

# 太平洋における大気・海洋間のCO<sub>2</sub>収支について

日大生産工(院) 島根 彰男  
日大生産工 和田 明  
(財)海生研 長谷川 一幸

## 1. はじめに

産業革命以後、人類は石油、石炭、天然ガス等の化石燃料を消費し続けてきた。そのため大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が次第に増加し、地球は温暖化するのではないかと指摘されてきた。このような状況下で、1997年に京都において気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)が開催され、日本は地球温暖化の原因と考えられているCO<sub>2</sub>を含めた温室効果ガスを2008年～2012年までに1990年の排出量に対し6パーセント削減することが義務付けられた。しかし、CO<sub>2</sub>排出の多くがエネルギー確保のためのものであり、CO<sub>2</sub>削減の具体的な対策がなされていないのが現状で、CO<sub>2</sub>の大気への排出をいかに抑制させるかが地球温暖化対策の重要な鍵となっている。

海洋は大気の50倍以上もの炭素を含み、人類が排出したCO<sub>2</sub>の取り込みに重要な役割を果たしていると考えられている。

そこで本研究では、特に太平洋がどの程度CO<sub>2</sub>の吸収に寄与しているかを検討する。そして、どの海域でどの程度のCO<sub>2</sub>の交換が行なわれているのかを推定することを目的とする。

## 2. 大気・海洋間のCO<sub>2</sub>収支

### (1) CO<sub>2</sub>交換量の算定

大気・海洋間のCO<sub>2</sub>交換量を算出するには、大気・海洋間のCO<sub>2</sub>分圧差と実験的に決められたガス交換係数の積を求める必要がある。以下に大気・海洋間のCO<sub>2</sub>交換量の式を示す。

$$F = E \cdot \Delta pCO_2 = k \cdot S \cdot \Delta pCO_2 \quad (1)$$

ここに、F: CO<sub>2</sub>交換量(mol/m<sup>2</sup>・yr)、E: ガス移動係数(mol/m<sup>2</sup>・yr・μatm)、k: ガス交換係数

(cm/h)、pCO<sub>2</sub>: 大気・海洋間のCO<sub>2</sub>分圧差(μatm)、S: CO<sub>2</sub>の溶解度(mol/kg・μatm)である。

### (2) 大気・海洋間のCO<sub>2</sub>分圧差の算定

CO<sub>2</sub>交換量を算出する際に用いる pCO<sub>2</sub>は、海洋のCO<sub>2</sub>分圧をpCO<sub>2-OCEAN</sub>とし、大気中のCO<sub>2</sub>分圧をpCO<sub>2-AIR</sub>とすると、両者の分圧の差によって求められ、これにより大気・海洋間の移動方向が決まってくる。以下に pCO<sub>2</sub>の式を示す。

$$\Delta pCO_2 = pCO_{2-OCEAN} - pCO_{2-AIR} \quad (2)$$

ここで、pCO<sub>2-OCEAN</sub>: 海洋のCO<sub>2</sub>分圧(μatm)、pCO<sub>2-AIR</sub>: 大気側のCO<sub>2</sub>分圧(μatm)である。

式(2)で pCO<sub>2</sub>が正の値、すなわちpCO<sub>2-OCEAN</sub>>pCO<sub>2-AIR</sub>であれば海洋側から大気側へCO<sub>2</sub>が移動し、pCO<sub>2</sub>が負の値、pCO<sub>2-AIR</sub><pCO<sub>2-OCEAN</sub>であれば大気側から海洋側へCO<sub>2</sub>が移動することを示す。

### (3) 海洋のCO<sub>2</sub>分圧の算定

pCO<sub>2-OCEAN</sub>の値は海域によって大きく変動するため、以下の算定式を用いて算出した。pCO<sub>2-AIR</sub>の値は場所による変動が小さいと見なせるため、一定値と仮定した。

$$pCO_{2-OCEAN} = \frac{\sum CO_2}{K_0} \frac{2 - \frac{Ac}{\sum CO_2}}{2 + \frac{K_1}{[H^+]}} \quad (3)$$

ここで、K<sub>0</sub>: 溶解度(mol/kg・atm)、CO<sub>2</sub>: 全炭酸濃度(mol/kg)、A<sub>c</sub>: 炭酸アルカリ度(eq/kg)、K<sub>1</sub>: CO<sub>2</sub>の第1解離定数(mol/kg)、H<sup>+</sup>: 水素イオン活動度(mol/kg)である。

使用した水温・塩分データは日本海洋データセンター(Japan Oceanographic Data Center: JODC)所蔵の1906年～1988年にわたる

VERIFICATION OF THE AIR-SEA CARBON DIOXIDE EXCHANGE OF THE PACIFIC OCEAN

Akio SHIMANE, Akira WADA and Kazuyuki HASEGAWA

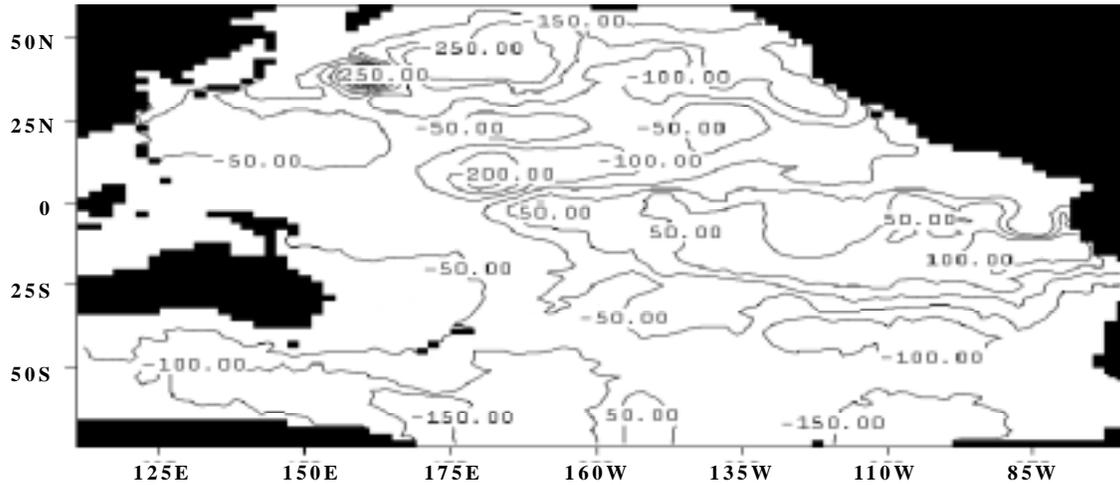


図-1 大気・海洋間のCO<sub>2</sub>分圧差(μatm)

約80年間の東経100度～西経60度区間に存在するBT類(XBT, MBT, DBT, AXBT:ステーション数924392点), SD類(各層観測, STD, CTD:ステーション数298346点)を整理し, 全炭酸濃度は, CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)のデータ(NDP-76)を緯度・経度方向2度に補間して使用した。

#### (4) 大気・海洋間のCO<sub>2</sub>分圧差

式(2)を用いて大気・海洋間のCO<sub>2</sub>分圧差を算出した結果が図-1である。図中の値はプラスであれば放出, マイナスであれば吸収する方向にCO<sub>2</sub>が移動していることを意味している。

図-1から, 両極付近ではCO<sub>2</sub>を吸収して, 赤道付近ではCO<sub>2</sub>を放出する方向に移動する傾向が分かる。しかし, 日本の東方(北緯40度・東経160度付近)に大きな放出域が見られた。

Broecker et al<sup>1)</sup>の海水のベルトコンベヤー説によれば, 北大西洋のグリーンランド沖で冷却された海水は深層に沈みこみ, 低緯度へとゆっくりと移動し, インド洋を通過して最終的に北太平洋で湧昇流として世界の海を循環しているとされている。この放出域は, この循環流によって深層の高濃度の全炭酸が北太平洋で湧き上がることで生じたと考えられる。

### 3. 大気・海洋間のCO<sub>2</sub>交換量

#### (1) CO<sub>2</sub>交換量の概要

CO<sub>2</sub>交換量を算出する式(1)中のガス交換係数(Eとk)は風速の関数であるが, 報告者によって様々な算定式が提案されている。

Liss and Merlivat<sup>2)</sup>は瞬間値に近い風速データを用いる場合に次式を提案している。

$$k / \text{cm} \cdot \text{h}^{-1} = 0.17U_{10}(S_{C20}/S_C)^{2/3} \quad (4a)$$

$$; 0 < U_{10} \leq 3.6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k / \text{cm} \cdot \text{h}^{-1} = [2.85U_{10} - 9.65](S_{C20}/S_C)^{1/2} \quad (4b)$$

$$; 3.6 < U_{10} \leq 13 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k / \text{cm} \cdot \text{h}^{-1} = [5.9U_{10} - 49.3](S_{C20}/S_C)^{1/2} \quad (4c)$$

$$; U_{10} > 13 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

ここで, U<sub>10</sub>: 高さ10mでの風速(m/s), Sc: シュミット数である。

一方, Tansら<sup>3)</sup>は長期的な平均風速データを用いる場合に以下の算定式を提案している。

$$E = 0.016(U - 3) \quad (5a)$$

$$E = 0.0 \quad (5b)$$

ここで, U: 風速(m/s)である。風速が3m/s以上であれば式(5a)を用いて, 風速が3m/s未満であれば式(5b)を用いる。

Wanninkhof<sup>4)</sup>は風速のデータセットの特徴を考慮し, 短期的なデータと長期的なデータを使う場合では算定式を区別すべきだとしている。以下にその際の算定式を示す。

$$k = 0.39U_{10}^2(S_{C20}/S_C)^{1/2} \quad (6)$$

$$k = 0.31U_{10}^2(S_{C20}/S_C)^{1/2} \quad (7)$$

ここで, 式(6)は長期的な風速データを用いた場合, 式(7)は短期的(瞬間値的)風速データを用いた場合のkと風速の関係である。

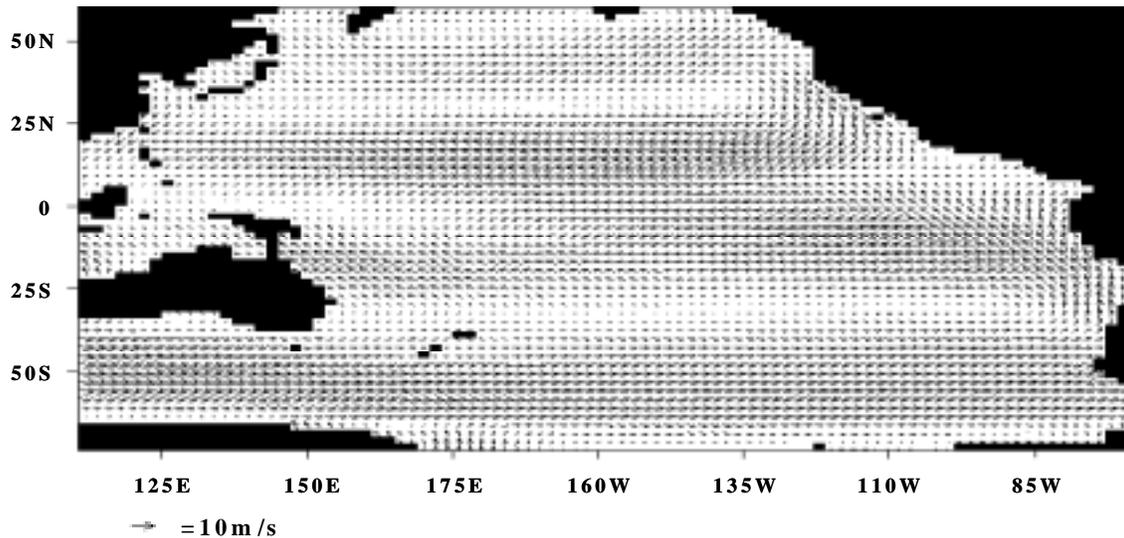


図-2 風速のデータ(m/s)

一方,石田ら<sup>5)</sup>はより簡単な算定式を提案している.これは,Eの大きさは風速に依存しないとしたものである.以下に式を示す.

$$E = 0.065 \quad (8)$$

現在のところ,どの係数が最も現実に近いかが明らかにされていない.そこで,本研究では以下に示すように長期的な平均風速データを用いたことから,Tansら<sup>3)</sup>の算定式(5)を使用した場合と,風速に依存しない石田ら<sup>5)</sup>の算定式(8)を使用した場合の2ケースでCO<sub>2</sub>交換量を算出した.

## (2) 使用した風速のデータ

海上で風速を測定する際に,航走船舶による観測では10m高度での値を測定基準としていたが,実際の船舶の多くで30m以上の高度で測定されていることが近年明らかになり,これまで測定値を過大評価していたことが明らかにされている.そこで本研究では,SSM/I衛星風速観測値を風速のデータとして使用した.SSM/I海上風データはNASAのGoddard Space Flight Center (GSFC)から提供されたもので,本計算の対象としている太平洋全域の1988年~1998年までの6時間毎のデータである.また,分解能は経度方向2.5度×緯度方向2.0度であったものを経度・緯度方向2度に補間して使用した.

本研究で大気・海洋間のCO<sub>2</sub>交換量を算定する際に使用した風速を図-2に示す.赤道付近では北東から南西方向へ吹く北東季節風,オーストラリア付近では北西季節風が現れているのが分かる.さらに,北東貿易風,南西貿易

表-1 CO<sub>2</sub>交換量(炭素換算GtC/yr)

大気中のCO <sub>2</sub> 分圧	ガス交換係数	
	ケース1	ケース2
300	0.63	0.09
310	0.16	-1.37
320	-0.30	-2.84
330	-0.76	-4.30
340	-1.22	-5.76
350	-1.68	-7.22
360	-2.14	-8.68
370	-2.60	-10.14
380	-3.06	-11.60

風,偏西風も確認できる.また,亜熱帯高圧帯(北・南緯30度付近)では風が収束し,その風速は非常に弱いということが分かる.

## (3) CO<sub>2</sub>交換量の計算結果

CO<sub>2</sub>交換量を求める際に式(1)を用いて,風速による影響を考慮したケース1(式(5))を使用し,風速による影響を無視したケース2(式(8))を使用した.その収支の合計を求めたのが表-1である.pCO<sub>2-AIR</sub>は,およそ1900年代以降の分圧と等しい,300~380 μatmまでの範囲を考慮した.

表からケース2はケース1に比べ,CO<sub>2</sub>収支量が大きい傾向になることが分かる.ケース1は風速が3m/s以上にならないと大気・海洋間でCO<sub>2</sub>の交換が起きない条件になっているのに対し,ケース2ではどの海域でも同じ大きさのCO<sub>2</sub>交換が行なわれる条件になっているので,ケース2の収支量が過大になったといえ

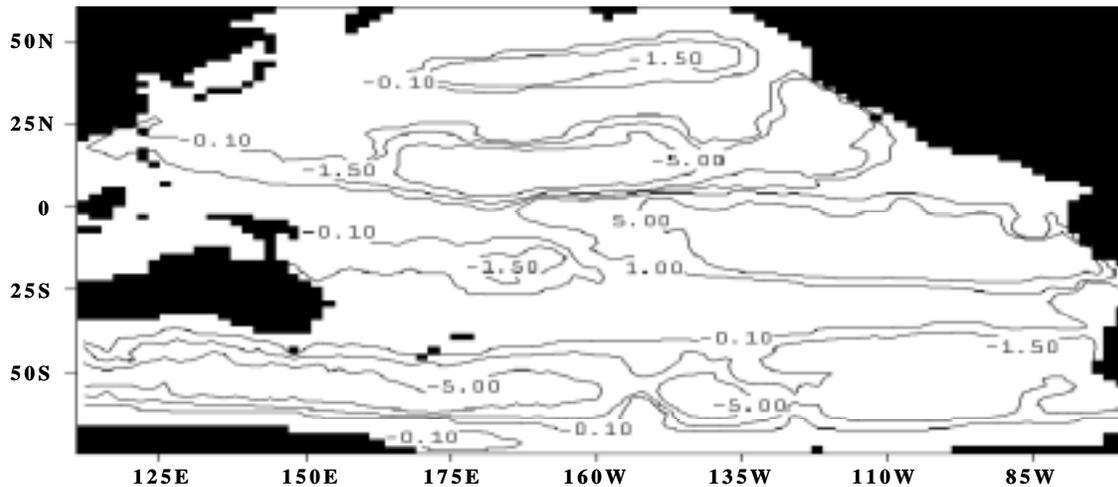


図-3 CO<sub>2</sub>交換量(×10<sup>-3</sup>Gt/yr)

る。また、 $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$ の値が小さければ大気にCO<sub>2</sub>が放出し、 $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$ の値が大きくなるにつれて海洋にCO<sub>2</sub>を吸収する傾向にあることが分かる。

IPCCの報告書によると、全海洋のCO<sub>2</sub>吸収量は $2.0 \pm 0.8 \text{ GtC/yr}$ (炭素換算)とされている。太平洋は全海洋に対しおよそ50パーセントを占めていることから、太平洋ではおよそ $1.0 \pm 0.4 \text{ GtC/yr}$ 吸収していると考えられる。IPCCの報告書の見積もりと本計算結果を比較してみると、ケース1では大気中のCO<sub>2</sub>分圧を330~340  $\mu\text{atm}$ (1970年~1980年代付近の $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$ に相当)に設定した時で、ケース2だと大気中のCO<sub>2</sub>分圧を310  $\mu\text{atm}$ (1940年付近の $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$ に相当)とした時にIPCCの報告書の見積もりとほぼ同値となった。このように、 $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$ の大きさやガス交換係数によって大気・海洋間のCO<sub>2</sub>交換量は変動することが確かめられた。

図-3に $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$ を330  $\mu\text{atm}$ (ハワイ・マウナロアにおける大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変動記録によると1970年付近の値)と設定し、ケース1を用いた場合の太平洋におけるCO<sub>2</sub>交換量を示す。図-3から、CO<sub>2</sub>の吸収域は北太平洋亜寒帯海域、北赤道海流海域、北赤道反流海域、南極環流海域に沿って分布していて、放出域はペルー沖から南赤道海流海域、南赤道反流海域に沿って分布しているのが分かる。

#### 4. おわりに

本研究では、太平洋における大気・海洋間のCO<sub>2</sub>収支を海洋のCO<sub>2</sub>分圧から算出した。太平洋のCO<sub>2</sub>吸収域を見ると、北太平洋亜寒帯海域、北赤道海流海域、北赤道反流海域、南極環流海域に沿って分布していることから、海流とCO<sub>2</sub>

の吸収域には関連性があることが示唆された。

太平洋のCO<sub>2</sub>収支の合計を見ると0.76GtC/yr吸収しており、これは人類が排出するCO<sub>2</sub>の量が約 $7.0 \pm 1.1 \text{ GtC/yr}$ なので約9~13パーセントに相当し、太平洋はCO<sub>2</sub>の吸収に大きく貢献していることが明らかになった。

大気のCO<sub>2</sub>分圧の平均増加率は、1970年以降1.3  $\mu\text{atm/yr}$ であったが最近では1.8  $\mu\text{atm/yr}$ と増加率も大きくなっている<sup>6)</sup>。大気のCO<sub>2</sub>分圧が約10  $\mu\text{atm}$ 増加すると、海洋に取り込まれるCO<sub>2</sub>量は本計算結果から、ケース1では0.46GtC/yr程度増加し、ケース2では1.46 GtC/yr程度増加することが明らかになった。

今後は大気・海洋間のCO<sub>2</sub>交換量の算出精度を高めるために海域ごとの $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$ を求めて、これを考慮してCO<sub>2</sub>交換量を算出していきたい。

#### 参考文献

- 1) Broecker et al.: Nature, Vol. 315, pp.21-26, 1985
- 2) Liss, P. and L. Merlivat: Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis. In: The role of air-sea exchange in geochemical cycling. NATO ASI series. Series C: Mathematical and Physical Sciences 185, (ed. P. Buat Menard). Dordrecht / Holland: D. Reidel Publ. Comp, pp.113-127, 1986
- 3) Tans, P.P., I.Y. Fung and T. Takahashi: Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget, Science, Vol. 247, pp.1431-1438, 1990
- 4) Wanninkhof, R.: Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, J. Geophys. Res., Vol. 97, pp. 7373-7382, 1992
- 5) 石田明生, 中田喜三郎, 青木繁明: 北太平洋における人間活動起源CO<sub>2</sub>の挙動に関する数値実験, 資源と環境, Vol. 4, No. 1, pp.53-60, 1995
- 6) 加藤義久: 地球の水圏-海洋と陸水, 東海大学出版会, 新版地学教育講座, 第10巻, pp.95, 1995