

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21337

研究課題名（和文）陸域・海域エコトーン部の地中浅所の緩衝水域：その形成条件特定と生態学的機能解明

研究課題名（英文）Buffer waters in shallow underground areas in terrestrial and marine ecotone areas: Identification of salinity conditions and ecological functions.

研究代表者

鬼倉 徳雄 (Onikura, Norio)

九州大学・農学研究院・教授

研究者番号：50403936

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：最初に、陸と海の境界部の地中浅所に、塩分が安定した水域が形成されることを明示し、その形成条件を特定した。背後地が山林である場所、背後地が平野である場所とも、表層水の塩分は潮の干満に伴い変動するのに対し、間隙水は低塩分で安定した。表層水は潮汐と降水量に左右された一方、間隙水塩分は潮汐に左右されず、安定的であった。また、山側の間隙水は降水量にも左右されていなかった。

干潟のベントス相は、山側、平野側に相違があり、特に、ヨシが山側だけに生育し、種多様性も高かった。間隙水の低い塩分がヨシの生育を支え、結果として、ヨシ帯に依存する生物等が生息することで、高い種多様性を示すと推察できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、陸域と海域の境界部、すなわち、エコトーン部の地中浅所には、塩分濃度が安定した汽水域（陸域・海域緩衝水域）が形成されることが明示でき、その緩衝水域の塩分は、背後地の相違により異なることが明確となった。そして、その塩分の相違が異なる生物相を生み出すことで、広域での種多様性を高めていると結論される。これらの研究成果は、学術的意義だけでなく、実学的な貢献度が極めて大きい。例えば、近年各地で行われているヨシ原の自然再生を行う際の候補地選定に有益な知見を提供できる。また、海岸線の開発工事の際、本研究成果を参考に、広域での種多様性に配慮した計画立案することが望まれる。

研究成果の概要（英文）：First, we explicitly identified stable salinity conditions of buffer waters in shallow underground areas at the boundary between land and sea. In both locations where the backlands were mountain forests and where the backlands were plains, the salinity of surface water fluctuated with the ebb and flow of the tide, whereas the pore water was stable at low salinity. Surface water salinity was influenced by tides and precipitation, while pore water salinity was not influenced by tides and was stable. Porewater on the mountain side was unaffected by not only tide but also precipitation.

The benthic fauna of the tidal flats differed between the mountain side and the plain side, with reeds growing on the mountain side, and the benthic species diversity was high. The low salinity of the pore water supports the growth of reeds, and as a result, it can be inferred that the species diversity is high due to the presence of organisms that depend on the reed zone.

研究分野：応用生態学

キーワード：塩分 エコトーン 地中間隙水 ベントス ヨシ

1. 研究開始当初の背景

一般に、陸域と海域の移行帯（エコトーン域）では、陸水と海水が混合するため、汽水域が形成される。そして、多くの汽水域では、水の流入と潮汐に応じた日常的な海水の流入出で塩分の変動が生じる（楠田・山本 2008）。このような塩分変動は、浸透圧調整を行う水生動植物の生理活性に影響するため（Anjum et al. 2014; Kültz 2015）、汽水域の塩分勾配や塩分変動は希少生物の生息適地や産卵適地の決定に関わる（Koyama et al. 2016; 長谷川・小路 2017）。

ただし、この塩分変動は表層水で起こる現象である。河口域に形成される干潟などの地下水（地中の間隙水）は、塩分の時間的変動が地表水と比べて小さく、安定している（Chapman 1981）。その理由は明確でなく、地表水と地下水との交換が小さいことが類推されるが、陸域由来の伏流水（淡水）が潮間帯の地下を介して海域に供給される可能性があること（Cave and Henry 2011）、潮間帯における地表水と地下水の交換率は底質の粒度、地表水と地下水間の塩分勾配、地表水の流速、潮差、タイドプールの有無など様々な要因に影響を受けることから（Chapman 1981; Robinson et al. 2007; Carol et al. 2012; Nakashita et al. 2016）、その安定性も立地や環境構造の相違によって異なる可能性が示唆される。

そして、この地中の安定した塩分は、少なからず水生動植物の分布や生息に影響すると予測されるが、このエコトーン域の地中間隙水と生物との関連性についてはほとんど議論されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、陸域と海域の境界部、すなわち、エコトーン部の地中浅所には、塩分濃度が安定した汽水域（以後、陸域・海域緩衝水域と称す）が形成されることを明示し、異なる立地条件の野外での観測に基づき、その形成条件を特定することにある。そして、その緩衝水域の生態学的機能を解明することにある。

3. 研究の方法

背後地が森林である砂浜と平野の砂浜で、緩衝水域の塩分濃度とその変化が異なるかを明らかにするため、流入河川がない福岡県福津市の津屋崎入り江内に、3観測点（背後地が森林に1観測点、平野に1観測点、および湾筋1点、それぞれ Y1、H1、M1 と称す）を設けた。Y1、H1 は地中間隙水の塩分計測を目的としたため、地中 20cm の深さの個所に塩分ロガー（HOBO U24, ONSET Computer Corporation, Massachusetts）の検出部が来るように、M は表層水の塩分計測を目的としたため、干潮時に最も水深が大きい場所とし、湾筋底面から 5 cm 程度の位置に設置した。まず、2020 年に予備調査を行い、地中にロガーを埋めた状態で塩分観測が可能であることを確かめ、また湾筋に設置したロガーで潮の干満に伴う塩分変動を確認した後、2021 年の 5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、11 月、2022 年 1 月および 3 月の計 8 回、大潮から 15 日間以上となるように、塩分ロガーを設置した。ロガーによる観測は 30 分に 1 回とした。計 8 回（合計 152 日分）の塩分データについて日最大値、日平均値と日較差を算出後、Friedman 検定を行い、観測点間を比較した。また、塩分の日最低値と最高値、気象庁ホームページよりダウンロードした降水量（当日降水量、10 日間量）と潮位差について整理し、塩分の日最高値、最低値を目的変数、降水量、潮位差を説明変数として、ステップワイズ重回帰分析を行った。

また、2021 年 12 月および 2022 年 7 月には、広域的な地中間隙水の塩分観測とタイドプール（地表水）の塩分観測を目的として、干潮前後 2 時間で、山側 7 か所（Y1-Y7）、平野側 5 か所（H1-H5）で、地表水（タイドプール）と地中間隙水を採取した。深さ 20-40 cm 程度の穴をスコップで掘り、地中から湧き出た穴内の水を 300 mL 程度、プラスチックボトルで採取し、実験室に持ち帰り、塩分計（YSI Model 30, YSI, Ohio）で測定した。

生物については、ドローン空撮画像を使って山側、平野側の植生分布を整理するとともに、九州大学水産実験所で保有する生物分布データベースから、ロガー設置個所の近隣のベントス調査結果を抜粋し、山側、平野側を比較した。

4. 研究成果

計 8 回、152 日分のデータについて、塩分の日最大値、日平均値と日較差を算出し、地点間を比較したところ、いずれも Friedman test で有意な差が認められ、Scheffe's test によって、塩分の日最高値は M、H1、Y1 の順に、日最低値は H1、Y1、M の順に高かった。日較差は M が H1、Y1 に対して有意に高い値を示し、H1 と Y1 の間に差は認められなかった。この結果は、目立った流入河川がない津屋崎入り江においても表層水の塩分変動が大きいこと（日最高値、最低値、日較差の平均：それぞれ 31.3、16.2、15.1 ppt）、同じ地中の間隙水でも平野側と山側でその塩分が異なること（平野側の日最高値、最低値：30.1、29.2 ppt；山側の日最高値、最低値：24.5、23.6 ppt）そして、地中に形成される汽水域は塩分がほとんど変動せずに安定していること（平野側、山側の日較差：1.0、0.8 ppt）を示している。つまり、本研究の目的である、陸域と海域の境界部、すなわち、エコトーン部の地中浅所には、塩分濃度が安定した汽水域（陸域・海域緩衝水域）が形成されることを明示したといえる。

平野側、山側に形成される陸域・海域緩衝水域の日平均塩分および日較差の年変化を図 1 に示

す。平野側（H1）に形成される緩衝水域の塩分は 30 ppt 前後であったが、2022 年は晩夏から初秋に降雨が続いたためか、8-9 月の塩分がやや低下していた。逆に降水が少ない冬季は高塩分を示した。山側（Y1）は季節的な変動が大きく見えたが、その理由は不明瞭であった。

日較差については、いずれの場所でも低い値を示し、10 ppt を超える日は一度もなかった。

塩分に関連する要因を明らかにするために行ったステップワイズ重回帰分析結果を表 1 に示す。まず、澇筋（表層水）については、その最小値は当日降水量に影響され、測定日に雨が降ると塩分が低下する傾向を示した。また、潮位差が大きいほど、塩分が低下する傾向を示した。モデルの調整済み R が 0.6 を超えており（ $p < 0.001$ ）、またいずれの説明変数も $p < 0.01$ であることから、澇筋の塩分最小値は当日降水量と潮位差に大きく影響されると判断できる。最大値については、最小値とは異なる傾向を示し、10 日間降水量がその塩分低下に影響すること、潮位差が大きいほど塩分が高くなることが解析結果から示された。潮位差が大きい方が入り江の奥まで外海の海水が到達するため、また、外海の海水の塩分低下は長期的な降水に左右されるため、両変数が選ばれたと推察される。

平野側の地中間隙水（緩衝水域）については、塩分最小値・最大値ともに、10 日間降水量が大きいと塩分が低下すること、そして、潮位差が大きいと塩分が低下することを、解析結果が示していた。モデルの調整済み R が 0.6 を超えており（ $p < 0.001$ ）、またいずれの説明変数も $p < 0.01$ であることから、説明力は高いと考えている。10 日間降水量は表層水の塩分最大値と傾向が同じであったが、潮位差は最小値と傾向が同じであった点は興味深い傾向かもしれない。

さて、山側の地中間隙水（緩衝水域）については、いずれの変数も選択しなかった。単回帰の相関分析を行ってみたが、平野側は最小値で当日降水量（ $r = -0.293, p < 0.01$ ）10 日間降水量（ $r = -0.636, p < 0.01$ ）潮位最高値（ $r = -0.274, p < 0.01$ ）最大値も当日降水量（ $r = -0.231, p < 0.01$ ）10 日間降水量（ $r = -0.593, p < 0.01$ ）潮位最高値（ $r = -0.265, p < 0.01$ ）と有意な関係性を示したが、山側の地中間隙水（緩衝水域）の塩分は、いずれの変数とも有意な関係性を示さなかった（塩分最小値では、当日降水量 $r = 0.057, p > 0.05$ 、10 日間降水量 $r = 0.026, p > 0.05$ 、潮位最高値 $r = -0.083, p > 0.05$ 、塩分最大値では当日降水量 $r = 0.038, p > 0.05$ 、10 日間降水量 $r = 0.012, p > 0.05$ 、潮位最高値 $r = -0.080, p > 0.05$ ）。降水や潮汐に左右されず、安定した汽水域を形成している点で、興味深い結果であるが、その原因は明らかとはならなかった。山林が地中に保有する地下水等が、その形成

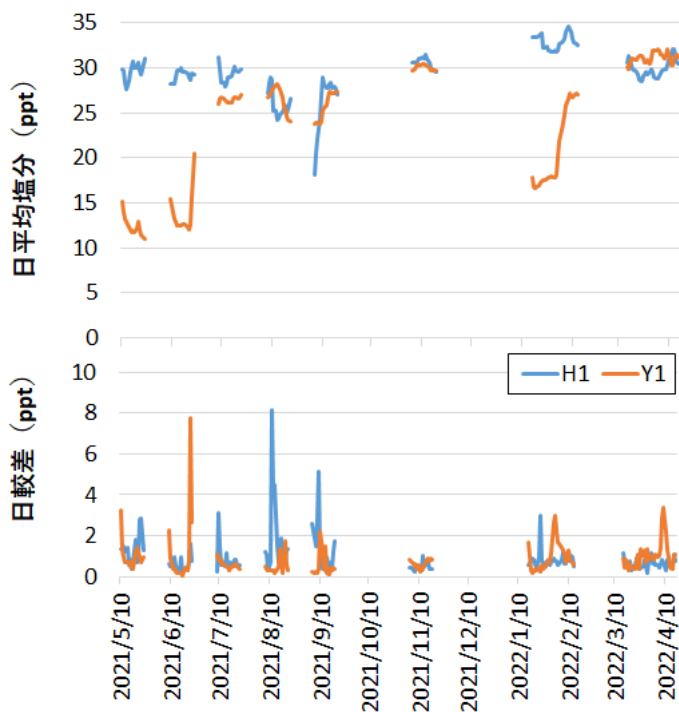


図 1. 陸域・海域緩衝水域の塩分変化（上：日平均；下：日較差）

表 1. ステップワイズ重回帰分析結果

目的変数	調整済みR	自由度	F値	p値	説明変数	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数	p値	VIF
澇筋（表層水） ：塩分最小値	0.608	2	45.4	<0.001	降水量	-0.088	0.029	-0.193	<0.01	1.000
					潮位差	-0.140	0.015	-0.585	<0.001	1.000
澇筋（表層水） ：塩分最大値	0.551	2	34.0	<0.001	10日間	-0.016	0.002	-0.536	<0.001	1.005
					潮位差	0.010	0.005	0.126	<0.1	1.005
平野側緩衝水域 ：塩分最小値	0.651	2	56.7	<0.001	10日間	-0.017	0.002	-0.648	<0.001	1.005
					潮位差	-0.011	0.004	-0.168	<0.01	1.005
平野側緩衝水域 ：塩分最大値	0.604	2	44.4	<0.001	10日間	-0.014	0.001	-0.604	<0.001	1.005
					潮位差	-0.009	0.004	-0.147	<0.05	1.005

山側緩衝水域：最小値・最大値とも変数選択されず

と安定化に影響しているのかもしれない。

2021年12月と2022年7月に、12調査点で地中間隙水に加えて、地表水としてのタイドプール（ただし、タイドプールが形成されなかった場合は、澇筋の塩分を測定）の塩分を計測したところ、地表水（タイドプールあるいは澇筋の水）の塩分は全ての調査点でばらつきが小さく、中央値は28.0 ppt を越えていた（12月の最小-最大；25.3-31.9 ppt、7月の最小-最大；25.8-34.1 ppt）。平野側の地下水の塩分は、7月に山側の地表水と有意な差が認められたものの、地表水と同様にばらつきが小さく、中央値は28.0 ppt を越えていた（12月の最小-最大；25.6-30.7 ppt、7月の最小-最大；26.1-30.4 ppt）。一方、山側の地下水の塩分は調査点内でのばらつきが相対的に大きく、特に7月に顕著であった（12月の最小-最大；11.6-24.6 ppt、7月の最小-最大；5.7-31.8 ppt）。山側の塩分の中央値は12月に19.1 ppt、7月に23.0 ppt であり、地表水および平野側の地下水と比べて有意に小さいことが示された。これらの結果は、ばらつきはみられるものの、広範囲で見ても、山側に形成される地中の緩衝水域の方が低塩分であることを明示している。

空撮画像を使った山側、平野側の植生被度は、それぞれ0.89と0.75 km²であり、空撮画像上ではその面積はさほど大差は認められなかった。しかしながら、現地を確認したところ、平野側の植生（ほとんどが陸生）はすべて海岸堤防よりも堤内地側に分布している（図2A）。堤外地に植生が分布するのは山側のみであった。山側の主要な植生はヨシで（図2B）、ほかにハマボウやハママツナなどが認められた。ヨシは低塩分環境を好む植物であることが知られている。日本の多摩川の河川汽水域から採取したヨシを用いた実験（高橋・近藤1991）では、約8 pptの塩分条件での発芽率はわずか0.6%で、幼植物は10日で枯死したことが報告されている。淡水条件下と塩水条件下（地下水の塩分が約17-25 ppt）でのヨシの発達を比較した報告では、出芽数が淡水下より約57%少なく、穂の数は淡水下の数と比べて6%程度しかなかった等、塩水下での生育の悪さが示されている（Asaeda et al. 2003）。津屋崎入り江の堤外地の山側、平野側の植生分布の明確な差は、緩衝水域の塩分の相違に起因すると考察できる。

九州大学水産実験所データベース内のコドラート調査結果を抽出したところ、山側の11コドラート、平野側の8コドラートでのベントス調査が実施されており、両者で明確に違いが認められたのはカニ類であった（山側8種、平野側3種）。実際に、干潮時に踏査したところ、山側にはアシハラガニ（図3A）、ユビアカベンケイガニ（図3B）、ハクセンシオマネキ（図3C）など、汽水域の植生帯やその周囲の微高地を利用する種が多く確認された一方、平野側はヤマトオサガニなど、入り江の大半の場所に普通に生息する種しか見られなかった。山側の緩衝水域が低塩分環境を保持し、ヨシが生育していることが、山側のカニ類の高い種多様性を支えていると考察できる。

平野側に出現するベントス類のほとんどは、山側にも出現したが、水産有用種のアサリは平野側にのみ出現した。我々が球磨川河口域で行った調査データを整理し、アサリの出現・非出現を応答変数、地中塩分を

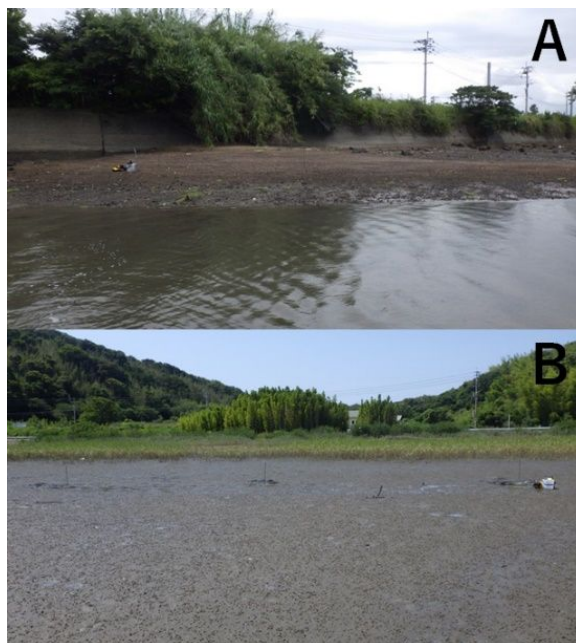


図2. 津屋崎入り江における平野側（A）と山側（B）の植生



図3. 津屋崎入り江の山側でのみ確認できるカニ類（A：アシハラガニ、B：ユビアカベンケイガニ、C：ハクセンシオマネキ）

説明変数として二項ロジスティック回帰分析を行ったところ、塩分が高いほど、アサリの出現の可能性が高まることが示された(図4)。立地の相違が緩衝水域の塩分の相違を創出することで、入り江全体での種多様性を高めていると考えられる。

本研究により、陸域と海域の境界部、すなわち、エコトーン部の地中浅所には、塩分濃度が安定した汽水域(陸域・海域緩衝水域)が形成されることが明示でき、その緩衝水域の塩分は、背後地の相違により異なることが明確となった。そして、その塩分の相違が異なる生物相を生み出すことで、広域での種多様性を高めていると結論される。ヨシ原の自然再生や海岸線の開発工事の際、本研究成果を参考に、計画立案してもらえると幸いである。

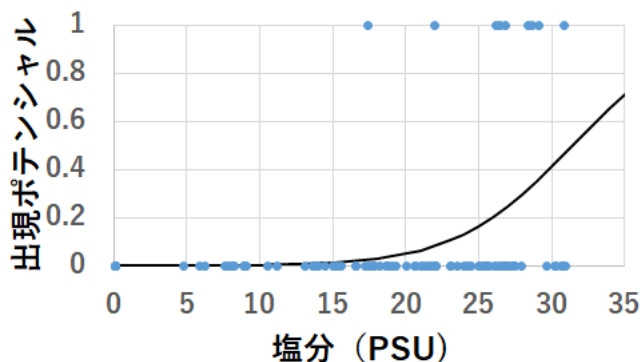


図4. 球磨川河口域における地中間隙水塩分に対するアサリの応答(鬼倉 未発表データ)

<引用文献>

- Anjum N.A., Ahmad I., Valega M., Mohmood I., Gill S.S., Tuteja N., Duarte A.C. & Pereira E. (2014) Salt marsh halophyte services to metal-metalloid remediation: assessment of the processes and underlying mechanisms. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44: 2038–2106.
- Asaeda T., Manatunge J., Fujino T., & Sovira D. (2003) Effects of salinity and cutting on the development of *Phragmites australis*. *Wetlands Ecology and Management* 11: 127–140.
- Carol E.S., Dragani W.C., Kruse E.E. & Pousa J.L. (2012) Surface water and groundwater characteristics in the wetlands of the Ajó River (Argentina). *Continental Shelf Research* 49: 25–33.
- Cave R.R. & Henry T. (2011) Intertidal and submarine groundwater discharge on the west coast of Ireland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92: 415–423.
- Chapman P.M. (1981) Measurements of the short-term stability of interstitial salinities in subtidal estuarine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 12: 67–81.
- 長谷川拓也・小路淳 (2017) 広島県三津大川におけるシロウオの遡上および産卵場の環境特性. *日本水産学会誌* 83: 574–579.
- Koyama A., Inui R., Iyooka H., Akamatsu Y. & Onikura N. (2016) Habitat suitability of eight threatened gobies inhabiting tidal flats in temperate estuaries: model developments in the estuary of the Kuma River in Kyushu Island, Japan. *Ichthyological Research* 63: 307–314.
- Kültz D. (2015) Physiological mechanisms used by fish to cope with salinity stress. *The Journal of Experimental Biology* 218: 1907–1914.
- 楠田哲也・山本晃一 (2008) 河川汽水域 その環境特性と生態系の保全・再生. 技報堂出版, 千代田区.
- Nakashita S., Hibino T., Komai K. & Narong T. (2016) Temporal variations of groundwater salinity and temperature in a tidal flat in front of a tide pool. *Continental Shelf Research* 122: 29–35.
- Robinson C., Gibbes B., Carey H. & Li L. (2007) Salt-freshwater dynamics in a subterranean estuary over a spring-neap tidal cycle. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 112: C09007.
- 高橋新平・近藤三雄 (1991) 水辺の緑化に関する実験的研究 ヨシ, ガマ, オギの発芽特性について. *日本緑化工学会誌* 16: 31–38.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小山彰彦・鬼倉徳雄	4. 巻 未定
2. 論文標題 津屋崎入江における潮間帯地下の塩分とヨシの空間分布	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用生態工学	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究 分 担 者	小山 彰彦 (Koyama Akihiko) (50814662)	九州大学・農学研究院・助教 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関