

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

中層・底層定置網を対象とした海亀脱出装置の開発
に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2023-07-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 塩澤, 舞香 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1763

博士学位論文

中層・底層定置網を対象とした
海亀脱出装置の開発に関する研究

平成 30 年度
(2019 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用生命科学専攻

塩澤 舞香

博士学位論文

中層・底層定置網を対象とした
海亀脱出装置の開発に関する研究

平成 30 年度
(2019 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用生命科学専攻

塩澤 舞香

中層・底層定置網を対象とした海亀脱出装置の開発に関する研究

目次

要旨

第1章 序論	1
1-1 海亀類の個体数の減少について.....	1
1-2 漁業における混獲問題とその対策.....	3
1-3 沿岸における海亀類の混獲対策.....	5
1-4 海亀脱出支援システム.....	5
1-5 本研究の目的と概要.....	7
第2章 海亀のはばたきと推進力	11
2-1 材料と方法.....	11
2-1-1 実験場所と使用した海亀について	11
2-1-2 実験の概要	12
2-2 結果	14
2-2-1 推進力とはばたきのパターン	14
2-2-2 推進力ピーク値, 力積, はばたき周波数の変化	14
2-2-3 セット内のはばたき回数の変化	16
2-3 考察	17
2-3-1 推進力ピーク値の変化	17
2-3-2 海亀の推進力と海亀脱出装置 (TRD) の扉の開放について.....	18
2-3-3 力積の変化と推進力ピーク値との比較	18

2-3-4	セット内のはばたき回数の変化	19
第3章 中層箱網内における海亀の推進力の推定		35
3-1	材料と方法.....	36
3-1-1	海亀の推進力の計測方法	36
3-1-2	推進力ピーク値の推定式の選定	36
3-1-3	海上実験に使用した海亀	37
3-1-4	海上実験に使用した計測機器と実験手順	37
3-2	結果	39
3-2-1	推進力ピーク値の推定式	39
3-2-2	中層箱網内におけるはばたき周波数と推進力ピーク値.....	40
3-3	考察	41
第4章 TRD の閉扉力		59
4-1	TRD の基本設計.....	59
4-2	TRD の閉扉モーメント.....	60
4-2-1	TRD の閉扉力の構成要素	60
4-2-2	閉扉モーメントの推定	61
4-2-3	静水下における閉扉モーメントの計測	63
4-2-4	流れ下における閉扉モーメントの計測	64
4-3	結果	65
4-3-1	土台ネットの弾性モーメント	65
4-3-2	土台ネットの復元モーメント	65
4-3-3	扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント	66

4-3-4	閉扉モーメントの推定値と実測値の比較	66
4-3-5	流れ下における閉扉モーメント	66
4-4	考察	67
4-4-1	閉扉力を構成するモーメント	67
4-4-2	扉の重ね合わせ幅と水中重量が閉扉モーメントに与える影響.....	68
4-4-3	流れ下における閉扉モーメント	68
第5章 TRD の適切な仕様について		82
5-1	材料と方法.....	83
5-1-1	水中に滞留した海亀の推進力	83
5-1-2	箱網内で突き上げを行う海亀の推進力	84
5-2	結果.....	84
5-2-1	水中に滞留し続けた海亀の脱出の可否について	84
5-2-2	中層箱網内で突き上げを行う海亀の脱出の可否について.....	84
5-3	考察.....	85
第6章 漁獲対象種の逸出の評価		93
6-1	材料と方法.....	94
6-1-1	海亀に対する漁獲対象種の行動の計測	94
6-1-2	TRD に対する漁獲対象種の行動観察	95
6-2	結果.....	95
6-2-1	海亀に対する漁獲対象種の行動	95
6-2-2	TRD に対する漁獲対象種の行動	96
6-3	考察.....	97

第7章 突き上げ強度の経時変化とその影響要因	106
7-1 材料と方法.....	107
7-1-1 実験概要	107
7-1-2 突き上げと遊泳	108
7-1-3 活動量の推定	108
7-1-4 浮上時のはばたき周波数	109
7-1-5 海亀の行動に影響を与える要因の検討	110
7-2 結果.....	110
7-2-1 網内における海亀の突き上げ行動	110
7-2-2 活動量の変化と影響要因	111
7-2-3 連続浮上時のはばたき周波数とその後の行動	112
7-3 考察.....	113
7-3-1 突き上げ開始前の海亀の行動	113
7-3-2 突き上げ開始後の海亀の行動	114
7-3-3 海亀脱出支援システムの設計について	116
第8章 総括	127
謝辞	136
引用文献	137

博士学位論文内容要旨
Abstract

専攻 Major	応用生命科学	氏名 Name	塩澤 舞香
論文題目 Title	中層・底層定置網を対象とした海亀脱出装置の開発に関する研究		

漁業における混獲は、希少種である海亀類の個体数減少要因の一つであると指摘されている。我が国沿岸で操業される定置網漁業においても、海亀類の混獲が多数報告されている。特に、魚捕部である箱網が海中に沈めて設置される中層・底層定置網においては、入網した海亀が溺死する可能性が極めて高い。そこで近年、中層・底層定置網における海亀類の混獲削減手法として、箱網の天井網に傾斜を配して角錐状とし、頂点部に海亀脱出装置 (Turtle Releasing Device: TRD) を設けた海亀脱出支援システムが考案された。入網した海亀は、呼吸のために海面に浮上しようとするが、天井網に遮られ、頭部で天井網を突き上げる行動をとる (以下、突き上げ)。本システムにおいて、海亀は天井網の傾斜に沿って突き上げを行いながら TRD まで誘導される仕組みであるが、TRD の詳細な仕様は未定であった。本研究では、TRD の開発と仕様の検討を目的とした。TRD は、天井網に設けた海亀の脱出口を扉で覆い、海亀が扉を押し開けて脱出するものとした。TRD には、潮流による流体力の影響下においても海亀が自力で開けることが可能で、なおかつ海亀の脱出後に速やかに閉鎖することが求められる。本研究では、海亀の推進力と扉の閉じようとする力 (閉扉力) について調べ、TRD の適切な仕様を検討した。

海亀の推進力の計測と推定

アオウミガメ 9 頭 (直甲長 0.39–0.72 m) とアカウミガメ 4 頭 (同 0.63–0.84 m) を用いて、海亀と張力計をワイヤーで接続し、水面下に滞留させた海亀の推進力を 1 頭ずつ計測した。各はばたきによって生じた推進力の最大値を推進力ピーク値とした。10 秒以内の間隔で連続して行われたはばたきをセットとし、セット毎の推進力ピーク値、はばたき周波数、はばたき回数の変化を調べた。大きな個体ほど推進力の最大値は大きかった。セット毎の推進力ピーク値の平均はセットを重ねるごとに小さくなり、約 30 分後にはアオウミガメで平均 57.6 N (SD = 25.2)、アカウミガメで平均 71.0 N (SD = 48.1) となった。はばたき周波数とはばたき回数もセット毎に小さくなり、はばたき回数は約 30 分後には平均 12 回 (SD = 8.2) となった。

さらに、箱網内で突き上げを行う海亀の推進力を調べるために、水槽実験で得たはばたき周波数 f (Hz) と直甲長 l (m) を説明変数とした重回帰分析を行い、推進力ピーク値 F_P (N) の推定式 $\ln F_P = 1.813 \ln f + 1.905 \ln l + 6.265$ ($R^2 = 0.714$) を得た。定置網の中層箱網内 (10 × 30 × 10 m) に、ビデオカメラと深度計を装着したアカウミガメ 6 頭 (直甲長 0.63–0.84 m) を 1 頭ずつ入網させ、約 20 分後に回収する実験を計 9 回行った。ビデオカメラの映像から得たはばたき周波数を用いて推定された突き上げ時の推進力ピーク値は、平均 111.2 N (SD = 71.6) であった。

TRD の閉扉力についての実験と理論考察

Φ6mm-0.1m (扉枠の太さ-重ね合わせ幅)、Φ6mm-0.2m、Φ6mm-0.3m、Φ8mm-0.2m、Φ8mm-0.3m の計 5 種類の扉を使用し、実験用箱網 (3 × 3 × 1.1 m) の天井網中央部に装着した各扉の静水下における閉扉モーメント M_θ (Nm) を張力計の計測値より得た。さらに、 M_θ を構成すると考えられる 3 つのモーメント (土台ネットの弾性モーメント M_E 、土台ネットの復元モーメント M_S 、扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント M_W) を実測あるいは試算によりそれぞれ求めた。 M_E と M_S は開放角度の増加に伴い増加したが、 M_W は減少した。3 つのモーメントを足し合わせて得た M_θ の推定値は、実測値と概ね一致し、

M_{θ} は M_E , M_S , M_W で構成されるとするのが妥当であると考えられた。

次に、大型回流水槽において、扉の支点側あるいは開放側から流れを受けた際の閉扉モーメント $M_{R\theta}$ を計測した。 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$, $\Phi 6\text{mm}-0.3\text{m}$, $\Phi 8\text{mm}-0.2\text{m}$, $\Phi 8\text{mm}-0.3\text{m}$ の4種類の扉は、海亀脱出時における最大の開放角度である 60° に開いた際に、定置網の操業限界とされる 0.4 m/s の流れを開放側から受けた場合でも閉鎖することが確認された。このうち、開放に要する力が小さく、海亀が最も脱出しやすいと考えられるのは $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉であり、この扉が同様の流れを支点側から受けた際の $M_{R\theta}$ は 30.4 Nm であった。このことから、海亀は真上方向に 55.2 N 以上の推進力を発揮すれば、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉を押し開けて脱出できることを明らかにした。

TRD の適切な仕様の設計

海亀の推進力と $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉の閉扉力を比較し、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が、海亀が脱出可能な仕様であるかを検討した。水中で30分間断続的にはばたいた後の海亀は、 55.2 N を上回る推進力を発揮していた。また、定置網の中層箱網内で突き上げを行う海亀は、全80セット中74セットの突き上げにおいて、セット内の半数以上の突き上げ時に 55.2 N を上回る推進力を発揮していたと推定された。 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉は、海亀の脱出にも十分であり、適切な仕様であると考えられた。

漁獲対象種の逸出の評価

TRD から漁獲対象種が逸出する可能性を検討するために、アカウミガメ9頭の背甲に前・後方向に向けてビデオカメラ2台を装着して1頭ずつ中層箱網内に入網させ、漁獲対象種の手付海亀からの逃避と海亀への追従遊泳の有無を調べた。また、TRD 付近への出現種をタイムラプスカメラにより調べた。接近する海亀から、すべての種が逃避した。一方、ブリ、カンパチ、ツムブリ、イシダイによる追従遊泳が観察された。追従の継続時間の中央値が最も大きかったのは、カンパチとブリの群れの26秒であった。ツムブリの追従は箱網上層部に至っており、海亀に追従して逸出する可能性が高いと考えられた。TRD 付近には33種の漁獲対象種が来遊し、このうち17種が鉛直上向きに遊泳して吻端でTRD に触れる行動をとった。漁獲対象種の逸出を防止するためには、TRD の確実な閉鎖が重要である。

突き上げ強度の経時変化とその影響要因の考察

混獲時の海亀の突き上げ行動の特性を調べるために、定置網の中層箱網内に、ビデオカメラ、加速度ロガー、深度計を装着した海亀5頭を1頭ずつ入網させる実験を計10回行った。ビデオカメラからはばたき周波数を、加速度ロガーから活動量の指標であるODBAと水温を取得した。5秒以内に連続して行われた突き上げを1セットとした。海亀は、実験開始から平均5.1分後 ($SD = 3.3$) に最初の突き上げを開始した。突き上げセット内の平均ODBAは時間経過に伴い大きくなったが、最初の突き上げから平均12.3分後 ($SD = 2.0$) には減少に転じた。5m以上の連続した浮上(連続浮上)のうち35%で、はばたき周波数が浮上に伴い増加した。はばたき周波数の増加を伴う連続浮上直後の突き上げ時のODBAは、他の突き上げ時のODBAに比べて大きかった。突き上げ回数、ODBA、はばたき周波数はいずれも水温の影響を受けていたことから、水温が低い季節や地域においては、TRD の仕様の変更を検討する必要があることを示した。

以上のように、本研究では、流れ下においても海亀が脱出可能であり、かつ海亀の脱出後に確実に閉鎖する適切なTRDの仕様を検討した。流れ下においても閉鎖する扉の中では、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が最も海亀が脱出し易く適切であると考えられた。海亀に追従して、あるいはTRDの隙間から漁獲対象種が逸出する可能性が考えられたため、海亀脱出時以外の確実な扉の閉鎖が重要である。海亀の推進力は、水温による影響を受けるため、海亀脱出支援システムを導入する際には季節や環境条件についても十分に考慮する必要がある。TRDの普及にあたっては、特に揚網作業時においてTRDの取り扱いに配慮が必要となる可能性が高いため、操業試験を継続的に行い、TRDの挙動、海亀の脱出、漁獲物の逸出についても評価した上で、漁業者への普及を進めたいと考える。

第 1 章 序論

1-1 海亀類の個体数の減少について

現在，世界には 7 種の海亀が棲息しており，これらは熱帯域から温帯域にかけて広く分布している。日本近海にはアカウミガメ *Caretta caretta*，アオウミガメ *Chelonia mydas*，タイマイ *Eretmochelys imbricata*，ヒメウミガメ *Lapidochelys olivacea*，オサガメ *Dermochelys coriacea* の 5 種が来遊し，このうちアカウミガメ，アオウミガメ，タイマイの 3 種は日本の沿岸でも産卵する（Dodd 1988, Karl & Bowen 1999, Uchida *et al.* 1982）。海亀は，人間との関わりが深い生物である。肉や卵はタンパク質が豊富であるため，一部の地域では古くから食材として利用されてきた。また，しばしば長寿や豊漁などの信仰の対象としても扱われる（小島 2005）。さらに，タイマイの甲羅に見られる黄色と褐色のモザイク模様が珍重され，かつては象牙，金，宝石に並ぶ宝飾品として扱われ，日本を含む国際間での輸出入が盛んに行われた（Meylan & Donnelly 1999）。一方，近年海亀類は世界的に個体数の減少が危惧されており，その全種が絶滅のおそれのある野生動植物の種の国際取引に関する条約（Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora: CITES, 通称ワシントン条約）の付属書 I に記載され，国際間での商取引が厳しく規制されている。また，国際的な自然保護機関である国際自然保護連合（International Union for Conservation of Nature and Natural Resources: IUCN）における絶滅のおそれのある野生生物の種のレッドリスト（The IUCN Red List of Threatened Species）では，情報不足（Data deficient: DD）のヒラタウミガメを

除く 6 種が絶滅危惧種に指定されている (IUCN 2018 年 11 月現在, Godfrey & Godley 2010, Seminoff & Shanker 2008)。オサガメとアカウミガメについては, それぞれ 2013 年と 2015 年に生息域の異なる個体群ごとの評価が公表され, アカウミガメのうちで日本に唯一の産卵地を持つ北太平洋個体群 (Resendiz *et al.* 1998) については軽度懸念 (LC: Least concern) となり, 絶滅危惧種から外された (IUCN 2018)。これは, これまで行われてきた海亀類の保護活動の成果でもあり, 個体数の維持と回復のために今後も継続して適切な保護活動を行っていく必要があると評価されている (IUCN SSC Marine Turtle Specialist Group 2015)。なお, 米国内において絶滅のおそれのある種およびその依存する生態系の保全を目的として策定された, 絶滅の危機に瀕する種の保存に関する法律 (Endangered Species Act: ESA) では, 海亀類はいずれも絶滅のおそれがある種 (Endangered species) またはその危険にさらされている種 (Threatened species) に指定されており, アカウミガメの北太平洋個体群は絶滅のおそれがある種に指定されている (U. S. Fish and Wildlife Service 2018 年 11 月現在)。

海亀類の個体数が減少した要因として, 産卵や孵化が行われる陸上域においては, 護岸や港湾建設等の海浜工事による産卵場の環境変化や喪失が挙げられている (Lutcavage *et al.* 1997)。一方, 海亀が大半の時間を過ごす海洋域においては, 気候変動や海洋汚染, 走行する船舶との衝突に加え, 漁業における偶発的な捕獲 (混獲) が指摘されている (阿部 & 南 2008, FAO 2010, Hawkes *et al.* 2009, Lewison *et al.* 2004, Lewison *et al.* 2013)。日本国内においては, これまで民間団体や研究機関により保護・研究活動が行われてきたが,

未だ個体数減少への懸念は拭かれていない。前述のように，日本沿岸は複数種の海亀の索餌場所や産卵場所であるため，国内における海亀の適切な保護や保全のための活動が強く求められている。

1-2 漁業における混獲問題とその対策

混獲とは，漁業において漁獲対象外の生物や未利用サイズの個体を偶発的に捕獲することである（Hall *et al.* 2000, Davies *et al.* 2009）。特に，海鳥類，鯨類，サメ類，鰭脚類，海亀類などの大型海洋生物は長寿命かつ繁殖率が低いために，混獲がそれらの資源量や生態系へ及ぼす影響は大きい（Soykan *et al.* 2008, Phillips *et al.* 2016）。また，こうした認識により，混獲が漁業の存続に影響を及ぼす場合もある。例えば，かつて日本が太平洋の公海上において行っていた大規模流し網漁業は，海鳥類，海産哺乳類，海亀類などの混獲による生態系への影響を指摘され，国連総会決議に基づき 1992 年末をもって全面操業停止となった（谷津 1995）。近年においても，ロシアの排他的経済水域内におけるさけ・ます流し網漁が 2016 年より操業禁止となった例がある（平成 29 年度水産白書）。

資源の持続的利用と同時に生態系の保全が強く求められる現代において，漁業における混獲対策手法の確立は極めて重要な課題となっている（浦 2008）。人々の環境への意識と問題認識から混獲が社会問題となる契機となったのは，1970 年代に端を発したエビトロール漁業における海亀類の混獲であり（Shiode & Tokai 2004, Gilman *et al.* 2009, FAO 2010），海亀排除装置（Turtle Excluder Device; TED）が開発された（NOAA 1995）。TED は，網内にグリッドを装着することで曳網中に海亀を能動的に排除するもので，米国や東南アジア

を始め世界各地で使用されている（*Mitchell et al. 1995, Epperly 2003*）。まぐろ延縄漁業では、海鳥類、サメ類、海亀類など多くの生物種が混獲されるため、その対策手法も多様である。海鳥類に対しては鳥おどしライン、サイドセッティング、青色餌、水中投縄、夜間投縄、加重枝縄、放水装置等が考案され（*Bull 2007, Melvin et al. 2014*）、現在では地域漁業管理機関により各漁船に対して複数の対策手法の導入が義務付けられている（*WCPFC 2017, IOTC 2012*）。サメ類に対しては電気刺激や磁石を使った方法が考案されたが、費用がかさむことから現場での実用化には至っていない（*Hart & Collin 2015*）。海亀類に対してはサークルフック（*Watson et al. 2005*）、魚餌の使用（*Gilman et al. 2006*）、浅枝縄の除去（*Beverly et al. 2009*）、中立ブイシステム（*Shiode et al. 2005, Shiga et al. 2008*）等の手法が考案され、特に大型のサークルフックについては漁獲対象魚の漁獲率を向上しつつ海亀類の混獲率を減らす効果が認められ、世界各地で使用されている（*Gilman & Huang 2017*）。このように、遠洋や沖合などの公海における漁業に対しては、地域漁業管理機関を通じて多くの手法が提案されてきた。一方で、沿岸における漁業に対してはまだ対策が十分でない（*Wang et al. 2013, 阿部 & 南 2008*）。沿岸で操業される漁業は、規模は小さいながらも種類と経営体数が多いため、混獲が生態系へ与える影響も大きいと考えられている（*Shester & Micheli 2011*）。特に、海亀類は産卵のために沿岸にも来遊することから、混獲対策手法の確立は非常に重要である。

1-3 沿岸における海亀類の混獲対策

ペルーやメキシコの沿岸で操業される刺し網漁業においては、毎年多くの海亀が網に絡まって混獲されている (Wallace *et al.* 2010, Wallace *et al.* 2011, Northridge 1991)。その対策として、浮子網に LED 照明を装着する方法が考案され、漁獲量に影響を与えることなく海亀の混獲数を約 3 分の 1 まで削減できることが報告されている (Wang *et al.* 2010, Wang *et al.* 2013, Ortiz *et al.* 2016)。その他にも、浮子網に装着する浮子を減らすことによる海亀混獲削減効果も認められ (Peckham *et al.* 2016)、いずれも実用化に向けて検証が続いている。こうした網への絡まりによる混獲は定置網漁業 (必携早わかり定置網技術総覧 2002, 西山 1974) においても発生しており、その対策手法として垣網の上部の網地を取り除く方法が考案された。これにより海亀の垣網への絡まりや囲い網部への入網が減少し、一部の魚種については漁獲量への影響がないことが実証されている (DeAlteris & Silva 2008)。しかし、定置網は漁獲対象とする魚種が多様で地域によって大きく異なるため、特に上層部を遊泳する魚の入網数や入網サイズに影響を与える可能性が懸念される。このように、考案された混獲回避手法を実用的なものとするためには、導入や維持管理にかかるコストが低いこと、使用方法が簡便で操業作業に支障をきたさないこと、漁獲に悪影響を及ぼさないことが求められる。

1-4 海亀脱出支援システム

定置網の中でも、最終的に魚群を集める魚捕部 (以下、箱網) が天井で覆われてかつ水中に沈めて設置されるものにおいては、迷入

した海亀の多くは網に絡まずとも海面まで浮上できずに溺死する可能性が極めて高い(塩出ら 2006, Ishihara *et al.* 2011, 石原ら 2014)。これまで、定置網においてはアザラシによる食害を防ぐために箱網の入り口に格子を設ける方法や (Lehtonen & Suuronen 2004) , 音響装置による駆逐方法 (Fjälling *et al.* 2006) などが考案されたが、これらによる漁獲量の減少が懸念されている。そこで、小型定置網を対象として、漁獲物の逸失を防ぎながら入網した海亀を網外へ脱出させるための海亀脱出装置が考案された(阿部 2006)。この装置は、魚捕部である袋網の天井部に、海亀が通れる程度の大きさの穴(脱出口)とそれを覆う扉を設けたものである。入網した海亀は、呼吸への欲求が高まると海面へ浮上しようとして頭部で天井網を突き上げるような行動(以後、突き上げ)をとり、扉を押し開けて脱出する。扉は、その端の一部を袋網の天井部に重ね合わせて取り付けられており、通常は扉の自重で閉鎖している。また、海亀の脱出時に押し開けられた際には、袋網と扉の重ね合わせ部分の弾性力等も作用して、海亀の脱出後に自動閉鎖する仕組みを有している。対象生物の入網を防ぐのではなく、入網したものを網外へ逃がすという点において、これまでに定置網用に考案された方法と大きく異なる。この海亀脱出装置を小型定置網の袋網に設置して行った実験では、大半の海亀が突き上げを行いながら袋網内から自力で脱出することと、海亀の脱出後には扉が自動閉鎖し、海亀脱出装置からの漁獲物の逸出がほぼ起こらないことが確認された(阿部 2006)。一方、規模が大型の中層・底層定置網(野村ら 1964)においては、魚捕部である箱網に入網した海亀が自然に脱出装置までたどり着くことは困難である。そこで、中層・底層定置網の箱網の天井網に傾斜を設け

て角錐状とし、頂点部に海亀脱出装置を装着した海亀脱出支援システム（Turtle Releasing System: TRS）が考案された（Takahashi *et al.* 2010, Shiode *et al.* 2011, Fig.1-1）。海亀は、突き上げにより天井網の傾斜に沿って海亀脱出装置まで誘導され、さらに突き上げを行い自力で脱出する仕組みである。天井網の傾斜による海亀の誘導効果については、海亀を用いた水槽実験や現場検証により確認されている（Shiode *et al.* 2011, Shiode *et al.* 2017）。一方、中層・底層定置網の箱網の規模や形状は小型定置網の袋網とは異なるため、小型定置網用の海亀脱出装置をそのまま導入することは困難である。例えば、小型定置網では魚捕部である袋網の天井部に穴を開けて脱出口とし、扉を袋網に直接装着していたが、大型の定置網の場合は箱網の天井網の張りが十分ではなく、天井網に直接扉を装着すると扉の閉鎖する力が弱く、潮流下において閉鎖を保つことが困難であると予想される。また、小型定置網の場合に想定されていたサイズよりも大きな個体が入網する可能性もあるため、規模が大型の中層・底層定置網用の海亀脱出装置を新たに考案する必要がある。

1-5 本研究の目的と概要

本研究では、中層・底層定置網用の海亀脱出装置（Turtle Releasing Device: TRD）の考案と適切な仕様の検討を目的とした。本研究における TRD の形状は、阿部（2006）で考案された小型定置網用の海亀脱出装置に倣い、海亀の脱出口と扉からなり、海亀が扉を押し開けて脱出するものとした。TRD には、潮流による流体力の影響下においても海亀が自力で押し開けることが可能で、なおかつ海亀の脱出後に速やかに閉鎖することが求められる。本研究では、海亀の推進

力と扉の閉じようとする力（閉扉力）について調べ、TRDの適切な仕様を検討し、さらにその実用性について評価した。

本研究は、全8章により構成されている。第2章では、水槽内で海亀を張力計に接続し、呼吸を行えない状況下での海亀の推進力を計測してその変化を明らかにする。また、海亀は前肢のはばたきによって生じる推進力によって遊泳し（Wyneken 1997）、突き上げ時にも前肢を大きくはばたかせることから、推進力についてより詳細に把握するために、前肢のはばたき回数やはばたき周波数といったはばたき様式についても明らかにする。

第3章では、計測することが困難である、定置網の箱網内で突き上げを行う海亀の推進力を明らかにするために、第2章における結果を利用して推進力の推定式を得る。そして、背甲に計測機器を装着した海亀を実際の定置網の中層箱網内へ入網させ、計測機器から得られた前肢のはばたきに関する情報と推定式をもとに、中層箱網内で突き上げを行う海亀の推進力を推定する。

第4章では、TRDの扉の閉鎖に作用する複数のモーメントの各推定式を得た上で、扉の仕様と各モーメントの関係を明らかにし、扉の仕様を決定する際に留意すべきことを整理する。また、流れを受けた場合に扉が閉まろうとするモーメントを計測し、流れ下においても確実に閉鎖する扉の仕様を明らかにする。

第5章では、第2章で明らかにした水中で滞留し続けた際の海亀の推進力、第3章で明らかにした中層箱網内で突き上げを行う海亀の推進力、第4章で明らかにしたTRDの仕様と閉扉力の特性、さらに操業作業性や海亀の脱出のし易さ等を総合的に比較検討しながら、適切な仕様のTRDを提案する。

第 6 章では、TRD から漁獲対象種が逸出する可能性について検討する。ここでは、海亀の背甲に前後方向にビデオカメラを装着し、箱網内で遊泳させることで、海亀に対する漁獲対象種の行動を把握する。また、定置網の中層箱網に導入した海亀脱出支援システムの TRD にビデオカメラを装着し、TRD 付近に来遊する生物とその行動を把握する。

第 7 章では、中層箱網内における海亀の突き上げ行動の特性とその影響要因について調べる。定置網のような受動漁具における混獲削減手法を適切に開発するためには、対象生物の混獲時の行動特性について把握することが重要である。そこで、箱網に入網した海亀特有の行動であり、海亀脱出支援システムにおける海亀の脱出において特に重要な突き上げに着目し、海亀がいつ突き上げを始めるのか、どのくらい突き上げを継続するのか、またその時の活動量はどのように変化するのかについて調べ、水温、海亀の甲長、経過時間、その他の特徴的な海亀の行動との関係についても明らかにする。

以上を総括して、漁獲対象種を逃がすことなく海亀のみを脱出させる TRD の仕様を提案するとともに、その有用性および導入時の留意点について考察する。なお、本研究において行った実験は、すべて東京海洋大学および実験実施場所の動物実験委員会の承認のもと、動物実験取扱規則に従って実施されたものである。

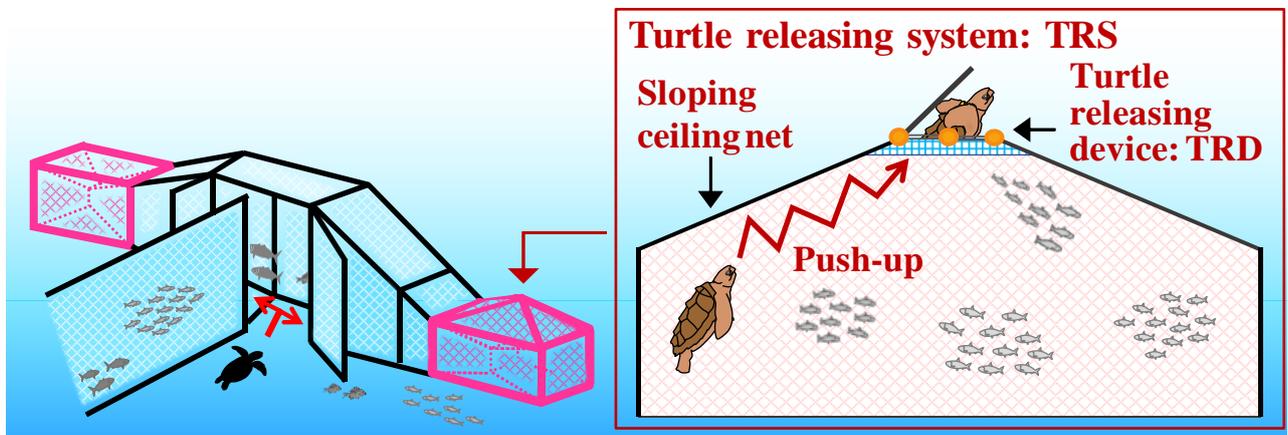


Fig.1-1 Overview of a set net with submerged bag nets (left) and a turtle releasing system (right).

第 2 章 海亀のはばたきと推進力

海亀が脱出可能な TRD を設計するためには、海亀の推進力を把握する必要がある。中層・底層定置網の箱網内に入網した海亀は、呼吸を行うことができないという特異的な環境下に置かれる。したがって、そうした状況下において海亀が発揮できる推進力とその変化を把握する必要がある。本章では、水槽内に滞留させた海亀の推進力を計測した。また、海亀は前肢のはばたきによって生じる推進力を利用して遊泳し (Wyneken 1997) 、突き上げ時も同様に前肢を大きくはばたかせる。そこで、連続して行われるはばたきの回数やはばたき周波数といったはばたき様式について調べた。

2-1 材料と方法

2-1-1 実験場所と使用した海亀について

2012 年 7 月 27 日から 29 日および 2014 年 7 月 27 日から 8 月 3 日に、国立研究開発法人水産総合研究センター (現 水産研究・教育機構) 西海区水産研究所亜熱帯研究センター八重山庁舎の屋外水槽 (10 × 10 × 2.1m) において実験を行った。2012 年にはアオウミガメ 6 頭 (直甲長: 0.48 – 0.72m, 個体 ID: G1 – G6) , 2014 年にはアオウミガメ 3 頭 (直甲長: 0.39 – 0.58m, 個体 ID: G7 – G9) およびアカウミガメ 4 頭 (直甲長: 0.63 – 0.84m, 個体 ID: L1 – L4) を使用した (Table 2-1) 。アオウミガメはいずれも石垣島周辺で捕獲されたもの、アカウミガメは三重県内の定置網で混獲されたものを用いた。アオウミガメは陸路、アカウミガメは陸路と空路にて、い

ずれも実験開始の約一ヵ月前に実験場所へ搬入し、給餌をしながら畜養した。

2-1-2 実験の概要

実験装置の概要を Fig.2-1 に示す。海亀の後方の縁甲板と水槽上部に固定されたデータ出力機能が付いた張力計（株式会社IMADA 製 ZP-1000N，最大荷重：1000N）を，3箇所の滑車を介して径 2mm のステンレスワイヤーで接続することにより，海亀が前肢をはばたかせて前進しようとする際に生じる張力を計測した。張力計の計測間隔を 0.064 秒（計測周波数 15.6Hz）として，得られた値をデータ処理ソフトウェア（ZP Recorder，株式会社IMADA）に取り込んだ。実験は，水槽内を自由に遊泳あるいは静止している海亀をダイバーが捕捉し，張力計に接続したワイヤー先端のフックを後方の縁甲板に取り付けて行った。海亀の捕捉からフックの装着までに要する時間は 10 - 20 秒であった。海亀と水槽底面の滑車との間のワイヤー長は約 50cm であり，実験中海亀は水面へ浮上することができない状態であった。海亀とステンレスワイヤーの水中重量は計測値に対して十分に小さく無視できる程度の値であり，また，実験中の海亀は固定された張力計にワイヤーで繋がれておりほぼ前進できない状況であったため，張力計の計測値を海亀の前肢のはばたきによって生じる力と捉えて差し支えないと考え，以後，計測値を海亀の推進力と呼ぶこととした。

大半の海亀は張力計に取り付けた直後から激しくはばたき，その後，静止と連続したはばたきを交互に繰り返した。計測開始から 10 分程度経過した時点ではばたきの回数は顕著に減少し，30 分程度経過すると自発的なはばたきはほぼなくなった。推進力が十分に小さ

なくなった時点の値を計測するために、計測開始から一定時間経過後に、ダイバーが海亀に触れることで刺激を与え、再開されたはばたきがなくなった時点で実験終了とした。本実験では、ダイバーが刺激を与えるタイミングを計測開始から10分後、もしくは30分後とし、それぞれ10分後刺激実験、30分後刺激実験と呼ぶこととした。さらに、2012年に実施した実験のうち、ダイバーによる刺激を与えずに終了とした4回の実験を無刺激実験と呼ぶこととした。各実験の実施回数をTable 2-2に示す。刺激を与えるタイミングは、実験中の海亀の様子を見ながら決定した。なお、実験中はダイバーが常に海亀の様子を観察し、いつでも海亀を救出できるようにした。

本研究では、海亀の前肢のはばたき1往復をはばたき1回とした。実験中の海亀の行動をダイバーが水中ビデオカメラ（Panasonic(株)製HX-WA30）により記録し、ビデオ映像からはばたき回数を計数した。実験中、海亀が体勢を立て直すような弱いはばたきを行う様子も見られたが、推進力が10N以下のはばたきは回数に含めないこととした。また、10秒以下の間隔で連続して行われた一連のはばたきをまとめて1セットとし、順にセット番号を付した。各セット間の海亀がはばたきを止めている時間の長さ、その後のセットの継続時間との間に有意な相関は見られなかったことから、はばたきを止めている時間がその後のセットの継続時間に与える影響については考慮しないこととした。

計測された推進力から、TRDの扉の開放に関係すると考えられる推進力ピーク値（前肢のはばたき1回で海亀が生み出した力の最大値(N)）、力積（各計測値(N)に計測間隔(s)を乗じたものをはばたき毎に積算した値(Ns)）、はばたき周波数（各推進力ピーク値間の時

間の逆数(Hz))をそれぞれはばたき毎に求め、セット数を重ねた際の各平均値の変化や、海亀の大きさとの関係について分析した(Fig.2-2)。

2-2 結果

2-2-1 推進力とはばたきのパターン

アオウミガメとアカウミガメともに、大きな個体ほど得られた推進力の最大値は大きかった(Fig.2-3)。同じ直甲長では、アカウミガメに比べてアオウミガメの方が大きな値となった。

推進力ピーク値の経時変化の例として、実験に用いたアオウミガメとアカウミガメそれぞれの中間的なサイズの個体の結果を Fig.2-4 に示す。1セット目の継続時間が120秒以上と顕著に長くなった結果が、アオウミガメでは全24回中2回、アカウミガメでは全13回中4回の実験で見られたが(Fig.2-4 左上)、2セット目以降はすべての実験回において複数回のセットを重ねていた。海亀の種類や大きさに関わらず、セットを重ねるとともに、セット内の推進力ピーク値の最大値が小さくなり、推進力ピーク値の測定回数であるはばたき回数も少なくなっていた。

2-2-2 推進力ピーク値，力積，はばたき周波数の変化

推進力ピーク値と力積およびはばたき周波数の各セットにおける平均を Fig.2-5 に示した。アオウミガメとアカウミガメともに大きな個体ほど推進力ピーク値は大きく、そして、いずれの甲長階級においてもセット数を重ねるごとに力は小さくなっていく傾向が見られた。このような傾向は、力積においても同様であった。はばたき周波数については、アオウミガメでは小さな個体ほど周波数が高く、

また多少の増減は見られるものの、セット数を重ねるとともに低くなる傾向が見られた。一方、アカウミガメでは一番小さな 0.55 – 0.65m の甲長階級の個体のはばたき周波数が顕著に低かったが、アオウミガメの場合と同様にセット数を重ねると全体的に低くなる傾向が見られた。

海亀の直甲長とセット内における推進力ピーク値の平均との関係を、1 セット目と、計測開始から一定時間が経過した際に与えた刺激の直後のセットに分けて Fig.2-6 に示す。同様に、直甲長と力積のセット内における平均値との関係を Fig.2-7 に示す。刺激直後のセットの結果は、刺激を与えるまでの時間（10 分または 30 分）で分けて示した。1 セット目において、両種ともに推進力ピーク値および力積の平均値は大きな個体ほど大きくなった。また、推進力ピーク値ではアカウミガメよりもアオウミガメの方が全体的に大きな値を示したのに対し、力積では両種間で顕著な差は見られなかった。10 分経過時に与えた刺激直後のセットにおいては、アオウミガメよりもアカウミガメの方が全体的に大きな値を示した。30 分経過時の刺激直後のセットにおいては、推進力ピーク値および力積ともに、両種で個体の大きさとの間に有意な相関は認められず ($p > 0.05$)、推進力ピーク値はアオウミガメでは平均 57.6N (SD = 25.2)、アカウミガメでは平均 71.0N (SD = 48.1) であった。力積については、アオウミガメでは 10 分後刺激実験とほぼ変わらず平均 24.1Ns (SD = 9.9) であったのに対し、アカウミガメではアオウミガメとほぼ同程度の 30Ns 前後の結果が見られる一方で、10 分後刺激実験と同程度の 70Ns 以上の力積を記録した個体も見られた。はばたき周波数については、1 セット目と 10 分後のアオウミガメにおいてのみ直甲

長と平均はばたき周波数との間に有意な相関が見られ ($p < 0.05$) , 30 分後には両種ともに有意な相関は認められなかった (Fig.2-8, $p > 0.05$) 。

2-2-3 セット内のはばたき回数の変化

セット内のはばたき回数の変化を種類別にそれぞれ Fig.2-9, Fig.2-10 に示す。1 セット目の継続時間が約 9 秒と極端に短く、他の結果とは異なる傾向を示すものもあったが、ほとんどの実験回において、両種ともにセット数を重ねると各セット内のはばたき回数は減っていく傾向が見られた。アオウミガメでは個体の大きさによる顕著な差は見られなかったが、アカウミガメでは 1 セット目における 0.55 – 0.65m の甲長階級のはばたき回数が顕著に多かった。アカウミガメではこの甲長階級の個体が一個体しかおらず、この個体の実験回すべてで 1 セット目の継続時間が 200 秒以上と長かったために、その結果として 1 セット目のはばたき回数が多くなったと考えられる。両種ともに、セット内のはばたき回数と各個体の大きさとの間に有意な相関は認められなかった ($p > 0.05$) 。

1 セット目と、刺激の直後のセットにおける、海亀の直甲長とはばたき回数の関係を Fig.2-11 に示す。両種ともに、いずれのセットにおいても海亀の大きさとセット内のはばたき回数の間には有意な相関は認められなかった。特に、1 セット目では値のばらつきも大きかった。刺激直後のセットでは、1 セット目に比べて大幅に減少して全体的に低い水準となり、10 分後刺激実験では平均 16.0 回 (SD = 10.4) , 30 分後刺激実験では平均 12.0 回 (SD = 8.2) であった。

2-3 考察

2-3-1 推進力ピーク値の変化

推進力ピーク値の最大値は大きな個体ほど大きくなり、同じ直甲長では、アカウミガメに比べてアオウミガメの方が大きくなった。これは、はばたき周波数の違いによるものであると考えられる。Fig.2-8 の 1 セット目において、同程度の甲長ではアカウミガメよりもアオウミガメの方が高いはばたき周波数を記録していた。ここでののはばたきの振幅が等しかったと仮定すると、より高いはばたき周波数を発揮したアオウミガメの方が同じ振幅でより速くはばたいたことになるため、大きな推進力を発揮することができたと考えられる。このように、推進力の大きさにははばたきの振幅も関与していると考えられる。Hays *et al.* (2007) において、海亀の背甲に装着したビデオカメラから海亀の振幅を取得して海亀の潜水行動との関係が調べられたが、ここでの振幅の取得方法（算出式）は振幅そのものの大きさを正確に捉えられるものではなかった。海亀の振幅を正確に測定することは非常に困難であるため、今後更なる検討が必要である。なお、アオウミガメとアカウミガメの直甲長と体重の関係はほぼ同様であったことから、甲長を体重で置き換えたとしても同様の結果となることが予想される (Fig.2-12)。

推進力ピーク値は、兩種ともにセット数を重ねるごとに小さくなっていく傾向が見られた (Fig.2-5)。これは、海亀が網内ではばたきを繰り返しているうちに、突き上げ時に生じる力の最大値が小さくなっていくことを示している。自発的なはばたきが見られるのは実験開始から 30 分程度までであった。そして、実験開始直後の 1 セット目においては大きな個体ほど推進力ピーク値の平均は大きい傾

向が見られたのに対し、実験開始から 30 分経過時には個体の大きさによる違いがなくなるほどに小さくなった。

2-3-2 海亀の推進力と TRD の扉の開放について

野生の成熟アオウミガメ 10 頭を用いて推進力を計測した実験では、成熟アオウミガメの推進力は 66.7 – 364.8N、平均 91.0N であったという報告がある (Wyneken 1997)。これは、張力計に接続されたアオウミガメが、砂浜から沖に向かって泳ぐ際の推進力を計測した実験の結果である。ここでの海亀は自発的に呼吸を行える状況ではあったが、海亀が一定の位置より前方へは進めない計測方法は本実験と同様である。本実験において、30 分経過時にアオウミガメとアカウミガメから得られた推進力ピーク値は、上記の報告における推進力の最小値 (66.7N) とほぼ同等であった。このことから、本実験で計測された値は、海亀の推進力として扱うのに妥当であると考えられた。

実験開始から 30 分経過後の推進力ピーク値は、アオウミガメでは平均 57.6N (SD = 25.2)、アカウミガメでは平均 71.0N (SD = 48.1) であった (Fig.2-6)。海亀は、網の中で必ずしも効率よく短時間で TRD に遭遇するとは限らず、場合によっては、30 分といった非常に長い時間が経過した後にようやく遭遇することも考えられる。したがって、TRD は、このように水中に滞留し始めてから時間が経過し、発揮できる推進力が小さくなった海亀でも脱出できる仕様が望ましい。

2-3-3 力積の変化と推進力ピーク値との比較

力積についても、推進力ピーク値と同様にセットを重ねると値は小さくなっていく傾向を示した (Fig.2-5(中))。これは、連続したは

ばたきを繰り返すと海亀がはばたきごとに生み出す力が小さくなっていくことを示している。また、兩種ともに 1 セット目、および実験開始から 10 分経過時点では、直甲長と力積との間に有意な相関が見られたのに対し、30 分経過時点ではそのような結果は得られなかった (Fig.2-7)。さらに、1 セット目において、推進力ピーク値ではアカウミガメよりもアオウミガメの方が全体的に大きな値を示したのに対し、力積では種による差は見られなかった。これは、アカウミガメのはばたき周波数がアオウミガメの約半分であり (Fig.2-5(下), Fig.2-8(左))、同じ直甲長での推進力ピーク値もアカウミガメがアオウミガメの約半分の値であるため (Fig.2-6(左))、その結果として 1 回のはばたきにおける力積はアオウミガメとアカウミガメで同程度になったと考えられる (Fig.2-7(左))。

2-3-4 セット内のはばたき回数の変化

セット内のはばたき回数は、セット数を重ねるごとに減少する傾向を示した (Fig.2-9, Fig.2-10)。このはばたき回数は、すなわち突き上げ回数に置き換えることができると考えられる。このことから、実際の箱網内において連続して突き上げを行うことができる回数は、時間経過に伴い減っていくと考えられる。特に、1 セット目から 2 セット目へのはばたき回数の減少が顕著であり、2 セット目以降の回数の減少は比較的穏やかであった。はばたき回数には海亀の種による違いは見られず、さらにいずれのセットにおいても個体の大きさとばたき回数との間に有意な相関は見られなかった。兩種を合わせたはばたき回数の平均は、10 分経過時点では平均 16.0 回 (SD = 10.4)、30 分経過時点では平均 12.0 回 (SD = 8.2) であった (Fig.2-11)。本実験を実施した水槽と同じ屋外水槽において、試作した TRD

を用いて行った海亀の脱出実験の結果では、脱出に至った連続突き上げの回数は5回程度であり、30分経過時のはばたき回数はこれよりも十分に多いものであった。したがって、はばたき回数については30分経過後でも海亀の脱出に十分であると考えられた。

本章において、海亀の自発的なはばたきによって生じる推進力の変化を明らかにした。海亀を水中に滞留させた場合、海亀の種類や大きさに関わらず30分程度ではばたきが見られなくなることで、海亀の推進力は時間の経過とともに低下することが示された。また、自発的なはばたきがほぼ見られなくなった際に発揮される推進力は個体の大きさに関係なく小さくなることを示し、その際の値を海亀の種類別に明らかにした。海亀を確実に脱出させるためには、水中に長時間滞留した海亀が突き上げ時に発揮する推進力よりもTRDの閉扉力を小さくする必要がある。一方、本章における結果はすべて海亀を水槽の底面に係留して得たものであり、箱網内で自由に遊泳や突き上げを行う海亀の推進力については明らかにされていない。海亀は突き上げにより扉を押し開けなければ脱出できないため、網内で突き上げを行う海亀の推進力についても把握する必要がある。そこで第3章では、海域に敷設された実際の定置網の中層箱網内で突き上げを行う海亀の推進力を調べた。

Table 2-1 Summary of turtle individuals used in the experiments. SCL, straight carapace length; SCW, straight carapace width; BW, body weight

Year	Species	Turtle ID	SCL (m)	SCW (m)	BW (kg)
2012	Green turtle	G1	0.72	0.59	47.6
		G2	0.67	0.55	41.3
		G3	0.60	0.50	26.5
		G4	0.55	0.46	20.8
		G5	0.52	0.41	16.0
		G6	0.48	0.40	14.4
2014	Green turtle	G7	0.58	0.47	23.6
		G8	0.54	0.45	21.6
		G9	0.39	0.33	8.0
	Loggerhead turtle	L1	0.84	0.64	75.0
		L2	0.74	0.60	57.0
L3		0.65	0.52	38.5	
L4		0.63	0.51	35.7	

Table 2-2 Summary of experiments

Year	Turtle ID	Number of experiments		
		No stimulation	10 min-later stimulation	30 min-later stimulation
2012	G1	2	-	-
	G2	-	2	1
	G3	-	1	1
	G4	1	1	1
	G5	1	2	-
	G6	-	1	1
2014	G7	-	2	1
	G8	-	1	-
	G9	-	2	1
	L1	-	2	1
	L2	-	2	1
	L3	-	2	2
Total	Green turtle	4	12	6
	Loggerhead turtle	0	8	5

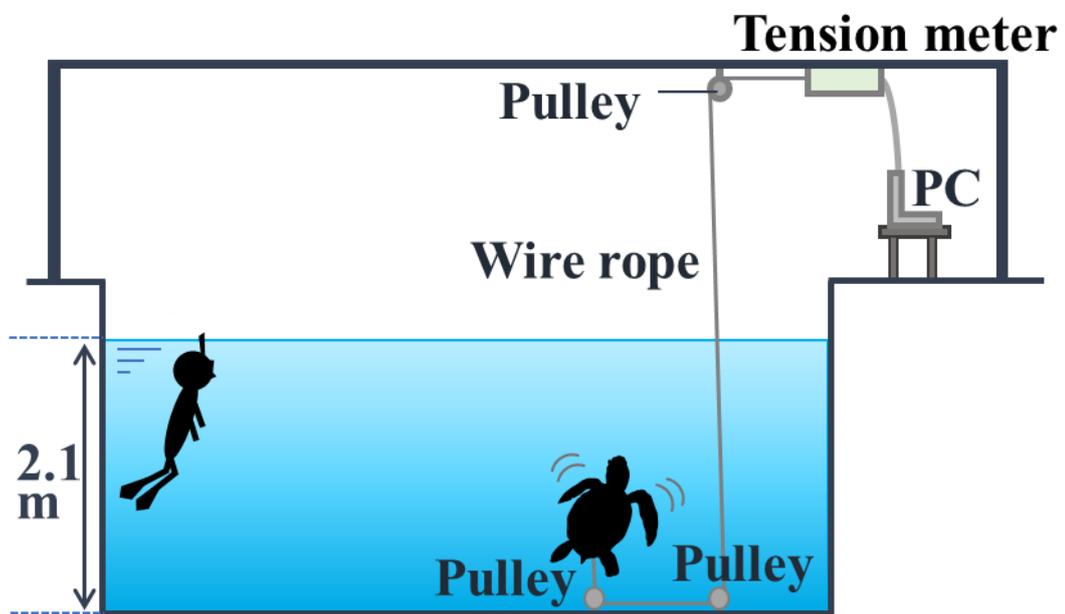


Fig.2-1 Schematic overview of water tank experiment. The sea turtle was connected to a tension meter with a wire rope through pulley blocks. Propulsive force generated by flipper beat was measured by the tension meter and recorded in a PC.

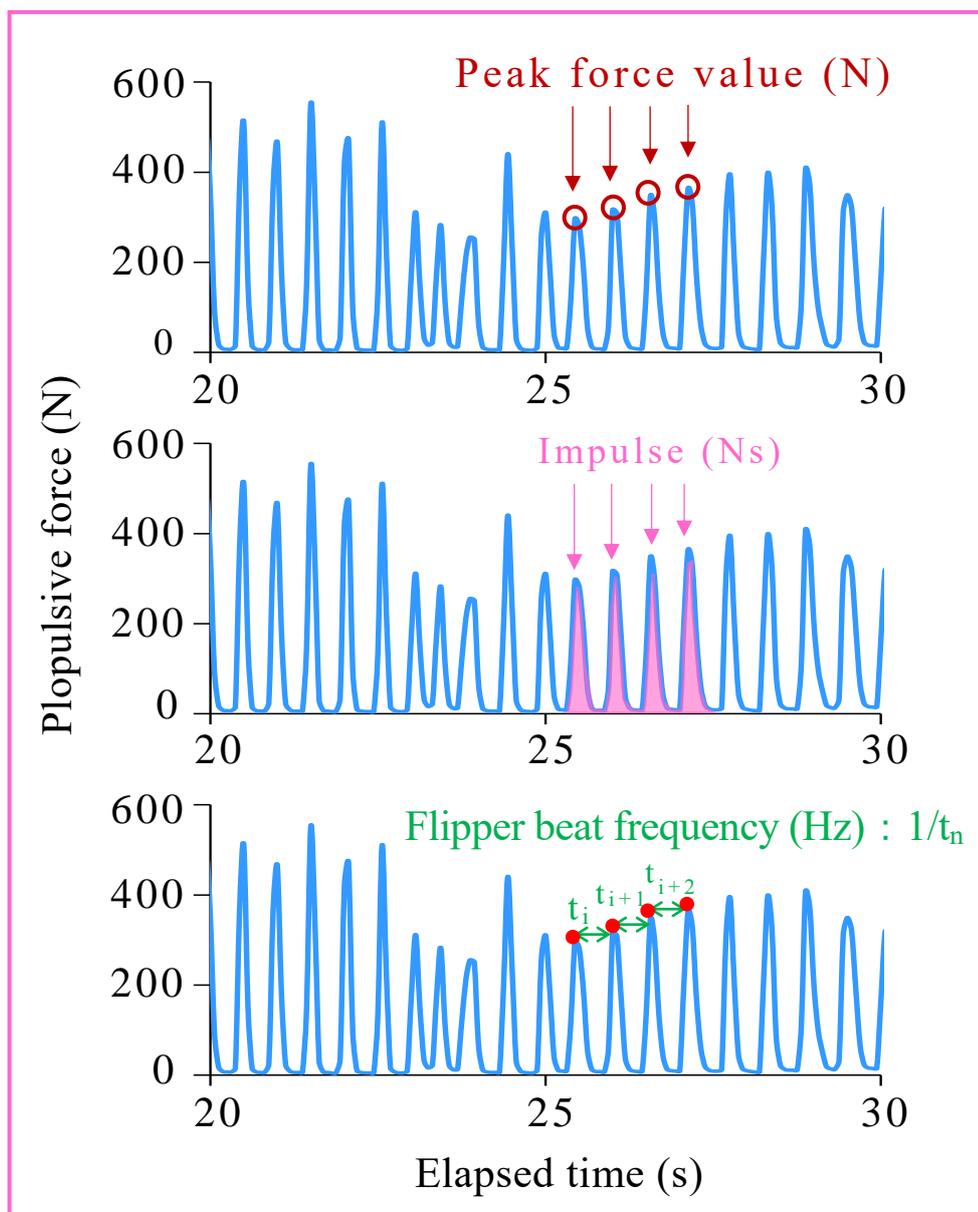
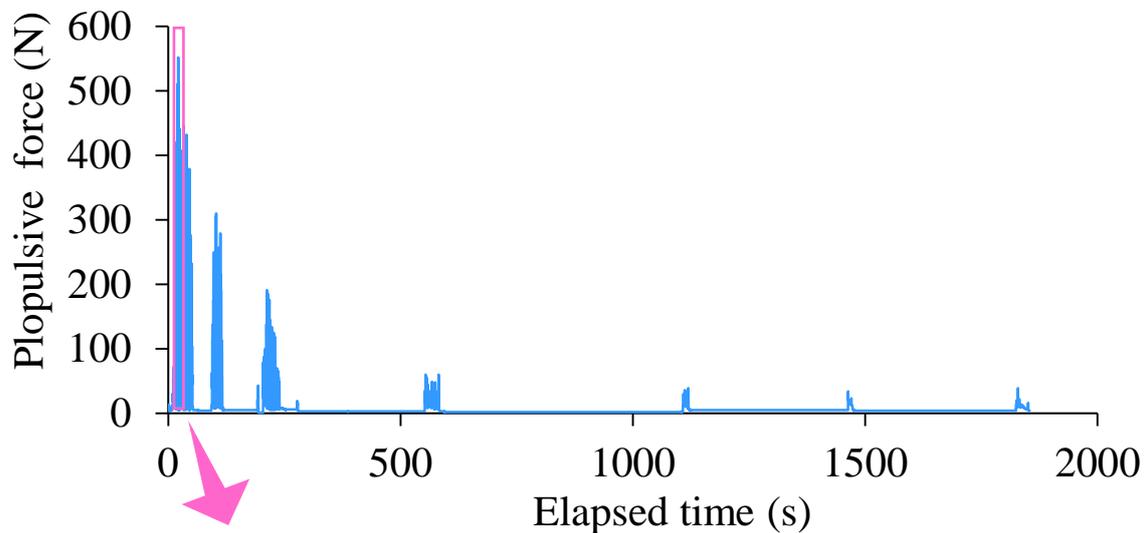


Fig.2-2 Change in propulsive force (N) (upper) and the enlarged figures (lower). Peak force value (N), a peak value of the propulsive force generated by a round trip of flipper beat; impulse (Ns), an integrating value of each measurement value (N) per a measurement interval (s); flipper beat frequency (Hz), inverse number of the time interval between adjacent point generating peak force value (s).

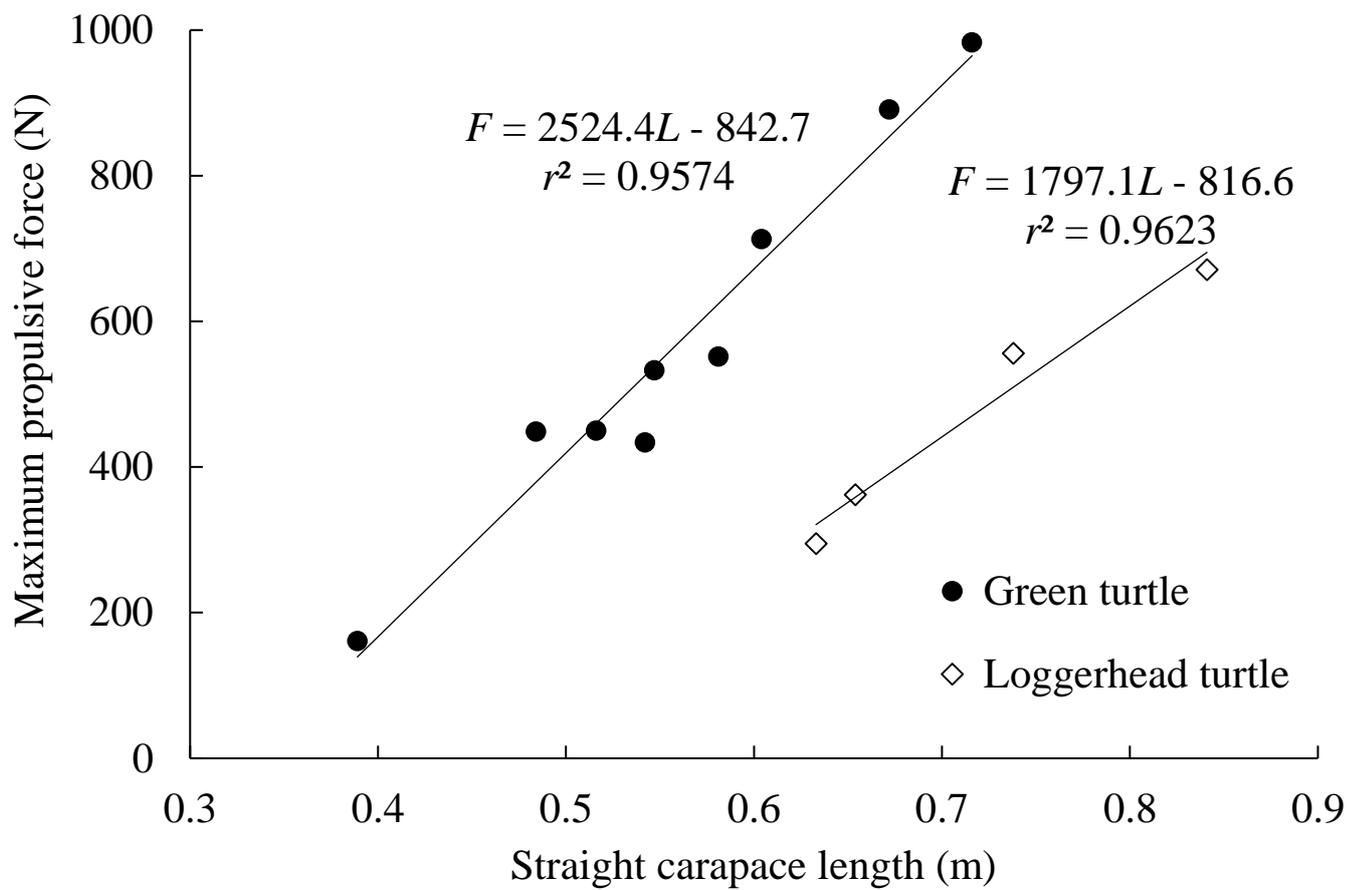


Fig.2-3 Relationships between straight carapace length and maximum propulsive force for green turtles and loggerhead turtles. Maximum propulsive force is the largest value in each individual. Closed circles (●) indicate green turtle, and open diamonds (◇) indicate loggerhead turtle. F , propulsive force (N); L , straight carapace length (m).

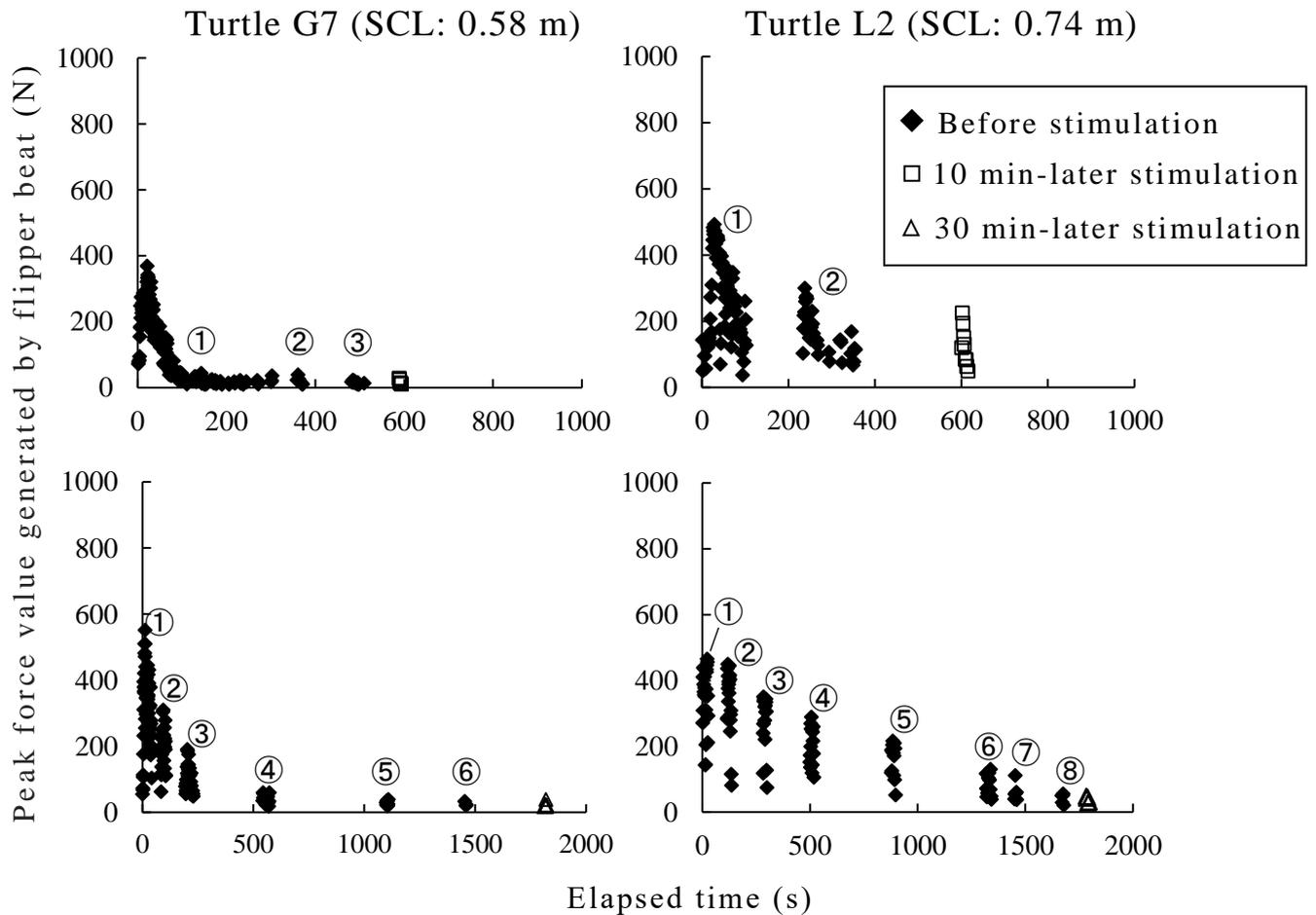


Fig.2-4 Examples of change in peak force value generated by each flipper beat for a loggerhead turtle and a green turtle. Each turtle was of medium size for each species. Upper graphs show the results of the touching stimulation experiments at 10 min after starting. Lower graphs show the experiments stimulated at 30 min after starting. Closed diamonds (◆) indicate the value before stimulation, open squares (□) indicate the value after 10 min-later stimulation, and open triangles (△) indicate the value after 30 min-later stimulation. Circled numbers indicate set numbers.

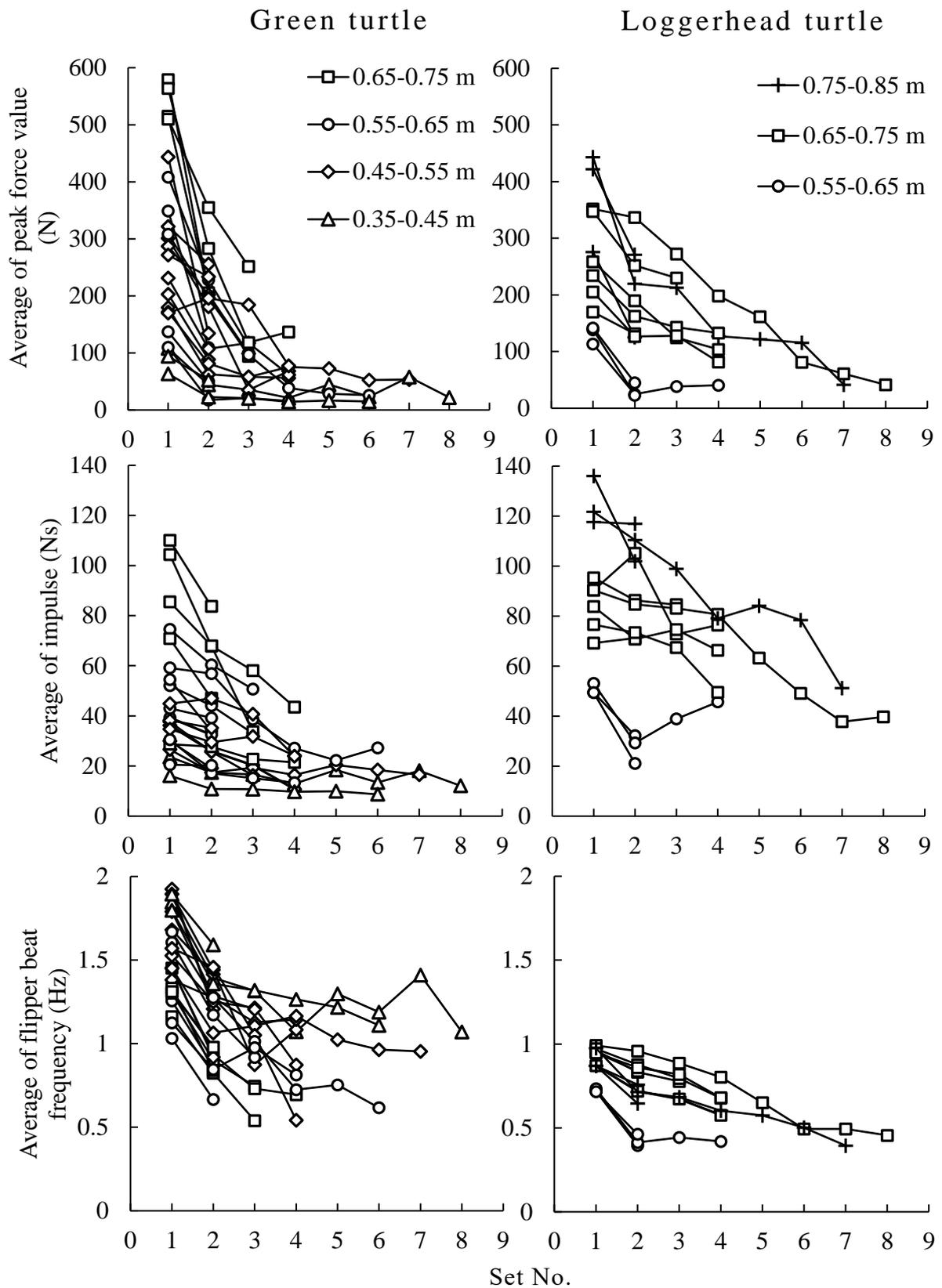


Fig.2-5 Change in average of peak force value (upper), impulse (middle), and flipper beat frequency (lower) in a set for green turtles (left side) and loggerhead turtles (right side). Each mark shows straight carapace length class (Δ , 0.35 – 0.45m; \diamond , 0.45 – 0.55m; \circ , 0.55 – 0.65m; \square , 0.65 – 0.75m; $+$, 0.75 – 0.85m).

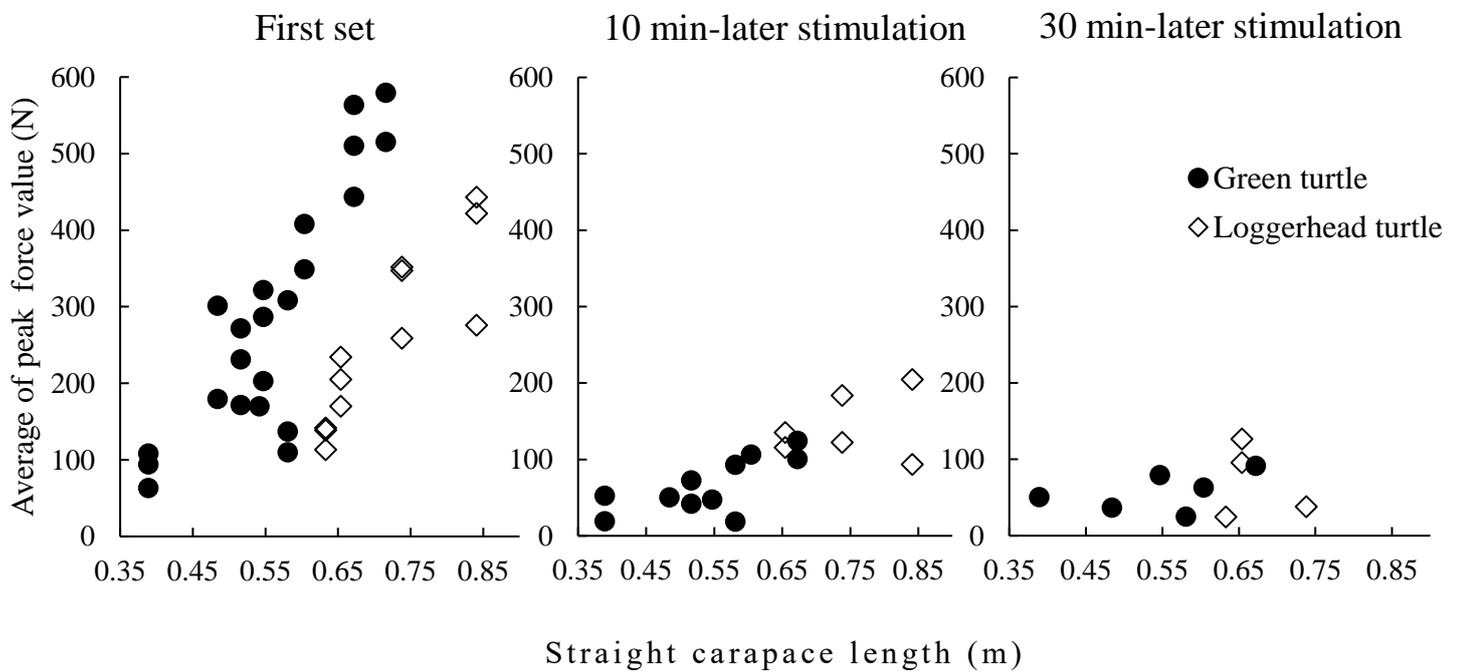


Fig.2-6 Relationships between straight carapace length and average of peak force value for green turtles and loggerhead turtles. The left side shows the first set, the middle shows the set stimulated at 10 min after starting, and the right side shows the set induced by touching stimulation at 30 min after starting.

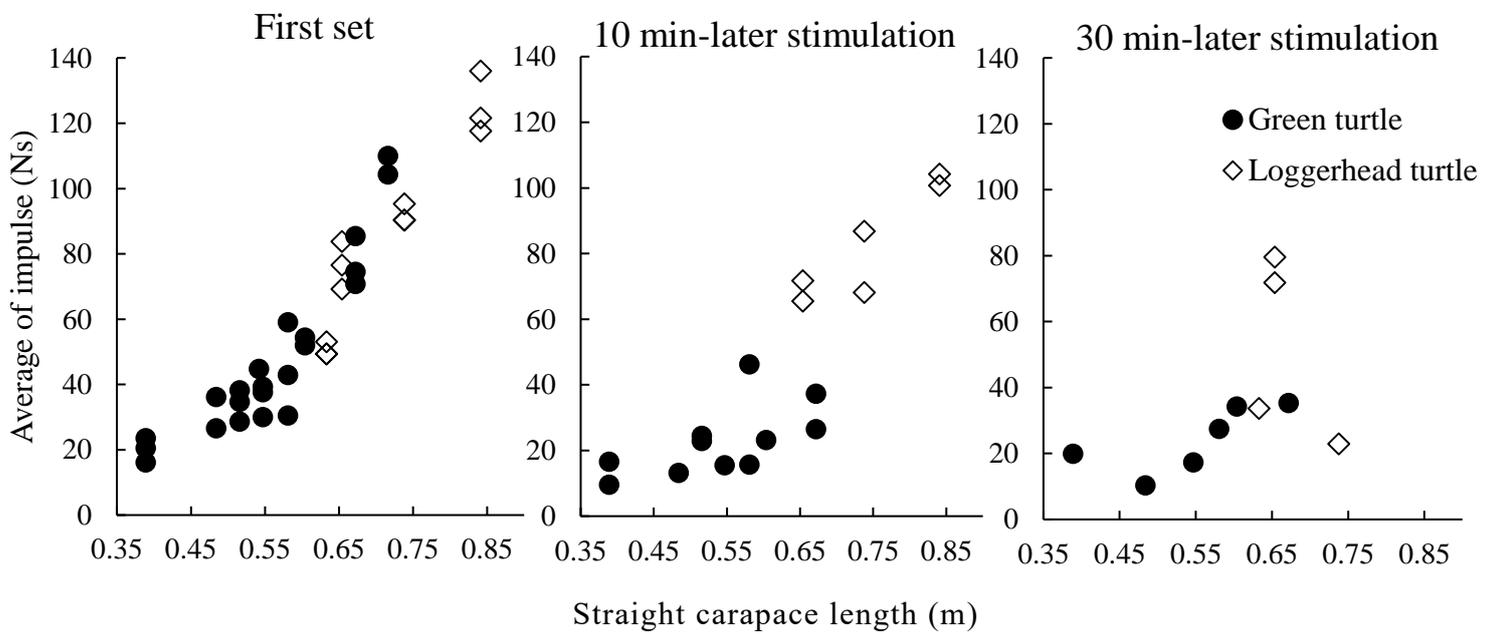


Fig.2-7 Relationships between straight carapace length and average of impulse for green turtles and loggerhead turtles. The left side shows the first set, the middle shows the set stimulated at 10 min after starting, and the right side shows the set stimulated at 30 min after starting.

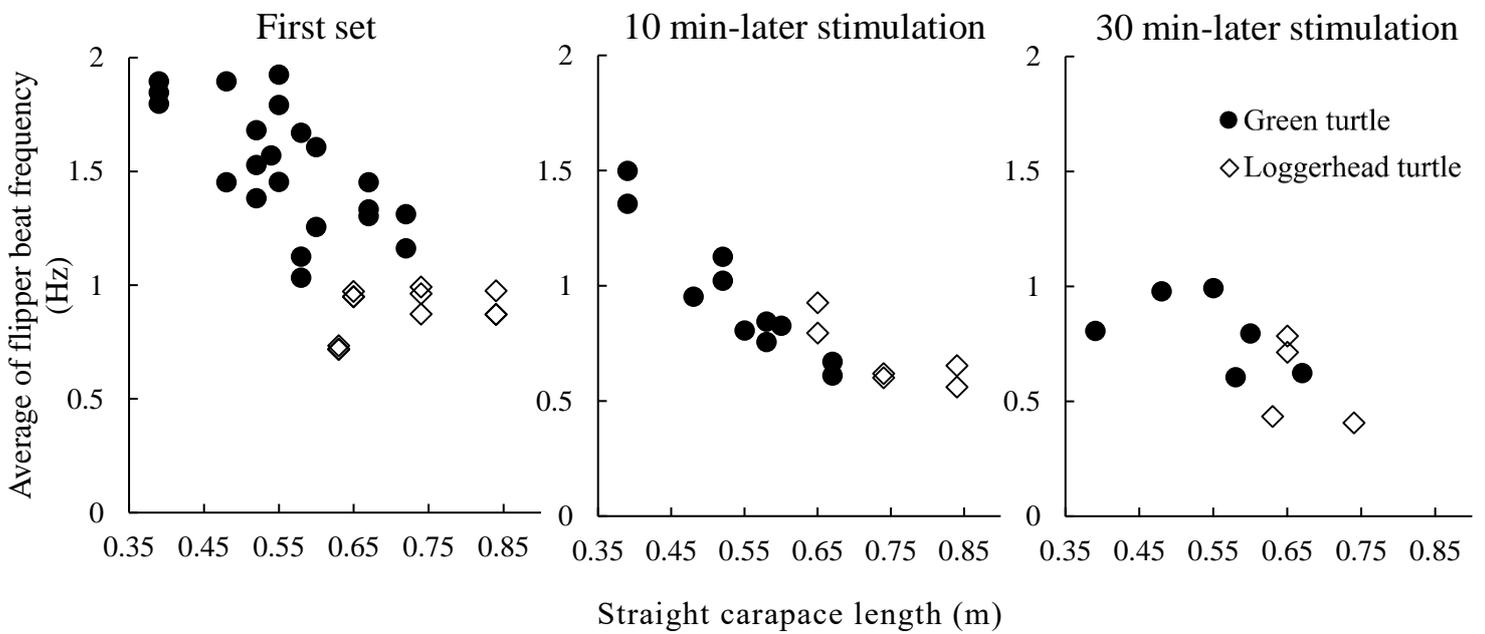


Fig.2-8 Relationships between straight carapace length and average of flipper beat frequency for green turtles and loggerhead turtles. The left side shows the first set, the middle shows the set stimulated at 10 min after starting, and the right side shows the set stimulated at 30 min after starting.

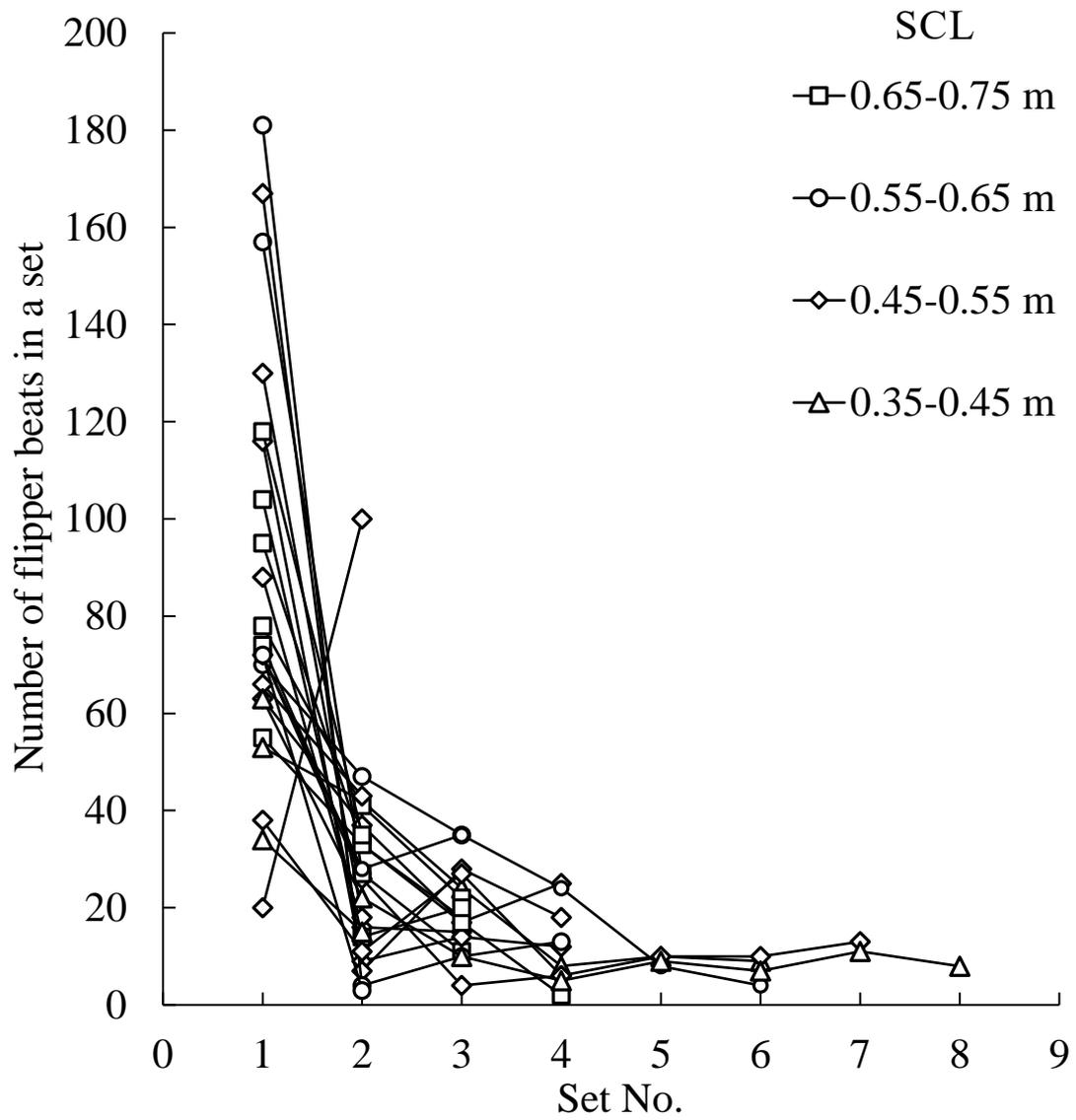


Fig.2-9 Change in cumulative number of flipper beats in a set respectively for green turtles.

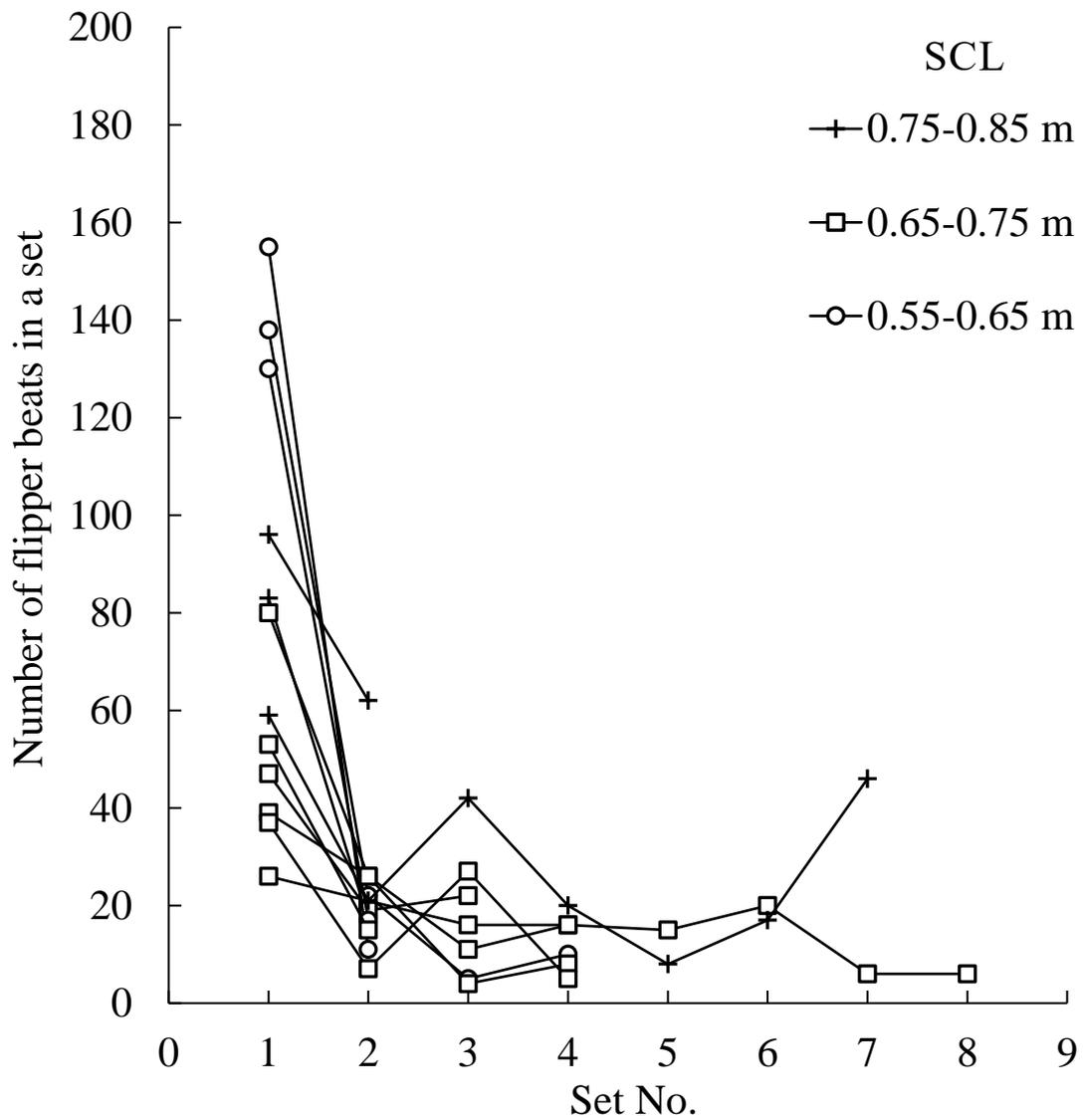


Fig.2-10 Change in cumulative number of flipper beats in a set respectively for loggerhead turtles.

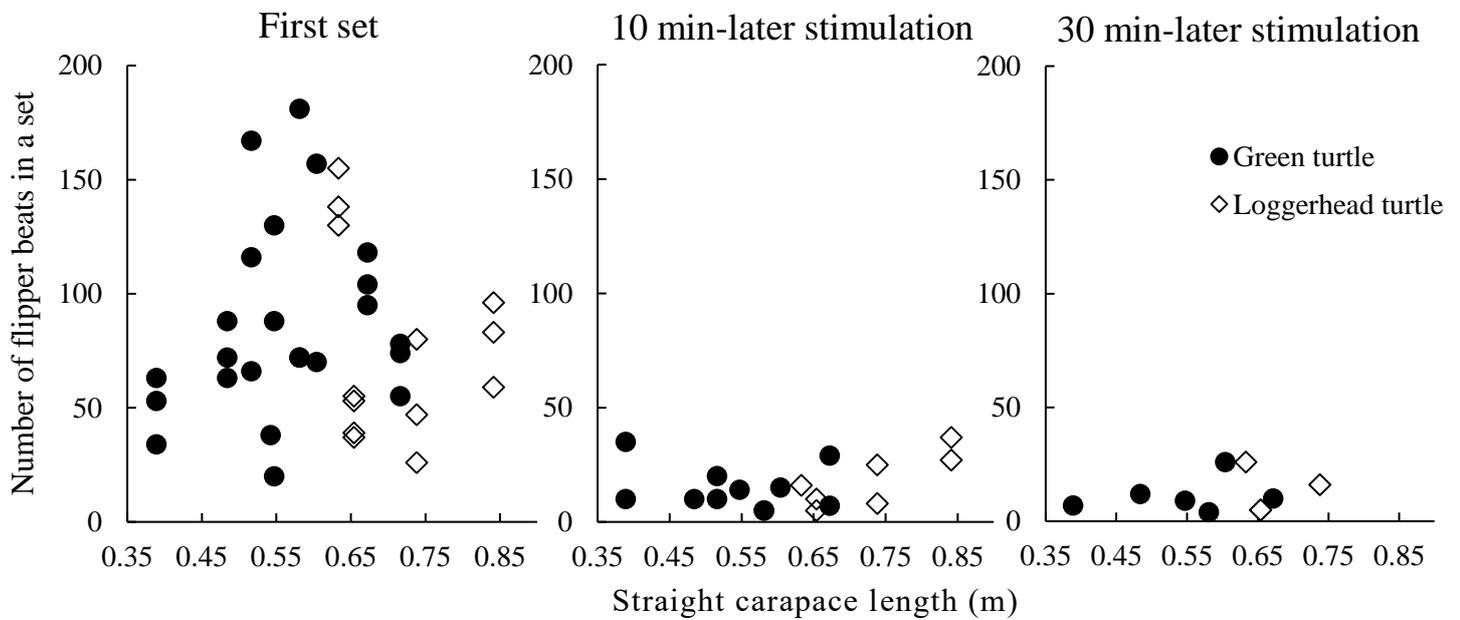


Fig.2-11 Relationships between straight carapace length and the cumulative number of flipper beats in each experiment for green turtles and loggerhead turtles. The left side shows the first set, the middle shows the set stimulated at 10 min after starting, and the right side shows the set stimulated at 30 min after starting.

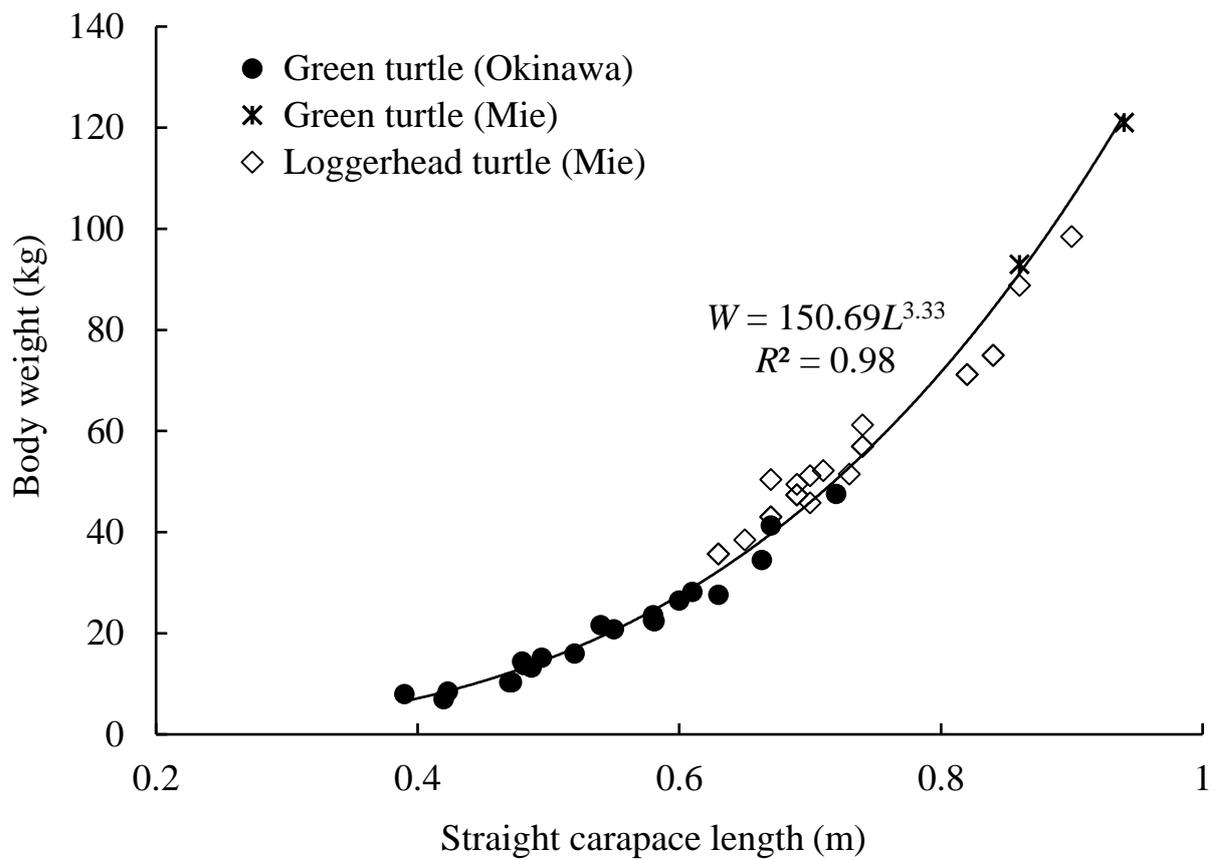


Fig.2-12 Relationships between straight carapace length and body weight for green turtles and loggerhead turtles. These data were obtained from this study and our unpublished data. Closed circles (●) indicate green turtle captured in Okinawa prefecture, asterisks (*) indicate green turtle captured in Mie prefecture, and open diamonds (◇) indicate loggerhead turtle captured in Mie prefecture. W , body weight (kg); L , straight carapace length (m).

第 3 章 中層箱網内における海亀の推進力の推定

第 2 章では，水槽内で海亀の推進力を計測し，はばたき毎に生じた推進力ピーク値，力積，はばたき周波数，連続してはばたく回数の変化について，種や甲長との関係を含めて調べた。TRD の開発を進めるためには，第 2 章で明らかにした水中に滞留した海亀の推進力に加えて，海中に敷設された定置網に入網した海亀の推進力を把握する必要がある。海亀は突き上げにより TRD の扉を押し開けて脱出することから，特に突き上げ時の推進力は重要である。しかし，海中に敷設された網内において，前章における水槽実験のように張力計に海亀を接続して推進力を計測することは困難である。

本章では，定置網の箱網内で突き上げを行う海亀の推進力を推定することを目的とした。第 2 章において，海亀の甲長や前肢のはばたき周波数と推進力の間に有意な関係があることを示した。そこでまず，第 2 章において得た前肢のはばたき周波数と海亀の甲長を用いて，推進力を推定する式を得た。そして，背甲にビデオカメラを装着した海亀を定置網の中層箱網内へ入網させ，映像から得た前肢のはばたき周波数と海亀の甲長を推定式に代入することにより，定置網の箱網内で突き上げを行う海亀のはばたきごとの推進力を推定した。なお，本章においては，日本国内の定置網で混獲される頻度が高く，混獲による資源動向が特に注目されているアカウミガメの亜成体から成体を対象とした。

3-1 材料と方法

3-1-1 海亀の推進力の計測方法

第2章における海亀の推進力計測実験のうち、2014年7月27日から8月3日に行われたアカウミガメ全4頭（直甲長 0.63 – 0.84m）を用いた実験の結果を利用した。供試個体の詳細を Table3-1 に示す。実験手順は第2章における海亀の推進力の計測実験と同様であり、実験装置の概要は Fig.2-1 の通りである。

3-1-2 推進力ピーク値の推定式の選定

本研究では、はばたき周波数と海亀の直甲長を、推進力ピーク値を推定するための回帰式の説明変数とした。直甲長を変数に入れる場合と入れない場合、さらに両辺に対数をとる場合ととらない場合の以下に示す4つの式を候補とした。

$$F_P = a_1 f + b_1 \quad (3-1) ,$$

$$\ln F_P = a_2 \ln f + b_2 \quad (3-2) ,$$

$$F_P = a_3 f + a_4 l + b_3 \quad (3-3) ,$$

$$\ln F_P = a_5 \ln f + a_6 \ln l + b_4 \quad (3-4) ,$$

ここで、 F_P は推進力ピーク値(N)、 f ははばたき周波数(Hz)、 l は直甲長(m)を示す。 a_1 から a_6 、 b_1 から b_4 は定数であり、回帰分析あるいは重回帰分析によりそれぞれ得た。式(3-1)から(3-4)のうちで、分析により得た自由度調節済み決定係数 R^2 値が最も大きい式を推定式として選定した。そして、推定値と実測値と比較することにより、推定式の妥当性を検討した。

3-1-3 海上実験に使用した海亀

2014年6月23日から24日および2015年7月6日から7日に、三重県沿岸に敷設された定置網の中層箱網(30×10×10m, Fig.3-1)内において実験を行った。2014年6月にはアカウミガメ3頭(直甲長: 0.84m, 0.74m, 0.63m, 個体ID: C1-C3), 2015年7月にはアカウミガメ3頭(直甲長: 0.82m, 0.69m, 0.67m, 個体ID: C4-C6)を使用した(Table 3-2)。海亀はいずれも三重県内の定置網で混獲されたものを用いた。供試個体は、実験の約1カ月前に採捕され、実験の実施までは生簀内においてアジ類, サバ類, イワシ類, イカ類などの生餌を与えて畜養した。実験終了後は再び生簀に戻し、同様の餌を与えながら約1カ月間行動を観察した後に放流した。なお、2014年の海上実験で用いた個体C1, C2, C3と、第2章における計測実験で用いた個体L1, L2, L4はそれぞれ同一の個体である。

3-1-4 海上実験に使用した計測機器と実験手順

市販のエポキシパテ(セメダイン(株)製 エポキシパテ金属用)と結束バンド(ヘラマンタイトン(株)製 AB300/AB200)を用いて、ビデオカメラ(Sony(株)製 HDR-AS100V, 画角170°, 以後、背甲カメラと称する)と深度計(JFE アドバンテック社製 DEFI-D20, 計測水深範囲0-2Mpa(0-200m相当))を海亀の背甲に装着し、中層箱網の魚捕部から海亀を入網させた(Fig.3-2)。深度計の計測周波数は1Hzとした。人為的な入網による海亀のストレスの影響を取り除くために、いずれの年においても海亀を入網させてから落ち着くまでの馴致時間を設けた。適切な馴致時間を決定するために、2013年8月に野生のアカウミガメ4頭(直甲長: 0.84m, 0.76m, 0.75m, 0.71m, 個体ID: T1-T4)を用いて予備実験を行った。海亀の背甲

に加速度ロガー（リトルレオナルド社製 W1000-3MPD3GT）を装着して中層箱網に入網させ、呼吸を行える状態下で活動量の指標となる ODBA（Overall dynamic body acceleration, Wilson *et al.* 2006）を取得した。網越しに行われた呼吸と呼吸の間を遊泳セットとして遊泳セット毎の平均 ODBA の変化を調べた。Fig.3-3 に、遊泳セット毎の平均 ODBA の入網から 30 分間の変化を示した。ここでは、ODBA の変化を相対的に評価するために、遊泳セット毎の平均 ODBA を、各実験における同平均 ODBA の最小値で除算した値で示した。入網直後に最小値の 1.5 倍から 4 倍ほどであった ODBA は時間の経過に伴い小さくなり、入網から約 15 分経過すると、いずれの個体においても最小値の 1.6 倍以下でほぼ一定となった。このことから、海亀は入網直後の興奮状態から約 15 分である程度落ち着くと考え、本実験における馴致時間を 15 分とした。

馴致時間経過後に海亀が網越しに呼吸を行ったことを確認した後に実験開始とし、中層箱網を海中に約 7m 沈めた。馴致時間中は、中層箱網の天井網が海面に接していたため、海亀は網越しに呼吸を行うことができたが、実験中は中層箱網が完全に海面下に沈み、海亀は呼吸を行うことができなかった。なお、2014 年では天井網を通常の操業時と同様の仕様にして実験を行い、2015 年では天井網を一定の傾斜角を設けた角錐状として、中央部に TRD を装着して実験を行った（Fig.3-4）。実験時間は、先行研究によって報告されているアカウミガメの潜水時間を参考にして決定した。先行研究において、直甲長 81 – 89cm の成熟個体の潜水時間は 17 – 26 分

（Sakamoto *et al.* 1990, Sakamoto *et al.* 1993, Minamikawa *et al.* 1997, Minamikawa *et al.* 2000）といった記録があることから、ここ

では実験時間を約 20 分とした。実験中は ROV (Remotely operated vehicle) で網内を撮影し、船上のモニターにおいて海亀の様子をリアルタイムで確認した。海亀を完全に追尾することは困難であったが、海亀を発見した際には 2m 以上の距離を保ちながら観察し、海亀の活動が著しく減退した場合には、実験を終了して速やかに魚捕部から海亀を回収した。

本実験においては、頭部で天井網を押し上げ、かつ前肢のはばたきを伴うものを突き上げとした。背甲カメラの映像から、中層箱網内で遊泳や突き上げを行う海亀の前肢のはばたき周波数を得た

(Fig.3-5)。背甲カメラのフレームレート (30fps) から、はばたき毎のはばたき周波数を「 $1 / (1/30 \times \text{はばたき 1 回に要したコマ数})$ (Hz)」として得た。得られたはばたき周波数と使用した海亀の直甲長を、水槽実験の結果から得た推定式に当てはめることにより、中層箱網内における海亀のはばたきごとの推進力ピーク値を推定した。

3-2 結果

3-2-1 推進力ピーク値の推定式

推進力の計測実験で得られたはばたき周波数と推進力ピーク値の関係を個体ごとに Fig.3-6 に示す。いずれの個体においても、はばたき周波数と推進力ピーク値の間に有意な相関が見られた ($p < 0.001$)。回帰分析および重回帰分析の結果、(3-1) 式から (3-4) 式の自由度調節済み決定係数 R^2 値は、それぞれ 0.57, 0.63, 0.65, 0.71 となった。したがって、はばたき周波数と直甲長を用いて対数をとった (3-4) 式が最も適切な推定式として選定された。得られた推定式 (3-4)'

を以下に示す。

$$\ln F_P = 1.811 \ln f + 1.911 \ln l + 6.26 \quad (3-4)'$$

(3-4)' 式は有意であり ($p < 0.0001$)、本式を用いて推進力ピーク値の推定値を求めたところ、推定値と実測値は概ね一致した

(Fig.3-7)。よって、本式を推進力ピーク値の推定式として用いることとした。

3-2-2 中層箱網内における海亀のはばたき周波数と推進力ピーク値

すべての海亀において、実験後の行動や摂餌量に異常は見られず、放流することができた。実験中において、潮流による吹かれのために箱網や箱網内の側張りロープがたわむことがあったが、海亀の甲羅や肢がそれらに絡まる様子はなく、背甲に装着した計測機器が網目やロープに引っかかることもなかった。海亀は箱網内で潜降や浮上を繰り返し、それに伴いはばたき周波数は約 0.2 – 1.5 Hz の間で変動した。海亀の滞在深度、はばたき周波数、突き上げ時の推進力ピーク値の経時変化を Fig.3-8 に示す。(3-4)' 式を用いて推定された推進力ピーク値の変化は、すなわちはばたき周波数の変化を示す。推進力ピーク値は、遊泳時では 6.3 – 408.4 N (mean ± SD = 81.6 ± 58.9 N)、突き上げ時では 6.5 – 436.3 N (mean ± SD = 111.2 ± 71.6 N) であった。また、海亀は箱網の底面あるいは中層付近から勢いよく浮上することがあり、その際に浮上に伴ってはばたき周波数および推進力が顕著に増加する場合があった。

3-3 考察

重回帰分析の結果，はばたき周波数と海亀の直甲長を用いて，さらに両辺に対数をとった (3-4)' 式が，推進力ピーク値の推定式として選ばれた。この式を用いて推定した値は実測値と概ね一致し，本式によりはばたき毎の推進力ピーク値を推定することが妥当であると考えられた。このことから，海亀の直甲長が既知であり，前肢のはばたき周波数を計測することができれば，海亀の推進力を求めることができると考えられた。

背甲カメラの映像から個々のはばたきに要したコマ数を計数することにより，前肢のはばたき周波数を正確に得ることが可能であり，定置網内で遊泳する海亀のはばたき周波数の変化を詳細に把握することができた。中層箱網内で突き上げを行う海亀のはばたき毎の推進力ピーク値を推定したところ，その最大値は第 2 章におけるアカウミガメの推進力の最大値とほぼ同程度であり，その範囲は 6.5 - 436.3N に及んだ。これらの値を TRD の扉の閉まる力と比較検討することにより，海亀が脱出可能な適切な TRD を提案することができると考えられる。

本研究では，海亀の推進力を推定するためのパラメータの一つとして，はばたき周波数を利用した。海亀は，前肢を翼のように動かすことにより推進力を得ている (Davenport *et al.* 1984, Prange 1976, Seymour 1982, Wyneken 1997)。そのため，前肢を動かした距離を表すはばたきの振幅や前肢の面積についても，推進力ピーク値を求める際のパラメータとなり得ると考えられる (Hays *et al.* 2007)。しかし，各はばたきの振幅を，本研究で用いたはばたき周波数のように正確に取得することは困難である。また，前肢の面積は直甲長と比

例関係にあることが知られている (Casale *et al.* 2017)。したがって、本研究で提案したはばたき周波数と直甲長を用いた式が、より簡便で妥当であると考えられる。

海上実験において、海亀が中層箱網の底層部や中層部から浮上する際に、深度が浅くなるにしたがってはばたき周波数が高くなり、推進力の推定値が大きくなる現象が多く見られた。自然環境下における海亀のはばたき周波数は、潜降や浮上に伴い減少する傾向があり、特に浮上時においては水面に近づくにつれてはばたきが急激に少なくなる (Hays *et al.* 2007, Yasuda and Arai 2009)。そのため、箱網内で浮上する海亀のはばたき周波数の高まりは、海亀の呼吸欲求の高まりを示している可能性がある。はばたき周波数が高いほど生み出される推進力は大きくなることから、浮上とともにばたき周波数が高くなり、そのまま突き上げに至れば、TRD からより迅速に脱出できる可能性も考えられる。

近年、海亀の行動や生態に関する研究において、摂餌や呼吸といった生活様式の把握、潜水様式の解明、エネルギー消費量の推定などを行う手段として、加速度ロガーが利用されている (Okuyama *et al.* 2009, Yasuda & Arai 2009, Narazaki *et al.* 2013, Okuyama *et al.* 2014)。さらに、加速度ロガーは遊泳する海亀、鰭脚類、海鳥類などのはばたき周波数の取得にも利用されている (Yasuda & Arai 2009, Sato *et al.* 2003, Sato *et al.* 2011, Arai *et al.* 2000, Watanuki *et al.* 2003)。本研究では、ビデオカメラの映像からはばたき周波数を取得したが、加速度ロガーを用いれば、より簡便にはばたき周波数を取得できる可能性も考えられる。しかし、これまで動物に加速度ロガーを装着して行われた先行研究では、動物は障害物に妨げられることなく自

由に遊泳や呼吸を行うことが可能であった。一方、本研究のように海亀が定置網の箱網内で遊泳する場合、ロープや側面網に海亀が接触することがある。加速度ロガーからはばたき周波数を取得する場合、動物の進行方向の加速度の変化からはばたきを判別して抽出する手法が多く用いられるが、海亀が障害物に接触した場合には、進行が妨げられるだけでなくその衝撃がノイズとして加速度に現れ、加速度の情報のみからはばたき周波数を正確に取得することが困難となると予想される。これは突き上げ時についても同様であり、突き上げは海亀が天井網に浮上を妨げられて生じる行動のため、突き上げ時のはばたき周波数を加速度の変化から抽出することは困難である。したがって、海亀が置かれている状況を確認しながら正確にはばたき周波数を取得する必要がある本研究においては、背甲カメラを使用することが適切であったと考えられる。

本章では、水温については考慮せずに海亀の推進力を推定した。海亀は外温動物であるため、水温が低くなるとエネルギー消費量や酸素消費量が低下する (Hochscheid *et al.* 2004, Lutz *et al.* 1989, Southwood *et al.* 2003)。また、活動性も低くなるため動きが鈍くなり、はばたき周波数も低くなると考えられる (Storch *et al.* 2005)。本実験を行った海域では、毎年5月下旬から9月下旬頃まで定置網で海亀が混獲される。そのうち5月は最も水温が低く20℃前後であり、7月から8月にかけては27℃前後まで上昇する。そのため、5月に入網した海亀のはばたき周波数は、6月下旬から7月上旬に行った本実験で得られたはばたき周波数よりも低くなり、それに伴い推進力も小さくなる可能性がある。中層・底層定置網に海亀が入網する時期や場所、入網時の水温は様々であると考えられる。した

がって、水温がはばたき周波数に及ぼす影響についても、詳細に検討する必要がある。

箱網内で遊泳や突き上げを行う海亀のはばたき周波数には、呼吸欲求の高まりが現れる可能性があることが示唆された。海亀脱出支援システムは呼吸欲求の高まった海亀の特徴的な行動である突き上げを利用したものであるが、網内で活発に遊泳して突き上げを行うことのできる時間は限られる。また、中層・底層定置網の箱網内は、自然環境下とは異なり、周囲を網で囲まれてなおかつ天井網で覆われており、海亀にとって非常に特異な環境である。そのため、TRDの開発を進める上で、箱網内で海亀はいつ突き上げを始めるのか、どのくらい突き上げを継続することができるのか、またその際の活動量はどのように変化するのかを把握することは重要である。これまで、自然環境下における海亀の行動については多くの研究が行われてきたが (Okuyama *et al.* 2014, Yasuda & Arai 2009, Hays *et al.* 2004, Hays *et al.* 2007, Narazaki *et al.* 2013), 定置網の箱網内のように周囲が完全に閉ざされた特異な環境下での行動を詳細に調べて定量的に評価した研究例はない。そこで、本研究の第7章においては、中層箱網における海亀の突き上げ行動について、はばたき周波数や活動量を指標として、影響要因を含めて定量的に調べることにする。

Table 3-1 Summary of turtle individuals used in the tank experiments. SCL, straight carapace length; SCW, straight carapace width; BW, body weight

Turtle ID	SCL (m)	SCW (m)	BW (kg)	Number of experiments
L1	0.84	0.64	75.0	3
L2	0.74	0.60	57.0	3
L3	0.65	0.52	38.5	4
L4	0.63	0.51	35.7	3

Table 3-2 Summary of turtle individuals used in the set net experiments. SCL, straight carapace length; SCW, straight carapace width; BW, body weight

Year	Turtle ID	SCL (m)	SCW (m)	BW (kg)	Number of experiments
2014	C1	0.84	0.64	75.0	1
	C2	0.74	0.60	57.0	1
	C3	0.63	0.51	35.7	1
2015	C4	0.82	0.63	71.2	2
	C5	0.69	0.55	47.4	2
	C6	0.67	0.55	43.0	2

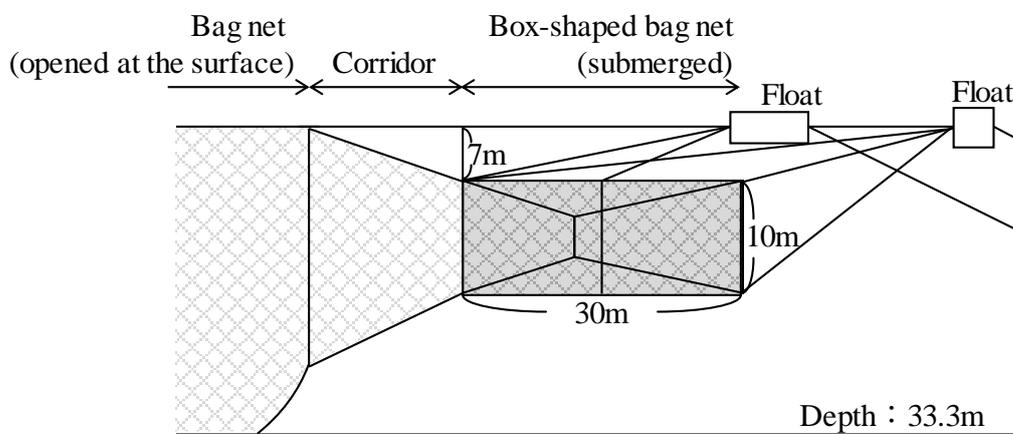
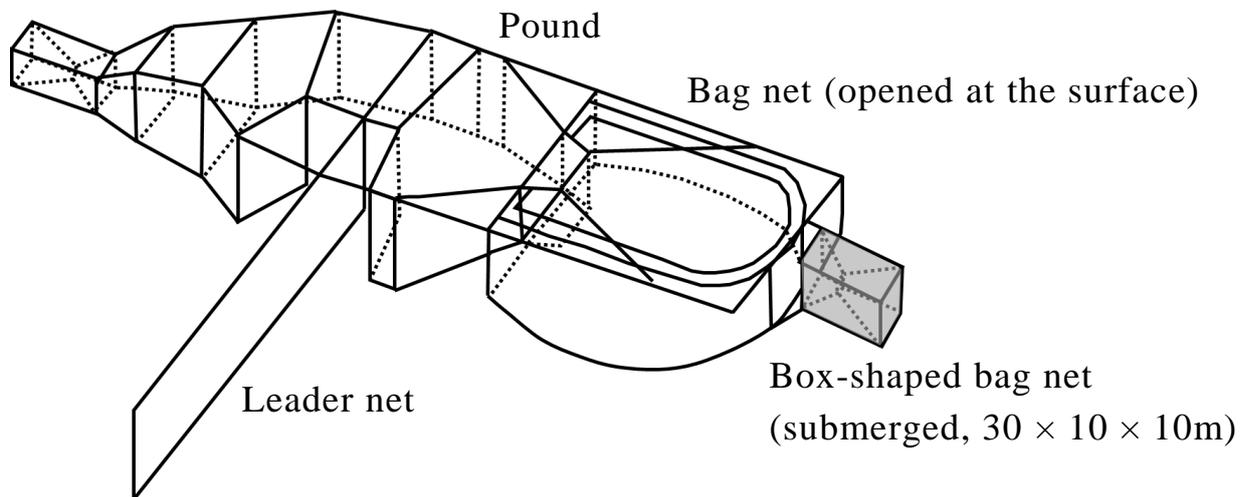


Fig.3-1 Set net used in the set net experiments in Mie Prefecture. The upper figure shows a general view of the set net. The experiments were conducted in the right side of box-shaped submerged bag net (shaded with gray). The lower figure shows the side view and details of the bag net.

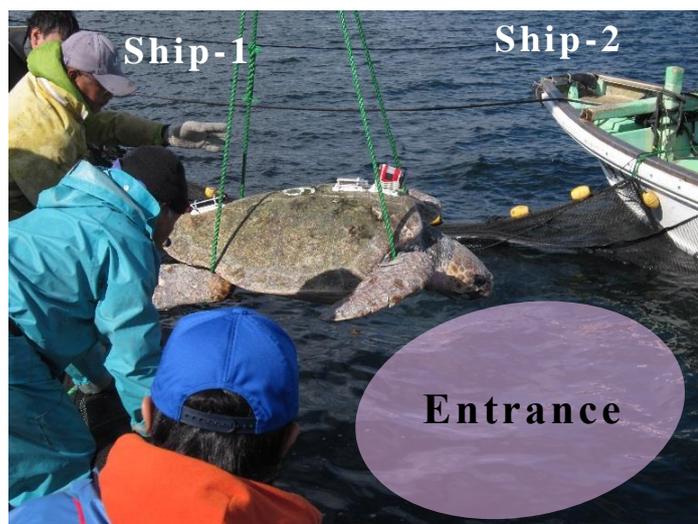
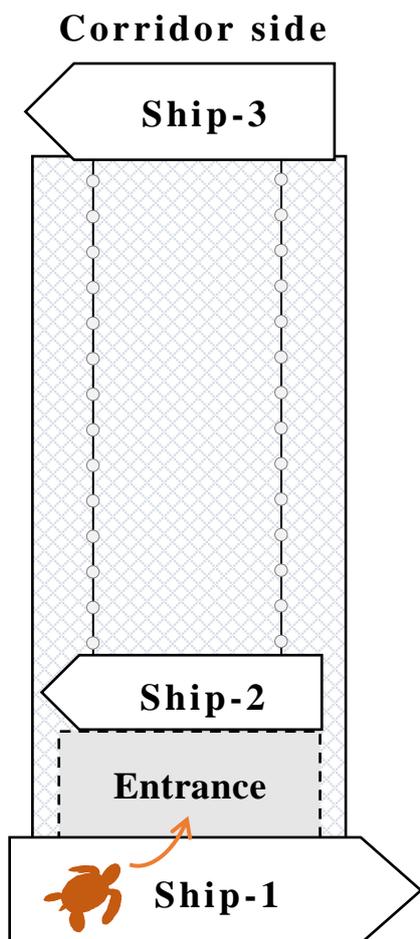


Fig.3-2 The distribution of the ships during experiments and entrance of the turtle.

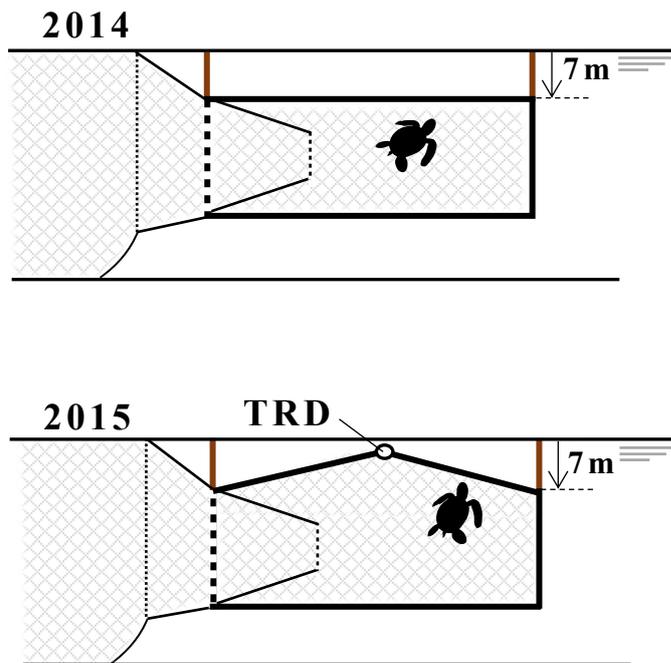


Fig.3-3 Side view of the box-shaped submerged bag net used in the set net experiments in 2014 (upper) and 2015 (lower). The bag net was submerged 7m below the sea surface during the experiments. In 2014, experiments were performed in a standard rectangular bag net without the TRD. On the other hand, a turtle releasing device (TRD) was attached to the top of quadrangular pyramid-shaped ceiling net with ropes and cable ties in 2015.

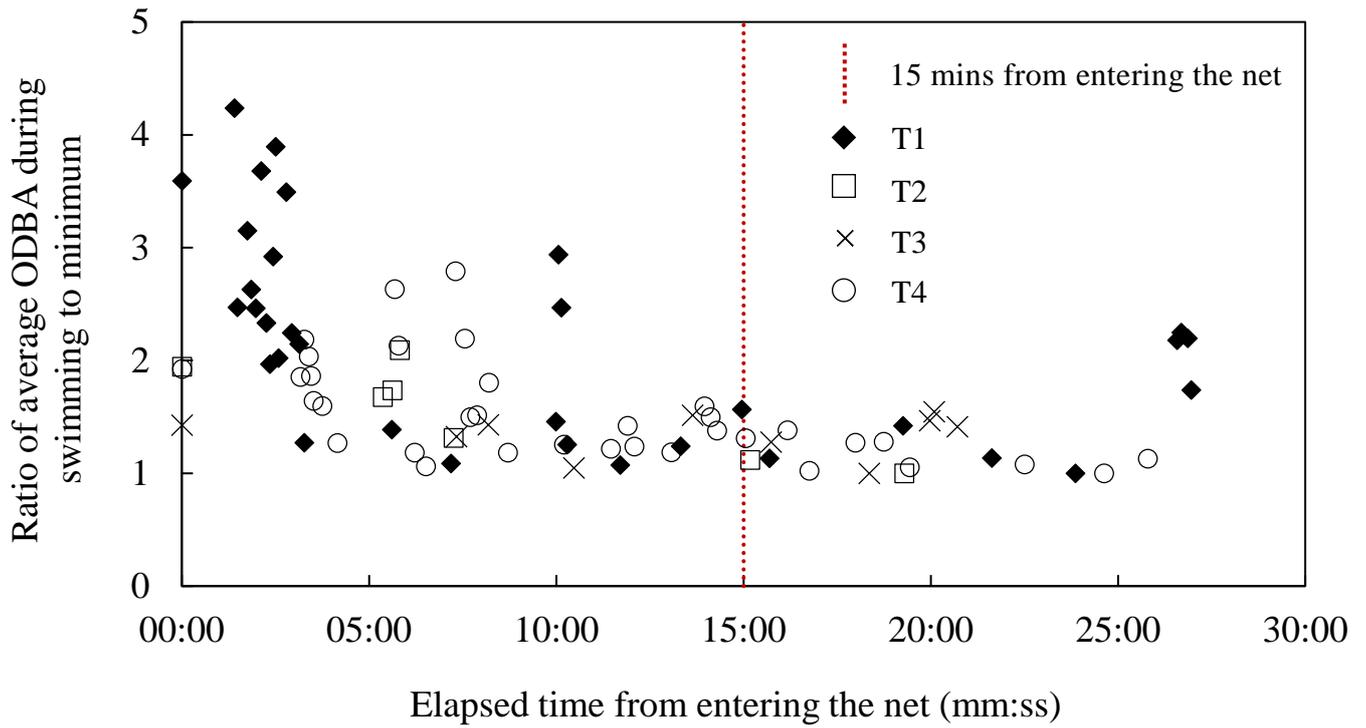


Fig.3-4 Elapsed change of average ODBA values of each swimming set which were divided by minimum value of that of each experiment. The time for plots was taken as the start point of each set. Dotted vertical line indicates 15 minutes from turtles entering the net.

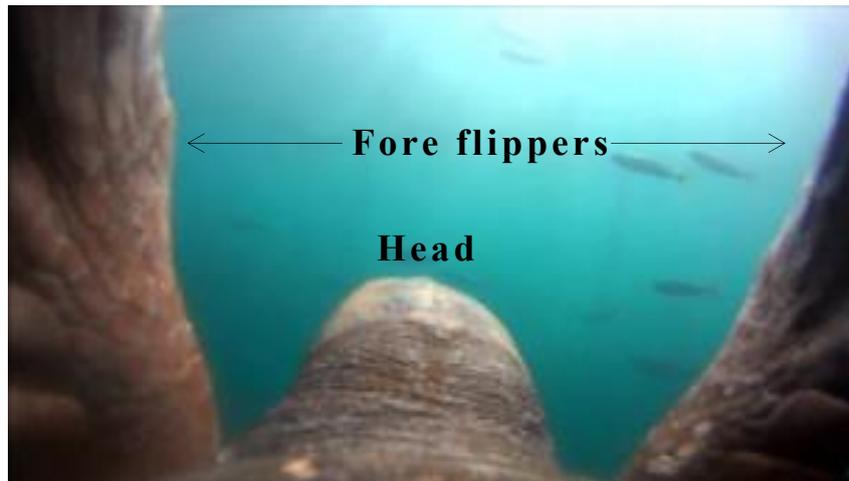


Fig.3-5 A capture image from the video camera attached onto the carapace of a turtle. The video captured the fore flippers and the head of a turtle. Flipper beat frequency was obtained from the video calculated from the frame-by-frame advance. Frame rate of the video was 30 Hz.

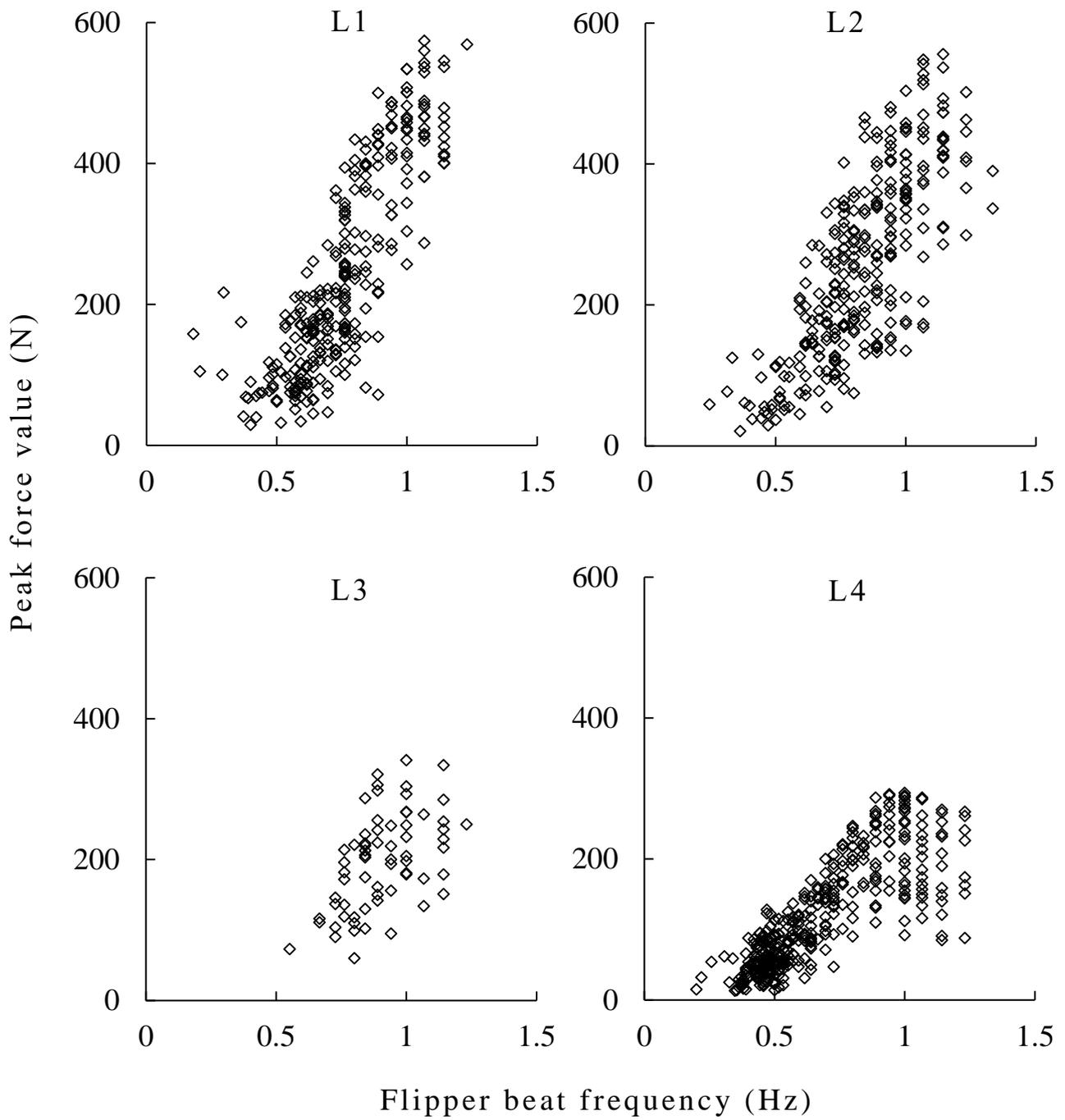


Fig.3-6 Relationship between the flipper beat frequency and the peak force value in the tank experiment for each individual.

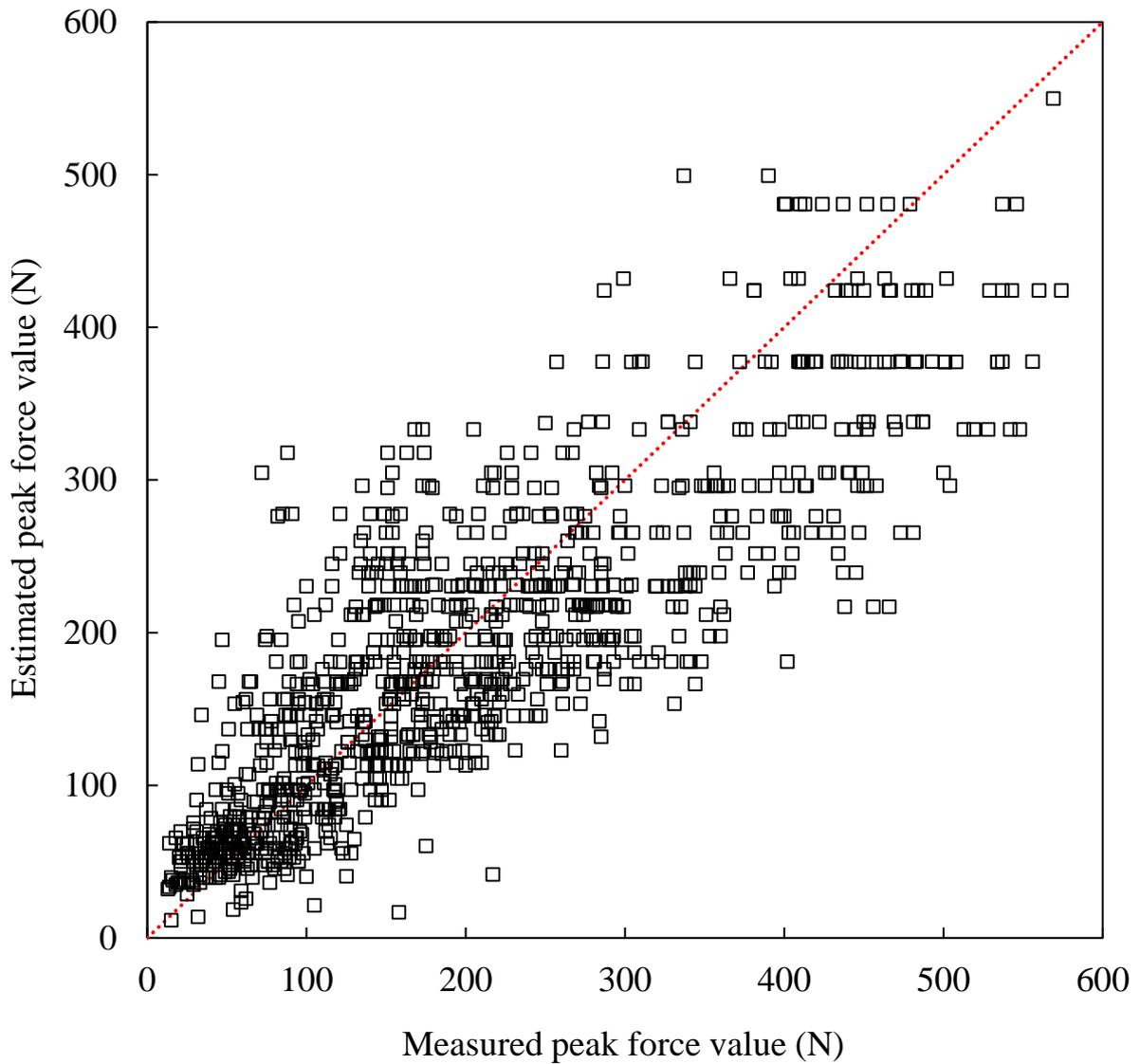


Fig.3-7 Comparison between measured and estimated peak force values. Dotted line indicates the function that measured peak force value = estimated peak force value.

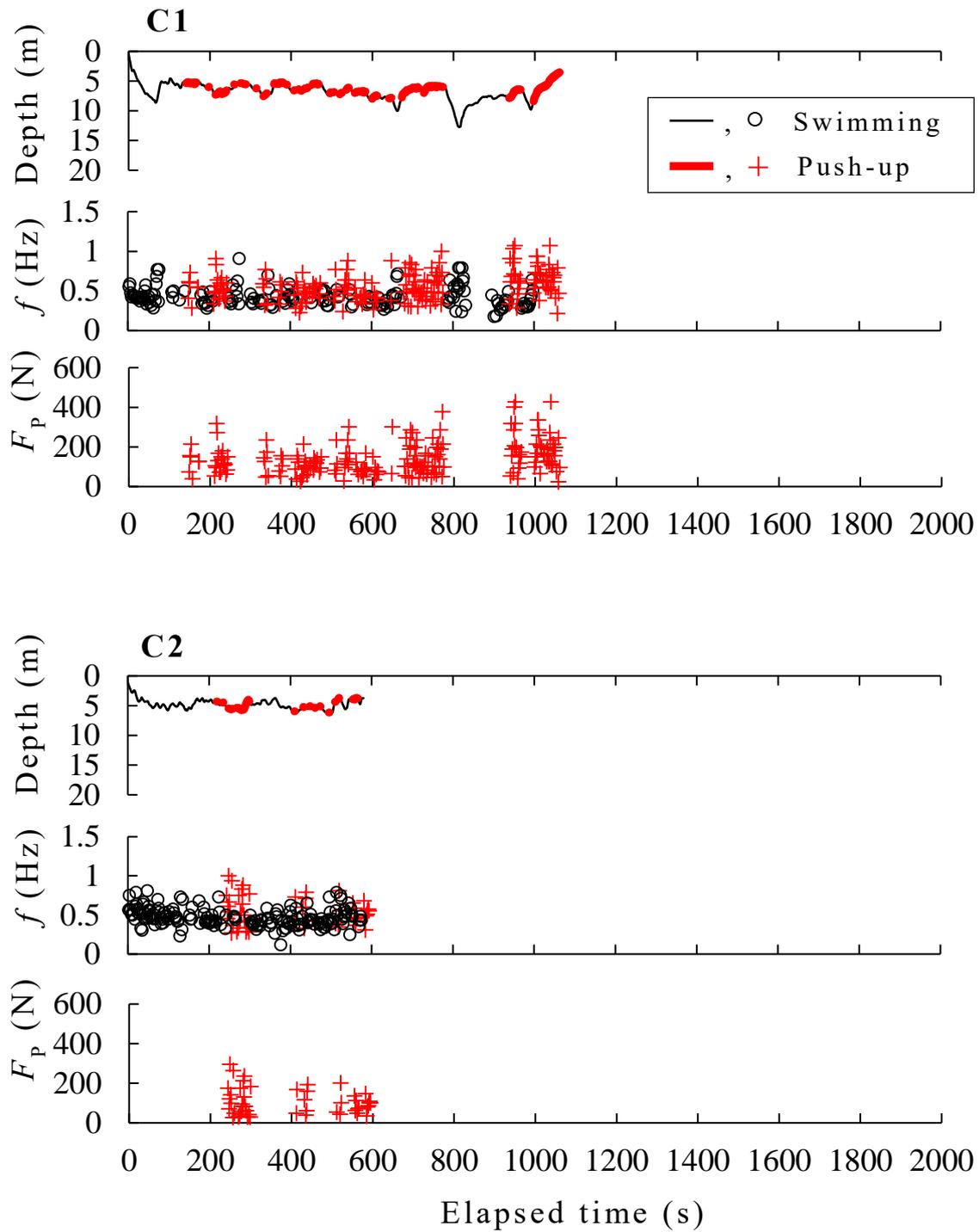


Fig.3-8 Changes in swimming depth, flipper beat frequency, and estimated peak force value during push-up for all set net experiments. f , Flipper beat frequency; F_P , Peak force value. Marks show flipper beat frequency and peak force value (\circ , during swimming; +, during push-up). Thin and thick lines show the depth during swimming and push-up, respectively. The time of plots was treated as start of each stroke.

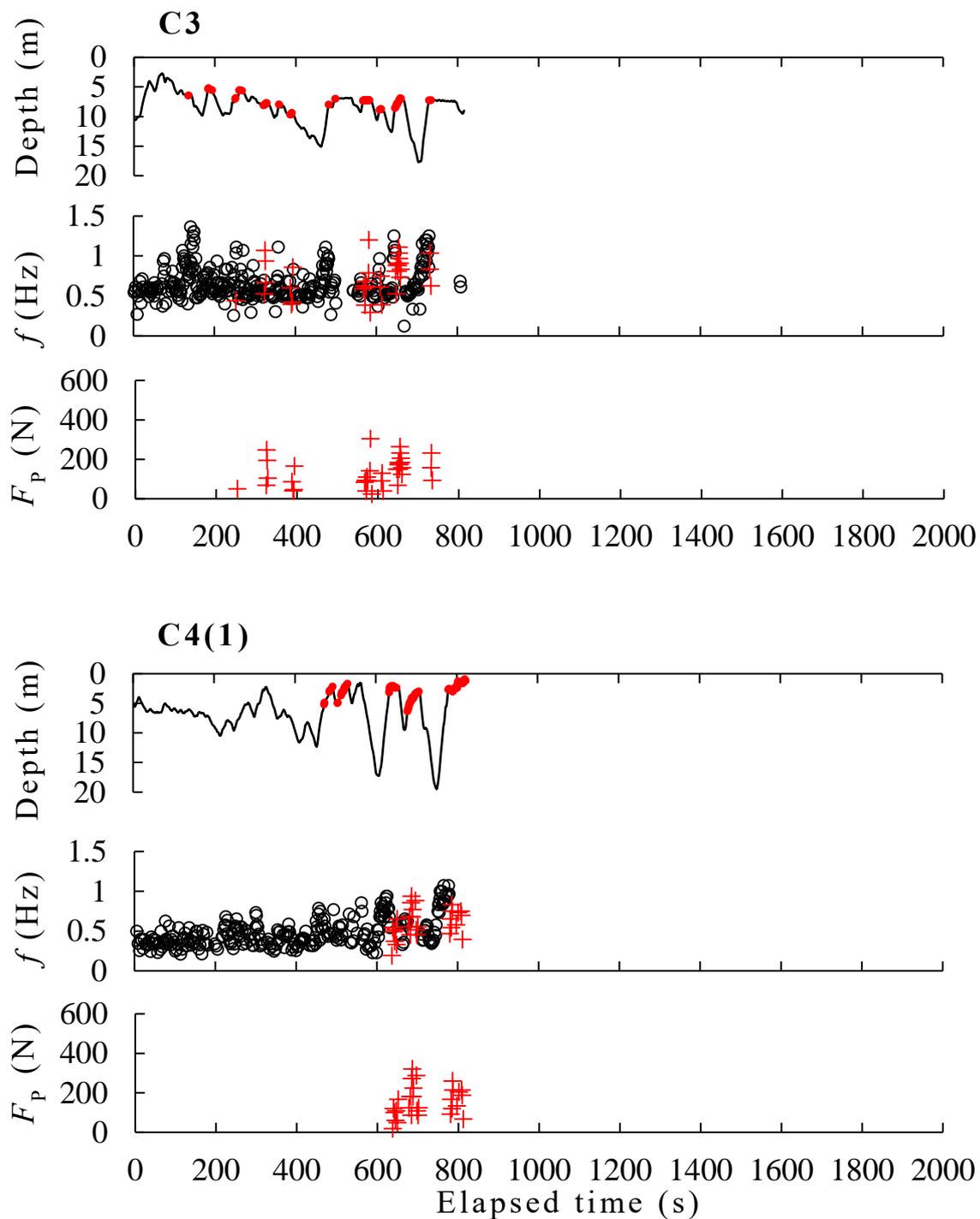


Fig.3-8(continuation) Changes in swimming depth, flipper beat frequency, and estimated peak force value during push-up for all set net experiments. f , Flipper beat frequency; F_P , Peak force value. Marks show flipper beat frequency and peak force value (\circ , during swimming; $+$, during push-up). Thin and thick lines show the depth during swimming and push-up, respectively. The time of plots was treated as start of each stroke.

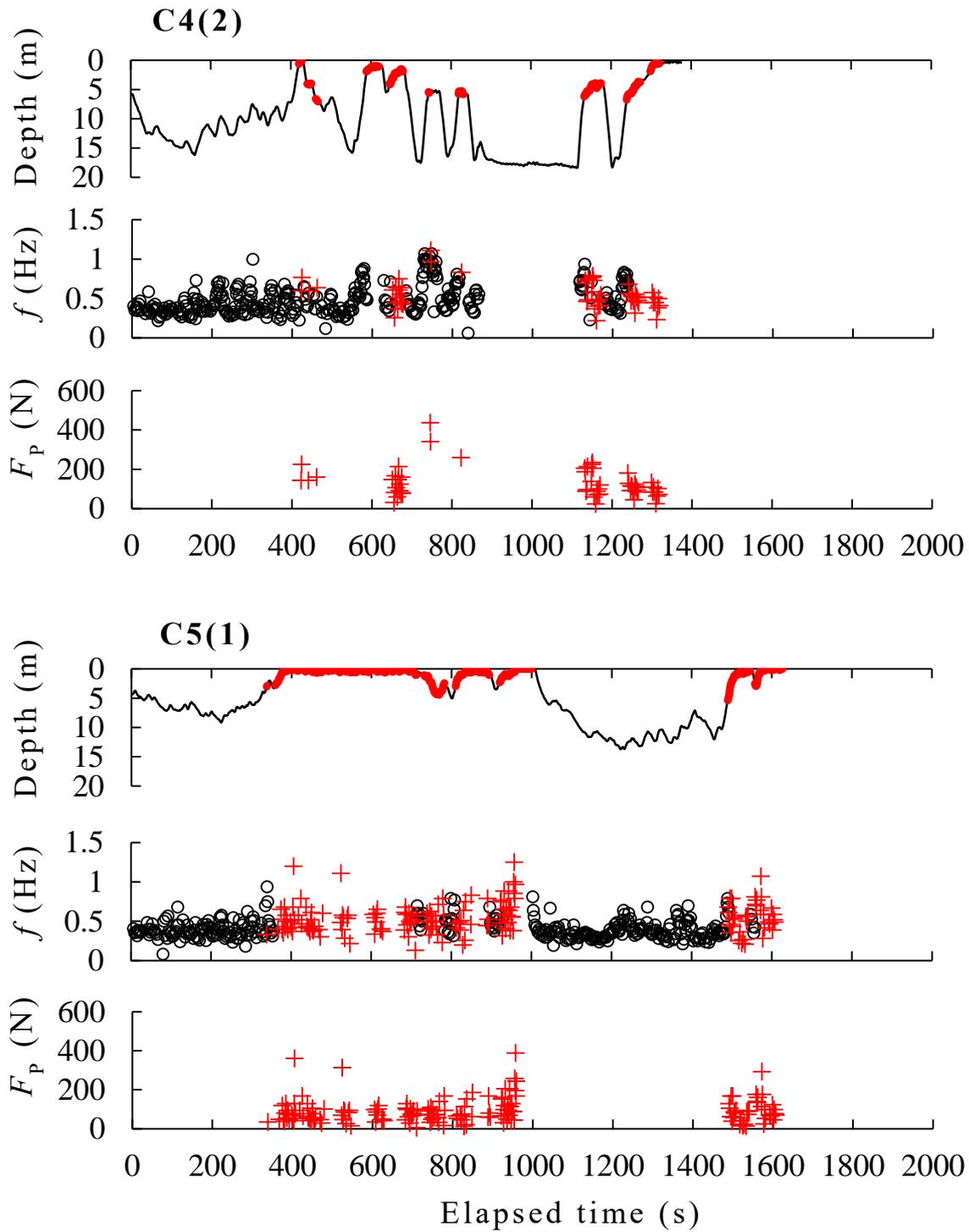


Fig.3-8(continuation) Changes in swimming depth, flipper beat frequency, and estimated peak force value during push-up for all set net experiments. f , Flipper beat frequency; F_P , Peak force value. Marks show flipper beat frequency and peak force value (\circ , during swimming; $+$, during push-up). Thin and thick lines show the depth during swimming and push-up, respectively. The time of plots was treated as start of each stroke.

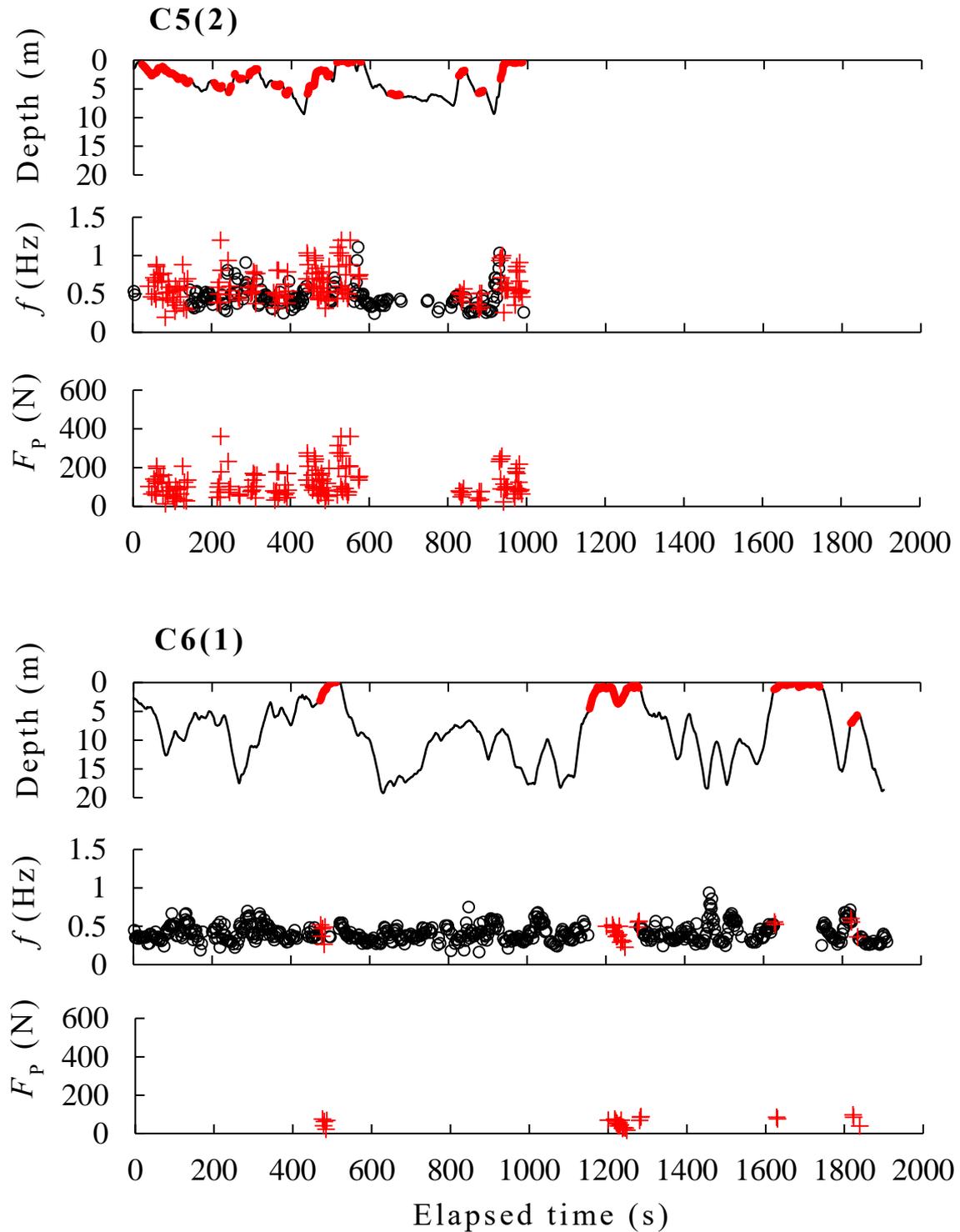


Fig.3-8(continuation) Changes in swimming depth, flipper beat frequency, and estimated peak force value during push-up for all set net experiments. f , Flipper beat frequency; F_P , Peak force value. Marks show flipper beat frequency and peak force value (\circ , during swimming; $+$, during push-up). Thin and thick lines show the depth during swimming and push-up, respectively. The time of plots was treated as start of each stroke.

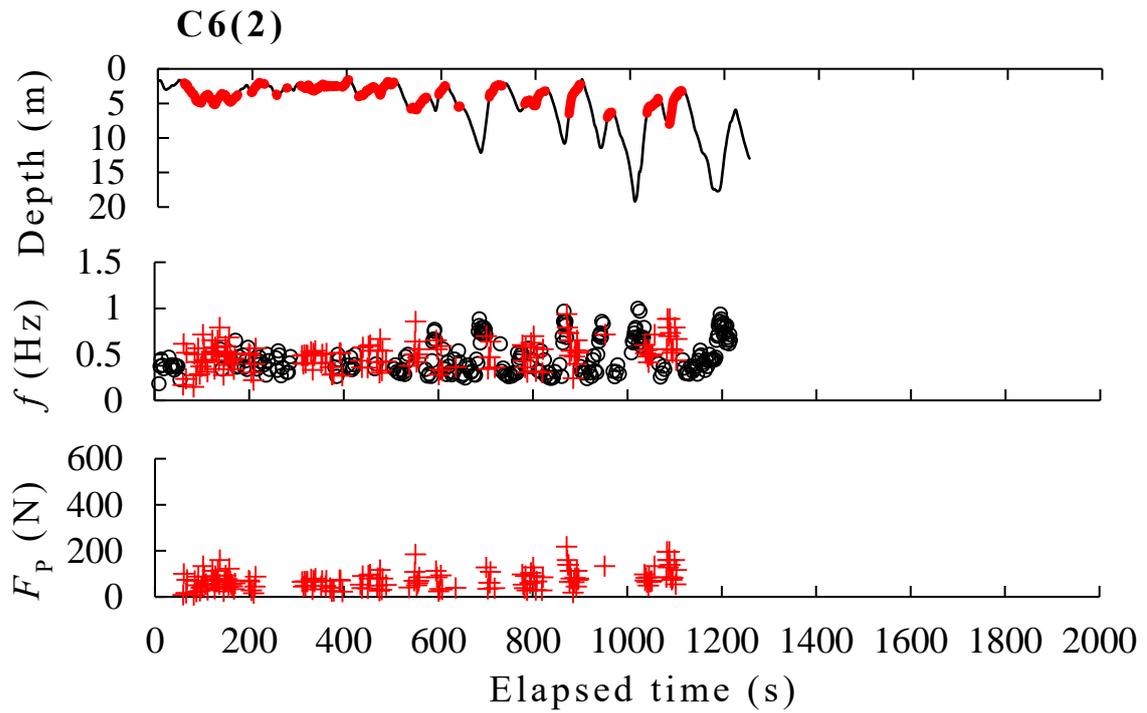


Fig.3-8(continuation) Changes in swimming depth, flipper beat frequency, and estimated peak force value during push-up for all set net experiments. f , Flipper beat frequency; F_P , Peak force value. Marks show flipper beat frequency and peak force value (\circ , during swimming; $+$, during push-up). Thin and thick lines show the depth during swimming and push-up, respectively. The time of plots was treated as start of each stroke.

第 4 章 TRD の閉扉力

前章までは、TRD からの海亀の脱出を可能とする条件を検討するために、海亀の推進力について調べてきた。一方、TRD には、海亀が脱出できることに加えて、漁獲対象種の逸出を防ぐために扉が確実に閉鎖することが求められる。また、TRD が使用される定置網漁場には潮流が存在し、その流体力は扉の開閉動作に大きな影響を与えると予想される。つまり、扉の開放時に扉の開放側から支点側に向かって流れを受けた場合には、流体力は扉を開放させる方向に働くため、扉が閉鎖し難くなる。一方、扉の支点側から流れを受けた場合には、流体力は扉を閉鎖させる方向に働くため、海亀が脱出し難くなると考えられる。したがって、TRD を適切に設計するためには、扉に作用する流体力の影響についても考慮する必要がある。本章では、TRD の閉扉力とその特性について調べ、流れ下においても確実に閉鎖する仕様を明らかにすることを目的とした。

4-1 TRD の基本設計

TRD は、海亀の脱出口となる 1.0m 四方の穴を開けた土台、脱出口を覆う扉、土台に装着した複数個の浮子からなるものとした (Fig.4-1)。土台は適度な柔軟性を持つ 2.0m 四方の高密度ポリエチレン樹脂製格子 (タキロン社製、トリカルネット N-24、網目ピッチ 10 × 10mm、縦糸幅 2.2mm、横糸幅 3.0mm、厚み 2.1mm) である (以下、土台ネット)。扉は、ステンレス丸棒で製作した枠に鍍網 (90 径、ベクトラン製) を張ったものであり、1.1m 四方の鍍網を張った部分と、枠のみの部分からなる (Fig.4-1(下))。扉枠のみの部分が結

束バンドやロープを用いて土台ネットに取り付けられ、この取り付け部分を重ね合わせ部（overlap）と呼び、この幅を重ね合わせ幅 l_0 とする。海亀によって扉が押し開けられた際には、重ね合わせ部によって下方へ押し込まれるように土台ネットが変形する。土台ネットに装着された浮子は、TRD 全体に浮力を与えるとともに、土台ネットの形状を維持する役割を持つ。

4-2 TRD の閉扉モーメント

4-2-1 TRD の閉扉力の構成要素

扉が押し開けられた際に働く力の概要を Fig.4-2 に示す。扉の縁辺部 A に対して支点 P と同距離の反対側に位置する部分を P' とする。P' 点には扉が開放した際に P と同じ高さを保つように、浮子が取り付けられている。

閉扉力は、以下の 3 つの力で構成されると考える。まず、重ね合わせ部に生じる土台ネットの弾性力である。次に、土台ネットの復元力である。これは、扉の開放に伴い変形した土台ネットが、浮子の浮力や周囲の網地の張りによって元の形状に戻ろうとする力である。扉の開放時には土台ネットの A-P 部分だけでなく A-P' 部分も下方へ押し込まれ、P' 点を支点とした弾性力と復元力も働く。このことから、P 点および P' 点を支点とする弾性力と復元力をそれぞれ F_E (N) と F_S (N), $F_{E'}$ (N) と $F_{S'}$ (N) とする。そして、もう一つが扉の水中重量 W (N) である。扉枠に用いるステンレス丸棒が太いほど、水中重量は大きくなる。ただし、支点に対して開放側と反対にある重ね合わせ部の水中重量は扉の開放方向に働く。また、支点となる一辺の部分の重量は扉の開閉には関与しない。本研究では、重ね合わ

せ部の水中重量を除いたものを扉の水中重量とし、重ね合わせ部の水中重量と区別した。なお、鍍網の水中重量は 10g 程度であり、扉枠の水中重量に比べて十分に小さいため無視した。ここで、P 点を支点として扉が開いた際に、土台ネットの弾性力、土台ネットの復元力、扉の水中重量の 3 つの力が扉の閉鎖方向に働くモーメントをそれぞれ土台ネットの弾性モーメント M_E (Nm)、土台ネットの復元モーメント M_S (Nm)、扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント M_W (Nm) とすると、A-P と A-P' の長さは等しいため、 F_E と F_E' 、 F_S と F_S' はそれぞれの大きさが等しいと仮定できるので、P 点を支点とする閉扉モーメント M_θ (Nm) は以下の式 (4-1) で表される。

$$M_\theta = 2M_E + 2M_S + M_W \quad (4-1)$$

本研究では、揚網時の作業性やステンレス丸棒の曲げ強度等を考慮して、扉枠の太さが 8mm で重ね合わせ幅が 0.3m、0.2m のもの（以下、 $\Phi 8\text{mm}-0.3\text{m}$ 、 $\Phi 8\text{mm}-0.2\text{m}$ と表記）、および扉枠の太さが 6mm で重ね合わせ幅が 0.3m、0.2m、0.1m のもの（以下、 $\Phi 6\text{mm}-0.3\text{m}$ 、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ 、 $\Phi 6\text{mm}-0.1\text{m}$ と表記）の計 5 種類を実験対象とした。

4-2-2 閉扉モーメントの推定

4-2-2-1 土台ネットの弾性モーメント

土台ネットの弾性モーメント M_E は、土台ネットの材質によって変化するため、ここでは現用の土台ネットと同じ樹脂製格子を用いて M_E を以下の方法で陸上において調べた。方形の平らな台上において、1.1m 四方の土台ネットを、扉の重ね合わせ幅と同じ 0.1m、0.2m、0.3m の幅で台の端（変形点）から一辺（以下、自由端）が張

り出すように設置した (Fig.4-3)。自由端には一辺と同じ長さで重量が無視できる程度の本棒を辺に沿って装着し、計測時の土台ネットの湾曲を防いだ。ワイヤーを介して自由端の中央に張力計 (株式会社 IMADA 製 ZP-200N, 最大荷重: 200N) を接続して土台ネットを一定の角度に下方向に引き曲げ、ネットの面と直角な方向の張力を曲げ弾性力 F_E (N) として計測した。自由端から変形点までの距離 (=重ね合わせ幅) を F_E に乗算したものを M_E とし、計測値から計測角度 (土台ネットの元の水平面と引き曲げられた土台ネットのなす角度; 扉の開放角度) に対する M_E の推定式を得た。なお、海亀が脱出する際に扉を開放する角度は最大で 60° 程度であるため、(田村ら 2014)、計測角度を 10° から 60° の 10° 間隔とした。

4-2-2-2 土台ネットの復元モーメント

土台ネットの復元モーメント M_s は、周囲の網地の張りや浮子の浮力によって変化する。ここでは、それらが一定であり、扉の開放時に P' 点の高さが維持されると仮定して M_s を以下の方法で陸上において調べた。1.1m 四方の土台ネットを中央で二分するように、重量が無視できる程度の 1.1m の本棒を辺と平行に装着し、間隔を空けて平行に設置した 2 つの平らな方形の台上に本棒がその間隔の中間に位置するように置いた。ワイヤーを介して本棒の中央に張力計 (ZP-200N) を接続し、2 つの台間で真下方向に引き、屈折点 (台の端) と本棒間の距離が重ね合わせ幅と等しく、なおかつ土台ネットの屈折角度が開放角度 θ と等しくなった際の張力を計測した (Fig.4-4)。2 つの台の間隔は、重ね合わせ幅と開放角度によって変更し、計測前に台の位置を固定した。計測時には、土台ネットが上方に反り返るのを防ぐ程度で摩擦の無視できるステンレス板で台上の土台

ネットを押さえた。張力計による計測値を F_T (N)とし、 F_T から F_E を除いたものを復元力 F_S (N), F_S に重ね合わせ幅を乗算したものを M_S とし、開放角度 θ に対する M_S の推定式を得た。弾性モーメントと同様に、 10° 間隔で 10° から 60° まで計測した。

4-2-2-3 扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント

扉に作用する重力は、扉の重心に対して常に鉛直下向きに働く (Fig.4-2)。重ね合わせ部を除いた扉の水中重量は、扉の閉鎖方向に働き、重ね合わせ部の水中重量は扉の開放方向に働く。したがって、扉の水中重量を W (N)、開放角度を θ (deg)、扉の支点から重心までの距離を l_w (m)、重ね合わせ部の水中重量を W' (N)、扉の支点から重ね合わせ部の重心までの距離を $l_{w'}$ (m)としたとき、扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント M_w (Nm)は以下の式 (4-2) で表される。

$$M_w = (W l_w - W' l_{w'}) \cos\theta \quad (4-2)$$

ここでは、上述した計5種類の扉それぞれについて M_w を試算した。

4-2-3 静水下的における閉扉モーメントの計測

国立研究開発法人水産総合研究センター(現 水産研究・教育機構)西海区水産研究所亜熱帯研究センター八重山庁舎の屋外水槽 ($10 \times 10 \times 2.1$ m)において、静水下的における閉扉力を計測し、閉扉モーメントを得た。天井部に TRD を設けた実験用箱網 ($3.0 \times 3.0 \times 1.1$ m, ポリエチレン製, 目合 75mm) を水槽内に敷設し、扉の開放側の中央部にワイヤーを介して張力計 (ZP-200N) を接続して閉扉力を計測した (Fig.4-5)。扉の開放角度を 10° から 60° とし、 10° 間隔で計測を

行った。重ね合わせ部近傍の P'点には、計 44.1N の浮力の浮子を装着した。なお、浮子の装着による、土台の形状の顕著な変化はなかった。ワイヤー接続点から支点までの距離 (1.1m) を得られた張力値に乗じて M_{θ} を得た。なお、閉扉力は常に扉に対して直角に作用するため、扉に対するワイヤーの角度が常に直角となるように、水槽上部の梁に設置した滑車の位置を変えて計測を行った。本実験で得た計測値と (4-1) 式から得た推定値を比較することで、推定式の妥当性について検討した。

4-2-4 流れ下における閉扉モーメントの計測

東京海洋大学大型回流水槽 (観測部長さ 9.0m, 水路幅 2.2m, 常用水深 1.6m, 胡ら 2004) において実験を行った (Fig.4-6)。実験水槽の寸法の制約により、土台ネットの寸法を 1.5 × 2m とした TRD のみを水槽内に設置した (Fig.4-6(上))。TRD は、土台ネットの四隅に取り付けたロープを用いて、観測部底面に対して水平に固定した。閉扉モーメントの計測実験 (Fig.4-5) と設置条件を同一とするために、流れの無い状態で M_{θ} を計測し、その値が計測実験における計測値と一致するように設置時のロープの張りを調節した。中層・底層定置網漁場において、通常の揚網が可能な限界流速は約 0.8 ノット (約 0.4m/s) と考えられている (金田 1977, 野村ら 1964)。したがって、TRD を実用化する上での海亀の脱出と自動閉鎖が可能な条件として、流速を 0.1m/s から 0.4m/s の範囲内の 0.1m/s 間隔、扉の開放角度を 10° から 60° の 10° 間隔として計測を行った。扉の向きは、扉の開放側あるいは支点側を上流に向けた場合の 2 通りとし、扉の支点から計測点までの距離 (1.1m) を計測値に乗じたものを、流れ下における閉扉モーメント $M_{R\theta}$ として得た。

4-3 結果

4-3-1 土台ネットの弾性モーメント

土台ネットの弾性モーメント M_E (Nm)の開放角度 θ に対する変化を重ね合わせ幅別に Fig.4-7 に示す。いずれの重ね合わせ幅においても、開放角度が大きくなるにつれて M_E は増加した ($p < 0.0001$)。また、重ね合わせ幅による有意な差異は見られなかった (One-way ANOVA, $n=18$, $F=0.025$, $p=0.975$)。そこで、すべての計測結果を合わせて、 M_E と θ との関係を表す近似式 (4-3) を得た。

$$M_E = 0.06\theta \quad (R^2 = 0.99) \quad (4-3)$$

4-3-2 土台ネットの復元モーメント

土台ネットの復元モーメント M_S (Nm)の開放角度 θ に対する変化を重ね合わせ幅別に Fig.4-8 に示す。 M_E と同様に、いずれの重ね合わせ幅においても、開放角度の増加にしたがって M_S は増加した。また、重ね合わせ幅が大きいほど M_S は大きくなり、重ね合わせ幅別に M_S と θ の関係を表す以下の近似式 (4-4) - (4-6) を得た。

$$M_S = 0.13\theta \quad (l_0=0.3, R^2 = 0.99) \quad (4-4)$$

$$M_S = 0.09\theta \quad (l_0=0.2, R^2 = 0.98) \quad (4-5)$$

$$M_S = 0.07\theta \quad (l_0=0.1, R^2 = 0.98) \quad (4-6)$$

4-3-3 扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント

(4-2) 式を用いて求めた M_w の開放角度 θ との関係を Fig.4-9 に示す。扉枠が太い扉の M_w の方が、細い扉による M_w よりも大きかった。また、扉枠の直径が同じ場合、重ね合わせ幅が大きいほどこのモーメントは小さくなったが、その差は最大で 0.3Nm 程度であった。いずれの扉においても、 M_w は扉の開放角度が大きくなるにしたがって減少した。

4-3-4 閉扉モーメントの推定値と実測値の比較

静水下における計測値より求めた閉扉モーメントの実測値と、(4-2) - (4-6) 式より求めた推定値の開放角度 θ に対する変化を扉の仕様別に Fig.4-10 に示す。いずれの扉においても、扉の開放角度が大きいかほど M_θ は大きくなった。また、開放角度が大きいか場合に、推定値が実測値よりも若干大きくなる傾向が見られたものの、概ね一致した。

4-3-5 流れ下における閉扉モーメント

扉の開放側から流れを受けた場合と、支点側から流れを受けた場合の流れ下における閉扉モーメント $M_{R\theta}$ をそれぞれ Fig.4-11 と Fig.4-12 に示す。扉の開放側から流れを受けた場合では、流速が大きいかほど $M_{R\theta}$ は小さくなり、 $\Phi 6\text{mm}-0.1\text{m}$ の扉においては流速 0.4m/s 以上かつ開放角度 40° 以上の場合に $M_{R\theta}$ が負の値をとり、扉が閉鎖せずに開いたままとなった。一方、扉の支点側から流れを受けた場合には、流速が大きいかほど $M_{R\theta}$ は大きく、いずれも正の値を示した。なお、いずれの方向から流れを受けた場合でも、計測時に扉が大きく振動する様子は見られなかった。

4-4 考察

4-4-1 閉扉力を構成するモーメント

本章では，開放角度 θ における土台ネットの弾性モーメント M_E と復元モーメント M_S ，扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント M_W の 3 つの推定式を導き，それらを合算したものを閉扉モーメント M_θ の推定式とした。 M_θ の推定値の θ に対する変化の傾向は実測値と概ね一致したものの，実測値に対してやや過大評価となった。本研究では，Fig.4-2 における P' の高さが扉の開放時にも一定であると仮定して，土台ネットの復元モーメントを求めた。しかし，静水下における水槽実験において扉を開放した際に，P' が 1 - 2cm 程度ではあるが沈み込む様子が見られた。このために，実測値が推定値をやや下回ったと考えられた。P' の高さは，周囲の網の張りと，P' の近傍に装着する浮子の浮力が関与しており，これらが十分でない場合には復元モーメントが減少すると考えられる。実際に，閉扉力の計測の際に，P' 近傍の浮子を外して扉を開放したところ，P' は大きく沈み込み，閉扉力が大幅に減少した。したがって，土台ネットの復元モーメントを損なわないためには，十分な浮力を P' やその周辺に与えるべきであると考えられる。本研究における閉扉モーメント計測時には，重ね合わせ部近傍の P' 点に計 44.1N 程度の浮力の浮子を装着したが，この浮子の浮力は周囲の天井網の張り具合によって調節することが望ましい。P' の高さが維持された場合には M_θ の実測値は推定値とよく一致すると考えられ， M_θ は M_E ， M_S ， M_W によって構成されるとするのが妥当であると考えられた。

4-4-2 扉の重ね合わせ幅と水中重量が閉扉モーメントに与える影響

閉扉モーメントを構成する各モーメントは、TRDの仕様である扉の重ね合わせ幅と水中重量によって変化する。したがって、これらの仕様を変更することにより M_{θ} を調節することが可能である。特に、重ね合わせ幅は重要な要素であると考えられ、田村ら（2014）による海亀脱出実験においても、重ね合わせ幅を変えた条件下での実験結果について検討されていた。 M_E および M_S は開放角度の増加に伴い大きくなり、また M_S は重ね合わせ幅が大きいほど大きくなった。これは、重ね合わせ幅に対する復元力の変化が小さかったため、重ね合わせ幅の増加に伴ってモーメントが増加したと考えられる。一方、 M_{θ} を構成する3つのモーメントのうち、 M_W のみが扉の開放角度の増加にしたがい減少した（Fig.4-9, 式（4-2））。これは、海亀が扉を押し開ける最初の段階で作用する力が最も大きくなることを意味する。また、扉の開放側から流れを受けた場合、海亀が扉を大きく開けるほど扉の閉鎖に必要な閉扉力は大きくなるが、 M_W は開放角度が大きいほど小さくなってしまふ。したがって、海亀の脱出のしやすさと扉の閉鎖に及ぼす流れの影響を考慮すると、扉の水中重量は小さく抑えて、重ね合わせ幅の調節により必要な閉扉力を得ることが望ましいと考えられる。

4-4-3 流れ下における閉扉モーメント

扉の開放側から流れを受けた場合、 $\Phi 6\text{mm}-0.1\text{m}$ の扉においては、流速が 0.4m/s を超えると、開放角度 40° 以上の場合に扉が閉鎖しなくなった。これは、閉扉力と逆向きに作用する流体力が、閉扉力よりも大きくなったためである。 0.4m/s は定置網の操業可能限界と言

われるほど速い流速であるが、漁獲物の逸出を防ぐためには、このような速い流れ下においても確実に閉鎖する扉が求められる。一方、他の4つの扉については、扉の開放側から0.4m/sの流れを受けた場合でも、開放角度60°の状態から閉鎖することが確認された。ここで、海亀の脱出のしやすさという観点で M_w の特性を考慮すると、海亀が扉を押し開ける最初の段階で必要とされる力がより小さい扉枠Φ6mmが適している。さらに揚網時の作業性を考慮すると、重ね合わせ幅のより小さな扉であるΦ6mm-0.2mが最も適切であると考えられた。第5章では、Φ6mm-0.2mの扉が、海亀が自力で押し開けられる仕様であるかを検討する。

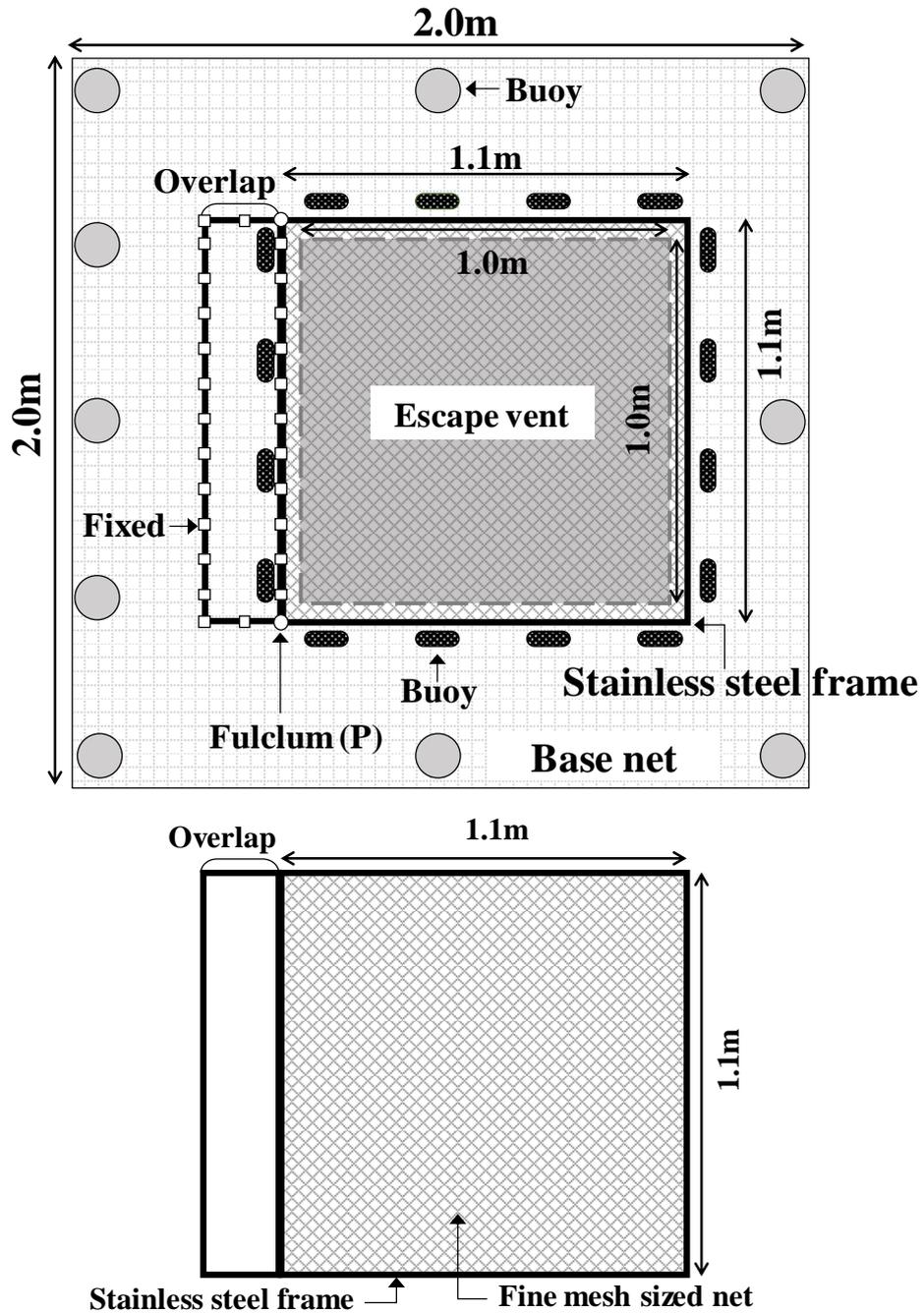


Fig.4-1 Schematic drawing of the turtle releasing device (TRD). The TRD consists of a flexible plastic grid as a base (defined as base net), and a flap door composed of a stainless-steel frame and fine mesh sized net, and buoys attached on the base net. The buoyancy of buoys attached around the edge of the base net is 14.7N, whereas the total buoyancy of buoys around the escape vent was adjusted to weight of the stainless-steel frame. The base net is provided with an escape vent. “Overlap” is a part of the stainless-steel frame fixed to the base net by bands. Lower shows an overview of the flap door. The flap door consists of the parts with or without fine mesh size net, and overlap part is not covered by a net.

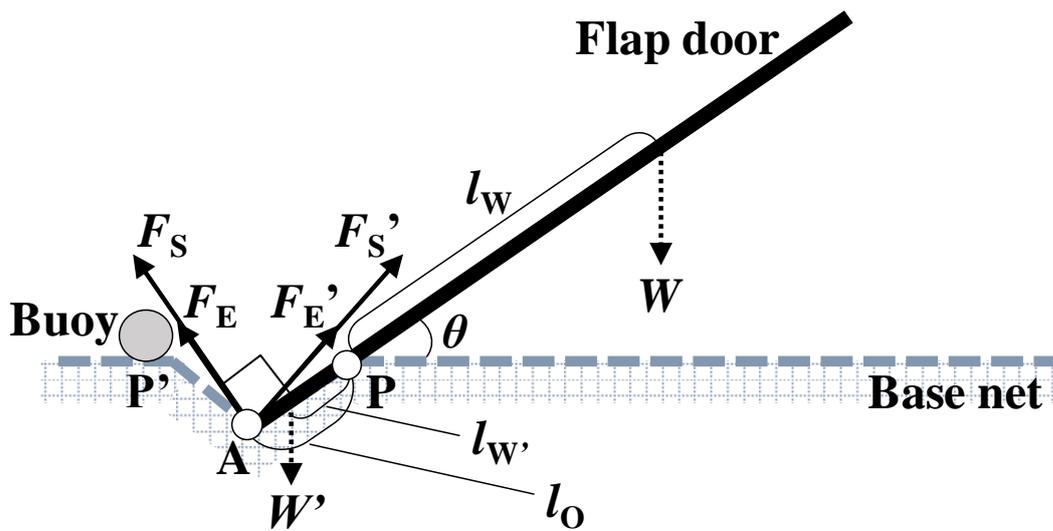
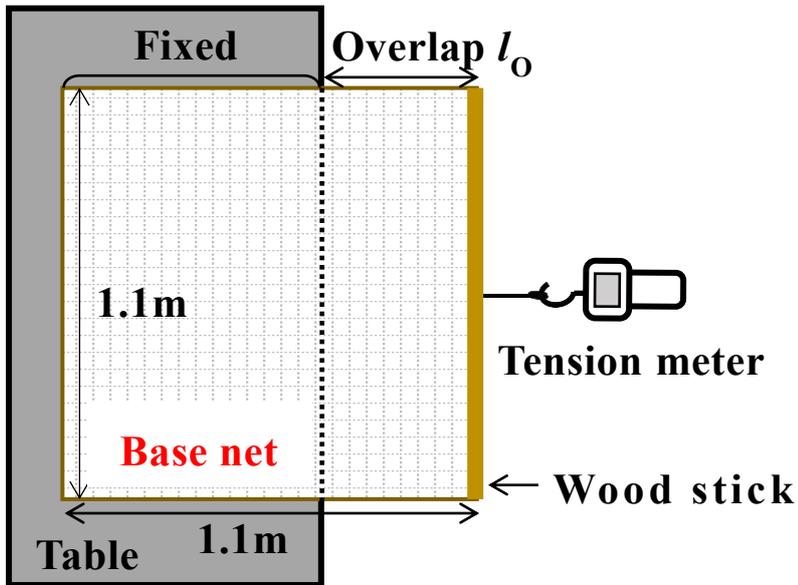
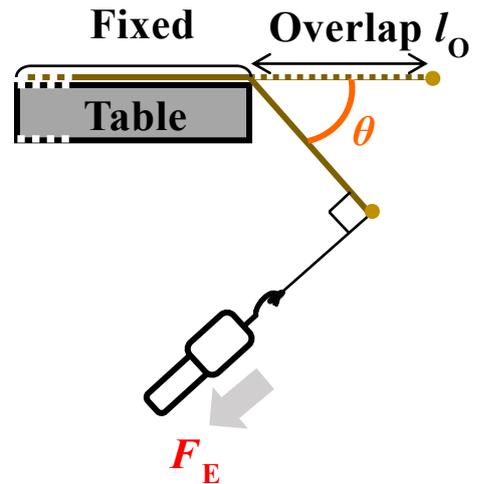


Fig.4-2 Schematic diagram of the forces generated in the TRD when the flap door was opened in θ degrees. Flap door is closed by elastic force of the base net (F_E), restoring force of the base net (F_S), and the weight of the flap door (W). P is the fulcrum of the doors, and A is one end of the flap door. l_O is length of the overlap. l_W is the distance from P to the center of gravity of the flap door except for overlap. $l_{W'}$ is the distance from P to the center of gravity of the overlap. W is the weight of the flap door except for that of overlap. W' is the weight of the overlap.

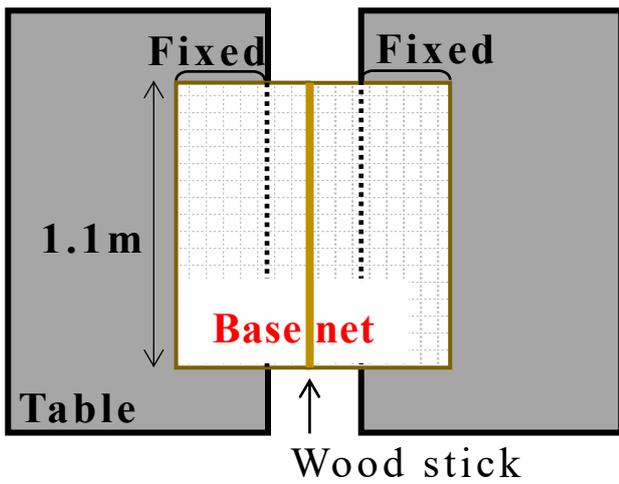


※ Upper view

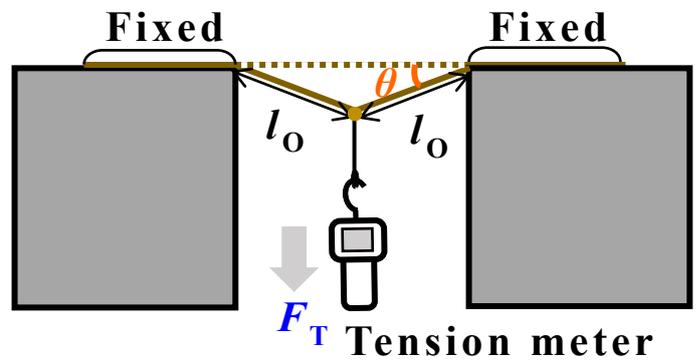


※ Side view

Fig.4-3 Overview of the measurement of the elastic moment of the base net (M_E). Left is an upper view, and right is a side view of the measurement.



※ Upper view



※ Side view

Fig.4-4 Overview of the measurement of the restoring moment of the base net (M_S). Left is an upper view, and right is a side view of the measurement.

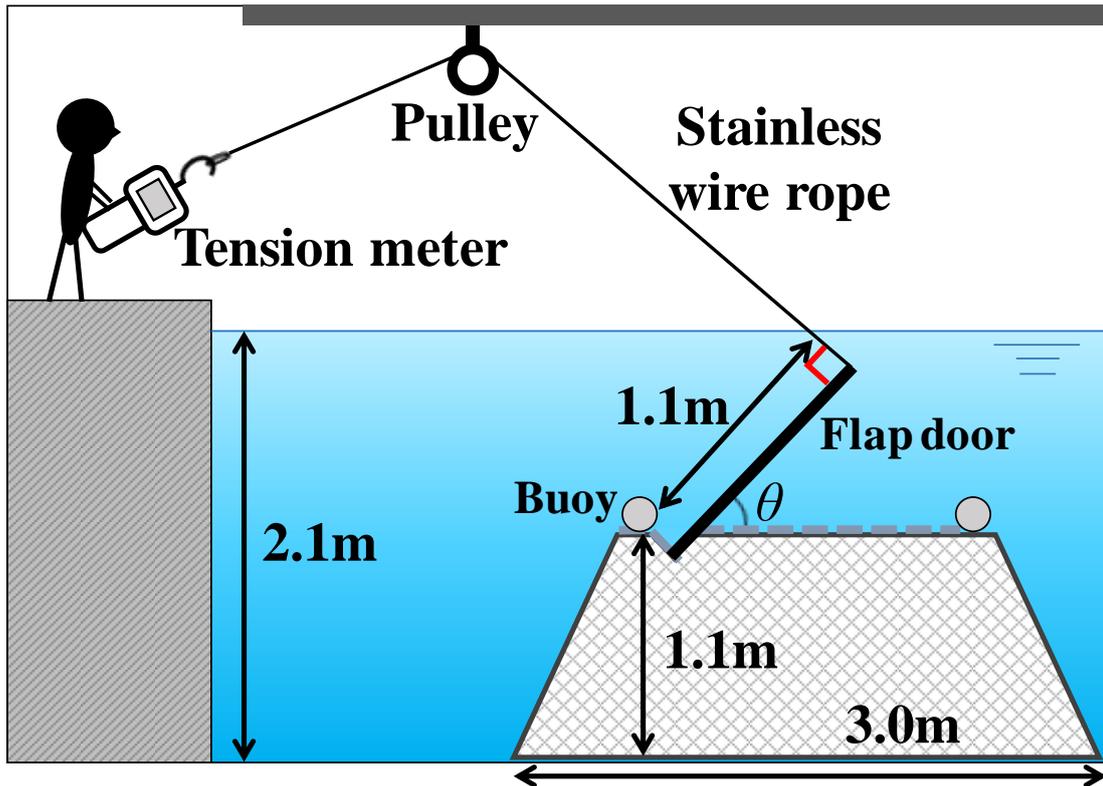


Fig.4-5 Overview of the experiment for the measurement of closing force of the flap door in a static water tank. An experimental box net where the TRD was attached on the ceiling was set in the tank. The center of the edge of the flap door was connected to a tension meter with a stainless wire rope through a pulley block. Buoys were attached around the edge of the base net.

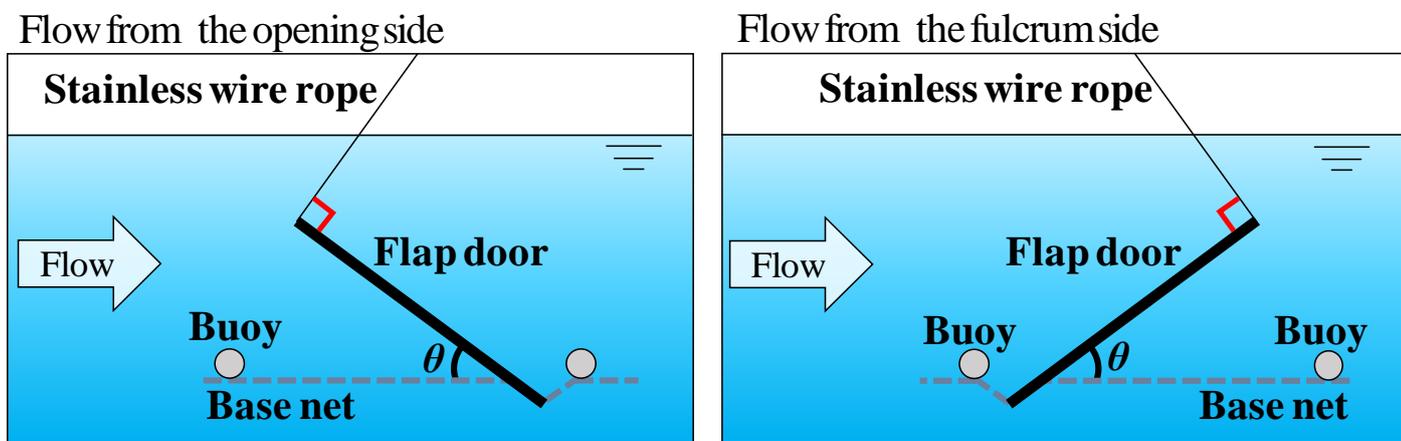
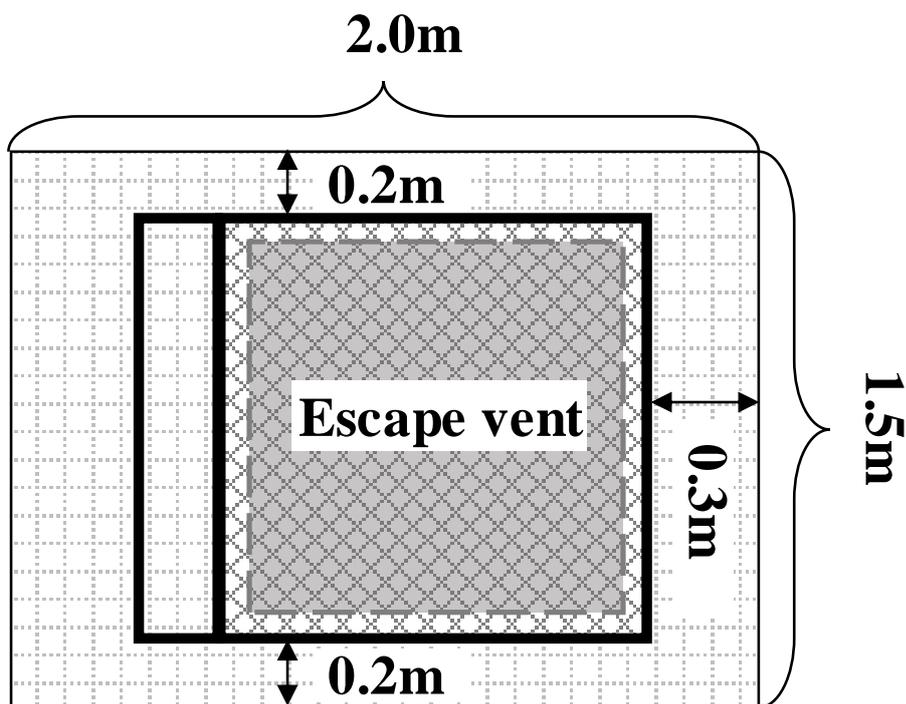


Fig.4-6 Overview of the experiment in a flume tank for the measurement of the closing force of the flap door in water current. Upper shows a specification of the base net and the flap door used in this experiment. Lower pictures show side views of measurements. Closing force was measured by a tension meter through a stainless wire rope in the flow from the opening side (lower left) and the fulcrum side (lower right).

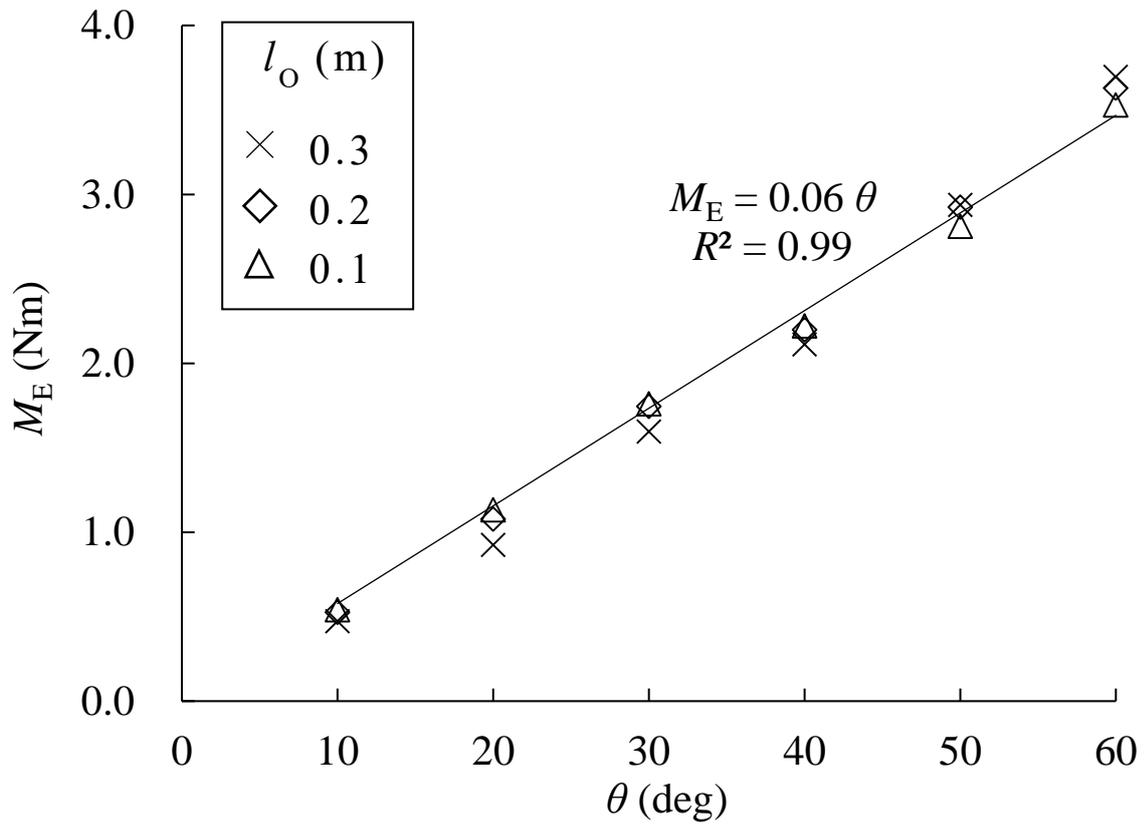


Fig.4-7 Relationship between opening angle of the flap door (θ) and the elastic moment of the base net (M_E) calculated with the elastic force obtained by the measurement. Open triangles (Δ) indicate the value when width of overlap was 0.1m, open diamonds (\diamond) indicate 0.2m, and x-marks (\times) indicate 0.3m. A regression line $M_E = 0.06\theta$ ($R^2 = 0.99$) was obtained from whole plots.

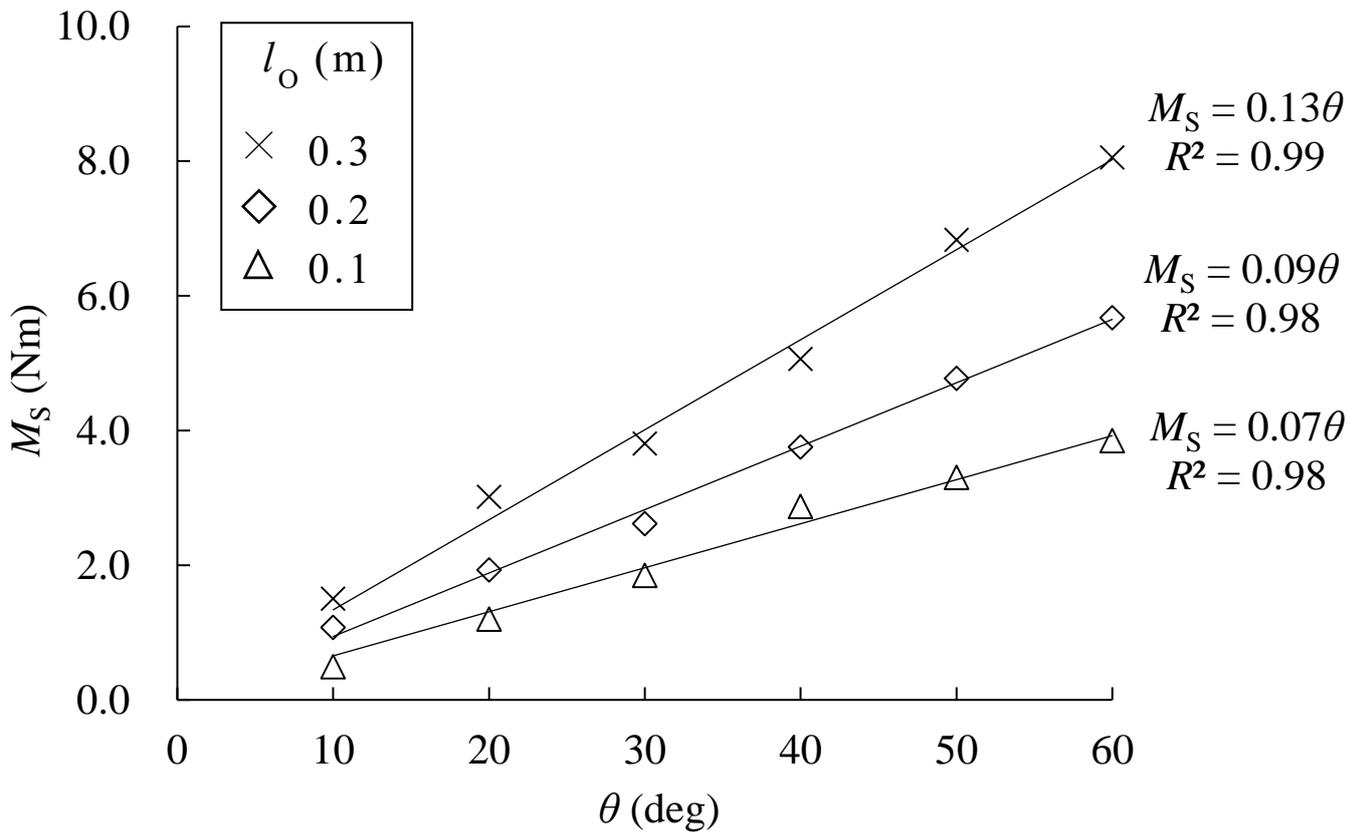


Fig.4-8 Relationship between opening angle of the flap door (θ) and the restoring moment of the base net (M_s) obtained by the measurement. Open triangles (Δ) indicate the value when width of overlap was 0.1m, open diamonds (\diamond) indicate 0.2m, and x-marks (\times) indicate 0.3m. Regression lines, $M_s = 0.13\theta$ ($R^2 = 0.99$, $l_o = 0.3\text{m}$), $M_s = 0.09\theta$ ($R^2 = 0.98$, $l_o = 0.2\text{m}$), $M_s = 0.07\theta$ ($R^2 = 0.98$, $l_o = 0.1\text{m}$), were obtained for each width of overlap, respectively.

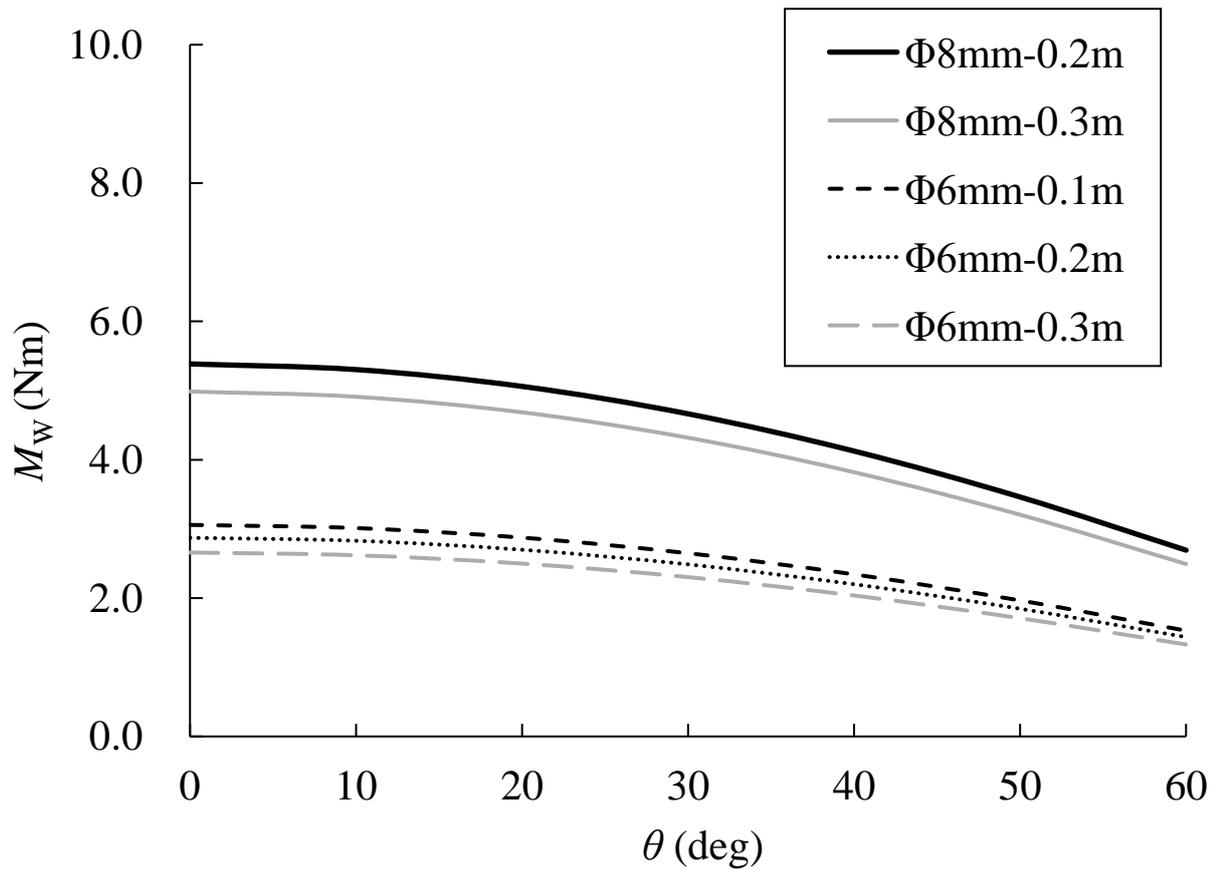


Fig.4-9 Relationship between opening angle of the flap door (θ) and the closing moment of the flap door by underwater weight of the flap door (M_w). Solid black line, $\Phi 8\text{mm}-0.2\text{m}$ flap door; solid gray line, $\Phi 8\text{mm}-0.3\text{m}$ flap door; dashed black line, $\Phi 6\text{mm}-0.1\text{m}$ flap door; dotted black line, $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ flap door; dashed gray line, $\Phi 6\text{mm}-0.3\text{m}$ flap door.

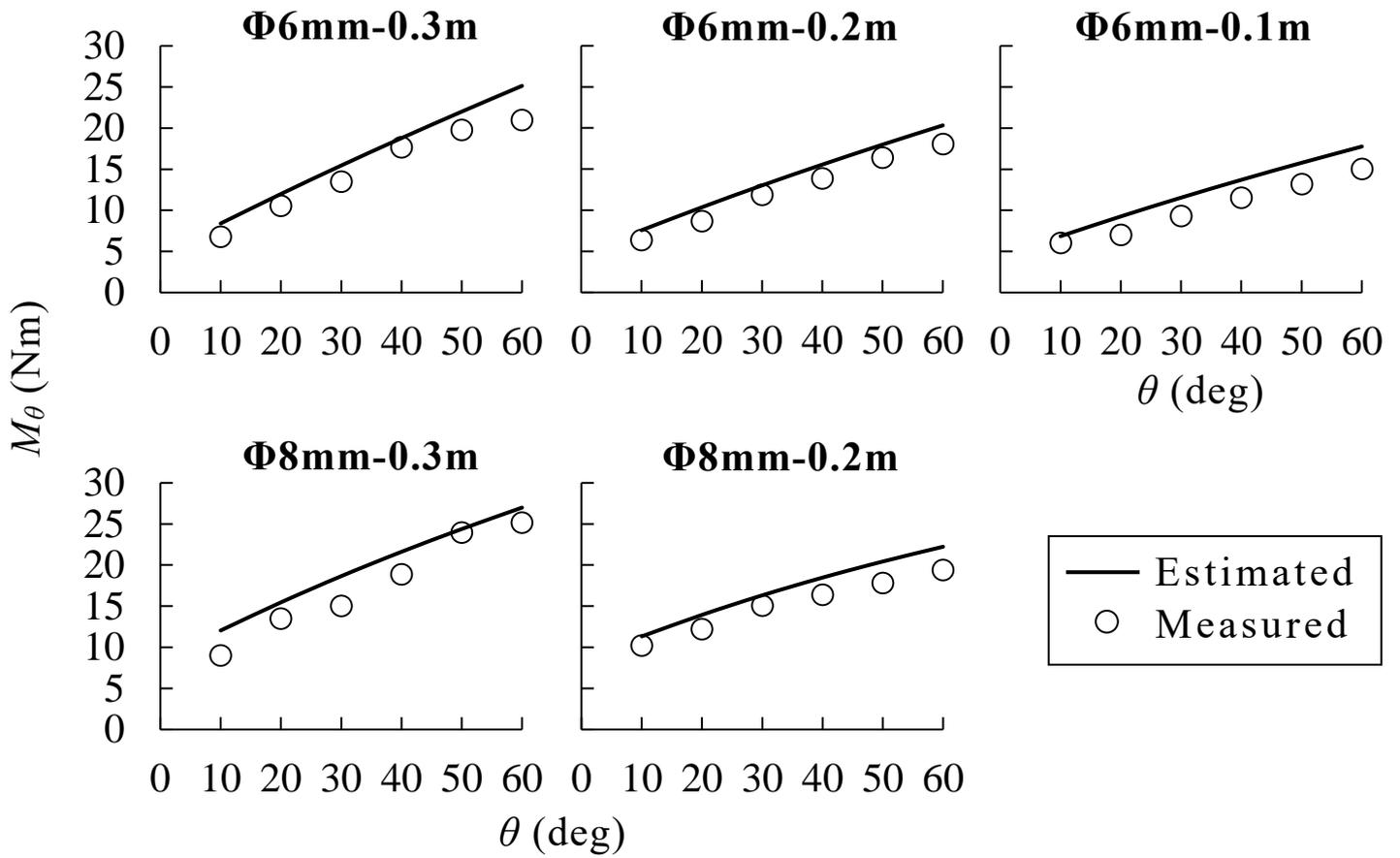


Fig.4-10 Closing moment of the flap door (M_θ) for each flap door. Solid lines indicate estimated values, and plots indicate measured values.

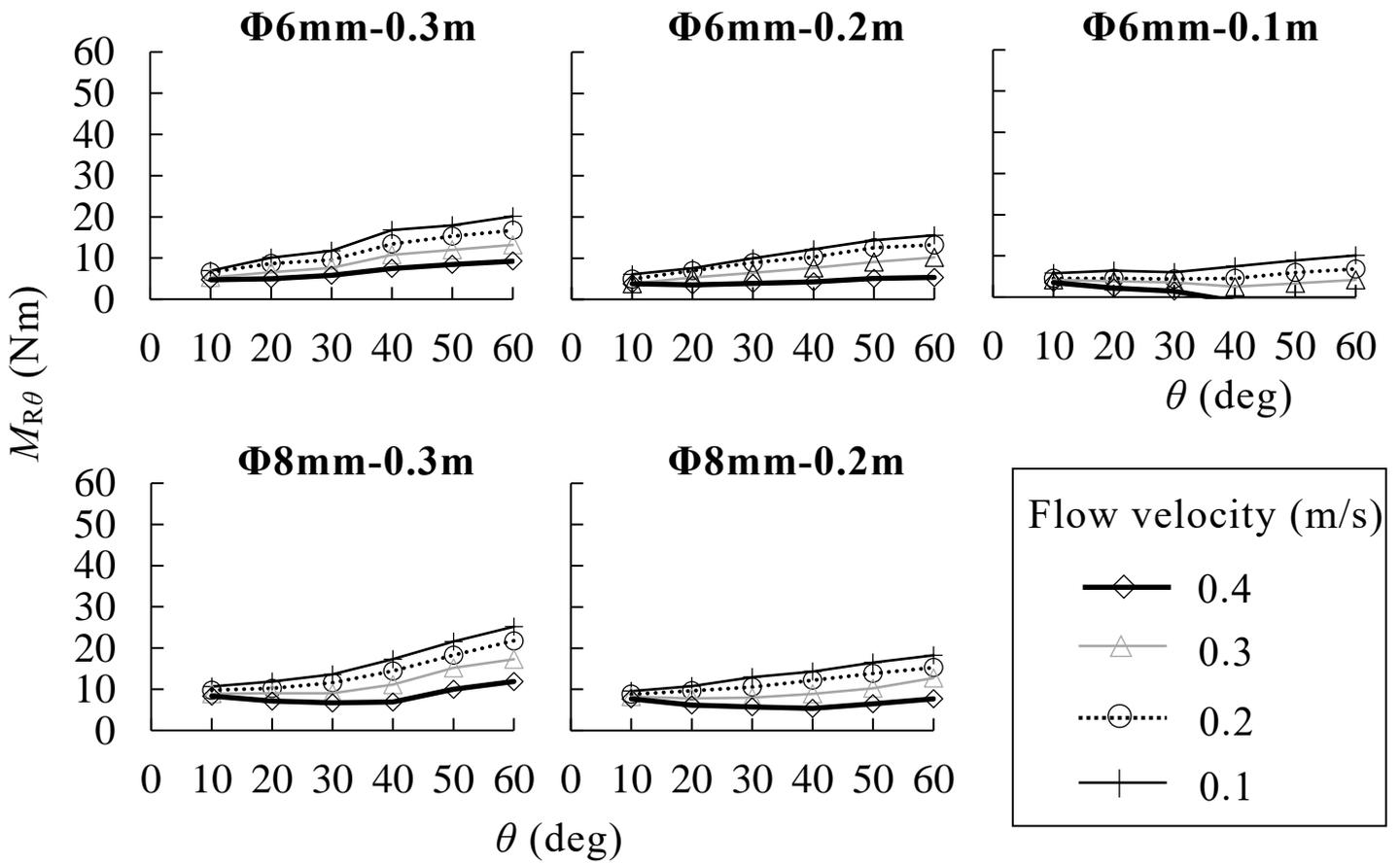


Fig.4-11 Closing moment of the flap door in the flow ($M_{R\theta}$) from the opening side of each flap door. Flow velocity was set in five levels from 0.1m/s to 0.4m/s with 0.1m/s intervals.

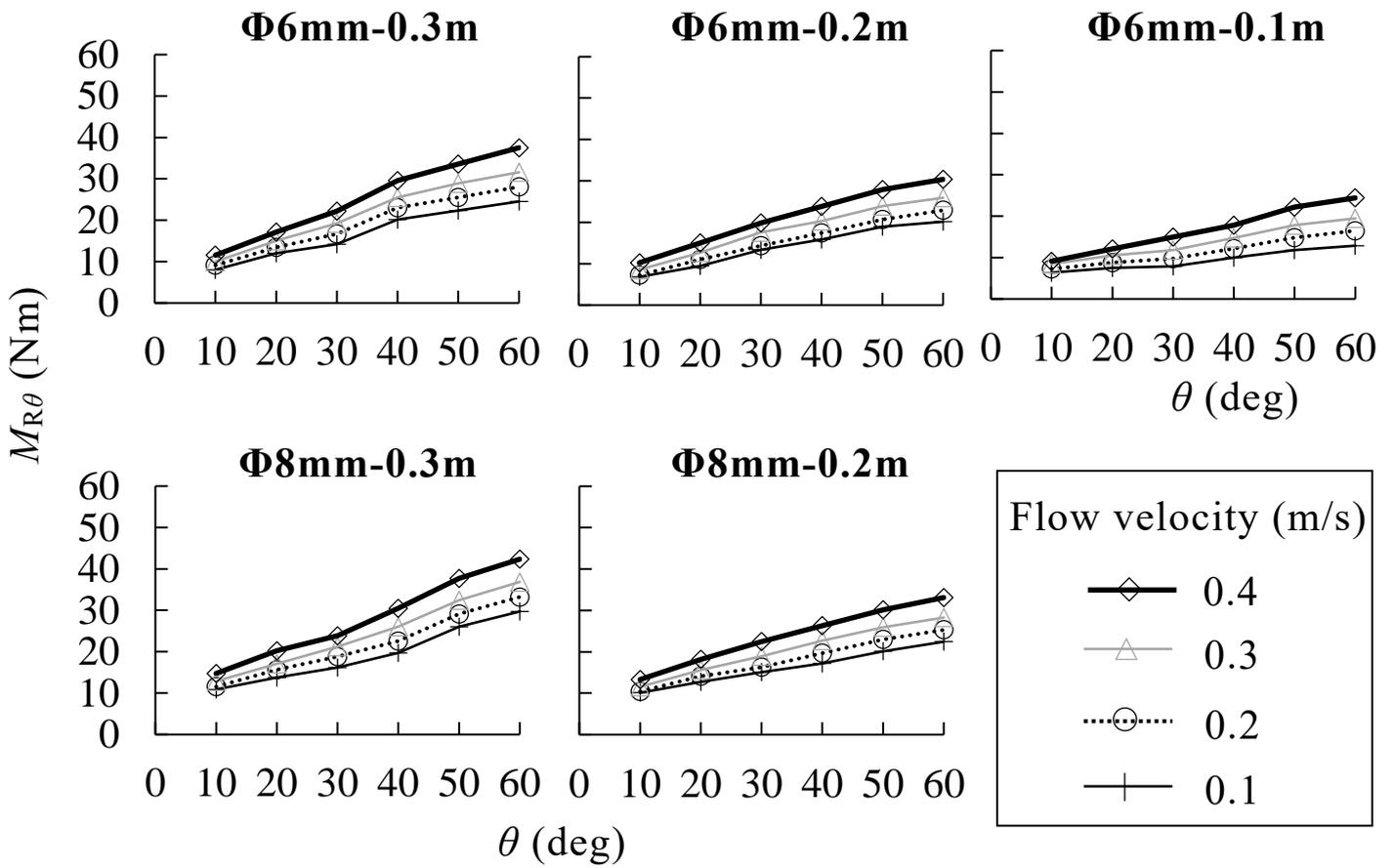


Fig.4-12 Closing moment of the flap door in the flow ($M_{R\theta}$) from the fulcrum side of each flap door according to flow velocity level.

第 5 章 TRD の適切な仕様について

第 4 章において、 $\Phi 6\text{mm}-0.3\text{m}$ 、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ 、 $\Phi 8\text{mm}-0.3\text{m}$ 、 $\Phi 8\text{mm}-0.2\text{m}$ の 4 種類の扉が、定置網の操業が可能な範囲内の流れ下においても閉鎖可能であることが分かった。そして、TRD の仕様や構成要素の特性を踏まえて海亀の脱出のしやすさや揚網時の作業性を考慮すると、扉枠の太さ(扉の水中重量)や重ね合わせ幅の小さな $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が、海亀が最も脱出しやすく作業への影響も小さいと考えられた。

本章では、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が、海亀が自力で押し開けて脱出することが可能な仕様であるかを検討した。TRD の閉扉力は、支点側から流れを受けた場合に最も大きくなる。また、閉扉力は開放角度が大きくなるほど大きくなる。そこで、海亀の脱出において最も厳しい条件下における脱出の可否を検証するために、扉の支点側から定置網の操業限界である 0.4m/s の流れを受けた場合に、海亀の脱出時における最大の開放角度である 60° まで扉を押し開けることを想定し、閉扉力と海亀の推進力を比較した。ここでは、第 2 章で示した箱網内で呼吸を行うことなく長時間滞留し続けた海亀の推進力と、第 3 章で示した箱網内で突き上げを行う海亀の発揮する力が、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉の閉まろうとする力を上回るかについて調べた。閉扉力については、第 4 章で得た、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が支点側から流れを受けた場合の結果を用いた。

5-1 材料と方法

5-1-1 水中に滞留した海亀の推進力

定置網の箱網に入網した海亀が水中に滞留し続けた場合を想定して、第2章の推進力計測実験におけるアオウミガメとアカウミガメの推進力ピーク値と、TRDの扉が閉まろうとする力の大小関係について検討した。第2章において、水中に滞留させたアカウミガメとアオウミガメの前肢のはばたきに伴う推進力の変化を明らかにした。その結果、両種ともに時間の経過とともに推進力は小さくなり、30分経過した時点での推進力は、アカウミガメ(直甲長: 0.63 – 0.84m)で平均71.0N (SD = 48.1), アオウミガメ(直甲長: 0.39 – 0.72m)で平均57.6 N (SD = 25.2)であった。これらの値を、海亀が箱網内で一定時間呼吸を制限された際に発揮しうる最低限の力であるとして、Φ6mm-0.2mの扉が支点側から流れを受けた場合の閉扉力と比較した。海亀は、開放時に最上部となる扉の開放側の縁辺中央(開放端)を最終的に突き上げて脱出すると仮定した。アカウミガメとアオウミガメが扉を開放角度 θ (deg)に押し開ける際のモーメント M_{TL} (Nm)および M_{TG} (Nm)は、扉の支点から開放端までの距離(1.1m)より、それぞれ以下の式(7), (8)により求められる。

$$M_{TL} = 71.0 \times \cos\theta \times 1.1 \quad (7),$$

$$M_{TG} = 57.6 \times \cos\theta \times 1.1 \quad (8),$$

(7)式および(8)式より求めた M_{TL} および M_{TG} と、Φ6mm-0.2mの扉が支点側から流れを受けた場合の $M_{R\theta}$ を比較した。

5-1-2 箱網内で突き上げを行う海亀の推進力

中層箱網内で突き上げを行う際の海亀の推進力と TRD の閉扉力を比較した。脱出時の扉の最大開放角度を 60° として、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が 60° 開放された際に、 0.4m/s の流れを支点側から受けたときに扉が閉まろうとする力は 27.6N であった (Fig.4-12)。この力は扉の開放方向に直角に作用するものである。一方、海亀が扉を突き上げる際の向きである鉛直上向きにこの力を換算すると、 55.2N となる。つまり、海亀は真上方向に 55.2N 以上の力を発揮すれば、扉をほぼ確実に開けることができると考えられる。第 3 章において得た、中層箱網内で突き上げを行う海亀の発揮する推進力が、どの程度の割合で 55.2N を上回るのかを調べた。

5-2 結果

5-2-1 水中に滞留し続けた海亀の脱出の可否について

M_{TL} と M_{TG} , $M_{R\theta}$ の開放角度に対する変化を Fig.5-1 に示す。開放角度の増加にしたがって $M_{R\theta}$ は増加するのに対し、 M_{TL} と M_{TG} は減少した。しかし、 M_{TL} と M_{TG} はいずれも開放角度 60° の場合でも 0.4m/s の流れ下における $M_{R\theta}$ を上回っていた。

5-2-2 中層箱網内で突き上げを行う海亀の脱出の可否について

第 3 章の海上実験における全 9 回の実験中には計 80 セットの連続突き上げが見られ、そのうち 74 セットにおいて、セット内の半数以上の突き上げでの推進力が 55.2N を超える値を示した (Table 5-1, Fig.5-2)。また、その比率はセットを重ねると低くなるという傾向は見られず、個体の大きさによる違いも見られなかった。セット内で推進力が 55.2N を超えた割合が最も低くなったのは 0 パーセント

の 3 回であり，その時の突き上げ回数はいずれも 1 回であった。次に低かった割合は 40 パーセントの 2 回であり，いずれも連続突き上げ回数は 5 回と少なかった。このように，セット内の突き上げ回数が少なく，推進力が十分でないセットもあったが，その後にはいずれも 10 回を超えるセットが見られ，その際の推進力が 55.2N 以上である割合が高かった。なお，連続突き上げ回数が 10 回を超えたセットでは，いずれも半数以上の突き上げにおいて 55.2N を超えていた。

5-3 考察

本章では，長時間水中に滞留した状況を想定した水槽実験の結果と，中層箱網内で突き上げを行う海亀の推進力を推定した結果を用いて，定置網の操業限界である流速（0.4m/s）下において，脱出時に想定される最大の開放角度である 60°まで扉を押し開ける力を海亀が発揮できるのかについて，Φ6mm-0.2m の扉を対象に検討した。長時間水中に滞留した条件については，アオウミガメとアカウミガメともに，60°に開放された扉が 0.4m/s の流れを支点側から受けた際の閉扉力よりも海亀の推進力が上回り，十分扉を押し開けられると考えられた。中層箱網内で突き上げを行う海亀のはばたき周波数から推定した推進力についても，同様の条件における閉扉力（55.2N）よりも十分に大きいと推定された。なお，突き上げ回数が 5 回を下回るセットが見られた実験回があったが，いずれの場合においても，その後十分に回数の突き上げを行っており，さらに十分な推進力を発揮していたため，中層箱網内で突き上げを行う海亀も TRD から十分脱出可能であると考えられた。

本研究における海亀の推進力との比較に用いた閉扉力の設定条件は、海亀の脱出において想定される最も厳しい条件であった。したがって、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉は海亀の脱出においても十分適切であると言える。以上のことから、支点側から流れを受けた場合でも海亀が十分に脱出でき、開放側から流れを受けた場合でも海亀の脱出後には自動で閉鎖する適切な仕様の扉は $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ であると考えられた。

なお、本研究の結果から、推定式 (3-4)' を利用して、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉を押し開けるのに必要な 55.2N 以上の力を発揮できるはばたき周波数を、アカウミガメの甲長別に推定することが可能となる。推定式 (3-4)' を得た際に使用したアカウミガメの甲長範囲内 ($0.63 - 0.84\text{m}$) において、 55.2N を発揮するのに必要な最低のはばたき周波数を推定したところ (Fig.5-3) , $0.47 - 0.35\text{Hz}$ と推定された。つまり、この周波数ではばたけば、アカウミガメは $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉を押し開けることができると言える。

Table 5-1 Proportion of push-up with the propulsive force lager than 55.2N in each set

Year	Turtle ID	SCL (m)	Proportion of push-up with the propulsive force larger than 55.2 N (%)																			
			Set No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
2014	C1	0.84		85.7 (6/7)	94.4 (17/18)	66.7 (4/6)	80.0 (4/5)	73.3 (11/15)	100 (9/9)	100 (4/4)	88.9 (8/9)	90.0 (9/10)	83.3 (5/6)	100 (2/2)	87.5 (42/48)	88.2 (15/17)	97.0 (32/33)					
	C2	0.74		71.0 (17/24)	71.4 (5/7)	70.0 (7/10)	85.7 (6/7)															
	C3	0.63		0.00 (0/1)	100 (4/4)	50.0 (2/4)	75.0 (6/8)	66.7 (2/3)	100 (12/12)	100 (3/3)												
2015	C4	0.82		71.4 (5/7)	100 (11/11)	100 (10/10)																
	C4	0.82		100 (2/2)	100 (1/1)	100 (1/1)	92.3 (12/13)	100 (2/2)	100 (1/1)	100 (5/5)	90.9 (10/11)	91.7 (11/12)	87.5 (7/8)									
	C5	0.69		0.00 (0/1)	63.5 (40/63)	75.0 (12/16)	73.3 (11/15)	83.3 (20/24)	68.4 (13/19)	82.4 (14/17)												
	C5	0.69		77.9 (28/36)	71.4 (5/7)	100 (4/4)	100 (1/2)	90.9 (10/11)	75.0 (6/8)	83.3 (5/6)	90.3 (28/31)	100 (20/20)	100 (3/3)	83.3 (5/6)	40.0 (2/5)	92.3 (24/26)						
	C6	0.67		60.0 (3/5)	100 (2/2)	66.7 (2/3)	50.0 (8/16)															
	C6	0.67		55.6 (15/27)	58.3 (7/12)	50.0 (3/6)	55.6 (10/18)	66.7 (2/3)	57.1 (4/7)	42.9 (3/7)	75.0 (6/8)	50.0 (3/6)	0.00 (0/1)	66.7 (4/6)	40.0 (2/5)	83.3 (5/6)	50.0 (1/2)	85.7 (12/14)	100 (1/1)	90.0 (9/10)	92.3 (12/13)	

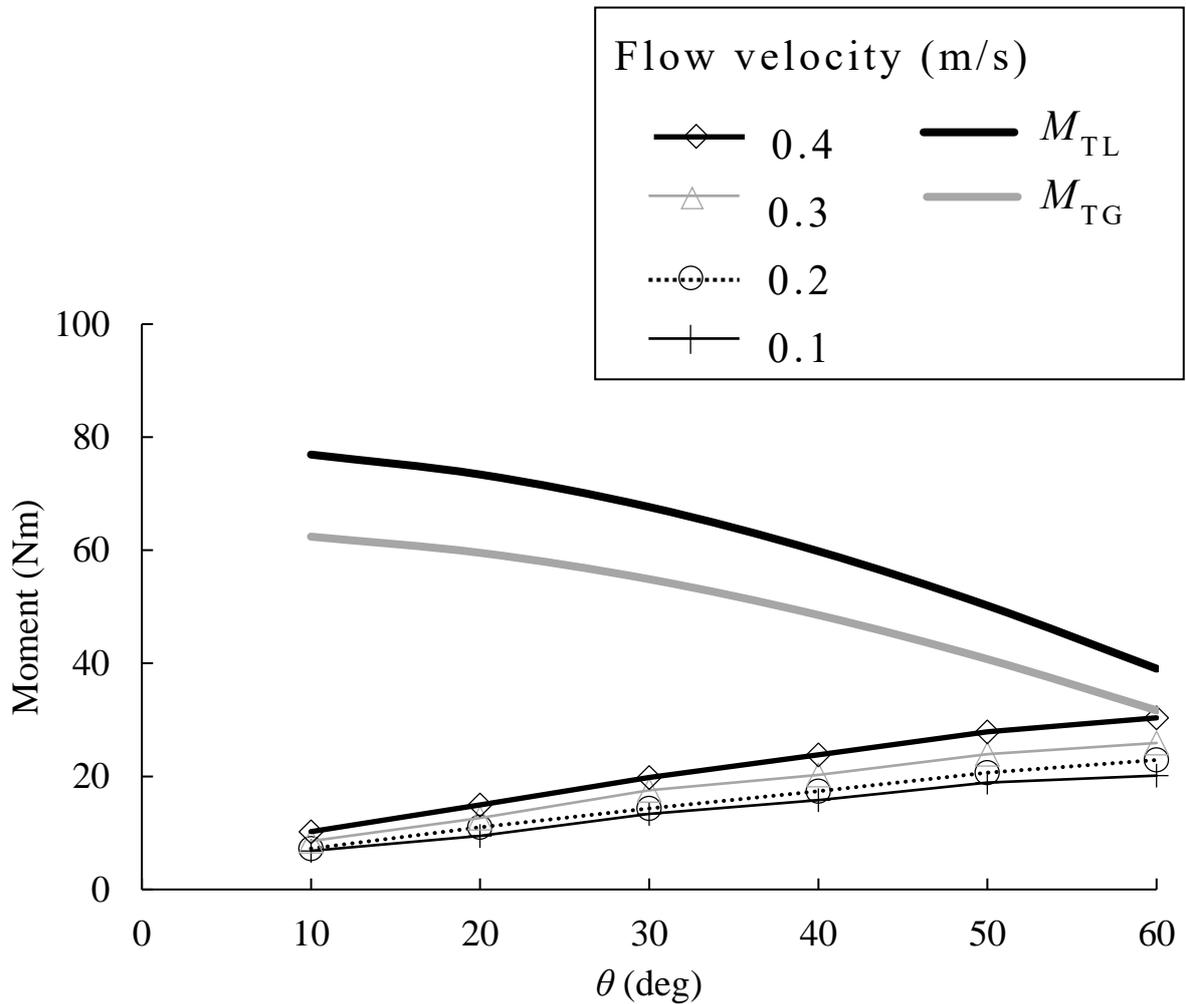


Fig.5-1 Closing moment of the $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ flap door in water current ($M_{R\theta}$) in the flow from the fulcrum side of the flap door and the opening moment for loggerhead turtle (M_{TL}) and green turtle (M_{TG}) when they push the flap door up with the force obtained in chapter2 when thirty minutes passed since turtles started staying underwater.

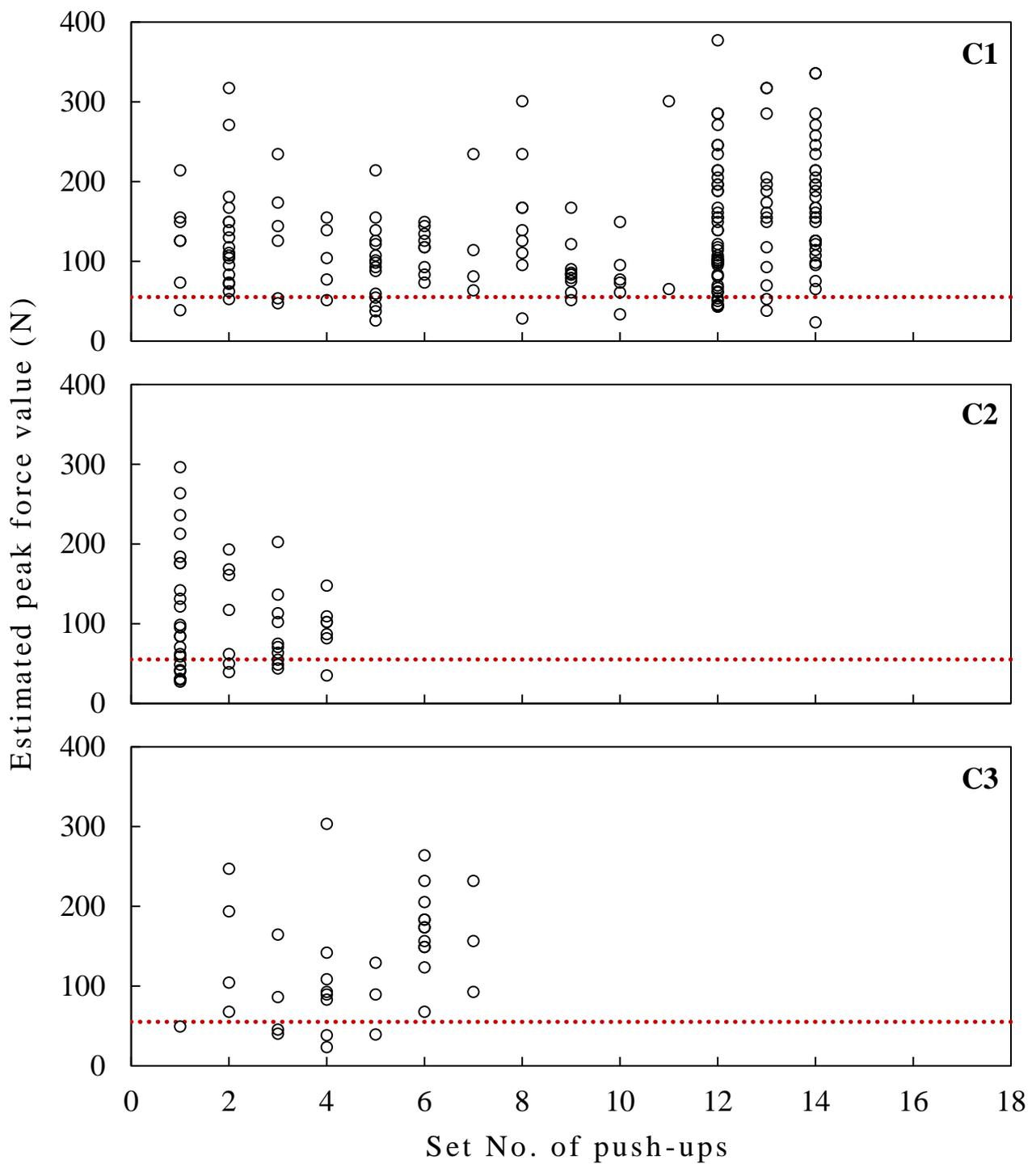


Fig.5-2 Estimated peak force values in each set of push-ups. Dotted line indicates 55.2N that is the closing force of the $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ flap door when the door receives a current of 0.8 knots from the fulcrum side while opening in 60 degrees.

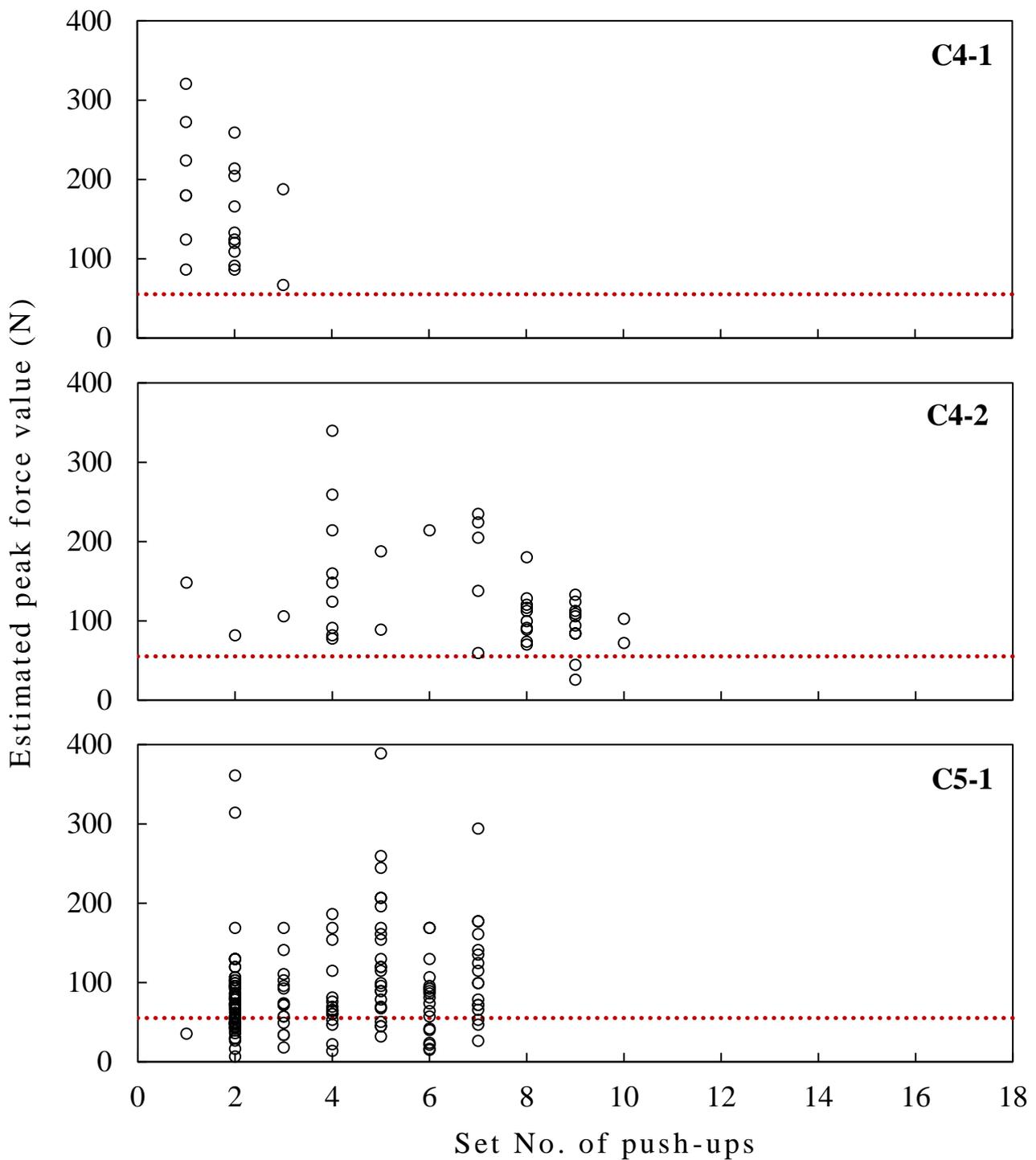


Fig.5-2(continuation) Estimated peak force values in each set of push-ups. Dotted line indicates 55.2N that is the closing force of the $\Phi 6\text{mm}$ -0.2m flap door when the door receives a current of 0.8 knots from the fulcrum side while opening in 60 degrees.

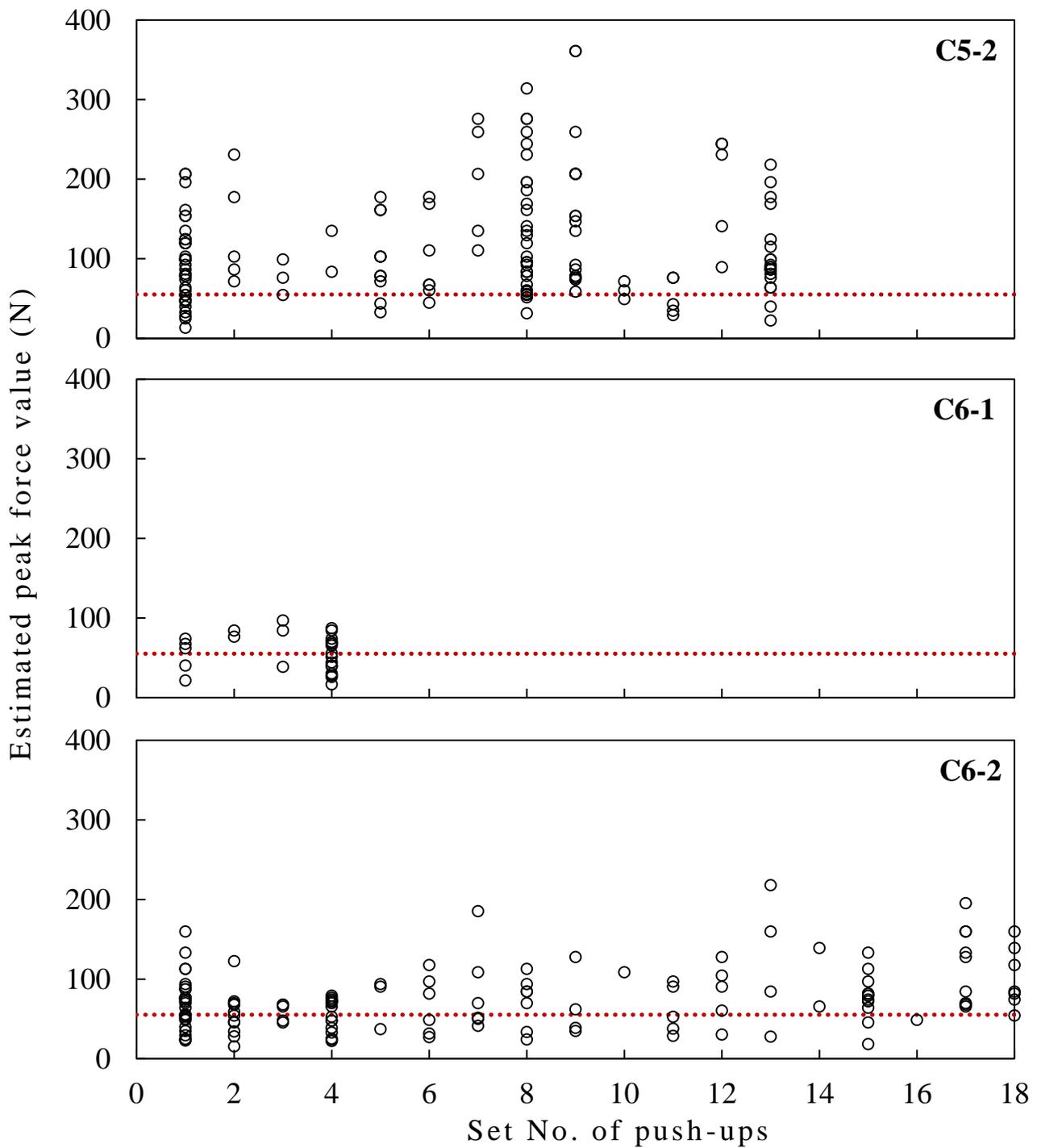


Fig.5-2(continuation) Estimated peak force values in each set of push-ups. Dotted line indicates 55.2N that is the closing force of the $\Phi 6\text{mm}$ -0.2m flap door when the door receives a current of 0.8 knots from the fulcrum side while opening in 60 degrees.

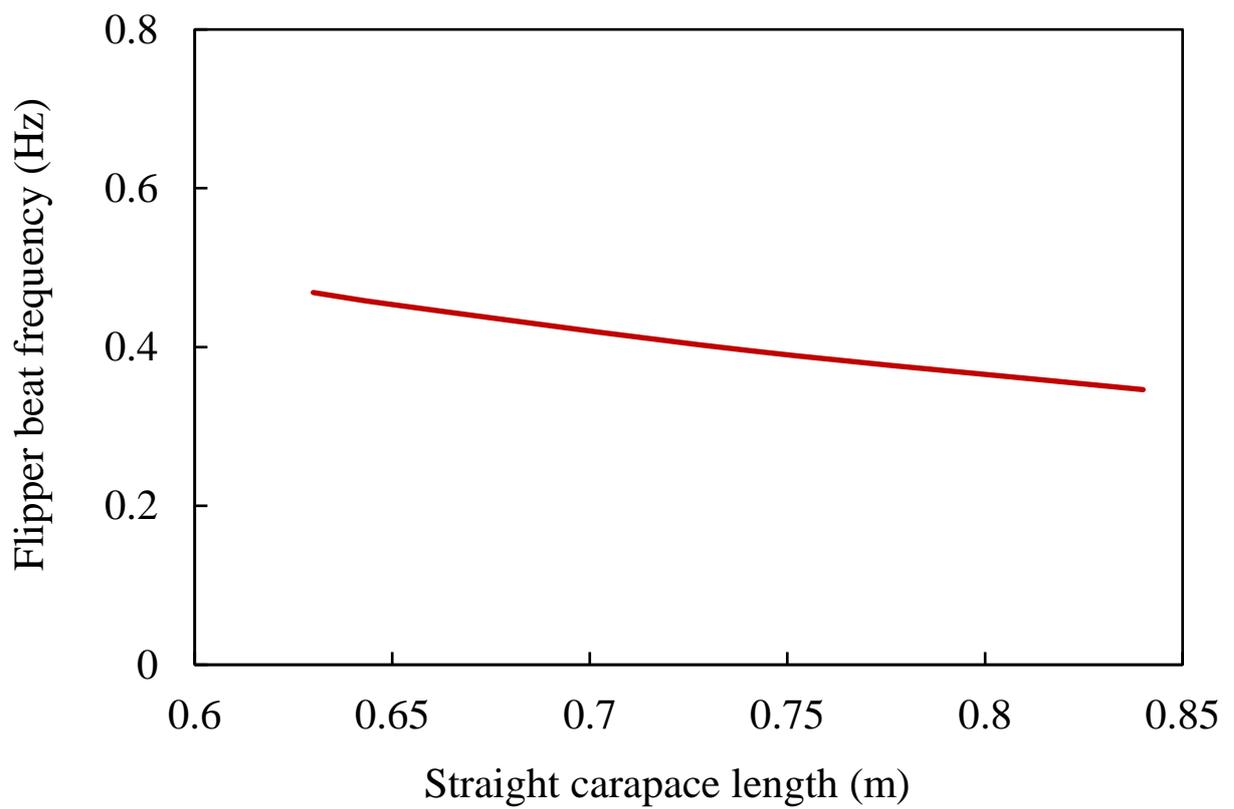


Fig.5-3 Relationship between straight carapace length of loggerhead turtles and flipper beat frequency which was estimated as minimum value for turtles to generate 55.2N.

第 6 章 漁獲対象種の逸出の評価

ここまで、潮流下においても海亀が脱出可能で、脱出後には自動閉鎖して扉の閉鎖を保つと考えられる TRD の中で、より海亀が脱出しやすく操業への支障が少ない、適切な TRD の仕様を検討してきた。こうした混獲死亡削減手法を漁具の一部として導入するにあたっては、操業への支障が少ないことに加えて、漁獲に悪影響がないことが非常に重要である。これまで定置網を対象として考案されてきた混獲削減手法の多くは、主に漁獲量の減少が懸念されたことで実用化されていない (Lehtonen & Suuronen 2004, Fjälling *et al.* 2006, DeAlteris & Silva 2008)。したがって、TRD の実用化を進めるためには、TRD から網外への漁獲対象種の逸出がないことを確認するとともに、逸出を抑制する改良を検討する必要がある。漁獲対象種の逸出は、TRD 付近に漁獲対象種がいた際に、潮流や波浪の影響により脱出部に隙間が生じた場合や、漁獲対象種自身が脱出部を開けたときに生じる可能性が考えられる。また、海亀が TRD 付近に来遊して脱出部を押し開けた際に、漁獲対象種が海亀を避けて TRD から離れていれば逸出は起きないものの、海亀に追従遊泳してきた場合に海亀と一緒に逸出する可能性がある。しかし、網内で遊泳して接近してくる海亀に対する漁獲対象種の反応行動は明らかではなく、また漁獲対象種の箱網内での行動や TRD が装着される天井網付近での分布についても知見が乏しいのが現状である。そこで本章では、海亀脱出支援システムを導入した箱網において、接近する海亀に対する漁獲対象種の逃避と海亀への追従の有無、TRD 付近に出現する漁獲対象種を調べた。

6-1 材料と方法

6-1-1 海亀に対する漁獲対象種の行動の計測

2014年6月と9月，2015年7月，2016年9月に，接近する海亀に対する漁獲対象種の逃避と海亀への追従の有無を調べた。実験場所と使用した中層箱網は，第3章における海上実験と同様である（Fig.3-1）。海亀は，周辺の定置網で混獲されたアカウミガメ計9頭（直甲長：0.63 – 0.84m）を用いた。海亀の背甲に，前・後方向に向けた背甲カメラ（Sony製 HDR-AS100V）計2台と深度計（JFEアドバンテック社製 DEFI-D20，計測周波数 1Hz）をエポキシパテと結束バンドを用いて装着し，海面まで引き上げた中層箱網内へ海亀1頭を入網させた。15分馴致させた後に中層箱網を通常の設定状態である水面下7mまで沈め，約20分経過後に再び中層箱網を海面まで引き上げて海亀を回収する一連の実験を，海亀を入れ替えながら計15回行った。本章では，海亀を入網させてから回収するまでを解析対象とした。海亀の背甲に前向きに装着したビデオカメラ（以後，前方カメラ）から，海亀からの漁獲対象種の逃避の有無を確認した。また，後ろ向きに装着したビデオカメラ（以後，後方カメラ）から，海亀への追従の有無を確認した。後方カメラの映像に漁獲対象種が映り込み，海亀と同じ方向に5秒以上継続して遊泳した場合を追従とし，映像から漁獲対象種が消えるまで，あるいは方向転換して海亀と異なる方向へ遊泳し始めるまでを1回の追従として，その継続時間を計測した。漁獲対象種が海亀に追従している間に1秒間隔で記録された海亀の遊泳深度を，漁獲対象種の追従深度とした。

6-1-2 TRD に対する漁獲対象種の行動観察

TRD 付近に出現した漁獲対象種の遊泳方向と TRD への接触の有無について調べた。2017 年 6 月から 8 月にかけての計 28 日間に、海亀脱出支援システムを導入して操業を行った。TRD には、本研究で扱うものとは異なる、網地と浮子から構成される Soft-TRD（塩出ら 未発表）を使用した（Fig.6-1）。Soft-TRD は、2m 四方の網地中央に約 1.5m の切れ込みを脱出部として持ち、切れ込みの両縁の網地を 10cm 程度重ね合わせ、両端にそれぞれ浮力 40N 程度の浮子を装着することで普段は脱出部が閉じるようにしてある。また、逸出した種を回収する目的で、Soft-TRD の周囲に筒状の網（3.2 × 5.6 × 8.0m, 目合 33mm, 以下、筒網）を装着した。筒網は上部も網で覆って浮子を装着し、上部中央にファスナーを取り付けて逸出種の取り出し口とした。なお、潮流や波浪などの影響で筒網全体がふかれることはあったが、筒網が脱出部を覆うなどして TRD の機能を妨げる様子は見られなかった。

6-2 結果

6-2-1 海亀に対する漁獲対象種の行動

前方カメラに映ったすべての種で、接近する海亀から逃避する様子が観察された。一方、追従は全 15 回中 7 回の実験で見られ、2014 年 6 月にカンパチ *Seriola dumerili*, 2014 年 9 月にツムブリ *Elagatis bipinnulata*, イシダイ *Oplegnathus fasciatus*, カンパチ, 2016 年 9 月にブリ *Seriola quinqueradiata*, カンパチ, イシダイが追従した（Fig.6-2）。ブリはカンパチとの群れで追従しており、ツムブリとイシダイはいずれも群れではなく単独で追従していた。追従の回数は、カン

パチのみで 9 回，カンパチとブリで 5 回，ツムブリで 16 回，イシダイで 2 回であった。追従した種はその直前に前方カメラに映ることはなかったことから，遭遇した海亀を回避して周り込んで追従したものではなかった。追従が見られた種それぞれについて，継続時間と追従深度の分布を Fig.6-3 に示した。継続時間の中央値が最も大きかったのはカンパチとブリの群れであり，26.0 秒であった。カンパチは，カンパチのみで追従するときよりもブリとともに追従するときの方が，継続時間が有意に長かった（Two-sided Mann-Whitney's U test, $p < 0.05$ ）。イシダイの継続時間は 2 回とも 5 秒と短かった。ツムブリとイシダイは中層箱網の上層部で追従する傾向が見られたが，カンパチとブリは深度 10m を中心とした箱網の中層部から下層部において追従した。そして，これらの深度は同種が前方カメラに映った場合の深度とほぼ同様であった。

TRD は天井網に装着されるため，浮上する海亀に追従する種は，海亀と一緒に網外へ逸出する可能性があると考えられる。そこで，追従時に 0.5m 以上の継続した浮上があった場合を浮上あり，なかった場合をそれ以外として，各追従の終了時点の深度（以下，終了深度）を魚種別に Fig.6-4 に示した。イシダイ以外の種はいずれも浮上時の追従が見られ，終了深度は広範囲に及んだ。追従の回数が最も多かったツムブリは，終了深度の多くが上層部であった。

6-2-2 TRD に対する漁獲対象種の行動

計 44 種の生物が TRD 付近に出現し（Fig.6-5），うち 33 種が漁獲対象種であった（Table 6-1）。さらに，漁獲対象種のうち 17 種において，鉛直上向きに遊泳して吻端が TRD の網地に触れる様子が観察された（Fig.6-6）。閉まっている脱出部をこじ開けようとする様子

は見られなかったことから、漁獲対象種が閉まっている脱出部を開けて逸出する可能性は低いと考えられたが、波浪の影響で脱出部に5cmほどの隙間が生じた際にはクロダイ *Acanthopagrus schlegelii* 3匹とハモ *Muraenesox cinereus* 2匹が網外（筒網内）へ逸出する様子が確認された。また筒網内には、その他にメジナ *Girella punctata*, ヤマトカマス *Sphyræna japonica*, マアジ *Trachurus japonicus* が確認された。これらは脱出部から逸出したと考えられ、いずれも TRD に対して鉛直上向きに遊泳する様子が観察された種であった。

6-3 考察

本研究において、いずれの種も海亀が接近すると逃避したことから、TRD 付近にいた種は海亀が接近した場合には海亀を避けて TRD から離れていくと予想され、海亀によって開けられた TRD から網外へ逸出する可能性は低いと考えられた。一方、海亀に追従した種のうちで、ツムブリは追従の多くが網の上層部で見られ、終了深度の多くが上層部であったため、海亀に追従して逸出する可能性が高いと考えられた。また、カンパチとブリの群れも海亀の浮上時に追従が見られ、かつ継続時間も長かった。定置網の箱網内において、ブリ類は中層以深を遊泳すると言われている（森 1971, 内田ら 2018）。しかし、定置網の箱網の設置深度は多様であり、底層定置網では深度 40m ほどの場所に箱網が設置される場合もある。そのため、本実験よりも深く設置される箱網内においては、海亀に追従しながらブリ類が逸出する可能性について更に検討する必要がある。

天井網に Soft-TRD を装着して行った操業試験では、わずかながら漁獲対象種の逸出があった。そして、いずれの種も脱出部に隙間

が開いた際に逸出したものと考えられた。本実験を行った中層箱網は海面付近に設置されており、潮流や波浪の影響を強く受けた際に、脱出部に隙間が生じたと考えられる。本研究で取り扱ってきた TRD において、潮流の影響については第 4 章で検証しており、扉が開いた状態になることは考えにくい。しかし、波浪の影響については検証していないことから、今後検討する必要があると考えられる。いずれのタイプの TRD を用いる場合でも、箱網の設置条件に応じてその仕様を適切に選定することで、脱出部を確実に閉鎖しておくことが重要である。なお、TRD を実際に導入する際には、まず筒網を装着して操業を行うなどして、逸出する漁獲対象種の有無、海亀の脱出の成否、操業への支障などを漁業者が十分に確認することが望ましい。

Table 6-1 Target fishery species observed around the Soft-TRD by time-lapse camera attached on the inside of the bag net

Swim upward and snout poking	Swim horizontally
Fishes	
<i>Conger japonicus</i>	<i>Engraulis japonicus</i>
<i>Muraenesox cinereus</i>	<i>Hyporhamphus sajori</i>
<i>Zeus faber</i>	<i>Lateolabrax japonicus</i>
<i>Cypselurus hiraii</i>	<i>Scombrops boops</i>
<i>Chelidonichthys spinosus</i>	<i>Coryphaena hippurus</i>
<i>Trachurus japonicus</i>	<i>Elagatis bipinnulata</i>
<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	<i>Seriola dumerili</i>
<i>Girella punctata</i>	<i>Seriola quinqueradiata</i>
<i>Siganus fuscescens</i>	<i>Lobotes surinamensis</i>
<i>Sphyraena japonica</i>	<i>Oplegnathus fasciatus</i>
<i>Paralichthys olivaceus</i>	<i>Scomber australasicus</i>
<i>Pleuronichthys cornutus</i>	<i>Aluterus monoceros</i>
<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	<i>Takifugu snyderi</i>
<i>Lagocephalus spadiceus</i>	
Cephalopods	
<i>Sepia esculenta</i>	<i>Octopus vulgaris</i>
<i>Loligo edulis</i>	<i>Octopus ocellatus</i>
<i>Todarodes pacificus</i>	
Crustaceans	
	<i>Panulirus japonicus</i>

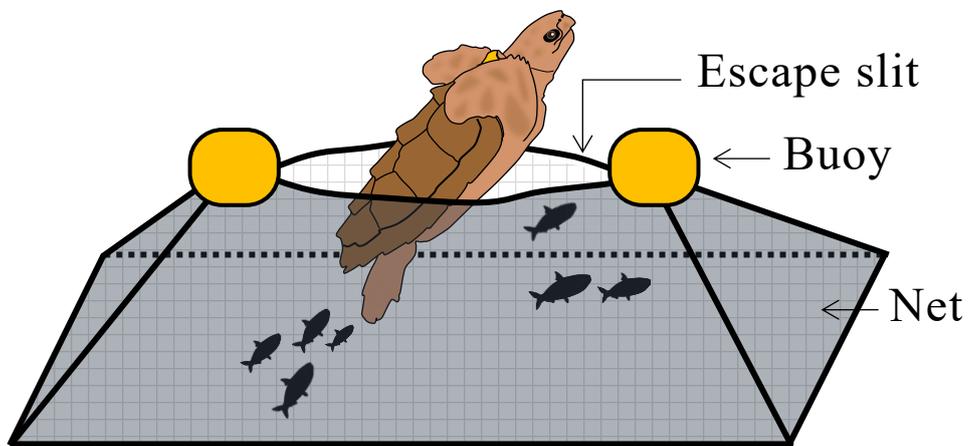


Fig.6-1 Overview of the Soft-TRD which consists of nets and buoys. Turtles can escape from the Soft-TRD by pushing their heads up to the escape slit and opening it.

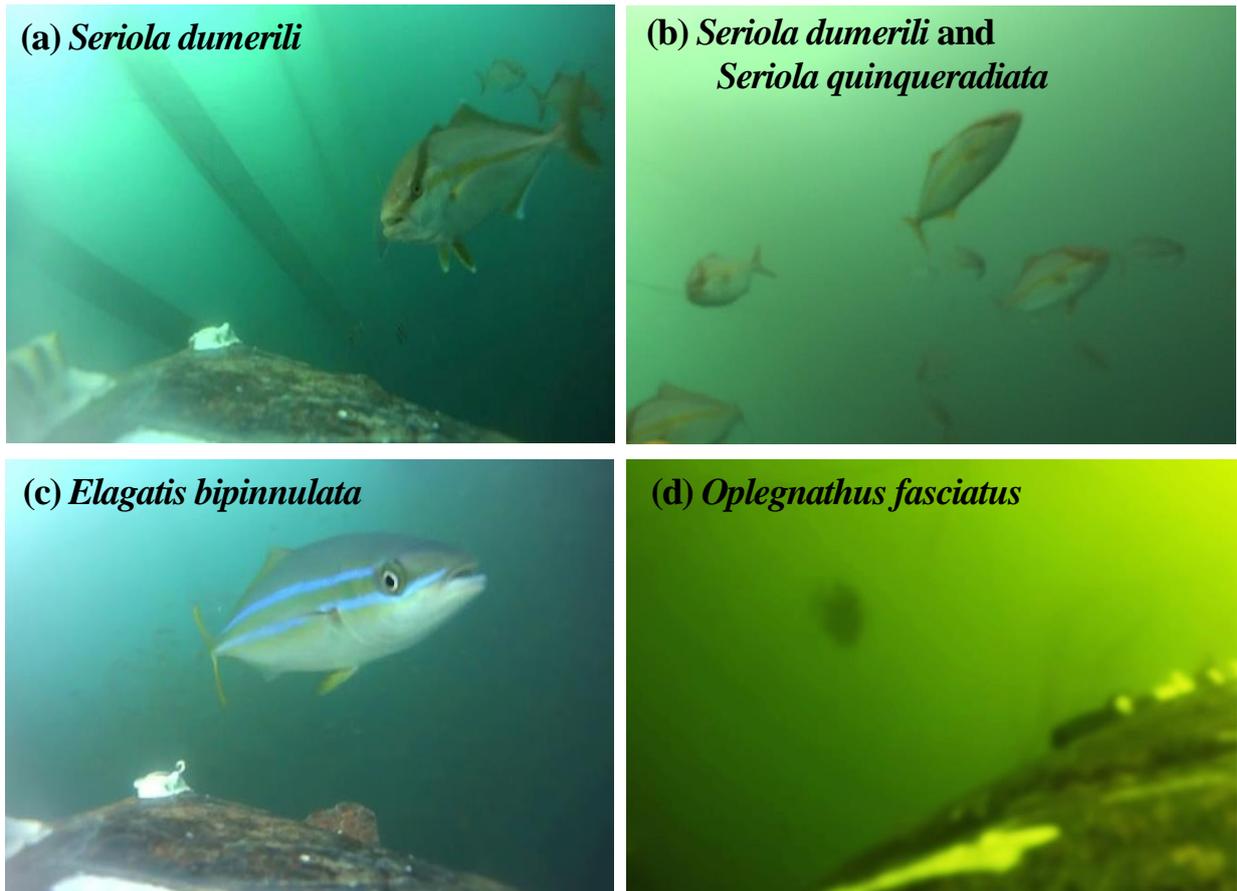


Fig.6-2 Captured images of behavior of target fishery species following a sea turtle. (a) Greater amberjack *Seriola dumerili*; (b) Greater amberjack *Seriola dumerili* and Yellowtail *Seriola quinqueradiata*; (c) Rainbow runner *Elagatis bipinnulata*; (d) Parrot fish *Oplegnathus fasciatus*.

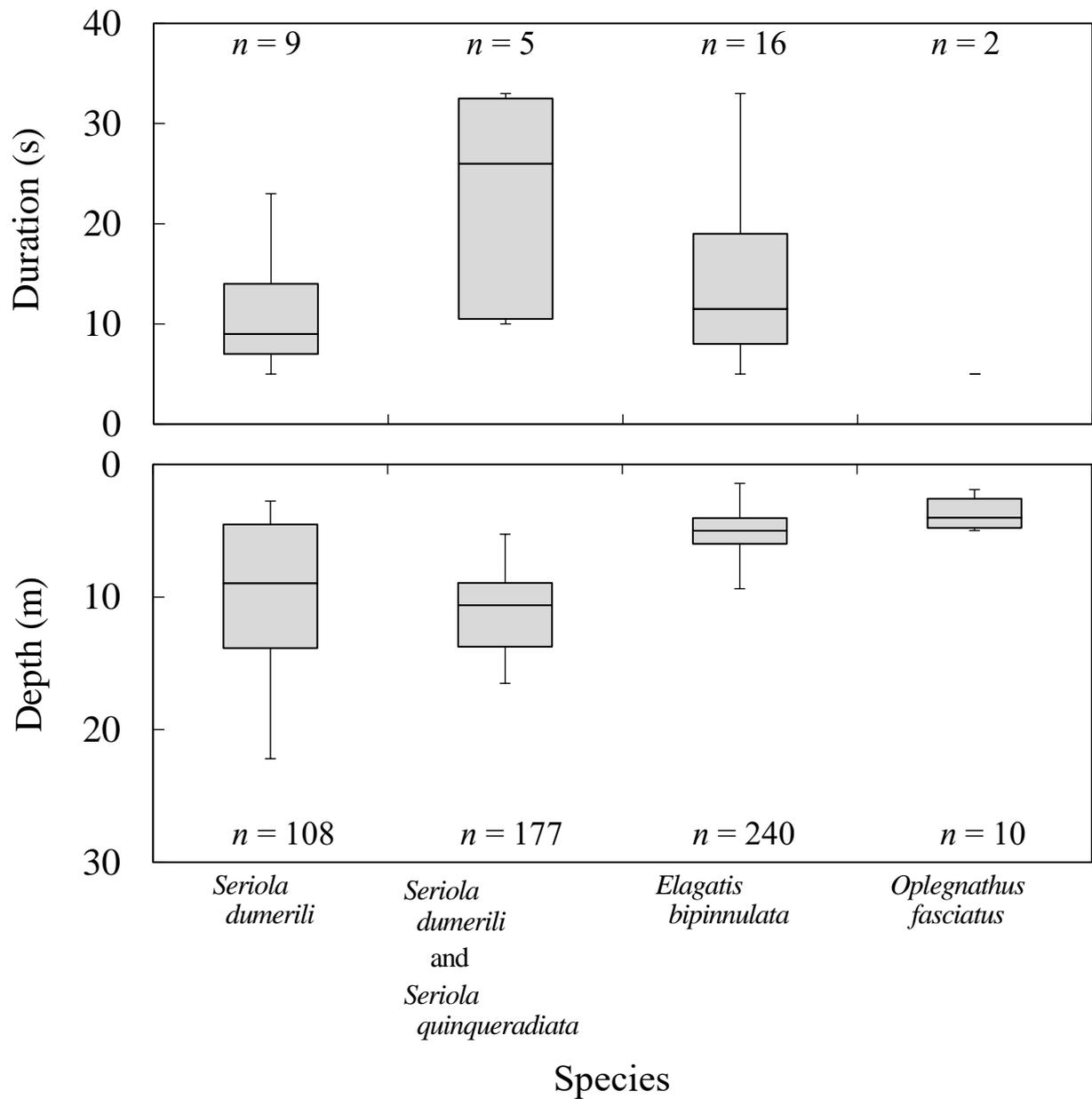


Fig.6-3 Box-whisker plots of duration (top) and depth (bottom) for fish following a sea turtle. The top bar is the maximum value, the lower bar is the minimum value, the top of the box is the upper or third quartile, the bottom of the box is the lower or first quartile, and the middle bar is the median value.

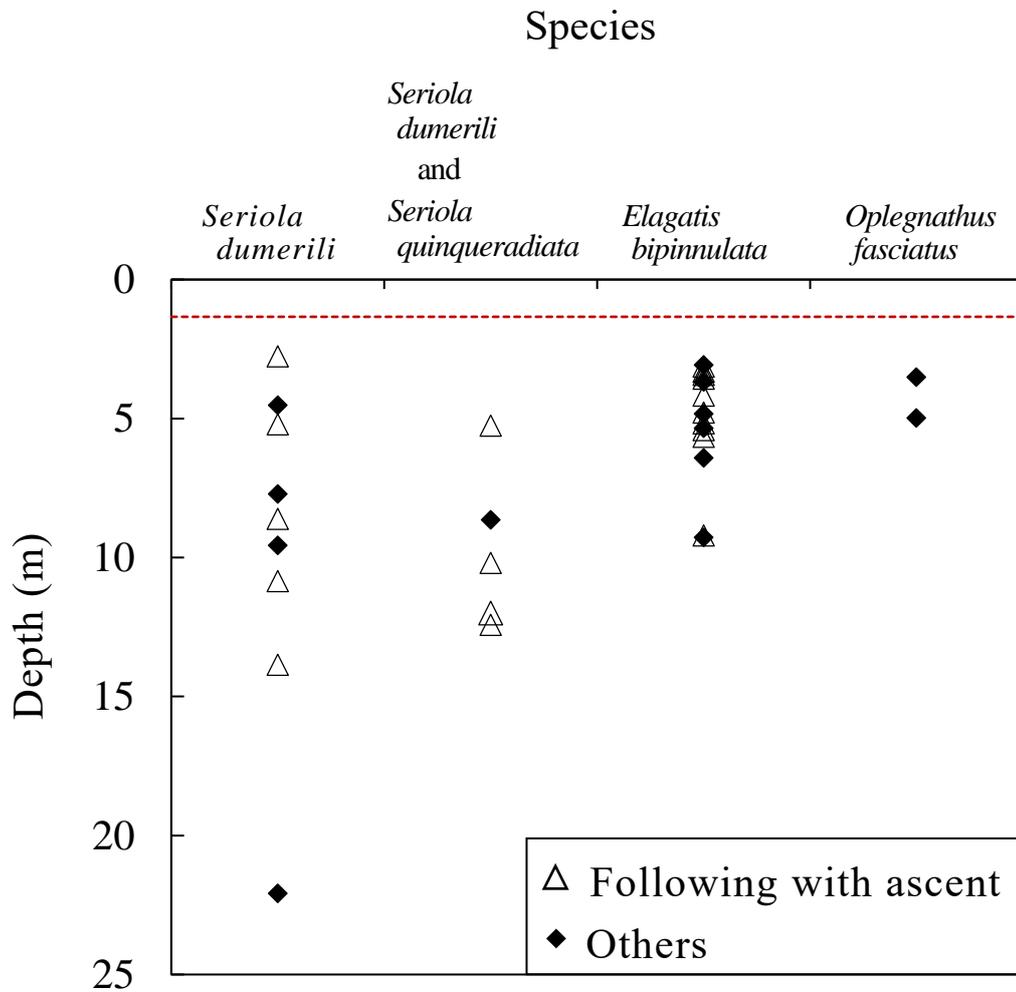


Fig.6-4 The depth where each following terminated. △, the following with ascent by difference at a depth of more than 0.5m; and ◆, others. Dashed line indicates depth of 1.34m, the average depth of the TRD during the experiments.



Fig.6-5 Target fishery species and non-target fishery species observed around the Soft-TRD by time-lapse camera attached on the inside of the bag net. There were 33 target fishery species and 11 non-target fishery species around the Soft-TRD.

(a) *Acanthopagrus schlegelii*



(b) *Muraenesox cinereus*



Fig.6-6 Captured images of snout-poking. (a) Black porgy *Acanthopagrus schlegelii*; (b) Arabian pike eel *Muraenesox cinereus*.

第 7 章 突き上げ強度の経時変化とその影響要因

定置網のような受動漁具は海中に固定して営まれるため、漁獲は対象生物の行動に依存する（Akiyama & Arimoto 2000, Fujimori *et al.* 2018）。そのため、適切な混獲削減手法を開発するためには、生物の混獲時の行動特性を把握することが重要である。特に、突き上げは TRD への遭遇と脱出行動そのものに関与する極めて重要な行動である。

既往研究において、海亀を水中に固定して静止させていた場合には、肺や血液中の酸素をほぼ全て消費した後も少なくとも 3 時間は生存可能であることが示されている（Lutz *et al.* 1984, Lutz & Bentley 1985, Berkson 1966）。しかし、網内において海亀は遊泳や突き上げにより酸素を大量に消費するため、生存時間は静止時よりも短くなり、活発に活動できる時間も限られると考えられる。そのため、突き上げを行ったとしても TRD までたどり着けない、あるいは TRD までたどり着いたとしても TRD の扉を押し開けられる十分な力で突き上げを行うことができなければ、海亀は脱出することができない。したがって、海亀脱出支援システムおよび TRD を適切に開発するためには、海亀はいつ、どのようなときに突き上げを行ってどの程度継続できるのか、突き上げの際の活動量はどのように変化するかといった特性を十分に理解しておく必要がある。

第 3 章において、箱網内で遊泳や突き上げを行う海亀の背甲に装着されたビデオカメラの映像から、遊泳努力量の指標である前肢のはばたき周波数（Booth 2009, Yasuda & Arai 2009, Wilson & Liebsch 2003）を取得した。そして、海亀が箱網の中-底層部から浮上する際

に、浮上とともにのはばたき周波数が増加する現象を確認した。自然環境下における海亀のはばたき周波数は、潜降や浮上の際に減少する傾向があることから (Hays *et al.* 2007, Yasuda & Arai 2009) , 浮上時のはばたき周波数の増加は、海亀の呼吸への欲求の高まりを示している可能性があることを第 3 章で示した。そしてこの現象は、その後続く突き上げにも影響を与えていると予想される。本章では、海亀脱出支援システムを導入した箱網内において海亀がいつ突き上げを始めるのか、どのくらい突き上げを継続することができるのか、突き上げ時の活動量の変化、はばたき周波数と突き上げとの関係について、それらに影響を与える要因を含めて明らかにすることを目的とした。

7-1 材料と方法

7-1-1 実験概要

実験場所と実験手順は、第 3 章の 3-1-4 における海上実験と同様である。2015 年 7 月と 2016 年 9 月に、三重県の沿岸に敷設された定置網の中層箱網内 (30 × 10 × 10m, Fig.3-1) において実験を行った。本実験では、海亀脱出支援システムを想定し、天井網の中央に向かって長辺方向に 20°, 短辺方向に 49°の傾斜を設けた (Fig.7-1)。海亀は、三重県内の別の定置網で混獲された野生のアカウミガメ計 5 個体を用いた (個体 ID: L1-L5, Table 7-1)。計測機器として、ビデオカメラ (Sony 株製 HDR-AS100V, 以後、背甲カメラ), 加速度ロガー (リトルレオナルド社製 W1000-3MPD3GT/ W380-PD3GT), 深度計 (JFE アドバンテック社製 DEFI-D20) を用いた (Fig.7-2)。背甲カメラの映像から、前肢のはばたき周波数を取得した (3-1-4 を参

照)。加速度ロガーからは3軸方向の加速度、深度、経験水温、遊泳速度が得られたが、このうち加速度と経験水温のみを解析に用いた。深度計から海亀の滞在深度を取得した。計測周波数は、加速度を32Hz、経験水温を1Hz、深度を1Hzとした。市販のエポキシパテと結束バンドを用いて各種計測機器を海亀一個体の背甲に装着し、海面まで引き上げた中層箱網の魚捕部から静かに入網させた。第3章における海上実験と同様に、中層箱網へ海亀を入網させてから15分間を馴致時間として海亀が天井網越しに呼吸を行える状態で待機し、馴致時間終了後に最初に呼吸が行われた時点を実験開始として中層箱網を水面下7mまで下した。実験時間は約20分としたが、海亀の活動が著しく減退した場合には、20分が経過する前に実験を終了して海亀を回収した(Table 7-1)。なお、海亀の緊急時に備えて、実験中は常に船上にダイバーが待機していた。

7-1-2 突き上げと遊泳

ここでは、突き上げ時の前肢のはばたき回数を突き上げ回数とした。さらに、5秒以内の間隔で連続して行われた一連の突き上げを1セットとし(push-up phase)、1セット内に行われた突き上げ回数を連続突き上げ回数とした。なお、実験開始から最初の突き上げを始めるまでを通常遊泳時(non-escaping phase)、その時間を通常遊泳時間とした。

7-1-3 活動量の推定

突き上げ強度の変化を把握するために、加速度の情報を用いた。解析には、データ解析ソフトウェア Igor Pro Version 6.22 (WaveMetrics, Inc., Oregon, USA) およびその拡張機能である Ethographer Version 2.04 software (Sakamoto *et al.* 2009) を用いた。

得られた加速度は，重力に由来する低周波成分からなる静的加速度と，海亀の動きに由来する高周波成分からなる動的加速度で構成される。Igor Pro の拡張機能である IFDL Version 4 (WaveMetrics, Inc.) を用いて，lowpass filter により低周波成分を取り出し，元の加速度から差し引くことで高周波成分を得た (Okuyama *et al.* 2012)。さらに，3 軸の動的加速度の絶対値を合計することで ODBA (overall dynamic body acceleration, *cf.* Wilson *et al.* 2006) を求めた。ODBA は体の動きの激しさを表し，酸素消費量や活動量の指標として用いられている (Okuyama *et al.* 2014)。ここでは，突き上げと遊泳それぞれのセット毎に平均 ODBA を求めた。

7-1-4 浮上時のはばたき周波数

前肢のはばたき 1 往復をはばたき 1 回とし，背甲カメラの映像から，中層箱網内で遊泳や突き上げを行う海亀のはばたき毎のはばたき周波数 (Hz) を取得した。傾斜を設けた天井網部分を除いた中層箱網の高さ (10m) の半分 (5m) 以上の鉛直距離を海亀が連続して浮上した場合を連続浮上 (ascent phase) とし，連続浮上時のはばたき周波数の変化と，その後の海亀の行動について調べた。連続浮上時のはばたき周波数の変化は，ピアソンの相関係数における有意性の検定によって，時間経過に伴い有意に増加するパターン，有意に減少するパターン，有意な変化がないパターンの 3 つに分類した。さらに，連続浮上時のはばたき周波数とその直後の突き上げ時の活動量との関係を明らかにするために，突き上げ直前の連続浮上時におけるはばたき周波数の変化による 3 つの分類に，突き上げ直前に連続浮上が見られなかった場合を加えた全 4 種類に分類して，その後の突き上げ時の ODBA を多重比較した。

7-1-5 海亀の行動に影響を与える要因の検討

通常遊泳時間，連続突き上げ回数，活動量，はばたき周波数に影響を与える要因について明らかにするために，ポアソン分布を仮定した一般化線形混合モデルを用いて解析を行った。通常遊泳時間，連続突き上げ回数，ODBA，はばたき周波数をそれぞれ応答変数とし，通常遊泳時間に対しては通常遊泳時の平均 ODBA，個体の直甲長，経験水温の 3 変数，連続突き上げ回数，ODBA，はばたき周波数に対しては，経過時間，個体の直甲長，経験水温の 3 変数を説明変数とした（Table 7-2）。いずれの解析においても，各個体を変量効果として扱った。解析には，フリーソフトウェア R（version 3.3.3，パッケージ glmML, R Core Team 2015）を用いた。

7-2 結果

7-2-1 網内における海亀の突き上げ行動

実験時間は，平均 19.8 分（SD = 5.1, $n = 10$ ）であった（Table 7-1）。海亀は遊泳と突き上げを繰り返した。実験中の海亀の滞在深度，はばたき周波数，ODBA の経時変化の一例を Fig.7-3 に示す。通常遊泳の間は，海亀はいずれも休むことなく泳ぎ続けており，特異的な行動は見られなかった。通常遊泳時間は，平均 5.1 分（SD = 3.3）であった（ $n = 10$ ，最長：8.9 分，最短：0.4 分，Table 7-1）。直甲長による通常遊泳時間の差は見られなかったが，経験水温が高く平均 ODBA が大きいほど短く，早く突き上げを始めた（Table 7-2）。連続した突き上げはそれぞれの実験で平均 0.89 セット/分（SD = 0.47）見られ，各連続突き上げにおける突き上げ回数は平均 6.1 回（SD = 6.1, $n = 169$ ，最多：44 回，最少：1 回）であった（Table 7-1）。実験

中、海亀は天井網の傾斜の頂点部に平均 1.9 回 ($SD = 2.8, n = 10$) 到達し、複数回突き上げを行った。連続突き上げ回数は、経過時間と直甲長による影響は見られなかったが、経験水温が低いほど多くなった (Table 7-2)。なお、全 10 回の実験のうち 3 回で、海亀が天井網に対して激しく突き上げを行った後に潜降し、はばたきを止めて網の底で平均 2.7 分 ($SD = 1.2$) 静止する様子が見られた。遊泳再開後は、いずれも浮上して突き上げを始めた。

7-2-2 活動量の変化と影響要因

加速度ロガーの脱落により加速度データを取得できなかった 2 回の実験 (Trial ID: 5 および 7) を除き、活動量の結果については計 8 回の実験を解析対象とした。突き上げ時の ODBA は、通常遊泳時の ODBA に比べて有意に大きく (Two-sided paired t test, $t = -6.81, df = 7, p < 0.001$)、平均 2.2 倍 ($SD = 0.6$) であった。通常遊泳時の ODBA は、経験水温が高いほど大きかったが、直甲長と経過時間による影響は見られなかった (Table 7-2)。一方、突き上げ時については、時間経過に伴い値が大きくなる傾向が見られた (Table 7-2)。遊泳時と突き上げ時のセット毎の平均 ODBA の変化を実験回別に調べたところ、遊泳セット毎の平均 ODBA にはいずれも時間経過に伴う有意な変化は見られなかったのに対し (Fig.7-4, Pearson's correlation analysis, $p \geq 0.05$)、突き上げ時については、8 回中 7 回の実験において、時間経過に伴いセット毎の平均 ODBA が有意に増加する傾向が見られた (Fig.7-5, Pearson's correlation analysis, $p < 0.05$)。平均 ODBA は、実験開始から 15 分経過時には通常遊泳時の平均 2.5 倍 ($SD = 1.0, n = 7$, 最大: 4.4 倍, 最小: 1.2 倍) まで達した。しかし、4 回の実験において、最初の突き上げを開始してから平均 12.3 分後

(SD = 2.0, $n = 4$, 最大: 14.6 分, 最小: 9.8 分) に減少に転じる傾向が見られた (Fig.7-5)。なお, セット毎の平均 ODBA の有意な増加が見られなかった実験回 (Trial ID: 4) においても, 実験開始から約 9 分間は突き上げ時の平均 ODBA が増加する傾向が見られた。その後値は徐々に減少し, 11 分経過後には海亀は底面網上で静止した。そして約 3.7 秒後に遊泳と突き上げを再開し, ODBA は再び増加した。

7-2-3 連続浮上時のはばたき周波数とその後の行動

通常遊泳時のはばたき周波数は, 2015 年 7 月では平均 0.40 Hz (SD = 0.11, $n = 523$), 2016 年 9 月では平均 0.48 Hz (SD = 0.12, $n = 336$) であり, 経験水温が高いほど高かった (Table 7-2)。一方, 経過時間と直甲長による影響は見られなかった。突き上げ時についても, 同様の傾向が見られた (Table 7-2)。

実験中に計 43 回の連続浮上が見られ, そのうち 29 回で浮上直後に突き上げに至り, 14 回で浮上後に突き上げを行わずに方向転換するなどして遊泳を続けた。連続浮上時のはばたき周波数は, 0.2-1.1 Hz の間で有意に増加するパターン ($p < 0.05$), 1.1-0.2 Hz の間で有意に減少するパターン ($p < 0.05$), あるいは有意な増加/減少がないパターン ($p \geq 0.05$) に分けられた (Pearson's correlation analysis)。連続浮上直後に突き上げを行った場合と遊泳を続けた場合に分けて, 連続浮上時のはばたき周波数の変化パターンの割合を比較したところ, その割合に有意な違いが見られた (Chi square test for goodness of fit, $n = 43$, $\chi^2 = 7.5$, $df = 2$, $p < 0.05$, Fig.7-6)。直後に突き上げを行った連続浮上においては, はばたき周波数が有意に増加するパターンが約半数 (48.3%, 29 回中 14 回) を占めたのに対し, 遊泳を続

けた場合ではその割合は少なく（7.1%，14 回中 1 回），有意な増加/減少がないパターンが過半数（64.3%，14 回中 9 回）を占めた。なお，直後に突き上げを行った連続浮上時にはばたき周波数が有意に減少したのは計 3 回のみであり，そのうち 2 回は各実験における最初の突き上げ直前の連続浮上時であった。突き上げ時の ODBA を本章における材料と方法（7-1-4）に示した 4 種類の分類によって多重比較したところ，はばたき周波数が有意に増加した連続浮上後の突き上げ時の ODBA が他に比べて有意に大きく（Tukey-Kramer test, $p < 0.01$ ），はばたき周波数が有意に減少した連続浮上後の突き上げ時の値が最も小さかった（ $p < 0.05$, Fig.7-7）。

7-3 考察

7-3-1 突き上げ開始前の海亀の行動

本実験において，海亀は先行研究における水槽実験での行動（Shiode *et al.* 2011）と同様に，最初の突き上げを始めるまでの間は休むことなく箱網内を泳ぎ続けていた。そして，実験開始から平均 5.1 分（SD = 3.1）で突き上げを開始した。突き上げは，海亀が呼吸のために浮上しようとした際に，天井網に遮られて頭部で網地を押しこむことで生じる行動である。海亀は，水温が高いほど早く突き上げを開始した。これは，水温が高いほど代謝速度や酸素消費量が大きくなることが原因であり（Lutz *et al.* 1989, Spotila *et al.* 1997），結果として通常遊泳時間が短くなったと考えられる（Hochscheid *et al.* 2004, Storch *et al.* 2005）。また，通常遊泳時の ODBA が大きいほど早く突き上げを始めた。活動量の指標として用いた ODBA と酸素消費量には，正の相関があることから（Halsey *et al.* 2011），ODBA

が大きいときは酸素消費が速く，呼吸欲求がより早く高まったと考えられる（Okuyama *et al.* 2014）。一方，大きな個体ほど潜水時間が長いことから（Hochscheid *et al.* 2007），本章においては大きな個体ほど通常遊泳時間が長いと予想されたが，通常遊泳時には個体の大きさによる影響は見られなかった。また，海亀やその他の海洋生物の体サイズとはばたき周波数の間には正の相関が認められているが（Revelles *et al.* 2007, Sato *et al.* 2010），本章において直甲長とはばたき周波数には有意な関係は認めらず，ODBAについても同様の結果となった。これらについては，本章における供試個体の体サイズの範囲が狭かったことに加え，中層箱網内という空間的な制限が関与していた可能性がある。

7-3-2 突き上げ開始後の海亀の行動

海亀は，エネルギーコストを削減するために潜水時に自身の浮力や重力を利用している（Minamikawa *et al.* 1997, Hays *et al.* 2004）。そのため，自然環境下においては潜降や浮上にしたがいはばたき周波数は減少する傾向があり，特に浮上時においては，水面に近付くにつれてはばたきが急激に少なくなる（Hays *et al.* 2007, Yasuda & Arai 2009）。一方，本実験を実施した中層箱網内においては，自然環境下と同様に連続浮上時にはばたき周波数が減少したのは全 43 回中 7 回のみであった。さらに，このうちで突き上げに至ったのは 3 回のみであり，そのうちの 2 回は実験中に最初に行われた突き上げの直前の連続浮上であった。水中に滞留し続けると，酸素消費に伴い海亀の肺の体積は小さくなるが（Hochscheid *et al.* 2003），これら 2 回では肺内に十分な酸素が残っており，自然環境下と同様の傾向が見られたと考えられる。

突き上げ直前の連続浮上時には，自然環境下と反対の傾向が半数を占めた。また，はばたき周波数の増加を伴う浮上後に行われた突き上げ時の活動量は，その他の突き上げ時の値よりも有意に大きかった。突き上げは呼吸欲求が高まると生じるものであることと（Shiode *et al.* 2011），連続浮上直後に突き上げを行わずに遊泳方向を水平に変えるなどして遊泳を続けた場合では，連続浮上時のはばたき周波数の増加はほぼ見られなかったことから，はばたき周波数の増加を伴う連続浮上は，海亀の呼吸欲求の高まりを示す指標となると考えられる。

いずれの実験回においても，通常遊泳時より突き上げ時の方が平均 ODBA は大きかった。また，通常遊泳時の ODBA には時間経過に伴う変化が見られなかったのに対して，突き上げ時には時間経過に伴い ODBA が大きくなる傾向が見られた。背甲に装着したビデオカメラからも，最初の突き上げ時には軽く天井網を押し程度であったのに対して，10分以上経過した後の突き上げ時には，頭をよじり前肢を激しくはばたかせながら頭部で天井網を強く押す様子が観察された。このことから，時間の経過とともに突き上げる力は大きくなり，それに伴って脱出の可能性は高まると考えられる。一方で，実験開始から最短で 9.8 分で ODBA の増加が減少に転じる場合があった。海亀脱出支援システムは，最初の突き上げが開始されてから活動が停止するまでの間に海亀が脱出できるものである必要があるため，最初の突き上げから 10 分程度で脱出できるようにするのが望ましい。なお，本実験では，実験開始時の海亀の生理的状态を統一させるために 15 分間の馴致時間を設けたが，それでもなお入網による急激な活動性の上昇や乳酸の増加などの影響が生じていた可能

性も考えられる。そのため、自然に入網した海亀については、本実験における結果よりも長い間突き上げを継続することができる可能性がある。

7-3-3 海亀脱出支援システムの設計について

海亀は入網後すぐには突き上げを開始しなかったことから、海中に沈められた箱網の危険性を認知していないと考えられた。そのため、突き上げを開始するのは、多くの酸素を消費した後であると考えられる。突き上げを開始するとさらに多くの酸素を消費し、また乳酸の蓄積やストレスによるさらなる酸素の消費により、生存可能時間は自然環境下における潜水時間よりも短くなると考えられる。また、海亀は外温動物であるため、箱網内における生存時間は、水温が低いほど長くなると考えられる (Lutz *et al.* 1989)。

1 セットあたりの連続突き上げ回数は、水温が低いほど多い傾向が見られた。これは水温が低いほど代謝による酸素消費が少ないこと (Lutz *et al.* 1989) が関与しているのかもしれない。これらの傾向は、水温が低いほど海亀の脱出に有利に作用する可能性があることを示している。突き上げは脱出につながる重要な行動であり、セット数が多いほど、また連続回数が多いほど、脱出成功率は高くなると考えられる (Shiode *et al.* 2011)。しかし、低水温のために十分な推進力を発揮できなければ、海亀は TRD の扉を押し開けることができずに網外へ脱出できない。

本研究では、第 3 章において、はばたき周波数と海亀の直甲長を用いて、以下の式により網内における海亀の推進力を推定した。

$$\ln F_P = 1.81 \ln f + 1.91 \ln l + 6.26 \quad (3-4)' ,$$

ここで、実験実施時の経験水温の違いを考慮して、本章における突き上げ時の推進力ピーク値を実験実施年別に(3-4)'式によって推定したところ、推定値は、2015年で平均100.4 N (SD = 65.8, n = 582), 2016年で平均155.1 N (SD = 81.4, n = 284)となり、2016年の推定値は、2015年の値に比べて有意に大きかった (Two-sided Student's *t*-test, *t* = -10.59, *df* = 864, *p* < 0.001)。両年で用いた海亀の直甲長はほぼ同様であったため (2015: 0.72 ± 0.07 m, 2016: 0.72 ± 0.02 m), この違いは水温の違いに起因するはばたき周波数の相違によるものであると考えられる。また、第5章において、海亀がTRDの扉を確実に押し開けるために必要な力は55.2Nであると示した。本章において、突き上げ時の推進力ピーク値が55.2Nを上回った割合は、2015年では76.1%, 2016年では90.5%であった。両年の割合ともに、海亀が脱出するのには十分であると考えられたが、その割合は水温の低下とともに低くなると予想される。日本周辺の定置網においては、水温の低い季節や地域における海亀の入網頻度は低いとされているが(塩出ら 2006), そうした季節や地域においてもより確実な脱出を実現するためには、TRDの仕様(扉の重ね合わせ幅、鍔網の目合など)を変更するなどして閉扉力を調節する必要があるだろう。以上のことから、海亀脱出支援システムの導入においては、来遊する海亀の大きさに加えて、水温等の設置場所の環境条件についても十分に考慮する必要があることが示唆された。混獲削減対象生物の行動特性を混獲状況下で調べた本章の内容は、海亀脱出支援システムの設計のみならず、新たな混獲対策手法の開発にも貢献するものと考えられる。

Table 7-1 Summary of experiments and turtle individuals. SCL, straight carapace length; SCW, straight carapace width; BW, body weight; a, trials which did not obtain the acceleration data

Year-Month	Turtle ID	SCL (m)	SCW (m)	BW (kg)	Trial ID	Ambient temperature (°C)	Duration of each experimental trial (min)	The number of push-up phase	The number of push-ups in a single phase
15-Jul	L1	0.82	0.63	71.2	1	19.9 ± 0.09	13.7	8	9.5 ± 4.4
					2	19.8 ± 0.16	22.9	11	6.4 ± 4.9
	L2	0.69	0.55	47.4	3	19.9 ± 0.16	18.1	8	7.4 ± 6.4
					4	19.9 ± 0.06	16.6	21	11.7 ± 12.1
	L3	0.67	0.55	43	5 ^a	19.9 ± 0.09	31.8	5	3.5 ± 3.8
					6	19.9 ± 0.08	20.9	29	5.9 ± 4.0
16-Sep	L4	0.74	0.60	61.2	7 ^a	24.9 ± 0.14	16.7	13	4.5 ± 3.2
					8	25.0 ± 0.33	17.1	17	4.0 ± 4.6
	L5	0.70	0.57	51.2	9	25.0 ± 0.08	22.1	32	2.9 ± 2.5
					10	25.1 ± 0.13	18.2	25	5.8 ± 4.6

Table 7-2 Results of generalized linear mixed model (GLMM)

Dependent variable	Fixed effect	<i>n</i>	coefficient	SE	<i>z</i>	<i>p</i>
The duration of the non-escaping phase	Ave. ODBA	10	1.24	0.24	-8.31	< 0.001
	SCL	10	-0.03	0.67	-0.04	0.96
	Temperature	10	-3.20	0.39	5.22	< 0.001
The number of push-ups in a phase	Elapsed time	159	0.00	0.00	-0.97	0.33
	SCL	159	0.00	0.02	0.28	0.77
	Temperature	159	-0.09	0.03	-2.65	< 0.005
ODBA (non-escaping phase)	Elapsed time	2039	0.00	0.00	1.48	0.14
	SCL	2039	-0.01	0.01	-0.52	0.6
	Temperature	2039	0.11	0.02	4.8	< 0.0001
ODBA (push-up phase)	Elapsed time	2717	0.03	0.03	5.51	< 0.0001
	SCL	2717	0.00	0.00	0.92	0.35
	Temperature	2717	0.16	0.06	2.53	< 0.05
FBF (non-escaping phase)	Elapsed time	859	0.00	0.00	0.36	0.72
	SCL	859	0.00	0.01	0.34	0.73
	Temperature	859	0.03	0.02	1.75	< 0.05
FBF (push-up phase)	Elapsed time	865	0.00	0.00	0.51	0.61
	SCL	865	0.00	0.01	0.41	0.68
	Temperature	865	0.04	0.02	2.42	< 0.05

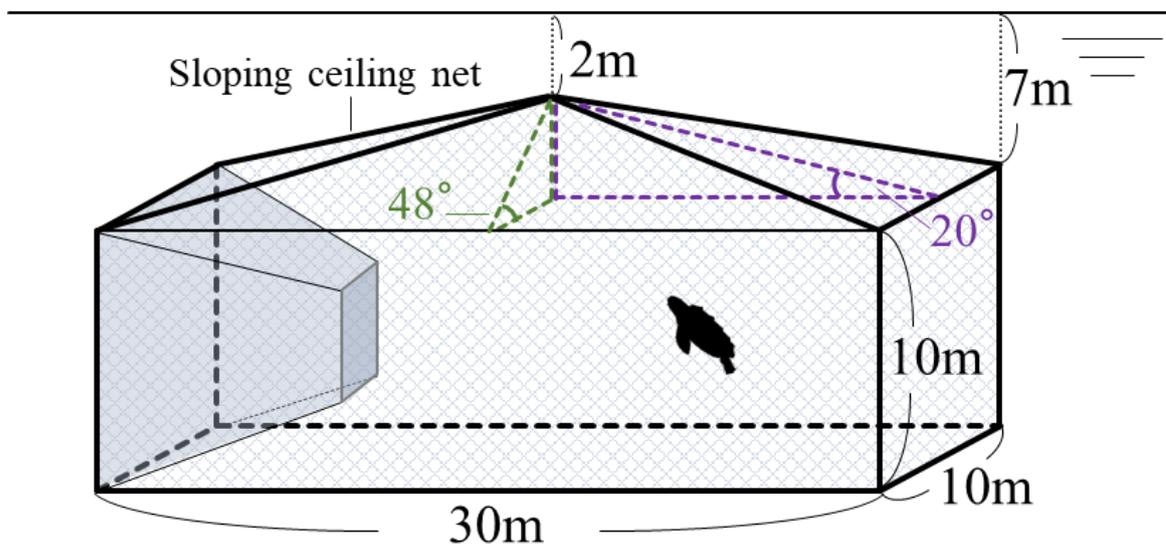


Fig.7-1 Overview of the submerged mid-water bag net used in the experimental trials. The ceiling net was manipulated into a pyramid shape for the turtle releasing system. The turtle releasing device (TRD) was not attached in this simulation experiment.

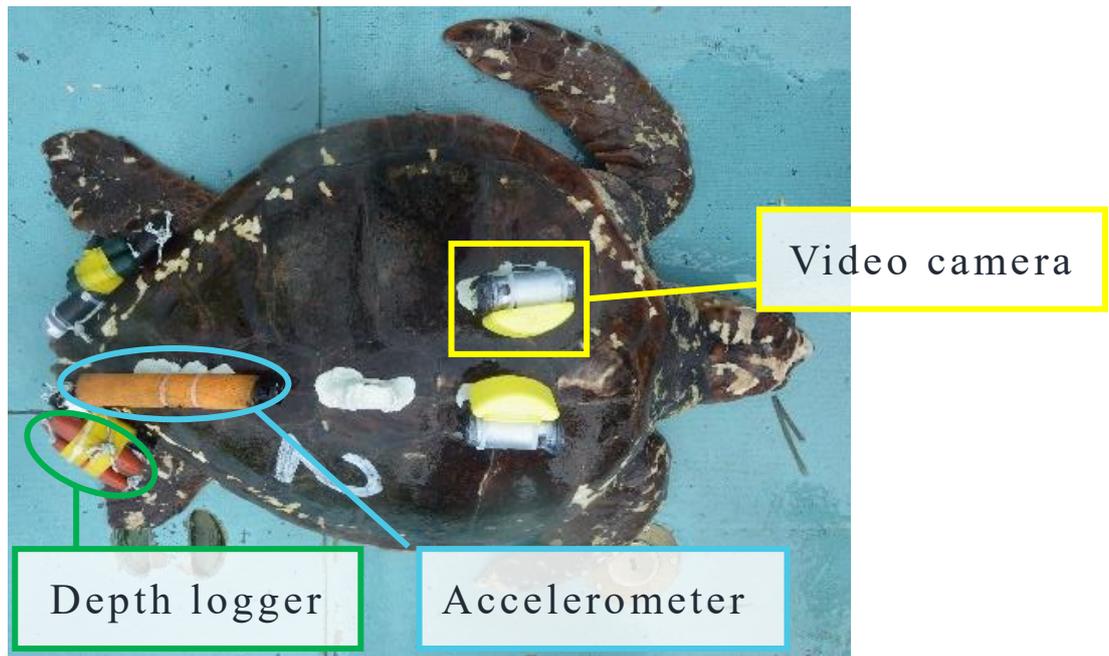


Fig.7-2 Instruments attached onto the carapace of a turtle.

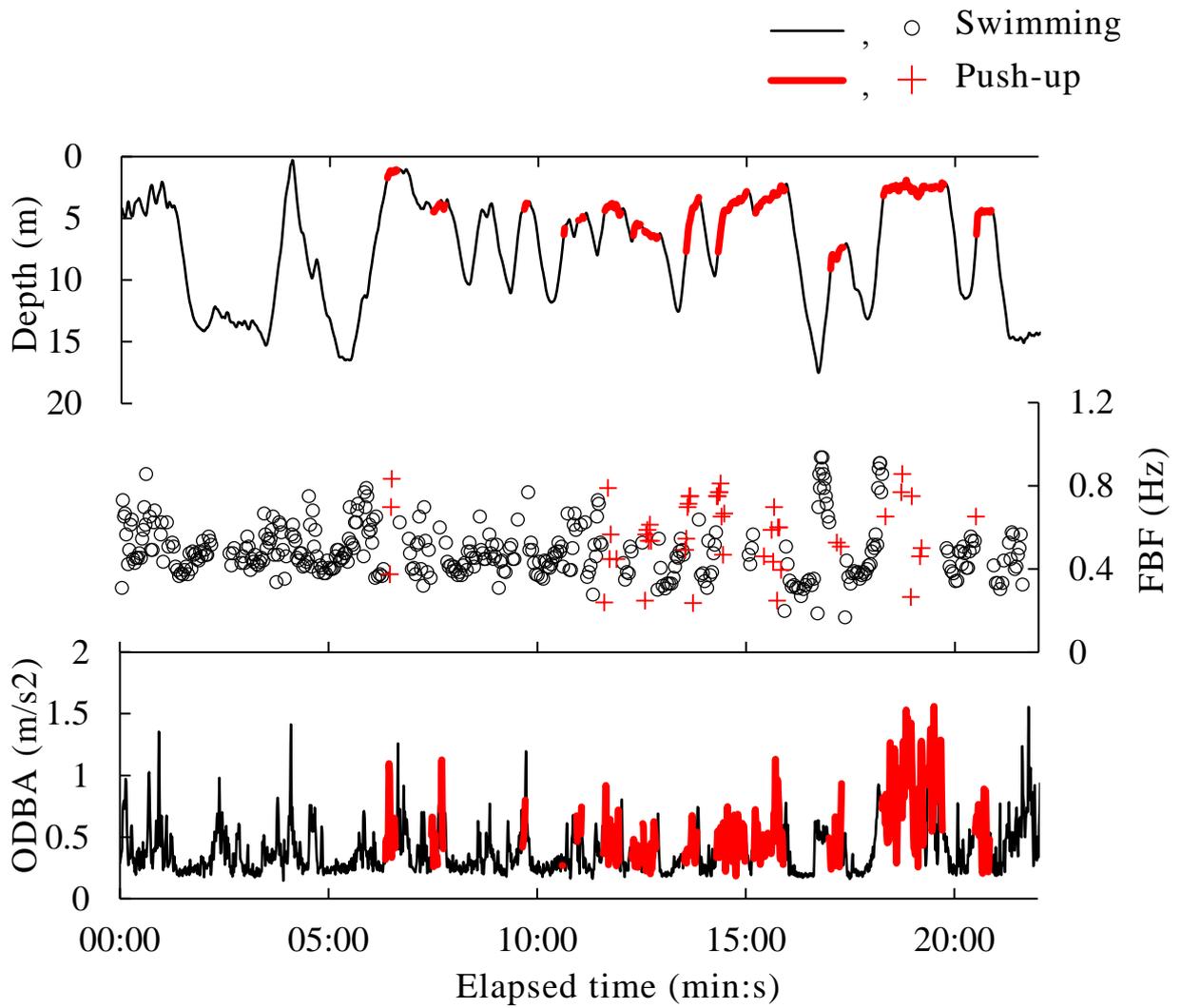


Fig.7-3 Typical profiles of the depth of a turtle, flipper beat frequency (FBF), and overall dynamic body acceleration (ODBA) during swimming and push-ups (Trial 9). Marks show FBF (○, during swimming; +, during push-ups). Lines show depth and ODBA. Red indicates push-ups. The time for plots of FBF was taken as the start point of each stroke.

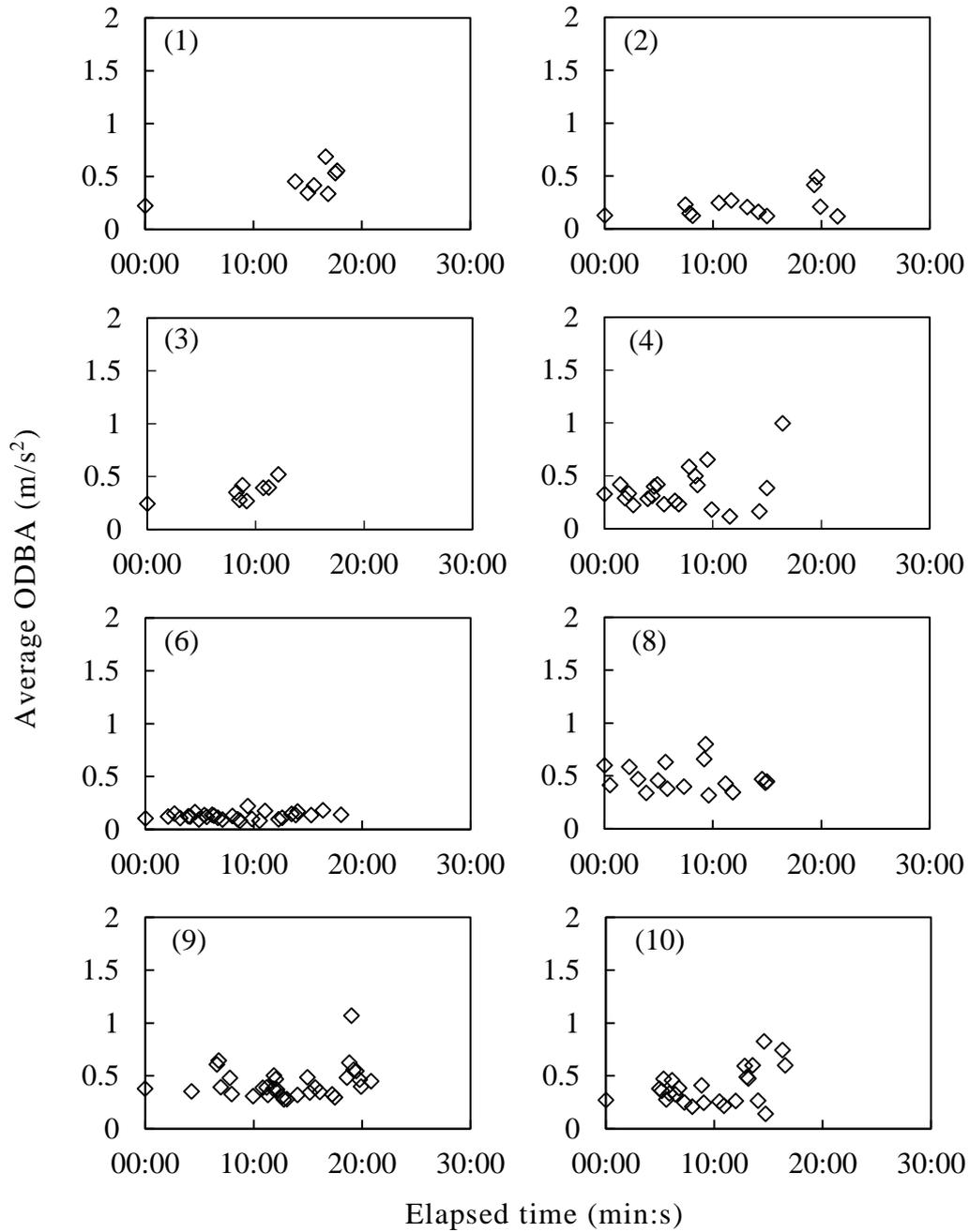


Fig.7-4 Changes in average overall dynamic body acceleration (ODBA) in each sequence of swimming. The numbers in parentheses indicate the trial ID. The time of each phase (\diamond) was taken as the start of each sequence.

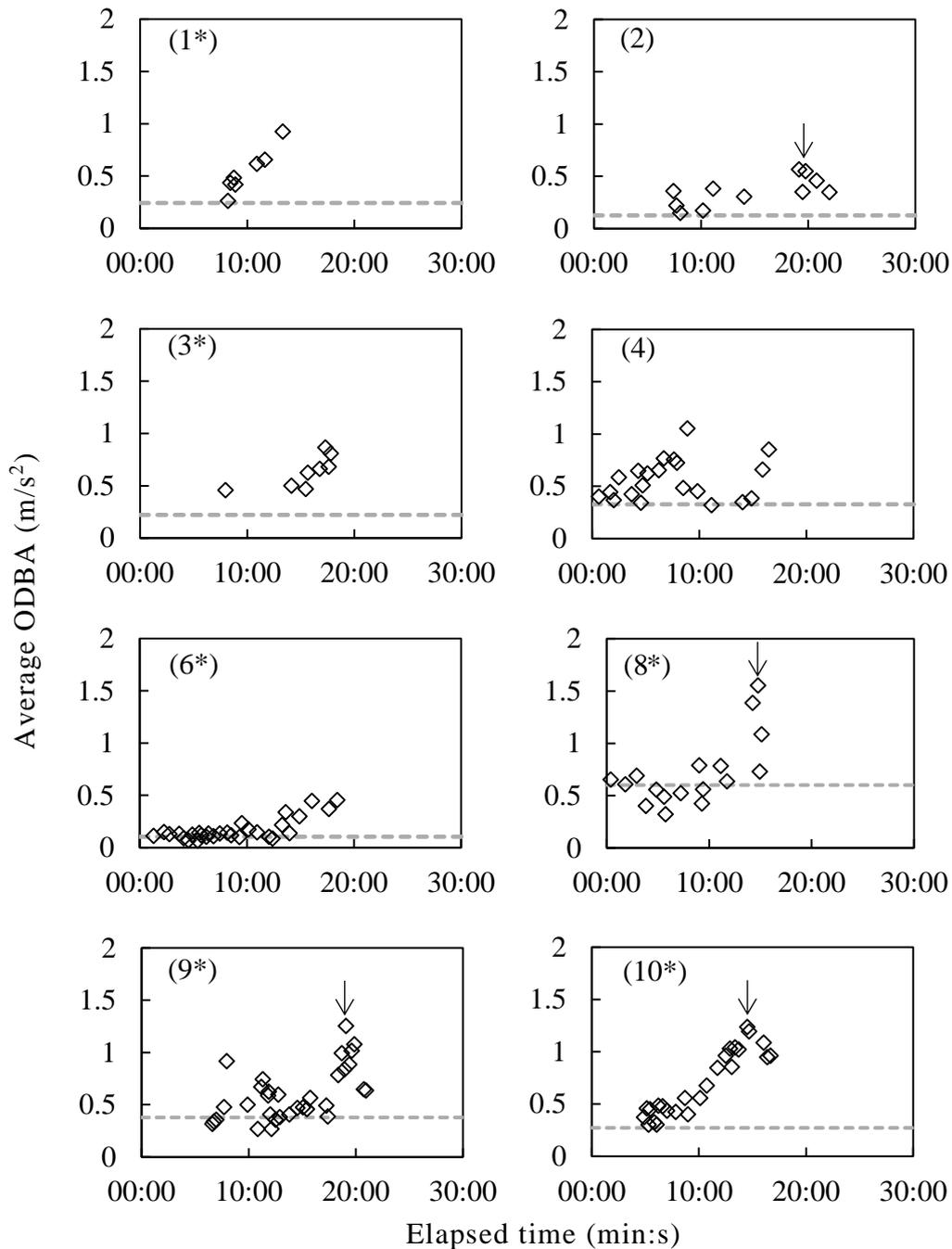


Fig.7-5 Changes in average overall dynamic body acceleration (ODBA) in each push-up phase. The numbers in parentheses indicate the trial ID. The time of each phase (\diamond) was taken as the start of the first push-up of each phase. The dashed line indicates the average ODBA in the non-escaping phase for each experimental trial. * indicates experimental trials with an ODBA which significantly increased with increasing time; \downarrow indicates the point at which the average ODBA started to decrease.

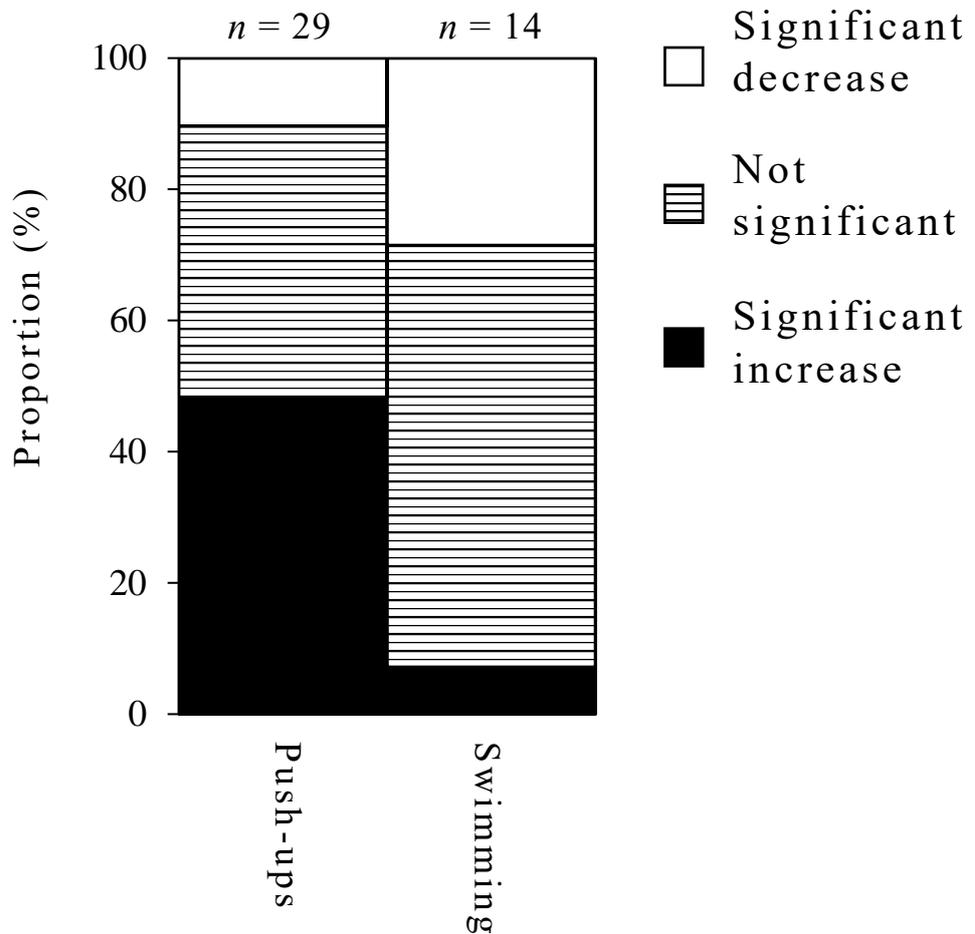


Fig.7-6 The proportion of different patterns of change in flipper beat frequency (FBF) during ascent phases. The horizontal axis indicates the actions of the turtles just after the ascent phases. White depicts a significant decrease in FBF during ascent phases, horizontal stripes depict no significant change, and black depict a significant increase.

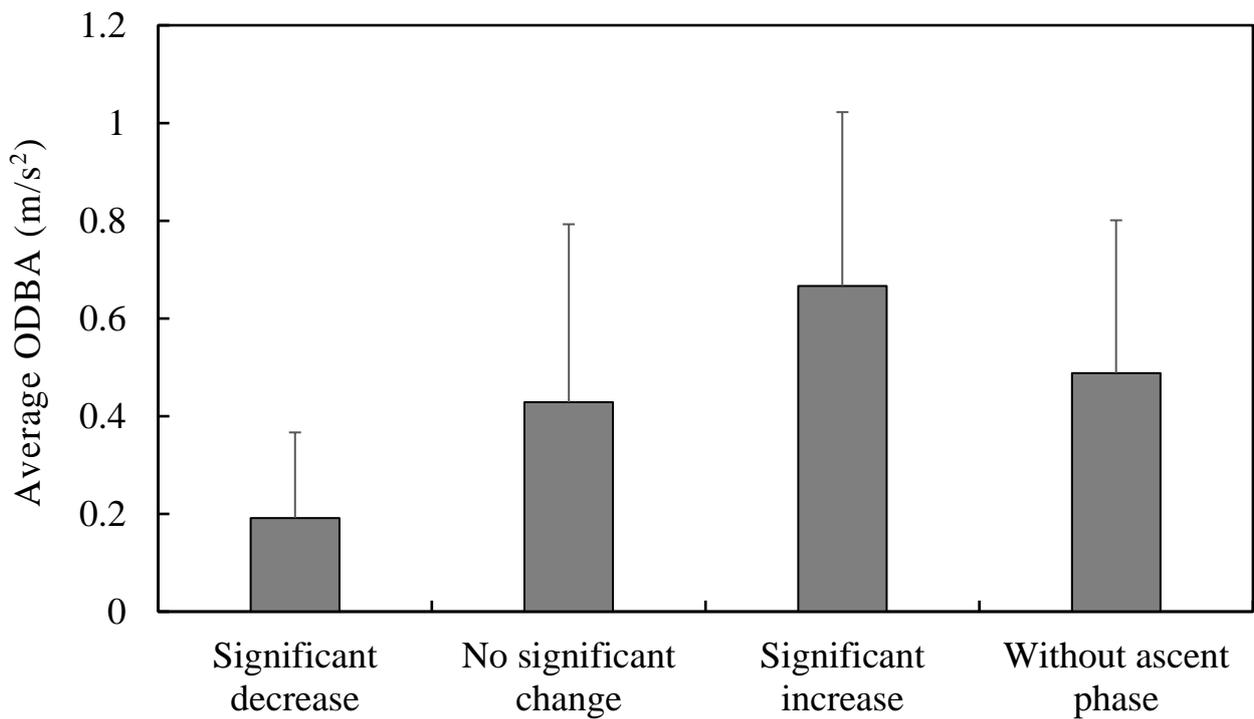


Fig.7-7 Difference of average overall dynamic body acceleration (ODBA) during the push-up phases between four groups: the three groups distinguished according to their pattern of changes in FBF during the ascent phase before the push-up phase using a Pearson's correlation analysis and the fourth group without an ascent phase just before the push-up phase. Vertical bars indicate standard deviation.

第 8 章 総括

本研究では、生態系の保全と持続可能な漁業の実現を両立するために、希少生物である海亀類の中層・底層定置網における混獲死亡を回避するための装置である TRD の開発を行った。TRD には、流れ下において扉が流体抵抗を受けている状況においても海亀が自力で押し開けることが可能で、なおかつ、漁獲対象種が逸出しないために自動で閉鎖することが求められる。本研究では、TRD の最適な仕様を提案することを目的とし、海亀の推進力と扉の閉扉力のそれぞれを詳細に調べた。さらに、提案した TRD からの漁獲対象種の逸出の可能性や、混獲された海亀の行動特性とその影響要因についても詳細に検討した。

海亀のはばたきと推進力について

中層・底層定置網の箱網部に混獲された海亀は、自由に呼吸を行うことができないという自然環境下とは異なる極めて特殊な状況に置かれる。また、実際の定置網において、海亀が箱網に入網するタイミングは様々であり、TRD を装着した中層・底層定置網に迷入した海亀が、入網前の呼吸からどの程度時間が経過してから TRD に到達するかは定かではない。場合によっては、30 分以上という海亀の呼吸間隔の観点から非常に長い時間が経過した後に到達することも考えられる。したがって、海亀を確実に脱出させるためには、TRD は入網からある程度の時間呼吸できずに水中に滞留し続け、突き上げる力が弱くなった海亀でも押し開けることのできる仕様である必要がある。そこでまず、水面下に滞留させた海亀の推進力を計測し、

その変化を詳細に調べた。甲長が大きいほど発揮する推進力の最大値は大きい傾向が見られた。また、一連の連続したはばたきであるセットを重ねるごとにセット内のはばたき回数は減少し、推進力とはばたき周波数も小さくなっていき、水中に滞留させ始めてから 30 分程度経過すると自発的なはばたきはほぼ見られなくなることが明らかとなった。30 分経過後の推進力は大きさによる差が見られないほどに小さくなり、アオウミガメで平均 57.6N、アカウミガメで平均 71.0N となった。本研究では、これらの値を、入網後断続的に突き上げを行い、自発的なはばたきがほぼ見られなくなった際に海亀が発揮し得る力とした。

中層箱網内におけるアカウミガメの推進力について

計測することが困難である、中層・底層定置網の箱網内で突き上げを行うアカウミガメの推進力を把握するために、はばたき周波数と海亀の直甲長を用いてアカウミガメの推進力を推定する式を取得した。そして、海上に敷設された定置網の中層箱網内に入網させた海亀に装着した背甲カメラの映像から前肢のはばたき周波数を取得し、網内で突き上げを行う海亀のはばたき周波数と海亀の直甲長を用いてはばたき毎（突き上げ毎）の推進力を推定した。水槽実験の結果から推定式 $\ln F_p = 1.813 \ln f + 1.905 \ln l + 6.265$ ($R^2 = 0.714$) が得られ、推定値と実測値は概ね一致した。この式により推定された突き上げ時の推進力は平均 111.2 N (SD = 71.6) であった。

TRD の閉扉力について

本研究で提案する TRD は、適度な柔軟性を持つ土台ネットに海亀の脱出口を開け、脱出口を扉で覆ったものとした。扉はステンレス製の枠に鍍網を張ったものであり、土台ネットには TRD の設置位置を天井網の最上部にするためと、形状を保ち閉扉力を維持するための浮子を複数個装着した。まず、静水下において扉が閉じようとする際の閉扉モーメント M_{θ} を計測した。さらに、 M_{θ} を構成すると考えられる 3 つのモーメント（土台ネットの弾性モーメント M_E 、土台ネットの復元モーメント M_S 、扉の水中重量による閉鎖方向のモーメント M_W ）を実測あるいは試算によりそれぞれ求め、各モーメントの特性について把握するとともに、これらを合算することにより得た M_{θ} の推定式の妥当性を検討した。その結果、 M_{θ} の推定値と実測値は概ね一致し、上記の 3 つのモーメントにより閉扉モーメントが構成されることが適切であると考えられた。各モーメントの特性を見ると、 M_E と M_S は開放角度の増加に伴い大きくなり、また M_S は扉と土台ネットとの重ね合わせ幅が大きいほど大きくなった。一方で、 M_W のみ小さくなった。これは、海亀が扉を押し開ける最初の段階で大きな力が必要となり、また海亀が扉を大きく開けた場合に、扉が閉じようとする力が小さくなることを示す。扉の開放側から流れを受けている状態で、海亀が扉を大きく開けて脱出した場合には、扉はより大きな流体抵抗を開放する方向に受けることになり、自動閉鎖にはそれに応じた大きな閉扉力が必要となる。したがって、海亀の脱出のしやすさと扉の閉鎖を考慮すると、水中重量を大きくすることは望ましくなく、 M_{θ} は重ね合わせ幅により調節することが適切であると考えられた。また本研究では、流れ下における閉扉モー

メントについても詳しく検討した。大型回流水槽において、扉の開放側と支点側から流れを受けた場合の閉扉モーメント $M_{R\theta}$ を計測し、流れ下においても確実に閉鎖する扉を選定した。その結果、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ 、 $\Phi 6\text{mm}-0.3\text{m}$ 、 $\Phi 8\text{mm}-0.2\text{m}$ 、 $\Phi 8\text{mm}-0.3\text{m}$ の 4 種類の扉が、海亀脱出時における最大の開放角度である 60° に扉が開いた際に、定置網の操業限界とされる 0.4 m/s の流れを開放側から受けた場合でも閉鎖することが確認された。したがって、これらの扉の中で最も水中重量が小さく、同条件下での閉扉力が小さい $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ が最も海亀が脱出しやすい仕様であると考えられた。

TRD の適切な仕様について

以上の結果より、流れの影響と海亀の脱出のしやすさの観点から、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ が最も適切な仕様であると考えられた。ここで改めて、第 2 章における推進力の計測実験および第 3 章における箱網内で突き上げを行う海亀の推進力の推定結果から、この扉の妥当性を検証した。 60° に開いた $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が 0.4 m/s の流れを支点側から受けた際の $M_{R\theta}$ は 30.4 Nm であった。このことから、海亀は真上方向に 55.2 N の推進力を発揮すれば $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉を開けることができる。そこで、海亀の推進力と扉の閉扉力を比較し、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉が、海亀が脱出可能な仕様であるか検証した。水中で 30 分間断続的にはばたいた後のアオウミガメとアカウミガメは、いずれも 55.2 N を上回る推進力を発揮していた。また、中層箱網内で突き上げを行うアカウミガメについても、突き上げ全 80 セット中 74 セットにおいて、セット内の半数以上の突き上げ時の推進力が 55.2 N を

上回ると推定された。以上から、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉は、海亀の脱出にも十分である、適切な仕様であると考えられた。

一方、TRDを装着する定置網周辺の流況や天井網の張り具合によって、TRDの設置環境は変化する可能性がある。特に、天井網の張りはTRDの扉の閉扉力に影響を与え得るものであり、定置網毎に、また海況によっても変化するものである。本研究では、この張りが関係する条件として、Fig.4-2におけるP'点の高さに着目し、扉の開放時にもその高さが維持されると仮定して解析を進めた。そして実際にP'点付近に装着する浮子を取り外した場合には、閉扉力は大きく減少した。したがって、 $\Phi 6\text{mm}-0.2\text{m}$ の扉の閉扉力を一定に保つためには、扉の開放時にも高さを維持する程度の浮子をP'点に装着することが強く求められる。なお、TRD全体の形状を安定させ、流れによる扉の傾きや開放を防ぐために、TRDの土台ネットの四隅には比較的浮力の大きな浮子を装着することも奨励される。そうすることにより、土台ネットの縁辺部より内側に位置する扉が一定の方向に大きく傾いて流れを受け、扉が開放してしまう可能性は極めて低いと予想される。

漁獲対象種の逸出について

TRDから漁獲対象種が逸出する可能性を検討するために、海亀の背甲に前・後方向に向けてビデオカメラを装着して中層箱網内を遊泳させ、漁獲対象種による海亀からの逃避と海亀への追従遊泳の有無を調べた。また、TRD付近への出現種を調べた。その結果、接近する海亀からすべての種が逃避したことから、TRD付近にいた種は海亀が接近した場合には海亀を避けてTRDから離れていくと予想

された。一方、ブリ、カンパチ、ツムブリ、イシダイによる追従遊泳が観察された。このうち、追従が箱網の上層部にまで至っていたのはツムブリであった。また、継続時間が特に長かったのは、定置網における主要漁獲対象種であるカンパチとブリからなる群れであり、海亀の浮上時にも追従が見られた。本研究で実験を行った中層箱網は比較的浅い深度に設置されていたため、より深く設置される箱網内においては、海亀に追従しながらブリ類が逸出する可能性について検討する必要がある。一方、TRD 付近には、33 種の漁獲対象種が来遊した。このうち 17 種において、鉛直上向きに遊泳して吻端が TRD に触れる様子が観察された。TRD は天井網に装着されるため、このように上向きに遊泳して TRD に触れることがある種は、逸出する可能性が特に高いと考えられる。このことから、漁獲対象種の逸出を防止するためには、TRD の確実な閉鎖が重要であることが改めて示された。TRD を含む海亀脱出支援システムを実際に導入する際には、まず TRD の周囲に筒網を装着して操業を行うなどして、逸出する漁獲対象種の有無、海亀の脱出の成否、操業への支障などを漁業者が十分に確認することが望ましいと考えられる。実際の定置網に TRD を試験的に導入して操業を行ったところ、TRD には扉枠などの固い素材も用いていることから取り扱いに多少の配慮が必要であったものの、TRD 自体には破損などの異常は生じず、作業にも大きな影響を与えることなく揚網を行うことができた。こうした取り組みを継続的に行い、現場で生じる問題点についても把握し、改良を進めていくことが望ましい。

突き上げ強度の変化とその影響要因について

定置網のような受動漁具では、曳網のような能動漁具とは異なり漁具が固定して設置されるため、入網した海亀は自力で脱出する必要がある。そのため、海亀脱出支援システムを利用した海亀の脱出の成否は、海亀自身の行動に委ねられる。したがって、TRDの適切な開発と実用化のためには、混獲状態に陥った海亀の行動特性、特に脱出につながる重要な行動である突き上げ行動について、詳細に把握する必要がある。そこで、背甲にビデオカメラ、深度計、加速度ロガーを装着した海亀を中層定置網の箱網内に入網させてその行動を詳細に調べた。海亀は、実験開始から約5分後に最初の突き上げを開始した。突き上げセット毎の活動量(ODBA)は時間の経過に伴い増加していき、最初の突き上げから約12分後に減少に転じた。これは、時間の経過に伴い呼吸への欲求が高まり、同時に突き上げの強度も強くなるが、一定時間が経過すると酸素や体力を消耗して乳酸も溜まり、突き上げの強度が落ちていくことを示していると考えられた。このことから、海亀脱出支援システムは、海亀が突き上げを開始してから約10分程度以内にTRDにたどり着き脱出できるものであることが望ましいと考えられた。また、連続浮上のうち35%ではばたき周波数が浮上に伴い増加する傾向を示した。さらに、はばたき周波数の増加を伴う連続浮上直後の突き上げ時のODBAは、その他の突き上げ時のODBAに比べて有意に大きかった。突き上げは網内において呼吸への欲求が高まった海亀特有の行動であることと、自然環境下においては、浮上に伴いはばたき周波数が低くなることから、はばたき周波数の増加を伴う浮上は海亀の呼吸への欲求の高まりを示す指標となると考えられた。さらに、突き上げ回数、

ODBA, はばたき周波数は, いずれも水温の影響を受けていた。海亀は外温動物であるため, 水温の低下に伴い代謝と活動量が低下する。それに伴い, 海亀の発揮する推進力も低くなると考えられる。本研究における実験条件(個体の大きさ, 水温)においては, 海亀はΦ6mm-0.2mの扉から十分脱出可能であると推定されたが, 水温が低い季節や地域において, より確実な海亀の脱出を検討する場合には, TRDの閉扉力を小さくする必要が生じる可能性もある。しかし, 閉扉力を小さくすると流れ下において扉が開放し, 漁獲対象種が逸出する可能性が大きくなる。そのため, 扉に張る鍍網の仕様を変更して扉が受ける流体抵抗を減らすといった対策を行うなど, TRDの使用状況を総合的に考慮しながら海亀の混獲死亡の削減と漁獲物の逸失の防止を高度に両立する工夫と努力が求められる。

まとめ

本研究では, 使用した5種類の扉のうち, 4種類が流れ下においても自動閉鎖可能であり, このうち海亀が最も脱出し易いのは, Φ6mm-0.2mの扉であると考えられた。海亀の推進力とΦ6mm-0.2mの扉の閉扉力を比較検討したところ, Φ6mm-0.2mの扉は海亀の脱出においても適切な仕様であると考えられた。一方, 海亀に追従して, あるいはTRDの隙間から漁獲対象種が逸出する可能性が考えられたことから, 海亀脱出時以外の確実な扉の閉鎖は極めて重要である。

混獲削減手法を導入するために漁具の仕様を変更することに対して, 漁業者は幾許か抵抗を感じると予想される。そのため, TRDの導入の際には, まずTRDの周囲に筒網を装着するなどして操業を行い, 漁業者自身が漁獲対象種の逸出や海亀の脱出について確認して,

揚網作業への影響等についても十分に納得した上で使用してもらうことが望ましい。その場合に、海亀の推進力は水温による影響を受けることから、TRDを導入する際には季節や環境条件についても十分考慮する必要がある。今後も操業試験を継続的に行い、TRDの耐久性や海中での挙動、海亀の脱出や漁獲対象種の逸出の有無についても評価した上で、漁業者への普及を進めていきたい。

謝辞

本研究において、一貫して大変熱心なご指導とご鞭撻を賜りました東京海洋大学学術研究院生産システム学研究室の塩出大輔准教授に心から深謝の意を表します。また、当初より多くのご助言を頂いた同研究室の胡 夫祥教授，東海 正教授，魚群制御学研究室の秋山清二准教授，国立研究開発法人水産研究・教育機構水産大学の原一郎名誉教授に感謝申し上げます。

水槽実験を行うにあたり，多大なご協力を頂いた国立研究開発法人水産研究・教育機構の照屋和久博士，小林真人博士，ならびに同機構西海区水産研究所亜熱帯研究センターの皆様には深厚なる謝意を表します。

海上実験を遂行するにあたり，多大なご支援とご協力を賜りました，松井信義氏，関根敏昭氏，平井良夫氏をはじめとした日東製網株式会社の皆様，ならびに有限会社志摩定置の皆様には心より御礼申し上げます。また，実験材料や実験方法について貴重なご意見を賜りました東京海洋大学学術研究院応用情報システム工学研究室の宮本佳則教授，内田圭一准教授に感謝の意を表します。

引用文献

A

阿部 寧. 小型定置網によるウミガメ混獲を防止する技術開発について. ていち 2006; **109**:63-76.

阿部 寧, 南 浩史. 海亀類の混獲対策-海亀個体群の状況と包括的アプローチ. 日本水産学会誌 2008; **74**: 230-233.

Akiyama S, Arimoto T. Analysis of accumulation performance of differing set-net designs. *Fish. Sci.* 2000; **66**: 78-83.

Arai N, Kuroki M, Sakamoto W, Naito Y. Analysis of diving behavior of Adélie penguins using acceleration data logger. *Polar. Biosci.* 2000; **13**: 95-100.

B

Berkson H. Physiological adjustments to prolonged diving in the pacific green turtle (*Chelonia mydas agassizii*). *Comp. Biochem. Physiol.* 1966; **18**: 101-119.

Beverly S, Curran D, Musyl M, Molony B. Effects of eliminating shallow hooks from tuna longline sets on target and non-target species in the Hawaii-based pelagic tuna fishery. *Fish. Res.* 2009; **96**: 281-288.

Booth DT. Swimming for your life: locomotor effort and oxygen consumption during the green turtle (*Chelonia mydas*) hatchling frenzy. *J. Exp. Biol.* 2009; **212**: 50-55.

Bull LS. Reducing seabird bycatch in longline, trawl and gillnet

fisheries. *Fish. Fish.* 2007; **8**: 31-56.

C

Casale P, Freggi D, Rigoli A, Ciccocioppo A, Luschi P. Geometric morphometrics, scute patterns and biometrics of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) in the central Mediterranean. *Amphibia-Reptilia* 2017; **38**: 145-156.

D

DeAlteris J, Silva R. Performance in 2004 and 2005 of an alternative leader design on the bycatch of sea turtles and the catch of finfish in Chesapeake Bay pound nets, offshore Kiptopeake, Va. U.S. *National Marine Fisheries Service*, New England Fisheries Science Center, Woods Hole, MA, USA. 2008.

Davenport J, Munks SA, Oxford PJ. A comparison of the swimming of marine and freshwater turtles. *Proc. R. Soc. Lond. B* 1984; **220**: 447-475.

Davies RWD, Cripps SJ, Nickson A, Porter G. Defining and estimating global marine fisheries bycatch. *Marine Policy* 2009; **33**: 661-672.

Dodd CK. Synopsis of the biological data on the loggerhead sea turtle *Caretta caretta* (Linnaeus, 1758). Fish and Wildlife Service. *Biol. Rep.* 1988; **88**: 110 p.

E

Epperly SP. Fisheries-Related Mortality and Turtle Excluder Devices (TEDs). *The biology of sea turtles*. CRC Press, Boca Raton 2003;

13: 339-353.

F

FAO. Guidelines to Reduce Sea Turtle Mortality in Fishing Operations.

FAO, Rome 2010; 128 p.

Fjälling A, Wahlberg M, Westerborg H. Acoustic harassment devices reduce seal interaction in the Baltic salmon-trap, net fishery. *ICES J. Mar. Sci.* 2006; **63**: 1751-1758.

Fujimori Y, Ochi Y, Yamasaki S, Ito R, Kobayashi Y, Yamamoto J, Tamaru O, Kuramoto Y, Sakurai Y. Optical and acoustic camera observations of the behavior of the Kuril harbor seal *Phoca vitulina stejnegeri* after invading a salmon setnet. *Fish. Sci.* 2018; **84**: 953-961.

G

Gilman E, Zollet E, Beverly S, Nakano H, Davis K, Shiode D, Dalzell P, Kinan I. Reducing sea turtle by-catch in pelagic longline fisheries. *Fish. Fish.* 2006; **7**: 2-23.

Gilman E, Gearhart J, Price B, Eckert S, Milliken H, Wang JH, Swimmer Y, Shiode D, Abe O, Peckham SH, Chaloupka M, Hall M, Mange J, Alfaro-Shigueto J, Dalzell P, Ishizaki A. Mitigating sea turtle by-catch in coastal passive net fisheries. *Fish. Fish.* 2009; **11**: 57-88.

Gilman E, Huang HW. Review of effects of pelagic longline hook and bait type on sea turtle catch rate, anatomical hooking position and at-vessel mortality rate. *Rev. Fish. Biol. Fish.* 2017; **27**: 43-52.

Godfrey MH, Godley BJ. Seeing past the red: flawed IUCN global

listings for sea turtles. *Endang. Species. Res.* 2008; **6**: 155-159.

H

Hart NS, Collin SP. Sharks senses and shark repellents. *International zoology* 2015; **10**: 38-64.

Hall MA, Alverson DL, Metuzals KL. By-Catch: Problems and solutions. *Marine Pollution Bulletin* 2000; **41**: 204-219.

Halsey LG, Jones TT, Jones DR, Liebsch N, Booth DT. Measuring energy expenditure in sub-adult and hatchling sea turtles via accelerometry. *PLoS ONE* 2011; **6**; e22311.

Hawkes LA, Broderick AC, Godfrey MH, Godley BJ. Climate change and marine turtles. *Endang. Species. Res.* 2009; **7**: 137-154.

Hays GC, Marshall GJ, Seminoff JA. Flipper beat frequency and amplitude changes in diving green turtles, *Chelonia mydas*. *Mar. Biol.* 2007; **50**: 1003-1009.

Hays GC, Metcalfe JD, Walne AW, Wilson RP. First records of flipper beat frequency during sea turtle diving. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2004; **303**: 243-260.

平成 29 年度水産白書. 水産庁, 東京, 2017.

Hochscheid S, Bentivegna F, Speakman JR. The dual function of the lung in chelonian sea turtles: buoyancy control and oxygen storage. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2003; **297**: 123-140.

Hochscheid S, Bentivegna F, Speakman JR. Long-term cold acclimation leads to high Q₁₀ effects on oxygen consumption of loggerhead sea turtles *Caretta caretta*. *Physiol. Biochem. Zool.* 2004; **77**: 209-222.

Hochscheid S, McMahon CR, Bradshaw CJA, Maffucci F, Bentivegna F, Hays GC. Allometric scaling of lung volume and its consequences for marine turtle diving performance. *Comp. Biochem. Physiol. A* 2007; **148**: 360-367.

「必携早わかり 定置網技術総覧」(井上喜洋編) (株)北日本海洋センター, 北海道. 2002; 482 p.

I

IOTC. On reducing the incidental bycatch of seabirds in longline fisheries. Indian Ocean Tuna Commission 2012.

Ishihara T, Kamezaki N, Matsushita Y, Iwamoto F, Oshika T, Miyagata Y, Ebisui C, Yamashita S. Reentry of juvenile and subadult loggerhead turtles into natal waters of Japan. *Curr. Herpetol.* 2011; **30**: 63-68.

石原 孝, 亀崎直樹, 松沢慶将, 石崎明日香. 漁業者への聞き取り調査から見る日本の沿岸漁業とウミガメの関係. *野生生物と社会* 2014; **2**: 23-35.

IUCN SSC Marine Turtle Specialist Group 2015. New Loggerhead Red List Assessment Published. Retrieved from <http://iucn-mtsg.org/>. Posted on 16 December 2015.

IUCN (2018) IUCN Red List of threatened Species. Version 2018.1. Retrieved from <http://www.iucnredlist.org/>. Accessed: 08 November 2018.

K

金田禎之. 定置網漁業. 「日本漁具・漁法図説 増補二訂版」(株)成山堂

書店，東京．1977；359-421．

Karl SA, Bowen BW. Evolutionary significant units versus geopolitical taxonomy: molecular systematics of an endangered sea turtle (genus *Chelonia*). *Conserv. Biol.* 1999; **13**: 990-999.

小島孝夫．漁労習俗伝播の諸相．「海の民俗文化」（小島孝夫編）明石書店，東京．2005；243-336．

L

Lehtonen E, Suuronen P. Mitigation of seal-induced damage in salmon and whitefish trapnet fisheries by modification of the fish bag. *ICES J. Mar. Sci.* 2004; **61**: 1195-1200.

Lewison RL, Freeman SA, Crowder LB. Quantifying the effects of fisheries on threatened species: the impacts of pelagic longlines on loggerhead and leatherback sea turtles. *Ecol. Lett.* 2004; **7**: 221-231.

Lewison RL, Wallace BP, Alfaro-Shigueto J, Mangel JC, Maxwell SM, Hazen EL. Fisheries bycatch of marine turtles: Lessons learned from decades of research and conservation. *The biology of sea turtles, Volume III*. CRC Press, Boca Raton 2013; **12**: 329-351.

Lutcavage ME, Plotkin P, Witherington BE, Lutz PL. Human impacts on sea turtle survival. *The biology of sea turtles*. CRC Press, Boca Raton 1997; **15**: 387-409.

Lutz PL, McMahon P, Rosenthal M, Sick TJ. Relationships between aerobic and anaerobic energy production in turtle brain in situ. *Am. J. Physiol.* 1984; **247**: R240-R247.

Lutz PL, Bentley TB. Respiratory physiology of diving in the sea turtle. *Copeia* 1985; **3**: 671-679.

Lutz PL, Bergey ANN, Bergey M. Effects of temperature on gas exchange and acid-base balance in the sea turtle *Caretta caretta* at rest and during routine activity. *J. Exp. Biol.* 1989; **144**: 144-169.

M

Melvin EF, Guy TJ, Read LB. Best practice seabird bycatch mitigation for pelagic longline fisheries targeting tuna and related species. *Fish. Res.* 2014; **149**: 5-18.

Meylan AB, Donnelly M. Status Justification for Listing the Hawksbill Turtle (*Eretmochelys imbricata*) as Critically Endangered on the 1996 IUCN Red List of Threatened Animals. *Chelonian Conservation and Biology* 1999; **3**: 200-224.

Minamikawa S, Naito Y, Uchida I. Buoyancy control in diving behavior of the loggerhead turtle, *Caretta caretta*. *J. Ethol.* 1997; **15**: 109-118.

Minamikawa S, Naito Y, Sato K, Matsuzawa Y, Bando T, Sakamoto W. Maintenance of neutral buoyancy by depth selection in the loggerhead turtle *Caretta caretta*. *J. Exp. Biol.* 2000; **203**: 2967-2975.

Mitchell JF, Watson JW, Foster DG, Caylor RE. The turtle excluder device (TED): a guide to better performance. NOAA Technical memorandum NMFS-SEFC-366, National Oceanic and Atmospheric Administration, Wasington, D.C. 1995.

森 敬四郎．漁具資材並びに網の構造に関する技術的動向．日本水産学会誌 1971; **37**: 223-231.

N

Narazaki T, Sato K, Abernathy KJ, Marshall GJ, Miyazaki N. Loggerhead turtles (*Caretta Caretta*) use vision to forage on gelatinous prey in mid-water. *PLoS ONE* 2013; **8**: e66043.

西山作蔵．定置網漁業の大要．「定置網の手びき」(株)北日本海洋センター，北海道．1974; 10-23.

野村正恒，森 敬四郎，二谷雄平，富 和一．中・底層定置網試験とその考察．ていち 1964; **29**: 47-75.

Northridge SP. Driftnet fisheries and their impacts on non-target species: a worldwide review. *FAO fisheries technical paper No.320*. FAO, Rome 1991; 115 p.

O

Okuyama J, Kawabata Y, Naito Y, Arai N, Kobayashi M. Monitoring beak movements with an acceleration datalogger: a useful technique for assessing the feeding and breathing behaviors of sea turtles. *Endang. Species. Res.* 2009; **10**: 39-45.

Okuyama J, Kataoka K, Kobayashi M, Abe O, Yoseda K, Arai N. The regularity of dive performance in sea turtles: a new perspective from precise activity data. *Anim. Behav.* 2012; **84**: 349-359.

Okuyama J, Tabata R, Nakajima K, Arai N, Kobayashi M, Kagawa S. Surfacing change their dive tactics depending on the aim of the dive: evidence from simultaneous measurements of breaths and

energy expenditure. *Proc. R. Soc. B* 2014; **281**: 20140040.

Ortiz N, Mangel JC, Wang JH, Alfaro-Shigueto J, Pingo S, Jimenez A, Suarez T, Swimmer Y, Carvalho F, Godley BJ. Reducing green turtle bycatch in small-scale fisheries using illuminated gillnets: the cost of saving a sea turtle. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2016; **545**: 251-259.

P

Peckham SH, Lucero-Romero J, Maldonado-Díaz D, Rodríguez-Sánchez A, Senko J, Wojakowski M, Gaos A. Buoyless nets reduce sea turtle bycatch in coastal net fisheries. *Conserv. Lett.* 2016; 9: 114-121.

Phillips RA, Gales R, Baker GB, Double MC, Favero M, Quintana F, Tasker ML, Weimerskirch H, Uhart M, Wolfaardt A. The conservation status and priorities for albatross and large petrels. *Biol. Conserv.* 2016; **201**: 169-183.

Prange HD. Energetics of swimming of a sea turtle. *J. exp. Biol.* 1976; **64**: 1-12.

R

R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria 2015.

Resendiz A, Resendiz B, Nichols WJ, Seminoff JA, Kamezaki N. First confirmed east-west transpacific movement of a loggerhead sea turtle, *Caretta caretta*, released in Baja California, Mexico. *Pacific Science* 1998; **52**: 151-153.

Revelles M, Carreras C, Cardona L, Marco A, Bentivegna F, Castillo JJ,

de Martino G, Mons JL, Smith MB, Rico C, Pascual M, Aguilar A. Evidence for an asymmetrical size exchange of loggerhead sea turtles between the Mediterranean and the Atlantic through the Straits of Gibraltar. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2007; **349**: 261-271.

S

Sakamoto KQ, Sato K, Ishizuka M, Watanuki Y, Takahashi A, Daunt F, Wanless S. Can ethograms be automatically generated using body acceleration data from free-ranging birds? *PLoS ONE* 2009; **4**: e5379.

Sakamoto W, Uchida I, Naito Y, Kureha K, Tsujimura M, Sato K. Deep diving behavior of the loggerhead turtle near the frontal zone. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1990; **56**: 1435-1443.

Sakamoto W, Sato K, Tanaka H. Diving patterns and swimming environment of two loggerhead turtles during interesting. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1993; **59**: 1129-1137.

Sato K, Mitani Y, Cameron MF, Siniff DB, Naito Y. Factors affecting stroking patterns and body angle in diving Weddell seals under natural conditions. *J. Exp. Biol.* 2003; **206**: 1461-1470.

Sato K, Shiomi K, Watanabe Y, Watanuki Y, Takahashi A, Ponganis PJ. Scaling of swim speed and stroke frequency in geometrically similar penguins: they swim optimally to minimize cost of transport. *Proc. R. Soc. B* 2010; **227**: 707-714.

Sato K, Shiomi K, Marshall G, Kooyman GL, Ponganis PJ. Stroke rates and diving air volumes of emperor penguins: implications for dive

- performance. *J. Exp. Biol.* 2011; **214**: 2854-2863.
- Seminoff JA, Shanker K. Marine turtles and IUCN Red Listing: A review of the process, the pitfalls, and novel assessment approaches. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2008; 52-68.
- Seymour RS. Physiological adaptations to aquatic life. *Biology of the Reptilia*. Academic Press, London, 1982; pp.151-202.
- Shester GG, Micheli F. Conservation challenge for small-scale fisheries: Bycatch and habitat impacts of traps and gillnets. *Biol. Conserv.* 2011; **144**: 1673-1681.
- Shiga M, Shiode D, Hayashi S, Tokai T, Hu F. Method for estimating buoyancy of midwater float required to standardize hook depth in pelagic longline. *Fish. Sci.* 2008; **74**: 479-487.
- Shiode D, Hu F, Shiga M, Yokota K, Tokai T. Midwater float system for standardizing hook depths on tuna longlines to reduce sea turtle bycatch. *Fish. Sci.* 2005; **71**: 1182-1184.
- 塩出大輔, 河原林奈美, 東海 正. 大型定置網へのウミガメ入網に関するアンケート調査結果について. ていち 2006; **109**: 54-62.
- Shiode D, Takahashi M, Hu F, Tokai T, Kobayashi M, Abe O. Development of sea turtle releasing system for large scale set net/pound net fisheries. 2 –practical study to release sea turtle from an experimental bag net. *Proceedings of the international symposium on SEASTAR2000 and Asian Bio-logging Science* 2011; 31-34.
- Shiode D, Tokai T. A review of development, modification and implementation of TED (Turtle Excluder Device) to reduce sea

turtle bycatch in trawl fisheries. Papers presented at the Expert Consultation on Interactions between Sea Turtles and Fisheries within an Ecosystem Context. Rome, 9-12 March 2004. FAO *Fisheries Report. No.738, Suppl.* FAO, Rome 2004; 171-177.

Shiode D, Shiozawa M, Ueno S, Hu F, Tokai T, Hirai Y. Behaviour of sea turtle in a submerged bag net of set net with the turtle releasing system (TRD). *Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems* 2017; **10**: 241-249.

Southwood AL, Darveau CA, Jones DR. Metabolic and cardiovascular adjustments of juvenile green turtles to seasonal changes in temperature and photoperiod. *J. Exp. Biol.* 2003; **206**: 4521-4531.

Soykan CU, Moore JE, Zydelis R, Crowder LB, Safina C, Lewison RL. Why study bycatch? An introduction to the theme section on fisheries bycatch. *Endang. Species. Res.* 2008; **5**: 91-102.

Spotila JR, O' Connor MP, Paladino FV. Thermal Biology. *The biology of sea turtles*. CRC Press, Boca Raton 1997; **11**: 297-314.

Storch S, Wilson RP, Hillis-Starr ZM, Adelung D. Cold-blooded divers: temperature-dependent dive performance in the wild hawksbill turtle *Eretmochelys imbricata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2005; **293**: 263-271.

T

Takahashi M, Shiode D, Hu F, Tokai T, Abe O, Kobayashi M. Development of turtle releasing system in the pound net: Guiding method of loggerhead sea turtle *Caretta caretta* with slope of the

upper panel. *Proceedings of the International Symposium on SEASTAR2000 and Asian Bio-logging Science* 2010; 25-27.

田村 怜子, 塩出大輔, 金子由佳里, 胡 夫祥, 東海 正, 小林真人, 阿部 寧. 中層・底層定置網の箱網用海亀脱出装置に対する海亀の行動. *日本水産学会誌* 2014; **80**: 900-907.

U

Uchida I, Nishiwaki M. Sea turtles in the waters adjacent to Japan. In: *Biology and Conservation of Sea Turtles*. (eds. Bjorndal K). *Smithsonian Institution Press*, Washington, D. C. 1982; 317-319.

内田 圭一, 小川大道, 長谷川浩平, 宮本佳則, 野呂英樹, 和田由香, 秋山清二. 超音波テレメトリーを用いた定置網内のクロマグロ小型魚とブリの行動モニタリング. *日本水産学会誌* 2018; **84**: 14-22.

浦 隆文. 混獲についての国際情勢および水産庁における対応. *日本水産学会誌* 2008; **74**: 220-221.

U. S. Fish and Wildlife Service. (2018) Retrived from https://www.fws.gov/endangered/improving_ESA/regulation-revisions.html. Accessed: 27 November 2018.

W

Wallace BP, Lewison RL, McDonald SL, McDonald RK, Kot CY, Kelez A, Bjorkland RK, Finkbeiner EM, Helmbrecht S, Crowder LB. Global patterns of marine turtle bycatch. *Conserv. Lett.* 2010; **3**: 131-142.

Wallace BP, DiMatteo AD, Bolten AB, Chaloupka MY, Hutchinson BJ,

- Abreu-Grobois FA, Mortimer JA, Seminoff JA, Amorocho D, Bjorndal KA, Bourjea J, Bowen BW, Briseño-Dueñas R, Casale P, Choudhury BC, Costa A, Dutton PH, Fallabrino A, Finkbeiner EM, Girard A, Girondot M, Hamann M, Hurley BJ, López-Mendilaharsu M, Marcovaldi MA, Musick JA, Nel R, Pilcher NJ, Troëng S, Witherington B, Mast RB. Global conservation priorities for marine turtles. *PLoS ONE* 2011; **6**: e24510.
- Wang JH, Fisler S, Swimmer Y. Developing visual deterrents to reduce sea turtle bycatch in gill net fisheries. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2010; **408**: 241-250.
- Wang JH, Barkan J, Fisler S, Godinez-Reyes C, Swimmer Y. Developing ultraviolet illumination of gillnets as a method to reduce sea turtle bycatch. *Biol. Lett.* 2013; **9**: 20130383.
- Watanuki Y, Niizuma Y, Geir WG, Sato K, Naito Y. Stroke and glide of wing-propelled divers: deep diving sea birds adjust surge frequency to buoyancy change with depth. *P. Roy. Soc. B-Biol. Sci.* 2003; **270**: 483-488.
- Watson JW, Epperly SP, Shah AK, Foster DG. Fishing methods to reduce sea turtle mortality associated with pelagic longlines. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2005; **62**: 965-981.
- WCPFC. Conservation and management measure to mitigate the impact of fishing for highly migratory fish stocks on seabirds. Western and Central Pacific Fisheries Commission 2017. Conservation and Management Measure 2017-12. 7p.

Wilson RP, Liebsch N. Up-beat motion in swinging limbs: new insights into assessing movement in free-living aquatic vertebrate. *Mar. Biol.* 2003; **142**: 537-547.

Wilson RP, White CR, Quintana F, Halsey LG, Liebsch N, Martin GR, Butler PJ. Moving towards acceleration for estimates of activity-specific metabolic rate in free-living animals: the case of the cormorant. *J. Anim. Ecol.* 2006; **75**: 1081-1090.

Wyneken J. Sea Turtle Locomotion: Mechanisms, Behavior, and Energetics. *The biology of sea turtles*. CRC Press, Boca Raton 1997; **7**: 165-198.

Y

Yasuda T, Arai N. Changes in flipper beat frequency, body angle and swimming speed of female green turtles *Chelonia mydas*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2009; **386**: 275-286.

谷津明彦. 公海流し網漁業. 「漁業の混獲問題」(松田 皎編) 株式会社厚生閣, 東京. 1995; 52-61.