東海大学紀要工学部
vol.54,No1,2014,pp.39-46

月面走行を想定した超軽量小型探査ローバ用インフレータブルホイールの走行性能の評価法

鈴木　亮[*1]　角田　博明[*2]　吉光　徹雄[*3]

An Evaluation Method of Running Characteristics of an Inflatable Wheel for a Small Sized Ultra-Lightweight Rover on Lunar Soil

by

Ryo SUZUKI[*1], Hiroaki TSUNODA[*2] and Tetsuo YOSHIMITSU[*3]

(Received on Mar. 27, 2014 and accepted on July 10, 2014)

Abstract

In this paper, the running characteristics of an inflatable wheel on lunar soil are described using the measurement of the contact area of the wheel on regolith simulant and the theory of Hertz. By the internal pressure of more than 1.0 kPa in the test article, the contact area does not have a large fluctuation. However, the contact areas suddenly increase if internal pressure becomes less than 0.5 kPa. When internal pressure is enough, it is thought that it can be treated as a range of the elastic deformation. The result of the running experiment shows that the slip ratio hardly changes by internal pressure. The result of the rolling resistance experiment shows that rolling friction is large, so that internal pressure is high on the regolith simulant in comparison with on a board or river sand. It became clear that the wheel used in the experiment had a stable property with internal pressure of more than 1.0 kPa. In addition, by running the experiment on the regolith simulant, it clarified that it is not necessary to raise internal pressure more than required.

Keywords: Space structure, Deployable structure, Ultra-lightweight structure, Membrane structure, Robotics rover

記号の説明

R_c: ホイールの静的半径
R_0: 非変形時のホイール半径
R: 球の半径
f: たわみ
r: 接触面積半径
E: 表面材料の弾性係数
K: 等価弾性係数
ν: ポアソン比
W: 接触面にかかる荷重
S: 滑り率
μ: 転がり摩擦係数
a: 接触面積の半径
d: 接触面の中心と接触面の圧力分布の中心間距離
A: 接触面積
l_0: 無負荷時の走行距離
l: 負荷時の走行距離
t: 膜の厚さ
σ: 膜材にかかる引張応力
p: 内圧(差圧)

*1 工学研究科　航空宇宙学専攻　修士課程
*2 工学部　航空宇宙学科　航空宇宙学専攻　教授
*3 宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所　准教授

1. はじめに

月や火星，小惑星など，表面が岩石や砂に覆われた天体への着陸調査は，その天体についてだけでなく，地球や太陽系の誕生に関しての情報が得られる可能性があり大変意義がある．また，将来の有人宇宙活動の拠点候補を探ることにも役立つと考えられる．惑星表面を移動し探査を行うローバの研究は，現在国内外の多くの研究機関や大学で行われている．それらの共通した特徴は，耐久性を高くするためにホイールなどの主要構成品に金属材料や複合材料を使用し，また走行制御性を優先するために動作性能を重視したものが多い．また，無人探査の分野では，宇宙探査のほかに火山観測・災害救助・原子力発電所の高濃度汚染区域の調査などを無人で行うローバも研究されている．

NASA の MER[1)]のような大型探査ローバは多くの観測装置を搭載できるため，それぞれの機器の観測結果を連携するような使い方が期待できる．しかし，ローバ自体が大型になり，また開発コストも大きくなるため，打ち上げの機会が限られることになる．本論文では，宇宙利用のハードルを下げることを目的に，低コストで開発ができる可能性が高く，また他のミッションとの相乗りに

より打ち上げの機会が得られやすい，ホイールの直径が 300 mm 程度の球形状で，質量が 1 kg 前後の超小型軽量ローバを対象として取り上げる．このようなローバを実現するために，ホイールにインフレータブル構造技術を採用する．インフレータブル構造とは，気密性の高い膜材料で構成した袋状の構造の内部に気体を導入し，内圧を与えることで膨張展開させる構造物である．

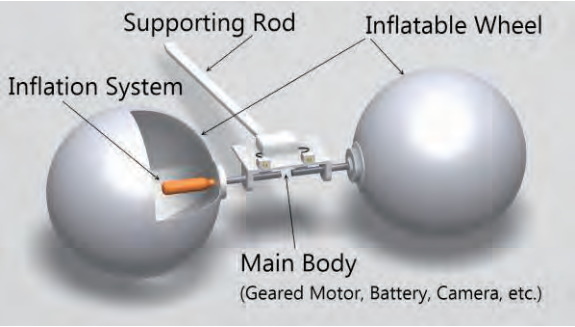

Fig. 1 Concept of small sized ultra-lightweight rover using Inflatable wheel[2)]

Table 1 Specifications of ultra-lightweight rover using Inflatable wheel

Total mass	1～1.5 kg
Wheel diameter	300 mm
Mission	Shooting the mother ship landing Exploration of lunar hole
Exploration location	Obverse side of the moon Flat ground near the lunar hole
Exploration time	A few hours in the morning
Exploration distance	About 300 m
On-board equipment	Camera, Sun sensor, etc.
Communications	Via mother ship
Others	Soft landing after releasing from mother ship Releasing height: about 10 m Deployment time: about 3 s

本研究で対象とするローバの概念図を Fig. 1 に，主な仕様を Table 1 に示す．このローバでは，月面の比較的平坦な場所を探査することを想定している．ホイールにはインフレータブル構造を使用するので，月面への着地時に,エアバックとしての機能を持たせることができる．ローバは着地した後は，月面上を走行するので，月面の軟弱土壌に対する走破性，大きい岩などの障害物回避判断，探査目標地点への誘導，地球との通信などが求められる．既存の研究では NASA/JPL のインフレータブルローバ [3, 4)]が知られている．このローバのホイールは直径が約 1.5 m の球形状で，ホイールの質量が一輪につき約 7.5 kg である．しかし，使用する材料や構造が本研究とは大きく異なり，本論文で対象とするよう超小型なローバについてはこれまでに十分な研究がなされてこなかった．そこで，本研究では，直径 300 mm 程度の超小型で軽量なホイールの設計法を明らかにするために，ホイールのたわみから接触面積を明らかにし，転がり摩擦係数から走行性能を明らかにするための評価方法を実験により検証する．そしてホイールの直径と走行に適した内圧の関係を明らかにする．

2. 評価方法の検討

2.1 超軽量小型なインフレータブホイールの特徴

月面はレゴリスと呼ばれる細かい粒子の砂で覆われている．そのため，ホイールと路面との摩擦係数が小さくなり，スリップしやすくスタックを起こしやすくなるため，それを防ぐための工夫が必要になる．そのため，月面探査機として実際に月面を走行した旧ソ連の Lunokhod やアポロ 15 号以降に活躍した有人月面車（LRV: Lunar Roving Vehicle）のホイールでは金属製のものが採用されていた．それらのホイールは軽量化と，走行中にホイール内に入り込んだ砂が車輪内に溜まらないようにするため，金属のメッシュやワイヤーで構成されている．しかし，Lunokhod や LRV のみならず近年の火星探査用ローバでも，スタックが発生している．

インフレータブルローバの場合，一般的に開発が行われている金属製のホイールを有するローバと同じ走行性能の評価方法をそのまま適用することはできない．金属製のホイールは荷重に対して形状が変形しにくい大きな剛性を有しているものが一般的であり，また質量が大きく，路面との接触荷重が大きいため，駆動力を路面に伝えやすく，走行を安定させやすい．それに対して，ここで取り上げる超軽量小型ローバ用のインフレータブルホイールの場合，ローバ自体が超軽量であるため，必然的に低荷重での使用となり，走行性能が金属性のホイールに比べて安定しないため，内圧を調整することで砂との接触の摩擦係数を増加させる工夫をして駆動力を伝達しなければならない．そのためには，ホイールのたわみと走行性能を明らかにするための評価方法を確立する必要がある．

2.2 ホイールのたわみ評価方法

インフレータブルホイールは，負荷される荷重や内圧により，変形形状（変形量）が決定される．ここでは変形形状（変形量）を代表するパラメータとして，ホイールのたわみを取り上げ，たわみが走行性能に与える影響を明らかにする.ホイールのたわみ f は式(1)で表される．ここで R_0 は非変形時のホイール半径を，R_C は変形したホイールの接触面から軸までの高さ（ホイールの静的半径と呼ばれる）を表す．

$$f = R_0 - R_c \qquad (1)$$

実際にたわみを測定しようとすると，球体では計測位置が特定しにくいことに加え，その変化量は 1 mm 以下の微小なものに過ぎず，たわみを十分な精度で直接測定することは困難である．そこで，接触面積を測定し，面積からたわみを推定する．接触面積からたわみを推定するには，Hertz の理論（あるいは Hertz 接触）[5)]に沿って考える．Hertz の理論は，材料が均質であること，接触部

分は物体の大きさに比べて微小であること，接触面に作用する荷重は垂直であること，変形は弾性限度内という仮定で成り立つため，インフレータブルホイールに十分な内圧が与えられている場合を考える．内圧が極端に低い状態（0 kPa 付近）ではホイールが大変形をするが，そのような状態では使用しないので，本検討では除外する．Hertz の理論によると平面と球体の接触面積 A の半径 a は式(2)のように示される．同様にたわみ f は式(3)のように示される．よって，接触面積 A とたわみ f の間は式(4)が成り立つ．

$$a = \sqrt[3]{\left(\frac{3W}{4}\right)\bullet\left(\frac{1-\nu}{E}\right)\bullet R} \qquad (2)$$

$$f = \sqrt[3]{\left(\frac{3W}{4}\right)^2\bullet\left(\frac{1-\nu}{E}\right)^2\bullet\frac{1}{R}} \qquad (3)$$

$$\frac{f}{A} = \frac{1}{\pi R} \qquad (4)$$

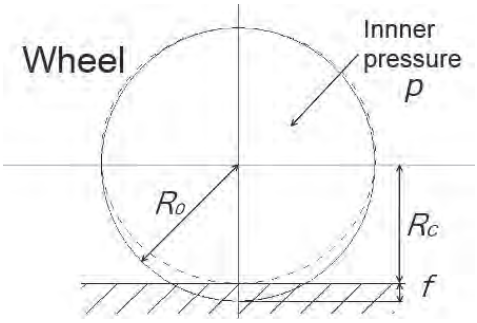

Fig. 2 Deflection of Inflatable wheel

2.3　ホイールの走行性能評価方法

走行性能については，一般的にローバ研究で用いられるテラメカニクス（走行力学）から，滑り率を評価項目として取り上げる．また，滑り率のほかに，将来の走行に必要なエネルギー試算に資するため，転がり摩擦係数も評価項目に加える．自動車のタイヤの評価方法では，滑り率や転がり摩擦係数はすでに研究されている．しかし，インフレータブルホイールは薄い膜材で構成されていて超軽量であるうえ，球形状であるため，自動車用タイヤの評価方法をそのまま使うことはできない．そこでインフレータブルホイールに適した評価方法を明らかにする必要がある．滑り率 S は，負荷がかかった状態で滑りながらホイールが走行した場合の距離（負荷時の走行距離 l; 計測値）と，極めて小さい負荷を与えて滑らずに進んだと見なした場合の距離（無負荷時の走行距離を l_0; 推定値）を用いて式(5)から求める．

$$S = \frac{l_0 - l}{l_0}\times 100 \qquad (5)$$

転がり摩擦は，球や円筒などの回転体を平面上で転がそうとするときに生じる抵抗のことである．ホイールの場合，転がり摩擦は加減速抵抗，空気抵抗（月面では考慮する必要はない），勾配抵抗などとともに走行への負荷を与えるものとして重要である．滑らかな回転体の転がり摩擦は，接触圧力によって回転体が弾性変形し，微小な平面で接触することにより生じる．すなわち，弾性球を剛体平面の上に置くと，球は Hertz 接触して弾性変形し，接触部は半径 a の平面となる．面接触しているものを転がそうとすれば抵抗が生じ，この抵抗が転がり摩擦である．滑らかな球の転がり摩擦係数 μ は式(6)で表される[5]．従って，球の半径 R が大きくなるほど，あるいは等価弾性係数 K が大きい(硬くて変形しにくい)ほど，転がり摩擦係数 μ は小さくなる．

$$\mu = \frac{d}{R} = \frac{\sqrt[3]{R^4/K}}{R} = R^{-\frac{1}{4}}K^{-\frac{1}{3}} \qquad (6)$$

3. 評価方法の検証実験

3.1　ホイールのたわみ評価方法

ホイールの接触面積を測定し推定したたわみと，実際に測定したたわみの大きさを比較する．たわみの値が近く，傾向も同じであればインフレータブルホイールでも Hertz の理論を使用して評価が可能である．Fig. 3 に示す接触面積測定装置を用いてカメラで接触面を撮影し，接触境界面を楕円形で近似して，PC 画面上でその楕円の半径を計測する．ホイールは車軸を取り付けたフランジによって片持ちの状態で固定され，接触面にかかる荷重は車軸の高さを上下させることで調節する．なお，実験に使用したホイールは，実際に宇宙環境で使用するものではなくインフレータブルホイールの傾向を見るため，入手しやすい塩化ビニル製のものを使用している．供試体の外観を Fig. 4 に，その諸元を Table 2 に示す．

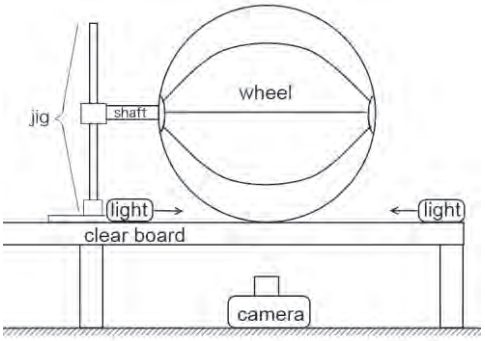

Fig. 3 Measuring equipment of contact area

Table 2　Specification of test article

For measuring contact area and slip ratio	Total mass	104.0 g
	Average membrane thickness	0.171 mm
	Diameter	253 mm
	Circumference length	795 mm
For measuring rolling friction	Total mass	82.13 g
	Diameter	322 mm

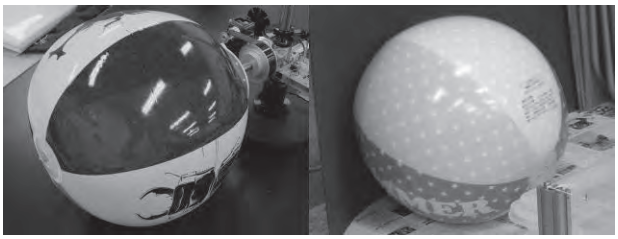

Fig. 4　Outline view of the test articles

3.2　ホイールの走行性能評価方法

性能評価法の妥当性を明らかにするために，滑り率と転がり摩擦についてそれぞれ検証実験を行った．滑り率は進行方向のみとし，横滑りについては取り上げない．Fig. 5 に示した装置を用いて，最初に実験テーブル上で走行実験を行う．剛体と仮定した実験テーブル上を走行路面に用いることで，走行路面の形状は変化しないものとし，ホイールの内圧を変化させてそれぞれの内圧での滑り率を計測することで，内圧が滑り率に与える影響を調べる．車軸高さを 116 mm に固定し，ホイールに与える荷重を 1 N で一定にする．内圧は 0.5 kPa から 4.0 kPa まで 0.5 kPa 刻みで変化させ，それぞれ 3 回ずつ計測を行った．

転がり摩擦は，荷重と内圧などによるホイールの変形，接地摩擦，空気抵抗に起因する．転がり摩擦を測定する実験は，0.01～1 mm 程度の粒径で角ばった粒子形状の月面模擬砂を敷き詰めて行い，転がり抵抗の測定に適した惰行法で行った．実験装置の概要を Fig. 6 に示す．0 地点と X 地点（$x = 300$ mm）の 2 点間で転がり摩擦係数を求める．2 地点におけるそれぞれの速度 V_0，V_x を求め，運動エネルギー保存則から転がり摩擦係数 μ は式(7)で求められる．実験では空気抵抗の影響があまり大きくならないように十分に低い速度で走行できるような傾斜にした．これにより，空気抵抗より転がり摩擦のほうが十分大きいとみなし，空気抵抗の影響は無視した．実験は月面模擬砂との比較として，180 番のサンドペーパーを貼り付けた板，一般的な川砂の上で行った．

$$\mu = \frac{m(V_x^2 - V_0^2)}{2Wx} \qquad (7)$$

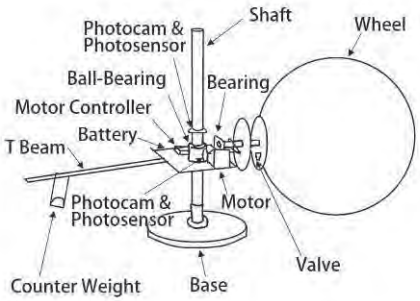

Fig. 5 Measuring equipment of slip ratio

4.　評価方法の検証実験結果

4.1　ホイールのたわみ評価方法の検証結果

たわみの測定結果を Fig. 7 と Fig. 8 に示す．Fig. 7 は，荷重を 1 N に固定した状態で，内圧を変化させた時の接触面積の変化を示している．Fig. 8 は，内圧を 1.5 kPa と 3.0 kPa にそれぞれ固定した状態で，荷重を変化させた時の接触面積の変化を示している．

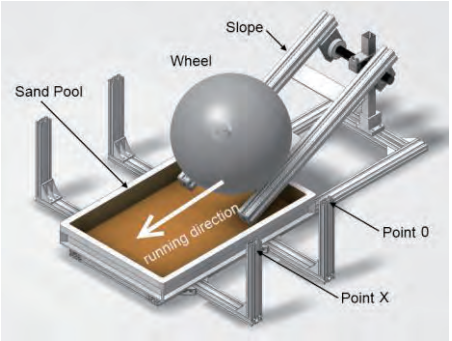

Fig. 6 Measuring equipment of rolling friction

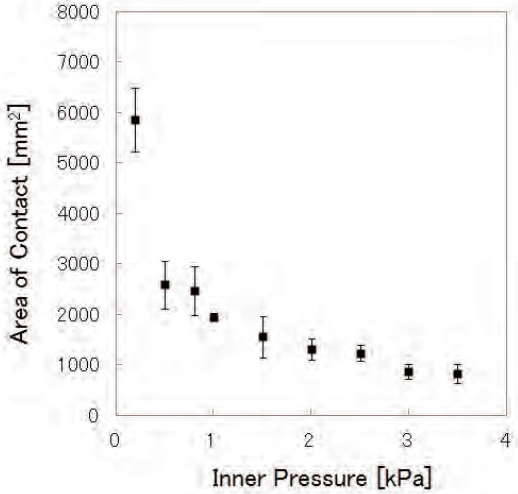

Fig. 7　Inner pressure vs. area of contact (Load: 1 N)

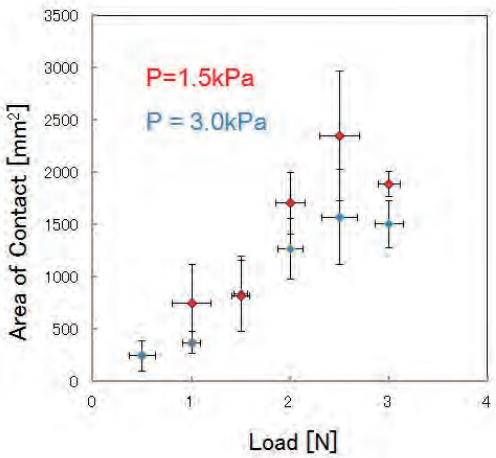

Fig. 8 Load vs. area of contact (Pressure: 1.5, 3.0 kPa)

Fig. 7 に示した内圧と接触面積の関係から，内圧が小さくなるにつれて接触面積が増していくことがわかる．特に 1 kPa 以下で急激に接触面積が増加する傾向にある．Fig. 8 の荷重と接触面積の関係からは，荷重が大きくなるにつれて接触面積も増していくことがわかる．1 kPa 以上の内圧では，内圧による差は荷重に比べて大きく変わらないことがわかった．

次に，内圧が 3.0 kPa の場合について，接触面積の測定値から式(4)を使用してたわみを計算する．実際にたわみを測定した値と，接触面積より求められた計算値を比較した結果を Fig. 9 に示す．ここで実験値のエラーバーは測定に使用した定規の精度 1 mm で表示しているが，実際は測定した際の接触などによって幅が大き目になっていると思われる．この結果から，実験値と接地面積から予測した値はほぼ同程度であることがわかった．よって，3.0 kPa のように内圧が十分に与えられている場合，Hertz の接触理論によって接触面積からたわみを計算によって求めることができることがわかった．

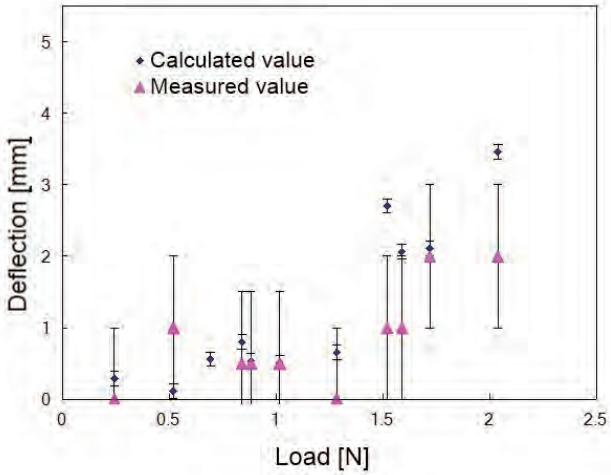

Fig. 9 Estimation of deflection value

4.2　ホイールの走行性能評価方法の検証結果

滑り率の実験結果をグラフに表したものを Fig. 10 に示す．図中のエラーバーは 5 %標準偏差である．実験毎に砂面を平らになるようにならして行ったが，手作業のためばらつきが発生したと考えられる．この結果から，内圧が小さくなると滑り率も小さくなる傾向がうかがえる．しかし，その差は小さく，今回の 0.5 kPa から 4.5 kPa までの範囲では，全体的に 5～6 %以下に収まっている．この程度の滑り率であれば，スパイクなどの滑り止めをホイールのトレッド部分（接触表面）に付けるなどの対策を施せば，改善がはかれると思われる．また，内圧が滑り率に与える影響が小さいことから，内圧を変えることにより滑り率を制御することは適当ではないことがわかった．

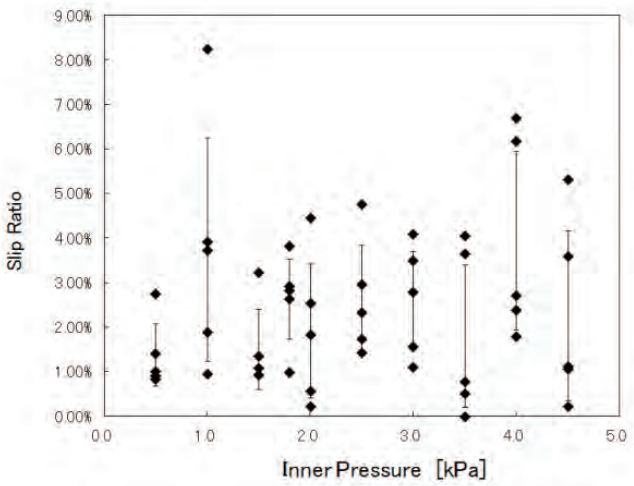

Fig. 10 Inner pressure vs. slip ratio

転がり摩擦係数の実験結果を Fig. 11 に示す．内圧が高くなるほどホイールの形状は球に近づくため，転がり摩擦は小さくなると考えられる．板上で転がした結果では，そのように内圧が大きいほど転がり摩擦が小さくなる傾向がみられる．同様に川砂の上でも板上とほとんど同じ値であり，内圧が高いほど転がりやすくなっていることがわかる．一方，月面模擬砂上で転がした結果では，内圧が大きくなるほど転がり摩擦が増す．これは，板上では発生しない沈み込みが発生し，内圧が高く剛性が増したホイールが月面模擬砂にめり込みやすくなったため，接触面積が増加し転がり摩擦が大きくなったと考えられる．川砂では沈み込みが発生しなかったか，しても小さかったため，板上と類似した結果になったと考えられる．

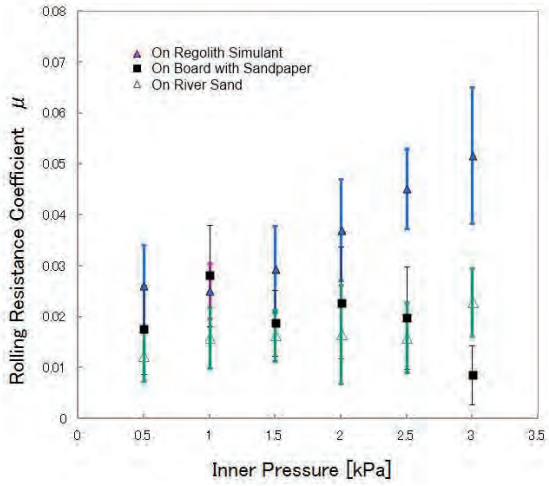

Fig. 11 Inner pressure vs. rolling resistance coefficient

月面模擬砂上での接触面積の大きさを測定し，同じ内圧において，平面上での接触面積より大きいことがわかれば沈み込んでいることが証明できる．月面模擬砂上では，Fig. 12 のように走行後の轍が残る．轍の幅は接触面直径とみなすことができるので，接触面積を知ることができる．轍の幅を測定し接触面積を推定した結果を Fig. 13 に示す．

Fig. 12 Wheel ruts on regolith simulant

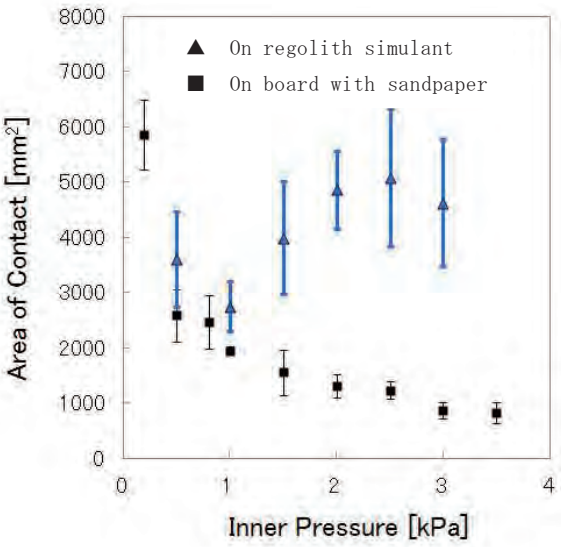

Fig. 13　Inner pressure vs. area of contact (On board with sandpaper and regolith simulant)

Fig. 13 に示す結果から，仮定通り，月面模擬砂地では内圧が高くなるほど，接触面積が増加していく傾向があることがわかった．これは板の上での内圧と接触面積の関係とは全く異なった傾向である．内圧が増加すると，月面模擬砂での接触面積が増大している傾向と，転がり摩擦係数の増加の傾向は等しく，接地面積の増加が転がり摩擦に影響していることがうかがえる．したがって，内圧の増加に伴う転がり摩擦係数の変化は，滑り率の変化よりも大きく，走行性能の評価には，転がり摩擦係数が適していることがわかった．

転がり摩擦抵抗とたわみの結果から最適な内圧を知ることができる．実験は直径 300 mm のホイールで行ったが，式(8)を用いて直径ごとの内圧を求めることができる．その結果を Fig. 14 に示す．これより，直径に応じた最適な内圧の範囲を知ることができる．

$$t\sigma = \frac{1}{2}pR \qquad (8)$$

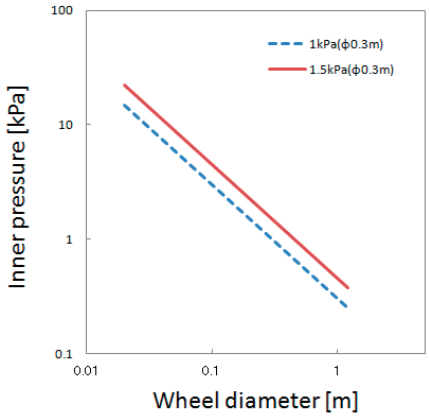

Fig. 14 Wheel diameter vs. inner pressure

5. 結　論

インフレータブルホイールの内圧とたわみの関係を接触面積の測定から明らかにした．接触面積を測定し，Hertz の理論を使って，接触面積からたわみを求めることができる．荷重を一定にして，内圧を変化させた場合，内圧が小さくなり剛性が小さくなると接触面積が増加する．実験で使用した供試体では，接触面積は内圧が 1 kPa 以上では大きな変化はなく安定しているが，0.5 kPa 以下で 0 kPa に近づくほど急激に増大する傾向が見られた．内圧が十分与えられていると，弾性変形の範囲に収まっていると考えられる．

走行性能評価実験から，滑り率は内圧によってほとんど変化しなかった．転がり摩擦係数による評価実験から，板上と川砂上の結果に対して，月面模擬砂上の結果は内圧が大きいほど転がり摩擦が大きくなるという傾向がみられ，大きく異なることがわかった．一般的に内圧が大きくなるほどホイールの剛性が増し，また真円に近づくため転がり摩擦が小さくなる．これは板上および川砂上での実験結果と同じ傾向が見られた．しかし，月面模擬砂上では内圧が大きいほど転がり摩擦が大きくなっている．砂地の轍を測定した結果から，接触面積が増大していることがわかり，ホイールが砂に沈み込んだ結果，接触面積が増大したためと考えられる．

以上の結果より，実験で使用したホイールは，内圧が 1.0 kPa 以上で安定した特性を持つことがわかった．また，月面模擬砂での走行を考慮すると内圧をあまり大きく設定する必要がないことがわかった．さらに月面模擬砂と川砂，板の上での転がり摩擦係が比較的近いことから，直径 300 mm の場合では，内圧を 1.0～1.5 kPa に設定するのが妥当と考えられる．

参考文献

1) P. Chris Leger, Ashitey Trebi-Ollennu, John R. Wright, Scott A. Maxwell, Robert G. Bonitz, Jeffrey J. Biesiadecki, Frank R. Hartman, Brian K. Cooper, Eric T. Baumgartner, and Mark W. Maimone: Mars Exploration Rover Surface Operations: Driving Spirit at Gusev Crater, 2005

IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hawaii, October 10-12, 2005.
2) Ryo Suzuki, Hiroaki Tsunoda, Takeshi Kuratomi, Tetsuo Yoshimitsu, and Kazuki Watanabe: Construction Method and Running Characteristics of Shock Absorbing Inflatable Wheel for Ultra-Light Rover, 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-c-35, Okinawa, Japan, June 9, 2011.
3) Jack A. Jones: Inflatable Robotics for Planetary Applications, 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics & Automation in Space: A New Space Odyssey, Montreal, Canada, June 18, 2001.
4) D. Apostolopoulos, M. D. Wagner, S. H. Heys, and J. Teza: Results of the Inflatable Robotic Rover Testbed, CMU-RI-TR-03-18, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, June 2003.
5) 加藤孝久，益子正文：トライボロジーの基礎，培風館，2004.