

マグロ類の水銀および セレン含有に関する研究—V*

成長に伴う水銀蓄積の数理的解析

浜田盛承・稲益猷二

On Mercury and Selenium in Tuna Fish Tissues — V.
A mathematical Approach to the Mechanism of Mercury Accumulation

By

Moritsugu HAMADA and Yūji INAMASU

The present paper aimed at clarifying the mechanism of mercury uptake by fish examining the relation between growth and mercury content. For the purpose of applying to the case like the present one which dealt with also the possibility of mercury uptake through gill, the Yamamura's equation³⁾ showing the mechanism of consumption and accumulation of vitamin A only through alimentary canal was improved as follows:

$$H = k' \ell_n^2 G$$

$$\text{where } G = \ell_n \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3}$$

This equation is identical with the Yamamura's, and shows that a linear relation with the slope of 1.0 should exist between growth index (G) and mercury content (H) when they are transformed into logarithmic value. And the examination on the data for three species of Tuna (*Thunnus albacares*, *Thunnus obesus* and *Thunnus thynnus*) and yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) shown in the annual reports^{7,8,9)} on mercury and selenium of tuna revealed the following results:

- 1) Linear relation with the slope of 1.0 was found to be present statistically between $\log G$ and $\log H$ in most of fishing areas and culture farms, suggesting that the mathematical approach be applicable to the present case.
- 2) Mercury accumulation coefficient (k') was the lowest in yellowfin tuna caught from the Central Pacific, being 1/3 to 1/4 of that in the same species from coastal waters.
- 3) The k' value of bigeye tuna was higher than that of yellowfin tuna, though it showed some between-area variation in either of the species.

* 水産大学校研究業績 第 795 号, 1977 年 6 月 10 日受理.
Contribution from the Shimonoseki University of Fisheries, No. 795.
Received June 10, 1977.

日本水産学会昭和 51 年度秋季大会 (下関) において発表済 (昭和 51 年 10 月 10 日講演).

- 4) In the cultured fish, the k' value of bluefin tuna and yellowtail differed according to the culture farms.
- 5) Large between-area or between-farm difference made it difficult to find a clear trend of between-species difference of k' .

1. 結 言

魚体筋肉の水銀濃度は体重および尾叉長の増大とともに増加することが知られている^{1,2)}が、成長に伴って魚体内に水銀がどのような速度で蓄積するかについての研究はまだ報告されていない。

先に、山村³⁾は魚の成長度とビタミンA蓄積量との関係を表わす式を導き、メヌケ、サバガレイ、ババガレイ、キチヂ、スケソウダラ、アブラザメおよびアブラガレイにきわめてよく適合できることを明らかにしている。

水銀についてもこのような関係式を導くことができれば、魚体内への水銀蓄積を知る上できわめて有効である。水銀の魚体内への取り込み径路としては、餌からだけでなくえらからの吸収も考えられるので、ビタミンA蓄積の場合と全く同様に考えるわけにはいかない。そこで、山村のたてた微分方程式の中に新しくえらからの吸収についての補正項を設けた式を用いて、キハダ、メバチ、養殖クロマグロおよび養殖ハマチの成長に伴う水銀蓄積について数理解析を行ったので、その結果を報告する。

2. 理 論

魚の成長度とビタミンA蓄積量との関係について、山村は数理解析を行い、次式を得ている。

$$A = k l_{\infty}^3 \left(\ln \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3} \right) \quad (1)$$

ここで、AはビタミンA蓄積量、 l_{∞} は対象とする魚種の最大体長、 λ はある魚体の体長と l_{∞} との比を示す。また、 k は定数である。

これに対して、魚の水銀蓄積を考える場合には、餌からだけでなくえらから取り込まれる水銀量も考慮しなければならない。

いま、魚体の体重を W (kg)とし、単位時間あたりの摂餌率を a_1 とすれば、その魚体の摂取する餌の量は単位時間あたり $a_1 W$ となる。餌の水銀濃度を c_1 、餌から魚体への水銀の吸収率を e_1 とすれば、餌から魚体内へ吸収される水銀量は $a_1 c_1 e_1 W$ となる。

また、単位時間あたりにえらを通ずる海水量が体重に比例すると仮定し、体重当りの通過海水量を a_2 とすれば、えらを通ずる海水量は $a_2 W$ となる。海水の水銀濃度を c_2 、えらから魚体内への水銀の吸収率を e_2 とすれば、海水からえらを通して魚体内に吸収される水銀量は $a_2 c_2 e_2 W$ となる。

すなわち、餌および海水から魚体内に吸収される水銀量は

$$a_1 c_1 e_1 W + a_2 c_2 e_2 W$$

で与えられる。

これについて、山村³⁾と同じような処理を施して整理すると、次の式が得られる。

$$H = k' l_{\infty}^3 \left(\ln \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3} \right) \quad (2)$$

ただし、 H は魚体内蓄積水銀量 (mg) である。なお

$$k' = \frac{a_1 c_1 e_1 + a_2 c_2 e_2 - \gamma(a_1 - a_1') / \beta}{\varepsilon}$$

である。ここで、 a_1' は魚体の生命を維持するための最低の摂餌率、 β は体重の増加係数、 γ は魚体における水銀排泄係数、 ε は体重の増加に関する係数である。

(2)式の両辺の対数をとれば、

$$\log H = \log k' l_{\infty}^3 + \log \left(\ln \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3} \right) \quad (3)$$

となる。

同一魚種、同一環境では k' 、 l_{∞} は一定とみなしうるので、

$$G = \ln \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3} \quad (4)$$

とおき、 $\log G$ を横軸に、 $\log H$ を縦軸にとれば、(3)式は傾き1.0の直線となる。また、切片から k' を算出することができ、魚種および漁獲海域ごとの水銀蓄積係数 k' の大小を比較することができる。

3. 試料および計算方法

3・1 試料

中・西部太平洋および東インド洋で漁獲された漁獲位置の明確なキハダ (*Thunnus albacares*) 74尾、メバ

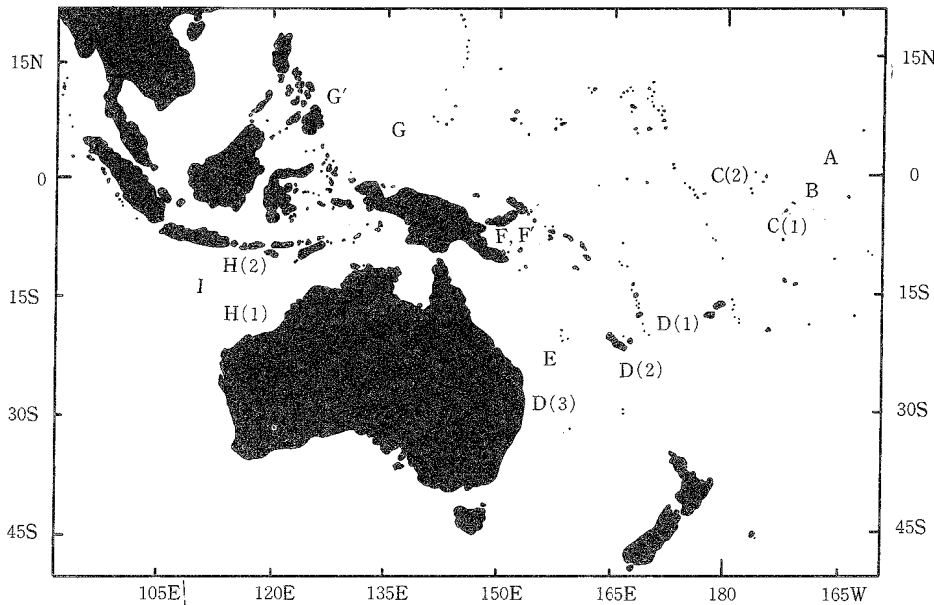


Fig. 1. Location of sampling stations of yellowfin tuna and bigeye tuna.
Yellowfin tuna (Fishing area A,B,C,D,E,F,G,H and I), Bigeye tuna (Fishing area F' and G')

チ (*Thunnus obesus*) 18 尾, 高知県古満目で養殖されたクロマグロ (*Thunnus thynnus*) 12 尾および山口県山陰沿岸で養殖されたハマチ (*Seriola quinqueradiata*) 23 尾を用いた。第 1 図にキハダおよびメバチの漁獲海域を示した。漁獲海域 14 箇所のうち, 同一記号で示した海域はそれぞれ同一船による漁獲位置を示しているが, 同一船であっても漁獲位置がかなり離れていたり, 沖合と沿岸の両方で漁獲している場合には海域ごとに分けて示した。

3・2 成長度 G の計算

λ は l/l_{∞} で定義したが, 最大尾叉長 l_{∞} は魚種によって異なる。落合⁴⁾はクロマグロ, メバチ, キハダおよびハマチの最大尾叉長としてそれぞれ 2.50 m, 2.00 m および 1.15 m の値を推定している。そこで, これらの値を用いて各魚体の G 値を(4)式に従って求めた。

3・3 蓄積水銀量 H の計算

各試料魚中に蓄積された水銀量を求める場合, まず筋肉各部位および各臓器に蓄積された水銀量を求めなければならない。すでに報告したように, キハダ 5 尾の筋肉水銀濃度は各魚体ごとに差はあっても部位による差はほとんど認められなかった⁵⁾。そこで, 筋肉内蓄積水銀量は筋肉の平均水銀濃度に筋肉重量を乗じて算出した。計算に用いた筋肉の水銀分析値は, キハダ 74 尾のうち 39 尾および養殖ハマチ 23 尾については先に発表した著者らの値^{6,9)}を, また残りのキハダ 35 尾, メバチ 18 尾および養殖クロマグロ 12 尾については東海区水産研究所の発表した値^{7,8,9)}をそれぞれ用いた。

筋肉重量の体重に対する割合は, 魚種, 時期, 雌雄などによってさまざまであるが 本報ではすべて 72%¹⁰⁾と仮定して計算した。内臓に蓄積された水銀量は後述するように筋肉のその 2.9%であったので, 体重 W の魚体中に蓄積された水銀量は筋肉の水銀濃度を c ($\mu\text{g/g}$) とすると,

$$\begin{aligned} H &= W \times 1000 \times 0.72 \times c (1 + 0.029) \\ &= 741cW \quad (\mu\text{g}) \\ &= 0.741cW \quad (\text{mg}) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

試料魚 127 尾について, (5)式を用いて各魚体内蓄積水銀量を求めた。

次に, キハダおよびメバチについては各魚獲海域ごとに, クロマグロおよびハマチについては各養殖場ごとに, それぞれ $\log G$ と $\log H$ との回帰直線の傾きを求めて, 理論値 1.0 との差の t 検定を行った。また, (2)式より各魚体の k' を算出した。

4. 結果および考察

先に, キハダにおける水銀の体内分布についての分析値を報告した⁹⁾が, これらに各組織重量を乗じて各組織における蓄積水銀量を求め, その結果を第 1 表に示した。ただし, 筋肉および血液の重量は, それぞれ体重の 72%¹⁰⁾, 1.5%¹¹⁾として計算した。この表にみられるように, 筋肉に蓄積された水銀量に対する内臓組織蓄積水銀量の割合は 1.9~3.5%であり, 魚種による差は僅少であった。そこで, これらの平均値 2.9%を筋肉蓄積水銀量に対する内臓組織蓄積水銀量の割合とし, 3・3 で述べた(5)式に従って H を計算した。

各試料魚について計算した $\log G$ および $\log H$ の関係を, 魚種, 漁獲海域および養殖場ごとに第 2 図~第 5 図に示した。また, これらの回帰直線の傾き (a_1), ならびにこの回帰直線の傾き $a_1 = 1.0$ に対する t 検定の結果を第 2 表にまとめて示した。第 2 表の結果から, 3 海域を除いた他の海域ならびに各養殖場につ

Table 1. Total mercury contents in viscera (A) and those in muscle tissue (B), and the (A) / (B) ratios on 4 yellowfin tuna, an albacore and a sailfish.

Item \ Sample	Yellowfin tuna				Albacore	Sailfish
	No.1	No.2	No.3	No.4		
Body weight (kg)	47.0	40.8	42.3	43.3	16.0	35.0
Sex	(F)	(F)	(F)	(M)	(M)	(F)
Total mercury content (μg)						
(1) Viscera						
Stomach	36.8	24.5	31.5	47.0	4.0	36.6
Gastric contents	7.0	2.1	3.6	2.2	0.3	7.6
Intestine	1.9	5.1	5.2	5.3	1.0	8.6
Intestinal contents	1.0	1.6	1.1	2.6	0	1.1
Pyloric caeca	19.8	61.8	26.9	63.5	3.7	79.6
Liver	27.6	18.5	30.6	33.5	4.4	61.0
Spleen	3.0	19.0	65.9	43.2	2.2	4.6
Heart	7.4	11.5	12.5	15.7	2.6	5.9
Gall bladder	0.4	0.3	0.5	1.0	0.3	1.2
Gonad	23.7	22.1	23.4	14.4	0.6	18.3
Blood*	21.2	49.0	19.1	25.0	9.6	21.0
Sum of mercury in viscera (A)	149.8	215.5	220.3	260.4	28.7	245.5
(2) Muscle* (B)	5414.4	7637.8	7309.4	7482.2	1497.6	7056.0
(A)/(B) $\times 100$ (%)	2.8	2.8	3.0	3.5	1.9	3.5

*.....Weight of blood and muscle tissue were estimated as 1.5 % and 72.0 % of body weight, respectively.

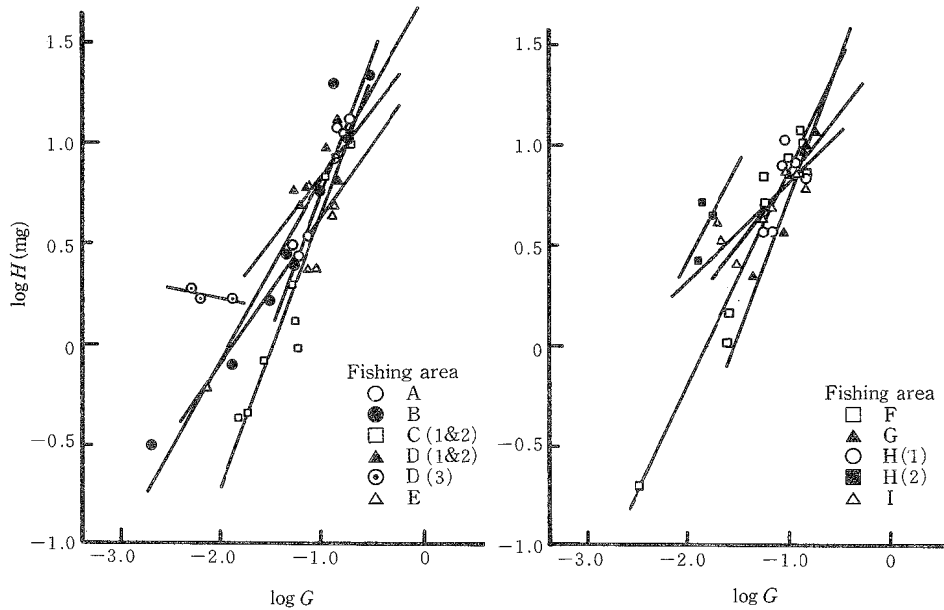


Fig. 2. Total mercury contents (H) in yellowfin tuna, plotted logarithmically against growth index (G).

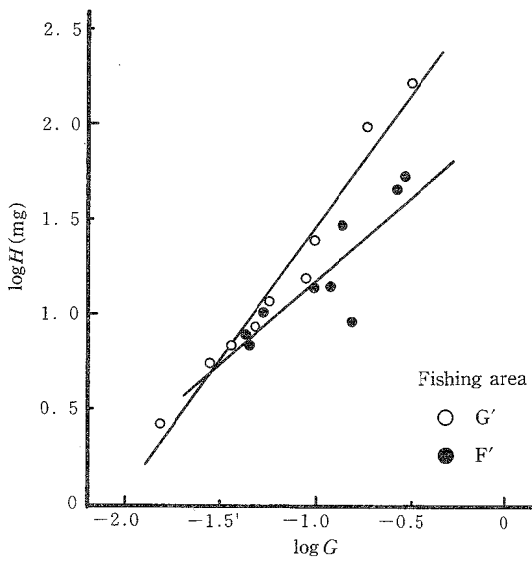


Fig. 3. Total mercury contents (H) in bigeye tuna, plotted logarithmically against growth index (G).

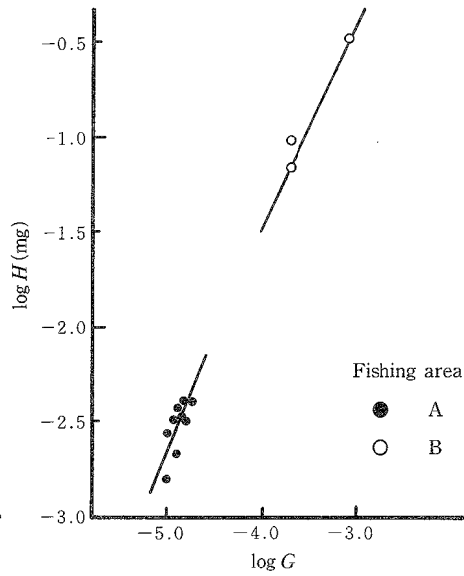


Fig. 4. Total mercury contents (H) in cultured bluefin tuna, plotted logarithmically against growth index (G).

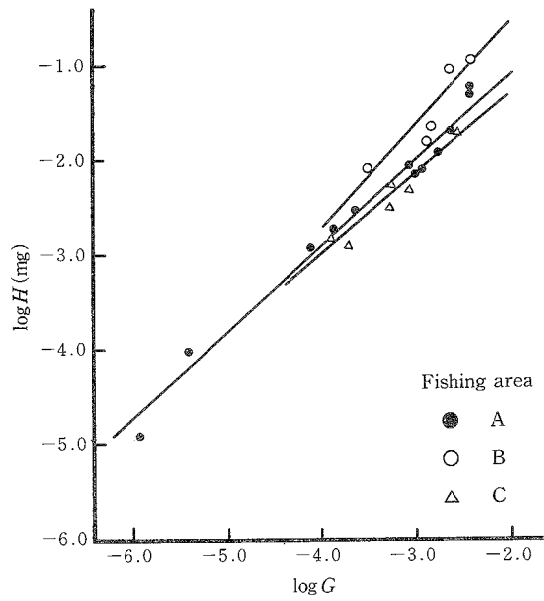


Fig. 5. Total mercury contents (H) in cultured yellowtail, plotted logarithmically against growth index (G).

Table 2. The slope (a_1) of the estimated linear regression equation of the logarithmic mercury contents in fish ($\log H$) on the logarithmic growth index ($\log G$), and t -test for $a_1 = 1.0$

Specimen	Fishing area	a_1	$ t_0 $
Yellowfin tuna	A	1.383	2.410
	B	0.907	0.895
	C(1 & 2)	1.375	2.281
	D(1 & 2)	0.579	1.750
	D(3)	-0.104	16.964*
	E	0.739	1.462
	F	1.084	0.779
	G	1.198	1.280
	H(1)	0.647	0.768
	H(2)	1.012	0.006
Bigeye tuna	I	0.493	4.827**
	F'	0.881	0.598
Cultured bluefin tuna	G'	1.405	4.039**
	A	1.339	0.959
Cultured yellowtail	B	1.094	0.448
	A	0.898	3.054
	B	1.116	0.441
	C	0.849	1.140

Note : Mercury contents were expressed in mg.
Growth index was defined as follows :

$$G = \ln \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3}$$

where λ is the ratio of the fork length to the maximum fork length of the species.

t_0 ... STUDENT'S t for testing whether $a_1 = 1.0$ or not

* ... significant at 0.05 level

**... significant at 0.01 level

いては回帰直線の傾きが1.0とみなすことができた。すなわち、大多数の漁獲海域および養殖場において理論値と計算値は一致することがわかった。理論値との一致のみられない海域は、キハダについてはオーストラリアのブリスベン沖D(3)とインドネシアのバリ島沖(1)であり、メバチについてはフィリピンのミンダナオ島北東沖(G')であった。これらの試料魚は比較的沿岸で漁獲されたものである。しかし、ロンボック島にきわめて近い海域H(2)で漁獲されたキハダの回帰直線の傾きは1.012で、理論値とよく一致する(0.01水準)ことから、沿岸で漁獲されたからといって、必ずしも理論値と一致しないということもできない。H(1)はH(2)の沖合であり、ここで漁獲されたキハダ(6尾)については直線の傾きは1.0とみなされた。両海域における同一船による試料魚を一緒にして計算すると、 $a_1 = 0.312$, $|t_0| = 5.535^{**}$ となり、傾きが1.0であるとはみなされない。漁獲海域H(1)およびH(2)のそれぞれにおいては、 $\log G$ と $\log H$ との間に傾き1.0の直線関係が成立するにもかかわらず、H(1)およびH(2)を一緒にして計算すると傾き1.0とはみなされない理由は、沿岸と沖合の海域条件が異なるので(2)式の k' に含まれる諸定数が違うためではないかと考えられる。(2)式は、この式を導き出した条件からも明らかなように、環境、餌、生態、生理条件がきわめて似通った海域で漁獲された魚群についてのみに適用できるのであり、沿岸と沖合のように諸要因の異なる海域を一緒にしては成立しない。同様の現象として、H(1)とH(2)の中間海域(I)で漁獲されたキハダについても、 $\log G$ と $\log H$

との間に傾き 1.0 の直線関係が認められなかった。これは、この海域が沿岸と沖合の中間に位置するために、環境要因などが異なっているためであると考えられる。

メバチの漁獲海域(G')は、第 1 図にみられるように、ミンダナオ島の沿岸寄りから北東沖にかけての広い海域であって、試料魚の生息条件がかなり異なっていると考えられるので、キハダについて述べたのと同じ理由で傾き 1.0 とはならないのであろう。

以上で述べたことから、環境要因のあまり変わらない大洋の漁獲海域および養殖場では(2)式が成立し、さらにこの式は、キハダ、メバチ、クロマグロおよびハマチのように異なる魚種についても成立することがわかった。

次に、魚種別および漁獲海域ごとに(2)式を用いて k' を求め、それらの値を比較検討した。各漁獲海域におけるキハダの k' を第 3 表に、メバチ、養殖クロマグロおよび養殖ハマチの k' を第 4 表に示した。第 3 表にみられるように、キハダの k' は D(3), H(2), I を除いてすべて 10 以下であった。10 以上の高い値を示した海域は、オーストラリアのブリスベン沖、インドネシアのロンボク島およびバリ島沖の 3 箇所であった。すなわち、これらの陸地に近い海域では大洋と異なり、魚は水銀を多く蓄積していた。なお、キハダの漁獲

Table 3. k' value of yellowfin tuna.

Specimen	Fishing area	k'										Mean of k'
Yellowfin tuna												
A	6.99	9.52	9.11	7.22	5.03	5.74						7.27
B	19.28	6.84	7.36	7.04	18.00	5.89	9.21	6.95	7.47			9.78
C(1&2)	7.05	9.28	8.41	2.12	2.94	5.19	4.16	3.09	3.64			5.10
D(1&2)	12.30	9.88	9.75	5.17	9.73	9.47						9.38
D(3)	41.24	14.35	32.65									29.41
E	3.34	3.54	10.53	5.00	4.42	7.66	10.81					6.47
F	6.04	11.90	10.40	11.40	16.60	11.23	7.16	5.35	8.01			9.79
G	6.22	7.73	5.97	4.97	8.53	7.50						6.82
H(1)	8.10	5.49	13.58	6.39	11.13	9.81						9.08
H(2)	45.27	24.43	30.53									33.41
I	9.52	5.44	7.77	8.97	9.38	9.20	10.48	10.66	18.31	24.96	11.47	

Table 4. k' value of bigeye tuna, cultured bluefin tuna and cultured yellowtail.

Specimen	Fishing area or Culture farm	k'										Mean of k'
Bigeye tuna												
F'	19.86	22.32	22.72	14.76	24.58	22.72	21.19	7.36	26.59			20.23
G'	23.58	31.63	22.28	67.07	25.67	24.85	21.66	21.16	64.33			33.58
Cultured bluefin tuna												
A	15.16	16.93	15.16	16.80	11.02	14.51	11.22	17.29	18.95			15.23
B	27.88	20.39	26.91									25.06
Cultured yellowtail												
A	7.07	16.45	7.67	8.89	10.91	4.69	4.74	6.55	5.52			7.39
	4.20	6.22	5.75									
B	16.99	10.99	8.50	25.15	20.75							16.48
C	8.80	4.00	4.72	3.49	6.28	5.17						5.41

海域(F)はその周囲が陸地であり、D(3), H(2), Iよりも陸地の影響を受けやすいと考えられ、 k' は高くなると推定されるにもかかわらず、大洋で漁獲されたキハダの k' と大差がなかった。このように、D(3), H(2), I, この中でも特にD(3), H(2)での k' が他の海域よりもはるかに高い理由としては、これらの海域の海水および餌の水銀濃度が高いとか、魚の摂餌率が高いことなどの要因が考えられる。

メバチについて得られた k' を第4表にみると、漁獲海域・G'における値がF'における値よりも高かった。G'では9尾中の2尾が他の魚体の約3倍の値(67.07, 64.33)を示し、また、F'では9尾中1尾が他の約 $\frac{1}{3}$ の値(7.36)であった。このG'での過大 k' を除いた平均値は24.40であり、F'での過小 k' を除いた平均値は22.07となり、両平均値には大差がみられない。

同一漁場(FおよびF')におけるキハダとメバチの k' を比較すると、キハダが9.79、メバチが20.23であり、メバチがキハダよりも約2倍の水銀を蓄積していた。

養殖クロマグロの k' についてみると、養殖場ごとにその値は異なり、養殖場Aでは15.23、Bでは25.06であった。養殖場Bでの水銀蓄積はAでのそれよりも1.6倍高いことを示している。養殖場ごとに k' が異なる理由は、キハダの場合と同様に、環境、餌などの条件の違いによるのであろう。このように養殖場ごとに k' が異なっていたので、キハダおよびメバチの k' とを比較して、魚種間の違いを表わすことはできなかった。

養殖ハマチについても、養殖場ごとに k' は異なることが第4表の結果からわかる。また、養殖場A, BおよびCにおける k' の平均値についてみると、AおよびCでの値はほぼ等しく、キハダの値よりも低かった。しかし、養殖場Bでは16.48となり、大洋でのキハダの値よりも高かった。

5. 要 約

魚の成長度とビタミンA蓄積量との関係を数理的に導いた山村の式を一部補正し、水銀蓄積の場合にも適用できるかどうかを検討した。

えらからの水銀吸収の項を新しく設けて整理し、次式を得た。

$$H = k' \ell_{\infty}^3 \left(\ln \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3} \right)$$

この式の両辺の対数をとれば、成長度 $\left(\ln \frac{1}{1-\lambda} - \lambda - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{\lambda^3}{3} \right)$ と水銀蓄積量(H)との間には理論的に傾き1.0の直線関係が成立する。キハダ、メバチ、養殖クロマグロおよび養殖ハマチの4魚種について、漁獲海域または養殖場ごとに成長度と水銀蓄積量との関係を調べたところ、両者間に傾き1.0の直線関係が統計的に成立し、理論値と一致した。

水銀蓄積係数 k' は、大洋で漁獲されたキハダの値が最も小さく、沿岸で漁獲されたキハダについては前者の3~4倍であった。メバチの k' はキハダのそれよりも高かったが、漁獲海域によって大きな差がみられた。養殖クロマグロおよび養殖ハマチについてもそれぞれ養殖場ごとに k' は大きく異なり、魚種による水銀蓄積の相違を判定することは難しかった。

本研究は農林水産技術会議特別研究費によるものである。本研究の実施にあたり、種々の便宜をはかっていただいた東海区水産研究所生物化学部平尾秀一部長を始めとして、部員の方々に厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) Inter-American Tropical Tuna Commission, 1972: "Mercury in tuna: A Review" (Background Paper No. 4), pp. 1~11.
- 2) FORRESTER, C. R., K. S. KETCHEN and C. C. WONG, 1972: *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **29**, 1487~1490.
- 3) 山村弥六郎, 1962: 日水誌, **28**, 39~44.
- 4) 松原喜代松・落合 明, 1965: 魚類学(下), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 731~807.
- 5) 浜田盛承・稲益猷二・上田 正, 1977: 本報告, **25**, 213~220.
- 6) 武田道夫・稲益猷二・越川虎吉・上田 正・中野道紀・富田輝雄・浜田盛承, 1976: 本報告, **25**, 47~65.
- 7) 農林水産技術会議事務局編, 1974: 「マグロ水銀含有起因とその拮抗物質に関する研究」, 昭和48年度推進会議資料, pp. 10~11.
- 8) 農林水産技術会議事務局編, 1975: 「マグロ水銀含有起因とその拮抗物質に関する研究」, 昭和49年度推進会議資料, pp. 16~23.
- 9) 農林水産技術会議事務局編, 1976: 「マグロ水銀含有起因とその拮抗物質に関する研究」, 昭和50年度推進会議資料, pp. 10~36.
- 10) 大島幸吉, 1949: 水産動物化学(上), 朝倉書店, 東京, p. 3.
- 11) 大島幸吉, 1949: 水産動物化学(上), 朝倉書店, 東京, p. 48.