

# III-490 月着陸船の設計および月基地の建設に関する月表土の支持力面からの検討

長崎大学工学部 正会員 後藤恵之輔

## 1. まえがき

今、月の開発利用に目が向けられている。月を生産工場としてあるいは人間の居住地として開発利用するには、まず月基地を建設しなければならず、そしてさらにその前段階として月の探査が必要である。月の探査については、①月周回の人工衛星によるリモートセンシング、②ランドローバを利用した無人探査、③月着陸船による有人探査の順に行われるであろう。月基地を建設する場合には、例えば支持力の問題があり、規模の大きな構造物は岩盤で支持するのが安全であるが、そうでない場合には支持力を推定しておく必要がある。

本文では、月探査のための月着陸船の設計および月基地の建設に関して、月表土の支持力面から検討を行うものである。すなわち、前者については、人類として初めて月着陸を行ったアポロ11号の月着陸船イーグル号がなぜ無事に着陸できたか、という問題から月着陸船の設計に一つの考えを示す。後者については、月基地を地上に建設するのがいいのか、それとも地中に半没させて建設するのがいいのか、その解答を具体例に基づきながら求めている。

## 2. 月の表土

月の表面<sup>1)</sup>は、レゴリスと呼ばれる、岩石や土が一緒にゆるく固まった層で覆われており、その下に岩盤がある。普通、1cmより小さい粒子を土といい、それより大きなものを岩と呼んでいる。

レゴリスの厚さは、場所によって大きく異なる。米国のアポロ宇宙船が月面着陸を果たした所（アポロ11, 12, 14, 16, 17号の着陸地点）では、わずか6地点であるが、その値が直接測られ、信頼できる値を得ている。いわゆる海では4～5m、高地では10m以上あり、場所によっては30mを超える所もあるという。一方、アポロ16号の宇宙飛行士らは、あるクレーターでレゴリスの厚さが2～3cmしかないのを発見している。

月の土<sup>2)</sup>については、ソ連がルナ計画で320kgのサンプルをリターンさせ、米国がアポロ計画で合計384kgのサンプルを持ち帰っている。また、米国はアポロ計画（アポロ6～8号）と平行して行ったサーバイヤー計画で、土質力学用表面サンプラーなどにより、月表面および表面近くの地中物質の密度や圧縮強度、せん断強度等を得ている。米国が探査した月の土の土質力学的性質のうち、2, 3を表-1に示す。

表-1 月の土の2, 3の性質

| パラメータ                      | 文献 <sup>3)</sup> | 文献 <sup>4)</sup> (備考)    |
|----------------------------|------------------|--------------------------|
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )    | 1.4~1.9          | 1.0近傍 (表面10~20cm深さ)      |
| 内部摩擦角 (度)                  | 35               | 30~50                    |
| 粘着力 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 0.01             | 0.003~0.03 (密度の増加とともに増大) |

## 3. 月着陸船の設計

1969年の7月20日、102時間45分40秒の旅の末に、アポロ11号の月着陸船イーグル号は静かな海に着陸<sup>5)</sup>した。そして、午後10時56分15秒にアームストロング船長により、人類最初の一步が月面に印された。

ところで、イーグル号はなぜ無事に着陸できたのであろうか。図-1に示すように、イーグル号は昆虫のような概観を持ち、全高7m、着陸脚展張時の直径9.45m、打上げ時の総重量15.1tである。月面は宇宙といっても無重力ではなく、地球の約1/6の重力がある。したがって、着陸時には15.1tの1/6、約2.52tの重量が月面に働いている。にもかかわらずイーグル号が無事着陸できたのは、月の表土に十分な支持力があつたからに他ならない。

この事を支持力理論から検討してみる。レゴリスについては、もちろん支持力理論は確立されていないため、地球上で使い慣れているテルツァーギの理論を用いることとする。

浅い基礎の極限支持力は、 $q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q$ で

|       |                |
|-------|----------------|
| 全高    | 7m             |
| 直径    | 9.45m(着陸脚展張時)  |
| 上昇段全高 | 3.8m           |
| 降下段全高 | 3.2m           |
| 上昇段直径 | 4.3m           |
| 降下段直径 | 4.3m           |
| 総重量   | 15.094t(打ち上げ時) |

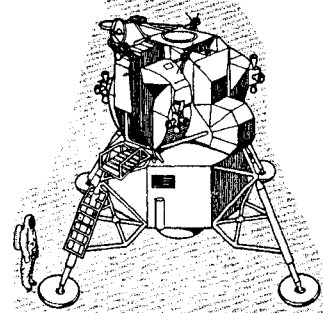


図-1 イーグル号の概観と諸寸法<sup>5), 6)</sup>

表される。ここに、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：基礎底面の形状による定数、 $B$ ：基礎の最小幅、 $c$ ：基礎底面直下の地盤の粘着力、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ ：それぞれ基礎底面より下あるいは上の地盤の密度、 $N_c$ 、 $N_r$ 、 $N_q$ ：支持力係数（基礎底面直下の地盤の内部摩擦角 $\phi$ の関数、図-2）、 $D_f$ ：基礎の根入れ深さ。

イーグル号の場合、着陸脚には円形の台座（直径は記載が見当たらないため、イーグル号の全景写真から計算して90cm）が設けてあり、脚の土中へのめり込みはなかった。これより、 $\alpha=1.3$ 、 $\beta=0.3$ 、 $B=90$ cm、 $D_f=0$ 。また、表-1のうち文献4)の小さい方の値を用いれば、 $\gamma_1=\gamma_2=0.001$ kg/cm<sup>3</sup>、 $c=0.003$ kgf/cm<sup>2</sup>、 $\phi=30^\circ$ として $N_c=15$ 、 $N_r=7$ 、 $N_q=12$ 。これらの諸値を用いて、極限支持力は $q_u=0.06+0.19=0.25$ kgf/cm<sup>2</sup>と求められる。これに対して、イーグル号の荷重強度は、着陸脚が4脚あることを念頭において $q=W/A \times 1/4=2.52 \times 10^3 / (\pi \times 90^2/4)=0.099$ kgf/cm<sup>2</sup>である。したがって、 $q_u > q$ であり、イーグル号は月面に無事着陸できることになる。

表-1で文献3)の小さい方の値を用いれば、 $\gamma_1=\gamma_2=0.0014$ kg/cm<sup>3</sup>、 $c=0.01$ kgf/cm<sup>2</sup>、 $\phi=35^\circ$ から $N_c=36$ 、 $N_r=25$ 、 $N_q=28$ 。これより $q_u=0.47+0.95=1.42$ kgf/cm<sup>2</sup> $> q=0.099$ kgf/cm<sup>2</sup>となり、表-1のいずれの値を用いても、イーグル号の無事着陸は達成される。この結果から判断して、月着陸船を設計する場合には、着陸脚に台座を設け、その接地面積を十分大きくとることが肝要である。もしそうしなければ、着陸船は着陸できるどころか、月の表土に支えられず土中にめり込んでしまう危険がある。

#### 4. 月基地の建設

浅い基礎の極限支持力を再掲する。 $q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_r + \gamma_2 D_f N_q$ 。この式において、基礎幅 $B$ と根入れ深さ $D_f$ の影響を検討してみる。

月基地として円形構造物を考え、レゴリスの諸値として表-1から文献3)の小さい方の値を採用する。これより、 $\alpha=1.3$ 、 $\beta=0.3$ 、 $\gamma_1=\gamma_2=0.0014$ kg/cm<sup>3</sup>、 $c=0.01$ kgf/cm<sup>2</sup>、 $\phi=35^\circ$ から $N_c=36$ 、 $N_r=25$ 、 $N_q=28$ 。したがって、極限支持力は $q_u=0.47+0.0105B+0.0392D_f$ と求められる。 $D_f$ の影響は $B$ に比べて4倍の効果があることが分かる。

月基地そのものではないが、図-3のタービン発電月面炉システムを例にとって上記を検討する。図-4(a)のようにそのまま半没式とするととき $q_u=18.92$ kgf/cm<sup>2</sup>、図-4(b)のように地上式とするととき $q_u=5.20$ kgf/cm<sup>2</sup>と求められ、半没式の方が地上式よりかなり大きな支持力が得られることとなる。このように半没式にすることは、この支持力向上の他に、月面に落下する隕石から構造物を防護する効果もある。

#### 5. まとめ

- (1) 月着陸船の設計においては、着陸脚に台座を設け、その接地面積を十分大きくすることが肝要である。
- (2) 月基地の建設に際しては、構造物の根入れを大きくして半没式にすることにより、支持力を著しく高めることができる。また、この半没式は月面に落下する隕石から構造物を防護する効果もある。

参考文献 1) 柳沢 訳：月のすべて、朝倉書店、p.36 (1986.5) 2) 後藤：月の開発利用のためのリモートセンシング等調査について、平成2年度土質工学研究発表会 (1990.6) 3) 塩崎：宇宙開発の動向と建設構造物、土と基礎、Vol.38, No.1, p.53 (1990.1) 4) (財) 未来工学研究所、提供資料 5) 竹内監修：NASA宇宙開発のパイオニア、教育社、pp.158-169 (1988.6) 6) スペース・イラストレーテッド、Vol.1, No.6, p.51 (1982.12) 7) 月面基地と月資源開発シンポジウム資料、p.20 (1990.2)

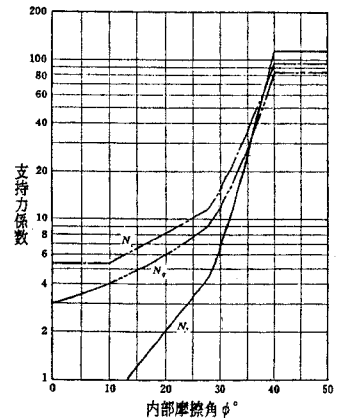


図-2 支持力係数

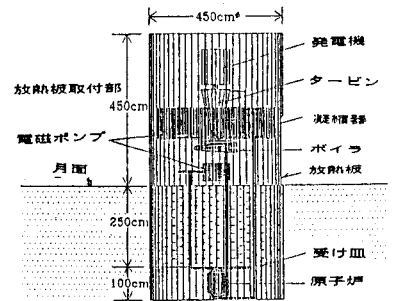


図-3 リチウム冷却カリウムタービン発電月面炉システム系統図<sup>7)</sup>

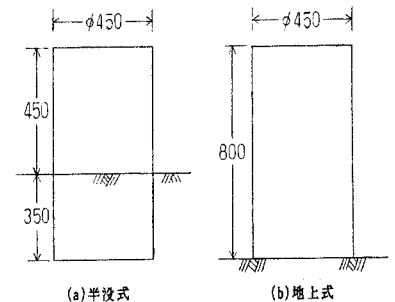


図-4 半没式と地上式の比較