

# 南大洋における $p\text{CO}_2$ および $p\text{O}_2$ の関係性

笹野大輔<sup>1</sup>、緑川 貴<sup>1</sup>、石井雅男<sup>1</sup>、小杉如央<sup>1</sup>、橋田 元<sup>2</sup>、吉川久幸<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所地球化学研究部

<sup>2</sup> 国立極地研究所

<sup>3</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究科

## Close linkage between $p\text{CO}_2$ and $p\text{O}_2$ in the Southern Ocean

Daisuke Sasano<sup>1</sup>, Takashi Midorikawa<sup>1</sup>, Masao Ishii<sup>1</sup>, Naohiro Kosugi<sup>1</sup>, Gen Hashida<sup>2</sup> and Hisayuki Yoshikawa-Inoue<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geochemical Research Department, Meteorological Research Institute

<sup>2</sup> National Institute of Polar Research

<sup>3</sup> Graduate School of Environmental Earth Sciences, Hokkaido University

Measurements of partial pressure of  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ ) and  $\text{O}_2$  ( $p\text{O}_2^{\text{sea}}$ ) in surface seawater were made in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean in December 2009 to January 2010. Distribution of  $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$  showed large variability and correlated reversely with  $p\text{O}_2$ , indicating that  $p\text{CO}_2$  and  $p\text{O}_2$  have close linkage through biological activity. Around  $60^\circ\text{S}/33^\circ\text{E}$  in the seasonal ice zone,  $\Delta p\text{CO}_2$  ( $=p\text{CO}_2^{\text{sea}} - p\text{CO}_2^{\text{air}}$ ) showed extremely small value ( $-144\mu\text{atm}$ ) and  $p\text{O}_2$  showed reverse change. Apparent oxygen utilization showed  $-79\mu\text{mol kg}^{-1}$ , suggesting strong supersaturation (123%) by biological activity. This biological activity can represent  $\text{CO}_2$  change for about 60%.

海洋は、物理化学および生物過程を通じて大気との間で二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) を交換しており、人間活動により増加しつつある大気中  $\text{CO}_2$  の主な吸収源として重要な役割を果たしている。全球規模で大気海洋間の  $\text{CO}_2$  フラックスをより正確に評価することは、将来を予測する上でも非常に重要である。その中で、南大洋は全体として  $\text{CO}_2$  を正味吸収しており、年間の  $\text{CO}_2$  吸収フラックスは  $0.05\text{PgC}$  と見積もられている (Takahashi et al, 2009) が、近年その減少も報告されている (Le Quéré et al, 2007)。しかし、南大洋では観測データが乏しいことや、空間的・時間的変動が大きいため不確実性が大きく、今後さらなる観測が必要である。

$\text{CO}_2$  の大気海洋間相互作用に影響を与えるものとして、風速などの気象条件や水温の変化、鉛直混合による深層からの海水の供給のほか、生物活動による影響が挙げられる。植物プランクトンが光合成を行い、海水中の  $\text{CO}_2$  を消費することにより  $\text{CO}_2$  分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) が低下し、大気から海洋への  $\text{CO}_2$  の吸収が促進される。特に、南大洋は生物生産が盛んな海域であり、大気海洋間の  $\text{CO}_2$  フラックスに生物活動が大きな影響を与えていると考えられる。

一方、海水中の酸素 ( $\text{O}_2$ ) の大気との相互作用は  $\text{CO}_2$  と比べて速く、海面ではほぼ飽和状態にある。しかし、高緯度海域では、水温が低く、鉛直混合が盛んであるため、海面でも  $\text{O}_2$  が不飽和状態になることがある。また、植物プランクトンが活発に光合成を行うと、 $\text{CO}_2$  が消費されるとともに  $\text{O}_2$  が海水中に放出されるため、海水中の  $\text{O}_2$  は過飽和状態になる。生物活動を通じて  $\text{O}_2$  は  $\text{CO}_2$  と密接な関係にあることから、海水中の  $\text{CO}_2$  とともに  $\text{O}_2$  の変動を同時に観測することで、 $p\text{CO}_2$  の変動に対する生物活動の影響を評価できると考えられる。こうした大気海洋間の  $\text{O}_2$  交換は大気  $\text{O}_2$  濃度の長期変動に基づく炭素循環の評価における不確実要素の一つとなっている。今回、インド洋から南大洋において、大気および海水中の  $p\text{CO}_2$  と共に、 $\text{O}_2$  の分圧 ( $p\text{O}_2$ ) の測定を行い、その関連性について検討を行った。

学術研究船白鳳丸 KH-09-5 次航海レグ 3 および 4 (2009/12/19 ~ 2010/01/26) において、インド洋から南大洋にわたる海域で観測を行った (Figure 1)。海水試料は、表面海水を船底部 5m の取り込み口からポンプで汲み上げ、シャワー型平衡器に通じて、これと平衡になった空気の  $p\text{CO}_2$  を非分散赤外分析計 (NDIR: Li-COR 6260) を用いて測定した。大気試料は船橋上部から取り込み、同様に NDIR を用いて  $p\text{CO}_2$  を測定した。 $p\text{CO}_2$  の校正には、4 本の標準ガスを用いた。 $p\text{O}_2$  は、燃料電池酸素計 (Sable Oxzilla II) を用いて測定を行った。NDIR から排出される試料を用いることにより、 $p\text{CO}_2$  と同時に海水および大気中の  $p\text{O}_2$  を測定した。

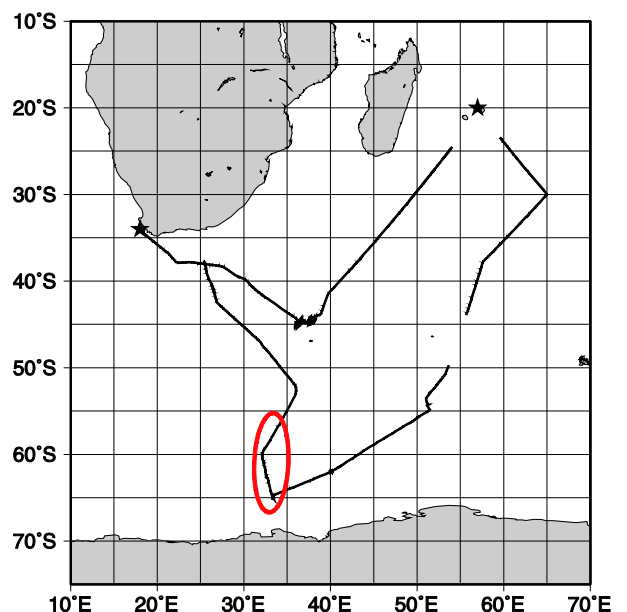


Figure 1. Cruise track of KH-09-5. Red circle indicates the area shown in figure 3.

pO<sub>2</sub> の校正には、ほぼ一定である大気中の酸素濃度をベースラインとし、CTD に搭載した酸素センサー RINKO で観測した 5m または 10m 深の溶存酸素濃度を用いて行った。

大気中の pCO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub><sup>air</sup>) は 364 から 384 μatm 前後で変動が小さかったのに対し、海水中の pCO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup>) は、海域によって 227 から 411 μatm と大きく変動していた (Figure 2)。大気海洋間の pCO<sub>2</sub> の分圧差 ( $\Delta pCO_2 = pCO_2^{sea} - pCO_2^{air}$ ) はおおむね負になっており、海洋が大気中の CO<sub>2</sub> を吸収していた。一方、pO<sub>2</sub> は、海水中で 0.196 から 0.249 atm と大きく変動していた。大気海洋間 pO<sub>2</sub> の分圧差 ( $\Delta pO_2 = pO_2^{sea} - pO_2^{air}$ ) はおおむね正になっており、O<sub>2</sub> は過飽和状態になっていた。O<sub>2</sub> は CO<sub>2</sub> と比べ大気海洋間の交換が速いことから、物理化学的な変動では O<sub>2</sub> の過飽和を説明することができないため、生物活動による O<sub>2</sub> の生産が影響していると考えられる。pO<sub>2</sub> の変動は、pCO<sub>2</sub> の変動と逆の傾向で良く対応しており、両者は強い関係性を持ちながら、変動していることがわかった。

季節海氷域の北限付近に相当する 60°S/33°E 付近において、 $\Delta pCO_2$  が -144 μatm と極小値を示し、非常に強い pCO<sub>2</sub> の吸収域であった (Figure 2)。同時に  $\Delta pO_2$  は極大値を示した。水温・塩分の変化が小さいことから水塊構造の変化による影響ではなく、植物プランクトンの強いブルームが起きていたと考えられる。この時、pO<sub>2</sub> から計算したみかけの酸素消費量 (AOU) は、-79 μmol kg<sup>-1</sup> と極小値を示し、O<sub>2</sub> の飽和度は 123% と非常に強い過飽和状態となっていた。生物活動による影響を評価するため、レッドフィールド比 C:O<sub>2</sub>=107:170 (Anderson and Sarmiento, 1994) を用いて、AOU を炭素分子あたりの濃度に変換し、全炭酸濃度 (DIC) と比較した。DIC は、水温・塩分から推定した全アルカリ度 (Lee et al, 2006) と pCO<sub>2</sub> から求め、塩分 35 に規格化した (nDIC)。nDIC の減少の約 60% は生物活動による O<sub>2</sub> の増加で説明することができた (Figure 3)。説明できなかった残りの CO<sub>2</sub> の変動は、O<sub>2</sub> の大気との交換速度が CO<sub>2</sub> と比べて速いことから、それ以前の低い pCO<sub>2</sub> の影響が、pO<sub>2</sub> と比べ長く残っているためと推測される。このように、南大洋では局所的に pCO<sub>2</sub> および pO<sub>2</sub> の変動が大きい海域が存在し、生物活動による影響が大きいことが示された。

## References

- Anderson, L.A. and J.L. Sarmiento, Redfield ratios of remineralization determined by nutrient data analysis, *Global Biogeochemical Cycles*, 8:65-80, 1994.
- Lee, K., L. T. Tong, F. J. Millero, C. L. Sabine, A. G. Dickson, C. Goyet, G.-H. Park, R. Wanninkhof, R. A. Feely, and R. M. Key, Global relationships of total alkalinity with salinity and temperature in surface waters of the world's oceans, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19605, doi:10.1029/2006GL027207, 2006.
- Le Quére, C. et al., Saturation of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> sink due to recent climate change, *Science*, 316, 1735, 2007.
- Takahashi, T., et al., Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans, *Deep Sea Res., Part II*, 56, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009, 2009.

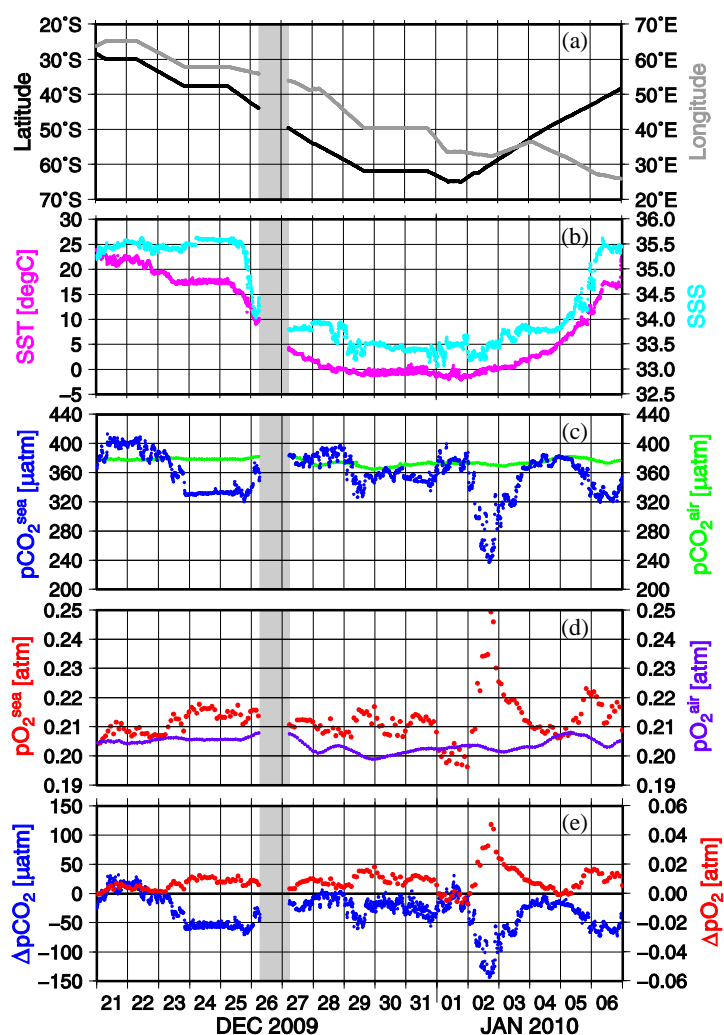


Figure 2. Time series of (a) latitude and longitude, (b) sea surface temperature (SST) and salinity (SSS), (c) pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup> and pCO<sub>2</sub><sup>air</sup>, (d) pO<sub>2</sub><sup>sea</sup> and pO<sub>2</sub><sup>air</sup> and (e)  $\Delta pCO_2$  and  $\Delta pO_2$  at leg3 of KH-09-5.

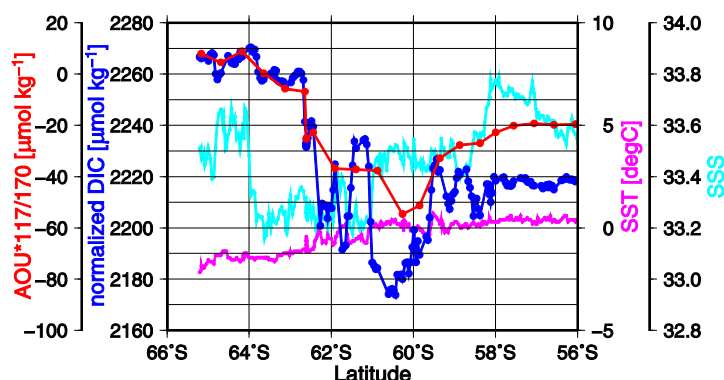


Figure 3 Meridional distribution of normalized DIC (salinity at 35), AOU, SST and SSS along 32-34°E.