ナミハダニの平坦面に対する付着力と付着機構*

水谷 勝己^{*1}, 江頭 快^{*2}
東海 正^{*3}, 大串 潤^{*4}Adhesive Force of a Spider Mite, *Tetranychus urticae*,
to a Flat Smooth SurfaceKatsumi MIZUTANI^{*5}, Kai EGASHIRA,
Tadashi TOUKAI and Jun OGUSHI^{*5} Department of mechanical engineering and biomimetics, Kinki University,
930 Nishimitani, Uchita-cho, Naga-gun, Wakayama, 649-6493 Japan

Adhesion of a spider mite to a surface of a flat smooth plate is investigated as a model for micromachine parts to adhere to and move on such surfaces. Adhesive force is measured using a setup with a cantilever at the end of which the plate is mounted. The measurement is carried out under various conditions in which plate material, surface roughness of a plate and environmental humidity are varied. The mechanism of adhesion of leg tips of a spider mite to a plate surface is also discussed. Of the forces acting between them, force from dispersion interactions is the most dominant because (1) there is high correlation between adhesive force and the component of dispersion force of surface energy in the surfaces tested: adhesive force of 8.7 μN for glass, 9.7 μN for mica, 9.9 μN for silicon and 12.1 μN for gold; and (2) high humidity and high surface roughness decrease adhesive force. For strong adhesion based on work of adhesion, spider mites have tenent hairs with a bell-shaped tip.

Key Words: Micromachine, Tribology, Spider Mite, Tenent Hair, Adhesive Force, Work of Adhesion, Surface Energy, Dispersion Interaction

1. 緒 論

機械は外部に力仕事を行うとき反力を受ける。機械の位置を固定してその作業を行わせるためには、反力に耐え得る地表面への固定が必要となるが、平坦面のように把持するものがないところでは強い固定は困難である。特に、自重による摩擦力が期待出来ないマイクロマシンでは、どのような機構を用いて固定するかは重要な問題である。報告されているものとして、細管内走行マイクロマシンにおける壁面への張り出しを対称位置で行う機構^①、細管外壁走行における数台

のマシンを外壁に沿って輪状に連結する機構^②などがある。しかし、このように閉じた形が確保できるものに比べ、広い平坦面上にある場合には固定のための良い方法は簡単には見当たらない。

一方、生物では、ヤモリに見られるごとく、どのような向きの壁面でも落下することなく移動できる小動物が少なからず存在する。そのため、これらに着目して平坦面への付着による固定とその離脱を検討することとした。対象生物をナミハダニ（体長が 0.5mm 程度、体重が 0.02mg 程度）とし予備調査を行ったところ、ガラス面上で、走行速度は1秒間に体長の数倍、付着力は体重の数十倍であった^③。物体の寸法が小さくなると支配的な力が体積力から表面力に変わるが、移動と付着の相反する機能を発揮しているこのダニにあっては双方の力に巧く適応しているものと考えられる。

そこで、本研究では、ナミハダニの平坦面に対する付着力を平坦面の材質や表面粗さ、測定時の湿度を変えて詳細に調査する。また、そのもとになる付着の

* 原稿受付 2004年9月8日。

^{*1} 正員, 近畿大学生物理工学部(☎649-6493 和歌山県那賀郡打田町西三谷930)。^{*2} 正員, 京都工芸繊維大学工芸学部(☎606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。^{*3} 近畿大学大学院生物理工学研究科[現:(株)ナガセインテグレックス]。^{*4} 近畿大学大学院生物理工学研究科。

E-mail: mizutani@waka.kindai.ac.jp

機構を脚先の構造, 脚の動作, 付着モデルなどから検討する。

2. ナミハダニ

ダニは動物分類学上, 節足動物門, 鋏角亜門, クモ形綱, ダニ目に属し, 羽が無く四対の脚を持ち, 昆虫とは区別される⁴⁾。ここで取り上げたナミハダニは図1のような形態をした植物寄生性のダニである。インゲン豆を用いて多数の飼育をしたところ, 通常は豆葉の裏に生息し, 口針により細胞組織液を吸引するが, それがなくなると他の葉へ, さらに他の幹の葉, 他の木の葉へと活発に移動するものであった。ナミハダニの体長は図1のごとく上方から見たときの最大長として, 体重は電子天秤で測定可能となる多数のダニの重さから求めた。平均値として体長 0.5mm, 体重 0.023mg を得た。

3. 付着力の測定

3.1 測定方法 付着力の測定のために構成した装置の概略を図2に示す。実体顕微鏡下に置いて使用し, 付着力によるカンチレバーのたわみを計測する。そのため, やわらかいカンチレバー先端のステージ上にガラス等の平坦面を固定し, ステージの下には隙間を隔てて微小変位計 (マイクロセンス 3401-HR-02, 日本エー・ディー・イー社) を設置している。測定の操作は, ガラス棒の極細の先端とダニの背を接着する, ガラス棒を操作してステージ上にダニを置く, ダニ自身で平坦面に付着するよう数秒間保持した後ガラス棒を引き上げる, である。この操作過程で計測されたステージの変位波形は図3のごとくである。ダニを載せることによって一旦下がったステージが引き上げられ, 最高を示した後に離脱して減衰振動した様子が推察出来るものとなっている。従って, 変位波形の最上点と減衰振動振幅の中央線との変位差から最大変位を, 最大変位にカンチレバーのパネ定数を乗じて付着力を求めた。ここで用いたカンチレバーのパネ定数は $0.98 \pm 0.12 \text{ N/m}$ である。

平坦面として, 硼硅酸ガラス (カバーガラス用: 以下, ガラスと略記), シリコンウエハー ((100) 面: 以下, シリコンと略記), 雲母 (蒸着基板用), ガラス上に金のスパッタリング膜を施したもの (膜厚約 100nm: 以下, 金スパッタ膜と略記) を用いた。それぞれの面は, 目視では非常に平滑で, 原子間力顕微鏡 (Dimension3100, DI 社) で様々な個所を粗さ測定 ($1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ の測定範囲) したところ中心線平均粗さ Ra は表1のごとくであった。

Fig. 1 Spider mite (*Tetranychus urticae*).

Fig. 2 Setup for measuring adhesive force of a spider mite to a surface of a plate.

Fig. 3 Time chart of adhesive force.

Table 1 Surface roughnesses of materials Ra used for measuring adhesive force.

	Glass	Mica	Silicon	Gold film
Mean surface roughness nm $\pm$ S.D.	1.08 $\pm$ 0.30	0.36 $\pm$ 0.19	0.24 $\pm$ 0.10	14.03 $\pm$ 2.26
Number of measurements	21	26	26	31

ガラスについては粒度の異なる砥粒 (#800, #1500, #4000) を用いたラッピングにより表面を粗くしたものも用いた。表面粗さ測定器 (SE-3400, 小阪研究所) による表面粗さは $0.006\mu\text{mRa}$ (平滑面), $0.039\mu\text{mRa}$ (#4000 面), $0.153\mu\text{mRa}$ (#1500 面), $0.338\mu\text{mRa}$ (#800 面) であった。

Fig. 4 Distributions of adhesive forces of a spider mite to a flat surface.

以上の測定は 20・30%の相対湿度で行った。湿度の影響を調べるために、加湿器を用い、顕微鏡をグローブボックスで覆うことによって、70・80%の高湿度を得た。

3.2 測定結果 図 4 に四種の平坦面に対するハダニの付着力分布を示す。これらの分布は対数正規分布に適合するものであった。分布の原因として、ダニの個体差、付着に関係した脚の数、接地点の平坦面の状態、測定操作の差異など多くのものが考えられるが、ここではその議論はせず、結果を表 2 のごとくにまとめることとした。四種の平坦面の中ではガラスに対する付着力が 8.2μN と最も小さく、雲母、シリコン、金スパッタ膜に対して順に大きくなっていく。金スパッタ膜の付着力は 12.1μN であり、他に比べて粗さが大きいにもかかわらず強い付着を示すことから、付着には平坦面材質による影響が存在しているものと見られる。

表 3 にガラスの場合について平坦面を粗くしたときの付着力を示す。ガラス面をラッピングすることにより付着力は半分程度に低下する。しかし、ラッピング面の中では、砥粒の粒度により粗さが相当異なるにもかかわらず付着力はほぼ同じである。

表 4 にガラスの場合について測定時の相対湿度を変えたときの付着力を示す。ここでは、再現性の確認のため(a)高湿度状態、(b)低湿度状態、(c)高湿度状態の順で測定を行っている。明らかに、低湿度に比べて 70・80%の高湿度の状態では付着力は低下している。

4. 付着機構の検討

4.1 脚先の構造 ナミハダニの脚は基本的には基節から始まり附節に至る六つの節とその先にある粘毛と爪間体から成る。そのうちの接地に関係する脚先部を、平坦面に接地していたと見られるものについて図 5 に SEM 写真で示す。また、一匹のダニを腹側か

Table 2 Adhesive forces of a spider mite to a flat surface.

	Glass	Mica	Silicon	Gold film
Mean adhesive force μN ± S.D.	8.2 ± 3.8	9.7 ± 3.6	9.9 ± 3.7	12.1 ± 6.8
Number of samples	381	128	59	211

Table 3 Adhesive forces of a spider mite to a glass surface unabraded or abraded.

	Un-abraded	Abraded with powders of:		
		#4000	#1500	#800
Mean adhesive force μN ± S.D.	8.7 ± 3.8	3.8 ± 1.8	4.3 ± 1.4	3.9 ± 1.9
Number of samples	30	26	22	25

Table 4 Adhesive forces of a spider mite to a glass surface at different humidities.

*	(a) High humidity	(b) Low humidity	(c) High humidity
Mean adhesive force μN ± S.D.	5.2 ± 3.2	7.3 ± 4.3	4.6 ± 3.0
Number of samples	11	24	12

*Low humidity: 20 - 30%R.H.; High humidity: 70 - 80%R.H.

Fig.5 Tip of the left second leg of a spider mite: (a) a tarsus, (b) empodiums and (c) tenent hairs.

ら観察したときの脚先部を図 6 に示す。図 5 および図 6 (4)によると、三対の爪間体(b)を間にしてその両側に粘毛(c)が一對ずつ存在し、爪間体を体側(内側)、粘毛を外側に位置する状態で接地している。爪間体と粘毛の付け根は 90°近くの角度を持って連結し、連結部と附節先端(a)は関節を構成している。また、爪間体や粘毛は附節の太さに比べて細い。このような脚先の

Fig. 6 Tenent hairs of four legs of a spider mite.

特徴は位置関係が異なる四対のどの脚でも同様であった。従って、バランスよく開いた爪間体と粘毛の双方によって体を支え、付着は先に広がり部を持つ粘毛の先端部が担っているものと推察される。図6において粘毛に着目すると、粘毛の軸部の太さは $0.5\mu\text{m}$ 程度、広がり部の大きさは $2\mu\text{m}$ 程度である。広がり形状は、扁平なもの(1)、凸なもの(2)、凹なもの(3)など様々で、中には、一つの脚で種々のタイプの混在しているもの(4)もある。数多くのダニについて同様な観察を行なったところ、前脚では扁平形状、後脚では爪間体の方に凸形状を呈するものが比較的多く見られたが、そうでない場合も多々あり、先端のひろがり形状と脚位置との間には定まった関係はみられなかった。粘毛先端の種々の広がり形状のうち凹形状に着目して拡大観測した一例を図7に示す。先端は開きかけの朝顔の花状になっている。これに平坦面を軸方向に強く押し付けられれば扁平形状が、斜めに弱く押し付けられれば凸形状が形成可能であることから、図7のようなものが元の形で、接地状況により種々の形に変形するものと思われる。

4.2 付着時の脚の動作 ガラス面上でのダニ脚先の動作をガラスの裏面から光学顕微鏡で観察し、ビデオに記録した。付着力測定と同様な操作でガラス面に付着させたダニを引き剥がす場合では、ダニは面から離脱した脚を激しくばたつかせていることが特徴的である。その一例を、脚をばたつかせた状態および第

Fig. 7 Tips of tenent hairs with a typical shape.

Fig. 8 A spider mite fluttering its legs on glass when being drowned off; all legs are fluttering in (a) and the second leg again adheres to the glass in (b).

二脚が再付着した状態の図8(a),(b)で示す。ばたつき動作は脚を体の遠い方から近くに引き付けるように曲げることであり、一秒間に五回程度の頻度でその動作を行なっている。その過程で再付着が生じるが、その位置は脚を引き付けた時の体に近い位置である。これに対して、歩行時においては、脚を体から比較的に遠い方に伸ばした位置で接地している。

また、以上とは別に、数多くのダニを小さな容器に入れ、上部をスライドガラスで蓋をして放置し、重力に逆らってガラス面に付着し、逆さ歩行したダニの残した痕跡を調べた。図9に位相差顕微鏡による観測の一例を示す。大きさが $1\mu\text{m}$ 程度の点状の痕跡が幾つか認められる。それらは大きさが同程度である粘毛先端の広がり部に対応するもので、その部から分泌液が出る、あるいは、その部は剥離しやすい状態にあるものと思われる。

4.3 付着モデル 平滑面に付着するヤモリ[®]、コガネムシ[®]、ハエ[®]などの付着モデルについて、脚先

Fig. 9 Traces left on glass on which a spider mite hung and walked.

の付着部と相手面との吸引力, 摩擦力, 静電気力, 水蒸気や分泌液の表面張力 (液架橋メニスカス力), 分子間力によるものが挙げられている。付着力の測定値やそれぞれのモデルに基づく計算値などからヤモリでは分子間力が, ハエでは分泌液の液架橋メニスカス力が主たるものであるとされている。ハダニの場合についてもそれぞれのモデルを検討する。

今, 単純に, 粘毛先端部は半径 R ($= 1\mu\text{m}$) の円板で相手面と密着や対向しているものとする。

(a) 吸引モデル: 対向部とそれ以外には一気圧の圧力差 P ($= 0.1\text{MPa}$) がある。すなわち付着力 F_s は,

$$F_s = \pi R^2 P \approx 0.3\mu\text{N} \quad (1)$$

(b) 液架橋メニスカス力モデル: 表面張力 γ の液が距離 h を隔てた対向部全域に架橋し, 半径 R_m ($= 0.5h$) と R のメニスカスを形成している。また, 液内外の圧力差 P はラプラスの式に従う。このときの付着力 F_m は⁹⁾,

$$F_m = \pi R^2 \gamma \left(\frac{1}{R_m} - \frac{1}{R} \right) \quad (2)$$

(c) 分子間力モデル: 対向面がわずかな距離 D を隔ててほぼ密着し, 両面間にはファンデルワールス力が働いている。すなわち, 付着力 F_i は, Hamaker 定数を A として⁹⁾,

$$F_i = \frac{AR^2}{6D^3} \quad (3)$$

結果は, 分泌液によるメニスカス力 F_m は, 表面張力をハエの場合と同様に $\gamma = 30\text{mN/m}$ とし, 液厚さ $2R_m$ を表 1 の金スパッタ膜の表面粗さ 14nm より大きいとして, $F_m = 10\mu\text{N}$ ($R_m = 10\text{nm}$ のとき) や $2\mu\text{N}$ ($R_m = 50\text{nm}$ のとき) を得る。また, 分子間力による F_i は, 固体と液体の双方に対する典型的な値 $A = 10^{-19}\text{J}$ を用い⁹⁾, D は典型的な原子間距離 ($\approx 0.4\text{nm}$) かそれよりも大きいとして¹⁰⁾, $F_i = 260\mu\text{N}$ ($D = 0.4\text{nm}$ のとき) や $33\mu\text{N}$ ($D = 0.8\text{nm}$ のとき) を得る。一匹の

ダニでは接地しているのは四本の脚, 一脚について二本の粘毛とすれば, 上で求めた力の八倍が付着力の推定値となる。これらの結果は, F_m は F_i よりもかなり小さいこと, 八倍の F_m は付着力の測定値と同オーダーであることを示している。そのため, 引き剥がし時の破断は固・液の界面に比べて弱い付着の液分子間でおこり, 破断強さは液の表面張力によっていると考えるのが妥当のように思われる。しかし, このことによって, ガラスと金スパッタ膜の測定値の間に 1.5 倍の差があるといった付着力の平坦面材質による差異を説明することはできない。そこで次のモデルを考える。

(d) 付着エネルギーモデル: 平坦面材質に注目し, 付着力に関係するのは粘毛先端部と相互作用することが出来る平坦面の表面エネルギーであると考え, それを評価することとした。まずは, 試験平坦面に表面張力 γ_2 が既知の液を滴下し, 出来た液滴の接触角 θ をもとに, Young-Dupré の式¹¹⁾,

$$W_{12} = \gamma_2 (1 + \cos \theta) \quad (4)$$

から面と液の付着エネルギー W_{12} を求めることとした。試験液として, 極性の高い結合を持たず表面張力が主として分散力成分によるアクリル系の溶液 (Norland 社 NOA65, $\gamma = 36.4\text{mN/m}$, 粘度 1200cps) を用いた場合に接触角 θ は図 10 のごとく得られた。

分散力のみが相互作用に寄与するときには γ^d を表面張力の分散力成分として,

$$W_{12} \approx 2\sqrt{\gamma_1^d \gamma_2^d} \quad (5)$$

である¹¹⁾。今, 粘毛先端部も分散力成分からなるとすると, 平坦面と粘毛先端部の付着エネルギー W_{13} は, ガラスを基準とした比で表すと次のごとくである。

$$\begin{aligned} W_{13} / W_{13(\text{glass})} & \approx 2\sqrt{\gamma_1^d \gamma_3^d} / 2\sqrt{\gamma_{1(\text{glass})}^d \gamma_3^d} \\ & = 2\sqrt{\gamma_1^d \gamma_2^d} / 2\sqrt{\gamma_{1(\text{glass})}^d \gamma_2^d} \\ & \approx W_{12} / W_{12(\text{glass})} \end{aligned} \quad (6)$$

同様に, 測定されたダニの付着力もガラスを基準とした比で表し, 両者の関係を調べた。結果は図 11 のごとくであり, 比であらわしたダニの付着力と分散力相互作用による平坦面付着エネルギーとの間には高い相関 (相関係数 0.98) が認められた。

以上を総合すると次のように考えられる。付着力は平坦面との界面, 界面から粘毛先端部 (あるとすれば分泌液もこの部に含まれる) にかけての部分のうち弱

Fig. 10 Contact angles θ between a droplet of acrylic solution and a flat surface.

Fig. 11 Relationship between adhesive force and surface energy, each normalized by its counterpart for glass.

い方の特性により定まるものであるが、表面エネルギーの分散力成分の値が大きい平坦面では大きな付着力が、分散力成分の値が小さい水蒸気膜の存在によって付着力は小さくなるなど分散相互作用に基づく界面の特性に強く支配されている。そして、その界面では、粘毛と平坦面の間で相互作用を示す真の接触域は見かけの面積のうち僅かであると見られ、その域を増すために相手に倣って変形しやすい粘毛の構造と強い押し付けを与える脚先の動作を伴っている。また、粘毛先端部の吸引力は付着に対する値としては小さいが、粘着性物質を先端部に吸い出す役目を果たす可能性がある。

5. 結 言

ナミハダニの平坦面に対する付着力を平坦面の材質や表面粗さ、測定時の湿度を変えて測定し、また、付着の機構をダニ脚先の構造、脚の動作、付着モデルなどから検討し、以下の結果を得た。

- 1) ナミハダニの付着力は、平滑ガラス面上では $8.2\mu\text{N}$ (体重の 37 倍)、金スパッタ膜上では $12.1\mu\text{N}$ (体重の 54 倍) であるなど平坦面材質によって変化し、平坦面の表面エネルギーの分散力成分の高い材料ほど大きい。
- 2) ナミハダニの付着力は平坦面の表面粗さが大きい場合や相対湿度が高い状態では低下する。
- 3) 平坦面との付着は、粘毛先端にある $2\mu\text{m}$ 程度の大きさの拡がり部が担っており、開きかけの朝顔の花形状は、相手面に倣って押し付けるのに適している。
- 4) 付着力の大きさを決定づけているのは粘毛先端拡がり部と平坦面の界面における分散相互作用に基づく付着エネルギーであると推察される。

文 献

- (1) N. Kawahara, Experimental Wireless Micromachine for Inspection on inner Surface of Tubes, *Proceedings of the Sixth International Micromachine Symposium*, (2000), 141-148.
- (2) M. Takeda, Experimental Chain-type Micromachine for Inspection on Outer Surface of Tubes, *Proceedings of the Sixth International Micromachine Symposium*, (2000), 149-153.
- (3) 水谷勝己・江頭 快・東海 正, ダニの微小歩行機械としての性能評価, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2001), 464-464.
- (4) 江原昭三・真梶徳純, 植物ダニ学, (1996), 2-3, 全国農村教育協会.
- (5) K. Autumn, Y. A. Liang, S. T. Hsien, W. Zesch, W. P. Chan, T. W. Kenny, R. Fearing, and R. J. Full, Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature*, **405** (2000), 681-685.
- (6) N. E. Stork, Experimental Analysis of Adhesion of *Chrysolina* (Chrysomelidae: Coleoptera) on a Variety of Surfaces, *J. Exp. Bio.*, **88** (1980), 91-107.
- (7) G. Walker, A. B. Yule and J. Ratchiffe, The adhesive organ of the Blowfly, *Calliphora vomitoria*: a functional approach (Diptera: Calliphoridae), *J. Zool. Lond.*, **A-205** (1985), 297-307.
- (8) 例えば, 小野 周, 表面張力, (1994), 14-16, 共立出版.
- (9) J. N. イスラエルアチヴィリ (近藤 保/大島広行訳), 分子間力と表面力, (2000), 172-204, 朝倉書店.
- (10) 同上, (2000) 172-174, 朝倉書店.
- (11) 同上, (2000) 308-311, 朝倉書店.