that the frequency of pulsation did not affect heat transfer as much as expected. However smaller intermittency increased the rate of heat transfer, because the average relative velocity between solids and air was enhanced as compared with the constant air velocity. Thus, similarly to other simultaneous operation of solids-gas contact, Pneumatic Escalator was confirmed to provide better heat transfer results by adding pulsation to heating air.

List of Figures and Table

Fig.1 Experimental equipment.

Fig.2 Oscillations of air velocity for various pulsatory conditions.

Fig.3 Effect of air flow rate on hold-up of particles within Pneumatic Escalator.

Fig.4 Effect of solids feed rate on hold-up.

Fig.5 Confirmation of experimental equation for particle transportation.

Fig.6 Variation of particle temperature with the number of cell.

Fig.7 Effect of (fl/u_0) on a and c in Eq. (2).

Fig.8 Effect of pulsation on Nu vs. Re 's relation.

Table 1 Physical properties of particle and air, dimension of Pneumatic Escalator, and range of operational conditions

研究速報

電気自動計測法によるソフトグラウンド上を駆動走行する球車輪の転動抵抗の測定*

Electro-automatic Measurement of Rolling Resistance for a Spherical Wheel
Driven on Soft Ground

横山 成昭**
Shigeaki YOKOYAMA

荒川 峰生**
Mineo ARAKAWA

斎藤 辰夫***
Tatsuo SAITŌ

樽谷 杉雄**
Sugio TARUYA

高橋 清**
Kiyoshi TAKAHASHI

1. はじめに

運輸経路や資源探索の開拓拡大に伴って、近年砂漠地帯、雪上、農地、月面などにおいて使用される車両の開発が重要視されるようになってきた。そこでエネルギー節約が迫られている現在、車輪の形状をエネルギーの有効利用の観点から見直す必要があるのではないかとと思われる。ところで車両の足となり、走行エネルギーを支配する車輪の転動抵抗は、車輪と路面との物理的性質によって決定され、接触している面の圧力と歪みの関係に依存する。従来から筆者らは、平坦な砂層上において円柱形

硬車輪が牽引あるいは駆動によって転動走行する場合の転動抵抗を解析してきた¹⁻¹⁰⁾。ところが、一般の車輪の転動抵抗を解析する場合に車輪の基本形である円柱車輪と共に球車輪についても調べることは有意義なことである。球車輪がやわらかい路面 (Soft Ground 以下 S.G. と略す) 上を転動走行する場合の転動抵抗を調べる場合、路面の歪みのみに着目し、車輪の歪みは無視してよいと考えられる。路面の歪みはわだちとなって残り、舗装道路のような硬い路面上を転動走行する場合に比べると著しく大きなエネルギーを必要することになる。やわらかい路面の例として、農地、砂漠などがあげられるが、これらは一般に平坦面であることは少なく、多少の起伏を呈することが普通である。このような路面上を硬球車輪が転動走行する場合、路面が受ける歪みのパター

昭和57年12月20日受付

*応用物理学会にて発表 (1982. 9 九州)

**芝浦工業大学電子工学科計測制御研究室
(〒108 東京都港区芝浦3-9-14)

***現在・堺化学工業K.K.勤務

①Rotary encoder (A)	②Rotary encoder (B)
③Potentiometer (A)	④Guide roller
⑤Base lift	⑥Guide rail
⑦D.C. motor	⑧Soft ground bed
⑨Balance weight	⑩D.C. servo motor
⑪Ball-nut	⑫Lifting screw
⑬Shaft	⑭Wheel driving motor
⑮Gyroscope	⑯Tachogenerator
⑰Torque meter	⑱Gear
⑲Test wheel	⑳Torque meter base
㉑Surface forming plate	㉒D.C. motor
㉓Potentiometer (B)	㉔Fork
㉕Soft ground	

Fig. 1 実験装置の外観

Fig. 2 実験装置の外観

ンは、車輪の転動にともなう変化するが、その挙動は路面の種類、堆積状態、起伏の状態、車輪の形状、大きさ、車輪への荷重などによって異なってくると考えられる。

そこで、路面の起伏の状態が車輪の走行特性に及ぼす影響を調べるため、S.G. の一例として砂層上に波長の異なる正弦波面を形成し、その上を木製の球車輪が走行する場合の特性を調べてみた。

2. 実験装置の構成

本実験に用いた、S.G. 上を走行する車輪の転動抵抗

測定装置の構造を Fig. 1 に示し、その装置の外観を Fig. 2 に示す。この装置は大別すると三つの部分から成り立っている、すなわち、やわらかい路面となる試料を満ちし車輪の路面となる移動可能な移動箱、走行路面を種々な状態に形成するための試料路面形成装置および測定車輪を装着して試料面を走行させながら、その転動抵抗を測定するためのトルクメータ部分から構成されている。これらは、外部からの電気信号により必要な動作ができるように、それぞれ自動制御されている。そのため、各装置の検出値の組合せにより、それぞれの装置間を容易に同期させることができるようになっている。たとえば、試料上に正弦波路面を形成する場合は、正弦波信号を路面の試料を積載した移動箱に対して垂直に変位する波面形成板に与え、そして、所要の定速度で移動箱を移動させることにより、試料上に正弦波路面を作ることができる。さらに、正確な波面を作成する場合には、試料の波面形成限界に関係する安息角を考慮し、波面の位置に対する波高の情報をデータとして作成する。そして、このデータを信号として砂箱移動装置と波面形成板に与え動作させる。

これらのサンプリング的な信号によって、装置が移動後、逐次、次のデータを装置に与えることにより、正確な波面を試料上に作成することができる。

車輪のトルク計についての計測法の概略を以下に述べる。測定用車輪⑩は、D.C. サーボモータ⑭によって減速機、トルク計⑰を介して駆動される。そのときの車輪のトルクの大きさは、トルク計により検出される。また、車輪のスリップ率を測定するために必要な車輪の走行距離の測定は、車輪を保持しているトルク計の移動距離をロータリーエンコーダで検出することによりなされる。なお、車軸に加わる荷重は重錘⑨により調整される。トルク検出の回路の構成を Fig. 3 に示す。本装置

Fig. 3 トルク検出器のブロック図

Fig. 4 モータの速度制御回路

では、トルク計のセンサーとしてストレインゲージを用い、そして車輪をこのトルク計を介してモータで駆動することにより、車輪の駆動トルクを計測した。Fig. 3の中に示されているトランスは、トルク計のアースと検出器系のアースとを絶縁をするためのものである。

車輪を駆動するモータの駆動増巾器の回路図をFig. 4に示す。車輪の回転数を制御するためには、動力源のモータの回転速度制御が必要となる。そこでモータとしては小型でトルクが大きい直流サーボモータを用い、それに速度制御を施し、所要の回転速度で車輪を駆動できる構造とした。この速度制御方法は、モータの回転速度を電圧として検出するタコジェネレータの出力電圧と、所要の回転速度と対応する設定電圧とを比較し、両者の電圧差が零となるようにモータの速度制御を行なうものである。

3. 実験結果および考察

ソフトグラントの試料として用いた砂層(安息角約 45°)上に、振幅が2 cmで波長のみが異なるいくつかの正弦波面を形成し、その路面上で試験車輪を駆動走行させて測定を行なった。路面用試料としては、平均粒径0.045 cmに選別された自然乾燥の川砂を使用した。正弦波の振幅を2 cmに限定した場合、この砂の安息角により、本波面形成装置では約15 cm以下の波長の路面を形成することはできない。また試験用車輪としては、周面を旋盤仕上げした球形および円柱形の木製車輪を使用した。駆動走行の場合、試験車輪の回転速度は、0.2 rad/secとした。砂面上に形成された正弦波路面、および球車輪のわだちの写真をFig. 5の(a)と(b)にそれぞれ示す。

車輪に対する路面の起伏の度合は正弦波路面の場合、波面のピーク点における曲率半径と試験車輪の半径とを比較することによって記述した。Fig. 6の(a), (b)は、振幅が2 cmで波長が20 cmの正弦波面上、および同じ振幅で波長が100 cmの正弦波面上において、直径30 cm

(a) 車輪通過前

(b) 車輪通過後

Fig. 5 ソフトグラント上の正弦波面

の球車輪が駆動され走行するときの様子を示している。

(a)および(b)の中の四つグラフは、上からそれぞれ、試験車輪が通過する前の路面と通過後の路面(わだち)との比較、沈降の深さ、駆動トルク、スリップ率を示している。(a)および(b)は、半径が15 cmの球車輪に対して、路面の起伏が著しい場合(波長:20 cm)と緩やかな場合(波長:100 cm)の一例であり、ちなみにそれらのピーク点における曲率半径は、それぞれ5.08 cmおよび127 cmである。スリップ率は、前記のように、路面に沿った方向ではなく、車輪が無駄に回転した割合と定義した。

Fig. 6の(a), (b)から明らかなことは、駆動トルクとスリップ率、および沈降量がほぼ同様な傾向を示しているということである。そして、Fig. 6から荷重には無関係(5 kg~30 kg)に駆動トルクの最大値は、わだちの変曲点の付近であることが認められた。さらに、路面の起伏の度合いが車輪の走行特性にどの様に影響するかを調べるため、試験車輪の沈降の深さ、駆動トルクおよびスリップ率をそれぞれ一周りにわたって平均をとり、

(a) 波長：20 cm

(b) 波長：100 cm

Fig. 6 正弦波 S.G. 上を走行する球車輪の特性

Fig. 7 S.G. の波長と球車輪の平均駆動トルク、沈降量、スリップ率、曲率半径との関係 (荷重 20 kg)

その値が正弦波路面の波長によってどのように変化するかを調べてみた。その結果の一例を Fig. 7 にそれぞれ示す。2点鎖線で示された曲線は、正弦波路面のピーク点における曲率半径が、その波長によってどのように変化するかを示したものである。ここで使用された車輪は、直径 30 cm、の球形車輪であり、それにはかけられた鉛直荷重は 20 kg である。このような条件のもとでは、Fig. 7 からわかるように試験車輪の半径 r と、正弦波路面のピーク点における曲率半径 ρ の両者を比較した場合、 r に対し δ が $\pm 50\%$ の範囲に在る波長をもつ路面において、平均の駆動トルク、沈降の深さ、およびスリップ率は、いずれも最大となることが認められた。波長がしだいに長くなると、これらの値は徐々に減少し、最終的には平坦な路面上を走行したときのそれらの各値に収束する。また、最大値が現われる波長より短い波長のところでは、同様に波長の減少にともない、平均の駆動トルクなどは、徐々に減少する。ここで注目されるのは、Fig. 7 で波長が短い正弦波路面上を走行する場合の平均の駆動トルクが、他の波長の場合に比べ小さいことである。このことは、次のように考えられる。いま実験に供されている路面の振幅 2 cm、波長 15 cm の正弦波路面の場合について考えてみる。この路面の最も急峻な部分は変曲点付近にあり、この傾斜は本実験の路面に使用した安息角にほぼ等しい。この路面上を車輪が転動走行する場合、車輪近傍の路面は、車輪面に垂直な面におよび接線方向のせん断力を受け、歪みを生ずる。この歪みは、車輪荷重の増加につれて車輪のすぐ前方にある正弦波路面の下りの変曲点付近における傾斜角をさらに大きくするような歪みである。そのため、車輪がこの地点を通過しようとしたときにはすでにもとの波形はなく、より起伏の少ない路面に変形しているから、見方をかえればこれが車輪の進行を助けることになる。

正弦波路面の山の部分および谷の部分の曲率半径が、車輪の半径に近づくような波長において、平均の駆動トルクなどが最大値を示すのは、上記のことと同様な現象が正弦波路面の上の部分において顕著に現われたものと考えられる。すなわち、いま車輪がちょうど路面の谷の位置にあったとすると、車輪の半径が路面の曲率半径に近づくと、進行方向前方にある山の分を変形させる効果がより小さくなる。ここからさらに車輪が進行すると、斜面を押しながらこの山を上ることになる。このとき、ピーク点付近にあった砂はそこにとどまろうとし、路面の傾きをさらに大きくすれば、砂が車輪側に崩れ落ち、これが車輪の進行を妨げることになる。

Fig. 8 S.G. の波長と球車輪の平均駆動トルク, 沈降量, スリップ率, 曲率半径との関係 (荷重 10 kg)

Fig. 9 球車輪および円柱車輪における荷重と平均トルクとの関係

以上のことを要約すると、起伏のある路面上を走行する場合の駆動トルクが、ある特定の波長領域の路面に対して小さくなったり大きくなったりするのは、次のような理由によるものと思われる。波長の長い路面上を走行する場合には、砂面の傾斜角は比較的小さいと考えられるから、路面の歪み、すなわち砂の移動は車輪の走行によってのみなされる。これに対して正弦波の波長が非常に短い路面上、およびその山の部分、谷の部分の曲率半径が車輪の半径に近づく路面上においては、それぞれ車輪の走行によって歪みを受けた路面が現在の波形を保持できなくなり砂が自ら崩れることになるが、そのときの砂の移動が前者は車輪の進行方向と一致しており、後者ではそれが逆の方向になる。

Fig. 8は車輪の荷重を、10 kg として同様の実験を行ない、各路面の波長に対する平均の駆動トルク、沈降量、スリップ率を示したものであり、それらは Fig. 7 と同じ傾向を示している。

なお、球車輪は半径の異なる小さな幅の円柱車輪の集合として近似できる。そこで、円柱車輪についても Fig. 7, 8 の傾向のあり方を確かめるために、球車輪と同じ半径で、かつ同じ荷重のもとで円柱車輪のそれについて実験を行なった。この場合、球車輪それと円柱車輪の車幅を選定する目安として、Fig. 9に示されるように円柱車輪の車幅をパラメータとして車輪の荷重に対するトルクの実測値、球車輪と類似する特性を示す円柱車輪の車幅 (実測より 12 cm) を特に選び、その条件を加味して実験を行なった。その結果を Fig. 10, 11 に示す。

車輪の荷重をパラメータとして、同一条件のもとに球

Fig. 10 S.G. の波長と円柱車輪の平均駆動トルク, 沈降量, スリップ率, 曲率半径との関係 (荷重 20 kg)

Fig. 11 S.G. 波長と円柱車輪の平均駆動トルク, 沈降量, スリップ率, 曲率半径との関係 (荷重 10 kg)

車輪と円柱車輪の上記のそれぞれの特性を比較してみた。荷重 20 kg の場合については、Fig. 7 と Fig. 10 とが対応し、また、荷重 10 kg の場合は、Fig. 8 と Fig. 11

がそれぞれ対応している。これらの測定結果のグラフを比較してわかるように円柱車輪においても、正弦波路面の波長に対する車輪の駆動トルク、沈降量、スリップ率は球車輪の場合と同じ傾向であることが確かめられた。

4. ま と め

ソフトグラウンド上を転動走行する球車輪が路面から受ける抵抗を測定するため、電子的な計測法を用いて計測のシステム化をはかった。これによって起伏のあるソフトグラウンド上においても、測定が正確かつ迅速に行なうことができた。本実験により得られた事柄を要約すると

以下の通りである。

- (1) 車輪周面の曲率に近い曲率を有する波長の路面上を、車輪が走行する場合、その駆動トルクの平均値は他の路面波長の場合に比べ著しく大きくなる。
- (2) 起伏の波長が著しく短い路面上を走行する場合の駆動トルクの平均値は、波長の長い路面上を走行する場合のそれよりも、むしろ小さくなる ことがある。
- (3) 波長による球車輪の走行特性は円柱車輪のそれに比べて傾向が似ていることが確かめられた。

引 用 文 献

- 1) 高橋清：粉体工学研究会誌, 11(8), 485 (1974)
- 2) 高橋清：粉体工学研究会誌, 11(8), 548 (1974)
- 3) 高橋清：粉体工学研究会誌, 12(7), 371 (1975)
- 4) 高橋清：粉体工学研究会誌, 12(7), 384 (1975)
- 5) 高橋清, 横山成昭他：粉体工学研究会誌, 12(8), 439 (1975)
- 6) 高橋清他：粉体工学研究会誌, 12(9), 495 (1975)
- 7) 高橋清, 横山成昭他：粉体工学研究会誌, 12(10), 557 (1975)
- 8) 高橋清他：粉体工学研究会誌, 12(10), 564 (1975)
- 9) 高橋清：応用物理学会誌, 43(8), 860 (1974)
- 10) 高橋清他：応用物理学会誌, 44(6), 577 (1975)
- 11) 高橋清他：応用物理学会誌, 50(5), 496 (1981)
- 12) 高橋清, 横山成昭他：応用物理学会誌, 50(9), 908 (1981)
- 13) 高橋清他：応用物理学会誌, 50(2), 137 (1981)
- 14) Takahashi K., Yokoyama, S.: *Japanese Journal of Applied Physics*, 18(6), 1149 (1979)
- 15) Takahashi, K.: *Japanese Journal of Applied Physics*, 20(1), 239 (1981)
- 16) Takahashi, K.: *Japanese Journal of Applied Physics*, 21(6), 940 (1982)

Authors' Abstract

Electro-automatic measurement of Rolling Resistance for a Spherical Wheel Driven on Soft Ground

by

Shigeaki YOKOYAMA, Tatsuo SAITŌ, Kiyoshi TAKAHASHI, Mineo ARAKAWA and Sugio TARUYA

(Department of Electronics Engineering, Shibaura Institute of Technology)

It is meaningful for the analysis of rolling resistance for an ordinary wheel running on soft ground to study the cylindrical wheel or the spherical wheel as a fundamental form of the ordinary wheel. The authors have presented several reports for the cylindrical wheel in this magazine. This time, experiments were made for a spherical wheel driven on soft ground to investigate the mean driving torque to the wheel, the slip ratio, and the amount of sinking, etc. caused by the load carried by the wheel axle. The result is reported on together with the measured result for the cylindrical wheel.

List of Figures

- Fig. 1** Construction of measuring apparatus of rolling resistance
- Fig. 2** Appearance of the electric apparatus for measuring the rolling resistance of a wheel

- Fig. 3** Block diagram of torque detector
- Fig. 4** Circuit diagram of motor speed controller
- Fig. 5** Sine wave surface
- a) Virgin
 - b) After transit

Fig. 6 Running characteristics of driving wheel on sine waved soft ground

- a) Wave length= 20 cm
- b) Wave length=100 cm

Fig. 7. 1 Relation between the wave length of sine waved soft ground and the cyclic averaged values of driving torque, the sinking depth and slip ratio of wheel (Spherical wheel: Vertical load=20kg)

Fig. 8. 2 Relation between the wave length of sine wave soft ground and the cyclic averaged values of driving torque, the sinking depth and slip ratio of wheel (Spherical wheel: Vertical load=10 kg)

Fig. 9 Relation between the vertical load and the driving torque of cylindrical wheels and the spherical wheel

Fig. 10 Relation between the wave length of sine waved soft ground and the cyclic averaged values of driving torque, the sinking depth and slip ratio of wheel (Cylindrical wheel: Vertical load=20 kg)

Fig. 11 Relation between the wave length of sine waved soft ground and the cyclic averaged values of driving torque, the sinking depth and slip ratio of wheel (Cylindrical wheel: Vertical load=10 kg)

国際単位系 (SI) への移行について

本会において使用する単位の SI への移行については、すでに会告 (会誌第17巻 5号289ページ (1980年)) においてお知らせしましたように、本年 (1983年) 末までは従来単位による原稿も受付けますが、来年 (1984年) より受け付ける原稿 (学会誌の研究報告と研究速報, 研究発表会等の研究報告, 研究速報および研究中間報告) は SI を使用したものに限ることになっております。従って移行する関係上、明年は過渡的に従来単位による記事と混載されることになります。移行を円滑に運ぶため、今年中に投稿される原稿もできるだけ SI を使用されますように、会員諸氏の御協力をお願い致します。なお, SI

についての解説, および単位換算の概略図が以下の号に掲載されておりますので, 御参照下さい。

国際単位系 (SI) と粉体工学; 17, No. 5, 274 (1980)
換算の概略図

圧力, 応力; 18, 136, 778, 863 (1981)
力, 重量; 18, 428, 778 (1981)
熱量, 仕事, エネルギー; 18, 779 (1981)
熱伝導率; 20, 279 (1983)
粘度; 20, 296 (1983)
熱伝達率; 20, 374 (1983)

おわび

前号 (6月号) の背表紙で第五号となっておりますのは第六号の誤りですので, ここに深くおわび申し上げます。