

掛川層群大日層の貝殻集積層

—その内部構造と起源—

間嶋 隆一*・本目 貴史**

Shell-concentrated bed of the Dainichi Formation of the Kakegawa Group

—Its fabric and origin—

Ryuichi Majima* and Takashi Homme**

Abstract We studied a shell-concentrated bed in the upper Pliocene Dainichi Formation of the Kakegawa Group, exposed at the Pacific side of central Honshu, Japan. This bed attains 30-50 cm in thickness, and is contacted sharply with a massive, fine-grained sandstone below and is conformably overlain by a hummocky cross-stratification. We measured the shell-orientation patterns of the four horizons of the bed. In the upper two horizons, the gastropod apices are oriented predominantly southeastward and the bivalve long axes in the northwest-southeast direction. In the lowermost horizon, the gastropods are oriented randomly with a weak southeast trend but the bivalves are distinctly aligned in east-west to northeast-southwest direction.

We interpreted that this bed was deposited under a high-speed and high-density unidirectional current flowing southeastward, and that all the shells were buried instantaneously. According to previous paleoceanographic reconstructions of the Kakegawa Group, this current is nearly shore normal and off-shore directed, and is attributed to an instantaneous combined current of a geostrophic flow and a backwash of a huge wave of a major storm. The combined current appears to give a very strong shear stress just above the sediments, probably easily making a density current, and its energy is reduced very quickly, probably resulting in instantaneous accumulation of the shells.

Key words : Kakegawa Group, physical rework, Pliocene, proximal tempestite, shell-concentrated bed, shell orientation, taphonomy.

はじめに

生物硬組織からなる貝殻などの遺骸が波浪や密度流などの物理的作用によって集積し、形成された貝殻集積層は、古生物学的に、また堆積学的に重要な情報を提供する

1993年3月3日受付。1993年5月17日受理。

* 横浜国立大学教育学部地学教室。Geological Institute, Yokohama National University, Yokohama 240, Japan.

** 静岡大学理学部地球科学教室。Institute of Geosciences, Shizuoka University, Shizuoka 422, Japan.

る。古生物学的にみると、このような貝殻集積層からはさまざまな種の化石標本を同一産地から多数得ることができるため、多くの古生物学的研究が貝殻集積層から産する化石標本に基づいて行われてきた。一方、堆積学的にみると、貝殻集積層を構成する個々の貝殻を分類学的に区別すれば、礫などに比べて極めて形態的類似度の高いグループに区別することが可能であり、これらのグループの堆積時の挙動はその形態的類似性からほぼ一定であることが期待される(Nagle, 1967; Brenchley &

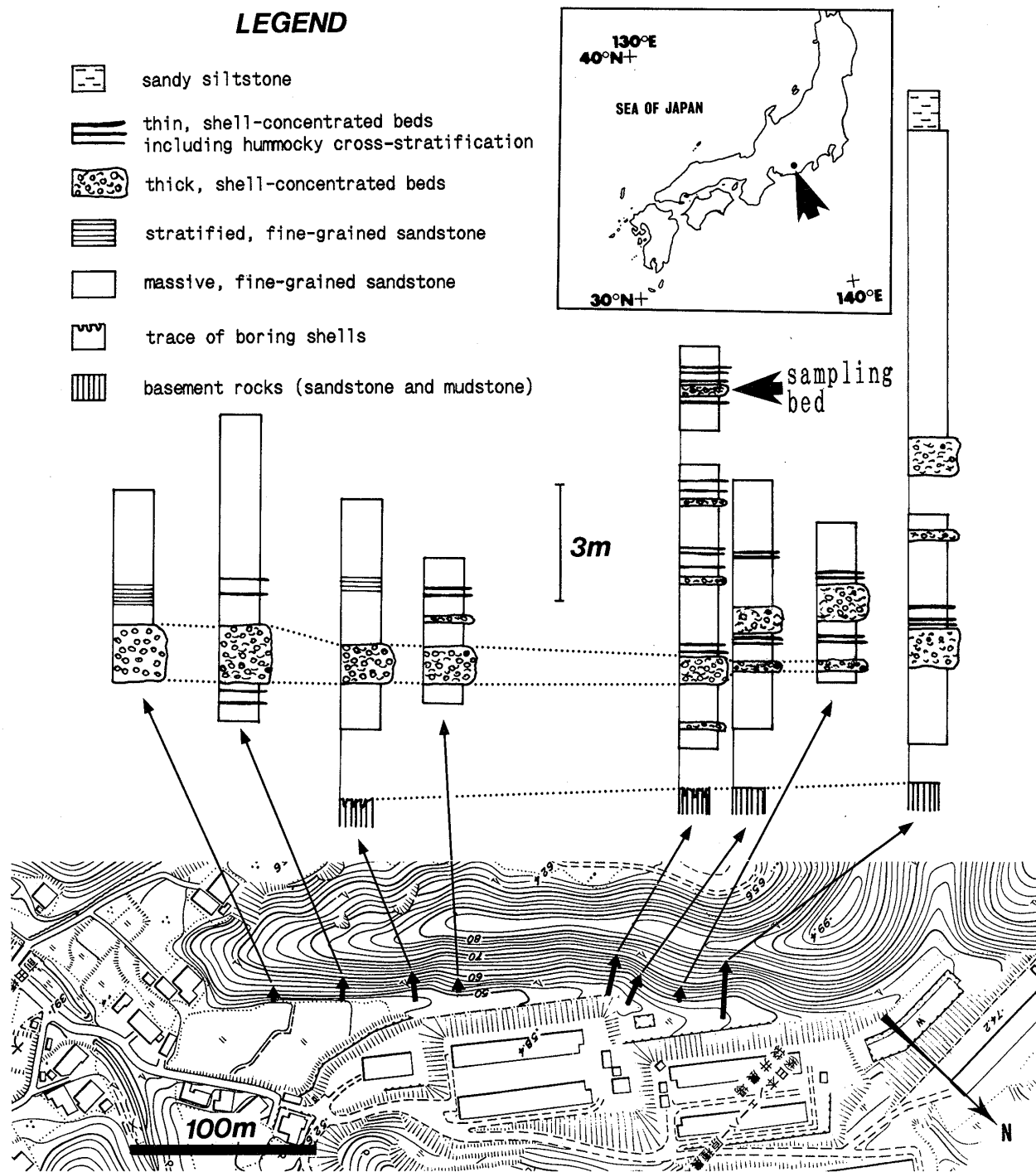


Fig. 1. Index map and the columnar sections of the study area, Dainichi, Fukuroi City, Shizuoka Prefecture.

Newall, 1970; Müller, 1979など). したがって, 堆積物中での貝殻の配列を知ることができれば堆積環境を推定する大きな手がかりとなる.

これまで多くの古生物研究者は一枚の貝殻集積層から産する同一種の個体は, ほぼ同一の時代に生息していた同一の個体群に属するというを暗黙の前提としてい

た. しかし, この前提は貝殻集積層の形成過程を知ることなしには無批判に受入れることはできない. すなわち, (1)貝殻集積層はどのような物理化学的条件で形成され, (2)どの程度の地理的範囲の生物個体を集積し, (3)集積された生物個体の時代差は最大どのくらいで, (4)集積過程での形態差による選別がどの程度行われた

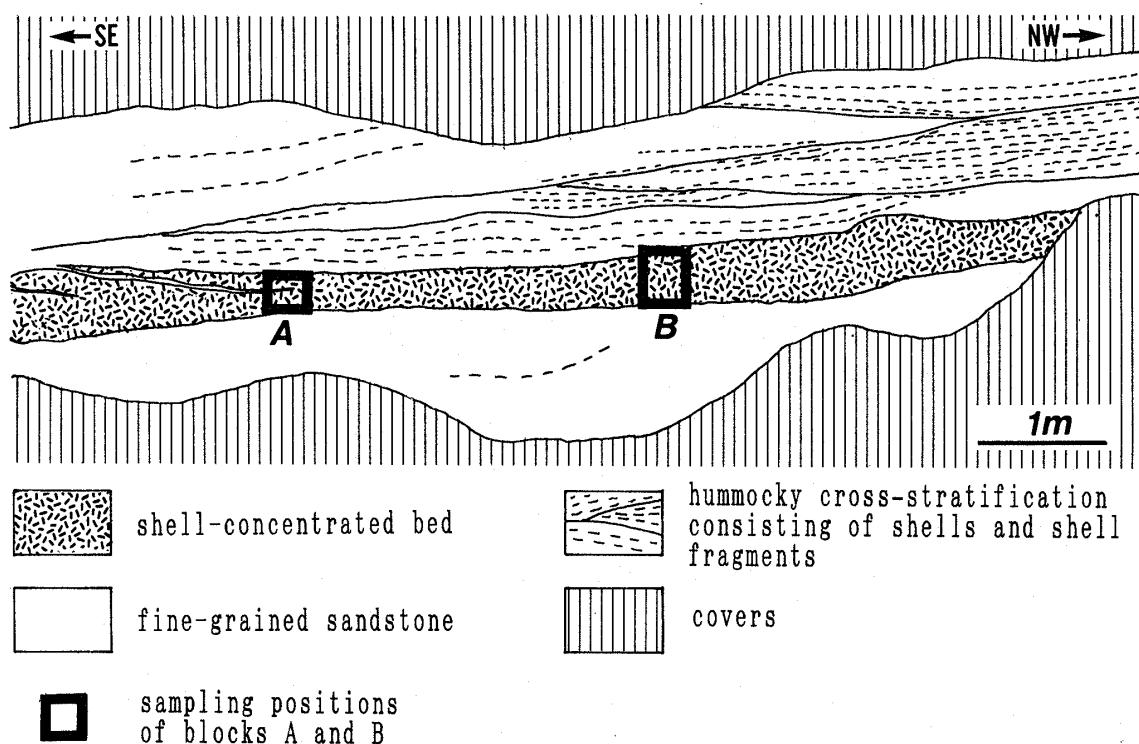


Fig. 2. Outcrop sketch of the shell-concentrated bed studied. The bed is sharply contacted with a massive, fine-grained sandstone below and conformably overlain by a hummocky and swaly cross-stratified, fine-grained sandstone that bears thin laminae consisting of shells and their fragments. Thick quadrangles show sampling position of the blocks A and B, respectively. This outcrop coincides with the fossil localities K-1 of Majima (1985) and Kakegawa 1 of Majima (1989).

のか、ということをしてきうる限り知る必要がある。

一方、最近の堆積学、特に堆積相解析の進歩により地層の堆積環境はかなり詳しく解析されるようになった。しかし、貝殻集積層については、単にラグ堆積物などとして扱われるだけで、物理的リワークを被った貝殻の配列の有用性に着目し、堆積環境復元的手段として使用した研究は多くない。

筆者らは以上のような問題意識から、これまで多くの古生物学的研究材料を供給し、すでに堆積相解析から堆積環境の復元が行われてきた上部鮮新統掛川層群大日層 (Ishibashi, 1989; Masuda & Ishibashi, 1991; 酒井・増田, 1992) に含まれる貝殻集積層の堆積機構の復元を試みた。その結果、貝殻集積層中の貝殻の配列に明瞭な規則性が存在し、その堆積機構の議論が可能なが判明したのでここに報告する。

材料と方法

地質概要

調査地点は静岡県袋井市大日にある(株)日本シーバー原種袋井農場の南に、北西-南東方向に発達する谷

である。この谷の位置図と谷に沿って調べた地質柱状図を Fig. 1 に示した。

この谷には大日層と中新統倉真層群松葉層(横山・坂本, 1957)が露出する。大日層は、谷の南壁に沿って露出し、地層の走向は北西-南東ないし北北西-南南東で、南西ないし西南西に 6° から 12° で傾斜する。谷の河床には松葉層の塊状泥岩や塊状砂岩が点々と露出し、しばしば穿孔貝の穿孔跡が密集して観察され、一部の穴の中には穿孔貝の印象もみられた。したがって、谷の河床面に沿って大日層が松葉層を不整合関係で覆っていることが推定される。しかし、不整合面そのものは崩落土に覆われて観察できなかった。

谷に沿って露出する大日層は主に塊状細粒砂岩層よりなり、礫と貝殻よりなる厚さ数 cm から 1.5 m の粗粒層を何枚か挟在する (Fig. 1)。これらの粗粒層のうち、下位のは礫優勢な貝殻混じり礫岩層からなり、上位の層準になるにつれ礫の割合を減じて貝殻の量が多くなる傾向がある。不整合面の上位約 3 m には厚さ 0.5 から 2 m の貝殻混じり礫岩層が谷壁に沿って追跡されるが、他の粗粒層は側方への追跡が困難であった。

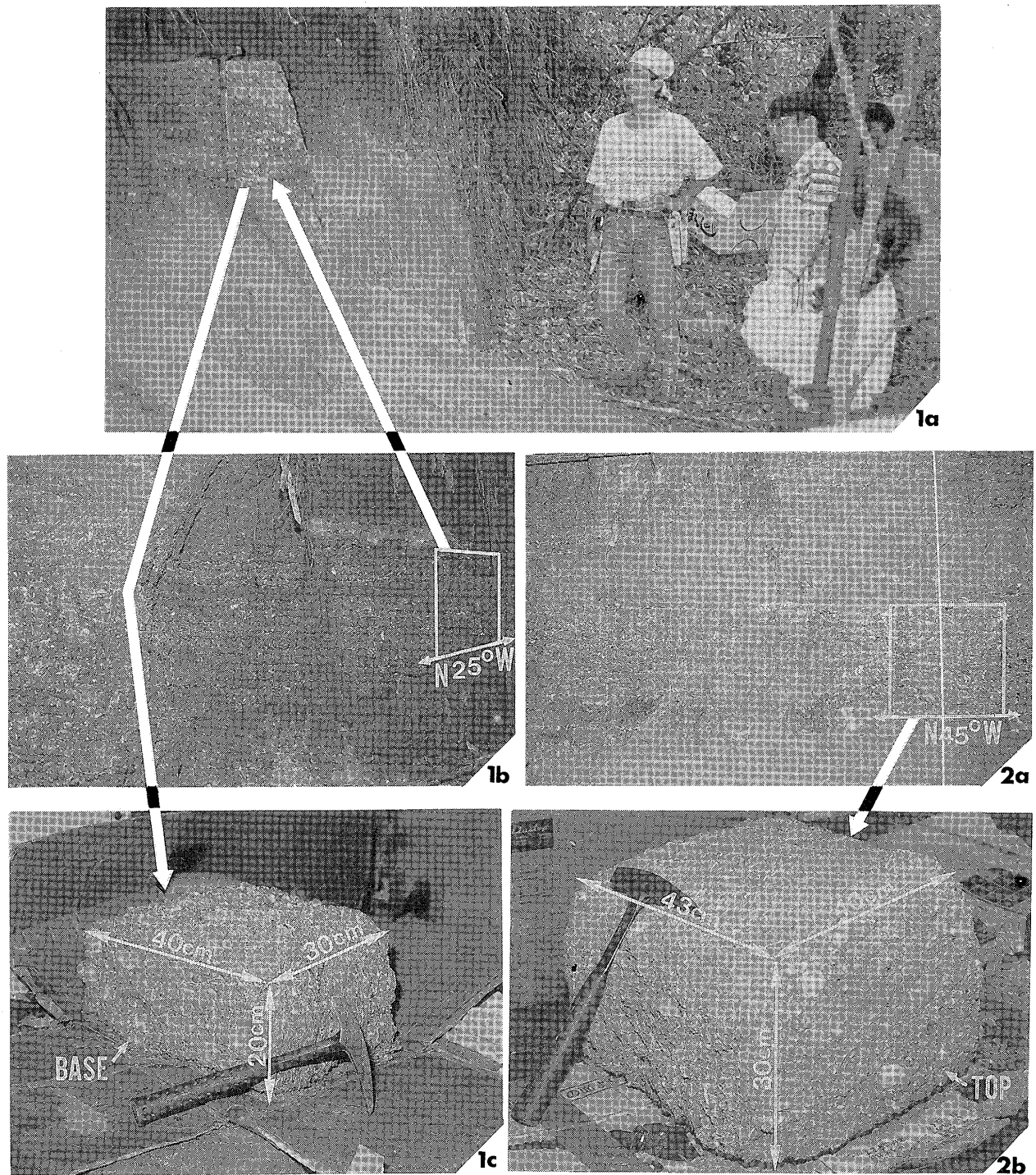


Fig. 3. The blocks A (1a, 1b, 1c) and B (2a, 2b) at outcrop (1a, 1b, 2a ; see Fig. 2) and laboratory (1c and 2b).

これらの粗粒層(以下、貝殻集積層)に含まれる貝は破片が多く、摩滅している。貝殻は非常に密に集積して貝殻片支持である。二枚貝はすべて離弁の状態で産出した。また、ほとんどの種は、カキやイガイのような密集した生態を示さないものからなる。さらに、生物活動を示す生痕や生物擾乱は観察されない。

貝殻集積層の観察は露頭からブロックを採取して行った。ブロックを採取した貝殻集積層の層準を Fig. 1 に、また、その露頭スケッチを Fig. 2 に示した。この貝殻集積層は、散在する細礫を除けば貝殻およびその破片と基質の細粒砂だけからなる。貝殻集積層の厚さは約 30 から 50 cm で側方に約 9 m 追跡され、下位の塊状

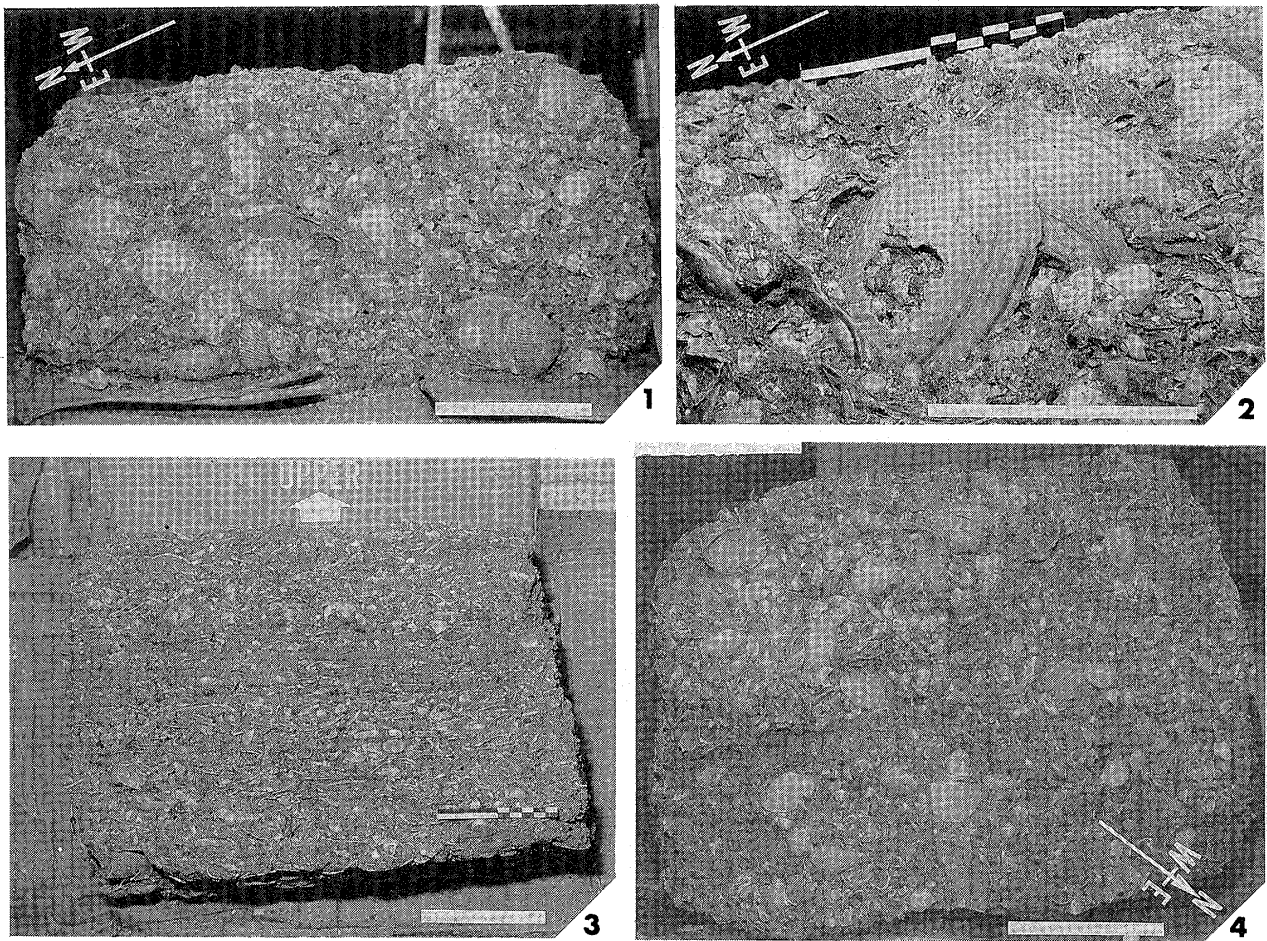


Fig. 4. 1. Basal view of the horizon, about 10 cm above from the base of the block A. Note a distinct imbrication indicating a paleocurrent from northwest to southeast. 2. Basal view of the horizon, about 5 cm above from the base of the block A. Note convex-down position of two isolate valves of *Panopea japonica* Reeve. 3. Lateral view of the block A. Note a thin, sand-rich bed about one third horizon from the top of the bed. This sand bed probably indicates an amalgamated surface within the bed but does not show a longer time span because both the shell beds above and below of this sand bed share the same hummocky cross-stratified bed. 4. Upper most surface of the block B. Scale bar = 10 cm.

細粒砂岩層と明瞭な侵食面で接し、上位にはハンモック状斜交層理(HCS)層が重なる。一般に大日層の砂岩は塊状無層理で、堆積構造の識別が容易でないが、この地点では貝殻とその破片が密集して葉理の一部を形成しており、容易に HCS 層を識別できた。Ishibashi (1989)によれば、大日層の一部は、厚いラグ堆積物を伴うHCS層やスウェール状斜交層理(SCS)層が癒着(amalgamation)しながら繰り返し重なり、静穏時波浪作用限界水深より深く、また暴風時波浪作用限界水深より浅い遷移帯、すなわち内側陸棚(inner shelf)の堆積物である。ブロックを採集した層準の大日層の特徴は、Ishibashi (1989)の遷移帯の堆積物の層相に一致するが、この層準には泥質岩がまったく含まれないことから、静穏時波浪作用限界

水深よりも浅い外浜(shoreface)の堆積物と考えられる。

ブロックサンプリング

露頭におけるブロックの採取位置を Fig. 2 に示した。ブロックは 2 個採取し、それぞれをブロック A、ブロック B と呼ぶ(Figs. 2, 3, 4)。ブロック A の大きさは、高さ(厚さ)30 cm、幅(露頭面)40 cm、奥行 20 cm で(Fig. 3-1c)、ブロック B は高さ 43 cm、幅 40 cm、奥行 30 cm である(Fig. 3-2b)。この露頭では、地層の傾斜がゆるく、また堆積時の水平面を示す確実な面が識別できなかったので傾斜は無視し、露出していた面の方角を測定して定方向サンプルとした。したがって、以下の議論で扱う方位は傾斜の補正を行っていない。ブロッ

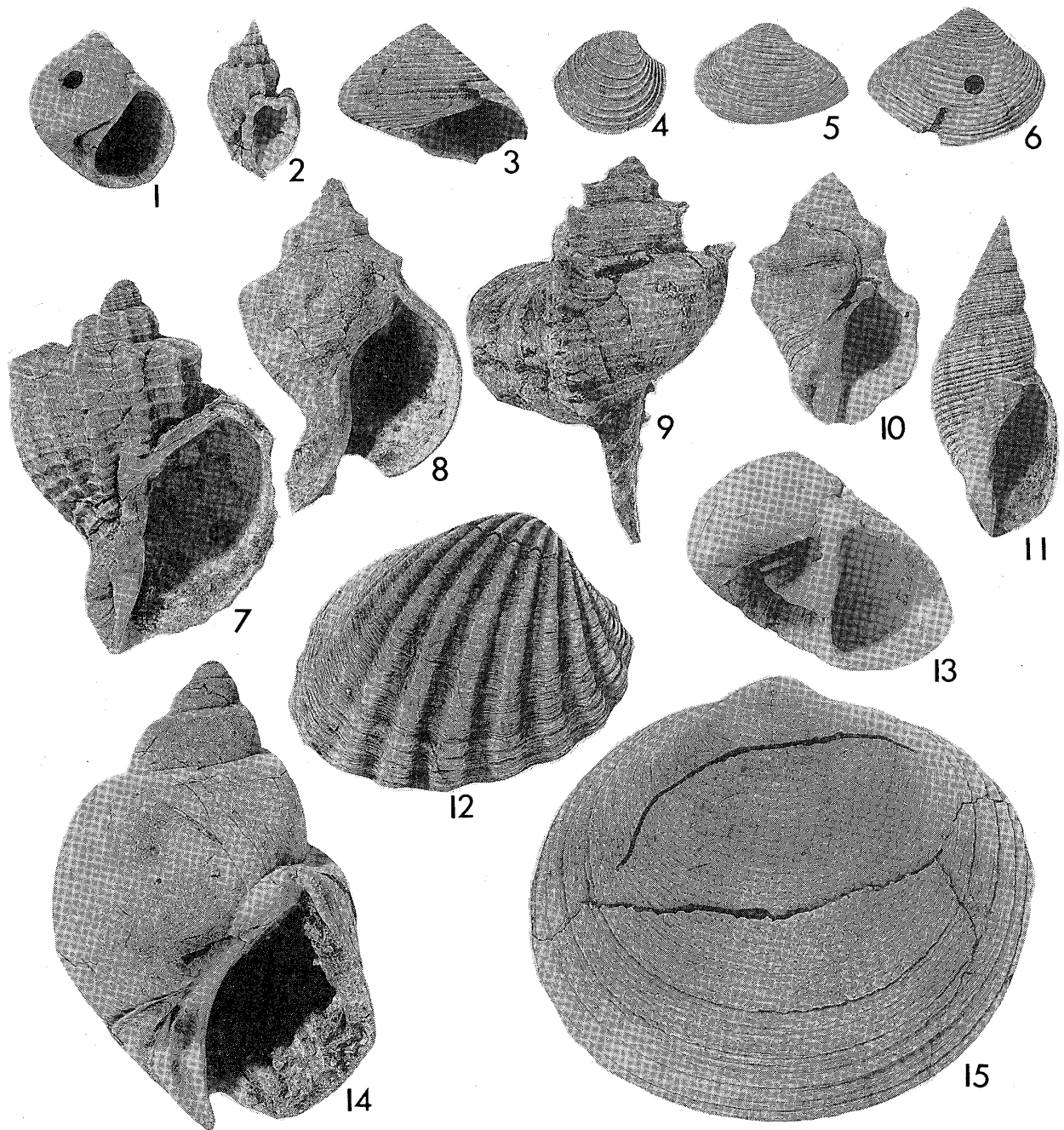


Fig. 5. Characteristic species collected from the block B. Natural size.

1 : *Cryptonatica andoi* (Nomura), 10-20 cm horizon (Fig. 7), NSM PM15494. 2 : *Trigonaphera kurodai* (Makiyama), 10-20 cm horizon, NSM PM15495. 3 : *Suchium mysticum* (Yokoyama), 0-10 cm horizon, NSM PM15496. 4 : *Placamen tiara* (Dillwyn), 30-43 cm horizon, NSM PM15497. 5 : *Solidicorbula erythrodon* (Lamarck), 20-30 cm horizon, NSM PM15498. 6 : *Crasatellites yagurai* Makiyama, 30-43 cm horizon, NSM PM15499. 7 : *Solatia (Habesolatia) nodulifera* (Sowerby), 20-30 cm horizon, NSM PM15500. 8 : *Siphonalia declivis* Yokoyama, 10-20 cm horizon, NSM PM15501. 9 : *Murex* sp., 10-20 cm horizon, NSM PM15502. 10 : *Thais clavigera* (Küster), 0-10 cm horizon, NSM PM15503. 11 : *Cancellaria pristina* (Yokoyama), 10-20 cm horizon, NSM PM15504. 12 : *Venericardia panda* (Yokoyama), 0-10 cm horizon, NSM PM15505. 13 : *Glossaulax hagenoshitensis* (Shuto), 30-40 cm horizon, NSM PM15506. 14 : *Babylonia elata* (Yokoyama), 0-10 cm horizon, NSM PM15507. 15 : *Glycymeris albolineata* (Lischke), 0-10 cm horizon, NSM PM15508. NSM PM=National Science Museum, Paleontology, Mollusca (Hyakunin-cho 3-23-1, Shinzuyuku-ku, Tokyo 169, Japan).

Table 1. Species composition of each horizon of the block B. Asterisks indicate extinct species.

	0-10cm			10-20cm			20-30cm			30-43cm			TOTAL		
	CS	DS		CS	DS		CS	DS		CS	DS		CS	DS	
GASTROPODA															
<i>Suchium mysticum</i> (Yokoyama) *	61	0	38	0	30	0	51	0	180	0					
<i>S. suchiense suchiense</i> (Yokoyama) *	10	19	9	5	21	4	18	3	58	31					
<i>Turritella perterebra</i> Yokoyama *	42	8	44	7	59	15	61	8	206	38					
<i>Natica vitellus</i> (Linnaeus)	1	0	1	0	1	0	0	0	3	0					
<i>Cryptonatica andoi</i> (Nomura)	4	0	2	0	1	0	1	0	8	0					
<i>Glossaulax didyma dainichiensis</i> Majima *	47	0	32	0	27	0	37	0	143	0					
<i>G. hagenoshitensis</i> (Shuto) *	36	18	29	6	20	5	25	13	110	42					
<i>G. reiniana</i> (Dunker)	1	0	7	0	0	0	0	0	8	0					
<i>Sinum javanicum</i> (Griffith et Pidgeon)	1	0	0	0	1	0	1	0	3	0					
<i>Cymatium</i> sp.	1	0	0	0	1	0	0	0	2	0					
<i>Murex</i> sp.	3	3	1	3	4	4	0	4	8	14					
<i>Rapana thomasiana</i> Crosse	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0					
<i>Thais clavigera</i> (Küster)	4	0	3	0	4	0	0	0	11	0					
<i>Zeuxis caelatus dainitiensis</i> (Makiyama) *	43	0	29	0	31	0	56	0	159	0					
<i>Reticunassa congrua</i> (Yokoyama) *	16	0	10	0	9	0	15	0	50	0					
<i>Babylonia elata</i> (Yokoyama) *	13	4	5	0	11	1	7	1	36	6					
<i>Siphonalia declivis</i> Yokoyama *	91	11	87	9	84	10	126	7	388	37					
<i>Olivella</i> sp.	9	0	5	0	6	0	13	0	33	0					
<i>Amalda albocallosa</i> (Lischke)	35	2	29	3	23	3	42	2	129	10					
<i>Cancellaria pristina</i> (Yokoyama) *	18	2	21	2	18	2	20	6	77	12					
<i>Solatia</i> (<i>Habesolatia</i>) <i>nodulifera</i> (Sowerby)	6	1	9	3	7	1	3	0	25	5					
<i>Trigonaphera kurodai</i> (Makiyama) *	11	0	6	0	1	0	15	1	33	1					
<i>Inquisitor</i> spp.	12	0	14	0	13	0	23	1	62	1					
<i>Terebra</i> spp.	11	0	5	0	4	0	8	0	28	0					
<i>Gyroscala</i> sp.	1	0	2	0	2	0	3	0	8	0					
TOTAL	477	68	389	38	378	45	525	46	1769	197					
BIVALVIA															
	CS	CD	DS	CS	CD	DS	CS	CD	DS	CS	CD	DS	CS	CD	DS
<i>Sacella confusa</i> (Hanley)	1	0	0	3	0	0	2	0	1	5	0	0	11	0	1
<i>Scapharca castellata</i> (Yokoyama) *	42	29	27	20	13	9	34	27	28	35	20	25	131	89	89
<i>Glycymeris albolineata</i> (Lischke)	1	1	0	2	0	1	0	0	4	2	2	0	5	3	5
<i>Amusiopecten praesignis</i> (Yokoyama) *	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	2
<i>Venericardia panda</i> (Yokoyama) *	2	1	0	2	1	1	1	1	0	1	1	0	6	4	1
<i>Crasatellites yagurai</i> Makiyama *	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
<i>Paphia</i> sp.	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5
<i>Callista chinensis</i> (Holten)	2	2	2	1	0	4	1	0	5	10	5	6	14	7	17
<i>Dosinorbis bilunulatus</i> (Gray)	1	1	0	7	3	0	3	2	0	6	3	0	17	9	0
<i>D. japonicus</i> (Reeve)	56	37	87	59	41	58	39	28	55	28	19	64	182	125	264
<i>Placamen tiara</i> (Dillwyn)	12	4	2	10	2	0	7	1	0	29	13	0	58	20	2
<i>Mactra</i> sp.	1	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	4	1	0
<i>Lutraria</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
<i>Macoma totomiensis</i> Makiyama *	23	5	20	23	17	14	14	9	14	22	7	29	82	38	77
<i>Solen</i> sp.	1	0	3	1	0	4	4	0	5	0	0	4	6	0	16
<i>Mya</i> sp.	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	4
<i>Panopea japonica</i> Reeve	0	0	34	0	0	18	0	0	17	0	0	37	0	0	106
<i>Solidicorbula erythrodon</i> (Lamarek)	1	0	0	2	0	2	6	2	1	9	3	0	18	5	3
TOTAL	145	82	180	132	78	114	112	70	133	148	73	167	537	303	594

CS = Number of shells preserved without missing part

DS = Number of shells damaged but identifiable

CD = Among CS, number of shells (Bivalvia) preserved in convex-down position

ク A の露出面の方位は N25°W, 垂直で (Fig. 3-1b),
 ブロック B は N45°W, 垂直であった (Fig. 3-2a). 採取
 したブロックは研究室に持ち帰り, 机の表面に対して層
 理面が垂直になるように据え付け, 処理を行った (Figs.

3-1c, 3-2b).

貝殻の測定

ブロックは下底面から 10 cm ごとに区分したが, ブ
 ロック B の最上部の区画だけ 13 cm とした. ブロック

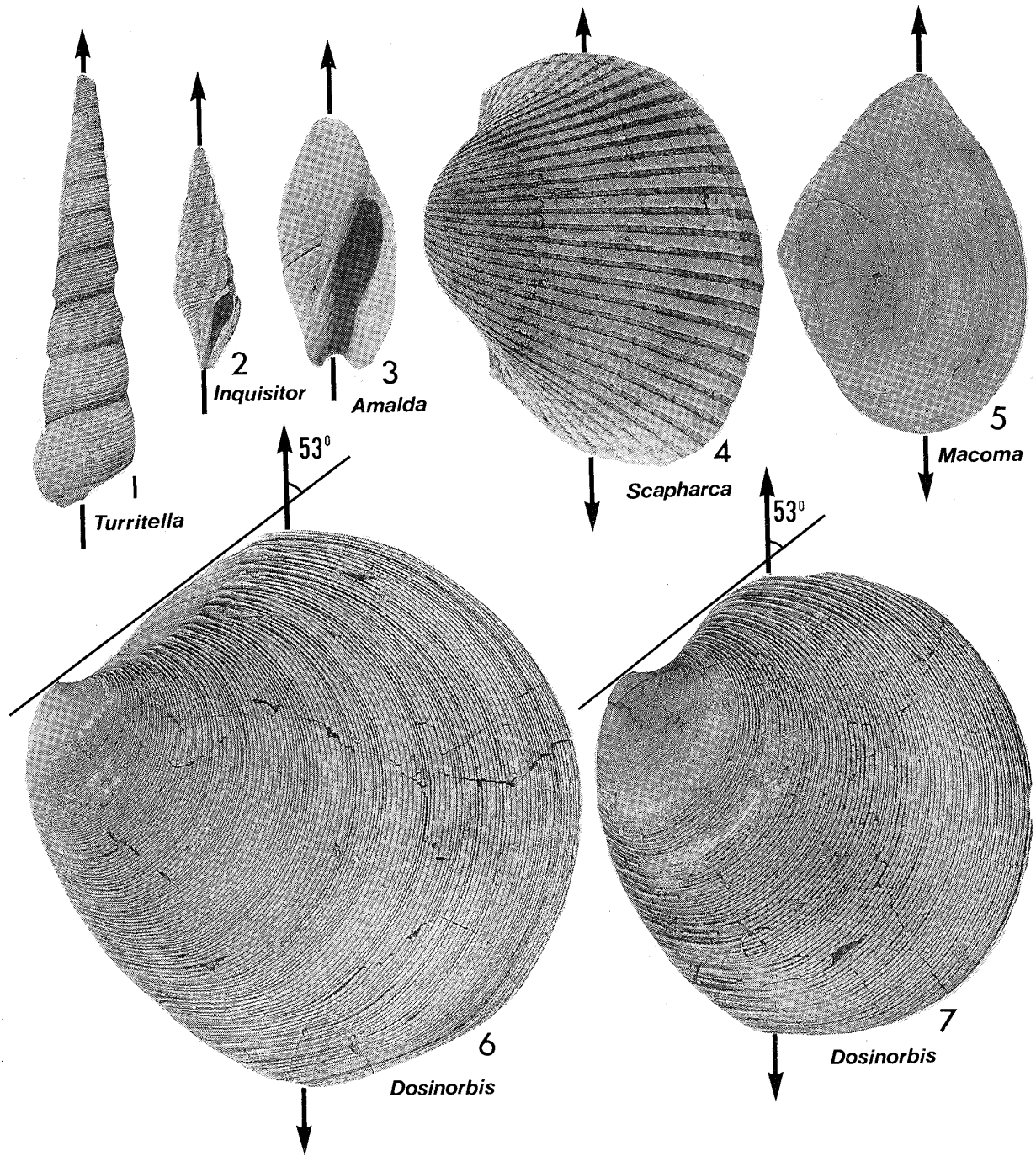


Fig. 6. Shells measured in orientation (rose diagrams in Fig. 7) within block B. Natural size. Gastropods (1-3) measured as unidirection (apex direction) and bivalves (4-7) measured as lineation (long axis). 1: *Turritella perterebra* Yokoyama, 20-30 m horizon, NSM PM15509. 2: *Inquisitor* sp., 30-43 m horizon, NSM PM15510. 3: *Amalda albocallosa* (Lischke), 30-43 m horizon, NSM PM15511. 4: *Scapharca castellata* (Yokoyama), 10-20 cm horizon, NSM PM15512. 5: *Macoma totomiensis* Makiyama, 10-20 cm horizon, NSM PM15513. 6: *Dosinorbis bilunulatus* (Gray), 10-20 cm horizon, NSM PM15514. 7: *Dosinorbis japonicus* (Reeve), 10-20 cm horizon, NSM PM15515.

は下底面から崩してゆき、種の同定 (Table 1, Fig. 5), 殻の方位 (Figs. 6, 7), 殻の大きさ (最大殻長) (Fig. 7), 二枚貝の convex-up と convex-down を記録した (Fig.

7). 殻の方位と大きさ, 二枚貝の convex-up と convex-down については, ほぼ完全な標本についてのみ記録した (Table 1). 殻の方位は層理面 (水平面) に投影した状

態のものである。一部の貝殻には覆瓦構造が見られ (Fig. 4-1), 殻の方位軸(長軸)は必ずしも層理面に平行ではないが, 多くの殻はその方位軸をほぼ層理面に平行にして堆積している (Fig. 4-3).

結 果

ブロック A は, 予察として一部の巻貝と二枚貝の方位, および二枚貝の convex-up と convex-down を断片的に測定・記録した。この結果を検討し, 解析法および測定対象を見直した後, ブロック B の解析を行った。したがって, 以下の議論ではブロック B の結果についてのみ考察する。なお, ブロック A の下底面から厚さにして 3 分の 2 ほどの層準に貝殻の密集度の低い部分が層理に平行に観察された (Figs. 2, 3-1b, 4-3)。この面は後述するように癒着面を示している可能性が高い。

種構成

ブロック B を処理した結果, 同定できた標本は巻貝 1966 個体, 25 種, 二枚貝 1131 個体, 18 種である (Table 1)。これ以外にも殻の保存が不完全で属名の同定が不可能な個体や未同定標本があるので, 実際の標本数と種数はこの数を上回る。

波部 (1977), 肥後 (1973), 奥谷 (1986) などを参考にして絶滅種 (Table 1 に * 印で表示) を除く現生種の深度分布と生息底質を調べた。その結果, 大部分の種がほぼ水深 10 m から 20 m で分布深度が重複し, 主に砂底から砂泥底に生息する種からなる。この深度は堆積相から推定した外浜の深度とほぼ一致する。しかし, *Cymatium* sp. や *Thais clavigera* (Küster) (Fig. 5-10) のように岩礁に生息する種も混在している。したがって, この貝殻集積層には浅海の砂底, 砂泥底, 岩礁に生息する種が混在して産する。また, 特に内湾度の高い種が産出しないので, 外洋に面した浅海に生息する種からなるといえる。

貝殻の方位

産出した貝殻のうち, 個体数が多い種類の殻の方位を測定した。測定した巻貝は, 細長い殻を有する *Turritella perterebra* Yokoyama (Fig. 6-1), *Amalda albocallosa* (Lischke) (Fig. 6-3), *Inquisitor* sp. (Fig. 6-2) および *Terebra* spp. で, それぞれの殻頂の方位 (Fig. 6 の矢印) を測定した。二枚貝は *Scapharca castellata* (Yokoyama), *Macoma totomiensis* Makiyama, *Dosinorbis bilunulatus* (Gray), *D. japonius* (Reeve) の 4 種の殻の長軸 (Fig. 6) を測定した。二枚貝の方位は殻の長軸の線方向 (lineation) であるのに対して, 巻貝は殻頂方向の定方向 (unidirection) であることに注意されたい。

計測結果は 10 cm (最上部のみ 13 cm) ごとに層準を区分し, ローゼダイアグラムにまとめた (Fig. 7)。巻貝の計測結果では, 下位から 20 cm 以上の層準で南南東から南東にかけての明瞭な成分, および北西方向の弱い成分が識別できる。しかし, その下位の層準では明瞭なピークは見られないが, 南東, 北西, およびそれに直交する北東と南西の成分が卓越する。*Amalda albocallosa* は北東および南西の成分が顕著である。

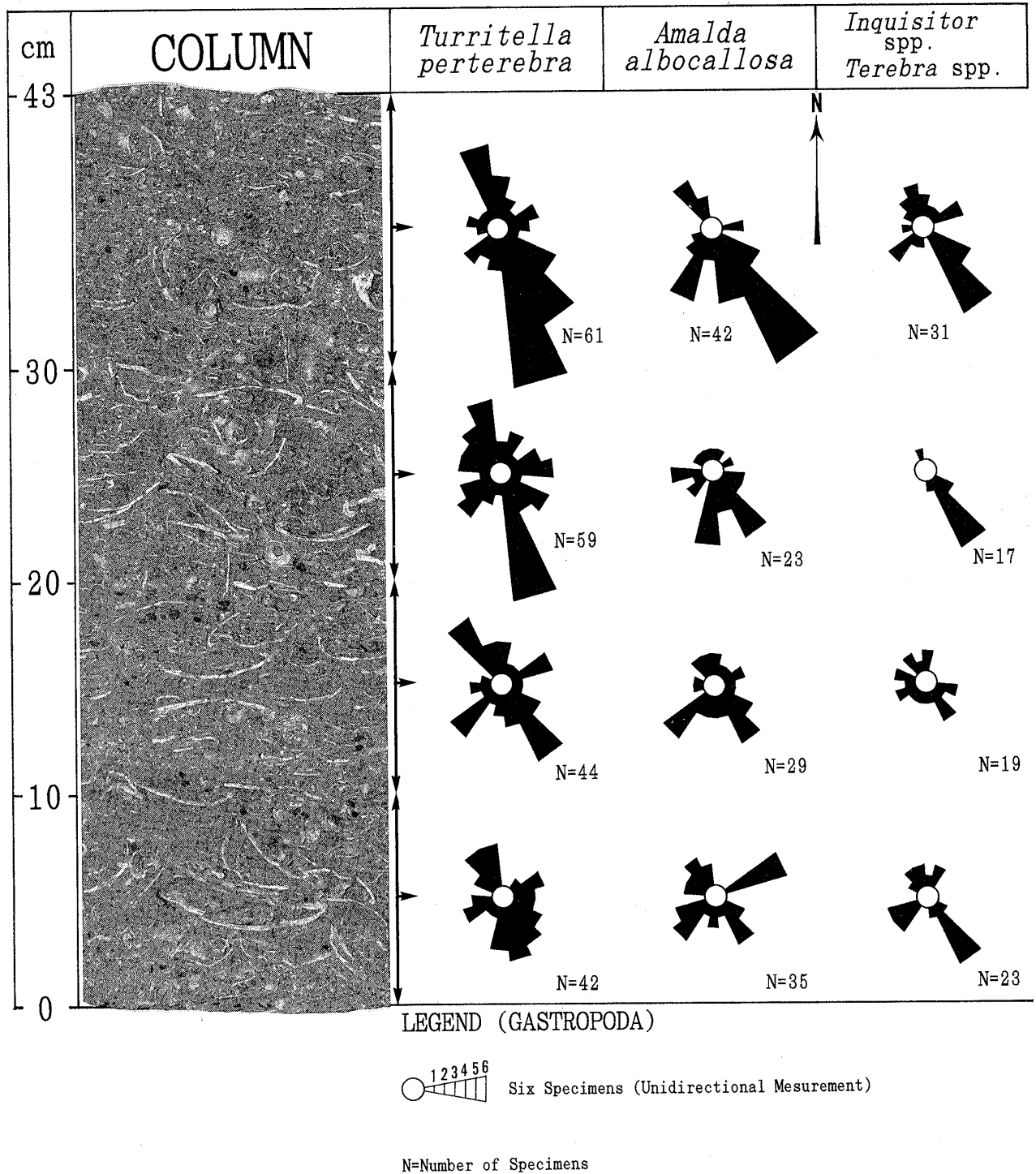
二枚貝では, 最下部から 10 cm の層準で北東-南西 (*Macoma totomiensis*), 東-西 (*Dosinorbis* spp.), およびその中間 (*Scapharca castellata*) の成分からなるのに対し, 20-43 cm の層準では北西-南東の成分が卓越し (一部で南北性の *Dosinorbis* spp. が存在する), 両層準間で配列傾向の著しい異なりを示す。10-20 cm の層準では北西-南東の成分 (*Scapharca castellata* と *Macoma totomiensis*) と東北東-西南西の成分 (*Dosinorbis* spp.) が卓越する。Fig. 7 の二枚貝のローゼダイアグラムでは convex-down の状態で産出した個体を黒で, convex-up を白で表現したが, 両者の間に同種・同層準で明瞭な配列傾向の異なりは認められない。

以上の計測結果をまとめると, 下位より 20 cm 以上の層準ではおおむね巻貝・二枚貝とも, 北北西-南南東から北西-南東にその長軸を平行に配列し, 巻貝の殻頂は南南東から南東を向く傾向がある。しかし, 20 cm 以下の層準では巻貝の配列に定まった傾向を認められなかったが, 北西-南東にその長軸を配列する種がある。二枚貝の配列は 0-10 cm の層準で北東-南西から東西の成分が卓越し, 同層準の *Amalda* を除く巻貝や他の層準の貝殻の配列と著しい対称をなす。

下部の層準の二枚貝には明瞭な覆瓦構造が観察された。Fig. 4-1 はブロック A の下部から約 10 cm の層準における例で, 北西からの流れを明瞭に示している (写真は貝殻集積層を下から見たものである。したがって, 覆瓦構造も下から観察した状態を示す。図中に示した方位で北に対する東と西の向きが逆になっていることに注意)。

二枚貝の convex-down と convex-up

ほぼ完全な二枚貝個体 (Table 1 の CS) の convex-down の個体数を数えた (Table 1 の CD)。各層準における convex-down の状態で産出した個体の割合は下位から 57% (0-10 cm), 59% (10-20 cm), 63% (20-30 cm), 49% (30-43 cm) である。下位 3 層準では半分以上の個体が convex-down の状態で産出するのに対し, 最上位の層準ではほぼ半分の個体が convex-down の状態で産する。



殻の大きさ

ほぼ完全な状態に保存された殻 (Table 1 の CS) の最大長軸を測定し、2 cm 以下、2 cm から 4 cm、4 cm 以上の 3 つの大きさに区分し、各層準ごとにその比率を計算した (Fig. 7)。その結果、巻貝では殻の大きさの各層準ごとの変化はほとんど見られない。しかし、二枚貝

では最大長軸 2 cm 以下の個体の比率が下位から上位になるにつれ約 15% から 35% に増えているのに対し、4 cm 以上の個体の比率は、40% 強からほぼ 20% へ減少する。したがって、少なくとも二枚貝では下位よりも上位の層準で小型の殻の割合が増え、大型の殻の産出の割合が減る傾向がある。

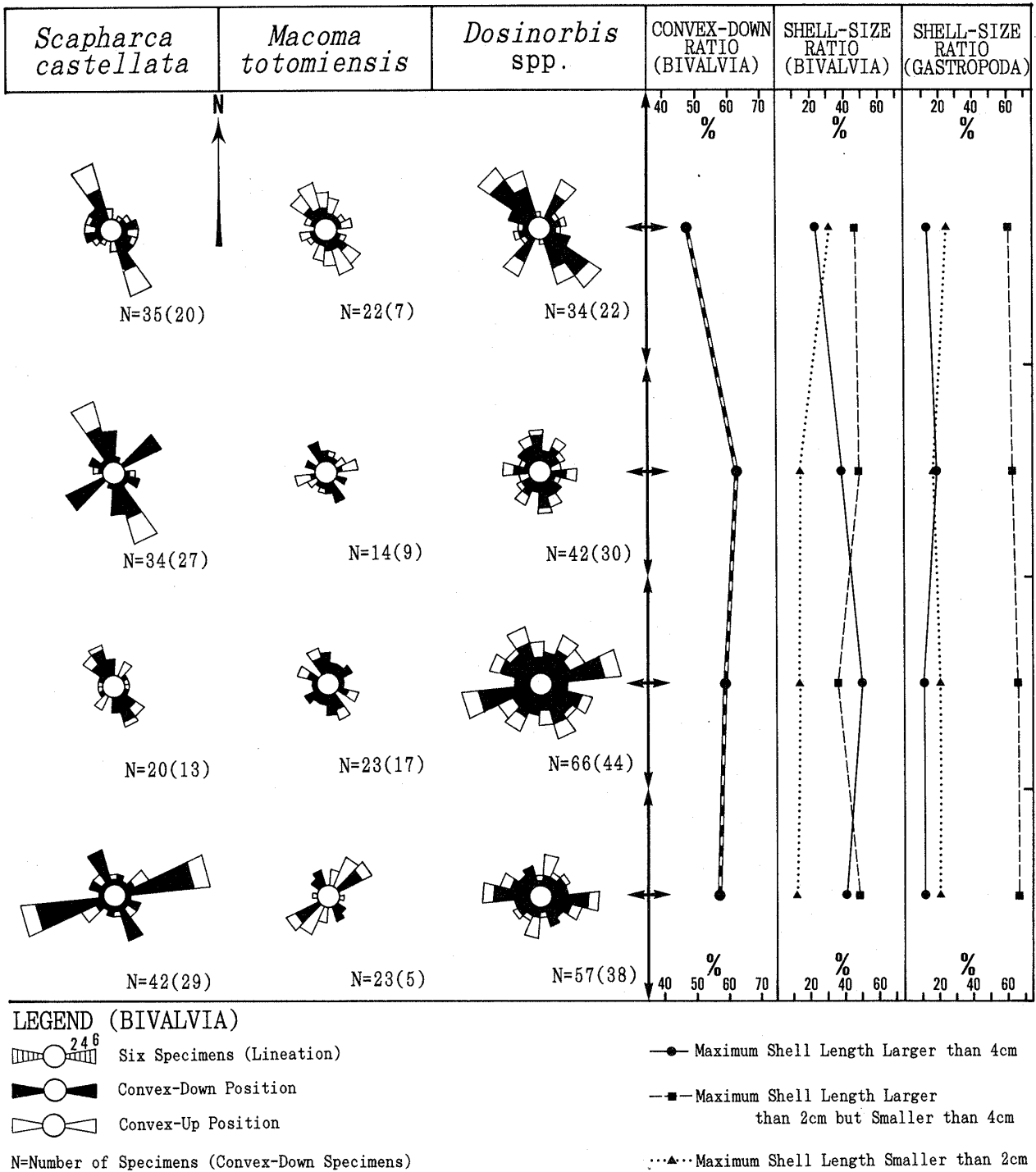


Fig. 7. Column, shell orientation patterns, convex-down ratio of bivalves, and shell-size ratio, of four horizons (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-43 cm from the bed base) of the block B. Note gastropods measured as uni-direction and bivalves measured as lineation in the shell orientation patterns (Fig. 6). These orientation patterns are explainable in the depositional condition that a high-speed and high-density current that flowed from north-west to southeast accumulated instantaneously all of those shells.

考 察

解析した貝殻集積層は以下に議論する理由から、北西からの著しく強い、恐らく秒速 1 m を超えるような定方向の密度流によって、この貝殻集積層全体をほとんど瞬時に堆積したと考えられる。この結論を導く前に、流水下における貝殻の配列に関する従来の知識と本研究の観察結果を批判的に比較検討し、その上で上記の結論を導きだしたい。これまでの堆積物上の貝殻の流水による配列の研究結果は、本研究で扱う貝殻集積層の形成条件に比較すると、流速が非常に低く、また堆積様式が異なるため適用できない。以下の議論で引用した貝殻配列の実験では流速が最大 45.9 cm/s(底質から 3 cm 上: Kelling & Williams, 1967), 20 cm/s(測定に関する詳細不明: Nagle, 1967), 50 cm/s(実験水槽からの水の流出量で計算: Brenchley & Newall, 1970)で、新たな堆積物は付加されず、貝殻が相互に干渉しないような条件下で行われた。

従来の貝殻配列の研究との比較

まず、上位の層準に見られる巻貝と二枚貝の配列方向について考察する。

上位の層準(Fig. 7 の 20-43 cm)の巻貝と二枚貝は、いずれも北西-南東あるいは北北西-南南東方向にその長軸を配列する傾向がある(以下では、これらを北西-南東方向と総称する)。これまでの流水下での貝殻配列の研究結果では、この配列は北東ないし南西に移動する振動流(すなわち、北西-南東方向の峰をもった波)の影響下で形成されたとするのが妥当なように思われる。すなわち、振動流下では円錐形の細長い巻貝と、明確な長軸をもつ(正四角形や正三角形ではない)離弁の二枚貝はその長軸を波の振動方向に直角に配列する傾向があるからである(Nagle, 1967)。しかし、この解釈には次の難点がある。

(1)振動流下で波の峰に平行に配列した円錐形の巻貝では、その殻頂方向の向きに偏りは生じないとされている(つまり、東を向くものが 50 個体あれば、西を向く個体もほぼ同数あるということ: Nagle, 1967; Müller, 1979)。しかし、Fig. 7 に示した巻貝の殻頂は南東方向への明瞭な配列の偏りがみられる。

(2)この貝殻集積層は貝殻が著しく密集し貝殻片支持である。このような密集した貝殻が浅海で振動流の影響を受けると、二枚貝は edgewise (層理面に対して直立した配列: Kidwell *et al.*, 1986)の産状を示すことが多い(Futterer, 1982; Allen, 1990)。ところが実際には二枚貝の大部分は層理面にほぼ平行に配列している(Fig.

4-3)。

(3)貝殻の配列から推定される波の峰の方位は北西-南東方向である。浅海域では波の岸に対する反射の影響で波の峰は海岸線にほぼ平行になることが知られ、ウェーブリップルの峰の方位は海岸線の方位の指標とされている(Leckie & Krystinik, 1989; Nummedal, 1991)。掛川層群堆積時の海岸線の方向は Ishibashi (1989)によればほぼ北北東-南南西とされている。したがって、貝殻の配列が波浪によって形成されたとすると Ishibashi (1989)の推定した海岸線の方位と著しく斜交することになる。

次に上記の貝殻の配列が定方向流下で形成された可能性を貝殻の配列に関する従来の研究結果から考察してみる。定方向流下では、円錐形の細長い巻貝(*Turritella* など)は、底質上での殻頂を中心とした回転の結果、その長軸を流れに平行に配列し、その殻頂を上流に向ける傾向があり、多くの研究によって支持されている(Nagle, 1967, fig. 4; Brenchley & Newall, 1970, fig. 5K; Müller, 1979, fig. 25b; 北村, 1990, fig. 5)。一方、Brenchley & Newall (1970)は、定方向流下の離弁の二枚貝は、その長軸を流れの方向に直角に配列し、かつ殻頂を上流側に向けるという実験結果を示した。また、Kelling & Williams (1967)と Nagle (1967)は、砂の底質上で *Mytilus* などの狭角の殻頂をもつ三角形の貝殻では、その長軸を流れに平行に配列し、殻頂を上流側に向けるという実験結果を示した。なお、Brenchley & Newall (1970)の実験では *Mytilus* の離弁殻は、その長軸を流れの方向にほぼ直角に配列するものの、殻頂をやや上流に向ける傾向があると示した。したがって、定方向流下において、細長い円錐形の巻貝はその殻頂を上流側に向け、少なくとも鈍角の殻頂を有する亜四角形の離弁二枚貝はその長軸を流れに直角に配列することになる。

これらのデータを上位の層準に見られる貝殻の配列傾向と比較すると、この解釈には以下の難点がある。

(1)巻貝類が示す配列は南東からの定方向流を強く示唆しているようにみえるが、離弁の二枚貝の長軸は推定される流れにほぼ平行に配列しており、これまでの実験結果と矛盾する。

(2)巻貝の殻頂方向の卓越する向きから推定される定方向流は南東、すなわち Ishibashi (1989)の推定した掛川層群堆積時の海況から判断すると沖合から岸に向かった流れで、このような定方向流を浅海域に持続的に仮定することは合理的でない。

(3)*Amalda* のような大きな殻口を有する腹側が平坦な紡錐型の巻貝では、殻頂を中心とした回転による殻の配

列は起きにくいように考えられる。Kelling & Williams (1967)は、殻口の大きな紡錐型の巻貝(*Nucella lapillus*)が、定方向流下で殻頂を下流側に向ける傾向があるという実験結果を示した。したがって、*Amalda*の殻頂の卓越する向きが必ずしも流れの上流側を示唆しているとはいえない。

(4)定方向流下の二枚貝は convex-up の状態が最も安定していることが知られている(Brenchley & Newall, 1970)。ところがこの貝殻集積層から産出する二枚貝には特に convex-up の状態が多いという傾向は認められない(Fig. 7)。

次に下位の層準、特に 0 から 10 cm の層準に見られる貝殻の配列について考察する。

この層準の巻貝の長軸は *Amalda* を除いてほぼ北西-南東を向き、*Inquisitor* と *Terebra* の殻頂の向きが卓越する方向は南東のようにみえる。一方、二枚貝はその長軸を東-西(*Dosinorbis*)から北東-南西(*Macoma*)方向に配列している。これらの配列は、前に述べた貝殻配列に関する従来の成果によれば、南東方向からの定方向流を仮定するのが合理的である。しかし、この解釈には、(1)南東(沖合)からの定方向流を仮定することが合理的だとは考えられないこと、(2)下位層準にみられる覆瓦構造が示す古流向が北西から南東への流れを示し(Fig. 4. 1)、貝殻配列から推定した流向とは逆になる、などの重大な難点がある。

貝殻集積層の堆積モデル

この貝殻集積層内の貝殻配列は、北西あるいは北北西からの、貝殻を多量に含んだ秒速 1 m を超える密度流のもとで、極めて急速に堆積したと仮定すれば合理的に説明できる。また、上部と下部の層準に見られる貝殻配列の異なりは密度流の上部と下部の堆積様式の異なりを反映し、10-20 cm の層準はそれらの中間的(あるいは遷移的)な堆積状態を示すと解釈できる。

粗粒物質からなる密度流堆積物の最下部には上流側に傾斜した覆瓦構造がしばしば観察される(Cheel & Leckie, 1992)。密度流の最下部では密度が非常に高く、剪断力が強いことから、粒子は相互に干渉しながら底質を引きずられたり(滑動)転がったり(転動)して運ばれる。覆瓦構造は、このような移動様式をした平板状の物質が、流れが減速する際形成した構造である。Fig. 4-3 では、覆瓦構造をなす二枚貝の長軸は覆瓦する方向と直交する傾向が顕著であるようにみえる。すなわち、この貝殻集積層の堆積様式では、殻の長軸を流れに直角にした配列が最も安定した覆瓦姿勢であったと推察される。Walker (1984b)は礫の a 軸(長軸)が流れに直交した配

列をなす覆瓦構造は、転動で礫が移動した結果であるとした。

巻貝のうち、*Amalda* は広い殻口を有し、殻口側(腹側)は平坦で、その反対側(背側)は丸くなり、垂四角形の二枚貝の片殻と類似した形態をもつ。下位層準の *Amalda* に北東(0 から 10 cm の層準)あるいは南西(10 から 20 cm の層準)の成分が卓越しているのは、*Amalda* が二枚貝と類似した殻形を有するため、この貝の一部が二枚貝と同様な堆積姿勢を示したためであると考えられる。その他の巻貝類(*Turritella*, *Inquisitor*, *Terebra*)の殻頂の向きは北西と南東の両成分およびそれに直交する成分がわずかに認められる。このうち、基本的に顕著なのは南東の成分である(特に 0 から 10 cm の層準)。一般に両端で質量の異なる長い形態をした物体は、その長軸を流れに平行にし、質量の大きい端を流れの上流に向ける傾向がある(Müller, 1979)。すでに述べたように、従来の研究で示された *Turritella* のような細長い円錐形の巻貝が質量の小さい殻頂側を上流に向けるのは、殻頂を中心として殻が底質上を回転する傾向が強いからである。しかし、非常に強い流れの下で、引き摺られた状態のまま急速に堆積・埋没した場合は、*Turritella* のような細長い円錐形の巻貝でも質量の大きい殻口側を上流に向けた配列が保存されることがある(Reineck & Singh, 1980, p. 148)。したがって、この層準の巻貝の配列は、それが北西からの強い定方向流下で堆積したという解釈と矛盾しない。また、これらの巻貝に明瞭な配列傾向が見られないのは高密度のもとで貝殻が相互に干渉したためであると推定される。

上位の層準(下位より 20 cm 以上)の貝殻の移動様式は、粒子の流体中での密度が下位より低く、また、速度が非常に速く、すべての貝殻が移動状態にあったため、貝殻は流体中に半ば懸濁した状態で移動していたと考えられる。このような密度流上部の物体はその長軸を流れに平行に配列し、またその質量の大きい方の端を上流側に向けていたと推定される。計測した巻貝類は殻頂よりも殻口側で質量が大きいことから、殻口側を上流に向けて流されたことが予想され、また二枚貝はその長軸を流れに平行にして流されたであろう。Brenchley & Newall (1970, fig. 5)は、弱い定方向流下でも *Cultellus* のように細長く軽い殻を有するものは底質を引き摺られずに流れに浮いてしまうため、その長軸を流れに平行に配列することを示した。このような半懸濁状態のもとでは、二枚貝の convex-up も convex-down もランダムであったことが予想される。この流れが急速に減速し、極めて短時間に堆積したとすると、上に述べた移動時の貝殻配列

が、ほぼ完全に保存・埋積されることがある(Reineck & Singh, 1980, p. 148; Walker, 1984b, p. 176)。

したがって、上部と下部の層準に見られる貝殻配列の異なりは密度流の上部と下部の貝殻の移動時の配列様式の異なりを反映したものであり、10-20 cm の層準はそれらの中間的(あるいは遷移的)な配列様式を示していると解釈できる。さらに、このような堆積機構で堆積した粗粒堆積物には級化がほとんど認められない例が知られ(Cheel & Leckie, 1992, fig. 6)、本層の巻貝の産状と調和的である(Fig. 7)。ただし、この貝殻集積層の二枚貝類は弱い級化現象を示す(Fig. 7)。

なお、ブロック A 付近に見られる薄い砂層の挟在(Fig. 2)は、本貝殻集積層の一部が癒着していることを示唆している。しかし、この癒着は、上部に同一のHCS層を共有することから、同一イベント内の、時間差はほとんどないが、異なった時間(瞬間)に起きた密度流によって形成されたと推定される。また、Fig. 7の貝殻配列から判断して、この癒着はブロックBには及んでいないと推察される。

以上述べたように、この貝殻集積層内の貝殻の配列は北西から南東に流れる貝殻を多量に含んだ密度流が急速に減速し、貝殻を堆積したと解釈すると合理的に説明できる。

では、この貝殻集積層を堆積した陸側(北西)から海側(南東)に流れる強い流れは、何の営力によってもたらされたのであろうか? すでに述べたように、この貝殻集積層は外浜の堆積物と推定される。外浜で想定できる強い流れには次のケースが考えられる。

(1) ストームピーク時における引き波と地衡流(geostrophic flow)との複合流(combined flow)。ストーム堆積物中に見られる海岸線に直交した古流向の多くは、ストームピーク時の波の片方向成分、特に浅海域では海岸から沖に流れる地衡流と引き波の成分が複合した流れによって、ほとんど瞬間的に形成されるという考えがある(Duke, 1990; Duke *et al.* 1991)。地衡流は高潮をもたらすようなストーム時に発生する底層流で、コリオリの力によって海岸線から沖に向かって北半球では右向きに流れ、結果的には沖合で海岸線に平行な流れになる。ただし、この流れは時間的に平均化されたもので、この流れと波の成分が複合した流れは複雑な楕円を描くように進む(Swift *et al.*, 1983)。この流れのうち、瞬間的に最も強いのは引き波と地衡流が複合した沖に向かう成分である。こうした流れがHCS層を形成するには、流れの中核(core current)部で最低でも秒速1 m以上の速さが必要である(Duke *et al.*, 1991)。この貝殻集積層

はHCS層の下部にあるため、より強い流れのもとで、すなわちストームピークにより近い状態で形成されたに違いなく、この貝殻集積層を形成した流れの速さが秒速1 mを大幅に超えていたと仮定しても不合理ではない。

(2) 地史的ストーム(major storm)に伴う、乱泥流(turbidity current)。地層に保存されるストーム堆積物は数千年に一度のイベントと推定され(Walker, 1984a)、そのシーケンス中には乱泥流の存在を示唆するバウマシーケンス(Bouma sequence)が頻りに観察される。したがって、これらの地史的ストームは非常に大規模で、我々がまだ現在のストーム時の海洋で観測していないような乱泥流を引き起こしたと考えられている(Walker, 1984a)。さらに、これまで記録されたストーム堆積物中の多くの古流向は海岸線にほぼ直交した方向を示し、重力方向に流れる乱泥流の存在を強く支持する(Leckie & Krystinik, 1989)。乱泥流は一般に秒速10 mを超えるような著しく速い速度(Walker, 1984b)で移動することが知られており、上記の貝殻配列を形成した可能性は十分にある。

(3) 津波。Dott & Bougeois (1982)は、HCS層を形成する要因として津波の可能性を指摘した。駿河トラフを南東部にひかえた前弧海盆堆積物である掛川層群のテクトニックセッティングからみて、その堆積時に大規模な津波が起ったとしても不思議ではない。

この3つの要因の内、(1)の引き波と地衡流の瞬間的な複合流が本貝殻集積層を形成したと考える。ストーム時の波浪は海底面上に著しく強い剪断応力を与えることが知られ(Duke, 1990)、密度流を形成しやすい条件にあったと考えられる。また、これまで議論したように、本貝殻集積層は密度流が極めて急速に減速したと考えるとその貝殻配列が合理的に説明できる。引き波と地衡流が形成する複合流は引き波が主成分であり(Duke, 1990)、引き波は次の寄せ波によって急速に減速することから、密度流からの急激な堆積を説明しやすい。(2)のストームに伴う乱泥流は、外浜がプロキシマルな堆積場であると考えられ、外浜での乱泥流の急速な減速は考えにくい。さらにストームに伴う乱泥流の発生を海洋学的見地から強く否定する見解もある(Duke, 1990; Duke *et al.*, 1991)。(3)の津波は深く陸域に進入することが考えられ、その堆積物中には多くの陸原物質(植物片など)が含まれるはずである。しかし、少なくとも本貝殻集積層中には、そのような証拠はない。

ま と め

(1) 掛川層群大日層の外浜堆積物と推定される層準に挟

在し、HCS 層に整合に覆われる貝殻集積層のブロックサンプリングを行い、貝殻の配列を調べた。

(2)貝殻の配列を計測した結果、貝殻には配列傾向が存在し、また貝殻集積層の上部と下部では、配列傾向が異なることがわかった。

(3)流水下における貝殻配列の従来の研究結果と比較したが、これらを元に解釈すると多くの矛盾が生じることから、従来行われてきた実験や観察とは異なった流速や堆積様式を仮定する必要があることがわかった。

(4)この貝殻集積層の貝殻の配列は、ほぼ北西から南東に流れる、秒速 1 m を超えるような貝殻を多量に含んだ密度流が極めて短時間に堆積したと仮定すると合理的に説明ができる。

(5)貝殻集積層を形成した密度流は、ストームピーク時における引き波と地衡流との複合流が引き起こしたと考えられる。

謝辞 本研究をまとめるにあたり、池谷仙之教授(静岡大学)、増田富士雄助教授(大阪大学)、石橋正敏氏(日鉱石油開発(株))、柴田知則氏(アラビア石油(株))、内村竜一氏(アラビア石油(株))には有益なご批判、ご助言をいただいた。また、静岡大学理学部地球科学教室の学生であった平川 静、木田正吾、石本裕巳、大嶋弘美、西之園真一、中島章博の各氏にはゼミ等で議論していただいたり、ブロックの採取を手伝っていただいた。上記の方々には厚く御礼申し上げます。

本研究には文部省科学研究費(課題番号 03640654 : 代表者間嶋隆一)を用いた。また、Fig. 1 に袋井市発行の“袋井市平面図(大日北)2”(1/2, 500)を使用させていただいた。記して感謝致します。

文 献

- Allen, J. R. L., 1990, 3. 4. 1. Shells. In Briggs, D. E. G. and Crowther, P. R., eds., *Palaeobiology. A Synthesis*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 227-230.
- Brenchley, P. J. and Newall, G., 1970, Flume experiments on the orientation and transport of models and shell valves. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **7**, 185-220.
- Cheel, R. J. and Leckie, D. A., 1992, Coarse-grained storm beds of the upper Cretaceous Chungo Member (Wapiabi Formation), southern Alberta, Canada. *Jour. Sediment. Petrol.*, **62**, 933-945.
- Dott, R. H. Jr. and Bougeois, J., 1982, Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **93**, 663-680.
- Duke, W. L., 1990, Geostrophic circulation or shallow marine turbidity currents? The dilemma of paleoflow patterns in storm-induced prograding shoreline systems. *Jour. Sediment. Petrol.*, **60**, 870-883.
- , Arnott, R. W. C. and Cheel, R. J., 1991, Shelf sandstones and hummocky cross-stratification: new insights on a stormy debate. *Geology*, **19**, 625-628.
- Futterer, E., 1982, Experiments on the distinction of wave and current shell accumulations. In Seilacher, E. and Einsele, G., eds., *Cyclic and event stratification*, Springer Verlag, Berlin, 175-179.
- 波部忠重, 1977, 日本産軟体動物分類学, 二枚貝綱/掘足綱. 図鑑の北隆館, 東京, x iii + 372 p.
- 肥後俊一, 1973, 日本列島周辺海産貝類総目録. 長崎県生物学会, 長崎県, 4 + 58(目) + 397 + 61(索).
- Ishibashi, M., 1989, Sea-level controlled shallow-marine systems in the Plio-Pleistocene Kakegawa Group, Shizuoka Prefecture, Japan: Comparison of transgressive and regressive phases. In Taira, A. and Masuda, F., eds., *Sedimentary facies in the active plate margin*, TERRAPUB, Tokyo, 345-363.
- Kelling, G. and Williams, P. F., 1967, Flume studies of the reorientation of pebbles and shells. *Jour. Geol.*, **75**, 243-267.
- Kidwell, S. M., Fürsich, F. T. and Aigner, T., 1986, Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios*, **1**, 228-238.
- 北村晃寿, 1990, 殻が開いた状態の二枚貝化石による古流向の推定—大桑層産 *Clinocardium fastosum* の場合—. 地質雑, **96**, 613-621.
- Leckie, D. A. and Krystinik, L. F., 1989, Is there evidence for geostrophic currents preserved in the sedimentary record of inner to middle-shelf deposits? *Jour. Sediment. Petrol.*, **59**, 862-870.
- Majima, R., 1985, Intraspecific variation in three species of *Glossaulax* (Gastropoda: Naticidae) from the late Cenozoic strata in central and southwest Japan. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N. S.*, no. 138, 111-137.
- , 1989, Cenozoic fossil Naticidae (Mollusca: Gastropoda) in Japan. *Bull. Amer. Paleont.*, **96**, 1-159.
- 横山次郎・坂本 亨, 1957, 5 万分の 1 地質図幅「見付・掛塚」(京都・第 60 号・第 71 号)および同説明書. 地質調査書.
- Masuda, F. and Ishibashi, M., 1991, Onlap and downlap patterns discovered in a depositional sequence of the Plio-Pleistocene Kakegawa Group, Japan. *Jour. Sediment. Soc. Japan*, no. 34, 75-78.
- Müller, A. H., 1979, Fossilization (Taphonomy). In Robinson, A. R. and Teichert, C., eds., *Treatise on Invertebrate Paleontology, Pt. A, Introduction*, A2-A78, Geol. Soc. Amer. and Univ. Kansas.
- Nagle, J. S., 1967, Wave and current orientation of shells. *Jour. Sediment. Petrol.*, **37**, 1124-1138.
- Nummedal, D., 1991, Shallow marine storm sedimentation—the oceanographic perspective. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cyclic and Events in Stratigraphy*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 227-248.
- 奥谷 喬, 1986編, 決定版 生物大図鑑 貝類. 世界文化社, 東京, 399p.
- Reineck, H. E. and Singh, I. B., 1980, *Depositional sedimentary environment 2nd ed.*, Springer-Verlag, New York, 551p.
- 酒井哲弥・増田富士雄, 1992, 鮮新・更新統掛川層群の沿岸～陸棚相にみられるパラシーケンス. 堆積研, no. 36, 19-24.

- Swift, D. J. P., Figueiredo, A. G. Jr., Freeland, G. L. and Oertel, G. F., 1983, Hummocky cross-stratification and megaripples: a geological double standard? *Jour. Sediment. Petrol.*, **54**, 1295-1317.
- Walker, R. G., 1984a, Shelf and shallow marine sands. In Walker, R. G., ed., *Facies models*, 2nd ed., Geoscience Canada, 141-170.
- , 1984b, Turbidites and associated coarse clastic deposits. In Walker, R. G., ed., *Facies models*, 2nd ed., Geoscience Canada, 171-188.

(要 旨)

間嶋隆一・本目貴史, 1993, 掛川層群大日層の貝殻集積層—その内部構造と起源—. *地質雑*, **99**, 659-674.
(Majima, R. and Homme, T., 1993, Shell-concentrated bed of the Dainichi Formation of the Kakegawa Group —Its fabric and origin—. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **99**, 659-674.)

掛川層群大日層の外浜堆積物と推定される層準に挟在し、ハンモック状斜交層理層に覆われる貝殻集積層のブロックサンプリングを行い、貝殻の種構成、大きさ、配列などを調べた。その結果、貝殻には配列傾向が存在し、また上部と下部の層準では、その傾向が異なることがわかった。流水下における貝殻配列の従来の研究結果と比較したが、これらを元に解釈すると多くの矛盾が生じることから、これまでの実験や観察とは異なった流速や堆積様式を仮定する必要があることが判明した。

この貝殻集積層の貝殻の配列は、ほぼ北西から南東に流れる、恐らく秒速 1 m を超える貝殻を多量に含んだ密度流が極めて急速に堆積したと仮定すると合理的に説明ができた。この密度流は、ストームピーク時における引き波と地衡流との複合流が引き起こしたと考えられる。