

コオロギの後肢関節の摩擦特性および接合面の構造調査

Investigation of frictional characteristics and structure of joint surfaces of hindlimb joints of crickets

東理大・工（学）*宮地 夏樹 東理大・院（学）賀東 春人 東理大・院（正）佐藤 魁星

東理大・工（正）佐々木 信也

Natsuki Miyaji*, Haruto Gato**, Kaisei Sato**, Shinya Sasaki*

*Tokyo University of Science, **Graduate school of Tokyo University of Science

1. 緒言

生物は進化の過程で、環境に適応した様々な構造を獲得した。その中で特に優れた特徴の原理を解明し、工学に応用することで新たな機能性を有する製品を生み出す、バイオミメティクスと呼ばれる分野が盛んに研究されている。

優れた特性を示す生物の一例として、バッタやコオロギ、キリギリス等が属する直翅類が挙げられる。直翅類は一般に後肢が著しく長く発達し、この後肢で体長の数倍から数十倍の高度まで跳躍する特徴を持つ。跳躍運動の際、後肢の膝関節には踏み切る直前に極めて大きい力が作用するため、高い剛性が要求される。加えて、跳躍前後で後肢は屈曲状態から短時間で伸展するため、関節の滑らかな運動も要求される。直翅類の後肢はこのような跳躍運動を繰り返しても破損せず、滑らかな運動機能を維持することから、関節の接合面は低摩擦かつ摩耗軽減を実現する構造を持つと考えられる。以上の原理を解明することで、優れた摩擦特性と長期間機能を維持する高い信頼性を両立した、しゅう動部品への応用が期待される。

直翅類の関節に着目した研究は数少なく、また後肢を中肢など他の肢や性別ごとに比較した例はほとんど存在しない。そこで、本研究では関節の原理解明を目的として、コオロギの後肢と中肢を用いて膝関節の摩擦特性と接合面の構造を調査・比較した。

2. 実験方法

2.1 実験試料

生きたヨーロッパイエコオロギの成虫から肢を切り離して実験に用いた。肢は膝関節を境に大きく 2 部位に分かれ、胴体側を大腿骨（femur）、爪先側を脛骨（tibia）と呼ぶ。オスとメスの個体からそれぞれ後肢（hindlimb）と中肢（middle leg）を実験に使用した。図 1 に後肢と中肢の画像を示す。

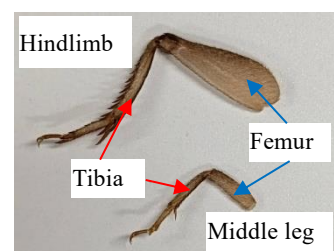


Fig. 1 Hindlimb and middle leg of house cricket

2.2 摩擦試験

肢が繋がった状態で膝関節を摩擦させるため、振り子摩擦試験機を作製した。図 2 に試験機の全体像、表 1 に試験条件を示す。中央の支柱の先端に振り子の支点と分度器、試料固定用の棒を備え、風の影響を無くするため、周囲を透明なビニールシートで覆っている。肢の膝関節を振り子の支点に合わせ、脛骨を振り子の糸、大腿骨を固定用の棒に接着剤で固定し、振り子を自由振動させることで膝関節をしゅう動させた。試験中はビデオカメラ（GZ-RX600-D、JVC ケンウッド、JP）で撮影し、映像から分度器の値を読み取り振れ角の推移を記録した。

振れ角の推移を最小二乗法で減衰曲線 $\theta_t = a \exp(-\beta t) + \gamma$ に近似し、得られた係数を以下の式に代入して摩擦係数 μ を算出する。 I は振り子慣性モーメント、 N_t [N] は関節に作用する荷重、 r [m] は回転半径、 T [s] は周期を表す⁽¹⁾。

$$\mu = -\frac{4\pi I \beta \gamma}{N_t r T} \quad (1)$$



Fig. 2 Pendulum friction tester

2.3 接合面観察

膝関節の接合面を SEM（TM3030Plus、日立ハイテック、JP）で観察した。しゅう動による接合面の変化を見るため、1 匹から左右の肢を用いて一方はしゅう動させず、他方は 1000 回程度しゅう動後に観察した。以降前者を未しゅう動（no sliding）、後者をしゅう動後（after sliding）と呼ぶ。

Table 1 Conditions of friction tests

Temperature	-	Room temp.
First angle	[rad]	1
Length of pendulum	[mm]	65
Mass of weight	[kg]	2.4×10^{-3}
Cycle	[s]	0.53

3. 実験結果

3.1 摩擦試験

式(1)から算出した、性別や部位ごとの膝関節の摩擦係数を図4に示す。エラーバーは標準偏差を表す。

摩擦係数の平均値は左から順にメス後肢：0.0669，メス中肢：0.0328，オス後肢：0.0635，オス中肢：0.0284となり，後肢の摩擦係数は中肢より高い結果が得られた。また性別で比較するといずれもオスの方が僅かに小さいものの，同程度の値となった。

3.2 接合面観察

オスの後肢の大腿骨および脛骨の接合面について，未しゅう動およびしゅう動後の観察結果を図5ならびに図6に示す。未しゅう動の大腿骨の接合面には直線状の溝が平行に並ぶ模様が確認され，脛骨は滑らかな接合面が観察された。しゅう動後は大腿骨側では平行溝の模様がより拡大して一部にひび割れも確認された一方，脛骨側はほとんど変化が見られなかった。

メスの後肢では未しゅう動の大腿骨に模様は確認できなかったが，しゅう動後はオスと同様に平行溝の模様が観察された。脛骨はオスと同様に滑らかな表面でしゅう動後も変化はなく，全体として性別による有意差は認められなかった。

また，図7ならびに図8に示すオスの中肢では，大腿骨側は後肢と同様に平行溝の模様が見られた一方，脛骨側は直径5~6 μm の多角形状突起が密集して発達しており，後肢より粗い面を持つことが確認された。しゅう動後は後肢と同様に大腿骨側で模様が拡大し，脛骨側はほぼ変化しなかった。

4. 考察

摩擦試験ならびにSEM観察の結果より，オスとメスの比較では構造および摩擦係数に明確な相違点は見られなかったため，性別による有意差はないと考えられる。

一方で中肢と後肢を比較すると，摩擦係数は中肢のほうが低く，関節接合面は大腿骨側が共通して平行溝が並ぶ構造を持つものに対し，脛骨側では後肢が滑らかな面で，中肢は突起やしわが発達した凹凸のある面を持つ点で異なることが分かった。ギリギリスを用いた先行研究では，後肢の膝関節で大腿骨側の凹凸面が接触面積を減らすことで脛骨との接着力を弱めて摩擦係数を下げていると示唆したが⁽²⁾，中肢は脛骨にも凹凸を発達させることで接触面積をさらに減少させ，後肢より低い摩擦係数を実現したと考えられる。

5. 結言

ヨーロッパイエコオロギの肢関節の摩擦特性と構造を調査するため摩擦試験とSEMによる表面構造観察を行い，以下の知見を得た。

- (1) 膝関節の接合面は，大腿骨側は平行溝が並ぶ構造を持ち，脛骨側は後肢で滑らかな面，中肢で凹凸が発達した面を持つ。
- (2) 肢関節の摩擦係数は中肢が後肢の半分程度で，性別による差は小さい。
- (3) 中肢の接合面は後肢より凹凸が多いため，接触面積の減少により凝着力が弱まり，摩擦低減に貢献したと考えられる。

文献

- 1) 東藤正浩，但野 茂，岩崎倫政，振り子法による家兎膝関節の摩擦・粘弾性測定，LIFE, (2014).
- 2) Jun Kyun Oh, Spencer T. Behmer, Richelle Marquess, Cengiz Yegin, Ethan A.Scholar and Mustafa Akbulut, Structural, tribological, and mechanical properties of the hind leg joint of a jumping insect: Using katydids to inform bioinspired lubrication systems, Acta Biomaterialia, volume 62, (2017), pp.284-292.

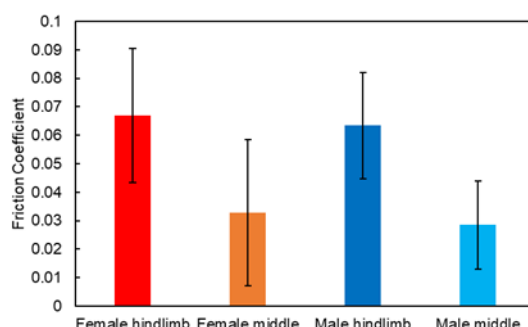


Fig. 4 Friction coefficient by gender and foot site

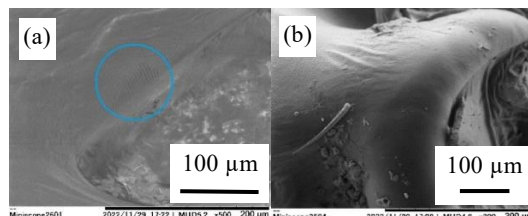


Fig. 5 Joining surface no sliding (male, hindlimb, (a) femur, (b) tibia)

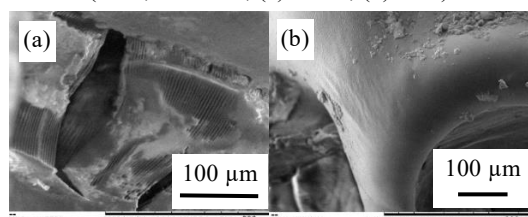


Fig. 6 Joining surface after sliding (male, hindlimb, (a) femur, (b) tibia)

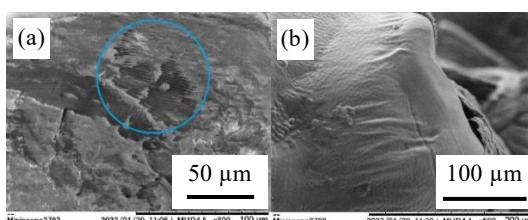


Fig. 7 Joining surface no sliding (male, middle leg, (a) femur, (b) tibia)

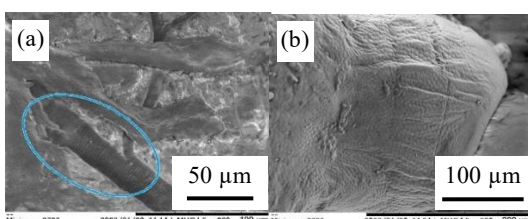


Fig. 8 Joining surface after sliding (male, middle leg, (a) femur, (b) tibia)