

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07901

研究課題名(和文) 長距離移動する海鳥を汚染トレーサーとした物質輸送の解明

研究課題名(英文) Migratory seabirds as a tracer of contaminant biotransport

研究代表者

庄子 晶子 (SHOJI, Akiko)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：30792080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：海鳥類は海洋生態系の高次捕食者であり、環境中の汚染物質を高濃度に体内に蓄積し、渡りや繁殖行動等を通して海域から陸上へ輸送しているが、その実態はよくわかっていない。本研究では、北太平洋沿岸で繁殖するウトウにデータロガーを装着し、利用海域と行動を記録した。また、ウトウの体組織と繁殖地の植物等を採取し、個体の水銀蓄積状況と繁殖地への影響を調べた。その結果、環境中への人為的水銀排出量とウトウ体内の水銀濃度には相関があり、ウトウによって輸送された水銀は糞として排出され、植物の根に吸収されていた。本研究により、ウトウの利用海域と水銀蓄積状況、繁殖地への輸送経路、陸上生態系への影響が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

経済活動の活発化に伴う海洋汚染は国際的に深刻な環境問題であり、海洋生態系及び海洋資源を保全するためにはその解決が急務である。一方、海鳥類が海域から陸上へ汚染物質を運搬していることが指摘されているが、物質輸送のメカニズムについてはほとんどわかっていない。本研究により、その解明方法が示されたとともに、広大な海域に散在する汚染物質の位置の特定について、海鳥類を用いる方法が有効であることがわかった。今後本研究を進展させ、他の海洋動物へのバイオロギング技術の利用、他の体組織の分析を行うことにより、様々な汚染物質の分布状況を調べることが可能であり、海洋汚染問題の解決の一助となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Seabirds are being widely used as indicators of marine pollution, including mercury, as they incorporate contaminants during their migration, and hence track contamination levels across wide ranges of space and time. However, the relative role of seabirds' wintering distribution and habitat in contaminant biotransport remains unclear. Here, we leverage the differential uptake of contaminants across tissues to test if seabirds can record how contaminants vary in space and time. To this effect, we measured mercury concentration in three tissues that are regenerated at different timepoints during wintering, and monitored behaviour with biologging devices for rhinoceros auklets breeding on both sides of the North Pacific. In both populations, mercury concentration in bird tissues correlates with local environmental contamination, highlighting the efficacy of seabirds to estimate mercury distribution at a wide-range of ocean.

研究分野：水圏生産科学

キーワード：海鳥 物質輸送 水銀 バイオロギング 海洋生態学

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

海鳥類は海洋生態系の高次捕食者であり、生物濃縮やプラスチックを大量に誤飲してしまうこと等によって汚染物質を高濃度に蓄積している。そして、渡り行動等を通じて越冬期の餌場となる海域から遠く離れた繁殖地へ大量の物質を持ち帰っている。このように、海洋汚染は海鳥類自身へ影響を与えているとともに、海鳥類を物質輸送者として繁殖地の他の生物を含めた生態系全体に影響を広げている可能性が指摘されている。海洋及び陸上の生態系保全の観点からも、この問題を解決することは急務であるといえるが、物質輸送のメカニズム、特に輸送元となる海域と輸送経路についてはほとんどわかっていない。研究代表者は、これまで海鳥類の行動生態についての研究を行ってきた。その中で、海鳥類は海洋環境の変化に柔軟に応答し、採餌行動を変化させていることがわかった。この特性を考えると、海鳥類という物質輸送者を通して、海洋環境の変化が陸上生態系へも変化をもたらしているのではないかという仮説が得られる。さらに、海鳥類のキャリアオーバー効果（個体のある時期に起きた出来事や作用が、その後の別の時期や次の周期での生理機能・意思決定に強い影響を及ぼし（キャリアオーバー）、生活史の形成や個体群動態の決定に大きな関わりを持っているとの報告がある）を合わせて考えると、非繁殖期に過ごす環境やそこでの行動が個体の繁殖ばかりでなく、繁殖地の生態系にも何らかの影響を与えるだろうという着想に至り、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、海鳥類による物質輸送を通じてどの海域から、どの程度の汚染物質が、こういったプロセスで陸上生態系へ運ばれるかを明らかにすることである。海鳥類が越冬海域での採餌行動によって取り込んだ水銀について、バイオリング技術と汚染物質濃度分析を用いて個体レベルで特定し、利用海域が異なる同一種の個体群間で比較することにより、陸上生態系に及ぼす影響とその程度の差について考察する。海洋生態系の高次捕食者であり、魚類等を大量に消費するウミスズメ科のウトウ *Cerorhinca monocerata* を調査対象種とし、北海道天売島とアラスカ州ミドルトン島を調査地とした。この2島は北太平洋の東西に位置しており、繁殖期の気候や海洋環境が似た特徴を持っている。ウトウは潜水採食性の海鳥類で、北太平洋沿岸域で広く多数繁殖しており、繁殖個体群によって汚染物質濃度が異なる海域を利用している。天売島で繁殖する個体群は水銀濃度が比較的高い日本海近海を越冬海域とし、ミドルトン島で繁殖する個体群は水銀濃度が比較的低い越冬海域を利用している。両者の生態や繁殖地の環境に大きな差はないが、越冬海域から繁殖地へ輸送される水銀量が異なると考えられる。この2つの個体群間において、地理や環境条件の違いによる汚染物質暴露状況の比較を行うことで、遠く離れた海域からの物質輸送の実態とその影響の違いを明らかにする。



図1. 足に装着されたジオロケーター

3. 研究の方法

2017年～2019年のウトウの繁殖期において、天売島及びミドルトン島で野外調査を実施した。天売島で採取した試料は北海道大学施設内で、ミドルトン島で採取した試料はカナダのマギル大学施設内でそれぞれ化学分析を行った。

(1) データロガーの装着・回収、体組織等のサンプリング、土壌、植生調査

各調査地において、ウトウを巣から手捕りで20個体捕獲し、越冬期の利用海域を調べるためにジオロケーター（小型位置記録計：図1）を足に装着して翌年に回収した。また、各調査地において、新たに別のウトウ20個体を捕獲し、異なる時期に取り込まれた水銀濃度を調べるため、

血液、羽、糞を採取して放鳥した。体組織サンプルは全て冷凍保存して分析時まで保管した。さらに、各調査地に調査区（ウトウの営巣区と非営巣区）を設定し、調査区毎に土壌と植物、コアサンプル（汚染物質による長期的な影響を調べるために採取する円筒状の堆積物サンプル）を採取した。

(2) 実験室における水銀濃度分析と安定同位体比分析

海鳥類による物質輸送経路、海鳥類によって供給された水銀の排出経路及び植物群集等への影響範囲を調べるため、血液、羽、糞、土壌、植物、コアサンプルの水銀濃度測定及び窒素・炭素安定同位体比分析について、北海道大学、港湾空港技術研究所、マッギル大学、オタワ大学（カナダ）で実施した。土壌は分析前にふるいにかけ、土壌以外の物質が全て取り除かれたことを生物顕微鏡で確認した。植物は根と葉に分けてそれぞれ分析した。

4. 研究成果

(1) ウトウ体組織中の水銀濃度と安定同位体比分析

本研究中に採取した全てのウトウ体組織中から水銀が検出された。ミドルトン島個体群の水銀濃度は天売島個体群と近かったが、羽ではやや高い結果となった。全ての糞から水銀が検出されたことより、ウトウは採餌行動を通じて餌であるプランクトンや魚等から水銀を体内に取り込んで蓄積し、繁殖行動を通じて営巣地内に運搬し、排出している輸送経路が示された。また、糞中の水銀濃度は血中濃度と比較して10分の1程度もしくはそれ以下であったことから、ウトウによる生物濃縮は見られず、餌の水銀濃度がそのまま反映されていた。さらに、同じ試料において、窒素・炭素安定同位体比分析を行ったところ、水銀濃度と安定同位体比の値に相関はなく、餌の栄養段階や採餌環境との関係は見られなかった。一方、安定同位体比は窒素と炭素どちらも抱卵期と育雛期で値に違いが見られ、有意に異なっていた。抱卵期から育雛期にかけて、窒素安定同位体比では上昇し、炭素安定同位体比では下降が見られた。

(2) ウトウ繁殖地の土壌と植物における水銀濃度と安定同位体比分析

ウトウ由来の影響を評価するため、天売島とミドルトン島それぞれの調査区（前述のウトウの営巣区と非営巣区）において、土壌及び植生調査を実施した。植物は各調査地の優先種であるイワノガリヤス（天売島）とキイチゴ（ミドルトン島）を対象種とし、根と葉の両方を分析した。その結果、どちらの調査地においても「営巣区」の根からは「非営巣区」と比較して有意に高い水銀濃度が検出されたことから、ウトウ由来の水銀が植物根に吸収されていることが示された。また、土壌からは高濃度の水銀が検出されたが、調査区間で違いはなかった。

(3) 植物根の多元素分析

以上の結果から、ウトウによって海から持ち込まれた水銀が陸上生態系にまで波及していることが示された（天売島の結果：図2）。そこで、天売島で採取したイワノガリヤスの根について、さらに9元素（ヒ素、カドミウム、鉛、水銀、銅、亜鉛、クロム、コバルト、ニッケル）を分析し、ウトウによる物質輸送の影響を検証した。これらの元素について主成分分析を実施したところ、「営巣区」と「非営巣区」ではイワノガリヤスの根の化学性に顕著な違いが

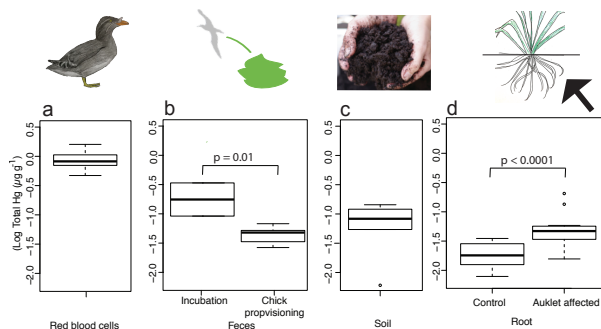


図2. ウトウによる汚染物質輸送の流れ

あった。調査区間の違いを形成していたのはヒ素、カドミウム、水銀、コバルトの4元素であり、ヒ素、水銀、コバルトが「営巣区」で高い一方で、カドミウムは「非営巣区」の方が高かった。最も大きな違いは水銀の値であったことから、ウトウ由来で輸送される物質のうち、水銀が最も強い影響を及ぼしていることが示された (Shoji et al. 2018 Env. Tox. Chem)。

(4) 汚染源の特定

天売島とミドルトン島で回収したジオロケータのデータ解析を行い、越冬期の利用海域を特定した (両個体群の利用海域：図 3)。天売島個体群では日本海を南北に利用していたのに対し、ミドルトン島個体群ではアラスカ湾を広く利用していた。越冬期の水銀取り込みを反映すると予測される羽試料を分析し、検証した結果、大気中の水銀濃度と羽中の水銀濃度は両調査地とも相関していることがわかった。これによって、ウトウの体組織が利用海域での汚染物質の取り込みを反映していることが示された。一方で、環境中への水銀排出量が高い海域を利用している天売島個体群と低い海域を利用しているミドルトン島個体群において、体組織中の水銀濃度に大きな差はみられず、大気循環や海流による自然由来の輸送によって水銀が長距離移動し、ウトウ体内の水銀濃度に影響していることが示された。このように、環境中に放出される自然及び人為由来による様々な形態の水銀は、国をまたいで長距離輸送されることから、国際的な環境問題解決に向けて今後のデータ拡充が必要であると考えられる。



図 3. 天売島及びミドルトン島のウトウの利用海域

本研究によって、北太平洋沿岸で繁殖するウトウを通じた汚染物質輸送について、どこでどのくらいの汚染物質を体内に蓄積し、どのような経路で繁殖地に持ち込み、どの程度の波及効果を陸上生態系に及ぼしているかを明らかにすることができた。この成果は、今後より広域な海洋生態系を対象とした際、そこにある有機水銀の蓄積量や分布を推定する上で重要なステップになると考えられる。また、本研究を発展させて、他の海洋動物へのバイオリギング技術の利用、他の体組織の分析を行うことにより、様々な汚染物質の分布状況を調べることが可能であり、海洋生態系の保全に貢献することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 A. Shoji, K.H. Elliott, S. Aris-Brosou, H. Mizukawa, S.M.M. Nakayama, Y. Ikenaka, M. Ishizuka, T. Kuwae, K. Watanabe, J. Escoruela Gonzalez and Y. Watanuki	4. 巻 38
2. 論文標題 Biotransport of Metallic Trace Elements from Marine to Terrestrial Ecosystems by Seabirds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Toxicology and Chemistry	6. 最初と最後の頁 106-114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/etc.4286	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 庄子晶子、杉山淳、谷日向子、新妻靖章	4. 巻 68
2. 論文標題 北海道におけるミサゴ成鳥と雛の水銀濃度	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本鳥学会誌	6. 最初と最後の頁 343～347
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3838/jjo.68.343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Guigueno M.F., Shoji A., Elliott K.H., Aris-Brosou S.	4. 巻 235
2. 論文標題 Flight costs in volant vertebrates: A phylogenetically-controlled meta-analysis of birds and bats	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology	6. 最初と最後の頁 193～201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cbpa.2019.06.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Annette L. Fayet, Masaki Shirai, Sakiko Matsumoto, Aimee Van Tatenhove, Ken Yoda, Akiko Shoji	4. 巻 18
2. 論文標題 Differences in breeding success among neighbouring streaked shearwater subcolonies correlate with egg size and quality of parental care	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ornithological Science	6. 最初と最後の頁 189～195
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2326/osj.18.195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Van-Tatenhove, A, Fayet A, Watanuki Y. Yoda K and Shoji A	4. 巻 46
2. 論文標題 Streaked Shearwater <i>Calonectris leucomelas</i> moonlight avoidance in response to low aerial predation pressure, and effects of wind speed	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Ornithology	6. 最初と最後の頁 177 ~ 18
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 庄子晶子, K. Elliott, S. Aris-Brosou, 水川葉月, 中山翔太, 池中良徳, 石塚真由美, 桑江朝比呂・渡辺謙太, 綿貫豊
2. 発表標題 海鳥の越冬期の行動が繁殖地への汚染物質輸送に与える影響
3. 学会等名 日本鳥学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 庄子晶子, Kyle H Elliott, Stephane Aris-Brosou, 水川葉月, 中山翔太, 池中良徳, 石塚真由美, 桑江朝比呂, 渡辺謙太, 綿貫豊
2. 発表標題 生物を介した水銀物質輸送
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoji, A., K. H. Elliott, S. Aris-Brosou, H. Mizukawa, S. M.M. Nakayama, Y. Ikenaka, M. Ishizuka, T. Kuwae, K. Watanabe, J. Escoruela Gonzalez and Y. Watanuki
2. 発表標題 Migratory seabirds transport mercury from marine to terrestrial ecosystems
3. 学会等名 Pacific Seabird Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名	庄子晶子, Kyle H Elliott, Stephane Aris-Brosou, 水川葉月, 中山翔太, 池中良徳, 石塚真由美, 桑江朝比呂, 渡辺謙太, 綿貫豊
2. 発表標題	海鳥を介した汚染物質輸送
3. 学会等名	日本鳥学会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	Naya Sena, Yutaka Watanuki, Kyle H. Elliott, Scott A. Hatch, Akiko Shoji
2. 発表標題	Black-legged kittiwake chicks show no significant behavioral response to dimethyl sulfide: an experimental study
3. 学会等名	Pacific Seabird Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Naya Sena, Akiko Shoji, Bungo Nishizawa, Jumpei Okado, Ken Yoda, Yutaka Watanuki
2. 発表標題	Testing the attraction of two procellariiform seabirds to DMS
3. 学会等名	Pacific Seabird Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Jumpei Okado, Motohiro Ito, Makoto Hasebe, Akiko Shoji, Haruka Hayashi, Nobuhiko Sato, Yosuke Koshino, Ui Shimabukuro, Akinori Takahashi, Kenta Watanabe, Tomohiro Kuwae, Yutaka Watanuki
2. 発表標題	Local forage fish availability and the reproductive performance of Rhinoceros Auklets in Hokkaido, Japan
3. 学会等名	North Pacific Marine Science Organization Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年	2018年

〔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
研究協力者	綿貫 豊 (Watanuki Yutaka) (40192819)	北海道大学・大学院水産科学研究院・教授 (10101)	
研究協力者	エリオット カイル (Elliott Kyle)		
研究協力者	アリスブロソウ ステファン (Aris-Brosou Stephane)		