

論文内容の要旨

論文題目

Air-sea water CO₂ flux and its regulating factors measured by a floating chamber method

(フローティングチャンバー法による大気-海水間 CO₂ フラックスと規定要因の測定)

氏名 所立樹

序論

大気-水圏間ガスフラックスは、大気中や水圏中の物質収支の予測において重要なファクターである。しかし、沿岸域のガスフラックスは、その規定要因の抽出・定量化が不十分であるため、正確な見積もりがまだ行われていない。沿岸域のガスフラックスは、全球規模の炭素収支や沿岸域における環境予測に影響を与えることが予想されるため、その規定要因の解明は必要な課題である。

CO₂ や Hg(生態系に対して、非常に大きな影響を与える物質である。)といった水中にわずかに溶存する気体の、大気-水圏間のフラックス(F)は、大気-水圏間のガス分圧差と溶解度、そして交換速度と呼ばれる係数(以下、 k)によって規定されている。

$$F=kS(P_w-P_a) \quad (P_w, P_a: \text{液相・気相のガス分圧 } S: \text{溶解度})$$

特に沿岸域では k を規定する要因の抽出、およびその定量化が不十分であるため、沿岸域のガスフラックスを正確に見積もることができないというのが現状である。

これまでの研究では、風速または液相の流速をパラメータとした経験式を用いて k を決定する方法と(e.g., O'Connor and Dobbins, 1958; Wanninkhof, 1992)、流体力学的モデルから演繹的に規定要因を抽出する方法(e.g., Danckwerts, 1951; Lamont and Scott, 1970)が採られている。しかし、測定点の制限無しに、大気-水圏間のガスフラックスを、乱流条件の変化に対応できる時

間・空間分解能で測定する方法が確立されておらず、どちらの方法においても実際のフィールドで k の規定要因を抽出し、定量化するのに十分な測定データが採取されていない。

本研究では、十分な時間・空間分解能を持つ測定手法(フローティングチャンバー法)を開発し、その妥当性を検証し、複数の沿岸域における k の測定を行った。また、 k の物理的な規定要因として、Lamont and Scott (1970)による Small eddy model におけるエネルギー散逸率(以下、 ε)を同時に測定し、従来の研究とは異なる乱流場においても Small eddy model が妥当であるかどうか、検証を行った。

手法とその評価

測定はサンゴ礁とそれに隣接する河川において、2003年から2006年において行った。これらの水域では、地形が複雑であるため、従来の研究とは異なる乱流場で、 k ・ ε の関係を検証できることが期待される。

ε の計算には、ADV(acoustic Doppler velocimeter)によって 4-64Hz で測定した、水面付近の 3次元流速を使用した。 ε は、測定した流速データから決定したパワースペクトルに、コルモゴロフの法則を適用することで算出した。本研究では、パワースペクトルの測定値と理論値のずれを ε の error range として評価し、その算出を行った。

フローティングチャンバー法の検証は、以下の手法に従って行った。1)装置内部の温度・気圧変化を測定し、 k 測定結果への影響を定量化。2)装置内外で測定した ε を比較することで、チャンバー装置による乱流とその影響を定量化。1)の結果では、装置内部の温度・気圧変化による影響は補正されていることを確認できた。ただし、その影響は小さなものであり、測定精度に影響を与えるものではなかった。これは、装置に取り付けた気圧バッファの影響であると考えられる。2)の結果では、装置内外では ε に有意な差が見られず、また内外の差がランダムに発生していたため、チャンバー装置は k に関連する乱流パラメータには影響を与えないものと考えられる。よって、本研究では、フローティングチャンバー法による測定結果は妥当なものであると評価した。また、測定条件(ε , 測定水域, 測定日時)がほぼ同一の時の、 k の測定結果のバラつき($\pm 5.10\text{cm/h}$)を測定結果の精度(precision)として評価した。ただし、砕波が起こるような条件下では測定を行っていないため、このような条件下では妥当性を保障することはできない。

結果と考察

k の測定結果は、河川などの一部のデータを除いて、全般的に既存の風速や流速をパラメータとした経験式の結果よりも有意に高い値であった。この結果から、沿岸域では、風速や流速のみでは k を説明できないことが明らかとなった。また、測定水域間の k の差が明瞭であり、これは地形による k への影響の可能性を示すものであると考えられる。

同時に測定した ε は、従来の研究結果よりも高い値が計測されており、また k と Small eddy model に示された通りの相関関係を示していた。よって、乱流の条件に関わりなしに、Small eddy model によって k を説明できることが明らかとなった。

レイノルズストレスを用いた分析の結果、水深よりも大きな長さスケールを持つ要素(水深 10m 以上の窪地や 1m 程度の直径を持つサンゴ)が水底に存在している水域では、乱流場により強いエネルギーが供給されていることが示されており、後流や流れ同士によるシアアがその原因として推察された。この強いエネルギー供給は大きな ε を生じると考えられるため、沿岸域の地形的な特徴によって、k の物理的に規定されることが推察された。

また A は既存の人工海水を用いた実験結果と整合的な範囲であったが、測定水域間で値が異なる傾向が示唆された。既存の研究による同一水域の POC 測定結果(Hata et al, 2002; Watanabe, 2004)と比較した結果、POC 濃度と A の間で相関があるような傾向が示された。この結果は、Asher and Pankow (1986)のフィルタリング処理を行った人工海水の結果と整合的であり、水面上の粒子の濃度が k の化学的な規定要因の一つであることが示された。

地形効果による k の増加は、陸域に近い沿岸域であれば、全球的に適用されると考えられる。本研究で示された k 測定値と既存の風速依存式の結果との比を、既存の収支モデル(Borges et al., 2005)に適用した場合、全沿岸域は CO₂ の放出域である可能性が高いことが示された。より正確な沿岸域の CO₂ 収支の計算のためには、砕波や後流、流れ同士のシアアの定量化が求められる。また、本研究の測定水域では、化学的・生物学的な要因による影響は大きなものではなかったが、富栄養湖や汚染された水域におけるガスフラックスにはより大きな影響を与えることが予想されるため、そのような環境における測定・解析を今後展開していく必要がある。