

沿岸域における大気－海水間 CO₂ フラックスの文献調査と多変量解析

(独法) 港湾空港技術研究所 依頼研修員 (中電技術コンサルタント(株)) 正会員 ○田多 一史

(独法) 港湾空港技術研究所 所 立樹

(独法) 港湾空港技術研究所 渡辺 謙太

(独法) 港湾空港技術研究所 正会員 桑江 朝比呂

1. 序論 (既往の知見)

(1) 沿岸域におけるブルーカーボンの意義

将来の気候変動を緩和するために、大気中 CO₂ 等の温室効果ガスの削減対策は喫緊の課題である¹⁾。近年、炭素ストックとして注目されている「ブルーカーボン」は海洋炭素の総称であり、海洋全体で 22 億トン-C/year 程度の CO₂ が吸収される(図-1 参照)。またブルーカーボンは、地球全体の光合成活動によって固定される炭素の約 55%に相当すると考えられている²⁾。既往の研究によると、堆積物中への有機炭素の堆積速度は、ブルーカーボンの蓄積速度の代表的な指標の 1 つとして見なされており、沿岸域～外洋にかけて 2.7 億トン-C/year 程度になると見積もられている³⁾。特に、沿岸域では堆積物中への有機炭素の蓄積量が大きく、大気中 CO₂ を隔離・貯留し、気候変動の緩和に寄与する可能性がある。

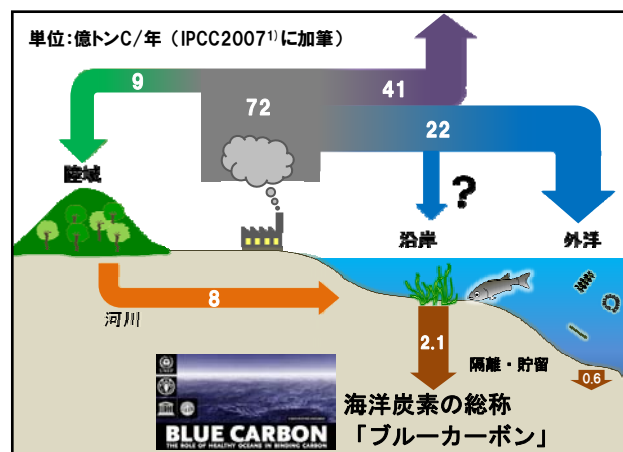


図-1 地球全体の炭素循環像

(2) 文献調査

本論文では、大気－海水間 CO₂ フラックスについて、海水から大気へ CO₂ の放出を正の値、大気から海水への CO₂ の吸収を負の値として扱うこととする。海洋別の大気－海水間 CO₂ フラックスは、外洋で－1.5PgC/year、大陸棚で－0.25PgC/year になり、それぞ

れ CO₂ の吸収源にあたるが、沿岸域は +0.25PgC/year で放出源と一般的に考えられている⁴⁾。個々の文献によると、河口域の沖合に位置する Scheldt⁵⁾ (+1.9 mol-C/m²/year), Loire⁶⁾ (+10.5 mol-C/m²/year), Kennebec⁷⁾ (+0.9 mol-C/m²/year) は、CO₂ の放出源にあった。一方で、河口域に位置する Amazon⁸⁾ (-0.5 mol-C/m²/year), Changjiang⁹⁾ (-1.9 mol-C/m²/year) は、CO₂ の吸収源にあった。このような CO₂ フラックスの変動は、成層の有無等といった環境条件に関係していると報告されており¹⁰⁾、大気－海水間で CO₂ が吸収源もしくは放出源になるかについての判断は、物理的・生物化学的な要因を考慮する必要がある¹¹⁾。

このような知見を踏まえ、本研究では沿岸域における大気－海水間 CO₂ フラックスの変動特性を把握することを目的として、文献中(グラフ等含む)に記載されている環境要因のデータを抽出・整理し、それらの因果関係を把握するための多変量解析(パス解析)を行った。

2. 多変量解析 (パス解析)

(1) 環境要因データの抽出・整理

大気－海水間の CO₂ フラックスの変動要因として、水温、塩分、全アルカリ度(TA)、溶存無機態炭素濃度(DIC)に注目し、それらの値について、文献から抽出・整理した(表-1 参照)。

表-1 大気－海水間 CO₂ フラックスと環境要因データ

事例	対象場所 文献)	大気－海水間 CO ₂ フラックス (mmol/m ² /d)	水温 (°C)	塩分 (‰)	TA (mmol/kg)	DIC (mmol/kg)	サンプル数
①	Marsh-dominated estuary (the Duplin River) ¹²⁾	55.2 ± 12.0	19.8 ± 2.6	27.8 ± 1.5	2.2 ± 0.1	2.1 ± 0.1	n=19
②	Cocheco, Bellamy, Oyster estuary ¹³⁾	9.3 ± 11.5	15.1 ± 2.2	16.6 ± 6.1	0.5 ± 0.2	0.7 ± 0.2	n=12
③	Tropical estuary (Cochin, India) ¹⁴⁾	151.5 ± 74.6	31.2 ± 1.4	11.1 ± 6.4	0.8 ± 0.4	0.8 ± 0.3	n=6
④	Guadalquivir estuary (SW Iberian Peninsula) ¹⁵⁾	103.7 ± 35.0	21.4 ± 0.4	17.0 ± 11.5	2.9 ± 0.3	2.8 ± 0.3	n=3

注) 各数値は、平均値±95%信頼区間を示している。

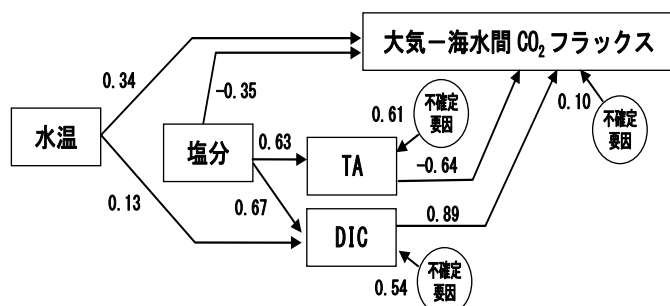
キーワード ブルーカーボン、沿岸域、大気－海水間 CO₂ フラックス、環境要因、パス解析

連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 TEL 046-844-5046

(2) 解析結果

大気－海水間の CO_2 フラックスの変動に対し、各環境要因（水温、塩分、全アルカリ度（TA）、溶存無機炭素濃度（DIC））の影響度や因果関係を把握するために、文献から引用された合計 40 データセットを用いて、多変量解析（パス解析）を行った。パス解析では、大気－海水間 CO_2 フラックスと各環境要因との相関の大きさを、直接パス係数（その環境要因の直接的な影響度）と間接的パス係数（他の環境要因を経由する間接的な影響度）とに分離して示すことが可能である。統計解析には、R 2.15.0¹⁶⁾のソフトウェアを使用した。なお、パス係数（標準化解）は、構造方程式モデル（SEM）を用いた最尤推定法により求めた。また、大気－海水間の CO_2 フラックスに対し、プラスの影響は海水から大気へ CO_2 の放出、マイナスの影響は大気から海水への CO_2 の吸収を表している。

パス解析の結果、大気－海水間 CO_2 フラックスに対し、水温と DIC は正のパス係数（0.34, 0.89）、塩分と TA は負のパス係数（-0.35, -0.64）となった（図-2 参照）。なお、本モデルで示された各パス係数は、全て $p < 0.05$ で有意となり、大気－海水間 CO_2 フラックスに対する不確定要因も 0.10 と小さかった。一方で、TA, DIC に対する不確定要因がそれぞれ 0.61, 0.54 とやや大きく、パスの改良等の検討が必要である。このような課題を踏まえ、他事例の現地データも含めた多変量解析モデルの精度向上が必要である。



注) 図中の数値はパス係数（標準化解）であり、変数に与える影響の大きさ・因果の強さを示している。0 から離れているほど影響が大きく、符号はそれぞれプラス・マイナスの影響を表す。

図-2 大気－海水間 CO_2 フラックスと各環境要因のパス解析結果

3. 結論

文献によるパス解析の結果、大気－海水間 CO_2 フラックス変動に影響を及ぼす環境要因（水温、塩分、TA, DIC）との因果関係を把握することができた。また、大気－海水間 CO_2 フラックスに対して、TA, DIC の影響がやや大きいことが示唆された。

参考文献

- 1) IPCC : Contribution of working group 2 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, *Ipcc fourth assessment report : Climate change 2007*, 976p, Cambridge University Press, New York, 2007.
- 2) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds) : *Blue carbon. A rapid response assessment.*, 80p, United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Norway, 2009.
- 3) Mcleod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H. and Silliman, B. R. : A blueprint for blue carbon : Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2 , *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, pp.552-560, 2011.
- 4) Cai, W. -J. : Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO_2 sinks or sites of terrestrial carbon incineration? , *Annual Reviews Marine Science*, pp.123-145, 2011.
- 5) Borges, A. V., and M. Frankignoulle : Distribution and air-water exchange of carbon dioxide in the Scheldt plume off the Belgian coast, *Biogeochemistry*, 59(1-2), pp.41-67, 2002.
- 6) de la Paz, M., X. A. Padin, A. F. Rios, and F. F. Pérez : Surface fCO_2 variability in the Loire plume and adjacent shelf waters : High spatio-temporal resolution study using ships of opportunity, *Marine Chemistry*, 118, pp.108-118, 2010.
- 7) Salisbury, J., D. Vandemark, C. Hunt, J. Campbell, B. Jonsson, A. Mahadevan, W. McGillis, and H. Xue : Episodic riverine influence on surface DIC in the coastal Gulf of Maine, *Estuarine Coastal Shelf Science*, 82, pp.108-118, 2009.
- 8) Körtzinger, A. : A significant CO_2 sink in the tropical Atlantic Ocean associated with the Amazon river plume, *Geophysical Research Letters*, 30(24), 2287, 2003.
- 9) Zhai, W., and M. Dai : On the seasonal variation of air-sea CO_2 fluxes in the outer Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea, *Marine Chemistry*, 117(1-4), pp.2-10, 2009.
- 10) Borges, A. V. : Do we have enough pieces of the jigsaw to integrate CO_2 fluxes in the coastal ocean? , *Estuaries*, 28(1), pp.3-27, 2005.
- 11) Laruelle, G. G., Dürr, H. H., Slomp, C. P., and Borges, A. V. : Evaluation of sinks and sources of CO_2 in the global coastal ocean using a spatially-explicit typology of estuaries and continental shelves, *Geophysical Research Letters*, 37, L15607, 2010.
- 12) Wang, Z. A., and Cai, W. -J. : Carbon dioxide degassing and inorganic carbon export from a marsh-dominated estuary (the Duplin River) : A marsh CO_2 pump, *Limnology and Oceanography*, 49(2), pp.341-354, 2004.
- 13) Hunt, C. W., J. E. Salisbury, D. Vandemark, and W. McGillis : Contrasting carbon dioxide inputs and exchange in three adjacent New England estuaries, *Estuaries and Coasts*, 34, pp.68-77, 2011.
- 14) Gupta, G. V. M., S. D. Thottathil, K. K. Balachandran, N. V. Madhu, P. Madeswaran, and Shanta Nair : CO_2 Supersaturation and Net Heterotrophy in a Tropical Estuary (Cochin, India) : Influence of Anthropogenic Effect, *Ecosystems*, 12(7), pp.1145-1157, 2009.
- 15) de la Paz, M., A. Gómez-Parra, and J. Forja : Inorganic carbon dynamic and air-water CO_2 exchange in the Guadalquivir Estuary, *Journal of Marine Systems*, 68, pp.265-277, 2007.
- 16) R Development Core Team : R : A language and environment for statistical computing, *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>, 2005.