

岩礁生態系のケミカルシグナルを介した 種間関係の解明に関する生態学的研究

(研究課題番号 09306012)
平成9～11年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

平成11年3月

研究代表者 谷口 和也
東北大学大学院農学研究科・教授

目 次

I. 緒 言 谷口和也（東北大学大学院農学研究科）	5
II. 海藻群落の動態と生産力 谷口和也, 吾妻行雄, 船砥恵子, 中脇利枝, 小笠原歩, 成田 薫（東北大学大学院農学研究科）	7
III. ケミカルシグナルの探索と機能解明 蔵多一哉*, 谷口和也**（*函館工業高等専門学校工業化学科, **東北大学院農学研究科）	31
IV. 動物群集構造と植食動物の生活史 大森迪夫*, 佐野 稔*, 石田暁之*, 佐々木浩一*, 谷口和也*, 關 哲夫**, 白石一成***（*東北大学大学院農学研究科, **水産庁養殖研究所, ***宮城県水産研究開発センター）	56

研究組織

研究代表者：谷口和也（東北大学大学院農学研究科・教授）

研究分担者：大森迪夫（東北大学大学院農学研究科・教授）

蔵多一哉（函館工業高等専門学校・工業化学科・教授）

研究経費

平成9年度	19,300千円
平成10年度	5,100千円
平成11年度	2,200千円
計	26,600千円

研究発表

(1) 学会誌等

1. 谷口和也：海藻群落形成に関する生態生化学的研究. 日水誌, **63**, 309-312 (1997).
2. K. Kurata, K. Taniguchi, K. Takashima, I. Hayashi and M. Suzuki : Feeding-deterrent bromophenols from *Odonthalia corymbifera*. *Pytochemistry*, **45**, 485-487 (1997).
3. 吾妻行雄, 川井唯史：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 (1997).
4. 吾妻行雄, 松山恵二, 中多章文, 川井唯史, 西川信良：北海道日本海沿岸におけるウニ除去後の海藻群落の遷移. 日水誌, **63**, 672-680 (1997).
5. 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. 北水試研報, **51**, 1-66 (1997)
6. 野村宗弘, 佐々 衛, 千葉信夫, 佐々木久雄, 谷口和也, 須藤隆一：内湾の水質浄化における海藻の役割. 日本沿岸域学会論文集, **10**, 125-136 (1998).
7. M. Sano, M. Omori, K. Taniguchi, T. Seki and R. Sasaki: Distribution of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* in relation to marine algal zonation in the rocky coastal area of the Oshika Peninsula, Northern Japan. *Benthos Research*, **53**, 79-87 (1998).
8. K. Kurata, K. Taniguchi, Y. Agatsuma, and M. Suzuki: Deterpenoid feeding- deterrents from *Laurencia saitoi*. *Phytochemistry*, **47**, 363-369 (1998).
9. Y. Agatsuma, S. Nakao, S. Motoya, K. Tajima and T. Miyamoto: Relationship between year-to-year fluctuations in recruitment of juvenile sea urchins *Strongylocentrotus nudus* and seawater temperature in southwestern Hokkaido. *Fisheries Science*, **64**, 1-5 (1998).
10. Y. Agatsuma : Aquaculture of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* transplanted from coralline flats in Hokkaido, Japan. *J. Shellfish. Res.*, **17**, 1541-1547 (1998).
11. 干川 裕, 吾妻行雄 : 生殖周期にもとづくエゾバフンウニ放流種苗の選択. 水産育種, **27**, 45-56

(1999).

12. 林 育夫, 伊藤祐子, 谷口和也: 匍匐性動物, 特に巻貝類とウニ類の日周行動実験システムの開発. 日本水産学会, 49, 1-12 (1999).
13. 谷口和也, 長谷川雅俊: 磯焼け対策の課題. 谷口和也編 磯焼けの機構と藻場修復. 恒星社厚生閣, 東京, 25-30 (1999).
14. 大森迪夫, 谷口和也, 白石一成, 關 哲夫: 海藻群落帯状構造と無脊椎動物の生活史. 谷口和也編 磯焼けの機構と藻場修復. 恒星社厚生閣, 東京, 62-72 (1999).
15. 佐野 稔, 大森迪夫, 谷口和也, 關 哲夫: アラメ海中林とキタムラサキウニの生活史. 谷口和也編 磯焼けの機構と藻場修復. 恒星社厚生閣, 東京, 43-83 (1999).
16. 吾妻行雄: 北海道日本海沿岸における藻場修復. 谷口和也編 磯焼けの機構と藻場修復. 恒星社厚生閣, 東京, 84-97 (1999).
17. Y. Agatsuma: Gonadal growth of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* from trophically poor coralline flats and fed excess kelp, *Laminaria religiosa*. *SUISANZOSHOKU*, 47, 325-330 (1999).
18. Y. Agatsuma, A. Nakata and K. Matsuyama : Seasonal foraging activity of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* on coralline flats in Oshoro Bay in southwestern Hokkaido, Japan. *Fisheries Science*, (in press).
19. Y. Agatsuma : Food consumption and growth of the juvenile sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. *Fisheries Science*, (in press).
20. 吾妻行雄, 小川美和, 谷口和也, 山田秀秋: 牡鹿半島泊浜沿岸の海藻. 野生生物保護 (印刷中).

(2) 口頭発表

1. 佐野 稔, 大森迪夫, 谷口和也, 關 哲夫, 佐々木良: キタムラサキウニの分布と海藻群落帯状構造との関係. 日本水産学会, 平成9年4月
2. 佐野 稔, 大森迪夫, 谷口和也, 關 哲夫: アラメ群落とサンゴモ群落におけるキタムラサキウニの成長と成熟の比較. 日本水産学会, 平成9年4月
3. 清水啓子, 船砥恵子, 谷口和也, 蔵多一哉: 褐藻アミジグサのエゾアワビに対する摂食阻害物質. 日本水産学会, 平成10年4月
4. 船砥恵子, 清水啓子, 谷口和也, 關 哲夫, 蔵多一哉: 褐藻サナダグサのアセトン抽出物によるエゾアワビに対する摂食阻害活性. 日本水産学会, 平成10年9月
5. 清水勇一, 谷口和也: 褐藻アラメの光合成特性の季節変化. 日本水産学会, 平成10年9月
6. 谷口和也, 山根英人: 表面形状の異なるコンクリートブロック状の漸深帯海藻群落の遷移. 日本水産学会, 平成10年9月
7. 谷口和也: 磯焼け対策の課題. 平成10年度日本水産学会秋季大会シンポジウム「磯焼け現象, その機構と藻場修復の展望」, 平成10年9月
8. 佐野 稔, 大森迪夫, 谷口和也, 關 哲夫: アラメ海中林とキタムラサキウニの生活史. 平成10年度

日本水産学会秋季大会シンポジウム「磯焼け現象，その機構と藻場修復の展望」，平成10年9月

9. 大森迪夫，谷口和也，白石一成，關 哲夫：海藻群落帯状構造と無脊椎動物の分布．平成10年度日本水産学会秋季大会シンポジウム「磯焼け現象，その機構と藻場修復の展望」，平成10年9月
10. 佐野 稔，大森迪夫，谷口和也，關 哲夫：宮城県牡鹿半島におけるキタムラサキウニの個体群の季節的な移動過程．日本水産学会，平成11年4月
11. 石田暁之，佐々木浩一，大森迪夫，谷口和也：岩礁域における植食性腹足類 *Tegula* 属2種の鉛直的分布構造と海藻群落．日本水産学会，平成11年9月
12. 佐野 稔，大森迪夫，谷口和也，關 哲夫：標識移植によって把握したキタムラサキウニ個体群のアラメ海中林への移動過程．日本水産学会，平成11年9月
13. 山田博一，吾妻行雄，谷口和也：宮城県女川町指ヶ浜沿岸のバフンウニの分布特性．日本水産学会，平成11年9月
14. 小島 博，谷口和也，關 哲夫：クロアワビの摂食活動の日周期性と摂食内容．日本水産学会，平成11年9月
15. 關 哲夫，谷口和也，蔵多一哉：エゾアワビ幼生の着底とジプロモメタンによる変態誘起機構．日本水産学会，平成11年9月
16. 成田 薫，谷口和也，吾妻行雄：宮城県牡鹿半島泊浜における褐藻エゾノネジモク群落の生活年周期と生産力．日本水産学会，平成11年9月
17. 甲本亮太，谷口和也，吾妻行雄：秋田県男鹿半島鶴の崎沿岸の海藻．日本水産学会，平成11年9月
18. 中林信康，工藤泰夫，谷口和也：秋田県八森町岩館沿岸における海藻群落の形成と砂の移動．日本水産学会，平成11年9月
19. 船砥恵子，谷口和也：フクリンアミジの生活年周期と底生動物群集．日本水産学会，平成11年9月
20. 清水勇一，谷口和也：褐藻ツルアラメの光合成と栄養要求．日本水産学会，平成11年9月
21. 小笠原歩，谷口和也：牡鹿半島佐須浜におけるマコンブの光合成・呼吸活性の季節変化．日本水産学会，平成11年9月
22. 杉下重雄，谷口和也：宮城県松島湾産養殖ワカメの藻体部位別の光合成特性．日本水産学会，平成11年9月
23. 中田恵英，吾妻行雄，谷口和也：宮城県北上町十三浜沿岸における海藻．日本水産学会，平成11年9月
24. 山根英人，佐々木國隆，吾妻行雄，谷口和也：潮下帯に設置したコンクリート面上における海藻の入植．日本水産学会，平成11年9月

(3) 出版物

1. 谷口和也：磯焼けを海中林へー岩礁生態系の世界ー．裳華房，東京（1998）．
2. 谷口和也：沿岸の環境圏（共著）．フジ・テクノシステム，東京（1998）．
3. 谷口和也：磯焼けの機構と藻場修復（編著）．恒星社厚生閣，東京（1999）．
4. 谷口和也：地球環境ハンドブック（共著）．朝倉書店，東京（印刷中）．

(4) 本研究遂行の過程でできた学位論文(農学)

1. 佐野 稔, 1999年度博士

海藻群落帯状構造とキタムラサキウニの生活に関する生態学的研究

2. 船砥恵子, 1999年度修士

アマジグサ目褐藻フクリンアミジの生活史と底生動物群集との関係

3. 石田暁之, 1999年度修士

泊浜岩礁域のクボガイ *Tegula argyrostoma* とバテイラ *Tegula pfeifferi* の生活史と海藻群落

4. 小笠原歩, 1999年度修士

褐藻マコンブ *Laminaria japonica* の生活年周期に関する生理学的, 生態学的研究

I. 緒 言

研究代表者 谷口 和也
(東北大学大学院農学研究科)

地球全体の植物が光合成によって生産する有機物の総量は、年間約 1,500 億トンと試算され、陸と海とでほぼ半分づつか、やや海の比率が高いといわれる。陸と海とが接する沿岸の岩礁海底は、面積では海洋全体の 0.1% とごく狭い範囲であるが、そこに生育する海藻が光合成によって生産する有機物の年間総量ではその 10% 以上にもおよんでいる。沿岸岩礁域の高い生産量は、海中林とよばれるコンブ目やヒバマタ目の大型多年生褐藻群落が生産している。その生産量は、1 年間で 3~8 kg (乾燥重量) /m² にも達し、陸上でもっとも高いと考えられている熱帯雨林の 2~5 倍もある。

海中林の高い生産力に依存して、藻体の葉上や根元には葉上動物とよばれる微小な甲殻類や巻貝が多数生息し、大型のエビ、カニの類やメバル、アイナメなどの魚類がそれらを食物としたり、海中林を棲場や隠れ場、あるいは産卵場として集まる。また、アワビやウニ、サザエなどの底棲の植食動物が海中林を直接、あるいはその落ち葉を食物として集まる。このため海中林を中心とした沿岸岩礁域には、多様な生物が複雑な食物網で結ばれて、海洋で、あるいは地球上でもっとも豊かな固有の生物社会、岩礁生態系が構成され、産業的にも沿岸漁業でもっとも主要な漁場となっている。

近年、海藻が生産する二次代謝産物が植食動物に対して忌避や誘因など強力な生態相関作用を持つことが明らかになってきた。その結果、岩礁生態系を構成する生物群は単に食物関係で結ばれるだけでなく、ケミカルシグナルを介して生物の生育段階ごとに密接に結ばれているとの認識に達するに至った。

しかし、これまでの研究はアワビやウニなど漁業生産の対象とされる個別の種で、しかもそれらの人工種苗生産や移植、放流など漁業技術に対応した生活史の一部を解明するにとどまっていた。このため、ケミカルシグナルによって著しく異なった環境を構成する種々の海藻群落との関係にはほとんど注意が払われず、海藻群落ごとの動物群集の組成や構造、生活史を通じた種間関係の実態はほとんど解明されていない。漁業対象種の生産性の向上を図るためにも、ケミカルシグナルを介した種間関係の解明を早急に推進する必要性に迫られている。

本研究は、1) 海藻群落の動態と生産力、2) ケミカルシグナルの探索と機能解明、3) 動物群集構造と植食動物の生活史の 3 章からなる。

「海藻群落の動態と生産力」においては、水深に対応した海藻群落の帯状構造と遷移の知見にもとづいて、遷移と途中相の初期に出現する小型多年生海藻としてフクリンアミジ、途中相の後期をなす大型 1 年生海藻としてマコンブ、極相をなす大形多年生海藻としてエゾノネジモクを研究の対象とした。褐藻フクリンアミジはすでに多数のケミカルシグナルを生産することが明らかとなっているため、その生活史をはじめて把握し、群落中に生息する特異的な動物群集の動態を明らかにした。褐藻マコンブは、人間の重要な食用資源であるにも関わらず天然における生活の実態は明らかではなかったため、その生活史と生産力の把握に努めた。海中林を構成する極相群落として、これまで褐藻アラメやカジメなど多年生のコンブ目褐藻の動態や生産力については詳細に把握されているが、ヒバマタ目褐藻についてはほとんど明らかではなかった。そこで、エ

ゾノネジモクを対象としてその生活史と生産力を把握するとともに、アラメやカジメで明らかにされたギャップ更新という群落の維持、更新の機構がエゾノネジモクにおいても当てはまるか否かを検討した。

「ケミカルシグナルの探索と機能解明」においては、アワビやウニなど底棲の大型植食動物を群落中から排除することが想定されたアミジグサ科褐藻のアミジグサ、サナダグサ、シマオオギ、シワヤハズ、フジマツモ科紅藻のマギレソゾ、ミツデソゾ、ウラソゾ、ユカリ科紅藻のユカリ、コノハノリ科紅藻のヤレウスバノリ、スジウスバノリの10種を対象に、エゾアワビに対する摂食阻害活性を把握し、それを基準として微量活性物質の化学構造の決定に努め、新規物質を含む幾つかの物質の単離精製に成功した。

「動物群集構造と植食動物の生活史」においては、これまでまったく知見がなかった水深に対応したエゾノネジモク海中林、紅藻無節サンゴモが優占する転石域、アラメ海中林、フクリンアミジ群落、無節サンゴモ群落（サンゴモ平原）における底棲動物群集の固有の組成を把握し、群落間で比較を行った。その結果にもとづいて、極めて近縁の小型巻貝であるバテイラとクボガイの海藻群落と対応した生活史を明らかにするとともに、漁業対象種として重要なキタムラサキウニの発育にともなう群落間の移動の実態を把握し、その生活史における意義を明らかにした。

これらの研究はほとんど新たな分野を開拓するものであるため、新たな実験方法の検討と調査機器の開発を同時に進めた。

終わりに臨み、本研究を遂行するにあたって、宮城県水産研究開発センター、宮城県栽培漁業センター、水産庁東北区水産研究所、志津川町、牡鹿町泊浜漁業協同組合の皆様には、調査や実験に際して懇篤なご協力をいただいたことを記し、心から感謝する。

II. 海藻群落の動態と生産力

谷口和也、吾妻行雄、船砥恵子、中脇利枝、小笠原歩、成田 薫
(東北大学大学院農学研究科)

1. 褐藻フクリンアミジ群落の季節的变化と底生動物群集との関係

1) はじめに

アミジグサ目褐藻フクリンアミジ *Dilophus okamurae* は、日本では北海道を除くほぼ全沿岸、中国、朝鮮半島、台湾の北東アジア沿岸の他、アメリカ西岸の潮間帯から潮下帯にかけて分布することが知られている。アミジグサ目褐藻は、すべての種が孢子体と配偶体との間で同型世代交代型の生活環をもつと考えられている^{1,2)}。すなわち、孢子体には減数分裂を行った四分孢子が形成されて配偶体に生長し、配偶体には卵と精子が形成されて受精した接合子が孢子体に生長する。しかし、実際に培養実験などによって生活環が確認された種は少ない。また、天然個体群において、種によっては四分孢子体が配偶体より圧倒的に優占すると報告されている^{3,4)}。他、生活史と生活年周期に関する知見はほとんどない。フクリンアミジについてもこれまでにまったく観察されていない。

一方、海藻の二次代謝産物の生態相関作用に関する研究が進展する中で、アミジグサ目褐藻の二次代謝産物が注目されるに至った。カリブ海沿岸において、ヨレアミジ *Dictyota cervicornis* はフジマツモ科紅藻マギレソゾ *Laurencia saitoi* とともに、本来植食動物の摂食圧に対する耐性が低いと考えられる高い生産速度をもつ海藻であるにもかかわらず、摂食されがたいのは、何等かの化学物質の生産によって摂食を阻害するためであると考えられた^{5,6)}。またカリフォルニア半島産のセンケイアミジ *Dictyota flabellata* は、摂食阻害物質と考えられたポリフェノールの含有率が低いにもかかわらず摂食されがたいのは、他の化学物質を生産するためであると考えられた⁷⁾。さらにフロリダ半島沿岸において、アミジグサ *Dictyota dichotoma*、ヨレアミジ *Dilophus alternans*、*Dilophus guineensis* の4種が摂食されがたい原因は、それらに特異的に含まれるテルペン化合物が摂食を阻害するためであると推定された⁸⁾。一方、エゾヤハズ *Dictyopteris divaricata*、サナダグサ *Pachydictyon coreaceum*、コモングサ *Spatogulossium pacificum* の3種は、エゾアワビ *Haliotis discus hannai* 稚貝にほとんど摂食されないことが報告されている^{9,10)}。

海藻が生産する植食動物に対する摂食阻害物質の探索は、生物試験法の開発によって進展した。これまで、アミジグサ目褐藻アミジグサ *Dictyota ciliolata*、*Dictyota acutioba*、チガミグサ *Stypopodium zonale* の4種やフジマツモ科紅藻マギレソゾなど植食動物に摂食されがたい海藻から得られた抽出物を他の海藻に塗布したり、人工餌料に混ぜて魚類やウニ類に供し、摂食阻害物質としてテルペン化合物が推定されている¹¹⁻¹⁶⁾。

フクリンアミジ群落は、東北地方太平洋沿岸において、海中林と呼ばれるコンブ目褐藻アラメ *Eisenia bicyclis* 群落とサンゴモ平原と呼ばれる紅藻無節サンゴモ群落の境界に形成され^{17,18)}、その群落中には、海中林やサンゴモ平原と比較して、ウニやアワビなどの大型植食動物が著しく少ないと報告されている¹⁹⁾。こ

の原因として、フクリンアミジは、エゾアワビ被面子幼生の着底、変態を阻害する2種類のスパタン型ジテルペン化合物を生産、分泌しているためであると推定された²⁰⁾。また、これらジテルペン化合物は、エゾアワビ稚貝に忌避行動を強くもたらすことも明らかにされた²¹⁾。

一方、植食動物の摂食に対する阻害活性を定量的に測定できるセルロースアルミニウム板法が確立され、フクリンアミジからキタムラサキウニ *Strongylocentrotus nudus* とエゾアワビに対する摂食阻害物質として9種類のジテルペン化合物が単離、同定された^{22~27)}。この生物試験法を用いることによって、エゾヤハズ^{28,29)}およびシワヤハズ *Dictyopteris undulata* からセスキテルペン誘導体が^{30,31)}、フジマツモ科紅藻ハケサキノコギリヒバ *Odonthalia corymbifera* からはブロモフェノール化合物が³²⁾、マギレソゾからはジテルペン化合物が³³⁾、それぞれ摂食阻害物質として単離、同定された。さらに、海中林を構成するアラメ、ツルアラメ *Ecklonia stronifera*、カジメ *Ecklonia cava*、クロメ *Ecklonia kurome* から水溶性のプロロタンニンが摂食阻害物質として単離、同定された^{34~36)}。

フクリンアミジが生産するジテルペンの大型植食動物に対する高い防御活性は、無節サンゴモがジプロロメタンを生産、分泌して大型植食動物幼生の着底、変態を誘起するために、大型植食動物の高い摂食圧が持続しているサンゴモ平原³⁷⁾へ生育するための条件となっていると考えられている。このため、フクリンアミジ群落は、植食動物を排除することによって海中林形成の条件をなしていると推定されている^{38~40)}。

しかし、潮下帯において帯状構造をなす各海藻群落と底生無脊椎動物の分布についての調査が行われた結果、海藻群落ごとに固有の動物相が認められ、フクリンアミジ群落にも殻高が1 cm以下の小型の軟体動物が多数生息することが明らかになった⁴¹⁾。したがって、フクリンアミジが生産するジテルペン化合物は、大型植食動物に対する防御物質としての役割を果たしているが、同所的に生活する動物に対してはまったく無関係であるか、他の機能を持っていると考えられる。したがって、海藻が生産する二次代謝産物の機能については、植食動物に対する防御としての役割ばかりでなく、より広範に生物種間の化学的な交信として捉え直す必要がある。

しかし、冒頭で述べたようにこれまでフクリンアミジ群落ばかりか、同型世代交代型の生活環をもつアミジグサ目褐藻の天然個体群における生活史と生活年周期はまったく明らかにされていなかった。このため、同所的に生活する動物群集組成との関係もまったく明らかにされていなかった。

そこで、フクリンアミジ群落の配偶体世代と孢子体世代との季節的な出現状況や密度、現存量などの変化、すなわち生活年周期を把握する。同時に動物群集組成の季節変化を把握し、群落の消長との比較検討を行う。

2) 調査方法

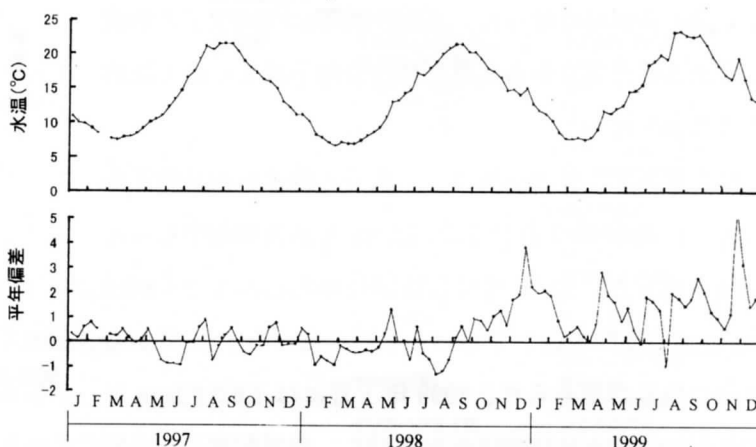
宮城県牡鹿郡女川町指ヶ浜沿岸の水深4~7 mに形成されているフクリンアミジ群落において、1998年6月から1999年9月まで1~2か月に1回の割合で調査を行った。調査時には、まず群落中に25cm×25cm方形枠を4枠任意に設置し、手で取れる動物を採集した後、エアリフト法によって枠内の海藻と動物をすべて採集した。エアリフト法とは、直径4 cmの塩化ビニル管の上端に40cm×25cmの採集袋(目合い0.435mm、GG42)を取り付け、塩化ビニル管の側面にゴム管を接続して潜水用タンクブロックから高圧の空気を送り、その噴流を利用して、各方形枠内の動植物すべてを吸い上げる採集方法である。フクリンアミ

ジは海底に付着している部分をダイバーナイフで削り取って採集した。

採集した標本は10%ホルマリン海水で固定した後、海藻と動物に分けた。フクリンアミジについては方形枠ごとに最長の個体から長い順に30個体を選び出し、それらの全長を測定した。次に、それに続く長さの20個体を加えた合計50個体の生殖細胞の有無を生物顕微鏡（倍率；10×10, 20, 40）によって観察し、四分胞子を形成した個体数と配偶子を形成した個体数のそれぞれ観察した50個体に対する割合を計算して成熟率を求めた。そして、方形枠ごとに湿重量を測定した後、約80℃に設定した熱風乾燥機で1～2日間十分に乾燥させて乾重量を測定した。

動物は、まず方形枠ごとに動物門に分けて、それぞれの湿重量を測定した。軟体動物については、その後可能な限り種の段階まで同定し、方形枠ごとにそれぞれの個体数と湿重量を測定した。またキタムラサキウニ稚子については、方形枠ごとに個体数と湿重量、各個体の殻径を測定した。

本節を含めて第2章における1997年から1999年にかけての調査期間中の表面海水温は、宮城県江ノ島（北緯38°24'、東経141°36'）における宮城県水産研究開発センターの定地海洋観測資料を参照した（図II-1）。それによれば、1997年から1998年10月頃まではほぼ平年並みの水温で推移していたが、1998年11月以降1999年にかけては、ほとんど恒常的に平年よりも高水温で推移している。

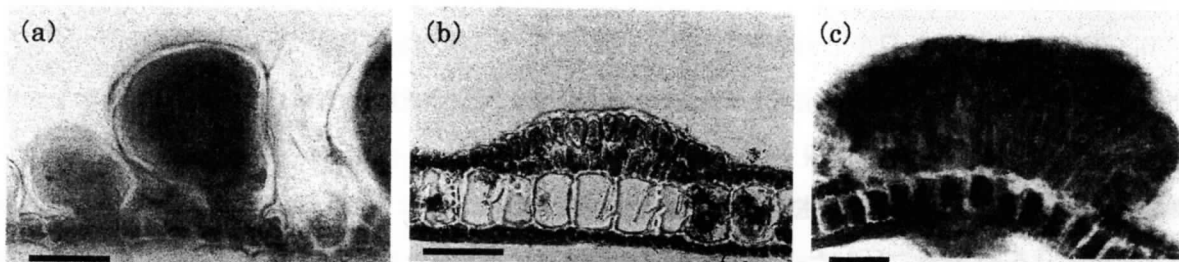


図II-1 調査地近傍宮城県江ノ島における1997年から1999年の旬別表面水温(上)および1965年から1995年までの平均旬別水温からの偏差(下)

3) 結 果

a. フクリンアミジの生活年周期

本調査において確認できたフクリンアミジの胞子体に形成される四分胞子嚢、雌性配偶体に形成される生卵器、ならびに雄性配偶体に形成される造精器の形状を図II-2に示した。四分胞子嚢は、1998年7月と9月（8月は欠測）に胞子体の付着器付近と周縁部を除く両面全体に多数形成されていた。また、生卵器および造精器は、1999年5月に集中的に確認された。生卵器は雌性配偶体の両面に散在してみられ、また、造



図II-2 フクリンアミジの生殖細胞 (a)フクリンアミジの四分胞子嚢（スケール：50 μ ）、(b)フクリンアミジの生卵器（スケール：100 μ ）、(c)フクリンアミジの造精器（スケール：150 μ ）

精器は雄性配偶体の先端部分に多くみられた。

フクリンアミジの全長、現存量（乾重量）および湿重量に対する乾重量の比、ならびに成熟率の季節変化を図II-3に示した。

四分胞子は、1998年7月には測定した全体の3.3%の個体に認められ、9月になると90%と大部分の個体に認められた。1998年10月から1999年3月までは四分胞子、配偶子いずれも確認できなかった。その後5月になると、雌性配偶子と雄性配偶子をもつ個体あわせて87.3%と、集中的に出現した。翌6月には配偶子はまったく認められなくなった。また、前年に四分胞子の形成が確認された7月から9月には四分胞子はまったく認められなかった。

フクリンアミジの全長は、大部分の個体が四分胞子を形成した1998年9月に 7.5 ± 1.0 cmと調査期間中もっとも長くなった。翌10月には急速に枯れ込んで 2.4 ± 0.3 cmと調査期間を通してもっとも短くなった。11月から新たに生長が認められ、1999年1月には 7.0 ± 0.5 cmに達した後、徐々に枯れ込みが進行し、雌雄配偶子が多数認められた5月には、 6.1 ± 0.6 cmになった。翌6月以降も枯れ込みが進行して9月には 3.2 ± 0.5 cmになった。

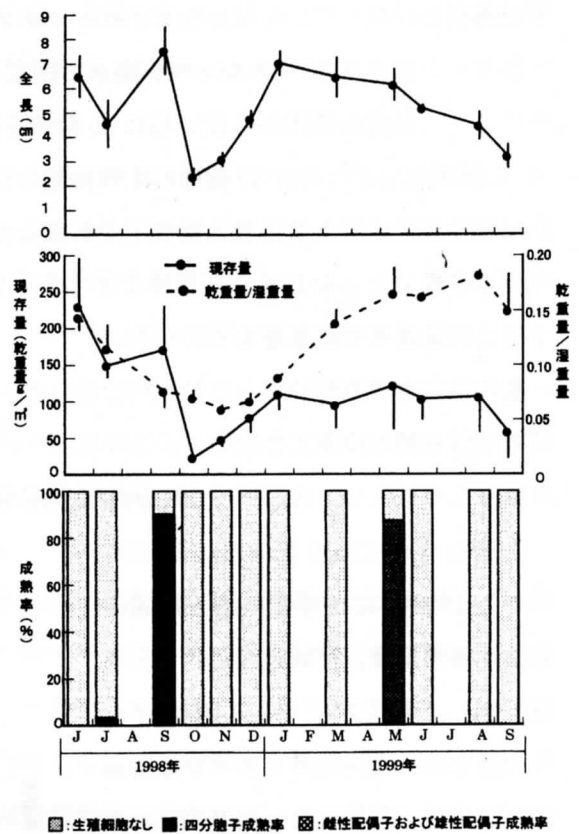
現存量は、調査を開始した1998年6月に調査期間中で最高 230.4 ± 65.4 g/m²から低下していき、四分胞子を集中的に形成した9月には 171.6 ± 59.0 g/m²、枯れ込みが急速に進んだ翌10月には 23.2 ± 5.3 g/m²と著しく低下して調査期間中最低となった。その後全長の経過と同様に、11月から徐々に上昇し、1999年1月には 109.6 ± 21.0 g/m²に達した。1月から8月まで現存量はほぼ一定の値で推移したが、9月には明らかに著しく低下し、 57.6 ± 35.5 g/m²となった。

湿重量と乾重量の比は、現存量の季節変化とは一致しない。1998年6月から11月にかけて低下した後、12月から上昇に転じて1999年8月に最高を示した。翌9月には明らかに低下した。

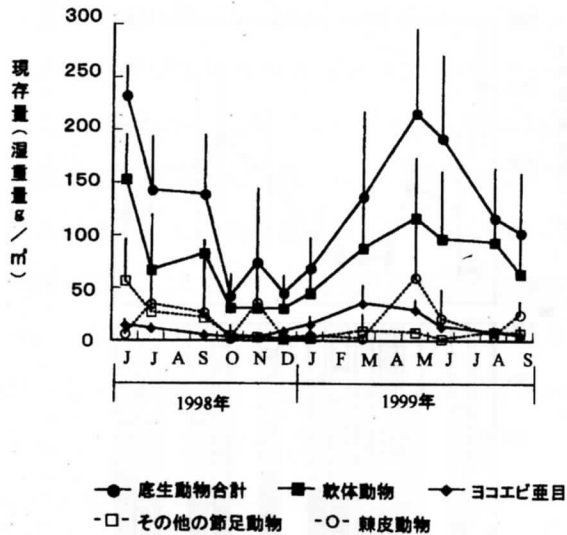
b. 底生動物群集

1998年6月から1999年9月までの調査期間中、フクリンアミジ群落に出現した底生動物は、表II-1に示したように、4動物門であった。出現した動物の中で密度、現存量ともにもっとも大きい値を示した軟体動物門については、これまでに24科32属37種を同定した。

フクリンアミジ群落に出現した底生動物の中で、詳細な分類ができなかった環形動物を除いた各動物門の現存量の季節変化を図II-4に示した。節足動物門は、現存量がもっとも多かったヨコエビ亜目とその他の節足動物に分けた。全底生動物現存量は、 232.6 ± 27.2 g/m²と調査期間中もっとも多かった1998年6月か



図II-3 1998年6月から1999年9月までのフクリンアミジの全長(上)、現存量(乾重量)および湿重量に対する乾重量の比(中)、ならびに成熟率(下)の季節変化。図中の縦棒は標準偏差をあらわす。



図II-4 1998年6月から1999年9月までの底生動物現存量の季節変化 図中の縦棒は標準偏差をあらわす

ら徐々に低下して10月には $43.1 \pm 19.9 \text{ g/m}^2$ となった。その後徐々に上昇していき、1999年5月には前年6月とほぼ等しい $192.8 \pm 78.0 \text{ g/m}^2$ となった。翌月から著しく低下していき、9月には $102.7 \pm 56.5 \text{ g/m}^2$ まで低下した。各動物門の現存量をみると、軟体動物が周年を通してもっとも多く、底生動物現存量の季節変化とはほぼ一致していた。ヨコエビ亜目の現存量は11月には $3.2 \pm 0.8 \text{ g/m}^2$ の年間極小から全底生動物の現存量が最低から上昇に転じる1998年12月から1999年3月にかけて上昇し、3月には $36.2 \pm 16.5 \text{ g/m}^2$ の年間極大へという明瞭な季節変化を示したが、フクリンアミジ群落の季節変化とは一致しなかった。棘皮動物の現存量は、1998年7月、9月、11月にはバフンウニが、また、1999年5月にはナマコの一種が多く出現していたため、一時的に現存量が上昇した。

周年現存量が最も多かった軟体動物の密度と各月における種組成の季節変化を図II-5に示した。密度は、1998年6月に $15,444 \pm 6,520$ 個体/ m^2 と調査期間中の最高値を示した後、10月ないし11月に向かって著しく低下していき、11月には $1,732 \pm 729$ 個体/ m^2 と調査期間中の最低値となった。その後12月から緩やかに上昇していき、1999年8月には $12,344 \pm 4,189$ 個体/ m^2 とピークに達した。9月には $7,204 \pm 5,451$ 個体/ m^2 に低下した。種組成をみると、ニシキウズ科のアコヤシタダミ *Lirularia iridescens*、マメシタダミ *Conotalopia minima*、ハナチグサガイ *Cantharidus callichroa*、リュウテン科のヤマザンショウ *Homalopoma sangarense*、チャツボ科のチャツボ *Barleeia angustata*、ミスジチャツボ *B. trifasciata* の組成比が高く、これら6種で周年75%以上を占めた。

表II-1. 1998年6月から1999年9月までフクリンアミジ群落に出現した底生動物

環形動物門		
節足動物門		
類脚綱	ソコムジシコ目の一種	
軟甲綱	薄甲目の一種	ヨコエビ亜目
	端脚目	ワレカラ亜目
	等脚目の一種	ヨツハモガニ
	十脚目	異尾下目
		その他一種
棘皮動物門		
ヒトデ綱	イトマキヒトデ	
	その他2種	
ウニ綱	キタムラサキウニ	
	バフンウニ	
ナマコ綱の一種		
軟体動物門		
多板綱	ヒザラガイ科	クサズリガイ
腹足綱	クチキレエビス科	クチキレエビス
	ウノアシガイ科	<i>Lottia</i> sp.
	ユキノカサガイ科	ユキノカサガイ
	シロガサガイ科	<i>Apeta</i> sp.
	ニシキウズ科	アコヤシタダミ
		マメシタダミ
		<i>Conotalopia</i> sp.
		ハナチグサガイ
		チグサガイ
		<i>Margarites</i> sp.
		<i>Minolia</i> sp.
	リュウテン科	ヤマザンショウ
		エゾサンショウ
	リソツボ科	タマツボ
		ヨコミソツボ
		キタノコツブガイ
	チャツボ科	チャツボ
		ミスジチャツボ
	イソコハクガイ科	シラギクガイ
	ミジンギリギリソツガイ科	ミジンソツガイ
	アミメケンカニモリ科	<i>Cerithiopsis</i> sp.
	タマガイ科	<i>Cryptonatica</i> sp.
	ハナゴウナ科	<i>Balcs</i> sp.
	チャイロタマキビ科	チャイロタマキビ
	オリイレヨウバイ科	ヒメムシロガイ
	エゾバイ科	エゾイソナ
	コゴメガイ科	<i>Cysticus</i> sp.
	フトコロガイ科	<i>Mitrella</i> sp.
	トウガタガイ科	ツクチキレガイ
		クチキレモドキ
		<i>Miralda</i> sp.
		<i>Cingulina</i> sp.
二枚貝綱	フネガイ科	コベルトフネガイ
	キヌマトイガイ科	キヌマトイガイ
	マルスダレガイ科	ヌノメアサリ
	サザナミガイ科	オビクイガイ

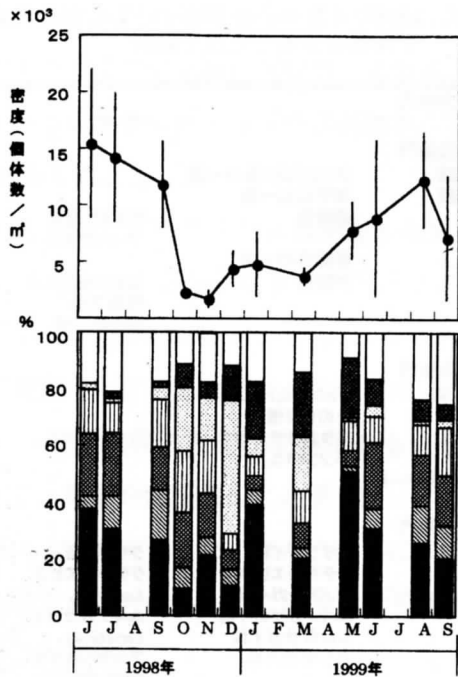


図 II-5 1998年6月から1999年9月までの軟体動物密度の季節変化(上)および各月における種組成(下) 上図中の縦棒は標準偏差をあらわす

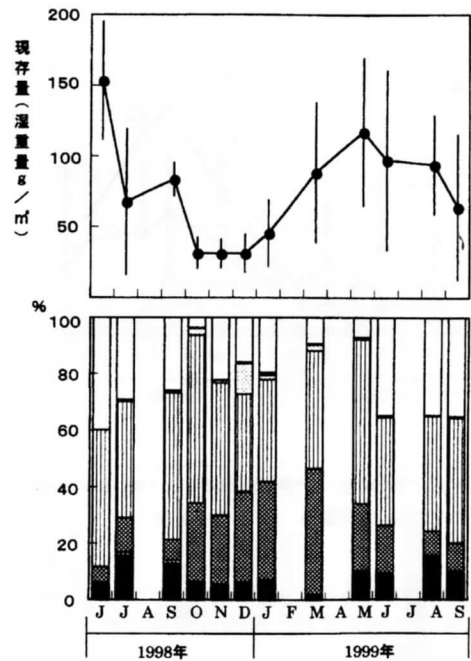


図 II-6 1998年6月から9月までの軟体動物現存量の季節変化(上)および各月における種組成(下) 上図中の縦棒は標準偏差をあらわす

次に、軟体動物現存量とその種組成の季節変化を図 II-6 に示した。現存量は密度と同様に調査期間中の最高値を示した1998年6月の $153.4 \pm 41.7 \text{g/m}^2$ から10月の $31.8 \pm 11.0 \text{g/m}^2$ へと著しく低下し、10月から12月までは調査期間中もっとも低くなった。現存量は密度より1か月遅れた1999年1月から上昇に転じ、5月には $117.4 \pm 52.1 \text{g/m}^2$ に達して密度よりも早くピークをむかえた。その後6月から9月にかけて著しく低下し、9月には $64.2 \pm 51.1 \text{g/m}^2$ となった。種組成をみると、ヤマザンショウの組成比が年間を通してもっとも高く、常に30%以上を占めていた。ハナチグサガイの組成比は1998年10月から徐々に高まり、1999年3月には44.4%に達した。アコヤシタダミの組成比は、ヤマザンショウやハナチグサガイより低く、年間を通してあまり変化がみられなかった。

軟体動物の中で、密度、現存量ともに大きな値を示した6種(図II-5、6)それぞれの季節変化を図II-7に示した。アコヤシタダミの密度は、フクリンアミ

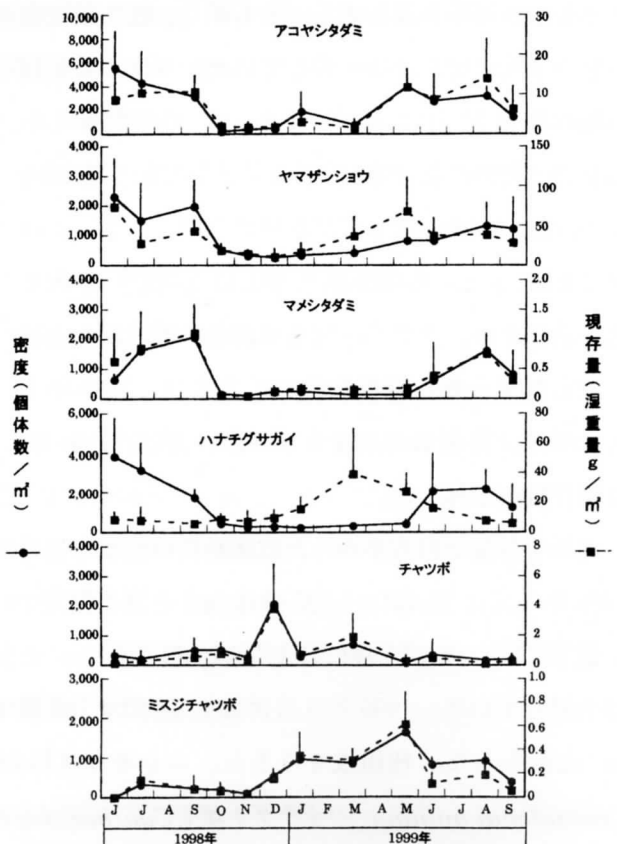
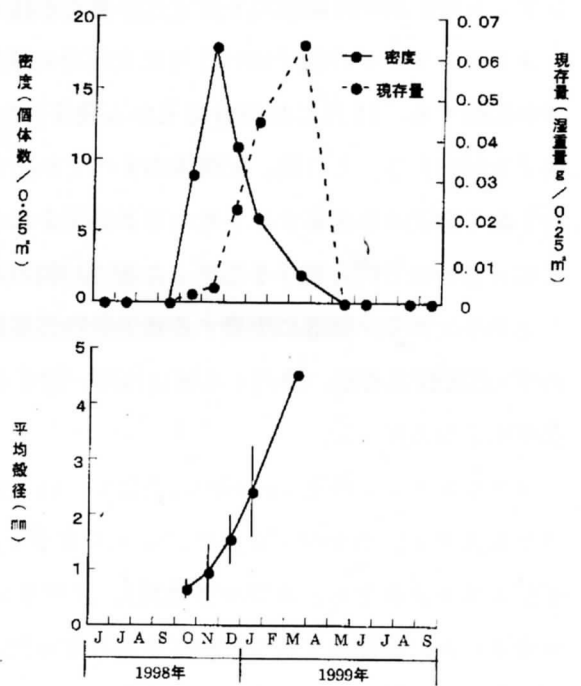


図 II-7 1998年6月から1999年9月までの軟体動物6種の密度および現存量の季節変化 図中の縦棒は標準偏差をあらわす

ジ群落の現存量の季節変化（図II-3）とほぼ同調してその現存量が多い6月から8月は $5,600 \pm 3,065 \sim 2,776 \pm 2,248$ 個体/ m^2 と高く、10月には 224 ± 153 個体/ m^2 と最低となり3月まで低かった。現存量の季節変化も密度とほぼ等しく、極大期には $8.8 \pm 7.0g/m^2$ （6月）、極小期には $1.7 \pm 1.3g/m^2$ （11月）を示した。ヤマザンショウ、マメシタダミの密度、現存量もアコヤシタダミとほぼ等しい季節変化を示した。ヤマザンショウの密度は6月から9月に $2,320 \pm 1,273 \sim 1,324 \pm 774$ 個体/ m^2 と高まり、12月には 252 ± 191 個体/ m^2 と低下した。また、マメシタダミの密度は8月から9月に $2,076 \pm 1,019 \sim 1,620 \pm 560$ 個体/ m^2 と高まり、10月から5月には $248 \pm 38 \sim 108 \pm 74$ 個体/ m^2 と低下した。ハナチグサガイの密度は、6月から8月に $3,828 \pm 1,936 \sim 2,200 \pm 560$ 個体/ m^2 と高く、10月から5月に $448 \pm 50 \sim 236 \pm 138$ 個体/ m^2 と低く、アコヤシタダミなどとほぼ等しい季節変化を示したが、その現存量は、1個体の成長による重量が



図II-8 1998年6月から1999年9月までのキタムラサキウニ稚子の現存量および密度（上）、平均殻径（下）の季節変化 下図中の縦棒は標準偏差をあらわす

アコヤシタダミなどと比べてはるかに重いので密度の季節変化とは著しく異なっており、密度が 328 ± 75 個体/ m^2 と著しく低い3月においては $39.3 \pm 30.3g/m^2$ と多かつた。これらに対して、チャツボはフクリンアミジ群落の現存量が最低から上昇を始めた12月に $2,080 \pm 1,335$ 個体/ m^2 となって季節的なピークに達した。また、ミスジチャツボは5月に $1,652 \pm 775$ 個体/ m^2 まで上昇して季節的なピークを示した。このように軟体動物においては、フクリンアミジ群落の現存量の季節変化と同調するアコヤシタダミ、ヤマザンショウ、マメシタダミ、ハナチグサガイなどの種とチャツボ、ミスジチャツボなどそれと独立する種とが存在する。

次に、フクリンアミジ群落内で変態していると考えられる棘皮動物キタムラサキウニ稚子の密度、現存量、ならびに平均殻径の季節変化を図II-8に示した。キタムラサキウニ稚子は10月に加入して11月に 72 ± 50 個体/ m^2 と多かつた密度が高くなり、以後徐々に低下して3月の2個体を最後に消失した。4月に消失するまでは殻径が10月の $0.66 \pm 0.16mm$ から3月の $5.0mm$ 、 $4.1mm$ まで著しく成長するのにともなって現存量が高まっていった。

4) 考 察

これまで、同型世代交代型の生活環をもつアミジグサ目褐藻の天然個体群について、四分胞子を形成した胞子体が圧倒的に多く存在し、配偶体はほとんど発見できないと考えられていた^{3,4)}。本研究によって、フクリンアミジは7月から9月にかけて胞子体が集中的に四分胞子を形成し、5月に配偶体が集中的に配偶子を形成すること（図II-2、3）が初めて明らかになった。このような生殖細胞形成の季節性から、フクリ

ンアミジの生活年周期は以下のように考えられる。

フクリンアミジの孢子体は9月に大部分の個体が四分孢子を形成し、その直後の10月にほとんどの孢子体が枯死する。11月には四分孢子から発芽した雌雄配偶体が生長し、5月にはそれらの大部分の個体が配偶子を形成する。その後、配偶体のすべてが枯死するか否かは明らかではないが、6月以降には受精した接合子から孢子体が発芽すると考えてよい。それらの孢子体は同年の9月には四分孢子を形成せず、翌年9月になって始めて四分孢子を形成して翌10月には枯死し、再び同様の生活年周期を繰り返すと考えられる。

フクリンアミジ群落に生息する底生動物群集組成については、すでに報告されている宮城県牡鹿半島泊浜沿岸⁴¹⁾と比較すると、優占する種はほぼ一致するが、本調査海域ではアコヤシタダミが特異的に出現することが明らかとなった。

フクリンアミジ群落に同所的に生息する底生動物は、フクリンアミジ群落の季節変化に同調する動物（アコヤシタダミ、ヤマザンショウ、マメシタダミ、ハナチグサガイ）、または独立して変動する動物（チャツボ、ミスジチャツボ、ヨコエビ垂目）、フクリンアミジ群落を初期の生活の場とする大型植食動物（キタムラサキウニ）が存在することが明らかとなった。なぜ、これらの動物はフクリンアミジ群落の季節変化に同調するのか、あるいは独立した変化をみせるのか、今後これらの動物の生活年周期に対応させてフクリンアミジが生産するジテルペン化合物を中心とした化学物質を介した関係について検討を行う必要がある。

これまでにフクリンアミジが生産するジテルペン化合物は、エゾアワビ幼生の着底、変態を阻害することが明らかにされている²⁰⁾。本研究において、フクリンアミジ群落でキタムラサキウニ稚仔はその主要な発生場である無節サンゴモ群落⁴²⁾とほぼ等しい密度での生息が確認され、また、それらは正常に成長を続けていた（図Ⅱ-8）。このことから、キタムラサキウニ稚仔はフクリンアミジ群落内で1) ジテルペン化合物の影響を受けずに下層に生育する無節サンゴモが生産するジプロモメタンによって着底、変態を誘起される、2) フクリンアミジもキタムラサキウニ幼生の変態を誘起する物質を生産する、との2つの仮説が導かれる。今後、キタムラサキウニ幼生の着底、変態物質の再検討と初期餌料の探索を行う必要がある。

5) 要 約

同型世代交代を行うフクリンアミジ群落の生活年周期の特徴を把握し、それにとまなう動物群集組成の季節変化を明らかにするため、1998年6月から1999年9月まで、宮城県牡鹿郡女川町指ヶ浜沿岸の水深4～7mに形成されているフクリンアミジ群落において調査を行った。フクリンアミジは7月から9月にかけて孢子体が集中的に四分孢子を形成し、5月には配偶体が集中的に配偶子を形成することが初めて明らかとなった。また生殖細胞形成の季節性から、フクリンアミジは孢子体と配偶体とが毎年交互に生長と成熟を繰り返す、2年周期をもって生活史を完結すると考えられた。フクリンアミジ群落に生息する動物については、フクリンアミジ群落の季節変化に同調する動物、独立して変動する動物、フクリンアミジ群落を初期の生活の場とする大型植食動物の3グループに分けられた。今後、フクリンアミジとこれらの動物の関係について化学生態学的に検討する必要がある。

2. 褐藻マコンブ群落の季節的变化と生産力

1) はじめに

コンブ目褐藻マコンブ *Laminaria japonica* は、北海道では室蘭市地球岬付近から噴火湾、渡島半島東部沿岸さらに津軽海峡を経て日本海の松前小島まで、本州では青森県日本海沿岸の小泊から竜飛崎を経て陸奥湾内に至る津軽半島、また下北半島先端から茨城県日立市^{43,44)}まで分布する。垂直的には水深約1mから30mまで生育するとされている²⁾。ただし、マコンブの地理的分布の南限は年代によって南進と北退を繰り返しており、日立市沿岸がこれまでもっとも南進した海域であること、また垂直分布の下限も毎年大きく変動することが報告されている⁴³⁾。

マコンブは、上古から重要な食用資源となっており、また最近では、ビタミン、ミネラルを豊富に含む他、アルギン酸、フコイダンからなる水溶性の食物繊維が非常に豊富で、抗癌作用や成人病の予防など生体調節機能をつかさどる役割をもっていることから、健康食品として大いに注目されている⁴⁵⁾。日本におけるコンブ類の総生産量は1960年代から1997年までの37年間に約11万トンから23万トンまでの大きな年変動を示している⁴⁶⁾。このうちマコンブはナガコンブ *L. longissima*、ミツイシコンブ *L. augustata*、に次いで全体の20%前後を占めている。

一方、マコンブはアワビやウニなど産業上重要な植食動物の成長や成熟にとって重要な食物であるため、マコンブ群落周辺にはそれらが多数生息する重要な漁場となっている。このように現在、マコンブは人間の食物としてだけでなく、海域の一次生産者としての重要な役割が認識されるに及び、養殖生産の向上を図るとともに、群落の造成と、管理を図って海域の漁業生産を向上させることも大変重要な課題となっている。

しかし、マコンブの生産量は年変動が激しく、この生産量を安定させる技術は、まだ確立していない。マコンブの生産量の変動は冬～春季の親潮の勢力に依存し、低水温で栄養塩濃度が高い親潮の流入が増大すれば、マコンブの生長が促進されて生産量が著しく向上するとされている⁴⁷⁾。このように冬～春季の海況条件によってマコンブの生産量予測は可能になっている。現在もっとも重要な課題は生産量を安定化させる技術の確立である。そのためには、マコンブの生活を周年を通して十分に把握する必要がある。

マコンブの生活年周期は、主に養殖管理の面から記載され、冬から春にかけての富栄養、低水温の時期を拡大成長期、晩春から夏にかけての水温が上昇し、海水中の栄養塩濃度が著しく低下する時期を身入成長期と、収穫2段階に分けられている⁴⁸⁾。しかし、天然に生育する個体群についての観察は噴火湾沿岸伊達市⁴⁹⁾、戸井町⁵⁰⁾、大間沿岸⁵¹⁾で記載されているほかほとんどみられない。まして、分布南限域となっている東北地方南部沿岸においてはまったくなされていない。この海域では、年によって1年で消滅したり、2年へと越年したりすることが知られている⁵²⁾。

そこで、マコンブの生活年周期を明らかにする一環として宮城県女川湾塚浜（北緯38°25'、東経141°34'）に生育するマコンブ群落を対象に、個体の生長と成熟、個体群の密度と現存量の季節変化を把握し、年間純生産量の推定を試みた。

2) 調査方法

宮城県女川湾塚浜の潮下帯、水深1~2mに生育したマコンプ群落を対象に、1998年11月から1999年12月まで永久方形枠の設置による個体標識と方形枠採集により、毎月1回調査した。

個体標識と永久方形枠設置による生長と密度の観察は以下の手順で行った。1998年11月の時点で発芽から約9か月経過したと考えられる水深1mのマコンプ群落に50cm×50cm鉄筋方形枠を固定して、枠内のマコンプ個体数を測定した。次に、枠内の15個体について茎状部に番号付きの直径1.3cmの円形プラスチック板の標識を取り付けて個体識別を行った後、巻き尺で葉長を測定し、特製の海藻パンチャー⁵³⁾で茎葉移行部から25cmの高さの部位に直径5mmの孔を植食動物の食痕と区別するために2つ並べて穿った。

翌月から、方形枠内の個体数の測定、標識個体の葉長と前月に穿った孔の茎葉移行部からの距離を測定した後、新たに茎葉移行部から25cmの部位に孔を穿った。標識個体の末枯れの進行によって葉長が25cmに達しない個体の場合は、茎葉移行部から10cmの部位に孔を穿った。1999年1月には、枠外に再生長を始めたとみられる9個体にも標識を施し、葉長を測定して茎葉移行部から25cmの部位に孔を穿った。翌月から枠内の標識個体と同様の測定を繰り返した。

調査を進める中で、新しく発芽した個体を確認した場合には、それらの個体数を測定した。その中でも標識が可能な葉長約10cmに達した個体には標識を施し、葉長25cmを越える個体には茎葉移行部から25cmの部位に、それ以下の個体には10cmの部位に孔を穿った。

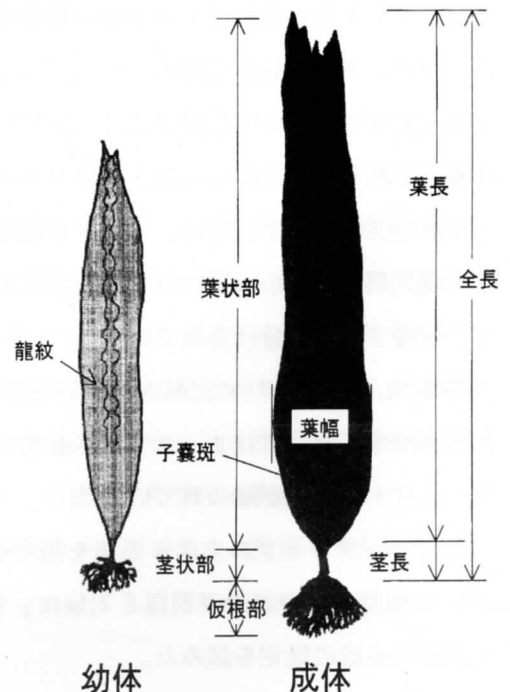
標識個体に穿った孔の継時的な位置の変化から、成長速度と末枯れ速度を次式によって求めた。

$$\text{生長速度} = (\text{今月の孔の位置} - \text{前月の孔の位置}) / \text{日数}$$

$$\text{末枯れ速度} = ((\text{前月の葉長} + \text{穴の移動距離}) - \text{今月の葉長}) / \text{日数}$$

方形枠採集に際しては、マコンプ群落中に50cm×50cm方形枠を任意に4枠設置し、内部のマコンプ全個体を仮根部を含めて、また他の海藻もすべて採集した。採集したマコンプなどは、方形枠ごとにまとめて実験室に持ち帰った。マコンプの生物測定部位を図II-9に示した。まず方形枠ごとに、個体数、全長、茎長、葉幅を測定した。幼体については幼形質である表面の龍紋形成の有無を、成体については成熟を示す子囊斑形成の有無を確認し、その部位の面積、また葉状部の全面積を測定した。面積の測定には、画像解析装置(Leica; Q-600)を用いた。さらに、葉状部、茎状部、仮根部の湿重量を測定した後、乾燥機にて約90℃で2~3日完全に乾燥させた後、乾重量を測定した。ただし、全長10cm以下の個体については方形枠ごとにまとめて湿重量、乾重量、葉面積を測定した。他の海藻については、方形枠ごとにまとめて湿重量、乾重量を測定した。

マコンプは介生生長を行うため、年間純生産量は次式により



図II-9 マコンプの生物測定部位

求めた^{54,55)}。

$$\text{生産量 (Pn)} = \text{極大現存量 (Bmax)} + \text{枯死脱落量 (L)}$$

期間 $t_1 \sim t_2$ の枯死脱落量 (L) は、次式によって計算される。

$$L(t_1 \sim t_2) = (N_1 - N_2) \cdot (w_1 + w_2) / 2$$

ここで、N: 個体数、w: 平均重量である。

3) 結 果

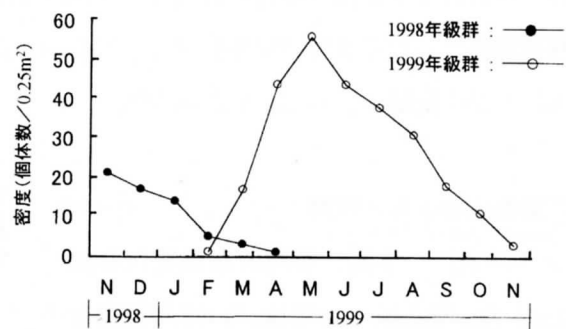
a. 永久方形枠内の密度および標識個体の生長

調査を開始した1998年11月に生育していたマコンプは、末枯れが進んで1999年5月には消失した。1999年1月から新たに発芽が認められたマコンプは、葉状部が薄く、龍紋が認められた。そこで前者を1998年級群、後者を1999年級群と規定した。

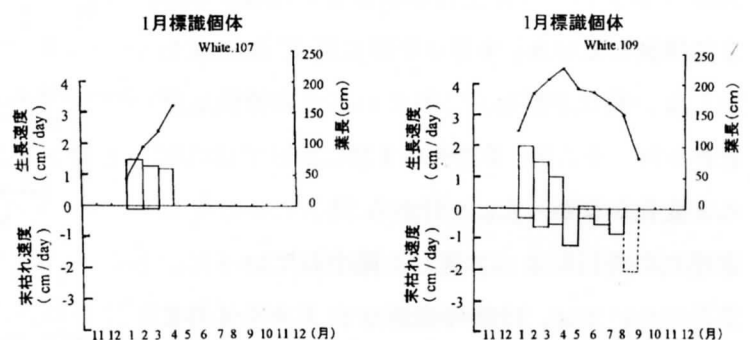
方形枠内のマコンプ密度の変化を図II-10に示した。1998年級群は、1998年11月の密度21個体/0.25m²から低下していき、翌年4月の1個体を最後に完全に消失した。1999年級群は、その後密度が急激に高まり5月に年間最高の56個体/0.25m²となった後、低下していき11月には3個体/0.25m²まで低下した。1999年11月の1999年級群の密度は、1998年級群の同時期と比べて7分の1で非常に低かった。また、1998年級群が、1998年11月にはほとんど成熟していたのに対し、1999年級群では11月になって成熟個体が始めて認められ、しかも3個体中1個体のみであった。

1998年級群の標識個体の中で、再生長が認められた1月標識の2個体について計算した生長速度と末枯れ速度、ならびに測定した葉長の季節変化を図II-11に示した。4月まで生き残った個体(w-107)は約1.2~1.5cm/日の伸長速度を示した。また、9月まで生き残った個体(w-109)は1~2月には約2.0cm/日、2~3月には1.5cm/日、3~4月には1.0cm/日と生長速度が低下していった。末枯れは、高い生長速度を示した1~3月においても0.3~0.6cm/日の速度で、また4~5月には約1.2cm/日で認められた。

1999年級群の標識個体において、生長が認められた7個体について計算した

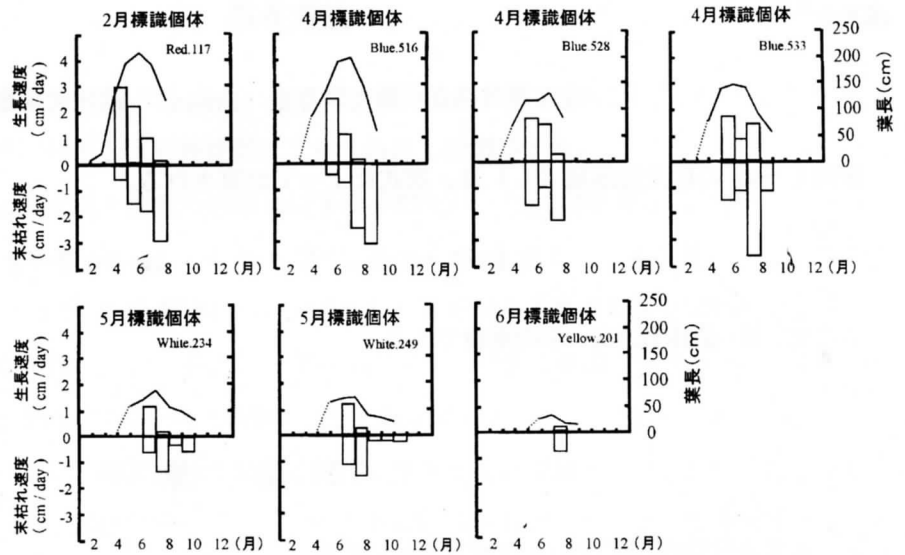


図II-10 方形枠内の年級群別個体密度の季節変化



図II-11 標識個体別の生長速度、末枯れ速度ならびに葉長の季節変化

生長速度と末枯れ速度ならびに測定した葉長の季節変化を図II-12に示した。2月標識の1個体は4~5月には3.0cm/日、5~6月には2.2cm/日、6~7月には1.0cm/日、7~8月には0.1cm/日と生長速度が低下していくとともに、末枯れ速度が4~5月には0.6cm/日、5~6月には1.5cm/日、6~7月には1.8cm/日、7~8月には2.9cm/日と上昇した。



図II-12 標識個体別の生長速度、末枯れ速度ならびに葉長の季節変化

4月標識のB-516は、5~6月には2.4cm/日、6~7月には1.1cm/日、7~8月には0.1cm/日、8~9月には0cm/日と生長速度が低下していくとともに、末枯れ速度が5~6月には0.4cm/日、6~7月には0.8cm/日、7~8月には2.4cm/日、8~9月には3.0cm/日と上昇し、2月の標識個体と類似した傾向を示した。4月には同時に標識した他の個体についても生長速度の低下と末枯れ速度の上昇の傾向は同様であった。

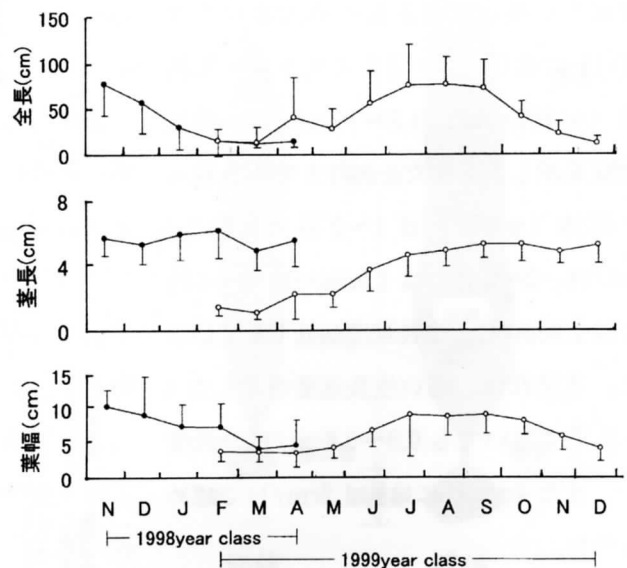
5月標識の2個体では、生長速度は、6~7月には1.1cm/日、7~8月には0.2cm/日と低下、8月以降に停止したのに対し、末枯れ速度は当初から高く、生長が停止した8月以後は低いながらも徐々に進行した。

6月標識個体は、ほとんど生長できずに10月には流失した。

再生長が行われて2年体へ移行した唯一の個体(w-109)の穿った孔の移動した長さから、再生長を始めてから枯死脱落にいたるまでの総生長量は、266.1cmと計算された。また、2月に標識した当歳個体の同様にして求めた総生長量は、307.7cmであった。

b. 採集個体の生長と成熟

マコソブの全長、茎長、葉幅の季節変化を図II-13に示した。全長については、1998年級群は末枯れの進行とともに4月まで縮小していった。1999年級群は2月に生育が確認された後、8月まで伸長していき、8月に年間最高値75.8cmを示した。特に5月から7月にかけての伸長は著しかった。その後、7月から9月にかけてはほとんど変化がなかった。9月から12月にかけては末枯れの進行によって著しく縮小していった。茎長については、1998年級群は11月から4月まで約5.6cmとほとんど変化がなかった。1999年



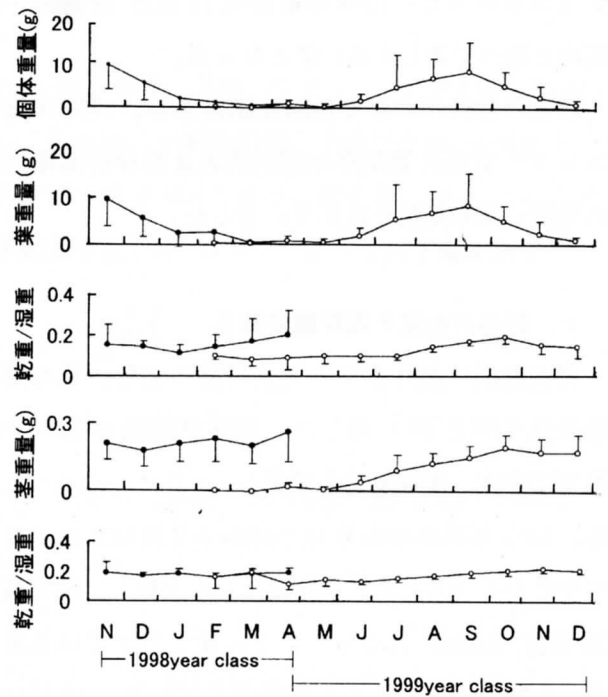
図II-13 マコソブの年級群別全長、茎長、葉幅の季節変化 グラフ中の縦棒は標準偏差をあらわす

級群は、2月から9月まで伸長を続けて約5.3cmと1998年級群とほぼ等しい長さに達した後12月まではほとんど変化がなかった。葉幅については、1998年級群は大型個体からの脱落と末枯れの進行のため4月まで緩やかに縮小していった。1999年級群は2月から4月にかけてはほとんど変化がなく、5月から7月にかけて急激に増加して約9.1cmに達した。その後、10月から12月にかけて低下を示したが、この低下は大型個体からの脱落と末枯れの進行のためである。

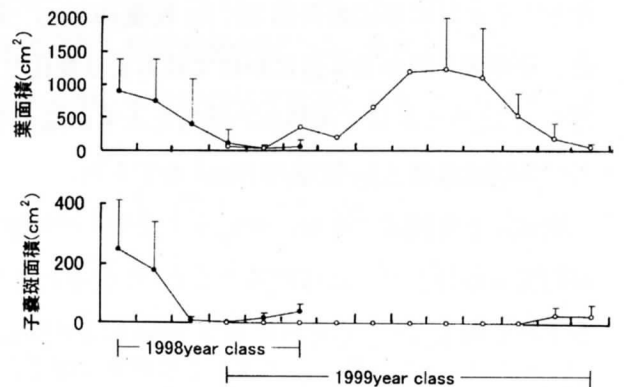
調査期間中におけるマコブの個体重量、葉重量、葉重量の乾/湿比、茎重量、茎重量の乾/湿比の季節変化を図II-14に示した。1998年級群の個体重量は、全長とほぼ同様に、4月まで減少していった。1999年級群は、2月から5月にかけてはほとんど変化がなく5月から9月にかけて著しく増加して9月に8.6gに達した後、12月にかけて全長とほぼ同様に減少した。葉重量については1998年級群、1999年級群ともに個体重量とほとんど同様の傾向を示し、両者とも全長とほぼ同調した変化を示した。肥厚充実度を示す葉重量の乾/湿比については、1998年級群は11月から1月にかけてはやや低下傾向を示したが、1月から4月にかけては上昇した。1999年級群は、2月から7月にかけてはほとんど変化がなく、7月から10月にかけて著しく上昇し年間最高を示した後、12月にかけて低下した。茎重量については茎長と同調した変化を示し、1998年級群は11月から4月までほとんど変化がなかった。

1999年級群は2月から5月にかけてはほとんど変化がなく5月から10月にかけて増加し、その後12月までほとんど変化がなかった。茎重量は、茎長と同調した変化を示した。茎重量の乾/湿比については、1998年級群は4月までほとんど変化がなかった。1999年級群は2月、3月と高い値を示した後、4月に急激に低下したが、その後徐々に上昇していき、10月から12月まではほとんど変化がなかった。

調査期間におけるマコブの葉面積、子囊斑面積の季節変化を図II-15に示した。葉面積については全長と同調した変化を示し、1998年級群は末枯れの進行とともに縮小した。1999年級群は2月から8月まで伸長と葉幅の増大ともなって拡大していき、特に5月から7月にかけて著しく拡大した。7月から9月にかけてはほとんど変化がなく、その後12月まで末枯れの進行とともに縮小した。これは、全長と同調した変化を示した。子囊斑面積については、1998年級群は11月から1月にかけて急激に縮小した後、3月から4月にかけてわずかに拡大した。1999年級群は子囊斑は11月から確認され、その面積は12月までほとんど



図II-14 マコブの年級群別個体重量、葉重量、葉重量の乾重/湿重比、茎重量、茎重量の乾重/湿重比の季節変化 グラフ中の縦棒は標準偏差をあらわす



図II-15 マコブの年級群別葉面積、子囊斑面積の季節変化 グラフ中の縦棒は標準偏差をあらわす

変化がなかった。1998年級群の11月と12月の子嚢斑面積と比べて著しく低い値となった。

以上の個体における各測定結果から、1999年級群マコンブの葉長と葉面積の関係式および単位面積当たりの重量の季節変化を表II-2に示した。

c. 群落の密度と現存量の変化

調査期間におけるマコンブ群落の密度、現存量の季節変化を図II-16に示した。1998年級群は11月から4月まで密度、現存量とも低下し、5月には消滅した。一方、1999年級群の密度は2月から3月にかけてはあまり変化がなかったが、4月に著しく上昇し、年間最高値94個体/0.25m²となった。その後7月までは急激に低下、7月以降はゆるやかに低下していき、12月に年間最低値3.3個体/0.25m²となった。1999年級群の現存量は密度の低下とともに5月から7月にかけて著しく増加し、8月に年間最高値206.3g乾重/0.25m²を示した。その後7月から9月にかけてはあまり変化なく、9月から12月にかけて末枯れの進行とともに減少し、12月に年間最低値2.4g乾重/0.25m²を示した。

次式より年間純生産量、回転率を表す年間純生産量/平均現存量比、さらに年間純生産量/年間極大現存量比をそれぞれ求めた。枯死脱落量は1999年4月から8月まで算出した。

$$\text{年間純生産量} = \text{枯死脱落量} (15.6 + 93.1 + 310.2 + 28.8) + \text{極大現存量} (825.2) = 1272.9$$

$$\text{回転率} = \text{年間純生産量} (1272.9) / \text{平均現存量} (310.0) = 4.1$$

$$\text{年間純生産量} (1272.9) / \text{年間極大現存量} (825.2) = 1.5$$

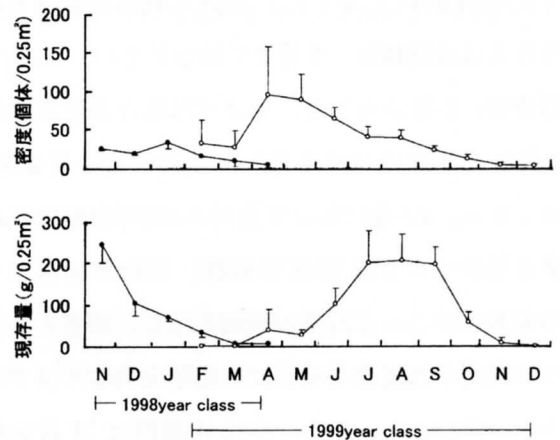
年間純生産量は1272.9g乾重/m²、回転率は4.1、年間純生産量/年間極大現存量比は1.5と推定された。

d. その他の海藻の季節変化

調査期間におけるマコンブ群落中のマコンブの現存量、その他の海藻の現存量、マコンブの占める割合の季節変化を表II-3に示した。マコンブ群落中のその他の海藻の現存量は最高でも38.0g乾重/m²と調査期間を通して極めて少なく、マコンブの現存量が低い末枯れの進行の著しい1998年11月と12月、また発芽期から伸長生長期初期にかけての3月から5月を除いて、各方形枠の現存量の80%以上をマコンブが占めていた。1998年11月、12月と1999年の同時期におけるマコンブの現存量を比較すると1998年の方が20倍以上も多かった。

表II-2. 1999年級群マコンブの葉長と葉面積の関係式[x:葉長(cm)、y:葉面積(cm²)]および単位面積あたりの重量

月	関係式	乾燥重量(g/cm ²)	湿重量(g/cm ²)
2月	y=3.3421x-6.0679	0.0046	0.045
3月	y=4.0214x-26.19	0.0066	0.10
4月	y=5.0659x-93.518	0.0048	0.054
5月	y=5.6502x-53.284	0.0040	0.044
6月	y=8.1465x-99.668	0.0055	0.054
7月	y=11.967x-265.31	0.0089	0.080
8月	y=11.219x-180.13	0.011	0.076
9月	y=10.936x-179.97	0.015	0.084
10月	y=9.4466x-70.981	0.019	0.096
11月	y=7.7054x-34.698	0.022	0.13

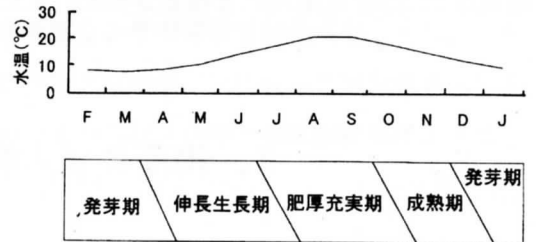


図II-16 マコンブの年級群別密度、現存量の季節変化 グラフ中の縦棒は標準偏差をあらわす

4) 考 察

マコンブの標識個体の全長 (図II-11、12)、採集個体の全長、茎長、葉幅 (図II-13)、個体重量、葉重量、葉重量の乾/湿比、茎重量、茎重量の乾/湿比 (図II-14)、葉面積、子嚢斑面積、子嚢斑面積/葉面積比 (図II-15)、永久方形枠における密度 (図II-10) ならびに方形枠採集における密度、現存量 (図II-16) の季節変化に基づいて、分布南限域におけるマコンブの生活年周期を図II-17に示したように以下の4期に分けるのが妥当であると考えられる。

- 1) 発芽期：水温が年間最低となる12月から4月にかけて肉眼的胞子体が出現し始める期間。密度が上昇し年間最高となる。
- 2) 伸長生長期：水温が上昇する4月から7月にかけて葉長、葉幅、茎長、葉面積の増大が盛んな期間。密度は著しく低下するが、現存量は著しく増加する。



図II-17 マコンブの生活年周期

- 3) 肥厚充実期：水温が年間最高となる7月から10月にかけて、葉状部の単位面積当たりの重量がさらに増加し、肥厚充実度を示す乾/湿比が上昇する期間。現存量は年間最高となる。
- 4) 成熟期：水温が下降を続ける10月から12月まで子嚢斑を形成し成熟する期間。また、マコンブは葉体の先端部で末枯れが絶えず起こっているが、特に水温が下降し始める9月から末枯れ量が生長量より大きくなり、肥厚充実期、成熟期、あるいは発芽期まで平行し枯死脱落が起こる。ただし、マコンブの生活年周期には年変動があり、マコンブが冬期に再生するか、あるいは枯死脱落し消失するか、またその時期は年により異なる。

本研究で明らかにした発芽期から成熟期までの季節は、北海道南部沿岸における知見⁵⁰⁾と比較し1か月程度遅れている。さらに、1998年級群の11月、12月における各測定値によると、1999年級群は1998年級群と比較してマコンブの生長が極めて悪く、個体群の密度、現存量ともに低かった。このことは、当海域における年平均水温が高いことに加えて、本調査期間を通して水温が平年値を1°Cから2°C上回っていたため、1999年級群は例年より発芽期、伸長生長期が遅く、また年間純生産量は低かったのではないかと考えられる。

調査期間中における塚浜の年間純生産量 1272.9g 乾重/m² は、多年生のコンブ科褐藻であるミツイシコンブの 1347.2g 乾重/m²⁵⁴⁾、生産力の高いコンブ科褐藻群落の 1.8~3.1kg 乾重/m²⁵⁶⁾、アラメの 20.0kg 湿重/m²⁵⁷⁾、カジメの 2.8kg 乾重/m²⁵⁸⁾、またヒバマタ目褐藻であるヤツマタモクの 5.5kg 乾重/m²、ノコギリモクの 8.3kg 乾重/m²⁵⁹⁾、アカモクの 22kg 湿重/m²⁵⁵⁾と比較し、湿重量が乾重量の5倍⁶⁰⁾とみなしても低かった。また、年間純生産量/年間極大現存量の比 1.5 はヤツマタモクの 1.4 及びノコギリモクの 1.2⁵⁹⁾とほぼ等しかったが、ミツイシコンブの 5.3⁵⁴⁾と比較し著しく低かった。

当海域における 1999年級群のマコンブの生産量が他の海域や他種とくらべて低かったのは、本調査期間中の水温が平年値より1°Cから2°C高く、マコンブの生長が極めて悪かったためであると考えられる。

5) 要 約

コンブ目褐藻マコンブの分布南限域となっている東北地方沿岸において、生活年周期の解明と年間純生産量の推定を試みるために、宮城県女川湾塚浜の潮下帯、水深1~2mに生育するマコンブ群落を対象に1998年11月から1999年12月まで毎月1回調査した。マコンブの生活年周期は12月から4月の発芽期、4月から7月の伸長生長期、7月から10月の肥厚充実期、10月から12月の成熟期の4期に分けられた。年間純生産量は1272.9g乾重/m²と推定された。また、回転率を表す年間純生産量/平均現存量の比は4.1となった。

3. 褐藻エゾノネジモクの季節的变化と生産力

1) はじめに

ヒバマタ目褐藻エゾノネジモク *Sargassum yezoense* は、東北地方牡鹿半島以北の太平洋岸および北海道から五島列島に至る日本海沿岸に広く分布する大型多年生海藻である⁶¹⁾。東北地方太平洋沿岸では、潮下帯の水深0~2mに優占群落を形成するため、それ以深に優占群落を形成するコンブ目褐藻のアラメ *Eisenia bicyclis* とともにこの沿岸岩礁域における一次生産を担う重要な種であると考えられる。

アラメについては、年齢と生長⁶²⁾、生活年周期と年齢ごとの個体の物質生産量^{53, 63, 64)}、群落の年間純生産量⁵⁷⁾、群落維持機構^{65, 66)}、群落の年変動機構^{17, 18)}、ならびに遷移過程⁵⁸⁾など詳細が明らかになっているが、エゾノネジモクについてはこれらの知見は全く得られていない。

エゾノネジモクが所属するヒバマタ目褐藻の優占海藻群落は、ガラモ場と呼ばれ、有用な魚介類はもとより多くの生物の産卵や棲息の場としての役割が明らかにされており⁶⁷⁾、大型1年生種アカモク *S. horneri*⁵⁵⁾ 大型多年生種のヤツマタモク *S. patens* とノコギリモク *S. macrocarpum*⁵⁹⁾ など幾つかの種については生活年周期や生産力が明らかにされている。それらの種の生産力は、アカモクで約4.4kg乾重/m²/年、ヤツマタモクで約5.5kg乾重/m²/年、ノコギリモクで約8.3kg/m²/年といずれも陸上の熱帯雨林をはるかに凌ぐことが示されている。

本研究は、エゾノネジモクの生活年周期の解明と年間純生産量の推定を目的に宮城県牡鹿半島泊浜にて調査を行い、得られた知見から既報のヒバマタ目褐藻3種との比較を試みた。またアラメ^{65, 66)} やカジメ⁶⁸⁾ で明らかにされたギャップ更新との比較により群落維持機構についても考察を試みた。

2) 調査方法

宮城県牡鹿半島泊浜の潮下帯水深1~2mに生育するエゾノネジモク群落を対象に、1997年6月から1998年11月まで1ないし2ヶ月に1回の間隔で調査を行った。エゾノネジモクは、海底面を被覆する盤状の仮根とコブ状の越年する茎状部をもち、そこから多数の主枝を発出している。このため群生すると個体が明確に把握できないため、藻体の測定および観察は主枝単位で行った。

エゾノネジモク群落内に 50cm×50cm の方形枠を 4ヶ所任意に設置し、枠内のエゾノネジモクを主枝の基部ないし仮根部からナイフによりすべて刈り取った。採集したエゾノネジモクは方形枠毎に主枝数、主枝長、湿重量を測定した。また、それぞれの主枝について成熟したことを示す生殖器床の有無の確認を行った。10cm 未満の主枝については本数を数えた後、湿重量をまとめて測定した。

次に方形枠毎に仮根部と茎部を除いて主枝の基部をそろえ、基部より 10cm 毎に切り分けて、それぞれ約 90°C で重量が変化しなくなるまで熱風乾燥し、乾燥重量によって群落の現存量の垂直分布、すなわち生産構造を求めた。そして月毎の生産構造の変化から葉状部の脱落量を推定し、その累計を純生産量とした。この方法は、陸上広葉草本で用いられる層別刈り取り法⁶⁹⁾であり、ヒバマタ目褐藻が頂端成長で気胞をもって海中に直立するという類似した特徴をもつことから、谷口・山田⁵⁹⁾および谷口・山田⁵⁵⁾が年間純生産量の推定に用いたことを適用したものである。また Allen の曲線法による年間純生産量の推定⁵⁴⁾もあわせて行った。

3) 結 果

1997年6月から1998年11月までのエゾノネジモクの現存量 (g 乾重/m²)、乾重量と湿重量の比、最長の主枝から 200 本の平均主枝長、1 m² あたりの総本数と 10cm 未満の主枝数の季節的变化を図 II-18 に示した。

現存量は、1997年6月に 1192.2g/m² を示した後低下して11月には 210.2g/m² となった。その後徐々に上昇して翌1998年6月に 805.7g/m² と年間極大値に達した。以後、再び低下して、9月に 146.4 g/m² と年間極小値となった。乾重量と湿重量との比は 0.20 前後とほぼ一定で経過したが、1997年11月に 0.29 とやや高い値を示したように現存量の年間極小期には高くなる傾向が認められた。

主枝長は、現存量の変化に類似して、1997年6月の平均 64.7cm と最も長く、11月に最も短くなった。翌1998年5月まで徐々に伸長した後、5月から8月までは平均 40cm 前後であり変化なく経過して9月に最も短くなった。

1 m² あたりの総主枝数は調査期間中、月平均で 2033.1 本に達した。ピークは 1997年6月、12月、1998年4月、8月に認められた。また 10cm 未満の主枝数は、1997年11月と 1998年9月に大きなピーク、1998年4月に小さなピークが認められた。1997年11月、1998年9月、11月には総主枝数と 10cm 未満の主枝数がほぼ一致した。

主枝長の変化を詳細に検討するため、主枝長

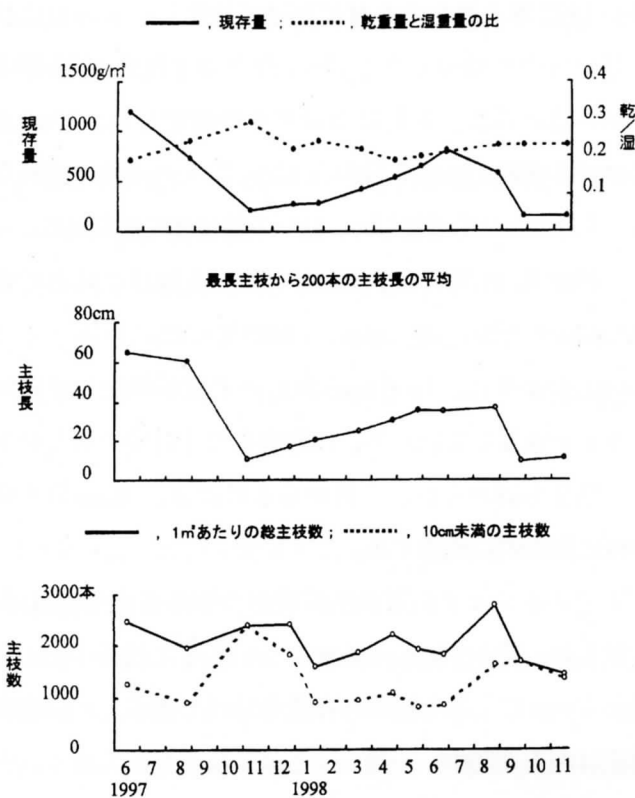


図 II-18 1997年6月から1998年11月までのエゾノネジモク群落の季節的变化 上段: 1m² あたりの現存量および乾重量と湿重量の比、中段: 最長主枝から 200 本の主枝長の平均、下段: 1m² あたりの総主枝数と 10cm 未満の主枝数

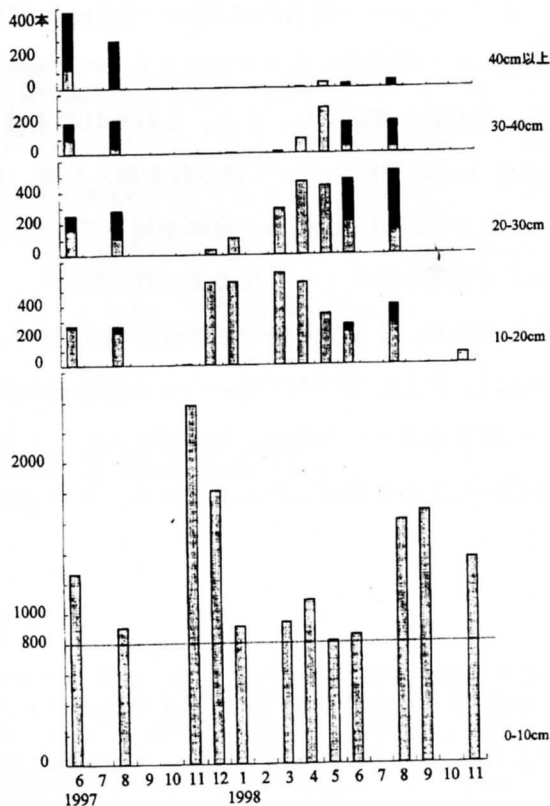
組成の季節的変化を10cmで示したのが図II-19である。同時に生殖器床を持った主枝数も示した。

1997年6月から8月にかけては、10cm未満から40cm以上の主枝までを含み、8月には20cm以上40cm未満は増加したが40cm以上のものは減少した。6月に10cm以上の主枝で認められた成熟主枝は数は減るものの割合は増加した。11月には10cm以上の主枝が消失してそれ以下の主枝が2377本とほぼ全体を占めた。

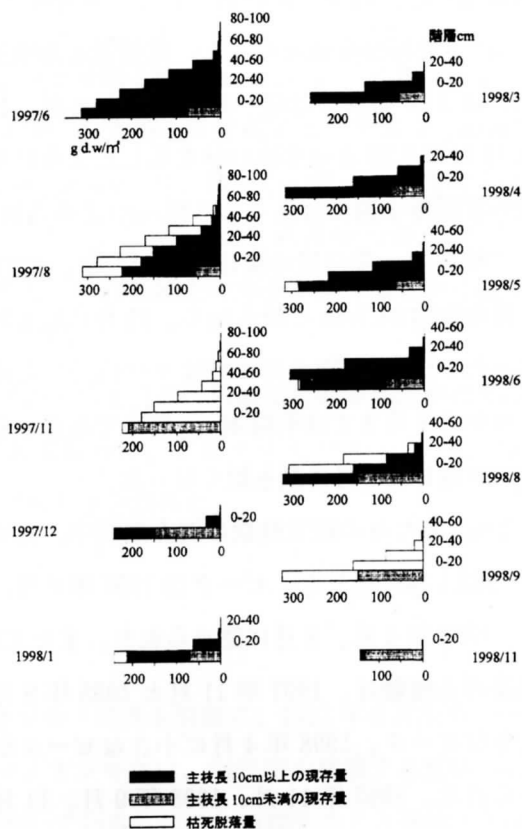
10cm未満の主枝は1998年1月にかけて911本と急減するが、10~20cmが急増、20~30cmも増加した。10cm未満の主枝は、その後4月に1082本と増加傾向を示した後、5月に812本と再び減少し、さらに9月に1666本と再び増加した。10~20cmの主枝は、1998年3月に617本と最も増加した後、6月に269本と減少、8月には400本と再び増加した。20~30cmの主枝は、10~20cmに遅れて増加していき、1998年8月に527本と最も増加した。30~40cmの主枝は、20~30cmに遅れて1998年3月から5月にかけて増加し、6月および8月にはやや減少した。40cm以上の主枝は1998年4月から認められ、8月にかけてやや増加した。1998年における成熟主枝は6月から10cm以上の主枝に認められ、8月にかけて増加した。長い主枝ほど成熟率が高かった。1998年11月には、10cm未満の主枝は9月とくらべて減少したが、10~20cmでは増加した。

以上のように、11月から新しい主枝が増加して翌年8月まで成長していくが、季節的には4月頃の新しい主枝の発芽も認められ、6月から8月には、10cm以上の主枝で集中的に成熟する。

エゾノネジモク群落の生産構造の季節変化を図II-20に示した。0~10cmの階層については主枝長10cm未満と10cm以上の主枝の現存量を分けて表示した。生産構造は調査期間中、一貫して下層の現存量が大きく、上層に向かうにつれ小さくなる様式を示した。生産構造は、1997年11月には、10cm以上の主枝が消失して10cm未満だけとなり、その後1998年6月まで徐々に上層の形成と各層の現存量の増大が認められた。この間に、



図II-19 1997年6月から1998年11月までのエゾノネジモク群落の10cm間隔の主枝長組成および生殖器床をもつ主枝の出現頻度



図II-20 1997年6月から1998年11月までのエゾノネジモク群落の生産構造の季節変化

1997年12月から1998年1月にかけては、10cm以下の層で27g、4月から5月にかけては同様に31.7g、5月から6月にかけても3.6gの枯死脱落が認められた。また、6月から8月にかけては10cm以上の階層で434.9gの枯死脱落が認められた。9月の残存した主枝の重量は146.4gである。現存量が年間極小値となる11月から翌年11月までをエゾノネジモクの1年の周期とすれば、この間に903.9gの枯死脱落量が認められたことになる。

4) 考 察

a. エゾノネジモク群落の生活年周期

調査期間中の1m²当たりの総主枝数は、各月で1425~2777本と季節的に大きく変動した(図II-18)。大きなピークは1997年11月から12月にかけてと1998年8月にあり、97年度と98年度の群落の間にも季節的な差があったが、図II-19より10cm未満の主枝が常に主枝の多くを占めており、これらの動向が大きく反映されている。とくに10cm未満の主枝のピークが1997年に11月であったものが翌1998年には8月から9月に早まり、総主枝数のピークもそれに似た変化をみせている。主枝の成長にも1997年と1998年では大きく差があり、最長200本の平均をみると1997年には6月に64.7cmに達したが、1998年では8月に記録した36.6cmまでであった。年度により群落の動態に差が生じた理由はわからないが、なんらかの環境の変化に対するエゾノネジモク群落の応答と思われる。このように変化に富んだ群落の動態をふまえた上で、エゾノネジモクの生活年周期を以下の3期にまとめた。

新生主枝の発出および発芽の時期(晩夏から秋季および春季)

エゾノネジモクの新生主枝の由来は、受精した卵から発芽したものと越年する茎状部からの発出によるものの2つが考えられる。本研究ではこれらを特に区別せず実験、観察を行った。

新生主枝が含まれる10cm未満の主枝数の季節変化をみると(図II-19)、大きなピークが1997年11月、1997年8月から9月にあり、水温が最も上昇し下降する晩夏から秋季にかけて新規加入の主枝を生ずるものと考えられる。また水温が年間で最も低い期間から上昇しはじめる4月にも小さなピークがあり、春季の新規加入も認められる。

伸長期(発出、発芽から夏季)

主枝の伸長成長は、図II-18中段の最長主枝200本の平均より発出・発芽から伸長の限界に達するまで、ほぼ滞りないように見えるが、図II-19より主枝長の頻度分布をみると、ピークは10cm未満が11月、10~20cmが翌年3月、20~30cmが4月、30~40cmが5月と水温の下降期から年間の最低水温期である3月にかけてそのシフトが遅くなっていることから、やや停滞していることが明らかである。また、図II-18より5月から8月にかけて伸長の頭打ちがみられるが、図II-19の6月、8月の20~30cm未満の増加にあるように夏季にも伸長する主枝があることがうかがえる。

成熟期(夏季)

図II-19より成熟の指標とする生殖器床をもつ主枝が群落に出現するのは1997年、1998年ともに6月、8月であった。成熟主枝は主枝長10cm以上のもので確認されているが、成熟率はより長いもの、時期は6

月より8月に高かった。1998年5月にはすでに伸長が頭打ちになった主枝が相当数ありながら、全く生殖器床をもつものは確認されず、また8月は年間で最高水温期にあることから、成熟は水温が重要な要因と考えられる。結果より成熟期は年間の最高水温期である夏季といえる。成熟期中に主枝は末枯れを始めており、水温の下降期である秋季には新生主枝との更新がなされている。

b. 年間純生産量

エゾノネジモク群落の1 m²当たりの現存量の変化をみると(図II-18上段)、1997年夏季の群落が消失し、11月に極小となっている。また、図II-19下段よりその主枝の構成も10cm未満のものがほぼすべてであり、群落の更新がなされたことが明らかである。その後、主枝の成長と共に群落はその現存量を増してゆくが、成熟期にあたる6月に年間現存量の極大値805.7gを記録し、以後末枯れにより縮小し9月には完全に消失した。図II-19下段より夏季の群落が消失し、10cm未満の主枝に更新されていることがわかる。これらから、1997年11月から1998年9月までの期間を1998年の宮城県牡鹿半島泊浜におけるエゾノネジモク群落の生活年周期の一周期として、年間純生産量の推定を行った。

層別刈り取り法によるある月と次の月の生産構造図(図II-20)を重ね合わせることにより求めた枯死脱落量の累計は757.5g/m²であり、これと枯死脱落量と見込まれる9月の現存量146.4g/m²を加えると、903.9g/m²となりこれを年間純生産量と見なすことができる。また、Allenの曲線法による年間純生産量の推定では、年間の現存量の極大値に達する6月までの枯死脱落量の累計は88.2g/m²あり、これに6月の年間極大現存量805.7g/m²を加えると893.9g/m²となり層別刈り取り法による推定値と大差なかった。

文 献

- 1) 岡村金太郎: 日本海藻誌. 内田老鶴圃, 東京, pp.158-185 (1936).
- 2) 吉田忠生: 新日本海藻誌. 内田老鶴圃, 東京, pp.205-234, 352 (1998).
- 3) 西林長朗, 猪野俊平: アミジグサ科褐藻の生活史について I. アミジグサ, エゾヤハズ, オキナウチワの四分孢子発生. 植物学雑誌, **72**, 261-268 (1959).
- 4) 藪熙, 能登谷正浩, 杉本清: アミジグサとコモングサの培養と細胞学的研究. 藻類, **29**, 129-134 (1981).
- 5) M. M. Littler, P. R. Taylor and D. S. Littler: Algal resistance to herbivory on a Caribbean Barrier Reef. *Coral Reefs*, **2**, 111-118 (1983).
- 6) M. M. Littler, D. S. Littler and P. R. Taylor: Evolutionary strategies in a tropical barrier reef system: Functional-form groups of marine macroalgae. *Jour. Phycol.* **19**, 229-237 (1983a).
- 7) P. D. Steinberg: Feeding preferences of *Tegula funebris* and chemical defenses of marine brown algae. *Ecol. Monogr.* **55**, 333-349 (1985).
- 8) V. J. Paul and M. E. Hay: Seaweed susceptibility to herbivory: chemical and morphological correlates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **33**, 255-264 (1986).
- 9) 菊地省吾, 桜井保雄, 佐々木実, 伊藤富雄: 海藻20種のエゾアワビ稚貝に対する餌料効果. 東北水研

研報, 27, 93-100 (1967).

- 10) N. Uki, M. Sugiura and T. Watanebe : Dietary value of seaweeds occurring on the pacific coast of Tohoku for growth of the abalone *Haliotis discus hannai*. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **52**, 257-266 (1986).
- 11) M. E. Hay, J. E. Duffy, C. A. Pfister and W. Fenical : Chemical defense against different marine herbivores : Are amphipods insect equivalents ? *Ecology*, **68**, 1567-1580 (1987).
- 12) M. E. Hay, W. Fenical and K. Gustafson : Chemical defense against diverse coral-reef herbivores. *Ecology*, **68**, 1581-1591 (1987).
- 13) M. E. Hay, P. E. Renaud and W. Fenical : Large mobile versus small sedentary herbivores and their resistance to seaweed chemical defenses. *Oecologia (Berlin)*, **75**, 246-252 (1988).
- 14) M. E. Hay and W. Fenical : Marine plant-herbivore interactions : the ecology of chemical defense. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **19**, 111-145 (1988).
- 15) G. Cronin and M. E. Hay : Susceptibility to herbivores depends on recent history of both the plant and animal. *Ecology*, **77**, 1531-1543 (1996).
- 16) G. Cronin, V. J. Paul, M. E. Hay and W. Fenical : Are tropical herbivores more resistant than temperate herbivores to seaweed chemical defenses ? Diterpenoid metabolites from *Dictyota acutiloba* as feeding deterrents for tropical versus temperate fishes and urchins. *J. Chem. Ecol.*, **23**, 289-302 (1997).
- 17) 谷口和也, 佐藤美智男, 大和田淳 : 常磐沿岸におけるアラメ群落の変動特性. 東北水研研報, **48**, 49-57 (1986).
- 18) 谷口和也, 佐藤陽一, 長田穰, 末永浩章 : 牡鹿半島沿岸におけるアラメ群落の構造. 東北水研研報, **49**, 103-109 (1987).
- 19) K. Taniguchi : Marine afforestation of *Eisenia bicyclis* (Laminariaceae ; Phaeophyta). *NOAA Technical Report NMFS*, **102**, 47-57 (1991).
- 20) 谷口和也, 白石一成, 蔵多一哉, 鈴木稔 : 褐藻フクリンアミジのメタノール抽出物に含まれるエゾアワビ被面子幼生の着底、変態阻害物質とその作用. 日水誌, **55**, 1133-1137 (1989).
- 21) 白石一成, 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木稔 : 褐藻フクリンアミジのメタノール抽出物によるエゾアワビ稚貝の行動規制. 東北水研研報, **52**, 13-15 (1990).
- 22) K. Kurata, M. Suzuki, K. Shiraishi and K. Taniguchi : Spatane-type diterpenes with biological activity from the brown alga *Dilophus okamurai*. *Phytochemistry*, **27**, 1321-1324 (1988).
- 23) K. Kurata, K. Shiraishi, T. Takato, K. Taniguchi and M. Suzuki : A New Feeding-deterrent diterpenoid from brown alga *Dilophus okamurai* Dawson. *Chem. Lett.*, 1629-1632 (1988).
- 24) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Shiraishi and M. Suzuki : Structures of secospatane-type diterpene with feeding-deterrent activity from the brown alga *Dilophus okamurai*. *Tetrahedron.Lett.*, **30**, 1567-1570 (1989).
- 25) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Shiraishi and M. Suzuki : Feeding-deterrent diterpenes from the

- brown alga *Dilophus okamurai*. *Phytochemistry*, **29**, 3453-3455 (1990).
- 26) 白石一成, 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木稔: 褐藻フクリンアミジのメタノール抽出物によるキタムラサキウニの摂食に及ぼす影響. 日水誌, **57**, 1591-1595 (1991).
 - 27) 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木稔, 白石一成: 褐藻フクリンアミジのジテルペン類によるエゾアワビに対する摂食阻害作用. 日水誌, **58**, 1931-1936 (1992).
 - 28) 白石一成, 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木稔: 褐藻エゾヤハズのメタノール抽出物によるキタムラサキウニとエゾアワビに対する摂食阻害作用. 日水誌, **57**, 1945-1948 (1991).
 - 29) 白石一成, 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木稔: 褐藻エゾヤハズの植食腹足類2種に対する摂食阻害. 東北水研研報, **54**, 103-106 (1992).
 - 30) 谷口和也, 山田潤一, 蔵多一哉, 鈴木稔: 褐藻シワヤハズのエゾアワビに対する摂食阻害作用物質. 日水誌, **59**, 339-343 (1993).
 - 31) K. Kurata, K. Taniguchi and M. Suzuki : Cyclozaronone, a sesquiterpene - substituted benzoquinone derivative from the brown alga *Dictyopteris undulata*. *Phytochemistry*, **41**, 749-752 (1996).
 - 32) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Takashima, I. Hayashi and M. Suzuki : Feeding-deterrent bromophenols from *Odonthalia corymbifera*. *Phytochemistry*, **45**, 485-487 (1997).
 - 33) K. Kurata, K. Taniguchi, Y. Agatsuma and M. Suzuki : Diterpenoid feeding-deterrents from *Laurencia saitoi*. *Phytochemistry*, **47**, 363-369 (1998).
 - 34) 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木稔: 褐藻ツルアラメのポリフェノール化合物によるエゾアワビに対する摂食阻害作用. 日水誌, **57**, 2065-2071 (1991).
 - 35) 谷口和也, 秋元義正, 蔵多一哉, 鈴木稔: 褐藻アラメの植食動物に対する化学的防御機構. 日水誌, **58**, 571-575 (1992).
 - 36) 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木稔: コンブ科褐藻数種のエゾアワビに対する摂食阻害活性. 日水誌, **58**, 577-581 (1992).
 - 37) K. Taniguchi, K. Kurata, T. Maruzoni and M. Suzuki : Dibromomethane, a chemical inducer of larval settlement and metamorphosis of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus*. *Fisheries Science*, **60**, 795-796 (1994).
 - 38) 谷口和也: 牡鹿半島沿岸における漸深帯海藻群落の一次遷移. 日水誌, **62**, 765-771 (1996).
 - 39) 谷口和也: 海中林造成の基礎と実践. 藻類, **44**, 103-108 (1996).
 - 40) 谷口和也: 海藻群落の形成に関する生態生化学的研究. 日水誌, **63**, 309-312 (1997).
 - 41) 大森迪夫, 谷口和也, 白石一成, 關哲夫: 海藻群落帯状構造と無脊椎動物の分布. 水産学会シリーズ 120. 磯焼けの機構と藻場修復 谷口和也編, 恒星社厚生閣, 東京, pp.62-72 (1999).
 - 42) M. Sano, M. Omori, K. Taniguchi, T. Seki and R. Sasaki : Distribution of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* in relation to marine algal zonation in the rocky coastal area of the Oshika Peninsula, northern Japan. *Benthos Research*, **53**, 79-87 (1998).
 - 43) 谷口和也: CO₂ 気候変化と増養殖漁業への影響. 農業および園芸, **66**, 215-220 (1991).

- 44) 川嶋昭二：日本産コンブ図鑑。北日本海洋センター，札幌，pp.6-7 (1993).
- 45) 館脇正和：海藻食と健康－「藻食論」，とくにコンブ食について。遺伝，**50**，66-70 (1996).
- 46) 農林水産省統計情報部：漁業養殖生産統計年報。(1960-1997).
- 47) 西田芳則：海況条件とコンブの豊凶変動。水産学シリーズ 120. 磯焼けの機構と藻場修復 谷口和也編，恒星社厚生閣，東京，pp.50-60 (1999).
- 48) 三本菅義昭：促成養殖コンブの成長過程に関する研究。北水研報告，**49**，1-78 (1984).
- 49) 船野隆：噴火湾沿岸伊達市におけるマコンブの生態およびコンクリートブロック，割石によるコンブ礁造成 第 I 報 マコンブの生態。#北水試報，**22**，17-77 (1980).
- 50) 戸井町：戸井海域のコンブの生活と海洋環境調査報告書－天然マコンブ不作原因調査－。1-89 (1992).
- 51) 桐原慎二：海藻類の群落構成と植食動物の生息量からみた磯焼け発生機構の解明。農林水産技術会議事務局，焼けの発生機構の解明と予測技術の開発，pp.6-80 (1997).
- 52) 谷口和也：海中造林による魚介類・藻類の資源増大をめざして。農林水産技術会議事務局（編）海洋牧場－マリンランディング計画，恒星社厚生閣，東京，pp.275-352 (1989).
- 53) 谷口和也，磯上孝太郎，小島博：アラメの 2～4 歳個体の生長および成熟についての考察。藻類，**39**，43-47 (1991).
- 54) A. Fuji and K. Kawamura：Studied on the biology of the sea urchin－VII. Bioeconomics of the population of *Strongylocentrotus intermedius* on a rocky shore of southern Hokkaido. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **36**，763-775 (1970).
- 55) 谷口和也・山田秀秋：松島湾におけるアカモク群落の周年変化と生産力。東北水研研報，**50**，59-65 (1988).
- 56) D. F. Westlake：Comparisons of plant productivity. *Biol. Rev.*, **38**，385-425 (1963).
- 57) 吉田忠生：アラメの物質生産に関する 2・3 の知見。東北水研研報，**30**，107-112 (1970).
- 58) A. Yokohama, J. Tanaka and H. Chihara：Productivity of the *Ecklonia cava* community in a bay of Izu Peninsula on the Pacific coast of Japan. *Bot. Mag. Tokyo.*, **100**，129-141 (1987).
- 59) 谷口和也・山田悦正：能登飯田湾の漸深帯における褐藻ヤツマタモクとノコギリモクの生態。日水研報告，**29**，239-253 (1978).
- 60) 有賀祐勝：資源としての海藻。#遺伝。**28**，45-59 (1974).
- 61) T. Yoshida：Japanese species of *Sargassum* subgenus *Bactrophyucus*. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University series V (Botany)*, **13**，99-246 (1983).
- 62) 谷口和也・加藤史彦：褐藻類アラメの年齢と生長。東北水研研報，**46**，15-19 (1984).
- 63) 谷口和也，小島博，山田秀秋：褐藻アラメの 1 歳個体における成長と成熟。日水誌，**59**，441-444 (1992).
- 64) 谷口和也，小島博，磯上孝太郎：褐藻アラメの 5，6 歳個体の成長と成熟。日水誌，**59**，1349-1353 (1993).
- 65) 谷口和也・鬼頭鈞：アラメ群落における年級群組成の変動。日水誌，**54**，1583-1588 (1988).
- 66) 谷口和也：牡鹿半島沿岸におけるアラメ群落の更新過程。東北水研研報，**52**，9-12 (1990).
- 67) 布施慎一郎：ガラモ場における動物群集。生理生態，**11**，25-31 (1962).

- 68) M. Maegawa and W. Kida : Regeneration process of *Ecklonia* marine forest in the coastal area of Shima Peninsula, central Japan. *Japan. J. Phycol.*, **37**, 194-200 (1989).
- 69) M. Monshi and T. Saeki : Über den lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die Stoffproduction. *Jap. Jour. Bot.*, **14**, 22-25 (1953).

Ⅲ. ケミカルシグナルの探索と機能解明

蔵多一哉*、谷口和也**

(*函館工業高等専門学校、**東北大学大学院農学研究科)

1. はじめに

海洋生態系は、これを構成する生物種間の“食う-食われる”の関係で結びついた複雑な食物連鎖を形成している。海洋生物が生産する代謝産物が様々な生理、生態的活性をもつことが解明されるに従って、生物種間関係が食物連鎖ばかりでなく、化学物質を介した交信によっても成り立っていることが次第に明らかになってきた¹⁻³⁾。

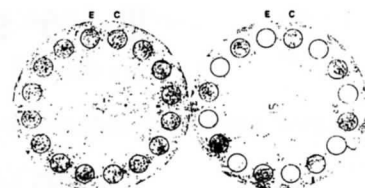
沿岸岩礁域においては海藻を一次生産者とする生物社会、すなわち岩礁生態系が構成されている。岩礁生態系における海藻群落遷移の過程は⁴⁾、まず一方の極相であるサンゴモ平原に植食動物に対する摂食阻害作用を持つ小型海藻が入植し、それに続く群落形成によって植食動物の排除が始まる。次いで小型海藻群落中には植食動物からの摂食を免れることを保証された大型1年生海藻と大型多年性海藻が発芽し、小型海藻に代わって群落を形成するようになる。その群落では生育速度の速い大型1年生海藻が大型多年性海藻に先行し、植食動物の摂食圧を十分に吸収することが可能であり、後続する生育速度の遅い大型多年性海藻の生き残りを保証する。大型1年生海藻が消失した後、残った大型多年性海藻は十分に植食動物の摂食圧に耐えることが可能なほどに成長を遂げており、もう一方の極相である海中林の形成に至るものと考えられている。この様に植食動物に対して摂食阻害作用を持つ小型海藻の役割は海中林の形成に対して重要な役割を果たしているものと考えられ、これまで小型海藻の褐藻アミジグサ科のフクリンアミジ⁵⁻¹¹⁾、シワヤハズ^{12,13)}、エゾヤハズ^{14,15)}、紅藻フジマツモ科のハケサキノコギリヒバ^{16,17)}、また、大型海藻であるコンブ科のツルアラメ¹⁸⁻²⁰⁾、アラメ²¹⁾の摂食阻害物質の検索を行ってきた。このような活性を持つ海藻の発見と活性物質の検索は、沿岸漁業の著しい生産低下をもたらすサンゴモ平原(磯焼け)を産業的に有用で多様な生物相を持つ海中林に造成するための支援技術として重要であると考えられる。

本研究ではアミジグサ科のアミジグサ、サナダグサ、シマオオギ、フジマツモ科のマギレソゾ、ミツデソゾ、ウラソゾの検索を行った。また、アミジグサ科シワヤハズに含まれている未同定の微量活性物質の構造決定、さらに、摂食阻害活性を持つと考えられるユカリ科紅藻ユカリ、コノハノリ科紅藻ヤレウスバノリ、スジウスバノリのスクリーニングとスジウスバノリから得られた新規ステロールの構造決定も合わせて行った。

2. 生物試験法

アワビやウニの摂食刺激物質として複合脂質のジガラクトシルジグリセリドやホスファチジルコリンなどが明らかにされた際に用いられたアビセル板法²²⁾を改良して、結晶セルロースを0.1 mmの厚さに塗布し

た直径 20 cm のアルミシート（メルク製）の周縁部に直径 2 cm の円を等間隔に 16 区画描き、交互に対照区と試験区を配して、エゾアワビ、キタムラサキウニ、エゾバフンウニの摂食選択性を求める試験を行った（図Ⅲ-1）。対照区にはホスファチジルコリン（PC）を 7.5 μg、試験区には同量の PC と海藻から抽出した画分 75 μg をエタノールに溶解して吸着させた。この試験板を 20 °C の恒温室内で 5 l の濾過海水を満たした円筒水槽（直径 30 cm、高さ 14 cm）の底に沈め、試験開始 1 日前から絶食させた殻長 3 cm のエゾアワビ 5 個体、殻径 3 cm のキタムラサキウニまたはエゾバフンウニ 10 個体を各水槽に入れて 15 時間の暗黒条件下で試験した。試験区と対照区の食み跡数または食み跡面積を測定して、次式の摂食選択性指数 $Ei^{23)}$ を求めた。



図Ⅲ-1 代表的な摂食阻害活性試験
活性の弱い画分（左）と
活性の強い画分（右）。
C：対照区、E：試験区。

$$Ei = \frac{Pi - pi}{Pi + pi}$$

ここで Pi は対照区の食み跡数（面積）、 pi は試験区の対照区の食み跡数（面積）を示す。また t 検定によって対照区と試験区に対する選択の有意差を求めた。この試験法は、試験に供した植食動物が対照区と試験区のいずれかを選択する以外の行動学的な条件をすべて排除した上で、忌避物質の存在のみが有意差をもたらすように設計したものである。図Ⅲ-1 に代表的な摂食阻害活性試験の結果を示す。

3. アミジグサの摂食阻害物質の検索

アミジグサ *Dictyota dichotoma* は、世界各地に広く分布する海藻であり、植食動物が多いサンゴモ平原に特異的に生育することが知られている。Littler らは、カリブ海のアミジグサに関する論文の中で、おそらくこの海藻は、自身が化学物質を産生することによって植食動物の摂食から免れているのであろうと推論している²⁴⁾。このことを裏付ける現象として、近年、新潟県の佐渡島や粟島においては、ホンダワラ類が優占する海中林が著しく衰退し、その裸地にアミジグサの優占群落が拡大した結果、アワビやサザエがほとんど漁獲されなくなる現象が起こっている。このため、この海藻の摂食阻害物質の検索を行った。

アミジグサは 1995 年 7 月に宮城県石巻市佐須浜の水深 3 ~ 5 m の海底からスキューバー潜水により採取し、すみやかに実験室に持ち帰って凍結した。凍結海藻 2.99 kg をアセトンで 10 日間浸漬抽出後、抽出液を減圧濃縮した。得られた抽出物をエーテルと水で分配し、エーテル可溶と水可溶画分を得た。水可溶部は活性炭カラムに吸着後、水、メタノール、メタノール/アンモニア/水 (8:1:1) で逐次溶出し、それぞれ水溶性活性炭通過部 (WP, 93 g)、水溶性メタノール溶出部 (WM, 2.1 g)、水溶性メタノール/アンモニア溶出部 (WMA, 1.8 g) とした。エーテル可溶部は 5% 水酸化カリウム水溶液で抽出後、1 M 塩酸で酸性にし、エーテル抽出して酸性部 (A, 13.3 g) を得た。エーテル可溶部から酸性部を抽出した残りのものについては塩基性部がほとんどないため、これを中性部 (N, 26.4 g) とし、それぞれ一次画分とした。一次画分の収量と摂食選択性指数 Ei 値を表Ⅲ-1 に示した。

一次画分のうち N 部と A 部に活性が認められた。このうち、より強い活性を示した N 部についてア

ルミナ (Merck 社製、Aluminium oxide 90、activity -II-III) カラムクロマトグラフィーにより粗分画を行った。展開溶媒はヘキサン (N-1)、ヘキサン/酢酸エチル 19:1 (N-2)、ヘキサン/酢酸エチル 9:1 (N-3)、ヘキサン/酢酸エチル 1:1 (N-4)、酢酸エチル (N-5)、メタノール (N-6) と逐次極性を上げて stepwise で溶出して二次画分とした。二次画分の収量と E_i 値を表 III-2 に示した。N-1~4 部までの各画分に活性が認められたが、このうち量的に多い N-2~4 部の画分について高速液体クロマトグラフィー (HPLC) を繰り返し行うことにより含まれる化合物の単離を行った。HPLC は逆相系 (日本分光 Megapak #SIL-C18, 溶媒: メタノール/水) および順相系 (Megapak SIL-CN, 溶媒: ヘキサン/イソプロピルアルコール) で行った。純品として得られた化合物 (1~15) については IR、 $^1\text{H-NMR}$ 、 $^{13}\text{C-NMR}$ 、UV 等のスペクトル分析から化合物の同定を行った。N-2 部からは 2-acetoxydictyoxide (1: 新化合物)、pachydictyol A (3)²⁵⁾、isopachydictyol A (4)²⁶⁾、acetyldictyol C (6)²⁷⁾、18-hydroxy-2,7-dolabelladiene (8)²⁸⁾、10-acetoxy-18-hydroxy-2,7-dolabelladiene (9)^{28, 29)}、dilophol (11)^{30, 31)}、dilopholacetate (12)³²⁾、3-acetoxyacetyldilophol (13)³¹⁾、dictyolactone (14)³³⁾、dichotol (15: 新化合物)、N-3 からは dictyol E (7)³⁴⁾、N-4 部からは 2-hydroxydictyoxide (2)³⁵⁾、dictyol C (5)³⁴⁾、10,18-dihydroxy-2,7-dolabelladiene (10)²⁸⁾ が得られ、それらの構造式は図 III-2 に示した。これらの化合物はすべてジテルペンであり、その骨格から 5 つのグループに分類される。それぞれ化合物 1~7 は hydroazulene、化合物 8~10 は dolabellane、化合物 11~13 は germacrane、化合物 14 は xenicane、化合物 15 は biflorin 型のジテルペンである。またこれらの化合物の E_i 値と中性部に対する収率を表 III-3 に示した。

表 III-1 アミジグサ(凍結品2.99kg) をアセトン抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量 (g)	26.4	13.3	93	2.1	1.8
E_i	0.87	0.75	-0.03	0.04	0.08

N: 中性部、A: 酸性部、WP: 水溶性活性炭通過部、WM: 水溶性メタノール溶出部、WMA: 水溶性メタノール/アンモニア溶出部

表 III-2 アルミナカラムクロマトグラフィーにより中性部から得られた二次画分と摂食選択性指数 E_i

画分	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
収量 (g)	0.283	2.711	4.430	8.887	2.575	2.953
E_i	0.72	0.84	0.78	0.71	0.37	0.52

N-1: ヘキサン溶出部、N-2: ヘキサン/酢酸エチル19:1溶出部、N-3: ヘキサン/酢酸エチル9:1溶出部、N-4: ヘキサン/酢酸エチル1:1溶出部、N-5: 酢酸エチル溶出部、N-6: メタノール溶出部

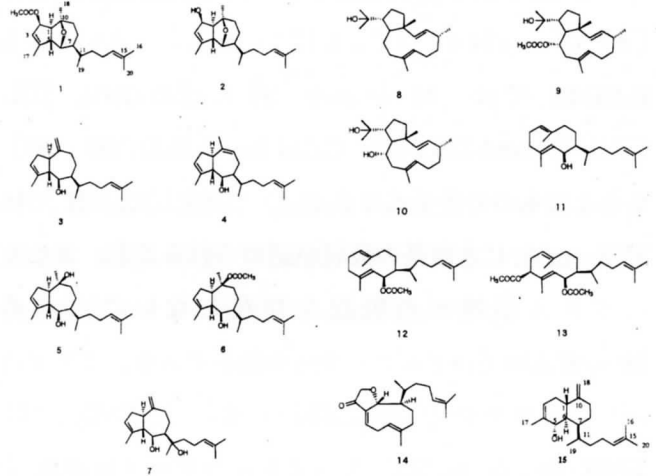


図 III-2 N-2 ~ 4 部から単離された化合物の構造式

表 III-3 N-2~4 部から単離した化合物の中性部に対する収率と摂食選択性指数 E_i

化合物番号	化合物名	中性部に対する収率 (%)	E_i
1	2-acetoxydictyoxide	0.04	0.97
2	2-hydroxydictyoxide	0.13	0.47
3	pachydictyol A	0.16	0.50
4	isopachydictyol A	0.12	0.24
5	dictyol C	0.32	0.54
6	acetyldictyol C	0.13	0.73
7	dictyol E	4.16	0.12
8	18-hydroxy-2,7-dolabelladiene	0.08	0.97
9	10-acetoxy-18-hydroxy-2,7-dolabelladiene	0.17	0.94
10	10,18-dihydroxy-2,7-dolabelladiene	0.44	0.42
11	dilophol	0.04	0.47
12	dilophol acetate	0.04	0.53
13	3-acetoxyacetyldilophol	0.08	0.35
14	dictyolactone	0.06	0.38
15	dichotol	0.16	0.77

アワビに対する生物試験の結果から、5つの微量成分 2-acetoxydictyoxide (1)、acetyldictyol C (6)、18-hydroxy-2,7-dolabelladiene (8)、10-acetoxy-18-hydroxy-2,7-dolabelladiene (9)、dictyolactone (14)、dichotol (15) が強い活性を示した。これに対して主成分である dictyol E (7) は不活性であった。他の微量成分 3~5 と 10~14 は中程度か弱い活性であった。それ故、アミジグサは酸性部に存在する未検索の活性物質と多様な骨格のジテルペンからなる多数の微量成分によって植食動物を忌避しているものと思われる。

2-acetoxydictyoxide (1) と dichotol (15) は新化合物であり、つぎにこの二つの化合物の構造決定について述べる。

1) Dichotol (15) の構造決定

Dichotol (15) はヘキササンから再結晶して m.p. 38 ~ 40 °C の無色針状結晶として得られ、比旋光度は $[\alpha]_D^{27} = +14.4^\circ$ (c, 0.17; CHCl₃) であった。L R-EIMS では M⁺ が *m/z* 288 に認められ、HR-EIMS [Found 288.2479. Calcd for C₂₀H₃₂O, 288.2388] からこのものの分子式は C₂₀H₃₂O と決定した。IR では 3238 cm⁻¹ に水酸基の吸収が認められること、またカルボニル領域での吸収が存在しないことから 15 の酸素原子はアルコール性水酸基であり、カルボニル、エーテルの可能性は除かれる。¹H-NMR、¹³C-NMR および HMBC スペクトルのデータは表 III-4 に示した。¹H-NMR、¹³C-NMR、¹H-¹H COSY および HSQC スペクトルからつぎの部分構造式 (図 III-3 a) が導かれる。

分子式からこの化合物の不飽和度は 5 である。上記の部分構造式中には炭素-炭素二重結合が 3 と環構造が 1 つ入っていることから残りの不飽和度 1 は環構造にあてられ、必然的に A と B を結合せざるを得ない。これにより biflorin 骨格のジテルペンアルコールの平面構造式 (図 III-3 b) が導かれる。この構造は表-4 に示した HMBC スペクトルを十分に満足するものであり、特に C-5 における H-3 と H₃-17 との long range correlation は A と B との結合を支持するものであった。

アリルアルコールの構造を確認するため、15 をアセ

表 III-4 Dichotol (15) の ¹³C-NMR(100MHz, DEPT), ¹H-NMR(400MHz) と HMBC データ*

C	¹³ C δ	¹ H δ J(Hz)	long range correlation
1	38.2	2.36 <i>m</i>	H ₂ -2, H-3, H-6, H-7, H ₂ -9, H ₂ -13
2	30.8	2.17 <i>m</i>	H-3
		2.04 <i>m</i>	
3	123.1	5.51 <i>m</i>	H ₂ -2, H ₂ -17
4	135.6		H ₂ -2, H ₂ -17
5	71.2	4.25 <i>br s</i>	H ₂ -3, H-6, H ₂ -17
6	50.4	1.67 <i>m</i>	H-1, H ₂ -2, H-7, H ₂ -8, H-11
7	34.4	2.14 <i>m</i>	H-6, H ₂ -8, H-9, H-11, H ₂ -12
8	26.9	1.94 <i>m</i>	H-7, H ₂ -9, H-11
		1.48 <i>m</i>	
		2.22 <i>m</i>	
9	32.9		H-1, H ₂ -2, H-6, H-7, H ₂ -18
10	152.2		H-1, H ₂ -2, H-6, H ₂ -8, H ₂ -9, H ₂ -18
11	32.0	1.95 <i>m</i>	H-6, H-7, H ₂ -8, H ₂ -12, H ₂ -13
12	37.0	1.45 <i>m</i>	H-7, H-11, H ₂ -13, H-14
		1.35 <i>m</i>	
13	26.3	2.04 <i>m</i>	H-11, H ₂ -12, H-14
		1.96 <i>m</i>	
14	124.9	5.14 <i>m</i>	H ₂ -12, H ₂ -13, H ₃ -16
15	131.5		H ₂ -13, H ₃ -16, H ₃ -20
16	25.7	1.69 <i>br s</i>	H-14, H ₃ -20
17	19.3	1.78 <i>br s</i>	H-3
18	106.4	4.75 <i>s</i>	H ₂ -9
		4.00 <i>s</i>	
19	19.0	1.04 <i>d</i> J=7	H-7, H-11, H ₂ -12
20	17.7	1.61 <i>br s</i>	H-14, H ₃ -16
OH		1.31 <i>d</i> J=3	

*重クロロホルムで測定した。

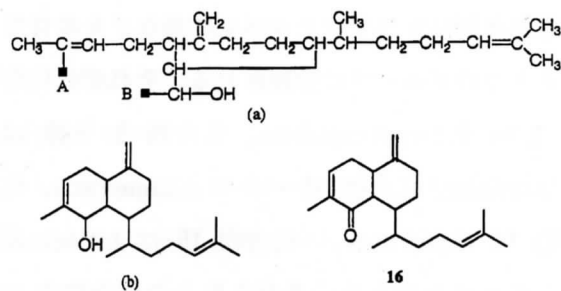


図 III-3 Dichotol の部分構造式、平面構造式および Jones 酸化生成物の構造式

トン中で Jones 酸化を行い HPLC (溶媒: ヘキサン/イソプロピルアルコール 100:1) で精製して $[\alpha]_D^{23} = -44.4^\circ$ (c, 0.05; CHCl_3) の無色油状物質 (16) を得た。16 は IR で 15 に存在した水酸基の吸収は消失し、代わりに 1675 cm^{-1} に α, β -不飽和ケトンに由来するカルボニルの強い吸収が認められた。UV では $\lambda_{\text{max}}(\text{EtOH})$ 235nm (ϵ 7200)、331 (ϵ 96) に吸収極大を示した。さらに $^1\text{H-NMR}$ において 15 の H-3 は δ 5.51(1H, *m*) であったが、16 では δ 5.51(1H, *m*) と低磁場にシフトしていた。以上の結果から 15 がアリルアルコールの構造を持つことが確定された。

つぎに 15 の相対立体配置は NOESY スペクトル (図 III-4) を測定して行った。核間水素の H-1/H-6 間には NOE は観測されない。よって H-1 と H-6 はトランスに配置し、*trans*-decalin 環であることがわかる。また、H-1/H-5、H-1/H₃-19、H-5/H₃-19 に NOE が認められることから H-1、H-5 および C-7 位に存在する 1,5-dimethyl-4-hexenyl 側鎖は互いに シス配置をしており、図 III-4 に示した相対立体配置であると考えられる。

15 は二級水酸基を持ち、水酸基の結合した炭素は不斉である。不斉な二級水酸基の絶対立体配置を決定する方法としては、大谷等によって確立された $^1\text{H-NMR}$ を用いる新 Moscher 法³⁶⁾がある。15 についてこの方法を適用し、絶対配置の決定を行った。15 を無水塩化メチレン溶液中、dicyclohexylcarbodiimide と 4-dimethylaminopyridine の存在下で (S)-methoxytrifluoromethylphenylacetic acid (MTPA) と (R)-MTPA を室温で 50 時間反応させた³⁷⁾。減圧下で溶媒を留去した後、HPLC で精製して純品の (S)-MTPA エステルと (R)-MTPA エステルを得た。これらの $^1\text{H-NMR}$ を測定し $\Delta\delta = (\delta_S - \delta_R)$ 値 (図 III-5) を求めた。図 III-5 に示した $\Delta\delta$ 値は $\Delta\delta > 0$ の ^1H グループが MTPA の右側、 $\Delta\delta < 0$ の ^1H グループが MTPA の左側に配置しており、 $\Delta\delta$ の絶対値が MTPA と近いほど大きく、遠いほど小さくなっている。この結果は 15 の絶対配置が正しいものであることを支持するものであり、C-1、C-5、C-6、C-7 はそれぞれ S、R、R、S と決定した。

2) 2-Acetoxydictyoxide (1) の構造決定

2-Acetoxydictyoxide (1) は $[\alpha]_D = -95.6^\circ$ (c, 0.05; CHCl_3) の無色油状物質である。LR-EIMS で M^+ が m/z 346 に認められ、また HR-EIMS では $\text{M}^+ - \text{CH}_3\text{COOH}$ のピークが m/z 286.2289 (Calcd. for $\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}$) であることから分子式は $\text{C}_{22}\text{H}_{34}\text{O}_3$ である。IR で 1735 cm^{-1} にカルボニルの吸収、 $^1\text{H-NMR}$ (表 III-5) で δ 2.01 にアセチルメチルプロトンと δ 5.41 にアリル位に存在するアセトキシルの付いたアリル位の水素および δ 173.3 にカルボニル炭素の吸収が認められたことから 3 つの酸素原子のうち 2 つはアセトキシルにあてられる。残りの 1 つは IR で水酸基の吸収が無いことからエーテルに使われているものと考えられる。これは、 $^{13}\text{C-NMR}$ において δ 74.6 と 77.2 に酸素の付け根の四級炭素とメチ

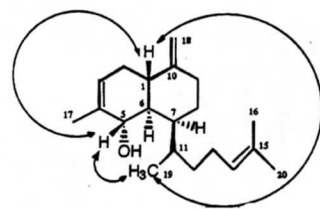


図 III-4 Dichotol (15) の相対立体配置と NOESY スペクトルで観察された NOE

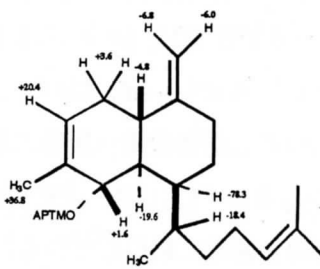
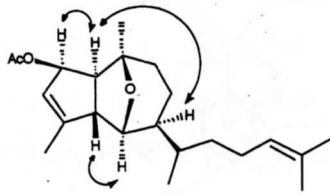
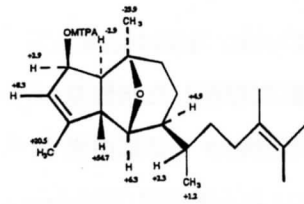


図 III-5 MTPA エステルの $\Delta\delta = (\delta_S - \delta_R)$ 値 (400 MHz で測定し、Hz 単位で示している)



図III-6 2-acetoxydictyoxide (1) の相対立体配置とNOESY スペクトルで観察された NOE



図III-7 MTPA エステルの $\Delta\delta = (\delta S - \delta R)$ 値 (400 MHz で測定し、Hz単位で示している)

ル炭素が認められることから支持される。さらに、 $^1\text{H-NMR}$ [δ 5.08 (1H, *br t*, $J=6$ Hz) と 5.69 (1H, *m*)] と $^{13}\text{C-NMR}$ [δ 124.5 (*d*), 130.6 (*d*), 131.5 (*s*) と 148.7 (*s*)] から二つの三置換炭素-炭素二重結合が存在する。1 の $^1\text{H-NMR}$ および $^{13}\text{C-NMR}$ のデータは 2-hydroxydictyoxide (2) のものと非常に類似している。1 の平面構造は 2 のスペクトルデータと比較しながら 1 の $^1\text{H-}^1\text{H}$ COSY スペクトルから導かれた。1 の相対立体配置は NOESY スペクトル

(図III-6) から決定した。H-1/H-2、H-1/H-7 と H-5/H-6 に NOE が認められることから C-1、C-2、C-5、C-6 と C-7 の相対立体配置は 2 のものと同じであることがわかった。2 を無水酢酸/ピリジンで定法によりアセチル化を行い、得られたアセテートは全ての点で 1 と一致した。絶対配置は 2 が二級アルコールであることから dichotol (15) の場合と同様に新 moscher 法^{36,37)}を適用して決定した。図III-7 にその結果を示したが、15 の場合と同様 $\Delta\delta$ 値は $\Delta\delta > 0$ の ^1H グループが MTPA の右側、 $\Delta\delta < 0$ の ^1H グループが左側に配置しており、その絶対値の大きさも MTPA からの距離に比例していることから 2-hydroxydictyoxide の絶対配置は 2 であると決定した。このことから 2-acetoxydictyoxide の絶対配置も 1 であると決定した。

表 III - 5 2-acetoxydictyoxide (1) の $^{13}\text{C-NMR}$ (100MHz,DEPT)と $^1\text{H-NMR}$ (400MHz) データ*

C	$^{13}\text{C} \delta$	$^1\text{H} \delta$	J(Hz)
1	61.3	2.54	<i>dd</i> , $J=12,4$
2	72.1	5.41	<i>dd</i> , $J=4,3$
3	130.6	5.69	<i>m</i>
4	148.7		
5	58.3	3.36	<i>br d</i> , $J=12$
6	77.2	4.07	<i>dd</i> , $J=4,2$
7	38.0	1.39	<i>m</i>
8	20.1	1.55	<i>m</i>
9	39.1	1.55	<i>m</i>
10	74.6		
11	37.0	1.39	<i>m</i>
12	34.3	1.45	<i>m</i>
		1.10	<i>m</i>
13	26.1	2.04	<i>m</i>
		1.92	<i>m</i>
14	124.5	5.08	<i>br t</i> , $J=6$
15	131.5		
16	25.7	1.60	<i>br s</i>
17	16.2	1.84	<i>br s</i>
18	21.3	1.29	<i>s</i>
19	16.4	0.90	<i>d</i> , $J=6.4$
20	17.7	1.68	<i>br s</i>
Ac	21.2	2.01	<i>s</i>
	171.3		

*重クロロホルムで測定した。

4. サナダグサの摂食阻害物質の検索

新潟県粟島において、ヒバマタ目海中林が消失したあとのサンゴモ平原に入植した海藻はアミジグサの他はサナダグサ *Pachydictyon coriaceum* Okamura であり、そこにおいて優占群落を形成している。サナダグサはアミジグサと同様にアミジグサ科の海藻であり、アミジグサと同様に摂食阻害物質を産生しているものと考えられ、検索を行った。

サナダグサは 1995 年 6 月に新潟県粟島の水深 6 m の海底からスキューバー潜水により採取し、凍結した。凍結海藻 1.87 kg をアセトンで抽出、抽出液はアミジグサの場合と同様に処理して一次画分として水溶性活性炭通過部 (WP, 65 g)、水溶性メタノール溶出部 (WM, 0.587 g)、水溶性メタノール/アンモニア溶出部 (WMA, 2.074 g) の三つの水可溶部と中性部 (N, 23.22 g)、酸性部 (A, 7.019 g) の二つの脂溶性部を得た。表III-6 に一次画分の収量と摂食選択性指数 *Ei* 値を示した。

強い活性が N 部と A 部に認められたが、このうち量的に多い N 部についてシリカゲル (Merck 社製、

シリカゲル 60) カラムクロマトグラフィーにより、アミジグサの場合のアルミナカラムクロマトグラフィーと同じ展開溶媒で粗分画をして二次画分を得た。二次画分の収量と E_i 値を表 III-7 に示した。

N-2 ~ 4 部に強い活性が認められ、まず N-2 部と N-3 部について HPLC を繰り返すことにより、含まれる化合物の単離同定を行った。この結果、13 の化合物が得られたが、このうち 11 の化合物がアミジグサから得られたものと一致した。これらは pachydictyol A (3)²⁵⁾、isopachydictyol A (4)²⁶⁾、18-hydroxy-2,7-dolabelladiene (8)²⁸⁾、dilophol (11)^{30,31)}、dilophol acetate (12)³²⁾、dichotol (15) が N-2 部から、acetyldictyol C (6)²⁷⁾、dictyol E (7)³⁴⁾、10-acetoxy-18-hydroxy-2,7-dolabelladiene (9)^{28,29)}、3-acetoxyacetyldilophol (13)³¹⁾、dictyolactone (14)³³⁾ が N-3 部から得られた。この他に N-2 部から hydroazulene 型ジテルペンの dictyoxide (17)³⁸⁾ と germacrene 型ジテルペンの obscuronatin (18)³⁹⁾ が得られた (図 III-8)。これらの化合物の中性部に対する収率を表-8 に示した。

表 III-8 に示した様に得られた化合物およびその収率はアミジグサのものと同様であり、アミジグサと同様の機構で植食動物に対する摂食阻害を発生しているものと思われる。

表 III-6 サナダグサ (凍結品 1.87 kg) をアセトン抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量 (g)	23.22	7.019	65	0.587	2.074
E_i	0.84	0.87	0.14	0.15	0.12

N: 中性部, A: 酸性部, WP: 水溶性活性炭通過部,
WM: 水溶性メタノール溶出部, WMA: 水溶性メタノール/アンモニア溶出部

表 III-7 シリカゲルカラムクロマトグラフィーにより中性部から得られた二次画分と摂食選択性指数 E_i

画分	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
収量 (g)	0.269	3.576	12.399	5.898	0.854	1.69
E_i	0.72	0.69	0.87	0.83	0.66	0.27

N-1: ヘキサン溶出部, N-2: ヘキサン/酢酸エチル 19:1 溶出部,
N-3: ヘキサン/酢酸エチル 9:1 溶出部, N-4: ヘキサン/酢酸エチル 1:1 溶出部,
N-5: 酢酸エチル溶出部, N-6: メタノール溶出部

表 III-8 サナダグサの N-2, 3 部から単離した化合物の中性部に対する収率

化合物番号	化合物名	中性部に対する収率 (%)
3	pachydictyol A	0.84
4	isopachydictyol A	0.04
6	acetyldictyol C	0.06
7	dictyol E	4.52
8	18-hydroxy-2,7-dolabelladiene	0.82
9	10-acetoxy-18-hydroxy-2,7-dolabelladiene	0.50
11	dilophol	0.62
12	dilophol acetate	0.12
13	3-acetoxyacetyldilophol	0.22
14	dictyolactone	0.54
15	dichotol	0.20
17	dictyoxide	0.20
18	obscuronatin	0.52

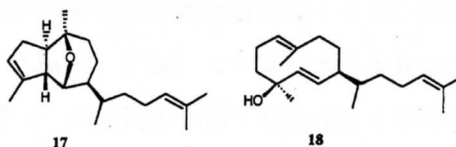


図 III-8 サナダグサから得られたジテルペンの構造式

5. シマオオギの摂食阻害物質の検索

シマオオギ *Zonaria diesingiana* はアミジグサ、サナダグサと同様にアミジグサ科の海藻であり、その群落中には植食動物の数が少ないことが観察されている。このためシマオオギの摂食阻害物質の検索を行った。シマオオギは沖縄県与那原で採集し、凍結した。凍結海藻 4.88 kg をメタノールで抽出し、減圧濃縮した。メタノール抽出物はアミジグサ、サナダグサの場合と同様に処理して水溶性部 3 画分と脂溶性部 2 画

分の一次画分を得た。一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i 値を表Ⅲ-9 に示した。

強い活性が酸性部 (A)、水溶性部のメタノール溶出部 (WM) およびメタノール/アンモニア溶出部 (WMA) に認められた。このうち最も量的に多く得られている A 部の検索を行った。

A 部を富士ゲル製パックドカラム RQ-2 (逆相、ODS) カラムにより粗分画した。溶媒はメタノール/水 (1:1)、メタノール/水 (3:1)、メタノール、ジクロロメタンで逐次溶出した。表Ⅲ-10 に A 部に対する収率と摂食選択性指数 E_i 値を示した。

いずれの画分も強い活性を示したが、このうち A-3 部が A 部の大部分を占めるものであり、また、 E_i 値も最大を示した。A-1 部および A-4 部は薄層クロマトグラフィー (TLC、メルク社製 Silica gel 60 F₂₅₄) によりヘキサン/酢酸エチル (2:1) で展開した際にその R_f 値がほぼ 0 の極性の非常に強い混合物であった。A-3 部を HPLC により繰り返して精製し、強い活性を示す二種のフロログルシン誘導体 **19** ($E_i = 0.89$ 、A 部の 16.4%) と **20** ($E_i = 0.88$ 、A 部の 0.4%) を得た **19** は既知化合物で 2-(5,8,11,14,17-icosapentaenoyl) phloroglucinol⁴⁰⁾ であり、**20** は新化合物で **19** よりも側鎖の二重結合が一つ少ない 2-(5,8,11,14,-icosatetraenoyl)phloroglucinol と推定した (図Ⅲ-9)。

20 は無色の油状物質であり、**19** と TLC (ヘキサン/酢酸エチル 2:1) で全く同じ R_f 値 (約 0.3) を示し、そのスペクトルデータ (IR、LR-EIMS、¹H-NMR) は非常に良く類似している。IR では 3300 cm^{-1} (水酸基)、1605、1425、824 cm^{-1} (芳香環) および 3012 cm^{-1} (オレフィン性 C-H 伸縮または芳香族 C-H 伸縮) が認められた。さらに 1635 cm^{-1} に芳香環に共役したカルボニル基に由来する強い吸収が認められる。このカルボニルは通常値よりもさらに 50 cm^{-1} ほど低波数側にシフトしていることからカルボニル基のオルト位には水酸基が存在して分子内水素結合を形成しているものと推定された。LR-EIMS では分子イオンピーク (M^+) が m/z 412 に認められることから分子式は $\text{C}_{26}\text{H}_{36}\text{O}_4$ と考えられる。¹H-NMR では芳香族プロトンが δ 5.85 (2H, s) にあらわれていることから褐藻類に普遍的に見られるフロログルシンにアシル基が一つ結合した構造と推定された。この構造であれば上述の IR におけるカルボニル基の低波数側へのシフトが説明される。このカルボニル基にはエチレン基が付いていることは δ 3.06 (2H, q, $J=7.3$ Hz) と δ 1.77 (2H, p, $J=7.3$ Hz) に二つのメチレンプロトンが認められるこ

表Ⅲ-9 シマオオギ (凍結品 4.88 kg) をメタノール抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

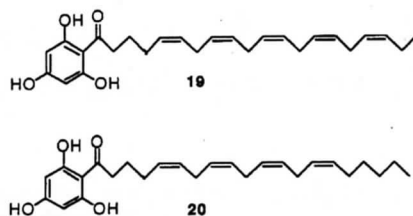
画分	A-1	A-2	A-3	A-4
収率 (%)	5.8	7.0	81.3	5.9
E_i	0.93	0.95	0.97	0.93

A-1: メタノール/水 1:1 溶出部、A-2: メタノール/水 3:1 溶出部、A-3: メタノール溶出部、A-4: ジクロロメタン溶出部

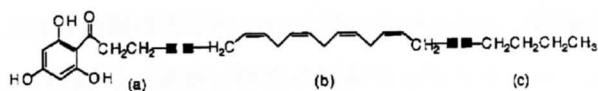
表Ⅲ-10 富士ゲル製パックドカラム RQ-2 カラムクロマトグラフィーにより酸性部から得られた二次画分の収率と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量 (g)	3.7	13.758	45.8	1.713	4.407
E_i	0.38	0.93	-0.05	0.83	0.96

N: 中性部、A: 酸性部、WP: 水溶性活性炭通過部、WM: 水溶性メタノール溶出部、WMA: 水溶性メタノール/アンモニア溶出部



図Ⅲ-9 シマオオギ酸性部から得られた二種のフロログルシン誘導体の構造



図Ⅲ-10 **20** の化合物の部分構造式

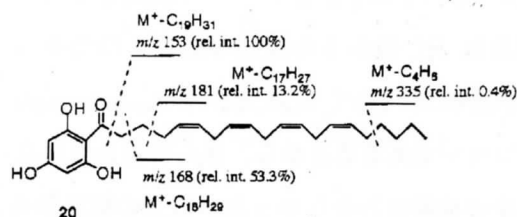
とから図Ⅲ-10 の(a) に示した部分構造式が導かれる。さらに $\delta 1.77$ のメチレン基の隣にはもう一つのメチレン基が付いているであろう事が $\delta 1.77$ のピークが五重線に開裂していることから予想される。 $^1\text{H-NMR}$ の低磁場には芳香族プロトン以外にオレフィンプロトンが $\delta 5.38$ (8H, *m*) に認められる。この化合物の不飽和度は9であり、芳香環に4、カルボニル基に1が使われている。残りの不飽和度4はオレフィンプロトンが8H 存在することから4つの vinylene units にあてられる。この vinylene units はそのスピン結合定数 ($J \leq 7$ Hz) から全てシス配置であることがわかる。さらにダブルアリリックなメチレンプロトンが $\delta 2.83$ (6H, *m*) に、また、モノアリリックなメチレンプロトンが $\delta 2.05$ (2H, *q*, $J=7.3$ Hz) と $\delta 2.18$ (2H, *q*, $J=7.3$ Hz) に認められることから図Ⅲ-10 の(b) に示した部分構造式が導かれる。残りのプロトンは全て高磁場にあらわれており、 $\delta 0.88$ (3H, *t*, $J=6.8$ Hz)、 1.28 (4H, *m*)、 1.35 (2H, *m*) の吸収からブチル基の存在が推定される (図Ⅲ-10 c)。図Ⅲ-10 に示した三つの部分構造式から必然的に 20 の構造式にならざるを得ない。

20 の LR-EIMS のフラグメンテーションを図Ⅲ-11 に示したが、この結果は十分にこの構造が正しいものであることを支持した。

つぎに WM 部を A 部と同様に富士ゲル製パックドカラム RQ-2 カラムにより、水 (WM-1)、水/メタノール 3 : 1 (WM-2)、水/メタノール 1 : 1 (WM-3)、水/メタノール 1 : 3 (WM-4)、メタノール (WM-5)、ジクロロメタン (WM-6) で逐次溶出して二次画分を得た。表Ⅲ-11 に WM 部の二次画分の収率と摂食選択性指数 E_i 値を示す。

全ての画分に強い活性が認められたが、このうち主要画分である WM-2 部を HPLC で精製し、TLC で単一のスポットを示す7つの化合物 (A ~ G) を単離した (表-12)。これらの化合物の IR スペクトルは互いに非常に良く類似しており、一見すると同じ化合物の IR スペクトルではないかと思間違うほどのものであった。また、以前にツルアラメから単離同定したフロロタンニンである 2-phloroecol (21)⁴¹⁾、4-phloroecol (22)¹⁸⁾、triphloroethol (23)⁴¹⁾ (図-12) の IR スペクトルとも類似していた。

表Ⅲ-12 に示したように単離した A ~ G は、全て非常に強い活性を示した。 $^1\text{H-NMR}$ スペクトル (表Ⅲ-12) では、A ~ G は全てフェノール性水酸基および芳香族プロトン以外に他のプロトンは存在しなかった。A ~ G の芳香族プロトンのスピン結合定数は全て約 2 ~ 3 Hz の間の値をとって

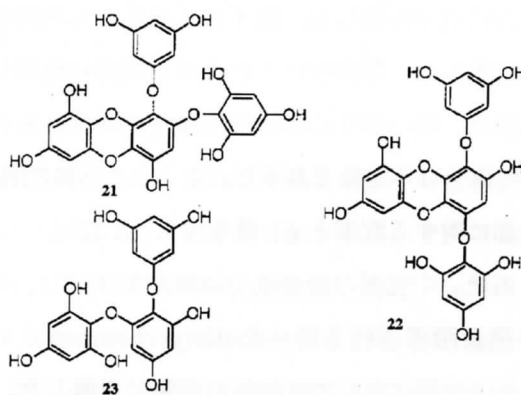


図Ⅲ-11 20 の LR-EIMS のフラグメンテーション

表Ⅲ-11 富士ゲル製パックドカラム RQ-2 カラムクロマトグラフィーにより WM 部から得られた二次画分の収率と摂食選択性指数 E_i

画分	WM-1	WM-2	WM-3	WM-4	WM-5	WM-6
収率 (%)	25.5	62.6	8.7	1.4	1.3	0.5
E_i	0.96	0.93	0.89	0.97	0.92	0.89

WM-1 : 水溶出部、WM-2 : 水/メタノール 3 : 1 溶出部、WM-3 : 水/メタノール 1 : 1 溶出部、WM-4 : 水/メタノール 1 : 3 溶出部、WM-5 : メタノール溶出部、WM-6 : ジクロロメタン溶出部



図Ⅲ-12 ツルアラメから単離されたフロロタンニンの構造式

る。このことはスピン結合している芳香族水素は互いにメタ位に配置していることを示すものであり、図III-12に示したような phloroglucinol units が結合したオリゴマーであると考えられる。A ~ G の芳香族プロトン数は 10H ~ 15H の間にあり、このことは phloroglucinol units が 6 ~ 11 程度結合したオリゴマーの可能性がある。これらの構造については今のところこれ以上の構造解析を実施していない。WM-2 部以外の他の WM 部の二次画分についてもその *Ei* 値および TLC における挙動から判断して重合度の異なるフロロタンニンであろうと考えられる。

WMA 部は一次画分の中では最も強い活性を示すものであり、A 部に次いで収量の多い画分である。TLC では、酢酸エチルで展開してもその大部分は *Rf* 値が 0 の極性の高いものであった。この画分はおそらく WM 部が phloroglucinol のオリゴマーであることから、さらに重合度の高いポリマーから成っているものと考えられる。このため、これ以上の検索は行わなかった。以上の結果から、シマオオギは A 部におけるフロログルシンのアシル誘導体および WM 部や WMA 部におけるフロロタンニンによって植食動物を強く忌避していることが明らかとなった。

6. シワヤハズの微量活性物質の同定

シワヤハズ *Dictyopteris undulata* の活性物質については、既に日本水産学会誌¹²⁾ および *Phytochemistry*⁴²⁾ において中性部と酸性部から得た 6 種のセスキテルペン誘導体 (図III-13) であることを報告している。シワヤハズは秋田県飛で採集した。陰干して風乾した海藻をメタノールで抽出した。抽出物はこれまでと同様に処理して一次画分を得た。強い活性は中性部と酸性部に認められ、三つの水溶性画分は不活性であった。得られた活性物質の中性部、酸性部に対する収率と *Ei* 値を表III-13に示した。

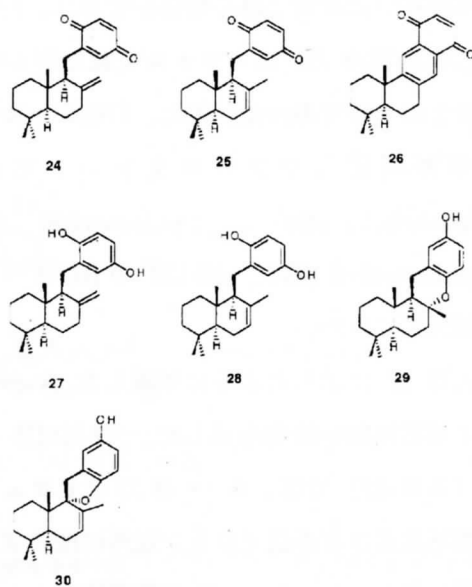
その後、中性部の微量成分の検索を続行し、今回新たに強い摂食阻害活性を持った dictyochromenol (31、図III-14) を中性部に対して 0.09%の収率で単離した。

このものは $[\alpha]_D = 0.0^\circ$ (c, 1.60; CHCl_3) の無色油

表III-12 シマオオギ WM-2 部 から単離した 7つの化合物 (A ~ G) の WM 部に対する収率と $^1\text{H-NMR}$ (400MHz) データ* および摂食選択性指数 *Ei*

化合物	収率 (%)	<i>Ei</i>	$^1\text{H}\delta$
A	1.05	0.91	5.81 (2H, d, J=2.9 Hz), 6.01 (4H, s), 6.03 (2H, d, J=2.2 Hz), 6.14 (2H, d, J=2.9 Hz), 6.23 (1H, dd, J=2.2, 2.2 Hz), 7.7-8.4 (9H, OH)
B	0.41	0.96	5.81 (1H, d, J=2.9 Hz), 5.82 (1H, d, J=2.9 Hz), 5.99 (2H, s), 6.01 (2H, s), 6.03 (2H, m), 6.04 (2H, s), 6.14 (1H, d, J=3.9 Hz), 6.15 (1H, d, J=2.4 Hz), 6.23 (1H, dd, J=2.4, 2.0 Hz), 7.7-8.3 (10H, OH)
C	2.39	0.85	5.82 (2H, m), 5.83 (1H, d, J=2.9 Hz), 6.01 (3H, s), 6.03 (3H, m), 6.14 (2H, m), 6.15 (3H, s), 6.23 (1H, dd, J=2.4, 2.0 Hz), 7.7-8.4 (11H, OH)
D	1.05	0.89	5.81 (1H, d, J=2.4 Hz), 5.82 (1H, d, J=2.5 Hz), 5.84 (1H, d, J=2.4 Hz), 5.99 (2H, s), 6.01 (2H, s), ca. 6.3 (1H, m), 6.04 (2H, s), 6.13 (1H, d, J=2.9 Hz), 6.14 (1H, d, J=2.9 Hz), 6.15 (2H, s), 6.23 (1H, dd, J=2.5, 2.0 Hz), 7.7-8.3 (11H, OH)
E	1.05	0.91	5.81 (1H, d, J=2.4 Hz), 5.84 (1H, d, J=2.9 Hz), 6.01 (1H, s), ca. 6.02 (2H, m), 6.14 (2H, s), 6.22 (1H, dd, J=2.4, 2.0 Hz), 7.7-8.3 (8H, OH)
F	1.28	0.91	5.81 (1H, d, J=2.7 Hz), 5.83 (1H, dd, J=2.7, 2.0 Hz), 5.84 (1H, dd, J=2.7, 1.8 Hz), 6.01 (2H, d, J=1.3 Hz), 6.03 (1H, d, J=2.0 Hz), 6.11-6.15 (3H, m), 6.157 (1H, s), 6.164 (2H, s), 6.23 (1H, dd, J=2.3, 2.2 Hz), 7.7-8.3 (9H, OH)
G	0.41	0.90	5.81 (1H, d, J=2.4 Hz), 5.84 (1H, d, J=2.4 Hz), 6.01 (2H, s), 6.03 (1H, d, J=2.0 Hz), 6.14 (1H, d, J=2.9 Hz), 6.15 (1H, d, J=2.8 Hz), 6.16 (2H, s), 6.23 (1H, dd, J=2.4, 2.2 Hz), 7.7-8.3 (9H, OH)

* 重アセトンで測定した。



図III-13 シワヤハズから得られたセスキテルペン誘導体

状物質であり、LR-EIMS では分子イオンピーク M^+ が m/z 312 に認められ、その HR-EIMS は m/z 312.2060 [Calcd. for $C_{21}H_{28}O_6$, 312.1965] であって $C_{21}H_{28}O_2$ の分子式を持つものであることがわかった。

IR スペクトルでは $3320, 1221\text{ cm}^{-1}$ にフェノール性水酸基に由来する O-H 伸縮および C-O 伸縮の吸収が、 $1579, 1487\text{ cm}^{-1}$ に芳香族の C=C 伸縮の吸収が認められ、これまでシヤハズから単離同定した活性物質 (図 III-13) と同様のフェノール性化合物である。

$^1\text{H-NMR}$ (表 III-14) では芳香族プロトンが $\delta 6.48$ (1H, *d*, $J=3$ Hz)、 6.57 (1H, *dd*, $J=8.8, 3$ Hz)、 6.64 (1H, *d*, $J=8.8$ Hz) に認められることから 1,2,4-3 置換の単環芳香族であると考えられる。さらにこの芳香環に共役したシス-二置換のオレフィンが存在することが $\delta 6.28$ (1H, *d*, $J=10$ Hz)、 5.60 (1H, *d*, $J=10$ Hz) から推定される。 $\delta 6.28$ のオレフィンは芳香環に結合し、 $\delta 5.60$ に隣接する炭素は四級炭素である。シヤハズから得られる化合物は全てヒドロキノンにセスキテルペン由来の C_{15} 残基が結合したものであることから、**31** は 6-hydroxy-2H-chromene 骨格を持つものと考えられる。この事は、**31** の UV スペクトルにおいて 262.8 nm ($\epsilon 3310$) と 332 nm ($\epsilon 3270$) に吸収極大を持つこと、および $^{13}\text{C-NMR}$ スペクトル (表 III-14) において $\delta 78.2$ (*s*) に酸素原子の結合した吸収が認められることから支持される。この四級炭素にはメチル基と $C_{11}H_{19}$ の組成を持つ二つの基が結合している。メチル基は $\delta 1.37$ (3H, *s*) の吸収から明らかである。 $C_{11}H_{19}$ ユニットの不飽和度は 2 であり、 $^{13}\text{C-NMR}$ における $\delta 124.1$ (*d*)、 124.4 (*d*)、 131.4

(*s*)、 135.3 (*s*) および $^1\text{H-NMR}$ の $\delta 5.07$ (1H, *m*)、 5.15 (1H, *m*) から二つの三置換オレフィンを含む鎖状構造を持つと考えられる。 $C_{11}H_{19}$ ユニットの構成するものは、上記の二つのオレフィンの他、オレフィンに結合したメチル基が三つ [$^1\text{H-NMR}$: $\delta 1.57$ (3H, *br. s*)、 1.59 (3H, *br. s*)、 1.67 (3H, *br. s*); $^{13}\text{C-NMR}$: $\delta 16.0$ (*q*)、 17.7 (*q*)、 25.7 (*q*)] と三つのアリリックなメチレン [$^1\text{H-NMR}$: $\delta 1.95$ (2H, *m*)、 2.08 (2H, *m*)、 2.14 (2H, *m*); $^{13}\text{C-NMR}$: $\delta 22.6$ (*t*)、 26.7 (*m*)、 39.7 (*t*)] の他に四級炭素に結合したメチレン [$^1\text{H-NMR}$: $\delta 1.64$ (1H, *ddd*, $J=12, 10, 7$ Hz)、 1.72 (1H, *ddd*, $J=12, 10, 7$ Hz); $^{13}\text{C-NMR}$: $\delta 41.0$ (*t*)]

表 III-13 シヤハズから得られたセスキテルペン誘導体の中性部および酸性部に対する収率と摂食選択性指数 E_i

化合物番号	化合物名	中性部に対する収率 (%)	酸性部に対する収率 (%)	E_i
24	zonarone	7		0.92
25	isozonarone	3.3		0.85
26	cyclozonarone	0.08		0.93
27	zonarol	17	14.6	0.85
28	isozonarol	10	8.1	0.78
29	chromazonarol	2	10.8	0.80
30	isochromazonarol	1.2		0.88

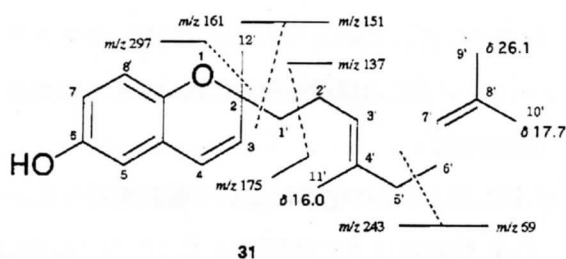


図 III-14 dictyochromenol の構造式、LR-EIMS のフラグメンテーションおよびメチル炭素のケミカルシフト値

表 III-14 Dictyochromenol (**31**) の $^{13}\text{C-NMR}$ (100 MHz, DEPT), $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz) と HMBC データ*

C	$^{13}\text{C } \delta$	$^1\text{H } \delta$ J(Hz)	long range correlation
2	78.2		H-3, H-4, H ₂ -1', H ₃ -12'
3	131.0	5.60 <i>d</i> $J=10$	H ₃ -1', H ₃ -12'
4	122.6	6.28 <i>d</i> $J=10$	H-3, H-5
A	122.0		H-3, H-4, H-5, H-8
5	112.9	6.48 <i>d</i> $J=3$	H-4, H-7, OH
6	149.2		H-5, H-7, H-8
7	115.5	6.57 <i>dd</i> $J=8.8, 3$	H-5, OH
8	116.7	6.64 <i>d</i> $J=8.8$	
B	147.1		H-4, H-5, H-7, H-8
1'	41.0	1.64 <i>ddd</i> $J=12, 10, 7$	H-3, H ₂ -2', H-3', H ₃ -12'
2'	22.6	2.14 <i>m</i>	H ₂ -1', H-3'
3'	124.1	5.15 <i>m</i>	H ₃ -1', H ₂ -2', H ₃ -5', H ₃ -11'
4'	135.3		H ₂ -2', H ₂ -5', H ₂ -6', H ₃ -11'
5'	39.7	1.95 <i>m</i>	H-3', H ₂ -6', H-7', H ₃ -11'
6'	26.7	2.08 <i>m</i>	H ₂ -5'
7'	124.4	5.07 <i>m</i>	H ₂ -5', H ₂ -6', H ₃ -9', H ₃ -10'
8'	131.4		H ₂ -6', H ₃ -9', H ₃ -10'
9'	25.7	1.67 <i>br. s</i>	H ₃ -7', H ₃ -10'
10'	17.7	1.59 <i>br. s</i>	H ₃ -7', H-9'
11'	16.0	1.57 <i>br. s</i>	H-3', H-5'
12'	26.1	1.37	H ₂ -1'
OH		4.38 <i>br. s</i>	

*重クロロホルムで測定した。

である。 δ 1.64 の四級炭素に結合したメチレンは ^1H - ^1H 2D COSY スペクトルにおいて δ 1.37 のメチルプロトンとの long range coupling および HMBC スペクトル (表 III-14) において δ 26.1 (*q*) に存在するこのメチル炭素との間にクロスピークが認められたことから支持される。 ^1H - ^1H 2D COSY スペクトルを解析すると $\text{C}_{11}\text{H}_{19}$ ユニットは 4,8-dimethyl-3,4-nonadienyl であることがわかる。以上の結果から dictyochromenol の平面構造式は **31** と決定した。このものの LR-EIMS のフラグメンテーションはこの構造を十分に満足するものであった (図 III-14)。

つぎに **31** の立体化学について検討を行った。まず、C-3' 位における立体配置は C-11' の ^{13}C -NMR のケミカルシフト値が δ 16.0 と高磁場に認められることから E-配置であると推定される。不斉炭素は C-2 位 に一つ存在するが、**31** の比旋光度は 0.0° である。**31** は生合成的には hydroquinone と *trans,trans*-farnesyl pyrophosphate から生成する 2-(*trans,trans*-farnesyl)hydroquinone が脱水素して環化生成すると考えられる (図 III-15)。このことは、**31** がラセミ体として存在している可能性を強く示唆するものである。**31** の構造決定が終わった頃、この化合物が既に Dave らにより同じ海藻から単離されていたことがわかった⁴³⁾。

Dave らは、C-2 位 における立体配置については何等のコメントをしていない。Dave らの単離した化合物の比旋光度は $+4.0^\circ$ であり、210 ~ 400 nm においてはコットン効果は認められなかった。このことから、Dave らの単離した化合物も今回単離した **31** と同様にラセミ体として得た可能性が高い。このため、**31** の光学分割を試みた。

光学異性体分離カラムはダイセル化学製の CHIRALCEL OD カラムを用い、hexane/isopropyl alcohol 25:1 の溶媒でクロマトを行ったところ図 III-16 に示したようにきれいに分割が可能であった。

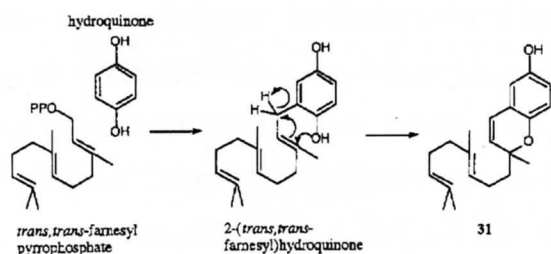


図 III-15 **31** の生合成経路

Chromatographic Conditions
 Column Chiralcel OD 0.46 cm I.D. x 25 cm
 Eluent Hexane / Isopropyl alcohol 25 / 1 (v/v)
 Flow rate 1.0 ml / min.
 Detection UV 254 nm
 Temperature 35 °C
 Sample (±) - dictyochromenol

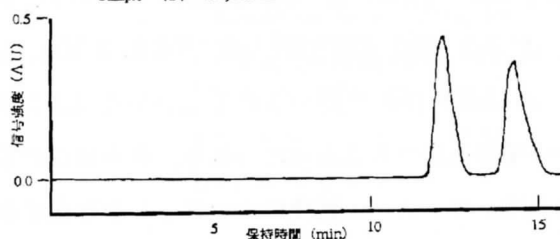


図 III-16 光学異性体分離カラムによる dictyochromenol のクロマトグラムと条件

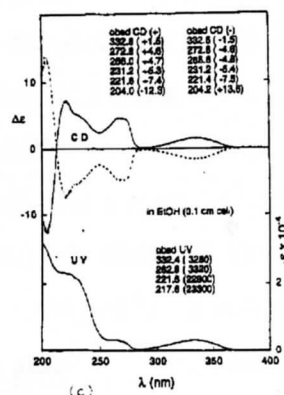
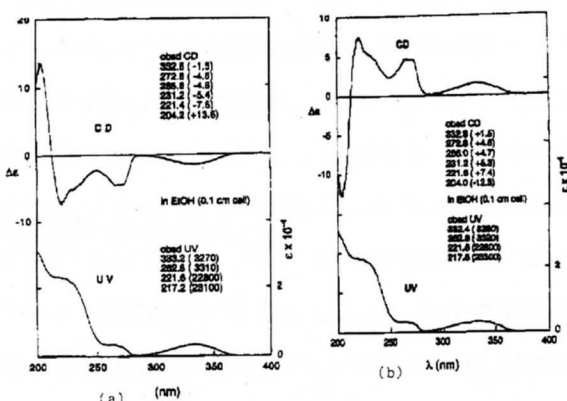


図 III-17 (+)-dictyochromenol および (-)-dictyochromenol の CD スペクトルと UV スペクトル
 (a) (+)-dictyochromenol
 (b) (-)-dictyochromenol
 (c) (+)-dictyochromenol と (-)-dictyochromenol

最初に溶出してくるものが (-)-dictyochromenol であり、後に溶出してくるものが (+)-dictyochromenol であった。これらの (-)-体と (+)-体の IR 等のスペクトルは(±)-dictyochromenol のものと全く同じであり、異なる点は単に比旋光度が (-)-体は -94.4° であり、(+)-体は $+94.1^\circ$ であるということだけで、まさしく dictyochromenol がラセミ混合物であることが確認できた。

次いで光学分割した (-)-体と (+)-体の C-2 位 における立体配置を旋光分散から決定するため、それぞれの CD スペクトルを測定した (図 III-17)。図 III-17a と図 III-17b はそれぞれ (-)-dictyochromenol と (+)-dictyochromenol の CD スペクトルと UV スペクトルである。(-)-体は負のコットン効果を、また、(+)-体は正のコットン効果を示すものであった。この二つのスペクトルを一つにして表示したのが図 III-17c である。それぞれの山と谷は見事なまでに対称的であり、光学分割が完全に行われたことを示すものである。

しかしながら、この CD スペクトルからの絶対配置の決定は種々検討を行ったが、現時点では不可能であるとの結論に達した。絶対配置の決定のためには、結晶性誘導体に導いて X 線回折により行うか、あるいは全合成によることが必要である。現在、*p*-bromobenzoyl chloride による (-)-dictyochromenol *p*-bromobenzoate と (+)-dictyochromenol *p*-bromobenzoate をそれぞれ約 3 mg 程度合成して結晶を得る事を行っている。

7. マギレソゾの摂食阻害物質の検索

紅藻フジマツモ科ソゾ属のマギレソゾ *Laurencia saitoi* は世界各地の沿岸に分布し、アミジグサと共にサンゴモ平原に特異的に生育する海藻として知られているものである。北海道日本海の寿都沿岸部には、サンゴモ平原が長期に持続している地域が存在する。そこでは、多数のキタムラサキウニが生息し、大型海藻は勿論の事、小型海藻も殆ど生育していない。その中であって、マギレソゾが特異的に多数生育していることが観察された。このことは、マギレソゾが植食動物に対する摂食阻害活性を持っていることの証左であり、活性物質の検索を行った。

半乾海藻 0.9 kg をメタノールで 3 日間浸漬抽出、減圧濃縮後これまでと同様に処理して一次画分を得た。一次画分の収量とエゾアワビに対する摂食選択性指数 E_i 値を表 III-15 に示した。

強い活性が中性部に認められたが、酸性部や水可溶部には認められなかった。中性部 20 g のうち 10 g をアルミナカラムクロマトグラフィーにより最初ヘキサン (N-1)、ヘキサン/ベンゼン 1:1 (N-2)、ベンゼン (N-3)、ベンゼン/酢酸エチル 10:1 (N-4)、酢酸エチル (N-5)、メタノール (N-6) で逐次溶出して二次画分を得た。二次画分の収量とエゾアワビに対する摂食選択性指数 E_i 値を表 III-16 に示した。

表 III-15 マギレソゾ (半乾品 0.9 kg) をメタノール抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量 (g)	20.0	6.1	20.5	3.1	1.4
E_i	0.85	0.27	0.03	0.04	0.004

N: 中性部、A: 酸性部、WP: 水溶性活性炭通過部、WM: 水溶性メタノール溶出部、WMA: 水溶性メタノール/アンモニア溶出部

表 III-16 アルミナカラムクロマトグラフィーにより中性部 (10 g) から得られた二次画分と摂食選択性指数 E_i

画分	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
収量 (g)	0.221	0.569	0.194	1.992	2.611	2.504
E_i	0.31	0.51	0.98	0.94	0.78	0.65

N-1: ヘキサン溶出部、N-2: ヘキサン/ベンゼン 1:1 溶出部、N-3: ベンゼン溶出部、N-4: ベンゼン/酢酸エチル 10:1 溶出部、N-5: 酢酸エチル溶出部、N-6: メタノール溶出部

非常に強い活性が N-3 部と N-4 部に認められ、N-5 部と N-6 部には強い活性が、また N-2 部は中程度の活性であった。N-3 ~ 6 部の各画分を HPLC で繰り返して精製を行い、これに含まれる 17 種のジテルペン化合物を単離同定した。またトリテルペン化合物は 1 種を単離同定し、4 種の化合物を 2 種ずつの等量混合物の状態と同定した。17 種のジテルペン化合物は、その構造から三つの型に分類される。

まず、シクロプロパン環が存在し、そのシクロプロパン環にヒドロキシメチルまたはそのアセテートが結合した parguerane 骨格の化合物は 8 種得られた。これらの化合物は図 III-18 に示した。

38 は N-4 部から得られた parguerol 7,16,19-triacetate⁴⁴⁾ であり、マギレソゾの主要なジテルペン 2 種のうちのひとつである。32 は parguerol⁴⁵⁾ であり、38 のトリアセテートのアセチル基が全て水酸基になっている。33、34、35 は 32 の三つの水酸基のうちの一つだけがアセテートになっており、それぞれ parguerol 7-acetate⁴⁴⁾、parguerol 16-acetate⁴⁵⁾、parguerol 19-acetate⁴⁴⁾ である。34、35 は N-6 部から得られたものである。N-5 部から得られた 36 と 37 は 33 ~ 35 のモノアセテートにさらにもう一つ水酸基がアセチル基で置き換わったジアセテートで、それぞれ parguerol 7,16-diacetate⁴⁶⁾、parguerol 16,19-diacetate⁴⁴⁾ であった。39 は epoxyparguerol⁴⁴⁾ であり、32 が脱臭素化した化合物である。

isoparguerane 型のジテルペンは、parguerane 型がシクロプロパン環を持つのにに対してシクロブタン環になっている。この型の化合物は 3 種得られた (図 III-19)。N-5 部からは 2 種の主要なジテルペンのうちの残りの一つである isoparguerol 7,16-diacetate (41)⁴⁴⁾ が得られた。さらに微量成分として 41 に存在する二つのアセチル基が水酸基に置き換わった isoparguerol (40)⁴⁵⁾ と 40 が脱臭素化してエポキシドになった 42 がそれぞれ N-6 部から得られた。

deoxyparguerane 型ジテルペンは、parguerane 型ジテルペンでシクロプロパン環に結合したヒドロキシメチルまたはそのアセテートがメチル基に置き換わったものであり、6 種得られた (図 III-20)。43 は N-6 部から得られた deoxyparguerol^{44,45)} である。44 は N-5 部から得られたもので 43 の 16 位の水酸基がアセテートになったもので、deoxyparguerol 16-acetate⁴⁸⁾ である。45 は 43 の 2 位に存在したアセトキシル基が水素で置き換わった 2-deacetoxydeoxyparguerol⁴⁴⁾ であり、N-6 部から得られたものである。さらに、45 が脱臭素化してエポキシドとなった 46 は N-3 部から得られた。47 は 45 が脱

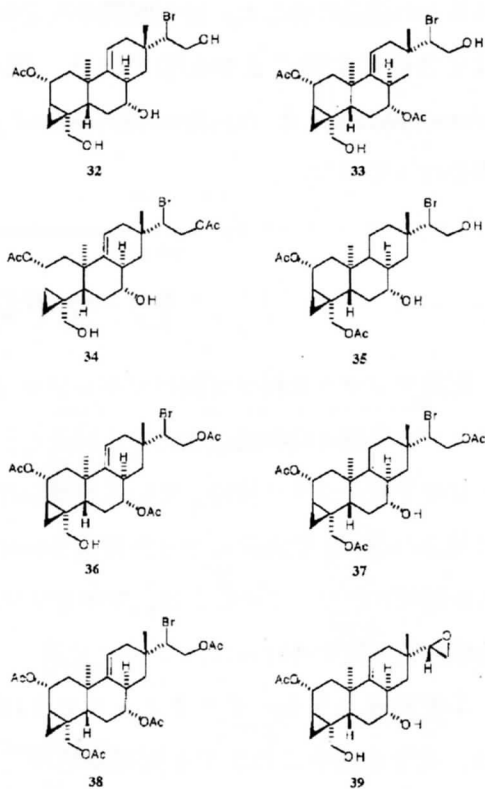


図 III-18 マギレソゾから得られた 8 種の parguerane 型ジテルペン化合物

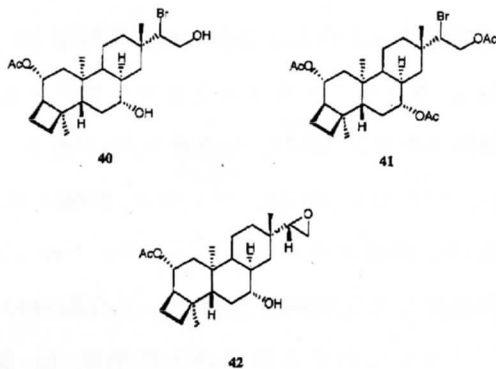


図 III-19 マギレソゾから得られた 3 種の isoparguerane 型ジテルペン化合物

臭素化する際に生じたと考えられる 46⁴⁷⁾ の異性体であり、エポキシ環の代わりにホルミル基を持つ化合物で 46 と同様に N-3 部から得られた。48 は deoxyparguerane 骨格の三つある六員環のうちの一つが開環した型の化合物で、N-3 部から得られた。

トリテルペン化合物として同定した化合物を図 III-21 に示した。このうち単離できた化合物は、N-6 部から得られた thyrseriferol (49)⁴⁹⁾ であった。化合物 50⁴⁹⁾ と 51⁴⁹⁾ は 49 に存在するメチル基のつけ根の炭素に結合した水酸基が脱水して生成したアルケン異性体の混合物であり、HPLC による分離で単離することができなかった。¹H-NMR の測定から 50 と 51 はほぼ 1 : 1 の割合で存在し、両者の収量は主要なジテルペンである 38 と 41 に匹敵する主要な化合物であった。これらは N-5 部から得られたものである。さらに N-4 部からは 50 と 51 の二級の水酸基がアセテートとなった 15(28)-anhydrothyrseriferol 18-acetate (52)⁵⁰⁾ と 15-anhydrothyrseriferol 18-acetate (53)⁵⁰⁾ が同様に分離不可能な等量混合物として得られた。

得られたジテルペンとトリテルペンの合わせて 22 の化合物の中性部に対する収率とエゾアワビに対する摂食選択性指数 *Ei* を表 III-17 に示した。エゾアワビに対する活性は、三つの主要成分のうち 38 と 50、51 の二つに強く、これによってエゾアワビを強く忌避しているものと考えられる。残りの主要成分である 41 の活性は非常に弱いものであった。微量成分の中では、44、45、52、53 が強い活性であった。46、47 は中程度の活性であり、残りの化合物は弱い活性かあるいは全く活性を示さなかった。活性は化合物の極性が小さいほど強い傾向であり、極性が大きい化合物は弱いか殆ど活性を示さなかった。炭素骨格の構造の違い、および臭素原子の存否の違いによる活性の差異は、この段階では特に認めることはできなかった。

エゾアワビに対して強い活性を示した化合物についてはキタムラサキウニとエゾバフンウニについても摂食選択性試験を実施した。供試したウニは殻径 3 cm 程度のものを水槽当たり 5 個体用いた他はエゾアワビの場合と実験条件は全て同じである。活性試験の結果は表 III-18 に示した。エゾアワビに対して最も強い活性を示した 38 はキタムラサキウニとエゾバフンウニに対しても強い活性であり、その *Ei* 値はさらに大きな数値のものであった。44 はキタムラサキウニではエゾアワビと同様の活性

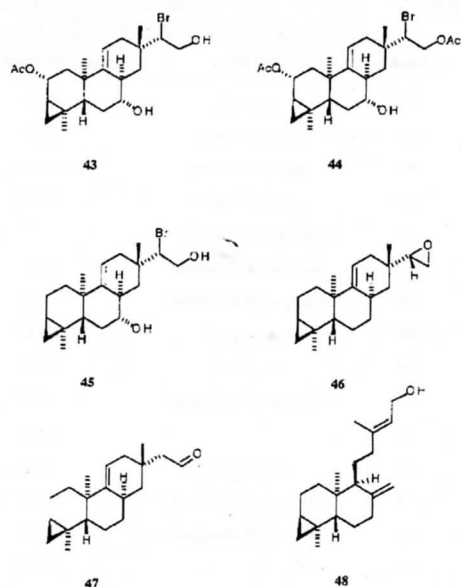


図 III-20 マギレソゾから得られた 6 種の deoxyparguerane 型ジテルペン化合物

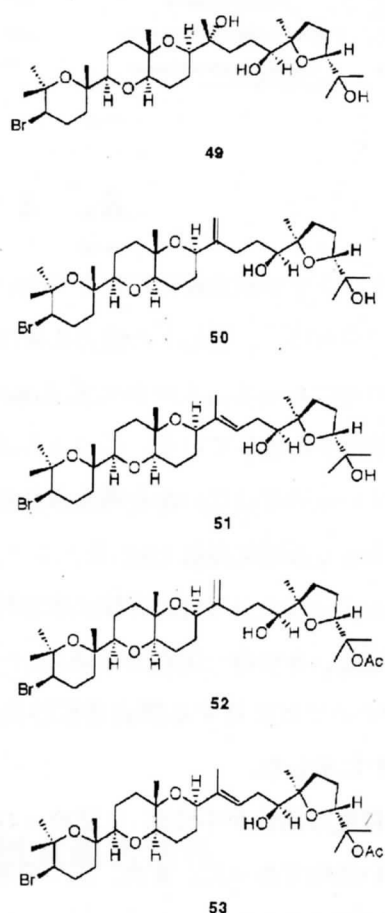


図 III-21 マギレソゾから得られた 5 種のトリテルペン化合物

表III-17 N-3~6 部から単離した化合物の中性部に対する収率と摂食選択性指数 E_i

化合物番号	化合物名	中性部に対する収率 (%)	E_i
32	parguerol	0.73	0.22
33	parguerol 7-acetate	0.30	0.11
34	parguerol 16-acetate	0.16	0.11
35	parguerol 19-acetate	1.12	-0.01
36	parguerol 7,16-diacetate	0.97	0.24
37	parguerol 16,19-diacetate	0.80	0.08
38	parguerol 7,16,19-triacetate	5.10	0.88
39	epoxyparguerol	0.28	-0.05
40	isoparguerol	0.40	-0.01
41	isoparguerol 7,16-diacetate	0.83	0.21
42		0.14	0.45
43	deoxyparguerol	0.78	0.11
44	deoxyparguerol 16-acetate	0.84	0.74
45	2-deacetoxydeoxyparguerol	0.26	0.70
46		0.10	0.63
47		0.15	0.59
48		0.28	0.42
49	thyrsiferol	0.23	0.40
50	15(28)-anhydrothyrsiferol	2.39	0.78
51	15-anhydrothyrsiferol	2.39	0.78
52	15(28)-anhydrothyrsiferyl 18-acetate	0.29	0.70
53	15-anhydrothyrsiferyl 18-acetate	0.29	0.70

表III-18 マギレソゾから単離した化合物のキタムラサキウニおよびエゾバフンウニに対する摂食選択性指数 E_i

化合物番号	化合物名	キタムラサキウニ	
		E_i	E_i
38	parguerol 7,16,19-triacetate	0.92	0.97
44	deoxyparguerol 16-acetate	0.75	0.96
45	2-deacetoxydeoxyparguerol	-0.11	-0.03
50	15(28)-anhydrothyrsiferol	-0.03	0.08
51	15-anhydrothyrsiferol	-0.03	0.08
52	15(28)-anhydrothyrsiferyl 18-acetate	0.26	0.44
53	15-anhydrothyrsiferyl 18-acetate	0.26	0.44

であったがエゾバフンウニでは 38 に匹敵する強活性を示した。これに対して 45 と 50、51 のトリテルペンの混合物および 52、53 の混合物はキタムラサキウニ、エゾバフンウニに対しては非常に弱い活性かあるいは全く活性を示さなかった。このことは、動物種の違いによる差異が典型的に認められた例であり、今後動物種と活性物質の構造相関を調べる事が重要と考えられる。

8. ミツデソゾの摂食阻害物質の検索

マギレソゾが植食動物に対して強い摂食阻害活性を示す物質を作り出すことにより、サンゴモ平原という特異な生育環境に適応した能力を身につけて自身の生存を図っていることが明らかになった。同じソゾ属の海藻の中であって、ミツデソゾ *Laurencia okamurai* は日本各地の潮間帯において他の海藻に優占して濃密な群落を形成している。このことは、ミツデソゾもマギレソゾと同様に植食動物に対する摂食阻害物質を持っているのではないかと考えられる。このため、長崎県松浦で採集したミツデソゾの検索を行った。

陰干した風乾海藻 1 kg をメタノールで抽出し、これまでの海藻の場合と同様に水溶性部と脂溶性部に分別し、5つの一次画分を得た。一次画分の収量とエゾアワビに対する摂食選択性指数 E_i 値を表III-19 に示した。

中程度の活性が中性部に認められたが、酸性部は弱い活性であった。また、三つの水溶性画分には活性は認められなかった。

次に、中性部をアルミナカラムクロマトグラフィーにより、最初にヘキサン (N-1)、続いてヘキサン/酢酸エチル 19 : 1 (N-2)、ヘキサン/酢酸エチル 9 : 1 (N-3)、ヘキサン/酢酸エチル 1 : 1 (N-4)、

表III-19 ミツデソゾ (風乾品1kg) をメタノール抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量 (g)	19.1	7.9	13.0	1.3	1.2
E_i	0.63	0.42	-0.003	0.002	0.04

N : 中性部、A : 酸性部、WP : 水溶性活性炭通過部、WM : 水溶性メタノール溶出部、WMA : 水溶性メタノール/アンモニア溶出部

表III-20 アルミナカラムクロマトグラフィーにより中性部から得られた二次画分と摂食選択性指数 E_i

画分	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
収量 (g)	1.141	6.682	5.746	2.969	0.496	1.058
E_i	0.57	0.84	0.76	0.80	0.47	0.05

N-1 : ヘキサン溶出部、N-2 : ヘキサン/酢酸エチル19 : 1溶出部、N-3 : ヘキサン/酢酸エチル9 : 1溶出部、N-4 : ヘキサン/酢酸エチル1 : 1溶出部、N-5 : 酢酸エチル溶出部、N-6 : メタノール溶出部

酢酸エチル (N-5)、メタノール (N-6) で逐次溶出して二次画分を得た。二次画分の収量とエゾアワビに対する摂食選択性指数 E_i 値を表Ⅲ-20 に示した。

強い活性が N-2~4 部に認められた。これらの三つの画分は量的にも中性部の大部分を構成するものである。これらについてシリカゲルカラムクロマトグラフィー、HPLC により精製を行い、N-2 部からは isolaurinterol (54)⁵¹⁾、debromisolaurinterol (55)⁵²⁾、debromolaurinterol (56)⁵¹⁾、isolaurenisol (57)⁵³⁾ を得た。N-3 部は、その 9 割を laurinterol (58)⁵¹⁾ が占めていた。また、laurinterol は N-4 部の主要成分でもあった。N-4 部からは、その他に filiforminol (59)⁵⁴⁾ と laurebiphenyl (60)⁵⁵⁾ を得た (図Ⅲ-22)。単離した化合物の中性部に対する収率と摂食選択性指数 E_i 値を表Ⅲ-21 に示した。

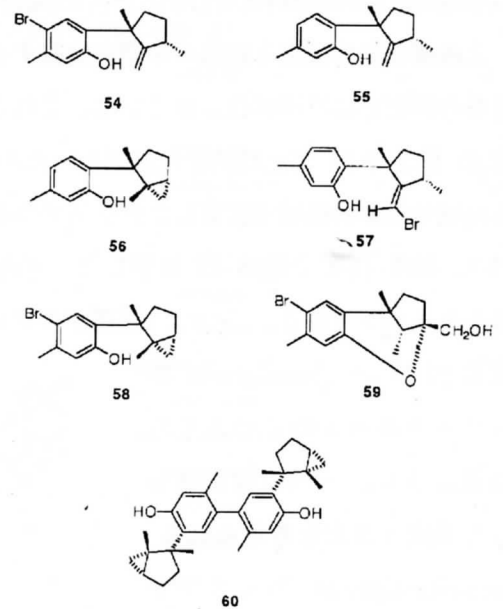
最も強い活性は isolaurinterol であり、そのデブromo体の debromisolaurinterol がそれに次ぐものであった。laurinterol がこの二つに次ぐ活性であるが、そのデブromo体の debromolaurinterol の活性は全くなかった。さらに、debromolaurinterol 二量体である laurebiphenyl も同様に活性はなかった。isolaurinterol 型の化合物が臭素原子の存否に活性が殆ど影響されないのに対して、

laurinterol 型の化合物はその存否に劇的な差が認められる。このことは、構造相関の観点からたいへん興味ある事実である。

ミツデソゾの中性部の主成分は laurinterol であり、N-3、N-4 部に合わせて 35 % 強を占めるものであり、この化合物の忌避作用が主として植食動物に対してはたらいているものと思われる。また、中性部の 6.5 % を構成する isolaurinterol、debromisolaurinterol の忌避作用も laurinterol を補完しており、合計 41 % のセスキテルペン化合物が植食動物に対するミツデソゾの生存戦略の手段として大きな役割を果たしているものと思われる。

9. ウラソゾから単離した化合物の摂食阻害活性

ソゾ属の海藻については、北海道寿都で採集したマギレソゾと長崎県松浦で採集したミツデソゾについて検索を行い、それぞれの海藻から幾つかの強い摂食阻害活性を持った化合物を同定した。ソゾ属の海藻の成分研究は、1970 年代に入って海洋天然物化学の研究が緒についた当初から、世界的規模で多数の天然物有機化学者の研究対象として取り上げられてきている。著者らも、主として親潮の影響を受けて比較的海水温の低い状態にある北海道東部の歯舞から襟裳岬を経て浦河に至る太平洋沿岸域で採集したウラソゾ *Laurencia*



図Ⅲ-22 ミツデソゾから単離した7種の化合物

表Ⅲ-21 N-2~4 部から単離した化合物の中性部に対する収率と摂食選択性指数 E_i

化合物番号	化合物名	中性部に対する収率 (%)	E_i
54	isolaurinterol	4.06	0.89
55	debromisolaurinterol	2.50	0.83
56	debromolaurinterol	1.54	0.08
57	isolaurenisol	0.11	0.44
58	laurinterol	35.1	0.77
59	filiforminol	0.07	0.53
60	laurebiphenyl	0.11	-0.18

nipponica の成分研究を行い、多くの化合物の単離同定を行ってきた。

北海道東部の根室と釧路の間に位置する厚岸で採集したウラボソの脂溶性部である酸性部と中性部が、著者の研究室に冷凍保存されていた。これらをエゾアワビに対する摂食選択性試験を行ったところ、酸性部は E_i 値が 0.44 で比較的活性は弱かったが、中性部の E_i 値は 0.64 と中程度の活性を示した。このため、寒海域の沿岸岩礁域で採集したウラボソの中性部から得た 17 種の化合物の試験を行った。これらは、図Ⅲ-23-1、図Ⅲ-23-2 と図Ⅲ-24 に示した。寒海域のウラボソの中性部を構成している化合物は、その殆どがセスキテルペンであり、二つの六員環がスピロ炭素で結合した chamigrane 型セスキテルペン (図Ⅲ-23-1 と

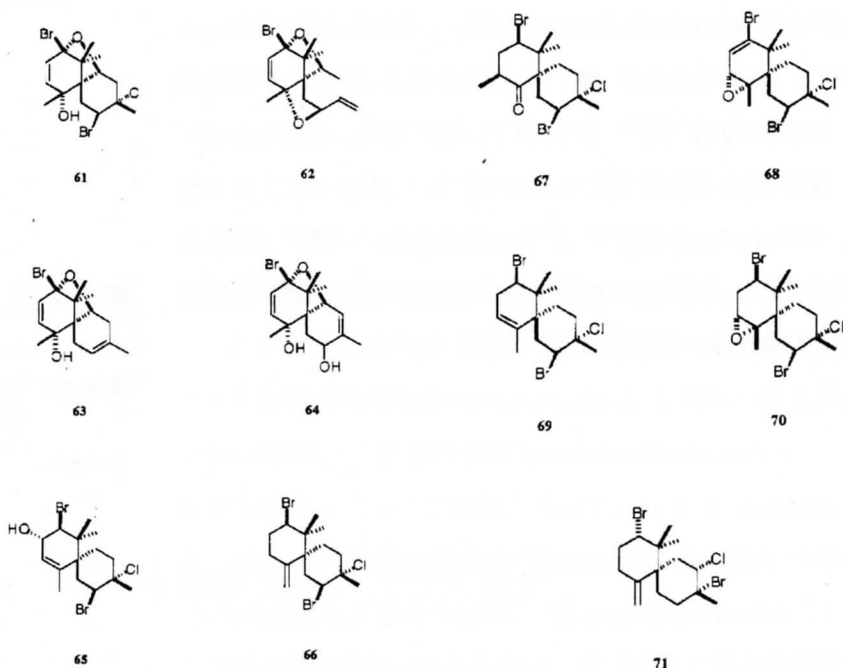
図Ⅲ-23-2) と chamigrane 型セスキテルペンの二つある六員環のうち、一つの環が開裂して再編されたと考えられる

seco-chamigrane 型セスキテルペン (図Ⅲ-24) である。これに対して、暖海域のウラボソの中性部の主成分は、生合成的に C_{16} -脂肪酸から生成すると考えられる C_{15} -ノンテルペン化合物である。セスキテルペン化合物の活性と比較するため、暖海域に位置すると

考えられる北海道函館近郊の上磯で採集したウラボソの中性部から単離した 6 種の化合物 (図Ⅲ-25) についても試験を行った。このうちの 1 種は、

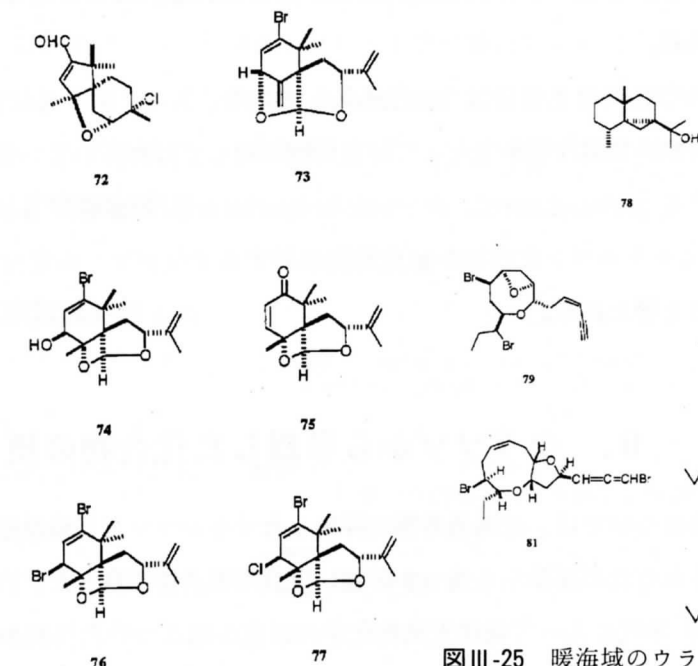
eudesmane 型セスキテルペンである。

これらの化合物のエゾアワビに対する摂食選択性試験の結果を表Ⅲ-22 に示した。そこに示したとおり、chamigrane 型セスキテルペン 11 種のうち bromodiether (62)、bromoalcohol-B (63)、bromoalcohol-E (64)、2,10-dibromo-3-chloro-9-hydroxy-



図Ⅲ-23-1 寒海域のウラボソから単離同定した chamigrane 型セスキテルペン化合物

図Ⅲ-23-2 寒海域のウラボソから単離同定した chamigrane 型セスキテルペン化合物



図Ⅲ-24 寒海域のウラボソから単離同定した *seco*-chamigrane 型セスキテルペン化合物

図Ⅲ-25 暖海域のウラボソから単離同定した *eudesmane* 型セスキテルペン化合物と脂肪酸由来の C_{15} ノンテルペン化合物

α -chamigrane (65) の4種は活性が低いか殆ど認められなかった。これらに共通している構造的特徴は、62を除いて分子内に水酸基を1つまたは2つ存在する極性の高い化合物であるという事である。また、水酸基が存在しない62は、他の chamigrane 型セスキテルペン化合物が全て C-15 位がメチル基であるのに、末端メチレンになっていることである。活性が認められた7種の化合物は pacifenol (61) を除いて、全て分子内に水酸基は存在せず、極性の低い化合物である。例外的に 61 には水酸基が1つ存在するが、活性は $Ei = 0.50$ と中程度であった。61は寒海域のウラボソの中性部の主成分であり、厚岸産の場合では中性部の 7.4% を占めるものである。

一方、*seco*-chamigrane 型セスキテルペン化合物6種は、全て活性は低いか非常に低いものであった。このことから、活性を持つためには chamigrane 骨格であり、かつ、環に結合して

いる4つの炭素が全てメチル基であることと化合物の極性が低いことが必要であると考えられる。

暖海域のウラボソの中性部の主成分は、laureatin (79)、isolaureatin (80)、isolaurallene (81) のような8員環あるいは9員環エーテル化合物である。これに対して、極性はこれら三つの化合物 (79 ~ 81) より低い炭化水素である直鎖構造を持つ laurencenyne (82)、*trans*-laurencenyne (83) は、低い活性であった。C-15 ノンテルペン化合物では、化合物の極性よりは環状エーテル構造を持つことが重要であるように思われる。暖海域のウラボソでは、セスキテルペン化合物は微量成分であるが、chamigrane 型セスキテルペンとは違う炭素骨格を持つ eudesmane 型セスキテルペンである cycloeudesmol (78) がセスキテルペン化合物の中では量的に多く存在する。78の活性は $Ei = 0.50$ と中程度であった。78は分子内に三級の水酸基が一つ存在し、寒海域の主成分である pacifenol (61) と同程度の極性と活性を持っているものである。

ソゾ属の海藻は、特異的にハロゲンを取り込んだ化合物を代謝しているということと、陸上植物にはない新規な構造を持った化合物が見出されているという理由から、天然物化学者の格好の研究材料として取り上げられてきた。しかしながら、これらの化合物の生理活性の面からの研究は殆どなく、何故、ソゾ属の海藻が陸上植物や他の海藻と比較して多量のハロゲン化合物を作り出しているのか、という素朴な疑問に対する解答は得られないままに現在に至っている。今回、マギレソゾ、ミツデソゾ、ウラボソから得られた多くの含ハロゲン化合物について摂食選択性試験を行ったが、この面からのハロゲン原子の有無による活性の相違は、一つの例外を除いては特に認めることは出来なかった。

表 III-22 N-3~6 部から単離した化合物の中性部に対する収率と摂食選択性指数 Ei

化合物番号	化合物名	Ei
61	pacifenol ⁵⁶⁾	0.50
62	bromodiether ⁵⁷⁾	0.29
63	bromoalcohol-B ⁵⁸⁾	0.06
64	bromoalcohol-E ⁵⁹⁾	0.06
65	2,10-dibromo-3-chloro-9-hydroxy- α -chamigrane ⁶⁰⁾	0.14
66	nidificene ⁶¹⁾	0.71
67	kylinone ⁶²⁾	0.59
68	deoxyrepacifenol ⁶³⁾	0.72
69	halochamigrane ⁶⁴⁾	0.61
70	halochamigrane epoxide ⁶⁴⁾	0.61
71	(-)-obtusane ⁶⁵⁾	0.56
72	laurencial ⁶⁶⁾	0.15
73	laureacetal-A ⁶⁷⁾	0.11
74	laureacetal-B ⁶⁸⁾	0.07
75	laureacetal-C ⁶⁹⁾	0.28
76	laureacetal-D ⁷⁰⁾	0.30
77	laureacetal-E ⁷⁰⁾	0.04
78	cycloeudesmol ⁷¹⁾	0.50
79	laureatin ⁷²⁾	0.50
80	isolaureatin ⁷²⁾	0.65
81	isolaurallene ⁷³⁾	0.72
82	laurencenyne ⁷⁴⁾	0.11
83	<i>trans</i> -laurencenyne ⁷⁵⁾	0.34

10. 紅藻三種のスクリーニングとスジウスバノリからの新規ステロールの単離

福島県双葉郡大熊に所在する福島県栽培漁業協会では、協会に隣接する東京電力福島一号原子力発電所からの温排水を利用してウニ稚仔とアワビ稚貝の種苗生産を行っている。飼育槽にはウニ・アワビの場合とも網かごを使用しているが、その網には前浜から揚水した海水中に含まれる種々の海藻の胞子が付着し、多様な海藻が生育するようになる。しかしながら、発芽した海藻は飼育槽という閉鎖系の場所で大量に存在する植食動物のウニ・アワビにより摂食されるはずであるが、それにもかかわらず生き残っている海藻がある。この海藻は、紅藻ユカリ *Plocamium telfairiae*、ヤレウスバノリ *Acrosorium flabellatum*、スジウスバノリ *Acrosorium polyneurum* の3種であった。これらの海藻は、いずれも形態的には植食動物にとっては摂食しやすいものである。この事実は、これら3種の海藻が摂食阻害物質を自身が産生することにより、植食動物からの摂食を免れているものと考えられるため、まず、そのスクリーニングを実施した。

海藻は協会の飼育槽から網かごを引き上げて採集した後、すみやかに実験室に持ち帰って凍結した。凍結海藻をアセトンで10日間浸漬抽出後、抽出液を減圧濃縮した。得られた抽出物をエーテルと水で分配し、エーテル可溶と水可溶画分を得た。水可溶部は活性炭カラムに吸着後、水、メタノール、メタノール/アンモニア/水(8:1:1)で逐次溶出し、それぞれ水溶性活性炭通過部(WP)、水溶性メタノール溶出部(WM)、水溶性メタノール/アンモニア溶出部(WMA)とした。エーテル可溶部は5%水酸化カリウム水溶液で抽出後、1M塩酸で酸性にし、エーテル抽出して酸性部(A)を得た。エーテル可溶部から酸性部を抽出した残りのものについては塩基性部がほとんどないため、これを中性部(N)とし、それぞれ一次画分とした。一次画分の収量とエゾアワビに対する摂食選択性指数 E_i 値を表III-23～25に示した。

3種の海藻は、ともにエーテル可溶部の中性部、酸性部に活性を示した。その強さは海藻の種類毎に見るとほぼ同程度であったが、若干ではあるが中性部の方が強かった。3種のうち、ユカリが非常に強い活性を示したが、これはこれまでに摂食阻害活性を調べてきた海藻の中でも一次画分のものとしては最強のものであった。ユカリについては、以前に採集したものの活性を調査したが、この際の摂食選択性指数 E_i 値は中性部・酸性部とも0.5以下であって活性は認められなかった。今回の場合は、植食動物が過剰なまでに存在する飼育槽という特殊な条件のもとで生き残った海藻の場合であり、天然の沿岸岩礁域に生育する海藻の場合とは生育環境は全く異なるものである。このことが事実であるとすれば、これまで天然の岩礁生態系の中では

表III-23 ユカリ(凍結品 114 g)をアセトン抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量(g)	0.114	0.223	2.496	0.05	0.102
E_i	0.96	0.93	-0.01	-0.01	0.09

N: 中性部, A: 酸性部, WP: 水溶性活性炭通過部,
WM: 水溶性メタノール溶出部, WMA: 水溶性メタノール/アンモニア溶出部

表III-24 ヤレウスバノリ(凍結品 371 g)をアセトン抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量(g)	0.201	0.697	3.024	1.703	2.634
E_i	0.74	0.66	-0.03	0.06	0.06

N: 中性部, A: 酸性部, WP: 水溶性活性炭通過部,
WM: 水溶性メタノール溶出部, WMA: 水溶性メタノール/アンモニア溶出部

表III-25 スジウスバノリ(凍結品 475g)をアセトン抽出して得られた一次画分の収量と摂食選択性指数 E_i

画分	N	A	WP	WM	WMA
収量(g)	0.283	0.562	3.472	1.885	2.591
E_i	0.78	0.71	0.03	0.13	0.08

N: 中性部, A: 酸性部, WP: 水溶性活性炭通過部,
WM: 水溶性メタノール溶出部, WMA: 水溶性メタノール/アンモニア溶出部

植食動物による摂食によって種の保存が脅かされることのなかった海藻が、この様な特殊な環境の中での生き残りを図るために植食動物を忌避する物質を作り出す能力を持ったことになり、その生物学的な進化の過程という面から非常に興味ある事実である。

三種の海藻のうち、スジウスバノリが多量に採集することが可能であったので、まず、この海藻の摂食阻害活性物質の検索を行うこととした。海藻は平成 11 年 6 月に協会の飼育槽の網に付着したものを採集し、凍結保存したもの 4.6 kg を使用した。抽出はスクリーニングの場合と同じ方法で行い、中性部 2.441 g と酸性部 3.929 g を得た。このうちより活性の強い中性部をシリカゲル (Merck 社製、シリカゲル 60) カラムクロマトグラフィーにより粗分画して二次画分とした。展開溶媒はヘキサン (N-1)、ヘキサン/酢酸エチル 19:1 (N-2)、ヘキサン/酢酸エチル 9:1 (N-3)、ヘキサン/酢酸エチル 1:1 (N-4)、酢酸エチル (N-5)、メタノール (N-6) と逐次極性を上げて stepwise で溶出した。二次画分の収量を表 III- 26 に示す。

二次画分の生物試験はこの時点では実施できなかったため、まず、量的に多く得られている N-3 と N-4 の画分について調べることにした。二つの画分とも結晶性物質から構成されていて、おそらく主成分は紅藻に普遍的に含有されるコレステロールであろうと思われた。大まかにコレステロールと他の成分とを分離するために、両画分について逆相系の ODS ローバークラム (Merck 社製) により粗分画した後、高速液体クロマトグラフィー (HPLC) により繰り返して精製を行った。この結果 TLC 上で顕著な UV 吸収を示すスポットを N-3 部の微量成分として 2 mg 単離することが出来た。

この化合物は無色の鱗片状結晶であり、コレステロールの結晶と同じ様な形態であった。IR スペクトルでは水酸基の吸収はなく、 1687 cm^{-1} に α, β -不飽和カルボニルの強い吸収が一本認められた。この他に、 1245 cm^{-1} と 1222 cm^{-1} にカルボニルの C-C-C の伸縮および変角振動に由来すると考えられる中程度の吸収が二本認められた。

$^1\text{H-NMR}$ (表 III- 27) では三級メチルが二本、二級メチルが三本で 15 H 分、オレフィンプロトンが 1 H 分の他は全てアルカンのメチレン、メチンプロトンが 26 H 分であり、合計 42 H のプロトンが存在した。 $^{13}\text{C-NMR}$ (表 III- 27) では sp^3 のメチル炭素が 5、 sp^3 のメチレン炭素が 10、 sp^3 のメチン炭素が 6、 sp^3 の四置換炭素が 2、 sp^2 の三置換炭素と四置換炭素がそれぞれ 1、そしてカルボニル炭素が 2 の合計 27 の吸収が認められた。この炭素数とその種類から水素数を求めると 42 H となり、 $^1\text{H-NMR}$ で認められた水素数に一致する。さらに、 $^{13}\text{C-NMR}$ ではカルボニル炭素以外に酸素原子や他のヘテロ原子と結合した炭素は存在しないためこの化合物の酸素数

表 III- 26 シリカゲルカラムクロマトグラフィーにより中性部から得られた二次画分の収量

画分	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
収量 (g)	0.041	0.283	0.763	0.987	0.083	0.553

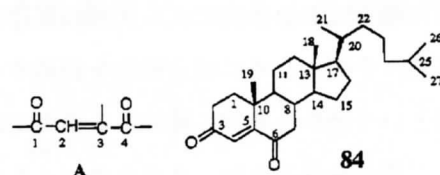
N-1: ヘキサン溶出部、N-2: ヘキサン/酢酸エチル19:1溶出部、
N-3: ヘキサン/酢酸エチル9:1溶出部、N-4: ヘキサン/酢酸エチル1:1溶出部、
N-5: 酢酸エチル溶出部、N-6: メタノール溶出部

表 III-27 cholest-4-en-3,6-dione の $^{13}\text{C-NMR}$ (150 MHz, DEPT), $^1\text{H-NMR}$ (600 MHz) と HMBC データ*

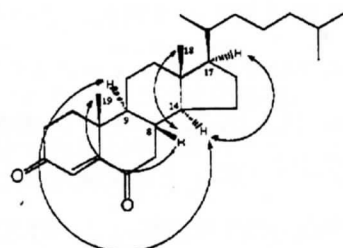
C	^{13}C δ	$^1\text{H} \delta$ (Hz)	long range correlation
1	35.5	1.88 m 2.13 ddd J=13.4,5,2,2.6	H ₂ -2, H-9, H-19
2	33.8	2.44 dddd 2.51 ddd J=17.5,4.9,2.7,1	H ₂ -1, H-4
3	199.5		H ₂ -1, H ₂ -2
4	125.4	6.15 d J=1	
5	161.1		H ₂ -1, H-4, H ₂ -7, H ₂ -19
6	202.3		H-4, H ₂ -7
7	46.8	2.01 dd J=16,12.4	H-8, H-9
8	34.2	1.88 m	H ₂ -7, H-9, H ₂ -11, H-14, H ₂ -15
9	51.0	1.34 m	H ₂ -1, H ₂ -7, H-8, H-10, H ₂ -11, H ₂ -12, H-14, H ₂ -19
10	39.8	1.49 m	H ₂ -1, H ₂ -2, H-4, H-8, H ₂ -11, H ₂ -19
11	20.9	1.60 m 1.27 m	H ₂ -7, H-9, H ₂ -12
12	28.0	1.86 m	
13	42.5		H-8, H ₂ -11, H ₂ -12, H-14, H ₂ -15, H ₂ -16, H-17, H ₂ -18
14	56.5	1.13 m	H ₂ -7, H-8, H-9, H ₂ -12, H ₂ -15, H ₂ -16, H-17, H ₂ -18
15	24.0	1.10 m	H-8, H-14, H ₂ -16, H-17
16	39.1	1.23 ddd 2.09 ddd J=12.9,12.9,4.1 J=12.9,6.7,4.5	H-14, H ₂ -15, H-17, H-20
17	56.0	1.15 m	H ₂ -12, H-14, H ₂ -16, H ₂ -18, H-20, H ₂ -21, H ₂ -22
18	11.9	0.70 s	H-14, H ₂ -12, H ₂ -16, H-17,
19	17.5	1.14 s	H ₂ -1, H-4, H-9
20	35.7	1.38 m	H ₂ -21, H ₂ -22, H ₂ -23,
21	18.6	0.91 d J=6.5	H-20, H ₂ -22
22	36.1	0.99 dd J=9.8,8.7,8.7	H-20, H ₂ -23, H ₂ -24
23	23.8	1.30 m 1.58 m	H ₂ -22, H ₂ -24, H-25
24	39.5	1.09 m	H ₂ -22, H ₂ -23, H-25, H ₂ -26, H ₂ -27
25	28.0	1.50 m	H ₂ -23, H ₂ -24
26	22.5	0.845 d J=6.6	H ₂ -24, H-25, H ₂ -27
27	22.8	0.850 d J=6.4	H ₂ -24, H-25, H ₂ -26

*重クロロホルムで測定した。

は2であり、分子式は $C_{27}H_{42}O_2$ であると思われる。この分子式から不飽和度を計算すると7であり、このうち分子内には炭素-炭素二重結合が1つ、カルボニルが2つ存在するので合わせて3つの不飽和度が使われる。よって、残りの不飽和度4は環構造に当てられることになる。N-3部とN-4部の主成分はコレステロールであること、炭素数、メチルの数とその様式および環構造の数が一致することから、この化合物はコレステロールの誘導体であるものと推定される。この化合物は ① IR スペクトルで 1687 cm^{-1} に一本の α, β -不飽和カルボニルの強い吸収以外に他のカルボニルの吸収は認められないこと、② $^{13}\text{C-NMR}$ において二つのカルボニル炭素は $\delta 199.5$ と $\delta 202.3$ にオレフィンに共役したケミカルシフト値に相当するカルボニルとして存在すること、さらに ③ $^1\text{H-NMR}$ におけるオレフィンプロトンの



図Ⅲ-26 スジスバノリから得られた新規ステロールとその部分構造式



図Ⅲ-27 84 の NOESY スペクトルで NOE の認められた水素

のケミカルシフト値が $\delta 6.15$ であってカルボニル1つと共役したオレフィンプロトンのケミカルシフト値(約 $\delta 5.7$ 程度)に較べて 0.5 程度も低磁場にシフトしていること、これらの事実(①~③)はこの化合物が 2-buten-1,4-dione (A) の部分構造を持つことを強く示唆している(図Ⅲ-26)。この化合物がコレステロールに関連するものであるとすると、A の部分構造を考慮して cholest-4-en-3,6-dione (84) であるように思われる。この構造は HMBC スペクトル(表Ⅲ-27)の結果を十分に満足するものであり、84 の平面構造を支持した。立体配置については、NOESY スペクトルを測定することにより決定した。NOE は図Ⅲ-27 に示したように核間水素(H-8、H-9、H-14)、核間メチル(H₃-18、H₃-19)および側鎖の付け根の水素(H-17)との間に認められた。この結果は、84 がコレステロールと同じ立体配置を持つことを示している。

文 献

- 1) 北川 勲(編)：“海洋天然物化学”，化学増刊 111号，化学同人，1987。
- 2) 北川 勲、伏谷伸宏(編)：“海洋生物のケミカルシグナル”，講談社，1989。
- 3) 安元 健(編)：“化学で探る海洋生物の謎”，化学増刊 121号，化学同人，1992。
- 4) 谷口和也：日本水産学会東北支部会報，**43**，3 (1993)。
- 5) K. Kurata, K. Shiraishi, T. Takato, K. Taniguchi and M. Suzuki : *Chem. Lett.*, 1629 (1988)。
- 6) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Shiraishi and M. Suzuki : *Tetrahedron Lett.*, **30**, 1567 (1989)。
- 7) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Shiraishi and M. Suzuki : *Phytochemistry*, **29**, 3453 (1990)。
- 8) 谷口和也，蔵多一哉，鈴木 稔，白石一成：日本水産学会誌，**58**，1931 (1992)。
- 9) K. Kurata, M. Suzuki, K. Shiraishi and K. Taniguchi : *Phytochemistry*, **27**, 1321 (1988)。
- 10) 谷口和也，白石一成，蔵多一哉，鈴木 稔：日本水産学会誌，**55**，1133 (1989)。
- 11) 白石一成，谷口和也，蔵多一哉，鈴木 稔：東北水研研報，**52**，13 (1990)。

- 12) 谷口和也, 山田潤一, 蔵多一哉, 鈴木 稔 : 日本水産学会誌, **59**, 339 (1993).
- 13) K. Kurata, K. Taniguchi and M. Suzuki : *Phytochemistry*, **41**, 749 (1996).
- 14) 白石一成, 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木 稔 : 日本水産学会誌, **57**, 1945 (1992).
- 15) 白石一成, 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木 稔 : 東北水研研報, **54**, 103 (1992).
- 16) 谷口和也, 高島国男, 蔵多一哉, 鈴木 稔, 林 育夫 : 藻類, **41**, 81 (1993).
- 17) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Takashima, I. Hayashi and M. Suzuki : *Phytochemistry*, **45**, 485 (1997).
- 18) 谷口和也, 蔵多一哉, 鈴木 稔 : 日本水産学会誌, **57**, 2065 (1991).
- 19) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Shiraishi, N. Hayama, I. Tanaka and M. Suzuki : *Chem. Lett.*, 267 (1989).
- 20) K. Kurata, K. Taniguchi, K. Shiraishi and M. Suzuki : *Phytochemistry*, **33**, 155 (1993).
- 21) 谷口和也, 秋元義正, 蔵多一哉, 鈴木 稔 : 日本水産学会誌, **58**, 571 (1992).
- 22) K. Sakata, T. Itoh and K. Ina : *Agric. Biol. Chem.*, **48**, 425 (1984).
- 23) R. R. U. #Vance : *Ecology*, **60**, 537 (1979).
- 24) M. M. Littler, P. R. Talor and D. S. Littler : *Coral Reefs*, **2**, 111 (1983).
- 25) D. R. Hirschfeld, W. Fenical, G. H. Y. Lin, R. M. Wing, P. Radrick and J. J. Sims : *Journal of the American Chemical Society*, **95**, 4049 (1973).
- 26) R. Duran, E. Zubia, M. J. Ortega and J. Salva : *Tetrahedron Lett.*, **53**, 8675 (1997).
- 27) M. Ishitsuka, T. Kusumi, J. Tanaka and H. Kakisawa : *Chem. Lett.*, 1517 (1982).
- 28) C. Ireland and D. J. Faulkner : *Journal of Organic Chemistry*, **42**, 3157 (1977).
- 29) C. Ireland, D. J. Faulkner, J. Finer and J. Clardy : *Journal of the American Chemical Society*, **98**, 4664 (1976).
- 30) V. Amico, G.G. Oriente, M. Piatteli and C. Tringali : *Journal of the Chemical Society, Chem. Comm.*, 1024 (1976).
- 31) N. Enoki, H. Shirahama, A. Furusaki, K. Suehiro, E. Osawa, R. Ishida and T. Matsumoto : *Chem. Lett.*, 459 (1984).
- 32) M. Ishitsuka, T. Kusumi, H. Kakisawa, Y. Kawakami, Y. Nagai and T. Sato : *Tetrahedron Lett.*, **27**, 2639 (1986).
- 33) J. Finer, J. Clardy, W. Fenical, L. Minale, R. Riccio, J. Battaile, M. Kirkuo and R. E. Moore : *Journal of Organic Chemistry*, **44**, 2044 (1979).
- 34) B. Danise, L. Minale, R. Riccio, V. Amico, G. Oriente, M. Piatteli, C. Tringali, E. Fattorusso, S. Mango and L. Mayol : *Experientia*, **33**, 413 (1977).
- 35) G. M. Konig, A. D. Wright and O. Sticher : *Tetrahedron Lett.*, **47**, 1399 (1991).
- 36) I. Ohtani, T. Kusumi, Y. Kashman and H. Kakisawa : *Journal of the American Chemical Society*, **113**, 4092 (1991).
- 37) M. Suzuki, Y. Takahashi, Y. Matsuo, M. D. Guiry and M. Masuda : *Tetrahedron Lett.*, **53**,

- 4271 (1997).
- 38) V. Amico, G. Oriente, M. Piattelli and C. Tringali : *Phytochemistry*, **18**, 1895 (1979).
- 39) Y. Kashman and A. Groweiss : *Journal of Organic Chemistry*, **45**, 3815 (1979).
- 40) V. Amico, R. Currenti, G. Oriente, M. Piattelli and C. Tringli : *Phytochemistry*, **20**, 1451 (1981).
- 41) Y. Fukuyama, I. Miura, Z. Kinzyo, H. Mori, M. Kido, Y. Nakayama, M. Takahashi and M. Ochi : *Chem. Lett.*, 739 (1985).
- 42) K. Kurata, K. Taniguchi and M. Suzuki : *Phytochemistry*, **41**, 749 (1996).
- 43) M. N. Dave, T. Kusumi, M. Ishitsuka, T. Iwashita and H. Kakisawa : *Heterocycles*, **22**, 2301 (1984).
- 44) S. Takeda, E. Kurosawa, K. Komiyama and T. Suzuki : *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **63**, 3066 (1990).
- 45) F. J. Schmitz, D. P. Michaud and P. G. Schmidt : *Journal of Organic Chemistry*, **104**, 6415 (1982).
- 46) S. J. Rochfort and R. J. Capon : *Australian Journal Chemistry*, **49**, 19 (1996).
- 47) K. Kurata, K. Taniguchi, Y. Agatsuma and M. Suzuki : *Phytochemistry*, **47**, 363 (1998).
- 48) M. D. Higgs and D. J. Faulkner : *Phytochemistry*, **21**, 789 (1982).
- 49) S. Sakemi, T. Higa, C. W. Jefford and G. Bernardinelli : *Tetrahedron Lett.*, **27**, 4287 (1986).
- 50) T. Suzuki, AS. Takeda, M. Suzuki, E. Kurosawa, A. Kato and Y. Imanaka : *Chem. Lett.*, 361 (1987).
- 51) T. Irie, M. Suzuki, E. Kurosawa and T. Masamune : *Tetrahedron Lett.*, **26**, 3271 (1970).
- 52) M. Suzuki and E. Kurosawa : *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **52**, 3352 (1979).
- 53) M. Suzuki and E. Kurosawa : *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **52**, 3349 (1979).
- 54) R. Kazlauskas, P. T. Murphy, R. J. Quinn and J. Wells : *Australian Journal Chemistry*, **29**, 2533 (1976).
- 55) Y. Shizuri and K. Yamada : *Phytochemistry*, **24**, 1385 (1985).
- 56) J. J. Sims, W. Fenical, R. M. Wing and P. Radlick : *Journal of the American Chemical Society*, **93**, 3774 (1971).
- 57) H. Kikuchi, T. Suzuki, M. Suzuki and E. Kurosawa : *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **58**, 2437 (1985).
- 58) T. Suzuki : *Chem. Lett.*, 541 (1980).
- 59) K. Kurata, A. Furusaki, C. Katayama, H. Kikuchi and T. Suzuki : *Chem. Lett.*, 773 (1981).
- 60) W. Fenical : *Phytochemistry*, **15**, 511 (1976).
- 61) S. M. Waraszkiewicz and K. L. Elickson : *Tetrahedron Lett.*, **2003** (1974).
- 62) S. J. Selover and P. Crews : *Journal of Organic Chemistry*, **45**, 69 (1980).
- 63) J. J. Sims, W. Fenical, R. M. Wing and P. Radlick : *Journal of the American Chemical*

- Society* , 98, 3774 (1973).
- 64) B. M. Howard and W. Fenical : *Tetrahedron Lett.*, 1687 (1975).
- 65) A. Furusaki, T. Matsumoto, K. Kurata, T. Suzuki, M. Suzuki and E. Kurosawa : *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 56, 6501 (1983).
- 66) K. Kurata, T. Suzuki, M. Suzuki, E. Kurosawa, A. Furusaki and T. Matsumoto : *Chem. Lett.*, 299 (1983).
- 67) T. Suzuki, A. Furusaki, N. Hashiba and E. Kurosawa : *Tetrahedron Lett.*, 3731 (1977).
- 68) T. Suzuki and E. Kurosawa : *Chem. Lett.*, 301 (1979).
- 69) K. Kurata, T. Suzuki, M. Suzuki and E. Kurosawa : *Chem. Lett.*, 29 (1983).
- 70) K. Kurata, T. Suzuki, M. Suzuki, E. Kurosawa, A. Furusaki and T. Matsumoto : *Chem. Lett.*, 557 (1983).
- 71) T. Suzuki, H. Kikuchi and E. Kurosawa : *Chem. Lett.*, 1267 (1980).
- 72) T. Irie, M. Izawa and E. Kurosawa : *Tetrahedron Lett.*, 26, 851 (1970).
- 73) K. Kurata, A. Furusaki and K. Suehiro, C. Katayama and T. Suzuki : *Chem. Lett.*, 1031 (1982).
- 74) H. Kigoshi, Y. Shizuri, H. Niwa and K. Yamada : *Tetrahedron Lett.*, 4729 (1981).
- 75) H. Kigoshi, Y. Shizuri, H. Niwa and K. Yamada : *Tetrahedron Lett.*, 1475 (1982).

IV. 動物群集構造と植食動物の生活史

1. 海藻群落帯状構造と無脊椎動物の分布

大森迪夫(東北大・院・農)・谷口和也(東北大・院・農)

白石一成(宮城県水研セ)・關 哲夫(養殖研)

1) はじめに

岩礁域潮下帯の海藻群落には、浅所から深所にかけて、優占する海藻種の異なる、景観的にも異なった帯状構造が観察される。北米北東海岸¹⁻³⁾、オーストラリアのニューサウスウェールズ⁴⁾、ニュージーランド北島北東海岸⁵⁾、三陸南部から常磐沿岸⁶⁻⁸⁾で一般的に見られる構造は、水深 5, 6m より浅所にヒバマタ目やコンブ目等の葉状海藻の優占する「海中林」があり、それより深所にいわゆる"Barren ground"と呼ばれる無節サンゴモ群落が存在する。それらの群落における動物群集の研究は「磯焼け」現象の形成、持続機構との関係、特にその中で果たすウニ類の役割に焦点が当てられてき⁹⁻¹⁶⁾、無節サンゴモ群落ではウニ類^{1), 4), 17-28)}、そしてカサガイ類や植食性巻貝類^{1), 4), 24-28)}の密度が高く、海中林においては低いことが報告されている。

一方、Sebens¹⁷⁾はサンゴモの優占する状態と葉状の海藻が繁茂する状態は相互に入れ替わる対をなした状態であると述べ、谷口ら²⁹⁾はその動態に、海藻が生産する二次代謝産物の無脊椎動物に対する着底変態誘起作用³⁰⁾や摂食阻害作用³¹⁻³⁷⁾が大きな役割を果たしていることを報告している。これらのことは、海藻と動物の間の相互作用系の存在とそこに生息する動物の生態を海藻との関係で捉えることの重要性を示している。そして、潮下帯岩礁域での鍵となる動物と、その動物と海藻の間の種間関係を抽出するためには、まず、群集を構成する動物の組成と分布構造、そしてその時空間的変動を海藻の分布との関係で捉えることが必要となる。

三陸南部から常磐沿岸の潮下帯岩礁域には、浅所から深所に向かって、大型多年生のコンブ目やヒバマタ目褐藻の優占する海中林、小型多年生褐藻のフクリンアミジ優占群落、そして殻状の多年生紅藻無節サンゴモの優占群落という帯状構造が見られる⁶⁾。ここでは、このような帯状構造に対応した底生無脊椎動物の分布構造、特に優占する海藻の違いに対応した構造が存在するか否かについて、群落を表徴する動物を明らかにしながら解析した結果について報告する。

2) 方 法

a) 生物の採集と処理

調査海域(図IV-1-1)は牡鹿半島北岸、宮城県牡鹿町泊浜の、沖に向かってU字型に開き、開放的な、なだらかな傾斜の岩礁域である。そこに見られる海藻群落の帯状構造は次の通りである。水深 2m 以浅にはエゾノネジモクが優占する場所(エゾノネジモク群落)があり、その縁辺部から水深 7m まではアラメが優占する

場所(アラメ群落)が続くが、両群落の境に転石域がモザイク状に存在し、その表面には無節サンゴモが着生する。アラメ群落より沖には無節サンゴモが優占する場所(無節サンゴモ群落)が広がるが、両者の境界部には幅約1m未満のフクリンアミジの優占する場所(フクリンアミジ群落)がある。

調査は潜水により1990年6、8、10、12月、1991年3月に行われた。調査の度に、任意に、フクリンアミジ群落以外の場所では各群落内に1定点を設け、2m×2mの方形枠を4枠設置し、動物を手づかみで採集した。さらに、各枠内に50cm×50cmの小枠を設置し、エアリフト採集により、手づかみで取り残された生物を採集した。フクリンアミジ群落では25cm×25cmの枠を10枠設け、エアリフト採集のみを行った。エアリフト採集とは、円筒上端に目合約1mmの生物捕捉用袋をくくりつけ、その円筒の下部から潜水用ポンベの空気を入れることにより上昇水流を起こさせ、動物を吸い込み、採集する方法である。

採集した生物は10%ホルマリン水溶液で固定し、実験室にて、軟体動物、短尾類、クモヒトデ類以外の棘皮動物、原索動物については種まで、その他の動物については綱、亜綱という上位分類群名を同定し、1m²当たりの個体数、生物量を求めた。

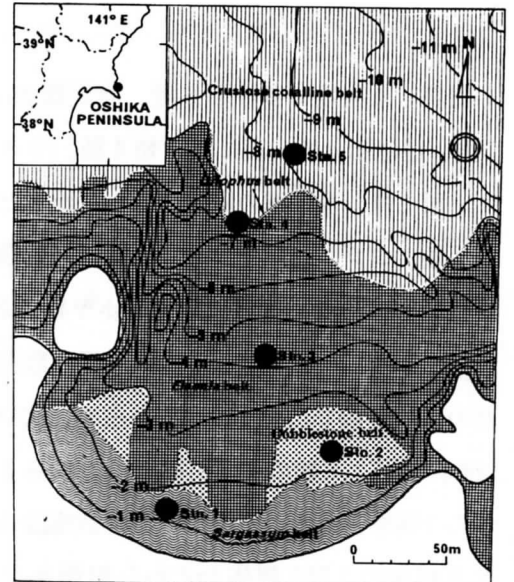
b) 分布構造の解析

年平均密度の高い上位19種に重要漁獲対象種のエゾアワビを加えた20種を解析対象に選んだ。これら20種で種の同定が行われた全生物個体数の99.0%を占める。この"場所 x 月 x 種"という3次元のデータについて、次の2種類の解析を行った。

第一は種組成の場所間の類似性、つまり組成の空間的配置の解析である。まず、各場所・月間の種組成についてPearsonの相関係数行列を求め、それを多次元尺度(MDS)二次元平面上にプロットし、各場所の平面上の位置の季節的挙動を見た。この場合、2つの場所の挙動域が相互に近い場合は、季節変動を含め、種組成が相互に類似していることを意味する。多次元尺度の解析はMinkowsky 常数=2、単調回帰、次元数=2の条件のもとでのKruskalの方法により行った。次に、Sheldonの多様度指数、均衡度指数、種数の季節変動を場所間で比較し、多様度で表される生物集団構造の空間的配置を解析した。

第二は種の分布パターンの解析である。サイズ効果を除去するため、場所間で標準化した生息密度を用い、各種・月の分布間についてPearsonの相関係数行列を求め、平均連結法によるクラスター分析を行った。次に、各クラスターが表す分布パターンの特色と海藻群落帯状構造との関係を解析した。

多様度に関する計算以外は全てSYSTAT for Windowsにより行った。



図IV-1-1 調査海域の地形及び海藻群落、定点の配置。

3) 結果

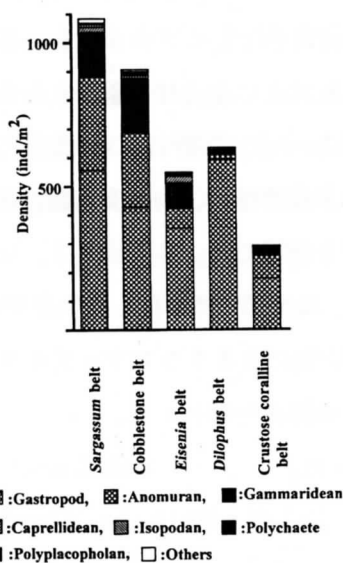
出現した生物は多板類6種、腹足類26種、斧足類2種、短尾類4種、真ヒトデ類4種、ウニ類2種、ナマコ類1種、及び種の同定を行わなかったユムシ類、多毛類、ヨコエビ類、ワレカラ類、端脚類、十脚甲殻類遊泳族、十脚甲殻類異尾類、ホヤ類であった(表IV-1-1)。これらの動物群の中で最も個体数密度が高かったのは腹足類で、全体の60%を占め、次いで異尾類の21%、ヨコエビ類の13%が続き、これら3分類群で全体の95%を占めた。年平均総個体数密度はエゾノネジモク群落の1,080個体/m²から無節サンゴモ群落の297個体/m²へと深度が増すにつれて低下し、腹足類、異尾類、ヨコエビ類も同様な傾向を示した(図IV-1-2)。さらに、どの場所でも腹足類が最も優占していた。しかし、フクリンアミジ域の総個体数密度はその傾向から幾分外れた高い値を示し、また腹足類が93%と非常に高い割合を占めるという他の海藻域とは異なった特色を示した。

先に述べた上位20種の年平均個体数組成、重量組成を場所間で比較すると次のようになる(図IV-1-3)。個体数組成でみた場合、エゾノネジモク群落と転石域、フクリンアミジ群落と無節サンゴモ群落は相互によく

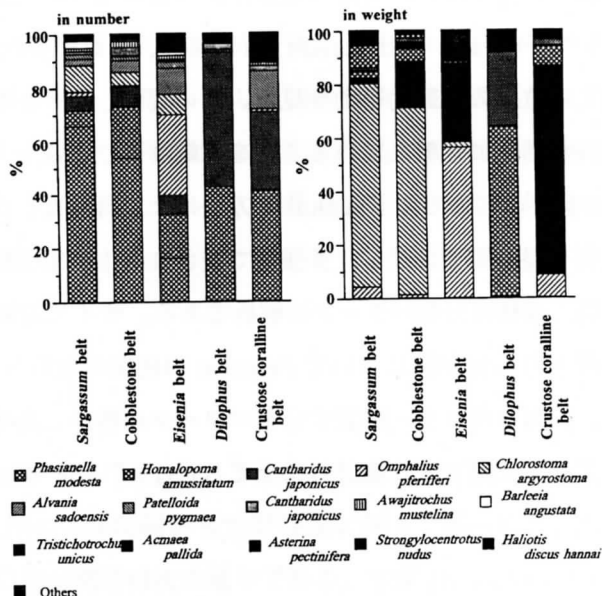
表IV-1-1 出現種、年平均密度、密度の順位。種識別番号は図中の表示に用いた。

Identification number of species	Species name	Av density in no./m ²	Density ranking	
Phylum Mollusca				
Class Polyplacophola				
1	<i>Placiphorella simpsoni</i> (Gould)	2.32 (0.01 %)	21	
	<i>Mopalia retifera</i> Thiele	1.96 (0.09)	23	
	<i>Ishnochiton cumptus</i> (Gould)	2.04 (0.09)	22	
	<i>Lepulozona coreanica</i> (Reeve)	14.37 (0.68)	12	
	<i>Acanthopleura japonica</i> (Lischke)	0.20 (0.01)	39	
	<i>Acanthochiton ruralimaculata</i> (Lischke)	1.28 (0.06)	27	
Class Gastropoda				
Subclass Prosobranchia				
2	<i>Haliotis discus hannai</i> Ino	0.63 (0.02)	31	
	<i>Tugali gigas</i> (v. Moriens)	0.01 (<0.01)	42	
	<i>Penepatella stellaeformis</i> (Reeve)	0.01 (<0.01)	43	
	<i>Celiana toreuma</i> (Reeve)	0.04 (0.01)	40	
	<i>Celiana graia</i> (Gould)	1.40 (0.06)	25	
	3	<i>Acmaea pallida</i> (Gould)	17.04 (0.81)	11
		<i>Patelloida pygmaea</i> (Dunker)	54.71 (2.60)	7
	4	<i>Omphalopus pferiferi</i> (Philippi)	85.66 (4.07)	5
		<i>Omphalopus rufus</i> (Gmelin)	0.01 (0.01)	44
	5	<i>Chlorostoma argyrostoma</i> (Tapparone et Canefri)	104.49 (4.97)	4
		<i>Tristichotrochus unicus</i> (Dunker)	8.86 (0.42)	14
	6	<i>Cantharidus japonicus</i> (A. Adams)	40.06 (1.90)	8
		<i>Cantharidus jessoensis</i> (Schrenk)	444.55 (21.15)	3
7	<i>Eurytrochus cognatus</i> (Pilsbry)	0.20 (<0.01)	38	
	<i>Awajitrochus mustelina</i> (Gould)	26.84 (1.27)	9	
8	<i>Homalopoma amussiatum</i> (Gould)	488.24 (23.23)	2	
	<i>Phasianella modesta</i> (Gould)	666.57 (31.71)	1	
9	<i>Tenanelia turrida</i> (A. Adams)	9.61 (0.45)	13	
	<i>Cyproneca janthostomoides</i> Kuroda	2.84 (0.13)	20	
10	<i>Mitrella burcardi</i> (Dunker)	0.01 (<0.01)	45	
	<i>Ochroclava kochi</i> (Philippi)	3.80 (0.18)	19	
11	<i>Barleeia angustata</i> (Pilsbry)	21.17 (1.00)	10	
	<i>Alvania sadoensis</i> (Yokoyama)	67.00 (3.18)	6	
12	<i>Ocellia lirata</i> (A. Adams)	0.40 (0.01)	35	
	Subclass Opisthobranchia			
13	<i>Aplysia sagamiensis</i> Baba	0.49 (0.02)	33	
	<i>Aplysia kurodai</i> (Baba)	1.28 (0.06)	26	
Class Pelecypoda				
14	<i>Mytilus edulis</i> Linne	0.64 (0.03)	30	
	<i>Protothaca englypta</i> (Sowerby)	1.88 (0.08)	24	
Phylum Arthropoda				
Class Crustacea				
Order Decapoda				
Tribe Brachyura				
15	<i>Haplogaster dentata</i> (De Haan)	0.60 (0.02)	32	
	<i>Pugettia quadridens</i> (De Haan)	8.13 (0.38)	15	
	<i>Cancer amphiochus</i> Rathbun	0.21 (<0.01)	37	
	<i>Plagusia dentipes</i> De Haan	0.03 (<0.01)	41	
Phylum Echinodermata				
Class Echinozoidea				
16	<i>Ceratonarhoa semiregularis</i> Muller et al	0.73 (0.03)	28	
	<i>Solaster paxillatus</i> Sladen	0.41 (0.01)	34	
	<i>Asterina pectinifera</i> Muller et Troschel	6.91 (0.32)	17	
	<i>Aphelasterias japonica</i> (Bell)	0.64 (0.03)	29	
Class Echinoidea				
17	<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> (A. Agassiz)	4.79 (0.22)	18	
	<i>Strongylocentrotus malus</i> (A. Agassiz)	8.03 (0.38)	16	
Class Holothuroidea				
18	<i>Apostichopus japonicus</i> (Selenka)	0.37 (0.01)	36	
	Total			
		2101.46		

Average density of the other animals: Echiurans, 0.40; Polychaetes, 25.52; Gammaridean amphipods, 446.28; Caprellidean amphipods, 36.60; Isopods, 24.20; Caridean shrimps, 11.60; Anomurans, 734.96; Ascidiaceans, 0.01



図IV-1-2 浅所から深所に向かう海藻群落帯状構造に沿った各動物群密度の変化。



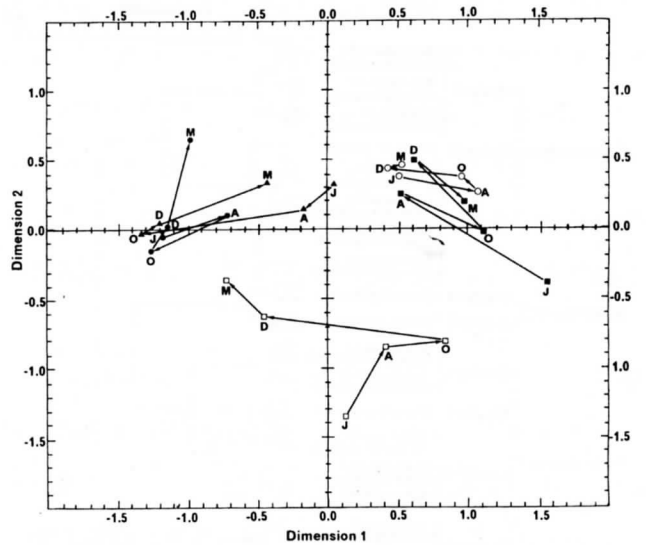
図IV-1-3 主要20種の個体数、重量組成の各海藻群落間の比較。

似ており、アラメ群落は明らかにそれらとは異なっていた。エゾノネジモク群落と転石域では共にリュウテンサザエ科のサラサバイ(最大殻長 $1\text{cm}^{38)}$ が最も優占し、フクリンアミジ群落と無節サンゴモ群落では共にリュウテンサザエ科のエゾサンショウガイ(最大殻長 0.8cm^{38})とニシキウズガイ科のエゾチグサガイ(最大殻長 1cm^{38})が優占していた。アラメ群落では群集の多様度が大きく、ニシキウズガイ科のバテイラ(最大殻長 4cm^{38})とエゾサンショウガイ、サラサバイが優占種として挙げられる。これらの種はバテイラを除いて全て殻長 1cm 以下の小型の巻貝である。

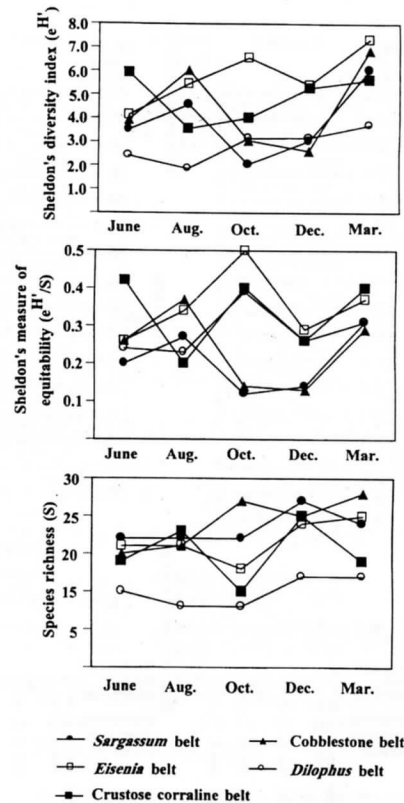
重量で見た場合には個体数で見た場合と異なった結果が得られた。場所間の類似性も個体数組成で見た場合とは異なり、エゾノネジモク群落と転石域は個体数で見た場合と同様に相互によく似ていたが、他の場所はこの一組とも、また相互にも異なっていた。エゾノネジモク群落と転石域では共にニシキウズガイ科のクボガイ(最大殻長 3cm^{38})が優占し、アラメ群落ではバテイラとキタムラサキウニ、フクリンアミジ群落ではエゾサンショウガイとエゾチグサガイ、無節サンゴモ域ではキタムラサキがそれぞれ優占していた。フクリンアミジ群落では重量で見た場合にも殻長 1cm 以下の小型の巻貝が優占していたことになる。

各場所、月の種組成の類似度を MDS 二次元平面上にプロットし、各場所の季節的挙動を見ると(図IV-1-4)、エゾノネジモク群落と転石域、フクリンアミジ群落と無節サンゴモ群落はそれぞれ近接した範囲で軌跡を描いたが、これら2者とアラメ群落の3者間では挙動域は明らかに異なっていた。

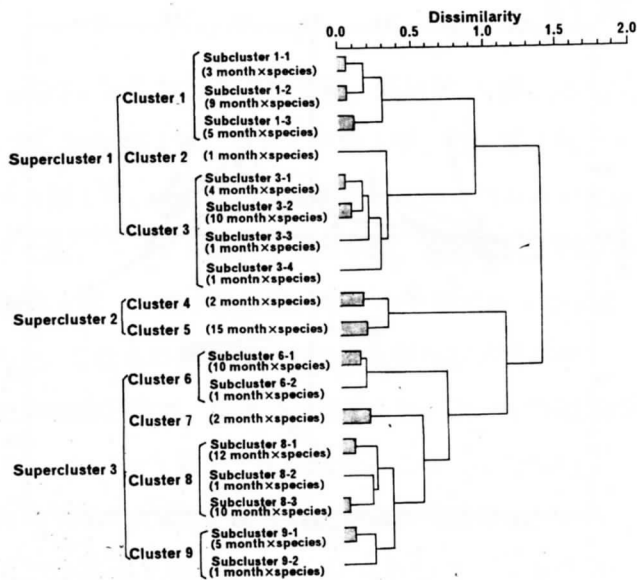
多様度指数は場所により複雑な季節変動を示すが(図IV-1-5)、エゾノネジモク群落と転石域、フクリンアミジ群落と無節サンゴモ群落はそれぞれ極めてよく類似した季節変動を示し、アラメ群落はこれら2者とは別の挙動を示した。一方、各場所の多様度指数の季節変動と均衡度のそれは極めて類似した季節変化を示すが、種数との間にはその様な関係は見られなかった。このことはこの多様度の季節変動が主に均衡度の変化によることを示している。



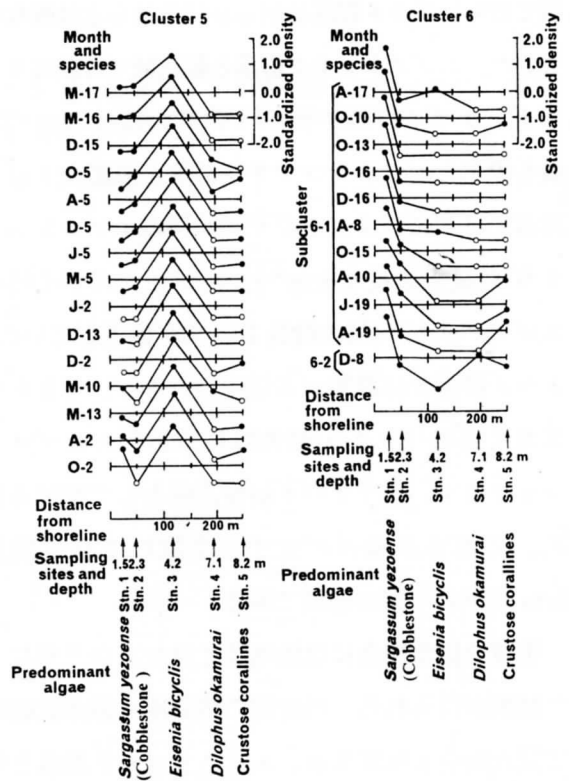
図IV-1-4 種組成の MDS 平面上での配置と群落ごとの季節的挙動。
 黒丸:エゾノネジモク群落、黒三角:転石域、白四角:アラメ群落、白丸:フクリンアミジ群落、黒四角:無節サンゴモ群落。
 J:6月、A:8月、O:10月、D:12月、M:3月。



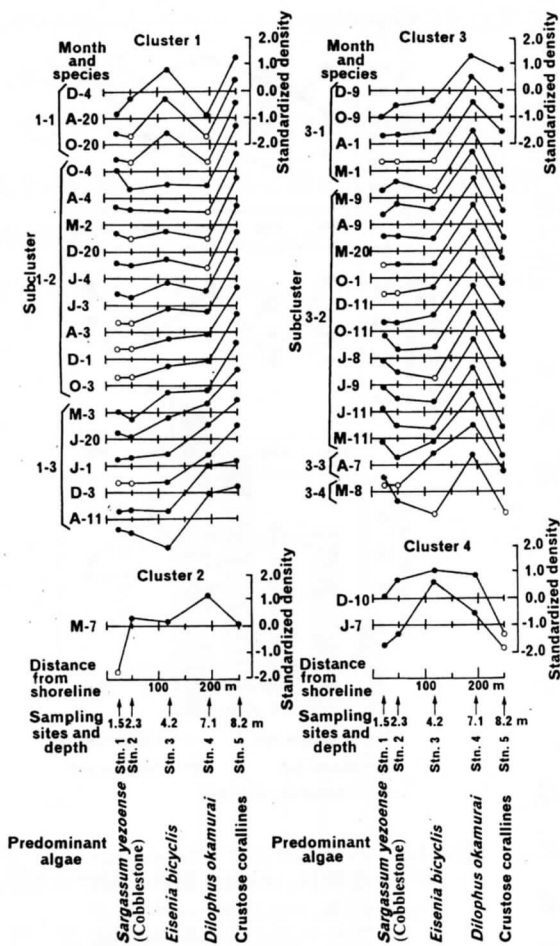
図IV-1-5 各群落における Sheldon の種多様度指数、均衡度指数、種数の季節変化。
 黒丸:エゾノネジモク群落、黒三角:転石域、白四角:アラメ群落、白丸:フクリンアミジ群落、黒四角:無節サンゴモ群落。



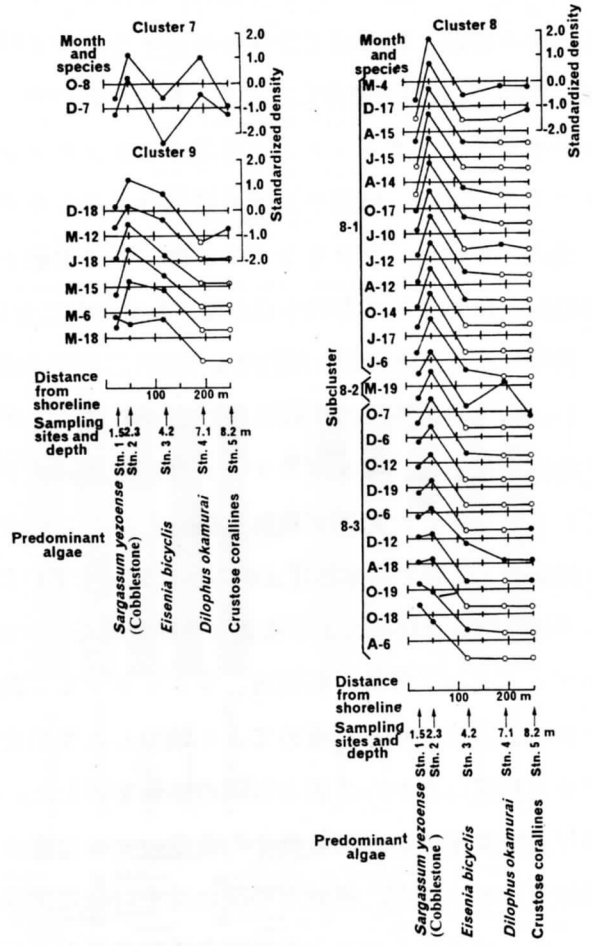
図IV-1-6 "種 x 月"を解析単位とした海藻群落帯状構造に沿った分布パターンのクラスター分析。



図IV-1-7 つづき



図IV-1-7 各クラスター、サブクラスターの海藻群落帯状構造にそった分布パターンの特色。



図IV-1-7 つづき

分布パターンの類似性に関する樹状図をみると(図IV-1-6)、連結レベルの違いによる階層構造の存在が明らかであった。即ち、最も高い類似度で連結される18のサブクラスター、次に高い類似度で連結される9つのクラスター、そして最も低い類似度で連結される3つのスーパークラスターという階層構造である。スーパークラスター1はクラスター1から3の3つのクラスターから、スーパークラスター2はクラスター4と5の2つのクラスターから、スーパークラスター3はクラスター6から9の4つのクラスターからそれぞれ構成され、各クラスターはさらにそれぞれ単一、あるいは複数のサブクラスターから構成されるという構造である。

分布パターンをこの様な階層構造に対応させて整理すると次のようになる(図IV-1-7)。クラスター1の構成員に共通した分布パターンの特色は無節サンゴモ群落での密度が相対的に高いことであり、クラスター3、5、6、8のそれは、それぞれフクリンアミジ群落、アラメ群落、エゾノネジモク群落、転石域での密度が相対的に高いということであった。クラスター2、4、7の構成者数はそれぞれ1、2、2にすぎず、また他のクラスターほど海藻の帯状構造との対応は明瞭でないが、それぞれフクリンアミジ群落、アラメ群落、転石域とフクリンアミジ群落での相対密度が高い分布パターンをであった。クラスター9は、3月のイトマキヒトデ(M-18)を除くと、クラスター8ほど明瞭ではないが、転石域での分布密度が相対的に高いという特色を示した。

これらのことから、スーパークラスター1はフクリンアミジ群落か無節サンゴモ群落での、スーパークラスター2はアラメ群落での、スーパークラスター3はエゾノネジモク群落か転石域での密度が高いという特色でそれぞれ結びつけられていると言える。

サブクラスターはクラスターの中の微細な違いに対応するもので、生態学的な意味は見出せなかった。

4) 考 察

個体数密度の深度に伴う減少傾向については、これまでに Ojeda and Dearborn¹⁾が米国東岸 Main 州の岩礁域についての報告が見られる。今回の調査ではこの様な深度による密度の減少傾向は腹足類、異尾類、ヨコエビ類にも見られた。このことはコンブ目、ヒバマタ目褐藻の優占する海中林では無節サンゴモが優占する場所よりも巻貝類の密度が低いというこれまでの報告^{1), 4), 24-28)}とは一致しない。

エゾノネジモク群落と転石域、アラメ群落、フクリンアミジ群落と無節サンゴモ群落はそれぞれ相互に異なった MDS 平面上に軌跡を描いた。このことは、この様な場所の組み合わせによる種組成の空間的配置構造が存在し、それが季節的にも安定して持続していたことを示している。また、多様性指数の季節変動を場所間で比較しても、それと全く同じ場所の組み合わせが得られ、その変動を引き起こす均衡度の季節変動もそれぞれの場所の組み合わせ間で異なっていた。種組成の解析によるこれらの結果は、エゾノネジモク群落と転石域、アラメ群落、フクリンアミジ群落と無節サンゴモ群落といった空間スケールでの群集構造の存在を明瞭に示している。個体数組成を場所間で比較すると、当然のことであるが、これらの各組み合わせは共通の優占種を有していた。それらの優占種はこれらの構造単位を表徴する種であり、エゾノネジモク群落と転石域ではサラサバイ、アラメ群落ではバテイラ、エゾサンショウガイ、サラサバイ、フクリンアミジ群落と無節サンゴモ群落ではエゾサンショウガイとエゾチグサガイである。それらはバテイラを除いてすべて

1cm以下の小型の巻き貝である。

分布パターンの解析により抽出されたスーパークラスターは、明らかに、種組成の解析で抽出された構造に対応し、クラスターはより狭い空間スケール、即ち各海藻群落に対応する構造をあらわす。

この様な分布パターンの解析と種組成の解析の双方で3つの群落の組み合わせを単位とした構造が見いだされたことは、この構造の確かさを示している。

ここで、種毎に所属するスーパークラスターとクラスターを整理してみる(表IV-1-2)。スーパークラスターで見ると、例外の月は幾つかあるが、エゾノネジモク群落と転石域で相対密度が高い種(スーパークラスター3)は8種、アラメ群落で相対密度が高い種(スーパークラスター2)は2種、フクリンアミ

ジ群落と無節サンゴモ群落で相対密度が高い種(スーパークラスター1)は6種で、残り3種のみが季節変動が大きい種であった。

一方、クラスターで見ると、クボガイ、サラサバイは、3月を除き、転石域での相対密度が高いクラスター8に所属する。3月は両種ともクラスター9に所属するが、クラスター9は8よりもアラメ群落での相対密度が高いという点が異なるだけで、転石域での相対密度が高いという点では両者とも同じである。クボガイは重量で見た場合、サラサバイは個体数で見た場合の転石域での優占種である。バテイラは周年クラスター5に所属し、エゾアワビも3月はクラスター1であるが、その他の月はクラスター5に所属し、これらはアラメ群落での相対密度が高い種であり、このうち、バテイラは重量、個体数の両方でアラメ群落で優占する種であった。エゾチグサガイは周年、エゾサンショウガイは8月を除きフクリンアミジ群落での相対密度が高いクラスター3に所属し、これら2種はフクリンアミジ群落での重量、個体数での優占種でもある。ユキノカサガイ、キタムラサキウニは3月を除き、ヒメコザラガイは周年、無節サンゴモ群落での相対密度が高いクラスター1に所属する。ユキノカサガイ、ヒメコザラガイは個体数で見た場合に、キタムラサキウニは重量で見た場合に無節サンゴモ群落で優占する種である。これら9種以外の11種は季節変動が大きく、周年同じ分布パターンを示さなかった。エゾノネジモク群落での相対密度が周年高い傾向を示す種は見いだされなかったが、それが何を意味するかは明らかでない。

種の分布パターンの解析は93の解析単位(種 x 月)について行ったが、そのうち83はクラスター1、3、5、6、8、という各海藻群落での相対密度が高いという明瞭な特色を表すクラスターに類別され、その様な特色の不明瞭なクラスターに類別されたのはわずかに10の解析単位にすぎなかった。

Castric-fey and Chasse³⁹⁾は岩礁域潮下帯の動物群集の構造や分布を規定する要因として帯状構造をなした海藻群落と共に水深、そして波の作用が重要であることを指摘している。しかし、海藻群落の帯状構造が主に光の要因により水深に沿って形成されている⁶⁾という事実は、動物の分布に与える水深の効果と優占する海藻による効果を区別することを難しくしている。しかし、調査定点の配置を見ると、エゾノネジモク群

表IV-1-2 主要動物20種類の所属スーパークラスター、クラスターの季節変化。
分子の数字はスーパークラスター、分母の数字はクラスターを表す。星印は採集個体数ゼロを表す。

Species name	June	Aug.	Oct.	Dec.	Mar.
<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	3/6	3/6	3/8	3/8	3/8
<i>Alvania sadoensis</i>	*	*	3/6	3/6	2/5
<i>Chlorostoma argyrostoma</i>	3/8	3/8	3/8	3/8	3/9
<i>Phasianella modesta</i>	3/8	3/8	3/8	3/8	3/9
<i>Asterina pectinifera</i>	3/9	3/8	3/8	3/9	3/9
<i>Barlecia angustata</i>	3/8	3/8	3/6	2/5	3/9
<i>Asajitrochus mustelina</i>	3/8	3/6	3/6	2/4	2/5
<i>Pugettia quadridens</i>	3/8	3/6	3/8	3/8	2/5
<i>Ochetoclava kochi</i>	*	3/8	3/8	*	*
<i>Omphalius pfeifferi</i>	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5
<i>Haliotis discus hannai</i>	2/5	2/5	2/5	2/5	1/1
<i>Cantharidus jessoensis</i>	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
<i>Homalopoma amussitatum</i>	1/3	1/1	1/3	1/3	1/3
<i>Acmaea pallida</i>	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
<i>Strongylocentrotus nudus</i>	1/1	1/1	1/1	1/1	1/3
<i>Patelloida pygmaea</i>	1/1	1/1	1/1	1/1	3/8
<i>Lepidozona coreanica</i>	1/1	1/3	1/3	1/1	1/3
<i>Tristichotrochus unicus</i>	2/4	1/3	3/8	3/7	1/2
<i>Cantharidus japonicus</i>	1/3	3/6	3/7	3/6	1/3
<i>Temanelia turrida</i>	*	*	3/6	2/5	2/5

落と転石域の両定点は0.8mの水深差しかなく、無節サンゴモ群落とフクリンアミジ群落の両定点間の水深差も1mにすぎない。また、フクリンアミジ群落は調査時には、わずか1m以下の幅で形成されているにすぎなかった。この様な条件下でもこの様な海藻群落に対応した分布構造が見いだされたことは動物の分布に果たす海藻の役割の大きさを示していると言える。

最上段の階層であるスーパークラスターに対応する分布構造はクラスターに対応する分布構造の形成要因以外の他の要因も加わって形成されるものと考えられる。

2. 泊浜岩礁域におけるクボガイ *Tegula argyrostoma* と バテイラ *Tegura pfeifferi* の生活史と海藻群落

石田暁之(東北大・院・農)・佐々木浩一(東北大・院・農)
大森迪夫(東北大・院・農)・谷口和也(東北大・院・農)

1) はじめに

クボガイ *Tegula argyrostoma* とバテイラ *Tegura pfeifferi* はともにニシキウズガイ科(Trochidae)に属し、成体の大きさや形態が相互に類似した植食性の腹足類で、北海道南岸、本州、九州の岩礁域潮間帯から潮下帯にかけて生息する。

三陸南部から常磐沿岸の潮下帯岩礁域には、優占海藻によって、景観的に、浅所ら深所に向かって、大型多年生のコンブ目やヒバマタ目褐藻の優占する海中林、小型多年生褐藻のフクリンアミジが優占するフクリンアミジ群落、そしてその深所に殻状の多年生紅藻無節サンゴモの優占するサンゴモ平原が配列される。宮城県牡鹿町泊浜地先の岩礁域では、この様な海藻群落带状構造に対応した動物群集の配列が見られ⁴⁰⁾、クボガイは主に浅所転石域に、バテイラはアラメ群落内に生息し、これらの場所での優占種となっている。

關⁴¹⁾は、岩礁域生態系はそれを構成する動物個体群と海藻を含む多様な動植物との間のそれぞれの生物の発育に応じた相互作用によって保たれていると述べている。谷口ら²⁹⁾は海藻群落の動態に、海藻が生産する二次代謝産物の無脊椎動物に対する着底変態誘起作用³⁰⁾や摂食阻害作用³¹⁻³⁷⁾が大きな役割を果たしていることを報告している。これらのことは、海藻と動物の間の相互作用系の存在とそこに生息する動物の生態を海藻との関係で捉えることの重要性を示している。浅所転石域の優占種であるクボガイとアラメ群落内の優占種であるバテイラは潮下帯岩礁域生態系の動態に大きな役割を果たしていると考えられ、両種の生活と海藻との結びつきを把握することは重要である。しかし、両種が稚貝から成貝に至るまで各海藻群落とどのように関わって生活しているのかについてはこれまでに報告されていない。

本研究は、両種の生息場を海藻群落带状構造といったマクロな生息場、及び海藻葉上、仮根部周辺、転石の下といった微細生息場として捉え、その発育、成長に伴う変化を明らかにする。さらに、微細生息場の変化と密接な関係を有すると考えられる発育に伴う食性との関係について考察した。

2) 材料と方法

a) 調査海域の概要

調査海域は牡鹿半島北岸の泊浜で行った。調査海域は北北東に開く湾入部を持つU字型の小湾で、直接外洋に面しており、湾の前面に波を遮るような岩礁や島が存在しないため沖合からの波浪の影響を直接受ける。海底は岸から200m先の水深8mまでなだらかに傾斜し、急速に深くなる場所は見あたらない(図IV-2-1)。潮間帯から水深約2mまでの海底には玉石が集積し、所々の露出岩盤上にエゾノネジモクが繁茂する。水深約2mから約10mまでの底質は黒色泥岩で、所々に玉石が散在する。これらの底質上に、水深約1mか

ら7mまではアラメ群落、水深約7mから10mまでは無節サングモ群落が広がり、両者の境界部には幅1m未満のフクリンアミジ群落が带状に連なる。

b) 定期的な生物の採集

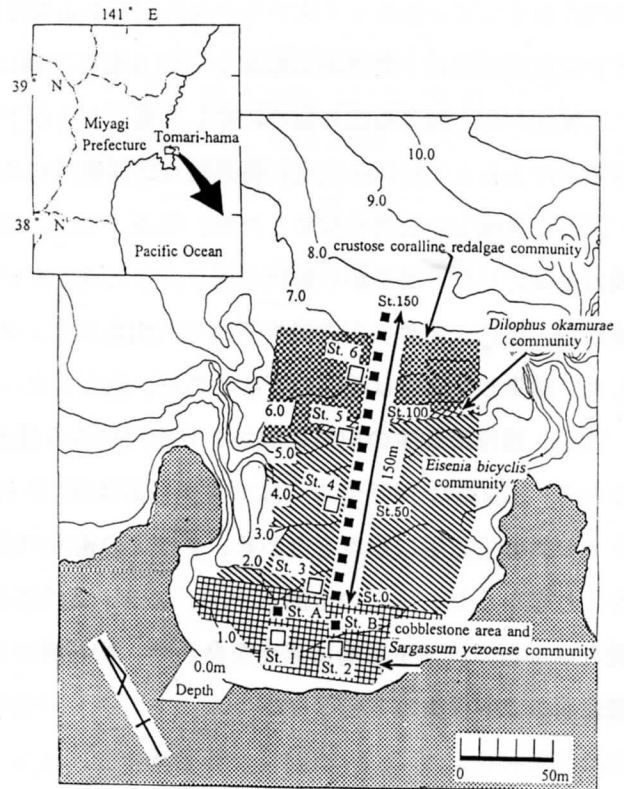
両種の分布、深度による体サイズ組成の変化を明らかにするため、潜水による定期的な生物の採集を行った。調査は1997年8月から1998年6月まで行い、水深1.5m地点から北北東の沖合に向かう調査ライン上に10m間隔で調査点を設定した(図IV-2-1)。各調査定点の番号は基点からの距離により、St. 0~St. 150と表した。また、クボガイは浅所に偏って分布するので、水深1~2mの転石域にSt. Aを、エゾノネジモクの繁茂するエゾノネジモク群落にSt. Bを設定した。各調査点に1m x 1mの方形枠を設置し、クボガイとバテイラを手掴みで採集した。また、その枠

中にランダムに50cm x 50cmの副方形枠を置き、前節で述べたエアリフト採集具を用いて枠中の生物を採集した。ただし、1998年3月の調査では、荒天のため、St. 130からSt. 150の定点でのサンプルは得られなかった。生物の採集と同時に各調査点の半径約5m以内の優占海藻の種類と底質を記録した。採集当日に研究室で10%ホルマリン海水で固定した採集物からクボガイとバテイラを選別し、後日、個体数の計数、ノギスによる0.01mmの精度での殻径測定、電子天秤による0.01gまでの湿重量の測定を行った。エアリフトによって採集した動植物については、実体顕微鏡下でクボガイとバテイラを摘出し、大型の個体はノギスを用いて、小型の個体は実体顕微鏡下でマイクロメーターを用いて殻径を0.01mmまで測定した。湿重量は電子天秤を用いて0.01gまで測定した。

c) 微細生息場に対応した生物の採集

両種の微細生息場に対応した分布を明らかにするため、転石域、エゾノネジモク群落、アラメ群落および無節サングモ群落の玉石表面、玉石を取り除いた後の海底面および葉状海藻葉上のそれぞれから生物を採集した。St. 1は水深1~2mの転石域、St. 2は水深1~2mのエゾノネジモク群落、St. 3は水深1~3mのアラメ群落の岸側縁辺部、St. 4は水深3~6mのアラメ群落中央部、St. 5は水深6~7mのアラメ群落沖側縁辺部、そしてSt. 6は水深7~8mの無節サングモ群落である(図IV-2-1)。St. 1とSt. 6には葉状海藻が繁茂しないので、玉石表面および同海底面からのみ採集した。

各調査点において、玉石3~4個をランダムに採集し、さらに玉石を取り除いた海底表面に50cm x 50cmの方形枠を置き、エアリフト法により枠中の生物を採集した。エゾノネジモク上に生息する生物は方形



図IV-2-1 調査海域の海底地形、海藻群落、定点の配置。黒四角はクボガイ、バテイラの海藻群落带状構造に沿った分布調査のための定点、白四角は微細分布調査のための定点。

枠内に着生しているエゾノネジモクを仮根部から切り取り、アラメ上に生息する個体はアラメの年齢を考慮せずに定点周辺の3個体を仮根部から切り取り、網口50cm x 50cm、長さ2.5m、目合0.475mmの網に入れて採集した。海藻の切り取りに際して葉上から落下する生物はこの採集用の網で可能な限り受け取った。採集した玉石と生物は研究室に持ち帰り、採集当日に10%ホルマリン海水で固定した。

玉石は表面上の動物を採集した後、長径、短径、高さを測定し、さらに表面上に生育する小型葉状海藻の種名を同定した。海藻から動物を選り分けた後、エゾノネジモクについては湿重量を、アラメについては側葉枚数、枝長、側葉の湿重量をそれぞれ測定した。アラメの葉面積は、谷口ら⁴⁴⁾に従い、側葉重量から推定した。採集した動物は前述の方法で処理、測定した。

Tegra 属浮遊幼生の出現期間が8月中旬から9月上旬⁴²⁾、バテイラの産卵期が5月から11月の期間であるので⁴³⁾、調査は1998年9、11、12月及び1999年6、9月の6回行った。ただし、1999年6月の調査はアラメの微細生息場に焦点を合わせ、アラメの密度の高いSt. 4と低いSt. 3でのみ行い、微細生息場の区分をより細かくし、玉石の上面と下面、アラメ葉状部と仮根部周辺を区別した採集を行った。1999年9月の調査は玉石の微細生息場に焦点を合わせ、転石域のSt. 1とSt. 3、4で、玉石上面と玉石を取り除いた海底表面からの採集のみを行った。

d)食性調査

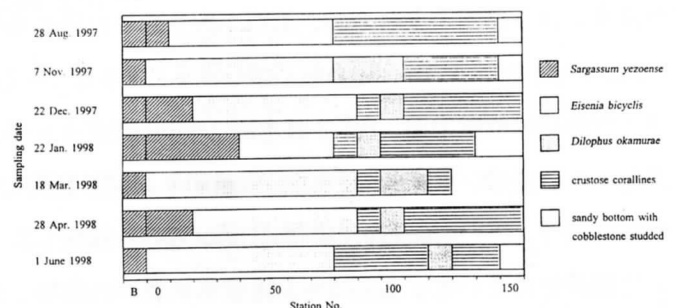
定期調査及び微細生息場調査のため1997年8月から1999年6月の間に採集した個体の胃内容物の観察を行った。クボガイについては、玉石表面と玉石下の海底面上の生息場所別にそれぞれ10個体、バテイラについては、アラメ葉上、アラメ仮根部周辺、玉石表面および玉石下の海底面の生息場所別にそれぞれ20個体選び、胃内容物を取り出し、グリセリンでスライドガラス上に封入し、観察に供した。

胃内から出現した海藻は細かく碎かており、種名を同定する事は出来なかったが、組織の色彩、細胞構造、細胞の形により、アラメと類似するタイプ1、ホンダワラ類と類似するタイプ2、マクサ、ツノマタ類、アカバ等の小型葉状海藻種と類似するタイプ3、無節サンゴモ類そして消化されて判別不能な海藻に類別して計数した。なお、砂粒はその表面に付着珪藻類はみられず、摂食時に食物に混ざって取り込まれたものと考えられた。カイアシ類、二枚貝類や巻貝類の稚貝、有孔虫類などの微細な動物はほとんど消化されておらず、偶然に混食された可能性が高いため、「その他」の区分にまとめた。

3) 結 果

a)底質及び優占海藻の分布

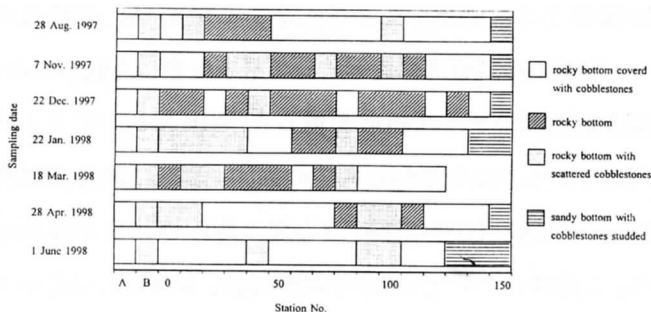
図IV-2-2、IV-2-3に各定点の優占海藻の種類と海底面の状態をそれぞれ示す。St. Aは水深約1mの転石帯にあり、玉石表面にマクサやヨレクサ等の小型葉状海藻と無節サンゴモが着生していた。St. Bは水深約1mの岩盤帯で、岩盤上にはエゾノネジモクが繁茂していた。



図IV-2-2 調査線にそった海藻群落带状構造とその季節変化。

ライン上の底質は岩盤と転石域がモザイク状に入り組んで存在し、1998年1月を除くいずれの季節においても水深約1~2mの浅所域にエゾノネジモク、1~6mにアラメ、6m以深では無節サンゴモがそれぞれ優占していたが、1998年1月には、水深約3mまでエゾノネジモクが優占種となっており、アラメ域の岸側縁辺部がやや沖側へ移動していた。また、1997

年11月以降、水深約5mのアラメ群落と無節サンゴモ群落の境界域にフクリンアミジ群落が形成されていた。St.150付近より沖側は砂と転石が混在する底質で、着生海藻は見られなかった。この砂質域・転石域と無節サンゴモ群落の境界は季節的に移動していた。

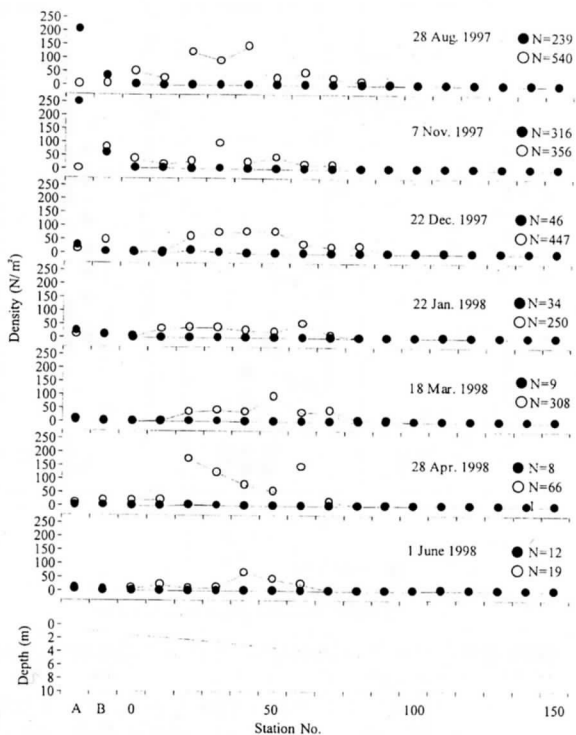


図IV-2-3 調査船にそった海底構造とその季節変化。

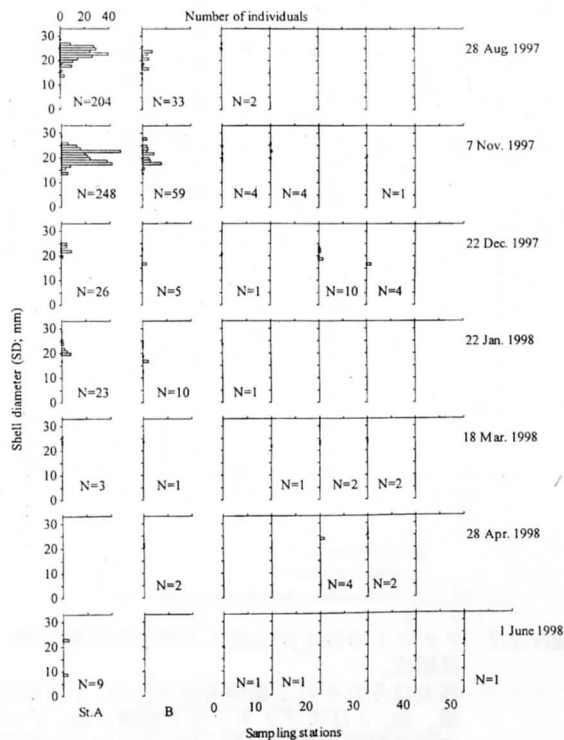
b) 分布および殻径組成の場所による変化

図IV-2-4にクボガイの調査線に沿った密度分布の季節変化を示す。クボガイはSt. Aでの密度が高く、St. Bおよび調査線上のSt. 0からSt. 50ではSt. Aに比べて密度は著しく低く、St. 50より沖側の調査点からは出現しなかった。St. Aでの密度は1997年8、11月に高かったが、12月以降は著しく低下した。調査定点別の殻径組成を見ると(図IV-2-5)、どの定点でも殻径10mm以上の大型の個体が主体を占め、10mm以下の小型の個体は1998年6月にSt. Aで4個体採集されたのみである。

バテイラの密度は水深2~5mのアラメ域内で高く、他の海藻種の混生割合が高いアラメ群落の縁辺部で低下し、水深6m以深のSt. 70より沖側のフクリンアミジ群落や無節サンゴモ群落からは殆ど出現しなかつ



図IV-2-4 クボガイ(黒丸)、バテイラ(白丸)の密度の調査線にそった変化。
"N"は採集個体数。

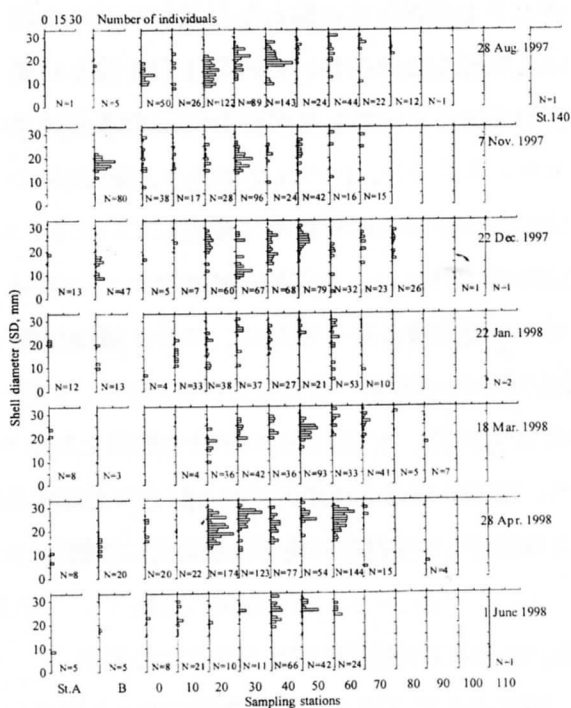


図IV-2-5 クボガイの殻径組成の定点間の比較。
測定尾数"N"は採集個体数に相当する。

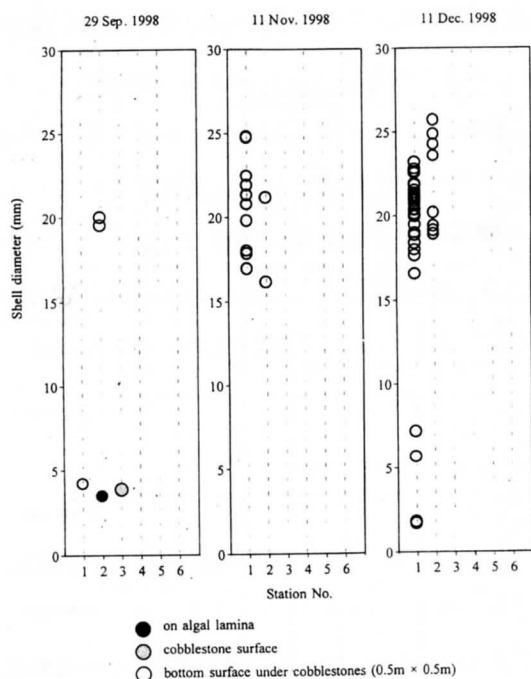
た(図IV-2-4)。また、クボガイ異なり、St. A、Bではアラメ群落内の調査点に比べて分布密度は著しく低かった。調査定点別のサイズ組成を見ると(図IV-2-6)、アラメ域内のバテイラは小型から大型の個体で構成されるのに対して、St.A、Bでは比較的小型の個体の割合が高かった。この様に、バテイラの小型個体は、個体数は少なかったが、広範囲から出現し、大型個体はアラメ群落内に集中的に分布する傾向が見られた。

c) 微細生息場所による分布

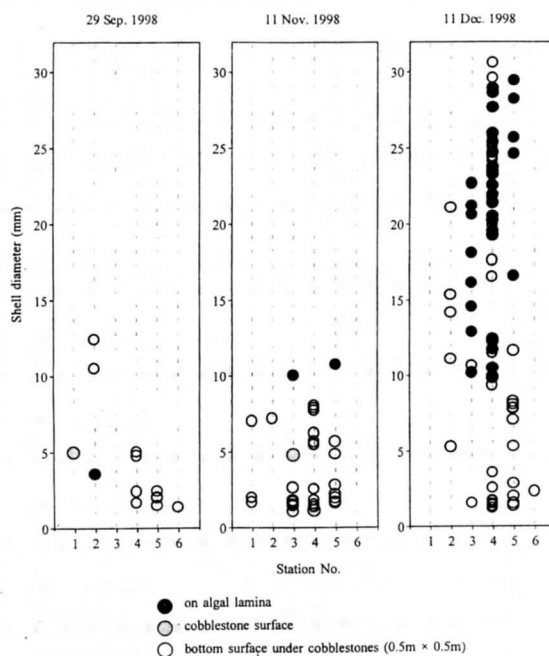
図IV-2-7 にクボガイの St.1 から 6 における微細生息場所別の殻径組成を示す。1998 年 9 月には、St. 1、St. 2 および St. 3 でクボガイが採集された。St. 1 では殻径 5mm 以下の小型個体が玉石下の底表面から、St. 2 では 20mm 前後の大型個体が底表面、5mm 以下の小型個体がエゾノネジモク葉上から、St. 3 では小型個体が玉石表面からそれぞれ採集された。11 月には、St. 1 と St. 2 のみで大型個体が採集され、殻径 15mm 以下の個体は全く採集されなかった。これらは全て玉石下の底表面に生息していた。12 月には St. 1 と St. 2 のみで採集され、St. 1 では殻径 15mm 以上の多数の大型個体と殻径 10mm 以下の小型個体がわずかに、St. 2 では大型個体のみが採集された。これらは全て玉



図IV-2-6 バテイラの殻径組成の定点間の比較。測定尾数"N"は総採集個体数に相当する。



図IV-2-7 クボガイの各定点における微細生息場所別殻径組成。各丸はそれぞれ1個体を表す。St. 1は転石域、St. 2はエゾノネジモク群落、St. 3はアラメ群落岸側縁辺部、St. 4はアラメ群落中央部、St. 5はアラメ群落沖側縁辺部、St. 6は無節サンゴモ群落に設定した定点。



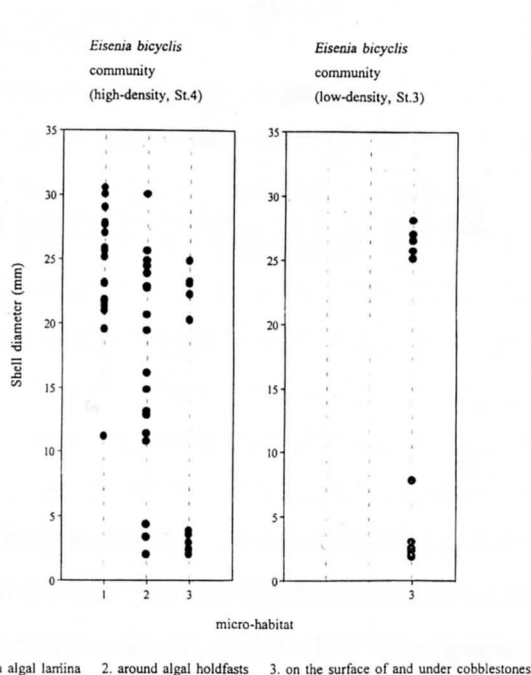
図IV-2-8 バテイラの各定点における微細生息場所別殻径組成。各丸はそれぞれ1個体を表す。St. 1は転石域、St. 2はエゾノネジモク群落、St. 3はアラメ群落岸側縁辺部、St. 4はアラメ群落中央部、St. 5はアラメ群落沖側縁辺部、St. 6は無節サンゴモ群落に設定した定点。

石下の底表面に分布していた。クボガイは転石域やエゾノネジモク群落内の玉石下の底表面に多く分布しており、海藻葉上や玉石表面にはほとんど分布していなかった。St. 4、5 および 6 からは全く出現しなかった。いずれの調査でも、小型個体の採集個体数が少なかった。

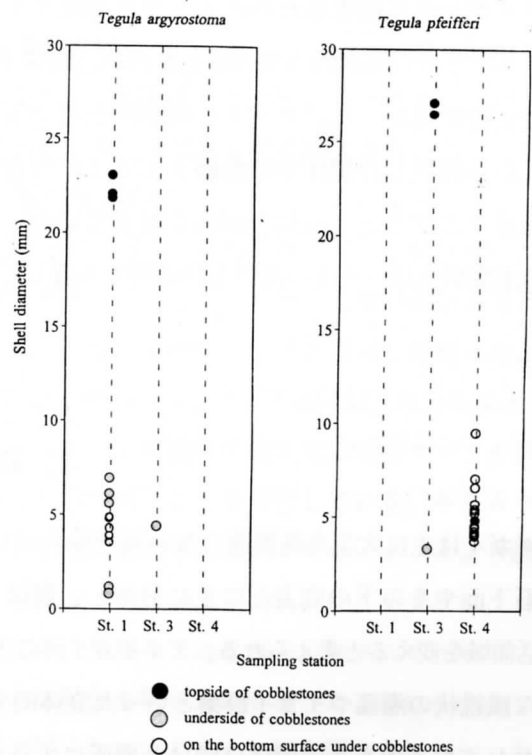
図IV-2-8 はバテイラの各調査点における微細生息場所別の殻径組成である。1998年9月には、St. 3を除く全ての調査点で採集された。St. 1での玉石表面、St. 2でのエゾノネジモク葉上から出現した各1個体以外は全て玉石下の底表面に分布し、それらは全て5mm以下の小型の個体であった。11月には、ほとんどの個体が玉石下の底表面から採集されたが、それらは殻径10mm以下の比較的小型の個体であるのに対し、St. 3とSt. 5のアラメ葉上から採集した個体は殻径10mm以上の個体であった。12月には、St. 2では殻径10mm以下の比較的小型の個体から20mm以上の大型個体まで、St. 6では小型の個体が玉石下の底表面に分布していた。アラメ群落内のSt. 3~5ではアラメ葉上と玉石下の底表面から採集されたが、玉石下の底表面には小型個体が、アラメ葉上に比較的大型の個体が多く分布していた。

この様に、バテイラの小型個体はほとんどの調査点で主に玉石下の底表面から採集されたが、アラメ群落内の調査点の方が他の調査点に比べて採集個体数は多かった。大型個体は、1998年9月と11月には採集されなかったが、12月の調査ではアラメ群落内のSt. 3~5のアラメ葉上から多数出現した。特に、アラメ群落中央部のSt.4での採集個体数に最も多かった。

図IV-2-9 にバテイラのアラメ微細生息場所別殻径組成を示す。アラメの密度が高いSt. 4では、アラメ葉上には主に殻径10mm以上の大型個体が、アラメの仮根部、玉石表面とその下の底表面には殻径5mm以下の小型個体から大型個体が分布していた。しかし、アラメ葉上や玉石表面からは殻径5~20mmの個体はほとんど出現しなかった。アラメの密度が低いSt. 3では、玉石表面とその下の底表面に殻径8mm以下の



図IV-2-9 バテイラの殻径組成のアラメ周辺微細生息場所間の比較



図IV-2-10 クボガイの殻径組成の転石周辺微細生息場所間の比較。

個体と 25mm 以上の大型個体が分布するが、その中間の殻径の個体は、St. 4 の場合と同様に、出現しなかった。

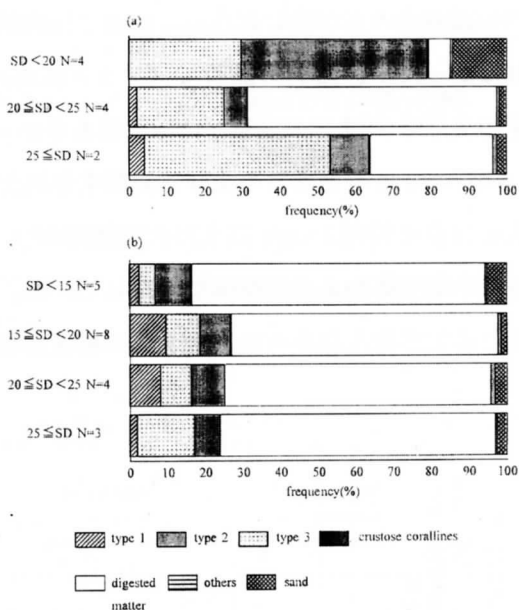
図IV-2-10 にクボガイ及びバテイラの玉石微細生息場別殻径組成を示す。クボガイは玉石下面とその下の底表面に殻径 8mm 以下の小型の個体が多く分布し、玉石上面には大型個体が分布していた。しかし、殻径 10~20mm の個体は出現しなかった。バテイラはアラメの分布密度が高い St. 4 の玉石下の底表面に主に小型個体が分布し、玉石上、下面からは小型個体がわずかに出現したにすぎなかった。アラメの密度が低い St. 3 では、玉石上面に殻径 25mm 以上の大型個体が分布していた。

両種の微細分布を比較すると、両種とも大型個体は玉石上面に主に分布し、小型個体は、クボガイは玉石下面とその下の底表面に、バテイラは玉石下の底表面に主に分布していたことになる。また、殻径 10~20 mm の個体は出現しなかった。

d)食 性

図IV-2-11 は判別の出来ない海藻類、混食された可能性の高い"その他"、及び砂粒を除外した、クボガイ、バテイラの微細生息場所別胃内容物組成である。玉石表面から採集したクボガイの胃内容物では海藻タイプ 2 と海藻タイプ 3 が 80% を占め、海藻タイプ 3 の割合が特に高かった。岩盤上から採集したものでは海藻タイプ 3 の占める割合は低く、海藻タイプ 2 の割合が高かった。海藻タイプ 1 とサンゴモ類はどちらの場合も著しく低かった。

アラメ葉上から採集したバテイラでは海藻タイプ 1 と海藻タイプ 3 が胃内容物の 70% 以上を占め、海藻タイプ 1 の割合が特に高かった。アラメの仮根部周辺や玉石下の底表面から採集した個体では海藻タイプ 1 の割合が低下し、海藻タイプ 2 と 3 の割合が高くなっていた。サンゴモ類の出現割合はいずれの微細生息場所でも著しく低かった。



図IV-2-11 クボガイ(a)及びバテイラ(b)のサイズ別胃内容物組成

4) 考 察

クボガイは主に大型海藻群落のない浅所転石域に周年分布することは明かである。小型個体はその転石域の玉石下面やその下の底表面に主に分布し、殻径 20mm 以上の大型個体は玉石上面のような開けた場所へと生活領域を変えると考えられる。アキガイ科の *Nucella emarginata* では、稚貝は *Mytilus californianus* の様な繊維状の海藻やイガイ群集といった立体的で複雑な構造をしているところで生息し、ヤドカリ類に捕食されなくなる大きさの個体は開けた場所に生息する⁴⁵⁾。捕食者に関するデータや知見はないが、クボガイの場合も小型個体が玉石下面やその下の底表面に分布していたということは、成長により被食の危険性が小

さくなると玉石上面のような開放的な空間へと生活領域を変えるものと考えられる。この微細生息場の変化に伴って食性も変わり、玉石表面では主に小型海藻やホンダワラ類を摂食するが、岩盤上に生息場を移すとホンダワラ類を摂食する割合が高くなる。リュウテンサザエ科のスガイ *Lunella coronata coreensis* は成長するにつれて摂食する海藻を珪藻からマクロな海藻へと変え、主に珪藻を摂食する殻径 20mm より小さい成貝は潮間帯上部に分布するが、主にマクロ海藻を摂食する殻径 20mm 以上の大型個体は潮間帯中部から下部に分布することが報告されている⁴⁶⁾。これは成長に伴う食性の変化と微細生息場所の変化が連動していることを意味している。クボガイにおいてもスガイと同様に微細生息場所の変化と食性の変化が平行して起きているものと考えられる。

バテイラはいずれの殻径の個体も主にアラメ群落に周年分布し、分布密度はアラメ群落の中央部で高く、縁辺部で低かった。また、アラメ群落の季節的な深淺方向への拡大・縮小に伴ってバテイラの分布の中心も変化する等、バテイラの生活とアラメ域との間に特異的な関係があることが示唆される。一方、微細生息場との関係は発育、成長に伴い明らかに変化すると考えられる。小型個体は玉石下の底表面に分布するが、殻径 10~20mm の個体はアラメの仮根部周辺に、殻径 20mm 以上の個体はアラメ葉上に主に分布するようになることがこのことを示している。大型個体は玉石上面や岩盤上にも出現するが、これらは波浪等の物理的要因によって葉上から脱落したものと考えられる。また、バテイラの場合もクボガイの場合と同様に微細生息場により食性が異なっており、微細生息場所の変化と食性の変化は平行しておこるものと言える。

バテイラの近縁種である *Tegula funebris* が比較的捕食者の影響を受けない潮間帯上部で性的成熟年齢 (6 令) に達するまで過ごし、その後潮間帯下部へと生息場を移す⁴⁷⁾ こと、有節サンゴモ群落は、サザエ稚貝にとって、付着珪藻が豊富に存在する摂食の場であるだけでなく、藻体が狭い間隙で密集して繁茂し、ヒトデ類などの外敵動物による食害が緩和され、そこがサザエ稚貝にとり生残率の高い好適な隠れ場所となっている⁴⁸⁾ ことが報告されている。玉石下面やその下の底表面という環境は両種の小型個体の摂食の場であると同時に、外敵動物による被食圧を低下させ、減耗を小さくさせる役割を果たしていると考えられる。その後の成長過程において、バテイラはアラメという特定の海藻を食物としてだけでなく、主たる生活空間として直接的に利用するようになる。しかし、クボガイは玉石表面上や岩盤上で生活し、マクサヤツノマタのような小型葉状海藻やエゾノネジモクを食物として利用はするが、葉状藻体の上で生活するというような関係は見られない。これが、海藻群落との関係における両種の基本的な違いの一つであると考えられる。

海藻群落の带状構造との関係で見た場合も両種の分布パターンは異なった様相を呈する。先に述べたように、带状構造という空間スケールで見た場合、クボガイは着底後それほど時間が経過していないと考えられる小型の個体から大型の個体までが転石域での密度が最も高く、他の場所からは殆ど出現しなかった。これに対し、バテイラのそれらは明らかにアラメ群落のみからと言っていいほどアラメ域に偏った分布を示した。佐野ら⁴⁹⁻⁵¹⁾ は、この研究と同じ調査域において、キタムラサキウニは着底後 1 歳までは無節サンゴモ群落に生息し、その後季節的にアラメ群落への分布域の拡大・縮小を繰り返すことを報告している。キタムラサキウニの無節サンゴモ群落への着底・変態は無節サンゴモの二次代謝産物であるジプロモメタンにより誘起されたもので⁶⁾、この着底・誘起作用はエゾアワビについても確認されている⁵²⁾。しかし、クボガイ、バテイラのマクロな分布あるいは発育成長に伴う微細生息場の変化は、当然のことながら、キタムラサキウニと同じ機構のみでは説明しえない。それは、生活史と海藻群落との関係を明らかにすること、特にバテイラの浮遊幼生の個体数分布、着底個体の生残率をアラメとの関係で明らかにすることで解き明かされるが、今後に残された重要な研究課題である。

3. 海藻群落帯状構造とキタムラサキウニの生活

佐野 稔(東北大・院・農)、大森迪夫(東北大・院・農)

谷口和也(東北大・院・農)、關 哲夫(養殖研)

キタムラサキウニ個体群の浮遊幼生が着底、変態を行い、成長して再生産が可能となるまでの一連の成育過程を成り立たせている条件を明らかにするためには、基本的には生息環境としての水深に対応する海藻群落帯状構造との関係で年齢による生息場所の変化を時空間的に把握する必要がある。これまで、キタムラサキウニの成育にともなう生息場所の変化については、宮城県北部海域では10月に着底、変態稚仔が無節サンゴモの優占する水深13mに最も高密度に分布し、殻径2~3cmの1歳群も同じ水深に分布すること⁵³⁾、北海道福島町沿岸の無節サンゴモ群落内で1歳から2歳にかけて分布範囲が水深6.0~8.9mから3.0~8.9mへと拡大すること⁵⁴⁾、北海道忍路湾において、0歳の個体は無節サンゴモ群落にとどまり、1歳以上の個体が生殖腺の発達にともなって浅所のホソメコンブ群落へと季節的に索餌移動を行うこと⁵⁵⁾が報告されている。しかし、着底、変態を行う場所の違いによる生き残りの違い、そして0+歳から1+歳、2+歳と年齢が進むなかで、季節的に生息場所が変化する過程という、着底、変態から成長、発育および加齢による生息場所の季節的な変化という点については十分に把握されているとはいえなかった。

また、沿岸岩礁域に生息する他のウニ類については、北海道の日本海、太平洋沿岸のエゾバフンウニが年齢が進むにつれて生息場所とする転石のサイズを大きくすること⁵⁶⁾、カリフォルニアのジャイアントケルプの優占する海中林内に生息するアメリカオオキタムラサキウニの若齢個体が親個体の下を生息場所とし、成長にともないそこから離れていくこと⁵⁷⁾、カリフォルニアのジャイアントケルプの海中林に生息するアメリカムラサキウニの卓越年級群が、年齢が進むにつれて、岩盤の裂け目からジャイアントケルプの仮根部へと生息場所を変えること⁵⁸⁾が報告されている。しかし、いずれも海藻群落内の微細な空間との関連でウニ類の生息場所を解析しており、海藻群落帯状構造との関係で把握したものではなかった。それは、最も重要な生息環境としてとらえられるマクロな海藻群落帯状構造が認識されていなかったためであると考えられる。

海藻群落帯状構造とキタムラサキウニの成長、発育にともなう生息場所の関係については、吾妻・川井⁵⁵⁾が北海道忍路湾における潮間帯付近に限定されたホソメコンブ群落と無節サンゴモ群落の帯状構造との関係で報告している。一方、三陸から常磐の沿岸岩礁域にはエゾノネジモク群落、アラメ海中林、無節サンゴモ群落からなる海藻群落の帯状構造が共通して認められるが⁶⁾、この帯状構造との関係ではキタムラサキウニの成長、発育にともなう生息場所の変化については明らかではない。本節では、アラメ海中林を中心としたこの海藻群落帯状構造との関係でキタムラサキウニの着底、変態から年齢による生息場所の変化を季節的に把握する。第3節の1では、キタムラサキウニ個体群の浮遊幼生が着底、変態を行う海藻群落と、それぞれの群落における生き残りおよび、加入後の個体が生息場所とする海藻群落を明らかにする。第3節の2では第3節の1の結果をもとに、キタムラサキウニ個体群の季節的な分布域の変化をアラメ海中林と無節サンゴモ群落からなる海藻群落帯状構造との関係で明らかにする。

調査海域の概要

本研究に関わる調査はすべて宮城県牡鹿半島の北側に位置する牡鹿町泊浜のボード浜（北緯 38° 141'、東経 141° 31'）において、1995 年 6 月から 1998 年 12 月にかけて行った（図 IV-3-1）。この調査海域はキタムラサキウニとエゾアワビの漁場となっている。

調査海域の沖合には、親潮と、津軽海峡をこえて対馬暖流が南下するとともに、黒潮が北上しており、これら 3 海流の季節、あるいは年による勢力の変化により海況が決定されている。調査海域はこのような沖合の海況変動の影響下にある。調査海域北側近傍の江ノ島における表面水温は、9 月に最も高く 1995 年では月平均で 22.22°C であり、2 月に最も低く 1995 年では月平均で 7.26°C であった（図 IV-3-2）⁵⁹⁻⁶¹。

江ノ島において気象庁により観測された有義波高、最大波高はともに季節的に変化し（図 IV-3-3）、波の高い時期は 2~4 月と 9 月である⁶²⁻⁶⁵。1998 年までの累年値でみると、有義波高（最大波高）は 2~4 月に 1.4~1.5m（2.03~2.44m）であり、9 月に 1.41m（2.33m）であった。

牡鹿半島は約 1 億 5 千年前の中生代ジュラ紀起源の黒色泥岩により成り立っている。調査海域は、東西両側に島が突き出た U 字型の小湾になっており、湾口部は幅約 200m で、北東に開口している。湾の沖側には島や礁が存在しないため、沖合からの波の影響を直接受ける。海底は緩斜面となっており距岸約 200m で水深 8m である。海底は黒色泥岩の岩盤となっており、水深 0m から 2m 付近までの、波の影響を恒常的にうける場所では、長径で 10~50cm の玉石が集積した転石域が形成されている。水深 2~10m 位までは硬質の岩盤であり、所々に玉石及び直径 1m 前後の不動石が存在し、水深 10m より深い沖側では西側で砂地となっている。

水深 2m 付近にはエゾノネジモク群落、水深 2~5、6 m の所にはアラメ海中林、水深 4、5m 以深には無節サンゴモ群落がそれぞれ形成されている。この帯状構造は、三陸から常磐沿岸において共通して認められる⁶。アラメ海中林と無節サンゴモ群落の間には小型多年生海藻のフ

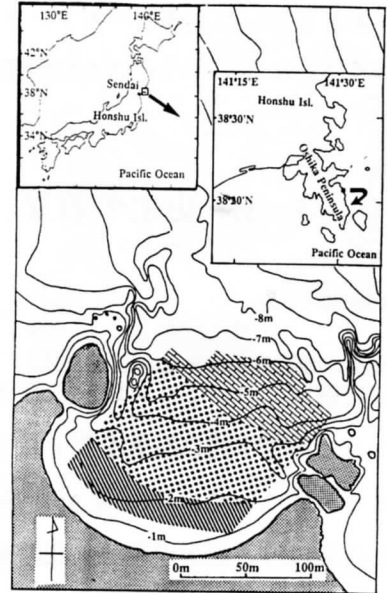


図 IV-3-1 調査海域の海底地形と海藻群落の分布。

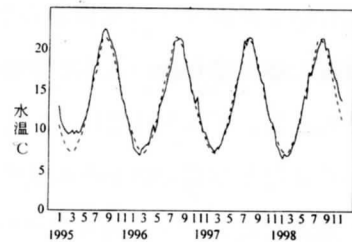


図 IV-3-2 宮城県江の島における水温の季節変化。実線は観測値、破線は過去 30 年の平均値(資料は宮城県水産研究開発センター⁵⁹⁻⁶¹による)。

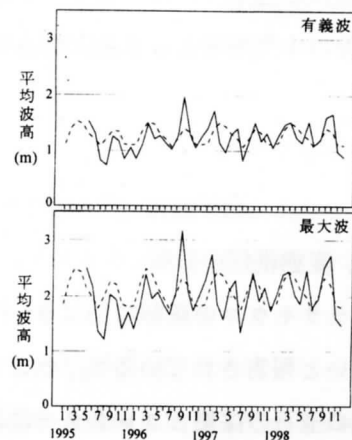


図 IV-3-3 宮城県江の島における波浪の季節変化。実線は観測値、破線は累年値(資料は気象庁⁶²⁻⁶⁵による)。

クリンアミジの優占群落が存在するとされている⁶⁾。しかし、本調査期間中は小規模なパッチとして認められたにすぎなかった。浅所のエゾノネジモク群落周辺に認められた転石域では無節サンゴモが優占し、ツノマタやスジウスバノリなどの小型海藻が着生していた。

3-1. 幼生の着底、変態ならびに加入の場所となる海藻群落

1) はじめに

沿岸岩礁域においてウニ類は無節サンゴモ群落に高密度で分布する⁶⁷⁾ことから、ウニ類の着底、変態に無節サンゴモが化学的に影響を及ぼしていることを検証する研究がなされている^{30, 67, 68)}。Rowley⁶⁷⁾はアメリカムラサキウニについて、Pearse and Scheibling⁶⁸⁾はホクヨウオオバフンウニについて、無節サンゴモの抽出物がこれらの浮遊幼生の着底、変態を誘起することを報告している。Taniguchi et al.³⁰⁾はこの物質を特定して、無節サンゴモの2次代謝産物であるジプロモメタンがキタムラサキウニ浮遊幼生の着底、変態を誘起することを明らかにしている。しかし、Rowley⁶⁷⁾は、アメリカムラサキウニではジャイアントケルプの海中林内と無節サンゴモ群落で着底、変態稚仔の密度に違いが認められず、着底、変態後の生き残りの違いによって親個体の密度が決まることを述べており、ウニ類が加入を行う場所を推定するためには着底、変態稚仔の密度とその後の生き残りの両方を捉える必要があると思われる。キタムラサキウニについては、宮城県北部海域において無節サンゴモ群落の水深13mで着底、変態稚仔と1歳の個体の密度が高いこと⁵³⁾や北海道福島町浦和において0歳の個体が無節サンゴモ群落に集中して分布すること⁵⁴⁾から、無節サンゴモ群落が加入場所であることが示されている。しかし、これらの報告ではコンブ属の優占する群落やアラメ海中林と無節サンゴモ群落との間でのキタムラサキウニの着底、変態稚仔の密度の比較をしておらず、無節サンゴモ群落以外の海藻群落での生き残りについては明らかでない。さらに、福島県いわき市においては殻径0.4~1.6cmのキタムラサキウニが潮間帯の転石の下に高密度で分布しており⁶⁹⁾、転石域に無節サンゴモが優占することを考えると、転石域についてもキタムラサキウニの着底、変態稚仔の生き残りを把握する必要がある。そこで、転石域、エゾノネジモク群落、アラメ海中林、無節サンゴモ群落における着底、変態稚仔の密度と加入した個体の各年齢における密度を比較することで、キタムラサキウニの着底、変態から加入する場所およびその後の生息場所となる海藻群落を明らかにする。

2) 方 法

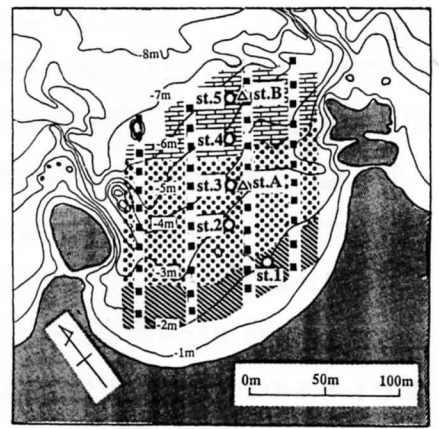
a) 着底、変態稚仔の分布

キタムラサキウニの産卵時期は9~10月^{42, 70-72)}で、浮遊幼生の出現期間は9~11月で海域によって大きく異ならないと報告されている⁵⁴⁾。そこで、着底、変態稚仔の調査は1995年10月4日と19日に、海藻群落別に天然の玉石の採集とコレクターによる採集で行った。

玉石の採集場所は転石域内に1カ所(St. 1)、アラメ海中林内に2カ所(Sts. 2, 3)、無節サンゴモ群落内に2カ所(Sts. 4, 5)とした(図IV-3-4)。各調査点から長径10~50cmの玉石を4~7個採集し、研究室に持

ち帰った後5%ホルマリンに玉石を約18時間浸した。その後、玉石表面に付着している生物を丁寧に水で洗い流し、目合0.095mm (XX13)の濾し網で回収した。玉石の表面積は、玉石を直方体に見たて、縦、横、高さを測定して求めた。回収した生物は実体顕微鏡下で観察し、着底、変態稚仔を取り出して個体数と殻径を測定した。

コレクターは、80枚のホタテガイ殻に針金が貫通しているマガキ用の採苗連を3本一組にしたものである。これを1995年10月4日にアラメ海中林のst. Aと無節サンゴモ群落のst. Bの海底に設置し、1995年10月19日に回収した(図IV-3-4)。回収して研究室に持ち帰ったコレクターは玉石の場合と同じ処理を行い、着底、変態稚仔の観察を行った。



○：玉石採集地点、△：コレクター設置地点、
■：ライトランセクト調査定点
■：エゾノネジモクとアラメの混在域
■：アラメ海中林
■：無節サンゴモ群落

図IV-3-4 着底、変態稚仔の調査地点とライトランセクト調査の定点。

b) 海藻群落帯状構造とサイズ別分布

キタムラサキウニのサイズ別分布を海藻群落の帯状構造との関係で把握するため、ライトランセクト調査を1995年7月と1996年9月に行った(図IV-3-4)。ラインは、水深約2mを基点とし、沖出し150m、40m間隔で4本平行に設定した。ライン上に15m間隔で11の調査点を設け、各調査点に1m²の方形枠を2枠置いて枠内に出現したキタムラサキウニの殻径を水中で測定した。

各調査地点で優占している海藻を水中で記録した。これをもとに谷口⁷³⁾の生活形分類に従い海藻群落を区別した。

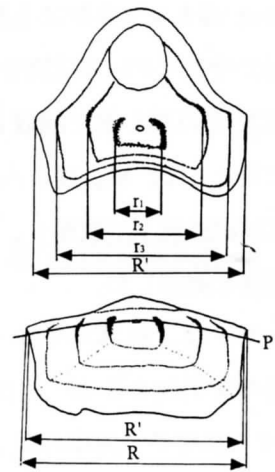
c) 海藻群落別の密度、サイズ組成、年齢組成

1995年6月から1996年6月まで、2ヶ月に1回、転石域、エゾノネジモク群落、アラメ海中林、無節サンゴモ群落を対象に調査した。各海藻群落の中心域(水深1~2m付近の転石域、水深2m付近のエゾノネジモク群落、水深2~4m付近のアラメ海中林、水深7~8m付近の無節サンゴモ群落)に1m²方形枠を各6枠置いて枠内のキタムラサキウニを採集した。採集した個体は研究室に持ち帰り、殻径、殻高、体重を測定した後、解剖して生殖板を取り出した。

d) 年齢査定

キタムラサキウニの生殖板に認められる輪紋は年齢形質として利用できる⁷³⁾。沢田⁷⁴⁾は、Jensen⁷⁵⁾の方法に従って生殖板を焼いて輪紋のコントラストを明瞭にする方法でキタムラサキウニの年齢査定を行っており、本研究ではこの方法を改良した次の方法で年齢を求めた。キタムラサキウニの生殖板をアルコールランプで焼き、その中から左右対称の形をしている第5生殖板を取り出した。これを接着剤でスライドガラス上に体表面側を上にして張り付けた。生殖板の横断面をみると縁辺部が体表面から体内に向かって若干内側に傾いている(図IV-3-5)ので、表面を研磨して、輪紋の幅から過去の成長を計算する場合には誤差が生じられる。そこで、研磨前に実体顕微鏡下でスケッチして、第5生殖板の幅を測定し、研磨後の測定結果との

関係式を求め、その補正を行うようにした。研磨はキシレンで透徹しながら粒度 1000 の研磨紙で行った。輪紋が明瞭に現れてきたら、実体顕微鏡下で輪紋をスケッチして輪紋幅、生殖板の幅、輪紋数を測定して個体ごとに年齢を推定した。生殖板の縁辺に輪紋が現れる時期は 8 月から 1 月の期間で、10 月には全ての個体に認められるようになる⁷⁴⁾。10 月はキタムラサキウニの着底、変態の時期でもあるので、この月を生まれた月として年齢を求めた。



図IV-3-5 キタムラサキウニの第5生殖板の水平面と横断面。
R:研磨前の生殖板の幅、R':研磨後の生殖板の幅、r:各年齢に対応する輪紋の幅、P:研磨後の水平面の位置。

3) 結 果

a)着底、変態稚仔の分布

本調査において採集された稚仔の殻径は、1995年10月4日では最頻値が350~400 μ m、1995年10月19日では450~500 μ mにあり、既報⁷⁶⁾の変態稚仔の殻径350~400 μ mと比較すると着底、変態して間もない個体であると認められる。

玉石採集によるキタムラサキウニの変態稚仔は、浅所から深所にかけて設定したすべての調査定点から採集された(表IV-3-1)。その密度は定点間で有意に偏りがあり、2回の採集とも無節サンゴモ群落であるSt. 4とSt. 5においてもっとも高密度であった。コレクターを用いた採集結果についても同様な傾向が認められ、無節サンゴモ群落に設置したコレクターでアラメ海中林のコレクターの約3倍もの個体が採集された。

表IV-3-1 天然の玉石とホタテガイ殻によるコレクターから採取したキタムラサキウニの着底・変態稚仔の密度。* χ^2 適合度検定、 $p > 0.05$ 。

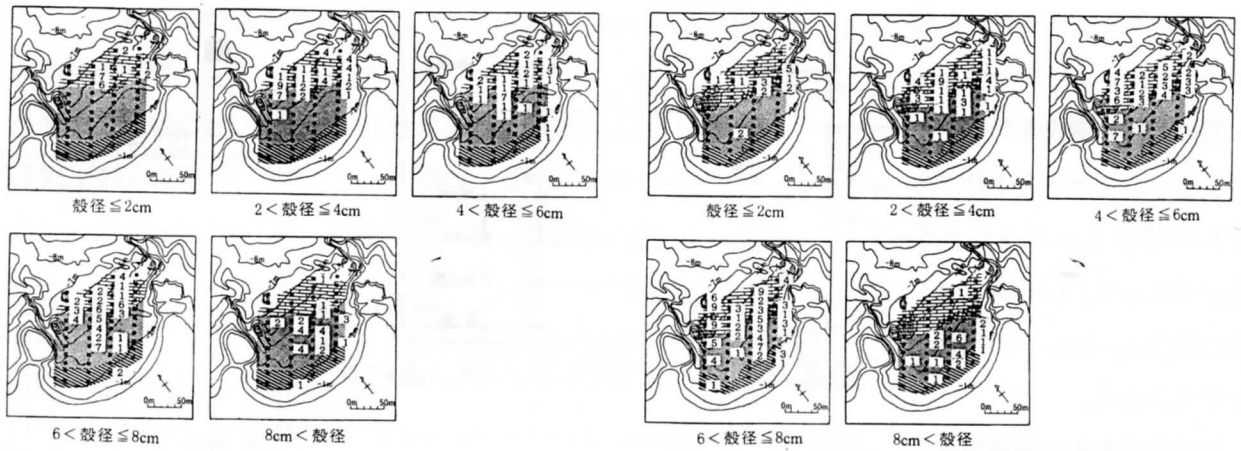
採集地点	水深(m)	群落	密度(個体数/m ²)	
			10月4日*	10月19日*
st.1	2.0	転石域	6.6	0
st.2	3.0	アラメ海中林	4.8	7.6
st.3	3.5	アラメ海中林	1.7	9.9
st.4	4.5	無節サンゴモ群落	21.7	40.4
st.5	5.5	無節サンゴモ群落	59.3	14.6

コレクター(10月4日設置、10月19日回収)

採集地点	水深(m)	群落	個体数/コレクター
st.A	3.0	アラメ海中林	48
st.B	5.0	無節サンゴモ群落	143

b)海藻群落带状構造とサイズ別分布

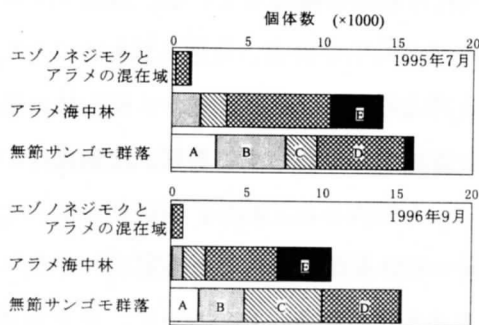
キタムラサキウニの分布は、殻径階級によって異なっていた(図IV-3-6a、b)。1995年7月の調査では殻径2cm以下の個体は、無節サンゴモ群落にのみ分布し、アラメ海中林に分布しなかった。殻径2~4cmの個体は、無節サンゴモ群落にもっとも多く分布したが、アラメ海中林にも分布が認められるようになり、殻径4~6cm、殻径6~8cmへと殻径が増大するにつれてアラメ海中林内へ分布域がより拡大していた。殻径8cmより大きい個体はその大半がアラメ海中林に分布した。1996年9月の調査においても、殻径2cm以下の個体がアラメ海中林から2m²あたり2個体認められた以外は、1995年7月の結果と同様に、殻径が大きくなるにつれて分布範囲がアラメ海中林の方へと拡大していた。



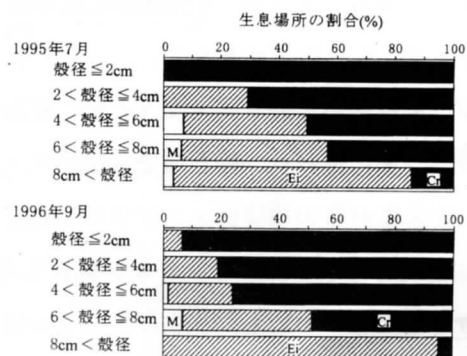
図IV-3-6a 1995年7月のサイズ別の分布。
調査定点右隣の数字は採集個体数(1m² x 2枠)。
海藻群落の凡例は図IV-2-1と同じ。

図IV-3-6b 1995年9月のサイズ別の分布。
調査定点右隣の数字は採集個体数(1m² x 2枠)。
海藻群落の凡例は図IV-2-1と同じ。

各海藻群落での各殻径範囲の個体の密度に各海藻群落の面積をかけてそれぞれ生息個体数を推定したのが図IV-3-7である。キタムラサキウニの90%以上は、アラメ海中林か無節サンゴモ群落に分布し、それぞれ約1.0万~1.5万個体であった。しかし、分布する個体の殻径組成は群落により異なり、0~6cmの個体は無節サンゴモ群落では1995年7月に60.2%、1996年9月に65.6%を占め、アラメ海中林では1995年7月に26.5%、1996年9月に22.2%を占めていた。殻径階級ごとに各群落に分布する個体数の割合を見ると、1995年7月の調査では殻径2cm以下の個体は無節サンゴモ群落だけに分布し、殻径階級が大きくなるにつれてアラメ海中林に分布する割合が大きくなっていった(図IV-3-8)。同様な傾向は、1996年9月の調査でも認められ、殻径階級が大きくなるにつれてアラメ海中林に分布する割合が大きくなっていった。



図IV-3-7 各海藻群落におけるキタムラサキウニのサイズ別の生息個体数。
A:殻径≤2cm、B:2<殻径≤4cm、C:4<殻径≤6cm、D:6<殻径≤8cm、E:8cm<殻径



図IV-3-8 キタムラサキウニのサイズ別の生息場組成。
M:エゾノネジモクとアラメの混在域、Ei:アラメ海中林、Cr:無節サンゴモ群落

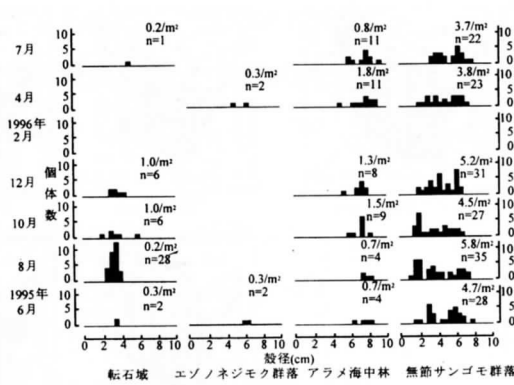
c) 海藻群落別の密度、サイズ組成、年齢組成

転石域、エゾノネジモク群落、アラメ海中林、無節サンゴモ群落におけるキタムラサキウニの密度を図IV-3-9に示した。最も密度が高い群落は無節サンゴモ群落であり、調査ごとの平均で3.7個体/m²~5.8個体/m²であった。アラメ海中林と転石域におけるキタムラサキウニの密度は、ほぼ周年分布が認められたが低く、アラメ海中林では0.7~1.8個体/m²、転石域では0~4.8個体/m²であった。エゾノネジモク群落にはほとんど分布せず、1995年6月と1996年4月にわずか2個体ずつ採集されただけにすぎなかった。

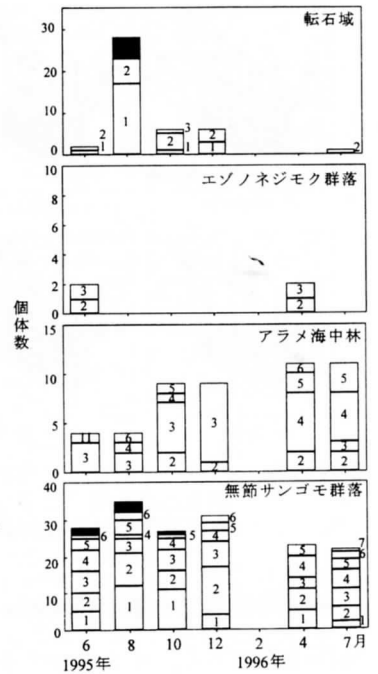
図IV-3-6a、bから推定されたように殻径組成も海藻群落によって異なっていた(図IV-3-9)。無節サンゴ

モ群落のキタムラサキウニは殻径1~8cmまでの小型から大型の個体で構成されているのに対し、アラメ海中林でのそれは殻径4cm以上の大型個体であった。転石域では、主に殻径2~5cmの小型個体が認められた。

年齢組成もまた海藻群落によって異なっていた(図IV-3-10)。小型から大型の個体すべての分布が認められた無節サンゴモ群落では、1歳から5、6歳の個体が周年分布している。大型の個体が分布するアラメ海中林では1歳の個体は認められず、2歳以上の個体となっている。小型個体が分布する転石域においては、1~3歳の個体であった。



図IV-3-9 各海藻群落におけるキタムラサキウニの密度と殻径組成。1996年2月は悪天候のためデータはない。



図IV-3-10 各海藻群落におけるキタムラサキウニの年齢組成。図中の数字は年齢、黒塗りは年齢不明。

4) 考 察

キタムラサキウニの着底、変態稚仔はどの海藻群落においても出現し、深所の無節サンゴモ群落でもっとも高密度であった。佐々木⁵³⁾も宮城県北部海域での調査により同様な現象を報告している。無節サンゴモは2次代謝産物であるジプロモメタンによってキタムラサキウニの浮遊幼生の着底、変態を誘起する³⁰⁾ため、無節サンゴモ群落から最も高密度で着底、変態稚仔が出現したと考えられる。また、アラメ海中林の最下層は無節サンゴモに覆われ、転石域でも無節サンゴモが優占しているにもかかわらず、着底、変態稚仔の密度が低かった。これらの事実はエゾアワビの着底、変態稚仔についても報告されており、着底期となった浮遊幼生の高密度分布域が無節サンゴモが優占する水深4~8mに偏っているためであると推定される⁷⁷⁾。キタムラサキウニについても同様に浮遊幼生の分布水深の偏りによると思われる。したがって、キタムラサキウニの着底、変態場所は浮遊幼生の分布水深と無節サンゴモのジプロモメタンの作用に左右され、その結果無節サンゴモ群落に多く着底すると考えられる。

キタムラサキウニの変態稚仔は、密度の違いはあっても、どの海藻群落にも認められたが、殻径2cm以下のキタムラサキウニは、深所の無節サンゴモ群落にのみ認められた(図IV-3-6a, b)。無節サンゴモ群落に認められるキタムラサキウニは、年齢組成では1歳以上の個体である。これらのことは、キタムラサキウニの着底、変態稚仔はエゾノネジモク群落、アラメ海中林では着底後1年以内にほとんど死亡するが、無節サンゴモ群落では多数生き残ることを示している。海中林での若齢個体の死亡率が高いことはニュージーランドウニ⁷⁸⁾とアメリカムラサキウニ⁷⁹⁾についても報告されている。その理由は明らかではない。

キタムラサキウニは、2歳以上になるとアラメ海中林にも認められるようになり、成長と加齢にともなって、その分布する個体数の割合は大きくなっていく(図IV-3-7, 8)。これらのことは、無節サンゴモ群落が

キタムラサキウニの加入の場であり、多数生き残ったキタムラサキウニは年齢が進むにつれて分布域をアラメ海中林へと拡大すること示している。

浅所の転石域においても低密度で変態個体が認められ(表IV-3-1)、小型で1~3歳の個体が分布する(図IV-3-9、10)。転石域は無節サンゴモ群落と同様な条件であると考えられるので、この場所においても着底、変態した個体は生き残りが、加齢にともなってアラメ海中林へ移動していくものと思われる。

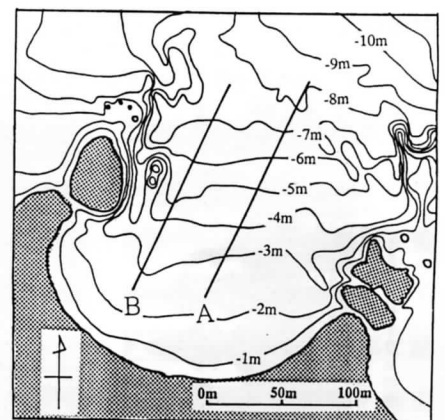
3-2. 加入後の分布域の季節変化

1) はじめに

第3節の1の結果より、無節サンゴモ群落に高密度で着底、変態したキタムラサキウニは主な分布域を無節サンゴモ群落とし、年齢が進むにつれて徐々にアラメ海中林へも分布域を広げることが明らかになった。吾妻・川井⁵⁵⁾は、北海道忍路湾においてキタムラサキウニが殻径20mm以上、1歳以上になると潮間帯周辺に限定されたホソメコンブ群落へと7月頃から索餌移動を開始することを観察し、生殖腺の発達と関連した摂食量の増大がその要因であると推定している。一方、アラメ海中林は分布下限が水深約5mまであり、ホソメコンブ群落よりも恒常的に群落が維持され⁸⁰⁾、この海藻群落帯状構造との関係ではキタムラサキウニの季節的な移動は明らかでない。この節ではアラメ海中林と無節サンゴモ群落からなる帯状構造におけるキタムラサキウニの分布域の季節変化を年齢ごとに明らかにする。

2) 方法

キタムラサキウニの採集は、1997年7月から1998年7月にかけて約2ヶ月間隔でライントランセクト調査により行った。アラメ海中林から無節サンゴモ群落にかかるように、水深約2.5mを基点とする沖出し150mのラインを、50m間隔で平行に2本(ラインA、B)設定した(図IV-3-11)。ライン上の採集地点を、アラメ海中林と無節サンゴモ群落の境界付近で採集地点が多くなるように、両群落の境界を中心とした50mの範囲では5m間隔、それ以外の場所では10m間隔に設定した。各採集地点に1m²の方形枠を2枠設定して枠内のキタムラサキウニを手で採集した。各採集地点周辺において優占している海藻を水中で記録し、谷口⁷³⁾の生活形分類に従い、ライン上の海藻群落をアラメ海中林と無節サンゴモ群落に区別した。採集したキタムラサキウニは研究室に持ち帰り、殻径、殻高、体重を測定した後、生殖板を取り出した。生殖板は70%アルコールに保存して、後日年齢査定を行った。

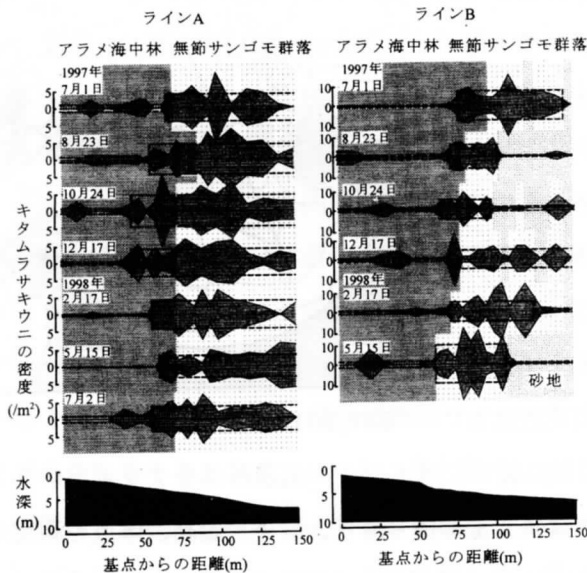


図IV-3-11 採集ラインの位置。

3) 結 果

ラインにそった密度変化を図IV-3-12に示した。ラインAではキタムラサキウニは、1997年7月では無節サンゴモ群落の70~150mの範囲に高密度域をもち、岸側のアラメ海中林にはほとんど出現しなかった。この高密度域の岸側の縁は、8月に60m地点、10月には50m地点へと、アラメ海中林内へ移っていた。1998年2月になるとこの高密度域の岸側の縁は50m地点より沖側に後退した。5月には岸側の縁がさらに60m地点へと後退した。1998年7月には、再び高密度域がアラメ海中林内へと拡大した。ラインBでは、無節サンゴモ群落の沖側に砂の流入が見られた時期があり、キタムラサキウニの高密度域の沖側の縁が季節によって変化した。高密度域の岸側の縁はラインAの場合と同様に1997年7月~10月にかけて80mから70mに移った。12月には75m地点へと後退し、2月にもそのまま75m地点にあった。5月になると65mへと移ったが、2月と同様にアラメ海中林との境界であった。

図IV-3-12で示した季節的な分布域の変化は年齢を区別せずに示している。それは、年齢ごとに区別した場合個体数が少なく、ライン上の密度の変化からキタムラサキウニの分布域の季節変化を推定することが困難であるためである。そこで、分布域の季節変化が年齢により異なるのか否かを確認するために、調査ごとにライン上の分布を年級群間、すなわち年齢間で比較した。年級群ごとにライン上の採集地点の中央値を求め、中央値の検定⁸¹⁾を行うと以下ようになった(表IV-3-2)。ラインAでは各年齢の分布域の中央値に有意差は認められなかった。ただし、1997年7月には1996年級群(0+歳)が1個体しか採集されなかったのので、検定から除いた。つまり、ラインAについては7月では0+歳を除いて年齢による違いがなく、8月からすべての年齢について分布域に違いがないということになる。ラインBでは1997年7月と1997年8月の分布域の中央値について年齢による有意差が認められた。ただし、ここではラインBの基点から終点までを対象として中央値を求めているので、次に季節的に分布域が変わる高密度域だけについて中央値を比



図IV-3-12 キタムラサキウニのライン上における分布域の季節変化。
実線は実測値、破線は区間ごとの平均値。区間ごとの平均値は各ラインの平均密度より低い値が4点連続して出現する範囲(低密度域)とそれ以外の範囲(高密度域)に分けて示した。

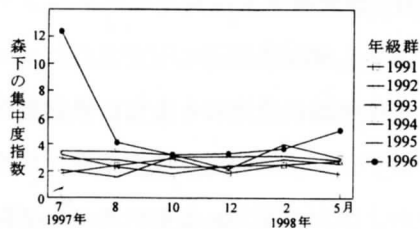
表IV-3-2 年齢による分布域の比較。表中の数値は各ライン上における年級群ごとの分布域の中央値(単位はm)と(個体数)を示す。中央値の検定、 $p>0.05$ 。

ラインA		1998						
採集日	1997							
年級群	7.1	8.23	10.24	12.17	2.17	5.15	7.2	
1991	82.5(27)	97.5(19)	112.5(13)	82.5(8)	75.0(8)	95.0(8)	70.0(10)	
1992	85.0(13)	85.0(15)	70.0(19)	75.0(23)	75.0(16)	120.0(11)	72.5(8)	
1993	90.0(20)	110.0(13)	90.0(21)	90.0(17)	80.0(15)	97.5(8)	110.0(17)	
1994	100.0(10)	95.0(6)	87.5(12)	85.0(13)	100.0(17)	100.0(14)	105.0(14)	
1995	95.0(14)	97.5(42)	110.0(27)	92.5(36)	90.0(30)	110.0(27)	90.0(21)	
1996	70.0(1)	92.5(27)	85.0(50)	80.0(27)	90.0(27)	100.0(21)	75.0(41)	
Median test	5.45	8.34	4.91	5.24	10.98	1.68	1.85	

ラインB		1998				
採集日	1997					
年級群	7.1	8.23	10.24	12.17	2.17	5.15
1991	97.5(12)	87.5(6)	113.0(2)	120.0(5)	90.0(7)	85.0(11)
1992	85.0(13)	82.5(6)	30.0(5)	116.0(6)	100.0(4)	82.5(8)
1993	95.0(35)	80.0(6)	85.0(20)	97.5(16)	120.0(13)	90.0(20)
1994	115.0(8)	10.0(7)	80.0(12)	100.0(10)	110.0(8)	80.0(14)
1995	110.0(21)	90.0(20)	95.0(17)	75.0(23)	100.0(18)	85.0(23)
1996	110.0(64)	87.5(50)	80.0(31)	90.0(61)	105.0(97)	85.0(99)
Median test	49.10*	12.70*	4.02	8.68	2.20	2.89

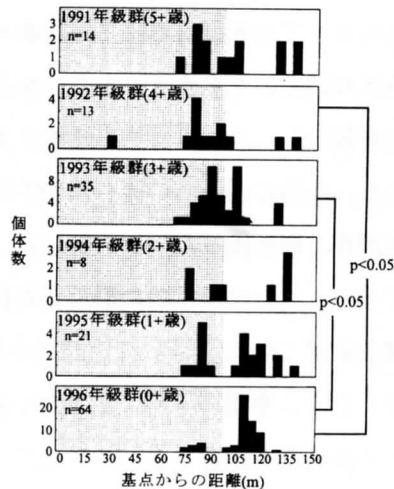
ラインB 高密度域における比較		
採集日	1997.7.1	1997.8.23
年級群	80-140m 区間	70-100m 区間
1991	100.0(11)	85.0(5)
1992	90.0(11)	80.0(5)
1993	95.0(33)	87.5(8)
1994	115.0(8)	77.5(2)
1995	110.0(20)	90.0(17)
1996	110.0(62)	85.0(48)
Median test	24.82*	8.34

較すると、1997年7月で有意差が認められた。つまり、ラインBでは1997年7月では年齢により高密度域に違いがあり、8月以降では違いがないということになる。そこで次に、



図IV-3-14 各年級群における森下の集中度指数の季節変化。

てScheffeの多重比較により、どの年級群間に有意差があるのかを検定した(図IV-3-13)。その結果、1996年級群(0+歳)と1993年級群(3+歳)、1996年級群と1992年級群(4+歳)の間に有意差が認められた。このときの1996年級群の高密度域は無節サンゴモ群落の100-120mであるのに対し、1992、1993年級群はアラメ海中林から無節サンゴモ群落にわたる75-100mであった。



図IV-3-13 1997年7月1日のラインBにおける年級群ごとの分布域(p<0.05, Scheffeの多重比較)。網掛けはアラメ海中林、白抜きは無節サンゴモ群落。

次に、無節サンゴモ群落に高密度に分布していることで1+歳以上の年級群の分布域とは異なる1997年7月における1996年級群(0+群)の分布の集中度が、他の年齢より大きいのか否かを確認するために、全採集地点についての分布の集中度を年級群ごとに計算したところ以下のようなになった(図IV-3-14)。1997年7月の1996年級群(0+歳)の森下の集中度指数は12.4と顕著に高い値を示した。しかし、8月以降にはその値は小さくなり他の年級群と変わらない数値で推移した。

4) 考 察

1996年級群(0+歳)の1997年7月の分布域が主に無節サンゴモ群落内に認められ(図IV-3-10)、8月以降は年級群による差が無く(表IV-3-2)、7月から8月にかけて分布の集中度が下がること(図IV-3-14)は、1996年級群の分布域が7月から8月にかけてアラメ海中林へと拡大することを示していると考えられる。この海域におけるキタムラサキウニの着底、変態の時期は10月であるので、無節サンゴモ群落に高い集中分布していたこの1996年級群は着底、変態してから約9ヶ月の個体ということになる。つまり、着底、変態後の最初の分布域の拡大は着底してから約9ヶ月後の7月から8月におこると言える。

1+歳以上のキタムラサキウニの主な分布域は7月には無節サンゴモ群落からアラメ海中林の縁辺部に認められた。それは8月、10月になるとアラメ海中林内へと拡大し、2月には再びアラメ海中林縁辺へと後退した(図IV-3-12)。年齢ごとにライン上の分布域を比較したところ、1+歳以上の年齢群では分布域の季節変化に違いはなかった(表IV-3-2)。つまり、1+歳以上では年齢に関係なく、季節的にアラメ海中林内へと分布域の拡大、縮小を行うと言える。一方、先に述べたように、アラメ海中林内には周年0.8~1.5個体/m²の密度でキタムラサキウニが分布する(図IV-3-9)。このことは、このようなアラメ海中林内への分布域の季節的な拡大、縮小の過程でアラメ海中林に留まる個体が現れることを意味している。

キタムラサキウニの分布域がアラメ海中林へと拡大し始める7~8月は水温が上昇する時期である(図IV-3-2)。キタムラサキウニは水温が上昇し始めると摂食量が多くなり⁸²⁾、北海道忍路湾では水温が11~21℃で

ある5~11月に摂食活動が活発になる⁸³⁾ことが報告されている。また、キタムラサキウニの摂食活動は、流速によっても制限される⁸⁴⁾。吾妻・川井⁵⁵⁾は北海道忍路湾のホソメコンブ群落と無節サンゴモ群落の带状構造において、キタムラサキウニが7月頃から潮間帯周辺に限定されたホソメコンブ群落へと索餌移動することを報告し、それはキタムラサキウニが生殖腺の発達にともない摂食量が増大することで摂食活動が活発になり、さらに深所への流れ藻の供給が低下し、また静穏な波浪条件となることが原因であると述べている。本調査で取り扱ったアラメ海中林は分布下限が水深5mとホソメコンブ群落よりも深く、群落の面積は広大であり、さらに恒常的に群落が維持されている点で異なるが、キタムラサキウニはアラメ海中林内へと分布域を広げていた。さらに、調査が行われた年の7~8月の波浪は比較的穏やかであった(図IV-3-3)ことも考えると、水温の上昇にともない摂食量が増大し⁸³⁾、摂食活動が活発になる⁸³⁾ことでキタムラサキウニはアラメ流れ藻を摂食するために、アラメ海中林内へと移動したと考えられる。

キタムラサキウニの分布域が無節サンゴモ群落側へ縮小する12月から2月は調査海域の水温が下降し、波高が高くなる時期である(図IV-3-3)。キタムラサキウニの摂食量は水温の下降とともに低下し⁸²⁾、摂食活動の活動性が低くなると報告されている⁸³⁾。吾妻・川井⁵⁵⁾は、ホソメコンブ群落と無節サンゴモ群落の带状構造において、キタムラサキウニが12月頃から浅所から深所へ移動し始める要因として、ホソメコンブの密度の低下と末枯れにより、潮間帯周辺に限定されたホソメコンブ群落周辺では食物が充足されず、さらに年間と通じて最も波浪が高くなり潮間帯では海水が強く動揺することを示している。アラメ海中林はホソメコンブ群落とは異なり、分布下限が5mと深く、この時期でもアラメ流れ藻は供給されている⁸⁵⁻⁸⁷⁾ため、無節サンゴモ群落側へ戻っていく現象には食物条件、波浪条件以外の要因が強く関係するものと思われる。エゾバフンウニ、アカウニ、アメリカムラサキウニでは、微細生息場は転石の下、岩盤の間、大型海藻の仮根部の下などであると報告されており^{56, 58, 88)}、これらの場所は快適に定位できる場所と思われる。また、アメリカオオキタムラサキウニなどでは海中林内で十分に摂食量が満たされているときには、これらマイクロハビタットに定位して流れ藻を摂食すると報告されている⁸⁸⁻⁹²⁾。さらに、Ebeling et al.⁹²⁾は、海中林内の微細生息場で流れ藻を摂食していたアメリカオオキタムラサキウニが、海中林の崩壊によって微細生息場から出てきて摂食活動を行うことを報告している。キタムラサキウニがこの様な行動を行うのか否かは明らかではない。しかし、転石の下⁹³⁾や流れ藻が集まりやすい場所⁶⁹⁾に、キタムラサキウニが集中して分布していることが報告されている。今回の調査海域においても、アラメ海中林内では岩陰などに集中して分布していた。アラメ海中林におけるキタムラサキウニの密度が、無節サンゴモ群落よりも周年低いこと(図IV-3-9)は、アラメ海中林ではこのような微細生息場が少なく、無節サンゴモ群落内に多いことを示していると思われる。この様に考えると、分布域が無節サンゴモ群落側へ縮小するこの時期には、水温が低下するにつれてキタムラサキウニの摂食量とそれともなう摂食活動が低下して、微細生息場への定位を行うようになるためにアラメ海中林内から微細生息場の多い無節サンゴモ群落側への移動が起きると考えられる。また、この時期は波高が高かったので、アラメによる掃き出し作用も関係していると思われる。以上のことから、キタムラサキウニは水温が上昇する7月頃から摂食量の増大にともなって索餌移動が活発になり、アラメ流れ藻を求めてアラメ海中林へと移動し、水温が低下する12~2月には摂食量の低下により摂食活動が低下して、快適な微細生息場へと定位するために無節サンゴモ群落へと移動が行われ、その結果としてアラメ海中林内へと季節的に分布域が拡大、縮小すると考えられる。

以上の結果をまとめると、キタムラサキウニの年齢による分布域の変化は次のようになる。キタムラサキウニは浅所から深所にかけて着底、変態を行い、無節サンゴモ群落に最も高密度に着底、変態して生き残る。着底後約9~10ヶ月になると分布域が広がり、アラメ海中林縁辺にも分布するようになる。1歳以上になると分布域が季節的に変化し、7月から8月にはアラメ海中林内へと分布域が拡大し、12月から2月にはアラメ海中林内から分布域が後退するようになる。この分布域の季節変化の過程で、アラメ海中林に留まる個体が現れる。このようなアラメ海中林内への季節的な変化は、季節的な摂食量の変化にともなって、アラメ海中林への索餌移動もしくは微細生息場への定位を行う行動を選択した結果として現れることが示唆された。

文 献

- 1) Ojeda, F. P. and Dearborn, J. H., 1989, Community structure of macroinvertebrates inhabiting the rocky subtidal zone in the Gulf of Maine: seasonal and bathymetric distribution, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 57, 147 - 161.
- 2) Neushel, M., 1967, Studies of subtidal marine vegetation in western Washington, *Ecology*, 48, 83 - 94.
- 3) Mann, K. H., 1972, Ecological energetics of the seaweed zone in a marine bay on the Atlantic Coast of Canada. I. Zonation and biomass of seaweeds, *Mar. Biol.*, 12, 1 - 10.
- 4) Underwood, A. J., Kingsford, M. J. and Andrew, N. L., 1991, Patterns in shallow subtidal marine assemblages along the coast of New South Wales, *Aust. Jour. Ecol.*, 6, 231 - 249.
- 5) Choat, J. H. and Shiel, D. R., 1982, Patterns of distribution and abundance of large brown algae and invertebrate herbivores in subtidal regions of northern New Zealand, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 60, 129 - 162.
- 6) Taniguchi, K., 1991, Marine afforestation of *Eisenia bicyclis* (Laminariaceae; Phaeophyta), *NOAA Technical Report NMFS*, 102, 47 - 57.
- 7) 谷口和也、1996、海中林造成の基礎と実践、*海藻*、44、103 - 108.
- 8) 谷口和也、1996、牡鹿半島沿岸における漸進帯海藻群落の一次遷移、*Nippon Suisan Gakkaishi*、62、765 - 771.
- 9) Lawrence, J. M., 1975, On the relationship between marine plants and sea urchins, *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 13, 213 - 286.
- 10) Mann, K. H., 1977, Destruction of kelp-beds by sea urchins: a cyclic phenomenon or irreversible degradation, *Helgol. Wiss. Meeresunters*, 30, 455 - 467.
- 11) Pearce, J. S. and Hines, A. H., 1979, Expansion of a central California kelp forest following the mass mortality of sea urchins, *Mar. Biol.*, 51, 83 - 91.
- 12) Mann, K. H., 1982, Kelp, Sea urchins and predators: a review of strong interactions in rocky ecosystems of eastern Canada, 1970 - 1980, *Neth. J. Sea Res.*, 16, 414 - 467.
- 13) Scheibling, R. E., 1984, Echinoids, epizootics and ecological stability in the rocky subtidal off

- Nova Scotia, Canada, *Helgol. Wiss. Meeresunters.*, **37**, 233 - 242.
- 14) Scheibling, R. E. and Stephenson, R. L., 1984, Mass mortality of *Strongylocentrotus droebachinsis* (Echinodermata: Echinoidea) off Nova Scotia, Canada, *Mar. Biol.*, **76**, 153 - 164.
 - 15) Harold, C. and Reed, D. C., 1985, Food availability, sea urchin grazing, and kelp forest community structure, *Ecology*, **66**, 1160 - 1169.
 - 16) Johnson, C. R. and Mann, K. H., 1988, Diversity, patterns of adaptation, and stability of Nova Scotian, *Ecol. Monogr.*, **58**, 129 - 154.
 - 17) Sebens, K. P., 1985, The ecology of the rocky subtidal zone, *Amer. Scient.*, **73**, 548 - 557.
 - 18) Steneck, R. S., 1986, The ecology of coralline algal crusts: convergent patterns and adaptive strategies, *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **17**, 273 - 303.
 - 19) Larson, B. R., Vadas, R. L. and Keser, M., 1980, Feeding and nutritional ecology of the sea urchin *Strongylocentrotus droebachensis* in Maine, USA, *Mar. Biol.*, **59**, 49 - 62.
 - 20) Wittman, J. D., 1985, Refuges, biological disturbance, and rocky subtidal community structure in New England, *Ecol. Monogr.*, **55**, 421 - 445.
 - 21) Fletcher, W. J., 1987, Interactions among subtidal Australian sea urchins, gastropods and algae: Effects of experimental removals, *Ecol. Monogr.*, **57**, 89 - 109.
 - 22) Ayling, A. M., 1981, The role of biological disturbance in temperate subtidal encrusting communities, *Ecology*, **62**, 830 - 847.
 - 23) Andrew, N. L. and Underwood, A. J., 1989, Patterns of abundance in the sea urchin *Centrostephanus rodgersii* on the central coast of New South Wales, Australia, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **131**, 61 - 80.
 - 24) Shiel, D. R. and Foster, M. S., 1986, The structure of subtidal algal stands in temperate waters, *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **24**, 265 - 307.
 - 25) Choat, J. H. and Shiel, D. R., 1982, Patterns of distribution and abundance of large brown algae and invertebrate herbivores in subtidal regions of northern New Zealand, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **60**, 129 - 162.
 - 26) Andrew, N. L., 1988, Ecological aspects of the common sea urchin, *Evechinus chloroticus*, in northern New Zealand: a review, *N. Z. Jour. Mar. Fresh. Res.*, **22**, 415 - 426.
 - 27) Andrew, N. L. and Choat, J. H., 1982, The influence of predation and conspecific adults on the abundance of juvenile *Evechinus chloroticus* (Echinoidea: Echinometridae), *Oecologia (Berl.)*, **84**, 80 - 87.
 - 28) Choat, J. H. and Andrew, N. L., 1986, Interactions amongst species in a guild of subtidal benthic herbivores, *Oecologia (Berl.)*, **68**, 387 - 394.
 - 29) Taniguchi, K. and Hasegawa, M., 1999, Cyclic succession of marine algal communities in an intralittoral zone, In "The ecological mechanism of "Isoyake" and marine afforestation" ed. Taniguchi, K., 25 - 37, Koseisyu-koseikaku, Tokyo, Japan.

- 30) Taniguchi, K., Kurata, K., Maruzoi, T. and Suzuki, M. 1994, Dibromomethane, a chemical inducer of larval settlement and metamorphosis of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus*, *Fisheries Sci.*, **60**, 795 - 796.
- 31) Steinberg, P. D., 1984, Algal chemical defense against herbivores: allocation phenolic compounds in the kelp *Alaria marginata*, *Science*, **223**, 405 - 406.
- 32) Steinberg, P. D., 1985, Feeding preferences of *Tegula funebris* and chemical defences of marine brown algae, *Ecol. Monogr.*, **55**, 333 - 349.
- 33) Steinberg, P. D. and Altena, I. V., 1992, Tolerance of marine invertebrate herbivores to brown algal phlorotannins in temperate Australia, *Ecol. Monogr.*, **62**, 189 - 222.
- 34) 谷口和也・白石一成・蔵田一哉・鈴木 稔、*Nippon Suisan Gakkaishi*, **55**, 1133 - 1137.
- 35) Kurata, K., Suzuki, M., Shiraishi, K. and Taniguchi, K., Spatane-type diterpenes with biological activity from the brown alga *Dilophus okamurai*, *Phytochemistry*, **27**, 1321 - 1324.
- 36) Kurata, K., Taniguchi, K. and Suzuki, M., 1996, Cyclozonalone, a sesquiterpene-substituted benzoquinone derivative from the brown alga *Dictyopteria undulata*, *Phytochemistry*, **41**, 749 - 752.
- 37) Kurata, K., Taniguchi, K., Takashima, K., Hayashi, I. and Suzuki, M., 1997, Feeding-deterrent bromophenols from *Odonthalia corymbifera*, *Phytochemistry*, **45**, 485 - 487.
- 38) Okutani, T. and Soyama, I., 1987, Fieldguide of marine shell-bearing mollusks, 237 pp., Kohoku shuppan, Tokyo.
- 39) Castric-fey, A. and Chasse, C., 1991, Factorial analysis in the ecology of rocky subtidal areas near Brest (West Brittany, France), *J. mar. biol. Ass. U.K.*, **71**, 515 - 536.
- 40) 大森迪夫・谷口和也・白石一成・關 哲夫、1999、海藻群落带状構造と無脊椎動物の分布、谷口和也編「磯焼けの機構と藻場修復」、62 - 72、恒星社厚生閣、東京。
- 41) 關 哲夫、1997、エゾアワビの種苗生産技術体系とその基礎となる生物学的研究、東北水研研報、(59)、1 - 71。
- 42) 佐々木 良、1994、宮城県北部海域におけるエゾアワビ浮遊幼生の加入初期過程、宮気水試研報 (9)、1 - 17。
- 43) 堀川博史・山中 紘、1982、バテイラ *Omphalius pfeifferi* (Philippi) の生態学的研究、南西水研研報、(14)、71 - 81。
- 44) 谷口和也・磯上孝太郎・小島 博、1991、アラメの2~4歳個体の生長および成熟についての観察、藻類、**39**、43 - 47。
- 45) Louis A. G., 1997, An ecological transition during juvenile life in a marine snail, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **157**, 185 - 194.
- 46) 行平英基・野田幹雄・橋本博明・具島健二、1995、スガイ *Lunella coronata coreensis* (Recluz, 1853) の分布と採餌、*J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, **34**、113 - 124。
- 47) Paine, R. T., 1969, The *Pisaster-Tegula* interaction : prey patches, predator food preference,

- and intertidal community structure, *Ecology*, **50**,
- 48) Yamazaki, A., Ishiwata, N., 1987, Population ecology of the spiny turban shell *Batillus cornutus* II. Habitats of juvenile shell, *La mer*, **25**, 184 - 189.
 - 49) 佐野 稔、1999、海藻群落帯状構造とキタムラサキウニの生活に関する生態学的研究、東北大学学位請求論文、117pp.
 - 50) 佐野 稔・大森迪夫・谷口和也・關 哲夫、1999、アラメ海中林とキタムラサキウニの生活史、谷口和也編 「磯焼けの機構と藻場修復」、73 - 83、恒星社厚生閣、東京。
 - 51) Sano, M., Omori, M., Taniguchi, K., Seki, T. and Sasaki, R., 1998, Distribution of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* in relation to marine algal zonation in the rocky coastal area of the Oshika peninsula, northern Japan, *Benthos Res.*, **53**, 79 - 87.
 - 52) 關 哲夫・佐野 稔、1998、エゾアワビ資源管理の考え方、東北水研研報、(60), 23-40.
 - 53) 佐々木良 (1992) 宮城県北部海域におけるエゾアワビ調査の現状と問題点、平成3年度東北ブロック増殖研究連絡会議報告書、101 - 112.
 - 54) 吾妻行雄, 林忠彦, 内田正文 (1989) 北海道南部沿岸におけるエゾバフソウニとキタムラサキウニ浮遊幼生の出現と産卵期. 北海道水産試験場研究報告 33, 9-20.
 - 55) 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.
 - 56) 川村一広、1973、エゾバフソウニの漁業生物学的研究、北水試報、**16**、1 - 54.
 - 57) Tegner, M. J., Dayton, P. K., 1977, Sea urchin recruitment patterns and implications of commercial fishing, *Science*, **196**, 324 - 326.
 - 58) Pearse, J. S. and Heins, H. A., 1987, Long-term population dynamics of sea urchins in a central California kelp forest: rare recruitment and rapid decline, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **39**, 275- 283.
 - 59) 宮城県水産研究開発センター、1997、平成7年度 漁海況調査報告書、宮城。
 - 60) 宮城県水産研究開発センター、1998、平成8年度 漁海況調査報告書、宮城。
 - 61) 宮城県水産研究開発センター、1999、平成9年度 漁海況調査報告書、宮城。
 - 62) 気象庁、1996、気象庁波浪観測資料、第19号、気象庁、東京都。
 - 63) 気象庁、1997、気象庁波浪資料、第1号、気象庁、東京。
 - 64) 気象庁、1998、気象庁波浪資料、第2号、気象庁、東京。
 - 65) 気象庁、1999、気象庁波浪資料、第3号、気象庁、東京。
 - 66) Harrold, C. and Pearse, J. H., 1987, The ecological role of echinoderms in kelp forests. In "Echinoderm studies", eds Jangoux, M. and Lawrence, J. M., pp 320. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
 - 67) Rowley, R. J., 1989, Settlement and recruitment of sea urchins (*Strongylocentrotus* spp.) in a sea-urchin barren ground and a kelp bed: are populations regulated by settlement or post-settlement process?, *Mar. Biol.*, **100**, 485 - 494.
 - 68) Pearse, C. M. and Scheibling, R. E., 1991, Effect of macroalgae, microbial films, and conspecifics

on the induction of metamorphosis of the green sea urchin *Strongylocentrotus droebachiensis* (Muller), *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **147**, 147 - 162.

- 69) 秋元義正・天神 瞭、1974、永崎禁漁区内のキタムラサキウニの生態について、福島水試研報、(2)、19 - 29.
- 70) Fuji, A., 1960, Studies on the biology of the sea urchin III. Reproductive Cycle of two sea urchins, *Strongylocentrotus nudus* and *S. intermedius*, in southern Hokkaido, *Bull. Fac. Fish. Hokkaido. Univ.*, **11**, 49 - 57.
- 71) 杉本 卓・田嶋健一郎・富田恭司、1982、北海道北部沿岸におけるキタムラサキウニの生殖周期、北海道水産試験場研究報告、**24**、91 - 99.
- 72) 吾妻行雄・元谷 怜・菅原義雄、1988、キタムラサキウニの生殖周期と餌料摂取について、第1報 生殖巣の季節変化、北水試報、**30**、33 - 41.
- 73) 谷口和也、1996、牡鹿半島沿岸における漸深帯海藻群落の一次遷移、日水誌、**62**、765 - 771.
- 74) 川村一広、1966、キタムラサキウニの年齢形質と成長について、北水試報、**6**、56 - 61.
- 75) 沢田 満、1977、キタムラサキウニの生態に関する研究 (I)年齢と成長、青森県水産増殖センター資料、**7**、1 - 7.
- 76) Jensen, M., 1969, Age determination of Echinoids, *Sarsia*, **37**, 41 - 44.
- 77) 川村一広、1970、エゾバフンウニとキタムラサキウニの浮遊幼生の形態変化について、北水試報、**12**、25 - 32.
- 78) 佐々木良、1994、宮城県北部海域におけるエゾアワビ浮遊幼生の加入初期過程、宮城県気水試研報、**9**、1 - 17.
- 79) Andrew, N. L., Choat, J. H., 1985, Habitat related differences in the survivorship and growth of juvenile sea urchins, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **27**, 155-161.
- 80) Rowley, R. J., 1990, Newly settled sea urchins in a kelp bed and urchin barren ground: a comparison of growth and mortality, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **62**, 229 - 240.
- 81) 谷口和也、1990、牡鹿半島沿岸におけるアラメ群落の更新過程、東北水研研報、**52**、9 - 12.
- 82) Zar, J. H., 1999, Biostatistical Analysis fourth edition, Prentice Hall, New Jersey, pp. 663.
- 83) 吾妻行雄・中多章文・松山恵二、1993、キタムラサキウニのホソメコンブに対する摂餌と同化、北水試報、**40**、21 - 29.
- 84) 吾妻行雄・松山恵二・中多章文、1996、北海道忍路湾におけるキタムラサキウニの摂食活動の季節変化、日水誌、**64**、592 - 597.
- 85) 谷中賢二・明田定満・佐藤 仁・松山恵二・吾妻行雄・中多章文、1994、ウニの摂餌活動に及ぼす物理的環境要因について、テクノオーシャン94国際シンポジウム論文集、85 - 88.
- 86) 谷口和也・磯上孝太郎・小島 博、1991、アラメ2~4歳個体の生長および成熟についての観察、藻類、**39**、43 - 47.
- 87) 谷口和也・小島 博・山田秀秋、1992、褐藻アラメの1歳個体における成長と成熟、日水誌、**59**、441 - 444.

- 88) 谷口和也・小島 博・磯上孝太郎、1993、褐藻アラメの5、6歳個体の成長と成熟、日水誌、59、1349 - 1353.
- 89) 今井利為、1995、本州中部におけるウニ類の増殖に関する研究、神奈川県水産試験場論文集、6、0 - 90.
- 90) Mattinson, J. E., Trent, A. L., Shanks, T. B. and Pearse, J. S., 1977, Movement and Feeding activity of red sea urchins (*Strongylocentrotus franciscanus*) adjacent to a kelp forest, *Mar. Biol.*, 39, 25 - 30.
- 91) Dean, T. A., Schroeter, S. C. and Dixon, J. D., 1984, Effects of grazing by two species of sea urchins (*Strongylocentrotus franciscanus* and *Lytechinus anamesus*) on recruitment and survival of two species of kelp (*Macrocystis pyrifera* and *Pterygophora californica*), *Mar. Biol.*, 78, 301 - 313.
- 92) Harrold, C. and Reed, D. C., 1985, Food availability, sea urchin grazing, and kelp forest community structure, *Ecology*, 66, 1160 - 1169.
- 93) Ebeling, A. W., Laur, D. R. and Rowley, R. J., 1985, Severe storm disturbances and reversal of community structure in a southern California kelp forest, *Mar. Biol.*, 84, 287 - 294.
- 94) 辻 秀二・葭矢 護・田中雅幸・桑原昭彦・内野 憲、1989、若狭湾西部沿岸海域でのキタムラサキウニの分布と生殖巣の季節的变化、京都海洋センター研究報告、12、15 - 21.