

人為由来水銀による 環境中水銀含有量の推移

++ 水銀に関する水俣条約の有効性を考える ++

国立研究開発法人国立環境研究所

環境リスク・健康領域

武内章記

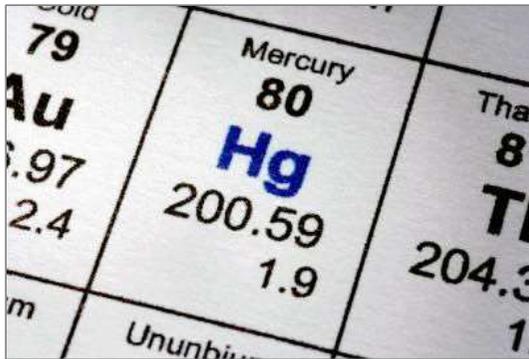
共同研究者：河合徹・岡部宣章（国立環境研究所）

：丸本幸治・多田雄哉（国立水俣病総合研究センター）

構成

1. 水銀について（性質・毒性・工業的用途など）
2. 地球規模の水銀汚染について（含有量・発生源・動態など）
3. 環境中水銀含有量の推移について
4. 生物中の水銀含有量の推移について

1. 水銀(Hg)について



原子番号：80（第12族元素）



液体状金属水銀
(蒸気圧： 1.20×10^{-3} mmHg)

同族元素

- Zn（亜鉛） 沸点：907°C
- Cd（カドミウム） 沸点：767°C

存在状態

- 個体（硫化物・塩化物等）
- 液体（融点：-38.9°C）
- 気体（沸点：356.7°C）

化学的存在形態

- 原子状（金属状）水銀： Hg^0
- 酸化態水銀： Hg^{1+} , Hg^{2+}
- 有機水銀
 - メチル水銀（ CH_3 :メチル基）
 - エチル水銀（ C_2H_5 :エチル基） etc



あらゆる環境に存在する金属元素

空気： Hg^0 , Hg^{2+}

雨・雪： Hg^{2+} , メチル水銀

湖水・海水・河川水： Hg^0 , Hg^{2+} , メチル水銀

土壌・植物： Hg^{2+} , メチル水銀, エチル水銀

食品： Hg^{2+} , メチル水銀

ヒト・動物： Hg^{2+} , メチル水銀

水銀の毒性に関する知見

	暴露経路	症状
金属水銀（ガス状）	呼吸	中枢神経障害、呼吸困難等
無機水銀化合物	摂食	消化器障害、腎不全等
有機水銀化合物 （比較的毒性が高い）	摂食	重度の中枢神経障害、視覚・聴覚障害、 発音障害、運動失調等 ⇒ 胎児への影響も懸念

(UNEP Global Mercury Assessment 2002)

健康被害の事例

- 有機水銀で消毒した種子で飼育された**豚肉の摂食**（アメリカ・ルーマニア）
- 水銀農薬工場の労働環境による水銀汚染（イギリス・スウェーデン）
- 有機水銀消毒した播種用の麦を原材料とした**パンの摂取**（イラク）
- 化学工場からの排水されたメチル水銀が蓄積した**魚介類の摂取**（日本）

魚介類に含まれる水銀について

妊婦への魚介類の摂食と水銀に関する注意事項（厚労省：平成22年6月1日改訂）

厚生労働省

これから
ママになるあなたへ

お魚について
知っておいてほしいこと

お魚はからだに良いもの
でも妊娠中はちょっと注意が必要

お魚はからだに良いものです
お魚(クジライルカを含む)は、健康な
たんぱく質や、血管障害の予防やアレルギー
反応を抑制する作用があるDHA(ド
コサヘキサエン酸)、EPA(エイコサペン
タエン酸)を多く含み、またカルシウムな
どの摂取源で、健康的な食生活をいと
む上で重要な食材です。妊婦および出産
のための栄養のバランスの良い食事には
欠かせないものです。

でも妊娠中はちょっと注意が必要です
ところが、お魚(クジライルカを含む)には、食物連鎖
(しよくもつれんさ)によって自然界に存在する水銀が取り
込まれています。お魚などを頻りにたくさん食べるなど、か
たよった食べ方をするとこの水銀が取り込まれ、おな
かの中の赤ちゃんに影響を与える可能性があります。こ
れまでの研究から指摘されています。

そのため、平成15年にお魚に含まれる水銀の摂取が検
討され、注意事項が公表されました。その後平成17年、平
成22年に注意事項の見直しが行われています。

次のページからの注意の
内容を読み、妊娠期間中に
食べるお魚の種類と量との
バランスを考えながら
食べましょう。

※食料摂取(しよくもつれんさ)による水銀の蓄積は胎児の体内に蓄積する可能性がある

注意が必要なのは、
食べるお魚の **種類** と **量** です

食べ方の
注意

- お魚1人前(80g)に含まれる
水銀量にまず注意しましょう
- 次に、1週間を基準として、
摂取する水銀量を考えましょう
- いろいろなお魚を
組み合わせて食べる場合 **例1**
- ある週に注意が必要なお魚を
その目安量をこえて食べた場合 **例2**

日本人が平均1食に食べるお魚の量は、刺身1人前、切
身1切れ、それぞれ約80gです。右図では、1人前(約
80g)を単位として、それぞれに含まれる水銀量を●印
で表しています。

おなかの中の赤ちゃんに影響を与えない水銀量は、1週
間に●1個までが目安です。

注意が必要なお魚を組み合わせて食べる時には、そ
れぞれに含まれる水銀量から、1週間の水銀量を合計
し、1週間に●1個までになるようにしてください。右頁
の例1のように、ある週に、「キタダイの焼物」1切れ(●)、
「ミナミマグロの刺身」1人前(●)を食べるのならば、そ
の他の食事のお魚は、注意が必要なお魚ではなく、ツナ
やサバなど特に注意が必要でないものを食べましょう。

例1
キタダイの焼物1切れ (●80g) + ミナミマグロの刺身1人前 (●80g)
ツナサラダ
1週間で 合計 ● 1個

例2
1週め
キンメダイの焼物1切れ (●80g) + ミナミマグロの刺身1人前 (●80g)
2週め
マカジキの刺身1人前 (●80g)
2週間で ● 2個 つまり 1週間で ● 1個

※調査結果から「ツナ魚」の水銀含有量は低いことが確認されています。

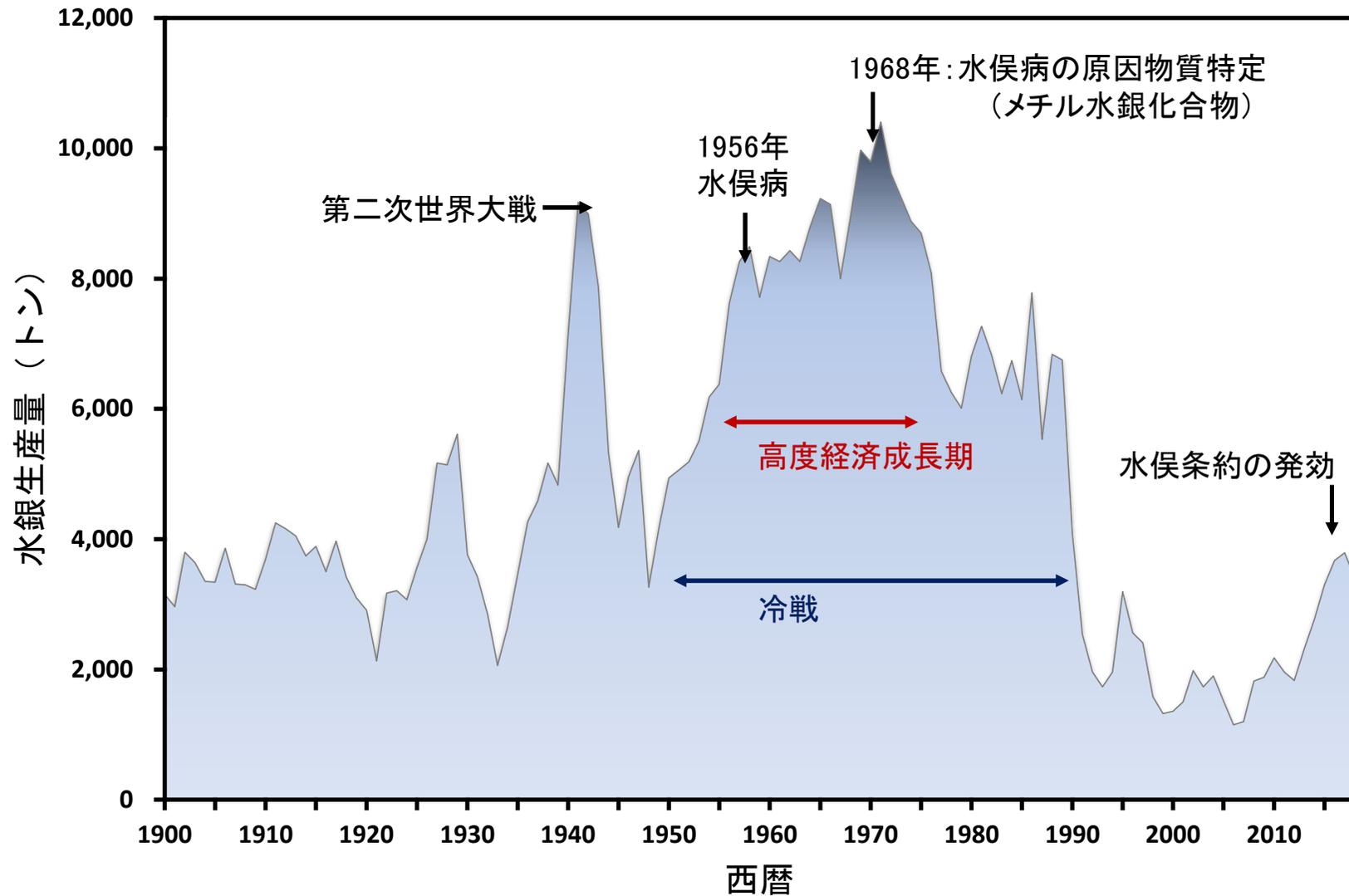
水銀及び水銀化合物の用途

金属水銀 (Hg)	歯科用アマルガム 金の精錬、メッキ 電極（クロル・アルカリ工業） 電化製品 （電池・蛍光灯・ディスプレイ等） 計測機器（体温計等）
酸化水銀 (HgO)	触媒（アセトアルデヒド製造） 試薬
塩化水銀 (HgCl ₂ ・Hg ₂ Cl ₂)	電極、殺菌剤、防腐剤、 触媒（塩化ビニル製造等） 試薬
硫化水銀 (HgS)	赤色顔料
有機水銀 (CH ₃ HgCl)	防腐剤、殺菌剤、農薬、試薬



世界の推定水銀生産量の推移

(USGS Data Series 140, Hg Supply-Demand Statistics)



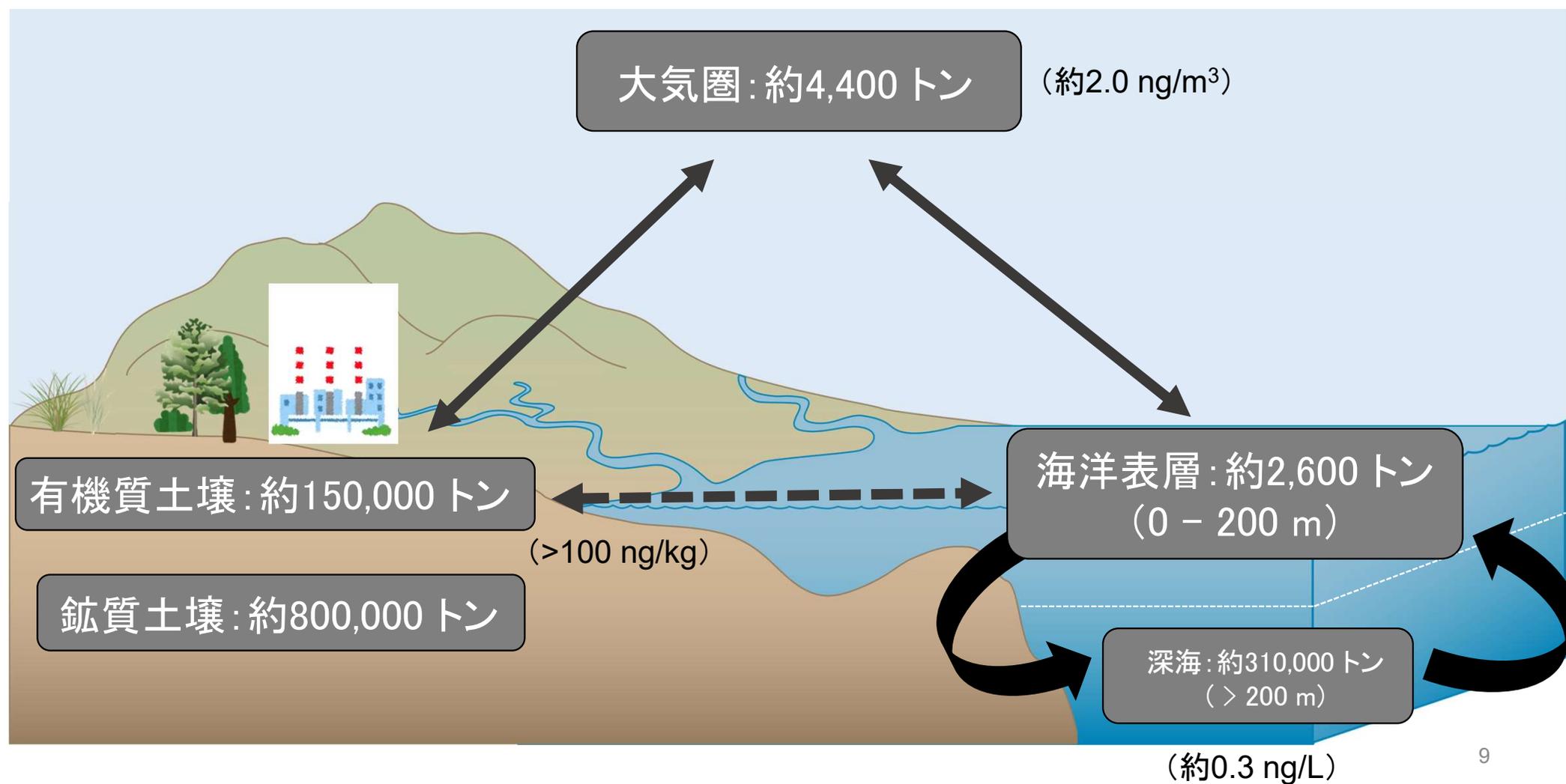
2. 地球規模の水銀汚染について

「ローカル」から「グローバル」へ

- 地球全体での水銀濃度の増加
- 大気を介した水銀の長距離輸送問題
- 環境変化による水銀の環境動態の変化

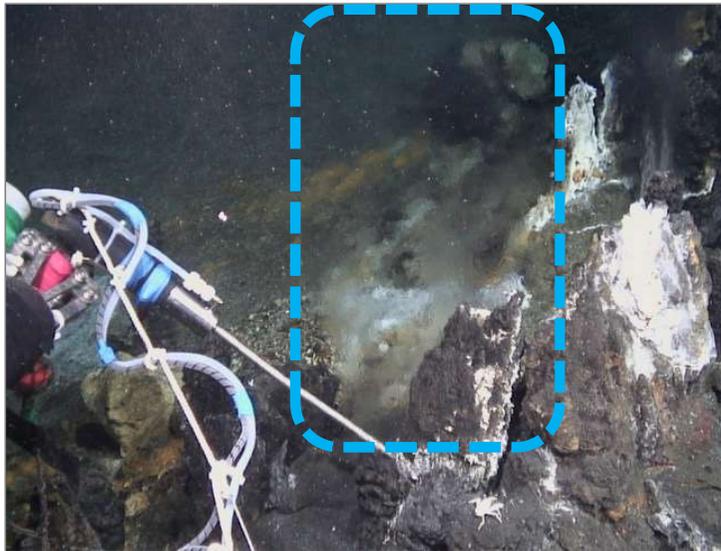
地球環境中の推定水銀含有量について (2015年)

(UNEP Global Mercury Assessment 2018)



大気への自然起源の水銀

熱水・火山活動



明神海丘（伊豆・小笠原海域）



硫黄山（北海道）

大気への人為由来の水銀

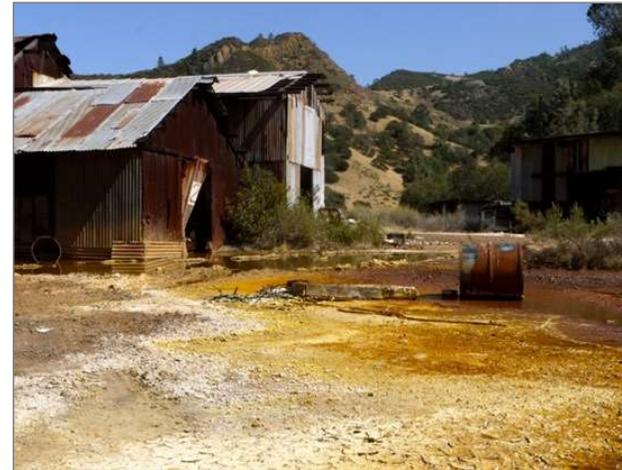
- 小規模な金採掘
- 発電・熱供給
- 鉱山業・精錬
- 鉄鋼製造
- セメント製造
- 塩化ビニル工業
- クロル・アルカリ工業
- 廃棄物の焼却



大気への人為起源水銀の再放出

過去に放出された人為起源水銀の再放出

- 森林火災
- 汚染土壌・植物から大気への放出
- 水環境から大気への放出



大気への年間総水銀排出推定量あたりの割合



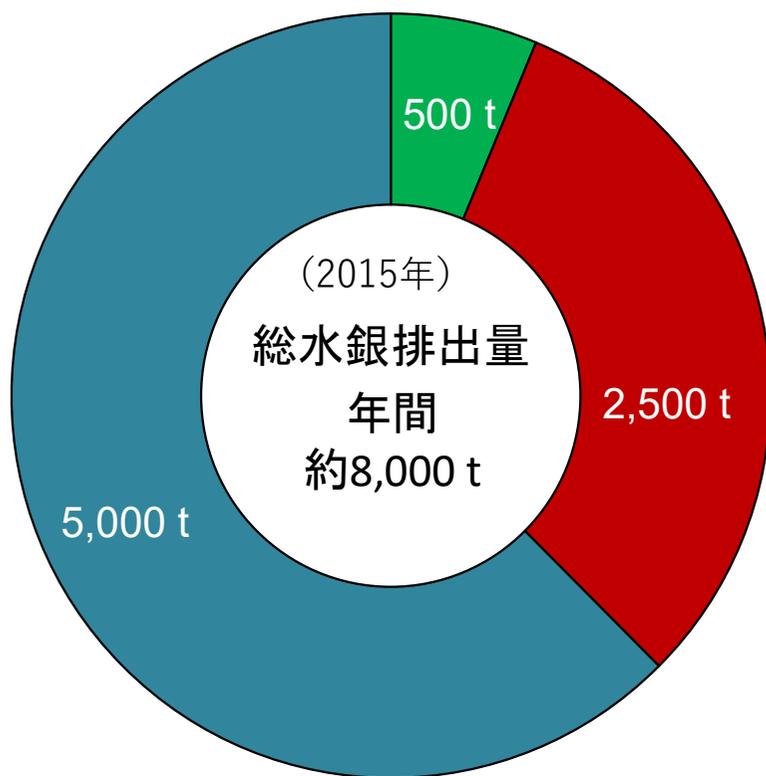
大気から地表への沈着

- 雨・雪（湿性沈着）
- ガス状水銀（乾性沈着）

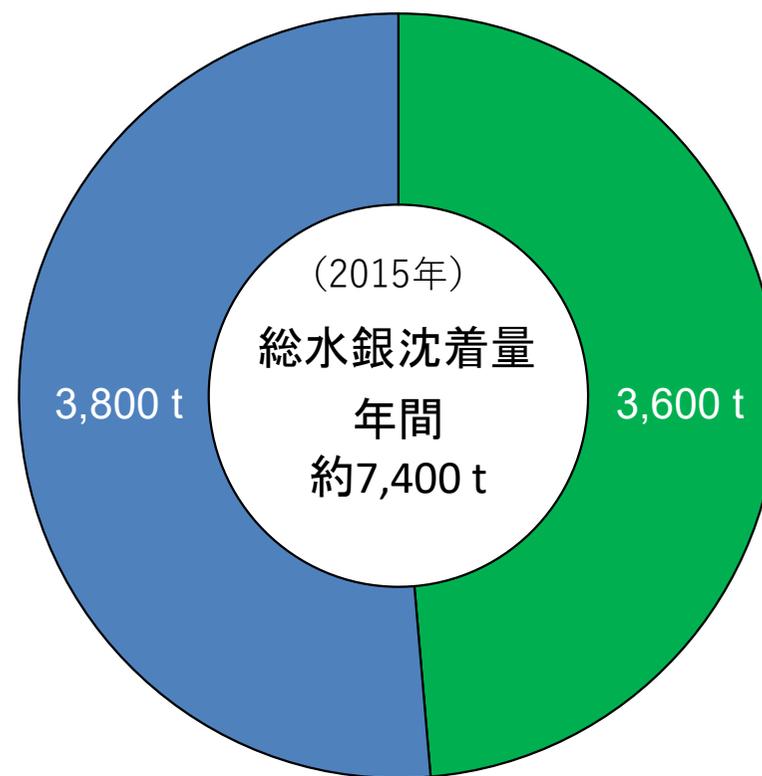


大気への年間水銀排出量 & 地表への沈着量 (推定)

(UNEP Global Mercury Assessment 2018)



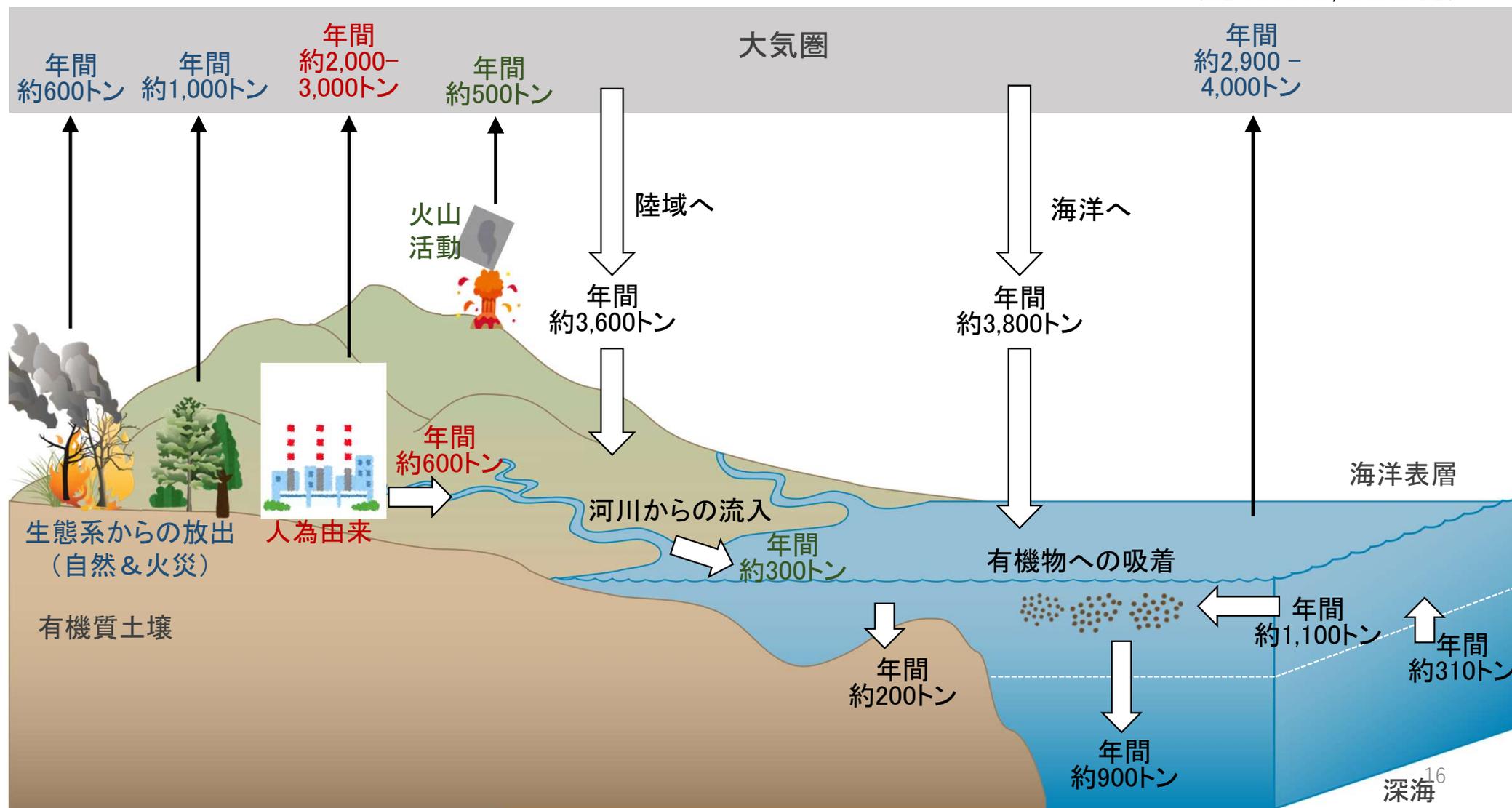
■ : 自然由来 ■ : 人為由来 ■ : 再放出



■ : 陸域へ ■ : 海域へ

地球環境中の推定水銀移動量について (2015年)

(UNEP Global Mercury Assessment 2018)



地球環境中の水銀滞留時間について

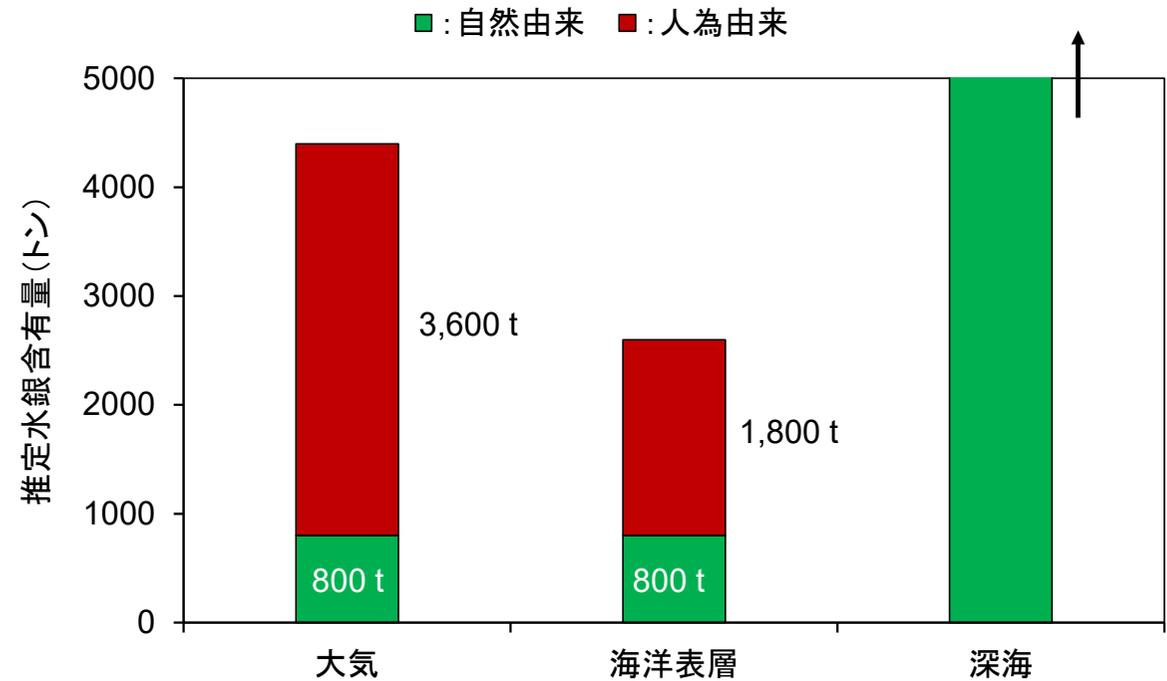
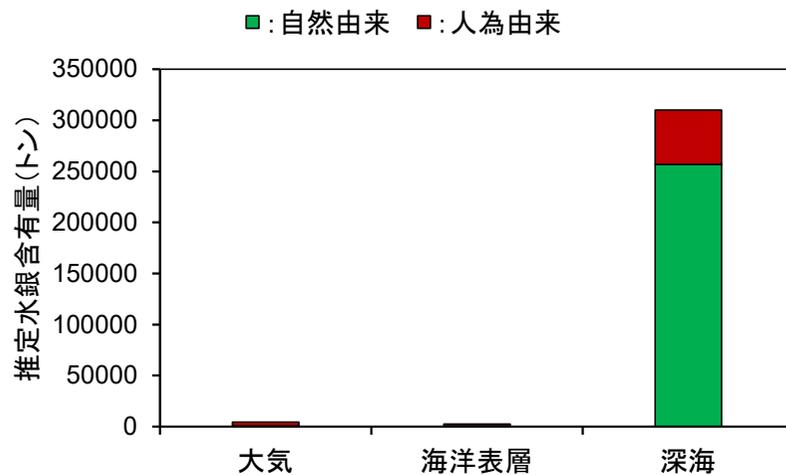
滞留時間：大気や海洋に流入した水銀がその環境内に留まっている時間

媒体	水銀の滞留時間
大気	約 6 ヶ月
海洋表層	約 6 ヶ月
深海	約 310 年
有機質土壌（陸域）	約 36 年

大気－海洋の水銀含有量の割合

(UNEP Global Mercury Assessment 2018)

	推定総水銀量 (トン)
大気	4,400
海洋表層	2,600
深海	310,000



大気・海洋の水銀の空間分布について

1 ng/L とは、学校の25mプールに、塩粒約3個分を溶かした濃度に相当

大気 (2013 – 2014)	水銀濃度 (ng/m ³)
北半球	1.54 ± 0.06
熱帯 (赤道)	1.24 ± 0.10
南半球	0.95 ± 0.06

Sprovieri et al., 2016

海洋表層 (2009 – 2019)	水銀濃度 (ng/L)
北極海	0.24 ± 0.17
北太平洋	0.12 ± 0.05
北大西洋	0.14 ± 0.08
熱帯 (赤道)	0.09 ± 0.06
南太平洋	0.04 ± 0.01
南極海周辺	0.26 ± 0.12

Bowman et al., 2020

環境基準を大きく下回る大気・海水中水銀濃度

環境基準値等	種類	基準値等	
		総水銀	有機水銀
大気	大気水銀濃度（指針値）	40 ng/m ³ 以下	—
水質	公共用水域の環境基準	0.5 µg/L 以下	検出されないこと
	地下水の環境基準	0.5 µg/L 以下	検出されないこと
	公共用水域への排水基準	5 µg/L 以下	検出されないこと
	下水道への排水口基準	5 µg/L 以下	検出されないこと
	水道の水質基準**	0.5 µg/L 以下	—
土壌	土壌の環境基準（検液中濃度）	0.5 µg/L 以下	検出されないこと
	要措置区域の指定要件（検液中濃度）	0.5 µg/L 以下	検出されないこと
	要措置区域の指定要件（土壌中濃度）	15 mg/kg 以下	—

中央環境審議会・S46環境庁告示第59号・H9環境庁告示第10号・S46総理府令第35号・S34年政令第147号・H15厚労省令第101号・H3環境庁告示第46号・H14環境省令第29号

**水質	水道の基準値（EU）	1.0 µg/L 以下	—
	水道の基準値（アメリカ）	2.0 µg/L 以下	—

CD98/83/EC・US EPA

3. 環境中水銀含有量の推移について

人間活動による環境中 水銀含有量の増加について

(UNEP Global Mercury Assessment 2018)

含有量 (2015年)	推定水銀量 (トン)
大気	4,400 (約4.5倍に増加)
海洋表層	2,600 (約2.3倍に増加)
深海	310,000 (約1.2倍に増加)
表層土壌	150,000 (約1.2倍に増加)

人間活動による環境中 水銀移動量の増加について

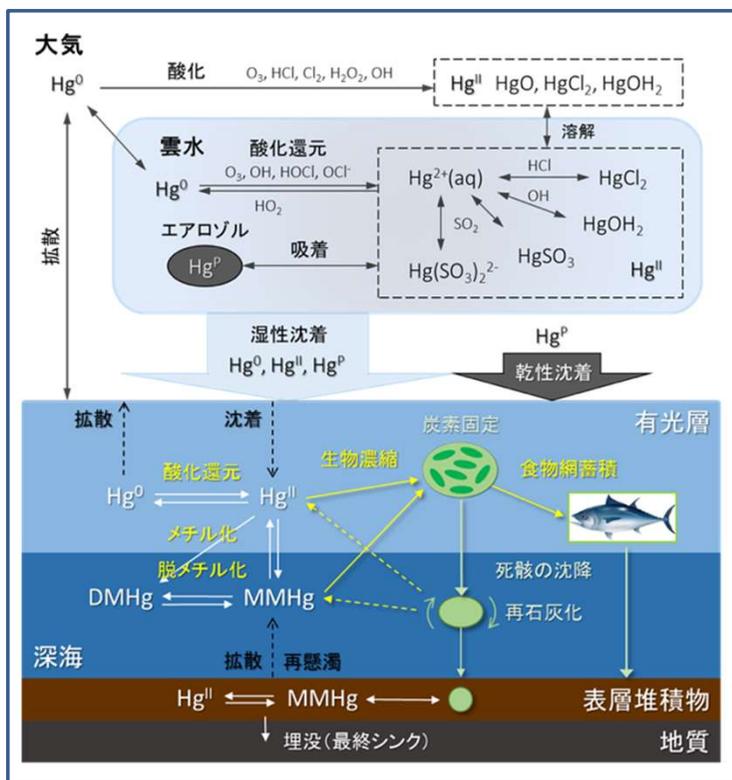
(UNEP Global Mercury Assessment 2018)

移動量 (2015年)	推定水銀移動量 (トン/年)
大気から地表へ	7,400 (約3倍増加)
海洋表層から大気へ	3,400 (約2.5倍増加)
陸域から沿岸へ (河川を介して)	300 (約1.3倍増加)

過去から現在までの環境中水銀含有量について

- ▶ 全球の水銀含有量と移動量を推定するモデルの開発を推進 (推進費【5-1405】【5-1702】【SII-6-3】)

全球モデルの概要



Kawai et al. (2020)

入力データ:

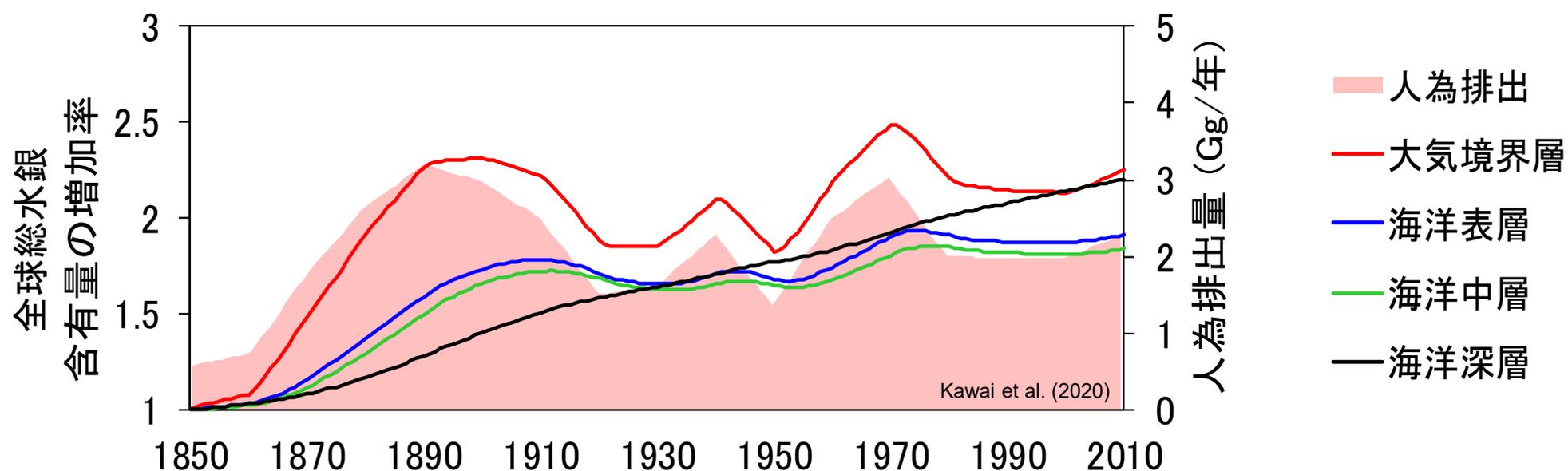
- 人為的な水銀排出量 (石炭火力発電所等)
- 天然の水銀排出量 (火山等)
- 気候データ
- 衛星データ
- 反応物質濃度
- 土地利用など

出力データ:

- 水銀濃度 (形態別)
大気、海水、底質、水産物
- 水銀移動量
沈着、拡散、深層輸送

大気—海洋間の総水銀含有量の変動を再現

1850年（産業革命以後）から2010年までのシミュレーション結果



4. 生物中の水銀含有量の推移について

- ▶ 生物に含まれる水銀の90%以上がメチル水銀の形態をしている。
- ▶ メチル水銀は自然毒であり、水環境に生息する微生物が生成する。
- ▶ 生物中のメチル水銀濃度は個体や生態系機能に依存する（食物連鎖など）
- ▶ 海水中のメチル水銀の滞留時間は約20年間



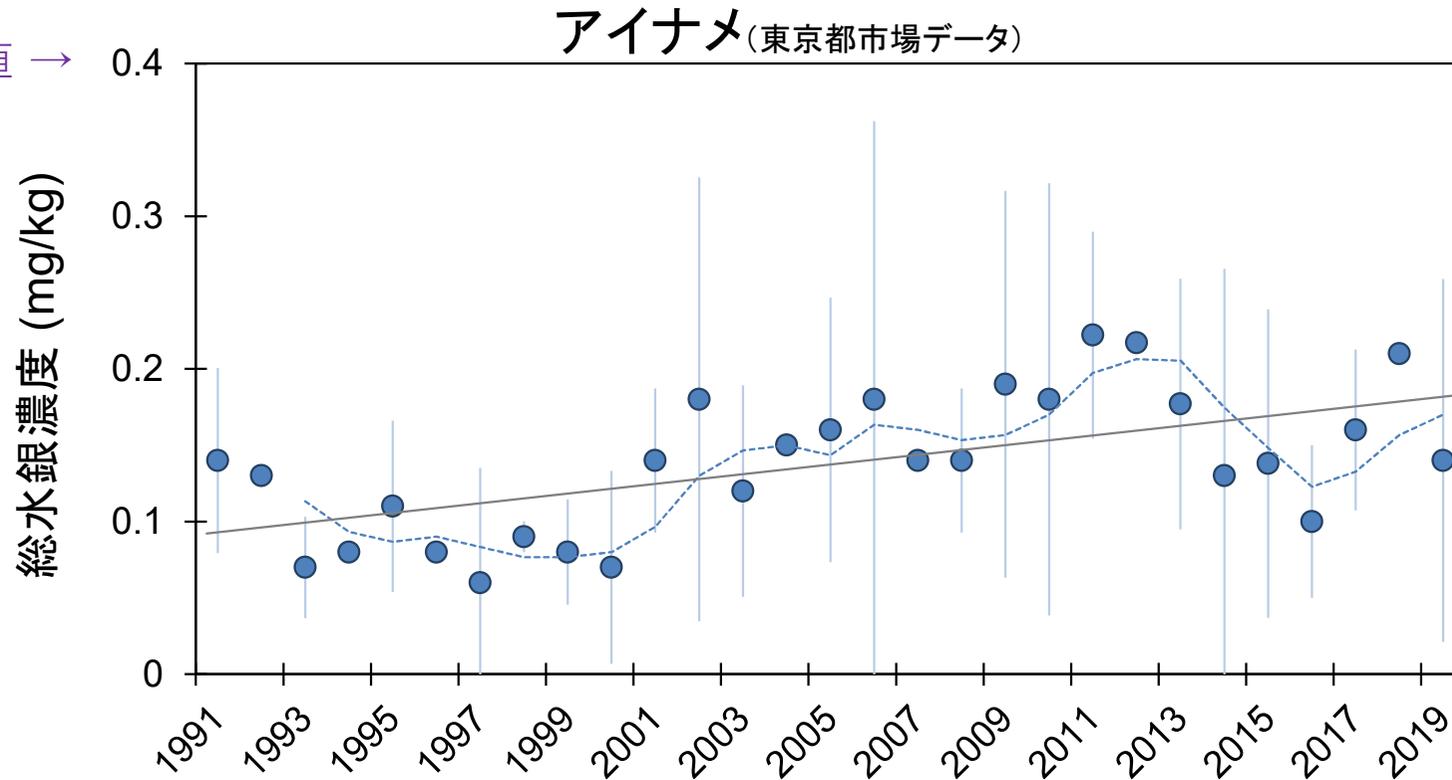
経年変化の報告事例（～2015年）

- 北欧の淡水魚の総水銀濃度が、1960年代から約3割から5割減少
- 北米大陸の野鳥の卵の総水銀濃度が、1970年代から約9割減少
- 北米大西洋沿岸の魚の総水銀濃度が、1970年代と比較して約5割減少
- 餌の変化によってシロクマの水銀濃度は、1960年代と比較して約5割減少

アイナメ（国内沿岸魚）の水銀含有量の推移

- ▶ 沿岸底生魚・5～7年（寿命）
- ▶ 肉食（カニやエビなどの甲殻類・小魚を捕食）

食品規制値 →



今後の水俣条約のある世界での有効性評価は...

- 人為由来水銀の再放出量が多く、除去プロセスが限定的なため、排出削減を進めても、環境中の水銀量の削減には時間がかかる。
 - 削減効果が生まれそうな地点を特定し、継続的な水銀の環境モニタリングで確認する。
- 生物中の水銀はメチル水銀であるために、人為由来水銀の排出削減を進めても、生物中の水銀濃度の減少には時間がかかる。
 - 削減効果が比較的早く反映されそうな栄養段階の低い生物を選択して、環境モニタリングで確認する。
- 気候変動の影響（降水量の増加や砂漠化など）によって、水銀移動量の空間分布が顕著になる可能性がある。
 - 水銀濃度モニタリングではなく、水銀移動量モニタリングも実施して確認する。