

太地町における水銀と住民の健康影響に関する調査

【背景と目的】

微量のメチル水銀は自然環境中にも広く分布しており、水環境中の食物連鎖によって魚介類や海洋哺乳動物に濃縮され、一部のマグロ、カジキなどの大型肉食魚や一部のクジラ、イルカなどの海洋哺乳動物でメチル水銀濃度は高くなることが知られている。和歌山県東牟婁郡太地町からの要請を受けて、毛髪水銀濃度測定によるメチル水銀摂取状況および健康影響の評価に関する調査を実施した。

【調査の対象と方法】

I. 毛髪水銀調査

1. 太地町住民（人口 3,526 名、男 1,600 名、女 1,926 名、平成 21 年 7 月 31 日現在）を対象に、メチル水銀の摂取状況把握のために、毛髪水銀濃度^{注1)}を測定した。夏季調査（平成 21 年 6 月 26 日～8 月 9 日）では、1,017 名からインフォームド・コンセントを得た上で頭皮から約 3 センチまでの毛髪を採取し、加熱気化-原子吸光法によって総水銀濃度を分析した^{注2)}。結果の通知に際しては、7.2 ppm 以上^{注3)}の協力者に対して神経内科検診の受診を勧めた。また、7 月 16、17、22 日の特定健康診査では 150 名（男 56 名、女 94 名）から、水銀とセレン濃度を測定するために健診時の検査済み血液試料の提供を受けた。太地町では秋から冬にかけてクジラやイルカの摂取が増えるため、毛髪水銀濃度の増加が予測されることから、それを確認するために冬季調査（平成 22 年 2 月 23～25 日）を行い、夏季調査と同様に 372 名から毛髪試料を採取した（協力者数：夏季のみ 765 名、冬季のみ 120 名、重複 252 名、延べ 1,137 名）。

注1) 摂取したメチル水銀の一部は毛髪に取り込まれるため、毛髪の水銀濃度からメチル水銀の摂取量を推定することができる。魚介類等からメチル水銀を摂取した場合には、毛髪中の総水銀の約 90%がメチル水銀（残りの約 10%は体内で脱メチル化された無機水銀）として検出されるため、メチル水銀摂取の指標として総水銀濃度が使われることが多い。

注2) 採取した毛髪試料は、それぞれ 1～2 mg を正確に秤量した上で 2N 水酸化ナトリウム溶液（0.5 mL）を加えて 60°C で 30 分間加温溶解し、その一部（5～100 μ L）を用いて加熱気化-原子吸光法^{下注)}によって総水銀濃度を分析した。また、総水銀濃度が 40 ppm を超える毛髪試料については、その由来を確認するためにメチル水銀濃度も分析した。メチル水銀分析に先立ち、1～2 mg の毛髪に 2N 塩酸（0.5 mL）を添加して、95°C で 5 分間加熱した。この過程で可溶化したメチル水銀をトルエンに抽出し、さらにグルタチオン（メチル水銀との複合体を形成）を含む水溶液に逆抽出した。得られた試料溶液（10～20 μ L）を用いて、総水銀と同様に加熱気化-原子吸光法にてメチル水銀濃度を分析した。

注3) 国立水俣病総合研究センターが 2000～2004 年に、北海道（網走、苫小牧）、宮城、千葉、埼玉、新潟、長野、和歌山、鳥取、広島、福岡、熊本（熊本、水俣）、沖縄の 14 地域の住民を対象に行った調査では、男の上位 5%が 7.2 ppm 以上の範囲にあった。

2. 毛髪提供者からは、自記式アンケートによって、年齢、性別および過去 1 か月間の魚介類摂取に関する情報を得た。冬季調査においては、新規参加者からは夏季調査と同様の情報を得るとともに、平成 21 年秋から冬にかけてのクジラ・イルカの摂取状況に関して、「全くあるいはほとんど食べていない」、「少しは食べた」、「よく食べた」の 3 段階の回答を得た。

II. 神経内科検診

夏季調査の参加者で、神経内科検診の同意を得られた 182 名（男 105 名、女 77 名）を対象に、専門医による神経内科検診を行った。今回はメチル水銀による健康影響の有無を明らかにする目的で、毛髪水銀濃度が高いと考えられる 7.2ppm 以上の住民に対して重点的に行ったが、7.2 ppm 未満でも、希望者には検診を行った。

実施期間と場所：平成 21 年 7 月 9 日から 14 日：太地町多目的センター
平成 21 年 7 月 21 日から 9 月 30 日：水俣市立総合医療センター
平成 21 年 10 月 29 日から 11 月 4 日：太地町多目的センター
平成 22 年 1 月 15 日：太地町多目的センター

通常の神経内科診察に加えて二点識別覚検査^{注 4)}と上肢運動機能評価システム（ヒューマンテクノロジー研究所、熊本市）（参考資料、II-4 参照）を用いた検査を行い、太地町検診受診者における神経学的所見^{注 5)}の特徴を明らかにするために、次の 3 点を検討した。

注 4) 二点識別覚の検査は 65 名に対して実施した。

注 5) 以後の解析では、便宜上、腱反射所見、感覚所見、それ以外を神経所見と分類する。

1. 太地町検診受診者でみられた神経所見、腱反射所見、感覚所見の出現頻度を評価するために、年齢構成の違いはあるが、今回入手できた水俣病非発生地区の漁村、鹿児島県大島郡 K 町（以下、鹿児島県 K 町という）の住民の神経内科検診データ（平成 15 年度環境省委託業務結果報告書：水俣病発生地域住民の健康状態に関する研究—水俣病非発生地域住民の健康状態—第 3 報—）と統計学的解析による比較検討を行った。

【解析方法】Fisher の直接確率計算法による頻度の検定を行ったほか、一部は χ 自乗法で検定した。

2. 太地町検診受診者でみられた神経所見、腱反射所見、感覚所見（振動覚、二点識別覚）と毛髪水銀濃度の相関について統計学的解析を行った。

【解析方法】① 神経所見、腱反射所見に関して、年齢、性別、毛髪水銀濃度を独立変数とするロジスティック回帰分析で検討した。また、WHO は IPCS 環境保健クライテリア（1990）で「毛髪水銀 50~125 ppm で、感受性の高い 5% に神経障害の初期症状が表れる」としているため、50 ppm を神経症状が表れる可能性のあるメチル水銀摂取量の下限值として、毛髪水銀濃度 50 ppm で区分した 2 群間の比較についても同様の方法で検討した。② 振動覚、二点識別覚に関しては、①と同様の検討を重回帰分析で行った。

3. 水俣病患者で比較的高頻度にみられる振戦（参考資料、II-1 参照）について、上肢運動機能評価システムで解析した検査結果を用いて検討した。評価は、熊本大学が行った水俣病発生地域である鹿児島県出水市の海沿いの潟地区住民、水俣病非発生地区の宮崎県の青島地区住民および振戦を呈する代表的な疾患である脊髄小脳変性症患者、パーキンソン病患者のデータとの比較で行った。また、太地町検診受診者でみられた所見と毛髪水銀濃度の相関について統計学的解析を行った。

【解析方法】① 各地域の比較は、Fisher の直接確率計算法による頻度の検定を行ったほか、一部は χ 自乗法で

検定した。② 振戦を呈する代表的な疾患との比較は、異常値を示した被験者の割合が30%以上の項目で比較した。③ 上肢運動機能評価システムの各項目について、上記 2. の①と同様の方法で解析を行った。

【結果と考察】

I. 毛髪水銀調査

1. 夏季調査

1) 参加者数

平成 21 年 6 月 26 日～8 月 9 日に行った夏季調査における毛髪提供者（参加者）の性・年齢別および太地町の人口に対する割合を表 1 に、年齢別参加者数と人口の分布を図 1 に示す。表 1 に示すように、参加者は住民の 28.8%に相当し、性年齢階級別では 60～69 歳の男 41.2%、同女 44.4%がそれぞれ最も高かったほか（60～69 歳の合計 42.9%）、男の 60 歳代から 70 歳代、女の 30 歳代から 70 歳代が 30%を超えていた。一方、男女とも 10 歳未満および 90 歳代以上は 10%未満であり、参加率は低かった。

表 1. 夏季調査における性・年齢階級別にみた太地町の人口と調査への参加状況

性		年齢階級（歳）											計
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
男	人口	108	164	121	154	153	246	255	254	130	15	0	1,600
	参加者	10	24	21	35	44	72	105	99	36	1		447
	%	9.3	14.6	17.4	22.7	28.8	29.3	41.2	39.0	27.7	6.7		27.9
女	人口	86	174	118	171	196	254	297	327	234	65	4	1,926
	参加者	3	22	15	53	78	96	132	126	44	1	0	570
	%	3.5	12.6	12.7	31.0	39.8	37.8	44.4	38.5	18.8	1.5	0	29.6
計	人口	194	338	239	325	349	500	552	581	364	80	4	3,526
	参加者	13	46	36	88	122	168	237	225	80	2	0	1,017
	%	6.7	13.6	15.1	27.1	35.0	33.6	42.9	38.7	22.0	2.5	0	28.8

人口は平成 21 年 7 月 31 日現在

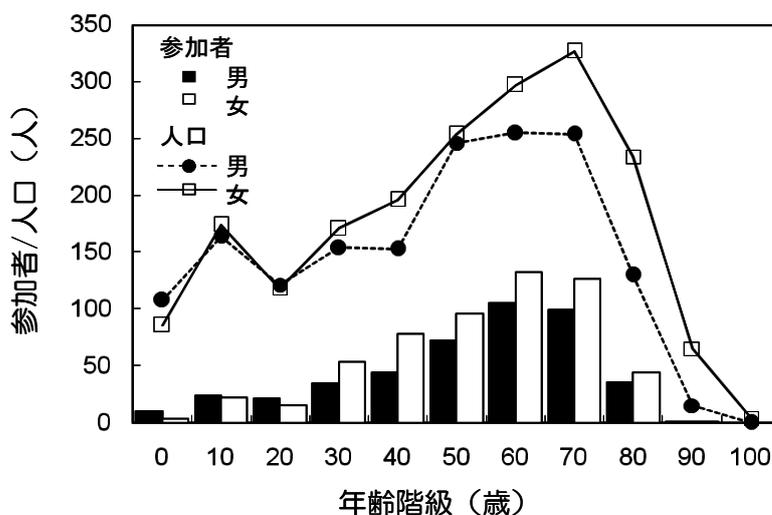


図 1. 夏季調査における年齢別の参加者数と人口
棒グラフは参加者数を、折れ線は人口を示す。

2) 毛髪水銀濃度の分布

夏季調査における男女別の毛髪水銀濃度の分布を図 2 に、毛髪提供者数、平均年齢、および毛髪水銀濃度の幾何平均値ならびに最小／最大値を表 2 に、国内 14 地域と比較して示した。図 2 に示すように、夏季調査の毛髪水銀濃度別の分布は、高濃度側に裾が広がる対数正規分布を示し、女に比べて男の方が高濃度側にシフトしていた。

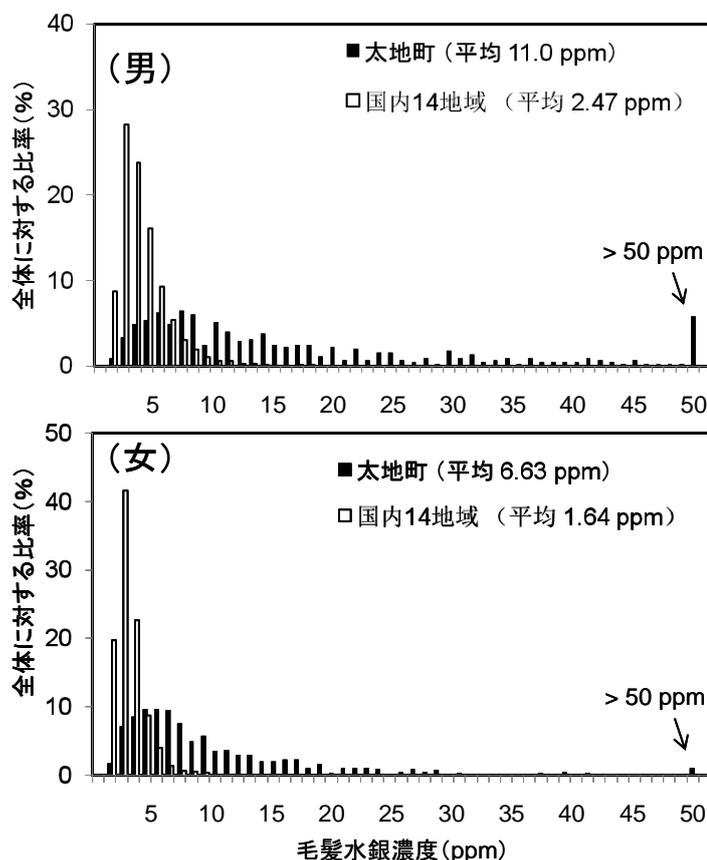


図 2. 夏季調査における太地町と国内 14 地域における毛髪水銀濃度の分布

表 2. 夏季調査における毛髪提供者数と毛髪水銀濃度

地域	性別	提供者 (人)	平均年齢 (歳)	幾何平均値 (ppm)	最小値 (ppm)	最大値 (ppm)
太地町	男	447	56.6	11.0	0.74	139
	女	570	57.7	6.63	0.61	79.9
	(女 15-49 歳) *	(147)	(39.3)	(4.70)	(0.61)	(42.7)
国内 14 地域	男	5,623	38.1	2.47	0.10	40.6
	女	3,470	32.7	1.64	0.01	25.8
	(女 15-49 歳) *	(1,280)	(35.1)	(1.42)	(0.02)	(12.5)

*女 15-49 歳は出生統計対象年齢群に相当

毛髪水銀濃度の分布について代表的ないくつかのパーセンタイル値を表 3 に示す。これによると、毛髪水銀濃度分布の両側各 5%を除く集団の 90%は、太地町では男が 2.25 ppm～51.7 ppm、女が 1.67 ppm～27.1 ppm の範囲にあったのに対し、国内 14 地域では男が 0.82 ppm～7.18 ppm、女

が 0.56 ppm～4.50 ppm の範囲であった。また中央値（男 11.0 ppm、女 6.46 ppm）は、それぞれの幾何平均値（男 11.0 ppm、女 6.63 ppm）とほぼ一致した。

表 3. 夏季調査における各パーセンタイルの毛髪水銀濃度（ppm）

地域	性別	標本数	パーセンタイル						
			両側 10 th	20 th	50 th	中央値	50 th	20 th	10 th
			片側 5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th
太地町	男	447	2.25	3.14	5.66	11.0	21.8	39.8	51.7
	女	570	1.67	2.15	3.68	6.46	12.1	20.8	27.1
	(女 15-49 歳)*	(147)	(1.36)	(1.76)	(2.65)	(4.56)	(7.76)	(12.8)	(16.1)
国内	男	5,623	0.82	1.05	1.59	2.49	3.83	5.66	7.18
14 地域	女	3,470	0.56	0.75	1.13	1.68	2.51	3.59	4.50
	(女 15-49 歳)*	(1,280)	(0.45)	(0.64)	(0.98)	(1.49)	(2.19)	(3.06)	(3.93)

*女 15-49 歳は出生統計対象年齢群に相当

3) 耐容摂取量および最大無作用量との比較

摂取したメチル水銀は一定の比率で毛髪に取り込まれるため、毛髪の水銀濃度と体重からメチル水銀の摂取量を推定することができる。表 4 には、メチル水銀についての耐容摂取量^{注 6)} ならびにその算定の基礎となった最大無作用量に相当する毛髪水銀レベルについて、これらを超過するものの集団中の頻度を示した。厚生省（1973 年）の一般集団における耐容摂取量（3.4 μg/kg/週）を超えてメチル水銀を摂取していると推定される対象者（毛髪水銀濃度>5.0 ppm）の頻度は、太地町では男 79.2%、女 63.1%であったのに対し、全国 14 地域では男 13.8%、女 3.2%であった。神経症状が表れる毛髪水銀濃度の下限値とされる 50 ppm^{注 7)} を超えた者の頻度は、太地町の男が 5.6%（26 名）、同女が 0.9%（6 名）であったが、国内 14 地域では認められなかった。人口動態統計では女の 15～49 歳の年齢群は出生統計の対象年齢（妊娠可能年齢）とされており、今回の夏季調査では、147 名が該当する。この年齢群で内閣府食品安全委員会の妊娠時週間耐容摂取量（2.0 μg/kg/週）^{注 8)} を超えてメチル水銀を摂取していると推定される者（毛髪水銀濃度>2.75 ppm）の頻度は、太地町で 73.5%（108 名）、国内 14 地域で 14.7%であった。

注 6) 耐容摂取量は継続的に摂取した際に、健康に悪影響を及ぼすおそれがないと推定される摂取量をいい、最大無作用量に不確実係数（安全係数）を考慮して算定された。

注 7) WHO は、IPCS 環境保健クライテリア（1990）で「毛髪水銀濃度 50～125 ppm で、感受性の高い 5% に神経障害の初期症状が表れる」としており、ここでは 50 ppm を神経症状が現れる可能性のあるメチル水銀摂取量の下限値とした。

注 8) 胎児影響を考慮した母親の毛髪水銀濃度について、セイシエルの小児発達研究における最大無作用量（12 ppm）とフェロー諸島の前向き研究の最小影響（10 ppm）を考慮して、それらの平均値 11 ppm が算出されている。妊娠時週間耐容摂取量（2.0 μg/kg/週）は毛髪水銀濃度 11 ppm に相当するメチル水銀摂取量を不確実係数 4 で割ったもの。妊娠中の母親の毛髪水銀濃度が 11 ppm を超えた場合、子どもの成長

にわずかな影響（音を聞いた場合の反応が 1/1000 秒程度遅れるなど）を及ぼす可能性が否定できないとされている。

表 4. 夏季調査における耐容摂取量および最大無作用量に相当する毛髪水銀濃度ごとの超過者頻度（％）

地域	性	標本数	毛髪水銀濃度 (ppm) *				最大値 (ppm)
			2.75	5	11	50	
太地町	男	447	91.6	79.2	50.0	5.6	139
	女	570	83.8	63.1	28.2	0.9	79.9
	(女 15-49 歳)**	(147)	(73.5)	(45.6)	(15.6)	(0.0)	(42.7)
国内	男	5,623	44.2	13.8	1.3	0.0	40.6
14 地域	女	3,470	20.6	3.2	0.2	0.0	25.8
	(女 15-49 歳)**	(1,280)	(14.7)	(1.4)	(0.1)	(0.0)	(12.5)

* 【耐容摂取量および最大無作用量に相当する毛髪水銀濃度】

2.75 ppm：妊娠時週間耐容摂取量（2.0 μg/kg/週、内閣府食品安全委員会、2005 年）に相当

5 ppm：成人における週間耐容摂取量（3.4 μg/kg/週、厚生省、1973 年）に相当

11 ppm：胎児影響の最大無作用量（内閣府食品安全委員会、2005 年）

50 ppm：成人における神経症状発現レベルの下限値（WHO、1990 年）

** 女 15-49 歳は出生統計対象年齢群に相当

4) 年齢階級別にみた毛髪水銀濃度

年齢階級別の毛髪水銀濃度の分布を図 3 に示した（散布図を参考資料、図 I-1 に示す）。10～20 歳代で最も低く、年齢とともに上昇した。このような毛髪水銀濃度の年齢依存性は、今回の太地町調査結果のみでなく、国内 14 地域の調査などでも、一般的に観察されている。年齢に依存した変化は男でより顕著であるが、男女とも 70 歳代が最も高くなった。20 歳代以降で男が女より高い傾向があるが、統計学的に有意の性差が認められたのは 40 歳代から 80 歳代までの年代であった（参考資料、図 I-2 参照）。小児の毛髪水銀濃度が高くなる傾向は国内 14 地域の調査でも認められており、一般に体重あたりの魚介類摂取量が多いためと考えられている。

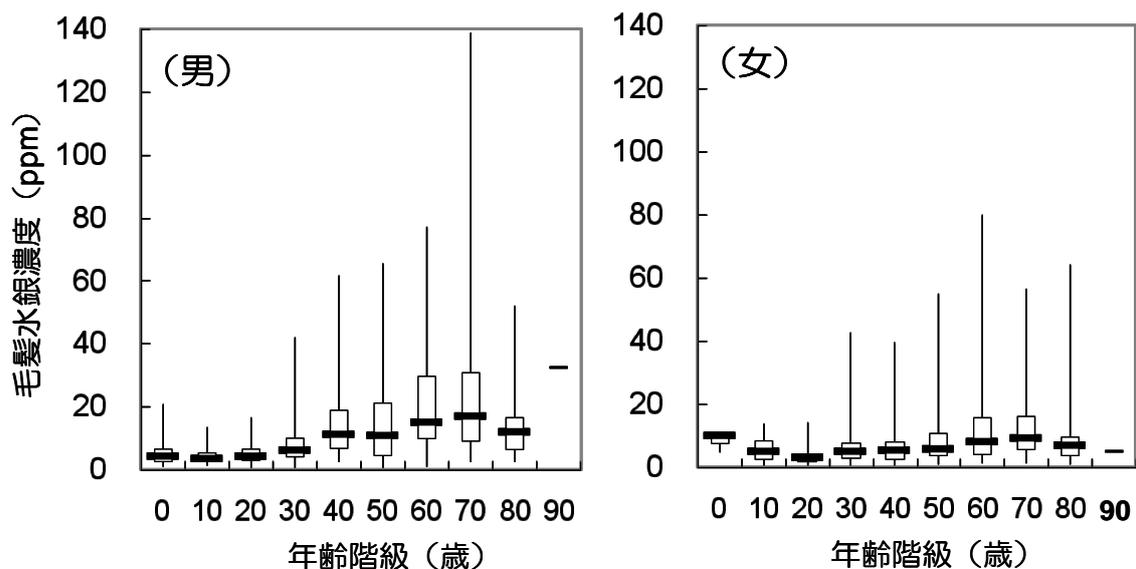


図 3. 夏季調査における年齢階級別にみた毛髪水銀濃度

各年代の横線はそれぞれの中央値を、ボックスの上端と下端はそれぞれ、75 および 25 パーセントイル値を示す。縦線の上端と下端はそれぞれ、各年代の最大値と最小値を示す。

5) 魚介類摂取傾向との関係

毛髪水銀濃度と魚介類（以下、魚介類にはクジラ類を含むものとする）の摂取傾向（魚種、頻度、摂取量）についていくつかの検討を行った。本調査においては、魚介類の摂取傾向は自記式の魚介類別摂取頻度アンケート（FFQ）^{注9)}によって調査した。

注9) FFQは様々な魚種について一般的な摂取傾向を把握できるという利点を有しており、魚種依存性の強いメチル水銀摂取量の推定には最もよく使われる食事調査法である。一方、実測式や記録式などの食事調査はFFQに比べて精度では優れるものの、実施期間が短期間に限定されるために魚種ごとの摂取状況の偶然による影響を強く受け、メチル水銀摂取量の推定における有用性は限定的である。

① 魚介類全般

毛髪水銀濃度は魚介類摂取傾向との関連が認められ、夏季調査では図4（対数変換グラフは参考資料、図I-3参照）に示すように、魚介類の摂取頻度が高いほど毛髪水銀濃度も高くなる有意の傾向を示した（Jonckheereの傾向度検定、 $p < 0.05$ ）。毛髪水銀濃度の年齢による変化（図3）のうち、成人についての年齢依存性は一日あたりの魚介類摂取量^{注10)}のパターン（図5、対数変換グラフは参考資料、図I-4参照）と比較的よく一致した。

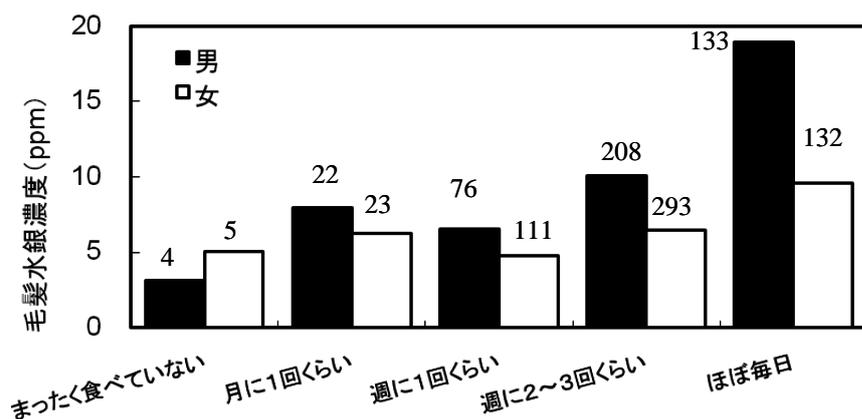


図4. 夏季調査における魚介類全般の摂取頻度別にみた毛髪水銀濃度の幾何平均値
柱の上の数字はそれぞれの群の人数を示す。

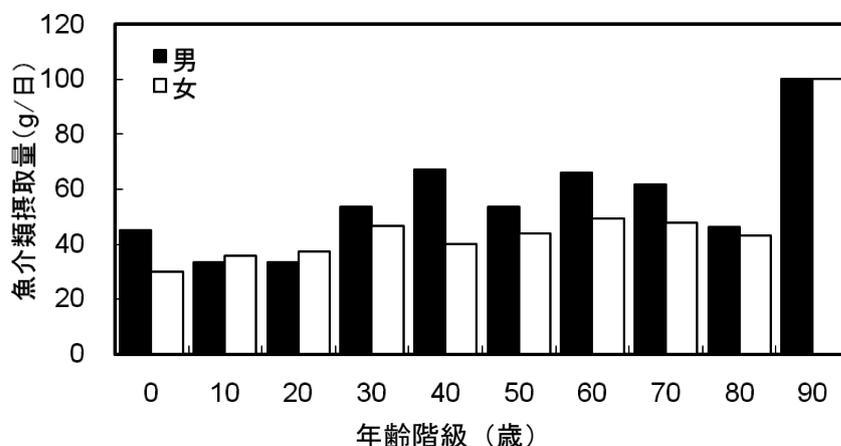


図5. 夏季調査における年齢階層別にみた魚介類摂取量の平均値

注 10) 魚介類の摂取量は次の方法で推定した。摂取頻度が「月に 1 回」と答えた人は 30 日に 1 回、「週に 1 回」は 7 日に 1 回、「週に 2~3 回」は 3 日に 1 回、「ほぼ毎日」は 1 日 1 回摂取したとみなし、摂取頻度と 1 回に食べる魚介類の量（サンマ 1 匹は 100 グラム、マグロの刺身 3 切れは 50 グラムと例示）から 1 日あたりの摂取量を求めた。

《水銀摂取源の確認》

水銀の摂取源が魚介類である場合、一般に毛髪に取り込まれる水銀の 90% 近くはメチル水銀として存在する。夏季調査で採取した毛髪試料では、メチル水銀の比率が $89 \pm 8\%$ （総水銀濃度 40 ppm 以上の 39 検体について測定）であったことから、毛髪中の水銀が魚介類摂取に由来することが推定された。

② クジラ・イルカの摂取頻度との関係

表 5 に夏季調査における、クジラ・イルカの摂取状況と毛髪水銀濃度の関連性を示した。クジラ・イルカを「過去 1 か月間に食べていない」群の毛髪水銀濃度、男 8.30 ppm、女 5.64 ppm と比較して、「過去 1 か月間に食べた」群では、男 15.2 ppm、女 9.75 ppm と毛髪水銀濃度が有意に高くなった ($p < 0.001$)。このほか、クジラ・イルカおよびマグロ・カジキの摂取頻度には有意な年齢依存性はみられなかった。また、一日あたりのクジラ・イルカの摂取量と毛髪水銀濃度の間に相関関係が認められた。

表 5. 夏季調査における「クジラおよびイルカ」の摂取と毛髪水銀濃度

性別	最近 1 か月間の クジラ・イルカの摂取	人数 (人)	平均年齢 (歳)	毛髪水銀濃度(ppm)		
				幾何平均値	最小値	最大値
男	食べていない	237	54.6	8.30	0.74	72.8
	食べた	210	58.9	15.2**	1.13	139
	計	447	56.6	11.0	0.74	139
女	食べていない	406	57.9	5.64	0.61	58.5
	食べた	164	57.1	9.75**	0.80	79.8
	計	570	57.7	6.63	0.61	79.8

** 「食べていない」グループとの有意差 ($p < 0.001$ 、t-検定) を示す。

③ 消費の多い魚介類

表 6 に本調査の毛髪提供者が「過去 1 か月間に食べた」と思う魚種を示す。質問方法が異なるため単純な比較はできないが、参考として国内 14 地域の調査で「比較的よく食べる」魚介類を示した。クジラ・イルカは太地町では過去 1 か月間に 36.8% が食べたと回答しているのに対して、国内 14 地域ではクジラを「よく食べる」は 1% 未満であった。また、マグロ・カジキについては太地町 56.3%、国内 14 地域平均 47.9% で太地町がやや高いものの大きな差はなかった。

表 6. 夏季調査における太地町および国内 14 地域で消費される魚介類の順位

順位	太地町		国内 14 地域	
	魚種	%	魚種	%
1	アジ	64.3	サケ	62.0
2	マグロ・カジキ	56.3	サンマ	52.3
3	イカ	56.0	サバ	50.7
4	サケ	54.6	マグロ	47.9
5	煉製品	50.4	イカ	47.0
6	エビ	48.1	煉製品	44.6
7	シラス	47.0	アジ	42.8
8	貝類	45.7	エビ	40.4
9	サバ	44.3	タコ	30.6
10	イワシ	44.3	イワシ	29.0
11	サンマ	44.1	カレイ	27.9
12	クジラ・イルカ	36.8	貝類	24.8
13	ウナギ	34.8	カツオ	20.4
14	カツオ	33.1	ブリ	19.3
15	タコ	30.5	ウナギ	17.4
16	ツナ缶	26.5	カニ	15.4
17	ムツ	25.7	タイ	13.9
18	ヨラリ	20.3	ヒラメ	7.5
19	ブリ	13.7	ホッケ	5.3
20	カニ	12.0	タチウオ	4.2
21	シシャモ	9.3	アユ	2.5
22	アユ	8.6	コイ	0.9
23	タイ	8.0	クジラ	0.7
24	カレイ	6.0		
25	キンメダイ	5.7	その他魚種は 0.5%以下	
26	ホッケ	5.7		
27	サメ	2.2		

太地町は「過去 1 か月間に食べたと思う」魚介類を、国内 14 地域は「よく食べる」魚介類を示す。

6) 毛髪水銀濃度と血液中水銀濃度および血液中セレン濃度

血液の水銀濃度は毛髪と同様にメチル水銀摂取量の推定に使われ、毛髪中の水銀濃度は血液中の平均 250 倍である。夏季調査で得られた 150 名（男 56 名、女 94 名）の血液中水銀濃度の幾何平均値は、男 46.0 ppb、女 26.2 ppb であった。毛髪水銀調査と重複した 132 名（男 52 名、女 80 名）については毛髪水銀濃度と血液中水銀濃度の間に高い相関がみられ、これまでの知見と矛盾しなかった。

また自然界のクジラや魚介類はセレンの主要な摂取源でもあるため、太地町住民はセレンの摂取量も高いことが予想された。また、セレンは生体内で水銀と相互作用することも示唆されており、水銀の生体影響を考察する上でセレンの摂取状況は重要な情報と考えられる。太地町住民の血液中のセレン濃度は日本人の一般的な値（170 ppb～200 ppb）と比較するとやや高い値を示したが、水銀濃度とは異なって有意の男女差は認められなかった（幾何平均値は、男 219 ppb、女 207 ppb）。しかし、血液中水銀濃度とは有意の相関（ $r = 0.527$ ）を示すことから、セレンも水銀と同様