

2022年9月8日(木) 環境研究総合推進費SII-6セミナー
「水銀に関する水俣条約の有効性を考える～条約発効5周年を機に～」

水銀曝露リスクの推移

林岳彦

国立環境研究所

背景I水銀曝露による健康影響の概要

■ 神経系への影響は古くから知られている

- 高濃度の曝露では重篤な神経系への影響が生じる(例:水俣病)
- 胎児期の曝露による小児の神経発達への影響が最も感受性が高い

(母親毛髪中濃度で6-14 $\mu\text{g/g}$ のレンジから検出可能な影響が生じうる)

村田ら(2011), 荻田ら(2016)

■ 近年、心疾患への影響の可能性も示唆されている

- 必ずしも多くの研究で一貫した影響が示されているわけではないが、複数の疫学研究から水銀の曝露と心疾患(心筋梗塞)の関連が示唆されている

Rice et al. (2010), 村田ら(2011), 荻田ら(2016)

➡ 一般的な水銀曝露の文脈では、胎児期曝露によるIQ低下 + 成人の心疾患死亡が主要な健康影響

背景I現在の曝露レベルの概要

■ 基本的に、海産物の摂取量の多い国で曝露量が多い

- 「市場を介した海産物消費」により広範な水銀曝露が生じていることが複数の質の高い研究から支持されている Sheehan et al. (2011)

– 近年の大規模疫学研究からの毛髪中水銀濃度の中央値の例:

日本: 1.0 $\mu\text{g/g}$ 、韓国: 0.7 $\mu\text{g/g}$ 、米国: 0.1 $\mu\text{g/g}$
スペイン: 1.5 $\mu\text{g/g}$ 、英国: 0.2 $\mu\text{g/g}$ 、ドイツ: 0.1 $\mu\text{g/g}$

Tatsuta (2022), Seo (2021), Den Hond et al. (2015)

* FAO/WHOの耐用週間摂取量
に対応する値は2.2 $\mu\text{g/g}$

* ただし魚介類の摂取には健康リスクを低下させる効果もあるため
単純に「魚食＝高リスク」ではないことに注意

■ 金鉱山等周辺での高濃度曝露も多く知られている 村田ら(2011)

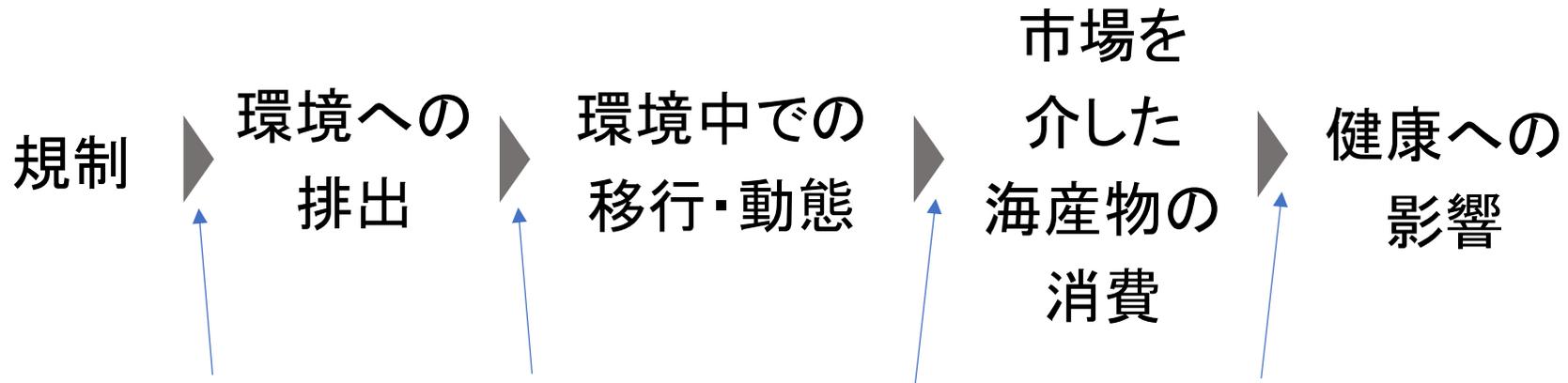
- 南アメリカ、アフリカ、アジアの金鉱山や水銀鉱山周辺で非常に高濃度の曝露が生じていることが多数報告されている

アマゾン川流域ではコミュニティでの平均毛髪中濃度が15 $\mu\text{g/g}$ を超える例も

➡ 本研究PGでは、対象となる人口規模が大きい市場を介した海産物消費による曝露での健康リスクを評価

背景I 水俣条約に基づく対策の評価の必要性

- 水俣条約による排出等の規制が、ヒトの健康リスクをどの程度低下させるかは必ずしも自明でない

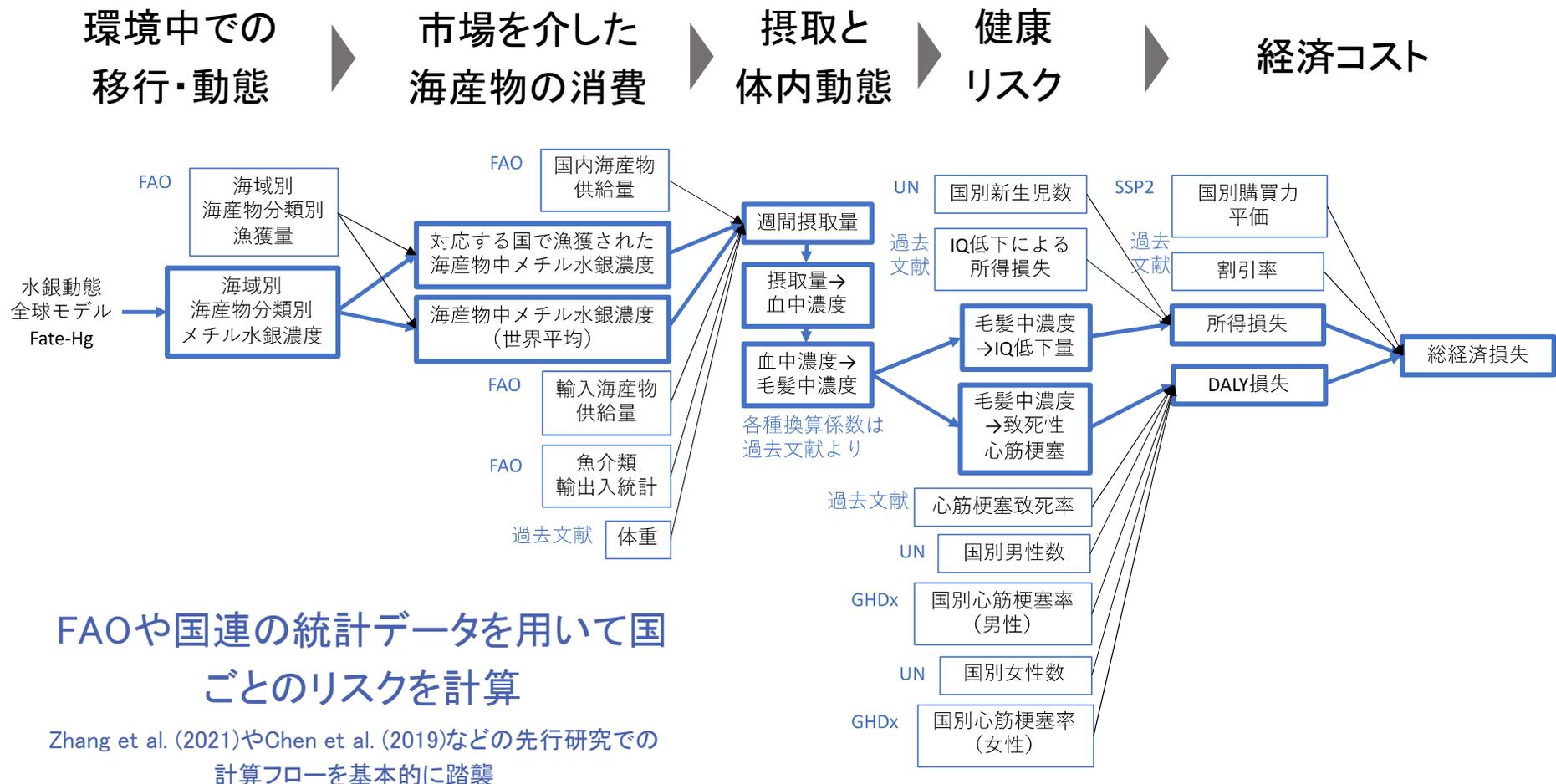


それぞれの段階で、即時に／線形に影響するわけではない

- ➡ 全球モデルの動態予測をもとに、水銀条約に基づく対策が各国の健康リスクに与える変化とその推移を計算した

方法I 推移予測計算の全体フロー(概要)

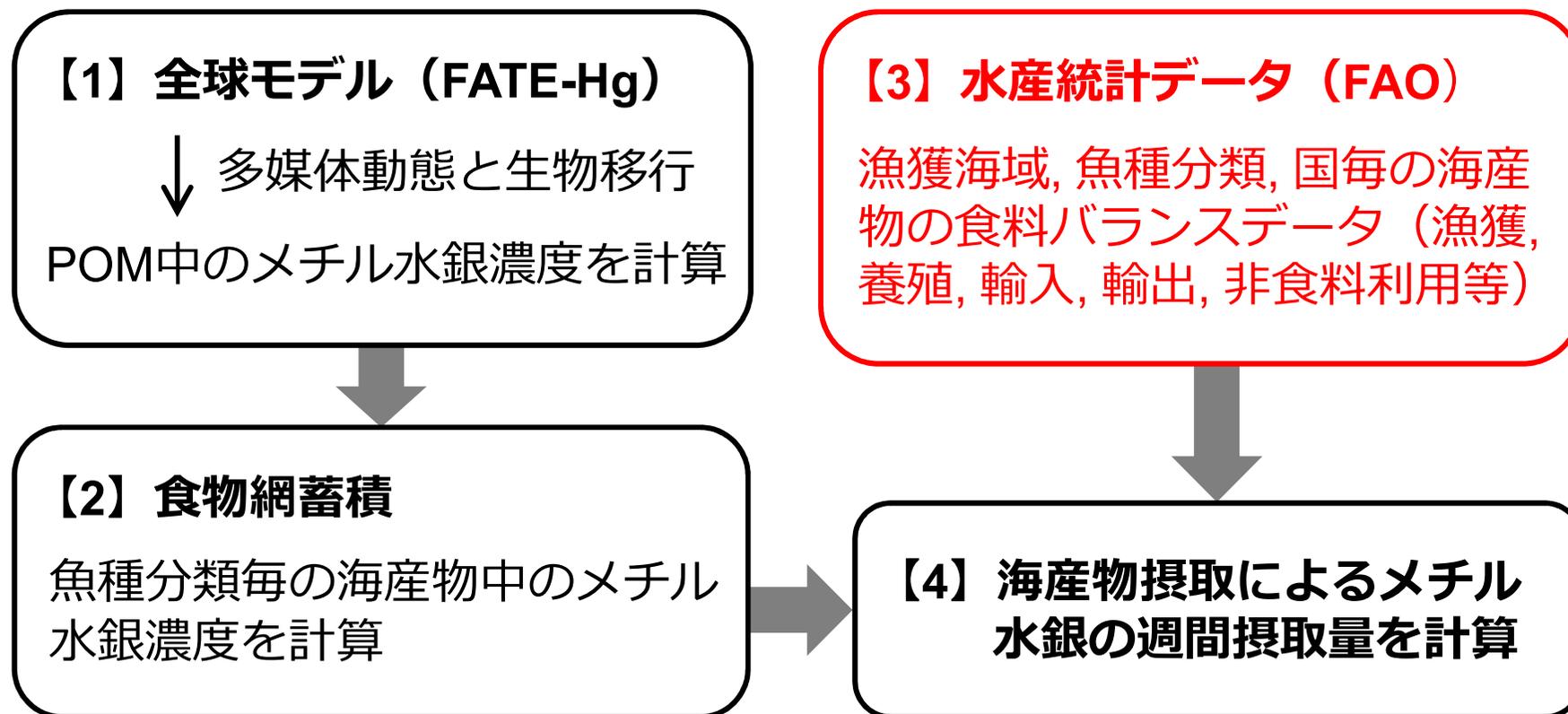
■ 海産物の消費→体内動態→人口動態→健康リスク→経済コストの一連の換算によりリスクの推移を計算



方法I海産物濃度→週間摂取量の計算

- 海産物濃度からのヒトの水銀摂取量の推計を、Lavoie et al. (2018)の計算法を拡張して行った

詳細はKawai et al. (2020)、林・河合 (2021)を参照



方法I海産物濃度→週間摂取量の計算

■ 水産統計を利用した国ごとの海産物摂取量の推計

$DFS_{i,f}$: i国における海産物カテゴリーfの国内供給量

$IFSc_{i,f}$: i国における海産物カテゴリーfの輸入供給量

国内供給 (DFS) = 生産 + α × (ストック変化 - 輸出 - 非食料使用)

輸入供給 (IFS) = 輸入 + (1- α) × (ストック変化 - 輸出 - 非食料使用)

α = 生産 / (生産 + 輸入)

Food balance sheets of fish and fishery products

データ種類	生産, 輸入, 輸出, 非食料使用, ストック変化
期間	1961 - 2013年
国	228カ国 (2010年)
魚種分類	FAOSTAT
漁業海域	-

Global Fishery and Aquaculture Production Statistics

データ種類	漁獲, 養殖
期間	1950 - 2017年
国	249カ国 (2010年)
魚種分類	ISSCAAP, FAOSTAT
漁業海域	FAO主要漁業海域

海産物の種類の違い、国内／国外供給、輸出入、ストック、非食糧利用、
漁業海域(獲られた海域)の情報が推計に反映

方法I海産物濃度→週間摂取量の計算

■ 海産物摂取によるメチル水銀の週間摂取量の計算

W_i : メチル水銀の週間摂取量 [$\mu\text{g Hg/kg/week}$]

$$W_{i,c} = \sum_{fg} (DFS_{i,fg} \times C_{i,fg} + IFS_{i,fg} \times C_{fg}) / BM_i / 52$$

【2】 $C_{i,fg}$, C_{fg} ($\mu\text{g Hg/g wt}$): 水産物中メチル水銀のモデル予測濃度

【3】 $DFS_{i,fg}$, $IFS_{i,fg}$ (g wt): 水産物の食料供給量

※ i : 国, fg : 魚種分類 (FAOSTAT), BM (kg): 平均体重

国内／国外供給(kg/year)に、それぞれが漁獲された海域での魚種分類ごとの水銀濃度(kgあたり)を重みづけてメチル水銀の週間摂取量を計算

方法I 週間摂取量→新生児のIQ低下の計算

■ 週間摂取量からの新生児のIQ低下量の計算

$\Delta IQ_{i,y}$: i国のy年における水銀摂取によるIQ低下量 [points]

$$\Delta IQ_{i,y} = (\Delta WI_{i,y} / 7) \times BW_i \times ItBL \times BLtH \times HtIQ \times NB_{i,y}$$

- $\Delta WI_{i,y}$: 週間摂取量の変化量 [$\mu\text{g}/\text{Kg}$ 体重/day]
- BW : 体重
- tBL : 一日摂取量から血中濃度の換算係数 [$0.6 \mu\text{g}/\text{L}$ per $\mu\text{g}/\text{day}$]
- BLtH : 血中濃度から毛髪中濃度の換算係数 [$0.25 \mu\text{g}/\text{g}$ per $\mu\text{g}/\text{L}$]
- HtIQ : 毛髪中濃度からIQ低下量の換算係数 [$0.3 \text{ IQ points per } \mu\text{g}/\text{g}$]
- $NB_{i,y}$: 新生児数

週間摂取量から換算係数により一人当たりIQ低下量を計算したのち、その国の新生児数で重み付けすることにより、その国でのその年の新生児のIQ低下量を計算

* 今回の計算ではZhang et al. (2021)の方法に準じ、IQへの影響には閾値があるものとは想定せず、低濃度域でも影響は線形的であると仮定

* 魚食によるベネフィットは勘案されていない

方法I 週間摂取量→心疾患死亡増の計算

■ 週間摂取量からの心筋梗塞による死亡数の計算

$\Delta\text{FHA}_{i,y}$: i国のy年における水銀摂取による心筋梗塞死亡数 [person]

$$\Delta\text{FHA}_{i,y} = U \times \text{FR} \times (\text{NF}_{i,y} \times \text{IHD}_{i,F} + \text{NM}_{i,y} \times \text{IHD}_{i,M}) \times [1 - \exp(-(\Delta\text{Wi}_{i,y}/7) \times \text{BW}_i \times \text{ItBL} \times \text{BLtH} \times \text{HtFHA})]$$

- U_w : 水銀が心疾患を引き起こすことの包括的な不確実性。Zhang et al. (2021)と同様に0.3と設定。
- FR: 虚血性心疾患の死亡率
- NF: 女性の数
- IHD_F : 女性の虚血性心疾患の発生率 (年齢調整済)
- NM: 男性の数
- IHD_M : 男性の虚血性心疾患の発生率 (年齢調整済)
- BW: 体重
- tBL: 一日摂取量から血中濃度の換算係数 [0.6 $\mu\text{g/L}$ per $\mu\text{g/day}$]
- BLtH: 血中濃度から毛髪中濃度の換算係数 [0.25 $\mu\text{g/g}$ per $\mu\text{g/L}$]
- HtFHA: 毛髪中濃度から致死性心筋梗塞への換算係数 [0.066 per $\mu\text{g/g}$]

各国での心筋梗塞による死亡率の男女別のベースラインリスクに応じて、水銀の摂取がさらにリスクを増加させると想定。包括的な不確実性係数の設定により不確実性を考慮

方法I健康リスク→経済的コストの換算

■ 経済的コストの計算法

$\Delta EV_{i,y}$: i国のy年における経済価値の変化量

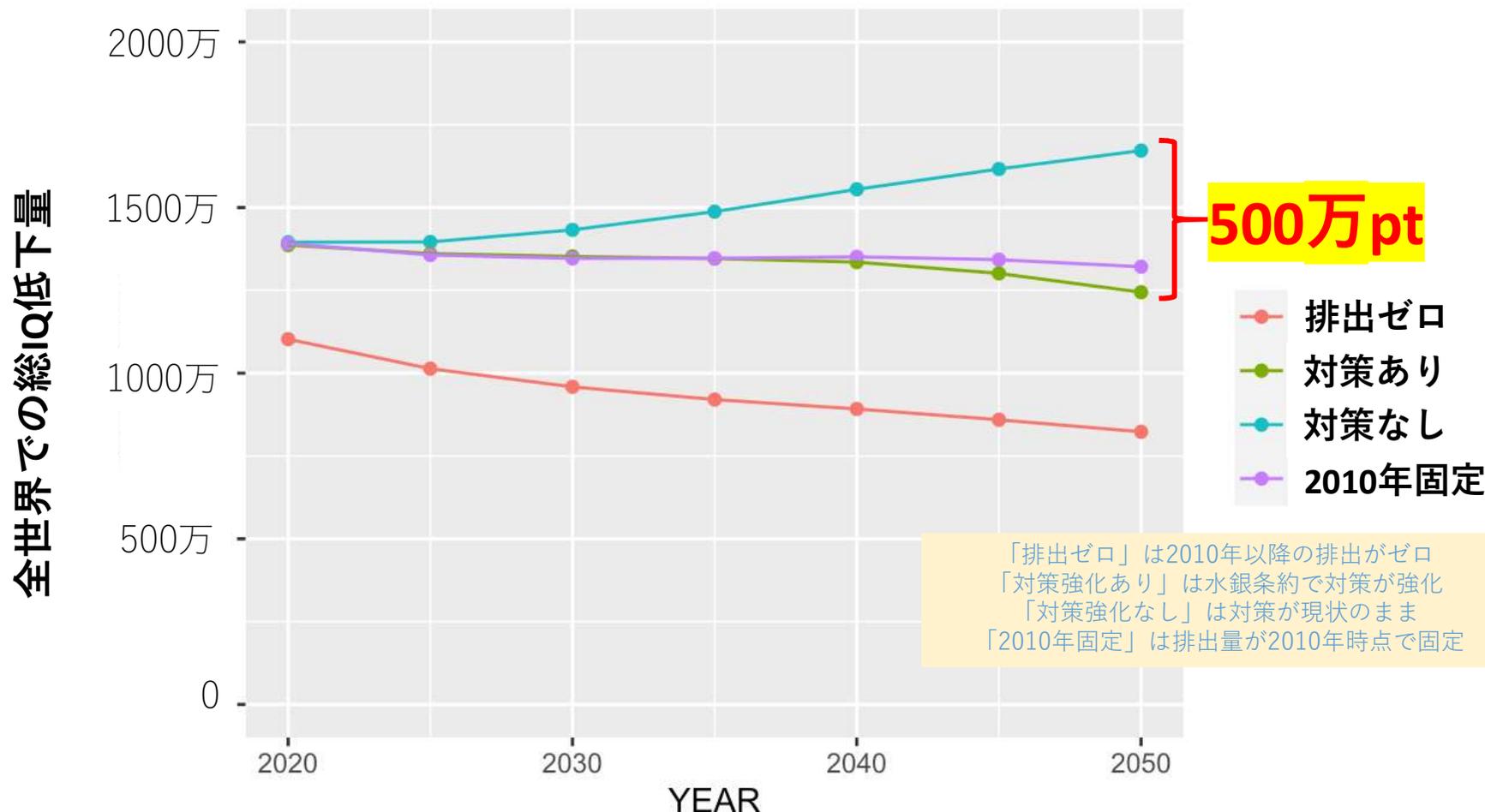
$$\Delta EV_{i,y} = (\Delta IQ_{i,y} \times IQtM \times [1 - \exp(-(\Delta Wi_{i,y}/7) \times BW_i \times ItBL \times BLtH \times HtFHA)] + \Delta FHA_{i,y} \times VSL) \times (PPP-GDPperCapita_{i,y} / PPP-GDPperCapita_{\text{米国},2008}) \times (1 / (1 + DR)^{(t-2020)})$$

- **IQtM**: IQ低下量からの経済価値換算係数
[Zhang et al. 2021と同じ18,832 USD/ ΔIQ ; 2008年時データを使用]
- **VSL**: 統計的生命価値
[Zhang et al. 2021と同じ6.3 millionUSD/Lifeを使用]
- **PPP-GDPperCapita_{i,y}**: 購買力平価調整済人口当たりGDP
- **DR**: 割引率
[0% (割引無し) もしくは3%を使用]

各国のIQ低下量と心疾患死亡増加数を経済コスト換算し、経済価値の時空間的な違いをGDPおよび割引率を考慮して調整した

結果I各シナリオ下での推移予測

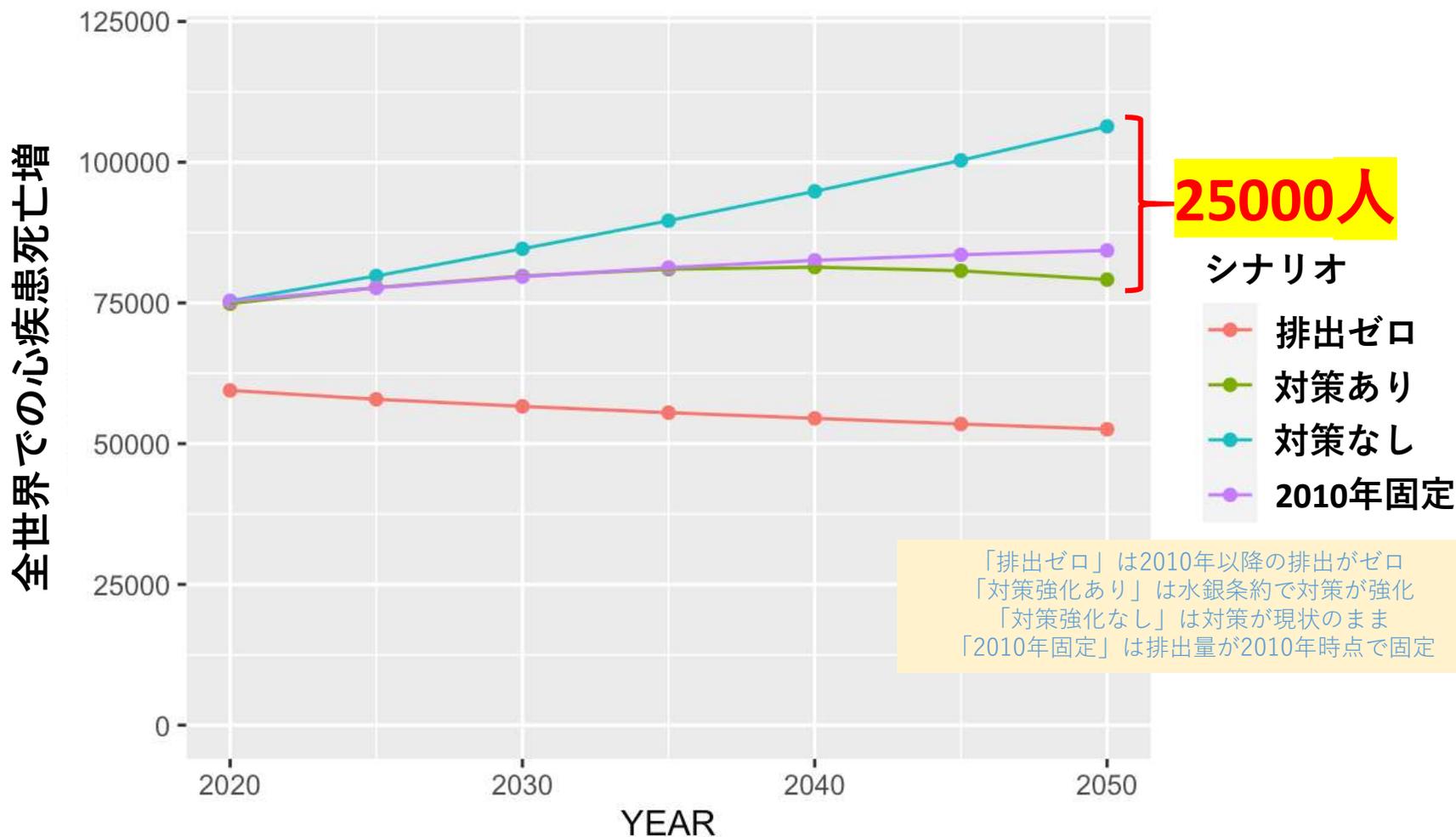
水銀曝露によるIQ低下量の推移(ポイント/年)



➡ タイムラグはありつつ、2050年時点では大きな違いを生む

結果I各シナリオ下での推移予測

水銀曝露による心疾患死亡増の推移(人/年)

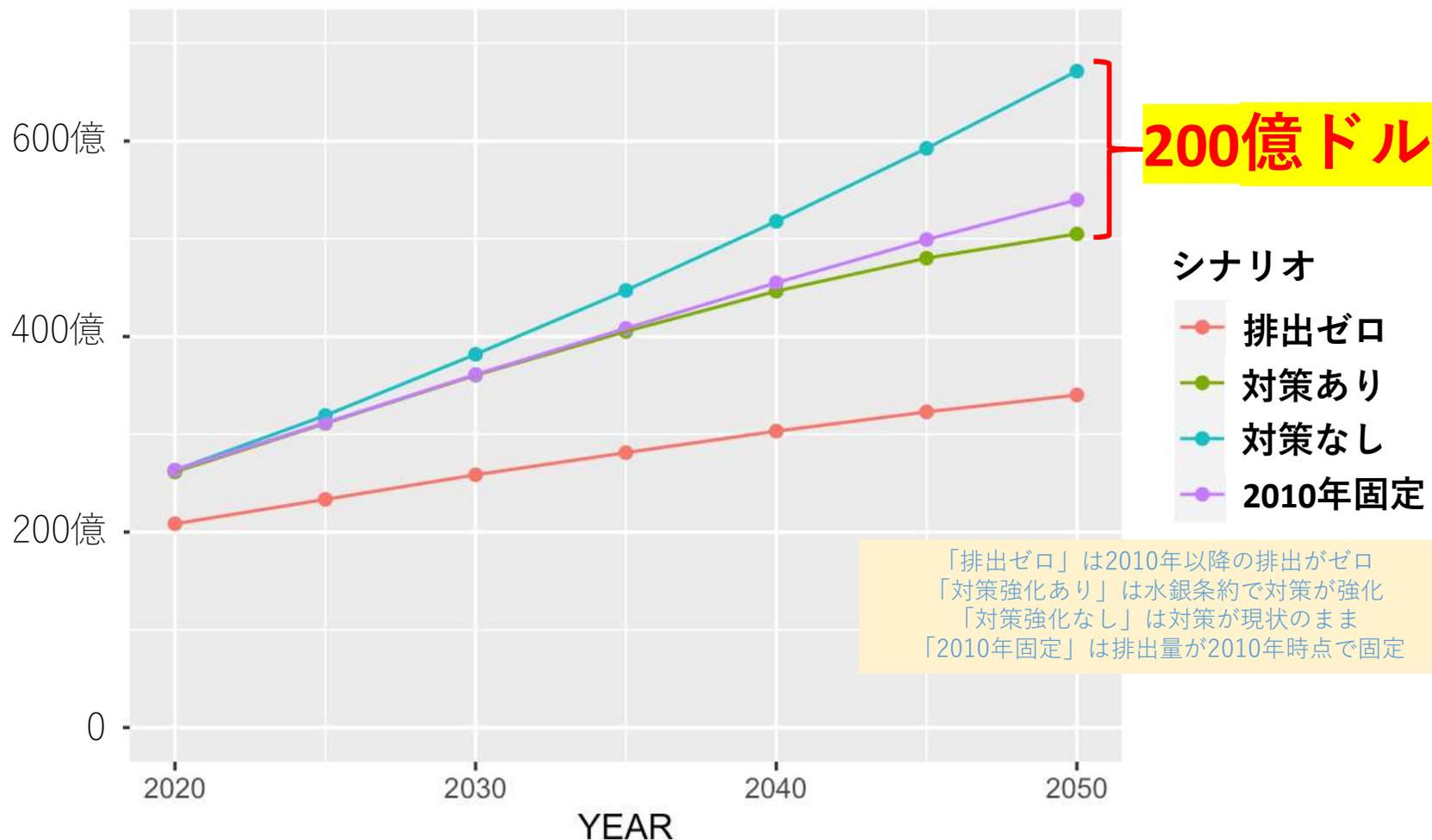


➡ 時間的な傾向はIQ低下量の推移とおおむね同じ

結果I各シナリオ下での推移予測

水銀曝露による経済的コストの推移(USD/年)

全世界での総経済的コスト (割引なし)



➡ 水銀対策は約2兆円/年の利益に繋がると予測された

結論

- 対策の効果がはっきりと現れるまでにはタイムラグがあるが、2050年時点では大きな違いを生むと予測された
 - ・IQ低下量は500万ポイント、心疾患死亡増は2万5千人、経済的コストは200億ドルの差をもたらす
 - ・健康影響の推移は基本的に魚介類中濃度の推移を概ね素直に反映する
- 計算には大きな不確実性があることには一定の留意が必要
 - ・水銀による曝露量-影響関係の仮定は不確実性が大きい(今回は閾値を考えていない)
 - ・水銀の心疾患死亡の関連の因果性はそこまではっきりしたものではない
 - ・魚食による神経発達・心疾患予防へのベネフィットは考慮されていない
 - ・経済換算のパラメータも限られた情報から得られたものである
 - ・曝露の予測値は実測値と概ね整合しているものの、国ごとの精度はそこまで高く無い
- ▶ 健康影響の絶対値の不確実性は大きい
(が、推移のトレンドはおそらく比較的安定に予測できているものと考えている)

現在、系統的な感度解析を実行中

引用文献

- 村田ら(2011)メチル水銀毒性に関する疫学的研究の動向. 日本衛生学会誌 66. 4. 682-695
- 荻田ら(2016)メチル水銀, 水銀およびセレンに関する研究動向 - 疫学研究を中心に -. 日本衛生学会誌. 71. 236-251
- Rice et al. (2010) A probabilistic characterization of the health benefits of reducing methyl mercury intake in the United States. *Environmental Science and Technology* 44, 5216-5224
- Sheehan et al. (2014) Global methyl mercury exposure from seafood consumption and risk of developmental neurotoxicity: a systematic review. *Bull World Health Organ* 92:254-269F
- Kawai et al. (2020) Application of a new dynamic 3-D model to investigate human impacts on the fate of mercury in the global ocean. *Environ. Model. Softw.*, 124, 104599
- 林・河合(2020) 全球モデルを利用した水銀の健康リスク計算手法の開発. 廃棄物資源循環学会誌, 32, 5 384-391.
- Tatsuta et al. (2022) Association between whole blood metallic elements concentrations and gestational diabetes mellitus in Japanese women: The Japan environment and Children's study. *Environmental Research* 212 113231
- Seo et al. (2021) Assessment of lead and mercury exposure levels in the general population of Korea using integrated national biomonitoring data
- Den Hond et al. (2015) First step toward harmonized biomonitoring in Europe: Demonstration project to perform human biomonitoring on a European Scale
- Zhang et al. (2021) Global health effects of future atmospheric mercury emissions. *Nature Communications* 12:3035
- Chen et al. (2019) Trans-provincial health impacts of atmospheric mercury emissions in China. *Nature Communications* 10, 1484