



貝殻密集層のタフオノミー – 軟体動物化石と有孔虫化石の複合解析による堆積過程の復元 –

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-10-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 能條, 歩, 鈴木, 明彦 メールアドレス: 所属:
URL	https://hokkyodai.repo.nii.ac.jp/records/9396

貝殻密集層のタフォノミー — 軟体動物化石と有孔虫化石の複合解析による堆積過程の復元 —

Taphonomy of shell concentrations:
Reconstruction of depositional processes by combined analyses of mollusc and foraminifer

Abstract

In order to understand the depositional processes, a combined analytical research including both molluscan and foraminiferal faunas is carried out on some shell concentrations formed under the controls of glacial sea-level fluctuations during the deposition of the Lower to Middle Pleistocene Setana Formation in southwestern Hokkaido. This research leads us to the following conclusions.

1) A maximum flooding surface was revealed by the horizon in which a synchronism, such as appearance of warm-water species of mollusc, peak of oxygen isotopic curve of planktonic foraminifera, maximum benthic foraminiferal numbers, and the planktonic foraminifera lived under 100m below sea surface, occurred, 2) The shell concentrations with high ratio of planktonic foraminifera to total foraminiferal number (P-T ratio) are hiatal or condensed concentrations, and those with low P-T ratio are event-concentrations, 3) The difference in results about paleobathymetry between molluscs and foraminifera in some shell concentrations indicate an effect of time-averaging, 4) Benthic foraminiferal analyses lead us to understand high-order sea-level fluctuations during a process of maximum flooding, and 5) Subtropical planktonic foraminifera are sensitive indicators to an occasional flow of warm current, while warm-water species of mollusc indicate a stable term of warming in northern cold-water areas.

Key words: shell concentrations, condensation, condensed section, mollusc, foraminifer, P-T ratio, benthic foraminiferal number, time-averaging

能條 歩* 鈴木明彦**

Ayumu Nojo*
and Akihiko Suzuki**

1999年6月1日受付.

1999年9月24日受理.

* 北海道教育大学岩見沢校理科教育研究室
Department of Science Education, Iwamizawa
College, Hokkaido University of Education,
Iwamizawa, Hokkaido 068-8642, Japan

** 北海道教育大学岩見沢校地学研究室
Department of Earth Science, Iwamizawa
College, Hokkaido University of Education,
Iwamizawa, Hokkaido 068-8642, Japan

はじめに

軟体動物などの化石密集層の存在は、化石の部分的溶解などが起こらないとすれば、生物遺骸供給量の著しい増加か堆積速度の低下を示唆する。言い換えれば、化石密集層は主に堆積物と生物遺骸の相対的供給比率の変化により形成される (Kidwell, 1986)。Kidwell (1991a) は相対的生物殻供給量の増加要因として、ストームなどによる比較的短期間に起こった集積 (イベント型密集層: Event-concentrations), 薄いイベント型密集層が複数集積したもの (複合型密集層: Composite or multiple-event concentrations), 堆積物供給速度が低いところでの長期間にわたる集積 (堆積速度低下型密集層: Hiatal or condensed concentrations), すでに埋積していた殻が選択的に移動・溶解して侵食面などに集積するもの (ラグ型密集層: Lag-concentrations) の4区分を提唱し、それぞれ

の堆積構造の特徴や形成過程を示した。これにより、特徴的な堆積構造や層序学的な特徴を元にして化石密集層を Kidwell のパターンに当てはめることができれば、その堆積過程をある程度復元することが可能となっている。しかし、Kidwell の区分は主に密集層の堆積構造や侵食面の形態などに依拠しており、生物遺骸の密集ということ以外に特徴的な堆積構造が見られない場合のパターン認識は容易でない。また、現生種を含む化石層では現生種の生態的情報を用いた考察ができるので、それらを利用して生物としての挙動や化石化の過程と堆積環境とのかわりに関する考察も可能と考えられていたが、それを行うためにはさらに別の手法が必要とされていた。

化石密集層は古生物学的な研究材料の宝庫であるにもかかわらず、その解析により復元された古環境がどの程度信頼できるかについての議論が絶えなかった。たとえば、ある密集層から産出する化石の解析によりその層準の堆積水

深を100m前後と見積った場合、その密集層の形成要因が堆積速度の低下によるものであれば、それが“相当期間”水深100mの環境にあったと解釈することができるが、“相当期間”の間に水深が複雑に変化しその一番深かったときが100mだったという可能性も否定できない。水深が100m前後であったということ以外に情報がなく、その形成要因が特定できない場合は、この解析によって得られた“水深100m”という古環境情報には、“確実なのは化石密集層の形成期間中のある時期水深100mの時があったということだけ”という“信頼限界”があることになる。この“信頼限界”問題は、化石密集層以外の散在的に化石を産出する部分でも本質的には同じであるが、軟体動物化石などのいわゆる大型化石 (macrofossil) は野外で埋没姿勢を観察することによりその化石の死後の移動をある程度見積ることが可能な場合もあり (近藤, 1989), 原地性 (*in situ*) の産状の化石の産出層準が上下に分散していれば時間的解像度を実質的に高められるので、化石の持つ情報のタイムスパンに関する“信頼限界”をある程度拡張することが可能である。しかし、散在型化石層による解析では、点在する少ない化石の示す情報にどこまで寄り掛かれるかという別な“信頼限界”が生じることも否めない。いずれにしろ化石の解析により古環境・古生態を論ずるには、化石情報の豊富さが第一義的に重要で、化石密集層をその形成要因とあわせて詳細に解析できれば格段に良質な古環境情報が得られると期待されることから、化石密集層形成にかかわるタフォノミーは常に第一級の問題として存在してきた。

一方、有孔虫をはじめとする微化石 (microfossil) は、産状すなわち埋没姿勢や配列方向などの検討が困難なことが多く、産状から *in situ* なものかどうかを推定することはできない。有孔虫の殻サイズは砂粒子と同じで、その死後の移動も砂粒子と同様と考えられるので、主に生層序や堆積環境の検討のためのサンプリングに際しては、“はきだめ”の可能性が高い化石密集層は高い解析解像度を要求される研究ほど不向きとされる場合が多かった。したがって、微化石は、大型化石に比べて解析の解像度が高まるという利点があるが、その分“信頼限界”問題を厳密に考える必要があり、貝殻密集層中の軟体動物と微化石の群集解析が同時に行なわれた例はほとんどなかった。

近年、シーケンス生層序学 (sequence biostratigraphy; Loutit et al., 1991; Brett, 1995) の手法により、コンデンスセクション (condensed section) の存在から堆積速度の変化を推定し、一連の堆積シーケンスのどの位置に化石包含層を位置づけられるかによって相対的海水準変動や堆積速度の変化を見積って古環境を復元する研究が行われている (北村, 1995など)。シーケンス層序学的手法におけるコンデンスセクションの認定は、その層準付近が最大海進期の堆積物であり、海岸線の陸側への移動に伴って堆積物の供給源が遠くなって堆積速度が低下する現象、すなわちコンデンセーション (condensation) が発生していたことを示す。しかし、その特徴とされる堆積相が明瞭でない場合はコンデンスセクションの認定は困難な場合が多

い。さらに、シーケンス層序学で言うコンデンスセクションは最大海進時に形成されたものをさすもので、コンデンセーションの発生そのものを認定するわけではない。つまり、コンデンスセクションは複数回発生したかもしれないコンデンセーションのうちの最大のものを示すもので、その認定により復元される堆積速度の低下現象は第5オーダー以下の最大海進に限られ、露頭単位で複数回発生するような数万年オーダーのコンデンセーションにかかわる環境変動を堆積相解析だけで認定することには限界がある。

本論では、貝殻密集層の形成にかかわるコンデンス堆積物と時間平均化についてレビューしたのち、軟体動物と有孔虫化石の複合群集解析による貝殻密集層の形成要因、すなわち貝殻密集層のタフォノミーと堆積過程の復元に関する新たな研究手法を、西南北海道に分布する中～下部更新統の瀬棚層をケーススタディーとして紹介する。また、同時にこの手法を応用することにより、堆積学的に顕著な変化がない堆積物でも堆積速度の変化を推定できる場合があることと、タフォノミーという研究分野が単に化石化の過程を示すにとどまらず、堆積過程を含めた古環境変遷の復元においても重要な情報を提供することを示す。

コンデンス堆積物と時間平均化

コンデンス堆積物 (condensed deposits) は、一般に堆積速度が著しく低下した状態で形成された地層で、厚い地層が堆積する十分な時間経過が認められるにもかかわらず薄い堆積物しか存在しない場合をさす。したがって、この堆積物は長い時間を反映 (time-rich) しており、堆積に要した時間が凝縮 (condense) して記録されている。また、コンデンス堆積物は海緑石・燐灰石等の自生鉱物の生成、マンガング塊の形成、浮遊性・底生化石の濃集、生物擾乱の発達などの特徴を示す。この現象は複数の化石帯に及ぶ長い時間間隙を示唆するハイエタスの証拠ともされてきた (Heim, 1934; Jenkyns, 1971; Wendt, 1988)。一般に堆積シーケンスには、相対的海水準上昇に伴う複数の海氾濫面 (flooding surface) が認められ、これらは広義のコンデンスセクション (condensed section) と見なされる。このうち、高海面期堆積体と海進期堆積体の境界を示す最大海氾濫面 (maximum flooding surface) に対応するダウンラップ面付近は、シーケンス層序学における狭義のコンデンスセクション (condensed section) として認定されてきた (Van Wagoner et al., 1988; Loutit et al., 1988; 伊藤, 1992)。狭義のコンデンスセクションは主として沖合の堆積環境で形成され、急速な海進に伴って海岸線が後退して沖側への堆積物の供給が減少するため、その時期に最も深い水深を示すことが多い。

一方、化石密集層 (fossil concentrations) あるいは貝殻密集層 (shell concentrations) は、生物遺骸供給の増加に伴って形成された地層なので、広義のコンデンス堆積物としてとらえることが可能とされている (Kidwell, 1986, 1989)。化石密集層をコンデンス堆積物として見た場合、これらは各堆積体の境界部やシーケンス境界に特徴

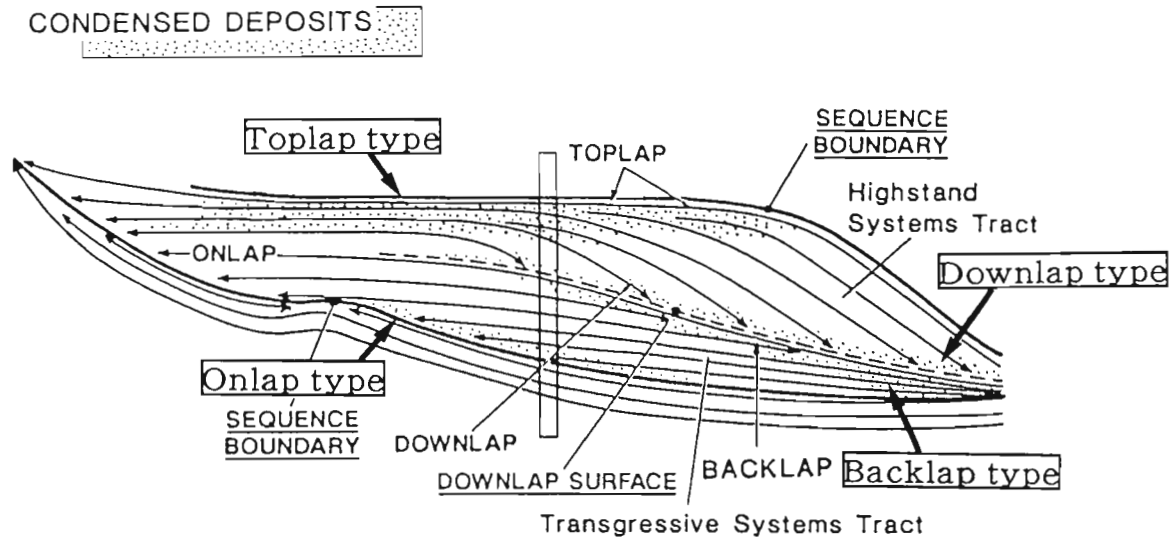


Fig. 1. Sites of condensation expected in an idealized siliciclastic depositional sequences (modified from Kidwell, 1991b).

的に発達する (Fig. 1)。化石密集層は堆積体のどの位置に発達するかによって次の4つのタイプに区分されている (Kidwell, 1991b; 近藤, 1998)。

①トプラップ型 (toplap type) :

高海面期堆積体の上部にみられる。この化石層は、堆積物の通過 (bypassing) による堆積速度の減少で形成される。斜交層理等が発達し、高エネルギー環境下で形成される。遺骸が砂質堆積物中に密集することが多い。上方浅海化の傾向を示す。

②ダウンラップ型 (downlap type) :

高海面期堆積体の下部にみられる。この化石層は、堆積物供給の減少 (sediment starvation) による堆積速度の減少で形成される。泥質堆積物からなることが多く、遺骸の分布密度は小さい。上方浅海化の傾向を示す。

③バックラップ型 (backlap type) :

高海面期堆積体最下部～海進期堆積体最上部に発達するダウンラップ面付近にみられ、シーケンス層序学における狭義のコンデンスセクションにあたる。この化石層は、最大海進時期において陸域からの堆積物の減少 (sediment starvation) による堆積速度の減少で形成される。遺骸が泥質堆積物中に密集することが多い。上方深海化の傾向を示す。

④オンラップ型 (onlap type) :

海進期堆積体の下部に発達する。シーケンス境界やラヴィンメント面 (ravinment surface) の直上に発達する海進ラグ (transgressive lag) に相当する。この化石層は、堆積物の通過 (bypassing) による堆積速度の減少で形成される。淘汰の悪い粗粒堆積物中に遺骸が密集することが多い。上方深海化の傾向を示す。

このように堆積シーケンスが認定され、貝殻密集層がその中のどこに位置づけられるかが明白な場合には、堆積過程の復元において化石のもつ古環境情報を十分に利用する

ことが可能となる。

ところで、化石密集層から採集された化石群集の大半は、同じ時期に生息していた生物の遺骸から構成されているのではなく、それぞれ異なる時間に生息していた生物の遺骸が凝縮した遺骸群集であるといえる。このため化石密集層中には何世代もの個体群や生態群集あるいは環境にともなう群集変化が凝縮して記録されており、ある環境に一定の期間生息していた生物 (群集) とそれらの変化が総和的に示されている。つまり、化石密集層にはこのような時間平均化 (time-averaging; Waker and Bambach, 1971) の影響が様々な程度で働いていることになる (Fürsich, 1978; Fürsich, 1990)。

時間平均化は、化石群集の古生態学的解釈や群集に基づく古環境復元の場合に重要な意味を持つ (Fürsich, 1990; Fürsich and Aberhan, 1990)。たとえば時間平均化の影響を強く受けた化石群集の場合、各生態群集での種構成の短期的変化は化石密集層形成の過程で平均化されてしまい、そのままの比率では保存されない。さらに、種多様度・食性構造・生活形組成等の群集特性に加えて、塩分濃度・溶存酸素度等の短期間の環境変動を読み取ることも困難である。また、ある時期にイベント的に出現した機会種 (opportunistic species) が卓越する群集が存在したとしても、時間平均化の影響を強く受けた化石群集においては、その産出頻度はかなり低下してしまう。

このように時間平均化の影響により、種多様度・食性構造・生活形組成等の生態群集に関する情報は化石群集にはほとんど保存されない (Staff et al., 1986) ので、一般に群集生態学で用いられる生態群集や個体群を対象とした各種指数を適用した群集解析には注意を必要とする (Fürsich and Aberhan, 1990)。

また、それぞれのタイプの化石密集層において時間平均化にかかわるタイムスパンは異なっている (Kidwell and Bosence, 1991; Kidwell, 1993; Kidwell and Beh-

rensmeyer, 1993). 軟体動物など大型無脊椎動物の遺骸を例にとると、現世の遺骸群集においては、潮間帯から沿岸では1~1000年オーダー、陸棚では100年~1万年オーダーのタイムスパンがあると見積もられている (Flessa, 1993; Flessa and Kowalewski, 1994). 次に地質時代の例を見てみると、新生代・中生代においては、イベント型密集層では1~100年オーダー、複合型密集層では1年~1000年オーダー (Kidwell, 1993; Kidwell and Behresmeyer, 1993), 古生代においては、single event fossil bedsでは1年未満、composite fossil bedsでは1年~1,000年オーダー、hiatal fossil bedsでは1万年~100万年オーダーと推定されている (Brett and Baird, 1993).

以上述べたように、化石密集層中の化石に基づく古環境復元には、堆積速度の変化とそれによる時間平均化の強弱が解析結果にどの程度の影響を与えているかの検討が不可欠である。

試料採取層準の地質概説

瀬棚層 (長尾・佐々 (1933) 定義; 能條ほか (1999) 再定義) およびその相当層は、西南北海道北部の黒松内低地帯から南部の上磯付近までの広い地域に分布する第四系海成堆積物層である。本層は最近能條ほか (1999) により各地域において部層単位で再定義され、それぞれ大局的に上部および下部に収斂する6部層に細区分されており、いずれの地域においても下位のすべての地層と傾斜不整合関係にある (椿原ほか, 1989; 能條・松田, 1997; 能條ほか, 1999). 瀬棚層の一般的な岩相は、下部はトラフ型斜交葉理をとともなう礫混じり粗粒砂岩、上部は貝化石密集層を含む細~中粒砂岩というものであり、有孔虫と石灰質ナノ化石の検討から下部が約1.2~1.0Maで上部は約1.0~0.6Maという堆積期間が見積もられている (能條ほか, 1999).

一方で、瀬棚層は保存のよい軟体動物化石を多産することでも知られており、それらは瀬棚動物群と命名されこれまでも多くの研究がなされた (例えば, 鈴木, 1989, 1991; Suzuki and Akamatsu, 1994など). 特に、瀬棚層基底部からは極海系軟体動物種の *Chlamys islandicus* や大型フジツボの一種の *Chirona evermanni* を特徴的に産出するほか、極海系大型海牛である *Hydrodamalis* sp. を産出している (美利河海牛化石調査研究会, 1992). これらのうち *Chlamys islandicus* や *Chirona evermanni* はオホーツク海~ベーリング海に現生し、*Hydrodamalis* sp. もベーリング海周辺に生息し18世紀に絶滅した現生種 (*H. gigas*) に非常に近縁な形態であることから、瀬棚層基底部堆積時は極海系寒冷水が卓越していたと考えられる。また、瀬棚層基底部の冷水系の化石動物群の出現は、Kent et al. (1971) がアラスカ沖北太平洋で氷漂流運搬岩屑物 (ice-rafted detritus) の増加によりそれ以前にくらべてより氷期的気候へと変化し始めたとした層準や、Koizumi (1992) が秋田沖 ODP Leg 127 Site 794において示した珪藻の寒流系種の激増する層準と一致しており、1.2Maに

北海道を含む北太平洋で強寒冷化イベントが発生したことがうかがえる。なお、能條ほか (1999) は得られた生層序学的な年代値や冷水系群集の存在などから、瀬棚層を富川層・大沢迦層・北浦層上部~脇本層・灰爪層・大桑層中~上部等に対比している。

本論では、黒松内町添別に分布する瀬棚層上部の添別砂岩部層模式地 (能條ほか, 1999) を研究対象とした (Fig. 2). 本地点では暗青灰色の細~中粒砂岩中に4枚の貝殻密集層が挟在するが、最下部のシルト岩層および直上の礫質貝殻密集層のほかは、下部から上部まで貝殻密集層の存在以外に岩相変化は乏しく、含泥率もほぼ一様である (Fig. 2). なお、本サンプルの層準は産出した石灰質ナノ化石により0.95~0.83Maのいずれかの時代に堆積したとされている (能條ほか, 1999). 以下に化石産出状況の概要を述べた後、その古環境復元に関する解析方法の詳細について解説する。

軟体動物化石群集の解析

黒松内町添別川流域に分布する瀬棚層の添別砂岩部層 (能條ほか, 1999) から多産する軟体動物化石は、絶滅種含有率から上部瀬棚動物群とされている (鈴木, 1991; Suzuki & Akamatsu, 1994). 添別セクションの砂岩層は岩相変化に乏しいが、軟体動物群集構成と産状及び化石密集の程度に基づいて7つのUnitに区分した (Fig. 2).

軟体動物化石のサンプルは、定量的解析のためブロック法により採集した。添別セクションより25×25×20cmのブロックを計11試料採取し、水洗処理の後、2mmの篩上に残ったすべての標本を拾い出した。なお、ここで二枚貝では殻頂が認められるか殻の約50%以上が保存されているもの、巻貝では殻口が認められるか殻の約50%以上が保存されているものを、それぞれ1個体として扱った。

添別セクションからは、二枚貝類41種、巻貝類35種、ヒザラガイ類1種の計77種が識別された (Table 1). 現生種についてはその生態学的データの地理分布 (肥後・後藤, 1993) に基づき、次のように区分した。すなわち太平洋側において主に北緯35度以北に分布する種類を寒流系種 (cold-water species), 太平洋側において主に北緯35度以南に分布する種類を暖流系種 (warm-water species), この両地域にまたがって広い分布を示すものを広温種 (eurythermal species) とした。

産出した軟体動物化石のうち、大半は *Acila* (*Truncacila*) *insignis*・*Glycymeris yessoensis*・*Crenomytilus grayanus*・*Modiolus difficilis*・*Swiftpecten swiftii*, *Mizuhopecten yessoensis*・*Clinocardium ciliatum*・*Ezocallista brevisiphonata*・*Callithaca adamsi*・*Mya* (*Mya*) *truncata* 等の寒流系種であるが、*Saccella sematensis*・*Rhinoclava kochi* の暖流系種2種, *Arca boucardi*・*Porterius dalli*・*Lucinoma annulata*・*Dosinia japonica*・*Saxidomus purpuratus* 等の広温種12種が産出した。

産出した軟体動物化石の産出頻度や群集組成に基づく

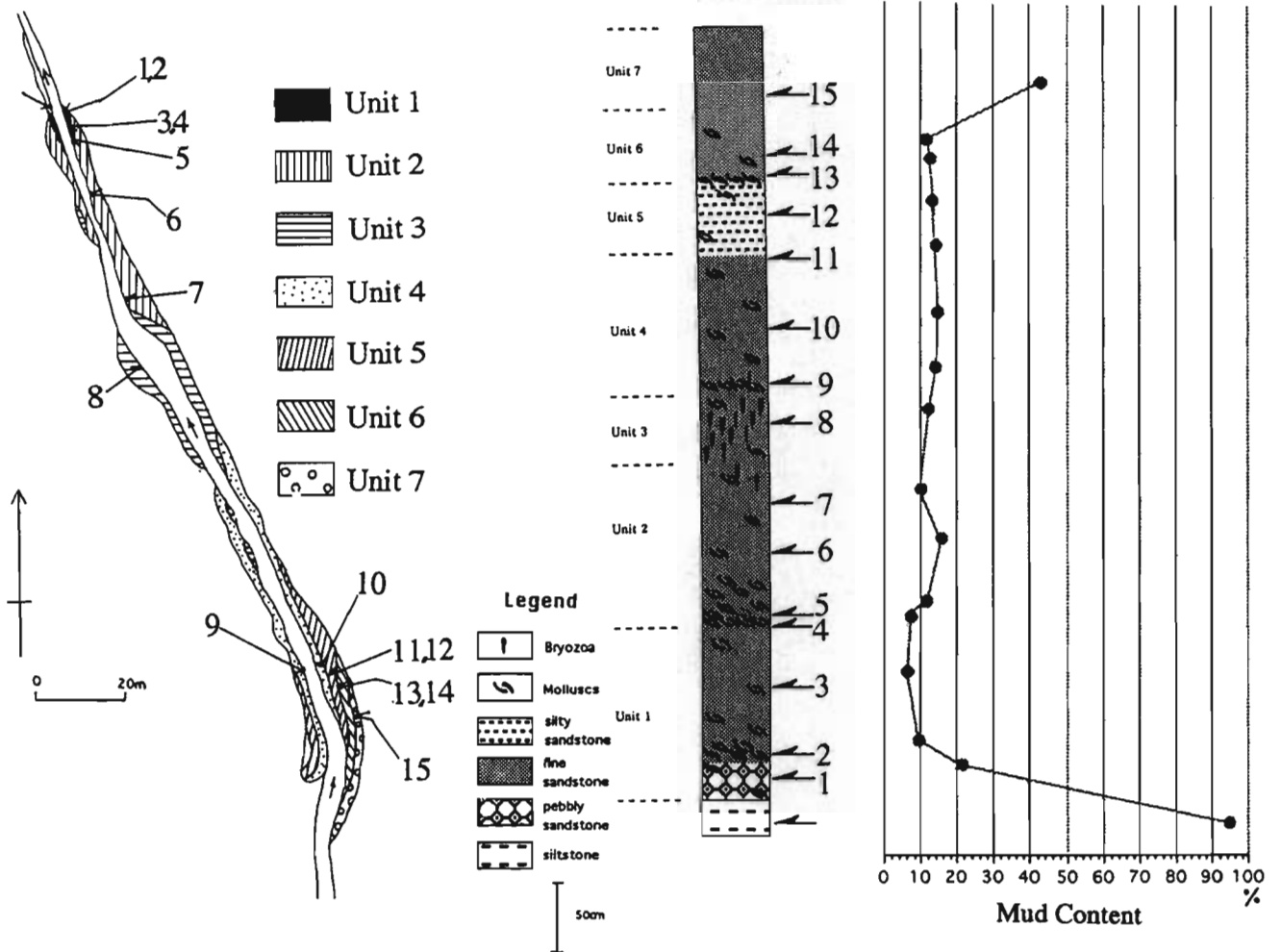
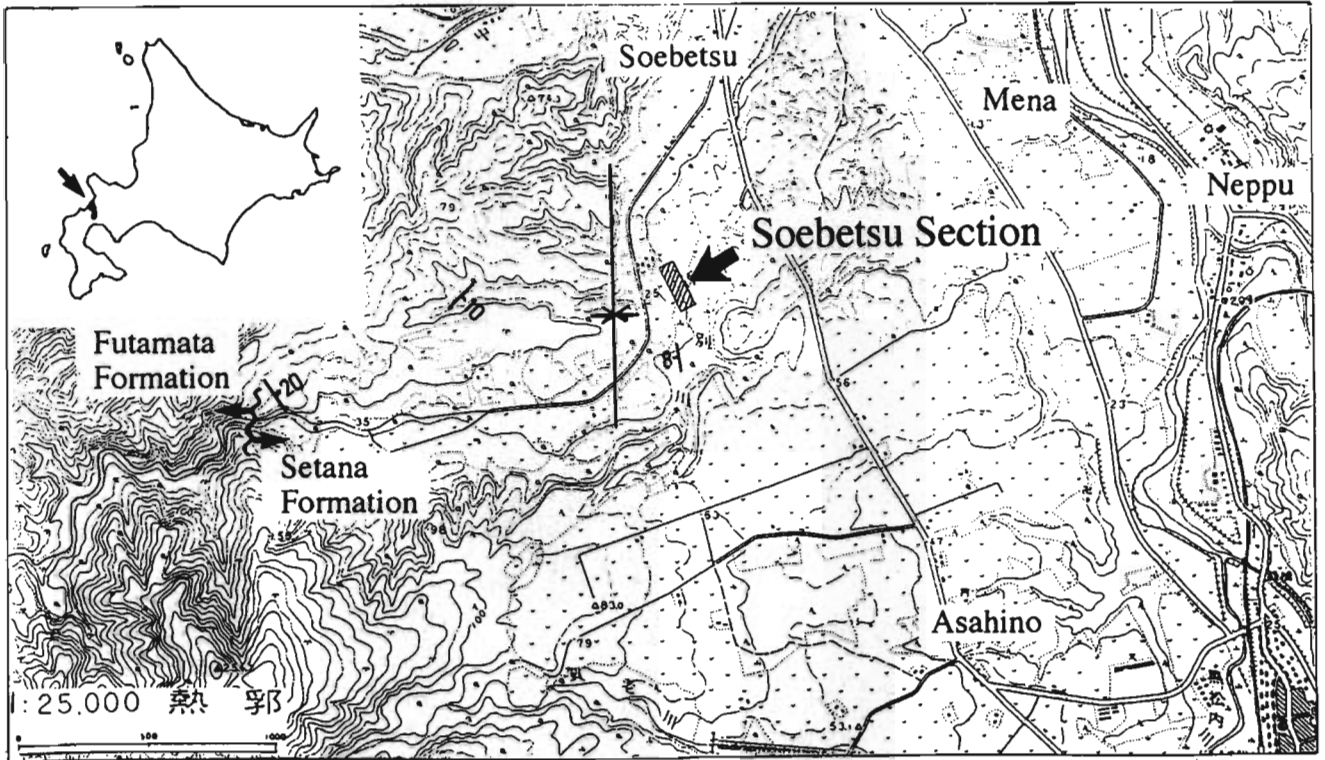


Fig. 2. Sampling location and route map of the Soebetsu Section.

Table 1. Mollusca of the Soebetsu Section.

Tana	Sampling Number														
	1	3	5	6	8	9	10	12	13	14	15				
Bivalvia															
○Ennucula tenuis (Montagu)								1							
○Acila (Truncaella) insignis (Gould)			10		24	2	1								
●Saccella somatensis (Suzuki and Isizaki)							1	2							
○Yoldia (Caesteerium) johanni Dall			2	1											
○Y. (C.) notabilis Yokoyama								4	1						
○Arca boucardi Jousseaume		4	5	47											
○Porterius dalli (Smith)	10	12	1												
○Glycymeris yessoensis (Sowery)			2		2	16		21	7						
○Crenomytilus grayanus (Dunker)		3	5	19	2								1		
○Modiolus difficilis Kuroda and Habe			6	2				1							
○Musculus niger (Gray)									2						
*Chlamys daishakaensis Masuda and Sawada	7	14	13	16		1	5	11	9	4	2				
○Swiftpecten swiftii (Bernardi)	3	3	5	4	1	2	2	9	4	2	2				
○Mitsuhopecten yessoensis (Jay)	5	4	2		8	22	24	29	22	9	3				
○Monia macroschisma Deshayes	11	33	11	30	1	1									
○Lucinoma annulata (Reeve)			2		13	39	4	3							
○Tridonta filatovae Habe								4							
○Cyclocardia crassidens (Broderip and Sowerby)	2		3			2	5							1	
○C. crebricostata (Krause)			1		1	12		496	16	1	1				
○C. isotakii Tiba	15	8	54	8	11	25	31	4	3						
○Miodontoculus nakamurai (Yokoyama)								7	3	1	3				
○Clinocardium ciliatum (Fabricius)					5			1							
○C. californiense (Deshayes)							8	6	2	2	1	3			
*Profulvia kurodai (Sawada)	6	3	2	2		2	1								
○Serripes groenlandicus (Brugulere)								18							
○Spisula voyi Dall								1							
○Esocallista brevisiphonata (Carpenter)		15	8	8	11		5	5	6	1	4				
○Saxidomus purpuratus (Sowerby)			3	1			1								
○Dosinia (Phacosoma) japonica (Reeve)							2								
○Liocyma fluctuosa (Gould)					1	1		6		3					
○Mercenaria stimpsoni (Gould)								2							
○Protothaca euglypta (Sowerby)								1							
○Calluthaca adamsi (Reeve)			1					5	2	1					
○Nuttallia commoda (Yokoyama)					1	3		2	2						
○Macoma calcarosa (Gmelin)							1	9							
Siliqua sp.								1							
○Mya (Mya) truncata Linne					2	3		34							
○Panomya arctica (Lamarck)						2		1							
○Pandora (Heteroclidus) pulchella (Yokoyama)			1					15							
○Myadora fluctuosa Gould					1	2	2								
○Thracia kakumana (Yokoyama)					3	1									
Gastropoda															
○Puncturella nobilis A.Adams	1	1		10	1	1		1	1						2
○P. major Dall			1	1		1									
○Acmaea pallida (Gould)	1	1		2											
○Notoacmea concinna (Lischke)			3	6											
○Probiacmea sybaritica (Dall)			1												
○Lepeta cf. alba (Dall)									1	1					1
L. sp.									1	1					
○Homalopoma amussitatum (Gould)	1		5	5	2	3	2								
*Margarites sp.			1	1											
○Tristichotrochus multiriratus (Sowerby)						4									
○Trochus corensis Pease	1														
○Turritella fortirirata (Sowerby)								8	1						
●Rhynchoclis kochi (Philippi)					1	4	3		1						
*Bittium cf. yokoyamai Otuka			2												
○Crepidula grandis Middendorff			6	7				8	3						
○Amathina nobilis (A.Adams)	2	1	6	2		1			1						
○Cryptonatica janthostomoides (Kuroda and Habe)			3	1		1	1	17	9	1					
○Lunatia pila (Pilsbly)			3				2	12	2						
○Fusitriton oregonensis (Redfield)					1										
○Boreoscala groenlandica (Ferry)						1									
○Ocenebra aduncum (Sowerby)			1			1									
○Boreotrochon candelabrum (Reeve)			1			2		2	1					1	
○Neptunea arthritica (Bernardi)						2	1	1							
○N. polycostata Scarlato								2							
○N. vinosa (Dall)								2							
Mohnia ? sp.	1							2							
○Plicifusus plicatus (A.Adams)								17							
*Searlesia japonica Yokoyama								27	3						
Clinopogma sp.								12							
Buccinum sp.								1							
○Hinia (Reticumassa) spursa (Gould)								3	47	8					
○Rectiplanes sanctioannis (Smith)									1						
○Suavodrillia declivis (v.Martens)							2		1						
○Ophiidermella miyatensis (Yokoyama)									2		2				
Odostomia sp.									1						

●; Warm-water species, ○; Cold-water species, ○; Eurythermal species, *; Extinct species

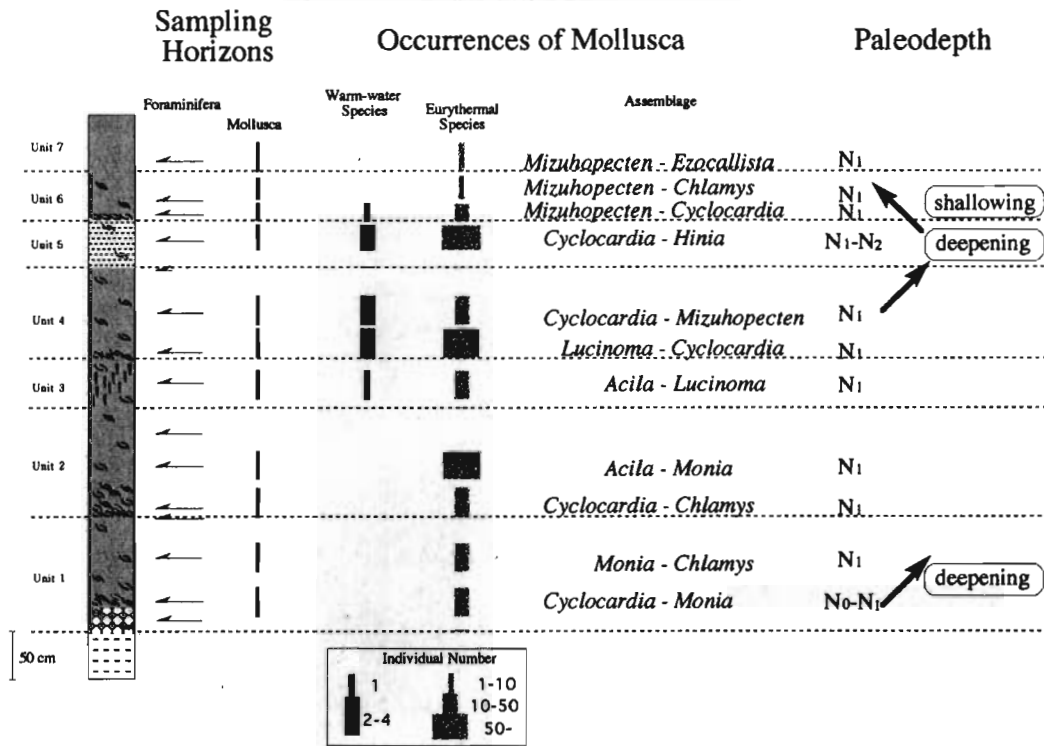


Fig. 3. Occurrence of mollusca, and paleodepth changes based on molluscan assemblages in the section.

と、以下のような11の化石集団 (fossil assemblage) が識別された (Fig. 3).

1) *Cyclocardia-Monia* 化石集団:

Cyclocardia isaotakii・*Monia macroschisma* を特徴種とし, *Porterius dalli*・*Chlamys daishakaensis*・*Profuvia kurodai* を随伴する。本集団は Unit 1 基底の細礫混じりの細粒砂岩中に密集して産出する。Unit 1 の基底面は侵食面である。なお、貝殻は部分的に密集するがいずれも基質支持である。*P. dalli* はすべて離弁で、摩滅した個体からなる。*P. kurodai* は合弁で層理面にほぼ直立した状態で産出した。*M. macroschisma* や *C. daishakaensis* は層理面に沿って配列するが、貝殻の保存状態は良い。

2) *Monia-Chlamys* 化石集団:

Monia macroschisma・*Chlamys daishakaensis* を特徴種とし, *Porterius dalli*・*Ezocallista brevisiphonata* を伴う。本集団は細粒砂岩から散在的に産出し、基質支持を示す。*P. dalli* や *Arca boucardi* はいずれも離弁で摩滅した個体も含まれる。*E. brevisiphonata* は合弁個体が多く、層理面にほぼ直立したのも認められた。*M. macroschisma* や *C. daishakaensis* は層理面に沿って配列するが、殻の保存状態は良い。

3) *Cyclocardia-Chlamys* 化石集団:

Cyclocardia isaotakii・*Chlamys daishakaensis* が多産する。*Acila (Truncacila) insignis*・*Monia macroschisma*・*Ezocallista brevisiphonata* を伴う。本集団は Unit 2 基底の細粒砂岩中に密集して産出する。貝殻は部分的に密集して貝殻片支持となる。*M. mac-*

roschisma や *C. daishakaensis* は層理面に沿って配列するが、貝殻の保存状態は良い。*C. isaotakii*・*A. (T.) insignis*・*E. brevisiphonata* も合弁個体が多く、保存良好である。

4) *Arca-Monia* 化石集団:

Arca boucardi・*Monia macroschisma* を特徴種とし, *Crenomytilus grayanus*・*Chlamys daishakaensis*・*Puncturella nobilis* を随伴する。本集団は細粒砂岩から散在的に産出し、基質支持を示す。*A. boucardi* は離弁個体が多いが保存は良い。*M. macroschisma*・*C. grayanus*・*C. daishakaensis* は層理面に沿って配列するが、貝殻の保存状態は良い。

5) *Acila-Lucinoma* 化石集団:

Acila (Truncacila) insignis・*Lucinoma annulata* を特徴種とし, *Cyclocardia isaotakii*・*Ezocallista brevisiphonata* を随伴する。本群集はコケムシに富む細粒砂岩から散在的に産出し、基質支持である。*A. (T.) insignis*・*L. annulata* は合弁で層理面にやや斜交した状態で産出した。*C. isaotakii*・*E. brevisiphonata* も合弁個体が大半で、貝殻の保存状態は良い。

6) *Lucinoma-Cyclocardia* 化石集団:

Lucinoma annulata・*Cyclocardia isaotakii* を特徴種とし, *Glycymeris yessoensis*・*Mizuhopecten yessoensis*・*Cyclocardia crebricostata* を随伴する。本群集は Unit 4 基底の細粒砂岩中に密集して産出する。貝殻は部分的に密集して貝殻片支持となる。*G. yessoensis*・*M. yessoensis* は層理面に沿って配列するが、貝

殻の保存状態は良い。 *L. annulata*・*C. isaotakii*・*C. crebricostata* も合併個体が多く、保存良好である。

7) *Cyclocardia*-*Mizuhopecten* 化石集団:

Cyclocardia isaotakii・*Mizuhopecten yessoensis* を特徴種とし、*Clinocardium californiense* を伴う。本群集は細粒砂岩から散在的に産出し、基質支持を示す。*M. yessoensis* は層理面に沿って配列し、貝殻の保存状態は良い。*C. isaotakii*・*C. californiense* も合併個体が多く、保存良好である。

8) *Cyclocardia*-*Hinia* 化石集団:

Cyclocardia crebricostata・*Hinia (Reticumassa) spursa* を特徴種とするが、*Cyclocardia crebricostata* が圧倒的に多い。二枚貝では、*Glycymeris yessoensis*・*Chlamys daishakaensis*・*Mizuhopecten yessoensis*・*Serripes groenlandicus*、*Mya (Mya) truncata*・*Pandora (Heteroclidus) pulchella*、巻貝では *Cryptonatica janthostomoides*・*Plicifusus plicatus*・*Searlesia japonica* を随伴する。本集団はやや泥質の細粒砂岩中に密集して産出するが、基質支持である。*G. yessoensis*・*C. daishakaensis*・*M. yessoensis* は層理面に沿って配列し、殻の保存状態は良い。*S. groenlandicus*・*P. (H.) pulchella* は合併個体が多く保存良好である。*M. (M) truncata* は合併で層理面にほぼ直立した状態で産した。巻貝類も原核が保存されている個体もあり保存は良好である。

9) *Mizuhopecten*-*Cyclocardia* 化石集団:

Mizuhopecten yessoensis・*Cyclocardia crebricostata* を特徴種とし、*Chlamys daishakaensis*・*Cryptonatica janthostomoides* を随伴する。本集団は Unit 6 基底の細粒砂岩中に密集して産出する。Unit 6 の基底面は侵食面である。*M. yessoensis*・*C. daishakaensis* は離弁が多いが殻の保存状態は良く、層理面に沿って配列する部分は貝殻片支持である。*C. crebricostata* も合併個体が多く保存良好である。

10) *Mizuhopecten*-*Chlamys* 化石集団:

Mizuhopecten yessoensis・*Chlamys daishakaensis* を特徴種とし、*Liocyma fluctuosa* を随伴する。本集団は細粒砂岩から散在的に産出し、基質支持を示す。*M. yessoensis*・*C. daishakaensis* は離弁が多いが貝殻の保存状態は良い。*L. fluctuosa* は合併個体が多く保存良好である。

11) *Mizuhopecten*-*Ezocallista* 化石集団:

Mizuhopecten yessoensis・*Ezocallista brevisiphonata* を特徴種とし、*Miodontius nakamurai*・*Clinocardium californiense* を伴う。本集団は炭質物を含む細粒砂岩から散在的に産出し、基質支持を示す。*M. yessoensis*・*C. daishakaensis* は離弁が多いが、*C. californiense*・*M. nakamurai* は合併個体が多い。一部は貝殻が溶脱しキャストとなる。

次に添別セクションの各層準における暖流系種と広温種の産出頻度に注目すると、暖流系種では、Unit 5 から

Saccella sematensis が、Unit 3, 4, 6 から *Rhinoclava kochi* がそれぞれ産出し、なかでも Unit 4 において最も産出頻度が高かった (Fig. 3)。一方、*Lucinoma annulata*・*Dosinia japonica*・*Saxidomus purpuratus* 等の広温種は各層準を通して連続して産出が認められ、すべての Unit から産出し、特に Unit 2, 4, 5 において高い産出頻度を示した。このような結果から、添別セクションには下部から上部に向かって、寒→暖→寒というサイクリックな変化があったことが判明した。この変化は寒暖の程度は異なるが、Kitamura et al. (1994) や北村 (1995) によって示された大桑層での海中気候変化の傾向と同様のものである。

また、生態学的データの生息深度 (肥後・後藤, 1993) に基づき、各化石群集の古水深を検討した (Fig. 3)。ここでは深度区分に関して Oyama (1973) の区分を採用し、鈴木 (1991) の方法により各化石群集の構成種についてその深度を積算してヒストグラムを作成し、ピークとなる位置を古水深とした。その結果は N1 (上浅海帯～中浅海帯: 潮下帯～20-30m) を主体として、いずれも浅海帯上部に相当するもので著しい変化はみられなかった。しかし、最下部の Unit 1 基底では、N0～N1 (潮間帯～中浅海帯: 潮間帯～20-30m) とやや浅い可能性が、また Unit 5 では、N1～N2 (上浅海帯～中浅海帯: 潮下帯～50-60m) とやや深い可能性が、それぞれ示された。この結果を強調すると、Unit 1 基底→Unit 1 上部、および Unit 4→Unit 5 にかけては深海化が、また Unit 5→Unit 6 にかけては浅海化が認められることになる (Fig. 3)。つまり、大局的にみるとこのセクションには浅→深→浅のサイクリックな変化が認められ、この変化は Kitamura et al. (1994) や北村 (1995) による大桑層での堆積サイクルに見られる古水深変化と類似する。

以上軟体動物化石の群集解析の結果から次の結論が示される。

- 1) 寒流系種・暖流系種・広温種の産出傾向から、上方へ向かう一連の寒→暖→寒というサイクルが認められる。このサイクルは大桑層にみられるもの (Kitamura et al., 1994; 北村, 1995) と類似した傾向を示す。
- 2) 暖流系種と広温種の産出頻度に注目すると、温暖化は Unit 3～5 の期間で安定化し、Unit 4～5 にかけての期間が最大海進時と推定される。
- 3) 貝殻密集層を含む軟体動物化石群集の示す古水深は、Unit 1 が N0～N1 (潮間帯～20-30m)、Unit 2, 3, 4, 6, 7 が N1 (潮下帯～20-30m)、Unit 5 が N1～N2 (潮下帯～50-60m) である。したがって、上方へ向かう一連の浅→深→浅のサイクリックな変化が認められた。
- 4) 上方へ向かう寒→暖→寒の古水温変化と浅→深→浅の古水深変化の一致は、本セクションの堆積過程が氷河性海水準変動の影響下にあったことを示唆する。

Table 2. Planktonic foraminifera of the Soebetsu Section.

Taxa	Sampling Number													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny	115	64	69	80	62	34	43	47	110	52	63	17	30	57
<i>Globigerina quinqueloba</i> Natland	22	14	13	19	12	3	3	12	9	10	4	5	7	10
<i>Grobigerina</i> spp.	5	2	2	1		1								
<i>Globigerinita glutinata</i> (Egger)	17	5	7	4	6	9			4	17	2	8	1	
<i>Globigerinita uvula</i> (Ehrenberg)	23	15	19	15	8	7	1	8	31	6	2	5		1
<i>Globigerinoides ruber</i> (d'Orbigny)	3		2					*		*				
<i>Globorotalia inflata</i> (d'Orbigny)								*	*	*	1	*		
<i>Neogloboquadrina incompta</i> (Chifelli)	170	221	174	108	123	94	85	73	218	158	168	80	171	171
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> (Ehrenberg) (D)	8	13	21	17	13	22	31	4	2	5	6	2	5	3
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> (Ehrenberg) (S)	24	28	18	16	16	27	24	5	9	10	9	2	9	5
<i>Neogloboquadrina</i> sp.	2		2					1	2			1		
Total Counted	389	362	327	260	240	197	187	150	385	258	255	120	223	247
Dext./total N. pachyderma %	25	31.71	53.85	51.52	44.83	44.898	56.36	44.44	18.18	33.33	40	50	35.71	37.5
Planktonic Foraminiferal Number (/g)	19.45	579.2	1046	832	1536	1260.8	299.2	240	2464	825.6	1632	192	44.6	99
Benthic Foraminiferal Number (/g)	55	510.4	566.4	614.4	944	608	665.6	643.2	2170	1539	2349	324.8	566.4	796.8
P/T Ratio (%)	26.12	53.16	64.88	57.52	61.94	67.466	31.01	27.17	53.18	34.91	41	37.15	7.3	11
Mud content (%)	22	10	6	7	12	16	10	12	14	15	15	13	13	12

* ; present

有孔虫化石群集の解析

有孔虫化石抽出用のサンプルは、貝殻密集層の直下・中心部・直上と貝化石散在部から20~55cm間隔で採取した。本論で扱ったような、ラミナなどの顕著な堆積構造のない塊状の地層では生物擾乱があったと考えることが妥当であり、有孔虫自身も種によっては堆積物表層から20cm程度まで連続的に生息域を持つものがある（たとえば矢吹・長谷川, 1996）ので、やみくもにサンプリングの間隔をつめて精度を上げて意味がないが、別の指標で生物擾乱が発生していなかったということが示されれば、さらに解析の解像度を上げるためにサンプルの間隔をつめることも可能である。本論では貝殻密集層との関連で研究する目的で基本的なサンプル層準を設定し、大型化石による生物擾乱が時に堆積物表層から20cm以上の深さにまで及ぶという報告例があること（Reineck and Singh, 1980; 近藤, 1989）などから20cm以上の間隔とした。

化石の抽出処理方法は能條ほか（1999）にしたがった。なお、貝殻密集層部分の有孔虫化石の処理にあたっては、大きな貝化石をとり除いて基質部分の堆積物を用いた。添別セクション産出の有孔虫化石リストを Table 2, 3に示す。

一般に有孔虫の解析に使用される指標には、底生有孔虫産出数や浮遊性種個体数/全有孔虫個体数比率などがある。また、亜熱帯性浮遊性有孔虫の産出状況は、北海道周辺の冷水域では暖流の去就を示す大変よい指標となり得るほか、浮遊性有孔虫は種によって浮遊する水深が異なっていることが知られており（Bé, 1977）、比較的生息水深の

深い種の産出はその地点の水深の増大を示す指標と考えることができる。一方、底生有孔虫は水深による棲み分けが知られており、現生種との比較などから詳細な古水深の復元が可能である（長谷川ほか, 1989）。

以下にそれぞれの指標の具体的検討方法例を示す。

底生有孔虫産出数 (Benthic Foraminiferal Number; BFN)

底生有孔虫産出数 (BFN)*は文字通り各サンプル1gあたりの底生有孔虫の産出個体数のことで、大陸棚の範囲では一般に水深が増すにつれて増加する傾向にあるといわれているが、海域により底生有孔虫が適応している水塊の性質と水深との対応関係に差異があることや、「有孔虫の生産性の増減」・「浅部からの流れ込みの大小」・「化石の保存度」といった複数の要因により規制されているため、必ずしも古水深のみを示す鋭敏な指標とは言えない。しかし、この指標は定量的に有孔虫化石を抽出するだけで得られ、浮遊性種と底生種の区別さえつけられれば種の同定は不要で比較的容易に得られるという利点がある。

本論で扱った各サンプル間には化石の保存度の差が見られなかったため、BFNの変動原因が「化石の保存度」によるものとは考えにくい。したがって、本サンプルのように岩相的な変化が乏しいにもかかわらず著しくBFNが変化している層準が見られる場合 (Fig. 4) は、その地点での「有孔虫の生産性の増減」・「相対的古水深変化」・「浅部からの流れ込み」などの堆積環境の変化を示すと考えられる。したがって、これらのサンプルの示す全体的傾向からは、Unit 4~5にかけて有孔虫の生産性・水深・流れ込みのいずれかあるいは複数の発生ピークがあったといえるので、急激な有孔虫の生産性の増加や多量の流れ込みがなかったとするならば、その地域の古環境に近似すると考えられる現生種の生息状況と比較することで、当時の相対的古水深変化をある程度見積ることができる。

Fig. 5に、これまでに公表されている日本海沿岸などの

* BFNのかわりに全有孔虫産出個体数、すなわち浮遊性種と底生種の産出個体数を合わせた数値 (FN) を用いる場合もあるが、浮遊性種と底生種は適応している環境 (水塊) が異なるため、両者をトータルすると複数の要因が指標を左右しているという欠点を助長する可能性があり、指標自体の有効性がさらに薄まると考えて本論ではBFNを採用した。

Table 3-1. Benthic foraminifera of the Soebetsu Section.

Taxa	Sampling Number															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
<i>Ammonia</i> spp.	2															
<i>Angulogerina hughesi</i> (Galloway and Wissler)						1										
<i>Anomalinaella rostrata</i> (Brady)	1															
<i>Anomalinaella</i> spp.		4														
<i>Anomalinoides globulosus</i> (Chapman and Parr)		1				2					4					
<i>Astacolus hyalaculus</i> Loeblich and Tappan				1												
<i>Astrononion hamadaense</i> Asano									1							
<i>Astrononion</i> spp.	2															
<i>Bolivina decussata</i> Brady				3	5	5		1	4	4	2		3	3	1	
<i>Bolivina</i> cf. <i>pseudoplicata</i> Heron-Allen and Earland	1							1	1							
<i>Bolivina</i> spp.		7														
<i>Brizalina alata</i> (Seguenza)								2								
<i>Brizalina</i> spp.	1		5	6	3	2	2			3		1				
<i>Buccella frigida</i> (Cushman)												3	11	1	4	
<i>Buccella makiyamae</i> (Chiji)			5	4	11	5	3	13	25	34	27	35	20	23	15	28
<i>Buccella nipponica</i> (Husezima and Maruhasi)				1				3			4	1	1	4	3	
<i>Buccella tanaii</i> Uchlo													7			
<i>Buccella tenerrima</i> (Bandy)	1	11	6	5	3	8	14	3	18	62	29	16	47	18	17	
<i>Buccella</i> spp.					2			1	3	4		2	6	11	5	
<i>Bulminella elegantissima</i> (d'Orbigny)	2	3	1	4	2		2	1	5	5	6	11	21	14	17	
<i>Cancris auriculus</i> (Fichtel and Moll)	1															
<i>Cibicides</i> cf. <i>kamadai</i> Asano													2			
<i>Cibicides lobatulus</i> (Walker and Jacob)	18	7		6			10	3	11	14	19					
<i>Cibicides refulgens</i> de Montfort	54	34	12	10	7	4	12	11	15	42	29	6	5	1		
<i>Cibicides subdepressus</i> (Asano)		1		1	4					1						
<i>Cibicides</i> spp.	1	1	2		3	3	1			2			1	2		
<i>Cibicoides pachydermus</i> (Rzehak)		1				1										
<i>Cornuspira involvens</i> (Reuss)		4														
<i>Criboelphidium oregoense</i> (Cushman and Grant)													1	1		
<i>Criboelphidium yabei</i> (Asano)													3	6	1	
<i>Cribrulinoides curta</i> (Cushman)						1		1								
<i>Cycloforia contra</i> (d'Orbigny)		4	10	1		1					2					
<i>Discorbinella araucana</i> (d'Orbigny)	30		1	3	6	1	1	9	8	10	3	1	1			
<i>Discorbinella</i> spp.	1	1														
<i>Elphidium aculeatum</i> (d'Orbigny)	1															
<i>Elphidium advena</i> (Cushman)										1						
<i>Elphidium bartletti</i> Cushman						5				6	2	3	36			
<i>Elphidium crispum</i> (Linné)	4	11	9	7	1	4	4		12	30	25			1	1	
<i>Elphidium excavatum</i> (Terquem) forma clavata Cushman	1	1		4	7		2	11	5	4	6	26	49	26	18	
<i>Elphidium frigidum</i> Cushman		4	4	2	4											
<i>Elphidium incertum</i> (Williamson)															1	
<i>Elphidium janseni</i> (Cushman)			2				1	1	2	2	2					
<i>Elphidium subarcticum</i> Cushman	20	14	12	22	23	20	37	21	40	43	44	25	79	99	126	
<i>Elphidium subgranulosum</i> Asano							1				4	9	21	20	22	
<i>Elphidium</i> spp.	3	2		2		1	1		1		1	6	7	4	3	
<i>Epistominella</i> spp.				1							1	2				
<i>Eponides</i> ? spp.						1			2						1	
<i>Fissurina annectens</i> (Burrows and Holland)										4	3	2				
<i>Fissurina lacunata</i> (Burrows and Holland)								1								
<i>Fissurina lucida</i> (Williamson)										3						
<i>Fissurina marginata</i> (Montague)	2	7	1	1	6	3	1	1	12	6	5	1	4	1	4	
<i>Fissurina obscurocostata</i> Galloway and Wissler								2	1							
<i>Fissurina orbignyana</i> Seguenza										1	1					
<i>Fissurina</i> cf. <i>rizzæ</i> Seguenza				1		1					1					
<i>Fissurina</i> cf. <i>subquadrata</i> Parr		2			1											
<i>Fissurina</i> spp.	1	2	1		1	1		1		2	2		1			
<i>Gavelinopsis praegeri</i> (Heron-Allen and Earland)		1					1	1	2							
<i>Gavelinopsis</i> sp.		8														
<i>Glabratella</i> cf. <i>aurantista</i> Seiglie and Bermúdez	1	13	5	5		2	2	6	5	1	1	1	1			
<i>Glabratella mirabilis panamensis</i> Seiglie and Bermúdez				3	5						4					
<i>Glabratella patelliformis</i> (Brady)			4	3	1			4			13					
<i>Glabratella pulvinata</i> (Brady)		2				16	7	4	3	6	7	3	4			
<i>Glabratella</i> sp. A	1	3	2		2					1						
<i>Glabratella</i> sp. B				2	2								1			
<i>Glabratella</i> spp.			1					2		1		1				
<i>Globocassidulina bisecta</i> Nomura					3			1			1					
<i>Globocassidulina</i> spp.	4	14	11	5	13	5			3	2	4	2	3			
<i>Guttulina</i> sp.										1						
<i>Gyroidina</i> spp.													4			
<i>Hanzawaia nipponica</i> Asano	18	4	3	1		1			1	6	5	1				
<i>Haynesina</i> sp.									3		1	1				
<i>Heronallenia</i> sp.							1									
<i>Heterolepa subhaidingeri</i> (Parr)	18		6		3	1	1									
<i>Islandiella helenae</i> Feyling-Hanssen and Buzas										3				1	1	
<i>Islandiella japonica</i> (Asano and Nakamura)					3	1						4				
<i>Islandiella norcrossi</i> (Cushman)	2				21	11	6	4	3	5	2	8				
<i>Islandiella sublimbata</i> (Asano and Nakamura)		15	9	11	9	11	9	5			2	3	4			
<i>Islandiella</i> sp.			1													
<i>Karrerella</i> spp.											1				3	
<i>Lagena acuticosta</i> (Reuss)										1	1					

Table 3-2. Benthic foraminifera of the Soebetsu Section (continued).

Taxa	Sampling Number														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Lagena apiopleura</i> (Loeblich and Tappan)			1	1		1									
<i>Lagena sulcata spicata</i> Cushman and McCulloch				1		2					1				
<i>Lagena</i> sp.															1
<i>Lenticulina nikobarensis</i> (Schwager)											1				
<i>Lenticulina</i> sp.			1												
<i>Melonis pacificum</i> (Cushman)												2			
<i>Melonis uchioi</i> Hasegawa										1					
<i>Miliolinella circularis</i> (Bornemann)					6										
<i>Miliolinella</i> sp.		3	1												
<i>Neoponides procerus</i> (Brady)	1												2	1	
<i>Nodosarina</i> ? sp.								1							
<i>Nonion japonicus</i> Asano									3						
<i>Nonion</i> spp.	1							2		2					
<i>Nonionella stella</i> Cushman and Moyer										2			1		
<i>Nonionoides grateolupi</i> (d'Orbigny)															1
<i>Oolina costata</i> (Williamson)										1					
<i>Oolina melo</i> d'Orbigny		1			1		1		1		1				
<i>Oolina</i> sp.											1				
<i>Oridosalis umbonatus</i> (Reuss)				1											
<i>Paracassidulina sulcata</i> Belford		3													
<i>Pararotalia nipponica</i> (Asano)		2					1								
<i>Patellina corrugata</i> Williamson			1			3								1	
<i>Patellinella hanzawai</i> Asano	2	2							1	1	2	2			
<i>Pateoris hauerinoides</i> (Rhmblcr)		7		11	11	6	8	5	15	18	13				
<i>Planoglabratella australensis</i> (Hellom-Allen and Earland)							1			2	6				
<i>Planoglabratella opercularis</i> (d'Orbigny)		1	5		5	16	1	3	15	3	4				
<i>Planoglabratella subopercularis</i> (Asano)	6		1	5	5	5	8	4	17	15	13	1	2		
<i>Planoglabratella</i> ? sp. C													1		
<i>Polystomellina discorbinoides</i> (Yabe and Hanzawa)		2		1	1		2								
<i>Poroponides cribroreponus</i> Asano			3												1
<i>Pseudononion japonicum</i> Asano	1						1	1					1		
<i>Pseudononion</i> sp.					1										
<i>Pseudoparrella naraensis</i> Kuwano		13	9	14	37	18	2	7	8	2	4	6	2	5	2
<i>Pseudoparrella takayanagii</i> (Iwasa)	49	3			10	6	19	16	17	36	18	7	5	2	2
<i>Pseudoparrella</i> spp.															4
<i>Pseudopolymorphina</i> sp.											1				
<i>Quinqueloculina agglutinata</i> Cushman							1	1			1				
<i>Quinqueloculina akneriana</i> d'Orbigny		8		6		1	1	1	20		2	1			
<i>Quinqueloculina costata</i> d'Orbigny					1				2						
<i>Quinqueloculina elongata</i> Natland			2	2	8										
<i>Quinqueloculina kuromatunaiensis</i> Asano			1		3									1	
<i>Quinqueloculina sawanensis</i> Asano		3							6	1					
<i>Quinqueloculina seminulum</i> (Linné)		4				6					1				
<i>Quinqueloculina vulgaris</i> d'Orbigny			6		2				6	2					
<i>Quinqueloculina cf. vulgaris</i> d'Orbigny				1											
<i>Quinqueloculina yezoensis</i> Asano					6		3		2	4					
<i>Quinqueloculina</i> sp. C		2	8	7						2	3				
<i>Quinqueloculina</i> sp. F						6									1
<i>Quinqueloculina</i> sp. G									4		9				
<i>Quinqueloculina</i> sp. H										6					
<i>Quinqueloculina</i> spp.	10	3	1	17	10	5	9		19	10					1
<i>Rectobolivina rephanus</i> (Parker and Jones)		1	1												
<i>Rosalina australis</i> (Parr)	4										6				
<i>Rosalina bradyi</i> (Cushman)	7	13	3	7			10	8		14	9	1	1		
<i>Rosalina isabelleana</i> d'Orbigny								6							
<i>Rosalina vilardeboana</i> d'Orbigny	9		1	3	8		4	3	6						
<i>Rosalina</i> spp.	1	28	2			1	1		4	8	1				
<i>Sigmohauerina</i> sp.			1												
<i>Sigmoidella pacifica</i> Cushman and Ozawa															1
<i>Sigmollina</i> sp.		1													
<i>Sigmomorphina semitecta terquemiana</i> (Fornasini)		2	1												
<i>Sigmovirgulina</i> sp.	1														
<i>Spirillina limbata</i> Brady				1	1										
<i>Spirillina vivipara</i> Ehrenberg		6	1	2		1		1	2						
<i>Spirillina</i> sp.										1					
<i>Spiroloculina hadai</i> Thalmann									2		1				
<i>Spiroloculina</i> sp.				1											
<i>Spiroplectammina</i> sp. A		4	1												
<i>Spiroplectammina</i> sp.				1											
<i>Spiroplectinella wrightii</i> (Silvestri)		3													
<i>Textularia conica</i> d'Orbigny		1	1												
<i>Textularia</i> spp.		1	4												
<i>Triloculina suttuensis</i> Asano									4						
<i>Triloculina tricarinata</i> d'Orbigny										2					
<i>Triloculina</i> sp. A											2				
<i>Valvulinaria hamanaoensis</i> (Ishiwada)												2			
Gen. et sp. indet.	2	6	8	4	13	3	6	13	4	9	11	7	8	10	3
Total Counted	277	323	183	201	306	202	222	217	357	494	393	227	381	277	295

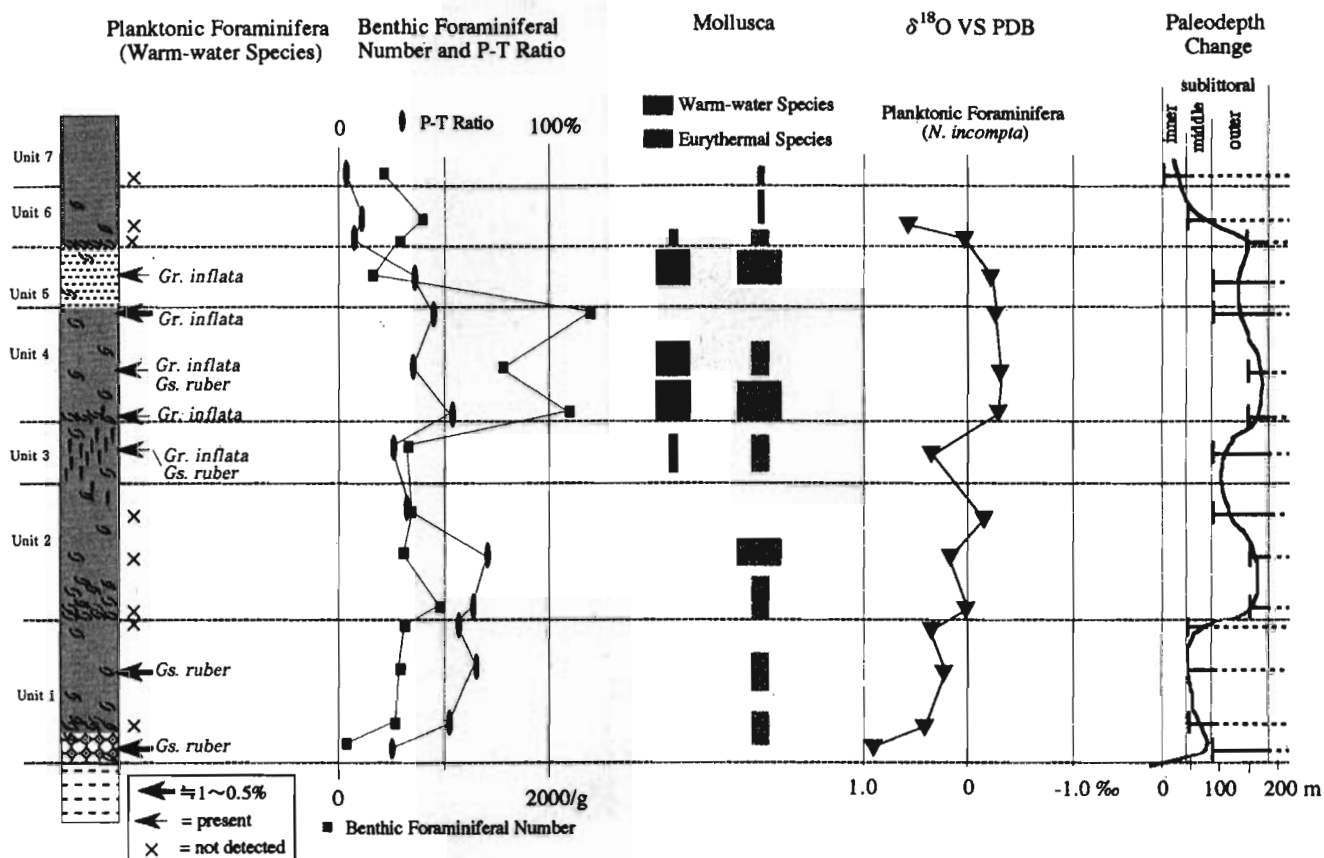


Fig. 4. Analyzed data sets of the Soebetsu Section.

データ (千地・紺田, 1970; 長谷川, 1989; 長谷川, 1993; 長谷川・小亀, 1995; 高田・長谷川, 1996; 長谷川ほか, 1997) から作成した水深とBFNとの対応関係を示す。この図では水深150m前後まではおおむね深度が増すにつれて数値が増加するといえるが、400mのところにも小ピークが見られるなど水深とBFNとの相関を強く主張するにややばらつきがある。したがって、BFNが水深以外の要因にも影響されていることは確実で、その値の大小で一義的に水深を推定したりコンデンスセクションを推定したりする指標と考えるのは危険であるといえる。このように、BFNは容易に得られる指標で「有孔虫の生産性」・「水深」・「流れ込みの発生状況」などをある程度推定する目安となるが、この指標だけでそのいずれの要因がもっとも重要な要素かを判断するのは危険である。

浮遊性種個体数対全有孔虫産出個体数比率 (P-T比)

この指標も、定量的に有孔虫化石を抽出するだけで得られ、浮遊性種と底生種の区別さえできれば種の同定は不要である。浮遊性有孔虫は外洋ほど多く棲息することから、

P-T比は一般に外洋水塊の影響度を示すものと考えられており、堆積環境や海流の流路などに左右されることもあるが、現在の日本海ではおおむね陸棚に向かい離岸距離(あるいは水深)に比例して増加する傾向にあるといえる。たとえば東シナ海や黒潮水塊(太平洋)では、水深200~500mで水深とともに増加し500~2000mではほぼ一定となったのち2000m以深で急速に低下するという報告(井上, 1980)**があるほか、これまで報告されている日本海地域の諸調査報告(周藤, 1965; 日高, 1965; 野村・池原, 1986; 的場・本間, 1987; 野村・池原, 1988; 長谷川, 1989; 井上, 1989; 長谷川, 1991; 長谷川, 1992; 長谷川, 1993; 長谷川・小亀, 1995; 高田・長谷川, 1996; 長谷川ほか, 1997)をコンパイルした結果からもほぼ同様の傾向が読み取れる (Fig. 6)。

近年北蒲原地域の西山~灰爪階において有孔虫の群集解析をシーケンス層序学と関連づけて検討した守屋(1995)**は、PB比の上昇と底生有孔虫種が示す浅海化が同時に見られることから、この地域のPB比の上昇は離岸距離や古水深の変化以外の要素によるものと推定した。そしてPB比と *Neogloboquadrina pachyderma* の左巻/右巻個体数比のカーブがよく一致することから、海水の低温化あるいは湧昇流の発達にもなって浮遊性種の生物生産性が增大したことがPB比上昇の原因であると結論している。さらに、産出個体数の層位変化の要因を、i) 堆積速度の変化・ii) 有孔虫生産量の変化・iii) 堆積環境の変化・iv)

** 井上(1980)や守屋(1995)ではP-T比ではなくPB比、すなわち浮遊性種と底生種の産出個体数比率を用いている。他の研究でもPB比を用いる場合があるが、P-T比とPB比は後者の方が数値が大きくなるが傾向は同じになるのでトレンドを比較する分には問題はない。本論では、全体に占める浮遊性種の比率がすぐわかるという利点があるのでP-T比の方を用いた。

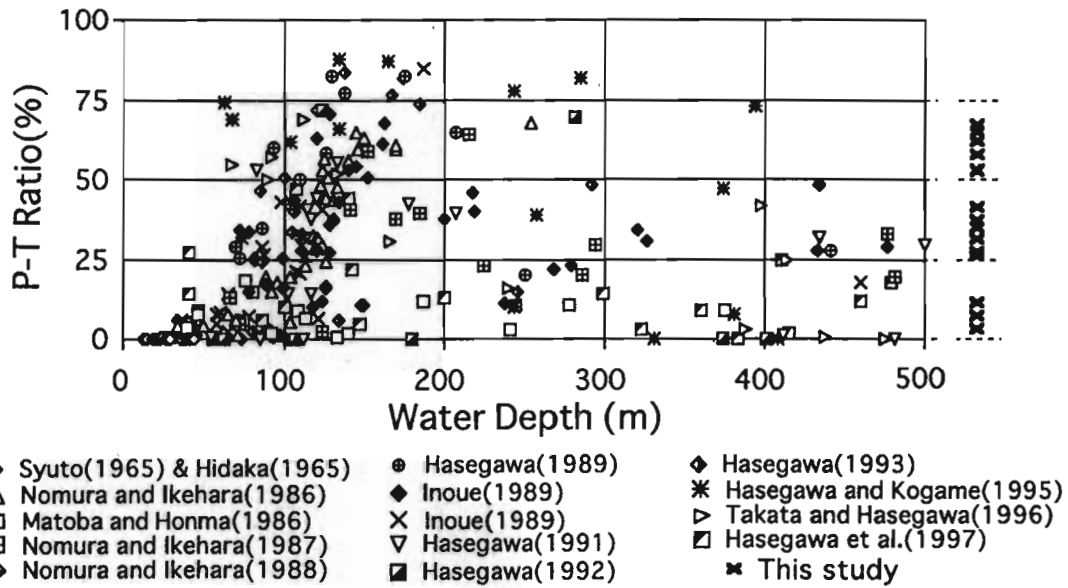


Fig. 6. P-T ratio of the recent Japan Sea.

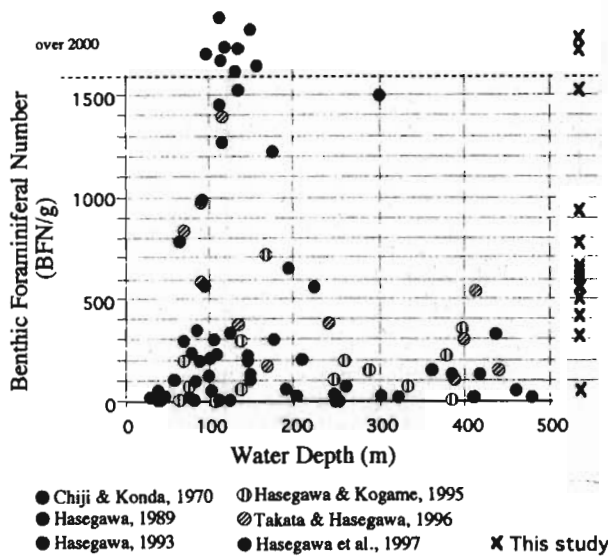


Fig. 5. Benthic foraminiferal number of the recent Japan Sea.

続成過程での保存の差、のいずれかによるものとし、浮遊性種のみが顕著なピークを形成する場合は浮遊性有孔虫の生産性の増大がその主な要因であるとして、真のコンデンセクションにともなう個体数ピークと生産性の増大によるピークを区別する必要性を指摘した。このように、これまであまり強調されてこなかったが、P-T比やBFNは堆積速度とも相関関係があり、P-T比の増加は水深の変化だけを原因とするわけではない。しかし、逆にいえば、他の要因との関連性を排除できればP-T比やBFNから堆積速度に関する情報を引き出すことが可能となる。

本研究は同一露頭の連続サンプルを使用しており、サンプル間で化石の保存度（有孔虫化石の溶解度）に差は見られなかったため、「続成過程での保存の差」はなかったと考えてよい。また、Fig. 4に示すように、浮遊性有孔虫

Neogloboquadrina incompta の $\delta^{18}\text{O}$ カーブを見ると、そのピークとP-T比のピークとは必ずしも一致していない。 $\delta^{18}\text{O}$ カーブは表層水温や塩分濃度などの変動を示すため、それらの海況変化はP-T比変動の原因とは考えられないことになる。一方、浮遊性有孔虫生産量の変化は栄養塩の変化にも関係があり、その変動は浮遊性有孔虫だけでなくBFNも増源させると考えられるが、BFNとP-T比のピークも一致していない。したがって、このP-T比変動は表層水温や塩分濃度あるいは栄養塩の変動による「有孔虫生産量の変化」によるとは考えられないため、「堆積速度の変化」と「堆積環境の変化」が個体数やP-T比変動の要因に関わっているとするのが妥当といえる。堆積速度と堆積環境は、たとえばストームの発生時のように堆積速度が変化すると堆積環境も変化するという密接な関係にあるが、本論では岩相的な変化がほとんどないので、堆積環境の変化を貝殻密集層が形成される時とされない時という観点にしばって検討した。

貝殻密集層の形成要因にかかわる堆積速度の変化と各指標との関係を考える時は、まずP-T比が浅海域からの流れ込みにより大きく変動すると考えられる点に着目する必要がある。主に流れ込みによって形成された貝殻密集層では、浅海域から流れ込んだ多くの有孔虫殻を含むはずであるが、その場合、一般に浅海ほど浮遊性有孔虫の比率が小さいので、流れ込んでくるものの大多数は底生有孔虫ということになりP-T比は下がる。逆に流れ込みの少ない状況では貝殻片の流れ込みもまた少ないと考えられるので、そのような場合に貝殻密集層が形成されるとすれば堆積速度の低下すなわちコンデンセーションが発生して長期にわたる集積が起こった結果と考えられる。この時底生有孔虫の流入は少ないが、浮遊性有孔虫の表層からの“降り積もり”が堆積速度に左右されることなく一定の速度で起こるとすれば、薄い堆積層中に長期間の“降り積もり”が蓄え

られた結果 P-T 比はあがる。したがって、P-T 比が低い貝殻密集層は流れ込みにより形成されたイベント型密集層であり、P-T 比が高い場合は流れ込みの少ない堆積環境で形成された堆積速度低下型密集層と考えられる。このように、貝殻密集層とその直下・直上の P-T 比を比較し、流れ込みの発生状況の推定から密集層の形成要因をある程度特定することが可能である。

本研究のサンプルの示す P-T 比は、下部から上部にかけて多少のゆらぎはあるものの低→高→低というトレンドを示し、中には50%以上という非常に高い値を示す層準も含まれている (Fig. 4)。前述のような P-T 比と貝殻密集層の関係に関する考察を本論のデータにあてはめることで次の結論が得られる。

- 1) Unit 1 の貝殻密集層の P-T 比は堆積速度が停滞していたことを示し、この密集層が礫層中にあること、下位層が植物遺体を多産し海生動物化石を産出ししないシルト岩層 (陸成層?) であることなどを考慮すると、海進期のラグ型密集層と考えられる。したがって、Kidwell (1991a) によればこの礫層部分がシーケンス層序学的にはシーケンス境界 (sequence boundary) あるいは海進ラビーンメント (transgressive ravinement) と位置づけられる。
- 2) Unit 2 および 4 の基底部の貝殻密集層の形成は、コンデンセーションに起因する堆積速度低下型密集層である。
- 3) Unit 6 基底の貝殻密集層は、主に流れ込みにより形成された。さらにこの化石層は *Mizuhopecten yesoensis* などの離弁した二枚貝化石の薄層であることから、イベント型密集層と考えられる。
- 4) Unit 6 → 7 の P-T 比の激減は、陸化の傾向を示す。このことは、Unit 7 で植物遺体を多産し海生動物化石が減少することからも支持される。

浮遊性有孔虫

ここでは亜熱帯性種の *Grobigerinoides ruber* と温暖性種の *Globorotaria inflata* に着目する (Fig. 4)。これらの種は北海道周辺日本海などの寒冷域では産出数が少なく、唯一流入する暖流である対馬暖流の去就によりその産出が変動する。Hemleben et al. (1989) は、飼育実験により現生の *G. ruber* の水温に対する耐性が16~31℃の範囲であると、Bé (1977) などとその卓越する生息深度を50m以浅としていることから、この種は表層に暖流が流入したことを強く示唆すると考えられる。さらに、*Gr. inflata* は生息水深が100m以深とされている (Bé, 1977) ことから、この種の産出は温暖化により水深が100mを越えたことを示すといえる。

ところで、暖流の流入を強く示唆する浮遊性有孔虫 *Gs. ruber* と前述の軟体動物の温暖種の産出層準にはタイムラグがある。これは、浮遊性有孔虫が暖流と共に流入しすぐに遺骸を堆積物中に残すことができるのに対し、軟体動物は環境が安定し個体がある程度成長してからでなければ化

石として堆積物中に残らないことに起因すると考えられる。したがって、このようなタイムラグは浮遊性有孔虫が暖流流入の良好な指標であることを示すと同時に、軟体動物温暖種の産出は温暖化の安定期を示しているといえる。

これらのことから添別セクションの化石産出状況を解釈すると次の結論が得られる

- 1) Unit 1 の *Gs. ruber* の産出は、海進の開始と暖流の流入が同時に起こったことを示す。また、Unit 2 における暖流系種の無産出は、暖流の弱体化や流路変化によると考えられる。
- 2) Unit 3 ~ 5 の *Gs. ruber* と *Gr. inflata* および軟体動物温暖種の産出は、暖流の流入の安定的継続と海域の深化 (水深100m以上) を示す。
- 3) Unit 6 ~ 7 の暖流系種の無産出は、暖流流入の弱体化・停止傾向を示す。

底性有孔虫による古水深の見積もり

底性有孔虫は水深により生息する種が異なっているため、水深との対応関係を決められれば産出種によって古水深を復元することが可能である。これまでも秋元・長谷川 (1989) や長谷川ほか (1989) などが、現世及び地質時代の底性有孔虫と水深との対応関係を検討し、水深指標となりうるいくつかの種群を提示している。有孔虫は、水深そのものではなく水深により分布が異なる水塊に適応しているため、これらの研究では古水深を数値で示すのではなく、いくつかの水塊の深度分布に対応した深度帯として表現した。本論ではこの考え方に基いて、これまでに公表されている石狩湾~東北~能代沖の現生種の分布データ (千地・紺田, 1970; Ikeya, 1970; Matoba, 1976; 的場・本間, 1986; 長谷川・小亀, 1995; 高田・長谷川, 1996; 長谷川ほか, 1997) との比較により、添別セクションの各サンプルの古水深を以下の手順で求めて検討した。

- 1) R モードクラスター分析によりそれぞれのサンプルにおいて高頻度で共産する種の組み合わせを求めた。分析には添別セクションの15試料に含まれる産出頻度の低い (3 個体未満) のものを除いた129タクサを用い、クラスター分析には類似度指数として Horn (1966) の重複度指数を用いて、Hasegawa (1988) の示した次式により計算した。

$$R_0 = \frac{\sum (X_i + Y_i) \log (X_i + Y_i) - \sum X_i \log X_i - \sum Y_i \log Y_i}{(X + Y) \log (X + Y) - X \log X - Y \log Y}$$

ただし上式において、 X_i と Y_i はそれぞれ種 X と Y とにおける i 番目の試料における個体数頻度、 X と Y はそれぞれ種 X と Y の総個体数を示す。

各クラスターは、単純算術平均による連結法により類似度の高いほうから順に連結した結果、類似度0.8を境に63個のクラスターが認められた (Fig. 7)。

- 2) 現生種のデータをコンパイルし、データのある種についてその生息水深を決定する。使用した報告のデータ間で同じ種の深浅が異なる場合は、生体群集のデータ

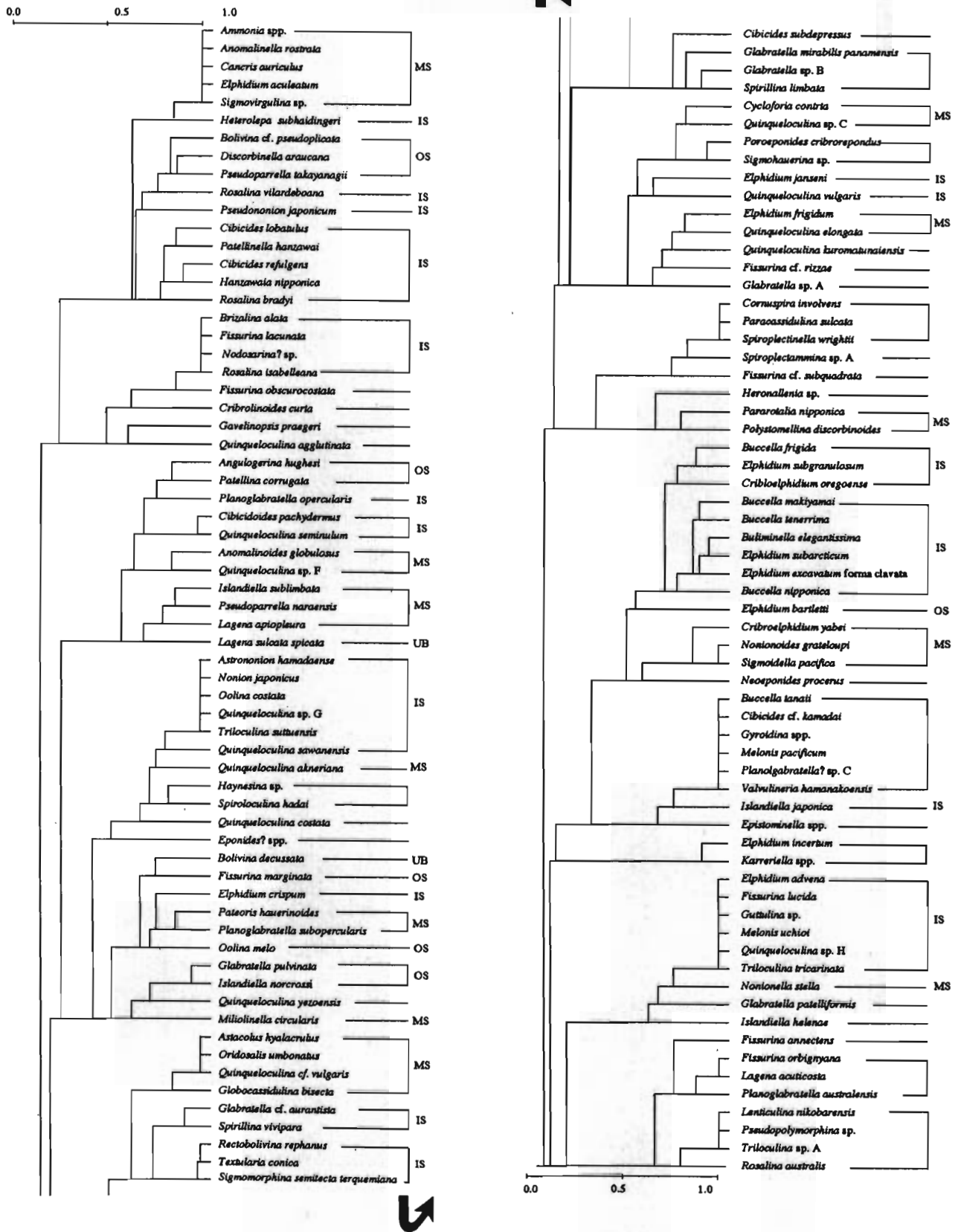


Fig. 7. Dendrogram of R-mode cluster analysis and shallow bathymetric zonation (Hasegawa et al., 1989) of species groups. The zone was determined by correlation with present foraminiferal distributions in the Japan Sea. The species groups with no zonation have no data for present distribution. IS=inner sublittoral zone (above 45m), MS; Middle sublittoral zone (45~90m); OS=outer sublittoral zone (90~190m); UB=upper bathyal zone (190~600m).

Table 4. Foraminiferal occurrence (%) in shallow bathymetric zone for each sample of the Soebetsu Section. The authors preferred deeper zone—which has “common” (about 4.5~13.5%) or “abundant” (over 13.5%) occurrence of each sample—to determined its paleodepths, because foraminifera may move downward.

Shallow bathymetric zone (Hasegawa et al., 1989)	Sampling Number														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Inner sublittoral (above 45m)	54	40	40	44	22	32	51	50	56	56	58	59	73	78	88
Middle sublittoral (45-90m)	2.2	16	23	30	27	24	12	10	18	7	12	4.4	2	4.4	0
Outer sublittoral (90-190m)	29	3.1	0	1.6	20	18	14	16	14	15	7.8	11	13	0	1.5
Upper bathyal (190-600m)	0	0	0	1.6	1.7	2.6	0	0	1.2	0.8	0	0	0.8	1.2	0

を優先するか、深い方のデータには深部への流れ込みが含まれるため生息時はより浅いところにと推定して浅い方のデータを採用するかし、秋本・長谷川 (1989) の上限深度帯を用いて示した。

- 3) 同一クラスター内に含まれた種は高頻度で共産することを示すため、それらは全て同じ水深に生息した種群とみなし、種群内に生息水深が決定された現生種がある場合はその深度を種群の生息深度とした。また、種群内に深浅の異なる複数の現生種が含まれる場合は、浅いほうの水深を採用した。したがって、決定された種群生息深度は示された深度帯以深で生息した種群であることとなる (Fig. 7)。
- 4) 得られた種群生息深度を各サンプルにあてはめてサンプル中の深度帯比率を求め、common (約4.5%~13.5%) または abundant (13.5~80.5%) の産出頻度を持つものを採用してそれぞれの堆積深度を決定した (Table 4)。なお、有孔虫化石は死後に深部へ向かって再堆積することが考えられるが、深部に生息したものが浅部に移動することは一般に考えにくい。したがって、各サンプルに複数の生息深度帯が認められた場合には浅いものが再堆積したと考え、堆積深度の決定にはサンプル内で最も深い深度帯を採用した。また、深度帯のうち外部浅海帯 (Outer Sublittoral Zone) は、他の深度帯に比べてやや幅が広いので、外部浅海帯に連続して上部漸深海帯 (Upper Bathyal Zone) に属する種群の産出が見られる場合には外部浅海帯下部で堆積したと判断して全体の古水深変動曲線を表現した (Fig. 4右)。

Fig. 4に示された深度変化のうち、特に貝殻密集層付近に着目すると、P-T比の高い密集層は深度が急激に深まった層準、すなわち Unit 2 と 4 の基底部に形成されていることが分かる。このことは、海水準の上昇に伴う海岸線の陸側への移動により、堆積物の供給源が遠くなって堆積速度が低下する現象 (コンデンセーション) が発生したことを示唆する。なお、コンデンセーションの一つの特徴と考えられる種多様性の増大は、本サンプルの有孔虫に関しては発生していない。

ところで、貝殻密集層中の貝類化石の示す生息深度はいずれも N0~N2 前後 (0~60m) と浅く、底生有孔虫化石の示す深度は外部浅海帯 (90~190m) と深い。極端に深度差が生じているのが主に貝殻密集層層準であることと両者の殻サイズの大きさを考慮すると、この古水深の不

一致は、水深の浅いときに形成された貝殻密集層中に、水深が増してから有孔虫が入り込んだ結果と解釈できる。したがって、貝殻密集層中に含まれる浅海性有孔虫化石と軟体動物化石はほぼ同時期 (貝類化石の堆積期) の堆積物であるが、深い生息深度を示す有孔虫化石は貝類化石の堆積後のものであり、化石埋積の時間差、すなわち時間平均化 (time-averaging) の効果があることを示す。貝殻密集層中に時間平均化が認められることは普通であるが、その影響を具体的に特定することは一般に難しい。今回異なるタクサ間の時間平均化が指摘できたことは、古環境解析において問題となっていた“信頼限界”の検討において重要な示唆を与え、解析の精度を上げるためにも重要な手法となる。

これまで述べた各指標による解析結果をまとめると次のように堆積過程が復元される。

- 1) 海進は暖流の流入とともに開始され、水深は中部浅海帯 (45~90m) 前後の浅海でラグ型密集層が形成された (Unit 1)。
- 2) Unit 2 基底の部分で水深は約中部浅海帯→外部浅海帯下部 (約45m→150m) と急激に深まった。このため、堆積物の供給源が (陸側に) 遠のいてコンデンセーションが発生し、堆積速度低下型密集層が形成された。
- 3) Unit 3 にかけてやや浅くなるなど水深に多少のゆらぎがあったが、Unit 4 基底部で再び外部浅海帯上部→下部 (約90m→150m) と深化したためコンデンセーションが発生して堆積速度低下型密集層が形成された。
- 4) Unit 4~5 にかけて水深は最大となり外部浅海帯下部 (約150~190m) となった。この時期には暖流の流入が安定的となり温暖期はピークを迎えた。
- 5) Unit 6 の基底で、軽微な削剥を伴う短期間の堆積物の移動が発生しイベント型密集層が形成された。この層準を境に暖流の流入は衰退・停止の傾向となり、その後 Unit 7 へ向かって中部浅海帯→内部浅海帯 (45m→0 m) と急速に浅海化し陸化した。

このような海進の発生・終了 (深化・浅化) と水温の上昇・下降のよい相関関係は、氷河性海水準変動の存在を示すとともに、一つの間氷期 (=一つの間氷期) 中にもさらに高いオーダーで水温変化と相関のある海水準の揺らぎがあったことを示す。

貝殻密集層の形成過程とその解析手法

これまで報告されてきた第四紀の水河性海水準変動は、氷期の海水準低下期と間氷期の海水準上昇期の繰り返しを、堆積シーケンスの認定や軟体動物化石などの群集解析によって示すものが多かった (Kitamura et al., 1994; 北村, 1995など). 本研究の事例は、北村 (1995) の大桑層上部に対比される一間氷期の高精度解析であり、Kitamura et al. (1994) が大桑層のシーケンスを DSDP コアの標準カーブと対比しておおのの氷期-間氷期サイクルをミランコビッチサイクルの 4 万年の地軸傾斜周期に一致するとした見解に従えば、本論の海水準変動は約 2 万年の歳差周期に対応していることになる。本論のデータにおいても北村 (1995) と同様に軟体動物化石の群集解析のみを用いて検討を行えば暖流系種の消長の様式からほぼ同様の結果を得るが、有孔虫の群集解析を加えた結果さらに詳細な解析が可能となり、95~83 万年前の堆積物中の約 2 万年周期の環境変動を復元するという高解像度解析が可能となった。

北村 (1995) では最大海成氾濫面を貝化石の層位分布を元に設定したが、本論では 20~55cm 間隔で有孔虫化石用のサンプルを採取し、その情報により 20~30cm の範囲で最大海成氾濫面を設定できた。微化石を用いることは、このようにピンポイント的なサンプリングと解析が可能である点にも大きな利点がある。このセクションでは含泥率もほぼ一定で、岩相変化も (貝殻密集層があることを除けば) ほとんどないため、堆積学的な解析を行うのは非常に困難であるが、前述のようにシーケンス層序学の手法を適用することで程度シーケンスの認定を行うこともできる。しかし、微化石だけでは堆積過程を知るための埋没姿勢などの情報を得ることは困難であるため、軟体動物化石の産状を含めた検討を加味することが必要である。また、貝殻密集層は露頭で確認できるスケールをもち、サンプリングに際して目的に則した設定がしやすく、化石の保存も一般的に良好であるうえ、単に化石のタフオノミーの解明にとどまらず、堆積速度変遷過程を詳細に復元することで堆積過程そのものの復元が期待できるので積極的に利用する価値がある。

貝殻密集層には、P-T 比が高いものと低いものがあり、その原因はそれぞれ有孔虫化石の浅部からの流れ込み量が少ないものと多いものであると推定された。有孔虫化石が砂粒と同様の挙動を示すことを考えれば、流れ込み量変化はすなわち堆積物の流れ込み量 (堆積速度) 変化である。本論では、それが急速に水深が深まったときに発生するコンデンセーションに起因することを $\delta^{18}\text{O}$ カーブや底生有孔虫の深度解析により確認したが、P-T 比だけでおおよその判断をつけることも可能であろう。しかし、前述のように有孔虫の産出数はいくつかの要素に影響されるため、コンデンセーションが P-T 比とダイレクトに相関するとは言い切れない。それでも、本論で行ったように連続露頭の一連のサンプルを用いる場合は、(特に第四紀層

の場合) 続成の差による溶解の問題は影響が少ないと考えられるので、浮遊生有孔虫による $\delta^{18}\text{O}$ などのデータから表層水温の変化と浮遊性種数に相関がないことが示せば生産量変化の問題も消去可能となり、結局 P-T 比と貝殻密集層との関係を堆積速度 (または堆積環境) の問題に還元できる。

本論では主に貝殻密集層の形成過程の復元について述べたが、その基本的手法は堆積速度の増減を有孔虫化石によって求め、貝殻密集層中の軟体動物化石の産状や群集解析結果とあわせて総合的に解釈するというものである。貝殻密集層の形成過程を堆積速度との関係から導きだせるということは、本論での議論が貝殻密集層のない塊状の堆積物においても有孔虫化石によって堆積速度の増減を推定することができるという可能性を示す。また、堆積物の粒度や構造に変化が見られなくても堆積速度の変化が起きているということが証明され、その復元手法が示されたことは、今後陸上セクション・コアサンプルのいずれの解析においても有用であろう。

これまで、堆積物としての挙動も含めて微化石を考察した研究例は少なく、むしろいかにそうした側面を排除して生物学的あるいは生層序学的な考察に集中できるサンプルを得るかが重要視されてきた。今後さらに本論で示されたような堆積物としての挙動も含めた考察手法が充実することで、堆積過程の復元に向けたより多くの応用が期待できる。

ま と め

西南北海道の中~下部更新統瀬潮層をケーススタディーとした貝殻密集層における軟体動物化石と有孔虫化石の複合解析により、以下のような堆積過程とその復元の技術的手法を示した。

- 1) 軟体動物化石の暖流系種の産出・有孔虫の酸素同位体比ピーク・底生有孔虫産出個体数ピーク・浮遊性有孔虫の 100m 以深生息種の出現が集中する Unit 4 最上部~Unit 5 基底が最大水深時にあたる。これらの指標による解析は、堆積相から最大海成氾濫面を認定できない場合にも有効である。この最大水深時の層準では軟体動物化石は散在的に産出し貝殻密集層は形成されていない (Fig. 8)。
- 2) 貝殻密集層が成因を特定できるような堆積構造を持たない場合でも、浮遊性種個体数/全有孔虫産出数比率 (P-T 比) の検討から堆積速度の増減を見積ってその形成要因を推定可能である。すなわち P-T 比の高い貝殻密集層は堆積速度の低下 (コンデンセーション) によるもの (堆積速度低下型密集層) で、P-T 比の低い密集層はストームなどの短期間かつ堆積速度の速いイベント的な作用により形成されたもの (イベント型密集層) である。
- 3) 軟体動物化石と底生有孔虫化石の示す古水深の差は、密集層の形成過程における時間平均化 (time-averaging) を示す。

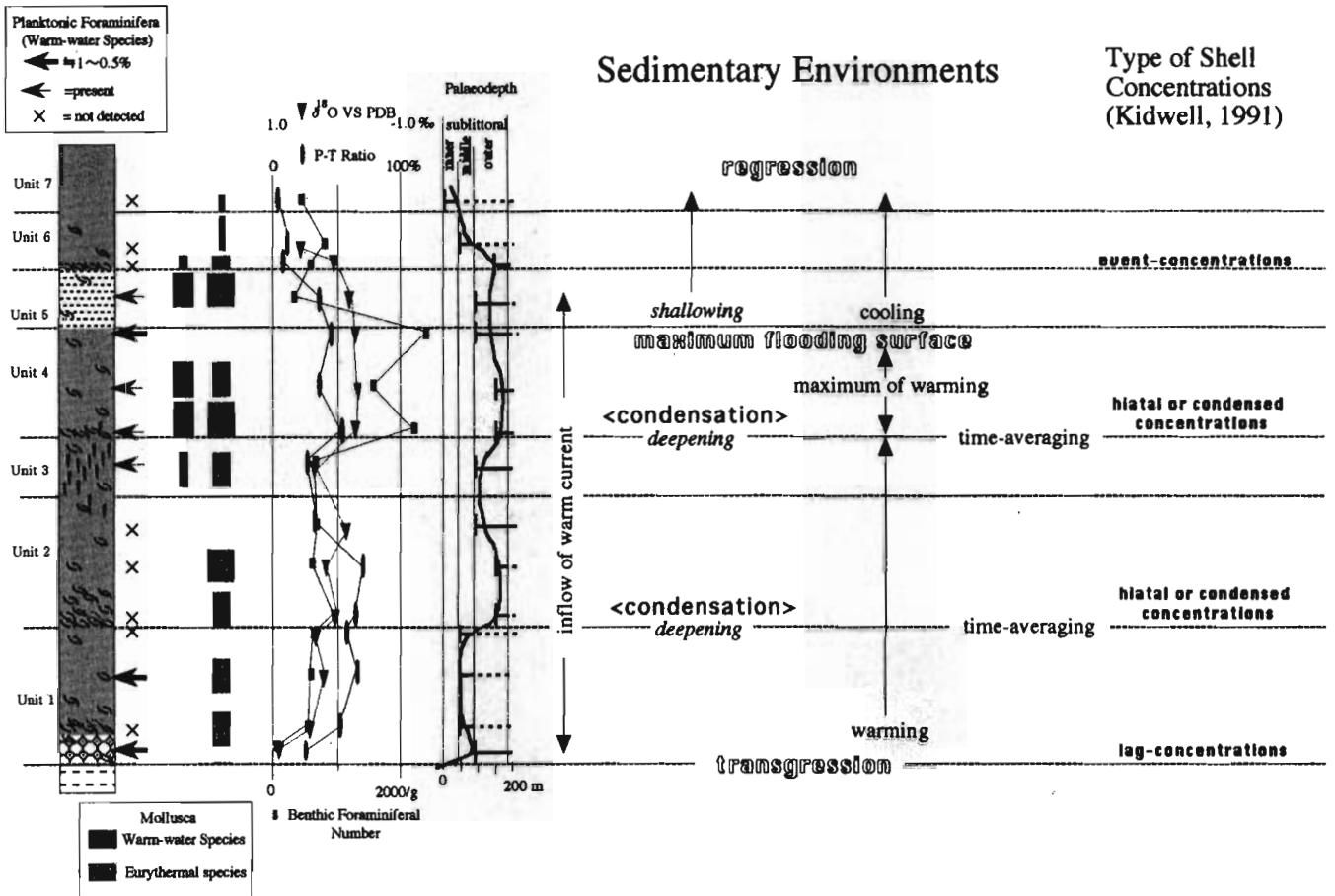


Fig. 8. Summary of sedimentary environments and shell concentration types.

- 4) 底生有孔虫の群集解析により、最大水深に至る過程でのさらに高次オーダーの水深変動を読み取ることが可能である。
- 5) 北海道周辺のような北方冷水域における暖流系浮遊性有孔虫化石の産出は暖流の流入の鋭敏な指標であり、軟体動物化石の暖流系種の産出は温暖化の安定期を示す。

謝 辞

本研究は、筆者の一人能條の博士論文の一部に基づいている。博士論文の執筆に際して、北海道大学大学院地球環境科学研究科の長谷川四郎助教授ならびに北海道教育大学岩見沢校の都郷義寛教授には終始多大なるご指導をいただいた。北海道大学大学院地球環境科学研究科の大場忠道教授には酸素同位体比の測定・検討に際してご指導いただき、同研究科南川雅男教授と村山雅史博士にも有益なるご助言をいただいた。クラスター分析およびBFN・P-T比の既存データコンパイルに際しては同研究科の高田裕行・黒澤一男両氏にそれぞれご助力いただき、板木拓也・山根雅之の両氏にも多くの有益な議論をしていただいたほか、同研究科の内田淳一氏と夕張市立のぞみ小学校松田敏孝教諭には現地調査にご協力いただいた。以上の方々をはじめ、小論を発表する機会を与えてくださった筑波大学地球科学系小笠原憲四郎教授ならびに高知大学理学部地質学教

室近藤康生博士に深く感謝する次第である。

文 献

- 秋元和實・長谷川四郎, 1989, 日本近海における現生底生有孔虫の深度分布 —古水深尺度の確立に向けて—, 地質学論集, no. 32, 229-240.
- Bé A. W. H., 1977, An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In Ramsay A. T. S. ed. *Oceanic Micropaleontology*, vol. 1, 1-100.
- Brett, C. E., 1995, Sequence stratigraphy, biostratigraphy and taphonomy in shallow marine environment. *Palaios*, 10, 597-616.
- Brett, C. E. and Baird, G. C., 1993, Taphonomic approaches to time resolution in stratigraphy: Example from Paleozoic marine mudrocks. In: Kidwell, S. M. and Behrensmeier, A. K. (ed.), *Taphonomic approaches to time resolution in fossil assemblages*. Short courses in Paleontology, no. 6, 250-274.
- 千地万造・紺田 功, 1970, 日本海北部奥尻島周辺の底質中における有孔虫群集の深度分布について. 大阪市立自然科学博物館業積, 147, 日本海の地学的特性に関する総合研究, 35-50.
- Flessa, K. W., 1993, Time-averaging and temporal resolution in Recent marine shelly faunas. In: Kidwell, S. M. and Behrensmeier, A. K. (ed.), *Taphonomic approaches to time resolution in fossil assemblages*. Short courses in Paleontology, no. 6, 9-33.
- Flessa, K. W. and Kowalewski, M., 1994, Shell survival and time-averaging in nearshore and shelf environments: estimates from the radiocarbon literature. *Lethaia*, 27,

- 153-165.
- Fürsich, F. T., 1978, The influence of faunal condensation and mixing of fossil benthic communities. *Lethaia*, **11**, 243-250.
- Fürsich, F. T. 1990, Fossil concentrations and life and death assemblages. In: Briggs, D.E.G. and Crowther, P.R. (ed.), *Paleobiology, a synthesis*. Blackwell Scientific Publications Plenum Press, New York, 235-239.
- Fürsich, F. T. and Aberhan, M., 1990, Significance of time-averaging for paleocommunity analysis. *Lethaia*, **23**, 143-152.
- 長谷川四郎, 1989, 能登半島周辺海域の有孔虫群集 (予報). 有田正史・岡村行信 (編) 「西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究」, 昭和63年度研究概要報告書 — 能登半島周辺海域一, 地質調査所, 165-175.
- 長谷川四郎, 1991, 日本海南東部, 佐渡島周辺海域の有孔虫群集 (予報). 岡村行信 (編) 「日本海中部東縁部大陸棚周辺海域の海洋地質学的研究」, 平成2年度研究概要報告書 — 新潟県沖海域一, 地質調査所, 136-145.
- 長谷川四郎, 1992, 日本海東部, 山形県 — 秋田県沖海域の有孔虫群集 (予報). 岡村行信 (編) 「日本海東縁部大陸棚周辺海域の海洋地質学的研究」, 平成3年度研究概要報告書 — 山形〜秋田県沖海域一, 地質調査所, 217-227.
- 長谷川四郎, 1993, 日本海東部海域の有孔虫群集 (予報). 岡村行信 (編) 「日本海中部東縁部大陸棚周辺海域の海洋地質学的研究」, 平成4年度研究概要報告書, 地質調査所, 203-217.
- 長谷川四郎・秋元和實・北里 洋・的場保望, 1989, 底生有孔虫にもとづく日本の後期新生代古水深指標. 地質学論集, no. 32, 241-253.
- 長谷川四郎・小亀 出, 1995, 日本海東部, 渡島半島西方海域の有孔虫群集 (予報). 岡村行信・井内美郎 (編) 「北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究」, 平成6年度研究概要報告書 — 北海道南西沖海域一, 地質調査所, 151-166.
- 長谷川四郎・宇佐見和子・矢吹守穂, 1997, 日本海北東部, 石狩湾周辺海域の有孔虫群集 (予報). 井内美郎・駒沢正夫・倉本真一 (編) 「北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究」, 平成8年度研究概要報告書 — 北海道南西沖海域一, 地質調査所, 251-261.
- Heim, A., 1934, Stratiographische Kondensation. *Ecol. Geo. Helv.*, **27**, 372-383.
- Hemleben Ch., Spindler M., and Anderson O.R., 1989, *Modern planktonic foraminifera*. Springer-Verlag, 363p.
- 日高 稔, 1965, 津屋崎沖の浮遊性有孔虫遺骸の分布. 福岡県津屋崎沖の底質 (満塩博美) 付録2, 九大理学部研究報告, **8**, p.130-133.
- 肥後俊一・後藤芳央編, 1993, 日本及び周辺地域産軟体動物総目録. エル貝類出版局, 693p.
- Ikeya N., 1970, Populational ecology of benthic foraminifera in Ishikari Bay, Hokkaido, Japan. *Records of oceanographic works in Japan*, **10**, 173-191.
- 井上洋子, 1980, 日本周辺海域の現生有孔虫の生態学的研究 その1. 日本周辺海域における現生底生有孔虫の分布. 石油資源開発技術特報, **41**, 114p.
- Inoue Y., 1989, Northwest Pacific foraminifera as paleoenvironmental indicators. *Science reports of the institute of geoscience University of Tsukuba, section B=Geological sciences*, **10**, 87-162.
- 伊藤 慎, 1992, コンデンスセクション. 堆積学研究会報, no. 36, 1-4.
- Jenkyns, H., 1971, The genesis of condensed sequences in the Tethyan Jurassic. *Lethaia*, **4**, 327-352.
- Kent D., Opdyke N.D., and Ewing M., 1971, Climate change in the North Pacific using ice-rafted detritus as a climatic indicator. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **82**, 2755-2766.
- Kidwell S.M., 1986, Models for fossil concentrations: paleobiologic implications. *Paleobiology*, **12**, 6-24.
- Kidwell, S. M., 1989, Stratigraphic condensation of marine transressive records : origin of major shell deposits in the Miocene of Maryland. *Jour. Geol.*, **97**, 1-24.
- Kidwell S.M., 1991a, The stratigraphy of shell concentrations. In Allen P.A., and Driggs D.E.G., ed. *Taphonomy-Releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, New York and London. 211-290.
- Kidwell, S.M., 1991b, Condensed deposits of shell concentrations: expected and observed features. In: Einsele, W., Ricken, W. and Seilacher, A. (ed.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 682-695.
- Kidwell, S.M., 1993, Pattern of time-averaging in the shallow marine fossil record. In: Kidwell, S.M. and Behrensmeier, A.K. (ed.), *Taphonomic approaches to time resolution in fossil assemblages*. Short courses in Paleontology, no. 6, 275-300.
- Kidwell, S.M., and Bosence, D.W.J., 1991, Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas. In: Allison, P. A. and Briggs, D.E.G. (ed.), *Taphonomy, releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, New York, 115-209.
- Kidwell, S.M. and Behrensmeier, A.K., 1993, Taphonomic approaches to time resolution in fossil assemblages: Introduction. In: Kidwell, S. M. and Behrensmeier, A. K. (ed.), *Taphonomic approaches to time resolution in fossil assemblages*. Short courses in Paleontology, no. 6, The Paleontological Society, Knoxville, 1-8.
- Kidwell, S.M. and Behrensmeier, A.K., 1993, Summary: Estimates of Time-Averaging. In: Kidwell, S.M. and Behrensmeier, A.K. (ed.), *Taphonomic approaches to time resolution in fossil assemblages*. Short courses in Paleontology, no. 6, The Paleontological Society, Knoxville, 301-302.
- Kitamura A., Kondo Y., Sakai H., and Horii M., 1994, 41,000-year orbital obliquity expressed as cyclic changes in lithofacies and molluscan content, early Pleistocene Omma Formation, Central Japan. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **112**, 345-361.
- 北村晃寿, 1995, 日本海第四紀堆積物のシーケンス層序学的解析への生層序学の貢献 — 時間面としての暖流系種の消長 —. 地質学論集, no. 45, 110-117.
- Koizumi I., 1992, Biostratigraphy and paleoceanography of the Japan Sea based on diatoms: ODP Leg 127. In Tsuchi R., and Ingle J. C. Jr. ed., *Pacific Neogene*. Univ. Tokyo Press., 15-24.
- 近藤康生, 1989, 二枚貝化石の産状観察法. 日本ベントス研究会誌, no. 37, 73-82.
- 近藤康生, 1998, 海進海退サイクルの古生態学とタフオノミー. 化石, no. 64, 54-60.
- Loutit, T.S., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1988, Condensed section: the key to age determination and correlation of continental margin sequences. *SEPM Spec. Pub.*, **42**, 183-213.
- Matoba Y., 1976, Foraminifera from off Noshiro, Japan, and postmortem destruction of tests in the Japan Sea. In Takayanagi Y., and Saito T., eds. *Progress in Micropaleontology*, 169-189.
- 的場保望・本間 登, 1986, 西津軽沖日本海の現世底生有孔虫の深度分布. 新生代底生有孔虫の研究. 秋田大学鉱山学部, 53-78.
- 守屋成博, 1995, 北蒲原地域堆積盆における西山〜灰爪階の有孔虫化石群集による高精度対比 — シーケンス層序学の基礎データ —. 石油資源開発(株)技術研究所研究報告, no. 11, 55-67.
- 長尾 巧・佐々保雄, 1933, 北海道西南部の新生代層と最近の地史 (2). 地質雑, **40**, 750-775.
- 能條 歩・松田敏孝, 1997, 西南北海道今金 — 上八雲地域の瀬棚層の“不整合”. 今金地域研究 (今金町博物館建設準備室

- 紀要), 3, 15-28.
- 能條 歩・長谷川四郎・岡田尚武・都郷義寛・鈴木明彦・松田敏孝, 1999, 西南北海道瀬棚層の広域的岩相層序区分と生層序年代. 地質雑, 105, 370-388.
- 野村律夫・池原 研, 1986, 山陰西部海域の有孔虫群集(予報). 「西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究」, 昭和60年度研究概要報告書 — 響灘・見島沖海域 —, 地質調査所, 110-127.
- 野村律夫・池原 研, 1987, 山陰沖の底生有孔虫群集. 「西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究」, 昭和61年度研究概要報告書 — 日御崎沖・鳥取沖海域 —, 地質調査所, 165-175.
- 野村律夫・池原 研, 1988, 若狭湾・北陸沖の底生有孔虫群集. 「西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究」, 昭和62年度研究概要報告書 — 経ヶ岬沖・ゲンタツ瀬海域 —, 地質調査所, 154-166.
- Oyama K., 1973, Revision of Matajiro Yokoyama's type mollusca from the Tertiary and Quaternary of the Kanto area. *Paleont. Soc. Japan, Spec. Pub.*, no. 17, 148pp.
- Reineck H.-E., and Singh I.B., 1980, *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag, 551p.
- Staff, G.M., Stanton, R.J. and Cummins, H., 1986, Taphonomy and Time-averaging and taphonomy and their impact on paleocommunity reconstruction: Death assemblages in Texas bays. *Geo. Soc. Amer. Bull.*, 97, 428-443.
- 首藤次男, 1965, 津屋崎沖の底棲有孔虫群集. 福岡県津屋崎沖の底質(満塩博美)付録1, 九大理学部研究報告, 8, p.124-129.
- 鈴木明彦, 1989, 西南北海道黒松内地域の瀬棚層の貝類化石群. 地球科学, 43, 277-289.
- 鈴木明彦, 1991, 西南北海道美利河 — 花石地域の瀬棚層の堆積環境. 地質雑, 97, 329-344.
- Suzuki A., and Akamatsu M., 1994, Post-Miocene cold-water molluscan faunas from Hokkaido, Northern Japan. *Palaeogeol., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 108, 353-367.
- 高田裕行・長谷川四郎, 1996, 日本海東部, 積丹半島沖海域の有孔虫群集(予報). 岡村行信・井内美郎(編)「北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究」, 平成7年度研究概要報告書 — 北海道南西沖海域 —, 地質調査所, 160-170.
- 椿原慎一・長谷川四郎・丸山俊明, 1989, 西南北海道黒松内地域の上部新生界 — とくに黒松内層の層序と微化石年代について —. 地質雑, 95, 423-438.
- 矢吹守穂・長谷川四郎, 1996, 西津軽沖日本海の現生底生有孔虫の堆積物中における鉛直分布. 日本地質学会第103年学術大会講演要旨, 151.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S. and Hardenbol, J., 1988, An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definition. *SEPM Spec. Pub.*, no. 42, 39-45.
- Waker, K.R. and Bambach, R.K., 1971, The significance of fossil assemblages from fine-grained sediments: time-averaged communities. *Geo. Soc. Amer., Abs.*, 3, 783-784.
- Wendt, J., 1988, Condensed carbonate sedimentation in the late Devonian of the eastern Anti-Atlas (Morocco). *Ecol. Geo. Helve.*, 81, 155-173.

(要 旨)

能條 歩・鈴木明彦, 1999, 貝殻密集層のタフォノミー — 軟体動物化石と有孔虫化石の複合解析による堆積過程の復元 —. 地質学論集, 第54号, 35-54. (Nojo, A. and Suzuki, A., 1999, Taphonomy of shell concentrations: Reconstruction of depositional processes by combined analyses of mollusc and foraminifer. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 54, 35-54.)

西南北海道の中～下部更新統瀬棚層をテストケースとした貝殻密集層の軟体動物化石と有孔虫化石の複合解析により堆積過程の復元方法を検討し, 以下の結論を示した.

1) 軟体動物暖流系種の産出・浮遊性有孔虫の酸素同位体ピーク・底生有孔虫産出個体数ピーク・浮遊性有孔虫の100m以深生息種の産出はほぼ同じ層準に集中し, そこが最大水深時にあたる. 2) 浮遊性種個体数対全有孔虫産出個体数比率(P-T比)の高い貝殻密集層は堆積速度低下型密集層で, 低い密集層はイベント型密集層である. 3) 軟体動物と底生有孔虫の示す古水深の差は, 貝殻密集層の形成過程における時間平均化(time-averaging)を示す. 4) 底生有孔虫の群集解析により, 最大水深に至る過程でのより高次オーダーの水深変動を読み取ることができる. 5) 北方冷水域における亜熱帯性浮遊性有孔虫の産出は暖流流入の鋭敏な指標となり, 軟体動物暖流系種の産出は温暖化の安定化を示す.