

三河湾東奥部の河口干潟（六条潟）における アサリ *Ruditapes philippinarum* 個体群の変動機構

芝 修一^{1,†}, 姫野天領¹, 大嶋真謙¹, 濱田孝治¹, 中村憲司¹,
吉田 司¹, 蒲原 聡², 田中義人³, 鈴木輝明⁴

The mechanism of population change of the Manila clam *Ruditapes philippinarum* at the river mouth tidal flat (Rokujo-gata) in the eastern part of Mikawa Bay, Japan

Shuichi SHIBA^{1,†}, Takamune HIMENO¹, Masakane OSHIMA¹,
Kouji HAMADA¹, Kenji NAKAMURA¹, Tsukasa YOSHIDA¹,
Satoru KAMOHARA², Yoshito TANAKA³ and Teruaki SUZUKI⁴

三河湾東奥部の豊川河口に位置する六条潟では、毎年大量にアサリ稚貝が発生し、漁業者によって採捕され伊勢・三河湾の沿岸域に広く移植されている。しかし、近年秋季から冬季にかけてアサリ稚貝が大量に減耗する現象がみられている。このアサリ資源の減耗要因を明らかにするため、2015年秋季から2017年春季にかけて個体群の推移、採捕圧および食害動物の出現状況を把握するとともに水温、クロロフィル *a* および海底近傍の流れの連続観測を実施した。特に減耗が顕著であった2015年秋冬季について、水温、餌料量を変数とする既往の成長モデルにより成長・生存状況を検討したが、生理的死亡は再現されなかった。風浪に伴う掘り出しによるエネルギー損失も考慮した成長モデルに改良し、成長・生存状況を再検討した。その結果、成長や減耗時期をおおむね再現することができたことから、風浪が顕著な海域においては掘り出しによるエネルギー損失も重要である可能性が示唆された。

キーワード：アサリ、減耗、風浪、成長モデル、個体群動態、三河湾

Massive occurrences of juvenile clams *Ruditapes philippinarum* have been appearing every spring at Rokujo tidal flat located in the Toyo River mouth region at the eastern part of Mikawa Bay. These have been collected by licensed fishermen and transplanted into the coastal shallows of Ise and Mikawa Bay. However, the Manila clam population have been showed a tendency to decline sharply from autumn to winter in recent years. To understand this phenomenon, we conducted field observation about its population change, catch effort and the appearance of predators from autumn 2015 to spring 2017. In addition, we continuously monitored water temperature, chlorophyll *a* and near-bottom currents condition. At first, we examined growth and the survival situation of clams by the usual growth model that assumes water temperature and the quantity of phytoplankton as variables, using data from autumn to winter 2015, when mortality was remarkable. However, we couldn't represent the physiological death. Then, we improved the model that considered an energy loss of dig caused by wind wave, too. As a result, population changes were correctly expressed.

2021年6月3日受付, 2022年1月11日受理

¹ 株式会社シャトー海洋調査, 〒530-0043 大阪府大阪市北区天満1-13-14
Chateau Marine Survey Co., Ltd., 1-13-14 Tenma, Kita, Osaka 530-0043, Japan

² 愛知県水産試験場, 〒443-0021 愛知県蒲郡市三谷町若宮97
Aichi Fisheries Research Institute, 97, Wakamiya, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan

³ 名城大学理工学部, 〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口1-501
Department of Science and Engineering, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

⁴ 名城大学大学院総合学術研究科, 〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口1-501
Graduate School of Environmental and Human Sciences, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

† shiba@chateau-kaiyou.co.jp

Therefore, we find that an energy loss might have an important role for growth and the survival situation of clams in the shallows where wind wave is remarkable especially in the case of insufficient food condition.

Key words: *Ruditapes philippinarum*, Manila clam, depletion, wind wave, growth model, population dynamics, Mikawa Bay

はじめに

アサリ *Ruditapes philippinarum* の全国漁獲量は、1984年以降減少に転じ、2018年では7,736トンとなった。我が国における重要な産地である愛知県の漁獲量は、1989年に過去最高の23,000トン記録した後漸減し、2006年までは10,000トン程度で低迷していたが、2008年以降20,000トン程度に回復し、2009年から2015年の間には全国の5割以上を占めた (Fig. 1a, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/, 2020年12月16日)。このような漁獲量の回復は、1998年以降の620 haにおよぶ大規模な干潟・浅場造成による生息域の拡大とアサリ稚貝の大量移植 (Fig. 1b) に支えられている (本田ほか, 2015) と考えられてきた。しかし、近年においては移植後のアサリの生残が極端に悪い事例 (服部ほか, 2017) や、富栄養化対策としての流入負荷削減に伴う栄養塩類の濃度低下が餌料不足を招き、アサリ資源の減少に影響している可能性が論じられており (曾根ほか, 2016; 鈴木, 2018; 蒲原ほか, 2018; 鶴

島ほか, 2019)、2014年以降漁獲量は著しく低下している。餌料量とアサリの減耗との関係性について著者らは、伊勢湾東部沿岸域の小鈴谷干潟および三河湾北部の西三河地区において水温と餌料量を説明変数とする個体成長モデルを用いた研究 (芝ほか, 2020, 2021; 蒲原ほか, 2021) を進めてきた。これらの海域は、伊勢・三河湾で秋冬季に卓越する北西風の影響が少ない海域であったことから、モデルのエネルギー収支において波浪によってアサリが受ける影響については考慮していなかった。特に小鈴谷干潟は、2000年に建設された人工島の後背地にあたり、冬季風浪によるアマモ実生株の流出が減りアマモ場が拡大したことが指摘 (Yoshida et al., 2009) されている。

漁獲量が落ち込み、資源レベルが低下した伊勢・三河湾ではあるが、三河湾東奥部に位置し、豊川の河口干潟である六条潟 (Fig. 2) においては、2014年以降も毎年大量にアサリ稚貝が発生し、その稚貝は県内各地に移植されている。六条潟は、豊川からの河川水流入により、小型の植物

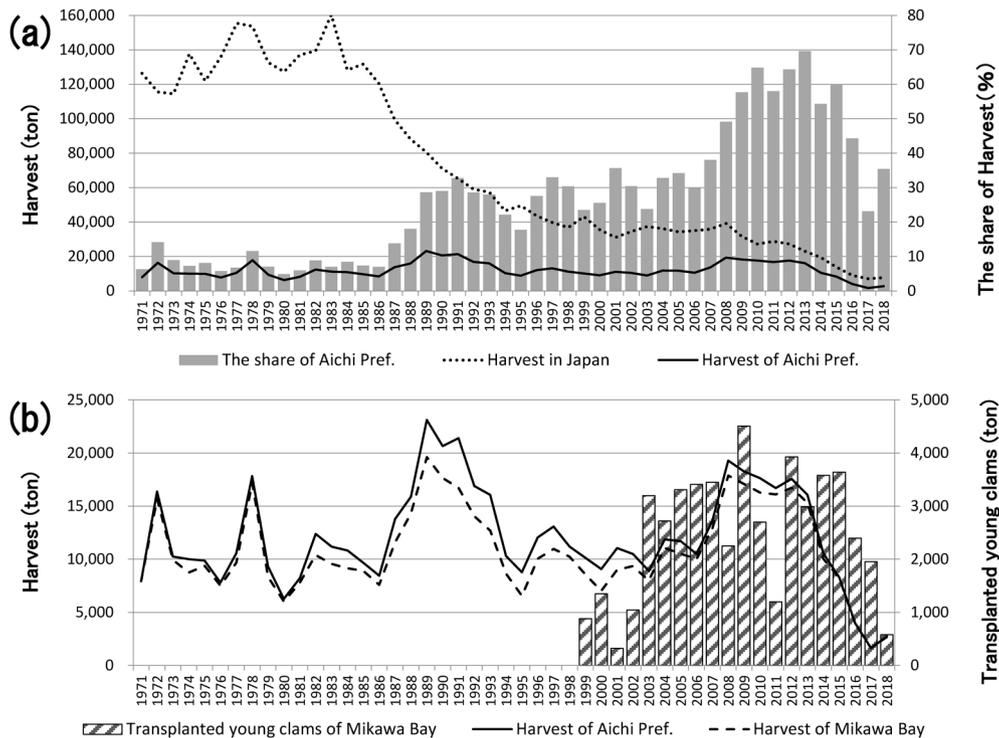


Figure 1. (a) Yearly changes of harvested adult Manila clams in Japan and Aichi Prefecture. The gray bar graph indicates the share of Aichi Pref. from 1971 to 2018. (b) Yearly changes of harvested adult Manila clams in Aichi Pref. and Mikawa Bay. The shadowed bar graph indicate transplanted young Manila clams in Mikawa Bay from 1971 to 2018.

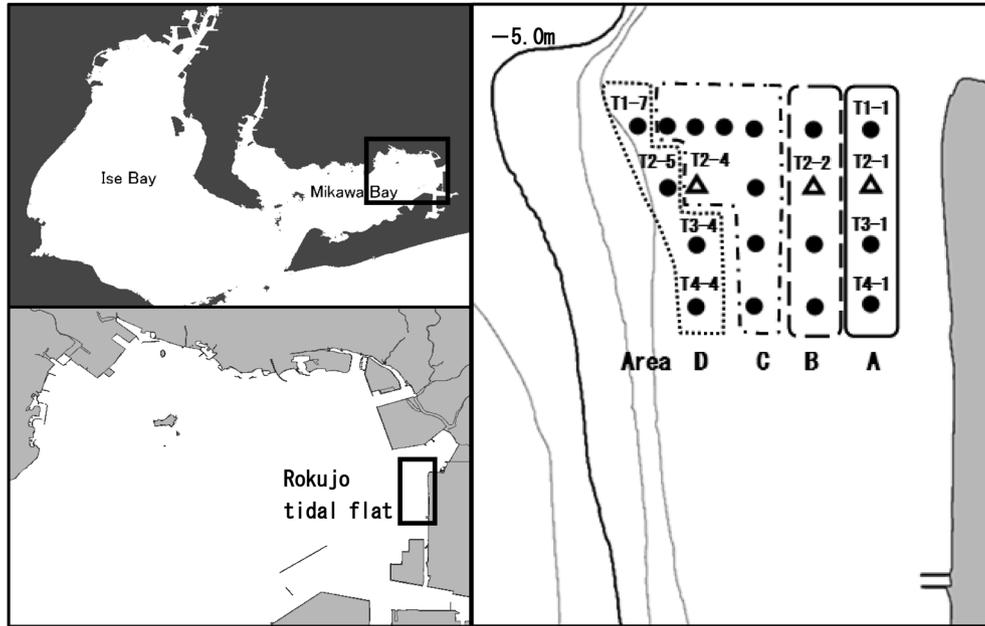


Figure 2. Location of sampling and monitoring stations at the Rokujo tidal flat.

プランクトン、特に低塩分下あるいは冬季でも増殖可能なクリプト藻綱が発生しやすい海域（森ほか、2020）であり、餌料価値が高い微細藻類の発生が六条潟でのアサリ稚貝の生残、成長を可能にする重要な条件の一つになっていると考えられている（栗田ほか、2020）。このようなアサリの餌料となる植物プランクトンの増殖に恵まれた環境下にあると考えられる六条潟においても、近年では前年秋に着底し成長した個体群は秋冬季に消滅することが報告（山田ほか、2015；石田ほか、2016、2017、2018）されている。その要因については、アサリ稚貝の性成熟によるエネルギー損失や秋季の餌料不足（曾根ほか、2019）やカゴ飼育試験の結果から波浪による影響（鈴木ほか、2018）が考えられているが、いずれも定性的な指摘に留まり詳細な解析は行われていない。

波浪によってアサリが受ける影響については、受動的な水平移動による逸散・集積と能動的な潜砂行動の増加による活力低下が考えられ、前者については多くの知見（柿野ほか、1991；桑原ほか、1993、1994；佐藤ほか、2020）が報告されている。一方で後者についての定量的な知見は少なく、柴田ほか（1997）や慶野ほか（2005）により摂餌量や運動量と活力との関係が求められている。特に慶野ほか（2005）は、アサリが砂上に掘り出され潜砂する頻度と潜砂行動に伴うエネルギー損失による肥満度の減少量との関係について検討し、冬季の室内実験結果より露出1回当たりの肥満度の減少量は0.057であることを導き出している。

そこで、本研究では六条潟において2015年秋季から2017年春季にかけて2年間にわたり、現地調査により個体群の推移や減耗時期、食害動物の出現状況等および放流用

稚貝の採捕に伴う採捕圧の推移を把握するとともに、水温とクロロフィル a 濃度の連続観測結果をもとに個体成長モデル（芝ほか、2020、2021）を用いて、水温や植物プランクトン量がアサリの成長、性成熟および生存に与える影響を検討した。さらに、海底近傍の流れの連続観測結果をもとに風浪による影響の解析を行ったうえで、洗掘等によるアサリの掘り出しに伴うエネルギー損失を考慮した個体成長モデルに改良し、秋季から冬季にかけてのアサリ資源の減耗要因を検討した。

材料と方法

調査地点および調査時期

豊川河口域南部の六条潟に調査海域を設定し、北から南の4測線（T1-T4）に4地点から7地点、計20地点の調査地点を設けた（Fig. 2）。調査期間は2015年10月から2017年5月まで、調査頻度は2015年10月から12月、2016年10月から11月には1週間から10日に1回、その他は月1回を基本とし、計35回行った。なお、調査地点を岸沖方向に4つの区域に分け、それぞれ岸からA、B、CおよびD区とした（Fig. 2）。

アサリ個体数密度、殻長等、肥満度の推移

各地点において、日中の冠水時に方形枠を用いて深さ10 cmまでの底泥を潜水により1回採取した。方形枠の大きさは、調査時の個体数密度に合わせて10×10 cm、20×20 cmもしくは50×50 cmとした。採取した底泥は、目合い1 mmの篩に残ったものを試料として実験室に持ち帰った。得られた試料は適宜分割して、アサリを計数した。アサリ個体をよく混合して殻長および殻付湿重量については

100個体を上限に測定した。また、2015年10月15日、10月27日、11月18日、2016年2月1日、6月14日、11月14日、2017年2月5日および5月9日の8回の調査において採集した殻長10 mm以上の個体から、30個体を上限に軟体部湿重量、殻長、殻高および殻幅を測定した。これらの測定値を用いて、式(1)により肥満度 (Condition Factor, 以下、CFとする) を求めた。

$$CF = \frac{WW}{L \times SH \times SW} \times 10^5 \quad (1)$$

WW: 殻付湿重量 (gWW), L: 殻長 (mm), SH: 殻高 (mm), SW: 殻幅 (mm)。

アサリ稚貝の特別採捕重量

調査海域は港湾区域内にあるため、愛知県の特別採捕許可を受けた漁業者によりアサリ稚貝の採捕が行われている。採捕は1999年に始まり、おおむね7月から11月の期間に(石田ほか, 2017), 約5 mm目の器具(まんがおよび水流噴射式貝桁網)を用いて採集されている(愛知県, 2008)。

調査期間中における採捕重量を把握するため、愛知県漁業協同組合連合会より漁法別(まんがおよび水流噴射式貝桁網)の日毎の特別採捕重量を聞き取った。特別採捕によって取り上げられた個体数密度(以下、採捕圧とする)は、採捕重量を採捕許可エリアのうち最低水面(Datum Line, 以下、D.L.とする)下1 m以浅の面積(まんが: 約268 ha, 水流噴射式貝桁網: 約66 ha)と各月における殻長7 mm以上の1個体あたりの平均湿重量で除して得た。

コホートの解析と殻長成長の推定

コホート解析は、各調査日における殻長計測結果を用いて相澤・滝口(1999)の方法により行った。さらに、発生個体群別調査日別の平均殻長から成長速度($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$)を算出した。

食害動物

各調査日各地点において潜水目視観察により、100×100 cmの方形枠内に表在するツメタガイ *Glossaulax didyma* およびキセワタガイ *Philine argentata* の個体数を計数した。また、調査海域周辺におけるカモ類の飛来数は、2016年5月から2017年3月における各日の調査開始時(原則的に9時)に船上からの目視観察により、おおむね100羽を一塊として群れごとの概数を記録した(計22回)。

餌料環境等の連続観測

(i) 観測地点、期間および頻度

餌料環境および水温を把握するため、測点T2-1, T2-2およびT2-4において2015年10月15日から2016年11月30日までクロロフィル濁度計(COMPACT-CLWおよびINFINITY-CLW, JFEアドバンテック社製)を用いた連続観測を実施した。また、アサリ調査時に多項目水質計(AAQ-RINKO, JFEアドバンテック社製)を用いて深度、水温、

電気伝導度、塩分、クロロフィルa蛍光強度、濁度、溶存酸素、pH、光量子およびORPの鉛直観測を0.1 m間隔で実施した。

クロロフィル濁度計は、センサーの中央部が海底から10 cmの高さになるよう横向きに設置し、10分間の間歇作動(バースト)、測定間隔1秒、観測数30個で観測した。

(ii) 観測データの解析方法(クロロフィル濁度計)

異常値を取り除いた後、バースト毎のクロロフィルa蛍光強度、水温および濁度の時間平均値を算出した。クロロフィルa蛍光強度からクロロフィルa濃度への換算は、現場海水の蛍光法(Strickland and Parsons, 1968)による分析値で補正した。さらに、クロロフィルa濃度から炭素濃度への換算は、クロロフィルa濃度と同時に採水した海水500 mLをガラスろ紙(テクノロジーズジャパン株式会社製, GF/C)でろ過して、CHNコーダー(株式会社ジェイ・サイエンス・ラボ製, MICRO CORDER JM10)を用いて分析した懸濁態有機炭素(Particulate Organic Carbon 以下、POCとする)で補正した。クロロフィルa濃度とPOCの分析は、2015年10月から2016年11月まで毎月9検体ずつ計90検体行った。

個体成長モデルを用いた成育状況の推定

芝ほか(2020)は、伊勢湾東部沿岸域において水温と餌料環境の変化に伴うアサリの成長過程を表現するモデル(以下、芝モデルとする)を構築した。このモデルは、餌料摂食による同化と呼吸による異化の差分でアサリの成長が表現されているSolidoro et al. (2000)が提案したモデルに、生殖腺へのエネルギー配分を考慮した項を追加している。さらに、芝ほか(2021)は同一データの水温、植物プランクトン量を用いて、餌料摂取やエネルギー配分等の考え方に違いがみられる他のモデル(Flye-Sainte-Marie et al., 2007a, 2007b; 鶴島ほか, 2019)との比較検証も行い、芝モデルはアサリ資源量低下と餌料環境との関連解析に有効なツールであることを示している。蒲原ほか(2021)は、芝モデルを利用し、西三河地先海域におけるアサリ資源量の低下について評価を行っている。

芝モデルでは、Solidoro et al. (2000)と同様に、殻付湿重量 WW (gWW) と殻長 L (mm) の関係を式(2) および(3)で与え、軟体部乾重量 DW (gDW) を主要な予報変数としている。

$$WW = a \times L^3 \quad (2)$$

$$DW = b \times WW^p \quad (3)$$

軟体部乾重量 DW (gDW) の時間変化は、式(4)に基づいて同化速度 A ($\text{gDW} \cdot \text{day}^{-1}$), 異化速度 C ($\text{gDW} \cdot \text{day}^{-1}$), 生殖腺配分速度 R ($\text{gDW} \cdot \text{day}^{-1}$) の収支から求める。

$$\frac{dDW}{dt} = A - C - R \quad (4)$$

式(4) に与える同化速度 A , 異化速度 C , 生殖腺配分速度 R は, それぞれ式(5)–(7) 式で与えられる.

$$A = A_{dmax} \times DW^{(1-1/3p)} \times f_{gT}(T) \times \min\left(1, \frac{F}{F^*}\right) \quad (5)$$

$$C = C_{dmax} \times (DW + DR) \times f_{rT}(T) \quad (6)$$

$$R = A \times R_{ratio} \quad (7)$$

同化速度 A は軟体部乾重量 DW と水温 T (°C), 餌としての植物プランクトン濃度 F (gC·L⁻¹) に, 異化速度 C は軟体部乾重量 DW と生殖腺乾重量 DR (gDW) の和と水温 T に依存し, 生殖腺配分速度 R は同化速度 A に比例係数 R_{ratio} (生殖腺配分率, %) を乗じて得られる. A_{dmax} および C_{dmax} は生物学的に決まる最大成長速度 (gDW^{1/3p}·day⁻¹) および最大呼吸速度 (day⁻¹) である (後述). 同化速度と異化速度の個体重量依存性は, von Bertalanffy 型 (同化速度が軟体部湿重量の2/3乗, 異化速度が軟体部湿重量+生殖腺重量に比例) を仮定している. 成長 (g), 呼吸 (r), 濾過 (v) の温度制限関数: $f_{gT}(T)$, $f_{rT}(T)$, $f_{vT}(T)$ は, 芝ほか (2020) に準じた. 式(5) 右辺の $\min(1, F/F^*)$ は, 餌濃度 F に対する機能的応答を示しており, F が最大摂餌可能濃度 F^* より小さい時は摂餌速度が F に比例し, F^* より大きくなると一定値 (飽食) となることを示している. F/F^* は Solidoro et al. (2000) に従い, 下記のように与えた.

$$\frac{F}{F^*} = \frac{F \times V_f \times f_{vT}(T) \times DW^q \times AssE \times \varepsilon_F}{DW^{(1-1/3p)} \times A_{dmax} \times f_{gT}(T) \times \varepsilon_T} \quad (8)$$

V_f : 最大濾水速度, $f_{vT}(T)$: 濾過の温度制限関数, q : 単位重量当たり濾過速度に関する係数, $AssE$: 同化効率, ε_F : 餌のエネルギー熱量, ε_T : アサリ軟体部のエネルギー熱量

前述の A_{dmax} および C_{dmax} は, 式(2), (3) で与えた殻付湿重量 WW と殻長 L , 軟体部乾重量 DW に基づき, 殻長基準の最大成長速度 A_{Lmax} (mm·day⁻¹), 最大異化速度 C_{Lmax} (day⁻¹) を用いて下記のように表すことができる.

$$A_{dmax} = p \times A_{Lmax} \times 3a^{1/3} \times b^{(1/3p)} \quad (9)$$

$$C_{dmax} = 3 \times p \times C_{Lmax} \quad (10)$$

von Bertalanffy 型の式では A_{Lmax} および C_{Lmax} は式(11) および (12) により表される.

$$A_{Lmax} = \frac{dL}{dt} + C_{Lmax} \times L \quad (11)$$

$$C_{Lmax} = A_{Lmax} \times L_{\infty}^{-1} \quad (12)$$

観測データを式(11) および (12) にあてはめることで, A_{Lmax} および C_{Lmax} を代数的に推定した. ただし, L_{∞} は当該海域で確認された最大殻長 (mm) とした.

生殖腺の発達, 鳥羽ほか (1993, 1994) の知見から 1–11 月の水温 4.5°C 以上の条件下で起こり, 生殖腺乾重量 DR を別途計算するものとし, その時間発展を示す式を式(13) に示す. また, 放卵・放精は, 計算した DR が実測した肥満度の最大値から求めた放卵・放精乾重量を超過した場合に起こるものとし, それまでに蓄積した DR すべてを体外に放出するとし, 式(14) で表現した. なお, 本モデルでは, 辻ほか (1994) の知見をもとに殻長 8 mm 以上の個体 (生物学的最小形) が生殖腺の発達および放精・放卵が可能と仮定した.

$$\frac{dDR}{dt} = \sum_{Jan.1}^{Nov.30} R \quad (13)$$

$$SPAWN = [\text{if } DR > \{ (4.03 \times 10^{-6} \times L^{3.19}) - (1.50 \times 10^{-6} \times L^{3.39}) \}] \text{ then } DR \text{ else } 0 \quad (14)$$

使用したパラメータを Table 1 に示した. R_{ratio} は, 芝ほか (2020) が示した殻長 16, 24, 32 mm の計算値 (それぞれ 12–14%, 16–19%, 19–22%) を線形補間し, 殻長に応じた R_{ratio} を与えた. 成長モデルによる計算は, 連続観測を実施した全測点 (T2-1, T2-2 および T2-4) について 2015 年 10 月 15 日から 2016 年 1 月 31 日まで実施した. 計算対象は, 計算開始時において主個体群であった殻長 6.0 mm および 11.5 mm のアサリとした.

地盤高と底質

毎月 1 回, 測点 T2-1, T2-2 および T2-4 において地盤高と底質を把握した. 地盤高 (D.L.) は, 三河港検潮所における実測潮位を用い, 調査時の水深から算出した. また, 採泥面積 0.05 m² のハンドグラフサンプラー (離合社製) を用いて表層 15 cm の底泥を採取し, 粒度試験法 (JIS A1204) により粒度組成を分析した.

流動環境の連続観測

(i) 観測地点, 期間および頻度

流動環境を把握するため, 測点 T2-1, T2-2 および T2-4 において 2015 年 10 月 15 日から 2016 年 11 月 30 日まで電磁流向流速計 (INFINITY-EM, JFE アドバンテック社製) を用いた連続観測を実施した.

電磁流向流速計は, センサーの中央部が海底から 10 cm の高さになるよう埋設し, 10 分間の間歇作動 (バースト), 測定間隔 0.1 秒, 観測数 300 個で観測した.

Table 1. Input parameters and calculated parameters used in the growth model of this study.

| Parameters | Description | Values | Unit | References |
|-----------------|--|----------------------------|--|--|
| a | Coefficient of allometric equation relating full wet weight to shell length | 0.000183 | $\text{gWW} \cdot \text{mm}^{-1}$ | Calculated from observed data |
| b | Coefficient of allometric equation relating tissue dry weight to full wet weight | 0.0256 | $\text{gDW} \cdot \text{gWW}^{-1}$ | Calculated from observed data |
| p | Coefficient of allometric equation relating tissue dry weight to full wet weight | 1.05 | no dimension | Calculated from observed data |
| A_{dmax} | Maximum growth rate on a dry weight basis | 0.0114 | $\text{gDW}^{0.265} \cdot \text{day}^{-1}$ | Calculated from observed data |
| C_{dmax} | Maximum respiration rate on a dry weight basis | 0.0186 | day^{-1} | Calculated from observed data |
| A_{Lmax} | Maximum growth rate on a length basis | 0.204 | $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ | Estimated from observed data |
| C_{Lmax} | Maximum respiration rate on a length basis | 0.00592 | day^{-1} | Estimated from observed data |
| R_{ratio} | Reproduction ratio | $0.0496 + 0.00498 \cdot L$ | no dimension | Calculated from Results of research (Shiba et al., 2020) |
| L_{∞} | Maximum length | 34.4 | mm | Collected in Rokujo tidale flat, 2015 |
| V_f | Maximum filtration rate | 34.8 | $\text{L} \cdot \text{gDW}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ | Aoyama et al., 1997 |
| q | Coefficient of allometric filtration rate | 0.651 | no dimension | Ohashi et al., 2010 |
| ε_T | Energetic content of clam | 12940.2 | $\text{J} \cdot \text{gDW}^{-1}$ | Standard Tables of Food Composition in Japan-2015 |
| ε_F | Energetic content of microalgae | 47697.6 | $\text{J} \cdot \text{gC}^{-1}$ | Platt and Irwin, 1972 |
| $AssE$ | Assimilation efficiency | $0.696 - 0.0069 \cdot L$ | no dimension | Nakamura, 2004; Akiyama, 1988 |
| T_{mg} | Maximum temperature for growth | 35 | $^{\circ}\text{C}$ | Kurashige 1957 |
| T_{og} | Optimal temperature for growth | 25 | $^{\circ}\text{C}$ | Isono et al., 1998 |
| β_g | Coefficient of temperature for growth | 0.2 | $^{\circ}\text{C}^{-1}$ | Solidoro et al., 2000 |
| T_{mr} | Maximum temperature for respiration | 35 | $^{\circ}\text{C}$ | Solidoro et al., 2000 |
| T_{or} | Optimal temperature for respiration | 23.4 | $^{\circ}\text{C}$ | Kitamura, 1937 |
| β_r | Coefficient of temperature for respiration | 0.17 | $^{\circ}\text{C}^{-1}$ | Solidoro et al., 2000 |
| T_{mv} | Maximum temperature for filtration | 32 | $^{\circ}\text{C}$ | Solidoro et al., 2000 |
| T_{ov} | Optimal temperature for filtration | 28 | $^{\circ}\text{C}$ | Akiyama, 1988 |
| β_v | Coefficient of temperature for filtration | 0.2 | $^{\circ}\text{C}^{-1}$ | Solidoro et al., 2000 |

(ii) 観測データの解析方法 (電磁流向流速計)

底質およびアサリ稚貝を移動させる外力として, 流れと波が共存する場での底面摩擦速度を指標とした. これを把握するため, 中川ほか (2010, 2015) を参考に観測データの解析を行った. 異常値を取り除いた後, バーストごとの北方成分, 東方成分について時間平均値 (u, v) を算出した. 平均的な水平方向の流れ ($U=(u^2+v^2)^{0.5}$) による底面せん

断応力 τ_c は, 抵抗係数 C_f を用いた式 (15) により評価した.

$$\tau_c = \rho \times C_f \times U^2 \quad (15)$$

ただし, ρ は海水密度であり, $1.025 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ を与えた. C_f については式 (16) より求めた (Dyer, 1986).

$$C_f = \left(\frac{K}{\ln(z \times z_0^{-1})} \right)^2 \quad (16)$$

粗度長さ ($z_0=0.3$ mm, 2021年10月におけるT2-1およびT2-2の中央粒径の平均値), カルマン定数 ($K=0.4$), 流速測定点の底面からの高さ ($z=10$ cm) を式(16) に与え, $C_f=0.0049$ とした.

波浪による底面せん断応力 τ_w は, 波による抵抗係数 f_w および底面での代表軌道流速振幅 u_b を用いて式(17) により評価した.

$$\tau_w = \frac{1}{2} \times \rho \times f_w \times u_b^2 \quad (17)$$

f_w は, Soulsby (1997) に従って式(18) により求めた. 解析対象期間中の波浪条件の下では0.0012–0.131の範囲であった.

$$f_w = 1.39 \times (A \times z_0^{-1})^{-0.52} \quad (18)$$

ただし, $A = u_b \times T \times (2\pi)^{-1}$ (T : 周期) である. また, u_b については, 波動流速の北方成分, 東方成分の二乗平均値 ($u_{w_rms}^2, v_{w_rms}^2$) から式(19) により求めた (Traykovski et al., 2007).

$$u_b = \sqrt{2(u_{w_rms}^2 + v_{w_rms}^2)} \quad (19)$$

これらを用いて, 流れと波の共存場での底面せん断応力 τ_{\max} は式(20) から算定した (Soulsby, 1997).

$$\tau_{\max} = [(\tau_m + \tau_w \times \cos \phi)^2 + (\tau_w \times \sin \phi)^2]^{0.5} \quad (20)$$

$$\tau_m = \tau_c \times \left[1 + 1.2 \times \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (21)$$

ただし, ϕ は流れおよび波浪伝搬方向の主軸のなす角であり, 式(21) は流れと波の相互作用を考慮した平均せん断応力 τ_m である. なお, 各底面せん断応力を海水密度 ρ で除して平方根を求めることで, それぞれの摩擦速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) が得られる.

底質およびアサリ稚貝の移動限界摩擦速度

流れと波の共存場での τ_{\max} が, 底質およびアサリ稚貝の限界摩擦速度を上回った時に底質およびアサリ稚貝の移動が生じると仮定した. アサリの移動と波浪環境との関係については, 柴田ほか (1997) および桑原ほか (2007) によって限界シールズ数を用いた検討がなされてきた. これによると, 底質の限界摩擦速度 τ_{cm} ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) は, 式(22) により求まる.

$$\tau_{cm} = \sqrt{\left(\frac{\rho_{d50}}{\rho} - 1 \right) \times g \times d_{50} \times \theta_{cr}} \quad (22)$$

ただし, θ_{cr} は限界シールズ数, ρ_{d50} は中央粒径 d_{50} の底質密度, g は重力加速度である. なお, ρ_{d50} は一般的な $2.65 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ を与えた. θ_{cr} は, 底質のレイノルズ数 Re から以下の式(24) で与えられる.

$$Re = \frac{d_{50} \cdot \sqrt{(\rho_{d50} - 1) \times g \times d_{50}}}{v} \quad (23)$$

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0.24 \times (Re^{2/3})^{-1} & \{Re^{2/3} < 4\} \\ 0.14 \times (Re^{2/3})^{-0.64} & \{4 \leq Re^{2/3} < 10\} \\ 0.04 \times (Re^{2/3})^{-0.1} & \{10 \leq Re^{2/3} < 20\} \\ 0.013 \times (Re^{2/3})^{0.29} & \{20 \leq Re^{2/3} < 150\} \\ 0.055 & \{150 \leq Re^{2/3}\} \end{cases} \quad (24)$$

底質の平均的な粒径とアサリ稚貝のサイズが異なる場合は, 混合砂礫とみなすことで粒径別にその運動特性を表現することができる. 芦田・道上 (1972) は, Egiazaroff (1965) の粒径別無次元限界掃流力を改良し, アサリ稚貝の限界摩擦速度 τ_{ci} を式(25) で表現した.

$$\frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} = \begin{cases} \left[\frac{\log 19}{\log \left(19 \frac{d_i}{d_m} \right)} \right]^2 \times \frac{d_i}{d_m} & ; \frac{d_i}{d_m} > 0.4 \\ 0.85 & ; \frac{d_i}{d_m} \leq 0.4 \end{cases} \quad (25)$$

ただし, d_i はアサリ稚貝の殻長, d_m は底質の中央粒径である. 式(25) の実験式は, $0.1 \leq d_i/d_m \leq 10$ の範囲で作成されたため, 当該海域における底質の中央粒径 (0.3–0.6 mm, Fig. 3) を踏まえると, 殻長6 mm以上のアサリに適用することは妥当ではない. そこで本研究では櫻井ほか (2014) を参考として, 流れと波の共存場での底面摩擦速度が底質の移動限界摩擦速度を上回り底質の掃流移動が起こった際に, アサリは洗掘を受けて掘り出されるものと仮定し, 底質の移動限界摩擦速度を掘り出しの閾値とした.

風浪によるアサリの掘り出しの影響の定式化

風浪による掘り出しによってアサリが受ける影響については, 受動的な水平移動による逸散・集積と能動的な潜砂行動の増加による活力低下が考えられ, 前者については多くの知見 (柿野ほか, 1991; 桑原ほか, 1993, 1994; 佐藤ほか, 2020) が報告されている. 一方で後者についての定量的な知見は少なく, 柴田ほか (1997) や慶野ほか (2005) により摂餌量や運動量と活力との関係が求められている. 特に慶野ほか (2005) は, 砂中に定位しているアサリを人為的

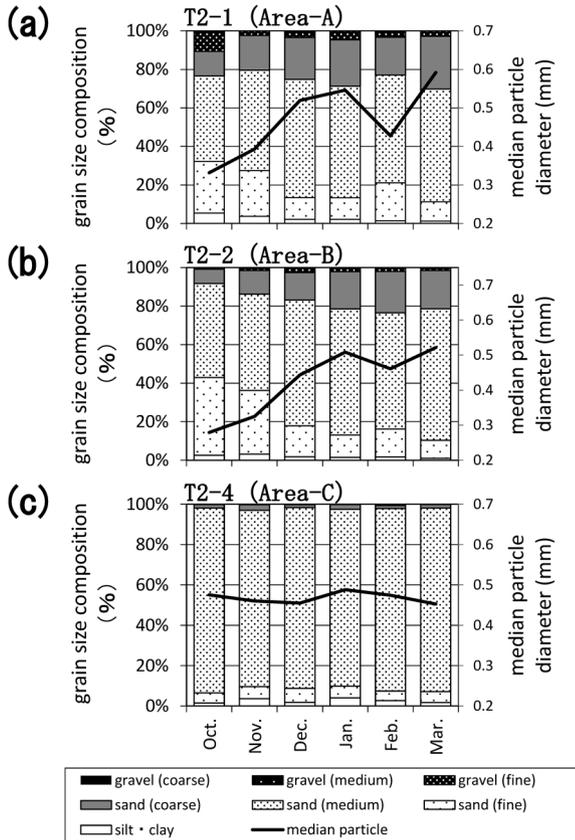


Figure 3. Monthly changes of grain size composition and median particle diameter from Oct. 2015 to Mar. 2016. Panel (a), (b) and (c) corresponds to St. T2-1 (Area-A), St. T2-2 (Area-B) and St. T2-4 (Area-C), respectively.

に砂上に掘り出す「露出」を1日当たり1, 3, 5および7回行う4試験区を設定し, 5日後における肥満度の計測結果から「アサリが砂上に掘り出され潜砂する頻度」と「潜砂行動によるエネルギー消費の指標として肥満度の減少量」との関係について検討し, 冬季の実験結果より露出1回当たりの肥満度の減少量は0.057であることを導き出している. その知見を下記の方法により成長モデルに取り込んだ.

式(1)によるアサリの肥満度を, 軟体部乾重量 DW について解くと, 下式として表される.

$$DW = CF \times L \times SH \times SW \times 10^{-5} \times 0.097 \quad (26)$$

ただし, 軟体部乾重量は, 軟体部湿重量に0.097(日本食品標準成分表: アサリ水分90.3 g/100 g, http://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365420.htm, 2020年12月2日)を乗じて求めた.

Fig. 4dおよびeにより求めた L と SW および L と SH との関係式, および掘り出し回数(Exposures)と肥満度の減少量との関係式を(26)式に代入すると下式として表される.

$$DW = 0.057 \times Exp. \times L \times 0.434 \times L \times 0.6904 \times L \times 10^{-5} \times 0.097 \\ = 1.651 \times Exp. \times L^3 \times 10^{-8} \quad (27)$$

式(27)は風浪による掘り出し回数によってアサリが受ける影響(E , エネルギー損失)であると考えられるので, これを芝モデルの右辺に追加し, 最終的に風浪による掘り出しの影響を考慮したアサリ軟体部乾重量の変化の式を以下のように得た(式(28), 以下, 改良芝モデルとする).

$$\frac{dDW}{dt} = A - C - R - E \quad (28)$$

結果

個体数密度および採捕圧の推移

Fig. 5に2015年10月から2016年3月, 2016年5月から12月における各区域のアサリ個体数密度の推移を4区域の平均値および採捕圧と併せて示した. 区域別にみると, 2015年の個体数密度は岸側のA区およびB区で高い一方, 沖側で低く, 最も沖のD区では $560 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下であった. 2016年は, 2015年と異なり沖側のC区で最も高く, 次いでB区, A区の順であった. D区は, 2016年においても最も低く $288 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下であった.

平均値の推移をみると, 2015年の個体数密度は調査開始時の10月15日に最大の $9,574 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ を示した後急減し, 12月8日では $330 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$, 2016年1月6日以降は $144 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下で推移した. 一方, 2015年の採捕圧は11月4日までに $2,053 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ に急増して以降横ばいで推移し, 特別採捕最終日の11月24日においても $2,090 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ であり, 調査開始時に確認された平均個体数密度と比較するとその22%程度に留まった.

2016年の平均個体数密度は, 調査開始時の5月18日に最大の $16,554 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ を示した. その後緩やかな減少傾向を示し, 7月7日では $7,290 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$, 9月5日では $4,934 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$, 10月18日では $1,870 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ であり, 11月2日以降は $166 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ で推移した. 2016年の特別採捕は7月14日から開始され, 採捕圧は9月5日では $2,669 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$, 10月18日では $5,343 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$, 特別採捕最終日の11月14日では $5,664 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ であり, 8-9月に確認された平均個体数密度のほぼ全量を取り切って終漁した. なお, 2016年9月20日には青潮が発生しアサリのへい死が確認(愛知県水産試験場, 2017)されているが, 青潮以降も特別採捕は継続され, 年間採捕量の35%にあたる898トンが採捕されていた.

食害動物

干出域のA区およびB区では, 調査期間を通じてツメタガイ, キセワタガイは確認されなかった. 干潟縁辺部では若干の食害動物の出現がみられ, ツメタガイはT2-5で2015年11月5日に $1 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ のみ確認された. キセワタガイは

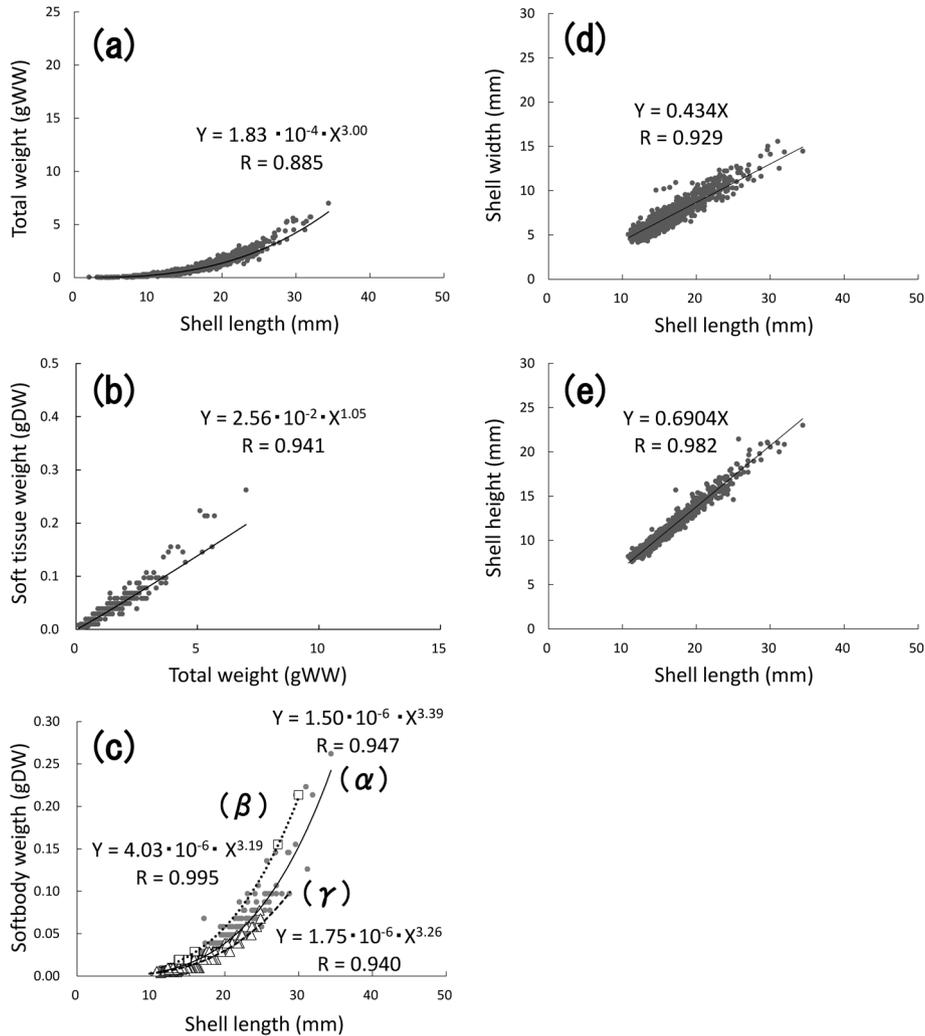


Figure 4. Relationships between (a) shell length (mm) and total weight (gWW), (b) total weight (gWW) and soft tissue weight (gDW), (c) shell length (mm) and soft tissue weight (gDW), (d) shell length (mm) and shell width (mm), and (e) shell length (mm) and shell height (mm). In the panel (c), soft tissue weight (gDW) is separated into clams of condition factor ≥ 25 (β), ≤ 15 (γ) and whole range (α).

2015年には確認されなかったが、2016年にはT1-6で11月14日に2 ind. \cdot m⁻²、T1-7で11月30日に4 ind. \cdot m⁻²、T2-5で11月2日から11月30日までに8–16 ind. \cdot m⁻²、T3-4で6月28日に1 ind. \cdot m⁻²および11月14日に16 ind. \cdot m⁻²、T4-4で6月14日および11月2日に1 ind. \cdot m⁻²、11月14日に4 ind. \cdot m⁻²が確認された。

カモ類の飛来数は、2016年10月25日に13,000羽、11月14日に140羽、11月30日に250羽と、10月下旬から11月にかけて確認されたが、その他の月には確認されなかった。

アサリ成長モデルのパラメータ設定に係わる調査結果

(i) 殻付全湿重量から軟体部乾燥重量への換算の係数
全個体を対象に計測したアサリの殻長と殻付全湿重量との関係、および殻付全湿重量と軟体部乾重量との関係をFig.

4aおよびbに示した。各回帰曲線は、相関係数 R が0.885以上であった。式(2)および(9)中の a ($1.83 \cdot 10^{-4}$)はFig. 4aの殻長 (mm) と殻付湿重量 (gWW) との関係から、式(3)、(5)、(8)、(9)および(10)中の b ($2.56 \cdot 10^{-2}$)、 p (1.05)はFig. 4bの殻付湿重量 (gWW) と軟体部乾重量 (gDW) との関係からそれぞれ求めた。

(ii) 死亡と産卵に係る肥満度および軟体部乾重量

殻長10 mm以上のアサリを対象として、観測により求めた2015年10月から2017年5月までの肥満度の推移をFig. 6に示した。肥満度(平均値)は調査開始時の2015年10月15日には20.6を示したが、10月27日および11月18日には最低値の約15に低下した。また、肥満度(平均値)の最高値は2017年5月の24.0であった。

肥満度を求めるために計測した殻長と軟体部乾重量との

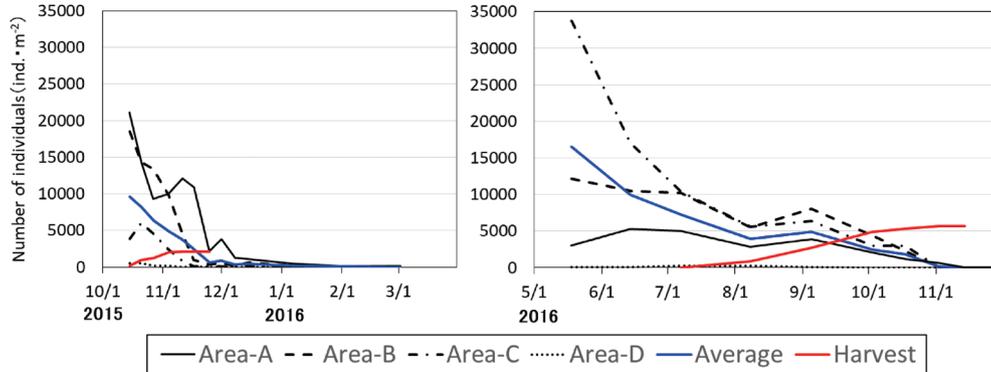


Figure 5. Number of individuals in each area (A–D, and Average) and harvested individuals in the Rokujo tidal flat (Harvest).

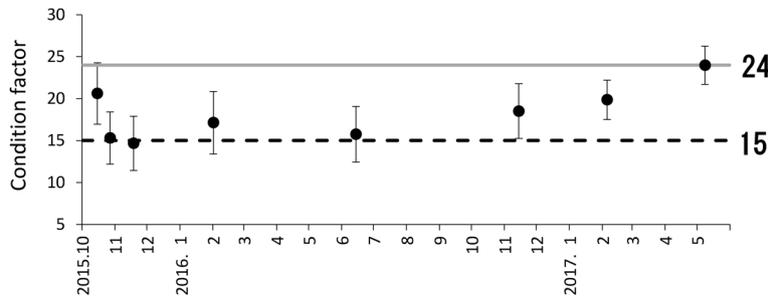


Figure 6. Temporal variation of condition factor (average) of Manila clams collected in the Rokujo tidal flat from Oct 2015 to May 2017. Error bars indicate ranges. Horizontal dashed and solid lines indicate critical lethal starved level (15) and spawning level (24) of condition factor (CF) assumed in this study, respectively. In the interpretation of the model's results, clams of $CF \leq 15$ and ≥ 24 were predicted to be subjected to physiological death and physiologically capable of spawning, respectively.

関係を Fig. 4c に示した。図中の γ ($Y=1.75 \cdot 10^{-6} \cdot X^{3.26}$, $R=0.940$) は、肥満度 15 以下を対象とした回帰曲線であり、これはアサリが生存できる限界乾重量（以下、生存限界乾重量とする）を表していると考え、各殻長においてこの値以下になると生理的死亡が生じるものとみなした。また、 β ($Y=4.03 \cdot 10^{-6} \cdot X^{3.19}$, $R=0.995$) は、肥満度 24 以上を対象とした回帰曲線であり、この値の最高値を超えると放卵および放精を行うこととした。その他、殻長と殻幅、殻長と殻高との関係を Fig. 4d および e に示した。殻長と殻幅、殻長と殻高との関係ともに、相関係数 R が 0.9 以上の高い相関を示した。

(iii) 成長速度

Fig. 5 で 2015 年に個体数密度が高かった A 区域における 2015 年 10 月から 2016 年 12 月までの殻長組成のコホート解析結果を Fig. 7 に示した。2015 年 10 月にみられた殻長 5 mm 以上の個体群は、2016 年 3 月までにはほぼ減耗した。2016 年 5 月に殻長 6 mm 以下の新規加入群が確認され、その後順調に成長したが 11 月中旬に減耗した。なお、各月における平均殻長の伸び (Fig. 8) を経過日数で除した成長速度 ($\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$) は、コホート F の 2016 年 5–6 月の期間

で最も高く、 $0.167 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ であった。この値を式 (11) の dL/dt として代入した。

水温および餌料量等の観測結果

(i) クロロフィル a 濃度と POC との関係

Fig. 9 に 2015 年 10 月から 2016 年 1 月における各月のクロロフィル a 濃度と POC との関係を示した。得られた直線近似式の傾き (10 月: 0.0555, 11 月: 0.163, 12 月: 0.157 および 1 月: 0.111) を線形補間して各日のクロロフィル a 濃度の観測結果を POC に換算した。

(ii) 水温、クロロフィル a 蛍光強度、濁度の連続観測結果

Fig. 10 に 2015 年 10 月 15 日から 2016 年 1 月 31 日における水温、クロロフィル a 蛍光強度および濁度の連続観測結果と POC 換算値を示した。なお、水温 (Fig. 10a) およびクロロフィル a 蛍光強度 (Fig. 10b) には、水質鉛直観測における底上 +0.1 m の観測値を併せて示した。水温 (Fig. 10a) は、地点間で大きな差はみられず、 $4.8\text{--}21.9^\circ\text{C}$ で推移した。クロロフィル a 蛍光強度 (Fig. 10b) および POC 換算値 (Fig. 10c) は、干潟縁辺部に近い T2-4 で高く岸側の T2-1 で低い傾向を示し、それぞれ $0.6\text{--}28.7 \text{ ppb}$ および $0.1\text{--}4.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ で推移した。濁度 (Fig. 10d) は、10 月中下旬を除いて降

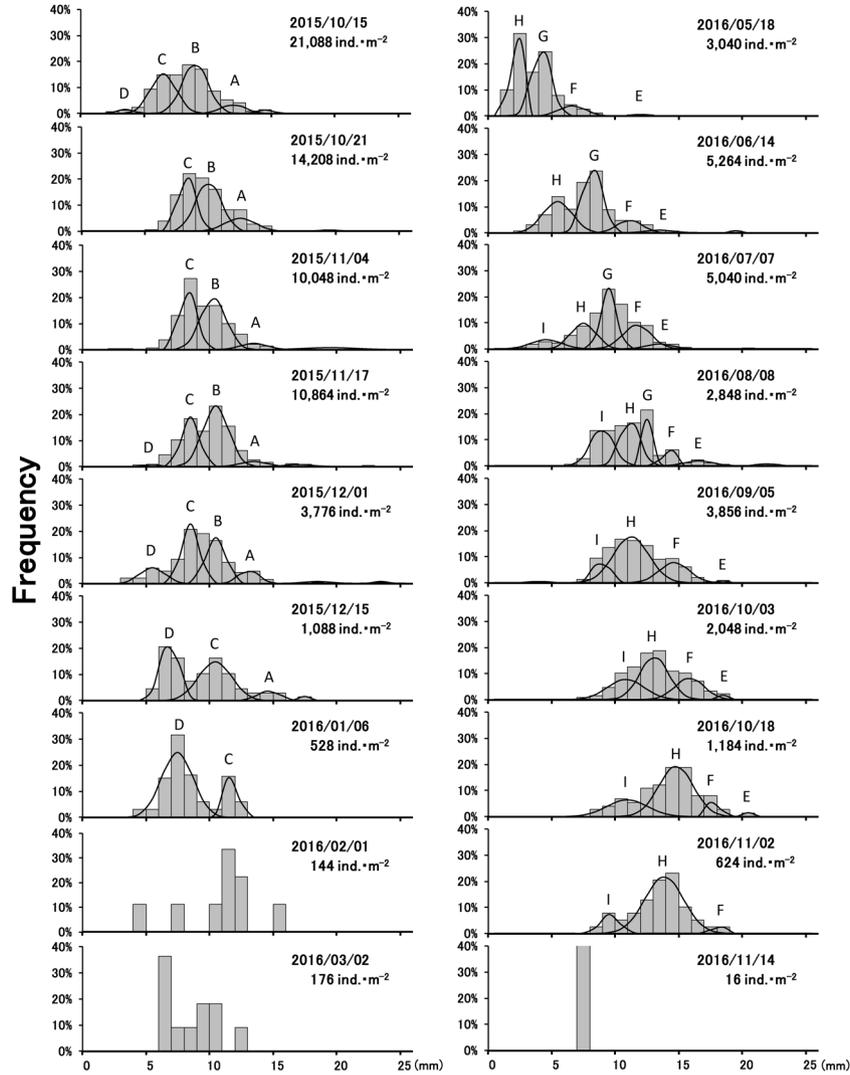


Figure 7. Shell length frequency of Area-A of Manila clams collected in the Rokujo tidal flat from Oct. 2015 to Dec. 2016. Alphabetic characters (A-I) show identified cohorts.

雨後に高くなる傾向を示し、0.5–74.9 ppmで推移した。アサリ個体成長モデル（芝モデル）による成育状況の推定アサリ軟体部乾重量および生殖腺乾重量の計算は、連続観測を実施した全測点（T2-1、T2-2およびT2-4）で行った。このうち、Fig. 11に測点T2-1の2015年10月15日から2016年1月31日における計算結果を例示した。なお、図中には植物プランクトン濃度および最大摂餌可能濃度 F^* も併せて示した。また、欠測であった1月7日から1月11日の間は、測点T2-2の水溫、POCを代入して計算を行った。測点T2-1における殻長6.0 mmおよび11.5 mmのアサリとともに、軟体部乾重量は生存限界乾重量を下回ることなく、生理的死亡は起こっていないと推察された。なお、測点T2-2およびT2-4の殻長6.0 mmおよび11.5 mmのアサリにおいても同様に生理的死亡は起こっていないと推察された。植物プランクトン濃度と F^* を比較すると、調査開始

から11月5日までの22日間のうち11日は植物プランクトン濃度が F^* を下回っており、餌濃度は飽和していなかったと推察された。11月上旬から12月上旬および12月下旬以降植物プランクトン濃度は F^* を上回っていたが、12月中旬には植物プランクトン濃度は F^* と同程度になる日もあった。

底質の粒度組成と中央粒径

Fig. 3には測点T2-1、T2-2およびT2-4における底質の粒度組成と中央粒径の経月変化を示した。粒度組成は、T2-1では細砂が10–30%、中砂が49–61%、粗砂が14–27%、礫分が2–12%であり、T2-2では細砂が9–40%、中砂が48–68%、粗砂が8–22%、礫分が1–3%であり、T2-4では細砂が5–7%、中砂が87–92%、粗砂が2–3%、礫分が0–1%であった。中央粒径は、T2-1では10月に0.332 mmを示した後1月までに0.546 mmと大きくなり、その後2月に

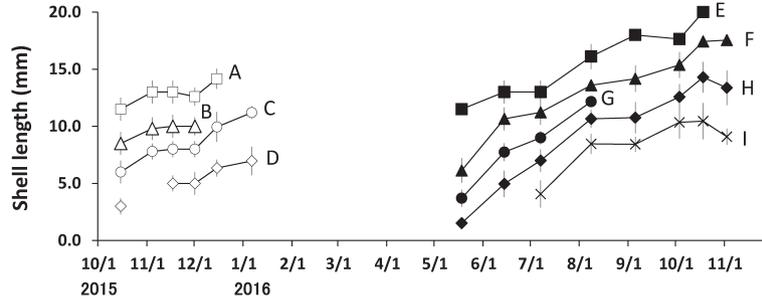


Figure 8. Monthly-mean shell length of identified cohorts (A–I) of Manila clams collected in Area-A from Oct. 2015 to Nov. 2016. Error bars indicate the range of shell length.

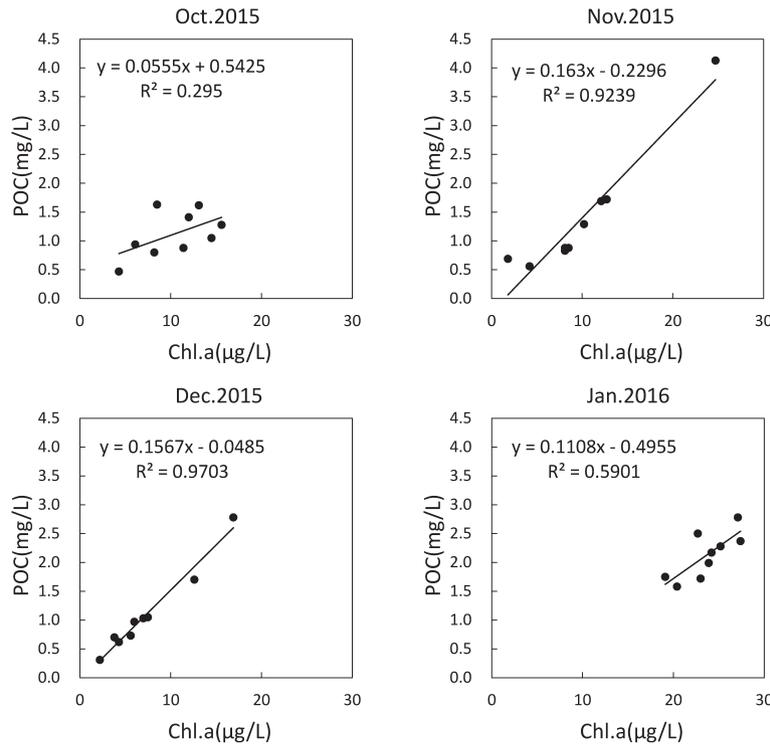


Figure 9. Relationships between chlorophyll-a and Particulate Organic Carbon (POC) from Oct. 2015 to Jan. 2016.

0.428 mm に一旦減少するが, 3月に再び増加し0.592 mm であった. T2-2の中央粒径は, 増減傾向はT2-1と同様で0.280–0.522 mmで推移した. T2-4の中央粒径は, 大きな変化みられず0.453–0.488 mmで推移した.

流れと波の共存場での底面摩擦速度と底質の移動限界摩擦速度の推移

Fig. 12には式(20)より求めた測点T2-1, T2-2およびT2-4の毎正時における流れと波の共存場での底面摩擦速度 τ_{\max} を示した. なお, 図中には, 式(22)より求めた底質の限界摩擦速度 τ_{cm} を併せて示した. また, 欠測した期間については, 他の連続観測点のデータを用いて補間した. τ_{\max} は, おおよそ岸側のT2-1で低く干潟縁辺部に近いT2-4で高い傾向を示し, T2-1では0.17–2.93 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, T2-2では

0.32–3.40 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, T2-4では0.09–4.06 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ で推移した. 底質の τ_{cm} は, T2-1では1.40–1.62 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, T2-2では1.36–1.57 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, T2-4では1.50–1.54 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ で推移した.

改良芝モデルを用いた育成状況の推定

慶野ほか(2005)の室内実験は, 露出を行う時刻は毎日9時から17時の間とし, 9時に1回目の露出を行って以降は3, 5および7回区ではそれぞれ3, 2および1時間おきに露出が行われており, 露出の時間頻度は1時間おきが最短であった. 露出後アサリが潜砂に要した時間についての記載はないが, 1時間後の次の露出までにおおよそ個体は潜砂するものと捉え, 露出1回あたりのエネルギー消費についての時間頻度も1時間単位と仮定し, Fig. 12に示した毎正時ごとの摩擦速度の結果について, 流れと波の共存場で

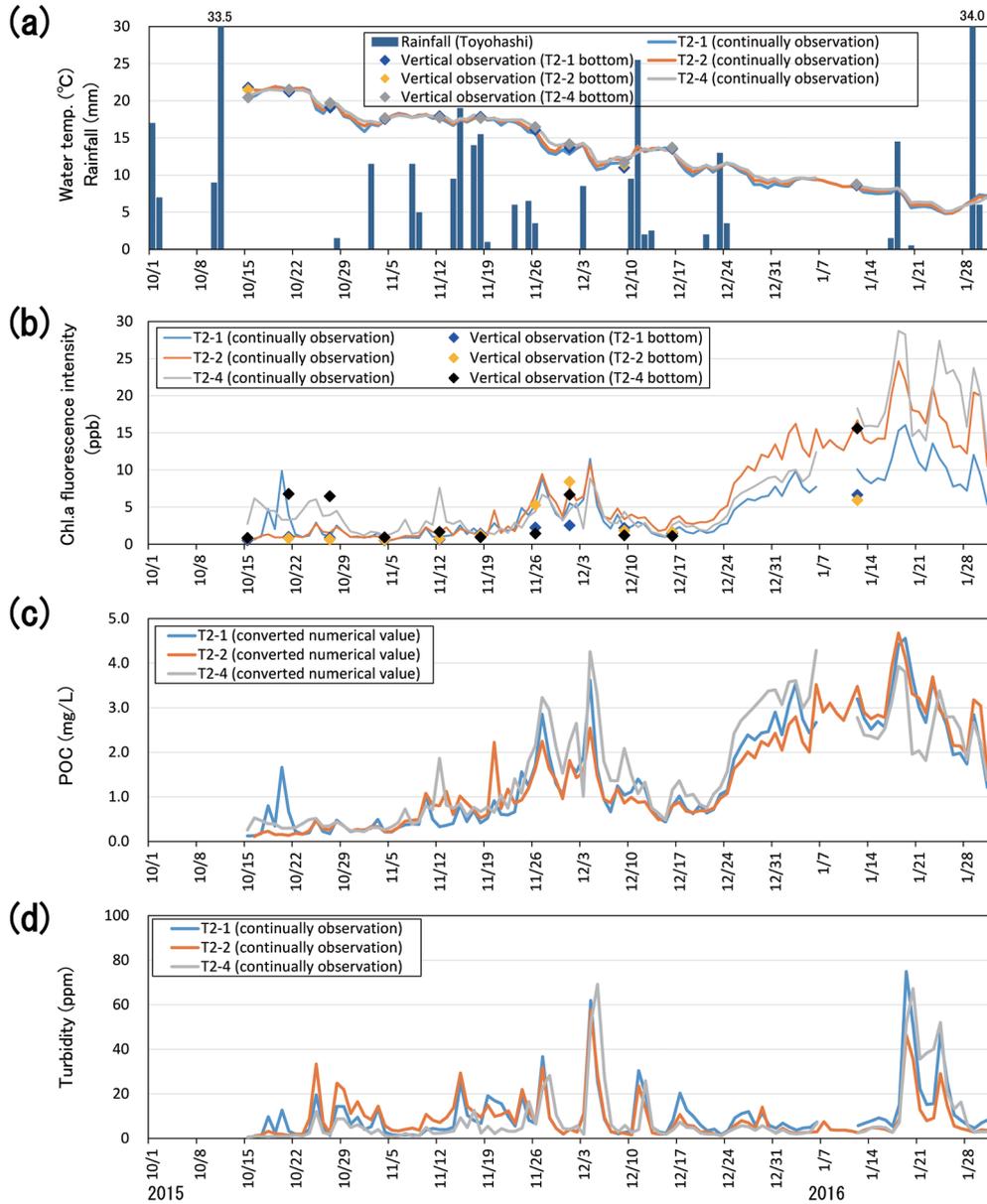


Figure 10. Temporal changes of observation data, (a) water temperature, (b) intensity of chlorophyll-*a* fluorescence, (c) concentration of POC, and (d) turbidity. In the panel (a), the bar graphs indicate rain fall at Toyohashi AMEDAS station. In the panel (a) and (b), diamonds indicate vertical observation of bottom.

の底面摩擦速度が底質の移動限界摩擦速度を上回った回数を計数（1日あたり最大24回）した。

改良芝モデルを用いて、各測点（T2-1、T2-2およびT2-4）における2015年10月15日から2016年12月31日までのアサリの軟体部乾重量、生殖腺重量、殻長の推移を計算するとともに生理的死亡の有無を判定した。計算対象は、調査開始時の2015年10月15日に確認されたすべての殻長サイズ（1 mmごと）とした。計算結果のうち測点T2-1（A区）における殻長2 mmごとの結果をFig. 13に例示した。殻長8 mm以上の個体は、餌料量が多かった10月

20日頃までは軟体部乾重量および殻長の成長がみられた。10月22日以降、餌料量が最大摂餌可能濃度 F^* と同程度になり、また同時期に掘り出し回数が増加すると軟体部乾重量は減少に転じ、11月1日までに生存限界乾重量を下回り、生理的死亡に至ったことが推定された。殻長6 mmの個体の軟体部乾重量は、11月上旬では生存限界乾重量は下回らず、掘り出し回数が顕著に増加した11月24日以降に再び軟体部乾重量が減少傾向を示し、12月5日に生存限界乾重量を下回った。殻長4 mm以下の個体は、殻長6 mmの個体と同様に12月5日に生存限界乾重量を下回った。

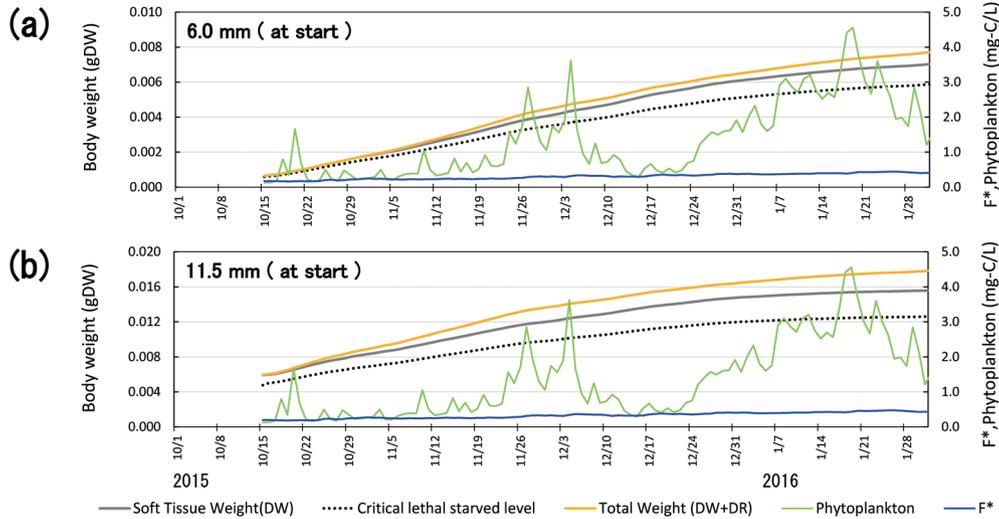


Figure 11. Changes of calculated body weight of Manila clams in St.T2-1 (gray and yellow curves shows soft tissue weight (DW) and total weight (DW+DR), respectively), estimated critical lethal starved level of soft tissue weight (chain curves), phytoplankton concentration (green line) and F^* (blue curves). Panel (a) and (b) corresponds to shell length 6.0 mm, 11.5 mm, respectively.

考察

2015年および2016年の秋季におけるアサリの減耗

2015年の秋季において採捕圧は低かった (Fig. 5) にもかかわらず, 10月下旬以降主に殻長10 mm以上の個体群を中心にアサリは顕著に減少していた (Fig. 7). 殻長10 mm以下の個体群も12月以降若干の成長がみられるものの減少し, 3月までに明瞭なコホートは確認されなくなった (Fig. 7). これらの期間中, 観察を行っていなかったカモ類を除いて食害動物はほとんど確認されず, また水温と植物プランクトン量を変数とする既往の芝モデルにより成育・生存状況を推定した結果 (Fig. 11), 水温と植物プランクトン量のみでは生理的死亡は再現されなかったことから, それら以外の要因が加わってアサリの減耗が生じたと考えられた. 六条潟では, 前年秋に着底し成長した個体群は秋冬季に消滅することが報告 (山田ほか, 2015; 石田ほか, 2016, 2017, 2018) されている. その要因について詳細には解析されていないが, カゴ飼育試験の結果から波浪による影響が示唆されていた (鈴木ほか, 2018). 計算された底面摩擦速度 (Fig. 12) および底面摩擦速度が底質の限界摩擦速度を上回り掘り出しが起これたと推定される頻度 (Fig. 13b) をみると, 10月下旬から11月上旬, 11月下旬から12月上旬にかけて底面摩擦速度が底質の限界摩擦速度を上回る頻度が増え, その継続時間も長くなっていた. アサリ個体数密度 (Fig. 7) は, 殻長10 mm以上の個体群では10月下旬以降, 殻長10 mm以下の個体群では12月以降顕著に減少しており, 殻長サイズによって減耗時期に違いはみられるものの風浪による影響が推測された.

2016年におけるアサリの平均個体数密度は, 調査開始

時の5月18日に最大の $16,554 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$ を示し, 8月までにC区の個体数密度の減少に合わせて緩やかに減少 (Fig. 5) した後, 個体数密度はほぼ横ばいとなり9月5日に $4,934 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$ となった. この個体数密度の減少要因について曾根ほか (2019) は2016年の六条潟では7-8月頃に群成長が鈍化し, 環境収容力の上限に達していたと考察しており, 餌料環境による制限がかかったと推測されるが, その詳細については今後の課題である. 9月以降採捕圧の増加に伴いアサリの平均個体数密度は減少し (Fig. 5), 風浪が顕著となる11月以前に減耗したことから, 2016年秋季におけるアサリの減耗は採捕圧による影響が大きかったと推測された. なお, 2016年における食害動物の出現状況については, 干出域のA区およびB区ではツメタガイおよびキセワタガイともに確認されなかった. 干潟縁辺部ではツメタガイは11月に $1 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$ が1回1地点で, キセワタガイは11月に一部の地点で最大 $16 \text{ ind.}\cdot\text{m}^{-2}$ 観察されたが, 上記のアサリ減耗時期とは異なっていた. また, カモ類の飛来は, 2016年10月3日から12月18日の間に実施した10回調査のうち10月25日に13,000羽, 11月14日に140羽および11月30日に250羽が確認されたが, それらの期間中アサリの平均個体数密度の減少傾向に大きな変化はみられなかった (Fig. 5). 伊勢・三河湾で秋冬季に卓越する北西風の影響を受ける六条潟は, カモ類の飛来頻度が少なく, 他の海域で問題となっているカモ類による食害 (千葉県水産試験場・千葉県漁業協同組合連合会, 1998; 堀・長谷川, 2005) は限定的であると推測された.

改良芝モデルを用いた成育状況の推定

Fig. 13に示した改良芝モデルを用いた成育状況の推定結果

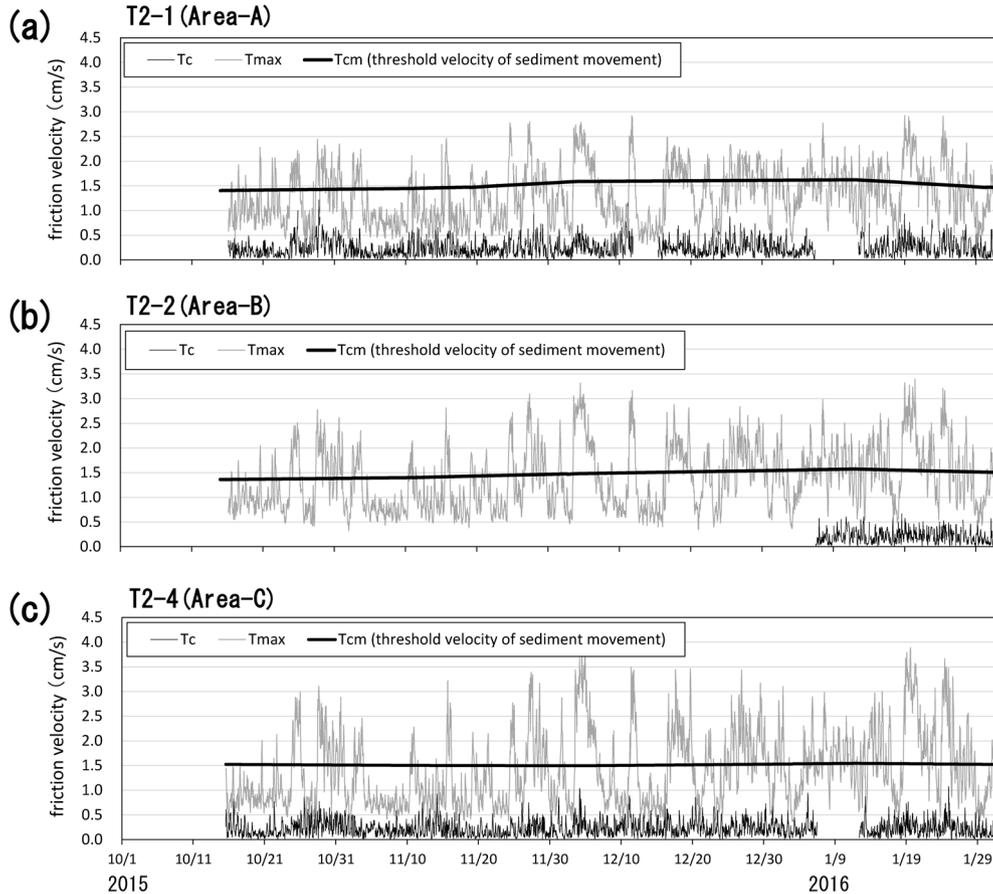


Figure 12. Changes of calculated τ_c , τ_{\max} and τ_{cm} (threshold velocity of sediment movement). Panels (a), (b) and (c) correspond to St. T2-1 (Area-A), St. T2-2 (Area-B) and St. T2-4 (Area-C), respectively.

によると、殻長8 mm以上の個体の軟体部乾重量は11月1日までに生存限界乾重量を下回ったが、殻長6 mm以下の個体の軟体部乾重量は、11月上旬には生存限界乾重量を下回らず、11月27日以降になって軟体部乾重量が減少傾向を示し、12月5日に生存限界乾重量を下回っていた。これらの殻長サイズに伴う生理的死亡の時期の違いは、芝モデルでは辻ほか(1994)の知見をもとに殻長8 mm以上で生殖腺へのエネルギー配分を行っていることから、殻長サイズに伴う性成熟へのエネルギー配分の有無による影響が考えられた。なお、性成熟が始まっていると考えられるやや大きい個体から減耗する事象は、曾根ほか(2019)の現地観測においても2015年10–12月における平均殻長の低下および殻長組成における8 mm以上の個体群の減少として表れており、本研究の改良芝モデルによってアサリの性成熟および成育・生存状況をおおむね再現していると考えられた。芝ほか(2020)では、伊勢湾東部沿岸域に位置する小鈴谷干潟において稚貝が冬季に死亡した要因の解析を芝モデルにより試みているが、その際に減耗時期が現場観測と比較して約2ヶ月遅れる結果となっていた。この死亡時期の遅れは、風浪によるエネルギー損失が含まれていな

かったことによる可能性も推測され、今後の検討が必要と考えられた。

曾根ほか(2019)は、六条潟における秋季から冬季にかけてのアサリの大量減耗の要因について、2014年、2015年および2016年の現地観測から夏季から秋季にかけて十分な栄養状態でないまま、性成熟が進行し、秋季に産卵・放精し、大きくエネルギー損失することにより、大量減耗を引き起こしていると定性的に考察した。本研究では、2015年秋季から冬季の減耗は餌料量の低下と風浪に伴う掘り出しによるエネルギー損失、また性成熟の進行に相まって成育に必要な餌料量が確保できなかったことが主要因と考えられた。

なお、風浪による掘り出しによってアサリが受ける受動的な水平移動の影響を考える必要もあるが、本研究では調査地点間の距離が約200 mと離れていたこともあり、エリアごとの個体数密度の推移(Fig. 5)では集積等による個体数密度の増加はみられなかった。今後、より詳細な地点配置を行い、風浪による逸散・集積も考慮した調査が課題である。また、アサリの潜砂行動を考慮すれば底質の掃流移動が生じた場合にアサリは掘り出されるとした仮定は、

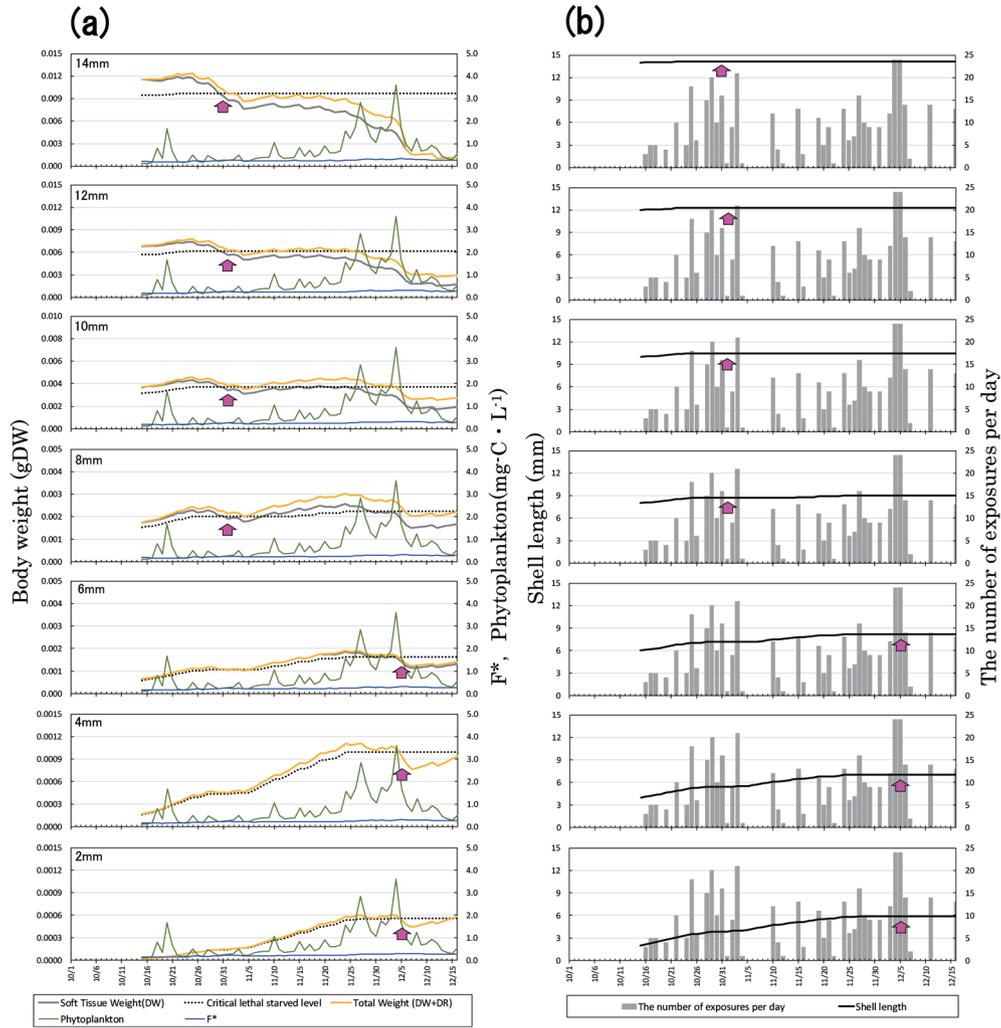


Figure 13. (a) Changes of calculated body weight of Manila clams in St. T2-1 (gray and yellow curves show soft tissue weight (DW) and total weight (DW+DR), respectively.), estimated critical lethal starved level of soft tissue weight (chain curves), phytoplankton concentration (green line) and F* (blue curves). Vertical arrows indicate the first date when DW (gray curves) became lower than the critical lethal starved level (chain curves). (b) Changes of calculated shell length of Manila clams in St. T2-1 and the number of exposures per day.

潜砂能力が高く、稚貝よりも深所に定位する大型のアサリにおいてはやや過大であることも推測される。さらに潜砂速度は水温による影響を受けることが報告（櫻井ほか, 1996）されており、今後、アサリの体サイズや潜砂速度を含めた検討が課題である。

六条潟は豊川河口域に発達した河口干潟であり、豊川からの河川水流入により、小型の植物プランクトン、特に低塩分下あるいは冬季でも増殖可能なクリプト藻綱が発生しやすい海域（森ほか, 2020）であり、餌料価値が高い微細藻類の発生が六条潟でのアサリ稚貝の生残、成長を可能にする重要な条件の一つになっていると考えられている（栗田ほか, 2020）。本研究では、このように餌となる植物プランクトンが豊富な六条潟においても、秋季から冬季にお

ける餌料量の低下と風浪に伴う掘り出しによるエネルギー損失が資源の減耗を引き起こしている可能性を示唆した。一方で、2005年頃には六条潟においても越冬する個体が確認（石田ほか, 2007）されており、鈴木（2017）や蒲原ほか（2021）の指摘にあるように2007年以降の三河湾におけるクロロフィルa濃度の減少が豊川河口域でも生じている可能性が考えられ、高い生産性を有するはずの河口域においても餌料環境の把握が重要であることが示唆された。今後は、改良した個体成長モデルを用いて、風浪による減耗を乗り越えるために必要な餌料量を明らかにする必要がある。さらには、アサリ資源の回復に向け餌料環境すなわち内湾の生産性を改善するための抜本的な対策を進める必要がある。

謝辞

本研究に使用した諸データの一部は、国土交通省中部地方整備局三河湾事務所により三河湾で実施された調査の一環として得られたものであり、関係者の方々、有益な助言を頂いた大阪大学大学院工学研究科の青木真一教授、名城大学大学院総合学術研究科の中田喜三郎特任教授、前横浜国立大学大学院都市イノベーション学府・研究院の中村由行教授に深く感謝申し上げます。アサリの性成熟および六条潟における餌料環境に関するご助言をいただいた、愛知県水産試験場漁業生産研究所の曾根亮太博士、株式会社日本海洋生物研究所の栗田貴代氏、森将人氏に感謝申し上げます。最後に、調査に協力いただいた愛知県漁業協同組合連合会の皆様には厚く感謝申し上げます。

引用文献

- 愛知県 (2008) 六条潟におけるアサリの生息状況. 三河港港湾計画検討委員会合同会 (第4回委員会・第6回幹事会) 資料, 22-23.
- 愛知県水産試験場 (2017) 人工構造物に囲まれた内湾の干潟・藻場生態系に対する貧酸素・青潮影響の軽減策の提案 (5-1404). 平成26年度-平成28年度環境省環境研究総合推進費終了成果等成果報告書, 環境省, 27-46.
- 相澤 康・滝口直之 (1999) MS-Excelを用いたサイズ度数分布から年齢組成を推定する方法の検討. 水産海洋研究, **63**, 205-214.
- 秋山章男 (1988) 第2章3. 底生生物の挙動と食物連鎖. 潮間帯周辺海域における浄化機能と生物生産に関する研究. 農林水産省農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター, **212**, 82-102.
- 青山裕晃・鈴木輝明 (1997) 干潟上におけるマクロベントス群集による有機懸濁物除去速度の現場測定. 水産海洋研究, **61**, 265-274.
- 芦田和男・道上正規 (1972) 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究. 土木学会論文報告集, **206**, 89-69.
- 千葉県水産試験場・千葉県漁業協同組合連合会 (1998) 千葉県北部地区冬期アサリ減耗原因調査 (平成5~7年度) 報告書, 59 pp.
- Dyer, K. (1986) Coastal and estuarine sediment dynamics. John Wiley & Sons, Chichester, 342 pp.
- Egiazaroff, I. V. (1965) Calculation of nonuniform sediment concentrations. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., **91**, 225-247.
- Flye-Sainte-Marie, J., F. Jean, C. Paillard, S. Ford, E. Powell, E. Hofmann and J. Klinck (2007a) Ecophysiological dynamic model of individual growth of *Ruditapes philippinarum*. Aquaculture, **266**, 130-143.
- Flye-Sainte-Marie, J., S. Pouvreau, C. Paillard and F. Jean (2007b) Impact of Brown Ring Disease on the energy budget of the Manila clam *Ruditapes philippinarum*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. **349**, 378-389.
- 服部宏勇・中嶋康生・川村耕平・伏屋 満 (2017) 腰マンガ漁場のアサリ資源管理について. 平成28年度水産業改良普及事業実績報告書, 51-54.
- Holling, C.S. (1959) The components of predation as revealed by a study of small-mammal predation of the European sawfly. Can. Entomol., **91**, 293-320.
- 本田是人・戸田有泉・二ノ方佳介・中嶋康生・鈴木輝明 (2015) 三河湾における水質環境と貧酸素水塊の変動. 水産海洋研究, **79**, 19-30.
- 堀 正和・長谷川夏樹 (2005) 沿岸域における水鳥類のベントス採餌量推定. 日本ベントス学会誌, **60**, 12-22.
- 石田基雄・青山裕晃・家田喜一・和久光靖 (2007) 河口域資源向上技術開発試験. 平成18年度愛知県水産試験場業務報告, 61-62.
- 石田俊郎・宮脇 大・曾根亮太 (2017) 河口域資源向上技術開発試験 アサリ稚貝発生量調査. 平成28年度愛知県水産試験場業務報告, 67-68.
- 石田俊郎・宮脇 大・鈴木智博 (2018) 河口域資源向上技術開発試験 アサリ稚貝発生量調査. 平成29年度愛知県水産試験場業務報告, 70-71.
- 石田俊郎・和久光靖・曾根亮太 (2016) 河口域資源向上技術開発試験 アサリ稚貝発生量調査. 平成27年度愛知県水産試験場業務報告, 71-72.
- 磯野良介・喜田 潤・岸田智穂 (1998) アサリの成長と酸素消費速度におよぼす高温の影響. 日本水産学会誌, **64**, 373-376.
- 柿野 純・中田喜三郎・西沢 正・田口浩一 (1991) 東京湾盤洲干潟におけるアサリの生息と波浪との関係. 水産工学, **28**, 51-55.
- 蒲原 聡・芝 修一・市川哲也・鈴木輝明 (2018) 伊勢・三河湾のアサリ増殖環境. 月刊海洋, **50**, 406-414.
- 蒲原 聡・芝 修一・鶴島大樹・鈴木輝明 (2021) 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. 水産海洋研究, **85**, 69-78.
- 慶野英生・杉山清泉・西沢 正・鈴木輝明 (2005) 冬季波浪時におけるアサリの潜砂行動とエネルギー消費過程に関する実験的研究. 水産工学, **42**, 1-7.
- 喜多村 勇 (1937) アサリの鰓の繊毛運動と温度との関係. 日本水産学会誌, **6**, 154.
- 倉茂英次郎 (1957) アサリの生態研究, 特に環境要素について. 「水産学集成」松本文夫編, 東京大学出版会, 東京, 611-655.
- 栗田貴代・今尾和正・橋口晴穂・森 将人・中田喜三郎 (2020) 三河湾六条潟におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* 稚貝が摂取する天然海水中の植物プランクトンのサイズとその藻類群. 海洋理工学会誌, **26**, 25-34.
- 桑原久実・日向野純也 (1993) 波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析手法の開発. 土木学会論文集, **40**, 311-315.
- 桑原久実・日向野純也・中村義治・三村信男 (1994) 波浪による二枚貝の移動予測モデルの妥当性と移動機構に関する研究. 土木学会論文集, **41**, 376-380.
- 桑原久実・山内 功・鳥羽光晴 (2007) 波・流れ共存場におけるアサリ稚貝の移動評価方法. 平成19年度日本水産工学会 学術講演会 講演論文集, 233-236.
- 森 将人・今尾和正・古賀あかね・橋口晴穂・中田喜三郎 (2020) 三河湾六条潟周辺海域におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* 稚貝の餌料環境. 海洋理工学会誌, **26**, 11-23.
- 中川康之・有路隆一・灘岡和夫・八木 宏・下迫健一郎・白井一洋 (2010) 東京湾羽田沖での現地観測に基づく台風襲来時における底泥の浸食・堆積量の評価. 土木学会論文集B2, **66**, 441-445.
- 中川康之・灘岡和夫・八木 宏・二瓶泰雄・川崎浩司・木村彰宏・久保田踊児・内川直洋 (2015) 底質輸送量算定における底面流速変動の確率分布を考慮した新たな外力評価手法の提案. 土木学会論文集B2, **71**, 523-528.
- Nakamura, Y. (2004) Suspension feeding and growth of juvenile Manila clam *Ruditapes philippinarum* reared in the laboratory. Fish. Sci., **70**, 215-222.
- 大橋昭彦・拓殖朝太郎・山田 智 (2010) アサリによるノリの色落ち原因プランクトン摂餌試験. 平成21年度愛知県水産試験場業務報告, 73.
- Platt, T., and B. Irwin (1972) Caloric content of phytoplankton. Limnol. Oceanogr., **18**, 306-310.
- 櫻井 泉・中山威尉・秦 安史・前川公彦・山田俊郎・田中良

- 男・桑原久実 (2014) 人工増殖場におけるアサリの成長および生残適地の選定手法. 日本水産学会誌, **80**, 776–785.
- 櫻井 泉・瀬戸雅文・中尾 繁 (1996) ウバガイ, バカガイおよびアサリの潜砂行動に及ぼす水温, 塩分および底質粒径の影響. 日本水産学会誌, **62**, 878–885.
- 佐藤誠浩・南部亮元・桑原久実・中林孝之 (2020) 振動流下における碎石敷設によるアサリ定位効果の検証. 土木学会論文集, **76**, 583–588.
- 芝 修一・姫野天領・吉田 司・蒲原 聡・田中義人・鈴木輝明 (2020) 個体成長モデルを用いた伊勢湾東部沿岸域におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* 資源の減耗要因の検討. 水産海洋研究, **84**, 11–26.
- 芝 修一・吉田 司・鶴島大樹・蒲原 聡・田中義人・鈴木輝明 (2021) アサリ (*Ruditapes philippinarum*) 資源動態に係る餌料環境解析手法としての個体成長モデルの比較検討. 海洋理工学会誌, **26**, 1–12.
- 柴田輝和・柿野 純・村上亜希子 (1997) 冬期の浅場における砂の流動に対するアサリの定位性ならびに餌料量・運動量とアサリの活力との関係. 水産工学, **33**, 231–235.
- Solidoro, C., R. Pastres, D. Melaku, M. Pellizzato, and R. Rossi (2000) Modelling the growth of *Tapes philippinarum* in Northern Adriatic lagoons. Mar. Ecol. Prog. Ser., **199**, 137–148.
- 曾根亮太・蒲原 聡・鈴木輝明 (2016) 内湾環境の現状とより豊かな海とするための課題—海から見た下水道整備のあり方— (特集 水処理問題の「いま」を考える). 月間下水道, **39**, 22–28.
- 曾根亮太・和久光靖・石田俊郎・宮脇 大・山田 智 (2019) 六条潟におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* の秋季減耗要因について. 水産海洋研究, **83**, 252–259.
- Soulsby, R. L. (1997) Dynamics of marine sands. Thomas Telford Publications, London, 249 pp.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons (1968) A practical handbook of seawater analysis. J. Fish Res. Board Can., **167**, 185–194.
- 鈴木輝明 (2017) 沿岸環境の再生・創出と豊かな漁業生産—伊勢・三河湾を例として—. 海洋と生物, **39**, 554–563.
- 鈴木輝明 (2018) 浚渫砂を利用した大規模干潟・浅場造成と今後の栄養塩管理の必要性—三河湾を例として—. 水環境学会誌, **41** (A), **8**, 256–261.
- 鈴木智博・宮脇大・石田俊郎 (2018) 人工生態系機能高度化技術開発試験 干潟・藻場の造成条件解明試験. 平成29年度愛知県水産試験場業務報告, 68–69.
- 鳥羽光晴・夏目 洋・山川 紘 (1993) 東京湾船橋地先におけるアサリの生殖周期. 日本水産学会誌, **59**, 15–22.
- 鳥羽光晴・深山義文 (1994) 飼育アサリのサイズと成熟, 産卵の関係. 日本水産学会誌, **60**, 173–178.
- Traykovski, P., P. L. Wiberg, and W. R. Geyer (2007) Observations and modeling of wave-supported sediment gravity flows on the Po prodelta and comparison to prior observations from the Eel shelf. Cont. Shelf Res., **27**, 375–399.
- 辻 秀二・宗清正廣・井谷匡志・道家章生 (1994) 舞鶴湾のアサリの生殖周期. 京都府立海洋センター研究報告, **17**, 1–9.
- 鶴島大樹・永尾謙太郎・中田喜三郎 (2019) 数値シミュレーションを用いた伊勢湾におけるアサリの餌料不足に関する一考察. 土木学会論文集B2, **75**, 1111–1116.
- 山田 智・蒲原 聡・曾根亮太 (2015) 河口域資源向上技術開発試験. 平成26年度愛知県水産試験場業務報告, 72–73.
- Yoshida T., H. Okamoto, Y. Tanaka, T. Hibino, T. Suzuki, and T. Takabe (2009) Reproduction dynamics of eelgrass (*Zostera marina* L.) populations in Ise-Mikawa Bay, central Honshu, Japan. Plant Species Biol., **24**, 202–208.