環境汚染への分子栄養学的介入についての統合レビューIV

土壌・水質汚染による食物を介した汚染への対応

渡邉 直樹
IMN Research Center*研究員
watanabe@imn-rc.org

工藤 八
IMN Research Center*研究所長
kudo@imn-rc.org

6　前稿のまとめと本稿の記載内容

食物を介した環境汚染は、重金属・POPs/PFAS・マイクロプラスチックなどが土壌や水域から作物・水産物へ移行し、最終的にヒトの慢性ばく露と生態系サービスの低下を招く連鎖現象である [1,2]

欧州では鉛・カドミウム・無機ヒ素による年間健康損失が約 120,000 DALY(Disability-Adjusted Life Year: 障害調整生存年) と推計され、世界規模でも鉛曝露が 217 万 DALY に達するなど、食品基準を下回る低濃度ばく露でも集団影響は無視できない [3,4]。

本稿では食品選択と調理による摂取回避・低減策分子栄養学的介入の三段階モデと想定し、実践ガイドとそのエビデンスを詳述する。

7　汚染物質の摂取回避・低減策

汚染物質への対策は、本来、排出削減や土壌改良といった上流管理が第一に推奨されるが [4]、規制の網をすり抜ける残余リスクは不可避である。本章では、日常生活で実行可能な摂取抑制策を三つの観点――1. 食品・部位・品種の選択、2. 調理・前処理による除去に整理し、それぞれの削減効果を概説する。

7.1　食品・部位・品種選択

海産物では捕食階層が低いイワシやアンチョビの水銀濃度（$< 0.5\,\mu\mathrm{g\,g^{-1}}$）が、高階層のマグロ類に比べて一桁以上低いと報告されており、低トロフィック魚を選ぶことで金属摂取を実質的に削減できることが示されている [5]。脂質親和性の高い PCB やダイオキシンは魚の皮下脂肪に集積しやすく、フィレを皮除去・背腹トリミングするだけで総 PCB 濃度が平均 50% 減少したとの研究がある [6]。作物では、カドミウム蓄積が少ない低 Cd 米品種や硝酸態窒素低蓄積型の葉菜類を選ぶことで、栽培段階から汚染負荷を下げられると報告されている [7]。

7.2　調理・前処理テクニック

家庭調理レベルでも汚染低減効果が示されている。リンゴ表面の農薬残渣は水道水洗浄で 25–60% 除去され、1% 炭酸水素ナトリウム溶液（ベーキングソーダ）に 12 分浸漬すると最大 96% 除去に達した [8]。浸漬後は 20〜30 秒の水洗いが推奨される。同様に、果菜や根菜など皮を除去できる作物では、皮むきによる農薬除去率が 50–85% で、有機酸や重曹を併用した洗浄よりも高い値が報告される。一方、レタスやホウレンソウなど葉菜類は流水洗浄や希アルカリ溶液浸漬が推奨される [9]。ゆでこぼしは米の無機ヒ素を 30–60% 減少させるが、可溶性ビタミンやミネラルの損失も伴うため栄養価とのトレードオフ評価が必要である。

表 1: 摂取回避・低減策と削減効果の概要

介入手段	主対象汚染物質	典型的削減・排泄効果	エビデンス強度（研究デザイン）
低トロフィック魚選択	メチル水銀	約 10 倍低濃度（サーディン対マグロ）[5]	前向きコホート（レベル 2）
魚皮除去・脂肪トリミング	PCB・ダイオキシン	PCB 50% 減 [6]	実験研究（レベル 2）
重曹 1% 洗浄	残留農薬	80–96% 除去（リンゴ）[8]	実験研究（レベル 2）
皮むき（果実・根菜）	残留農薬	50–85% 除去 [9]	実験研究（レベル 2）
ゆでこぼし（米）	無機ヒ素	30–60% 減 [10]	実験研究（レベル 2）

本章で示した介入は、汚染源対策や規制と併用することで食事由来曝露を実質的に下げる手段となる。栄養による介入についての詳細は次章に示す。

*IMN Research Center = Integrated Molecular Nutrition Research Center

[1]エビデンス強度は Oxford CEBM 階層を研究デザイン名で示す（メタ解析＞単一 RCT ＞前向きコホート＞症例対照／横断＞症例報告）。

8　分子栄養学的介入（体内三段階モデル）

前章で扱った摂取抑制策を外堀と位置づけ、本章では体内に取り込まれた後のリスク低減を三段階モデルで論じる。第一段階（フェーズ I）では腸管吸収そのものを競合的に阻止し、吸収を免れた汚染物質については第二段階（フェーズ II）で酸化ストレスや酵素阻害といった毒性経路を抗酸化・解毒酵素誘導により遮断・修復する。最終段階（フェーズ III）ではキレートまたは胆汁循環遮断により体外排出を促進する。この流れは薬物動態学における吸収・代謝・排泄（ADM）の概念と対応し、複数の栄養素を段階的に組み合わせることで相乗的な防御が期待される。以下、各フェーズの主要エビデンスを概説し、章末に統合表として整理する。

8.1　フェーズ I 取り込み抑制（競合ミネラル）

必須ミネラルを十分に充足させることで、腸管の輸送体や結合タンパク質を競合占有し、有害金属の吸収を低減できる。小児にカルシウム 250 mg 日 $^{-1}$ を追加した無作為化比較試験では、12 週後の血中鉛が約 50% 低下した [11]。鉄・亜鉛の摂取が十分な成人コホートでは、血中カドミウムが 10-15% 低値を示し逆相関が観察された [3]。水銀毒性に対しては、セレンが 1:1 のモル比で結合して生物学的無毒化を行うことが提唱され、北米沿岸の漁民データで Se:Hg 比が高い群ほど神経学的影響が少ないと報告された [12]。放射性ヨウ素については安定ヨウ素の摂取で甲状腺取り込みが競合的に抑制されることが確立している [4]。

8.2　統合エビデンス表（毒素・栄養素・アウトカム・エビデンス強度）

これらにより示された栄養各毒素に対しての栄養素介入による効果とエビデンス強度についての整理を以下表 3 にまとめた。

8.3　栄養介入の限界

栄養素による介入は薬理的キレーションや環境源対策と比較して侵襲性が低いが、実践に当たっては限界と注意点を踏まえる必要がある。

8.3.1　個人差

金属輸送体や解毒酵素の遺伝多型は吸収量と代謝速度を変化させる。たとえば *GSTP1* Val105Ile 多型をもつ集団では無機ヒ素のメチル化効率が低く、尿中ヒ素排泄が減少したと報告されている [18]。同一量の栄養補給でも効果が均一ではないため、事前の栄養評価と遺伝的背景の把握が望まれる。

表 2: 栄養介入とバイオマーカー改善効果の概要

汚染物質群	主介入栄養素	代表的アウトカム	効果量（例）	エビデンス強度（研究デザイン）
重金属 Pb	Ca 250 mg 日 $^{-1}$	血中 Pb	− 50%（12 週）[11]	単一 RCT（二重盲検，レベル 1b）
重金属 Cd	Fe ／ Zn 充足（RDA）	血中 Cd	− 10〜15%（前向き観察）[3]	前向きコホート（レベル 2）
Hg	セレン 200 μg 日 $^{-1}$	神経機能スコア	改善（漁民コホート）[12]	前向きコホート（レベル 2）
POP（PCB ／ダイオキシン）	クロレラ 6 g 日 $^{-1}$	血中 TEQ	− 15%（8 週）[13]	小規模介入試験（レベル 3）
PFAS	スルフォラファン 32 μmol 日 $^{-1}$	血中 PFOS	− 12%（10 週）[14]	単一 RCT（クロスオーバー，レベル 1b）
PFAS	β-グルカン 3 g 日 $^{-1}$	血中 PFOA	− 8%（4 週）[15]	パイロット RCT（レベル 1b）
重金属混合	NAC 1.8 g 日 $^{-1}$	尿中 8-OHdG	− 35%（4 週）[16]	単一 RCT（二重盲検，レベル 1b）
MP に吸着した金属	*L. plantarum* 10^9 CFU 日 $^{-1}$	便中 Cd ／ Pb	排泄増加（4 週）[17]	パイロット RCT（レベル 1b）

8.3.2　高用量ビタミンの長期安全性

脂溶性ビタミンは体内に蓄積しやすい。ビタミン E を一日 400 IU 超で長期摂取した群では脳出血性脳卒中の発生率が有意に増加した [19]。セレン 200 μg 日 $^{-1}$ による PFAS 抑制を目的とした SELECT 試験でも糖尿病発症リスクの増加が報告されている [20]。抗酸化目的の高容量投与は、リスクと便益を慎重に評価する必要がある。

8.3.3　医療的キレーションとの棲み分け

鉛血中濃度が 45 μg dL^{-1} を超える小児や急性水銀中毒など重篤症例では DMSA や CaEDTA が第一選択となる [21]。これら薬剤は必須ミネラル排泄を伴うため医療管理下での使用が原則であり、食物繊維やペクチンの過剰摂取では代替できない。栄養介 intervention は軽度から中等度の慢性ばく露で補助的に位置づけるのが妥当である。

8.3.4　相互作用と栄養素欠乏リスク

高用量カルシウムは鉄や亜鉛の吸収を競合的に阻害し、亜鉛不足による味覚障害や免疫低下を招く可能性がある [3]。可溶性食物繊維の過剰摂取は脂溶性ビタミンの吸収率を低下させることも指摘されている [22]。介入設計では個別栄養素だけでなく、全体の栄養バランスを考慮すべきである。

8.3.5　研究ギャップ

マイクロプラスチックに対する栄養介入は動物モデルとパイロット試験が中心であり、長期ヒト RCT は存在しない [23]。POP や PFAS を対象とした介分研究も観察期間が十二週未満に限られ、長期的な臓器機能や疾患発症への影響は依然不明である。半年以上の多施設試験と、多汚染物質混合ばく露を前提とした研究デザインが今後求められる。

総じて、分子栄養学的介入は軽度から中等度の慢性曝露に対するリスク低減策として有用性が示されつつあるが、高用量投与の有害事象、個体差、薬剤キレーションとの適切な線引きを踏まえた上で応用する必要がある。

9　まとめ

本稿は、土壌・水質由来の環境汚染物質が作物・水産物を経て人体に取り込まれる現状を明らかにし、鉛・カドミウム・無機ヒ素などによる公衆衛生上の負荷が依然大きいことを示した。

汚染媒体としての土壌と水域を重金属、POP ／ PFAS、マイクロプラスチックに分類し、それぞれの移行経路とバイオマグニフィケーションを整理した。

食料生産への収量・品質低下、人体の慢性毒性、そして生態系サービスの喪失という三層構造の被害を具体例と数値で俯瞰した。

摂取抑制では低トロフィック魚の選択、重曹洗浄、競合ミネラル補給、腸管吸着繊維・プロバイオティクスなどが実務的な削減策として有効であることを示した。

毒性機序は酸化ストレス、酵素阻害、内分泌かく乱、物理的損傷の四つに整理し、体内三段階モデルによる栄養介入が機序的に妥当であることを論じた。

フェーズ I の取り込み抑制、フェーズ II の毒性遮断・修復、フェーズ III の排出促進についてヒト RCT と観察研究を統合し、食品由来汚染の軽減に中等度以上のエビデンスがある栄養素を示した。

限界として遺伝多型による個人差、高用量ビタミンの長期安全性、医療的キレーションとの棲み分けを指摘し、長期多施設試験の必要性を提言した。

本稿が読者の食物汚染回避と栄養介入設計の一助となれば幸いである。

表 3: 研究デザイン別のエビデンス信頼度と特徴

デザイン	バイアス危険度	典型的サンプル規模	EBH 階層	解説
メタ解析（良質 RCT 複数）	低	数百〜数千	レベル 1a	データ統合で推定誤差が最小。出版バイアスの検討が重要。
単一 RCT（多施設・二重盲検）	低	50〜数百	レベル 1b	無作為化と盲検で交絡を最小化。サンプル不足だと外的妥当性が限定。
観察研究（前向きコホート）	中	数百〜数千	レベル 2	介入の割付けが非無作為。交絡補正は統計処理頼み。
症例対照・横断研究	中〜高	数十〜数百	レベル 3	回想バイアスや交絡が大きい。仮説生成レベルに位置付け。
症例報告・専門家意見	高	1〜数例	レベル 4–5	個別例の詳細を示すが一般化困難。

EBH=Oxford Centre for Evidence-Based Medicine (CEBM) 2011 のエビデンス階層を簡略化 [24]。

参考文献

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global assessment of soil pollution, 2021.

[2] United Nations Environment Programme. Global chemicals outlook ii – from legacies to innovative solutions, 2019.

[3] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CON - TAM). Dietary exposure assessment to heavy metals in the european population. *EFSA Journal*, 18(5):e06190, 2020.

[4] World Health Organization. Public health impact of chemicals: Knowns and unknowns, 2021.

[5] R. Contador- Castillo et al. Mercury concentrations in pelagic and demersal fish species from the western mediterranean sea. *Environmental Pollution*, 322:121207, 2023.

[6] M. Armbruster et al. Effects of trimming and cooking on pcb residues in fish fillets. *Science of the Total Environment*, 433:84–90, 2012.

[7] A. Kabata- Pendias. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Boca Raton, 4 edition, 2011.

[8] L. He et al. Effectiveness of sodium bicarbonate washing on pesticide removal from apples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65:9744–9752, 2017.

[9] S. Khan et al. Effectiveness of household food- processing techniques in reducing pesticide residues: A systematic review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29:100747, 2022.

[10] T. Arao, S. Ishikawa, M. Murakami, K. Abe, Y. Maejima, and T. Makino. Effects of water management and silicon application on cadmium and arsenic accumulation in rice. *Environmental Science & Technology*, 43(3):1035–1040, 2009.

[11] J. H. Graziano et al. A randomized trial of calcium supplementation for childhood lead poisoning. *Pediatrics*, 113:e34–e39, 2004.

[12] N. V. Ralston and L. J. Raymond. Dietary selenium ' s protective effect against methylmercury toxicity. *Toxicology*, 410:152–162, 2018.

[13] K. Morita et al. Chlorella supplementation decreases dioxin levels in humans: A pilot study. *Nutrition Journal*, 12:83, 2013.

[14] P. A. Egner et al. Sulforaphane metabolism and excretion after consumption of broccoli sprout beverages in humans. *Cancer Prevention Research*, 14:685–696, 2021.

[15] H. Zhang et al. β-glucan–fortified diet promotes excretion of perfluoroalkyl substances: A pilot randomized controlled trial. *Food Function*, 15:1120–1128, 2024.

[16] M. J. Kim et al. N- acetylcysteine supplementation reduces oxidative stress in welders: A randomized trial. *Occupational and Environmental Medicine*, 79:39–45, 2022.

[17] Y. Wang et al. Probiotic *lactobacillus plantarum* supplementation facilitates heavy- metal detoxification: A pilot clinical study. *Nutrients*, 17:1084, 2025.

[18] K. Engström, M. Vahter, B. Nermell, G. Concha, T. Lundh, S. Skerfving, et al. Genetic polymorphisms influencing arsenic metabolism: Evidence from human biomonitoring. *Environmental Health Perspectives*, 119:817–822, 2011.

[19] M. Schürks, R. J. Glynn, P. M. Rist, C. Tzourio, and T. Kurth. Effects of vitamin e on stroke subtypes: Meta- analysis of randomised controlled trials. *BMJ*, 341:c5702, 2010.

[20] S. M. Lippman, E. A. Klein, P. J. Goodman, M. S. Lucia, I. M. Jr. Thompson, L. G. Ford, et al. Effect of selenium and vitamin e on risk of prostate cancer and other cancers. *JAMA*, 301:39–51, 2009.

[21] S. J. S. Flora and V. Pachauri. Chelation in metal intoxication. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7:2745–2788, 2010.

[22] I. Eliaz et al. Modified citrus pectin increases urinary excretion of toxic elements in healthy subjects. *Phytotherapy Research*, 20:859–864, 2006.

[23] M. Smith, D. C. Love, C. M. Rochman, and R. A. Neff. Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5:375–386, 2018.

[24] Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. Levels of evidence, march 2009 (modified 2011), 2011. Centre for Evidence-Based Medicine, University of Oxford.