

ウニ類の摂食、消化吸収および  
体部位への物質配分に関する研究

猪股 英里

## 目 次

第1章 緒言	・・・3
1. 研究の背景	・・・3
2. 研究史	・・・4
3. 研究の目的	・・・6
第2章 ウニ類の成長および生殖巣の量的発達と品質に及ぼすスサビノリの食物としての効果	・・・8
目的	・・・8
第1節 エゾバフンウニ稚仔の成長	・・・8
1) 材料と方法	・・・8
2) 結果	・・・10
第2節 キタムラサキウニ成体の生殖巣の量的発達と品質	・・・12
1) 材料と方法	・・・12
2) 結果	・・・18
第3節 考察	・・・28
第3章 キタムラサキウニとバフンウニの消化吸収した物質の体部位への配分	・・・32
目的	・・・32
第1節 物質の消化吸収	・・・32
1) 材料と方法	・・・32
2) 結果	・・・36

第2節 物質の体部位への配分	・・・41
1) 材料と方法	・・・41
2) 結果	・・・42
第3節 考察	・・・55
第4章 総合考察	・・・61
謝辞	・・・64
引用文献	・・・65

## 第1章 緒言

### 1. 研究の背景

食用となるウニ類は沿岸岩礁域に生息し、海藻あるいは海草を主要な食物とする植食動物である (Lawrence 1975)。ウニ類を漁獲する主要国はチリ、日本、アメリカ、カナダ、韓国、ロシアである (吾妻 2009)。世界のウニ漁獲量はピークとなった 1995 年の 108,969 t から 2013 年の 74,023 t へと減少を辿っている (FAO <http://www.fao.org/fishery/en>)。ウニ類の需要と供給のギャップは天然資源だけで埋めることはできないとの認識から、1990 年代後半から養殖による生産量の向上をめざした研究が急速に実施されている (McBride 2005, Pearce 2010)。日本の主要なウニ類の漁獲対象種は 6 種である (Andrew et al. 2002)。北日本においてはエゾバフンウニ *Strongylocentrotus intermedius*、キタムラサキウニ *Mesocentrotus nudus*、バフンウニ *Hemicentrotus pulcherrimus* の 3 種が対象となる。エゾバフンウニとキタムラサキウニで日本のウニ総漁獲量の 70% を占める (Andrew et al. 2002)。日本ではウニ資源の維持・増大を図るために、漁場へ人工種苗が放流されている。放流数は 2010 年に 4973 万個体であり、エゾバフンウニが全体の 84.8% を占めた (Agatsuma 2013a)。ウニ人工種苗の放流にいたるまでの中間育成においては、コンブ、ワカメ、野草のオオイタドリなどを食物として与えている (Sakai et al. 2003)。放流による高い経済効果を得るには放流種苗のコストを軽減する必要がある。そのためには、より成長を促進する食物の開発が求められている。

キタムラサキウニは北海道南部、青森県、岩手県で生産された種苗が放流されている (Agatsuma 2013a)。しかし、放流数はエゾバフンウニに比べると少なく、他の地区では天然資源に依存している。また、本種は紅藻無節サンゴモ群落に

高密度に生息する (Agatsuma 2013b)。しかし、それらの生殖巣の量的発達は低下しているため (吾妻 1997)、漁獲されずに放置されている。したがって、これらのウニを給餌により短期育成し、生殖巣の量的な発達の促進と品質が改善できれば商品化に結びつくと考えられる。商品化によって、ウニの間引きが図られれば藻場の保全にもつながると考えられる。キタムラサキウニ成体の短期育成には、短期間で生殖巣の量的な発達と品質の改善が可能な安価な食物が要求される。さらに、給餌時期を決定するためには、摂食、消化吸收した食物の生殖巣への季節的な物質配分を解明する必要がある。

バフンウニは福井県以西で漁獲される (Agatsuma 2013c)。本種は東北と北海道においても分布するが (Agatsuma 2013c) 漁獲されていない。本種は成熟卵巣に強い苦味を呈する含硫アミノ酸プルケリミンが蓄積する (Murata and Sata 2000) ため、卵を保有する時期には生鮮で食用するには不適である。そこで、生殖巣が成熟していない時期に育成して生殖巣を量的発達させ、品質を改善することができれば、商品として出荷できる可能性がある。そのためには、キタムラサキウニ成体と同様に生殖巣への季節的な物質配分を解明する必要がある。

## 2. 研究史

ウニ類の成長と生殖巣の量的発達は食物としてミツイシコンブ *Saccharina angustata* (名畑ら 1999)、*Saccharina (Laminaria) longicuris* (Larson et al. 1980, Keats et al. 1984)、チガイソ *Alaria crassifolia* (Fuji 1967)、*Nereocystis luetkeana* (Vadas 1977) などのコンブ目褐藻が優れることが報告されている。また、ウニ類の体成長や生殖巣の量的発達にはタンパク質、炭水化物、脂質が利用される (Lawrence and Lane 1982)。生殖巣の量的な発達 (McBride et al. 1998, Akiyama et al. 2001, Hammer et al. 2004, Cook and Kelly 2007) と成長 (Akiyama et al. 2001,

Hammer et al. 2004, 2006, Daggett et al. 2005) は同一食物でもタンパク質含有率によって大きく影響される。タンパク質含有率の高い人工飼料は海藻よりも成長と生殖巣の量的発達が著しく促進される (de Jong-Westman et al. 1995, Lawrence et al. 1997)。一方、ウニ類の体成長と生殖巣の量的発達は炭水化物含有率に左右されないことが明らかにされている (Eddy et al. 2012, Heflin et al. 2012a)。また、低濃度の脂質がウニ類の体成長を促進させたことが報告されている (Kennedy et al. 2007)。

ウニ類の生殖巣の色彩、硬さ、味 (遊離アミノ酸含有量) は商品価値を決定する重要な要素である。タンパク質含有率が高い魚肉や配合飼料を与えると、生殖巣は白色を呈する (Agatsuma 1998, Barker et al. 1998, Pearce et al. 2002a)。また、生殖巣指数 (生殖巣重量の体重比) が5以下の生殖巣は褐色を呈することが知られている (Agatsuma et al. 2005)。また、生殖巣の色彩はトウモロコシ、粗びきの小麦粉、コンブ粉末等を含むウニ用に調整した飼料 (Watts et al. 1998)、接着剤としてのスターチの含有 (Pearce et al. 2002a)、そして、 $\beta$ -カロテンの量の増加によって良好になったことが報告されている (Pearce et al. 2002b, Pearce et al. 2004)。一方、配合飼料よりもコンブ属褐藻を与えたウニの生殖巣がより硬くなったことが報告されている (Pearce et al. 2002a, 2004)。生殖巣の遊離アミノ酸含有量は、タンパク質含有率の高い魚肉を与えると、甘味を呈するグリシンやアラニンが減少し (干川ら 1998)、苦味を呈する主にリジンやバリンが増加する (Osako et al. 2006)。これまで、無節サンゴモ群落に生息するキタムラサキウニ、ホクヨウオオバフンウニ *Strongylocentrotus droebachiensis*、ニュージーランドウニ *Evechinus chloroticus* の生殖巣の量的発達と品質の改善を図るため、コンブ目褐藻、フシスジモク *Sargassum confusum*、モロイトグサ *Polysiphonia morrowii*、ダールズ *Palmaria palmata*、オオバアオサ *Ulva lactuca*、魚肉あるいは配合飼料を与

えた研究が行われた (吾妻 1997, 名畑ら 1999, Vadas et al. 2000, James 2006)。

紅藻スサビノリ *Pyropia yezoensis* は、日本における伝統的な養殖の主対象種である。スサビノリの養殖は生産量が調整されている。そのため、余剰生産物の有効利用が望まれている。また、本種はタンパク質含有率が乾燥重量の約 39% と極めて高いことから (香川 2008)、ウニ類の成長と生殖巣の量的発達の促進に有効な食物となる可能性が考えられる。

一方、摂食、消化吸収された物質の主要な体部位である殻、口器、消化管、ならびに生殖巣への配分について、コンブ目褐藻 *Laminaria digitata* を与えた有機物量として報告されている (Guillou et al. 2000)。また、コンブ属褐藻 (Fuji 1967, Otero-Villanueva et al. 2004) と人工飼料 (Fenandez and Boudouresque 2000, Otero-Villanueva et al. 2004) を与えてエネルギー量の配分として明らかにされている。しかし、生物を構成する主要な元素である炭素・窒素量 (Sterner and Elser 2002) の配分については調べられていない。摂食、消化吸収した食物が物質として体内でどのように蓄積あるいは消費されるのかをより理解するためには重要であると考えられる。また、これまで季節的な物質配分のウニ種間の相違を同一の食物を与えて、同時に同一環境で飼育して調べた研究はない。

### 3. 研究の目的

本研究では、タンパク質含有率が高いスサビノリのエゾバフンウニ稚仔の体成長およびキタムラサキウニ成体の生殖巣の量的発達と品質の改善におよぼす食物としての効果を明らかにする。また、キタムラサキウニ成体とバフンウニ成体の体部位への物質と炭素・窒素の配分を季節的に明らかにする。そして、ウニ稚仔の中間育成への応用および成体の給餌による短期育成技術への展開について考察する。

第 2 章においては、スサビノリを食物として与え、エゾバフンウニ稚仔とキタムラサキウニ成体のスサビノリに対する摂食、消化吸収量とエゾバフンウニ稚仔の成長およびキタムラサキウニ成体の生殖巣の量的発達と色彩と遊離アミノ酸含有量をコンブ属褐藻を与えたウニと比較して明らかにする。

第 3 章においては、キタムラサキウニ成体とバフンウニ成体に成分が一定である配合飼料を与えて、年 4 回飼育実験を行い、摂食、消化吸収から殻、口器、消化管、ならびに生殖巣への配分にいたる物質と炭素・窒素量を季節的に調べ、種間の相違を明らかにする。

第 4 章においては、第 2 章で明らかになったエゾバフンウニ稚仔の体成長とキタムラサキウニ成体の生殖巣の量的発達と品質に及ぼすスサビノリの食物としての効果および第 3 章で明らかになったキタムラサキウニ成体とバフンウニ成体の季節的な物質と炭素・窒素の配分にもとづき、ウニの体成長の促進および生殖巣の量的発達の促進と品質改善をめざした中間育成と給餌による短期育成に向けた食物の形状とタンパク質含有率、給餌の適期について提言する。



## 第 2 章 ウニ類の成長および生殖巣の量的発達と品質に及ぼすスサビノリの食物としての効果

### 目的

本章では、飼育実験により、はじめにエゾバフンウニ稚仔のスサビノリに対する摂食量、餌料転換効率、消化吸収効率および成長率と生殖巣指数を調べる。続いて、キタムラサキウニ成体のスサビノリに対する生殖巣指数、生殖巣の色彩と遊離アミノ酸含有量を調べて、いずれもコンブ属褐藻を与えた個体と絶食させた個体と比較する。そして、ウニの成長と生殖巣の量的発達と品質におよぼすスサビノリの食物としての効果を明らかにする。

### 第 1 節 エゾバフンウニ稚仔の成長

#### 1) 材料と方法

2009 年 4 月に北海道栽培漁業振興公社鹿部事業所で採苗したエゾバフンウニ人工種苗を 2009 年 12 月から宮城県水産技術総合センターで乾燥マコンブを食物として与えて約 4 ヶ月間飼育した。2010 年 4 月 13 日に約 140 個体を 10L 角型水槽 (30×15×25 cm) 11 基に収容し、無給餌で 7 日間飼育した。飼育実験は 2010 年 4 月 20 日から 6 月 21 日にかけて行った。ウニは 10L 角型水槽 9 基に 10 個体ずつ収容し、水槽毎に殻径と体重を、それぞれノギス (精度 0.1 mm) と電子天秤 (湿重量、精度 0.1 g) で測定した。

各水槽には濾過海水を約 2 回転/時間で掛け流し、通気を行った。実験区の 3 基にはスサビノリを、対照区として 3 基には乾燥マコンブ *Saccharina japonica* (函館梶原昆布店) をほぼ 1 週間に 1 回の頻度で飽食量与え、残り 3 基は無給餌区として絶食させた。スサビノリは宮城県松島湾で養殖して、2 月に採集後 -30°C

で冷凍し、飼育海水で解凍したものを用いた。乾燥マコンブは函館市沿岸で養殖されたものである。また、摂食以外の要因による食物の重量変化を調べるため、実験区と対照区に与えたほぼ同重量のスサビノリとマコンブを同水槽各 1 基に收容した。そして、スサビノリは收容時と回収時の湿重量を、マコンブは收容時と回収時の乾燥重量を測定し、その比率として重量変化率を求めて摂食量を補正した。スサビノリはウニに与える前にペーパータオルで余分な水分を除去し、湿重量を測定した。マコンブはウニに与える前に恒温乾燥機 (NDO-600ND、EYELA) 80°C で 5~6 日間乾燥後の乾燥重量を測定した。また、ウニに与えたほぼ同量のスサビノリの湿重量と恒温乾燥機で 80°C で 4~5 日間乾燥後の重量を測定し、その比率から摂食量を乾燥重量に換算した。ウニに摂食されずに残ったスサビノリ、マコンブならびに排泄物は、内径 13mm のビニールパイプで吸い上げて目合い 200  $\mu\text{m}$  のナイロン製ネットに濾し取って回収し、両者を区分けしてスサビノリは湿重量、マコンブと両海藻の排泄物は同様に恒温乾燥機で乾燥後の乾燥重量を測定した。また、センサ (TR-5530, T&D) 付き自動温度記録計 (RTR-52A, T&D) を用いて、毎日午前 9 時 50 分、午前 10 時、午前 10 時 10 分の飼育水温を測定して、それらの平均を求めた。

実験開始時の 20 個体と実験終了時の全個体のウニの殻径、体重、生殖巣重量を測定し、生殖巣指数 (生殖巣重量 $\times$ 100/体重 (湿重量)) を求めた。実験期間中の水槽毎のエゾバフンウニ 1 個体あたりの摂食量、タンパク質摂取量、消化吸収効率、ならびにウニの水槽毎の殻径と体重の成長率、ウニのスサビノリとマコンブに対する餌料転換効率を次式により求めた。スサビノリのタンパク質含有率は第 2 章第 2 節で明らかにした値 (36.7%) を用いた。マコンブのタンパク質含有率は香川 (2008) による 9.1% とした。

スサビノリの摂食量 = (与えたスサビノリの湿重量 × 重量変化率 - 残ったスサビノリの湿重量) × 乾湿比 / 個体数

マコンブの摂食量 = (与えたマコンブの乾重量 × 重量変化率 - 残ったマコンブの乾重量) / 個体数

タンパク質摂取量 = 摂食量 × タンパク質含有率

消化吸収効率 = ((摂食量 - 排泄物の乾重量) / 個体数) × 100 / 摂食量

餌料転換効率 = (実験終了時の水槽毎の平均体重 - 実験開始時の水槽毎の平均体重) × 100 / 摂食量 (湿重量)

殻径の成長率 = (実験終了時の水槽毎の平均殻径 - 実験開始時の水槽毎の平均殻径) × 100 / 実験開始時の水槽毎の平均殻径

体重の成長率 = (実験終了時の水槽毎の平均体重 - 実験開始時の水槽毎の平均体重) × 100 / 実験開始時の水槽毎の平均体重

実験区、対照区、無給餌区のウニの殻径と体重の成長率、実験開始時と実験終了時のウニの生殖巣指数の4区間には、正規性 (Kolmogorov Smirnov 検定) および等分散性 (Bartlett 検定) のみとめられないものがあつたため、有意差の有無を Kruskal-Wallis 法によって検定し、Scheffe の多重比較を行つた。また、ウニの実験区と対照区の摂食量、タンパク質摂取量、消化吸収効率、餌料転換効率の有意差の有無を Mann-Whitney の U 検定で解析した。

## 2) 結果

各水槽のエゾバフンウニの殻径と体重の平均値は 15.1~15.8 mm、1.8~1.9 g であり、水槽間で統計学的な有意差はみとめられなかつた (表 1)。エゾバフンウニ稚仔の飼育水温は、4月20日の 8.4°C から 6月15日の 20.0°C までの範囲にあつ

表 1. 実験開始時のエゾバフンウニ稚仔の殻径と体重 (平均値  $\pm$  標準誤差)

水槽	食物	個体数	殻径 (mm)	体重 (g)		$\chi^2$	df	P
A	スサビノリ	10	15.3 $\pm$ 0.2	1.8 $\pm$ 0.1	殻径	7.841	8	0.4491
B		10	15.6 $\pm$ 0.1	1.9 $\pm$ 0.1	体重	5.666	8	0.6846
C		10	15.4 $\pm$ 0.3	1.8 $\pm$ 0.1				
D	マコンブ	10	15.7 $\pm$ 0.2	1.9 $\pm$ 0.1				
E		10	15.4 $\pm$ 0.2	1.8 $\pm$ 0.1				
F		10	15.8 $\pm$ 0.2	1.9 $\pm$ 0.1				
G	無給餌	10	15.5 $\pm$ 0.2	1.8 $\pm$ 0.1				
H		10	15.4 $\pm$ 0.2	1.9 $\pm$ 0.1				
I		10	15.1 $\pm$ 0.2	1.8 $\pm$ 0.1				

た (図 1)。

エゾバフンウニの摂食量、タンパク質摂取量、餌料転換効率、消化吸収効率、殻径と体重の成長率ならびに生殖巣指数を表 2 に示した。実験区における摂食量は 1.80 g であり、対照区の 3.17 g よりも有意に少なかった ( $P < 0.05$ )。実験区におけるタンパク質摂取量 0.66 g は対照区におけるタンパク質摂取量 0.26 g よりも有意に多かった ( $P < 0.05$ )。実験区の餌料転換効率 42.0% は対照区の 20.9% よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。実験区の消化吸収効率は 94.9% と対照区の消化吸収効率 26.7% よりも著しく高く、有意な差がみとめられた ( $P < 0.05$ )。殻径と体重の成長率は食物間で有意な差がみとめられた ( $\chi^2 = 7.200$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.0273$ ,  $\chi^2 = 7.200$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.0273$ )。殻径と体重の成長率は、実験区と対照区で有意な差はみとめられず、いずれも無給餌区よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。エゾバフンウニの生殖巣指数は 4 区間で有意な差がみとめられ ( $\chi^2 = 72.6924$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.0001$ )、実験区の指数は対照区と有意差は認められなかったものの、実験開始時と無給餌区の指数よりも有意に高かった ( $P < 0.01$ )。

## 第 2 節 キタムラサキウニ成体の生殖巣の量的発達および品質

### 1) 材料と方法

2009 年 3 月 27 日に、宮城県石巻市狐崎沿岸水深 4~5 m ( $38^{\circ}21'N$ ,  $141^{\circ}25'E$ ) の無節サンゴモ群落において性成熟サイズに達した殻径約 40 mm (Fuji 1960b) のキタムラサキウニ約 80 個体を採集した。採集したウニを宮城県水産技術総合センターに設置した 40L と 60L 角型水槽に収容し、実験開始時まで 10 日間無給餌で飼育した。各水槽には濾過海水を約 2 回転/時間で掛け流し、通気を行った。

飼育実験は 2009 年 4 月 6 日から 6 月 4 日にかけて行った。10L 角型水槽 9 基にウニを 5 個体ずつ収容し、水槽毎に全個体の殻径をノギス (精度 0.1 mm) で、

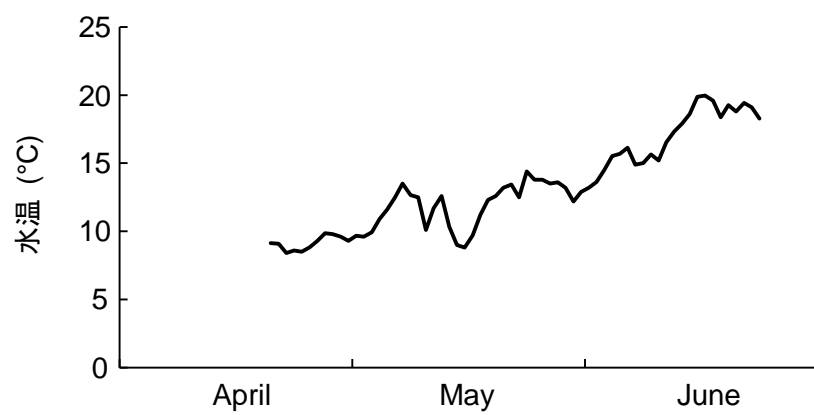


図 1. 飼育水温の日変化

表 2. エゾバフンウニ稚仔のスサビノリとマコンブに対する摂食量、タンパク質摂取量、餌料転換効率、消化吸収効率および無給餌を含めた殻径と体重の成長率 (平均値 ± 標準誤差)  
 アスタリスクと異なるアルファベットは食物区間で有意差があることを示す (P < 0.05)。

	実験開始時	スサビノリ	マコンブ	無給餌
摂食量 (g dry/ ind.)		1.80 ± 0.32	3.17 ± 0.03*	
タンパク質摂取量 (g / ind.)		0.66 ± 0.03*	0.26 ± 0.00	
餌料転換効率 (%)		42.0 ± 0.6*	20.9 ± 0.8	
消化吸収効率 (%)		94.9 ± 0.9*	26.7 ± 0.8	
殻径の成長率 (%)		49.8 ± 0.5 <sup>a</sup>	31.5 ± 1.3 <sup>ab</sup>	-0.5 ± 1.0 <sup>b</sup>
体重の成長率 (%)		194.4 ± 2.0 <sup>a</sup>	123.4 ± 6.4 <sup>ab</sup>	-4.5 ± 1.1 <sup>b</sup>
生殖巣指数	2.8 ± 0.3 <sup>b</sup>	6.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	5.4 ± 0.3 <sup>a</sup>	1.0 ± 0.1 <sup>b</sup>

体重を電子天秤（湿重量、精度 0.1 g）で測定した。実験区の 3 基にはスサビノリを、対照区として 3 基にはリシリコンブ *Saccharina ochotensis* を与え、残り 3 基は無給餌区とした。スサビノリは宮城県松島湾で養殖して、2 月に採集後 $-30^{\circ}\text{C}$ で冷凍し、飼育海水で解凍したものを用いた。リシリコンブは北海道利尻島産の母藻から採苗し、宮城県松島湾で 11 月～3、4 月まで養殖して採集後 $-30^{\circ}\text{C}$ で冷凍し、飼育海水で解凍したものを用いた。スサビノリとリシリコンブは、ほぼ 1 週間に 1 回の頻度で、飽食量を与えた。スサビノリはウニに与える前にペーパータオルで余分な水分を除去し、湿重量を測定した。同時に、摂食以外の要因によるスサビノリの重量変化を調べるため、同水槽 1 基に実験区とほぼ同量を収容し、収容時とほぼ 1 週間後の回収時の湿重量を測定して重量変化率を求めた。また、スサビノリは恒温乾燥機により  $80^{\circ}\text{C}$  で 4～5 日間乾燥後の重量を測定し、乾湿比を求めて摂食量を乾燥重量に換算した。摂食されずに残ったスサビノリと排泄物は内径 13 mm のビニールパイプで吸い上げて目合い  $200\ \mu\text{m}$  のナイロン製ネットで濾過して回収し、両者を分別して残餌については湿重量、排泄物については同様に恒温乾燥機で乾燥した後の乾重量を測定した。また、センサ (TR-5530, T&D) 付き温度データロガー (RTR-52A, T&D) を用いて、毎日午前 9 時 50 分、午前 10 時、午前 10 時 10 分の飼育水温を測定し、それらの平均を求めた。

実験期間中のキタムラサキウニ 1 個体あたりのスサビノリの摂食量とタンパク質摂取量、消化吸收効率と餌料転換効率、ならびに飼育したウニの水槽毎の殻径と体重の成長率を次式により求めた。

$$\text{摂食量} = (\text{与えたスサビノリの湿重量} \times \text{重量変化率} - \text{残ったスサビノリの湿重量}) \times \text{乾湿比} / \text{個体数}$$



タンパク質摂取量 = 摂食量 × タンパク質含有率

消化吸収効率 = (摂食量 - 排泄物の乾重量 / 個体数) × 100 / 摂食量

餌料転換効率 = (実験終了時の水槽毎の平均体重 - 実験開始時の水槽毎の平均体重) × 100 / 摂食量 (湿重量)

殻径の成長率 = (実験終了時の水槽毎の平均殻径 - 実験開始時の水槽毎の平均殻径) × 100 / 実験開始時の水槽毎の平均殻径

体重の成長率 = (実験終了時の水槽毎の平均体重 - 実験開始時の水槽毎の平均体重) × 100 / 実験開始時の水槽毎の平均体重

実験開始時に 15 個体、実験終了時に全個体を解剖し、殻径、体重、生殖巣重量を測定し、生殖巣指数 (生殖巣重量 × 100 / 体重 (湿重量)) を求めた。また、生殖巣の色彩を標準色 (標準色カード 202、日本色研株式会社) を用いて、I (コーヒーブラウン)、III (山吹色)、V (カナリア色) とそれらの中間色 II (I と III の間)、IV (III と V の間) の 5 段階に判定した。色彩は I (コーヒーブラウン) が最も悪く、V (カナリア色) が最も良好であることを表す。同時に、全個体の生殖巣を 20%ホルマリンで固定した。固定した生殖巣は常法に従いパラフィンで包埋し、6 μm 厚の切片を作成した。切片はマイヤーのヘマトキシリンとエオシンで二重染色した。そして、生物顕微鏡下で雌雄を判定し、栄養食細胞と生殖細胞の形成過程から回復期、成長期、成熟前期、成熟後期、一部放出期、放出期の 6 つの発達段階から判定した (Fuji 1960a, Byrne 1990, King et al. 1994)。

生殖巣の遊離アミノ酸含有量を測定するため、全個体の生殖巣の一部を -30°C で保存後、試料 (0.5~1 g) に 10%過塩素酸 5 ml を加え、氷冷下でホモジナイズ後、遠心分離 (7500×g で 10 分) を行った。沈殿に 5%過塩素酸 2 ml を加え、ガラス棒で攪拌して抽出を 2 回行い、すべての上澄みを合わせた。得られた抽出

液を 10N および 1N の KOH で中和し、析出した塩をろ紙 (No.2) でろ過して除き、蒸留水で 25 ml に定容して遊離アミノ酸分析用試料とした。遊離アミノ酸分析は高速アミノ酸分析計 (L-8500A、日立) を用い、リチウム系緩衝液を用いた生体成分分析法により行った。生殖巣の色彩と遊離アミノ酸含有量は組織学的観察から雌雄に分けて示す。

スサビノリとリシリコンブの一般成分を分析するために、 $-30^{\circ}\text{C}$  で冷凍したスサビノリ 198~222 g とリシリコンブ 104~130 g の湿重量を測定後、凍結乾燥機で乾燥させ、ミキサーにより粉末状にした。灰分は、試料約 1 g をるつぼに入れ、マッフル炉 (GT-P2S、SHIROTA) により  $600^{\circ}\text{C}$  で 24 時間加熱し、加熱前後の重量の差より求めた。粗タンパク質は、マイクロケルダール法により測定した全窒素量に窒素係数 6.25 を乗じて求めた。粗脂肪は、ソックスレー法により求めた。炭水化物は、全体の乾重量と灰分、粗タンパク質、粗脂肪含有量の差から求めた。

ウニの年齢を明らかにするために、実験終了時に全個体の囲肛部周辺の殻板を内径 27 mm のコルクボーラーでくり抜き、外表面を砥石で研磨し、ガラスセラミック板上でガスバーナーにより加熱した。そして、キシレンに浸漬し、実体顕微鏡の落射照明下で、生殖板中に年 1 回形成される黒色帯 (輪紋) 数から、年齢を査定した (Jensen 1969, 川村 1973)。

実験終了時のウニの殻径と体重の成長率の食物間、実験開始時および実験終了時のウニの生殖巣の遊離アミノ酸含有量の実験開始時および実験終了時の 4 区間には正規性 (Kolmogorov Smirnov 検定) および等分散性 (Bartlett 検定) のみとめられないものがあつたため、差の有無を Kruskal-Wallis 法によって検定し、Scheffe の多重比較を行った。海藻の一般成分の海藻間の有意差の有無を Mann-Whitney の U 検定で解析した。実験開始時および実験終了時のウニの生殖

巢指数の 4 区間には、正規性および等分散性が認められたため、それらの有意差の有無を一元配置分散分析 (ANOVA) を行い、Tukey の多重比較を行った。生殖巣指数の雌雄の有意差の有無を t 検定により求めた。

## 2) 結果

各水槽のキタムラサキウニの殻径と体重の平均値は 45.2~47.1 mm、39.8~45.8 g であり、水槽間で統計学的な有意差はみとめられなかった (表 3)。実験に用いたキタムラサキウニの年齢は 3 歳から 7 歳の範囲であり、特に 4 歳の個体が 66.7%と多かった (表 3)。

実験期間中の水温は、2009 年 4 月 7 日の 9.7°C から 6 月 4 日の 16.6°C の範囲で推移した (図 2)。

スサビノリとリシリコンブの一般成分の含有率を表 4 に示す。粗タンパク質はスサビノリが 36.7%であり、リシリコンブの 5.9%よりも有意に高かった ( $P < 0.01$ )。炭水化物および灰分は、スサビノリのそれぞれ 38.4%および 23.6%に対して、リシリコンブはそれぞれ 48.2%および 44.5%と有意に高い値を示した ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ )。粗脂肪の含有率は海藻間で有意差は認められなかった ( $P > 0.05$ )。

スサビノリを与えたキタムラサキウニの摂食量、タンパク質摂取量、餌料転換効率、消化吸収効率、殻径と体重の成長率を表 5 に示す。実験期間中の摂食量は 17.26 g、タンパク質摂取量は 6.33 g、餌料転換効率は 8.1%、消化吸収効率は 96.2%であった。殻径の成長率には食物間で有意差がみとめられ ( $\chi^2 = 6.4889$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.0390$ )、実験区が無給餌区よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。体重の成長率も、食物間で有意差がみとめられ ( $\chi^2 = 6.4889$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.0390$ )、実験区が無給餌区よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。

実験開始時と実験終了時のウニの生殖巣の発達段階は雌雄すべて濾胞内に栄

表 3. 実験開始時のキタムラサキウニ成体の殻径と体重 (平均値 ± 標準誤差) および年齢

水槽	食物	個体数	殻径 (mm)	体重 (g)	$\chi^2$	df	P	年齢								
								I	II	III	IV	V	VI	VII		
A	スサビノリ	5	45.6 ± 0.3	39.8 ± 0.8	殻径	10.110	8	0.2574				3	2			
B		5	46.4 ± 0.5	42.8 ± 1.3	体重	11.874	8	0.1569				3	2			
C		5	46.9 ± 0.4	45.8 ± 1.1								4		1		
D	リシリコシブ	5	45.2 ± 0.6	40.2 ± 2.0						1		2	2			
E		5	47.1 ± 0.3	42.4 ± 1.6								4	1			
F		5	45.8 ± 0.4	43.5 ± 1.0								4	1			
G	無給餌	5	45.9 ± 0.6	40.4 ± 1.6						1		4				
H		5	46.3 ± 0.5	42.7 ± 0.3						1		4				
I		5	46.3 ± 0.7	41.9 ± 2.4						3		2				

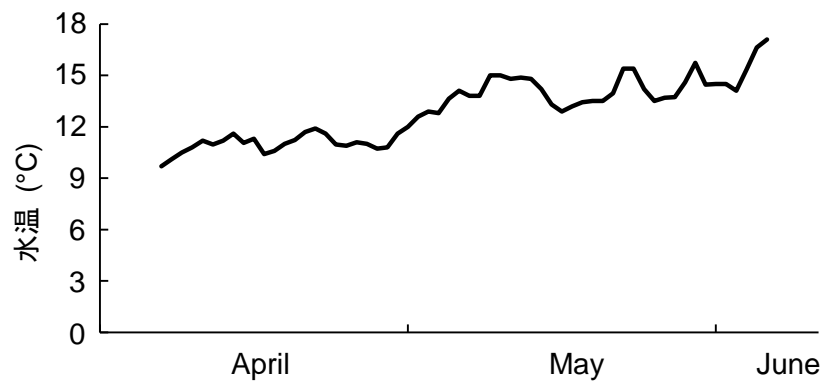


図 2. 飼育水温の日変化

表 4. スサビノリとリシリコンブの一般成分の含有率 (%) (平均 ± 標準誤差)

アスタリスクは食物区間に有意差があることを表す (P < 0.05)。

一般成分	スサビノリ	リシリコンブ
粗タンパク質	36.7 ± 1.2*	5.9 ± 0.5
炭水化物	38.4 ± 1.2	48.2 ± 4.1*
粗脂肪	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.2
灰分	23.6 ± 0.7	44.5 ± 3.5*

表 5. キタムラサキウニ成体のスサビノリに対する摂食量、タンパク質摂取量、餌料転換効率、消化吸収効率およびリシリコンブと無給餌区を含む殻径と体重の成長率 (平均値 ± 標準誤差) 異なるアルファベットは食物区間で有意差があることを示す (P < 0.05)。

	スサビノリ	リシリコンブ	無給餌
摂食量 (g dry/ind.)	17.26 ± 0.09		
タンパク質摂取量 (g)	6.33 ± 0.03		
餌料転換効率 (%)	8.1 ± 0.2		
消化吸収効率 (%)	96.2 ± 0.1		
殻径の成長率 (%)	8.9 ± 0.2 <sup>a</sup>	6.9 ± 0.9 <sup>ab</sup>	2.3 ± 0.1 <sup>b</sup>
体重の成長率 (%)	17.0 ± 0.7 <sup>a</sup>	14.6 ± 1.7 <sup>ab</sup>	-6.5 ± 0.9 <sup>b</sup>

養食細胞が充満する回復期であった。実験開始時と実験終了時のウニの生殖巣指数と生殖巣の色彩の出現頻度を図 3 に示す。生殖巣指数は雌雄とも実験開始時および実験終了時の 4 区間で有意差が認められた (精巣:  $F = 65.599$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.0001$ ; 卵巣:  $F = 85.853$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.0001$ )。生殖巣指数の雌雄間では有意差が認められなかった ( $P > 0.05$ )。スサビノリを与えた実験区の生殖巣指数は精巣で 22.0、卵巣で 20.3 であり、対照区の指数 (精巣 15.3、卵巣 13.4) よりも有意に高かった ( $P < 0.01$ )。実験開始時と無給餌区の指数は実験区と対照区よりも有意に低かった ( $P < 0.01$ )。生殖巣の色彩は、実験開始時と無給餌区で褐色に近い I と II の個体が精巣で 50%、卵巣で 14~22.2% 出現し、山吹色とカナリア色の中間色である IV の個体の比率は、精巣で 2.5~16.7%、卵巣で 0~28.6% だった。対照区では IV の個体が精巣で 37.5%、卵巣で 42.9% であったのに対して、実験区では精巣で 50%、卵巣では 90.9% と著しく高かった。

実験開始時と終了時の実験区、対照区、無給餌区の生殖巣の遊離アミノ酸組成を、精巣と卵巣に分けて表 6 と表 7 に示した。遊離アミノ酸含有量は、卵巣ではすべてのアミノ酸、精巣ではヒスチジン、リジン、アルギニン、オルニチン、 $\alpha$ -アミノ-n-酪酸を除いて実験開始時、実験終了時の実験区、対照区の 4 区間で有意差がみとめられた (表 8)。含有量の多いグリシンは精巣、卵巣ともに実験開始時が実験区と対照区よりも有意に多かった ( $P < 0.05$ )。また、精巣では無給餌区が実験区よりも有意に多かった ( $P < 0.05$ )。リジンは、卵巣では実験区が対照区と無給餌区よりも有意に多かった ( $P < 0.05$ )。ロイシンは、卵巣では実験区が無給餌区よりも有意に多く ( $P < 0.01$ )、対照区で実験開始時と無給餌区よりも有意に多かった ( $P < 0.05$ )。また、精巣では実験区と対照区で無給餌区よりも有意に多かった ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ )。アルギニンは、卵巣では実験区で無給餌区よりも有意に多かった ( $P < 0.01$ )。バリンは精巣、卵巣ともに実験区が無給餌区



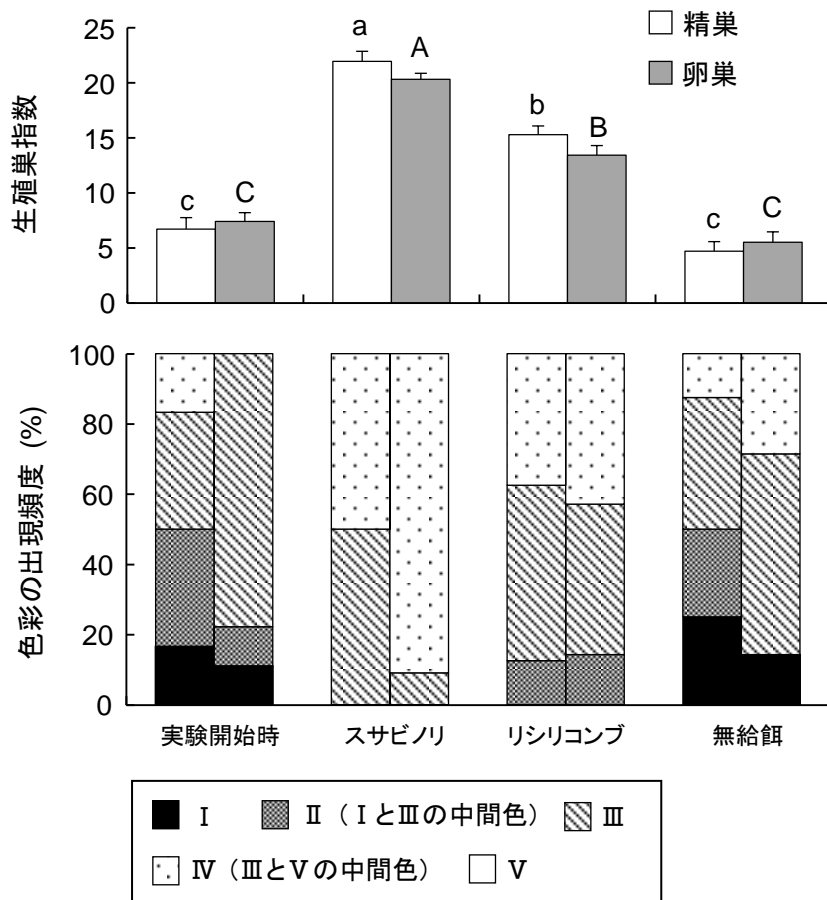


図3. 実験開始時と実験終了時のキタムラサキウニ雌雄の生殖巣指数および生殖巣の色彩の出現頻度

左が精巣、右が卵巢の結果を示す。縦棒は標準誤差を表す。異なる小文字と大文字のアルファベットはそれぞれ精巣と卵巢の食物区間に有意差があることを表す ( $P < 0.05$ )。

表 6. キタムラサキウニの実験開始時および実験終了時のスサビノリ区、リシリコンブ区、無給餌区の精巢中の遊離アミノ酸含有量 (mg/100g)

異なるアルファベットは4区間に有意差があることを表す (P < 0.05)。

	実験開始時	スサビノリ	リシリコンブ	無給餌
プロリン	17.4 ± 42.6 <sup>ab</sup>	25.1 ± 2.6 <sup>a</sup>	19.3 ± 3.0 <sup>a</sup>	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>
アラニン	121.0 ± 24.0 <sup>a</sup>	118.8 ± 25.9 <sup>a</sup>	42.8 ± 3.9 <sup>ab</sup>	38.0 ± 8.0 <sup>b</sup>
グリシン	730.9 ± 108.4 <sup>a</sup>	217.7 ± 69.4 <sup>c</sup>	409.8 ± 22.3 <sup>bc</sup>	574.1 ± 39.2 <sup>ab</sup>
セリン	52.6 ± 27.6 <sup>ab</sup>	136.2 ± 19.9 <sup>a</sup>	113.5 ± 6.8 <sup>a</sup>	12.8 ± 1.6 <sup>b</sup>
スレオニン	135.4 ± 55.0 <sup>ab</sup>	331.4 ± 31.1 <sup>a</sup>	221.9 ± 15.6 <sup>a</sup>	26.7 ± 6.0 <sup>b</sup>
グルタミン酸	79.3 ± 24.2 <sup>ab</sup>	69.0 ± 5.6 <sup>ab</sup>	134.0 ± 6.0 <sup>a</sup>	19.3 ± 1.5 <sup>b</sup>
アスパラギン酸	2.0 ± 3.1 <sup>ab</sup>	2.2 ± 1.3 <sup>ab</sup>	4.5 ± 0.6 <sup>a</sup>	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>
ヒスチジン	48.1 ± 16.6	72.5 ± 12.2	53.9 ± 3.2	55.7 ± 9.6
リジン	357.6 ± 27.5	407.5 ± 28.7	352.7 ± 17.3	334.5 ± 23.7
フェニルアラニン	85.5 ± 11.2 <sup>ab</sup>	96.0 ± 22.5 <sup>ab</sup>	157.5 ± 9.7 <sup>a</sup>	32.8 ± 8.1 <sup>b</sup>
チロシン	204.3 ± 29.2 <sup>ab</sup>	154.5 ± 44.4 <sup>ab</sup>	340.4 ± 12.9 <sup>a</sup>	111.2 ± 28.7 <sup>b</sup>
ロイシン	146.9 ± 23.9 <sup>ab</sup>	331.5 ± 50.5 <sup>a</sup>	387.3 ± 21.9 <sup>a</sup>	49.7 ± 11.0 <sup>b</sup>
イソロイシン	106.5 ± 25.4 <sup>ab</sup>	189.0 ± 27.1 <sup>a</sup>	229.2 ± 14.9 <sup>a</sup>	39.9 ± 8.6 <sup>b</sup>
アルギニン	615.6 ± 254.1	563.0 ± 55.2	594.9 ± 47.1	529.7 ± 27.9
メチオニン	88.9 ± 43.3 <sup>a</sup>	60.5 ± 7.6 <sup>ab</sup>	76.3 ± 6.5 <sup>a</sup>	23.1 ± 3.6 <sup>b</sup>
バリン	172.0 ± 37.6 <sup>ab</sup>	416.8 ± 68.1 <sup>a</sup>	290.7 ± 18.8 <sup>a</sup>	94.5 ± 20.5 <sup>b</sup>
オルニチン	30.8 ± 5.3	33.9 ± 5.6	24.8 ± 1.5	26.3 ± 3.2
アンモニア	19.3 ± 5.4 <sup>a</sup>	11.7 ± 1.1 <sup>ab</sup>	8.2 ± 0.7 <sup>b</sup>	18.9 ± 2.1 <sup>a</sup>
トリプトファン	69.0 ± 27.5 <sup>ab</sup>	70.5 ± 15.7 <sup>ab</sup>	99.8 ± 6.3 <sup>a</sup>	15.6 ± 5.1 <sup>b</sup>
シスタチオン	36.2 ± 11.7 <sup>ab</sup>	56.2 ± 10.8 <sup>a</sup>	40.2 ± 6.4 <sup>a</sup>	14.8 ± 2.3 <sup>b</sup>
α-アミノ-n-酪酸	8.0 ± 9.3	11.3 ± 1.0	11.1 ± 2.8	7.2 ± 5.7
α-アミノアジピン酸	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>	10.1 ± 5.8 <sup>a</sup>	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>
タウリン	120.0 ± 54.8 <sup>ab</sup>	118.4 ± 20.7 <sup>ab</sup>	54.8 ± 7.3 <sup>b</sup>	128.5 ± 10.3 <sup>a</sup>
総遊離アミノ酸	3247.2 ± 152.7 <sup>ab</sup>	3503.8 ± 267.7 <sup>a</sup>	3667.4 ± 142.6 <sup>a</sup>	2153.4 ± 138.7 <sup>b</sup>

表 7. キタムラサキウニの実験開始時および実験終了時のスサビノリ区、リシリコンブ区、無給餌区の卵巣中の遊

離アミノ酸含有量 (mg/100g)

異なるアルファベットは 4 区間に有意差があることを表す (P < 0.05)。

	実験開始時	スサビノリ	リシリコンブ	無給餌
プロリン	2.8 ± 2.8 <sup>b</sup>	28.0 ± 19.6 <sup>ab</sup>	29.0 ± 3.1 <sup>a</sup>	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>
アラニン	126.2 ± 16.8 <sup>a</sup>	93.3 ± 7.0 <sup>a</sup>	79.2 ± 7.0 <sup>ab</sup>	36.4 ± 2.3 <sup>b</sup>
グリシン	718.6 ± 32.4 <sup>a</sup>	314.7 ± 22.3 <sup>b</sup>	368.2 ± 12.3 <sup>b</sup>	540.7 ± 48.5 <sup>ab</sup>
セリン	93.5 ± 11.6 <sup>ab</sup>	155.0 ± 8.9 <sup>a</sup>	168.8 ± 9.9 <sup>a</sup>	15.3 ± 3.9 <sup>b</sup>
スレオニン	169.0 ± 23.5 <sup>bc</sup>	398.2 ± 15.4 <sup>a</sup>	297.6 ± 7.3 <sup>ab</sup>	41.1 ± 12.4 <sup>c</sup>
グルタミン酸	61.2 ± 8.9 <sup>b</sup>	75.4 ± 4.0 <sup>ab</sup>	152.2 ± 7.3 <sup>a</sup>	18.7 ± 0.7 <sup>c</sup>
アスパラギン酸	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>	1.8 ± 0.6 <sup>b</sup>	6.0 ± 0.6 <sup>a</sup>	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>
ヒスチジン	56.8 ± 5.9 <sup>b</sup>	96.0 ± 4.8 <sup>a</sup>	58.3 ± 2.5 <sup>b</sup>	46.5 ± 8.0 <sup>b</sup>
リジン	326.5 ± 27.3 <sup>ab</sup>	404.2 ± 17.9 <sup>a</sup>	295.2 ± 7.7 <sup>b</sup>	265.5 ± 28.5 <sup>b</sup>
フェニルアラニン	89.1 ± 12.9 <sup>bc</sup>	140.6 ± 7.4 <sup>ab</sup>	189.1 ± 9.5 <sup>a</sup>	25.0 ± 4.8 <sup>c</sup>
チロシン	244.6 ± 24.0 <sup>ab</sup>	200.7 ± 16.8 <sup>bc</sup>	345.2 ± 20.1 <sup>a</sup>	92.3 ± 22.5 <sup>c</sup>
ロイシン	184.2 ± 16.6 <sup>bc</sup>	387.9 ± 39.8 <sup>ab</sup>	476.9 ± 22.3 <sup>a</sup>	37.5 ± 8.0 <sup>c</sup>
イソロイシン	123.5 ± 10.0 <sup>bc</sup>	241.8 ± 12.1 <sup>ab</sup>	285.1 ± 15.1 <sup>a</sup>	29.9 ± 5.2 <sup>c</sup>
アルギニン	468.4 ± 24.0 <sup>ab</sup>	565.6 ± 31.9 <sup>a</sup>	497.1 ± 23.9 <sup>ab</sup>	339.0 ± 27.3 <sup>b</sup>
メチオニン	81.7 ± 7.6 <sup>ab</sup>	91.9 ± 5.6 <sup>a</sup>	105.0 ± 5.1 <sup>a</sup>	25.1 ± 4.6 <sup>b</sup>
バリン	193.7 ± 16.4 <sup>bc</sup>	483.9 ± 21.6 <sup>a</sup>	363.2 ± 17.1 <sup>ab</sup>	69.5 ± 9.6 <sup>c</sup>
オルニチン	32.5 ± 3.4 <sup>ab</sup>	38.2 ± 5.2 <sup>a</sup>	27.2 ± 1.9 <sup>ab</sup>	19.2 ± 3.6 <sup>b</sup>
アンモニア	19.6 ± 2.4 <sup>a</sup>	11.4 ± 0.8 <sup>bc</sup>	9.5 ± 0.8 <sup>c</sup>	18.6 ± 3.2 <sup>ab</sup>
トリプトファン	86.6 ± 9.5 <sup>a</sup>	87.5 ± 8.4 <sup>a</sup>	117.0 ± 11.6 <sup>a</sup>	15.7 ± 7.5 <sup>b</sup>
シスタチオニン	14.4 ± 3.2 <sup>ab</sup>	28.4 ± 3.0 <sup>a</sup>	31.1 ± 4.0 <sup>a</sup>	8.3 ± 2.3 <sup>b</sup>
α-アミノ-n-酪酸	10.2 ± 2.5 <sup>ab</sup>	12.4 ± 1.3 <sup>a</sup>	12.7 ± 2.8 <sup>ab</sup>	3.7 ± 1.4 <sup>b</sup>
α-アミノアジピン酸	0.0 ± 0.0 <sup>b</sup>	7.1 ± 2.9 <sup>a</sup>	1.4 ± 0.9 <sup>ab</sup>	0.0 ± 0.0 <sup>ab</sup>
タウリン	129.2 ± 9.2 <sup>ab</sup>	186.8 ± 20.5 <sup>a</sup>	47.1 ± 5.3 <sup>b</sup>	129.0 ± 13.4 <sup>a</sup>
総遊離アミノ酸	3260.9 ± 198.1 <sup>ab</sup>	4050.9 ± 157.7 <sup>a</sup>	3961.9 ± 113.5 <sup>a</sup>	1777.3 ± 167.1 <sup>b</sup>

表 8. 実験開始時および実験終了時のキタムラサキウニ生殖巣の遊離アミノ酸 (FAA) 含有量の実験開始時、  
実験終了時の実験区、対照区間の Kruskal Wallis の検定結果

	FAA	$\chi^2$	df	P	
精巣	プロリン	14.885	3	0.002	
	アラニン	16.319	3	0.001	
	グリシン	19.456	3	0.0002	
	セリン	21.492	3	<0.0001	
	スレオニン	21.425	3	<0.0001	
	グルタミン酸	22.182	3	<0.0001	
	アスパラギン酸	14.237	3	0.003	
	ヒスチジン	2.642	3	0.450	
	リジン	4.029	3	0.258	
	フェニルアラニン	20.103	3	0.0002	
	チロシン	18.514	3	0.0003	
	ロイシン	21.699	3	<0.0001	
	イソロイシン	21.612	3	<0.0001	
	アルギニン	0.801	3	0.849	
	メチオニン	17.238	3	0.001	
	バリン	21.390	3	<0.0001	
	オルニチン	3.282	3	0.350	
	アンモニア	16.441	3	0.001	
	トリプトファン	17.531	3	0.001	
	シスタチオニン	15.806	3	0.001	
	$\alpha$ -アミノ-n-酪酸	7.183	3	0.066	
	$\alpha$ -アミノアジピン酸	11.440	3	0.010	
	タウリン	14.753	3	0.002	
	卵巣	プロリン	18.539	3	0.0003
		アラニン	19.900	3	0.0002
		グリシン	23.989	3	<0.0001
セリン		25.095	3	<0.0001	
スレオニン		30.245	3	<0.0001	
グルタミン酸		27.286	3	<0.0001	
アスパラギン酸		24.360	3	<0.0001	
ヒスチジン		20.487	3	0.0001	
リジン		15.213	3	0.002	
フェニルアラニン		26.299	3	<0.0001	
チロシン		21.599	3	<0.0001	
ロイシン		24.312	3	<0.0001	
イソロイシン		28.218	3	<0.0001	
アルギニン		15.802	3	0.001	
メチオニン		19.029	3	0.0003	
バリン		29.278	3	<0.0001	
オルニチン		11.242	3	0.010	
アンモニア		18.267	3	0.0004	
トリプトファン		19.183	3	0.0003	
シスタチオニン		20.842	3	0.0001	
$\alpha$ -アミノ-n-酪酸		10.976	3	0.012	
$\alpha$ -アミノアジピン酸		11.249	3	0.010	
タウリン		19.890	3	0.0002	

よりも有意に多く ( $P < 0.01$ )、卵巣では実験開始時よりも有意に多かった ( $P < 0.01$ )。総遊離アミノ酸含有量は、精巣、卵巣とも 4 区間で有意差がみとめられ (精巣:  $\chi^2 = 17.5449$ ,  $df = 3$ ,  $P = 0.0005$ ; 卵巣:  $\chi^2 = 22.4916$ ,  $df = 3$ ,  $P = 0.0001$ )、精巣、卵巣とも、実験区と対照区が無給餌区よりも有意に多かった (精巣の実験区:  $P < 0.05$ , それ以外の区:  $P < 0.01$ )。

### 第 3 節 考察

これまでの研究でアマノリ属紅藻 *Porphyra purpurea* を与えたホクヨウオオバフンウニの消化吸収効率がカラフトコンブ *Saccharina latissima* を与えたウニの効率よりも有意に高かったことが明らかにされている (Daggett et al. 2005)。本研究では、スサビノリを与えたエゾバフンウニ稚仔の消化吸収効率は 94.93% と著しく高く (表 2)、フシスジモク、ホソメコンブ *Saccharina religiosa* を与えたエゾバフンウニ稚仔の 4~6 月の消化吸収効率 50~60%、55~74.1% よりも明らかに高い値を示した (Agatsuma 2000)。

ナガコンブ *Saccharina longissima* とコンブ目褐藻 *Macrocystis integrifolia* を与えたエゾバフンウニの餌料転換効率は 4~6 月でそれぞれ 7.5~12.8% と 5~14.9% の範囲にあったことが報告されている (町口 1992)。本研究では、スサビノリを与えたエゾバフンウニの餌料転換効率は 42.0% とマコンブを与えたウニの転換効率よりも有意に高く、ナガコンブと *M. integrifolia* を与えたウニの餌料転換効率よりも著しく高いことが明らかになった。

Daggett et al. (2005) は、アマノリ属紅藻 *P. purpurea* を与えたホクヨウオオバフンウニの成長率が高タンパクである配合飼料を与えたウニの値に相当すると報告している。本研究で使用したスサビノリの粗タンパク質含有率は 36.7% と高かった。実験区の成長率は対照区と差がなかったものの、高い値を示したこと

から、スサビノリはエゾバフンウニ稚仔にとって有効な食物であると考えられた。しかし、実験区と対照区でスサビノリを与えたエゾバフンウニ稚仔の摂食量はマコンブよりも少なかった。ウニ類の摂食量は食物の形態によって影響を受けることから (Klinger 1982)、スサビノリは藻体が浮遊してウニは摂食し難く、薄い藻体は摂食の効率を低下させたと考えられる。

無節サンゴモ群落に生息するキタムラサキウニ成体に 4 月よりホソメコンブを飽食量与えると 2 ヶ月後の 6 月に生殖巣指数は 6.5 から 17.5 に増加する (吾妻 1997)。これに対して本研究では、スサビノリを与えたキタムラサキウニの生殖巣指数は精巣で 22.0、卵巣で 20.3 と著しく増加し、リシリコンブを与えた場合よりも有意に高い値を示した (図 3)。ウニ類の消化吸収効率は食物となる海藻 (草) 種によって異なる (Fuji 1962, Boolootian and Lasker 1964, Lowe and Lawrence 1976, Larson et al. 1980, Frantzis and Grémare 1992, Agatsuma 2000)。また、ヨーロッパバフンウニ *Psammechinus miliaris* の消化吸収効率は配合飼料がカラフトコンブよりも高い (Otero-Villanueva et al. 2004)。しかし、オオバアオサを与えたヨーロッパムラサキウニ *Paracentrotus lividus* (Schlosser et al. 2005) とアオサ属緑藻 *Ulva australis* を与えたオーストラリアミナミムラサキウニ *Heliocidaris erythrogramma* (Senaratna et al. 2005) の消化吸収効率は配合飼料と同等、あるいは高いことが報告されている。また、配合飼料でも成分の相違によって消化吸収効率が異なる (Fernandez and Boudouresque 2000, Senaratna et al. 2005)。ホソメコンブを与えたキタムラサキウニの消化吸収効率は、4 月から 6 月に 40~80% で推移する (吾妻 1997)。また、ワカメの葉状部を与えたキタムラサキウニの消化吸収効率は、4 月から 7 月で 60~70% である (Agatsuma et al. 2002)。これに対して、本研究でスサビノリを与えたキタムラサキウニの消化吸収効率は 96.2% と著しく高いことが明らかになった (表 5)。高い生殖巣指数は、スサビノリの 36.7%

の高いタンパク質含有率と、ウニの高い消化吸収効率によってもたらされたと考えられる。

食用ウニの生殖巣中の主なカロテノイド系色素は  $\beta$ -エキネノンであり (Matsuno and Tsushima 2001)、 $\beta$ -カロテンから生成される (Griffiths and Perrott 1976, Tsushima and Matsuno 1990, Tsushima et al. 1993)。また、 $\beta$ -カロテンは生殖巣の色彩を良好にするのに効果的な色素であることが報告されている (Robinson et al. 2002)。過去の研究から、スサビノリの  $\beta$ -カロテン量は 38000  $\mu\text{g}/100\text{g}$  であり、リシリコンブの 850  $\mu\text{g}/100\text{g}$  よりも著しく高い値であることが明らかになっている (香川 2008)。したがって、スサビノリを与えたウニの生殖巣の色彩が良好になったのは  $\beta$ -カロテン量が多いことを反映していると考えられる。また、Plank et al. (2002) は、 $\beta$ -カロテン含有率の高い飼料を与えると、アメリカシロウニ *Lytechinus variegatus* の卵巣のエキネノン量が精巣よりも多くなることを示しており、本研究における卵巣の色彩が精巣よりも良好だったことと関連しているのかもしれない。

遊離アミノ酸は、ウニ生殖巣の呈味に関与する (小俣ら 1962)。金子ら (2009) は遊離アミノ酸を、プロリン、アラニン、グリシン、セリン、スレオニンなどの甘味アミノ酸、グルタミン酸、アスパラギン酸などの旨味アミノ酸、ヒスチジン、リジン、フェニルアラニン、チロシン、ロイシン、イソロイシン、アルギニン、メチオニン、バリン、オルニチンなどの苦味アミノ酸に分類した。また、ウニ生殖巣の遊離アミノ酸含有量は精巣と卵巣とで異なることが報告されている (平野ら 1978, Osako et al. 2007)。コンブ属褐藻とワカメを与えたキタムラサキウニの精巣のグリシンの量は生殖巣 100 g 当り 766 mg、バリンの量は 196 mg、リジンの量は 210 mg であり、卵巣のグリシンの量は 743 mg、バリンの量は 191 mg、リジンの量は 284 mg であることが明らかにされている (平野ら

1978)。また、ミツイシコンブを与えたキタムラサキウニ生殖巣のグリシンの量は1 g 当り 8 mg、バリンとリジンの量は1 g 当り 1 mg 以下である (名畑ら 1999)。これに対して、魚肉 (イカナゴ *Ammodytes personatus*) のみを 3 ヶ月与えたキタムラサキウニ生殖巣のバリンとリジンの量は1 g 当りそれぞれ 4.80 mg、5.67 mg である (干川ら 1998)。本研究では、スサビノリを与えたキタムラサキウニの精巣のグリシンは 100 g 当り 217.7 mg、卵巣のグリシンは 314.7 mg と著しく少なく、精巣と卵巣のバリンとリジンは、それぞれ 416.8 mg、407.5 mg および 483.9 mg、404.2 mg と著しく多い。したがって、スサビノリを与えたキタムラサキウニの生殖巣は、甘味アミノ酸であるグリシンが著しく少なく、苦味アミノ酸であるバリンとリジンが著しく多いことが明らかになった。しかし、卵巣のリジンの結果を除いて、グリシンとバリンおよびリジンの量はリシリコンブを与えたウニの生殖巣と有意な差はみとめられなかった。小俣 (1964) は、バフンウニ生殖巣中のメチオニンの含有量は少ないものの、その最低呈味濃度は極めて低く、ウニの呈味に大きく関与することを報告している。本研究では味について調べていない。しかし、上記以外の含有量が少ないアミノ酸がウニの呈味に関与している可能性も考えられる。

本研究により、スサビノリを与えることによって生殖巣の色彩は良好になったものの生殖巣には苦味アミノ酸のバリンとリジンの含有量が増加し、甘味アミノ酸のグリシンの含有量が減少したことから、生鮮で食用とするには不適であると判断される。



### 第3章 キタムラサキウニとバフンウニの物質の消化吸収から体部位への配分

#### 目的

本章では、成分が一定である配合飼料を与えたキタムラサキウニとバフンウニを同時に同一環境で飼育し、摂食、消化吸収から殻、口器、消化管ならびに生殖巣への季節的な物質と炭素・窒素の配分量を調べて種間の相違を明らかにする。

#### 第1節 物質の消化吸収

##### 1) 材料と方法

##### (1) ウニの採集と実験デザイン

2012年6月14日、2012年10月9日、2012年12月26日ならびに2013年3月25日に、宮城県石巻市狐崎沿岸 (38°21'N, 141°25'E) の水深1~2mの無節サンゴモ群落から採集した殻径約40mmのキタムラサキウニと殻径約30mmバフンウニ約40個体ずつをただちに宮城県塩釜市の水産総合研究センター東北区水産研究所に運び、濾過海水をかけ流した巡流式水槽で籠に収容して垂下し、約1週間、無給餌で飼育した。その後、東北大学農学研究科低温実験室の循環式飼育システム (Aquatic Habitats, Florida) の1.5L水槽32基にキタムラサキウニ8個体とバフンウニ8個体を1個体ずつ、水槽を乱数表を用いて無作為に選択して収容し、約1週間無給餌で飼育した。そして、収容したウニの殻径 (精度0.1mm) と体重 (精度0.1g) を測定し、配合飼料 (Texas AgriLife Research Mariculture Laboratory, Port Aransas, USA) を2日に1回8時間与え、残った飼料と排泄物はサイフォンを用いて回収後、両者を区分けした。用いた配合飼料は、Lawrence et al. (2011) でエゾバフンウニに与えられた飼料を改良したものである。排泄物は

アルミカップに移し、残った飼料は濾紙 (No.113, Whatman) で濾過した残渣をいずれも約 1 週間 80°C で乾燥させた後の乾燥重量 (精度 0.01 g) を測定した。飼育実験は、2012 年 7 月 2 日から 7 月 30 日、2012 年 10 月 23 日から 11 月 20 日、2013 年 1 月 15 日から 2 月 12 日、ならびに 2013 年 4 月 9 日から 5 月 7 日の 4 回、各 4 週間の期間行った。飼育海水は人工海水 (ライブシーソルト、デルフィス) を使用し、1 時間に 3~4 回転になるように海水を循環させ、通気を行った。各月の実験の水温と塩分は、宮城県水産技術総合センターによる、それぞれ採集地近傍の石巻市江ノ島 (38°23'N, 141°35'E) における 1974 年~2004 年、および荻浜 (38°22'N, 141°26'E) の 2008 年~2012 年の観測値の月別平均値に設定した。明暗周期は 12h : 12h とした。水温は温度データロガー (RTR-52A, T&D) とセンサ (TR-5530, T&D) を用いて毎日午前 10 時に測定した。水質として塩分 (psu)、溶存酸素量 (DO) (mg/l)、アンモニア濃度 ( $\mu\text{g/l}$ ) をそれぞれ導電率計 (ES-51, HORIBA) と導電率セル (3582-10D, HORIBA)、溶存酸素計 (OM-51, HORIBA) と溶存酸素電極 (5420-10D, HORIBA)、ならびにイオンメーター (D-53, HORIBA) とアンモニア電極 (5002A-10C, HORIBA) を用いて毎日測定した。塩分が設定値より 1psu 以上高くなった場合とアンモニア濃度が 500  $\mu\text{g/l}$  以上になった場合は、直ちに海水の約 1/3 から 1/2 の量を交換した。また、摂食以外の要因による配合飼料の重量変化を調べるため、ウニを収容しない水槽 3 基をウニ収容時と同時に乱数表で選択して、ウニに与えたのとほぼ同量の配合飼料を収容した。そして、収容時のほぼ水分を含んでいない重量と 8 時間後の回収時の乾燥重量 (80°C、約 1 週間) から重量変化率を求め、摂食量を補正した。

## (2) 飼料の一般成分の分析

ウニに与えたものと同じ配合飼料の一般成分を分析するために、-30°C の冷凍

庫に入れた配合飼料約 2 g を凍結乾燥させ、乳鉢と乳棒を用いて粉末状にし、分析用サンプルとした。灰分は、試料 30~50 mg をるつぼに入れ、マッフル炉 (GT-P2S, SHIROTA) により 500°C で 4 時間加熱し、加熱前後の重量の差により求めた。水酸化ナトリウム可溶タンパク質は、試料 1~3 mg を 0.4N NaOH で約 3 日間抽出した後、DC プロテインアッセイキット (Bio-rad, California) を用い、ウシ血清アルブミンをスタンダードとして Lowry 法 (Lowry et al. 1951) により求めた。トリクロロ酢酸 (TCA) 可溶炭水化物は、試料 2~3.1 mg を 5%TCA で 1 時間抽出した後 (約 100°C)、D-グルコースをスタンダードとして、フェノール硫酸法 (Dubois et al. 1956) により求めた。総脂質は、試料 65~110 mg について、Folch et al. (1957) に従い、クロロホルム - メタノール法により求めた。

### (3) 測定

実験開始時に、飼育用のキタムラサキウニとバフンウニの殻径と体重を測定した。また、約 1 週間の無給餌飼育前に実験開始時として分析用の両種各 8 個体および飼育終了時の各 8 個体の殻径と体重を測定した。実験開始時に解剖したウニと飼育を開始したウニの殻径と体重には種毎で有意差はみとめられなかった (Mann-Whitney の U 検定、 $P > 0.05$ ) (表 9)。

ウニに与えた配合飼料と実験期間中に回収した排泄物は個体毎に事前に重量を測定した秤量瓶またはアルミホイルに入れ、80°C の恒温乾燥機 (NDO-600ND, EYELA) で約 1 週間収容して乾燥重量を測定して (精度 0.1 mg)、全量を乳鉢あるいはビーズ式細胞破碎装置 (MS-100, TOMY) で均一になるまで破碎し、NCS Analyzer (FLASH2000, Thermo Fisher Scientific) を用いて炭素と窒素含有率および C/N 比を求めた。

実験期間中のウニ 1 個体あたりの配合飼料とその炭素・窒素の摂食量、消化

表 9. 実験開始時の分析用 (A) と飼育用 (R) のキタムラサキウニとバフンウニの殻径と体重 (平均 ± 標準誤差) および殻径と体重の 2 つの処理群間の U 検定結果

	測定日	処理群	n	殻径 (mm)	体重 (g)	P	
						殻径	体重
キタムラサキウニ	2012年 6月 22日	A	8	43.2 ± 0.5	36.9 ± 1.6	0.8334	0.5992
	2012年 7月 2日	R	8	43.4 ± 0.9	38.8 ± 2.3		
	2012年 10月 16日	A	8	41.8 ± 0.3	31.4 ± 0.8	0.5615	0.7929
	2012年 10月 23日	R	8	42.2 ± 0.3	32.3 ± 0.9		
	2013年 1月 7日	A	8	42.3 ± 0.6	33.4 ± 1.4	1	0.8748
	2013年 1月 15日	R	8	42.3 ± 0.5	33.5 ± 1.3		
	2013年 4月 1日	A	8	46.6 ± 0.9	45.6 ± 3.0	0.8748	0.5632
	2013年 4月 9日	R	8	46.8 ± 0.8	47.1 ± 2.0		
バフンウニ	2012年 6月 22日	A	8	33.4 ± 0.4	14.9 ± 0.6	0.4939	0.1278
	2012年 7月 2日	R	8	33.8 ± 0.4	16.4 ± 0.6		
	2012年 10月 16日	A	8	33.3 ± 0.6	15.3 ± 0.8	0.636	0.9581
	2012年 10月 23日	R	8	33.2 ± 0.4	15.6 ± 0.6		
	2013年 1月 7日	A	8	32.5 ± 0.2	14.3 ± 0.4	0.6348	0.8748
	2013年 1月 15日	R	8	32.4 ± 0.3	14.6 ± 0.3		
	2013年 4月 1日	A	8	32.8 ± 0.8	14.7 ± 1.0	0.8746	0.7929
	2013年 4月 9日	R	8	33.0 ± 0.9	15.6 ± 1.3		

吸収量、消化吸収効率を次式により算出した。また、消化吸収量については C/N 比を求めた。

$$\text{配合飼料の摂食量} = \text{給餌量 (湿)} \times \text{重量変化率} - \text{残餌量 (乾)}$$

$$\text{炭素・窒素の摂取量} = \text{摂食量} \times \text{飼料の炭素・窒素の含有率}$$

$$\text{消化吸収量} = \text{摂食量} - \text{排泄物量}$$

$$\text{炭素・窒素の消化吸収量} = \text{炭素・窒素の摂取量} - \text{排泄物量} \times \text{排泄物の炭素・窒素の含有率}$$

$$\text{消化吸収効率} = \text{消化吸収量} \times 100 / \text{摂食量}$$

$$\text{炭素・窒素の消化吸収効率} = \text{炭素・窒素の消化吸収量} \times 100 / \text{炭素・窒素の摂取量}$$

#### (4) 統計学的解析

キタムラサキウニとバフンウニの配合飼料とその炭素・窒素の摂食 (取) 量、消化吸収量、消化吸収効率、消化吸収量の C/N 比は実験を行った時期間で正規性 (Shapiro-Wilk 検定) と等分散性 (Levene 検定) が一部みとめられなかったの で Kruskal-Wallis 法を用いて有意差を検定し、Steel-Dwass の多重比較を行った。また、摂食 (取) 量、消化吸収量、消化吸収効率、消化吸収量の C/N 比の種間の有意差、ならびに配合飼料と消化吸収量の C/N 比間の有意差を Mann-Whitney の U 検定で解析した。

## 2) 結果

### (1) ウニの大きさと飼育環境

実験開始時の分析用と飼育用のキタムラサキウニの殻径と体重の平均値は、

2013年4月にそれぞれ46 mm 台と40 g 台でやや大きかった。他の月は42~43 mm の個体であった。バフンウニは32~33 mm と14~16 g 台であった(表9)。

実験期間中の水温と塩分、溶存酸素量(DO)の4期間毎の平均値を表10に示す。飼育水温は、2012年10~11月に18.6°Cともっとも高く、2013年4~5月に7.9°Cともっとも低かった。塩分は32.8~33.2psu、DOは7.6~7.8 mg/l、アンモニア濃度は136.0~479.3 µg/lの範囲であった。

## (2) 飼料の一般成分

配合飼料の水酸化ナトリウム可溶タンパク質の含有率は20.7%、TCA可溶炭水化物の含有率は27.1%、総脂質含有率は3.4%、ならびに灰分含有率は29.0%であった。

## (3) 飼料とその炭素・窒素の摂食(取)量、消化吸収量、消化吸収効率

キタムラサキウニとバフンウニの配合飼料とその炭素・窒素の摂食(取)量、消化吸収量、消化吸収効率ならびに消化吸収量のC/N比を表11に示す。両種とも消化吸収量のC/N比を除くすべての項目において時期間で有意差がみとめられた( $P < 0.05$ )(表12)。飼料の摂食量とその炭素・窒素の摂取量は、キタムラサキウニは7月が1~2月よりも有意に多く( $P < 0.05$ )、バフンウニは7月が他の時期よりも有意に多かった( $P < 0.01$ )。キタムラサキウニは飼料の消化吸収量が7月と4~5月が10~11月よりも有意に多く( $P < 0.05$ )、炭素・窒素の消化吸収量は7月が10~11月と1~2月よりも有意に多かった( $P < 0.05$ )。バフンウニの飼料の消化吸収量は7月が10~11月と1~2月よりも有意に多く( $P < 0.01$ )、炭素・窒素の消化吸収量は7月が他の時期よりも有意に多かった( $P < 0.05$ )。飼料の摂食量とその炭素・窒素の摂取量およびそれらの消化吸収量はキタムラサキ

表 10. 飼育水温と水質 (平均 ± 標準偏差)

	2012 年 7 月	2012 年 10～11 月	2013 年 1～2 月	2013 年 4～5 月
水温 (°C)	16.8 ± 0.2	18.6 ± 0.2	9.6 ± 0.2	7.9 ± 0.1
塩分 (psu)	32.9 ± 0.4	32.8 ± 0.4	33.2 ± 0.3	32.8 ± 0.2
DO (mg/l)	7.6 ± 0.1	7.7 ± 0.1	7.6 ± 0.1	7.8 ± 0.1
アンモニア濃度 (μg/l)	136.0 ± 80.1	479.3 ± 161.0	242.2 ± 84.3	349.4 ± 85.6

表 11. キタムラサキウニとバフンウニの配合飼料の摂食量、炭素・窒素摂食量およびそれらの消化吸収量、消化吸収効率ならびに消化吸収量の C/N 比 (平均 ± 標準誤差)

	キタムラサキウニ				バフンウニ			
	2012年 7月	2012年 10月～11月	2013年 1月～2月	2013年 4月～5月	2012年 7月	2012年 10月～11月	2013年 1月～2月	2013年 4月～5月
摂食量 (g 乾重)	7.34 ± 0.41 <sup>a*</sup>	5.95 ± 0.28 <sup>ab*</sup>	5.62 ± 0.31 <sup>b*</sup>	6.43 ± 0.45 <sup>ab*</sup>	4.14 ± 0.10 <sup>a</sup>	2.57 ± 0.15 <sup>b</sup>	2.47 ± 0.10 <sup>b</sup>	2.90 ± 0.24 <sup>b</sup>
炭素の摂食量 (g)	2.34 ± 0.13 <sup>a*</sup>	1.90 ± 0.09 <sup>ab*</sup>	1.79 ± 0.10 <sup>b*</sup>	2.05 ± 0.14 <sup>ab*</sup>	1.32 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.82 ± 0.05 <sup>b</sup>	0.79 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.08 <sup>b</sup>
窒素の摂食量 (g)	0.24 ± 0.01 <sup>a*</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>ab*</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>b*</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>ab*</sup>	0.14 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.10 ± 0.01 <sup>b</sup>
消化吸収量 (g 乾重)	4.73 ± 0.18 <sup>a*</sup>	3.70 ± 0.13 <sup>b*</sup>	4.18 ± 0.11 <sup>ab*</sup>	5.23 ± 0.43 <sup>a*</sup>	3.30 ± 0.08 <sup>a</sup>	2.03 ± 0.08 <sup>b</sup>	1.98 ± 0.09 <sup>b</sup>	2.62 ± 0.22 <sup>ab</sup>
炭素の消化吸収量 (g)	1.77 ± 0.07 <sup>a*</sup>	1.42 ± 0.05 <sup>b*</sup>	1.48 ± 0.05 <sup>b*</sup>	1.78 ± 0.13 <sup>ab*</sup>	1.16 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.70 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.87 ± 0.07 <sup>b</sup>
窒素の消化吸収量 (g)	0.19 ± 0.01 <sup>a*</sup>	0.15 ± 0.01 <sup>b*</sup>	0.16 ± 0.01 <sup>b*</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>ab*</sup>	0.12 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>b</sup>
消化吸収効率 (%)	65.2 ± 2.3 <sup>b</sup>	62.9 ± 2.6 <sup>b</sup>	75.4 ± 2.8 <sup>ab</sup>	81.3 ± 3.4 <sup>a</sup>	79.7 ± 1.2 <sup>b*</sup>	79.7 ± 2.1 <sup>b*</sup>	80.6 ± 3.5 <sup>ab</sup>	90.9 ± 2.1 <sup>a</sup>
炭素の消化吸収効率 (%)	76.1 ± 2.0 <sup>b</sup>	75.1 ± 2.3 <sup>b</sup>	83.2 ± 2.1 <sup>ab</sup>	87.0 ± 2.5 <sup>a</sup>	87.6 ± 1.0 <sup>b*</sup>	88.8 ± 1.2 <sup>b*</sup>	89.1 ± 2.1 <sup>ab</sup>	94.6 ± 1.2 <sup>a*</sup>
窒素の消化吸収効率 (%)	79.9 ± 1.6	77.9 ± 2.5	85.3 ± 1.9	88.4 ± 2.1	88.9 ± 1.0 <sup>b*</sup>	90.8 ± 1.0 <sup>b*</sup>	91.5 ± 1.8 <sup>ab</sup>	96.0 ± 0.8 <sup>a*</sup>
消化吸収量の C/N 比	9.26 ± 0.12	9.39 ± 0.13	9.48 ± 0.04	9.57 ± 0.07	9.59 ± 0.05 <sup>*</sup>	9.50 ± 0.04	9.47 ± 0.05	9.59 ± 0.05

異なるアルファベットは時期間に有意差があることを示す (P < 0.05)。

アスタリスクは種間に有意差があることを示す (P < 0.05)。



表 12. キタムラサキウニとバフンウニの配合飼料の摂食量、炭素・窒素摂取量およびそれらの消化吸収量、消化吸収効率ならびに消化吸収量の C/N 比の時期間の Kruskal-Wallis 検定結果

項目	種名	$\chi^2$	df	P
摂食量	キタムラサキウニ	8.082	3	0.0443
	バフンウニ	19.125	3	0.0003
炭素の摂取量	キタムラサキウニ	8.082	3	0.0443
	バフンウニ	19.125	3	0.0003
窒素の摂取量	キタムラサキウニ	8.082	3	0.0443
	バフンウニ	19.125	3	0.0003
消化吸収量	キタムラサキウニ	14.602	3	0.0022
	バフンウニ	18.472	3	0.0004
炭素の消化吸収量	キタムラサキウニ	11.253	3	0.0104
	バフンウニ	19.534	3	0.0002
窒素の消化吸収量	キタムラサキウニ	10.489	3	0.0148
	バフンウニ	19.284	3	0.0002
消化吸収効率	キタムラサキウニ	15.520	3	0.0014
	バフンウニ	11.574	3	0.009
炭素の消化吸収効率	キタムラサキウニ	11.560	3	0.0091
	バフンウニ	11.386	3	0.0098
窒素の消化吸収効率	キタムラサキウニ	10.625	3	0.0139
	バフンウニ	15.384	3	0.0015
消化吸収量の C/N 比	キタムラサキウニ	5.747	3	0.1246
	バフンウニ	4.742	3	0.1917

ウニがバフンウニよりも有意に多かった ( $P < 0.01$ )。キタムラサキウニの飼料の消化吸収効率と炭素の消化吸収効率は、4～5月が7月と10～11月よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。窒素の消化吸収効率は多重比較で有意差はみとめられなかった ( $P > 0.05$ )。バフンウニの飼料の消化吸収効率と炭素・窒素の消化吸収効率は4～5月が7月と10～11月 ( $P < 0.05$ ) よりも有意に高く、7月、10～11月ならびに4～5月はキタムラサキウニよりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。消化吸収量のC/N比は両種とも時期間で有意差がみとめられず(表12)、7月にバフンウニがキタムラサキウニよりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。配合飼料のC/N比は  $9.8 \pm 0.3$  (SE) であり、両種の消化吸収量のC/N比との間には、すべての時期で有意差はみとめられなかった ( $P > 0.05$ )。

## 第2節 物質の体部位への配分

### 1) 材料と方法

#### (1) 体部位の指数、炭素・窒素含有率、C/N比ならびに配分率

第1節において、4時期の殻径と体重を測定した飼育開始時の分析用と飼育終了時の両種各8個体を解剖して殻、口器、消化管(内容物は除く)、ならびに生殖巣の主要な体部位に分けた。そして、80°Cで約1週間乾燥後の各体部位の乾燥重量を測定し、体部位指数(体部位の乾燥重量 $\times 100$ /体全体の乾燥重量)を求めた。以後、破碎してNCS Analyzerを用いて炭素・窒素含有率とC/N比を求めた。そして、体全体に対する各体部位の炭素・窒素の重量比および飼育期間中に消化吸収した飼料の乾燥重量とその炭素・窒素量に対する各体部位の乾燥重量、炭素・窒素の増重量の割合を配分率として次式から算出した。

体全体に対する各体部位の炭素・窒素の重量比 = 各体部位の総炭素・窒素含

有量／体全体の総炭素・窒素含有量

各体部位の乾重と炭素・窒素の増重量 = 各体部位の飼育終了時の乾重と炭素・窒素重量の平均－各体部位の飼育開始時の乾重と炭素・窒素重量の平均

各体部位への乾重と炭素・窒素の配分率 = 各体部位の乾重と炭素・窒素の増重量×100／消化吸収した乾重と炭素・窒素量

## (2) 統計学的解析

体部位指数、炭素・窒素含有率ならびに C/N 比の時期間と体全体に対する各体部位の炭素・窒素の重量比の体部位間に正規性 (Shapiro-Wilk 検定) と等分散性 (Levene 検定) が一部みとめられなかったので Kruskal-Wallis 法を用いて有意差を検定し、Steel-Dwass の多重比較を行った。また、体部位指数、炭素・窒素含有率および C/N 比の開始時と終了時の有意差を Mann-Whitney の U 検定で解析した。

## 2) 結果

### (1) 体部位指数

キタムラサキウニとバフンウニの実験開始時と終了時の殻、口器、消化管、生殖巣の体部位指数を図 4 に示す。実験開始時と終了時の体部位指数は、両種ともすべてに時期間で有意差がみとめられた (表 13)。殻指数は、キタムラサキウニでは開始、終了時とも 10～11 月と 1～2 月が 6～7 月 ( $P < 0.01$ ) と 4～5 月 ( $P < 0.05$ ) よりも有意に高かった。また、10～11 月、1～2 月、4～5 月では終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.01$ )。バフンウニでは、実験終了時に 1～2 月が 6～7 月 ( $P < 0.01$ ) と 10～11 月 ( $P < 0.05$ ) よりも有意に高かった。また、6～7 月

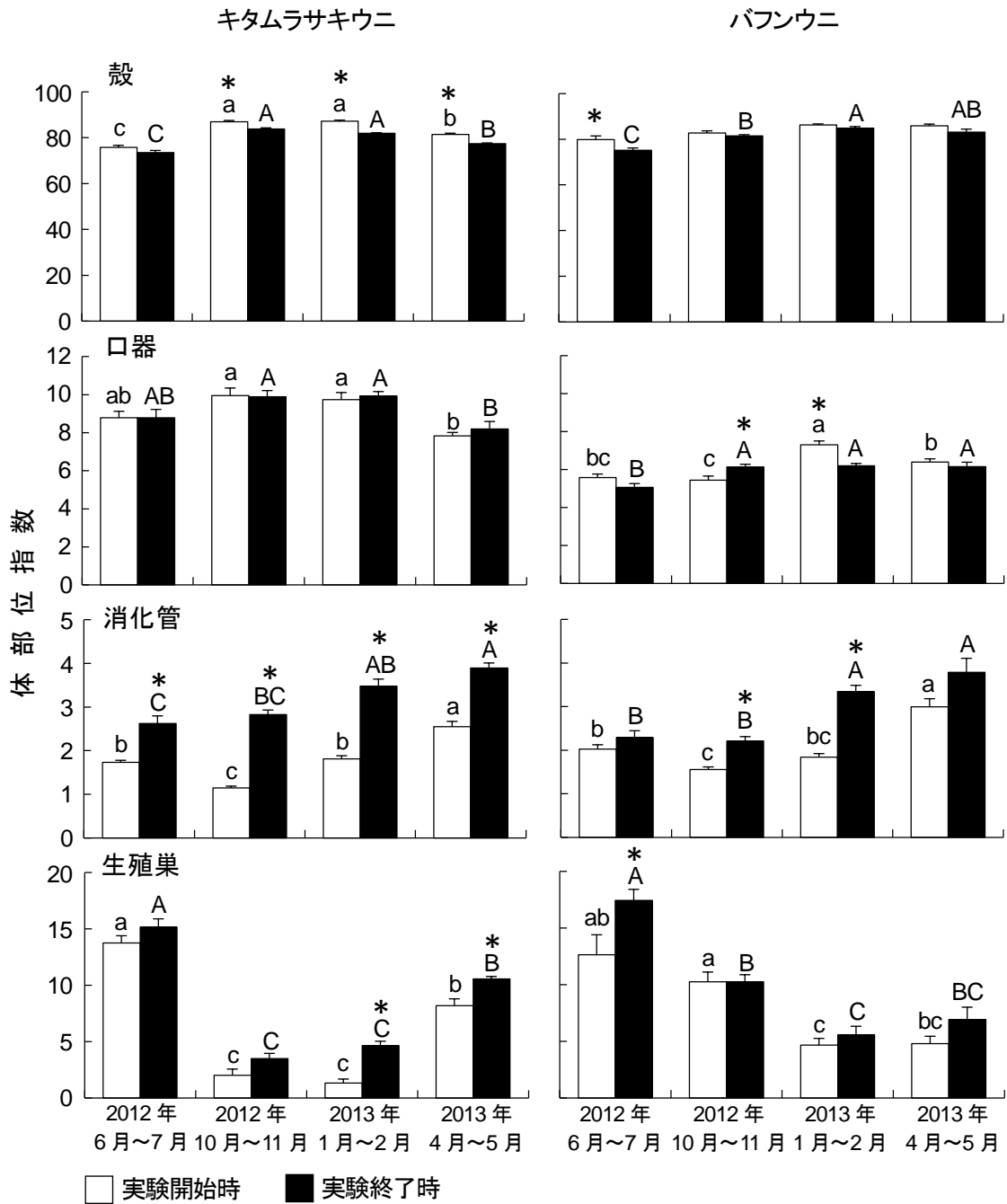


図 4. 実験開始時と終了時のキタムラサキウニとバフンウニの殻、口器、消化管、生殖巣指数  
 縦棒は標準誤差を表す。  
 異なる小文字と大文字のアルファベットはそれぞれ実験開始時と実験終了時に時期間で有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。  
 アスタリスクは実験開始時と実験終了時の間に有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。

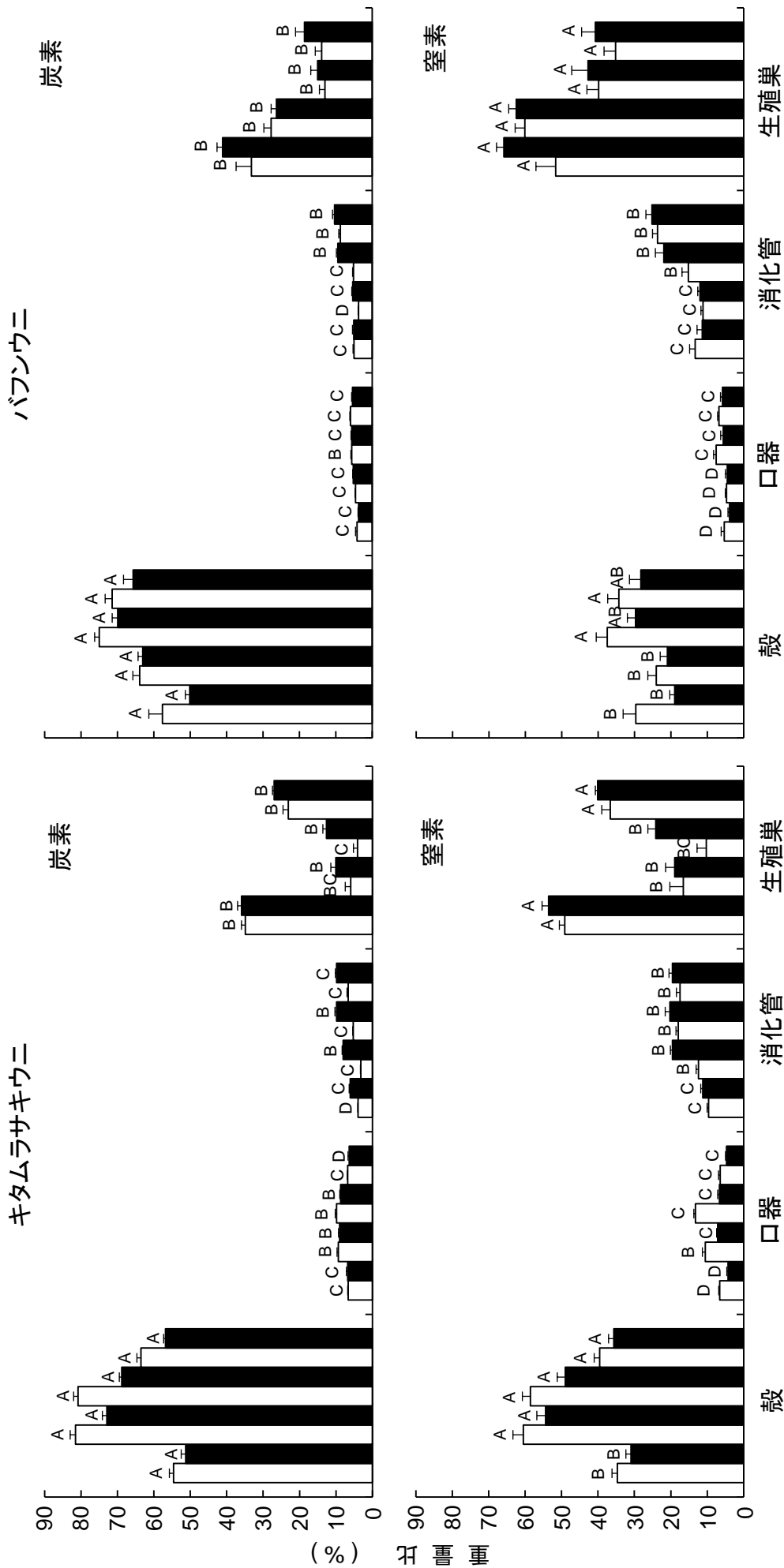
表 13. 実験開始時および終了時のキタムラサキウニとバフンウニの体部位の指数、炭素・窒素含有率、C/N 比の時期間の Kruskal-Wallis 検定結果

項目	要因	キタムラサキウニ			バフンウニ			
		$\chi^2$	df	P	$\chi^2$	df	P	
体部位指数	実験開始時	殻	25.031	3	<0.0001	12.099	3	0.0071
		口器	14.594	3	0.0022	20.724	3	0.0001
		消化管	26.412	3	<0.0001	21.855	3	<0.0001
		生殖巣	26.412	3	<0.0001	16.761	3	0.0008
	実験終了時	殻	26.847	3	<0.0001	19.810	3	0.0002
		口器	11.832	3	0.008	12.352	3	0.0063
		消化管	20.119	3	0.0002	21.781	3	<0.0001
		生殖巣	26.821	3	<0.0001	22.577	3	<0.0001
炭素含有率	実験開始時	殻	2.335	3	0.5038	0.889	3	0.828
		口器	17.616	3	0.0005	4.878	3	0.181
		消化管	17.421	3	0.0006	19.849	3	0.0002
		生殖巣	24.384	3	<0.0001	17.707	3	0.0005
	実験終了時	体全体	25.932	3	<0.0001	14.634	3	0.0022
		殻	1.733	3	0.6296	1.588	3	0.6621
		口器	3.872	3	0.2756	2.685	3	0.4428
		消化管	15.395	3	0.0015	22.338	3	<0.0001
窒素含有率	実験開始時	生殖巣	17.906	3	0.0005	14.065	3	0.0028
		体全体	25.375	3	<0.0001	20.07	3	0.0002
		殻	11.878	3	0.0078	6.497	3	0.0898
		口器	11.869	3	0.0078	7.472	3	0.0583
	実験終了時	消化管	5.830	3	0.1202	2.696	3	0.4409
		生殖巣	21.867	3	<0.0001	18.344	3	0.0004
		体全体	25.457	3	<0.0001	7.960	3	0.0468
		殻	2.651	3	0.4487	2.946	3	0.4
体部位の C/N 比	実験開始時	口器	7.378	3	0.0608	10.094	3	0.0178
		消化管	14.196	3	0.0027	17.707	3	0.0005
		生殖巣	18.915	3	0.0003	17.489	3	0.0006
		体全体	25.974	3	<0.0001	12.466	3	0.0059
	実験終了時	殻	13.230	3	0.0042	7.031	3	0.0709
		口器	10.946	3	0.012	15.173	3	0.0017
		消化管	0.088	3	0.9932	5.918	3	0.1157
		生殖巣	23.594	3	<0.0001	18.742	3	0.0003
実験終了時	体全体	24.057	3	<0.0001	2.969	3	0.3965	
	殻	3.119	3	0.3736	3.673	3	0.299	
	口器	6.628	3	0.0848	12.153	3	0.0069	
	消化管	9.889	3	0.0195	10.938	3	0.0121	
実験終了時	生殖巣	17.389	3	0.0006	18.463	3	0.0004	
	体全体	25.077	3	<0.0001	8.105	3	0.0439	

には終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.05$ )。キタムラサキウニの口器指数は開始、終了時とも 10~11 月と 1~2 月が 4~5 月よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。バフンウニでは開始時に 1~2 月が他の時期よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。終了時は 6~7 月が他の時期よりも有意に低かった ( $P < 0.05$ )。キタムラサキウニの消化管指数は開始時に 4~5 月が他の時期よりも有意に高かった ( $P < 0.01$ )。終了時は、4~5 月が 6~7 月と 10~11 月よりも高かった ( $P < 0.01$ )。また、すべての時期で終了時にかけて有意に上昇した ( $P < 0.01$ )。バフンウニでは開始時に 4~5 月が他の時期よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。終了時には 1~2 月と 4~5 月が他の時期よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。また、10~11 月と 1~2 月で終了時にかけて有意に上昇した ( $P < 0.01$ )。キタムラサキウニの生殖巣指数は開始、終了時とも 6~7 月が他の時期よりも有意に高く ( $P < 0.01$ )、4~5 月が 10~11 月と 1~2 月よりも高かった ( $P < 0.01$ )。また、1~2 月と 4~5 月は終了時にかけて有意に上昇した ( $P < 0.01$ )。バフンウニでは、6~7 月は実験終了時にかけて有意に上昇し ( $P < 0.05$ )、終了時には他の時期よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。また、10~11 月は 1~2 月よりも高かった ( $P < 0.05$ )。

## (2) 体部位の炭素と窒素の含有率と C/N 比

キタムラサキウニとバフンウニの体全体に対する各体部位の炭素と窒素の重量比を図 5 に示す。体全体に対する炭素と窒素の重量比は、すべての時期で体部位間に有意差がみとめられた (表 14)。炭素の重量比は両種ともすべての時期で殻が他の体部位よりも有意に高く ( $P < 0.01$ )、生殖巣がそれに次いだ。窒素の重量比は、殻でキタムラサキウニがバフンウニよりも高い傾向がみられ、10~11 月と 1~2 月に他の体部位よりも有意に高く ( $P < 0.01$ )、6~7 月は生殖巣より低かった。バフンウニの生殖巣の窒素重量比は炭素よりも顕著に高く、6~7 月



□ 実験開始時 ■ 実験終了時

図5. キタムラサキウニとバブンウニの体全体に対する各体部位の炭素と窒素の重量比  
各体部位の棒グラフは左から順に2012年6月～7月、10月～11月、2013年1月～2月、4月～5月の実験開始時と終了時の結果を示す。  
異なる大文字のアルファベットは体部位間に有意差があることを示す。

表 14. キタムラサキウニとバフンウニの体全体に対する各体部位の炭素と窒素の重量比の体部位間の Kruskal-Wallis 検定結果

	種名	測定日	$\chi^2$	df	P		
体全体に対する炭素の重量比	キタムラサキウニ	6月	29.091	3	<0.0001		
		7月	26.662	3	<0.0001		
		10月	24.307	3	<0.0001		
		11月	19.253	3	0.0002		
		1月	24.906	3	<0.0001		
	バフンウニ	2月	22.832	3	<0.0001		
		4月	26.284	3	<0.0001		
		5月	29.091	3	<0.0001		
		6月	26.739	3	<0.0001		
		7月	27.818	3	<0.0001		
		10月	28.253	3	<0.0001		
		11月	26.526	3	<0.0001		
		1月	26.125	3	<0.0001		
		2月	27.480	3	<0.0001		
		4月	26.310	3	<0.0001		
		5月	27.557	3	<0.0001		
		体全体に対する窒素の重量比	キタムラサキウニ	6月	28.912	3	<0.0001
				7月	29.091	3	<0.0001
				10月	18.787	3	0.0003
11月	26.193			3	<0.0001		
1月	24.693			3	<0.0001		
バフンウニ	2月		26.591	3	<0.0001		
	4月		26.253	3	<0.0001		
	5月		27.318	3	<0.0001		
	6月		27.043	3	<0.0001		
	7月		28.102	3	<0.0001		
	10月		29.091	3	<0.0001		
	11月		29.091	3	<0.0001		
	1月		25.855	3	<0.0001		
	2月		23.867	3	<0.0001		
	4月		23.031	3	<0.0001		
	5月		22.307	3	<0.0001		



と 10～11 月に殻よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。両種とも生殖巣の炭素と窒素の重量比は生殖巣指数と類似した時期的な変化がみられた。消化管の重量比は両種とも炭素よりも窒素が高い傾向がみられた。

キタムラサキウニとバフンウニの実験開始時と終了時の各体部位の炭素含有率を図 6 に示す。両種とも、炭素含有率は消化管と生殖巣において殻と口器よりも顕著に高かった。殻の炭素含有率は、両種とも開始時と終了時に時期間で有意差はみとめられなかった (表 13)。バフンウニの口器の炭素含有率は実験開始時と終了時に時期間で有意差はみとめられなかった。キタムラサキウニでは実験開始時にのみ有意差がみとめられたが (表 13)、終了時には時期間で有意差がみとめられなかった ( $P > 0.05$ )。消化管、生殖巣ならびに体全体の炭素含有率は、両種とも開始時と終了時で時期間に有意差がみとめられた (表 13)。キタムラサキウニの消化管の炭素含有率は、開始時には 4～5 月が 6～7 月と 10～11 月よりも有意に高く ( $P < 0.05$ )、終了時には 1～2 月と 4～5 月が 10～11 月よりも高かった ( $P < 0.05$ )。また、すべての時期で終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.01$ )。バフンウニでは、開始時に 4～5 月が 10～11 月と 1～2 月よりも有意に高く ( $P < 0.05$ )、終了時には 4～5 月が 6～7 月と 10～11 月よりも有意に高かった ( $P < 0.01$ )。また、1～2 月は終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.01$ )。キタムラサキウニの生殖巣の炭素含有率は、10～11 月に終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.05$ )。バフンウニでは、6～7 月と 10～11 月で終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.05$ )。キタムラサキウニの体全体の炭素含有率は、すべての時期で終了時にかけて有意に増加した (7 月:  $P < 0.05$ , 他の時期:  $P < 0.01$ )。バフンウニでは、開始時と終了時との間に有意な差はみとめられなかった ( $P > 0.05$ )。

両種の実験開始時と終了時の各体部位の窒素含有率を図 7 に示す。両種とも窒素含有率は炭素含有率と同様に、消化管と生殖巣において殻と口器よりも顕

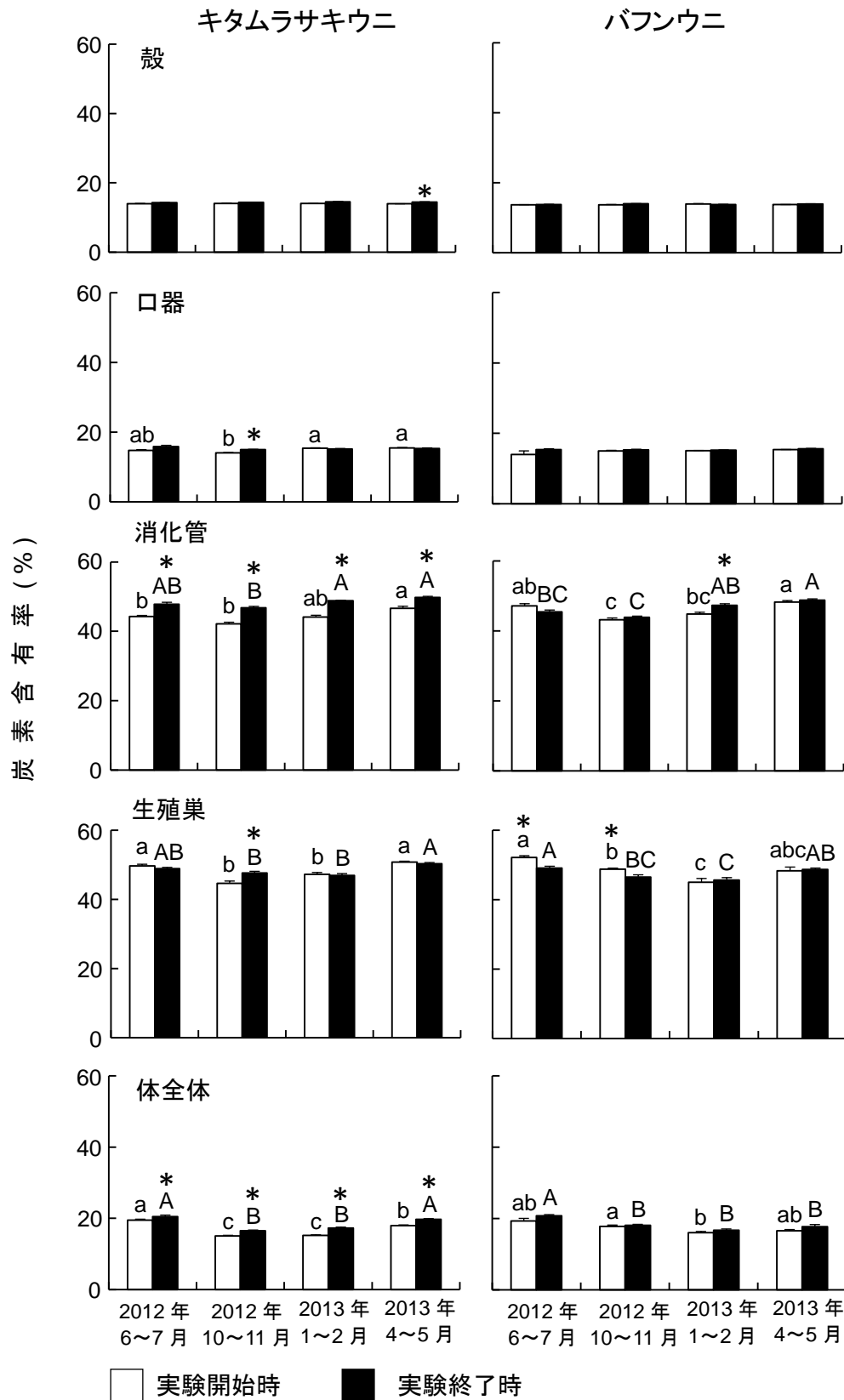


図 6. キタムラサキウニとバフンウニの各体部位の乾燥重量に対する炭素含有率

縦棒は標準誤差を表す。

異なる小文字と大文字のアルファベットは実験開始時と実験終了時に時期間で有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。

アスタリスクは実験開始時と実験終了時の間に有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。

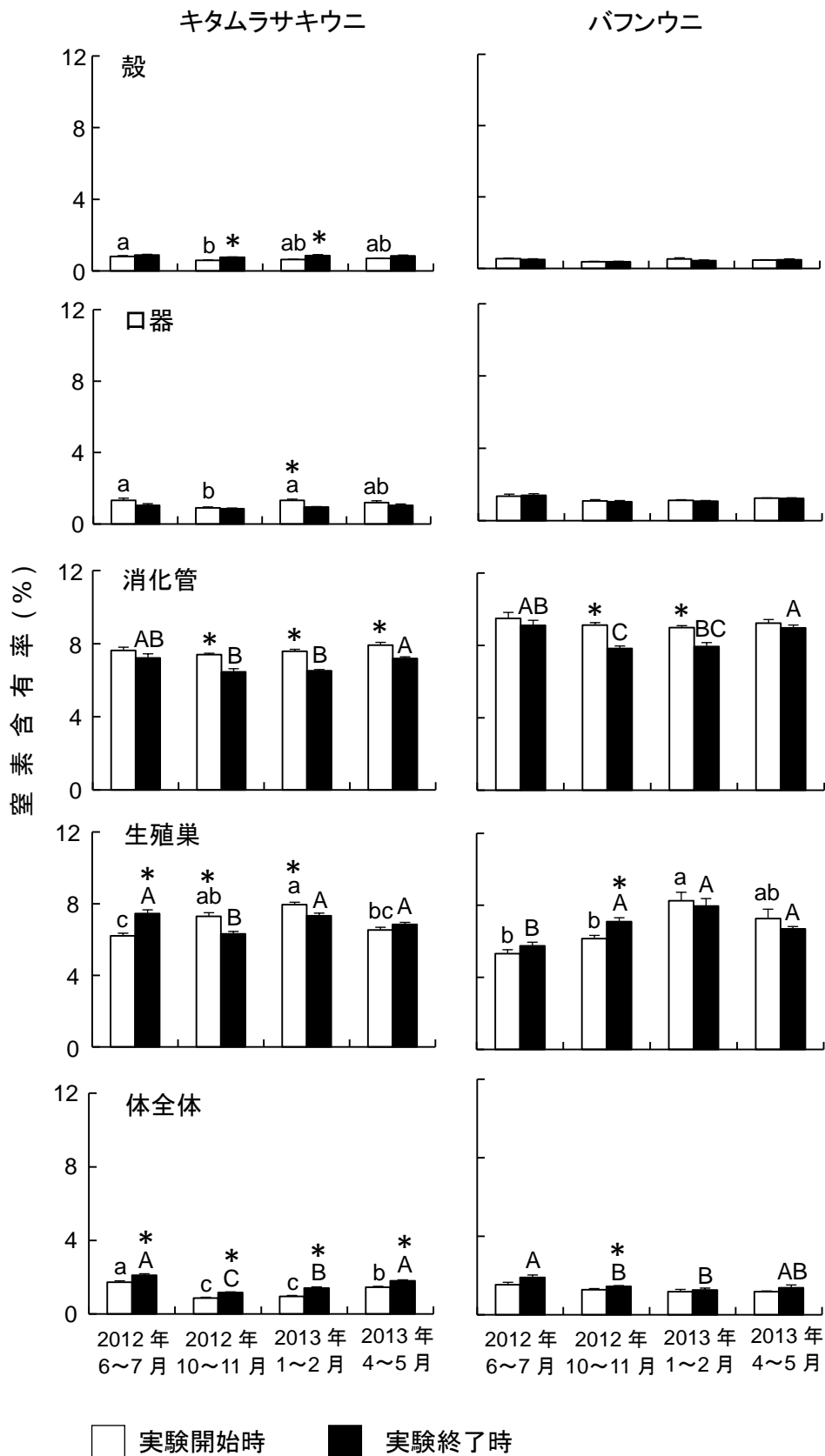


図7. キタムラサキウニとバフンウニの各体部位の乾燥重量に対する窒素含有率  
 縦棒は標準誤差を表す。  
 異なる小文字と大文字のアルファベットは実験開始時と実験終了時に時期間で有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。  
 アスタリスクは実験開始時と実験終了時の間に有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。

著に高かった。殻の窒素含有率は、キタムラサキウニでは開始時のみ時期間で有意差がみとめられた (表 13)。10~11 月と 1~2 月は終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.05$ )。バフンウニでは時期間で有意差はみとめられなかった。キタムラサキウニの口器の窒素含有率は開始時にのみ時期間で有意差がみとめられた (表 13)。バフンウニでは終了時のみ時期間で有意差がみとめられたが ( $P < 0.05$ )、多重比較で差は検出されなかった。両種の消化管の窒素含有率は終了時にのみ有意差がみとめられ (表 13)、キタムラサキウニは 4~5 月が 10~11 月と 1~2 月よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。また、6~7 月を除く 3 期間で終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.01$ )。バフンウニでは 4~5 月が 10~11 月と 1~2 月よりも有意に高かった ( $P < 0.05$ )。また、10~11 月と 1~2 月で終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.01$ )。生殖巣と体全体の窒素含有率は、両種とも開始時と終了時に時期間で有意差がみとめられた (表 13)。キタムラサキウニの生殖巣の窒素含有率は、6~7 月で終了時にかけて有意に増加し ( $P < 0.01$ )、10~11 月と 1~2 月では有意に減少した ( $P < 0.05$ )。バフンウニでは、10~11 月で終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.05$ )。キタムラサキウニの体全体の窒素含有率は、すべての時期で終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.05$ )。バフンウニでは、10~11 月で終了時にかけて増加した ( $P < 0.05$ )。

両種の実験開始時と終了時の各体部位の C/N 比を図 8 に示す。両種とも C/N 比は殻でもっとも高く、口器がそれに次いだ。バフンウニの殻の C/N 比はキタムラサキウニよりも顕著に高かった。キタムラサキウニの殻の C/N 比は開始時にのみ時期間で有意差がみとめられ (表 13)、10~11 月と 1~2 月は終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.05$ )。バフンウニでは、炭素と窒素の含有率と同様に開始、終了時とも時期間で有意差はみとめられなかった (表 13)。キタムラサキウニの口器の C/N 比は開始時にのみ時期間で有意差がみとめられた (表 13)。バ

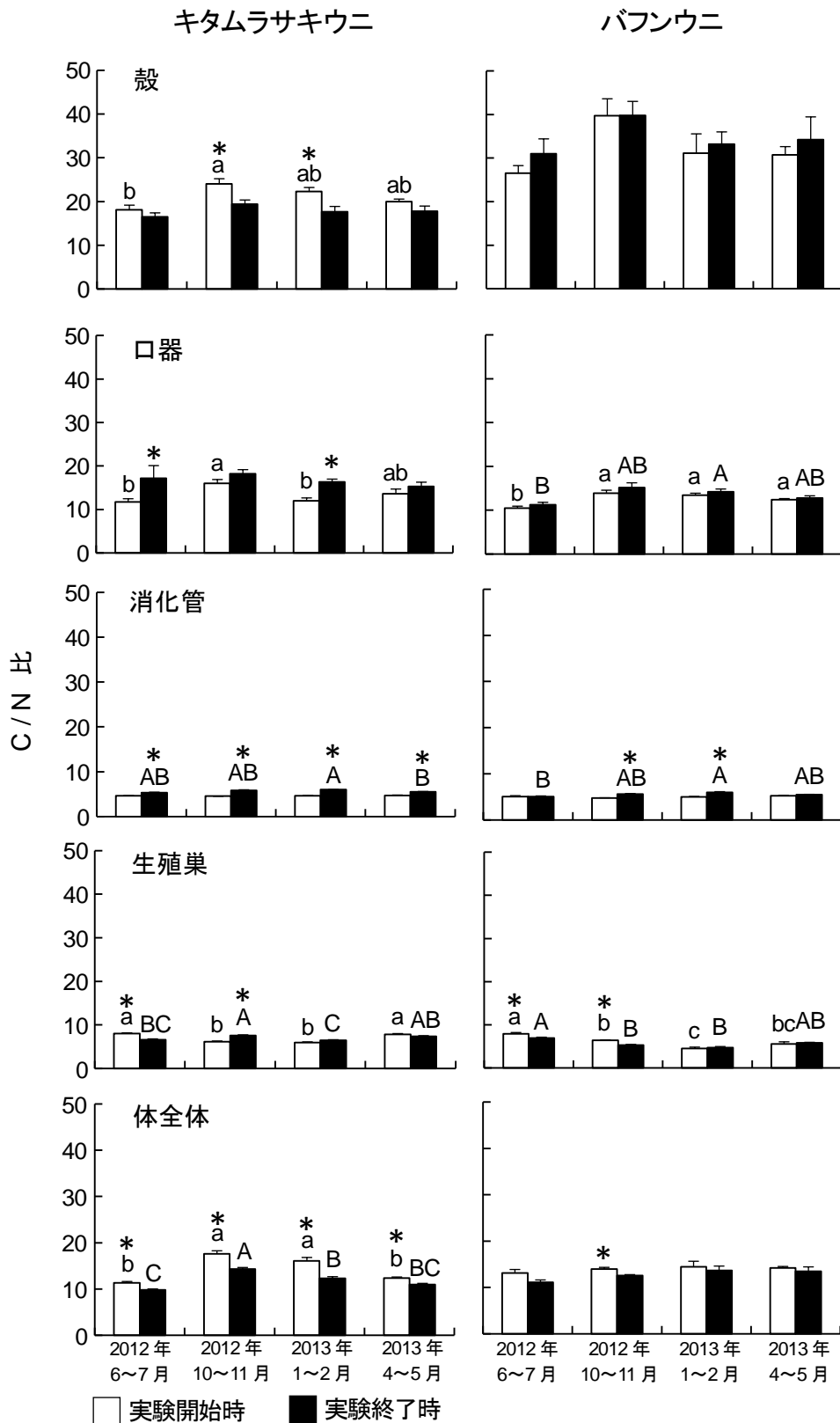


図 8. キタムラサキウニとバフンウニの各体部位の C/N 比

縦棒は標準誤差を表す。

異なる小文字と大文字のアルファベットは実験開始時と実験終了時に時間間で有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。

アスタリスクは実験開始時と実験終了時の間に有意差があることを示す ( $P < 0.05$ )。

フンウニでは、開始時と終了時に時期間で有意差がみとめられた (表 13)。両種の消化管の C/N 比は終了時にのみ有意差がみとめられた (表 13)。キタムラサキウニではすべての時期で終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.01$ )。バフンウニでは 10~11 月と 1~2 月に終了時にかけて有意に増加した ( $P < 0.01$ )。生殖巣の C/N 比は、両種とも開始時と終了時に時期間で有意差がみとめられた (表 13)。キタムラサキウニでは、終了時にかけて 6~7 月は有意に減少し ( $P < 0.01$ )、10~11 月は有意に増加した ( $P < 0.01$ )。バフンウニでは、6~7 月と 10~11 月は終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.05$ )。キタムラサキウニの体全体の C/N 比は開始時と終了時で時期間に有意差がみとめられ (表 13)、すべての時期で終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.05$ )。バフンウニでは、開始時では時期間に有意差がみとめられず (表 13)、終了時は差がみとめられたものの (表 13)、多重比較で検出されなかった。また、10~11 月は終了時にかけて有意に減少した ( $P < 0.01$ )。

### (3) 物質および炭素と窒素の配分

キタムラサキウニとバフンウニの消化吸収した配合飼料 (乾燥物質) とその炭素と窒素量の各体部位への配分率を図 9 に示す。キタムラサキウニの消化吸収した飼料 (乾燥物質) の体全体の配分率は、殻への配分が他の月に比べて顕著に高い 10~11 月にもっとも高く、生殖巣への配分が高かった 1~2 月がそれに次いだ。4~5 月には殻で負の配分がみとめられた。炭素の体全体への配分率は、生殖巣への配分率が高かった 1~2 月にもっとも高く、殻への配分率の高い 10~11 月がそれに次いだ。窒素の体全体の配分率は、生殖巣と殻への高い配分を反映して 1~2 月にもっとも高く、生殖巣への配分がもっとも高い 6~7 月がそれに次いだ。殻への配分率は 10~11 月と 1~2 月が他の時期より高い傾向がみ

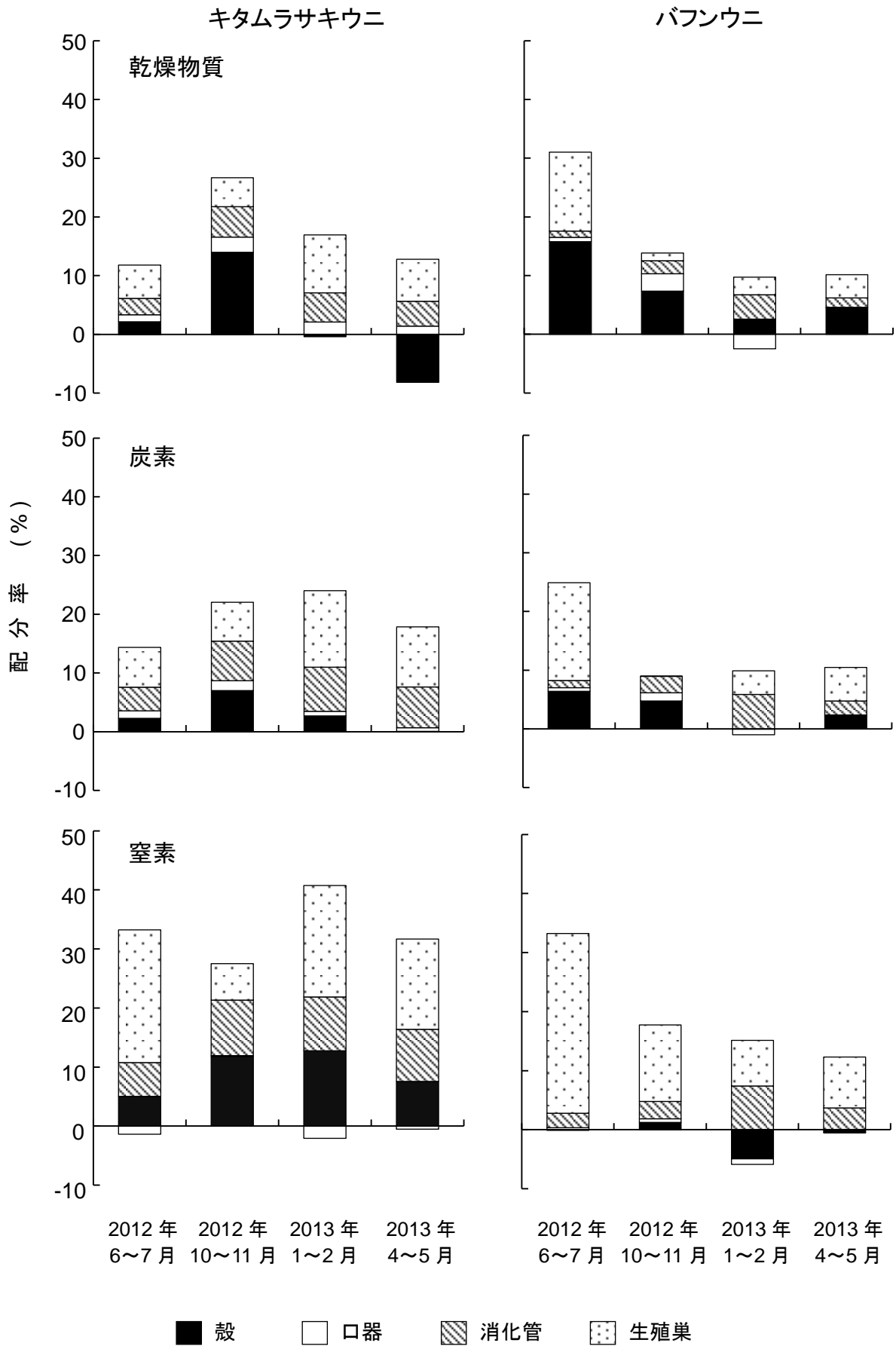


図9. 消化吸収した飼料（乾燥物質）とその炭素と窒素量に対する各体部位への配分率（重量比）

られた。生殖巣の配分率は10～11月で低かったが、他の時期では炭素の配分率より10%以上高かった。消化管への配分は乾燥物質、炭素、窒素のいずれも6～7月に低かった。また、10～11月を除いて口器でわずかな負の窒素の配分がみとめられた。バフンウニの体全体への乾燥物質の配分率は殻と生殖巣への配分率が顕著に高い6～7月がもっとも高かった。また、殻への配分率が低かった1～2月にもっとも低く、口器では負の配分がみられた。炭素の体全体への配分率は生殖巣への配分率が顕著に高い6～7月がもっとも高かった。窒素の配分率は、乾燥重量と炭素の配分率と同様に、生殖巣への配分率が著しく高い6～7月にもっとも高かった。殻では、10～11月を除いた他の時期で負の配分がみとめられ、1～2月は顕著であった。口器の配分率はすべての季節で1%以下と低かった。乾燥物質および炭素と窒素の消化管への配分率は1～2月に他の時期よりも高かった。バフンウニは乾燥物質の殻、炭素と窒素の生殖巣への高い配分率から、いずれも6～7月が他の時期に比べて顕著に高く、窒素の殻への配分はキタムラサキウニに比べて顕著に低かった。

### 第3節 考察

#### (1) 物質の消化吸収

キタムラサキウニの産卵期は9月から10月の年1回である (Agatsuma 2013b)。本研究において、ウニを採集した狐崎沿岸においても10月に生殖巣が放出期になることが確認されたことから (木下ら 2012)、7月は成熟・産卵にむけて栄養を蓄積するために摂食量と消化吸収量が多かったと考えられる。バフンウニは7月に生殖巣の廬胞内に配偶子を残存したまま栄養食細胞を発達させる回復期Ⅰから残存した配偶子が食作用により消失して栄養食細胞が充満する回復期Ⅱに移行する時期に相当する (Ogasawara et al. 2011)。増加した摂食量と消化吸収量



は、栄養食細胞へ栄養が蓄積されて生殖巣の量的な発達に結びつくと考えられる。一方、すべての時期でキタムラサキウニの配合飼料と炭素・窒素の摂食（取）量および消化吸収量がバフンウニよりも多かったのは体サイズの差（表 9）に起因するといえる。

消化吸収効率は季節や水温によって変化する。ホソメコンブを与えたキタムラサキウニの消化吸収効率は 10～80% であり、水温が 6°C へと低下する 2 月には 10% 前後へと著しく低下する（吾妻 1997）。また、アラメまたはアカモクを与えたバフンウニの消化吸収効率はそれぞれ 41～84% と 54～90% であり、2～3 月には 50% 台まで低下する（遠藤 2008）。本研究で用いた配合飼料の消化吸収効率はキタムラサキウニで 63～81%、バフンウニでは 80～91% と高かった。両種とも水温が低い 4～5 月に消化吸収効率が高かったことから、水温以外の要因が関係しているのかもしれない。また、両種の消化吸収量は窒素が炭素よりも少ないのに対して、消化吸収効率は窒素が炭素よりも高いことは、少ない窒素を効率的に利用できることを示す。その能力は消化吸収効率がキタムラサキウニよりも高いバフンウニで顕著であると考えられる。また、4～5 月におけるキタムラサキウニの高い飼料と炭素の消化吸収効率は、その時期の高い消化管指数と消化管の炭素の含有率によって消化管に栄養を蓄積する機構を示唆する。同時期におけるバフンウニの高い飼料と炭素・窒素の消化吸収効率も高い消化管指数と消化管の炭素・窒素の含有率に対応している。

消化吸収量の C/N 比は飼料の C/N 比と差がみとめられなかった。Atkinson and Smith (1983) は、海草と藍藻を含む底生の海産植物 53 属の C/N 比の平均は 22 と報告している。配合飼料の C/N 比は 9.8 と低かった。両種の消化吸収量の C/N 比と有意差がみとめられなかったことは栄養要求を反映していると想定される。6～7 月にバフンウニの消化吸収量の C/N 比がキタムラサキウニよりも高かった

のは、その時期の生殖巣への炭素の配分率が高かったことと一致する。

## (2) 物質の体部位への配分

消化吸収された栄養素は、体成長と生殖巣の量的発達他に、呼吸に利用される (Lawrence and Lane 1982)。消化吸収されて体部位へ配分されない乾燥物質と炭素は主に呼吸として消費され、熱として損失したと考えられる (Fuji 1967)。富士 (1969) は、マコンブを与えた満4歳のエゾバフンウニは、1年間で消化吸収した乾燥物質の90.9%が熱として損失したことを報告している。本研究において、熱として損失した比率の4時期間の平均はキタムラサキウニで86.1%、バフンウニで82.7%であり、エゾバフンウニよりも低く、体部位への配分が多いことを示す。また、呼吸による酸素消費量と水温との間には高い相関がみられ (松山・横浜 1984)、ウニの一種 *Sterechinus neumayeri* の呼吸速度は水温が上昇するほど増加することが報告されている (Brockington and Peck 2001)。キタムラサキウニでは6~7月、バフンウニでは10~11、1~2、4~5月に乾燥物質と炭素の配分率が低く、熱としての損失が大きくなった。水温が最も高かったのは10~11月の期間であることから、水温以外の要因も関わっていると考えられる。キタムラサキウニは7月から10月 (吾妻・川井 1997)、バフンウニは11月から3月 (Agatsuma et al. 2006) にかけて成熟と産卵に向けて生殖巣を発達させるための活発な索餌活動を行うことが知られており、熱としての損失の増加は種毎の生活の年周期に対応していると考えられる。

キタムラサキウニとバフンウニの乾燥物質、炭素・窒素の配分率を種毎の生殖巣の発達段階と対応させて図10に模式化した。キタムラサキウニの10~11月と1~2月の開始・終了時の高い殻指数と口器指数および6~7月におけるバフンウニの終了時の低い同体部位指数と終了時にかけての減少は、それぞれ生

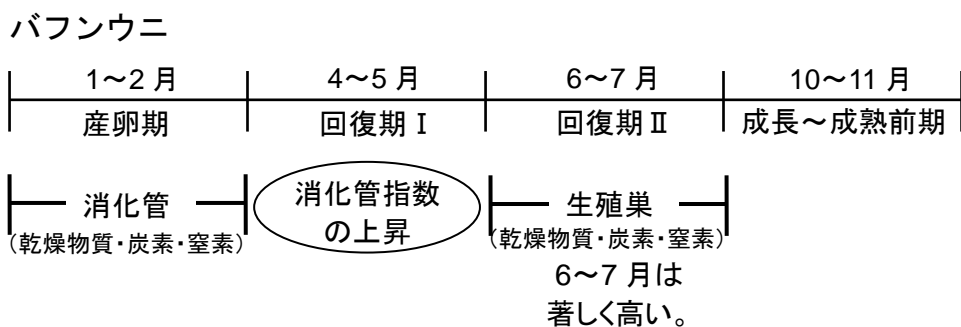
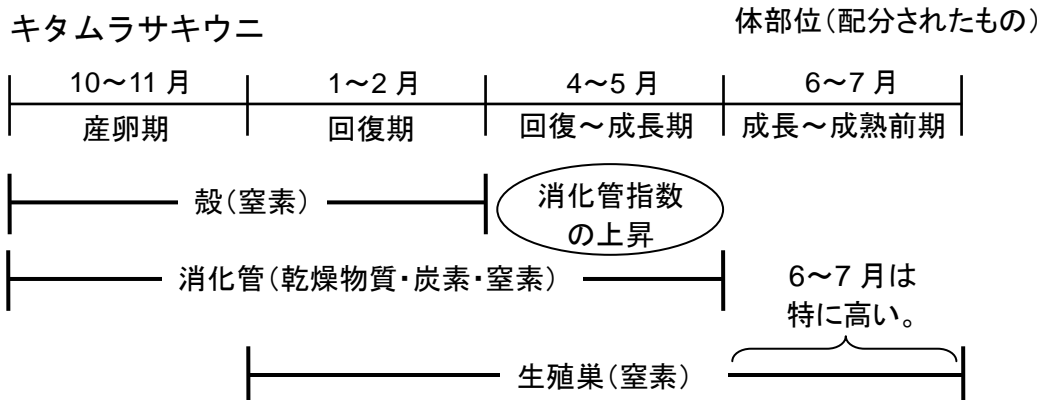


図 10. キタムラサキウニとバフンウニの乾燥物質、炭素・窒素の配分率のまとめ  
 配分率が高い時期を生殖巣の発達段階と対応させて、配分された各体部位とともに示した。カッコ内は配分されたものを表す。生殖巣の発達段階は、それぞれキタムラサキウニは Agatsuma (2013b)、バフンウニは Ogasawara et al. (2011) を引用した。

殖巢指数の低下および上昇に相対的に左右されたと考えられる。また、キタムラサキウニでは 10~11 月と 1~2 月に殻指数が終了時にかけて減少したのに対して、窒素含有率は増加し、C/N 比は減少した。また、殻への窒素の配分率はバフンウニにくらべて顕著に高く、10~11 月は乾燥物質の配分率も高かった。ウニ類の生物生産には、海水中に溶解しているカルシウムやマグネシウムといった無機物質が関与している可能性が高い (Watts et al. 2013)。バフンウニの骨格(殻、口器) 形成に要するカルシウムは食物 (金子ら 1981a) と海水中からも取り込まれる (金子ら 1981b)。また、配合飼料を与えたアメリカシロウニの殻の成長に用いられる炭素の約 40%が食物由来であると報告されている (Prado et al. 2013)。キタムラサキウニとバフンウニでは、殻に配分される炭素のうち、どの程度が食物由来かは明らかではない。しかし、アメリカシロウニと同様に食物からも炭素を取り入れる可能性が考えられる。キタムラサキウニ成体は、産卵後の秋季に殻の成長率が増加する (吾妻 1997)。10~11 月にはバフンウニよりも太くて長い棘と殻を連結する窒素源となるタンパク質の多い筋肉と結合組織へと窒素含有率の増加と高い配分率がもたらされたと考えられる。一方、バフンウニでは殻の炭素と窒素含有率と C/N 比に時期間で有意差はみとめられず、殻への窒素の配分率は極めて低かった。キタムラサキウニの殻への窒素の高い配分率は体全体に対する殻の窒素の高い重量比を反映しているといえる。また、両種とも炭素と窒素の口器の配分率が低く、特に窒素で顕著であった。Heflin et al. (2012b) は、アメリカシロウニの殻への資源配分は食物の栄養成分、特にタンパク質の含有率によって変化するのに対して、口器では食物の栄養成分に影響されないことを報告している。本研究では、殻に対して口器への配分率は低く、季節によっても大きく変化しないことが明らかになった。

キタムラサキウニではすべての時期で終了時にかけて消化管指数および消化

管の炭素含有率と C/N 比が有意に増加し、6~7 月を除いて窒素含有率が有意に減少した。また、バフンウニでは、1~2 月に終了時にかけて消化管指数および消化管の炭素含有率と C/N 比が有意に増加し、窒素含有率が有意に減少した。実験開始時の消化管の C/N 比はキタムラサキウニで 4.6~4.7、バフンウニで 4.7~5.2 と飼料とその消化吸収量の C/N 比よりも低い。消化管は吸収した栄養を一時的に蓄積する器官であることから (Klinger et al. 1988, Lares and Pomory 1998)、消化吸収された飼料がそのまま消化管へ蓄積されて消化管の C/N 比の増加をもたらしたと考えられる。そのため、消化管への乾燥物質、炭素ならびに窒素の配分率は、キタムラサキウニでは熱としての損失が大きかった 6~7 月以外の時期で高く、バフンウニでは 1~2 月で高かった。バフンウニの消化管への配分率は、産卵直後の生殖巣が回復期 I にあり、摂食活動が活発な時期である 1~2 月 (Ogasawara et al. 2011) にのみ特異的に配分率が高いことが明らかになった。

キタムラサキウニとバフンウニの生殖巣指数は産卵によって、それぞれ 10~11 月および 1~2 月に低下したと考えられる (木下ら 2012)。また、キタムラサキウニは生殖巣が回復期から成長期にいたる 1~2 月と 4~5 月 (吾妻 1997) に生殖巣指数は飼育終了時にかけて有意に増加し、1~2 月には乾燥物質と炭素・窒素の配分率も高かった。バフンウニでは消化吸収量が多かった 6~7 月に終了時にかけて生殖巣指数が有意に増加し、他の時期に比べて生殖巣への乾燥物質、炭素・窒素の配分率が著しく高かった。また、キタムラサキウニは 6~7 月、バフンウニは 10~11 月に終了時にかけて生殖巣の窒素含有率が有意に増加して C/N 比が有意に減少した。これは、産卵前の生殖巣中に形成された配偶子の存在によると考えられる。また、キタムラサキウニでは 10~11 月に終了時にかけて生殖巣の炭素含有率が増加し、窒素含有率が減少して C/N 比が増加した。これは産卵で配偶子が放出されて窒素含有率が減少したためであり、10~11 月の窒

素の低い配分をもたらしたと考えられる。また、バフンウニは6~7月と10~11月に生殖巣の炭素含有率とC/N比が終了時に減少した。この時期は、生殖巣が回復期Ⅰから回復期Ⅱ、そして成長期へと移行する時期に相当する (Ogasawara et al. 2011)。配偶子形成が始まると、生殖巣のグリコーゲン含有量が消費されて減少する (Marsh et al. 2013) ことから、炭素が相対的に減少したのかもしれない。両種の生殖巣は生殖周期に対応した炭素と窒素含有率の季節変化がみとめられ、キタムラサキウニではそれらの配分率も産卵期の10~11月に低い傾向がみられた。しかし、バフンウニは消化吸収量の多い6~7月に生殖巣への配分率が著しく高く、他の時期では低い明確な種間の相違がみとめられた。バフンウニでは、窒素の消化吸収効率が1~2月を除いてキタムラサキウニよりも高かったことが、生殖巣への高い窒素の配分率に結びついた可能性がある。

キタムラサキウニではすべての時期で、体全体の炭素と窒素含有率が終了時にかけて有意に増加し、C/N比が有意に減少した。このことは、開始時と比べて相対的に窒素量が増えたことを表している。それに対してバフンウニでは、10~11月のみ終了時にかけて窒素含有率が増加し、それによってC/N比が減少した。また、実験終了時の体全体のC/N比はキタムラサキウニでは9.8~14.3、バフンウニでは11.1~13.7であり、Agatsuma et al. (2013) で報告されたアラメ、エゾノネジモク、ならびに無節サンゴモ群落とマコンブ給餌または無給餌のキタムラサキウニの体全体のC/N比10.2~11.2、バフンウニの体全体のC/N比10.9~18.9とほぼ同等の値を示した。C/N比が低い食物を与えても、ウニの体全体のC/N比は変わらず、バランスを維持することが明らかになった。

## 第4章 総合考察

本章においては、第2章と第3章で得られた結果に基づいて、エゾバフンウニの稚仔については生産された人工種苗が漁場に放流されるまでの中間育成技術、キタムラサキウニとバフンウニの成体については生殖巣の量的な発達と品質の改善を短期間で効率的に図るための新たな給餌技術を提言する。

これまで、アカウニ *Pseudocentrotus depressus* 稚仔の成長は粗タンパク質含有率が20~50%の配合飼料が10%の飼料よりも有意に速いことが報告されている (Akiyama et al. 2001)。Hammer et al. (2004) は、アメリカシロウニ稚仔の成長がタンパク質含有率が21~33%で最も速くなることを報告した。第2章において、エゾバフンウニ稚仔の餌料転換効率は、タンパク質含有率が高いスサビノリに対して著しく高かった。しかし、成長率はマコンブを与えたウニと差がみとめられなかった。スサビノリは藻体が浮遊して摂食し難く、薄い藻体は摂食の効率を低下させて摂食量の減少をもたらしたと考えられる。そこで、ノリを固形化した飼料として与えればウニが摂食しやすく摂食量も増加して、より成長が促進されると考えられる。また、スサビノリの粗タンパク質含有率は36.7%であったため、エゾバフンウニ稚仔の体成長に適している可能性がある。最大の成長量をもたらす飼料のタンパク質含有率について今後明らかにする必要がある。

キタムラサキウニ成体については、第2章において、スサビノリを与えたウニの生殖巣は量的に発達し、色彩は良好だったが、苦味アミノ酸が増加し、甘味アミノ酸が減少することが明らかになった。de Jong-Westman et al. (1995) は、ホクヨウオオバフンウニ成体の生殖巣がタンパク質含有率が10%よりも20%の配合飼料で有意に量的に発達したことを報告しているが、生殖巣の質については考慮していなかった。Pearce et al. (2002b) は、ホクヨウオオバフンウニの生殖

巢の質（色彩と味）を考慮した生殖巣の量的発達に飼料のタンパク質含有率が10～19%で最大となる可能性を示唆した。また、アメリカシロウニの摂食した量に対する生殖巣重量の割合はタンパク質含有率が9%よりも15、21、33%の飼料が有意に高い (Hammer et al. 2004)。本研究で用いたスサビノリの粗タンパク質含有率は36.7%とこれらのウニの至適含有率よりも顕著に高く、生殖巣の苦味の遊離アミノ酸含有量の増加に関わっている可能性がある。余剰に生産されたスサビノリとともに問題となっている低品質な色落ちしたノリのタンパク質含有率は24.8～28.4%と通常のノリよりも低い (秋本・志水 2005)。また、色落ちノリはβ-カロテンの量が30000～32100μg/100g (秋本・志水 2005) と通常のスサビノリのβ-カロテン量 (38000μg/100g) と同程度の値を維持するため、生殖巣の色彩の改善は可能であると判断される。色落ちノリを食物として用いるためには、生殖巣の品質が低下せず、量的発達が最大となる食物中のタンパク質含有率を明らかにする必要がある。そして、配合飼料化した色落ちノリのタンパク質含有率の調整が必要とされるかもしれない。また、第3章で用いた配合飼料の可溶タンパク質含有率は20.7%であり、ホクヨウオオバフンウニ生殖巣の量的発達をもたらす至適含有率に近い。配合飼料と消化吸収した飼料のC/N比に有意差がなかったことは栄養要求を反映していると考えられた。この配合飼料を与えたキタムラサキウニ成体の生殖巣への窒素の配分率は産卵後1～2月から高くなることが明らかになった。しかし、1～2月は殻への窒素の配分率も高い。殻への窒素の配分率が減少する2月以降に給餌を開始して、生殖巣の量的な発達を促進させるとともに品質の改善を図ることが可能であると考えられる。

バフンウニ成体については、第3章において、6～7月に生殖巣への著しく高い乾燥物質と炭素・窒素の配分率がみとめられた。6～7月は回復期Ⅱに移行し、残存卵が減少してプルケリミンの蓄積量は減少する (Murata et al. 2002)。したが



って、この時期に生殖巣の量的発達をもたらす至適含有率に近い色落ちノリなどの食物、あるいは飼料を与えて短期間に効率的に生殖巣を量的に発達させて、収穫が可能になると考えられる。しかし、バフンウニの生殖巣の品質については、緑藻を与えると色彩が良好であった報告しかない (川名 1938)。収穫に向けた品質改善と収穫時のバフンウニ生殖巣の生鮮としての食用の可否について明らかにする必要がある。本研究によりバフンウニの窒素の消化吸収効率はキタムラサキウニよりも高いことが明らかになった。キタムラサキウニとバフンウニ成体の生殖巣の量的発達の促進と品質の改善を図るには、種固有の栄養要求を明らかにする必要がある。そのためには、摂食、消化吸収した栄養成分がウニの各体部位の成分にどのように反映されていくのかを明らかにする研究が必要である。

## 謝 辞

本研究の遂行と取りまとめにあたり、懇切なご指導とご校閲を賜った東北大学大学院農学研究科水圏植物生態学分野の吾妻行雄教授に心から感謝申し上げます。有益なご指摘をいただいた同研究科生物海洋学分野の遠藤宜成教授と水産資源化学分野の山口敏康准教授に厚く御礼申し上げます。本研究を行う機会を与えていただいた東北大学谷口和也名誉教授（故人）に深く謝意を表す。研究結果の取りまとめに終始ご指導いただいた水圏植物生態学分野の青木優和准教授と遠藤 光助教に厚くお礼申し上げます。南フロリダ大学の John M. Lawrence 教授と Texas Agrilife Research Mariculture Laboratory at Port Aransas の Addison L. Lawrence 教授には実験デザインについて多大なご指導をいただくとともに本研究で用いた配合飼料を提供いただいた。独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所の村田裕子博士には遊離アミノ酸含有量を分析していただいた。東北大学大学院農学研究科水産資源科学分野の中野俊樹助教には一般成分についてご指導いただいた。水圏動物生理学分野の高橋計介准教授には組織切片の作製をご指導いただいた。水産資源生態学分野の伊藤絹子助教には炭素、窒素量の分析のご指導とご協力をいただいた。ウニの飼育実験に際して、宮城県水産技術総合センターの職員各位、および独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所の村岡大祐主任研究員には多大なるご支援とご協力を賜った。北海道栽培漁業振興公社鹿部事業所の方々にはエゾバフンウニ人工種苗を提供していただいた。宮城県漁業協同組合石巻東部支所の平塚秀正氏にはウニの採集に対して多大なご協力をいただいた。同組合塩竈支所の伊勢修夫氏にはスサビノリとリシリコンブを提供していただいた。ここに記して著者の深甚なる謝意を表す。

## 引用文献

- 吾妻行雄 (1997) キタムラサキウニの個体群動態に関する生態学的研究. 北水試験報 51:1-66.
- Agatsuma Y. (1998) Aquaculture of the sea urchin (*Strongylocentrotus nudus*) transplanted from coralline flats in Hokkaido, Japan. J. Shellfish Res. 17:1541-1547.
- Agatsuma Y. (2000) Food consumption and growth of the juvenile sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. Fish. Sci. 66:467-472.
- 吾妻行雄 (2009) 世界のウニ漁業. ウニ学. 本川達雄 (編), 東海大学出版会, pp.249-266.
- Agatsuma Y. (2013a) Stock enhancement. In: Lawrence J.M. (Ed.), Sea Urchins: Biology and Ecology, third edition. Elsevier, Amsterdam, pp.213-224.
- Agatsuma Y. (2013b) *Strongylocentrotus nudus*. In: Lawrence J.M. (Ed.), Sea Urchins: Biology and Ecology, third edition. Elsevier, Amsterdam, pp.449-460.
- Agatsuma Y. (2013c) *Hemicentrotus pulcherrimus*, *Pseudocentrotus depressus*, and *Heliocidaris crassispina*. In: Lawrence J.M. (Ed.), Sea Urchins: Biology and Ecology, third edition. Elsevier, Amsterdam, pp.461-473.
- 吾妻行雄, 川井唯史 (1997) 北海道忍路湾におけるキタムラサキウニの季節的移動. 日水誌 63:557-562.
- Agatsuma Y., Yamada Y., Taniguchi K. (2002) 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. 68:1274–1281.
- Agatsuma Y., Sato M., Takiguchi K. (2005) Factors causing brown-colored gonads of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* in northern Honshu, Japan. Aquaculture 249:449–458.
- Agatsuma Y., Yamada H., Taniguchi K. (2006) Distribution of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* along a shallow bathymetric gradient in Onagawa Bay in northern Honshu, Japan. J. Shellfish Res. 25:1027–1036.
- Agatsuma Y., Watanabe M., Kinoshita J., Inomata E. (2013) Variability of carbon and nitrogen composition in body compartments of *Strongylocentrotus nudus* and *Hemicentrotus pulcherrimus* (Echinodermata: Echinoidea) associated with food availability. Cah. Biol. Mar. 54:677–683.
- 秋本恒基, 志水信弘 (2005) 低品質ノリの有効利用への取り組み. 福岡水技セ研報 15:123–132.
- Akiyama T., Unuma T., Yamamoto T. (2001) Optimum protein level in a purified diet for young red sea urchin *Pseudocentrotus depressus*. Fish. Sci. 67:361–363.
- Andrew N.L., Agatsuma Y., Ballesteros E., Bazhin A.G., Creaser E.P., Barnes D.K.A., Botsford L.W., Bradbury A., Campbell A., Dixon J.D., Einarsson S., Gerring P.K., Hebert K., Hunter M., Hur S.B., Johnson C.R., Juinio-Meñez M.A., Kalvass P., Miller R.J., Moreno C.A.,

- Palleiro J.S., Rivas D., Robinson S.M.L., Schroeter S.C., Steneck R.S., Vadas R.L., Woodby D.A., Xiaoqi Z. (2002) Status and management of world sea urchin fisheries. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 40:343–425.
- Atkinson M.J., Smith S.V. (1983) C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnol. Oceanogr.* 28:568–574.
- Baker M.F., Keogh J.A., Lawrence J.M., Lawrence A.L. (1998) Feeding rate, absorption efficiencies, growth, and enhancement of gonad production in the New Zealand sea urchin *Evechinus chloroticus* Valenciennes (Echinoidea: Echinometridae) fed prepared and natural diets. *J. Shellfish Res.* 17:1583–1590.
- Booolootian R.A., Lasker R. (1964) Digestion of brown algae and the distribution of nutrients in the purple sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus*. *Comp. Biochem. Physiol.* 11:273–289.
- Brockington S., Peck L.S. (2001) Seasonality of respiration and ammonium excretion in the Antarctic echinoid *Sterechinus neumayeri*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 219:159–168.
- Byrne M. (1990) Annual reproductive cycles of the commercial sea urchin *Paracentrotus lividus* from an exposed intertidal and a sheltered subtidal habitat on the west coast of Ireland. *Mar. Biol.* 104:275–289.
- Cook E.J., Kelly M.S. (2007) Effect of variation in the protein value of the red macroalga *Palmaria palmata* on the feeding, growth and gonad composition of the sea urchins *Psammechinus miliaris* and *Paracentrotus lividus* (Echinodermata). *Aquaculture* 270:207–217.
- Daggett T.L., Pearce C.M., Tingley M., Robinson S.M.C., Chopin T.

- (2005) Effect of prepared and macroalgal diets and seed stock source on somatic growth of juvenile green sea urchins (*Strongylocentrotus droebachiensis*). *Aquaculture* 244:263–281.
- de Jong-Westman M., March B.E., Carefoot T.H. (1995) The effect of different nutrient formulations in artificial diets on gonad growth in the sea urchin *Strongylocentrotus droebachiensis*. *Can. J. Zool.* 73:1495–1502.
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., Smith F. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28: 350–356.
- Eddy S.D., Brown N.P., Kling A.L., Watts S.A., Lawrence A. (2012) Growth of juvenile green sea urchins, *Strongylocentrotus droebachiensis*, fed formulated feeds with varying protein levels compared with a macroalgal diet and a commercial abalone feed. *J. World Aquacult. Soc.* 43:159–173.
- 遠藤 光 (2008) ヒバマタ目褐藻群落におけるバフンウニの成長と生殖巣の発達に関する生態学的研究. 平成 19 年度東北大学審査学位論文, 62pp.
- Folch J., Lees M., Stanley G.H.S. (1957) A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *J. Biol. Chem.* 226:497–509.
- Fernandez C., Boudouresque C.-F. (2000) Nutrition of the sea urchin *Paracentrotus lividus* (Echinodermata: Echinoidea) fed different artificial food. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 204:131–141.

- Frantzis A., Grémare A. (1992) Ingestion, absorption, and growth rates of *Paracentrotus lividus* (Echinodermata: Echinoidea) fed different macrophytes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 95:169–183.
- Fuji A. (1960a) 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.* 11:1–14.
- Fuji A. (1960b) Studies on the biology of the sea urchin II. Size at first maturity and sexuality of two sea urchins, *Strongylocentrotus nudus* and *S. intermedius*. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 11:43–48.
- Fuji A. (1962) Studies on the biology of the sea urchin V. Food consumption of *Strongylocentrotus intermedius*. *Jpn. J. Ecol.* 12:181–186.
- Fuji A. (1967) Ecological studies on the growth and food consumption of Japanese common littoral sea urchin, *Strongylocentrotus intermedius* (A.Agassiz). *Mem. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 15:83–160.
- 富士 昭 (1969) 北海道のウニとその増殖, 水産増養殖叢書 21, 日本水産資源保護協会, 79pp.
- Griffiths M., Perrott P. (1976) Seasonal changes in the carotenoids of the sea urchin *Strongylocentrotus droebachiensis*. *Comp. Biochem. Physiol.* 55B:435–441.
- Guillou M., Luming L.H.L., Michel C. (2000) The effect of feeding or starvation on resource allocation to body components during the reproductive cycle of the sea urchin *Sphaerechinus granularis*

- (Lamarck). J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 245: 183–196.
- Hammer B.W, Hammer H.S., Watts S.A., Desmond R.A., Lawrence J.M., Lawrence A.L. (2004) The effects of dietary protein concentration on feeding and growth of small *Lytechinus variegatus* (Echinodermata: Echinoidea). Mar. Biol. 145:1143–1157.
- Hammer H., Watts S., Lawrence A., Lawrence J., Desmond R. (2006) The effect of dietary protein on consumption, survival, growth and production of the sea urchin *Lytechinus variegatus*. Aquaculture 254:483–495.
- Heflin L.E., Gibbs V.K., Powell M.L., Makowsky R., Lawrence J.M., Lawrence A.L., Watts S.A. (2012a) Effect of dietary protein and carbohydrate levels on weight gain and gonad production in the sea urchin *Lytechinus variegatus*. Aquaculture 358–359:253–261.
- Heflin L.E., Gibbs V.K., Powell M.L., Makowsky R., Lawrence A.L., Lawrence J.M. (2012b) Effect of diet quality on nutrient allocation to the test and Aristotle's lantern in the sea urchin *Lytechinus variegatus* (Lamarck, 1816). J. Shellfish Res. 31:867–874.
- 平野敏行, 山沢 進, 須山三千三 (1978) キタムラサキウニ生殖腺のエキス成分に関する研究. 日水誌 44:1037–1040.
- 千川 裕, 高橋和寛, 杉本 卓, 辻 浩二, 信太茂春 (1998) キタムラサキウニ養殖における生殖巣の質に及ぼす魚肉給餌の影響. 北水試験報 52:17–24.
- James P.J. (2006) A comparison of roe enhancement of the sea urchin *Evechinus chloroticus* in sea-based and land-based cages. Aquaculture



253:290–300.

Jensen M. (1969) Age determination of echinoids. *Sarsia* 37:41–44.

香川 芳子 (2008) 五訂増補日本食品標準成分表. 女子栄養大学出版部, pp.287.

金子浩大, 白井隆明, 田中宗彦, 亀井正志, 松本 仁, 大迫一史 (2009) ガンガゼ *Diadema setosum* 生殖腺の呈味特性. 日水誌 75:689–694.

金子 泉, 池田弥生, 尾崎久雄 (1981a) バフンウニにおけるカルシウムの消化管吸収率. 日水誌 47:1421–1424.

金子 泉, 池田弥生, 尾崎久雄 (1981b) バフンウニにおける海水からのカルシウムの吸収と排出. 日水誌 47:1425–1430.

川村一広 (1973) エゾバフンウニの漁業生物学的研究. 北水試報 16:1–54.

川名 武 (1938) バフンウニの増殖について. 水研誌 33:104–116.

Keats D.W., Steele D.H., South G.R. (1984) Depth-dependent reproductive output of the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis* (O.F. Müller), in relation to the nature and availability of food. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 80:77–91.

Kennedy E.J., Robinson S.M.C., Parsons G.J., Castell J.D. (2007) Effect of lipid source and concentration on somatic growth of juvenile green sea urchins, *Strongylocentrotus droebachiensis*. *J. World Aquacult. Soc.* 38:335–352.

King C.K., Hoegh-Guldberg O., Byrne M. (1994) Reproductive cycle of *Centrostephanus rodgersii* (Echinoidea), with recommendations for the

establishment of a sea urchin fishery in New South Wales. *Mar. Biol.* 120:95–106.

木下順二、松井俊幸、猪股英里、青木智也、伊藤知洋、遠藤 光、吾妻行雄 (2012) 褐藻エゾノネジモク群落におけるキタムラサキウニとバフンウニの卵巣と精巣の大きさと色彩の相違. 平成 24 年度日本水産学会秋季大会要旨集, pp.33.

Klinger T.S. (1982) Feeding rates of *Lytechinus variegatus* Lamarck (Echinodermata: Echinoidea) on differing physiognomies of an artificial food of uniform composition. In: Lawrence J.M. (Ed.), *Echinoderms: proceedings of the International Conference, Tampa Bay*, Balkema Press, Rotterdam, pp.29–32.

Klinger T.S., Watts S.A., Forcucci D. (1988) Effect of short-term feeding and starvation on storage and synthetic capacities of gut tissues of *Lytechinus variegatus* (Lamarck) (Echinodermata: Echinoidea). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 117:187–195.

小俣 靖 (1964) ウニのエキス成分に関する研究—IV. エキス構成成分の呈味性. *日水誌* 30:749–756.

小俣 靖, 小杉直輝, 伊藤 武 (1962) ウニのエキス成分に関する研究 I. 遊離アミノ酸組成. *日水誌* 28:623–629.

Lares M.T., Pomory C.M. (1998) Use of body components during starvation in *Lytechinus variegatus* (Lamarck) (Echinodermata: Echinoidea). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 225:99–106.

Larson B.R., Vadas R.L., Keser M. (1980) Feeding and nutritional ecology of the sea urchin *Strongylocentrotus drobachiensis* in Maine,

- USA. Mar. Biol. 59:49–62.
- Lawrence J.M. (1975) On the relationships between marine plants and sea urchins. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 13:213–286.
- Lawrence J.M., Lane J.M. (1982) The utilization of nutrients by post-metamorphic echinoderms. In: Jangoux M., Lawrence J.M. (Eds.), Echinoderm Nutrition. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.331–371.
- Lawrence J.M., Olave S., Otaiza R., Lawrence A.L., Bustos E. (1997) Enhancement of gonad production in the sea urchin *Loxechinus albus* in Chile fed extruded feeds. J. World Aqua. Soc. 28:91–96.
- Lawrence J.M., Chang Y., Cao X., Lawrence A.L., Watts S.A. (2011) Potential for production of uni by *Strongylocentrotus intermedius* using dry formulated feeds. J. World Aquacult. Soc. 42:253–260.
- Lowe E.F., Lawrence J.M. (1976) Absorption efficiencies of *Lytechinus variegatus* (Lamarck) (Echinodermata: Echinoidea) for selected marine plants. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 21:223–234.
- Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. (1951) Protein measurement with the Folin phenol reagent. J. Biol. Chem. 193:265–275.
- 町口裕二 (1992) エゾバフンウニに対するジャイアントケルプの餌料価値. 北水研報 56:61–70.
- Marsh A.G., Powell M.L., Watts S.A. (2013) Biochemical and energy requirements of gonad development. In: Lawrence J.M. (Ed.), Sea Urchins: Biology and Ecology, third edition. Elsevier, Amsterdam,

pp.45–57.

Matsuno T., Tsushima M. (2001) Carotenoids in sea urchins. In: Lawrence J.M. (Ed.), *Edible sea urchins: biology and ecology*. Elsevier Science, Amsterdam, pp.115–138.

松山恵二，横浜康継 (1984) 簡易型ガス検容計によるウニ類の呼吸速度の測定. 北水試月報 41:207–213.

McBride S.C. (2005) Sea urchin Aquaculture. In: Kelly A.M., Silvertein J. (Eds.), *Aquaculture in the 21<sup>st</sup> Century*, vol.46. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, pp.179–208.

McBride S.C, Lawrence J.M., Lawrence A.L., Mulligan T.J. (1998) The effect of protein concentration in prepared feeds on growth, feeding rate, total organic absorption, and gross assimilation efficiency of the sea urchin *Strongylocentrotus franciscanus*. *J. Shellfish Res.* 17:1563–1570.

Murata Y., Sata N.U. (2000) Isolation and structure of pulcherrimine, a novel bitter-tasting amino acid from the sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*) ovaries. *J. Agri. Food Chem.* 48:5557–5560.

Murata Y., Yokoyama M., Unuma T., Sata N.U., Kuwahara R., Kaneniwa M. (2002) Seasonal changes of bitterness and pulcherrimine content in gonads of green sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* at Iwaki in Fukushima Prefecture. *Fish. Sci.* 68:184–189.

名畑進一，干川 裕，酒井勇一，船岡輝幸，大堀忠志，今村琢磨 (1999) キタムラサキウニに対する数種海藻の飼料価値. 北水試研報 54:33–40.

- Ogasawara M., Matsui T., Agastsuma Y. (2011) Growth and rapid gonad recovery of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* after spawning in an *Undaria pinnatifida* and *Saccharina japonica* kelp bed. J. Shellfish Res. 30:159–166.
- Osako K., Kiriya T., Ruttanapornvareesakul Y., Kuwahara K., Okamoto A., Nagano N. (2006) Free amino acid composition of the gonad of the wild and cultured sea urchins *Anthocidaris crassispina*. Aquaculture Sci. 54:301–304.
- Osako K., Fujii A., Ruttanapornvareesakul Y., Nagano N., Kuwahara K., Okamoto A. (2007) Differences in free amino acid composition between testis and ovary of sea urchin *Anthocidaris crassispina* during gonadal development. Fish. Sci. 73:660–667.
- Otero-Villanueva M.M., Kelly M.S., Burnell G. (2004) How diet influences energy partitioning in the regular echinoid *Psammechinus miliaris*; constructing an energy budget. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 304:159–181.
- Pearce C.M. (2010) Introduction. Bull. Aquacult. Assoc. Can. 108-1:1–2.
- Pearce C.M., Daggett T.L., Robinson S.M.C. (2002a) Effect of binder type and concentration on prepared feed stability and gonad yield and quality of the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. Aquaculture 205:301–323.
- Pearce C.M., Daggett T.L., Robinson S.M.C. (2002b) Effect of protein source ratio and protein concentration in prepared diets on gonad yield and quality of the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*.

- Aquaculture 214:307–332.
- Pearce C.M., Daggett T.L., Robinson S.M.C. (2004) Effect of urchin size and diet on gonad yield and quality in the green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*). Aquaculture 233:337–367.
- Plank L.R., Lawrence J.M., Lawrence A.L., Olvera R.M. (2002) The effect of dietary carotenoids on gonad production and carotenoid profiles in the sea urchin *Lytechinus variegatus*. J. World Aquacult. Soc. 33:127–137.
- Prado P., Heck Jr. K.L., Watts S.A., Cebrian J. (2013)  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  signatures from sea urchin skeleton: importance of diet type in metabolic contributions. Mar. Ecol. Prog. Ser. 476:153–166.
- Robinson S.M.C., Castell J.D., Kennedy E.J. (2002) Developing suitable colour in the gonads of cultured green sea urchins (*Strongylocentrotus droebachiensis*). Aquaculture 206:289–303.
- Sakai Y., Tajima K., Agatsuma Y. (2003) Mass production of seed of the Japanese edible sea urchins *Strongylocentrotus intermedius* and *S. nudus*. In: Lawrence JM, Guzmán O. (eds.) Sea Urchins: Fisheries and ecology. DEStech Publication, Lancaster, pp.287–298.
- Schlosser S.C., Lupatsch I., Lawrence J.M., Lawrence A.L., Shpigel M. (2005) Protein and energy digestibility and gonad development of the European sea urchin *Paracentrotus lividus* (Lamarck) fed algal and prepared diets during spring and fall. Aquacult. Res. 36:972–982.
- Senaratna M., Evans L.H., Southam L., Tsvetnenko E. (2005) Effect of different feed formulation on feed efficiency, gonad yield and gonad

- quality in the purple sea urchin *Heliocidaris erythrogramma*. *Aquacult. Nutr.* 11:199–207.
- Sterner R.W., Elser J.J. (2002) *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton University Press, Princeton, 439pp.
- Tsushima M., Matsuno T. (1990) Comparative biochemical studies of carotenoids in sea urchins–I. *Comp. Biochem. Physiol.* 96B:801–810.
- Tsushima M., Kawakami T., Matsuno T. (1993) Metabolism of carotenoids in sea-urchin *Pseudocentrotus depressus*. *Comp. Biochem. Physiol.* 106B:737–741.
- Vadas R.L. (1977) Preferential feeding: an optimization strategy in sea urchins. *Ecol. Monogr.* 47:337–371.
- Vadas Sr. R.L., Beal B., Dowling T., Fegley J.C. (2000) Experimental field tests of natural algal diets on gonad index and quality in the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*: a case for rapid summer production in post-spawned animals. *Aquaculture* 182:115–135.
- Watts S.A., Boettger S.A., McClintock J.B., Lawrence J.M. (1998) Gonad production in the sea urchin *Lytechinus variegatus* (Lamarck) fed prepared diets. *J. Shellfish Res.* 17:1591–1595.
- Watts S.A., Lawrence A.L., Lawrence J.M. (2013) Nutrition. In: Lawrence J.M. (Ed.), *Sea Urchins: Biology and Ecology*, third edition. Elsevier, Amsterdam, pp.155–169.