

小惑星リュウグウのテクトニクス最若年代を示すグルーブマーク  
Planetary groove mark indicating the latest event on asteroid Ryugu

田中 剛<sup>1\*</sup>

Tsuyoshi Tanaka<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学 名誉教授

<sup>1</sup>Professor Emeritus, Nagoya University, Chikusa, Nagoya 464-8601, Japan

\*Corresponding author. E-mail: tanakat@nagoya-u.jp

**Abstract**

Planetary groove marks are found on asteroid Ryugu. These marks indicate the latest event on the asteroid. The clear mark must be formed later than faint giant craters. The groove marks are common in terrestrial sedimentary formation. The terrestrial groove mark is considered to be formed under a rapid water stream. However, there is neither water nor stream on the asteroid. The groove marks are considered to have been formed by travelling big boulder on the surface of asteroid with weak gravity. Image processing by computer will make clearer the further details of surface tectonics on the asteroid.

**Keywords:** asteroid Ryugu; groove mark; observation from low angle; image analysis

1. 露頭をはすかいに見る

学生時代の必修科目の一つに地質調査があった。筆者ら、名古屋大学理学部地球科学科 昭和42年進学組の学生16名は、3~4名1組で、長野県飯田市東部の山中に1ヶ月ほど放り込まれ、その地域の地質図を作る作業が課題であった。地質図と言っても単なる岩相分布だけでなく、その地域の地史が読めることが求められた。地史を編むテクニックとして、露頭を正面からだけでなく、はすかいに（斜めから）見ると、別の地質現象がより分かり易くなる場合があることも教わった。

2. 小惑星リュウグウ

小惑星リュウグウは、火星と木星の間にある一般の小惑星より、やや地球寄りの公転軌道を持つ、アポロ群と呼ばれる小惑星群の一つで、直径が約900mのそろばん玉型をしている。その表面はやや暗く、炭素質隕石に相当する物質で覆われており、有機物の存在が期待されることから、生命体の研究に迫り得る調査対象として選ばれた。リュウグウに向かった探査機「はやぶさ2」は、2018年6月にリュウグウ近傍に到着した。そこからの試料採集など、心躍る活躍は、多くの報道資料でよく知られている（例えば、はやぶさ2プロジェクトウェブページ <[www.hayabusa2.jaxa.jp](http://www.hayabusa2.jaxa.jp)>）。

リュウグウの表面は、様々な角度から写真に撮影され、凸凹に富む巨大な集塊岩の様相を呈している。2021年5月、渡邊誠一郎氏により、名古屋大学理学部・理学研究科広報誌「理philosophia」40号の表紙にリュウグウ全体の精細な写真が紹介された（図1）。この「理philosophia」で紹介されたリュウグウの印刷写真からは、精細な表面構造がよく読み取れ、特に画像を斜め（低角度）から見ることにより、いくつかの巨大なチャネル構造が見出されたので、リュウグウの最も若い年代を表すテクトニクス指標として紹介する。

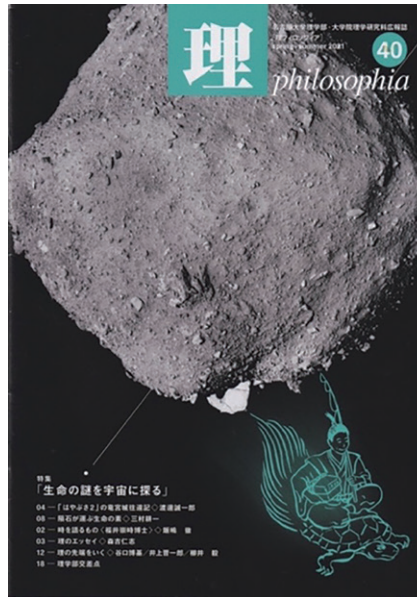


図1: 小惑星リュウグウの精細な写真が表紙を飾った名古屋大学理学部・理学研究科の広報誌「理philosophia」40号。

広報誌表紙の原版写真提供:  
JAXA/東京大/高知大/立教大/  
名古屋大/千葉工大/明治大/  
会津大/産総研

### 3. 小惑星リュウグウに見られる線状窪地

リュウグウの写真は、太陽を背にして撮影されたものが多い。巨大なクレーターののような窪地や明るい反射能を持つ岩石も見出され、リュウグウの持つ複雑な歴史が想像される。これまでリュウグウの表面に見出されている顕著なクレーターや岩塊や地溝などには、ウラシマクレーター、オトヒメ岩塊、ホウライ地溝などリュウグウにちなんだ命名がなされている（はやぶさ2プロジェクトウェブページ <[www.hayabusa2.jaxa.jp](http://www.hayabusa2.jaxa.jp)>）。

本論の主題技法である「低角度から見る」のは、図2に示すように、広報誌を目の近くに水平に置き、冊子の周囲（360度任意の方向）から眺めるのである。コンピュータのスクリーン画面ではこの観察作業が試みにくく、昔風の印刷体を手にすることができたからこそ手軽に出来たことである。俯角は種々に試みていただきたい。



図2: 「理philosophia」表紙に印刷された小惑星リュウグウの画像を低角度から見ている様子。

すでに紙に印刷されている平面の画像を低角度から見ても、印刷内容以上の新しい事象は何も出て来ないのではないか? と思えるかもしれない。しかし、「低角度から見る」ことにより、相互に関連する模様が連続し、紙面直上からの目視のみでは見出し難かった、直線状溝構造が容易に確認し得た。多数の線状構造が見出される中、比較的明瞭な直線状構造とそれが見られる場所を図3に矢印と記号A-A', B, C, Dで示す。



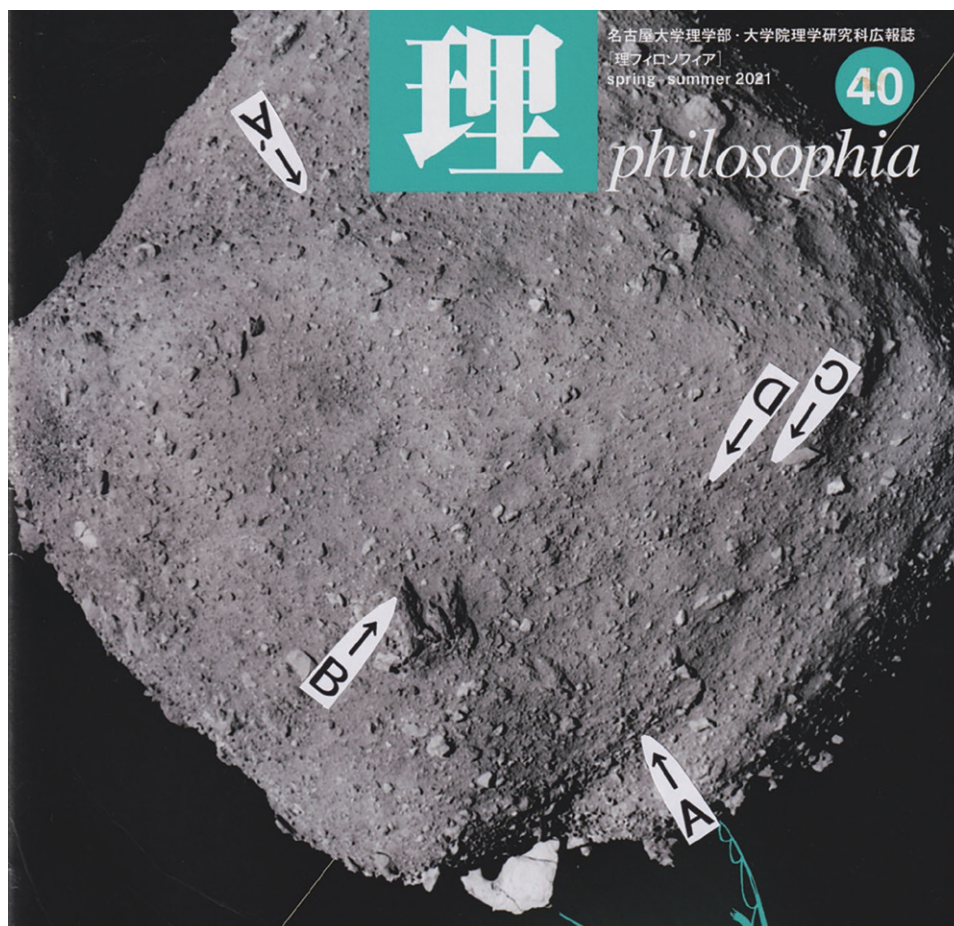


図3： 写真を水平に近い低角度から見ると明瞭な線状構造が見出される箇所と方向。  
ここに記した4本以外にも多数の線状構造が認められる。

Aの方向から明瞭な線状窪地 (groove cast) が読み取られる。細線がAの矢印先端付近に始まり、A'付近まで伸びる。A方向から見た画像と逆のA'方向から見た画像を、それぞれ図4 Aおよび4 Bに掲げる。リュウグウの直径を900mとすれば、この線状窪地は、長さ500m、幅10m、深さ1m程度と推定される巨大な溝構造である。

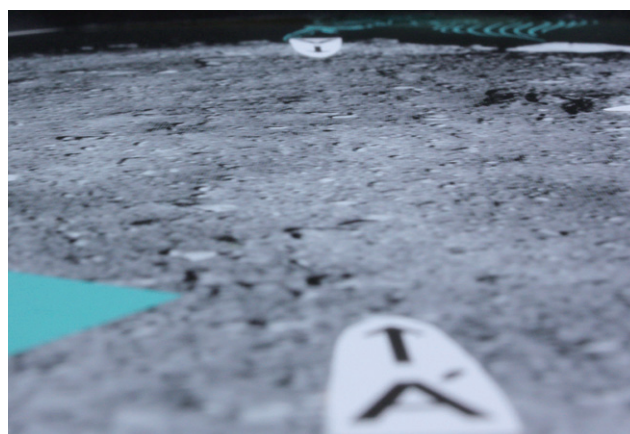


図4 A (左) および図4 B (右) :  
図3に掲げた写真をA方向 (図4 A)、および逆のA'方向 (図4 B) から見た写真。  
図版から離れて見ると線状窪地 (groove cast) がより分かり易い。

類似の窪地はB方向にも見ることができる。上記Aの線状窪地より長さは短いものの、幅が20m程度とやや広く、その先が少し左に曲がっているようにも見える。いずれも線状構造の底面には凸凹が少なく、滑らかなことが特徴である。この線状構造もAと同様に逆方向からも確認することができる。



図5：図3のB方向に見える線状窪地。

やや小規模の線状窪地も見られる(図6)。CとDは、いずれも長さ200m、幅5mほどで相互に平行に近い線状窪地である。これらの線状窪地は、他の円型クレーター様の模様などによって消されることがなく、大規模に続くものが存在する(A-A'など)。明瞭な形状を保っている線形窪地は、クレーターより後の若い年代に形成されたものと考えられる。



図6：やや小規模な線状窪地CとD。相互に平行している。

斜めから観察して見やすくなる線状窪地は、リュウグウと同じアポロ群の小惑星ベンヌの表面写真においても多数観察される。ベンヌやリュウグウの表層部では、類似の地質現象があったと考えられる。



#### 4. 線状窪地の成因

小惑星リュウグウの表面には、上に紹介した明瞭な線状窪地以外にも、見えなかったような不明瞭な線状窪地を含めると、さまざまな方向に多数の線状窪地が見いだされる。このような線状窪地は、火星と木星の間に存在するMain beltの著名な小惑星や火星や木星の衛星表面にも見出されている。

地球上の地質中にもその成因により、groove cast、flute cast、load cast あるいは bounce cast などと呼ばれる小さな類似の構造が観察される。図7に岐阜県上麻生で観察されるgroove castの写真を示す(足立・水谷(1971)のPlate 2)。このgroove castは、groove castの上に堆積した砂岩にその筋構造が転移・保存されたもので、図7は底板側から観察しているのもので、元来凹んでいたところが逆の凸の線状を成している。このようなグループマークの成因は、水流により引きずり動かされた物体が、水底の泥をこすり削ったため生じた、浅くてまっすぐ伸びた樋状の溝またはスジで、貝殻や礫などの溝をつけた物体そのものがマークの末端に残っている場合もあるという。地層中のグループマークは、タービダイトのような激しい流れに伴い、形成されたものと考えられている(新版地学辞典(1996) 平凡社)。



図7：岐阜県上麻生の砂岩面に観察されるgroove cast。スケールは、約1m。(足立・水谷(1971)のPlate2)。

しかしながら、小惑星リュウグウの表面には水流も無ければ、貝殻や礫に相当する、溝を掘ったと考えられる物体も見当らない。溝の幅から推測すると、溝を掘った物体は、巨大で、直径5~20m以上あったと考えられる。さらに、リュウグウに見られる溝は、図3や図4のような写真の上では平坦な場所に存在するように見えるが、惑星本来の立体に戻して考えると、実際は、歪な球体の小惑星をグルリと囲んでいる曲面上に形成されている溝である。従って、リュウグウ上のグループマークは岩体がある方向から、リュウグウに突込してきた力により形成された溝とは考えにくい。さらに、リュウグウ上のグループマークのどちらの端にも、それを形成したと考えられる岩塊が残存している所も見出されない。

前節のような観察から、リュウグウ上の線状窪地は、リュウグウ上に存在した岩塊が、リュウグウの弱い重力に完全には捕捉固定され続けられず、何かのショックを引き金として小惑星表面に沿って少しずつ転がり、やがて宇宙空間に離脱していった移動軌跡と考えられる。従って、溝の端に溝を刻したと考えられる岩塊は残存しない。はやぶさ2が次に探査を目指している直径数十メートルの高速自転小惑星1998KY26(三柁, 2021)などはこのような接触回転により、高速の自転速度を獲得したのではないだろうか? また、より古い時代に作られた溝のマークは、図5に示したBのようにやや不明瞭で、図3のA-A'のように明瞭な線状窪地は、より後期に形成されたものと考えられる。しかも、どの線状窪地も、小惑星表面の巨大なクレーターの影響を受けていない(クレーターより若い)。

## 5. 惑星表面のテクトニクス年代の更なる解析を目指して

ここに紹介した小惑星リュウグウの線状窪地は、地質調査で教わった露頭の観察テクニックを応用して、平面写真をより低角度から見て、直線で連続する模様をより認識しやすくすることにより、見出された模様である。リュウグウの表面には直線だけでなく、曲線を描く模様の存在も考えられる。そのような曲線状模様は「斜めから見る」事のみによっては強調され難い。市販の画像解析プログラムには、多様な解析が可能なプログラムが含まれていよう。集塊岩のように見える、小惑星表面のテクトニクス解析に画像解析手法を適用することにより、年代を含む多くの小惑星史を明らかにできるのではないだろうか。

さらに小惑星は、より小さい岩塊が集積し、惑星になる途中を表している場でなく、逆により大きな重力を持つ天体が中程度に破壊され、それ以降は、重力が小さい故に、リュウグウのグループマークを描いた岩塊のように、少しずつ宇宙空間に飛散している侵蝕の場を表している天体ではないだろうか？ 宇宙線照射で作られる $^{21}\text{Ne}$ の量から、小惑星イトカワの表面も短時間で削剥更新されているという (Nagao et al., 2011)。小惑星表層のより詳細な地質学的解析が望まれる。

2021 年度 ISEE 年代測定研究シンポジウムでの発表の折、関西学院大学の谷水雅治氏から、「小惑星から岩塊が飛び出したとするなら、それは小惑星の自転に伴う遠心力によると考えられる。そうすると、今回の発表にあった、様々な方向を持つ線状窪地からは、小惑星の自転方向が様々な方向に変化した、という事が考えられるが、そのように考えて良いか？」との質問をいただいた。様々な方向に向かう線状窪地は、自転方向の突発的な転換に伴う岩塊の移動に因るとみなすのが自然と考えられる。本論の図6に紹介したCとDのようにほぼ並行した線状窪地は、自転方向の同じ転換に起因するものであろう。リュウグウの表面には本論で紹介した明瞭な線状窪地から、半ば消えかかった不明瞭なものまで、多数の線状窪地が確認される。それらの線状窪地は、地球上のタービダイトのような、ある一時期のテクトニックイベントによって形成されたのではなく、それぞれ、数千万年～数億年に一度の複数回の出来事によって形成されたもので、風化が遅い小惑星面上においては、それらがあたかも昨日の出来事のように明瞭に保存されているのであろう。それらの形成機構や年代を含めた研究が望まれる。

## 引用文献

- 足立 守・水谷 伸治郎 (1971) 美濃帯古生層のsole markings と古流系について. *地質学論集*, **6**, 39-48.  
 グループマーク：地学団体研究会編「新版地学辞典」平凡社1996年.  
 はやぶさ2プロジェクトウェブページ <[www.hayabusa2.jaxa.jp](http://www.hayabusa2.jaxa.jp)>  
 三桝 裕也 (2021) はやぶさ2の拡張ミッション. ISASニュース No 488.  
 <<https://www.isas.jaxa.jp/ISASNEWS/No.488/ISASnews488.pdf>>  
 Nagao, K. et al. (2011) Irradiation history of Itokawa regolith material deduced from noble gases in the Hayabusa samples. *Science*, **333**, 1128-1131.  
 「理philosophia」40号表紙, 名古屋大学理学部・理学研究科広報誌, 2021年5月発行.