解説

月惑星探査ロボットの研究開発における課題 —走行力学の観点からの考察—

Research Issues on Lunar/Planetary Exploration Robots
—A Technical Note on Traction Mechanics—

吉田 和哉* *東北大学大学院工学研究科

Kazuya Yoshida* *Tohoku University, Graduate School of Engineering

1. ま え が き

月惑星探査において、ロボティクスによるミッションが強く期待されている。ロボット技術を駆使した無人探査機は、人が訪れることのできない遠方の天体に至り、非常に多くの情報を私たちにもたらす。まず、フライバイ（近傍通過）もしくは周回飛行により、対象天体の全貌が明らかにされ、次いで、表面への着陸および移動探査ができれば、その天体の地質や環境について起源や変遷をより詳しく知ることができる。探査の対象は、太陽系内の様々な天体に及んでおり、筆者が小学校時代に図鑑で見ていた天体の姿は、年々最新の映像に描き換えられている。

1960年代後半から70年代初頭に至るアポロミッションでは、計6回の月面着陸による有人探査が行われたが、着陸地点はいずれも月の表側の低緯度地方であった[†]。アポロ以来最大の月面探査といわれる日本の探査機「かぐや」（2007年9月打ち上げ）は、月の北極・南極を通過する軌道を周回し、全球にわたって詳細なりモートセンシングを続けている。2008年4月には、約677万地点の高度観測結果に基づき、世界初となる月全体の正確な地形図が作成された[1]。今後の日本の宇宙探査のターゲットの一つは月面であるといわれており、周回探査機「かぐや」の成果に基づいて決定される地点への精密な誘導着陸、そして移動ロボット（ローバー）による表面探査を行い、さらには有人基地建设へ向けて展開していくことが議論されている。

月の表面は、岩石や砂におおわれた、まったく真空の荒涼とした世界である。表面の大半はレゴリスと呼ばれる細かな砂でおおわれており、探査ローバーの走行制御は必ずしも容易なものではない。例えば、米国の火星探査ローバー・オポチュニティーは、やわらかいレゴリスでおおわれたエリアを通過する際に車輪が空転を起こし、脱出するまでに数週間を要する事態となった（図1）[2]。

このように、月惑星探査ローバーを設計する際には、岩

図1 火星探査ローバー・オポチュニティーが一時的にスタックした状況 ©NASA

のような大きな障害物を検出して避ける能力や、小石のような岩石を乗り越えて走行できる能力に加えて、レゴリスのような軟弱地盤を踏破する能力も求められる。本稿では、特にやわらかい路面における走行制御の問題に注目する。

やわらかい路面では、車輪やクローラーに「すべり」が生じやすい。すべりは、移動のための駆動力の伝達効率を低くするばかりではなく、オドメトリ（車輪・クローラーの回転数に基づいて移動距離を推定する方法）の精度を低下させてしまう。オドメトリの精度低下は、特に、ロボットの旋回動作において顕著である。よって、軟弱地盤上における牽引力とすべりの関係をモデル化し、すべり量を予測すること、そしてすべりを小さくするような走行制御を行うことは重要な課題である。近年、このような認識が広まり、数多くの研究がなされている。本稿では、車輪もしくはクローラーのすべりに着目した牽引力のモデル化の方法を概説し、やわらかいレゴリスでおおわれているような軟弱な斜面を踏破するためには、どのような考え方をしなければならないかについて考察する。

2. すべりと車輪牽引力のモデル化

自動車工学の分野では、アスファルトのような硬い路面の上を、ゴム製の空気圧タイヤのような変形する車輪が走行するための力学解析がなされているが、その対極にあるモデルとして、ここでは、車輪は剛で変形せず地面が変形

原稿受付 2009年4月13日

キーワード: Surface Locomotion, Rover Designs, Traction Mechanics, Soil-wheel Interaction, Slope Climbing

*〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

*Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi

[†]最高緯度はアポロ15号の北緯26度

図2 速度関係

図3 車輪接地面の応力分布モデル

図4 すべり率に対する DP の概形

する場合を考える。

まず車輪のすべりについて定義する。車輪が図2に示すように角速度 ω で回転し、速度 v_x, v_y で移動しているとき、すべり率 s およびすべり角 β を以下のように定義する。

$$s = \begin{cases} (r\omega - v_x)/r\omega & (\text{加速時}) \\ (r\omega - v_x)/v_x & (\text{減速時}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1}(v_y/v_x) \quad (2)$$

車輪と土壤が接する領域において、車輪の法線方向の土壤圧縮応力を $\sigma(\theta)$ 、車輪接線方向の土壤せん断応力を $\tau(\theta)$ とする。いま、 $\sigma(\theta)$ が図3に示すような分布となる場合、地面法線方向の反力 N 、および車輪に沿った地面接線方向（図の x 方向）の正味牽引力（Drawbar Pull と呼ばれる） DP は、以下の式で与えられる [3] [4]。

$$N = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{\tau(\theta) \sin \theta + \sigma(\theta) \cos \theta\} d\theta \quad (3)$$

$$DP = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{\tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta\} d\theta \quad (4)$$

ただし、 r は車輪半径、 b は車輪幅、

$$\tau(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) [1 - e^{-j(\theta)/k}] \quad (5)$$

$$j(\theta) = r[\theta_f - \theta - (1-s)(\sin \theta_f - \sin \theta)] \quad (6)$$

c, ϕ は土壤を特徴づけるパラメータであり、 k は土壤と車輪との干渉の度合いを示すパラメータである。その他の記号は図3に記載のとおりである。

式(5)の指数部には r/k が含まれており、例えば車輪半径 $r = 0$ のときには $\tau(\theta) = 0$ となり、車輪径が無限大のとき、最大値 $\tau(\theta) = c + \sigma(\theta) \tan \phi$ となる。低剛性タイヤ（空気圧使用の場合は低圧タイヤ）やクローラーは、等価半径を大きくした車輪としてとらえることができる。また、 r の値を0でない正值に固定した場合は、 k が小さくなると $\tau(\theta)$ の値が大きくなる。車輪の r/k 比は、その半径とタイヤ表面のラグパターンより定まる、車輪の牽引性能を特徴づけるパラメータであるといえることができる。

式(5)に示される DP の概形をグラフに示すと図4の

ようになる。 DP のグラフは、車輪を地面に押し付ける力 N の大きさに伴って上下する。また、すべり率が0のときは DP の値は負となる。これは、車輪が軟弱地盤に沈み込むからであり、沈み込んだ車輪は前方の土壤を締め固めて前進しなければならない。このことに起因する走行抵抗を「締め固め抵抗」[5]といい、この値は車輪の沈下量に伴って増大する。

3. 斜面登坂の限界

次に、四つの車輪をもつローバーが、斜面を最大傾斜角方向に直登する場合を考える。

ここでは斜面の表面は平坦、砂は均質であると仮定し、ローバーは左右対称であるとする。

図5(a)のようにローバーが斜面を登る際には、通常、前方車輪の接地荷重が減少し、後方車輪の接地荷重が上昇する ($N_3 > N_1$)。これに伴い牽引力も前方、後方で $DP_3 > DP_1$ のように差異を生じる。一方、図5(b)は、ボディ重心を前方にシフトするなどして全車輪の接地荷重を均等にした場合を示している。いずれの場合においても、ローバーが前進できるためには、全重量の斜面下方成分 $W \sin \delta$ に対して、車輪が発生する牽引力の和が勝たなければならない。

$$W \sin \delta \leq 2DP_1 + 2DP_3 \quad (a)$$

$$W \sin \delta \leq 4DP_2 \quad (b)$$

ここで、(a) の場合について以下の点を指摘することができる。

- 四つの車輪を等トルク制御してしまうと、負荷の小さい前輪は回転数が増える傾向、負荷の大きい後輪は減少する傾向になる。このように車輪回転数の不均一を生じると、負荷の小さい車輪において空転とそれに伴う土壤へのもぐり込みが発生し、走行抵抗を増大させてしまう。
- 接地荷重の大小にかかわらず、すべての車輪を等速で回転させる（すべての車輪のすべり率を同一にすることが、この場合の正しい制御方策である。これが実現できれば $2DP_1 + 2DP_3 = 4DP_2$ とすることは可能

図5 ローバーの斜面登坂モデル

である。しかし、接地荷重の大きい車輪では大きな駆動トルクを必要とし、車輪モータが十分なトルクを出せない場合には、 $2DP_1 + 2DP_3 < 4DP_2$ となってしまう。

- 仮に、すべての車輪を等速で回転させることができたとしても、接地荷重が大きい後方車輪のほうが、前方車輪より沈み込み量が多い。この結果として、ローバーの傾斜は斜面の傾斜角 δ よりも大きくなり、その分、重力荷重の分力 $W \sin \delta$ が増大する。

したがって、斜面登坂において図5(b)のように全車輪の接地荷重を均等にすることは、有効な戦略である。

以上の知見に基づいて、接地荷重を均等にし、全車輪を等速回転させても、すべての車輪のすべり率が1になってしまうと、それ以上の牽引力を出すことはできない。筆者の経験上、車輪型ローバーが砂もしくは模擬レゴリスの斜面を直登する場合、斜度20度前後が限界となる[6]。

4. クローラーによる登坂

図6のように m 個の転輪をもつクローラーが、 i 番目の転輪の下区間 $[x_{i-}, x_{i+}]$ の間に、 $\sigma(x)$ なる圧縮応力分布を生ずるものとするとき、クローラー全体が発生する推進力 T は、以下のように求められる[3][4]。

$$T = b \sum_{i=1}^m \int_{x_{i-}}^{x_{i+}} \tau(x) dx \quad (7)$$

$$\tau(x) = (c + \sigma(x) \tan \phi) [1 - e^{-s'x/k'}] \quad (8)$$

ここで、 s' はクローラーのすべり率であり、式(1)におい

図6 クローラーの走行モデル

て車輪の円周速度 rw を履帯の周速度に置き換えたものとして定義できる。 k' は、履帯表面と地面との干渉の度合いを示すパラメータである。 b は履帯の幅であり、その他の記号は図6に記載のとおりである。

なお、上記の式は推進力を求めるものであり、正味牽引力 DP を得るためには、 T よりクローラーの沈下に伴う締め固め抵抗等の値を差し引かねばならない。

斜面の表面が平坦であり、クローラーが斜面に密着できる場合には、一般にクローラーのほうが車輪よりもより大きな斜度を登ることができる。しかしながら、図6に解析モデルを示したように、推進力は斜面への押し付け荷重が分布する転輪下面のみに発生しうることには注意が必要である[7]。

5. クローラー vs. 車輪

JAXA では、月ローバーの試作モデルとして、図7に示すような「おむすび形」のクローラーを持つ車体が開発されており[8]、ローバー走行系の基本形態として車輪型が優れているか、クローラー型が優れているかは、興味深い問題である。

この課題については、2006年にWongら[9]が走行力学の観点から系統的な比較を論じている。その結論を端的に述べると、幅、荷重、すべりの条件等を同一にして、接地長が L のクローラーが発生する推進力 T_{tr} と、ホイールベース長がやはり L の4連車輪が発生する推進力 T_{ti} を比較すると常に $T_{tr} > T_{ti}$ であるが、特に砂上において低圧（低剛性）タイヤなどを用いて工夫することにより、 T_{ti}/T_{tr} 比を1に近づけることが可能である（文献[9] Fig. 3, Fig. 10）。

以上の比較は走行推進力に注目したものであるが、ローバー設計の際に考慮しなければならない問題として、(1) シャーシ全体の機構が簡便かつ、軽量であること、(2) 駆動部への土砂の噛り付きが生じにくいこと、(3) 履帯離脱などのクリティカルな現象がおきないこと、(4) 走行抵抗が小さいこと、(5) ステアリング特性に優れていること、などを考慮しなければならない。

クローラーにとって不利な状況の一つに、図8に示す場合があげられる。この場合には、同図右に示すように、受動リンクを用いたイコライジング（荷重等分配）機構によ

図7 月面ローバーの試験モデル
(JAXA フォトアーカイブより, ©JAXA)

図8 路面に突起がある場合のクローラー型と車輪型走行系の比較

り支持されている4連車輪のほうが適応能力に優れている。 T_{ti}/T_{tr} 比が1に近い推進性能を出すためには、すべての車輪が動輪である必要があり、機構の簡便さの観点から全軸独立にモータを配置することが考えられる。モータ数が増えることは開発上のネガティブ要因となるかもしれないが、一方で、自在な駆動力制御の可能性が増えること、また仮に一つのモータが故障しても、クラッチにより開放できれば致命的にならないという冗長性の観点からは、ポジティブ要因であるといえる。

6. 斜め登坂

以上では、斜面を直登する場合について考えてきた。しかしながら斜度30度を越えるようなクレーター内壁を直登すること自体が、賢明な戦略とはいえない。地上でも、多くの登山道路は斜めやジグザグに登坂するように施工されている。

斜面を斜めに登る能力を論じるためには、車輪もしくはクローラーの横特性を理解しなければならない。Ishigamiら[10]は、砂上での剛性車輪について、縦と横の駆動性能を概観する Thrust-Cornaring 曲線を求め、斜面横断制御を論じている。このチャートに基づけば、車輪（もしくはクローラー）の特性と土壌パラメータを与えることにより、最大登坂限界を論じることが可能である。

7. あとがき

本稿では、月惑星探査ロボットの研究開発における課題の一つとして、走行力学の観点からの考察を要約した。

ローバーの走行系設計は重要な側面であり、険しい未知環境でも自在に機能するローバーの開発がなされることは、言うまでもなく望ましいことである。それに加えて、走行系の性能を最大限に引き出すための制御方策についても、まだまだ検討の余地があり、研究者としての興味を引きつける部分である。

本学会での学術研究の成果が、我が国の宇宙探査ミッションに役立てられることを望んで止まない。

参考文献

- [1] H. Araki, et al.: "Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry," Science, vol.323, no.5916, pp.897-900, 2009.
- [2] NASA's Opportunity Rover Rolls Free on Mars, <http://marsrovers.nasa.gov/newsroom/pressreleases/20050606a.html>
- [3] M.G. Bekker: Introduction to Terrain-Vehicle Systems. University of Michigan Press, 1969.
- [4] J.Y. Wong: Terramechanics and Off-Road Vehicles. Elsevier, 1989.
- [5] 杉山昇：建設機械と土の諸問題。鹿島出版会，1982.
- [6] 三輪，石上，永谷，吉田：“テラメカニクスに基づく月・惑星探査ローバーの登坂性能解析”，第11回ロボティクスシンポジウム予稿集，2006.
- [7] J.Y. Wong: "An Improved Method for Predicting Tracked Vehicle Performance," Journal of Terramechanics, vol.21, pp.35-43, 1984.
- [8] S. Nishida and S. Wakabayashi: "A Study on Mobility Platform of Lunar Work Rover," ISTS paper 2008-k-57.
- [9] J.Y. Wong and W. Huang: "Wheels vs. Tracks? A Fundamental Evaluation from the Traction Perspective," Journal of Terramechanics, vol.43, pp.27-42, 2006.
- [10] G. Ishigami, K. Nagatani and K. Yoshida: "Slope Traversal Controls for Planetary Exploration Rover on Sandy Terrain," Journal of Field Robotics, vol.26, pp.264-286, 2009.

吉田和哉 (Kazuya Yoshida)

1986年東京工業大学大学院修士課程修了，1986年東京工業大学助手。1994年米国マサチューセッツ工科大学客員研究員，1995年東北大学助教授を経て，2003年より東北大学教授，大学院工学研究科航空宇宙工学専攻。宇宙ロボットを中心とした運動力学，制御工学および宇宙探査工学の研究に従事。「おりひめ・ひこぼし」を用いた宇宙ロボット実験，小惑星探査機「はやぶさ」の開発など日本の宇宙開発ミッションに貢献。宇宙探査ロボット技術の応用として，災害時の情報収集ロボットの開発にも取り組んでいる。工学博士。計測自動制御学会，日本機械学会，日本航空宇宙学会，IEEEの会員。（日本ロボット学会正会員）