

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450268

研究課題名(和文)ニホンウナギの産卵回遊生態の解明

研究課題名(英文)The spawning ecology of Japanese eels

研究代表者

渡邊 俊(WATANABE, Shun)

近畿大学・農学部・講師

研究者番号：60401296

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ニホンウナギのポップアップタグを用いた解析結果から、川を降った親ウナギは、まずは黒潮を利用し、小笠原付近では南下すること、さらには大陸棚以外のどの場所(産卵場も含む)でも終始、日周鉛直移動を行っており、その上限と下限には光と水温が深く関係していることが明らかとなった。また、本種の産卵生態に関する研究結果から、本種の産卵の時間は、新月3日前の午前1時と推測することができ、また、産卵場所については西マリアナ海嶺南端部と塩分フロントが交差する近くの内部潮汐エネルギーが強くなる地点と考えた。

研究成果の概要(英文)：Our analysis of the oceanic migratory behavior of large female *Anguilla japonica* silver eels with pop-up satellite archival tags found that they first use the Kuroshio Current and then go south into the open sea near the Ogasawara Islands. The daily rhythm of diel vertical migration of Japanese eels observed in the open sea and their spawning area was the same behavior found in all areas during their spawning migration. A clear relationship between the upper and lower limits of migration and the sun and moon light and water temperature was found. Their experienced temperatures estimated from the development rate of collected eggs was not significantly different from the environmental temperature from CTD data, only if spawning occurred at 1:00 at night 3 days before new moon in all cases. Therefore, we hypothesize that Japanese eels spawn at about 1:00 a.m. and internal tide patterns may contribute to the mechanisms that determine the places they spawn in the open ocean.

研究分野：魚類生態学

キーワード：ニホンウナギ 卵 内部潮汐 UNA-CAM ポップアップタグ 日周鉛直移動 光 水温

## 1. 研究開始当初の背景

2008年と2009年における計12個体のニホンウナギの産卵親魚の捕獲の成功(Chow et al. 2009; 黒木 2010; Kurogi et al. 2011)と2009年5月の天然ウナギ卵(31個)発見によって、太平洋におけるウナギ産卵場調査の探検的・博物学的時代は幕を降ろした(Tsukamoto et al. 2011)。これは、まだ親魚も卵も採集されておらず、10ミリ前後の小型レプトセファルスもしくはプレレプトセファルスの採集にとどまっている大西洋サルガッソー海におけるヨーロッパウナギの産卵場調査の到達点(Schmidt 1924)を遥かに凌ぐ。太平洋におけるこの成果は、ウナギが西マリアナ海嶺の海山域で新月の夜、一斉に産卵するという「新月仮説(Tsukamoto et al. 1996, 2003)」、「海山仮説(塚本 1996; Tsukamoto et al. 2003)」、「塩分フロント仮説(Tsukamoto 1992; Kimura et al. 1994)」の3つの作業仮説の賜ともいえる。

今後のウナギの産卵場調査は、産卵の起こる可能性のあるおよそ200kmの推定産卵場の範囲を特定しようと躍起になっていた時代から、今やピンポイントの産卵地点を予想し、そこに集結する雌雄の親ウナギたち個々の産卵回遊行動を解明しようとする先端的海洋科学のフェーズに入るといえる。しかし、産卵地点そのものを示す野外での産卵行動の観察例は未だ無い。そこで、産卵事例を数多く知り、産卵地点と非産卵地点の環境条件の比較検討から産卵集団形成のメカニズムを明らかにする必要がある。また、実際の天然下で産卵行動が起こる地点をピンポイントで予測し、人類史上誰も見たことのない謎の産卵行動をつぶさに観察するには、最先端の海洋工学機器を動員し、生物学のみならず、地学、海洋物理学、海洋化学、衛星海洋学など様々な分野を融合することが求められる。

## 2. 研究の目的

ニホンウナギ(*Anguilla japonica*)の親魚と卵が、グアム島沖の西マリアナ海嶺域で採集されたことから、本種の産卵場に関する研究には終止符が打たれたとの見方がある。しかし、本種の雌雄が広い海の中で何を目印にどのように集合し、なぜその場所のみ産卵場を形成するかという生物学的問題は未解決のままである。

本研究では、今まで蓄積された環境データ(水温、塩分、地形)と卵および仔魚採集データに加え、新たに内部潮汐シミュレーションやポップアップタグと漂流系水中カメラシステム(UNA-CAM)の最新の電子技術による産卵回遊と行動のデータをとり、これらを総合的に解析することにより、本種の産卵回遊生態

の全貌を解き明かす。

## 3. 研究の方法

(1)過去のデータに基づく産卵の時空間的特性の検証とその予測技術の確立

卵が採集された3航海(KH-09-2, KH-11-6, KH-12-2)から、産卵の時空間的特性を推定する。次にこれらの結果を踏まえて産卵イベントの予測技術を確立し、航海にてその技術の検証を行う。

(2)ウナギの産卵生態の解明に関する航海の実施

ニホンウナギの産卵行動を新規に開発した漂流系水中カメラシステム(UNA-CAM)を用いて映像記録し、行動解析と記載を行う。

卵、孵化仔魚の採集を行う。産卵行動観察が出来なかった場合、この調査結果から産卵地点の推定を行う。また、この調査により複数の産卵地点形成の有無を確認する。

(3)ポップアップタグを用いた親ウナギの産卵回遊生態の解明

河川を降り、外洋へ産卵回遊を行うウナギを採集し、それにポップアップタグ(MiniPAT: Wildlife Computers, Inc., Washington, USA)を取り付けた後、日本沿岸、外洋域、産卵場にて放流する。タグの浮上日は放流後90日とし、サテライト経路でデータを得て、本種の体験水深と水温についての解析を行い、彼らの回遊生態を明らかにする。

(4)まとめ

以上の結果をまとめ、ニホンウナギの回遊行動と産卵地点の時空間的特性を明らかにすることで、ピンポイントで産卵地点を予測する技術を確立し、本種の産卵回遊生態を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1)過去のデータに基づく産卵の時空間的特性の検証とその予測技術の確立

3航海(KH-09-2, KH-11-6, KH-12-2)で得られたニホンウナギの卵の採集地点・日時と卵の鉛直分布から、本種の主要産卵日は新月3日前と推定した。また、過去の航海で採集された卵の発生段階、西マリアナ海嶺南端部の海域の水温データ、ポップアップタグのデータから得られた親ウナギの産卵場での遊泳水深と水温、人工飼育個体の水温と発生速度の関係(Ahn et al. 2012)などに基づき、ニホンウナギの産卵時刻を推定した結果、本種の産卵時刻は新月3日前の午前1時であると推

察できた。

新月3日前の内部潮汐の数値シミュレーション(Niwa & Hibiya 2014)結果から、卵とプレプトセファルスが採集された地点付近では、常に内部潮汐エネルギーが強くなっていることが分かった。これらの地点はそれぞれの産卵期に用いられたものと推定し、ニホンウナギの産卵には特徴的な海底地形により増幅された内部潮汐が何らかの役割を果たしているものとの仮説を提案する。この仮説は、産卵イベントの予測技術の確立に貢献するものと考えている。

#### (2)ウナギの産卵生態の解明に関する航海 (なつしま航海)

NT14-09(2014年5月14日～6月4日)とNT15-08(2015年5月5日～22日)の二つの航海を実施し、そこから以下の結果を得た。

塩分フロントと海嶺が交叉する点の第3象限に約7マイル間隔の測点を設け、新月(2014年5月29日3時40分)前の6日間(5月23～8日)、漂流系・係留系水中カメラシステム(UNA-CAMと江戸っ子)によりニホンウナギの産卵行動の観察、および計量魚群探知機による親ウナギの産卵集団の探索を試みた。しかし、本種の産卵行動の観察および集団の探索に成功することができなかった。ただ、UNA-CAMによりクビナガアナゴの遊泳行動の観察に成功した。また、5月26～28日、同海域においてORIネットによりニホンウナギの卵、計3個と4月生まれのプレプトセファルス、計8個体を採集することができた。

西マリアナ海嶺の西側の広範囲で孵化仔魚の採集を行った結果、産卵行動の観察および集団探索を行った海域のみならず、西マリアナ海嶺の最南端部海域においても孵化仔魚、計238個体の採集に成功した。この結果は、同じ月に複数の産卵場が形成されることを示唆すると考えた。

2015年5月の産卵日と推定される期間(5月14日～18日)、数値シミュレーションによって西マリアナ海嶺南端部における内部潮汐エネルギーの分布を推定した。西マリアナ海嶺と2015年5月の塩分フロントの交点の第3象限に最も近い内部潮汐のエネルギーの高い場所を推定産卵地点とし、漂流系水中カメラシステム(UNA-CAM)を投入し、本種の産卵行動の観察を行った。しかしながら、産卵行動の観察は成功することができなかった。この主な原因は、調査期間中、2つの台風が産卵場に居座り、わずか2日間のみ調査(5月19

～21日：新月後)しかできず、当初の計画を実行することができなかったことと考える。

産卵前に親魚が西マリアナ海嶺と塩分フロントの交点に集まってくる様子を環境DNAの手法を用いて探知できるかをNT15-08にて新たに試みた。9定点において表層から1000mまでの各100m間隔による採水を行い、各層2Lの海水を濾過し、濾紙から全DNAを抽出し、船上にてリアルタイムPCRを用いて本種のDNAの有無を検討した。その結果、2定点の2層の3つのサンプル(C6の250mおよびC5とC6の400m)から本種のDNAを検知した。

#### (3)ポップアップタグを用いた親ウナギの産卵回遊生態

3つの実験から以下の結果を得た。

三河湾で採集された天然の銀ウナギ計3尾(全長:792-992mm)にポップアップタグを装着し、2014年5月19日と30日に西マリアナ海嶺南端部の3地点で放流した。その結果、3個体中1個体のみ正常な行動データを得ることができた。データ解析から、ニホンウナギは産卵場でも日周鉛直移動を行っており、その遊泳水深の上限と下限には光と水温が制限要因になっていることが明らかとなった。

2014年10月に利根川と三河湾で採集した天然の銀ウナギ計3尾(全長:852-955mm)にポップアップタグを装着し、2014年12月10日～12日の夜に北海道大学水産学部の練習船「おしよる丸」から小笠原諸島西方海域の3地点で放流した。得られたデータ解析の結果、ニホンウナギは回遊途上の外洋でも明瞭な日周鉛直移動を行っていることが明らかになった。

2015年11月に三河湾と宮崎県五ヶ瀬川で採集した天然の銀ウナギ計5個体(全長:899-987mm)にポップアップタグを装着し、2015年12月13日に愛知県恋路ヶ浜から2個体、12月22日に宮崎県小倉ヶ浜から3個体を放流した。2個体から得られたデータを解析した結果、ニホンウナギは産卵回遊の初期に黒潮を利用することが判明した。

以上の解析結果から、本種は、産卵回遊中すべての期間にて日周鉛直移動を行い、その上限と下限は、それぞれ光と水温が制限要因になっていることが分かった。

#### (4)まとめ

ポップアップタグを用いたニホンウナギの産卵回遊行動をまとめると、川を降った親ウナギは、まずは黒潮を利用すること、また

小笠原付近では南下すること、さらには大陸棚以外のどの場所でも終始、日周鉛直移動を行っており、その上限と下限には光と水温が深く関与することが明らかとなった。

次に、本研究から得られたニホンウナギの産卵生態に関する結果を統合すると、産卵の時間(ピーク時)は、新月3日前の午前1時と推測することができ、また、産卵場所については西マリアナ海嶺南端部と塩分フロントが交差する近くの内部潮汐エネルギーが強くなる地点と推察することができた。今後、航海を通じてこれらの仮説を検証したい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

Schabetsberger, R., M. J. Miller, G. Dall'Olmo, R. Kaiser, F. Økland, S. Watanabe, K. Aarestrup, K. Tsukamoto, Hydrographic features of anguillid spawning areas: potential signposts for migrating eels, Marine Ecology Progress Series, 査読有, 554, 2016, 141-155  
DOI: <https://doi.org/10.3354/meps11824>

Watanabe, S., S. Hagihara, M. J. Miller, M. Machida, K. Komatsu, S. Nishida, K. Tsukamoto, Collection of spawning-condition eels of *Ariosoma meeki* in the Kuroshio Current in the East China Sea. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 査読有, 96(8), 2016, 1701-1707  
DOI: <https://doi.org/10.1017/S002531541500209X>

Fukuba, T., T. Miwa, S. Watanabe, N. Mochioka, Y. Yamada, M. J. Miller, M. Okazaki, T. Kodama, H. Kurogi, S. Chow, K. Tsukamoto, A New Drifting Underwater Camera System for Observing Spawning Japanese Eels in the Epipelagic Zone along the West Mariana Ridge, Fisheries Science, 査読有, 81(2), 2015, 235-246  
doi:10.1007/s12562-014-0837-4

Miller, M. J., T. Miwa, N. Mochioka, S. Watanabe, Y. Yamada, T. Fukuba, K. Tsukamoto, Now you see me, now you don't: observation of a squid hiding in its ink trail. Marine Biodiversity, 査読有, 45, 2015, 149-150  
DOI:10.1007/s12526-014-0249-9

Aoyama, J., S. Watanabe, M. J. Miller, N. Mochioka, T. Otake, T. Yoshinaga, K. Tsukamoto, Spawning sites of the Japanese eel in relation to oceanographic structure and the West Mariana Ridge, PLoS One, 査読有, 9(2), 2014, e88759.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088759>

Miller, M. J., S. Koyama, N. Mochioka, J. Aoyama, S. Watanabe, K. Tsukamoto, Vertical body orientation of a snipe eel (Nemichthyidae, Anguilliformes) in the deep mesopelagic zone along the West Mariana Ridge, Marine and Freshwater Behaviour and Physiology, 査読有, 14(4), 2014, 265-272  
DOI:10.1080/10236244.2014.926128

Tsukamoto, K., S. Watanabe, M. Kuroki, J. Aoyama, M. J. Miller, Freshwater habitat use by a moray eel species, *Gymnothorax polyuranodon*, in Fiji shown by otolith microchemistry. Environmental Biology of Fishes, 査読有, 97, 2014, 1377-1385  
DOI:10.1007/s10641-014-0228-9

Watanabe, S., J. Aoyama, K. Tsukamoto, On the Identities of *Anguilla borneensis*, *A. malgumora*, and *Muraena malgumora*, Copeia, 査読有, 2014(3), 2014, 568-576  
doi: <http://dx.doi.org/10.1643/C1-14-059>

Watanabe, S., M. J. Miller, J. Aoyama, K. Tsukamoto, Evaluation of the population structure of *Anguilla bicolor* and *A. bengalensis* using total number of vertebrae and consideration of the subspecies concept for the genus *Anguilla*, Ecology of Freshwater Fish, 査読有, 23(1), 2014, 77-85  
DOI: 10.1111/eff.12076

Watanabe, S., M. Iida, C. Lord, P. Keith, K. Tsukamoto, Tropical and temperate freshwater amphidromy: a comparison between life history characteristics of Sicydiinae, ayu, sculpin and galaxiids. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 査読有, 24(1), 2014, 1-14.  
doi:10.1007/s11160-013-9316-8.

[学会発表](計11件)

Watanabe, S., Internal Tide and eel spawning aggregation, Eel Planet International Symposium, 29 Nov. 2016,

College of Bioresource Sciences, Nihon University (Fujisawa, Kanagawa).

渡邊 俊・萩原聖士・Michael J. Miller・町田真道・小松幸生・西田周平・塚本勝巳, 東シナ海における産卵直前のゴテンアナゴ *Ariosoma meeki* の雌雄親魚の採集報告, 平成28年度日本水産学会春季大会, 2016年3月27日, 東京海洋大学品川キャンパス(東京都港区)

渡邊 俊, 親ウナギの産卵回遊生態, うなぎプラネット, 2015年12月19日, 日本大学生物資源科学部 (神奈川県藤沢市)

渡邊 俊, 産卵生態研究のフロンティア. 鹿児島県ウナギ資源・増殖のための勉強会, 2015年10月29日, ホテルウェルビューかごしま(鹿児島県鹿児島市)

渡邊 俊・眞鍋諒太郎・金子裕紀・青山 潤・塚本勝巳, *Anguilla celebesensis* の産卵回遊行動, 第48回日本魚類学会年会, 2015年9月5日, 近畿大学農学部(奈良県奈良市)

渡邊 俊, 産卵生態研究のフロンティア, うなぎの未来III, 2015年7月19日, 東京大学農学部弥生行動一条ホール(東京都文京区)

Watanabe, S., Eel fisheries and resources in Japan, Eel Planet International Symposium, 28 June 2015, Nihon Daigaku Kaikan (Chiyoda, Tokyo)

渡邊 俊・三輪哲也・福場辰洋・沖野龍文・丸山奏子・岡村明浩・佐藤優太・水品亜由菜・樋口貴俊・竹内 綾・宮尾萌莉・加来 剛・坂本洋平・Michael J. Miller・塚本勝巳, ニホンウナギの産卵回遊生態の解明に向けて, 平成27年度日本水産学会春季大会, 2015年3月30日, 東京海洋大学品川キャンパス(東京都港区)

渡邊 俊・加来 剛・眞鍋諒太郎・塚本勝巳, 産卵場におけるニホンウナギの遊泳行動, 平成27年度日本水産学会春季大会, 2015年3月30日, 京海洋大学品川キャンパス(東京都港区)

渡邊 俊・唐木田望都・能代正治・谷本 晃・金子裕紀・加来 剛・眞鍋諒太郎・塚本勝巳, ウナギの産卵回遊行動の研究におけるポップアップタグ技法の検討と展望, 平成27年度日本水産学会春季大会, 2015年3月30日, 東京海洋大学品川キャンパス(東京都港区)

Watanabe, S., M. Kuroki, M. J. Miller, J. Aoyama, T. Pickering, P. Sasal, K. Tsukamoto, Primary biological parameters for conservation of tropical eels in the South Pacific Ocean, 144th annual meeting American Fisheries Society, 19 Aug. 2014, Quebec Convention Center (Quebec, Canada)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
渡邊 俊 (WATANABE, Shun)  
近畿大学・農学部・講師  
研究者番号: 60401296

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
なし