

バイオミメティック接合技術

細田 奈麻絵*

1. はじめに

消費型社会が引き起こした環境破壊が地球規模で深刻な問題となっている現在、ものづくりを根本から考え直す事が求められている。ものづくりの要素技術である接合技術もその例外ではない。プロダクトやマテリアルのリサイクルにとって分離・解体技術はコア技術であるものの、従来の接合技術は高い接合部の信頼性を得る事のみ視点に置かれていたため分離が困難であり、分離が容易な接合技術の開発は循環型社会の構築に今後不可欠である。環境破壊を引き起こした人工の技術に比べ、循環型システムによって支えられている自然界には優れたしくみを見る事ができる。自然の創り出したデザインは、循環性・高効率(省エネルギー)・機能性に優れており、ものづくりのプロセスは常温で行われ経済的である。バイオミメティクス(生態模倣技術)はこのような自然の優れたしくみを学び新技術の基礎としてそのアイデアを取り入れるものである。

我々が注目しているのは自然界の可逆的な接合のアイデアである。その一つはあらゆる表面を垂直にも逆さまにも歩行できるように進化させた小動物の脚の可逆的な接着性であり、もう一つは、秋になると自発的に葉を落とす落葉のしくみである。本稿では、このような可逆性に着目したバイオミメティック接合の研究の取り組みについて紹介したい。

2. 小動物の脚の可逆的な接着性

ハムシ、ハエ、ヤモリ、クモなどの小動物は物質表面を垂直にも逆さまにも歩いて移動する事ができる。窓ガラスのように平で爪が使えないような状況であっても歩き回る事が可

能であるが、これは足の裏に接着性に優れた毛があるためである。接着性に優れた毛のタイプは大きく分けると、1)分泌液を伴うウエットタイプと2)ドライタイプに分ける事ができる。ウエットタイプでは、毛管現象、分泌液の粘性、マイクロ吸盤などにより支配され、ドライタイプでは、摩擦や分子間力(ファンデルワールス力)により支配されていると考えられている。図1に常温直接接合の人工的な技術と生物(ヤモリ)の接着との比較を示した。

一般に、接合強度を上げるには接触する部分の密着性を高くし、2固体間の結合力を上げ、界面に発生する応力を小さくする必要がある。材料工学的な常温直接接合では、密着性を高くするため、接触させる前に両表面を厳密に平坦にする必要がある。例えばアルミニウムをサファイアに接触させる場合は10 nm以下に粗さを制御する必要があり⁽⁴⁾、高い研磨技術が要求される。これに対し、生命がとった密着性への戦略は全く異なっている。密着性を向上させるため、接触部分を分割化し、変形し易いように細長く薄い毛状の表面を創っている。工業製品のように環境が整っていない自然の表面は、歩行表面は粗さがあり、また塵や花粉その他の微粒子によって汚れている。このような表面上でも接着できる工夫として取った対策が上述の接触面の分割化、細長く薄い毛状の構造である。接触部を微分化する事で、汚れにより生じた非接触部分による剥離が最小限に食い止められ、細長く薄い毛状の構造は固い素材でありながら表面の凹凸に柔軟に変形する事を可能にしている。図2にハムシの脚の裏に生えている接着性剛毛が凹凸のある植物表面のレプリカと接している像を示した。ハムシの剛毛のサイズは凹凸より小さく、表面と良く密着しているのが確認できる。また、細長い毛の構造が接触部分の形状にそって密着を可能にしている様子も見られる⁽⁵⁾。接着力を向上させる方法では、材料工学的な方法では

* 独立行政法人 物質・材料研究機構ナノ物質ラボ グループリーダー(〒305-0044 つくば市並木1-1)

Bio-inspired Joining Technology; Naoe Hosoda (Interconnect Design Group, Advanced Nano Materials Laboratory, National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: Biomimetics, adhesion, bonding, separation, leaf fall, Gecko

2009年2月17日受理

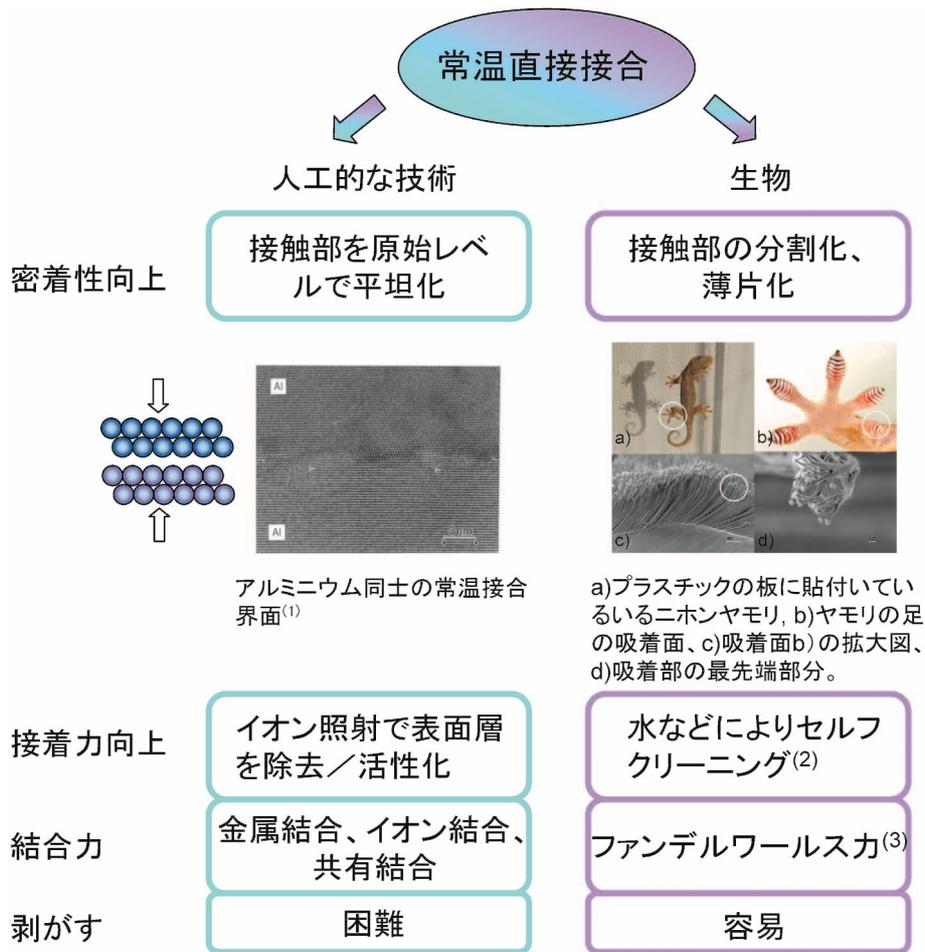


図1 人工的な技術による常温直接接合と生物(ヤモリ)に見られる常温直接接合の比較。

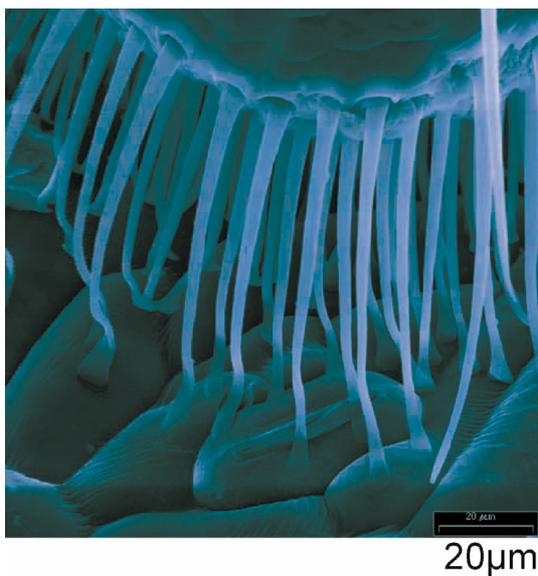
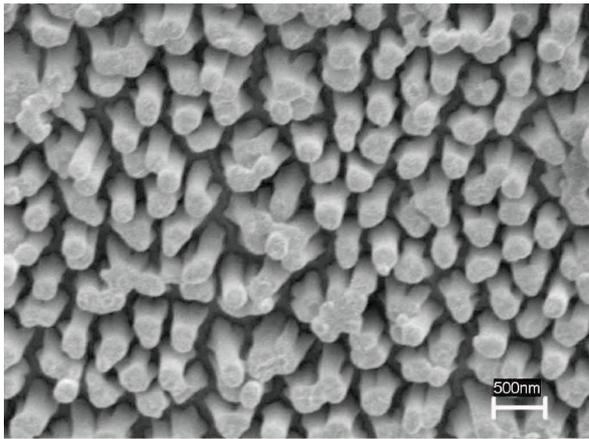


図2 葉のレプリカ表面上に接触するハムシの脚先端の剛毛。

イオン照射などにより表面層を除去/活性化している⁽⁶⁾。ヤモリの場合は、セルフクリーニングを行っている⁽²⁾。

結合力は、材料工学的に直接接合した場合は材料の組み合わせによって金属間結合、イオン結合、共有結合など強力な強度が得られるが、ヤモリの場合はファンデルワールス力により吸着している⁽³⁾。また、このような強度の違いは接合部の可逆性に大きく影響し、ヤモリの毛の接着は66 ms⁽⁷⁾で剥離できるのに反し、材料工学的に接合したものは剥がすのが困難である。ヤモリの可逆的に優れた接着は、環境調和型の接着として興味深く、これまで毛状の構造が提案されている。ヤモリタイプの接着を最初に発表したのはマンチェスター大学の Geim らで柱状のプラスチックを表面上に形成したものであった⁽⁸⁾。Geim らのヤモリのりは接着強度が弱く長時間の接着力を保持するのが困難、さらに製造工程にかかる時間が長い、コストが高い等の問題があった。その後、微細な毛状構造はカーボンナノチューブ⁽⁹⁾や、高分子ナノロッド⁽¹⁰⁾、ポリジメチルシロキサン(PDMS)⁽¹¹⁾、メタクリレート低粘性樹脂⁽¹²⁾(図3)などの材料でも提案されている。これまでに提案されている毛の形は柱状のことが多い。

ヤモリタイプの毛の構造は次のような項目を考慮する必要がある⁽¹³⁾,



500nm

図3 メタクリル低粘性樹脂で作製した毛状表面⁽¹¹⁾.

1. 毛のアスペクト比
2. 毛の密度
3. 基盤に対する毛の傾斜角
4. 根元から先端方向へ毛の固さの傾斜を作る。(階層構造, 材質変化)
5. 最先端の接触面の形状
6. 動かす方向に対して非対称形状
7. 相互付着防止

これら, すべての項目についてヤモリは設計し, 常温で製造しているが, 人工的に作ることはまだ困難である. 項目4に対応する薄い層を先端に形成したマッシュルーム型の毛構造は繰り返しの接着性もあり, 汚れた場合でも水洗いにより吸着性が復帰する事が報告されている⁽¹⁴⁾. ヤモリタイプの接着は, 可逆性接着に期待されているが, 高い剥離強度を期待する事は接合のメカニズムから考えても限界がある. 毛状構造にイガいの接着剤を組み合わせたものでも最高で120 nN(1ピラー当り)である⁽¹⁵⁾. しかしながら, ヤモリタイプの接着は垂直な表面を移動するロボットの歩行や繰り返し性の高い接着部などへの導入には魅力的な課題である.

3. 落葉型の可逆的接合

材料工学的な手法で得られる高い剥離強度を持ちつつ, 簡単に壊す良いアイデアは, 落葉樹の葉を落とすしくみから学ぶ事ができる. 落葉樹は葉柄と枝の間に葉を落とすための離層を形成している. この離層は, 水不足やエチレンガスの増加などによりオーキシン濃度が変化し, これが合図となり離層が成長し, 最終的に葉が落ちる. 離層の働きを持ったしくみを接合部に入れる事で, 高い剥離強度と自発的な剥離を実現する事ができる(図4).

図5a), b)はヤマザクラの葉柄と茎の部分で, 図5c)は葉柄と茎の接続部分の断面を撮影したものである. c)の中央部分に見える層が離層である. 植物は枝から芽を出す時からこのように分離するしくみを設計している. 我々が取り組んで



図4 落葉の離層の仕組みと落葉型の可逆的接合の模式図.

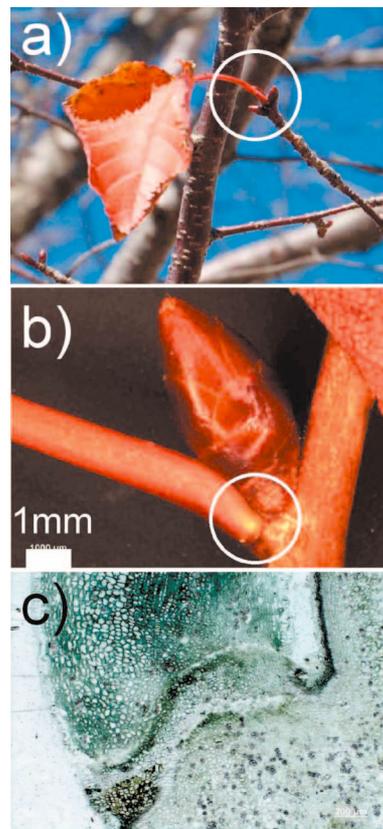


図5 a)ヤマザクラの葉と枝. b)葉柄と枝の接続部の拡大図. c)葉柄と茎の接続部の断面写真. 中央に見える層が離層.

いる落葉をモデルにした接合法は, (1)接合部に離層形成, (2)環境の変化により離層が成長, (3)自発的分離の経路を経る特徴を持っている. 離層はある条件になると接続部の強度を弱めるような働きをする材料を選ぶ必要がある. 材料の選択条件として, a)接合界面を加熱すると脆性の層を成長させる材料, b)水素雰囲気にと微粉化する材料, c)液体金属と接すると脆化ないしは溶解する材料の3通りの脆化する材料を選定した. a)の例にはアルミニウムとステンレス⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾, b)の例には水素吸蔵合金の一つであるLa-Ni系合金⁽¹⁸⁾, c)の例には錫ベースのはんだやアルミニウムを選定した⁽¹⁹⁾. 図6に離層のタイプと剥がれるしくみ及び実施例を示した.

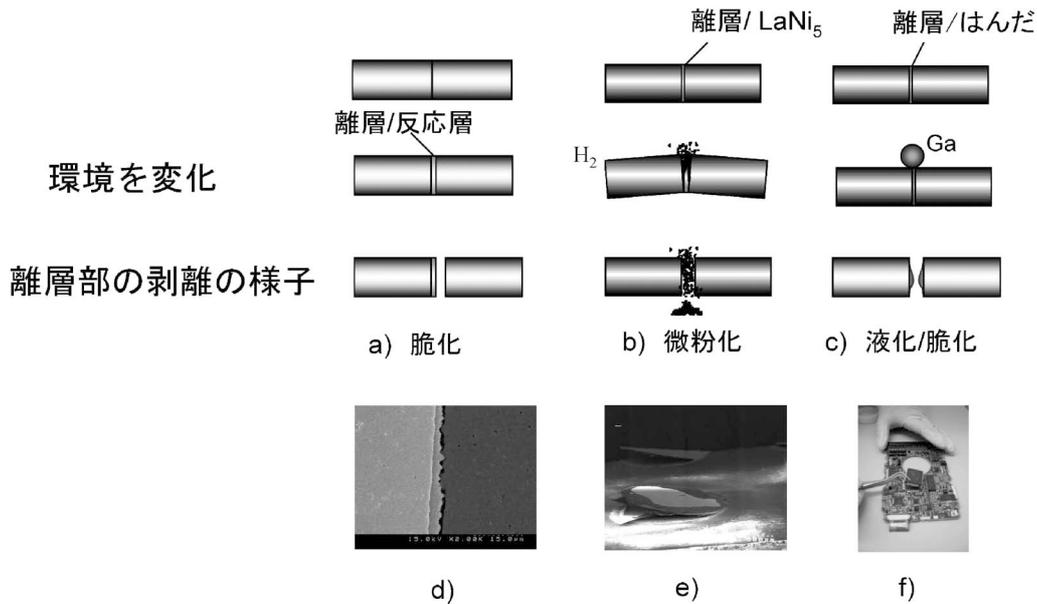


図6 離層のタイプと剥がれるしくみ. a)は加熱により脆い反応層を成長させるタイプ, b)は水素と反応して微粉化するタイプ, c)は液体金属と接すると融解ないしは脆化するタイプの離層の例. d)アルミニウムとステンレス鋼が離層ぶで剥がれる様子. e)多層膜(ガラスエポキシ基板上に銅・離層(LaNi₅)/銅/はんだ)構造を作製し, 水素雰囲気中で離層部が剥離した様子. f)はんだ(離層)にガリウムを塗り液化/脆化により使用済みプリント回路からチップを取り出しているところ.

アルミニウムとステンレスは高温で接合するとAl-Fe系の脆い反応層が形成される事が知られているが, ここでは, 反応層が形成されない常温で直接接合し, その後550°Cで加熱する事で離層の働きをする層を形成させている. 図6d)は加熱後に成長した離層の写真である. 離層形成後の剥離は, 中央部に見えるAl-Fe系合金層とアルミニウムの界面で生じる事が確認されており, 剥離現象は真空中あるいは不活性ガス中で加熱した時のみ発生する事が確認されている. 2番目の水素と反応すると微粉化するLa-Ni系合金を離層として界面に挿入した場合は, 非加熱で分解する事ができる. 図6e)に多層構造の一部に離層を挿入した例を示している. この多層膜は, ガラスエポキシ基板上に銅・離層(LaNi₅)・銅・はんだの構造になっており, 基板ごと水素雰囲気に曝すと写真の様に離層部分で剥離しているのが分かる. 3番目の離層の例には, 液体ガリウムと接すると融けたり脆化したりする材料を用いている. ガリウムは29.8°Cで液体になるため特殊な設備を必要としない利点がある. 錫は, ガリウムと接すると融ける性質があり, 錫がベースのはんだは常温で接するだけで簡単に融かす事ができる. この性質は, はんだが多用されているエレクトロニクス実装にとって利用しやすく, チップのリサイクルやリペアなどへの適用が期待できる. 図6f)は, 使用済みのエレクトロニクスのプリント回路上のチップのはんだ付け部分にガリウムを塗り, 非加熱で取り外している写真である. ガリウムではんだを融かした後, ガリウムを拭き取ると再びはんだで接合する事ができることも確認している⁽²⁰⁾. 図7はガリウムを拭き取った後で, 再びはんだ付けした銅の棒状試料の接合界面である. 以上の様に, 冶金的な方法で直接接合した界面であっても離層の役割となる

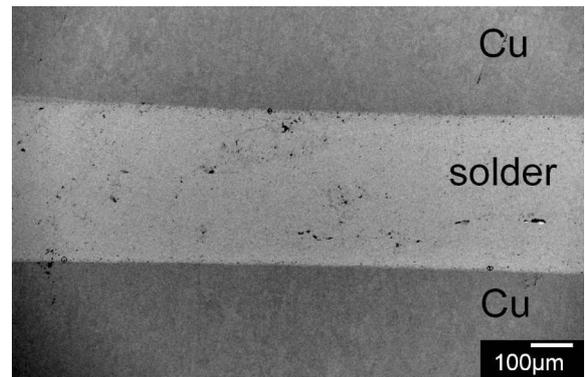


図7 ガリウムで剥離後, 界面からガリウムを拭き取り, 銅同士をはんだ(Sn-3.0 mass% Ag-0.5 mass% Cu)で再接合した界面⁽¹⁹⁾.

層を挿入する事で容易に取り外す事が可能になることが実証されている.

材料の破壊・脆化現象はこれまで負の要素として考えられて来たがこれを積極的に利用する事で, 壊して利用するリサイクル技術の可能性を広げる事になる. 壊す事が容易にできる接合技術の進歩は, これまでネジやスナップフィットなどの機械的な締結の適用に偏っていた易解体性設計の自由度も広げ新しい発想の環境調和型製品開発へ貢献することが期待される.

4. ま と め

自然界に存在する生物の接合や分離の現象は, 近年の観察

