

PEEK フィルムを使用した月面ローバー用エアバッグ型ホイールの落下衝撃特性評価

鎌形 史也^{*1} 角田 博明^{*2} 吉光 徹雄^{*3}

Evaluation of Fall Impact Characteristics of Air Bag Type Wheel for Lunar Rover Using PEEK Film

by

Fumiya KAMAGATA^{*1}, Hiroaki TSUNODA^{*2} and Tetsuo YOSHIMITSU^{*3}

(Received on Sep. 30, 2015 and accepted on Jan. 07, 2016)

Abstract

This paper deals with the fall impact characteristics of the inflatable wheel used on the ultra-lightweight lunar rover. The wheel of the rover is assumed to be a spherical inflatable wheel of 150-300 mm in diameter. The inflatable wheel used for testing was build by joining two PEEK film molded articles that were pressed while heating. The reduction methods of the impact force of the inflatable wheel are considered as a result of dropping experiments carried out in a sandbox. It was confirmed that the internal pressure due to the impact generated by the collision with the lunar surface becomes small. In addition, it is shown that the fringe of the PEEK wheel is effective at reducing the impact force. Furthermore, the stress in the membrane due to deflection of the wheel is considered, and it was confirmed that the wheel would not likely break.

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

記号の説明

e :	反発係数
H_0 :	初期落下高さ
H_f :	接地後の反発高さ
F_{max} :	最大衝撃力
m :	供試体質量
V_0 :	衝突速度
T :	接地時間
l :	縁接地跡長さ
r_{PEEK} :	PEEK ホイール内半径 (球面部分のみの半径)
R_{PEEK} :	PEEK ホイール外半径 (縁も含めたホイールの半径)
h :	供試体沈み込み深さ
F :	衝撃力
r :	接地跡の半径
R_A :	無変形時の供試体半径
f :	供試体のたわみ
σ :	膜応力

S :	供試体接地面積
t :	膜厚さ
Y :	縁の落下跡長さ
P_A :	無変形時のホイール内圧
P_B :	変形時のホイール内圧

1. はじめに

超小形な探査機や探査車を開発することで宇宙利用のハードルを下げる事が期待されている¹⁾。本研究では、比較的低コストな着陸方法であるハードランディングを想定し、超小形な月探査用インフレータブルローバーのホイールの落下衝撃特性を明らかにする。月面でのミッションを想定した超小形ローバーは、Fig. 1のようなホイール部分に直径 150~300 mm の球状インフレータブルホイールを用いることで、輸送時の高収納性と軽量化を実現させる²⁾。ホイールにはエアバッグの機能を持たせることにより着地時の衝撃力を吸収し、ローバー自身でのハードランディングを実現する。

エアバッグによる着陸時の衝撃吸収に関しては、すでに NASA が質量 530 kg のマーズ・エクスプロレーション・ローバー (MER: Mars Exploration Rover) を、衝突最高

^{*1} 住友精密工業株式会社 (工学研究科航空宇宙学専攻修士学生)

^{*2} 工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻教授

^{*3} JAXA 宇宙科学研究所准教授

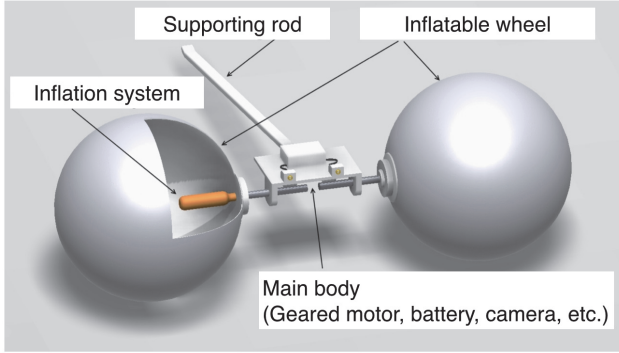


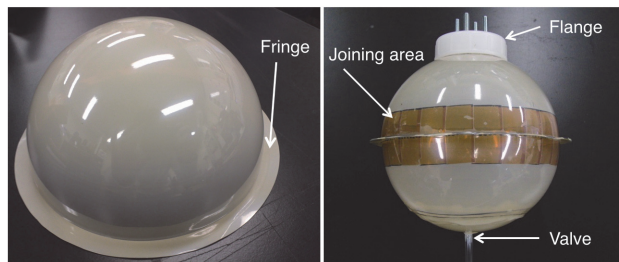
Fig. 1 Construction image of inflatable rover using sphere-shaped inflatable wheel²⁾

速度 26 m/s の落下衝撃に耐えられる高さ約 5.5 m のエアバッグで覆うことにより、ハードランディングを実現させている³⁻⁴⁾。しかし MER は、探査車やエアバッグの規模が大きく、そのまま質量 1~2 kg 程度の超小形ローバーに使うのは、使用する材料や構造が大きく異なるため適切ではない。また、MER ではローバーとエアバッグは個別に構成されていたが、超小形ローバーでは、可能な限りシンプルな構成にする必要があり、エアバッグの機能を兼用できるホイールが望ましい⁵⁻⁶⁾。そこで、加熱成形した半球状の PEEK フィルムを使用して試作したインフレーターホイール(以下では PEEK ホイールと呼ぶ)を使い、ホイール単体を供試体とした落下実験を行うことで、エアバッグとしての衝撃吸収性能を評価した。本論文では、衝撃力と内圧の関係、PEEK ホイールの縁が衝撃力に与える影響、ホイールのたわみにより膜面に生じる膜応力の 3 つの観点から実験的に PEEK ホイールの衝撃特性を明らかにする。

2. 落下実験方法の検討

2.1 PEEK ホイールの試作

膜材には月面での使用を想定し PEEK フィルムを使用する。PEEK (polyetheretherketone) はエンジニアリングプラスチックとして工業の分野で広く使われており、優れた機械的特性と耐久性を有している。この PEEK フィルムを加熱しながら直径約 150 mm の半球の金型でプレス



(a) Shape forming of PEEK film (b) Prototype of PEEK wheel

Fig. 2 Inflatable wheel using three-dimensional shape forming of PEEK film

成形することにより、球状部分の直径が 150 mm の PEEK フィルム製の半球が完成する。2 個の半球状の成形品を接合して PEEK ホイールを構成する。立体成形された PEEK フィルムと試作した PEEK ホイールを Fig. 2 に示す。本研究では、インフレーターホイールの直径は 150~300 mm を目標としているが、試作では金型と設備の制約から直径を 150 mm とした。立体成形に使用した PEEK フィルムは当初は膜厚が $100\mu\text{m}$ であったが、立体成形される過程で引き延ばされるため、頂点部分は膜厚が $96\mu\text{m}$ となり、頂点から外縁部に近づくにつれて膜厚が薄くなっていき最も薄い部分で $45\mu\text{m}$ になっている。

PEEK フィルムの接合には、内圧による膜応力で破断しない接合強度と気密性が求められる。そのため、Fig. 3 に示すように、縁同士をエポキシ系弾性接着剤で接合を行い、成形で生じた半球端部を縁として残すことで、気密が維持できるようにした。また、縁部分の接合のみでは接合強度が低くホイールに内圧を加えた時に破断する恐れがあるため、ホイール内側からポリイミドテープで補強することによって接合強度の向上を図る。落下実験用に縁の幅を変えて試作した 2 種類の PEEK ホイールの諸元を Table 1 に示す。

2.2 簡易モデルでの落下実験方法の検討

試作した PEEK ホイールを使った落下実験に先立ち、実験方法を確立するために、供試体として塩化ビニル製の球状のボールを使用し予備実験を行った。実験では、剛体面とみなしたタイルに落下させたときの接地時の最大衝撃力の測定を行った。落下実験で使用する加速度計の測定レンジは $\pm 70\text{G}$ であり、また供試体を落下させる装置の測定範囲の落下高さが最大で 500 mm であることから、落下高さ 300, 400, 500 mm で落下実験を行った。実験装置の外観を Fig. 4 に示す。落下高さ 500 mm から落下させた時の衝突速度 3.13 m/s に対して、球の抗力係数を 0.47 として空気抵抗によって減少した衝突速度は、塩化ビニル製のボールでは 3.08 m/s で 1.6% 減速、PEEK ホイールでは 3.05 m/s で 2.6% 減速しており、空気抵抗によって衝突速度が減少する割合は十分に小さいことから、空気抵抗による影響は考慮しないこととした。

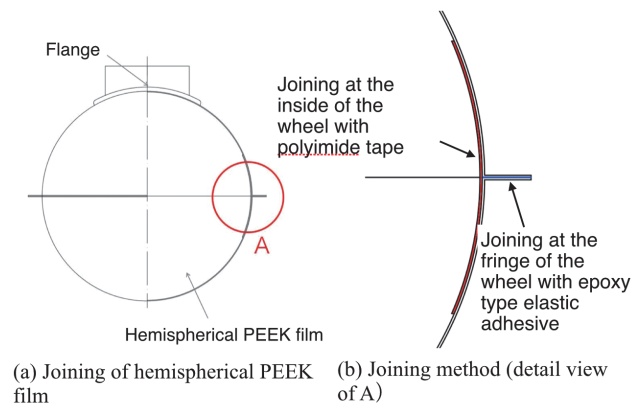


Fig. 3 Joining method of hemispherical PEEK film

Table 1 Specifications of test articles #1 and #2

Test article	#1	#2
Membrane material	PEEK film	PEEK film
Radius	75 mm	75 mm
Width of fringe	5 mm	10 mm
Membrane thickness	Minimum	0.045 mm
	Maximum	0.096 mm
Mass (without flange)	56.9 g	62.8 g

落下衝撃力の測定は次の3種類の方法で行い、それぞれを比較することで落下衝撃力測定方法を評価した。

(1) MEMS 加速度センサ (Analog Devices ADXL278) を使用して自作した加速度計を使用し、落下衝撃時の最大加速度と供試体質量より衝撃力を求める。

(2) デジタルカメラを用いて動画撮影を行い、動画から切り出した静止画像より、供試体がバウンドした時の最大高さを求める。落下高さとバウンド後の最大高さから供試体の反発係数を求め、反発係数を用いて最大落下衝撃力を求める。反発係数 e は、初期落下高さ H_0 と接地後の反発高さ H_1 より式(1)で表され、最大衝撃力 F_{max} は式(2)より求められる。ここで、 m は供試体質量、 V_0 は衝突速度、 T は接地時間を表す。なお、前述した加速度計を用いた計測より、衝撃加速度が感知される時間は約 0.0175 s であったため、使用したカメラのフレームレート (300 fps) では約 19% の精度で測定できていることになる。

$$e = \sqrt{H_1/H_0} \quad (1)$$

$$F_{max} = \pi m V_0 (1 + e) / 2T \quad (2)$$

(3) 内圧を加えた球体に初速度を与えた剛体壁を接触させる条件で有限要素解析を行い、接触面に加わる力から最大衝撃力を求める。

使用した供試体と自作した加速度センサの諸元を Table 2 に示す。加速度計測定、画像測定、有限要素解析の3種類の方法で落下高さ 400 mm から落下させた時の衝撃力測定を行った結果を Fig. 5 に示す。これより、加速度測定と画像計測、有限要素解析による衝撃力の測定結果の差は最大で ± 5 N 程度であることがわかり、大きな違いが見られないと判断した。このことから、落下実験では自作の加速度計を用いた計測で衝撃力の評価を行うこととした。

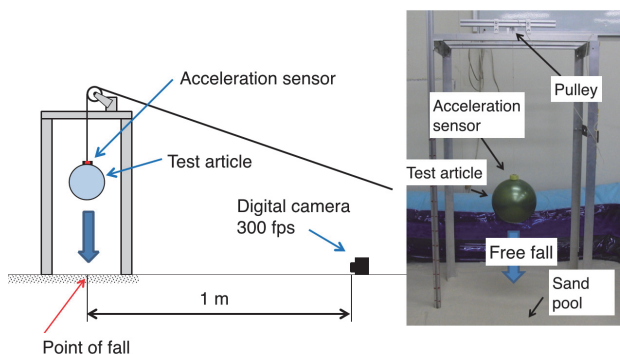


Fig. 4 Experimental arrangement of free fall experiment

Table 2 Specifications of test article of preparatory experiment and acceleration sensor

Test article of preparatory experiment

Material	Vinyl chloride
Radius	85 mm
Membrane thickness	0.993 mm
Mass	96.4 g

Acceleration sensor

Dimension	$5 \times 5 \times 1.98$ mm	
Mass	1.7 g	
Measurement range	X axis	70 G
	Y axis	37 G
Accuracy	X axis	27 ± 1.35 mV/G
	Y axis	55 ± 1.35 mV/G
Others	Using 0.5 mm enameled wire	

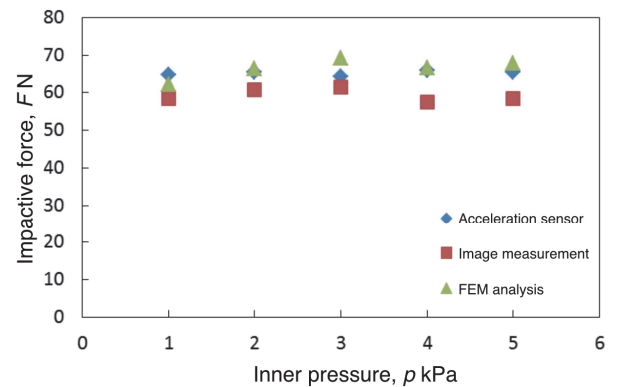


Fig. 5 Comparison of three measurement methods using inner pressure vs. impactive force

3. PEEK ホイールを用いた落下実験

3.1 落下衝撃力の測定

落下実験で使用する PEEK ホイールは Table 1 で示したものを供試体として、第 2 章に述べた予備的に行った落下実験と同様の実験方法で加速度計を用いて衝撃力の計測を行う。縁の幅が 5 mm の PEEK ホイールと縁の幅が 10 mm の PEEK ホイールを比較することによって、縁の幅が落下衝撃力にどのような影響を与えるのかを内圧と衝撃力の関係から明らかにする。このとき、供試体 1, 2 の質量差は 5.7 g (10% 程度) と小さいことから、衝撃加速度ではなく衝撃力で比較と評価を行う。落下実験では軟土壌を想定して、粒度 0.05~0.2 mm の珪砂を敷きつめた砂面で行う。

3.2 ホイールのたわみと接地面積の測定

落下面の跡から測定した接地面積と加速度計測によって得られた衝撃力より、内圧と衝撃力の関係を求める。また、衝撃時の供試体のたわみと内圧上昇量の関係を明らかにする。供試体である PEEK ホイールを砂面に落下させた場合、落下跡がほとんど残らない。そこで、Fig. 6 のように接地時の縁の跡の長さを測定し、式(3)~(4)より接地時の沈み込み深さと、式(5)より接地面積から評価

を行う。

$$Y = \sqrt{R_{PEEK}^2 - (l/2)^2} \quad (3)$$

$$h = r_{PEEK} - Y \quad (4)$$

$$r = \sqrt{r_{PEEK}^2 - Y^2} \quad (5)$$

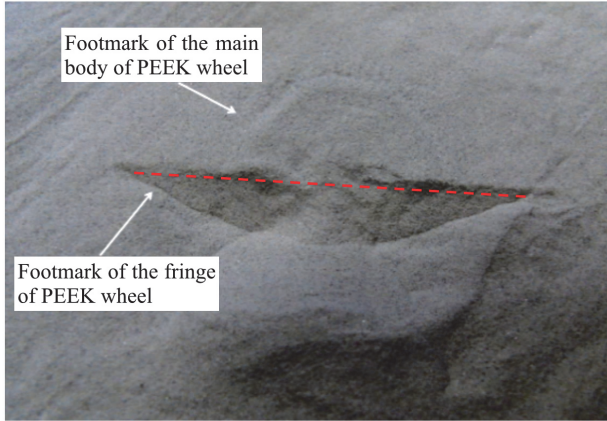


Fig. 6 Footmark of PEEK wheel on the sand pool after falling

供試体の沈み込み深さ h と接地面積 S は、縁が接地した跡から推定しているため、前述の方法では縁と膜面が変形しないで接地していることが前提条件となっている。そのため、接地時の PEEK ホイールの形状は次の 2 種類が考えられる。最初は、Fig. 7(a) のように PEEK ホイールが縁も含めてたわんだ状態、次は同図(b)のように、縁は変形せずに接地したが縁周辺膜面のみが変形した状態である。これらを考慮して実験結果から、衝撃時のホイール形状の評価を行っていく。

式(4)より求めた沈み込み深さ分だけ PEEK ホイールがたわむと想定した時、変形時の内圧上昇による PEEK ホイールへの影響をたわみと膜応力の関係から明らかにする。内圧が与えられている球のたわみと膜応力の関係は、無変形時の供試体の状態を状態 A、たわみによって変形した時の状態を状態 B として、等温過程での状態方程式を用いて式(6)より得られる。

$$P_B = \frac{1}{3t} \frac{r P_A}{\left\{ \cos(\tan^{-1}(f/(R_A - r))) - \frac{1}{3} (\cos(\tan^{-1}(f/(R_A - r))))^3 \right\}} \quad (6)$$

4. PEEK ホイールを用いた落下実験による評価結果

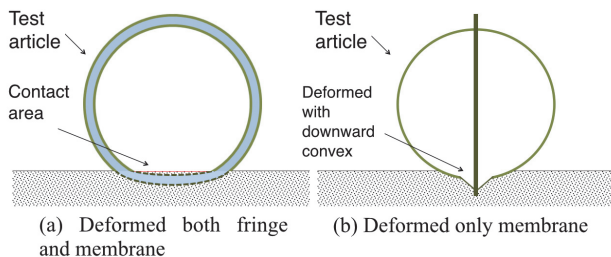


Fig. 7 Deformed shape of PEEK wheel at the time of impact on sand pool

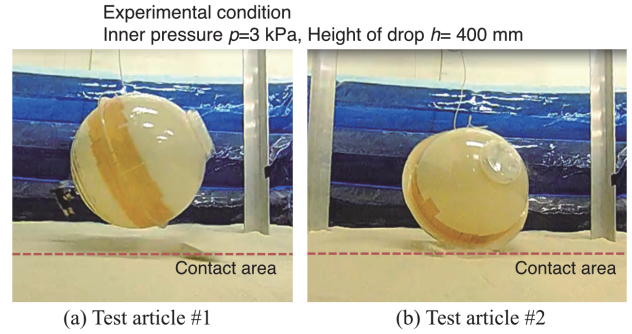


Fig. 8 Comparison of two test articles after bounce on the sand

4.1 落下衝撃力の評価

供試体 1, 2 を用いて砂面へ落下実験を行った時の、接地後に跳ね返った到達点の画像を Fig. 8 に示す。この図に示すように、接地後の跳ね返り到達高さは供試体 1 が接地面から約 20 mm で落下高さに対して 5%、供試体 2 は 5 mm となっており落下高さの 1.3% となり、PEEK ホイールは落下高さに対して跳ね返り高さが極めて小さいことがわかる。供試体 1 と供試体 2 の到達点高さを比較した時、供試体 2 は供試体 1 の半分以下になっている原因は、砂と縁の間で摩擦抵抗が発生することによって、縁の接地から膜面の接地までの間と、膜面の接地後に砂面から離れるまでの間に縁に摩擦力が加わることでエネルギーが吸収され、跳ね返りが抑えられていると考えられる。

Fig. 9 に供試体 1, 2 それぞれの内圧と衝撃力の関係の実験結果を示す。これより、供試体構成をパラメータとして衝撃力と内圧の関係を比較すると、各内圧時の衝撃力は供試体 1、供試体 2 では大きな違いは見られないことがわかった。このことから、PEEK ホイールの縁部分の幅は落下衝撃力には大きな影響を与えないと考えられ、落下高さと内圧が衝撃特性に影響を与えるパラメータになっていると考えられる。落下高さはミッションの内容や運用上の要求条件によって決まることが多いので、内圧が衝撃力を低減するのに重要になってくる。実験結果より、膜応力を低くするにつれて衝撃力は小さくなるが、ホイールとして構造を保つためには、内圧を 1 kPa 以上

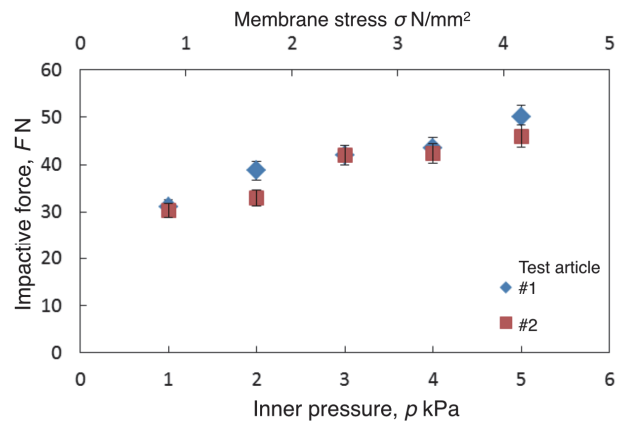


Fig. 9 Comparison of test articles #1 and #2 by inner pressure vs. impactive force

とする必要がある。したがって、内圧が 1 kPa のとき膜応力は 0.83 N/mm^2 程度となり、衝撃力も最小に抑えることができる。Fig. 10 に落下高さ 300, 400, 500 mm から落下させた時の衝撃力から、落下高さと衝撃力の関係を示す。図中のプロットを結んだ線を延長することで、落下高さを変えた場合の衝撃力を推定することができる。

4.2 ホイールのたわみと接地面積の評価

縁の幅をパラメータとして、縁の接地跡から求めた接地面積と内圧の関係を Fig. 11 に示す。供試体 1 と 2 で比較したとき衝撃力と内圧の関係からは違いは見られなかったが、内圧と接地面積の関係で比較を行うと 2 つの供試体で衝撃特性が異なっていることがわかる。Fig. 11 より、供試体 1 は内圧を 0 kPa に近づけることで接地面積を大きくすることができ、衝撃力を最低にすることができると考えられる。しかし、供試体 2 の場合は Fig. 9 に示す実験結果より内圧を 0 kPa に近づけることで衝撃力は小さくなっているが、Fig. 11 より内圧が大きくなると接地面積も大きくなることがわかる。

3.2 節で示したように、縁の接地跡から接地深さと接地面積を測定した場合、PEEK ホイールの変形形状には 2 通り考えられる。これらから、供試体 1 の場合は、内圧が 0 kPa に近づくにつれて接地面積が大きくなっている

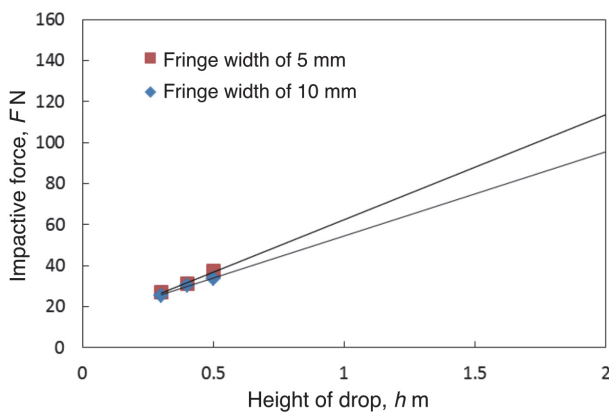


Fig. 10 Comparison of test articles #1 and #2 by height of drop vs. impactive force (inner pressure of 1 kPa)

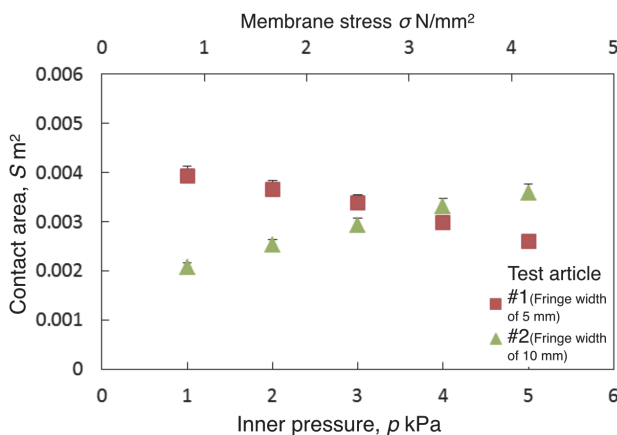


Fig. 11 Comparison of test articles #1 and #2 by inner pressure vs. contact area on the sand

ことから、内圧が低いことによって供試体に変形し接地面積の値が大きくなったと考えられる。供試体 2 では、内圧が 0 kPa 近くにつれて接地面積は小さくなっていることから、供試体 1 のように供試体に変形するのではなく縁によって砂面を変形させていると考えられる。

供試体 1 と供試体 2 の衝撃特性として、供試体 1 は縁の幅が小さいことによって、落下衝撃時に供試体の変形が起こりやすくなり、その変形によって衝撃力を軽減させることができると考えられる。また、供試体の変形量は内圧に依存するため、内圧を 0 kPa に近づけて供試体のたわみを大きくさせることで衝撃を軽減できる。供試体 2 の場合は縁幅が大きいため、供試体 1 のように供試体全体を変形させてたわませることによって衝撃を軽減するのではなく、内圧が 0 kPa に近づくにつれて供試体は下向きの凸形状となると推測されるため、落下方向に対して逆向きに膜面と砂面との間に摩擦抵抗が発生することによって衝撃を軽減させることができると考えられる。また、内圧が大きくなると接地時に供試体は深く沈むが、膜面は球形状に近づくことで膜面と砂面の摩擦抵抗が小さくなり衝撃力が大きくなると考えられる。この現象は供試体 1 でも生じていると思われるが、供試体 2 の方が縁の幅が広いため、より顕著にその影響が現れていると考えられる。

次に供試体がたわむことによる膜応力の上昇について評価を行う。式 (6) より、供試体 1, 2 と同じ、直径 150 mm の球のたわみとたわみによって上昇する膜応力の関係を Fig. 12 に示す。また、直径 300 mm にした時を想定して計算を行ったときのたわみとたわみによって上昇する膜応力の関係を Fig. 13 に示す。たわみによって膜面に生じる膜応力から PEEK ホイールの耐圧性を見ると、PEEK ホイールの破断応力は 70 N/mm^2 であることから、直径 150 mm の球の場合たわみが 65 mm 以下、直径 300 mm の球の場合ではたわみが 130 mm 以下であれば破断応力に達しないことがわかる。直径の 40%球がたわんだときに破断することから、落下衝撃時のホイールのたわみが原因で起こる内圧の上昇によって PEEK ホイールが破壊する可能性は小さいと考えられる。

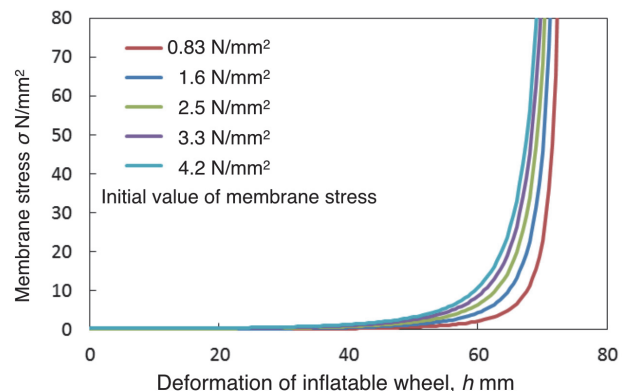


Fig. 12 Deformation of inflatable wheel vs. membrane stress (wheel diameter of 150 mm)

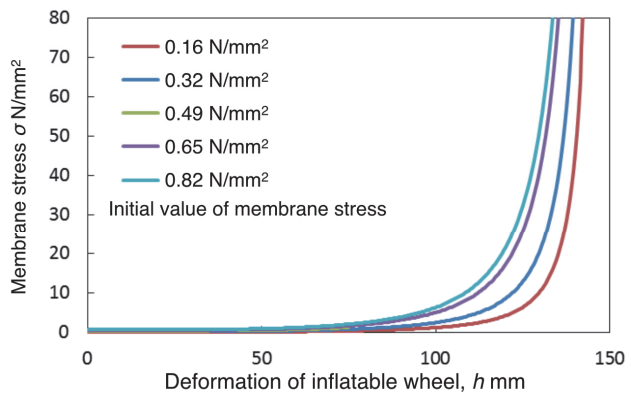


Fig. 13 Deformation of inflatable wheel vs. membrane stress (wheel diameter of 300 mm)

5. まとめ

PEEK フィルムを使用して試作した PEEK ホイールをエアバッグ型ホイールとして使用するために、ホイール単体を供試体として使用した落下実験を行うことで、落下衝撃力の測定結果から PEEK ホイールの衝撃特性評価を行った。小形で軽量のインフレーターホイールの落下衝撃力を計測するために、MEMS 加速度センサを使用して質量 1.3 g の自作加速度計を使用した。加速度計測による衝撃力測定結果を、画像データによって得られた反発係数による計算結果と有限要素解析の結果と比較することで、加速度センサによる計測と実験方法の妥当性を検証した。

直径 150 mm の PEEK ホイールを供試体として行った落下実験から、PEEK ホイールの落下衝撃特性として以下の 3 つのことが明らかになった。

(1) PEEK ホイールの落下衝撃力は内圧に依存し、膜応力を 0.83 N/mm^2 程度以下になるようにホイール内圧を設計することで、落下衝撃力は 30 N 以下にすることができる。

(2) PEEK ホイールの縁の幅によって衝撃力を軽減するメカニズムが異なる。PEEK ホイールは縁幅を狭くするとホイールの縁と膜面がたわむことによって落下衝撃は軽減する。縁の幅を広くすると縁は変形せず縁周辺膜面のみ変形し、接地時にホイールが凸形状になることによって砂との摩擦抵抗が増大し落下衝撃力を軽減できる。また、縁と砂間に発生する摩擦抵抗はホイールのバウンドを抑える効果もある。

(3) ホイールのたわみによって膜応力は上昇するが、試作した PEEK ホイールは 70 N/mm^2 の膜応力まで耐える

ことができることから、半径 75 mm の PEEK ホイールではたわみ 65 mm、半径 150 mm の PEEK ホイールでは 130 mm まで内圧による供試体の破壊が起こる可能性は低い。

これらより、月面上から落下させた時の衝撃によって縁が構造的に破壊されることを防ぐことができれば、たわみによるホイール内圧の上昇によって膜材の破断や接合部が破壊されることを避けることができる。

参考文献

- 1) Jack A. Jones: Inflatable Robotics for Planetary Applications, The 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space: A New Space Odyssey, Montreal, Canada, June 18 - 21, 2001.
- 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, 5-12 June 2011, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan.
- 3) Masoud Alizadeh, Ahmad Sedaghat and Ebrahim Kargar: Shape and Orifice Optimization of Airbag Systems for UAV Parachute Landing, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 15, No. 3, pp. 335-343, 2014.
- 4) Robert D. Braun, Robert M. Manning: Mars Exploration Entry, Descent and Landing Challenges, IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 4-11 March 2006.
- 5) 鈴木亮・鎌形史也・青山卓・角田博明・吉光徹雄：樹脂フィルムの立体成形によるインフレーターホイールの構成法，第 56 回宇宙科学技術連合講演会，3008，別府国際コンベンションセンター（ビーコンプラザ），2012. 11. 20-22.
- 6) Fumiya Kamagata, Ryo Suzuki, Suguru Aoyama, Hiroaki Tsunoda, and Tetsuo Yoshimitsu: Structural Characteristics of Inflatable Wheel Using Three-dimensional Shape Forming of Engineering Plastic Film, 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013-c-21, 2-9 June 2013, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.