

2種類の生物からヒントを得たクラッチテクスチャ技術 着想・設計・量産工法まで

松尾 道憲*

抄 録

ジヤトコでは、クラッチの本質課題であるスティックスリップに対して、2匹の生物からヒントを得て、従来の摩擦材でなく相手面にテクスチャ加工を施すことで、クラッチの摩擦安定性・長寿命化を実現した。着想、設計、量産を視野に入れた工法などについて説明する。

1. はじめに

人が住める地球環境を維持するために、世の中では従来以上に持続可能性のあるものが求められている。自動車業界においてもその責任は大きく、カーボンニュートラルに限らず、車のライフ延長など、あらゆる分野で改革が必要である。

現在、イノベーションの創出と基盤技術開発に従事し、従来にはない技術の発想を求められる立場にあり、その中で生物模倣に着目した。

生物は、地球が誕生してから、今の形にたどり着くまでに長い歴史の上で進化を遂げてきた。そこから学び、活かすということは、持続可能性を学びながらも、イノベーションを探索できる切り口だと考えており、今回開発した技術においても、2種類の生物からヒントを得た。

キリギリスとカエルの足に見られる六角形は、スティックスリップ抑制やグリップ向上の機能があるとされていたため、クラッチの構成部品である鉄プレートに対して、微細な六角形の溝を入れるテクスチャ技術を開発した。

結果として、クラッチの「大幅な摩擦特性の改善」という自然界からの恩恵を受けることが出来た。着想から量産工法までの内容を紹介する。

2. 着想、適用部位の選定

2.1 着想

従来にはない技術の発想を求めて、自動車業界以外のヒントに着目し、自然界の情報をリサーチした。

人間が考える範疇を大きく超えたものを探すには、長い歴史が積み重ねてきた、生物の知恵を借りることが最適だと考えた。

自然界の中でも、特に昆虫を中心に情報調査を行った。昆虫は、外殻がロボットのように感じられ、複雑ながらシンプルさを兼ね備えているため、工業製品へのアイデアが出しやすく、多くの事を学べると感じていた。

昆虫類や、それを対象にしている技術などを調べていくと、生物模倣というジャンルがあり、アリの生態系を活かしたロボットや、ハエの脳、フナムシの足など、あらゆる分野で非常に面白い研究が進んでいることがわかり、その中にキリギリスの足裏について記事があった。

キリギリスの足の裏には、六角形のテクスチャがあり、スティックスリップを抑制するという期待値がある。シリコン材を使った摩擦の実験結果としては、スティックスリップがなくなり、スムーズな摩擦特性になる結果が示されていた (Fig. 1)⁽¹⁾⁽²⁾。

* イノベーション技術開発部

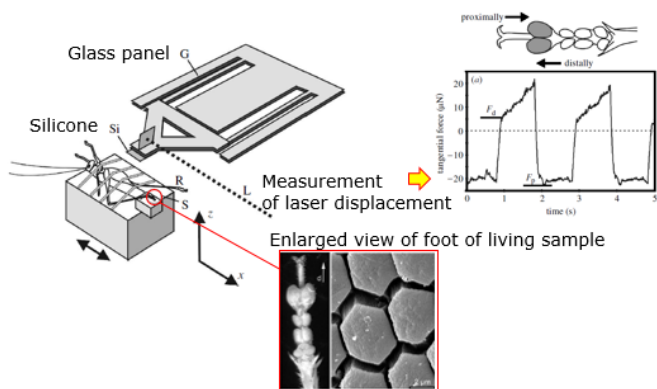


Fig. 1 Information extract for the bottom of katydid feet

さらに、生物の足裏についてリサーチをした。キリギリスに近い印象のあるバッタに着目すると、足に6角形模様がないようであった。バッタは飛んで逃げ、キリギリスは走って逃げる、といった違いがあることが分かった。

キリギリスと同じ、後ろ脚で蹴る印象のあるカエルに着目すると、足に6角形構造があり、医療の分野で研究がされていた。主にグリップ性向上機能について着目して書かれていた (Fig. 2)⁽³⁾。

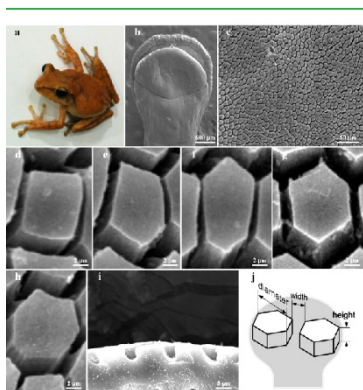


Fig. 2 Information extract for the bottom of frog feet

ここで注目した点は、「昆虫類」と「両性類」という異なる種族で、かつ、住む環境も違うであろう2匹が足の裏に6角形を有していること、各々着目されている機能が違う点であり、6角形が摩擦面に与える「良い効能」が複数あると考え、テクスチャを検討することとした。

2.2 適用部位

2.2.1 どの部品に適用するか？

我々の製品に活かすには、トランスミッションのどの部品にテクスチャを入れるかも、効果を発揮する確率を上げるために非常に重要になる。

トランスミッション内部には、軸やベルト・プーリ、ギヤ表面、クラッチなど、あらゆる場所に摩擦面が存在するが、6角形の持つ機能が欲しい場所としては、クラッチ部品が適当だと考えた (Fig. 3)。

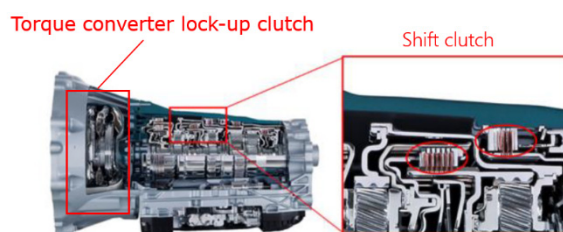


Fig. 3 Candidate parts for texture adaptation

何故クラッチがいいのか。クラッチはギヤ段を切り替えるタイミングで、締結・解放を繰り返す。締結時には徐々にクラッチに押しつけ力を加えながら係合させるが、その遷移中に滑り状態が存在する。滑り現象があると、摩擦部の自然現象であるスティックスリップが起きることがあり、スティックスリップはユーザに不快な振動を与えるという課題がある。

通常、クラッチの摩擦は設計コントロール下であり、スティックスリップの発生率は非常に少ないが、使用に伴う劣化によってスティックスリップが起きることがある。

キリギリスは自然界において、スティックスリップを抑制しているため、自社製品のスティックスリップ現象にも試す価値があると考えた。また、カエルで着目されているような、グリップ力の向上も併せて期待できる。

クラッチは摩擦で締結し、駆動力を伝達しているが、締結時にもエネルギーが必要である。グリップ力が上がるということは摩擦係数が上がることで、押しつけ力が下がることも期待できる。

2.2.2 クラッチ部品のどこに適用するか？

クラッチとしては、摩擦材と鉄プレートの2か所が適用先として考えられるが、今回は鉄プレート面を選択した。

従来の感覚では、鉄側へテクスチャを入れると、やすりのようになり、摩擦材のセルロース材等を摩滅させてしまう懸念があった。しかし、生物もセルロース性の葉の上で生活をしていると考え、その領域まで面圧を下げれば成り立つ可能性があると考えた (Fig. 4)。

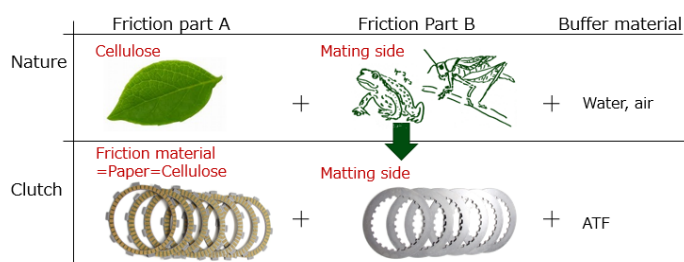


Fig. 4 Conceptual representations of adaptation locations

3. 設計

3.1 面圧を計算する

細かな寸法についてはフェルミ推定を用いて設計した。油中環境下や、鉄の剛性など、動物の生活環境と異なる点も多く、量産まで視野に入れると、全てを設計することは難しい。開発コンセプトとしては「地球上で生物が生活する面圧程度で使うこと」とした (Fig. 5)。

The aim was to use the texture at surface pressures below that at the bottom of the creatures' feet so as to be innocuous to the friction material paper.



Fig. 5 Representation of concept

インターネット上には、昆虫が好きな方のブログがあり、キリギリスの質量について、一部の情報を見つけることが出来た。キリギリスの精巣は1～13.8%を占め、重量は2.7～70.1mgとあり、そこから、体重を491.9mgとした。

キリギリスを研究する論文 (3) には足裏の画像データがあり、六角形の面積を計測し、 $1.67576 \times 10^{-11} \text{m}^2$ を仮置きし、1本の足のサイズを全長から割り出して、足1本の数を見積もった (Fig. 6)。

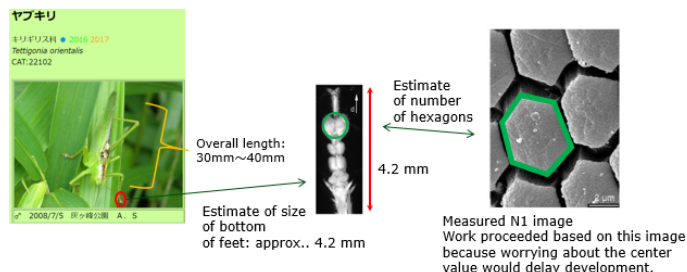


Fig. 6 Enlarged view of the bottom of katydid feet

次に、仕事をする六角形の総数を算出することにした。キリギリスの足は6本あるが、それは静的な状態であって、実際に移動する際は後ろの太い足2本に重心が集まるのでは？という仮定のもと、今回は後ろ足2本に集中する場合の足の面圧で計算をした。これらの情報から、足裏で体重を支える六角形は約7万個程度あると仮定し、指標となる六角形1つの面圧を決めた。

同様な検討をカエルでも行ったが、サイズ、面圧共に、オーダが近い結果となったため、キリギリスの計算結果を使った。

3.2 サイズ 自動車部品ヘリサイズ

クラッチへの適用に関しては、面圧が高いトルクコンバータ単板ロックアップクラッチの面圧をベースに検討を行い、上記のロックアップクラッチ設計に合わせて、生物の六角形を拡大し、一辺約120μmの六角形が導き出された。

3.3 溝幅、溝深さの設計

溝幅、溝深さに関しては幅50μm、深さ20μmとした。

これは写真からは計測できなかった為、油膜厚さと、油が流れ込める余裕度で仮決めをした。そして、試作及び量産工法を考慮し、コストなども参考に、総合的に決めた。

3.4 6角形の向き

カエルの足を研究する論文(5)では、6角形の向きについて、角を先に向けるか、辺を先に向けるかで液体の流れに差異が生じることが述べられていた。角を向けたものを Corner-Sliding(以下 CS)、辺を向けたものを Side-Sliding(以下 SS) と呼び、本稿でもその名称を使用する。

さらに、クラッチへ微細溝を適応することで、溝を流れる油によるミクロな冷却向上の効果も期待した。ただし、クラッチは回転部品であり、正6角形をそのまま配置すると、時計の12時、6時方向と、3時、9時方向で、6角形の向きが変わり、回転による影響(油と摩擦面の状態)が、部位ごとに異なる可能性があると考えた。そのため、6角形を放射上に角度を少しずつ変えて、回転方向に対して同じ向きになるように6角形を配置した(Fig. 7)。

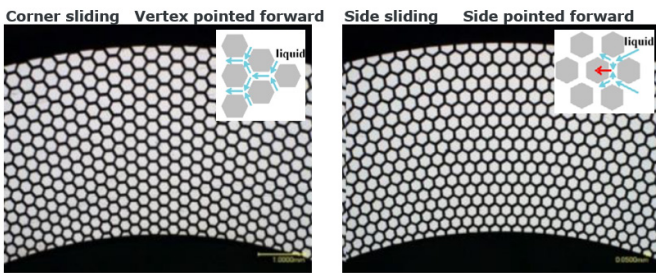


Fig. 7 Prototype test pieces directionally aligned
(Left: CS; right: SS)

4. 検証結果

4.1 試作

まず、フェムト秒レーザー技術を活用して最初の試作を試みた。

摩擦材を攻撃しないためには、HAZ (Heat-Affected Zone) による盛り上がりを抑えながら精密に加工する必要があるが、本工法を選択することにより、意図通りとなった(Fig. 8)。

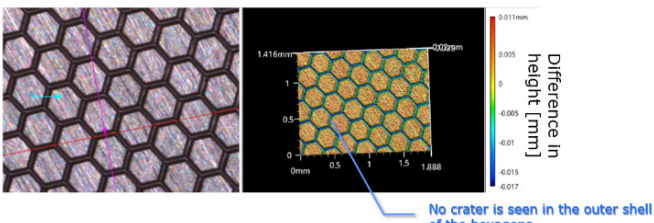


Fig. 8 Appearance of texture prototype

4.2.1 結果 μ 性能の改善効果

縦軸に μ 、横軸に滑り速度である差回転をとった性能を μ -V 特性という。右肩下がりとなる特性を負勾配といい、スティックスリップの要因となる。負勾配気味のクラッチを用意し、鉄側プレートをテクスチャ有り品に交換すると、特性が正勾配になることが確認できた。また、油温や面圧に対するロバスト性も向上し、負勾配が顕在化しやすい低温、低面圧状態でも性能が安定した。Fig. 9 に 40℃、0.2MPa での特性を示す。

なお、測定の結果 CS、SS 共に差が大きく出なかったため、本論文では CS を対象に述べる。

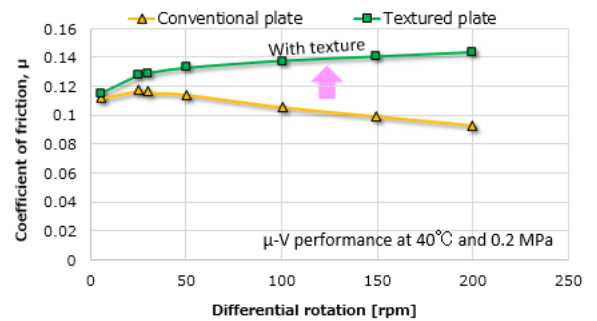


Fig. 9 μ -V performance

4.2.2 結果 μ の負勾配に至るまでの耐久寿命

クラッチの寿命を図る LVFA 試験機を使い、耐久試験を行った。供給する油温は 120℃で温調し、一定時間毎に 40℃、80℃、120℃で摩擦特性を測定したところ、 μ -V 特性が負勾配となり基準を下回るまでの時間が、従来品に対し 65% 伸び、特に低面圧の伸びが顕著であることがわかる(Fig. 10)。

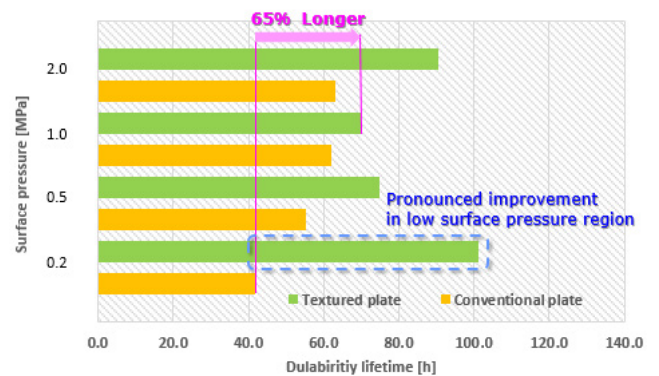


Fig. 10 Difference in service life due to the effect of the texture

4.2.3 考察

この結果は、従来鉄プレートに無かった機能や効果が付与されたことによるもので、

- A) 「六角形パッドが高差回転領域での μ を安定化」させ、
- B) 「溝が低温、低面圧域での、摩擦面の油膜適正化を助けることで μ を安定化」、
- C) さらに「溝の油が冷却性能を向上させた」

ことにより、摩擦特性の改善と、寿命が延びる効果が得られたと考える。

5. 量産にむけて

幅 50 μ m 深さ 20 μ m の溝を、それ以上のうねりを持つ鉄板に打つには相当な技術が必要である。自動車部品に採用するには、生産規模や生産速度も重要な要素である。

企画段階で、技術面と量産規模が両立可能なメーカを検討したところ、日本国内に精密プレス技術を持つ会社があった。試作検証後、そちらで試作型の作成を行い、プレスによるトライアルを開始した。プレス条件の見直し等、改善を繰り返しながら、現在開発を進めている。

量産工法でのトライアルがスムーズに進んだことで、単品試験に限らず、車載条件での制御確認、バラツキ検討など、前倒しでの検討が可能となった。

6. まとめ

- (1) 生物からヒントを得て、クラッチ摩擦特性の安定性が大幅に改善できた。特に「低温への適応」は、始動後に捨てる熱が少ない電気自動車への貢献が期待でき、「長寿命化」においても、自動車のロングライフ化など、車の新しい使われ方に貢献できると考える。

- (2) 生物を工業製品に適用する際には、モチーフ化することが難しいが、足裏自体が六角形というシンプルな構造であったため、フェルミ推定的な設計が可能で、意図した機能を得ることができた。

7. 参考文献

- (1) Stanislav Gorb, Biological microtribology: anisotropy in frictional forces of orthopteran attachment pads reflects the ultrastructure of a highly deformable material, Proceedings of the Royal Society B, pp. 1239-1244 (2000).
- (2) 下村政嗣：生物の多様性に学ぶ新世代 バイオミメティック材料技術の新潮流，科学技術動向，2010 年 5 月号 No.110, pp. 9-28 (2010)
- (3) Huaway Chan, Bioinspired Surface for Surgical Graspers Based on the Strong Wet Friction of Tree Frog Toe Pads, ASC APPLIED MATERIALS & INTERFACES, Volume 7, Issue 25, pp. 13983-13995 (2015).
- (4) Alexey Tsipenyuk, Use of biomimetic hexagonal surface texture in friction against lubricated skin, Journal of the Royal Society Interface, 11, pp. 1-6 (2014).
- (5) Fandong Meng, et al., Tree frog adhesion biomimetics: opportunities for the development of new, smart adhesives that adhere under wet conditions, PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY A, Volume 377, Issue 2150, p.17 (2019)
- (6) 松尾道憲：2 種類の生物からヒントを得たクラッチテクスチャ技術 着想・設計・量産工法まで，自動車技術会シンポジウム「動力伝達系の最新技術 2022」，文献番号 20224625

■ 著者 ■



松尾 道憲