

鮮魚の流通における品質推定支援モデル

明田川雅子¹, 中村 誠^{2†}, 太田博光³, 前田俊道²

Quality Estimation Support Models of the Fresh Fish in the Distribution

Masako Aketagawa¹, Makoto Nakamura², Hiromitsu Ohta³, Toshimichi Maeda²

Abstract : Models which ensure accurate non-destructive estimates of the freshness of fish meat (K-value) in real time are proposed to improve quality control and maintain the skill level of distributors of marine products. Six kinds of fish, each differing with respect to the hue of the fish body surface, were used to construct the models. Relationships between fish coloration and K-values from sample acquisition until 72 hours later under refrigeration at -2°C , $+2^{\circ}\text{C}$, and $+6^{\circ}\text{C}$ were investigated. A statistical analysis revealed that fish coloration does reflect its K-value, although the strength of the relationship differs by fish species. Three models were designed on the basis of these results, and the usefulness of each model was evaluated. The models are as follows: (1) Model to estimate the K-value of fish meat based on the coloration of the fish body surface (Model 1), (2) Model to predict the K-value of fish meat after several hours for the same fish for which the K-value was estimated with Model 1 (Model 2), and (3) Model to predict the K-value of the fish meat after an arbitrary elapsed time for just-killed fish (Model 3). For all three models, a high estimation accuracy was confirmed, demonstrating their potential usefulness for quality control in the distribution of marine products.

Key words : Fresh fish, K-value, Color, Quality estimation, Modeling

1. 緒 言

生鮮魚類の品質は時間経過に伴って急速に低下するため、生産から消費に至るまでの流通においては十分に品質管理をする必要がある。現在、水産物の流通における品質管理には、例えば陸路の流通の起点となる魚市場の競り人等の所謂目利きによる官能評価と高速液体クロマトグラフによる鮮度判定等の機器による化学分析が貢献している。目利きによる官能評価は長年の経験により培われた知識を基に行われており、非破壊で即座に品質の程度を見積もることに利点があり、生鮮度を競う現場に適したものである。しかし、厳しい労働環境等が起因して目利きの後継の育成は十分には進んでおらず¹⁾、技術水準の維持に不安を残している。一方、魚肉鮮度K値の測定に代表される化

学分析では官能評価より高精度が期待できるものの、魚肉採取等を伴うものが多く、また結果を得るまでに長時間を要することに難がある。

本研究では、水産物の流通に関わる現場の技術水準の維持と品質管理に資することを目的として、非破壊でかつリアルタイムにK値を推定する3種類のモデルを検討するものとした。具体的には、先ず、鮮魚の体表の色彩からK値を推定するモデル（以下、モデル1と呼ぶ）である。このモデル1は、魚市場や仲卸業者等の品質管理、一般消費者の購入時の品質推定の支援に用いるものであり、対象魚の致死後の正確な履歴が不明な場合に適用する。致死後に魚体の色彩が色素胞の挙動により変化することは明らかにされており²⁾⁻⁵⁾、体表の色彩の変化に着目した競り人の品質を見積もるスキル分析に関する報告⁶⁾⁻⁹⁾もある。しかし

1 水産大学校水産学研究科生 (Graduate student, National Fisheries University)

2 水産大学校水産学研究科 (Graduate School of Fisheries Science, National Fisheries University)

3 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

† 別刷り請求先 (correcting author): nakamura@fish-u.ac.jp

ながら、K値そのものを体表の色彩から直接推定する報告はなされていない。また、サケにおいて加工した魚肉の色彩から品質を評価するシステム¹²⁾の開発が進められているが、魚体に微小の穴をあけることから、検査に要する時間と破壊による商品価値低下を伴うため生鮮度を競う鮮魚の流通には適さない。次に、モデル1でK値推定をした鮮魚を対象として数時間経過後のK値を予測するモデル（以下、モデル2と呼ぶ）である。このモデル2は鮮魚の運搬中や到着時、また冷蔵期間中の任意の時刻におけるK値を予測するものであり、出荷者と購入者双方の品質管理を支援することを目的とする。最後に、即殺処理した鮮魚について、一定範囲の冷蔵温度下で致死後の任意の経過時間におけるK値を予測するモデル（以下、モデル3と呼ぶ）である。このモデル3は、生簀を有する漁業者や養殖業者、卸売業者等で即殺処理後の計画出荷を行うことが可能な出荷者の品質管理を支援するものである。過去、生鮮魚介類のK値変化は時間経過に対して線形であるという仮定の下で報告^{13),14)}がなされてきた。しかしながら鮮魚のK値は必ずしも時間経過に対して線形であるとは言い難い¹⁵⁾⁻²⁰⁾。そのため、致死からの履歴が正確なデータを収集し、それを基に、より精度良くK値を予測することが可能なモデルを実現することは、鮮魚の商品価値向上と品質管理の観点から有用である。以上、本報では鮮魚の流通における品質管理を支援することを目的とした3種類のモデルを提案すると共に、設計したこれらのモデルの有用性を評価したのでその結果について報告する。

2. 実験方法

2-1. 試料魚

Table 1に各モデルの設計と評価実験に用いた試料魚の

体格と試料数を示す。モデル1とモデル2の試料魚にはアカアマダイ（学名：*Branchiostegus japonicus*, 英名：Tilefish）、マダイ（学名：*Pagrus major*, 英名：Red seabream）、シロサバフグ（学名：*Lagocephalus*, 英名：White chestnut）、イサキ（学名：*Parapristipoma trilineatum*, 英名：Striped grunt）、マアジ（学名：*Trachurus japonicus*, 英名：Japanese jack mackerel）及びウマヅラハギ（学名：*Thamnaconus modestus*, 英名：Black scraper）の計6魚種を定めた。試料は入手性を考慮して、アカアマダイとシロサバフグは共に計82尾、マアジは計155尾ほど山口県漁業協同組合萩地方卸売市場で競りにかけられた鮮魚を使用した。また、マダイは計138尾、イサキは計149尾、ウマヅラハギは計158尾ほど山口県漁業協同組合萩地方卸売市場の鮮魚に有限会社中野水産（角島）で即殺処理を施した鮮魚を加えて使用した。これらの試料の内、解析とモデル設計にアカアマダイは計50尾、マダイは計80尾、シロサバフグは計50尾、イサキとマアジは共に計90尾、ウマヅラハギは計100尾を使用し、残りは評価実験に用いた。

モデル3の試料魚にはマダイ、イサキ及びウマヅラハギの計3魚種を定めた。3魚種とも有限会社中野水産（角島）で即殺処理を施し、マダイは計58尾、イサキとウマヅラハギは共に計60尾を使用した。この内、解析とモデル設計には各魚種共に計36尾を使用し、残りは評価実験に用いた。

2-2. 魚体体表の色彩測定

Fig. 1に試料魚の体表の色彩の測定点を示す。これらの測定点は、次の方法で定めた。まず、色相の異なる背部、体幹部及び腹部の各部位の色彩を測定するため、体幹部を基準に測定線（L2）を設定したあと、これと等間隔でか

Table 1 Constitution of specimens

Species	Total length [mm]	Weight [g]	[mean ± SD]
			Number of samples
Tilefish	338.3 ± 24.9	484.5 ± 101.7	82
Red seabream	415.7 ± 86.2	1059.4 ± 645.9	138
White chestnut	315.7 ± 18.7	464.9 ± 83.9	82
Striped grunt	329.4 ± 29.1	515.1 ± 121.3	149
Japanese jack mackerel	273.7 ± 36.2	217.3 ± 85.3	155
Black scraper	284.6 ± 30.3	333.8 ± 118.5	158

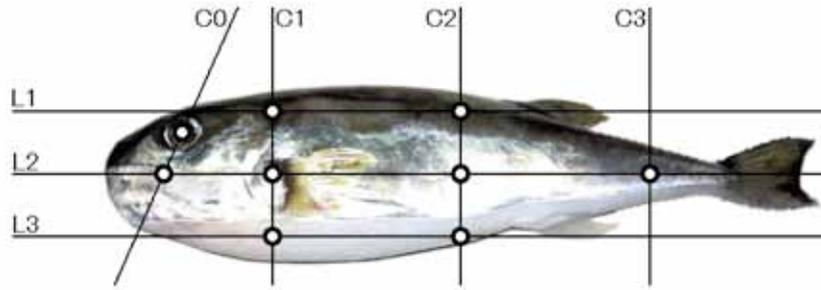


Fig. 1 Measuring points of color on the fish body surface.

つ平行に背部と腹部の測定線（それぞれ、L1とL3）を定めた。同様に、胸部、体中部及び尾部の色彩を測定するため、腹部の肛門を通りかつ測定線（L2）と垂直になる測定線（C2）を引き、これと等間隔かつ平行に胸部と尾部の測定線（それぞれ、C1とC3）を定めた。測定点はこれらの測定線の交点（背部2点、体幹部3点、腹部2点）と、頭部1点、眼球1点の計9点で構成した。以下、測定点の名称は測定線の交点、例えば、背部の頭部方向の測定点では記号により（L1-C1）で、また頭部と眼球は各々（L2-C0）、（E）と表すものとする。

体表の色彩の測定項目にはCIE1976L*a*b*表色系に規定される明度指数L*、色座標a*、色座標b*（以下、色度a*、色度b*と呼ぶ）を定めた。各測定点の彩度C*ab、色相角h及び2点の測定点間の色差 ΔE^*ab はそれぞれ式（1）から式（3）により計算した。なお、色彩の測定には光源にCIE測色用標準イルミネラントD65を内蔵する測定径8mmの接触式色彩計（コニカミノルタ（株）：CR-400）を用いた。

$$C^*ab = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad [-] \quad (1)$$

$$h = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad \left[^\circ \right] \quad (2)$$

$$\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad [-] \quad (3)$$

2-3. 魚肉の鮮度測定

魚肉の鮮度指標には、最も一般的に使用される生化学的な鮮度指標であるK値を用いた。式（4）にK値の計算式を示す。K値の測定法にはHPLC（high performance liquid chromatography）法を用いるものとし、試料の調整方法には過塩素酸抽出法を適用した。なお分析用の試料肉は1尾あたり1gとし、色彩の測定面の反対の体側より採取し

た。

$$K \text{ value} = \frac{H_x R + H_x}{ATP + ADP + AMP + IMP + H_x R + H_x} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

2-4. 測定時間

モデル1とモデル2の設計に用いる色彩とK値の測定時間は卸売市場での競り終了後から消費者に届くまでの期間を考慮して、試料入手後約2時間、24時間、48時間及び72時間の各経過時と定めた。また、モデル3では即殺処理を施してから小売業者や消費者に届くまでの期間を考慮して、即殺処理後2時間、24時間、48時間及び72時間を目安として分単位で正確に管理するものとした。

2-5. 環境条件

体表の色彩の測定とK値分析における中和処理迄は温度を約12℃、湿度を50%RH程度、照度を約300lxに保った恒温室内で行った。また、試料魚は冷蔵室の温度を-2℃、+2℃、+6℃の3条件の下で、発泡スチロール製の容器に氷納して保管した。

3. 解析方法

解析に用いる体表の色彩の指標は、次の第1)項～第3)項に示す計20点に定めて、先ず、各冷蔵温度下における各測定時間の基本統計量を算出した。

1) 測定点（計9点）

- ・背部 (L1-C1), (L1-C2)
- ・頭部 (L2-C0)
- ・体幹部 (L2-C1), (L2-C2), (L2-C3)
- ・腹部 (L3-C1), (L3-C2)
- ・眼球 (E)

2) 部位内の2点の測定点間の差（計5点）

- ・背部内の2点間の差 $\{(L1-C1) - (L1-C2)\}$
 - ・体幹部内の2点間の差 $\{(L2-C1) - (L2-C2)\}$,
 $\{(L2-C1) - (L2-C3)\}$,
 $\{(L2-C2) - (L2-C3)\}$
 - ・腹部内2点間の差 $\{(L3-C1) - (L3-C2)\}$
- 3) 部位間の2点の測定点間の差 (計6点)
- ・背部-体幹部間の差 $\{(L1-C1) - (L2-C1)\}$,
 $\{(L1-C2) - (L2-C2)\}$
 - ・背部-腹部間の差 $\{(L1-C1) - (L3-C1)\}$,
 $\{(L1-C2) - (L3-C2)\}$
 - ・体幹部-腹部間の差 $\{(L2-C1) - (L3-C1)\}$,
 $\{(L2-C2) - (L3-C2)\}$

次に体表の色彩とK値に及ぼす冷蔵温度の影響は、冷蔵温度を3水準、測定時間を4水準とする二元配置の分散分析と多重比較により確認した。ここで、等分散性と多重比較の検定では各々ルービン検定とシェッフェの検定を用いるものとした。なお、等分散性が棄却された場合には、改めて冷蔵温度と測定時間に対してクラスカル・ウォリスの検定を行った。

また、体表の色彩とK値との関係については、相関分析と無相関の検定により確認するものとした。

4. モデル化と評価の方法

4-1. モデル化

モデル1

モデル1は測定した体表の色彩を基に、瞬時にK値を推定するモデルである。モデル1には色彩の非線形性に良く対応するファジィ推論モデル²¹⁾を用いるものとした。式(5)にファジィ規則の基本式を示す。ファジィ規則の前件部変数にはK値との関連が強い体表の色彩の組み合わせを、また後件部変数にはK値を定めた。

IF *Lightness* is A_i and *Hue* is B_i and *Chroma* is C_i and *Color difference* is D_i THEN *K value* is E_i (5)

ここで、 $A_i \sim E_i$ はファジィラベルである。

前件部変数の組み合わせは次の通り抽出した。まず、目的変数に測定時間や冷蔵温度に関係なく全試料のK値を、また、説明変数に色彩とK値との相関分析でK値との関係が確認された色彩 ($p < 0.01$, 又は, $p < 0.05$) を定めて重回帰分析を行い、決定係数 R^2 を求めた。ここで、説明変数の数は重回帰式の複雑化を避けるために6個迄を目安とした。次に、高い決定係数 R^2 を得た5個程度の重回帰式の

うち、魚肉の変性(硬直、解硬等)に伴う体表の色彩の挙動^{2), 22), 23)}の観点から最も適切と見なせる色彩の組み合わせを前件部変数に用いるものとした。

モデルの前件部のメンバーシップ関数は(以下、MFと呼ぶ)はVL (very low), LO (low), ME (medium), HI (high), VH (very high) の5個で構成した。関数VLとVHには台形を、また関数LO, ME及びHIには三角形を適応した。前件部を構成する各変数のMFは次のステップを経て作成した。

Step 1: 変数の全試料の平均値を関数MEのグレード1.0に対応させ、関数MEのファジィ部分集合の幅を標準偏差 σ の大きさに定める。

Step 2: 関数VL及びVHのグレード1.0は、関数MEの中心から標準偏差 σ 程離れた距離に定める。

Step 3: 関数LOは関数VLとMEの中間に、また関数HIはMEとVHの中間に定める。

後件部のMFはCL1 (class 1) からCL7 (class 7) の計7個で構成した。関数CL1とCL7には台形を、また関数CL2からCL6には三角形を適応した。後件部を構成するK値のMFは次のステップを経て作成した。

Step 4: 全試料におけるK値の最小値を関数CL1のグレード1.0に、最大値を関数CL7のグレード1.0に対応させる。

Step 5: CL1とCL7のグレード1.0の値を基準として、CL1~CL7の全ての関数の面積が等しくなるようにファジィ部分集合の幅を定める。

前件部変数のメンバーシップ関数はモデルの推定精度を高めるため、確定演算の結果、実験により得られたK値とモデルの推定結果とに大きな差が見られたものは、主に関数に関わる前件部変数のMFの台集合の幅を縮小するようにチューニングするものとした。なお、確定演算にはmin-max重心法²⁴⁾を用いた。

モデル2

モデル2は、モデル1で推定した各対象魚のK値を用いて任意の経過時間におけるK値を予測するものである。モデルの候補には直線、累乗曲線、指数曲線、修正指数曲線、ロジスティック曲線及びゴンペルツ曲線を定めた。式(6)、式(7)及び式(8)に修正指数曲線、ロジスティック曲線及びゴンペルツ曲線の基本式を示す。

$$K(x) = c - ba^x \quad [\%] \quad (6)$$

$$K(x) = \frac{c}{1 + be^{-ax}} \quad [\%] \quad (7)$$

$$K(x) = cb^{ax} \quad [\%] \quad (8)$$

ここで、 $K(x)$ は目的変数、 x は説明変数、 a 、 b 及び c は定数である。

目的変数に試料入手後の各測定時における K 値の平均値を、また、説明変数に試料入手時からの経過時間を定めて各々の曲線を用いて近似を行い、決定係数 R^2 を求めた。各曲線の係数は最小二乗法により決定するものとした。最も高い決定係数 R^2 が得られた曲線をモデルとして用いるものとした。

モデル3

モデル3は、任意の冷蔵温度下で即殺処理後からの任意の経過時間における K 値を予測するものである。モデルの候補にはモデル2と同様の曲線を定めた。まず、目的変数に各試料魚の K 値を、説明変数に即殺処理時からの経過時間を定め、 -2°C 、 $+2^\circ\text{C}$ 及び $+6^\circ\text{C}$ の冷蔵温度帯毎に各々の曲線を用いて近似を行い、決定係数 R^2 を求めた。次に、各冷蔵温度下における計18個のモデルの適応性を検討し、魚種毎に総合的に最も決定係数 R^2 が高くなるモデルを選択した。各魚種とも選択したモデル式に冷蔵条件を変数として加えることで、1つのモデルで -2°C から $+6^\circ\text{C}$ までの冷蔵温度下における対象魚の K 値が予測可能となるようにした。

4-2. 評価方法

まず、設計した各モデルについては、前述の通り決定係数 R^2 を求めると共に、試料毎に観測値と推定値、又は予測値との残差 ε を算出した。残差 ε を1%未満、1%以上3%未満、3%以上5%未満、5%以上10%未満、10%以上の計5個のカテゴリーに分け、全試料に占める各カテゴリーの割合を基として有用性を検討した。

$$\varepsilon = |K - K_i| \quad [\%] \quad (9)$$

ここで、 $i=1\sim 3$ であり、 K_i はそれぞれモデル1からモデル3で得られた K 値を表す。

次に、各モデルに対して評価実験を行い、残差 ε と全試料に占める各カテゴリーの割合からモデルの精度と妥当性

を検討するものとした。

5. 結 果

5-1. 実験結果

Fig. 2に試料入手後約2時間経過時における体表の色彩の分布を示す。眼(E)を除いた各試料魚の体表の彩度 C^*ab の平均はアカアマダイ、マダイ、シロサバフグ、イサキ、マアジ、ウマヅラハギの順にそれぞれ12.84, 12.20, 11.47, 8.13, 5.74, 4.00となった。彩度 C^*ab の高い魚種は明度 L^* も高く、彩度 C^*ab の低い魚種は明度 L^* も低い傾向にあることが分かる。

Table 2に試料入手後約2時間経過時の試料魚の各部位における体表の色彩を示す。各魚種の背部、体幹部、腹部の色彩は、アカアマダイではそれぞれ暗い灰みの赤、灰みの黄赤、黄赤みのうすい灰色を、マダイでは暗い灰みの黄赤、明るい灰みの黄赤、黄赤みの明るい灰色を、シロサバフグでは緑みを帯びた黄みの暗い灰色、ごくうすい緑みの黄、うすい灰色を呈した。イサキではそれぞれ黄赤みの暗い灰色、黄赤みの暗い灰色、赤みを帯びた黄みの明るい灰色、マアジでは暗い灰色、暗い灰色、うすい灰色を、ウマヅラハギでは暗い灰色、黄みの暗い灰色、赤みを帯びた黄みの灰色を呈した。

Fig. 3に冷蔵温度 $+2^\circ\text{C}$ における各試料魚の K 値の経時変化の様子を示す。72時間経過時迄の K 値の平均上昇速度はシロサバフグが最も早く $0.36\%/h$ 、マダイが最も遅く $0.05\%/h$ であり、魚種毎に大きく異なるものとなった。また、 K 値の平均上昇速度の速い魚種では各経過時間帯における K 値の分散が大きくなる傾向を示した。

5-2. 解析結果

Table 3に72時間経過時迄で K 値との相関($p<0.05$)が確認された色彩の一覧を示す。Table 3に示すとおり各魚種とも55個から87個の色彩が K 値との関連を示した。例えばマダイでは、背部(L1-C2)の彩度 C^*ab が負の相関($r=-0.299$, $p<0.01$)を、頭部(L2-C0)の明度 L^* が正の相関($r=0.299$, $p<0.01$)を、体幹部(L2-C2)の色相角 h が負の相関($r=-0.355$, $p<0.01$)を、眼(E)の明度 L^* が正の相関($r=0.338$, $p<0.01$)をそれぞれ示した。また、色彩の差とは体幹部-腹部間 $\{(L2-C1)-(L3-C1)\}$ の色度差 Δb^* で負の相関($r=-0.526$, $p<0.01$)を、同じく体幹部-腹部間 $\{(L2-C2)-(L3-C2)\}$ の色度差 Δb^* で負の相関($r=-$

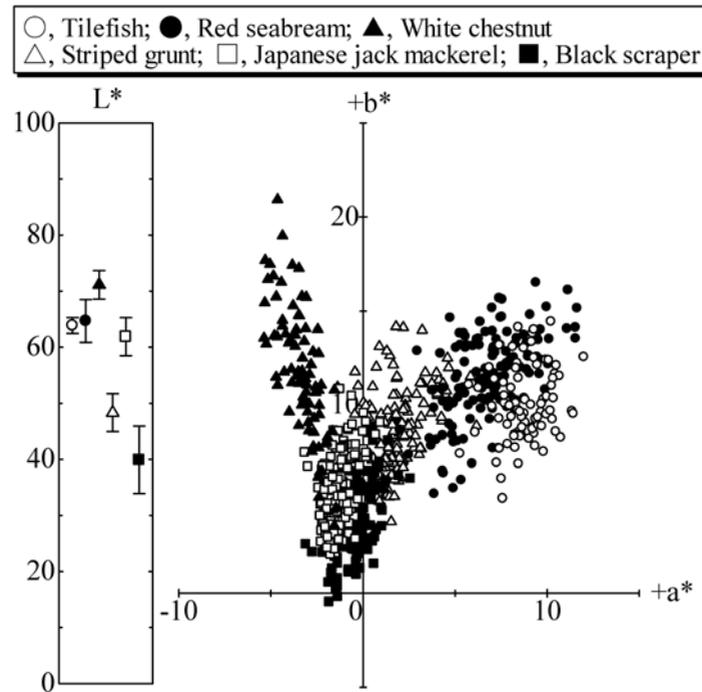


Fig. 2 Distribution of color on the fish body surface.

Table 2 Body skin color of specimens

Species	Indices	[mean \pm SD]		
		Dorsal region	Trunk part	Abdominal region
Tilefish	L*	35.68 \pm 3.80	68.08 \pm 6.14	83.15 \pm 3.63
	a*	9.95 \pm 2.06	12.02 \pm 3.07	1.44 \pm 3.07
	b*	3.97 \pm 3.87	15.81 \pm 7.69	3.03 \pm 3.21
Red seabream	L*	45.71 \pm 6.81	73.51 \pm 5.32	74.15 \pm 5.56
	a*	7.92 \pm 3.35	8.55 \pm 3.25	1.09 \pm 2.11
	b*	14.23 \pm 4.38	14.55 \pm 4.26	4.59 \pm 2.10
White chestnut	L*	31.57 \pm 3.80	85.62 \pm 7.12	85.09 \pm 3.02
	a*	- 1.58 \pm 1.25	- 5.07 \pm 2.50	- 0.74 \pm 2.08
	b*	7.40 \pm 2.19	18.08 \pm 8.00	0.10 \pm 2.07
Striped grunt	L*	28.94 \pm 3.39	43.64 \pm 7.44	69.57 \pm 4.87
	a*	1.22 \pm 1.15	2.56 \pm 1.61	2.27 \pm 3.09
	b*	5.56 \pm 2.21	8.42 \pm 3.52	10.14 \pm 4.45
Japanese jack mackerel	L*	29.27 \pm 4.28	61.51 \pm 11.79	85.84 \pm 4.10
	a*	- 1.22 \pm 0.68	- 1.96 \pm 1.79	- 0.86 \pm 1.25
	b*	1.62 \pm 1.53	10.90 \pm 4.45	- 0.10 \pm 3.01
Black scraper	L*	27.33 \pm 5.20	40.22 \pm 7.94	54.56 \pm 8.96
	a*	- 0.53 \pm 0.85	- 0.88 \pm 1.92	0.03 \pm 1.92
	b*	2.04 \pm 1.53	4.10 \pm 2.73	6.34 \pm 3.08

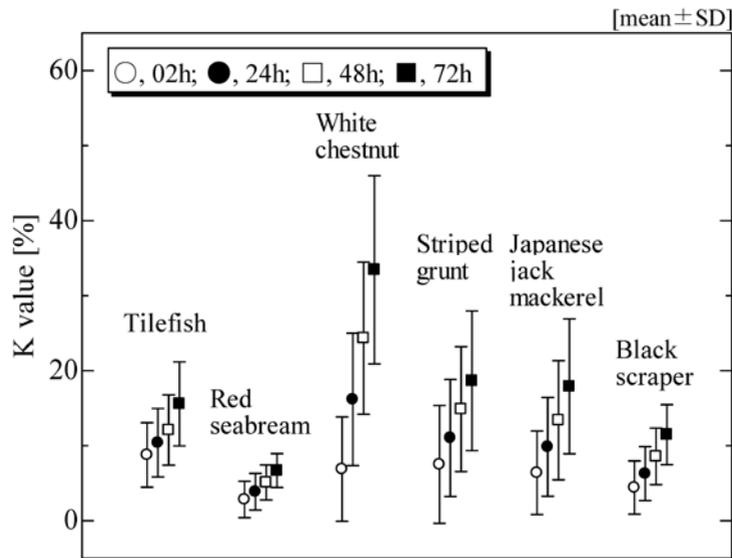


Fig. 3 Changes in K value of specimens.

0.516, $p < 0.01$)を確認した。この様に、魚種により差違があるもののK値と色彩は良好に対応している。

Table 4にTable 3に示す色彩を説明変数に定めて重回帰分析を行った結果、モデル1の変数として有用性を確認した色彩の組み合わせを示す。各魚種の重回帰式の重回帰係数 r は、アカアマダイ、マダイ、シロサバフグ、イサキ、マアジ及びウマヅラハギでそれぞれ0.616, 0.687, 0.448, 0.695, 0.692及び0.614となった。

5-3. モデルの設計結果

モデル1

Fig. 4にマダイのK値を推定するファジィ推論モデル(モデル1)のチューニング後のメンバーシップ関数の構成を示す。前件部変数は背部(L1-C2)の彩度 C^*ab から体幹部-腹部間 $\{(L2-C2) - (L3-C2)\}$ の色度差 Δb^* 迄の計6個の色彩から成り、各変数は計5個のメンバーシップ関数で構成した。また後件部変数のK値は計7個のメンバーシップ関数で構成した。

ファジィ規則の数はアカアマダイが327個、マダイが532個、シロサバフグが320個、イサキが588個、マアジが585個及びウマヅラハギが565個となった。

モデル2

マダイのモデル2の候補である直線、累乗曲線、指数曲

線、修正指数曲線、ロジスティック曲線及びゴンペルツ曲線についての近似曲線を求めた結果、各曲線の決定係数 R^2 は各々0.990, 0.995, 0.999, 0.982, 0.999及び0.997を得た。よって、マダイのモデル2には最も高い決定係数 R^2 を得たロジスティック曲線を用いるものとした。同様に、アカアマダイは指数曲線($R^2=0.987$)、シロサバフグは直線($R^2=0.999$)、イサキはゴンペルツ曲線($R^2=0.999$)、マアジは累乗曲線($R^2=0.999$)及びウマヅラハギはロジスティック曲線($R^2=0.999$)をそれぞれ用いることとした。式(10)から式(15)に各魚種のモデル2を、Table 5にそれらのモデルの係数を示す。

$$\text{Tilefish : } K_2 = ba^{(\log_a \frac{K_1}{b}) + t_{12}} \quad [\%] \quad (10)$$

Red seabream :

$$K_2 = \frac{c}{1 + be^{\{\ln \frac{1}{b} (\frac{c}{K_1} - 1)\} - at_{12}}} \quad [\%] \quad (11)$$

White chestnut :

$$K_2 = a \left(\frac{K_1 - b}{a} + t_{12} \right) + b \quad [\%] \quad (12)$$

Striped grunt :

$$K_2 = cb^{a(\log_a \log_b \frac{K_1}{c}) + t_{12}} \quad [\%] \quad (13)$$

Table 3-1 Colors of the fish body surface which confirmed the relationship between K values

(a) Tilefish and red seabream

Species	Measuring points	Indices
Tilefish	(L1-C1)	L^*, h
	(L1-C2)	L^*, a^*, C^*ab, h
	(L2-C0)	L^*, b^*, C^*ab, h
	(L2-C1)	L^*, a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C2)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(L2-C3)	L^*, a^*, b^*, C^*ab
	(L3-C1)	h
	(L3-C2)	a^*, b^*, C^*ab, h
	(E)	b^*, C^*ab
	(L1-C1)-(L2-C1)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h$
	(L1-C1)-(L3-C1)	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta h$
	(L1-C2)-(L2-C2)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta h$
	(L1-C2)-(L3-C2)	Δh
	(L2-C1)-(L2-C2)	Δh
	(L2-C1)-(L2-C3)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab$
	(L2-C1)-(L3-C1)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*ab, \Delta h$
	(L2-C2)-(L2-C3)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta C^*ab, \Delta h$
	(L2-C2)-(L3-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta C^*ab$
	(L3-C1)-(L3-C2)	ΔC^*ab
Red seabream	(L1-C1)	L^*, b^*, C^*ab, h
	(L1-C2)	L^*, a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C0)	L^*, a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C1)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(L2-C2)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(L2-C3)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(L3-C1)	L^*, b^*, C^*ab, h
	(L3-C2)	b^*, C^*ab, h
	(E)	L^*
	(L1-C1)-(L1-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*ab$
	(L1-C1)-(L2-C1)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab$
	(L1-C1)-(L3-C1)	$\Delta b^*, \Delta C^*ab$
	(L1-C2)-(L2-C2)	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L1-C2)-(L3-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*, \Delta E^*ab$
	(L2-C1)-(L2-C3)	$\Delta a^*, \Delta h, \Delta E^*ab$
(L2-C1)-(L3-C1)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*, \Delta E^*ab$	
(L2-C2)-(L2-C3)	Δa^*	
(L2-C2)-(L3-C2)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*, \Delta E^*ab$	

Table 3-2
(b) White chestnut and striped grunt

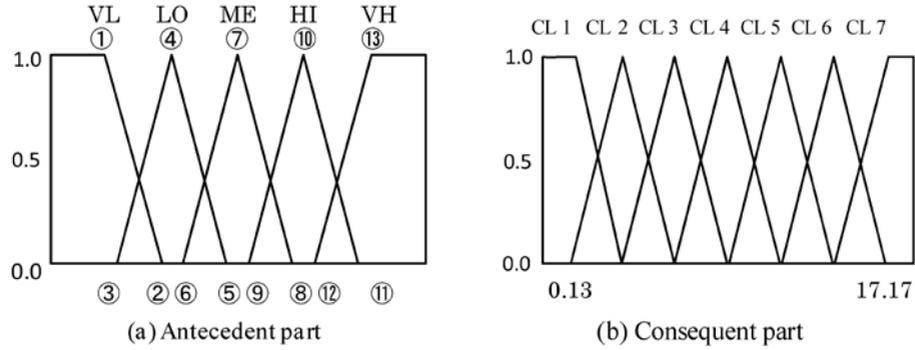
Species	Measuring points	Indices
White chestnut	(L1-C2)	b^*, h
	(L2-C0)	a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C1)	a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C2)	a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C3)	L^*, a^*, b^*, C^*ab
	(L3-C1)	b^*, C^*ab, h
	(L3-C2)	L^*, a^*, b^*, h
	(E)	L^*, b^*, C^*ab
	(L1-C1)-(L2-C1)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab$
	(L1-C1)-(L3-C1)	$\Delta h,$
	(L1-C2)-(L2-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*ab$
	(L1-C2)-(L3-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L2-C1)-(L2-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*$
	(L2-C1)-(L2-C3)	ΔL^*
	(L2-C1)-(L3-C1)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L2-C2)-(L2-C3)	Δa^*
	(L2-C2)-(L3-C2)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L3-C1)-(L3-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta E^*ab$
	Striped grunt	(L1-C1)
(L1-C2)		a^*, b^*, C^*ab, C^*ab
(L2-C0)		L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
(L2-C1)		$a^*,$
(L2-C2)		L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
(L2-C3)		L^*, b^*, C^*ab
(L3-C1)		L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
(L3-C2)		L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
(E)		L^*, a^*, b^*, h, C^*ab
(L1-C1)-(L1-C2)		$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta h, \Delta C^*ab, \Delta E^*ab$
(L1-C1)-(L2-C1)		$\Delta a^*, \Delta h$
(L1-C1)-(L3-C1)		$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*ab$
(L1-C2)-(L2-C2)		$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta h, \Delta E^*ab$
(L1-C2)-(L3-C2)		$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
(L2-C1)-(L2-C2)		$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*ab$
(L2-C1)-(L2-C3)		$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*ab$
(L2-C1)-(L3-C1)		$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
(L2-C2)-(L2-C3)		$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab$
(L2-C2)-(L3-C2)		$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
(L3-C1)-(L3-C2)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab$	

Table 3-3
(c) Japanese jack mackerel and black scraper

Species	Measuring points	Indices
Japanese jack mackerel	(L1-C1)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(L1-C2)	L^*, a^*
	(L2-C0)	L^*, a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C1)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(L2-C2)	L^*, a^*, b^*, h
	(L2-C3)	L^*, a^*, h
	(L3-C1)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(L3-C2)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(E)	L^*, a^*, b^*, h
	(L1-C1)-(L1-C2)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L1-C1)-(L2-C1)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L1-C1)-(L3-C1)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L1-C2)-(L2-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L1-C2)-(L3-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L2-C1)-(L2-C2)	$\Delta L^*, \Delta h, \Delta E^*ab$
	(L2-C1)-(L2-C3)	$\Delta b^*, \Delta C^*ab$
	(L2-C1)-(L3-C1)	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*ab$
(L2-C2)-(L2-C3)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta h, \Delta E^*ab$	
Black scraper	(L1-C1)	L^*, b^*, C^*ab, h
	(L1-C2)	L^*
	(L2-C0)	L^*, a^*, b^*, C^*ab
	(L2-C1)	L^*, a^*, h
	(L2-C2)	L^*, b^*, C^*ab
	(L2-C3)	L^*, a^*, h
	(L3-C1)	L^*, a^*, h
	(L3-C2)	L^*, a^*, b^*, C^*ab, h
	(E)	L^*, b^*, C^*ab
	(L1-C1)-(L1-C2)	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*$
	(L1-C1)-(L2-C1)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta E^*, \Delta h$
	(L1-C1)-(L3-C1)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta h, \Delta E^*$
	(L1-C2)-(L2-C2)	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta E^*$
	(L1-C2)-(L3-C2)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*$
	(L2-C1)-(L2-C2)	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta h, \Delta E^*$
	(L2-C1)-(L2-C3)	$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta E^*ab$
	(L2-C1)-(L3-C1)	ΔL^*
(L2-C2)-(L2-C3)	$\Delta L^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h, \Delta E^*$	
(L2-C2)-(L3-C2)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h$	
(L3-C1)-(L3-C2)	$\Delta a^*, \Delta b^*, \Delta C^*ab, \Delta h$	

Table 4 Constitution of multiple regression analysis models which estimate K values

Species	Explanatory variables	Partial regression coefficients
Tilefish	(L1-C2), C*ab	- 0.297
	(L2-C0), L*	0.271
	(L2-C0), b*	- 0.384
	(L2-C2), L*	0.304
	(L2-C3), L*	- 0.165
	(E), b*	- 0.329
	(L1-C1)-(L2-C1), ΔC*ab	0.258
	Constant	- 4.956
Red seabream	(L1-C2), C*ab	- 0.080
	(L2-C0), L*	0.034
	(L2-C2), h	- 0.090
	(E), L*	0.071
	(L2-C1)-(L3-C1), Δb*	- 0.118
	(L2-C2)-(L3-C2), Δb*	- 0.140
	Constant	8.721
White chestnut	(L2-C0), a*	1.221
	(L2-C0), b*	0.332
	(L2-C2), a*	1.423
	(L3-C2), L*	- 0.540
	(L3-C2), a*	2.264
	(L2-C1)-(L3-C1), ΔE*ab	- 0.434
	Constant	84.959
Striped grunt	(L1-C1), a*	3.583
	(L2-C0), L*	0.262
	(L3-C2), C*ab	- 0.444
	(E), L*	0.460
	(L2-C1)-(L2-C2), ΔL*	0.215
	(L2-C2)-(L2-C3), ΔC*ab	1.186
	Constant	- 18.935
Japanese jack mackerel	(L1-C1), a*	2.948
	(L2-C1), L*	0.416
	(L3-C2), b*	0.849
	(L1-C1)-(L2C1), ΔL*	0.522
	(L1-C1)-(L2C1), Δb*	- 0.583
	(L1-C1)-(L3C1), Δb*	- 0.477
Constant	0.989	
Black scraper	(L1-C2), L*	0.263
	(L2-C0), a*	0.424
	(L3-C2), a*	0.204
	(E), L*	0.183
	(L1-C1)-(L2-C1), ΔE*ab	0.142
Constant	- 8.436	



Antecedent part variables	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
(L1-C2), C*ab	11.90	14.01	12.90	15.21	17.51	15.21	17.51	19.42	17.51	19.82	22.13	19.82	22.13
(L2-C0), L*	50.05	54.10	49.80	54.10	58.16	54.10	58.16	62.22	58.60	60.70	64.20	62.22	62.27
(L2-C2), h	51.30	54.33	51.30	55.61	59.91	55.61	59.91	64.21	59.91	64.21	68.51	62.30	68.50
(E), L*	35.64	39.38	35.64	39.38	43.12	39.38	43.12	46.86	43.20	46.20	48.80	46.86	50.60
(L2-C1)-(L3-C1), Δb*	5.22	7.71	2.95	6.59	10.20	8.18	10.20	12.68	10.20	12.68	15.17	12.68	15.17
(L2-C2)-(L3-C2), Δb*	3.83	6.09	3.83	6.09	8.35	6.09	8.35	10.61	8.35	10.61	12.10	10.61	12.87

Fig. 4 Membership functions for inferring the freshness of red seabream.

Table 5 Coefficients of model 2

Coefficients	Tilefish	Red seabream	White chestnut	Striped grunt	Japanese jack mackerel	Black scraper
a	1.000	0.255×10^{-3}	6.098×10^{-3}	1.000	1.472	0.318×10^{-3}
b	4.937	18.184	-19.302	0.027	0.029×10^{-3}	1.833
c	—	20.000	—	45.000	—	25.000

Japanese jack mackerel :

$$K_2 = b \left\{ \left(\frac{K_1}{b} \right)^{\frac{1}{a}} + t_{12} \right\}^a \quad [\%] \quad (14)$$

Black scraper :

$$K_2 = \frac{c}{1 + be^{\left\{ \ln \frac{1}{b} \left(\frac{c}{K_1} - 1 \right) \right\} - at_{12}}} \quad [\%] \quad (15)$$

ここで、 K_2 はモデル2により予測するK値、 K_1 はモデル1により推定したK値、 t_{12} ($0 < t_{12} \leq 4320$ (min)) は試料入手時からの任意の経過時間とする。

モデル3

モデル2と同様に曲線を用いて近似曲線を求めた結果、マダイのモデル3には累乗曲線を、またイサキとウマヅラ

ハギにはゴンベルツ曲線を用いることとした。マダイにおける累乗曲線の決定係数 R^2 は -2°C で0.767、 $+2^\circ\text{C}$ で0.747及び $+2^\circ\text{C}$ で0.804となり、全温度帯の平均は0.773を得た。イサキとウマヅラハギのゴンベルツ曲線の決定係数 R^2 は全温度帯の平均で各々0.877と0.773であった。式(16)から式(18)に各魚種のモデル3を、Table 6に各モデルの係数を示す。

Red seabream :

$$K_3 = \{a_2(s+10) + b_2(s+10)^2 + c_2\} t_{03}^{\{a_1(s+10) + b_1(s+10)^2 + c_1\}} \quad [\%] \quad (16)$$

Striped grunt :

$$K_3 = c_3 \{a_2(s+10) + b_2(s+10)^2 + c_2\} \{b_1 a_1^{(s+10)}\}^{t_{03}} \quad [\%] \quad (17)$$

Black scraper :

Table 6 Coefficients of model 3

Coefficients	Red seabream	Striped grunt	Black scraper
a ₁	- 0.049	1.000	0.016×10 ⁻³
a ₂	- 0.522×10 ⁻³	- 0.026	- 1.023
b ₁	3.377×10 ⁻³	1.000	- 0.001×10 ⁻³
b ₂	- 0.108×10 ⁻³	0.994×10 ⁻³	0.393
c ₁	0.757	—	1.000
c ₂	0.041	0.212	—
c ₃	—	15.000	20.000

$$K_3 = c_3\{b_2(s + 10)^{a_2}\}^{a_1(s+10)+b_1(s+10)^2+c_1}t_0^3 \quad [\%] \quad (18)$$

ここで、K₃はモデル3によって予測するK値、t₀₃(0<t₀₃≤4320(min))は即殺処理時からの任意の経過時間、s(-2≤s≤+6(°C))は冷蔵温度とする。

6. 考 察

6-1. K値と魚体体表の色彩

彩度の高い魚種（アカアマダイ、シロサバフグ、イサキ）^{6-8), 10), 11)}については測定線C1上の色彩の色差及び、体幹部上の測定点の色彩がK値に反映することが報告されている。また、彩度の低い魚（マアジ、ウマヅラハギ）⁹⁻¹¹⁾では腹部の測定点（L3-C2）の色彩（主に色度）がK値に反映することが報告されている。これらのことは本研究でも確認した。よって、本報ではこれまでに報告のなされていないマダイのK値と体表の色彩の関係を、モデルの変数に用いた色彩を対象にして考察する。

まず、マダイの明度L*について考察する。Fig. 5に頭部（L2-C0）と眼（E）の明度L*の経時変化の様子を示す。マダイのK値と明度L*において最も強い関連が確認された測定点は頭部（L2-C0）である（r=0.299, p<0.01）。頭部（L2-C0）の色彩は2時間経過時に灰みの黄赤色を呈したのに対し、24時間経過時以降には灰みの黄みを帯びた赤色へと変化した。頭部（L2-C0）の2時間経過時と24時間経過時との色差ΔE*abは0.97で僅かに異なる程度であるのに対して、2時間経過時と72時間経過時の色差ΔE*abは1.13となり、感知し得る程に異なるものへと変わった。2時間経過時の明度L*の平均は57.32、また72時間経過時の明度L*は58.74で両者には有意差（p<0.01）が確認されたが、色度a*、b*や彩度C*abには規則的な変化は確認されなかつ

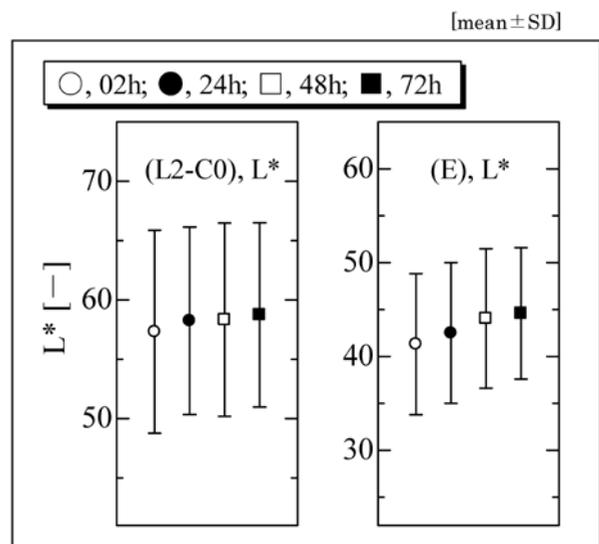


Fig. 5 Changes in value L* of red seabream.

た。よって、頭部（L2-C0）の色差ΔE*abには明度差ΔL*が最も貢献するものとなり、色彩の変化、即ち明度L*の変化の程度からK値の推定が可能となると考える。眼（E）の2時間経過時と72時間経過時との色差ΔE*abは2.27となり、経時的に感知し得る程に異なるものとなる。眼（E）における2時間経過時の明度L*の平均は41.32、また、72時間経過時の明度L*は44.60と大きく上昇する。これは眼の経時的な白濁の様子を表すものである。眼（E）の色彩は頭部（L2-C0）の場合と同様に色度a*、b*、彩度C*abには規則的な変化が確認されないことから、明度L*の変化が色差ΔE*abに貢献するものと捉えることができる。このことから、眼（E）の明度L*はモデルの変数に有用となる。

次に色度b*について考察する。Fig. 6にマダイの体幹部と腹部の測定線C1及びC2上の色度b*の経時変化の様子を

示す。背部と体幹部間の平均値の色差 ΔE^*ab は27.81, 背部と腹部間では30.80及び体幹部と腹部間では12.47であり, 各部位はそれぞれ別の色系統である。体幹部頭部寄り (L2-C1) の色度 b^* は2時間経過時から72時間経過時にかけて平均で2.17低下し, 2時間経過時と72時間経過の間には有意差 ($p < 0.01$) が確認された。一方, Fig. 6に示すとおり腹部頭部寄り (L3-C1) の色度 b^* には経時的な変化は確認されなかった。よって, 腹部頭部寄り (L3-C1) の色度 b^* を基準とすると, 体幹部頭部寄り (L2-C1) と腹部頭部寄り (L3-C1) の間の色度 b^* の変化がK値の経時的変動に良く対応するものとなり, 色度差 Δb^* がK値を推定する変数として有用となる。また, 体幹部頭中央 (L2-C2)

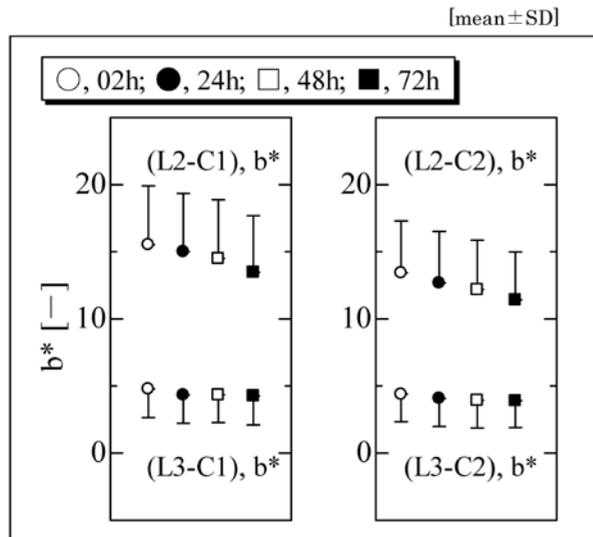


Fig. 6 Changes in chromaticity b^* of red seabream.

の色度 b^* は2時間経過時から72時間経過時にかけて平均で2.01低下し, 2時間経過時と72時間経過の間には有意差 ($p < 0.01$) が確認された。一方, Fig. 6に示すとおり腹部頭部寄り (L3-C2) の色度 b^* の経時的な変化は確認されなかった。よって, 腹部頭部寄り (L3-C2) の色度 b^* を基準とすると, 体幹部頭部寄り (L2-C2) と腹部頭部寄り (L3-C2) の間の色度差 Δb^* の変化もK値の経時的変動を良く反映するものとなり, K値を推定する変数として有用となる。

Fig. 7にマダイのK値推定のためのモデル化に用いた色彩の測定点 (部位) を表す。マダイは明度 L^* 及び彩度 C^*ab が高く色鮮やかな魚種であるが, K値の上昇速度は遅く, 体表の色彩の変化も他の5魚種と比較して極めて小さい。しかしながら, Fig. 7に示すこれらの部位に着目して色彩を変数として用いることで, 体表の色彩からK値を推定することが可能となることが明らかになった。

6-2. K値と温度

Fig. 8に即殺処理を施したマダイの各温度帯におけるK値の経時変化を示す。マダイとウマヅラハギでは2時間経過時及び24時間経過時には共に各温度帯間では有意差が確認されなかった。しかし, 48時間経過時と72時間経過時には -2°C と $+2^{\circ}\text{C}$, -2°C と $+6^{\circ}\text{C}$ 間で有意差 ($p < 0.01$) を確認した。よって, 冷蔵温度の上昇に伴ってK値の上昇速度は速くなると言える。また, イサキでは, 2時間経過時には各温度帯についての有意差は確認されなかったが, 24時間経過時で -2°C と $+6^{\circ}\text{C}$, $+2^{\circ}\text{C}$ と $+6^{\circ}\text{C}$ 間で有意差 (各々, $p < 0.01$, $p < 0.05$) を確認した。さらに, 48時間

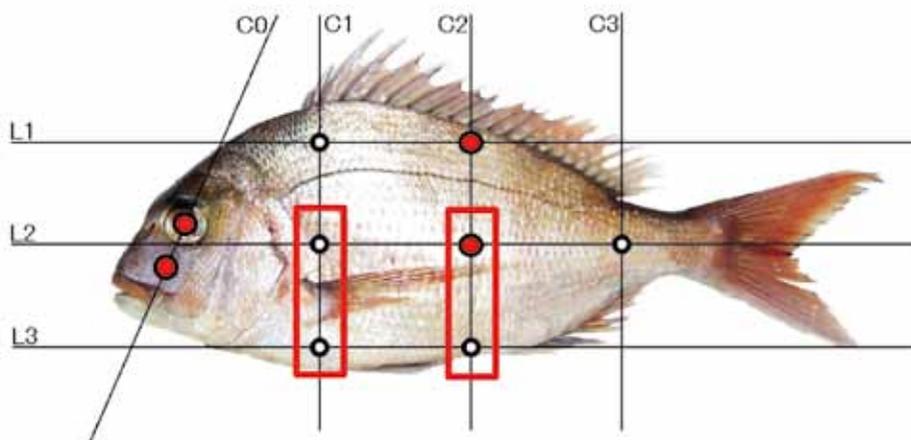


Fig. 7 Measuring points of the color that was used for modeling (Red seabream).

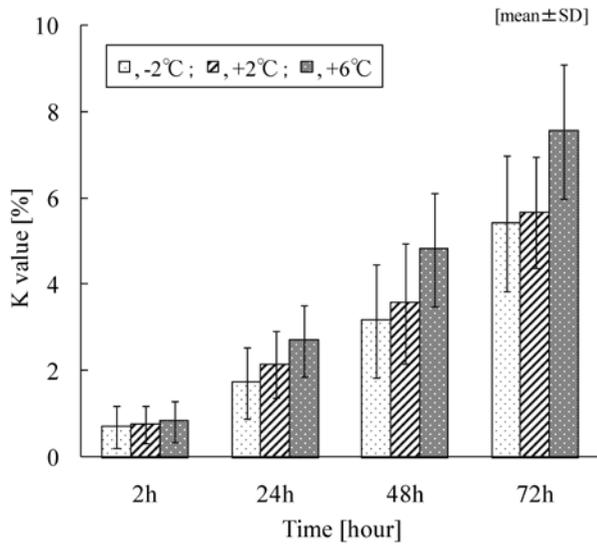


Fig. 8 Changes in K values of red seabream.

経過時には-2℃と+2℃、+2℃と+6℃間で、また、72時間経過時には全ての温度帯間で有意差 (p<0.01) を確認した。よってK値の上昇速度は魚種によって異なるが、冷蔵温度を適切に把握してモデルに組み込むことでK値の推定精度が上昇すると言える。

6-3. モデルの有用性

モデル1

Table 7にTable 4で示した色彩を説明変数とした重回帰式を用いてシミュレーションと評価実験を行った結果を、またTable 8に同色彩の組み合わせを前件部変数に定めたファジィ推論モデル (モデル1) によりシミュレーションと評価実験を行った結果を示す。表中のAvg., Min.及びMax.はそれぞれ式 (9) で求めた残差 ε の平均値, 最小値及び最大値を示す。Table 7とTable 8を比較すると、全魚

Table 7 Simulation and experimental evaluation results of multiple regression analysis models

		[%]					
		Tilefish	Red seabream	White chestnut	Striped grunt	Japanese jack mackerel	Black scraper
Simulation	Avg.	3.20	1.61	9.66	5.24	5.09	3.27
	Min.	0.01	0.00	0.04	0.02	0.00	0.02
	Max.	10.07	6.32	43.97	23.47	26.26	15.58
Experimental evaluation	Avg.	4.02	1.83	9.74	5.61	4.16	2.57
	Min.	0.01	0.02	0.01	0.07	0.08	0.01
	Max.	16.52	6.49	35.61	18.99	18.95	9.00

Table 8 Simulation and experimental evaluation results of model 1 (fuzzy inference models)

		[%]					
		Tilefish	Red seabream	White chestnut	Striped grunt	Japanese jack mackerel	Black scraper
Simulation	Avg.	1.15	0.85	3.61	1.70	2.31	1.97
	Min.	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
	Max.	3.58	3.93	16.23	6.45	15.74	9.40
Experimental evaluation	Avg.	1.20	0.92	3.37	1.81	1.76	1.86
	Min.	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
	Max.	3.27	4.45	18.80	7.13	10.30	7.44

種共にファジィ推論を用いたモデル1の方が重回帰式を用いるよりも残差 ε の平均値が小さく、かつ残差 ε の最大値も小さい。よってモデル1の方が良好なK値推定を行っていることがわかる。

Table 8に示すとおり、モデル1のシミュレーションによる残差 ε の平均値は小さい方から順にマダイ、アカアマダイ、イサキ、ウマヅラハギ、マアジ及びシロサバフグとなった。シミュレーション時、最も残差 ε の平均値が小さいマダイでは全試料の97%が残差3%未満の範囲に入ったのに対し、最も残差 ε の平均値が大きいシロサバフグでは残差3%未満の割合は全試料の48%であった。また、評価実験による残差 ε の平均値は小さい方から順にマダイ、アカアマダイ、マアジ、イサキ、ウマヅラハギ及びシロサバフグとなり、シミュレーション結果とほぼ同様の傾向を示した。評価実験時、マダイでは全試料の97%が残差3%以内の範囲に入ったのに対し、シロサバフグでは残差3%未満の割合は全試料の55%であった。

マダイの推定精度が最も高く、シロサバフグの推定精度が最も低い理由としては、前述のとおり72時間経過時迄のK値の平均上昇速度の違いに起因するものと考えられる。即ち、マダイのK値の平均上昇速度が最も遅く(0.05%/h)、またシロサバフグが最も速い(0.36%/h)のものであった。K値の上昇速度の速い魚種では、K値の変動に体表の色彩の変化が安定して対応しない傾向がある。したがって、モデル1に限らずK値の上昇速度の速い魚種では重回帰式の推定精度も低下する。モデル1の方が重回帰式より良好な推定結果が得られた理由としては、非線形性に強いファジィ推論の特徴が表れたものと推察する。よって、体表の色彩からK値を推定することにファジィ推論を適用することは有用であると考えられる。

モデル2

Table 9にモデル2(式(10)~式(15))のシミュレーションと評価実験を行った結果を示す。シミュレーションの結果、残差 ε の平均値が最も小さいマダイでは全試料の81%が残差3%未満に入ったのに対し、残差 ε の平均値が最も大きいシロサバフグでは残差3%未満に入った試料は全試料の28%であった。評価実験の結果、残差 ε は何れの魚種もシミュレーションとほぼ同様の傾向を示し、シロサバフグの精度が最も低いものとなった。

シロサバフグの精度が低い要因としては、まず、モデル2の変数として使用したモデル1で求めたK値(K_1)の推定精度が低いことが影響したものと考えられる。次に、試料入手後2時間経過時のK値が0.32%から29.11%の非常に広い範囲に分布したことから、モデル式がK値の経時変化の傾向に良好に対応できなかったものとする。

予測精度の改善方法について考察する。マダイ、イサキ及びウマヅラハギの試料魚の一部は致死からK値測定に至るまでの時間と冷蔵温度を厳密に管理することができた。そのため、これらの3魚種については、致死からの時間が明確な試料を基準にして全試料の致死から試料入手後2時間経過時とした時間を予測し、さらに24時間経過時、48時間経過時及び72時間経過時とした時間を修正した。各魚種共に、以上により求めた致死からの予測時間を説明変数に、またK値を目的変数に定めて、モデル2と同様の曲線を候補にして近似を行った。その結果、マダイ、イサキ及びウマヅラハギはそれぞれ累乗曲線の決定係数 R^2 が0.820、0.927及び0.831となり、最も高い精度を得た。式(19)にこれら3魚種についての精度改善を試みたモデル2(以下、モデル2'とする)の式を、Table 10にこれらの累乗曲線の係数を示す。

Table 9 Simulation and experimental evaluation results of model 2

		[%]					
		Tilefish	Red seabream	White chestnut	Striped grunt	Japanese jack mackerel	Black scrapper
Simulation	Avg.	2.11	1.86	6.81	3.05	3.39	2.47
	Min.	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	0.00
	Max.	10.17	8.91	27.72	15.79	15.79	12.84
Experimental evaluation	Avg.	2.13	1.74	6.70	2.70	2.80	2.65
	Min.	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.01
	Max.	11.82	8.58	26.98	11.48	18.51	12.20

Table 10 Coefficients of equation 19

Coefficients	Red seabream	Striped grunt	Black scraper
a	0.691	0.814	0.772
b	0.011	0.012	0.012

Red seabream, striped grunt and black scraper :

$$K'_2 = b \left\{ \left(\frac{K_1}{b} \right)^{\frac{1}{a}} + t_{12} \right\}^a \quad [\%] \quad (19)$$

ここで、モデル2'のK値を K'_2 、モデル1により推定したK値を K_1 、そして試料入手時からの任意の経過時間を t_{12} ($0 < t_{12} \leq 4320$ (min)) とする。

式(19)を用いてシミュレーションを行った結果、残差 ε の平均値、最小値及び最大値は、マダイで1.22, 0.00及び6.08, イサキで2.96, 0.00及び14.53, ウマヅラハギでは2.12, 0.01及び9.44となった。また、シミュレーション時に全試料に占める残差 ε が3%未満の試料の割合はモデル2ではマダイ81%, イサキ58%, ウマヅラハギ69%であったのに対して、モデル2'ではマダイ95%, イサキ60%, ウマヅラハギ77%となり増加した。同様に、評価実験では残差 ε の平均値、最小値及び最大値はマダイで1.26, 0.01及び5.49, イサキで2.59, 0.01及び12.63, ウマヅラハギで1.92, 0.00及び9.48となり、全試料に占める残差 ε が3%未満の割合も増加した。このように本手法を用いるとモデル2の予測精度が向上する。そのため、アカアマダイ、シロサバフグ及びマアジについても致死からの時間の管理を十分行った試料のデータを加えて再計算することで、モデル2の予測精度の向上が期待できる。

また、モデル2は適用する冷蔵温度が不明であると仮定し、一般的な冷蔵温度の -2°C から $+6^{\circ}\text{C}$ の比較的広い範囲において時間のみを変数として作成した。しかしながら、6-2で述べたとおりK値の上昇速度は冷蔵温度によって異なるため、残差 ε が大きくなった。今後はモデルに冷蔵温度を反映させることで、予測精度が高く、より実用的なモデルを実現することが可能であると考えられる。

モデル3

Fig. 9に致死からの時間と冷蔵温度を変数としたマダイのモデル3によるK値を予測する曲線を、またTable 11に

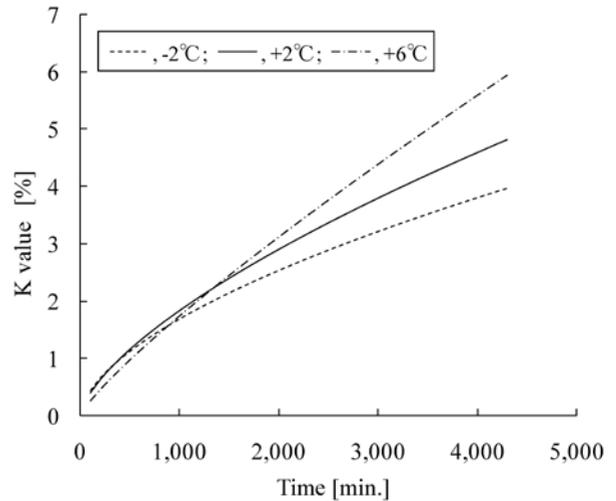


Fig. 9 Prediction curves of K value of red seabream by using model 3.

モデル3 (式(16)～式(18))による3魚種の評価結果(残差 ε)を示す。全魚種ともシミュレーションでは全試料の89%以上が、また評価実験でも全試料の95%以上がK値の残差3%未満の範囲に入り、何れも良好な予測結果を得た。また、経過時間のみを説明変数にしてモデル3の場合と同様の曲線を用いて残差 ε を求めた結果、マダイでは残差 ε の平均値と最大値がそれぞれ2.02%と7.41%, イサキでは1.05%と4.13%, ウマヅラハギでは1.57%と6.74%であった。よって、何れの魚種も致死からの時間と冷蔵温度を変数に有するモデル3の方が精度の高いことから、冷蔵温度をモデルの変数に加えることで予測精度が向上すると言える。

7. 結 言

本報では、水産物の流通に関わる現場の技術水準の維持と品質管理に資することを目的として、体表の彩度の異なる6種類の鮮魚を対象に非破壊かつリアルタイムにK値を推定する3種類のモデルの作成を試みた。その結果、先ず、魚市場や仲卸業者等の品質管理、一般消費者の購入時の品質推定を支援するモデル1にはファジィ推論によりK値の変化傾向を捉えた複数の測定点の色彩を合成したものをを用いることで、体表の色彩からK値を良好に推定できることを示した。次に、出荷者と購入者双方の品質管理を支援するモデル2はモデル1で求めたK値を使用した近似式を求めることで、冷蔵期間中の任意の時刻におけるK値を

Table 11 Simulation and experimental evaluation results of model 3

		[%]		
		Red seabream	Striped grunt	Black scraper
Simulation	Avg.	0.86	0.87	1.39
	Min.	0.01	0.01	0.03
	Max.	4.99	3.13	5.25
Experimental evaluation	Avg.	0.88	0.88	0.83
	Min.	0.00	0.00	0.01
	Max.	5.08	3.70	3.53

予測できる可能性を示した。また、生簀を有する漁業者や養殖業者、卸売業者等で即殺処理後の計画出荷を行うことが可能な出荷者の品質管理を支援するモデル3には試料魚の即殺処理からの時間と保存温度を用いることで、 -2°C から $+6^{\circ}\text{C}$ の冷蔵温度下では致死後の任意の経過時間におけるK値を高い精度で予測できることを示した。

寿司がSUSI、刺身がSASIMIとして、日本の魚食文化は世界に広がり定着してきている。しかし、米国、EUなどの諸外国に水産物を輸出するためには輸出先国のHACCP基準等の衛生基準を満たす必要があり、品質管理のさらなる高度化が求められている。今後は鮮魚の流通における品質管理を支援することで、魚食文化の普及、そして我が国の水産業のさらなる発展のために貢献していきたい。

謝 辞

試料魚の確保等、実験にご協力をいただいた山口県漁業協同組合山口県漁協萩地方卸売市場（萩市）と中野水産（下関市角島）の皆様へ深甚の謝意を表します。また、一緒に実験と解析に取り組んでくれた本校海洋機械工学科機械情報システム研究室の宮田典君をはじめ、研究室の皆様に感謝致します。

本研究の一部はJSPS科研費25330302の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 水産庁編：平成25年度水産白書，108-169（2013）
- 2) 藤井良三：魚類の体色と色素胞，遺伝，48（7），69-75（1994）
- 3) Lin O. M., et al. : Skin Color of the Red Sea Bream

(*Pagrus major*), Food Science and Technology, 31, 27-32（1998）

- 4) 林茂群，他4名：キンメダイ赤色素胞の挙動に及ぼす浸漬処理の影響，日本水産学会誌，64（4），715-719（1998）
- 5) 林茂群，他3名：養殖マダイ色素顆粒のカリウム凝集に対する温度の相乗効果，日本水産学会誌，68（2），280-285（1998）
- 6) 中村誠，他5名：鮮魚の熟練の品質評価に関する基礎的検討－アカアマダイの外観評価について－，人間工学，43（5），261-267（2007）
- 7) Nakamura M, et al. : Quality estimation model of white chestnut (*Logocephalus wheeleri*) by auctioneers, Fisheries Engineering, 45（2），119-128（2008）
- 8) 中村誠，他5名：鮮魚の熟練の品質評価の解析－有彩色魚種の外観評価について－，人間工学，45（2），118-125（2009）
- 9) 中村誠，他5名：鮮魚の熟練の品質評価の解析－彩度の低い魚種の熟練の品質評価について，人間工学，48（3），142-149（2012）
- 10) 明田川雅子，他4名：色彩で診る魚肉鮮度のモデル化に関する研究，第18回日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大会，第15回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会合同大会予稿集，45-46（2013）
- 11) 中村誠，他4名：鮮魚の流通における生産者支援モデル，日本人間工学会第55回大会講演集，50，420-421（2014）
- 12) 宮崎俊之，他12名：北海道産アキサケの品質等級判別システムの開発，北海道立工業試験場報告，307，

- 21-26 (2008)
- 13) 原明弘, 宇田文明: K値の温度履歴の理論式, 近似式と探偵実験, 日本水産学会誌, 50 (10), 1745-1756 (1984)
 - 14) 濱田 (佐藤) 奈保子, 大熊廣一, 渡邊悦生: K値を用いる魚肉の生可食限界の推定に関する理論的考察, 日本食品科学工学会誌, 51 (9), 495-504 (2004)
 - 15) 山中英明: 魚介類の死後変化と品質, 日本水産学会誌, 68 (1), 5-14 (2002)
 - 16) 岡本昭, 他7名: 養殖イサキの死後変化に及ぼす刺殺条件と保存温度の影響, 日本水産学会誌, 72 (5), 918-923, (2006)
 - 17) 小関聡美, 他3名: 魚介類の死後硬直と鮮度 (K値) の変化, 「海-自然と文化」東海大学紀要海洋学部, 14 (2), 31-46 (2006)
 - 18) 中添純一, 山中英明 (編): 水産物の品質・鮮度とその鮮度保持技術, 恒星社厚生閣, 82-91・102-111 (2004)
 - 19) 渡邊悦生 (編): 魚介類の鮮度判定と品質保持, 恒星社厚生閣, 9-19 (1995)
 - 20) 岡本満, 齋藤寛之: 釣獲されたサワラの船上における致死方法の検討, 日本水産学会誌, 77 (6), 1083-1088 (2011)
 - 21) Zadeh A. L: Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 339-353 (1965)
 - 22) McNiven A. M, Potter R. K: Microtubule polarity confers direction to pigment transport in chromatophores, J. Cell Biology, 103, 191-255 (1993)
 - 23) Fujii R: Cytophysiology of fish chromatophores, Int. Rev. Cytol., 43, 191-255 (1993)
 - 24) Mamdani E. H, Assilian S.: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, Int. J. Man Machine Studies, 7, 1-13 (1974)

