

海中林造成の基礎と実践

谷口和也

水産庁東北区水産研究所 (985 宮城県塩釜市新浜町 3-27-5) *

Kazuya Taniguchi 1996: Fundamental and practice of marine afforestation. Jpn. J. Phycol. (Sôri) 44:103-108.

Recent studies on the succession of marine algal communities in the sublittoral zone have contributed to the development of marine afforestation technology in coralline flats called "Isoyake" where the crustose corallines are dominated. Coralline flats enlarge its area when the communities of large perennial brown algae that form marine forest are reduced by the combined hydrographical factors of high temperature and/or low nutrients. Succeedingly, destructive grazing by dense populations of herbivores such as sea urchin maintain coralline flats. Since dibromomethane, the secondary metabolite of crustose corallines induces normal metamorphosis of sea urchin larvae, an enforced grazing pressure sustain coralline flats. Marine afforestation in coralline flats reduce grazing pressure at the primary stage due to the growth of large annuals. This relative decrease in grazing pressure drives algal succession towards the final marine forest stage.

Key Index Words: algal succession, coralline flat, Isoyake, marine afforestation, marine forest

Kazuya Taniguchi, Shinhama 3-27-5, Shiogama, Miyagi 985, Japan.

はじめに

日本沿岸の漸深帯岩礁海底には、浅所に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が、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 (Ayling 1981) が形成されている。海域によっては、海中林とサンゴモ平原との境界域に小型多年生海藻の優占する草原が認められる。海中林は、陸上森林以上の高い生産力 (吉田 1970, 有賀 1974, 谷口・山田 1978, Yokohama *et al.* 1987, 谷口・山田 1988) によって、アワビ、サザエ、イセエビなど重要な水産生物の漁業生産を支えている。このため、海中林が衰退してサンゴモ平原が拡大、持続すれば、水産生物の漁獲量が著しく低下するので、古くから磯焼け (遠藤 1911) と呼ばれていた。ここでは、海中林とサンゴモ平原とを対極とする海藻群落の変動機構についての生態学的理解と、その理解にもとづいてサンゴモ平原に海中林を造成し、磯焼けを克服した実践例を紹介する。

磯焼けの発生海域と原因

海中林やテングサ群落が衰退することによって磯焼けが発生したり、あるいは現在でも持続している海域は、Fig. 1 に示したように 25 道県に及び、その大部分は外洋域に面している (柳瀬 1981)。

これまで、海域によって異った多くの磯焼けの原因が報告されているため (田村 1951)、磯焼けについての統一した生態学的理解が困難な印象を与えている。しかし、原因を自然の生態学的要因と人為的要因に分けて整理すれば (Table 1) 理解が可能になる (谷口ら 1995)。

生態学的要因は、地史的時間の中で確立してきた海藻群落を最も主要な一次生産者とする岩礁域固有の生物群集の変動をもたらす必然的、可逆的な条件である。無機環境の変化は、相対的に偶然な一時的変化も含み、生物の生存と再生産に直接影響を及ぼすため、磯焼け発生の主要な要因とみなされる。遠藤 (1911) が磯焼けの記載の中で無節サンゴモも含めて死亡する海藻と残存する海藻を認めているのは、環境変化に対して海藻毎に生存の生理学的閾値が異なる結果であることを示している。生物の影響は、環境変化によって生物種間関係が変化することを示しており、主として磯焼けの持続に係わる要因である。

* 現住所：981 宮城県仙台市青葉区堤通雨宮町 1-1 東北大学農学部生物海洋学講座

* Present address : Laboratory of Biological Oceanography, Faculty of Agriculture, Tohoku University, Tsutsumidori-Amamiya, Aobaku, Sendai, Miyagi 981, Japan

Table 1. Cause of marine forest decline

I. Ecological factors	II Artificial factors
1. Environmental change	1. Over harvest
1) Hydrographic variation (temperature, nutrient, wave action etc.)	2. Low of transparency by pollution
2) Geophysical change (tsunami, eruption, flood waters etc.)	3. Suspension of silt and drift sand
	4. Waste water from mine factories
2. Biological effects	5. Oil pollution
1) Grazing by herbivorous animals	6. Synthetic detergent (?)
2) Inhibition of algal growth by crustose coralline red algae	7. Agricultural chemicals (?)

(Taniguchi et al. 1995)

人為的要因は、海藻ばかりでなく沿岸生物すべてに偶然的に生存条件を奪い、しかもその要因が取り除かれな限り最終的にはすべての生物を死滅に追い込む不可逆的な過程をたどる。したがって、これらの要因は生態学的要因と類似した現象を示すが、生態学的要因とは決定的に異なり、環境破壊そのものである。この要因には、過剰な収穫や、陸上森林の過剰な伐採によって沿岸に大量の淡水や土砂が流入するなど生態学的要因と区別するのに困難な例もある。地球温暖化のように人間活動が地球規模で環境に影響する事態が憂慮される現在 (谷口 1991)、要因を区別するのにさらに困難さを増している。しかし、人為的要因は個々の要因を明確にして環境修復技術を開発すれば人間自身の手で取り除くことができる。この場合も海藻群落の変動機構を生態学的に理解することが前提となる。

磯焼けの発生と持続

磯焼けは、海況変動に対応して生物種間関係が変化する結果、海中林とサンゴモ平原とが相互に拡大と縮

小を繰り返すサイクリックな遷移の過程 (Fig. 2) でサンゴモ平原が拡大、持続した結果起る現象である (谷口ら 1995)。

磯焼けをもたらすサンゴモ平原の拡大は、世界各地ではほぼ共通する高水温、低栄養の海況下で海中林が衰退した結果として観察されている。日本の太平洋沿岸に主に分布するアラメ、カジメ海中林の場合は、黒潮蛇行期など暖流が強勢な海況下で死亡率が高まり、加入率が低下する結果衰退する (河尻ら 1981, Yokohama et al. 1987, Taniguchi 1991)。過去 50 年近くも磯焼けが持続していた北海道日本海沿岸では対馬暖流の流量増加による温暖化がホンメコンブ群落の衰退をもたらしたと推定されている (北海道 1994)。北アメリカ沿岸のオオウキモ海中林の衰退もエル・ニーニョ現象の発生が引き金となっている (Tegner and Dayton 1987)。また、高水温の海況下では、しばしば発生する台風などの大きな時化にともなう強い波動によっても、藻体が海底から大量に離脱して海中林は崩壊する (Tegner and Dayton 1987)。

浅所へ拡大したサンゴモ平原は、優占する無節サンゴモが揮発物質、ジプロモメタンを分泌してウニなど植食動物の着底、変態を誘起して集め (Fig. 3. Taniguchi et al. 1994)、それらの高い摂食圧で他の海藻を排除して持続する。無節サンゴモは、自らの平原をウニの発生の場として提供するとともに、ウニの高い摂食圧を利用して維持するといえよう。

他方、無節サンゴモは生長にともなって表層の死細胞を剥離していくので、この作用によって他の海藻の着生を阻害してサンゴモ平原を持続させるとの考えもある (Masaki et al. 1984)。しかし、無節サンゴモの着生阻害作用は着生する海藻の種類と海況に対応して温度依存的に発現するので (谷口 1994)、サンゴモ平原の持続にとって重要ではない。ウニなど植食動物の存在は表層の死細胞を除去する役割によって無節サンゴモの生長に寄与していると考えられる。



Fig. 1. The areas recorded marine forest decline (Yanase 1981).

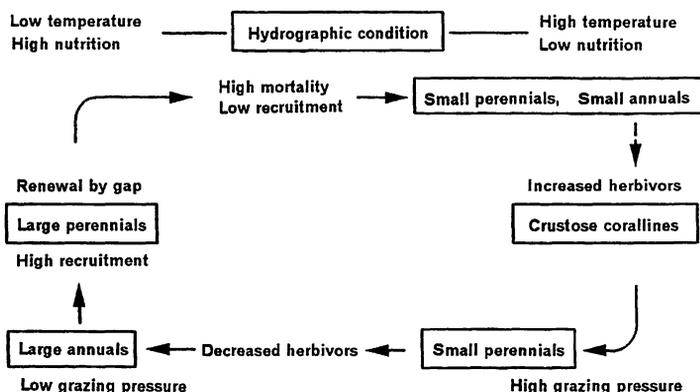


Fig. 2. Cyclic succession of marine algal communities in the sublittoral zone (Taniguchi *et al.* 1995).

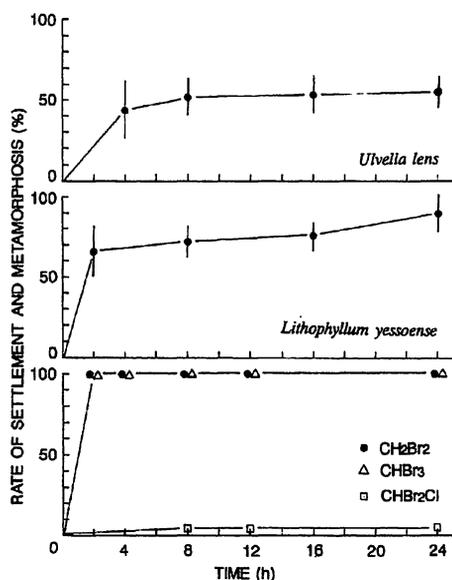


Fig. 3. Rate (%) of sea urchin, *Strongylocentrotus nudus* larvae settled and metamorphosed in response to substrates of live *Ulvella lens* (top), live *Lithophyllum yessoense* (middle), and solutions of dibromomethane (CH_2Br_2), tribromomethane (CHBr_3) and chlorodibromomethane (CHBr_2Cl) (bottom). solid circles and empty symbols represent metamorphosis and settlement, respectively (Taniguchi *et al.* 1995).

海中林の回復

サンゴモ平原から海中林の形成に至るには、植食動物に対して化学的防御物質を生産する小型多年生海藻による摂食圧の排除、次いで大型1年生海藻による摂食圧の吸収によって大型多年生海藻の発芽個体が保護される過程をたどる (Fig. 2)。着生阻害作用をもつ無節サンゴモ上には、毎年冬～春季には植食動物の摂食

活性の低下も関連して付着珪藻やヒトエグサ、アナオサなど短命な小型1年生海藻の生育が常に認められる。これらに対して、アミジグサ科褐藻やフジマツモ科紅藻に代表される小型多年生海藻は、テルペン (Fig. 4) やフェノールなど植食動物に対する化学的防御物質を生産してサンゴモ平原に高密度に生息する植食動物を排除し、長期にわたって草原を形成する。

化学的防御物質を生産する海藻として、東北地方太平洋沿岸ではアビやウニを排除することからケカツグサ (凶作草) と呼ばれるフクリンアミジ (谷口ら 1989, 1992b)、北海道日本海沿岸ではマギレンソとエゾヤハズ (白石ら 1991, 1992)、本州日本海沿岸ではアミジグサとシワヤハズ (谷口ら 1993)、西日本沿岸ではウミウチワとウスバウミウチワが明らかにされている。これらの海藻は、光条件が良好で植食動物が高密度に生息するサンゴモ平原に生育の場を見出し、化学的防御物質を獲得して自らの草原を維持することを可能にした。また、小型多年生海藻が形成する草原は、摂食圧を排除する自らの維持機構によって後達の大型海藻の侵入を保障し、海中林の形成を促進すると考えられる。

小型多年生海藻の草原は、高密度に形成されると大型海藻の侵入を妨害する傾向も認められる。しかし、低水温の海況下でコンブやワカメなど大型1年生海藻が速やかに高密度の群落を形成して小型多年生海藻を排除する (Taniguchi 1991)。大型1年生海藻は高い生長速度と高密度の群落によって摂食圧に対抗していると考えられる。

一年未満で消滅するこれらの群落は、同時に発芽して海中林を構成するアラメ、カジメなど寿命が長く生長がおそい大型多年生海藻に対する発芽段階での摂食

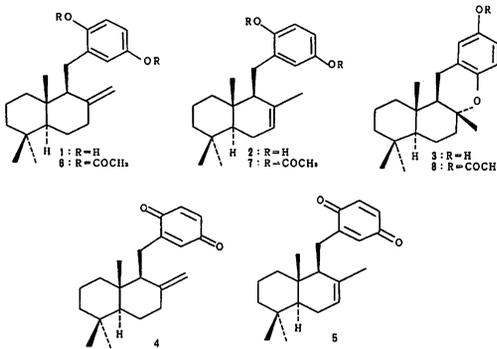


Fig. 4. Chemical structures of active sesquiterpene derivatives, 1-5 obtained from the brown alga *Dictyopterus undulata* (Taniguchi et al. 1993).

圧を吸収する役割を果たすことによって海中林の形成を促進する。この知見は、アラメ、カジメ海中林の造成に応用されている (Taniguchi 1991)。

海中林の維持

海中林は、化学的防御物質としてフロロタンニンを生産して植食動物を排除するとともに、ギャップ更新によって安定的に維持される。

海中林を構成する大型多年生海藻は共通して水溶性のポリフェノール化合物、フロロタンニン (谷口ら 1991) を生産するが、生長が速い大型1年生海藻は生産しない (谷口ら 1992)。また、多年生海藻の中でもツルアラメのように藻体が小型の種で最も多く、アラメのように大型の種で最も少ないという適応的な化学的防御機構を示している (谷口ら 1992)。しかし、フロロタンニンは水溶性なので藻体が死亡すると失われる (谷口ら 1992a)。アワビやウニが生育している藻体を直接摂食せずに脱落して流れ藻となった藻体や側葉を主に摂食するのはこのためである。

海中林は、すべての年齢群がモザイク的に分布して構成されている (谷口・鬼頭 1988)。このため、高齢

個体が死亡して密度が低下し、林床に光が差し込むようになった場所 (ギャップ) では後継群が顕著に形成されるようになる。海中林は、場所的に高齢個体の死亡と後継群の形成を繰り返して全体としては安定的に維持されている (Maegawa and Kida 1989, Maegawa et al. 1988, 谷口 1990)。この機構は陸上森林と同様なギャップ更新である。アラメ海中林では、ギャップ更新を利用して満2歳以上の大型個体を5個体/m²以下に制御する管理によって高い生産力の下に安定的に維持できることが明らかにされている (谷口 1990a)。しかし、死亡率が高く、加入率が低い高水温の海況が持続すれば、海中林はギャップの拡大によって衰退し、サンゴモ平原が拡大する。

海中林の造成

海中林の造成は、1) 種苗の生産と供給、2) 着生基質の整備、3) 種苗の保護育成の各要素技術からなり (Table 2)、中でもサンゴモ平原の持続要因としての摂食圧対策である種苗の保護育成が最も重要である (谷口ら 1995)。

植食動物が生息できない砂浜海域では、水産生物の漁場拡大を目的に天然石やコンクリートブロックによる着生基質の整備だけで、近隣の海中林から供給される生殖細胞が着生して容易に海中林が形成される (川崎・寺脇 1994)。

サンゴモ平原に海中林を造成するためには、植食動物の年間摂食量を経験的に海中林の年間純生産量の1/3~1/4以下に制御する必要があるとされる (高間ら 1981)。カリフォルニア沿岸では衰退したオオウキモ海中林を定期的なウニの駆除によって回復させた (North 1971)。日本では東北地方沿岸でサンゴモ平原から植食動物の駆除を継続するとともに、マコンブをロープ養殖して残存する植食動物への餌料供給と成熟した藻体からの遊走子の供給によってマコンブ群落の形成に成功した (菊地ら 1979)。しかし、この実験で最初に優占群落を形成したのはアカモクであり、マコンブ群落の形成は親潮が強勢な寒冷な年 (奥田 1986)

Table 2. Elements of marine afforestation technology

I. Production and supply of seed and seedlings	II. Preparation of substratum	III. Protection of seeds and seedlings
1. Transplantation of matured adult	1. Establishment of artificial reefs	1. Removal of herbivorous animals
2. Mass-scattering of zoospores, gametophytes and young sporophytes	2. Blasting of rocks	2. Reduction of grazing pressure by other algae
3. Long-line culture and sea bottom transplantation of sporophytes	3. Destruction of other algae	3. Access obstruction against herbivorous animals
		4. Enclosure of seedlings by net
		5. Utilization of natural chemicals

(Taniguchi et al. 1995)

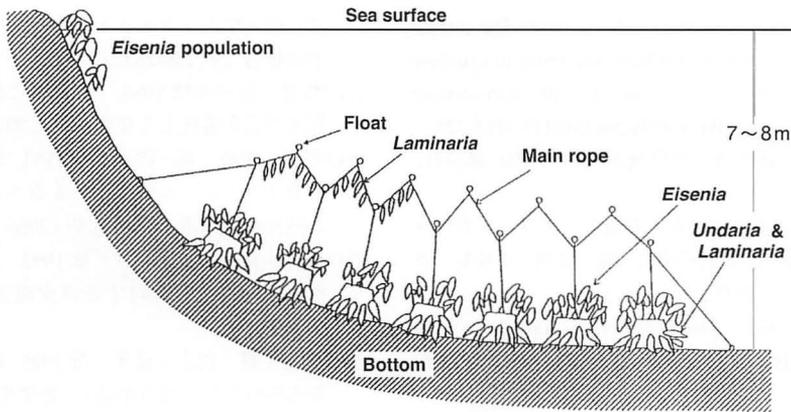


Fig. 5. Schematic diagram of marine afforestation of *Eisenia bicyclis* (Taniguchi 1989).

まで待たねばならなかった。無節サンゴモのマコンブに対する着生阻害作用の低下とマコンブの最適な繁茂条件は寒冷な海況であることが分かる。

磯焼けが問題化していた北海道日本海沿岸ではキタムラサキウニの駆除の継続によって日本海特産種のフシジモク優占の海中林の形成をみた(北海道1994)。ここで当初期待されたホソメコンブが生育しなかったのは無節サンゴモの着生阻害作用が発現する温暖な海況にあったことは明らかである。その後の北海道におけるウニ駆除事業によって寒冷な年や冬季に低温化する内湾においてはホソメコンブ群落の形成が確認されている。これら事業規模での海中林造成の成功によって、北海道日本海における磯焼けは“森林伐採による鉄分不足”であるとする説(松永1993)は全く根拠を失った。

アラメ、カジメ海中林の造成は、徳島県では海藻礁に植食動物の這い上り防止装置を取り付けること(中久1981)によって、また長崎県では植食動物の駆除と海面近くに設置した施設から成熟した藻体の垂下による遊走子の供拾(四井・前迫1993)によって成功している。東北地方沿岸においては、アラメ海中林の造成に際して生長が速い大型1年生海藻のワカメ・マコンブの人工種苗をアラメ種苗とともに移植する方法が実施され成果を挙げている(Taniguchi 1991)。この場合、海藻礁の中～下部にワカメやマコンブの種苗を移植して植食動物への餌料供給と這い上り防止を図るとともに、マコンブのロープ養殖を併用して生長がおそいアラメ種苗に対する摂食圧を低減させた(Fig. 5)。これは、海中林の形成過程にもとづいて生長のおそいアラメ種苗を保護する技術が有効となった例である。この技術の行使によって約1,000m²の造成された海中林の生産力にもとづいて1t近いエゾアワビの生産を可能と

した。今後、化学的防御物質を生産する小型多年生海藻を利用して植食動物を排除する方法の開発が期待される。

引用文献

- 有賀祐勝 1974. 資源としての海藻. 遺伝 28 : 49-54.
- Ayling, A. M. 1981. The role of biological disturbance in temperate subtidal encrusting communities. *Ecology* 62 : 830-847.
- 北海道 1994. 海域特性総合利用技術開発調査報告書(磯焼けグループ). 1-68. 海域特性総合利用技術開発調査検討委員会(磯焼けグループ)事務局, 北海道水産部栽培漁業課.
- 河尻正博・佐々木正・影山佳之 1981. 下田市田牛地先における磯焼け現象とアワビ資源の変動. 静岡県水産試験場報告 15 : 19-30.
- 川崎保夫・寺脇利信 1994. 藻場の造成. 74-85. 磯部雅彦(編) 海岸の環境創造, ウォーターフロント学入門. 朝倉書店, 東京.
- 菊地省吾・浮 永久・秋山和夫・鬼頭 鈞・菅野 尚・佐藤重勝・桜井喜十郎・鈴木 博 1979. アワビ餌料藻類の造林技術開発に関する研究. 浅海域における増養殖漁場の開発に関する総合研究. 農林水産技術会議事務局研究成果 116 : 129-189.
- Maegawa, M. and Kida, W. 1989. Regeneration process of *Ecklonia* marine forest in the coastal area of Shima peninsula, central Japan. *Jpn. J. Phycol.* 37 : 194-200.
- Maegawa, M., Kida, W., Yokohama, Y. and Aruga, Y. 1988. Comparative studies on critical light conditions for young *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava*. *Jpn. J. Phycol.* 36 : 166-174.

- Masaki, T., Fujita, D. and Hagen, N. T. 1984. The surface ultrastructure and epithelium shedding of crustose coralline algae in an "Isoyake" area of south western Hokkaido, Japan. *Hydrobiologia* 116/117: 218-223.
- 松永勝彦 1993. 森が消えれば海も死ぬ. 1-190. 講談社, 東京.
- 中久義昭 1981. 藻場・海中林の造成—アラメ・カジメ場. 116-129. 日本水産学会(編) 藻場・海中林. 恒星社厚生閣, 東京.
- North, W. J. 1971. The biology of giant kelp beds (*Macrocystis*) in California. *Nova Hedwigia Beihefte* 32: 1-600.
- 奥田邦明 1986. 1984年の異常冷水現象の発生過程について. 東北水研研報 48: 87-96.
- 白石一成・谷口和也・蔵多一哉・鈴木 稔 1991. 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.
- 白石一成・谷口和也・蔵多一哉・鈴木 稔 1992. 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.
- 高間 浩・児玉正碩・山内幸児 1981. 藻場造成技術(技術論). 43-66. 水産庁研究部研究課(編), 昭和55年度指定調査研究, 海中林構築物周辺の水産生物の資源生態に関する事前研究報告書(海藻関係).
- 田村 正 1951. 磯焼け対策の重要性. 北水試月報 8: 28-36.
- 谷口和也 1989. アラメ海中林の造成と管理. 農林水産技術会議事務局, マリーンランニング計画技術指導書シリーズ 2: 1-7.
- 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.
- 谷口和也 1990a. アラメ群落の後継群形成に及ぼす間引効果. 日水誌 56: 595-597.
- 谷口和也 1991. CO₂ 気候変化と増・養殖業への影響—藻類. 農業および菌芸 66: 215-220.
- 谷口和也 1994. 海中林の維持管理技術の開発. 農林水産技術会議事務局, バイオコスモス計画平成5年度研究報告 245-255.
- Taniguchi, T. 1991. Marine afforestation of *Eisenia bicyclis* (Laminariaceae: Phaeophyta). NOAA Technical Report NMFS 102: 47-57.
- 谷口和也・鬼頭 鈞 1988. アラメ群落における年級群組成の変動. 日水誌 54: 1583-1588.
- 谷口和也・山田悦正 1978. 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.
- 谷口和也・山田秀秋 1988. 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.
- 谷口和也・蔵多一哉・鈴木 稔 1991. 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.
- 谷口和也・蔵多一哉・鈴木 稔 1992. 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.
- 谷口和也・關 哲夫・蔵多一哉 1995. 磯焼けの機構と克服技術としての海中造林. 野生生物保護 1: 37-50.
- 谷口和也・白石一成・蔵多一哉・鈴木 稔 1989. 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.
- 谷口和也・秋元義正・蔵多一哉・鈴木 稔 1992a. 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.
- 谷口和也・蔵多一哉・鈴木 稔・白石一成 1992b. 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.
- 谷口和也・山田潤一・蔵多一哉・鈴木 稔 1993. 褐藻シワヤハズのエゾアワビに対する摂食阻害物質. 日水誌 59: 339-343.
- Taniguchi, K., Kurata, K., Maruzoi, T. and Suzuki, M. 1994. Dibromomethane, a chemical inducer on settlement and metamorphosis of the sea urchin larvae. *Fisheries Science* 60: 795-796.
- Tegner, M. J. and Dayton, P. K. 1987. El Niño effects on southern California kelp forest communities. *Advances in Ecological Research* 17: 243-279.
- 柳瀬良介 1981. 磯焼けの起こる要因および回復しない要因(原因論). 9-39. 水産庁研究部研究課(編), 昭和55年度指定調査研究, 海中構築物周辺の水産生物の資源生態に関する事前研究報告書(海藻関係).
- 遠藤吉三郎 1911. 海産植物学. 1-748. 博文館, 東京.
- Yokohama, Y., Tanaka, J. and Chihara, M. 1987. Productivity of the *Ecklonia cava* community in a bay of Izu peninsula on the Pacific coast of Japan. *Bot. Mag. Tokyo*, 100: 129-141.
- 吉田忠生 1970. 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.
- 四井敏雄・前迫信彦 1933. 対馬東岸の磯焼け帯における藻場回復実験. 水産増殖 41: 67-70.