

B-7 北太平洋の海洋表層過程による二酸化炭素の吸収と生物生産に関する研究

(3) 表層炭酸物質の変動と海洋生物生産の影響に関する研究

農林水産省中央水産研究所

海洋生産部物質循環研究室 佐々木克之、田中勝久、
小埜恒夫（科学技術庁特別研究員）

平成 8-12 年度合計予算額 21,481 千円

（うち平成 12 年度予算額 3,328 千円）

[要旨] 1997 年 1 月、5 月、8 月、1998 年 4 月および 1999 年 3 月と 11 月に三陸沖東経 144° を中心とする黒潮域から親潮域にかけて表層の炭酸ガス分圧 (pCO_2) の連続分布調査を行い、季節変動要因を検討した。1 月と 3 月は pCO_2 は水温と逆相関、5 月と 8 月は正相関、11 月は 15°C を中心に低温部で逆相関、高温部で正相関、4 月は関係が見られない結果が得られた。冬季の鉛直混合による pCO_2 の高い水の表層への供給、親潮域のブルーミングおよび春季から夏季の栄養塩の枯渇が pCO_2 濃度変化の要因と考えられた。栄養塩と pCO_2 の関係では冬季から春季にかけて硝酸塩が $1\mu M$ 減少すると pCO_2 が 10ppm 減少する関係が見られた。1、5 および 8 月の全炭酸と pCO_2 の関係を調べると、1 月と 8 月では良い関係が見られたが、5 月には見られなかった。同じ海水の pCO_2 の季節変化要因を検討すると、冬季から春季は主として植物プランクトンの増殖により pCO_2 は減少し、春季から夏季は水温が上昇するにもかかわらず全炭酸の減少によって pCO_2 は大きく上昇しないことが示されたが、この時期は栄養塩は枯渇しているので、全炭酸の減少要因を明らかにすることが今後の課題となる。最後に、水温、全炭酸およびアルカリ度の季節変化から pCO_2 の変化を予測すると 10% の精度で予測することが示された。

親潮域および混合水域では pCO_2 と水温、水温と硝酸塩濃度は良い相関を示した。塩分と水温も良い相関を示したので、同一塩分の水温の 1、5 および 8 月の季節変化から同一塩分の pCO_2 変化と硝酸塩濃度変化を求めたところ、1 月から 5 月にかけての pCO_2 の減少と硝酸塩濃度の減少との関係はほぼ等しい値 ($\Delta pCO_2/\Delta$ 硝酸塩=10) となり、この間の pCO_2 の減少は光合成によることが明らかにされた。水温と硝酸塩濃度との相関を各月で明らかにすることにより硝酸塩濃度の減少量を見積もることにより、冬から春にかけての pCO_2 の減少をリモートセンシングの水温情報から推定できる可能性を示した。春から夏にかけて pCO_2 は増加するが、予測手法はまだ確立していない。

[キーワード] 炭酸ガス分圧、親潮域・混合域、表面水温、栄養塩、クロロフィル、全炭酸とアルカリ度

1. はじめに

地球的規模炭素循環のキーププロセスのひとつと考えられている海洋と大気の炭酸ガス交換を定量的に明らかにすることは、現在の地球化学に求められている重要課題のひとつである。

北太平洋は中層水の起源となる水域であることに加えて、世界の水域の中でも最も生物生産の高い海域であり、この海域の交換量を時空間的に把握することが重要視されている。Stephensら(1995)は北太平洋の pCO_2 と表面水温(SST)との関係を調べたが、春季のデータはばらつきが大きいと述べている。Landrumら(1996)は、SST以外の物理および生物作用により、北太平洋の亜寒帯域の春季と夏季および亜熱帯域の春季の pCO_2 はSSTと関連していないと述べている。このように、我々が対象としている北太平洋亜寒帯域の pCO_2 は春季から夏季にかけて変動が大きく、とくにリモートセンシングで測定可能なSSTとの関連が十分でないため、広域的な pCO_2 の予測が困難になっている。本研究ではこの海域の pCO_2 分布の特徴を把握するために、亜寒帯海流である親潮と亜熱帯海流である黒潮が近接して流れている三陸沖の東経144°線に沿った pCO_2 の連続観測を行い、 pCO_2 と水温その他の環境要因の関連を明らかに使用とするものである。

2. 研究目的

本課題では、調査船調査により現場の分圧とその他の環境要因との関係を把握して、 pCO_2 濃度を決めている要因解析を行い、 pCO_2 予測に寄与できることを目的とする。

3. 研究方法

中央水研所属調査船蒼鷹丸により東経144°線を北緯33°から42°までを中心として調査を行った(Fig. 1)。表層の炭酸ガス分圧は、サブテーマ(1)海洋表層炭酸ガス分圧測定の高高度化に関する研究(通産省工技院計量研担当)開発の小型分圧計により表層の分圧を連続測定した。その他の環境要素として水温(CTD)、塩分(CTD)、クロロフィル(ロゼット採水・ジメチルフォルムアミド抽出・蛍光法分析)、栄養塩(ロゼット採水・濾過凍結・オートアナライザー分析)、全炭酸(ロゼット採水・クーロメータ分析)の分析を行った。詳しくは、Sasakiら(1998)を参照のこと。

4. 調査結果と考察

1) 季節的な pCO_2 緯度変化

1997年には1月、5月および8月、1998年に4月、1999年に3月と11月に調査を実施した。Fig. 1に示したように、このうち3月は東経146°線、11月は148°線、それ以外は144°線で調査を実施した。図2に pCO_2 の緯度変化を季節ごとに示した。1月は黒潮側で約300ppm、親潮側で400ppm弱、3月では黒潮側で300ppm混合域から親潮域で400ppm弱、4月では黒潮側で約330ppmであるが、混合域から親潮域では220ppmから400ppmまで大きく変動した。5月では黒潮側のデータは欠測であるが、混合域から親潮域では時には200ppm以下になる低い値を示した。8月では黒潮側で350ppmほどの高い値で親潮側では約300ppmであった。11月では緯度変化は小さく300~350ppmの範囲で変動した。これらの結果から、三陸沖では親潮水域の1月から3月にかけて400ppm弱の pCO_2 濃度となるが、それ以外の季節では他の海域も含めて海水中の pCO_2 は大気 PCO_2 より低く、この海域が全体としては炭酸ガスの吸収域となっていると考えられる。

2) pCO_2 と表面水温との関係

Fig. 3~8 に pCO₂ と同時に得られた表面水温との関係を示した。1月と3月では pCO₂ は水温と逆相関の関係が見られた。4月ではとくに 2~6℃付近で同一水温で pCO₂ は 260~400ppm まで変動していて、pCO₂ と水温との明確な関係は見られなかった。5月と8月では pCO₂ は水温と正相関の関係にあった。11月では 16℃付近を境に低温部では逆相関、高温部では正相関が見られた。これらの現象は、冬季は鉛直混合によって pCO₂ の高い海水が低温部に表れるが、ブルーム時期に pCO₂ が大きく減少し、それ以降の季節では pCO₂ は主として水温で決定されるようになること、11月に低温部で再び鉛直混合が生じるようになることによって理解される。

3) 水温とクロロフィル (Chl) からの pCO₂ 予測

現在はリモートセンシングによって海洋表層水温とクロロフィル a (Chl) 濃度を把握できるようになってきた。そこで、得られた水温と Chl 濃度と pCO₂ の関係について検討した。pCO₂ と水温および採水して Chl を分析したのは 30 マイル毎であり、北緯 33° ~42° の間では 19 点あったが、5月については 9 点であった。1、5、8 および 11 月の結果を Table 1. に示した。水温については 1 月で逆相関、その他の月は正相関であった。Chl についてはすべて逆相関であった。水温についての相関係数 R は 5 月を除いてかなり高い値であり、5 月以外は水温からある程度 pCO₂ を予測できることを示している。Table 2. には pCO₂ と水温および Chl との重相関を示した。この表の平均誤差 (RMS) は、計算値と実測値の差の二乗の平方根をとったもので、標準偏差 (SD) は平均誤差の標準偏差である。この式を見ると、pCO₂ が水温と逆相関なのは 1 月だけであった。また、Chl と逆相関だったのは 1 月と 5 月であった。Chl は植物プランクトンの指標であり、植物プランクトンが増加すれば pCO₂ は減少すると考えられるが、式では 8 月と 11 月では正相関であった平均誤差と標準偏差を見ると、5 月以外ではかなりの精度で予測できることがわかる。5 月はブルーム後期であり、ブルーム時には水温と Chl から予測することは難しいことを示している。Fig. 5 を見ると 4 月はさらに難しいと考えられる。

Table 1. Regression of pCO₂ with water temperature (WT) or chlorophyll a (Chl)

month	WT		Chl	
	a	R	a	R
1	-5.08	0.93	-6.03	0.04
5	11.77	0.71	-35.94	0.72
8	4.45	0.92	-71.7	0.52
11	1.80	0.85	-26.59	0.58

A: regression coefficient, R: coefficient of correlation

Table 2. Bi-regression of pCO₂ with water temperature (WT) and chlorophyll a (Chl)

Month	regression (pCO ₂ =a*WT+b*Chl+c)	RMS	SD
1	pCO ₂ =-5.098*WT-12.304*Chl+385.9	6.1	4.3
5	pCO ₂ =6.458*WT-21.348*Chl+204.5	20.4	12.5
8	pCO ₂ =4.714*WT+11.739*Chl+229.9	6.5	3.3
11	pCO ₂ =2.759*WT+24.42*Chl+241.7	3.3	1.6

4) 塩分と pCO₂ との関係

1月、5月および8月の表面塩分と pCO₂ の関係を Fig. 9~14 に示した。この関係は水温の場合と同様で、1月と3月では逆相関、4月では有意な関係は見られず、5月と8月では正相関を示し、11月では塩分 34 以上では正相関、以下では逆相関を示した。水温および塩分と pCO₂ が相関がある場合には、pCO₂ はそれぞれの端子（例えば親潮の北と南、親潮と黒潮など）間の混合で決まっているということが出来る。ブルームが生じる4月と冬季混合が始まる11月ではこのような関係は見られなかった。

5) 表面栄養塩と pCO₂ との関係

採水で得られた試料の栄養塩濃度と同じ station の pCO₂ との関係を調べてみた。Fig. 15~17 は硝酸塩、リン酸塩および珪酸塩と pCO₂ の関係を示したものである。全体として栄養塩濃度が高いほど pCO₂ 濃度が高いという関係が見られた。pCO₂ (ppm) を Y として、栄養塩濃度を X (μM) として表すことにすると、硝酸塩については、1月では $Y=5.4 \cdot X+280$ 、5月には親潮から混合域については (May-2) $Y=26 \cdot X+170$ となり、黒潮域では1月のライン上にあった。8月には硝酸塩がほとんど枯渇していて、相関は見られなかった。リン酸塩と pCO₂ では、1月では $Y=77 \cdot X+270$ 、5月は2つの関係となり、黒潮域では $Y=41 \cdot X+270$ 、親潮域と混合域では $Y=300 \cdot X+80$ となり、8月では逆相関となり $Y=-150 \cdot X+350$ となった。珪酸塩と pCO₂ は硝酸塩と同様な分布となり、1月は $Y=3.5 \cdot X+280$ 、5月の親潮と混合域では $Y=15 \cdot X+190$ で、8月には相関が見られなかった。

これらの栄養塩 (Y: μM) は表面水温 (X: °C) とよい相関が見られた。水温と硝酸塩の関係 (Fig. 18) は、5月に 9°C を境にして二つの相関が見られた。8月では水温が 17°C 以上では 0.5 μM 以下であった。1月: $Y=-0.93 \cdot WT+19$ ($R^2=0.96$)、5月: 9°C 以下; $Y=0.82 \cdot WT-3.1$ ($R^2=0.86$)、9°C 以上; $Y=-0.38 \cdot WT+7.1$ ($R^2=0.83$)、8月: 17°C 以上; $Y=-0.014 \cdot WT+0.5$ ($R^2=0.36$)。

Fig. 19 は水温とリン酸塩との関係を季節別に示したものである。5月に 9°C を境にして二つの相関が見られたのと 8月に硝酸塩と異なり相関が見られた。1月: $Y=-0.065 \cdot WT+1.4$ ($R^2=0.91$)、5月: 9°C 以下; $Y=0.054 \cdot WT+0.1$ ($R^2=0.93$)、9°C 以上; $Y=-0.056 \cdot WT+1.1$ ($R^2=0.98$)、8月: $Y=-0.025 \cdot WT+0.66$ ($R^2=0.83$)。Fig. 20 は水温と珪酸塩との関係を季節別に示したものである。リン酸塩と同じように5月には 9°C を境にして二つの相関が見られた。1月: $Y=-1.49 \cdot WT+29.7$ ($R^2=0.95$)、5月: 9°C 以上は相関なし、9°C 以下; $Y=1.3 \cdot WT-5.9$ ($R^2=0.83$)、8月: $Y=-0.17 \cdot WT+5.6$ ($R^2=0.35$) であった。

これらの回帰直線の勾配の N/P は、1月では 14.3、5月の 9°C 以下では 15.2、9°C 以上では 6.8、8月では 0.56 であった。N/Si は、1月では 0.62、5月の 9°C 以下では 0.63、9°C 以上では相関なし、8月では 0.08 であった。5月の 9°C 以下は混合域と親潮域に相当する海域であるので、1月と5月の混合域、親潮域においては栄養塩は Redfield 比で消費されているが、5月の黒潮域および8月では硝酸塩が枯渇していると考えられる。この海域では硝酸塩に比べリン酸塩と珪酸塩が消費されているので、アンモニウム塩が関与している可能性がある。

これらを見ると、5月の親潮・混合域でのみ水温と栄養塩の関係は正相関で、その他は逆相関である。一般には水温が低い時に栄養塩が高いので正相関になることが多いが、5月の

親潮・混合域ではブルームの影響でブルームの生じている水温の低い海域で栄養塩が低い現象がおきたため、正相関が見られたと考えられる。

6) 全炭酸・アルカリ度と pCO₂ の関係

Fig. 21 に pCO₂ と全炭酸 (TCO₂) の関係を示した。ここでは水温の影響を除くために、pCO₂ の温度依存性の式 (Takahashi et al (1993)) : $pCO_2(10^\circ C) = pCO_2(t) * EXP(0.0423(10-t))$ (ここで t は観測された時の水温) を用いて 10°C の pCO₂ に変換した。Fig. 21 を見ると、1月と8月はそれぞれ回帰式 (1月 : $pCO_2 = EXP(-102) * TCO_2^{14.1}$, 8月 : $pCO_2 = EXP(-93.1) * TCO_2^{13.0}$) が得られたが、5月では関係が見られなかった。同じ濃度の TCO₂ で8月の pCO₂ が1月のそれより高い値を示したのは、後に述べるように8月ではアルカリ度が減少していたためと考えられた。5月で pCO₂ と全炭酸との関係が見られなかった原因は不明である。Fig. 22 に全炭酸および塩分 35 に規格化した全炭酸と水温との関係を示した。規格化した全炭酸は水温と良い関係を示した。アルカリ度と pCO₂ との関係は見られなかった。Fig. 23 にアルカリ度および規格化したアルカリ度と水温との関係を示した。1月では両者に関係が見られなかったが、5月と8月には規格化したアルカリ度は水温と良い関係が見られた。Fig. 24 は全炭酸と栄養塩との関係を見たものである。1月ではかなり良い関係が見られたが、5月になると硝酸塩だけはある程度関係が見られたものの、リン酸塩と珪酸塩では相関が見られなかった。8月になると栄養塩はほぼ枯渇していて、栄養塩の変化なしに全炭酸が減少していた。

7) 同一水塊の pCO₂ およびその他の環境因子の季節変化

我々は親潮域や混合域の pCO₂ の季節変化を定量的に把握するため「同一塩分の水は同一水塊の水である」という仮定をおいた。この仮定をおくと、もし水温と塩分の関係がわかれば同一塩分の水温変化と水温と pCO₂ の関係から、pCO₂ の季節変化がわかることになる。また、同様にして、同一塩分の水温変化と水温と栄養塩の関係から、栄養塩の季節変化がわかることになる。そこで、水温と塩分の関係について検討した結果、水温 (Y : °C) と塩分 (X : psu) の関係は Fig. 25 に示したように、1月は $Y = 9.1 * X - 300$ 、5月は $Y = 3.1 * X - 97$ 、8月は $Y = 7.2 * X - 220$ であった。これらの関係を用いて pCO₂ の季節変化を求めたのが Table 3 である。

8) pCO₂ の季節変化

塩分 33、33.5 および 34.0 の水の水温は Fig. 25 の関係を用いて計算して、塩分 33.0 の水は1月は 0.3°C、5月は 5.3°C で8月は 17.6°C であった。pCO₂ と水温との関係は Fig. 26 に示した。この場合、pCO₂ (Y : ppm) と水温 (WT : °C) の関係は、1月では $Y = -5.1 * X + 381$ 、5月では $Y = 11.8 * X + 141$ 、8月では $Y = 4.5 * X + 239$ であった。1月と8月は相関が良いが、5月は悪かった。この関係を用いて計算すると塩分 33 の水では1月→5月→8月では pCO₂ は 379→204→319ppm と変化することになる。塩分 33.5 および 34.0 の水でも同様の傾向を示した。Table 3 の左欄の CA は Carbonic Alkalinity を表し、Sasai et al (2000) によって求めた。すなわち、 $CO_2 = (K1/K2) * (2TCO_2 - CA)^2 / (CA - TCO_2)$ 、K1 と K2 は炭酸の解離定数、CO₂ は pCO₂ から計算した。

Table 3 Seasonal change of several factors about pCO2

Month	Salinity	WT	pCO2	NO3	P04	Si(OH)4	TCO2	TA	*CA
1	33.0	0.3	379	18.7	1.38	29	2108	2300	2203
	33.5	4.85	355	14.5	1.08	22	2071	2300	2187
	34.0	9.4	332	10.3	0.79	16	2035	2300	2175
5	33.0	5.3	204	1.5	0.39	1.1	2027	2224	2246
	33.5	6.9	222	2.2	0.47	3.1	2020	2219	2205
	34.0	8.4	240	2.8	0.55	5.2	2013	2214	2189
8	33.0	17.6	319	0.3	0.22	2.7	1954	2164	2185
	33.5	21.2	335	0.2	0.13	2.1	1940	2157	2145
	34.0	24.8	352	0.2	0.04	1.5	1927	2150	2149

*CA was calculated from pCO2 and TCO2

(9) pCO2 季節変化の要因

硝酸塩の季節変化は、塩分と水温の関係 (Fig. 25) と水温と硝酸塩の関係 (Fig. 18) から求めて Table3 に示した。その結果を見ると、1月から5月にかけて硝酸塩は塩分 33.0 で 17.2 μM 減少し、5月から8月にかけては 1.2 μM 減少したことになる。全体としては1月から5月にかけては大幅に減少するが、5月から8月にかけては 1 μM 内外の少量しか減少していない。Table 4 に pCO2 と硝酸塩の変化の関係を示した。

Table 4 Relation of pCO2 change to nitrate and water temperature

months	factor	33.0 (psu)	33.5 (psu)	34.0 (psu)
Jan→May	ΔpCO2	-153.0	-131.0	-81.0
	ΔNO3	-17.7	-12.8	-7.9
	ΔpCO2/ΔNO3	8.6	10.2	10.3
May→Aug	ΔpCO2	109	106	100
	ΔWT	12.3	14.4	16.4
	CalΔpCO2	145	188	248

$$\text{Cal}p\text{CO}_2(t_2) = p\text{CO}_2(t_1) * \text{EXP}(0.0423 * (t_2 - t_1))$$

塩分 33.0 では 1月から5月にかけて pCO2 は 153ppm 減少していて、硝酸塩は 17.7 μM 減少していて、その比は 8.6 であった。同様にして塩分 33.5 における比は 10.2、塩分 34.0 では 10.3 であった。塩分 33.0 では水温が少し上昇しているが、塩分 33.5 と 34.0 ではほとんど同じ水温なので、三陸沖の親潮から混合域では 1月から5月にかけての pCO2 は硝酸塩が 1 μM 減少すると pCO2 が約 10ppm 減少していると言うことができる。リン酸塩の場合の ΔpCO2/ΔP04 は硝酸塩の場合ほど安定的でなく、塩分 33 で 153、塩分 33.5 で 213、塩分 34.0 で 344 であった。珪酸塩の場合、この比は塩分 33.0 で 5.4、塩分 33.5 で 6.7、塩分 34.0 で 7.6、平均 6.6 で、1月から5月にかけて珪酸塩 1 μM 減少することにより pCO2 が約 6.6ppm 減少することになる。

5月から8月にかけて硝酸塩はわずかに減少しているだけであるが、pCO2 の増加は大きい。これは水温上昇が大きかったためと考えられる。そこで、Table 4 の下に示した pCO2 の温度依存性の式 (Takahashi et al (1993)) を用いて水温上昇に伴う pCO2 値を求めて、計算上の pCO2 増加量を求めた。塩分 33 では計算上の増加量は 139ppm であるのに対して、実際の増加

量は 115ppm であり、水温変化のみを考慮した値はより大きな値となった。この傾向は塩分が 33.5、34.0 となるに従い増加した。この差は 24~129ppm にもなり、1 μ M 内外の硝酸塩が減少することによっては説明ができない。他には、水温上昇に伴い pCO₂ が大気 pCO₂ より高くなり、炭酸ガスが海洋から大気に放出されて低い値になることが考えられる。さらに、後に述べるように 5 月から 8 月にかけてアルカリ度が減少しているので、炭酸カルシウムの生産に伴い全炭酸が減少して、pCO₂ が水温変化から予想した値より少なかった可能性もある。この問題は後に検討する。

次ぎに全炭酸 (TCO₂) とアルカリ度 (TA) の変化を検討した。Table 3 の結果を整理すると Table 5 になる。

Table 5 Ratios of changes of nitrogen, phosphate, silicate, total and inorganic carbon

months	Salinity	$\Delta N/\Delta P$	$\Delta N/\Delta Si$	$\Delta C^*/\Delta N$	$\Delta C^*/\Delta P$	$\Delta C^*/\Delta Si$
Jan→May	33.0	17.3	0.6	5.9	103	3.7
	33.5	20.1	0.7	4.9	98	3.2
	34.0	31.6	0.7	3.9	122	2.7
May→Aug	33.0	7.4	-0.8	34.3	255	-26.1
	33.5	5.7	9	25.4	146	49.6
	34.0	5.2	0.7	24.9	129	18.9

$\Delta C^* : (\Delta TCO_2 - 0.5\Delta CA)$

1 月から 5 月にかけての栄養塩中の窒素、炭素、リンおよび珪素の減少量の比を見た (Table 5)。親潮域の塩分 33.0 における N/P は 17.3 であり、Redfield 比 (16) に近かったが、混合域の塩分 34.0 ではこの比はずっと大きく 31.6 になった。これはリンに比べて窒素の減少がずっと大きかったということであるが、その原因については不明である。炭素の変化量はアルカリ度の変化量で補正した。すなわち、

$Ca^{++} + 2HCO_3^- = CaCO_3 + CO_2(g) + H_2O$ 、ここで (g) は気体炭酸ガスを示す。この式からアルカリ度が 2 増加すると CO₂ が 1 減少することになる。すなわち、 $\Delta C^* = \Delta TCO_2 - 0.5\Delta CA$ 。このようにして求めた 1 月から 5 月の炭素と窒素の比は平均 4.9 で、Redfield 比 (6.75) より小さい値であり、窒素の減少量が炭素のそれより大きかったことを示している。また窒素と珪素の比は 0.6~0.7 で一般に 1:1 と言われることと比較すると珪素の減少量が大きかった。平均 $\Delta C^*/\Delta P$ は 108 で Redfield 比 (106) とほぼ同じ値を示した。従って、1 月から 5 月にかけて主として珪藻のブルームにより炭素が窒素とともに取り込まれて、下層へ沈降することにより、海水中の全炭酸が減少して、それに伴い pCO₂ が減少したと推定できる。

5 月から 8 月にかけての $\Delta N/\Delta P$ は平均 6.1 で、Redfield 比よりはるかに小さい値であり、リン酸塩に比べ硝酸塩の消費が小さいことを示している。この時期は硝酸塩が枯渇しているので、アンモニウム塩の取り込みがあるのかもしれない。 $\Delta C^*/\Delta N$ が平均 28.2 と大きな値を示すのも同様に硝酸塩の取り込みが小さかったためと考えられる。しかし、 $\Delta C^*/\Delta P$ も 177 とかなり大きな値であり、硝酸塩の減少が小さいだけでなく、全炭酸の減少が大きかったためと推定できる。この値はアルカリ度の減少による全炭酸の減少を補正しているため、もし補正しなければさらにこの比は大きくなる。夏季になぜ全炭酸の減少量が大きくなるのかは

今後の検討課題である。

(10) pCO₂ の変動要因

pCO₂ は水温、塩分、TC および TA の分布で決定される。今回は等塩分で考察しているため塩分の効果は考慮しない。その他の要因と pCO₂ の関係は Takahashi et al (1993) によった。すなわち、水温との関係では $pCO_2(T_2) = pCO_2(T_1) * EXP(0.0423(T_2 - T_1))$ とする。TCO₂ の関係では $Ln(pCO_2(2)/pCO_2(1)) = 12 * Ln(TC(2)/TC(1))$ 。TA の関係では $Ln(pCO_2(2)/pCO_2(1)) = -9.4 * Ln(TA(2)/TA(1))$ とする。1月、5月および8月についての塩分：33、33.5 および 34 の pCO₂、その他については Table 3 も示した。先に述べたように、1月の TA と水温との関係はバラツキが大きかったため、また pCO₂ と関係するのは炭酸アルカリ度 (CA) のため、CA を Sasai et al (2000) によって求めた。Table 3 の結果を見ると、5月と8月の TA と CA はほぼ同様な値なので、1月についても CA の値を用いることにした。Table 6 には、pCO₂ の季節変化を水温、TC (TCO₂) と CA の変化で説明できるかどうか検討した結果を示した。Jan-May は1月から5月の変化を示している。WTpCO₂ は1月から5月にかけて水温だけが変化した場合予測される pCO₂ を示す。TCpCO₂ は WTpCO₂ に対して TC の変化だけにより予測される pCO₂ を、同じく CApCO₂ は CA の変化だけにより予測される pCO₂ を示す。

Table 6 Estimation for the variation of pCO₂ from January to August through May

months	Salinity	WTpCO ₂	TCpCO ₂	CApCO ₂	TC/CApCO ₂	Real pCO ₂	Difference	Error(%)
Jan-May	33.0	468	270	390	193	204	-11	-5
	33.5	387	272	358	243	222	22	10
	34.0	318	274	300	255	240	15	6
May-Aug	33.0	342	205	444	306	319	-13	-4
	33.5	407	232	528	352	335	17	5
	34.0	481	260	571	351	352	-1	0

WT:Water Temperature, TC(TCO₂):Total Carbon, CA:Carbonic Alkalinity

TC/CApCO₂ は TC と CA の両者の変化による pCO₂ を示し、real pCO₂ は観測結果の値を示す。最後の欄は実際の pCO₂ と予測した pCO₂ の差を%とで示したものであり、5~10%の誤差であった。1月から5月の塩分 33.0 の結果を見ると、水温だけ上昇したとすると 468ppm になるが、同時に TC の減少によって 270ppm まで減少し、またアルカリ度の減少によって 390ppm まで減少し、両者の減少を考慮すると 193ppm になる。実際の oCO₂ は 204ppm なので誤差は-5%であった。したがって、大まかには pCO₂ の変化は水温、TC および CA の変化によるものと考えてよい。CA の変化は円石藻のような炭酸カルシウム殻をつくるプランクトンによるものと推定されるが、現場でのデータはないので、今後の課題と考えられる。Fig. 22 と Fig. 23 に示したように、1月のアルカリ度を除いて、規格化した全炭酸とアルカリ度は水温と良い相関があるのでそれぞれの季節や月についてこのような相関が得られれば、ある程度 pCO₂ の予測が可能となる。

5. 本研究により得られた成果

三陸沖の東経 144° 線を中心に、1、3、4、5、8 および 11 月に親潮、混合域および黒潮域の表層炭酸ガス分圧 (pCO₂) の連続測定を行い、1 月と 3 月は pCO₂ は水温と逆相関、5 月と 8 月は正相関、11 月は 15°C を中心に低温部で逆相関、高温部で正相関、4 月は関係が見られない結果が得られた。冬季の鉛直混合による pCO₂ の高い水の表層への供給、親潮域のブルーミングおよび春季から夏季の栄養塩の枯渇が pCO₂ 濃度変化の要因と考えられた。栄養塩と pCO₂ の関係も明らかにされた。1、5 および 8 月の全炭酸と pCO₂ の関係を調べると、1 月と 8 月では良い関係が見られたが、5 月には見られなかった。同じ海水の pCO₂ の季節変化要因を検討すると、冬季から春季は主として植物プランクトンの増殖により pCO₂ は減少し、春季から夏季は水温が上昇するにもかかわらず全炭酸の減少によって pCO₂ は大きく上昇しないことが示されたが、この時期は栄養塩は枯渇しているため、全炭酸の減少要因を明らかにすることが今後の課題となる。最後に、水温、全炭酸およびアルカリ度の季節変化から pCO₂ の変化を予測すると 10% の精度で予測することが示された。

6. 引用文献

- 1) Landrum, L. L. and R. Gammon (1996): North Pacific Ocean CO₂ disequilibrium for spring through summer, 1985-1989, *J. Geophys. Res.*, 101, 28, 539-28, 555
- 2) Stephens, M. P., G. Samuel, D. B. Olson, R. A. Fine and T. Takahashi (1995): Sea-air flux of CO₂ in the North Pacific using shipboard and satellite data, *J. Geophys. Res.*, 100, 13, 571-13, 583.
- 3) K. Sasaki et al: Variation of the partial pressure of CO₂ in surface water from Kuroshio to Oyashio and the relation of environmental factors with the partial pressure on 144° E off Sanriku, Japan on May, 1997. *J. Oceanography*, 54, 593-603, 1998
- 4) Takahashi, T. J. Olafsson, J. G. Goddard, D. W. Chipman and S. C. Sutherland: Seasonal variations of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. *Global Biogeochem. Cycles*, 7, 843-878, 1993

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術雑誌)

- ① K. Sasaki et al: *J. Oceanography*, Vol. 54, 593-603 (1998) "Variation of the partial pressure of CO₂ in surface water from Kuroshio to Oyashio and the relation of environmental factors with the partial pressure on 144° E off Sanriku, Japan on May, 1997"
- ② T. Ono & K. Sasaki: *Bull. of National Res. Insti. of Fish. Sci.* No. 14 (in press) (1999) "Seasonal variation in the distributions of carbonate properties and nutrients in the Kuroshio/Oyashio interfrontal zone observed from January to August"

(2) 口頭発表

- ① 小笠恒夫・斉藤紘史・佐々木克之: 98 年度海洋学会春季大会講演要旨、92 (1998) "冬

期－夏期の黒潮・親潮混合水域における pCO₂ 変動”

②小埜恒夫・佐々木克之：99 年度海洋学会秋季大会講演要旨、157（1999）“黒潮・親潮混合水域における諸化学成分の季節変動(1)：1997 年 1 月－8 月”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

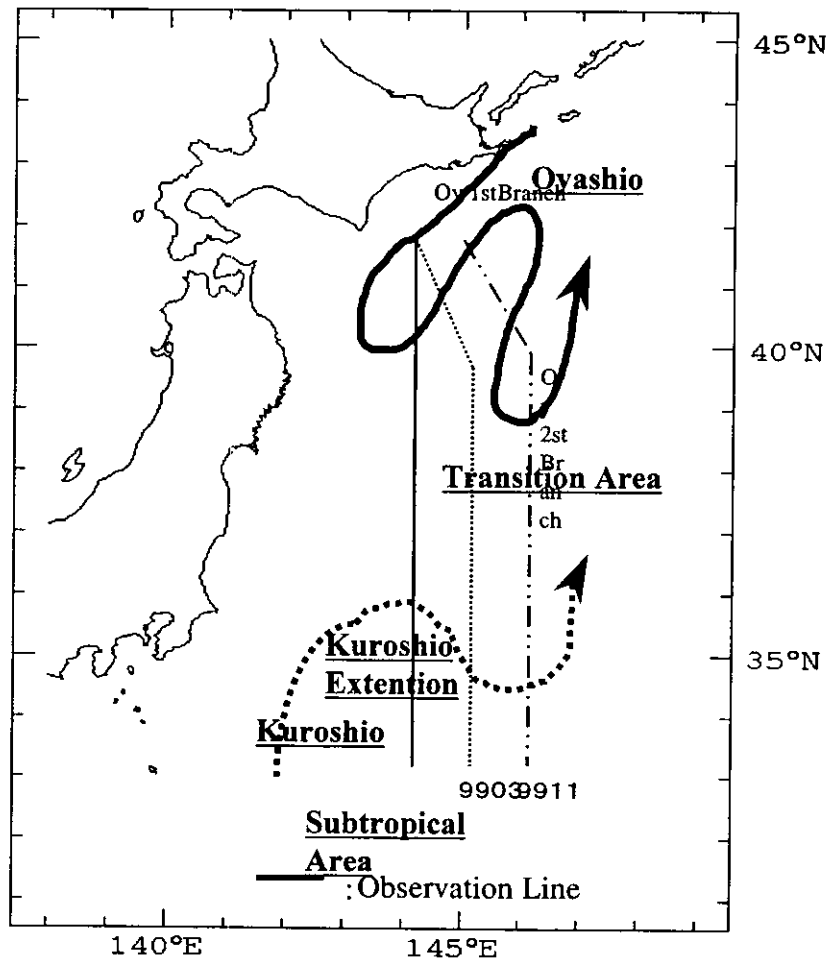


Fig. 1 Lines for pCO₂ observation

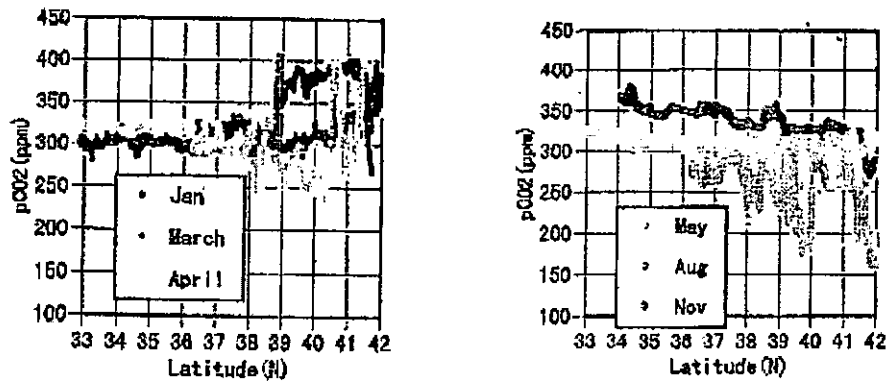


Fig. 2 Seasonal changes of pCO₂ meridional distributions
 Right: Jan, Mar and Apr. Left: May, Aug and Nov.

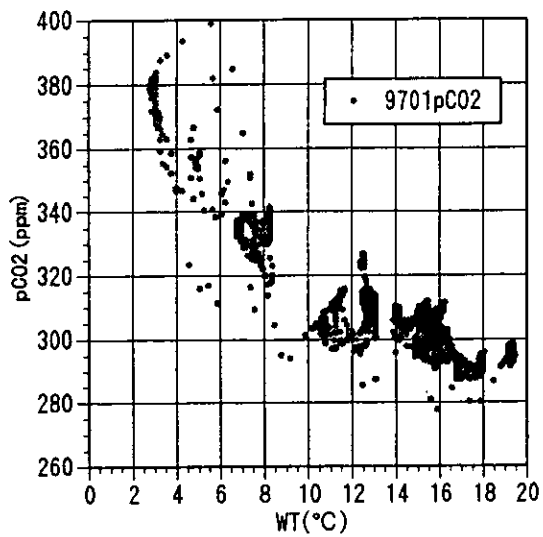


Fig.3 Relation of pCO2 to WT at Jan.

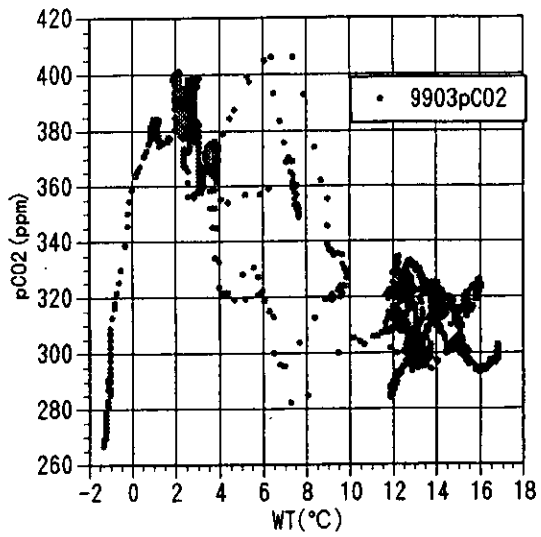


Fig.4 Relation of pCO2 to WT at Mar.

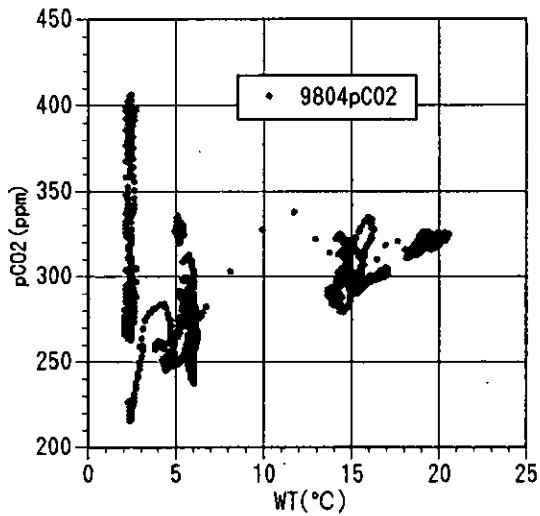


Fig.5 Relation of pCO2 to WT at Apr.

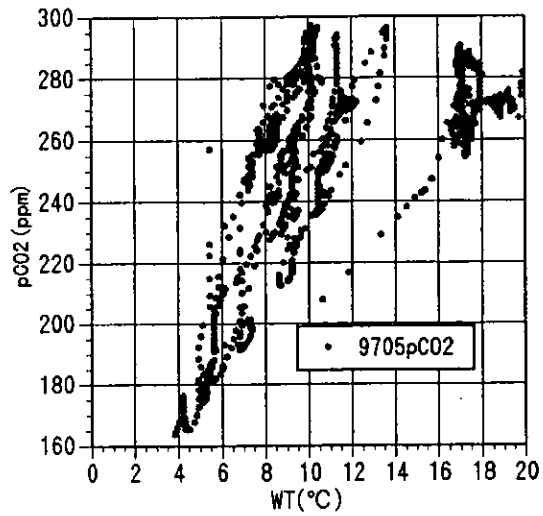


Fig.6 Relation of pCO2 to WT at May

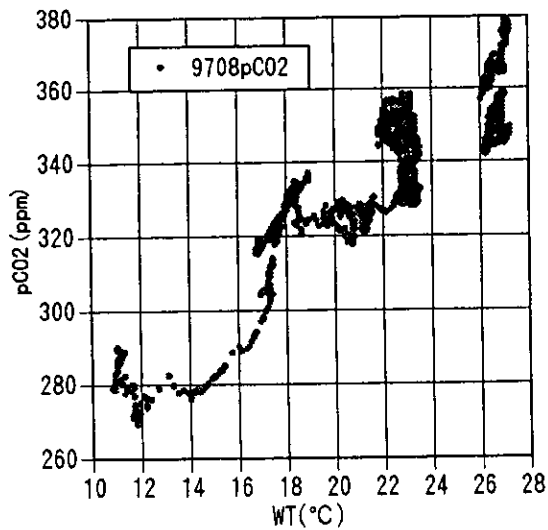


Fig.7 Relation of pCO2 to WT at Aug.

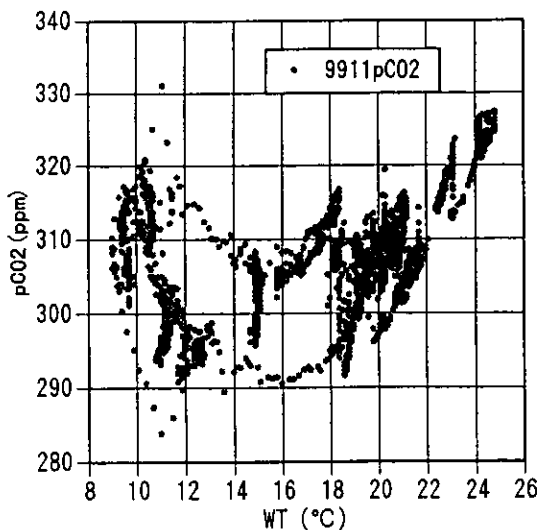


Fig.8 Relation of pCO2 to WT at Nov.

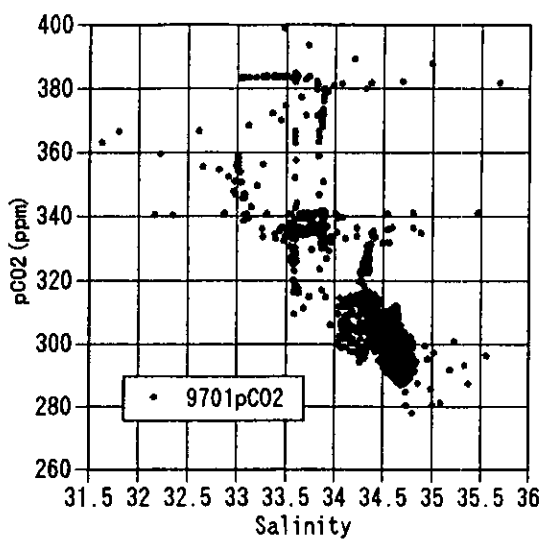


Fig.9 Relation of pCO2 to S at Jan.

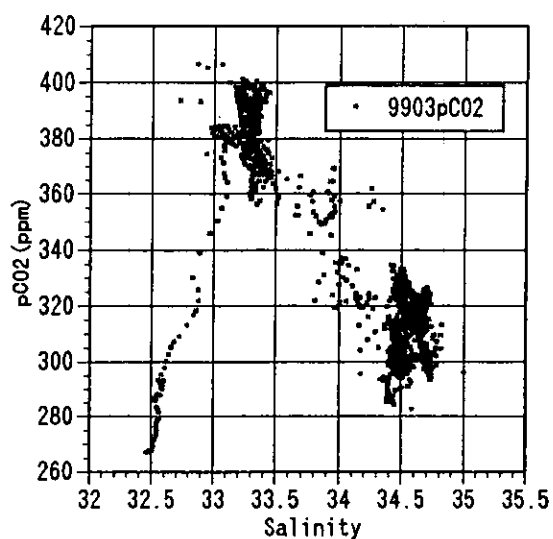


Fig.10 Relation of pCO2 to S at Mar.

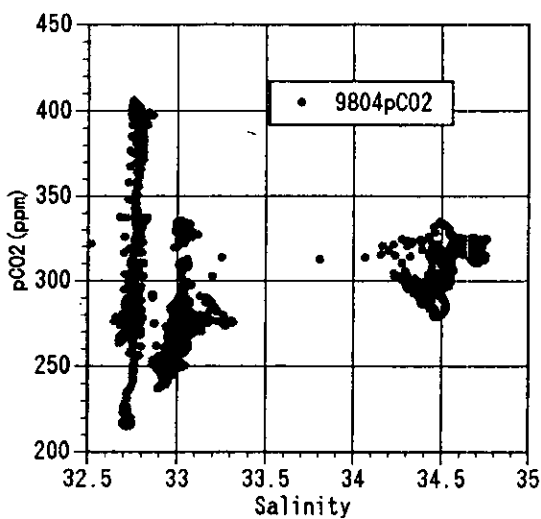


Fig.11 Relation of pCO2 to S at Apr.

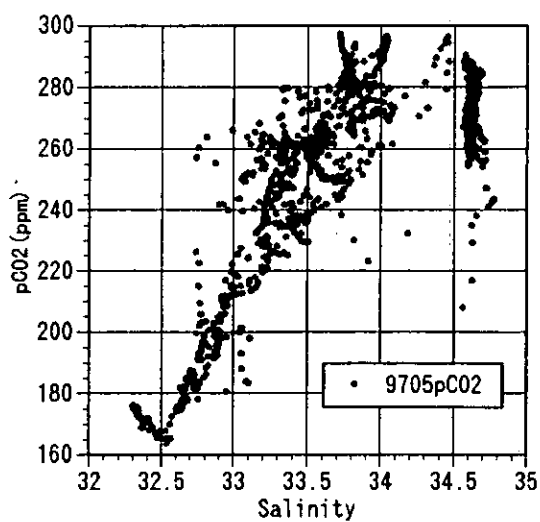


Fig.12 Relation of pCO2 to S at May

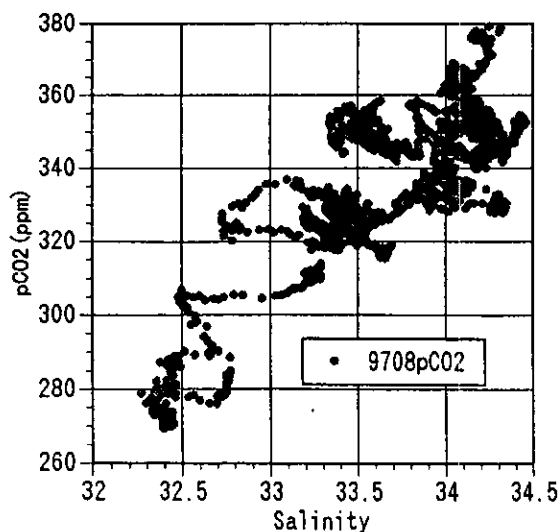


Fig.13 Relation of pCO2 to S at Aug.

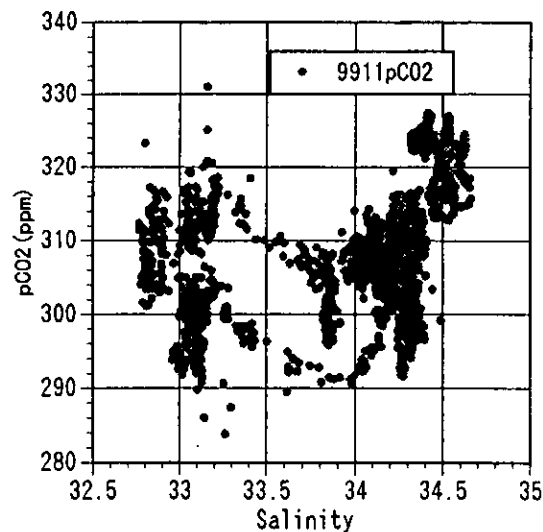


Fig.14 Relation of pCO2 to S at Nov.

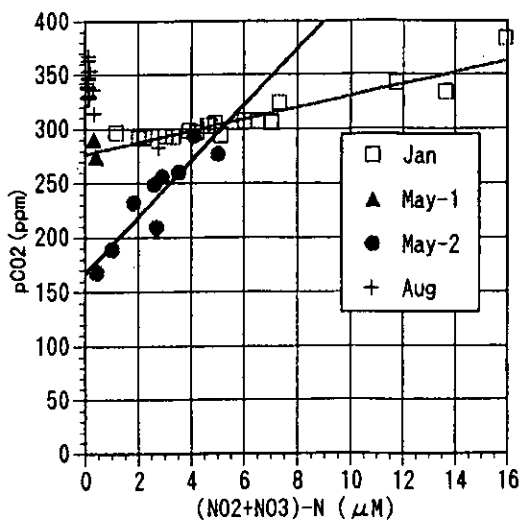


Fig. 15 Relation of pCO₂ to (NO₂+NO₃)-N

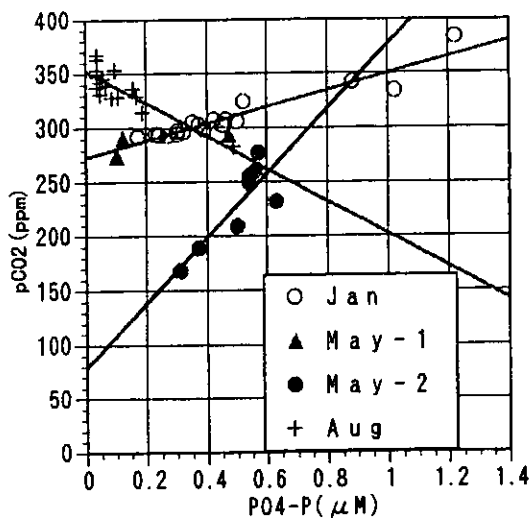


Fig. 16 Relation of pCO₂ to P04

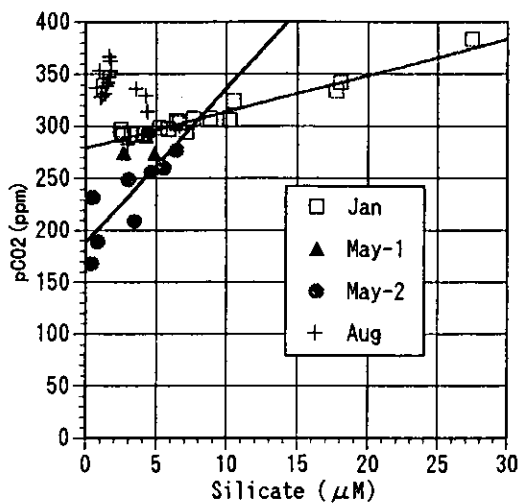


Fig. 17 Relation of pCO₂ to Silicate

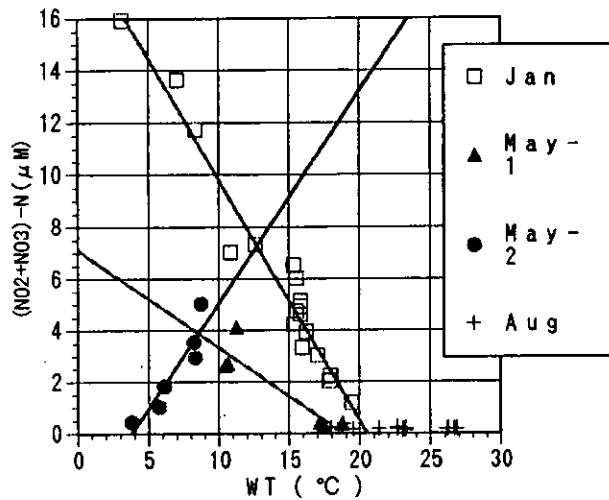


Fig. 18 Relation of (NO₂+NO₃)-N to WT

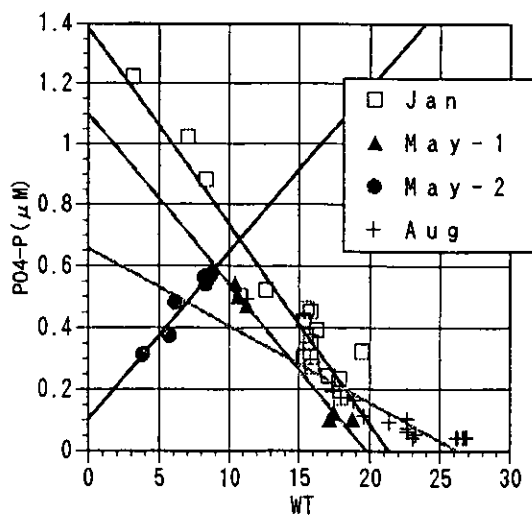


Fig. 19 Relation of P04 to WT

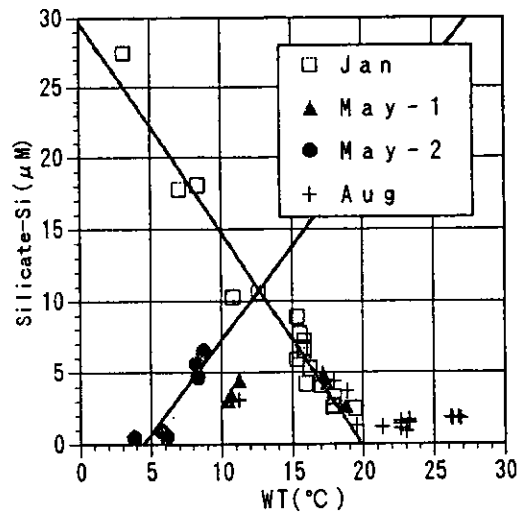


Fig. 20 Relation of Si to WT

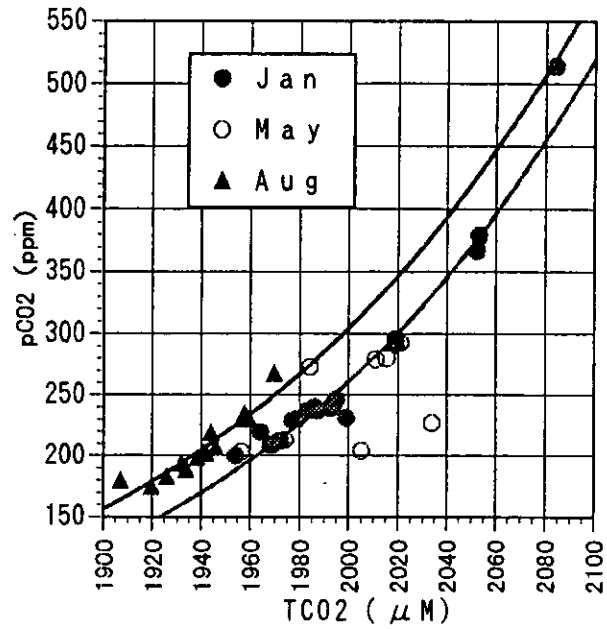


Fig.21 Relation of pCO₂ to TC0₂

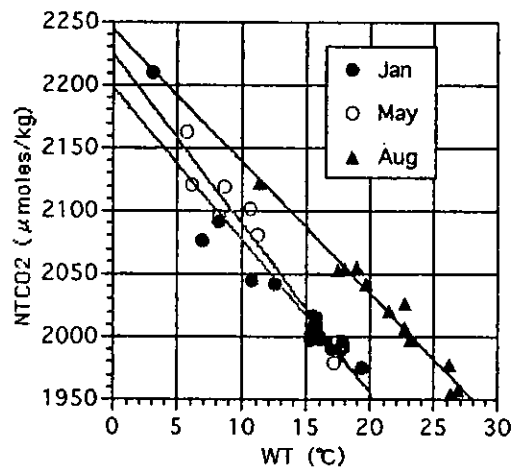
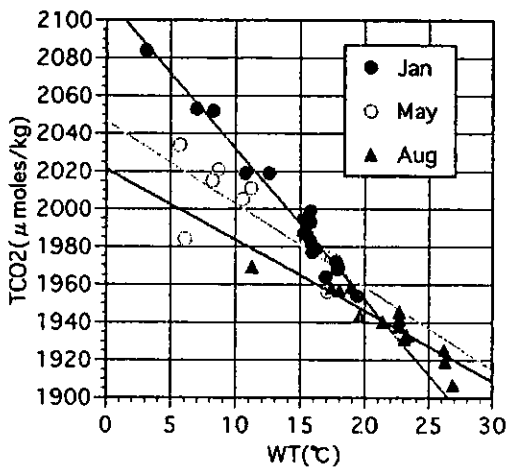


Fig.22 Relation of TC0₂ and normalized TC0₂(NTCO₂) to water temperature

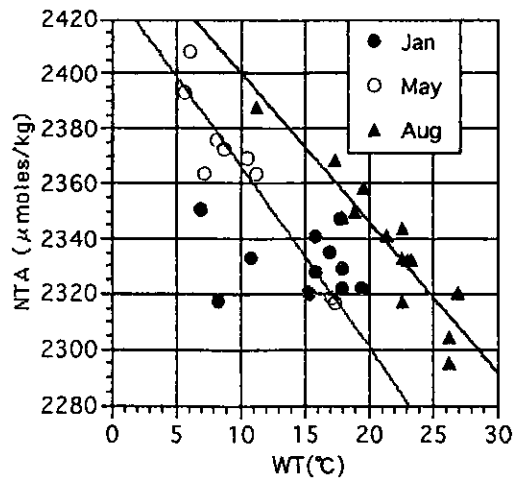
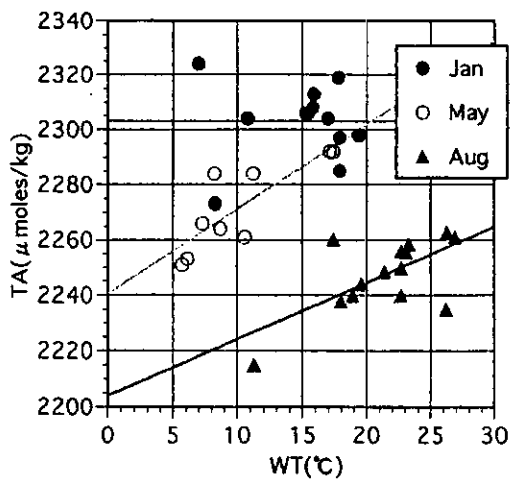


Fig.23 Relation of alkalinity(TA) and normalized alkalinity(NTA) to water temperature

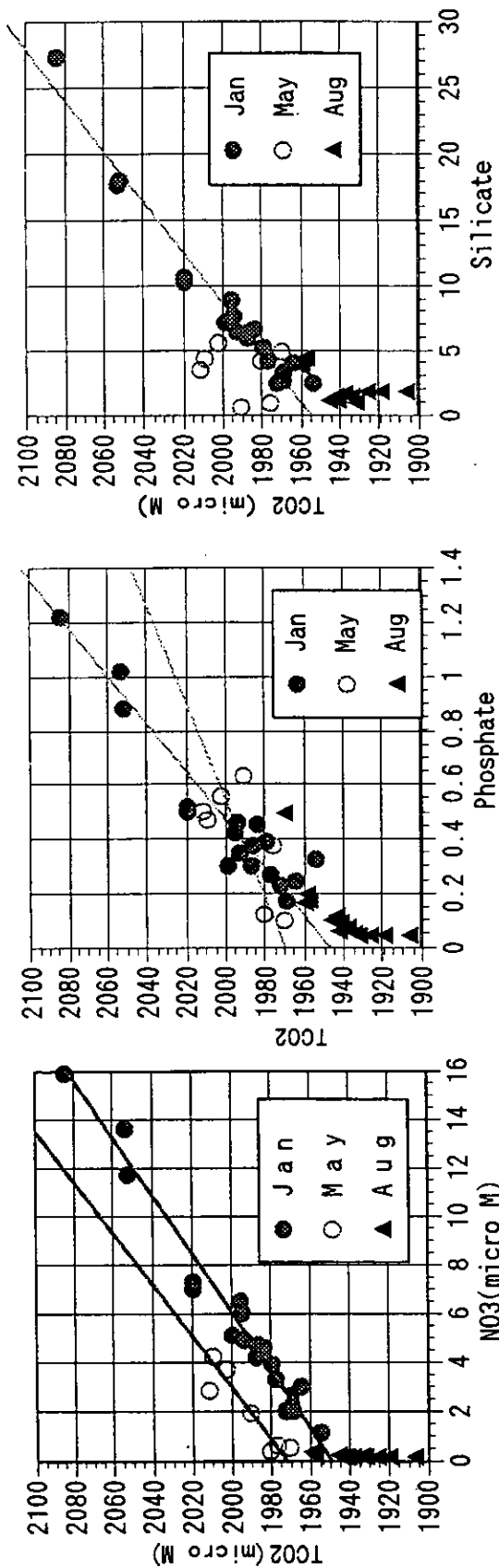


Fig.24 Relation of Nutrients(μ M) to TCO2

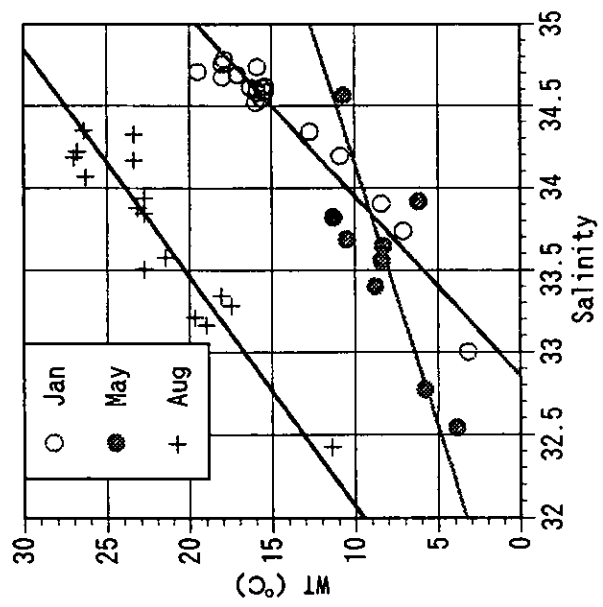


Fig.25 Relation of Temperature to Salinity

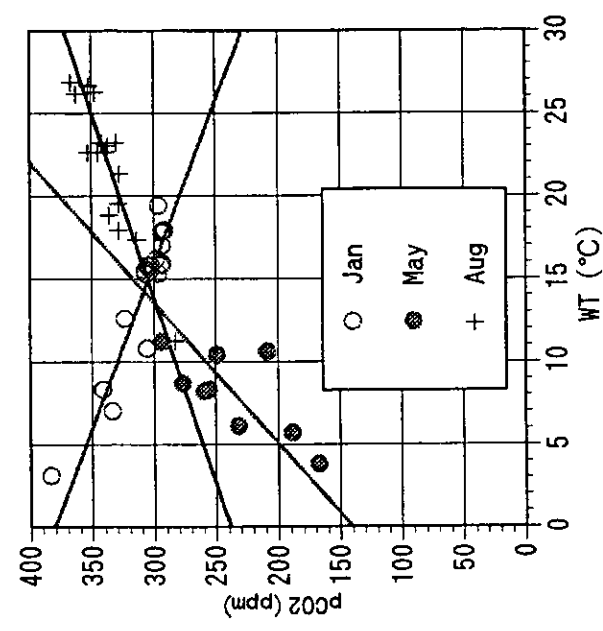


Fig.26 Relation of pCO2 to water temperature