to provide a Recommendation for Space Data System Standards in the area of proximity space links. Proximity space links are defined to be short-range, bi-directional, fixed or mobile radio links, generally used to communicate among fixed probes, landers, rovers, orbiting constellations, and orbiting relays. These links are characterized by short time delays, moderate (not weak) signals, and short, independent sessions.

## 月ローバの通信系に関する検討

### ■ 回線設計パラメータ

項目	数値	備考
最大距離	10km	暫定、ミッション要求による
ローバのテレメトリ周波数	401.585625(MHz)	コマンド周波数は 437.1(MHz)。CCSDS による
ローバのアンテナパターン	0(dBi)	オムニアンテナを想定
ランダのアンテナパターン	0(dBi)	オムニアンテナを想定
ランダの LNA 雑音指数	1.5(dB)	暫定値
変調方式	--	PCM/Bi-Phase-L/PM、CCSDS による
BER(ビットエラーレート)	$10^{-6}$	CCSDS による

### ■ データレートと送信出力

データレート(bps)	2000	4000	8000	16000	32000	*
ローバの送信出力(mW)	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	

\* CCSDS では 2048000 まで規程

(NASDA 電子・情報系技術研究部 谷島正信氏による)

## 月面ローバの通信系について

---

ローバの走行範囲(10km)程度であれば、ランダーのアンテナ位置高さは関係ない。

### 【課題】

- ・ 月面の起伏、障害物の影響

→ 月の表面の起伏は、地形情報に基づいて回避が可能である。

- ・ 月面からの反射波の影響

→ UHF帯は反射干渉しにくく、レゴリスは岩石と比較すると反射しにくい。また、指向性アンテナの使用により低減が可能であり影響は少ない。

- ・ ランダーとローバの通信機の温度環境の差に対する通信リンクの確保(Sojournerではこれによるトラブルが生じた)

## ローバ(ランダー)の自律制御の必要性

---

探査位置が月の裏側で、通信時間遅れの少ない通信網を設備できない場合、ローバ(ランダー)単体で予め定められた探査内容を実施する高度な自律制御機能が要求される。

- ・ 月の表側であれば、ローバを遠隔操縦で運転できることをLunokhod (USSR)は実証している。

- ・ Sojournerでは、ランダーによって得られた地形情報を基に地球上に火星の仮想空間を構築し、その中をローバを走行させるのに必要な距離、方向の指令データをローバに送信し、それをローバがプレイバックすることで走行した。なお、一部自律制御の試験を行っている。

- ・ 探査位置が月の裏側で、通信時間遅れの少ない通信網を確保する

## ローバのポジショニングに関する研究

月面の移動探査を行う場合、その探査地点がどの場所か、ある程度、正確に知る必要がある。

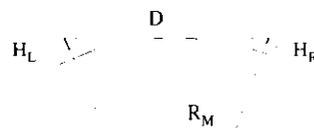
ランダーからローバを見通しできる範囲の場合はよいが、これが離れた場合、何らかの手段でローバの位置を測定する必要がある。

また、ローバが計測機器などを月面上に所定の距離ごとに配置する場合、同様の課題が生じる。



## ランダーからローバの見通し距離

レーザーなどを利用してランダーからローバの位置を確認できれば、ローバの遠隔操縦は確実となる。そこで見通し距離を求める。

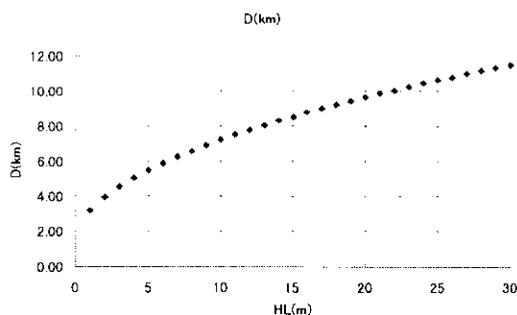


月を平滑な球面として、ランダーから距離D(km)にあるローバをランダーのカメラから直視するには、ランダーのカメラの高さ $H_L$ 、ローバに付けられた目標物の高さ $H_R$ 、月の半径 $R_M$ とすると(1)式の関係にある。

$$D = \sqrt{(H_R + R_M)^2 - R_M^2} + \sqrt{(H_L + R_M)^2 - R_M^2} \quad (1) \text{式}$$

## ランダーからローバの見通し距離

$H_R$ を0.5m、 $R_M \doteq 1738.225\text{km}$ (平均半径)として $H_L$ と $D$ の変化を求める。これより、レーザーが月面5mの高さにあることで5km程先を見通せる。



## ローバがランダーから降りる装置

次の2つの方式が基本である。

- 1) ランダーに設備されたスロープを利用  
Lunokhod (USSR), Sojourner (NASA)
- 2) ランダーに搭載されたアームで吊り降ろす  
Mars Surveyor 2001(NASA)



Lunokhod



Sojourner



Marie Curie

## ローバの走行とレゴリス飛散

ApolloミッションでのLRVの走行の映像を見ると多量のレゴリスを舞い上げている情景が見られる。そこでローバの走行とレゴリスの飛散について検討する。

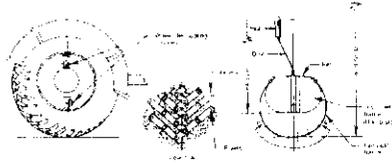
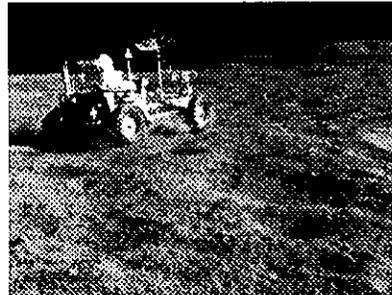


Fig. 8-46. Technical drawings of the Lunar Roving Vehicle (LRV) and its components. (NASA, 1972) (Left) Diagram of the LRV in its stowed position. (Right) Diagram of the LRV in its deployed position.



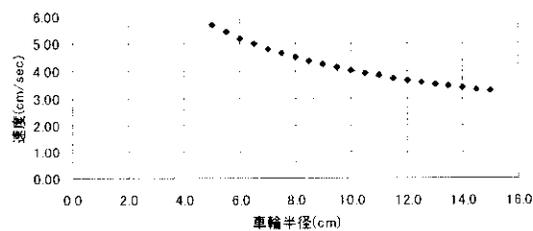
## レゴリス飛散を低減する走行速度

### ■ 飛散の要因

- 1) タイヤ内部にレゴリスが溜まる構造
- 2) 車輪の回転による加速度(最大 $3,127\text{cm/sec}^2$ )が月表面重力( $162.27\text{cm/sec}^2$ )より高い
- 3) タイヤのバネ効果による振動

【補足】大気がないため、地球のようにタイヤ下部の地中の空気が圧縮されて吹き上がることはない。

$(V^2/r < 162.27\text{cm/sec}^2)$  となる車輪半径と速度を求める。



## ミッション支援技術研究

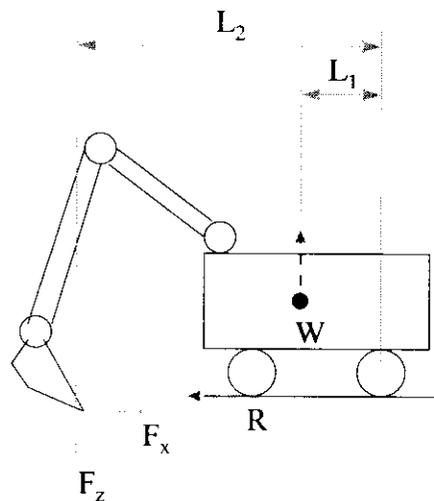
### ■ 掘削

- ・ 月面の表層を取り除いて内部の石などを探査したいという要望への対応。
- ・ 掘削を行う場合、ローバに外力が加わることになり、これに対してローバが有効に力を伝達できないと、掘削することができない。

### ■ 複数ミッションへの対応

- ・ 将来、月の利用において、1台のローバが複数のミッションを実施することの可能性がある。その実現方法として、複数の機器を1台のローバに搭載するものと、機器を着脱して実施することが考えられる。

## 掘削を考慮した設計



●鉛直方向の  
掘削可能条件

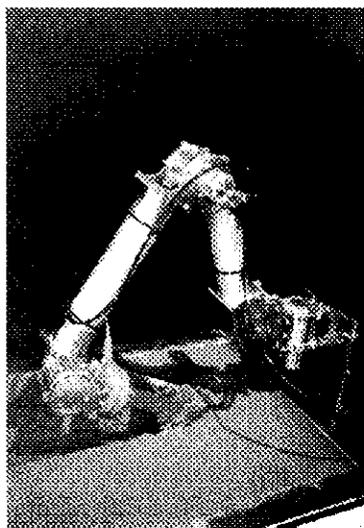
$$W \cdot L1 > Fz \cdot L2$$

●水平方向の  
掘削可能条件

$$Fx < R$$

ローバの重さ, 重心  
車輪の抵抗

## 掘削用試験装置



先端部分とベース部で各バスごとに力の最大値とその方向について測定したところ、先端部では、掘削中の抵抗がブレード上面に対しほぼ垂直に発生しており、ベース部分ではベース部分を斜め下に引っ張る力が作用していることが共通的に確認された。

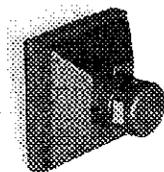
実験において2cm層厚で17Nの最大荷重が確認された。

2cm層厚ごとの掘削に比べ、1cm層厚ごとの掘削のほうがトルク、力共小さい傾向がある。

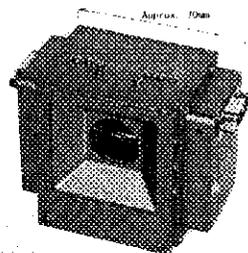
地盤の固さに対しては、かさ密度が高い（＝硬い）ほど掘削力が必要になる結果が得られた。

## ミッション機器着脱機構

項目	状態
エネルギーの供給	必要、一部必要、不要
ローバとの情報伝達	<ul style="list-style-type: none"> <li>・不要（ミッション機器単独でランダー等と交信）</li> <li>・不要（通信の不要なミッション機器）</li> <li>・必要（ローバの通信回路を借りてランダー等と交信）</li> <li>・ミッション機器とローバの協調のための情報伝達必要</li> </ul>
使用条件	停止して使用、移動しながら使用



[ミッション機器側]



[ローバ側]

## 研究の課題

---

- 熱設計
- レゴリスに適したローバの車輪
- 月面における通信
- ローバの走行制御、ポジショニング
- ミッション支援技術

	表 題	'99.11.30 月面探査ローバ ワークショップ 「月表面温度解析結果」
<p>各緯度における月表面温度の解析</p> <p>日本飛行機（株） 湯本 隆宏</p>		

	1. 概 要	'99.11.30 月面探査ローバ ワークショップ 「月表面温度解析結果」
<ol style="list-style-type: none"><li>1. 月面の熱環境</li><li>2. 熱数学モデルの説明</li><li>3. 解析結果の説明</li><li>4. Lunar Sourcebook との比較</li><li>5. まとめ</li></ol>		



## 2. 月表面温度 (赤道) (Thermal Environments)

'99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」

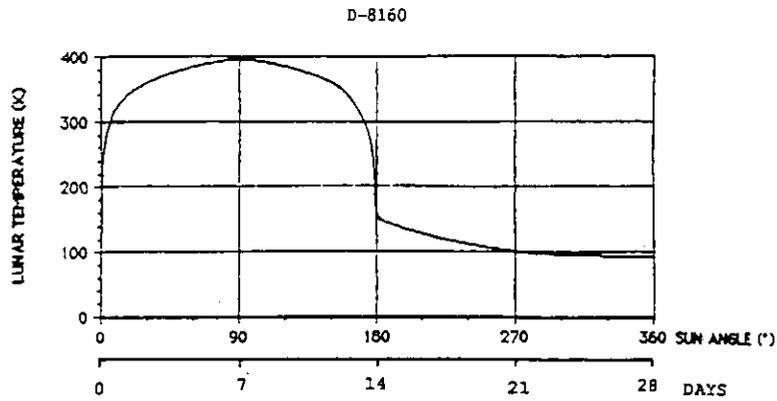
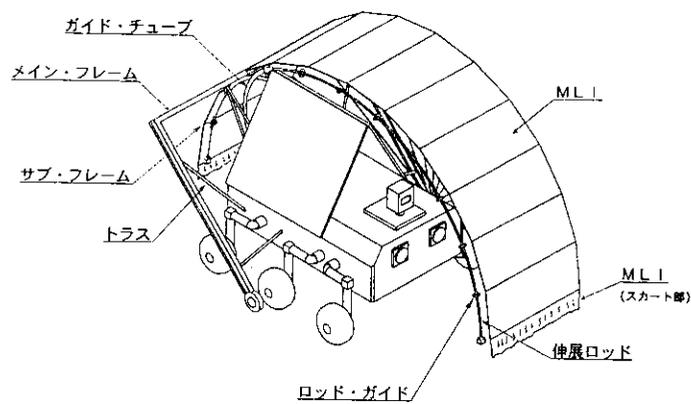


Figure 7. Lunar Surface Temperature as a Function of Orbit Position



## 3. 保温パラソルシステム

'99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」





#### 4. 緯度別温度解析の必要性

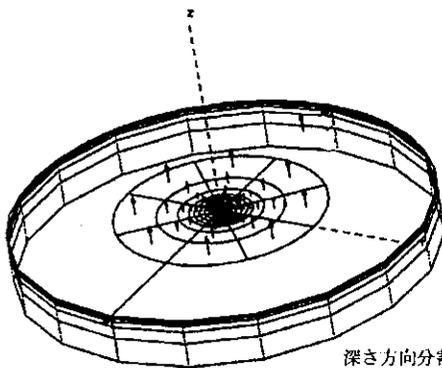
99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」

1. 月面着陸ミッションの着陸点が決定していない
2. 月面温度実測データは低緯度に限られている
3. 高緯度の方が熱設計的に有利であると思われる



#### 5. 月面熱数学モデル

99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」



ノードNo.	半径 (m)	円周/深さ	深さ/深さ	要素数
10#	0.0 ~ 0.5	1	7	7
11#	0.5 ~ 1.0	8等分	7	56
12#	1.0 ~ 1.5	8等分	7	56
13#	1.5 ~ 2.0	8等分	7	56
14#	2.0 ~ 2.5	8等分	7	56
15#	2.5 ~ 3.0	8等分	7	56
16#	3.0 ~ 4.0	8等分	7	56
17#	4.0 ~ 6.0	8等分	7	56
18#	6.0 ~ 10.0	8等分	7	56
19#	10.0 ~ 1000.0	1	7	7
計				462

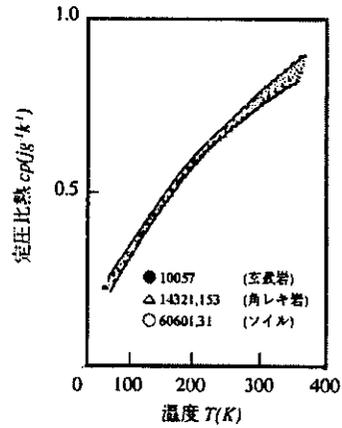
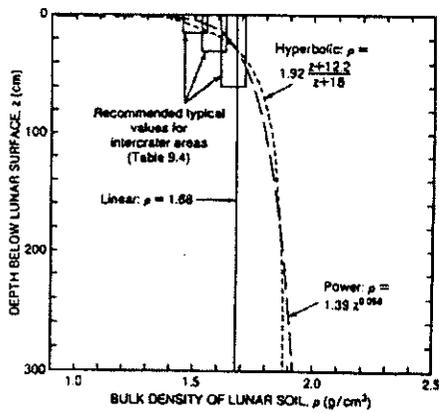
深さ方向分割 : 0.01, 0.03, 0.07, 0.13, 0.25, 0.50, 1.00 (m)  
(深さ1mのノードを境界ノード(定温ノード)として定義)

熱伝導率 ( $\lambda$ ): 0.01 (W/(m·K))



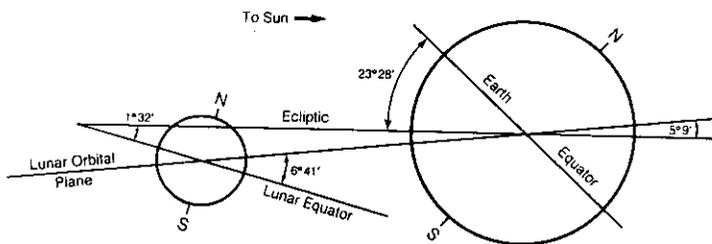
## 6. レゴリス比重・比熱

99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」



## 7. 熱入力条件

99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」



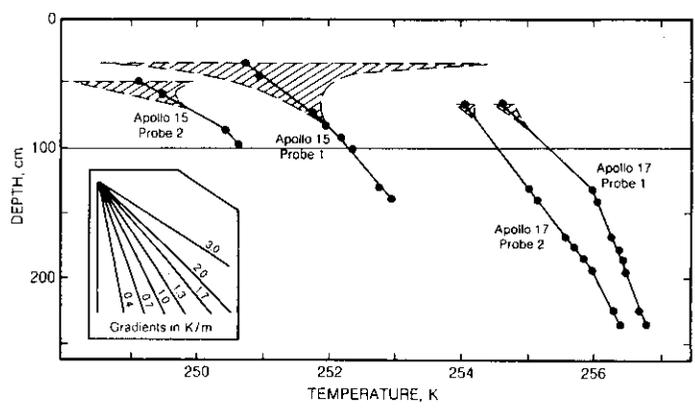
解析条件

太陽光強度	1365 (W/m <sup>2</sup> )
月面太陽光吸収率	0.92
月面赤外輻射率	0.92
黄道に対する月の赤道傾斜角	1° 32'



## 8. 地下温度計測データ (Lunar Sourcebook)

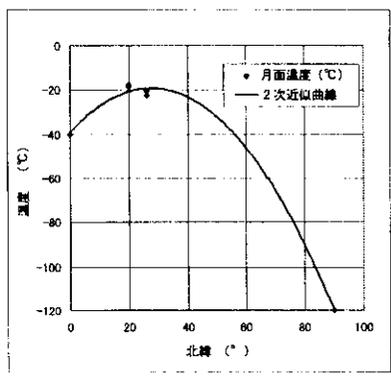
'99. 11. 30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」



## 9. 地下 1 m 温度文献調査結果

'99. 11. 30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」

緯度 (°) (北緯)	地下 1m 月面温度 (°C)	参考文献
0	-40	宇宙開発、21世紀の将来像 (NASDA殿 提供資料)
20	-17.6	LUNAR SOURCEBOOK
20	-18.6	(アポロ17号 計測データ)
26	-20.5	LUNAR SOURCEBOOK
26	-22.3	(アポロ15号 計測データ)
90	-120	宇宙開発、21世紀の将来像 (NASDA殿 提供資料)





## 10. 解析ケース

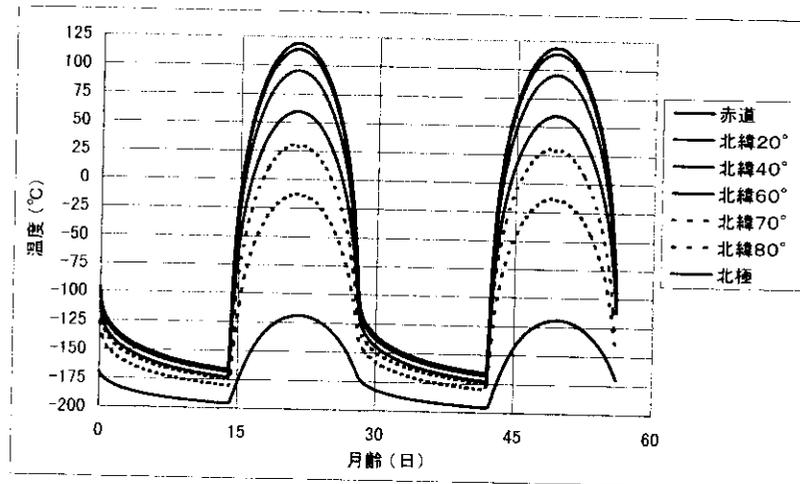
99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」

解析ケース	解析緯度（北緯）	境界ノード温度（℃）
1	0	-40
2	20	-20
3	40	-25
4	60	-50
5	70	-70
6	80	-90
7	90	-120
8	0	-120
9	90	-40



## 11. 月表面緯度別温度解析結果

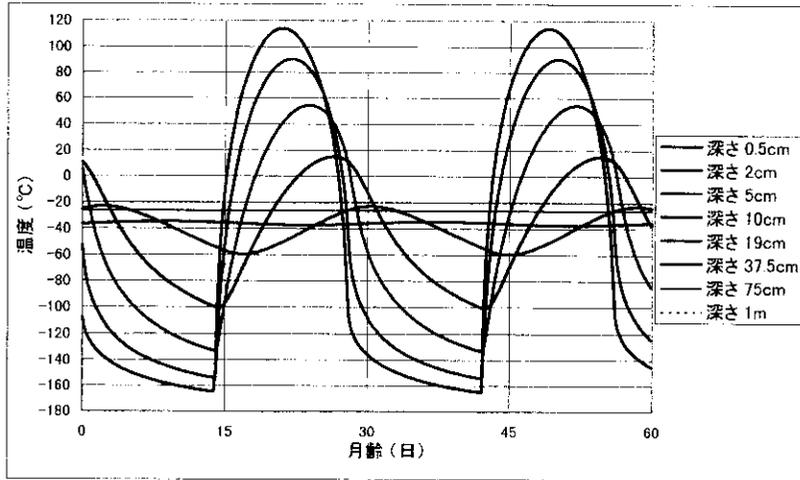
99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」





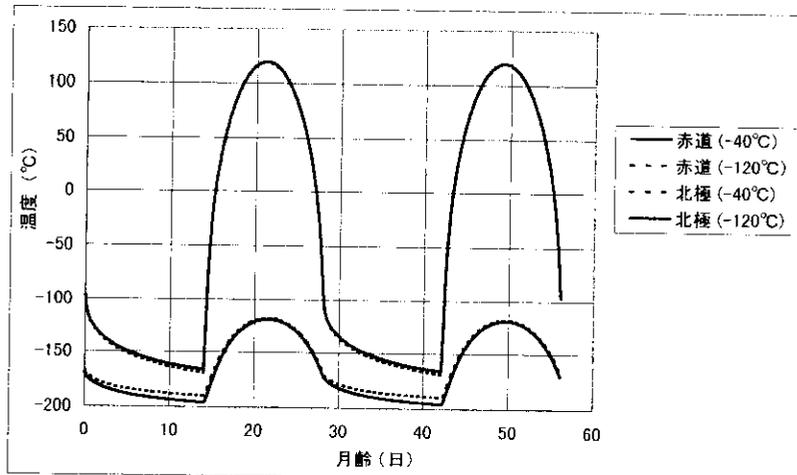
## 12. 月面深さ方向温度解析結果 (緯度 20°)

'99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」



## 13. 境界温度が月表面温度に 与える影響 (解析結果)

'99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」





### 14. Lunar Sourcebook との比較

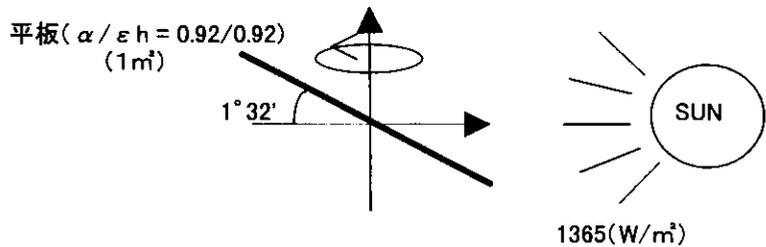
99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」

	日陰になっている 極のクレータ	それ以外の極地	北緯26° (Apollo 15)	北緯20° (Apollo 17)	赤道
Lunar Sourcebook	-233°C	-63 ~ -43°C	-181 ~ 101°C	-171 ~ 111°C	-160 ~ 120°C
解析結果	—	-196 ~ -119°C	—	-166 ~ 114°C	-166 ~ 119°C



### 15. 極地温度簡易解析

99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」



スピン係数 : 0.00733  
 一周当たりの熱入力量 : 9.206(W) → 定常解析結果 : -157.74 (°C)  
 宇宙との輻射結合 : 0.92(m<sup>2</sup>)



## 16. まとめ

99.11.30  
月面探査ローバ  
ワークショップ  
「月表面温度解析結果」

1. 熱設計の面では、高緯度に着陸するミッションの方が望ましい
2. どの緯度に着陸しても低温側の熱対策は必要不可欠
3. 低温側の熱対策としては極地が最も厳しい
4. クレータ等の地形を考慮した熱解析が必要
5. 文献によるデータの吟味の必要性

# 月面ローバーの走行性と掘削に関するテラメカニックス的考察

## テラメカニックス

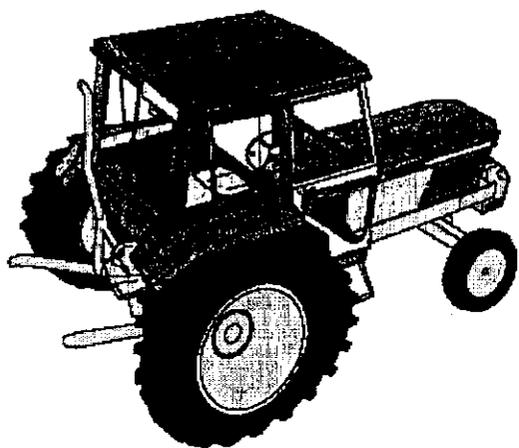
テラ = 地盤  
メカニックス = 機械

機械と地盤の相互作用の研究

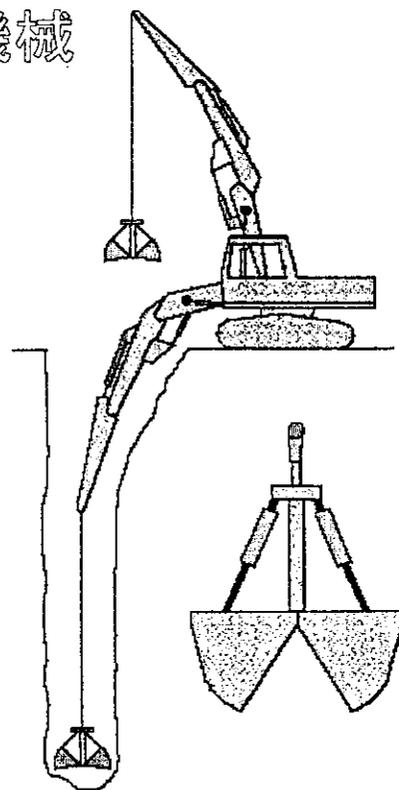
➔ 屋外作業機械の設計と効率的な使用

屋外作業機械

農業機械



建設機械



# テラメカニックスと月面ローバーとの関わり

1. 月面におけるローバーの運動挙動予測
2. 月面におけるローバーの走行性予測  
→ 走行部（特に接地部）の設計
3. レゴリスの掘削抵抗予測 → 作業部分の設計

## 1. 月面におけるローバーの運動挙動予測

- ・ 3次元的な運動挙動予測
- ・ 車両の転倒解析

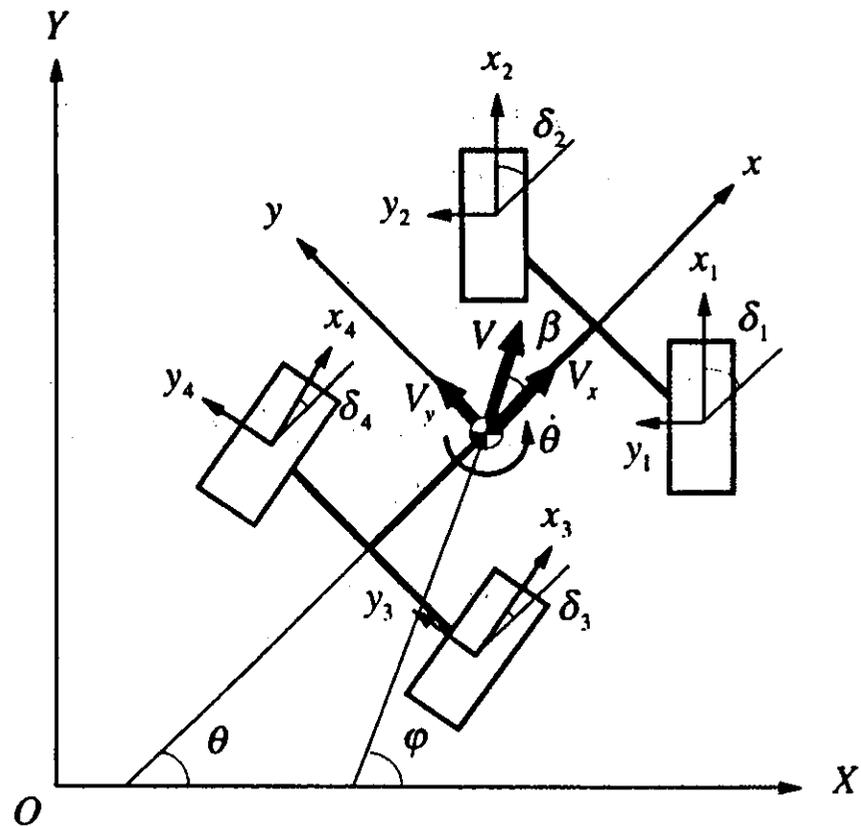
車両の運動方程式 → 数値計算

問 題：車両・地盤間の相互作用

地 盤 の 変 形

車両が地盤から受ける力

# 平面上における車両の運動解析（計算の考え方）



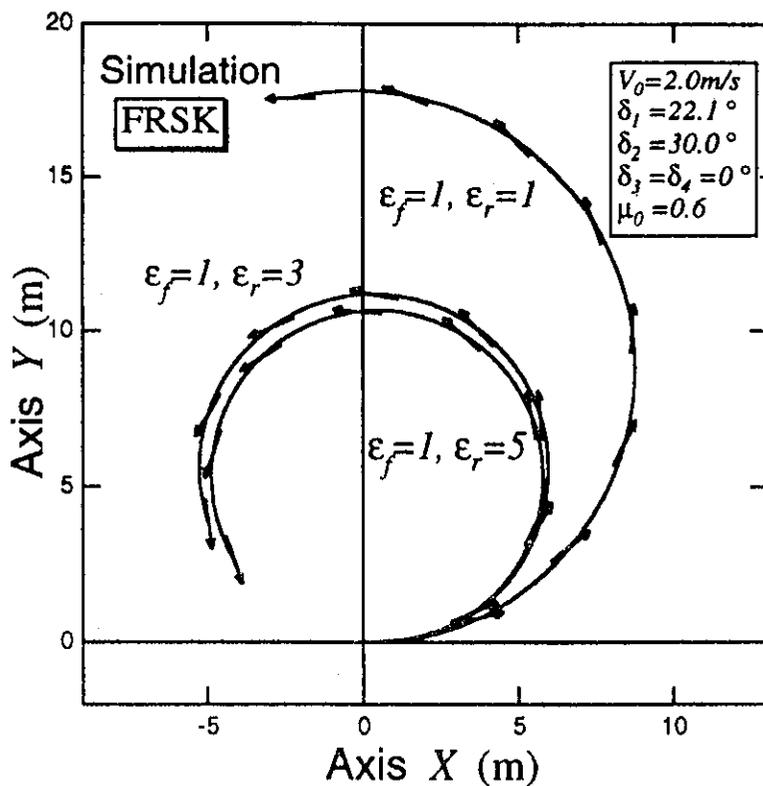
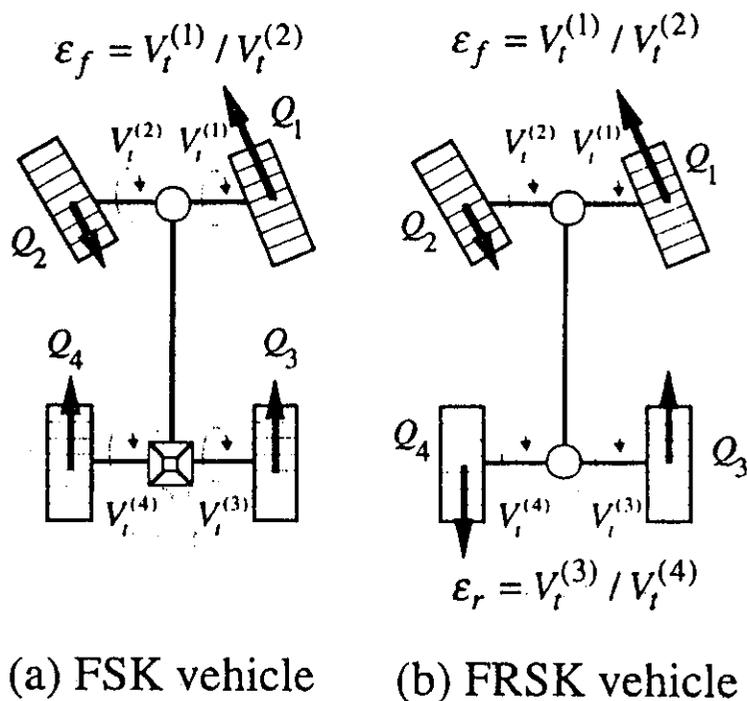
$$m(\dot{V}_x - V_y \dot{\theta}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n Q_x^{(i,j)} - \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n R^{(i,j)}$$

$$m(\dot{V}_y + V_x \dot{\theta}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n Q_y^{(i,j)},$$

$$I_z \ddot{\theta} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n \left( Q_y^{(i,j)} \cdot x^{(i,j)} - Q_x^{(i,j)} \cdot y^{(i,j)} \right)$$

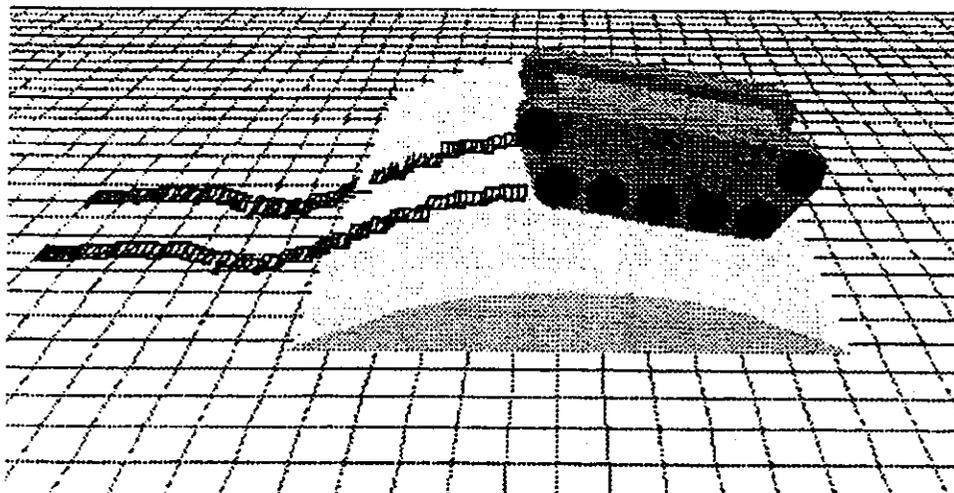
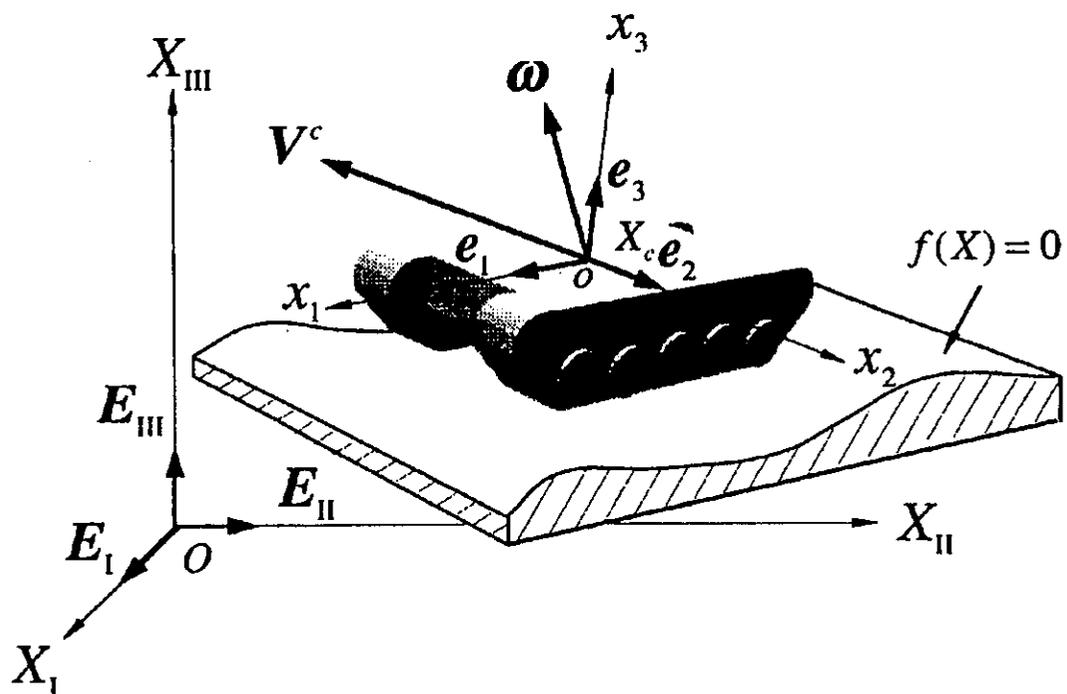
Watanabe, K. et al. (1999) テラメカニックス第19号より引用

# 平面上における車両の運動解析 (計算結果)



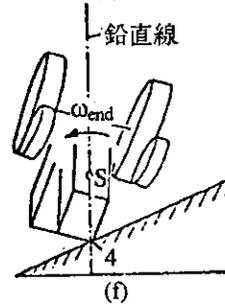
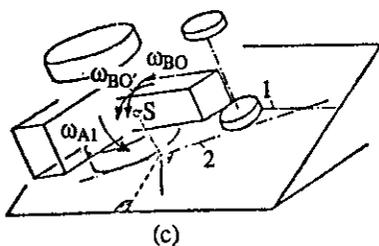
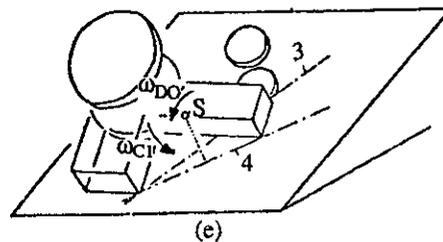
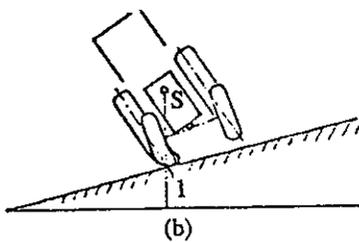
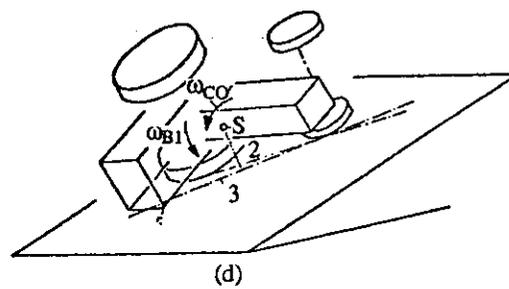
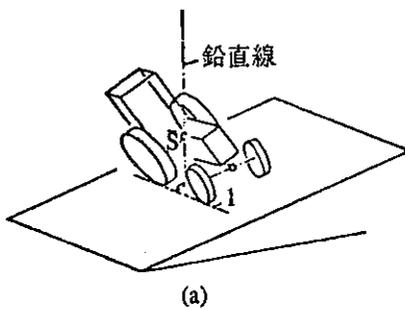
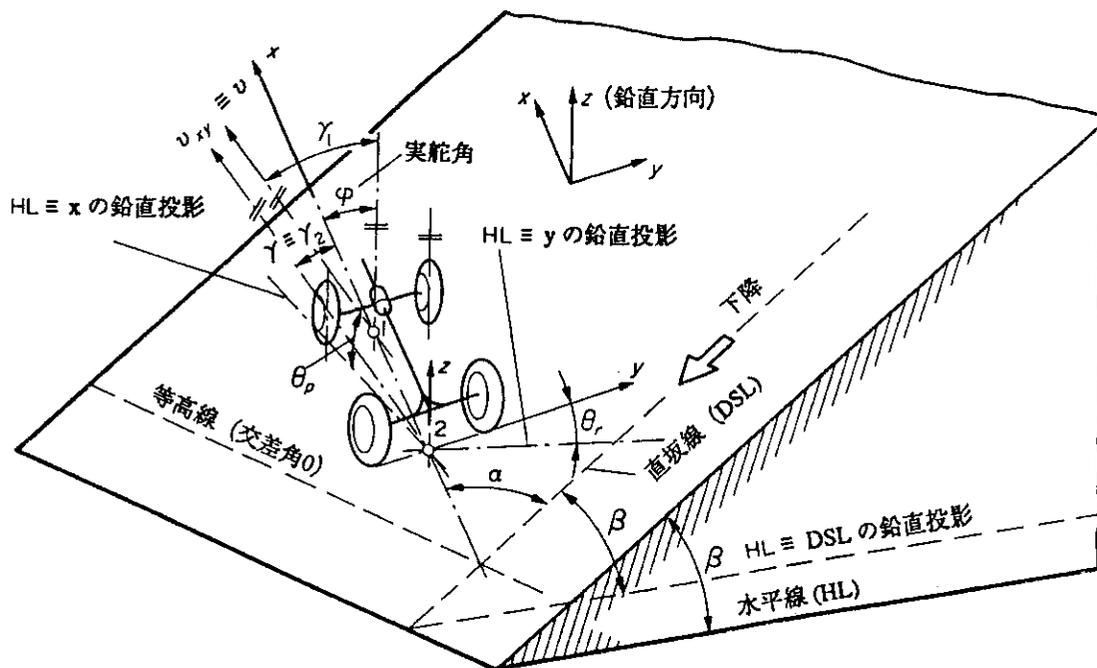
Watanabe, K. et al. (1999) テラメカニックス第 19 号より引用

# 車両の運動解析 —凹凸面上の走行—



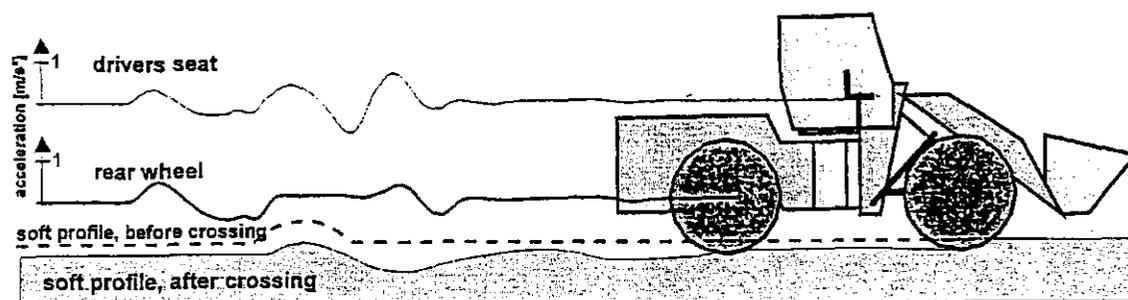
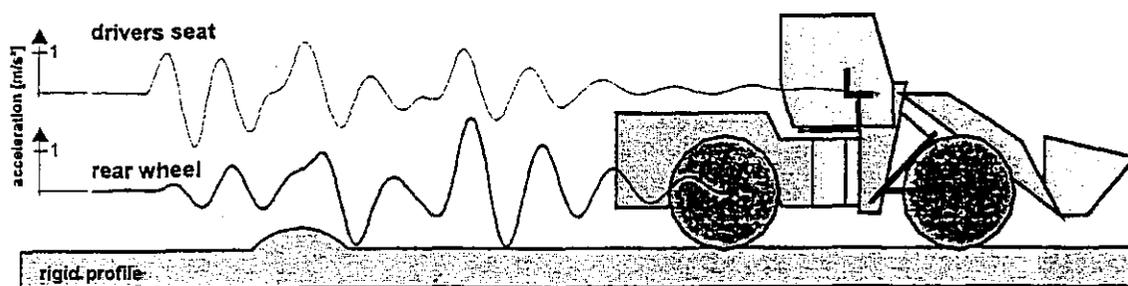
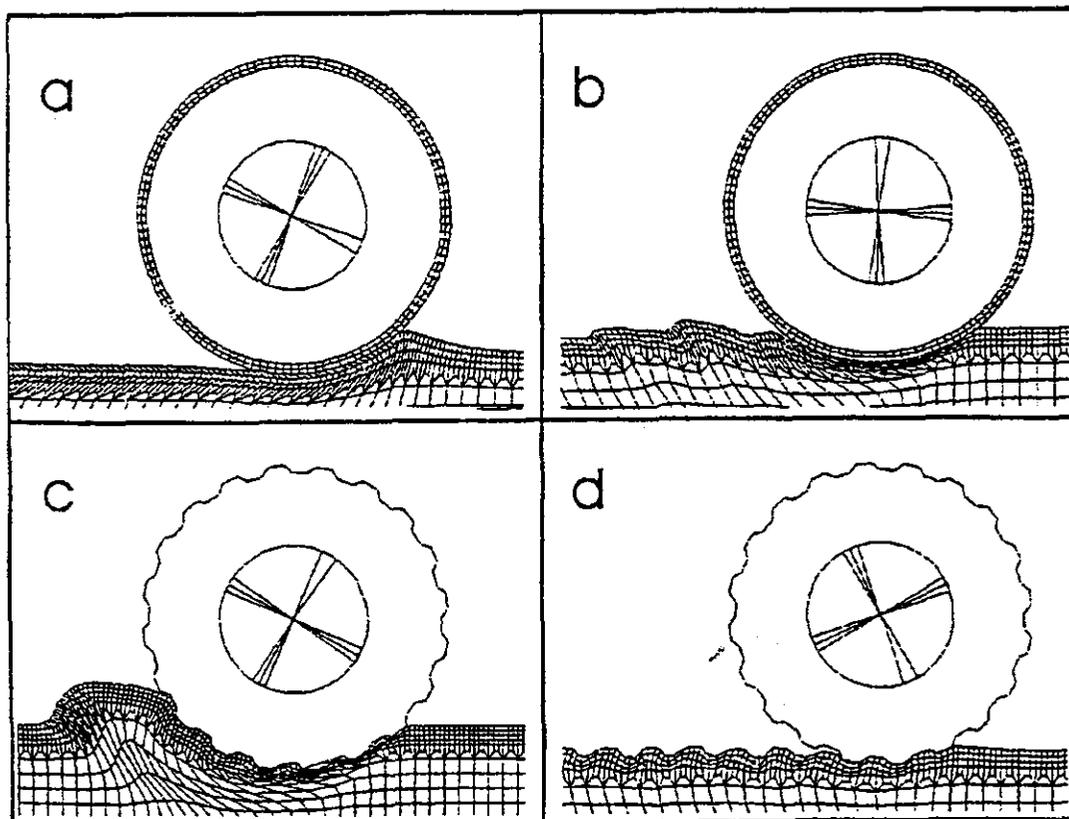
Yamakawa, J. et al. (1999) : Proc. 13th ISTVS より引用

# 斜面における車両の転倒・転落の予測



田中孝・笈田昭：車両・機械と土系の力学（学文社）より引用

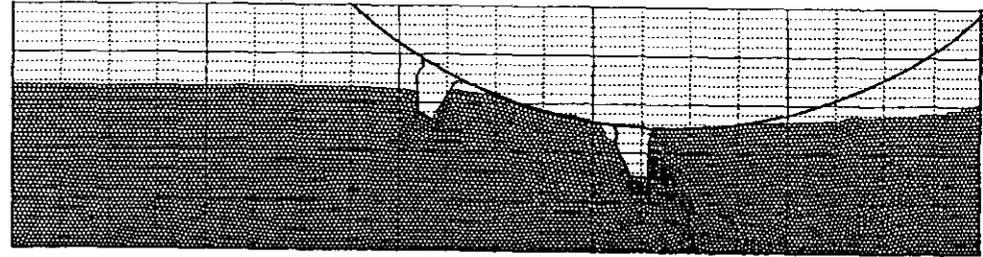
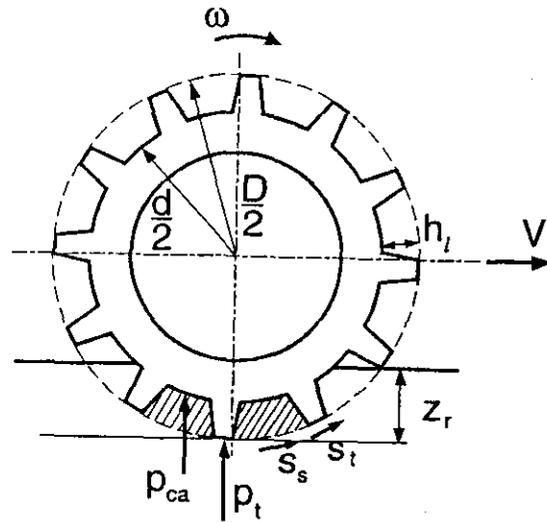
# FEMによるタイヤの走行シミュレーション



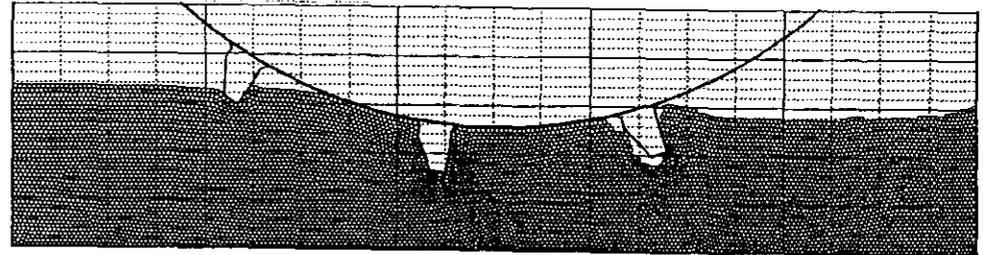
Schmid I.C. (1999) : Proc. 13th ISTVS より引用

# DEMによるラグタイヤの解析

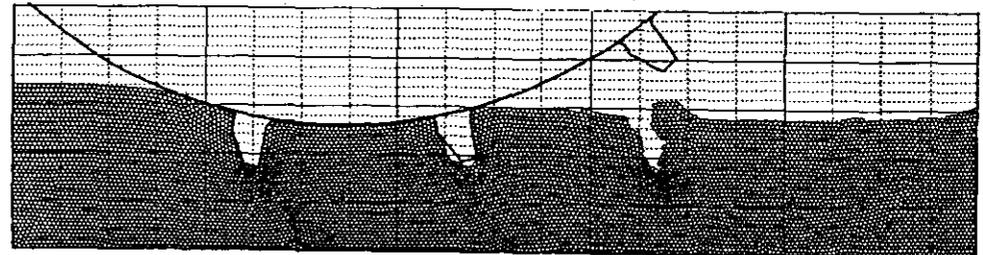
- 115 -



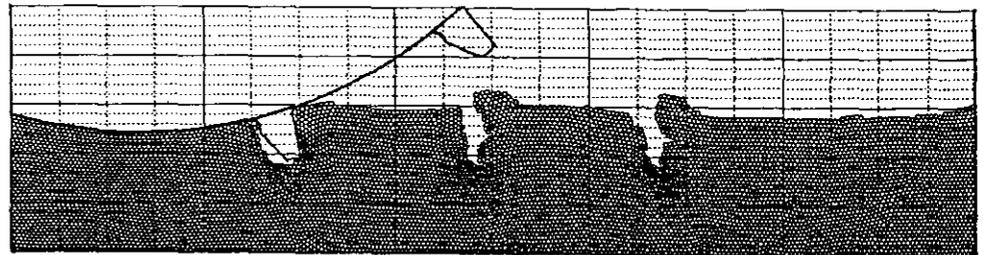
シミュレーション開始後 3.0 秒



シミュレーション開始後 3.3 秒



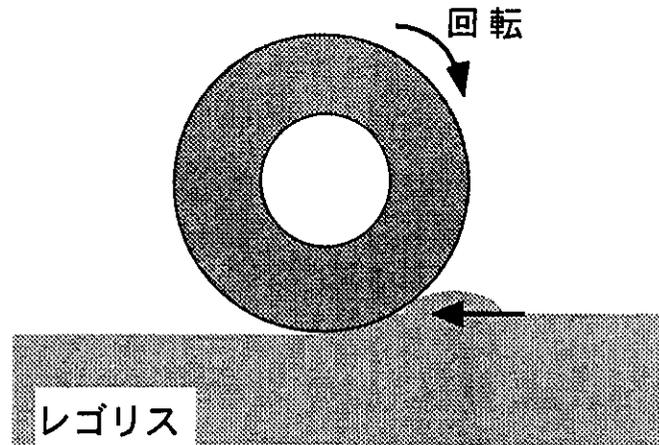
シミュレーション開始後 3.6 秒



シミュレーション開始後 4.0 秒

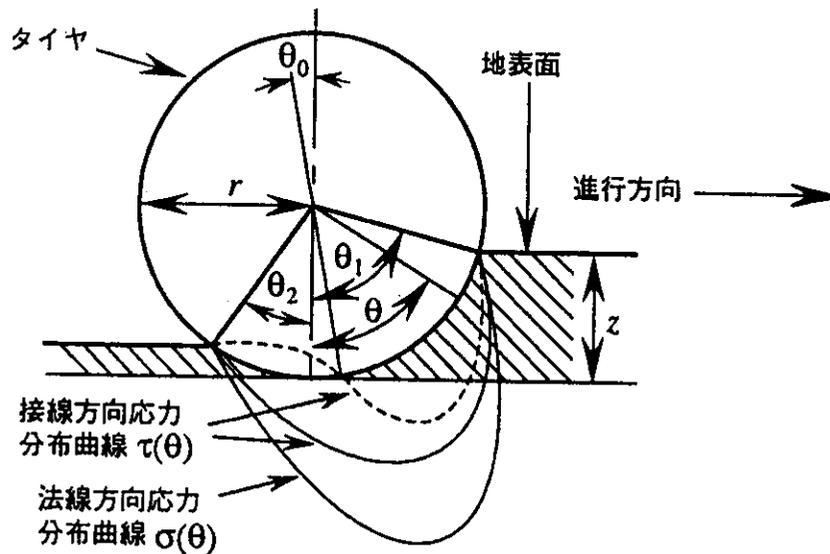
テラメカニックスライブラリー1  
オフロードタイヤ工学より引用

## 2. 月面におけるローバの走行性予測

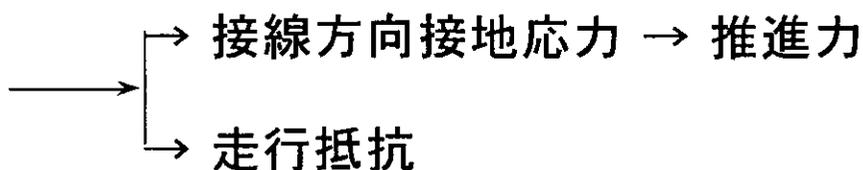


走行するには 推進力 > 走行抵抗

### 牽引力と走行抵抗の予測

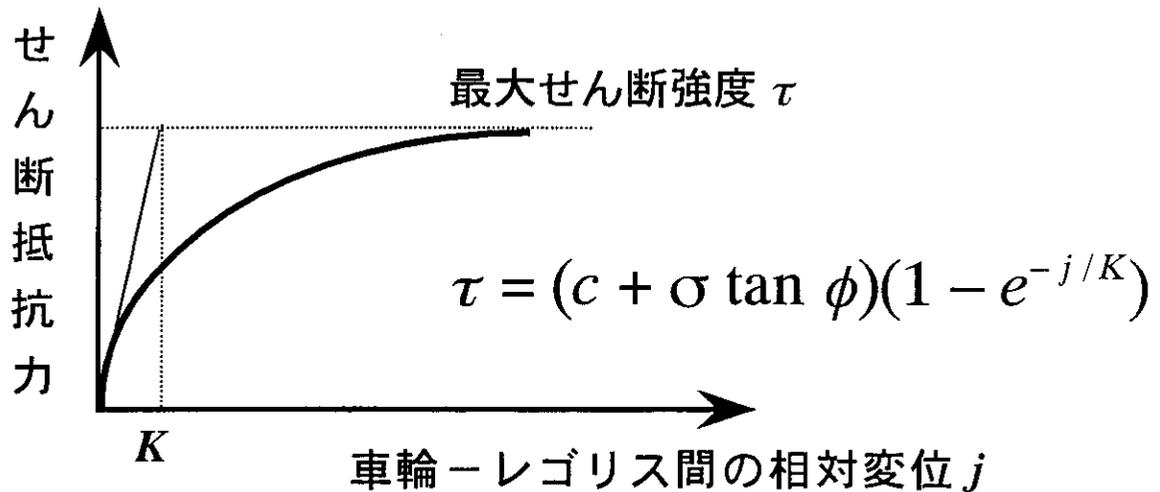


車輪の走行時の沈下量 → 法線方向接地応力



## 接線方向接地応力

→ せん断抵抗力の発揮 → 推進力



## 最大せん断強度 $\tau$ の予測

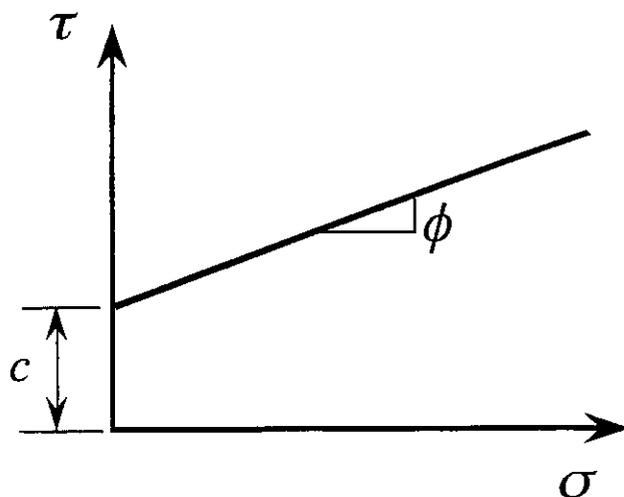
### Coulomb 則

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

$\sigma$  : 法線方向応力

$c$  : 粘着力

$\phi$  : 内部摩擦角



## 月面における特殊条件

### 1) 重力 1/6 の影響

利点：車輪の沈下量は小→走行抵抗小

欠点：法線方向圧小→せん断強度小

### 2) 低重力下におけるレゴリスの力学特性

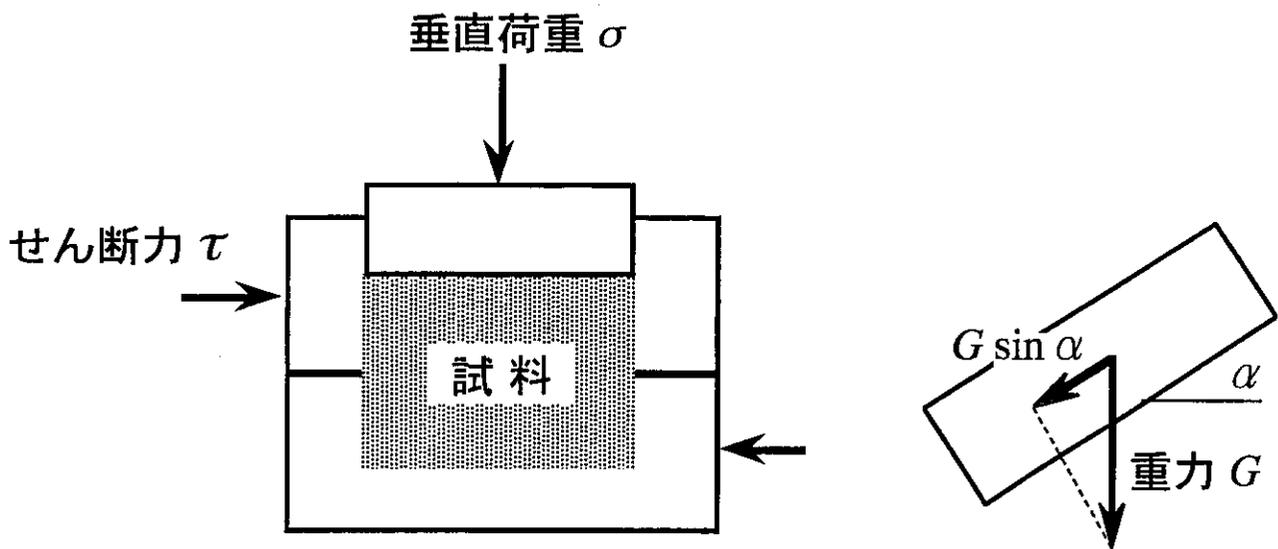
レゴリスの圧縮特性→車輪沈下量の予測

Coulomb 則の成立の可否の検討

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad ?$$

# 低重力下におけるレゴリスの力学特性

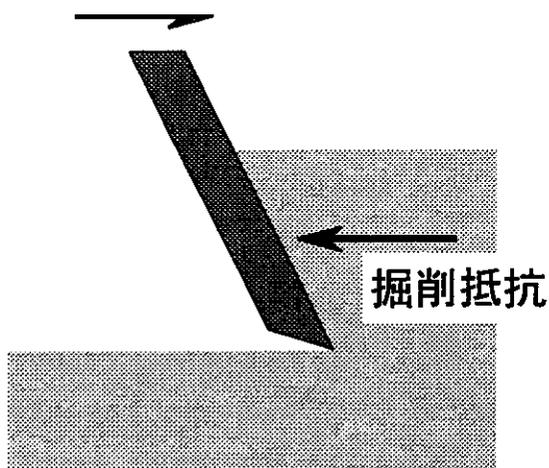
## 傾斜型一面せん断試験



- ・ 低重力レベルにおける Coulomb 則 ?
- ・  $C$ ,  $\phi$  の特徴と大きさ

### 3. 掘削問題について

試料採取に伴うレゴリスの掘削



低重力下における  
レゴリスの力学特性



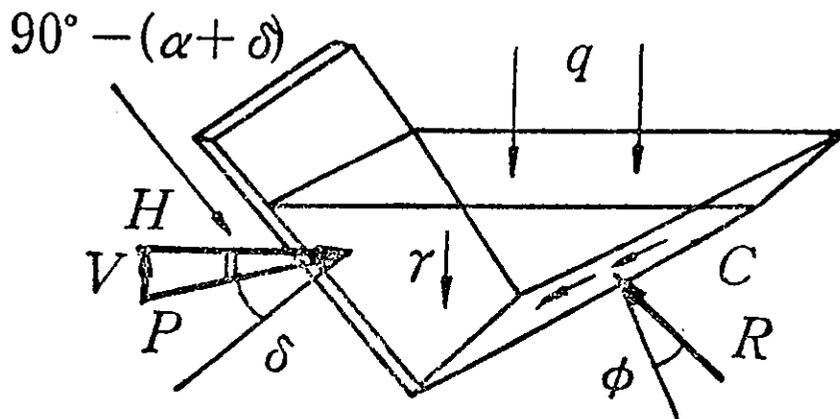
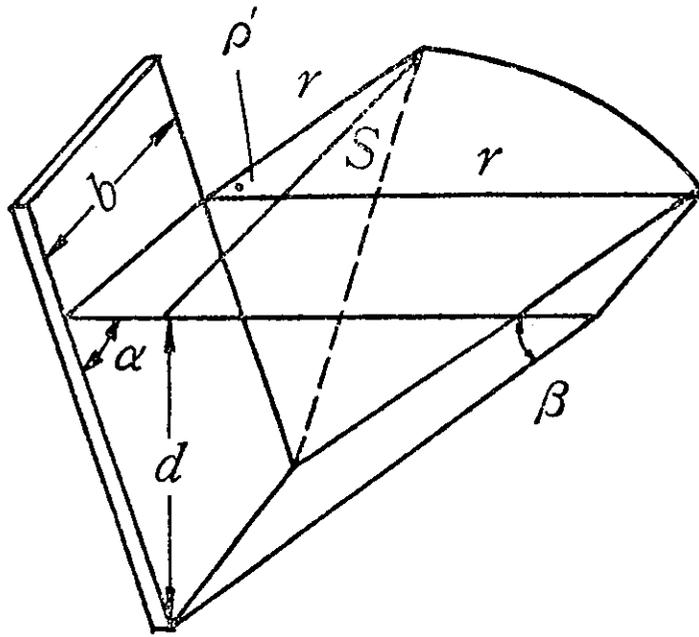
掘削抵抗の予測



掘削機構の設計

低重力下における  
掘削反力の取り方？

## 掘削抵抗の予測方法



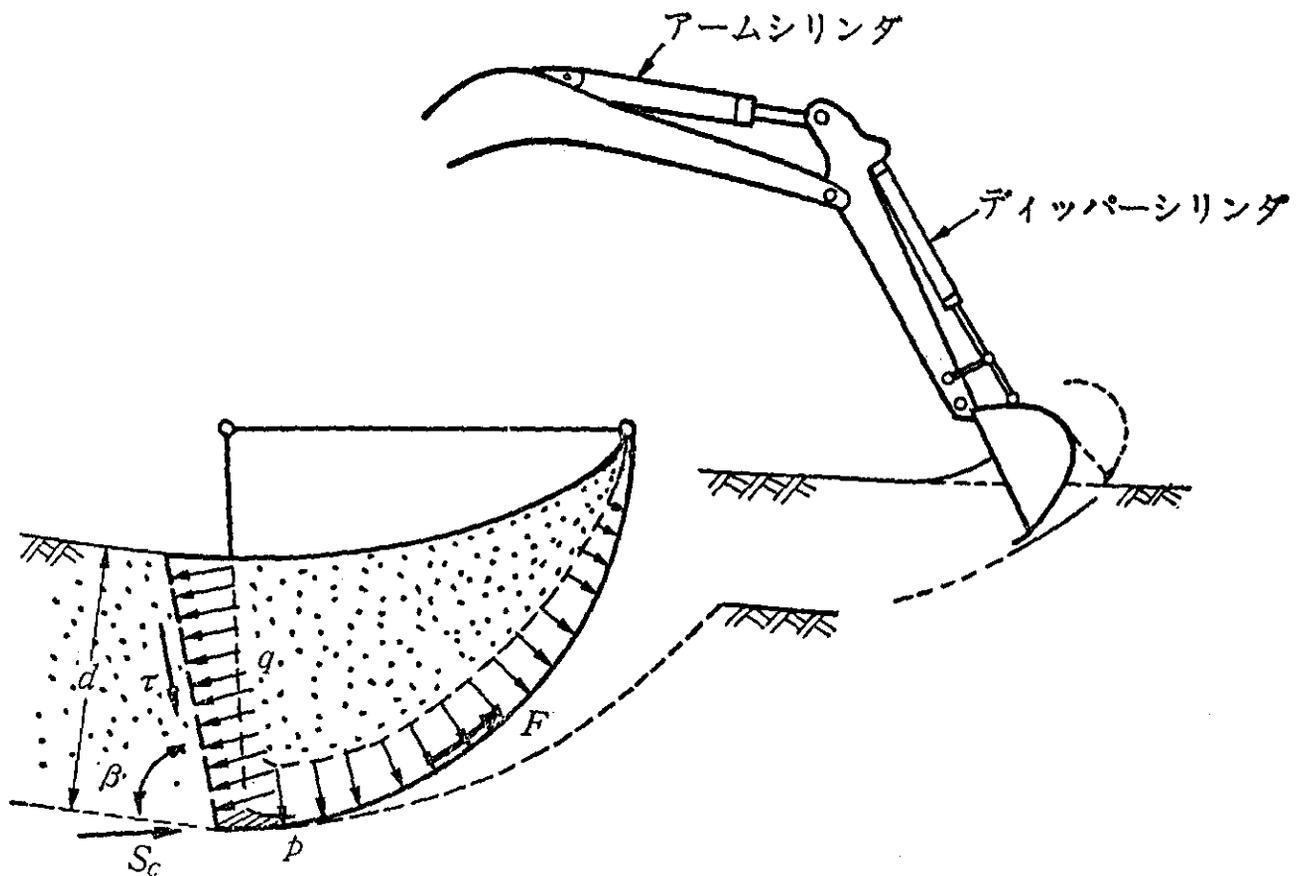
$$H = H_1 + 2H_2$$

$$= b \left[ \frac{rd^2}{2} \frac{r}{d} \left\{ 1 + \frac{2}{3} \frac{r}{d} \frac{d}{b} \sin \rho' \right\} + cd \{ 1 + \cot \beta \cot (\beta + \phi) \} \right. \\ \left. \left\{ 1 + \frac{r}{d} \frac{d}{b} \sin \rho' \right\} + qr \left\{ 1 + \frac{r}{d} \frac{d}{b} \sin \rho' \right\} / \right. \\ \left. \{ \cot (\alpha + \delta) + \cot (\beta + \phi) \} \right]$$

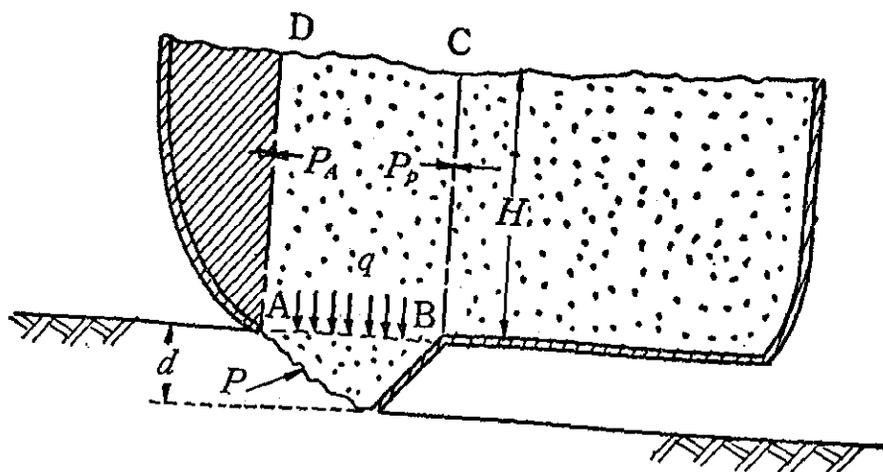
杉山昇：建設機械と土の諸問題（鹿島出版会）より引用

# 掘削抵抗の予測 —機械掘削の場合—

## バケットによる掘削



## スクレーパーによる掘削



杉山昇：建設機械と土の諸問題（鹿島出版会）より引用

# 月面移動探査機用エネルギー伝送 システムの概念検討

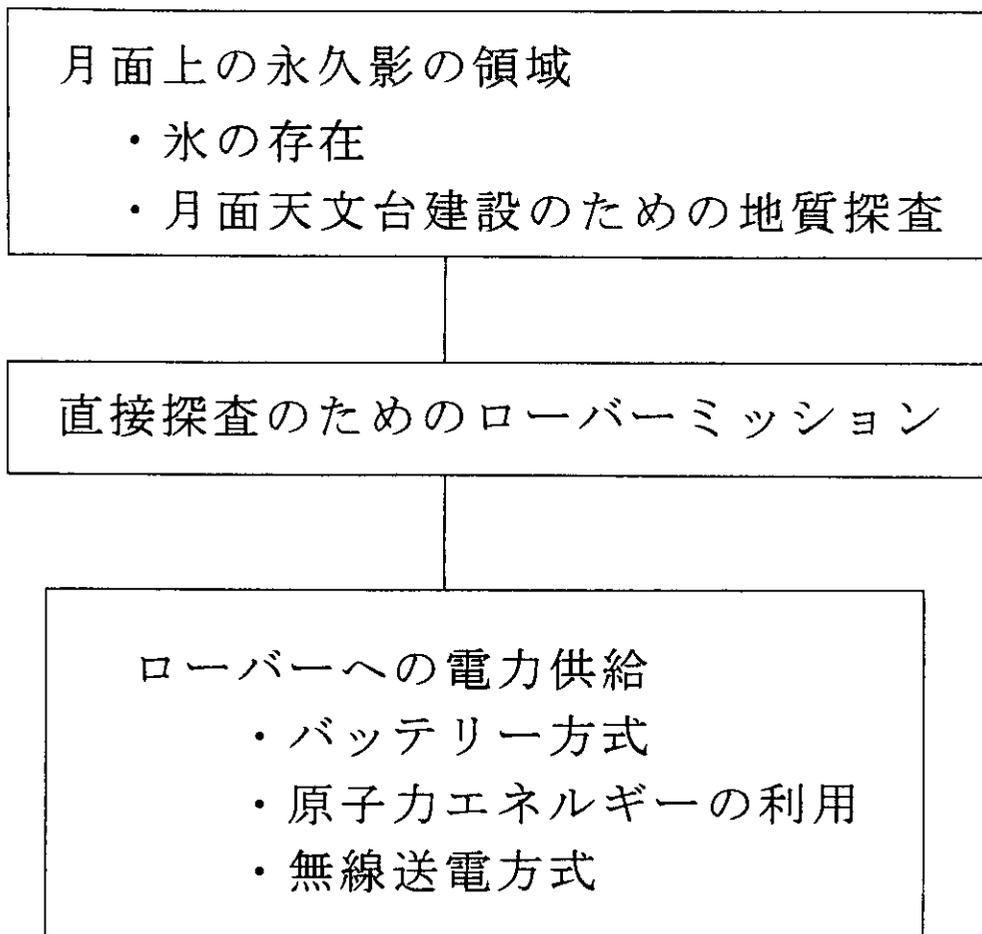
田中孝治、佐々木 進

宇宙科学研究所

## 項 目

- ・ 研究背景、目的
- ・ 送電方式の検討
- ・ システム検討
- ・ まとめ

## 研究の背景



## 研究の目的

永久影内での移動探査を行うローバーミッションのためのマイクロ波送電システムの概念検討

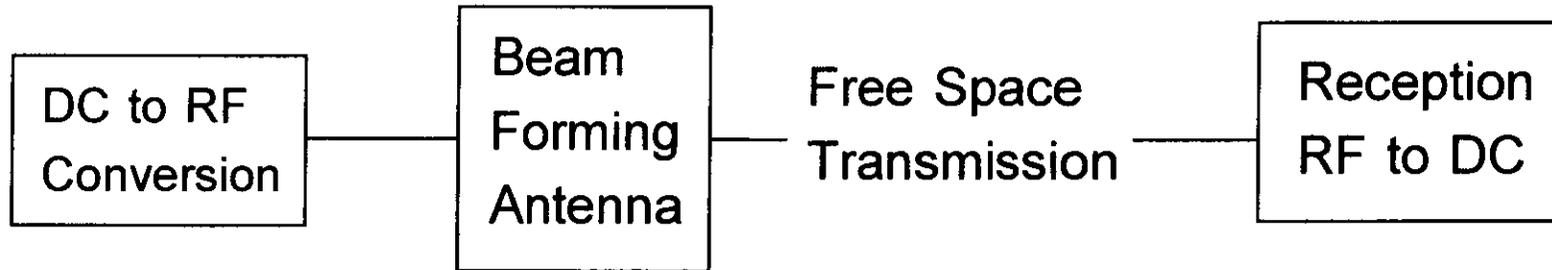
## 形態

- ・ 周回衛星から月面ローバーへの無線電力伝送
- ・ 月面上母船からローバーへの無線電力伝送

## システム検討の前提

- ・ ローバーは永久影内探査用
- ・ 月面上母船からの電力伝送
- ・ 伝送距離：10km
- ・ ローバー必要電力：100W
- ・ 母船が日照時のみローバーを運用し、日陰時ローバーは母船内に退避する

# Beamed RF Power Transmission System



## Microwave

- Solid State devices
- Electron Tube devices

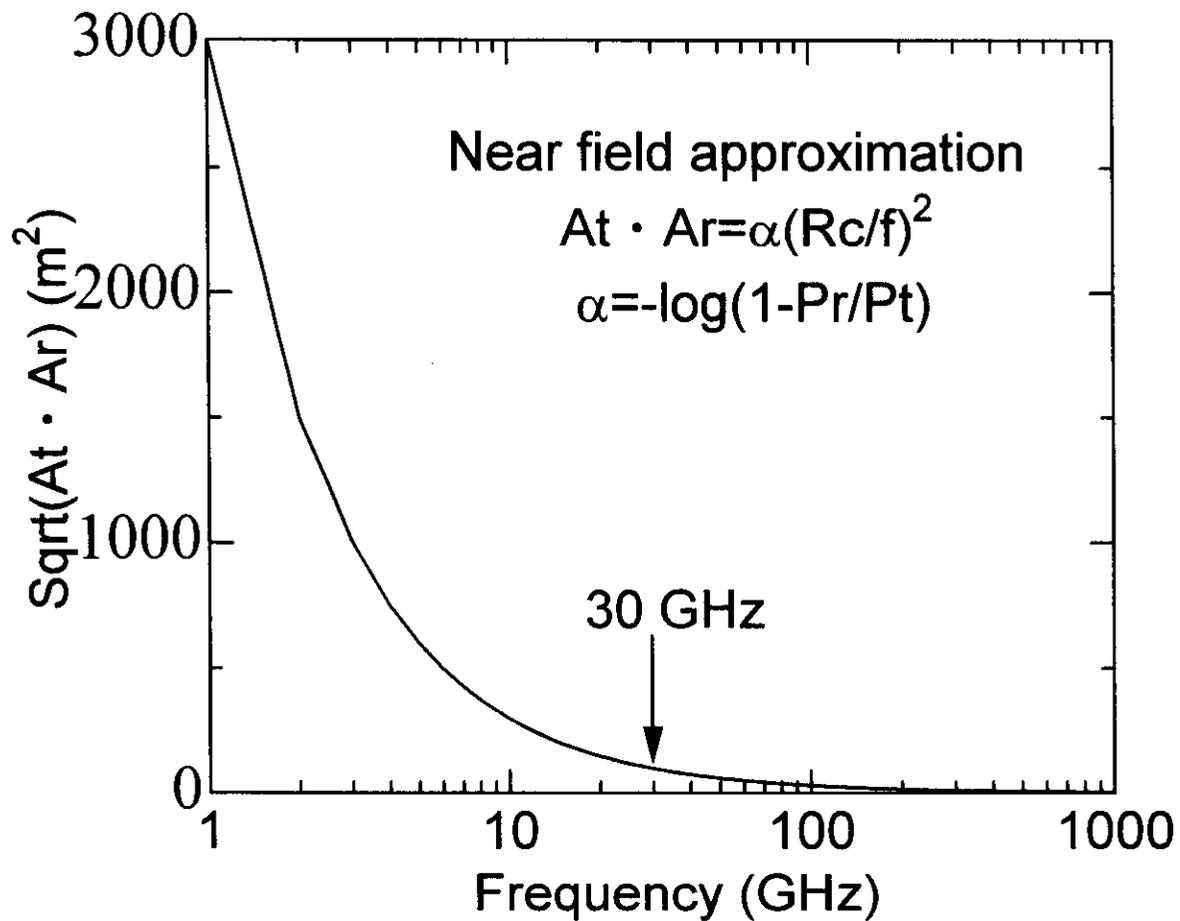
Rectenna

## Laser

- Laser Diode Array System  
(0.85  $\mu$  m)

Photovoltaic converter  
(GaAlAs)

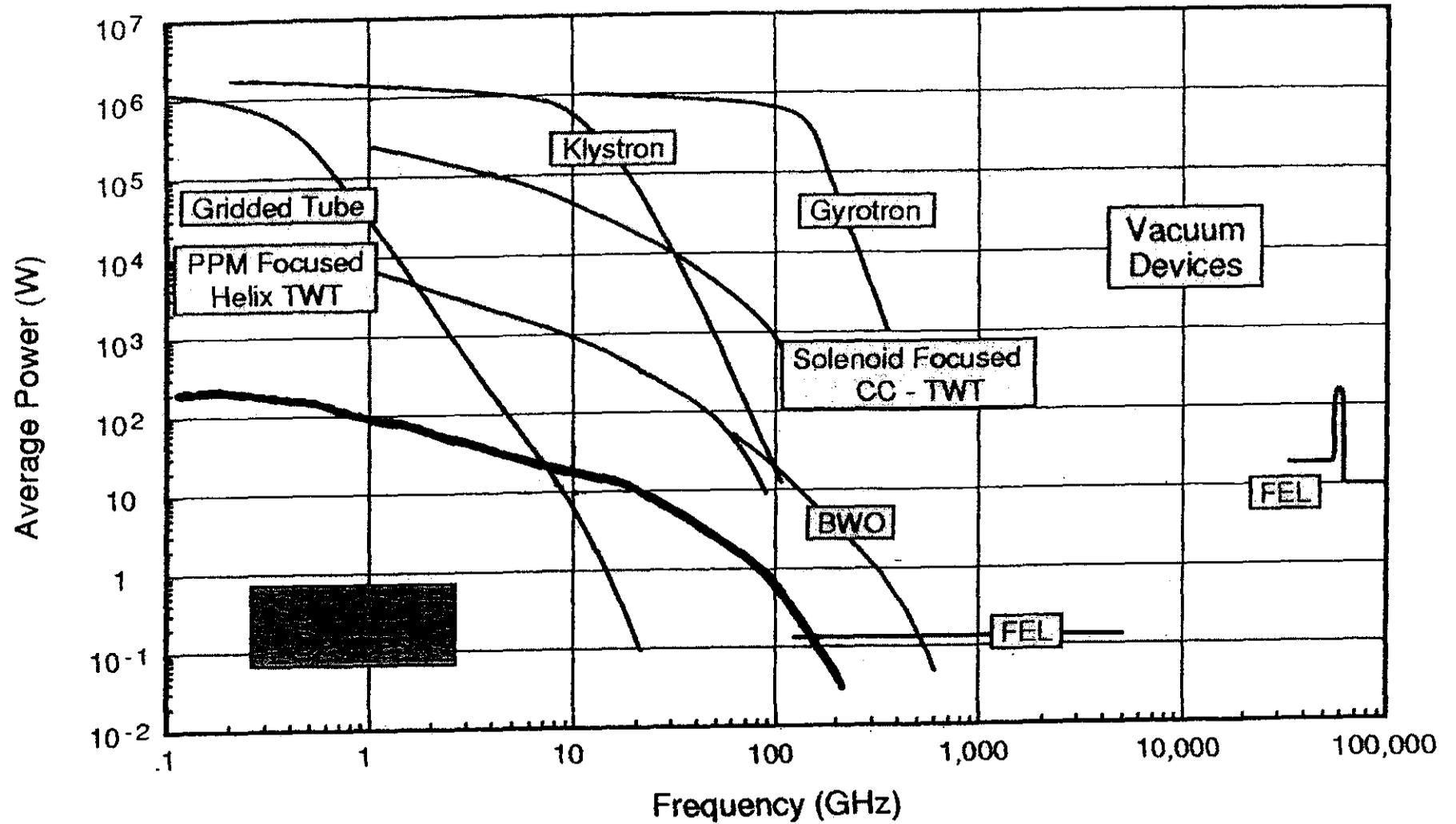
## Transmitter/Receiver Size vs. Frequency



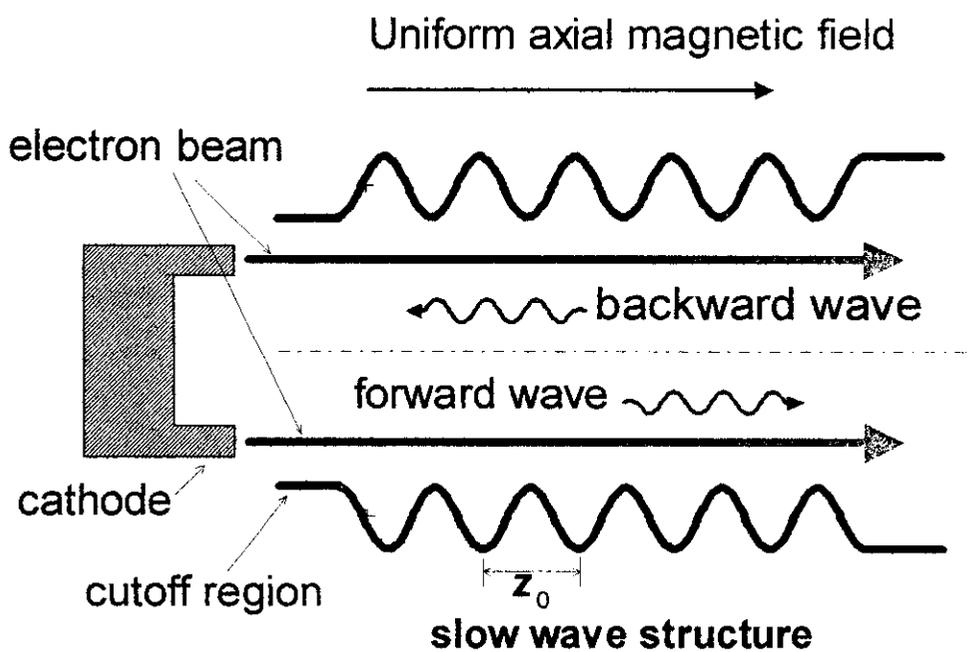
R : Distance (m),      f : Frequency (GHz)

$A_t$  : Transmitter Area ( $m^2$ ),     $A_r$  : Receiver Area ( $m^2$ )

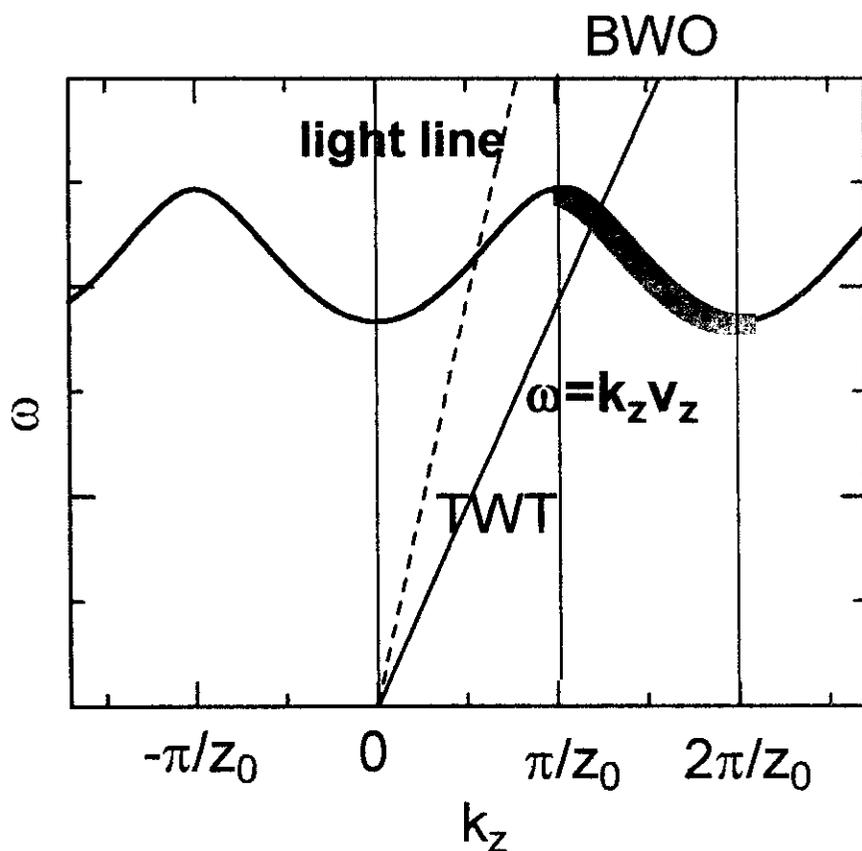
$P_t$  : Transmitted Power ( $m^2$ ),    $P_r$  : Received Power ( $m^2$ )



RF vacuum electronic and solid-state devices—current state of technology for single device performance.

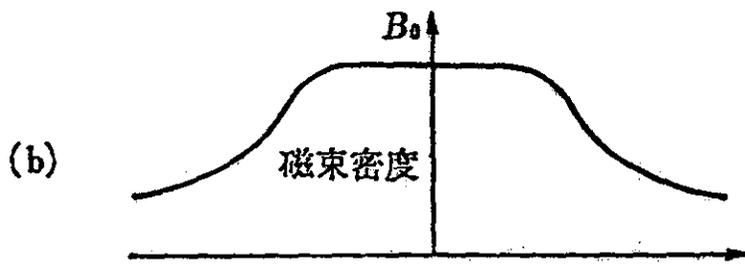
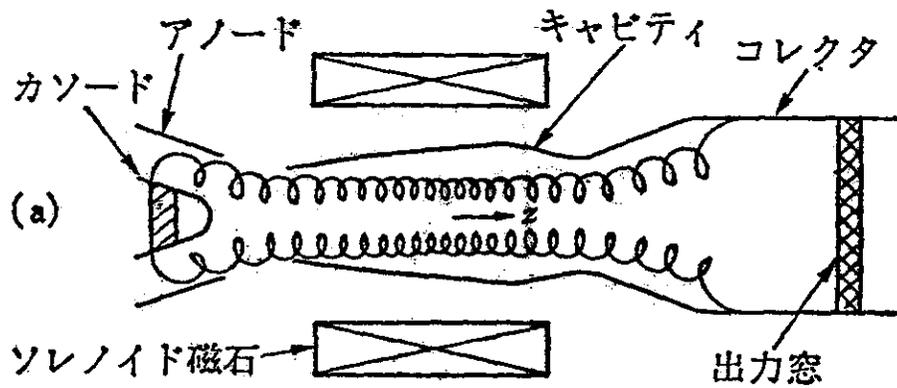


(a) A scheme of a BWO

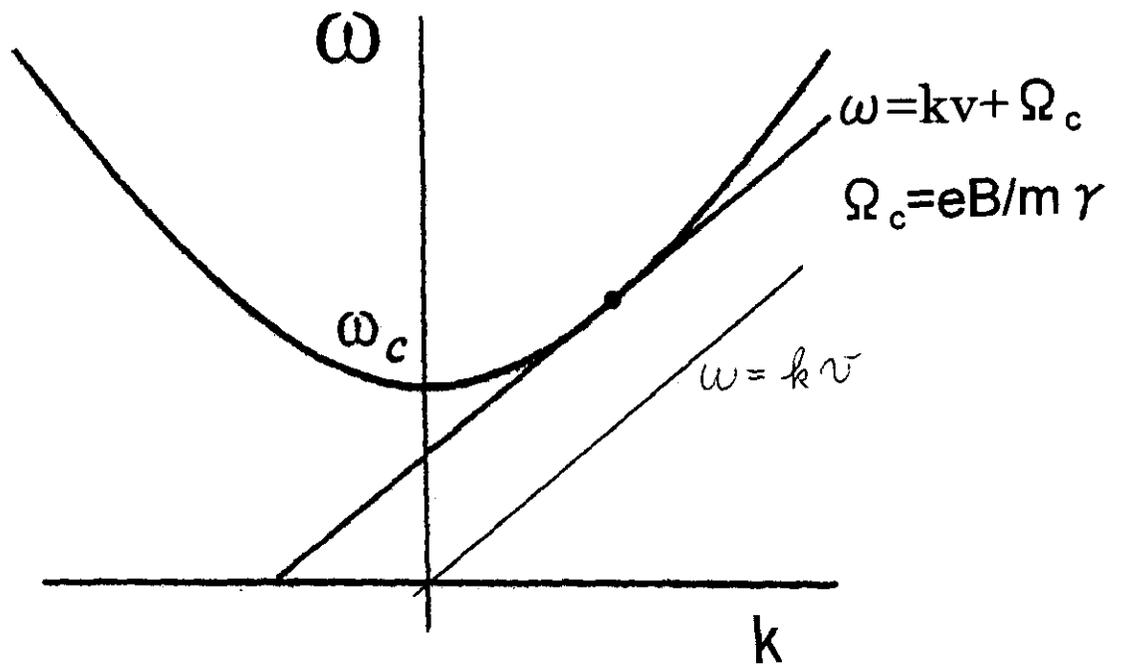


(b) A dispersion diagram for a BWO

# Fast wave device



ジャイロトロンの基本構成



## Performance Characteristics

- Microwave devices

Devices	Mass	Efficiency
TWTA(5.8GHz)	6.4kg/kW	50%
TWTA(30GHz)	6.4kg/kW	30%
Gyrotron(35GHz)	3kg/kW	40%

Rectenna (5.8GHz)	0.24kg/m <sup>2</sup>	80%
Rectenna (30GHz)	0.67kg/m <sup>2</sup>	60%
CWC(1~10)	—	80%

- Laser devices

Laser Transmitter	50kg/kW	40%
Laser PV Converter	6kg/kW	20%

## Comparison of Efficiencies

Frequency (GHz)	DC to RF (%)	Beam Forming Antenna (%)	Free Space Transmission (%)	RF to DC (%)	Total Eff. (%)	Input Power (kW)	Output Power (W)
5.8	50	80	0.8[10km]	80	0.25	10	25
30	30	80	32[5km]	60	4.6	10	460
30	30	80	9.4[10km]	60	1.4	10	135
353(THz)	40	-	100[~10km]	20	8	5	400

- Microwave      Diameter transmitter antenna : 10 m  
                          Diameter receiver antenna : 4 m
- Laser            Diameter transmitter dish : 50 cm  
                          Diameter receiver dish : 10 cm

## 送電系の比較

	効率(%) [5km]	指向精度 (度)	重量(kg)		
			送電機構	アンテナ	受電部
マイクロ波 (30GHz)	4.6	0.06	64	150	8
レーザー (353THz)	8	0.003	250	0.2	2.4

### マイクロ波システム

- 利点
- ・ 技術的に確立されている
  - ・ 送電モードとサーチモード  
(フェーズドアレイアンテナの利用)

- 欠点
- ・ アンテナが大きく重い
  - ・ 送電効率が劣る

### レーザーシステム

- 利点
- ・ 小さく軽いシステムが実現できる
  - ・ 送電距離が長い
- 欠点
- ・ 開発途上の技術
  - ・ 機械的精度が要求される
  - ・ アンテナには冷却機構を考慮する必要がある

## マイクロ波送電システム

### ・母船

太陽電池 : 10kW

DC-RF 変換システム : MPM

(固体素子+TWTA)

送電アンテナ径 : 10 m

(100 素子位相制御フェーズドアレーア  
ンテナ+AZ 方向駆動)

トラッキング : 光学的方法

(ローバーで発光、母船で追尾)

### ・ローバー

受電アンテナ径 : 4m

受電電力 : 460W(5km)

135W(10km)

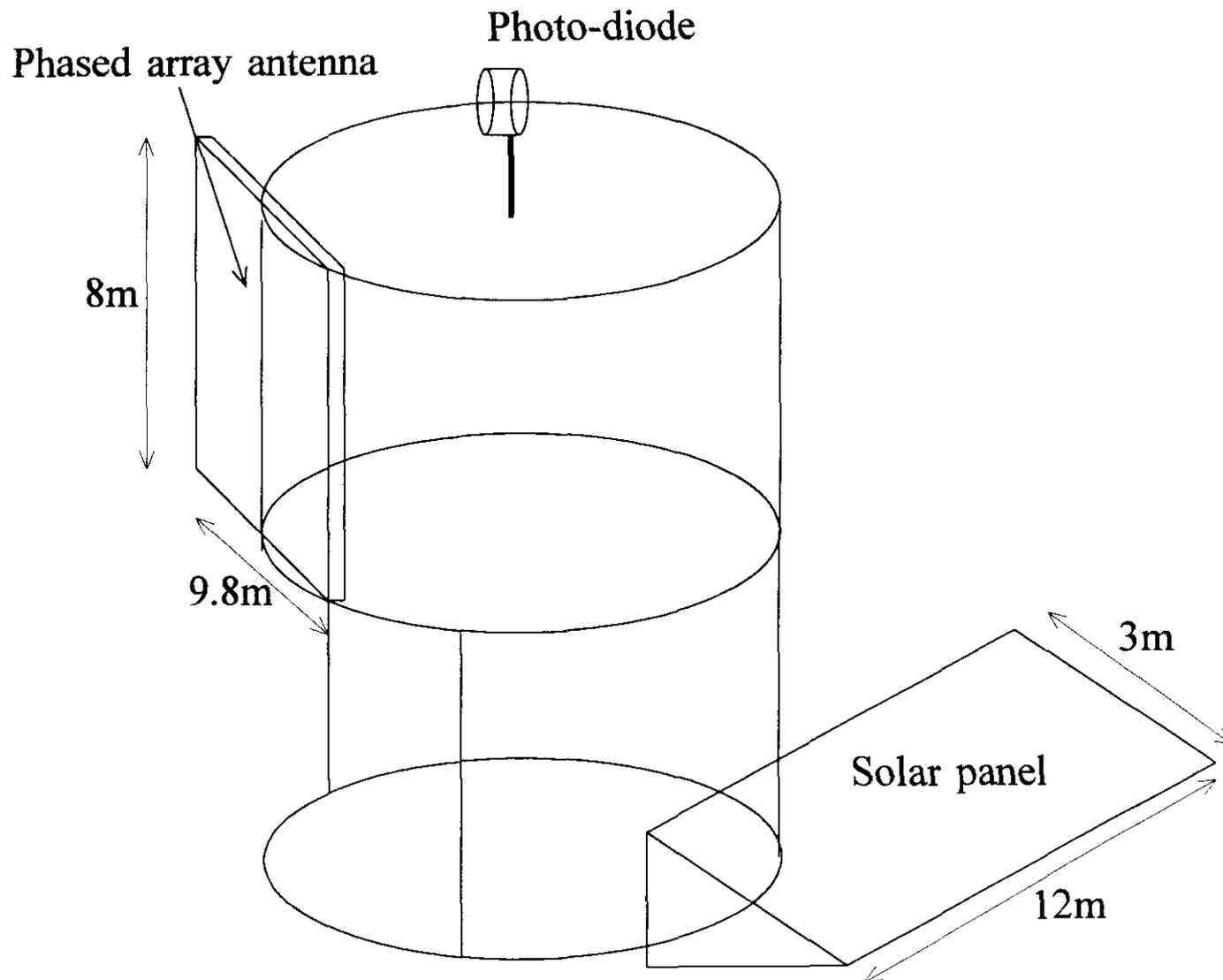
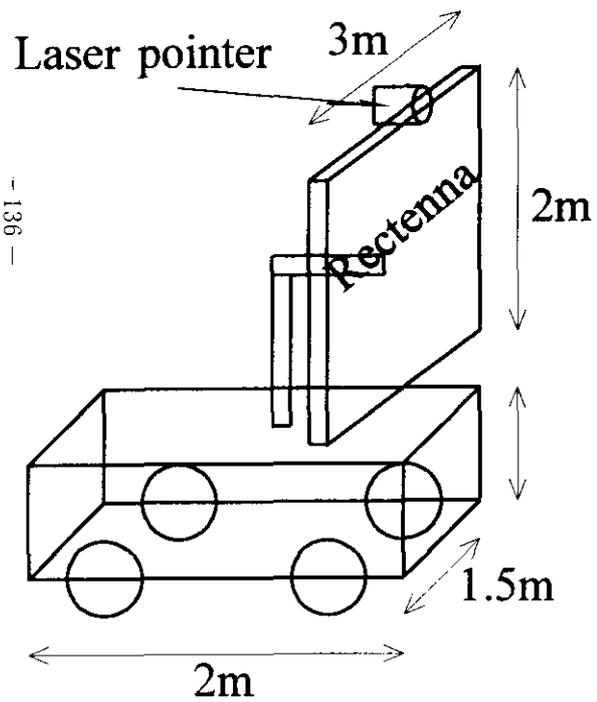
## マイクロ波無線送電システムを用いた場合の ミッション重量

### ・母船ミッション重量

太陽電池	36kg
マイクロ波送電系	214kg
アンテナ駆動部	20kg
制御装置・電源	20kg
合計	290kg

### ・ローバーミッション

受電・整流部	8kg
レクテナ駆動部	5kg
制御装置	5kg
合計	18kg



## まとめ

●マイクロ波およびレーザーを用いた無線送電システムに関して、デバイスを中心に比較を行った。

●マイクロ波送電を用いたローバーミッションのシステム検討

- ・ミッション重量はほぼ等しい
- ・技術が確立している
- ・アンテナ制御が容易

## 今後の課題

●アンテナおよび制御システムの具体的検討

●月面探査システムに搭載される他のミッションを考慮したシステム検討

# 月面ローバの 走行経路計画に関する研究

筑波大学            ○城間直司, 油田信一  
宇宙開発事業団 市川誠, 吉岡信人, 飯島純一

## 実際に活躍するローバの開発

- 月環境適応からの要求
  - 大気が存在しない
  - 宇宙線, 太陽風
  - 熱対策 ( -150 – 130 °C )
  - クレータ, レゴリス
- ミッション側からの要求
  - 掘削, サンプル採取 → アーム, ハンド
  - クレータ縁, 中央丘 → 斜面走破
  - 観測装置設置 → ポジショニング

## 目標

### 実際に月面で活躍するローバの開発

- ローバの走行系について

### どれくらいの走行性能が必要か？

## 目的

走行系の評価の指針となる

### 走行効率 の提案

## ローバの月面上での余分な走行

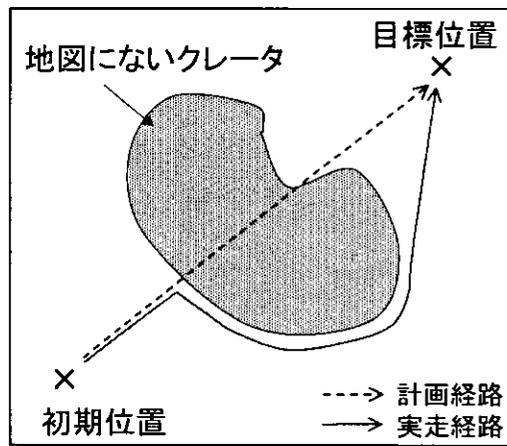
- SELENEによる地図  
(分解能10m)

- 不完全な情報に  
基づく経路計画

- 障害物回避による  
余分な走行

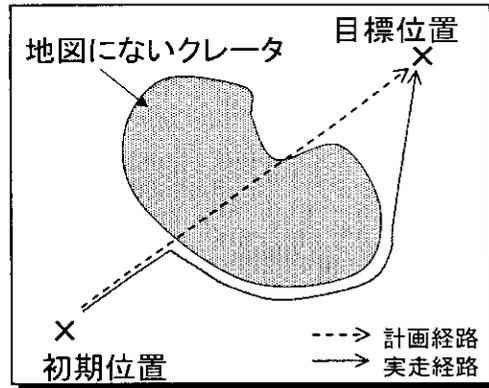
- 目的地に到達可能か？

- どのくらい余分な走行をするのか？



## ローバの走行効率

- 迂回による余分な走行
- 予めロスを見積もって経路を計画
- 余分な走行の算出



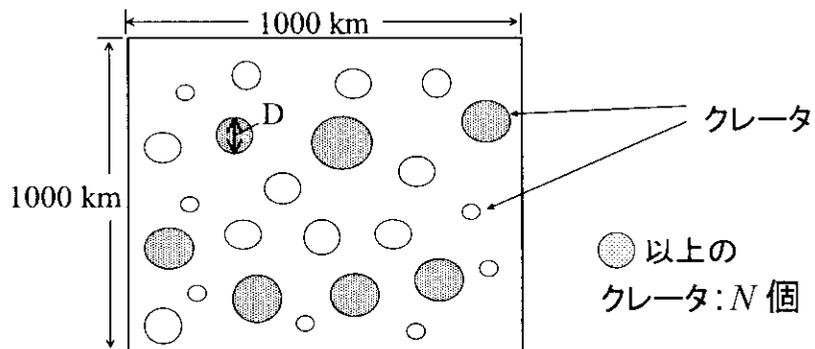
$$\text{走行効率} = \frac{\text{計画走行距離}}{\text{迂回による全走行距離}}$$

## 月面のクレータ分布モデル

面積  $10^6 \text{ km}^2$  内にある直径  $D \text{ m}$  以上のクレータの概数  $N$  (E.M. Shoemaker)

高地 :  $\log N = 11.05 - 2.12 \log D$

海 :  $\log N = 8.12 - 1.71 \log D$



## 指針としての走行効率

- 迂回による余分な走行概算  
→ 予めロスを見込んだ走行計画
- 走行性能からの探査可能な範囲の決定
- 探査範囲からのそれを実現する走行性能の決定
- 走破すべき小さなクレータの概算  
→ 走行系仕様へ反映
- センサレンジの走行への影響  
→ 走行速度, センサ能力, 配置

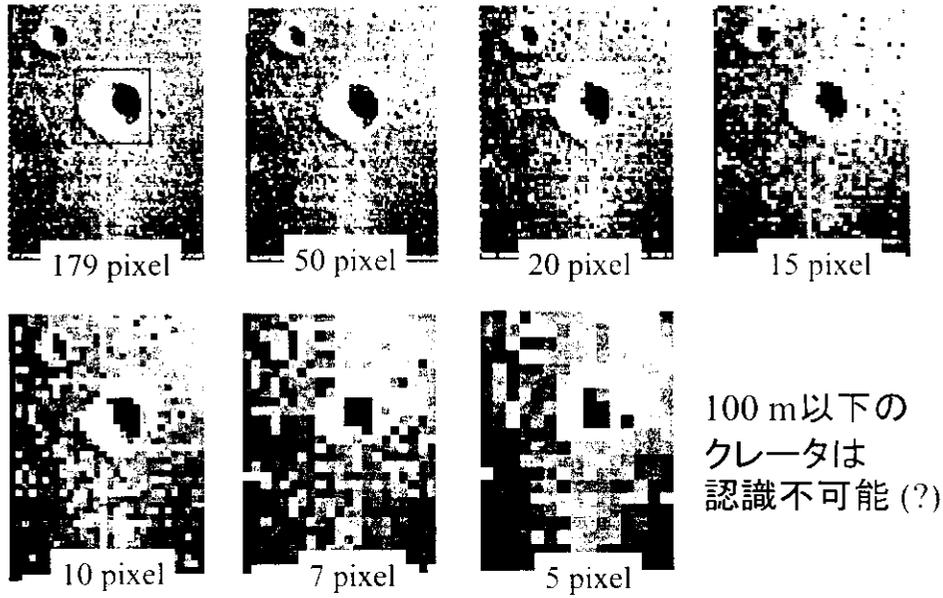
## どの程度の大きさのクレータが認識可能か？

- 10mの分解能の月面図
- クレータの認識には何画素必要か？
- 過去のデータでは, 7画素

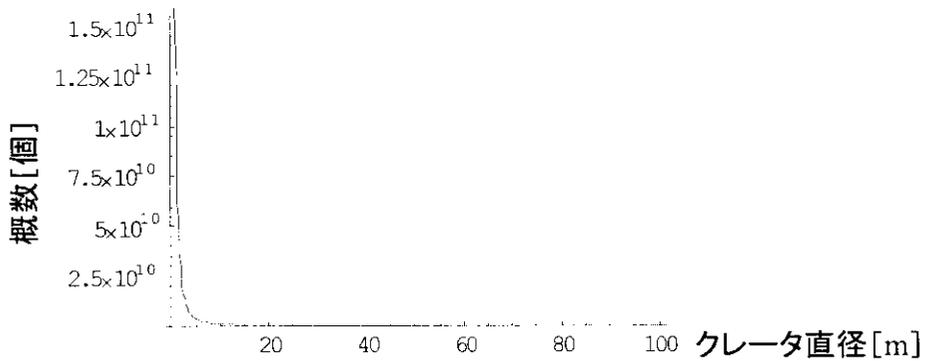
## クレータの認識に必要な画素数の検証

- クレータ認識の解像度による違い

## 解像度によるクレータの見え方の違い



## 認識不可能なクレータ

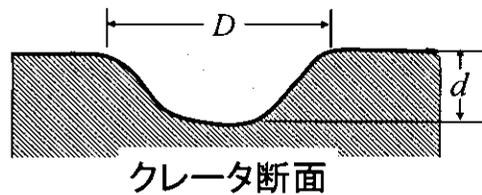


小さなクレータは無数に存在  
→ ある程度の大きさは走破すべき

## クレータのモデル

直径  $D$  m のクレータの深さ  $d$  m (R. B. Baldwin)

$$\log D = 0.896 + 1.027 \log d + 0.256 \log^2 d$$

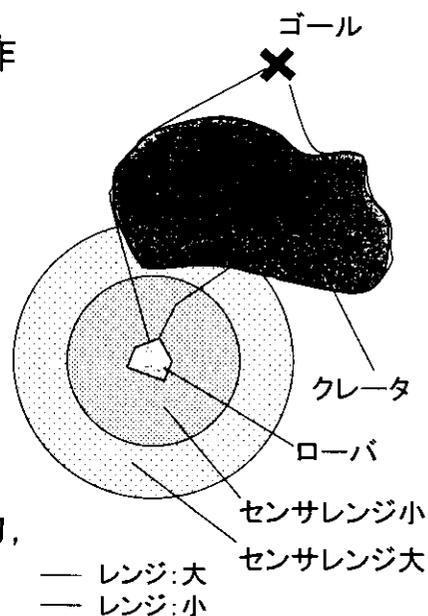


走破すべきクレータの大きさ

→ 走破可能とする走行性能を決定

## センサレンジによる走行効率の違い

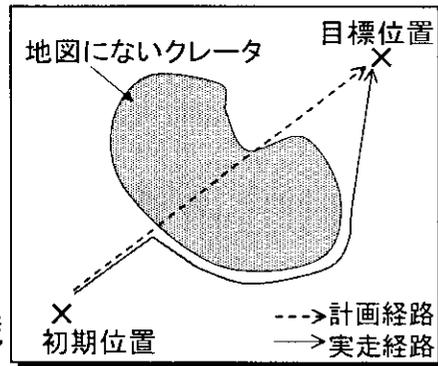
- カメラ画像による遠隔操作
- 下に凸のクレータ
- どの程度先のクレータが認識可能か？
- どの程度のセンサレンジが必要か？
- レンジに応じたセンサ能力, センサ配置, 走行速度



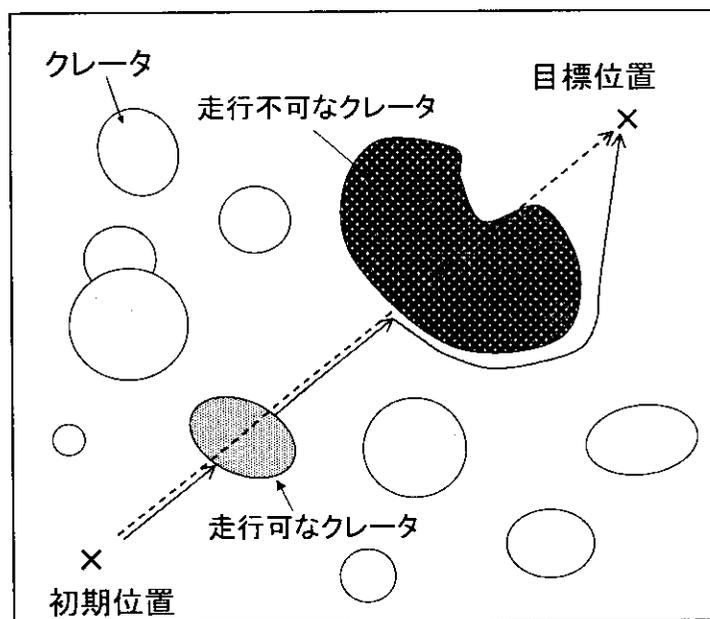
## 走行効率シミュレーション

### シミュレーション条件

- 2次元平面
- 全方向移動車
- センサにより障害物認識
- 現在地, 目標値は既知
- センサベースによる → Tangent Bugアルゴリズム  
障害物回避



## 走行効率シミュレーション法



## 走行効率シミュレーション

シミュレーションにより以下のものを概算

- 障害物回避による余分な走行
- 走破すべき小さなクレータ
- 必要なセンサレンジ

## まとめ

- 走行系の評価の指針となる走行効率の提案
- 走行効率より, ローバの余分な走行, 走破すべきクレータ, センサレンジ等の概算
- 走行効率を, ローバの走行系設計, 走行計画へ反映
- 100m以下のクレータは認識不可能

# 单腕型1輪ローバー

(Arm Equipped Single Wheel Rover)

月・惑星探査活動では、科学調査、建設、資源探査ミッションなど、これまで惑星探査機や着陸船では実現できなかった、広範囲にわたる規模の大きなミッションを可能にするものとして、移動ロボット「ローバー」に大きな期待が寄せられている。そのため、惑星探査ローバーは、その体積・重量に対して性能を最大限まで引き上げたシステムであることが求められている。

我々はこの要求を満足するシステムとして、大型の駆動車輪1輪とアーム1本から成る「单腕型1輪ローバー」を開発した(Fig.1)。本機は、分離合体型の惑星探査ローバー(Fig.2)の構成ユニットとして使用することを考えている。

本機は、動輪の数が最小構成単位の1輪と少ないため、車輪径を大きく取ることができ、同規模の多輪ローバーに比べて高い不整地走破能力を持っている。一方、単純一輪車に比べてアームが回転モーメントの反力を支持するため、大きな推進トルクが得られる。また、姿勢を変化することで、アームを疑似5自由度マニピュレータとして使用でき、高い作業性を持つ(Fig.3)。さらに、アームで複数台を連結して多車輪型ローバーを構成し、より高い走破性を実現できる(Fig.4)。

また、主駆動モーターの数を2個に減らし、その出力を効率よく5つの各関節軸に伝達して駆動する浮遊差動干涉駆動機構・ワイヤー干涉駆動機構・ブレーキ機構や、格納時の姿勢を小さく、運用時の可動範囲を大きく取るための肘部2重関節機構などを採用し、機構面でもローバーとしての性能を十分発揮できるように配慮されている。(Fig.5)

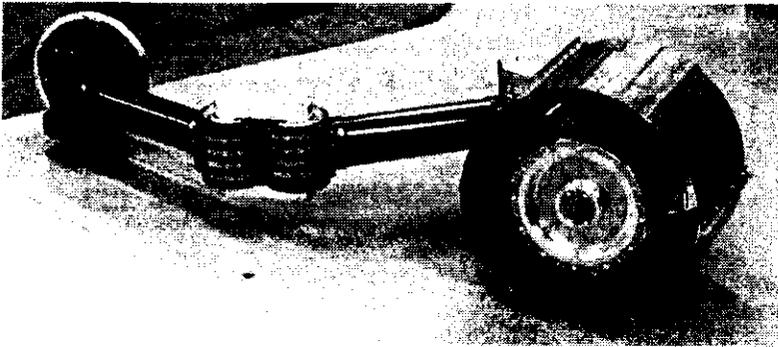


Fig.1 Arm Equipped Single Wheel Rover

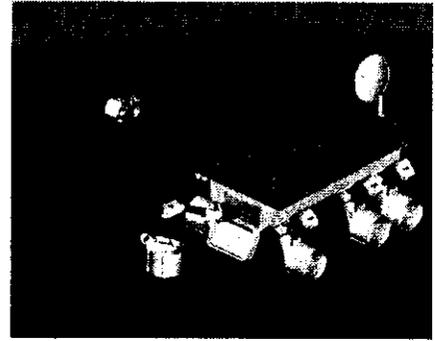


Fig.2 Rover model with a main body and multiple detachable wheel units

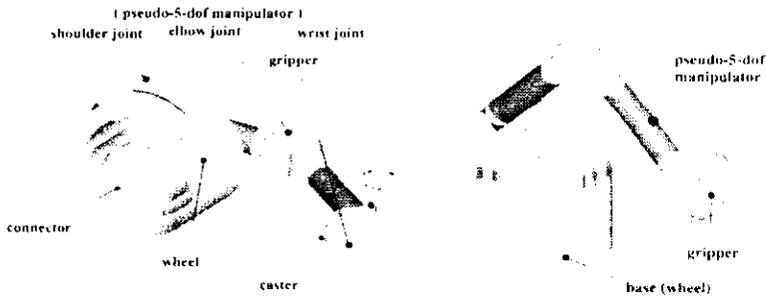


Fig.3 Locomotive mode and Manipulator mode



Fig.4 Combined mode

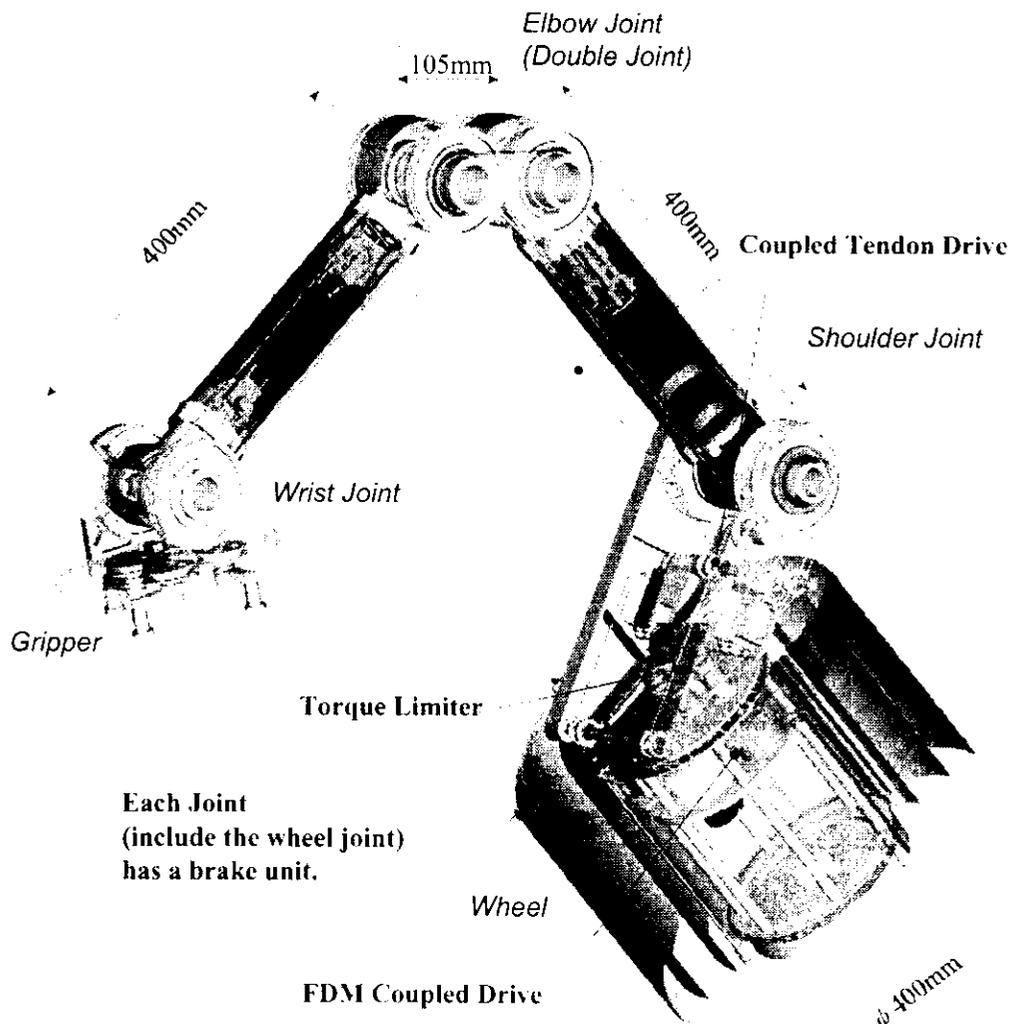


Fig.5 Mechanism of Arm equipped single wheel rover

# ローバの開発コンセプト

## － ローバ技術研究 －

宇宙開発事業団

市川 誠

### 1. はじめに

宇宙開発事業団（以降、NASDA と称す）では過去に 6 輪ローバ、また、東京工業大学との共同により 3 輪ローバを研究してきました。SELENE に続く次期月探査が相乗りミッションとなった場合、ローバにさける質量などのリソースが少ないと考えられることから、現在、小型ローバの研究に取り組んでいます。本日は NASDA のローバ技術研究の概要についてお話しします。

### 2. 研究の構成

現在の NASDA のローバ研究は、「ローバ設計の基礎研究」と「ミッション支援技術の研究」の 2 本立てで構成されます。

ローバによる移動探査の対象地点と適用される科学ミッションの内容は、まだ、未定です。そして先に『小型月面ローバを実現するための課題について』で講演させていただきましたように、探査地点、科学ミッションの内容によって、全体のシステム構成やローバの設計；どれ位移動できるか；等を含めて、大きく変わることになります。そこで「ローバ設計の基礎研究」は探査地点、ミッション内容に特定されない項目、あるいは月のローバを工学的に成立させる上で重要と考えられる項目を対象にしています。

一方、ローバの設計はその温度環境だけでなくミッションの内容にも影響されます。例えば掘削を行う場合、ローバが掘削反力で浮き上がらないようにする設計です。なお、先の講演でお話ししましたが、「ミッション研究」、「ローバ研究」、「ミッション支援技術研究」という枠組みから、ミッションを実現するためのローバ以外の工学面にも取組まねばならない、と考え始めています。

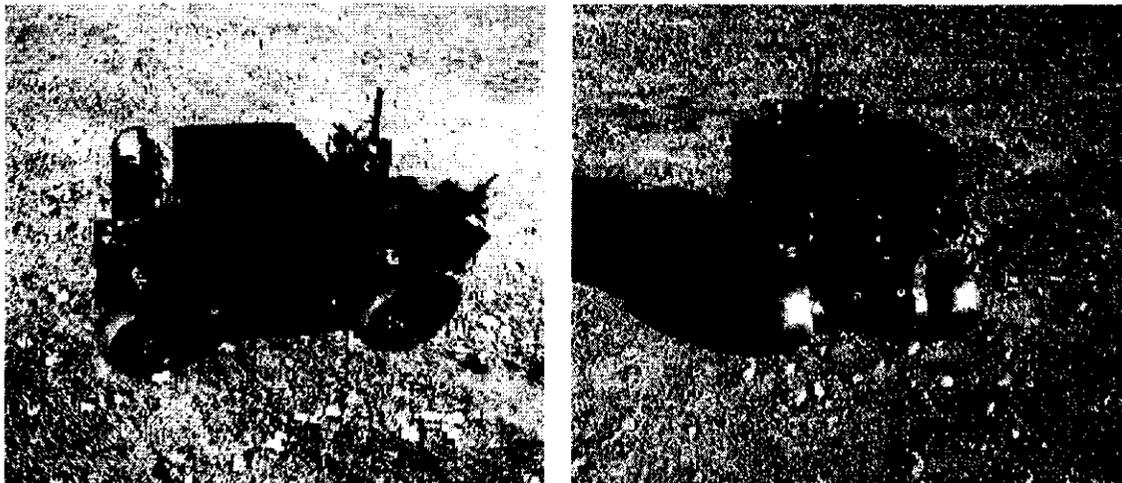
### 3. ローバ設計の基礎研究

ローバ設計の基礎研究として様々なものがありますが、現在は優先順位の高いと考えられるものとして、熱・エネルギーシステムの研究、そしてかさ密度の低い月面を走行する車輪の設計に関するテラメカニックスの研究、そして、移動探査を行う場合、その地点が月のどの地点に対応するか、という観点から、ローバのポジショニングの研究に取り組んでいます。

熱・エネルギーシステムの研究は ISAS の小林教授をはじめとした委員の方に、テラメカニックスの研究は立命館大学の深川先生をはじめとした委員の方に、ローバ技術研究会の中で検討いただいています。ローバのポジショニングの研究は現在、筑波大学知能ロボット研究室との共同研究で進めています。

次にパネルの写真について説明します。

(1) ポジショニング評価用プロトタイプ



項目	仕様	備考
操舵方式	独立ステアリング方式	
懸架方式	並行リンク	
車輪数	4	
車輪径	15cm	
速度	最大 20cm/秒	
寸法	60cm 長×40cm 幅×35cm 高	
質量	約 20kg	バッテリー込み

図1 ポジショニング評価用プロトタイプ

図1に、本日、持ってくることはできませんでしたが、現在、NASDAで研究開発中のポジショニング及び自律移動の研究のための小型ローバを示します。ステアリング方式は独立ステアリング方式で横行、斜行などにも対応します。図2に地面の凹凸に対する並行リンクの懸架機構の動き、図3にローバを小さく収納するための展開構造の検討を示します。なお、展開構造はまだ、製作していません。

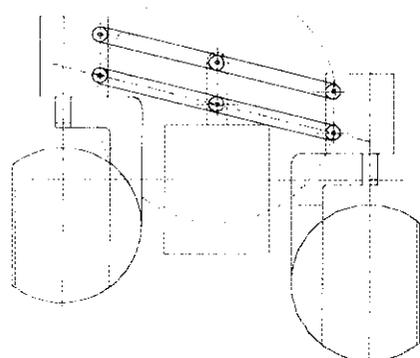


図2 並行リンクによる左右の車輪高さの変化への対応

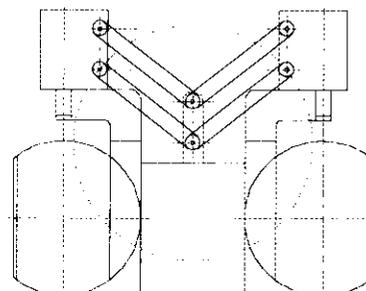


図3 並行リンクの部分を途中で折曲がるようにして衛星への収納時に寸法を小さくできるようにする展開構造(未)

## (2) 車輪の研究

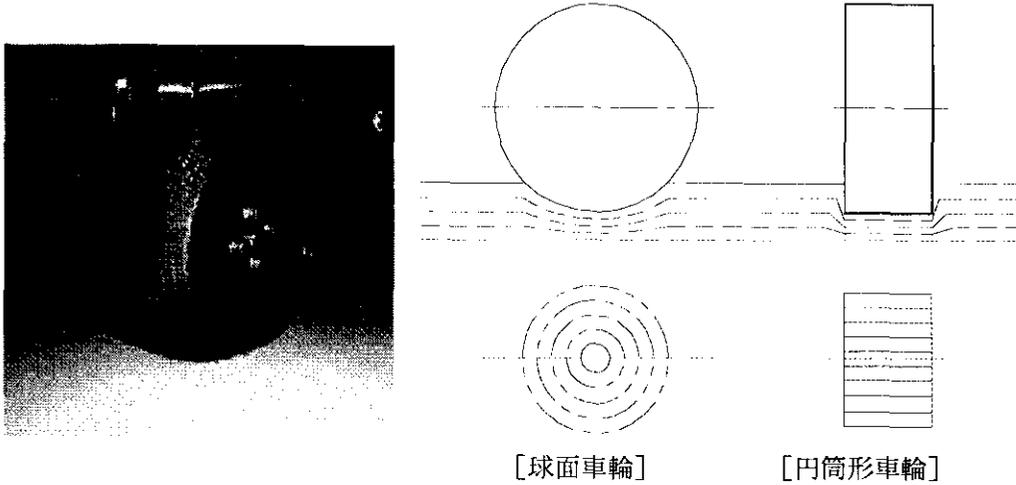
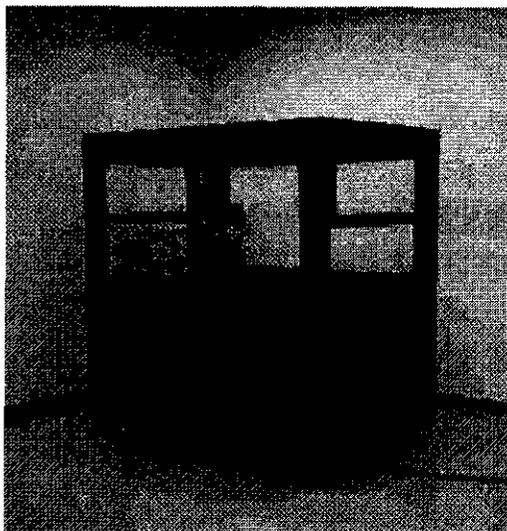


図4 車輪の接触部の形状とレゴリスへの圧力

図1のローバは独立ステアリング方式であることから、車輪の据え切りを行います。この据え切り時の車輪とレゴリス間の接触抵抗を少なくするため、図4のように車輪の形状を球形にしています。図5,6で示す月面表層モデル（ローバの走行系の設計における車輪とレゴリスの相互作用の研究のために月レゴリスを模擬したしたシュミラントを収納した設備）で現在の車輪に関する評価を車輪表面に数種のグローサを取り付けながら行いつつあります。なお、月面表層モデルを使ってみたいという方がいらっしゃいましたら、ご一報ください。



車輪単体とレゴリスの相互作用,あるいは掘削の研究のためのシュミラント収納容器。実験の再現性を確保するため、均し装置を装備。

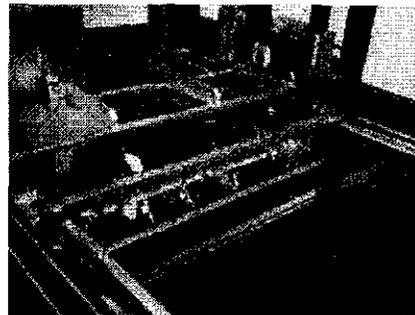


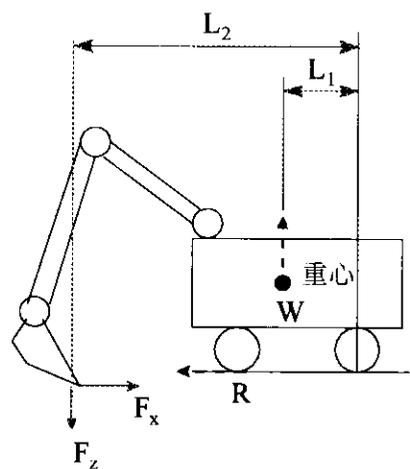
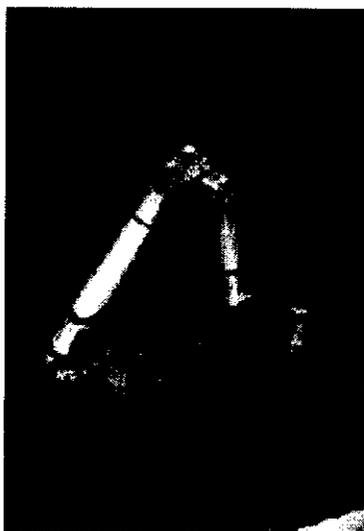
図5 月面表層モデル

## 4. ミッション支援技術の研究

ミッション支援技術の研究として現在、取組んでいるものに掘削技術と、ミッション機器着脱技術があります。

### (1) 掘削技術

掘削は繰り返しの話になりますが、掘削しようとしたらローバが浮き上がったり、掘削する代わりに車輪がスリップしてしまつては目的が達成できません。このため、シミュラントを用いて掘削を実施し、かかる力に関するデータをとっているものです。あるデータでは「現在の掘削バケット寸法で月の重力で掘削するには 20kg 程度の質量が必要」というものもあります。今後、この実験を更に進めるとともに現在、掘削に用いているアームの多機能化を進めたいと考えています。



- 鉛直方向の掘削可能条件  
 $W \cdot L_1 > F_z \cdot L_2$
  - 水平方向の掘削可能条件  
 $F_x < R$
- W:ローバの重さ  
R:車輪の抵抗

図6 掘削用試験装置

### (2) ミッション機器着脱機構

1台のローバを各種の科学ミッションに適用させる方法としてミッション機器を交換できるようにすることが考えられます。また、いつになるか分かりませんが、将来の月利用の時代となつたら、ローバに各種のミッション機器を付け替えることにより、多様な仕事をさせることが期待されます。このような観点から、ミッション機器着脱機構の研究に取り組んでいます。

本機構は機械的結合、電気的結合、情報の伝達の3要素が必要となります。図1にミッション機器とローバ間のそれらの組み合わせの分析結果を示します。

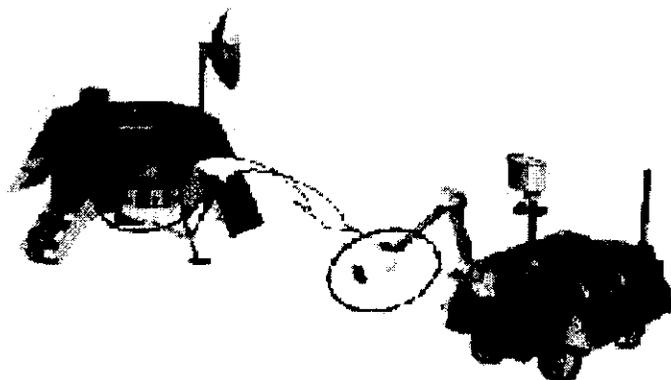
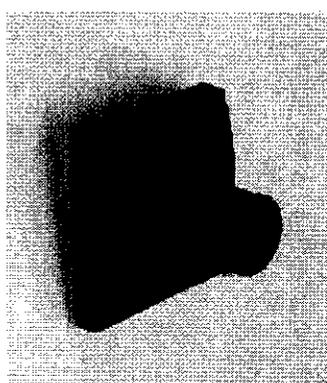


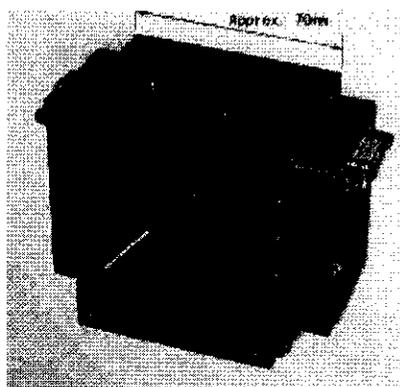
図7 ミッション機器交換の概念 (アーム自体交換も有り)

表1 ミッション機器とローバの関係

項目	状態
エネルギーの供給	必要、一部必要、不要
ローバとの情報伝達	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 不要 (ミッション機器単独でランダー等と交信)</li> <li>・ 不要 (通信の不要なミッション機器)</li> <li>・ 必要 (ローバの通信回線を借りてランダー等と交信)</li> <li>・ ミッション機器とローバの協調のための情報伝達必要</li> </ul>
使用条件	停止して使用、移動しながら使用



[ミッション機器側]



[ローバ側]

ミッション機器荷重：10kg，エネルギー：10W，伝送量：115,200bps

図8 ミッション機器着脱インターフェース (プロトタイプ)

図8に着脱機構のプロトタイプを示します。信号の授受にIrDAを用いています。

### (3) その他

まだ、着手していませんが、岩石のサンプル採取の必要性がサイエンスの方から問われていることから、これについても研究を開始できればと考えています。

### 5. 最後に

以上、NASDAにおけるローバ技術研究の現状について、概要を述べさせていただきました。



## 月探査ローバ Micro5

久保田孝(宇宙研)  
黒田洋司(明治大)  
國井康晴(中央大)

## 日本の月・惑星探査ミッション

- ・Planet-Bミッション (火星探査機「のぞみ」)
- ・Muses-Cミッション (小惑星サンプルリターン)
- ・Lunar-Aミッション (月ペネトレータ)
- ・SELENEミッション (月周回衛星と着陸実験機)

## 次期月探査ミッション

- 複数ペネトレータ
- 月面天文台
- 月面ローバ

## 月面探査ローバ

### ○移動できる

- 広範囲な探査(移動距離数十km～数百km)
- クレータや断崖など地殻が露頭している地域の探査

### ○月表面に接触している

- サンプル採取、収集、分析
- 地下探査(深さ数十cm～数mの探査)
- 観測機器(望遠鏡、月震計など)の設置

## 月探査ローバ

< Smaller, Faster, Better >

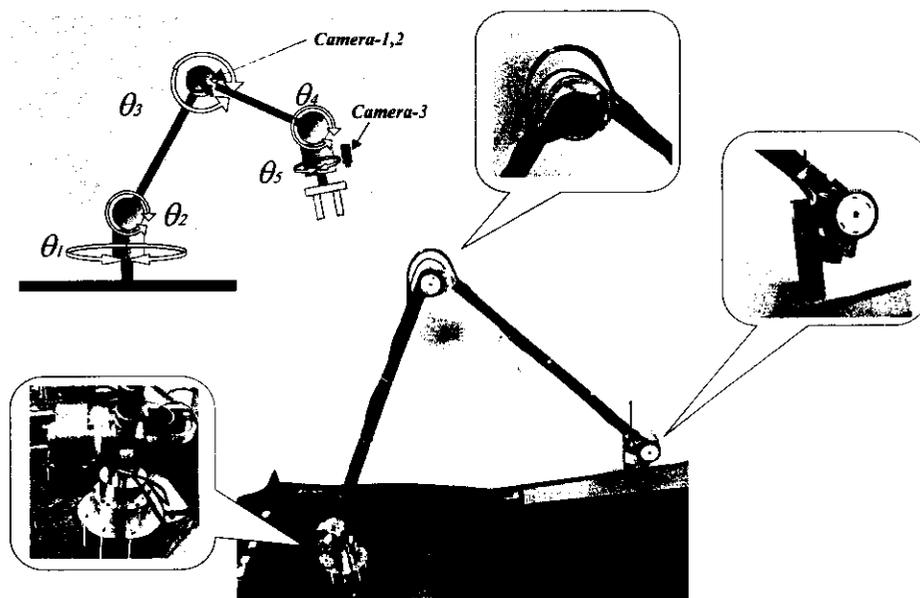
- 小型軽量(サイエンス機器)
- 低消費電力走行
- 不整地走破性能
- 長距離移動
- 新しい走行メカニズム
- 軽量マニピュレータ

## マニピュレータ

- サンプリング
- 観測機器の試料への誘導
- サンプルの破碎、切断
- 観測機器の操作

十分な多自由度  
十分な可搬重量  
十分な長さ  
軽量、低消費電力

### 軽量マニピュレータシステム



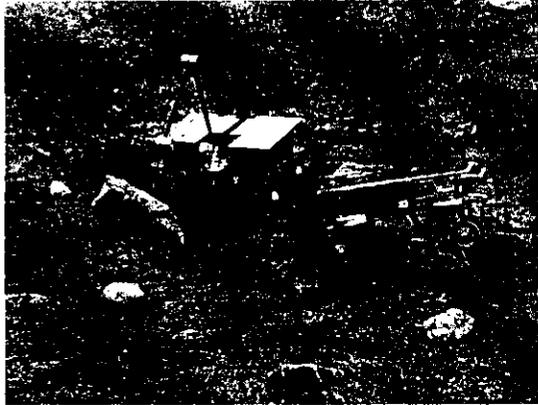
## マイクロローバシステム



## 複数ローバによる協調探査

- 探査範囲の拡大
- 探査期間の長期化
- 安全性、信頼性向上
- 協調作業

## 協調探査実験



## まとめ

- 月面探査ローバ
- 新走行システム
- 軽量マニピュレータ
- マイクロローバの提案
- 複数探査ローバの協調ミッション