

H-P-1 昆虫を規範とした壁面移動ロボットの研究

—液体の粘性を利用した壁面付着—

Study on insect-inspired wall-climbing Robot

-Adhesion using viscosity of liquid-

○小林憲司（工学院大） 正 鈴木健司（工学院大）

正 高信英明（工学院大） 正 三浦宏文（工学院大）

Kenji KOBAYASHI, Kogakuin University, Kenji SUZUKI, Kogakuin University

Hideaki TAKANOBU, Kogakuin University, and Hirofumi MIURA, Kogakuin University

This paper describes effects of viscous force on adhesive characteristics of sole pads for insect-inspired wall-climbing robots. Ants can walk on the smooth vertical surfaces using an adhesive organ and secreted viscous liquid. We fabricated two kinds of adhesive pads inspired by the adhesive organ of ants. Pure water and silicone oil with various kinetic viscosities were provided to the pads, and normal and tangential adhesive forces between the pad and a glass surface were measured. The experimental results show that the pad provided with highly viscous silicone oil generates higher adhesive force than the pad utilizing surface tension force of water.

Key Word : Wall-climbing robot, Insect-inspired robot, Viscous force, Surface tension force

1. 緒言

マイクロマシンの設計においては、表面間力に起因した貼りつきや摩擦などを低減させることが重要な課題となる。その一方、有用な表面間力を積極的に利用することによって、従来のマクロな構造体にはないマイクロレベルでの新たなシステムを作り出すことが可能である。そこで表面間力を利用し、壁面歩行を行っている昆虫に注目した。例えば、アリは脚先から液体を出し、その表面張力や粘性力などを利用して平滑な壁面の歩行を行っている[1][2]。このメカニズムを利用することによって、小型ロボットに、簡便な機構により壁面歩行を行わせることが可能になると考えられる。またヤモリを規範としファンデルワールス力によって壁面歩行を行うロボットとして Kim[3],[4]らの Stickybot や Michael [5]らが製作した Waalbot がある。鈴木ら [6] は、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて製作した付着パッドをロボットの脚に装着することにより、壁面歩行ロボットを開発している。このロボットでは、水を供給することで壁面に垂直なメニスカス力が得られるガラスパッドと、壁面に平行に大きな摩擦力が得られる PDMS (polydimethylsiloxane) パッドを組み合わせ、壁面歩行と天井歩行を実現している。また、萩原ら[7] は、ガラスと PDMS の複合化パッドを作製し、水 $0.3[\mu\text{C}]$ を手作業で供給することにより、メニスカス力と摩擦力を同時に得ることができた。しかし、実際のアリは粘性の高い液体を分泌していることから、メニスカス力だけでなく粘性力も付着に深く関与していると考えられる。

そこで、本研究では、MEMS 技術を用いて付着パッドを製作し、純水と粘度の異なるシリコンオイルを用いて壁面に対して垂直方向、平行方向の付着力評価を行い、粘性が付着力に及ぼす影響を調べ、付着力の向上を目的とする。

2. 壁面付着

2.1 昆虫の壁面付着

昆虫は垂直な壁面を歩行することができる。これは、昆虫の脚の先端に、爪と“arolium”と呼ばれる付着パッドが存在し、平滑な面では付着パッドから液体を出し、その表面張力、粘性力、パッドの柔軟性などを利用して付着していることが知られている[2]。図1にアリの付着パッドの

SEM 画像を示す。昆虫の付着パッドには、多数の毛に覆われたパッドとなめらかな表面を持つパッドの2種類があるが、アリの付着パッドはなめらかで柔軟な表面を持つ[8]。

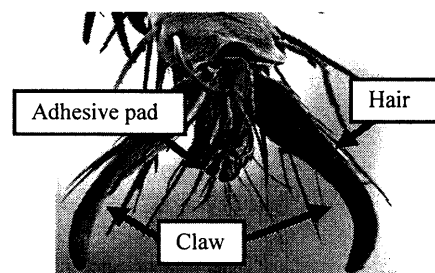


Fig. 1 Claws and an adhesive pad of ant

2.2 液体による付着力

固体間に挟まれた液体と固体表面の接触角が 90° より小さい場合は、図2のように中央がくぼんだ凹面のメニスカスが形成され、逆に 90° より大きい場合は図3のように中央が膨らんだ凸型面のメニスカスが形成される。液体は表面張力により、表面積を小さくしようとするため、凹型の場合はメニスカス内部では圧力が下がり、2平面間を引き付ける方向に力が働く。メニスカス力、ラプラスの式より次のようになる。

$$F = \gamma_w \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \times \pi r_2^2 \quad (1)$$

ここで、 γ_w は水の表面張力、 r_1 と r_2 はそれぞれ液体を鉛直面と水平面で切った切り口の主曲率半径を表す。

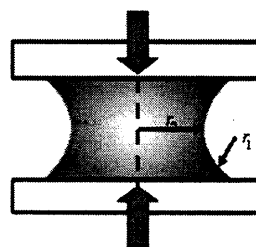


Fig. 2 concave meniscus

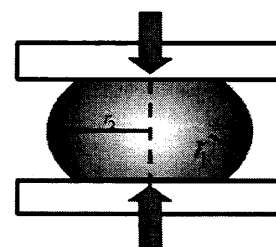


Fig. 3 convex meniscus

一方、粘性力は流体内に速度勾配が生じたときに働く力であり、流速を u 、粘性係数を μ とすると式 (2) で表される。

$$F = \mu \frac{du}{dy} \quad (2)$$

付着パッドが壁面に平行に動く場合には、パッドの速度を U 、パッド・壁面間の液体の厚さを h 、液体の粘性係数を μ とすると、速度勾配は $du/dy = U/h$ となり、物体に働く理論粘性力 F は式 (3) で表される。このことから粘性力は速度 U に比例し、間隔 h に逆比例して変化する。

$$F = \mu \frac{U}{h} \quad (3)$$

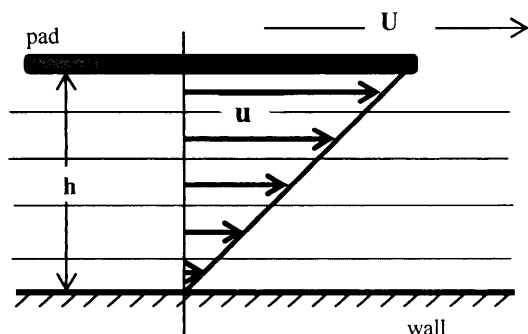


Fig. 4 viscous force parallel to the wall

3. MEMS による付着パッドの製作

3.1 ガラスパッドの概要

アリの付着パッドを規範として、ガラスパッドを製作した。ガラスは親水性が高いため、液体を供給することで付着面に垂直方向へ強いメニスカス力が得られる。

ガラスパッドは直接壁面に付着する付着層(ガラス)とガラスパッドを接続するチューブで構成された「接続層」との合計 2 層から構成されている。製作プロセスを以下に示す。

- ① 厚さ 170[μm]の石英ガラスをフェムト秒レーザー加工機により、パッドの形状にカットする。パッド形状は、6×6[mm]の正方形(面積 36[mm²])と半径 3.38[mm]の円形(面積 35.89[mm²])の 2 種類を製作した。
- ② シリコンウエハの基板上に PDMS を塗布し、スピニングで厚さ 1800[μm]の膜を 2 枚製作し、レーザー加工機により、4×4[mm] にカットする
- ③ 1800[μm]の PDMS 層はチューブを入れるための穴を開け、ガラス層に少量の PDMS を塗布し、PDMS 層と接着し完成する。製作したガラスパッドを図 5 に示す

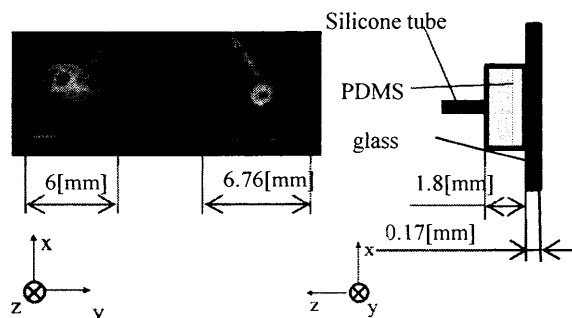


Fig. 5 glass pad

3.2 複合化パッドの概要

複合化パッドは、ガラスと PDMS で構成されるパッドで、アリの付着パッドの柔軟性を再現したものである。

PDMS は加工が容易で、シリコンゴムの材料となる柔軟な材料である。また、付着面に垂直な付着力よりも平行方向の摩擦力が大きいことが特徴である。

この複合化パッドの構造を図 6 に示す。付着面は中央部にガラスパッドがあり、その周囲を PDMS パッドが囲んでおり、各パッドは PDMS の湾曲層に固定されている。付着原理は、壁面に押付けた際に付着面の厚みの差により、周囲の PDMS が最初に壁面に付着する。さらに押付け力を加えることにより湾曲層に圧力がかかる。湾曲層は柔軟な PDMS で製作されていることから中心に湾曲していき、付着層の中心のガラスが壁面に付着する。このように付着させることで、壁面において同一平面上で PDMS とガラスを付着させることができる。このことから二つの特性を発揮することができる。

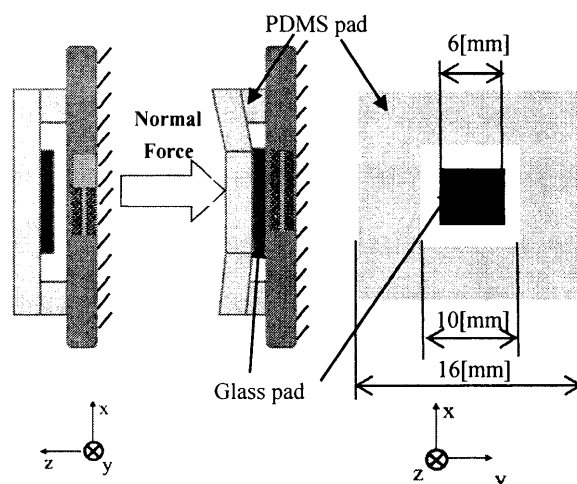


Fig. 6 Structure of composite pad

製作プロセスを以下に示す。

- ① シリコンウエハの基板上に PDMS を塗布し、スピニングで厚さ 390[μm]の PDMS 膜を 2 枚と 1800[μm]の PDMS 膜 1 枚を製作する。
- ② 390[μm]の PDMS 薄膜 2 枚をフェムト秒レーザー加工機により 16×16[mm] にカットし、その内の 1 枚は中央を 10×10[mm] に切り抜く。1800[μm]の PDMS 層は 4×4[mm] にカットする。また、厚さ 170[μm]の石英ガラスをレーザー加工機により 6×6[mm]にカットする。
- ③ 初めに 390[μm]の 2 枚の PDMS 層を接着する。接着面に O_2 プラズマを当て、表面を活性化させることで接着する。ガラス層は少量の PDMS を塗布し 390[μm]の PDMS 層と接着する。1800[μm]の PDMS 層はチューブを入れるための穴を開け、ガラス層と同様に手順で接着する。完成したパッドを図 7 に示す。

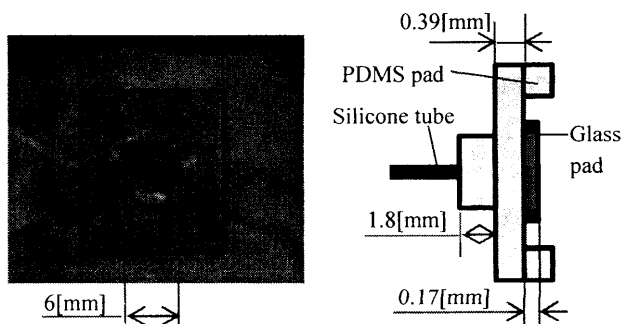


Fig. 7 Composite pad

4. 付着力測定

4.1 実験方法

製作した付着パッドを用いて、垂直方向、平行方向の付着力測定を行った。使用した測定装置のシステム図を図8に示す。

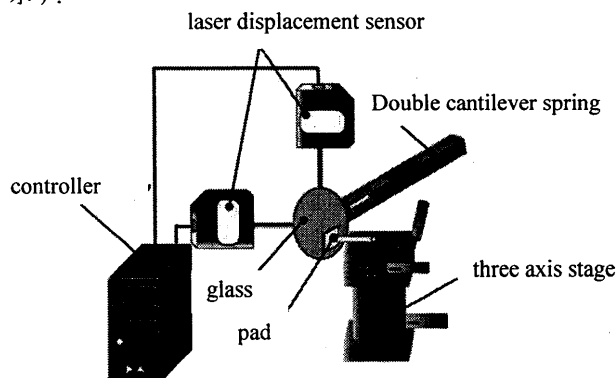


Fig.8 Experimental setup for measuring adhesive forces

- 1) 付着パッドを3軸ステージに固定し、マイクロピペットで液体を供給し、ステージを移動してガラスの付着面に近づけ押し付ける。付着面は平行板ばねに固定されており、ばねの変位をレーザ変位計で測定し、ばね定数 (1537.9N/m) を乗じることで押し付け力が得られる。
- 2) 垂直方向の付着力測定
1)の後、押し付けと逆方向に付着パッドが剥がれるまで引っ張り、はがれる直前のばねの変位から垂直方向の付着力を求める。
- 3) 平行方向の付着力測定
1)の後、パッドを付着面に平行方向に滑らせ、ばねの変位から平行方向の付着力を求める。
- 4) 2), 3)を3回ずつ行いその平均値を付着力とする。また測定時の液体の量、押し付け力、滑り速度をパラメータとし実験を行った。

パッドに供給する液体は、純水と、動粘度の異なる4種類のシリコンオイルを使用し、表面張力と粘性の影響を調べた。表1に使用した液体の物性を示す。

Table1 Physical properties of liquids

	Kinematic viscosity [mm ² /s]	Viscosity [mPa · s]	Surface tension [mN/m]
pure water	1	1	72
Silicone oil	1	1	17
	10	10	20
	100	97	21
	1000	970	21

4.2 ガラスパッドの垂直付着力

ガラスパッドの垂直付着力の測定結果を図9に示す。

まず、正方形と円形のガラスパッドの付着力の差はほとんど見られないことから、パッドの面積が同じならば形状によらず付着力はほぼ等しいと考えられる。

液体量の影響については、純水を用いた場合には液体量0.1[μl]から0.2[μl]になると付着力が大きく増加し、0.2[μl]以上では徐々に付着力が減少した。これは、0.2[μl]以下で

load	100[mN]
velocity	267.81[μm/s]

◆	pure water	
○	silicone oil	[1mm ² /s]
□	silicone oil	[10mm ² /s]
◇	silicone oil	[100mm ² /s]
×	silicone oil	[1000mm ² /s]

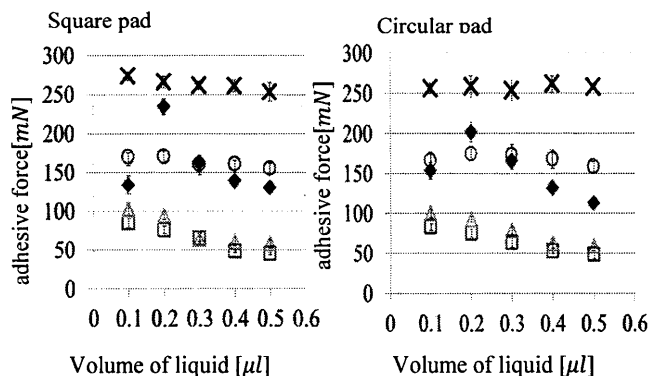


Fig.9 Normal adhesive force as a function of volume of liquid

ではガラスパッド全体に純水が行き渡らず、液体量の増加とともに水の断面積が増加したためにメニスカス力が増加し、液体量0.2[μl]以上では液体がパッド全体に行き渡っており、液体量が増加すると引き離す際に液膜が厚くなるために式(1)の r_1 が増加してメニスカス力が減少したと考えられる。一方、シリコンオイル[1mm²/s], [10mm²/s]を用いた場合には、付着力は液体量に対してほぼ単調に減少している。これは、シリコンオイルは水よりも濡れやすく、0.1[μl]でパッド全面に行き渡っており、液体量の増加とともに引き剥がす際の液膜の厚さが増加したためと考えられる。また純水の表面張力が72mN/m、シリコンオイルの表面張力は約20mN/mであることから、シリコンオイル[1mm²/s], [10mm²/s]より純水の付着力が大きいと考えられる。以上のことから純水、シリコンオイル[1mm²/s], [10mm²/s]を用いた付着力はメニスカス力が支配的であると考えられる。

また、シリコンオイル[100mm²/s], [1000mm²/s]を用いた付着力はどちらも液体量の変化に伴う付着力に大きな変化が見られず、付着力はシリコンオイル[100mm²/s]よりシリコンオイル[1000mm²/s]の付着力が大きくなった。これは式(2)から粘性係数が大きいほど付着力が大きくなったと考えられる。以上のことからシリコンオイル[100mm²/s], [1000mm²/s]を用いた付着力は粘性が大きく影響していると考えられ、また従来の研究で使用されていた純水よりもシリコンオイル[1000mm²/s]を用いた方が大きい付着力が得られた。

4.2 ガラスパッドの平行付着力

図10,図11,図12にガラスパッドによる付着面に平行な付着力の測定結果を示す。

図10より、すべての液体において液体量の変化に伴う付着力の変化が少ないことがわかる。これは、ガラスパッドが押付けられた際に余分な液体がパッドから溢れその後平行に引っ張るため溢れた液体がパッドに回収されず液体量に関わらずパッドとガラス面の隙間が一定であるためと考えられる。また液体を供給していないガラスパッドの付着力は摩擦力のみであり、液体に純水、シリコンオイル[100mm²/s], [1000mm²/s]を用いた付着力はガラスパッドの摩擦力より増加していることがわかる。これは純水では平行方向のメニスカス力が働いていると考えられ、シリコンオイル[100mm²/s], [1000mm²/s]では粘性により付着

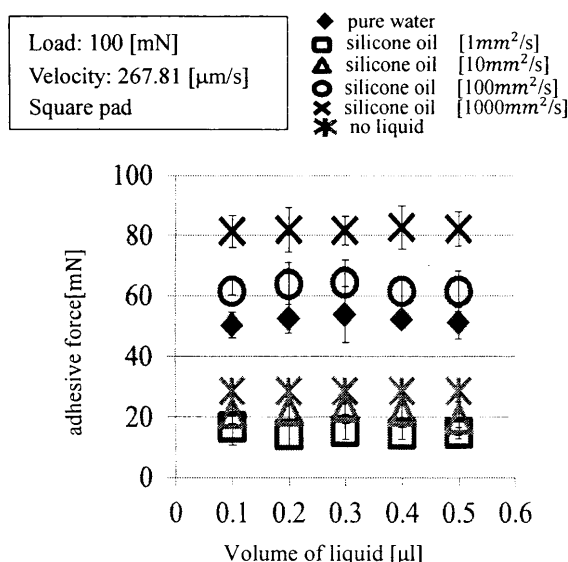


Fig.10 Parallel adhesive force as a function of volume of liquid

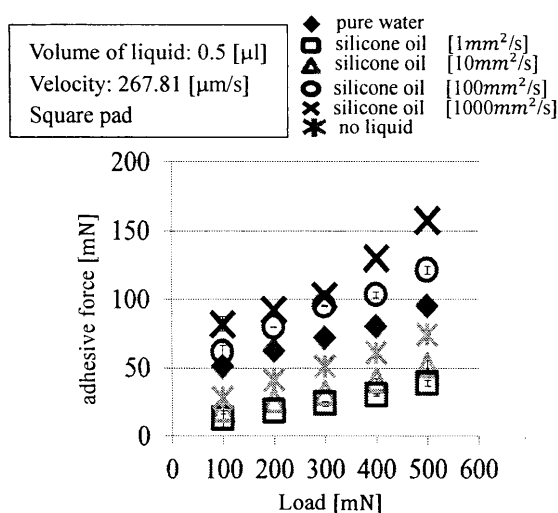


Fig.11 Parallel adhesive force as a function of load

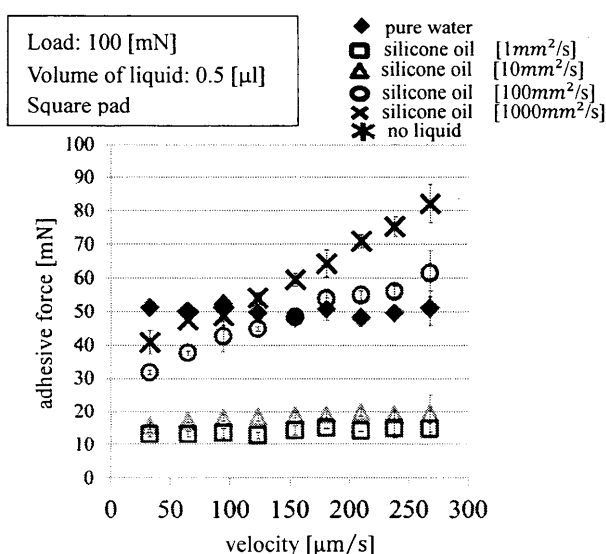


Fig.12 Parallel adhesive force as a function of velocity

力が増加したと考えられる。またシリコンオイル [$1\text{mm}^2/\text{s}$], [$10\text{mm}^2/\text{s}$] は動粘度が低いため、潤滑効果によりガラスパッドのみの付着力よりも低下したと考えられる。

図 11 は押しつけ力に対する平行付着力の変化を示している。すべての液体において押付け力が増加すると付着力が増加することがわかる。また液滴なしでは摩擦力の増加は線形であるが、シリコンオイル [$1000\text{mm}^2/\text{s}$] の付着力は傾きが大きく非線形である。これは式(3)から押付け力が増加することで壁面とガラスパッドの隙間が狭くなり粘性力が増加したために付着力も増加したと考えられる。

図 12 は滑り速度に対する平行付着力の変化を示している。液体に純水、シリコンオイル [$1\text{mm}^2/\text{s}$], [$10\text{mm}^2/\text{s}$] を用いた付着力は滑り速度が変化しても変化が少なくなることがわかる。また液体にシリコンオイル [$100\text{mm}^2/\text{s}$], [$1000\text{mm}^2/\text{s}$] を用いた場合は滑り速度の増加に伴い付着力も増加することがわかる。これは式(2.2)から速度が増加することで粘性力が増加するために付着力が増加したと考えられる。つまりメニスカス力による平行付着力は速度によらず、粘性による付着力は速度が影響することがわかる。

上記のことからシリコンオイル [$100\text{mm}^2/\text{s}$], [$1000\text{mm}^2/\text{s}$] を用いた付着力は粘性が大きく影響していると考えられる。また液体量を変化させた平行付着力、押付け力を変化させた平行付着力、滑り速度を変化させた平行付着力のすべてにおいて従来の研究で使用されていた純水よりもシリコンオイル [$1000\text{mm}^2/\text{s}$] を用いた方が付着力を増加することが確認された。

4.3 複合化パッドの垂直付着力

同様の方法でシリコンオイル [$1000\text{mm}^2/\text{s}$] を用いた複合化パッドの付着力を測定した。測定結果をガラスの面積が同じガラスパッドの結果とともに図 13 に示す。複合化パッドの垂直付着力とガラスパッドの垂直付着力の変化が少ない。このことから複合化パッドの垂直方向の付着力は PDMS パッドの付着力ではなく中心に配置されているガラスパッドの付着力のみで付着していると考えられる。

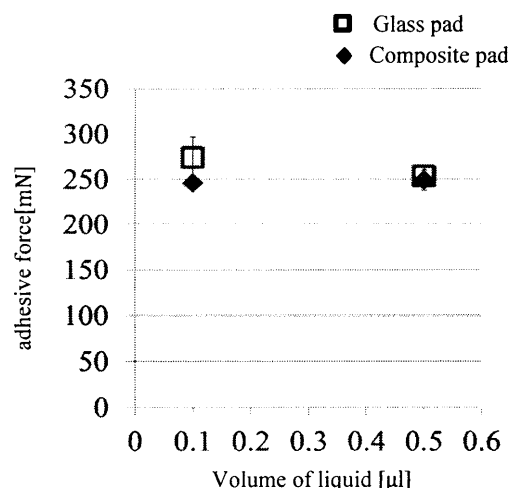


Fig.13 Normal adhesive force of composite pad

4.4 壁面に対して平行方向の付着力

複合化パッドの平行付着力の測定結果を、ガラスの面積が同じガラスパッドの結果とともに表 2 に示す。

Table2 Parallel adhesion of Composite pad

	silicone oil [1000mm ² /s]	pure water	no liquid
Composit Pad	492.4	414.2	301.4
Glass pad	157.9	95.4	73.9

まず使用液体に純水, シリコンオイル [1000mm²/s] を用いた場合と使用液体なしの場合においてガラスパッドより複合化パッドの付着力が増加することが確認できた. また液体なしの複合化パッドより使用液体に純水, シリコンオイル [1000mm²/s] を用いた複合化パッドの付着力の方が大きいことがわかる. これは使用液体に純水, シリコンオイル[1000mm²/s] を用いることで中心に配置されているガラスパッドに付着力が発生するため付着力が増加したと考えられる. また従来の研究で使用されていた純水よりもシリコンオイル [1000mm²/s]を用いた複合パッドの方が付着力を増加することを確認した.

5. 結言

本研究では, 壁面付着における液体の粘性の影響を調べるため, ガラスで作成したパッドに純水と粘度の異なるシリコンオイルを用いての付着力測定を行った. また, ガラスパッドとPDMSパッドを組み合わせた複合化パッドの付着力測定を行った. その結果, 以下の知見が得られた.

① ガラスパッドの付着力測定

ガラスパッドを用いた場合, 純水, シリコンオイル [1mm²/s], [10mm²/s] による付着力はメニスカス力が大きく影響しており, 液体量の変化に伴い垂直方向の付着力が変化する. また, シリコンオイル[100mm²/s], [1000mm²/s]を用いた場合は粘性が大きく影響しており, 速度や押付け力の増加に伴い平行方向の付着力が増加する.

② 複合化パッドの製作・測定

複合化パッドの用いた場合, 垂直方向にはガラスパッドの付着力のみで付着しており, 平行方向の付着力はガラスパッドの付着力より増加し, また中心に配置してあるガラスパッドに液体を供給することにより付着力が増加する.

また純水を用いた場合の付着力よりもシリコンオイル [1000mm²/s]を用いることで付着力が増加することを確認した.

文献

- [1] Walter Federle, Werner Baumgartner and Bert Holldobler, "Biomechanics of ant adhesive pad: frictional are rate- and temperature-depemd," Journal of Experimental Biology, 206, 2004, pp. 67-74.
- [2] Thomas Endlein and Walter Federle, "Walking on smooth or rough ground: passive control of pretarsal attachment in ants," Journal of Comparative Physiology, A, 194, 2008, pp.49-60.
- [3] Carlo Menon, Michael Murphy, and Metin Sitti : "Gecko Inspired Surface Climbing Robots", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Shenyang, China, Aug 2004.

- [4] Walter Federle, Elizabeth L. Brainerd, Thomas A. McMahon, and Bert Holldobler : "Biomechanics of the movable pretarsal adhesion organ in ants and bees", PNAS, Vol. 98, No.11, pp. 6215-6220.
- [5] Michael P. Murphy and Metin Sitti : "Waalbot: An Agile Small-Scale Wall-Climbing Robot Utilizing Dry Elastomer Adhesives" IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 3, 2007.
- [6] Kenji Suzuki, Shusuke Nemoto, Takahiro Fukuda, Hideaki Takanobu and Hirofumi Miura, "Insect-Inspired Wall-Climbing Robots Utilizing Surface Tension Forces," JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 4, No. 1, Feb. 26, 2010, pp.383-390.
- [7] 萩原智也, 關宏隆, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文:"アリを規範とした壁面歩行ロボットの研究~付着パッドの特性評価~, 日本機械学会第2回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集 2010
- [8] Walter Federle, Elizabeth L. Brainerd, Thomas A. McMahon, and Bert Holldobler : "Biomechanics of the movable pretarsal adhesion organ in ants and bees," PNAS, Vol. 98, No.11, pp.6215-6220.