

## 惑星土質力学のすすめ

惑星探査 惑星土質力学 惑星地盤力学

筑波大学 国際会員 ○松島 亘志

## 1. はじめに

地盤材料は自然が作った材料であり、この振る舞いを理解し、適応することで、人類は多くの恩恵を受け、また脅威から逃れてきた。土質力学(地盤材料の振る舞いを記述する力学)は、そのための基礎力学であり、当然ながら様々な科学・工学で必要とされている。地盤工学では、これまで主に地盤材料物性や堆積状況が与えられた(要素試験により求められた)という条件で、その力学的振る舞いを理解し、記述し、応用するという面に重点が置かれてきたが、この試みは既に「実用」という観点からはある程度成熟したのではないかと、という印象を筆者は持っている。すなわち、我々が現在直面している問題の多くは、上記の条件が与えられないと何もできない(現場の材料を用いた要素試験なしでは設計できないとか、流動などによって状態が変化してしまった場合に対応できないなど)ことに起因しているのではないかと。だとすれば、我々が今後向かうべき方向は、地球も含めた固体惑星の表層がどのように形成され、進化するのかを力学的観点から検討し、工学的予測に耐えうるレベルまでに進歩させることではないか。このような試みは、既に地球・惑星科学の分野である程度行われてきているが、これまでわれわれが蓄積してきた土質力学・地盤工学の知見を融合させれば、飛躍的に研究が進むのでは、という期待がある。そのような融合的な研究分野として、惑星土質力学というものを提案したい。

## 2. 惑星土質力学とは

地盤材料が多数の固体粒子からなっていることは、あらゆる土質力学の教科書の第 1 章に出てくるが、そこでは粒子物性の記載方法(土粒子密度、粒度や粒子形状など)については述べられているものの、そのような粒子がどのような自然の営みの中で形成されたのか、という「力学」について書かれているものは皆無である。我々は小学校から河川の「侵食・運搬・堆積」作用について学ぶが、これらは定性的な説明にとどまり、「力学」の土台に乗っていない。実は、堆積学や河川工学の分野では、これらを力学で記述しようとする試みが 20 世紀前半から始まっている<sup>1-5)</sup>。それらの力学は、主に単一土粒子と流体の相互作用を基礎としており、地盤工学者から見ると、土粒子の集団挙動という観点が不足しているように見えるが、それでも多くの重要な成果を挙げている。これらの成果はなぜか土質力学の教科書には載っていない。一方、砂防分野では 20 世紀後半に土石流の力学の研究が活発になされ、粒子-流体系の集団挙動の力学が研究された<sup>6-8)</sup>。そこには侵食・運搬・堆積の力学が当然ながら含まれている。しかし、これも土質力学の教科書には載っていない。これらは、「流れる」地盤材料を扱っており、いわゆる古典的な地盤工学(構造物を安全に建設するための技術)で対象とする「固体」としての地盤材料と異なっている、というのが理由であろうが、現在、斜面流動や土石流、液状化などが地盤工学の重要な対象現象になっていることを考えると、これは明らかに片手落ちである。

少し脱線するが、実は、「流れる」粒状体の研究は、統計物理学者の研究対象でもあり、統計力学の手法を援用した方法での rapid granular flow 研究が 1980 年代以降に活発に行われた<sup>9-11)</sup>。これらは土質力学にも多くの示唆を与えるものであるが、やはり全く土質力学に取り上げられていない。更に奇妙なのは、1990 年代以降の統計物理学者が関心を寄せている粒状体の静力学への統計力学の適用<sup>12-15)</sup>についてさえ、全く取り上げられていないことである。何故奇妙なのかと言えば、粒状体の静力学は正に「固体」の地盤材料の力学であり、しかも最上<sup>16)</sup>や佐武<sup>17)</sup>など、何人かの「日本」の土質力学者はこれに対して先駆的な研究を行っているのである。

「侵食・運搬・堆積」の力学には、粒子破砕による粒度分布の変化や、粒子摩耗による粒子形状の変化、などの要素も含んでいる。粒子破砕に関しては、土質力学分野の研究<sup>18-20)</sup>のほか、惑星科学の分野<sup>21)</sup>(小惑星のサイズ分布や月のクレーター年代学などの絡みで)や地震学の分野<sup>22-23)</sup>でも研究が積み上げられている。

地球のように流水が地盤形成に主要な役割を果たしている惑星の場合、粒子-流体系力学と「侵食・運搬・堆積」の力学が、地盤材料の起源を記述する鍵となるだろう。一方、月や小惑星のように水や大気のない星の表面は、隕石衝突による粒子破砕と物質移動の力学が重要な鍵となる<sup>21)</sup>。通常土質力学、地盤工学では、惑星探査・開発などは我々の生活と直接関わりのないこと、あるいは遠い将来のこととしての対象に含めていないが、1960~70 年代の米国 Apollo 計画では、Scott や Mitchell など多くの地盤工学者が計画に参加し、回収サンプルの土質試験やサンプリング機器の開発、月面探査車の走行性などで重要な役割を果たしている<sup>24-27)</sup>ことは、余り知られていないようである。

近年、世界各国で様々な月・惑星探査プロジェクトが計画・実行されており、我が国でも SELENE(かぐや)計画による月探査(2007-2009)や、はやぶさによる小惑星イトカワ探査と微粒子回収(2003-2010)に成功し、現在は、はやぶさ2(2014-)による C 型小惑星探査が進行中、新たに無人機着陸による月探査(SLIM)も計画されている。これらの目的は、太陽系の起源の解明、将来の更なる宇宙開発のための技術蓄積など様々であるが、地盤工学の分野にも大いに関連している。そもそも、固体天体の表層には「地盤材料」しかない。従ってそこで行う活動は、必ずその現地の材料と関わってくる。たとえば、かぐやの分光解析結果から鉱物組成を求める過程では、表層数 mm の土の間隙比の情報が重要となる。ほかにも、着陸時のジェット噴射でどの程度の砂が飛び散り、それが着陸機本体や、基地施設などにどの程度影響を及ぼすかの評価、宇宙服や宇宙船への侵入を防げない微粒子が人体に及ぼす影響評価、自動月面探査車の走行安定性の確保、地盤調査やサンプリング手法の開発、滞在に必要な物資を現地の地盤材料から作り出す技術(ISRU: In-situ resource utilization)など、地盤工学的課題は山積している。

Apollo 計画での回収試料の調査などから、月の表層土は非常に良配合の砂から成っていることがわかっている。これは、月には大気がないため、地球では燃え尽きてしまう微小隕石が数多く降り注いでおり、これらによる土粒子の衝突破砕の結果であると言われているが、ではその粒度分布は、どのように決定されているのか、現在の粒度分布が最終的な定常状態であるのか、などの議論は、未だ結論は出ていない。それらの表層部での間隙比や、強度定数(粘着力と内部摩擦角)、あるいは圧縮性などについても、実は Apollo 計画での限られた実験結果から得られる、大雑把な評価しか行われていない<sup>27)</sup>。これらの地盤材料特性は、それを利用するあらゆる局面で必要になってくるものであるが、これまでの地盤工学の手法(現地の材料を用いた要素実験)は使えず、真の意味の「予測」が必要となる、という観点からは、土質力学・地盤工学の学問としての成熟性を評価するための格好のテストフィールドとも言える。

### 3. いくつかの具体例

#### 3-1. 富士山大沢崩れ

富士山山体西面斜面には、大沢川による大規模な侵食谷があり、「大沢崩れ」と呼ばれている(図 1)。その規模は、山頂直下から延長 2.1km、最大幅 500m、最大深さ 150m となっており、これまでの崩壊土量は約 7,500 万 m<sup>3</sup>、現在も年平均約 15 万 m<sup>3</sup> の土砂が流出していると推定されている<sup>28,29)</sup>。国土交通省富士砂防事務所では、富士山南西山麓の土砂災害防止策の一環として、源頭域での調査工事や大沢扇状地における砂防施設の建設、観測システムの設置などを行っているが、土砂流出を防ぐ根本的な解決策は見いだせていない。このような長期の侵食・運搬・堆積作用による地形変化を定量評価する手法が開発されれば、短期・長期の防災計画の立案、想定する対策工の効果検証などに役立てることが可能となる。図 2 は、粒子法を用いた解析の一例である<sup>30)</sup>が、初期の円錐形の山体にランダムに雨水粒子を降らせることにより、多くの放射谷が形成され、そのうちの 하나가集水局所化メカニズムにより大きな侵食谷に発達する様子を再現することができている。このような手法は、全国の土砂流危険渓流の対策立案に応用できると考えられる。



図 1 大沢崩れ(富士砂防事務所<sup>28)</sup>)

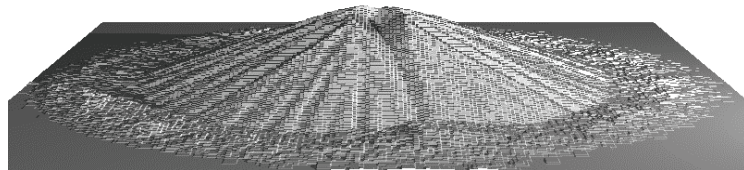


図 2 粒子法による侵食谷形成シミュレーション<sup>30)</sup>

#### 3-2. 大井川の地形形成と治水の歴史

静岡県の大井川は延長 168km の一級河川であり、南アルプスの険しい山岳地帯を流下すること、流域の平均年降水量が 3,000mm と多いこと、フォッサマグナの崩落地帯が上流部にいること、上流の地質が侵食されやすい砂岩、泥岩からなること、などから、土砂輸送量が多く、中流部には『鶴山の七曲り』と呼ばれる蛇行地帯が形成されている(図 3)。また、1500 年代に武田信玄によって地形を生かした流路制御が行われるなど、土木工事の歴史上も重要な河川である。我が国の現在の河川計画では、利水・治水の観点から、主にダムや河川堤防の整備が行われているが、中長期的な土砂移動現象と地形変動現象を予測する技術が未発達なため、様々な問題(ダムの堆砂問題、河川周辺生態系の断絶、コンクリート堤防による自然破壊、河床のフェイシングによる流水の地下浸透阻害、海岸での砂浜減少など)が発生している。より広い国土計画の枠組みも視野に入れた合理的な河川中長期計画の立案のためには、土砂移動現象と地形変動現象の解明と、その知見を生かした土砂移動制御は必須である。





図3 大井川の蛇行地帯(Google earth の複数の衛星画像をつなげて作成)

### 3-3. 月表層土シミュラントの開発とそれを用いた地球上での実験

Apollo 計画で回収された月サンプルは稀少であり、それを使って系統的な実験を行うことは難しい。そのため、それらのデータを基に、月面表層土の模擬土(シミュラント)がいくつか作成されている。我が国では清水建設が、月の海地域の岩石の鉱物組成に似た、富士山の玄武岩を粉砕して粒度調整したシミュラント FJS-1 を作成している<sup>31)</sup>。その特徴としては、含まれる細粒分の付着力(van der Waals 引力や静電気力)により、ある程度の粘着力を有すること、低圧力下で非常に緩い構造を形成できること、などが挙げられる。これにより、月面表層はふかふかの状態となり、宇宙飛行士の足跡がくっきり残る(図4)。Matsushima and Ishikawa (2015)<sup>32)</sup>は、自立高さ試験により FJS-1 の bulk の粘着力  $c$  を求め、それが細粒分含有率によって変化することを確認している(図5)。

一方、FJS-1 では、微小隕石衝突時に部分溶融によって生じる粒子(アグルーチネイト)を含んでいない。これは溶融した粒子がくっつき合うことで非常にいびつな形状となっており(図6)<sup>33)</sup>。古い地層では 50%~60%の含有率となっている場所もある<sup>27)</sup>。Katagiri et al. (2014)<sup>34)</sup>は、イメージベース個別要素法(図7)により、アグルーチネイト含有率が土の間隙比特性に影響を及ぼすことを明らかにしている。



図4 月面の宇宙飛行士の足跡(NASA)

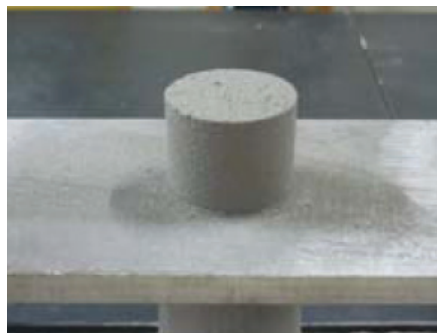


図5 FJS-1 による自立高さ試験<sup>32)</sup>

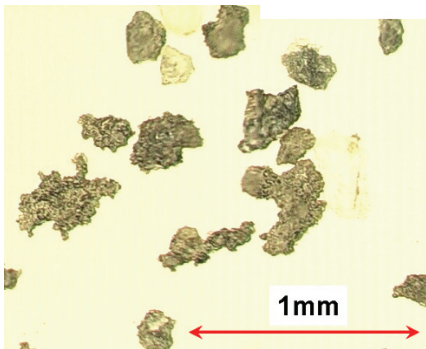


図6 デカルト高地で回収された粒子<sup>33)</sup>

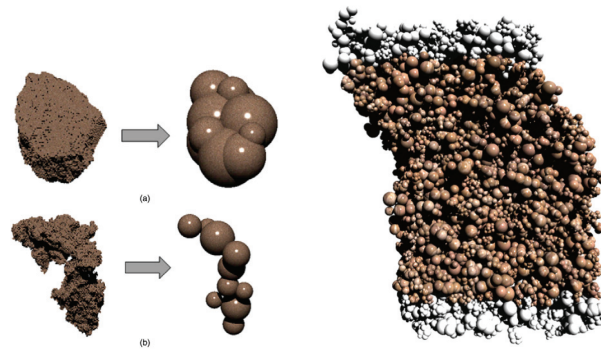


図7 イメージベース個別要素法による月の砂のせん断試験解析<sup>34)</sup>

## 4. おわりに

以上述べてきたように、惑星土質力学は、単なる土木構造物設計のためだけでなく、土を扱うあらゆる分野に波及する学問であり、その鍵となる力学が、土質力学である。十分成熟してしまった分野は縮小するのが自然の流れであるが、地盤工学がこれまでの守備範囲にこだわらずに外に目を向ければ、まだまだやるべきことは山のように残っている。

## 参考文献

- 1) Gilbert, Grove Karl, and Edward Charles Murphy. The transportation of debris by running water. No. 86. US Government Printing Office, 1914.
- 2) Hjulström, F. (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bulletin of the Geological Institute, 25, 221–527. University of Uppsala.
- 3) Shields, Albert. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau, 1936.
- 4) Rouss, H.: Modern conceptions of the mechanics of turbulence, Trans. ASCE, 102, 463-543, 1937.
- 5) Lane, E.W., Kalinske, A.A., Engineering calculations of suspended sediment, Trans. AGU, 22, 307-603, 1941.
- 6) Bagnold, R.A., Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. Royal Society A, 225, 49-63, 1954.
- 7) Takahashi, Tamotsu. "Mechanical characteristics of debris flow." Journal of the Hydraulics Division 104.8 (1978): 1153-1169.
- 8) Iverson, Richard M. "The physics of debris flows." Reviews of geophysics 35.3 (1997): 245-296.
- 9) Jenkins, JoT, and S. B. Savage. "A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic, spherical particles." Journal of Fluid Mechanics 130 (1983): 187-202.
- 10) Sela, N., and I. Goldhirsch. "Hydrodynamic equations for rapid flows of smooth inelastic spheres, to Burnett order." Journal of Fluid Mechanics 361 (1998): 41-74.
- 11) G.D.R.MIDI, On dense granular flows, The European Physical Journal E, 14 (4), 341-366, 2004.
- 12) S.F. Edwards, R.B.S. Oakeshott, Theory of powders, Physica A, 157, 3, 1989, 1080-1090
- 13) Jaeger, Heinrich M., and Sidney R. Nagel. "Physics of the granular state." Science 255.5051 (1992): 1523-1531.
- 14) de Gennes, Pierre-Gilles. "Granular matter: a tentative view." Reviews of modern physics 71.2 (1999): S374.
- 15) Edwards, S. F. "New kinds of entropy." Journal of statistical physics 116.1-4 (2004): 29-42.
- 16) MOGAMI, Takeo. "A statistical approach to the mechanics of granular materials." Soils and Foundations 5.2 (1965): 26-36.
- 17) Cowin, S. C., & Satake, M. (1979). Continuum mechanical and statistical approaches in the mechanics of granular materials. Journal of Rheology (1978-present), 23(2), 243-256.
- 18) Hardin, Bobby O. "Crushing of soil particles." Journal of Geotechnical Engineering 111.10 (1985): 1177-1192.
- 19) McDowell, G. R., M. D. Bolton, and D. Robertson. "The fractal crushing of granular materials." Journal of the Mechanics and Physics of Solids 44.12 (1996): 2079-2101.
- 20) Einav, Itai. "Breakage mechanics—part I: theory." Journal of the Mechanics and Physics of Solids 55.6 (2007): 1274-1297.
- 21) Melosh, H. Jay. "Impact cratering: A geologic process." Research supported by NASA. New York, Oxford University Press (Oxford Monographs on Geology and Geophysics, No. 11), 1989, 253 p. 1 (1989).
- 22) Turcotte, D. L. "Fractals and fragmentation." Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) 91.B2 (1986): 1921-1926.
- 23) Steacy, Sandra J., and Charles G. Sammis. "An automaton for fractal patterns of fragmentation." Nature 353.6341 (1991): 250-252.
- 24) Costes, N. C., et al. "Apollo 11 soil mechanics investigation." Science 167.3918 (1970): 739-741.
- 25) Scott, R. F., Carrier, W. D., Costes, N. C., & Mitchell, J. K. (1971). Apollo 12 Soil Mechanics Investigation. Geotechnique, 21(1), 1-14.
- 26) Mitchell, J. K., W. N. Houston, R. F. Scott, N. C. Costes, W. D. Carrier III, and L. G. Bromwell. "Mechanical properties of lunar soil: Density, porosity, cohesion and angle of internal friction." In Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, vol. 3, p. 3235. 1972.
- 27) Heiken, G., Vaniman, D., & French, B. M. (1991). Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon. Cambridge University Press Archive.
- 28) 国土交通省中部地方整備局, 富士山砂防事業 大沢崩れの現状, <http://www.cbr.mlit.go.jp/fujisabo/jigyousi/genjyou.html>
- 29) 松島亘志, 亀田敏弘, 佐藤和正, ロボット化施工を目指した土石流防止工の検討, 第 10 回建設ロボットシンポジウム 論文集, 163-172, 2004.
- 30) 松島亘志, 粒子法を用いた広域長期間地形変動解析, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2p, 2015.
- 31) Kanamori, H., Udagawa, S., Yoshida, T., Matsumoto, S., and Takagi, K., (1998). "Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan", Proc., Space'98, ASCE, Reston, Va., 462–468.
- 32) Matsushima, T. and Ishikawa, T. (2015) Particle Grading Effect on Mechanical Properties of Lunar Soil Simulant FJS-1. Earth and Space 2014: pp. 60-68. doi: 10.1061/9780784479179.008
- 33) Matsushima, T., Katagiri, J., Saiki, K., Tsuchiyama, A., Ohtake, M., Nakano, T., and Uesugi, K. (2008) 3D Particle Characteristics of Highland Lunar Soil (No. 60501) Obtained by Micro X-Ray CT. Earth & Space 2008: pp. 1-8. doi: 10.1061/40988(323)20
- 34) Katagiri, J., Matsushima, T., Yamada, Y., Tsuchiyama, A., Nakano, T., Uesugi, K., Ohtake, M., Saiki, K., Investigation of 3D grain shape characteristics of lunar soil retrieved in Apollo 16 using image-based discrete-element modeling, Journal of Aerospace Engineering, ASCE., 28(4), 04014092, DOI:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000421, 2014.