

白嶺丸によるグレートバリアリーフ調査航海

鈴木 淳¹⁾・川幡 穂高²⁾

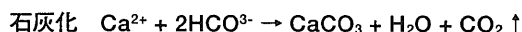
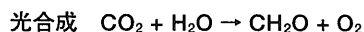
1. はじめに

1996年5月, 白嶺丸によるグレートバリアリーフの海洋学的調査が実施された。この調査は, 新エネルギー・産業技術総合開発機構の事業で, (株)関西総合環境センターに委託して実施された『海洋中の炭素循環メカニズムの研究(NOPACCS)』のNH96-1航海の第2節および第3節として企画されたものである。無数の浅瀬や狭小なチャンネルなど, 地形の変化に富むグレートバリアリーフ海域の航行にあたり, 細心の注意を払って調査計画が立案され, 実施に移された。白嶺丸は, 9日間のグレートバリアリーフ海域の航海によって, 14点での停船CTD観測および32点の航走中の採水と各種の航走連続観測に無事成功した。これらの観測結果の解析により, 世界最大のサンゴ礁であるグレートバリアリーフが潜在的な大気への二酸化炭素の放出源となっているという驚くべき事実が明らかになった。

2. サンゴ礁と大気二酸化炭素

サンゴ礁は, 熱帯から亜熱帯の浅海域に広く分布し, 活発な有機炭素生産が行われている場である。また, サンゴ礁にはサンゴや石灰藻類など, 骨格として炭酸カルシウムを分泌する生物が多く棲息し, 炭酸塩の生産量も大きい(Suzuki *et al.*, 1995)。サンゴ礁は, その活発な生物の代謝活動を通じて, 海洋全体の炭素循環システムの一部を担うが, サンゴ礁が全体として大気への二酸化炭素の放出源であるか, 吸収源であるのかという問題については, 多くの議論が交わされてきた。

二酸化炭素は大気-海洋境界において分圧が高い相から低い相へと移行する。より物理化学的に正確な表現をすれば, 「分圧」は「フィギャシティ(兆散能; fugacity)」と言い換えられるべきであるが, ここでは慣例にしたがい, 分圧を用いている。光合成は二酸化炭素の固定反応であるが, 反対に石灰化は海水の二酸化炭素分圧を上昇させ, 大気への二酸化炭素の放出を引き起こす(鈴木, 1994; Suzuki, 1998)。



したがって, 両反応が同時に進行しているサンゴ礁では, サンゴ礁全体としての役割を評価するために, 有機炭素生産量と炭酸塩生産量を比較することが重要である(鈴木, 1992)。ポリネシアの堡礁の海面における二酸化炭素フラックスの観測の結果, サンゴ礁が二酸化炭素の放出源となっていることが報告されている(Gattuso *et al.*, 1993)。しかし, その一方, 琉球列島の石垣島のサンゴ礁では, 群集が海水の二酸化炭素分圧を低下させる効果を持つことが報告された(Kayanne *et al.*, 1995)。また, これに対し, 石垣島のサンゴ群集は陸域からの栄養塩の流入によって藻類が増え, その結果, 有機炭素生産が大きくなっているとする指摘もある(Gattuso *et al.*, 1996)。サンゴ礁の代謝活動は, 生物の構成や水温, 栄養塩および海水の滞留時間など, 海洋環境によって大きく影響されると考えられる。また, 陸域に近接して分布する裾礁では, 陸域からの淡水の流入も物質循環に大きく影響することが予想される。個々のサンゴ礁の特徴を踏まえた上で, サンゴ礁生態系の一般的な挙動の解明が求められている(鈴木ほか, 1996)。

1) 地質調査所 海洋地質部
2) 地質調査所 海洋地質部 / 東北大学大学院理学研究科

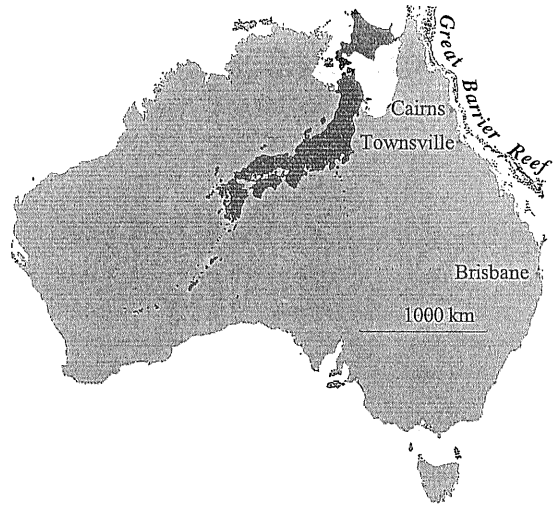
キーワード: 白嶺丸, グレートバリアリーフ, サンゴ礁, 二酸化炭素, 炭酸

3. 航海計画の立案

1992年のNH92-1航海に際してパラオに寄港した白嶺丸に搭載された二酸化炭素分圧計は、その堡礁の礁湖の二酸化炭素分圧が、外洋よりも著しく高いことを示した(Kawahata *et al.*, 1997). また、1994年9月にNH94-2航海の途中に寄港したマーシャル諸島のマジュロ環礁の調査でも、同様に礁湖の二酸化炭素分圧が高いことが明らかになった(Suzuki *et al.*, 1997, Kawahata *et al.*, 1999). マジュロ環礁などの海洋島のサンゴ礁は、陸域からの影響が少なく、また、大きな礁湖は海水の滞留時間が長い代謝活動の平均的な状態を反映するので、サンゴ礁生態系の一般的な挙動を検討するのに適していると思われる。この2つのサンゴ礁の結果は、少なくとも大きな礁湖を持つ海洋島のサンゴ礁が、二酸化炭素の放出源になっている可能性を強く示唆する。では、礁湖の海水の二酸化炭素分圧が外洋に比べて高いという現象は、普遍性を持つのであろうか？

この問題を検討するのに最適のサンゴ礁は、世界最大といわれるグレートバリアリーフであろう。そこで『海洋中の炭素循環メカニズムの研究』が延長され、南太平洋も調査対象とするようになったため、グレートバリアリーフ海域での海水の炭酸系を観測することが計画されたのである。

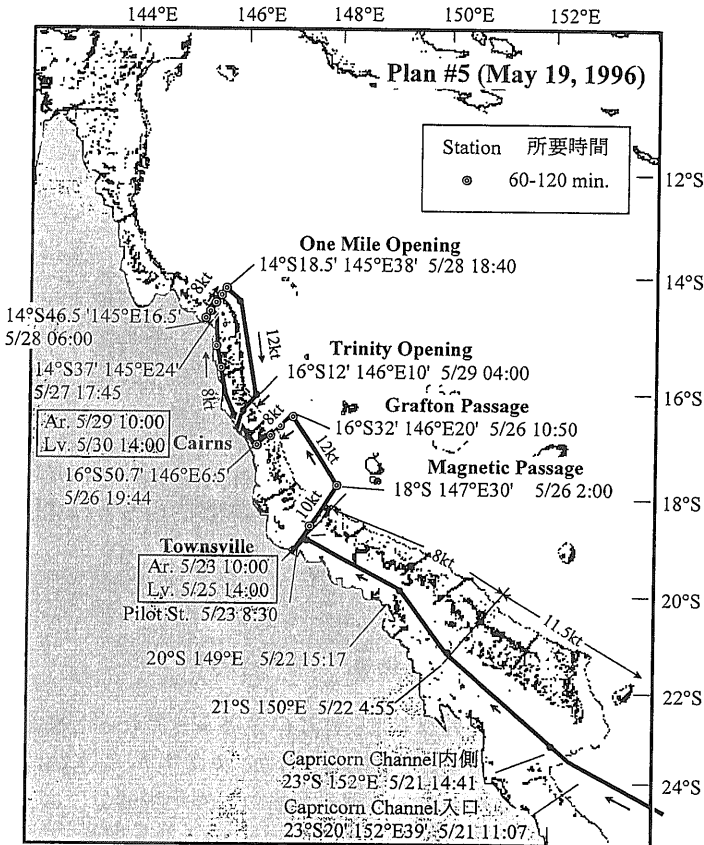
グレートバリアリーフは、オーストラリア大陸北東岸のおよそ南緯23度から南緯11度にかけての陸棚上に分布する大規模なサンゴ礁海域である(第1図)。全長は2,700 km, その面積は224,000km²に及び、これは日本の国土面積(370,000km²)のおよそ6割に相当する。グレートバリアリーフ海域は、無数の浅瀬や狭小なチャンネルなど、地形の変化に富むにもかかわらず、海図の整備は必ずしも万全とはいえない。準備にあたっては、調査の前年より、白嶺丸の高橋船長はじめ航海士・機関士の方々と何度も会合を開いて、航行や操船にも細心の注意を払いながら航海計画が立案された(第2図)。また、グレートバリアリーフ域の調査航海は、オーストラリア海洋科学研究所(Australian Institute of Marine Science; AIMS)の鮎貝天志博士との共同研究として実施されることとなった。この海域に設定されているオーストラリア海洋科学研究



第1図 グレートバリアリーフと日本の大きさ比べ。グレートバリアリーフの北端トール海峡(Toress Strait)を稚内に対比すると、南端のカプリコーン水路(Capricorn Channnel)はちょうど鹿児島に対応する。

所の定期的な観測測線のいくつかを通過するように白嶺丸の航路が選定された。また、海水中の溶存態・粒子態有機炭素濃度についてはオーストラリア海洋科学研究所で分析されることとなった。調査海域は、グレートバリアリーフ海洋公園として、人間の活動が制限・管理されている。グレートバリアリーフ海洋公園局に調査計画案を提出して許可を求めるとともに、排水制限など、環境への配慮も十分に検討された。

グレートバリアリーフ調査中に、タウンズビルとケアンズの2ヶ所に寄港することも決まった。タウンズビルには、オーストラリア海洋科学研究所があり、ここでオーストラリア側からの調査機材を積み込み、調査の後、ケアンズで採取した試料と機材を降ろす予定となった。タウンズビルからケアンズまでの間を重点調査海域として多数の観測点が配置された。また、堡礁の間のチャンネルを何度も通過して、礁湖と外洋の海水の組成の違いを捉えるように航路が設定された。狭小なチャンネルの通過には危険が伴うため、この海域の航路に詳しい現地の水先案内人(pilot)の乗船を求めることとなった。



第2図

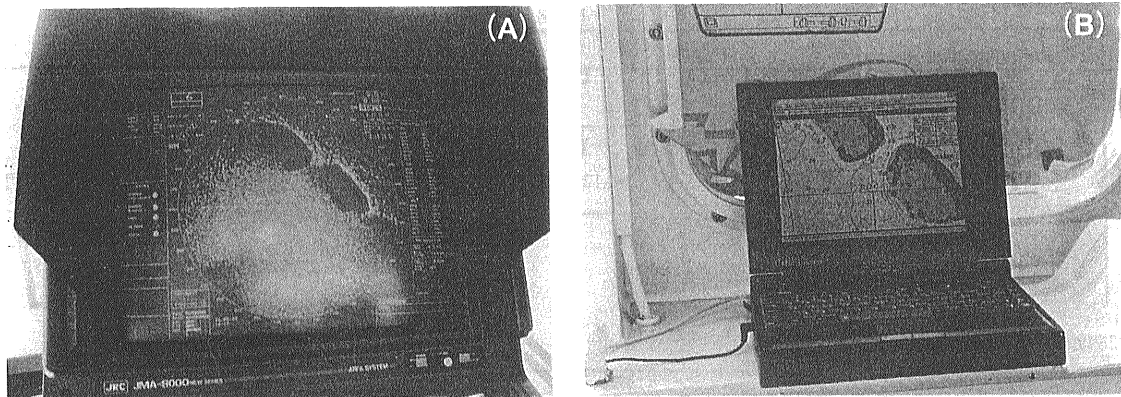
白嶺丸航海NH94-1におけるグレートバリアリーフ調査測線の計画図。採水地点の他、チャンネルの通過時刻や航行速度などが細かく検討された。

4. いよいよグレートバリアリーフへ

ニュージーランドのウェリントンを出港し北上を続けた白嶺丸は、1996年5月21日、カプリコーン水路よりグレートバリアリーフ海域に入り、航走中の二酸化炭素分圧観測および表層採水を実施しながら、5月23日にタウンズビルに入港した。さらに、5月25日にタウンズビルを出港後、マグネチック水路を通過して外洋に出、この途中で2点のCTD観測採水と航走中の二酸化炭素分圧観測および採水を実施した。翌5月26日は、グラフトン水路を通過して礁湖に至る測線上で4点のCTD観測採水を実施した。5月27日は、ケアンズ付近の礁湖を航行し4点のCTD観測採水と1点の現場濾過を実施した後、夜間はリザード島近海で投錨、停泊した。翌5月28日は、ワンマイル水路（第4図）を通過する測線上で4点のCTD観測採水と1点の現場濾過を実施した後、外洋に出て南下し、トリニティー水路より、5月29日ケアンズに入港した。

本調査では、表層海水についてサンプリング頻度を増すために、船底から船内へ揚水している海水を第4研究室で分析に供した。この海水が揚水されることによって変質していないことは、前年のNH95-1航海の際に、pH・全炭酸・全アルカリ度および栄養塩について確認されている。この船底から揚水した海水は、二酸化炭素分圧の測定に用いられており、溶存炭酸関連成分の分析の内部一致性 (internal consistency) を検討できるほか、炭酸系の状態の精密な解析に適している。なお、粒子態有機炭素・無機炭素および溶存態有機炭素濃度測定用の海水は、配管内壁からの異物の混入の可能性を嫌い、第3研究室脇の舷側からのバケツ採水による。

本調査期間中、CTD観測採水14点、第4研究室内での採水と舷側での表層採水をあわせて32点の観測を実施した。また、航走観測期間中、船底における海水の水温、塩分、蛍光強度を5分間隔で、また海水の二酸化炭素分圧および船首から採



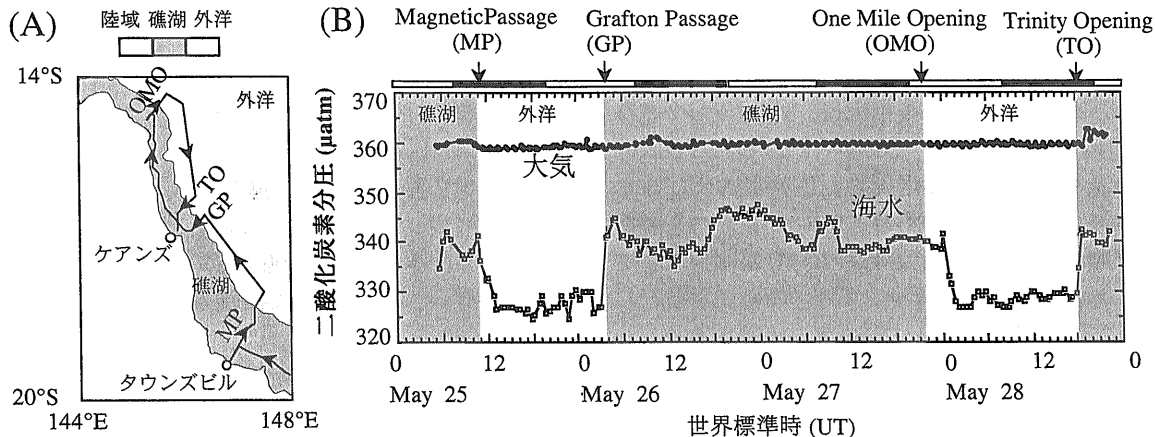
第3図 (A) リーフの位置を写し出すレーダー像。波による乱反射を拾うように調整され、水路と波のない浅瀬との区別が明瞭になっている。この操作は現地の水先案内人の指示による。中央の水路がワンマイル水路 (One Mile Opening) であり、最も狭い部分の幅は約1,000 m であって、水路の名前もこの幅に由来する。(B) レーダー像に対応する周辺の海図。タウンズビルから乗船した水先案内人が使用した電子海図で、GPS (全地球測位システム) と組み合わせて現在の船の位置も表示される。

取した大気の二酸化炭素分圧を20分間隔で連続測定した。

筆者の一人、調査団長であった川幡が、ウェリントンからカプリコーン海峡への航行中に急性十二指腸潰瘍による激しい胃痛に見舞われ、治療のためタウンズビルで下船するという事態があったにもかかわらず、予定された航海と分析作業は順調に進められ、一連の調査は無事終了した。

5. 驚くべき結果

礁湖の海水は、外洋の表層水と異なった水塊特性を示すことが観測された。カプリコーン水路における外洋水と礁湖の海水の二酸化炭素分圧は、それぞれ310-330 μ atm, 320-360 μ atm であって、礁湖の海水の二酸化炭素分圧のほうが高い (Kawahata *et al.*, in press)。タウンズビル以北の海域でも同じ傾向が認められ、外洋水とラグーン海水の二酸化炭素分圧は、それぞれ325-330 μ atm, 335-



第4図 グレートバリアリーフ北部の海水の二酸化炭素分圧測定結果。航路図 (A) に沿っての航走観測の結果を (B) に示す。(B) のハッチの部分に礁湖内のデータである。

350 μ atmである(第4図)。この海域の外洋水と礁湖の海水の二酸化炭素分圧はともに大気中の二酸化炭素分圧(平均360 μ atm)よりも低いため、全体として二酸化炭素の吸収海域となっているものの、サンゴ礁生物の代謝活動が礁湖の二酸化炭素分圧を増加させ、相対的・潜在的に二酸化炭素を放出させる海域になっていることを示す。海水の全炭酸と全アルカリ度の分析結果も、礁湖の高い二酸化炭素分圧が生物の石灰化によることを示している。

熱帯低緯度の貧栄養海域に分布するパラオ堡礁やマジロ環礁などの海水の滞留時間が長いサンゴ礁では、有機炭素の分解が進み、石灰化の効果が蓄積して、サンゴ礁海水の二酸化炭素分圧は上昇する(Suzuki *et al.*, 1999)。これらのサンゴ礁でも礁原部分は二酸化炭素の吸収効果を持つ可能性があるが、ひとつのサンゴ礁全体としては、放出効果が卓越すると考えられる。サンゴ礁は、地形や生物群集に大きな多様性を持つが、パラオ堡礁やマジロ環礁(鈴木ほか, 1996)に加えて、大陸縁辺に位置する世界最大規模のサンゴ礁グレートバリアリーフからも同様の結果が得られた。一般的にサンゴ礁が海洋の炭素循環のなかで大気への二酸化炭素の放出の場となっていることが強く示唆されたことの意義はきわめて大きい。

6. おわりに

白嶺丸のグレートバリアリーフ航海での観測事実は、それまでのサンゴ礁の大気二酸化炭素についての放出源か吸収源かという議論に、大きなインパクトを与えたと思われる。この調査結果の公表論文は現在印刷中である(Kawahata *et al.*, in press)。本調査航海の許可申請にあたり、オーストラリア海洋科学研究所の鮎貝天志博士の御協力をいただいた。また、船上での化学分析は(株)関西総合環境センターによるものである。このように多い調査航海を安全に実施できたのも、高橋船

長はじめ白嶺丸乗組員の御尽力によるものに他ならない。2000年3月末の白嶺丸の運行終了にあたり、本研究を支えてくださった多くの関係者の御助力に心から感謝の意を表します。

文 献

- Gattuso, J.-P., M. Pichon, B. Delesalle, M. Frankignoulle (1993) : Community metabolism and air-sea CO₂ fluxes in a coral reef ecosystem, (Moorea, French Polynesia). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 96, p.259-267.
- Gattuso, J.-P., Frankignoulle, M., Smith, S. V., Ware, J.R., Wollast, R. (1996) : Coral reefs and carbon dioxide. *Science*, 271, p.1,298.
- Kawahata, H., Suzuki, A., and Goto, K. (1997) : Coral reef ecosystems as a source of atmospheric CO₂: evidence from PCO₂ measurements of surface waters. *Coral Reefs*, 16, p.261-266.
- Kawahata, H., Suzuki, A., and Goto, K. (1999) : PCO₂ spatial distribution in coral reefs of Majuro Atoll, Marshall Islands. *Geochem. J.*, 33, p.295-303.
- Kawahata, H., Suzuki, A., Ayukai, T. and Goto, K. (2000) : Distribution of the fugacity of carbon dioxide in the surface seawater of the Great Barrier Reef. *Mar. Chem.* (in press).
- Kayanne, H., Suzuki, A. and Saito, H. (1995) : Diurnal changes in the partial pressure of carbon dioxide in coral reef water. *Science*, 269: p.214-216.
- 鈴木 淳 (1992) : サンゴ礁生態系における物質生産. *地質ニュース*, no.452, p. 42-50.
- 鈴木 淳 (1994) : 海水の炭酸系とサンゴ礁の光合成・石灰化によるその変化-理論と代謝量測定法-. *地質調査所月報*, 45, p.573-623.
- Suzuki, A. (1998) : Combined effects of photosynthesis and calcification on the partial pressure of carbon dioxide in seawater. *J. Oceanogr.*, 54, p.1-7.
- Suzuki, A. and Kawahata, H. (1999) : Partial pressure of carbon dioxide in coral reef lagoon waters: comparative study of atolls and barrier reefs in the Indo-Pacific Oceans. *J. Oceanogr.*, 55, p. 731-745.
- 鈴木 淳・川幡徳高・後藤浩一 (1996) : サンゴ礁における大気-海洋間の二酸化炭素交換-パラオ堡礁・マジロ環礁の炭酸系化学- *月刊海洋*, 28 (8), p.487-492.
- Suzuki, A., Kawahata, H., and Goto, K. (1997) : Reef water CO₂ system and carbon cycle in Majuro Atoll, the Marshall Islands in the central Pacific. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, Panama, 1, p.971-976.
- Suzuki, A., Nakamori, T., and Kayanne, H. (1995) : The Mechanism of production enhancement in coral reef carbonate systems: model and empirical results. *Sediment. Geol.*, 99, p.259-280.

SUZUKI Atsushi and KAWAHATA Hodaka (2000) : Hakurei-maru cruise in the Great Barrier Reef.

<受付: 2000年5月8日>