

## 教材用2足前後型受動歩行模型の歩行に関する研究

A Study on Walking of Front and Back Swing Type  
Bipedal Passive Walking Model as a Teaching Material

松永泰弘・中村玄輝  
Yasuhiro MATSUNAGA and Genki NAKAMURA

（平成21年10月6日受理）

### Abstract

In recent years, the development and research of bipedal robots have been actively advanced. However, the walkings of robots and humans are different, and the robots need complicated control with a large energy consumption. In this research, we analyzed the passive dynamic walking. The passive dynamic walking model, with simple structure, walks down a gentle slope by use of the gravity force and inertia force. For bipedal front and back swing type passive walking model as a teaching material, we tried the experiment and simulation analysis of walking motion.

### 1. 緒言

「第3期科学技術基本計画<sup>1)</sup>」において、ものづくりを担う人材を養成・確保するために、幼い頃からものづくりの面白さに馴染み、創造的な教育を行い、子ども自らが知的好奇心や探究心を持って科学技術に親しみ、目的意識を持ちながらものづくり、観察、実験、体験学習を行うことにより、ものづくりの能力、科学的に調べる能力、科学的なものの見方や考え方、科学技術の基本原則を体得できるようにすることが強調されている。

近年の先進的科学技術として、HONDAのASIMOに代表される2足歩行ロボットがあげられ、子どもたちが博覧会などの場でロボットを目にする機会も増えている。本研究では、人間に近い省エネルギーの歩行を行う受動歩行に着目し、教材用2足前後型受動歩行模型（図1:以下、受動歩行模型とする）の歩行についての研究を行う。受動歩行は、簡単な構造のものが重力と慣性力を利用して斜面を歩行するもので、昔から玩具の機構として利用されてきた。また、1991年にMcGeer<sup>2)</sup>によって研究されて以来、二足歩行ロボットの一機構としての利用に注目が集まり、関連する分野において世界中で研究されている。受動歩行模型において、重心の移動や歩行周期が歩行に重要な役割を果たし<sup>3)</sup>、模型の諸元によってさまざまな歩行条件が存在する。そのため、受動歩行模型の歩行実験およびシミュレーション解析を行い、歩行における各諸元の影響について調べる。

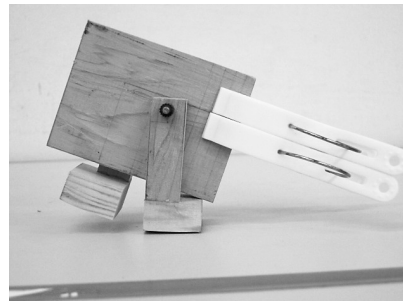


図1 2足前後型受動歩行模型<sup>4)</sup>

## 2. 受動歩行

受動歩行とは、動力を搭載せずに重力などを利用して斜面を歩行する歩行のことである。その特徴として、

- (1) 簡単な機構であること
- (2) モーターやアクチュエータを使用せずに、重力と慣性力を利用すること

などが挙げられる。

これらの特徴から、2足歩行ロボットのように難しい制御を必要とせず、また、モーター等を使用せずに重力と慣性力を利用して歩行するため、省エネルギーの歩行が可能である。人間は歩行する際には重心の投影点が常に足裏から外れる動歩行を行っている。歩行するとき片足を上げるが、下ろすときには重力を利用して自然と足を振り下ろす。受動歩行もこれらと同じように歩行を行う。

そのため、受動歩行はこれらの特徴から二足歩行ロボットの一機構<sup>5)</sup>として、また、人間の歩行現象の解明につながる研究<sup>6)</sup>が行われている。

## 3. 歩行実験

受動歩行模型の歩行の様子を調べるために歩行実験を行う。模型は、小学校理科、工作教室などの実践で用いられる模型（図1）を使用する。本模型は、静岡市内の公立小学校5年理科の授業で、支点・力点・作用点など力に関する学習内容の応用的体験学習教材として実践されている<sup>7)</sup>。

図1の受動歩行模型は、胴体と前足が固定されており、後ろ足はシャフトによって胴体に取り付けられているので、後ろ足のみが独立して前後に可動する。おもりは位置を変更しやすいように洗濯バサミを使用している。

実験では、おもりの位置と斜面の角度による歩行への影響を調べるために、おもりの位置と斜面の角度のみが変更可能なものとなっている。

### 3. 1 実験方法

歩行実験には図1の模型を使用し、各諸元は図2および表1に示す。歩行実験は、おもりの位置を胴体の中心からの距離 $k$ を、 $k=25\text{mm}\sim 35\text{mm}$  まで $5\text{mm}$ ずつ変化させ、また、斜面の角度 $\phi$ を $\phi=10^\circ\sim 24^\circ$  まで変化させ（図3）、歩行の違いを調べる。ただし、おもりの重心は、おもりの左端からほぼ $46\text{mm}$ の位置にある。斜面にはゴムシートを敷いた状態で行う（図4）。歩行の様子を

30fps (1/30秒) のビデオカメラに撮影する。撮影した動画をAVIEDIT (有限会社ティーエムエヌティー) を使用して、コマ送り画像で歩行の様子を調べる (図5)。

おもりが胴体の後方に移動することで、全体の重心位置が変化する。したがって、 $k$ の値が大きくなることで、全体の重心は徐々に後方に移動し、重力のモーメントと慣性モーメントに影響をあたえる。

また、斜面の角度を大きくすることで、歩行の時の斜面との接点と各部の重心位置との距離、全体の重心と接点との距離がそれぞれ変化するため、 $k$ の値と同様に重力のモーメントと慣性モーメントに影響をあたえることになる。実験は、図3に示すように、足が閉じた状態で、かつおもりを水平に置いた状態から歩行を開始する。歩行周期は、模型が斜面を10歩分歩いたものについて測定する。

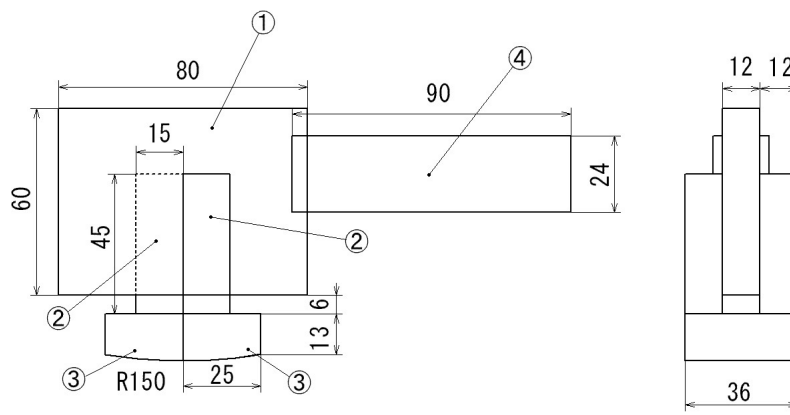


図 2 受動歩行模型 (JW-CAD使用)

表 1 各部名称と質量

番号	名称	質量	個数
①	胴体	29.8g	1
②	脚部上部	4.2g	2
③	脚部下部	5.8g	2
④	おもり	12.3g	1

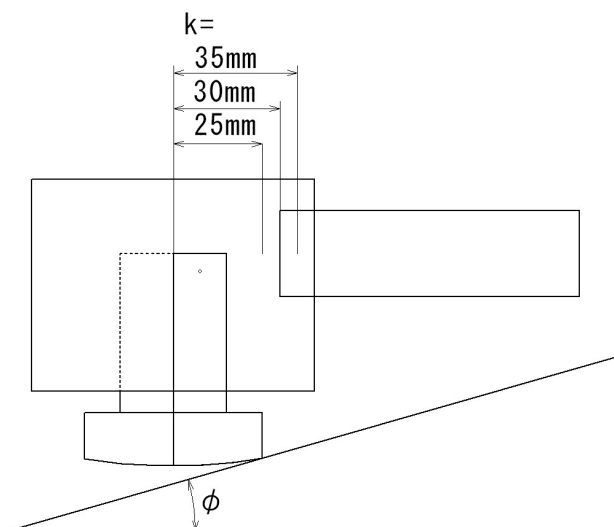


図 3 おもりの位置 $k$ と斜面の角度 $\phi$

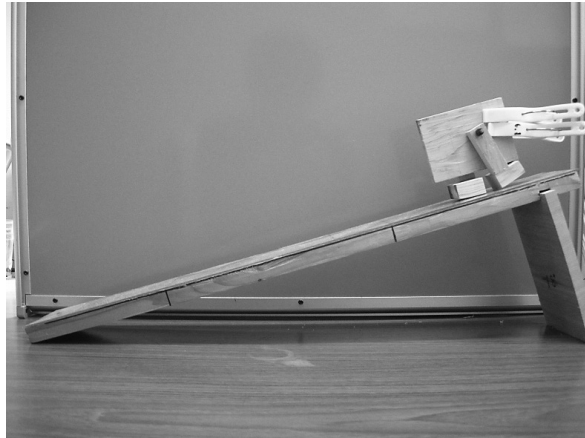


図4 実験の装置



図5 AVIEDITによる測定

### 3. 2 受動歩行模型の歩行

受動歩行模型の歩行動画をコマ送りにすることで、1歩が4つの段階から成り立っていることがわかった。それらをstep1～step4と分けると、各stepでの歩行の様子は以下ようになる。なお、図6のGは後ろ足が閉じた状態での全体の重心、 $G'$ は後ろ足が開いた状態での全体の重心である。

[step1] 後ろ足が開いた状態で、後ろ足が接点となり、接点を中心に左まわりとなる。なお、接点は受動歩行模型の回転移動に伴い前へと移動する。そして、接点が後ろ足のかかと（足裏前方先端）に達すると、かかとを中心として前足が斜面に接地するまで左まわりの回転を行う。（図6（a））

[step2] 接点は接地した前足に移り、接点を中心に左まわりとなる。接点は前足のつま先まで移動する。同時に後ろ足はシャフトを中心とした右まわりの振り子の運動をし、前足に衝突してカチッと音を鳴らす。このとき、後ろ足の衝突により、全体は前方へすべる。（図6（b））

[step3] step2により後ろ足が前足に接している状態となる。接点と全体重心の位置関係より、前足を接点として斜面を登るように右まわりの運動を行う。（図6（c））

[step4] 接点は前足から後ろ足に移り、後ろ足は右まわりの運動をする。また、後ろ足を除いた部分はシャフトを中心として右まわりの運動を行い、step1と同じように後ろ足が開いた状態となる。このとき、胴体が後ろ足と衝突するため、全体は前方へすべる。（図6（d））

その後、step1の運動へと戻る。これらstep1～step4を繰り返して歩行を行う。

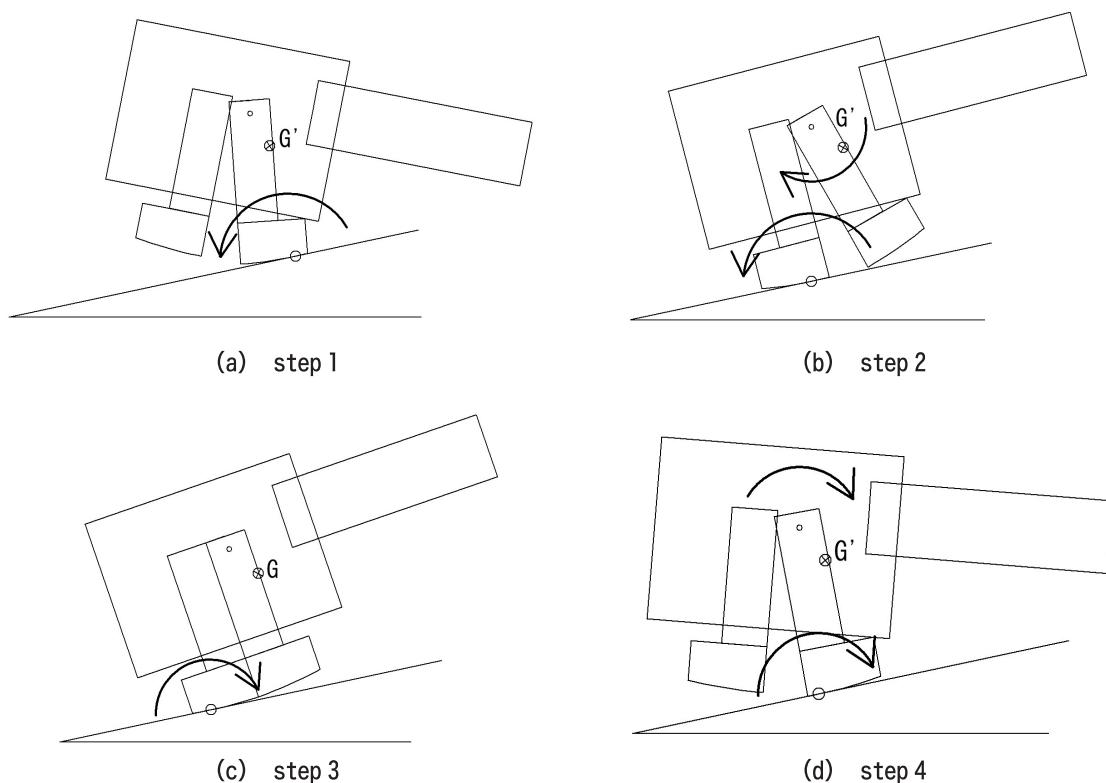


図 6 歩行による 4 つのstepの様子

### 3. 3 実験結果

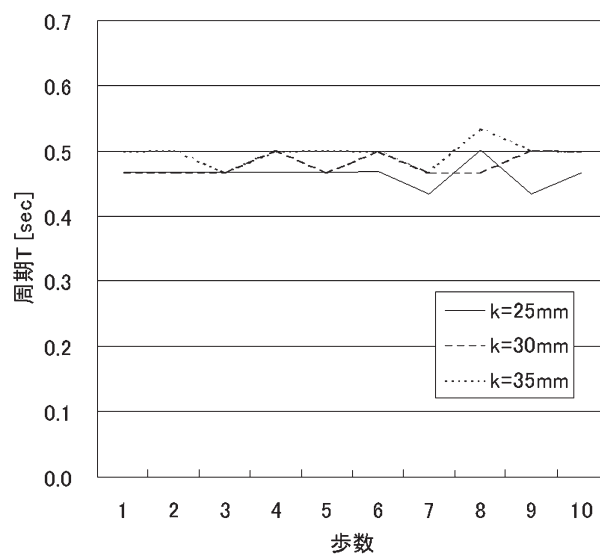
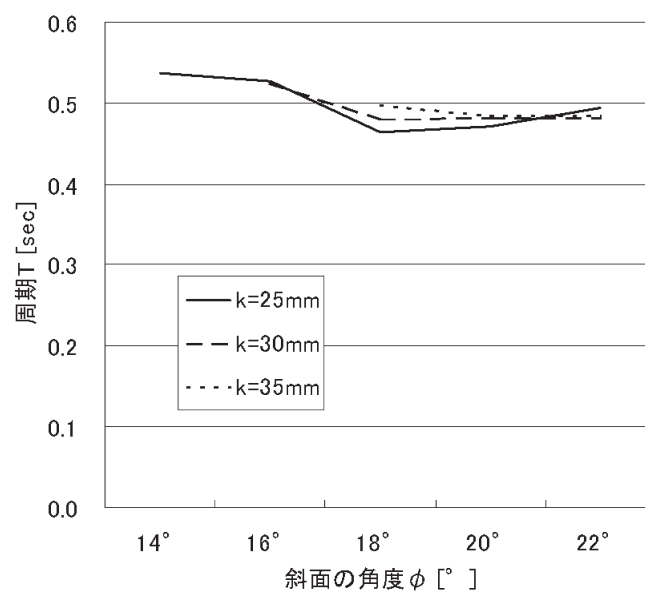
歩行結果を表2に示す。結果は10歩以上歩行したものを「○歩行する」とした。表2より斜面の角度とおもりの位置によって歩行する条件が異なることがわかる。 $\phi=14^\circ$ においては $k=25\text{mm}$ のみが歩行を行っているが、 $\phi=16^\circ$ 、 $18^\circ$ と斜面の角度が大きくなるにしたがい、 $k=30\text{mm}$ 、 $35\text{mm}$ の順に歩行可能となる。したがって、斜面の角度が小さいときにはおもりの位置は胴体に近いものが歩行し、斜面の角度が大きくなると、おもりの位置が後方に位置するものが歩行することがわかる。

図7に、斜面の角度を $\phi=18^\circ$ とし、 $k$ の各値に対する歩数ごとの周期 $T$ の変化を示す。図7より、歩行の周期は変動が小さく安定していることがわかる。これは $\phi=14^\circ\sim 22^\circ$ のときにおいても同様の結果を得た。また、 $k$ の値が大きいくほど周期 $T$ が大きくなることがわかる。

図8に $k$ の各値について、斜面の角度 $\phi$ に対する平均周期 $T$ の変化を示す。平均周期は10歩分の周期の平均値とした。図8より $\phi$ が小さいときには $k$ が大きいものから周期が長くなっているが、 $\phi$ が大きくなるにつれてその差は少なくなり、ある角度で周期が逆転することがわかる。また、 $k=25\text{mm}$ のときの $\phi$ による周期の変化をみると、 $\phi$ が小さいときの周期は長い、 $\phi$ が大きくなるにつれ周期は短くなっていき、ある角度を超えると周期が長くなる現象が見られる。

表2 歩行結果 (実験)

斜面の角度 $\phi$ [°]	胴体の中心線からの距離k		
	25mm	30mm	35mm
10	-	-	-
12	△	△	△
14	○	△	△
16	○	○	△
18	○	○	○
20	○	○	○
22	○	○	○
24	×	×	×

図7 歩数ごとの周期Tの変化 ( $\phi=18^\circ$ )図8 斜面の角度 $\phi$ に対する平均周期Tの変化

## 4. シミュレーション解析

実験で用いた模型 (図2、表1) に対して、シミュレーションソフトを用いて歩行運動のシミュレーションを行う。使用ソフトはDesign Simulation Technologie 社の2次元運動シミュレーションプログラム「Working Model 2D」である。模型のモデルはJW-CADで作成し、このCADモデルをWorking Model 2Dに取り込む。モデルの運動は二次元のアニメーションで表示され、速度、角速度、力などの解析結果を求めることができる (図9)。

シミュレーションの条件として、静摩擦係数0.5、動摩擦係数0.5、反発係数0.5、アニメーションステップ (計算刻み) を0.001sとする。

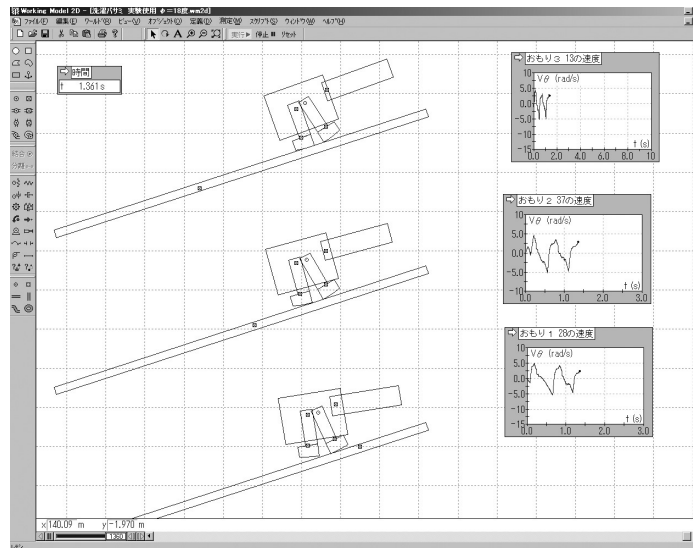


図 9 シミュレーションの画面

### 4. 1 角速度による歩行運動の考察

シミュレーションにより、胴体の重心まわりの角速度 $\omega$ を測定し、歩行運動について考察する。

図10に胴体の角速度 $\omega$ の時間変化を示す。1歩目を除いて、周期的な波形となり、歩行の周期を測定することが可能である。

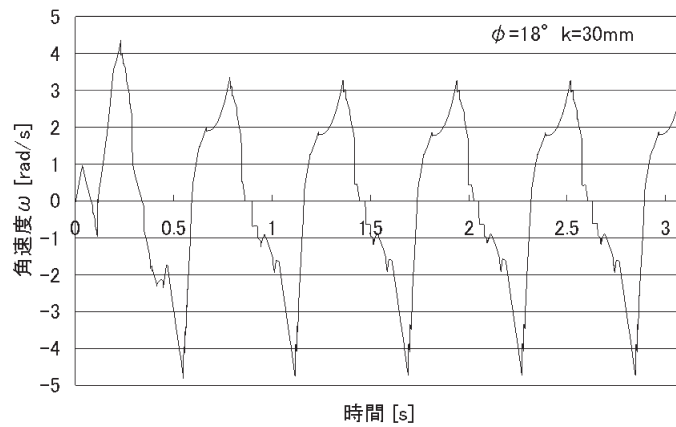
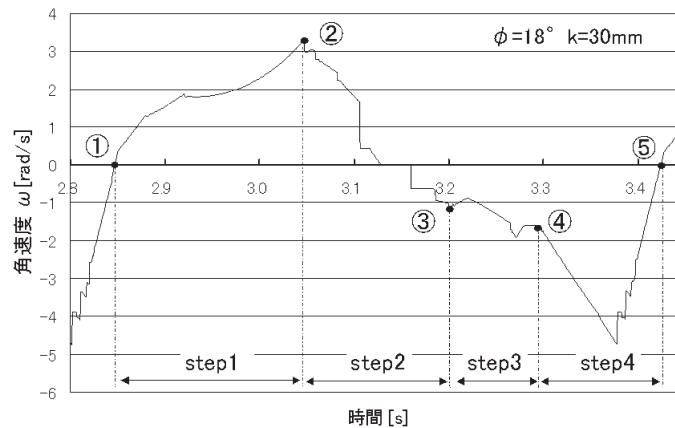
図11に4つのstep (図6参照) における角速度 $\omega$ の変化を示す。

step1は、 $\omega=0$ の静止状態①から始まる。足が開いた状態で、後ろ足下部の接点が前に移動し、左回転しながら、 $\omega$ は増加する。①と②の中間点あたりで、後ろ足かかとの頂点を中心とした回転となり、前足が斜面に接地する②まで $\omega$ は増加する。

step2は、前足が接地する②から始まり、前足下部の接点が前に移動し、左回転を続けながら左回転は減速する。②と③の中間点あたりから③まで後ろ足が前足に対して衝突と反発を繰り返す。 $\omega=0$ で一度静止し、後ろ足の衝突と反発により、 $\omega$ は減少し続ける。

step3は、足が閉じた状態で右回転となる③から始まる。このとき、前足下部の接点は後ろに移動しながら右回転が加速する。

step4は接点が前足から後ろ足に移った④から始まる。胴体はシャフトを中心として回転し、右回転が加速する。しかし、④と⑤の中間点あたりで胴体は後ろ足に衝突し、全体は斜面をすべり、右回転は減速する。⑤の $\omega=0$ で静止し、step1へと戻る。

図10 角速度 $\omega$ の時間変化図11 角速度 $\omega$ における4つのstep

#### 4. 2 歩行結果と歩行周期

シミュレーションによる歩行結果を表3に示す。実験と同様に、10歩以上の歩行を「○ 歩行する」とした。

表3より、斜面の角度とおもりの位置によって歩行する条件が異なることがわかる。 $\phi=12^\circ$ では $k=25\text{mm}$ のみが歩行を行ったが、 $\phi=14^\circ$ 、 $16^\circ$ 、 $18^\circ$ と斜面の角度が大きくなるにしたがい、 $k=30\text{mm}$ 、 $35\text{mm}$ の順に歩行可能となる。また、 $\phi=22^\circ$ のときには $k=35\text{mm}$ のみが歩行を行っている。

表 3 歩行結果 (シミュレーション)

斜面の角度 $\phi$ [°]	胴体の中心線からの距離 $k$		
	25mm	30mm	35mm
10	-	○	-
12	○	-	-
14	○	○	△
16	○	○	△
18	○	○	○
20	×	×	○
22	×	×	×
24	×	×	×

○ 歩行する    △ 途中で止まる    × 転倒する    - 歩かない



したがって、斜面の角度が小さいときにはおもりの位置は胴体に近いものが歩行し、斜面の角度が大きくなると、おもりの位置が後方に位置するものが歩行を行うことがわかる。

図12に斜面の角度を  $\phi=18^\circ$  とし、 $k$ の各値に対して歩数ごとの周期 $T$ の変化を示す。図12より、どの $k$ の値においても歩数による周期の変動は小さく、周期が安定していることがわかる。これは、 $\phi=12^\circ \sim 20^\circ$  においても同様の結果を得た。

図13に $k$ の各値について、斜面の角度  $\phi$  に対する平均周期 $T$ の変化を示す。平均周期は実験と同様に、10歩分の周期の平均値とした。図13では  $\phi$  が小さいときには  $k$  が大きいほど周期が長くなっているが、 $\phi$  が大きくなるにつれてその差は小さくなり、ある角度で周期が逆転する。また、 $k$ の各値において  $\phi$  に対する周期の変化が、単調な増加もしくは減少にならないことがわかる。

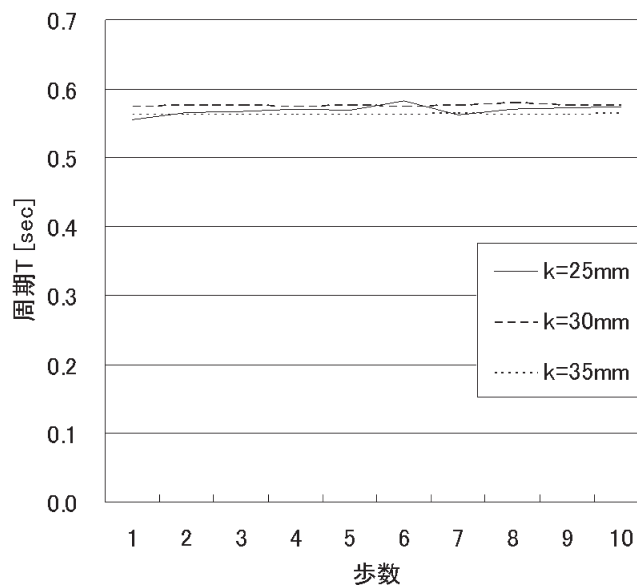


図12 歩数ごとの周期 $T$ の変化 ( $\phi=18^\circ$ )

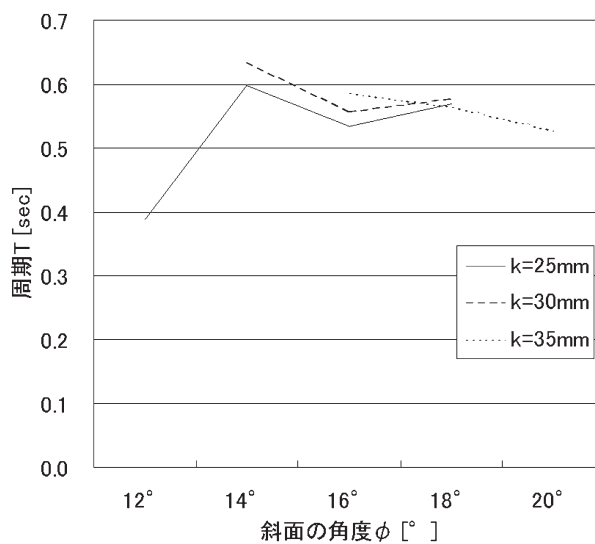


図13 斜面の角度  $\phi$  に対する平均周期 $T$ の変化

## 5. 実験とシミュレーション解析の比較および考察

実験結果およびシミュレーション結果を比較し、考察を行う。

実験とシミュレーションによる歩行結果（表2、3）を比較すると、定性的に一致することがわかる。斜面の角度 $\phi$ によって歩行可能なおもりの位置が異なり、 $\phi$ が小さいときには重りの位置 $k$ が小さいものが歩行を行い、 $\phi$ が大きいときには $k$ が大きいものが歩行を行う。これは、 $\phi$ および $k$ を変化させることで、受動歩行模型の重力によるモーメントおよび慣性モーメントに影響を及ぼすためである。なお、実験とシミュレーションの歩行結果には歩行範囲の差があるが、これは、材料の弾性変形や摩擦係数、反発係数の値の影響と考えられる。

本研究で用いた受動歩行模型を歩行させるためには、以下のような調節が必要となる。

○歩かない、途中で止まる

斜面を急ににする。もしくは、おもりの位置を前に移動する。

○転倒する

斜面を緩やかにする。もしくは、おもりの位置を後ろに移動する。

斜面の角度 $\phi$ とおもりの位置 $k$ の歩行周期に対する影響について考察を行う。

$\phi=18^\circ$ における歩行ごとの周期 $T$ の変化について実験結果とシミュレーション結果（図7、12）を比較する。実験結果、シミュレーション結果ともに安定した周期で歩行を行い、おもりの位置 $k$ が35mm、30mm、25mmの順に歩行周期が長くなっていることがわかる。また、シミュレーション結果のほうが実験結果よりも周期が長い結果となった。これは後ろ足と胴体もしくは軸との摩擦を無視しているためと考えられる。次に、斜面の角度 $\phi$ に対する平均周期 $T$ の変化（図8、13）について比較する。 $\phi=14^\circ$ の範囲で同様の結果が得られた。 $\phi$ が小さいときの歩行周期は $k$ が大きいものが長くなっているが、 $\phi$ が大きくなることで徐々にその差は縮まり、ある角度を超えると $k$ が小さいものの歩行周期が長くなる逆転現象が確認できる。また、 $\phi$ が大きくなるにつれ、周期の差は小さくなり、歩行周期が長くなるV字型の変化となる。

$\phi$ がある範囲を越えると、 $k$ の値によって歩行結果が異なる。一方で、 $\phi$ が適当な範囲内にあった場合には、全ての $k$ で歩行を行っていることから、受動歩行模型の歩行において、おもりの位置より斜面の角度の影響が大きいことが考えられる。

## 6. 結 言

本研究では、受動歩行を取り上げ、教材用2足前後型受動歩行模型の歩行について研究し、歩行実験およびシミュレーション解析を行った。

受動歩行模型の歩行の一步を4つの段階に分け、それぞれの段階で歩行の様子を明らかにした。また、歩行実験結果、シミュレーション結果より、受動歩行模型の歩行には斜面と角度とおもり位置に対して、重力によるモーメントと模型の慣性モーメントが変化することによる歩行結果と歩行周期への影響を明らかにした。

最後に、本研究は科学研究費補助金（21500869）の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 文部科学省「第3期科学技術基本計画」(2006)
- 2) McGeer T. :Passive Dynamic kiWalng、Int. J. Robotics Research、9-2、pp. 53-57 (1990)
- 3) 松永泰弘・中村玄輝・鞍谷文保・山田哲也：教材用 2 足やじろべえ型受動歩行模型の運動解析、日本産業技術学会誌、第49巻第3号、pp. 205-211 (2007)
- 4) 加藤孜：本当に動くおもちゃの工作、コロナ社、Vol. 4、pp. 21-38 (1999)
- 5) 大須賀公一・桐原謙一：受動歩行ロボットQuartet II の歩行解析と歩行実験、日本ロボット学会誌、Vol. 18、No. 5、pp. 737-742 (2006)
- 6) 佐野明人・池俣吉人・藤本英雄：歩行現象の力学原理から見たヒトの歩行、バイオメカニズム学会誌、Vol. 30、No. 3、pp. 119-122 (2006)
- 7) 松永泰弘・中村玄輝・鷺見学：2 足前後型受動歩行模型の運動解析と実践、日本産業技術学会第51回全国大会（仙台）講演要旨集、p. 60 (2008)

