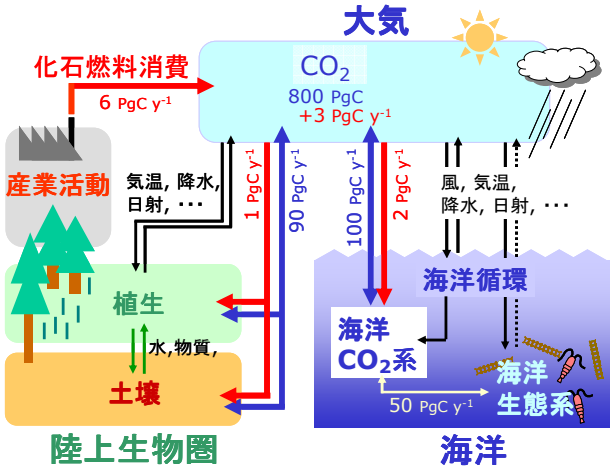
# 地球環境変動の解明をめざして
# ー 海洋における長期の$CO_2$観測から ー

○石井雅男、 斉藤 秀、 松枝秀和 （地球化学研究部） 吉川久幸（北海道大学）
中舘 明、 根本和宏、 緑川 貴 （気象庁 気候・海洋気象部）

## 1. はじめに

二酸化炭素（$CO_2$）の排出量を国際社会において実効的に削減し、地球の温暖化を抑制するためには、根拠となる温暖化の将来予測と影響評価の科学的な不確実性を、できる限り低減しなければならない。そのためには、さまざまな$CO_2$排出量のシナリオに基づいて、気候の変化に伴う炭素循環の変化についても評価しながら、大気$CO_2$濃度の動向を推定してゆく必要があり、炭素循環の実態と変動要因を観測によって把握することが不可欠となっている。

大気中の$CO_2$濃度は、石油など化石燃料の消費によって、近年、急激に増加している。また海洋の物理的な動きや生態系の営みに伴って変化する大気・海洋間の$CO_2$交換や、陸上の植生と土壌における光合成や呼吸にも、大きな影響を受けている。すなわち、気温、降水、風といった気象要素の変化は、こうした海洋や陸上における炭素の動きへの影響を通じて、大気の$CO_2$濃度にも影響を及ぼすのである（第1図）。



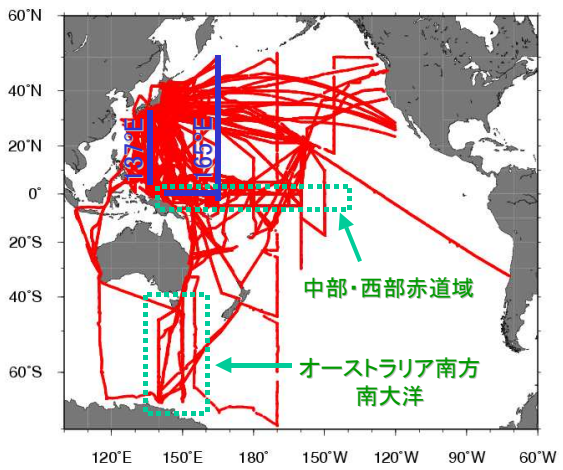

第1図： 炭素循環と気候のかかわり

実際に、化石燃料の消費によって大気に排出される$CO_2$の量は、近年、年間6PgC（ペタグラム炭素、1PgC=$10^9$ton炭素）を越え、その後も増加を続けているが、海洋と陸上植生への吸収量は、最近の10年間だけでも、年間1～5PgCの範囲で大きく変動している。このことは、気候、炭素の循環、大気の$CO_2$濃度が、密接に関わりながら変化していることを、如実に示している。

気象研究所地球化学研究部と気象庁気候・海洋気象部は、地球温暖化が社会に広く認識される以前の1960年代から、観測手法の開発と改良を進めながら、大気と海洋における$CO_2$の調査を続けてきた。これによって、炭素循環の理解に貢献し、高い評価を受けている。本発表では、最新の結果も織り交ぜながら、成果の概要を報告する。

## 2. 船舶による海洋$CO_2$観測

気象研究所と気象庁では、北太平洋の北部から南大洋に及ぶ広い海域で、船舶による海洋$CO_2$の観測を実施してきた（第2図）。

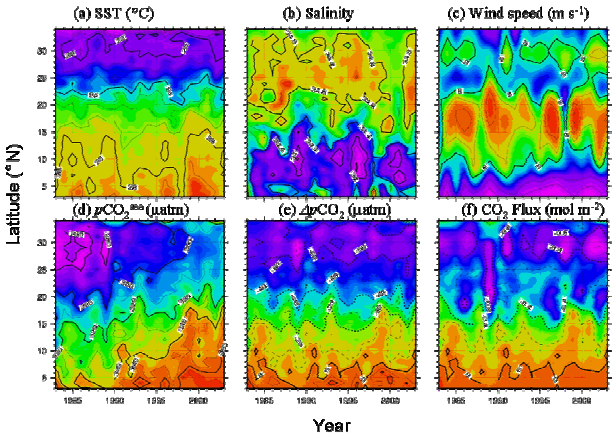



第2図： 気象研究所と気象庁による海洋$CO_2$の観測域

特に本州の南方では、亜熱帯循環を貫く東経137度の観測線に沿って、北緯34度から北緯3度まで、1980年代前半から20年以上にわたって、大気と海洋の$CO_2$観測を続けており、現在では、凌風丸と啓風丸の2隻の観測船によって年4回の定期観測を行っている。また1996年には、東経165度でも観測を開始した。そのほか、太平洋赤道域では、海洋科学技術センター（現 海洋研究開発機構）と協力して、1987年からほぼ毎年観測を行うかたわら、南大洋でも、東京大学海洋研究所白鳳丸の共同利用によって、不定期ながら30年以上にわたる観測の実績がある。さらに、国土交通省航海訓練所の練習船や、商船による太平洋の広域観測も行った（表1）。

表1　気象研究所と気象庁気候・海洋気象部による海洋$CO_2$分圧の船舶観測　（＊は継続中の観測）

| 船舶名 | 所属 | 観測期間 | 航海数 | データ総数 |
|---|---|---|---|---|
| 凌風丸 | 気象庁 | 1981.01-2002.11＊ | 61 | 25,730 |
| 高風丸 | 気象庁 | 1998.04-2001.12 | 18 | 24,181 |
| 啓風丸 | 気象庁 | 2001.01-2002.12＊ | 8 | 4,995 |
| 北斗丸 | 運輸省航海訓練所 | 1992.07-1996.08 | 4 | 3,926 |
| 大成丸 | 運輸省航海訓練所 | 1993.01-1998.03 | 4 | 4,328 |
| 開洋丸 | 水産庁 | 1987.10-1987.12 | 1 | 795 |
| 白鳳丸 | 東京大学海洋研 | 1968.11-2003.01 | 10 | 11,938 |
| なつしま | 海洋科学技術センター | 1987.01-1991.03 | 4 | 3,862 |
| かいよう | 海洋科学技術センター | 1994.01-1999.11 | 7 | 10,982 |
| みらい | 海洋科学技術センター | 1998.01-2003.02 | 10 | 23,067 |
| うぇりんとん丸 | 商船三井 | 1988.11 | 1 | 223 |
| 蒼玄丸 | 海洋バイオテクノロジー研 | 1991.10 | 1 | 409 |
| ありげーたーりばてぃ | 商船三井 | 1999.01－2000.10 | 9 | 2,135 |




第3図：　本州南方東経137度の冬季（1月下旬～2月上旬）における(a)表面水温、(b)表面塩分、(c)風速、(d)表面水の$CO_2$分圧、(e)大気と表面海水の$CO_2$分圧　(f)$CO_2$吸収・放出量（1月と2月の合計値）の緯度分布と経年変化

## 2. 1. 亜熱帯域における海洋$CO_2$の増加傾向

本州南方の亜熱帯域は、冬季には大気$CO_2$の強い吸収域、夏季には弱い放出域か弱い吸収域になっており、年平均では強い吸収域となっている(Inoue *et al.*, 1987)。こうした季節変化のパターンは、水温の季節変化に大きく左右されており、亜熱帯域に共通して見られる特徴である。一方、植物プランクトンによる炭酸固定の季節変化も無視できないが、栄養塩が枯渇した状態でも炭酸が固定されていると考えられるなど、その実態はまだ十分に解明されていない(Ishii *et al.*, 2001)。

また東経137度では、どの緯度帯でも、冬季に表面水の$CO_2$分圧（海水と気液平衡状態にした空気中の$CO_2$分圧）の増加傾向が観測されている（第3図）。1983年から2003年までの21年間の平均増加速度は+1.7±0.2 ppm/年であり、大気$CO_2$濃度の増加速度（+1.6 ppm/年）にほぼ等しい。このことは、化石燃料の消費によって大気中の$CO_2$濃度が増加するとともに、その影響が海洋にも及んで、海洋でも$CO_2$が増加していることを示している(Inoue *et al.*, 1995; Midorikawa *et al.*, 2004)。

さらに、東経137度では、高い測定精度の全炭酸濃度（海水に溶けている炭酸物質の濃度の総和）の観測によって、最近、海洋の内部でも$CO_2$の増加が検出された。特に北緯20度から北緯30度の亜熱帯循環北部では、1994年から2003年の9年間に、表層はもちろん、水深800m付近でも$CO_2$が増加していることが分かった（斉藤ら、2004）。化石燃料の消費によって排出された$CO_2$が、北太平洋の中層水にも蓄積されていることを示す直接的な証拠と言える。

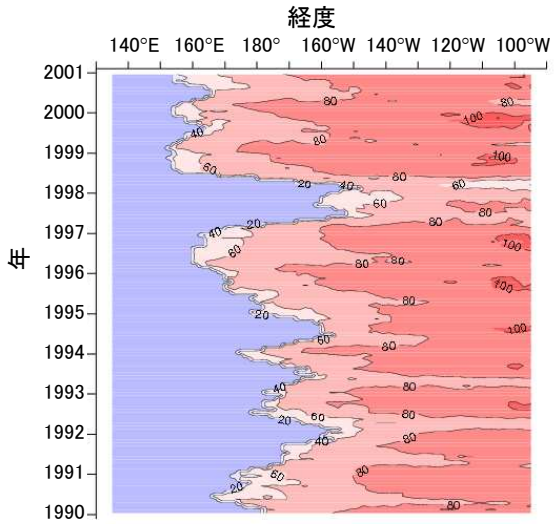
このような定線における海洋$CO_2$の定期観測は、世界的に例が少なく、その時系列データは、きわめて貴重である。

## 2. 2. エルニーニョと海洋の$CO_2$変動

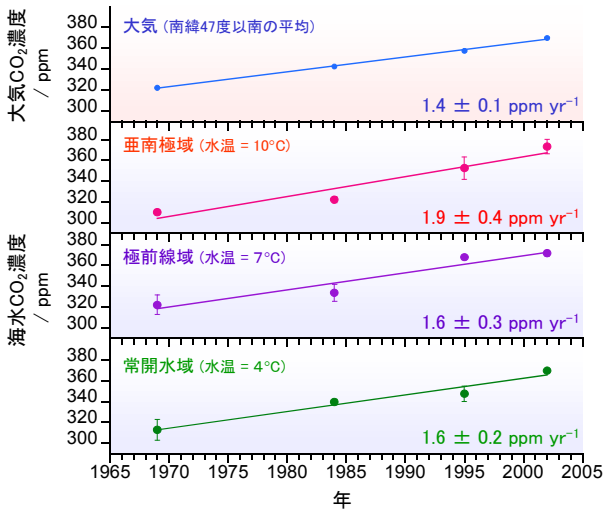
太平洋の赤道域で発生するエルニーニョは、世界の各地に異常気象を引き起こす。また大気の$CO_2$濃度にも大きな影響を与えており、気象条件の変化と炭素循環の変化が密接に関連することを示す、典型的で顕著な例となっている。

太平洋赤道域の中部から東部の海域では、南東貿易風とコリオリ力の緯度変化の力学的な相互作用によって、水深100m付近から、$CO_2$を多く含む亜表層水が湧き上っている。このため、これらの海域からは多量の$CO_2$が大気に放出されている。一方、西部の海域では貿易風が弱く、高い表面水温と多量の雨によって海洋表層が成層化しており、亜表層水が表面に供給されないために、$CO_2$の放出量は極めて少ない。したがって、エルニーニョが発生すると、貿易風が赤道域の中部でも弱まるために、湧昇域の分布は大幅に縮小し、赤道域からの$CO_2$放出は著しく減少する(Inoue and Sugimura, 1992; Ishii and Inoue, 1995; Inoue *et al.*, 1996　ほか)。

気象研究所では、赤道域における海洋$CO_2$の観測を通じて、こうした現象を明らかにするとともに、赤道域における海洋$CO_2$の分布を経験的に推定する手法を編み出した（第4図）。さらにこの方法に基づいて、赤道域から大気に放出される$CO_2$が、1990年から2000年の11年間に0.1PgCから0.8PgCの範囲で大きく年々変化したことを明らかにした(Ishii *et al.*, 2004)。赤道域におけるこのように大きな$CO_2$放出量の変化は、エルニーニョが降水パターンの変化によって熱帯域の陸上植生の$CO_2$吸収に及ぼす大きな影響とともに、大気$CO_2$濃度の増加速度の年々変化に対して、顕著な影響を及ぼしていると考えられる。




第4図： 赤道域における大気・海洋間の$CO_2$分圧差の経度－時間分布




第5図 南大洋における大気と表面海水の$CO_2$増加

気象研究所ではまた、西部に広がる暖水域において、表面水の$CO_2$分圧や全炭酸濃度が、亜熱帯域と同じように増加していることを、観測データから検出した。さらに湧昇域では、海洋生態系による炭酸固定量が大気への$CO_2$放出量を大きく上回っており、海洋の物理循環の変化だけでなく、海洋生態系の動向もが、大気への$CO_2$放出量の年々変化に影響を及ぼしていることを明らかにした(Ishii *et al.*, 2004)。

### 2. 3. 南太平洋と南大洋における海洋$CO_2$の増加傾向

海は地球表面積のおよそ70%を占め、その半分以上は南半球に分布している。しかし南半球の海洋$CO_2$データは北半球に比べて著しく少なく、その分布や変化については、未解明の点が多い。そのため、南半球における大気・海洋間の$CO_2$交換量の評価は、不確定性が特に大きくなっている。

気象研究所では、1968/69年、1983/84年、1994/95年、2001/02年それぞれの南半球の夏に、西部南太平洋やオーストラリア南方の南大洋において海洋$CO_2$の観測を実施した。そして、南太平洋の亜熱帯域や、南大洋の亜南極域、極前線域、極前線南の常開水域でも、大気$CO_2$濃度の増加とともに、海洋の$CO_2$が長期的に増加していることを、世界で初めて明らかにした(Inoue *et al*, 1999; Inoue and Ishii, 2004)（第5図）。

また、南極大陸の近傍に位置し、海氷の消長、海水の動き、夏季に活発に活動する生態系が、相互に密接に関わりつつ変化している季節海氷域では、海洋生態系による夏季の炭酸固定量の時間的・空間的な変化が、この海域の大気・海洋間の$CO_2$交換量の変化にきわめて大きな影響力を持っていることを定量的に評価した(Ishii *et al.*, 1998; 2002)。

なお、海洋における物理的な条件、生態系、そして海洋$CO_2$変動の間の密接な関連は、気象庁が実施している西部北太平洋亜寒帯の観測でも見出されている(Midorikawa *et al.*, 2002; 2003)。これらの結果は、高緯度域における気候変化が、長期的には、大気・海洋間の$CO_2$交換量や海洋内部における$CO_2$の蓄積量を大きく変化させる可能性を示している。

## 3. 係留ブイによる観測

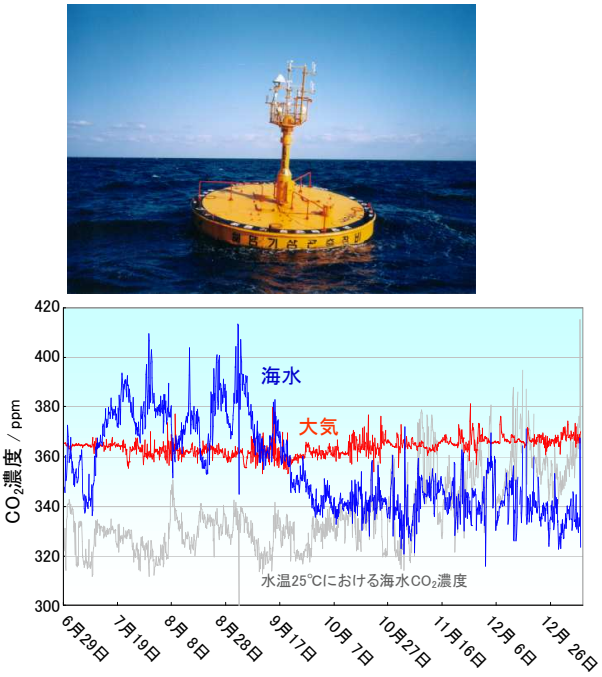
ここまで述べたように、船舶を使った観測には、精度の高いデータを広域で取得できる長所がある。しかし、船舶の運航には多くの制約もあるため、短い時間間隔の観測を長期に行うことは不可能に近い。また冬季の高緯度海域のような荒天域の観測には、大きな危険がともなう。したがって、係留ブイや漂流ブイなどをプラットフォームとする自動$CO_2$測定装置を開発することは、船舶による観測の短所を補い、観測網を充実させる上でとても有意義である。

気象庁では、旧科学技術庁科学技術振興調整費による特別研究「世界海洋観測システム構築に資する革新的ブイシステムの基盤技術開発研究」（平成5年度～9年度）の中で、ブイ搭載型の大気・海洋$CO_2$観測装置を開発し、これを、当時、東シナ海に展開されていた海洋気象ブイロボット（第6図上）に搭載して、自動観測を実施した。装置は、船舶搭載型の装置をさらに小型化・省電力化したものである。

観測は、1997年6月から1998年1月のおよそ半年間にわたって実施した（第6図下）。そして、水温の日変化にともなう$CO_2$分圧の日変化や、水温と鉛直混合の変化にともなう季節変化のデータを取得することができた。

また観測期間中には3個の台風が近海を通過し、波高10mを越える大しけにも遭遇したが、観測は正常に続けることが

できた。台風が通過すると、海水の鉛直混合が活発になり、表面水温や$CO_2$分圧も著しく変化した。また、大気・海洋間の$CO_2$交換がきわめて活発になると考えられる。この観測結果によれば、7月から9月の夏季3ヶ月の間に、1m$^2$あたり70ミリモルの$CO_2$が海洋から大気へと放出されたが、そのおよそ50%はこれら3個の台風の通過時に放出されている。夏季の亜熱帯域は、一般に大気・海洋間の$CO_2$交換が少ないと考えられていたが、台風の通過がこれに大きく寄与していることを、ブイを利用した連続観測によって定量的に示すことができた。




第6図：気象ブイロボット(上)と、ブイで自動観測された東シナ海（28°10'N, 126°20'E）における大気と海洋の$CO_2$濃度の時間変化(下)

## 3. まとめ

大気と海洋における$CO_2$の長期観測により、北太平洋亜熱帯域、太平洋赤道域、南太平洋亜熱帯域、南大洋それぞれの海域おいて、大気$CO_2$濃度の増加とともに、海洋でも$CO_2$が増加していることを実証できた。また赤道域ではエルニーニョが発生すると、海洋から大気へ放出される$CO_2$が著しく減少することも分かった。

一方、炭素循環の変化に起因するような、大気と海洋の$CO_2$分圧差の長期的な変化については、気象研究所と気象庁で観測してきた海域の表面水では、今のところほとんど検出されていない。しかし、東経137度の水深800m以浅では、過去9年間に、全炭酸濃度の顕著な増加とともに、酸素濃度の減少や栄養塩濃度の増加もわずかながら観測されており、全炭酸濃度の増加のうち、いくらかは炭素循環の変化に起因すると考えられる。

今後とも、海洋$CO_2$分布の長期的な変化はもちろん、短期の変化についても、さまざまな海域で観測と解析を進める必要がある。そして、海洋の$CO_2$分布や生態系など、炭素の循環に関わるさまざまな要素と、気象や海洋の物理条件などとの関連について理解を深め、地球温暖化が大気中の$CO_2$濃度や炭素循環に及ぼす影響について、基礎的な情報を蓄積してゆくことが大切である。

一般に、温室効果気体の分布や変動に関する観測では、単一の機関でカバーできる時間・空間領域が限られている。また、継続的なモニタリングを必要としながら、研究的な要素が大きいのも、こうした調査の特徴である。今後とも、国内・海外の機関との協力はもとより、現業部門と研究部門が密接に連携をとりながら、調査を進めてゆく必要がある。

## 参考文献


Inoue, H., Sugimura, Y. Fushimi, K., 1987. $pCO_2$ and $\delta^{13}C$ in the air and the surface sea water in the western North Pacific. *Tellus* **39B**, 228-242.

Inoue, H. Y. Sugimura, Y., 1992. Variation and distributions of $CO_2$ in and over the equatorial Pacific during the period from the 1986/88 El Nino event to the 1988/89 La Nina event. *Tellus* **44B**, 1-12.

Inoue, H. Y., Matsueda, H., Ishii, M., Fushimi, K., Hirota, M., Asanuma, I., Takasugi, Y., 1995. Long-term trend of the partial pressure of carbon dioxide ($pCO_2$) in surface waters of the western North Pacific, 1984-1993. *Tellus* **47B**, 391-413.

Inoue, H. Y., Ishii, M., Matsueda, H., Aoyama, M., 1996. Changes in longitudinal distribution of the partial pressure of $CO_2$ ($pCO_2$) in the central and western equatorial Pacific, west of 160°W. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 1781-1784.

Inoue, H. Y., Ishii, M., Matsueda, H., Saito, S., Midorikawa, T., Nemoto, K., 1999. MRI measurements of partial pressure of $CO_2$ in surface waters of the Pacific during 1968 to 1970: re-evaluation and comparison of data with those of the 1980s and 1990s. *Tellus* **51B**, 830-848.

Inoue H. Y., Ishii, M., 2004. Variations and trends of $CO_2$ in the surface seawater in the Southern Ocean south of Australia between 1969 and 2002. *Tellus* **56B**, in press.

Ishii, M., Inoue, H. Y., 1995. Air-sea exchange of $CO_2$ in the central and western equatorial Pacific in 1990. *Tellus* **47B**, 447-460.

Ishii, M., Inoue, H. Y., Matsueda, H., Tanoue, E., 1998. Close coupling between seasonal biological production and dynamics of dissolved inorganic carbon in the Indian Ocean sector and the western Pacific Ocean Sector of the Antarctic Ocean. *Deep-Sea Res. I,* **45**, 1187-1209.

Ishii, M., Inoue, H. Y., Matsueda, H., Saito, S., Fushimi, K., Nemoto, K., Yano, T., Nagai, H., Midorikawa, T., 2001. Seasonal variation in total inorganic carbon and its controlling processes in surface waters of the western North Pacific subtropical gyre. *Mar. Chem.*, **75**, 17-32.

Ishii, M., Inoue, H. Y., Matsueda, H., 2002. Net community production in the marginal ice zone and its importance for the variability of the oceanic $pCO_2$ in the Southern Ocean south of Australia. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 1691-1706.

Ishii, M., Saito, S., Tokieda, T., Kawano, T., Matsumoto, K., Inoue, H. Y., 2004. Variability of surface layer $CO_2$ parameters in the western and central equatorial Pacific. In: Shiyomi *et al.* ed., *Global Environmental Change in the Ocean and on Land.* Terrupub, Tokyo.

Midorikawa, T., Umeda, T., Hiraishi, N., Ogawa, K., Nemoto, K., Kubo, N., Ishii, M., 2002. Estimation of seasonal net community production and air-sea $CO_2$ flux based on the carbon budget above the temperature minimum layer in the western subarctic North Pacific. *Deep-Sea Res. I,* **49**, 339-362.

Midorikawa T., Ogawa, K., Nemoto, K., Kamiya, H., Umeda, T., Hiraishi, N., Wada, A., Ishii, M., 2003. Interannual variations of net community production and air-sea $CO_2$ flux from winter to spring in the western subarctic North Pacific. *Tellus* **55B**, 466-477.

Midorikawa, T., Nemoto, K., Kamiya, H., Ishii, M., Inoue, H.Y., 2004. Persistently strong oceanic $CO_2$ sink in the western subtropical North Pacific. *Geophys. Res. Lett.,* submitted.

斉藤秀、石井雅男、習田恵三、藤村昌彦、金子郁雄、緑川貴 2004年度 日本海洋学会秋季大会