

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：64303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710037

研究課題名(和文) "地球の限界(化学汚染)" 定量化に向けた統合的環境リスク評価手法のデザイン

研究課題名(英文) Designing an Integrated Environmental Risk Assessment Scheme: Towards Quantification of Chemical Pollution Planetary Boundaries

研究代表者

半藤 逸樹 (HANDOH, ITSUKI C.)

総合地球環境学研究所・研究推進戦略センター・特任准教授

研究者番号：40446266

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：海棲哺乳類のへい死イベントに関するデータと全球多媒体モデルFATEのポリ塩化ビフェニル(PCBs)の暴露量予測から統合的環境リスク評価手法をデザインするための研究を行った。海棲哺乳類の大量へい死が起こり得るPCBsの臨界暴露量を定義し、化学汚染のホットスポット(地中海や北西ヨーロッパ沿岸域)を特定した。この臨界暴露量は、化学汚染の閾値と限界を評価するための尺度であり、「地球の限界」や「人間-自然系の限界リスク」のような新しいパラダイムを補完する。本研究で構築した統合的環境リスク評価手法は、海生哺乳類大量へい死イベントにおける化学汚染と騒音被害の相対的重要性を評価することに応用し得る。

研究成果の概要(英文)：A comprehensive study was performed to integrate mortality event data sets of 33 marine mammal species, and outputs of a Finely-Advanced Transboundary Environmental model (FATE) predictions on exposure levels of polychlorinated biphenyls (PCBs), into a single environmental risk assessment scheme. We defined critical exposure levels (CELs) of PCBs above which mass mortality events are likely to occur, and identified marine pollution 'hotspots' such as the Mediterranean Sea and north-western European coasts. The proposed CELs help can design both thresholds and boundaries for chemical pollution (whatever the toxic substances), which will definitely play a role in the emerging global paradigms such as Planetary Boundaries and Boundary Risk for Humanity and Nature. Our environmental risk assessment scheme can also be applied to address the relative importance of chemical pollution versus 'noise pollution' on mass mortality events of marine mammals in a quantitative fashion.

研究分野：地球システム科学

キーワード：化学汚染 地球の限界 統合的環境リスク評価 残留性有機汚染物質 全球多媒体・生物濃縮モデル
ベイズ不確実性解析 海棲哺乳類大量へい死イベント 人間-自然系の限界リスク

1. 研究開始当初の背景

新たな持続可能性の指標として、Rockström *et al.* (2009)は Planetary Boundaries (人間活動に対する地球の限界; PBs)を提唱した。PBsの項目には、すでに限界(閾値に基づく努力目標)を超えている気候変動、生物多様性の喪失、窒素循環などが含まれる一方、化学汚染は定量化されていない。このPB、“地球の限界(化学汚染)”(以下、化学汚染PB)については、残留性有機汚染物質(POPs)、重金属、放射性核種などの全球濃度、生態系や地球システムの機能に対する影響などが挙げられているものの、個々のプロセスの不確実性と、それらを統合する環境リスク評価のデザインは提案されていない。「環境リスク = 曝露量 × 有害性」という定義の下、例えばPOPsの場合、残留性、長距離輸送、生物濃縮、毒性のなかで、毒性以外は生態系・生体に対する曝露量を支配し、既存の環境動態解析モデル(例: Finely-Advanced Transboundary Environmental model; FATE)や生物濃縮モデル(Kelly *et al.*, 2007)によって予測され得る。しかしながら、有害性を統一する尺度(毒性等価係数など)があるのはダイオキシン類に限り、暴露された化学物質群についての複合的な毒性影響には十分な知見がない。また、海生哺乳類の大量へい死イベントが、POPsの暴露→生物濃縮→高次消費者の免疫低下→感染症発症→大量へい死につながる一連の過程であるかのように研究されてきたものの、作業仮説の域を出ていない面もあることに着目し、この検証を含めて本研究を着想した。

2. 研究の目的

(1)個別のPCBに対する環境リスクとその不確実性の定量化: 毒性等価係数が既知であるPCBsについて、FATEによる全球濃度予測を行い、それに生物濃縮モデルを結合させて得た曝露量に毒性等量を掛けることで、各PCBについての環境リスクとして評価する。また、環境リスクの不確実性に、FATEと生物濃縮モデルのパラメーター群の不確実性が伝播する規模を定量化する。

(2)統合的環境リスク評価デザインの確立: 毒性等価係数が未知のPCBsに対して、その平均と偏差(係数の不確実性)を仮定(参考: Kennedy *et al.*, 2008)して(1)を適応する。その上で、複合毒性効果を無視した場合の環境リスクの総和をPCBsに関する統合的環境リスクマップとする。

(3)化学汚染PB定量化を検討: (2)で得られた全球の統合的環境リスクマップを基に、マウスの半数致死量などを加味する。このリスクマップと高次消費者の形態異常の報告例の分布を比較し、化学汚染PBの定量化を検討した上で、環境政策提言の基礎資料とする。

3. 研究の方法

(1)既往の学術論文(70編以上)のレビューから海棲哺乳類大量へい死のデータベースを構築: 過去の大量へい死イベントについて、発生期間・場所・へい死および座礁個体数・生物種・栄養段階・疾患の有無・肝臓PCBs濃度の有無をデータベース化し、時空間分布を可視化した。

(2)最先端の化学汚染動態予測モデルによるリスクマップの作成: POPsの動態予測モデルFATEと生物濃縮モデルを主軸に、各PCBsの毒性等量データを用いて、ベイズ不確実性解析(=曝露量の予測値をベイズ統計学的に模倣するエミュレーターを構築し、計算機コスト縮減して能率的に予測値の不確実性を推定すること)を駆使してリスクマップを作成した。なお、毒性については種差があることを考慮して、「曝露量=疑似リスク」という認識のもとにリスクマップを作成した。FATEによる予測期間は、1931~2010年と設定した(パラメータの設定などの詳細は、Handoh and Kawai (2014)を参照)。曝露量の単位は、 $\log_{10}(\text{ng/g Leq})$ とし、すべて脂質換算で統一した。なお、曝露量の基準は平均栄養段階にある魚類を対象とした。FATEの予測精度については、(1)でデータベース化した肝臓のPCBs濃度を用いて検証した。

(3)臨界曝露量の算出: (1)と(2)の結果を基に、大量へい死が起こり得る曝露量(曝露濃度の重心)を算出した。簡単のため、大量へい死の重みについては、種差はないものとした。

4. 研究成果

(1)海生哺乳類の大量へい死イベントデータベースの構築: 過去193回の海生哺乳類の大量へい死イベントをまとめた(図1)。イベントが認められた33種の海棲哺乳類のなかで、ハクジラ類と鯨類が26種を占めた。イベントの発生は1980年代後半がピークであり、栄養段階は4以上で顕著であることを確認できた(Handoh and Kawai, 2014)。

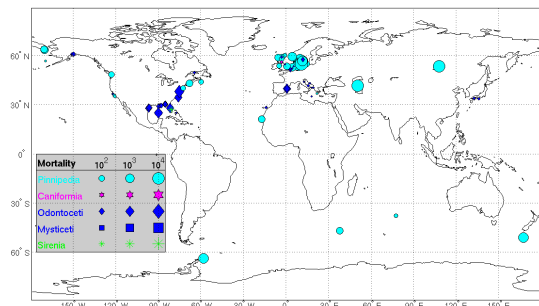


図1 海棲哺乳類大量へい死イベントの時空間分布。

(2)PCBsの臨界曝露量推定と化学汚染のホットスポット特定: 大量へい死・座礁イベントが化学汚染に起因するという作業仮説を基に推定を行ったところ、魚類への換算で

PCB#153では293~1,414 ng/g Leqという臨界曝露量を得た。これは PCBs 異性体毎に異なり、大きな不確実性を伴う。2010年現在の、PCB#28とPCB#153のリスクマップに臨界曝露量を考慮して、PCBs 汚染のホットスポットの時空間分布を提示した(図2)。PCB#28では北半球中高緯度の沿岸域で顕著で、一方PCB#153は地中海がホットスポットとなった。このような空間構造は1980年代後半でも似ており、PCBsの残留性の結果といえる。

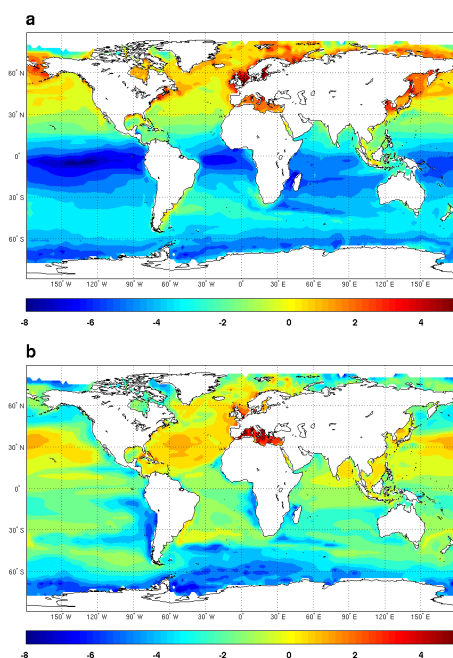


図2 FATEの予測による魚類体内のPCBs濃度分布(2010年)。単位はlog₁₀(ng/g Leq)。 (a) PCB#28と(b)PCB#153の事例。ホットスポットはxで示す。

(3)化学汚染PB 0.1の提示: (2)の臨界曝露量から世界初の化学汚染PBの定量化に成功した(Handoh and Kawai, 2014) 2015年1月現在, Steffen *et al.* (2015)の提示したPBs 2.0では未だに化学汚染PBの定量化が行われていないが、この事情はMacLeod *et al.* (2014)にある化学汚染PB策定の条件によるものである。現在、申請者はStockholm Resilience Centreと協議を進めており、本研究の成果が反映されていく見通しがある。

(4)人間-自然系の限界リスク(BRIHN = Boundary Risk for Humanity and Nature)の提案: 化学汚染はPBsだけでなく、Global Catastrophic Risk(GCR; 地球規模巨大災害リスク)でも項目の一つになっている。PBsはレジリアンス論の発展である一方、GCRがリスク研究にその起源を持つことから、レジリアンスとリスクを統合するフレームワークを構築することができた(Baum and Handoh, 2014)。このフレームワークは、PBsの著者陣にも受け入れられており、今後の地球環境研

究の枠組みでも検討される見込みである。

(5)今後の課題: 海生哺乳類の大量へい死イベントについて、作業仮説「POPの暴露→生物濃縮→高次消費者の免疫低下→感染症発症→大量へい死」がどの程度妥当であるかについては、さらなる研究を進める必要がある。実際、化学汚染は様々な化学物質とカクテル効果により成り立っており、排出量インベントリが構築されていない各化学物質の閾値や限界を定めることは困難である。一方、「騒音被害(noise pollution)」を取り上げてみると、潜水艦の中周波ソナーによる海棲哺乳類の大量へい死・座礁イベントは、米国では訴訟に至る事例もあり、生物種毎の聴覚閾値を踏まえた影響評価も注目されている。本研究で得られた海生哺乳類大量へい死のデータベースとリスクマップに、騒音被害による影響を推定することで、上記作業仮説の検証を進める予定である。

<引用文献>

- Baum, S.D., Handoh, I.C. (2014). *Ecol. Econ.*, **107**: 13-21.
 Handoh, I.C., Kawai, T. (2014). *Mar. Pollut. Bull.*, **85**: 824-830.
 Kelly *et al.* (2007). *Science*, **317**: 236-239.
 Kennedy *et al.* (2008). *J. Roy. Statist. Soc.*, **171**: 109-135.
 MacLeod *et al.* (2014). *Environ. Sci. Technol.*, **48**: 11,057-11,063
 Rockström *et al.* (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, **461**: 472-475.
 Steffen *et al.* (2015). *Science*, **347**: 6223.

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6件)

- Baum, S.D., Handoh, I.C. (2014). Integrating the planetary boundaries and global catastrophic risk paradigms. *Ecological Economics* 107: 13-21. 査読有
Handoh, I.C., Kawai, T. (2014). Modelling exposure of oceanic high-trophic-level consumers to polychlorinated biphenyls: Pollution 'hotspots' in relation to mass mortality events of marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*. 85: 824-830. 査読有
 Sugahara, Y., Kawaguchi, M., Itoyama, T., Kurokawa, D., Tosa, Y., Kitamura, S.-I., Handoh, I.C., Nakayama, K., Murakami, Y. (2014). Pyrene induces a reduction in midbrain size and abnormal swimming behavior in early-hatched pufferfish larvae. *Marine Pollution Bulletin*. 85: 479-486. 査読有
 河合 徹・鈴木 規之・半藤 逸樹. (2015).

海洋を含む化学物質の全球動態モデルの構築. *地球環境* 19: 147-154.

半藤 逸樹. 専門教育への期待～専門家不在の「地球環境問題」をだれが解決するのか?. *産業と教育(H26年)*. 9: 40-43

Kawai, T., Jagielło, K., Sosnowska, A., Odziomek, K., Gajewicz, A., Handoh, I.C., Puzyn, T., Suzuki, N. (2014). A New Metric for Long-Range Transport Potential of Chemicals. *Environmental Science & Technology* 48: 3245-3252. 査読有.

〔学会発表〕(計 10 件)

半藤 逸樹・河合 徹. 全球多媒体モデル FATE は海棲哺乳類の PCBs 生物の濃縮を予測できるのか?. 第 23 回環境化学討論会. 京都大学百周年記念時計台記念館、芝蘭会館、芝蘭会館別館. 2014 年 05 月 14 日～2014 年 05 月 16 日.

半藤 逸樹・河合 徹. 全球多媒体モデル FATE による臨界暴露量予測: 環境リスク評価の一元化に向けて. 第 20 回日本環境毒性学会研究発表会. 富山国際会議場. 2014 年 09 月 10 日～2014 年 09 月 11 日.

半藤 逸樹. 化学汚染(地球環境問題)の解決に資する研究: 「化学的不均衡」を乗り越えるために. 新潟市三条ロータリークラブ定例会(招待講演). 新潟県三条市. 2014 年 5 月 07 日.

半藤 逸樹・伊東 万木・高田 秀重・河合 徹. 全球多媒体モデル FATE 開発と International Pellet Watch の連携による PCBs 汚染海域の推定. 第 22 回環境化学討論会. 東京農工大学. 2013 年 07 月 31 日-2013 年 08 月 02 日.

半藤 逸樹. 地球環境研究における「レジリエンス」と「リスク」の統合. 第 3 回環境レジリエンスに関する研究会(招待講演). 法政大学市ヶ谷キャンパス. 2013 年 07 月 30 日.

Handoh, I.C., and Kawai, T. Modelling marine pollution 'hotspots' in the globe: A critical assessment for the relationship between PCBs exposures and mass mortality events of marine mammals. The 7th International Conference on Marine Pollution and Ecotoxicology. The University of Hong Kong, Hong Kong. 17-21th June, 2013.

Handoh, I.C., Transforming a regional socio-ecological system within Planetary Boundaries. The 1st Asia Future Conference. Bangkok. 8-10th March, 2013.

半藤 逸樹. レジリエンス概念論. 金沢大学シンポジウム「里山・里海とレジリエンス 再生の当事者としての私たち」(招待講演). 金沢市. 2012 年 11 月 23 日.

Handoh, I.C., and Kawai, T. A Transdisciplinary Risk Assessment Framework to Define Planetary Boundaries

for Chemical Pollution. World Congress on Risk 2012: Risk and Development in a Changing World. Sydney Convention and Exhibition Centre, Sydney, Australia. 18-20th July, 2012.

半藤 逸樹・河合 徹. 化学汚染の Planetary Boundaries をデザインする. 第 21 回環境化学討論会. 松山市. 2012 年 7 月 11～13 日.

〔図書〕(計 4 件)

半藤 逸樹 (2014). ベイズ不確実性解析で化学汚染を解く. 総合地球環境学研究所編「地球環境学マニュアル 2」. 朝倉書店. pp.14-15.

半藤 逸樹・大西 健夫 (2013). 統合知(方法論). 立本成文編「人間科学としての地球環境学～人とつながる自然・自然とつながる人」. 京都通信社, pp.253-269.

半藤 逸樹 (2013). 地球システムと未来可能性. 立本成文編「人間科学としての地球環境学～人とつながる自然・自然とつながる人」. 京都通信社, pp.271-285.

半藤 逸樹・窪田 順平 (2012). レジリエンス概念論. 香坂玲編「地域のレジリエンス: 大災害の記憶に学ぶ」. 清水弘文堂書房. pp.51-74.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

半藤 逸樹 (HANDOH, ITSUKI C.)

総合地球環境学研究所・研究推進戦略センター・特任准教授

研究者番号: 40446266