

# 温暖化対策におけるサンゴ礁の意義

小宮山 宏<sup>1)</sup>

温暖化対策としてのサンゴ礁の役割に期待が寄せられている。サンゴの専門家以外にも、この問題に関して発言する人が増えてきている。筆者もその一人で、いわば、「にわかサンゴ屋」である。温暖化対策を広く探索する過程で、一時これこそ切札ではないかと考えたことがある。ついで、よく考えてみると、サンゴはCO<sub>2</sub>放出だと考え、対策リストから除外したこともあった。今は、もう少し複雑であることを理解している。実体を知りたい、メカニズムを知りたい、分かれば対策とし得るのではないかと、美しい地球を創造しつつ温暖化を解決する手段となし得るのではないかと期待している。そうした立場から、表題について論じる。

## 1. CO<sub>2</sub> 対策の分類とサンゴ礁の位置づけ

地球環境は、東西対立に代わる人類の新しいパラダイムとなりつつある。その中でも、CO<sub>2</sub>による地球の温暖化は、1)その影響がきわめて甚大かつ広範囲にわたる可能性のあること、および、2)現代の物質文明の基盤と直接関連しているために解決に基本的な困難が伴うことから、最も重要な課題である。

炭素は、大気中でCO<sub>2</sub>、陸上でセルロースやリグニン、地中でフミン質、海中でHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等とその化学形態は変化するが、決して消滅することも生成することもない。循環するのみである。したがって、CO<sub>2</sub>の大気中濃度を制御する手段としては、CO<sub>2</sub>発生量の削減(非化石系エネルギーシステムの開発、広い意味での省エネルギー、植生の保護)と、CO<sub>2</sub>固定(植林など陸への固定、深海隔離など海中固定)に限定される。こうした考え方を、第1表に示した。

これらの対応策の実行は、いずれも容易ではない。例えば、代替エネルギーに関しては、核エネ

ギーは安全性に対する懸念、太陽エネルギーは大規模かつ高効率な技術が確立していない、という困難な問題をそれぞれ抱えている。省エネルギーは現実的な対応策である。しかし、原理的にも技術的にも限界があるので、これだけに依存するわけにはいかない。

このように、発生量の削減だけで何とかするという見通しが立たないために、固定という考えが生まれる。陸への固定の代表的なものは植林である。海への固定の代表的なものが、排煙から回収したCO<sub>2</sub>の深海への隔離、あるいは、ここで取り上げるサンゴ礁育成である。

さて、温暖化対策は全人類の合意に基づき、大規模に実行しないと十分な効果が期待できない。したがって、広く受け入れられ易いものである必要がある。サンゴ礁の育成は、この意味からは申し分がない。問題は、有効な対策と言えるのかどうかである。この点を議論するために、まず、対策として有効な固定とはどういうことか検討してみよう。

## 2. 有効な固定法の満たすべき条件

固定、固定と言われているが、温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>の固定は、次のような条件を満たすものでなければならない。第1に、大気中に蓄積するCO<sub>2</sub>の量を減らすことが目的であるから、その対

第1表 CO<sub>2</sub>問題対応策の分類

### イ)CO<sub>2</sub>発生量の削減

- 代替エネルギーの開発(太陽, 核, 地熱)
- 省エネルギー(効率改善, 節約, 産業ソフト化, リサイクル)
- 植生の保護

### ロ)炭素の固定

- 陸への固定(植林, 廃坑への注入)
- 海への固定(深海投棄, 吸収速度の促進)

1) 東京大学工学部: 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

第2表 化石燃料からの排出と大気への残留

	二酸化炭素濃度	化石燃料等からの二酸化炭素 放出量, 億 tC/y
西暦	ppmv	総計
1963	319.1	28.6
1968	322.8	36.0
1973	329.8	46.5
1978	335.2	50.8
1983	342.8	50.8*
1988	351.2	58.9

\* オイルショックのため液体燃料が大幅に減少した。  
国連統計1985/86

策を実行した結果、海か陸かの炭素が増えることが必要である。

第2に、固定の規模が大きいことが必要である。第2, 3表に示すように、化石資源の燃焼と森林破壊とで発生するCO<sub>2</sub>は、炭素換算で年率70~80億トンである。全部を固定する必要はないとしても、1億トン程度の規模でないとCO<sub>2</sub>対策とは言い難いだろう。

第3に、固定の効率が重要である。固定のために消費されるエネルギーから発生するCO<sub>2</sub>や、固定のための資材をつくるために発生するCO<sub>2</sub>よりも、固定されるCO<sub>2</sub>が多いことが必要である。

第4に、固定の期間が重要である。固定期間は、短すぎでは意味がないが、無限である必要もない。化石資源の可採埋蔵量や、化石資源代替エネルギーの開発の可能性などを考慮すると、期間が100年を越える固定は、十分検討に値する。逆に、永久固定というのはないといって過言でない。

さて、こうした観点から、サンゴ礁を觀てみよう。

### 3. CO<sub>2</sub>対策としてのサンゴ礁育成の評価

サンゴに関する誤解の最たるものは、海水からCaCO<sub>3</sub>が析出するから固定だというものである。上でまとめた固定の条件の第1は、「固定とは、海か陸の炭素を増やすこと」であった。海水中のHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>は、もともと「海に固定されていた」のであり、固体として析出させても意味はない。要は、その結果、大気と海とのCO<sub>2</sub>の交換がどうなるかである。これは、物理化学的に明快であり、CaCO<sub>3</sub>

第3表 熱帯林消失面積と造林面積 (FAO/UNEP, 億 ha または億 ha/y)

	熱帯林面積	熱帯林消失面積	造林面積	差
1981/85 平均	19.3	0.113(0.58%)	0.011	0.102
小泉(1990)				

が析出すれば海から大気へCO<sub>2</sub>は放出する。議論におよばない。

それにもかかわらず、固定だと期待する理由は、光合成が石灰化に卓越していると考えるからである。サンゴと共生している褐虫藻による光合成、さらには、サンゴ礁を構成する多様な生態系による光合成は、石灰化に卓越するというデータが多い。

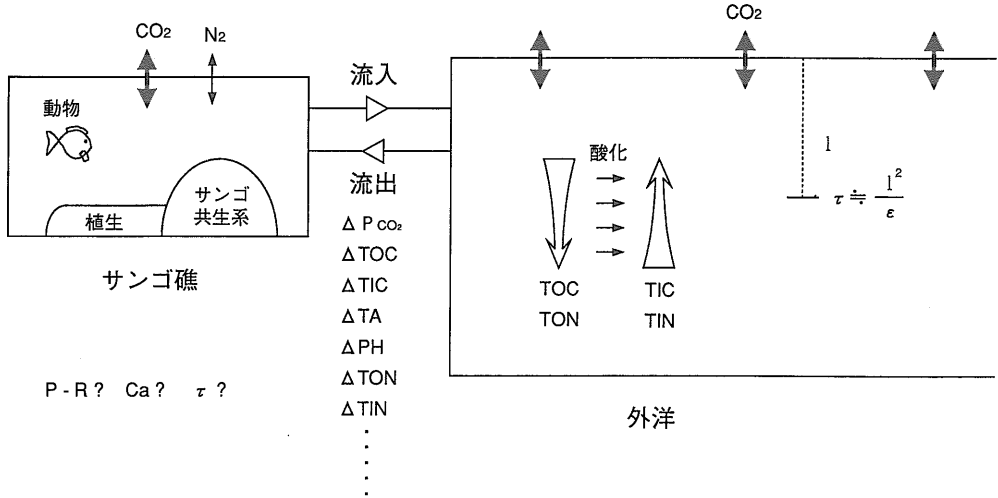
規模と効率は、有望である。世界中で、サンゴによる初期固定速度が年間数億トンと言われている(第4表)。海洋の広さを考えれば、人工サンゴ礁などで大規模な固定を行う可能性はある。固定の効率に関しても、エコシステムによる固定であるため、エネルギーを多量に消費するわけではない。固定は光合成の結果であるから、エネルギーは太陽光である。この点は、砂漠植林などで、例えば、海水淡水化にエネルギーを消費するといった例と比較して有利である。

固定の期間は十分検討しなければならない。サンゴに限らず、植物性プランクトンを増殖させることにより固定しようというCO<sub>2</sub>対策に対して、「やがて」無機化し、「最終的には」大気に放出されてしまうからだめだという議論がある。しかし、前述のように、放出までの期間が100年を越えるかどうか、対策として検討に値するか否かの分かれ目である。もし、海の表層で速やかに無機化し、大気に放出されるのだとすれば、あきらめた方が良からう。

第4表 植物体の存在形態別分布と生産速度

	面積 億 ha	植物 億 tC	密度 t/ha	純生産 億 tC/y	生産率 t/ha/y	時間
河口	1.4	6.3	4.5	10	7.1	0.63
藻場, サンゴ礁	2.0	5.4	2.7	7	3.5	0.77
湧昇流域	0.4	0.04	0.1	1	2.5	0.04
大陸棚	26.6	1.2	0.045	43	1.6	0.03
外洋	332.0	4.5	0.014	187	0.56	0.02
全海域	361.0	17.4	0.048	248	0.69	0.07

小島(1990), 小島(1989)



第1図 サンゴ礁による炭素収支評価モデルの概念図

P-Rは正味光合成, Caは炭酸カルシウム生成, τはCO<sub>2</sub>の放散時間, εは拡散係数, TOC=全有機炭素(total organic carbon), TIC=全無機炭素(total inorganic carbon), TON=全有機窒素(total organic nitrogen), TIN=全無機窒素(total inorganic nitrogen)

しかし、海洋の物質循環に不明な点が多いので断言はできないものの、窒素やリンなどの栄養塩とリンクして無機化された炭素は、おそらく、大気に放出されないだろう。さらに、数100 m以深で無機化されるとすれば、表層に拡散してくるまでの期間は100年を越える。光合成で生じた有機物の行方は、ひとつのキーである。

美しい透明なサンゴ礁のどこを、どの様な物理化学的な形態で、光合成された有機物が循環しているのだろう。粘液の量や行方、春行われるという大量の産卵、魚類による外海とのやりとりなど、意外に量的に大きいものがあるのかも知れない。

有機物の無機化、再放出の期間の議論からも明らかのように、サンゴ礁の役割には外洋との関係が重要である。むしろ、サンゴ礁内の海面を通じての大気とのやりとりよりも、外洋への影響が本質的である可能性も高い。つまり、サンゴ礁の生態系の活動の影響を含んだ海水が外洋へ流出し、その結果、サンゴ礁がなかったと仮定した場合と比較してCO<sub>2</sub>の吸収がどれだけ増えるかという視点が重要である。

さて、炭素の収支はCO<sub>2</sub>対策としての有効性を判定する最終目的である。したがって、光合成と呼吸の比、それらの差である正味の光合成速度と石灰化速度との比の測定が必要であることは言うまでも

ない。ただ、今までのデータを見ると、炭素収支だけで、これらの結果が明確になるかどうか疑問もある。こういう場合の有効なアプローチは、関連する別のデータを測定して、総合的に判断していくことである。サンゴの場合、それは、栄養塩収支であろう。つまり、栄養塩濃度は、律速と言えるかどうかははっきりしないが、光合成速度と密接に関係していることは明らかである。サンゴ礁の中での光合成のC:N:Pが、レッドフィールド比でよいのか、そもそもこの比はどのくらい一般的に成立するのか、不明である。したがって、栄養塩を測ればすべてOKとはいかないかも知れないが、窒素とリンの収支を空間的・時間的に測定して、炭素収支と対照して総合的に判断すれば、今よりもずっと高い精度の議論が可能になるだろう。

サンゴ礁の活発な光合成を支える栄養塩はどこから供給されるのだろう。サンゴの共生系で循環しているという説、外洋から供給されるという説などがあるが、サンゴ礁では窒素の固定が行われているというデータが報告されている。もし、海洋の光合成速度が窒素により律速されていると仮定すれば、マクロな収支で考えたとき、窒素の生産速度が、サンゴ礁の正味の働きとなるはずである。それほど事情は単純ではないとしても、窒素はサンゴ礁の鍵のひとつである。

以上、化学システム工学の専門家として、温暖化対策としてのサンゴ礁に関して論じた。誤りはあるだろうが、システム全体に影響を及ぼすような大きな誤りはないと思う。「にわかサンゴ屋」なので、多分マクロに捉えすぎていると思う。マクロな収支から研究を始めてみて、ミクロな視点とマクロな視点の融合、例えば、サンゴの生理とサンゴ礁の生態系との関わりなどが、全体の理解のためには必要だと感じていることを強調しておきたい。

#### 4. 本特集号の経緯

温暖化対策におけるサンゴ礁の意義については、これまでも様々な場で議論されてきたが、CO<sub>2</sub>放出/吸収それぞれの立場の研究者が同じ場で議論する機会はあまりなかったように思う。この問題にすでに平成元年より取り組んでいる工業技術院は、昨年(1992年)12月11日に環境技術研究総合推進会議において、サンゴ礁における地球温暖化対策技術についての討論会を企画し、私がその座長をつとめた。

討論会では、放出の立場から北海道大学の角皆静男教授、吸収の立場から地質調査所の茅根 創主任研究官が講演を行った。講演に続いて、琉球大学の森 保助教授からはサンゴ飼育水槽実験の結果について、海洋バイオテクノロジー研究所の荒井孝之副主任研究員からはサンゴの放出する有機物の形態と量について、東京学芸大学の岡崎恵視助教授からはサンゴと同様の問題を持つ円石藻について、東京大学の山田興一教授からはCO<sub>2</sub>吸収/放出の論点について、電子技術総合研究所の野崎 健主任研究官からはエコ・エネルギー基地としてのサンゴ礁についてコメントをいただいた。最後に、工業技術院の本城 薫地球環境技術企画官から、工業技術院の地球温暖化対策技術開発におけるサンゴ礁研究についてまとめの言葉をいただいて閉会した。

この討論会を終えてみて感じたことは、サンゴ礁の吸収/放出の議論については、これまでデータに基づかないモデル同士の議論が中心であったのに対して、論点が明確になりつつあり、ミクロなスケールでもデータがで始めている、ということである。そうした意味で、吸収/放出の間での接点が明らかになりつつあると感じられた。

本特集号は、本討論会で講演・コメントをいただいた方々に加え、サンゴ礁海域でのCO<sub>2</sub>分圧の測定技術を開発している計量研究所の北野 寛主任研究官はかと、栄養塩などの物質循環の立場からサンゴ礁を研究している地質調査所の山室真澄博士からも原稿をいただいてまとめたものである。討論会当日は時間の制限から、とくにコメントについて十分な時間をとれなかった。本特集号によって、サンゴ礁とCO<sub>2</sub>について十分な理解が得られることを期待する。

今後は、明らかにされた論点にそってデータを積み重ねることが重要である。しかしながら、サンゴ礁は、もしCO<sub>2</sub>の吸収の場として活用できるならば優れた対策技術になりうる。筆者としては、東京湾沖に巨大な人工サンゴ礁が建設され、CO<sub>2</sub>のシンクとして、また、リゾート地として役割を果たす、そんな夢を描いている。

#### 文 献

- 国連統計 (1985/1986) : 新エネルギー・産業技術総合開発機構情報センターデータ  
小泉 博(1990) : 大気中のCO<sub>2</sub>変動に対する森林生態系の役割—熱帯林を中心にして—。化学工業, 54(1), 22-25.  
小島紀徳(1990) : 陸上植物によるCO<sub>2</sub>の固定技術。MOL, 28(5), 56-61.  
小島 寛(1989) : 二酸化炭素と森林生態系。エネルギーレビュー, 1989-3, 14-18.

---

KOMIYAMA Hiroshi (1993) : Roles played by coral reef ecosystems in mitigating global warming.

---