

南極産二枚貝 *Laternula elliptica* の殻に残された安定同位体の記録：
南極の融氷水の歴史

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 河合, 庸展, 和田, 秀樹 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000358

南極産二枚貝 *Laternula elliptica* の殻に残された 安定同位体の記録—南極の融氷水の歴史—

河合庸展¹・和田秀樹¹

Stable isotopic records from Antarctic *Laternula elliptica*'s shell—the history of meltwater in Antarctica—

Tsunehiro KAWAI¹ and Hideki WADA¹

Abstract Stable isotopes of oxygen and carbon are useful tools in understanding the paleoclimates. The stereome isotopic data of an organism is indicative of the isotopic composition of the ocean water where the organism lived. In this study we measured stable carbon and oxygen isotopes of the shell an Antarctic Bivalvia *Laternula elliptica*. Samples of fossil Antarctic Bivalvia *L. elliptica* shell from the Pliestocene (46 ka) and Holocene (3.5 ka-4ka) were collected from Lutzow Holm Bay and from the Recent *L. elliptica* at MucMurdo Sound in Antarctica. The quantity of meltwater from ice sheet militating the ocean water can be estimated from the $\delta^{18}\text{O}$ of shells of *Laternula*. Detailed microsampling within a shell also sheds light on seasonal isotopic variation.

We measured two modern as well as three fossil shells (3.5 ka-4 ka) and some 46 ka shell fragments. The $\delta^{13}\text{C}$ values suggest that in *L. elliptica* inception of carbon occurred during the course of growth. The $\delta^{18}\text{O}$ values have a seasonal variation of about 1‰. The light values are suggestive of addition of meltwater indicating summer season and the heavy values are likely to winter. This seasonality gives important information about the life span of a molluscan shell. Using these data the life span of the Recent *L. elliptica* might have been for 7 years and that of the fossil *Laternula* about 9 years. The $\delta^{18}\text{O}$ fluctuation within Recent shells are in the range of 1‰, and that of the fossil shells in 3‰, which shows that there was a greater variation of oxygen isotopes during the course of life 3.5 ka-4 ka than the Recent. The ^{18}O depleted value suggests that there was mass mixing of meltwater with the sea water at 3.5 ka-4 ka which decreased toward the Recent. In this study the shell data of the three periods indicate that the biggest meltwater effect was the highest recorded at 3.5 ka-4 ka and the second was around 46 ka.

Key words: oxygen isotope, carbon isotope, Antarctica, *Laternula elliptica*, melt water history.

緒言

現在、人為活動によって大気中の二酸化炭素が増加し、温室効果をもたらす、地球温暖化が起こっているとされている。極地域の気温が上昇した場合、南極やグ

リーンランド等の氷床が融解し地球の海水準が上昇する。しかし、二酸化炭素の温室効果は確かに直接気温の上昇に関係しているが、ここ近年の年平均気温の上昇(0.01~0.02°C/年)の直接の原因かどうかはいまだによく分かっていない。

¹ 静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷 836.

¹ Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan.

E-mail: tsune_K@exite.co.jp (T.K.), seh-wada@ipc.shizuoka.ac.jp(W.H.)

氷床の融解が、極地の気温上昇によって起こるものであることは明白である。過去の氷床の融解の歴史を知ることは過去の極地の気温上昇を知る事につながり、古環境の再構築を可能とする。

南極の過去の気温変動、特に氷期、間氷期に関しては、アメリカや旧ソビエト連邦、日本などによる氷床コアの分析により少しずつ研究されてきている。近年南極ポストーク基地の氷床コアの分析から過去16万年の気温変動がほぼ分かっている (BARBORA *et al.*, 1987)。

1993年からは日本南極観測隊によってドームフジという地点で氷床コアが採取され、約35万年まで遡る氷柱試料が得られている。

氷河が溶けた場合氷河中に含まれる角礫を海底に落とす。このような礫を堆積物が含む場合、氷床がその位置まで来て溶けたことを意味する。南極 Ross 海で行われた CIROS 計画では、40 Ma 以上の過去に遡るボーリングが行われ、その堆積物の年代から氷床の融解の歴史が調べられている (BARETT, 1986, 1988)。

氷床の融解の歴史を推測する上で有効な手段は、堆積物の性格を知り、含まれる貝化石等の酸素同位体比を測定することである。海に生息している生物体の硬組織の酸素同位体比は、その生物の生息している海水の水温と同位体組成によって決まると考えられる。KLEIN (1997) は、アメリカ・オレゴンのバンドン海域に産する *Mytilus trossulus* (Gould) 貝殻化石の酸素同位体比の分析結果からその変化の原因は、生息域の海水に、小さな $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つ淡水河川水の影響が加わり、*M. trossulus* が成長と共に生息場所を移動させていくためとしている。一般的に、上述のような河口域を除いた海水の同位体比は、全世界の海洋においてはほぼ均質である同位体標準値 0‰ を示している (CREIG, 1961)。南極の場合にはそれに氷床の融氷水 (meltwater) の影響が加わると考えられる。融氷水の酸素同位体比は -30 ~ -60‰ である。水温 0°C 付近の海水と平衡なアラゴナイトの酸素同位体比は $\delta^{18}\text{O}$ 値は 5‰ (PDB) といわれている (BARRERA, 1994)。BARRERA (1994) は、南極に生息する現生の二枚貝 *L. elliptica* の貝殻の酸素同位体比の値を報告している。その平均値はほぼ +4.5‰ (PDB) を示す。BARRERA (1994) で使われた *Laternula elliptica* は氷床の影響を受けているとは考えにくい露岩地帯の海岸から試料採取されたものであるが、BARRERA (1994) はこの 0.5‰ のずれの要因に関しては、夏の間の水温の違いと塩分濃度 (融氷水の影響) による同位体組成の違いによって十分に説明しうるものとしている。

MIURA (1998) は、3.5 ka ~ 4 ka という年代と 46 ka という 2 つの年代を示す *L. elliptica* の貝殻化石の安定同位体比の測定を行い、年代によって平均値は違うがだいたい +3 ~ +4‰ の値を得た。そして、その 1‰ 前後の差は融氷水の影響と考えた。

以上のように、南極の海に生息している生物体硬組織の現生と化石の酸素同位体比を測定して得られる海水の酸素同位体組成の時間変化は、融氷水の海水への混入の時間的変化と見ることができ、さらに、貝殻の微量試料採取による季節ごとの酸素同位体比のデータは、海の生息域の季節毎の融氷水の量を知る手がかりになる。

サンプルについて

Laternula elliptica

南極の浅海に多く生息しているため、多数採取可能なオキナガイ科に属する二枚貝である。AHN (1994) による、南極半島のキングジョージ島での観察によるとこの貝は、潮の影響を受ける水深 5 m より浅い礫質の海底では見つかることはなく、水深 6 ~ 7 m から 30 m 以深にかけて生息している。通常海底砂に潜没して、サイフォンを長く出し、海水を吸い込みエサを採取する。多くの場合海底面 50 cm 以上の深さで生活していると言われている (HARDY, 1972) が、キングジョージ島では比較的浅所にも発見され、成長するにしたがって次第に深く潜っていく。

サンプルの採取地点

本研究に使った *Laternula elliptica* は、現生 2 個体 (試料番号: SUM-HM-W0001~2)、化石の破片 6 個体 (試料番号: SUM-HM-W0003~4, SUM-CM-W0006~8) である。現生の *L. elliptica* はアメリカのオハイオ州立大学バードポーラーリサーチセンターの P. バークマンが、南極ロス海テラノバ湾 (図 1) において、ダイバーによる潜水によって採取した個体である。

一方、化石試料の *L. elliptica* に関しては、南極の日本の昭和基地近くの宗谷海岸 (図 1) ラングホブデで第 37 次南極観測隊の国立極地研究所三浦英樹が採取したサンプルである。この第 37 次南極観測夏隊は、小湊東海岸にある隆起海浜堆積物に 1 m × 1 m × 1 m のトレンチを掘り、壁面 (図 2) から *L. elliptica* の貝殻化石を採取した。化石は殆ど破片となっていたが、殻の半分ほどが保存されているときもある。このトレンチ調査によって隆起海岸には、新旧 2 つの層準が認められ、2 度の大きな海面上昇あるいは、氷床量の変化による海岸隆起などの歴史を含んでいることが分かった。貝化石はこれら新旧 2 つの層準から保存状態の良いものを選んで研究対象とした。なお、本研究で使用した試料は、静岡大学 (SUM)

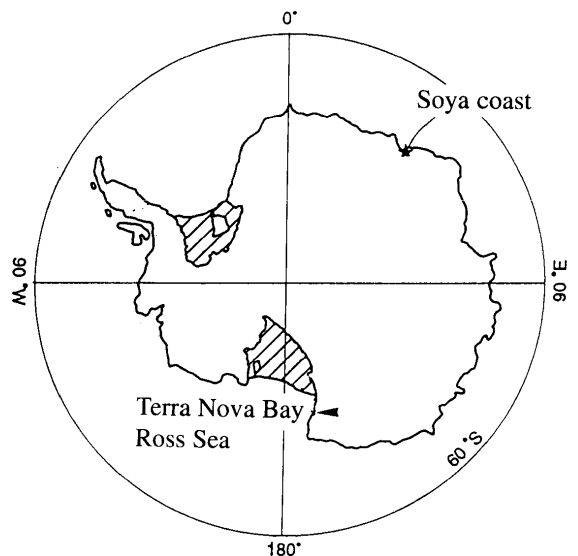


図 1 本研究で分析した南極産二枚貝 *Laternula elliptica* の採取地。

Fig. 1 Sampling location of *Laternula elliptica* in Antarctic bivalve.

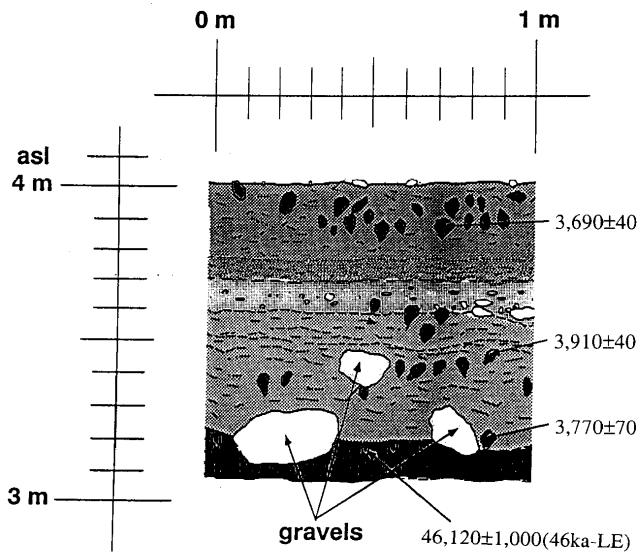


図2 南極リュッホルム湾, 宗谷海岸の小湊東地域で掘られたトレンチの壁のスケッチ.
Fig. 2 Schematic cross-section of the trench wall at Kominato-Higashi Beach of Lutzow-Holm Bay in Antarctica (after MIURA, 1998).

に保管されている。

L. elliptica の ¹⁴C 年代

L. elliptica の貝殻化石は、タンデム型加速器質量分析計による ¹⁴C 年代測定が行われた (MIURA, 1998)。それによると、図2に示されるような前述の2層準に相当する、最終氷期以降の3,500~4,000年前 (3.5~4 ka) と、46,000年前後 (46 ka) を示す2つの年代が得られた。これら以外の最終氷期付近の ¹⁴C 年代測定結果については森脇ほか (1998) で報告されている。

L. elliptica の成長過程について

殻の炭酸カルシウムから微細な成長構造に沿って試料を分割するためには、殻がどのように成長していくかを知って、その成長過程を細部に追跡できるのかを確認した上で分割する必要がある。*L. elliptica* の殻の厚さは現生試料のSUM-HM-W 0001の場合最大で0.8 mmと大変薄く、断面を光学のおよび走査型電子顕微鏡観察等によって観察した結果、模式的に図3のように殻の構造を

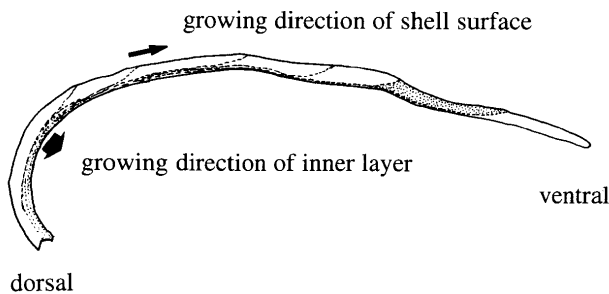


図3 南極産 *Laternula elliptica* の殻の断面図。陰で示した部分は同一シーズンに成長した部分。
Fig. 3 Cross section of Antarctic *Laternula elliptica*. Shell growing within a season is shown in dotted area.

描くことができる。この模式断面図は、ちようつがい部分にある弾帯受を避けた断面を表しており、ある時期 (多分南極の夏に当たる時期) に成長すると考えられる部分は網掛けで示した。この図に示されるように *L. elliptica* は、その構造から内外2つの異なる層を認識することができ、外側の層は細かな結晶がかなり隙間だらけに詰まった構造をしたアラゴナイト層であり、内側の層は、アラゴナイトの結晶が細かいレンガの薄層を積み重ねたような構造が観察され真珠構造を作っている。そのため内側の層は、板状に薄くはがすことができる。

これらの個体の成長方向は図3の矢印のように、貝殻の内側の層と外側の貝殻表面部分では異なっている。貝殻表面の矢印に沿って試料採取していけば貝殻の形成初期から晩期までの変化を連続して測定できる。さらに、本研究で行う酸素同位体比の変化によって季節性を特定することができれば、貝殻の成長してきた環境指標 (例えば海水温や塩分濃度等) の季節変化が推定できるであろう。

L. elliptica の XRD 分析

L. elliptica の現生の貝殻と化石の個体の、それぞれ貝殻の表面と内側の層の組織をつくる物質の結晶についての粉末試料 X 線回折 (XRD 分析) を行った。これらのピークから求められる結晶面間隔の結果から現生、化石とも貝殻表面および内側の層とも、すべてアラゴナイトのピークが認められ、方解石のピークは認められなかった。

また、エックス線回折結果および走査型電子顕微鏡による写真から、現生および化石の貝殻の内側の層にみられるアラゴナイトの真珠構造がはっきりと確認でき、化石貝殻が変質を受けずに保存されていることが分かる。常温でアラゴナイトは方解石に比べて熱力学安定性は低く、時間がたつに従い方解石に結晶構造が変化し、この結晶系の転移する時に同位体の変換が起きる可能性がある。しかし、この *L. elliptica* 化石の貝殻構造は、過去の環境変化を知るための同位体測定に問題ないことを示している。

L. elliptica の貝殻の炭素・酸素同位体比の測定

同位体測定は、静岡大学理学部地球科学教室の質量分析計 MAT 250 を使用した。測定試料は CaCO₃ として、5 μg 以上の試料量が必要である (和田ほか, 1982, 1984 a, 1984 b, 1996 など)。試料は鋭いカッターナイフの刃先で貝殻表面から掻き取り、得られた微量のアラゴナイトは、真空中で 60.00°C の濃リン酸と反応させて CO₂ ガスにして測定を行った。

現生の *L. elliptica* の貝殻と化石の比較的良好な形態を保ったまま採取された 3.5 ka~4 ka の年代を示す貝殻について、以下のように貝の成長に伴う経年変化と季節変化を調べた。

現生の *L. elliptica* の貝殻の記録

南極ロス海テラノバ湾で採取した2個体を使った。2個体の貝殻のそれぞれ左殻を選び、それぞれ SUM-HM-W 0001, SUM-HM-W 0002 とした。この現生試料採取点を図4に示す。

まず、同時期に成長したと考えられる最も外側にある成長線1本から貝殻の縁に沿って、時計回りに約1 cm ごとにカッターで掻き取った。その結果を図5に示す。横軸は殻頂から、殻の縁辺に沿った長さをミリメートル

表 1 南極ロス海テラノバ湾で採取された現生の *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001, 図 4) の炭素・酸素同位体比の結果. 貝殻表面の同位体比の季節変化を測定した位置は図 4 に A, B, C, D で示してある.

Table 1 Carbon and oxygen isotopic results of modern *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001) collected from Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica. Carbon and oxygen isotopic results of the seasonal change of shell surface denoted by A, B, C, D are shown in Fig. 4.

Distance from umbo(mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\delta^{18}\text{O}$ (‰)		Seasonal change of shell surface		
	v. PDB	v. PDB	v. PDB	v. PDB	Analyzed cycle	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
23	0.53	3.99					
33	0.43	4.43			A	1	2.11
43	0.52	4.58				2	2.31
51	0.60	4.70				3	2.70
58	0.93	4.64				4	2.54
65	0.99	4.78				5	2.48
75	1.33	4.71				6	2.73
86	1.59	4.77				7	2.83
95	1.55	4.70			B	1	2.93
104	1.23	4.40				2	2.40
117	1.12	4.72				3	2.74
129	0.78	4.62				4	2.12
142	1.53	4.72				5	2.10
155	1.16	4.54				6	2.75
168	0.78	4.49				7	2.59
181	0.44	4.02			C	7	2.24
192	-0.16	3.68				8	2.09
203	0.27	3.81				9	1.46
214	0.45	4.18				10	1.77
						11	1.77
						12	2.03
					D	12	2.38
						13	2.51
						14	2.39
						15	2.06
						16	1.77
						17	2.15
						18	2.34
							4.93
Shell surface							
Number of cyclic pattern							
Anterior							
1	2.56	5.02					
2	2.66	4.21					
3	2.21	4.48					
4	2.06	4.55					
5	1.15	4.20					
6	1.16	4.80					
Posterior							
1	2.61	4.65					
2	2.40	4.51					
3	2.46	4.74					
4	2.20	4.83					
5	2.12	5.02					
6	1.95	4.76					

でとってある. $\delta^{18}\text{O}$ については, 殻頂からの距離 65 mm から 142 mm (貝殻の中央部) にかけて 1 点を除いては, ほぼ一定の値を示している. 図 4 でも分かるように, 殻頂に近い部分は何年かの成長部分が重なっているため, 同時期の成長でない試料が含まれている可能性がある.

次に貝殻表面の成長方向に沿った結果を示す. 貝殻表面は全体的に白く, 何本かの弱い同心円状の殻彫刻が認められる. 大きく分けて, 周期 1 cm 弱の肋と溝によって 7 つのサイクルに分けられる. さらに肋と溝一組あたり, ほぼ平行, 時に斜交するものを含め, 7~8 本の成長線が見られる. 1 サイクルのうちの溝の部分の成長線 2, 3 本をひとまとめでしたものを 1 サンプルとして全部で 6 箇所試料採取した. その結果を図 6 に示す. この図から貝殻形成初期から貝殻形成晩期にかけて, $\delta^{13}\text{C}$ の値が次第に軽くなっていく傾向があることがわかる.

次に図 4 でブロック A, B, C, D と示された部位の同位体分析について説明する. 貝殻表面の肋と肋の間の部分を 1 ブロックとし, 各ブロック中に見られる数本の成長線 (6~8 本) 1 本 1 本からカッターの刃を使い線状に掻き取り, 同位体比を測定したものが図 7 である. 同時

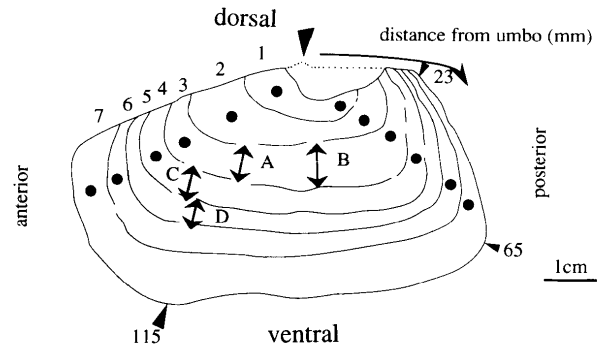


図 4 南極テラノバ湾で採取された現生の *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001) 貝殻表面の試料採取地点. 貝殻最縁辺部の 19 試料は, 殻頂から時計回りに採取し, 図 7 にあらわした. 季節変化を知るための試料は, A, B, C, D と書かれた領域を殻の成長方向に採取した.

Fig. 4 Sampling locality of Modern *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001) at Terra Nove Bay, Ross Sea, in Antarctica. The 19 samples from the marginal layer were collected along the clockwise direction from the umbo (see Fig. 5). Samples from Zones A, B, C and D were collected for clarifying the seasonal change of shell growing (see Fig. 7).

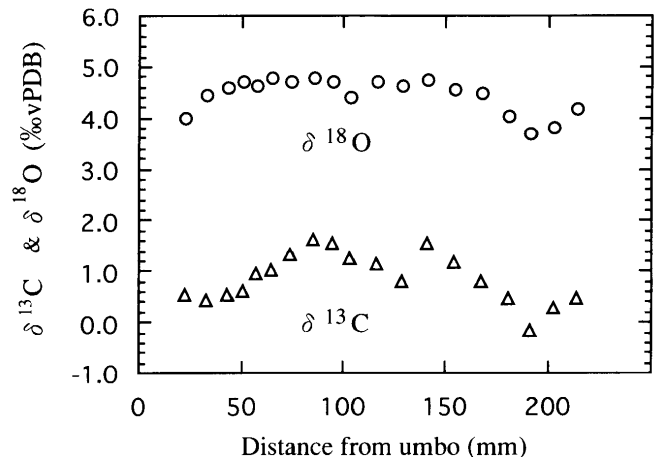


図 5 南極テラノバ湾で採取された現生の *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001) 貝殻表面の最縁辺部試料の炭素・酸素同位体比の変化.

Fig. 5 The variation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of marginal layer of the recent *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001), at Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica.

期に成長した同じブロック内での変化を見るためにブロック A, B を測定し, 季節変化の周期性をみるために, さらにブロック C, D を測定した. ブロック A, B, では全部で 7 本の成長線が, ブロック C では 6 本の成長線が, ブロック D では 7 本の成長線が数えられた. 図 7 に見られるような結果から $\delta^{18}\text{O}$ 値に関して 1 ブロックごとに, 明瞭な周期性のあることが認められる.

化石の *L. elliptica* の貝殻の記録

化石のサンプルは, 南極昭和基地近くの宗谷海岸で採取されたもので, 試料番号は, SUM-HM-W0003~4, SUM-CM-W0006~8 であり, 試料採取地点の断面図は図 2 である.

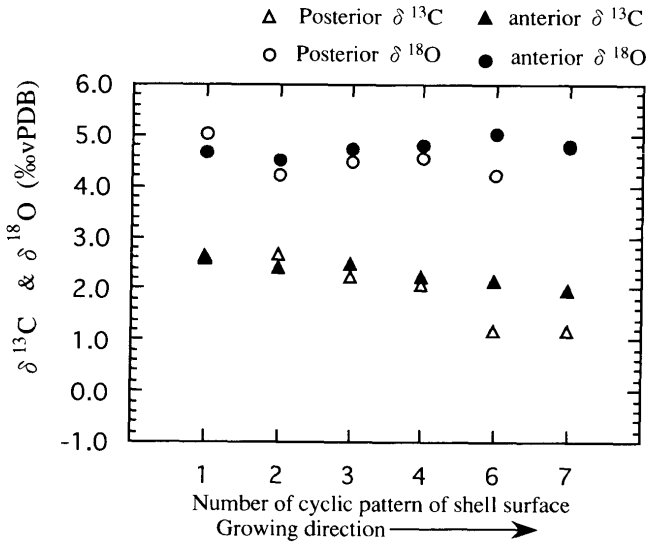


図 6 南極テラノバ湾で採取された現生の *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001) 貝殻表面の成長方向に沿っての炭素・酸素同位体比の変化。測定部位は図4の黒い点で表わされている。

Fig. 6 The variation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of surface layer along the growing direction of the recent *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001), at Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica. Analytical sites were indicated by solid circles in Fig. 4.

表 2 南極宗谷海岸で採取された、化石試料 *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0003, 図8) の炭素・酸素同位体比の結果。貝殻表面の同位体比の季節変化を測定した位置は図8にA, Bで示してある。

Table 2 Carbon and oxygen isotopic results of fossil *Laternula elliptica* (sample No. SUM-HM-W0003, Fig. 8) collected from Soya Coast, Antarctica. Carbon and oxygen isotopic results of the seasonal change of shell surface denoted by A, B are shown in Fig. 8.

Number of ribs	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Seasonal change of shell surface
1	3.52	0.11	
1	2.95	1.66	Number of rib
2	3.13	0.55	5-1
2	3.43	-0.46	5-2
3	2.94	0.32	5-3
3	2.81	0.39	5-4
4	2.35	0.22	5-5
4	2.56	-0.09	6-1
5	2.07	0.92	6-2
5	2.01	0.99	6-3
6	2.61	0.88	6-4
6	2.19	1.19	
6	2.20	1.32	
7	1.52	1.68	
7	1.96	2.01	
8	1.65	2.25	
8	1.60	2.27	
9	1.38	2.58	
9	1.10	1.57	

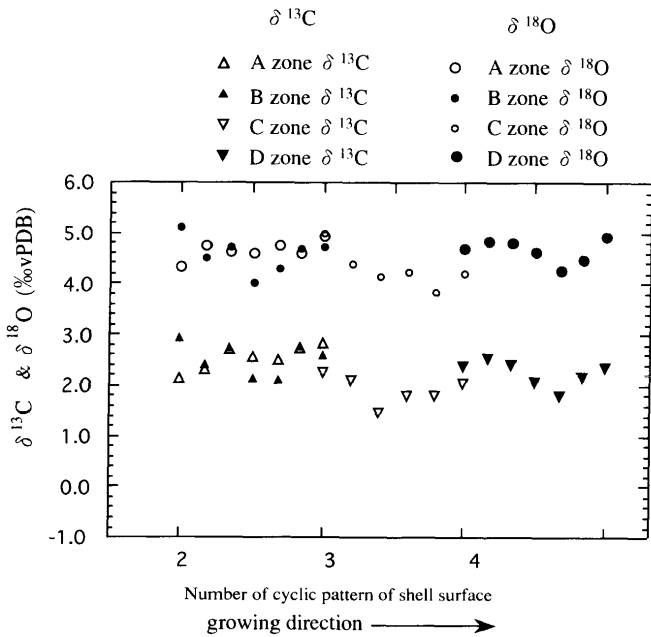


図 7 南極ロス海テラノバ湾で採取された現生の *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001) 貝殻表面の季節変化を示す試料の炭素・酸素同位体比の変化。A, B, C, Dと書かれた領域は図4に示されている。

Fig. 7 The variation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of the seasonal cyclic layers of the recent *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0001), at Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica. The localities of blocks A, B, C and D are shown in Fig. 4.

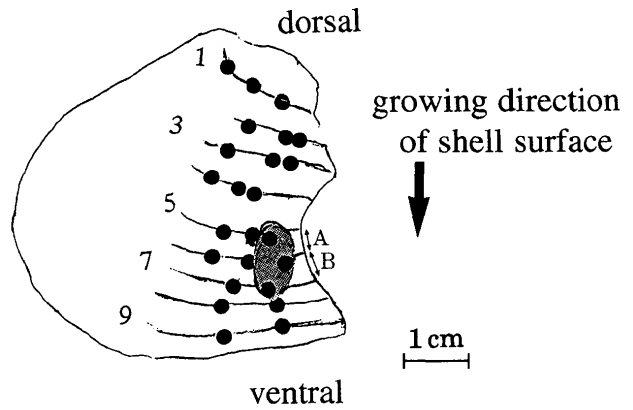


図 8 南極宗谷海岸で採取された化石の *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0003) 貝殻表面の同位体測定用試料採取点。貝殻表面の模様につけられた番号は肋の番号。網掛け部分は、肋の5から7番で、季節変化を調べるために試料採取した場所(図9に示されている)である。

Fig. 8 Sampling locality for stable isotopes of fossil *Laternula elliptica* (SUM-HM-W0003) at Soya Coast, in Antarctica. The numbers indicate rib part on the surface ornamentation of the shell. Samples from zones (shaded area) were collected from rib number from 5th to 7th for clarifying the seasonal change of shell growing (see Fig. 9).

3.5ka~4kaの年代を示す *L. elliptica* の貝殻化石

この年代を示す半分に分れた貝殻化石 (SUM-HM-W0003) と2つの小さな貝殻破片 (SUM-HM-W0003~4) の試料採取をし、その同位体測定を行った。SUM-HM-W0003の貝殻の試料採取点を図8に示す。この貝殻は、成長方向を追って試料採取できる。その半分に分れた貝殻の表面の肋と溝によって9ブロックにわけ、その中の

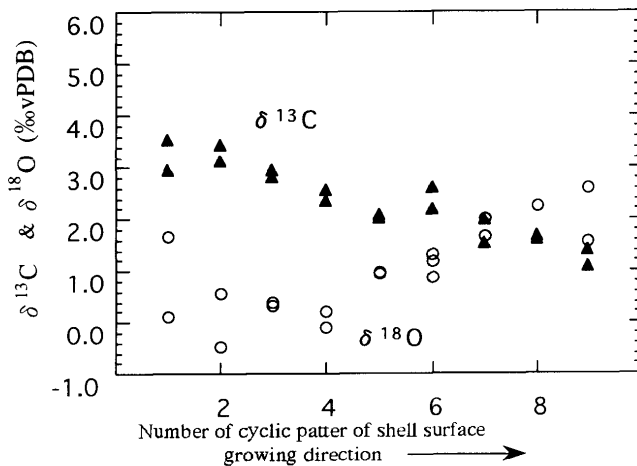


図9 南極宗谷海岸で採取された化石の試料 *Laternula elliptica*, (sample No. SUM-HM-W0003) の成長方向に沿う炭素・酸素同位体比の変化。

Fig. 9 The variation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of shell surface along the growing direction of a fossil *Laternula elliptica*, (sample No. SUM-HM-W0003) at Soya Coast, Antarctica.

表3 南極宗谷海岸で採取された, *Laternula elliptica* 化石破片2個体 (SUM-HM-W0003~5) の貝殻表面の炭素・酸素同位体比の結果。

Table 3 Carbon and oxygen isotopic results of fossil fragments (SUM-HM-W 0003~5) of *Laternula elliptica* collected from Soya Coast, Antarctica.

Shell surface of SUM-CM-W0004	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
W0004-1	2.92	2.62
W0004-2	2.84	2.65
W0004-3	2.87	2.62
W0004-4	2.83	3.00
W0004-5	2.76	2.20
W0004-6	2.61	2.04
W0004-6	3.06	2.31
W0004-6	2.79	2.81
Bulk of SUM-CM-W0004		
W0004-2 b-1	2.39	2.76
W0004-2 b-2	1.69	2.96
Shell surface of SUM-CM-W0005		
W0005-1	3.26	0.92
W0005-2	2.74	0.64
W0005-3	3.11	-0.20

肋の部分の1本の成長線を選んで2~3箇所ずつ試料採取をした。この貝殻表面の結果は図9に示す。貝殻表面の $\delta^{13}\text{C}$ 値は現生の*L. elliptica*と同じように+3.5%~+1%の値を取り、成長方向に沿って軽くなっている。 $\delta^{18}\text{O}$ 値については、貝殻表面は現生のもの(+4~5%)よりも、かなり軽い値である0~+2.5%の範囲の値を取りながら重くなっていく傾向がある。

現生試料と同様の9つのブロック内の変化を調べるための試料採取は、2つのブロックにわたって行った。連続する2つのブロック内で9本の成長線が数えられた

表4 南極宗谷海岸で採取された, *Laternula elliptica* (SUM-CM-W0006~8) 化石破片の貝殻表面の炭素・酸素同位体比の結果。

Table 4 Carbon and oxygen isotopic results of fossil fragments (SUM-CM-W0006~8) of *Laternula elliptica* collected from Soya Coast, Antarctica.

Shell surface of SUM-CM-W0006	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
	0.37	2.60
	0.57	2.61
	1.10	3.41
	0.63	2.71
Bulk of shell of SUM-CM-W0008		
	0.79	3.58
	0.14	3.47
	1.56	3.42
	0.19	2.97
	-0.33	3.34
	0.34	2.93
	1.31	3.60

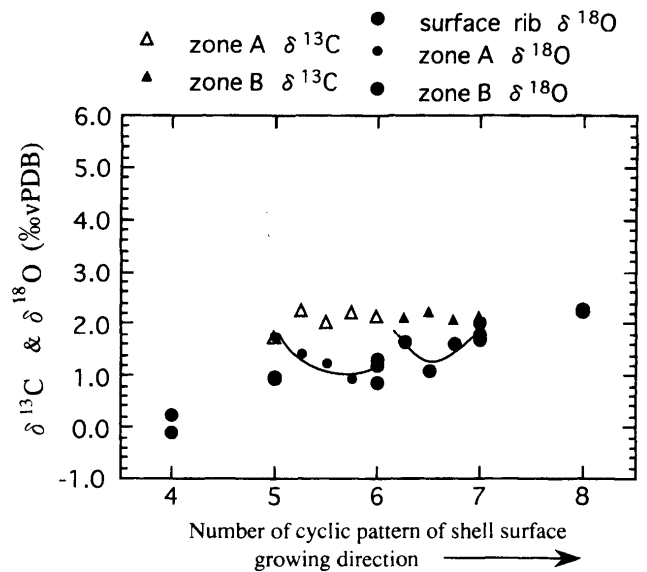


図10 南極宗谷海岸で採取された化石試料 *Laternula elliptica*, (sample No. SUM-HM-W0003) の貝殻表面の季節変化を示す試料の炭素・酸素同位体比の変化。試料採取領域は図8に示されている。

Fig. 10 The seasonality of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of rib number from 5 to 7 of *Laternula elliptica*, (sample No. SUM-HM-W0003) at at Soya Coast, Antarctica. The $\delta^{18}\text{O}$ value of the rib parts on the surface are plotted on this diagram.

が、現生の試料ほど明瞭ではないがこの結果(図10)もやはり $\delta^{18}\text{O}$ 値に関しては、周期性を示す。

46 kaを示す *L. elliptica* の貝殻化石

46 kaを示す *L. elliptica* の貝殻化石 (SUM-CM-W0006~8) は、地層から採集する時すでに細かい破片になっていたため、幾つかの破片を任意に選び、SUM-HM-W0004~5の貝殻破片と同様な場所で試料採取し、それらを測定した。表面を4点、内層を3点、バルクを

7点試料採取し、その結果は図11に示されている。

結果の議論と考察

同時間に成長したアラゴナイトの酸素・炭素同位体比について

図5で示された様に、現生のSUM-HM-W 0001について、同時期に形成された貝殻表面をつくるアラゴナイトの酸素同位体比はほぼ一定の値を示す。

貝殻中央部の成長線の明瞭な部位を測定すれば、成長時期の酸素同位体比を代表させることができる。炭素同位体比については、酸素同位体比に比べてやや変動が大きい。

貝殻の成長に伴う同位体変動

貝殻表面の肋部分についての $\delta^{18}\text{O}$ 値と $\delta^{13}\text{C}$ 値の成長に伴う経時変化は、現生の*L. elliptica* (SUM-HM-W 0001)については図6、化石の3.5 ka-4 kaを示す*L. elliptica* (SUM-HM-W 0003)については、図9にそれぞれ示されている。

炭素同位体比の変化について、重要なのは、現生および化石どちらも成長するに従って、2~3%の範囲で $\delta^{13}\text{C}$ 値が減少していることだろう。減少してゆく理由は、*L. elliptica*が成長するにしたがって砂の中に深く潜って生息していることに関連しているためと思われる。海底の有機物を含む堆積物中の間隙水の溶存炭素の同位体比は海水起源(0%)の炭素が主であるが、深くなるにしたがって硫酸還元バクテリアなどの活動によって生成される有機物起源の炭素(CO_2)が加わる。堆積物の粒度にもよるが、通常極く表層の間隙水をのぞいて間隙水中の炭酸イオンの炭素同位体比は急激に軽い同位体に富んでくる(酒井・松久, 1996)。それを*L. elliptica*が間隙水の一部を摂取しながら成長してゆき、また成長するに従い深く潜るため、水管から吸入される軽い炭素同位体比をもつ CO_2 の量の割合が増えてくることになる。その結果、このような変化を示していると推定される。

成長に伴う*L. elliptica*への氷床の融氷水の影響

次項に述べるが、肋の酸素同位体比の周期性は年周期の貝殻成長時期の変化を示している可能性が高い。図9で見られるように、酸素同位体比の成長に伴う変化はSUM-HM-W 0003の*L. elliptica*の場合、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の結果は肋で数えると4~5番目あたりで、0%から3%の範囲で増加している。この傾向は現生の結果(図6)に見られなくて、SUM-HM-W 0003のみに見られるという事から、この化石の貝殻が形成されるときに、特徴的な環境の変化があったのではないかと考えられる。この化石貝殻が形成された3.5 ka~4 kaの間の9年間のうち4~5年目にかけて、酸素同位体比が劇的に重くなっていったことを示している。

水と炭酸カルシウム(アラゴナイト)との間の酸素同位体分別係数の温度依存性は水温が4°C上昇するとアラゴナイトの酸素同位体比は約1%小さくなる(酒井・松久, 1996)。この酸素同位体比の増加が水温にのみ起因するとしたら、約3%の増加に相当する値としてこの時期に12°Cの水温の下降があったことになる。しかし、現在でも年に1~2°Cしか変わらずほぼ水温0°C付近を保っているのに、恐らくこのような大幅な温度上昇は、現在の南極海岸地域においてはあり得ない。3.5 ka~4 kaにおいてもそうであったと考えられる。

一方、氷床の融氷水が極端に軽い値を示すことは、よく知られている。この氷床の融氷水が海水に混入したと考えると、その量によっては図9に見られる3%の酸素同位体値の変動は十分に考えられる。氷床の融氷水の $\delta^{18}\text{O}$ 値を-30%と仮定して、融氷水の影響が全くない海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値(0% SMOW)と0°C付近で同位体平衡のもとで生成されるアラゴナイトの $\delta^{18}\text{O}$ 値を5%(BARRERA, 1994)となることから、0°C付近での海水と融氷水の混入量を計算することができる。

Xを海水に対する融氷水の混入の割合とする。全体の海水の量を1とすると次のような計算式が成り立つ。

$$(1-X) \times 5(\%) + X \times (-30(\%)) = \text{海水の } \delta^{18}\text{O} \text{ 値}$$

図9の化石貝殻の酸素同位体比は0~+3%という値なので、この式に当てはめて計算すると、この貝殻の形成初期に海水に融氷水が15パーセント程混入して、成長するとともにその量は減少してゆき、貝殻形成晩期には5パーセント程になったということになる。

季節による同位体変動の記録

現生SUM-HM-W 0001の肋と溝1サイクルのブロック内の変化であるブロックA, B, C, Dの結果(図7)をみてみると、各ブロックごとにははっきりとした周期性があることが分かる。

前述のように、貝殻の酸素同位体比の変化は温度変化だけでは説明できず、*L. elliptica*が取り込む生息域の周辺海水の酸素同位体組成が変化をしたのである。つまり、氷床が発達する冬には融氷水が海水に混入せず、重い酸素同位体比を示し、夏になり氷床の融氷水が海水に混入すると軽い酸素同位体比の割合が高くなる。

このように1つの肋と溝が季節変化を示すので、*L. elliptica*の貝殻表面の肋と溝の数はその貝殻が生息していた年数を示すことになる。現生のSUM-HM-W 0001の肋と溝の数は7つであったので、この貝は7年間生息していたといえる。図7はその中の3つの肋と溝の結果だが、一つの溝についてはAブロック、Bブロックと1つのブロック内の成長帯につき2ヶ所ずつ試料採取してある。多少のずれがあるとはいえ、周期性は非常に明瞭である。

一方、 $\delta^{13}\text{C}$ 値も酸素と同様の周期性をもつように見える。TURNER (1982)はアラゴナイトが無機的にゆっくりと形成されたときは、早く形成されたときに比べて高い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示す、と述べている。夏の間は貝殻の形成速度は早いと考えられ、形成速度が大きい夏の間は相対的に低い値を示し、形成速度が夏に比べて小さい間は高い値を示すためかも知れない。酸素にもこの効果はあるかも知れないが、他の要因が大きいと考えられる。

化石であるSUM-HM-W 0003の個体は、同様の考えが成り立つならば9年間生息していたことになる。図10は、SUM-HM-W 0003の2つのブロックについての季節変化の結果である。ブロック内の酸素同位体比の変化は、現生のものと似て、1つのブロックごとに、成長に伴い少し下がってまた元に戻る緩やかな周期性が見られる。凸部分が重い $\delta^{18}\text{O}$ 値を示し、凹部分は軽い $\delta^{18}\text{O}$ 値を示すのは、現生のものと同じ理由による季節変動によるものであろう。SUM-HM-W 0003の成長していた9年間の酸素同位体変動は大きく、この経年変化を示しながらも明瞭に1%程度の季節変化が現れていることを示した。

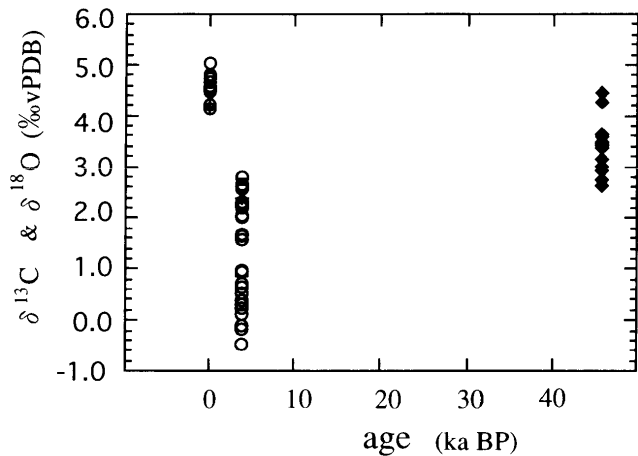


図11 南極ロス海テラノバ湾で採取された現世、および宗谷海岸で採取された化石の *Laternula elliptica* 貝殻試料の年代別の酸素同位体比の変化。

Fig. 11 The variation of $\delta^{18}\text{O}$ values against the radio carbon dating of the *Laternula elliptica*. Modern shell samples are collected from the Terra Nova Bay, Ross, Sea, and the fossil shells are from Soya Coast, Antarctica.

現代と 3.5 ka~4 ka と 46 ka の氷床の融解について

最後に、この 3.5 ka~4 ka の融氷水の影響を考慮して、本研究で測定した三つの異なった年代の *L. elliptica* の酸素同位体比の結果から推定される、氷床融解の歴史について述べる。図 11 は、貝殻の年代ごとの酸素同位体比の変化を表したものである。現生試料については、同位体比の変動領域内であるので最外殻の測定値とブロック A, B, C, D として測定された結果を除いてある。現生の試料については 2 個体の貝殻について、3.5~4 ka を示す化石貝殻については SUM-HM-W0003 と SUM-HM-W0004 の 2 個体、46 ka を示す SUM-CM-W0006~8 については破片の結果を用いた。

図 11 に示されるように、現生の結果はほとんど +4~+5‰ を示して、46 ka の化石試料はそれから 1‰ ほど低い結果を示し、3.5 ka~4 ka の化石試料は 0~+3‰ という最も広い範囲でかつ最も低い値を示す。

これらの酸素同位体比の変化を無理なく説明できる唯一の過程は氷床の融氷水の影響であろう。氷期であり、氷床が発達していたであろう 46 ka の化石試料の結果は、この時期でも氷床の融氷水があったことを示している。そして 3.5 ka~4 ka の化石が生息していた時期についてはその 2~4 倍の融氷水の混入があったことを示している。この時期の融氷水の影響が大きかったことは図 9 の貝殻表面の酸素同位体比の結果から見ても明らかである。

化石の *L. elliptica* が採取された地域は、現在氷床から 5 km 程離れた地域である (MIURA, 1998)。同位体の結果から推定される、融氷水により海水の酸素同位体組成が大きく変化したという仮定が正しいとすれば、氷期中の 46 ka はもちろん、3.5 ka~4 ka も氷床は現在よりもさらに発達しており、3.5 ka~4 ka の時期にこの地域に最も大きな融氷の影響が表れる氷河がすぐ近くに存在していたことを示すのではないだろうか。つまり、より気温が高かった 3.5~4 ka の時期の方が 46 ka の時期よりも融氷水も多かったのであろう。

まとめ

南極宗谷海岸から得られた *L. elliptica* の貝殻化石と、南極 Ross 海 Terra Nova Bay から得られた現生の *L. elliptica* の貝殻の酸素同位体測定の結果から以下のことがわかった。

- ・南極宗谷海岸に最終氷期中の 46 ka と最終氷期以降の 3.5 ka~4 ka に、氷河からの大量の融氷水が海水に混入した。そしてそれは最終氷期以降の 3.5 ka~4 ka の方がずっと大規模だった。

- ・*L. elliptica* の成長線ごとの詳細な酸素同位体比の結果は、夏の時期に冬の時期に比べてより多量の氷床の融氷水が発生するという季節による融氷水の影響の大きさの違いを現すことを明らかにし、その融氷水の量の見積もりも可能とする。

謝辞

静岡大学理学部地球科学教室新妻信明、生形貴男両博士には適宜適切なお教示を賜り、生形博士と横浜国大間嶋隆一博士には原稿を査読していただいた。国立極地研究所の三浦英樹氏と、アメリカのオハイオ州立大学 P. BERKMAN 博士には試料提供していただいた。

又、近藤浩正氏の他、Dr. S-KUMAR、加藤和浩氏、平研介氏には電子顕微鏡、X 線ほかの実験にご協力をいただいた。ここに感謝いたします。

引用文献

- AHN I-Y. (1994), Ecology of the Antarctic Bivalve *Laternula elliptica* (KING and BRODERIP) in Collins Harbor, King George Island: benthic environment and an adaptive strategy. *Memoir of National Institute of Polar Research Special Issue*, 50, 1-10.
- BARNORA J. M., RAYNAUD D., KOROTKEVICH Y. S. & LORIOS C. (1987), Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329, 408-414.
- BARRERA E., TEVESZ M. J. S., CARTER G. J. & MCCALL P. L. (1994), Oxygen and carbon isotopic composition and shell microstructure of the bivalve *Laternula elliptica* from Antarctica. *Palaeos*, 9, 275-287.
- BARRETT P. J. (1986), Antarctic Cenozoic history from the MSST-1 drillhole McMurdo Sound. *DSIR Bulletin*, 237, 1-174.
- CRAIG H. (1961), Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, 133, 1833-1834.
- KLEIN R. T., LOHMANN K. C. & THAYER C. K. (1997), Elemental and isotopic proxies of paleotemperature and paleosalinity: Climate reconstruction of the marginal northeast Pacific ca. 80 ka. *Geology*, 25, 363-366.
- MIURA H., MAEMOKU H., SETO, K. & MORIWAKI K. (1998), Late Quaternary East Antarctic melting event in the Soya coast region based on stratigraphy and oxygen isotopic ratio of fossil molluscs. *Polar Geoscience*, 11, 262-277.

- 森脇喜一・平川一臣・中田正夫 (1998), 第四紀後期における東南極氷床の変動と海水準変動. 第四紀研究, **37**, 165-175.
- 酒井 均・松久幸敬, (1996), 安定同位体地球化学. 東京大学出版会, 東京, 403p.
- TURNER J. V. (1982), Kinetic fractionation of carbon-13 during calcium carbonate precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **45**, 1183-1191.
- 和田秀樹・新妻信明・斉藤常正 (1982) 超微量試料による炭素・酸素同位体比の測定について. 静岡大学地球科学研究報告, **7**, 35-50.
- 和田秀樹・伊藤良三・秋山文孝 (1984 a), 微量石墨の炭素同位体分析用試料の調整と測定. 静岡大学地球科学研究報告, **10**, 133-141.
- 和田秀樹・藤井 昇・新妻信明 (1984 b), MAT 250 による超微量炭酸ガス試料の安定同位体比測定法. 静岡大学地球科学研究報告, **10**, 103-112.
- 和田秀樹・長井洋一・安藤隆丸・新妻信明 (1991), MAT 250 による同位体比測定のための微量炭酸ガス試料精製用新型トラップ. 静岡大学地球科学研究報告, **17**, 161-167.
- 和田秀樹・新妻信明・水谷一義・薬師寺秀樹・青島逸子 (1996), MAT 250 質量分析計用のコンピューター制御新試料導入装置について. 静岡大学地球科学研究報告, **23**, 63-70.