

琉球大学学術リポジトリ

石炭紀秋吉生物礁複合体の形成メカニズムと時代遷移過程の解明

メタデータ	言語: 出版者: 長井孝一 公開日: 2009-03-26 キーワード (Ja): 秋吉石灰岩層群, 石灰紀, 生物礁複合体, 化石サンゴ礁, 造礁生物, 古生態, 古環境, 石灰岩 キーワード (En): Akiyoshi Limestone Group, Carboniferous, Organic reef complex, Fossil reef, Reef-building organisms, Paleoecology, Paleoenvironment, Limestone 作成者: 長井, 孝一, 杵山, 哲男, Nagai, Koichi, Sugiyama, Tetsuo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/9391

石炭紀秋吉生物礁複合体の形成過程

長井 孝一(琉球大学理学部)

Growing mechanisms of the Akiyoshi Organic Reef Complex

Koichi NAGAI (University of the Ryukyus)

1. はじめに

生物礁(organic reef)とは、地質時代から現世を通じて、地球上で最も生物の多様性と生産性の高い生態系の一つである。地質時代には生物礁以外にも多くの carbonate buildups (堆積時に、周囲の堆積物に比べて地形的に突出した構造を持つ石灰岩体の総称: reef, bioherm, bank, mound, knollなど多くの種類が含まれる)が存在している。顕生代のcarbonate buildupsの変遷史の中で、現世サンゴ礁に匹敵するような強固なフレームワーク (rigid organic framework) を伴う生物礁は、現世を含めても6つあるいは7つの限られた時代にしか存在していない。その原因は、顕生代に繰り返し起きた地球規模での造礁生物の大絶滅と関連がある。顕生代における生物礁の消長は、この絶滅という事象によって区切られた、古い生物礁生態系の崩壊とこれにかわる新しい生物礁生態系の再構築の歴史の繰り返しにほかならない。

後期古生代(特にその前半の石炭紀)は、生物礁の発達のもっとも悪い時代の1つである。その原因を、欧米の研究者は、石炭紀が礁生態系の大崩壊後の立ち直りのための時期であるとも (James,1983), 強い外的な抑圧(気候の寒冷化等)が働いて生物礁の形成が

頭打ちになり、礁の発達はその初期の段階で停滞したためとも考えている(Copper,1988) どちらの理由にせよ、実際に欧米の石炭系で観察される carbonate buildups は、フレームワークを完全に欠く mud mound や、強度で明らかに劣る“フレームワーク”しか持たない reef mound と呼ばれるものばかりである（これらの carbonate buildups はいずれも厳格な意味での生物礁の範疇には入らない）。なお、本稿ではフレームワーク (framework) の用語を、「硬骨格を分泌する固着性・付着性の造礁生物（サンゴ、石灰藻等）が造上げた礁の骨組みをなす構造物」という意味で使用する。

西南日本秋吉帯（市川，1984）に点在する後期古生代の礁起源石灰岩体は、この時代の carbonate buildups の中では極めて異質な存在である。これらの石灰岩体は、海洋底から海面に達した玄武岩海山上に形成された生物礁複合体起源の異地性岩体と考えられおり（勘米良，1983など），近年では，その崩壊・付加モデルも提示され（Sano Kanmera，1991a-d），主に付加テクトニクスという今日的な見地で注目されている。これらの石灰岩体が生物礁複合体起源であることが明らかにされて（太田，1968 など）既に長い年月が経過している。しかしながら，「生物礁不毛の時代とされるこの時代になぜ例外的に，これらの石灰岩体が生物礁として存在しえたのか？」ということに関しては，これまでほとんど議論がなされてこなかった。したがって，この問題は古くて重要な問題であるといえる。この問いに対する答えを導き出すことは，地球規模の生物礁の変遷史を考察する上で極めて重要である。

筆者は，石炭紀秋吉石灰岩中に見られる生物礁フレームワークと造礁化石群の古生の復元作業を通して，秋吉生物礁複合体（秋吉石灰岩の起源となる生物礁複合体，松山長井，1990）の形成・発達機構の解明を試みている。本稿では，近年の筆者の研究成果の概要を述べるとともに，上記の問題点についての考察を試みる。

2. 生物礁変遷史における石炭紀の位置づけ

最初に、欧米の多くの研究者が、生物礁の変遷史の中で石炭紀をどのように位置づけてきたか、簡単に紹介する。生物礁とは波浪に対する抵抗能力をもつ生物群が、波浪の中でその生息環境を維持するために造り上げた構造物（生物地形）である。このことは、現世のサンゴ礁が強力な波浪の営力をもものともせず成長していることから理解できる。しかし、地質時代の生物礁の多くは現世サンゴ礁ほど強固なフレームワークを持っていない。また地質時代にはフレームワークを完全に欠く carbonate buildups も多く存在する。顕生代における生物礁をはじめとする carbonate buildups の変遷史は、多くの研究者によって、造礁化石群の消長や礁生態系の進化と関連づけて論じられてきた (Heckel, 1974; James, 1979, 1983, 1984; Longman, 1981; Copper, 1988 など)。現世サンゴ礁に匹敵するような強固なフレームワークを持つ生物礁は、地質時代の中でも限られた時代にしか存在していない。特定の限られた時代にしか、厳密な意味の生物礁が存在しないことの原因については、次の2つの説明がなされている。

(1) 強固なフレームワークを構築するような大型骨格を持つ後生生物 (large skeletal metazoans) は地質時代を通じて限られた時代にしか存在しなかった。

(2) 環境が大型骨格を持つ後生生物の生育に適していなかった。

(1) についてであるが、地質時代には、明らかに強度で劣るフレームワークしか造れなかった化石群だけが存在した時代や、フレームワークを造るような化石群が全く存在しなかった多くの時代がある。その原因は、顕生代に繰り返し起きた地球規模での造礁化石群集の大絶滅にあると言われる。

Copper(1988)は顕生代における地球規模での礁生態系の大絶滅は全部で6回あるとし、地質時代を通じての地球規模での礁生態系の消長を *erathemic succession* と名付けた (Fig. 1)。erathemic succession の生じる原因は、3000万年から1億年の間隔で礁生態系が絶滅してしまうことである。erathemic succession は、この時間枠で起こる礁生態系の回復の過程であり、開拓期 (pioneering phase) に始まり、極相期 (climax phase) に到達して、再

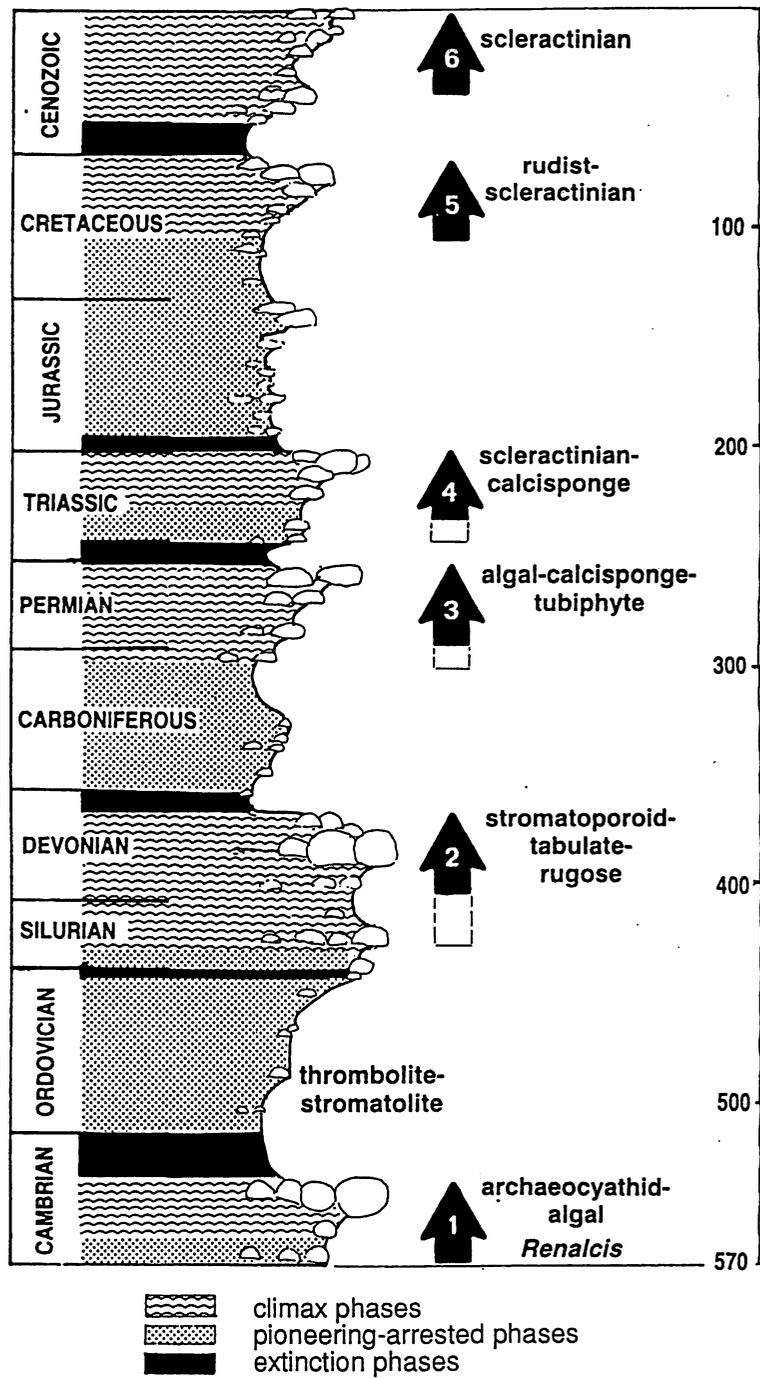


Fig.1. Geologic column with different phases of erathemic successions as seen through geologic time (from Copper, 1988).

び絶滅期 (extinction phase) で終息する。顕生代には絶滅期によって区切られた6つの erathemic successionsが観察できるとしている。絶滅期には大型の生物骨格を分泌できる化石群がほとんど存在しなくなる。また礁生態系の崩壊後、再び極相期に到達するまでの開拓期には、“造礁”生物がまだその造礁能力を十分に回復していないので、明らかに強度で劣る“フレームワーク”を持つcarbonate buildupsだけが地質記録に残ることになる。

James (1979) と Longman (1981) も、“真の生物礁”の存在する時代 (Copper 1988, の極相期に相当する) として、それぞれ6つの時代を挙げている。ただし、これらの3者間で見解が一致している時代は、デボン紀と第四紀の2つの時代に過ぎず、研究者間のこの種の見解の相違が、礁(reef)という術語の定義や用法の混乱とともに、この分野の研究を難しくしている。

顕生代を通じて最大の造礁化石群の絶滅はデボン紀新世に起きている。層孔虫類、床板サンゴ類および四放サンゴ類の多くの種が絶滅し、シルル紀からデボン紀にかけて完成されていた礁生態系が完全に崩壊している。James(1983)は、顕生代の生物礁変遷史を、このデボン紀新世の礁生態系の大崩壊で大きく2分し、前半の2.4億年間の第1進化サイクルと、後半の3.4億年間の第2進化サイクルに区分している (Fig. 2)。

(2)についてであるが、上記のCopper(1988)は大絶滅の後の回復が遅く、再び極相に到達するのに数千万年かかっている時代のあることを指摘している。この時代は開拓期の生物群集が極相に到達するのに失敗して、遷移の初期の状態のまま停滞した時代である。Copper(1988)は長期間にわたって停止 (休止) したままの遷移を停止遷移 (arrested succession) と名付けた。彼は停止遷移は強い外的抑制が働いて、極相へ到達しようとする“生物礁”の潜在能力 (potential) を制限するような環境に生じ、オルドビス紀と石炭紀に典型であるとした。また、停止遷移の原因として、i)地球規模での環境変化、ii)“生物礁”の形成が閉鎖的な海洋環境 (restricted marine) で行われたこと、の2つを挙げている。

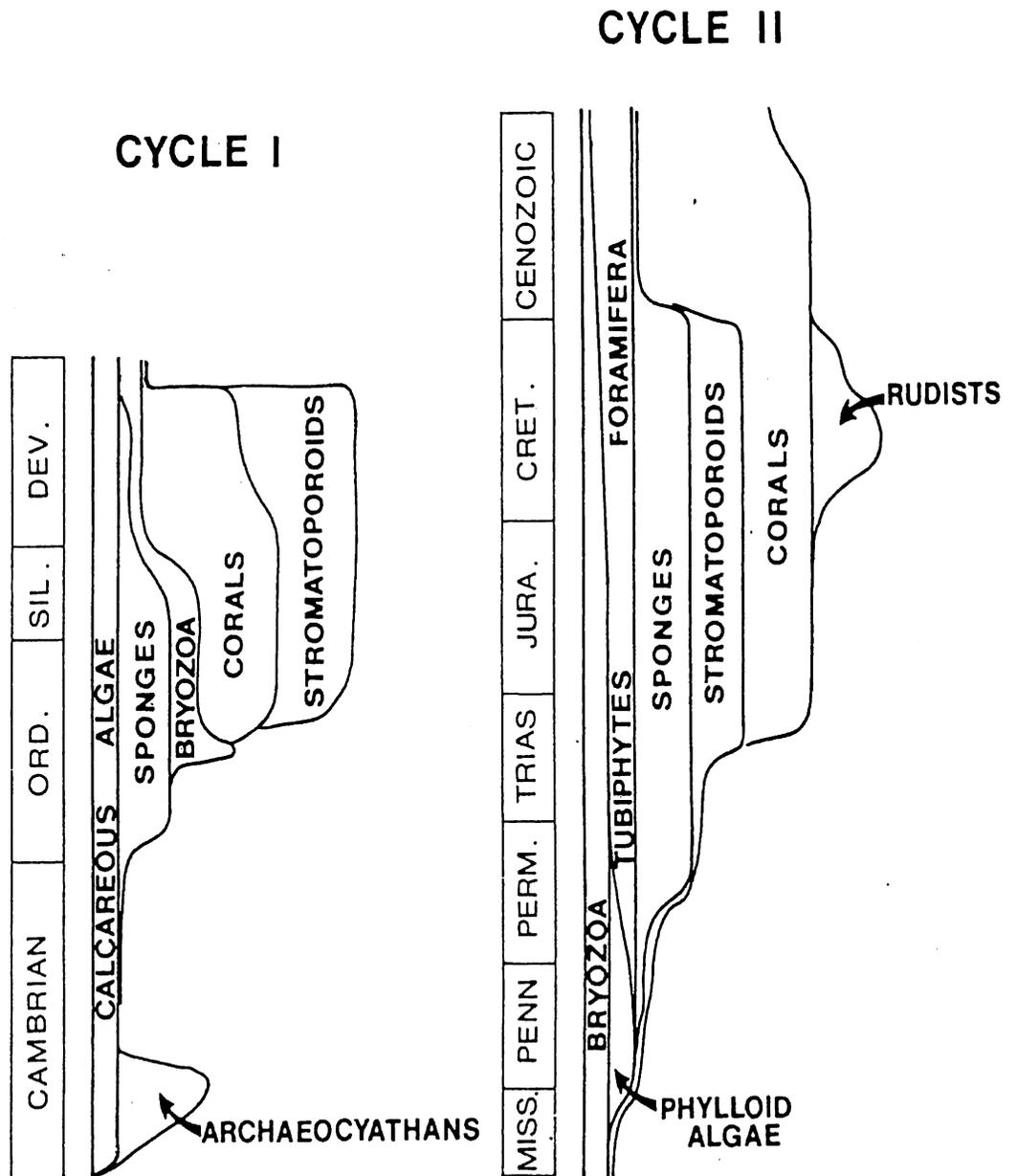


Fig.2. A generalized plot of the main biotic constituents of carbonate buildups against time for the Phanerozoic(from James,1983).

i)は地球規模で生物礁の発達に適した環境が減少するケースで、地球規模での気候の寒冷化などがこれにあたる。ii)は閉鎖的な水塊内でcarbonate buildupsの形成が行われたために、遷移に失敗し極相に到達せずに終わってしまうケースである。これと関係するが、James(1979, 1983)は地質時代に多いreef moundsを半生物礁 (half reef) や不完全生物礁 (incomplete reef) と見なし、生物礁の遷移の第三ステージ (Diversification stage) まで到達できなかったcarbonate buildupsと位置付け、大型後生生物の成長に不利な環境で形成されたとも述べている。

石炭紀は、デボン紀新世の生態系大崩壊に続く時代、すなわちJames(1983)の第1進化サイクルが消滅したあとの、第2進化サイクルの立ち上がりの時期にあたり、生物礁の発達の最も悪い時代の1つとされている。

デボン紀新世の礁生態系の大崩壊後、デボン紀に続くTournaisianでは、大型の生物骨格を分泌する化石自体が、汎世界的に極めて少なくなっており、しばらくの間はフレームワークを完全に欠くmud moundsだけが存在した時代である。mud moundsはヨーロッパや北米でよく研究されている。Waulsortian mud moundとも呼ばれ、地形的に突出した構造は持っている。しかし、海ユリ、コケ虫などの化石を一部含むだけで、ほとんどlime-mudstoneから構成されていて、フレームワークはもとより、大骨格を持つ生物を完全に欠いている。

Middle Visean以降になって、ようやく新しい“造礁”生物の造るbuildupsが出現する。しかし、欧米で研究されてきた、それらのbuildupsは、mud moundsとは異なり硬骨格生物によって構成されているが、boundstoneの発達が悪く、明らかに“フレームワーク”の強度で劣るため、reefの範疇には入れられず、knoll reef, reef moundなどの名称でよばれている。英国のDerbyshireのmid-ViseanやScotlandのUpper Viseanで、*Girvanella*などの藍藻類の造るストロマトライトを主体に、コケ虫類 (fenestellidsとfistuliporidsが多い)、ケイタイテス類、四放サンゴなどを伴うbuildupが報告されている。しかし、その主体はcalcilutiteである (Wolefenden, 1958; Jameson, 1987)。

この後も、石炭紀から二畳紀にかけて、新しく進化してきた硬骨格を持つ生物群が carbonate buildups を構築するようになる。Pennsylvanian の carbonate buildups の研究は欧米、特に合衆国の Mid-Continent で古くから行われており、近年ではカナダでも盛んに研究されている。葉片状藻類 (phylloid algae) を主体として構築されている場合が多く、reef mounds の範疇に入れられている。これらの reef mounds はいずれも、intracratonic carbonate platform 上や intracratonic basin 中で形成されたものであり、明らかに相対的に低エネルギーの環境下で形成されたものである。

以上のように要約される。近年は Copper (1988) のように、地球環境的要因と結びつける考え方も出てきているが、石炭紀に対しては、デボン紀の生物礁生態系の大崩壊に続く時代であるため、その立ち直りにはより長大な時間がかかった、すなわち、大きな絶滅の後なので、再び礁を造れるような能力を持った生物が進化・誕生してくるためには長い回復の時間が必要であった、との認識が強く存在する。このことと関連して、欧米の研究者には、石炭紀の“造礁”生物はフレームワークを造る能力で極めて劣っていたという考え方が根強くある（彼らが実際に目にする石炭紀の carbonate buildups に強固なフレームワークを持つものがほとんどないので）。

日本の秋吉帯の後期古生代の礁起源の石灰岩体の存在は、この認識が誤りであることを明瞭に示している。これらの石灰岩体が礁起源であることは、太田 (1968) らの研究によって、30年近くも前に明らかにされており、多くの欧米の研究者の論文でも引用されている。しかし、彼らには「これらの生物礁のタイプとその形成場」および「その存在が意味すること」の2点について未だに誤解があるようである。

以下に筆者が研究してきた秋吉石灰岩を例に、近年の付加テクトニクスとは違う立場で、この生物礁の特徴を記述し、その後、その存在の意味について考える。

3. 秋吉生物礁複合体

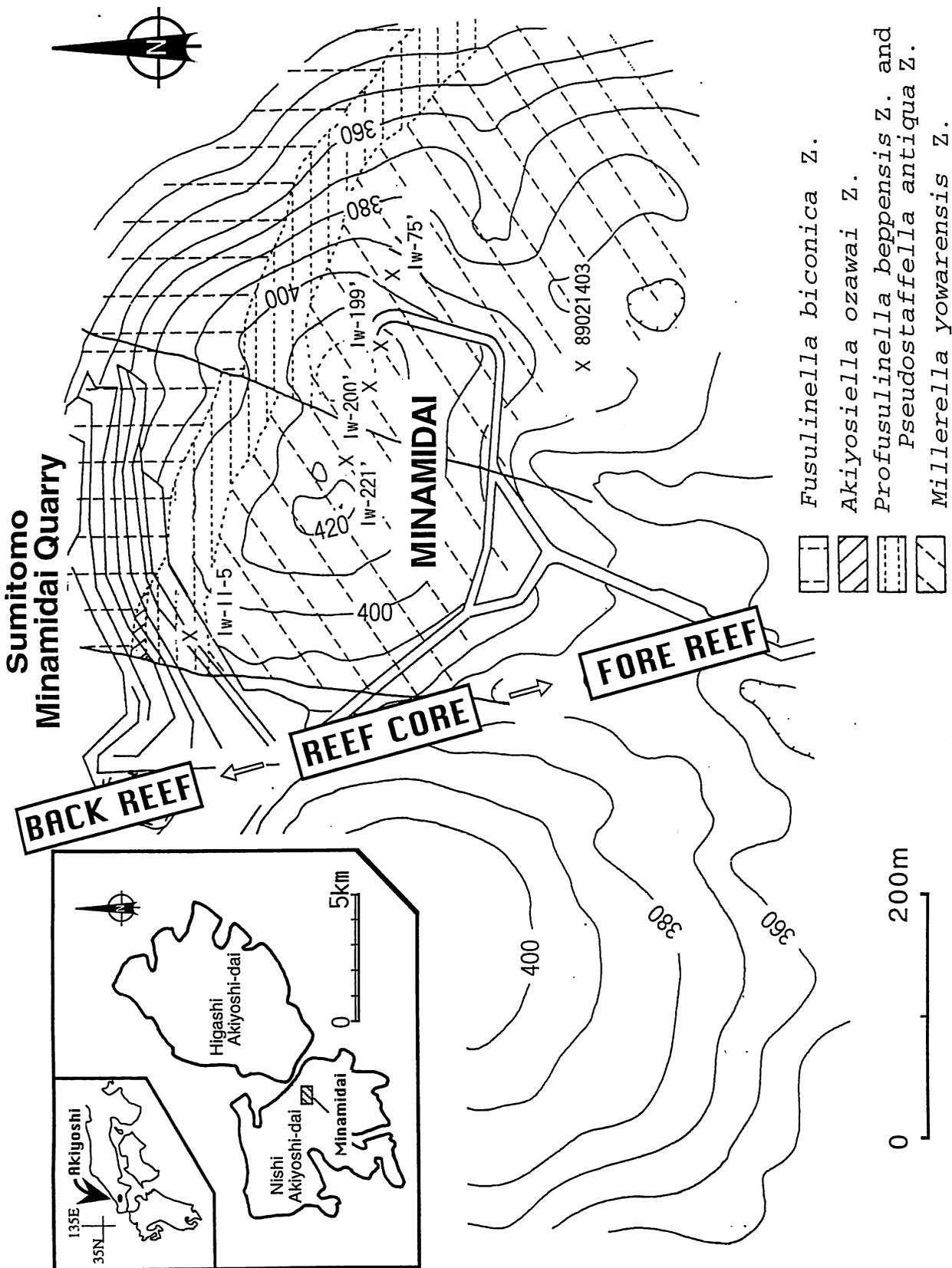


Fig.3. Generalized geologic map of eastern part of Minami-dai area, showing distribution of reef zonation and localities of rock samples of which sketches and photographs are shown in this paper.

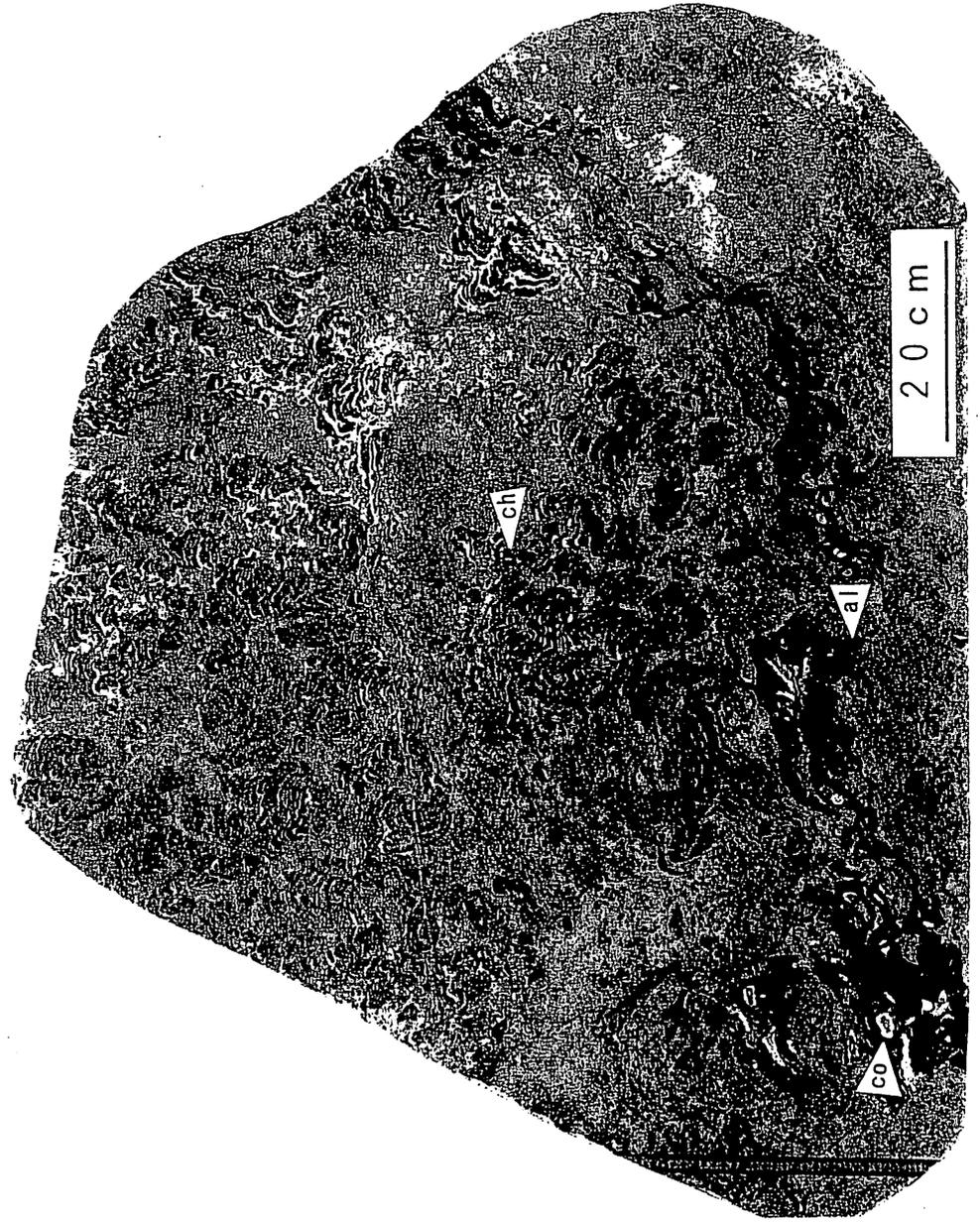


Fig.4. Polished slab of Boundstone type IV-J(Encrusting-algae chaetetid framestone- bafflestone). Note encrusting algae played as sediment-binder at early stage of framework growth. al:algae; ch:chaetetids; co:solitary coral, back reef slope zone. Pseudostaffella antiqua Zone. Loc. Iw-II-5

A. 調査地域の地質概説

野外調査は、主に山口県美祿郡秋芳町秋吉台の、住友大阪セメントKK秋芳鉱山南台採石場で行った。調査地域に採石場を選択したのは、フレームワークの復元に不可欠な、連続した露頭観察と大型の岩石試料の採集が比較的容易に行えるためである。

調査地域の地質図をFig. 3に示す（この地質図に示す地形は南台採石場採掘開始初期のものであり、採掘の進展に伴い現在の地形は大きく変貌している）。この地域の層序と地質構造および石灰岩の特徴とその地積古環境の概要は、すでに長井（1979）、長井・太田（1980）、萩山・長井（1990）で報告しているので、本稿で必要と思われることだけを簡単に記す。本地域には下部～中部石炭系が逆転した状態で分布する。南台頂上部（現在は完全に消失）から南側斜面にかけて*Millerella yowarensis* 帯が広く分布し、南台頂上付近から北側斜面を下るに従って、これより上位の化石帯が順次露出する。数本の南北性の断層と、石灰岩に部分的にbroken limestone（Sano and Kanmera, 1991a-d）の組織がみられるものの、石灰岩の保存は概して良く、化石帯や岩相の連続性もよい。

鉱山の開発に伴い、この地域の中央部に、多彩な造礁化石群によって構築された大規模なフレームワークが露出した。調査は採掘の進行に合わせて随時行い、フレームワークの特徴とその時空的分布の把握に努めた。また、鉱山と博物館の協力を得て、大型の岩石試料を採集し、フレームワークの成長方向に平行又は直角に切断研磨して、連続研磨石板（観察面積0.1–1m²程度）を作製した。研磨石板の例をFig. 4に示す。作製した研磨石板と薄片を併用し、フレームワークを構築する化石群の古生態学的解析と石灰岩の堆積相の解析を行い、この時代（石炭期中世前期）の秋吉生物礁複合体の復元を試みた。試料採集地点は、鉱山開発前の地表踏査時のものを含めると、この地域内で1000地点以上におよぶ。試料採集地点のうち、本稿で取り扱った試料の採集地点をFig. 3中に示す。

B. 石灰岩の分類

Table 1. Classification of limestones in the Akiyoshi organic reef complex in middle Carboniferous time. Basic classification follows Dunham(1962) and Embry and Klovan(1971).

Original components not bound together during deposition			Original components were bound together during deposition			Original components not bound together during deposition		
Contain lime-mud	Lacks lime-mud and is grain-supported		Organisms act as sediment bafflers	Organisms act as sediment binders	Organisms act as frame-builders	Consist of pebble-cobble sized lithoclasts and fragments of reef-builders		
	Mud-supported	Grain-supported				Grain-supported	Matrix-supported	
Less than 10% grains	More than 10% grains							
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone	Rudstone Floatstone	
I. Mudstone	II. Wackestone-Packstone	III. Grainstone-Packstone	IV. Boundstone					V. Rudstone-Floatstone
I-A: Bioturbated mudstone	II-A: Fusulinid algal wackestone	III-A: Closely packed bryozoan crinoid grainstone	IV-A: Discoid compound coral bindstone	IV-B: Bryozoan compound coral framestone	IV-C: Massive chaetetid framestone	IV-D: Cerioid coral framestone	IV-E: Bryozoan algal chaetetid cerioid coral framestone	V-A: Reef-builder debris rudstone-floatstone
I-B: Internal filling mudstone	II-B: Wackestone-packstone with variety kind of grains	III-B: Loosely packed bryozoan crinoid grainstone	IV-F: Encrusting chaetetid-algal framestone	IV-G: Dendroid coral bafflestone-framestone	IV-H: Encrusting chaetetid dendroid coral bafflestone-framestone	IV-I: Algal bindstone	IV-J: Encrusting algal-chaetetid framestone-bafflestone	V-B: Reef-builder debris lithoclastic rudstone
	II-C: Internal filling wackestone-packstone	III-C: Oolitic grainstone	III-D: Foraminiferal abraded bioclast grainstone-packstone	III-E: Oncooid grainstone-packstone	III-F: Fusulinid algal fragment grainstone-packstone	III-G: Intraclastic grainstone-	V-C: Blackened pebble rudstone	V-D: Rudstone containing non-marine crust pebbles
	II-D: Brachiopod shell wackestone-packstone	III-H: Cortoid grainstone-packstone						

調査地域の石灰岩は主要構成要素の種類や堆積組織などの特徴によって細かく分類できる。本研究で取り扱った中部石炭系の石灰岩を、基本的にはDunham (1962)とEmbry and Klovan(1971)の分類に基づいて、Mudstone, Wackestone-Packstone, Grainstone-Packstone, BoundstoneおよびRudstone-Floatstoneの5つに大区分し、さらにそれらを27種類の岩型に細分した (Table 1)。その詳しい報告は他の機会に行うことにするが、極めて特徴的なことは、生物礁フレームワークと直接的に結びつくboundstoneに11種類もの岩型が見られたことである。

これら27種類の石灰岩型は、調査地域内でそれぞれに異なる分布パターンを示す。調査地域には、生・岩相の帯状分布 (facies zonation)が明瞭に観察されるが、これはその各facies zoneごとに、観察される石灰岩型の種類、組み合わせ、およびその頻度が異なることによって生じたものである。

C. 秋吉生物礁複合体の復元

調査地域の*Millerella yowarensis*帯上部から*Pseudostaffella antiqua*帯にかけて、大規模フレームワークで特徴づけられる生物礁複合体の礁相(reef core facies)が広く露出した。近年の化石層序学的研究成果 (上野, 1989; Ozawa et al., 1990)によれば、*M. yowarensis*帯上部はロシアのlower Lower Bashkirianに、*P. antiqua*帯はupper Lower Bashkirianにそれぞれ対比されているので、この礁相の形成された時代は石炭期中世前期となる。

この時代の秋吉生物礁複合体の模式的な復元図をFig. 5に示す。石灰岩の生・岩相の特徴とその分布状態 (配列状態)を、現世サンゴ礁のそれらや、Longman(1981)やJames(1984)が提示したモデルと比較検討して作成したものである。各zoneの名称は、Longman (1981)を一部改変して用いている。なお、復元にあたっては、南台地域だけのデータでは不十分なので、秋吉台他地域の同時代のデータも併用した (旧住友セメント採石場地域: Ota et al., 1969, 太田, 1968; 龍護峰地域: 長井, 1978 など)。それでもなお、この時代の前礁相 (特にreef talus) や礁湖相 (特に中心部) のデータは大きく欠けている。Fig. 6の生物礁複合体の模式復元断面図中に、石灰岩の主要構成化石群、構成粒子

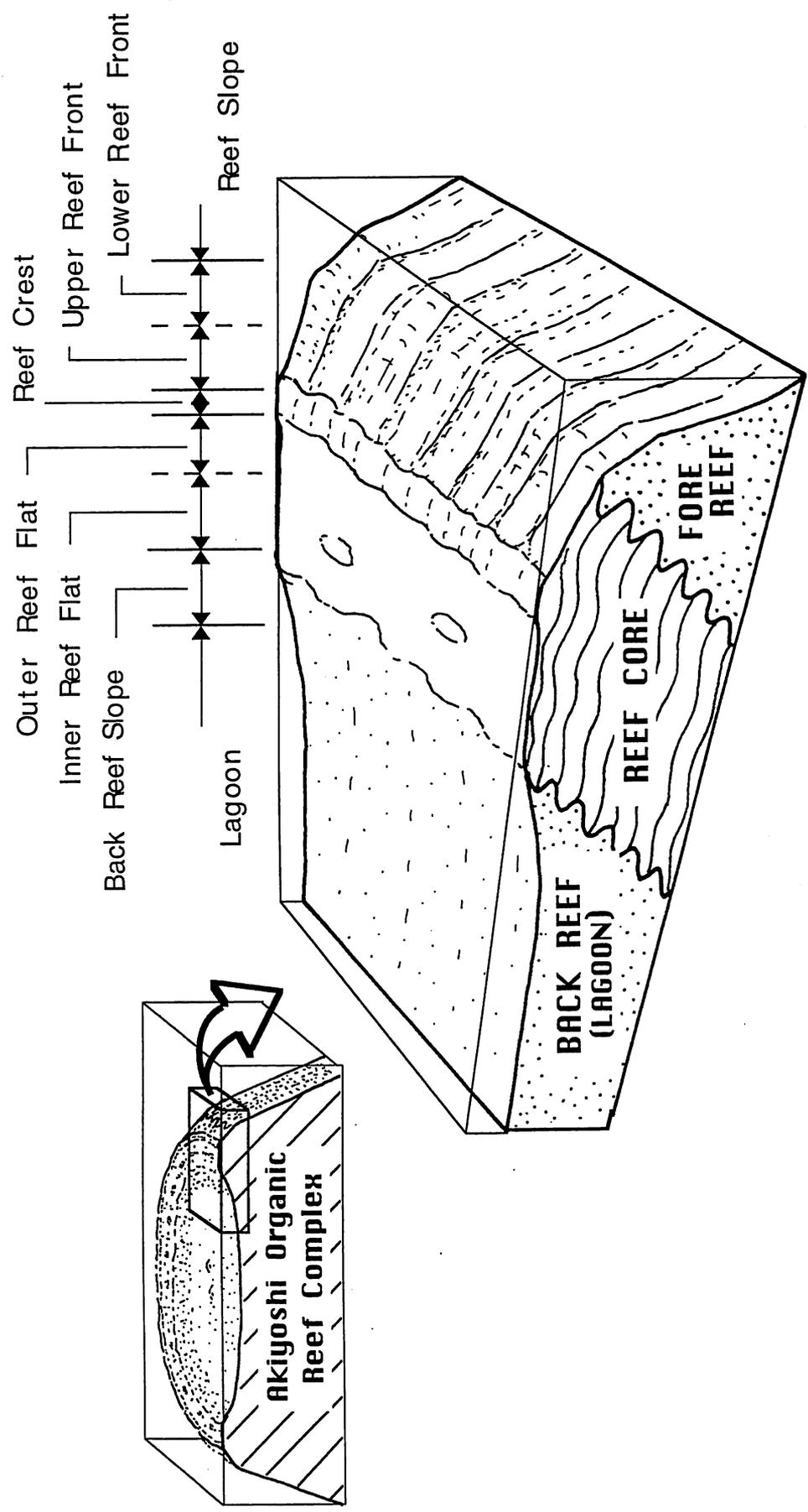


Fig.5. Schematic diagram showing reef zonation of Akiyoshi organic reef complex at Middle Carboniferous time.

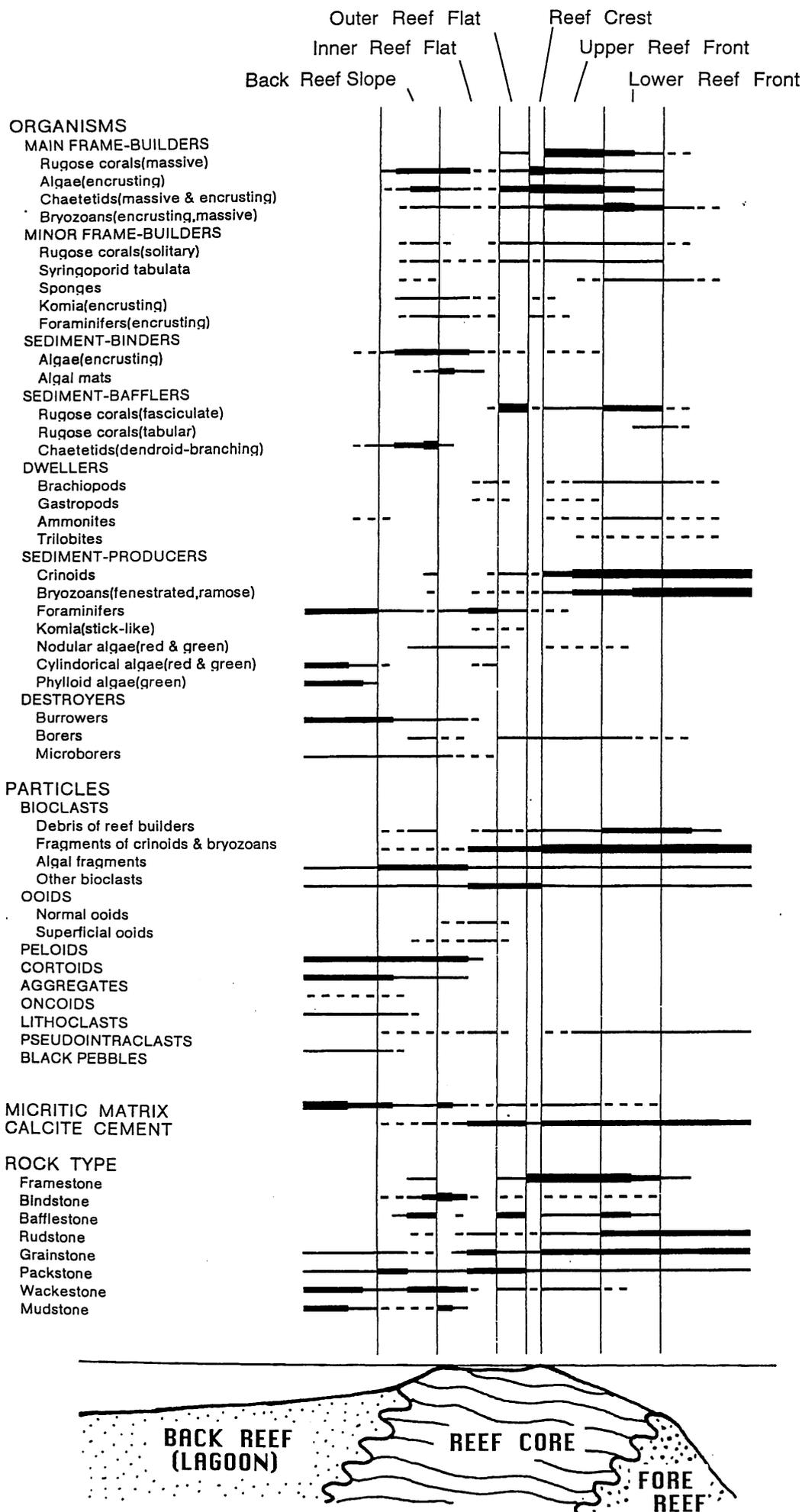


Fig.6. Schematic cross section illustrating zonation of Akiyoshi organic reef complex in early Middle Carboniferous time, and distribution and abundance of major constituents and rock-types of limestones.

Table 2. Major functional roles of reef organisms in Akiyoshi organic reef complex in middle Carboniferous time. Basic classification based on Fagerstrom (1987).

Major functional units	Dominant growth/movement direction	Growth forms	Common taxa
R E E F Frame-builders (Organisms act as frame-builders)	upward	massive, domal, branching	rugose corals, chaetetids (tabulate corals, calcareous algae, sponges)
B U I L D E R S S Frame-encrusters (Organisms act as frame-encrusters)	lateral	tabular, sheet-like, irregular	calcareous blue-green and red algae, chaetetids, bryozoans, tabulate corals encrusting foraminifers
B U I L D E R S S Sediment-bafflers (Organisms act as sediment-bafflers)	upward	branching,	rugose corals, chaetetids
D E R S S Sediment-binders (Organisms act as sediment-binders)	lateral	sheet-like	calcareous blue-green algae, non-skeletal algae (bryozoans, chaetetids)
Sediment-stabilizer (Organisms act as sediment-stabilizer)	lateral/upward		tabular corals, nodular algae ramose bryozoans
Reef-destroyers (Organisms act as reef-destroyers)	downward/lateral		filamentous blue-green algae, indet. borers and burrowers
Reef-dwellers (Reef dwelling organisms)	equidimensional/ lateral		mollusks, brachiopods, echinoids, trilobites crinoids, bryozoans, foraminifers,
Sediment-producers (Organisms act as sediment-producers)	upward/lateral		crinoids, bryozoans, foraminifers calcareous green & red algae

などの分布を示す。

D. 造礁化石群

この時代（石炭紀中世前期）の秋吉生物礁複合体を構成する化石群は、多岐の分類群にわたる。化石群がこの時代の秋吉生物礁複合体内で果たす役割を、Table 2 に分類して示す。なお、分類区分はFagerstrom(1987)を改変して用いた。全部で8種類の役割に分類できるが、このうちのframe-builders, frame-encrusters (encrusting form を持つ化石がframe-builderの役割を果たしていたか, sediment-binderの役割を果たしていたかを区別するために、前者の役割を持つものを特にこのように区分した), sediment-bafflers, sediment-bindersの4者を合わせたものをreef-buildersとして統合した。

石炭紀中世の秋吉生物礁複合体を構築するreef-buildersとして最も重要な分類群は、群体四放サンゴ類, ケイティーテス類 (chaetetids), 付着性藻類 (encrusting algae) および付着性コケ虫類 (encrusting bryozoans) である。この時代の生物礁複合体内では、この4者の重要度はほぼ等価である。

これらの主要reef buildersは、それぞれ異なる生態と成長形態を持ち、生物礁複合体でそれぞれ異なる役割を果たしている。また、その成長を規定する環境要因が互いに異なるため、生物礁複合体内で明らかに異なる分布を示している (Fig. 6)。

付着性コケ虫類は、fistuliporidsやhexagonellidsを主体とし、この4種類の分類群の中では、生物礁複合体の最も外側の空間を占める。reef frontからreef slope上部にかけての外洋側斜面上に分布し、主にframe-encrusterの役割を果たしている。

群体四放サンゴ類も、礁相の中央部より外側に分布が集中し、frame-builderおよびsediment-bafflerとして生物礁複合体内で重要である。その群体成長形態の違い（塊状、樹状、平盤状等）によって、生物礁内での役割と分布に違いがある。

付着性藻類は層状藍藻-紅藻類および層状のKomiaを主体とし、礁相の全域に分布するが、特にreef crest, inner reef flatおよびback reef slopeで卓越する。付着性藻類の役割の中で、サンゴ類やケイティーテス類などの固着生物にその成長の基盤を供給する

sediment-binderとしての先駆者の役割は、フレームワークの形成過程で極めて重要である。

ケイタイテス類は礁相の全域にわたって分布するが、その成長形態は環境によって大きく変化する。波浪に対して強い抵抗力を示したと思われる塊状、不規則型、および厚い層状の形態を持つものは礁相内のより外洋側部分でframe-builderおよびframe-encrusterの役割を果す。個々の群体が薄い層状あるいは三日月型、半球状の形態を持つものは、それらが互いに積み重なることによって、樹状の形態を取り、主に礁相のback reef側で sediment-bafflerの役割を果たす (Fig. 4)。

E. 各Facies zoneの特徴

この時代の秋吉生物礁複合体の各facies zoneの生・岩相の特徴や石灰岩の形成過程等について以下に記述する。

(1) 前礁相 (Fore Reef Facies)

秋吉生物礁複合体の礁相よりも外洋側の部分を前礁相とした。秋吉石灰岩では、その起源となる生物礁複合体の、外側部分 (外洋側部分) の情報が失われていることが多く、前礁相に関する情報は極めて少なく、不明な点が多い。本研究では秋吉生物礁複合体の前礁相を reef slope facies zone と reef talus facies zone に2分した。reef talus facies zoneに関する情報は秋吉石灰岩層群本体には全く残されていないが、reef slope facies の石灰岩は本研究の調査地域内にも分布している。

a. Reef talus facies zone

秋吉生物礁複合体のreef talus faciesは石灰岩本体から離れた海山の裾に近い場所で、チャートと互層あるいは指交関係で堆積したと考えらる (Uchiyama et al., 1986; Sano and Kanmera, 1988)。本稿では省略する。

b. Reef slope facies zone

フレームワークが最もよく発達する reef front facies zone よりも外側を reef slope facies zone とした。調査した地域内では、南台地域の *M. yowarensis* 帯にこの facies zone が 100m

前後の幅で分布する。 reef front facies zoneとの境界は漸移的であり、必ずしも明瞭ではない。おそらく、その元々の境界は、フレームワークを構築する化石群のうち、光に依存する藻類や四放サンゴ類の繁栄を制限する水深に近似されると考えられる。 reef slopeの下部境界については現時点ではまったく不明である。

reef slope化石群集は、コケ虫類、海ユリ類を中心に、四放サンゴ類、石灰藻類、腕足類、頭足類、海綿類および三葉虫類などから構成される。量的に最も多くを占めるのは、海ユリ類および網目状・円筒状・分枝状のコケ虫類（*Fenestella*や*Polypora*などの fenestelid bryozoansが最も多い）である。海ユリとコケ虫は、石炭紀古世の海底火山活動によって形成された海山に最初に付着し、それ以降の石炭・二畳紀を通じて常に生物礁複合体の最も外側部分を構成した化石群である。この両者はreef slopeの斜面上に生息し、その死後、容易に破片化し海ユリ・コケ虫片からなるgrainstone-packstone (III-A, III-B岩型)を形成する。

四放サンゴ類、付着性の石灰藻類・コケ虫類は斜面上に点在し、小規模なboundstoneを構築する。特に平板状のaphroid群体を造る四放サンゴ（*Ivanovia*）は特徴的で、その分布はreef slopeおよびreef frontの下部に限られる。この四放サンゴの平板状の形態は、現世の造礁サンゴに見られるのと同様な透光量の減少に対する適応の可能性が強い。頭足類や三葉虫類は外洋の遊泳生活者として生息し、その死後、斜面上に堆積して砂レキ質石灰岩の中に取り込まれる。頭足類は時に密集した産状を示している。

reef slope faciesの石灰岩は小規模な原地性造礁化石と、原地に生息した化石と化石片、斜面上部の浅海域から滑動してきた石灰粒子などから構成される。すなわち次の3タイプの石灰岩からなる。

- 1) 海ユリ、コケ虫片を主成分とし時に頭足類、腕足類、三葉虫などの化石を伴う grainstone-packstone(III-A, III-B岩型)
- 2) 散点的に分布する小規模なboundstone(IV-A, IV-B岩型)
- 3) 斜面上部のより浅い区域に由来する、大型のreef-builders片から細粒の石灰粒子

(よく円摩されたbioclastsが最も多い)におよぶ雑多な粒子を主成分とする rudstone-grainstone-packstone (V-A, III-D岩型)

これらのうち最も優勢な岩型はIII-Aの grainstone-packstoneであり、逆にV-Aのrudstoneは量的に最も少なく、またポケット状の限られた分布を示す。

この reef slope facies zoneにおける石灰岩の形成過程は、生物による石灰粒子のせき止め作用 (sediment-baffling, sediment-trapping) や堆積物上に付着成長して堆積物を安定させる作用 (sediment-binding, sediment-stabilizing) に負う部分が多い。これらの作用を担う生物群は小規模なフレームワークを造る造礁生物であるが、海ユリ・コケ虫類も (死後は分解してバラバラになるけれども) おそらく生きていた時には、ある程度このような作用を果していたものと考えられる。これらの作用によって石灰粒子 (原地で形成されたかまたは運ばれてきた) は斜面を滑り落ちることを免れる。さらに堆積物の内部で急速なセメント作用が進行し石化が生じる。これらの作用の繰り返しによって reef slope は維持され、さらに上方および外側 (外洋側) へ発達したと考えられる。

(2) 礁相 (Reef Core Facies)

生物礁複合体の中核をなす、フレームワークのよく発達する部分を礁相とした。礁相をさらに reef front facies zone, reef crest facies zone, reef flat facies zone, back reef facies zoneの4つに区分した。reef front zoneとreef flat zoneをそれぞれさらに2つに細分した。

a. Reef front facies zone

reef slope facies zoneとreef crest facies zoneの中間部分をreef front facies zoneとした。秋吉生物礁複合体で最もフレームワークの発達が良く、構成化石群の多様性の最も高いfaciesである。このfacies zoneは南台地域では100~200mの幅で分布する。reef crest facies zoneとの境界は明瞭である。両zoneの間の本質的な違いは、水深と基盤が水平であったか傾斜していたかの2点である。この2点の違いは、造礁化石群の組み合わせの違いとその成長形態の違いとなって間接的にあらわれるので、両zoneの境界を、この違いに着目して引いた。

reef front zoneも reef slopeと同じく外洋側へ傾斜する斜面を形成する。円盤状の四放サンゴの底面（成長時の斜面を示す）と、腕足類の殻の中に残されたgeopetal構造の micrite と calcite cementの境界面（堆積時の水平面を示す）との関係から、この斜面の傾斜角として、30度前後—最大約40度の値を得ている（Sugiyama and Nagai, 1994）。

reef front facies の石灰岩は以下の3タイプの石灰岩から構成される。

- 1) 大規模かつ多様なboundstone（主にIV-A, B, C, D, E岩型）
- 2) boundstone の間の空間を埋める wackestone-packstone
- 3) フレームワークの間にポケット状に堆積したrudstone-grainstone-packstone
（III-A,B,D;IV-A岩型）

boundstone は多種多様であるが、群体四放サンゴ類を主要構成者とする framestone が最も顕著に見られる。Fig. 7 に群体四放サンゴと豊富なコケ虫化石類を主体とするIV-B 岩型のboundstoneの石板のスケッチを示す。束状の群体サンゴ（*Siphonodendron*）と極めて豊富なコケ虫類（12属を含む）のほかに、buildersとして石灰藻類や床板サンゴを伴う。多様な形態を示すコケ虫類（特にencrustingの生態を持つ *Fistulipora*, *Meekoporella*および *Meekopora*属が重要である）がサンゴ群体に付着、あるいは群体間の空間を埋めて成長し、全体として強固なフレームワークを造り上げている。このboundstoneはreef frontのlower zoneのframeworkを構築する boundstone として最も良く発達し、その野外における規模は、1地点で数m~10m以上におよぶ（スケッチのサイズは採石能力と関係していて、フレームワークの規模とは関係がない）。IV-E 岩型のboundstoneの顕微鏡写真をFig. 8 に示す。多様な造礁化石群が互いに組合わさって、強固なフレームワークを造りあげていることが読みとれる。

Table 3 に石炭紀中世前期のreef front faciesを構築する化石群集の構成化石とその生態を、その生物礁複合体内で果す役割ごとにまとめて示す。化石群集は多様な化石群から構成され、その生態や成長形態も極めて多彩である。特にフレームワークを構築する reef-buildersの多様度は礁相の他のfacies zoneのフレームワークに比べてはるかに高い。

- ☉ rugose corals (phaceroïd)
- ☉ bryozoa (encrusting)
- ☉ calcareous algae (encrusting)
- ☉ bryozoa (fenestrated)
- ☉ bryozoa (ramose)
- ☉ taburate coral

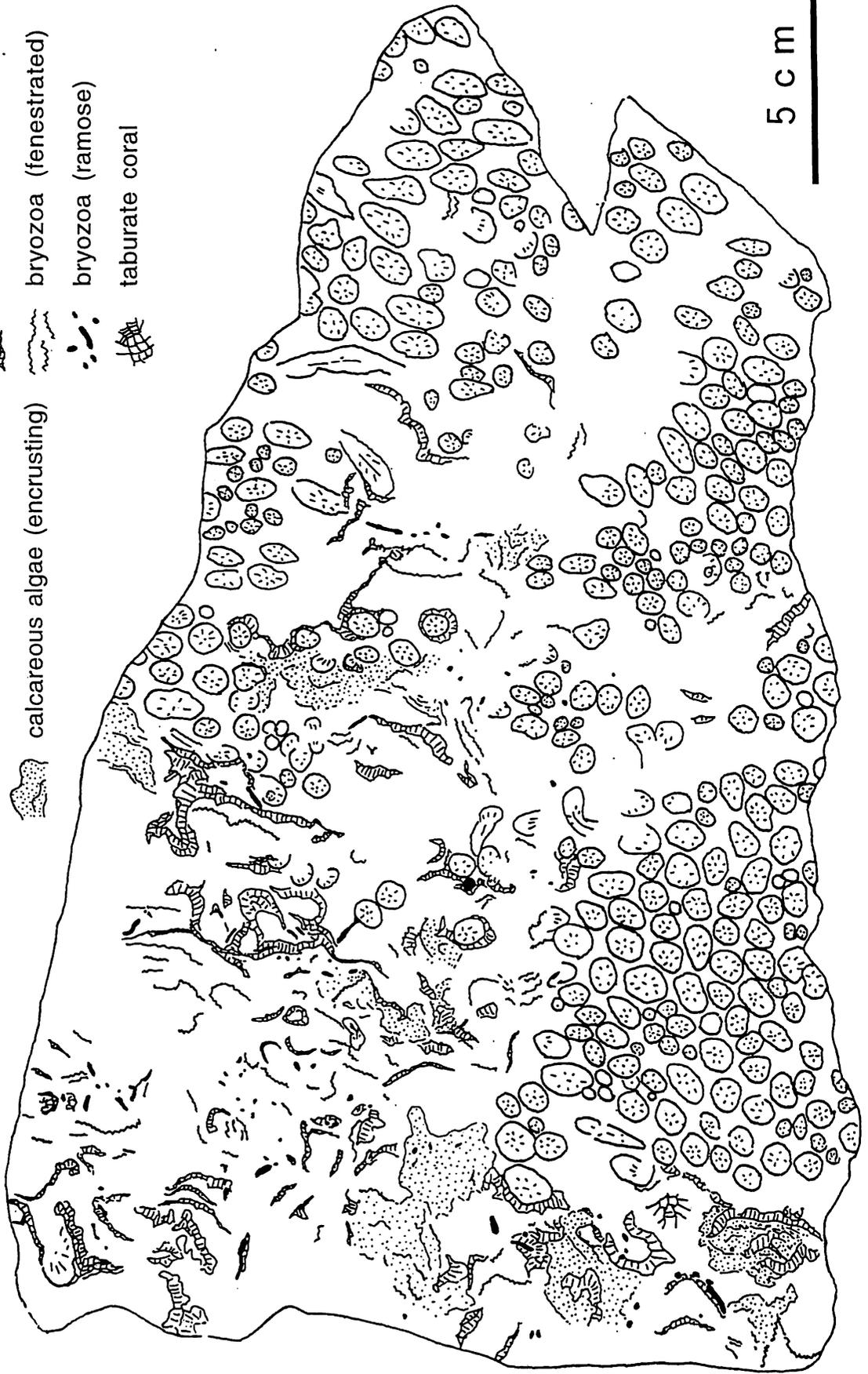


Fig.7. Detailed sketch of cross-section showing reef framework in Akiyoshi organic reef complex. Bryozoa compound coral framestone (boundstone type IV-B). Lower reef front zone, upper part of *Millerella yowarensis* Zone, Loc. 89021403-A-2b.



Fig.8. Thin section photomicrograph of boundstone type IV-E (Bryozoa algal chaetetid-ceroid coral framestone). Upper reef front zone, Upper part of *Millerella yowarensis* Zone. Loc. Iw-75-A-5.

多くの種類の化石が、別個の役割を果しながら組み合わせられた結果、多様な化石群組み合わせと多彩な形態を持つ強固なフレームワークが形成されている。また、これらのフレームワークの間に生じた小環境に様々な生態的nicheを持つ化石群がdwellersとして生息しているのも大きな特徴である。

reef front facies zoneは、フレームワークを構築する化石群の組成や成長形態の違いとフレームワークの規模の大きさやその分布密度の違いにより、upper zoneとlower zoneに分できる。upper zoneとlower zoneでは以下の諸点で違いがある(Table 3 参照)。

1) upper zoneでは相対的に大規模なフレームワークが構築されその空間占有率が高いのに対し、lower zoneではフレームワークは相対的に小規模かつ空間占有率も低く、やや散点的な分布を示す。

2) upper zoneでは群体四放サンゴは塊状(cerioid type)の形態を持つものを主体とするが、lower zoneでは塊状、束状のものがほぼ等価の割合を占める。また平板状の群体四放サンゴはlower zoneにだけ見られる。

3) upper zoneに比較してlower zoneでは石灰藻類の重要度が減少し、代わってコケ虫類の重要度が増加する。

b. Reef crest facies zone

南台地域の *M. yowarensis* 帯上部にreef crest facies zoneが分布するが、その幅は10m前後と極めて狭い。reef crest faciesの石灰岩は、ただ1種のboundstone (IV-F 岩型)と、これに伴うgrainstone-packstoneからなる。IV-F 岩型のboundstoneの石板スケッチをFig. 9に示す。このboundstoneを造る化石群は、ケイティーテス類と付着性石灰藻類を主体とし、単体四放サンゴと床板サンゴ(syringoporids)をわずかに伴う。群体の四放サンゴは全く見られない。スケッチではこれらの化石群が組合わさって、層状の極めて強固な構造を造り上げていることが観察できる。

ケイティーテス類は成長形態の変位の幅が大きく、環境によって様々な形態を示すが、このreef crest zoneでは、その多様な形態の中で最も強固な形態(横方向への連続性のよ

Table 3. Major functional roles, growth forms and ecologies of organisms comprising the reef front community in middle Carboniferous time.

Functional roles and organisms	Growth forms	Ecology	Distribution	
			UZ	LZ
FRAME-BUILDERS				
<u>Petaraxis</u> sp. (c)	massive(cerioid)	epifaunal-attached	#	+
<u>Ozakiophyllum</u> sp. (c)	massive(cerioid)	epifaunal-attached	#	+
<u>Oniophyllum</u> sp. (c)	massive(cerioid)	epifaunal-attached	+	
<u>Siphonodendron</u> sp. (c)	fasciculate(phaceroïd)	epifaunal-attached		#
<u>Echigophyllum</u> sp. (c)	fasciculate(dendroid)	epifaunal-attached	+	+
<u>Chaetetes</u> sp. solitary corals	massive-irregular ceratoid	epifaunal-attached	#	+
indet. sponges	nodular	epifaunal-attached	+	+
indet. syringoporoid	shrub-like dendroid	epifaunal-attached	+	+
indet. tabulate corals	tabular, nodular	epifaunal-attached		+
FRAME-BUILDERS(ENCRUSTERS)				
blue-green alga type A	crustose	encrusting	#	+
blue-green alga type B	crustose	encrusting	+	+
<u>Komia</u> sp. (a)	crustose	encrusting	+	
<u>Fistulipora</u> spp. (b)	tabular, massive, irregular	encrusting	#	#
<u>Meekopora</u> sp. (b)	irregular mesh-work	encrusting	+	+
<u>Meekoporella</u> sp. (b)	irregular mesh-work	encrusting	+	#
<u>Leioclema</u> sp. (b)	tabular	encrusting		+
SEDIMENT-BAFFLERS				
SEDIMENT-STABILIZERS				
<u>Ivanovia</u> sp. (c)	tabular(aphroid)	epifaunal		+
<u>Stenopora</u> sp. (b)	cylindrical	epifaunal-attached	+	+
<u>Pseudobatostomella</u> sp. (b)	cylindrical	epifaunal-attached	+	+
<u>Streblascopora</u> sp. (b)	ramose	epifaunal-attached	+	+
<u>Sulcoretepora</u> sp. (b)	cylindrical, ramose	epifaunal-attached		+
<u>Dyscritella</u> sp. (b)	cylindrical, ramose	epifaunal-attached		+
indet. nodular algae	nodular	epifaunal-attached		+
SEDIMENT-BINDERS				
<u>Fistulipora</u> spp. (b)	tabular, massive, irregular	encrusting	#	#
blue-green alga type A	crustose	encrusting	#	+
blue-green alga type B	crustose	encrusting	+	+
REEF-DWELLERS				
brachiopods		epifaunal-attached	+	
ammonoids		nektonic	+	+
gastropods		epifaunal-vagile	+	+
trilobites		nektonic	+	+
SEDIMENT-PRODUCERS				
crinoids		epifaunal-attached	#	#
<u>Fenestella</u> spp. (b)	fenestrated	epifaunal-attached	#	#
<u>Polypora</u> spp. (b)	fenestrated	epifaunal-attached	#	#
<u>Stenopora</u> sp. (b)	cylindrical	epifaunal-attached	+	+
<u>Dyscritella</u> sp. (b)	cylindrical, ramose	epifaunal-attached		+
<u>Pseudobatostomella</u> sp. (b)	cylindrical	epifaunal-attached	+	+
<u>Streblascopora</u> sp. (b)	ramose	epifaunal-attached	+	+
foraminifers		benthic	+	+
REEF-DESTROYERS				
indet. boring organisms		endolithic	+	+

a : algae, b : bryozoans, c : rugose corals, UZ : upper zone, LZ : lower zone, # : abundant, + : common

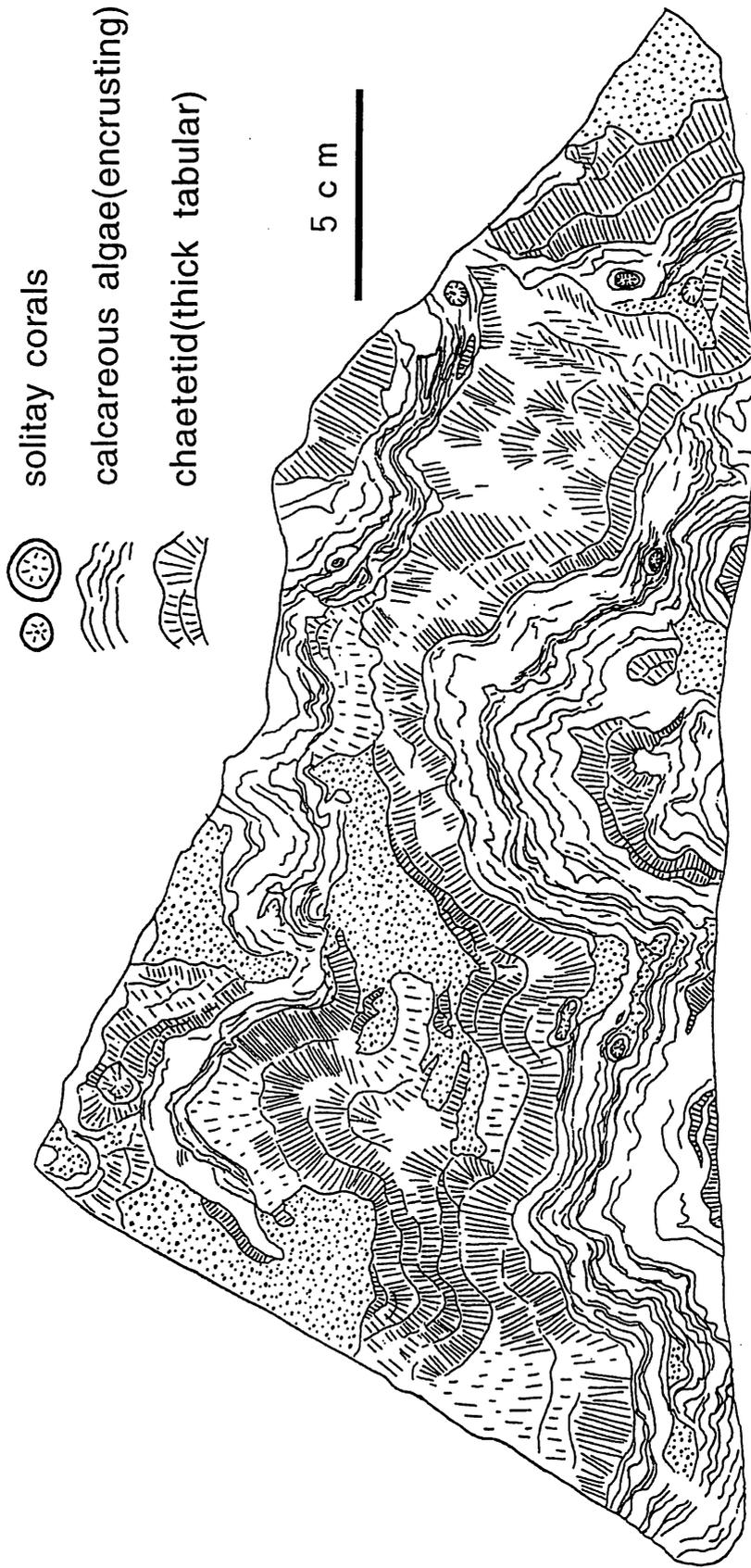


Fig.9. Detailed sketch of cross-section showing reef framework in the Akiyoshi organic reef complex. Encrusting chaetetid-algal framestone(Boundstone type IV-F). Reef crest zone.Upper part of *Millerella yowarensis* Zone, Loc. Iw-199-3.

い厚い層状：thick tabular form) を示す。syringopoid tabulataも環境によって encrusting formと dendroid formの2つの成長形態を取ることは、すでに報告したが(叔山・長井, 1990), この reef crestでは encrustingの形態を取っている。単体サンゴも基盤となる藻類上へ側壁を密着させて、基盤上を横方向に這うように成長している。

reef crestは生物礁複合体の最浅部であり、強い波浪営力と低潮期の空中露出の2つの大きなストレスにさらされる場所である。従ってこれらのストレスに適応できた数少ない化石群によって構築されたと考えられる。

c. Reef flat faices zone

reef crest facies zoneと back reef slope facies zoneの間の平坦部を reef flat facies zoneとした。このzoneと reef crestとの境界はかなり明瞭であるが、back reef slopeとの境界は漸移的である。石炭紀中世前期の生物礁複合体ではこのzoneの幅は広く、南台では *M. yowarensis* 帯から *P. antiqua* 帯にかけて150~200mの幅で分布する。この時代の reef flat facies zoneを、さらに outer reef flatと inner reef flatに2分した。outer reef flat faciesは樹状の群体サンゴを主とする boundstone (IV-G, H岩型) とオーイドを含むような、成熟度の高い grainstone-packstoneおよび rudstone(III-C, D; V-C岩型) で特徴づけられる。

IV-H岩型の boundstoneのスケッチを Fig.10に示す。樹状の群体四放サンゴ(*Hiroshimaphyllum*)と不規則塊状のケイティーテス類を主構成員とする。他に単体サンゴ, syringopoids, *Komia*などが含まれる。ケイティーテスは四放サンゴの回りを、完全に取り巻いて付着成長する。樹状の群体四放サンゴを主構成員とするフレームワークは、reef crestを間に挟んで reef frontとこの outer reef flatの両側で見られるが、この outer reef flat facies zoneにはコケ虫化石がほとんど含まれない。この時代の outer reef flat facies zoneは、reef crestの後背部に位置したサンゴの成長に必要な水深を持つ moat状の窪地と、それに続く良好な海水循環と攪拌作用をうける礁原が示唆される。

inner reef flat facies zoneは石灰藻類を主体とする boundstone (IV-I岩型) と algal matsを伴うような mudstoneおよび雑多な構成粒子からなる wackestone-packstone (II-B岩型) で特

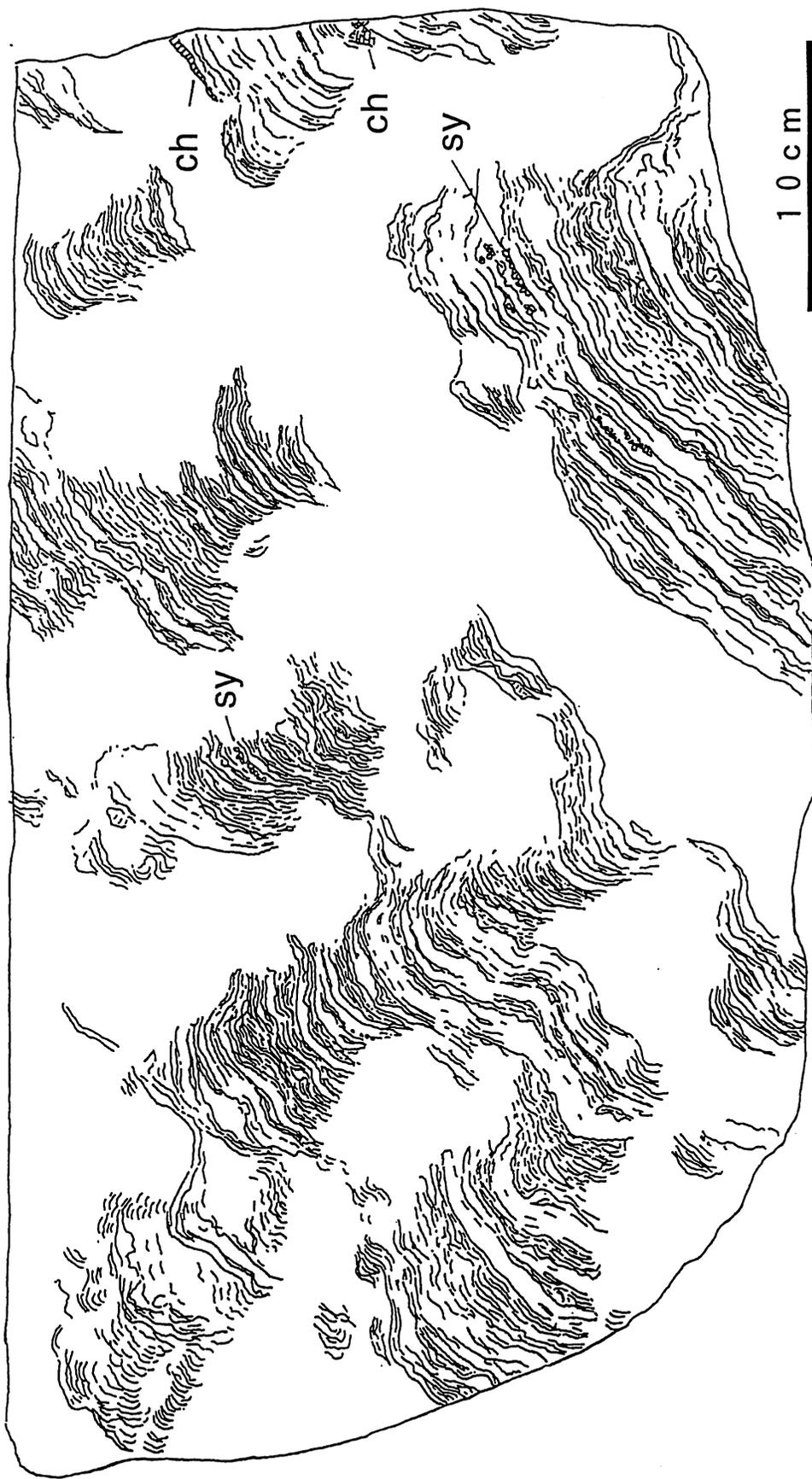


Fig.11. Detailed sketch of cross-section showing reef framework in the Akiyoshi organic reef complex. Algal bindstone (Boundstone type IV-1). Composed dominantly of encrusting blue-green algae with minor associated chaetetids(ch) and syringoporid tabulata(sy), forming stromatolitic structure of LH-LH type. Outer reef flat zone, *Pseudostaffella antiqua* Zone, Loc. Iw-221'.

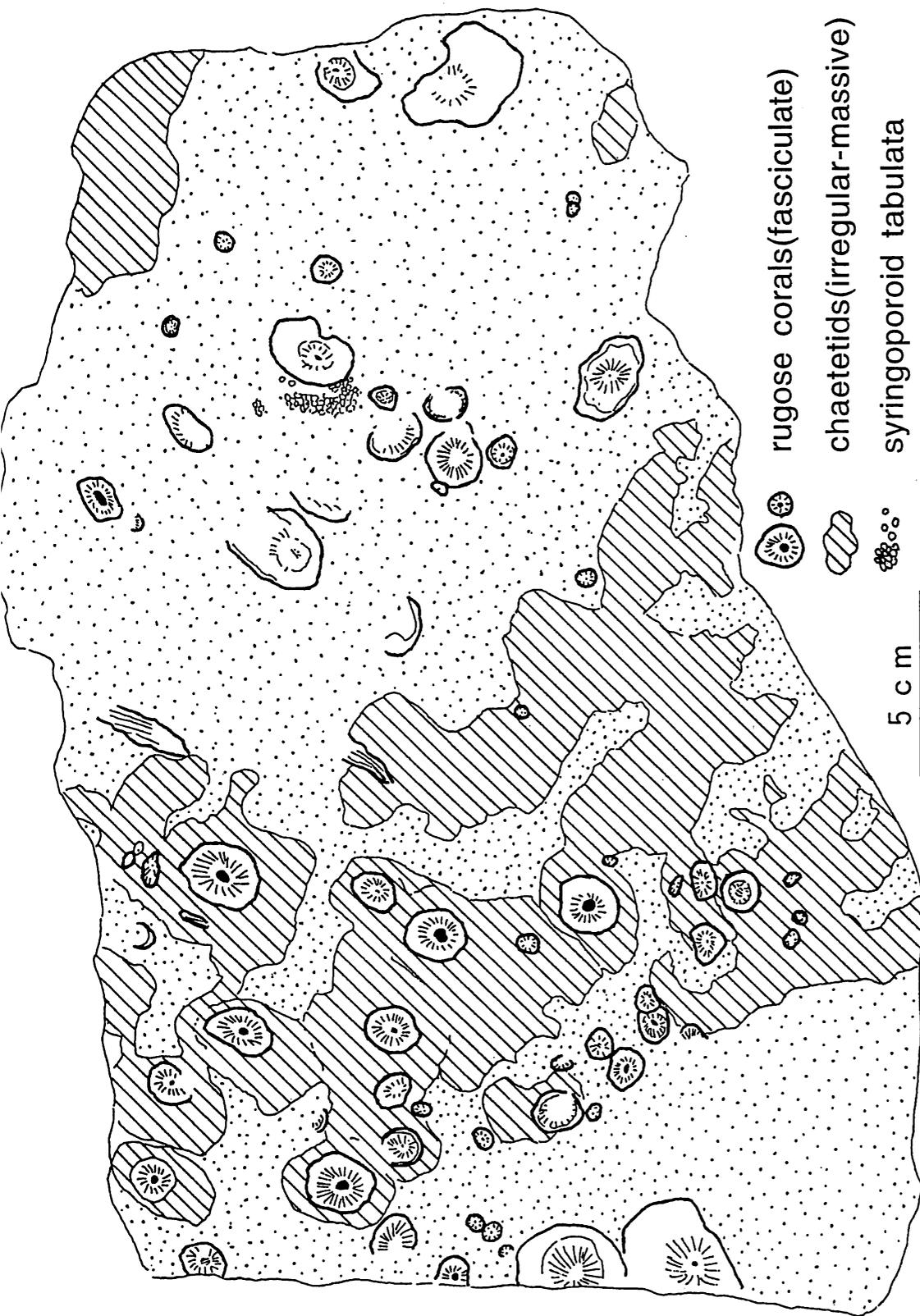


Fig.10.Detailed sketch of cross-section showing reef framework in the Akiyoshi organic reef complex. Encrusting chaetetid dendroid coral bafflestone-framestone (Boundstone type IV-H). Outer reef flat zone.Upper part of Millerella yowarensis Zone, Loc. Iw-200'-co-A.

徴づけられる。このzoneに特徴的なboundstoneの石板スケッチをFig.11に示す。付着性石灰藻類がほとんど単独でsediment-binderの役割を果たし、見掛け上、LLH型（laterally linked hemispheroid type）のストロマトライトに類似のbindstoneを形成している。他に層状の成長形態を取り得る化石（chaetetids, fistuliporid bryozoans, encrusting foraminifers, encrusting syringoporids）をわずかに伴う。堆積環境としてintertidalの静水環境が推定される。

reef flat zoneは海水面直下に位置する平坦部であるため、海水面変動の影響を最も受け易い場所であり、海水面の変動によって、その生・岩相の特徴や分布の幅は大きく変化したはずである。南台では、露出面と堆積の同一時間面が緩い斜行関係にあるため、reef flatのouter zoneとinner zoneの境界が、地表での*M. yowarensis* 帯と*P. antiqua* 帯の境界にほぼ一致してしまっている（*M. yowarensis* 帯でouter zoneがみられ、*P. antiqua* 帯でinner zoneがみられる関係にある）。従って、outer zoneとinner zoneの関係が本当に同時異相の関係にあったかどうかは、不確かである。特に*P. antiqua* 帯にouter zoneにみられるcoral boundstoneがあったことの証拠は、未だ見い出していない。

いずれにしてもreef flat facies zoneは、生物礁複合体中で最も変貌しやすいzoneであり今後のより詳細な研究が必要である。

d. Back reef slope facies zone

reef flat facies zoneと礁湖相の間の斜面を back reef slope facies zoneとした。このfacies zoneは南台の住友セメント南台採石場北側ベンチの*P. antiqua* 帯から*Profusulinella beppensis* 帯にかけて広く分布した。

back reef slope faciesに典型的なboundstone（IV-J岩型）の石板の写真をFig. 4に示す。小型の層状、半球状、三日月状、不規則塊状などの形態を持つケイティーテス類が付着性藻類を伴って構築するboundstoneである。ケイティーテス類は群体の間に藻類薄層を挟みながら、次々と群体を積み重ねて成長し、最終的には不規則枝分れ状、あるいはポケットを持つようなboundstoneを構築し、その間隙に堆積物をつなぎとめる役割を果た

す。すなわち、ここではケイティーテス類はframe-builderであるとともに sediment-baffler の役割も果たしている。他に単体サンゴ、付着性の有孔虫類 (encrusting foraminifers), 付着性コケ虫類, 床板サンゴ (syringoporids) などをbuildersとして伴なう。

Fig. 4 に示す石板でboundstoneの成長基盤面, 化石の成長方向, geopetalの3者の関係調べ, boundstoneの基盤が30度前後傾斜した斜面であることを確認している。また, 同石板から, 付着性藻類がsediment-binderとして最初に堆積物上に付着成長して, ケイティーテス成長のための基盤を供給する先駆者 (pioneer) の役割を果たしていることが読みとれる。

(3) 礁湖相 (Lagoon Facies)

back reef slope facies zoneに続く生物礁複合体の内側部分の静水域をlagoon facies zoneとした。ただし, 南台地域の*M. yowarensis*帯~*P. antiqua*帯にはlagoon faciesの石灰岩は全く露出してない。かわって*Profusulinella beppensis*帯より上位のlagoon faciesが広範に分布している。他地域 (龍護峰, ウズラ採石場の北側一帯, 東秋吉台の大久保地域など)には礁湖相の*M. yowarensis*帯石灰岩が部分的に見られる。いずれもcortoidsを主成分とするgrainstone-packstone(III-H岩型)からなり, lime-mudが広く堆積するような礁湖が存在した証拠は見つかっていない。

ここでは, 南台地域の*P. beppensis*帯~*Fusulinella biconica*帯のlagoon faciesの特徴についてその概要を述べることにする。なお, Fig. 3の分布図に示すlagoon faciesには, 便宜的に, この*P. beppensis*帯~*F. biconica*帯から得られたデータを書き込んでいるので注意されたい。その特徴は以下のような要約される。

1) mudstone-wackestone facies(I-A, II-A, B岩型)が卓越するがgrainstone-packstone facies(III-E, F, G, H岩型)もかなりの割合を占める。

2) 化石はlagoon中に生息する有孔虫類とsediment-producerの範疇に入る藻類に限られる。

藻類はdacyclad algae, codiacean algae, phylloid algaeなどの緑藻類が最も多い。

3) 礁湖起源と礁相起源の2種類のbioclastsが含まれる。

4) 生物擾乱作用が著しい。また、擾乱作用によって形成される偽礫(pseudo-intraclasts)の量は無視できない。

5) cortoids-bahamite grains, aggregate grains, oncoidsなどの藻類活動によって形成される粒子が多い。

6) 明瞭な堆積サイクルが観察される。mudstone-wackestoneに始まり、有孔虫や藻類片、礁相起源のbioclastsなどから構成されるgrainstone-packstoneを経て、oncoids, aggregate grains, cortoid grainsを主成分とするgrainstone-packstoneで終わるサイクルが何度も繰り返す。lagoon facies zoneは礁相によって囲まれた静水域であるが、常にmuddy sedimentsが堆積し続ける場所ではなく、その堆積作用は礁相の成長と海水面変動に大きく支配されている。

4. 考 察

A. 秋吉生物礁複合体はどんなタイプの生物礁だったか

以上述べてきた石炭紀中世の秋吉生物礁複合体の特徴は以下の3点に集約される。

1) 生・岩相の分布に礁相を中心とした明瞭な帯状配列がみられる。

2) 固着性・付着性の造礁化石群が分泌した石灰質骨格が互いに積み重なって、強固なフレームワークが構築されている。

3) 個々の造礁化石の分布とその成長形態、造礁化石群の組み合わせとそれらが全体で造り上げる構造(フレームワーク)のタイプ、およびそれらの構造の推定される波浪に対する強度は、生物礁複合体内の各facies zoneによって大きく変化する。

特に3番目の特徴は、この時代の主要造礁生物が、波浪の営力に対して十分に適応した能力を持ち、波浪の強度を含む複数の環境要因の組み合わせによって規定される生物礁複合体内の小環境ごとに(各zoneごとに)、その環境に最適の組み合わせと形態で成

長した結果生じたと考えらる。この特徴は現世サンゴ礁にみられる造礁サンゴ等の生態的な帯状分布 (ecologic zonation) とほぼ同じ特徴といえる。

以上の特徴は、秋吉生物礁複合体が、高エネルギーの波浪環境下で形成された、high energy reefであることを明瞭に示している。さらに、秋吉石灰岩に共通する特徴（玄武岩基盤を持つこと、陸源物を全く含まないこと等）や近年の付加テクトニクスに基づく研究成果を加味すれば、秋吉生物礁複合体は、大洋の海山上で激しい波浪環境に十分適応して形成された生物礁複合体そのものであるといえる。すなわち、秋吉生物礁複合体は、現世の大洋型生物礁 (oceanic reef) と極めて相似の構造を持っている。生物礁が造礁生物が波浪に適応して造り上げた構造物である以上、同じ環境で形成された生物礁が同じような構造を持つのは、ある意味では必然とも言える。

秋吉生物礁複合体（秋吉帯の礁起源石灰岩体は、といってもよい）は同時代の carbonate buildups の中では極めて異質な存在であるが、その異質性は、秋吉生物礁複合体が海山上で形成された oceanic reef であることと密接に関係している。現世サンゴ礁は熱帯域から亜熱帯域の海洋域、具体的には大洋中の海山や海嶺上、大陸棚上および島弧周辺などに分布している。すなわち、大陸地殻と海洋地殻の両者の上に発達しているが、地質記録に残されている生物礁（特に古生代）は陸棚上や intracratonic basin の縁辺部で形成されたものが多く、海山や海嶺上で形成された生物礁は、地質記録にはあまり多く残されていない。海洋地殻上で形成された oceanic reef は付加過程を経るという宿命を負っていて失われ易いことによる。また、変動帯に組み込まれるので、地質構造が複雑になり、生物礁の原地形などの情報が失われてしまうため研究が難しく、好適な研究材料がほかにある欧米では研究の対象にされて来なかった理由もあるかもしれない。いずれにしろ、本稿の最初の部分で記した生物礁の変遷史は、ほとんど大陸地殻上に形成された carbonate buildups のデータに基づいて書かれているとあって過言ではなく、このことが秋吉生物礁複合体の異質性を特に際立たせているとも言える。

B. 造礁生物の造礁能力と地球環境

上記の秋吉生物礁複合体の特徴は、石炭紀の造礁化石の造礁能力（強固なフレームワークを構築する能力）に対して、これまでの通説とは異なる見解を提示する。造礁能力とは、より具体的に、1) 硬い殻や骨格を分泌する能力、2) 基盤上にしっかりと固着・付着する能力、および3) それらの生産速度、を示すと考えられる。秋吉生物礁複合体の存在は、デボン紀の大絶滅の後でありながら、少なくとも石炭紀中世初めころには、造礁生物がこういった能力を回復していたことを明示している。

ここで重要なことは、秋吉生物礁複合体の異質性は、造礁化石群の造り上げた構造物にあって、秋吉生物礁複合体を構築した造礁化石群そのものが異質なのではないという点である。これらの造礁化石群は秋吉だけに特異なものではない、これらの化石群のうちの多くは、属あるいは科のレベルで見れば、全て世界的に見いだされるものばかりである。最も注目せねばならない事は、同じ時代の同じ分類群に属する化石が、欧米などの大陸地域ではreef moundsを構成しフレームワークを造らないのに対し、秋吉生物礁複合体では同じ化石が強固なフレームワークを持つ生物礁を構築していることである。

この、両者の違いを生じた原因を何に求めるべきか。それは両者の形成された環境の相違にあると考えざるをえない。地質記録に多いshelf reefと海山の頂上部に発達するoceanic reefとを、再度比較してみる。両者の間には、

- 1) 形態の違い
 - 2) 成長基盤の違い
 - 3) 側方の堆積物との関係の違い
 - 4) 陸域から受ける影響力の違い（oceanic reef は陸域の影響をほとんど受けないが、shelf reef は陸域の影響を強く受ける。特に陸源物質の流入はshelf reefの死活にかかわる）
 - 5) 海洋条件の違い（一般に oceanic reef の方が強い波浪や流れにさらされる）
 - 6) 海水面変動に対する対応の違い
- などの違いがある。

石炭紀の地球環境を、生物礁の形成場という視点で捉えるとき、特に、4) と5) の

違いは重要である。石灰岩の形成場を、carbonate platform としてとらえる立場では、大陸が合体していた後期古生代には、intracratonic の小規模な carbonate platform だけが存在し、大陸の回りに大規模な carbonate platform (epeiric platform) が発達した時代は、前期古生代と中生代に限られるとされている (James and Mountjoy, 1983)。後期古生代に多い intracratonic platform は、どうしても相対的に低エネルギーの海洋環境下で形成され、陸域の影響も受けやすいことになる。また、地球規模での気候変動の立場からは、後期古生代は氷室期 (Icehouse State) に当たり (Fisher, 1984)、炭酸塩の形成量も著しく減少したとされている (Tucker et al., 1990)。さらに、後期古生代は大陸の合体によって、海嶺の活動の不活発化した時期であり、このことと気候の寒冷化によって石炭紀中頃から二畳紀にかけて、汎世界的に大規模な海退が生じるとともに (Hallam, 1977; Vail et al. 1977)、短周期で振幅の大きい海水面変動が繰り返し起きている (Ross and Ross, 1985 など)。

石炭紀を停止遷移 (arrested successions) が典型的に見られる時代である (Copper, 1988)。停止遷移とは、生物礁生態系の崩壊後の回復が遅れ、開拓相 (pioneering phase) のままで数1000万年の間停滞して、極相に到達できなかった遷移である。停止遷移は強い外的な抑圧が働いて、極相へ到達しようとする“生物礁”の potential を制限するような環境で典型的に起きる。石炭紀の大陸内部や周辺の小規模な浅海域では、気候の寒冷化、海退、海水面振動や低エネルギーの海洋環境といった諸要因が強く作用し、たとえ石炭紀の化石群が礁を構築できる能力 (potential) を内在していたとしても、これらの化石群がその能力を発揮して生物礁を構築することを強く抑圧をしたとが考えられる。

また、秋吉石灰岩で代表される生物礁起源石灰岩の存在は、これらの化石群がその能力を十分に発揮して、実際に生物礁を構築できた環境 (外的な抑圧をあまり受けなかった環境) が、石炭紀には、これらの石灰岩が堆積した熱帯の大洋中に限られていたことを実証している。

5. まとめ

秋吉石灰岩に代表される秋吉帯の生物礁起源石灰岩の存在は、以下の2点を示す証拠物として、生物礁変遷史上、極めて重要である。

1. デボン紀後期に起きた生物礁生態系の崩壊後の立ち直りは比較的早く、遅くとも石炭紀中世の初めには、“造礁化石群”は強固なフレームワークを造る能力を回復し、生物礁生態系の再構築がなされた。

2. ただし、生物礁の発達を抑圧する外的な環境要因が多く作用した石炭紀にあって、生物礁の形成に適した環境は、おそらく大陸周辺部には存在せず、海山の存在していた熱帯の大洋域だけに限られていた。

6. 文 献

Copper, P., 1988, Ecological successions in Phanerozoic reef ecosystems: Is it real? *Palaios*, 3, 136-152.

Dunham, R. J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *AAPG Mem. no.1*, 108-121.

Embry, A. F. and Klovan, J.E., 1971, A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Islands, Northwest Territories. *Canada. Petrol. Geol. Bull.*, 19, 730-781.

Fagerstrom, J. A., 1987, *The evolution of reef communities*. John Wiley and Sons, 628pp, New York.

Hallam, A., 1977, Secular changes in marine inundation of USSR and North America through the Phanerozoic. *Nature*, 256, 762-772.

Heckel, P. H., 1974, Carbonate buildups in the geologic records, A review. *SEPM Spec. Pub.*, no.18, 90-154.

市川浩一郎, 1984, 東アジアの基盤構造の発展 I. 藤田和夫編著, アジアの変動帯,

223-238. 海文堂, 東京.

James, N. P., 1979, Reefs. In Walker, R. G. ed., Facies Models, Geoscience Canada, Reprint Series 1, 121-132.

———, 1983), Reef environment. In Scholle, P. A., Bebout, D. G. and Moore, C. H. eds., Carbonate depositional environments, AAPG Mem. no.33, 346-440.

———, (1984) : Reefs. In Walker, R. G. ed., Facies Models, Second Edition, Geoscience Canada, Reprint Series 1, 229-244.

——— and Montjoy, 1983, Shelf-slope break in fossil carbonate platform: An overview. SEPM Spec. Pub., no.33, 189-206.

勘米良亀齡, 1983, 西南日本上部古生界の堆積構造過程に関する一問題. 日本地質学会西日本支部第100回例会記念シンポジウム論文集, 67-76.

Longman, M. W., 1981, A Process approach to recognizing facies of reef complex. SEPM Spec. Pub., no.30, 9-40.

長井孝一, 1978, 秋吉台龍護峰地域の礁性石灰岩の岩相と生相. 秋吉台科博館報, 13号, 15-34.

長井孝一, 1979, 秋吉石灰岩層群下部層中にみられる礁性石灰岩について. 地球, 1巻, 661-667.

———・太田正道, 1980, 山口県秋吉台南台地域の地質. その1層序および地質構造. 九大教養地学研報, 21号, 7-15.

太田正道, 1968, 地向斜型生物礁複合体としての秋吉石灰岩層群. 秋吉台科博館報, 5号, 1-44.

Ota, N., Sugimura, A. and Ota, M., 1969, Reef deposits in the Millerella zone of the Akiyoshi Limestone Group. Paleont. Soc. Japan, Spec. Pub., no.14, 1-12.

Ozawa, T., Kobayashi, F., Ishii, K. and Okimura, Y., 1990, Carboniferous to Permian Akiyoshi Limestone Group. 4th International Symposium on Benthic Foraminifera, Guidebook for

Field Trip No.4, Akiyoshi, 31pp.

Ross,C.A.and Ross,J.R.P.,1985, Late Paleozoic depositional sequences are synchronous and worldwide. *Geology*, 13, 194-197.

Sano,H.and Kanmera,K.,1988,Paleogeographic reconstruction of accreted oceanic rocks, Akiyoshi, southwest Japan. *Geology*, 16, 600-603.

— — — — and — — — —, K.,1991a,Collapse of ancient reef complex — What happened during collision of Akiyoshi reef complex ? — Geological setting and age of Akiyoshi terrane rocks on western Akiyoshi-dai plateau. *Jour. Geol. Soc. Japan*,97, 113-133.

— — — — and — — — —,1991b,Collapse of ancient reef complex — What happened during collision of Akiyoshi reef complex ? — Broken limestone as collapse products. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 97, 217-229.

— — — — and — — — —,1991c,Collapse of ancient reef complex — What happened during collision of Akiyoshi reef complex ? — Limestone breccias, redeposited limestone debris and mudstone injections. *Jour. Geol. Soc. Japan*,97,297-309.

— — — — and — — — —,1991d,Collapse of ancient reef complex — What happened during collision of Akiyoshi reef complex ? — Sequence of collisional collapse and generation of collapse products. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 97, 631-644.

板山哲男・長井孝一,1990,秋吉石灰岩層群産 Auloporidid Corals の成長形態について。秋吉生物礁複合体における造礁生物群の古生態学的研究 I。秋吉科博館報, 25号, 7-25.

— — — — and — — — —,1994,Reef facies and paleoecology of reef-building corals in the lower part of the Akiyoshi limestone Group,carboniferous, Southwest Japan. *Cour.Foesch.-Inst.Senckenberg*, 172, 231-240.

Tucker, M. E., Wright, V. P. and Dickson,J. A. D.,1990,Carbonate sedimentology.Blackwell Sci. Pub., London, 482pp.

Uchiyama, T., Sano, H. and Kanmera, K.,1986, Depositional and tectonic settings of chert
around the Akiyoshi Limestone Group, southwest Japan. Mem. Fac. Sci., Kyushu
Univ., Ser.D, 26, 51-68.

上野勝美,1989,秋吉石灰岩層群の石炭系および下部二畳系有孔虫生層序, 秋吉石灰岩
層群上部古生界有孔虫類の研究, その1. 秋吉台科博館報, 24号, 1-40.

Vail, P. R., Mirchum, R. M., Todd, R. G., Widmier, J. M., Thompspo, III S, Sangrze, J. B.
and Hatlzlid, W. D.,1977Seismic stratigraphy and globalchanges of sea level. AAPG
Mem., no.26, 49-212.

West, R. R.,1988,Temporal changes in Carboniferous reef mound communities. Palaios, 3,
152-169.

Wilson,J.L.,1975,Carbonate facies in geologic history. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-
New York, 471pp.

Wolefenden, E. B.,1958,Paleoecology of the Carboniferous reef complex and shelf limestones
in northwest Derbyshire, Englang. Geo. Soc. Amer. Bull.,69,871-898.