魚介類筋肉におけるカルシウムの含量と分布

讃岐 斉, 秦 正弘, 竹内 昌昭

(1998年7月22日受付)

Distribution of Calcium in Fish and Marine Invertebrate Muscles.

Hitoshi Sanuki,^{*1,2} Masahiro Hata,^{*3} and Masaaki Takeuchi^{*1}

The calcium contents of 21 species of fish and nine species of marine invertebrate muscles were determined by atomic absorption spectroscopy. The results are summarized as follows: The calcium contents in fish ordinary muscles and invertebrate muscles were 2.2–39.0 and 5.9–45.5 mg/100 g, respectively. The contents in white muscles were higher than those in reddish muscles. The calcium contents in muscles of small-sized fishes were higher than those in the muscles of larger-sized fishes. The contents of water soluble fraction were higher than those of water insoluble fraction except in common mackerel, skipjack, albacore and blue shark. In fish muscle containing high-level calcium, a high Ca^{2+} -binding protein content was found in water soluble fraction. However, these correlations were not observed in marine invertebrate muscles.

キーワード：魚類，無脊椎動物，カルシウム，筋肉

カルシウムは、生物の硬組織の構成成分のみならず、カルシウムイオンとして、筋肉の収縮、^{1,2)} 物質代謝および情報伝達³⁻⁵⁾など多くの現象に関与しており、重要な役割を果たしている。細胞内カルシウム濃度は通常 10^{-7}M 程度と低く抑えられており、必要量以上のカルシウムは筋小胞体などに貯蔵され、必要に応じてこれらカルシウムプールより動員される。^{6,7)}

魚介肉は畜肉に比べカルシウム含量が高く、種によるカルシウム含量の違いも大きいことが知られている。⁸⁾ また魚介肉の形状・性質が畜肉に比べ種による違いが大きいことも明らかとなっている。魚類の骨格筋には普通筋と血合筋があり、それらははっきりと分離して存在しており、その存在割合は魚種によって異なっている。^{9,10)} 貝類閉殻筋には平滑筋、横紋筋の二種の筋肉が存在している。¹¹⁾ またイカ胴肉には魚類には無い斜紋筋が存在している。¹¹⁾ 筋肉のカルシウム含量や存在状態がこれら筋肉の機能および量とどのような関係があるかは

大変興味深い、いまだ明らかでない。筋肉におけるカルシウム含量と部位・組織分布に関しては魚類ではマイワシ、マサバ、サケ、マアジ、スケトウダラおよびカタチイワシ、⁴⁻⁶⁾ 無脊椎動物ではザリガニ、¹²⁾ イカ¹³⁾ などについて報告されているがその例は少ない。カルシウムの存在状態については報告が無いようである。

本研究ではカルシウムの含量、組織分布と筋肉の機能との関係を考察するための基礎データを得るために、各種魚介類筋肉のカルシウム含量を、種別、部位別に調べた。また、一部の種については筋肉を水可溶性画分、水不溶性画分に分け、両画分のカルシウム含量を調べるとともに、細胞内のカルシウム動態に関するカルシウム結合タンパク質の存在についても調べた。

実験方法

試料魚介類 供試試料の魚類 21 種および無脊椎動物 9 種は宮城県塩釜市、仙台市、気仙沼市、石巻市および

*1 東北大学大学院農学研究科生物資源化学講座 (Laboratory of Marine Biochemistry, Graduate School of Agriculture, Tohoku University, Tsutsumidori-Amamiya, Aoba, Sendai, Miyagi 981-8555, Japan).

*2 現所属：鹿児島県立国分高等学校 (Kokubu High School, Kokubu, Kagoshima 899-4332, Japan).

*3 東北大学大学院農学研究科生物環境機能学分野 (Laboratory of Environmental Biochemistry, Graduate School of Agriculture, Tohoku University, Tsutsumidori-Amamiya, Aoba, Sendai, Miyagi 981-8555, Japan).

*4 秦 満夫：昭和 59 年度魚介類有効成分利用技術成果の概要，水産庁研究部研究課，1985，pp. 84-115.

*5 秦 正弘：昭和 61 年度魚介類有効成分利用技術成果の概要，水産庁研究部研究課，1987，pp. 114-178.

*6 竹内昌昭，秦 正弘，佐藤善夫，山口敏康，伊藤正雄：有効栄養成分利用のための基礎研究．栄養成分，昭和 62 年度魚介類有効栄養成分利用技術成果の概要，水産庁研究部研究課，1988，pp. 136-239.

*7 梅田 豊：マサバ普通肉におけるカルシウム含量について．卒業論文，東北大学，仙台，1988，45p.

女川町において購入した。コイ、ギンザケおよびニジマスは養殖魚を用いた。試料は、氷あるいはドライアイスで、冷却しながら実験室へ搬入した。直ちに使用しないものは、 -80°C で凍結保存した。

分析試料の調製 魚類については背側普通肉を小骨が入らないように採り分析に用いた。無脊椎動物の筋肉についても、他の組織などが入らないように採り分析に用いた。水可溶性画分と水不溶性画分中のカルシウムの定量に際しては以下の抽出操作を行った。すなわち、筋肉5~12 gに、4倍量の蒸留水またはリン酸緩衝液（イオン強度：0.05, pH 7.5）を加え、ポリトロン型ホモジナイザーで60秒間ホモジナイズした後、遠心分離（ $40,000\times g$, 20分, 4°C ）した。沈殿に対し、更に上記の操作を2回繰り返し、最後に沈殿を少量の蒸留水またはリン酸緩衝液で洗浄した。この洗浄液と上記の操作で得られた上清を合わせ水可溶性画分とし、沈殿を水不溶性画分とした。これらの操作はことわりのない限り、約 4°C で行った。

水可溶性画分に対しては、さらに80%エタノール処理、5%トリクロロ酢酸処理、熱変性処理を行った。¹⁴⁾

- (1) エタノール処理：水可溶性画分にエタノールを徐々に加え、エタノールの最終濃度を80%とした後、約2時間振とうした。
- (2) トリクロロ酢酸処理：水可溶性画分に10%トリクロロ酢酸溶液を徐々に加え、トリクロロ酢酸の最終濃度を5%とした後、約1時間振とうした。
- (3) 熱変性処理：水可溶性画分をビーカーに入れ、沸騰浴中で1~2時間加熱した。

各処理後、遠心分離（ $40,000\times g$, 20分）した。沈殿を(1)は80%エタノール、(2)は5%トリクロロ酢酸溶液、(3)は蒸留水またはリン酸緩衝液で1~2回洗浄した後、遠心分離（ $40,000\times g$, 20分）し、上清を合わせて可溶性画分（除タンパク質上清画分）とし、沈殿を不溶性画分とした。

原子吸光法によるカルシウムの定量¹⁵⁾ 試料を100 mlビーカーに秤り取り、プレートヒーターを用いて蒸発、乾固した。ガスバーナーにより部分的に灰化した後、電気炉で 500°C , 48時間灰化した。灰化後、硝酸3 mlおよび60%過塩素酸3 mlを加え、プレートヒーター上で加熱し残存炭素を除去した。冷却後、1%塩酸を加え灰分を溶解、50 mlに定容しこれを1%塩酸灰化試料溶液とした。25 ml容メスフラスコに1%塩酸灰化試料溶液を適量採取し、干渉除去剤として塩化ランタン0.1 N塩酸溶液3 mlを加え、1%塩酸で定容し原子吸光測定用試料溶液とした。除タンパク質上清画分は灰化処理せず、そのまま用いた。原子吸光光度計（日立、170-30型）を用いて波長422.7 nmにおける吸光度を

測定し、検量線よりカルシウム量を求めた。検量線は原子吸光分析用カルシウム標準溶液（1000 ppm, 和光純薬工業）および塩化ランタン0.1 N塩酸溶液より調製したカルシウム含量0.5~4.0 ppmの標準溶液を用い作成した。

タンパク質の定量 タンパク質はLowryらの方法¹⁶⁾に従い、牛血清アルブミンを標品として定量した。

結 果

魚類普通肉のカルシウム含量 魚類21種の普通肉中の総カルシウム含量をTable 1に示した。ヨシキリザメが最も低く2.2 mg（筋肉100 g当たり、以下同じ）、マアナゴが最も高く39.0 mgであった。赤身魚のうちマサバ、カツオおよびビンナガは3.0~5.5 mgと低く、畜肉の値（2~6 mg）⁸⁾と同程度であったが、同じ赤身魚でもサンマは12.5~16.7 mg、マアジは8.0, 11.9 mgであり、マサバ、カツオおよびビンナガよりも高い値であった。またカレイ類は5.7~10.6 mg、タラ類は8.7~9.5 mg、マダイ、クロソイ、イサキおよびアカカマスは11.1~18.9 mgであった。

体重とカルシウム含量との関係をみると体重300 g未満の7魚種のカルシウム含量の平均値は約15 mgと高く、300 g以上の15魚種のそれは約7 mgと低い。マサバが約4 mg、大型の魚であるビンナガ、カツオが3.0~5.5 mgと低いことから、比較的大型（300 g以上）の赤身魚の筋肉ではカルシウム含量が低い傾向にあると言える。マアジおよびサンマなど小型（300 g未満）の赤身魚の筋肉のカルシウム含量は8.0~16.7 mgと比較的高い。白身魚の筋肉のカルシウム含量は全般的に高いが、魚種間での差が大きい。比較的大型（400 g以上）の魚のサケ、タラおよびカレイ類は5.7~10.6 mgである。一方、比較的小型（400 g未満）の白身魚の筋肉では大型魚より高く、11.1~39.0 mgである。

タンパク質1 g当たりのカルシウム含量はTable 1に示すように、種による変動が大きく、ヨシキリザメが最も低く0.16 mgであり、その他マサバ、カツオおよびビンナガも、それぞれ0.27, 0.18 および0.27 mgと低い。一方、コイ、マダイおよびマアナゴは1.0 mg以上の高い値を示し、最も高い値を示したマアナゴとヨシキリザメとでは両者に約14倍の開きがあった。

魚類筋肉における水可溶性画分および水不溶性画分のカルシウムの分布 蒸留水あるいはリン酸緩衝液（ $I=0.05$, pH 7.5）を用い普通肉を分画した際のカルシウム分布をTable 2に示した。水可溶性画分と水不溶性画分のカルシウム量の和は、Table 1の総カルシウム量より若干低い、これは分画の際、ホモジナイザーや容器壁についたカルシウムが一部回収されなかったことに

Table 1. Calcium contents in fish ordinary muscles

No.	Japanese name	English name	Scientific name	Body length (cm)	Body weight (g)	Ca content	
						mg/100 g muscle	mg/g protein
1	Masaba	Common mackerel	<i>Scomber japonicus</i>	29.0	311	4.3	0.27
2	"	"	"	29.5	345	5.4	—
3	"	"	"	30.5	425	3.3	0.20
4	"	"	"	29.5	330	4.7	—
5	"	"	"	28.0	320	3.8	—
6	"	"	"	27.5	340	4.0	—
7	Katsuo	Skipjack	<i>Katsuwonus pelamis</i>	—	—	3.2	0.18
8	"	"	"	42.0	1604	3.8	0.17
9	"	"	"	45.0	2370	5.0	—
10	Binnaga	Albacore	<i>Tunnus alalunga</i>	—	—	3.0	0.27
11	"	"	"	—	—	5.5	—
12	Maaji	Horse mackerel	<i>Trachurus japonicus</i>	23.5	238	8.0	0.40
13	"	"	"	21.0	149	11.9	0.60
14	Sanma	Pacific saury	<i>Cololabis saira</i>	29.5	131	12.5	0.62
15	"	"	"	27.0	112	16.1	0.80
16	"	"	"	27.5	119	16.7	0.83
17	"	"	"	27.5	114	15.5	—
18	"	"	"	26.5	110	14.1	—
19	Ginzake (Cultured)	Coho salmon	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	—	—	9.2	0.63
20	"	"	"	—	—	6.1	0.42
21	Nijimasu (Cultured)	Rainbow trout	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	32.0	490	10.8	0.56
22	"	"	"	24.5	215	11.6	0.64
23	Koi (Cultured)	Carp	<i>Cyprinus carpio</i>	32.5	709	16.9	1.12
24	Meitagarei	Finespotted flounder	<i>Pleuronichtys cornutus</i>	33.0	764	7.0	0.61
25	"	"	"	31.0	660	9.5	0.51
26	Babagarei	Dover sole	<i>Microstomus achne</i>	31.0	436	10.6	0.81
27	Magarei	Sand dab	<i>Limanda herzensteini</i>	25.0	459	7.1	0.37
28	Isigarei	Stone flounder	<i>Kareius bicoloratus</i>	35.0	880	5.7	0.24
29	Suketodara	Alaska pollack	<i>Theragra chalcogramma</i>	60.5	1708	9.5	0.64
30	Madara	Pacific cod	<i>Gadus macrocephalus</i>	45.5	1367	8.7	0.51
31	Kitiji	Bighand thornyhead	<i>Sebastolobus macrochir</i>	19.5	239	16.5	0.87
32	Madai	Red sea bream	<i>Pagrus major</i>	21.4	340	18.9	1.06
33	Kurosoi	Jacopever	<i>Sebastes schlegeli</i>	22.5	382	12.7	0.69
34	Isaki	Three-line grunt	<i>Parapristipoma trilineatum</i>	22.5	229	13.3	0.68
35	Akakamasu	Wahoo	<i>Sphyrna pinnatus</i>	22.5	96	12.3	0.62
36	"	"	"	23.5	103	11.1	0.66
37	Maanago	Conger eel	<i>Conger myriaster</i>	55.0	289	39.0	2.19
38	Yosikiri-zame	Blue shark	<i>Prionace glauca</i>	150	25000	2.2	0.16

Table 2. Distribution of calcium in fish ordinary muscles

	Sample	Calcium content	
		Water soluble fraction mg/100 g muscle	Water insoluble fraction mg/100 g muscle
1* ¹	<i>Scomber japonicus</i>	1.69	2.24
7* ¹	<i>Katsuwonus pelamis</i>	1.13	1.97
8* ²	"	1.54	2.13
11* ¹	<i>Tunnus alalunga</i>	2.16	3.13
14* ²	<i>Cololabis saira</i>	8.00	4.28
19* ¹	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	4.54	4.01
20* ¹	"	3.11	2.73
23* ¹	<i>Cyprinus carpio</i>	8.64	6.70
24* ¹	<i>Microstomus achne</i>	3.61	3.32
25* ¹	"	4.62	4.17
26* ²	<i>Pleuronichtys cornutus</i>	7.22	3.20
27* ²	<i>Limanda herzensteini</i>	3.80	3.07
29* ²	<i>Theragra chalcogramma</i>	6.22	2.70
30* ²	<i>Gadus macrocephalus</i>	6.37	2.20
33* ²	<i>Sebastes schlegeli</i>	9.33	3.18
38* ²	<i>Prionace glauca</i>	0.87	1.25

*¹: extracted with D.W.*²: extracted with phosphate buffer (pH 7.5, I=0.05).

よる。しかし回収率は90.8~99.0%でありカルシウムの大部分は回収されている。魚肉においては、一般に中性の低イオン強度溶媒 (I=0.05~0.15) が筋肉構成タンパク質の分画抽出に用いられる¹⁷⁾が、リン酸緩衝液 (I=0.05, pH 7.5) と蒸留水では抽出の結果は同様の傾向を示した。水抽出により得られた水可溶性タンパク質を電気泳動した後 ⁴⁵Ca オートラジオグラフィを行ったところ、カルシウム結合タンパク質の一つであるトロポニン C¹⁸⁾ の混入は認められなかった (讃岐 齊, 未発表)。筋肉の総カルシウム含量の低い魚種では、水不溶性画分中のカルシウム含量が水可溶性画分よりも高く、総カルシウム含量の高い魚種では、水可溶性画分中の含量が水不溶性画分よりも高かった。また、複数の試料を分析したギンザケおよびメイタガレイでは、カルシウムの分布は個体による差は少なくそれぞれ魚種固有の値を

示した。以上のことから、魚類筋肉におけるカルシウム分布は、魚種間で異なることが示された。

水可溶性画分のカルシウム分布の分画法による違いをマサバ筋肉についてみたところ、その分布は処理法により大きく変動した (Fig. 1)。各種処理後における可溶性画分のカルシウム含量は、5% トリクロロ酢酸処理、熱処理、80% エタノール処理の順に高く、一方不溶性画分におけるカルシウム含量はその逆になった。分画を5% トリクロロ酢酸処理により行った場合、溶液は強酸性となり、タンパク質と結合しているカルシウムがタンパク質より遊離するといわれており、¹⁹⁾ そのために5% トリクロロ酢酸処理では、可溶性画分のカルシウム含量が80% エタノール処理および熱処理のそれに比べ高くなったものと考えられる。

水可溶性画分を、80% エタノール処理した結果を Table 3 に示した。サンマ、メイタガレイ、ババガレイ、マガレイ、スケトウダラ、マダラおよびクロソイでは、水不溶性画分よりも80% エタノール不溶性画分のカルシウム含量が高く、後者は全体の46~72% を占めた。ヨシキリザメおよびカツオは、80% エタノール不溶性画分におけるカルシウムの分布は27~39% と低かった。この二つの画分におけるカルシウム分布の差はクロソイ、ババガレイ、スケトウダラおよびマダラなどで大きく、両者の間に2倍以上の開きが認められた。またタンパク質1g当たりのカルシウム含量は、水不溶性画分では0.13~0.35 mg の範囲であるのに対し、80% エタノール不溶性画分のカルシウム含量は0.10~1.10 mg と変動が大きい。また、総カルシウム含量の高いものは80% エタノール不溶性画分における含量も高い。よって、魚類筋肉のカルシウム含量の違いは、80% エタノール不溶性画分のカルシウムの違いによるものと考えられる。

無脊椎動物筋肉のカルシウム含量 9種の試料のうちホタテガイおよびマガキは、閉殻筋を横紋筋と平滑筋に、スルメイカは外套、鰭および腕に分けそれぞれのカルシウムを定量した (Table 4)。ホタテガイの横紋筋のカルシウム含量は5.9~12.0 mg (筋肉100g当たり、以下同じ) 平滑筋では9.4~33.0 mg であった。またマガキの横紋筋は18.9, 21.6 mg, 平滑筋は33.7, 31.6 mg であり、両種ともに平滑筋が横紋筋よりも高かった。ウバガイ (閉殻筋)、エゾアワビ (貝殻筋) およびサザエ (足筋) は、それぞれ15.4, 14.2 および15.9 mg と15 mg 前後の値であったが、アカガイ (閉殻筋) は44.5 mg と他の貝類に比べ高かった。マダコ腕部は12.4~14.8 mg であり部位により若干違いが見られた。スルメイカの外套、腕および鰭の含量は、それぞれ8.0, 12.8 および15.8 mg で部位により2倍程度の違いが認めら

Fig. 1. The effects of TCA, heat and ethanol treatment in the calcium contents of the soluble and insoluble fraction of water extracts in the mackerel muscle.

□, 5% TCA treatment; ▨, heat treatment; ■, 80% ethanol treatment.

Table 3. Distribution of calcium in fish ordinary muscles

Sample	Calcium content				
	Water soluble fraction			Water insoluble fraction	
	80% ethanol soluble fraction mg/100 g muscle	80% ethanol insoluble fraction mg/100 g muscle	mg/g protein	mg/100 g muscle	mg/g protein
7*1 <i>Katsuwonus pelamis</i>	0.28	0.85	—	1.97	—
8*2 "	0.11	1.43	0.14	2.13	0.22
14*2 <i>Cololabis saira</i>	0.22	7.78	0.63	4.28	0.33
24*1 <i>Pleuronichtys cornutus</i>	0.15	3.56	—	3.32	—
25*1 "	0.19	4.43	—	4.17	—
26*2 <i>Microstomus achne</i>	0.42	6.80	1.05	3.20	0.31
27*2 <i>Limanda herzensteini</i>	0.62	3.18	0.40	3.07	0.30
29*2 <i>Theragra chalcogramma</i>	0.42	5.80	0.85	2.70	0.27
30*2 <i>Gadus macrocephalus</i>	0.37	6.00	0.45	2.20	0.26
33*2 <i>Sebastes schlegeli</i>	0.27	9.06	1.10	3.18	0.35
38*2 <i>Prionace glauca</i>	0.17	0.70	0.10	1.25	0.13

*1 : extracted with D.W.

*2 : extracted with phosphate buffer (pH 7.5, I=0.05).

れた。またケガニの頭胸部筋肉は 23.5 mg, 歩脚肉の腕節は 45.5 mg, 同じく前節は 41.0 mg であり歩脚肉で高かった。スルメイカ筋肉では鰭および腕の含量は外套のその約 2 倍であり, マダコの腕では基部より先端部

の方が高かった。

無脊椎動物筋肉の水可溶性画分および水不溶性画分のカルシウム分布 リン酸緩衝液を用いて抽出した結果を Table 5 に示した。ホタテガイおよびエゾアワビでは水

Table 4. Calcium contents in invertebrate muscles

No.	Sample			Tissue	Body length (cm)	Body weight (g)	Ca content	
	Japanese name	English name	Scientific name				mg/100 g muscle	mg/g protein
1	Hotategai	Scallop	<i>Patinopecten yessoensis</i>	Striated muscle	12.3	183	5.9	0.49
				Smooth muscle	"	"	9.4	—
2	"	"	"	Striated muscle	11.5	143	12.0	1.07
				Smooth muscle	"	"	33.0	2.70
3	"	"	"	Striated muscle	12.0	201	7.7	0.49
				Smooth muscle	"	"	20.1	1.24
4	"	"	"	Striated muscle	10.8	167	7.4	0.53
5	"	"	"	Striated muscle	11.5	199	7.3	0.48
6	Magaki	Oyster	<i>Crassostrea gigas</i>	Striated muscle	24.0	303	18.9	1.06
				Smooth muscle	"	"	33.7	1.88
7	"	"	"	Striated muscle	20.0	260	21.6	1.13
				Smooth muscle	"	"	31.6	1.74
8	Ezoawabi	Abalones	<i>Haliotis discus hannai</i>	Smooth muscle	11.5	215	14.2	0.87
9	Ubagai	Surf clam	<i>Pseudocardium sachalinensis</i>	Striated muscle	10.5	298	15.4	0.96
10	Sazae	Turbans	<i>Batillus cornutus</i>	Smooth muscle	10.0	258	15.9	1.34
11	Akagai	Ark shell	<i>Scapharca broughtonii</i>	Striated muscle	8.5	155	44.5	2.16
12	Surumeika	Common squid	<i>Todarodes pacificus</i>	mantle	43.5	225	8.0	0.52
				arm	"	"	12.8	1.00
				laterl fin	"	"	15.8	1.25
13	Madako	Common octopus	<i>Octopus vulgaris</i>	arm (point)	56.0	1236	12.4	0.72
				arm (middle)	"	"	12.5	0.96
				arm (root)	"	"	14.8	1.14
14	Kegani	Crab	<i>Erimacrus isenbeckii</i>	muscle	28.5	226	45.5	2.83
				muscle	"	"	41.0	2.20
				muscle	"	"	23.5	1.51

Table 5. Distribution of calcium in invertebrate muscles*

Sample	Calcium content				
	Water soluble fraction			Water insoluble fraction	
	80% ethanol soluble fraction mg/100 g muscle	80% ethanol insoluble fraction mg/100 g muscle	mg/g protein	mg/100 g muscle	mg/g protein
1 <i>Patinopecten yessoensis</i>	0.19	2.61	0.29	2.59	0.31
8 <i>Haliotis discus hannai</i>	0.15	6.77	0.46	6.88	0.79
9 <i>Pseudocardium sachalinensis</i>	0.19	8.70	1.05	5.78	0.87
12 <i>Todarodes pacificus</i>	0.38	5.31	0.30	2.21	0.46

* : extracted with phosphate buffer (pH 7.5, I=0.05).

可溶性画分と水不溶性画分のカルシウム含量はほぼ同量であったが、ウバガイおよびスルメイカでは水可溶性画分が水不溶性画分より高く、スルメイカでは70%以上

が水可溶性画分に分布した。筋肉の総カルシウム量と水可溶性画分および水不溶性画分のカルシウム含量の分布の間には魚類にみられた相関は認められなかった。

80% エタノール不溶性画分のタンパク質 1 g 当たりのカルシウム含量は、ホタテガイおよびスルメイカでは約 0.30 mg と低く、ウバガイでは 1.05 mg と高かった。また、水不溶性画分のカルシウム含量も同様に、ホタテガイおよびスルメイカで低く、ウバガイはこれらの 2 倍程度の値を示した。また、総カルシウム量が高くなるにつれ 80% エタノール不溶性画分、水不溶性画分のタンパク質 1 g 当たりのカルシウム含量がともに高くなる傾向が見られた。

考 察

これまで報告されている筋肉を主とする魚類可食部のカルシウム含量⁸⁾は、今回調べた値より高いものが多い。これには、試料採取時の小骨の混入により高い値を示したものもあると考えられる。これに関して、梅田は、マサバについて、漁獲海域、漁期、魚体の大きさと普通肉のカルシウム含量について、小骨の混入を防ぎその関連を調べた。^{*7}それによるとマサバのカルシウム含量は 100 g 当たりほとんどが 3~6 mg の値（平均値 4.1 mg）であり、試料により 2 倍程度の開きがあった。今回のマサバ普通肉のカルシウム含量は 3.3~5.4 mg（平均値 4.3 mg）であり、梅田の結果と合わせて考えると、試料の調製に注意すれば個体による差は小さくなるといえる。サンマについても 12.5~16.7 mg となり、その他複数の個体を分析した魚種では、ほぼ同程度の値を示したことから、普通肉のカルシウム含量は魚種それぞれほぼ固有の値があると言える。このように魚類普通肉のカルシウム量はさほど高くはなく、およそ 100 g 当たり 50 mg 以下と言うのが妥当な値であろう。体重との関係においては、比較的大型の魚種の筋肉は小型の

のよりも低いカルシウム含量を示す傾向が認められた。このことについては、魚種、個体数を増やし更に検討する必要がある。

赤色筋、白色筋の違いや血合筋の発達の違いは、魚の生育域や遊泳能力と深いつながりを持つといわれている。^{9,10)}カツオ、ビンナガおよびマサバなどの回遊魚の筋肉のカルシウム含量はおよそ 5 mg/100 g 以下と低く、それに対して底魚、磯魚は高い値を示した。すなわち、持続的な遊泳時に機能する赤色筋のカルシウム含量と、瞬発的な遊泳に機能する白色筋のそれとでは大きく異なり、魚類の生態と筋肉のカルシウム含量とは、何らかの関係があることが示唆された。

無脊椎動物筋においては、ホタテガイの横紋筋のカルシウム含量は 5.9~12.0 mg の値であり、試料により 2 倍程度の開きが認められた。すなわち、魚類普通肉のカルシウム含量と同様に、試料の調製に注意すれば個体による差はさほど大きくはない。横紋筋と平滑筋で、また筋肉の部位によっても含量に差が認められ、運動機能に関与する部位のカルシウム含量は高い値を示し、イカの筋肉についての報告と一致した。¹³⁾

今回得られたカルシウムの分布は、ホモジナイズの際カルシウム貯蔵部位である筋小胞体、ミトコンドリアなどが破壊され、また細胞外カルシウムまでも混合された状態での値を示しているもので、生体内において細胞が刺激を受けていない生理的な細胞内での分布²⁰⁾を示しているものではない。ホモジナイズした状態では、カルシウム濃度は mM オーダーとなり、カルシウムと結合能のあるタンパク質をはじめとする物質は全て、カルシウムと結合しているものと推測される。²¹⁾

水不溶性画分のタンパク質 1 g 当たりのカルシウム含

Fig. 2. Calcium contents of the 80% ethanol insoluble fraction and water insoluble fraction in fish ordinary muscles.

量はヨシキリザメを除き 0.3 mg 前後である (Fig. 2)。水不溶性画分の大部分はアクトミオシンを主体とする筋原繊維タンパク質であり、従ってカルシウムの結合量もほぼ一定になると考えられる。水不溶性画分のカルシウム含量はそれ故にアクトミオシン量を反映していることになる。ヨシキリザメについては、サメでは筋基質タンパク質や残渣中の細胞内タンパク質が多いために、²²⁾ タンパク質 1 g 当たりのカルシウム含量が低くなったものと思われる。

魚類筋肉ではタンパク質 1 g 当たりのカルシウム含量が高いものは (Table 1), そのカルシウムは水可溶性画分に多く分布し (Table 2), 80% エタノール不溶性画分におけるタンパク質 1 g 当たりのカルシウム含量も高くなる傾向が認められた (Fig. 2)。このタンパク質のほとんどは水可溶性タンパク質と考えられるので、80% エタノール不溶性画分のカルシウム量は、タンパク質に結合したカルシウムによるものと結論される。

無脊椎動物筋肉におけるカルシウムの分布は、魚類筋肉において認められた傾向とは異なっていた。つまり、魚類筋肉と無脊椎動物筋肉とでは、水可溶性画分および水不溶性画分に存在するカルシウム結合タンパク質の量や種類の違いが考えられ、両者の筋肉におけるカルシウムの存在形態は異なることが示唆される。

カルシウムは低濃度では生理活性、代謝の調節に重要な役割を果たしているが、高濃度になると細胞毒ともなるので細胞内の濃度はある一定の低いレベルに調節されている。⁶⁾ その濃度調節に関与するタンパク質がパルブアルブミンを代表とするカルシウム結合タンパク質である。²³⁾ 今後、カルシウム結合タンパク質や筋小胞体の量、および性状についても検討する必要がある。

文 献

- 1) J. M. Gills: Relaxation of vertebrate skeletal muscle. A synthesis of the biochemical and physiological approaches. *Biochim. Biophys. Acta*, **811**, 97-145 (1985).
- 2) 山本啓一, 丸山工作: 筋肉, 化学同人, 京都, 1989, 117p.
- 3) H. ラスムッセン: 細胞の持続反応とカルシウムサイクル. *サイエンス*, **12**, 60-70 (1989).
- 4) 藤本 守: 体液カルシウムのホメオスタシス. 生体の科学, **38**, 9-142 (1987).
- 5) 小島 至: カルシウムと細胞情報, 「実験医学バイオサイエンス 3」(一戸裕子編), 羊土社, 東京, 1994, 156p.
- 6) 最上秀夫: 細胞内のカルシウムイオン動態とその調節, 「カルシウムのシグナル伝達機構」(小島 至編), 中外医学社, 東京, 1993, pp. 1-5.
- 7) D. Pietrobon, F. Di Virgilio, and T. Pozzan: Structural and functional aspects of calcium homeostasis in eukaryotic cells. *Eur. J. Biochem.*, **193**, 599-622 (1990).
- 8) 科学技術庁資源調査会編: 四訂日本食品標準成分表, 大蔵省印刷局, 東京, 152-177 (1982).
- 9) 落合 明: 生物学的特徴, 「白身の魚と赤身の魚」(日本水産学会編), 水産学シリーズ 13, 恒星社厚生閣, 東京, 1986, pp. 7-27.
- 10) 土屋隆英: 筋肉の構造, 「水産動物筋肉タンパク質の比較生化学」(新井健一編), 水産学シリーズ 76, 恒星社厚生閣, 東京, 1989, pp. 9-15.
- 11) 今野久仁彦: 無脊椎動物のタンパク質, 「魚の科学」(阿部宏喜, 福家真也編), 朝日書店, 東京, 1995, pp. 12-21.
- 12) J. A. Cox, L. Kohlar, and G. Benzonana: Ionic composition and distribution of myogen proteins in the tail muscle of fresh water crayfish. *Comp. Biochem. Physiol.*, **53B**, 101-105 (1976).
- 13) T. Taguti, K. Suzuki, and I. Osakabe: Magnesium and calcium contents of fish and squid tissues. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **35**, 405-409 (1969).
- 14) 須山三千三: 非タンパク態窒素成分を定量するための組織抽出液の調製, 「水産生物化学・食品学実験書」(齊藤恒行, 内山 均, 梅本 滋, 河端俊治編), 恒星社厚生閣, 東京, 1974, pp. 2-7.
- 15) 日本食品工業学会食品分析法編集委員会編: 食品分析法, 光琳, 東京, 1982, pp. 269-366.
- 16) O. H. Lowry, N. J. Rocebrough, A. L. Farr, and R. C. Randall: Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, **193**, 265-275 (1951).
- 17) 志水 寛, 柄多 哲, 西岡不二男: 低イオン強度領域における魚類筋肉からのタンパク溶出パターン. 日本誌, **42**, 1025-1031 (1976).
- 18) J. F. Head and S. V. Perry: The interaction of the calcium-binding protein (troponin C) with bivalent cations and the inhibitory protein (troponin I). *Biochem. J.*, **137**, 145-154 (1974).
- 19) Y. Ogawa and M. Tanokura: Steady-State properties of calcium binding to parvalbumins from bullfrog skeletal muscle: Effects of Mg^{2+} , pH, ionic strength, and temperature. *J. Biochem.*, **99**, 73-80 (1986).
- 20) 幹 誠: 筋小胞体のカルシウム遊離チャンネル. 蛋白質核酸酵素, **34**, 1331-1341 (1989).
- 21) Ch. Gerday: Soluble calcium binding proteins in vertebrate and invertebrate muscles, in "Calcium and Calcium Binding Proteins" (ed. by Ch. Gerday, L. Bolis and R. Gills), Springer-Verlag, Berlin, 1988, pp. 23-39.
- 22) 鈴木たね子: 化学的特性, 「水産利用原料」(野中順三九編), 恒星社厚生閣, 東京, 1987, pp. 176-181.
- 23) C. W. Heizmann: Parvalbumin, an intracellular calcium-binding protein; distribution, properties and possible roles in mammalian cells. *Experientia*, **40**, 910-921 (1984).