

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	バイオミメティクスが変える水中ドローンの世界 マグロとイルカの尾鰭推進とペンギンの羽ばたき翼推進
Title(English)	Biomimetics Transforming the World of Underwater Drones -Caudal-Fin Propulsion of Tuna and Dolphins and Flapping-Wing Propulsion of Penguins-
著者(和文)	田中博人
Authors(English)	Hiroto TANAKA
出典(和文)	精密工学会誌, Vol. 92, Issue 4, pp. 301-305
Citation(English)	Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 92, Issue 4, pp. 301-305
発行日 / Pub. date	2026, 4

バイオミメティクスが変える水中ドローンの世界* —マグロとイルカの尾鰭推進とペンギンの羽ばたき翼推進—

Biomimetics Transforming the World of Underwater Drones
—Caudal-Fin Propulsion of Tuna and Dolphins and Flapping-Wing Propulsion of Penguins—

田中博人**

Hiroto TANAKA

Key words biomimetics, fluid dynamics, swimming, penguin, tuna fish, dolphin, UUV, ROV, cost of transport

1. はじめに

筆者はペンギンの遊泳メカニズムとペンギン型水中遊泳ロボットを研究している。主宰研究室を2015年秋に立ち上げ、初めて水中カメラを水族館の水槽に沈めてペンギンの遊泳を撮影したのが2016年だったので、研究開始からちょうど10年が経った。ペンギンロボット開発には2017年に着手し、その6年後の2023年にペンギンロボットが初めて水中を推進した。ペンギンは高速性と運動性の両方に優れ、そのメカニズムの理解とロボットによる再構成には、興味が尽きない。

バイオミメティクス (Biomimetics, 生物模倣学) とは、生物の機能の仕組みを理解して抽出および再構成し、人間社会の (主に技術的な) 問題の解決に応用し、その過程で生物への理解を深化させる学問分野である¹⁾。実際には、さまざまな古典学問分野の基盤上に成立する。筆者の研究は、水中ドローンにおけるペンギンのバイオミメティクス研究ともいえる。

本稿では、まず水中ドローンの遊泳性能に関して、現状とバイオミメティクスへの期待を概説する。次にマグロやイルカのような尾鰭推進の高速性を生体データと流体力学から紐解く。最後に、高速かつ俊敏なペンギンの羽ばたき推進の性能と、筆者のペンギンロボットを紹介する。

2. 水中ドローンの現状と遊泳性能の課題

水中を移動する無人機はUUV (Unmanned Underwater Vehicle, 無人潜水機) と呼ばれ、自律的に潜水航行するAUV (Autonomous Underwater Vehicle, 自律型無人潜水機) と、テザーケーブルに繋がれて水上の人間が遠隔操縦するROV (Remotely Operated Vehicle, 遠隔操縦無人潜水機) に分類される。水中では電波が大きく減衰する (青または緑の可視光波長を除く) ため無線通信ができず、

遠隔操縦には有線通信が必要となる。「水中ドローン」に明確な定義はないが、水中ドローンとは小型のROVを指し、大きさは1m以下、質量は70kg以下が目安である²⁾。つまり、普通車で運搬可能で少人数で運用できる手軽なROVといえる。

ここ10年で水中ドローンへの注目度が急激に高まっている。それに先立って、まず飛行ドローンが社会に認知されて広く普及した。例えば代表的な市販クアッドコプタ (4つの回転翼で飛行する機体) であるDJI社 (中国) Phantomシリーズの初代モデル発売が2012年であり、ジンバル付きカメラ搭載モデルPhantom2の発売が2014年である³⁾。ちなみに、DJI社創業が2006年なので、Phantom発売まで6年間かかっている。その頃から飛行ドローンの普及が進んで空中撮影が当たり前のものとなり、「ドローン」という言葉自体が一般社会に浸透した。

一方、水中ドローンの普及はそれより遅れて2017年頃から始まった²⁾。例えばChasing社 (中国) Gladiusシリーズの市販開始が2017年であり、これはDJI Phantom発売の5年後である。飛行ドローンの有用性が一般社会に認知されるにつれ、水中ドローンへの期待が高まり、市販製品と実用への投入が拡大している。2022年の報告書によると、市場規模は2019年度の19億円から2022年度の29億円に成長し、2025年度には62億円に拡大すると試算されている⁴⁾。

水中ドローンの主な用途はカメラによる水中撮影である。業務内容や水の透明度によって、サンプリングアームやイメージングソナーなどの追加機器を搭載する。利用先分野は多岐にわたり、港湾や橋梁などの水中インフラ施設点検、水産業、海洋調査、災害救助、エンターテインメントなどがある²⁾。

水中ドローンの形態と運動制御方法としては、機体に分散配置された回転翼型推進機を4つから8つ有し、各推進機の回転数を変えて運動を制御する。この制御方式には、推進機の推力と回転数の関係を事前に把握しておけば制御アルゴリズムを構築しやすいという利点がある。さらに、多数の推進機の分散配置により、姿勢と運動の微調整が可

*原稿受付 令和8年2月2日

**東京科学大学 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

能となり、撮影中の姿勢維持や低速移動に適している。

一方、遊泳性能の課題としては、最高速度と推進効率の低さがある。多数の推進機のために機体形状は直方体状に「ずんぐり」となる。すると、機体の流体抵抗が大きくなり、速度を出しにくく、推進効率も悪くなる。一般に、流体中の物体の抗力（流体抵抗） D は

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_D \quad (1)$$

と表される。ここで ρ (kg/m³)は流体の密度、 U (m/s)は相対流速、 S (m²)は代表面積、 C_D は抗力係数である。ずんぐりとした機体形状では、この抗力係数が大きい。例えば立方体に正面から流れが当たる場合、前方投影面積を代表面積として立方体の C_D は1.05である⁵⁾。さらに式(1)より、抗力は速度の2乗に比例し、速度が増すほど急激に抵抗が増える。実際、多くの水中ドローンの最高速度は3ノット(1.54 m/s)以下であり、高速をうたうChasing M2 PROでも4ノット(2.1 m/s)である。

高速で高効率に巡航できれば、移動時間の短縮や移動範囲の拡大につながる。ただし、潜水艦のように前進が得意なだけでは、移動先の用務に要求される細かな動きができない。さらに、潮流や波浪および地形によって水流が変化する場合もあり、その対応には大きな瞬発力を発生可能な運動性も必要である。したがって、高速巡航性と運動性の両立が水中ドローンの課題といえる。

3. マグロとイルカの遊泳性能と尾鰭推進ロボット

動物は、限りあるエネルギー源を使って生存するために必要な移動能力に対して、消費エネルギーを最小化するように進化してきたかのように見える。海洋を回遊して採餌する遊泳動物は、抵抗が少ない体形で推進効率に優れ、中には捕食や逃避のために優れた高速性と運動性を兼ね備えたものがある。また、潮流や波浪および地形などの複雑で変化する自然環境にも適応している。そうした遊泳動物を規範とすれば、高効率で高速かつ俊敏な水中ドローンにつながる事が期待できる⁶⁾。

高速性に優れた遊泳動物として、マグロのような回遊魚とイルカのような小型鯨類を挙げられる。彼らは流線形の胴体を持ち、尾鰭を振って推進する。尾鰭で推進する魚類と鯨類の速度は、おおよそ

$$\text{長距離移動時 } V_{\text{migration}} \text{ (m/s)} = 0.5L^{0.43} \quad (2)$$

$$\text{巡航時速度 } V_{\text{cruise}} \text{ (m/s)} = 1.8L^{0.50} \quad (3)$$

$$\text{瞬発的な高速遊泳時 } V_{\text{burst}} \text{ (m/s)} = 7.8L^{0.88} \quad (4)$$

のように体長 L (m)の指数関数で表される⁷⁾。遊泳動物の最高速度の信頼できるデータを見つけるのは容易ではないが、マルチビームソナーで計測されたタイセイヨウクロマグロ(*Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758))の遊泳速度に11.0 m/sという最高記録がある⁸⁾。マグロの体長を2.7 mとすると体長比速度は4.1 BL/sとなる。これは式(4)の $V_{\text{burst}} = 18.7$ m/s (6.9 BL/s)よりは小さい。イルカについては、筆者らが水族館で全長2.1 mのカマイルカ(*Lageno-*

rhynchus obliquidens)の3次元運動解析を行い、9.5 m/sの最高速度が記録された⁹⁾。全長を L として計算すると4.5 BL/sである。これも $V_{\text{burst}} = 15.0$ m/s (7.1 BL/s)より小さい。

マグロとイルカの胴体を上から見ると、それぞれNACA 67-021翼型とNACA 66018翼型に似ている⁷⁾。これらは層流翼型と呼ばれ、最小圧力位置すなわち最大厚み位置が、先端から全長の70%および60%にあり、層流境界層を先端からできるだけ長く維持することを図った翼型である。層流境界層の摩擦抵抗は、乱流境界層の摩擦抵抗よりも小さく、したがって層流翼型は抵抗が小さい。ただし、層流境界層は物体表面に小さな凹凸があるだけでも乱されて乱流境界層に遷移してしまうので注意が必要である。実際、イルカの抗力は乱流境界層を仮定した方がよく推定できる¹⁰⁾。ところで、乱流境界層の摩擦抵抗を低減するバイオメティクスとして、サメの鱗の突起列を規範としたリブレットがある。これは、理想的には摩擦抵抗を最大10%低減できる。その入門解説は筆者の別記事¹¹⁾を参照されたい。

流線形を長軸まわりに回転してできる回転体の抗力係数 C_D は、回転体の長さ l と直径 d の比 l/d が約2.7のときに最小となる。長さに対するレイノルズ数 Re が 10^6 で自然に境界層を発達させたときの最小 C_D (前方投影面積を代表面積とする)は約0.025、 Re が 10^7 で強制的に乱流境界層に遷移させたときの最小 C_D は約0.038である⁵⁾。参考値として、乗用車の C_D は0.25~0.45であり、トラックは約0.9である¹²⁾。それと比べて流線形回転体の抗力係数が非常に小さいことがわかる。

効率データとして、スマ(*Euthynnus affinis* (Cantor, 1849))の稚魚とキハダマグロ(*Thunnus albacares* (Bonaterre, 1788))を回流水槽で持続的に泳がせて酸素消費量を計測し、CoT (Cost of transport)を計算した研究を紹介する。CoTは、ある距離を移動する際に消費するエネルギーであり、移動効率の指標である。キハダマグロは $3.1 \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ($L=0.2 \text{ m}$, $V=0.8 \text{ m/s}$ (4.0 BL/s))が記録され、スマのデータからは $8.16 \times 10^4 L^{-1.85} \text{ J kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ($L=0.12\sim 0.26 \text{ m}$, $V=3.5\sim 5.1 \text{ BL/s}$)の関係が得られている¹³⁾。つまり、体長が大きいほど単位質量当たりのCoTは小さい。

水中ドローンの規範としてのマグロ型やイルカ型の形態の利点は、動力を尾鰭に集中させて強力に推進でき、体の形状も流線形で抵抗が少ないので、高速遊泳に適することである。しかし、以下に説明するように、静止時や低速時の運動性に欠点がある。

尾鰭の振りの振幅中心をずらせば、尾鰭の振動面内で機体を回転できる。例えばマグロのように尾鰭を左右に振る場合は、振幅中心を左右のどちらかにずらせば平均推力は左右方向成分を生じ、尾鰭の前方に位置する重心まわりにヨー(左右回転)が可能である。しかし、それ以外のピッチ(頭上げ下げ回転)とロール(長軸周りの回転)は、尾

鰭の左右の振りでは実現できない。そこで、重心の前方に配置された左右の胸鰭の揚力を制御すれば、ピッチとロールを実現できる。しかし、式(1)の抗力と同様に、揚力は流速の2乗に比例するため、低速時には胸鰭の揚力は小さく、静止時には揚力を発生できずピッチとロールができない。このように、尾鰭推進は静止時や低速時の機動が不得意といえる。

これまでに多くの尾鰭推進の遊泳ロボットが研究されており、3次元運動制御可能なイルカロボットも実現している¹⁴⁾¹⁵⁾。しかし速度に関して大半のロボットは1 m/sにも届かない低速で2.5 BL/s未満であり、2 m/sに近づくものはわずかである¹⁶⁾。例外的に高速なのが3.7 m/s (11.6 BL/s, $L=0.32$ m)を記録した魚型ロボット iSplash IIである¹⁷⁾。また、最高速度2.1 m/s (2.9 BL/s, $L=0.72$ m)に達し、水面からジャンプもできるイルカ型ロボット¹⁸⁾も存在する。それでも本物のマグロやイルカの最高速度にはいまだ遠く及ばないのが現状である。その主な原因は、水中で大きな尾鰭を素早く振るのに必要な、大出力かつ大トルクな防水モータ製品が市場にないことだろう。通常のモータ製品を使う場合は、防水化が技術課題となる。

最近、新発想の高速な魚型ロボットが発表された¹⁹⁾。筆者も共著者として名を連ねているこのロボットでは、電気接点のないブラシレスモータを水没させて使用することで、モータの防水対策を不要とした。電気回路部は、エポキシ樹脂で封止された。強力なモータモジュールを採用して、減速器を介さずダイレクトドライブで尾鰭を振る。全長413 mmで、尾鰭の周波数10 Hzのときに最高速度2.6 m/s (6.3 BL/s)を達成した。ダイレクトドライブゆえに、振幅中心も簡単に換えられ、素早くヨー回転することもできる。このブラシレスモータを水没させる方式は、次に述べる筆者のペンギン型ロボットでも採用している。

4. 高速で俊敏なペンギンとペンギンロボット

ペンギンは、飛行していた鳥が潜水遊泳に再適応して出現した鳥である。飛行能力を完全に失い、繁殖期以外は常に海洋で生活し、海中でオキアミや小魚やイカを捕食する。左右の翼の羽ばたきで推進し、足は推力を発生しない。

まず遊泳速度を見てみよう。バイオロギングで得られた野生ペンギンの採餌遊泳中の平均巡航速度は、最大種のエ

ンペラーペンギン (*Aptenodytes forsteri* (Gray, 1844)) と最小種のコガタペンギン (*Eudyptula minor* (Forster, 1781)) を含む7種について、1.7~2.3 m/sである²⁰⁾。遊泳速度の最高記録は、筆者が調べた限りではエンペラーペンギンの7.1 m/sである²¹⁾。これは南極の海氷上でパドルホイール式流速計によって計測された。なお、このときウェッデルアザラシから逃避していたという記述が論文にある。コガタペンギンの最高記録は、パドルホイール式流速計によって計測された3.3 m/sである²²⁾。また、一般に「最速のペンギン」といわれることが多いジェンツーペンギン (*Pygoscelis papua* (Forster, 1781)) では、最高記録6.6 m/sという記述が文献にある²³⁾。ただし計測方法は不明である。

これらの速度データを、別の体長データ²³⁾と合わせて体長比速度と V_{cruise} および V_{burst} を計算し、表1にまとめた。ペンギンの採餌中の巡航速度は、尾鰭推進の魚類と鯨類に基づく V_{cruise} よりも大きい (エンペラーペンギンを除く)。つまり、ペンギンは魚に勝るとも劣らない高速巡航が可能だといえる。最高速度の記録がある3種については、最高速度は V_{burst} に近い値であり、体長比速度に換算すると、6.2~8.5 BL/sとなった。これは、前節のタイセイヨウクロマグロ (4.1 BL/s) とカマイルカ (4.5 BL/s) の最高体長比速度よりも大きい。よって、今回のデータでは、体の大きさに対する最高速度において、ペンギンはマグロやイルカに勝るといえる。

胴体の抗力係数は、アデリーペンギン属のペンギン3種 (アデリーペンギン (*Pygoscelis adeliae* (Hombron & Jacquinet, 1841)), ヒゲペンギン (*Pygoscelis antarcticus* (Forster, 1781)), ジェンツーペンギン) について、冷凍死体を型取りして精密に複製した模型の抗力を回流水槽で計測して算出された²⁴⁾。胴体の長さ l に対する直径 d の比は4.00~4.54である。前方投影面積を代表面積とした抗力係数 C_D は、 $Re > 5 \times 10^5$ のとき、0.03~0.04だった。これは前節の工学的な流線形回転体の C_D と同程度であり、ペンギン胴体形状は非常に抵抗が小さいことがわかる。 Re 依存性は、 $6 \times 10^4 < Re < 7 \times 10^5$ の範囲で

$$C_D = 11.975 \times Re^{-0.4434} \quad (5)$$

と近似された。

効率は、野生のアデリーペンギン属のペンギン3種 (アデリーペンギン、ヒゲペンギン、ジェンツーペンギン) に

表1 ペンギンの遊泳速度。文献20の質量、周波数、巡航速度の表に、体長²³⁾と最高速度²¹⁾²³⁾を追加し、式(3)、(4)の速度計算値も追加

種	平均質量 (kg)	平均羽ばたき周波数 (Hz)	平均巡航速度 (m/s)	体長 (m)	巡航体長比速度 (BL/s)	V_{cruise} (m/s)	V_{burst} (m/s)	最高速度 (m/s)	最高体長比速度 (BL/s)
エンペラーペンギン	24.5	1.35	1.7	1.15	1.5	1.9	8.8	7.1 ²¹⁾	6.2
キングペンギン	11.9	1.55	2.1	0.95	2.2	1.8	7.5	—	—
ジェンツーペンギン	5.5	2.18	2.3	0.78	2.9	1.6	6.3	6.6 ²³⁾	8.5
アデリーペンギン	4.2	2.46	2	0.7	2.9	1.5	5.7	—	—
ヒゲペンギン	3.8	2.54	2.3	0.68	3.4	1.5	5.6	—	—
マカロニペンギン	3.3	2.3	2	0.7	2.9	1.5	5.7	—	—
コガタペンギン	1.1	3.6	1.8	0.42	4.3	1.2	3.6	3.3 ²²⁾	7.9

ついて、現地に建設された流路実験室で計測した酸素消費量から CoT が算出された。その最小値はそれぞれ 4.9, 3.7, 7.6 J kg⁻¹ m⁻¹ で、そのときの速度は 2.2, 2.4, 1.8 m/s だった²⁵⁾。これは前節のキハダマグロの CoT (3.1 J kg⁻¹ m⁻¹) よりもやや大きな値 (効率が悪い) である。

遊泳距離については、キマユペンギン (*Eudyptes pachyrhynchus* (Gray 1845)) の移動を Argos 衛星システムで計測した研究があり、それによると 1 日の平均移動距離は 69.7 km から 83.0 km で、最高記録は 222.8 km だった²⁶⁾。こうした長い移動距離から、移動効率の重要性がわかる。

ペンギンの俊敏性の研究はほとんどないが、水族館で水槽を上から撮影した研究によると、旋回率は 58~576°/s が記録された²⁷⁾。

ペンギンの形態と推進方式として、低抵抗な胴体の前寄りに、1 対の主翼が左右に配置され、その主翼の羽ばたきで推力を発生して前進する²⁴⁾²⁸⁾。旋回時には左右の翼運動を変えて体を回転させる²⁹⁾。理論上、左右の翼がそれぞれ独立に運動を変えて流体力を任意に制御できれば、静止状態からでも 1 羽ばたきでロール、ピッチ、ヨーの体の回転が可能である。しかも羽ばたき翼は、固定翼ならば流れが剥離してしまうような大きな迎え角 (翼面と相対流速の角度) でも、流れが剥離せずに大きな流体力を発生できる³⁰⁾³¹⁾。つまり、1 羽ばたきの瞬発力があり、素早く体を回転できる。よって、ペンギン型羽ばたき推進は、静止・低速時の運動性に欠点があったマグロ・イルカ型の尾鰭推進と異なり、静止状態から高速時まで一貫して運動性に優れたデザインといえる。しかも高速性もあわせもつ。

最後に、筆者らのペンギンロボット第 1 号機³²⁾ のメカニズムと性能を紹介する (図 1)。ペンギンの優れた遊泳性能を再構成するには、左右の翼がそれぞれ独立して流体力を制御できる必要がある。そのためには、各翼の回転自由度が最低 2 つ必要である。すなわち、主たる羽ばたきである体長軸まわりのフラッピングと、翼長軸まわりのフェザリングである。フェザリングによって迎え角を直接変えて流体力を制御できる。そのような機構として、2 つの自作サーボモータで差動歯車を介してフラッピングとフェザリングを任意に制御可能な電動機構³¹⁾ を実装した (図 1 (b, c))。サーボモータは防水せず、むしろ水没して浸水させる設計であり、市販の直流ブラシレスモータ (RI KV100, CubeMars Co., Ltd., 中国) を用いて製作した。減速器は、2 段の遊星歯車で構成され、減速比は 13.44 である。この機構は、翼長 250 mm の翼を水中にて 2 Hz で羽ばたかせることができる。

機体の重さは 9.5 kg (重心調節用の重り 2.3 kg を含む)、体長は 0.72 m (固定尾翼の 0.17 m を除く)、翼長は 0.25 m である。翼は、ジェントウペンギンの翼の 3D スキャン計測²⁷⁾ に基づいて設計し、FDM 式 3D プリンタで PLA フィラメントを用いて製作した。

最大速度は 2.1 m/s (2.9 BL/s) で、ペンギンの巡航速度に匹敵する速度を達成した。このときの消費電力から計

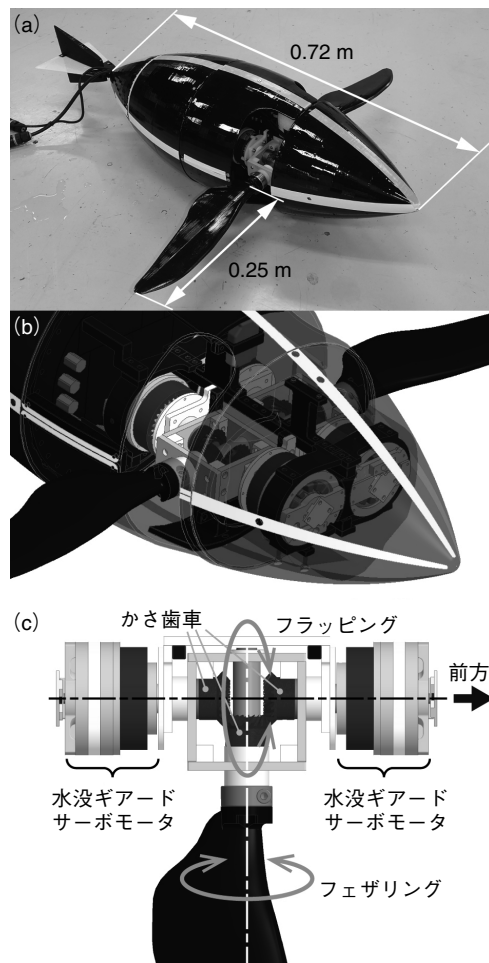


図 1 (a) ペンギンロボットの外観。(b) 電動羽ばたき機構の配置。(c) 2 自由度の電動羽ばたき機構の構成

算した CoT は 24.5 J kg⁻¹ m⁻¹ であり、前節のペンギンよりもエネルギー消費が大きい。ただし、フェザリング振幅を大きくして速度を 0.9 m/s と遅くすると CoT は 7.0 J kg⁻¹ m⁻¹ まで改善した。つまり、フェザリングによって高速遊泳と高効率遊泳を切り替えることができる。

静止状態からの機体回転も、左右のフェザリング振幅を変えるだけで実現した。ロール、ピッチ、ヨー回転中の平均回転率はそれぞれ 423°/s (最大瞬時値 710°/s)、82°/s (最大瞬時値 146°/s)、51°/s (最大瞬時値 145°/s) だった。前進して相対流速が大きくなり翼の流体力が増加すれば、さらなる回転率の増大が期待できる。

5. おわりに

水中ドローンは、飛行ドローンに 5 年ほど遅れて発展している。そして現在、高速性と運動性を両立する新しい水中ドローンの登場が期待されている。本稿では、高速性向上の規範生物となるマグロとイルカの尾鰭推進の速度と効率を生体データで示した。さらに、高速性と運動性を両立できる規範生物としてペンギンに注目し、魚に勝るとも劣らない高速性を生体データで示した。それらを規範として

魚型・イルカ型ロボットおよびペンギン型ロボットの研究が進行中であり、現在の水中ドローンを凌駕する遊泳性能を示し始めている。筆者らのペンギンロボットは、片翼2自由度の電動羽ばたき機構を水没ギアードサーボで実装し、高速遊泳と高機動を実現した。これまでの飛行ドローンがそうであったように、水中ドローンの普及が進むほど続々とロボット研究者や開発者が参入することが予想される。それは生物規範型水中ドローンのさらなる性能向上と実用化をもたらすだろう。

参 考 文 献

- 1) J.F.V. Vincent et al: Biomimetics: its practice and theory, J.R. Soc. Interface, **3**, 9, (2006), 471.
- 2) 小林康宏：海の産業革命水中ドローンビジネスの教科書，スペースワン，(2025)。
- 3) ドローンステーションブログ：DJI「PHANTOM」進化の歴史【前編】，<https://www.drone-station.net/blog/?p=146>，2026.1.15 アクセス。
- 4) 藤川理絵，インプレス総合研究所：水中ドローンビジネス調査報告書2022，インプレス，(2022)。
- 5) S.F. Hoerner: Fluid-dynamic drag, Published by the author, (1965)。
- 6) F.E. Fish: Advantages of aquatic animals as models for bio-inspired drones over present AUV technology, Bioinsp. Biomim., **15**, 2, (2020) 025001.
- 7) A. Azuma: The Biokinetics of Flying and Swimming, 2nd ed., AIAA, Virginia, (2006)。
- 8) G.D. Melvin: Observations of in situ Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) with 500-kHz multibeam sonar, ICES J. Mar. Sci., **73**, 8, (2016) 1975.
- 9) H. Tanaka et al: Measurement of time-varying kinematics of a dolphin in burst accelerating swimming, PLoS ONE, **14**, 1, (2019) e0210860.
- 10) F.E. Fish: The myth and reality of Gray's paradox: implication of dolphin drag reduction for technology, Bioinsp. Biomim., **1**, 2, (2006) R17.
- 11) 田中博人：遊泳生物のリブレット構造の流体摩擦力低減効果と模倣，ながれ，**40**, 4, (2021) 279
- 12) 炭谷圭二，ほか：自動車と流体力学：車体周り流れと空力特性，ながれ，**23**, 6, (2004) 445.
- 13) C. Sepulveda and K.A. Dickson: Maximum Sustainable Speeds and Cost of Swimming in Juvenile Kawakawa Tuna (*Euthynnus affinis*) and Chub Mackerel (*Scomber japonicus*), J. Exp. Biol., **203**, 20, (2000) 3089.
- 14) M. Nakashima et al: Three-Dimensional Movement in Water of the Dolphin Robot—Control Between Two Positions by Roll and Pitch Combinatio, J. Robot. Mechatron., **18**, 3, (2006) 347.
- 15) J.Z. Yu et al: Control of Yaw and Pitch Maneuvers of a Multi-link Dolphin Robot, IEEE Trans. Robot., **28**, 2, (2012) 318.
- 16) J. Zhu et al: Tuna robotics: A high-frequency experimental platform exploring the performance space of swimming fishes, Sci. Robot., **4**, 34, (2019) eaax4615.
- 17) R.J. Clapham and H. Hu: iSplash-II: Realizing fast carangiform swimming to outperform a real fish, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2014) 1080.
- 18) J.Z. Yu et al: Development of a Fast-Swimming Dolphin Robot Capable of Leaping, IEEE/ASME Trans. Mechatron., **21**, 5, (2016) 2307.
- 19) K. Iguchi et al: Agile robotic fish based on direct drive of continuum body, npj Robotics, **2**, (2024) 7.
- 20) K. Sato et al: Stroke frequency, but not swimming speed, is related to body size in free-ranging seabirds, pinnipeds and cetaceans, Proc. R. Soc. B., **274**, 1609, (2007) 471.
- 21) G.L. Kooyman et al: Heart Rates and Swim Speeds of Emperor Penguins Diving Under Sea Ice, J. Exp. Biol., **165**, 1, (1992) 161.
- 22) P. Bethge et al: Diving behaviour and energetics in breeding little penguins (*Eudyptula minor*), J. Zool., **242**, 3, (1997) 483.
- 23) D.G. Ainley and R.P. Wilson: The Aquatic World of Penguins: Biology of Fish-Birds (Fascinating Life Sciences), Springer, Cham, (2023)。
- 24) R. Bannasch: Hydrodynamics of penguins: An experimental approach, The penguins: Ecology and management, Surrey Beatty & Sons, (1995) 141.
- 25) B.M. Culik et al: Underwater Swimming at low energetic cost by pygoscelid penguins, J. Exp. Biol., **197**, (1994) 65.
- 26) T. Mattern et al: Marathon penguins – Reasons and consequences of long-range dispersal in Fiordland penguins/Tawaki during the pre-moult period,” PLOS ONE, **13**, 8, (2018) e0198688.
- 27) C.A. Hui: Maneuverability of the Humboldt penguin (*Spheniscus humboldti*) during swimming, Can. J. Zool., **63**, 9, (1985) 2165.
- 28) N. Harada, T. Oura, M. Maeda, Y. Shen, D.M. Kikuchi, and H. Tanaka: Kinematics and hydrodynamics analyses of swimming penguins: wing bending improves propulsion performance, J. Exp. Biol., **224**, 21, (2021) jeb.242140.
- 29) N. Harada and H. Tanaka: Kinematic and hydrodynamic analyses of turning manoeuvres in penguins: body banking and wing upstroke generate centripetal force, J. Exp. Biol., **225**, 24, (2022) jeb.244124.
- 30) P.R. Bandyopadhyay et al: Biorobotic insights into how animals swim, J. Exp. Biol., **211**, 2, (2008) 206.
- 31) Y. Shen, N. Harada, S. Katagiri and H. Tanaka: Biomimetic Realization of a Robotic Penguin Wing: Design and Thrust Characteristics, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **26**, 5, (2021) 2350.
- 32) T. Shimooka, A. Kakogawa, and H. Tanaka: An agile robotic penguin driven by submersible geared servomotors: various maneuvers by active feathering of the wings, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2024) 303.



田中博人
2008年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了(情報理工学)。ハーバード大学研究員、千葉大学特任助教、東京工業大学准教授を経て、大学統合により2024年から東京科学大学准教授、現在に至る。