完新世の記録に基づいて推定する将来の 地球環境変動に対するサンゴ礁の応答

茅 根 創*

Response of Coral Reefs to Future Global Changes : Prediction based on Holocene Records

Hajime KAYANNE*

Abstract

Coral reefs are related to all the factors of the predicted global changes for the next century : CO₂ increase, global warming and sea-level rise. The analysis and modeling of postglacial reef responses to these changes with a time scale of 10³ years provide ground truth information as to the possible responses of reefs to the future changes. The sea-level rise might bring about submergence of reefs. The threshold rate is 4 m/1,000 years : if the sea-level rise over 40 cm occurs in the next century, reef surface will not keep up with the rising sea. Rise in sea surface temperature might cause bleaching of corals in the tropical region. On the other hand, the distribution area of reef corals was expanded at the hypsithermal time in the subtropical region such as Japan. Calcium carbonate deposition in coral reefs releases CO₂ into the atmosphere. The postglacial CO₂ increase did not match the time of reef calcium carbonate deposition. This might show the effect of photosynthetic CO₂ fixation which occurs simultaneously in reefs. Postglacial records show that reef responses to global changes are not simple ones.

I. はじめに

サンゴ礁は、海洋でもっとも生物種の多様性が大きい生態系である。サンゴ礁の生物群集は、サンゴ体内の共生藻などによる高い光合成生産によって維持されている。また、サンゴなどの造礁生物は、石灰化によってサンゴ礁という地形をつくる。サンゴ礁は、生物にすみかを提供するとともに、光合成のための受光面積を拡大している。サンゴ礁のこうした特徴は、海岸の防波構造物とともに地域の生産の場を提供している(茅根, 1991a)。自然の生態系としても経済的にも貴重なサンゴ礁は、沿岸域の開発という人為的な影響によっ

て、その多くが衰退の危機にあることが警告されている(Wilkinson, 1992)。さらに、二酸化炭素濃度の増加による地球温暖化という地球規模の環境変動も、サンゴ礁に影響を及ぼす(Budde-meier, 1992)。

予測されている来世紀の地球環境変動は、大気中の二酸化炭素濃度の上昇とその温室効果による温暖化、さらに(これについては議論があるが)温暖化に伴う海水準の上昇である。海岸地形は一般に、このうち海水準の変動に影響される。しかし生物がつくる地形であるサンゴ礁は、予測される地球環境変動のどの要素とも密接に関係している(図1)。サンゴ礁地形は、他の海岸地形同様、

* 地質調査所海洋地質部

* Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

図 1 予測される地球環境変動とサンゴ礁の関係

Fig. 1 Relationships between the predicted global changes and coral reefs

海水準の変動に影響される。また、サンゴ礁をつくる造礁サンゴは、熱帯・亜熱帯にだけ分布するので、その生育は気候変動によって影響を受ける。さらに、サンゴ礁の高い光合成と石灰化による生産は、地球上の炭素循環に関係している。このように地球環境変動のすべての要素と関係する生物地形としては、ほかにマングローブ林があげられる。こうした点から、サンゴ礁とマングローブ林の地球環境変動に対する応答に関する研究は、IGBP（地球圏生物圏国際協同研究）のコアプロジェクト LOICZ（海岸・沿岸域における陸域海域の相互作用）の4つの研究領域のうちの1つにあげられている（Holligan and de Boois, 1993）。

現在議論されている地球環境変動の時間スケールは、 10^2 年である。これに対して人間の観測記録は長くても 10^1 年の時間スケールであり、この時間スケールのギャップが、変動とそれに対するシステムの応答の予測を困難にしている。一方、地質学的な情報の時間スケールは、もっとも短いもので 10^3 年で、これは後氷期の変動とそれに対する応答についてのものである。こうした 10^3 年からのアプローチは、観測記録からのアプローチと相補って、地球環境変動に対するサンゴ礁の応答について事実に基づいた情報を提供する。

後氷期の環境変動は、大気中の二酸化炭素濃度の上昇が190 ppm から280 ppm、6,000年前のヒブシサーマル期の平均気温が現在より $+2 \sim 3^\circ\text{C}$ 、海水準の上昇速度が最大10 m/1,000年（1 m/100

年）以上である。IPCCのBaUモデルによる予測によれば、来世紀末に二酸化炭素濃度は800 ppm、温暖化による平均気温の上昇は $+4^\circ\text{C}$ 、海水準上昇は65 cmである（Houghton *et al.*, 1990）。後氷期の変動と予測されている変動とは、変化の速度または規模のオーダーが近い。このことも、後氷期の環境変動にサンゴ礁がどのように応答したかを明らかにすることが、来世紀の予測に役立つという考えを支持する。

サンゴ礁と後氷期の海水準変動との関係については、すでに茅根（1991b）、Kayanne（1992）で、二酸化炭素濃度変動との関係については、Kayanne（1992）、茅根（1993）で述べた。本稿ではこれらをまとめるとともに、温暖化との関係も議論して、問題点を整理したい。

II. 海水準変動に対するサンゴ礁の応答

後氷期の海水準の上昇速度は、最大10 m/1,000年（10 mm/年）以上で、これは来世紀予測される海水準上昇6 mm/年より大きい。現在の海岸を縁取るサンゴ礁は、後氷期の海水準上昇に追いついて形成されたのだから、来世紀の海水準上昇にも沈水しないで追いついていくのではないかと考えられがちである。

Buddemeier and Smith（1988）は、サンゴ礁の上方堆積速度を最大10 mm/年と見積もった。これは、当時1988年に見積もられていた海水準上昇速度15 mm/年より小さいことから、サンゴ礁

は海面に追いつけずに沈水してしまうだろうと考えた。しかしながら、最近の海水準上昇の予測は 6 mm/年と下方に修正されている。Buddemeier (1992) は、この海水準上昇がサンゴ礁の最大の上方堆積速度以下であり、後氷期の海水準上昇速度はこれを上回るがサンゴ礁はこれに追いつくことができたことから、サンゴ礁は沈水しないだろうと述べている。また、Kinsey and Hopley (1991) は、現在頭打ちになっているサンゴ礁における炭酸カルシウムの堆積が、将来海水準が上昇して上方に堆積の場がつけられることによって活性化すると考えている。

しかしながらサンゴ礁は、後氷期の海水準上昇に常に追いついて上方に成長したわけではない。Neumann and Macintyre (1985), Davies *et al.* (1985) は、サンゴ礁と海水準上昇との間の関係を、サンゴ礁の頂面が常に海面に追いついていた“Keep-up 型”、遅れて海面に追いついた“Catch-up 型”、海面上昇に追いつけなかった“Give-up 型”の 3 種類に区分した。サンゴ礁は、海面上昇に追いつけずに“Give-up”（沈水）する可能性もあるわけである。しかしながら、サンゴ礁がどのような条件で海水準上昇に Keep-up するのかについては、このサンゴ礁の分類モデルでは不明である。

サンゴ礁は、その形成される水深や陸からの位置によって、様々な層相に区分することができる。こうした層相を無視して、最大の堆積速度と海水準上昇を比べることは問題である。Kayanne (1992) は、後氷期のサンゴ礁の層相を区分し、それぞれの層相の形成深度と上方堆積速度との関係をまとめた。それによれば、海面近くの波の荒い場につくられる層相は礁嶺か石灰藻嶺で、その上方堆積速度は 4 m/1,000 年以下である。上方堆積速度が 10 m/1,000 年以上の層相の形成深度は、水深 3 m 以深の波の力の比較的穏やかな場である。このことから、来世紀の海水準上昇が 40 cm 以上であれば、サンゴ礁の頂面はこれに追いつけず沈水すると考えた。

III. 温暖化に対するサンゴ礁の応答

多くの造礁サンゴ類が生育できる水温は、18–30°C である。30°C を超える水温にサンゴが長期間さらされると、サンゴの活動が低下し最終的には死んでしまう。0.5–1.5°C の水温上昇が数週間、3–4°C の水温上昇が数日間続くと、サンゴは死滅する (Jokiel and Coles, 1990)。また、水温上昇はサンゴが体内の共生藻を放出して最終的にサンゴ自身が死に至る「白色化 (bleaching)」をもたらすことが知られている。

Glynn (1993) は、1980 年代に世界の各地で見られた白色化は、その頻度、規模、深刻さのいずれの点においても過去に例を見ないものであることを示し、これがその時期の世界的な平均気温の上昇と ENSO (エルニーニョ・南方振動) イベントに伴う水温の上昇によるものである可能性を議論している。さらに来世紀の温暖化に伴い、熱帯域で 1°C、亜熱帯域で 1–2°C 海水温が上昇すると、このような白色化がより広範囲に起こることを指摘している。

Glynn は、現在の海水温度の分布がそれぞれの地域のサンゴにとって最適であるという仮定に基づいて、上記の議論を進めている。しかしながら、日本などサンゴ礁分布の縁辺域では、1–2°C の水温上昇はサンゴの一般的な最適生育水温の範囲内である。本州南岸などでは、むしろ冬季の最低水温がサンゴの生育限界を下回る場合もあり、温暖化によってサンゴの生育が促進される可能性もある。Veron (1992) は、日本で約 400 種のサンゴを記載し、その多くがフィリピンなどサンゴ礁分布の核心域とも共通することを示した。さらに、Veron and Minchin (1992) は、各地点で認められるサンゴの種数が、八重山諸島の 363 種を最大として高緯度へ向かって減少し、これが表面海水温度の低下と調和的であることを示した。このことから、高緯度では水温の上昇によって生育できるサンゴの種数が増加する可能性がある。

地学的証拠からは、海水温度の上昇に伴って北限のサンゴ礁でサンゴの種数が増加したことが明らかにされている。地球の平均気温が 2–3°C 高

かった6,000年前には、サンゴ礁分布の北限域にあたる千葉県館山湾では、造礁サンゴが現在の倍の70種認められる(Veron, 1992)。これらは積み重なって礁に近いものを構成していた。このことから、日本のようなサンゴ礁分布の縁辺域では、温暖化に伴ってサンゴやサンゴ礁の分布域が拡大する可能性がある。

IV. 二酸化炭素濃度上昇に対するサンゴ礁の応答

サンゴ礁は、光合成と石灰化という2つの経路で地球規模の炭素循環に関わっている。両者ともに、広い意味での炭素の固定過程である。光合成は正味の二酸化炭素の固定であるが、固定された二酸化炭素は呼吸と分解によって放出される。一方、石灰化は、海水の炭酸系の平衡によれば、海水の二酸化炭素濃度を上昇させる。実際のサンゴ礁では、光合成と石灰化とが相伴って起こっている。すなわち、サンゴ礁が大気中の二酸化炭素の吸収源であるか放出源であるかは、光合成・呼吸・石灰化速度の関係によって決まる。

後氷期には、1万5千年前から1万年前に、大気中の二酸化炭素濃度が190 ppm から280 ppm に上昇した。この濃度上昇を、後氷期のサンゴ礁の形成に伴って大気中へ二酸化炭素が放出されたと考えることによって説明する「サンゴ礁仮説」が提唱されている(Berger, 1982; Berger and Kilingley, 1982; Opdyke and Walker, 1992)。これは、サンゴ礁の石灰化によって二酸化炭素が放出されることを前提としている。Berger (1982) は、産業革命前の大気二酸化炭素量の2倍の炭素が1万5千年前から1万年前までの間にサンゴ礁に炭酸カルシウムとして堆積すれば、この時期の二酸化炭素濃度上昇の半分の説明できるとした。Opdyke and Walker (1992) は、1万年前に堆積速度が最大になるような堆積モデルによって、大気二酸化炭素濃度の上昇を説明している。しかしながら、これらのモデルで入力変数として用いられているサンゴ礁における炭酸カルシウムの堆積速度の変化は、二酸化炭素濃度上昇の時期に合わせて適当に与えられており、地学的なデータに

基づくものではない。

Kayanne (1992) は、ボーリング調査によって得られた実際の後氷期のサンゴ礁の形成過程をまとめて、1,000年あたりのサンゴ礁における炭酸カルシウムの堆積速度を求めた。それによれば、堆積速度が最大になるのは完新世中期の5,000年前から6,000年前である。これは、この時期に海面上昇速度が緩やかになり、サンゴ礁が海面に追いついていったという事実と調和的である。サンゴ礁における堆積速度が最大になる時期は、サンゴ礁仮説の推定とは異なり、二酸化炭素濃度の上昇時期とは一致しない。このことから Kayanne (1992) は、サンゴ礁仮説は支持されず、サンゴ礁における炭酸カルシウム堆積の最大の時期にも、それに伴って二酸化炭素が大気に放出されなかったと考えた。

現在のサンゴ礁と大気二酸化炭素との関係についても、吸収と放出の2通りの考え方がある。Ware *et al.* (1992) は、地球全体のサンゴ礁の光合成による有機物生産量 (Crossland *et al.*, 1991) と石灰化生産量 (Kinsey and Hopley, 1991) の見積もりに基づいて、サンゴ礁では石灰化がまさり、二酸化炭素は大気へ放出されると考えた。しかし、地球規模の生産量の見積もりには不確定な部分が大きすぎ、結論を出すには問題が大きい。

実際のサンゴにおける二酸化炭素の流量について、Gattuso *et al.* (1993) は放出しているという測定結果を得た。しかし、彼らはサンゴ礁海水中の二酸化炭素濃度を直接測定していない。さらに彼らの測定結果は、同時に測定された光合成・石灰化速度とも調和しない。Kayanne *et al.* (submitted) は、石垣島サンゴ礁の海水中の二酸化炭素分圧を直接測定して、日中の光量が大きいほど二酸化炭素分圧の低下量が大きくなり、サンゴ礁は二酸化炭素を吸収していることを示した。この結果は、1日で積算した光合成量が石灰化量よりも大きいという測定結果とも調和的である。

サンゴ礁における光合成による純生産が小さい(あるいはほとんど0である)という考えは、サンゴ礁は熱帯の貧栄養の海に囲まれているため、

純生産を支える栄養塩の補給がないのではないかとこの前提に基づいていた。しかしながら窒素に関しては、サンゴ礁において大気からの窒素固定が卓越しているという測定結果が最近多く得られている (Larkum *et al.*, 1988; Yamamuro *et al.*, 1992; Shashar *et al.*, 1994)。窒素の収支から考えると、サンゴ礁の純生産は大きい可能性が高い。

V. おわりに

地球規模の環境変動に対するサンゴ礁の応答は、決して単純なものではない(図1)。海面上昇がサンゴ礁の上方成長速度を上回ればサンゴ礁は沈水してしまい、下回ればサンゴ礁は海面上昇に追いついて行ける。海水温度の上昇は、現在の水温がサンゴの生育限界の上限に近い熱帯域では、サンゴの白色化などサンゴ礁の衰退をもたらす。逆にサンゴ礁分布の周辺域では、水温の上昇によって生育がより活発になる。サンゴ礁における石灰化は大気中に二酸化炭素を放出して、温暖化に正のフィードバックをもたらす。一方、光合成は二酸化炭素を吸収して、負のフィードバックをもたらす。

こうした複雑なサンゴ礁の応答を予測する際に、後氷期のサンゴ礁の記録は事実に基づいた情報を提供する。来世紀の環境変動の予測自体不確定な部分が多いが(たとえば来世紀の海水準上昇の予測値は、最近数年間で数分の1になった)、後氷期の記録は変動と応答の係にきい値を与える。これによって、観測の時間スケールを超える現象の予測に対する、地質学的方法の有効性を主張することができる。

文 献

- Berger, W. H. (1982): Deglacial CO₂ buildup: Constraints on the coral-reef model. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, **40**, 235-253.
- Berger, W. H. and Killingley, J. S. (1982): The Worthington Effect and the origin of the Younger Dryas. *J. Marine Res.*, **40** (Suppl.), 27-38.
- Buddemeier, R. W. (1992): Corals, climate and conservation. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, **1**, 3-10.
- Buddemeier, R. W. and Smith, S. V. (1988): Coral reef growth in an era of rapidly rising sea level: Predictions and suggestions for long-term research. *Coral Reefs*, **7**, 51-56.
- Crossland, C. J., Hatcher, B. G. and Smith, S. V. (1991): Role of coral reefs in global ocean production. *Coral Reefs*, **10**, 55-64.
- Davies, P. J., Marshall, J. F. and Hopley, D. (1985): Relationships between reef growth and sea level in the Great Barrier Reef. *Proc. 5th Int. Coral Reef Congr.*, **3**, 95-103.
- Gattuso, J.-P., Pichon, M., Delesalle, B. and Frangignoulle, M. (1993): Community metabolism and air-sea CO₂ fluxes in a coral reef ecosystem (Moorea, French Polynesia). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **96**, 259-267.
- Glynn, P. W. (1993): Coral reef bleaching: Ecological perspectives. *Coral Reefs*, **12**, 1-17.
- Holligan, P. M. and de Boois, H. ed. (1993): *Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ)*. IGBP Report, No. 25, 50p.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. J. and Ephraums, J. J. (1990): *Climate change: The IPCC scientific assessment*. Cambridge Univ. Press, London, 365p.
- Jokiel, P. L. and Coles, S. L. (1990): Response of Hawaiian and other Indo-Pacific reef corals to elevated temperature. *Coral Reefs*, **8**, 155-162.
- 茅根 創 (1991a): サンゴ礁の物質生産と地球環境. 月刊海洋, **23**, 753-758.
- 茅根 創 (1991b): 完新世海面変動とサンゴ礁. 地学雑誌, **100**, 1019-1026.
- Kayanne, H. (1992): Deposition of calcium carbonate into Holocene reefs and its relation to sea-level rise and atmospheric CO₂. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, **1**, 50-55.
- 茅根 創 (1993): 後氷期のサンゴ礁への炭酸カルシウム堆積速度. 地球化学, **27**, 37-42.
- Kayanne, H., Suzuki, A. and Saito, H. (submitted): Diurnal Pco₂ changes in coral reef water and its relation to CO₂ sink/source problem.
- Kinsey, D. W. and Hopley, D. (1991): The significance of coral reefs as global carbon sinks—Response to greenhouse. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol. (Global and Planetary Change Section)*, **89**, 363-377.
- Larkum, A. W. D., Kennedy, I. R. and Müller, W. J. (1988): Nitrogen fixation on a coral reef. *Marine Biol.*, **98**, 143-155.
- Neumann, A. C. and Macintyre, I. (1985): Reef response to sea level rise: Keep-up, Catch-up or Give-up. *Proc. Fifth Intern Coral Reef Congress, Tahiti*, **3**, 105-110.
- Opdyke, B. N. and Walker, J. C. G. (1992): Return of the coral reef hypothesis: Basin to shelf partitioning of CaCO₃ and its effect on atmospheric CO₂. *Geology*, **20**, 733-736.
- Shashar, N., Feldstein, T., Cohen, Y. and Loya, Y.

- (1994): Nitrogen fixation (acetylene reduction) on a coral reef. *Coral Reefs*, **13**, 171-174.
- Veron, J. E. N. (1992): Conservation of biodiversity: A critical time for the hermatypic corals of Japan. *Coral Reefs*, **11**, 13-21.
- Veron, J. E. N. and Minchin, P. R. (1992): Correlations between sea surface temperature, circulation patterns and the distribution of hermatypic corals of Japan. *Continental Shelf Res.*, **12**, 835-857.
- Ware, J. R., Smith, S. V. and Reaka-Kudla, M. L. (1992): Coral reefs: Sources or sinks of atmospheric CO₂? *Coral Reefs*, **11**, 127-130.
- Wilkinson, C. R. (1992): Coral reefs of the world are facing widespread devastation: Can we prevent this through sustainable management practices? *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, **1**, 11-21.
- Yamamuro, M., Minagawa, M. and Kayanne, H. (1992): Preliminary observation on food webs in Shiraho coral reef as determined from carbon and nitrogen stable isotopes. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, **1**, 358-361.

(1994年11月14日受理)