

令和 2 年 3 月 10 日現在

機関番号：32692

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13654

研究課題名(和文)濡れの制御にもとづく接着・剥離繰り返し界面の構築

研究課題名(英文)Continuous adhesion and detachment using liquid

研究代表者

西尾 和之(NISHIO, Kazuyuki)

東京工科大学・工学部・教授

研究者番号：00315756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：2つの平面試料を上下に向かい合わせて配置し、界面に液体を展開して密着させ、試料を垂直に引っ張った際の接着力を計測する装置を制作した。予備的な実験を行う簡易的な装置を組み上げて動作を確認した後に本格的な装置を製作した。接合面の角度を精密に調整する仕様としたが、結果的に、ナノスケールでの調整は困難であった。固体界面の接着力を確保するために親水化処理を行った結果、酸化チタンを成膜し、熱処理でアナターゼ型結晶として紫外線照射したもので接触角がほぼ0°となり、理想的な濡れ性にすることができた。ステンレスの多孔体シートを用いて液体の浸み出しと吸い戻しを行い、液体の存在によって接着力が発生する事を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体界面の接着/剥離の繰り返しは困難な課題であるが、ロボット類の可動範囲を広げるために重要な動作である。本研究で得られた成果は、固体界面に展開した水が接着に寄与する事、多孔体を通して固体界面の液量を制御できる事を示したものであり、今後の研究の進展により、強い接着と容易な剥離を繰り返す界面の構築が期待される。また、水は大量に存在し、我々の日常生活では「水は滑りやすいもの」として認識されているが、界面の水の量(膜厚)をナノスケールで制御することにより、水の強い表面張力を利用した接着剤としての新たな利用が可能となる。

研究成果の概要(英文)：First, preliminary apparatus to evaluate liquid adhesion was prepared. A glass plate was placed on a force gauge and pure water was cast on the glass. Then, another glass plate was moved downward using thread connected to a fishing reel and horizontally attached to the glass plate on the force gauge. Adhesion was measured by pulling the thread upward using the fishing reel. Based on the preliminary apparatus, motor-driven precise apparatus was constructed. Second, to increase the adhesion between the glasses using water, hydrophilic surface was prepared. Formation of Titanium dioxide film, crystallization to anatase and irradiation of UV light enabled the surface super-hydrophilic, whose contact angle was approximately 0 deg. Third, water was exuded through porous metal sheet using syringe pump and spread between the porous metal sheet and glass plate. Then, water was suctioned back to syringe pump.

研究分野：界面化学

キーワード：固体界面 親水性 接着 流体

1. 研究開始当初の背景

ASIMO(本田技研工業)、pepper(ソフトバンク)あるいは地平アイコ(東芝)などの人型ロボット、人間が立ち入る事ができない領域で活動する探査ロボットや無人航空機(ドローン)など、人類に代わってロボット類が活躍する場が飛躍的に広がっている。しかし、人間と同様、重力に逆らって壁や天井を自由に移動することはいまだに困難であり、目途も立っていない。一部で、自動の窓拭きロボットなどで実現されているものの、接触面を常に吸引し続けるために、掃除機のような大がかりな排気装置が必要となる。その結果、多大な電力を消費し、騒音も大きいという問題がある。多大な電力消費と騒音は、近年急速に広まっているドローンが抱える課題でもある。

20年近く前、ヤモリの手足の表面にある、マイクロスケールからナノスケールに至る微細な階層構造の強接着性を模倣する手法が報告され(Nature, vol.405, p.681, 2000)、企業を含めて数多くの研究が進められてきた。しかし、壁面や天井を移動するためには、強い接着と容易な剥離の切り替えとその繰り返しが必要であり、ヤモリの手足の模倣では未だに達成されていない。

日本の固有種であるアカハライモリは、ヤモリのような特殊な手足の表面構造を持たないものの、水槽の壁に密着してよじ登ることができる。小笠原水産センター(父島)や葛西臨海水族園で出会うことができるタマカエルウオは、魚でありながら水中にいる事を嫌い、水槽の壁面に飛びついて留まる習性がある。身近な存在であるカタツムリやナメクジも、垂直面に長時間安定して静止し続けている。彼ら・彼女らが垂直面に留まるときの共通点は、自身の体を利用して、対象物(壁面)との界面を若干濡らしている点にある。この現象を模倣し、固体界面の濡れを適切に制御することができれば、少ないエネルギー消費で垂直面に張り付く程の接着強度を得て、移動する事も可能になるものと期待される。

固体同士の接着は非常に重要な加工プロセスであり、接着剤や粘着性の両面テープをはじめとして、社会で幅広く利用されている。その一方で、一旦接着したものを剥がす作業が必要となる場面も多い。その際は、あえて接着力を弱めた接着剤、マジックテープ、吸盤などが利用されている。しかし、いずれの場合も、接着力の強さと剥離の容易さの両立に優れているとはいえない。接着力を弱めた接着剤の場合は、剥離性を高めるためのトレードオフとして接着力を大幅に犠牲にしている。マジックテープは、適用範囲がマジックテープ間の接着に限定される上、剥離過程で特殊な動作と多大な力を要する。吸盤は、小さいつまみを引っ張ることで剥離作業を容易にしている例があるものの、吸盤を押しつける接着過程で多大な力を必要とする。吸盤と真空装置を組み合わせたバキュームチャックが製造ラインなどで使用されているが、装置が大がかりとなる上、エネルギーの消費が著しい。更に、吸盤やバキュームチャックは、木の葉などの柔らかい場所では用いることができない。

2. 研究の目的

本研究では、強い接着と容易な剥離を繰り返すために、互いに接した時に強い接着力を得る一方、剥離の際にその接着力を大幅に弱める新規プロセスを提案し、その現象を実証することを目的とする。具体的には、第一に、固体の界面に液体を僅かに浸み出させる事によって接着力を発現させる。これは、ガラスなどの平滑な固体同士が通常は接着しないものの、界面に水が介在すると接着し、剥がすのに苦労する現象である。このときの接着力はラプラスの式で示されるが、定性的には、(1)液体の表面張力が大きく、(2)固体表面の液体の濡れ性が高く、(3)固体界面の水の膜が薄い程接着力が大きくなる。第二に、界面に展開した液体の膜厚(液体の量)を変えることによって接着力を弱める。固体の界面に液体を展開し、更に固体界面の液体の量を変化させる方法として、接着させる2つの固体(被着材)の一方を多孔質構材料にする。多孔体の孔を通して固体界面に液体を展開して接着力を発現させる。一旦発現した接着力を弱める手段は、界面に存在する液体を多孔質材料に吸い戻し、究極的には乾燥させる方法、あるいは更に水を浸み出して液体の膜厚を上げる方法が考えられる。ラプラスの式に基づく接着力は、ナノスケールでの液体の膜厚の変化に大きく影響されることから、微量の調整で接着力を大きく変化できる可能性がある。よって、マイクロシリンジ(小型注射器)の機械的な微動などで接着力を大幅に変化させる可能性がある。

本研究では、下記の3項目を主要な目標とし、強接着-易剥離の繰り返しの実現をはかった。

- (1) 接着力計測装置の製作と接着力の測定
- (2) 平滑面界面の液体の濡れによる接着特性の把握
- (3) 多孔質材料表面の濡れの制御にもとづく接着-剥離界面の構築と評価

3. 研究の方法

微弱な接着力を正確に計測する装置の製作では、はじめに、入手が容易な既存の部品を利用して簡易的な接着力計測装置を組み立て、その測定結果に基づき精度の高い装置を製作するという、2段階の方法をとった。固体界面の液体の濡れによる接着特性の把握では、スライドガラスを固体とし、その表面の親水性を最大にする処理方法を探索した。多孔質材料からの液体の浸み出し操作は、ステンレスの多孔体シート(パンチングメタル)を用いたが、そのままでは表面が粗く固体間の液体の膜厚の制御が困難であったため、表面を研磨して粗さを下げて実験に用いた。

4. 研究成果

(1)接着力計測装置

はじめに、実験スタンドを基本骨格とした簡易的な接着力計測装置を組み立てた。スタンドの下側に、デジタルフォースゲージを上向きに設置し、その先端にアルミニウム製の試料固定台を固定した。実験スタンドの上端には滑車を設置し、滑車から非伸縮性の釣り糸を下げて、下向きの試料固定台を吊り下げた。滑車を介した反対側の釣り糸を小型の手動リールに巻き取り、リールの巻き取りと逆回転で下向きの試料固定台を上下動させる方式とした。また、2つの試料固定台の水平性を確保するために、上側の試料固定台と釣り糸の間にプラスチック製のダブルボールジョイントを接続し、上側の接着面が任意の角度で引っ張られる様にした。この簡易接着力計測装置の上下両側の試料固定台にスライドガラスを両面テープで接着し、界面に純水を添加して接合し、手動リールで糸を上向きに引張り、接合面が剥離した時の引張り強度とスライドガラスの面積から接着強度を求めた。その結果、同じ条件で測定しても数値の再現性が得られ難いものの、最大で $300\text{g}/\text{cm}^2$ 程度の接着力を得ることができた(図1)。

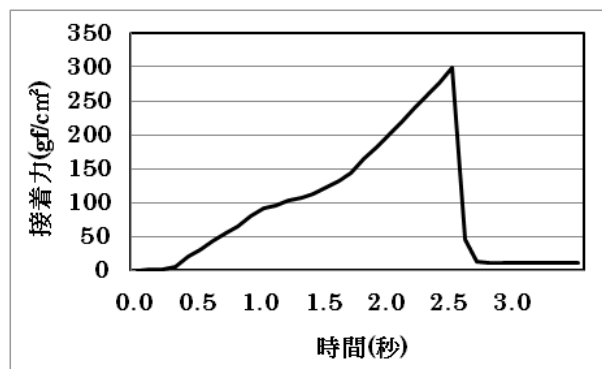


図1 接着力測定結果の例

簡易的な接着力計測装置で接着力の計測に成功したことから、この構成に基づいて本格的な装置の製作を進めた。上側の試料(試料台)を厳密に垂直に引き上げる方法について検討を進めた結果、下向きの試料台を下端に固定する円柱状のテフロンロッドを製作し、これを垂直に配置し、テフロンロッド径よりも僅かに内径の大きいステンレスのガイドパイプ内で上下にスライドさせる方式とした。円柱状ロッドの回転を防止するため、ガイドパイプに縦にスリットを入れ、このスリットを通してテフロンロッドにピンを固定した。ガイドパイプを接着力計測装置の上側に固定し、水平方向のX軸・Y軸の移動に加えて傾斜を自在に微調整できる様にした。釣り糸の巻き取りはモーターを使用し、回転数で引き上げ速度を調整した。製作した装置の外観を図2に示す。この装置を用いてガラス板の間に純水を展開して接着力を測定したところ、値の再現性が十分ではないものの、ガラス板の親水性を向上させると接着力が増大し、ラプラス式に従った特性が得られた。ただし、はじめに製作した簡易装置と比較して接着力が低下する傾向があった。



図2 接着力測定装置

これは、ガラス板の接合面を完璧に水平にすることができなかつた事が原因と考えられる。また、ガラス板の接合面に埃が入り込むと接着力を低下させ得るため、実験台に設置できる簡易的なクリーンブースを設置し、この中で操作を行う事とした。

(2)液体を展開した固体間の接着力の把握

ガラス表面の親水化処理について、強酸(王水)による化学処理、強塩基(水酸化カリウム)による化学処理、プラズマ照射による物理処理を行った表面の水の接触角を測定して比較したところ、強塩基による化学処理で水の接触角が 5° 程度となり、高い親水性が得られることがわかった。更に、ガラスの表面に酸化チタンを形成し、熱処理によって酸化チタンをアナターゼ型結晶とし、紫外線照射によって超親水性表面を得る手法について検討を進めた。酸化チタンの成膜方法について、ゾル・ゲル法と電子ビーム蒸着法の2つの手法で検討を進めて親水性を比較した結果、電子ビーム蒸着法で形成した酸化チタン膜で水の接触角がほぼ 0° となり、超親水性の表面が得られることが確認された。この表面に純水を展開して接着力を測定したところ、簡易型装置で計測された最大値の約 $300\text{g}/\text{cm}^2$ に到達することができなかつた。これは、平滑なガラス板での検討結果と同様に接合界面が完全に水平ではなく、接合界面にわずかながら隙間が生じてしまったためと考えられる。

(3)多孔体を用いた液体の浸み出し

多孔質体から液体を浸み出させ、固体界面を接着させる実験は、孔径 0.3mm 、孔ピッチ 0.6mm 、厚さ 0.5mm のステンレス多孔体(パンチングメタル、図3)を用いて検討を進めた。ステンレス多孔体の表面に高低差 30 ミクロン程度の圧延による凹凸があったため、機械研磨によって表面の粗さを取り除いた。高さ約 5mm の金属パイプをステンレス多孔体の裏側に接着し、パイプから純水を送り込む方法をとった。実体顕微鏡下でシリンジポンプから純水を送液したところ、多孔体の表面に純水を供給できたが、送液量と同量の吸い戻し操作では、表面に供給した純水全てを多孔体に吸い戻すことができなかった。これは、加圧による水の展開に対して、減圧による水の吸い戻しのロスが大きくなり、シリンジポンプの可動域を使い切ってしまったためである。浸み出し用のシリンジポンプと吸い戻し用のシリンジポンプを使い分ける事で、浸み出した純水を吸い戻すことができた。多孔体の表面に酸化チタンを電子ビーム蒸着し、紫外線照射によって超親水性とし、表面にガラスを設置した状態でも液体の浸み出しと吸い戻しの動作を確認することができた。最後に、上側の被着材をガラス板とし、多孔体から純水を浸み出させることで接着力が生じることを確認することができた。

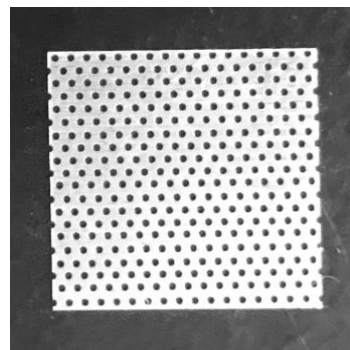


図3 ステンレスの多孔体

5. 主な発表論文等

6. 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。