

北洋産底魚(ツノガレイ、マダラ、スケトウ、 およびキチジ)の水銀およびセレンレベル^{※1}

武田 道夫・上田 正^{※2}・片岡 昭吉^{※3}・乾 栄一^{※4}

The Level of Mercury and Selenium in Some Demersal Fishes (Alaska Plaice, Alaska Pollack, Pacific Cod, and Thornhead) from Bering Sea

Michio Takeda, Tadashi Ueda
Akiyoshi Kataoka, and Eiichi Inui

The levels of mercury and selenium in the muscle, liver, and gonad of Alaska plaice (*Pleuronectes putlasi*), Alaska pollack (*Theragra chalcogramma*), Pacific cod (*Gadus morhua macrocephalus*) and thornhead (idiot; *Sebastes macrochir*) trawled from Bering Sea were determined by flameless atomic absorption- and fluoro-spectrophotometry, respectively.

Total mercury content (T-Hg) in the muscle of each species correlated significantly with body length. The mean T-Hg in the muscle were 0.05 ± 0.01 for Alaska plaice, 0.03 ± 0.02 for Alaska pollack, $0.03 \pm 0.00_5$ for Pacific cod, and $0.25 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ for thornhead.

Methyl mercury content (MeHg) determined by gas-liquid chromatography correlated significantly with T-Hg in the muscle for each species. The mean ratio of MeHg to T-Hg were more than 75% in the muscle of Alaska plaice, Alaska pollack, and Pacific cod, while that for thornhead was not more than about 35%.

The mean T-Hg of liver were 0.06 ± 0.01 for Alaska plaice, 0.02 ± 0.01 for Alaska pollack and $0.01 \pm 0.00_5 \mu\text{g g}^{-1}$ for Pacific cod. The mean T-Hg of gonad were 0.03 ± 0.02 for Alaska plaice, $0.02 \pm 0.00_5$ for Alaska pollack, and $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ for Pacific cod.

The mean selenium level of muscle were 0.64 ± 0.23 for Alaska plaice, 0.20 ± 0.05 for Alaska pollack, 0.25 ± 0.06 for Pacific cod, and $0.34 \pm 0.04 \mu\text{g g}^{-1}$ for thornhead. The mean Se/Hg (molar ratio) of muscle were 37 ± 19 for Alaska plaice, 19 ± 8 for Alaska pollack, 26 ± 6 for pacific cod, and 4 ± 0.4 for thornhead. The mean selenium content of liver of Alaska plaice was $3.51 \pm 1.11 \mu\text{g g}^{-1}$. The gonads of Alaska plaice and Alaska pollack contained 0.83 ± 0.40 and $0.33 \mu\text{g}$ of selenium g^{-1} on the average, respectively.

※1 一部は昭和54年10月19日、日本化学会第40回秋季合同大会(於九州大学)にて発表。

※2 水産大学校製造学科

※3 水産大学校練習船辨洋丸

※4 農林水産省西海区水産研究所調査船陽光丸

1. 緒 言

海産生物の水銀レベルは、その生物の成長度、食物連鎖上の位置および生息海域と関係があると考えられている¹⁾。また、外洋性大形魚に蓄積されている水銀が、天然由来である限り、セレンを伴って吸収蓄積されるので、その毒性は低いと推察されている²⁾。しかし、海産生物が水銀を蓄積する機構、生物種によって含有する水銀形態およびセレンとの相対比が大きく相違する理由については、まだ、不明である。

先に著者らは、含有水銀レベルが高いグループのマグロ類、カジキ類およびサメ類等の水銀とセレンに関する分析結果を報告してきた¹⁾。今回は、食物連鎖上の位置がプランクトンフィーダーに近く、含有水銀レベルが低いと考えられる北洋(ベーリング海)産底魚のツノガレイ (*Pleuronectes pullasi*)³⁾、スケトウ (*Theragra chalcogramma*) およびマダラ (*Gadus morhua macrocephalus*) について、水銀とセレンの体内分布を検討した。また、同一海域に生息する底魚でありながら、その成長度に対して、比較的高い水銀レベルを示すメスケと同類のキチジ (*Sebastolobus macrochir*) の筋肉についての分析結果も併せて報告する⁴⁾。

2. 実験方法

2・1 試料魚

1977年6月、水産大学校練習船耕洋丸がアリューシャン海域で漁獲したツノガレイ30尾、スケトウ16尾およびマダラ16尾を試料とした。試料魚の漁獲位置を Fig. 1 に、体長および体重の範囲とそれらの平均値を Table 1 に示した。

試料魚は船内で凍結した後、 -20°C で保蔵した。この凍結試料魚を解凍後、普通肉、肝臓および性腺を分取し、細碎して分析に供した。

また、キチジについては、アラスカ産の無頭、無内臓の凍結商品10尾を試料としたため、その生物測定値は不明である。

2・2 総水銀定量法⁵⁾

細碎試料を、五酸化バナジウムを酸化助剤として、硫酸-硝酸混液によって加熱分解した。この分解液中の水銀量を還元気化原子吸光法によって求めた。その水銀量を湿潤試料1g当たりの μg として計算し、その値を総水銀量(以下T-Hgと略す)とした。各試料について測

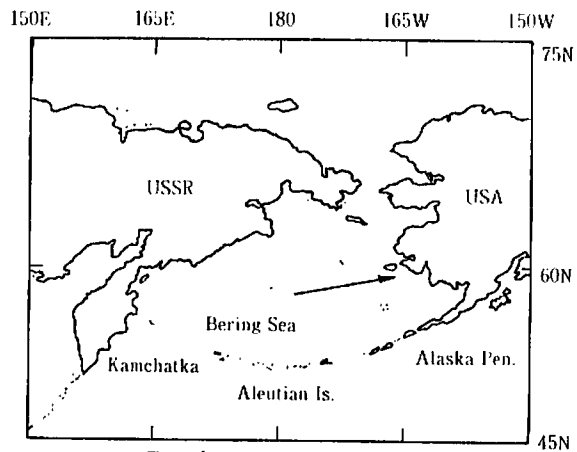


Fig. 1. Location trawled

Table 1. Species, size, and sex of specimens from Bering Sea

Species	No. of specimen	Body weight (g)		Body length (cm)		Sex	
		Mean	Range	Mean	Range	Male	Female
Alaska plaice <i>Pleuronectes pallasi</i>	30	333.8	134-575	30.4	23.0-37.0	19	11
Alaska pollack <i>Theragra chalcogramma</i>	16	1095.5	165-3400	51.4	30.5-80.0		
Pacific cod <i>Cadus morhua macrocephalus</i>	16	557.7	508-636	36.9	34.0-38.0		
Thornhead (idiot) <i>Sebastolus macrochir</i>	10	(dressed specimens)					

定を5回繰り返し、その平均値を求めた。

2・3 メチル水銀定量法⁶⁾

細砕試料を塩酸酸性ベンゼンで処理して、抽出した塩化メチル水銀をシステイン溶液でクリーンアップし、ベンゼン液相へ移行した。このベンゼン溶液中のメチル水銀量を、 α -クロロナフタレンを内部標準物質とするガスクロマトグラフィーにより求めた。同一試料について、3-6回、測定を繰り返し、その測定値の差が $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ 以上の場合には、さらに測定を繰り返した。分析結果は湿潤試料1g当たりの塩化メチル水銀態水銀重量 (μg)として表した(以下この値を MeHg と略記する)。

2・4 セレン定量法⁷⁾

細砕試料を硝酸-過塩素酸-硫酸系分解剤で加熱処理した。分解液中のセレン酸を過酸化水素水で還元した後、2・3-ジアミノナフタレンを蛍光発色剤とする蛍光法により定量した。測定は、同一試料について5-6回繰り返し、その測定値の変動係数が30%以下の場合の値を採用して、その平均値を求めた。湿潤試料1g当たりのセレン重量 (μg)として表した。

3. 結果と考察

3・1 ツノガレイの水銀量

3・1・1 筋肉の T-Hg :

試料30検体の筋肉の T-Hg の分布範囲は $0.02-0.07$ 、平均値は $0.05 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ であった。試料魚の体長と筋肉 T-Hg との関係を、Fig. 2 に示した。すなわち、両者の対数値間には、Table 2 に示したように、相関係

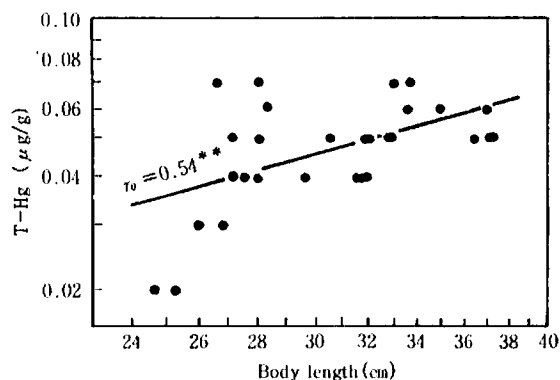


Fig. 2. Correlation between total mercury level in muscle and body length of Alaska plaice

Table 2. Statistical analyses of mercury and selenium level in some demersal fishes from Bering Sea
(regression equation : $y = mx + b$ or $\log y = m \log x + b$)

Species	x	y	r_s
Alaska plaice	body length (log)	T-Hg of muscle (log)	0.54**
	T-Hg of muscle	MeHg of muscle	0.76**
	T-Hg of muscle	T-Hg of liver	0.40*
	body length (log)	T-Hg of liver (log)	0.31
	body length (log)	Se of muscle (log)	0.20
	T-Hg of muscle	Se of muscle	0.20
	Se of muscle	Se of liver	0.43
	T-Hg of liver	Se of liver	0.01
Alaska pollack	body length (log)	T-Hg of muscle (log)	0.51*
	body length (log)	T-Hg of liver (log)	-0.30
	T-Hg of muscle	MeHg of muscle	0.84**
	T-Hg of muscle	T-Hg of liver	0.30
	body length (log)	Se of muscle (log)	-0.29
	T-Hg of muscle	Se of muscle	-0.33
Pacific cod	body length (log)	T-Hg of muscle (log)	-0.10
	T-Hg of muscle	MeHg of muscle	0.78**
	T-Hg of muscle	T-Hg of liver	0.58
	T-Hg of muscle	Se of muscle	0.41
Thornhead	T-Hg of muscle	MeHg of muscle	0.78**
	T-Hg of muscle	MeHg/T-Hg	0.74*
	T-Hg of muscle	Se of muscle	0.64 [†]

** Significant at 0.01 level, * significant at 0.05 level, [†] significant at 0.1 level.

T-Hg : Total mercury, MeHg : methyl mercury, Se : selenium.

r_s : Correlation coefficient.

数 $r_s = 0.54 [> r (28, 0.01)]$ で、一次の相関関係が、有意水準 0.01 で認められる。ツノガレイ筋肉の T-Hg は、その成長度と共に増加し、他の多くの魚種と同一傾向を示した。また、筋肉 T-Hg を性別に分けての平均値を求めると、Table 3 に示したように、雄 (19尾) 0.05 ± 0.01 、雌 (11尾) $0.05 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ となり、性別による有意差は認められなかった。

3・1・2 筋肉の MeHg : 試料魚 27 尾の MeHg は、Table 3 に示したように、分布範囲 0.01-0.07、平均値 $0.04 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ であった。また、体長と MeHg のそれぞれの対数値の間には、 $r_s = 0.47 [> r (25, 0.05)]$ で、有意の一次相関が認められた。

筋肉における MeHg の性別平均値の間には、Table 3 に示したように、0.05 水準で有意差が認められ、雄の方が、やや高い傾向にあると言える。

筋肉の T-Hg と MeHg との関係を図 3 および Table 2 に示した。すなわち、両者の間には、 $r_s = 0.76 [> r (25, 0.01)]$ で、有意水準 0.01 の相関が認められた。すなわち、ツノガレイ筋肉中の水銀は、メチル水銀として蓄積されていると言える。また、MeHg/T-Hg の平均値は、Table 3 に示したように、雄 (17尾) 79 ± 22 、雌 (10尾) $68 \pm 13\%$ であるが、t-検定の

Table 3. T-Hg, MeHg, MeHg/T-Hg, Selenium and Se/Hg of muscle, liver and gonad of Alaska plaice

Organ	Determination	Sex	n	Range	Mean	t_0 and DF
Muscle	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	sum	30	0.02–0.07	0.05 ± 0.01	0 (28)
		male	19	0.02–0.07	0.05 ± 0.01	
		female	11	0.03–0.07	0.05 ± 0.01	
	MeHg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	sum	27	0.01–0.07	0.04 ± 0.01	2.239 (25) *
		male	17	0.01–0.07	0.04 ± 0.02	
		female	10	0.02–0.06	0.03 ± 0.01	
	MeHg/T-Hg (%)	sum	27	40–100	75 ± 20	0.003 (25)
		male	17	40–100	79 ± 22	
		female	10	43–86	68 ± 13	
	Selenium ($\mu\text{g g}^{-1}$)	sum	27	0.39–1.25	0.64 ± 0.23	0.125 (25)
		male	17	0.41–1.25	0.67 ± 0.25	
		female	10	0.39–0.97	0.59 ± 0.18	
Se/Hg (molar ratio)	sum	27	19–107	37 ± 19	0.002 (25)	
	male	17	21–107	40 ± 22		
	female	10	19–57	32 ± 12		
Liver	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	sum	28	0.02–0.14	0.06 ± 0.01	2.043 (25) *
		male	17	0.03–0.14	0.06 ± 0.03	
		female	11	0.02–0.09	0.05 ± 0.02	
	Selenium ($\mu\text{g g}^{-1}$)	sum	13	1.85–5.83	3.51 ± 1.11	0.108 (11)
		male	7	2.23–5.83	3.89 ± 1.17	
		female	6	1.85–4.35	3.06 ± 0.94	
	Se/Hg (molar ratio)	sum	11	41–326	169 ± 86	-0.003 (9)
		male	5	41–276	120 ± 58	
		female	6	94–326	211 ± 86	
Gonad	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	sum	11	0.01–0.07	0.03 ± 0.02	
		male	3	0.02–0.07	0.05 ± 0.03	
		female	8	0.01–0.06	0.03 ± 0.01	
	Selenium ($\mu\text{g g}^{-1}$)	sum	11	0.33–1.57	0.83 ± 0.40	2.464 (9) *
		male	4	1.05–1.57	1.28 ± 0.25	
		female	7	0.33–0.79	0.59 ± 0.19	
	Se/Hg (molar ratio)	sum	8	38–84	56 ± 19	
		male	1	38	38	
		female	7	38–84	58 ± 19	

t_0 : T for testing the difference in the mean value.

Code address : DF = degree of freedom, T-Hg : total mercury content, MeHg : methyl mercury content.

* : Significantly different between the sexes at 0.05 level.

結果では、性別による有意差は認められなかった。全試料の MeHg/T-Hg の平均値は $75 \pm 20\%$ であるので、ツノガレイ筋肉中の水銀は大部分がメチル水銀態として存在し、他の多くの魚種と同じような蓄積傾向を示していると推論できる。

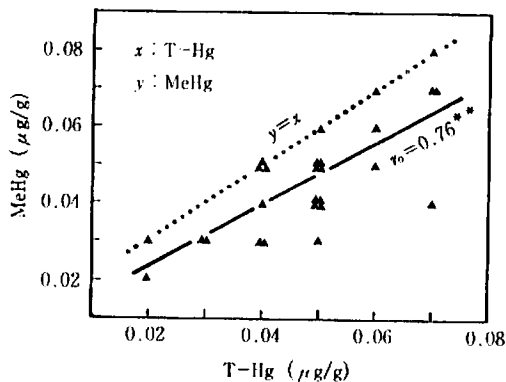


Fig. 3. Correlation between total mercury and methyl mercury in muscle of Alaska plaice

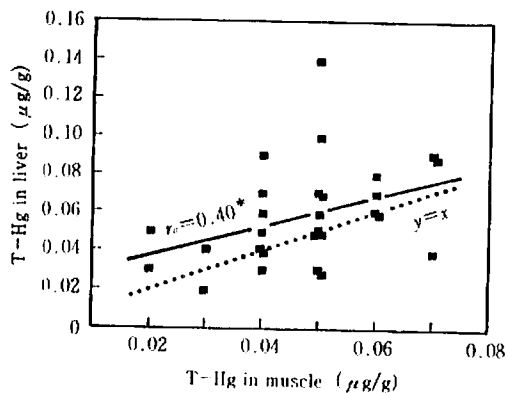


Fig. 4. Correlation between total mercury in muscle and that in liver of Alaska plaice

3・1・3 肝臓のT-Hg：試料魚28尾の肝臓のT-Hgは、その分布範囲0.02-0.14、平均値 $0.06 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ であった。これらの値を筋肉のそれと比較すると、それぞれの下限值は $0.02 \mu\text{g}$ と同一レベルであるが、上限値は筋肉が0.07に対し、肝臓のそれは2倍高い $0.14 \mu\text{g g}^{-1}$ であった。そこで、その両者の関係をFig. 4に示した。すなわち、筋肉と肝臓のT-Hg間には、 $r_s = 0.40 [> r (26, 0.05)]$ の有意の一次相関が認められた。しかし、筋肉と肝臓のそれぞれのT-Hgを比較すると、肝臓の値の方が高いものが16試料、相等しいものが6試料、筋肉の方が高いものが5試料あった。この分布状態について χ^2 -検定した結果、 $\chi^2_0 > \chi (1, 0.05)$ となり、有意水準0.05で肝臓のT-Hgの方が筋肉のそれより高いと推測できる。先に報告したマグロ類¹⁾および養殖ハマチ⁸⁾では、いずれも筋肉の水銀レベルの方が、肝臓のそれより約2倍または以上高かった。このことは、ツノガレイが水銀に対して特異な生理機能を持つことを示唆しているのかも知れない。

雄17尾、雌11尾の肝臓のT-Hgの性別平均値の間には、Table 3に示したように $t_0 = 2.043 [> t (25, 0.05)]$ の有意差があり、雄の方がやや高いことが認められた。

なお、ツノガレイ肝臓のT-Hgと体長のそれぞれの対数値間には、Table 2に示したように、有意の相関は認められなかった。

3・1・4 性腺のT-Hg：精巣3検体のT-Hgは分布範囲0.02-0.07、平均値 $0.05 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ 、卵巣8検体のT-Hgは分布範囲0.01-0.06、平均値 $0.03 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ であった。また、雌雄を一緒にした平均値は $0.03 \pm 0.02 \mu\text{g g}^{-1}$ で、これらの性腺に対応する筋肉のそれは、 $0.05 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ となり、 t -検定の結果、筋肉のT-Hgの方が、性腺のそれより高いと認められた。

以上の結果、本実験に供試したツノガレイの組織の水銀レベルの順序は、肝臓>筋肉>性腺となる。

3・2 ツノガレイのセレン量

3・2・1 筋肉のセレン量 :

27 検体の筋肉のセレン量を Table 3 に示した。その分布範囲は、0.39-1.25、平均値は $0.64 \pm 0.23 \mu\text{g g}^{-1}$ であり、雌雄による平均値の差に有意性は認められなかった。体長と筋肉のセレン量について、それぞれの対数値間を Fig. 5 に示した。両者間には、 $r_0 = 0.2$ [$< r(25, 0.1)$] で、有意の相関は認められなかった。このことは、既に報告⁹⁾した多くの魚種の場合と同一結果であり、セレンは魚類にとっては必須元素で、その成長度に関わり無く、ある量が保持されているものと推察される。

ツノガレイ筋肉の T-Hg とセレン量との関係を Fig. 6 に示した。図より明らかなように、両者の間の一次回帰式に対しては、 $r_0 = 0.20$ [$< r(25, 0.1)$] となり、有意の相関は認められない。このことは、今まで調査してきた魚種における結果と同一であった¹⁰⁾。

3・2・2 肝臓のセレン量 : 肝臓13検体のセレン量は、その分布範囲、1.85-5.83、平均値 $3.51 \pm 1.11 \mu\text{g g}^{-1}$ であった。肝臓のセレン量と対応する試料魚の体長、肝臓の T-Hg、または、筋肉のセレン量との間には、Table 2 に示したように、 r_0 はそれぞれ、-0.03、0.01 および 0.43 で、いずれも有意の相関は認められない。

肝臓のセレン量と対応する試料魚13検体筋肉のそれとの比は、3.4-9.4であり、その平均値は 5.4 ± 1.7 であった。すなわち、ツノガレイでは肝臓のセレン含量は筋肉のそれより約5倍高い。しかし、先に報告したキハダの場合は、肝臓のセレン量は筋肉のそれの約45倍であり、ツノガレイにおける値との間に10倍近い違いが見られる。

肝臓セレン量の性別平均値間には、Table 3 に示したように有意の差は認められなかった。

3・2・3 性腺のセレン量 : 精巣4検体と卵巣7検体の平均セレン量は、それぞれ、

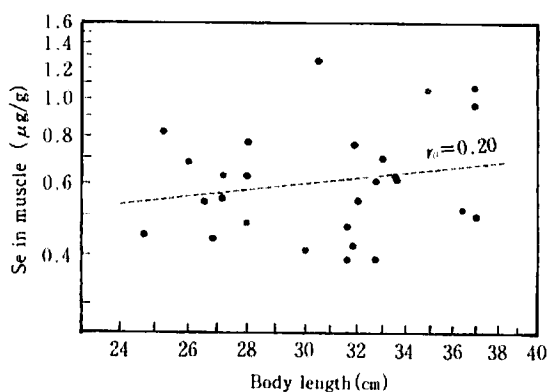


Fig. 5. Correlation between selenium level in muscle and body length of Alaska plaice

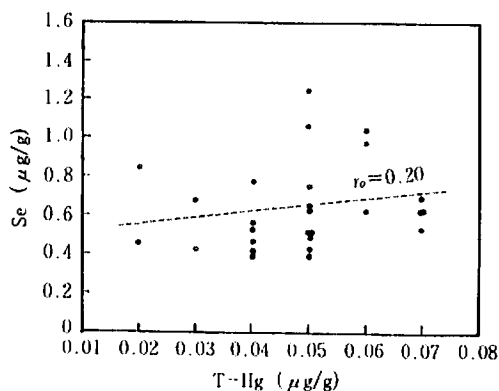


Fig. 6. Correlation between total mercury and selenium in muscle of Alaska plaice

1.28±0.25 および 0.59±0.19 $\mu\text{g g}^{-1}$ であった。これらの平均値の差の有無についての t-検定の結果は、Table 3 に示したように、水準 0.05 で有意の差が認められ、卵巣に比し精巣により多くのセレンが含有されることが認められた。

性腺のセレン量と対応する試料魚の筋肉および肝臓のセレン量とを比較すると、平均値で雄では、筋肉 0.82±0.27、肝臓 3.95±0.69 $\mu\text{g g}^{-1}$ となり、雌では筋肉 0.61±0.21、肝臓 3.00±1.10 $\mu\text{g g}^{-1}$ であった。すなわち、この 3 つの組織のセレンレベルを比較すると、雌雄共通して肝臓のセレンレベルが、他のそれに比較し約 3-5 倍高いことが明らかとなった。

3・3 スケトウの水銀およびセレン量

3・3・1 筋肉の水銀量 : 試料魚 16 尾の筋肉の T-Hg を Table 4 に示した。分布範囲は 0.01-0.07、平均値 0.03±0.02 $\mu\text{g g}^{-1}$ であった。試料魚の体長と T-Hg の関係を Fig. 7 に示した。すなわち、両者の対数値間の一次回帰係数には、 $r_0 = 0.51$ [$> r$ (14, 0.05)] で有意が認められ、スケトウでは、他の多くの魚種と同じように、成長と共に筋肉の水銀レベルが高くなると考えられる。しかし、前記のツノガレイに比較すると、体長、体重共にスケトウの方が大きいのに関わらず、その T-Hg は低い。

筋肉の MeHg については、分布範囲 0.01-0.08、平均値 0.03±0.02 $\mu\text{g g}^{-1}$ で、T-Hg の

Table 4. Mercury and selenium level of Alaska pollack, Pacific cod, and thornhead

Species	Organ	Determination	n	Range	Mean	
Alaska pollack <i>Theragra chalcogramma</i>	muscle	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	16	0.01-0.07	0.03±0.02	
		MeHg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	16	0.01-0.08	0.03±0.02	
		Selenium ($\mu\text{g g}^{-1}$)	14	0.12-0.30	0.20±0.05	
		Se/Hg (molar ratio)	14	7-36	19±8	
	liver	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	16	0.01-0.05	0.02±0.01	
		MeHg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	14	0.01-0.03	0.01 ₅ ±0.00 ₇	
	ovary	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	5	0.01-0.03	0.02±0.00 ₅	
		Selenium ($\mu\text{g g}^{-1}$)	2	0.33, 0.74	0.33	
		Se/Hg (molar ratio)	2	63, 84	73	
	Pacific cod <i>Gadus macrocephalus</i>	muscle	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	16	0.02-0.03	0.03±0.005
			MeHg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	16	0.02-0.04	0.03±0.008
			Selenium ($\mu\text{g g}^{-1}$)	12	0.19-0.38	0.25±0.06
Se/Hg (molar ratio)			12	19-38	26±6	
liver		T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	8	0.01-0.02	0.01±0.00 ₅	
testicle		T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	1		0.01	
Thornhead (Idiot) <i>Sebastolobus macrochir</i>		muscle	T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	10	0.23-0.26	0.25±0.01
			MeHg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	10	0.04-0.14	0.09±0.03
	Selenium ($\mu\text{g g}^{-1}$)		9	0.28-0.41	0.34±0.04	
	Se/Hg (molar ratio)		9	3-4	4±0.4	

n : Number of determinations.

それらと、ほぼ同じレベルであった。T-HgとMeHgとの関係をFig. 8に示した。両者の間は、 $r_s = 0.84$ [$> r(14, 0.01)$] の極めて高い相関関係が認められ、図からも明らかなように、スケトウ筋肉中の水銀は、ほとんどメチル水銀態として存在していると考えることができる。

3・3・2 肝臓の水銀量

スケトウ16尾の肝臓のT-Hgの分布範囲は0.01—0.05で、その平均値は $0.02 \pm 0.01 \mu\text{g/g}$ であった。肝臓のT-Hgと、体長または筋肉のT-Hgとの間の r_s は、それぞれ、 -0.30 と 0.30 で、共に有意の相関は認められなかった。

肝臓のMeHgの分布範囲は0.01—0.03 (14試料) で、平均値は $0.01_g \pm 0.007 \mu\text{g/g}$ で、また、MeHgと体長との間に有意相関は認められなかった。肝臓のMeHgとT-Hgとの比の平均値は、 $106 \pm 35\%$ で、筋肉中と同じように、肝臓中の水銀はメチル水銀態として存在すると推察される。

3・3・3 卵巣の水銀量

卵巣の試料数は5個であるが、そのT-Hgの分布範囲は0.01—0.03、平均値 $0.02 \pm 0.00_g \mu\text{g/g}^{-1}$ であった。前記の筋肉や肝臓の水銀量と同じように、スケトウ卵巣の水銀レベルも低い。

3・3・4 スケトウのセレン量

スケトウ14尾の筋肉セレン量の分布範囲は0.12—0.30、平均値 $0.20 \pm 0.05 \mu\text{g/g}$ であった。試料魚の体長との間の相関をFig. 9に示した。両者の対数値間の一次回帰係数は、 $r_s = -0.29$ [$< r(12, 0.1)$] で有意と認められない。すなわち、スケトウ筋肉のセレンレベルは成長とは無関係であり、他の魚種と同一結果であった。スケトウ筋肉のT-Hgとセレン量との関係をFig. 10に示したが、両者の間には、 $r_s = -0.33$ [$<$

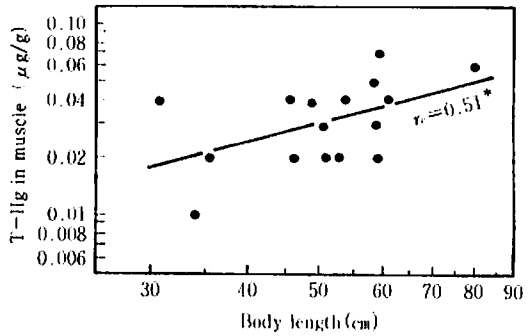


Fig. 7. Correlation between total mercury level in muscle and body length of Alaska pollack

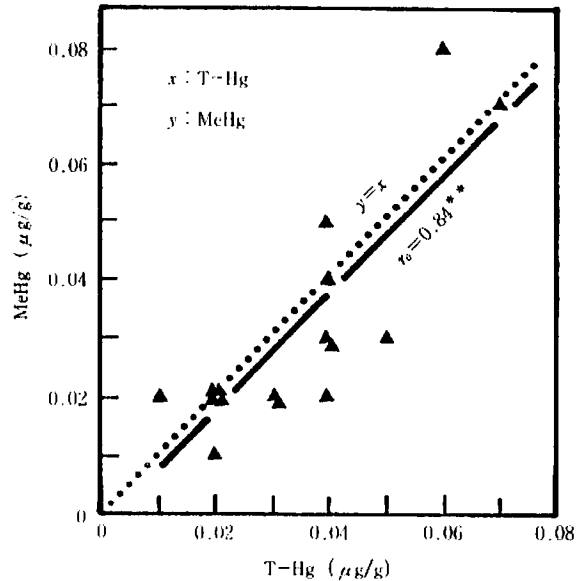


Fig. 8. Correlation between total mercury and methyl mercury in muscle of Alaska pollack

$r(12, 0.1)$ で、有意の相関は認められない。このことは、魚類筋肉中のセレンは必須元素として、成長度や水銀レベルと無関係に、ある一定量以上が保持されるという推論を支持するものであろう。

スケトウ筋肉セレン量は、前述のツノガレイ筋肉の平均値 $0.64 \mu\text{g g}^{-1}$ と比較すると約 $1/3$ と低い。

スケトウ卵巣は2検体のみであるが、そのセレン量は、 0.33 と $0.74 \mu\text{g g}^{-1}$ で、ツノガレイの場合と、ほぼ同程度のレベルであった。

3・4 マダラの水銀およびセレン量

マダラ筋肉 (16尾) の T-Hg は、Table 4 に示したように、分布範囲 $0.02-0.03$ 、平均 $0.03 \pm 0.00_5 \mu\text{g g}^{-1}$ と非常に低い値であった。体長と T-Hg との間には、Table 2 に示したように $r_0 = -0.10$ [$< r(14, 0.1)$] で有意の相関は認められなかった。

マダラ筋肉の MeHg も低い値で (Table 4)、対応する T-Hg との間には、 $r_0 = 0.78$ [$> r(14, 0.01)$] で、高い相関を示した (Table 2)。MeHg の T-Hg に対する比も、ほぼ1で、マダラ筋肉中の水銀はメチル水銀態として存在していると推察される。

マダラ肝臓 (8 検体) の T-Hg は平均 $0.01 \pm 0.00_5 \mu\text{g g}^{-1}$ で、筋肉のそれより、さらに、低いレベルであった。肝臓の T-Hg と対応する筋肉のそれとの間には、 $r_0 = 0.58$ [$< r(6, 0.1)$] で、有意の相関は認められなかった (Table 2)。

マダラ精巢の T-Hg は、1 検体のみであるが、 $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ で、他の組織と同様に低い値であった。

マダラ筋肉のセレン量 (12 検体) は、Table 4 に示したように、分布範囲 $0.19-0.38$ 、平均 $0.25 \pm 0.06 \mu\text{g g}^{-1}$ で、ツノガレイのそれより低く、スケトウのレベルより高い。マダラ筋肉の T-Hg とセレン量との関係を Fig. 11 に示した。両者の間には $r_0 = 0.41$ [$< r(10, 0.1)$] で、有意の相関は認められず、他の魚種と同じ傾向が認められた。

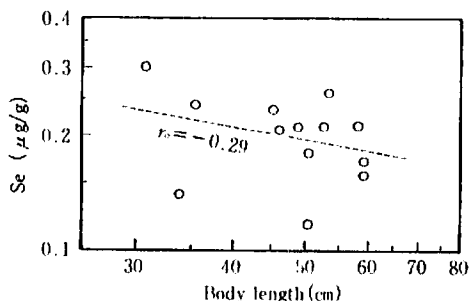


Fig. 9. Correlation between selenium level in muscle and body length of Alaska pollack

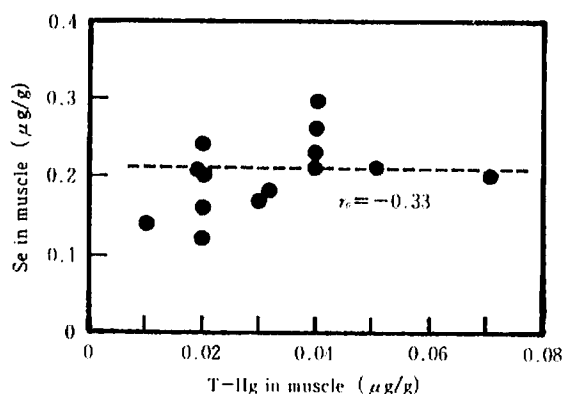


Fig. 10. Correlation between total mercury and selenium in muscle of Alaska pollack

3・5 キチジの水銀およびセレン量

キチジ試料は漁船内で頭部および腹部を除いた冷凍品10尾を用いた。その重量の分布範囲は246-439、平均は 310 ± 60 gであった。

このキチジ筋肉のT-HgはTable 4に示したように、分布範囲0.23-0.26、平均 $0.25 \pm 0.01 \mu\text{g g}^{-1}$ で、前記3魚種の筋肉T-Hgに比べると、かなり高い値であった。

また、MeHgの分布範囲は0.04-0.14、平均は $0.09 \pm 0.03 \mu\text{g g}^{-1}$ で、T-Hgとの間にはFig. 12およびTable 2に示したように、 $r_s = 0.78$ [$> r(8, 0.01)$]で、有意の相関が認められた。一方、MeHgとT-Hgとの比は、範囲17-56、平均 $35 \pm 13\%$ で、低い値であった。今までの調査結果では、多くの魚類では肝臓、脾臓、腎臓および血液では、MeHg/T-Hg値が低い例は見られたが、筋肉におけるその比が、このように低いことは、カジキ類¹¹⁾以外では、その例が無く、極めて珍

しい。筋肉中の水銀で、メチル水銀以外の形態は無機態であろうと推測されているが、まだ、確認されてはいない。また、メチル水銀の無機化機構も明らかとは言えない¹²⁾。

キチジは前記の底魚と異なり、卵胎生であり、遠洋性大形魚に比べて、体長・体重、共に小さいのにも関わらず、筋肉中の水銀レベルはマグロ類に匹敵する。しかし、一方、MeHg/T-Hg値は30%程度で、極めて低い。これらの特殊性がキチジの生態とどのような関わりがあるのか、極めて興味ある問題である。また、含有水銀の内、無機態が多いならば、食品衛生上からもさらに究明すべき点であろう。

キチジ筋肉のセレン量はTable 4に示したように、分布範囲は0.28-0.41、平均値 $0.34 \pm 0.04 \mu\text{g g}^{-1}$ (9検体)であり、前記のツノガレイ筋肉のそれより低く、スケトウおよびマダ

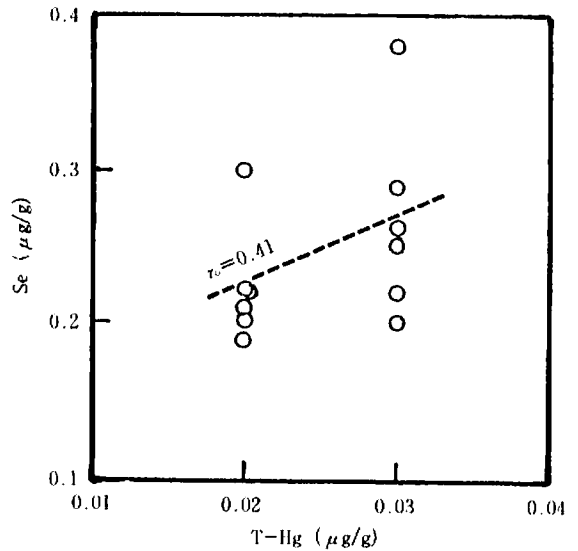


Fig. 11. Correlation between total mercury and selenium in muscle of Pacific cod

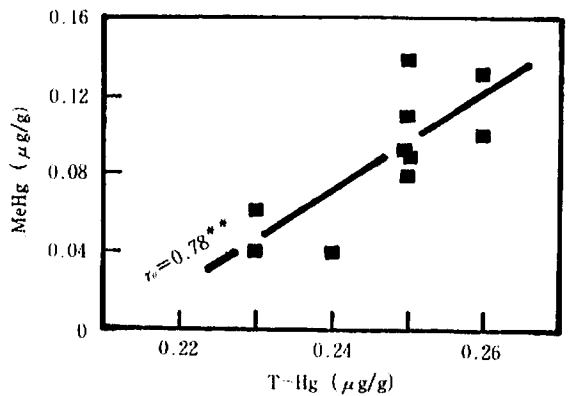


Fig. 12. Correlation between total mercury and methyl mercury in muscle of thornhead

ラ筋肉のそれより高いレベルにあった。キチジ筋肉の T-Hg とセレン量との間には、Fig. 13 と Table 2 に示したように、 $r_s = 0.64 > r(7, 0.1)$ の有意水準 0.1 で相関が認められた。すなわち、キチジ筋肉の水銀はセレンを伴って蓄積されていると考えることもできる¹³⁾。

3・6 ツノガレイ、スケトウ、マ

ダラおよびキチジの水銀とセレンの関係

海洋生物中の水銀は環境水中より直接プランクトンが体内に濃縮したものを食物連鎖を通じて、捕食生物により段階的に濃縮されることが考えられている。この際、セレンを伴って蓄積されるので、水銀の毒性が抑制されると推察されている。この推論に立てば、食物連鎖上位の生物では、必須元素として保持しているセレンレベルに、水銀に伴われて摂取されるセレンが附加されるはずである。そこで、前述の分析データに基づいて、セレンと水銀のモル比を計算した。その結果をツノガレイについては Table 3 に、スケトウ、マダラおよびキチジについては Table 4 に示した。各魚種の筋肉における Se/Hg (モル比) の平均値は、ツノガレイ 37±19、スケトウ 19±8、マダラ 26±6 およびキチジ 4±0.4 であった。キチジはその筋肉の T-Hg が他の 3 魚種のそれより 1 桁高いオーダを示し、Se/Hg は 1 桁代で、明らかに食物連鎖上では高い位置にあることが分かる。

このことを確かめるために、さらに、各試料魚を、その T-Hg およびセレン量が各平均値より高いグループと低いグループとに分け、その各グループごとの平均値の差、すなわち、摂取餌より持ち込まれた水銀とセレン量を示す値を次式で求めた。

$$\Delta \text{Hg} = \frac{m_1 - m_2}{\text{Hg}}$$

$$\Delta \text{Se} = \frac{s_1 - s_2}{\text{Se}}$$

$$\Delta \text{Se} / \Delta \text{Hg} = \frac{(s_1 - s_2) / \text{Se}}{(m_1 - m_2) / \text{Hg}} = (2.54) \frac{(s_1 - s_2)}{(m_1 - m_2)}$$

m_1 : 平均 T-Hg より高いグループの平均 T-Hg、 m_2 : 平均 T-Hg より低いグループの平均 T-Hg、 s_1 : 平均セレン量より高いグループの平均セレン量、 s_2 : 平均セレン量より低いグループの平均セレン量、Hg : 水銀原子量、Se : セレン原子量。

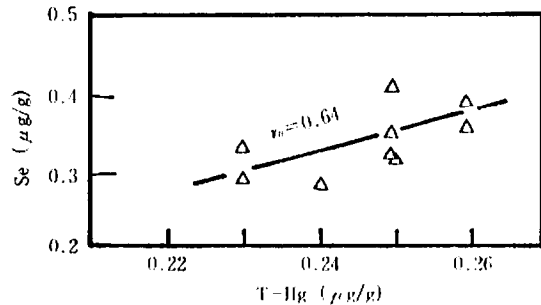


Fig. 13. Correlation between total mercury and selenium in muscle of thornhead

計算の結果は、水銀1モルに伴って蓄積されるセレンのモル数は、ツノガレイ 14、スケトウ 5、マダラ 8、キチジ 7となり、いずれもセレンは、水銀のみに伴われて蓄積するとは限らないことを示している。

また、海水における Se/Hg (モル比) は約50で、プランクトンに関する分析値も約55¹⁴⁾で、ほぼ等しい。そこで、プランクトンフィーダーに近い食性を持つ魚種は Se/Hg 値が50に近く、食物連鎖位置の高い魚種は、その比が1に近くなるものと推測できる。キチジ筋肉における Se/Hg は4で、マグロ筋肉のそれとは、同じレベルであるが、その取込み方は、必ずしもマグロ類の傾向と同じではない。このことは、キチジ筋肉では必須元素として保有しているセレンレベルが高いので、餌より追加される水銀とセレンの値が、正確に算出されないことを示しているのかも知れない。いずれにしても、キチジは特異な水銀蓄積を行う興味ある魚種と言える。

ツノガレイの肝臓および性腺の水銀とセレンの比は Table 3 に、スケトウ卵巣のそれは Table 4 にそれぞれ示した。すなわち、ツノガレイ肝臓では Se/Hg (モル比) の平均値は169±86で、筋肉のそれより、ほぼ5倍高い値であるが、性腺の Se/Hg は筋肉のそれの約1.5倍に過ぎない。なお、スケトウ卵巣の Se/Hg は73で、筋肉の約4倍であった。一般に、魚類肝臓の Se/Hg は、筋肉のそれより高く、ツノガレイ肝臓の Se/Hg (モル比) は、ピンナガ肝臓の値145に類似していた。このように、肝臓における高セレンレベルは、単に水銀に対応して取込まれるばかりでなく、複雑な生理機能に関わっているためであろう。

4. 要 約

ベーリング海で漁獲したツノガレイ、スケトウ、マダラおよびキチジの筋肉、肝臓および性腺の水銀とセレンの含量を測定し、次のような結果を得た。

- 1) 筋肉の平均 T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$) は、ツノガレイ 0.05±0.01、スケトウ 0.03±0.02、マダラ 0.03±0.00₅、キチジ 0.25±0.01であった。また、ツノガレイ、スケトウおよびマダラの筋肉中の水銀は、ほとんどメチル水銀態と推察されるが、キチジでは T-Hg に対し MeHg の占める割合は約35%に過ぎなかった。
- 2) 肝臓の平均 T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$) は、ツノガレイ 0.06±0.01、スケトウ 0.02±0.01、マダラ 0.01±0.00₅で、筋肉のそれとはほぼ等しいが、または、より低い値であった。
- 3) 性腺の平均 T-Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$) は、ツノガレイ 0.03±0.02、スケトウ 0.02±0.00₅、マダラ 0.01で、筋肉の値より低かった。
- 4) 筋肉の平均セレン量 ($\mu\text{g g}^{-1}$) は、ツノガレイ 0.64±0.23、スケトウ 0.20±0.05、マダラ 0.25±0.06、キチジ 0.34±0.04であった。また、筋肉中の平均 Se/Hg (モル比) は、ツノガレイ 37±19、スケトウ 19±8、マダラ 26±6、キチジ 4±0.4で、キチジは食物連

鎖上で、上位に位置する数値を示した。

- 5) ツノガレイ肝臓では、平均セレン量 ($\mu\text{g g}^{-1}$) は、 3.51 ± 1.11 で、平均 Se/Hg (モル比) は 169 ± 86 と高い値を示した。
- 6) 性腺の平均セレン量 ($\mu\text{g g}^{-1}$) は、ツノガレイ 0.83 ± 0.40 、スケトウ 0.33 であり、また、Se/Hg については、ツノガレイ 56 ± 19 、スケトウ 73 の値が得られ、筋肉における値とほぼ類似した。

本研究の分析を担当した、当時、水産大学校製造学科学生 梅村博文、江藤泰広、田中知加子、徳本弘光、中内修二、浜 一司、角田 隆、立野 勉および前田有紀の諸君に厚くお礼申し上げます。また、試料魚 (キチジ) を供された株式会社ホクスイ 手塚久雄氏に深謝する。

(文 献)

1) 例えば

- 武田道夫・稲益敏二・越川虎吉・上田 正・中野道紀・富田輝雄・浜田盛承：水産大研報、25、47-65 (1976)
- 2) H. E. Ganther, and M. L. Sunde : *J. Food Sci.*, **39**, 1-5 (1974)
- 3) 大石圭一：かれい、恒星社厚生閣、pp. 30-39 (1977)
- 4) S. Kamimura : *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **41**, 487 (1975)
- 5) 武田道夫・稲益敏二・富田輝雄・浜田盛承・勝浦 洋：水産大研報、23、145-153 (1975)
- 6) 上田 正・武田道夫：日本誌、**43**、1115-1121 (1977)
- 7) W. Horwitz(ed), *Official Methods of Analysis of the AOAC*, 12th ed., AOAC, Washington, pp. 455-456 (1975)
- 8) 武田道夫・上田 正：日本誌、**45**、901-904 (1979)
- 9) 武田道夫・上田 正：水産大研報、26、267-279 (1978)
- 10) 甲斐徳久・上田 正・武田道夫・片岡昭吉：水産大研報、**31**、69-73 (1983)
- 11) N. Kai, T. Ueda, M. Takeda, and A. Kataoka : *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **52**, 553-556 (1986)
- 12) 鈴木継美：微量元素と生体、秀潤社、p. 32 (1987)
- 13) N. Kai, T. Ueda, Y. Takeda, and A. Kataoka : *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **53**, 1697 (1987)
- 14) 武田道夫・片岡昭吉：下関女子短期大学紀要、**3**、1-8 (1984)