

古環境指標としての石灰藻

井龍 康文¹⁾・松田 伸也²⁾

1. はじめに

炭酸塩堆積物は、主に炭酸塩骨格を有する生物の遺骸からなる。それらの生物のうち、造礁サンゴ・石灰藻・底生有孔虫等は、年代や堆積環境の決定に有効であるため、炭酸塩堆積物は古海洋環境の変化や地殻変動の推定といった地球科学の中心的課題を解明するために重要な研究対象とされてきた。本論では、新生代の代表的な石灰藻である無節サンゴモと *Halimeda* (本論では、さぼてんぐさ属に含められる種群を *Halimeda* と略記する) の古環境指標としての有用性について、簡単に紹介する。

なお、本論では我々の研究をいくつか紹介するが、それらの研究が行われた後に種名が確定された種や属名が変更された種が存在するため、ここでは最新の分類学的知見に基づく種名を記述した。

2. 無節サンゴモ

2.1 無節サンゴモとは

サンゴモ類は細胞壁に高マグネシウム方解石を沈着させ、藻体を岩石のように硬くする特異な藻類であり、熱帯から寒帯まで、潮間帯から透光帯下限までの広い範囲に分布している。サンゴモ類は石灰化していない膝節をもつ有節サンゴモと、膝節をもたない無節サンゴモに大別でき、無節サンゴモには皮殻型から樹枝状・リボン束状のものなど、様々な形態のものがある。サンゴ礁において、有節サンゴモは主に砂粒や細礫の生産者であり、

無節サンゴモは砂粒・礫のほか原地成礁岩の形成に関与している。

サンゴモ類は、従来カクレイト目サンゴモ科とされており、膝節の有無、四分(または二分)胞子囊窩の胞子放出孔が単一か複数か、隣り合う細胞列糸の連絡様式が細胞融合によるか第二次連絡孔によるかにより6亜科に分けられ (Johansen, 1976)、各属は栄養組織の細胞配列様式を重視して区分されていた。現在では、サンゴモ目とし (Silva and Johansen, 1986)、それを四分胞子囊の分裂様式が十字型か環形かで、エンジイモ科 (Sporolithaceae) とサンゴモ科 (Corallinaceae) の2科に分け (Verheij, 1993)、サンゴモ科をさらに8つの亜科に区分する見解が有力である (Woelkerling *et al.*, 1996)。

2.2 現世無節サンゴモの分布-琉球列島を例にして-

(1) 礁原から礁斜面の無節サンゴモ

日本における1970年代以降の無節サンゴモ研究の興味は、古環境指標をつくるために、浅礁湖 (= 礁池) から陸棚までのサンゴモ群落の組成とその分布を明らかにすること、および炭酸塩の生産量という堆積学的な面の理解のために遷移・成長速度・堆積速度を明らかにすることの2点にしばられていた。この20年間で、琉球列島近海は世界的にみても相対的にサンゴモ研究の進展したフィールドのひとつとなっている。

琉球列島沿岸の裾礁は、海岸と礁縁に平行に、海浜から浅礁湖・内側礁原・礁嶺・外側礁原・礁斜面に区分される。造礁サンゴと同様に、無節サンゴモ群落にも、地形の帯状分布に対応して帯状

1) 東北大学大学院理学研究科:
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉
2) 琉球大学教育学部

キーワード: 石灰藻, 無節サンゴモ, サンゴモ球, 石灰藻球, *Halimeda*, 琉球群礁, 琉球列島

分布がみられる。

浅礁湖内の礁岩はそのほとんどが塊状・樹枝状のサンゴに由来する。礁岩上の無節サンゴモ群落は、礁斜面上部と同様に、皮殻型の *Hydrolithon onkodes*, *Pneophyllum conicum*, *Lithophyllum inspidum* を優占種とし、樹枝状の *Lithophyllum tamiense*, *Neogoniolithon variable*, *Lithophyllum* sp. 等が伴ってみられる。塊状サンゴ起源のあるいは更新統石灰岩の平坦な底質には樹枝状の *Neogoniolithon frutescens* が多くみられる。これらの樹枝状サンゴモはしばしば非固着性の団塊となる。その他の非固着性サンゴモ球として、多くの浅礁湖・内側礁原で *Mesophyllum erubescens* がみられるほか、石垣島の川平湾口水路には *Lithophyllum pallescens* がほとんど単一種の球状団塊として密集して分布している。

琉球列島のサンゴ礁の礁嶺と外側礁原の多くは干潮時に水面上に露出する。礁嶺の最高部は平均低潮位よりも数十 cm 高く、無節サンゴモは生育していない。外側礁原は、その下限がほぼ平均低潮位にあたり、サンゴは多量に生育しているものの、無節サンゴモは潮だまりにわずかに散見される程度である。このように、琉球列島の礁縁の潮間帯環境には無節サンゴモがほとんど生育していないことが特徴である。石垣島川平の礁嶺の表面直下のサンゴ・サンゴモ試料の放射性炭素年代は、この礁嶺が 1,500～3,000 年前の相対的高海水準時の礁の突出部の残存地形であることを示している (Konishi and Matsuda, 1980)。このような礁嶺はしばしば石灰藻嶺と誤って記されていた (例えば、堀, 1980)。

Iryu and Matsuda (1988) は、石垣島米原沖卓礁の南側礁斜面で *H. onkodes*, *H. reinboldii*, *P. conicum*, *N. cf. myriocarpum*, *N. variable*, *L. inspidum*, *Lithophyllum* sp. A, *Mesophyllum purpurascens* について、深度分布の定量調査を行った。凹凸の少ない礁岩の表面では、*H. onkodes*, *L. inspidum* が 10m 以浅の群落で優占種であったが、それらは水深が増すごとに出現頻度を減じ、20m をこえると出現しなかった。*N. cf. myriocarpum* と *N. variable* は水深 15m に出現のピークがあり、30m 以深では分布が認められなかった。これらのことから、彼らは礁斜面の無節サンゴモ群落

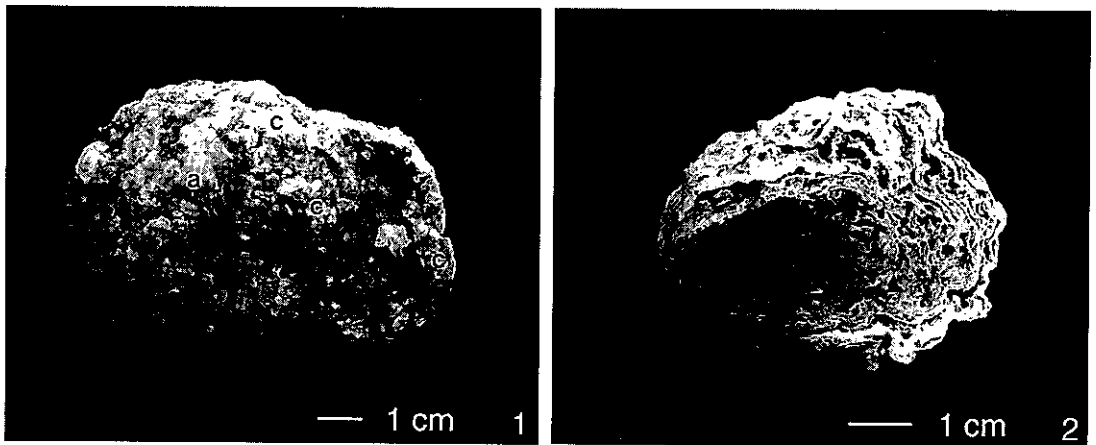
を、1) 水深 15m までの *H. onkodes* および *L. inspidum* によって特徴づけられる群落、2) 水深 15～25m の *N. cf. myriocarpum* によって特徴づけられる群落、3) 水深 25m 以深の群落に区分した。また彼らは、*H. onkodes* をはじめとする主要種は、インド洋・太平洋の熱帯海域に広く分布するので、3 群落の帯状分布は同海域で共通して認められる可能性があることを指摘した。

(2) 陸棚の無節サンゴモ

単一個体の藻体として、あるいは複数種の無節サンゴモの硬組織が集合して構成する球状・亜球状の団塊をサンゴモ球 (rhodolith) と称する (第 1 図)。琉球列島の陸棚および陸棚斜面上部では、無節サンゴモと皮殻型底生有孔虫 *Acervulina inhaerens* によって、きわめて大量のサンゴモ球がほぼ原地成の状態で形成され、堆積しつつあることが明らかとなっている (井龍, 1984; Tsuji., 1993; Iryu et al., 1995)。

沖縄本島の西側では、サンゴモ球は、孤立した堆の頂上部を含む水深 60～80m 面と 100～120m 面上とその外縁斜面を広く覆っており、その分布下限は 135m に達している (松田ほか, 1992)。このサンゴモ球は球状・楕円体状の外形を有するものが多く、最大のもは直径 15cm に達する。多くのサンゴモ球の断面では、皮殻型無節サンゴモと *A. inhaerens* の遺骸が重なりあった同心円構造が認められる。一般に、サンゴや貝のように肉眼で識別し得る大型生物遺骸の核はみられない。内部は生物侵食により多孔質になっており、その孔隙が未固結堆積物で満たされている場合もあるが、多くの場合、生物侵食による孔隙や個体間の隙間は、膠結した底生有孔虫・軟体動物・こけ虫類・棘皮動物などの破片からなる砂質の石灰質堆積物で満たされており、サンゴモ球全体が堅牢となっている。サンゴモと *A. inhaerens* の個体間の隙間や *A. inhaerens* の室には、海中膠結作用により晶出した高マグネシウム方解石とアラレ石の結晶やシアノバクテリアによって生成されたミクライトセメントが認められる (Kaźmierczak and Iryu, 1999)。平均球径が約 3cm 以上のサンゴモ球の底質全体に対する被度は最大約 80% をこえるところから 10% 以下のところまで、様々であるが、水深と被度に相関はみられない。

松田ほか (1992) は、沖縄本島近辺の陸棚上で



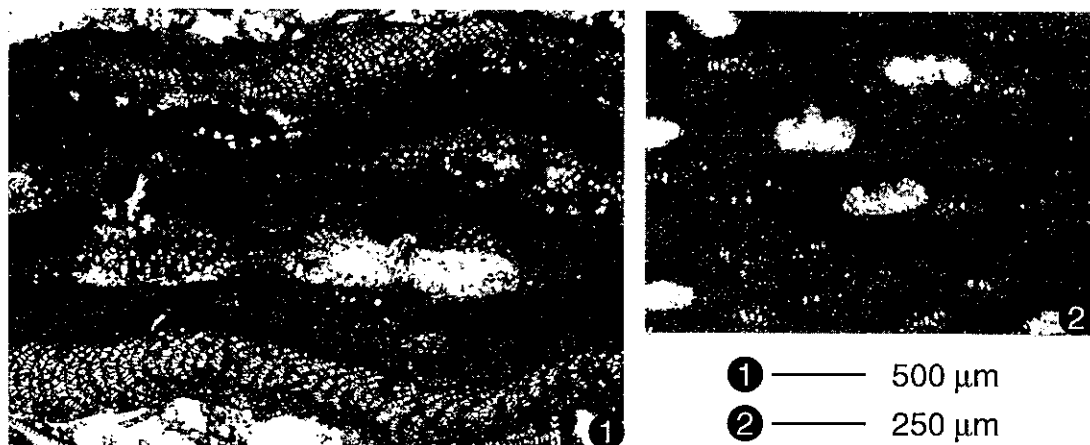
第1図 琉球列島慶良間諸島沖水深79mから採取された現世サンゴモ球の表面(1)および断面(2)の写真。表面には無節サンゴモ(c)や皮殻型底生有孔虫*Acervulina inhaerens*(a)がみられる。

採取したサンゴモ球の表面の生物群集を定量的に検討した。無節サンゴモは水深79, 82, 88, 98, 102mの地点のサンゴモ球の表面において約40%の被度を占める優占生物であり、次いで*A. inhaerens*が約10%みられる。124mでは、生体サンゴモの被度は数%と極めて小さいが*A. inhaerens*は10%である。野原ほか(1980)が採取した沖縄本島全域の試料を概観すると、100mまでサンゴモの優占するサンゴモ球があり、そこから120mまでの漸移帯をへて120~135mの範囲に*A. inhaerens*の優占帯があるように見える。サンゴモ球上に生育する無節サンゴモは*Sporolithon*, *Lithoporella*, *Lithophyllum*, *Mesophyllum*, *Lithothamnion*の5属といしのはな亜科のいくつかの属に含まれる。枯死部をもつ個体は少なく、胞子を形成している個体もみられることから、これらの無節サンゴモはこの大深度に自生していると思われる。表面の生体群落にも、内部の遺骸群落にも、礁斜面上部のサンゴモ群落を特徴づける種が認められないことから、これらのサンゴモ球は礁斜面上部より搬入されたものではない(松田・富山, 1988)。また、松田・野原(1994)は慶良間堆頂部を含む沖縄本島近海の水深66~135mの地点から得られた11個のサンゴモ球から放射性炭素年代を求め、海中膠結作用やサンゴモ球内部に取り込まれて固化した堆積物の影響をも考慮した上で、これらのサンゴモ球が氷期の低海水準時に極浅海環境で形成されたrelictではないと結論づけた。

2.3 古環境指標としての無節サンゴモ

(1) 浅海相中の無節サンゴモ化石

1970年代のAdeyらの一連の研究(Adey, 1979など)は、潮間帯から陸棚まで、サンゴモの属により深度帯を識別できると指摘した点できわめて先駆的であったが、いろいろな海域の短い報告を総合してイメージとして語るに終わっている。実際に、無節サンゴモ古水深指標を確立し、それを堆積物に適用した研究は、Iryu(1992)により初めてなされた。彼は、琉球に分布する第四紀更新世のサンゴ礁性堆積物である琉球層群に含まれる無節サンゴモ化石を検討した。そして、現在の琉球列島周辺海域における無節サンゴモ群落との比較から、琉球層群中に4つの化石サンゴモ群落を識別し、それぞれの化石群落の分布深度を推定した。それらの4つの群落は、1) *H. onkodes*の産出によって特徴づけられるA群落(堆積水深20m以浅)、2) *N. cf. myriocarpum*あるいは*Neogoniolithon brassica-floridum*の産出によって特徴づけられるB群落(堆積水深15~35m)、3) *H. onkodes*, *N. cf. myriocarpum*, *N. brassica-floridum*, *Lithothamnion australe*を欠くC群落(堆積水深35~50m)、4) *L. australe*の産出により特徴づけられるD群落(この群落が認められる露頭では、多くの場合、サンゴモ球がみられる)(堆積水深50m以深)である(第2図)。化石サンゴモ群落から推定される古水深と、化石造礁サンゴ群集による推定古水深を比較したところ、A群落およびB群落に関しては、造



第2図 琉球層群より産する無節サンゴモ化石。1. *Neogoniolithon brassica-floridum*, 2. *Hydrolithon onkodes*.

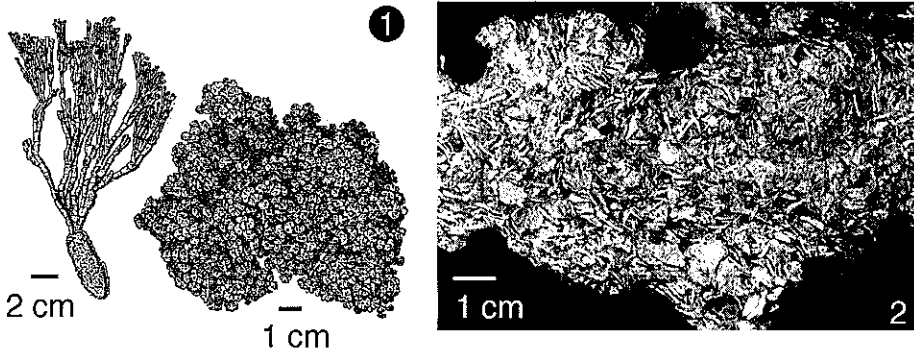
礁サンゴ群集とほぼ一致した結果が得られた。しかし、C群落認められた露頭からは、より浅海域を示すサンゴ群集が認められるケースもあった。また、D群落が認められた石灰岩は、造礁サンゴの生育限界もしくはそれ以深で堆積したものであるため、サンゴ化石はごくまれにしか認められず、両者の推定結果が比較可能なケースは限られていたが、矛盾は認められなかった。以上より、化石サンゴモ群落の示す古水深は、化石造礁サンゴ群集によって決定される古水深とよく一致すると結論される。ただし、C群落は特定の水深を特徴づける無節サンゴモが産しないということによって定義される群落であり、その信頼性は他の群落より劣ると思われる。

(2) 沖合相中の無節サンゴモ化石

サンゴモ球は世界各地の新生代の炭酸塩岩に多く含まれているが、1970年代まで、それらはサンゴモが光合成を行うことが可能な水深域で、波浪の影響等で回転させられて形成されたものであると解釈されてきた。すなわち、サンゴモ球は浅海域～中深度の高エネルギー環境に特有な存在と考えられてきた(例えば、Studencki, 1979)。

サンゴモ球は、琉球層群に多く含まれており、それが全岩の体積の20%以上を占める石灰岩は石灰藻球石灰岩と呼ばれてきた(Minoura, 1979)。しかし、琉球層群は、サンゴ礁段丘堆積物と理解されており(中川, 1967, 1969; Konishi *et al.*, 1974など)、石灰藻球石灰岩の堆積環境についても、礁原(沖縄第四紀調査団, 1976)や比較的浅い水路

からやや深い礁斜面(Minoura and Nakamori, 1982)と解釈されていた。これに対し、野田(1976, 1984)は層序学的観察に大西洋の陸棚サンゴモ球の報告(Milliman, 1974)を合わせて、この岩相をサンゴ礁の沖合相であると推論した。井龍(1984)は多良間島近海陸棚より採取したサンゴモ球試料を検討し、沖永良部島の層序学的研究と合わせて、石灰藻球石灰岩相は水深50～150mの陸棚の堆積物であると論じた。この見解は、世界中の大部分の地質学者がサンゴモの生育環境は極浅海であるという先入観をもっており、多くの藻類学者も光量が水面の0.1%程度にすぎない水深100mの陸棚に、大型のサンゴモが繁茂しているとは考えておらず、また琉球列島の現世のサンゴモの群落組成や分布様式の知見も蓄積されていなかったため、国内の古生物学者・藻類学者の双方から疑問視された。しかし、その後、松田の一連の調査(松田・富山, 1988; 松田ほか, 1992; 松田・野原, 1994)やTsuji(1993)の研究により、琉球列島の島棚には、琉球層群の石灰藻球石灰岩に含まれるサンゴモ球と同様のものが普遍的に分布することが証明された。以上の成果により、石灰藻球石灰岩の堆積環境が陸棚であるということが、国内の研究者に広く受け入れられ、琉球層群の礁斜面から陸棚までの堆積物を含む礁複合体の全体像を把握することが可能となった(井龍ほか, 1992など)。その結果、琉球層群には複数の年代の異なるサンゴ礁複合体が重なり合っており、また海水準変動に伴う水深変化が岩相変化として記録されていること



第3図 現世および化石 *Halimeda*. 1. 左はみつでさぼてんぐさ (*H. incrassata*), 右はさぼてんぐさ (*H. opuntia*) である (吉田, 1998). 2. 与那国島の *Halimeda* 石灰岩.

が明らかになってきた (Nakamori, 1986; Nakamori et al., 1995; Iryu et al., 1998; Sagawa et al., 2001). 琉球層群の石灰藻球石灰岩と同様の石灰岩は隆起速度の大きなパプアニューギニアからも報告されている (中森ほか, 1995; 松田, 1995).

琉球列島の現世および更新世サンゴモ球に関しては極めて網羅的な研究がされており, その研究は現在も進行中である. それらの研究成果は, ヨーロッパやアジア各地の新生代の炭酸塩岩に含まれる化石サンゴモ球の古環境解釈に影響を与えつつあり, 陸棚で形成されたと推定される化石サンゴモ球が多数報告されつつある (Pomar et al., 2002).

3. *Halimeda*

3.1 *Halimeda* とは

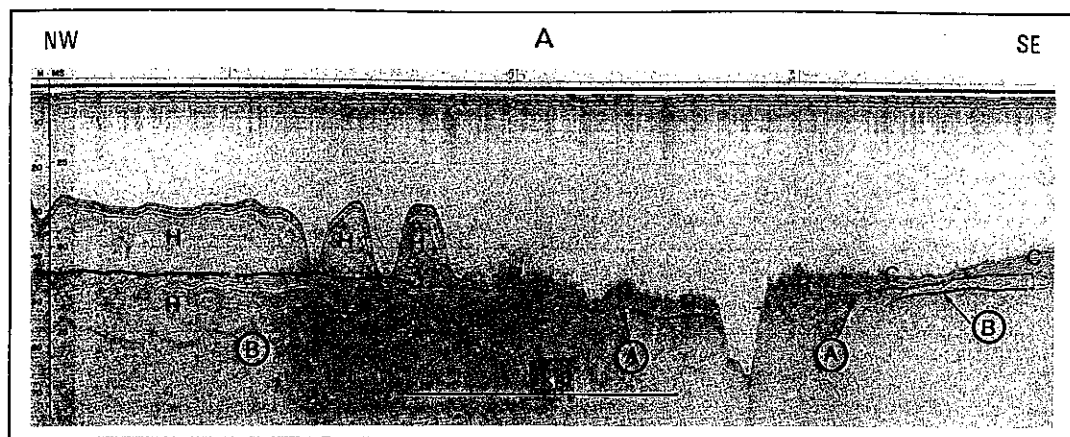
Halimeda 属は緑藻綱イワツタ目ハゴロモ科に属する. 藻体は, 円盤状・楔形・柱状の節間部 (体節) がいくつも連結して, 全体として樹状~匍匐状をしたサボテン様の外見を呈する (第3図の1). 体の高さは25cmを越えない. 体は管状系の集合体である. 管状系は, 中心部では複雑に絡まり合い, 分枝・融合するが, 表面に向かって曲がり, 漏斗状に膨らんだ小囊で終わる. 小囊はほぼ連続的に配列し, 表層を構成する. したがって, 体内には細胞間隙がよく発達している. この間隙は藻体内部にある細胞外空間で, 海水とは半閉鎖状態にある. 石灰化は, この特殊な空間で起こり, 管状系の周囲に針状のアラレイシの結晶が晶出する. *Halime-*

da はジュラ紀半ばに出現し, これ以降の石灰岩中に高い頻度で含まれる (Flügel, 1988).

3.2 古水深指標としての *Halimeda*

Wray (1977) が指摘しているように, *Halimeda* は, 現在水深100mを越す海域にまで分布している (Hills-Colinvaux, 1980) にもかかわらず, 長らく熱帯の極浅海域を示す示相化石であると誤解されてきた. 後述するように, 1970年代後半以降の *Halimeda* バンクの発見とそれに引き続く研究の進展によって, *Halimeda* は陸棚域にまで分布することが広く認識されるようになった.

サンゴ礁域に生息する *Halimeda* の深度分布は, Goreau and Goreau (1973) などにより, 主にカリブ海の島々で知見が得られられてきた. その結果, *Halimeda* 各種の生息深度が明らかとなってきた (Hills-Colinvaux, 1980; Johns and Moore, 1988). このように *Halimeda* は種に特有の深度分布を有するので, もし炭酸塩堆積物中に含まれる *Halimeda* を種レベルで同定することができれば, *Halimeda* は有用な古水深指標となる. しかし, *Halimeda* が化石として産出する場合, 藻体が完全な状態で見出されることはなく, 節間部あるいはその碎屑物となっており, 種レベルでの同定が不可能な場合が大部分である. 従って, 現生 *Halimeda* 種の生息深度に関する知見をそのまま地質学的に応用することはできない. 一方, Boss and Liddel (1987) は, ジャマイカ島ではサンゴ礁深部 (24m以深) の *Halimeda* は, 浅部 (24m以浅) の *Halimeda* に比べ, 節間部が大きく薄いことを明らかにした. そして, 深部に特徴的なそれを “deep-water *Halimeda*



第4図 北部グレートバリアリーフにみられる *Halimeda*バンクの断面図 (Orme and Salama, 1988). Hが*Halimeda*の節間部の累積体である。

suite”, 浅部のそれを “shallow-water *Halimeda* suite” と呼び、この区分を古水深指標として用いることができる可能性を主張した。彼らの区分はその後、Mankiewicz (1988) によって、スペインの中新統のサンゴ礁堆積物中の *Halimeda* 層に対して適用された。

井龍・鈴木 (1990) は、この指標を琉球層群の石灰岩に適用した。彼らは、与那国島に分布する琉球層群に *Halimeda* の節間部が密集する石灰岩を見出し (第3図の2)、これを *Halimeda* 石灰岩と呼称し、琉球層群の石灰岩の岩相区分体系に加えた。*Halimeda* 石灰岩は石灰藻球石灰岩、*Cycloclypeus-Operculina* 石灰岩および碎屑性石灰岩とは漸格的に変化する累重関係にあり、サンゴ石灰岩とは明瞭な境界をもって接するという産状であった。*Halimeda* 石灰岩の構成粒子は主に *Halimeda* の節間部からなり、大型有孔虫 *Cycloclypeus carpenteri* や石灰藻球が伴ってみられた。*Halimeda* の節間部は、現在のサンゴ礁の比較的深所に生育するものに特有の形状 (deep-water *Halimeda* suite) であった。以上の層位学的・古生物学的証拠より、彼らは *Halimeda* 石灰岩は水深50m以深のサンゴ礁前縁深部に密集して生育していた *Halimeda* の節間部が、ほぼ現地で堆積したものであると推定した。

3.3 *Halimeda*バンク

1970年代後半に、北部グレートバリアリーフの陸棚東縁部に、主に原地成の *Halimeda* の節間部が

累積して形成された地形的高まり (第4図) が多数分布することが報告された (Orme *et al.*, 1978; Davis and Marshall, 1985; Phipps *et al.*, 1985; Orme, 1985)。それらは、南北数～十数km、東西数kmの広がりを持ち、基部の水深は30～50mであり、頂部は周囲より15～20m高くなっている。その後、この累積体は *Halimeda*バンクと呼ばれるようになり、東部ジャワ海 (Roberts *et al.*, 1987a, 1987b; Roberts *et al.*, 1988) やニカラグア沖の陸棚 (Hine *et al.*, 1988) でも存在が確認された。Marshall and Davies (1988) は、*Halimeda*バンクの形成と栄養塩の供給が密接に関わっていると述べた。彼らは、震探データとコア試料を検討し、*Halimeda*バンクの形成時は、陸棚斜面に沿って上昇した栄養塩に富んだ湧昇流が陸棚外縁のサンゴ礁の切れ目から流入したために、陸棚域が富栄養化した時期であったことを示した。

このように、*Halimeda*バンクは富栄養の陸棚に特有のものであり、貧栄養の熱帯浅海域に広がるサンゴ礁とは対照的な存在である。*Halimeda*バンクの発見は、Chave (1967) による冷水性炭酸塩堆積物の評価と並んで、近年の地質時代の炭酸塩堆積物の堆積環境や形成過程の解釈に、全く新たな視点を与えたという点で高く評価される。

4. おわりに

本論では、石灰藻の中でも、新生代の炭酸塩堆積物の構成要素として重要な無節サンゴモと *Hal-*

*imeda*の古環境指標としての有用性について述べた。石灰藻類と造礁サンゴを併用することにより、潮間帯から透光帯下限近くまでの範囲で、従来にない精度で炭酸塩堆積物の堆積環境を復元することができるようになってきた。とはいえ、無節サンゴモについては、今なお、採集しやすいところに生育し、かつ特徴のある大型種が記載されているのみという状況にある。深い陸棚だけでなく、浅いサンゴ礁でも礁岩の陰などに多数の未記載種が存在している。これらの研究が進展すれば、さらに詳細な環境区分が可能になると思われ、筆者らは鋭意努力中である。これら石灰藻類の研究に、若い研究者の新たな参入を願ってやまない。

文 献

- Adey, W. H. (1979) : Crustose coralline algae as microenvironmental indicators for the Tertiary. In: Gray J. and Boucot A. J. (eds.), Historical Biogeography, Plate Tectonics, and the Changing Environment, Oregon State Univ. Press, Corvallis, Oregon, 459-464.
- Boss, S. K. and Liddel, W. D. (1987) : Patterns of sediment composition of Jamaican fringing reef. *Sedimentology*, 34, 77-87.
- Chave, K. E. (1967) : Recent carbonate sediments - an unconventional view. *J. Geol. Educat.*, 15, 200-204.
- Davies, P. J. and Marshall, J. F. (1985) : *Halimeda* bioherms - Low energy reefs, Northern Great Barrier Reef. *Proc. 5th Int. Coral Reef Congr.*, 5, 1-7.
- Flügel, E. (1988) : *Halimeda*: paleontological record and paleoenvironmental significance. *Coral Reefs*, 6, 123-130.
- Goreau, T. F. and Goreau, N. I. (1973) : The ecology of Jamaican coral reefs. II. Geomorphology, zonation, and sedimentary phases. *Bull. Mar. Sci.*, 23, 399-464.
- Hills-Colinvaux, L. (1980) : Ecology and taxonomy of *Halimeda*: primary producer of coral reefs. *Adv. Mar. Biol.*, 17, 1-327.
- Hine, A. C., Hallock, P., Harris, M. W., Mullins, H. T., Belknap, D. F. and Jaap, W. C. (1988) : *Halimeda* bioherms along an open seaway Miskito Channel, Nicaraguan Rise, SW Caribbean Sea. *Coral Reefs*, 6, 173-178.
- 堀 信行 (1980) : 日本のサンゴ礁. *科学*, 50, 111-122.
- 井龍康文 (1984) : 琉球列島における現生石灰藻球の発見とその意義. 琉球弧南端海域の海洋環境に関する総研速報, 1, 47-55.
- Iryu, Y. (1992) : Fossil nonarticulated coralline algae as depth indicators for the Ryukyu Group. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan*, N. S., no. 167, 1165-1179.
- Iryu, Y. and Matsuda, S. (1988) : Depth distribution, abundance and species assemblages of nonarticulated coralline algae in the Ryukyu Islands, southwestern Japan. *Proc. 6th Int. Coral Reef Symp.*, 3, 101-106.
- 井龍康文・鈴木 淳 (1990) : 与那国島の琉球層群にみられる *Halimeda* 石灰岩の堆積環境. *化石 (日本古生物学会)*, no. 49, 13-22.
- 井龍康文・中森 亨・山田 努 (1992) : 琉球層群における層序区分単位. *堆積学研究会報*, no. 36, 57-66.
- Iryu, Y., Nakamori, T. and Yamada, T. (1998) : Pleistocene reef complex deposits in the Central Ryukyus, south-western Japan. In: Camoigne, G. and Davies, P. J. (eds.), *Reefs and Carbonate Platforms in the Pacific and Indian Oceans*. Special Publications of the International Association of Sedimentologists, no. 25, Blackwell Sci. Ltd., Oxford, 197-213.
- Iryu, Y., Nakamori, T., Matsuda, S. and Abe, O. (1995) : Distribution of marine organisms and its geological significance in the modern reef complex of the Ryukyu Islands. *Sedim. Geol.*, 99, 243-258.
- Johansen, H. W. (1976) : Current status of generic concepts in coralline algae (Rhodophyta). *Phycologia*, 15, 221-244.
- Johns, H. D. and Moore, C. H. (1988) : Reef to basin sediment transport using *Halimeda* as a sediment tracer, Grand Cayman Island, West Indies. *Coral Reefs*, 6, 187-193.
- Kaźmierczak, J. and Iryu, Y. (1999) : Cyanobacterial origin of microcrystalline cements from Pleistocene rhodoliths and coralline algal crusts of Okierabu-jima, Japan. *Acta Palaeontol. Pol.* 44, 117-130.
- Konishi, K., Omura, A. and Nakamichi, O. (1974) : Radiometric coral ages and sea level records from the late Quaternary reef complexes of the Ryukyu Islands. *Proc. 2nd Int. Coral Reef Symp.*, 2, 595-613.
- Konishi, K. and Matsuda, S. (1980) : Relative fall of sealevel within the past 3000 years. *Trans. Proceed. Palaeont. Soc. Japan*, N. S., no. 117, 243-246.
- Mankiewicz, C. (1988) : Occurrence and paleontologic significance of *Halimeda* in late Miocene reefs, southern Spain. *Coral Reefs*, 6, 271-279.
- Marshall, J. F. and Davies, P. J. (1988) : *Halimeda* bioherms of the northern Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 6, 139-148.
- 松田伸也 (1995) : 無節サンゴモから見たバブアニューギニア、ヒュオン半島の第四紀段丘を構成する石灰岩. *地学雑誌*, 104, 706-718.
- 松田伸也・野原昌人 (1994) : 沖縄本島近海の陸棚上に見られるサンゴモ球の放射性炭素年代. *琉球大学教育学部紀要*, 44, pt. 2, 185-193.
- 松田伸也・富山卓子 (1988) : 琉球列島の島棚上にみられる現生サンゴモ球に関する一考察. *琉球大学教育学部紀要*, 33, pt. 2, 343-354.
- 松田伸也・井龍康文・野原昌人 (1992) : 沖縄島周辺海域のサンゴモ球およびその地質学的意義. *堆積学研究会報*, no. 37, 109-111.
- Milliman, J. D. (1974) : *Marine carbonates*. Springer-Verlag, Berlin, 375p.
- Minoura, K. (1979) : Sedimentological study of the Ryukyu Group. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 2nd Ser (Geol.), 49, 1-69.
- Minoura, K. and Nakamori, T. (1982) : Depositional environment of algal balls in the Ryukyu group, Ryukyu Islands, southwestern Japan. *J. Geol.*, 90, 602-609.
- 中川久夫 (1967) : 奄美群島 徳之島・沖永良部島・与論島・喜界島の地質 (1). *東北大地古研邦報*, no. 63, 1-39.
- 中川久夫 (1969) : 奄美群島 徳之島・沖永良部島・与論島・喜界島の地質 (2). *東北大地古研邦報*, no. 68, 1-17.
- Nakamori, T. (1986) : Community structures of Recent and Pleistocene hermatypic corals in the Ryukyu Islands, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 2nd Ser (Geol.), 56, 71-133.
- Nakamori, T., Iryu, Y. and Yamada, T. (1995) : Development of coral

- reefs of the Ryukyu Islands (southwest Japan, East China Sea) during Pleistocene sea-level change. *Sedim. Geol.*, 99, 215-231.
- 中森 亨・松田伸也・大村明雄・太田陽子 (1995) : 造礁サンゴ群集に基づくパプアニューギニア, ヒュオン半島の更新世石灰岩の堆積環境. *地学雑誌*, 104, 725-742.
- 野田睦夫 (1976) : 与論島の琉球石灰岩. *地質学雑誌*, 82, 367-381.
- 野田睦夫 (1984) : 沖永良部島の琉球石灰岩 (その2). 堆積相. *地質学雑誌*, 90, 319-328.
- 野原昌人・大嶋和雄・横田節哉・村上文敏・井内美郎・池田国昭 (1980) : 沖縄本島周辺海域の海底堆積物. 環境庁企画調整局 (編), 環境保全研究成果集, 2 (61), 3-28.
- 沖縄第四紀調査団 (1976) : 沖縄および宮古群島の第四系. とくに“琉球石灰岩”の層序について. *地球科学*, 30, 145-162.
- Orme, G. R. (1985) : The sedimentological importance of *Halimeda* in the development of back reef lithofacies, northern Great Barrier Reef (Australia). *Proc. 5th Int. Coral Reef Congr.*, 5, 31-37.
- Orme, G. R. and Salama, M. S. (1988) : Form and seismic stratigraphy of *Halimeda* banks in part of the northern Great Barriere Reef province. *Coral Reefs*, 6, 131-137.
- Orme, G. R., Flood, P. G. and Sargent, G. E. G. (1978) : Sedimentation trend in the lee of the outer (Ribbon) reefs northern region of the Great Barrier Reef Province. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 291, 85-99.
- Phipps, C. V. G., Davis, P. J. and Hopley, D. (1985) : The morphology of *Halimeda* banks behind the Great Barrier Reef east of Cooktown, Qld. *Proc. 5th Int. Coral Reef Congr.*, 5, 27-30.
- Pomar, L., Obrador, A. and Westphal, H. (2002) : Sub-wavebase cross-bedded grainstones on a distally steepened carbonate ramp, Upper Miocene, Menorca, Spain. *Sedimentology*, 49, 139-169.
- Roberts, H. H., Aharon, P. and Phipps, C. V. (1988) : Morphology and sedimentology of *Halimeda* bioherms from the eastern Java Sea (Indonesia). *Coral Reefs*, 6, 161-172.
- Roberts, H. H., Phipps, C. V. and Effendi, L. (1987a) : *Halimeda* bioherms of the eastern Java Sea. *Geology*, 15, 371-374.
- Roberts, H. H., Phipps, C. V. and Effendi, L. (1987b) : Morphology of large *Halimeda* bioherms, eastern Java Sea (Indonesia) : a side scan sonar study. *Geol. Marine Lett.*, 7, 7-14.
- Sagawa, N., Nakamori, T. and Iryu, Y. (2001) : Pleistocene reef development in the southwest Ryukyu Islands, Japan. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 175, 303-323.
- Silva, P. C. and Johansen, H. W. (1986) . A reappraisal of the order Corallinales (Rhodophyta). *Brit. Phycol. J.*, 21, 245-254.
- Studencki, W. (1979) : Sedimentation of algal limestones from Busko-Spa environs (Middle Miocene, Central Poland). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 27, 155-165.
- Tsuji, Y. (1993) : Tide influenced high energy environments and rhodolith-associated carbonate deposition on the outer shelf and slope off the Miyako Islands, southern Ryukyu Island Arc, Japan. *Mar. Geol.*, 113, 255-271.
- Verheij, E. (1993) : The genus *Sporolithon* (Sporolithaceae fam. nov., Corallinales, Rhodophyta) from the Spermonde Archipelago, Indonesia. *Phycologia*, 32, 184-196.
- Woelkerling, W. J., Womersley, H. B. S. and Johansen, H. W. (1996) : Family Corallinaceae. In: Womersley, H. B. S. (ed.), *The Marine Benthic Flora of Southern Australia Part IIIB. Gracilariales, Rhodymeniales, Corallinales and Bonnemaisoniales*, Union Offset, Canberra, 158-323.
- Wray, J. L. (1977) : *Calcareous algae*. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 185p.
- 吉田忠生 (1998) : 新日本海藻誌. 内田老鶴園, 東京, 1222p.

IRYU Yasufumi and MATSUDA Shinya (2002) : Calcareous algae as paleoenvironmental indicators.

< 受付 : 2002年5月20日 >