

B-56 二酸化炭素の海底固定化に関する研究

(1) 回収二酸化炭素の深海底貯留法の評価に関する研究

③ 二酸化炭素の海洋固定化を目的とする深海底の海洋生物に関する調査研究

東京水産大学 海洋環境学科 石丸 隆

平成 10～12 年度合計予算額 5,190 千円

(うち、平成 12 年度予算額 1,642 千円)

[要旨] 底生生物および近底層生物の採集を行った結果、駿河トラフでは、生物量が大きく、一方、小笠原諸島、母島沖南方の窪地は生物量が極めて低かった。後者は二酸化炭素海底固定化の実施サイトとして適当である可能性があるが、固有種の存在の可能性があり、今後も引き続き調査すべきである。動物プランクトンを用いた pH 耐性の試験では、塩酸よりも二酸化炭素によって pH を低下させた場合の方が影響が著しく強く、pH の低下だけでなく、二酸化炭素そのものの毒性を評価する必要があることが明かとなった。

[キーワード] 二酸化炭素、海底固定化、深海生物、実施海域、pH

1. はじめに

二酸化炭素の海底固定を行う地形としては、水深 3,500 m 以上の窪地であることが必要である。海洋の平均水深は 3,800m であり、水深 5,000 から 6,000m の、大洋底と呼ばれる地形が広大な面積を占める。均一な地形に形成される生物群集は類似していると考えられるため、生物多様性の維持という観点からは、固定サイトとして大洋底中の小さな窪みを選択するのが良い。しかし、大洋底においては、乱泥流のために堆積物が平坦化されており、適当な窪みが存在するかどうかは不明であり、また窪みを探すことも容易ではない。生物群集の調査には、必要な採集器具や観測装置を海底まで垂下することが必要であるが、このために必要な長さのワイヤーを有する研究船は少なく、また深くなるに連れて観測や採集に要する時間が長くなるため、調査の実施は加速度的に困難となる。従って固定サイトは大陸斜面あるいは海嶺周辺の斜面上の 3,500m を少し越える水深の窪みのうちから選択することとなる。従来、そのような特殊な地形における底生生物や近底層性物の分布に関する研究はほとんど無いため、まず、そのような地形に生息する海洋生物の生物量を明かにし、また固有の底生生物や近底層性物が存在するかどうかについて調べておくことが重要である。

一方、二酸化炭素を海洋に隔離するためには、中層放流や海底固定など、いずれの方法によるにせよ、その影響域がどの範囲に及ぶかを数値モデルにより明らかにすることが行われるが (Adams et al., 1997¹⁾; Caulfield et al., 1997²⁾ など)、そのために用いられる、海洋生物の低 pH や高二酸化炭素濃度に対する耐性についての情報は極めて少なく、動物プランクトンに対する pH の影響に関しては、Yamada and Ikeda (1998)³⁾ が、線虫類に対する二酸化炭素の毒性に関しては、Takeuchi et al. (1997)⁴⁾ などがあるのみである。まず、多種類の深海生物に関して、低 pH や高濃度の二酸化炭素の毒性を急性毒性のみならず、慢性毒性に関しても明らかにすることが急務である。

2. 研究目的

(1) 候補海域における底生、近底層生物群集の調査

二酸化炭素海底固定の候補地の選択には、3500m 以上の水深をもつ大陸斜面と海嶺上から海図によって検索することが必要であり、さらに、マルチナロウビーム音響測深機等により海底地形を明らかにし、有人、無人の深海探査機を用いた映像記録や採集による底生生物、近底層生物の定量的な調査を行うことが望ましい。また、海底固定した二酸化炭素の影響範囲を調べるためには深海係留系を用いた海流の測定なども必要である。しかしながら、このような広範な調査を行うには、研究船のシブタイムの確保や観測機器の充実が前提となる。本研究では、利用可能船舶として、東京水産大学の研究練習船「神鷹丸」を選んだため、研究目的は、ドレッジおよびソリネットによる定性的な底生生物、近底層生物の生物層の解明に限定した。

(2) 生物に対する二酸化炭素の影響の評価

二酸化炭素の生物に対する影響の研究手法として、現場法と実験室における研究が考えられる⁵⁾。このうち、現場法では、生物群集を対象とし、現場水温、塩分、圧力下で影響を調べることができるが、これには潜水艇の使用や、特殊な現場式実験観察装置の製作が必要となる。一方、研究室における方法では、採集した生物をもちいて比較的容易に各種の条件下で実験を行うことができるが、深海生物の場合は、生きたまま研究室に持ち帰ることは困難であり、また、深海の圧力をシミュレートした実験系を作ることはきわめて難しい。

本研究では、各種の動物プランクトンを海洋表層および中層から採集して研究室に持ち帰り、低 pH および高二酸化炭素濃度の影響を調べることを目的とした。

3. 研究方法

(1) 候補海域の決定及び底生、近底層生物群集の調査

海底地形図（海上保安庁水路部）を精査し、黒潮の流路等を調べて候補地を選んだ。適当と考えられる地形は駿河トラフ上および小笠原海嶺周辺の斜面上などに見られ、これらの海域における底生および近底層の動物群集の性状を明らかにすることを目的として採集調査を行った。

採集は、東京水産大学研究練習船「神鷹丸」によって行った。平成 10 年 7 月 13 日には、駿河トラフ上の比較的緩やかな斜面を持つ窪地（34-04.18 N, 138-30.95 E ~ 34-02.68N, 138-27.97 E, 水深 約 3780 m）において、ソリネットによる採集を行った。ワイヤーを繰り出しながら約 1 kt (0.5 m/s) で航走し、ワイヤー長が 4670 m（使用できる最大長）に達した後、同速力で 30 分間曳網し、回収した。

平成 10 年 10 月 18 日には、母島南東約 100km にある窪地（26-01N, 142-45 付近、水深約 3650m）を対象として調査を行った。この窪地は急峻な斜面を持つカルデラ状の地形で底面の直径は約 7 km で周囲の高度は底面より約 200m であり、二酸化炭素海底固定の実験サイトとしては理想的である。ここでは、ソリネットによる採集 1 回、ドレッジによる採集 2 回を行った。この海域での採集は、さらに、平成 11 年 10 月 19 日にソリネットにより 2 回、ドレッジにより 1 回（試料は得られなかった）を、平成 12 年 10 月 15,16 日には、ソリネットにより 1 回、ドレッジにより 1 回行った。曳網条件はいずれも駿河トラフにおけるソリネットの場合と同様である。採集試料は、直ちに 5% ホルマリン海水中で固定保存し、研究室に持ち帰って試料中の生物を観察し

た。

(2) 生物に対する低 pH および高二酸化炭素濃度の影響

① 塩酸添加による低 pH の影響

研究練習船「青鷹丸」により、平成 11 年 2 月 5 日に相模湾中央の観測点 (35-00 N, 139-20 E) において、ORI I ネット (口径 160 cm、目合 1mm) の 2000 m ワイヤアウト傾斜曳きによる動物プランクトンの採集 (到達水深 556 m) を行った。採集された動物プランクトンからカイアシ類 *N. cristatus* のコペポダイト V 期の個体を選別して濾過海水に移し、冷蔵庫内で生かしたまま実験室に持ち帰り約 3 °C の恒温室内で飼育した。低 pH に対する耐性を調べるために、3 または 5 個体を、予め塩酸で pH を調節した相模湾表層水 (塩分 33PSU) 200 ml を入れた腰高シャーレに移し、経時的に生死の判定を行った。実験に用いた固体はあまり動かなかつたため、生死判定には、運動の有無と心臓の動きを実態顕微鏡により観察する方法を併用した。海水の pH は、塩酸添加後に大きく変動するため添加 12 時間後に実験を開始した。

② 動物プランクトンに対する高二酸化炭素濃度の影響

平成 12 年度には、二酸化炭素を一定の率で混合した空気を曝気して pH を調節した海水を作り、この海水をペリスタルティックポンプによって恒温水槽中においた飼育容器に循環させる装置 (図 5) を製作した。*N. cristatus* は、平成 11 年春以降は、実験に必要な個体数が得られなかったため、動物プランクトンとしては、相模湾表層より IONESS ネットにより採集した外洋性カイアシ類 *Scottocalanus helena*e と *Mesocalanus tenuicornis* の 2 種と東京水産大学係船場から手曳きネットにより採集したヤムシ 1 種を用いて実験を行った。

4. 結果・考察

(1) 候補海域の決定及び底生、近底生物群集の調査

駿河トラフの窪地からは、多量の管棲ゴカイなどが採集された (図 2)。試料中に木片が混ざっていることから解るように、陸からの有機物の供給が多く、また海洋表層の生産力の高さも高いものと考えられ、これらを反映した高い生物量があるものと考えられる。一方、母島沖の測点では、平成 10 年度の試料では、ソリネット試料中に、少数のクモヒトデ、巻き貝、ウミユリが採集されたのみであった。その後の採集では、次第に多くの種が得られるようになったが、いずれの採集においても生物量は小さかった。平成 12 年 10 月のソリネット試料中に見られた種を図 3 に示す。生物量は小さいが、多様性の高い群集が存在することが示唆される。

このように、生物量が低く、また表面の流速が低く二酸化炭素の海底への投下時に船を定位させやすいという点で母島沖の窪地は二酸化炭素の海洋固定を行う場としてふさわしいと考えられるが、今後、種組成や固有主の存在等を詳細に調べる必要がある。

(2) 生物に対する低 pH、高二酸化炭素濃度の影響

塩酸による pH の低下が、*N. cristatus* の生残に与える影響を図 4 に示す。pH はいずれの設定条件でも、実験開始から 72 時間後までにやや上昇したが、実験に供した 3 個体が 72 時間後まですべて生残したのは、pH が 5.7-6.4 のもののみであり、少なくとも 72 時間後に全数が生き残る

pHは6.4である。また、72時間後における半数致死条件 LC_{50} は、pH6.0程度と推定された。これは、yamada and Ikeda³⁾ における結果とよく似ていた。

二酸化炭素の添加によって pH を調節した海水中におけるカイアシ類とヤムシ類の死亡率の経時変化を図6、7と8にそれぞれ示す。死亡率と pH の関係を示す回帰直線を最小二乗法により求め、この直線の X 切片を LC_0 、死亡率 50%を与える pH の値を LC_{50} とした。*Scottocalanus helenae* と *Microcalanus tenuicornis* では、実験開始 96 時間後の LC_0 はそれぞれ 8.10, 8.28 (表1)、 LC_{50} はそれぞれ、7.03, 7.27 となった。ヤムシ *Sagitta crassa* では、実験開始 72、96 時間後には、死亡率 0 と 100%を与える pH のみが観察されたため、回帰直線は得られなかったが、両時間における LC_0 、 LC_{50} は、それぞれ 7.0、6.7 程度と考えられる。

塩酸により pH を低下させた実験では、カラヌス目カイアシ類 6 種の 96 時間 LC_0 、 LC_{50} は、それぞれ 5.63-6.79、5.16-6.14 であり、ヤムシ *Sagitta elegans* の 72 時間でのそれらは 7.73、6.73 である³⁾。本研究の二酸化炭素による pH 低下実験で得られたカイアシ類の 96 時 LC_0 、 LC_{50} は、以上の値に比べて著しく高い。このことは、カイアシ類にとっては低 pH の毒性よりも、二酸化炭素の毒性の方がはるかに強いことを示している。一方、ヤムシ類では、異なる 1 種類ずつに関するデータではあるが、二酸化炭素自体の毒性は明らかではない。

従来、海洋動物プランクトンに対する二酸化炭素の毒性に関する報告は見当たらない。本研究により、カイアシ類に関しては、低い pH の影響を考えるだけでは不十分であり、二酸化炭素の毒性自体を考えることが必要であることが明らかとなった。このことは、ヤムシ類では明らかではなく、分類群ごとに異なる可能性がある。多くの分類群の海洋生物について二酸化炭素の毒性を明らかにすることが急務である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 二酸化炭素の海底固定の候補地として考えられる場所は、海底の地形や生物影響調査に必要なコストを考えると、それほど多くはない。母島沖の窪地は、水深や地形的には好適であり、また生物量が極めて小さいため理想的である。しかし、生物多様性の保護の観点からは、固有種や絶滅の可能性のある種が存在しないことを調べなければならず、今後とも調査を続ける必要がある。

(2) 二酸化炭素の生物影響を調べる際には、低 pH と高二酸化炭素濃度の両方の効果を調べなければならないが、従来、後者に関しては報告が見当たらなかった。本研究では、動物プランクトンに対する影響を調べ、海洋の動物プランクトン中で最も卓越するカイアシ類に関しては、pH の影響より、二酸化炭素そのものの影響が強いことを明らかにした。

6. 引用文献

- 1) Adams, E. E., J. A. Caulfield, H. J. Herzog and D. I. Auerbach (1997): Impacts of reduced pH from ocean CO₂ disposal: Sensitivity of zooplankton mortality to model paramteres. Waste Mgmt, 17, 375-380.
- 2) Caulfield, J. A., D. J. Aurebach, E. E Adams and H. J. Herzog (1997): Near field impacts of reduced pH from CO₂ disposal. Energy Convers. Mgmt. 38, 343-348.
- 3) Yamada, Y. and T. Ikeda (1999): Acute toxicity of lowered pH to some oceanic

zooplankton. *Plankton Biol. Ecol.*, 46, 62-67.

- 4) Takeuchi, K. Y. Fijioaka, Y. Kawasaki and Y. Sjiyayama (1997): Impacts of high concentration of CO₂ on marine organisms; a modification of CO₂ ocean sequestration. *Energy Comers. Mgmt.* 38, S337-S341.
- 5) Shirayama, Y. (1995): Current dispoal of deep-sea biology in relation to the CO₂ disposal. in Handa, N and T. Osumi eds. *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide*. Terra Pub., 253-264.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

なし

(2) 口頭発表

T.Ishimaru : Int. Symposium on "Deep Sea & CO₂ 2000," 3-4 (2000-2),
"Biological Impacts of CO₂ Storage in the Deep-Sea Floor Depression"

(3) 出願特許

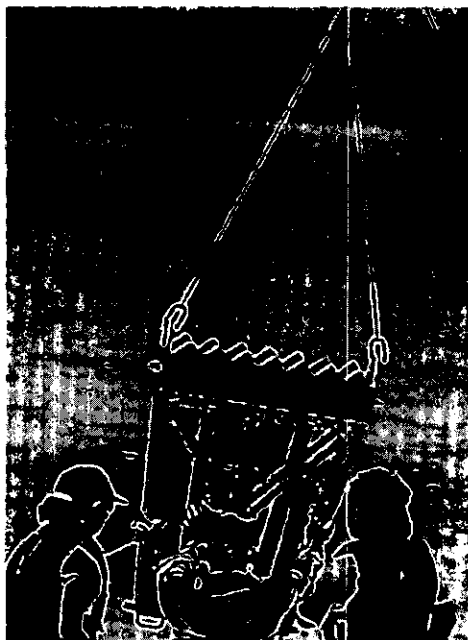
なし

(4) 受賞等

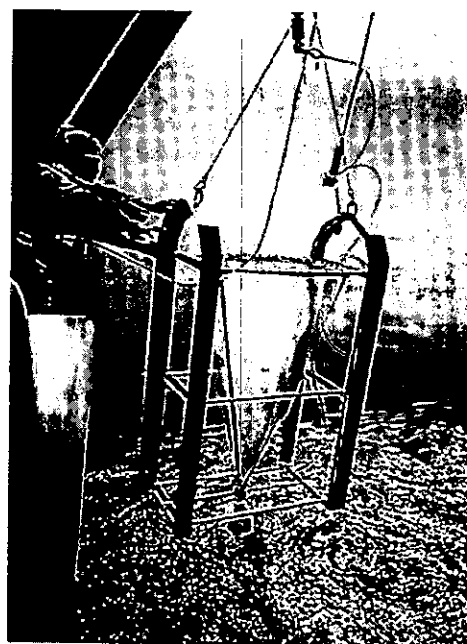
なし

(5) 一般への公表

なし



ドレッジ



ソリネット

図1 底生生物の採集に用いたドレッジと主に近底層生物の採集に用いたソリネット。

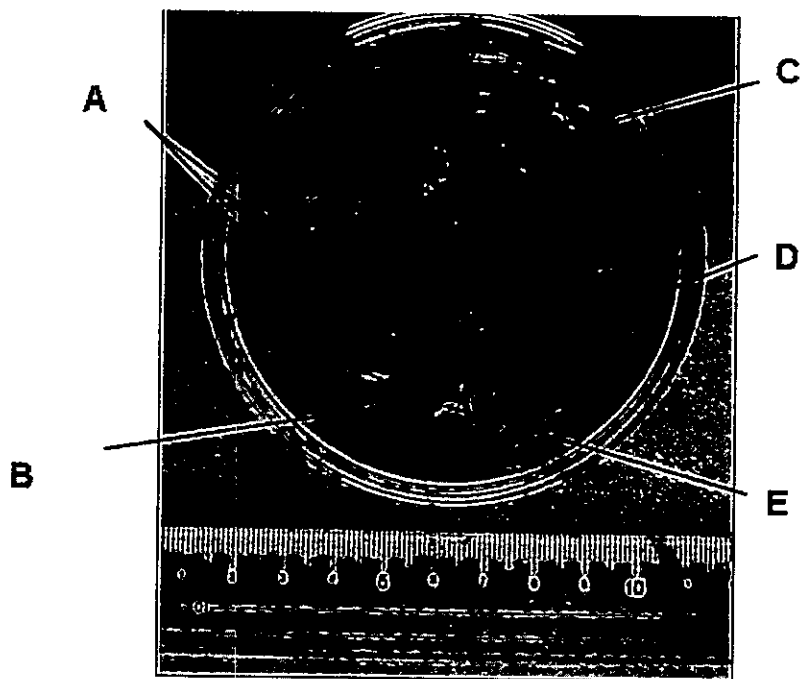


図2 駿河トラフからソリネットにより採集された試料。

A: 二枚貝、B: 管棲ゴカイ、C: ゴカイの棲管、
D: 木片、E: 巻貝

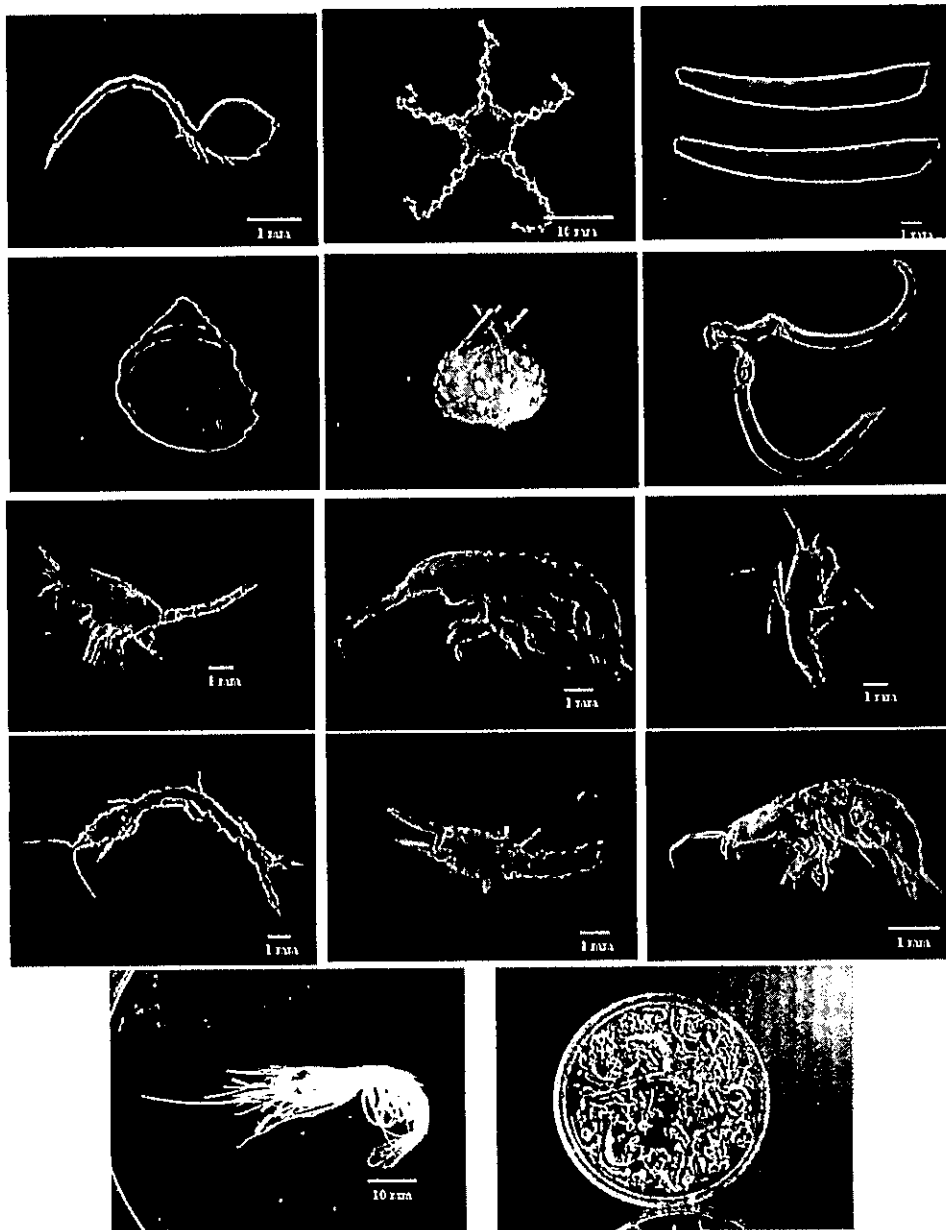


図3 母島沖のソリネットサンプル中に見られた各種底生生物（平成12年10月採集）。

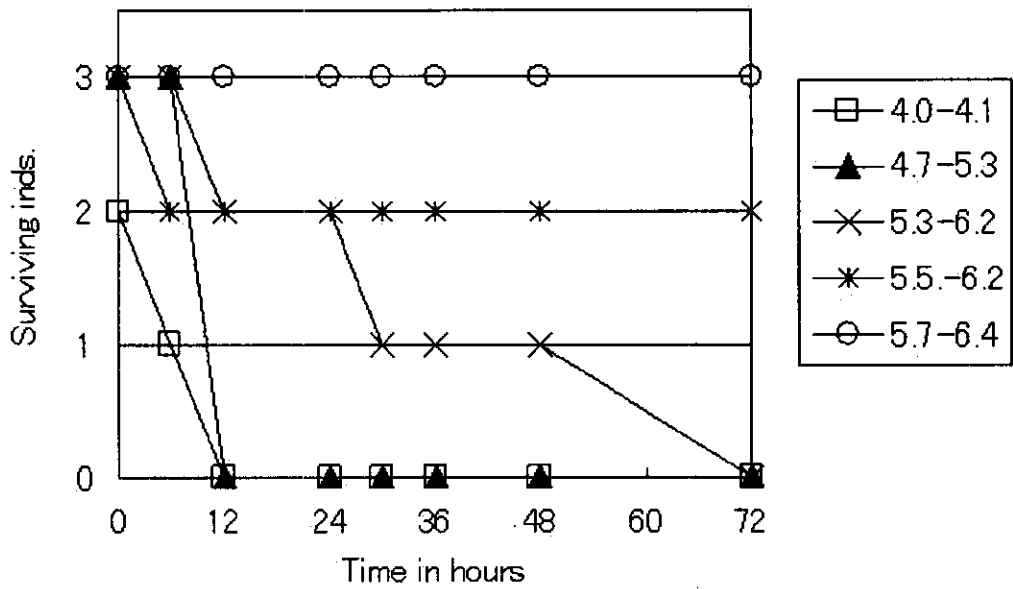


図4 塩酸の添加によって pH を調節した海水中におけるカイアシ類 *Neocalanus cristatus* の生存個体数の経時変化。

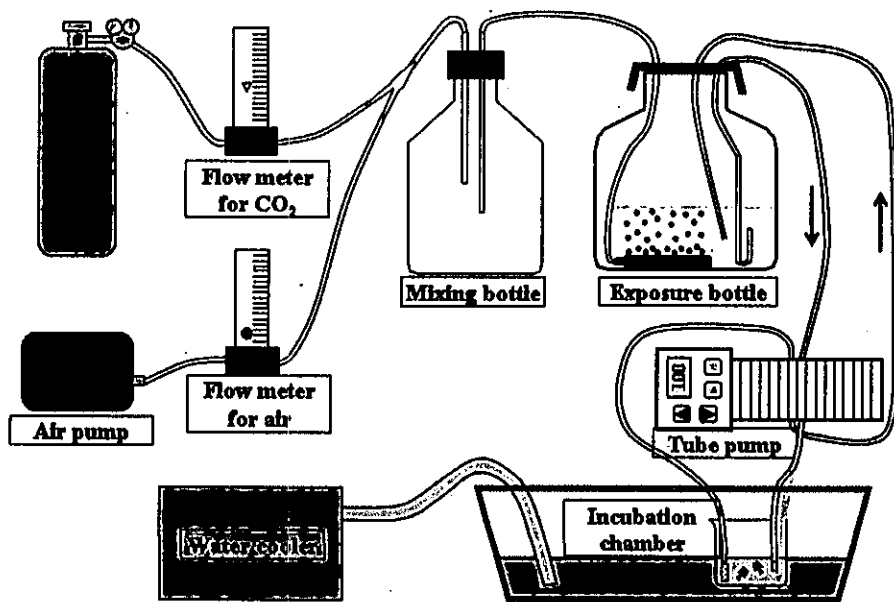


図5 高い二酸化炭素濃度が生物に与える影響を調べるために用いた装置。

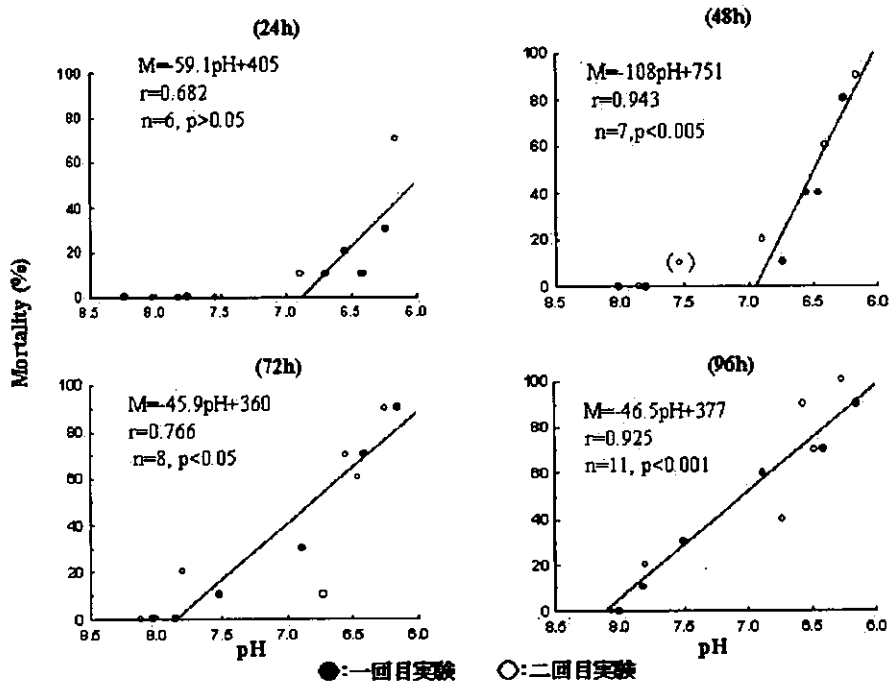


図6 二酸化炭素の添加によってpHを調節した海水中におけるカイアシ類 *Scottocalanus helenaе* の死亡率の経時変化。

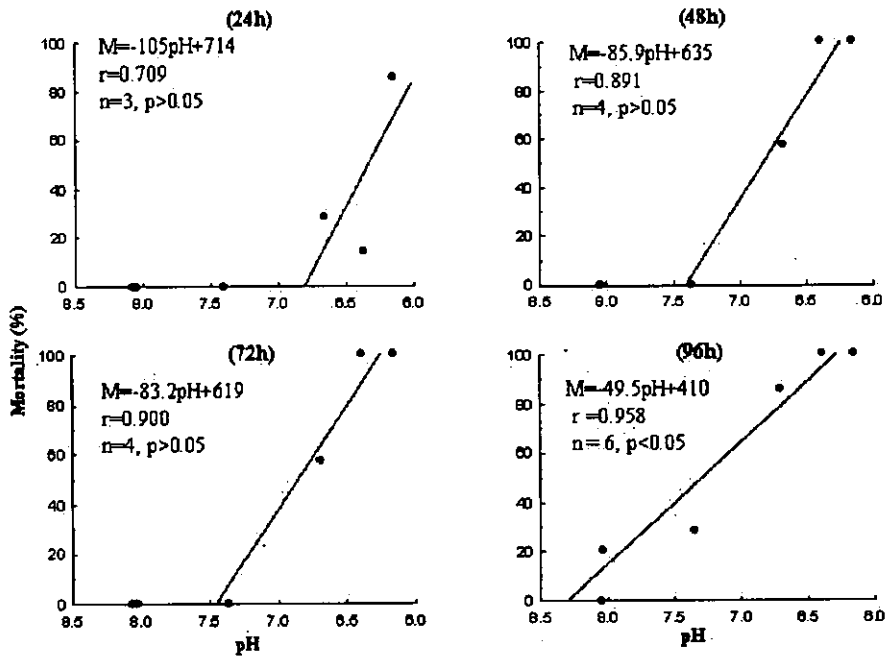


図7 二酸化炭素の添加によってpHを調節した海水中におけるカイアシ類 *Mesocalanus tenuicornis* の死亡率の経時変化。

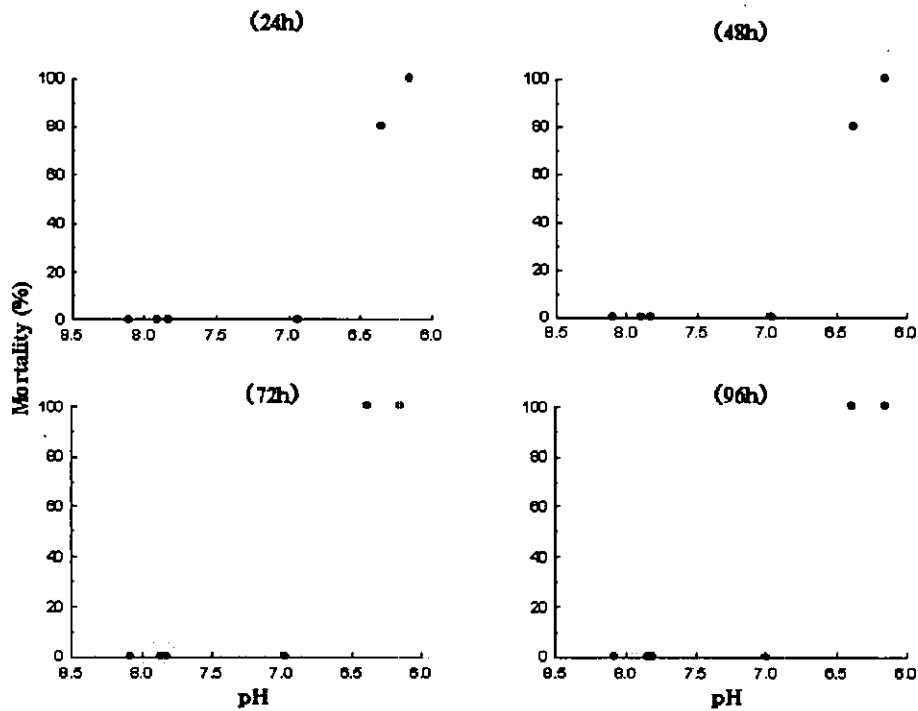


図8 二酸化炭素の添加によって pH を調節した海水中におけるヤムシ類 *Sagitta classa* の死亡率の経時変化。

表1 二酸化炭素および塩酸添加による低 pH 海水中におけるカイアシ類の LC_{50} および LC_0 の経時変化。上段は本研究による二酸化炭素添加によるもの、下段は Yamamot and Ikeda (1999)³⁾ による塩酸添加によるもの。

species		24h	48h	72h	96h
<i>Scottocalanus helenae</i>	LC_{50}	6.00	6.49	6.75	7.03
	LC_0	6.85	6.95	7.84	8.10
<i>Mesocalanus tenuicornis</i>	LC_{50}	6.32	7.15	6.83	7.27
	LC_0	6.80	7.39	7.43	8.28
<i>Calanus pacificus</i>	LC_{50}	5.83	6.02	6.02	6.14
	LC_0	6.33	6.32	6.33	6.79
<i>Neocalanus cristatus</i>	LC_{50}	5.39	5.67	5.82	5.95
	LC_0	5.92	6.21	6.22	6.16