



人類が初めて目にした天然ウナギ卵 —ウナギ産卵場 2000 年の謎を解く—

文責 塚本勝巳（東京大学大気海洋研究所教授）

【要 旨】

2008 年より共同でウナギ産卵場調査に取り組んできた東京大学海洋研究所（現東京大学大気海洋研究所）と水産総合研究センターは、海洋研究開発機構の学術研究船・白鳳丸、水産庁の調査船・開洋丸と照洋丸、水産総合研究センターの調査船・北光丸、水産大学校の練習船・天鷹丸、北海道大学の練習船・おしよる丸を動員して大規模なウナギ研究航海をマリアナ諸島沖に展開しました。

その結果、2009 年 5 月の新月、ついに世界初の天然ウナギ卵 31 粒を西マリアナ海嶺南端部で採集することに成功しました。これは、東アジア全体に広く分布するニホンウナギの産卵場の位置とタイミングを厳密に特定する決定的証拠となりました。また、古代ギリシャのアリストテレスを悩ませた 2000 年におよぶウナギ産卵場の謎が、完全に解明された瞬間といえます。また、開洋丸と北光丸が捕獲した親ウナギの解析も急ピッチで進み、回遊生態、産卵習性、繁殖生理に関する詳細な新発見が数多く得られました。これらの知見は、人工シラスウナギの種苗生産技術の開発に大きなブレークスルーをもたらすと同時に、世界的に激減したウナギ資源の保全と国際管理のための貴重な科学的根拠になるものと期待されます。

これらの成果は英雑誌 *Nature Communications*（2011 年 2 月 1 日付け）に掲載されました。

<http://www.nature.com/ncomms/journal/v2/n2/full/ncomms1174.html>



白鳳丸・JAMSTEC 学術研究船



開洋丸・水産庁漁業調査船

【背景と目的】

古代ギリシャのアリストテレスは、有名な著書「動物誌」の中で「ウナギは泥の中から自然発生する」と書いた。どこにも卵をもった親ウナギや生まれたての稚魚が見つからなかったためだ。アリストテレスを悩ませたウナギの繁殖生態の解明に大きな一歩を踏み出したのは、デンマークの海洋生物学者ヨハネス・シュミット博士である。20世紀の初頭、シュミット博士は大西洋のサルガッソー海において、“レプトセファルス”と呼ばれるウナギの小さな仔魚を多数採集し、ここがヨーロッパウナギとアメリカウナギの産卵海域であることを明らかにした (Schmidt 1922)。これに触発され、太平洋でも東アジアに分布するニホンウナギの産卵場を見つけようという気運が盛り上がった。

1973年には、東京大学海洋研究所（現 東京大学大気海洋研究所）の研究船・白鳳丸（現 海洋研究開発機構所属）を用いて、全国共同利用の研究者による本格的なウナギ産卵場調査が始まった。その結果、1973年には台湾東方海域で体長約 50 mm の仔魚が 52 尾 (Tanaka 1975)、1986年にはフィリピン・ルソン島東方海域で約 40 mm の仔魚が 21 尾採集された (Kajihara 1988) (図 1)。その後さらに東の海域で、鹿児島大学の敬天丸が 20-30 mm 前後の仔魚を 1988年と 1990年に、それぞれ 7 尾と 21 尾採集した (Ozawa et al. 1989, 1991)。1991年には、白鳳丸がマリアナ諸島西方海域で 10 mm 前後の仔魚を約 1000 尾採集し、これによってニホンウナギの産卵場はマリアナ諸島西方海域とほぼ特定された (Tsukamoto 1992)。つまり、ニホンウナギの推定産卵場の歴史的推移は、仔魚の輸送経路を遡っていくことにより、まず黒潮流域の沖縄南方海域、台湾東方海域からフィリピン・ルソン島東方海域へ南下していき、さらに北赤道海流を遡行・東進してマリアナ諸島西方海域に到達した。これに伴い、採集されるレプトセファルスのサイズは徐々に小さくなっていった (図 1)。すなわち、ウナギの産卵場調査の歴史は、広大な海の中でより小さいレプトセファルスを求め続けた歴史といえる。

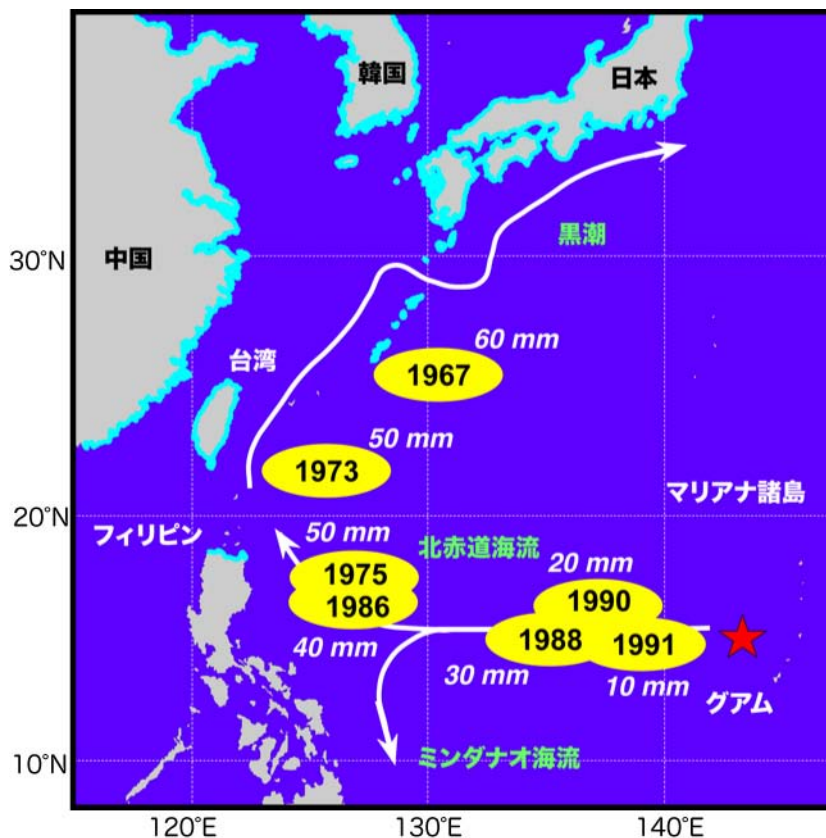


図 1 太平洋におけるニホンウナギの推定産卵場の歴史的変遷。図中楕円はこれまでの推定産卵場の位置。中の数字は根拠となった調査が行われた年。傍らの数字はその時採集されたレプトセファルスのおおよその全長。星印は現在の推定産卵場。太く塗りつぶした陸地の部分はニホンウナギの分布域。

得られたレプトセファルスの全採集記録を、海流データや海底地形と合わせて詳しく解析してみると、ニホンウナギの産卵場はマリアナ諸島の西に横たわる西マリアナ海嶺の海山域と推定された (海山仮説) (Tsukamoto et al. 2003)。また、耳石から求めたレプトセファルスの日齢査定結果から、産卵は各月の新月 (実際には新月の 2-4 日前) に同期して一斉に起こるものと考えられた (新月仮説) (Tsukamoto et al. 2003)。これら 2 仮説に基づいて調査を継続した結果、2005 年 6 月の新月当日、西マリアナ海嶺南部のスルガ海山西方で、ふ化後わずか 2 日目のプレレプトセファルス (全長 5 mm 前後) 計 130 尾が採集さ

れた。産卵後の経過日数と海流から逆算すると、この時の産卵はまさにスルガ海山近傍で行われたことが明らかになった (Tsukamoto 2006)。これはウナギの個々の産卵イベントをピンポイントで特定することに成功した初めての事例であり、またこれによってニホンウナギの産卵場は南部西マリアナ海嶺の海山域であることが確定的となった。

これらの結果に基づき、水産総合研究センターは2008年から3年計画で、国際資源調査事業の一環として水産庁・開洋丸の「ウナギ産卵場における親魚の捕獲調査」を計画した。得られた天然親ウナギの生理状態をお手本として人工種苗生産技術の革新を図るためである。この調査は東京大学が同期間に計画していた白鳳丸によるウナギ産卵場調査航海との共同研究として実施され、計画の2年目(2009年)には開洋丸、白鳳丸の他に、水産総合研究センターの北光丸、水産大学の天鷹丸が加わり、また3年目(2010年)には、北海道大学のおしよ丸と水産庁の照洋丸も調査に参加した。なお、こうした官学共同の大規模な調査航海は海洋学上、水産学上初めての試みである。

2008年5-9月の新月、開洋丸はマリアナ海域のトロール調査で、産卵後の親ウナギ5尾の捕獲に成功した (Chow et al. 2009, Kurogi et al. in press)。内2尾(ニホンウナギ雌)はスルガ海山近傍で、また3尾(ニホンウナギ雄2、オオウナギ雄1)はスルガ海山の南約100kmの海山域で捕獲され、産卵場は西マリアナ海嶺の南端付近にまで広がっていることが示された。この一連の調査で、上記海山仮説と新月仮説はほぼ実証された。しかしながらこの時点では、まだ産卵の決定的証拠となるウナギ卵や産卵中の親ウナギは発見されていなかった。

一方、世界のウナギ資源は、近年減少の一途を辿っている (図2)。盛時の1%以下の資源水準にまで激減したヨーロッパウナギは、2007年以降CITES(ワシントン条約)付属書IIや国際自然保護連合のレッドデータブックに記載されるに至った。東アジア全域に広く分布するニホンウナギは、台湾、中国、韓国、日本が共有する重要な水産資源であるが、養殖用種苗に用いられるシラスウナギの漁獲量は1970年代をピークに減少を続け、今では盛時の10-20%にまで落ち込んだ。原因として乱獲や河川環境の劣化があるが、近年では温暖化やエルニーニョなど地球規模で起こる海洋環境の変動が仔魚の回遊経路に影響し、東アジアに來遊するシラスウナギの量を大きく左右する要因として注目されている (Kim et al. 2007)。

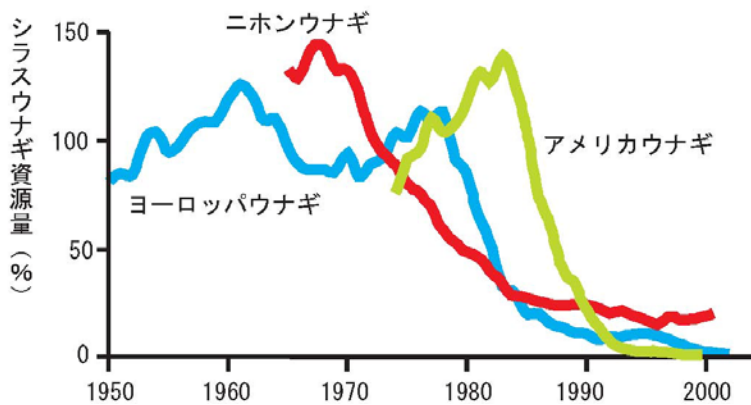


図2 ウナギ資源の世界的激減

減少を続ける養殖用シラスウナギ種苗の安定供給を目指して、人工的にシラスウナギを生産するための生理学的基礎研究が、1960年代より東京大学と北海道大学で始まった。その後、静岡、愛知、千葉各県の水産試験場、さらには水産庁養殖研究所(当時)が加わり、ウナギの人工種苗生産技術の開発研究が続けられてきた。2002年には養殖研究所が人工レプトセファルスを変態させ、シラスウナギを得ることに成功した (Tanaka et al. 2003)。また2010年3月、水産総合研究センターは人工シラスウナギを親ウナギに仕立てて採卵することに成功し、さらには2010年8月にはこれより二世代目の人工シラスウナギを得る、完全養殖のサイクルを完結させることにも成功した。しかし、順調に発展してきた人工種

苗生産技術の開発研究であるが、現在でも依然として産業レベルで養殖用シラスウナギ種苗を大量に生産する技術の完成に至ってはいない。

こうした状況の中で、2008年から3年間実施された白鳳丸と開洋丸を中心とするウナギ共同研究航海では、以下の3項目を主目的とした。

- 1) 天然海域でウナギ卵とウナギ親魚を得て、その産卵生態を解明する。
- 2) 天然卵・親魚の生理・生態情報をウナギ人工種苗生産技術の開発に活かす。
- 3) 得られた知見をウナギ資源の保全と国際管理方策の立案に資する。

【成果の概要】

東京大学と水産総合研究センターは、全国諸大学のウナギ研究者と共にニホンウナギの産卵生態に関する共同調査研究を実施し、以下の成果を得た。成果は2011年2月1日付け英雑誌 *Nature Communications* に発表される（以下の【発表論文】）。

1) ウナギ卵の発見

2009年5月22日未明（新月の2日前）、白鳳丸（海洋研究開発機構）は西マリアナ海嶺南端部の海山域でニホンウナギの受精卵を31個採集した（**図3**）。採集地点は、塩分の高い水塊と低い水塊が接して出来る塩分フロントと西マリアナ海嶺の海山列が交わった点で（**図4**）、親ウナギが産卵海域に形成される塩分フロントを目安に産卵地点を決めるというフロント仮説（Tsukamoto 1992, Kimura et al. 1994）を裏付けるものであった。卵が分布する水域は極めて狭く、10km四方に限られた。卵は船上で直ちにリアルタイムPCRにより遺伝子解析され、ニホンウナギと種査定された。これらはさらに陸上でミトコンドリアDNAの塩基配列が詳しく解析され、ニホンウナギであることが確認された。卵は広い囲卵腔をもった胚体期のもので、直径は平均1.6mm、受精後約30時間、新月3日前の夜間産卵されたものと推定された。翌23日に採集された卵には、船上で観察中に孵化したものもあった（**図3**）。

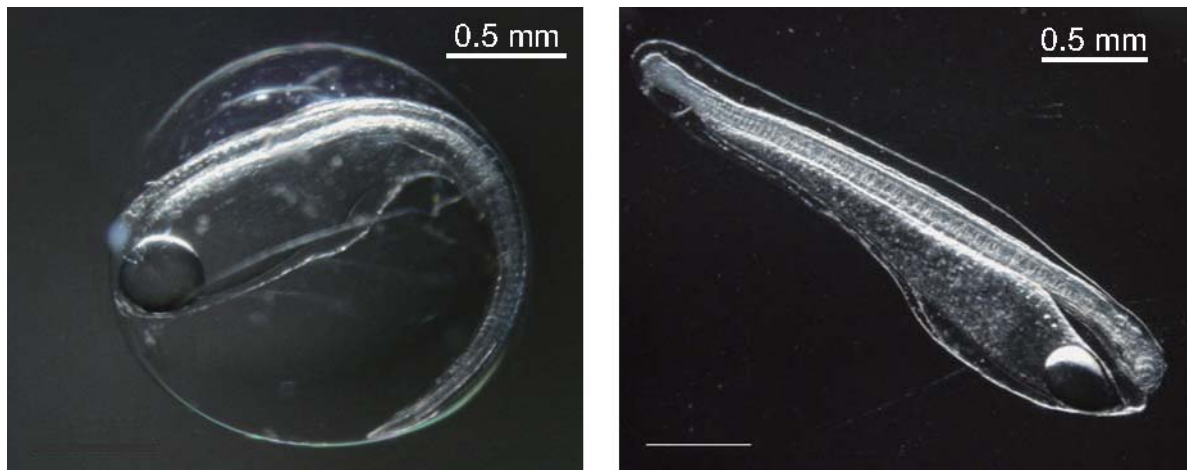


図3 2009年5月の白鳳丸研究航海で採集された天然ニホンウナギ卵（左）と船上で孵化したニホンウナギ仔魚（右）。

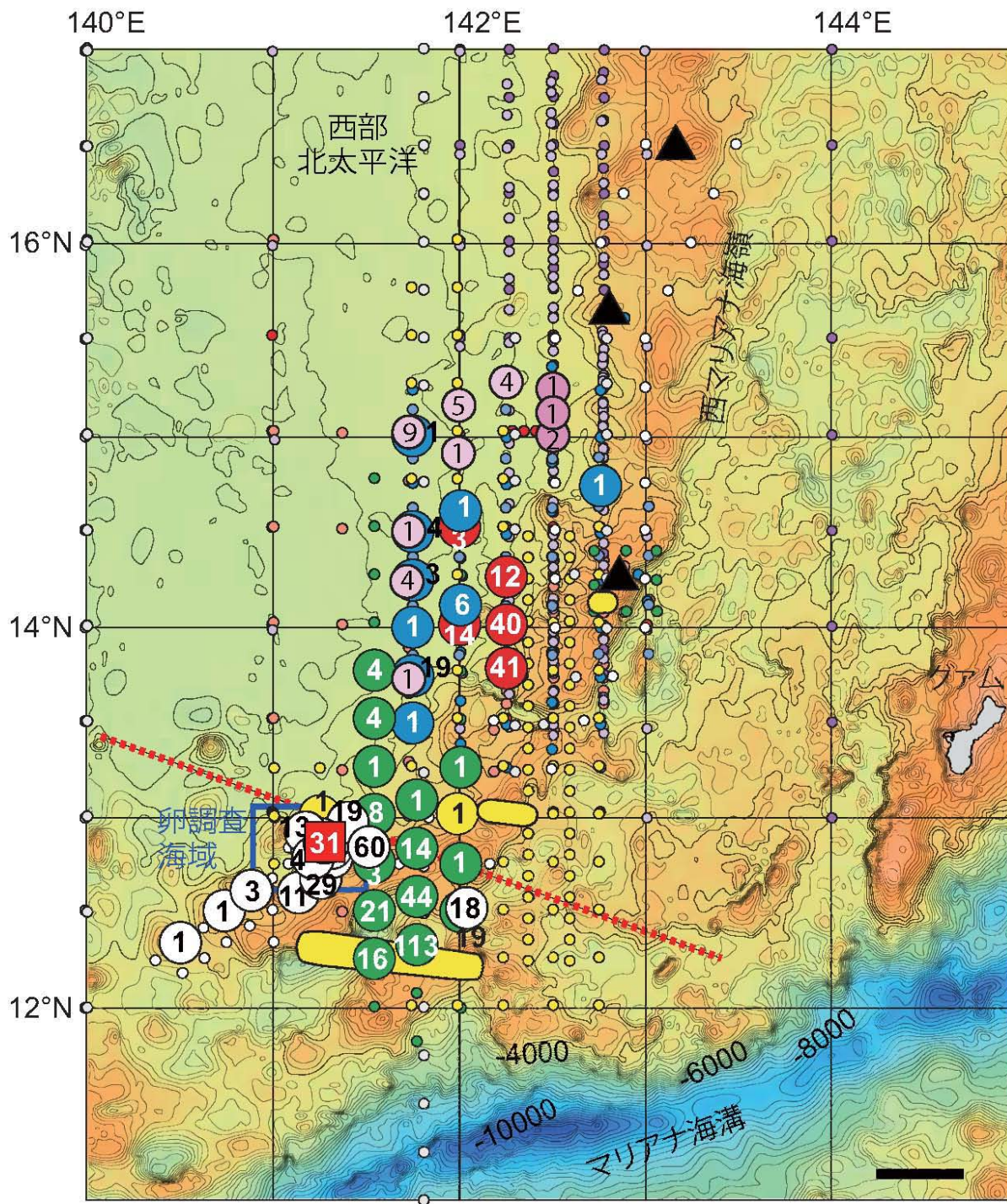


図4 西マリアナ海嶺の南部海山域における白鳳丸の調査地点とウナギ卵およびプレレプトセファルスの採集地点（2005-2009年）。赤の四角はウナギ卵採集地点と採集数。大きい丸と中の数字はプレレプトセファルスの採集地点と採集尾数（赤：2005，青：2007，緑：2008 Leg1，黄：2008 Leg2，白：2009）、小さい丸は調査したもの、卵もプレレプトセファルスも採れなかった地点。青い四角はウナギ卵採集地点周辺で集中的調査が行われた場所（Egg Grid）。薄赤の陰影部は2006，2007年にオオウナギのプレレプトセファルス29尾が採集された10地点の範囲。赤破線は2009年5月時点の塩分フロントの位置。西マリアナ海嶺の海山列と塩分フロントの交点の直南でウナギ卵が採集された。年を追うに従い、ニホンウナギ・プレレプトセファルスの採集される地点が南下する傾向がある。

2) 産卵水深の情報

卵が採集された地点で、大型プランクトンネットを水深別に水平曳網したところ、ウナギ卵から孵化したばかりのプレプトセファルスが水深 160m 層で多数採集され、その上下の層ではほとんど採集されなかった（図 5）。この海域は所々に比較的低い海山が点在する海山域ではあるが、平均すると水深 3000-4000m の深い海である。そうした深海域の表層近くに孵化直後のプレプトセファルスが集中分布していたことになる。160m 層は丁度水温が急激に変化する温度躍層の最上部にあたり、また植物プランクトンやその死骸が集積してクロロフィル濃度が最大になる層（150m）の直下である。おそらく水深 200m 前後で産卵された卵は、海水より軽いため発生に伴ってゆっくりと浮上し、その後孵化したプレプトセファルスは海水の密度が大きく変わる温度躍層に集積したものと考えられる。

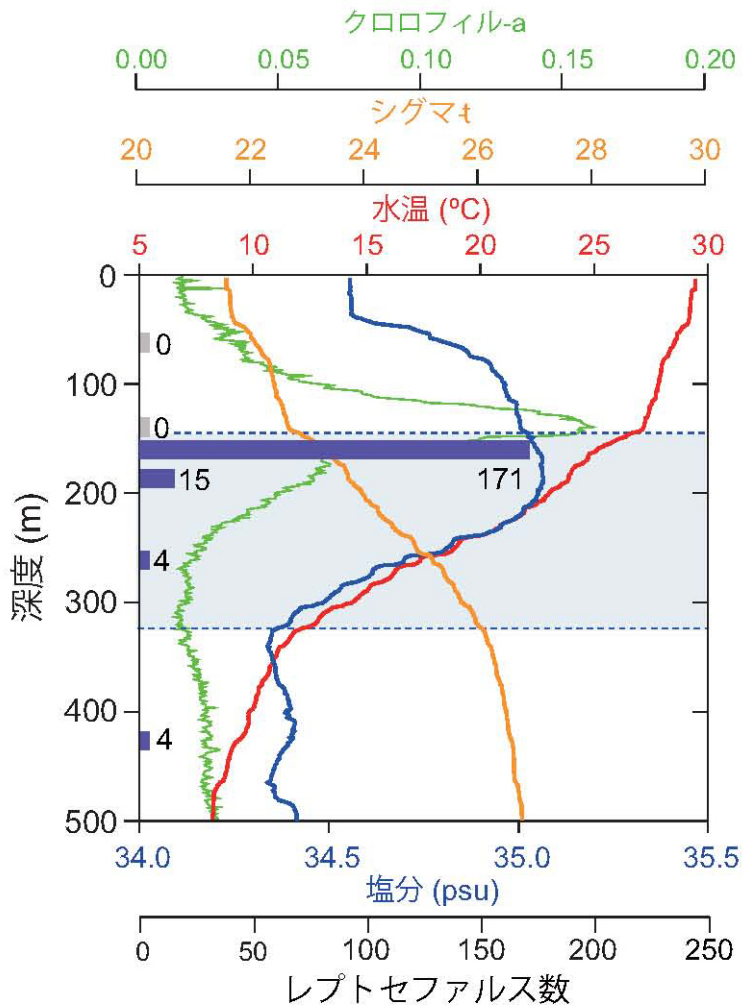


図5 ウナギ卵が採集された地点の水温（赤）、塩分（青）、クロロフィル濃度（緑）、密度（黄）の鉛直分布とプレプトセファルス（紫棒グラフ）の分布水深（2009年5月23日）。プレプトセファルスは水深160mに集中し、その上は皆無、下は極わずかに（おそらく160m層からのコンタミ）採集がある。160mは温度・密度が急激に変化する躍層（陰影部）の最上層で、クロロフィル極大層の直下にあたる。

3) 2種のウナギ親魚の大量捕獲

ウナギ卵が採集された海域において2009年6月の新月期に実施した開洋丸と北光丸の調査航海でニホンウナギ親魚8尾(雄4、雌4)とオオウナギ親魚2尾(雄1、雌1)を捕獲した(図6)。これで2008、2009年を合わせ、ニホンウナギ計12個体(雄6、雌6)とオオウナギ計3個体(雄2、雌1)が西マリアナ海嶺南端部で捕獲されたことになる。これらの全長は、ニホンウナギ雄が447~639mm、雌が555~767mmで、雌が雄より有意に大きかった。またオオウナギの雄は457と623mm、雌は1223mmであった。特筆すべきは、これら2種のウナギが同一の曳網で捕獲されたということで、これは異なる2種が同じ産卵場で産卵していることを示している(同所的産卵)。

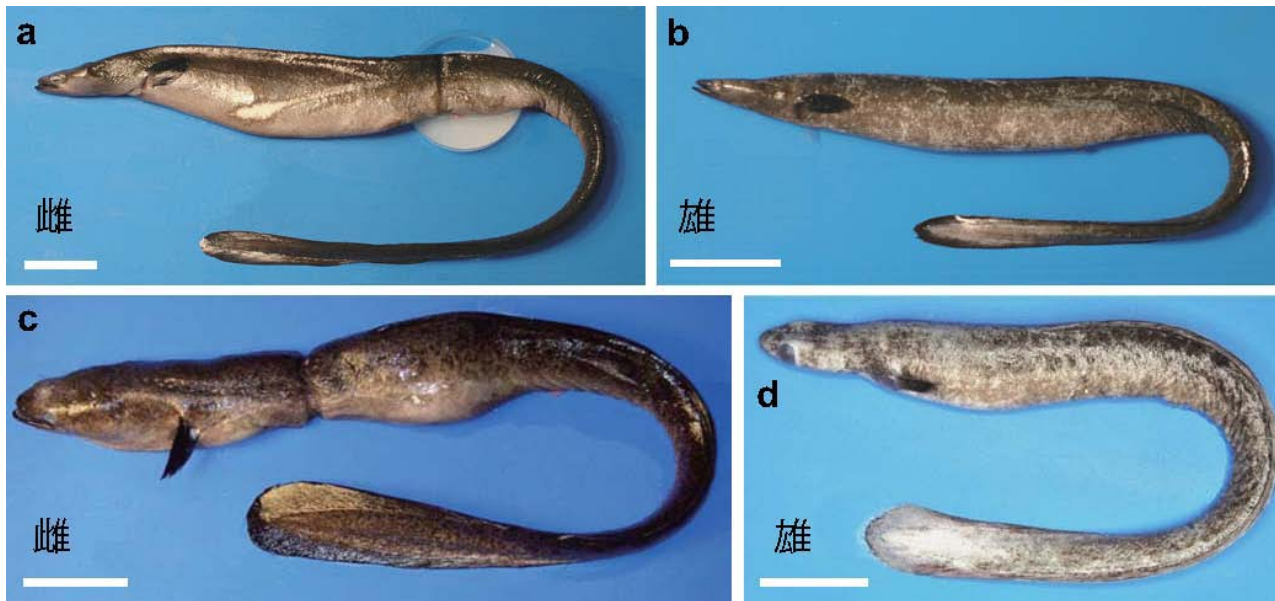


図6 2009年6月の開洋丸調査航海で捕獲されたニホンウナギ *Anguilla japonica* とオオウナギ *Anguilla marmorata* の産卵親魚。 a: 2009年6月23日の新月当日に捕獲された全長749mm、体重244gの雌ニホンウナギ(生殖腺指数GSI: 13.1%、体重に対する生殖腺の重量比で、成熟度の目安)。腹腔に162gの排卵卵を残していた。皿の中に一部流出。何らかの理由で6月の産卵イベント時に放卵出来なかったものと考えられる。 b: 2009年6月22日の新月前日に捕獲された全長447mm、体重129gの雄ニホンウナギ(GSI: 40.3%)。 c: 雌オオウナギ、全長1,223mm、体重2,496g、GSI: 11.4%。この個体は、上記aの雌ニホンウナギ同様、トロール網の目合いの大きな袖網部に引っかかって捕獲されたため、網のロープに体が締め付けられて体がくびれて見える。 d: 雄オオウナギ、全長457mm、体重190g、GSI: 25.3%。この個体はトロール網最後端の魚捕り部で捕獲されたため、雌魚に比べて体のダメージは少ないが、網目によるひっかけ傷が体表に多い。(a, b, dのスケールバーは50mm, cは100mm)

4) 産卵親魚の解析結果

得られた2種の雄ウナギはいずれもよく発達した精巢をもち、腹部を押すと精液が出る個体もいた。2008年8月末に捕獲されたニホンウナギの雌2個体の卵巣は退縮し、産卵後かなり時間の経ったものと考えられたが、2009年6月捕獲のニホンウナギとオオウナギの雌の卵巣には、いずれもかなり発達した卵細胞が多数存在しており、後に産卵可能と考えられた(図7)。一方これらの個体の卵巣を組織切片にしてみると、過去の排卵経験を示す多数の排卵後濾胞が認められ、既に1回以上産卵していると考えられた。これはウナギが1産卵期に2回以上の複数回産卵することを示す。どの位の間隔で何回産むか、一度産卵した後、いかにして次の新月期の産卵まで産卵場に留まっているのか、今のところ不明である。なお新月の日に捕獲された雌のニホンウナギ3個体の内、1個体は発達途上の卵巣と同時に、すでに排卵された卵を体内に多数もっていた。この卵は何らかの原因でその月の新月期には産卵されず、すでに体内で退行・再吸収の途上にあるものと考えられた。

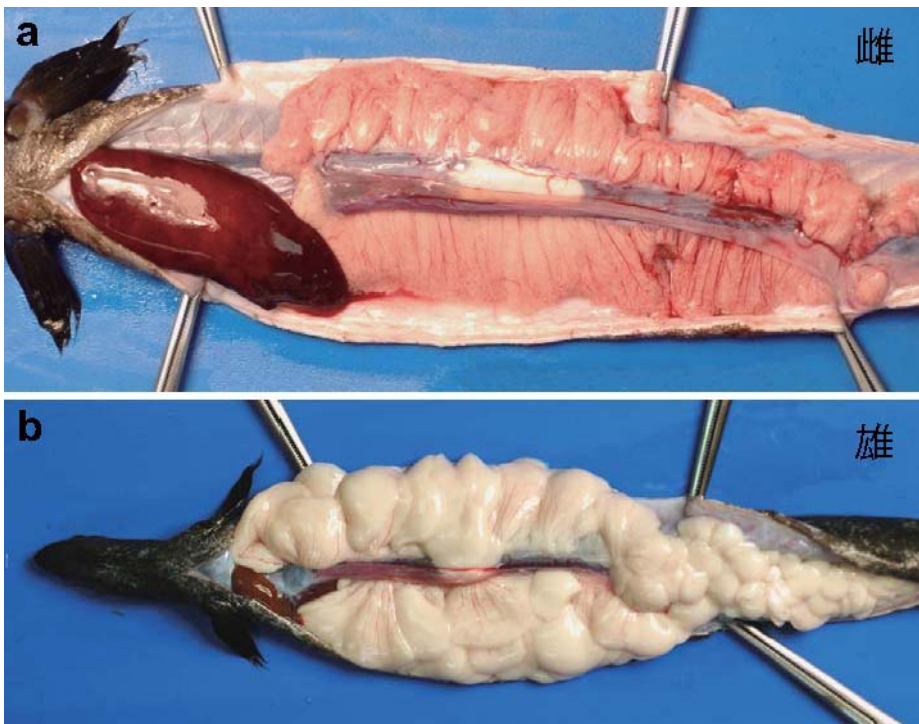


図7 2009年6月の新月期に西マリアナ海嶺南端部で採集されたニホンウナギ親魚の生殖巣。 a: 産卵後の雌ニホンウナギ(全長739mm, 体重330g, GSI:11.2%)。次の産卵に向けて卵巣内の卵細胞が発達途上にあり、1ヶ月か2ヶ月後の新月に再び産卵するものと考えられる。餌はとらないため、消化管は退行しているが、肝臓は大きく、健康な鮮紅色をしている。 b: 2009年6月の新月期に同海域で採集された、よく発達した精巢をもつ雄ニホンウナギ(全長447mm, 体重129g, GSI:40.3%、図6のbと同一の個体)。採捕されたとき船上で放精した。

5) 産卵地点の南下傾向

2005年から得られるようになったプレプトセファルス、2008年以来の親ウナギ、および今回の卵の採集地点をすべて地図上にプロットしてみると(図4)、ニホンウナギの産卵地点は1990年代に比べ、近年は200~300kmほど南下している傾向が窺える。産卵地点の南下は、近年のエルニーニョ頻発に関連した塩分フロントの南下が関係しており(Kim et al. 2007)、これが東アジアに来遊するシラスの量を大きく左右している可能性がある。数値シミュレーションによると、南で産卵が起きた場合には、プレプトセファルスの回遊経路が南にずれ、黒潮に入って東アジアに北上来遊するシラスが減る。

【意 義】

上記の成果は、基礎・応用の両面で大きな意義をもつ。すなわち、生物学と海洋学の基礎面では、これまで謎に包まれていたウナギの産卵生態の解明に貢献した。一方応用面では、ウナギの人工種苗生産技術の開発を促進し、ウナギ資源の保全と国際管理方策の立案に必要な情報を提供した。個々の成果の意義は以下の通り。

1) ウナギ卵の発見

今回採集に成功したウナギ卵は、歴史的に人類が初めて目にする天然の卵である (図 3)。世界に 19 種・亜種いるウナギの中で、これまで卵が発見されたものは一種たりともない。またこのウナギ卵発見は、あるひとつの産卵イベントの場所とタイミングを正確に示す決定的証拠として重要である。これらの卵の形態や性状は、ホルモン注射した親ウナギから人工授精を経て得られる人工卵のお手本となり、現在人工種苗生産技術の開発研究において大きな問題となっている卵質の改善に役立つ。

2) 産卵水深の情報

産卵水深が約 200m と推定できたことで、従来漠然と信じられていたウナギの産卵が深海底で起こるといふ俗説を排し、深い海域ではあるがその比較的浅い層で産卵が起こるといふ新たな事実がわかった (図 5)。この発見により、人工種苗生産で親ウナギに与えればよい産卵環境条件 (水温、塩分、光条件など) が明らかになった。これもまた卵質の向上につながる。同時に、孵化した仔魚の最適な飼育環境条件を知ることが出来た。さらにプレプトセファルスが集積した水深 (160m) は、クロロフィル極大層 (150m) の直下であったことから、人工種苗生産で最大の難問となっているレプトセファルスの餌の開発に有力な示唆が得られるものと考えられる。

3) 2 種のウナギの同所的産卵

近縁のウナギ属魚類の 2 種が同所的に繁殖しているにもかかわらず、多くのハイブリッドができないのは、両者の間に当然何らかの生殖隔離メカニズムが存在しているはずである。この生殖隔離機構を解明することによりウナギの種分化機構について理解が深まる。また、産卵場を共有する 2 種の産卵生態の違いを明らかにすることで、地理分布の成立過程と回遊行動の進化過程における両種の相違点を考察することができる。さらにその比較によって、そもそもウナギがなぜ回遊するかという根本命題の解明に大きな手がかりが得られる。

4) 産卵親魚の解析結果

得られた天然の親ウナギは、直ちに人工種苗生産で用いる親魚のお手本となる。またそのホルモンレベルや遺伝子の発現状態を知ることによって、親魚の卵質の向上を図ることができる (図 7)。さらに複数回産卵の発見から、人工親魚を 2 回以上採卵に使えることが実証され、親魚の有効利用が出来るようになる。

5) 産卵地点の南下傾向

今後、エルニーニョ、塩分フロントの南下、産卵地点の南下 (図 4) およびシラスウナギ資源の変動の因果関係が明確になることで、東アジアに來遊するシラスウナギのより信頼性の高い資源予測が可能となる。さらには、ウナギ資源の保全対策立案のために、科学的根拠に基づく提案ができるようになる。

【展 望】

今回のウナギ卵発見により、探検的ウナギ産卵場調査の時代は終わった。これからはより詳細な海洋学的、生物学的研究が始まる。広い海の中のピンポイントともいえる限られた地点に雄ウナギと雌ウナギは何を目印に集まることができるのだろうか？親ウナギの回遊ルートはどこか？そもそも何故ウナギは何千キロもの大回遊をしなくてはならないのか？ 研究の課題は尽きない。

一方で、これからはウナギ産卵場調査の応用的展開が強く望まれる。世界的に激減しているウナギ資源を保全するために、早急に資源変動メカニズムを解明しなくてはならない。それには周到に計画された、産卵場における親ウナギと仔魚密度の定期的資源調査が必要である。これらの信頼できる定量的科学データに基づいて、ウナギの国際資源管理に着手しなければ、中国、台湾、韓国、日本の共有資源であるニホンウナギの将来は危うい。同時に天然ウナギ資源の過度の利用を抑えるために、人工シラスウナギの大量生産の実用化を急がねばならない。人工種苗生産技術の実用化に必須の天然のお手本と海洋環境データを集積するためにも、今後も調査船による研究航海が必要である。

【発表論文】

タイトル : Oceanic spawning ecology of freshwater eels in the western North Pacific
(北太平洋西部の海洋におけるウナギの産卵生態)

著者 : Katsumi Tsukamoto¹, Seinen Chow², Tsuguo Otake¹, Hiroaki Kurogi², Noritaka Mochioka³, Michael J. Miller¹, Jun Aoyama¹, Shingo Kimura¹, Shun Watanabe¹, Tatsuki Yoshinaga⁴, Akira Shinoda¹, Mari Kuroki⁵, Machiko Oya¹, Tomowo Watanabe², Kazuhiro Hata⁶, Shigeo Ijiri⁷, Yukinori Kazeto², Kazuharu Nomura², Hideki Tanaka⁸

所属 : 1. Atmosphere and Ocean Research Institute (東京大学大気海洋研究所), 2. Fisheries Research Agency National Research Institute of Fisheries Science (水産総合研究センター中央水産研究所) 3. Faculty of Agriculture, Kyushu University (九州大学農学研究院), 4. School of Marine Biosciences, Kitasato University (北里大学海洋生命科学部) 5. The University Museum, The University of Tokyo (東京大学総合研究博物館), 6. National Fisheries University (水産大学校), 7. Hokkaido University (北海道大学水産科学研究所) .8. Fisheries Research Agency National Research Institute of Aquaculture (水産総合研究センター養殖研究所)

掲載誌 : *Nature Communications* 2月1日付け (オンライン誌)

<http://www.nature.com/ncomms/index.html>
(日本語サイト) <http://www.natureasia.com/japan/ncomms/>

【文 献】 (abc 順)

- Chow, S., Kurogi, H., Mochioka, N., Kaji, S., Okazaki, M. & Tsukamoto, K. (2009). Discovery of mature freshwater eels in the open ocean. *Fisheries Science*. 75, 257-259.
- Kajihara, T. (1988). Distribution of *Anguilla japonica* leptocephali in Western Pacific during September 1986. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 54, 929-933.
- Kim, H., Kimura, S., Shinoda, A., Kitagawa, T., Sasai, Y. & Sasaki, H. (2007). Effect of El Niño on migration and larval transport of the Japanese eel, *Anguilla japonica*. *ICES Journal of Marine Science* 64, 1387-1395.
- Kimura, S., Tsukamoto, K. & Sugimoto, T. (1994). A model for the larval migration of the Japanese eel: roles of the trade winds and salinity front. *Marine Biology* 119, 185-190.
- Ozawa, T., Tabeta, O. & Mochioka, N. (1989). Anguillid leptocephali from the western North Pacific east of Luzon in 1988. *Nippon Suisan Gakkaishi* 55, 627-632.
- Ozawa, T., Kakizoe, F., Tabeta, O., Maeda, T. & Yuwaki, Y. (1991). Japanese eel leptocephali from

- three cruises in the western North Pacific. *Nippon Suisan Gakkaishi* 57, 1877-1881.
- Schmidt, J. (1922). The breeding places of the eel. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* 211, 179-208.
- Tanaka, S. (1975). Collection of leptocephali of the Japanese eel in waters south of the Okinawa Islands. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 41, 129-136.
- Tanaka, H., Kagawa, H., Ohta, H., Unuma, T. & Nomura, K. (2003). The first production of glass eel in captivity: fish reproductive physiology facilitates great progress in aquaculture. *Fish Physiology and Biochemistry* 28, 493-497.
- Tsukamoto, K. (1992). Discovery of the spawning area for the Japanese eel. *Nature* 356, 789-791.
- Tsukamoto, K. (2006). Spawning of eels near a seamount. *Nature* 439, 929-929.
- Tsukamoto, K., Otake, T., Mochioka, N., Lee, T. W., Fricke, H., Inagaki, T., Aoyama, J., Ishikawa, S., Kimura, S., Miller, M. J., Hasumoto, H., Oya, M. & Suzuki, Y. (2003). Seamounts, new moon and eel spawning: The search for the spawning site of the Japanese eel. *Environmental Biology of Fishes* 66, 221-229.

【用語解説】 (アイウエオ順) (一部、小学館 SuperNipponica Professional X によった)

- 囲卵腔 (いらんこう)** : 動物卵の表面と卵を直接とりかこむ卵黄膜や受精膜との間にある隙間。ウナギ目魚類の卵は他の魚卵に比べ、特にこの間隙が広いことで知られる。
- エルニーニョ (えるにーにょ)** : 南アメリカのペルー、エクアドル沖で数年に一度、熱帯系の温暖水が突入する海洋の現象。最近の研究では、エルニーニョは現象的にはペルー沖の局所的なものでなく、太平洋全域の海洋、大気循環に密接に結び付いていることが明らかになってきた。ウナギ親魚の産卵と仔魚の回遊にもこのエルニーニョ現象が関係するといわれている (Kim et al. 2007)。
- 塩基配列 (えんきはいれつ)** : 遺伝子本体である DNA (デオキシリボ核酸) の並び順。
- 塩分フロント (えんぶんふろんど)** : 塩分が急激に変化する外洋の潮目 (しおめ)。マリアナ諸島沖のウナギ産卵場では塩分濃度 34.5 を目安にして、これより塩分濃度の高い水が北側に、低い水が南側に位置し、おおむね東西方向に横たわる顕著なフロントが形成される。東アジアの淡水域から南下してきた親ウナギは、この塩分フロントを北から南に横切り南の水塊に進入することで、自分の産卵海域に到達したことを知り、回遊をやめて、産卵行動の準備をはじめるといふ「塩分フロント仮説」が提出されている (Tsukamoto 1992, Kimura et al. 1994)。フロントにおける南北の塩分差は沿岸域の潮目に比べれば極わずかなものであるから、親ウナギは塩分の差自体を目印にして産卵場に到達したことを認知するのではなく、むしろそれ以外の水塊の特徴、例えば水塊特有の水の匂いなどをかぎ分けて産卵場を知るのではないかと考えられる。大西洋のウナギの産卵場とされるサルガッソー海には塩分のフロントではなく、温度フロントがある。
- 温度躍層 (おんどやくそう)** : 海や湖の内部で鉛直的に水温が急激な変化を示す層。水温躍層ともいう。同様な密度変化を示す層を密度躍層といい、水温躍層はほぼ密度躍層と一致するところが多い。密度が急激に変化する層には上層から沈降する粒子や下層から浮上するものが溜まりやすい。
- 海山 (かいざん)** : 大洋の底から 1000m 以上の高さでそびえる地形。西マリアナ海嶺の南端部にも頂上が海面下 2000-3000m にある低い海山が連なって海山列を形成している。
- 海山仮説 (かいざんかせつ)** : レプトセファルス分布と体サイズ、海流および海底地形から導き出された、産卵場所推定のための仮説で、ニホンウナギは西マリアナ海嶺のスルガ、アラカネ、パスファインダーの 3 海山を中心とする、西マリアナ海嶺の海山域で産卵するというもの (Tsukamoto et al. 2003)。
- 海嶺 (かいらい)** : 大洋の底にそびえる起伏の多い海底山脈。個々の海山は 1000-4000m の高さで、急傾斜の側面をもつ。
- 完全養殖 (かんぜんようしょく)** : ウナギの生活環の全段階を通じて、人間の手で養殖できるようになる

こと。受精卵からレプトセファルス、シラスウナギを経て親まで育て、これからまた次の世代の子ができるようになること。マダイやヒラメでは1970年代から全生活環を通じて完全養殖することが可能であったが、ウナギは仔魚期間が約半年～1年もかかり、この間の生残率も極めて低いため、2010年3月になって初めて人工シラスウナギから育てた親魚から(F₁)次世代(F₂)が得られ、その全生活環を人の管理下に置くことに成功した。しかし、事業化のための大量生産には至っていない。

クロロフィル(くろろふいる): 光合成を行う生物に広くみいだされる緑色の色素で、葉緑素ともいう。クロロフィル濃度が高いと、植物プランクトンやその死骸の濃度が高いことを示す。

国際自然保護連合(こくさいしぜんほごれんごう): 略称 IUCN。地球的規模と視野で、自然保護および天然資源保全のための調査研究、啓発活動、保護のための計画づくりとその政策提言などを行う国際的な団体。正式名称は「自然および天然資源の保全に関する国際同盟」であるが、一般的に「国際自然保護連合」The World Conservation Union と称している。

仔魚(しぎょ): 卵から孵化した後、親とほぼ同じ形質をもつ稚魚になるまでの間の幼生。親と大きく異なる形態をもつ仔魚も多く、仔魚から稚魚に発育段階が進む時大規模な形態変化を伴う変態をする。ウナギの場合、仔魚のレプトセファルス(最大伸長期で約60mm)から稚魚のシラスウナギへ変態する時、約5mm体長が縮む。

耳石(じせき): 内耳の中にある炭酸カルシウムからなる硬組織。耳石に一日に一本ずつできる同心円状の輪紋数を数えることで、孵化後何日経った個体であるか(日齢)わかる。また採集された日から日齢を差し引くことで、その個体の孵化した日付を推定できる。

シラスウナギ(しらすうなぎ): 稚魚期のウナギで、レプトセファルスが変態後に達する発育段階。全長55mm前後。レプトセファルスはシラスウナギに変態して、黒潮を離脱し、河口に向かって接岸する。変態に伴って約5mm体長が縮む。体に黒色素が発達するとクロコとよばれる段階になり、河川に遡上する。現在のウナギ養殖は、全てこの天然のシラスウナギを河口で捕らえて種苗としており、ウナギ資源に与えるインパクトは大きい。

新月仮説(しんげつかせつ): 耳石の日周輪によるレプトセファルスの孵化日推定の結果から導かれた産卵のタイミング推定のための仮説で、ニホンウナギは産卵期(初夏を中心とする4月から9月ごろまでの約半年間)の各月の新月の日と同期して一斉に産卵するというもの(Tsukamoto et al. 2003)。

人工種苗(じんこうしゅびょう): 人工的に成熟させた親から得た卵に由来する養殖・放流用の稚仔。ウナギでは、ホルモン投与して人為的に成熟させた親ウナギから受精卵を得、レプトセファルスを経てシラスウナギにまで育てた養殖用の種苗を指す。

数値シミュレーション(すうちしみゅれーしょん): 広範な海域の海流データをいれたコンピュータ上で、海洋生物の稚仔に見立てた粒子を放流し、その分散様式を推定するモデル実験。

生殖的な隔離機構(せいしよくてきなかくりきこう): 生物種が独立した種や集団として維持されるには、遺伝子の交流の無い状態が長期に亘って保たれなければならない、そのために異種間に存在する生物学的、物理化学的隔離のメカニズム。種間や集団間で生じている時間的、空間的産卵活動のズレおよび繁殖相手の生理学的・行動学的識別や遺伝学的不稔の状態を指す。

同所的産卵(どうしょてきさんらん): 同じ場所で別種の生物が産卵すること。遺伝子の交流が起こりやすく、ハイブリッドの生じる可能性がある。

日齢(にちれい): 孵化後の日数。動物の齢を一日単位で表したもの。ウナギレプトセファルスやシラスウナギにおいて、耳石に沈着する日周輪を耳石中心から縁辺まで計数することで各個体の日齢を推定することができる。採集日から逆算すれば孵化日(誕生日)もわかる。

胚体(はいたい): 多細胞動物において、卵割をはじめたあとの発生期にある個体の総称。ここでは狭義に、卵内において、早期の桑実胚・胞胚・原腸胚を除く、後期の胚の体部を指す。

排卵後濾胞(はいらんごろほう): 一定の成熟段階に達した卵細胞が卵巣から排出されたあと(排卵)、卵巣に残った胞状構造(濾胞)。濾胞は卵巣内で卵細胞を包み、卵黄素材などの供給を行って卵形成を助けるが、排卵後は役目を終え退縮する。排卵後濾胞が卵巣内にあることは少なくとも一度は排卵した個体であることを示す。

プレレプトセファルス(ぷれれぷとせふあるす): 母親由来の卵黄や油球などの栄養物質をもった段階の前期葉形仔魚。この間は卵黄や油球を栄養源として成長するが、これらを消費した後は、外界の餌を採り始め、レプトセファルス(後期葉形仔魚)となる。全長3～10mm前後。

ミトコンドリアDNA(みとこんどりあでいーえぬえー): 細胞内小器官であるミトコンドリアが持つ独自の遺伝子。

卵質(らんじつ):受精率や孵化率、あるいは生残率、成長率、奇形率などを指標にして評価する卵の質。

ウナギ養殖ではレプトセファルスの餌の問題と共に、大量種苗生産の壁となっている難問で、天然の親魚の正常な成熟過程、生理状態、産卵行動が解明されれば、天然ウナギ卵に匹敵する良質の人工卵が得られ、ウナギ人工種苗の大量生産の実現に大きく近づく。

リアルタイムPCR(りあるたいむ ぴーしーあーる):蛍光物質などを利用し、実験的な遺伝子増幅の様子を直接観察できる分析機器。この手法を用いてニホンウナギ特有の遺伝子が増幅されるかどうかを船上で確かめ、形態形質が未発達でニホンウナギか否か判別の難しい卵やプレレプトセファルスの種査定に用いる。

レッドデータブック(れっどでーたぶっく):絶滅の危機に瀕(ひん)している野生生物の現状を記録した資料集。野生生物を保護し、種の絶滅を防ぐには、まずそれぞれの種の置かれている生息の現状を科学的に把握しなければならない。そのため国際自然保護連合(IUCN)が、世界的な規模で絶滅のおそれのある野生の動植物の種を選び出し、その現状を明らかにするために編集・発行している。

レプトセファルス(れぷとせふあるす):アナゴ、ウツボ、ハモ、ウミヘビなど、ウナギの仲間の仔魚期の総称で、透明な柳の葉状の特徴的な形をしていることから葉形仔魚とも呼ばれる。ニホンウナギの場合、全長10~60 mm程度でおよそ半年間に亘りこの発育段階が続く。

ワシントン条約(わしんとんじょうやく):国際的取引を規制することにより、絶滅のおそれのある野生動植物を守り、将来にわたって持続的な利用が続くようにしようとする国際条約。正式名称は「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)。略称CITES(サイテス)。

【謝辞と経費】

本研究の成果は、海洋研究開発機構の学術研究船・白鳳丸、水産庁の開洋丸と照洋丸、水産総合研究センターの北光丸、水産大学校の天鷹丸、および北海道大学のおしよる丸によって得られた。研究航海の間、各船舶の乗組員と航海の運営支援にあたった陸上職員の各位には、終始暖かいご協力と適切なご助言を賜った。深く謝意を表す。

また本研究の一部は、以下の研究経費を用いて行われた。

- 1) 文部科学省・日本学術振興会科学研究費基盤S(平21~24)
- 2) 水産庁国際資源調査事業
- 3) 水産総合研究センター運営費交付金プロジェクト「天然ニホンウナギの資源生態調査」(平20~22)
- 4) 農林水産技術会議委託プロジェクト研究「ウナギおよびイセエビの種苗生産技術の開発」(平17~20)、「ウナギの種苗生産技術の開発」(平21~23)
- 5) 東洋水産東和会
- 6) 登亭のぼり会ウナギ基金