

海産物の非破壊評価方法についての調査研究

報 告 書

平成31年3月31日

一般社団法人 日本海事検定協会 検定サービスセンター

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産大学校 海洋機械工学科
講師 徳永憲洋

要 旨

近年の水産業では海産物の生産量が年々と減少していることから、海産物の単価を高めるために海産物のブランド化が重要とされている。一般的には海産物に付加価値を与えることでブランド化が促進される。海産物の付加価値として挙げられるものは、生産された場所や漁獲方法などの生産関連の価値、鮮度、脂質量、栄養などの品質や健康安全に関わる価値などである。中でも品質は魚の美味しさに直接関わる重要な項目であるが、品質を定量的かつ魚を破壊せずに評価することは困難である。多くは目利き人が海産物を目で見て品質を見極めているが、主観的な評価のためブランドの信頼性を向上させ難い。

一方で、農産物では「糖度」や「酸度」などで表現される定量的な評価指標があり、その指標が農産物のブランド化を後押ししているだけでなく、生産現場では評価指標を指針とすることで生産方法の改善に役立てられている。これらの評価指標は農産物専用の非破壊測定器によって測定されている。しかし海産物においては農産物のような非破壊測定器の開発が進んでいないばかりか評価指標もまだ確立されていない。特に海産物の美味しさは、「脂質」あるいは「鮮度」といった指標だけで決まらず、歯応え、栄養素、熟成度、といった様々な要素が折り重なって作られているだけでなく、消費者個人の官能的感覚によっても多様に異なる。

以上のことから、本事業では海産物の美味しさを構成する多様な要素について定量的かつ非破壊で評価でき、かつ「海産物の美味しさの指標」を消費者に分かりやすく提示できる、海産物の非破壊評価システムの開発を目指す。

本事業は平成 28 年度～30 年度の 3 年間の期間で行われ、大きく分けると以下の 2 項目について取り組んだ。

- (1) 超音波を利用した魚肉の非破壊評価方法の検討
- (2) 魚の体形から脂質量を非破壊測定する方法の検討

(1) では、魚肉の非破壊評価方法として超音波を用いた方法を検討する。具体的には、医療現場で用いられるような超音波プローブを魚体に当てることで、魚体内の超音波エコーを取得し、取得されたエコー信号から、脂質量、歯応え、鮮度等の品質に関わる指標の定量評価を行うだけでなく、魚体内の異物や寄生虫の有無の発見、病巣の発見等が行えるシステムを開発することが本研究の長期的な目標となる。本目標を達成するべく、本事業内研究は、(A) 超音波魚体スキャン装置の開発、(B) 超音波信号から脂質量や歯応えなどの指標を定量的に評価する方法の提案およびソフトウェア開発、(C) 提案手法の有効性を実験的に検証、の 3 項目について取り組んできた。

(2) では、簡易的に海産物の脂質量を非破壊的に評価する方法について研究を行った。具体的には、海産物の目利き人は海産物を見ただけで脂の乗りを評価する。目利き人は魚の身体つき（体形）を見て脂の乗りを評価するという話がある。これが事実であれば、機

械の目（マシンビジョン）でも同様の目利きが可能となる。さらにスマートフォンのカメラを利用して魚の目利きができるようなアプリケーションも実現可能となり、一般の消費者も手軽に魚の非破壊評価ができるようになる。そこで本事業内研究では、まず魚の体形と脂質量に関係性があるかどうかを調査する研究を行った。

目次

1. 本事業について.....	1
1.1 本報告書の適用範囲等.....	1
1.2 事業目的.....	1
2. 研究背景と目的.....	2
2.1 研究背景.....	2
2.2 研究目的.....	3
2.3 研究内容.....	3
2.4 報告書の内容について.....	4
第1章 超音波魚肉評価装置に関する研究.....	5
1. 研究目的.....	5
2. 超音波魚体スキャン装置の開発.....	5
3. 超音波信号から魚肉の脂質量，歯応え，鮮度を評価するソフトコンピューティング技術の提案およびソフトウェア開発.....	6
3.1 Integrated Backscatter 法.....	6
3.2 機械学習法の説明.....	7
3.2.1 自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM).....	7
3.2.2 Bag of Features (BoF).....	7
3.2.3 放射基底関数ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN).....	8
3.2.4 脂質量および歯応え (肉の硬さ) の評価方法について.....	8
4. 開発した手法の有効性を実験的に検証.....	9
4.1 実験の枠組み.....	9
4.2 結果.....	11
4.2.1 超音波魚体スキャン装置から得られた信号.....	11
4.2.2 IBV と脂質量との相関を調べた結果.....	12
4.2.3 IBV のヒストグラムにおける度数を利用した脂質推定の結果.....	13
4.2.4 IBV とテクスチャとの相関を調べた結果.....	14
4.2.5 IBV のヒストグラムにおける度数を利用したテクスチャ推定の結果.....	15
4.2.6 機械学習法による脂質量とテクスチャの評価結果.....	16
4.3 考察とまとめ.....	18
5 魚肉の鮮度評価に関する研究.....	19
5.1 材料と方法論.....	19
5.1.1 実験試料と使用した装置.....	19

5.1.2 方法論.....	20
5.1.3 枠組み.....	20
5.2 超音波データから IB 値を取得する方法について.....	21
5.3 調査結果.....	22
5.4 考察.....	25
5.5 まとめ.....	25
6. マダイの評価に関する研究結果.....	26
6.1 材料と方法.....	26
6.2 結果.....	27
6.3 考察.....	28
7. まとめ.....	29
第2章 目利き装置に関する研究.....	30
1. 研究目的.....	30
2. 研究内容.....	30
2.1 魚にマーカを刺す.....	30
2.2 魚の写真を撮る.....	31
2.3 写真からマーカの位置（座標）を取得する.....	32
2.4 可食部フィレの脂質量を測定する.....	34
2.5 マーカの座標を利用し様々な特徴量を作る.....	34
2.5.1 マーカ間の距離.....	34
2.5.2 マーカ三点間の角度.....	34
3. 結果.....	35
3.1 マーカ間の距離と脂質との関係.....	35
3.2 マーカ3点間の角度と脂質との関係.....	36
3.3 重回帰モデルを用いた結果.....	37
4. まとめ.....	37
総括.....	38
参考文献.....	38
海産物の非破壊評価方法についての調査研究委員会 委員一覧.....	39

1. 本事業について

1.1 本報告書の適用範囲等

本報告書は、一般社団法人日本海事検定協会（以下、日本海事検定協会）と国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産大学校（以下、水産大学校）の共同研究である「海産物の非破壊評価方法についての調査研究」（以下、本事業）の適用範囲に基づく研究成果を取りまとめたものである。本事業の実施場所は、水産大学校 海洋機械工学科 内燃制御実験棟および 日本海事検定協会 検定サービスセンターである。

1.2 事業目的

海産物に品質や安全性，健康増進の付加価値の付与，さらに海産物の「美味しさ」を提示するために，主に海産物の非破壊評価方法に関する調査研究を水産大学校と日本海事検定協会が共同で実施し，その成果を報告書としてまとめ，公表するものである。

2. 研究背景と目的

2.1 研究背景

我が国の水産物の生産量は年々減少している。また漁業に従事する個人経営体の収入は改善が見られるものの依然として低く、漁船漁業を営む会社経営体では平均漁労所得の赤字が続いている。さらに漁業従事者の高齢化も進んでおり、水産業の衰退に拍車をかけている[1]。こうした状況の中で漁業関係者の中には水産物に付加価値を付与することでブランド化を促進し、消費者にアピールすることで経営の活路を見出す取り組みも行われている。すなわち今後の漁業は如何に消費者に受け入れられるものを生産するか、という点が重要になると思われる。

付加価値とは“朝獲れ”、“活き締め”、または“調理加工済み”といった手間をかけるものや、“産地”というブランド、または“特定の成分”に着目してクラス分けをする、または養殖場では特定の餌を与えることで肉質の改善を謳う[2, 3]、といったいくつかのタイプが見受けられる。

こうした付加価値に対する取り組みはまだ漁業関係者の中でも一部のみであり、漁業者の多くはこのような取り組みを計画している、または取り組んでいない状況にある[4]。しかし付加価値の中でも特定の成分に着目するタイプの場合、加工などの手間や地理的な条件などの制約を受けず実施しやすいと思われる。例えば脂の乗りを測定する機器はいくつか販売されており、現場ではブランド化に一役を買っている。

しかし脂の乗りを測定し評価することについては問題があり、“脂の量が多い水産物が美味しい”とは一概には言えないということから、より多面的な評価を設けて付加価値はつけられるべきである。つまり水産物の評価を行ううえで最も重要だと思われるのがその水産物の本来の美味しさを測定することであり、これが本質的な付加価値だと考える。さらに水産物でも例えば魚一匹ごとに適切に評価をしていくことができればブランド化や信頼（品質保証）を促進する有用な助けになると考える。

2.2 研究目的

本事業は、海産物の成分を非破壊で定量的に測定・評価し、かつ海産物の官能的な表現である「美味しさ」を誰もがわかるように可視化し提示できる装置の開発を目標とする。

当装置として本事業内研究では、以下の二つの非破壊評価装置を考案し、装置開発に関わる基礎研究を行うことを目的とする。ひとつは海産物に超音波を照射・走査し、得られる超音波信号をソフトコンピューティングで解析し、海産物に含まれる成分・物理量（脂質量や歯応え（肉の硬さ）など）を定量的にかつ非破壊で評価する「超音波魚肉評価装置」である。二つ目は魚の身体つき（体形）から脂質量を評価する機械の目（マシンビジョン）を利用した「目利き装置」である。

一つ目の超音波魚肉評価装置は、大まかに言うと、医療診断で用いられる超音波エコー診断の要領を海産物に応用させる、といった内容になる。すなわち海産物に超音波プローブを当て、得られる超音波エコー信号を、ソフトコンピューティング技術によって解析し、海産物に含まれる成分量や物理量の評価を定量的かつ非破壊で行う。また得られたエコー画像をもとに異物や寄生虫の有無、病巣の有無を視覚的に提示することも可能となる。

二つ目の目利き装置は、目利き人が通常行っている視覚を用いた魚の評価を、マシンビジョンで行う装置のことである。目利き人は魚の体形や色合いなど視覚から入ってくる情報だけで魚の脂質量や鮮度を評価しているといわれている。本装置は目利き人の行っている評価を機械で実現する。装置が実現できれば、一般の消費者もスマートフォンのカメラを利用して簡易的に海産物の評価を定量的かつ非破壊で行うことが可能となるだろう。

2.3 研究内容

以上のような装置の開発を目指すべく、本事業 3 ヶ年では、以下の項目について取り組んだ。

- A) 超音波魚体スキャン装置の開発
- B) 超音波信号から魚肉の脂質量、歯応え、鮮度を評価するソフトコンピューティング技術の提案およびソフトウェア開発
- C) B で開発した手法の有効性を実験的に検証
- D) 魚の体形を数値化する方法の検討
- E) 数値化された体形の情報と脂質量との関係性を調査

A, B, C が超音波魚肉評価装置に関わる取り組み、D, E が目利き装置に関わる取り組みである。

まず A では、超音波を用いた研究を行うにあたり、魚体に超音波を照射し、かつ魚体上を走査させることで、魚体全体の超音波信号を得る装置の開発を行った。

B では A で開発された装置で得られた超音波信号から魚肉の脂質量、および歯応えや鮮度といった量を推定するソフトコンピューティング技術を提案し、そのソフトウェア開発を行った。C では B で開発されたソフトコンピューティング技術の有効性を実験的に検証

した。

D では、マシンビジョンで撮影された魚から体形に関わる情報を数値化する方法について検討を行った。さらに E では、数値化された情報と脂質量との関係性を調査した。

2.4 報告書の内容について

本報告書は二部構成で報告する。第 1 部に「超音波魚肉評価装置」に関わる取り組みについて報告する。第 2 部では「目利き装置」に関する取り組みについて報告する。

第 1 章 超音波魚肉評価装置に関する研究

1. 研究目的

本研究の目的は、超音波を用いることで海産物の脂質や歯応え、鮮度などを定量的に、かつ非破壊で評価可能かどうかを実験的に検証することである。

具体的には、大きく以下の 3 項目について取り組んだ。

- A) 超音波魚体スキャン装置の開発
- B) 超音波信号から魚肉の脂質量、歯応え、鮮度を評価するソフトコンピューティング技術の提案およびソフトウェア開発
- C) B で開発した手法の有効性を実験的に検証

以下、A, B, C の取り組みそれぞれについて述べる。

2. 超音波魚体スキャン装置の開発

本研究では、魚体に対して超音波を照射・走査するための装置として、超音波魚体スキャン装置を開発した（開発は国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産大医学校 海洋機械工学科 徳永研究室にて行われた。）。図 1 に開発された超音波魚体スキャン装置の外観を示す。

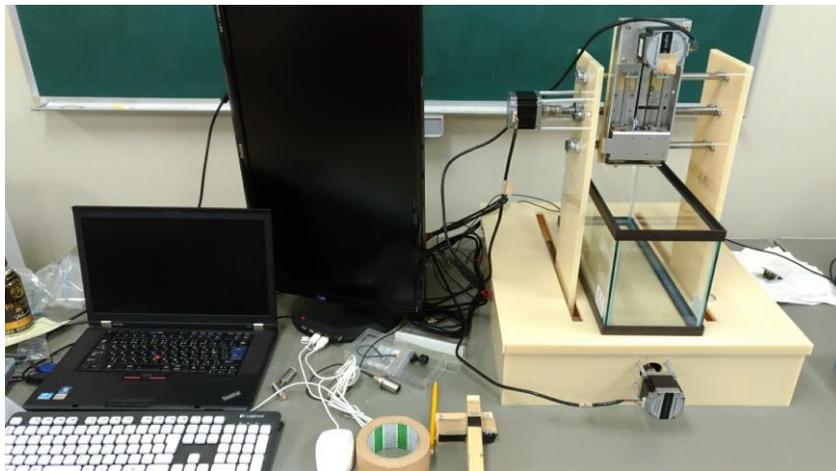


図 1. 超音波魚体スキャン装置

図 2 に超音波魚体スキャン装置の構成を示す。超音波の発生は超音波探傷器である DIO-1000J (Starmans 社製) を利用した。また二つの探触子を用い、それぞれ送信・受信側探触子とした。送信側の探触子は公称周波数 10MHz のものを利用した。受信側の探触子は公称周波数 5MHz のものを利用した。二つの探触子は XYZ ステージにおける Z 軸ステージ上の治具に横並びに取り付けられている。受信側の探触子から得られた超音波信号はオン

ロスコープ（UDS-1G02S-10k：日本データシステム株式会社製）を介してパソコンに記録される。パソコンは超音波信号の記録と XYZ ステージの制御に利用する。

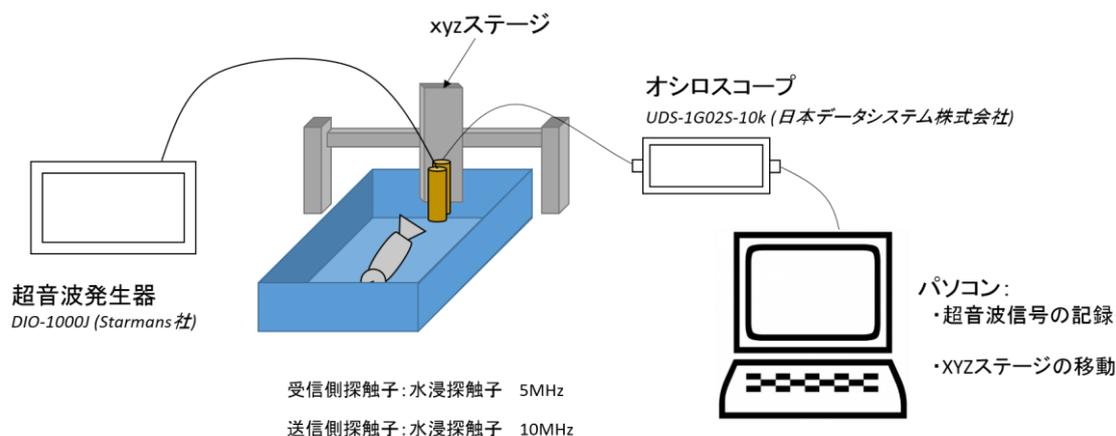


図 2. 超音波魚体スキャン装置の構成

3. 超音波信号から魚肉の脂質量，歯応え，鮮度を評価するソフトコンピューティング技術の提案およびソフトウェア開発

超音波信号から魚肉の脂質量，歯応え（肉の硬さ＝テクスチャ），鮮度を評価するソフトコンピューティング技術として，本研究では主に2つを提案した．ひとつは超音波の後方散乱信号のエネルギー減衰度を数値的に表現する Integrated Backscatter 法（以下，IB 法と称す）を用いた方法，もうひとつは自己組織化マップと放射基底関数ネットワークの二つのニューラルネットワークを組み合わせた機械学習法を利用した評価方法である．下記に IB 法と機械学習法の二つについて説明をし，さらに両手法を用いた評価方法の説明をする．

3.1 Integrated Backscatter 法

IB 法では，超音波信号の周波数スペクトルを利用し，超音波が構造物で反射する際の後方散乱波のエネルギー減衰率を表す「IB 値」を計算する．

IB 値の計算は様々な方法が提案されているが，本研究では次式で計算する．

$$IBV = 20 \log \left(\frac{\sum_i P(f_i)}{\sum_i P_b(f_i)} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

ここで， $P(f_i)$ はフーリエ変換によって得られる周波数 f_i の周波数スペクトル強度を表す．

また $P_b(f_i)$ は基準信号から得られた周波数スペクトルを表す。基準信号では大抵の場合、スチール板等の基準となる構造物に超音波を照射した際の反射信号を利用する。本研究ではスチール板に照射した際に得られた信号を利用した。式 1 は後方散乱信号の周波数スペクトルの面積の減衰率を求めている。超音波が通過する構造物（生体の場合は細胞組織）によって減衰率が異なることを利用し性状特定を可能とする。

IB 法は血管内超音波法 (IVUS) における血管内組織性状の特定において実用化されている手法である [5,6]。一般的には、IB 法は超音波信号のある短時間区間における周波数スペクトルを求め、その短時間区間における IBV を求める。言い換えると、一連の超音波信号に窓関数を掛けて複数の短時間信号に分割し、その分割された短時間信号に対してフーリエ変換を施し、得られた各周波数スペクトルに対して IBV を計算する。この操作を短時間フーリエ変換と呼ぶ。本研究でも魚体から得られた超音波信号に対して短時間フーリエ変換を施し、IBV を計算している。

3.2 機械学習法の説明

本研究では自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM), Bag of Features (BoF), 放射基底関数ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN) を階層的に組み合わせた機械学習法を利用する。以下に SOM, BoF, RBFN についてそれぞれ簡単に説明する。

3.2.1 自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM)

SOM は、T. Kohonen によって提案されたニューラルネットワークの一種であり、学習によって多次元データを 1, 2 次元程度のマップ空間にデータ間のトポロジーを保存しつつ写像することが可能である。この特徴から SOM はビッグデータの可視化やデータマイニング等に応用されている。

一方で、SOM は参照ベクトルユニットが格子状に配置されたネットワーク構造を持ち、各参照ベクトルユニットは多次元データの代表ベクトルを表現することになる。この特性から SOM はデータの量子化にも利用されている。本研究ではこの量子化の特性を利用している。

3.2.2 Bag of Features (BoF)

Bag of Features は、文書内容の分類に利用されていた Bag of Words という方法を他分野で利用できる形に形を変えた方法である。Bag of Words では文章中の単語 (Word) の出現頻度をヒストグラムとして表し、そのヒストグラムをベクトルデータとして表現したのちに、様々な分類手法によって文章全体の分類等を行う。同様に、画像や信号データ等においても特徴量を Word として扱い、ヒストグラムを作成し、分類手法などで分類、認識等

に利用したものが **Bag of Features** (**Bag of Keypoints** と呼ばれる) である。

3.2.3 放射基底関数ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN)

RBFNは三層の多層パーセプトロンに類似したニューラルネットワークといえる。RBFNは入力層、中間層、出力層の三層で構成され、中間層のユニットには放射基底関数を採用している。各層間は結合荷重で結ばれている。すなわち、多層パーセプトロンの中間層ユニットにおけるシグモイド関数が放射基底関数に置き換えられたものと考えることができる。

RBFNは入力 \mathbf{x} に対する出力 y を表現する関数 $f(\mathbf{x})$ を次式に従って表現する。

$$y = f(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K a_k \phi_k(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|) \quad (2)$$

$$\phi_k(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 K は放射基底関数 $\phi_k(\cdot)$ の数(中間層ユニットの数)、 \mathbf{c}_k および σ_k は k 番目の放

射基底関数の中心ベクトルと範囲である。また a_k は $\phi_k(\cdot)$ に接続する結合荷重を表す。

本研究では放射基底関数の数 K を入力ベクトルの数と同じにし、中心ベクトル \mathbf{c}_k を入力ベクトルと同じとした。すなわち、入力ベクトル上に放射基底関数を作成するRBFネットワークとした。また σ_k はすべて1.0とした。

RBFNの結合荷重の学習については、線形最小二乗法により求めている。

3.2.4 脂質量および歯応え(肉の硬さ)の評価方法について

本研究で提案する、超音波信号から魚肉を評価する方法の処理の流れを示す。

まず魚体から得られた超音波信号群に対して、魚体部分の信号のみを関心領域(**Region of Interest: ROI**)として取り出す。その後ROIに含まれる信号に対して前処理を施す。前処理としては、微分処理、対数変換、ローパスフィルタ、プリアンファシス処理、短時間フーリエ変換、正規化処理、が順に施される。最終的には周波数スペクトルベクトルの集合が得られる。

IB法を用いた評価方法、あるいは機械学習法を利用した評価方法、どちらにおいても上記の前処理を同じように施され、その後、両手法の処理がそれぞれ行われる。

IB法による評価方法

前処理で得られた周波数スペクトルベクトルをもとに式1でIBVを求める。ROI内の信号に対して、短時間に区分化された領域ごとにフーリエ変換が施されており、その区分化された各領域でIBVを求めることになる。これにより深さ×横幅の大きさのIBVの2次元

行列データが得られる。1 サンプル (1 魚体) の全ての ROI に対して IBV 行列を求めることで、1 サンプルからは立体的な IBV 行列が得られることになる。

上記で立体的な IBV 行列を全サンプルで生成したのちに、IBV と脂質量、テクスチャとの関連性を調べる。本研究では IBV をもとにヒストグラムを作成し、そのヒストグラムの度数と脂質量、テクスチャとの相関を調べる。具体的には、IBV を-100 [dB]から 20 [dB]まで 4 [dB]毎に区分けし、立体的 IBV 行列における分布数 (ヒストグラム) を求める。その後、求められたヒストグラムの各ビンの値と魚体サンプルの鮮度との相関を求め、最も相関の高い IB 値の範囲を特定する。併せて、テクスチャとの対応も求める。

機械学習法を用いた評価方法

まず、前処理で生成した正規化された周波数スペクトルベクトルを SOM に与えて学習させる。SOM は 100 個の参照ベクトルユニットで構成されている。これにより、100 個のキーとなる周波数スペクトルベクトルが生成される。

次に、SOM で生成されたキーベクトルを辞書として、1 サンプルにおいて得られた全周波数スペクトルベクトルを照合し、ヒストグラムを生成する。照合はユークリッド距離を基準とする。

最後に RBFN で脂質量、およびテクスチャを推定する。本処理には学習モードと推定モードがある。学習モードでは上記で生成されたヒストグラムベクトルを入力ベクトルとし、それに対応する脂肪量および歯ごたえを教師信号として RBFN を学習させる。推定モードでは新たなサンプルに対するヒストグラムベクトルを入力させ、脂肪量と歯ごたえを推定する。

4. 開発した手法の有効性を実験的に検証

4.1 実験の枠組み

以下に実験の枠組みを示す。

(1) 実験で用いたサンプル

36 匹のマアジ (*Trachurus japonicus*) をサンプルとして使用する。マアジは西日本を拠点とする 3 漁港で、2017 年 7 月、8 月に水揚げされたものである。

(2) 各種測定

サンプルからは、魚体の体長、体高、体幅、体重をノギス、デジタルはかりで測定した。体長は魚の口先から尾びれの先までを測定する。体高は背縁から腹縁までの垂直方向の距離において最も大きい部分を測定する。体幅は左右の胸びれ部の距離を測定する。体重はデジタルはかりで測定する。これらの測定は日本海事検定協会の谷口、中野が行った。

(3) 超音波信号データの取得

魚体をスキャン装置に設置し、超音波を照射しながらスキャンを行う。スキャン

中は 100msec 毎に超音波信号データがパソコンに記録される。スキャンでは図 3 に示すように、魚体上の探触子を 2 往復半させ超音波を照射する。プローブの移動速度は 2.16 mm/sec である。このため、超音波信号データは約 0.22 mm 間隔で記録されることになる。照射する超音波はバースト波とし PRF は 200Hz, 送信周波数は 400kHz とする。また取得されるデータのサンプリング周波数は 500MHz である。走査の場所は胸びれの付根をスタートとしている。

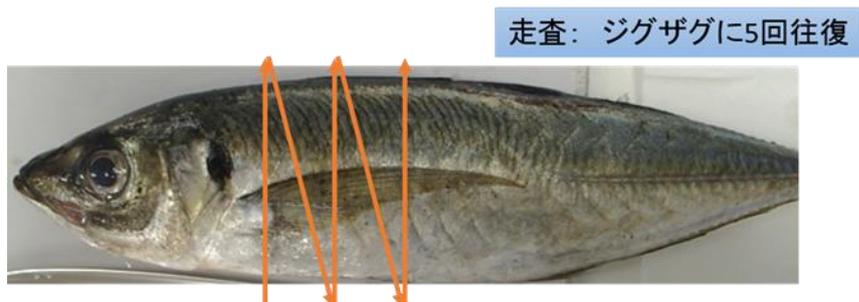


図 3. 超音波プローブの走査

(4) テクスチャ測定 (肉の硬さの測定)

魚体を三枚おろしにした後に、二枚のフィレ対して、テクスチャ測定器でテクスチャを測定する。テクスチャ測定では、二枚のフィレそれぞれに対して三ヶ所のテクスチャを測定する。測定箇所はエラ側からゼイゴまでを三等分した箇所とした。本研究で用いたテクスチャ測定器は、株式会社イマダのレオメーター (テクスチャーアナライザー)FRTS-50N を用いた。本測定器では、プランジャーと呼ばれる圧縮器具を設定した押し込み深さまで試料に押し付け、その際の押し返す力[N]を測定する。2 回の押し付け試験を行うことで、人間が複数回食品を噛んだ際の歯応えを測定することが可能である。本研究では押し込み深さを 4[mm], 押し込み速度および戻し速度 7[mm/s]とした。

(5) 脂質量の測定

脂質量の測定は外部の分析機関に依頼した。本実験では公益財団法人北九州生活科学センターに脂質量の成分分析を依頼した。分析手法はソックスレー抽出法、単位は[%]が用いられている。

(6) 提案手法の評価

前述した 2 つの提案手法を用いてそれぞれ脂質量とテクスチャの推定を行う。検証は leave-one-out 交差検証で行う。具体的には 36 サンプル中 35 サンプルを推定モデルの作成及び学習データ、残り 1 サンプルをテストデータとし、全 36 サンプルがテストデータとなるように検証を繰り返す。

4.2 結果

4.2.1 超音波魚体スキャン装置から得られた信号

まず超音波魚体スキャン装置から得られた超音波エコー画像（B-mode 画像）を図 4 に示す。図 4 における濃淡は超音波信号の強度を表す。すなわち色が白色になるほど、超音波の信号強度が強いことを表す。魚体の表面、および魚体下に置いたスチール板において強い信号が得られていることがわかる。また図中の赤い枠は ROI を示す。ROI の領域は手動で指定している。

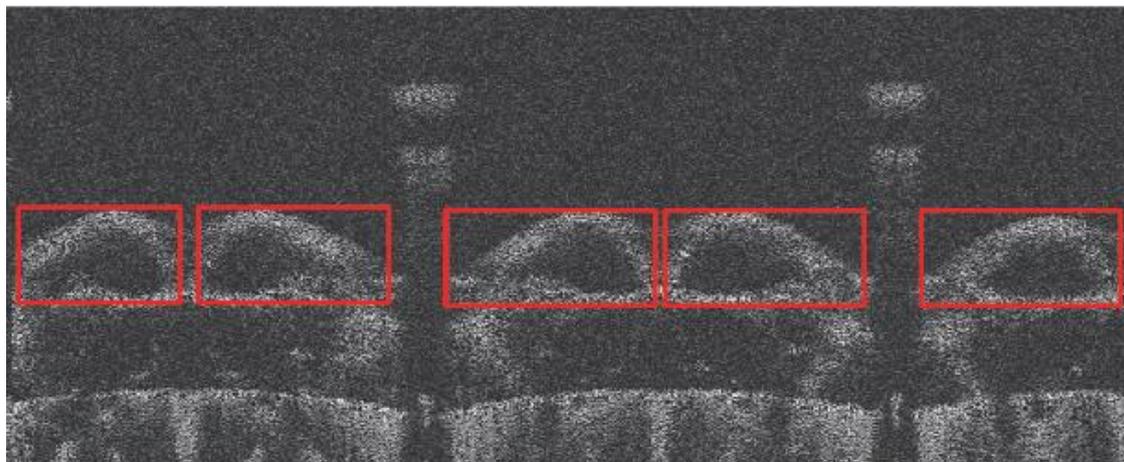


図 4. 魚体をスキャンして得られた超音波信号データの B-mode 画像。赤の矩形枠は関心領域（ROI）を示す。

4.2.2 IBV と脂質量との相関を調べた結果

図 5 に IBV と脂質量との相関を調べたグラフを示す。本グラフは、立体的 IBV 行列における IBV のヒストグラムの各ビンにおける度数と脂質量との相関を調べたものである。この結果から、 -60 [dB] 付近 (-64 [dB]以上 -60 [dB]未満)の度数と脂質量に大きな相関があることが分かった。

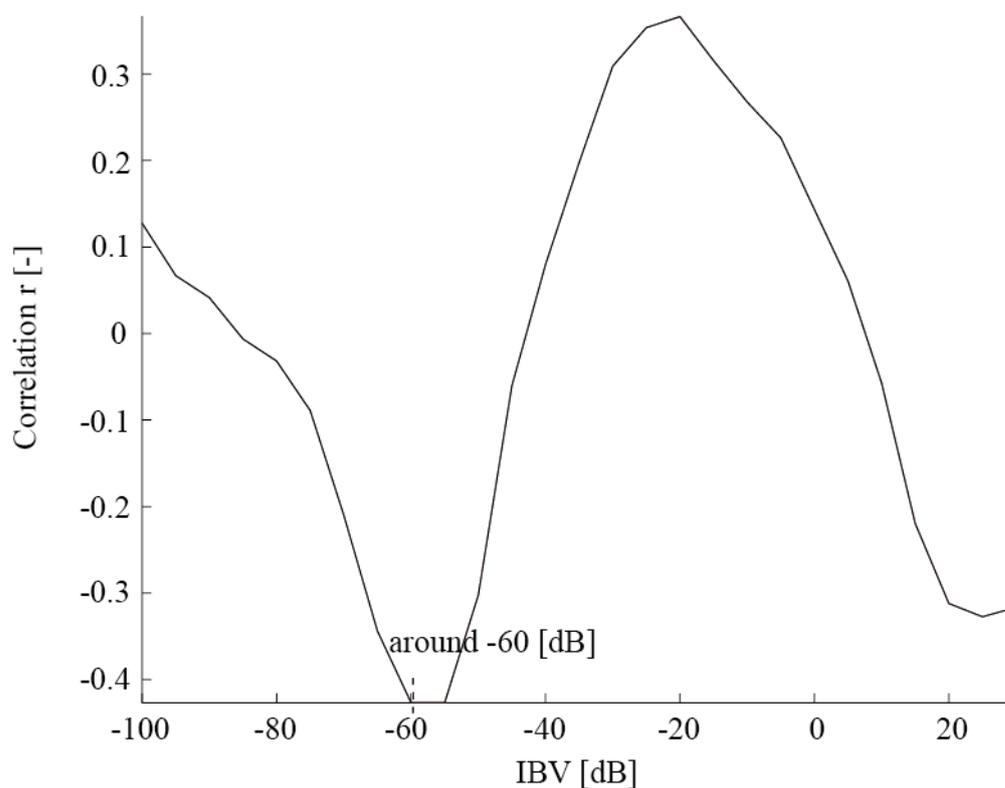


図 5. IBV と脂質量との相関を表したグラフ. -60 [dB] 付近 (-64 [dB]以上 -60 [dB]未満)でのヒストグラムの分布数と脂質量に大きい相関がある。

4.2.3 IBV のヒストグラムにおける度数を利用した脂質推定の結果

立体的 IBV 行列から生成されたヒストグラムにおいて、-64 [dB]以上-60 [dB]未満での度数を説明変数、脂質量を目的変数とした線形回帰モデルを生成し、そのモデルを利用し、脂質量を推定した。その結果を図 6 に示す。図中の横軸がモデルの推定値、縦軸が実測値である。この結果から、推定値と測定値の相関は $r=0.73$ ($p<0.05$) であり、推定精度は高いものとなった。

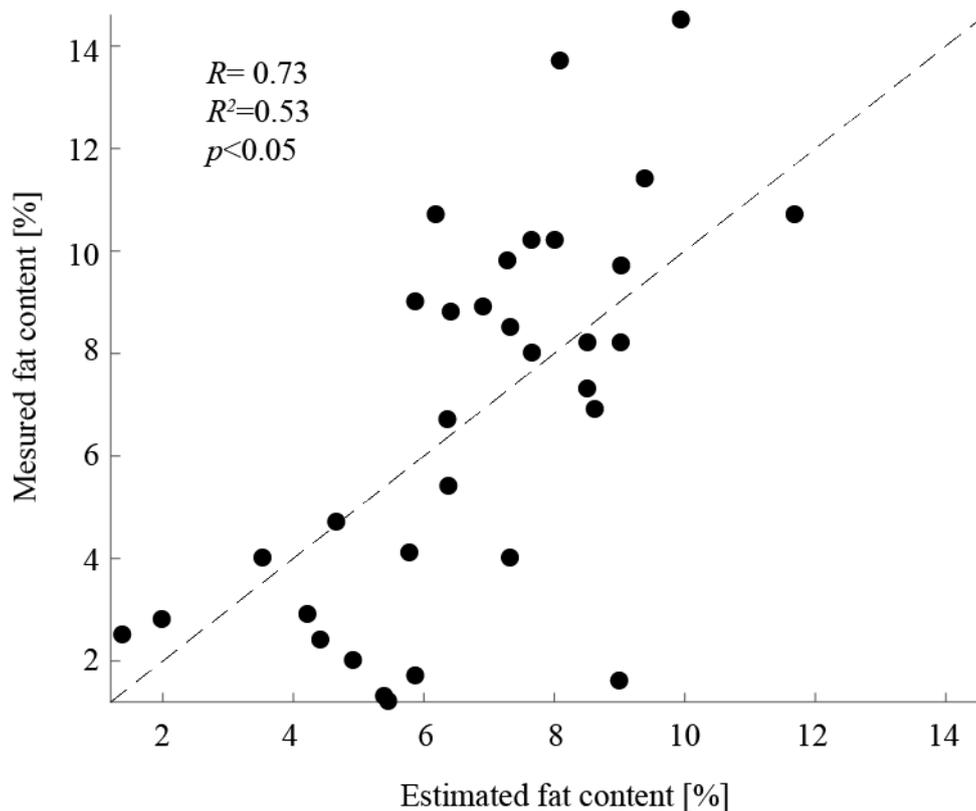


図 6. 立体的 IBV 行列において-64[dB]以上-60 [dB]未満での度数を利用し、脂質量を推定した結果。横軸が推定値、縦軸が実測値である。

4.2.4 IBV とテクスチャとの相関を調べた結果

図 7 に IBV とテクスチャとの相関を調べたグラフを示す。グラフは、IBV のヒストグラムの各ビンにおける度数とテクスチャとの相関を調べたものである。この結果から、-60 [dB] 付近 (-60 [dB]以上-56 [dB]未満) の度数とテクスチャに大きな相関があることが分かった。

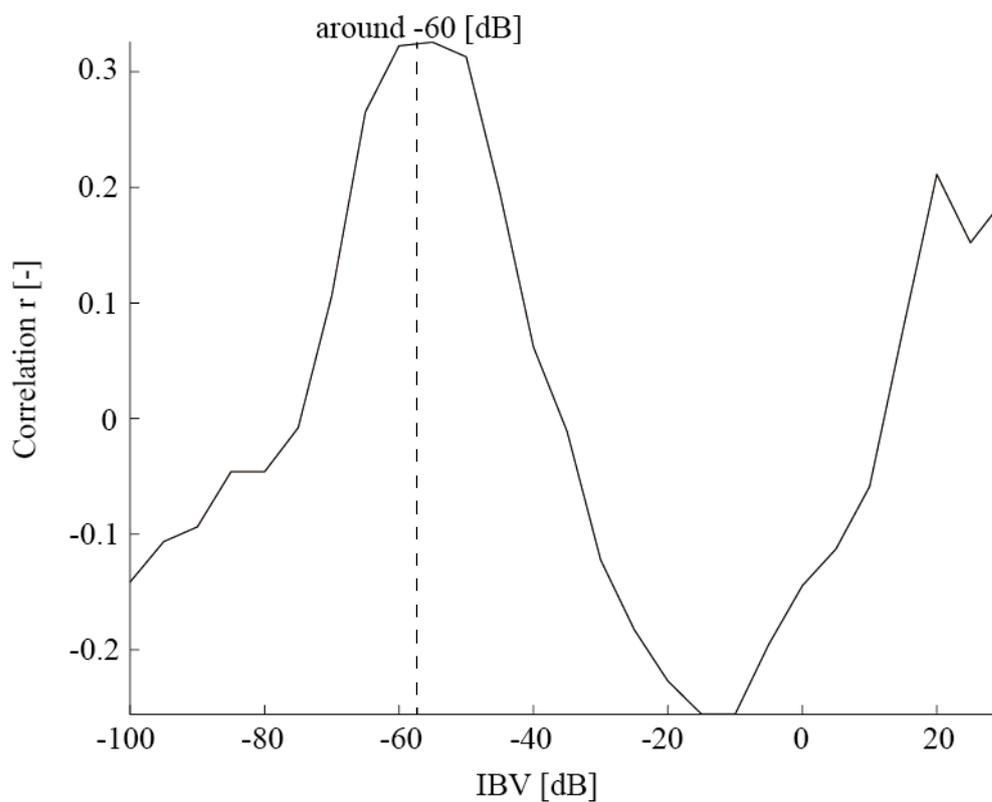


図 7. IBV とテクスチャとの相関を表したグラフ。-60 [dB] 付近 (-60 [dB]以上-56 [dB]未満)でのヒストグラムの分布数とテクスチャに大きい相関がある。

4.2.5 IBV のヒストグラムにおける度数を利用したテクスチャ推定の結果

立体的 IBV 行列から生成されたヒストグラムにおいて、-60 [dB]以上-54 [dB]未満での度数を説明変数、テクスチャを目的変数とした線形回帰モデルを生成し、そのモデルを利用し、テクスチャを推定した。その結果を図 8 に示す。図中の横軸がモデルの推定値、縦軸が実測値である。この結果から、推定値と測定値の相関は $r=0.52$ ($p<0.05$) であり、脂質量の推定ほど高い精度ではなかったが概ね推定が可能であることが示唆された。

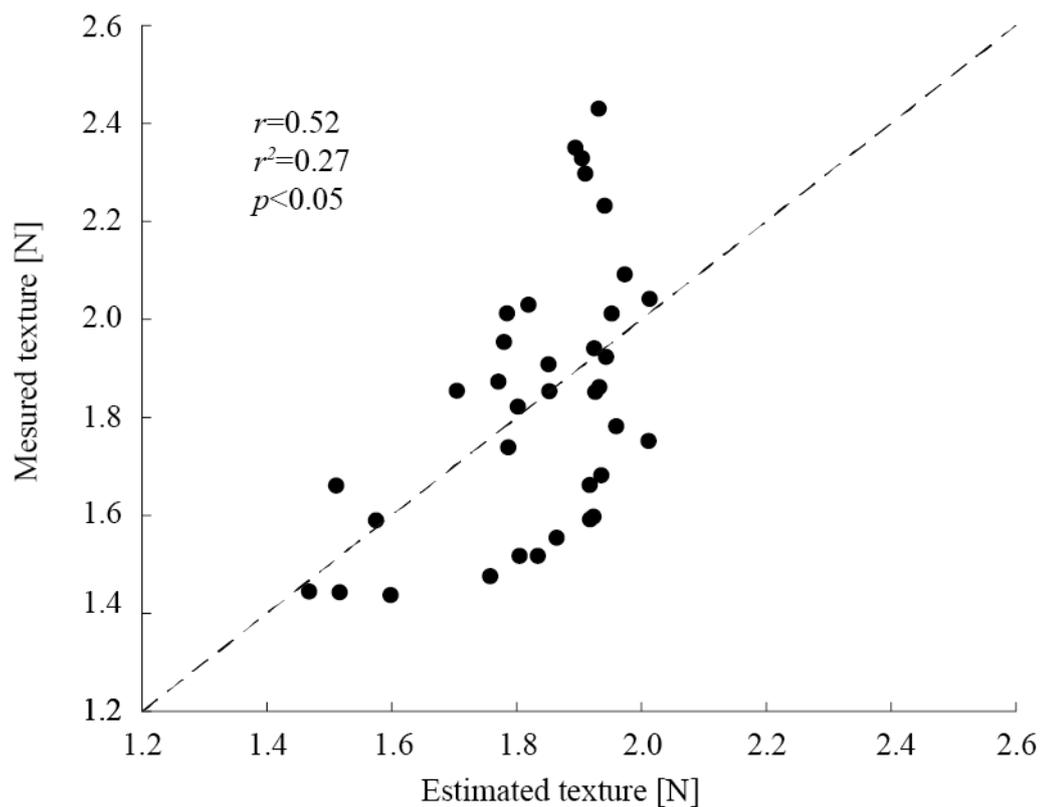


図 8. 立体的 IBV 行列において-60[dB]以上-54 [dB]未満での度数を利用し、テクスチャを推定した結果。横軸が推定値、縦軸が実測値である。

4.2.6 機械学習法による脂質量とテクスチャの評価結果

図 9 および図 10 に機械学習法を用いた脂質量, およびテクスチャの推定結果をそれぞれ示す. 図ではデータの多くが破線周りにプロットされている. この際の推定値と測定値の相関係数は $r = 0.82$ ($p < 0.05$) であり, 推定精度が高いことが示された. また IB 法での脂質推定 (図 6) と比較してより高くなっていることが分かる. またテクスチャの結果においても推定値と測定値の相関係数は $r = 0.62$ ($p < 0.05$) であり機械学習法を用いた場合は, IB 法よりも高い推定精度が得られた.

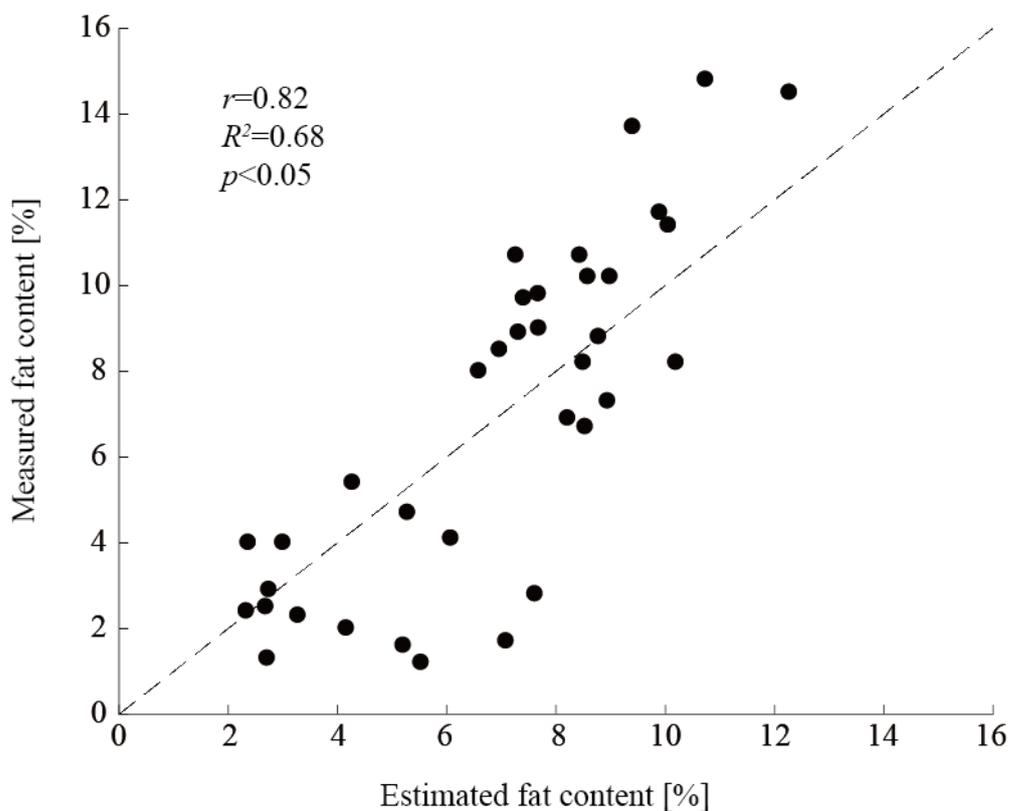


図 9. 機械学習法による脂質量の推定結果. 横軸は機械学習法による脂質の推定値, 縦軸が実測値を示す.

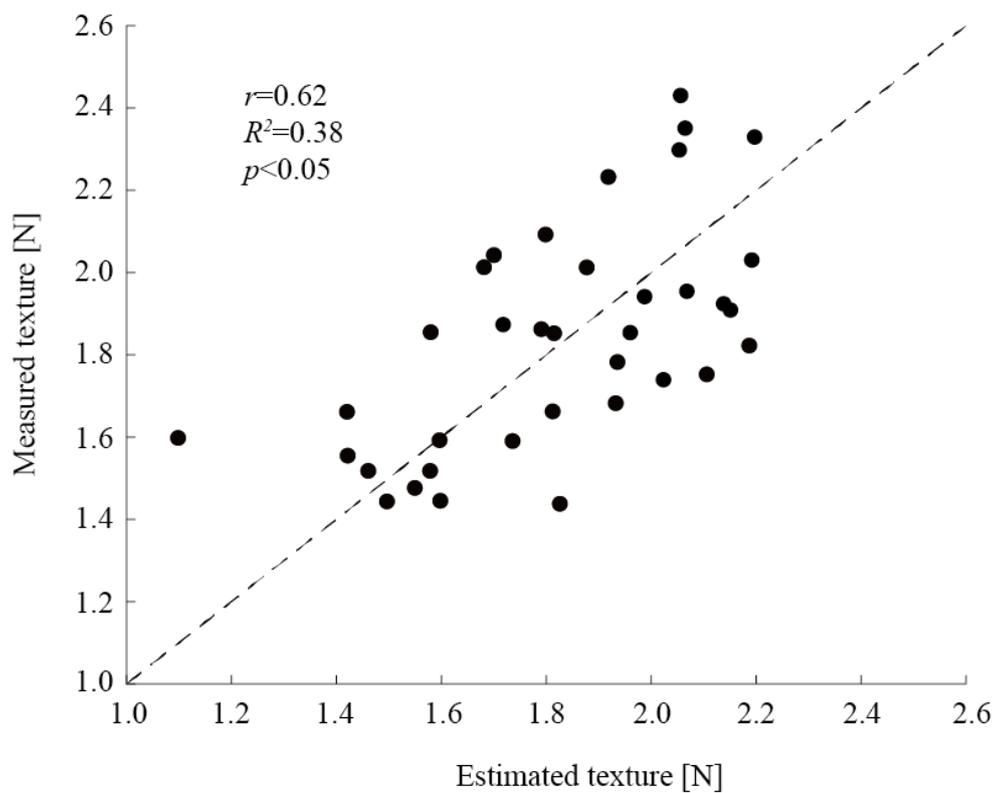


図 10. 機械学習法によるテクスチャの推定結果. 横軸は機械学習法によるテクスチャの推定値, 縦軸が実測値を示す.

4.3 考察とまとめ

超音波を用いた魚肉の脂質量およびテクスチャ（＝歯応え）の非破壊的評価方法について、IB法と機械学習法の2つの評価方法を提案し、実験的にそれぞれの有効性を検証した。その結果、魚肉の脂質量推定において、機械学習法とIB法は共に超音波信号から魚肉の脂質を推定することが可能であると示唆された。また脂質量推定において機械学習法を用いた場合とIB法を用いた場合を比較すると、機械学習法を用いた場合の方がより良い推定精度が得られた。さらに魚肉の歯応えの推定において、機械学習法は歯応えの推定値と測定値との間にやや相関があるが、決定係数は低く脂質量推定ほどの推定精度は得られなかった。IB法を用いた歯応えの推定は、歯応えの推定値と測定値との間に相関はあるが低く、決定係数を見てもIB法を用いた歯応えの推定が困難であることが分かった。

以上の検証結果より、超音波信号から脂質量およびテクスチャの評価は可能であると示唆できる結果を得ることができた。またIB法と機械学習法を用いた評価では機械学習法を用いた評価方法が優れていることが分かった。

IB法も機械学習法も周波数スペクトルベクトルを利用している部分に違いはないが、IB法は周波数スペクトルの面積を、機械学習法は周波数スペクトルを特徴ベクトルとして利用している部分が異なる。すなわち本質的にはIB法は特徴ベクトル間の距離にマンハッタン距離を利用し、機械学習法ではユークリッド距離を用いている、といっても良いだろう。このことから機械学習法の推定精度が高かったと考える。

5 魚肉の鮮度評価に関する研究

我々は平成 28 年度の本事業（海産物の非破壊評価方法に関する調査研究）における調査研究において、IB（Integrated Backscatter）値を用いることで、超音波信号から魚肉の脂肪量および歯ごたえを非破壊で推定できることを示した。そこで平成 29 年度の事業では、同様の方法で海産物の鮮度を超音波信号から非破壊で推定できないかを調査研究したので、本節ではその研究について報告をする。

5.1 材料と方法論

5.1.1 実験試料と使用した装置

【実験試料】

- ・ マアジ (*Trachurus japonicus*)

下関沖で早朝に獲れたマアジ 15 匹を水産大学校に輸送し、実験で使用した。漁港での試料調達、輸送調整は日本海事検定協会の谷口、中野が行った。

【装置】

- ・ 超音波魚体スキャン装置

水産大学校海洋機械工学科 徳永研究室で作成したものを使用。

魚体スキャン装置の構成については前節で説明されている。

- ・ 鮮度測定器：QS-SOLUTION 社製 濾紙泳動型鮮度測定器

日本海事検定協会所有の機器

- ・ テクスチャ試験機：IMADA 社製 FRTS-50N

日本海事検定協会所有の機器

- ・ クールインキュベーター：AS One 社製 KMH-050 /1-423-01

日本海事検定協会所有の機器

5.1.2 方法論

本研究では、超音波を魚体に照射し得られた超音波信号から鮮度を推定する方法としてIB値を利用した方法を取り入れる。IB値で鮮度を推定できるかどうかを調査することが本研究の主眼となる。この節では本研究の調査の枠組みを説明する。

5.1.3 枠組み

本研究ではマアジ15匹を3グループに分け、1グループ目を水揚げ日に測定、2グループ目を水揚げから24時間後に測定、3グループ目を水揚げから48時間後に測定することとした(図11を参照)。測定を行わない間は、庫内が10℃に保たれたクールインキュベーターにマアジを入れて保存した。



図 11. 検体のグループ分け

測定では、各種魚体データの取得、超音波信号の取得、テクスチャの測定、鮮度の測定を行う。測定の手順は以下で行った。

- (1) 魚体の体長、体高、体幅、体重を測定する。
- (2) 魚体をスキャン装置に設置し、超音波信号データを取得する。
- (3) 魚体を三枚おろしにし、二枚のフィレのテクスチャ測定を行う。
- (4) テクスチャを測定した箇所からサンプルを採取し、鮮度測定を行う。

(1) 魚体の体長、体高、体幅、体重を測定する。

本測定において、体長は魚の口先から尾びれの先までを測定する。体高は背縁から腹縁までの垂直方向の距離において最も大きい部分を測定する。体幅は左右のヒレ部分の距離を測定する。体重はデジタルはかりで測定する。

これらの測定は日本海事検定協会の谷口、中野が行う。

(2) 魚体をスキャン装置に設置し、超音波信号データを取得する。

魚体をスキャン装置に設置し、超音波を照射しながらスキャンを行う。スキャン中は100msec 毎に超音波信号データがパソコンに記録される。

スキャンでは図 3 に示すように、魚体上の探触子をジグザグに動かしながら超音波を照射する。プローブの移動速度は 2.16 mm/sec である。このため、超音波信号データは約 0.22 mm 間隔で記録されることになる。照射する超音波はバースト波とし PRF は 200Hz, 送信周波数は 20MHz とする。また取得されるデータのサンプリング周波数は 500MHz である。

(3) 魚体を三枚おろしにし、二枚のフィレのテクスチャ測定を行う。

魚体を三枚おろしにした後に、二枚のフィレの重量をデジタルはかりで測定する。その後、テクスチャ測定器にフィレを設置し、フィレのテクスチャを測定する。

フィレのテクスチャ測定では、二枚のフィレそれぞれに対して三ヶ所のテクスチャを測定する。測定箇所はエラ側からゼイゴまでを三等分した箇所とした。測定値の単位は N (ニュートン) である。

(4) テクスチャを測定した箇所からサンプルを採取し、鮮度測定を行う。

テクスチャを測定した箇所付近から魚肉のサンプル (1 cm 角) を 3 カ所分切り出し、鮮度測定を行った。鮮度は K 値 (単位は%) で表される。3 カ所の平均値を最終的な鮮度とする。鮮度測定器の扱いについては省略する。

5.2 超音波データから IB 値を取得する方法について

IB 値の取得は本章 4 節で述べた方法と同じである。簡単に手順だけを下に示す。

- (1) 超音波信号データから魚体部分の関心領域 (ROI) を切り出す。
- (2) ROI の信号の前処理
- (3) (2) の信号をもとに IB 値を求める。
- (4) IB 値を分けし、分けされた IB 値ごとに分布数を求める。
- (5) (4) で求めた分布数と K 値、テクスチャとの相関を計算し、最も高い相関を出した IB 値の区間を割り出す。

5.3 調査結果

まず時間経過による鮮度の変化を図 12 に示す. 図 12 では, 各グループにおける K 値の平均値をプロットしている. プロットの色はグループを表している (色については図 11 を参照). また各点における最大値と最小値をひげで表している. 結果から 10℃の庫内で保存した場合, マアジは 24 時間で K 値は約 8~11%の上昇があることがわかった.

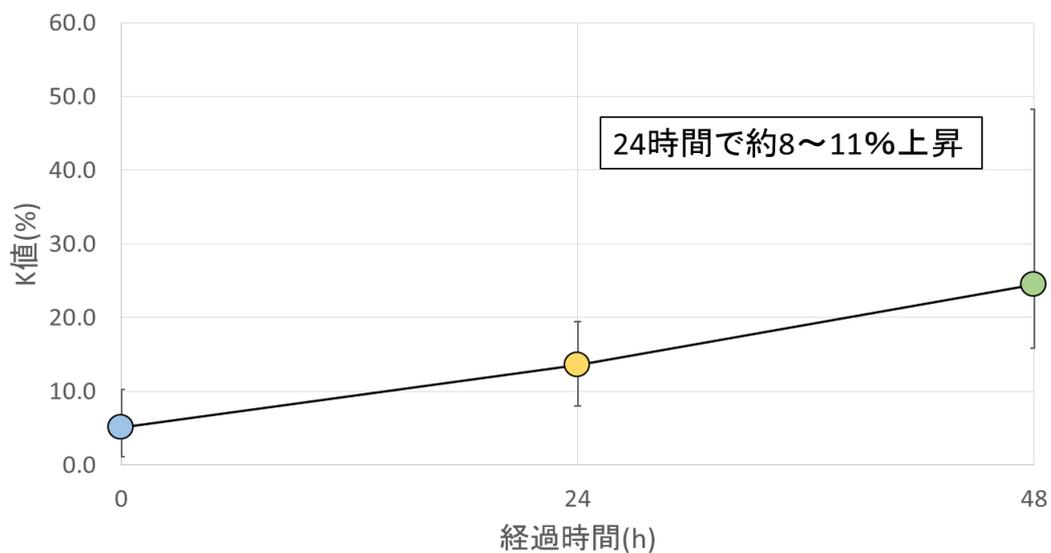


図 12. 時間経過による鮮度 (K 値) の変化

次に時間経過によるテクスチャの変化を図 13 に示す. 結果から 24 時間で約 0.2~0.3 (N) の低下が見られた. 時間経過により筋肉質の細胞が分解され肉が柔らかくなっているためである.

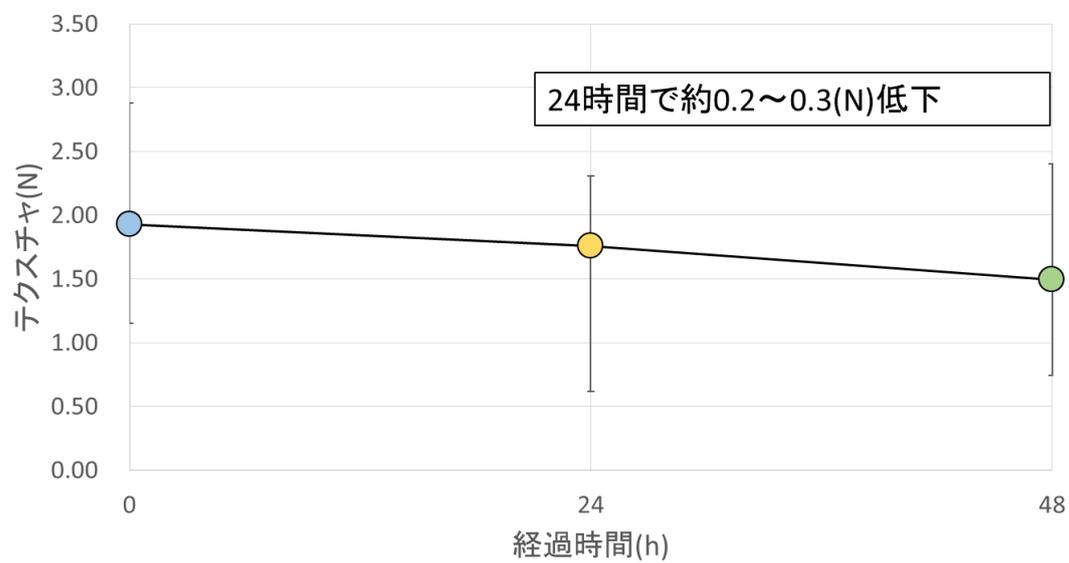


図 13. 時間経過によるテクスチャの変化

次に図 14 に IB 値と K 値間の相関について調べた結果を示す。結果から、約 -92 (dB) 付近で大きな負の相関係数 (-0.8) が得られた。すなわち IB 値が -92 (dB) 付近の分布数を調べることで高い精度で鮮度を推定できる、ということが示唆された。参考として -92 (dB) における分布数と K 値との関係 (線形回帰直線) を図 15 に示す。この結果から高い精度で鮮度を推定できる可能性が示唆された。

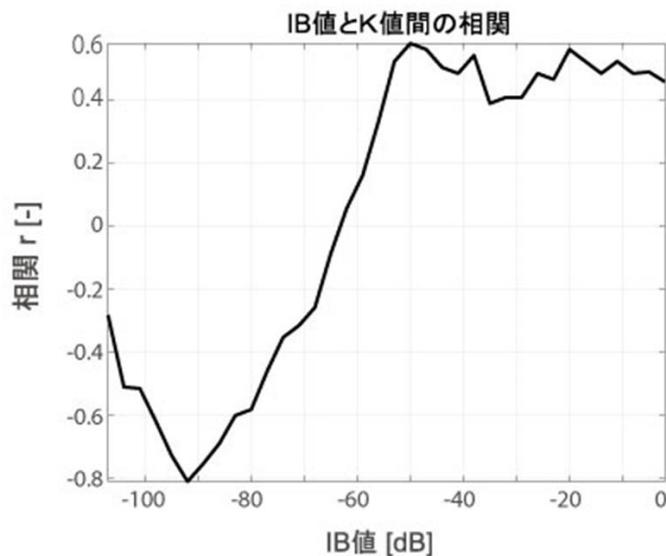


図 14. IB 値と K 値間の相関係数

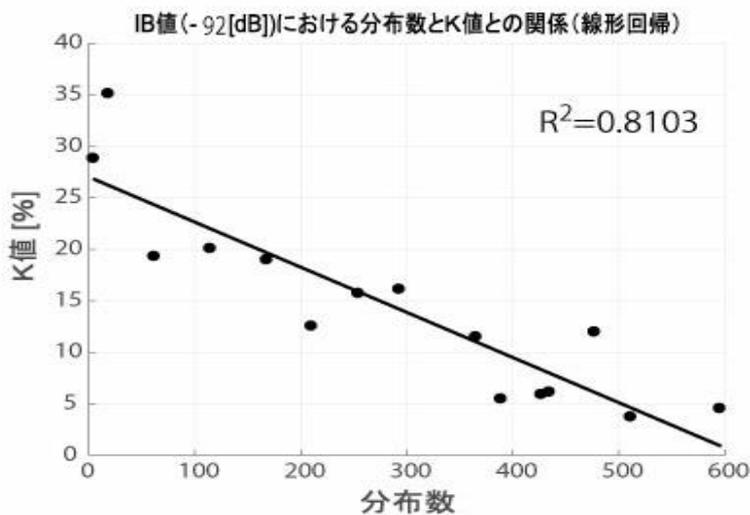


図 15. -92 (dB) における分布数と K 値との関係

5.4 考察

本研究では IB 値と鮮度 (K 値) との関係を調査した。その結果、超音波信号から算出される IB 値 (-92 dB) の分布数を調べることで、高い精度で鮮度を推定できることが示唆できた。しかし、IB 値は後方散乱におけるエネルギーの減衰率を見ている。これは物質の硬さにも影響される値である。このことから、IB 値で見ているのは、実際は魚肉の硬さであり、鮮度ではない、ということも考えられる。図 12 と図 13 を見ると、鮮度と魚肉の硬さ (テクスチャ) には高い相関があることがうかがえる。またテクスチャと IB 値との関係を調べた結果を図 16 に参考として示す。テクスチャにおいても -92 (dB) においても正の相関がみられる。このことから IB 値は鮮度というよりはテクスチャを見ていると考えられる。

しかし、時間経過による魚肉のテクスチャの変化のモデルおよび K 値の変化のモデルが用意してあれば、そのモデルを利用してテクスチャから鮮度も求めることができると考えられる。

また本研究で行ったテクスチャの IBV (-92dB) と先の研究で行った IBV (-60dB) の結果が異なる。これは水温やスチール板の状態など、実験した環境が異なることで生じたと考えられる。このため、キャリブレーションのような処理を、超音波装置を利用する前に行わなければならない。通常超音波探傷検査でも試験材を用いてキャリブレーションを行うため、この魚肉の評価においても装置のキャリブレーション方法を確立する必要がある。

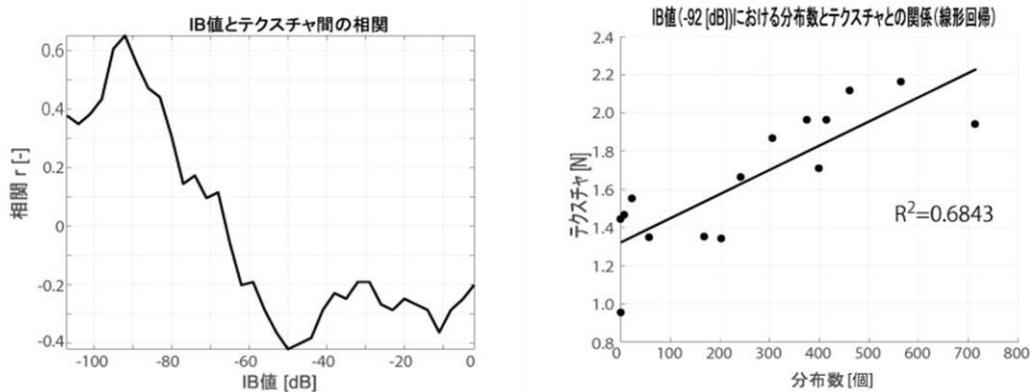


図 16. テクスチャと IB 値との関係を調べた結果

5.5 まとめ

本研究では IB 値と鮮度 (K 値) との関係を調査した。その結果、超音波信号から算出される IB 値 (-92 dB) の分布数を調べることで、高い精度で鮮度を推定できることが示唆できた。但し、実際には鮮度というよりは魚肉の硬さを IB 値は見ていることが考えられる。また時間経過による魚肉のテクスチャの変化のモデルおよび K 値の変化のモデルが用意してあれば、そのモデルを利用してテクスチャから鮮度も求めることができると考えられ、

今後、さらに調査をする必要がある。

6. マダイの評価に関する研究結果

平成 29 年度までの事業（海産物の非破壊評価方法に関する調査研究）における調査研究で、超音波を用いた脂質量とテクスチャおよび鮮度の評価に可能性があることが示唆された。しかし、マダイのような鱗の硬い魚に対しても同様に評価が可能であるかを確認する必要がある。その理由は、鱗が硬い場合は、音響インピーダンスが高く、鱗の表面で超音波のエネルギーのほとんどが反射されてしまい、魚肉に透過し難くなると考えられるためである。平成 30 年度では、マアジで行われた方法をそのままマダイに適用した場合に、評価が可能かを調査した。

6.1 材料と方法

魚のサンプルとしてはマダイ (*Pagrus major*) を 20 サンプル用いた。ただしその中の 3 サンプルは超音波信号の取得に失敗（端子の接続不良）していたため 17 サンプルを利用している。サンプルは下関で測定日早朝に水揚げされたものである。

方法は 4 節で述べた機械学習法での評価と同じである。

6.2 結果

図 17と図 18に,機械学習法によるマダイの脂質量およびテクスチャの推定結果を示す.脂質量の推定では,推定値と実測値の相関が $r=0.08$ でありほぼ推定ができていなかった.機械学習におけるパラメータ等を変えても推定が困難であった.一方で,肉の硬さを表すテクスチャに関しては,相関が $r=0.52$ であり,ある程度テクスチャの推定は可能であることが示唆される.

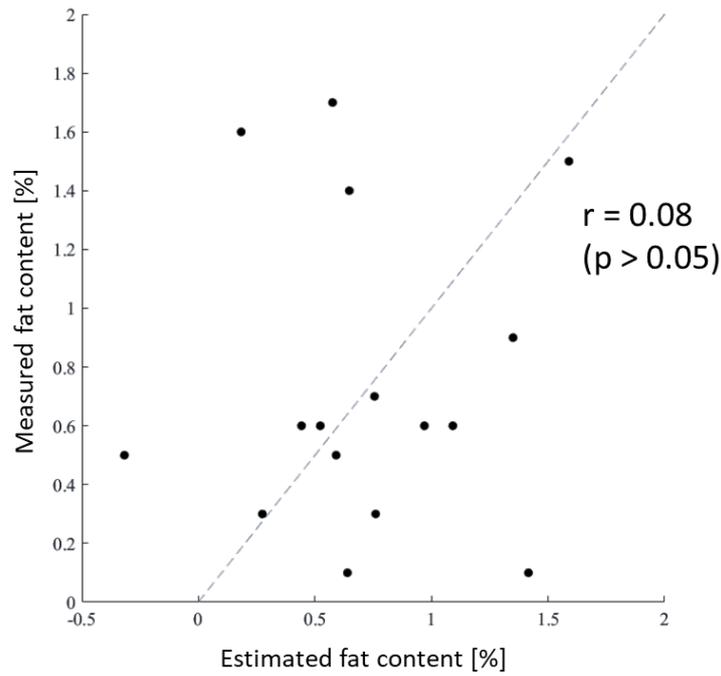


図 17. 機械学習法によるマダイの脂質量推定の結果. 横軸と縦軸はそれぞれ機械学習法による推定脂質と実測値を表す.

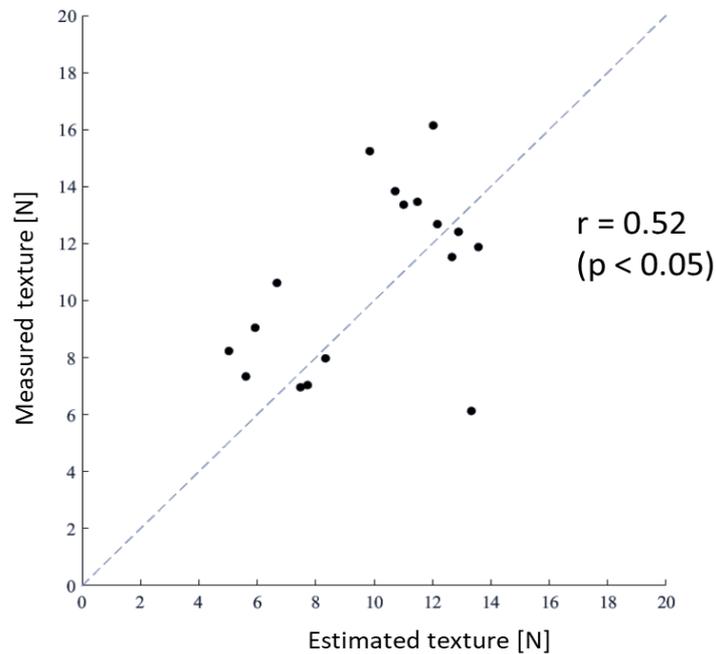


図 18. 機械学習法によるマダいのテクスチャ推定の結果. 横軸と縦軸はそれぞれ機械学習法による推定テクスチャと実測値を表す.

6.3 考察

結果から、それほどまでの推定精度が得られたわけではないため、マダイについては超音波での評価が困難であることが示唆される。この結果が、鱗が硬いためにマダイの評価が困難であったかどうかは、本結果だけでは結論付けられないが、ひとつの要因として考えられるため、今後の研究では魚種を増やして検討する必要があると考える。

7. まとめ

本事業では超音波を用いて海産物の非破壊評価方法を調査することを目的とし、事業内で超音波魚体スキャン装置の開発、および超音波信号から脂質量、テクスチャ（肉の硬さ）、鮮度を推定する方法を提案し、実験的に有効性を検証した。

その結果、マアジに関しては超音波を用いて脂質、テクスチャ、鮮度を評価することが可能であることが示された。しかしマダイにおいては評価が困難であることが示唆された。その理由として考えられることは、マダイは鱗が硬いために超音波が鱗の表面で大部分が反射され、魚体内部に超音波が十分に透過していないことが原因のひとつだと考える。しかし、本研究の結果だけでは結論付けられないため、今後の研究では魚種を変えて検討する必要がある。

また超音波装置にも問題があると考ええる。本研究で使用した超音波装置は、超音波探傷器とロガーを利用した簡素な作りになっており、魚体内を超音波で見るためには、専用の装置を開発する必要があるだろう。本研究ではソフトウェア面からのアプローチを試み、超音波を用いることで脂質やテクスチャを評価できることが示唆できた。しかし今後は、ハードウェア面を充実させなければ、ソフトウェアを活かすこともできず、水産業界において超音波の利用価値を高めることもできないだろう。超音波を用いる利点は魚体内の内部を非破壊で見ることができることであり、寄生虫の有無や卵巣の確認など他の評価も可能であり、非常にマルチな評価装置となる。水揚げされた大量の魚を一遍に評価することには適していないが、大量の海産物の中から数匹をサンプルとして取り出し、それを評価する、という使い方も可能だと考える。

第2章 目利き装置に関する研究

1. 研究目的

多くの魚に触れ、そして食している漁業従事者や釣り人は、魚の脂の乗りを見た目で判断できるという。もしその評価が正しければ、完璧な評価ではないとしても魚を簡便に選別することが可能である。また「機械の目（マシンビジョン）」を通して魚を自動的に評価することも可能となるだろう。そこで我々は魚の見た目から脂の乗りは評価できるのかどうかを調べるべく本研究を行うに至った。

本研究は、魚の体形と脂質量との関係を調べ、カメラ等で撮影した魚の画像から脂の乗りを推定できるかどうかを調査することが目的である。

特に本研究では魚の体形を簡単な特徴で表現し、体のどこの部位と脂質量が関係しているかを調査することに主眼を置いた。

2. 研究内容

魚の体形を数値化する方法として、本研究ではマーカを刺した魚体をカメラで撮影し、そのマーカの座標を利用して、魚体の体形の数値化を試みた。

まずマーカが付けられたサンプルを撮影装置に設置し写真を撮影する。撮影されたサンプルは三枚おろししたのちに、可食部のフィレ部を皮付きで分析機関に輸送し脂質量を測定する。撮影された写真からコンピュータ上でマーカの位置計測および番号付けが自動的になされる。その後、マーカ位置を利用した各種計測値と脂質量との関係を調べる。

手順をまとめると以下の順番で行われる。

- (1) 魚にマーカを刺す、
- (2) 魚の写真を撮る、
- (3) 写真からマーカの位置（座標）を自動的に取得する、
- (4) 可食部フィレの脂質量を測定する、
- (5) マーカの座標を利用して各種測定値と脂質量との関係を調べる、である、

本研究で利用した魚のサンプルは全てマアジであり、110 サンプルを用いた。マアジは平成30年9月から10月までの間で異なる日、場所で水揚げされたサンプルである。どれも水揚げされた翌日に実験が行われている。

以下にそれぞれの手順の詳しい内容を説明する。

2.1 魚にマーカを刺す

図19に10個の赤いマーカを刺したマアジの写真例を示す。10個のマーカの位置には規則があり、(1) 口先、(2) 眼球中央、(3) (4) 鰓の上下、(5) 鰓中央にある黒斑点、(6) 腹びれの付根、(7) 第一背びれの付根、(8) 尻びれの付根、(9) 第二背びれの付根、

(10) 尾びれ、にマーカーを設置する。マーカーの色を赤にした理由は、この後の、写真からマーカー位置（座標）を、画像処理によって自動取得する際に赤色は都合が良いためである。本研究で使用したマアジは赤色の成分がほとんど含まれていない（エラや血液を除いて）。そのため赤色のマーカーを取得することが非常に簡単に行える。ただし魚体に赤成分が多く含まれる鯛などでは赤色のマーカーよりも緑色などが適切だろう。このように魚体の色成分に応じてマーカーの色は変える必要がある。また 10 本にした理由は、あまり多くのマーカーを利用すると、特徴が多くなりすぎて調査が困難になるためである。またマーカーの位置についても規格を統一することを考えて設定してある。



図 19. 10 個の赤いマーカーを刺した魚の写真.

2.2 魚の写真を撮る

2.1 で用意した魚サンプルの写真撮影は、同じ撮影条件で行う必要がある。本研究での撮影条件とは、魚体からレンズまでの距離、角度、背景光である。この撮影条件を統一化させるために、本研究では水産大学校海洋機械工学科の椎木研究室で開発された撮影装置（図 20）を利用する。本装置は、LED ランプ、ビジョンセンサを搭載している。LED ランプは、天井及び周辺に設置されており、魚体にまんべんなく光が照射できるようになっている。またビジョンセンサとして、Intel RealSense D435 (Intel 社製) が天井に設置されている。本ビジョンセンサは、RGB センサと深度センサが搭載されており、カラー画像、深度画像を同時に取得できる。ビジョンセンサから魚サンプルを設置する台までは 500mm 離れている。また撮影可能範囲は縦 30 (cm) x 横 30 (cm) x 深さ 25 (cm)、カラー画像最大解像度は 1980 x 1080、深度画像最大解像度は 1280 x 720 である。図 19 は本装置によって撮影された画像の一例である。本研究では深度センサを利用しない。

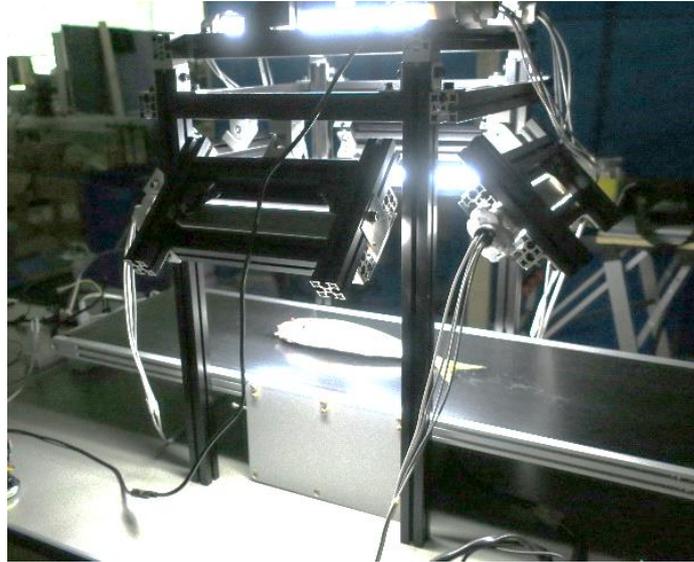


図 20. 撮影装置（水産大学校 海洋機械工学科 椎木研究室 提供）

2.3 写真からマーカ―の位置（座標）を取得する

2.2 で撮影された画像に対して、以下の処理を順に施し、マーカ―の座標を自動的に取得する。以下の処理は数値計算ソフトウェアである Matlab (Mathworks 社) で作られたプログラムで自動的に処理される。

- A) 画像から魚の写っている部分だけを切り出す
- B) 画像の RGB 成分をそれぞれ抽出
- C) RGB 成分のそれぞれの差の絶対値を求める
- D) 円のハフ変換を使い円形部分を自動抽出、同時に円の中心座標も取得
- E) 抽出された座標をもとに 10 個のマーカ―に自動番号付け

A において、装置で撮影された画像は図 19 のように上下左右に魚と関係のない余計な部分があるため、その部分を除いて魚だけの画像を切り出す。

B では切り出した画像は赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の三原色それぞれの数値の混合で一つ一つのピクセルの色が作られているため、この画像から R 成分、G 成分、B 成分の画像をそれぞれ取り出す。

C では、各三成分の差の絶対値を求める。すなわち、R 成分、G 成分、B 成分の画像行列をそれぞれ I_R 、 I_G 、 I_B とするならば、三成分の差の絶対値で求められる画像 I_d は
$$I_d = |I_R - I_G - I_B|$$
 と定義できる。この作業により、赤いマーカ―部分だけが取り出される。

取り出した結果を図 21 (b) に示す。

D では、円のハフ変換を利用し、画像 I_d から自動的に円形部分を特定する。この処理に

よりマーカーの中心座標を自動的に取得することが可能である。

E では抽出されたマーカーに対して自動的に番号付けを行う。自動番号付けは以下の条件に従って行う。

- ・左端一番：①（口の先端）
- ・左端二番②（眼球）
- ・左端三番，四番，五番：②に対して下を③，上を④，それ以外を⑤（エラ部分）
- ・左端六番，七番：②に対して下⑥，上を⑦
- ・左端八番，九番：②に対して下⑧，上を⑨
- ・左端十番：⑩

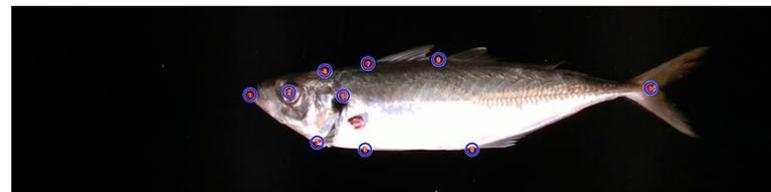
左端一番とはマーカーの x 座標が最も左端にあるマーカーのことを指す。また左端二番とはマーカーの x 座標が 2 番目に左端にあるマーカーを指す。以下同様である。本研究で魚サンプルとして利用したマアジは，目の位置やエラの付き方などが大体同じのため，本条件ですべて自動的な番号付けが成功した。自動的に番号付けされた結果例を図 21 (c) に示す。



(a)



(b)



(c)

図 21. マーカー座標の検出過程. (a) 原画像から魚の写っている部分だけを切り出した画像，(b) マーカー部分だけを取り出した画像，(c) マーカーの座標を取得し，それぞれのマーカーに青い円を描き，さらに番号付けをした画像。

2.4 可食部フィレの脂質量を測定する

マーカーを付して撮影されたマアジは、三枚におろされ、そのうち可食部の 2 枚のフィレを分析機関（北九州生活科学センター）に冷凍輸送し脂質量を測定した。脂質量の測定は皮つきで行い、ソックスレー抽出法で行われた。

2.5 マーカーの座標を利用し様々な特徴量を作る

マーカー位置を利用した各種測定

値と脂質量との関係を調べる。本研究では、(1) マーカー間の距離、(2) マーカー3点間の角度、の二項目について脂質量との関連を調べた。

2.5.1 マーカー間の距離

マーカー間の距離（図 22 に例を示す）と脂質量との関係を調べる。まず魚サンプルに取り付けられた 10 個のマーカーのそれぞれの相互距離をマーカーの位置座標から自動計算する。これを全サンプルで行い、サンプル毎にマーカー間の距離行列が完成する。この距離行列をもとに脂質との相関を計算する。ただし本距離行列は対角成分が 0 の上三角行列である。

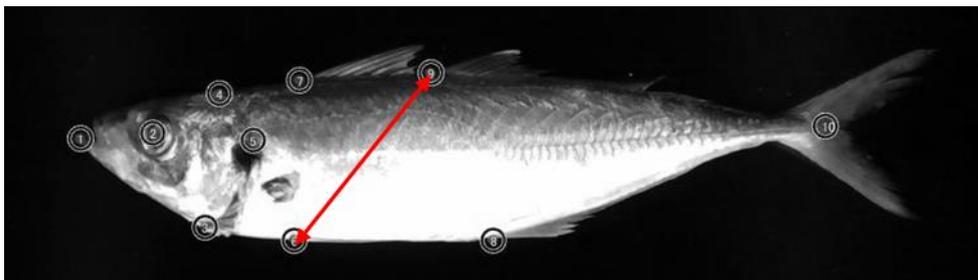


図 22. マーカー間の距離の例。赤い線がマーカー間の距離を表す。

2.5.2 マーカー三点間の角度

マーカー三点間の角度（図 23 に例を示す）と脂質量との関係を調べる。言い換えると、魚の部位の大きさ（広がりや細さ）と脂質量との関係を調査することに相当する。10 点からなるマーカーから生成できる 3 点間全ての組み合わせについて総当たりで調査を行う。

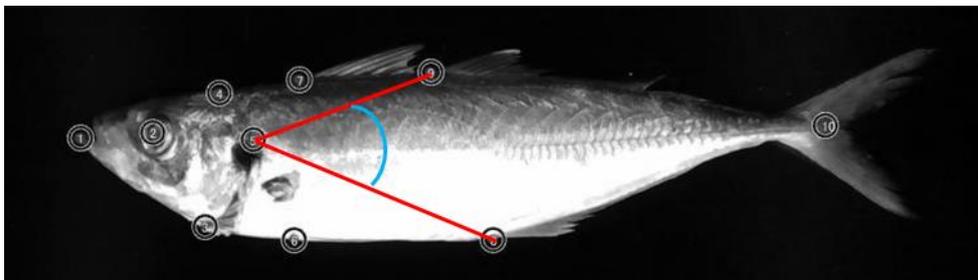


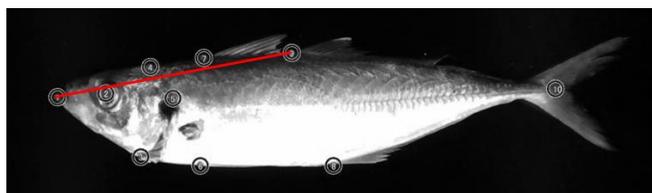
図 23. マーカー3点間の角度の例。マーカー三点から成る赤い線の成す角を青色で表す。

3. 結果

3.1 マーカー間の距離と脂質量との関係

図 24 にマーカー間の距離と脂質量との相関を総当たりで調べ、相関の高かった上位 3 位の箇所を示す。どの相関も高いが、関係している部位としては頭頂部が挙げられる。ただし、②の結果は長さが短いほど脂質が高い、ということを表し、結果としては奇妙な結果といえる。漁港 A（都合上名前は伏せる）で 10 月初旬に水揚げされたマアジは、総じて体長が短かったが、脂質はどのマアジも高かった。これが結果に反映されていると考える。そのため、この実験だけでは、体形と脂質に関係があるとはいえない。

① $r = -0.762$
 $p < 0.01$



② $r = -0.759$
 $p < 0.01$



③ $r = -0.757$
 $p < 0.01$

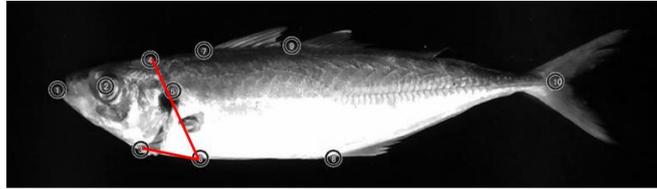


図 24. マーカー間の距離と脂質量との相関（上位 3 位）。①相関が最も高かった距離（赤いラインで示したマーカー間）、②2 番目に相関が高かった距離（赤いラインで示したマーカー間）、③三番目に相関が高かった距離（赤いラインで示したマーカー間）。

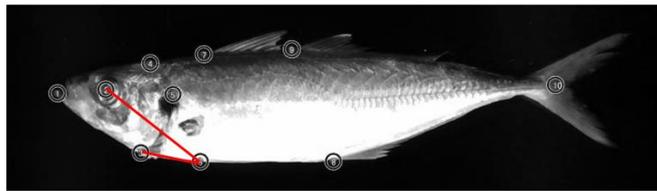
3.2 マーカー3点間の角度と脂質との関係

図 25 にマーカー3点間の角度と脂質量との相関を総当たりで調べ、相関の高かった上位3位の箇所を示す。結果として部位としては頭の広がりや脂質に関係があるということが示唆できる。

① $r = -0.518$
 $p < 0.01$



② $r = -0.509$
 $p < 0.01$



③ $r = -0.444$
 $p < 0.01$

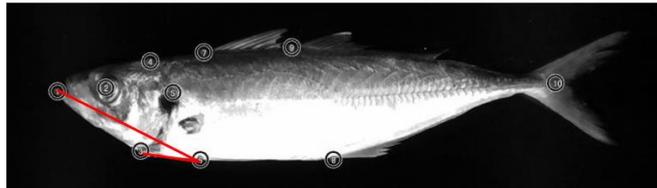


図 25. マーカー三点間の角度と脂質量との相関（上位3位）。①相関が最も高かった角度（赤いラインで示したマーカー間）、②2番目に相関が高かった角度（赤いラインで示したマーカー間）、③三番目に相関が高かった角度（赤いラインで示したマーカー間）。

3.3 重回帰モデルを用いた結果

マーカー間の距離で最も相関の高かった箇所①-⑨間の距離、およびマーカー3点間の角度で最も相関の高かった箇所③-⑥-④の角度、を説明変数とし、脂質量を目的変数とした重回帰モデルを作成し、モデルによる脂質推定の評価をした。その結果を図 26 に示す。この結果から、脂質の推定精度もよく、体形から脂質を推定することの可能性が示唆できる結果となった。

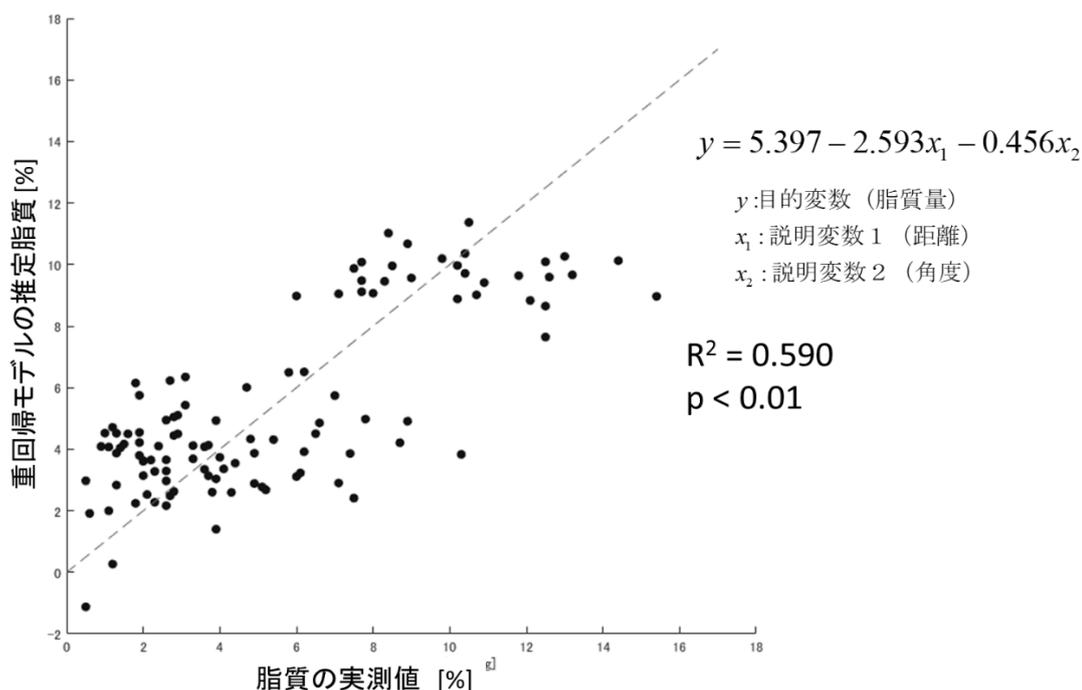


図 26. 重回帰モデルによる脂質推定の結果。マーカー間の距離で最も相関の高かった箇所およびマーカー3点間の角度で最も相関の高かった箇所を説明変数とし、脂質を目的変数とした。

4. まとめ

魚の体形と脂質量には関係があることが、実験から示唆できた。本研究の結果からは頭頂部が脂質と関係をしていることが示唆された。しかしながら、特定の漁場かつ時期で獲れたマアジが、小ぶりでありながら、どのマアジも脂質が高い、という分布であったため、この影響が、結果に反映されているともいえる。特に今回の結果では、距離と脂質との相関が高くなったが、それも上記が理由として挙げられる。よって、体形と脂質量に関係がある、と断定するにはまだ早いと考える。

本研究では体形のモデルを長さ、角度で表現したが、これは体形というよりは局部のパラメータを表現するだけなので、体全体をモデル化する必要があるだろう。今後の研究で検討をする予定である。

総括

本事業は平成 28 年度～30 年度の 3 年間の期間において、以下の 2 項目について基礎的研究に取り組んだ。

- (1) 超音波を利用した魚肉の非破壊評価方法の検討
- (2) 魚の体形から脂質量を非破壊測定する方法の検討

超音波を利用した魚肉の非破壊評価方法の検討では、超音波信号から魚肉の脂質量、歯応え（テクスチャ）、鮮度を測定するソフトウェアの開発、および検証を主に行った。その結果、海産物の「美味しさ」を表す重要な要素である脂質、テクスチャ、鮮度の 3 項目を、超音波の照射で定量的かつ非破壊的に評価できることが示せた。魚肉の非破壊的な評価方法として超音波も利用できることが示せたことは学術的にも意義は大きいと考える。本研究ではソフトウェア面からアプローチで研究を進めたが、今後、さらに研究を発展させるためには、ハードウェア面の開発を進める必要がある。また成分評価だけでなく、寄生虫の寄生場所や数の評価などを支援できるようにすることで、本装置の実用性も高まると考える。

魚の体形から脂質量を非破壊測定する方法の検討では、体形と脂質に関係があることが示唆された。本研究では魚の体形のどこの部分が脂質量と関係しているか、ということに主眼を置き、長さや角度といったパラメータと脂質量との関係を調べた。この結果、頭頂部が脂質と関係しているということが示唆された。一方で、これらのパラメータは必ずしも魚の体形を表しているとはいえないので、今後は体全体をグラフ等でモデル化し、モデルと脂質量との関係を調べるアプローチが必要になると考える。また漁獲の時期や漁場を考慮して実験を行う必要があると考える。

参考文献

- [1] 水産白書 第 2 節 我が国の水産業をめぐる動き
- [2] 平成 22 年度水産白書(1)海産物の消費動向, 水産庁 (2012)
- [3] 山中 英明, 魚介類のブランド化とトレーサビリティ, 日本調理科学会誌, vol.39, no.2, pp.108-114 (2006)
- [4] 農林水産統計 (2018/03/21)
- [5] M. Kawasaki, Integrated Backscatter Intravascular Ultrasound, Intravascular Ultrasound, pp.41-52 (2012)
- [6] 川崎雅規, 血管内超音波, 日本冠疾患学会雑誌, 13, pp.34-37 (2007)
- [7] T. Kohonen, Self Organizing Maps 3rd Edition, SpringerVerlag, Berlin (2001)

海産物の非破壊評価方法についての調査研究委員会 委員一覧

	氏名	所属
委員長	赤羽 建紀	(一社) 日本海事検定協会 検定サービスセンター
	杉生 将規	同上
	金子 幸央	同上
	谷口 真市	(一社) 日本海事検定協会 横浜大黒事業所
	中野 新太	同 名古屋第二事業所
	徳永 憲洋	国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産大学校 海洋機械工学科 講師