

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ペンギンの翼の曲げ剛性とねじり剛性の計測
Title(English)	Measurement of flexural and torsional stiffnesses in penguin wings
著者(和文)	田口 元貴, 田中 博人
Authors(English)	Genki Taguchi, Hiroto Tanaka
出典(和文)	日本機械学会2022年度年次大会予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 9

ペンギンの翼の曲げ剛性とねじり剛性の計測

Measurement of flexural and torsional stiffnesses in penguin wings

○学 田口 元貴, 正 田中博人

Genki TAGUCHI, Hiroto TANAKA

東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

Penguins are propelled through the water by flapping their wings. During swimming, wing flapping causes bending deformation of the wings. The cross section of the wing forms a thick wing shape, and the wing skeleton consists of a humerus, a forearm, a manus, and digits. Previous anatomical studies have shown that penguin wings are mobile in the wing plane at each joint. However, the range of motion and stiffness of bending outside the wing plane have not been investigated. Furthermore, the range of motion and stiffness with respect to torsion is unknown. In this study, we measured the static flexural and torsional stiffness of wings collected from a gentoo penguin (*Pygoscelis papua*) cadaver. As a result, we found asymmetries in flexural stiffness with respect to the bending direction and torsional stiffness with respect to the torsional direction. Furthermore, assuming that each joint of the penguin wing is a torsional spring and the other parts are rigid, the spring stiffness of each joint during bending and torsional deformation was measured. The results showed that the asymmetry of wing flexural stiffness was strongly influenced by the wrist joint and the asymmetry of wing torsional stiffness was strongly influenced by the elbow joint.

Key Words : Gentoo penguin (*Pygoscelis papua*), Biomechanics, Flapping wing, Wing flexibility

1. 結 言

ペンギンは一対の翼を羽ばたかせて水中を推進する。翼断面は分厚く内部に骨格を有し、骨格は上腕、前腕、手、指で構成される。これまでの解剖学的研究では、翼は各関節で翼面内において可動であることが示されている⁽¹⁾。一方、当研究室の運動解析により、遊泳中のペンギンの翼は羽ばたき時に翼面外にも曲げ変形することが分かった⁽²⁾。その曲げ変形は打ち上げ時に大きく、打ち下ろし時には小さかった。この非対称な曲げ変形が翼構造によって受動的に生じているのかは不明である。さらに、ねじりに関する可動域や剛性は未知である。そこで本研究では、ペンギンの死体の冷凍翼を用いて静的曲げ試験とねじり試験を行い、翼全体を一様な材料とみなしたときの曲げ剛性とねじり剛性を計測した。さらに、各関節をねじりバネでモデル化したときのバネ剛性を、翼の曲げ変形時とねじり変形時でそれぞれ求めた。特に、打ち上げと打ち下ろしの非対称性を調べた。

2. 実験方法

2・1 実験サンプル

実験サンプルとして、長崎ペンギン水族館から提供されたジェンツーペンギン (*Pygoscelis papua*) の左翼と右翼を使用した (図 1)。この個体は 2021 年 5 月 6 日 (年齢 34 歳以上) に死亡したオスで、解剖後に冷凍保管されていた。実験時には約 25°C で自然解凍した。関節位置は翼面を触って内部骨格形状を推定して求めた。以後、関節を翼根から翼端にかけて関節 1 (肘)、関節 2 (手首)、関節 3 (指付け根)、関節 4 (指先) と呼ぶ。

2・2 翼の静的曲げ試験

図 2 (a) は翼の曲げ剛性計測の模式図、図 2 (b) は実際の様子である。翼全体を一端固定の一様な梁として、翼端から約 15 mm の位置で翼面の腹側から背側方向 (以下、背方向) と、翼面の背側から腹側方向 (以下、腹方向) のそれぞれに電動リニアステージ (XCVL6200-2-1-F-N, 駿河精機株式会社, 日本) で変位と荷重を与え、それ

らの関係をデジタルフォースゲージ (ZTS-50N, 株式会社イマダ, 日本) を使って計測した. そのときの変位を d [m], 荷重を F [N], 固定位置と荷重位置の距離を L [m] とすると曲げ剛性 EI [Nm²] は以下のように計算できる.

$$EI = FL^3/3d \quad (1)$$

電動ステージの変位速度は 0.005 m/s であり, 計測回数は右翼が 3 回, 左翼が 5 回である. また, 図 3 (a) のように各関節について, 関節近傍の翼根側をバイスで固定し, 関節を挟み翼端側の適当な位置で背方向, 腹方向のそれぞれに変位と荷重を与え, 角度変位とトルクの関係を実算し, 曲げ変形時の関節のバネ剛性を計測した.

2・3 翼の静的ねじり試験

図 4 (a) はペンギンの翼のねじり剛性計測の模式図である. ペンギン翼全体を一様な材料として上腕を固定し, 翼端から約 15 mm の位置でねじり上げ方向 (図 4 (a) のねじり方向) とねじり下げ方向 (図 4 (a) と反対のねじり方向) のそれぞれに電動回転ステージ (RMWG75G-N, 駿河精機株式会社, 日本) で角度変位を与えた. トルクは

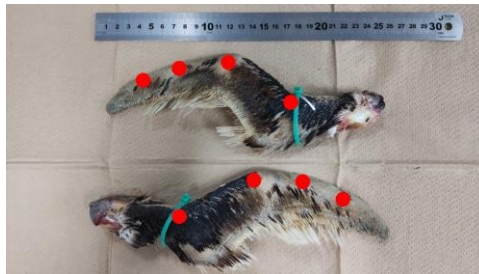


Fig. 1 Dorsal view of the frozen wing samples of a gentoo penguin. Red points mean joint.

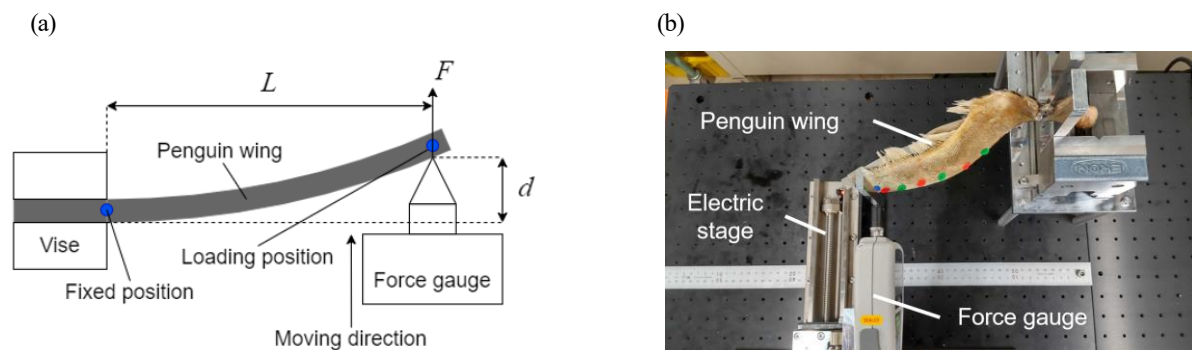


Fig. 2 Measurement of flexural stiffness of penguin wing. (a) Schematic diagram of static bending test of whole wing. (b) Measurement setup.

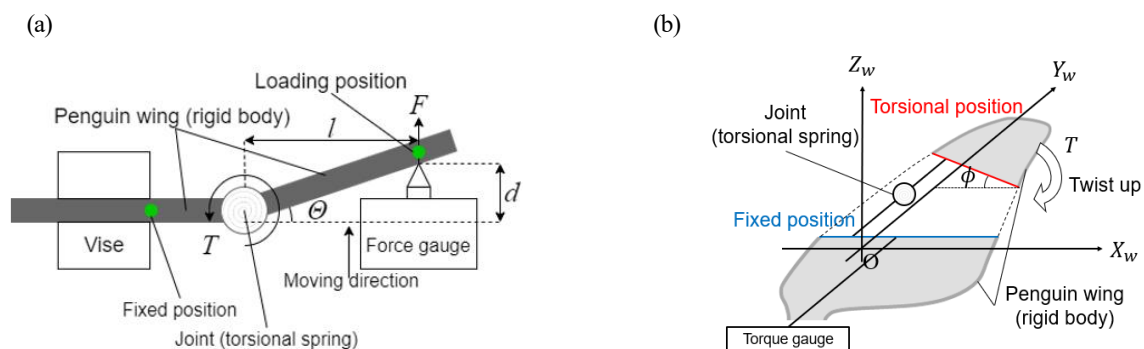


Fig. 3 Measurement of spring stiffness of joint of penguin wing. (a) Bending test. (b) Torsion test.

翼端側固定部でデジタルトルクゲージ (HTGA-5N, 株式会社イマダ, 日本) を用いて計測した. その時の計測範囲の長さを l [m], ねじれ角を ϕ [rad], トルクを T [Nm], 比ねじれ角 θ [rad] とすると, ねじり剛性 GI_p [Nm²] は以下のように計算できる.

$$GI_p = T/\theta = Tl/\phi \quad (2)$$

電動回転ステージの変位速度は 0.5 deg/s であり, 計測回数は右翼と左翼でそれぞれ 5 回である. また, 図 3 (b) のように各関節について, 関節近傍の翼根側を固定し, 関節を挟み翼端側の適当な位置でねじり上げ方向, ねじり下げ方向のそれぞれに角度変位とトルクを与えることで, それらの関係を算出し, ねじり変形時の関節のバネ剛性を計測した.

3. 実験結果と考察

3・1 翼全体の曲げ剛性と曲げ変形時の各関節のバネ剛性

翼全体を一樣な材料としたときの曲げ試験の結果の例が図 5 である. 得られた結果から最小 2 乗法で線形近似直線を求めた. この時の左翼の近似直線の決定係数の平均と標準偏差は背方向が 0.977 ± 0.009 , 腹方向が 0.676 ± 0.014 であった. 一方で右翼は背方向が 0.955 ± 0.017 , 腹方向が 0.868 ± 0.012 であった. これらからペンギンの翼が曲げ変形を行うとき, 変位と荷重の関係は線形性が高く, 弾性変形していることが分かった.

それらの線形近似直線の傾きを荷重と変位の比 F/d [N/m] として, 式 (1) から翼全体の曲げ剛性を算出した. その結果, 計測した左翼の曲げ剛性の平均と標準偏差は背方向が 0.187 ± 0.009 Nm², 腹方向が 0.0180 ± 0.0006 Nm² であり, 背方向は腹方向の 10.4 倍であった. また, 右翼は背方向が 0.317 ± 0.007 Nm², 腹方向が 0.0193 ± 0.0016 Nm² であり, 背方向は腹方向の 16.4 倍であった. 以上から, いずれの翼も背方向の剛性が腹方向の剛性より高いという異方性を持つことが分かった. この傾向が全てのペンギンに適用されると仮定すると, これは遊泳中の翼の曲げ変形と一致する傾向であり, 遊泳中の翼の曲げ変形は受動的である可能性が高いと考えられる.

関節周辺の曲げ試験で, 翼の曲げ変形時の各関節, 各変位方向の角度変位とトルクの関係が得られた. そして, 最小 2 乗法で線形近似直線を求め, その傾きを曲げ変形時の関節のバネ剛性とした. その結果が図 6 である. ここから, 左翼と右翼は右翼の関節 3 以外では同じ関節位置で背方向の剛性の方が腹方向より大きいことが分かる. また, 背方向と腹方向の剛性の比を見ると, 関節 2 の比は左翼が 19.4, 右翼が 16.3 と他の関節と比較して大きい. このことから翼全体の曲げ剛性の異方性は関節 2, すなわち手首関節による影響が大きいと考えられる.

3・2 翼全体のねじり剛性とねじり変形時の各関節のバネ剛性

翼全体を一樣な材料とみなしたときのねじり試験の結果の例が図 7 である. 得られた結果のグラフから最小 2 乗法によって線形近似直線を求めた. この時の左翼と右翼の近似直線の決定係数は全て 0.990 を超えていた. この

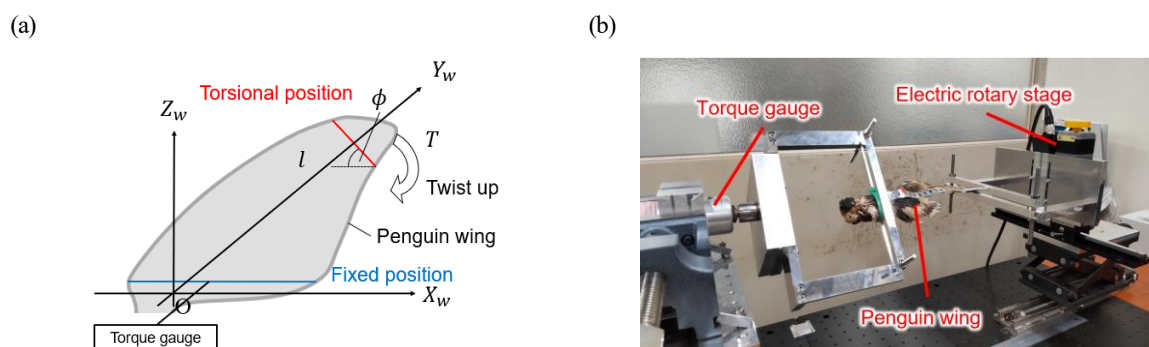


Fig. 4 Measurement of torsional stiffness of penguin wing. (a) Schematic diagram of static torsion test of whole wing. (b) Measurement setup.

ことからペンギンの翼がねじり変形を行うとき、比ねじれ角とトルクの関係は線形性が非常に高く、弾性変形していることが分かった。

それらの線形近似直線の傾きを比ねじれ角とトルクの比 T/θ [Nm/rad]として、式(2)から翼全体のねじり剛性を算出した。その結果、左翼のねじり剛性の平均と標準偏差はねじり上げ方向が、 0.0716 ± 0.0022 Nm²、ねじり下げ方向が 0.0436 ± 0.0011 Nm²であり、ねじり上げ方向はねじり下げ方向の1.64倍であった。一方で右翼はねじり上げ方向が 0.0849 ± 0.0004 Nm²、ねじり下げ方向が 0.0616 ± 0.0010 Nm²であり、ねじり上げ方向はねじり下げ方向の1.38倍であった。以上から、いずれの翼もねじり上げ方向の剛性がねじり下げ方向より高いという異方性を持つことが分かった。

関節周辺のねじり試験で、翼のねじり変形時の各関節、各変位方向の角度変位とトルクの関係が得られた。それに対して、最小2乗法で線形近似直線を求め、その傾きをねじり変形時の関節のバネ剛性とした。その結果が図8である。この結果から、左翼でも右翼でも翼全体のねじり剛性と同じく、ねじり上げ方向の剛性の方がねじり下げ方向の剛性よりも大きいという異方性を持つ関節は関節1、すなわち肘関節のみであることが分かる。このことから翼全体のねじり剛性の異方性は肘関節による影響が大きいと考えられる。

4. 結論

本研究では、一羽から得られた2枚の翼に対して、静的曲げ試験とねじり試験を行い、ペンギンの翼全体は曲げ変形時もねじり変形時も弾性変形することが分かった。そして、ペンギンの翼全体の曲げ剛性は、いずれも背方向の剛性の方が腹方向よりも大きいという異方性があり、これは手首関節の影響が大きいことが分かった。一

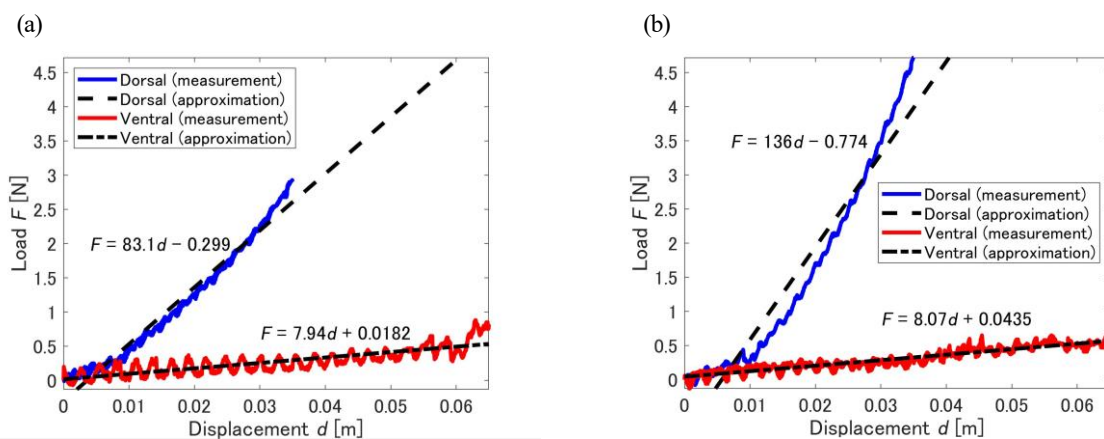


Fig. 5 Relationship between displacement and load in static bending test of each entire wing. (a) The left wing. (b) The right wing.

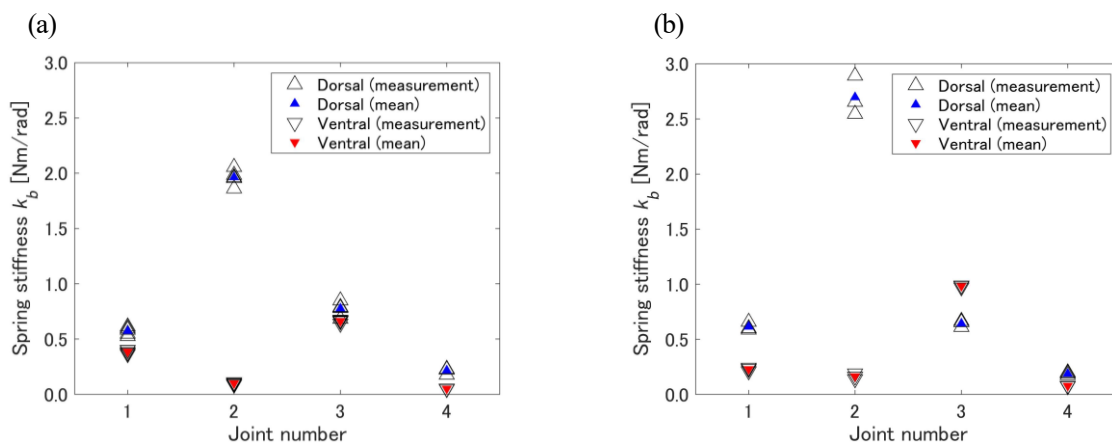


Fig. 6 Spring stiffness of each joint in each wing during bending deformation. (a) The left wing. (b) The right wing.

方で、ペンギンの翼全体のねじり剛性は、いずれの翼もねじり上げ方向の剛性の方がねじり下げ方向よりも大きいという異方性があり、これは肘関節の影響が大きいことが分かった。

謝辞

翼サンプルを提供していただいた長崎ペンギン水族館に心より感謝申し上げます。本研究は JSPS 科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05468 の支援を受けた。

文 献

- (1) Raikow, R.J., Bicanovsky, L. and Bledsoe, A.H., “Forelimb Joint Mobility and the Evolution of Wing-Propelled Diving in Birds”, *The Auk*, Vol. 105, No. 3 (1988), pp. 446-451.
- (2) Harada, N., Oura, T., Maeda, M., Shen, Y., Kikuchi, D. M., Tanaka, H., “Kinematics and hydrodynamics analyses of swimming penguins: wing bending improves propulsion performance”, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 224, No. 21 (2021), jeb242140.

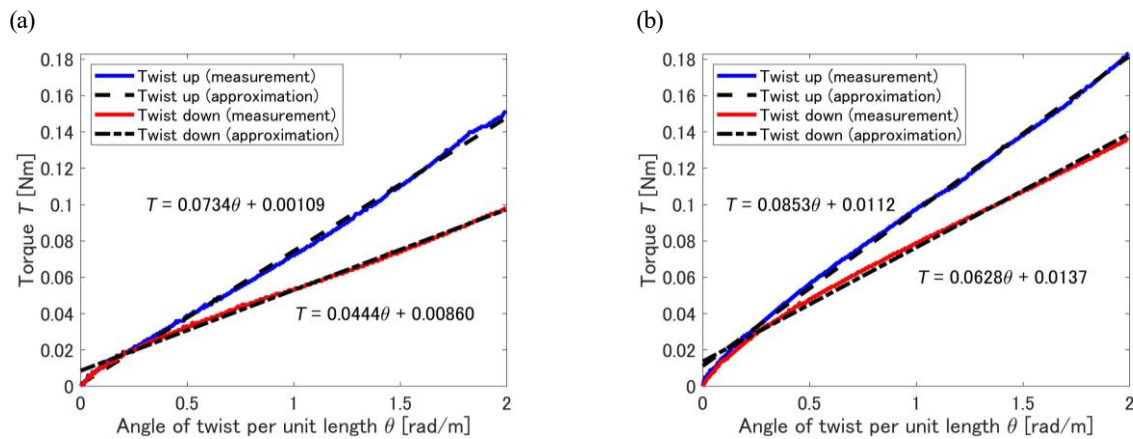


Fig. 7 Relationship between angle of twist per unit length and torque in static torsion test of each entire wing. (a) The left wing. (b) The right wing.

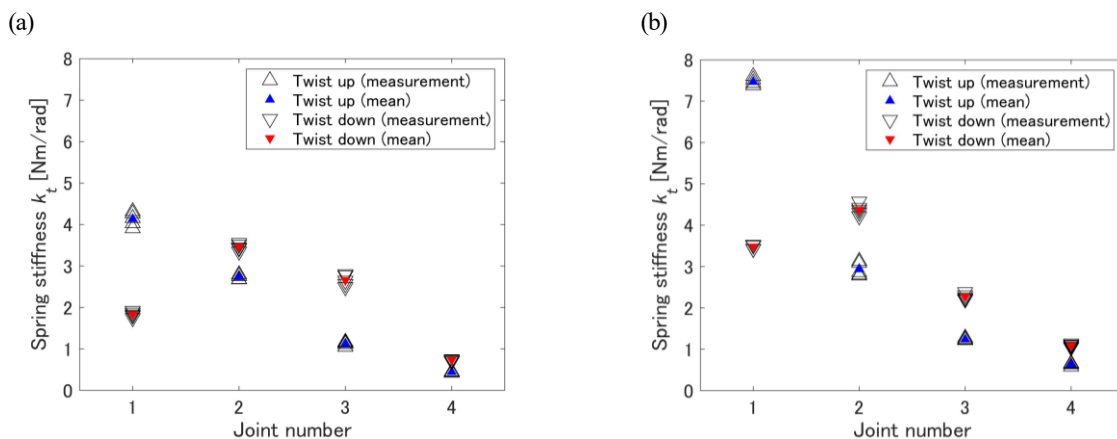


Fig. 8 Spring stiffness of each joint in each wing during torsional deformation. (a) The left wing. (b) The right wing.