

飼育試験によるエゾアワビ餌料環境評価指標の検討

干川 裕*, 高谷義幸

元北海道立総合研究機構中央水産試験場

Consideration of the parameter indicating the food condition of abalone *Haliotis discus hannai* reared in a tank

HIROSHI HOSHIKAWA* and YOSHIYUKI TAKAYA

Formerly: Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan

We investigated the relationship between actual food intake and the obesity level calculated from each weight (total weight, soft body weight, muscle weight, and muscle dry weight) and shell length, muscle moisture content, muscle glycogen content of Ezo abalone *Haliotis discus hannai* reared individually using raw kelp *Saccharina japonica* as bait and varying the amount of feeding to identify indicators suitable for evaluating the feed environment of abalone fishing grounds. The obesity level accurately reflected the amount of food consumed during a state of food shortage, however but no difference in food intake was detected when the amount of food increased. However, the moisture and glycogen contents more accurately reflected the amount of food consumed under a range of feeding conditions, from starvation to satiation.

キーワード：磯焼け，エゾアワビ，筋肉含水率，グリコーゲン含有率，飼育試験，餌料環境評価指標

日本海南西部の積丹半島から渡島半島西岸は北海道におけるエゾアワビ *Haliotis discus hannai* の主漁場の一つである。これらの漁場では 1950 年代から磯焼けが拡大し、海藻群落の消失による餌不足のためウニ類の身入り不良やエゾアワビの成長不良が起こっており (Saito, 1979; 藤田, 1987; 吾妻, 1995, 1997; 赤池ら, 2002; 干川, 2012), 対策として、ウニ類の食圧制御や、施肥及び栄養塩フラックスの増加によりコンブなどの海藻群落を回復させる取り組みが行われている (吾妻, 1997; 川井ら, 1999; 川井ら, 2002; 桑原, 2003; 栗林・赤池, 2014)。

このような磯焼け対策事業の効果を検討する際に、ウニ類では可食部である生殖巣重量が全重量に占める割合 (生殖巣指数) の改善を調べることで藻場回復効果を評価することができる (川井ら, 2002; 金田, 2009) のに対し、アワビ類では肥満度 (重量を殻長の 3 乗で除した指数) が飢餓や餌の量など餌料環境を反映しているという報告があるものの (川尻ら, 1981; 橋本ら, 2006; 滝尾ら, 2009), 餌料の種類による成長差を反映しないことや、飢餓の程度が小さい場合には餌の量に対応し

ていない等の問題点も指摘されている (Carefoot *et al.*, 1993; Jackson *et al.*, 2001; Qi *et al.*, 2010; 干川, 2012; 清本ら, 2019)。

一方、グリコーゲン等のアワビの体成分を生化学指標として、飢餓などのストレスや、漁場の餌料環境などの評価に用いた報告がある (Watanabe *et al.*, 1992; Carefoot *et al.*, 1993; 渡辺ら, 1993; Takami *et al.*, 1995; 中野ら, 1996; 橋本ら, 2006)。グリコーゲンは軟体動物の筋肉中に蓄積されエネルギー源として利用される重要な物質であり (Gddard and Martin, 1966; Carefoot *et al.*, 1993; 宮園・中野, 2000), 筋肉含水率と逆の季節変化を示すことが知られている (Watanabe *et al.*, 1992; 木村, 2003; 零石ら, 2004)。

そこで我々は、無給餌を含む異なる給餌条件下でエゾアワビを長期間飼育し、これまで報告されている全重量肥満度、軟体部重量肥満度、筋肉重量肥満度、筋肉乾燥重量肥満度および生化学的指標として筋肉含水率と筋肉グリコーゲン含有率について、実際に摂餌した餌の量との比較検討を行い、餌料環境評価指標としての有効性を評価した。

試料及び方法

供試アワビ 公益社団法人北海道栽培漁業振興公社で種苗生産され、松前町の漁港内で約2年間養殖されたエゾアワビ（以下、アワビとする）を試験に用いた。2014年に実施した実験1-1および実験1-2に供試したアワビは2014年6月4日に中央水産試験場に搬入し、砂濾過海水を掛け流したFRP製の1トン水槽（内寸縦175 cm, 横90 cm, 深さ70 cm, 水深60 cm）に設置したトリカルネット製のカゴ（縦70 cm, 横70 cm, 高さ50 cm, 水面までの深さ40 cm, 目合2 cm, シェルターあり）に収容して、試験開始（6月18日）まで無給餌で蓄養した。2015年の実験2に用いたアワビは同年5月15日に搬入し、試験開始（6月23日）まで2014年と同様に蓄養した。いずれの実験とも飼育試験開始時に全ての供試貝の殻長と全重量を測定した。また、各肥満度および生化学的指標の開始時の値を得るために、飼育試験に供試しなかったアワビから2014年7月2日と7日に合計20個体、2015年6月30日と7月6日に合計16個体をそれぞれ無作為に抽出し、殻長、全重量、軟体部重量、筋肉重量、筋肉含水率および筋肉グリコーゲン含有率（2015年のみ）を測定した。

実験1-1 アワビの成熟・産卵時期にあたる2014年6月18日から9月16日まで90日間飼育を行った。飼育試験では前述の1トン水槽にトリカルネット製の小カゴ（縦13 cm, 横10 cm, 高さ22 cm, 水面までの深さ15 cm, 目合5 mm, シェルターなし）を計64個配置し、搬入したアワビから無作為に抽出した計64個体を1個体ずつ収容した。餌は噴火湾で養殖された生鮮マコブ *Saccharina japonica* を用い、無給餌の0%と、1日当たりの給餌量を開始時平均全重量の1%、3%および5%に調整した3給餌区の計4区（各16個体）を設定し、1週間に1回7日分を給餌した。給餌時にカゴ内に残餌があった場合は、取り出してその重量を測定し、給餌量との差を摂餌量とした。各個体の総摂餌率（Total food intake ratio : TFIR）および日間摂餌率（Daily food intake ratio : DFIR）を下記の式で求めた。

$$\text{総摂餌率} = \text{総摂餌量} / ((\text{開始時全重量} + \text{終了全重量}) / 2) \times 10^2$$

$$\text{日間摂餌率} = \text{総摂餌量} / ((\text{開始時全重量} + \text{終了全重量}) / 2) / \text{給餌日数} \times 10^2$$

これらは後述する実験1-2および実験2においても、同様に算出した。

水温調整をしていない砂濾過海水を、1トン水槽全体での日間換水率が約15回になるように掛け流し、エアーストーンで通気した。水温は飼育開始時に14℃であっ

Water temperature 2014 and 2015

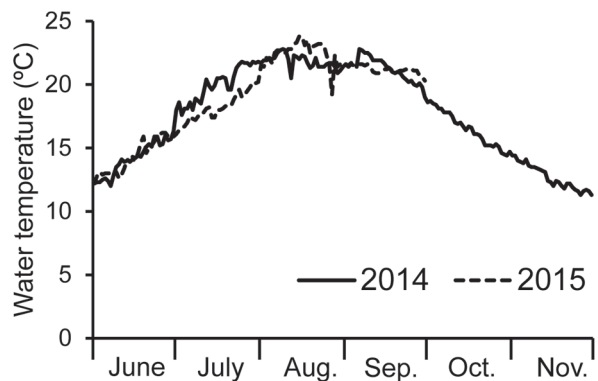


Fig.1 Temperature of the seawater used for *Haliotis discus hannai* rearing experiments in 2014 (Experiment 1-1 and Experiment 1-2) and 2015 (Experiment 2). The temperature was measured at seawater intake equipment at 10:00 every morning.

たがその後徐々に上昇し、8月上旬には22℃、試験終了時の9月中旬には21℃であった（Fig. 1）。

実験1-2 飼育開始時期と試験施設および給餌方法は実験1-1と同様であったが、飼育期間は実験1-1を延長して成熟から産卵後の回復時期を含む2014年11月25日までの160日間とした。9月中旬以降、飼育水温は下降を続け11月下旬には12℃となった（Fig. 1）。

実験2 飼育方法は実験1-1および実験1-2と同様だったが、給餌量をさらに増やした場合の各指標の変化を調べるために開始時平均全重量の1%、3%、5%および10%となる給餌区を設定した。飼育期間は実験1-1とほぼ同様に2015年6月23日から9月25日の94日間だった。飼育水温は試験開始時には15℃だったが、8月には23℃まで上昇し、試験終了時の9月下旬には21℃であった（Fig. 1）。

各肥満度 全重量肥満度（condition index : CI）、軟体部重量肥満度（condition index of soft body : CIS）、筋肉重量肥満度（condition index of muscle : CIM）、筋肉乾燥重量肥満度（condition index of dried muscle : CIDM）を下記の式で求めた。開始時のCIは、各実験に供試した全個体（64個体）の値を用いた。CISとCIMおよびCIDMの開始時の値は、前述したように供試貝とは別に測定したアワビの値を用いた。

$$CI = \text{全重量 (g)} / SL^3 \times 10^5$$

$$CIS = \text{軟体部重量 (殻以外の軟体部重量 (g))} / SL^3 \times 10^5$$

$$CIM = \text{筋肉重量 (軟体部の筋肉重量 (g))} / SL^3 \times 10^5$$

$$CIDM = \text{筋肉乾燥重量 (筋肉重量 (g) \times (1 - \text{筋肉含水率} / 100))} / SL^3 \times 10^5$$

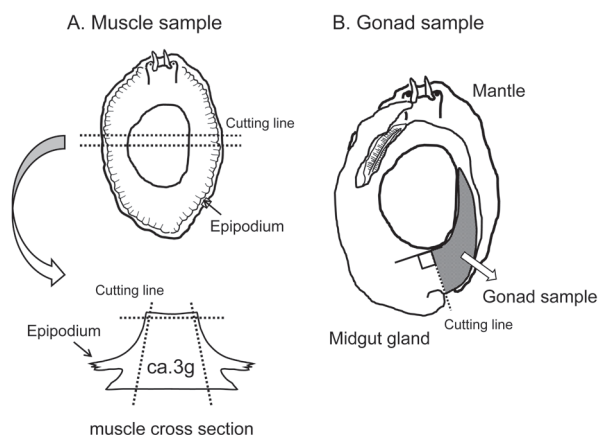


Fig.2 Sampling method and position for muscle and gonad sampling of *Haliotis discus hannai*.

ただし、SLは殻長（mm）を示す。

筋肉含水率（以下、含水率とする） アワビの筋肉は、殻についている閉殻筋と移動や海底への付着に用いる足部筋肉からなっており（Olaechea *et al.*, 1996）、含水率は閉殻筋と足部筋肉の中央部で低く、足部筋肉縁辺部では高い（渡辺ら, 1993）。部位によるばらつきを避けるため、含水率が低い閉殻筋と足部筋肉の中央部付近で正中線に直交するように厚さ約3 mmで切断した筋肉小片を含水率測定に用いた（Fig. 2）。この筋肉小片が殻に付着していた面には殻内部の真珠層の碎片を含む個体があったため、Fig. 2に示したように閉殻筋上面を厚さ1 mmほど切除した。また、上足突起に付着する水分の影響を除くために上足を含む両側面も取り除いた。これらの処理を行った筋肉小片（湿重量で約3 g）を、事前に乾燥重量を測定した市販のアルミカップに入れ湿重量を小数点以下4桁まで電子天秤（AE240, メトラー社製）で測定した後に乾燥機（DS64, ヤマト科学株式会社製）により60℃で24時間乾燥後、恒量に達するまで105℃で72時間以上乾燥した。冷却後に乾燥重量を測定し、下記の式で含水率を求めた。

含水率 = (筋肉小片湿重量 - 筋肉小片乾燥重量) / 筋肉小片湿重量 × 10²

筋肉グリコーゲン含有率（以下、グリコーゲン含有率とする） 閉殻筋から別の筋肉小片（湿重量0.2 g程度）を切り出し、秤量済みラウンドチューブ（14 mL ポリプロピレンラウンドチューブ BD ファルコン型番 352059）に入れて湿重量を測定した。その後、真空凍結乾燥して乾燥重量を求めた。これに30% KOHを加えて加温溶解し、Watanabe *et al.*, (1992)の方法でグルコースを抽出した。グルコースは、臨床用検査キット（グルコースC II テストワコー, 和光純薬製）を用いて定量したが、

定量の際には試薬の容量を調整の上、マイクロプレートを用いてマイクロプレートリーダー（INFINITE F50, TECAN 社製）の波長490 nmで測定した。これに0.9を乗じてグリコーゲン量とし、乾燥重量当たりの含有率（%）を算出した。

生殖腺指数 中腸腺および生殖腺の体積を求めるために、中腸腺と生殖腺を含む角状突起をFig. 2に示したように筋肉部分から取り外し、70%エタノールで固定した。この標本を切断部から先端にかけて長さ約1 cmごとに分割し、断面の長径と短径を測定した。清本ら（2016）の手法と同様に、先端は楕円錐とし、基部は楕円錐台として体積を求めた。全体体積から中腸腺体積を引いた値を生殖腺体積とし、下記の式で生殖腺指数（GI）を求めた。

$$GI = \text{生殖腺体積 (mm}^3\text{)} / SL^3 \times 10^4$$

殻長と重量の成長 殻長の成長については、下記に示した終了時と開始時の差を飼育日数で除した日間成長量（DGA）を用いた。

$$DGA (\mu\text{m/日}) = (SL_b - SL_a) / \text{飼育日数} \times 10^3$$

ただし、SL_aは開始時殻長（mm）、SL_bは終了時殻長（mm）を示す。

体重の成長については、下記に示した瞬間成長率（SGR）を用いた。

$$SGR = (\ln W_b - \ln W_a) / \text{飼育日数} \times 10^4$$

ただし、W_aは開始時湿重量（g）、W_bは終了時湿重量（g）を示す。

統計検定 開始時の各給餌区の殻長と全重量、全重量肥満度（CI）では正規性と等分散が認められたため、一元配置分散分析（以下ANOVA）により給餌区間の平均値の差を検定した。有意差が検出された実験2の肥満度については多重比較としてTukey-Kramer検定を行った。飼育試験終了時における給餌区間の日間摂餌率、各肥満度、含水率、グリコーゲン含有率、殻長日間成長量、体重の瞬間成長率および生殖腺指数では、正規性あるいは等分散が認められなかったため、Kruskal-Wallis検定を行い、給餌区間および開始時との間で有意差が認められた場合には、多重比較としてSteel-Dwass検定を行った。総摂餌率と各肥満度、含水率およびグリコーゲン含有率との相関分析にはPearsonの積率相関係数を用いた。その際に、各指標値の有効性をさらに詳しく調べるため、4給餌区を対象にした場合、最少給餌区を除く3給餌区（実験1-1と1-2では1%区、3%区および5%区、実験2では3%区、5%区および10%区）を対象にした場合、そして最少給餌区と次に少なかった給餌区を除く2給餌区だけを対象とした場合に分けて、相関関係の有意性を検討した。これらの計算には、フリー統計ソ

フト R ver.4.3.3 (R Core Team. R Foundation for Statistical Computing, Vienna) を用い, 有意水準は 5% とした。

結 果

供試員の開始時殻長, 重量および全重量肥満度 両年の試験開始時に測定したアワビの殻長, 全重量および全重量肥満度 (CI) を Table 1 に示した。実験 1-1 と 1-2 に用いたアワビの平均殻長は 63.1 ~ 64.5 mm, 平均全重量は 35.9 ~ 39.9 g, 平均 CI は 13.9 ~ 14.8 であり, 両実験とも給餌区間では差はなかった (ANOVA $p > 0.05$)。実験 2 に用いたアワビの平均殻長は 67.6 ~ 68.6 mm, 平均全重量は 43.7 ~ 46.3 g, 平均 CI は 13.8 ~ 14.4 であった (Table 1)。殻長と全重量では給餌区間で差は認められなかった。平均 CI は給餌区間で有意差が検出されたが (ANOVA $p < 0.05$), 多重比較では有意差のある給餌区の組み合わせはなかった (Tukey-Kramer 検定, $p > 0.05$)。

給餌率と摂餌率 Fig. 3 に各実験における給餌率と日間摂餌率の関係を示した。設定された給餌率に応じて日間摂餌率は変化し, 各給餌区間で有意な差が認められた (Steel-Dwass 検定, $p < 0.01$)。日間摂餌率は給餌率 1% では給餌率とほぼ同様であったが, 給餌率が高くなるのに伴いそれを下回り, 給餌率 5% に対して 3.4 ~ 4.4%, 10% に対して 5.1% (いずれも中央値) であった (Fig. 3)。

供試員の生残率, 給餌率と各肥満度, 含水率およびグリコーゲン含有率の関係 各実験における供試員の生残率は, 実験 1-1 では全ての給餌区で 100%, 実験 1-2 では 1% 区と 5% 区が 100%, 0% 区が 81.3%, 3% 区が 93.8%, そして実験 2 では 1% 区と 3% 区が 100%, 5% 区と 10% 区が 93.8% だった。

Fig. 4 に各実験における給餌率と各指標値の関係を示した。各指標の傾向は以下のとおりであった。

各肥満度

実験 1-1 および実験 1-2

給餌率 0% 区は開始時および他区に対して有意に低く (CI, CIS, CIM, CIDM), 特に実験 1-2 で顕著であった。

給餌率 1% 区は CIM のみ開始時と同等だったが, それ以外は開始時より低下した (CI, CIS, CIDM)。

給餌率 3 ~ 5% 区は開始時と同等の肥満度が多かったが (実験 1-2 の CI, CIS, CIM, CIDM), 低下したもの (実験 1-1 の CI, CIS) もあった。

給餌率 1 ~ 5% 区では給餌率の増加に応じて増加傾向を示した (CI, CIS, 実験 1-2 の CIM, CIDM) が, 傾向が不明瞭な場合 (実験 1-1 の CIM) もあった。

実験 2

CI は給餌率 1 ~ 10% の全区で開始時より有意に低下した。

給餌率 1% 区は他区よりも低い傾向が顕著であった (CI, CIS, CIM の 3% 区および 5% 区, CIDM)。

いずれの肥満度でも給餌率 3 ~ 10% 区の差が検出されなかった (CI, CIS, CIM, CIDM)。

含水率 (MC)

Table 1 Initial size and condition index of *Haliotis discus hannai* used in the experiment with four food-ratio treatments ($n = 16$ in each treatment)

Experiment	Treatment	Shell length Mean $\pm$ SD	Wet weight Mean $\pm$ SD	Condition index (CI) Mean $\pm$ SD
1-1	0%	64.11 $\pm$ 2.34	37.83 $\pm$ 4.43	14.43 $\pm$ 1.21
	1%	64.19 $\pm$ 1.40	39.25 $\pm$ 4.44	14.82 $\pm$ 1.04
	3%	64.11 $\pm$ 2.12	37.90 $\pm$ 3.90	14.39 $\pm$ 1.32
	5%	63.48 $\pm$ 1.25	35.95 $\pm$ 4.11	14.03 $\pm$ 1.18
1-2	0%	63.70 $\pm$ 2.39	36.09 $\pm$ 4.25	13.93 $\pm$ 1.10
	1%	64.53 $\pm$ 1.75	39.08 $\pm$ 2.58	14.55 $\pm$ 0.90
	3%	63.15 $\pm$ 1.91	36.80 $\pm$ 3.77	14.60 $\pm$ 1.06
	5%	64.15 $\pm$ 1.75	37.10 $\pm$ 4.56	14.04 $\pm$ 1.44
2	1%	68.13 $\pm$ 1.39	43.78 $\pm$ 2.87	13.84 $\pm$ 0.67
	3%	68.49 $\pm$ 1.39	46.35 $\pm$ 2.69	14.43 $\pm$ 0.73
	5%	67.66 $\pm$ 1.71	44.79 $\pm$ 2.54	14.47 $\pm$ 0.70
	10%	68.68 $\pm$ 1.09	45.29 $\pm$ 2.55	13.98 $\pm$ 0.63

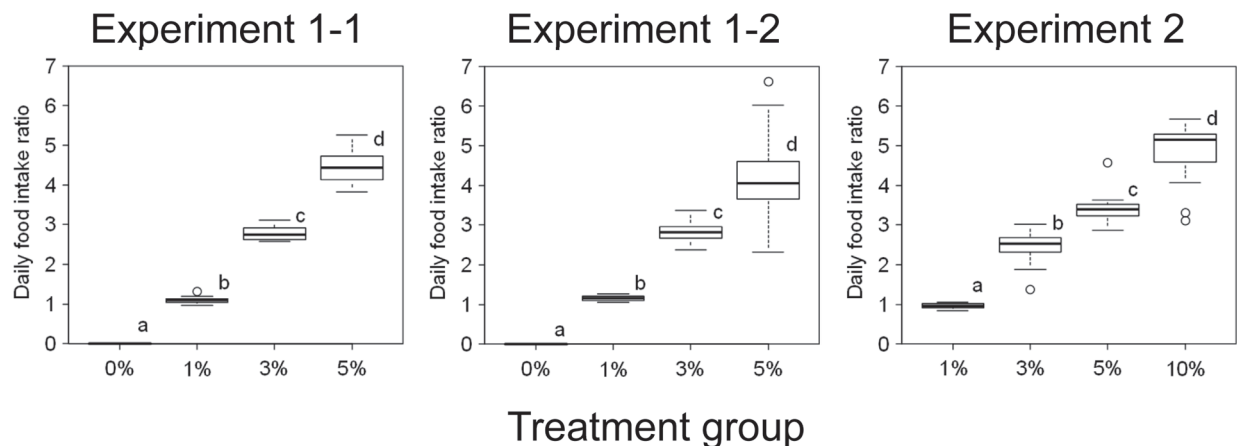


Fig. 3 Food intake ratio of *Haliotis discus hannai* in each treatment group.

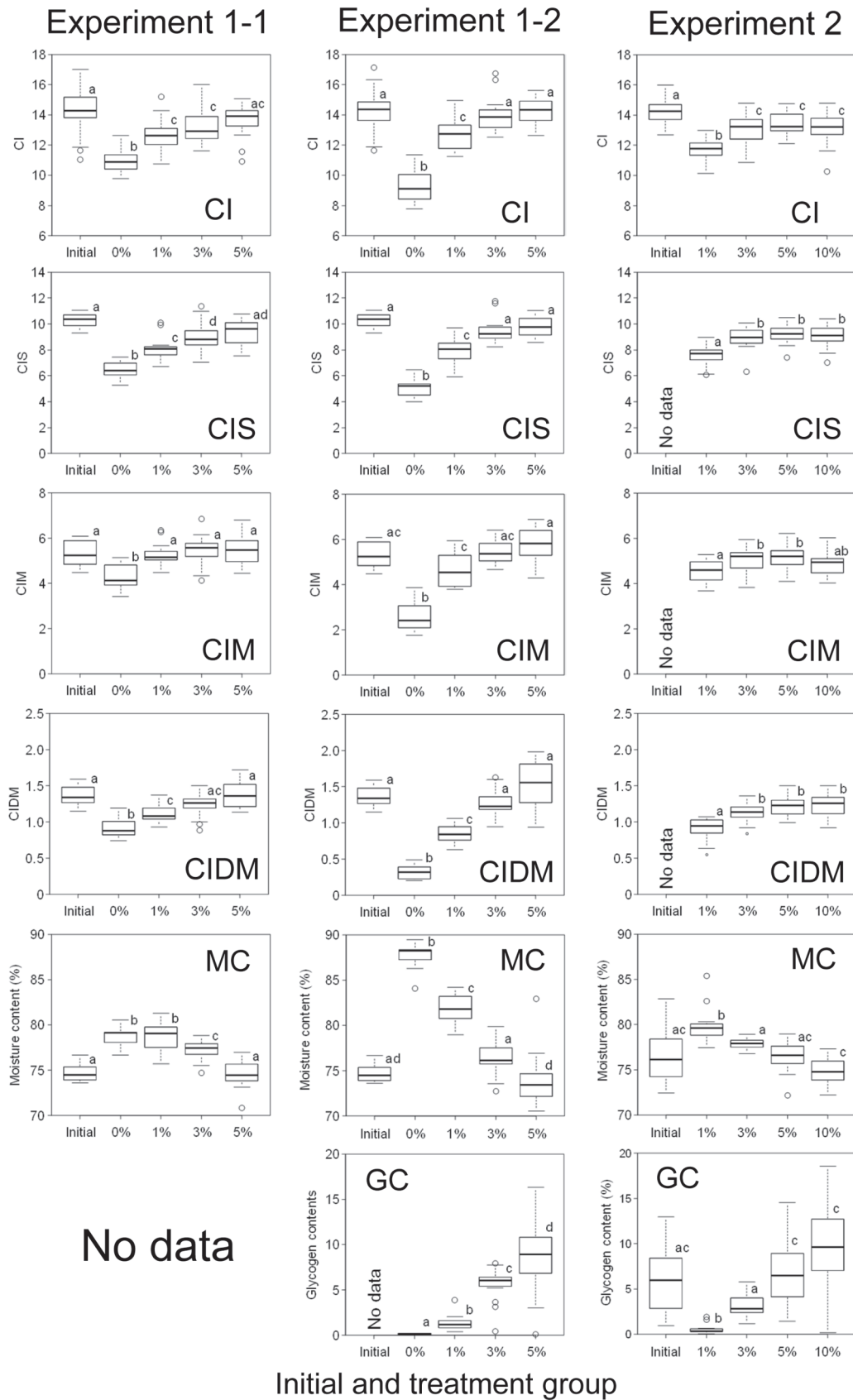


Fig.4 Condition index (CI), Condition index of soft body (CIS), Condition index of muscle (CIM), Condition index of dried muscle (CIDM), moisture content (MC), and glycogen content (GC) of *Haliotis discus hannai* reared in each treatment group. Superscript letters indicate significant differences among groups ($p < 0.05$, Steel-Dwss test).

実験 1-1 および実験 1-2

給餌率 0%区および 1%区で開始時 (約 75%) よりも顕著に上昇した (最大 88.2%)。

給餌率 1 ~ 5%区では給餌率の増加に応じて明瞭に低下した。

給餌率 3%区 (実験 1-2 のみ) および 5%区では開始時と同等まで低下した。

実験 2

給餌率 1%区は開始時および他区より有意に上昇した (79.6%)。

給餌率 1 ~ 10%区では給餌率の増加に応じて明瞭な低下傾向を示した。

給餌率 10%区は 3%区よりも有意に低下した。

グリコーゲン含有率 (GC)

実験 1-2

給餌率 0 ~ 5%区で給餌率の増加に伴い 0.1% から 8.9%まで明瞭に増加し, 各給餌区間で有意差があった。

実験 2

給餌率 1%区 (0.3%) は開始時 (5.9%) および他区より有意に低下した。

給餌率 3 ~ 10%区では給餌率の増加に伴い 2.8% から 9.6%まで増加し, 5%区および 10%区は 3%区よりも有意に高かった。

Fig. 5 に実験 1-2 および実験 2 における含水率とグリコーゲン含有率の関係を示した。両者の間には強い負の相関関係が認められた ($p < 0.001$)。

成長と成熟に及ぼす給餌率の影響 給餌率別の殻長日間成長量 (以下, DGA とする) と体重瞬間成長率 (以下, SGR とする), および生殖腺指数 (以下, GI とする) を Fig.6 に示した。

DGA

実験 1-1 では 1.1 ~ 8.3 $\mu\text{m}/\text{日}$ と全般に低く, 給餌率間でも差は認められなかった。

実験 1-2 では給餌率の増加に応じて増加し, 3%区と 5%区は約 10.0 $\mu\text{m}/\text{日}$ で 1%区 (0.9 $\mu\text{m}/\text{日}$) より有意に高かった。

実験 2 でも同様に 3 ~ 10%区では 13.3 ~ 21.2 $\mu\text{m}/\text{日}$ と高く, 5%区と 10%区では 1%区 (4.2 $\mu\text{m}/\text{日}$) よりも有意に高かった。

SGR

-30 から 10 程度の間で変化した。

各実験ともに給餌率の増加に伴い増加した。

中央値が 0 以上の値となったのは実験 1-1 の 5%区, 実験 1-2 の 3%区と 5%区, および実験 2 の 5%区と 10%区のみであった。

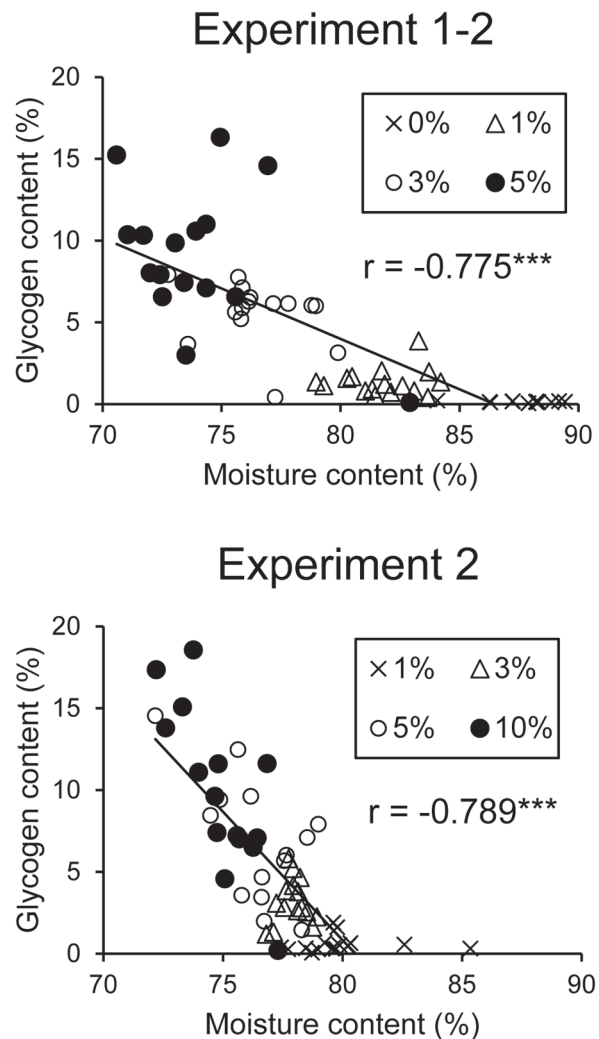


Fig.5 Relation between the moisture and the glycogen contents in Experiment 1-2 and Experiment 2. (***: $p < 0.001$)

GI

0 から 60 程度の間で変化した。

各実験ともに給餌率の増加に伴い増加した。

飼育期間が異なる実験もあるが, ある給餌率に対する GI は各実験とも似た値であった。

総摂餌率と各肥満度, 筋肉含水率およびグリコーゲン含有率との関係 各実験における個体ごとの総摂餌率に対する, 各肥満度, 筋肉含水率および筋肉グリコーゲン含有率の関係を Fig. 7 に示した。また, Table 2 に 4 給餌区全てを対象にした場合, 最少給餌区を除く 3 給餌区を対象にした場合および最少給餌区と次に少なかった給餌区を除く 2 給餌区を対象とした場合の, 総摂餌率と各指標との相関係数および p 値を示した。4 給餌区全てを対象にした場合は, 総摂餌率と全ての指標との間に有意な相関関係が認められた ($p < 0.05$)。含水率だけが負の

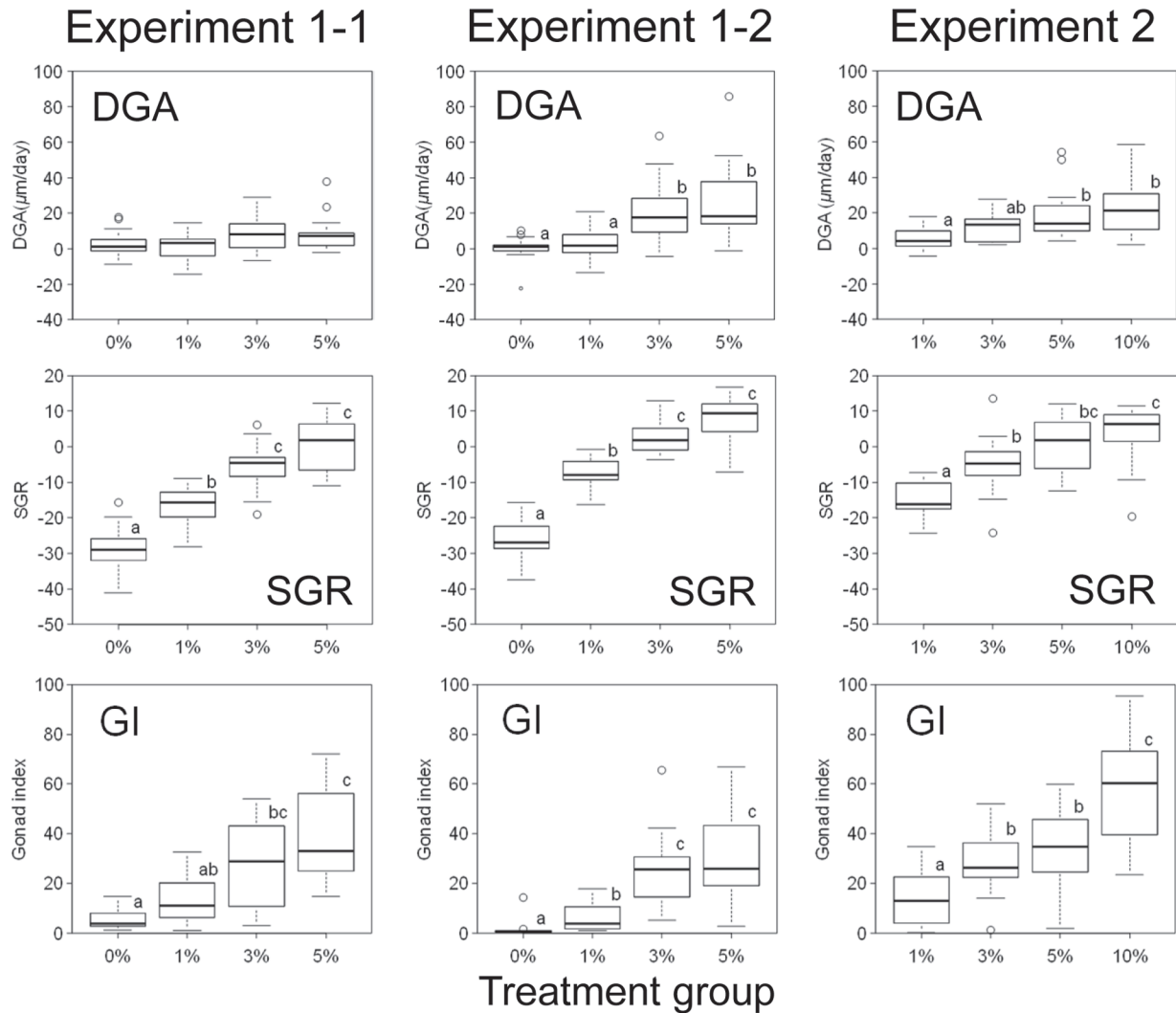


Fig.6 Daily growth amount in shell length (DGA), growth ratio in body weight (SGR), and gonad index (GI) of *Haliotis discus hannai* reared in each treatment group. Superscript letters indicate significant differences among groups ($p < 0.05$, Steel-Dwass test).

相関関係を示し、他の指標は正の相関関係を示した。また、実験 1-1 では 0% 区を除く 3 給餌区での相関関係は CIS と CIDM および含水率でのみ有意であり、0% 区と 1% 区を除く 2 給餌区では筋肉含水率のみが有意であった。実験 1-2 では、3 給餌区ではすべての指標が有意であったが、2 給餌区では CIDM、含水率およびグリコーゲン含有率だけが有意であった。実験 2 では 1% 区を除く 3 給餌区で有意であったのは CIDM と含水率およびグリコーゲン含有率で、さらに 2 給餌区では実験 1-1 と同様に含水率とグリコーゲン含有率だけが有意であった (Table 2)。これらの結果は、各肥満度 (実験 1-2 の CIDM を除く) は総摂餌率が 300 ないし 400 以上になると頭打ちとなり変化が少なくなる一方、含水率とグリコーゲン含有率は総摂餌率の全範囲にわたり、それに応じて有意に変化することを示している。

考 察

本研究で設定した給餌区は実験 1-1 および 1-2 が 0% 区 (無給餌) から 5% 区まで、実験 2 が 1% 区から 10% 区までのそれぞれ 4 段階だったが、給餌区に対する実際の日間摂餌率は 5% 区以上では減少し、特に実験 2 の 10% 区の日間摂餌率は 5.1% と設定値の半分だった (Fig. 3)。このことから、5% 区と 10% 区における給餌量はアワビにとって飽食量かそれ以上であったと考える。

飼育実験実施期間の水温は、開始時の 6 月下旬は 15°C であったが 8 月には 23°C になり、実験 1-1 と実験 2 が終了した 9 月は 21°C、実験 1-2 が終了した 11 月下旬には 12°C まで低下した (Fig. 1)。エゾアワビは水温が 8.2°C から 20°C の範囲では、水温の上昇に伴い摂餌率が増加することが報告されている (Uki and Kikuchi,

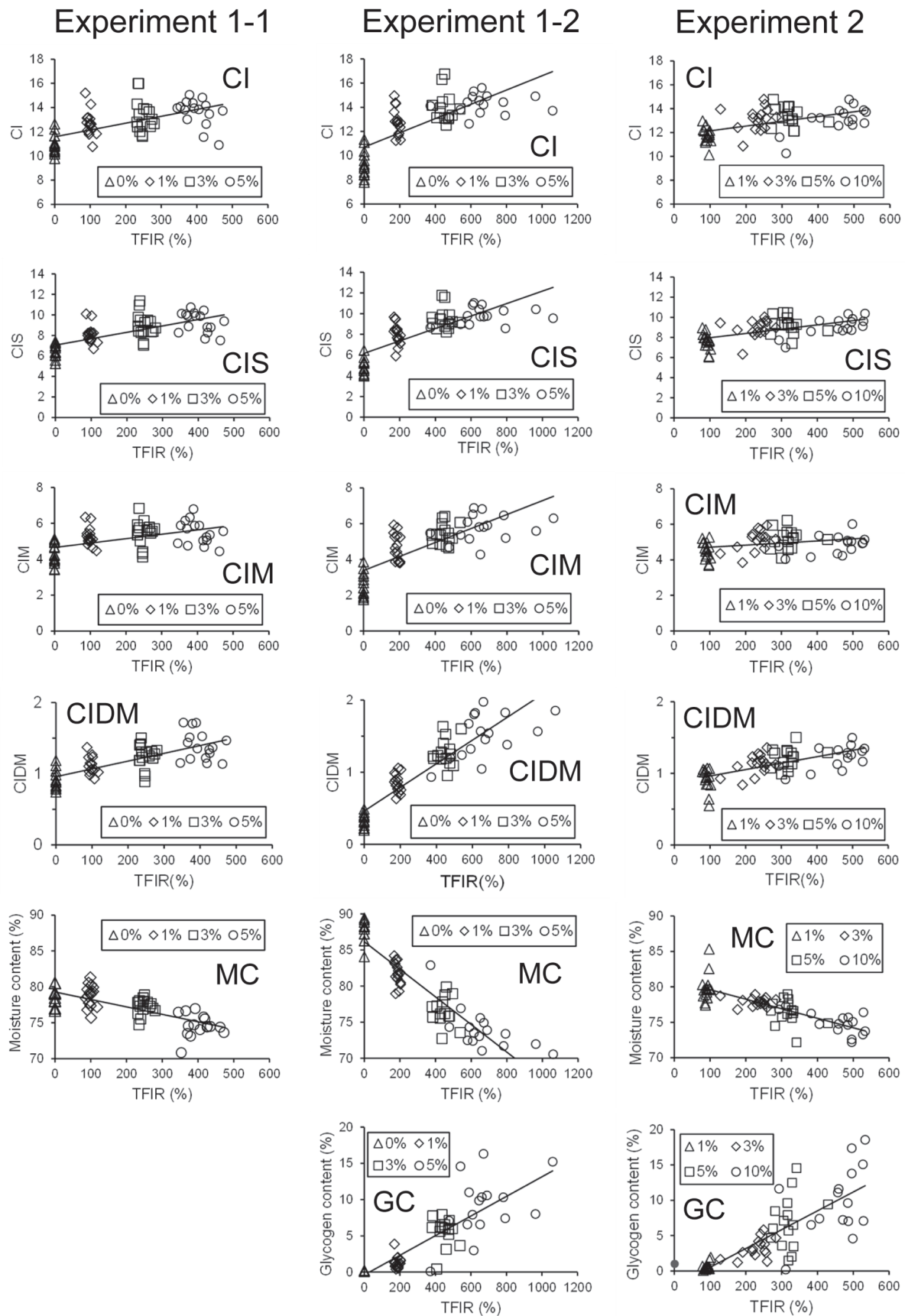


Fig.7 Relationship between the total food intake ratio (TFIR) and each parameter (CI, CIS, CIM, CIDM, moisture content, and glycogen content).

Table 2 Correlation efficiency between total food intake ratio and each parameter (CI, CIS, CIM, CIDM, moisture content, and glycogen content) in three groups as the full model, without the minimum treatment group, and without the minimum and next fewer treatment group with *p*-value for the correlation efficient

		Full model		Without "0%"		Without "0%" & "1%"		
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	
Experiment 1-1	Parameter	CI	0.597	1.894E-07	0.106	0.471	-0.044	0.8079
		CIS	0.681	5.768E-10	0.388	0.0063	0.041	0.8235
		CIM	0.493	3.44E-05	0.259	0.075	0.013	0.9412
		CIDM	0.722	1.26E-11	0.538	7.94E-05	0.312	0.082
		Moisture content	-0.746	1.457E-12	-0.767	2.025E-10	-0.677	2.08E-05
		Full model		Without "0%"		Without "0%" & "1%"		
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	
Experiment 1-2	Parameter	CI	0.730	3.365E-11	0.557	4.78E-05	0.099	0.5947
		CIS	0.788	7.484E-14	0.582	1.76E-05	0.209	0.2571
		CIM	0.792	6.956E-13	0.460	0.0011	0.323	0.0754
		CIDM	0.902	2.2E-16	0.820	1.63E-12	0.591	0.00046
		Moisture content	-0.924	2.2E-16	-0.874	6.25E-17	-0.692	1.56E-05
			0.848	2.2E-16	0.798	1.822E-11	0.578	0.00069
		Full model		Without "1%"		Without "1%" & "3%"		
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	
Experiment 2	Parameter	CI	0.517	1.66E-05	0.158	0.2930	0.172	0.3611
		CIS	0.566	1.69E-06	0.246	0.0986	0.208	0.2692
		CIM	0.289	0.02252	0.007	0.9635	-0.042	0.8237
		CIDM	0.666	3.26E-09	0.455	0.00145	0.336	0.0694
		Moisture content	-0.801	5.65E-15	-0.748	2.30E-09	-0.611	3.30E-04
			0.800	1.01E-14	0.687	1.82E-07	0.508	0.00408

Bold letter shows the significant correlation ($p < 0.05$)

1982)。水温の変化は飼育実験におけるアワビの摂餌活動に影響を及ぼしたと推察されるが、全ての給餌区が同じ水温条件であったことから、実験結果に大きく影響したとは考えにくい。

アワビ類では飢餓状態になると筋肉や中腸腺に含まれるグリコーゲンやトリグリセライドが5～10日で減少し、その後は筋肉内のタンパク質を分解してエネルギー源とし長期間の飢餓に耐える（瀬川，1991；Carefoot *et al.*, 1993；Takami *et al.*, 1995）。静岡県下田市沿岸で報告された黒潮の大蛇行による磯焼けでは、沿岸のカジメ群落の著しい枯死とアワビの死亡が起こった（川尻ら，1981）。下田市沿岸の磯焼け漁場から採集されたアワビは採集直後から水分と体液が滲み出して軟体部が委縮しており、飢餓に起因する筋肉内のタンパク質分解が起こっていたと推察される。

川尻ら（1981）は、飽食および絶食条件で飼育したアワビの肥満度と、カジメ群落および磯焼け漁場から採集

したアワビの肥満度を比較した結果、肥満度が餌料条件を反映していることを報告している。造成人工礁のカゴ内に放流したアワビ稚貝について給餌区と無給餌区で肥満度を調べた報告では、給餌区の肥満度が無給餌区より高い値を示した（滝尾ら 2009）。一方、北海道南西部沿岸で、海藻が生育している漁場と磯焼け漁場から採集したアワビの CIS を季節別に調べた報告（干川，2012）では、海藻が繁茂する6月の CIS が産卵期の9月および産卵後の11月に比べて高かったが、いずれの季節でも餌料環境の異なる漁場間で CIS に差は認められなかった。滝尾ら（2009）の飼育試験では無給餌区のアワビは摂餌行動がカゴ内に制限されていたのに対して、干川（2012）が調査した漁場では磯焼けの場所でも無節サンゴモ上の付着珪藻類や小型の海藻、流れ藻などの餌料が存在したことと、アワビ自身が摂餌のために移動したことで CIS に差を生じるほど摂餌量に違いがなかった可能性が考えられる。本研究では各肥満度とも給餌率0%区の値が他の

給餌区に比べて有意に低かった (Fig. 4)。特に飼育期間が 160 日と長かった実験 1-2 ではその傾向が顕著であった。このように飢餓状態の期間が長くなると、各肥満度が低下することは、川尻ら (1981) および滝尾ら (2009) の結果と一致していた。以上のことから、各肥満度は飢餓状態のアワビを判定する有効な指標であると考えられる。

一方、3%以上の給餌率では、いずれの実験においても各肥満度に給餌区間の差は検出されず、総摂餌率との相関関係も CIDM 以外では認められなかった (Fig. 4, Table 2)。DGA および SGR を検討すると (Fig. 6)、1%以下の給餌率では DGA は 0 前後、SGR はマイナスの値であるのに対し、3%以上では概ね両者ともプラスに転じていた。したがって、0%区および 1%区では殻長は変化せず重量だけが減少したため両者を元に算出した各肥満度は低下したのに対し、給餌率が 3%区以上の給餌区では殻長と重量の両方が成長した結果、各肥満度の変化が少なくなり給餌率や総摂餌率の差を反映しなかったと推察される (Fig. 7)。すなわち、飢餓などの過酷な条件下では各肥満度はその状況をよく反映するが、藻場が回復して餌条件が改善された場合には、その程度の差を肥満度で評価することは困難であることを示唆している。なお、CIDM は筋肉湿重量を筋肉含水率で補正しており、実験 1-2 では飼育期間の長期化に伴い給餌区間での含水率の差が大きくなった (Fig. 4) ことにより、総摂餌率との間に他の肥満度では確認できなかった有意な相関関係が認められたと推察される。

アワビと同じ植食性腹足類のサザエでは、飢餓状態の評価で RNA/DNA 比やグリコーゲン含有量など生化学的指標の有効性が示唆された (Okumura *et al.*, 2002)。アワビのヤセ貝は正常貝に比べ水分が多く、グリコーゲン含有量が少ない (橋本ら, 2006)。クロアワビの含水率は餌のある春から夏にかけて 59.1 ~ 61.5%と低くなり、餌が少ない冬には 75.2 ~ 76.5%と高くなった (Watanabe *et al.*, 1992)。また、同報告ではグリコーゲンは逆に夏に 6%以上と高く、冬には 3.2%と低かった。岩手県沿岸の漁場から採集したエゾアワビ足部筋肉の構成成分は水分、タンパク質およびグリコーゲンで、特に水分は約 69%と最も多かった (中野ら, 1996)。本研究で飢餓状態の 0%区の含水率は 79.0 ~ 88.2%, 飽食状態の 5%区および 10%区の含水率は 73.4 ~ 74.8%であった (Fig. 4)。これらの値は中野ら (1996) や Watanabe *et al.*, (1992) に比べると高かった。この理由として、アワビ類の含水率を求める方法の違いが影響している可能性が挙げられる。本研究では、アワビが生きている状態で軟体部を殻から外し、ただちに足部筋肉小片を切り出して分析用サ

ンプルとしたが、中野ら (1996) は岩手県で採集したアワビを -50°C の冷凍庫で一旦凍結してから東京に搬送し、解凍後に腹足筋を採取した。また、その腹足筋を液体窒素で再び急速凍結し分析を行うまで -40°C で保存した。一方、海洋深層水を利用して飽食給餌で 1 年間養殖したアワビの筋肉含水率は 72.9 ~ 74.4%であり (原田ら, 2012)、我々の結果と同様の値だった。

ホタテガイ閉殻筋の一般成分について季節変化を調べた研究 (木村, 2003; 雫石ら, 2004) では、Watanabe *et al.*, (1992) や本研究の結果と同様にグリコーゲン量と水分量は逆の変動を示した。ホタテガイの閉殻筋はエネルギー蓄積器官として重要であり、主な蓄積物質はグリコーゲンとタンパク質で、特にグリコーゲンは優先的に蓄積と消費される特性がある (宮園・中野, 2000)。アワビでも前述したように飢餓状態ではグリコーゲンはエネルギー源としてすぐに消費されるため、餌条件の違いを検出する指標として有効であると考ええる。また、含水率はアワビだけでなくホタテガイでもグリコーゲン量と逆の変動を示すことから、主要なエネルギー源であるグリコーゲン量を間接的に評価する指標となると考える。

アワビでは餌の量が成長だけでなく、成熟にも影響を及ぼすことが知られている (Uki and Kikuchi, 1982; 高見ら, 2012; 清本ら, 2016)。本研究でも 3%区以上の飼育区で生殖腺指数の値が明瞭に上昇し (Fig. 6)、成熟に伴い生殖腺の体積が増加したことを示している。一方で、無給餌の 0%区でも実験 1-1 で僅かだが生殖腺が発達した個体が含まれていた。エゾアワビでは無給餌でも成熟して卵数は少ないが産卵に至ったという報告がある (高見ら, 2012)。殻長や重量の成長量が 0 に近い 3%区でも生殖腺指数が増えたことは、自らの成長よりも再生産に優先的にエネルギーを配分している可能性が考えられる。

今回検討した 6 種類の指標と総摂餌率との相関関係を調べた結果、全給餌区を対象とした場合には各指標とも有意な正もしくは負の相関関係が認められた (Table 2) が、総摂餌率が増加するに伴い、各肥満度は総摂餌率との相関関係が弱くなったのに対し、筋肉含水率および筋肉グリコーゲン含有率は総摂餌率によく対応していた (Table 2, Fig. 7)。したがって、これらの 2 指標は、生息場所の餌量が減少した場合だけでなく増加した場合でも、その変化を評価することが可能であると推察される。筋肉グリコーゲン含有率はサンプルの処理過程が複雑であり、分析機器が必要なことに加えて分析に要する時間も長い。一方、同等の検出力がある筋肉含水率の測定は電子天秤と乾燥機があれば可能である。そのため、アワビの餌料環境をより簡便に評価する指標として含水率が

有効であると考え。今後は、餌料環境が異なる漁場から採集したアワビについて筋肉含水率および筋肉グリコーゲン含有率を調べ、漁場における有効性を確認する必要がある。

謝 辞

本研究の実施にあたり試験用アワビの入手等でご協力を賜った、松前さくら漁業協同組合ならびに松前町役場、北海道渡島地区水産技術普及指導所松前支所の職員の方々に厚くお礼申し上げます。本研究は、農林水産技術会議委託プロジェクト研究「生態系ネットワーク修復による持続的な沿岸漁業生産技術の開発」の一環として実施された。

引用文献

- 吾妻行雄. 北海道における磯焼けの現状と対策. 「地球環境シンポジウム “磯焼けの現状と課題” (佐々木達編)」株式会社エコニクス, 札幌. 1995 ; 31-47.
- 吾妻行雄. キタムラサキウニの個体群動態に関する生態学的研究. 北海道立水産試験場研究報告 1997 ; 51 : 1-66.
- 赤池章一, 津田藤典, 桑原久実. 北海道岩内沿岸における天然コンブ群落の形成と維持. 北海道立水産試験場研究報告 2002 ; 63 : 41-54.
- Carefoot TH, Qian PY, Taylor BE, West T, Osborne J. Effect of starvation on energy reserves and metabolism in the Northern abalone, *Haliotis kamtschatkana*. *Aquaculture* 1993 ; 118 : 315-325.
- 藤田大介. 北海道大成町の磯焼けに関する聞き取り調査. 水産増殖 1987 ; 35 : 135-138.
- Goddard CK, Martin AW. Carbohydrate Metabolism. In *Physiology of Mollusca. Vol. II*, 1966 ; 275-308. Ed. Wilbur KM, Yonge CM. Academic press Inc., New York • London.
- 原田恭行, 熊谷敬之, 小善圭一, 横井健二. 異なる餌料で養殖したアワビ F1 交雑種の肉質の比較. 日本水産学会誌 2012 ; 78 : 945-950.
- 橋本加奈子, 田中種雄, 田中邦三, 石田修, 河西伸治, 池上直也, 清野英明. 千葉県におけるアワビ「ヤセ貝」の出現状況とその性状 (資料). 千葉県水産総合研究センター研究報告 2006 ; 1 : 139-151.
- 干川裕. 北海道の磯焼け海域における群集構造の特徴とエゾアワビの再生産に及ぼす磯焼けの影響. 日本水産学会誌 2012 ; 78 : 1208-1212.
- Jackson D, Williams KC, Degnan BM. Suitability of Australian formulated diet for aquaculture of the tropical abalone *Haliotis asinina* Linnaeus. *J. Shellfish Res.*, 2001 ; 20 : 627-636.
- 金田友紀. 北海道南西部日本海沿岸における磯焼けの修復技術. 北水試だより 2009 ; 77 : 18-21.
- 川井唯史, 金田友紀, 桑原久実. 北海道南西部日本海の磯焼け地帯でホソメコンブ群落を維持するための条件. 平成 11 年度 日本水産工学会 学術講演会講演論文集 1999 ; 9-10.
- 川井唯史, 金田友紀, 新井章吾, 桑原久実. 磯焼け地帯におけるウニ侵入防止フェンスによるホソメコンブ群落の造成とキタムラサキウニ生殖巣の発達. 水産工学 2002 ; 39 : 15-20.
- 川尻正博, 佐々木正, 影山佳之. 下田市田牛地先における磯焼け現象とアワビ資源の変動. 静岡県水産試験場研究報告 1981 ; 15 : 19-30.
- 木村稔, 今村琢磨, 成田正直, 潮秀樹, 山中英明. ホタテガイ貝柱成分の季節変化. 日本水産学会誌 2002 ; 68 : 72-77.
- 清本節夫, 村上恵祐, 木村量, 丹羽健太郎, 薄浩則. 給餌水準を変えた飼育条件下におけるメガイアワビの生殖腺の体積変化. 日本水産学会誌 2016 ; 82 : 315-320.
- 清本節夫, 渡邊庄一, 前野幸男, 吉村拓, 玉置昭夫. 海藻群落の優占種の差異がクロアワビとメガイアワビの再生産と成長に与える影響. 水産増殖 2019 ; 67 : 65-79.
- 栗林貴範, 赤池章一. ホソメコンブ $\delta^{15}\text{N}$ を指標とした藻場再生への施肥効果とウニ類密度管理の検証. 水産工学 2014 ; 51 : 47-54.
- 桑原久実. 北海道南西部沿岸域における磯焼けの機構解明とその対策に関する研究. 水産工学 2003 ; 39 : 197-204.
- 宮園章, 中野広. 北海道オホーツク海沿岸域における地まきホタテガイの閉殻筋中のタンパク質量とグリコーゲン量の季節変化. 北海道立水産試験場研究報告 2000 ; 58 : 23-32.
- 中野広, 鈴木満平, 山下倫明. アワビ類の生体成分からみた造成漁場と天然礁の漁場評価法の確立. 平成 4 年度沿岸漁場整備開発事業に関する水産庁研究所研究報告書. 1996 103 pp. : 47-52.
- Okumura T, Nagasawa T, Hayashi I, Sato Y. Effect of starvation on RNA:DNA ratio, glycogen content, and C:N ratio in columellar muscle of the Japanese turban shell *Turbo (Batillus) cornutus* (Gastropoda). *Fish. Sci.*,

- 2002 ; 68 : 306-312.
- Olaechea RP, Ushio H, Watanabe S, Takada K, Hatae K. Toughness and collagen content of abalone muscles. *Biosci. Biotech. Biochem* 1993 ; 57 : 6-11.
- Qi Z, Liu H, Li B, Mao Y, Jiang Z, Fang J. Suitability of two seaweeds, *Gracilaria lemaneigoris* and *Sargassum pallidum*, as feed for the abalone *Haliotis discus hannai* Ino. *Aquaculture* 2010 ; 300 : 189-193.
- Saito K. Study on propagation of Ezo abalone, *Haliotis discus hannai* INO-I Analysis of the relationship between transplantation and catch in Funka bay coast. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 1979 ; 45 : 695-704.
- 瀬川進. トコブシの酸素消費量およびアンモニア態窒素排出量に及ぼす絶食の影響. 日本水産学会誌 1991 ; 57 : 2001-2006.
- 雫石志乃舞, 大西千賀子, 田中淳也, 成田清一. ホタテガイ閉殻筋成分の季節変化. 青森県ふるさと食品研究センター研究報告 2004 ; 1 : 19-24.
- Takami H, Yamakawa H, Nakano H. Survival and physiological stress of juvenile disk abalone *Haliotis discus discus* during long-term starvation. *Fish Sci* 1995 ; 61 : 111-115.
- 高見秀揮, 深澤博達, 河村知彦, 村岡大祐. エゾアワビの成熟に及ぼす餌料の質・量の影響. 日本水産学会誌 2012 ; 78 : 1205-1207.
- 滝尾健二, 安藤和人, 川辺勝俊, 駒澤一朗, 有馬孝和. 伊豆大島差木地漁港内における石詰め型生簀「養殖礁」によるクロアワビ *Haliotis discus discus* およびメガイアワビ *Haliotis gigantea* の養殖試験. 東京都水産海洋研究報告 2009 ; 3 : 7-12.
- Uki N, Kikuchi S. Influence of food levels on maturation and spawning of the abalone, *Haliotis discus hannai* related to effective accumulative temperature. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab* 1982 ; 45 : 45-53.
- Watanabe H, Yamanaka H, Yamakawa H. Seasonal variations of extractive components in the muscle of Disk Abalone. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1992 ; 58 : 921-925.
- 渡辺裕子, 山中英明, 山川紘. クロアワビ成貝および稚貝の部位によるエキス成分の差異. 日本水産学会誌 1993 ; 59 : 501-506.