

高齢ウニ（キタムラサキウニ）生殖巣の大きさと色調の給餌飼育による改善

干川 裕^{*1}, 菅原 玲², 奥村裕弥³, 中島幹二¹, 鵜沼辰哉^{4,5}

¹元北海道立総合研究機構中央水産試験場, ²北海道立総合研究機構中央水産試験場,

³北海道立総合研究機構網走水産試験場, ⁴国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産資源研究所 釧路庁舎,

⁵現所属：国立大学法人東北大学大学院農学研究科

Improving the gonad size and color of old sea urchins (*Mesocentrotus nudus*) by cultivation

HIROSHI HOSHIKAWA^{*1}, AKIRA SUGAWARA², HIROYA OKUMURA³, KANJI NAKAJIMA¹ and
TATSUYA UNUMA^{4,5}

¹ Formerly: Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido 046-8555,

² Central Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, YoichiHokkaido, 046-8555,

³ Abashiri Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Abashiri, Hokkaido, 099-3119,

⁴ Kushiro Field Station, Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency,
Katsurakoi 116, Kushiro, Hokkaido 085-0802, Japan

⁵ Present address: Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University,
Aramaki, Sendai, Miyagi 980-8572, Japan

On barren grounds, the sea urchin *Mesocentrotus nudus* has small and dark gonads of low commercial value from a lack of food. Efforts have been made to develop cultivation techniques to increase commercial value. However, the sea urchins on barren grounds are relatively old and fishermen believe that the small gonad size and dark gonad color of aged urchins are difficult to improve. Here, we fed urchins collected from barren grounds with sufficient *Saccharina japonica* and examined the gonad index and gonad color by age. It was found that by providing sufficient food, the gonad index of old urchins could be increased to the same level as that of young sea urchins. In addition, the dark gonad color can be brightened with the increase in the gonad index. This result could lead to the effective use of aged sea urchins in barren grounds.

キーワード：磯焼け, キタムラサキウニ, 生殖巣, 未利用資源, 明度

キタムラサキウニ *Mesocentrotus nudus* (A. Agassiz) はエゾバフンウニ *Strongylocentrotus intermedius* (A. Agassiz) と並んで北海道の沿岸漁業において重要な魚種の一つである。ところが、近年、北海道南西部の日本海沿岸ではウニ類の餌となる海藻が減少する磯焼けが顕著になっている（藤田, 1987; 赤池ら, 1999, 2002; 栗林ら, 2014）。餌料環境の良い漁場に生息するキタムラサキウニは、漁獲サイズの殻径50 mmに達する年齢も4歳と若く、生殖巣指数（体重に対する生殖巣重量の割合）も20以上になるが、餌料となる海藻が不足している漁場では、漁獲サイズに達する年齢も高齢になり、かつ生殖巣指数も極めて

低いことが報告されている（吾妻, 1997）。このような餌料海藻が少ない磯焼け海域に生息する生殖巣が小さく商品価値の低いキタムラサキウニに短期間飽食給餌することで、生殖巣の大きさを増加できることが報告されている（吾妻, 1997; Agatsuma *et al.*, 2002; Kinoshita *et al.*, 2013; Unuma *et al.*, 2015; Takagi *et al.*, 2019）。

一般に、国内市場における生ウニ（生殖巣）の評価要素は、サイズ、食感、色調、および味と言われている（Agatsuma *et al.*, 2005）。磯焼け海域から採集されたキタムラサキウニの生殖巣は、マコンブ *Saccharina japonica* を食べさせることで、その品質（サイズ、食感、色調、お

よび味)が改善されることが報告されている (Takagi *et al.*, 2019)。彼らの報告では飼育開始時に比べて、終了時には生殖巣指数と明度 (L^* 値)が増加し、遊離アミノ酸のうち甘味を呈するアラニン含量の増加と、苦味を呈するアルギニン含量の低下から美味となり、官能試験ではアラメ群落から採集したキタムラサキウニの生殖巣よりも高い評価を得た。

このように、磯焼け海域に生息する生殖巣が小さく商品価値が低いキタムラサキウニにマコンブなどの適性餌料を与えることで、品質を改善する可能性が示されてきた。一方で、磯焼け海域に多い高齢ウニでは、生殖巣が褐色化する(身の色が黒ずむ)という問題が知られており、そのようなウニの品質改善についてはまだ不明な点が多い。生殖巣の褐色化は、7歳以上の高齢の個体と、若齢でも生殖巣が小型の個体で顕著であり (Agatsuma *et al.*, 2005)、生殖巣指数と褐色化の程度は有意な負の相関関係を持つ (Kinoshita *et al.*, 2013)。このような生殖巣の褐色化には、加齢色素として知られるリポフスチンが関与していると言われている (Pease and Cameron, 1991; Vaschenko *et al.*, 2012)。

また、高齢のウニは給餌しても生殖巣の量的増大が得られにくい(身入りしにくい)という問題が漁業者の間で言われている(著者らによる聞き取り)。羅臼のエゾバフンウニで殻径と生殖巣指数の関係を調べた報告では、生殖数指数は殻径6 cmまでは増加して約25に達するが、7 cmを超えると減少して殻径8 cm以上では約17になるとされる(川村, 1993)。また、*S. purpuratus*でも殻径40~50 mmまでは生殖巣指数は増加するが、それより大きいとわずかに減少すると報告されている (Conor, 1972)。これらは天然の漁場から採集したウニに関する事例であり、給餌飼育したウニではないが、大型の高齢ウニは身入りしにくいという漁業者の感覚とは一致する。その一方、*S. purpuratus*では、産卵期前の2月はウニの体重と生殖巣重量の関係はほぼ直線的であり、大型になっても生殖巣は相対的に小さくはならないとの報告もある (Ebert *et al.*, 2011)。

以上のように、漁業現場では高齢ウニは「(1) 身入りしにくい」うえに「(2) 身の色が黒ずんでいる」と考えられており、磯焼け漁場で集めて給餌飼育を行っても商品価値が改善されるか疑問視する声もあった。そこで本研究では、磯焼け海域から採集したキタムラサキウニに対し、屋内水槽で6月から8月にかけて飽食量の生鮮マコンブを給餌し、年齢と生殖巣指数、色調、および生化学成分との関係を調べた。これにより、給餌飼育を行う場合に問題となる高齢個体の「身入り」および「身の色」の改善の可能性を検証したので報告する。

試料及び方法

供試ウニ 北海道南西部の日本海に面した岩内町沿岸の磯焼け海域から潜水で採集した。実験1に用いたウニは2012年5月23日、実験2に用いたウニは2015年4月20日に採集し、北海道立総合研究機構中央水産試験場養殖技術実験室に設置したFRP製1トン水槽(内寸縦175 cm, 横90 cm, 深さ70 cm, 水深60 cm)に收容した。中央水産試験場の沖500 m, 水深10 mから取水して砂濾過した無調温の海水を掛け流し、実験開始時まで無給餌で飼育した。

実験1 2012年6月25日から8月16日まで、51日間の飼育実験を行った。無給餌で飼育していたウニから無作為に120個体(殻径45~76 mm)を選び、うち20個体を実験開始時に解剖し、残りの100個体を飼育実験に用いた。養殖技術実験室に設置したFRP製1トン水槽にトリカルネット製のカゴ(縦65 cm×横65 cm×深さ40 cm, 目合1 cm)を2個入れ、それぞれに50個体のウニを收容して飼育した。無調温の砂濾過海水を掛け流し、カゴ内にエアストーンを入れて通気を行った。飼育開始時に13℃だった水温はその後徐々に上昇し、終了時には22℃となった (Fig. 1)。噴火湾に面した鹿部町沖で養殖された生鮮マコンブを常に飽食となるように週に1, 2回給餌した。

飼育開始時と終了時に、殻径、体重および生殖巣重量を測定し、生殖巣指数を下記の式で求めた。

$$\text{生殖巣指数} = \text{生殖巣重量} \times 100 / \text{体重}$$

殻から生殖板を採取し、輪紋数に基づく年齢査定を行った (川村, 1973; 吾妻, 1997)。また、生殖巣の色調 (L^* 値, a^* 値, b^* 値)を評価するため、生殖巣をすり潰してガラスバイアルに入れ、分光測色計 (CM-700d, KONICA MINOLTA Co. Ltd, Japan)を用いて L^* 値, a^* 値, b^* 値を測定した (渡邊, 2010)。

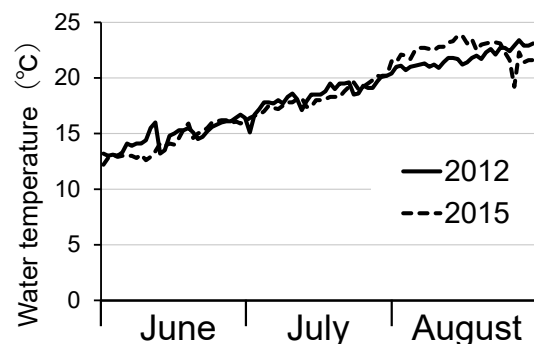


Fig. 1 Temperature of the seawater used for *Mesocentrotus nudus* rearing experiments in 2012 (Experiment 1) and 2015 (Experiment 2). The temperature in the tank was measured every morning at 10:00.

実験2 実験1よりも終了時の生殖巣指数を高めるために飼育日数を増やし、2015年6月3日から8月27日まで、84日間の飼育実験を行った。無給餌で飼育していた個体から高齢個体と推定される大型の48個体(殻径58~84 mm)を選び、うち18個体を飼育開始前の2015年5月15日に解剖し、残りの30個体を飼育実験に用いた。FRP製1トン水槽にトリカルネット製のカゴ(縦44 cm×横70 cm×深さ48 cm, 目合2 cm)を入れ、その中にウニを収容して飼育した。飼育開始時に13℃だった水温はその後徐々に上昇し、終了時には23℃となった(Fig.1)。その他の手順は実験1と同様とした。

組織学的観察 実験1のウニについては、組織学的観察に供するため、飼育終了時の生殖巣の一部をデビッドソン液で固定した。常法により厚さ10 μmのパラフィン切片を調製した後、ヘマトキシリン・エオシンで染色して光学顕微鏡で観察し、各個体の成熟度をFuji (1960)の基準を若干改変した回復期(ステージ1)、成長期(ステージ2)、成熟前期(ステージ3)、成熟期(ステージ4)、および放出期(ステージ5)に分類した(Unuma, 2002)。

生化学分析 実験1のウニについては、生化学分析に供するため、飼育終了時の生殖巣を-80℃で冷凍保存した。成熟度により成分含量が異なる影響を避けるため(Unuma et al., 2003; Murata et al., 2020)、生殖細胞の割合が少なく商品価値が高いステージ2の個体のみを分析した。生殖巣の含水率は、105℃で24時間乾燥した前後の重量変化から求め、グリコーゲン含有率はアンスロン硫酸法により分析した(Unuma et al., 2003)。また、遊離アミノ酸のうち、うま味を呈するグルタミン酸、甘味を呈するステロニン、セリン、グリシン、アラニン、苦みを呈するバリン、イソロイシン、ロイシン、メチオニン、フェニルアラニン、アルギニン(岸・木戸, 2007)の含有量を高速アミノ酸分析計(日立株式会社L-8900)により測定した(Murata et al., 2020)。

データ解析 生殖巣指数および色調(L^* , a^* , b^*)のデータについては、実験1では10歳から13歳、実験2では10歳から11歳の個体をまとめて10歳以上として扱った。これらの年齢間の差については、実験1ではノンパラメトリック多重比較検定であるKruskal-Wallis検定を行い、事後の比較にはDunn-Bonferroni検定を用いた。実験2では終了時の各年齢の測定数が2~7個体と少なかったため、多重比較検定は実施しなかった。実験1, 2のいずれにおいても、年齢と L^* 値, a^* 値, b^* 値との相関解析、および年齢毎の生殖巣指数と L^* 値との相関解析はピアソンの積率相関係数により行った。実験1と2の間で、開始時の生殖巣指数をt検定により比較した。含水率、グリコーゲン含有率および遊離アミノ酸含有量については、7歳以上で生

殖巣の褐色化が見られることから(Agatsuma et al., 2005)、4~6歳を若齢群、7歳以上を高齢群とした2群に分け、若齢・高齢と雌雄の4群間で比較を行った。前述と同様にKruskal-Wallis検定を行い、事後の比較にはDunn-Bonferroni検定を用いた。計算にはフリー統計ソフトR(ver.4.2.2)を用いた。

結果

実験1 飼育期間中に斃死した個体はなかった。供試したウニの試験終了時の殻径は 61.0 ± 9.2 mm(平均±標準偏差, 以下同じ)であり、年齢は4歳から13歳で、4歳と7歳にモードがある2峰型だった(Fig.2A)。年齢別の殻径をFig.2Bに示した。4歳から7歳にかけては、同じ年齢でも殻径の最大値と最小値には約20 mmのばらつきがあったが、8歳以上ではその範囲が狭まり、10歳以上では殻径70 mm台であった。全体として若齢では小型であり、高齢になるにつれて大型となるが、9歳以上では頭打ちになった。

試験開始時に解剖した個体(殻径 61.6 ± 9.2 mm, 年齢 9.0 ± 3.3 歳, $n = 20$)の生殖巣指数は 9.0 ± 3.0 であり、年

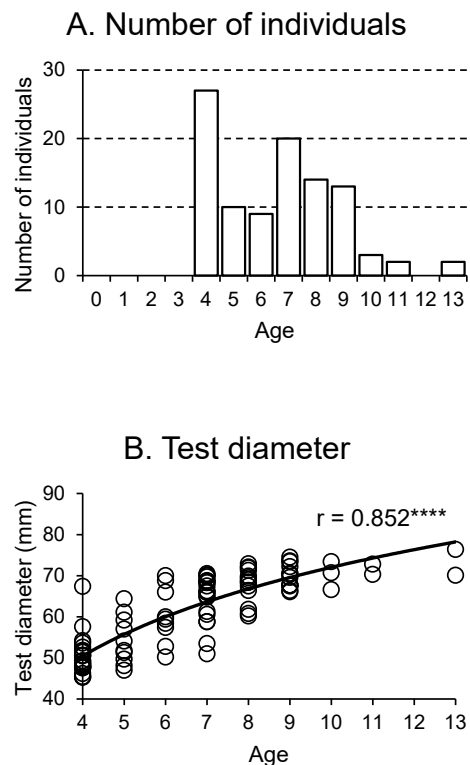


Fig.2 Number of individuals and test diameter by age of *Mesocentrotus nudus* reared in Experiment 1. (A) Number of individuals. (B) Test diameter. Data for each animal were plotted by age. Asterisks indicate significant correlation (****, $p < 0.0001$).

齢による差はなかった。試験終了時には 14.0 ± 2.7 となり、5.0上昇した。試験終了時の年齢別の生殖巣指数をFig. 3に示した。最大が7歳の 15.1 ± 2.5 、最小が6歳の 13.3 ± 2.9 であり、年齢間で有意な差はなく加齢に伴う減少傾向は認められなかった。

試験開始時に解剖した個体の年齢と生殖巣の色調の関係をFig. 4に示した。年齢と L^* 値 ($p < 0.0001$) および b^* 値 ($p < 0.01$) の間には、有意な負の相関関係が認められた。試験終了時の年齢別の色調をFig. 5に示した。 L^* 値は最大が4歳の 46.4 ± 3.0 、最小が10歳以上の 35.3 ± 2.6 であり、

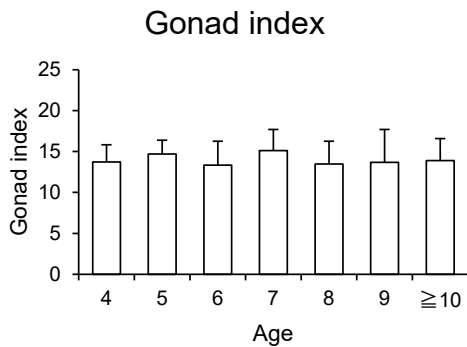


Fig. 3 Gonad index by age of *Mesocentrotus nudus* reared in Experiment 1. Values represent the mean \pm SD of 7–27 individuals.

加齢に伴って明瞭に減少して8歳以上では40未満となり、高齢になるほど生殖巣の明度が下がり黒ずみが顕著となった (Fig. 5A)。4歳と7歳以上の年齢群、および5歳以下と10歳以上の年齢群には有意差が認められた (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 55.572$, $df = 6$, $p = 3.552e-10$)。 a^* 値は最大が4歳の 14.6 ± 1.4 、最小が7歳の 12.9 ± 1.1 であり、4歳と7歳から9歳の間で有意差が認められたが (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 25.458$, $df = 6$, $p = 0.0002808$)、明度のような明瞭な加齢に伴う減少は認められなかった (Fig. 5B)。 b^* 値は最大が4歳の 34.0 ± 3.7 、最小が9歳および10歳以上の 28.6 ± 3.9 および 28.6 ± 4.2 であり、加齢に伴い減少し、4歳と、7~9歳の間で有意差が認められた (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 29.948$, $df = 6$, $p = 4.021e-05$) (Fig. 5C)。色調の中で L^* 値だけが4歳と10歳以上の個体の間で有意な差が認められた。

生殖巣の L^* 値、 a^* 値、 b^* 値のうち、黒ずみの程度を評価するには L^* 値が適切と判断されたため、生殖巣指数と L^* 値の関係を年齢別に調べてFig. 6に示した。加齢に伴い L^* 値が40未満の個体が増加した。しかし、7歳から9歳では、生殖巣指数と L^* 値の間に有意な正の相関関係が認められ ($p < 0.05$)、生殖巣指数が15を超えると L^* 値が40を超える個体が増えた。これに対し、10歳以上では個体数が少なく、生殖巣指数と L^* 値の間に相関関係は認められ

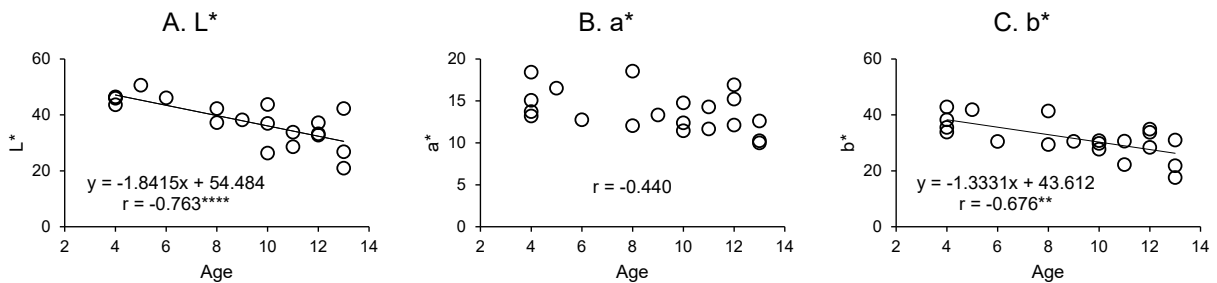


Fig. 4 Relationship between age and gonad color of *Mesocentrotus nudus* before rearing in Experiment 1. (A) Lightness (L^*). (B) Redness (a^*). (C) Yellowness (b^*). Regression line and Pearson's correlation coefficient are shown in each panel. Asterisks indicate significant correlation (**, $p < 0.01$; ****, $p < 0.0001$). For color measurement, the gonads were mashed, placed in glass vials, and subjected to spectrophotometric colorimetry.

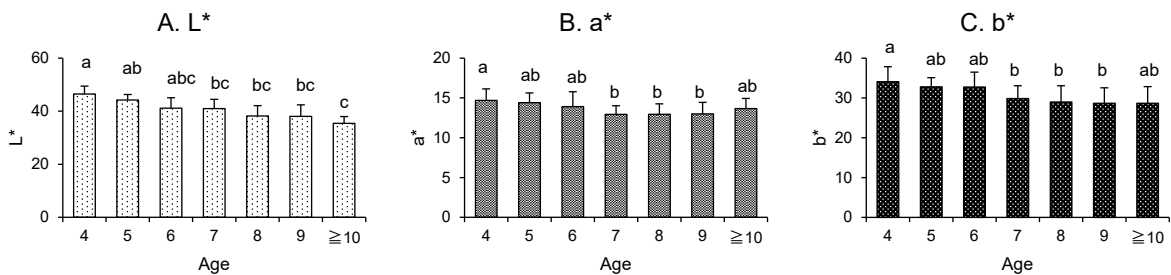


Fig. 5 Gonad color by age of *Mesocentrotus nudus* reared in Experiment 1. (A) Lightness (L^*). (B) Redness (a^*). (C) Yellowness (b^*). Values represent the mean \pm SD of 7–27 individuals. Superscript letters indicate significant differences among ages ($p < 0.05$, Dunn–Bonferroni test).

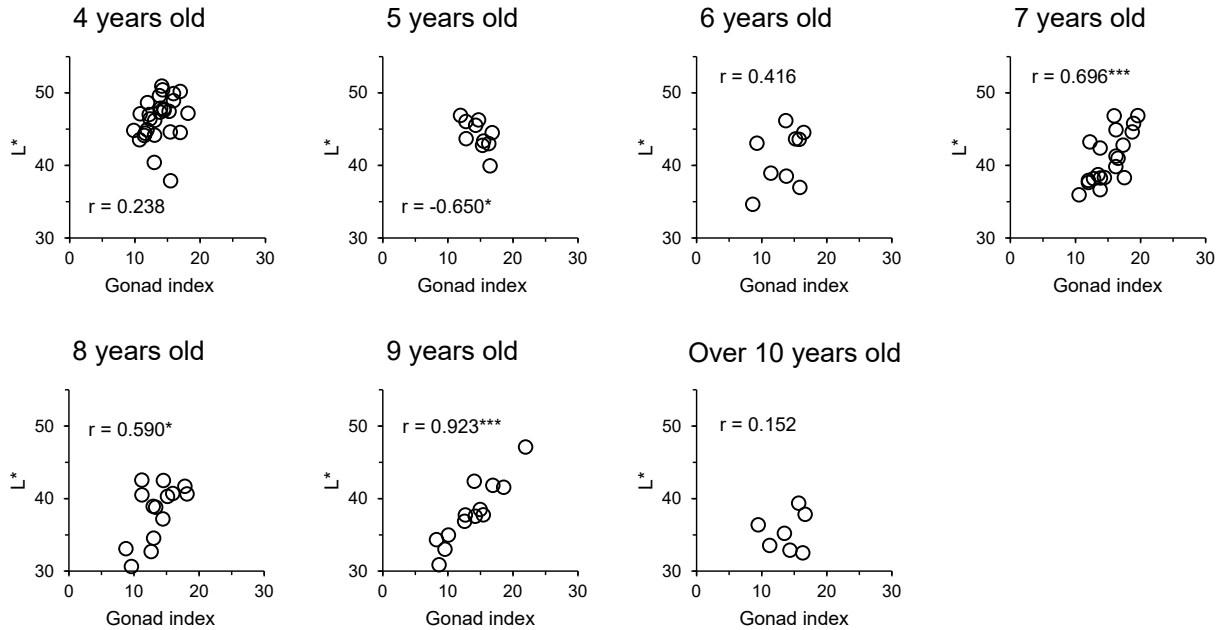


Fig. 6 Relationship between gonad index and lightness (L^*) of *Mesocentrotus nudus* gonads reared in Experiment 1. Data for each animal were plotted by age. Pearson's correlation coefficients are shown in each panel. Asterisks indicate significant correlation (*, $p < 0.05$; ***, $p < 0.001$).

ず、 L^* 値が40を超える個体はなかった。

試験終了時の生殖巣の成熟度は、雌ではステージ1が9個体、ステージ2が41個体、雄ではステージ1が4個体、ステージ2が29個体、ステージ3が17個体であった。この中からステージ2の個体のみを生化学分析に供した結果を若齢群と高齢群に分け、雌雄別にFig. 7に示した。水分含量、セリン、グリシン、アラニン、イソロイシン、ロイシンおよびメチオニンでは性別と年齢による差はなかった。グルタミン酸、バリン、フェニルアラニンおよびアルギニンでは性別による差はあったが、年齢による差はなかった。グリコーゲン含有率は雄の若齢群が雌の若齢群および雄の高齢群に比べて有意に低かった (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 11.82$, $df = 3$, $p = 0.008027$)。また、スレオニンでは雌の高齢群が雄の高齢群および雌雄の若齢群に比べて有意に高かった (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 13.228$, $df = 3$, $p = 0.004168$)。

実験2 飼育期間中に斃死した個体はなかった。供試したウニの試験終了時の殻径は 75.2 ± 4.4 mmであり、年齢は4歳から11歳で、7歳にモードのある単峰型だった (Fig. 8A)。年齢別の殻径をFig. 8Bに示した。高齢個体を含むと推定される大型個体を選択的に供試したため、ほとんどの個体が殻径70 mm以上、10歳以上の個体が80 mm台であり、加齢に伴う殻径の増加は緩やかだった。

試験開始時に解剖した個体 (殻径 69.1 ± 5.3 mm, 年齢 6.8 ± 1.0 歳, $n = 18$) の生殖巣指数は 11.0 ± 2.8 であり、実験1よりも有意に高かったが ($p < 0.05$)、年齢による差

はなかった。試験終了時には 17.8 ± 2.9 となり、6.8上昇した。試験終了時の年齢別の生殖巣指数をFig. 9に示した。最大が8歳の 18.6 ± 3.8 、最小が10歳以上の 17.2 ± 3.0 であり、年齢間で差はなく加齢に伴う減少傾向は認められなかった。

試験開始時に解剖した個体の年齢と生殖巣の色調の関係をFig. 10に示した。年齢と L^* 値の間には有意な負の相関関係 ($p < 0.05$) が認められたが、回帰直線の傾きは-1.39であり、実験1における開始時の-1.84 (Fig. 4A) よりも大きく、加齢に伴う L^* 値の減少は実験1よりも緩やかな傾向があった。試験終了時の年齢別の色調をFig. 11に示した。 L^* 値は最大が8歳の 43.3 ± 2.7 、最小が4歳の 40.5 ± 4.6 であり、年齢間でほとんど差が無く、実験1の開始時と終了時、および実験2の開始時に確認されたような加齢に伴う減少は見られなかった (Fig. 11A)。 a^* 値は最大が9歳の 14.5 ± 1.3 、最小が4歳の 11.5 ± 0.6 (Fig. 11B)、 b^* 値は最大が8歳の 28.6 ± 3.6 、最小が7歳の 25.6 ± 3.5 であり (Fig. 11C)、いずれも年齢による増減の傾向はなかった。

生殖巣指数と生殖巣の L^* 値の関係を年齢別にFig. 12に示した。各年齢とも個体数が少なく、生殖巣指数と L^* 値の間に有意な正の相関関係は認められなかったが、ほとんどの個体で生殖巣指数が15を超え、7歳から10歳以上でも L^* 値が40を超える個体が多かった。とくに、10歳以上では、生殖巣指数が15に達しなかった1個体を除いて L^* 値が40を超えた。

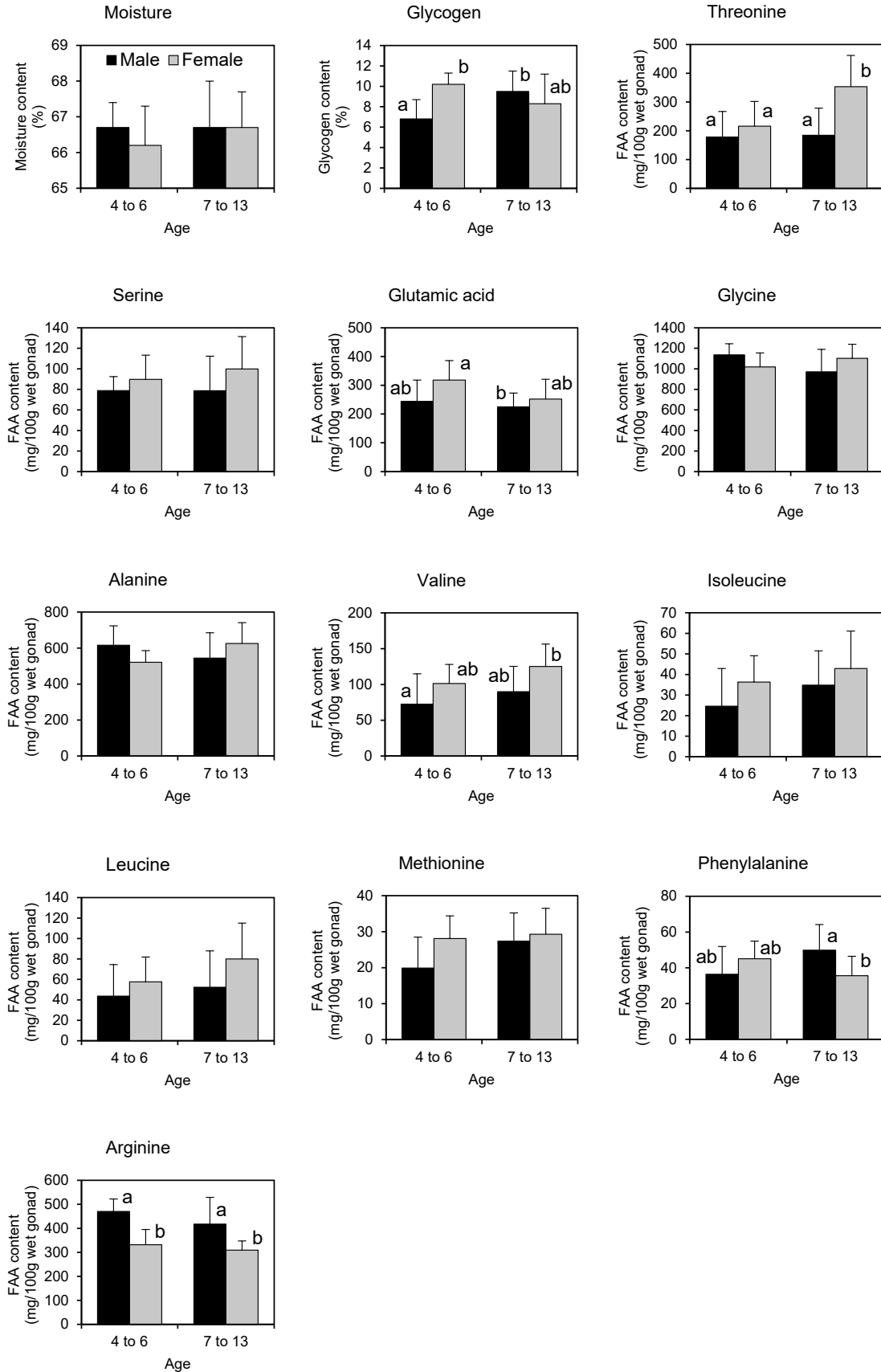


Fig. 7 Water, glycogen, and free amino acid content in *Mesocentrotus nudus* gonads reared in Experiment 1. Values represent the mean \pm SD of 8–17 individuals. Superscript letters indicate significant differences among groups ($p < 0.05$, Dunn–Bonferroni test).

考 察

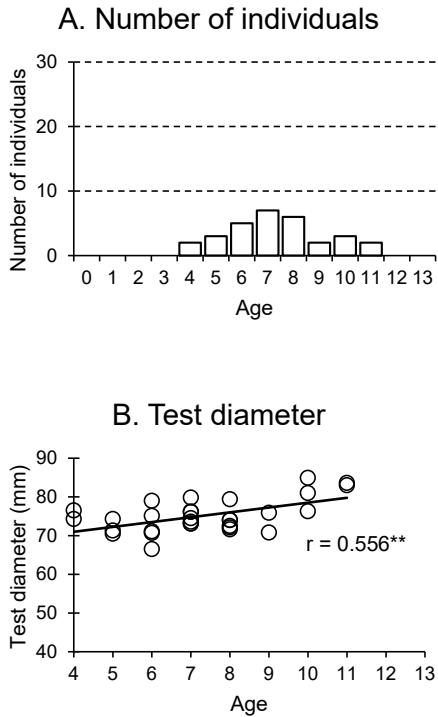


Fig.8 Number of individuals and test diameter by age of *Mesocentrotus nudus* reared in Experiment 2. (A) Number of individuals. (B) Test diameter. Data for each animal were plotted by age. Asterisks indicate significant correlation (**, $p < 0.01$).

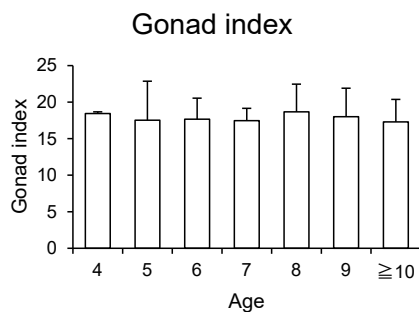


Fig.9 Gonad index by age of *Mesocentrotus nudus* reared in Experiment 2. Values represent the mean ± SD of 2–7 individuals.

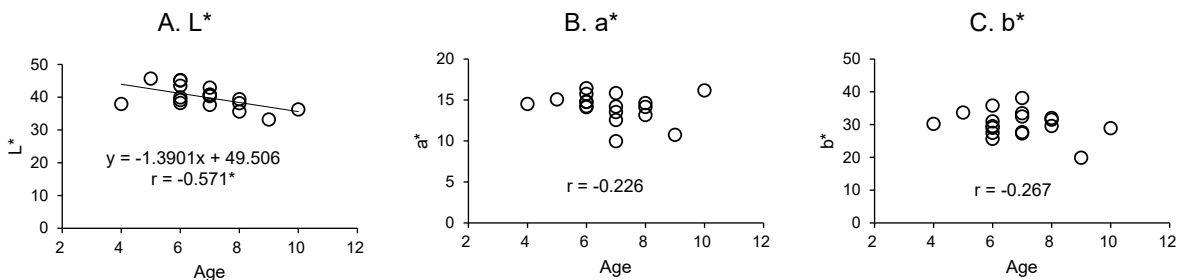


Fig.10 Relationship between age and gonad color of *Mesocentrotus nudus* before rearing in Experiment 2. (A) Lightness (L*). (B) Redness (a*). (C) Yellowness (b*). Regression line and Pearson’s correlation coefficient are shown in each panel. An asterisk indicates significant correlation (*, $p < 0.05$).

高齢ウニの身入りの向上と身の色の改善 本研究では、磯焼け海域から採集したキタムラサキウニに飽食量のマコンブを給餌し、高齢個体の「身入り」および「身の色」の改善について検証した。「身入り」については、実験1, 2とも生殖巣指数は4歳から10歳以上までどの年齢群でも同様に上昇し (Fig.3, Fig.9), 10歳程度までの高齢ウニであれば、給餌飼育によって身入りを問題なく改善できることが明らかになった。しかしながら、「身の色」については、実験1では生殖巣の明度 (L*値) は年齢が高くなるほど小さくなり、高齢ウニでは生殖巣の色が暗くなる (身が黒ずむ) ことが確認された (Fig.5A)。一方で、7歳から9歳の高齢ウニであっても、生殖巣指数が15を超えるような個体では、L*値が良好な色調と判定できる目安の40 (菅原ら, 2016) を超えることも多く (Fig.6), 身入りを高めることが身の色

の改善に繋がることを示唆された。実験1では、10歳以上のウニの身の色は十分に改善されなかったが、さらに身入りを高めれば改善される可能性があるとして著者らは考えた。そこで、実験2では飼育日数を伸ばし、終了時の生殖巣指数を高めたところ、実験1で見られた加齢に伴い明度が小さくなる現象はほとんど解消された (Fig.11A)。10歳以上のウニでも大半の個体でL*値が40を超え (Fig.12), 身の色が改善された。これらの結果から、磯焼け海域から採集した高齢のキタムラサキウニであっても、給餌飼育によって「身入り」と「身の色」を改善でき、高齢になるほど身の色

の改善には身入りを高める必要があると考えられた。ウニの身の黒ずみには、生殖巣へのリポフスチン蓄積が関与していると言われている (Pease and Cameron, 1991; Vaschenko *et al.*, 2012)。リポフスチンは多くの動物で細胞質内の過酸化された不飽和脂肪酸がオートファジーによりリソソーム内に取り込まれ、加水分解された結果生ずる黄茶色の蛍光性色素である (Sulzer *et al.*, 2008; Du *et al.*, 2013)。通常、リポフスチンはリソソーム

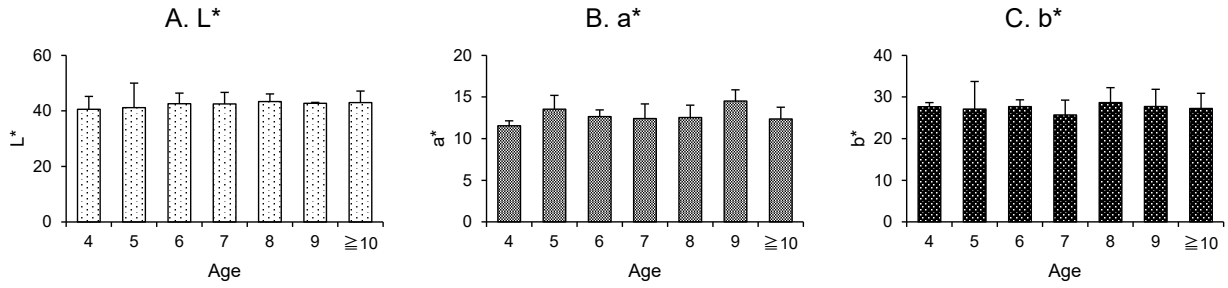


Fig.11 Gonad color by age of *Mesocentrotus nudus* reared in Experiment 2. (A) Lightness (L*). (B) Redness (a*). (C) Yellowness (b*). Values represent the mean \pm SD of 2-7 individuals.

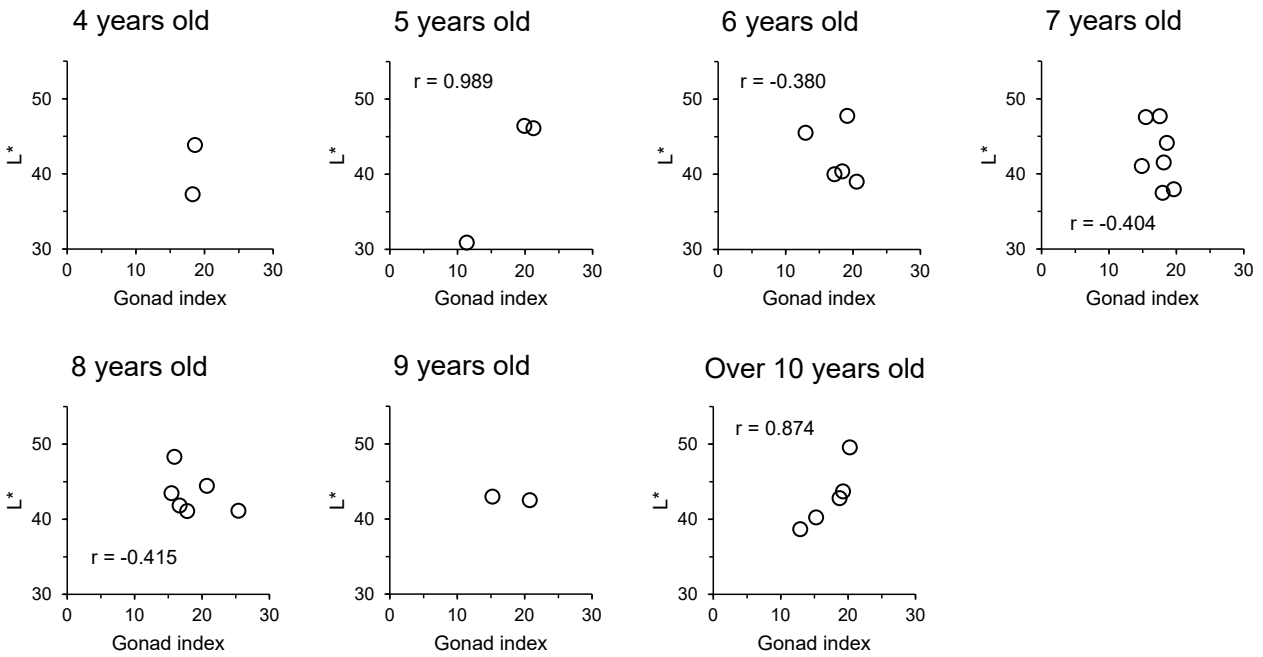


Fig.12 Relationship between gonad index and lightness (L*) of *Mesocentrotus nudus* gonads reared in Experiment 2. Data for each animal were plotted by age. Pearson's correlation coefficients are shown in each panel.

内で分解されず、エキソサイトーシスによって除去もされないため細胞内に蓄積し、年齢とともに増加するため加齢色素とも呼ばれている (Porta, 2002)。ウニでも生殖巣をはじめ、口器の筋肉や食道、放射神経などにも含まれており、それらの組織では若い個体に比べて高齢個体でリポフスチンの積分光学濃度は有意に高かった (Vaschenko *et al.*, 2012 ; Du *et al.*, 2013)。リポフスチンは加齢とともに増加することから、甲殻類や二枚貝では年齢を推定する指標として用いられている (Lomovasky *et al.*, 2002 ; Kodama *et al.*, 2005 ; Philipp *et al.*, 2007 ; Puckett *et al.*, 2008 ; Bosley *et al.*, 2011 ; 渡邊ら, 2012)。

ウニの生殖巣においてもリポフスチンは高齢になるほど蓄積量が増えて黒ずみ (褐色化) が進み、給餌飼育によって身入りを高めても、消失はしないと考えられる。ウニは成熟開始前に、配偶子形成に必要な栄養を生殖巣内

の栄養細胞に蓄えることで身入りが高まる (Unuma, 2002 ; Unuma *et al.*, 2015)。栄養細胞の大きさが増加した結果として、生殖巣全体の体積が増加する (Reunov *et al.*, 2004)。Du C. *et al.*, (2013) は組織面積当たりの積算光学濃度 (IOD) を用いてウニの組織に蓄積したリポフスチン量の評価を行った。また、渡邊ら (2012) はオウギガニ *Leptodius exaratus* の脳神経節の嗅葉神経細胞塊内のリポフスチンが占める面積比を用いて蓄積量とした。このように組織単位面積当たりのリポフスチン色素密度に着目すると、給餌飼育によって生殖巣の体積が増大し、結果としてリポフスチンの積算光学濃度または面積比が下がったために生殖巣全体としての明度が高くなったのであろう。実験2の開始時には、実験1の開始時と比べて生殖巣指数が高く、加齢に伴う明度の減少も緩やかな傾向があった。さらに、実験2の終了時には、加齢に伴い明度

が小さくなる現象がほとんど見られなくなった。これらの結果から、身入りが高まるにつれて明度の上昇が緩慢になり、生殖巣指数が低かったときに大きかった明度の年齢による差が次第に縮小するのかもしれない。

高齡ウニと若齡ウニの生殖巣の成分 ウニの生殖巣の味には、呈味性遊離アミノ酸の含有量が大きく影響する (Komata *et al.*, 1962; Komata, 1964)。また、著者らがウニの加工業者から聞き取ったところ、評価要素のひとつに水分の多寡(水っぽさ)があり、生殖巣の水分含量とグリコーゲン含量には負の相関関係がある(高谷・今村, 1996; Unuma *et al.*, 2003)。さらに、キタムラサキウニの食品としての旬は、生殖巣が大きくなり栄養細胞の割合が高く生殖細胞が少ない配偶子形成ステージ2からステージ3の初期にあたる7月前後である (Unuma *et al.*, 2015)。そこで、実験1の終了時にステージ2の個体について生殖巣の水分含量、グリコーゲン含量、および呈味性遊離アミノ酸量について若齡群と高齡群で比較した (Fig. 7)。その結果、性別による差はあるものの、若齡個体と高齡個体で差が認められたのは、グリコーゲンとスレオニンだけであった。グリコーゲンは高齡の雄で若齡の雄よりも高かったが、生殖巣の味には直接関係はなく、独特の触感と味をまとめる作用があるとされる (村田, 2009)。スレオニンは高齡の雌で若齡の雌よりも高かったが、甘味を呈する遊離アミノ酸の中でもウニの味に大きく影響するとされるグリシンやアラニン (Komata *et al.*, 1962; Komata, 1964; Takagi *et al.*, 2019) と比べて含有量は少なかった。以上のように、高齡ウニと若齡ウニで給餌飼育後の生化学成分の違いは小さく、高齡ウニに多く含まれていたグリコーゲンとスレオニンについても、多いことによる弊害は考えにくいことから、高齡ウニの身入りと身の色を給餌飼育によって改善できれば、味を含めて若齡個体に比べて遜色のない商品になりうると考えられる。

磯焼け漁場の高齡ウニの有効活用 北海道の日本海側では、他の海域に比べて漁業者の高齡化と沿岸漁業における収入の低迷が深刻な問題となっており、とくに後志・檜山海域で著しい。これらの海域では、近年のウニの価格高騰 (鶴沼, 2019) や消費者の生ウニに対する嗜好の高まりを受けて、収入源としてのウニ漁業の重要性は増しているが、磯焼けが大きな問題となっている。そのため、磯焼け漁場の生殖巣が小さく商品価値の低いウニをカゴや水槽に収容し、給餌飼育して出荷する技術 (短期養殖) の開発と普及が重要な課題である。ウニの餌として適しているコンブ等を与えることで生殖巣の量的・質的改善を図ることは報告されてきたが (吾妻, 1997; 名畑ら, 1999; Takagi *et al.*, 2019)、磯焼けのために入手困

難なコンブに代わる野菜などの代替餌料の開発も進められつつある (臼井ら, 2018)。一方で、高齡ウニの身入りや身の色を懸念する声もあったが、本研究ではどちらも改善可能であることを示した。ただし、今回の実験で供試したウニは13歳までしかいなかったが、キタムラサキウニの寿命は14~15歳といわれており (Agatsuma, 2001)、漁場によっては本研究よりも高齡の個体が含まれる可能性がある。本種が卓越発生によって個体群を維持していること (吾妻, 1997) を考慮すると、高齡ウニに偏った漁場も想定されるため、さらに高齡の個体でも身入りや身の色が改善が可能かどうか今後の研究により確認する必要がある。

結論 磯焼け漁場に多い高齡のキタムラサキウニであっても、10歳程度までの年齢であれば餌料を十分に与えて飼育することにより、若齡ウニと同様に生殖巣が増大することと、生殖巣指数の上昇に伴って生殖巣の黒ずみが改善されることが明らかになった。さらに、水分、グリコーゲン、呈味性遊離アミノ酸の含量は若齡ウニとほとんど差がなく、味を含めて若齡個体と遜色のない商品になりうると考えられた。したがって、磯焼け海域に多数生息する未利用のキタムラサキウニは、10歳程度までの年齢であれば数か月間の給餌飼育により有効活用できると考えられた。

謝 辞

本研究の実施にあたりご協力を賜った、岩内郡漁業協同組合、岩内町、ならびに後志南部地区水産技術普及指導所職員の方々に厚くお礼を申し上げます。

本研究は、重点研究「給餌型ウニ低温蓄養システムの開発」(2012~2014年)並びに職員研究奨励事業(業績部門)「給餌型ウニ低温蓄養システム事業化に向けた安定生産技術開発事業」(2015年)により実施した。

引用文献

- 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. 北海道水産試験場研究報告 1997; 51: 1-66.
- Agatsuma, Y. Ecology of *Strongylocentrotus nudus*. In: Lawrence, J.M. (Ed.), Edible Sea Urchins: Biology and Ecology. Elsevier Science, Amsterdam, 2001; 347-361.
- Agatsuma Y, Yamada Y, Taniguchi K. Dietary effect of the boiled stipe of brown alga *Undaria pinnatifida* on the growth and gonadal enhancement of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus*. *Fish. Sci.* 2002; 68: 1274-

- 1281.
- Agatsuma Y, Sato M, Taniguchi K. Factors causing brown-colored gonads of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* in northern Honshu, Japan. *Aquaculture* 2005 ; 249 : 449-458.
- 赤池章一, 吉田秀嗣, 松田泰平, 八木宏樹, 富山 優. 北海道積丹半島西岸における大型海藻と無節サンゴモ群落の分布面積の年変動. 北海道水産試験場研究報告 1999 ; 56 : 125-135.
- 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. 北海道水産試験場研究報告 2002 ; 63 : 41-54.
- Bosley KM, Dumbauld BR. Use of extractable lipofuscin to estimate age structure of ghost shrimp populations in west coast estuaries of the USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2011 ; 428 : 161-176.
- Conor JJ. Gonad growth in the sea urchin, *Strongylocentrotus purpuratus* (Stimpson) (echinodermata: Echinoidea) and the assumptions of gonad index methods. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1972 ; 10 : 89-103.
- Du C, Anderson A, Lortie M, Parsons R, Bodnar A. Oxidative damage and cellular defense mechanisms in sea urchin models of aging. *Free Radic. Biol. Med.* 2013 ; 63 : 252-263.
- Ebert TA, Hernandez JC, Russell MP. Problems of the gonad index and what can be done: analysis of the purple sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus*. *Mar. Biol.* 2011 ; 158 : 47-58.
- Fuji A. Studies on the biology of the sea urchin, I. Superficial and histological gonadal changes in gametogenic process of two sea urchins, *Strongylocentrotus nudus* and *S. intermedius*. *Bull. Fac. Fish., Hokkaido Univ.* 1960 ; 11 : 1-14.
- 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.
- 川村一広. エゾバフンウニの漁業生物学的研究. 北海道水産試験場研究報告 1973 ; 16 : 1-54.
- 川村一広. 第3章日本のウニ産業種の生態と漁業, 資源管理, 増養殖. 「うに 増養殖と加工・流通 (川村一弘監修)」(株)北海道水産新聞社, 札幌. 1993 ; 148-253.
- Kinoshita J, Endo H, Agatsuma Y. Sexual differences in gonad size and color of *Strongylocentrotus nudus* and *Hemicentrotus pulcherrimus* (Echinoidea: Echinodermata), from maturation to post-spawning in *Sargassum yezoense* bed (Phaeophyceae: Heterokontophyta). *Cah. Biol. Mar.* 2013 ; 54 : 633-639.
- 岸恭一, 木戸康博. タンパク質・アミノ酸の新栄養学. 講談社, 東京. 2007 pp.250.
- Kodama K, Yamakawa T, Shimizu T, Aoki I. Age estimation of the wild population of Japanese mantis shrimp *Oratosquilla oratoria* (Crustacea: Stomatopoda) in Tokyo Bay, Japan, using lipofuscin as an age marker. *Fish. Sci.* 2005 ; 71 : 141-150.
- Komata Y, Kosugi N, Ito T. Studies on the extractives of "uni" . I. free amino acid composition. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* 1962 ; 28 : 623-629 (in Japanese with English abstract).
- Komata Y. Studies on the extractives of "uni" . IV. taste of each component in the extractives. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* 1964 ; 30 : 749-756 (in Japanese with English abstract)
- 栗林貴範, 阿部剛史, 門谷 茂. 北海道日本海沿岸における栄養塩濃度の長期トレンドと海藻藻場. 沿岸海洋研究 2014 ; 52 : 75-81.
- Lomovasky BJ, Morriconi E, Brey T, Calvo J. Individual age and connective tissue lipofuscin in the hard clam *Eurhomalea exalbida*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2002 ; 276 : 83-94.
- 村田裕子 9章 味の科学. 本川達夫編集, ウニ学. 東海大学出版会. 秦野市. 2009 ; 206-220.
- Murata Y, Yoshimura H, Unuma T. Compositions of extractive components in the testes and ovaries of various sea urchins: comparisons among species, sexes, and maturational status. *Fish. Sci.* 2020 ; 86 : 203-213
- 名畑進一, 干川 裕, 酒井勇一, 船岡輝幸, 大堀忠志, 今村琢磨. キタムラサキウニに対する数種海藻の餌料価値. 北海道水産試験場研究報告 1999 ; 54 : 33-40.
- Pearse JS, Cameron, RA. Echinodermata: Echinoidea. In: Giese AC, Pearse JS, Pearse VB. (eds), *Reproduction of Marine Invertebrates*, vol. 6. California, U.S.A. 1991 ; 514-662.
- Philipp JSE, Brey T, Broeg K, Abele D. Physiological aging in the Icelandic population of the ocean quahog *Arctica islandica*. *Aquat. Biol.* 2007 ; 1 : 77-83.
- Porta ED. Pigments in Aging: An Overview. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2002 ; 959 : 57-60.
- Puckett BJ, Secor DH, Ju Se-Jong. Validation and application of lipofuscin-based age determination for Chesapeake Bay blue crabs *Callinectes sapidus*. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2008 ; 137 : 1637-1649.
- Reunov AA, Yurchenko OV, Kalachev AV, Au DWT. An

- ultrastructural study of phagocytosis and shrinkage in nutritive phagocytes of the sea urchin *Anthocidaris crassispia*. *Cell Tissue Res.* 2004 ; 318 : 419-428.
- 菅原 玲, 奥村裕弥, 福田裕毅. 給餌型ウニ低温蓄養システムの開発(重点研究). 平成26年度道総研中央水産試験場事業報告書. 2016 ; 180-183.
- Sulzer D, Mosharov E, Tallozy Z, Zucca FA, Simon JD, Zecca L. Neuronal pigmented autophagic vacuoles: lipofuscin, neuromelanin, and ceroid as macroautophagic responses during aging and disease. *J. Neurochem.* 2008 ; 106 : 24-36.
- Takagi S, Murata Y, Inomata E, Aoki M. N, Agatsuma Y. Production of high quality gonads in the sea urchin *Mesocentrotus nudus* (A. Agassiz, 1864) from a barren by feeding on the kelp *Saccharina japonica* at the late sporophyte stage. *J. Appl. Phycol.* 2019 ; 31 : 4037-4048.
- 高谷義幸, 今村琢磨. エゾバフンウニ (*Strongylocentrotus intermedius*) の絶食による体成分の変化(短報). 北海道水産試験場研究報告 1998 ; 49 : 27-30.
- Unuma, T. Gonadal growth and its relationship to aquaculture in sea urchins. In: Yokota Y, Matranga V, Smolenicka Z (eds). *The sea urchin: from basic biology to aquaculture* Leiden, Netherland. 2002 ; 115-127.
- 鵜沼辰哉. 特性・流通面から見るウニ養殖 成功の鍵はエサの確保. 月刊養殖ビジネス 2019 ; 56 : 4-8.
- Unuma T, Yamamoto T, Akiyama T, Shiraishi M, Ohta H. Quantitative changes in yolk protein and other components in the ovary and testis of the sea urchin *Pseudocentrotus depressus*. *J. Exp. Biol.* 2003 ; 206 : 365-372.
- Unuma T, Murata Y, Hasegawa N, Sawaguchi S, Takahashi K. Improving the food quality of sea urchins collected from barren grounds by short-term aquaculture under controlled temperature. *Bull. Fish. Res. Agen.* 2015 ; 40 : 145-153.
- 白井一茂, 田村怜子, 原日出夫. 野菜残渣を餌としたムラサキウニ養殖について. 神奈川県水産技術センター研究報告 2018 ; 9 : 9-15
- Vaschenko MA, Zhadan PM, Aminin DL, Almyashova TN. Lipofuscin-like pigment in gonads of sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* as a potential biomarker of marine pollution: a field study. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2012 ; 62 : 599-613.
- 渡邊庄一. 長崎県沿岸におけるアカウニの資源生物学的研究. 長崎県水産試験場研究報告 2010 ; 36 : 49-84.
- 渡邊隆司, 浜崎活幸, 横田賢史, Carlos A. Strussmann, 渡邊精一. Lipofuscin を年齢形質としたオウギガニの年級群推定. *Cancer* 2012 ; 21 : 7-12.