

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1228

October 2022

生物の繁殖場としての沿岸生息場の評価手法に関する検討 —東京湾内外のホソウミニナに関する事例—

秋山吉寛・内藤了二・岡田知也

Method for Assessing Coastal Habitats as Breeding Grounds for Marine Organisms
— Case Study of the Intertidal-Flat Snail *Batillaria attramentaria* in Tokyo Bay and
Adjacent Waters

AKIYAMA Yoshihiro B., NAITO Ryoji, OKADA Tomonari

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

生物の繁殖場としての沿岸生息場の評価手法に関する検討 ー東京湾内外のホソウミニナに関する事例ー

秋山吉寛*・内藤了二*・岡田知也**

要 旨

沿岸の生物生息場は繁殖場としての機能を持ち、周囲の生息場に生物を供給して、生物の充実に貢献する。東京湾内外の生息場が有する巻貝（ホソウミニナ）の繁殖場としての機能を評価するために必要な、本種個体群の成貝における繁殖可能な個体の割合（PFA）を予測するための手法を新規に開発した。繁殖能力が寄生生物によって失われておらず、生殖腺がよく発達しているため、繁殖可能と考えられる成貝を、簡易に得られる形態指標に基づき抽出するため、成熟度・寄生予測モデルを構築した。本手法は繁殖場としての質に基づく複数の生息場の相対評価や、1つの生息場の長期モニタリングの際に、活用が期待される。

キーワード：底生動物，分類木，繁殖可能個体，形態指標

* 沿岸海洋・防災研究部 主任研究官

** 沿岸海洋・防災研究部海洋環境・危機管理研究室 室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5019 Fax：046-844-9265 e-mail：ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Method for Assessing Coastal Habitats as Breeding Grounds for Marine Organisms — Case Study of the Intertidal-Flat Snail *Batillaria attramentaria* in Tokyo Bay and Adjacent Waters

AKIYAMA Yoshihiro B.*
NAITO Ryoji*
OKADA Tomonari **

Synopsis

Coastal habitats function as breeding grounds and supply organisms to surrounding habitats, contributing to the variety and quantity of organisms. We developed a new method for estimating the proportion of fertile adults in a population of the intertidal gastropod *Batillaria attramentaria*. Such estimates are necessary to evaluate the function of habitats as breeding grounds for this species in Tokyo Bay and adjacent waters in Japan. Using easily obtained morphological indicators as criteria, we constructed a model to estimate the maturity and parasite infection to identify snails with mature gonads that had not been made sterile by parasite infestation. This method would be useful for the relative evaluation of habitats and for the long-term monitoring of a single habitat in terms of their quality as breeding grounds.

Key words: benthic animal, classification tree, fertile adult, morphological indicators

* Senior Researcher of Coastal, Marine and Disaster Prevention Department

** Head of Marine Environment and Emergency Management Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5019 Fax: +81-46-844-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 方法	2
2.1 ホソウミニナの採集および測定	2
2.2 成熟度・寄生予測モデルの構築	9
2.3 成熟度・寄生予測モデルの評価	18
3. 結果	19
3.1 採集したホソウミニナの特徴	19
3.2 成熟度・寄生予測モデル	19
4. 考察	20
4.1 モデルの正確さ	20
4.2 モデルの適用	20
4.3 本手法を利用する際の注意点と今後の課題	21
5. まとめ	21
謝辞	21
参考文献	21

1. はじめに

沿岸域の多様な生物は様々な環境価値（生態系サービス）を有しており、例えば、魚介類による食料供給、マングローブ林による海岸防護、二枚貝による水質浄化、アマモによる温暖化抑制、潮干狩り場のアサリによる観光・レクリエーションがある（岡田ら, 2020）。生物多様性は環境価値の基盤であり、生物多様性が豊かであると環境価値は高まる（Cardinale et al., 2012; Harrison et al., 2014）。しかし、様々な人間活動によって沿岸域の生物の生息環境は改変され、沿岸域の環境価値は低下している（Vlachopoulou and Makino, 2017; Masucci and Reimer, 2019）。沿岸域において高い環境価値を再生するためには、生物の存続および繁栄に適した生息場の再生が求められる。

国土交通省港湾局では、生物の生息環境の向上に向けた取り組みとして、港湾域および沿岸域において、干潟・浅場・藻場・サンゴ礁の保全・再生に加えて、生物共生型港湾構造物の設置など様々な生物の生息・育成場の保全・拡大を実施している。ただ、これまでの保全・再生では、まずは一歩でも進むことが重要であり、造成干潟や生物共生型港湾構造物等を、造れる水域に、小さなスケールでも良いから、着実に造っていくことを目指し、水域全体に渡る生態系ネットワークの視点はあまり重視されてこなかった。沿岸域の生態系を、より一層多様かつ持続可能な状態に再生させていくためには、生物の盛衰に影響を及ぼす、水域全体に渡る生物の移動や繋がりへの考慮が必要と考えている。つまり、これまでの造成干潟や生物共生型護岸の断面形状の設計（部分最適な技術開発）だけでは不十分であり、水域に対する生物生息場の最適配置の検討（全体最適な技術開発）を行う必要があると考えている（秋山ら, 2014, 2015, 2016, 2017a,b, 2018a,b, 2020; 秋山, 2020; 秋山ら, 2022）。

多くの海生生物は生活史の中で浮遊期間を有し、この期間に水中を漂って移動し（Pechenik, 1999; Shanks et al., 2003）、各地の生息場に着底および定着することによって、複数の生息場間にネットワークを形成する。このネットワークは、一時的に起きる局所攪乱によって任意の生息場の生物が絶滅した場合、その生息場への生物の再加入に関わり、生物の順応性を高める（Hanski, 1999; Almany et al., 2009）。ネットワークが充実してくると、生物が存続および繁栄しやすくなり、環境価値の高い沿岸域の実現が期待できるようになる。著者らは、限りある資源を用いて生物多様性および環境価値の豊かな生物

生息場をより効果的に再生・創出することを目標とし、生物多様性および環境価値を高める生息場の空間配置の特徴を明らかにするために一連の検討を行っている（秋山ら, 2014, 2015, 2016, 2017a,b, 2018a,b, 2020; 秋山, 2020; 秋山ら, 2022）。本研究では、この検討の一部として、ネットワークの形成に関わる生物の繁殖力に着目した。沿岸の生物生息場は繁殖場としての機能を持ち、周囲の生息場への生物の供給源となる。生物の繁殖力は生息環境に応じて変動するため（Pardo and Johnson, 2005）、繁殖場としての機能を評価するためには、生息場に生息する成体の繁殖力に着目した定量化が必要である。

海生生物には比較的短距離を移動する種と、より長距離を移動する種があり（Shanks et al., 2003）、それぞれ生息に適した生息場の空間配置の考え方は異なる（秋山ら, 2015）。軟体動物であるウミニナ類のうち、ホソウミニナ *Batillaria attramentaria* は直達発生で浮遊幼生期は無いが（足立・和田, 1997）、稚貝の時期に一時的に浮いて（Floating）比較的短距離を移動する（Adachi and Wada, 1999; Johnson et al., 2001）。一方、ウミニナ *B. multiformis* は幼生の時期に面盤周縁の繊毛を活発に動かして水中を遊泳し、長距離を移動する（Johnson et al., 2001; Furota et al., 2002; 金谷・伊藤, 2022）。しかし、両種とも着底後の生態に類似点が多い（奥谷, 2017）。そのため、両種に適した生息場の空間配置を明らかにすることにより、短距離移動種と長距離移動種の底生生物に適した生息場の空間配置の提案が期待できる。そこで、本研究では、両種の中で、まず、短距離移動型のホソウミニナを扱うことにした。

ホソウミニナは東アジアの干潟や岩礁に生息し（奥谷, 2017）、度々優占種となり、生息基質（殻）の提供、摂食効果および生物擾乱を通じて、他の軟体動物、腔腸動物、節足動物、海草の繁栄を促進する（Wonham et al., 2005）。この多様な生物種に対する繁栄促進効果は、生息場における本種の繁殖と、Floatingによる周囲の生息場への稚貝の供給（Adachi and Wada, 1999）によって、周囲の生息場へと波及してゆくことが期待される。

1つの生息場における本種の繁殖力は、成貝における繁殖可能な個体の割合（PFA: Proportion of Fertile Adults）、成貝の生息密度、生息場面積の3つの値の積によって定量化できる。成貝における繁殖可能な個体は、産卵期の直前に最もよく成熟し、繁殖と直接的に関わる生殖腺の成熟の程度（Elhasni et al., 2010）に基づき判別することができると考えられる。砂泥上の卵密度（Adachi and

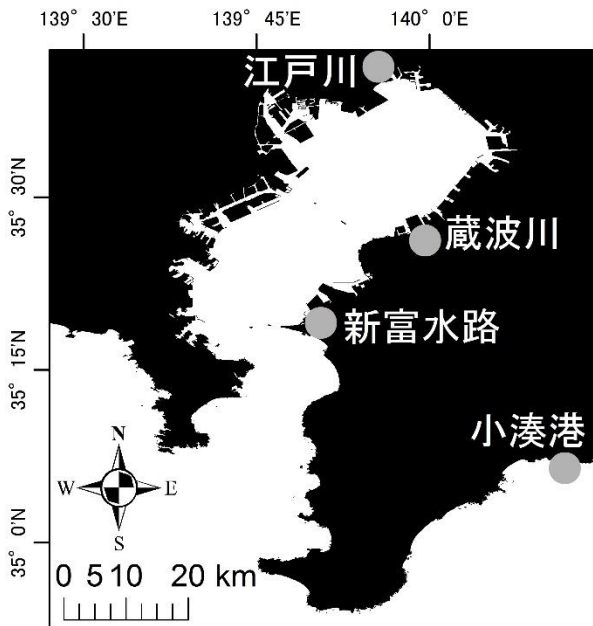


図-1 採集地の位置.

Wada, 1999) を、PFA および成員の生息密度の積として扱うことも考えられるが、本種と他種の卵の判別技術は確立されておらず、適用の検討は困難である。先述の3つの値のうち、調べるのが困難な値はPFAである。PFAを明らかにするには、成員を解剖し、成熟した生殖腺を持つ個体の割合を調べる必要がある。また、日本沿岸に広く分布する二生吸虫（扁形動物門：吸虫綱）は、生活史の中で第一中間宿主、第二中間宿主、終宿主に寄生し（長澤, 2008）、第一中間宿主である本種に寄生して本種を去勢させるため（Miura et al., 2005; Lin, 2006）、二生吸虫の寄生の有無も調べる必要がある。

このように、PFAを明らかにするには専門的な知識と経験を要する生殖腺の特定、成熟度の判定、二生吸虫の寄生の判定が必要であり、一般的に困難である。そのためか、本種への二生吸虫の寄生率に関する報告はあるが（Miura et al., 2005; Lin, 2006）、本種のPFAに関する知見は見つからない。もし、先述の困難を解消できれば、生息場を持つ本種の繁殖場としての機能は評価しやすくなる。Yamada, (1982), Miura et al., (2006) および Hechinger et al., (2009) は、本種の形態および重量は、本種の成長および二生吸虫の寄生と関係して変化することを報告している。これらの知見に依ると、成体の形態および重量の値から本種のPFAを予測できる可能性がある。ただし、成員のサイズ組成や成長速度は生息環境や属する地域集団により変化する点（Boulding and Alstyn, 1993; Johansson et al., 1997）に留意する必要がある。

そこで本研究では、東京湾内外の異なる生育環境を持

表-1 ホソウミニナの採集場所および採集個体数.

採集地	生息環境	採集月日	個体数
江戸川	潟湖干潟の潮間帯下部	6月9日	50
		9月21日	30
新富水路	人工水路干潟の潮間帯上・下部	6月10日	30
蔵波川	人工水路干潟の潮間帯上・下部	9月21日	30
小湊港	岩礁の潮間帯	6月30日	30

つ4地点の集団を用いて、本種のPFAを算定するために、形態および重量に基づき簡易に成熟度および寄生の有無を予測し、繁殖可能な個体を判定する手法を新規に開発することを目的として検討を行った。

なお、本稿は、秋山ら（2022）の内容を改変し、補足説明を追加したものである。そのため、本研究を引用する際には、秋山ら（2022）も参考文献に挙げられたい。

2. 方法

2.1 ホソウミニナの採集および測定

腹足類の中には、成熟した生殖腺を有する個体が長期間（9か月間）にわたり確認される種（Borsetti et al., 2020）や、生殖腺の成熟の程度が明らかに季節的に変動する種（Elhasni et al., 2010）が知られており、生殖腺の成熟度の経時的変化のパターンは単一ではない。ホソウミニナの繁殖期は春から秋までであり（風呂田, 2005）、この期間に産卵が行われる（足立・和田, 1997）。そのため、少なくとも本種成体の雌に関して、生殖腺は繁殖期の産卵前によく成熟した状態であると推測される。しかし、本種の生殖腺の成熟度合いが年間を通じてどのように変化するのかが明らかにされていない。このように、ホソウミニナの生殖腺に関する基礎研究は不足しており、不明な点はあるものの、ここでは本種の生殖腺が繁殖のためによく成熟していると期待される繁殖期に、生殖腺の成熟度を調べることによって、妥当なPFAを求めることができると仮定した。そのため、本種の採集は繁殖期にあたる2021年6および9月（風呂田, 2005）に実施した。この期間は二生吸虫がホソウミニナに寄生している期間でもある（Shimura and Ito, 1980；秋山ら未発表）。

様々な生息環境の成員の測定値から妥当な予測値を導く手法を開発するため、東京湾内外の多様な生息環境（図-1, 2, 表-1）において、本種の成員（殻高 ≥ 14 mm（Byers and Goldwasser, 2001））を採集した。

この多様な生息環境の中には、二生吸虫に寄生された貝がより多く生息する潮間帯下部が含まれる（Miura et al.,

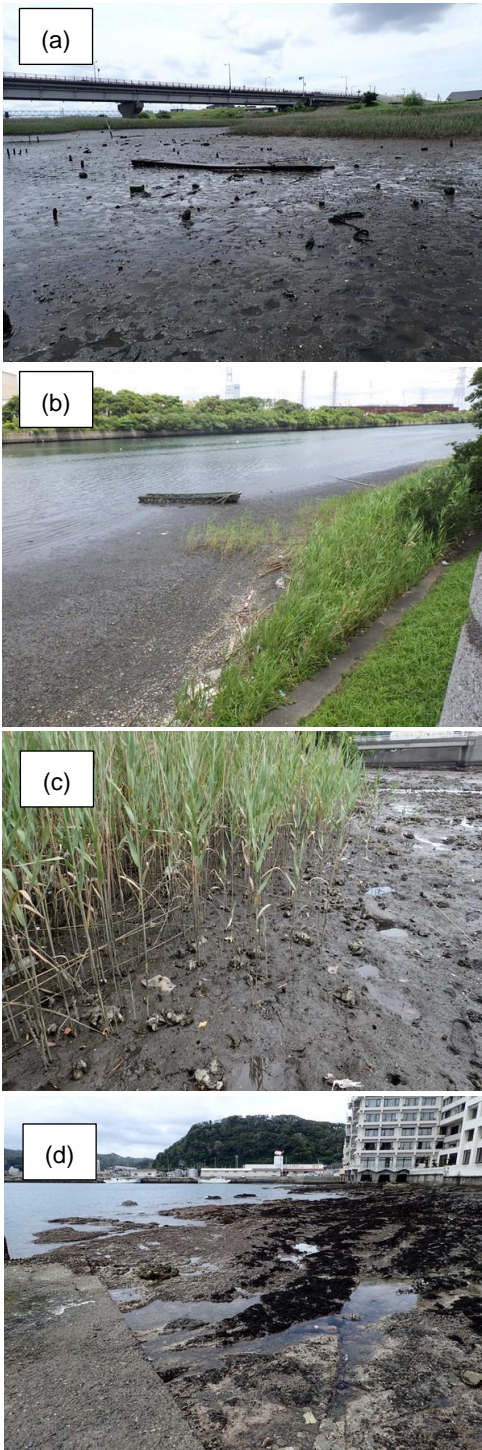


図-2 採集地の状況. (a) 江戸川, (b)新富水路, (c) 蔵波川, (d) 小湊港.

2006). 生殖腺の成熟に影響する可能性のある表在動物が殻に付着した貝 (Chan and Chan, 2005) は除外した. 腹足類の形態の種内変異に関する知見 (Kameda et al., 2007) を参考に, 採集した貝の殻形態 (殻高 (H), 殻幅 (D), 殻口高 (AH), 殻口幅 (AW), 螺塔の高さ (SH), 螺塔の幅 (SW)) (単位はmm), および殻込み湿重量 (WW) (単

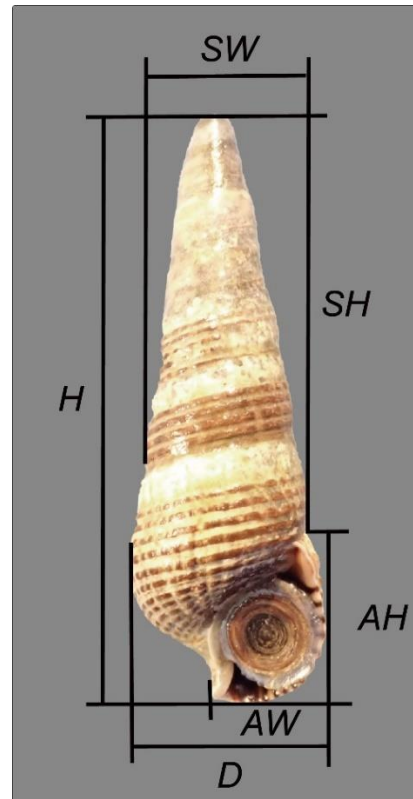


図-3 殻形態の計測部位の定義.

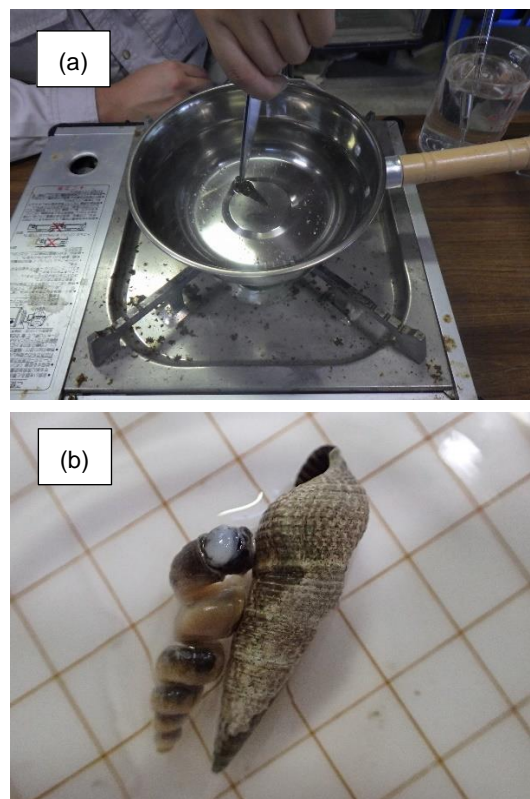


図-4 肉抜き作業. (a) 約 99℃で 15 秒間湯煎, (b) 殻から抜き出した軟体部 (左) および殻 (右).

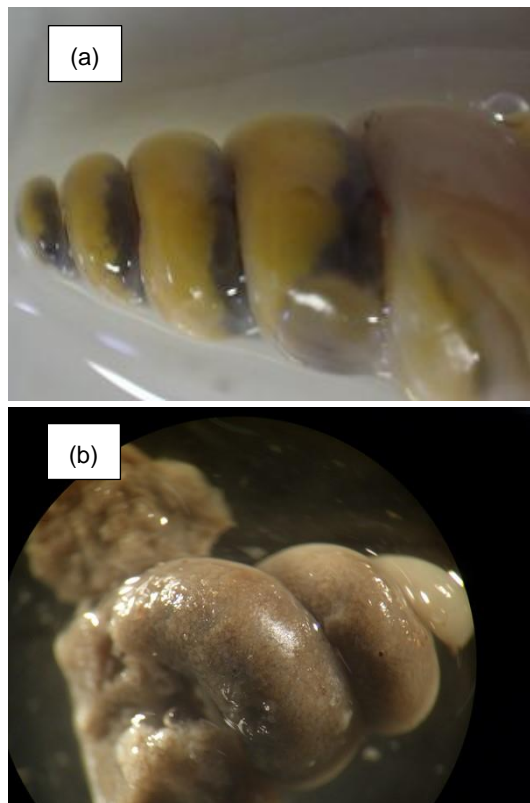


図-5 性別による生殖腺の色の違い. (a) 雄, (b) 雌.

位はg)を測定した(図-3).肉抜き方法(Fukuda et al., 2008)に従い殻から軟体部を抜き出した(図-4).肉抜きに失敗して、軟体部が途中で千切れた個体は、殻を割って軟体部を取り出した.軟体部の消化腺上部に位置する生殖腺を観察し、性別、成熟度、二生吸虫の有無を記録した.性別は生殖腺の色で判断し、黄色~橙色を雄、緑白色~白色を雌とした(図-5).雌の生殖腺の色は、実際に産卵した雌の生殖腺を観察して決定した(秋山ら未発表).著者らが調べた限りでは、本種の生殖腺がどの程度成熟すれば繁殖可能とみなせるのかに関する知見は、生殖腺成熟度指数(GSI: Gonadosomatic Index)を含めて見つけられなかった.そこで、本検討では生殖腺の成熟度を次の2段階で評価した.生殖腺が肥大し内部組織がよく観察できる場合を++,生殖腺が小さく内部組織がよく観察できない場合を+と評価した(図-6).ここでは、++の成貝は繁殖可能と仮定し、++の個体の割合をPFAと定義する.各成熟度の個体(ただし、6月に江戸川で得た個体を除く)の生殖腺湿重量(GWW)および軟体部湿重量(SWW)の値を式(1)に代入して求めたGSIは表-2に示すとおりであり、GSIの平均値は、++では35.5、+では24.7であった.

$$GSI = \frac{GWW}{SWW} \times 100 \quad (1)$$

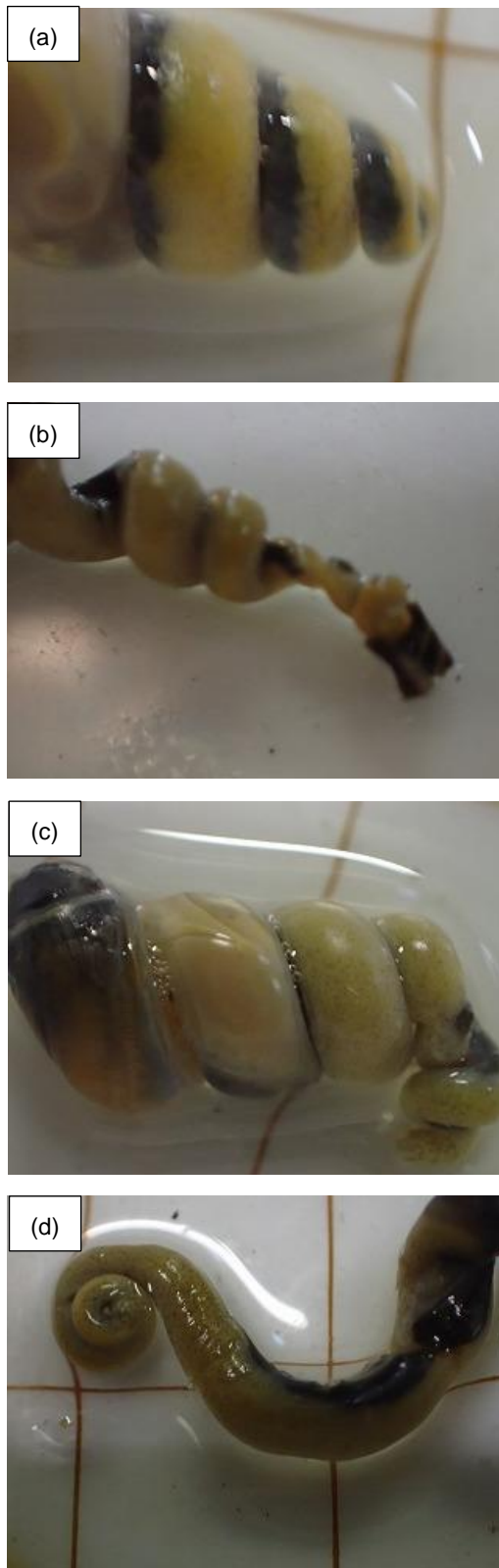


図-6 生殖腺の成熟度の違い. (a) 雄++, (b) 雄+, (c) 雌++, (d) 雌+.

東京湾内外のホソウミニナには二生吸虫が寄生していることがあり、これまでに*Acanthoparyphium* sp. I,

表-2 ホソウミニナの計測データ

採集日	採集地	個体ID	性別	生殖腺の成熟度	吸虫の有無	殻込み湿重量(g)	軟体部湿重量(g)	生殖腺の湿重量(g)	GSI(%)
2021/6/9	江戸川河口(6)	1	オス	+	無	1.75	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	2	メス	+	無	1.81	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	3	不明	na	無	1.37	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	4	オス	+	無	1.15	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	5	オス	++	無	1.23	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	6	オス	++	無	1.56	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	7	オス	++	無	1.7	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	8	オス	++	無	2	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	9	オス	+	無	1.47	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	10	メス	+	無	1.67	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	11	オス	++	無	1.48	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	12	オス	+	無	1.96	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	13	メス	+	無	1.7	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	14	メス	+	無	1.7	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	15	オス	++	無	1.85	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	16	オス	++	無	1.66	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	17	オス	++	無	2.16	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	18	オス	++	無	1.57	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	19	メス	+	無	1.54	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	20	メス	++	無	1.49	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	21	メス	++	無	1.78	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	22	メス	++	無	1.63	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	23	オス	+	無	1.46	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	24	オス	+	無	1.57	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	25	メス	++	無	1.61	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	26	メス	+	無	1.68	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	27	メス	+	無	1.75	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	28	不明	na	無	1.53	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	29	オス	+	無	1.2	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	30	オス	+	無	1.5	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	31	メス	++	無	1.59	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	32	オス	++	無	1.86	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	33	オス	++	無	1.31	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	34	メス	+	無	1.31	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	35	メス	++	無	1.61	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	36	オス	++	無	1.41	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	37	オス	+	無	1.6	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	38	オス	++	無	1.89	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	39	メス	++	無	1.84	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	40	オス	+	無	1.77	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	41	メス	++	無	1.8	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	42	メス	++	無	1.61	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	43	オス	++	無	1.71	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	44	メス	+	無	1.25	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	45	オス	++	無	1.55	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	46	メス	+	無	1.56	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	47	メス	++	無	1.87	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	48	オス	++	無	1.51	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	49	メス	+	無	1.77	-	-	-
2021/6/9	江戸川河口(6)	50	オス	++	無	1.66	-	-	-
2021/9/21	江戸川河口(9)	1	メス	++	無	1.04	0.25	0.09	36
2021/9/21	江戸川河口(9)	2	オス	+	無	1.49	0.55	0.16	29
2021/9/21	江戸川河口(9)	3	メス	+	無	1.1	0.22	0.04	18
2021/9/21	江戸川河口(9)	4	オス	-	有	3.08	0.79	0.33	42
2021/9/21	江戸川河口(9)	5	不明	-	有	1.88	0.49	0.29	59
2021/9/21	江戸川河口(9)	6	オス	++	無	1.37	0.3	0.1	33
2021/9/21	江戸川河口(9)	7	オス	++	無	0.84	0.23	0.1	43
2021/9/21	江戸川河口(9)	8	オス	++	無	1.23	0.32	0.15	47
2021/9/21	江戸川河口(9)	9	オス	++	無	1.47	0.32	0.13	41
2021/9/21	江戸川河口(9)	10	オス	+	無	1.33	0.29	0.13	45
2021/9/21	江戸川河口(9)	11	オス	+	無	1.46	0.38	0.09	24
2021/9/21	江戸川河口(9)	12	オス	++	無	1.62	0.4	0.15	38
2021/9/21	江戸川河口(9)	13	オス	+	無	1.29	0.29	0.1	34
2021/9/21	江戸川河口(9)	14	オス	++	無	1.47	0.36	0.15	42
2021/9/21	江戸川河口(9)	15	オス	+	無	1.63	0.36	0.1	28
2021/9/21	江戸川河口(9)	16	メス	-	有	1.77	0.52	0.29	56
2021/9/21	江戸川河口(9)	17	メス	-	有	2.93	0.87	0.36	41
2021/9/21	江戸川河口(9)	18	メス	-	有	2.15	0.54	0.25	46
2021/9/21	江戸川河口(9)	19	メス	-	有	2.07	0.63	0.28	44
2021/9/21	江戸川河口(9)	20	メス	-	有	1.62	0.38	0.22	58
2021/9/21	江戸川河口(9)	21	メス	+	無	1.59	0.37	0.16	43
2021/9/21	江戸川河口(9)	22	メス	++	無	2.71	0.59	0.3	51
2021/9/21	江戸川河口(9)	23	メス	-	有	5.51	1.36	0.56	41
2021/9/21	江戸川河口(9)	24	メス	+	無	1.05	0.21	0.07	33
2021/9/21	江戸川河口(9)	25	メス	-	有	3.24	0.94	0.33	35
2021/9/21	江戸川河口(9)	26	メス	+	無	1.84	0.35	0.12	34
2021/9/21	江戸川河口(9)	27	メス	+	無	1.65	0.3	0.08	27
2021/9/21	江戸川河口(9)	28	メス	+	無	1.05	0.26	0.07	27
2021/9/21	江戸川河口(9)	29	メス	+	無	0.94	0.24	0.08	33
2021/9/21	江戸川河口(9)	30	メス	+	無	1.41	0.37	0.07	19
2021/6/10	新富水路	1	メス	-	有	2.58	0.62	0.17	27
2021/6/10	新富水路	2	メス	-	有	2.4	0.58	0.18	31
2021/6/10	新富水路	3	メス	-	有	2.32	0.63	0.2	32
2021/6/10	新富水路	4	メス	-	有	2.46	0.51	0.15	29
2021/6/10	新富水路	5	メス	-	有	2.35	0.56	0.16	29

表-2 続き 1

採集日	採集地	個体ID	性別	生殖腺の成熟度	吸虫の有無	殻込み湿重量(g)	軟体部湿重量(g)	生殖腺の湿重量(g)	GSI(%)
2021/6/10	新富水路	6	メス	-	有	2.39	0.59	0.18	31
2021/6/10	新富水路	7	メス	-	有	2.43	0.48	0.17	35
2021/6/10	新富水路	8	オス	-	有	1.85	0.43	0.16	37
2021/6/10	新富水路	9	メス	-	有	2.42	0.57	0.17	30
2021/6/10	新富水路	10	メス	-	有	1.86	0.5	0.15	30
2021/6/10	新富水路	11	メス	-	有	2.45	0.4	0.14	35
2021/6/10	新富水路	12	オス	-	有	1.81	0.56	0.18	32
2021/6/10	新富水路	13	メス	-	有	2.61	0.53	0.14	26
2021/6/10	新富水路	14	メス	-	有	2.37	0.64	0.17	27
2021/6/10	新富水路	15	オス	-	有	2.1	0.45	0.14	31
2021/6/10	新富水路	16	メス	-	有	1.85	0.48	0.14	29
2021/6/10	新富水路	17	メス	-	有	2.38	0.47	0.18	38
2021/6/10	新富水路	19	メス	-	有	1.88	0.46	0.13	28
2021/6/10	新富水路	20	メス	-	有	2.26	0.47	0.13	28
2021/6/10	新富水路	21	オス	-	有	2.15	0.46	0.1	22
2021/6/10	新富水路	22	オス	-	有	1.94	0.44	0.17	39
2021/6/10	新富水路	23	オス	-	有	1.48	0.33	0.11	33
2021/6/10	新富水路	24	オス	-	有	2.06	0.44	0.12	27
2021/6/10	新富水路	25	オス	-	有	2.14	0.42	0.09	21
2021/6/10	新富水路	26	オス	+	無	1.51	0.29	0.06	21
2021/6/10	新富水路	27	オス	-	有	1.78	0.3	0.08	27
2021/6/10	新富水路	28	オス	-	有	2	0.5	0.12	24
2021/6/10	新富水路	29	オス	+	無	1.48	0.31	0.07	23
2021/6/10	新富水路	30	不明	-	有	1.7	0.32	0.13	41
2021/9/21	蔵波川	1	オス	++	無	1.69	0.4	0.08	20
2021/9/21	蔵波川	2	オス	+	無	1.23	0.26	0.05	19
2021/9/21	蔵波川	3	オス	+	無	1.41	0.33	0.06	18
2021/9/21	蔵波川	4	オス	+	無	1.19	0.37	0.06	16
2021/9/21	蔵波川	5	オス	+	無	1.37	0.26	0.02	8
2021/9/21	蔵波川	6	メス	+	無	1.18	0.24	0.03	13
2021/9/21	蔵波川	7	メス	+	無	1.67	0.26	0.04	15
2021/9/21	蔵波川	8	メス	++	無	1.15	0.29	0.06	21
2021/9/21	蔵波川	9	オス	+	無	1.27	0.26	0.04	15
2021/9/21	蔵波川	10	オス	+	無	1.48	0.28	0.04	14
2021/9/21	蔵波川	11	オス	+	無	1.6	0.26	0.05	19
2021/9/21	蔵波川	12	メス	+	無	1.22	0.2	0.04	20
2021/9/21	蔵波川	13	オス	+	無	1.7	0.23	0.05	22
2021/9/21	蔵波川	14	メス	+	無	1.19	0.22	0.03	14
2021/9/21	蔵波川	15	メス	+	無	1.36	0.21	0.03	14
2021/9/21	蔵波川	16	メス	+	無	1.33	0.18	0.03	17
2021/9/21	蔵波川	17	オス	++	無	1.1	0.2	0.04	20
2021/9/21	蔵波川	18	オス	+	無	1.12	0.2	0.03	15
2021/9/21	蔵波川	19	メス	+	無	1.09	0.24	0.06	25
2021/9/21	蔵波川	20	メス	+	無	1.35	0.24	0.04	17
2021/9/21	蔵波川	21	オス	+	無	1.12	0.18	0.04	22
2021/9/21	蔵波川	22	オス	+	無	1.11	0.27	0.06	22
2021/9/21	蔵波川	23	オス	+	無	1.22	0.18	0.03	17
2021/9/21	蔵波川	24	メス	+	無	1.34	0.21	0.03	14
2021/9/21	蔵波川	25	オス	+	無	1.26	0.26	0.03	12
2021/9/21	蔵波川	26	オス	+	無	1.31	0.31	0.06	19
2021/9/21	蔵波川	27	オス	+	無	1.02	0.21	0.03	14
2021/9/21	蔵波川	28	オス	+	無	1.38	0.31	0.03	10
2021/9/21	蔵波川	29	オス	+	無	1.21	0.25	0.04	16
2021/9/21	蔵波川	30	オス	+	無	1.1	0.24	0.03	13
2021/6/30	小湊港	1	オス	+	無	0.65	0.07	0.02	29
2021/6/30	小湊港	2	オス	+	無	0.82	0.12	0.05	42
2021/6/30	小湊港	3	オス	+	無	0.77	0.1	0.04	40
2021/6/30	小湊港	4	メス	+	無	0.52	0.07	0.02	29
2021/6/30	小湊港	5	メス	+	無	0.66	0.08	0.03	38
2021/6/30	小湊港	6	メス	+	無	0.79	0.11	0.04	36
2021/6/30	小湊港	7	オス	+	無	0.87	0.11	0.03	27
2021/6/30	小湊港	8	メス	+	無	0.68	0.07	0.02	29
2021/6/30	小湊港	9	オス	+	無	0.55	0.1	0.03	30
2021/6/30	小湊港	10	メス	+	無	0.66	0.08	0.02	25
2021/6/30	小湊港	11	オス	+	無	0.62	0.06	0.02	33
2021/6/30	小湊港	12	メス	+	無	0.64	0.07	0.03	43
2021/6/30	小湊港	13	メス	+	無	0.73	0.09	0.03	33
2021/6/30	小湊港	14	メス	+	無	0.62	0.08	0.03	38
2021/6/30	小湊港	15	メス	+	無	0.55	0.09	0.02	22
2021/6/30	小湊港	16	メス	+	無	0.64	0.08	0.02	25
2021/6/30	小湊港	17	メス	+	無	0.87	0.12	0.04	33
2021/6/30	小湊港	18	メス	+	無	0.68	0.1	0.03	30
2021/6/30	小湊港	19	メス	+	無	0.72	0.11	0.03	27
2021/6/30	小湊港	20	メス	+	無	0.55	0.06	0.02	33
2021/6/30	小湊港	21	メス	+	無	0.61	0.08	0.02	25
2021/6/30	小湊港	22	オス	+	無	0.54	0.06	0.02	33
2021/6/30	小湊港	23	オス	+	無	0.75	0.09	0.03	33
2021/6/30	小湊港	24	オス	+	無	0.46	0.07	0.02	29
2021/6/30	小湊港	25	オス	+	無	0.67	0.09	0.02	22
2021/6/30	小湊港	26	メス	+	無	0.53	0.06	0.01	17
2021/6/30	小湊港	27	オス	+	無	0.51	0.04	0.01	25
2021/6/30	小湊港	28	オス	+	無	0.54	0.06	0.02	33
2021/6/30	小湊港	29	オス	+	無	0.61	0.1	0.02	20
2021/6/30	小湊港	30	オス	+	無	0.61	0.1	0.02	20

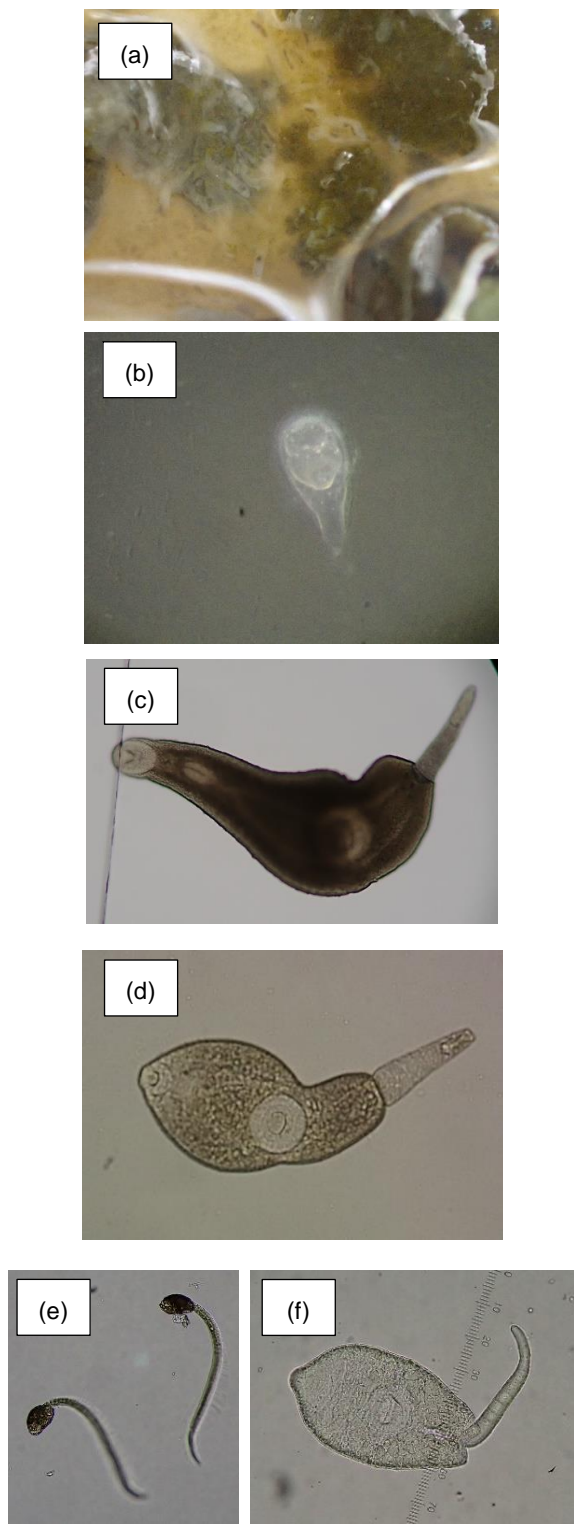


図-7 ホソウミニナに寄生していた二生吸虫。(a) 生殖腺の解剖中に確認されたレジアおよびセルカリア, (b) *Philophthalmus hechingeri* のメタセルカリア, (c) *Philophthalmid* sp. II Lineage PL2 のセルカリア, (d) *Philophthalmid* sp. II Lineage PL3 のセルカリア, (e) *Cercaria bitillariae* のセルカリア, (f) *Renicola* sp. I のセルカリア

Cercaria batillariae lineage HL2, 4~7, *C. hosoumininae*, *Philophthalmus hechingeri* および *Philophthalmid* sp. II lineage PL1~3, *Renicola* sp. 1 の出現が確認されている (Shimura and Ito, 1980; Miura et al., 2005; Sasaki et al., 2022) (秋山ら未発表) (図-7)。小櫃川河口干潟では, *C. batillariae* の出現率が高い (Miura et al., 2005)。これらのうち, *C. hosoumininae* および *Renicola* sp. I 以外の種ではレジア (図-7a), *C. hosoumininae* および *Renicola* sp. I ではスポロシストがホソウミニナの生殖腺に寄生する (Hechinger, 2007)。本検討では実体顕微鏡 (SZ-60, オリンパス, 東京) で生殖腺を観察して二生吸虫の寄生の有無を確認し, 種を区別せずに記録した。著者の秋山は東京湾内外 (江戸川放水路, 蔵波川, 盤洲干潟, 新富水路, 小湊港, 港湾空港技術研究所メソコスム) で採集した60個体の成貝を飼育したところ, そのうち少なくとも13個体は産卵したが, 二生吸虫 (3種) に寄生された14個体は全て産卵しなかった (秋山, 未発表)。よって, 二生吸虫に寄生された成貝は繁殖不可能と判断した。以下の成熟度・寄生予測モデル構築には, 新富水路1検体 (計測前の殻破損, 表-2には非掲載), 江戸川 (6月) 2検体 (生殖腺観察不可, 表-2の個体ID3および28), 江戸川 (9月) 1検体 (殻形態および湿重量を計測する前に標本を紛失, 表-2の個体ID9) を除く166個体分のデータを用いた (表-2)。

2.2 成熟度・寄生予測モデルの構築

PFAを推測するためには, ある生息場に生息する多くの成貝の中から, 二生吸虫に寄生されておらず, 成熟度が高いために繁殖可能とみなせる成貝を抽出する必要がある。本研究では, この抽出のために予測や意思決定に利用される樹木状構造のグラフィック表現である決定木 (分類木) を用いて, 成熟度・寄生予測モデルを構築した。目的変数は二生吸虫の寄生の有無および生殖腺の成熟度とした。説明変数に関しては, 成貝の大きさおよび重さを表す測定値のうち, *H*, *D*, *AH*, *AW*, *SH*, *WW* の範囲が2つの採集機会の間で全く重複しないケースが認められた (図-8, 9, 10, 11)。特に, ホソウミニナの体サイズが比較的小さい岩礁 (小湊港) と, 大きい内湾の干潟 (Adachi and Wada, 1999) との間で, 成貝の大きさおよび重さの測定値の重複しないケースが目立った。具体的には, *H* に関しては江戸川 (6月) と小湊港, 新富水路と小湊港 (図-8a), *D* に関しては新富水路と小湊港 (図-8b), *AH* に関しては江戸川 (6月) と小湊港, 新富水路と小湊港 (図-9a), *AW* に関しては江戸川 (6月) と小湊港, 新富水路と小湊港 (図-9b), *SH* に関しては新富水路と小湊港 (図-10a), *WW* に関しては江戸川 (6月) と小湊港, 新

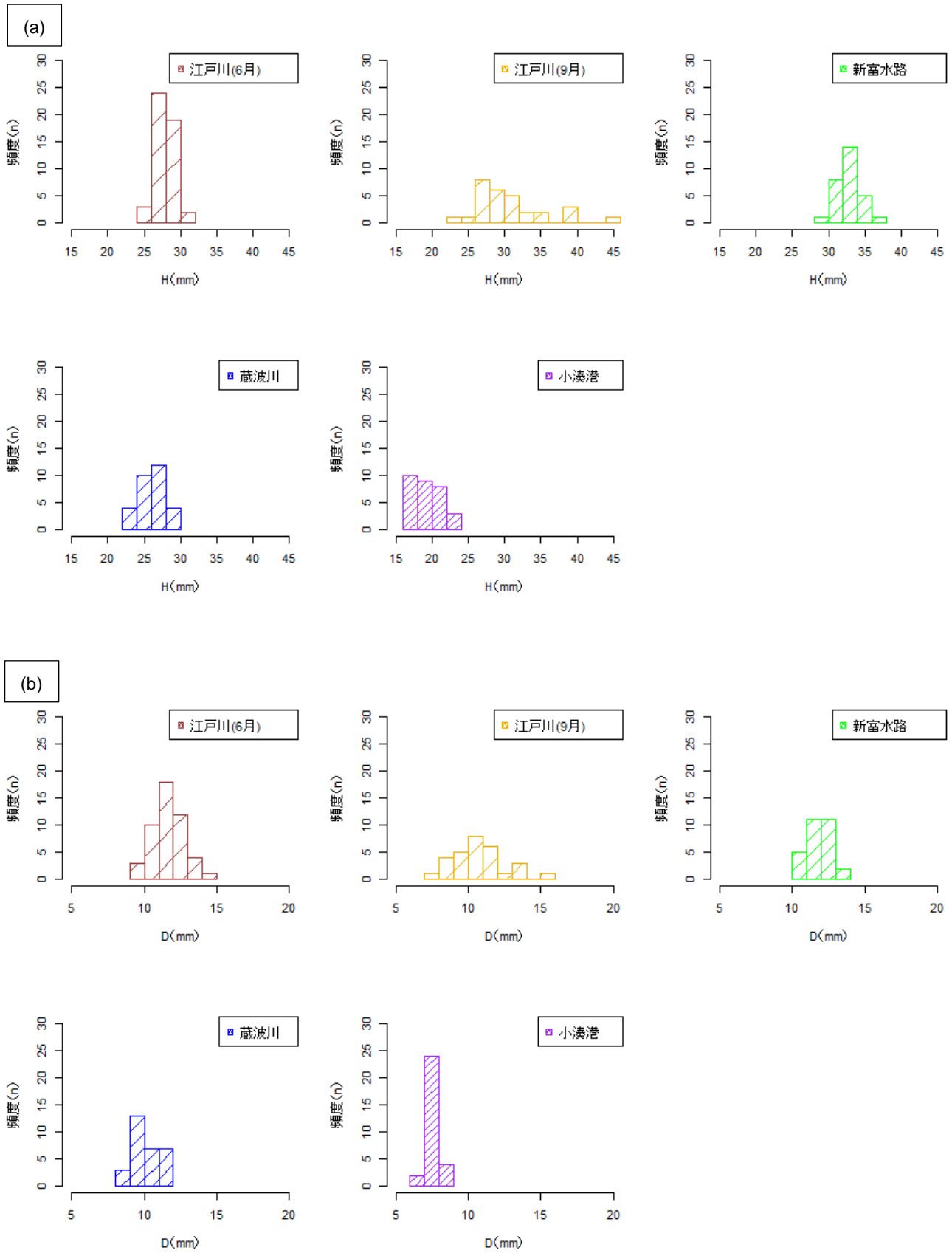


図-8 各採集機会におけるホソウミナナの (a) 殻高 (H) および (b) 殻径 (D) の頻度分布

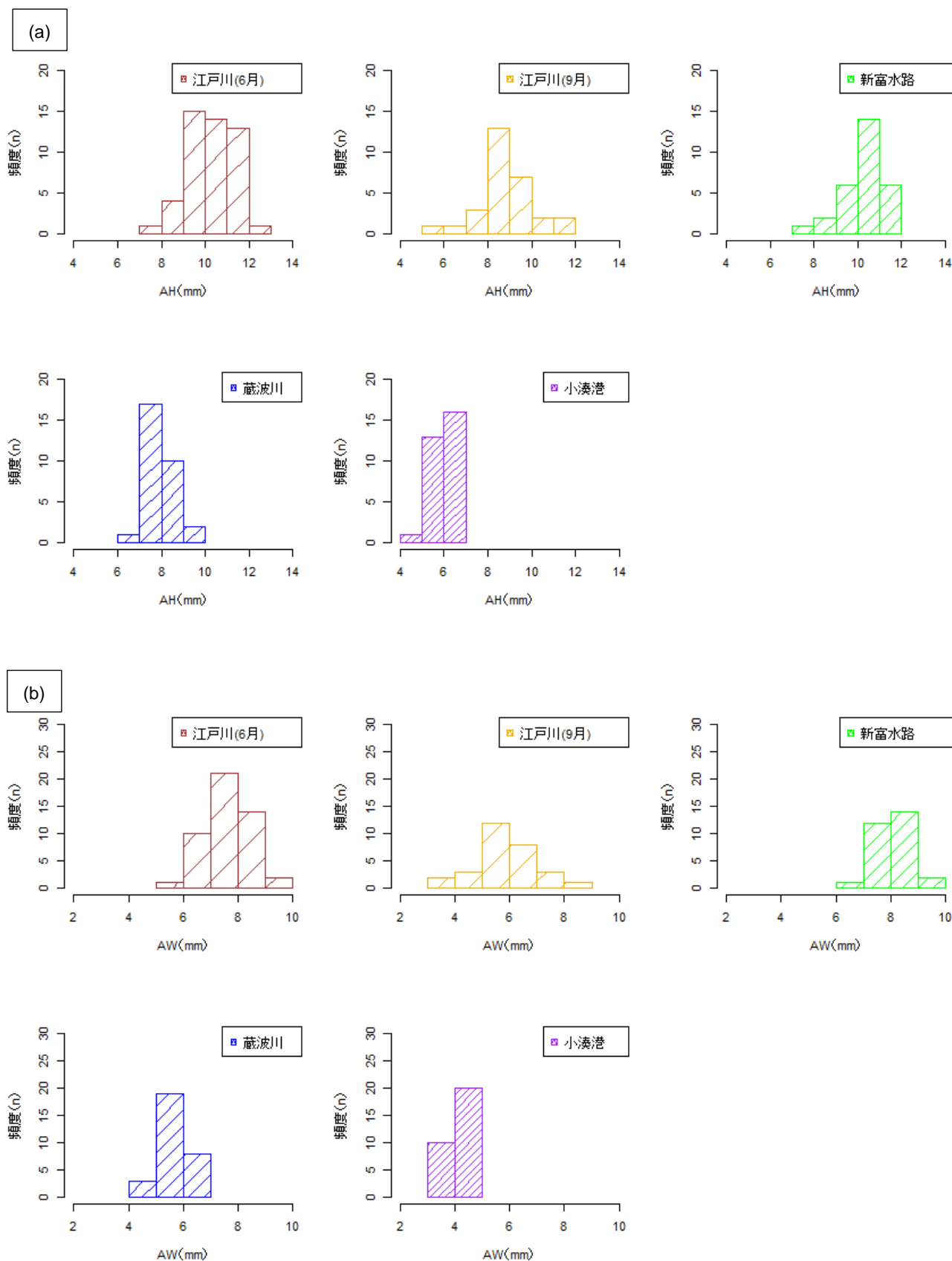


図-9 各採集機会におけるホソウミミナの (a) 殻口高 (AH) および (b) 殻口幅 (AW) の頻度分布

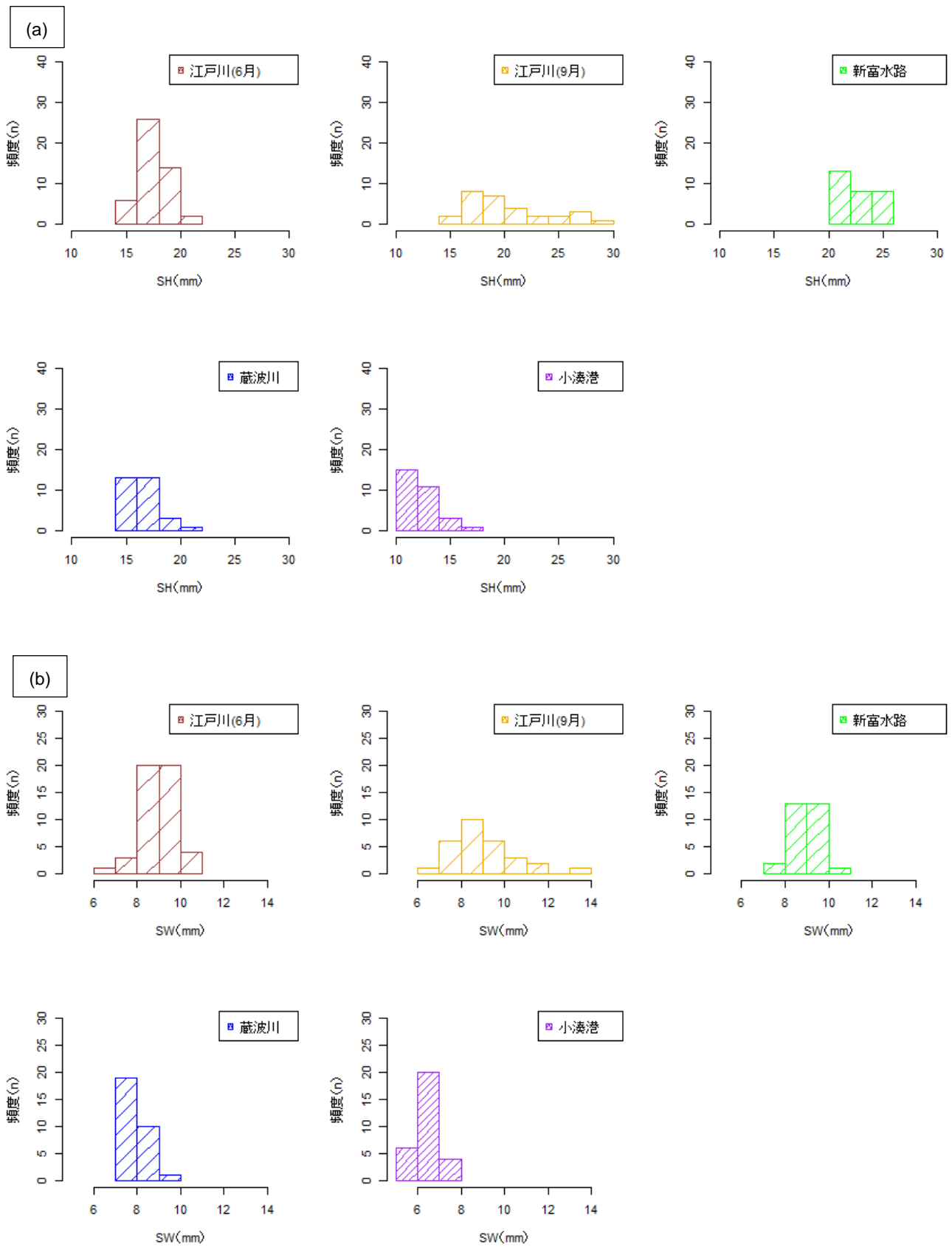


図-10 各採集機会におけるホソウミナナの (a) 螺塔高さ (SH) および (b) 螺塔の幅 (SW) の頻度分布

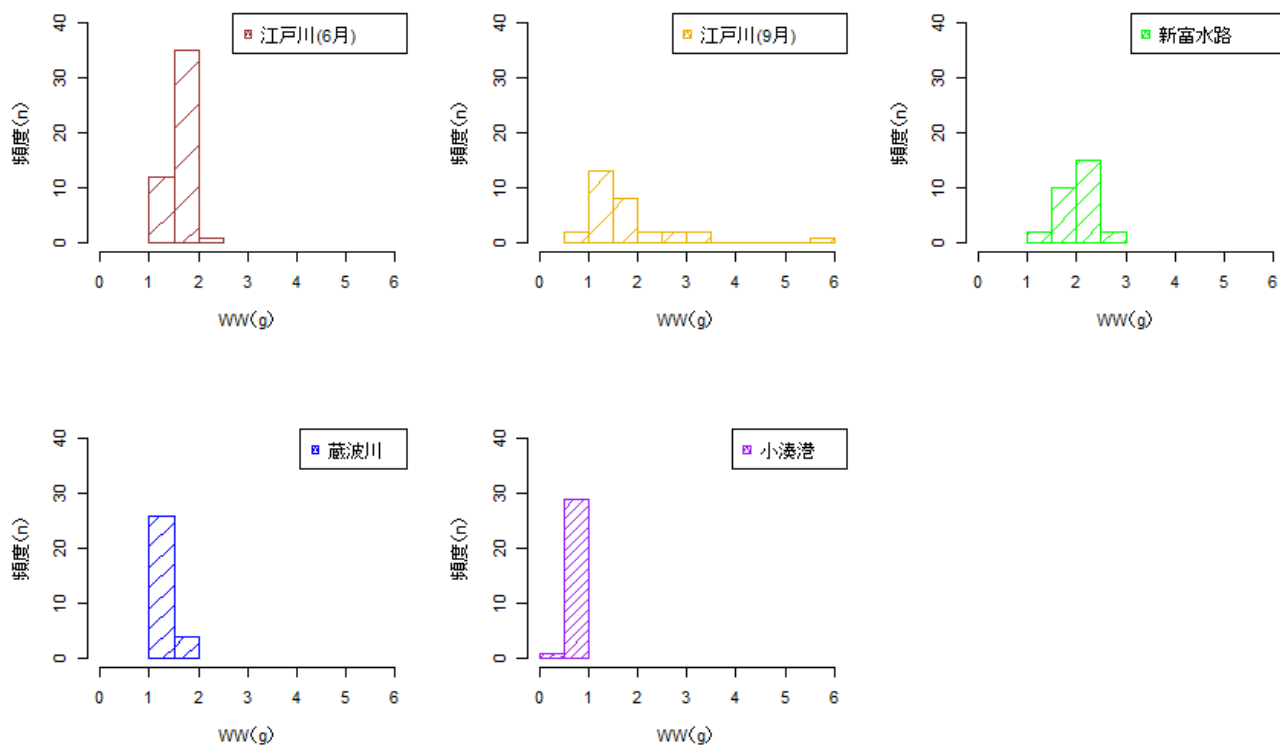


図-11 各採集機会におけるホソウミナナの殻込み湿重量 (WW) の頻度分布

富水路と小湊港、蔵波川と小湊港 (図-11) である。採集機会の間で重複しない測定値を説明変数として成熟度・寄生予測モデルに組み込むと、正確な予測ができないおそれがある。例えば、*C. batillariae*に寄生されたホソウミナナは大型化するが (Miura et al., 2006)、ホソウミナナの体サイズと関係する条件は二生吸虫の寄生だけでなく、先述したとおり生息場タイプの種類 (干潟、岩礁) もある (Adachi and Wada, 1999)。小湊港付近では *C. batillariae*に寄生されたホソウミナナが確認されているが (Shimura and Ito, 1980; 秋山, 未発表)、*C. batillariae*に寄生された小湊港の岩礁域に生息するホソウミナナの体サイズは、江戸川放水路や新富水路の干潟に生息するホソウミナナと比べて明らかに小さい (秋山, 未発表)。これは、二生吸虫の寄生による体サイズ増加の影響よりも、生息場タイプの違いによる体サイズ低下の影響の方が大きいと推察される。よって、測定値をそのまま説明変数に導入すると、*C. batillariae*に寄生されて大型化したホソウミナナを、正確に予測できないと考えられる。そのため、殻形態および湿重量のデータを貝の全身のサイズを表すと考えられる値 (H , D , または AH) で割って標準化した形態指標を用いた。説明変数の候補として6種類の形態指標 (H/D , AH/H , AW/D , SH/AH , SW/D , WW/D)

を作成した (図-12, 13, 14)。これらの形態指標の値の範囲は、2つの採集機会のすべての組合せで重複した (図-12, 13, 14)。 H/D , AH/H および AW/D はウミナナ属の形態変異の検討に利用される (村永・富山, 2020)。 SH/AH は AH を、 SW/D は D をそれぞれ基準として、生殖腺または二生吸虫が収まる空間の相対的な広さを表すことを想定している。 WW/D は二生吸虫の寄生による腹足類の重量の変化 (Hechinger et al., 2009) から、寄生貝と未寄生貝の分離が期待できる。これらの形態指標のうち、 SH/AH と強く相関 (Kendallの順位相関係数, $\tau b = -0.87$, データ解析環境RのパッケージKendall (McLeod, 2011)を用いて算出した。以下のKendallの順位相関係数についても同様)した AH/H を除く5つの形態指標 (H/D , AW/D , SH/AH , SW/D , WW/D) を説明変数として採用した。

これらの形態指標のうち、貝の成長 (H の増加) との関係が不明な AW/D , SH/AH , SW/D , WW/D と H との関係について、Kendallの順位相関係数を用いて確認したところ、それぞれ H と有意に相関した ($AW/D \tau b = 0.30$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$; $SH/AH \tau b = 0.18$, $p = 0.00084$; $SW/D \tau b = -0.19$, $p = 0.00022$; $WW/D \tau b = 0.77$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$) (図-15)。よって、明らかに貝の成長と共に変化する H/D を加えた5つの形態指標の値は、成長に伴う個体の成熟と共に増減する

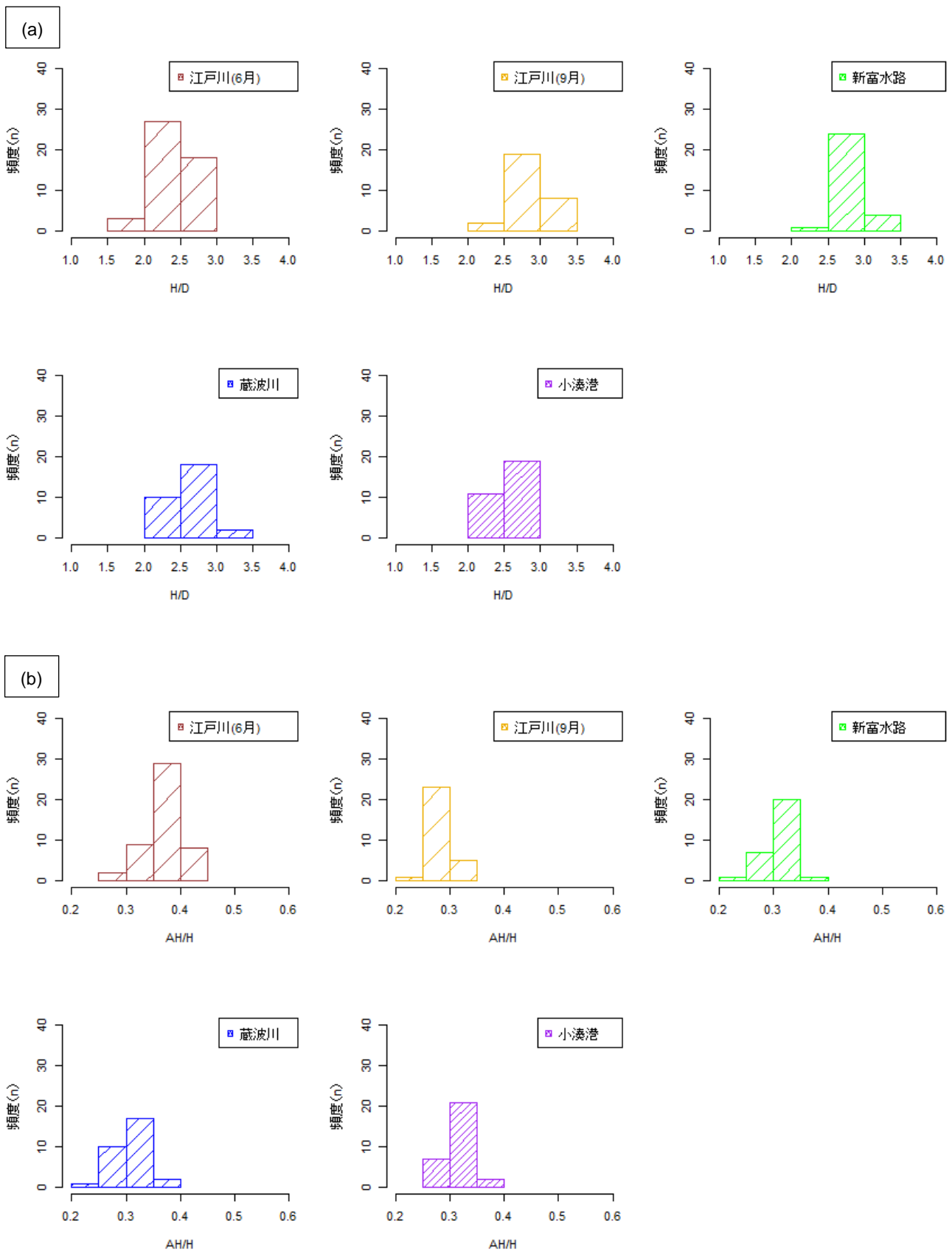


図-12 各採集機会におけるホソウミナナの形態指標 (a) H/D および (b) AH/H の頻度分布

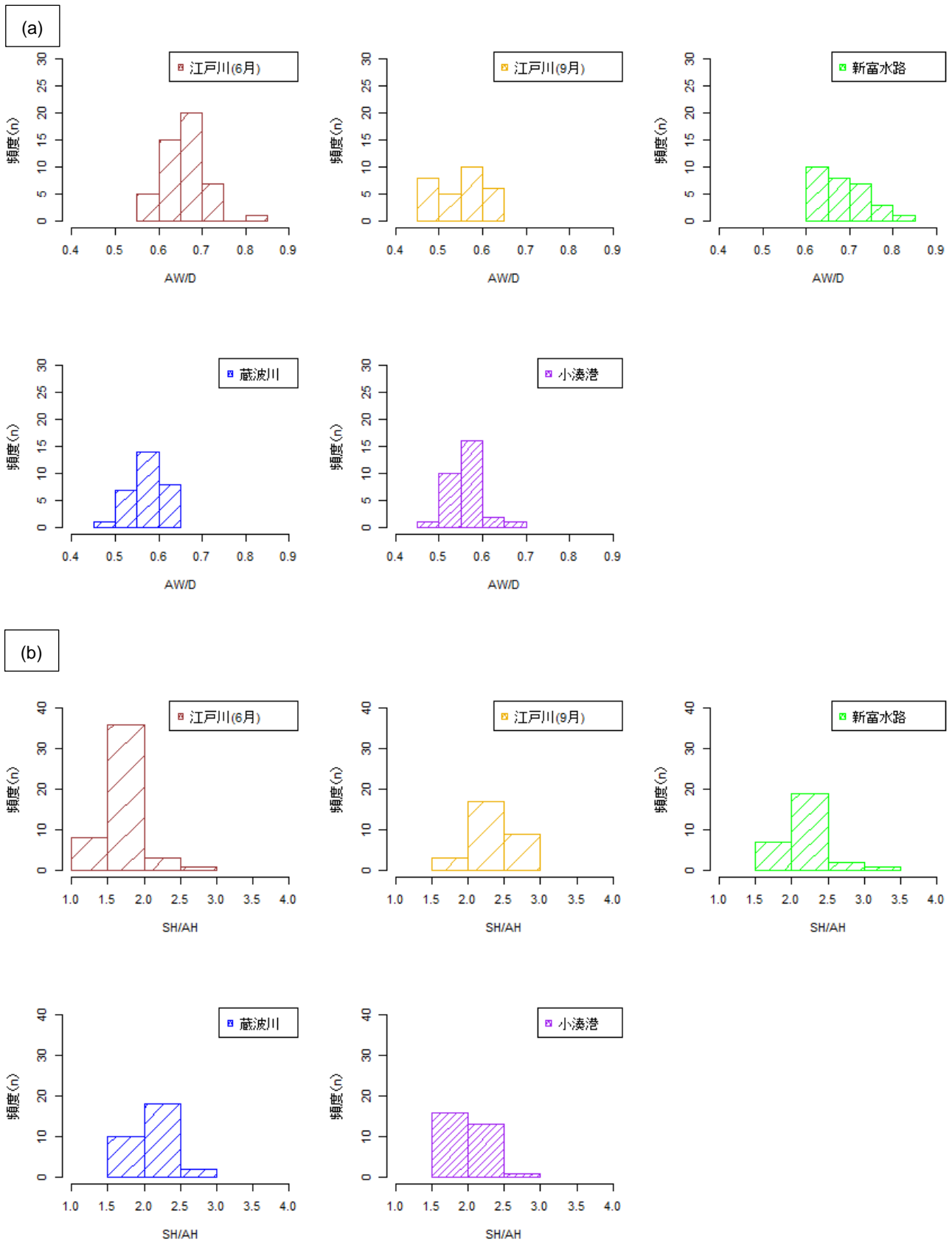


図-13 各採集機会におけるホソウミナナの形態指標 (a) AWD および (b) SH/AH の頻度分布

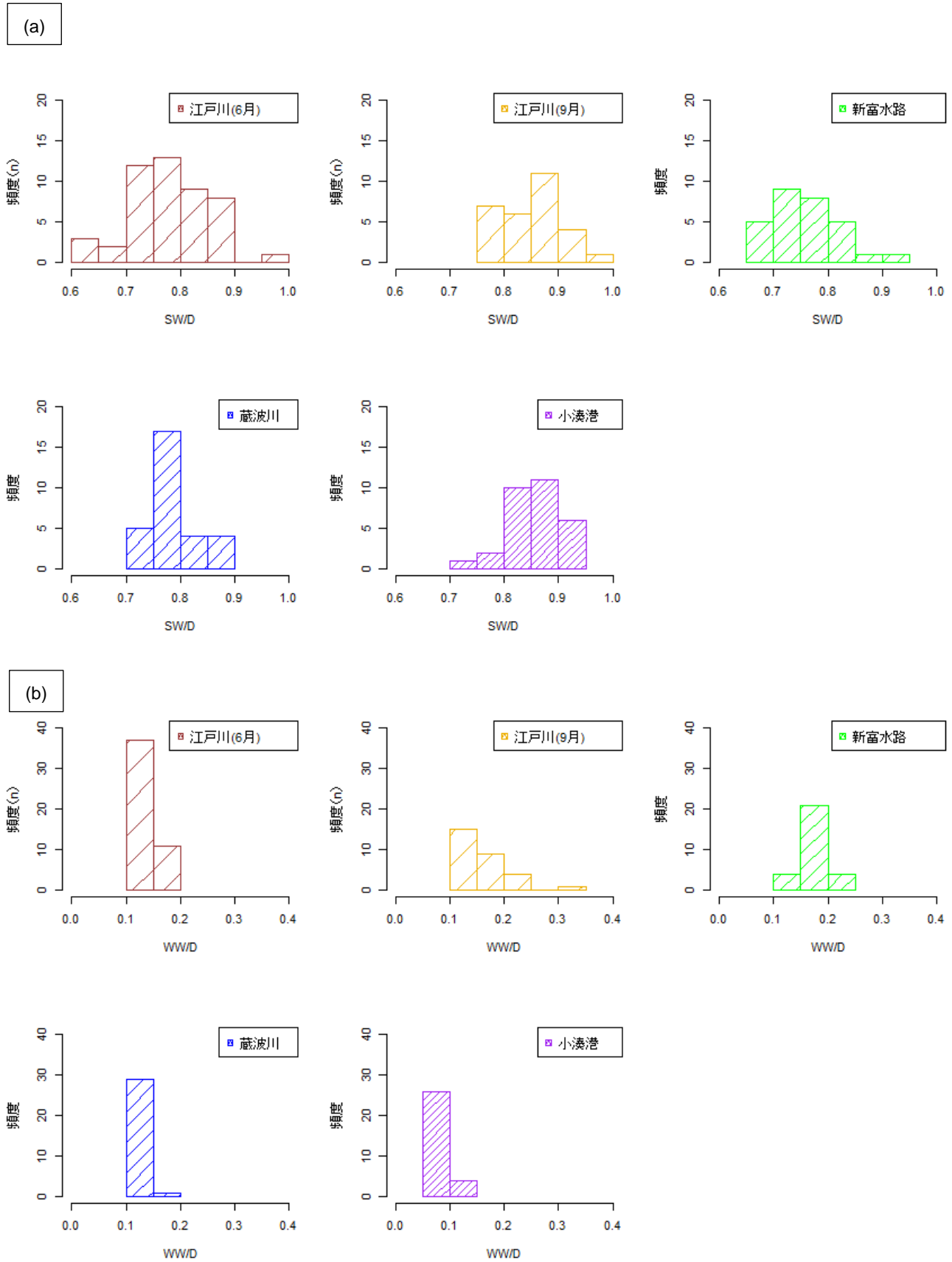


図-14 各採集機会におけるホソウミナナの形態指標 (a) SW/D および (b) WW/D の頻度分布

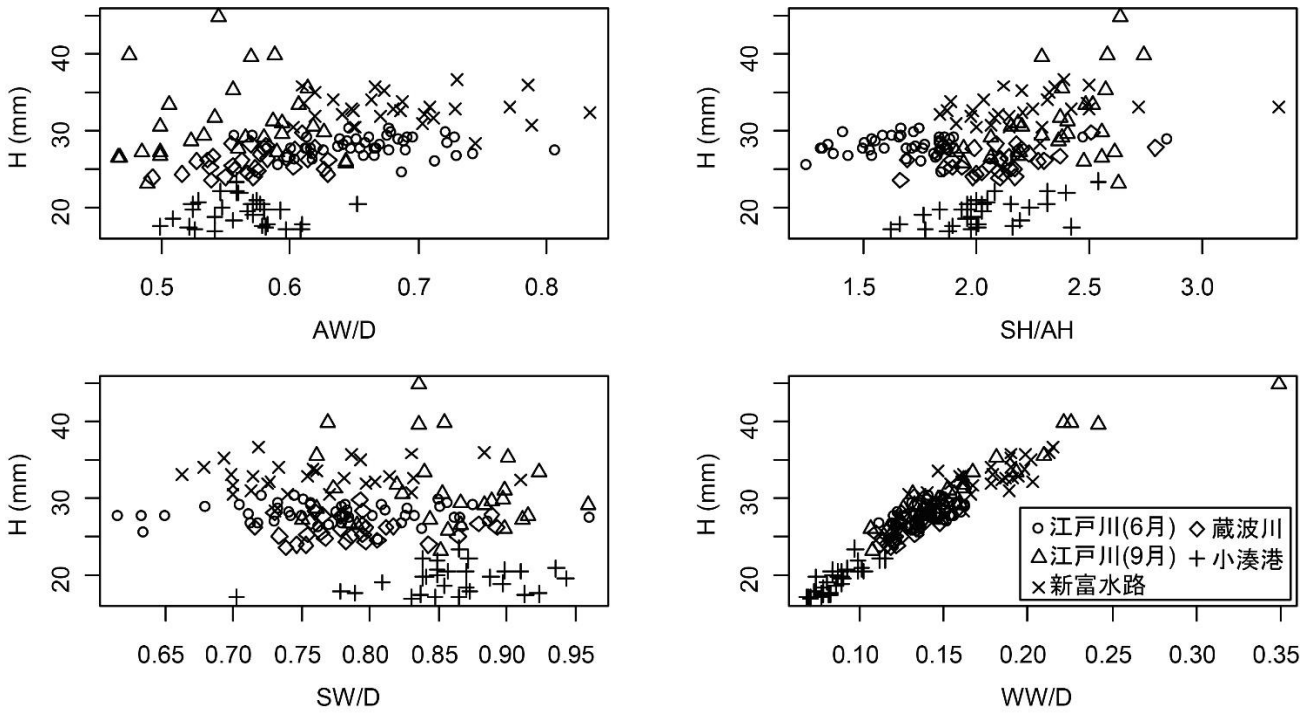


図-15 各採集機会におけるホソウミニナの4種の形態指標 (AW/D, SH/AH, SW/D, WW/D) と殻高 (H) との関係

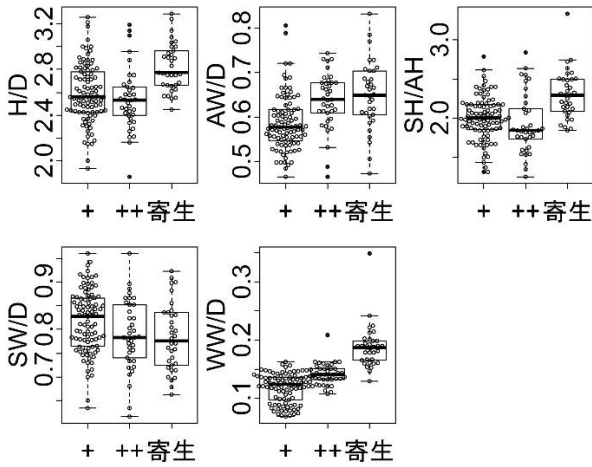


図-16 各形態指標の箱ひげ図. 各群の個体数は+93; ++37; 寄生36.

表-3 Kruskal-Wallis rank sum test を用いた各形態指標の3群 (成熟度+, ++および寄生) 間比較の結果

	χ^2	自由度	p
H/D	26.45	2	1.8×10^{-6}
AW/D	30.33	2	2.6×10^{-7}
SH/AH	29.24	2	4.5×10^{-7}
SW/D	8.76	2	0.013
WW/D	87.99	2	$< 2.2 \times 10^{-16}$

表-4 Pairwise Wilcoxon rank sum test を用いた形態指標ごとの3群 (成熟度+, ++および寄生) 間の対比殻で得られたp値 (Holm法で補正済み).

	H/D	
	+	++
++	0.23	
寄生	1.4×10^{-5}	3.6×10^{-6}
	AW/D	
	+	++
++	3.1×10^{-5}	
寄生	3.1×10^{-5}	0.56
	SH/AH	
	+	++
++	0.063	
寄生	3.7×10^{-6}	1.0×10^{-5}
	SW/D	
	+	++
++	0.084	
寄生	0.026	0.602
	WW/D	
	+	++
++	2.3×10^{-6}	
寄生	$< 2.0 \times 10^{-16}$	2.0×10^{-11}

と考えられる。

この5つの形態指標の予測子としての有用性を事前に確認するため、3群（成熟度+, ++および寄生）間の形態指標の値の差をKruskal-Wallis testおよびPairwise Wilcoxon rank sum testによるpost-hoc testで検証した。p値はHolm法（Holm, 1979; 永田・吉田, 1997）で補正した。Kruskal-Wallis testの結果、検証したすべての形態指標について、有意水準5%の時、統計的に有意な群間差が認められた（図-16, 表-3）。さらに、Pairwise Wilcoxon rank sum testの結果、有意水準5%の時、形態指標ごとに、1～3組の2群間に有意差が認められた（表-4）。有意差が認められた2群間を具体的に述べると、H/Dに関しては+と寄生, ++と寄生, AW/Dに関しては+と++, +と寄生, SH/AHに関しては+と寄生, ++と寄生, SW/Dに関しては+と寄生, WW/Dに関しては+と++, +と寄生, ++と寄生であった。これらの形態指標は予測子としての有用性が期待できる。成熟度・寄生予測モデル構築の際、k-分割交差検法により分類木の枝を剪定した。本検討ではk = 10とした。

説明変数に性差がある時、性別を考慮した成熟度・寄生予測モデル構築を要する。性別による本種の殻形態、湿重量、形態指標の相違を事前に確認するため、Wilcoxon rank sum testを行った。また、目的変数の成熟度または寄生率に性差がある時、雌雄別の成熟度・寄生予測モデル構築の検討を要する。性別による成熟度または寄生率の相違を事前に確認するため、成熟度では表-1の各採集機会に対して、寄生率では二生吸虫の寄生が確認された江戸川（9月）および新富水路の各データに対して、Fisher's exact testを行った。有意水準は5%とした。全ての統計解析はR Studio Version 1.2.5019で実行した。各統計解析手法の詳細はSokal and Rohlf (1995), 永田・吉田 (1997) およびRのヘルプが参考になる。

2.3 成熟度・寄生予測モデルの評価

成熟度・寄生予測モデルによる予測の正確さは感度（SE）および精度（P）を用いて評価した。

$$SE = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

ここで、TPは真陽性であった個体数、FNは偽陰性（陽性であるが誤って陰性と判定）であった個体数、FPは偽陽性（陰性であるが誤って陽性と判定）であった個体数である。感度は解剖で判明した成熟度もしくは寄生の状態を、成熟度・寄生予測モデルによって正確に予測できた

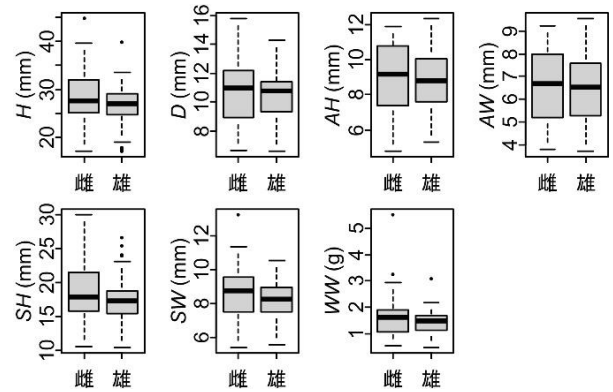


図-17 殻形態および殻込み湿重量の雌雄間比較。

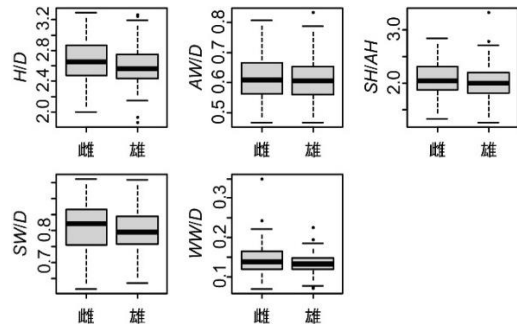


図-18 形態指標の雌雄間比較。

表-5 調査機会ごとの雌雄別成熟度。

	江戸川(6月)		江戸川(9月)		新富水路	
	+	++	+	++	+	++
雄	10	17	5	5	2	0
雌	11	10	7	2	0	0
	蔵波川		小湊港			
	+	++	+	++		
雄	18	2	14	0		
雌	9	1	16	0		

表-6 調査機会ごとの雌雄別の二生吸虫寄生状況。

	江戸川(9月)		新富水路	
	有	無	有	無
雄	1	10	10	2
雌	7	10	16	0

割合である。一方、精度は成熟度・寄生予測モデルによって予測された成熟度もしくは寄生の状態が、解剖の結果と一致した割合である。

3. 結果

3.1 採集したホソウミミナの特徴

性比はほぼ1:1であり、殻形態 (H , D , AH , AW , SH , SW), 殻込み湿重量 (WW), 5つの形態指標 (H/D , AW/D , SH/AH , SW/D , WW/D) について, 有意な性差は認められなかった (Wilcoxon rank sum test, $p > 0.05$) (図-17, 18). また, 各採集機会における成熟度毎の雌雄別個体数を表-5に示す. Fisher's exact testを行ったところ有意な性差は認められなかった ($p > 0.05$). 二生吸虫の寄生は江戸川 (9月) および新富水路で確認され (表-2), 各採集機会において, 寄生率に有意な性差は認められなかった (Fisher's exact test, $p > 0.05$) (表-6). よって, 成熟度・寄生予測モデル構築の際は性別を考慮しなかった.

3.2 成熟度・寄生予測モデル

(1) モデルの概要

分類木分析の結果, 成熟度・寄生予測モデルは4種類の形態指標 (WW/D , AW/D , H/D , SH/AH) で構成された (図-19). SW/D は予測子として選ばれなかった. このモデルでは, 図-19の下部に並ぶ5つのノードのうち, 左にある橙色の3つに分離されると成熟度は+, 右から2番目の灰色のノードに分離されると成熟度は++, 一番右の緑色のノードに分離されると二生吸虫に寄生されているとそれぞれ予測する.

(2) 「成熟度+」の予測の正確さ

成熟度が+と予測される成員の形態指標の条件は3通りあり, 1通り目は $WW/D < 0.159$, $AW/D < 0.610$, 2通り目は $WW/D < 0.159$, $AW/D \geq 0.610$, $H/D \geq 2.762$, 3通り目は $WW/D < 0.159$, $AW/D \geq 0.610$, $H/D < 2.762$, $SH/AH \geq 1.725$ であった (図-19). 感度は0.91 (85/93個体) であり, 実際には+である個体のうち, 誤って++と予測 (偽陰性) された個体は7個体, 寄生と予測 (偽陰性) された個体は1個体であった (図-20). 精度は0.83 (85/102個体) であり, 成熟度・寄生予測モデルでは誤って+と予測された個体のうち, 実際には++ (偽陽性) であった個体は14個体, 寄生 (偽陽性) であった個体は3個体であった (図-20).

(3) 「成熟度++」の予測の正確さ

成熟度が++と予測される成員の形態指標の条件は $WW/D < 0.159$, $AW/D \geq 0.61$, $H/D < 2.762$, $SH/AH \geq 1.725$ であった (図-19). 感度は0.46 (17/37個体) であり, 実際には++である個体のうち, 誤って+と予測 (偽陰性) された個体は14個体, 寄生と予測 (偽陰性) された個体は6個体であった (図-20). 精度は0.68 (17/25個体) であり,

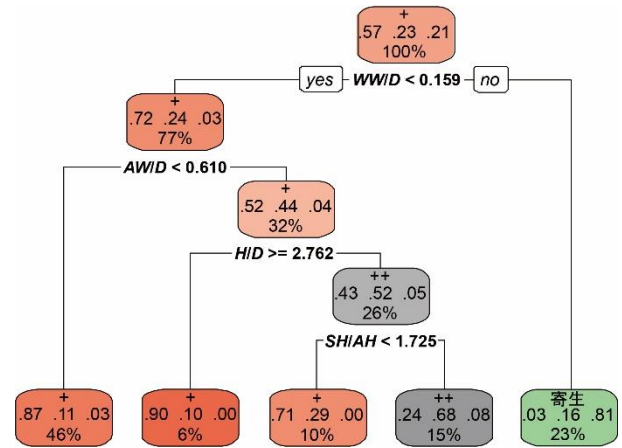


図-19 成熟度・寄生予測モデル. 各ノード下部の%の値はそのノードに属する個体数の百分率, その上の3つの値は, 解剖によって確認された成熟度および寄生の判別個体数の割合であり, 左から+, ++, 寄生をそれぞれ表す.

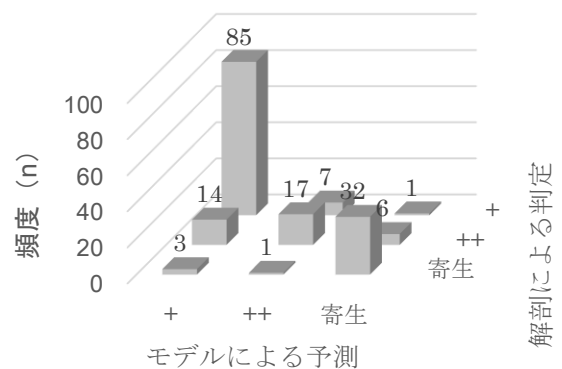


図-20 解剖に基づく判定と成熟度・寄生予測モデルによる予測との関係

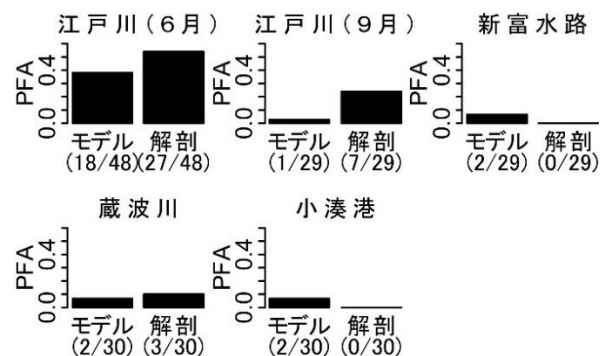


図-21 成熟度・寄生予測モデルによる PFA の予測値解剖による PFA の実測値との比較

成熟度・寄生予測モデルでは誤って++と予測された個体のうち, 実際には+ (偽陽性) であった個体は7個体, 寄

生（偽陽性）であった個体は1個体であった（図-20）。

(4) 「寄生」の予測の正確さ

寄生と予測される成貝の形態指標の条件は $WW/D \geq 0.159$ であった（図-19）。感度は0.89（32/36個体）であり、実際には寄生である個体のうち、誤って+と予測（偽陰性）された個体は3個体、++と予測（偽陰性）された個体は1個体であった（図-20）。精度は0.82（32/39個体）であり、成熟度・寄生予測モデルでは誤って寄生と予測された個体のうち、実際には++（偽陽性）であった個体は6個体、+（偽陽性）であった個体は1個体であった（図-20）。

(5) PFAの予測の正確さ

成熟度・寄生予測モデルによるPFAの予測の正確さは、実際のPFAの値が0.10以下の場合に高く、この場合の予測の誤差の絶対値は0.07以下であり（図-21）、一方、実際のPFAが0.24以上の場合、予測の正確さは低く過小評価し、この場合の予測の誤差は江戸川（6月）で-0.16、江戸川（9月）で-0.21であった（図-21）。これらの過小評価の主な原因は++の個体を誤って+と予測することであり、江戸川（6月、9月）では合計13ケース確認された（図-22）。最も多かった誤った予測パターンは、 $AW/D < 0.610$ であるため+と予測するパターンであり、13ケース中7ケースが該当した。この誤った予測パターンは蔵波川でも1ケース確認された。

4. 考察

4.1 モデルの正確さ

成熟度・寄生予測モデルによる予測の正確さは+の成熟度および寄生の有無に対して高かった。一方、++の成熟度に対しては低かったものの、他の採集機会と比べて明らかにPFAが高い江戸川（6月）に対して、PFAは最も高いと正しく予測できていた。

++に対して成熟度・寄生予測モデルによる予測の正確さが低かった主な原因は、++の個体と+の個体を分離する正確性の低さであった。この問題は成熟度に対してより敏感な予測子のモデルへの導入で解決できる可能性がある。また、これらの結果は生殖腺を+と++に分けた際の観測誤差の影響を受けており、より正確に+と++を判別できる明白な基準の導入によって、モデルの正確さは向上する可能性がある。

4.2 モデルの適用

成熟度・寄生予測モデルの正確さを考慮すると、複数

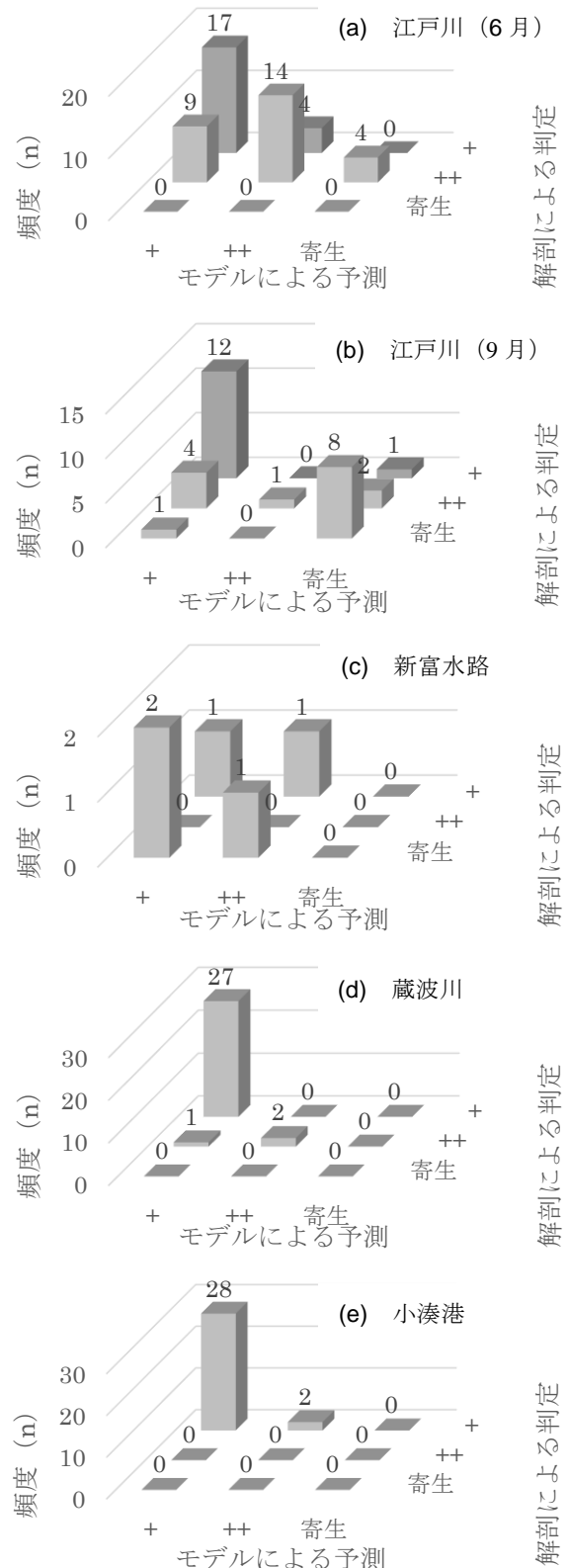


図-22 採集機会ごとの解剖に基づく判定と成熟度・寄生予測モデルによる予測との関係。

の生息場の中からPFAが相対的に高い生息場を抽出する場合には、成熟度・寄生予測モデルの適用が期待でき

る。

PFA だけでは1つの生息場における繁殖力は評価できないが、PFA は成員の単位個体数あたりの繁殖可能な個体数の割合を示す値とすることができる。PFA の高さは二生吸虫の寄生によって繁殖不能になるリスクの低さや、繁殖へのエネルギーの配分のしやすさと関係している。後者は摂餌を通して得られるエネルギーの豊富さを反映していると考えられる (Cheng and Lam, 1999)。よって、PFA は生息場が持つ繁殖場としての質の高さを表す指標として用いることができ、造成した干潟や岩礁等の生息場の繁殖場としての質の相対評価や長期モニタリングに活用が期待できる。一方、高い予測の正確さを必要とする場合には、成熟度・寄生予測モデルの利用は適さない。例えば、ある生息場の PFA の絶対値を求めたい場合がこれに該当する。

今回開発したモデルによる PFA の予測の正確さは、実際の PFA が高い場合に、明らかに低下するケースが認められたため、本モデルを用いて1つの生息場における本種の繁殖力を定量化することは困難と考えられる。1つの生息場における本種の繁殖力を定量化するためには、本モデルを改良し、PFA をより正確に予測できるようにする必要がある。

4.3 本手法を利用する際の注意点と今後の課題

本種の生殖腺の成熟度は近縁種のイボウミナ *Batillaria zonalis* と同様に、時期によって変化する可能性がある (Chan and Chan, 2005)。また、本種の生殖腺の成熟時期は水温によって前後する可能性がある (Yamada, 1982)。本検討に用いた成員は繁殖期の特定の時期に各採集地の限られた空間で採集されたため、成熟度の値は偏っている可能性がある。また、二生吸虫の寄生率は江戸川 (6月) と江戸川 (9月) の間で明白に異なっていた。これらを考慮すると、PFA を求める際は、繁殖期である春から秋に、評価対象の生息場全域において、3か月に1回よりも高い頻度で貝を採集し、平均的な PFA を予測する必要があると考えられる。その際に採集する貝の数は、PFA の生息場内のばらつきと関わる貝の生息数、生息場内の環境異質性、および生息場の広さを考慮して設定する必要があると考えられる。

本検討では、生殖腺が肥大し内部組織がよく観察できる、GSI の平均値が 35.5 である個体の成熟度を ++、生殖腺が小さく内部組織がよく観察できない、GSI の平均値が 24.7 である個体の成熟度を + とそれぞれ評価して、++ の個体の割合を PFA と定義した。生殖腺が十分に成熟していなければ繁殖できないため、視覚的に生殖腺の発達

が確認でき、GSI のより高い個体を、より繁殖の期待できる個体として評価することは妥当である。しかし、この成熟度に基づく個体の区別が、実際の繁殖の可否とどの程度一致するののかについては検証されていない。もし、より正確に成員における繁殖可能な個体を判別できる明白な基準が見つければ、成熟度・寄生予測モデルの正確さは増し、実用性は一層高まるであろう。今後の課題である。

本検討では東京湾内外に生息する本種を対象に成熟度・寄生予測モデルを構築したが、本モデルの他海域への適用可能性は検討していない。今後の課題である。

5. まとめ

本検討では1つの生息場におけるホソウミナ個体群の繁殖力の定量評価に必要な PFA を、簡易に求められる形態指標から成る条件を用いて予測する手法を新規に開発した。相対的な PFA の高さを推定できる本手法は、複数の生息場を対象とした繁殖場としての質の相対評価や、1つの生息場の繁殖場としての質の経時的変動のモニタリングを実施する際に利用が期待される。本手法を改良し、簡易さを維持しながら PFA の推定の正確さを向上させることにより、生息場の繁殖力の評価ができ、多くの現場海域に普及できる手法が実現できると考えられる。生息場を多様な生物種の繁殖場の観点から評価するには、同様の手法の他種への適用可能性の検討を要し、今後の課題である。

(2022年8月30日受付)

謝辞

本研究を実施するにあたり、東北大学の柚原剛様には研究計画から原稿執筆まで、幅広くご対応いただきました。現地採集にあたり、松戸市漁業協同組合、市川市漁業協同組合、東京東部漁業協同組合、埼玉東部漁業協同組合、東安房漁業協同組合小湊支所に便宜を図っていただきました。二生吸虫の一部は旭川医科大学の佐々木瑞希助教に種同定をしていただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

秋山吉寛 (2020) : 魚類に着目した生息場再生のための適地選定方法に関する検討, 令和2年度国土交通省国土技術研究会論文集 (活力), pp. 32-35.

- <https://www.mlit.go.jp/chosahokoku/r2giken/brochure/r2katsuryoku.pdf>. (August, 2022)
- 秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也 (2014) : 内湾に分布する魚類の生息場と生活史に基づく類型, 国土技術政策総合研究所資料, No. 809. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0809pdf/ks0809.pdf>. (August, 2022)
- 秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也 (2015) : 沿岸域の環境デザインに向けた魚類の類型, 海岸工学論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I_1495-I_1500.
- 秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也 (2016) : 浮遊幼生に着目した生息場の空間配置の検討, 国土技術政策総合研究所資料, No. 889, pp.28. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0889pdf/ks0889.pdf>. (August, 2022)
- 秋山吉寛・黒岩寛・岡田知也 (2017a) : 東京港京浜運河周辺のシースケープの検討—浮遊期をもつ貝類・甲殻類に着目して—, 国土技術政策総合研究所資料, No. 989, pp. 38. <https://www.y.sk.nilim.go.jp/kenkyuseika/pdf/ks0989.pdf>. (August, 2022)
- 秋山吉寛・黒岩寛・岡田知也 (2018a) : 浮遊期をもつ底生性モデル生物の多様性および持続性に着目した生息場の空間配置の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 74, No. 2, pp. I_1219-I_1224.
- 秋山吉寛・黒岩寛・岡田知也 (2018b) : 内湾生物の多様性および持続性に着目した生息場の空間配置の検討, 国土技術政策総合研究所資料, No. 999, pp. 15. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0999pdf/ks0999.pdf>. (August, 2022)
- 秋山吉寛・黒岩寛・眞田武・増田龍哉・岡田知也 (2017b) : 東京港京浜運河周辺の浮遊期をもつ貝類・甲殻類に適したシースケープの検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_1381-I_1386.
- 秋山吉寛・内藤了二・吉村香菜美・岡田知也 (2020) : 沿岸域における海生生物の分布とシースケープとの関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I_1045-I_1050.
- 秋山吉寛・三戸勇吾・大西晃輝・柚原剛・内藤了二・岡田知也 (2022) : ホソウミニナの繁殖場としての生息場の評価手法に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 78, No. 2.
- 足立尚子・和田恵次 (1997) : ホソウミニナの卵と発生様式, ちりぼたん, Vol. 28, No. 2, pp. 33-34.
- 岡田知也・三戸勇吾・桑江朝比呂 (2020) : 沿岸域における環境価値の定量化ハンドブック, 生物研究社, 262p.
- 奥谷喬司 (2017) : 日本近海産貝類図鑑第二版, 東海大学出版会, 1375p.
- 金谷弦・伊藤萌 (2022) : 松島湾櫃ヶ浦で発見されたウミニナ *Batillaria multiformis* の卵塊, みちのくベントス, No. 6, pp. 47-51.
- 長澤和也 (2008) : 魚介類に寄生する生物, 成山堂書店, 186p.
- 永田靖・吉田道弘 (1997) : 統計的多重比較法の基礎, サイエンティスト社, 187p.
- 風呂田利夫 (2005) : 内湾ベントスにおける地域個体群間ネットワークの重要性, 水産総合研究センター研究報告別冊, Vol. 3, pp.35-46.
- 村永蓮・富山清升 (2020) : 鹿児島湾におけるウミニナ *Batillaria multiformis* (Liscke, 1869)の殻形態の比較, *Nat. Kagoshima*, Vol. 46, pp.423-433.
- ADACHI, N. and WADA, K. (1999): Distribution in relation to life history in the direct-developing gastropod *Batillaria cumingi* (Batillariidae) on two shores of contrasting substrata, *J. Moll. Stud.*, Vol. 65, pp. 275-287.
- ALMANY, G. R., CONNOLLY, S. R., HEATH, D. D., HOGAN, J. D., JONES, G. P., MCCOOK, L. J., MILLS, M., PRESSEY, R. L. and WILLIAMSON, D. H. (2009): Connectivity, biodiversity conservation and the design of marine reserve networks for coral reefs. *Coral Reefs*, Vol. 28, pp. 339-351.
- BORSETTI, S., MUNROE, D., RUDDERS, D. and CHANG, J. (2020): Timing of the reproductive cycle of waved whelk, *Buccinum undatum*, on the U.S. Mid-Atlantic Bight. *Helgoland Mar. Res.*, Vol. 74, 5.
- BOULDING, E. G. and VAN ALSTYNE, K. L. (1993): Mechanisms of differential survival and growth of two species of *Littorina* on wave-exposed and on protected shores, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 169, pp. 139-166.
- BYERS, J. E. and GOLDWASSER, L. (2001): Exposing the mechanism and timing of impact of nonindigenous species on native species, *Ecology*, Vol. 82, No. 5, pp. 1330-1343.
- CARDINALE, B. J., DUFFY, E., GONZALEZ, A., HOOPER, D. U., PERRINGS, C., VENAIL, P., NARWANI, A., MACE, G. M., GRACE, J. B., LARIGAUDERIE, A., SRIVASTAVA, D. and NAEEM, S. (2012): Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, Vol. 486, No. 7401, pp. 59-67.

- CHAN, D. H. L. and CHAN, B. K. K. (2005): Effect of epibiosis on the fitness of the sandy shore snail *Batillaria zonalis* in Hong Kong, *Mar. Biol.*, Vol. 146, pp. 695-705.
- CHENG, S. G. and LAM, S. (1999): Effect of food availability on egg production and packaging in the intertidal scavenging gastropod *Nassarius festivus*. *Mar. Biol.*, Vol. 135, pp. 281-287.
- ELHASNI, K., GHORBEL, M., VASCONCELOS, P. and JARBOUI, O. (2010): Reproductive cycle and size at first sexual maturity of *Hexaplex trunculus* (Gastropoda: Muricidae) in the Gulf of Gabès (southern Tunisia). *Invertebr. Reprod. Dev.*, Vol. 54, No. 4, pp. 213-225.
- FUKUDA, H., HAGA, T. and TATARA, Y. (2008): Niku-nuki: a useful method for anatomical and DNA studies on shell-bearing, *Zoosymposia*, Vol. 1, pp. 15-38.
- FUROTA, T., SUNOBE, T., ARITA, S. (2002): Contrasting Population Status between the Planktonic and Direct-Developing Batillariid Snails *Batillaria multiformis* (Lischke) and *B. cumingi* (Crosse) on an Isolated Tidal Flat in Tokyo Bay. *Venus*, Vol. 61, No. 1-2, pp. 15-23.
- HANSKI, I. (1999): *Metapopulation Ecology*. Oxford University Press, Oxford.
- HARRISON, P. A., BERRY, P. M., SIMPSON, G., HASLETT, J. R., Blicharska, M., BUCUR, M., DUNFORD, R., EGOH, B., GARCIA-LLORENTE, M., GEAMĂNĂ, N., GEERTSEMA, W., LOMMELEN, E., MEIRESONNE, L. and TURKELBOOM, F. (2014): Linkages between biodiversity attributes and ecosystem services: A systematic review. *Ecosyst. Serv.* Vol. 9, pp. 191-203.
- HECHINGER, R. F. (2007): Annotated key to the trematode species infecting *Batillaria attramentaria* (Prosobranchia: Batillariidae) as first intermediate host, *Parasitol. Int.*, Vol. 56, pp. 287-296.
- HECHINGER, R. F., LAFFERTY, K. D., MANCINI III, F. T., WARNER, R. R. and KURIS, A. M. (2009): How large is the hand in the puppet? Ecological and evolutionary factors affecting body mass of 15 trematode parasitic castrators in their snail host, *Evol. Ecol.*, Vol. 23, pp. 651-667.
- HOLM, S. (1979): A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scand. J. Stat.*, Vol. 6, pp. 65-70.
- JOHANESSON, K., ROLÁN-ALVAREZ, E. and ERLANDSSON, J. (1997): Growth rate differences between upper and lower shore ecotypes of the marine snail *Littorina saxatilis* (Olivi) (Gastropoda), *Biol. J. Linn. Soc.*, Vol. 61, pp. 267-279.
- JOHNSON, M. P., ALLCOCK, A. L., PYE, S. E., CHAMBERS, S., J., FITTON, D. M. (2001): The effects of dispersal mode on the spatial distribution patterns of intertidal molluscs. *J. Anim. Ecol.*, Vol. 70, pp. 641-649.
- KAMEDA, Y., KAWAKITA, A., KATO, M. (2007): Cryptic genetic divergence and associated morphological differentiation in the arboreal land snail *Satsuma (Luchuhadra) largillierti* (Camaenidae) endemic to the Ryukyu Archipelago, Japan, *Mol. Phylogenet. Evol.*, Vol. 45, pp. 519-533.
- LIN, P. P. (2006): Prevalence of parasitic larval trematodes in *Batillaria attramentaria* throughout Elkhorn Slough, *Elkhorn Slough Tech. Rep. Ser.*, Vol. 2006, No. 1.
- MASUCCI, G. D. and Reimer, J. D. (2019): Expanding walls and shrinking beaches: loss of natural coastline in Okinawa Island, Japan. *PeerJ*, Vol. 7, e7520.
- MCLEOD, A. I. (2011): Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. R package version 2.2. <https://CRAN.R-project.org/package=Kendall>
- MIURA, O., KURIS, A. M., TORCHIN, M. E., HECHINGER, R. F. and CHIBA, S. (2006): Parasites alter host phenotype and may create a new ecological niche for snail hosts, *Proc. R. Soc. B*, Vol. 273, pp. 1323-1328.
- MIURA, O., KURIS, A. M., TORCHIN, M. E., HECHINGER, R. F., DUNHAM, E. J. and CHIBA, S. (2005): Molecular-genetic analysis reveal cryptic species of trematodes in the intertidal gastropod, *Batillaria cumingi* (Crosse), *Int. J. Parasitol.*, Vol. 35, pp. 793-801.
- PARDO, L. M. and JOHNSON, L. E. (2005): Explaining variation in life-history traits: growth rate, size, and fecundity in a marine snail across an environmental gradient lacking predators, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 296, pp. 229-239.
- PECHENIK, J. A. (1999): On the advantages and disadvantages of larval stages in benthic marine invertebrate life cycles. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 177, pp. 269-297.
- SASAKI, M., MIURA, O. and NAKAO, M. (2022): *Philophthalmus hechingeri* n. sp. (Digenea: Philophthalmidae), a human-infecting eye fluke from the Asian mud snail, *Batillaria attramentaria*, *J. Parasitol.*, Vol. 108, No. 1, pp. 44-52.
- SHANKS, A. L., GRANTHAM, B. A. and CARR, M. H.

(2003): Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves. *Ecol. Appl.*, Vol. 13, pp. S159-S169.

SHIMURA, S. and ITO, J. (1980): Two new species of marine cercariae from the Japanese intertidal gastropod, *Batillaria cumingii* (Crosse), *Jpn. J. Parasitol.*, Vol. 29, pp. 369-376.

SOKAL, R. R. and ROHLF, F. J. (1995): *Biometry* Third Edition, W. H. Freeman and Company, 887p.

VLACHOPOULOU, E. I. and Makino, M. (2017) Local fisheries and land reclamation: the case of the Tokyo Bay mantis shrimp fishery, in: P. Guillotreau, A. Bundy, R. I. Perry (Eds.), *Global Change in Marine Systems: Integrating Natural, Social and Governing Responses* (1st ed.), Routledge, pp. 220-236.

WONHAM, M. J., O'CONNOR, M. and HARLEY, C. D. G. (2005): Positive effects of a dominant invader on introduced and native mudflat species, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 289, pp. 109-116.

YAMADA, S. B. (1982): Growth and longevity of the mud snail *Batillaria attramentaria*, *Mar. Biol.*, Vol. 67, pp. 187-192.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1228 October 2022

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019 〕
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料

No.1228

生物の繁殖場としての沿岸生息場の評価手法に関する検討
—東京湾内外のホソウミニナに関する事例—

October 2022