

首長竜の遊泳におけるヒレ間・ヒレ内協調運動に関する一考察

A Mechanism for Inter- and Intra-limb Coordination in Plesiosaur Locomotion

○学 横田陸矢 (東北大) 福原 洸 (東北大) 加納剛史 (東北大) 石黒章夫 (東北大)

Rikuya YOKOTA, Tohoku University, r-yokota@riec.tohoku.ac.jp

Akira FUKUHARA, Tohoku University

Takeshi KANO, Tohoku University

Akio ISHIGURO, Tohoku University

The Plesiosauria are a group of aquatic reptiles lived from the Late Triassic Period into the Late Cretaceous Period. They were unique because they evolved four large wing-like flippers almost always identical in size and shape. Due to this unique body structure, it has been assumed that plesiosaurs may have performed a unique swimming style. However, the locomotor patterns of plesiosaurs are yet to be understood. To reveal their locomotion, we develop plesiosaurs-like robots and aim to establish a control mechanism which can generate adaptive locomotor patterns of plesiosaurs through robot experiments. In this paper, we focus on intra-flipper coordination in plesiosaur locomotion because previous studies have discussed only inter-flipper coordination. Therefore, we investigated the thrust of flippers depending on the inter- and intra-flipper coordination.

Key Words: Motor Control, Swimming Robot, Plesiosaur, Flapping and Feathering Motion

1 緒言

首長竜は、中生代に栄えた水生爬虫類であり、四肢に大きなヒレを有していた(図1(a)) [1]. これは、ウミガメやペンギンのような前肢が後肢より大きく、大きな前肢を活用し遊泳する現生の水生生物には見られない(図1(b)), 首長竜固有のボディプランである. この独特なボディプランの獲得は、首長竜類の化石が世界中から発見され、長い生存期間(約1億3千万年間; 鯨類の2倍)と高い多様性(70属; 水生爬虫類の中で最多)を示すことから、水中への適応に優れた進化の一つであったと考えられている [2]. それゆえ、彼らがどのように四肢を活用し遊泳していたのかについて、多くの古生物学者たちの関心を集めてきた. また、彼らの遊泳様式を復元・解明することで、優れた遊泳能力を有する水中ロボットの実現にも貢献することが期待できる.

しかしながら、首長竜には、運動復元の手がかりとなる足跡化石や軟組織、類似したボディプランを有する生物が現代には存在しないため、彼らの遊泳様式の復元・解明は極めて困難な状況にある. このような状況の中で、コンピュータシミュレーション [3,4] や首長竜規範型ロボット [5,6] を用いることで、首長竜の運動復元・解明を目指すといった、工学と融合した手法に注目が集まっている. これらでは、四ヒレ間の協調運動に着目し、首長竜の遊泳様式について遊泳性能や遊泳効率といった観点から考察が行われてきた. しかしこれらは、実験環境や身体構造などが限定的な条件に設定された、定常的なロコモーションに関する議論に留まっている. それゆえ、実世界環境下において状況に応じて変化していたとされる首長竜の遊泳の実態は、依然として明らかになっていない.

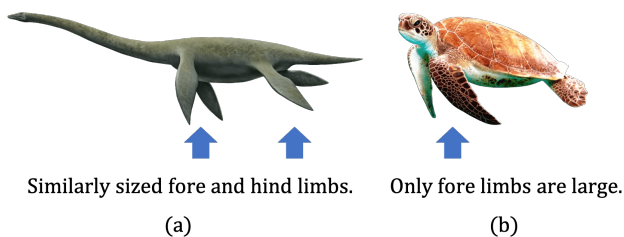


Fig.1 Comparison of (a) a plesiosaur and (b) a sea turtle.

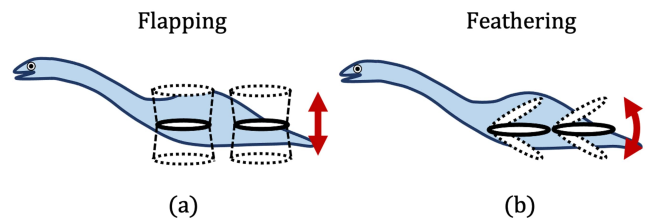


Fig.2 (a) Flapping motion (b) Feathering motion

そこで筆者らは、この現状を打破するため、現生生物に内在する制御原理を手掛かりに、絶滅した古生物の運動様式の復元を目指す新奇なアプローチから、首長竜の遊泳様式の解明に取り組んできた [7]. そして、四脚動物の脚間協調制御メカニズム [8] をもとに、首長竜の前後ヒレ間の状況適応的な協調運動の自発的生成に成功した. 本結果は、陸生爬虫類から進化したとされている首長竜が [9], 進化の過程において脚間協調制御を継承していた可能性が高いことを示唆している. しかしながら、上記の先行研究では、首長竜の遊泳におけるヒレ間の協調運動のみに焦点が当てられており、各ヒレ内に備わる複数の運動自由度がどのように協調して羽ばたき運動を生み出していたのかについては考えられていない.

そこで本研究では、ヒレ間協調に加え、各ヒレ内の羽ばたき運動の協調(上下に羽ばたき運動であるフラッピング運動(図2(a))とヒレの長軸まわりの運動であるフェザリング運動(図2(b))の協調)に注目する. ウミガメやペンギンに代表されるような現生生物では、状況に応じてフラッピング運動とフェザリング運動の位相関係を変化させ、巧みに迎え角を調整することで、高推進性および高機動性の獲得が可能であることが知られている [10,11]. それゆえ、首長竜の遊泳においても状況に応じて迎え角を調整していた蓋然性が高く、新たにヒレ内協調に着目し、遊泳性能や遊泳効率についてロボットを用いて考察することで、より説明能力の優れた首長竜の運動復元・解明が期待できる. 本稿では、首長竜規範型ロボットを構築し、フラッピング運動およびフェザリング運動の協調関係が遊泳中の推進力にどのような影響を及ぼすのかを検証した. また、前後ヒレ間の間隔および各ヒレの可動範囲といった身体的特徴が協調関係に与える影響について検証したため、その結果を報告する.

2 検証用プラットフォーム

首長竜の遊泳について検証するために、首長竜の片側半身を模した前後2ヒレを有するロボットを開発した(図3)。なお、本ロボットは、単純化のために以下の4つの仮定に基づき構築した:

- 首長竜は左右のヒレを同期させて遊泳していた
ウミガメやペンギンに代表される現生生物が、定常的な遊泳の際に左右のヒレを同期させて泳いでいることに基づき、本ロボットは片側半身の前後ヒレ部分のみを模した構造とした[12]。
- 首長竜のヒレは翼形状をしていた
首長竜の四肢の骨格情報やヒレの軟組織の存在に基づき、本ロボットのヒレの形状には、翼のように断面が後方にかけて薄くなるような形状を導入した[13]。なお、単純化のために、ヒレには根本から先端までの弦長が一定である矩形翼を採用した。
- 首長竜のヒレは underwater flight と呼ばれる羽ばたくような運動を行っていた
運動効率の観点から首長竜は、underwater flight と呼ばれるヒレの上下の羽ばたきから生み出される揚力を活用した遊泳様式を示していた可能性が高い[14]。本研究ではこのような仮説に基づき、本ロボットのヒレの運動軌跡を設計した。
- 首長竜のヒレは周期的な underwater flight を行っていた
ウミガメやペンギンなどに代表される現生生物が、周期的な羽ばたき運動により効率的な遊泳を行っていることに基づき、本ロボットのヒレの羽ばたき運動を設計した[15]。

2.1 機構系

各ヒレには2つのサーボモータ(Besttechnology: DYNAMIXEL XW540-T140-R)が実装されており(図4(a))、ヒレを上下に羽ばたくフラッピング運動(図4(b))およびヒレの長軸周りの運動であるフェザリング運動(図4(c))を行うことができる。また、力覚センサ(SNC: Single Point Load Cell-SC616C-500g)をロボットの根元部分に実装した(図4(a))。これにより、各ロボットが遊泳時に得られた推進力(頭尾方向の力)を計測することができる。ここで、これらのサーボモータの制御および推進力情報の取得には、シングルボードコンピュータ(Raspberry Pi 財団: Raspberry Pi 4 Model B)を用いている。なお、本検証では、ロボットを図5に示すような回流水槽へ固定し、擬似的に遊泳する様子を再現して検証を行った。

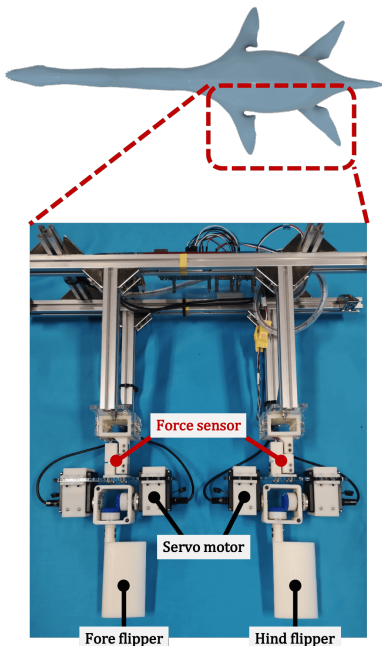


Fig.3 Overview of the plesiosaur-inspired flipper-driven robot.

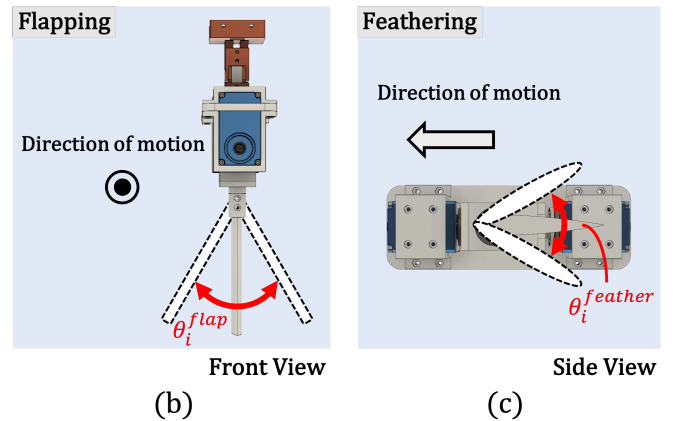
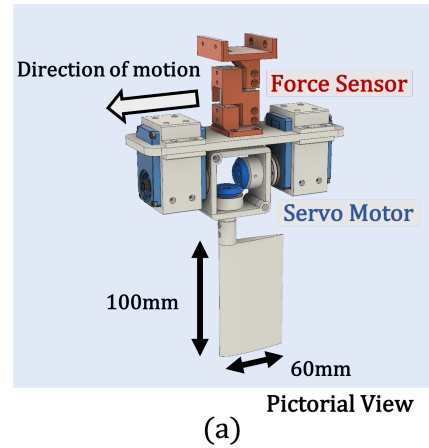


Fig.4 Structure of a flipper. (a)Pictorial view, (b)Front view, (c)Side view.

2.2 制御系

各ヒレには周期的な羽ばたき運動を生成するために位相振動子を実装し、その位相 ϕ_i に応じてフラッピングおよびフェザリングの角度を制御する(図6)。ここで、ヒレの打ち下ろしは $\frac{\pi}{2} < \phi_i \leq \frac{3\pi}{2}$ に、打ち上げは $0 < \phi_i \leq \frac{\pi}{2}$, $\frac{3\pi}{2} < \phi_i \leq 2\pi$ に対応して行うことにした。なお、フラッピング角 θ_i^{flap} とフェザリング角 $\theta_i^{feather}$ を、同一の制御変数 ϕ_i により以下の式のように制御することで、ヒレの羽ばたき運動を実現している:

$$\dot{\phi}_i = \omega, \quad (1)$$

$$\theta_f^{flap} = \theta_{\max}^{flap} \sin(\phi_f + \Delta\phi^{inter}), \quad (2)$$

$$\theta_h^{flap} = \theta_{\max}^{flap} \sin \phi_h, \quad (3)$$

$$\theta_i^{feather} = \theta_{\max}^{feather} \sin(\phi_i - \Delta\phi_i^{intra}). \quad (4)$$

ここで、添字 i はヒレの識別子であり、前ヒレ(f)、後ヒレ(h)に対応する。また、 θ_{\max}^{flap} , $\theta_{\max}^{feather}$ はそれぞれ、フラッピングとフェザリングの振幅である。さらに、 $\Delta\phi^{inter}$, $\Delta\phi_i^{intra}$ はそれぞれ、前後ヒレ間の位相差、各ヒレのフラッピングとフェザリングの位相差を表している。

式(1)は、位相 ϕ_i の時間発展式であり、固有角速度 ω からなる。また、式(2)、式(3)はそれぞれ、前後ヒレのフラッピング($flap$)の目標角度である。さらに、式(4)は、各ヒレのフェザリング($feather$)の目標角度である。

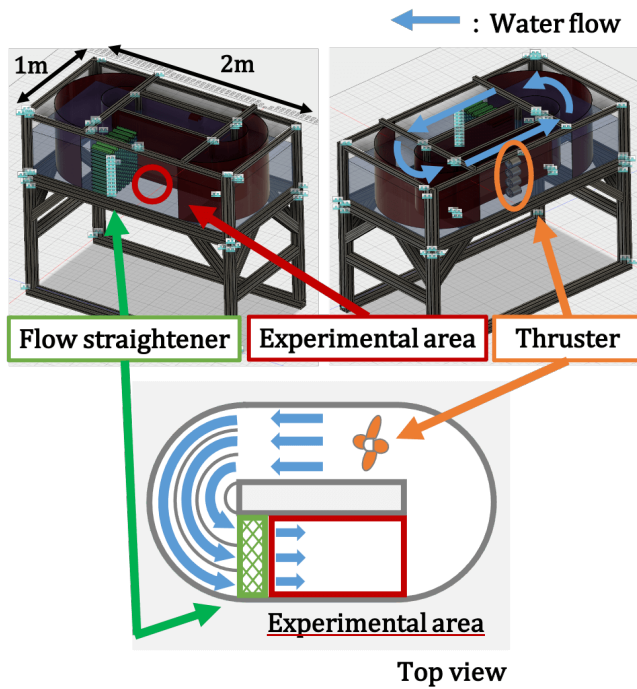


Fig.5 Flume tank.

3 ヒレ間・ヒレ内協調運動に関する検証

3.1 実験概要

首長竜の遊泳におけるヒレ間・ヒレ内協調運動の影響を調査するため、本実験では、検証用プラットフォームを用いて、前後ヒレ間およびヒレ内の位相関係が推進力に与える影響について検証した。なお、前後ヒレ間の位相関係に関しては、前ヒレと後ヒレの位相差 $\Delta\phi^{inter}$ を $0\sim 360[\text{deg}]$ ($20[\text{deg}]$ 間隔) で変化させた。また、各ヒレ内の位相関係については、各ヒレ内のフラッピングとフェザリングの位相差 $\Delta\phi_i^{intra}$ を $0\sim 180[\text{deg}]$ ($15[\text{deg}]$ 間隔) で変化させた。ここで、本実験では単純化のために、前後ヒレのフラッピングとフェザリングの位相差は同じ値とした ($\Delta\phi_f^{intra} = \Delta\phi_h^{intra}$)。

さらに、各試行における羽ばたき運動実験の測定時間は 20 秒間とし、後ヒレが生成する平均の推進力を力覚センサで測定した。なお、推進力の測定では、羽ばたき運動開始の 3 秒後から測定を行っている。また、本実験における各パラメータは表 1 のように設定した。

加えて、本実験では、前後ヒレ間の間隔および各ヒレの可動範囲といった身体的特徴の変化がヒレ間・ヒレ内の協調関係に与える影響についてそれぞれ検証した。なお、前後ヒレ間の間隔および各ヒレの可動範囲 (フラッピングの振幅 θ_{max}^{flap}) は、表 1 の値から $240[\text{mm}] \rightarrow 300[\text{mm}]$, $30[\text{deg}] \rightarrow 15[\text{deg}]$ に変更した。

3.2 実験結果

はじめに、前後ヒレ間およびヒレ内の位相関係が推進力に与える影響について調査した。表 1 のパラメータにおいて、前後ヒレ間の位相差および各ヒレ内のフラッピングとフェザリングの位相差を変化させ、後ヒレの推進力を計測した結果を図 7 に示す。図 7 は、横軸をヒレ内の位相差 $\Delta\phi^{intra}[\text{deg}]$ 、縦軸を前後ヒレ間の位相差 $\Delta\phi^{inter}[\text{deg}]$ とし、後ヒレの推進力 $[g]$ をカラーマップにより示している。

実験結果より、前後ヒレ間およびヒレ内の位相関係に応じて、後ヒレの推進力が大きく変化していることが確認できる。また、前後ヒレ間の位相差が $140[\text{deg}]$ のとき、およびヒレ内のフラッピングとフェザリングの位相差が $60[\text{deg}]$ のときに後ヒレの推進力が最大となっていることがわかる。加えて、このときの後ヒレの最大推進力は、1 ヒレのみで生み出すことができる最大推進力と比較し、約 $200[\%]$ 増加している。

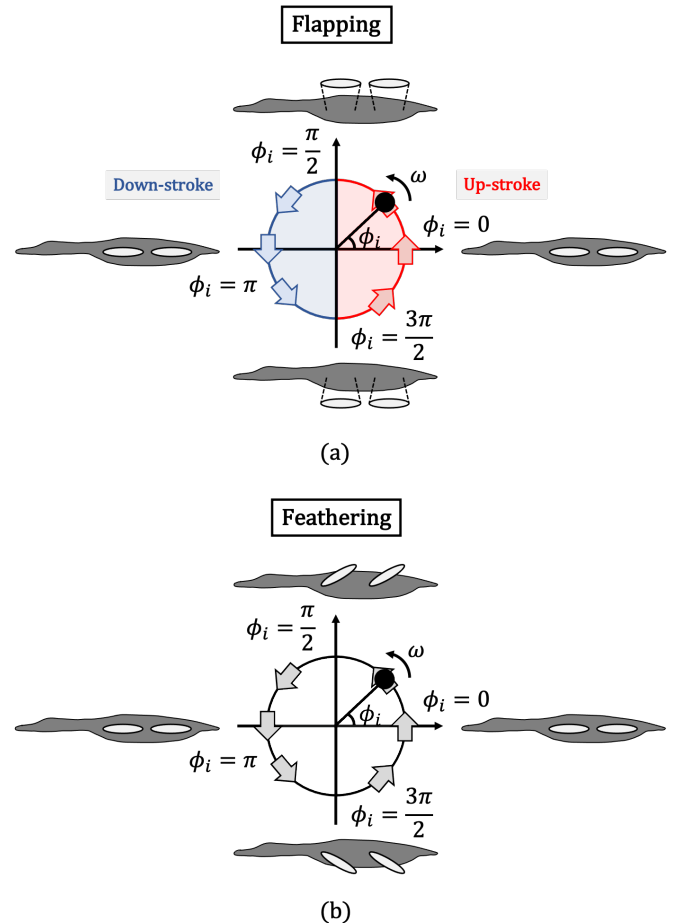


Fig.6 Relationship between phase oscillators and (a)flapping and (b)feathering motion.

Table 1 Experimental parameters.

Parameter description	Symbol	Value
Spacing between fore and hind flipper	D	$240[\text{mm}]$
Flapping and feathering frequency	$f(= \frac{\omega}{2\pi})$	$1.0[\text{Hz}]$
Flapping amplitude	θ_{max}^{flap}	$30[\text{deg}]$
Feathering amplitude	$\theta_{max}^{feather}$	$20[\text{deg}]$
Flow speed of water tunnel	U	$0.26[\text{m/s}]$

次に、前後ヒレ間の間隔および各ヒレの可動範囲といった身体的特徴の変化がヒレ間・ヒレ内の協調関係に与える影響を調査した。前後ヒレ間の間隔を表 1 の値 ($240[\text{mm}]$) から $300[\text{mm}]$ へ変更した場合の、後ヒレの推進力を計測した結果を図 8 に示す。実験結果より、最大推進力を生成する最適な前後ヒレ間の位相差が、 $140[\text{deg}]$ から $180[\text{deg}]$ へ推移していることが確認できる。

また、各ヒレの可動範囲 (フラッピングの振幅 θ_{max}^{flap}) を表 1 の値 ($30[\text{deg}]$) から $15[\text{deg}]$ へ変更した場合の、後ヒレの推進力を計測した結果を図 9 に示す。実験結果より、最大推進力を生成する最適なヒレ内のフラッピングとフェザリングの位相差が、 $60[\text{deg}]$ から $30[\text{deg}]$ へ推移していることが確認できる。以上の実験結果より、身体的特徴の変化に応じて、最適な (最大推進力を生成する) 前後ヒレ間および各ヒレのフラッピングとフェザリングの位相差が変化することがわかる。

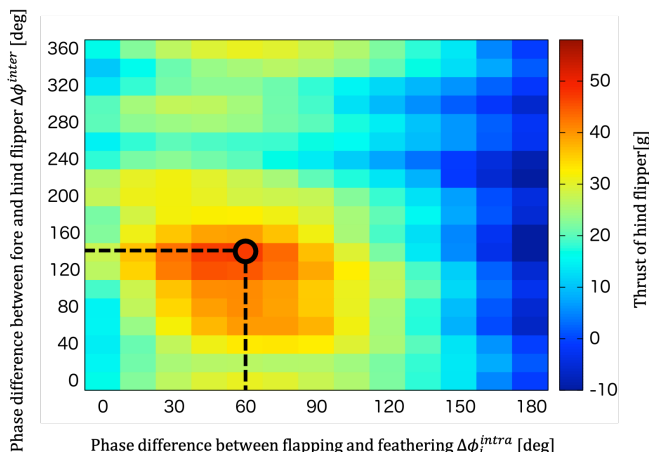


Fig.7 Thrust of the hind flipper depending on the inter- and intra-flipper coordination. (Spacing between fore and hind flipper is 240[mm]. Flapping amplitude is 30[deg].)

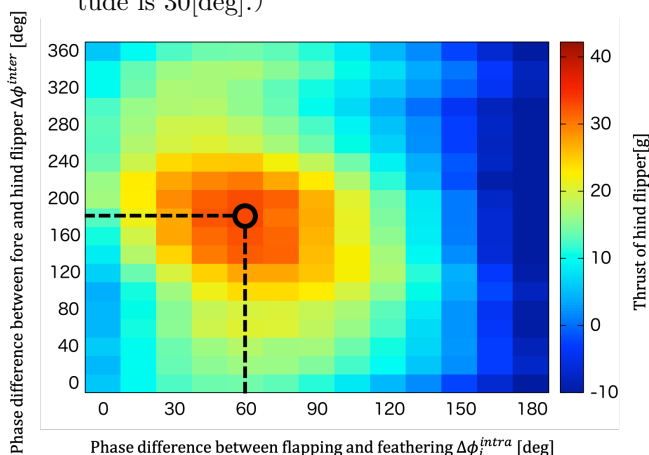


Fig.8 Thrust of the hind flipper depending on the inter- and intra-flipper coordination. (Spacing between fore and hind flipper is 300[mm]. Flapping amplitude is 30[deg].)

4 結言

本稿では、首長竜の遊泳様式を復元・解明するために、前後ヒレ間・ヒレ内協調運動に着目した。そこで、首長竜規範型のヒレを有するロボットを開発し、前後ヒレ間および各ヒレのフラッピングとフェザリングの位相関係が推進力に与える影響を検証した。また、前後ヒレ間の間隔および各ヒレの可動範囲といった身体的特徴がヒレ間・ヒレ内の協調関係に与える影響について検証した。

その結果、前後ヒレ間および各ヒレのフラッピングとフェザリングの位相差の変化に伴い、後ヒレが生成する推進力が変動することを確認できた。さらに、前後ヒレ間の間隔や各ヒレの可動範囲といった身体的特徴の変化により、最適な（最大推進力を生成する）前後ヒレ間および各ヒレのフラッピングとフェザリングの位相差が推移することを確認できた。加えて、首長竜の4ヒレでの遊泳は、現生物に見られる2ヒレでの遊泳と比較して、高い推進性能を示すことが確認できた。以上より、首長竜類は遊泳時に、高い推進性能を得るために、ヒレ間およびヒレ内の位相関係を状況適応的に調整していた可能性が示唆された。

今後の展望としては、状況に応じて変化する最適な前後ヒレ間・ヒレ内位相差を、状況適応的かつ自発的に生成する制御メカニズムの設計・解明を目指す。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費挑戦的萌芽研究 (JP19K21974) および JSPS 科研費若手研究 (JP19K15010)、東北大学学際科学フロンティア研究所領域創成研究プログラムの助成を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

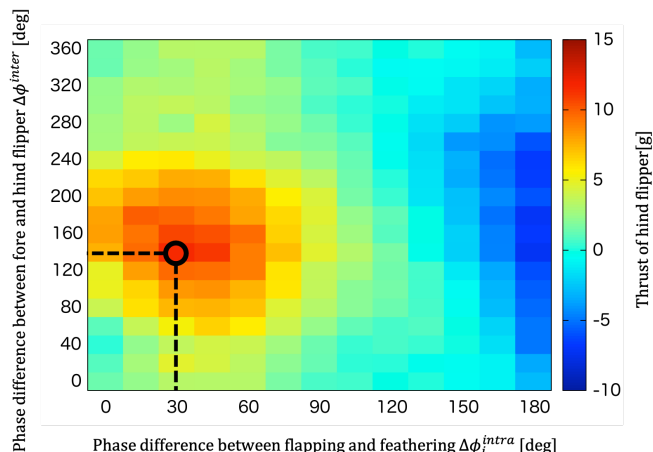


Fig.9 Thrust of the hind flipper depending on the inter- and intra-flipper coordination. (Spacing between fore and hind flipper is 240[mm]. Flapping amplitude is 15[deg].)

参考文献

- [1] Wintrich, T., Hayashi, S., Houssaye, A., Nakajima, Y. and Sander, P. M., "A Triassic plesiosaurian skeleton and bone histology inform on evolution of a unique body plan," *Science Advances*, Vol. 3, No. 12, e1701144, 2017.
- [2] Hayashi, S., "Aquatic adaption of marine reptiles: bone inner structure suggests increasing swimming ability in plesiosaurs," 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 26800270, 2017.
- [3] Liu, S., Smith, A.S., Gu, Y., Tan, J., Liu, C.K. and Turk, G., "Computer simulations imply forelimb-dominated underwater flight in plesiosaurs," *PLoS computational biology*, 85, 11(12), p.e1004605, 2015.
- [4] Hawthorne, M., McMenamin, M. and De la Salle, P., "How Plesiosaurs Swam: New Insights into Their Underwater Flight Using "Ava" a Virtual Pliosaur," *Preprints*, 85, pp.1-10, 2019.
- [5] Long, J.H., Schumacher, J., Livingston, N. and Kemp, M., "Four flippers or two? Tetrapodal swimming with an aquatic robot," *Bioinspir. Biomim (INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING)*, 1, pp.20-29, 2006.
- [6] Muscutt, L.E., Dyke, G., Weymouth, G.D., Naish, D., Palmer, C. and Ganapathisubramani, B., "The four-flipper swimming method of plesiosaurs enabled efficient and effective locomotion," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1861), 2017.
- [7] 佐藤光暁, 福原 洸, 小川久介, 佐藤たまき, William Sellers, 石黒章夫, "自律分散制御の視座に基づく古生物の適応的な運動様式の復元手法," 第 32 回自律分散システム・シンポジウム資料, 2A1-4, 2020.
- [8] Owaki, D., and Ishiguro, A., "A quadruped robot exhibiting spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping," *Scientific reports*, 7(1), 277, 2017.
- [9] Carroll, R. L. and Gaskill, P., "The nothosaur *Pachypleurosaurus* and the origin of plesiosaurs," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020.
- [10] Shen, Y., Harada, N., Katagiri, S., and Tanaka, H., "Biomimetic Realization of a Robotic Penguin Wing: Design and Thrust Characteristics," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B309*, pp.343-393, 1985.
- [11] 東昭, "生物の泳法 (講談社)," 第 6 章, pp.104-113, 1980.
- [12] Peter, L., Lutz and John, A., Musick, "Biology of Sea Turtles," 第 7 章, Vol.1, 1997.
- [13] Bakker, R.T., "Plesiosaur extinction cycles - events that mark the beginning, middle and end of the Cretaceous," *Geological Association of Canada, Special Paper*, 39, pp.641-664, 1993.
- [14] Carpenter, K., Sanders, F., Reed, B., Reed, J., and Larson, P., "Plesiosaur swimming as interpreted from skeletal analysis and experimental results," *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 113(1/2), pp.1-34, 2010.
- [15] Furuya, T., et al., "実験用ウミガメ型海中ロボットの設計・試作," 日本設計工学会 2005 年度春季研究発表講演会, 2005.