

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04712

研究課題名(和文) 外洋性魚類・鯨類を指標とした北西太平洋における水銀安定同位体比の三次元分布解析

研究課題名(英文) Mercury stable isotope distribution of North West Pacific Water using pelagic fish and dolphins as bioindicator

研究代表者

板井 啓明 (Itai, Takaaki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：60554467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、北西太平洋で捕獲された海洋大型生物中の水銀安定同位体比を計測することで、当海域における水銀動態解析に応用するとともに、水銀安定同位体比の生態研究に対する応用性を評価した。具体的には、(1)北西太平洋各地域から採取されたカツオ中水銀安定同位体比のバリエーションと変動要因解析、(2)Mass balance modelカツオへの水銀蓄積速度の解析、(3)海棲哺乳類への水銀濃縮機構の解析、を実施するとともに、環境からヒトまでの水銀フロー解析への有効性を評価するため、既存研究を包括した解析も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水銀は広域的な汚染物質として世界的に認識され、2017年の水銀に関する水俣条約の発効を受け、その環境動態の詳細な理解に基づく条約の有効性評価が求められてきた。微量元素の動態を詳細に調べるには安定同位体比の活用が有効だが、高度な技術を要するため分析できる機関は世界的にも限られていた。本課題では北西太平洋を対象に海洋生物中の水銀安定同位体比を測定することで、当海域の生態系を介した水銀の循環について新しい知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, we measured mercury stable isotope ratios of marine pelagic fishes and dolphins from Northwest Pacific Ocean to constrain the geochemical cycle of Hg in this region, and to assess the applicability of mercury stable isotope ratios to ecological studies. Following topics have been examined, (1) Hg stable isotope variation in skipjack tuna collected from various regions of the Northwest Pacific Ocean, (2) mass balance model of Hg bioaccumulation to skipjack tuna, and (3) mechanism of mercury accumulation to marine mammals. The comprehensive data interpretation of previous studies was also conducted to evaluate potential of Hg isotope as the tracer of Hg flow analysis from the environment to humans.

研究分野：地球化学

キーワード：水銀 安定同位体 海洋生物 北西太平洋

1. 研究開始当初の背景

水銀安定同位体地球化学は、重元素安定同位体比分析技術の発展に伴い研究が進み、近年では環境動態解析ツールとしての成熟度が高まっている¹。水銀は環境中で様々な酸化還元反応により動態が変化し、大きな質量依存同位体分別 (MDF) を示す。また、光化学反応に敏感な非質量依存同位体分別 (MIF) を示すため、ユニークなトレーサーとして利用できる。地球表層の主要なリザーバーにおける同位体比分布について、これまでに 100 報以上の論文が出版されている。各リザーバーにおける水銀は固有の安定同位体比分布を有し、対象とする系によっては起源やプロセス解析に応用できる可能性がある¹。しかし、水銀の生物地球化学的循環は他の重金属と比較して速く、かつ広域にわたるため、同位体比のデータベースも時空間的に広い範囲をカバーする必要がある。とくに、世界における人為的水銀排出の約 40% を占める東アジア地域や、隣接する北西太平洋地域におけるデータは重要である。海域では、沈着した水銀がメチル化する機構が知られており、メチル水銀 (以下 MeHg) は著しく高い生物濃縮性を有するため、時空間的に高密度で同位体比を計測することが望ましい。しかし、海水中的の水銀濃度は総水銀として数 pM 程度、メチル水銀に限定すると fM のオーダーであり、水銀安定同位体比をハイスループットで計測するのは現実的ではない。そこで申請者は、海洋の大型生物に着目して研究を進めることを発案した。

2. 研究の目的

大型海洋生物の水銀安定同位体比を計測するモチベーションは大きく三つある。一つ目は、生物から得られるデータを海洋中水銀の指標として利用し、海洋における水銀動態に様々な制約を与えることである。このような手法は、生物濃縮性の高い残留性有機汚染物質の研究などでは一般的に用いられている²。また水銀の場合、生物が選択的に MeHg を濃縮するため、海洋中 MeHg の同位体比指標として有効に利用できる。二つ目は、水銀安定同位体比に特有な MIF を用いて、生態学的なトレーサーとしての可能性を探ることである。MIF はメチル水銀の光分解反応に伴い大きく変化するため、海洋表層から深度方向に沿って、系統的な変化をする可能性が指摘されている。このことから、MIF は摂餌深度の指標となるという指摘もある。三つ目は、水産資源としての海洋大型魚類の同位体比変動要因を調べることで、ヒトへの水銀暴露源調査への有効性評価に繋げることである。この方針に沿い、以下の課題に取り組んだ。

(1) 北西太平洋各地域から採取されたカツオ中水銀安定同位体比のバリエーションと変動要因解析

広い海域における水銀同位体比のバリエーションを解析するには、単一種の回遊性の大型魚を用いるのが都合が良い。カツオは水銀を高蓄積する魚の中でも南北回遊の性質を有すことから、緯度方向の変化を見るのに適している。水銀安定同位体比の分析法を所属する専攻のマルツコレクタ型 ICP 質量分析計を用いて確立し、北西太平洋各地で採取されたカツオの水銀安定同位体比を包括的に分析することを目的とした。

(2) Mass balance model カツオへの水銀蓄積速度の解析

水銀安定同位体比のデータを詳細に解析するには、その値が反映する時間スケールに制約を与える必要がある。前節で示したカツオのデータに関しても、カツオの回遊パターンと海水温の分布を対応させるには体内でのターンオーバー速度を見積もる必要がある。魚類中メチル水銀濃度の規制要因については、摂取と排泄に代謝や成長のパラメータを組み込んだ Bioenergetic model や³、生態系構造解析を重視した Ecological model⁴などが提唱されている。前者は湖などの閉鎖系水域における研究が多い。一方、マグロやカツオは回遊魚であり、Bioenergetic model におけるパラメータの取得や、摂餌行動の制約などは困難な点が多い。しかし、近年発展しているバイオリギングによる行動解析は、この分野の研究を一段階精緻なレベルに発展させる可能性がある。そこで、既報のカツオの行動解析データを参考に、総水銀濃度の規制要因に関する複合的解析を実施した。

(3) 海棲哺乳類への水銀濃縮機構の解析

海棲哺乳類は、マグロ・カツオ類よりも更に高い栄養段階に位置し、筋肉中総水銀 (以下 THg) レベルも、それらの魚類と比較して 1-2 桁程度高いことが知られている。海棲哺乳類の、各種臓器組織における THg・MeHg は世界各地で報告がなされてきた。一方、毒性影響を評価する上でもっとも重要な脳については、報告例が比較的少なかった。複数臓器間の比較により、相互の水銀濃度の関係が明らかにできれば、過去に蓄積されたデータから脳中の水銀濃度を推定できる可能性がある。これら臓器間の水銀濃度の関係を明らかにするために、各組織の THg、MeHg を分析し、解析を実施した。

(4) 既存研究のデータを包括したヒトへの曝露源調査への有効性評価

水銀安定同位体比は地球表層の各種リザーバーが固有の同位体変動幅を有すが、発生源から環境毒性学的に重要な研究対象（ヒト・魚など）に至るまでに、水銀は石炭・鉱石（以下一次供給源）や元素状水銀（以下二次供給源）の産業利用にともなう揮発(IND_{vol})、大気圏における酸化(AT_{ox})、海洋におけるメチル化(OC_{met})・脱メチル化(OC_{dmet})、食物網における濃縮(BI_{acc})・代謝(BI_{mtb})、ヒトへの取り込み(HM_{int})といったプロセスを経るため、安定同位体比は様々に変化する。以下、本研究および既存研究で報告された各種リザーバーにおける MDF 指標と MIF 指標の変動幅・同位体分別挙動との比較を通じ、ソース解析・曝露源解析における水銀安定同位体比の有効範囲について検討した。

3. 研究の方法

(1) 試料は愛媛大学 ES-Bank に保管された北西太平洋各地のカツオ試料を活用した。採取地点は黒潮・親潮混合域 (KOTR)、黒潮域 (KR)、東シナ海 (ECS)、赤道付近 (NEQ) に分類した (Table 1)。分析法は既報に従い、筋肉試料を凍結乾燥・粉末化し、試料 0.2 g に対し高純度硝酸 3.5 ml を加え、マイクロ波加熱分解装置 (ETHOS-D, Milestone) で分解した。分解溶液中の THg は還元気化型原子吸光光度計 (RA-5, Nippon Instruments) で測定した。水銀安定同位体比は、上記酸分解試料を 20% 逆水 (HNO₃:HCl = 3:1) で希釈し、還元気化型試料導入装置を接続したマルチコレクタ型誘導結合プラズマ質量分析計 (CV-MC-ICP-MS, Thermo Scientific, Neptune) で分析した。質量分析計内の質量差別効果は NIST3133 標準試料を用いた Sample standard bracketing 法で補正し、分析精度は UM-Almaden⁵ および ETH-Fluka⁶ を用いて検証した。CV-MC-ICP-MS による分析は、フランス国立科学研究センター・トゥールーズ地球環境科学研究所 (CNRS-GET) および東京大学地球惑星科学専攻で実施した。

(2) 研究 (1) で調べた地域別のカツオ試料について、mass balance モデルを応用した。一般的な水銀 mass balance モデルでは、いくつかの仮定の下、ある年齢 (t) における筋肉中水銀濃度は以下の式で推定される⁴。

$$C_t = C_0 e^{-(E+G)t} + (\alpha \cdot C \cdot \delta I) / (E+G) [1 - e^{-(E+G)t}]$$

ここで、各パラメータは Table 2 の通りである。I、E については、Aoki et al. (2017)⁷ による日本近傍海域で実施されたバイオリギング研究のデータを基に、体長・平均回遊温度・摂取エネルギーを用いて算出した。G は Uchiyama & Struhsaker (1981) における von Bertalanffy 型成長曲線を用いて計算した⁸。

(3) 研究 (1) で得られたカツオのデータに加え、既存の水銀安定同位体比データを包括して解析を実施した。

4. 研究成果

(1) カツオ筋肉中 THg は、0.02-1.05 μg/g wet wt. の範囲で変動し、大型個体ほど濃度が増加する傾向が認められた。地域別では、KR・ECS で THg が高く、KOTR・NEQ で低い傾向が認められた (Table 1)。カツオのサイズに着目すると、KOTR の個体は他の群と比較して有意に小型であった。KOTR の群内では体長と THg に有意な正の相関が認められた。水銀安定同位体比は、 $\delta^{202}\text{Hg}$ が -0.41~+0.93‰、 $\Delta^{199}\text{Hg}$ が +1.79~+3.79‰ の範囲で変動した (Fig. 1)。これらの変動は、同じ種についての同位体比を報告した Blum らの研究よりもかなり大きい ($\delta^{202}\text{Hg}$ and $\Delta^{199}\text{Hg}$: $0.63 \pm 0.08\text{‰}$ and $2.71 \pm 0.17\text{‰}$, 2SD, n = 3)⁹。このことは、同じ種であっても地域によって同位体比が有意に変動することを示している。カツオは回遊性であり、同位体比の解釈には体内での turnover rate を考慮する必要がある。詳細な検討は次節で示すが、排泄速度を考慮すると半減期は約 200 日程度と推定される。このことは同位体比を解釈する上で重要な前提である。

MDF の指標である $\delta^{202}\text{Hg}$ は、食物連鎖の過程でその値が変化する可能性が指摘されている。この過程についてはまだ詳細な研究が必要であり、データの解釈が難しい。一方、 $\Delta^{199}\text{Hg}$ については生体内の水銀代謝や食物網を介した水銀濃縮過程で変化しないと考えられていることから、この指標に着目した考察を示す。これまでの様々な研究で、環境中試料から正の $\Delta^{199}\text{Hg}$ 値が計測されてきたが、1‰以上の正の値を示すのは魚を中心とした水圏生物試料に限られている¹。これは、海洋表層での光分解により $\Delta^{199}\text{Hg}$ が上昇した MeHg が、選択的に生物に濃縮した結果と考えられる。いくつかの研究で、水圏生物の $\Delta^{199}\text{Hg}$ は生息深度に依存することが指摘されている^{9,10}。 $\Delta^{199}\text{Hg}$ のバリエーションが各海域での平均的な摂餌深度を反映していると仮定すると、海洋学的な知見とは調和的である。一般に、カツオの生息可能な範囲は水温 (17-30°C) と溶存酸

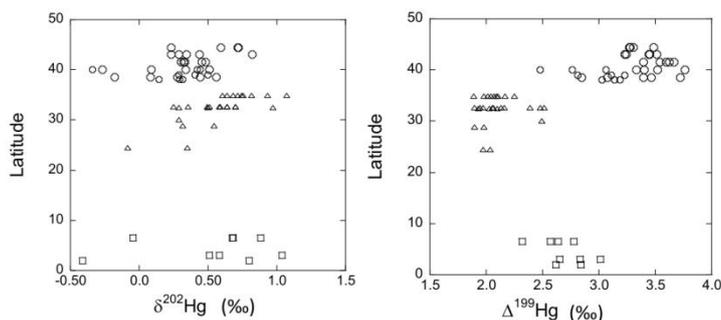


Fig. 1 Relationship between $\delta^{202}\text{Hg}$, $\Delta^{199}\text{Hg}$ and latitude. ○, △, □ represent samples from KOTR, KR, and NEQ, respectively.

素濃度 (3.0-3.5 ml/l) に規定されていると考えられている¹¹。黒潮-親潮混合域は生産性が高く餌密度が高いが、親潮起源の冷たい水塊が潜り込むため、摂餌深度は浅くなると推定される。一方、黒潮の影響が強い海域では摂餌深度は深くなる。この傾向は、北西太平洋を対象としたカツオのバイオリギング研究でもサポートされている⁷。

安定同位体比と濃度分析の結果を総合すると、(i) KOTR は低い THg・浅い摂餌深度、(ii) KR は高い THg・深い摂餌深度、(iii) NEQ は低い THg・中間的な摂餌深度、を持つと推定された。近年の海洋学的研究では、大気から沈着した水銀 (主として無機態) は、外洋の中深層で生物濃縮性の高い有機水銀に変化することが知られており¹²、生息深度の深い魚類ほど総水銀濃度が高い傾向も認められている¹³。本研究の結果は、暖流域を回遊するカツオは摂餌深度が深く、生物濃縮性の高いメチル水銀を豊富に含む餌を取り込むために、THg が高値となる可能性を示唆した。

(2) KOTR と KR における THg の年齢依存性を式(1)と Table 2 に従い算出したところ、両地点とも経時的な濃度の増加を示した。この濃度の上昇は、KOTR では約 300 日、KR では約 500 日ではほぼ定常状態に達し、その THg はそれぞれ $0.17 \mu\text{g g}^{-1}$ 、 $0.38 \mu\text{g g}^{-1}$ であった。KOTR のモデルは実測値と整合的であり、KOTR で認められた THg-体長の有意な正の相関は、成長に伴う排泄効率および成長希釈の減少によるものと考えられた。一方、KR の定常状態における予測濃度は実測値よりも低い傾向であった。この差を説明するには、(1) 餌の種類の変化、(2) 摂餌率の上昇、のいずれかが必要である。

Table 2. Parameter for the model calculation.

Parameter	KOTR	KR	Estimation
Weight (g)	2000	3600	Own data
Temperature (°C)	23	19	Aoki et al., 2017
α 同化効率	0.8	0.8	Ferris & Essington (2014)
C_s ($\mu\text{g g}^{-1}$) 餌中水銀濃度	0.015 ^a	0.07 ^b	^a Epipelagic fish and ^b squids in Central Pacific provided by Ferris & Essington (2014)
I (g day^{-1}) 摂餌率	0.118	0.042	Computed from Aoki et al. (2017)
E (day^{-1}) 排泄速度	0.003	0.0021	Computed from body size and experienced temperature by Aoki et al., 2017
G (day^{-1}) 成長速度	0.005	0.004	Computed using von Bertalanffy growth by Uchiyama & Struhsaker (1981)
C_0 ($\mu\text{g g}^{-1}$) 初期水銀濃度	0.01	0.01	

摂餌率については、バイオリギングの結果から、KR 近辺での値は KOTR と比較して低いと考えられる。一方、前節で示した通り、KR の個体は KOTR よりも深い摂餌深度を持つことが水銀安定同位体比から示唆されている。すなわち、KR の個体については、MeHg の高い mesopelagic な魚種やプランクトン食性へのシフトを示している可能性がある。

本モデルを適用した場合に得られるカツオ体内での THg 半減期は、約 200 日と算出される。カツオの南北回遊が季節依存であることを考慮すると、黒潮-親潮混合域での摂餌は夏期の数カ月に限定される。従って、地域間での水銀安定同位体比変動は、捕獲地点での摂餌を直接的に反映しているとは考えにくい。KOTR の個体は比較的小型で、1-2 歳魚と推定されている。今回のモデル計算では、出生後のカツオ中水銀濃度が定常状態に達するまでに 300 日以上が必要である。KOTR の個体については、出生後の成長に寄与した栄養源の大部分が黒潮-親潮混合域近辺での摂餌に依存したため、高い $\Delta^{199}\text{Hg}$ を示した可能性がある。KR の個体が KOTR の $\Delta^{199}\text{Hg}$ よりも明瞭に低い値を示すのは、成長段階で黒潮-親潮混合域での摂餌を経験していない群から捕獲されたか、もしくは南下以降に 1 年以上が経過した可能性を示唆している。長い生体内半減期は同位体比の解釈を複雑にするが、その性質を利用して生態履歴に制約を与えられるという利点もある。

本アプローチでは、日本近海のカツオ中水銀濃度を mass balance model で計算したが、そのパラメータ導出にバイオリギングのデータを活用したのが特徴的な点である。本研究では各群の回遊域における平均的な水温と摂餌率だけを活用したが、バイオリギングでは代謝による発熱量の計測や、水平・鉛直方向への遊泳速度に基づくエネルギー消費量の計算などが可能で、より精緻な計算ができる可能性がある。また、大型魚における THg の体長依存性については、bioenergetic な過程に加え、餌の変化について制約を与える必要があるが、この推定において水銀安定同位体比は有効な可能性がある。餌生物中の THg データについては、西部太平洋のデータを詳細に集めることでより妥当なパラメータを設定できる余地があり、将来課題と位置付けた。

(3) 研究 (1) で得られたデータ、および既存データの MIF、MDF のバリエーションに基づき、以下の考察を実施した。

・MIF を利用した解析: 既存の研究では、天然試料における $\Delta^{199}\text{Hg}$ は -5.2~+5.8‰ の変動が報告されているが、大半の試料は $\pm 1\%$ の範囲に収まることが知られている¹。顕著に高い $\Delta^{199}\text{Hg}$ を示すのは魚類であり、低い $\Delta^{199}\text{Hg}$ を示すのは極域の氷雪である。実際に、本研究におけるカツオ中 $\Delta^{199}\text{Hg}$ は +1.79~+3.79‰ と高い値の範囲で変動した。魚類中に記録された高い $\Delta^{199}\text{Hg}$ は、海洋中で生成したメチル水銀の光還元により生じると考えられている⁹。この過程における MIF と比較すると、一次供給源の $\Delta^{199}\text{Hg}$ の変動幅は小さく^{1,14}、また IND_{vol} 、 AT_{ox} における MIF も小さいため¹⁵、魚類中の $\Delta^{199}\text{Hg}$ は、海洋沈着～生物濃縮 (OC_{met} 、 OC_{dmet} 、 BI_{acc} 、 BI_{meb}) の解析には有効だが、大気放出～海洋沈着の解析にはあまり有効でないと考えられる。HM_{int}については、毛髪を指標として用いる場合、曝露源-毛髪間での MIF は認められないことが報告されている¹⁶。日本人の

主要な水銀曝露源は魚介類であると考えられており、魚介類中総水銀の $\Delta^{199}\text{Hg}$ は生息深度等によって大きな変動を示すことから、ヒト試料中の $\Delta^{199}\text{Hg}$ は曝露源解析に利用できる可能性がある。また、本研究のカツオの場合、同一魚種であっても海域間で有意に異なる $\Delta^{199}\text{Hg}$ を示した。したがって、曝露源が限定される系においては、食品の産地などについても MIF から情報を得られる可能性がある。

・MDF を利用した解析: カツオにおける $\delta^{202}\text{Hg}$ は -0.41‰ から $+0.93\text{‰}$ の範囲で変動した。天然試料における $\delta^{202}\text{Hg}$ は -4.3‰ から $+3.3\text{‰}$ の範囲で変動が認められている。天然試料の変動幅を考慮すると、カツオ中 $\delta^{202}\text{Hg}$ の変動は $\Delta^{199}\text{Hg}$ と比較して小さいため、一次供給源との関係を解析するには、各プロセスにおける MDF の程度を細かく評価する必要がある。MDF は食物網を介した生物濃縮 (BI_{acc}) で生じるという報告があるが¹⁷、飼育実験ではこの変化は小さいとも指摘されている¹⁸。したがって、生物体内の代謝による MDF については、更なる実験的研究が必要である。また、 OC_{met} 、 OC_{dmet} については、微生物反応を介した場合に MDF が起こることが知られている^{20,21}。これらのプロセスを加味して同位体比を解析するには、現状の海洋におけるメチル水銀動態の理解がまだ十分でない。大気放出～海洋沈着に関しては、大気や降水の同位体比データが蓄積されてきており、主要な一次供給源(石炭・辰砂など)の間で $\delta^{202}\text{Hg}$ が統計的に有意な差を示すこと、石炭の $\delta^{202}\text{Hg}$ も産地によってある程度変化することがわかっている。一次供給源の同位体比変動が大きいと、MIF と比較すると、MDF の方が大気放出～海洋沈着の解析には有効である。ただし、揮発後の AT_{ox} における MDF により各水銀化学形態の $\delta^{202}\text{Hg}$ が変化するため、時空間的に高密度かつ化学形態別のサンプリングが必要である。 HM_{mt} については、食物源と毛髪中 MDF の間に約 2‰ の同位体分別が認められている^{16,21}。ヒト体内での代謝過程で同位体分別が生じていると考えられ、この過程での同位体分別の定量化が必要である。

海洋におけるメチル化・脱メチル化は大きな MDF・MIF を伴うため、海洋生物試料から一次供給源を探ることは容易でない。ただし、大気放出～海洋沈着までのプロセスには制約を与えられる可能性もあるため、各段階における同位体比データを蓄積することで、総合的な解析を進めれば、濃度データだけでは判明しえない様々な情報を得ることができると考えられる。同位体分別に関わる重要な未知パラメータは多く残されており、実験研究と観測研究の一層の進展により、水銀安定同位体比の有効範囲がより明確になると予察される。水銀化合物ごとの同位体分析や²²、メチル水銀の炭素安定同位体比分析²³、偶数質量核種の MIF など^{24,25}、データの蓄積によりその有効性が明らかになると期待される。

引用文献

1. Blum, J. D., et al. (2014). *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 249-269.
2. Isobe, T., et al. (2009). *Marine Pollution Bulletin*, 58(3), 396-401.
3. Ferriss, B. E., & Essington, T. E. (2014). *Ecological Modelling*, 278, 18-28.
4. Trudel, M., & Rasmussen, J. B. (2006). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63(8), 1890-1902.
5. Blum, J. D., & Bergquist, B. A. (2007). *Analytical and bioanalytical chemistry*, 388(2), 353-359.
6. Jiskra, M., et al. (2012). *Environmental science & technology*, 46(12), 6654-6662.
7. Aoki, Y., et al. (2017). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 140, 83-93.
8. Uchiyama, J. K., & Struhsaker, P. 1981. *Fish. Bull.*, 79, 151-162.
9. Blum, J. D. et al. (2013). *Nature Geoscience*, 6(10), 879-884.
10. Gantner, N. et al. (2009). *Environmental science & technology*, 43(24), 9148-9154.
11. Barkley, R. A. et al. (1978). *Fish. Bull.*, 76(3), 653-662.
12. Sunderland, E. M. et al. (2009). *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2).
13. Choy, C. A. et al. (2009). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(33), 13865-13869.
14. Sun, R. et al. (2014). *Environmental science & technology*, 48(13), 7660-7668.
15. Sun, R. et al. (2016). *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4.
16. Laffont, L. et al. (2009). *Environmental science & technology*, 43(23), 8985-8990.
17. Perrot, V. et al. (2012). *Environmental science & technology*, 46(11), 5902-5911.
18. Kwon, S. et al. (2013). *Environmental toxicology and chemistry*, 32(10), 2322-2330.
19. Rodríguez-González, P. et al. (2009). *Environmental science & technology*, 43(24), 9183-9188.
20. Kritee, K., et al. (2008). *Environmental science & technology*, 42(24), 9171-9177.
21. Sherman, L. S. et al. (2013). *Environmental science & technology*, 47(7), 3403-3409.
22. Masbou, J. et al. (2013). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 28(10), 1620-1628.
23. Masbou, J. et al. (2015). *Analytical chemistry*, 87(23), 11732-11738.
24. Chen, J. et al. (2012). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90, 33-46.
25. Enrico, M., et al. (2016). *Environmental science & technology*, 50(5), 2405-2412.

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 0件）

1. 著者名 板井啓明	4. 巻 11
2. 論文標題 環境中の水銀分析に関する研究の動向	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ぶんせき	6. 最初と最後の頁 492-496
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 板井啓明
2. 発表標題 水銀安定同位体比の測定法と環境化学的応用
3. 学会等名 日本質量分析学会 第67回質量分析総合討論会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板井啓明、高橋嘉夫、山田真也、関澤央輝、早川亮大、大井かなえ、須田博貴、竜野秀行、岡田信二、奥村拓馬、橋本直、一戸悠人、林佑、今井悠喜、野田博文、神代暁、宇留賀朋哉
2. 発表標題 魚類中微量水銀のSXRF/XAFS測定における超伝導転移端 センサー検出器（TES）の応用
3. 学会等名 日本地球化学会 2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板井啓明
2. 発表標題 地球化学分野の先端的分析手法と環境毒性学の接点
3. 学会等名 第46回 日本毒性学会学術年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takaaki Itai, Shinsuke Tanabe
2. 発表標題 Mercury stable isotope variation of skipjack tuna from western North Pacific Ocean -Possibility as the feeding depth tracer
3. 学会等名 JPGU meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板井啓明
2. 発表標題 水銀安定同位体比を指標とした海洋生態系における水銀の挙動
3. 学会等名 プラズマ分光分析研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板井啓明
2. 発表標題 カツオ中水銀濃度の規制要因に関する複合的考察
3. 学会等名 第27回環境化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takaaki Itai, Toshiki Kamei, Shinsuke Tanabe
2. 発表標題 Comprehensive assessment for controlling factor of total Hg level in skipjack tuna from Western North Pacific Ocean
3. 学会等名 Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) North America 32nd Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 板井啓明、Jeroen E. Sonke、David Point、田辺信介
2. 発表標題 海洋高次生物における水銀安定同位体比のバリエーション
3. 学会等名 日本質量分析学会 同位体比部会
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------