

太平洋広域における大気海洋間の二酸化炭素交換の研究*

—平成2年度日本気象学会堀内基金奨励賞受賞記念講演—

井上(吉川)久幸**

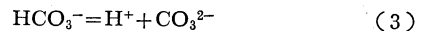
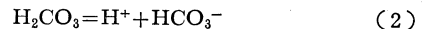
1. はじめに

この度の日本気象学会堀内基金奨励賞, どうも有難うございます。私たちがこれまで行なってきた大気・海洋間の二酸化炭素交換に関する一連の仕事が, 気象学会の皆様方に評価して頂きました事は誠に光栄に存じております。同時に学際的なこのような仕事にまで目をくぼって頂いている事に対して深く感謝する次第です。先程は, 私たちという言葉を用いましたが, 表題にあります様な仕事は個人でなにかも出来るものではなく, 歴代の部長をはじめとして, 多くの同僚の協力によってはじめて成立ったものであります。

現在, 大気中の二酸化炭素 (CO₂) は毎年約 1.5 ppm 増加している事が知られており, その温室効果による地球規模での気候変動の可能性が指摘されております。二酸化炭素増加による気候変動を解明するためには, 将来の大気中の二酸化炭素濃度を正確に予測する事が必要ですが, そのためには, 先ず現在の増加率に対する理解が不可欠であります。石油や石炭のいわゆる化石燃料の燃焼によって大気に放出される二酸化炭素の内, 約 50% に相当する量が 大気に留っている事が観測や統計データから分っているものの, 大気に放出される二酸化炭素と大気中の二酸化炭素濃度の増加率との相関は, それほどでもなく自然の発生源や吸収源の変動を観測しておく事が重要であります。また大気に放出された二酸化炭素の残りの 50% の行き先についても, 現在でも分かっておらずいわゆる Missing Sink と言われている事は既に皆さん御存知の事と思えます。海洋あるいは植生が行き先としてもっとも可能性が高いわけですが, そのどちらに蓄積されているかは, 未だよく分っていない状態

あるわけです。こうした背景もあり, 大気・海洋間の二酸化炭素交換に関する研究が地球化学研究部においては, 既に 1960 年代から始められていました。今回受賞する事になった仕事もその延長線上に有る事は言うまでもありません。

二酸化炭素は, 炭酸ガスとも言う事からも分かるように水に溶けた場合酸としての働きをします。例えば, 大気より海水に二酸化炭素が溶けこむと, まず二酸化炭素分子は水和されますが (aqCO₂), この水和された二酸化炭素と H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻ の間には比較的迅速に化学平衡が成立ちます。



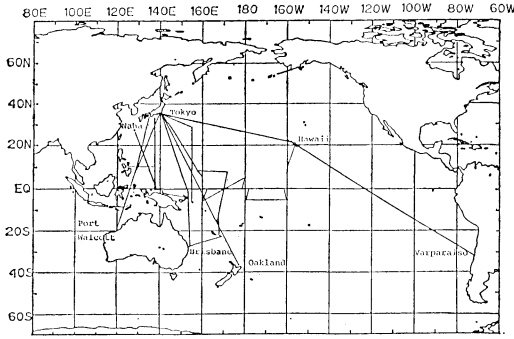
これらの化学種の存在比 (モル分率) は, 水溶液の pH, 温度, イオン強度, 圧力等によって決るもので, 通常の表面海水の状態では, 大部分が重炭酸イオン (HCO₃⁻, 9 割程度) として存在しており, 次に多いのは, 炭酸イオン (CO₃²⁻) で約 1 割です。大気との間で交換をおこす事の出来る化学種は, aqCO₂ (1% 未満) だけです。これまでの一連の研究においては, この aqCO₂ と平衡になった空気中の二酸化炭素濃度を測定してきたわけで, けっして全炭酸 (H₂CO₃ + aqCO₂ + HCO₃⁻ + CO₃²⁻) の濃度を測定してきたわけではありません。この aqCO₂ と平衡になった空気中の二酸化炭素濃度こそが海水が大気中に二酸化炭素を逃す能力 (二酸化炭素分圧, 値としては水蒸気圧分低くなる) の目安となるものであり, 空気に比べて高ければ, その海域は大気への二酸化炭素の発生源という事になるわけですし, 逆に低ければ吸収源という事がいえるわけです。

* Studies on CO₂ exchange between air and sea in the wide area of the Pacific Ocean

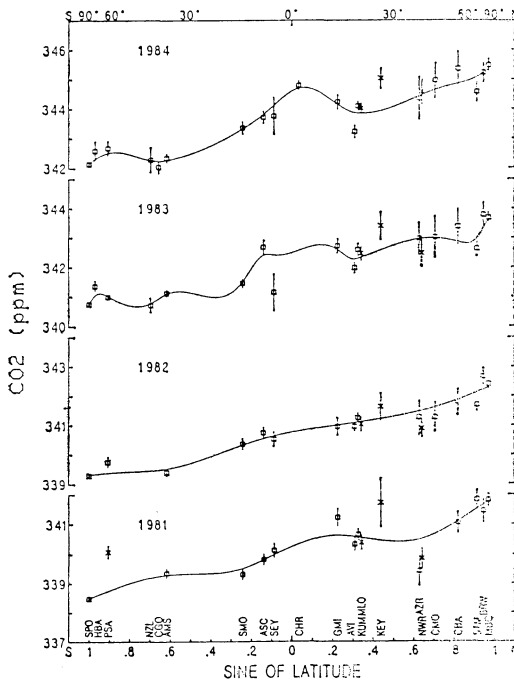
** Hisayuki Yoshikawa Inoue, 気象研究所地球化学研究部。

2. 観測システム

私共では, それまで地球化学研究部で用いられていた

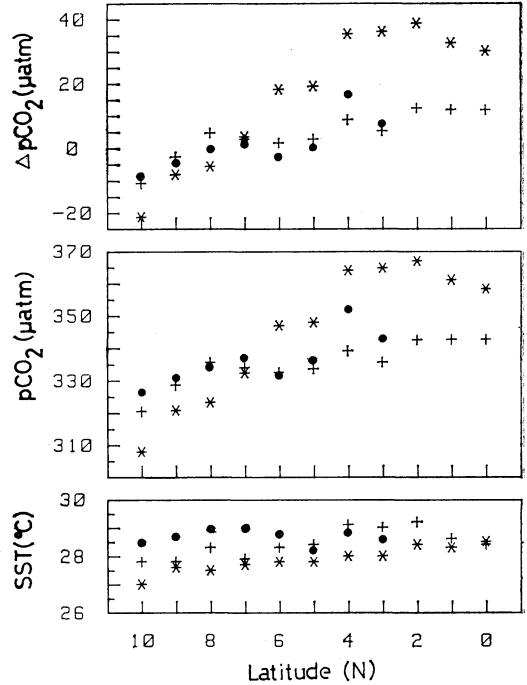


第1図 1987年1月以降の観測海域



第2図 1981年から1984年までの二酸化炭素濃度の緯度分布 (After Conway *et al.*, 1988) 1982/83 ENSO 期間中は、赤道附近の濃度の極大が見られない。

装置をもとに大気及び海水中の二酸化炭素の濃度(海水と平衡になった空気中の濃度)を船上で連続的に測定するシステムを開発しました。ここでは装置の概略について述べます。装置は主に三つのユニットの組合せから成立っていて、一つは非分散型赤外分光光度計(NDIR Analyzer)であり残りの二つは、NDIR Analyzerの出力を記録し保存するユニットと、電磁弁、エアポンプ、

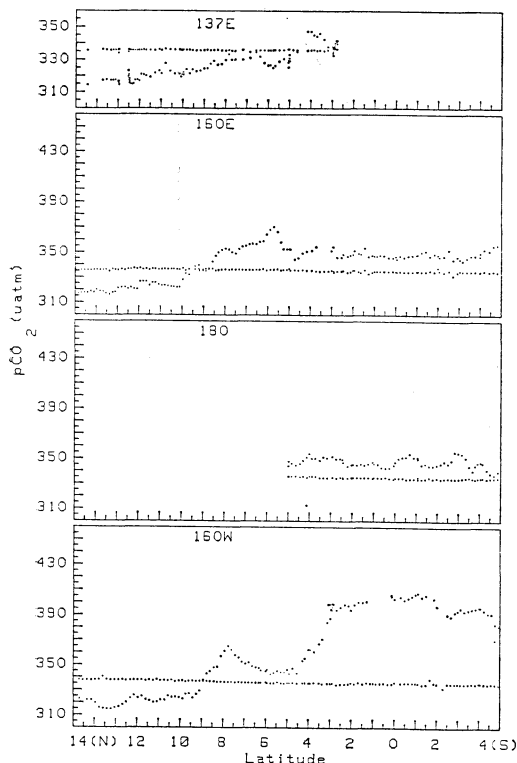


第3図 1983年(*), 1985年(+), 1987年(•)1月の西部熱帯太平洋における二酸化炭素分圧と水温。

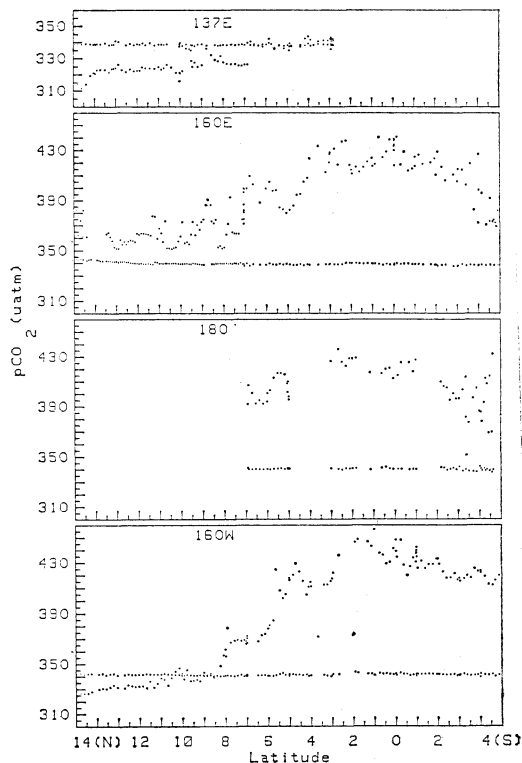
水蒸気トラップ等から成立つユニットであります。この中で特に重要な事は、空気からの水蒸気の除去であります。水蒸気は、NDIR Analyzerのセルの中で二酸化炭素による光エネルギー吸収に付加的な変化を与え、測定値に誤差をもたらしますので、水蒸気は、電子冷却装置、パーマピュアドライヤー、Mg(ClO₄)₂等で除去するようにしました。大気は船首よりパイプで実験室にまで空気を導き分析しました。海水中の二酸化炭素濃度(海水と平衡になった乾燥空気中の二酸化炭素濃度で表す)の測定は、船底より海水をくみ上げ、平衡器に海水を導く事により行ないました。平衡器内で閉じた回路にある空気との間で二酸化炭素交換がおり、平衡に達した空気中の二酸化炭素濃度を測定するようになっている訳です。

3. 観測結果

第1図に1987年以降これまでに観測した海域を示しました。これ以前にも南極海やインド洋で測定を行ったり(Inoue and Sugimura, 1988 a) 同位体に関する室内実験等(Inoue and Sugimura, 1985)をしています。



第4図 1987年1月—2月の中部及び西部熱帯太平洋における二酸化炭素分圧。



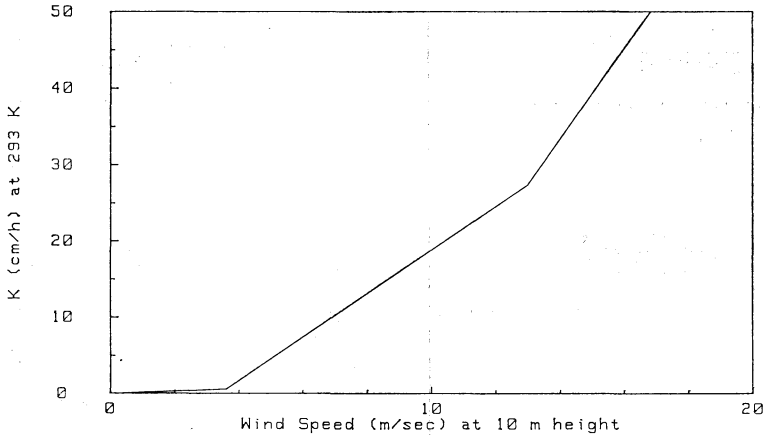
第5図 1989年1月—2月の中部及び西部熱帯太平洋における二酸化炭素分圧。

今日は、これらの結果についてはふれませんが、さて1987年から現在までに1986/88 ENSO Event (エルニーニョ) が起こり、それに引続いて La Nina Event (Cold Event) が1989年に発生しました。これらの現象により地球上の炭素循環が如何に変化したかを知ることは、将来の大気中の二酸化炭素増加率を予測するうえでも極めて重要でありまして、今回は今までえられております結果のうち、熱帯太平洋での観測結果について紹介したいと思います。

ENSO Event により大気中の二酸化炭素の濃度増加率や緯度分布は、ある特徴的な変化をする事が知られています (第2図)。しかしながら、その変動が何に由来するのかは未だよく分っておりません。熱帯太平洋における大気と海洋間での二酸化炭素交換の変動がひとつの有力な説ではありますが、交換量を検討するために必要な表面海水中の二酸化炭素分圧の時間的変動はほとんど報告されていないわけです。

↓ 1986/88 ENSO Event 前に報告された ENSO 期間

中の赤道太平洋における二酸化炭素分圧の報告はほとんどありません。1982/83 ENSO Event 中に西部赤道太平洋で測定された結果 (Inoue *et al.*, 1987, Fushimi, 1987), と Feely ら (1987) によって東部熱帯太平洋で測定された結果が報告されている程度です。第3図は、1982/83 ENSO 期間中の1983年に137° Eにそって測定した結果と Non-ENSO 期間の1985年の測定結果を示しております。西部赤道太平洋においては、1983年1月は水温のアノマリーは負になっており、Non-ENSO 期間に比べて二酸化炭素分圧は高くなっている事が分かります。この事は、この海域においては、ENSO 期間中に海水の鉛直混合が Non-ENSO 期間よりもさかんであった事を示しているわけです。では、東部熱帯太平洋は1982/83 ENSO 期間中どうであったかかというと、水温のアノマリーは当然ながら正で、二酸化炭素分圧は大気のそれとほとんど同じに減少していたわけでありまして、これはこの海域での鉛直混合がかなりおさえられていた事を意味しており、表面混合層の ENSO による変動の



第6図 二酸化炭素交換係数と風速の関係。

パターンと矛盾するものではないわけでありませぬ。

次に1982/83 ENSO 以後におきた最初のエルニーニョである1986/88 ENSO Event 中の結果について話します。第4図は、1987年1月から2月にかけての表面海水中の二酸化炭素分圧の測定結果であります。表面海水中の二酸化炭素分圧は、160°W にそった分布とその他のものとは、かなり異なっている事がわかります。160°W にそった表面海水中の二酸化炭素分圧は、1°S 附近で極大を示し、3°N 以南では、380 μatm を超える値を示しました。一方、160°E、180° では二酸化炭素分圧の値は350 μatm 附近の値を示し明らかな極大は示しませんでした (Inoue and Sugimura 1988 b)。この明らかな差は、5°S にそった160°-161°W 附近の比較的せまい範囲で観測されました。また137°E にそっては、ENSO Event に伴う大きな二酸化炭素分圧の変動は観測されませんでした (第4図)。これらの観測結果は、1986/88 ENSO Event により熱帯太平洋域においては、二酸化炭素分圧は、通常年 (Non-ENSO period) よりも異なっていた事を示しています。しかしその変動自体は1982/83 ENSO Event のときほど大きくはなっていないようであります。

第5図に1989年1月から2月にかけて観測した表面海水の二酸化炭素分圧の分布を示しました (Inoue and Sugimura, 1989)。1988年の春以降 SOI Index は、1975年以來の正の値となり、La Nina Event が発生しました。この時期の太平洋熱帯域の二酸化炭素分圧は、あきらかに温度の減少と共に増加している事がわかります。第5図に示すように1987年1月と比較して160°W、180°、

160°E では、水温の低下とともに炭酸ガス分圧は増加している事がわかります。特に160°E では、最大値が約450 μatm になり約100 μatm も増加していました。また180°においてもかなりの増加が観測されました。160°W については、もともと1987年の El Nino 期間中でもかなり高い値を示していたので、その変化率はそれほどでもなく、値自体は、他の測線に比べて最も高くなっています。これらの海域においては、栄養塩の濃度も Non-ENSO 期間よりも高く、鉛直方向の混合がさかんになり、深層の水の影響を受けたために二酸化炭素分圧が上昇したと考えられます。これに比べて、137°E では、1987年と1989年でほとんど変化がみられませんでした。

また1990年1月-2月においても160°W、180°、160°E において二酸化炭素分圧を測定しました。1990年の値は、El Nino 期間よりは大きく、La Nina 期間よりも小さい事がこれまでの観測結果より分かっております。

これまででは、海水中の二酸化炭素分圧の変動に関連した事を話してきましたが、ではそのフラックスはどうだったのでしょか。1987年及び1989年1-2月の160°E、180°、160°W の5°S-5°N におけるフラックス ($F(\text{CO}_2)$) を式(4)により計算しました。

$$F(\text{CO}_2) = k \cdot s \cdot \Delta p\text{CO}_2 \quad (4)$$

ここで k は交換係数であり、 s は二酸化炭素の海水への溶解度であります。この交換係数は、風速と Schmidt Number (Sc) の関数であり、つぎのように表されます (Etocheto and Merlivat, 1988)。

$$k = 0.17 \cdot U_{10} \cdot (600/Sc)^{2/3}$$

$$0 < U_{10} \leq 3.6 \text{ m/s} \quad (5)$$

$$k = [2.85 \cdot U_{10} - 9.65] \cdot (600/S_c)^{1/2}$$

$$3.6 < U_{10} \leq 13 \text{ m/s} \quad (6)$$

$$k = [5.9 \cdot U_{10} - 49.3] \cdot (600/S_c)^{1/2}$$

$$U_{10} > 13 \text{ m/s} \quad (7)$$

この交換係数と風速の関係を第6図に示しました。ここで U_{10} は、高さ 10 m での風速です。この図からわかるように、風速 13 m/s を超えるような場合は交換が著しく促進されるわけです。

洋上での観測値や全球の解析値 ($1.875^\circ \times 1.875^\circ$) のデータをもとに1987年及び1989年のフラックスを計算したところ1987年では、 $0.35 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から $2.50 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ の間にあり、一方 La Nina 期間中では、 $2.15 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ から $7.24 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であり、明らかに La Nina 期間中のほうが二酸化炭素放出量が大きくなりました。この交換係数については、もし Smethie *et al.*, (1985) により報告された値を使うと式(5)-(7)で得られる値に比べて約2倍程度大きくなり現状では正確なフラックスを求める事はなかなか困難であります。この海域において大きなフラックスの変動があったという事は明らかであります。

4. おわりに

最近の研究結果によれば、ENSO 期間中の二酸化炭素増加率の変動に高緯度の旱魃、火災の発生がかなり寄与しているという報告もあり、この問題はかなり複雑な様相を示しています。その様な事はあるにしても、表面海水の二酸化炭素分圧の時間的、空間的な変動が大気中の二酸化炭素増加の動向を知るうえで重要である事は今後も変わりなく、私共は大気及び表面海水の二酸化炭素濃度について積極的に測定を行ない、その交換に係わる基本的な情報を得るべく努力していきたいと考えております。海洋における炭素循環は非常に複雑で、その解明は一筋縄ではゆきそうもありませんが、今回の受賞をその一つのステップとして、がんばりたいと思っております。

謝辞

この分野での研究のきっかけを作って頂いた杉村行勇地球化学研究部長、及び船上での観測に協力していただいた同僚の皆様と気象庁海洋課、海洋科学技術センター、川崎汽船(株)、大阪商船三井船舶(株)の皆様へ深く感謝します。

参考文献

- Conway, T.J., P. Tans, L.S. Waterman, K.W. Thoning, K.A. Masarie and R.H. Gammon, 1988: Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere, 1981-1984. *Tellus*, **40 B**, 81-115.
- Etcheto, J. and L. Merlivat, 1988: Satellite determination of the carbon dioxide exchange coefficient at the ocean-atmosphere interface: a first step. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15669-15678.
- Feeley, R.A., R.H. Gammon, B.A. Taft, P.E. Pullen, L.S. Waterman, T.J. Conway, J.F. Gendron, and D.P. Wisegarver, 1987: Distribution of chemical tracers in the eastern equatorial Pacific during and after the 1982-83 El Nino/Southern oscillation Event. *J. Geophys. Res.*, **92**, 6545-6558.
- Fushimi, K., 1987: Variation of carbon dioxide partial pressure in the western North Pacific surface water during the 1982/83 El Nino event. *Tellus*, **39 B**, 214-227.
- Inoue, H. and Y. Sugimura, 1985: Carbon isotopic fractionation during the CO_2 exchange process between air and sea water under equilibrium and kinetic conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 2453-2460.
- , and K. Fushimi, 1987: pCO_2 and $\delta^{13}\text{C}$ in the air and surface sea water in the western North Pacific. *Tellus*, **39 B**, 228-242.
- , and Y. Sugimura 1988 a: Distribution and variations of oceanic carbon dioxide in the western North Pacific, Eastern Indian, and Southern Ocean south of Australia. *Tellus*, **40 B**, 308-320.
- , and Y. 1988 b: Distribution of the pCO_2 in surface seawater of the western and central equatorial Pacific during the 1986/87 El Nino/Southern Oscillation event. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 1499-1502.
- , and —, 1989: Distribution of pCO_2 in surface sea water of the central and western equatorial Pacific during the 1986/87 ENSO event and the Cold event in 1989, Environmental Pollution Monitoring and Research Programme. **59**, 170-174.
- Smethie W.M. Jr. T. Takahashi and D.W. Chipman, 1985: Gas exchange and CO_2 flux in the tropical Atlantic Ocean determined from ^{222}Rn and pCO_2 measurements. *J. Geophys. Res.*, **90**, 7005-7022.