

西オーストラリア、ピルバラ地塊産の“世界最古（太古代前期：35億年前）ストロマトライト化石”は、藍色細菌がつくる真の浅海成ストロマトライトではなく、中央海嶺周辺（遠洋深海）の熱水性堆積物の一部であることが解明された。

1. はじめに

ストロマトライトは藍色細菌（シアノバクテリア）がつくるドーム状、柱状あるいはマッシュルーム状の堆積構造であり、現世の産出例は極めてまれだが、いずれも光合成が可能な浅海域に特徴的に形成される。一方、化石ストロマトライトはほぼ世界中の先カンブリア時代（主として27-7億年前）の地層から報告されており、かつては汎世界的な分布をもっていたことが知られている。ストロマトライト化石についてはこれまで多くの研究がなされ、40億年に及ぶ地球生命進化史の中でも特に初期生命に関する重要な証拠の一つとして注目を集めてきた。その理由は、ストロマトライトあるいはそれをつくった藍色細菌が太陽光エネルギーを利用して地球上に大量の酸素を発生させた最初の光合成生物とみなされるからである。地球形成初期のマグマ・オーシャン（あるいはポンド）冷却直後の大気中には約100気圧の二酸化炭素が満ちており、遊離酸素は皆無に近かったと推定されている^[1]。このような大気組成を今日の窒素・酸素優勢のものへと変化させた主要な原因が、生物の光合成にあったことはほぼ疑いがなく、ストロマトライト化石の記録は、酸素を大量発生させた光合成の起源が何時まで遡れるのかを教えてくれる。

これまでに報告された“世界最古のストロマトライト”は、西オーストラリア北西部、ピルバラ地塊ノースポール地域の太古代前期（約35億年前）Warrawoona層群から産したものである（図1）^[2]。また同地域からは世界最古生命化石として知られる藍色細菌に類似した形態の微化石が産することもあって^[3]、このノースポール・ストロマトライトの産出意義はその後他の研究者達によって追認されてきた。ただし、それは必ずしも過去のスト



—生命と地球の共進化—

“35億年前最古ストロマトライト”の正体

—西オーストラリア、ピルバラ産、
太古代中央海嶺の熱水性堆積物—

磯崎 行雄 ¹⁾	寺林 優 ²⁾
いそざき ゆきお	てらばやし まさる
椛島 太郎 ³⁾	角田 地文 ⁴⁾
かばしま たろう	かくた ちふみ
恒松 知樹 ⁴⁾	鈴木 良剛 ³⁾
つねまつ ともき	すずき よしひさ
小宮 剛 ³⁾	丸山 茂徳 ⁵⁾
こみや つよし	まるやま しげのり
加藤 泰浩 ⁶⁾	
かとう やすひろ	

編集部

受理：1995年5月18日

筆者：1) 東京工業大学理学部 助教授、2) 香川大学教育学部 講師
3) 東京工業大学理学部、4) 山口大学理学部
5) 東京工業大学理学部 教授、6) 山口大学理学部 助手

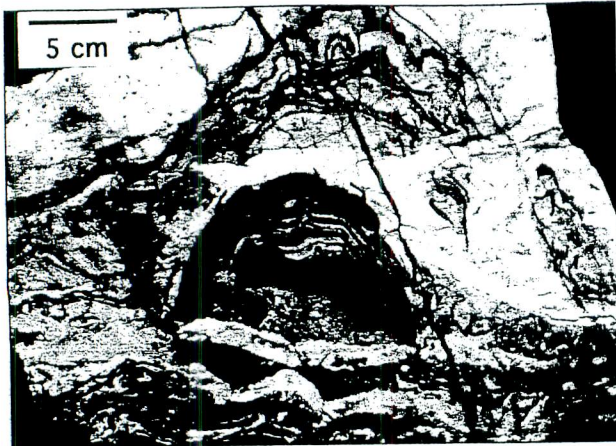


図1 “最古ストロマトライト”として報告されたノースポール・サンプル (Lowe, 1994).

ロマトライトを認定する上での一般的判断基準をすべて満たしておらず、その形態が典型的な柱状のものとは異なるという指摘が最近になってなされるようになった^[4]。それでも微細な褶曲構造は基本的に藍色細菌によってつくられたとみなす従来の一般的見解は未だ覆えされていなかった。

筆者達のグループは、最近5年間にわたって西オーストラリア、ピルバラ地塊の太古代造山帯の研究を精力的に進めており^[5]、1994年度も文部省の国際学術研究計画（課題番号06041038、代表：磯崎）の一部として、ノースポール地域での野外調査を行った。その結果、上述のノースポール産“世界最古ストロマトライト”に関して、従来の解釈と大きく矛盾するいくつかの地質学的証拠を発見した。特にその形成場がこれまで想定されていた光合成可能な浅海域などではなく、太陽光が届かない遠洋深海底であったことが明らかになった。本稿では、この新しい研究成果の概要を紹介する。

2. ノースポール付加体

オーストラリア北西部に位置するピルバラ地塊の北半部には太古代の緑色岩・花崗岩帯が分布する。緑色岩帯には、玄武岩質緑色岩のほかにチャート、珪質泥岩、泥岩、砂岩、礫岩などの種々の堆積岩類が産し、35–33億年前（太古代中頃）

のU-Pb年代が報告されている^[6]。また、これらの太古代緑色岩および堆積岩は、後の時代の変成作用をほとんど被っていないので、初生的な火成岩・堆積岩組織をよく保存しており、世界最古生命化石が発見されている由縁である。これらの緑色岩・堆積岩類はすべて大陸性地殻の上に整合的に堆積・噴出した現地性地質体と従来みなされてきたが、最近、我々の研究グループはノースポール地域を含む数地域においてピルバラ太古代緑色岩帯の詳細な野外調査を行い、これらの緑色岩・堆積岩類が顕生代の付加体と同様の特徴を有することを解明した。その結果については既に予察的に報告した^[7]ので、ここでは概要の説明にとどめることにする。

ノースポール地域に分布する緑色岩・堆積岩類は、かつて一連整合の堆積体とみなされたことからWarrawoona層群Towers累層と呼ばれてきた。本地質体は明瞭な枕状構造をもつ玄武岩質緑色岩を主体とし、少量の層状チャートを伴うが、粗粒陸源砕屑岩はほとんど含まない（図2）^[6]。構成岩の岩相および層序に基づき、層理面に平行な断層で境される3つのユニット（見かけ下位からユニットI, II, IIIと呼ぶことにする）に区分される。ユニットIおよびIIは、共に厚さ2000–3000mの緑色岩（玄武岩質枕状溶岩）とその上位に累重する厚さ10–30mの層状チャートからなる。ユニットIIIだけは、厚さ2000m以上の緑色岩（コマチャイト質玄武岩）からなり、厚さ0.5–3m程度の薄いチャート層を頻繁にはさむ。

“最古ストロマトライト”として報告された構造（以下ではストロマトライト様構造と呼ぶ）はユニットIの最上部のチャート層中に産し、層状重晶石（BaSO₄）鉱床を密接に伴う（図3）。このストロマトライト様構造と重晶石の産出はこれまで10地点以上で確認され、層状チャート中のこの層準は少なくとも20kmにわたって断続的に追跡される（図2）。またストロマトライト様構造および重晶石の直下に接する緑色岩はつねに強い変質を被っており、さらに複数のT-チャートと呼ばれる暗灰色細粒の石英脈に貫かれている。このT-

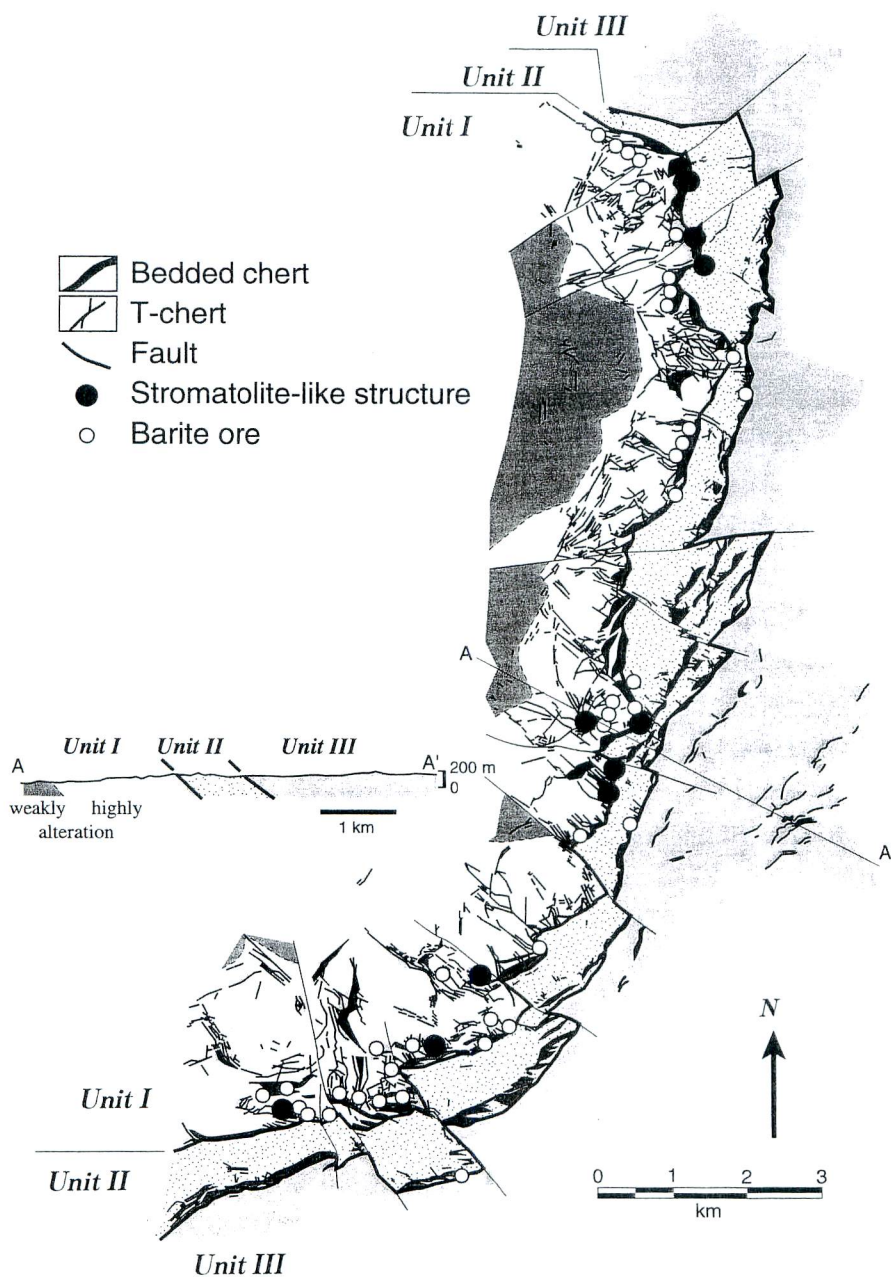


図2 西オーストラリア、ピルバラ地塊、ノースポール地域の地質図。ほとんど緑色岩類からなり、少量の層状チャートを伴うユニットIのみにストロマトライト様構造と重晶石鉱床が産する。

チャート脈はしばしば重晶石を伴い、またメノウ状の鉱脈鉱床類似の組織を有する。

ユニットIおよびIIの構成岩がもつ層序は、海洋プレート層序と呼ばれる海洋地殻の最上部（中央海嶺玄武岩）とそれを覆う遠洋深海堆積物の層序の一部に対応する。また両ユニットの構成岩はさらに側方短縮によってデュープレックス構造様の覆瓦状構造に参加していることが野外で確認された。このように、少なくともユニットIおよびIIは顕生代の付加体と同様な構成岩種、層序およ

び内部構造をもつことが示された^[7]ため、これらは太古代の付加体の一部をなすと判断される。なお、ユニットIIIも同様の付加体の一部をなすと推定され、緑色岩の性質や層序から判断して、おそらく巨大な海台起源の緑色岩岩体が主体をなす部分とみなされる。

3. ストロマトライト様構造の起源

このような新しい観点に従えば、ユニットIの“最古ストロマトライト”を含む層状チャートは

Oceanic plate stratigraphy
of Unit I

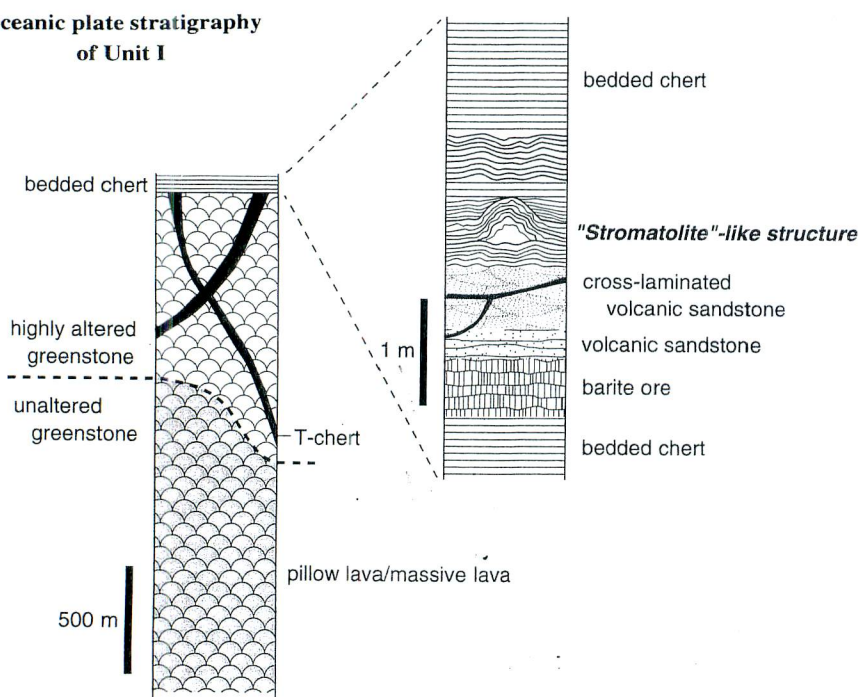


図3 ノースポール地域の太古代付加体の海洋プレート層序とストロマトライト様構造・重晶石鉱床の産出層準。ストロマトライト様構造が層状チャート中に産することに注目。

太古代の中央海嶺玄武岩の上に累重する遠洋深海堆積物と理解される。特に、ストロマトライト様構造および随伴する重晶石層そして直上・直下の層状チャートのいずれにも粗粒の陸源碎屑粒子が全く含まれないことは、それらが陸域から十分離れた距離にあった遠洋域で堆積したことを強く示唆する。なお、一部に明瞭な斜交葉理が認められるが、これは単に水流の運搬能力の強さを示すもので、従来考えられていたような浅海域のみの指標とはなりえない。当時の中央海嶺の水深やシリカの濃集・沈積プロセスなど、太古代層状チャートの起源に関して未解明の問題点が残されているものの、少なくとも“ノースポール・ストロマトライト”の産出のみに基づいて、これらの地層の堆積環境を大陸縁辺の浅海域と推定することには大きな論理的矛盾がある。なぜなら、その堆積場が海洋中央部の深海底ならば、光合成は不可能であり、狭義のストロマトライトは形成されえないからである。それでは、このストロマトライト様構造の正体は何であろうか。現時点で判明している地質学的情報を総合して、その起源について以下で考察する。

問題のストロマトライト様構造が玄武岩質緑色

岩直上の層状チャート中に限定されて産することから、その初生的堆積環境は太古代の海洋中央部の遠洋深海底と推定される。また、ストロマトライト様構造はほとんどの場合重晶石層と密接に随伴し（図2, 3）、ドーム状の構造そのもの一部あるいはかなりの部分が石英と重晶石との交互層から構成される。これらの観察事実は、ストロマトライト様構造が重晶石鉱床の形成時にできたものであることを示している。一方で、重晶石は緑色岩中に貫入したT-チャートにも頻繁に伴われることから、その起源はT-チャートの成因に関連している。

T-チャートは層状チャートの下位の変質緑色岩を様々な方向から貫く（図2）が、その上位の層状チャートには不明瞭に移化することが多く、層状チャートを貫く例は観察されていない。また、ストロマトライト様構造および重晶石層の直下の緑色岩は必ずといってよいほど強い変質を被っており、肌色を呈する程度まで強い変質を被った緑色岩にはすべてT-チャートが貫入している。T-チャートは緑色岩/層状チャート境界から層厚にして最大約2000mの層準に限られて集中的に発達し、その下位にはT-チャートに貫入されない新鮮

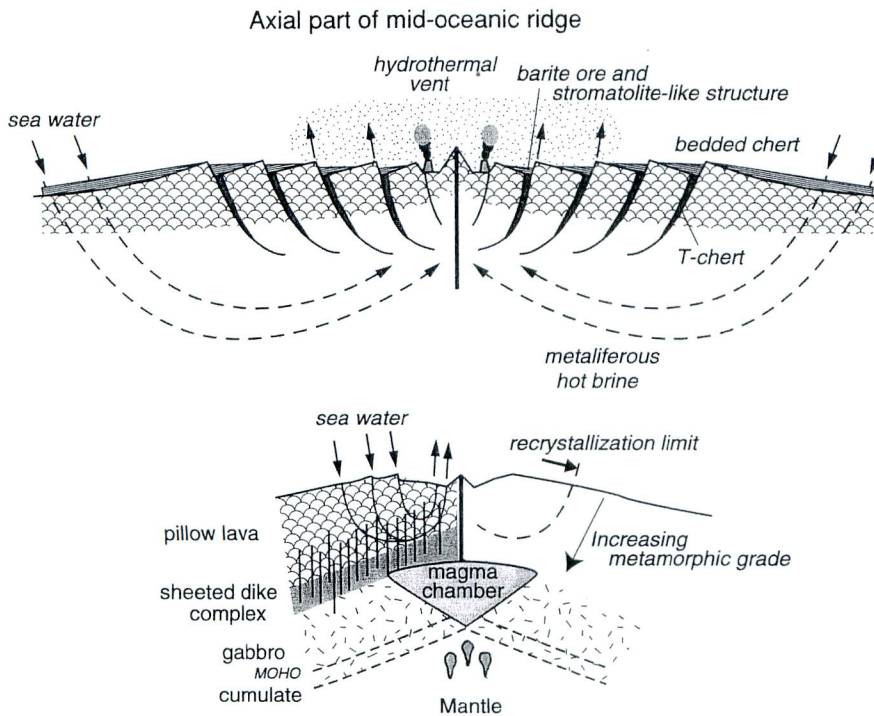


図4 ストロマトライト様構造と重晶石の形成場の模式復元図。太古代中央海嶺中軸部での熱水循環に伴い重晶石鉱床とストロマトライト構造が形成された。T-チャートは、熱水が海嶺玄武岩中に発達した展張性裂かを通過した時の流路であった。

な緑色を呈する緑色岩が産する（図2, 3）。これらの観察事項は、緑色岩の原岩である太古代の中央海嶺玄武岩が噴出した直後に海嶺中軸部で熱水循環に伴う強い変質作用を被ったことを示すと考えられる。現世の例と同様に、海嶺周辺の熱水循環システムを通して（海水/岩石間の相互作用で）玄武岩から溶脱されたシリカや他の元素が移動し、海水中に熱水として噴出されていた通路が存在したと考えられるが、おそらくT-チャートはこのような通路そのものが冷却・固化したものと推定される（図4）。さらに予察的にノースポール地域の層状チャートおよびT-チャートの希土類元素の分析をおこなった結果、熱水の関与を示すEuの正異常が確認された。このように層状チャート中のシリカおよび硫酸バリウムはT-チャート由来と推定され、重晶石層は現世の中央海嶺で形成される塊状硫化物鉱床に比較可能である。以上のように、ノースポールのストロマトライト様構造は、太古代の中央海嶺周辺の遠洋深海で形成された重晶石鉱床に伴う構造とみなされ（図4）、これまで理解されてきたような、陸域縁辺で光合成を営む狭義の浅海成ストロマトライトではないと結論される。

4. 光合成生物進化史における意義

以上のように、これまで“最古”と信じられてきたノースポール・サンプルが浅海域で形成された狭義のストロマトライトではないことが判明したことから、最古ストロマトライトのタイトルは、より若い年代のサンプルにゆずられることになる。真に浅海起源のストロマトライトは約27億年前（太古代末）以降に汎世界的に繁殖するようになったので、その最初の出現時期はさらに古いと推定される。一方、散点的に報告されている32億年以前のサンプルは、いずれも真の浅海成ストロマトライトとしては疑問視されるようになってきた^[4]ので、現時点ではストロマトライトの出現時期を32-27億年前のある時期、おそらく30億年前後とみなすのが妥当と考えられる。従って、地球生命史の中での主要イベントの一つである光合成の開始、とくに大気組成を大きく改変させた酸素発生型光合成の開始時期は、従来考えられていたよりもかなり後の太古代末にずれ込むことになりそうである。おそらく酸素を発生しないタイプの光合成生物（光化学系Iあるいは光化学系IIのどちらか一方だけをもつタイプ：緑色細菌，紅

色細菌など)の起源はさらに遡る可能性が強い^[8]が、35億年前頃に光合成が機能していたことを積極的に支持する証拠はこれまでに認められていない。

本稿で紹介したノースポール・ストロマトライトの検討結果は、従来の地球生命(特に光合成生物)の進化史に関する一般的理解に大きな変換を要求するものであるが、この新しい認識は果たして他の地質学的証拠と調和的なのだろうか。ここでは、当時の地球でおきた二つの事件、すなわち大量の稿状鉄鉱層の堆積と地磁気強度の顕在化との関連について触れておく。稿状鉄鉱層(BIF)は先カンブリア時代を特徴づける堆積岩の一種であるが、汎世界的に原生代前期(25-20億年前)に集中的に堆積したことが知られている。この時期のBIFの集中的堆積は、ある時期に溶存酸素が臨界点を越えて過剰に供給されるようになったために、それまで海水中に大量に溶存していた鉄イオンが一気に酸化されて沈殿したことによるとされている^[9]。上述の議論から、大量の酸素を発生する最初の光合成装置としてのストロマトライトの起源が従来よりも若がえり、30億年前以降となったことは、やや遅れて始まった鉄鉱層の集中的堆積という現象との関連においてより調和的にみえる。

一方で、27億年前に急激に地磁気強度が増大したという観察がある^[10]が、もしこの指摘が正しければ、ストロマトライトが27億年前になって初めて汎世界的分布をもつようになったこととの関連が説明可能となる。すなわち、この時期に何らかの原因でダイナモが機能し始めたとすると、地磁気強度の増加とともに地球をとりまく磁気圏が成立し、同時にバン・アレン帯が出現したと推定される。バン・アレン帯の形成は、太陽風の地球への侵入を偏在化し、地表の多くの部分を太陽風の照射から保護する効果をもつ。おそらく初期光合成生物にとって、地磁気強度が強まる以前のごく浅い海は“諸刃の剣”であった可能性が強く、ストロマトライトといえども当初から浅海では繁殖できなかったに違いない。ちなみに、ノースポールに隣接する地域のWarrawoona層群の

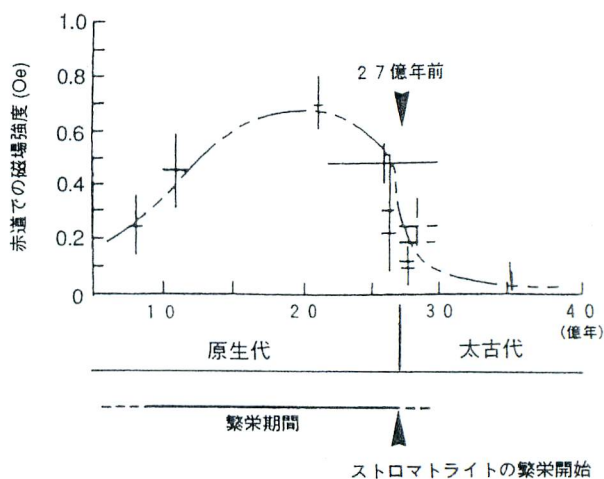


図5 27億年前のストロマトライト(酸素発生型光合成)の台頭と地磁気強度の増大。ストロマトライトの浅海域での繁栄は、バン・アレン帯(太陽風バリアー)成立の結果と推定される。

層状チャートからは35億年前の世界最古生命化石が産するが、おそらくこれも同様に遠洋深海起源であると判断される。おそらく地磁気顕在化するまでは深海に封じ込められていた生命が、ある時期に一斉に浅海域に進出したのであろう。27億年前に上述のような一連の変化が起きたとすると、それ以降にストロマトライトが世界の浅海域に一気に進出したタイミングとよく一致することになる(図5)。このように太古代・原生代境界に近い27億年前という時期は、生命と固体地球とが連動しながら共進化した様子がうかがえる地球史上の一大イベント期であったと推定される。

参考文献

- [1] Matsui, T. and Abe, Y. : *Nature*, **319**, 303-308 (1986).
- [2] Walter, M. R. *et al.* : *Nature*, **284**, 443-445 (1980); Schopf, J. W. : Princeton Univ. Press, 543p (1983).
- [3] Schopf, J. W. *et al.* : *Science*, **260**, 640-646 (1993).
- [4] Lowe, D. R. : *Geology*, **22**, 387-390 (1994).
- [5] 丸山茂徳・磯崎行雄 : *科学*, **62**, 175-184 (1992).
- [6] Hickman, A. H. : *Geol. Surv. West. Aust. Bull.*, no.127, 268p (1983); Hickman, A. H. : *Exc. Guidebook*, 3rd Int. Archean Symp., 57p (1983); Thorpe *et al.* : *Precamb. Res.*, **56**, 169-189 (1992).
- [7] 磯崎行雄ほか (1995), 寺林 優ほか (1995): 地球惑星合同学会要旨集, 354, 349; 椛島太郎ほか (1995), 角田地文ほか (1995): 地質学会講演要旨集, 238.
- [8] 伊藤 繁・岩城雅代 : *遺伝*, **49**, 12-17 (1995).
- [9] Holland, H. D. : Princeton Univ. Press, 582p (1984).
- [10] Hale, C. J. : *Nature*, **329**, 233-237 (1987).