

サンゴ礁の水中ボーリング技術の開発と その科学的必要性

菅 浩伸¹⁾・安達 寛²⁾・中島洋典³⁾・内藤玄一⁴⁾

1. はじめに ～サンゴ礁のボーリング調査～

1896年に初めてサンゴ礁でボーリングが行われて(Sollas, 1904)1世紀あまりが経過した。当初のサンゴ礁構造の研究ではDarwinの沈降説を検証するため、海洋プレート上の環礁にて基盤の火山岩を目指した深層ボーリングが競って行われた。くしくも原爆実験が契機となってBikini環礁やEniwetok環礁でもボーリング調査が進んだ(Emery *et al.*, 1954; Ladd and Schlanger, 1960など)。日本では基盤には達しなかったものの北大東島での431.7mの掘削(Hanzawa, 1940)は有名である。このような深層ボーリングはきわめて大規模なプロジェクトであった。

1970年代半ばから、礁原部の完新世堆積層に焦点を絞り多くのコアを採取する多孔浅層ボーリングが行われ始め、サンゴ礁の形成史が断面に描かれた等時間線を用いて論じられ始めた(Easton and Olson 1976; Macintyre and Glynn, 1976)。日本でも喜界島にて多孔浅層ボーリングが行われた(Konishi *et al.*, 1978)。このような研究が活発になった背景には、放射性炭素年代測定法の確立とともに、研究者自身の手によって掘削が可能な簡易ボーリング機の開発があった。

この時期、水中で使用できる簡易ボーリング機の開発が相次いだ。その仕様も油圧式(Macintyre, 1975; 1978)、圧縮空気を用いたピストル型エアドリル(Davies and Stewart, 1976)、水中用ハウジングに納めた充電式電気ドリル(Easton, 1981)

などが検討された。このうち、圧縮空気を用いたエアドリルは、長さ30cm程度のコアを多数得るために都合がよい(Davies *et al.*, 1977)。しかし、最も掘進深度が大きく信頼できる方式は油圧式であった。Macintyreの油圧式ボーリング機は数多くの地質試料採取に威力を発揮しており(Macintyre and Glynn, 1976; Adey *et al.*, 1977; Glynn and Macintyre, 1977など)、Shinn *et al.* (1977)でも同型のボーリング機が用いられている。日本でのKonishi *et al.* (1978)や、オーストラリアでの完新統を貫く掘削においても油圧式が採用された。ただ、水中で使用可能なボーリング機が必ずしも潜水調査をしてコアを得る道具とはなり得なかった。礁斜面の水深10～20m地点にてダイバーによる掘削を成功させた例はMacintyreのグループ(Adey *et al.*, 1977; Macintyre *et al.*, 1981)にみられる程度である。ここに水中で掘削するための作業手法確立の重要性がある。

近年、再び大規模プロジェクトとして大深度礁斜面にて掘進深度の大きなボーリングが行われ、完新世初期の海面変動などの環境変遷史が明らかになった例もある(Fairbanks, 1989)。しかし、一方で礁斜面の地形・地質構造に関する研究も再び進み出そうとしている(Blanchon, 1997など)。従来の研究でデータの集積がみられた礁原の構造と形成過程に対して、礁斜面のそれに関するデータはきわめて少ない。外洋側の海中にて使用できる学術研究のための水中用簡易ボーリング機の開発と作業手法の確立が待望されていた。

1) 岡山大学 教育学部:
〒700-8530 岡山県岡山市津島中3-1-1

2) (株)ジオアクト

3) 有明高等専門学校 一般科

4) 防衛大学校 地球科学科

キーワード: ボーリング機, 水中調査装置, 方法論, サンゴ礁, サンゴ年輪

2. サンゴ年輪研究におけるボーリング調査の意義と今後の展開

造礁サンゴの周期的成長とそれに伴う成長輪の形成は19世紀終盤から指摘され(Wells, 1963), その後各地で成長速度に関するデータの集積がみられた。当初のサンゴ年輪研究の主な目的は石灰化速度の解明にあったが, サンゴ成長速度と海水温との関係が指摘され(Ma, 1934), 環境指標としての検討も始まった。一方, 古生代のサンゴにも成長輪が存在することが確認され(Ma, 1933), 年輪中に刻まれた日輪を数えることによって, 古生代には地球の自転速度が速かった(約400日/年)ことが明らかになった(Wells, 1963)。このように, 初期の研究は成長輪というパターンの検出とその説明・応用に注がれた。

従来, 顕微鏡下で行われてきたサンゴ年輪の研究であるが, X線写真による成長輪の可視化(Knutson *et al.*, 1972)によってパターンの検出が簡易化された。しかし, 依然としてサンゴ群体をまるごと切断する方法であったため, 小さな群体すなわち短期間の成長記録しか解析できなかった。そんな中, Macintyreによる簡易水中ボーリング機の開発は, サンゴ年輪研究にも大きな影響を与えた。Hudson *et al.* (1976)は同型のボーリング機を用いてMontastrea annularisの大群体を掘削し, 30cm前後のコアを多数得た。以降, より長いコアを得ることによって過去にさかのぼった連続的な成長記録が議論されるようになる。また, 試料とするサンゴ群体を生かしたままにできることも, 様々な方面の研究を可能とした(Hudson, 1977など)。

一方, 1970年代には, 従来, 古水温指標として用いられてきた酸素同位体比がサンゴ骨格にも適用できそうであること(Weber and Woodhead, 1972), 炭素同位体比が日照量・水深など共生藻の活動と関係すること(Weber, 1974)が明らかになる。また, 水温と骨格中のストロンチウムに相関があること(Weber, 1973; Smith *et al.*, 1979)が指摘されるなど, 骨格中の同位体比や微量元素が環境指標になることが注目され, 以降, その対応関係が検討されてきた。その結果, これらを組み合わせ, 海洋古環境の変遷が明らかになるとの展望が開けてきた。それとともに, より大きな群体から長

尺コアの採取が試みられ100年を越す環境変遷が明らかになってきた(Isdale, 1984など)。この過程で, サンゴ骨格のコアを得る目的で新たな油圧式ボーリング機も開発されている(Isdale and Daniel, 1989)。

現生サンゴを用いた環境復元の試みは化石サンゴにも適用され, 完新世の環境変遷が議論されるようになる。井口ほか(1983)は, 琉球列島喜界島にて3500年前のサンゴ群体から海洋古環境の変動を論じている。Gagan *et al.* (1997)は, Great Barrier ReefのOrpheus島にて化石サンゴ群体の掘削を行い, 約5800年前の大陸沿岸での降水変動を明らかにしている。いずれも既に礁の掘削によって形成過程が明らかになった礁原上の化石サンゴを再掘削したものである。このような完新世の古環境解析にサンゴ群体が用いられ始めた背景には, 年代測定法の確立とともに, サンゴ礁の地質構造・形成過程を明らかにする目的での掘削研究の進展が大きく寄与している。

近年, 地球温暖化に代表される全球的環境問題の浮上に伴い, 熱帯・亜熱帯域における広範な地域での環境変動記録としてサンゴ骨格の有用性が指摘されている。しかし, 浅海域に生息する造礁サンゴは地域的要因の影響を受けやすい。特に, 塩分や水温変動の著しい礁原・礁湖に生息するサンゴ骨格を用いた場合, そこから得られた微量元素や同位体の値がどれほど一般性をもつのか疑問が残る。しかし, これまで研究に用いられたサンゴ群体は礁原あるいは礁湖中のものがほとんどである。現在, 外洋側にて長期間の記録を有するサンゴ骨格コアの必要性が認識されてきた理由はここにある。そして今後, 熱帯・亜熱帯域の環境記録を数千年の過去にさかのぼるために, 礁斜面堆積層コア中のサンゴ骨格が必要とされるであろう。サンゴ年輪研究においても, 外洋側で使用できる掘進トルクの大きい水中ボーリング機の開発および外洋側での掘削手法の確立が必要とされる背景はここにある。

3. 水中用ボーリング機および作業手法の開発

(1) 機器の構成

今回, 我々はサンゴ礁外洋側の礁斜面で完新世

の堆積層コアを採取することを目的として簡易ボーリング機（株）ジオアクト製KT-O型オイルフィードタイプボーリング機）の開発に取り組んだ。均質ではないサンゴ礁堆積層をなるべく深く掘進するためには、十分なトルクを確保する必要がある。柔らかく均質なサンゴ群体の掘削は堆積層の掘削より容易である。しかし、径の大きなコアを採取するためには、ある程度大きなトルクを有する方がよい。油圧方式は水中での作動安定性と十分なパワーを備えているため、今回我々が作製したボーリング機本体に採用した。また、補助用として、トルクは小さいものの携行性に優れた、空気ポンペを動力源とするエアドリルを使用することとした。

油圧ボーリング装置は、船上の油圧パワーユニットと水中でドリルビットを回転させる油圧モーター、両者をつなぐ油圧ホース、さらに、ドリルビット先端に水を送りビットの冷却・スライムの除去を行うための高圧送水ポンプ・ホースより構成される。当初、油圧モーターではなく油圧ドリルを用いたが、1997年8月の試験掘削にてトルクが小さく掘進に不安を残すことが判明したため、その後油圧モーターに改良した。油圧モーターには内径50mmのパック型ダブルコアチューブをセットした。ドリルビットはメタルビット2種類とダイヤモンドビットを用意した。

補助用のエアドリルは、レギュレーターファーストステージに接続し、通常のSCUBAダイビングに用いる空気ポンペを利用できるようにした。ここでは、このエアドリルに通常の木工用ドリルビットを装着し、マストを固定するアンカーボルト用の小孔をあけるために用いた。エアドリルは単体でもボーリング機として用いることが可能である。しかし、トルクが小さく、1本のタンクでの掘削可能深度が浅い。柔らかく均質なハマサンゴの短尺コア掘削などには使用できる。エアドリル用には内径55mmのシングルコアチューブを用意した。

以上の機器構成で20m程度の水深でも掘削できるものとした。ただし、水深とともに人間の潜水可能時間は短くなり、水深10m以深での掘削作業には減圧潜水を要する場合が多くなる。現在の空気ポンペを用いたSCUBA潜水での作業には本機の掘削可能水深は十分なスペックであるといえよう。

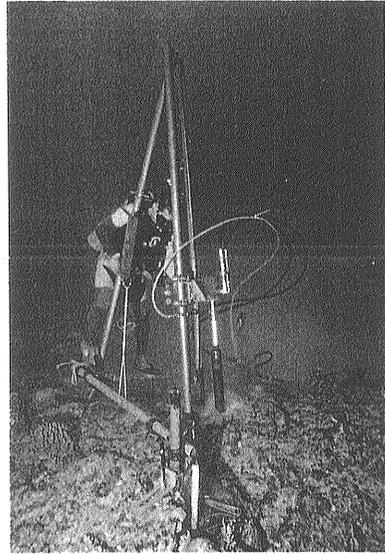


写真1 掘削補助マストに固定した油圧モーター・コアチューブ（1997年12月、久米島南西沖の水深12mにて）。

(2) 水中での掘削補助マスト

水中では浮力の影響で擬似的な無重力状態になるため、作業を行うための反力を得にくい。これは、コアビットの押し込み、引き上げ回収等の作業過程で問題となる。また、波浪や流れの影響を受ける外洋の浅海底で掘削孔をまっすぐに安定させるためにも補助マストが必要となる。補助マスト（写真1）の設計・作成は本ボーリング装置で最も思案を要した工程であった。

マストの主要部、油圧モーターを上下させる仕組みは以下の通りである。2本のステンレス製パイプ（長さ2.4m）を地面に垂直に立てるよう並べて組み、その間で油圧モーターをとりつける台座を上下に滑らせる。台座はチェーンを介した手動の回転動作で上下させる仕組みとした。マストの上端には長さの調整が可能なステンレス製補助パイプを接続し、油圧モーターを上下動させる2本のパイプを立て、この角度を調整することを可能にした。次に、マストを安定して自立させるため、マスト下部を三角形に組んだパイプに固定した。さらに、海底の起伏に対応できるように、三角形の交点に垂直に立てた短いパイプを配し、これらにL型金具を取り付けアンカーボルトで海底に固定した。

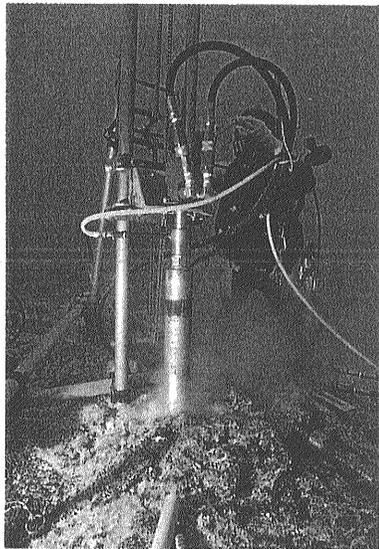


写真2 ケーシングを挿入しながらの掘削(1997年12月, 久米島南西沖の水深12m地点にて)。

(3) フィールドでの掘削

機器の試験と外洋側での掘削手法の開発を兼ねた試験は1997年8月と1997年12月～1998年1月にかけて、琉球列島久米島のサンゴ礁斜面にて行った(菅ほか, 1998)。作業水深は6～14mであった。

作業は、まず、掘削地点にマストを設置し、この直上に船を4本のアンカーロープで固定する。日時によって風向き・潮流が変化するため、このアンカー打ちは非常に重要である。8月に行った最初の掘削に際しては、この点が十分でなかったため船の固定にきわめて多くの時間と労力を費やす結果となったが、その後改善することができた。

コアチューブの回転には当初油圧ドリルを用いたが、後にトルクの大きい油圧モーターを採用したことにより、掘削限界深度が深くなり、ケーシング作業も可能となった。12月からの掘削では、砂礫質の構成物を挟む堆積層であったためケーシング(φ85mmを3mとφ75mmを7m)を挿入しながらの掘削(写真2)を行い7.45mまで掘進をした(基盤に達して掘削終了)。

掘削作業には熟練したダイバーが最低4名と船上での作業員1名以上が必要である。調査チーム内にはボーリング機の操作に慣れたダイバーが必要である。今回行った2度のフィールド調査では、1カ

所の掘削作業に準備・片づけを含めて数日から10日あまりを要した。作業時間が長くなるため水深10m以深での掘削作業は、減圧潜水を伴う場合が多かった。

今回の掘削で本機は完新統を貫く掘削を行うに十分な性能を有することが判った。また、サンゴ礁外洋側の波浪に耐える掘削手法もある程度確立できた。今後、作業者の減圧症対策が向上すれば、より効率的作業が可能となるであろう。

4. おわりに

今回作製したダイバーによって操作できる水中用ボーリング機とそれを用いた掘削手法の開発は、サンゴ礁外洋側の浅海底でのコア採取を可能とした。これによって、研究者自身が水中にて大サンゴ群体の掘削はもちろん、堆積層コアをケーシングを挿入しながら掘削することができる。開発にあたっては可能な限り軽量コンパクトに設計した。フィールドでの掘削においても良好な作動性能と操作性を示した。今後、サンゴ礁研究・海洋古環境研究をはじめとした浅海底での調査研究に有用な機材となるであろう。

謝辞：本機器開発の機会は、防衛大学特別研究費によって提供されたものである。フィールドでの掘削経費の一部には文部省科学研究費(萌芽的研究：平成9～11年度)課題番号09878028(中島洋典)を使用した。現地においては赤間節雄、与那城徳太郎、安村 猛、宍戸誠一郎の各氏の協力を得た。

引用文献

- Adey, W.H., Macintyre, I.G., Stuckenrath, R. and Dill, R.F. (1977) : Relict barrier reef system off St Croix: its implication with respect to late Cenozoic coral reef development in the western Atlantic. Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp., 2, 15-21.
- Blanchon, P. (1997) : Architectural variation in submerged shelf-edge reefs. Proc. 8th Int. Coral Reef Symp., 1, 547-554.
- Easton, E.H. and Olson, E.A. (1976) : Radiocarbon profile of Hanauma Reef, Oahu, Hawaii. Geol. Soc. Am. Bull., 87, 711-719.
- Easton, W.H. (1981) : A submersible, rechargeable, electric drill. Atoll Res. Bull., no. 255, 83-90.
- Emery, K.O., Tracey, J.I. Jr. and Ladd, H.S. (1954) : Geology of Bikini and nearby atolls. U.S. Geol. Survey Prof. Pap., 260-A, 1-265.
- Davies, P.J., Marshall, J.F., Foulstone, D., Thom, B.G., Harvey, N., Short, A.D. and Martin, K. (1977) : Reef growth, southern great

- barrier Reef - preliminary results. BMR Jour. Aust. Geol. Geophys., 2, 66-72.
- Davies, P.J. and Stewart, D.B. (1976) : Scuba-operated coring device. BMR Jour. Aust. Geol. Geophys., 1, 246-247.
- Fairbanks, R.G. (1989) : A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the younger Dryas event and deep-ocean circulation. Nature, 342, 637-642.
- Gagan, M.K., Anker, S., Ayliffe, L.K., Barnes, D.J., Chappell, J.M.A., Hopley, D., Isdale, P.J., Lough, J.M. and McCulloch, M.T. (1997) : Massive corals: grand archives of Australian palaeoclimate. In: Turia, N. and Dalliston, C. (eds.) Proc. Great Barrier Reef Natl. Conf., Townsville, 1, 195-209.
- Glynn, P.W. and Macintyre, I.G. (1977) : Growth rate and age of coral reefs on the Pacific coast of Panama. Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp., 2, 251-259.
- Hanzawa, S. (1940) : Micropaleontological studies of drill cores from deep well in Kita-Daito-jima. 矢部教授還暦記念論文集, 2, 755-802.
- Hudson, J.H., Shinn, E.A., Halley, R.B. and Lidz, B. (1976) : Sclerochronology: a tool for interpreting past environments. Geol., 4, 361-364.
- Hudson, J.H. (1977) : Long-term bioerosion rates on a Florida reef: a new method. Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp., 2, 491-497.
- 井口真仁, 佐藤野廣, 岩原豊起, 小西健二 (1983) : イシサンゴ群体の骨格年代学を用いた完新世海洋古環境の精密解析 - 琉球列島喜界島の場合 - . 地球, 5, 739-752.
- Isdale, P. (1984) : Fluorescent bands in massive corals record centuries of coastal rainfall. Nature, 310, 578-579.
- Isdale, P. and Daniel, E. (1989) : The design and development of a lightweight submarine fixed drilling system for the acquisition of coral cores. Mar. Tech. Soc. Jour., 23 (1), 3-8.
- 菅 浩伸, 中島洋典, 安達 寛, 内藤玄一 (1998) : サンゴ礁斜面の掘削 - 琉球列島久米島における海底平坦面の構造と形成 -. 日本地理学会予稿集, No.53, 156-157.
- Konishi, K., Tsuji, Y., Goto, T. and Tanaka, T. (1978) : Holocene raised reef drilling at Kikai-jima, central Ryukyus, No.1. Sci. Rept. Kanazawa Univ., 23 (2), 129-153.
- Knutson, D.W., Buddemeier, R.W. and Smith, S.V. (1972) : Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals. Science, 177, 270-272.
- Ladd, H.S. and Schlanger, S.O. (1960) : Drilling Operations on Eniwetok Atoll. U.S. Geol. Survey Prof. Pap., 260-Y, 863-903.
- Ma, T.Y.H. (1933) : On the seasonal change of growth in some Palaeozoic corals. Proc. Imp. Acad., 9, 407-409.
- Ma, T.Y.H. (1934) : On the growth rate of reef corals and the sea water temperature in the Japanese islands during the latest geological times. Sci. Rept. Tohoku Imperial Univ., 2nd Ser., 16, 165-189, 4 pls.
- Macintyre, I.G. (1975) : A diver-operated hydraulic drill for coring submerged substrates. Atoll Res. Bull., no.185, 21-26.
- Macintyre, I.G. and Glynn, P.W. (1976) : Evolution of modern Caribbean fringing reef, Galeta Point, Panama. A.A.P.G. Bull., 60, 1054-1072.
- Macintyre, I.G. (1978) : A hand-operated submersible drill for coring reef substrata. In: Stoddart, D.R. and Johannes, R.E. (eds.) Coral reefs: research methods. UNESCO, Paris, 75-80.
- Macintyre, I.G., Burke, R.B. and Stuckenrath, R. (1981) : Core Holes in the Outer Fore Reef off Carrie Bow Cay, Belize: A Key to the Holocene History of the Belizean Barrier Reef Complex. Proc. 4th Int. Coral Reef Symp., 1, 567-574.
- Shinn, E.A., Hudson, J.H., Halley, R.B. and Lidz, B. (1977) : Topographic control and accumulation rate of some Holocene coral reefs: South Florida and Dry Tortugas. Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp., 2, 1-7.
- Sollas, W.J. (1904) : Narrative of the expedition in 1896. In: Armstrong, H.E. et al., The atoll of Funafuti. Roy. Soc. Lond., 1-28.
- Smith, S.V., Buddemeier, R.W., Redalje, R.C. and Houck, J.E. (1979) : Strontium-calcium thermometry in coral skeletons. Science, 204, 404-407.
- Weber, J.N. and Woodhead, M.J. (1972) : Temperature dependence of Oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. Jour. Geophys. Res., 77, 463-473.
- Weber, J.N. (1973) : Incorporation of strontium into reef coral skeletal carbonate. Geochim. Cosmochim. Acta, 37, 2173-2190.
- Weber, J.N. (1974) : $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios as natural isotopic tracers elucidating calcification processes in reef-building and non-reef-building corals. Proc. 2nd Int. Coral Reef Symp., 2, 289-298.
- Wells, J.W. (1963) : Coral growth and geochronometry. Nature, 197, 948-950.

KAN Hironobu, ADACHI Hiroshi, NAKASHIMA Yosuke and NAITO Gen'ichi (1998) : Development of a submersible, diver-operated coring device: a tool for reef science.

<受付: 1998年6月12日>