

魚介類の死後硬直と鮮度（K値）の変化

小関聡美*1・北上誠一*2・加藤 登*1・新井健一*2

Rigor mortis of fish and shellfish and evaluation of freshness of their muscles as K value

Satomi KOSEKI, Seiichi KITAKAMI, Noboru KATO, and Ken-ichi ARAI

Abstract

To evaluate the freshness of fish and shellfish, the decomposed compounds from ATP in their muscles were analyzed quantitatively with a lapse of storage time.

The K value of muscle was then demonstrated as $B/A \times 100$, where B is the amount of inosine and hypoxanthine and A is the sum amount of ATP-related compounds.

The onset of rigor mortis and following shortening of the muscles from aqueous animals are known to occur very earlier than those from terrestrial animals, and the content of ATP is closely related to the changing in development of rigor mortis of the muscles. Consequently, the method for evaluating the freshness of these muscles by using the K value has become popular especially in Japan, because the fresh fillet of these animals in rigor state were suitable to be raw material of 'Sashimi' and 'Sushi'.

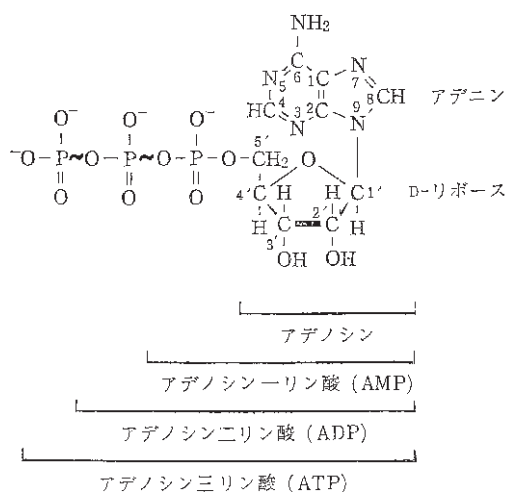
In addition to the K value, other appropriate evaluating indices like as organoleptical, physical, and microbial tests depending on the type of processed muscle food product have to measure. The synthetic evaluation by using several indices used to give us more reasonable evaluation of the quality of product.

緒 言

動物が死ぬと、その筋肉中で生きている時とは異なる生化学的変化が起こる。すなわち筋肉は、ATP（アデノシン三リン酸）の化学エネルギー（図1）を利用して動く器官であり、ATPの消費と同時に再生産を行うが、死後はATPを再生産する機能を失い、それが引き金となって、生鮮食品および加工食品原料としての適性に影響を受ける。それゆえ、魚肉中で起こる諸々の生化学的変化を知ることが、品質評価や品質制御を行う上で必要不可欠である。

1 死後変化

生きている動物の筋肉はしなやかで透明感があるが、死後は硬化して不透明となる。これが死後硬直（Rigor mortis）である。硬直に至る時間は、一般にウシでは24時間、



pH 7.0 でイオン化している状態の ATP の構造
(記号~は“高エネルギー”結合を表す)

図1 生体エネルギーと ATP
(A. L. Lehninger, 1968)

2006年10月7日受理

*1 東海大学海洋学部水産学科 (Department of Fisheries, The School of Marine Science and Technology, Tokai University)

*2 社団法人全国すり身協会 (National Surimi Manufactures Association; Abashiri)

ブタでは12時間、ニワトリでは2時間くらいで、硬直の持続時間は5℃ではウシで8～10日間、ブタで4～6日間、ニワトリで半日～1日間といわれる。一方、魚肉では死後数分から十数時間で硬直し、持続時間は5～22時間であり、極めて速いのが特徴であるが(図2)、その理由は未だ明らかにされていない。

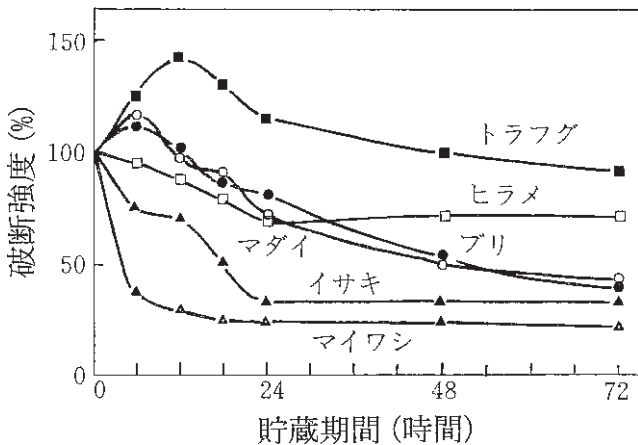


図2 代表的な刺身の対象魚を4℃で冷蔵した場合
破断強度の変化(畑江, 1995)

硬直の開始時間及びその持続時間が異なるのは、筋肉内で起こる様々な生化学反応の速度に依存し、それは動物の種ばかりでなく、栄養状態や貯蔵温度などの諸条件によって影響を受けるからである。硬直に至る主な生化学的反応は、先ずフォスファージェンおよびグリコーゲンの低下であるが、魚肉中のフォスファージェンはクレアチンリン酸であり、無脊椎動物ではアルギニンリン酸である。硬直に伴ってATPが分解し、生成したADPは、フォスファージェン

とリン酸転移酵素によってATPへと再生される。また、ミオキナーゼによって2分子のADPからATPを再生する系も働いている。一方、グリコーゲンは嫌氣的条件下ではグルコースを経て乳酸へと分解される過程でATPを生産する。さらに赤色筋に多く含まれるミトコンドリアの作用(呼吸)を介して、好氣的条件下での効率的なATP生産を行う(図3)。このようなATPの補給機構によって、死後しばらくの間は筋肉中のATP量は維持されるが、やがてフォスファージェンやグリコーゲンが消失し、次いでATPも消失すると、筋肉は硬直ようになる。ATPが消失する時期と筋肉が硬直する時期はほとんど一致している。

動物の生存時の筋肉のpHは7.2～7.4であるが、解糖反応に伴い低下してゆく。その原因は解糖反応に伴う乳酸の生成、蓄積のためとされているが、ATPの分解によるH⁺の生成も関与している。死後のpH低下は、グリコーゲン含量に大きく依存し、底生性の白身魚肉ではグリコーゲン含量は0.4%以下と少ないので、6.0～6.4、回遊性の赤身魚肉ではグリコーゲン含量は1.0%前後と多く、5.2～5.6となる(図4)。これは貝類の筋肉でも同様である。なお、筋肉中のpHが低下すると、小胞体やミトコンドリアなどからCa²⁺イオンの漏出が起こり、また筋原繊維タンパク質の変性も起こって、筋肉の硬さに影響を及ぼすことになる。

ATPの消失に伴って硬直した筋肉の構造は、生筋の収縮と基本的に同じであり、細いフィラメントと太いフィラメントの間に滑りが起こるため、サルコメア(筋節)が短くなっている(図5)。ただし、生筋の収縮は可逆的であるのに対し、硬直は不可逆的である点が異なっている。硬直筋では、小胞体の膜内にCa²⁺を蓄積するために必要な

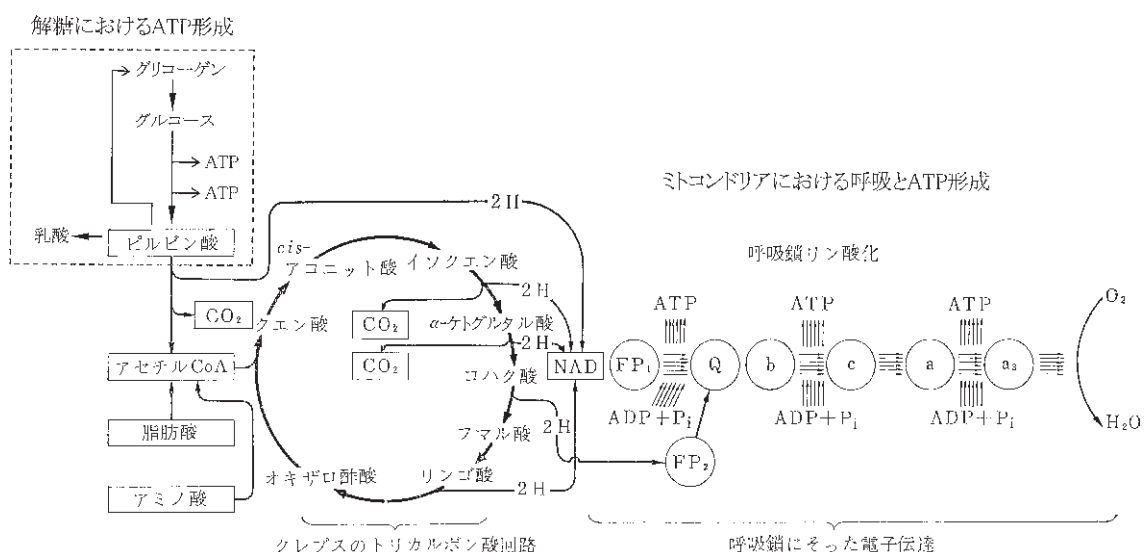


図3 嫌氣的解糖と好氣的呼吸におけるATP生産(A. L. Lehninger, 1968)
FP₁: NADH デヒドロゲナーゼ, FP₂: スクシナートデヒドロゲナーゼ
Q: CoQ, b, c, a, a₃: チトクローム

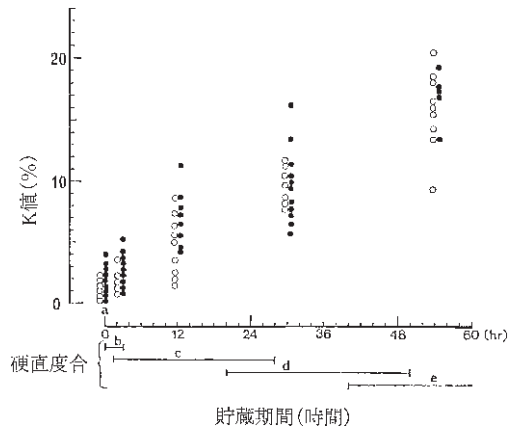


図4(A) サバ氷水保管時間及び硬直度合とK値の関係（福田ら，1984）
a：活魚，b：硬直前，c：硬直中，d：解硬中，
e：解硬後
○：生鮮魚，●：冷凍魚

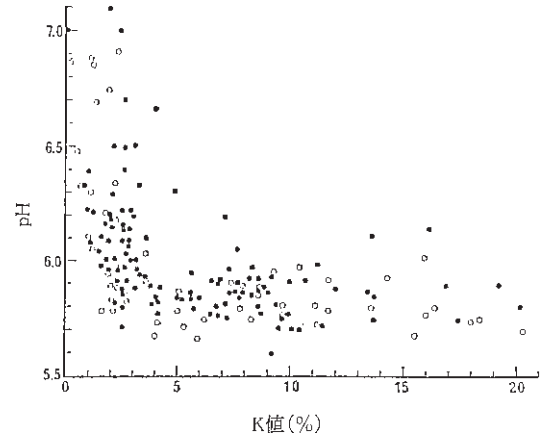


図4(B) サバ肉のpHとK値の変化（福田ら，1984）
○：生鮮魚（n=55），●：冷凍魚（n=118）

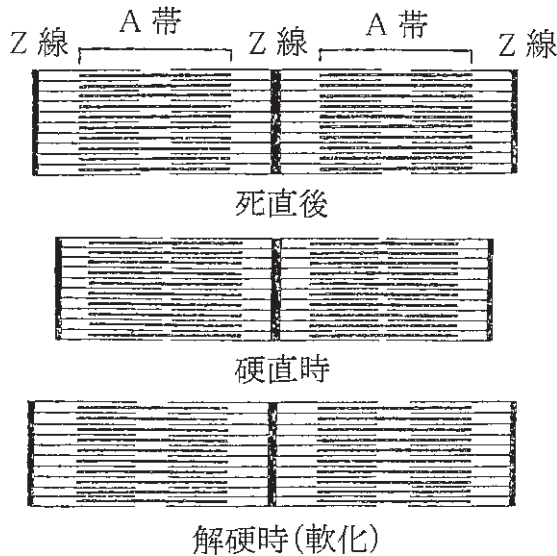


図5 収縮の際のA帯，I帯の変化。A帯は固定されたままだが，I帯は消える。（水産食品学，1993）

ATPが消失しているのに、Caイオンは漏出した状態にある。すなわち、生筋では 10^{-6} M内外のCaイオン濃度が硬直筋では 10^{-4} M程度まで上昇するので、Caイオン濃度の測定は硬直の度合を推測するのに有効である可能性が考えられる。

以上に述べたように、死後における筋肉の硬直は一連の生化学的变化と強く関わっており、通常は温度に依存する反応である。つまりATPの消失と硬直の速さとその度合は、温度に依存した反応として観察される。しかし、後述するようにリン脂質からなる小胞体やミトコンドリアの膜に損耗が起こり、Caイオンの漏出を招くような異常な環境条件下においては、ATPの消失や硬直の速さにも異常を生ずることが既に知られているので（図6）、特別な配慮が必要となる。

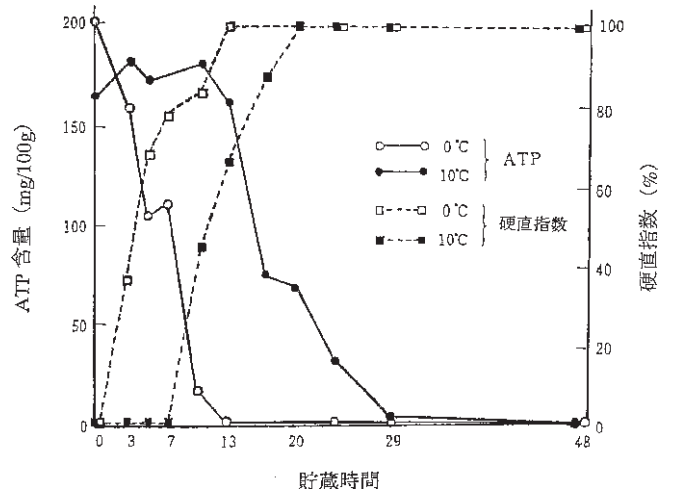


図6 0°Cおよび10°C貯蔵した即殺マダイのATP含量の硬直指数の変化（山中，2002）

ATPが消失する硬直完了時には筋肉は最も硬くなり、その後時間経過に伴い軟化する。これを解硬というが、畜肉の場合は硬直の解除が極めて遅く、食品として供給するまでに熟成とよばれる一定の期間を要する点で、硬直から軟化までの過程に関わる研究が重要視されてきた。一方、魚介肉の場合は、解硬と同時に生化学的变化が速やかに起こり、軟化し易いために、硬直を遅らせるための方策が重視される。軟化を招く要因としては、筋肉中の内因性プロテアーゼの作用について多大な検討が行われている。この過程は自己消化ともいわれているが、生成するアミノ酸量やペプチド量の全タンパク質に対する割合や消化分解の経緯など、未だ明らかにされていない面がある。また、熟成中においては筋原繊維上のZ線の脆弱化による筋原繊維の断片（小片）化が起こり（図7）、こうした変化と硬度変化（軟化度）との相関性についても定量的な分析が必要である。なお、Z線の脆弱化は硬直で発生する筋肉の張

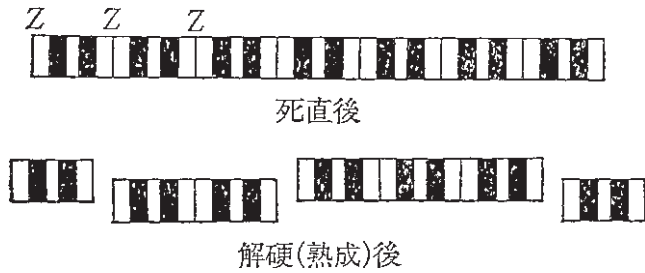


図7 筋原繊維の小片化を示す模式図
(水産食品学, 1993)

力、Z線とCaイオンの作用により起こる構造崩壊、または内因性プロテアーゼによる消化分解が原因とする諸説があるが、この問題は未だ決着していない。

軟化に伴って、硬直時に形成されたアクチンとミオシンのフィラメント間の結合が弱められることは、Caイオンによってミオシンフィラメントの解離量が著しく増加すること、アクチンフィラメントと結合してミオシンとの反応を脆弱にするタンパク質が存在することなどから確かめられている。また、筋内膜を構成しているコネクチン（筋細胞間結合タンパク質）や筋肉組織を結合しているコラーゲン（筋細胞周辺結合組織タンパク質）の分解や脆弱化が筋肉の軟化に関与しているとする説もあるが、どの程度で寄与しているのかは明らかではない。

動物の死後、筋肉が硬直完了に至るまでの速さと時間は様々な要因により影響を受けるが、特別な原因に基づいて死後における性状変化が非常に速く進行する現象が知られている。その一つに、死直後の筋肉を10℃以下に冷却す

ると、激しく収縮する冷却収縮（cold shortening）が挙げられる。この冷却収縮は赤色筋で多く起こり、筋肉のpHやATP含量は生筋とほとんど変わらないが、筋小胞体やミトコンドリアからのCaイオンの放出が原因で起こる。もう一つは疲労させずに殺した動物筋肉を急速凍結し、短時間の間に解凍すると激しく収縮する現象であり、解凍硬直（thaw rigor）とよばれている。多量のATPやグリコーゲンが解凍時に急速に分解して乳酸やイノシン酸を生成すると、筋肉中の急激なpH低下を引き起こす。これが筋小胞体やミトコンドリアからのCaイオンの放出を促し、硬直が起こると考えられている。このような動物筋肉を-15℃で2週間ほど貯蔵し、凍結状態のままATPを消失させてやると硬直が起こらなくなる。このような死後変化の異常は、筋肉の硬直の進行や生化学的諸性状に影響を及ぼす。

魚介類は、死後硬直及び解硬と平行して、漁獲直後から微生物による変化も受ける。初めはほとんど目立たないが次第に活発となり、色沢の劣化、異臭、異味を生じ、ときには有害な物質を生成する。このような過程を腐敗という。一般に魚介類の筋肉は、畜産動物の筋肉に比べて組織が軟弱で水分が多く、微生物によって汚染され易いことから、腐敗が早いのが特徴である。従って、魚介類筋肉の場合、微生物の制御については特別な配慮が必要である。

微生物の増殖に伴って、筋肉の成分は次第に変質ないし分解するが、その様式は複雑である。ここには即殺したヒラメを氷蔵した場合の変化の例を示す（図8）。白身魚の場合、筋肉のpH変化はあまり大きくない。また揮発性塩

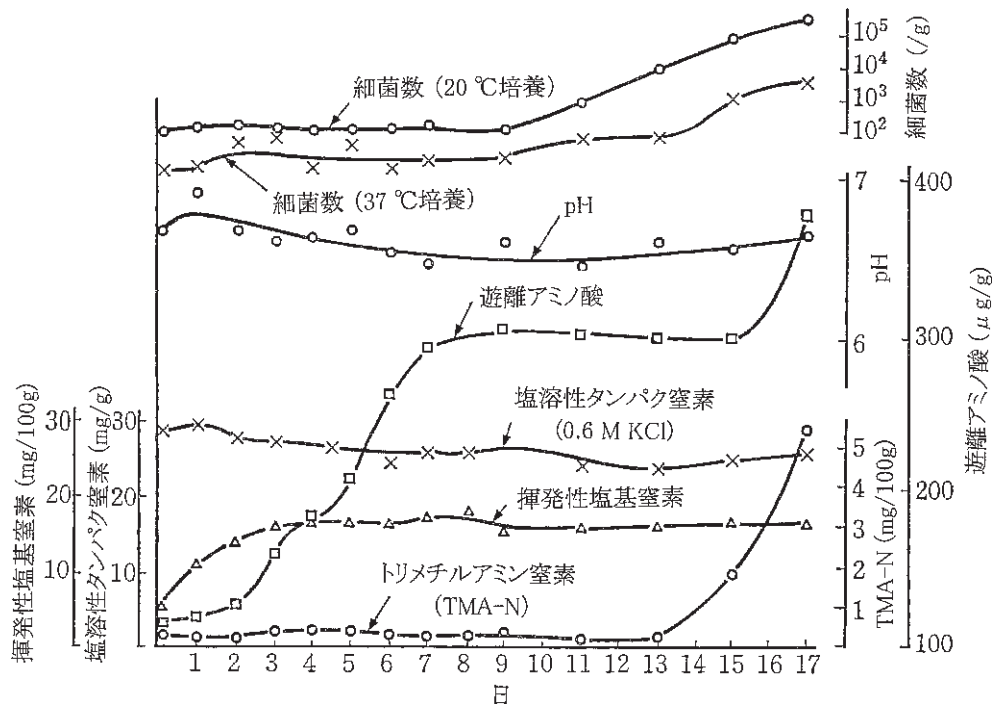


図8 即殺ヒラメ氷蔵中の筋肉の細菌数、pH、遊離アミノ酸、塩溶性タンパク窒素、揮発性塩基窒素、トリメチルアミン窒素の変化（内山ら、1966）

基窒素量は当初から増加して2～3日後にはほぼ最大値に達し、遊離アミノ酸量は2～3日以後に増加が目立っている。しかし、同じ条件下における筋肉のK値（後述）の増加は、12時間後に始まって28時間後に最大値となる事実を考えると、腐敗による成分変化は極めて遅い速度で進行していると言わねばならない。

2 魚介類の鮮度判定

魚介類の鮮度は正確かつ客観的に判断しなければならない。それは魚介類の利用価値を判断するために必要だからである。そのため古くから種々の鮮度判定法が考案されたが、いずれも一長一短で全ての魚介類に利用できる簡便な方法はない。従って、判定法に用いられている指標の意味を良く理解した上で目的に最も適した方法を選択することが肝要である。ここでは、これまでに提案された主な方法と最近良く利用されるようになったK値による判定法、その他、従来から採用されてきた古典的な方法との関連性について述べる。

官能的方法 人間の感覚により物の性状を調べる方法を官能検査という。検査項目によっては、機器による検査をはるかに上回る感度を示すことがあり、魚介類の外観、異味、異臭を判別する場合など、総合的に評価しやすい利点がある。しかし検査結果の数量化が困難で客観性に乏しいために、検査に従事する人（パネリスト）の選定及び評価基準の設定などについて十分な配慮が必要となる。魚介類のチェックポイントと基準を表1に示す。

化学的方法 生存時の魚介類筋肉中には全く存在しないが、鮮度低下に伴って生成、蓄積する物質、または魚介類筋肉の構成成分で鮮度低下に伴って変質（変性）する物質として、揮発性塩基窒素量（NH₃、トリメチルアミン、ジメチルアミンなど）、pH（解糖に伴う乳酸の生成や揮発性塩基窒素の生成に依存する）及びATP（アデノシン三リン酸）の分解生成物、揮発性有機酸、非タンパク態窒素、ヒスタミン、インドールなどを測定し、指標とする方法が挙げられる。なお、魚肉では経験的に揮発性塩基窒素が5～10mg/100gなら極めて新鮮、15～25mg/100gなら普通の鮮度、30～40mg/100gで初期腐敗、50mg以上/100gなら腐敗という値が採用されているが、ATPの分解（K

値の上昇）に比べれば、かなり遅い変化に相当する（図9）。

魚介類の筋肉構成成分で鮮度低下に伴って変質（変性）する物質としては筋肉構造タンパク質や脂質などがある。一般にタンパク質が変性すると、溶解性や機能性が変化する。また、脂質では構成高度不飽和脂肪酸が酸化され易いために、これらを含む原料から加工された製品の品質に影響を及ぼす。従って、タンパク質や脂質の変質の度合は正確に評価しなければならない。因みに水産物製品であるかまぼこの主原料は、筋原繊維タンパク質であり、干物（乾物）の主原料は筋原繊維タンパク質と脂質であるが、水産物製品の原料である冷凍すり身タンパク質に関しては塩溶解性、ミオシンのATPase活性、ゲル化能などが良い指標となる。干物の場合は、保水性、水分活性及び脂質酸化度などを品質の指標としている。なお、これらの指標の変化は、生鮮魚肉中でのATPの分解（K値）とは関わりなく別途に進行し、その速度はかなり遅く、かつ複雑な反応機構で起こっている。

物理的方法 鮮度低下に伴う魚体の硬さや電気抵抗などの変化に基づく方法である。魚体の硬度（硬度指数）を指標とする方法は、筋肉が死後硬直によって硬化し、その後経時的に軟化する現象を数値化したものである。日本では魚介類筋肉を刺身や寿司種として生食する食習慣が定着しているため重用されている。しかし、魚種や生存時の生理状態、栄養状態及び魚介の致死条件や方法によって硬度変化の様相が著しく変動するため、正確な判定が難しい。また、トリメーターを使用した魚肉の誘導率から鮮度を判定する方法もやはり魚種毎の差が大きいのので正確な判定をすることができない。これらの指標については基礎的な検討が今後必要である。

微生物学的方法 魚介類の腐敗は微生物の汚染によるものであり、魚介類が本来含んでいる成分に起こる変化を測定した化学的指標など、他の指標の変化とは関わりなく別途に起こるが（図8）、生菌数の増加は腐敗の進行と密接な関係があるので、魚介類の鮮度をある程度反映していると判断することが出来る。一般に魚が初期腐敗に達したときは、生菌数が1cm²当り10⁶付近で10⁷～10⁸に増殖すると強い腐敗臭を感ずるようになる。しかし、貯蔵条件が

表1 鮮度の官能評価におけるチェックポイント

項目	部位	初 期 腐 敗
外 観	体 表	光沢がなくなる。鱗の脱落が多い。
	眼 鰓	白く混濁し、眼窩の中に落ち込む。血液の浸出が多い。周辺から灰色を帯びようになる。しだいに暗緑灰色になる。
	腹 部	腹部が切れて内臓が露出したり、肛門から腸内容物が出てくるようになる。
匂 い	全 体	不快ななまぐさ臭がある。
	鰓	不快臭を帯びようになる。
硬 さ	背・尾部	弾力が乏しくなる。
	腹 部	軟化し始める。指圧をかけると肛門から容易に腸内容物が出るようになる。
粘質物	体 表	粘液が粘着性を増す。

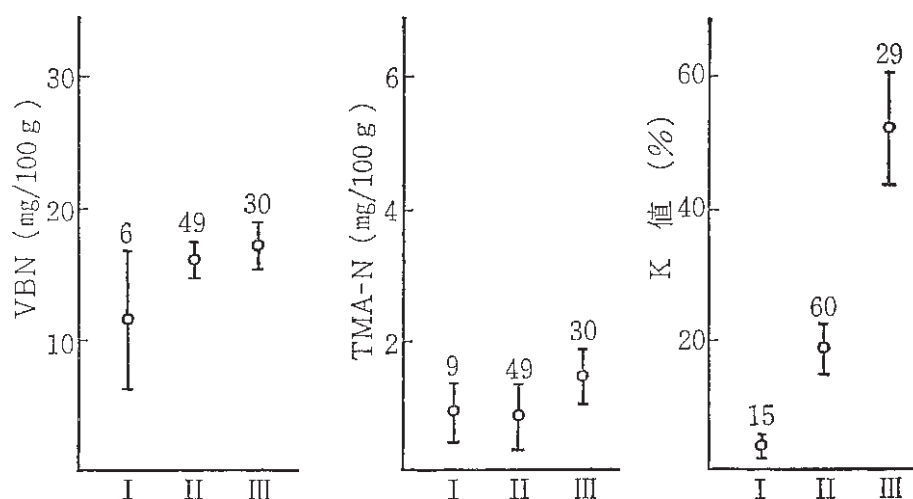


図9 各種魚類筋肉における VBN, TMA-N, および K 値の相関
 I: 即殺魚の筋肉, II: マグロ肉をはじめとする各種すし種 (高級品), III: 各種すし種 (中級品). 図中の数字は検体数を示す. (内山ら, 1970)
 VBN: 揮発性塩基窒素, TMA-N: トリメチルアミン窒素

好気的か嫌気的かによって生菌数は影響を受けるので, 他の指標の変化と併せて総合的に判定することが必要であるといえる. 特に最近では食品の安全に対する消費者の意識がいつそう高まり, 水産食品業界でも HACCP (Hazard Analysis Critical Control: 食品の危害分析重要管理点監視方式) の導入状況が安全性に対する関心度のバロメーターになっている. 欧米先進国でも魚介類の消費量が増大し

ているため, その危害に対する警戒が強いので我が国から輸出される水産物などに関しては K 値を含め, 総合的な品質規制が必要になると思われる.

3 K 値による鮮度判定

筋肉は運動器官であり, 動くためのエネルギー源として ATP を利用する. 魚介類筋肉にも多量の ATP (表 2)

表 2 水産動物生鮮肉中の酸化溶核酸成分含量 ($\mu\text{mole/g}$ 筋肉湿重量)

		ATP	ADP	AMP	IMP	HxR	Hx	Total	Muscle
スルメイカ	squid, <i>Ommastrephes sloani pacificus</i>	7.48	1.53	0.55	0	0	0.01	9.57	Mantle (胴)
		8.28	1.52	0.55	0	0	0.01	10.31	
ヤリイカ	squid, <i>Doryteuthis bleekeri</i>	3.12	2.42	2.19	0	0	0.19	7.92	Mantle (外套膜)
マダコ	octopus, <i>Polyopus dofleini</i>	4.00	1.02	0.20	0	0	0	5.22	Arm (腕)
ホタテ	scallop, <i>Pecten yessoensis</i>	6.02	0.87	0.59	0	0	0	7.48	Adductor (貝柱)
		6.40	1.20	0.60	0	0	0	8.20	
アカザラ	akazara, <i>Chlamys nipponensis akazara</i>	6.53	1.10	0.43	0	0	0	8.06	Adductor (貝柱)
		6.07	1.24	0.67	0	0	0	7.98	
ホッキ	surf clam, <i>Spisula sachalinensis</i>	3.98	0.50	0.33	0	0	0	4.81	Foot (斧足)
		4.76	0.50	0.52	0	0	0	5.78	
アカガイ	ark-shell, <i>Anadara broughtonii</i>	4.86	1.05	0.75	0	0	0	6.66	Foot (斧足)
		3.33	0.88	0.51	0	0	0	4.72	
アワビ	abalone, <i>Haliotis discus hannai</i>	3.48	0.56	0.20	0	0	0	4.27	Adductor (貝柱)
		3.10	0.50	0.25	0	0	0	3.85	
ケガニ	crab, <i>Erimacrus ienbeckii</i>	5.87	1.75	0.29	0	0	0	7.91	Leg (脚)
		4.70	1.06	0.21	0	0	0	5.97	
タラバガニ	crab, <i>Paralithodes brevipes</i>	3.51	1.64	0.26	0.16	0	0	5.57	Leg (脚)
シャコ	squill, <i>Squilla oratoria</i>	3.84	1.24	0.94	0.50	0.46	0	6.98	Abdominal (腹)
トヤマエビ	prawn, <i>Pandalus hypsinotus</i>	6.61	2.09	0.94	0	0	0	9.64	Abdominal (腹)
		6.93	1.38	0.54	0	0	0	8.85	
コイ	carp, <i>Cyprinus carpio</i>	4.68	0.95	0.04	0	0	0	5.67	Dorsal (背)
ニジマス	rainbow trout, <i>Salmo gairdnerii irideus</i>	5.84	1.06	0.54	0.22	0	0	7.66	Dorsal (背)

(新井, 1966)

が含まれており、死後はその再生回路が働かないため ATP は減少し消失する。それゆえ、ATP の変化が筋肉の鮮度低下の指標として広く利用されるようになった。鮮度低下に伴う魚介類筋肉中の ATP の分解を追跡した分析結果によると、魚類筋肉（図10）では ATP → ADP → AMP → IMP → イノシン (HxR) → ヒポキサンチン (Hx) の順に、頭足類、貝類などの軟体動物筋肉（図11）では ATP → ADP → AMP → アデノシン (AdR) → イノシン → ヒポキサンチンの順に、また甲殻類などの節足動物（図12）では上記二つの経路を介して分解してゆくことが明らかになった。なお、貝類筋肉では室温で保管するときに ATP 含量がしばらく一定に保持されるので、ATP の再生回路（解糖反応）がしばらくの間は働いていること、また、頭足類（イカ）と甲殻類（エビ）筋肉では最終産物のヒポキサンチンの生成、蓄積が速やかに起こるのが特色であることも明らかになった。そこで、分析される全成分の合計値に対するイノシン+ヒポキサンチンの合計値の百分率を求め、これを魚介類筋肉の鮮度低下の指標（K 値）とすることになった（図13）。なお、魚介類筋肉中には ATP からヒポキサンチンにまで分解するのに数種類の酵素が介在しているが（図14）、魚類筋肉には AMP-デアミナーゼが含まれるのにアデノシン-デアミナーゼは含まれておらず、貝類と頭足類筋肉はその逆で前者が含まれず

に後者のみが含まれていることが分かった。また、甲殻類筋肉には両酵素が含まれていることが分かったが、動物種により存在する酵素群が異なる理由については未だ良くわかっていない。筋肉を保管する時に抗生物質を添加しても ATP 分解様式は変わらないので、上記した酵素群はいずれも筋肉中に内在するものであるが、低温では 5'-ヌクレオチダーゼ活性が抑制されるため、保管中の筋肉中には IMP（イノシン酸）、または AMP（アデニル酸）が多量に生成し、蓄積されるのが特色である。なお、これらの成分は呈味成分として知られている。

K 値の他に、K' 値及び Ki 値などの修正（変更）値も指標として用いられている。K' 値は分子がイノシン酸+イノシン+ヒポキサンチンの合計値、Ki 値は分母がイノシン酸+イノシン+ヒポキサンチンの合計値に変更した値であるが、これらを指標とした方が便利な場合もありうる。またイノシンに対するヒポキサンチンの量比に注目した例もあるが、分別には時間がかかる。

魚介類筋肉の K 値が鮮度判定の指標として有用であることが初めて報じられたのは1959年のことであるが、それによると17検体の凍結魚について求めた K 値はこれを供給した業者側の記録及び官能的な鮮度評価と良く合致していた（表3）。その後、検討が重ねられて現在では一般に活魚及び洗いに供しうる魚肉では K 値が 0～10%、刺身

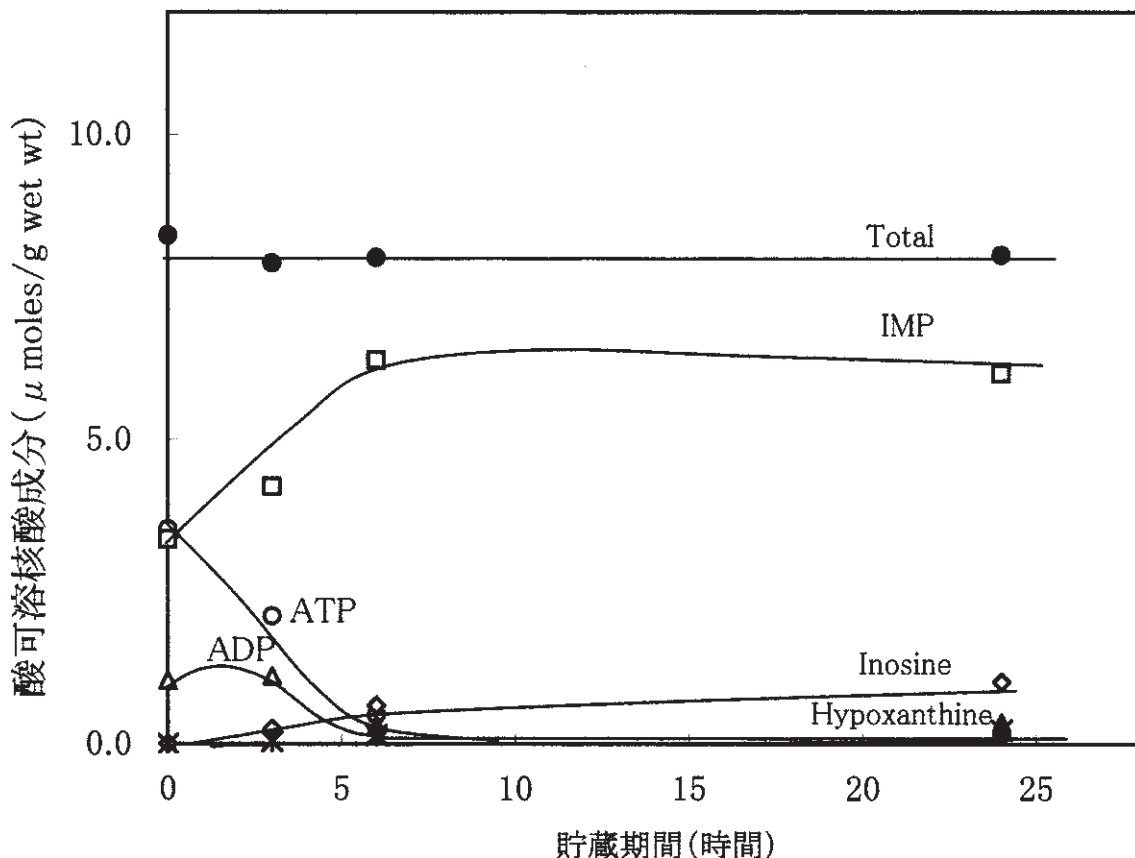


図10 氷蔵中の魚類筋肉中の酸可溶核酸成分の変化（ニジマス背筋）（斉藤ら，1959）

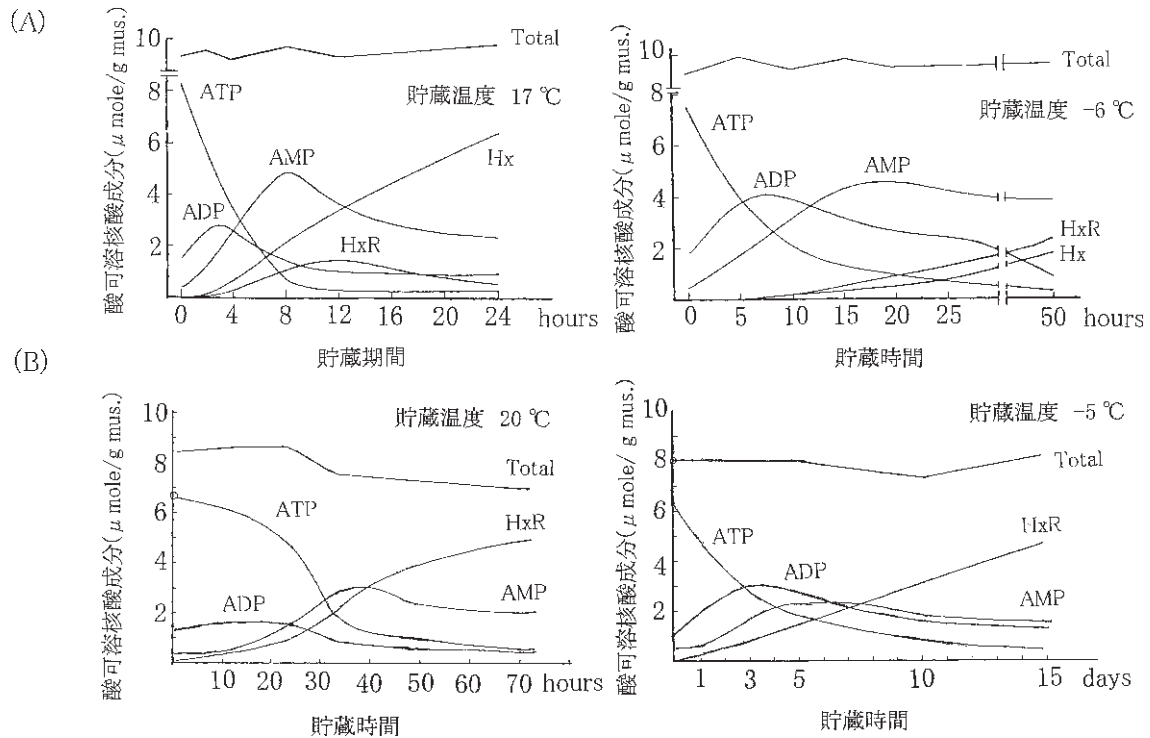


図11 室温及び氷蔵中の頭足類と貝類筋肉中の酸可溶核酸成分の変化
(A) スルメイカ外套膜筋 (B) ホタテ貝柱筋 (新井, 1960・1966)

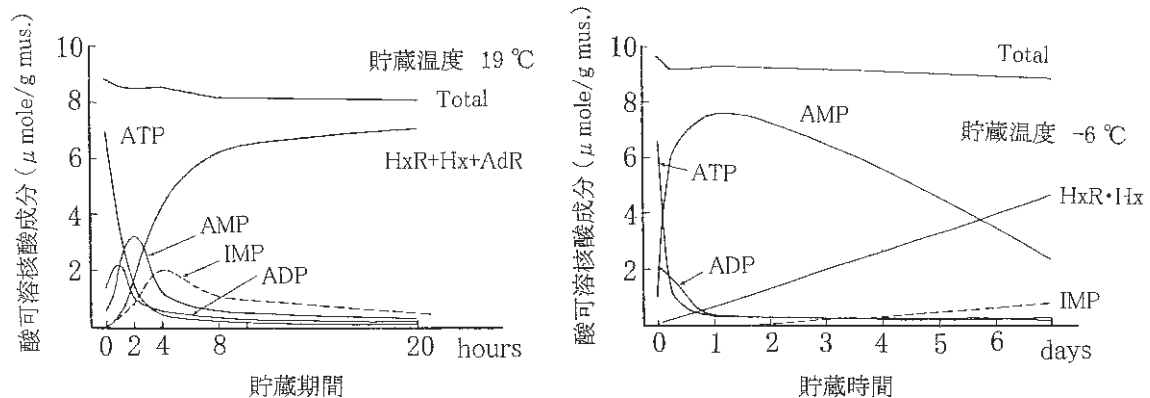


図12 室温及び氷蔵中の甲殻類筋肉中の酸可溶核酸成分の変化
(トヤマエビ腹部筋) (新井, 1966)

用には20%以下、鮮魚として一般に市販されるものはK値が15~35%、この中、煮魚用には40%以下、すり身などの加工原料用には60%以下の魚肉が利用されている。ただK値が60%以上のものは初期腐敗に相当する魚肉であることも明らかになっている(図15)。K値は‘生きの良さ’を表しているといわれているが、ATPの分解に関わる酵素群の作用が魚介類の死後における特に温度履歴と時間に依存することを考えれば極めて当然のことである。ただし、ATPの分解に関与する酵素の量及び活性は魚介類の種によって、あるいは同じ種でも個体によっても異なるので、ATPの変化の速度、つまりK値の上昇の速度及び度合もそれぞれの場合で異なる可能性が当然予想される。実

際にヒラメの筋肉を貯蔵する時、K値と貯蔵温度との関係を調べた結果(図16)を見ると、温度が高いほどK値の上昇は速い。またカキ閉殻筋を0~25°Cの間の温度で貯蔵した時の硬直度和K値の変化を示すが(図17)、貯蔵温度が高いほどK値は速やかに上昇している。しかし、その反応様式は単純ではなく、経時的に速度が変わる場合も見られる。これはおそらく筋肉内の解糖反応やATPの分解反応が進行してpHの低下が起こるなど、その生化学的条件が変わることが原因になっているであろうと推定される。8種類の魚介類を氷蔵した場合のK値の変化を比較した結果(図18)を見ると、K値の上昇の速度と反応様式は種類によってかなり異なっている。この理由も未だ

$$\text{魚類} : K(\%) = \frac{HxR+Hx}{ATP+ADP+AMP+IMP+HxR+Hx} \times 100$$

$$\text{貝類、頭足類} : K(\%) = \frac{HxR+Hx}{ATP+ADP+AMP+HxR+Hx} \times 100$$

$$\text{甲殻類} : K(\%) = \frac{HxR+Hx}{ATP+ADP+AMP+IMP+AdR+HxR+Hx} \times 100$$

IMP:イノシン酸, AdR:アデノシン, HxR:イノシン, Hx:ヒポキサンチン

ヌクレオチドの分解生成物を指標とする鮮度判定値で、魚肉の新鮮さの度合い、換言すれば‘生きの良さ’を数量的に表示する。

図13 魚介類筋肉の生鮮度（K 値）の表示法

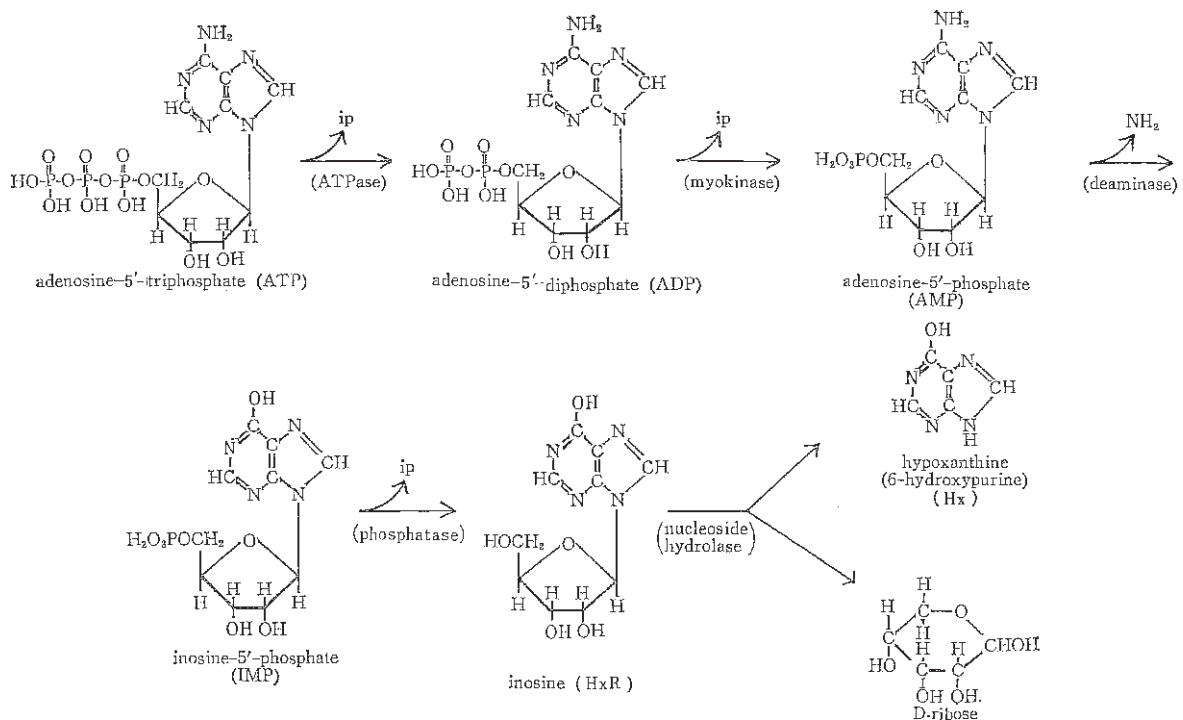


図14 魚類筋肉での ATP の死後変化と関連酵素群（江平ら，1974）

確定したわけではないが、筋肉内の関連酵素系の分布レベルや生化学的状態が経時的に変化することに関係しているのかも知れない。因みに魚介類の栄養状態、生理状態、致死条件、筋肉のタイプ及び貯蔵温度などは全て死後における K 値の変化の速度に影響を及ぼす事実が既に報じられている。

筋肉中の ATP が消失し、K 値が目立って上昇し始める時期は、筋肉の硬直が完了する時期と一致している。既に述べたように、K 値が 20% 以下の魚介類筋肉が刺身の原料として向いているのは、こうした変化の初期状態のものである。魚介類筋肉を生食する日本人にとっては、この因

果関係は極めて便利な発見であったように思える。ただし、筋肉の硬さ（硬直指数、図19）の変化を調べると、貯蔵温度との関係が極めて複雑であることがわかる。たとえば、即殺したマダイの場合は（図6）、0℃あるいは10℃で貯蔵すると、温度が低い0℃の貯蔵の方が、10℃の場合よりも筋肉の硬直の増加及び ATP 含量の減少が速やかに起こっている。これは先に述べたように筋肉に冷却収縮が起こったことを示唆している。すなわち10℃では ATP が消失するときに小胞体やミトコンドリアが Ca イオンを取り込む能力を失うため、その時に筋肉は収縮し、硬直するに至る。一方、0℃では ATP は高含量である

表3 冷凍魚肉の鮮度（官能検査）とK 値

魚 種		グレード(品質)*	冷凍貯蔵期間 (month, at -18～ -20℃)	K 値(%)	漁獲後の経過時間
ブリ	Yellow-tail	medium	3.5	42	100-120 hrs.
タチウオ	Swordfish	medium	15	46	100-120 hrs.
イワシ	Sardine	high	6	10	40 hrs.
サンマ	Mackerel pike	high	3	12	
サバ1	Mackerel	high	3.5	20	
サバ2	Mackerel	medium	7	46	
サバ3	Mackerel	medium	7	23	
サバ4	Mackerel	medium	7	27	
タラ	Codling	low	7	89	7 days
メバル	Rockfish	low	3.5	78	10 days
アオザメ	Mackerel (or Salmon) shark	medium	2	25	
ヨシキリザメ	Great blue shark	low	5	83	20-50 days
カレイ	Long-jaw flounder	medium	4	40	
オヒョウ	Halibut	high	3	29	
コイ	Carp	very high	0	0	
イカ	Squid	very high	0	0.1	freshly caught

(T. Saito *et al*, 1959)

*グレード(品質)：グレードは冷凍前の生魚で官能検査により決定した。

K値の目安

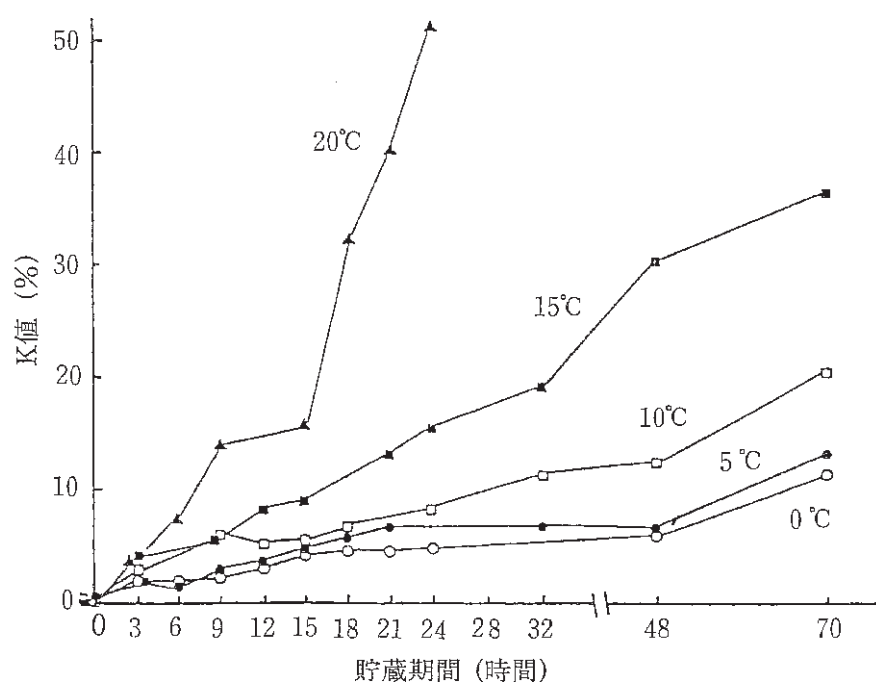
さしみ 20 (%) 以下

煮・焼 40 (%) 以下

初期腐敗 60 (%) 以上

K値 (%)	0	10	20	35	60
活魚, 洗い					
さしみ					
一般鮮魚					
加工原料					

図15 魚類の鮮度指標 K 値の定義 (渡辺, 2002)

図16 ヒラメを各種温度に貯蔵した時の K 値の変化
(岩本・山中, 1987)

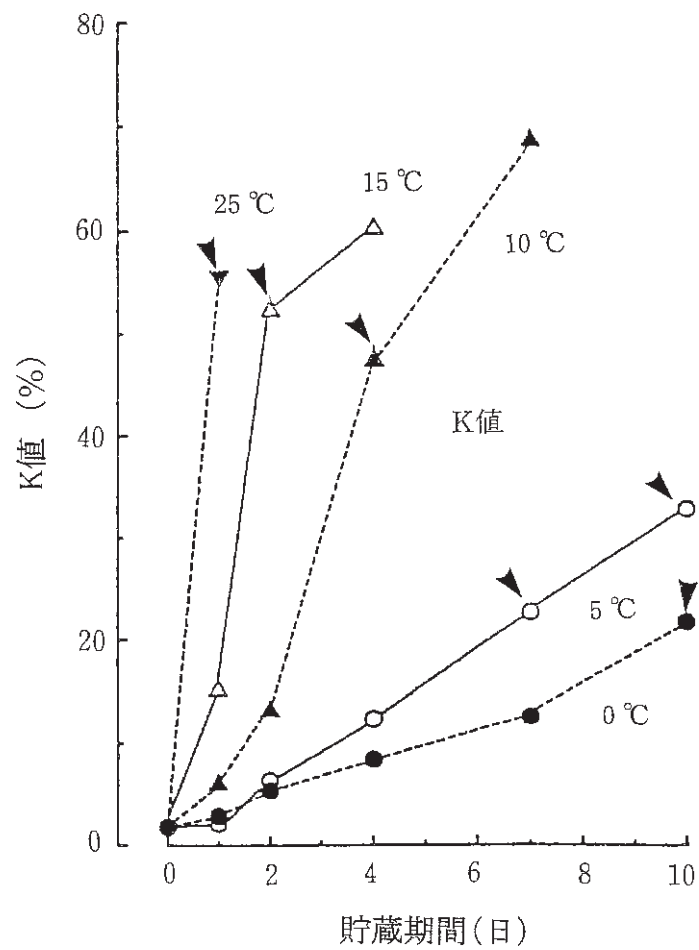


図17 カキ閉殻筋を 0℃(●), 5℃(○), 10℃(▲), 15℃(△) および 25℃(▼) に貯蔵した時の K 値の変化. 矢印は初期腐敗を示す. (山中, 1995)

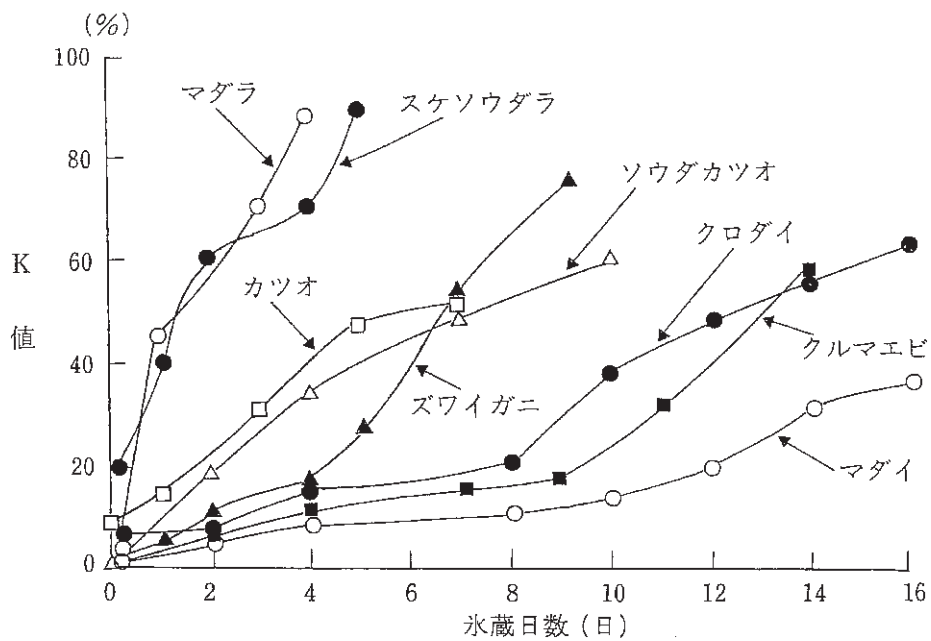
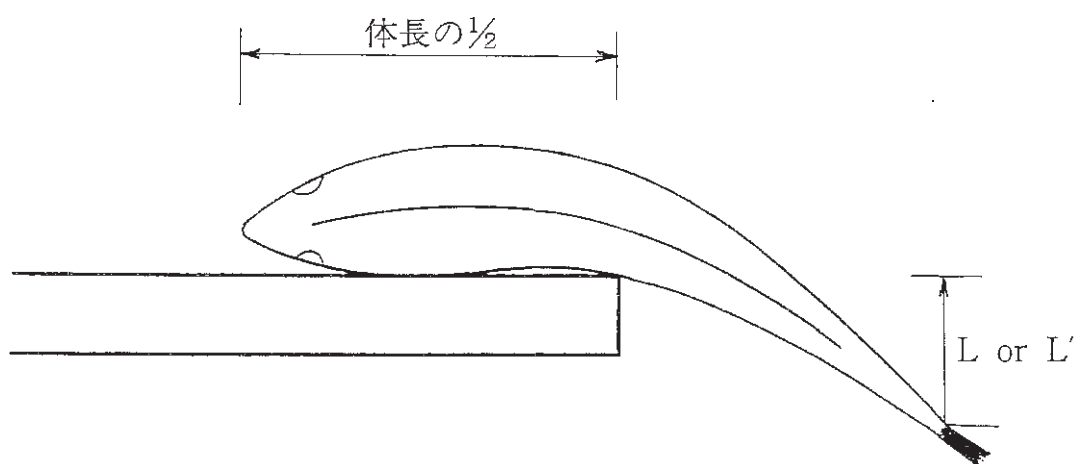


図18 魚類・甲殻類の氷蔵中の K 値の変化 (渡辺, 1998)



L: 即殺直後に垂れ下がった位置までの長さ

L': 貯蔵後に垂れ下がった位置までの長さ

$$R = \frac{L - L'}{L} \times 100$$

図19 硬直指数 (R) (畑江, 1995)

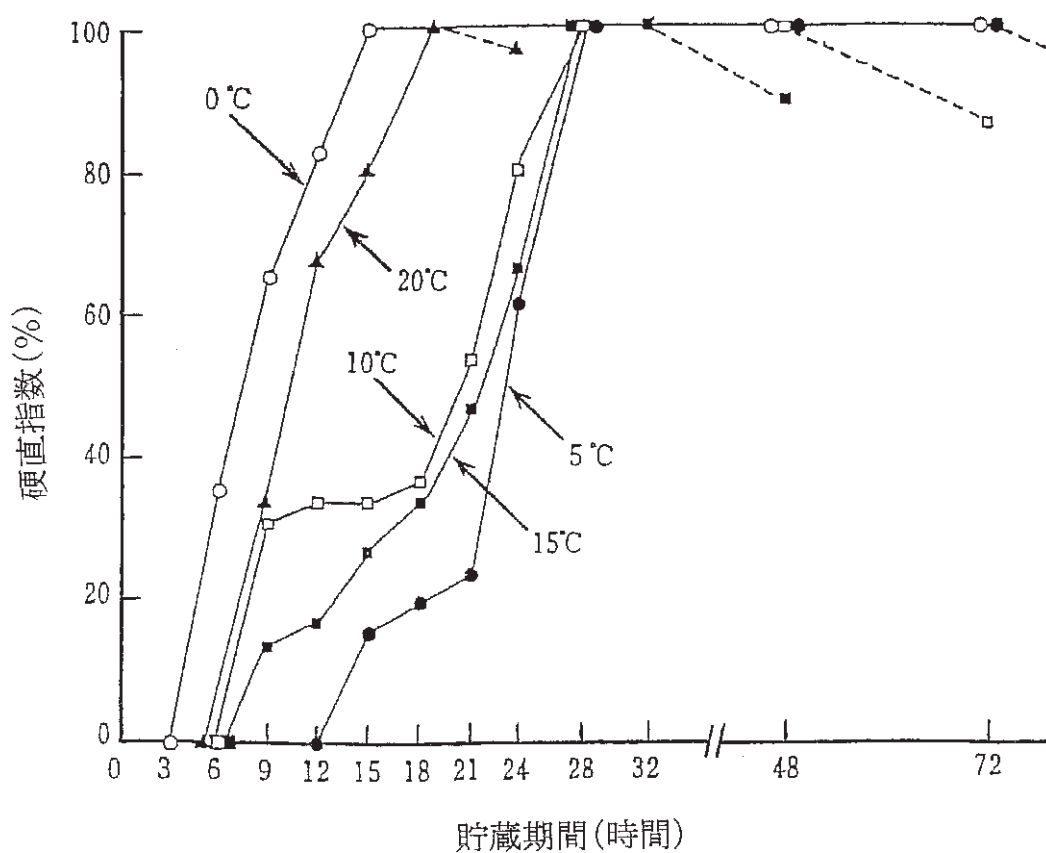


図20 0°C, 5°C, 10°C, 15°C, 20°C に貯蔵した即殺ヒラメの硬直指数の変化. (山中, 2002)

にも関わらず小胞体やミトコンドリアの膜が損耗を受けて Ca イオンを漏出する。その結果、魚肉は収縮し、硬直が始まる（実際に硬直完了期と ATP 消失期はややずれて起こっており合致しない）。また、ヒラメを 0～20℃ で貯蔵する時（図20）、魚肉の硬度指数の増加は 5～15℃ の温度域の方がむしろ遅く、かつ硬度指数の増加の様相が段階的となり複雑となるが、これも冷却収縮の影響と見ることが出来る。なお、小胞体やミトコンドリアからの Ca イオンの漏出は筋肉中の pH の低下によっても起こることが知られているが、実際にホタテの閉殻筋の場合は（図21）、筋肉の pH が 6.5 以下、ATP 減少に伴う K 値の上昇が 20 % 以上に至った時に筋肉の硬化が強まることが示されている。ただし、ATP の減少と pH の低下が硬化の原因になっているので異質な硬さであろうと推察される。

動物筋肉では畜肉及び魚介肉のいずれかを問わず、そこに含まれている ATP は貯蔵に伴って減少し、完全硬直に至るときには消失している。ただし、貯蔵温度及び pH によっては小胞体やミトコンドリアからの Ca イオンの漏出により硬直が異常に促進されるが、これは例外で、通常は、低温では ATP の分解も遅く、受動的に K 値の上昇も貯蔵温度に依存しており、低温の方が速いような逆の現象は見られない。従って、魚介類を貯蔵するとき、筋肉の ATP 含量、硬さ及び K 値に起こる変化は貯蔵に供する魚

介肉の生理的な条件によって影響を受けて複雑に変わる事実を十分に理解し、魚介類筋肉の利用目的に合わせた判断をしなければならない。

魚介類筋肉中のタンパク質成分は筋肉の硬さや K 値に比べて比較的ゆっくりと変質する。タンパク質は巨大な分子であり、その変質（変性）の指標も複数ある。タンパク質の加工食品であるねり製品のゲル形成能、及びその加工原料である冷凍すり身のみオシン Ca-ATPase 活性を測定し、魚を氷蔵したときの K 値との関連性を調べた（図22）。これによると、三魚種の間では魚肉の K 値の上昇はスケトウダラが最も速く進み、シログチとサバの K 値の上昇はかなり遅かった。しかし、これらの魚肉から経時的に調製した冷凍すり身の Ca-ATPase 全活性はサバの場合が最も急速に減少し、シログチとスケトウダラでは、その減少はかなり遅かった。また、これらの冷凍すり身から一定の条件下で調製したねり製品の破断強度もやはりサバの場合に最も速やかに減少し、シログチとスケトウダラの場合は減少が遅かった。この事実はサバの場合は K 値が低く、筋肉の鮮度が極めて優れている（たとえば K 値が 20% 以下の）ような筋肉でも、それから冷凍すり身を調製すると、その品質はかなり劣り、実際にゲル形成能も劣化していることを示している。この原因は、サバ筋肉中での急激な乳酸生成に伴って pH が低下したために、ミオシ

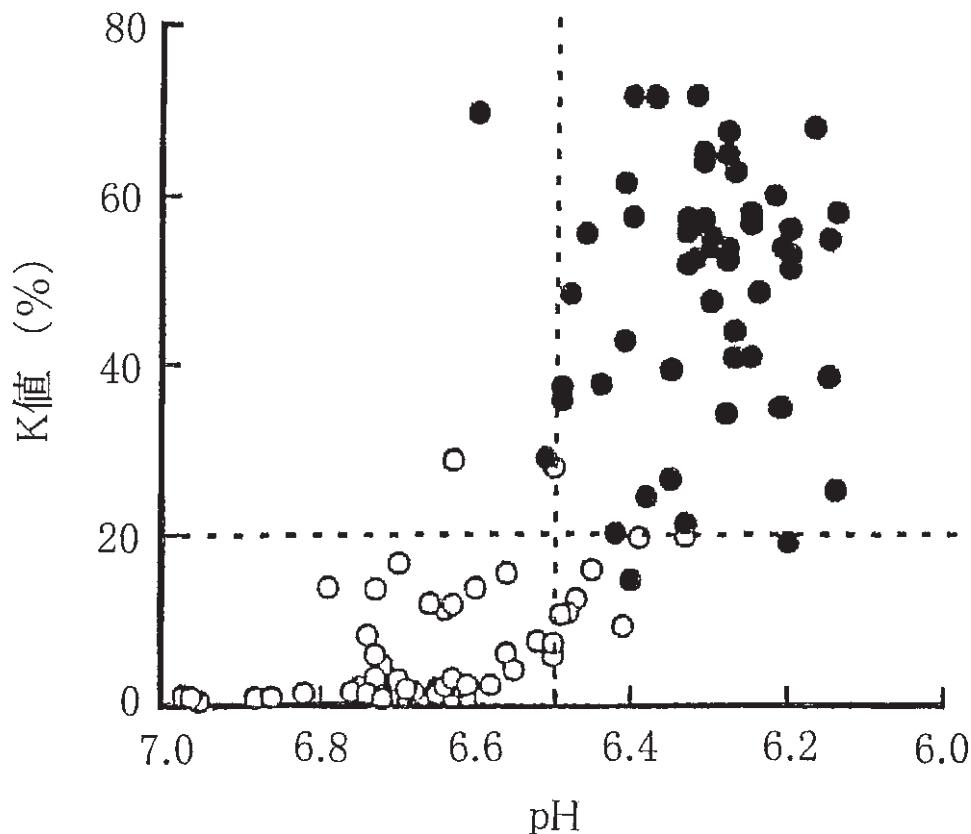


図21 ホタテガイ貝柱の pH, K 値と硬化との関係。（山中，2002）
●：硬化，○：非硬化

ンが酸変性したことに起因していることは既に確かめた。一方、スケトウダラの場合は筋肉のK値が大きく上昇し、60%以上の初期腐敗に相当する鮮度になっても、なおかつ冷凍すり身タンパク質の変性度は小さく、そのゲル化能も保持されていることが示されている。すなわち、先に述べたとおり、この結果は魚肉のK値の上昇は筋肉中に存在する数種の酵素群の作用によって起こり、タンパク質の変性とは別に進行している反応であることを極めて歴然と示している。同じく、貯蔵中の魚肉の微生物による汚染度とミオシンATPase活性を指標とした場合の魚肉中のタンパク質の変性度とは全く関係なく、それぞれが別に

進行していることも既に明らかにされている(図23)。

K値の測定は、イオン交換樹脂カラムを用いた高速液体クロマトグラフによってなされる方法が一般的だが、ECTEOLA-セルロースを担体とした薄層クロマトグラフによる方法もある。最近迅速簡便化を目標とした方法の開発にも成功しており、ATP関連化合物の分解及びその酸化還元に関わる酵素群と酸素電極を使用したバイオセンサー法(株環境科学コーポレーション社)(図24)、また、これらを試験紙片に吸着乾燥させた鮮度試験紙(同上社)などが販売されている。

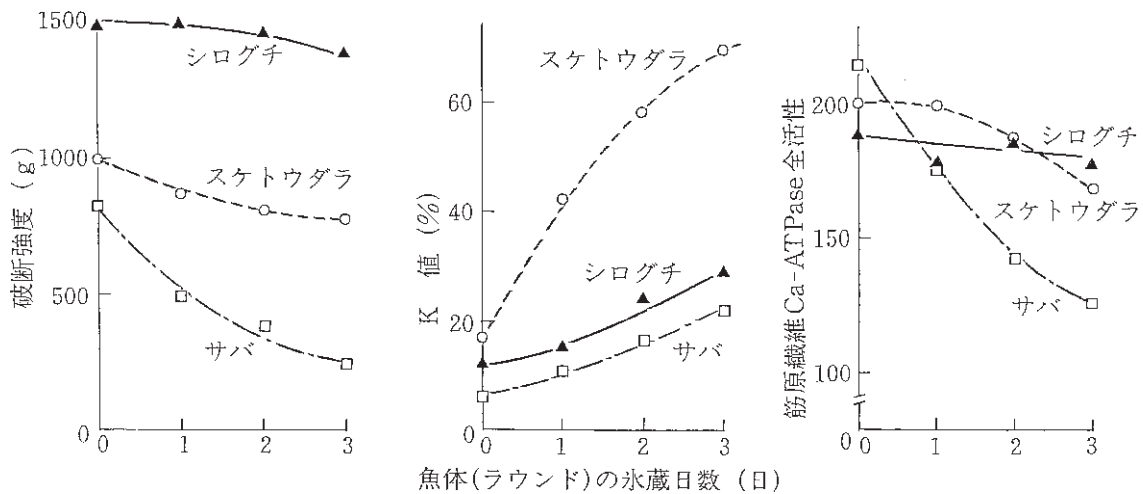


図22 スケトウダラ、シログチ、マサバを水蔵した時のK値、ゲル形成能、筋原繊維Ca-ATPase全活性の変化。ゲル形成能と筋原繊維Ca-ATPase活性はすり身を調整した後、測定した。水蔵中の肉質pH: マサバは5.7, シログチおよびスケトウダラは6.8-7.2。(橋本・新井, 1985)

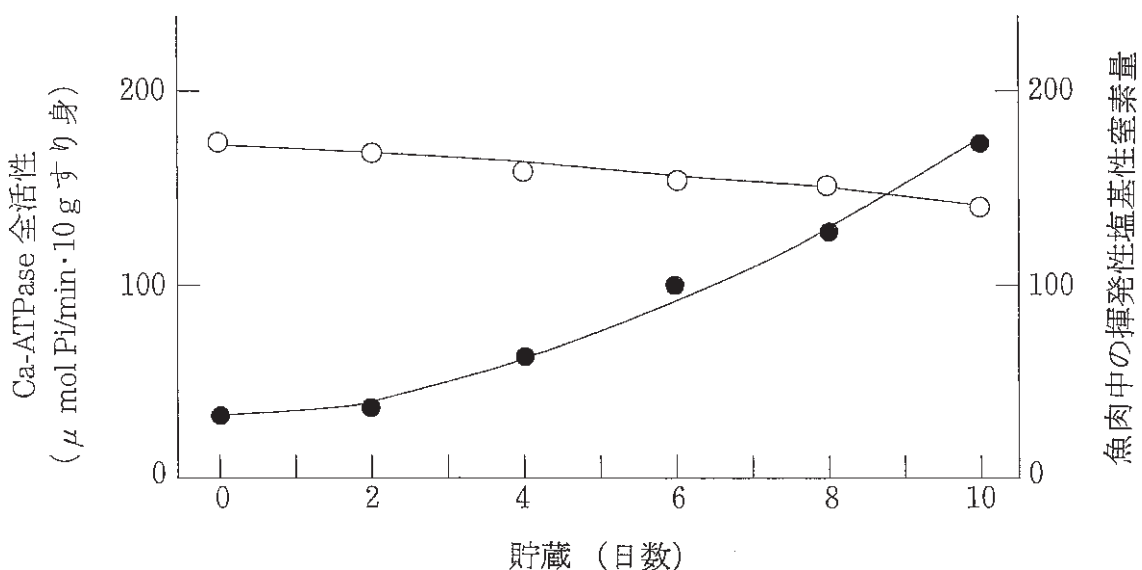


図23 スケトウダラ脱水肉の貯蔵(3°C)中における品質の変化。(川島ら, 1973)
○: Ca-ATPase全活性, ●: 揮発性塩基性窒素量

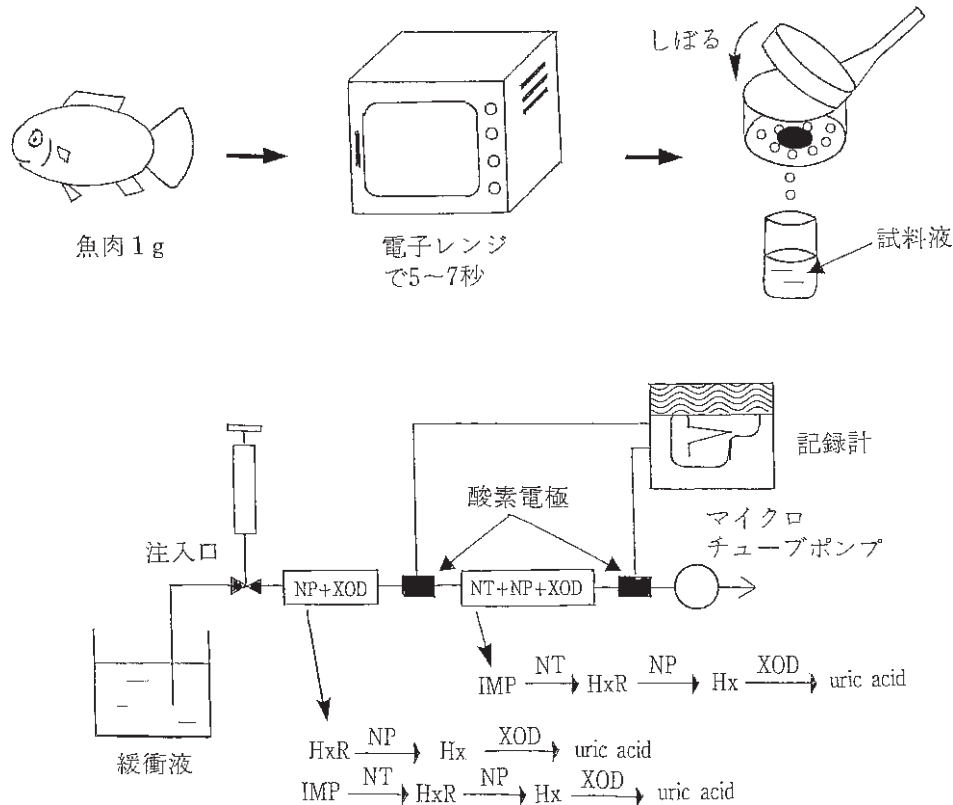


図24 鮮度計測用バイオセンサシステム

酵素反応に使用された O_2 量から HxR+Hx 量および IMP+HxR+Hx 量を求める。
HxR: イノシン, Hx: ヒポキサンチン, NT: ヌクレオチダーゼ, NP: ヌクレオシド
ホスホリラーゼ, XOD: キサンチンオキシダーゼ, uric acid: 尿酸
(渡辺, 1998・H Okuma *et al*, 1992)

参考文献

1 死後変化について

A.L.Lehninger (1968): 生命とエネルギーの科学 (藤本大三郎訳), 化学同人, 京都. 49-108pp.

新井健一他10名 (1993): 水産食品学 (須山三千三, 鴻巣章二編), 恒星社厚生閣, 東京. 95-107pp.

2 魚介類の鮮度判定について

藤井健夫 (1995): 魚介類の鮮度判定と品質保持. 水産学シリーズ106 (渡辺悦生編) 恒星社厚生閣, 東京, 64-81pp.

加藤 登 (1995): 魚介類の鮮度判定と品質保持. 水産学シリーズ106 (渡辺悦生編) 恒星社厚生閣, 東京, 90-101pp.

村田道代 (1995): 魚介類の鮮度判定と品質保持. 水産学シリーズ106 (渡辺悦生編) 恒星社厚生閣, 東京, 82-89pp.

新井健一他10名 (1993): 水産食品学 (須山三千三, 鴻巣章二編) 恒星社厚生閣, 東京. 95-107pp.

3 K 値による鮮度判定について

加藤 登 (2004): 水産食品の安全・安心対策—現状と課題, 水産学シリーズ143 (阿部宏喜, 内田直行編) 恒星社厚生閣, 東京. 91-103pp.

新井健一 (1960): 水産無脊椎動物中の酸可溶核酸成分 I, 貝類筋肉中の酸可溶核酸成分に及ぼす貯蔵温度の影響 1, 北

大水産彙報, 11, 67-71.

新井健一 (1966): 海産無脊椎動物筋肉中のヌクレオチド. 日水誌, 32, 174-180.

新井健一他10名 (1993): 水産食品学 (須山三千三, 鴻巣章二編), 恒星社厚生閣, 東京. 171-183pp.

江平重男, 内山均, 宇多文昭 (1974): 水産生物化学・食品学実験書 (斉藤恒行ら編) 恒星社厚生閣, 東京, 17-57pp. 263-268pp.

畑江敬子 (1995): 魚介類の鮮度判定と品質保持. 水産学シリーズ106 (渡辺悦生編) 恒星社厚生閣, 東京, 20-31pp.

川島孝省, 大場明子, 新井健一 (1973): スケトウダラ冷凍すり身中のアクトミオシン含量とかまぼこの弾性との関係について. 日水誌, 39, 1201-1209.

大熊廣一 (2004): 水産食品デザイン学—新製品と美しさの創造— (渡辺悦生編) 成山堂書店, 東京, 168-172pp.

斉藤恒行, 新井健一 (1957): 水産動物筋肉中の有機リン化合物に関する研究—V. コイ筋肉中の核酸系化合物の凍結貯蔵中における変化に就いて. 日水誌, 23, 265-268.

斉藤恒行, 新井健一, 矢島敏克 (1959): 水産動物筋肉中の有機リン化合物に関する研究—VII. 血合筋におけるアデニンヌクレオチドの変化. 日水誌, 25, 573-575.

Tsuneyuki Saito and Ken-ichi Arai (1957): Slow Freezing

of Carp Muscle and Inosinic Acid Formation. Nature, **179**, 820.

Tsuneaki Saito, Ken-ichi Arai and Minoru Matsuyoshi (1959): A New Method for Estimating the Freshness of Fish. 日水誌. **24**, 749-750.

渡辺悦生 (1995): 魚介類の鮮度判定と品質保持. 水産学シリ

ーズ106 (渡辺悦生編) 恒星社厚生閣, 東京, 32-43pp.

山中英明 (1995): 魚介類の鮮度判定と品質保持. 水産学シリ
ーズ106 (渡辺悦生編) 恒星社厚生閣, 東京, 9-19pp.

山中英明 (2002): 魚介類の死後変化と品質 (総説), 日水誌, **68**, 5-14.

要 旨

魚介類の鮮度を評価するため、これら筋肉中の ATP の貯蔵に伴う分解生成物を定量した。そして K 値を $B/A \times 100$ で表したが、B はイノシン+ヒポキサンチンの合計量、A は ATP 関連化合物の合計量である。水産動物の筋肉の死後硬直の開始と、それに続く軟化は陸上動物のそれよりも著しく早く起こるが、筋肉中の ATP 含量は、筋肉の死後硬直の変化と強く関わっていることが知られている。結果的に、筋肉の鮮度を K 値を用いて評価する方法が我が国で人気を克ち得たのは、これらの動物の筋肉切片を硬い状態で“さしみ”や“すし”に使うのが好ましいからである。

筋肉の加工食品の種類によっては、K 値に加えて、さらに適切な評価指標、たとえば官能的、物理的及び微生物的試験を追加しなければならない。この理由は多くの指標による方がより納得できる製品の品質評価ができるからである。