

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年2月15日現在

機関番号：82707

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2012

課題番号：20681023

研究課題名（和文）鳥類の新たな餌資源としてのバイオフィルムを考慮した干潟・湿地生態系の保全

研究課題名（英文）Conservation of tidal flats and wetlands on the basis of biofilm as a novel diet for birds

研究代表者

桑江 朝比呂（KUWAE TOMOHIRO）

（独）港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チームリーダー

研究者番号：40359229

研究成果の概要（和文）：本研究により、これまでまったく知られていなかった餌が世界で初めて解明された。具体的には、干潟堆積物表面に発達するバイオフィルム（微生物やそれが放出する多糖類粘液で構成された混合物の薄い層）が、小型シギ類の主食となっていることを示した。さらに、この未知の餌の摂食が、より広範な、多くの種にも当てはまる事実であることを示し、どのような要因でバイオフィルムの摂食割合が決定されるのかを解明した。

研究成果の概要（英文）：Here, we conducted field observations on shorebird foraging behavior on Japanese and Canadian tidal flats, analyzed chemical components of the bird droppings and prey items. One of the surprising discoveries is that many shorebird species, such as Dunlin (a very common species worldwide) and Red-necked Stint (very common in East Asia and Oceania), consume surficial intertidal biofilm, a hitherto unsuspected food comprised of microbes, their extracellular mucus substances, and detritus. This finding is the first in the world to demonstrate that biofilm feeding is indeed widespread.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：資源保全学

キーワード：鳥類・干潟・湿地・生態系保全・自然再生

## 1. 研究開始当初の背景

干潟生態系の保全や再生をすすめるうえで、食物網の上位者である鳥類の保全が鍵をにぎる。干潟における典型鳥類種であるシギ・チドリ類は、採餌場として干潟を利用しているため、餌環境の保全や再生が重要となる。これまで、シギ・チドリ類は、干潟に生息するゴカイやカニなどの底生無脊椎動物を餌としていると定性的に報告されることが多

かった。しかし、実際の餌生物を特定し定量的に調べることは、技術的に非常に困難であった。さらに、餌生物や採餌量の決定要因については、未解明な部分が多く取り残されていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、以上の背景をふまえ、シギ・チドリ類の食性を定量的に実証し、干潟生態系

の保全や再生を実施する際の技術的なポイントを提案することを目的とした

### 3. 研究の方法

「鳥類の食性は研究手法的に困難」という隘路を打開するため、超望遠ビデオカメラによる採餌行動解析、糞の安定同位体比分析、採餌器官の形態解析など、様々な新たな観測技術や定量技術を開発して導入し、生態学、生理学、行動学、形態学、系統学といった様々な学問分野の融合を図りつつ検討した。

### 4. 研究成果

はじめに成果の概要を以下に示す。

シギ・チドリ類は、餌密度の高い干潟を飛来地として選択して採餌していた。餌生物の種類や捕捉速度は、その利用可能性によって決定していた。たとえば、餌密度が高いエリア（パッチ）を利用するときや、堆積物の硬さなどの環境制約が緩いときに、捕捉速度は高まった。

本研究により、これまでまったく知られていなかった餌が世界で初めて解明された。具体的には、干潟堆積物表面に発達するバイオフィーム（微生物やそれが放出する多糖類粘液で構成された混合物の薄い層）が、小型シギ類の主食となっていることを示した。さらに、この未知の餌の摂食が、より広範な、多くの種にも当てはまる事実であることを示し、どのような要因でバイオフィームの摂食割合が決定されるのかを解明した。本研究により、餌生物に関する常識を覆すとともに、食物網構造の理解や、生態系の保全・再生のあり方に、パラダイム変換をもたらした。

次に、具体的な成果を以下に示す。

第一に、干潟に飛来するシギ・チドリ類の個体数と餌の密度との関係や、干潟の成立経緯（自然干潟 vs 再生干潟）の違いが飛来数に与える影響について検討することを目的として、再生干潟と自然干潟における飛来数を調査し、データを比較しながら検討した。

シギ・チドリ類は、干潟上では採餌にほとんどの時間を割いていた。つまり、採餌のために干潟を利用していた。

シギ・チドリ類は、再生後数年の干潟にも飛来し、餌生物を採餌していた。対象とした再生干潟における堆積物の粒径が粗く、餌生物の密度が低いことと、再生干潟に飛来するシギ・チドリ類が少なかったこととの関連性が示唆された。

第二に、シギ・チドリ類の食性ととりわけ餌生物の特定、採餌試行速度、捕捉速度、採餌様式や、それらの決定要因を定量的に検討するため、日本の干潟における典型種である、シロチドリとハマシギを題材にして現地観測を実施した。

シギ・チドリ類のなかには、ミリメートル

スケールの非常に小さな餌を、0.3 秒程度の非常に高速な採餌行動により捕捉する種も存在することがわかった。このような目視観察ではほとんど不可能な行動を定量化するため、本研究では、昼間は望遠可視光ビデオカメラ、夜間は熱赤外線ビデオカメラをもちいた現地観測システムを、新たに開発して導入した。繰り返し再生やストップモーション再生することにより、シギ・チドリ類の採餌行動を、従来の目視による観察よりも正確に記録することができた。

シギ・チドリ類は、餌の利用可能性が高まるときに、捕捉速度を高めていた。たとえば、餌生物（多毛類やカニ類）が高密度の場所や、夜行性の多毛類を主食とするシロチドリのケースでは夜間に、より多くの餌を捕捉していた。

採餌様式を複数持つ種では、環境条件の変化に応じて、適切に採餌様式を選択し調整していた。たとえば、干潟の干出後のサクシヨンの発達により、堆積物へ嘴が突き刺しにくくなる（堆積物が硬くなる）状況下で、ハマシギは摂取速度を高めるために、採餌様式を表面つき採餌にシフトさせていた。すなわち採餌様式に関する可塑的で適応的な採餌行動が実証された（図-1）。

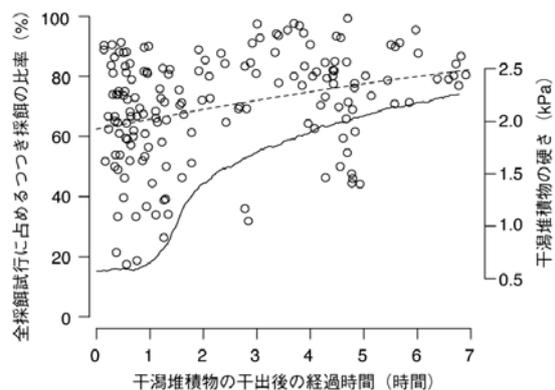


図-1 ハマシギの全採餌試行に占めるつき採餌の比率と、干出後の経過時間との関係。破線は、一般化線形モデルによって支持された予測を示す。重ね合わせた実線は、調査地における堆積物の硬さ（ペーンせん断力）の変化を示す（右側の y 軸）。

突き刺し採餌をするシギ・チドリ類によっては、堆積物が硬いことは環境制約となるため、泥質干潟のような柔らかい潮間帯の生息場の保全や再生が重要であると考えられた。

第三に、望遠ビデオカメラを用いても、定量化できない餌、すなわち、肉眼では観察できないくらい微小な餌を小型シギ類が採餌していることを証明するため、糞の安定同位

体比を用いた食性解析手法や熱量収支による解析手法を新たに開発して導入した。

その結果、複数種の小型シギ類が、ゴカイなど小動物の他に、バイオフィルムと呼ばれる食物網の基底に位置する微生物をも食べることを世界で初めて発見した。人間の目には見えない、これまで誰も予想もし得なかったものを鳥類が餌としていて、さらには主食となっている場合があることを突き止めたということで、世界中の鳥類学者、生態学者、そしてナチュラルリストを驚かせる新事実となった。

小型シギ類のバイオフィルムへの依存度は、時空間的に異なっており、鳥類の形質や環境条件によって決定していると考えられた。すなわち、鳥類の体サイズが小さく（採餌器官が発達していること、そして必要熱量が少ないこと）、バイオフィルム密度の高い干潟では、バイオフィルムへの依存度が高まることが示唆された。

第四に、未知の餌を探索することが、その生態系全体の理解にどのように影響を与えるかについて論じた。バイオフィルム-鳥の直接的なリンクの発見を「未知の食物網の発見」としてとらえ、未知の食物網構造や上位捕食者の有無が、どのように生態系の安定性に影響を与えるのかといった、様々な生態系の保全に適用可能な新たな視点を導入した。

具体的には、これまで考えられてきた、バイオフィルム-底生無脊椎動物-鳥という、単純な食物連鎖系の構造ではなく、鳥が底生無脊椎動物とバイオフィルムの両方を餌とする雑食性で、ギルド内捕食系を構成した食物網構造であることを解明し、食物網の基本構造に対して見直しを迫った（図-2）。さらに、食物網の理論検討により、ギルド内捕食系は、鳥、底生無脊椎動物、バイオフィルムの3つの群集を安定化させる可能性があることがわかった。

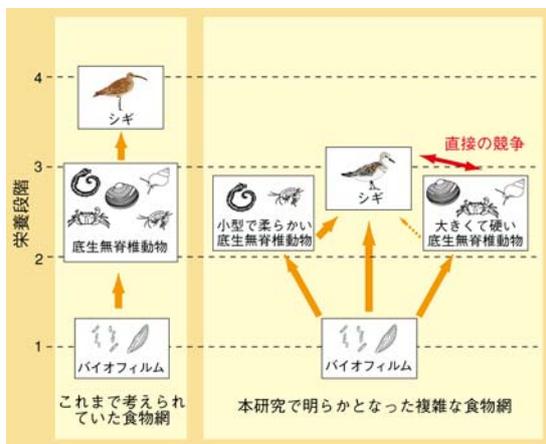


図-2 バイオフィルムを採餌する小型シギ類の発見により、小型シギ類が生息する生態系においては、小型シギ類の栄養段階が下がり、従来考えられてきた食物網よりも複雑になるという点において見直しが必要となる。具体的には、小型鳥類は、小さく柔らかい底生無脊椎動物とバイオフィルムの二つの餌をギルド内捕食\*するとともに、捕食がほとんどできない餌、すなわちバイオフィルムを採餌する大型もしくは硬い底生無脊椎動物と競争関係となる。

さらに、鳥-バイオフィルムのリンクによって、全球規模（フライウェイごと）のシギ・チドリ類の地理的分布の一部について、合理的に説明できることを示した。

第五に、泥表面のバイオフィルムを主食としていることを示した本研究成果により、これまで教科書や図鑑で解説されていた、「シギは長い嘴をもちいて泥深くの餌をとり、チドリは泥表面の餌をとる」シギ類をひとくくりにした、これまでの食性の説明論理は破綻していることが示された。したがって、説明論理に見直しを迫るため、適応度（子孫繁栄）や個体数の回復を考えるうえでキーとなる食性が、その鳥類にとってどのような進化上の意義があるのかについて論じた。

小型シギによるバイオフィルムを主食とする理由について検討し、「体サイズという形質にもとづく採餌行動と採餌器官形態が多様化した結果、ニッチ分化（食い分け）が起きた」との説明が合理的であることがわかった（図-3）。すなわち他種との競争において、小型のシギは体サイズが小さいため要求熱量が少なくすむので、バイオフィルムを新たな食物源として開拓し、バイオフィルムをより効率よくできるよう、舌先の棘毛が長く密に発達し進化したとする説明を提案した。

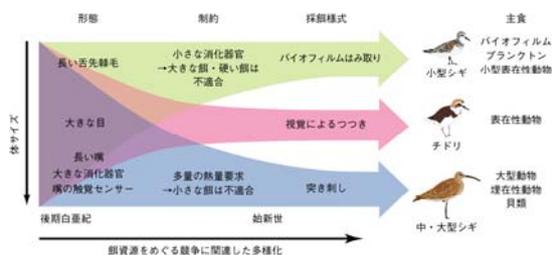


図-3 近縁種のグループは共通の祖先を持ち、いくつかの形質をかつて共有していた。しかし、適応放散が進む間に、同所に生息する種は餌をめぐる競争のなかで採餌関連形質とともに多様化していった。そのような形

質の中でも、体サイズと体サイズに関連したつつき速度、採餌器官、そして消化器官は、シギ・チドリ類の採餌様式における多様化の鍵となり、ニッチ分化につながっていったのかもしれない。

第六に、バイオフィーム食が、どの程度シギ・チドリ類に広範にみられる現象なのかを検討するため、潜在的にバイオフィーム食を示す種は、バイオフィーム食に適合した採餌器官、すなわち、舌先に棘毛を有する」との仮定のもと、採餌器官の系統解析を実施した。シギ・チドリ類には、特有のブラシ状の舌先を持つ種が多く、この舌先をもちいてバイオフィームを絡め取って採餌する行動が観察された。この特有の採餌器官の形態は、系統的に偏ったグループのみ広範に存在していた。また、体サイズが小型な鳥類種ほど発達していた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Kuwa, T., E. Miyoshi, S. Hosokawa, K. Ichimi, J. Hosoya, T. Amano, T. Moriya, M. Kondoh, R. C. Ydenberg, and R. W. Elner (2012) Dynamic and complex food web structures revealed by exploring missing trophic links between birds and biofilm. *Ecology Letters*, 15: 347-356. (査読有)
- ② Aynur Abliz・中山恵介・丸谷靖幸・井上徹教・桑江朝比呂・館山一孝・岡田知也・加藤淳子・石田哲也 (2012) 知床を対象とした海陸の栄養塩循環機構の解明. 土木学会論文集 B1-67 (水工学論文集 56): 721-726. (査読有)
- ③ 佐々木奈々・村上和男・梅田悠輔・桑江朝比呂・中瀬浩太 (2011) 東京港野鳥公園の干潟における栄養塩除去量算定と考察. 土木学会論文集 B2-67 (海岸工学): I1116-I1120. (査読有)
- ④ Aynur Abliz・中山恵介・丸谷靖幸・桑江朝比呂・石田哲也 (2011) 安定同位体比による知床ラウス川を通じた海起源栄養塩の流域内分布. 水工学論文集 55: 1303-1308. (査読有)
- ⑤ Kuwa, T., E. Miyoshi, S. Sassa, and Y. Watabe (2010) Foraging mode shift in varying environmental conditions by dunlin *Calidris alpina*. *Marine Ecology Progress Series* 406, 281-289. (査読有)
- ⑥ 秦野拓見・村上和男・石射広嗣・門脇麻人・桑江朝比呂・中瀬浩太 (2010) 東京港野鳥公園干潟における窒素・リン収支の特性土木学会論文集 B, 66 巻, 419-433. (査読有)
- ⑦ 桑江朝比呂. 干潟の生き物と食物連鎖 (2009). 私たちの自然, 549 巻, 5-7. (査読無)
- ⑧ 石射広嗣・秦野拓見・門脇麻人・桑江朝比呂・村上和男 (2009) 節間における干潟域の栄養塩類フラックスと堆積物が直上水に及ぼす影響の検討. 海洋開発論文集 25 巻, 335-340. (査読有)
- ⑨ 佐々真志・渡部要一・桑江朝比呂 (2008) 鳥と地盤と底生生物の関係に果たす水際土砂環境の役割. 海岸工学論文集 55 巻, 1171-1175. (査読有)
- ⑩ 桑江朝比呂 (2008) シギの主食は干潟の“ヌルヌル”だった! 自然保護 No. 505: 24. (査読無)

[学会発表] (計 20 件)

- ① Sasaki, N., Murakami, K., Umeda, Y., Kuwa, T., Miyoshi, E., and Nakase, K. (2011) Effects of tidal flat on water quality improvement in the Tokyo Port Wild Bird Park, Proceedings of the Sixth International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2011), Hong Kong, China, 2018-2025.
- ② Takekawa, J., I. Woo, A. Brand, M. Iglecia, E. Flynn, and T. Kuwae (2011) Assessing biofilm seasonality, distribution, and consumption in the Southern San Francisco Bay. Proceedings of the South Bay Science Symposium 2011, San Francisco, p. 18.
- ③ 桑江朝比呂・三好英一・細川真也・一見和彦・細谷淳・守屋年史・石井正春・R. C. Ydenberg・R. W. Elner (2011) 小型シギにおける普遍的なバイオフィームの採餌. 2011 年度モニタリングサイト 1000 シギ・チドリ類調査交流会東北要旨集 pp. 2.
- ④ Murakami, K., N. Sasaki, T. Kuwae, and H. Ishii (2011) The estimates of nutrient cycles of artificial tidal flat in Tokyo Bay. Proceedings of The Ninth International Meeting on the Environmental Management of Enclosed Coastal Seas (EMECS 9), Baltimore, USA, pp. 95.
- ⑤ 桑江朝比呂・三好英一・細川真也・一見和彦・細谷淳・守屋年史・石井正春・R. C. Ydenberg・R. W. Elner (2011) 数種の小型シギにおけるバイオフィームの採食. 第 58 回日本生態学会大会, 札幌, pp 69.
- ⑥ Kuwae, T., E. Miyoshi, S. Hosokawa, T. Moriya, K. Ichimi, R. C. Ydenberg, and

R. W. Elner (2010) Evidence of biofilm grazing in several *Calidris* shorebirds. International Wader Study Group Annual Conference 2010, Lisbon, Portugal, pp. 45.

- ⑦ Maruya Y., A. Abuliz, K. Nakayama, T. Kuwae, T. Okada, T. Ishida (2010) Mass transport and nutrient circulation evaluated by stable isotope analysis and chemical decomposition. Proceedings of the 5th Conference of the Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, pp. 428-435, Hanoi, Vietnam.
- ⑧ 桑江朝比呂・三好英一・細川真也・一見和彦 (2009) 小型シギによる餌資源としてのバイオフィルムの重要性. 2009年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 函館, pp. 87.
- ⑨ 桑江朝比呂・R. W. Elner (2009) 小型シギ類の主食としてのバイオフィルム. 第56回日本生態学会大会, 盛岡, pp. 468.
- ⑩ Kuwae, T. (2008) Biofilm: discovery of a new food source for shorebirds and its conservational implications. 2008 International Workshop on Management and Function Restoration Technologies for Estuaries and Coastal Seas, Ansan, Korea, pp. 37-48.

[図書] (計1件)

- ① 桑江朝比呂 (分担執筆) (2008) 恒星社厚生閣. 安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態-アサリからクジラまで 85-96.

[その他]

(1) ホームページ等

下記のURLにて研究成果を発信している.

<http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/biofilmfeeding.html>

(2) アウトリーチ活動

- ① 福岡県福岡市において地元住民と地方自治体職員に対し実施した (23年度).
- ② 風連湖・米国サンフランシスコ湾において地元住民に対し実施した (22年度).
- ③ 大阪南港・東京都港区において地元住民に対し実施した (21年度).
- ④ 風蓮湖・コムケ湖において地元住民に対し実施した (20年度).
- ⑤ 干潟における鳥類の食性や採餌・排泄が干潟の物質循環に及ぼす影響に関して研究している大学やNPOの研究者に参集いただき、「干潟における物質循環と鳥類の役割に関する講演会」を主催した (20年

度).

(3) 報道関連

- ① 2012年3月7日掲載, 朝日新聞 (夕刊) 全国版 第45204号 (7面), 「シギ, 干潟の膜ペロッ, 微生物が作るヌルヌル 主食にも」
- ② 2012年2月8日掲載, カナダ国新聞 The Vancouver Sun (p. B2) "Mucous-like mud keeps birds moving: Energy-rich biofilm can make up 70 per cent of avian diet, study suggests"
- ③ 2012年2月8日掲載, 米国新聞 Forbes デジタル版 "Magic mud' on tidal flats key to shorebird populations"
- ④ 2012年2月8日掲載, カナダ国新聞 The Times Colonist (p. A2) (p A6), 他5誌以上 "Magic mud' on tidal flats key to shorebird populations"
- ⑤ 2012年2月8日掲載, カナダ国新聞 The Leader-Post "Shorebird populations tied to biofilm"
- ⑥ 2012年2月7日掲載, 産経新聞 香川版 (22面), 「小型シギ類 主食は干潟の泥の膜」
- ⑦ 2012年2月6日掲載, 読売新聞 関西版 (30面), 「干潟消え「シギ」半減 微生物が作る粘膜主食」
- ⑧ 2012年2月6日掲載, 毎日新聞 関西版 (22面), 「シギ主食 干潟粘液」
- ⑨ 2012年2月6日掲載, 神奈川新聞 (22面) はじめ地方紙10誌以上, 「微生物の膜 主食と解明 干潟のシギなど」
- ⑩ 2009年7月27日掲載, 港湾空港タイムズ 第1166号 (1面) 「世界初, 鳥が干潟で食べるもの」
- ⑪ 2008年10月発刊, 米国雑誌 Estuary (p. 3), "Peep Treats"
- ⑫ 2008年9月発刊, 雑誌「自然保護」第505巻 (p. 24), 「シギの主食は, 干潟の“ヌルヌル “だった!」
- ⑬ 2008年8月28日掲載, 米国新聞 The Berkeley Daily Planet (p. 32), "Mudflat Menu: Biofilm with a Side of Clamworms"
- ⑭ 2008年8月発刊, 雑誌「Birder」第22巻 第8号 (p. 87), 「シギの食物は微生物? 食物の半分以上を微生物に依存するヒメハマシギ」
- ⑮ 2008年7月11日掲載, 読売新聞 (北海道総合 32面) 「干潟の表面膜 シギのごちそう」
- ⑯ 2008年4月14日掲載, カナダ国新聞 The Vancouver Sun (p. A4) 他カナダ国7誌, "Sandpipers' feeding habits could spell trouble for port expansion: Discovery about birds food raises concerns about plan for Roberts Bank terminal"
- ⑰ 2008年4月2日掲載, 米国新聞 The

Oregonian, “Sandpipers graze on algae,  
say researchers”

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桑江 朝比呂 (KUWAE TOMOHIRO)

(独) 港湾空港技術研究所沿岸環境研究領  
域沿岸環境研究チームリーダー

研究者番号：40359229