

相模湾初島沖の深海底総合観測 —シロウリガイ群生域の1年間—

門馬 大和*¹ 満澤 巨彦*¹ 海宝 由佳*¹
岩瀬 良一*¹ 藤原 義弘*¹

相模湾初島南東沖で「深海底総合観測ステーション」による観測を始めてから、1995年6月末までに1年9か月が経過した。この間に、カラービデオ画像、地震、水中音、地中温度、CTD、流向流速等、極めて高密度かつ高精度の観測データが得られた。ステーションの設置以来、伊豆半島東方沖の地震活動は沈静化しているが、1994年11月中旬に発生した小規模な群発地震を挟む前後5か月間にわたって、シロウリガイ群生域内の地中温度に若干の低下が生じた。なお、この群発地震はシロウリガイの行動には特に影響を与えていない。また、シロウリガイの観察を通じて、その生殖活動が高い頻度で確認された。すなわち、これまでに10回以上の放精放卵現象を観察しており、発生時期にも季節性は見られない。このような高頻度の産卵行動は、化学合成生物の種の保存上特徴的な活動とも考えられ、今後の新たな研究テーマが発生した。年間を通じて、流れ及びCTD観測を行い、本海域の深海環境の基本的な特性が明らかになった。底層流や水温は、潮汐の周期で変動している。流向は南向きすなわち、相模湾の湾口向きが卓越しており、通常10cm/s以下、最大約20cm/sの流れが観測された。水温については、2.46～3.25℃（現場水温）の範囲で変化している。1994年及び1995年の3月末から5月にかけて、懸濁物の増加による激しい濁りが観察された。これらは、春先の生物の大発生（スプリングブルーム）によるものではないかと考えられる。地中温度については、海底下20cmで水温よりも約2℃高く、一般的にシロウリガイコロニー内が、コロニー外に比べて温度が高いが、これらが逆転する場合もある。

キーワード：長期観測ステーション、初島沖、相模湾、群発地震、シロウリガイ、放精放卵、流向流速、CTD、地中温度

Long-term Deep Sea Floor Observation off Hatsushima Island in Sagami Bay —One Year in the *Calypptogena* *Soyoe* Clam Colony—

Hiroyasu MOMMA*² Kyohiko MITSUZAWA*² Yuka KAIHO*²
Ryoichi IWASE*² Yoshihiro FUJIWARA*²

* 1 海洋科学技術センター深海研究部

* 2 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

One year and nine-month long real time and continuous sea floor observations were carried out between September 1993 and June 1995 using color video cameras, seismometer, hydrophone, heat flow temperature sensors, CTD and current meter. The observatory is located 6 km south-east off Hatsushima Island in Sagami Bay, at a depth of 1,174m. A frequent spawning of *Calyptogena soyoe* was observed for more than ten times during above period. It seems that the spawning is accompanied with increase of water temperature by approximately 0.2°C. Number of the clams which are visible from the observatory varies significantly with time.

It is interesting that earthquake swarm, which occurred 35km south of the observatory in the middle of November 1994, seems that it is coinciding with temperature decrease under the seafloor by 0.7°C between November 1994 and April 1995.

Basic annual environmental changes were observed by CTD and current meter, which ranged between 2.46 and 3.25°C in temperature, and current was less than 10 cm/s in usual and 20cm/s at maximum.

key words : Long-term observatory, Deep sea environment, *Calyptogena soyoe*, Spawning, Hatsushima Island, Sagami Bay, Earthquake swarm, Bottom current, CTD, Heat flow

1. ステーション設置後の経過

1993年9月、深海の諸現象を総合的に理解することを目的として、相模湾初島沖に「深海底総合観測ステーション」を設置した (Momma, 1993; 門馬, 1994)。ステーションには、カラービデオカメラ2台、短周期地震計、ハイドロフォン、地中温度 (熱流量) 計2台、CTD、電磁流向流速計が搭載され、光ケーブルを通じて初島の陸上局にリアルタイムでデータが送られている。

ステーションの海底設置後、1993年11月に無人探査機「ドルフィン3K」によって、設置位置の微調整や地震計、ハイドロフォン、地中温度計の海底面への設置が行われ、本格的な観測に着手した。1994年3月末からは、専用回線で横須賀のJAMSTECにもデータが送られるようになった。通常の観測は無人で、毎週1泊2日で初島に出掛けて有人観測を行っている。無人観測ではビデオテープの交換ができないので、1日当たり午前0時と正午に各15分間の自動録画を行って、1週間に210分録画テープ1巻を使用する。これに対して、有人の場合は1週間当たり約1日半の連続録画を行う。ビデオデータを除けば、有人、無人の差は存在しない。画像データの収録は、例えば現地の人にテープの交換を頼んだり、3倍速録画で時間をのばすことも可能であるが、3年間の観測予定期間に対する水中ライトの寿命 (1灯当たり約4,000時間: 170H, 2灯1組で3組を切り替えて使用した場合、合計510H: 1年5か月) を考慮して、控えめに

している。

1994年10月、観測から満1年経過後、首振り装置付きカメラが観察中に海底に落下する事故が発生した。「しんかい2000」や「ドルフィン3K」で現場観察を行った結果、首振り装置 (アルミ合金) のネジ穴が腐食し、ステーションのフレームに固定していたステンレスボルトが抜け、カメラと共に脱落したことが分かった。多くの耐圧容器はアルミ合金で出来ており、当初から、異種金属間の電蝕には十分注意していたが、荷重と振動によってネジ部に緩みが生じ、海水が進入して腐食を早めた可能性がある。1995年4月、「ドルフィン3K」で、傾斜したカメラと首振り装置の姿勢を調節した。水中部の機器には、これ以外の故障は起きていない。海底地震計に底層流によると思われるノイズが当初から発生していたため、1995年4月、地震計本体や接続ケーブルの固定作業を「ドルフィン3K」で行った。あわせて、電磁流向流速計に西向きの流れが卓越して記録される傾向があったので、他の電磁流速計による現場キャリブレーションを行った。

ケーブル陸揚げ部及び浅海部については、定期的にダイバーによる調査と保守を行っているが、陸揚げ部や浅海部のケーブル防護管や取り付けネジが脱落することがしばしばある。1994年秋には、10年に1度という大きな波浪によって、ケーブルが陸揚げ部で約2m移動したこともあった。1995年3月、それまで初島第2漁港のプレハブ内に置かれていた陸上局を、初島海洋資料館内に移

設した。これに伴って、観測中の海底のビデオ画像を一般見学者に開放するようにした。また、工事や落雷によって、陸電が瞬断する事故がたびたび生じたため、水中部のすべてと陸上局の主要な電源を無停電化した。

本観測は、同時に得られる複数の観測データから、それらの相互関係を調べるのが大きな目的である。従来は、各センサーのデータを個別に表示、記録しており、これらの時間スケールも違っていたため同時に比較することが困難であった。1995年4月から、長い時間スケール（最大1か月）で全データを表示して観察することが可能になった。これによって、例えば放精放卵が発生した際の水温、地中温度、流れなどの変化が同一画面で観察できる。

2. シロウリガイ個体数の変動

ステーションで観察されるシロウリガイの個体数は一定ではなく、時間と共に変化する。図1は、1994年1月から6月にかけて同一画角内で観察された、シロウリガイの約1週間ごとの個体数変化を示す。この画角の範囲はおおよそ1m四方弱で、最も多い時には100個体前後いたが、2月末から4月下旬にかけて最も少ない時には50個体程度まで減少し、その後再び増加の傾向が見られる。シロウリガイは、地中から湧出する間隙水中のメタンや硫化物を摂取しており、その湧出量の変化は地中温度変化を伴うのではないかと考えられる。また、湧出量の増減によって、貝が他の場所に移動する可能性もある。

地中温度計により、シロウリガイコロニーの内 (T_1) 外 (T_2) で、海底のごく表層 (U:上)、約10cm (M:中)、

約20cm (L:下) の各層温度を測定している。ごく表層の温度 (T_{10} , T_{20}) は、水温変化の影響を強く受けるので、貝の生息域と考えられる海底下約10cm付近の温度 (T_{1M}) に注目する。1994年2月10日頃から3月中旬にかけて、 T_{1M} がコロニー外の T_{2M} よりも低下し、その後は上昇の傾向にある (図2)。ほかに比べて、 T_{1M} には全般的に水温の変化とも異なる短周期の脈動が認められる。これは、泥中で貝が動くためではないかと思われる。94年3月18日から20日にかけて、 T_{1M} にそれまでと異なる温度の低下が見られる (図3) が、図1によると、この間に個体数が大幅に減少している。個体数の減少は、死亡や泥中への埋没というよりは、場所の移動によるものと思われるが、この温度変化が貝の移動の原因か、結果かは明らかではない。すなわち、貝の移動は何かの環境要因の変化によると思われるが、地中温度のみで貝の個体数変化を説明することは今のところ困難である。なお、個体数減少の時期は、懸濁物が増加して視界が不良になった時期と大まかに一致するが、この現象 (視界不良) は1995年春にも観測され、春先の生物の大発生 (スプリングブルーム) と関連があると思われるが、貝の個体数の大幅な変化を伴っていない。

3. 相模湾初島南東沖シロウリガイ *Calyplogena soyoe* の放精放卵現象

長期観測ステーションのビデオカメラにより、シロウリガイ *Calyplogena soyoe* Okutani の放精放卵現象が確認された。放精放卵現象は1993年12月21日に初めて確認され、1995年6月8日までの間に計11日にわたって観

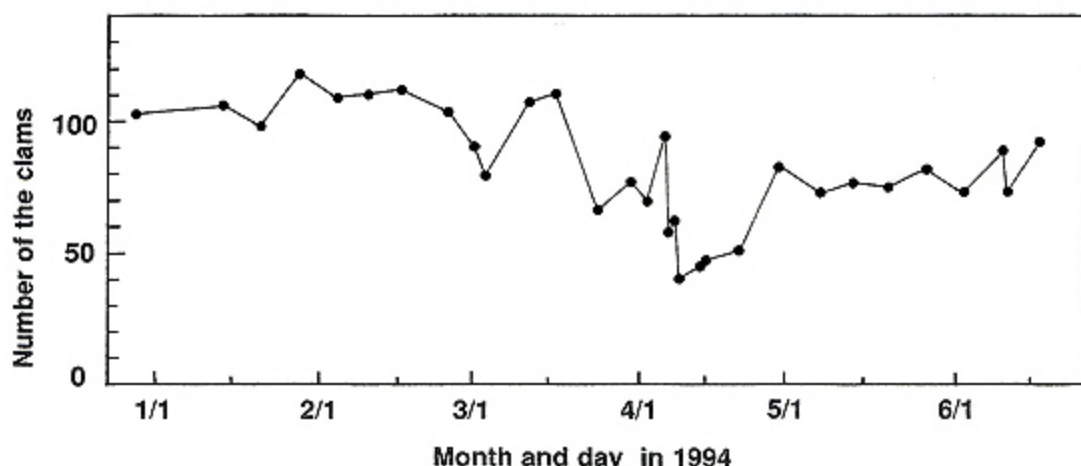


図1 ステーションのビデオカメラで同一画角内に見えたシロウリガイの個体数変化

Fig. 1 Change of the clams in number which were visible from the video camera at a fixed angle.

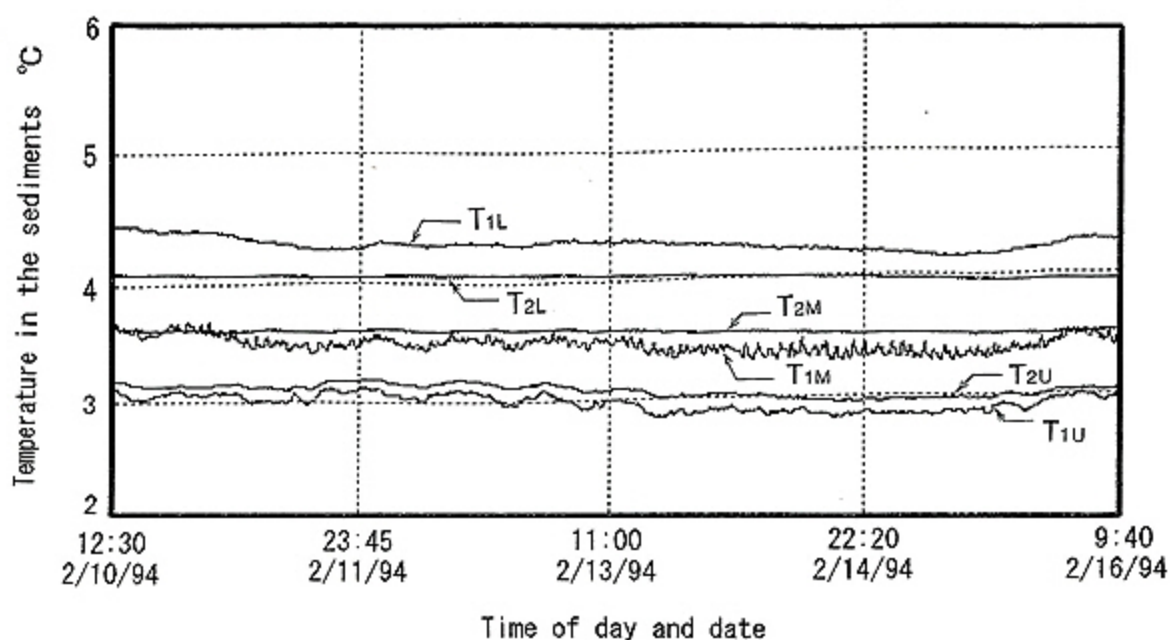


図2 地中温度計による温度変化 (1994年2月10日~16日)

Fig. 2 Temperature variations under the sea floor between Feb. 10 and 16 1994. I: within the clam colony, 2: out of the colony, U: upper temperature sensor near the surface, M: middle sensor at a depth of 10cm, L: lower sensor at a depth of 20cm.

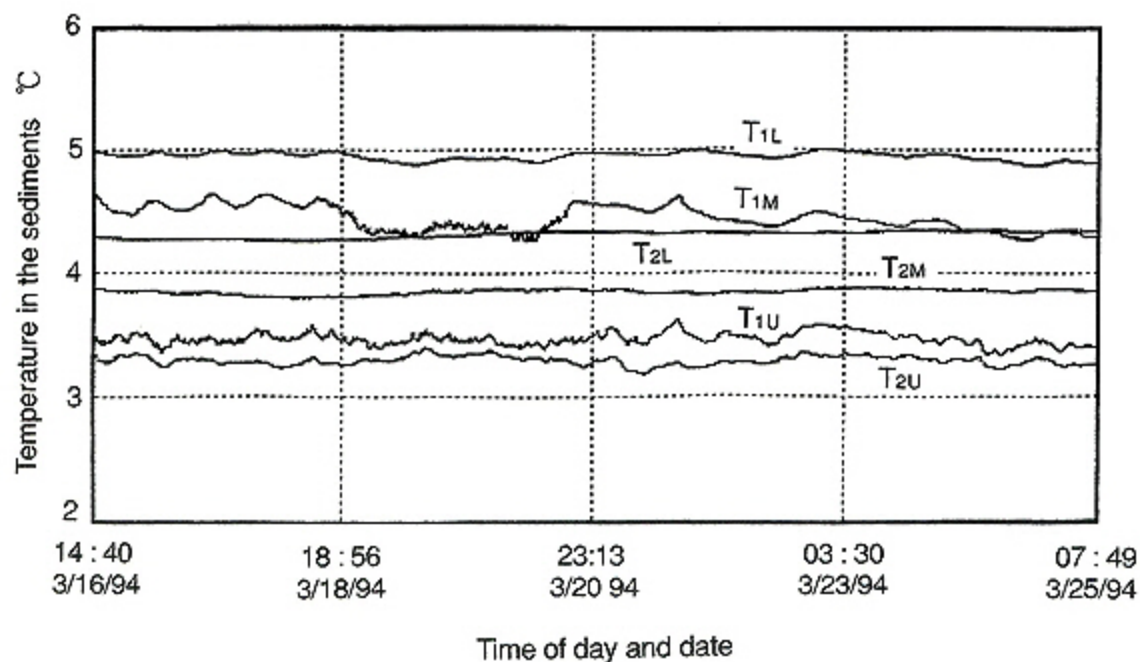


図3 地中温度計による温度変化 (1994年3月16日~25日)

Fig. 3 Temperature variations under the sea floor between Mar. 16 and 25 1994. I: within the clam colony, 2: out of the colony, U: upper temperature sensor near the surface, M: middle sensor at a depth of 10cm, L: lower sensor at a depth of 20cm.

察された（同日の午前と午後に発生した場合もある：表1）。放精放卵直前のシロウリガイは水管を大きく伸ばし、水管の先端を頻りに収縮させていた。精子及び卵は水管より勢よく放出され、すぐに海中に拡散した。シロウリガイ類は Berg (1985) が報告しているように比較的大きな卵を持つため、粒径とそれに伴う画面の白濁状況の違いから放卵現象と放精現象はビデオ画面上で区別が可能であった。同一個体による複数回の放精放卵現象は確認されていない。多数の個体がほぼ同時に配偶子の放出を行っており、画面上で区別可能な場合には放精の約10分後に放卵が行われている。放精放卵が行われた場合、長期ステーションのテレビカメラ画面が一面に白濁し、約5分間にわたって視界の悪い状態が続く（写真

4）。画面が白濁するため放精放卵を行った正確な個体数は不明であるが、通常、画面から観察される範囲に数十個体のシロウリガイが観察され、その内数十個体が放精放卵を行う。1個体の放精放卵時間は十数秒から約1分程度であった。放卵後、ハオリムシ類 *Riftia pachyptila* Jones, 1981 の観察とは異なり、卵は水中を中性浮力で漂うが（Van Dover, 1994）、ハオリムシ類で観察されているようにその卵が生息域に沈降・着底したかどうかは、画面からは不明である。精子も卵と同様に中性浮力であるが、卵よりも広く拡散しており、多くの場合、ビデオカメラで観察可能な範囲すべてを白濁させている。このように卵及び精子は海中に浮遊しているため、配偶子は海中で受精している可能性が高く、このことは先のハオ

表1 シロウリガイの放精放卵記録
Table 1 Record of Spawning of *Calyplogena soyoyae*.

Date	Time	Temperature (°C)	Sex of spawning	Moon age (Tokyo at noon)
93/12/21	17:06	—	male	7.7
	17:14	—	female	
94/01/06	13:46	—	male	23.7
94/02/09	12:50	—	male	28.2
94/02/16	22:03	2.92	male	5.5
	22:10	2.93	female	
94/03/11	10:34	—	male	28.5
	16:28	3.18	male	28.5
94/03/11	16:39	3.19	female	
94/05/26	20:41	3.10	male	15.4
	20:50	3.14	female	
94/07/22	15:26	2.96	male	13.2
94/10/27	17:50	2.90	male	22
95/01/26	9:31	3.42	male	24.7
	9:37	3.27	male	
	9:50	3.31	male and female	
95/03/02	15:36	3.119	male	0.6
	15:45	3.113	female	
95/06/08	18:23	2.997	male	9.7
	18:34	3.039	male	
	18:41	3.048	female	

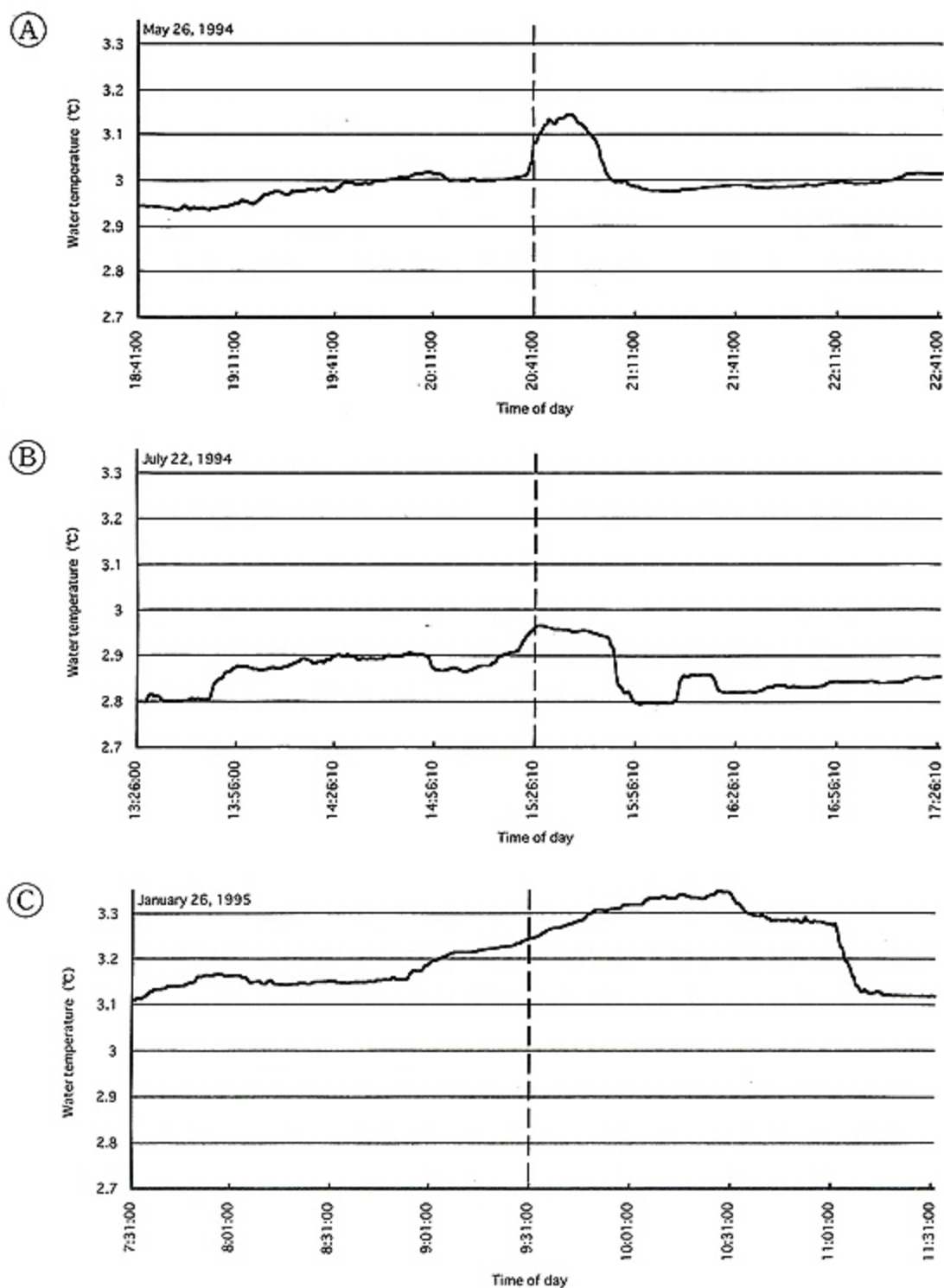


図4 放精放卵時の水温変化。A: 1994年5月26日, B: 1994年7月22日, C: 1995年1月26日。点線は放精放卵開始時刻
 Fig. 4 Increase of water temperature at spawning. A: May 26, 1994, B: July 22, 1994, C: January 1, 1995.
 Broken lines show the beginning of spawning.

リムシ類での考察とは異なる (Van Dover, 1994)。

長期ステーションでは、塩分濃度、水深、水温、地中温度、流向流速等の物理データを計測しているが、放精放卵現象は水温の上昇との相関が高く (図4 A~C)、今のところ、それ以外のデータとの明らかな相関は見られなかった。放精放卵開始時の水温は3°C前後で、放精放卵開始2時間前より常に0.2°C程度上昇しており、海水温度の上昇がシロウリガイの放精放卵活動の引き金となっている可能性が高い。ただし、これまでのデータから水温上昇時に常に放精放卵現象が確認されているわけではないことから、水温以外にも現在計測を行っていない何らかの要因が放精放卵現象の引き金になっている可能性が考えられる。化学合成生物群集構成種の放精放卵現象を生息環境中で観察した例はハオリムシ類以外に報告されておらず (Van Dover, 1994)、その際の物理計測も行われていないことから、温度の上昇が化学合成生物群集の構成種全般の放精放卵活動の引き金になりうるのかどうかは不明である。浅海性の二枚貝では、温度の変化が放精放卵の引き金になるものも知られている (Orton, 1920; Nelson, 1928; Thorson, 1946; Loosanoff, 1953; Sastry, 1963, 1966)。また海洋生物の中には、月齢と放精放卵活動に強い因果関係があるものもあるが (Newell et al., 1991)、シロウリガイに関しては月齢との明らかな相関は見られない (表1)。

シロウリガイは多数の個体が同時に配偶子を放出しており、また雌雄共に放精放卵活動を行っている。シロウリガイが不連続に分布し、生息に硫化物を必要とすることを考えると、この放精放卵現象はシロウリガイが硫化物の湧出する遠隔地へ子孫を残すための繁殖戦略として非常に重要な手段になるものと考えられる。Van Dover (1994) もハオリムシ類での大規模な放精放卵活動の可能性を示唆している。

深海性の二枚貝の中には季節に応じた繁殖期をもつものが報告されている (Lightfoot et al., 1979)。しかし、シロウリガイ類の生殖腺の組織学的研究からシロウリガイ類は特定の繁殖期を持たないものと考えられており (Fiala-Medioni and Pennec, 1989)、今回、シロウリガイの放精放卵現象がほぼ年間を通じて観察されたことは、この説と矛盾しない。

これまでの観察の結果、放精放卵が常に水温の上昇を伴っているため、今後は、「しんかい2000」や無人探査機「ドルフィン3K」を用いて、人工的にシロウリガイの現場加温を行い、水温上昇と放精放卵現象の相関を検証する予定である。 (藤原 義弘)

4. 初島沖深海底の流れの変動

4. 1 電磁流向流速計

観測地点周辺の定常的な流れの特性や地震等地殻変動に関連する突発的な流れ、台風等による気象擾乱の影響を観測することを目的として、水平XY2成分の流速を計測できる電磁流速計 (アレック電子製) を用いて底層流の計測を行っている。流速の測定範囲は0~±200cm/sec、測定精度±2%または0.5cm/sec、分解能0.1cm/sec、時定数0.5秒である。流向は、ホール素子を用いた方位センサーを基準としており、方位の精度±2°、分解能0.2°、時定数0.2秒である。耐圧容器の材質はチタン2種で、センサーとデータ変換部は水中ケーブルにより接続されている。流速計センサーは、フレーム内の流れの擾乱をさけるためフレーム上面より約15cm上に取付けである。ステーションの高さが約140cmであるため、センサーは海底上約155cmに位置する。

4. 2 流速の現場キャリブレーション

平成7年4月18~20日にかけて「ドルフィン3K」により、自己記録型電磁流速計 (アレック電子 ACM8M) を、現場キャリブレーションを目的として、ステーション流速計より約6m北側の海底上約90cmの高さに設置した。その結果、予想どおりステーション流速計の流向がやや西向きにかたよる傾向が認められた。このため、約6m程度の距離では流向はほぼ同じであると仮定し、キャリブレーション用に設置した流速計の流向を基準とし補正を行った。

4. 3 1年間の流れの観測

流向・流速データは1秒ごとに記録されるが、このデータの1時間平均を取ったデータの1年間の記録を図5に示す。これによると、流向は、南南西方向がやや卓越しており、流速値は5cm/secをほぼ中心に、2~8cm/secの範囲で変化している。このデータは1時間の平均値であり、瞬間的には最大20cm/sec程度が観測されている。図5を見るかぎり、南北成分、東西成分とも大きな違いは認められない。日周期以下の変動成分を削除するために、24時間の移動平均を計算した (図6) と、流向は180°~270°で変動しており、特に、南南西方向が卓越していることが確認できる。また、日単位の平均流速値は5~7cm/secである。南北及び東西成分流速によると流向同様、南南西方向の流れが卓越している。この傾向は、図7の流向・流速分布においても確認できる。

4. 4 流れ変動の傾向

流速の変動周期を調べるために、南北成分及び東西成分の2時間移動流速変動に対してBT法によるスペク

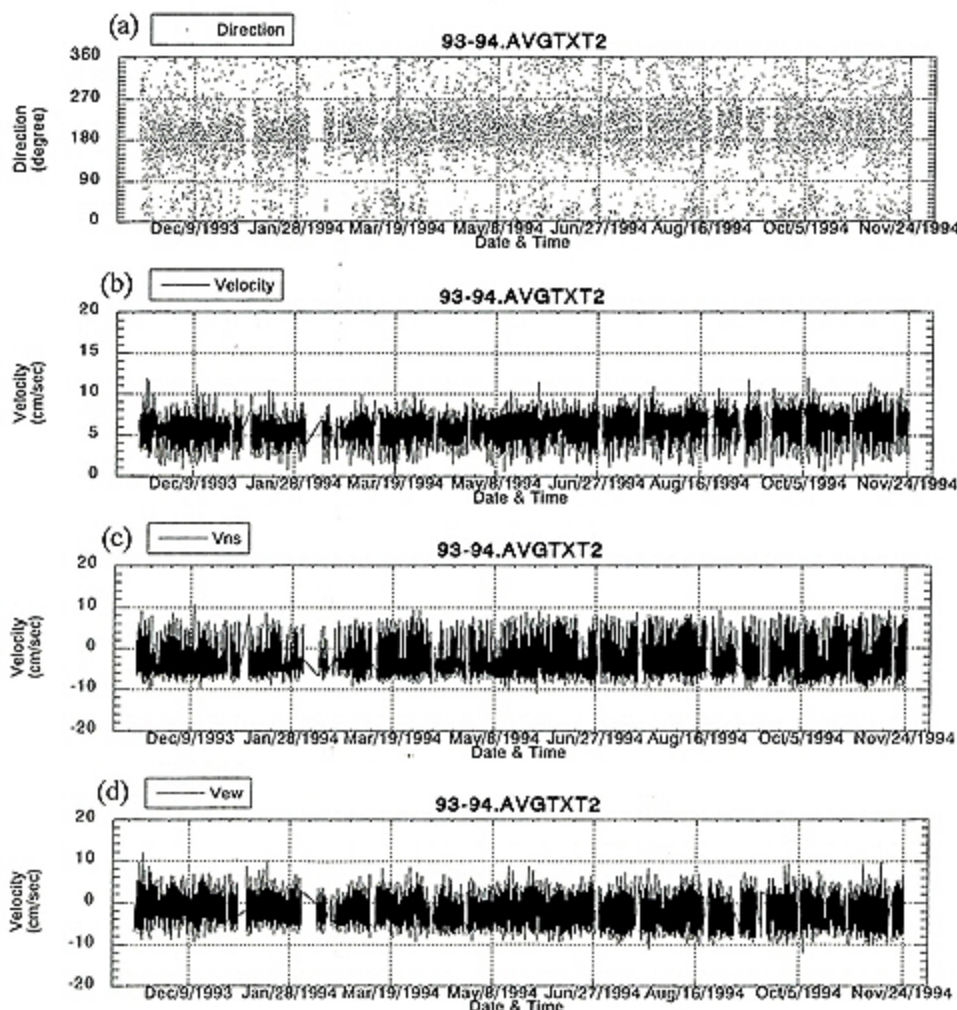


図5 流れの時間変動(1時間平均値)。(a)流向, (b)流速, (c)南北成分流速, (d)東西成分流速。観測期間: 1993年11月12日~1994年11月24日。横軸の1日盛りは10日間を示す

Fig. 5 Time series of (a) current direction, (b) velocity amplitude, (c) northern velocity component, (d) eastern velocity component with an hour average from Nov. 12, 1993 to Nov. 24, 1994.

トル解析を行った(図8参照)。その結果、東西、南北成分共に12時間の半日周期及び、14.5日周期が卓越している。この変動周期は共に潮汐に起因するものと考えられる。

また、観測地点は東南東方向に深くなる斜面の途中(水深約1,174m)に位置するが、水深1,200m付近より傾斜が緩やかになり、水深約1,350mで平坦となる。観測地点は斜面の勾配の変曲点に位置しており、この地点で斜面に沿う南南西の流れが年間を通じて卓越していることより、相模トラフ底では反時計周りの流れが卓越しているものと考えられる。

4.5 今後の流れの観測

観測開始後、地殻変動等の突発的な現象が発生していないため、海底変動と流れとの関連性を把握するに至っていないが、今後引き続き観測することにより、海底変動現象と流れとの関連性をとらえることが期待される。さらに、流れの変動に関しては、年単位の長期変動特性をとらえることが可能となる。

流向の西方向への片寄り、他の観測機器の電源により生じる磁場の可能性が高い。流向をより正確にキャリブレーションするために、ステーション流速計のセンサーと同じ高さで、水平距離で1~2m程度離れた地点でキャリブレーションを行う必要がある。(満澤[15])

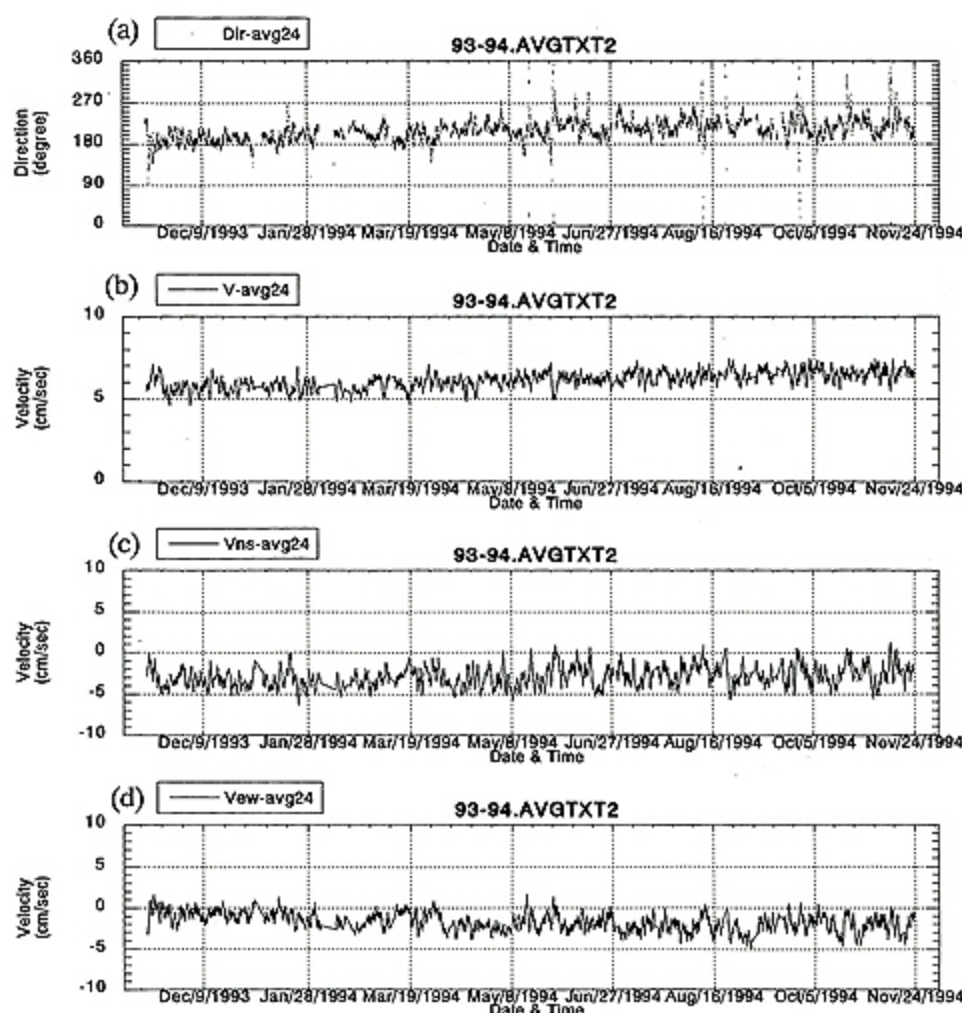


図6 流れの時間変動(24時間移動平均値)。(a)流向、(b)流速、(c)南北成分流速、(d)東西成分流速。観測期間：1993年11月12日～1994年11月24日。横軸の1日盛りは10日間を示す

Fig. 6 Time series of (a) current direction, (b) velocity amplitude, (c) northern velocity component, (d) eastern velocity component with 24 hours moving average from Nov. 12, 1993 to Nov. 24, 1994.

5. 地中温度計測

本ステーションで使用している2台の地中温度計はサーミスタ温度計(海洋電子製)である。全長37cmで、海底に刺さる槍の部分には25cmである。各々の槍にはサーミスタが10cm間隔で3か所に取り付けられており、海底に刺した状態では、海底直下、海底下約10cm、及び海底下約20cmの温度を計測している。この地中温度計のうちの1台はステーション近傍のシロウリガイ群生内に設置され、そこから約1m離れたシロウリガイ群生外に他の1台が設置されている。以下、シロウリガイ群生内に設置された地中温度計による計測温度を、上(海底直下)から下(海底下約20cm)へ順に、 T_{10} 、 T_{10} 、 T_{10}

と呼び、シロウリガイ群生外に設置された地中温度計による計測温度を、同様に T_{20} 、 T_{20} 、 T_{20} と呼ぶことにする。

5.1 計測温度のキャリブレーション

1993年9月のステーション設置から、同年11月のステーション水中部移設までの間、地中温度計はステーション本体に搭載されていたので、その間の地中温度計は水温を計測していた。図9に9月21日のステーション設置前後の計測温度を、図10に T_{10} 以外の各温度と T_{10} との温度差を示す。このときのサンプリング間隔は20秒である。ステーションは、10:07に海底面直上に達し、約30分曳航した後、10:41に着底した。これらの図を見ると

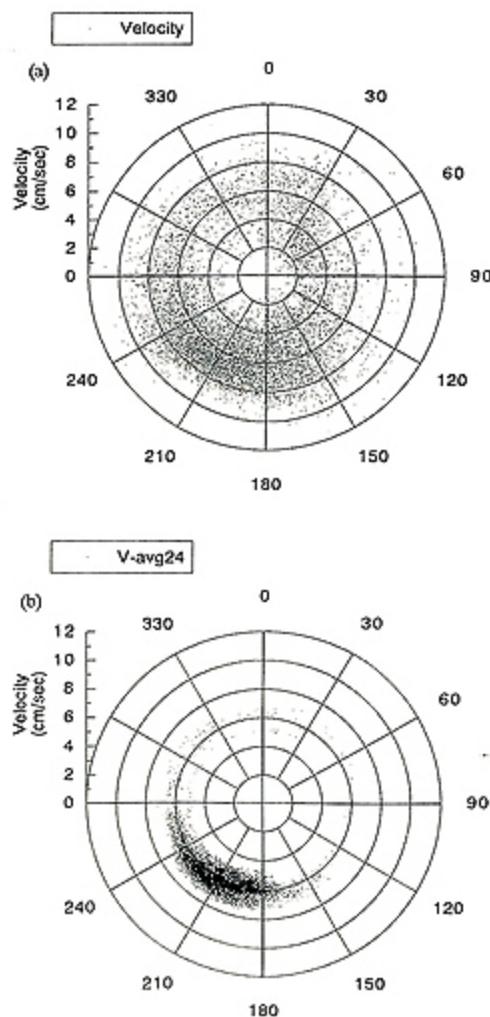


図7 流速-流向分布。(a) 1時間平均結果、(b) 24時間移動平均結果。観測期間：1993年11月12日～1994年11月24日
Fig. 7 Polar diagram of velocity for direction from Nov. 12, 1993 to Nov. 24, 1994. (a) An hour average data, (b) 24 hours moving average data.

わかるように、各サーミスタ間で計測温度に差があり、ステーションが海底直上に達した10:07ころ以降、それらは一定値となっているが、最大で0.65℃程度の差を有している。そこで、値が安定した11:00以降、当日収録したデータの最後の13:52までの温度差の平均値を求め、これらの値を計測温度から差し引き、さらに、海底直上に設置しているCTD (Sea Bird Electronics: SBE 9plus) のサーミスタ温度計からのずれを補正することにより、地中温度計の計測温度のキャリブレーションを行った。キャリブレーション後のデータによれば、約2か月後の海底温度計の海底設置までの間の各サーミスタ間の計測

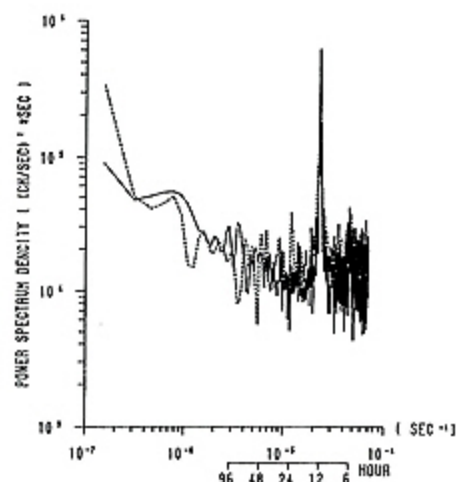


図8 スペクトル解析結果。観測期間：1993年11月12日～1994年11月24日。データ：2時間移動平均値。実線：南北成分流速、点線：東西成分流速

Fig. 8 Power spectra of northern and eastern component calculated by BT method from Nov. 12, 1993 to Nov. 24, 1994. Data arranged with 2 hours moving average. A solid line indicates the northern component, a dotted line indicates the eastern component.

温度のずれは、最大でも0.01℃以下であった。

5. 2 日～月単位の温度変動

図11に一例として、1994年10月における地中温度及び前記のCTD測定システムで計測した水温（以下CTD水温：Twと呼ぶ）と深度を示す。ここで用いたデータは、専用電話回線を通じて海洋科学技術センター横須賀局に伝送されたものであり、JJYにより時刻校正されている。一部にデータが欠落しているところがあるが、これは保守作業や伝送上の障害等により、データが収録できなかったことがその理由である。この期間の地中温度のサンプリング間隔は約2分であり、CTD水温のサンプリング間隔は1秒である。図11は、2分間の平均値をプロットしている。

この図から、地中温度は浅い所ほど水温変動による影響を大きく受けていることがわかる。すなわち、1日オーダー以下の水温変動に起因する短周期の温度変化は、シロウリガイ群生内の地中温度も、群生外の地中温度も、深いところほど減衰が大きい。しかしながら、減衰の割合は前者よりも後者の方が大きく、前者の熱伝導率が後者のものよりも大きいと考えられる。また、この期間における温度勾配は、前者の方が後者よりも大きく、海底下20cmと海底直下の温度差を比較すると、前者は後者の約1.8倍であり、地殻熱流量が2か所で倍程度も異なることになる。ただし、温度勾配については、後述する

ように、月オーダー以上の長い周期での顕著な変動が観測されている。

なお、水温変動のうち、1日オーダーの変動はこの期間においては深度の変化と良い相関を示しており、この傾向は特に1994年10月10日前後に顕著である。この種の水温変動は、潮汐に伴う底層流の変化等に起因していると考えられるが、水温変動と深度変化との間に明瞭な相関が見られない時期もあり、今後底層流の変化を含めた総合的な解析が必要である。

5. 3 月～年単位の温度変動

図12, 13に、それぞれ、1994年5月から翌年の5月までのシロウリガイ群生内の地中温度と群生外の地中温度をCTD水温と併せて示す。

データが欠落しているところは、前述の原因に加え、夏場の落雷による停電もその原因となっている。現在は無停電給電装置の増設により対処している。また、1995年3月下旬には、初島陸上局の移設工事に伴い、水中部を含め1週間給電を停止した。

この期間で顕著な現象は、シロウリガイ群生内の温度勾配(図12)が、1994年11月から翌年の4月上旬までの約5か月間、それ以前と比べて、最大で2/3程度にまで減少していることである。 T_{10} については、11月上旬から12月中旬までの間に約0.7℃減少している。この間、水温変動(T_w)には地中温度にこれだけの変動を与えるほどの変化が見られないので、この地温変動は、間隙水の移動など地中起源の要因によるものと考えられる。一方、この時期、シロウリガイ群生外での温度勾配(図13)は減少しておらず、むしろ若干の増加傾向が見受けられる。

シロウリガイ群生内での地中温度が減少し始めたこの時期に相前後して、1994年11月11日から同月20日にかけて、伊豆半島東方沖において北緯34度52分、東経139度15分を中心とするやや顕著な群発地震が発生している。気象庁の速報では、この間に約50個の震源が求められており、マグニチュードは最大で3.6となっている。この間、本ステーションの地震計においてもP-S時にして2～3秒の地震が数個検出されている。

中西ほか(1995)や太田(1990)は、伊豆半島東方沖の群発地震と連動して、シロウリガイ群生内の地中温度が変動する傾向を指摘している。中西ほか(1995)によれば、1993年1月及び同年5月の群発地震に相前後して海底下8cmの温度が、0.1もしくは0.2℃程度変化したと報告されており、また、その変動期間は約1か月程度である。前記1994年11月の群発地震は、これらの群発地震発生域より9km程度南というシロウリガイ群生域から離れた

位置で発生しており、規模もひとまわり小さいものであるにもかかわらず、前述のように約5か月にわたって約0.7℃の温度低下という、より規模の大きな変動が観測された。こうした現象の相違は、測定条件の違いによるのは勿論であるが、この地域の地震に伴う応力変化を反映したものとも考えられる。図12, 13に示した期間中は、これ以外に顕著な群発地震活動が発生しておらず、今後も長期観測を継続し、地中温度変化と群発地震の因果関係を調べる必要がある。

(岩瀬良一)

6. 海底地震観測

6. 1 海底地震計及びハイドロフォンによる観測状況

伊豆半島東方沖群発地震やマグマの移動に起因する微動、海底噴火などをモニターし、海底下の変動とシロウリガイなどの化学合成生物群集の行動との関係を総合的に調べるため、海底地震計及びハイドロフォンを装備している。

地震及び水中音は、アナログ式ペンレコーダで連続記録を行い、3成分(各16ビット)デジタル地震データは、初島陸上局において自動地震判定を行い、専用電話回線を通じて横須賀に転送し、判定前後の記録を8mmデータカートリッジに両方で記録する。水中音は、アナログ式データレコーダで連続記録を行っている。また、1994年11月からは、初島陸上局において全地震データのデジタル連続記録も行っている。なお、地震データの時刻は、JJYで自動的に校正される。ハイドロフォンには、水中部に供給する50Hzの交流によると思われる電氣的ノイズが回り込んでおり、微小な音はとらえにくい。何度か地震に伴う水中音が記録された。地震判定による記録及び連続記録の一部から、関東周辺で起こった地震と、日本付近の中規模の地震についてまとめた。

気象庁及び防災科学技術研究所から発表されている暫定震源によると、1994年3月11日より1995年6月10日(約1年3か月)の間に、ステーション海底地震計からの震源距離200km以内、M(マグニチュード)3以上では302個の震源が報告された。そのうち、初島で地震と判定されたものは58個である。震源距離200～400km、M3以上では196個の震源が報告されているが、初島で地震と判定されたものは4個である。1995年2月17日より6月8日の間(3か月22日)は、数度にわたり調整のために陸上伝送システムを停止したので、アナログ連続記録の読み取りを行った。その結果、さらに震源距離200km以内

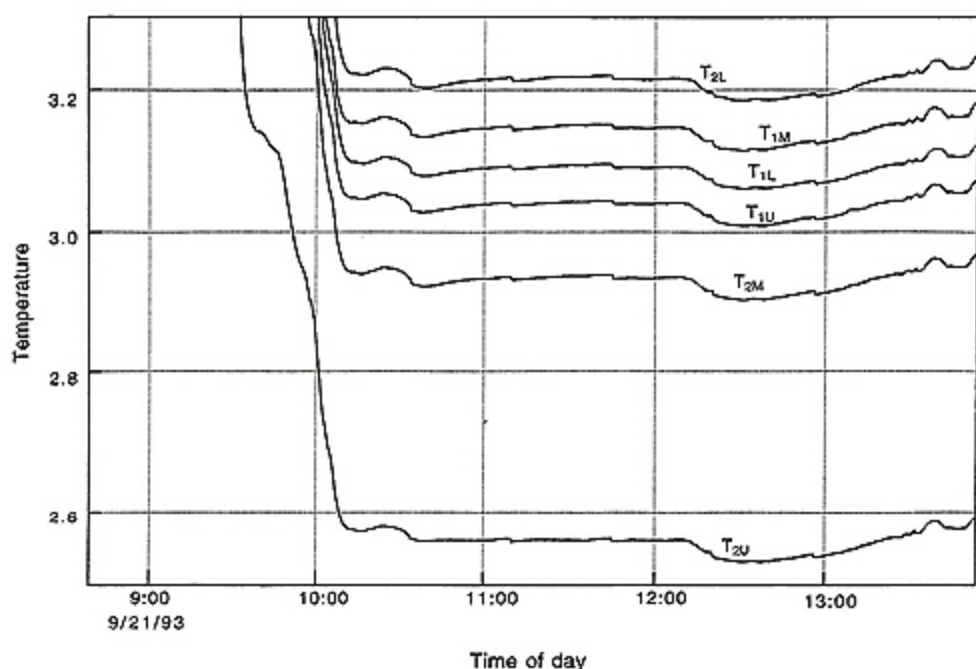


図9 ステーション着底前後の地中温度計の温度変化

Fig. 9 Temperature profile of heat flow sensors before and after the arrival of the observatory at the seafloor on September 21, 1993. T_{1L} , T_{1M} , T_{1U} , T_{2L} , T_{2M} and T_{2U} : Temperature measured by heat flow sensors (See the explanation of Fig. 11).

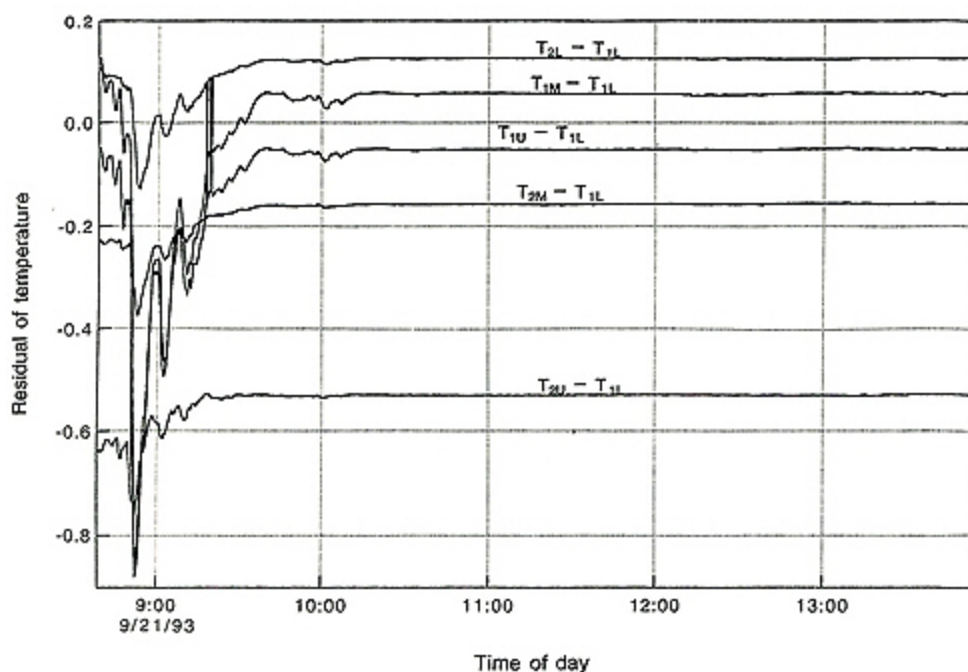


図10 ステーション着底前後の地中温度計の T_{1L} からの温度差

Fig. 10 Temperature residuals from T_{1L} of heat flow sensors before and after bottoming of the observatory.

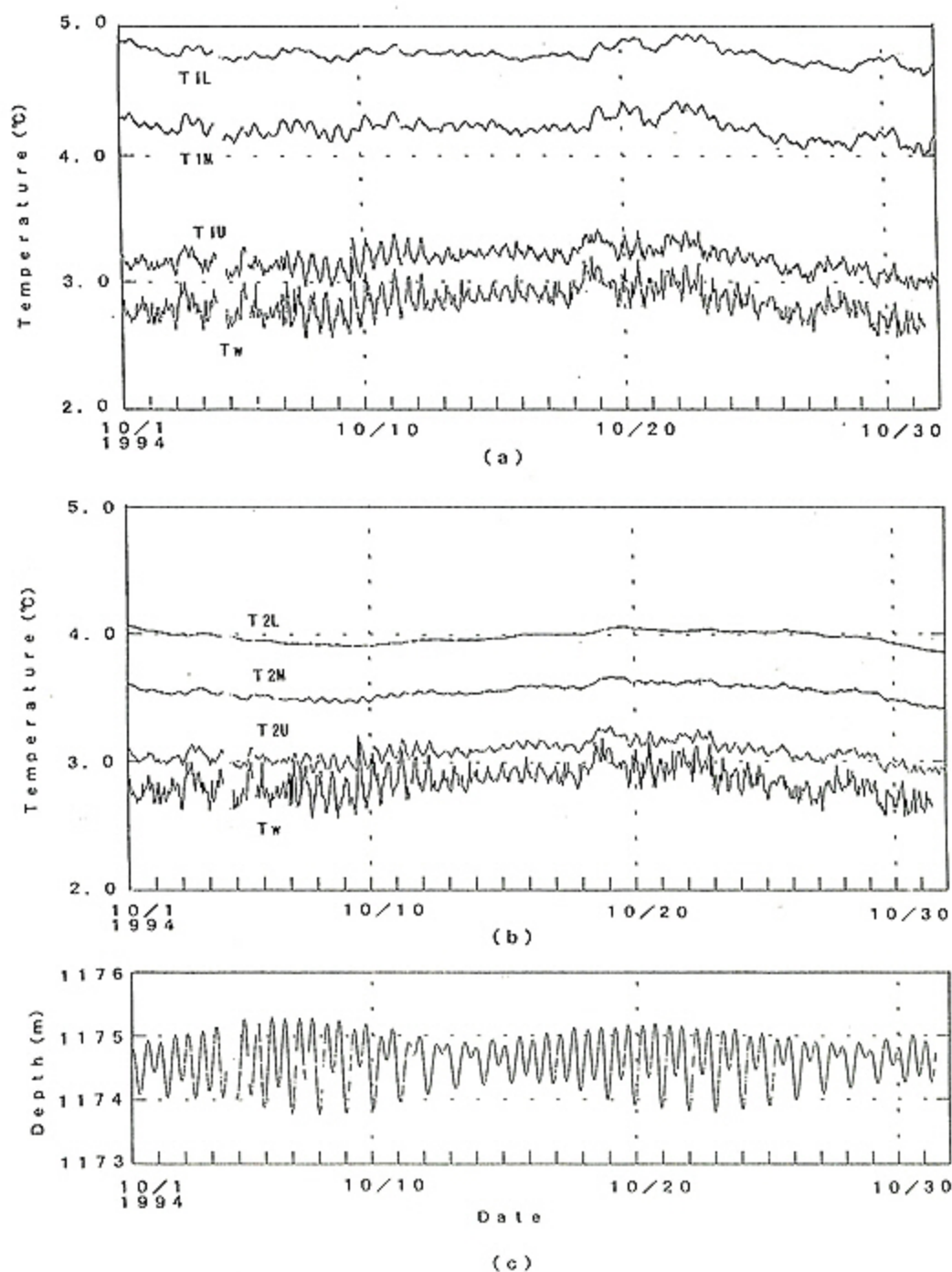


図11 シロウリガイ群集内外の地中温度、水温及び深度の変化 (1994年10月)

Fig. 11 Temperature profiles under the seafloor inside and outside the *Calyptogenia* colony, sea water temperature, and water depth in October 1994. (a) Temperature profiles under the seafloor inside the colony and water temperature. T_{1L} , T_{1M} and T_{1U} : Temperatures at 20cm, 10cm and just below the seafloor inside the colony, respectively. T_w : Temperature at 50 cm above the seafloor. (b) Temperature profiles under the seafloor outside the colony and water temperature. T_{2L} , T_{2M} and T_{2U} : Temperature at 20cm, 10cm and just below the seafloor, respectively. T_w : the same as (a). (c) Water depth profile.

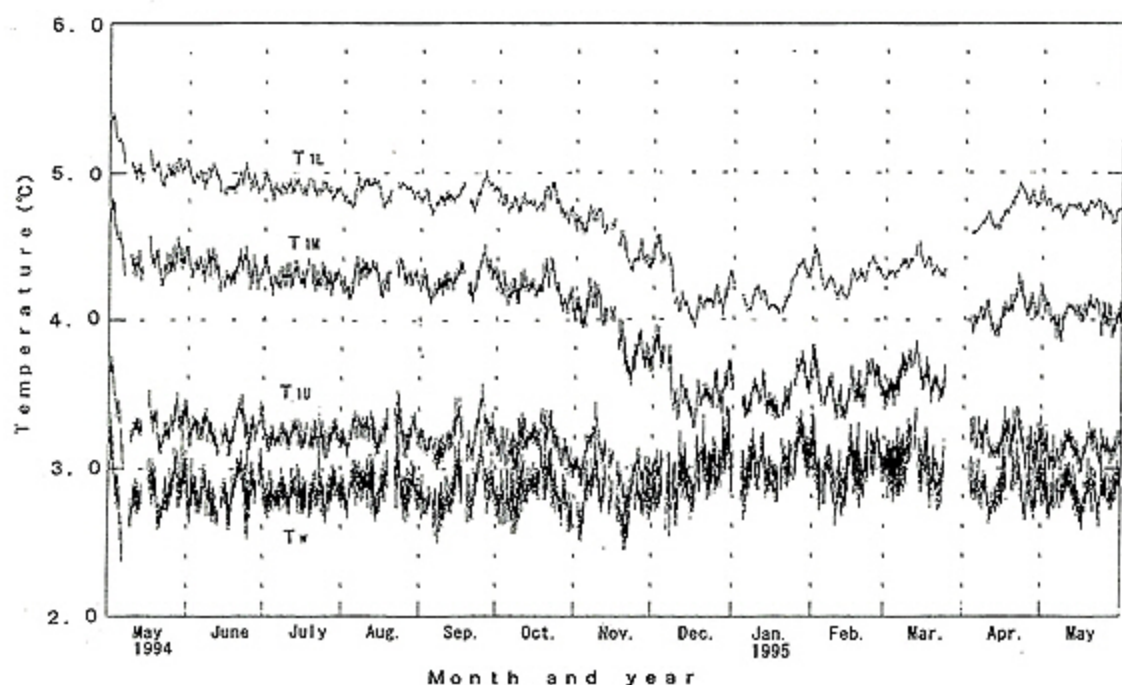


図12 シロウリガイ群集内の地中温度及び水温の変化 (1994年5月～1995年5月)

Fig. 12 Temperature profiles under the seafloor inside the *Calyplogena* colony and sea water temperature between May 1994 and May 1995. T_{1L}, T_{1M}, T_{1U} and T_w: the same as Fig. 11.

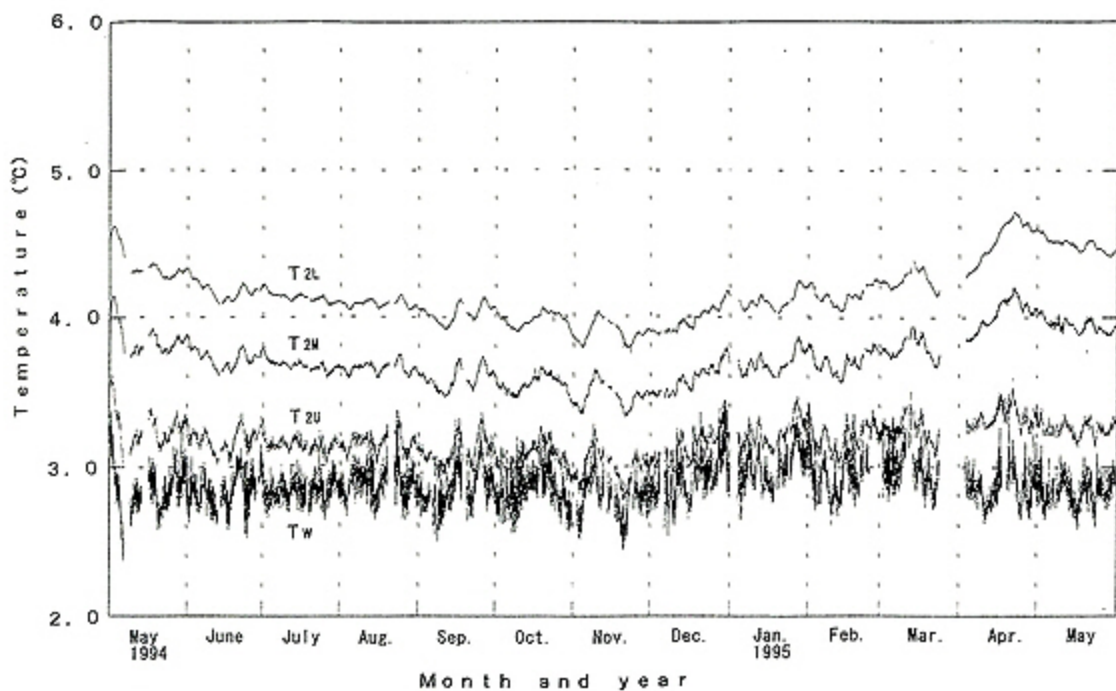


図13 シロウリガイ群集外の地中温度及び水温の変化 (1994年5月～1995年5月)

Fig. 13 Temperature profiles under the seafloor outside the *Calyplogena* colony and sea water temperature between May 1994 and May 1995. T_{2L}, T_{2M}, T_{2U} and T_w: the same as Fig. 11.

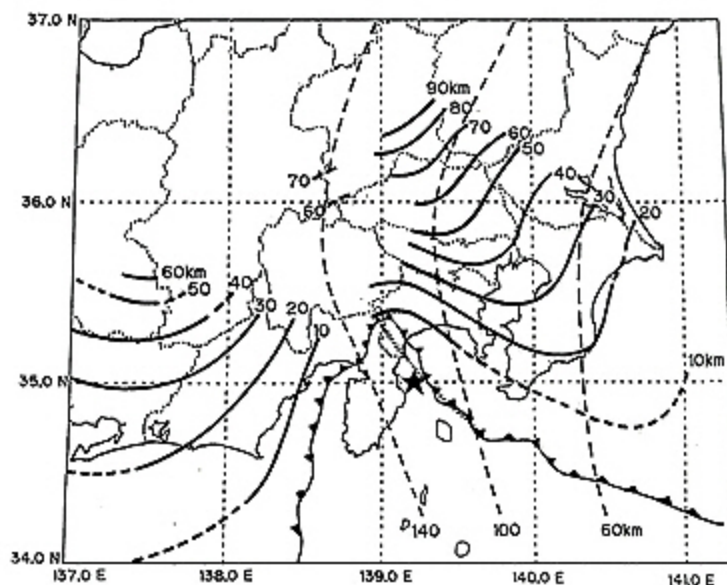


図14 関東、中部地方における沈み込んだフィリピン海プレート上面と太平洋プレート上面の等深線(Ishida 1989)とステーションの位置 (星印)

Fig. 14 Contour of subducted Philippine Sea plate and Pacific plate under Kanto-Chubu district (Ishida 1989). Star indicates the deep sea observatory off Hatsushima Island.

で14個、震源距離200~400kmで3個の地震が検出された。以下では、これらも観測された地震データとして使用する。

合算すると、震源距離200km以内では302個のうち72個、震源距離200~400kmでは230個のうち7個の地震が観測されている。地震計のデジタルデータは16ビットであるが、近くで発生する地震で飽和しないよう分解能1.22mkine(kine: cm/sec)、フルスケール40kineと低倍率に設定した。このため、ノイズレベル付近の小さい波形をとらえることは難しく、これが地震記録数の少ない原因と考えられる。

伊豆半島付近のプレートの相対関係について見ると(図14)、伊豆半島や相模湾をのせたフィリピン海プレートは、相模湾から関東地方の地下へ、駿河湾から東海地方の地下へ沈み込んでいる。フィリピン海プレート上には、八丈島、大島から手石海丘、箱根へと抜ける火山帯が走っており、地殻が厚くなり場所によってはマグマや地下の部分溶融がある可能性がある。関東地方においては、フィリピン海プレートのさらに下に太平洋プレートが沈み込んでおり、その深さは初島沖付近では約120kmと推定されている。太平洋プレートの沈み込み口は日本海溝及び伊豆小笠原海溝である。この地震観測の目的は初島沖周辺のローカルな地震活動の把握にあるため、帯域、設置方法、地震判定基準の変数などは遠地地震につ

いては考慮していない。観測期間中に、気象庁や防災科技研などから報告された各地域の広域的な地震活動と、初島沖で観測された地震データについて概要を述べる。また、波形の例を図15及び図16に示す。

6. 2 沈み込み前のフィリピン海プレートの地震及び沈み込んだ太平洋プレートの地震

(1) 伊豆半島東方沖

シロウリガイの挙動や海底火山などとの関連を重視している伊豆半島東方沖では、1970年代より毎年のように群発地震活動があり、1989年には海底噴火も見られた。我々が観測を開始する直前の1993年に、10年に1度という活発な群発地震活動が見られたが、その後あまり目立った活動はない。観測開始後の1993年11月から1994年1月にかけて3個の震源情報が報告されており、これらはすべて記録され、P-S時間が2~2.5秒である。なお、この海域で沈み込んだ太平洋プレートによると思われる深さ100kmをこえる地震が2つ報告されているが、初島沖の地震計では観測されなかった。

(2) 大島近海、新島近海、三宅島近海

これらの海域でも時折群発地震が起こるが、M4クラスの大きさのものが観測されている。ただし、記録の有無はあまりマグニチュードや震源からの距離によらないようでもあり、震源のメカニズムや波の伝搬経路の影響が出ている可能性もある。震源の深さ50~180kmの、沈

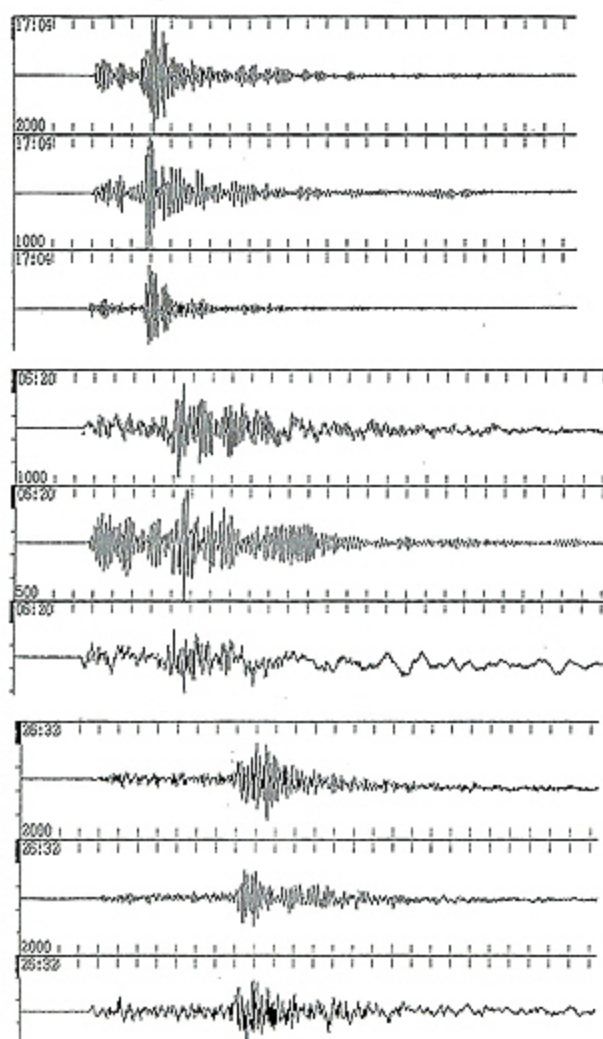


図15 地震波形の例。横方向の目盛りは1秒の長さを表わす。3つのトレースは、同一の地震の直交する3成分(上から南北成分、東西成分、上下成分)を表わす。上の地震は、1994年10月29日に房総南東沖 N34.873, E140.751, M4.9, 深さ71.3kmで発生した。ステーションから震源までの直距離は約156kmである。下の地震は、1994年9月4日に千葉県中部 N35.579, E140.131, M4.3, 深さ76.6kmで発生した。ステーションから震源までの直距離は約126kmである。

Fig. 15 Examples of wave forms. Tic marks on horizontal scale indicate one second per division. Upper 3 traces are three perpendicular components (N-S, E-W, U-D) of one earthquake. The focal parameters of the upper event are 10/29/1994, N34.873, E140.751, M4.9, depth: 71.3km. Slant range between the observatory and hypocenter is about 156 km. The focal parameters of the lower event are 1994.9.4, N35.579, E140.131, M4.3, depth 76.6km. Slant range between the observatory and hypocenter is about 126km.

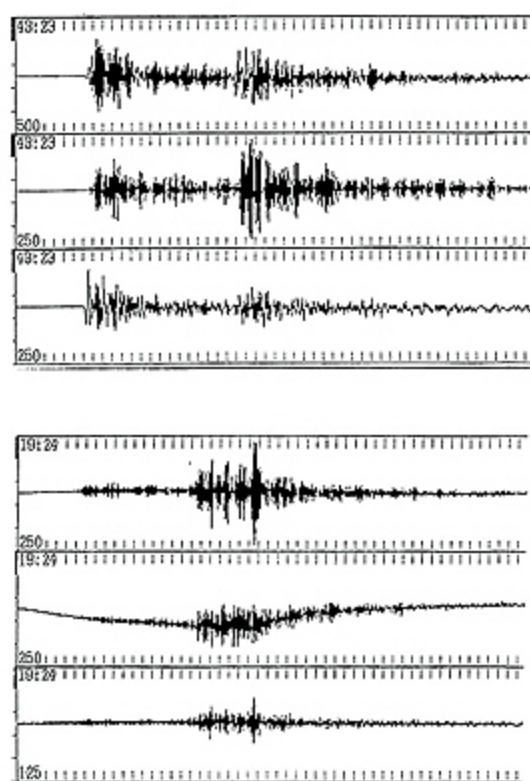


図16 地震波形の例。横方向の目盛りは1秒の長さを表わす。3つのトレースは、同一の地震の直交する3成分(上から南北成分、東西成分、上下成分)を表わす。上の地震は、1994年12月3日に伊豆半島東方沖 N34.908, E139.32, M3.8, 深さ13.4kmで発生した。ステーションから震源までの直距離は約18kmである。中の地震は、1994年10月25日に神奈川県西部 N35.183, E138.983, M4.9, 深さ4kmで発生した。ステーションから震源までの直距離は約30kmである。下の地震は、1995年4月18日に駿河湾北部 N35.064, E138.6, M4.9, 深さ17kmで発生した。ステーションから震源までの直距離は約60kmである。

Fig. 16 Examples of wave forms. Tic marks on horizontal scale indicate one second per division. Upper 3 traces are three perpendicular components (N-S, E-W, U-D) of one earthquake. The focal parameters of the upper event are 12/3/1994, N34.908, E139.32, M3.8, depth: 13.4km. Slant range between the observatory and hypocenter is about 18km. The focal parameters of the middle event are 10/25/1994, N35.183, E138.983, M4.9, depth: 4km. Slant range between the observatory and hypocenter is about 30km. The focal parameters of the lower event are 4/18/1995, N35.064, E138.6, M4.9, depth: 17km. Slant range between the observatory and hypocenter is about 60km.

み込んだ太平洋プレート付近に発生したと思われる11個の地震は、初島沖の地震計では観測されなかった。

(3) 房総はるか沖

相模トラフと伊豆小笠原海溝が会合する海溝3重会合点付近では、フィリピン海プレートの下にもぐり込んだ太平洋プレート内部の地震活動が活発である。M3クラスの地震がほとんどで、深さは10kmから200kmにわたる。27個のうち、1つが連続記録で観測されている。観測されない原因の1つとして、これらの地震と、初島沖地震計との間には、フィリピン海プレートの下の方のやわらかいアセノスフェア（マントル部分溶融層）があるため、波が減衰した可能性もある。

6. 3 沈み込んだフィリピン海プレートの地震 (相模トラフ側)及び沈み込んだ太平洋プレートの地震

(1) 房総沖

沈み込んだ太平洋プレート内部、フィリピン海プレート内部、あるいは太平洋プレートとフィリピン海プレートとの間に地震が起こる。勝浦沖などの深さ50~80kmの地震は観測されているが、それより浅い地震や深い地震は観測されていない。勝浦沖の地震は4個観測されている。震源の深さは63~77kmでM3.8~5.1、特徴としてP波の振幅が比較的大きく、S波の半分から同じくらいである。館山沖の地震は、震源の深さが約56kmでM3.2の地震2つはP波が不明瞭であるが、深さ82km、M4.4の地震は勝浦沖と同様の波形である。これらの地震は、ちょうどフィリピン海プレートの内部を伝わって初島沖に到達するため減衰が少ないと考えられる。

(2) 九十九里沿岸及び銚子

九十九里の地震は7個報告されており、うち4個が初島でも観測されている。M3クラス(そのうち3つは4に近い)の地震で、深さ20km台と60kmが観測された。波形は全体に振幅が小さく、P波が読み取りにくい。観測されなかった地震はM3~3.2で深さは50km台であった。銚子の地震は、15個のうち2個が観測された。深さ43kmと46kmの地震である。マグニチュードは、3.6と4.4である。深さ46km、M4.4の地震は、P波は読めるが、そのあとに後続波が続くS波の位置がよくわからない。これらも、フィリピン海プレートの内部を伝わって初島沖に到達するものである。

(3) 千葉県北部、中部

千葉県北部の地震は11個報告されているが、うち6個が観測されている。観測された地震はM3.6~4.3で深さは52km、65km、70~73km、観測されなかった地震は

M3.2~4.2で深さは50km、60km、66~69kmである。千葉県中部の地震は20個報告されているが、うち10個が観測されている。観測された地震はM3.3~5で深さは60km、70km、73~77km、観測されなかった地震はM3.0~4.1で深さは50km、60~74kmである。これらはフィリピン海プレートの内部を伝わって初島沖に到達する。ここでは、M4を超えるような地震がしばしば起こるため、初島で観測される機会も多い。P波よりもS波の振幅が大きい、全体に振幅が大きいのでP波も読み取れる。

(4) 茨城県南部、南西部

千葉県同様地震はフィリピン海プレートの周辺に発生し、プレート内部を伝わってくる。茨城県南西部では、報告されている24個のうち10個が観測された。マグニチュードは3.7~5.4、深さは40~124kmである。観測されなかった地震はM3~4.1、深さは16.5~90kmである。茨城県南部では、報告された地震10個のうち3個が観測された。3個のうち2つは100kmを超える深さのM3.7と4.2の地震で、1つはM3、深さ63.8kmである。他の地震は深さ27~135kmにわたって分布しており、M3~3.3が多い。

多くの地震は、千葉県同様P波よりもS波の振幅が大きい、全体に振幅が大きいのでP波も読み取れる。

(5) 神奈川県

神奈川県の地震は8個報告されており、うち5個が観測されている。観測された地震はM3.3~4.9で深さは4km、10km、30km、113km、118km、観測されなかった地震はM3.4~3.8で深さは72km、79km、137kmである。

深さ4km、M4.9の地震と深さ10km、M3.6の地震はそれぞれ箱根の南と北に発生しているが、前者のほうが低周波成分に富み、S波に対するP波の振幅が大きい。この差の原因としては震源のメカニズム、マグニチュードの違い、波の伝搬経路の違いなどが考えられるが、何に起因するものかは不明である。

(6) 山梨県

山梨県中部において3個の地震が報告されているが、初島沖の地震計では観測されなかった。山梨県東部の地震は、報告された7個の地震のうち、3つが観測された。震源の深さは16~19kmで、M3.1~4.4で低周波成分の少ない波形が観測された。

6. 4 沈み込んだフィリピン海プレートの地震 (駿河トラフ側)及び沈み込んだ太平洋プレートの地震

(1) 駿河湾

駿河湾北部において地震が発生した。マグニチュードは防災科技研の速報では4.9である。この本震と、10分後に起こった余震とが記録された。やや低周波成分を含んだ波形が観測された。

(2) 長野県

この地域の地震は、震源の深さ10km未満のものが21個報告されているが、うちM5とM3.7の2つを観測している。長野県南部のM5の地震では、低周波成分を含んだ波形が観測された。

6. 5 全体的傾向

地震発生場所や規模にムラがあるために、観測された地震分布も片寄って見えるが、全体的には震源距離200km以内でM4クラスならば記録されることが多い。大島から南西方向の浅い地震や、相模湾、伊豆諸島の沈み込んだ太平洋プレートに発生した地震などはあまり観測されていないが、伝搬経路に波の減衰の大きい部分(部分溶融したマントルなど)があったり、複雑な構造のために波が曲げられたりしている可能性がある。一方、千葉県から茨城県にかけての深さ50~80kmくらいの地震は、伝搬経路が沈み込んだフィリピン海プレートにあたるためか、M3程度の小さい地震でも観測できることがある。

(海宝由佳)

7. ま と め

1年9か月間の長期観測を通じて、2つの重要な現象が観測された。第1は、シロウリガイが高い頻度で放精放卵を行っていることである。画像記録は全観測期間ではなく、その約18%しかカバーしていないので、実際の発生頻度はもっと高いと考えるべきであろう。熱水及び冷湧水域の化学合成生物が発見されてから既に20年近くになるが、これらの生態及び生殖行動はほとんど未知である。高頻度の放精放卵は、初島沖に高密度で生息するシロウリガイ群生と無関係ではないと思われる、さらには化学合成生物に特有の生態という可能性もある。今後、ステーションを中心とした現場実験や、ステーションによる観測と連動した、潜水船やROVによるタイムリーな調査を計画したい。このためには、潜水船は無理としても、ROV(「ドルフィン3K」)にもっと機動性を持たせる必要がある。第2は、伊豆半島東方沖の群発地震に対応したと考えられる、地中温度の低下である。中西ら(1995)によっても同様な結果が得られており、群発地震の前後にわたって地中温度が低下するのが事実とすれば、地中温度の変化が地震の発生を予測する指標となる

可能性もある。

深海底において、画像を含む多数の観測センサーによって1年間以上の長期にわたる連続観測を行ったことは、世界にも例がないであろう。年間を通じて得られる膨大なデータには、極めて多くの有益な情報が含まれていると思われる。これらを掘り起こすために、各データを単独に取り扱うのみならず、相互関係を考察すること(多変量解析)が今後の重要な課題である。その1つの試みとして、同一時間スケールによる長期間の全データ表示・記録や、最も定量化の遅れているシロウリガイの行動(個体数変化、移動量等)を数値化するための画像処理を進めている。

長期観測において、センサーのキャリブレーションが新たなニーズとなっている。今のところ、キャリブレーションされた他のセンサを現場に持ち込んで、データの相互比較によって補正する方法が現実的である。電磁流速計の流向を、現場キャリブレーションによって補正する試みを行い、良好な結果が得られた。今後は、CTD等の現場キャリブレーションも必要である。

本研究の3年間の観測目標も違えば先ではなくなってきた。今後、ステーション水中部の引き揚げ、機器の保守・機能向上、同一地点または近くの場所への再設置等、技術的な課題にも挑戦しつつ、観測を継続していきたい。

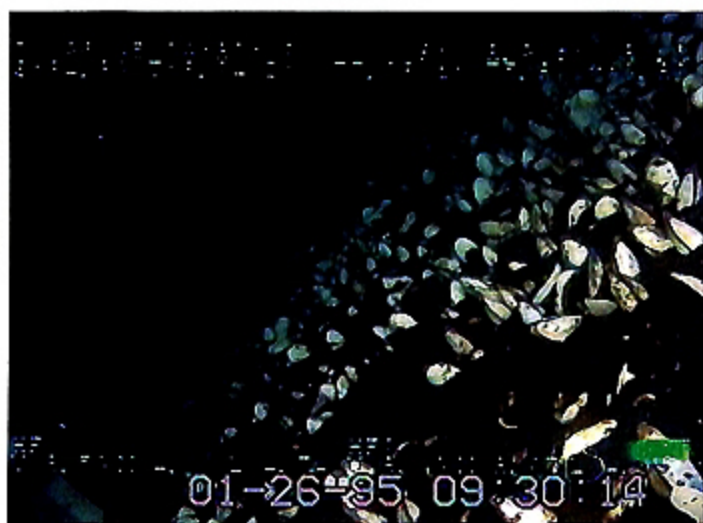
引用文献

- Momma, H., K. Mitsuzawa, Y. Kaiho and H. Hotta (1993): "Hatsushima"—Real Time Long-term Deep Sea Floor Observatory. *Proc. IEEE/Oceans '93*, 3, 473-477.
- 門馬大和・満澤巨彦・海宝由佳・堀田 宏 (1994): 相模湾初島沖「深海底総合観測ステーション」の設置と長期観測. *JAMSTEC 深海研究*, 10, 363-371.
- Berg, C. J. (1985): Reproductive strategies of mollusks from abyssal hydrothermal vent communities. *Biol. Soc. Wash. Bull.*, 6, 185-197.
- Fiala-Medioni, A. and M. Le Pennec (1989): Adaptive features of the bivalve Molluscs associated with fluid venting in the subduction zones of JAPAN. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 71, 161-168.
- Lightfoot, R. H. (1979): Seasonal Reproduction in deep sea bivalves and brittle-stars. *Deep-Sea Res.*, 26, 967-974.
- Loosanoff, V. L. (1953): Reproductive cycle in

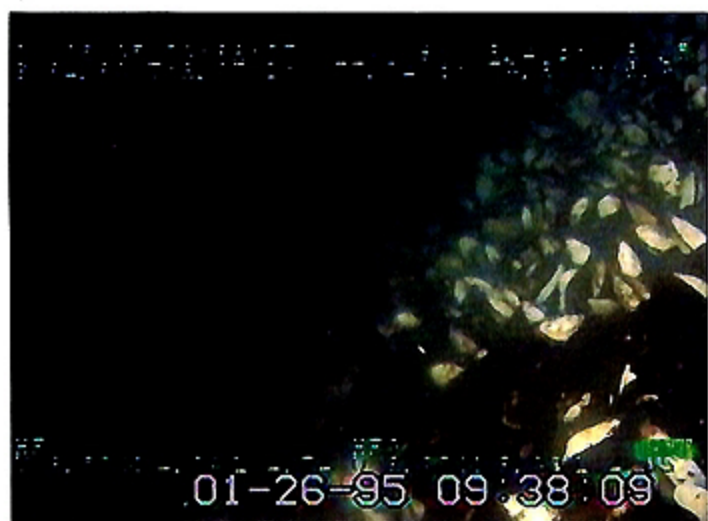
- Cyprina islandica. Biol. Bull., 104, 146-155.
- Nelson, T. C. (1928): Relation of spawning of the oyster to temperature. Ecology, 9, 145-154.
- Newell, C. R., H. Hidu, B. J. Mcallice, G. Podniesinski, F. Short, and L. Kindblom, (1991): Recruitment and commercial seed procurement of the blue mussel *Mytilus edulis* in Maine USA. J. World Aquacult. Soc., 22, 134-152.
- Orton, J. H. (1920): Sea temperature, breeding and distribution of marine animals. J. mar. biol. Ass. U. K., 12, 339-366.
- Sastry, A. N. (1963): Reproduction of the bay scallop, *Aequipecten irradians* Lamarck. Influence of temperature on maturation and spawning. Biol. Bull., 125 146-153.
- Sastry, A. N. (1996): Temperature effects in reproduction of the bay scallop, *Aequipecten irradians* Lamarck. Biol. Bull., 130 118-134.
- Thorson, G. (1946): Reproduction and larval development of Danish marine bottom invertebrates, with special reference to planktonic larvae in the sound (Oresund). Medd. Dan. Fisk. -Havunders., 4, 1-523.
- Van Dover, C. L. (1994): In situ spawning of hydrothermal vent tubeworms (*Riftia pachyptila*). Biol. Bull., 186, 134-135.
- 太田 秀 (1990): 相模湾冷水生態系に関する生態学的知見. 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 6, 181-195.
- 中西正男・藤本博巳・村上英幸(1995): 初島南東沖シロウリガイ群集域の海底及び海水の温度変化ー伊豆半島東方沖群発地震との関係. 地震, 48, 71-79.

(原稿受理: 1995年6月30日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載



A



B

写真1 ステーションから見たシロウリガイ (1995年1月26日)。A: 放精放卵直前 (9:30), B: 放精放卵直後 (9:38)

Photo 1 Video image of vesicomyid clam bed (January 26, 1995). A: Before spawning (9:30), B: Just after spawning (9:38).