

# 生食用天然イワガキ可食部の非侵襲重さ計量器の開発

(第1報 音響式アルキメデス方を用いた身入り推定)

柳本 憲作, 木村 英人

## Development of a measure to weigh the edible portion in a non-invasive raw natural IWAGAKI rock oyster

Kensaku YANAGIMOTO, Hideto KIMURA

(Received on November 12, 2018)

### Abstract

This research proposed a non-invasive measurement method to presume an edible portion weight of IWAGAKI rock oyster. Most of the circulating IWAGAKI rock oysters are natural with shell to maintain freshness. The quality guarantee of natural IWAGAKI oysters which are a high grade foodstuff should be specified the weight of edible portion. The weight of edible portion of the IWAGAKI oyster is calculated from the weight and volume of the shellfish and the density of each part. In this experiment, the volume of uneven IWAGAKI shellfish was measured by the acoustic Archimedes' principle. For each density value required to estimate the weight of edible portion, approximate one from measured value was used. As a result, the qualitative tendencies of individuals weighing 150 g to 450 g are almost identical, and the error rate in this range is 0.3% at the minimum and 25% at the maximum.

**Key Words** : IWAGAKI rock oyster, Acoustic, Non-invasive measurement, Archimedes' principle

## 1. 結 言

本研究は、高級食材である天然イワガキの質保証（可食部の重さ明示）を目的に、イワガキの口をこじ開けずに可食部の重さを推定する方法を提案する。夏に旬を迎える天然イワガキは、「海ミルク」と言われ大型殻付きのものが流通の増加傾向にある。イワガキは、養殖牡蠣（真牡蠣）に比べると岩に付着した側の殻の厚みが非常に大きく、見た目の大きさと可食部である中身の重さとの相関が小さい。消費者から「値段の割には中身が小さい」などの不満の声がある。可食部である中身の重さの明示は消費者からのニーズとして重要であり、このためマーケットの売り場では右殻を開けたハーフシェルで身入りがわかる状態にして陳列されているケースもある。近年、各産地ではイワガキをブランド化し高級食材として売り出すなど新しい動きもあり、鮮度を保持するために殻付きの状態でも市場に流通している。そのため生産者や仲買人からも、非侵襲な方法によってイワガキの可食部重量の測定が可能な装置の開発ニーズが高い。

このような理由により本研究は、イワガキ全体の重さと音響信号を利用した体積の測定により、可食部である中身の重さを推定する方法を提案し（柳本他, 2016）、実験により考察した。幸いなことにイワガキの殻と可食部の密度差が2倍ほどあるため、予め各部の密度がわかればイワガキの全重量と体積を測定することで、可食部の身の重さの推定が理論的に可能である。そこで、凹凸形状のイワガキの体積測定を実用的に行う方法として音響信号を利用したイワガキの体積測定法を提案した。装置は計量槽と音響計測部からなる。あらかじめ注水された計量槽にイワガキを投入すると測定部内の測定管の水位が上昇し、この管内空気柱の共鳴周波数を計測することでイワガキの排除体積（体積増加 $\Delta V$ ）を算出する。本測定方法は、物体を沈下さ

せる液体の比重には影響されないため、イワガキ用の滅菌処理した海水を用いることができる。本提案による体積測定を音響式アルキメデス方と命名し、従来の測定方法との精度比較も実験により行った。

イワガキの身である可食部は外套膜に覆われ海水を多少包含しているが、本実験では一緒とした。可食部の重さの計算には殻および身の各密度を定数として使い、本システムより計測したイワガキ全体の重量と体積から可食部の身の重さを推定する。本方法によれば、おおよその可食部である中身の重さを推定することは可能であるが、現段階では味の決めてとなる身入り（グリコーゲンの含有量）の推定までには至っていない。



Fig.1 Appearance of Iwagaki edible portion measurement system



Fig.2 Sample of IWAGAKI rock oyster. These come from SHONAI in Yamagata Pref..

## 2. 計量器の概要

**2・1 可食部推定の原理** 図 4 に本測定装置のコンセプトを示す。装置は計量槽と音響測定槽からなる。計量槽は内径 100 mm、高さ 600 mm のアクリル製の円筒で、底部にて音響測定槽（内径 20 mm、高さ 450 mm）と連結パイプで接続されている。計量槽にイワガキが投入されると音響測定槽の水位が上昇し、音響測定部の測定管（内径 7 mm の細管）の空気柱の長さが変化する。測定管の上端にスピーカーからのチューブを接続し、測定管内の空気柱を共鳴させる。同じく上端の管壁に開けた小さい穴からチューブによりマイクロホンへ音を導き、FFT アナライザーにより共鳴周波数が測定される。投入前後における測定管の空気柱の共鳴周波数の変化でイワガキの排除体積（体積増加  $\Delta V$ ）を算出する。計算に使用する共鳴周波数を高音域までに拡張することで、微小変位にも適応させている。

図 3 に殻付きイワガキの断面図と X 線 CT 画像を示している。イワガキの身である可食部は、外套膜に覆われ海水を包含している。各部位の体積と密度を、殻の部分 ( $V_s, \rho_s$ )、可食部である身の部分 ( $V_e, \rho_e$ )、外套膜における包含海水の部分 ( $V_w, \rho_w$ ) とすると、可食部の身の重さ  $W_e$  は、式 (1) で表される。本測定システムでは、イワガキ全体の重量  $W$  と体積  $V$  の計測値から可食部の身の重さ  $W_e$  を推定する。

$$W_e = \frac{\rho_e (W - \rho_s V + V_w (\rho_s - \rho_w))}{\rho_e - \rho_s} \quad (1)$$

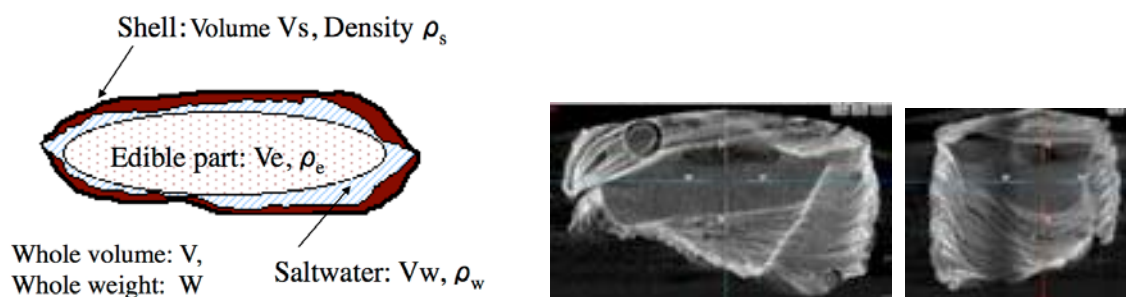


Fig.3 Cross section of IWAGAKI rock oyster. Edible oyster part is covered by a film with saltwater.

外套膜の含水量は、イワガキの個体による差が大きいこと、また可食部の密度が海水の密度に近いことから分離が困難である。このため、本報告では外套膜の含水量を可食部に含めて計算を行った。

**2.2 音響測定部の特性** 音響測定部の寸法記号を図5(a)に示す。測定管はジュラルミン製のパイプ(長さ450 mm, 内径7 mm, 肉厚0.5 mm)で、その上端および側壁に真鍮製の接続パイプ(長さ15 mm, 内径4 mm)が取付けられている。それぞれのパイプはスピーカーおよび小型マイクロホンとゴムチューブで接続されている。音響測定部は、図5(b)に示したようにサイドブランチ型の音響管としてモデル化できる。このとき、測定管の入り口側と閉口端におけるそれぞれの音圧と体積速度の関係は、分布定数回路として式(2)で表せる。さらに測定管の入り口からみたインピーダンス  $\dot{Z}_p$  は式(3)で表せる。よって音響パワーの入出力比  $W_i/W_o$  は式(4)となる。

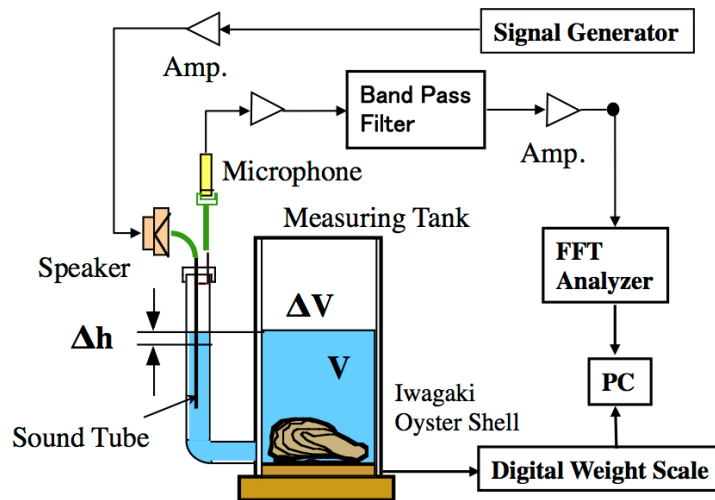
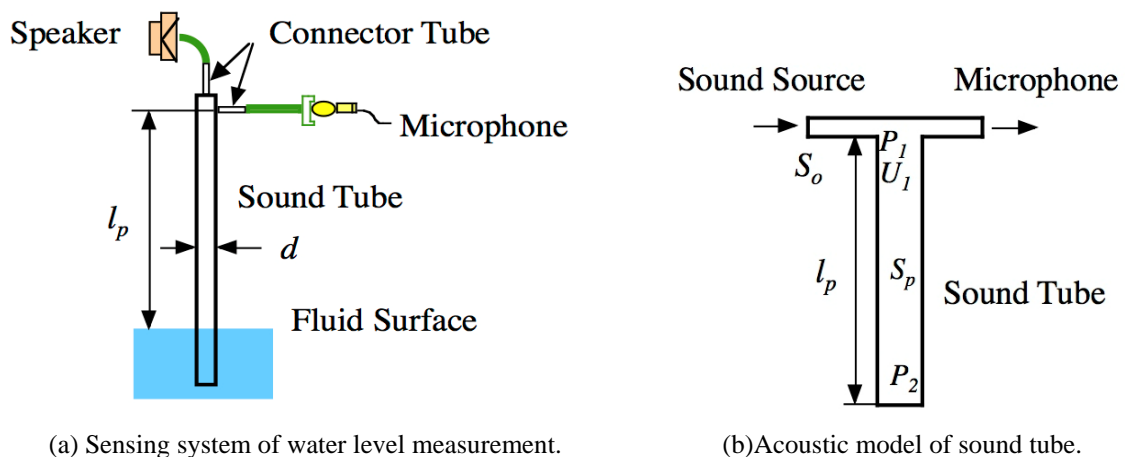


Fig.4 Diagram of acoustic Archimedes' principle.



(a) Sensing system of water level measurement.

(b) Acoustic model of sound tube.

Fig.5 Sensor are consist of streght slender pipe and connector tube. This sound tube is modeled by side branch resonator. Swept-sine signal is inputted to sound tube.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_1 \\ \dot{U}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl_p & j \frac{\rho c}{S_p} \sin kl_p \\ j \frac{S_p}{\rho c} \sin kl_p & \cos kl_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_2 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、測定管の閉口端では体積速度  $\dot{U}_2=0$  である.

$$\dot{Z}_p = \frac{\dot{P}_1}{\dot{U}_1} = j \frac{\rho c}{S_p} \frac{1}{\tan kl_p} \quad (3)$$

$$G = 10 \log_{10} \frac{W_i}{W_o} = 10 \log_{10} \left| 1 + \frac{1}{4} \tan kl_p \right| \quad (4)$$

ここで、 $k = \frac{2\pi f}{c}$ ,  $f$ は周波数,  $c$ は音速である.

図 6 に式(4)より計算した測定管の周波数特性を示す. ゲインの各ピークは測定管の共鳴周波数と一致する. 水位の変化に対し低周波数域におけるピーク値は, その周波数がほとんど変化しない. しかし, 5 kHz 以上の高周波数域ではその変化率は 25 Hz/mm~50 Hz/mm と大きい. 計量槽へ投入されるイワガキの体積が 93 cm<sup>3</sup> ~434 cm<sup>3</sup> (小型 150 g~特大 690 g) の場合, 測定管中の水の変位は 11.4 mm~53.1 mm であり, 高周波数域でのピーク周波数を用いると測定精度は 0.163 cm<sup>3</sup>/Hz~0.326 cm<sup>3</sup>/Hz の範囲で体積が計測される.

図 7 は共鳴周波数のうち第 7 ピークから第 15 ピーク ( $f_7 \sim f_{15}$ ) までの周波数値の総和を水位のゼロ基準に対して示している. 単一共鳴周波数の値から体積を計算する方法に比べ, 測定精度が良くなることや FFT アナライザの周波数分解能の影響を小さくできる.

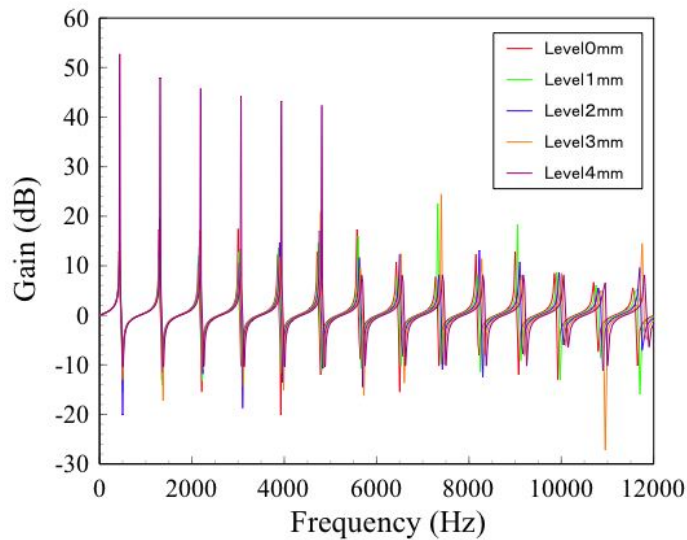


Fig.6 Resonant frequency of side branch are calculated by formula(3). Resonant frequency over  $f_7(5600\text{Hz})$  are obviously shift higher with water level change.

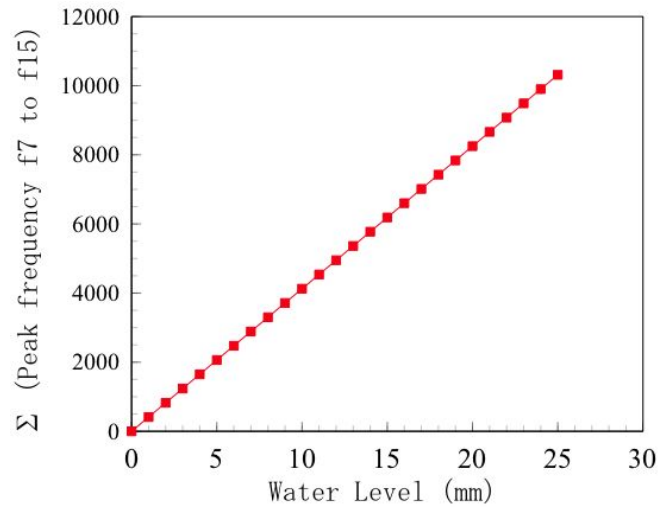
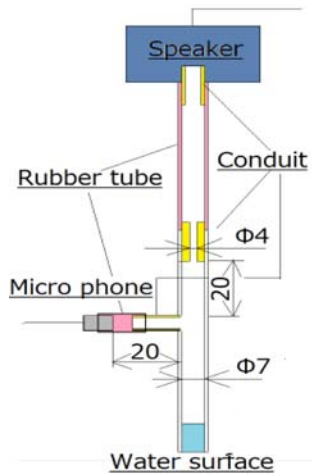
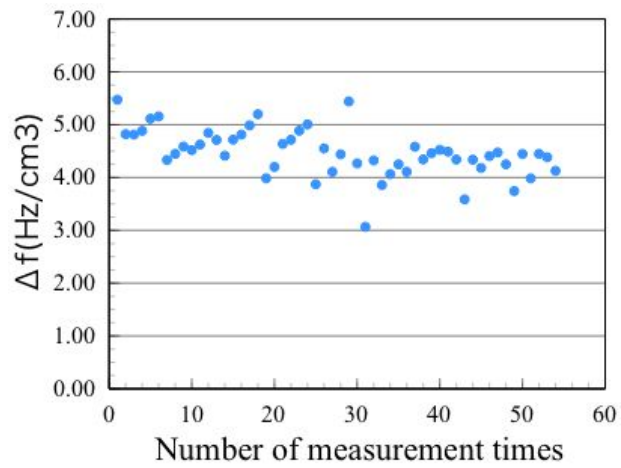


Fig.7 Sum total of resonant frequency between f7 and f15 is linear with water level.

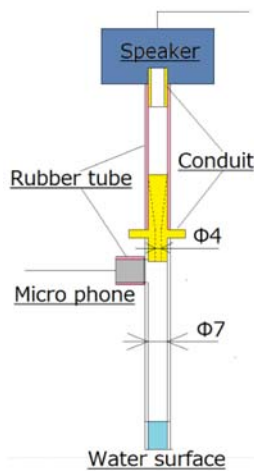


(a) Conduit shape is straight type

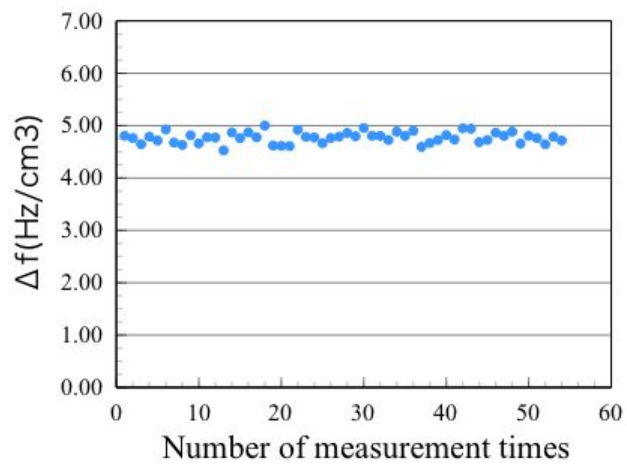


(b) Error of Coefficient  $\Delta f$  in this straight type

Fig.8 Coefficient  $\Delta f$  are alternatively changed between 4.501Hz and 5.958Hz with measurement times.



(a) Conduit shape is taper type



(b) Error of Coefficient  $\Delta f$  in this taper type

Fig.9 Coefficient  $\Delta f$  are alternatively changed between 4.520Hz and 4.991Hz with measurement times. Error of  $\Delta f$  is 0.471Hz.

### 3. 推定結果および考察

#### 3・1 体積測定の精度について

体積の測定値は、音響管内に発生する共鳴周波数の  $f_7$  から  $f_{15}$  の 9 個のピーク周波数を用いて式(5)より計算する。式(5)中の  $\Delta f$  を実験値から定数化し、イワガキの体積  $V$  を計算する。測定槽に物体を投入する前の共鳴周波数  $f_{b7}$  から  $f_{b15}$  が、物体の投入後にそれぞれシフトした値の和を 9 個のピークで平均し、さらに単位体積あたりの値に定数化した。基準点を投入体積 0 とし、50  $\text{cm}^3$  ~ 305  $\text{cm}^3$  の範囲で体積が既知なスケール（正方形のブロック）を 54 個用意し、式(5)によって換算定数  $\Delta f$  を算出した。

$$\Delta f = \frac{\sum_{k=7}^{15} (f_k - f_{bk})}{9 \times V} \quad \left[ \text{Hz} / \text{cm}^3 \right] \quad (5)$$

この換算定数  $\Delta f$  に及ぼす影響として、室内の温度変化が考えられる。室内の温度が変化すると音速が変化し、理論的には温度と  $\Delta f$  はゆるやかな直線関係にあるが、室内の温度範囲における変化に対する  $\Delta f$  の変化は極めて小さいことを実験にて確認した。

Fig.8(a),(b)に、音源と音響管との接続導管がストレート形状のパイプの場合を示す。この場合、換算定数  $\Delta f$  は 3.066Hz ~ 5.440Hz 間に分布しており、その変化は 2.374Hz と大きくなっている。体積測定の実験では、この換算定数を  $\Delta f = 4.57\text{Hz}$  と定め、54 個のブロックスケールの測定を行った。その結果、最大誤差率 22.336%、最小誤差率 0.290%、平均誤差率 7.234% という精度であった。

そこで、Fig.9(a) に示したように導管パイプの絞りをラップ形状にすることで、音響的なインピーダンスの変化を小さくしスムーズな音のエネルギーの伝搬を行い、さらにマイクとの接合距離を縮小しサイドブランチ部の共鳴周波数への悪影響を防いだ。マイクの位置を音響管の上部限度へ移動させることで、音圧が最大となる音の腹の部分での集音を行った。その結果、 $\Delta f$  の変動幅は 4.501Hz ~ 5.958Hz の 1.457Hz となり、音響管の再設計前と比べて  $\Delta f$  の変動幅を小さくすることができた。この場合の体積測定精度は、平均誤差率 3.624%、最大誤差率 11.823%、最小誤差率 0.0374% となった。

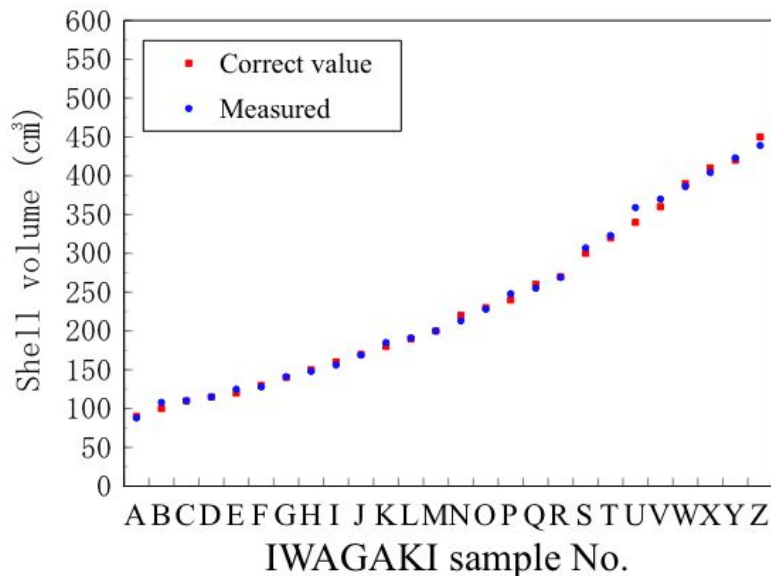


Fig.10 Calculation and measurement of IWAGAKI rock oyster volume. Correct volume is measured with Archimedes' principle. Coefficient  $\Delta f$  is 4.751. Error is between 5.51% and 0.28%.

体積測定時において、水槽に物体を沈下させ音響管内の水面が上昇すると、音響管内の空気柱が圧縮される。そこで、マイクロホンの付け根部分に直径 1mm 程度の空気の抜け穴による気圧調整機構を設けた。さらに導管パイプの径 4.0mm あったものを 2.0mm にまで絞り込むことで平均誤差率は 1.62%，最大誤差率 3.66%，最小誤差 0.043% となった。このときの換算定数  $\Delta f$  は、Fig.9(b)に示したように 4.520Hz~4.991Hz と変動幅が約 0.471Hz ときわめての安定した値を示した。

Fig.10 にイワガキの体積測定結果を示した。このときの換算定数は、 $\Delta f=4.750\text{Hz}$  とした。体積の真値はデジタル式吊り秤を用い、水中に沈下させその浮力から計算した。測定値をこの真値と比較したところ、最大誤差率 5.51%，最小誤差率 0.28% の平均誤差率 1.86%，であり、ゲージブロックを用いた実験値とほぼ同程度の測定精度が得られた。

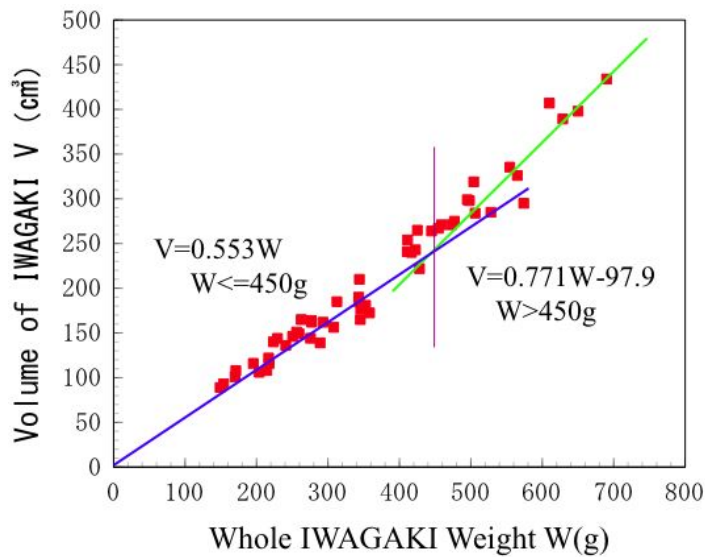


Fig.11 IWAGAKI shellfish volume and whole weight are correlated. Over weight  $W>450\text{g}$ , increasing of shell volume turn to large.

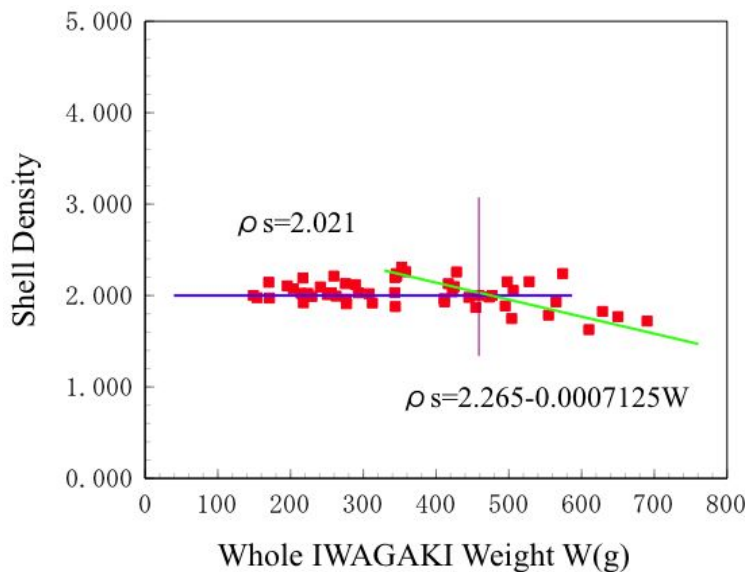


Fig.12 Iwagaki shell density is  $\rho s=2.021$  approximately in range of  $W<450\text{g}$ . However, over weight  $W>450\text{g}$  shell density is decreasing.



Fig.13 Parasitic worm and scale insect (left side picture) are boring IWAGAKI shell (right side picture).

**3・2 実験に使用したイワガキについて** 測定に使用した天然イワガキは 2015 年 6 月から 2017 年 9 月にかけて、山形県の鼠ケ関、吹く浦ならびに新潟県山北町で採取された小型のサイズから特大 (150 g~690 g) のもの合計 50 個である。図 11 は貝全体の重さと体積との関係を示している。体積は吊り秤により空気中と水中の重さの差から求めている (この方法による体積を真値とする)。体積は貝の総重量に対してほぼ直線的に増加するが、450 g を折点として増加傾向が大きくなる。また、身の重さは概ね総重量の 15%~22.5% をしめているが、450 g を越えるサイズでは 8.5%~15.2% と小さくなる。

**3・3 身の重さ推定結果** イワガキの右側殻の表面は、檜肌茸きのため濡れ分 (含水量) は、殻の重さの約 4.5%~8.5% にもなる。測定では保湿を行い、水揚げ後 24 時間以内とした。図 12 は貝の総重量と殻の密度を示している。総重量  $W \leq 450$  g では、ほぼ  $\rho_s = 2.021$  g/cm<sup>3</sup> の定数と近似できる。 $W > 450$  g では、重量  $W$  の関数として  $\rho_s = 2.265 - 7.125W \times 10^{-4}$  g/cm<sup>3</sup> と近似式で表される。また、可食部の含水量は貝の総重量の 6.3%~22.7% と、個体によってその差が大きい。そのため本報告の身の重さは全重量から殻の重さを引いた値としている。可食部の密度は定数  $\rho_e = 1.02897$  g/cm<sup>3</sup> を用いている。

図 14 に種々のサイズ (150 g~690 g) のイワガキを計測し、計算した結果を示す。総重量 450 g までは身の重量比が 15%~20% の範囲にあり、測定値に近い値を示す。計算の誤差は、図 12 に示したように殻密度

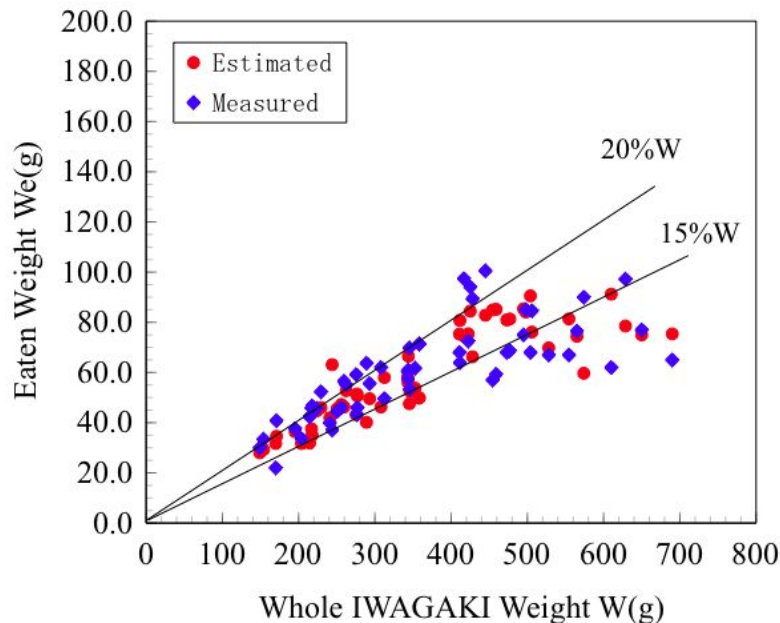


Fig.14 Eaten portion of IWAGAKI was calculated by formula(1). Over IWAGAKI weight  $W > 450$ g, shell density is approximated  $\rho_s = 2.265 - 0.0007125W$ . Two line show 15% - 20% rate of IWAGAKI whole weight.



の値の個体差が大きいと思われる。450 g を超えるイワガキでは、図 13 に示したような殻の一部の石灰化や形状、寄生物の付着により密度に大きな違いがあり、推定値の誤差の大きな要因である。図 15 にこの推定値と測定値の累積誤差の分布を示している。測定数の 4 割で 10% 以内、8 割では 20% 以内の推定誤差である。

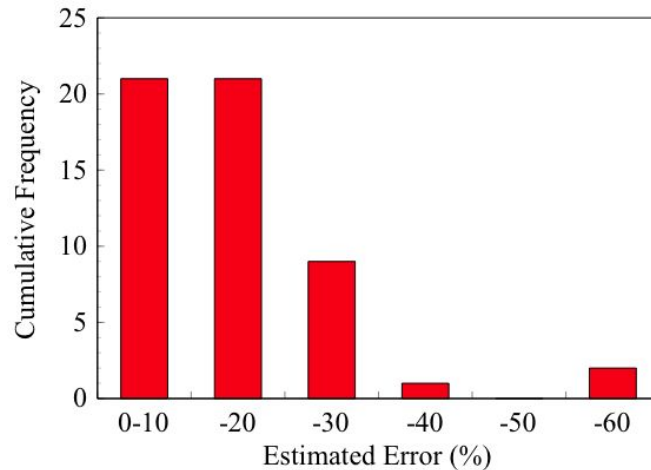


Fig.15 Estimated error was distributed  $\pm 10\%$ . Error is differential of calculation and measurement as shown fig.14. Error is large in big size IWAGAKI(W=600g).

#### 4. 結 言

本研究は、高級食材である天然イワガキの質保証（可食部の重さ明示）を目的に、イワガキ全体の重さと体積の測定により、可食部である中身の重さを推定する方法を提案し、実験により考察した。この凹凸形状のイワガキの体積測定を実用的に行う方法として、計量槽に投入されたイワガキの排除体積を音響管の空気柱共鳴周波数の変化として計測し、これによりイワガキの体積を算出した。可食部の重さを推定するために必要な各密度値は測定値から近似したものを使用した。その結果、イワガキの重さが 150 g～450 g の個体では定性的な傾向はほぼ一致し、この範囲での誤差率は最小 0.3%，最大 25% である。

#### 参考文献

- (1) Yanagimoto, K, "Development of a measure to weigh the edible part in a non-opened raw natural IWAGAKI rock oyster by using acoustic signal", International Food Machinery and Technology Exhibition Research summaries VOL.23, The Japan Food machinery Manufacture's Association, pp.71-72(2016).
- (2) 枝松広明, ヘルムホルツ共鳴を利用したイワガキ軟体部の体積測定, 京都大学地域環境工学科課題研究要旨集 (平成 25 年度), pp.1-2(2013).
- (3) Ministry of Agriculture, Fisheries Agency, "Issues surrounding aquaculture production" (2013)
- (4) Kondo, N, Yosikawa, H, "Volume measurement method using Helmholtz resonance in water", Kyoto University (2011).