特集

ナノ接合・分離プロセス

生物を模倣したナノヘア構造による可逆接合*

Jose Berengueres**, 高橋 邦夫**

A Reversible Joining Process by Bio-mimicking Nano-hair Structure*

by Jose BERENGUERES** and TAKAHASHI Kunio**

キーワード 凝着, コンプライアンス, 剛性, 毛構造, 表面粗さ, 把持, 脱離, メカニズム

1. 緒言

近年, 産業がグローバル化し, 製造プロセスが地球規模の境界条件に応じて最適化を目指し, めまぐるしく変遷を繰り返している。その中で, 持続可能性 (sustainability) を考慮した製造プロセスのデザインは今後ますます重要となる。製造プロセス全体は個々の要素プロセスから成るが, 製造プロセス全体の中でも多くの割合を占める接合プロセスを可逆化する意義は極めて大きい。現在までにいくつかのプロセスが提案されているが, それらの殆どは厳密な可逆過程では無い。持続可能社会実現のためには, 省エネルギーや物質循環とともに全体的なシステムとして製造プロセスをデザインする必要がある。要素プロセスにおける1選択肢として, 厳密な可逆接合プロセスを用意できれば, それは未来の産業に対する大きな礎となる。

厳密な可逆性を実現するために生物の使用機構を理解し模倣することは1つの有望な手段である。昆虫やヤモリが微小毛構造による凝着力を利用して天井を歩くことは古くから知られており, Walker らが詳しいレビューを書いている¹⁾。Autumn らは MEMS 技術を利用した力測定系で実際にヤモリの凝着力を計測している²⁾。この仕事がきっかけとなってヤモリの微小毛構造が脚光を浴びはじめた。Geim³⁾や Sitti⁴⁾らはヤモリの微小毛構造を模倣したテープ (Gecko Tape) を実際に試作しているが, それらは殆ど粘着テープと同様の機能しか有していない。粘着テープを用いて天井を素早く歩くことは難しい。この事実から容易に想像できるように, ヤモリの素早い歩行においては把持機構だけでなく脱離機構を理解することが重要である。Sitti⁴⁾らは可能性のある脱離機構を提案

したがそれは正しいものではなかった。正しい脱離機構は著者らによって初めて明らかにされた^{5, 6)}。それは把持機構によって発生する力の大きさを予測できる凝着理論⁷⁾に基づく定量的な検討によって初めて可能だったのである。

筆者らは生物の利用するナノヘア構造による把持機構および脱利機構を利用した厳密な可逆接合の可能性について検討してきたので解説する。

2. 把持力発生のメカニズムと理想強度

ヤモリの指表面に観察される微小毛構造を Fig. 1 に示す。微小毛構造は Seta と呼ばれる $100\mu\text{m}$ 程度の毛の先端に無数の Spatula と呼ばれる $10\mu\text{m}$ 程度の毛が生えてい

Fig. 1 Schematic illustrations of the micro- and nano-hair structure of Gecko fingers

*原稿受付 平成18年1月27日

**正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

る2段階の毛構造を呈している。各々の毛構造は傾斜梁なので、Fig.1(b)に示すバネと凝着部からなるユニットの集合体とモデル化することができる。バネ定数は k で凝着部の曲率半径は R としている。このユニットに対する凝着過程は著者らによって初めて理論的に検討されており^{7,8)}、そのフォースカーブ（力と変位の関係）はFig.2のようになる。ここで、力 F と変位 Z_i は、各々、

$$f_T = \pi \Delta \gamma R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$h_T = \left\{ \frac{\pi^2 (1-\nu^2)^2 \Delta \gamma^2 R}{2^5 E^2} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を用いて厳密に無次元化されている。 $\Delta \gamma$ は表面張力と界面張力を用いて $\Delta \gamma = \gamma_{s1} + \gamma_{s2} - \gamma_i$ と表される凝着仕事であり、通常物質の組み合わせでは $0.01 \sim 1.0$ (J/m²)程度の値をとることが理論的検討⁹⁾および精密な条件における実験的検討¹⁰⁾より明らかになっている。 E および γ は弾性定数であり、 $\Delta \gamma$ 、 E 、および ν はいずれも物性値である。この図からわかる様に、1つのユニットが支えることのできる力は弾性定数やバネのコンプライアンス ($1/k$)に依存せず、厳密に

$$f_{\text{adhesion}} = \frac{3}{2} \pi \Delta \gamma R \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。表面間の長距離相互作用が働いたとしてもこれは良い近似となる事がわかっている⁸⁾。バネのコンプライアンスが大きくなるとフォースカーブが傾くことを定量的に示している。

凝着部を半径 R の球と近似し、このユニットをFig.3(a)(b)に示すように配置すると、厳密に平らな表面に対する接合応力 σ_{adhesion} は

$$\sigma_{\text{adhesion}} = \frac{3}{2} \pi \Delta \gamma R / (2R)^2 = \frac{3}{8} \pi \Delta \gamma \frac{1}{R} \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表され、接触部の曲率半径の逆数に比例する事がわかる。すなわち、小さい毛構造ほど大きな接合応力を発生しうる事を明確に示している。Fig.3に接合応力を R の

Fig. 2 Force curve for the single spring-sphere unit.

関数としてプロットしている。ナノサイズの毛に対しては真空チャックよりも大きな把持力（接合力）が発生することが解る。また R が原子サイズ程度になると接合力は物質の理想強度程度となる点は用いた凝着理論が一種のグリフィス理論である事と関連している。蛇足ではあるが、現在のヤモリがナノヘア構造を有するのは、進化の過程でより大きな把持力を得た種が生き残ったためと推察される。

3. 強度におよぼす表面粗さの影響

実際の表面にはなんらかの凹凸があり、原子レベルで平らな接合面を用意することは現時点では殆ど不可能である。先述の凝着理論を用いれば、強度におよぼす表面粗さの影響を定量的に明らかにする事が出来る。Fig.4(a)に粗さの有る表面に対する凝着のモデルを示す。Fig.4(b)の表面粗さを表す量としてFig.4(c)に示す表面の高さ分布確率密度関数 $p_{h,d}(z)$ がある。この関数は確率であるので

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_{h,d}(z) dz = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

を満たすように規格化されている。

厳密に表面粗さが無い場合は式(4)の接合応力が発生する。Fig.5(a)に示すAの様に、粗さ分布関数の幅が十分に狭いとき、つまり粗さがバネのコンプライアンスに対して十分に小さいときは接合応力の減少は殆ど無い。

Fig. 3 Schematic illustrations of the multi-hair structure which adheres to the exactly flat surface; (a) and (b). Ideal strength of the joint of the multi-hair structure as a function of the contact radius. The ideal strength is larger than the vacuum suction.

しかし, Fig. 5(a) に示す B の様に, 粗さ分布関数の幅が大きいときは, 表面に凝着しているユニットと凝着していないユニットが発生することになるので接合力が減少する. 一方, Fig. 5(b) に示すように, 無視できない粗さ B が存在しても, それに対してバネのコンプライアンスが十分に大きければ, 表面粗さによる接合力の低下はコンプライアンスに吸収される. つまり, 粗さの有る表面に対して多毛構造が凝着する際のフォースカーブは, 1 つのユニットに対するフォースカーブと高さ分布確率密度関数の重畳積分で表す事ができる. すなわち

$$f_{\text{multi-hair}} = \int_{-\infty}^{\infty} p_{\text{h.d.}}(z) f_{\text{single-hair}}(z) dz \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表すことができる. 式 (6) を用いて多毛構造に対するフォースカーブを計算する事ができる. そのフォースカ

Fig. 4 Schematic illustrations of the multi-hair contact to the rough surface (a) comparing with the surface profile and the height distribution probability function.

Fig. 5 Schematic illustrations of the effect of the compliance of the spring on the adhesion of the multi-hair structure onto the rough surface

ーブの最小値から接合応力すなわち接合部の強度を計算できる.

そこで Fig. 6 の図中に示す矩形の高さ分布関数を仮定した場合の強度を高さ分布関数の幅 $\tilde{W}_p$ の関数として具体的にプロットしたものが Fig. 6 である. 表面粗さ $\tilde{W}_p = 0$ の極限において, 接合部の強度は理想値に漸近するが, 表面粗さが増加するとその強度が減少することがわかる. また, その減少の程度はコンプライアンス $1/k$ が大きくほど小さくできることがわかる.

ヤモリの微小毛が指表面に対し傾いているが, これは大きなコンプライアンスを発生させるために有利な構造である. Geim³⁾や Sitti⁴⁾らの試作した模倣構造では, 微小毛が指表面に対して垂直となっており, その為コンプライアンスが小さい. 微小毛を支える根の部分が堅い場合は粗さのある表面に凝着させることが難しかった為, 彼らは Tape 状の構造を選択したと予想される. しかし, 垂直な微小毛でもコンプライアンスはゼロでは無いので, 我々の理論に当てはめて考察すれば, 把持できる限界の表面粗さを予測することができる.

蛇足ではあるが, ヤモリは傾斜毛構造による大きなコンプライアンスのために粗い表面を把持することが可能としている. 彼らは長い進化の過程でそのような構造を手に入れたと予想される.

4. 脱離のメカニズム

ヤモリ等の生物が素早く天井を歩くための脱離機構として Sitti⁴⁾らが提案したモデルは正しいものではなかった. 正しい脱離機構は著者らによって初めて明らかにされている^{5, 6)}. ヤモリが天井にしがみついている状況を想像して頂きたい. Fig. 7(a) に示すように傾斜毛構造 (Seta) に垂直荷重 F_n が加わる. Seta の先端には無数の Spatula がついており大きな凝着力を発生させている. Seta 先端の凝着部の応力分布は Fig. 7(b) の σ_n の様になっている. F_n が大きくなると応力分布 σ_n の左端が部分的に限界値を超えて脱離が生じる. その際, F_n に垂直な方向に力 F_t を加えると応力分布は σ_{n+t} にしめす様により平らになり, より大きい荷重に耐えられるようになる. 負の F_t を加えると

Fig. 6 Adhesion force as the function of the surface roughness assuming the rectangular height distribution function.

Fig. 7 Mechanism of Geckos to control the adhesion force (a, b) and required hair structure to mimicking the exactly reversible joining process (c)

Fig. 8 Schematic illustration of the exactly reversible joint design

逆に応力分布がより急峻となり、容易に脱離が起こるようになる。すなわち、ヤモリは天井からぶら下がる際には正の適切な F_t を加えることで最大の凝着力を発生させ、負の F_t を加えることにより速やかに脱離を起こしているのである。

事実、ヤモリが足を凝着面から離すときは peeling motion と呼ばれる独特の動きをしている。つまり指を負の方向に動かしているのである。Hansen らはこれを毛構造のクリーニングの為の動作だと説明している¹⁰⁾が、著者らは足を素早く脱離させる為の動作であると理解するのが自然であると主張している^{5, 9)}。さらに、ヤモリの指は親指と小指が正反対の方向に向いており、彼らは20本の指を絶えず全方向をカバーするように配置する傾向がある。これは正負方向の F_t によって凝着力を制御する上で必須の特性だったのである。さらにヤモリの毛の曲率は少ない力で脱離する為に適している。この湾曲毛構造も長い進化の過程で手にれたものである事が想像される。

5. 厳密に可逆な接合プロセスの可能性

この機構を模倣するにはヤモリと全く同じ2段階毛構造を作る必要は無い。Fig. 8に示す様に“はり”と平らな凝着部があれば、同様の機構を実現できる。さらにその毛構造を集めてFig. 9に示すような構造を作ることができれば、厳密に可逆な接合プロセスを実現できる可能性が有る。その際、十分に大きな接合応力を発生させるには毛構造の微小化が重要になり (Fig. 3参照)、表面粗さのある物体に接合させるには毛構造のコンプライアンスを設計する必要がある (Fig. 6参照)。また、脱離の容易さを調整するには毛構造に適切な曲率を持たせる必要がある。

一方、全く別な観点からこの機構を眺めると、Fig. 8の

接合界面の構造は、ある極限で粘着材と一致する。粘着材はFig. 8の毛同士が独立で無い構造と見なせるからである。PowerStrip等の製品に柔らかい高分子が用いられる理由は、毛構造で大きなコンプライアンスを達成する事と等しかったのである。著者らは既に、弾性体が完全密着する為の限界を理論的に明らかにしている¹²⁾が、これは全ての毛が凝着する条件に対応している。

これらの毛機構もしくは粘着材構造のメカニズムを理解する事により、厳密に可逆な接合プロセスを要求性能に応じて設計する事ができる。毛構造をマイクロサイズにしたり凝着仕事 (表面張力) の大きい粘着材を選択する事で、真空吸着よりも強い接合部が得られる。毛構造や粘着材のコンプライアンスを適切に選択する事で、粗さのある表面に対応する事ができる。また、コンプライアンス (剛性) を変化できる高分子を用いて、把持と脱離をコントロールできる粘着材を設計する事も出来ると考えられる。

6. 結 論

ヤモリ等の生物が天井を素早く歩く際に用いる把持機構と脱離機構を参考にし、厳密に可逆な接合プロセスの可能性を解説した。多毛構造による可逆接合体を設計する際、十分に大きな接合応力を発生させるには毛構造の微小化が重要になり (Fig. 3参照)、表面粗さのある物体に接合させるには毛構造のコンプライアンスを設計する必要がある (Fig. 6参照)。また、脱離の容易さを調整するには毛構造曲率を適切に選択する必要がある。この観点は粘着材に対しても拡張可能で、近年研究が盛んになってきた剛性を変化しうる高分子等を用いて粘着材の機能を高める事ができる。これらの機構は厳密に可逆であるのでマニピュレーションにも適応が可能である。

参考文献

- 1) Walker, G. Adhesion to smooth surfaces by insects - a review, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 13, pp.3-7, 1993.
- 2) Autumn, K. Liang, Y.A. Hsieh, S.T. Zesch, W. Chan W.P. et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature* 405, pp.681-685, 2000.
- 3) Geim, A.K. Dubonos, S.V. Grigorieva, I.V. Novoselov, K.S. Zhukov, A.A. et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair, *Nature materials* 2, pp.461-463, 2003.
- 4) Sitti, M. and Fearing, R.S. Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures for future wall-climbing robots, *Proceedings of IEEE, International Conf. on Robotics and Automation* 1, pp.1164-1170, 2003.
- 5) Takahashi, K. Effect of surface roughness on adhesion of multi-hair structure, *Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Effects and Contact Mechanics VII* (WIT press), pp.141-150, 2005.
- 6) Takahashi, K. et.al., "Geckos' foot hair structure and their ability to hang from rough surfaces and move quickly", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, to be published (accepted).
- 7) Takahashi, K. Mizuno, R. and Onzawa, T. Influence of the stiffness of the measurement system on the elastic adhesion-al contact, *Journal of Adhesion Science and Technology* 9, pp.1451-1464, 1995.
- 8) Takahashi, K. and Onzawa, T. Effect of the stiffness of the measurement system on adhesion force curves in the elastic continuum limit, *Journal of Adhesion Science and Technology* 10, pp.17-31, 1996.
- 9) Takahashi, K. and Onzawa, T. A simple formula for surface energy by a shifted step-potential approximation, *Physical Review B* 48, pp.5689-5691, 1993.
- 10) Takahashi, K. Iiyama, T. Katoh, N. and Onzawa, T. Instrument for measurement of the adhesion force in ultra-high vacuum surface analysis apparatus, *Journal of Vacuum Science and Technology A* 12, pp.889-891, 1994.
- 11) Hansen, W.R. and Autumn, K. Evidence for self-cleaning in gecko setae, *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 102, pp.385-389, 2005.
- 12) Takahashi, K. and Onzawa, T., Effect of surface roughness on the heatless and pressureless bonding for low-energy precise processing, *Journal of High Pressure Institute of Japan*, 35, pp.159-164, 1997.