

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.59 No.1 June 2020

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 浅海域における海水中二酸化炭素分圧の観測と統計解析モデルの適用…………… 3
2. 潜堤による港内波の制御に関する基礎的研究…………… 66

浅海域における海水中二酸化炭素分圧の観測と 統計解析モデルの適用

田多 一史*・所 立樹**・渡辺 謙太***・茂木 博匡****・桑江 朝比呂*****

要 旨

海洋生物によって取り込まれる炭素「ブルーカーボン」は、その約8割が浅海域の生態系内に貯留される。一方で、浅海域は環境条件や生物活動が時空間的に大きく変化するため、海水中二酸化炭素(CO₂)分圧は短期的に変動しやすい。したがって、浅海域はCO₂の吸収源にも放出源にもなりうる。一方で、国内の浅海域において海水中CO₂分圧は十分に計測されていないため、その包括的な解析や予測手法も確立されていない。また海水中CO₂分圧の変動は、複雑で多様な生物化学的過程にも規定されることから、海水中CO₂分圧の動態を説明するためには統計解析モデルを適用して主要な環境要因を抽出する必要がある。

そこで本研究においては、国内の様々な浅海域(亜寒帯～温帯～亜熱帯の海草場、干潟、サンゴ礁)において、海水中CO₂分圧とその環境要因の現地観測(2010年～2015年)を実施するとともに、得られた観測データに統計解析を適用することによって、海水中CO₂分圧に影響を与える重要な環境要因を抽出し、現況を推定することを目的とした。

海水中CO₂分圧と関連する環境要因の観測データに対して一般化線形モデルを適用し、海水中CO₂分圧の現況推定モデルを構築した。また、全データセットに対してパス解析を適用し、因果関係を検討した。その結果、大気-海水間CO₂フラックスは、主に(1)風速、(2)流入負荷、そして(3)生物過程から影響を受けることが分かった。特に、海水中CO₂分圧は生物生産(光合成、呼吸・分解)の指標(Δ DIC)や石灰化の指標(Δ TA)との関係性が強く、呼吸・分解や石灰化により海水中CO₂分圧を高め、光合成により海水中CO₂分圧を低下させることが主要な要因と示唆された。

陸と海の境界条件を適切に設定することにより、物理過程や生物過程による影響の把握が可能な浅海域においては、本研究で開発されたモデルを活用することにより、海水中CO₂分圧の現況推定が可能となる。また、CO₂の吸収源対策として浅海生態系を保全・再生・造成する際のCO₂吸収能力を高める計画・設計に対しても、本研究成果の貢献が期待される。

キーワード： ブルーカーボン、CO₂吸収、海草場、干潟、サンゴ礁

* 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 客員研究員 (中電技術コンサルタント株式会社)

** 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 客員研究員 (国立研究開発法人 国立環境研究所)

*** 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 主任研究官

**** 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 研究官

***** 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ グループ長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所

電話：046-844-5046 Fax：046-844-1274 E-mail：ktada@cecnet.co.jp

Field Observation and Statistical Analyses of the Fugacity of Carbon Dioxide in Shallow Coastal Waters

Kazufumi TADA*

Tatsuki TOKORO**

Kenta WATANABE***

Hirota MOKI****

Tomohiro KUWAE*****

Synopsis

Blue Carbon is the carbon taken up by marine organisms and stored in the ocean. Shallow coastal ecosystems store approximately 80% of the total carbon stored in marine sediments. On the other hand, the fugacity of carbon dioxide ($f\text{CO}_2$) in shallow coastal waters fluctuates due to the temporal variations in environmental conditions and biological activities. Shallow coastal waters, thus, can be both sources and sinks of CO_2 . However, because $f\text{CO}_2$ has not been sufficiently measured in shallow coastal waters, the comprehensive analyses and prediction methods have not been established. Hence, the objectives of this study were to statistically extract important environmental factors that regulate the $f\text{CO}_2$ in shallow coastal waters and to estimate the current $f\text{CO}_2$ dynamics.

Field observations were conducted from 2010 to 2015 to obtain data on the $f\text{CO}_2$ and environmental factors in various ecosystems. Generalized linear models were constructed to estimate the $f\text{CO}_2$ in seawater using the dataset. Path analyses were applied to the entire data set to infer the causal relationship between the $f\text{CO}_2$ values and the environmental factors. We found that the air–water CO_2 fluxes were mainly affected by (1) wind speed, (2) allochthonous inputs, and (3) biological processes. In particular, the $f\text{CO}_2$ was strongly related to the indices of biological production (ΔDIC) and calcification (ΔTA). These results suggest that respiration, decomposition, and calcification mainly increase the $f\text{CO}_2$, and photosynthesis mainly decreases the $f\text{CO}_2$.

The statistical models developed in this study can be used to estimate the $f\text{CO}_2$ in shallow coastal waters where the effects of physical and biological processes can be quantified by setting appropriate boundary conditions between land and sea. Our findings help planning the conservation, restoration, and creation of shallow coastal ecosystems for enhancing their function of CO_2 uptake.

Key Words: blue carbon, CO_2 uptake, seagrass meadows, tidal flats, coral reefs

* Member, Coastal and Estuarine Environment Group, Coastal and Estuarine Environment Department (Chuden Engineering Consultants)
** Member, Coastal and Estuarine Environment Group, Coastal and Estuarine Environment Department (National Institute for Environmental Studies)
*** Senior Researcher, Coastal and Estuarine Environment Group, Coastal and Estuarine Environment Department
**** Researcher, Coastal and Estuarine Environment Group, Coastal and Estuarine Environment Department
***** Head of Group, Coastal and Estuarine Environment Group, Coastal and Estuarine Environment Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5046 Fax : +81-46-844-1274 E-mail : ktada@cecnet.co.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	6
2. 大気－浅海域間のCO ₂ フラックスの計測方法	6
2.1 水中CO ₂ 分圧の特性	6
2.2 バルク法による計測	7
3. 現地観測事例（亜寒帯，温帯，亜熱帯の代表事例）及び統計解析（パス解析，一般線形モデル）	10
3.1 北海道風蓮湖における連続観測及び移動観測	10
3.2 北海道コムケ湖における空間分布の移動観測	13
3.3 東京湾走水海岸における連続観測	16
3.4 都市型浅海域（東京湾野島海岸）における移動連続観測	20
3.5 石垣島名蔵湾における連続観測	33
3.6 統計解析	38
3.7 まとめ	53
4. 国内の様々な浅海域における海水中CO ₂ 分圧と統計モデル（一般化線形モデル）による予測	53
4.1 統合統計モデルの必要性及び目的	53
4.2 各観測場所の地域環境特性	53
4.3 データ構造の把握	56
4.4 統計解析を用いた現況推定モデルの構築	56
4.5 まとめ	61
5. 結論	61
6. あとがき	62
謝辞	62
参考文献	62

1. まえがき

IPCC第5次評価報告書¹⁾によると、気温、海水温、海面水位、雪氷減少などの観測事実が強化されたことにより、気候システムの温暖化には疑う余地はないことが再確認され、20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因が人間活動であった可能性が極めて高い(95%以上)とされた。また、大気中の温室効果ガス(CO₂(二酸化炭素)等)は、過去80万間で前例のない水準にまで増加しており、CO₂の累積総排出量とそれに対する世界平均地上気温の応答は、ほぼ比例関係のあることから、最終的に地上気温が何度上昇するかは、CO₂の累積総排出量の増加幅に関係すると考えられている。

温室効果ガスの増加と気候変動(極端現象の増加や影響の拡大等)の関連性も指摘されている。このため、気候変動を抑制するには、温室効果ガス排出量の抜本的かつ持続的な削減が必要である。

一方で、2009年にUNEP(国連環境計画)、FAO(国連食糧農業機関)、IOC/UNESCO(政府間海洋学委員会/国連教育科学文化機関)などの国際連合の各組織により、報告書「Blue Carbon」(「ブルーカーボン・レポート」)が共同で出版された²⁾。この報告書で使われた「ブルーカーボン」とは、海洋生物の作用によって海中に取り込まれた炭素のことである。地球上の生物が吸収するCO₂のうち、海洋生物は陸上とほぼ同じ割合以上のCO₂を吸収しており、浅海域(ごく浅い沿岸部)の生態系は海洋で貯留される炭素の約8割程度であることが提唱された。

地球温暖化対策には、その原因である温室効果ガスの排出量を削減する(陸上・海洋生物などによって温室効果ガスの吸収量を増加させることを含む)という「緩和策(mitigation)」、気候変動に対して自然生態系や社会・経済システムを調整することにより温暖化の影響を低減させるという「適応策(adaptation)」に分けることができる。

そこで、本研究では温室効果ガスの削減等の「緩和策」の1つとして、海洋に存在する炭素の総称「ブルーカーボン」に関して、浅海域における大気-浅海域間のCO₂のやりとりに着目した。

既往の研究によると、海草場等の植生が生育する浅海域は、堆積部中への炭素隔離機能の場として重要であると考えられている^{3), 4), 5)}。一方で、浅海域は陸域から流入するDIC(溶存無機炭素濃度)や有機物の分解・呼吸、石灰化によって「CO₂の放出源」と考えられることが多いが^{6)~15)}、内湾の高い一次生産力や大河川でのブルーム、海草場の活発な光合成活動によって「CO₂の吸収源」となった研究事例^{16)~18)}もあることから、海草場における海水中

CO₂分圧や大気-海水間CO₂フラックスは未解明な部分が多い^{19), 20)}。また、浅海域において海水中CO₂分圧は環境条件や生物活動等に左右されやすく日周変動が大きいため、複雑でダイナミックな炭素フローとストックの動態を計測・解析することは、非常に困難となっている^{8), 21)~23)}。海水中CO₂分圧は、炭酸系²⁴⁾や滞留時間²⁵⁾、表層の乱れ²⁶⁾等の環境要因(物理過程、化学過程、生物過程)の影響を受けるため²⁷⁾、短時間スケールで大きく変動していることが考えられる²⁸⁾。特に、海草場での日周期変動を捉えたCO₂フラックスとその環境要因の同時観測事例は、極めて少なかった²⁹⁾。さらに、これまでの浅海域の研究事例¹⁷⁾では、自然が豊かで閉鎖性が高い亜寒帯の海域にとどまり、都市部の温帯域や亜熱帯域の浅海域での観測事例は少なかった。

まず、浅海域での観測データが極めて少なく、現地における実現象を把握する必要があるため、現地観測を実施した。次に、観測データから傾向や性質を把握し、重要な環境要因を抽出する必要があるため、統計解析を実施した。統計解析手法は、変数間の因果関係を仮定するとともに、因果推論を行うパス解析²⁹⁾を適用した。

本研究では、物理過程(水塊の移流拡散、風速、潮位変化等)、化学過程、生物過程(光合成、呼吸等)を考慮し、海水中CO₂分圧に及ぼす影響を検討するために統計解析を適用し、海水中CO₂分圧の現況推定モデルを構築することを目的とした。

2. 大気-浅海域間のCO₂フラックスの計測方法

2.1 水中CO₂分圧の特性

水中CO₂分圧は、水中の様々なパラメータの影響を受けている。例えば、水中CO₂濃度が一定の場合でも、CO₂溶解度が変化すれば水中CO₂分圧も変化し、水温が高くなるほどCO₂溶解度が減少、水中CO₂分圧は上昇する。これは水温が高くなるほど、水中に溶け込んでいる気体分子の分圧(運動エネルギー)が増加し、より大気中に飛び出そうとするためである。

水中の植物プランクトンや海草による光合成などの生物活動も水中CO₂分圧を変化させる。水中にはCO₂の他に炭酸水素イオン、炭酸イオンが存在しており、CO₂濃度が変化した際に、これらのイオンがCO₂濃度変化の一部を補填する性質を持っている。この性質に係るパラメータとして、溶存無機炭素濃度(DIC: Dissolved Inorganic Carbon)、全アルカリ度(TA: Total Alkalinity)、水素イオン濃度(pH: Potential of Hydrogen)の3つがある。

DICは、水中の無機炭素成分である溶存CO₂、炭酸水素

イオン、炭酸イオンの総量である。なお、通常の海水の場合、DICの90%以上を炭酸水素イオンが占める。TAは、水中のカルシウムイオンやマグネシウムイオンといったミネラル分で決定される。TAが増加すると、水中CO₂分圧の増減に対する緩衝能力が強くなることで、水中CO₂分圧は変化し難くなる。また、水中CO₂分圧が増加するとpHは低下、水中CO₂分圧が減少するとpHは上昇する。

生物活動との関連性については、海草などの光合成や呼吸・分解は基本的にDICのみを増減させるが、サンゴや有孔虫、貝類などの炭酸カルシウムの骨格を形成する石灰化反応はTAにも影響を与える。TAを変化させる生態系がCO₂分圧に与える影響は、非常に複雑である。

浅海域においては、塩分とDIC、TAとの間に強い相関関係があるため、塩分は水中CO₂分圧に対しても間接的に強い影響を及ぼしている。これは塩分が高いほど、カルシウムやマグネシウムなどのミネラル分を多く取り込んでいるため、TAも高くなる。また、TAが高くなるほどCO₂を炭酸水素イオンなどのイオンとして水中に取り込むため、DICも同様に高くなる。一方で、一般的な河川水は海水に比べて相対的にミネラル分が少なくなるため、DICやTAは低くなる傾向にある。なお、河川流域が石灰岩地帯の場合には、河川水のDIC、TAは海水よりも高くなることもある。これらのことから、河川水と海水の両方の影響を受ける浅海域では、河川水のDIC、TAが地域的・季節的ごとの違いに起因するとともに、河川水と海水の混合割合の変化に伴って塩分が変動し、水中CO₂分圧を大きく変化させている。

以上のように、水中のCO₂分圧は、水温、塩分、DIC、TA、pHといった水質パラメータに影響を受ける非常に複雑な変動をしている。

2.2 バルク法による計測

バルク法は、大気と海水間のCO₂分圧差、交換速度と呼ばれる海水面上の風速などによって経験的に決定される係数を用いてCO₂フラックスを算出する方法である。大気-海水間CO₂フラックスの測定手法としては最も良く使われている手法であり、現在、外洋によるCO₂吸収速度も、この手法で算出されている^{30), 31)}。ただし、交換速度の経験式は、主に外洋や十分に広い湖などの測定結果に基づいたものであり、水深や地理条件が多様な浅海域で適用可能かについては、今後、議論の余地がある^{6), 7), 26), 32)}。

(1) 計算式

バルク法の計算式は、式(1)に示すとおりである。

$$F = kS(fCO_{2water} - fCO_{2air}) \quad (1)$$

fCO_{2water} と fCO_{2air} は、それぞれ海水中と大気中のCO₂分圧のことである。海水に対するCO₂の溶解度 S (mol/m³/atm) は、水温と塩分の既存の経験式から算出される。交換速度 k (m/s) は、一般的に風速をパラメータとした経験式から決定される。

交換速度の経験式³¹⁾は、式(2)に示すとおりである。

$$k = 0.39 \cdot U_{10}^2 \times \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \quad (2)$$

U_{10} は、水面から10mの高さの風速であり、現場の風速計やアメダスの観測データを高度補正³³⁾して計算する。高度補正のためには、地表面粗度を決定する必要がある。アメダスのデータに関しては、文献値^{34), 35)}を使用することができる。

Sc はシュミット数と呼ばれる無次元数で水温と塩分の経験式³⁶⁾から算出される。

(2) 海水中CO₂分圧

海水中CO₂分圧は、CO₂濃度計(例:可搬型二酸化炭素測定装置 写真-2.1 参照)による自動計測、又は採水サンプルによる炭酸系イオン等(溶存無機炭酸濃度(DIC)、全アルカリ度(TA)、pHのうち2種類)を用いた平衡計算から算出される³⁷⁾。ここで、可搬型二酸化炭素測定装置(Portable Carbon Dioxide Analyzer: CO2-14)とは、非分散赤外線吸収法(NDIR)により、二酸化炭素濃度の測定



写真-2.1 可搬型二酸化炭素測定装置
(CO2-14, 紀本電子社製)

を連続でかつ高精度に行う装置である。NDIR は海水を直接扱うことができないため、ガス透過膜を使用したパッシブ平衡器を循環させることで、海水中の二酸化炭素分圧を高精度に連続測定することが可能である。この測器の精度は、 $0.01\mu\text{atm}$ 程度である。

(3) 大気中 CO_2 分圧

大気中 CO_2 分圧は、海水中 CO_2 分圧と同様に CO_2 濃度計（例：可搬型二酸化炭素測定装置）による計測，又は国立環境研究所の観測データ（<http://db.cger.nies.go.jp/gem/ja/ground/>より，落石岬，波照間のデータを入手可能）等により収集される。なお，大気中 CO_2 分圧は，これまでの観測データ等から，概ね $400\mu\text{atm}$ と推定されることが妥当と考えられている。

(4) 風速

風速は，3 軸音波風速センサー（例：CSAT3B, Campbell 社製）等の風速計，又は気象庁の測候所の観測データ等により収集される。

(5) 水温，塩分

水温及び塩分は，水温・塩分計（例：Compact-CT, JFE アドバンテック社製）等を用いて計測する。

(6) TA, DIC

TA と DIC 測定用サンプルは，250ml の Schott Duran 瓶で採取し（写真-2.2 参照）， $200\mu\text{l}$ の塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定する。このサンプルは，フロールー型の炭酸系分析装置（例：MDO-02, 紀本電子社製），もしくはパッチ型分析装置（例：ATT-05, 紀本電子社製 写真-2.3 参照）で測定する。本測定では，酸化還元電位と塩酸の添加量を Glan Plot と呼ばれる非線形式に近似させることで，TA と DIC を得ることができる³⁷⁾。この測器の測定精度は， $1\mu\text{mol/kg}$ 以下である。



写真-2.2 TA・DIC 測定用サンプルの採取の様子



写真-2.3 TA・DIC 分析装置
(ATT-05, 紀本電子社製)

(7) pH

pH は，pH 計（例：HACH 社：HQ40d）等を用いて計測する。TA もしくは DIC のみを測定する手法（オープンセル法¹⁰⁾）と pH の組み合わせから，海水中 CO_2 分圧を算出することも可能である。ただし，pH の精度については 0.001 以下という高い水準が要求される。

以上より，バルク法による計測フローは，図-2.1 に示すとおりである。

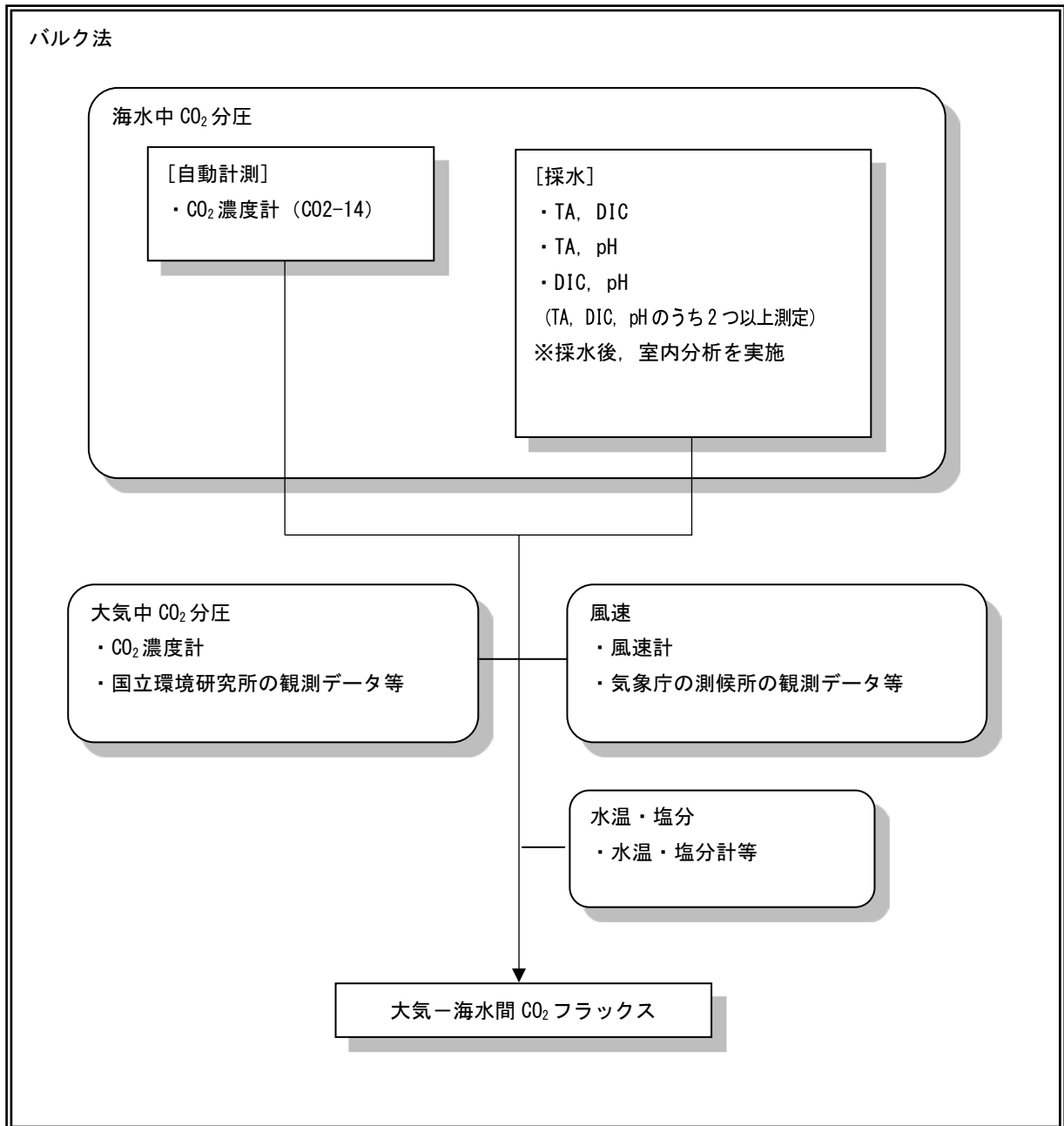


図-2.1 バルク法による計測フロー

3. 現地観測事例 (亜寒帯, 温帯, 亜熱帯の代表事例) 及び統計解析 (パス解析, 一般線形モデル)

現地観測事例として, 亜寒帯の北海道風蓮湖, コムケ湖, 温帯の東京湾走水海岸, 野島海岸, 亜熱帯の石垣島名蔵湾の観測結果を整理するとともに, パス解析及び一般線形モデルを用いた統計解析を行った。

3.1 北海道風蓮湖における連続観測及び移動観測

(1) 観測概要

a) 観測場所

本調査水域は, 河口付近に位置する海草場であり, 陸域負荷と生物活動の影響の両方が捉えやすい閉鎖的な場であること, そして水域の約 7 割がアマモ場で占められていることを理由に³⁸⁾, 北海道の風蓮湖(北緯 43° 19' 46.5", 東経 145° 15' 27.8") を選定した。風蓮湖は, 根室半島と野付崎の中間に位置する潟湖(約 60.5 km²) である。湖内の底質は, 春国岱の砂州付近では砂質, 風蓮川河口部では泥質となっている³⁹⁾。一方, 湖内の水質は, 流入河川の影響を強く受け⁴⁰⁾, 負荷源の流入や外海水の影響については, 塩分が有効な指標となっている⁴¹⁾。

また, 水中の植物プランクトン量の指標となるクロロフィルa濃度は, 2006年~2008年の水質調査結果⁴²⁾によると0.9~35.3 µg/lの範囲で変動するとともに, 風蓮川河口部付近で高くなる傾向を示している。なお, 開口部の流況は, 概ね同位相・同方向のほぼ滞筋に沿った潮汐流が主となっている⁴¹⁾。これらの湖内環境を勘案し, 多変量解析に適した幅広い環境データを測定・収集するために, 調査地点は風蓮川河口付近からオホーツク海に繋がる開口部付近まで, 風蓮湖内の環境勾配に沿って縦断的に設定した(図-3.1参照)。



図-3.1 現地調査位置

b) 観測時期・項目・分析方法

観測時期は, 2010年の8月と11月(No.10で48時間連続観測), 2011年の6月~11月(1回程度/月の頻度でNo.2~No.11の移動観測)とし, 気象, 水質データ等を測定・収集した。環境調査項目は, 風速, 水温, 塩分, 溶存無機炭素濃度(DIC), 全アルカリ度(TA)とした。サンプルは250 mlのSchott Duran瓶で採取され, 200 µlの塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定した。DICの測定は, フロースルー型の炭酸系分析装置(MDO-02, 紀本電子製⁴³⁾), もしくはパッチ型分析装置(ATT-05, 紀本電子製)を用いた。なお, 両者の装置で, DICと同時にTAも測定した。調査時期及びサンプル数等は, 表-3.1に示すとおりである。

表-3.1 調査時期・サンプル数等

調査時期	サンプル数	サンプル頻度
2010年	8月5日~7日	42
	11月16日~18日	43
2011年	6月27日	10
	7月17日	10
	8月10日	10
	8月24日	10
	9月17日	10
	10月19日	10
	11月4日	10

c) 大気-海水間CO₂フラックスの測定手法

大気-海水間CO₂フラックスは, バルク法(2.2参照)を用いて算出した。

d) 生物過程による炭素増減量の見積方法

生物による光合成や呼吸・分解の影響が無い場合, 溶存無機炭素濃度(DIC)は境界地点濃度(河川水と外海水)の単純な混合割合から決定される⁴⁴⁾。したがって, 実際の

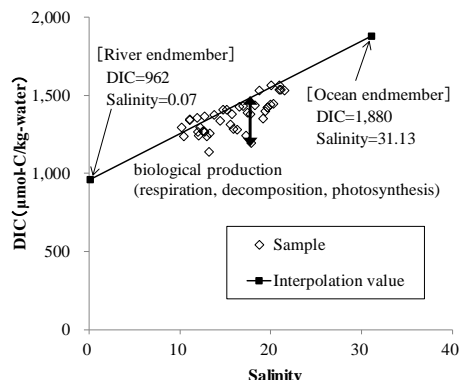


図-3.2 生物過程による炭素増減量の見積方法, 縦軸: DIC, 横軸: 塩分, 点: 採水サンプル, 黒線: DICと塩分の内挿値(2010年8月5日~7日の採水サンプル)

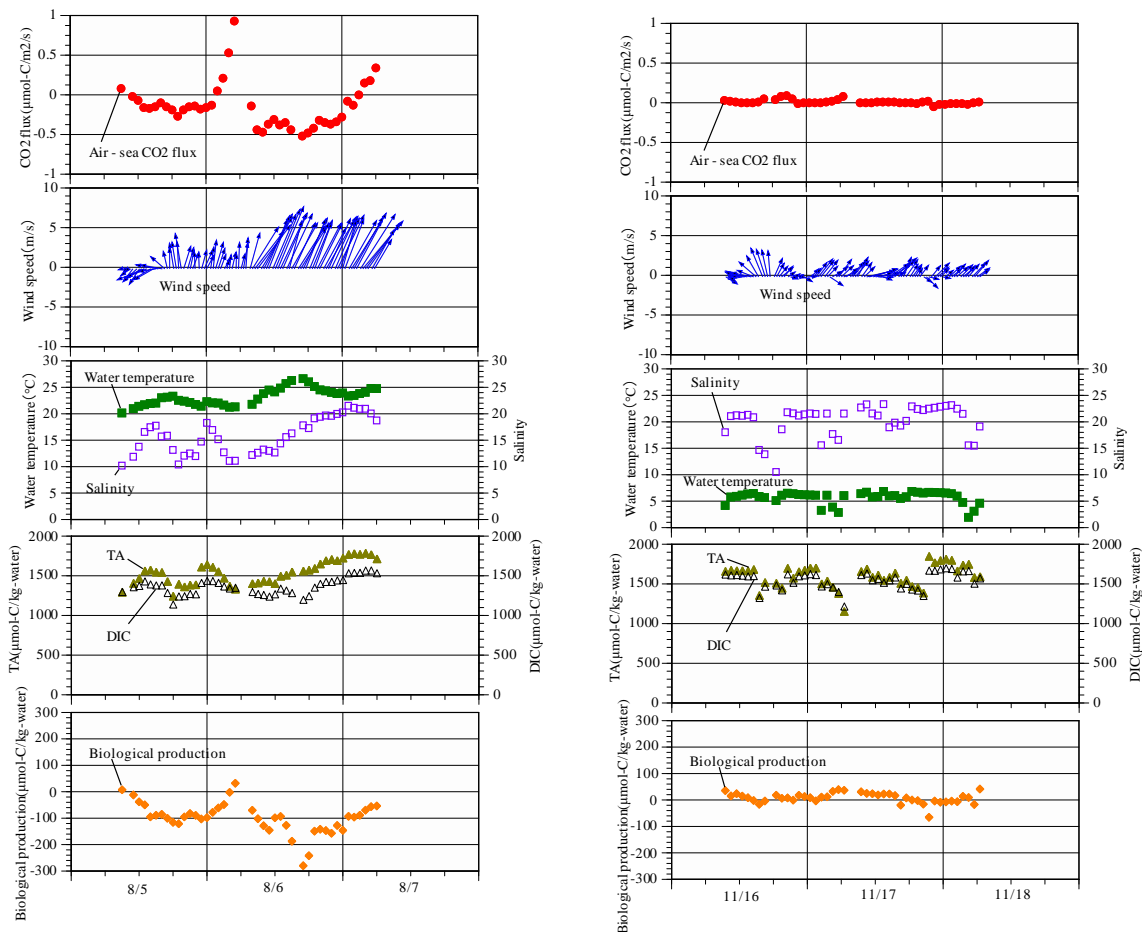
採水サンプルから得られたDICから塩分の内挿値（河川境界地点と外海境界地点のデータを結んだ線）を減じた値を生物過程による炭素増減量（ $\mu\text{mol-C/kg-water}$ ）と見なすことができる（図-3.2参照）。この生物による呼吸・分解及び光合成に起因する炭素増減量は、正の場合は従属栄養的な環境（呼吸・分解活動>光合成活動）、負の場合は独立栄養的な環境（光合成活動>呼吸・分解活動）を意味する。

(2) 観測結果

a) 2010年夏季・秋季

2010年の夏季（8月5日～7日）と秋季（11月16日～18日）の調査結果（No.10で48時間連続観測）は、図-3.3に示すとおりである。大気-海水間 CO_2 フラックスについて、海

水から大気へ CO_2 の放出を正の値、大気から海水への CO_2 の吸収を負の値として扱うこととする。大気-海水間 CO_2 フラックスは、夏季に -0.14 ± 0.09 （平均値 $\pm 95\%$ 信頼区間、以下同じ） $\mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ 、秋季に $0.01 \pm 0.01 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ となり、夏季に変動が大きく、大気から海水へ吸収傾向にあった。風速（夏季： $5.0 \pm 0.8 \text{ m/s}$ 、秋季： $2.2 \pm 0.3 \text{ m/s}$ ）や生物過程による炭素増減量（夏季： $-98.2 \pm 17.7 \mu\text{mol/kg}$ 、秋季： $8.3 \pm 5.9 \mu\text{mol/kg}$ ）は、大気-海水間 CO_2 フラックスの変動と同様に夏季に変動が大きかった。なお、夏季の生物過程による炭素増減量は、概ね負の値（夕方頃に極小値）を示しており、期間を通じて独立栄養的な環境（光合成活動>呼吸・分解活動）であったことがうかがえる。また、水温と塩分について、夏季は高水温（ $23.2 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ）と低塩分（ 15.9 ± 1.0 ；本論文では、塩分は無次元数として表記



(a) 夏季（8月5日～7日）

(b) 秋季（11月16日～18日）

図-3.3 大気-海水間 CO_2 フラックスと環境調査結果（2010年8月，11月）縦軸：大気-海水間 CO_2 フラックス，風速，水温，塩分，TA，DIC，生物過程による炭素増減量，横軸：期間，赤点：大気-海水間 CO_2 フラックス，青矢印：風速，緑点：水温，白抜き紫点：塩分，濃緑点：TA，白抜き黒点：DIC，橙点：生物過程による炭素増減量

する), 秋季は低水温 ($5.7 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$) と高塩分 (20.2 ± 0.9) の環境にあった. TA (夏季: $1,537 \pm 45 \text{ } \mu\text{mol/kg}$, 秋季: $1,602 \pm 42 \text{ } \mu\text{mol/kg}$) と DIC (夏季: $1,363 \pm 32 \text{ } \mu\text{mol/kg}$, 秋季: $1,545 \pm 32 \text{ } \mu\text{mol/kg}$) は, ややTAの方が高かったが, 概ね同様な変動傾向を示した.

b) 2011年春季～秋季

2011年の春季～秋季(6月～11月)の調査結果(1回程度/月の頻度でNo.2～No.11の移動観測)は, 図-3.4に示すとおりである. 大気-海水間CO₂フラックスは, 6月27日及び8月10日に海水中へ吸収傾向, 10月19日に大気中へ放出

傾向にあった. 地点別では, 流入負荷の影響を受けやすい風蓮川河口付近(No.11)では, CO₂の吸収・放出の変動($-0.31 \sim +0.20 \text{ } \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)が他地点よりも顕著であった. 風速は6月27日に3.3～4.8 m/s, 8月10日に1.4～3.2 m/sとやや大きかったが, 他の時期は概ね2.0 m/s以下と静穏であった. 生物過程による炭素増減量は, 6月27日と8月10日に負の値を示しており, 独立栄養的な環境(光合成活動>呼吸・分解活動)にあった. また, 全体的に風蓮湖奥部では, 高水温・低塩分の状態にあり, TAやDICも開口部と比較してやや小さい傾向を示した.

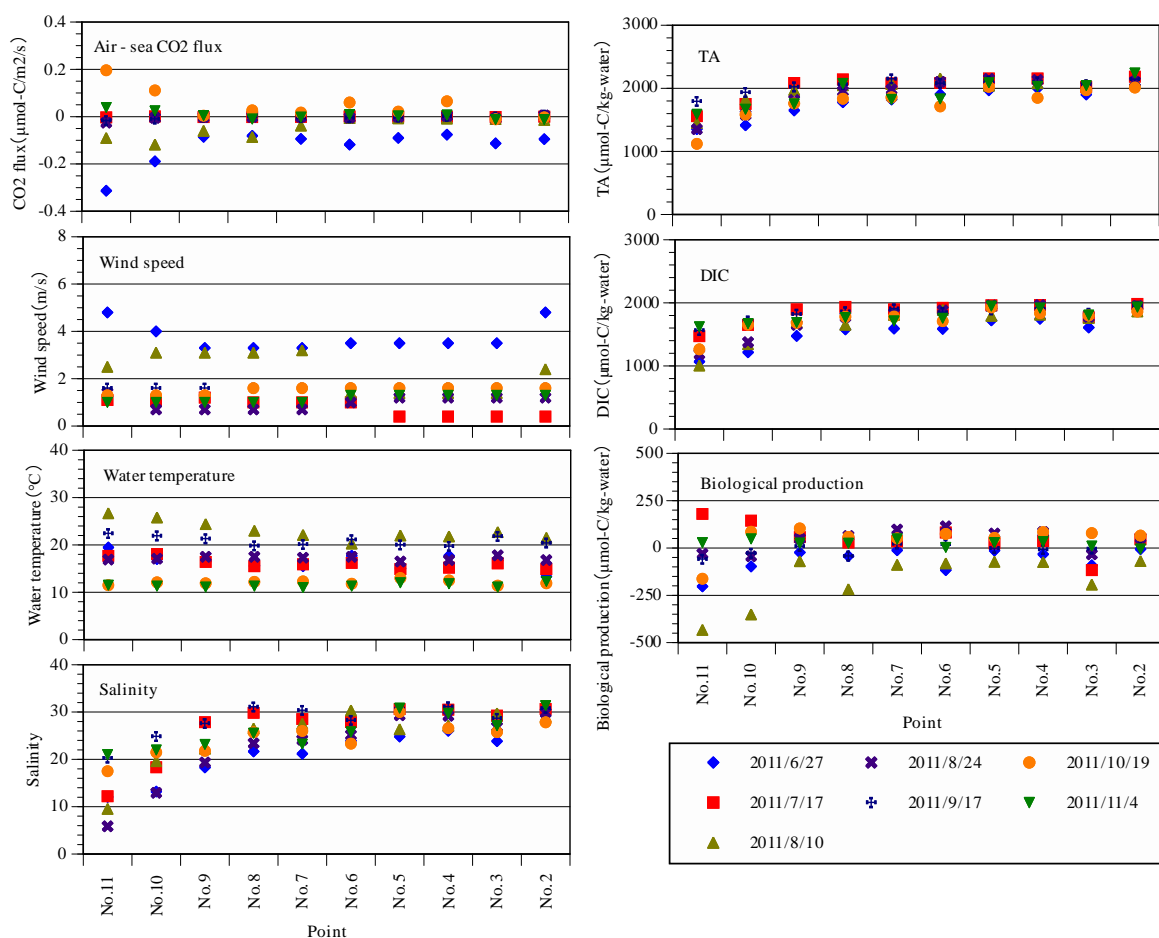


図-3.4 大気-海水間CO₂フラックスと環境調査結果(2011年6月～11月), 縦軸: 大気-海水間CO₂フラックス, 風速, 水温, 塩分, TA, DIC, 生物過程による炭素増減量, 横軸: 調査位置, 青点: 2011/6/27, 紫点: 2011/8/24, 橙点: 2011/10/19, 赤点: 2011/7/17, 濃青点: 2011/9/17, 緑点: 2011/11/14, 濃緑点: 2011/8/10

3.2 北海道コムケ湖における空間分布の移動観測

(1) 観測概要

a) 観測場所

本調査水域は、陸域負荷と生物活動の影響の両方が捉えやすい閉鎖的な海草場であることを理由に、北海道北東部に位置するコムケ湖（北緯 44° 15' 30"，東経143° 30' 20"）を選定した。コムケ湖は、オホーツク海沿いに3つの湖盆が連なる汽水湖である。元々は海であったが、海流の影響によって砂州が広がり、海と隔てられた海跡湖となった。その後、1977年からの浅海漁場開発事業によって湖口が開削され、オホーツク海と繋がることで海水交換が起きるようになった。なお、コムケの流動特性として、潮位変動によるオホーツク海と第1湖間で塩水の流出入があり、平水時に塩水は第1湖から第2湖、第3湖へ流入し、降雨を伴う出水時には低塩分水が第3湖から第2湖、第1湖へと流出することがわかっている^{45),46)}。また、湖内環境としてアマモ場が生育するとともに、ホッケイエビ、ホタテガイ、アサリ、カキ等の水産資源の養殖も行われている。これらの湖内環境を勘案し、統計解析に適した幅広い環境データを収集するために、調査地点は、流入河川からオホーツク海に繋がる湖口付近まで、コムケ湖を中心に20地点を設定した（図-3.5参照）。

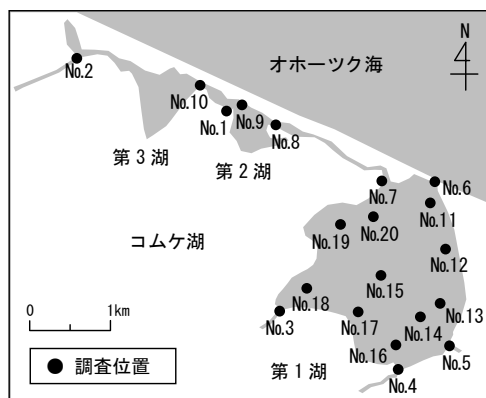


図-3.5 現地調査位置

b) 観測時期・項目・分析方法

観測時期は、2013年5月、8月とし、気象、水質等を測定・データ収集した。環境調査項目は、風速、水温、塩分、光量子密度、溶存無機炭素濃度（DIC）、溶存無機窒素濃度（DIN）、溶存有機炭素濃度（DOC）、全アルカリ度（TA）、クロロフィルa濃度（Chl.a）とした。風速は気象庁 紋別測候所の観測データを用い、水平成分の高度補正を行った。水温と塩分は水温・塩分計（Compact-CT, JFEアドバンテック社製）、光量子密度は照度計（MDS-MkV/L, JFEアドバンテック社製）を用いて表層（水面下0.5m層）を計測し

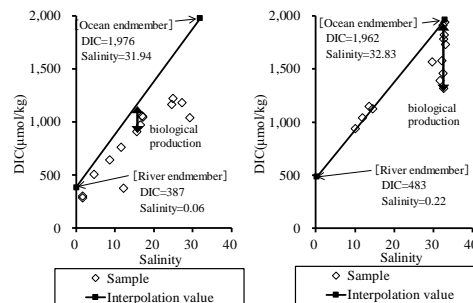
た。DIC, TA測定用サンプルは250mlのSchott Duran瓶で採取し、200 μ lの塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定した。これらは、フロースルー型の炭酸系分析装置（MDO-02, 紀本電子製⁴³⁾、もしくはパッチ型分析装置（ATT-05, 紀本電子製）で測定した。DIN, DOC測定用サンプルは孔径0.2 μ mのPTFEフィルター（DISMIC-25HP, ADVANTEC社製）で濾過後、酸洗浄済50mlポリボトル、焼処理済100mlガラスバイアル瓶にそれぞれ分取、冷凍保存した。DINはQuAAtro2-HR（ビーエルテック社製）、DOCは濾過サンプルにpH2.0以下になるよう塩酸の添加、バブリングによる無機炭酸の除去後、TOC-5000A（Shimadzu社製）で測定した。Chl.a測定用サンプルは焼処理済GF/Fフィルター（Whatman社製）で濾過後、冷凍保存した。分析時には、このフィルターを90%アセトンで浸し、12時間暗所で抽出後、紫外可視近赤外分光光度計UV-2450（Shimadzu社製）で測定した。大気中CO₂分圧（ fCO_{2air} μ atm）は国立環境研究所 落石測候所の観測データを用い、海水中CO₂分圧（ fCO_{2water} μ atm）は炭酸系の化学的平衡関係（DIC, TA）により間接的に算出した。

c) 大気-海水間CO₂フラックスの測定手法

大気-海水間CO₂フラックスは、バルク法（2.2参照）を用いて算出した。

d) 生物過程による炭素増減量の見積方法

光合成や呼吸・分解の影響が無い場合、DICは河川・外海境界地点濃度（河川水と外海水）の単純な混合割合で決定される。この混合割合から計算されたDICと実測DICの差分を「生物過程による炭素増減量^{44),47)}」として算出した（図-3.6参照）。正の値は従属栄養的な環境（呼吸・分解活動>光合成活動）、負の値は独立栄養的な環境（光合成活動>呼吸・分解活動）を表している。



(a) 春季（2013年5月） (b) 夏季（2013年8月）

図-3.6 生物過程による炭素増減量の算出、縦軸：DIC、横軸：塩分、白抜き黒点：採水サンプル、黒線：DICと塩分の内挿値

(2) 観測結果

2013年の春季(5月14日~15日)と夏季(8月27日~29日)における大気-海水間CO₂フラックスと各環境要因の調査結果を整理した(図-3.7参照)。本論文では、大気-海水間CO₂フラックスについて、海水から大気への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っている。

a) 大気-海水間CO₂フラックスとfCO₂(CO₂分圧)

大気-海水間CO₂フラックスは、春季に流入河川(No.1~No.5)で 1.64 ± 0.83 (平均値 $\pm 95\%$ 信頼区間, 以下同じ) $\mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$, コムケ湖内(No.6~No.20)で $0.04 \pm 0.08 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ となり、平均的に海水から大気へ放出傾向にあった。夏季には流入河川で $4.65 \pm 3.14 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ の放出にあったが、コムケ湖内で $-0.13 \pm 0.08 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ となり、大気から海水への吸収となった。海水中fCO₂は、流入河川(春季:

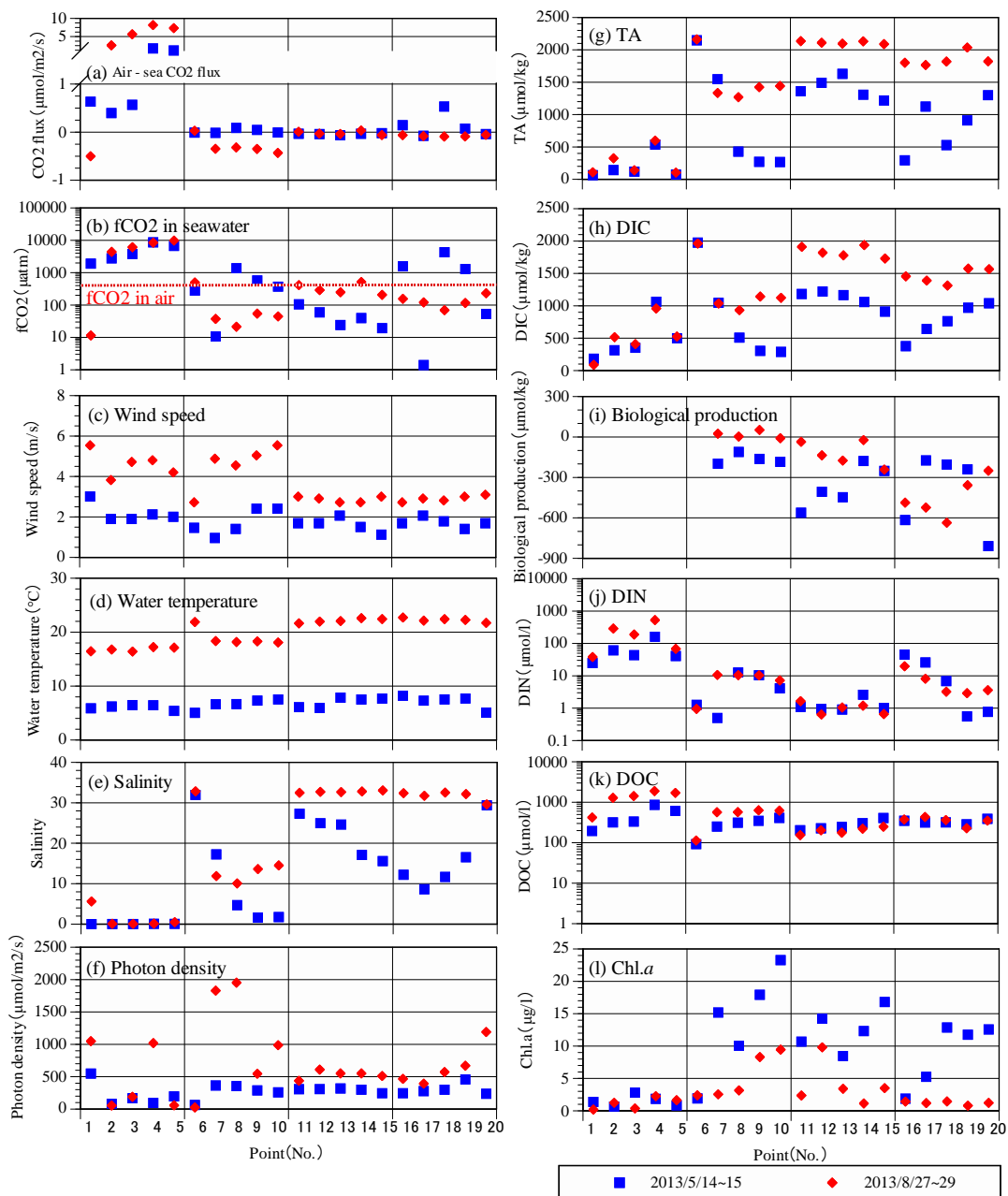


図-3.7 大気-海水間 CO₂フラックスと環境調査結果(2013年5月, 8月) 縦軸: 大気-海水間 CO₂フラックス, CO₂分圧, 風速, 水温, 塩分, 光量子密度, TA, DIC, 生物過程による炭素増減量, DIN, DOC, Chl.a, 横軸: 調査位置, 青点: 2013/5/14~15, 赤点: 2013/8/27~29

4,764±2,476 μatm , 夏季: 5,771±3,367 μatm) よりもコムケ湖内 (春季: 672±578 μatm , 夏季: 202±84 μatm) で概ね低くなった。

b) 各環境要因

風速は, 春季に1.8±0.2 m/s, 夏季に3.7±0.5 m/sとなり, 夏季に比較的やや強い風が吹いた. 水温は, 春季に6.7±0.4 °C, 夏季に20.0±1.1 °Cとなり, コムケ湖内の塩分は, 春季に16.4±5.0 (本論文で塩分は無次元数として表記する) に対し, 夏季に27.0±4.6とやや高くなった. これは, 春季に河川からの融雪水の流入, 夏季に外洋からの海水の流入が卓越していたことがうかがえる. 光量子密度は, 春季 (270±52 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) よりも夏季 (683±231 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) の方が高い傾向にあった. TA (春季: 838±279 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 夏季: 1,436±332 $\mu\text{mol}/\text{kg}$) とDIC (春季: 793±197 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 夏季: 1,259±244 $\mu\text{mol}/\text{kg}$) は, 春季よりも夏季に高くなり, 概ね同様な傾向を示した. 生物過程による炭素増減量は, 春季に-325±110 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 夏季に-200±118 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ となり, 概ね独立栄養的な環境 (光合成活動>呼吸・分解活動) となった. DINは, コムケ湖内 (春季: 7.7±6.3 $\mu\text{mol}/\text{l}$, 夏季: 5.5±2.8 $\mu\text{mol}/\text{l}$) よりも流入河川 (春季: 66.3±47.7 $\mu\text{mol}/\text{l}$,

夏季: 223±174 $\mu\text{mol}/\text{l}$) で非常に高く, DOCもコムケ湖内 (春季: 298±43 $\mu\text{mol}/\text{l}$, 夏季: 352±90 $\mu\text{mol}/\text{l}$) と流入河川 (春季: 465±237 $\mu\text{mol}/\text{l}$, 夏季: 1,348±499 $\mu\text{mol}/\text{l}$) で同様の傾向を示した. また, 河川流入によって変化する生産と呼吸のバランスを簡単に判断する手法として, DOCとDINの比率⁴⁸⁾がある. 本調査水域におけるDOC/DINは, 流入河川 (春季: 8.2±3.5, 夏季: 10.3±7.6) と比べて, コムケ湖内 (春季: 201±97, 夏季: 125±51) で非常に高くなった. つまり, コムケ湖内では河川内と比較し, DOC分解よりDIN消費が卓越していることが推察される. Chl.aは, 流入河川 (春季: 1.5±0.8 $\mu\text{g}/\text{l}$, 夏季: 1.1±0.8 $\mu\text{g}/\text{l}$) よりもコムケ湖内 (春季: 11.7±2.9 $\mu\text{g}/\text{l}$, 夏季: 3.5±1.6 $\mu\text{g}/\text{l}$) で高くなった. これらを勘案すると, 河川流入と共にコムケ湖内に有機炭素及び栄養塩が多く供給され, 湖内では豊富なDINを用いて一次生産が活発となっていることが示唆される.

c) 第1湖内の分布特性

コムケ湖 (第1湖内) における海水中 $f\text{CO}_2$ と塩分の分布は, 図-3.8に示すとおりである. 海水中 $f\text{CO}_2$ は, 湖内中央付近で約400 μatm (大気中 $f\text{CO}_2$) よりも低くなることから,

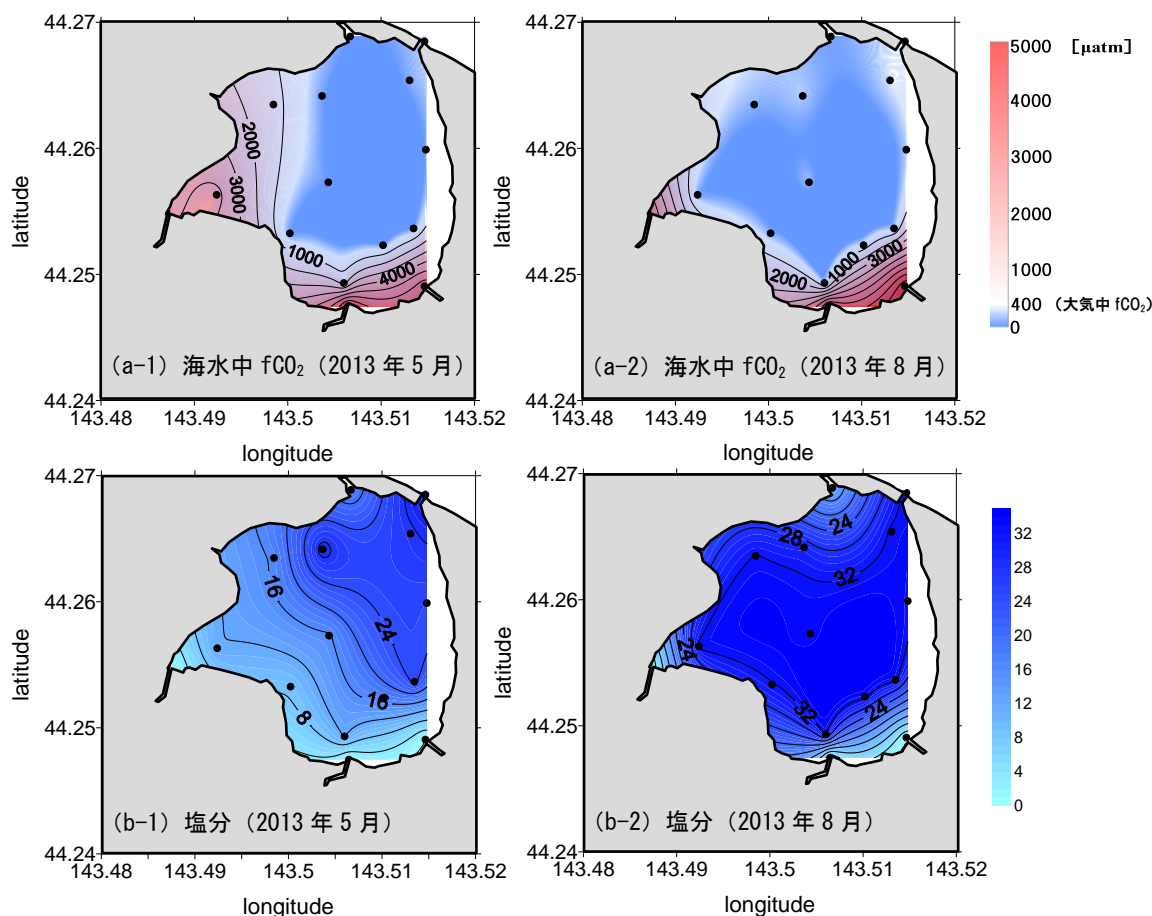


図-3.8 第1湖内の海水中 $f\text{CO}_2$ と塩分の分布特性 (2013年5月, 8月)

大気から海水中へのCO₂の吸収となっている。一方、湖奥の流入河川付近で、海水中fCO₂は1,000 μ atm以上と非常に高くなり、海水から大気中へのCO₂の放出となった。これらの海水中fCO₂の分布特性は、概ね塩分と対応しており、高塩分域で海水中fCO₂が低くなる傾向を示し、春季よりも夏季に海水中fCO₂が低い範囲が広がった。

3.3 東京湾走水海岸における連続観測

(1) 観測概要

a) 観測場所

本観測海域は、東京湾において希少な天然アマモ場群落が残存する神奈川県横須賀市の走水海岸（北緯35°15'53"、東経139°43'34"）を選定した。走水海岸は東京湾奥部と比べて水質・底質悪化の影響が小さく、昭和54年~57年の沖合の離岸堤設置によって、水深約2m以浅の静穏域に大小のパッチを形成しながら、約4haのアマモ場が安定的に維持されている⁴⁹⁾。また、本海岸では大きな河川の流入は見られないが、汀線付近で湧水が流入しており、それらの流入量が比較的多い箇所を陸境界地点と設定した。このような海域環境を勘案し、走水海岸のアマモ生育域内に連続観測地点、陸域からの湧水が流入する付近に陸境界地点、アマモ場や湧水の影響を受けにくく周辺で最も高塩分である付近に外境界地点を設定した（図-3.9参照）。各地点の平均水深は、連続観測地点2.8m、陸境界地点0.1m、外境界地点3.0mであった。

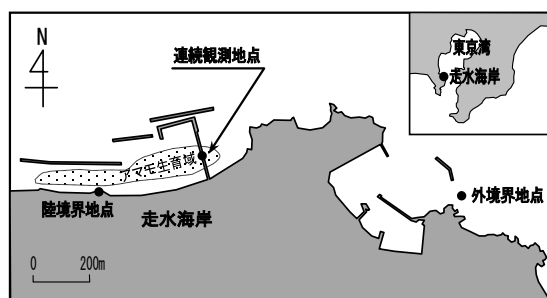


図-3.9 現地調査位置

b) 観測時期・項目・分析方法

2013年7月22日~24日（アマモ繁茂期）、12月4日~6日（アマモ衰退期）の期間に1時間間隔で、走水海岸のアマモ場で48時間の観測を実施した。アマモ場の中央付近に架けられた橋の上から、観測機器による計測及びバケツ採水を行った。観測機器による水中計測項目（鉛直方向に0.1m間隔）は、水温、塩分、光量子密度、DO（溶存酸素量）とした。基本的な水質環境としての水温、塩分は、

水温・塩分計（Compact-CT, JFEアドバンテック社製）で計測した。光合成の指標の1つとなる光量子密度は、照度計（MDS-MkV/L, JFEアドバンテック社製）から測定照度を変換し測定した。水中の酸素量としてのDOは、溶存酸素計（RINKO ID, JFEアドバンテック社製）を用いて測定した。各項目は、1時間ごとに鉛直方向に0.1m間隔で計測した。併せて、水位変動を把握するため、深度は水温・深度計（Compact-TD, JFEアドバンテック社製）を用いて1時間間隔で連続的に計測した。

バケツ採水（海面直下の表層水）による分析項目は、TA（全アルカリ度）、DIC（溶存無機炭素濃度）、NO₃+NO₂-N（硝酸態・亜硝酸態窒素）、NH₄-N（アンモニア態窒素）、PO₄-P（リン酸態リン）、SiO₂（二酸化ケイ素）、TDN（溶存態全窒素）、DON（溶存態有機窒素）、TDP（溶存態全リン）、DOP（溶存態有機リン）、Chl.a（クロロフィルa）とした。TA、DIC測定用のサンプルは、表層水においてバケツ採水したものを250mlのSchott Duran瓶で採取し、微生物活動による変化を防ぐために⁵⁰⁾、200 μ lの塩化第二水銀を添加してDICを固定した。これらは、フロースルー型の炭酸系分析装置（MDO-02, 紀本電子社製^{43), 51)}、もしくはパッチ型分析装置（ATT-05, 紀本電子社製）で測定した。

栄養塩類及びChl.a測定用のサンプルは、表層水においてバケツ採水したものを速やかに分注及び濾過作業を行った。NO₃+NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P、SiO₂、TDN、TDP測定用のサンプルは、孔径0.2 μ mのPTFEフィルター（DISMIC-25HP, ADVANTEC社製）で濾過後、酸洗浄済み50mLポリボトルに分取した後、冷凍保存した。NO₃+NO₂-N、NH₄-Nは、濾過サンプルをそれぞれカドミウムカラム還元-ジアゾ化法、サリチル酸を用いたインドフェノール法で分析した。また、PO₄-P及びSiO₂は、モリブデンブルー法により分析した。測定にはTRAACS800（Bran+Luebbe社製）を使用した。TDN、TDPは、過硫酸カリウムを添加し熱分解後、カドミウムカラム還元-ジアゾ化法、モリブデンブルー法により分析した。この分析には、SWAAT（BL-TEC社製）を用いた。DONについては、TDNからNO₃+NO₂+NH₄-Nを引いた値とし、DOPも同様にTDPからPO₄-Pを引いた値として算出した。Chl.a測定用サンプルは、採水サンプルを熱処理済GF/Fフィルター（Whatman社製）で濾過し、このフィルターを冷凍保存した。Chl.a分析時には、このフィルターを90%アセトンで浸し、12時間暗所で抽出後、紫外可視近赤外分光光度計UV-2450（Shimadzu社製）で測定した。

fCO₂air（大気中CO₂分圧）はCO₂濃度計（CO2-09⁵²⁾、紀本電子社製）を用いて連続計測し、fCO₂water（海水中CO₂

分圧)は炭酸系の化学的平衡関係(DIC, TA)による間接的な計算方法⁵³⁾で算出した。風速は、気象庁 横浜測候所の観測データを用い、水平成分の高度補正³³⁾を行った。以上の各種機器計測、サンプリング、測候所のデータから、アマモ場の海水中 CO₂ 分圧とその環境要因の日周変動を確認した。

c) 大気-海水間CO₂フラックスの測定手法

大気-海水間CO₂フラックスは、バルク法(2.2参照)を用いて算出した。

d) 炭素増減量(ΔDIC)及びアルカリ度増減量(ΔTA)の算出手法

走水海岸のような浅海域では、生物による呼吸・分解や光合成の影響が無い場合、DICは淡水と外海水の単純な混合比から決定される。しかし、実際は淡水と外海水の単純混合以外の生物過程等によって影響を受けるため、陸水と外洋水による塩分-DICの直線近似値から内挿した推定値と実測値の差分を「炭素増減量(ΔDIC)」(μmol kg⁻¹)とみなした¹⁷⁾。正の値は呼吸・分解活動、負の値は逆に光合成活動が卓越することを示している。外境界地点と連続観測地点の塩分は、ほぼ同様の値(両地点間の差は最大1.2未満)を示したが、その中で外境界地点の塩分が最も高くなった。このため、本ケースで算出した炭素増減量(ΔDIC)は、図-3.10に示すとおりとなった。

また、同様に石灰化や人工排水等の影響が無い場合、TAは淡水と外海水の単純な混合比から決定されるが、単純混合以外の影響を受けるTAの増減量を「アルカリ度増減量(ΔTA)」とみなした⁵⁴⁾。正の値は炭酸塩の溶解、負の値は炭酸塩の生成が卓越することを示している。

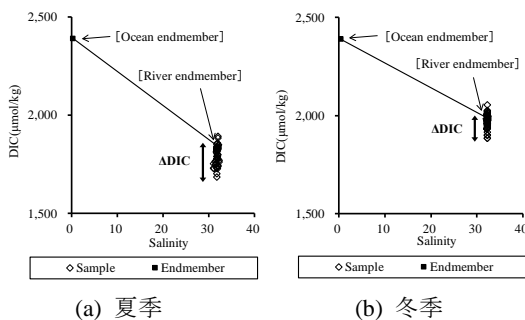


図-3.10 生物過程による炭素増減量の算出、縦軸：DIC、横軸：塩分、白抜き黒点：採水サンプル、黒点：境界地点、黒線：DICと塩分の内挿値

(2) 観測結果

アマモ場における大気-海水間CO₂フラックスと各環

境要因の調査結果は、図-3.11に示すとおりである。本論文では、大気-海水間CO₂フラックスについて、海水から大気への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っている。

a) 海水中CO₂分圧と大気-海水間CO₂フラックス

現地観測結果によると、海水中CO₂分圧は夏季に270 ± 16 (平均値 ± 95%信頼区間, 以下同じ) μatm, 冬季に313 ± 14 μatmとなり、日中の午後を中心に低くなり、夜間に高くなる傾向にあった。一方で、大気中CO₂分圧は夏季に406 ± 6 μatm, 冬季に439 ± 5 μatmとなり、海水中CO₂分圧と比べて高い値で推移したが、変動幅は約1/3程度と小さかった。大気-海水間CO₂フラックスは、夏季・冬季ともに-0.03 ± 0.01 μmol-C m⁻² s⁻¹となり、海水中CO₂分圧と同様に日中の午後を中心にマイナス傾向で概ね大気から海水への吸収となった。

b) 各環境要因

風速は夏季に1.9 ± 0.3 m s⁻¹, 冬季に2.3 ± 0.2 m s⁻¹と小さく、水温は夏季に24.9 ± 0.1 °C, 冬季に14.8 ± 0.1 °C, 塩分は夏季に31.8 ± 0.1, 冬季に32.2 ± 0.0となり、概ね安定した水質環境であった。TAは夏季に2124 ± 5 μmol kg⁻¹, 冬季に2203 ± 3 μmol kg⁻¹, DICは夏季に1793 ± 13 μmol kg⁻¹, 冬季に1966 ± 10 μmol kg⁻¹となり、DICよりもTAの方が高く推移したが、TAの変動幅は約1/3程度と小さかった。光子密度は夏季に0 ~ 3774 μmol m⁻² s⁻¹, 冬季に0 ~ 3434 μmol m⁻² s⁻¹となり、日中における変動幅は大きかった。Chl.aは夏季に4.2 ± 0.3 μg L⁻¹, 冬季に1.2 ± 0.1 μg L⁻¹となり、日中の上げ潮に伴ってやや上昇を示したが、値自体や変動幅は大きくなかった。ΔDICは夏季に-51 ± 14 μmol kg⁻¹, 冬季に-22 ± 10 μmol kg⁻¹となり、呼吸・分解活動よりも光合成活動の方が卓越していることが示された。なお、DOCは測定していない。ΔTAは夏季に29 ± 5 μmol kg⁻¹, 冬季に-10 ± 4 μmol kg⁻¹となり、ΔDICよりも変動幅は小さく、石灰化や嫌気反応、都市排水の影響が想定される。栄養塩類で最も濃度が高かったのはSiO₂で夏季に60.2 ± 2.3 μmol L⁻¹, 冬季に59.7 ± 3.6 μmol L⁻¹となった。夏季のTDNは14.8 ± 0.6 μmol L⁻¹となり、そのうちDONは11.9 ± 0.4 μmol L⁻¹, NO₃+NO₂-Nは0.8 ± 0.1 μmol L⁻¹, NH₄-Nは2.1 ± 0.3 μmol L⁻¹であったことから、DONの占める割合が大きかった。一方で、冬季のTDNは29.3 ± 0.6 μmol L⁻¹となり、そのうちDONは8.8 ± 0.5 μmol L⁻¹, NO₃+NO₂-Nは17.4 ± 0.5 μmol L⁻¹, NH₄-Nは3.1 ± 0.2 μmol L⁻¹であったことから、NO₃+NO₂-Nの占める割合が大きかった。夏季のTDPは0.6 ± 0.0 μmol L⁻¹となり、そのうちDOPは0.3 ± 0.0 μmol L⁻¹, PO₄-Pも0.3

$\pm 0.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ で同程度にあった。一方で、冬季のTDPは $0.9 \pm 0.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ となり、そのうちDOPは $0.2 \pm 0.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.6 \pm 0.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ で、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の占める割合が大きか

った。DOは夏季に $89.0 \pm 9.2\%$ 、冬季に $82.4 \pm 5.0\%$ となり、日中の光合成活動によるDOの上昇と夜間の呼吸によるDOの低下という日周変動が確認された。

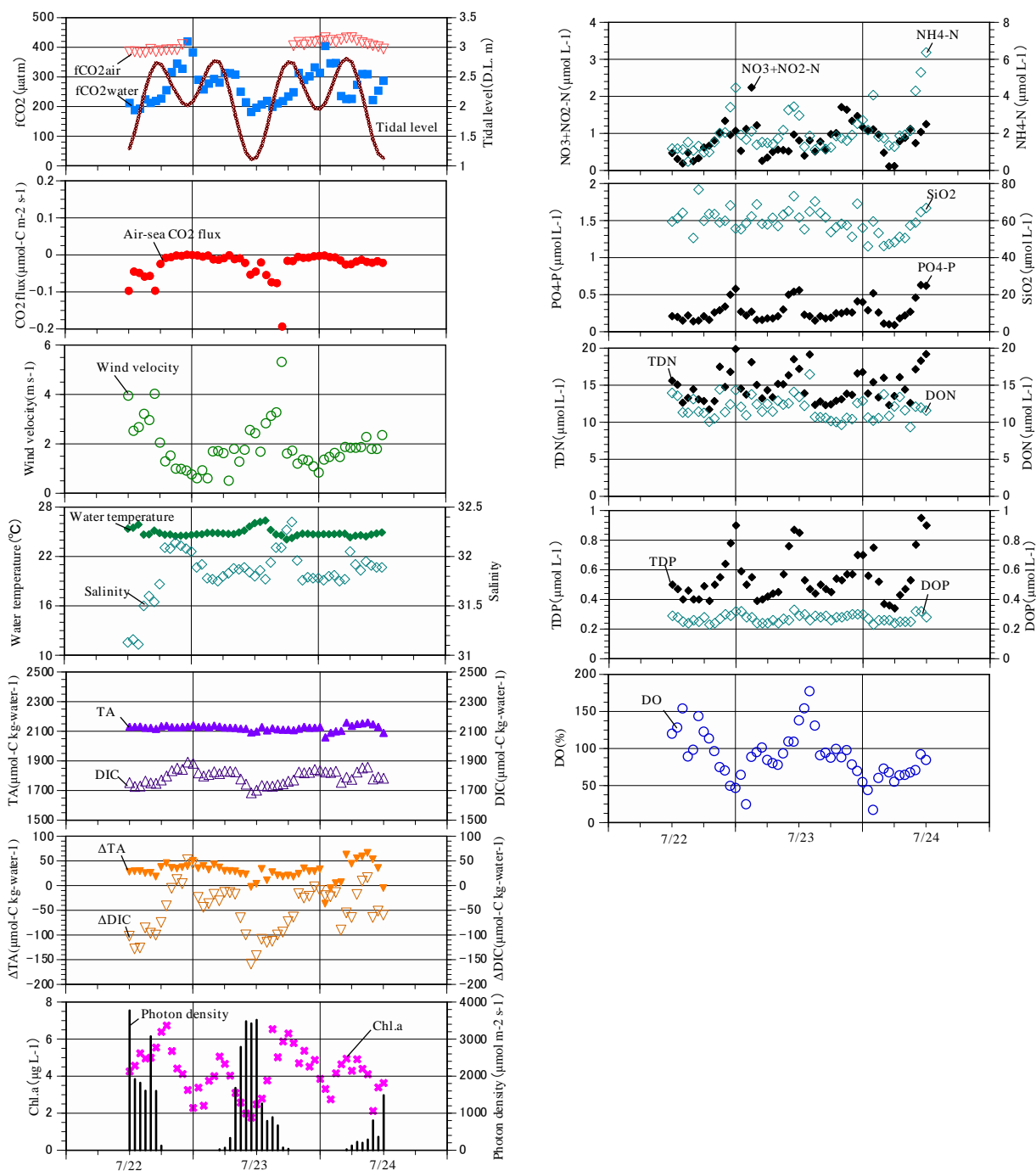


図-3.11 (1) 現地観測結果 (夏季: 2013年7月22日~24日), 縦軸: CO_2 分圧, 潮位, 大気-海水間 CO_2 フラックス, 風速, 水温, 塩分, TA, DIC, ΔTA , ΔDIC , Chl.a, 光量子密度, $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, SiO_2 , TDN, DON, TDP, DOP, DO, 横軸: 期間, 白抜き赤点: 海水中 CO_2 分圧, 青点, 大気中 CO_2 分圧, 茶線: 潮位, 赤点: 大気-海水間 CO_2 フラックス, 白抜き緑点: 風速, 緑点: 水温, 白抜き青緑点: 塩分, 紫点: TA, 白抜き紫点: DIC, 橙点: ΔTA , 白抜き橙点: ΔDIC , 桃点: Chl.a, 黒棒線: 光量子密度, 黒点: $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, TDN, TDP, 白抜き青緑点: $\text{NH}_4\text{-N}$, SiO_2 , DON, DOP, 白抜き青点: DO

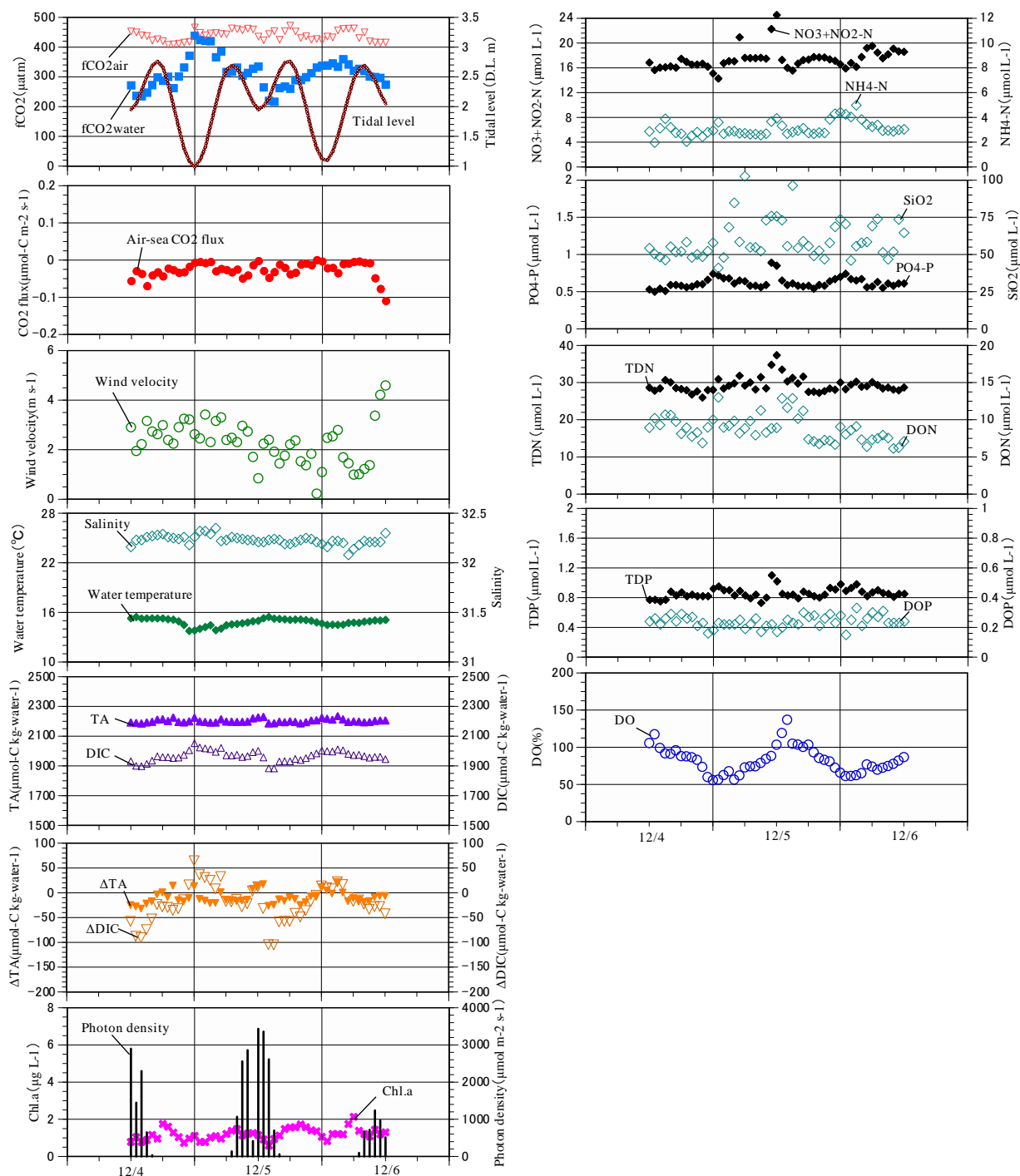


図-3.11(2) 現地観測結果(冬季:2013年12月4日~6日)縦軸:CO₂分圧,潮位,大気-海水間CO₂フラックス,風速,水温,塩分,TA,DIC,ΔTA,ΔDIC,Chl.a,光量子密度,NO₃+NO₂-N,NH₄-N,PO₄-P,SiO₂,TDN,DON,TDP,DOP,DO,横軸:期間,白抜き赤点:海水中CO₂分圧,青点,大気中CO₂分圧,茶線:潮位,赤点:大気-海水間CO₂フラックス,白抜き緑点:風速,緑点:水温,白抜き青緑点:塩分,紫点:TA,白抜き紫点:DIC,橙点:ΔTA,白抜き橙点:ΔDIC,桃点:Chl.a,黒棒線:光量子密度,黒点:NO₃+NO₂-N,PO₄-P,TDN,TDP,白抜き青緑点:NH₄-N,SiO₂,DON,DOP,白抜き青点:DO

3.4 都市型浅海域（東京湾野島海岸）における移動連続観測

(1) 観測概要

a) 観測場所

本観測水域は、都市排水を含む陸域負荷や生物活動の影響が捉えやすい閉鎖的な場であることを理由に、平潟湾（北緯 35°19'43"，東経 139°37'41"）を選定した。都市型浅海域の水質環境は、都市排水に含まれる有機炭素やミネラル分 (Ca²⁺, Mg²⁺等)、栄養塩類（アンモニア態窒素、

リン酸態リン等）の他に、呼吸・分解及び光合成による DIC の増減、コンクリートの溶出や嫌気反応等による TA の増減等、様々な複合的要因により影響を受けている。

神奈川県横浜市南部に位置する平潟湾は、背後に工場や住宅地が密集するとともに、金沢湾を通じて東京湾に通じる閉鎖性内湾である。1966 年～1967 年の埋め立てや遮水壁の設置により、海水交換の低下に伴う水質汚濁や悪臭の発生、泥化により生物相は多毛類が優占した。その後、1992 年～1994 年に遮水壁の撤去・開放と堆積底土の

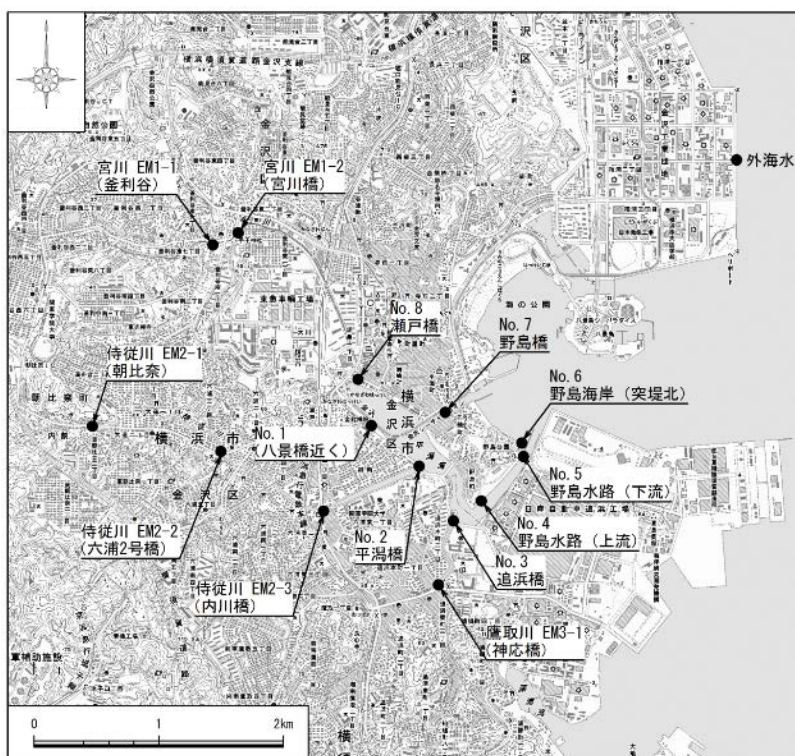


図-3.12 観測位置

表-3.2 観測地点

区分	地点 No.	地点箇所
平潟湾	No.1	八景橋近く
	No.2	平潟橋
	No.3	追浜橋
	No.4	野島水路（上流）
	No.5	野島水路（下流）
	No.6	野島海岸（突堤北）
	No.7	野島橋
	No.8	瀬戸橋
東京湾	外海水	湾外
宮川	EM1-1	釜利谷
	EM1-2	宮川橋
侍従川	EM2-1	朝比奈
	EM2-2	六浦 2 号橋
	EM2-3	内川橋
鷹取川	EM3-1	神応橋

浚渫工事により、海水交換の改善に伴う DO（溶存酸素）の上昇、湾奥及び水路での塩分の上昇、底質の酸化還元電位の上昇、砂泥質化等が確認され、多毛類からアサリ等の殻を形成する（石灰化により TA に影響を与える）二枚貝に優占種が変化した^{55), 56)}。流入河川付近では高潮時に海水遡上により汽水域が形成されている。

このような水域環境を勘察し、平潟湾から野島水路及び野島運河を経由し金沢湾に通じるまでの領域で、平面的に 8 地点 (No.1~No.8) の観測地点を設定した。併せて、外境界地点、流入河川の陸境界地点 (宮川、侍従川、鷹取川) のサンプリングも実施した (図-3.12, 表-3.2 参照)。

b) 観測時期・項目・分析方法

観測時期は、2015 年 8 月と 12 月 (No.1~No.8 で 3 時間毎の移動連続観測、河川・外海水は観測期間中 1 回) とし、気象、水質データ等を測定・収集した。観測項目は、風速、水温、塩分、全アルカリ度 (TA)、溶存無機炭素濃度 (DIC)、量子子密度、クロロフィル a (Chl.a)、海水中 CO₂ 分圧 (fCO_{2water})、大気中 CO₂ 分圧 (fCO_{2air}) とした。風速は気象庁 横浜測候所の観測データを用い、水平成分の高度補正を行った³³⁾。水温と塩分は水温・塩分計 (Compact-CT, JFE アドバンテック社製)、量子子密度は照度計 (MDS-MkV/L, JFE アドバンテック社製)、クロロフィル a はクロロフィル濁度計 (Compact-CLW, JFE アドバンテック社製) を用いて測定した。TA, DIC 測定用サンプルは 250ml の Schott Duran 瓶で採取され、200 μ l の塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定した。これら

は、フロースルー型の炭酸系分析装置 (MDO-02, 紀本電子社製⁴³⁾)、もしくはパッチ型分析装置 (ATT-05, 紀本電子製) を用いて測定した。大気中 CO₂ 分圧は CO₂ 濃度計 (CO₂-09) を用いて測定し、海水中 CO₂ 分圧は炭酸系の化学的平衡関係 (DIC, TA) による間接的な計算方法⁵³⁾で算出した。

観測時期及びサンプル数等は、表-3.3 に示すとおりである。

c) 大気-海水間CO₂フラックスの測定手法

大気-海水間CO₂フラックスは、バルク法 (2.2参照) を用いて算出した。

d) Δ DIC, Δ TAの算出方法

生物による光合成や呼吸・分解の影響が無い場合、溶存無機炭素濃度 (DIC) は境界地点濃度 (河川水と外海水) の単純な混合割合から決定される。このため、実際の採水サンプルから得られた DIC から塩分の内挿値 (河川境界地点と外海境界地点のデータを結んだ線) を減じた値を生物過程による炭素増減量 Δ DIC (μ mol-C/kg-water) と見なすことができる^{44), 47)}。この生物による呼吸・分解及び光合成に起因する炭素増減量は、正の場合は従属栄養的な環境 (呼吸・分解活動 > 光合成活動)、負の場合は独立栄養的な環境 (光合成活動 > 呼吸・分解活動) を意味する。

また、全アルカリ度 (TA) も同様に石灰化等の影響が無い場合、TA は境界地点濃度 (河川水と外海水) の単純な混合割合から決定される。実際の採水サンプルから得

表-3.3 観測時期・サンプル数等

		8月24日~25日		12月21日~22日	
		サンプル数	サンプル頻度	サンプル数	サンプル頻度
平潟湾	No.1	9	3時間間隔	9	3時間間隔
	No.2	9		9	
	No.3	9		9	
	No.4	9		9	
	No.5	9		9	
	No.6	9		9	
	No.7	9		9	
	No.8	9		9	
東京湾	外海水	1	1回	1	1回
宮川	EM1-1	1		1	
	EM1-2	1		1	
侍従川	EM2-1	1		1	
	EM2-2	1		1	
	EM2-3	1		1	
鷹取川	EM3-1	1		1	
小計		79 サンプル		79 サンプル	
合計		158 サンプル			

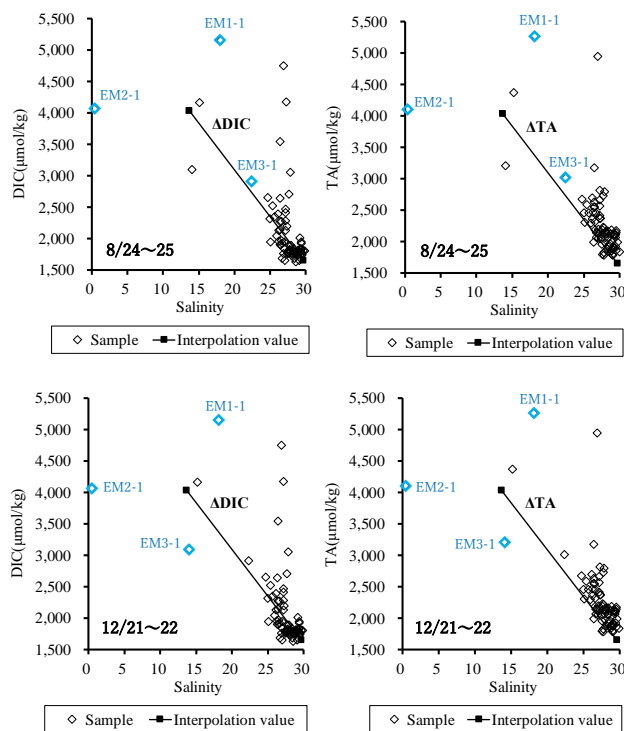


図-3.13 ΔDIC, ΔTA の算出結果【夏季, 冬季】，縦軸：DIC, 横軸：塩分, 白抜き黒点：採水サンプル, 黒点：境界地点, 白抜き水色点：河川側境界地点, 黒線：DIC と塩分の内挿値

られた TA から塩分の内挿値(河川境界地点と外海境界地点のデータを結んだ線)を減じた値を石灰化によるアルカリ度増減量 ΔTA ($\mu\text{mol-C/kg-water}$) と見なすことができる⁵⁴⁾。この石灰化等に起因するアルカリ度増減量は、正の場合は炭酸カルシウム(CaCO_3)の溶解、負の値は CaCO_3 の析出を意味している。

この ΔDIC , ΔTA の算出結果は、図-3.13 に示すとおりである。

(2) 観測結果

a) 夏季 (8月24日～25日)

夏季の観測結果 (No.1～No.8 で3時間毎の移動連続観測) は、図-3.14 に示すとおりである。大気-海水間 CO_2 フラックスについて、海水から大気へ CO_2 の放出を正の値、大気から海水への CO_2 の吸収を負の値として扱うこととする。海水中 CO_2 分圧は $1,593 \pm 1,282$ (平均値 $\pm 95\%$ 信頼区間, 以下同じ) μatm 、大気中 CO_2 分圧は 401.0 ± 0.4 μatm 、大気-海水間 CO_2 フラックスは 0.21 ± 0.20 $\mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ となり、概ね海水から大気へ放出傾向にあった。

水温と塩分について、高水温 (25.6 ± 0.2 $^\circ\text{C}$) と高塩分 (27.7 ± 0.3 ; 塩分は無次元数として表記する) の環境にあった。TA ($2,200 \pm 68$ $\mu\text{mol/kg}$) と DIC ($2,014 \pm 99$ $\mu\text{mol/kg}$)

は、やや TA の方が高かったが同様な変動傾向を示し、 ΔTA (-11.6 ± 53.5 $\mu\text{mol/kg}$) と ΔDIC (69.5 ± 89.5 $\mu\text{mol/kg}$) はともに変動幅が大きかった。また、風速 (3.0 ± 0.3 m/s)、クロロフィル a (13.7 ± 7.8 $\mu\text{g/l}$)、光量子密度 (82.3 ± 32.7 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$) も日周期変動が確認された。

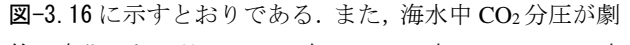
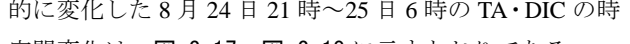
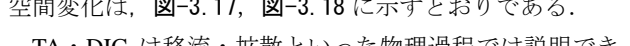
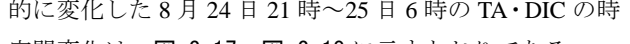
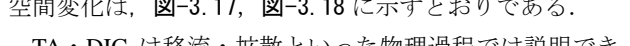
夏季の日中に湾奥中心部から湾外にかけて CO_2 の吸収域が形成されるとともに、夜間には宮川の流入域付近で CO_2 の顕著な放出域が確認された。これは、日中に植物プランクトン等による光合成活動が活発になったことと、夜間の下げ潮時に都市排水による流入負荷の影響が大きかったことが考えられる。

b) 冬季 (12月21日～22日)

冬季の観測結果 (No.1～No.8 で3時間毎の移動連続観測) は、図-3.15 に示すとおりである。海水中 CO_2 分圧は 781.6 ± 74.5 μatm 、大気中 CO_2 分圧は 445.2 ± 0.0 μatm 、大気-海水間 CO_2 フラックスは 0.13 ± 0.04 $\mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ となり、概ね海水から大気へ放出傾向にあった。また、水温と塩分について、低水温 (12.8 ± 0.2 $^\circ\text{C}$) と高塩分 (29.5 ± 0.6) の環境にあった。TA ($2,716 \pm 127$ $\mu\text{mol/kg}$) と DIC ($2,595 \pm 130$ $\mu\text{mol/kg}$) は、ややTAの方が高かったが同様な変動傾向を示し、 ΔTA (325.8 ± 113.3 $\mu\text{mol/kg}$) と ΔDIC (368.3 ± 115.4

$\mu\text{mol/kg}$) はともに変動幅が大きかった。また、風速 ($3.3 \pm 0.2 \text{ m/s}$)、クロロフィル a ($8.4 \pm 8.3 \mu\text{g/l}$)、光量子密度 ($53.7 \pm 21.0 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$) も日周期変動が確認された。

c) 海水中 CO_2 分圧の時空間分布の日周変化

平潟湾内の海水中 CO_2 分圧の時空間分布の日周変化は、   図-3. 16 に示すとおりである。また、海水中 CO_2 分圧が劇的に変化した 8 月 24 日 21 時～25 日 6 時の TA・DIC の時空間変化は、 図-3. 17,  図-3. 18 に示すとおりである。

TA・DIC は移流・拡散といった物理過程では説明できないような濃度変化をしており、さらに TA と DIC の濃度変化は同調していなかった。このことから、陸域の複数個所から TA・DIC の含有成分の異なる不規則で特異な排水が流入していたことが予想される。特に 8 月 25 日の 3 時以降、湾内の TA・DIC 濃度分布の不均一さが生じることによって、海水中 CO_2 分圧の分布特性にも影響を及ぼしていることが考えられた。

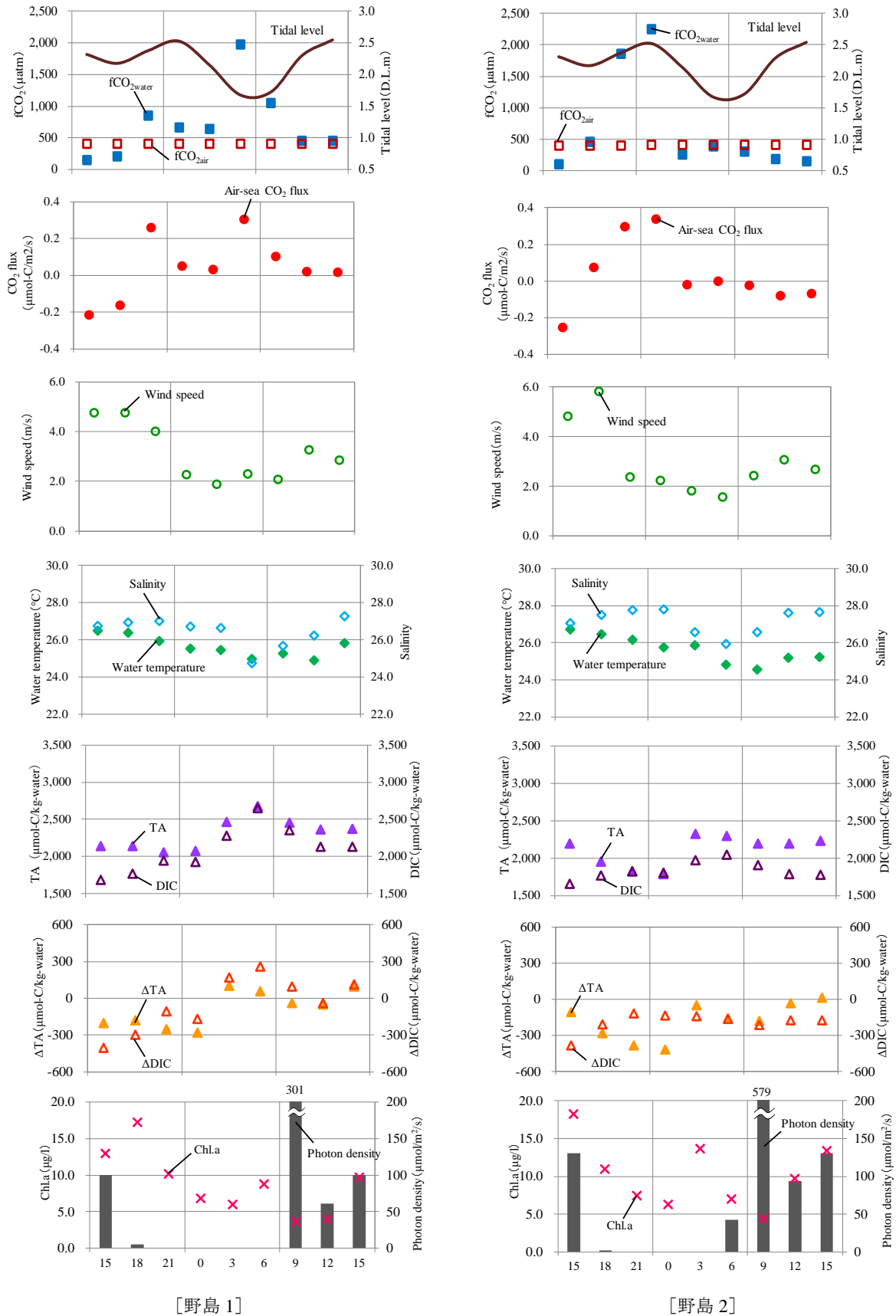
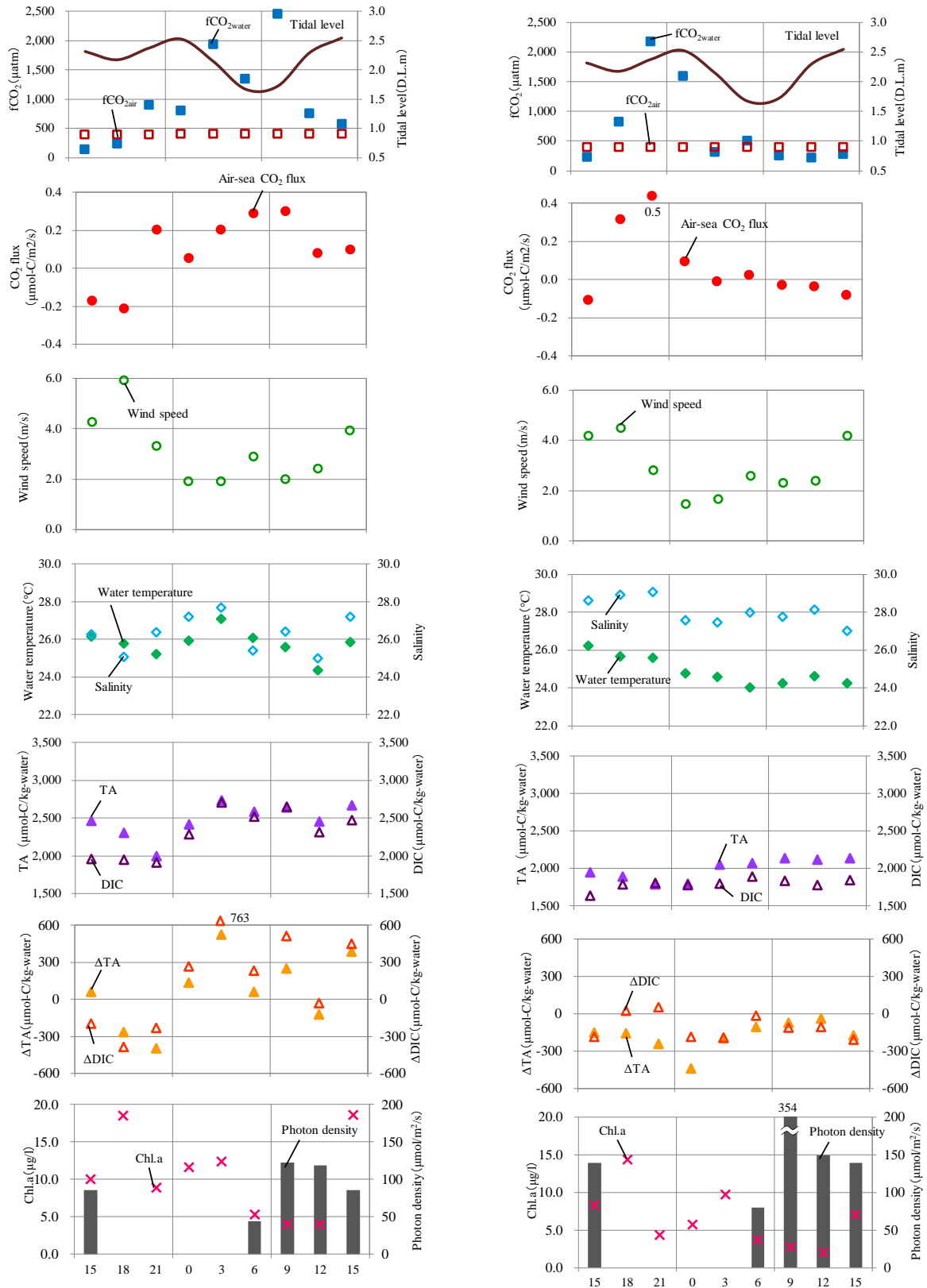


図-3.14(1) 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因の連続観測結果【夏季：8/24~25】

縦軸：CO₂ 分圧，潮位，大気-海水間 CO₂ フラックス，風速，水温，塩分，TA，DIC，ΔTA，ΔDIC，Chl.a，光子密度，横軸：時間，白抜き赤点：海水中 CO₂ 分圧，青点，大気中 CO₂ 分圧，茶線：潮位，赤点：大気-海水間 CO₂ フラックス，白抜き緑点：風速，緑点：水温，白抜き青点：塩分，紫点：TA，白抜き紫点：DIC，橙点：ΔTA，白抜き橙点：ΔDIC，赤点：Chl.a，黒棒線：光子密度



[野島 3]

[野島 4]

図-3.14(2) 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因の連続観測結果【夏季：8/24~25】

縦軸：CO₂分圧，潮位，大気-海水間 CO₂ フラックス，風速，水温，塩分，TA，DIC，ΔTA，ΔDIC，Chl.a，光子量子密度，横軸：時間，白抜き赤点：海水中 CO₂ 分圧，青点，大気中 CO₂ 分圧，茶線：潮位，赤点：大気-海水間 CO₂ フラックス，白抜き緑点：風速，緑点：水温，白抜き青点：塩分，紫点：TA，白抜き紫点：DIC，橙点：ΔTA，白抜き橙点：ΔDIC，赤点：Chl.a，黒棒線：光子量子密度

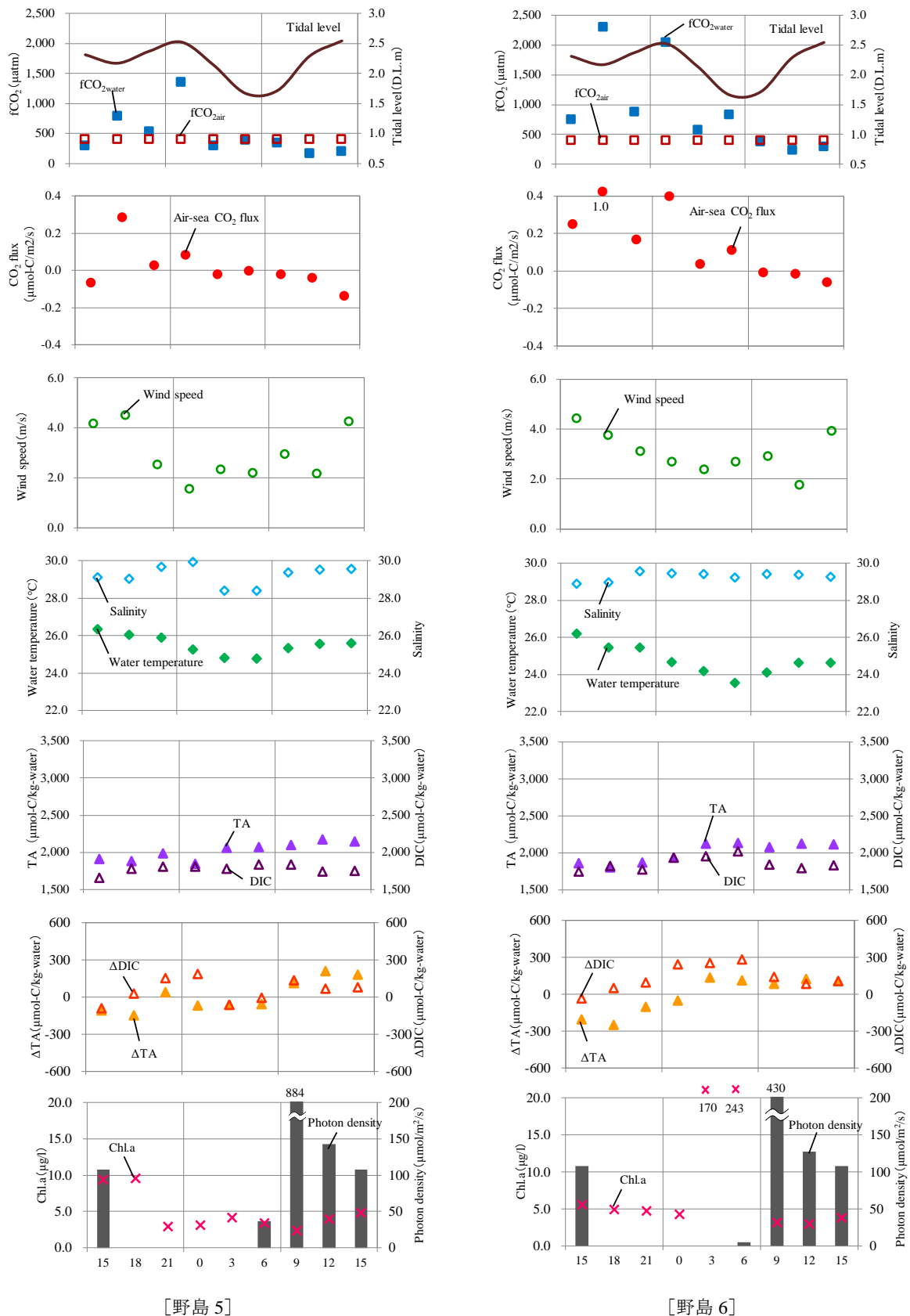


図-3.14(3) 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因の連続観測結果【夏季：8/24~25】

縦軸：CO₂ 分圧，潮位，大気-海水間 CO₂ フラックス，風速，水温，塩分，TA，DIC，ΔTA，ΔDIC，Chl.a，光量子密度，横軸：時間，白抜き赤点：海水中 CO₂ 分圧，青点，大気中 CO₂ 分圧，茶線：潮位，赤点：大気-海水間 CO₂ フラックス，白抜き緑点：風速，緑点：水温，白抜き青点：塩分，紫点：TA，白抜き紫点：DIC，橙点：ΔTA，白抜き橙点：ΔDIC，赤点：Chl.a，黒棒線：光量子密度

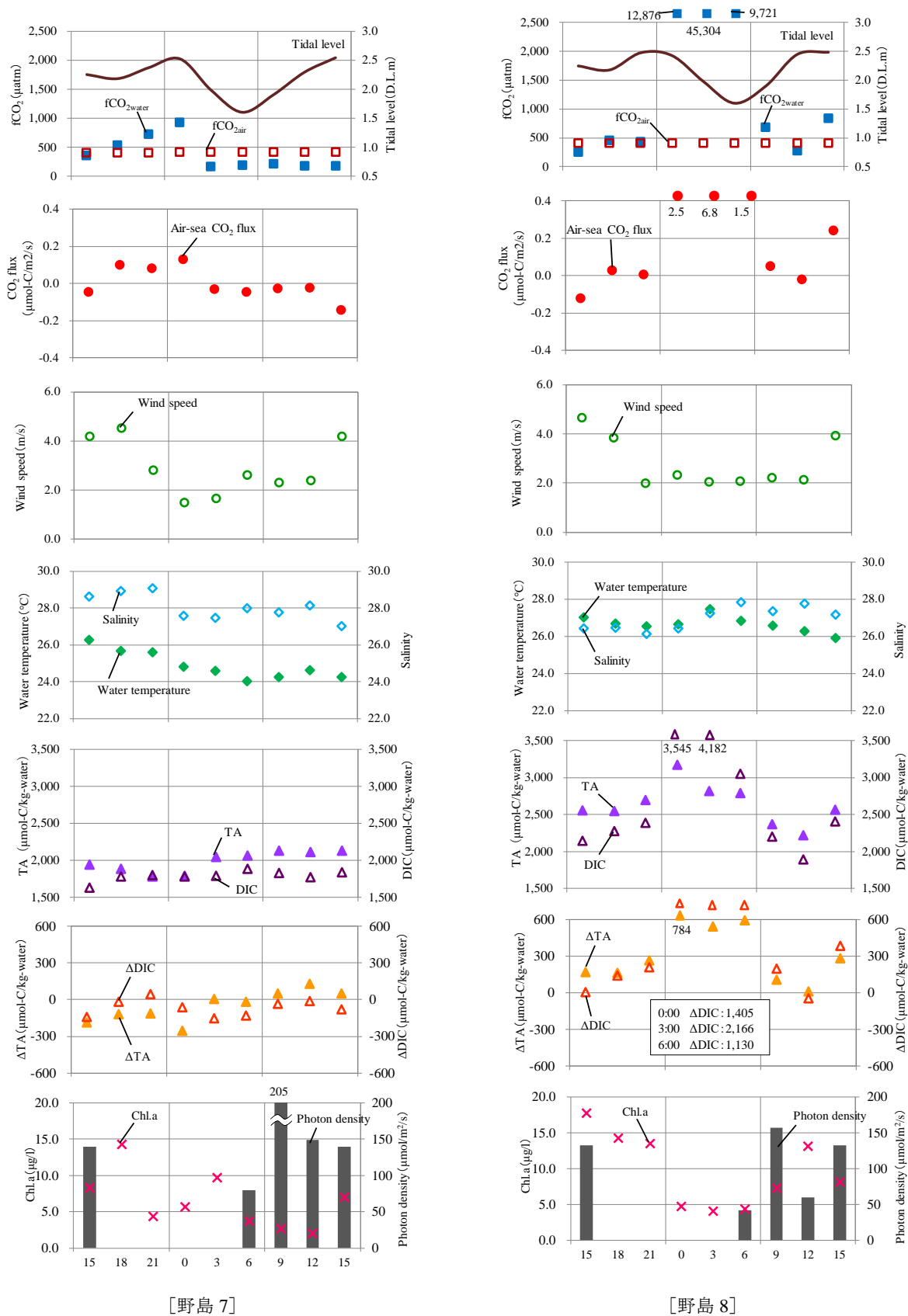
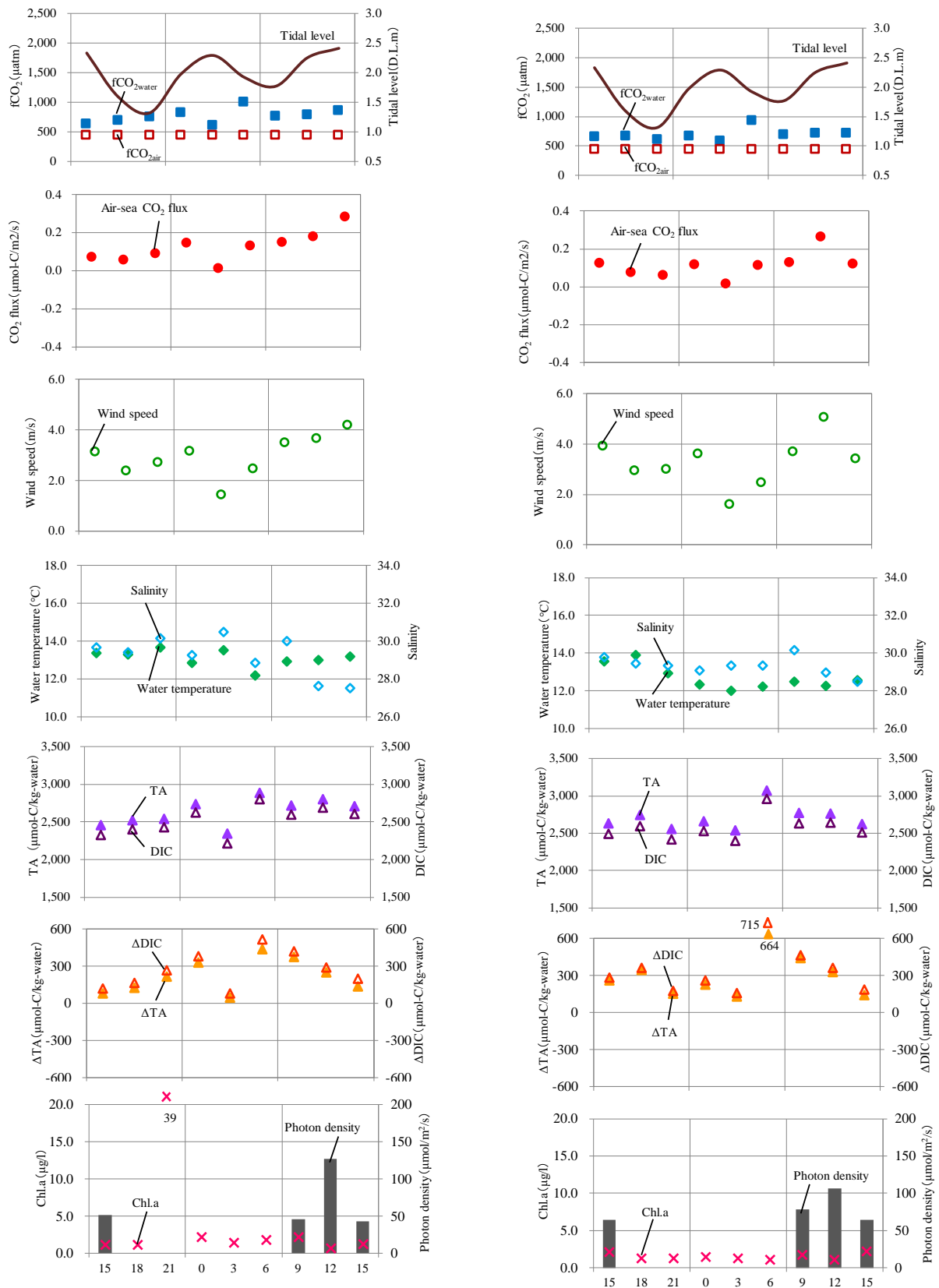


図-3.14(4) 大気-海水間 CO₂フラックスと各環境要因の連続観測結果【夏季：8/24~25】

縦軸：CO₂分圧，潮位，大気-海水間 CO₂フラックス，風速，水温，塩分，TA，DIC，ΔTA，ΔDIC，Chl.a，光子密度，横軸：時間，白抜き赤点：海水中 CO₂分圧，青点，大気中 CO₂分圧，茶線：潮位，赤点：大気-海水間 CO₂フラックス，白抜き緑点：風速，緑点：水温，白抜き青点：塩分，紫点：TA，白抜き紫点：DIC，オレンジ点：ΔTA，白抜きオレンジ点：ΔDIC，赤点：Chl.a，黒棒線：光子密度



[野島 1]

[野島 2]

図-3. 15(1) 大気-海水間 CO₂フラックスと各環境要因の連続観測結果【冬季：12/21～22】

縦軸：CO₂分圧，潮位，大気-海水間 CO₂フラックス，風速，水温，塩分，TA，DIC，ΔTA，ΔDIC，Chl.a，光子密度，横軸：時間，白抜き赤点：海水中 CO₂分圧，青点，大気中 CO₂分圧，茶線：潮位，赤点：大気-海水間 CO₂フラックス，白抜き緑点：風速，緑点：水温，白抜き青点：塩分，紫点：TA，白抜き紫点：DIC，橙点：ΔTA，白抜き橙点：ΔDIC，赤点：Chl.a，黒棒線：光子密度

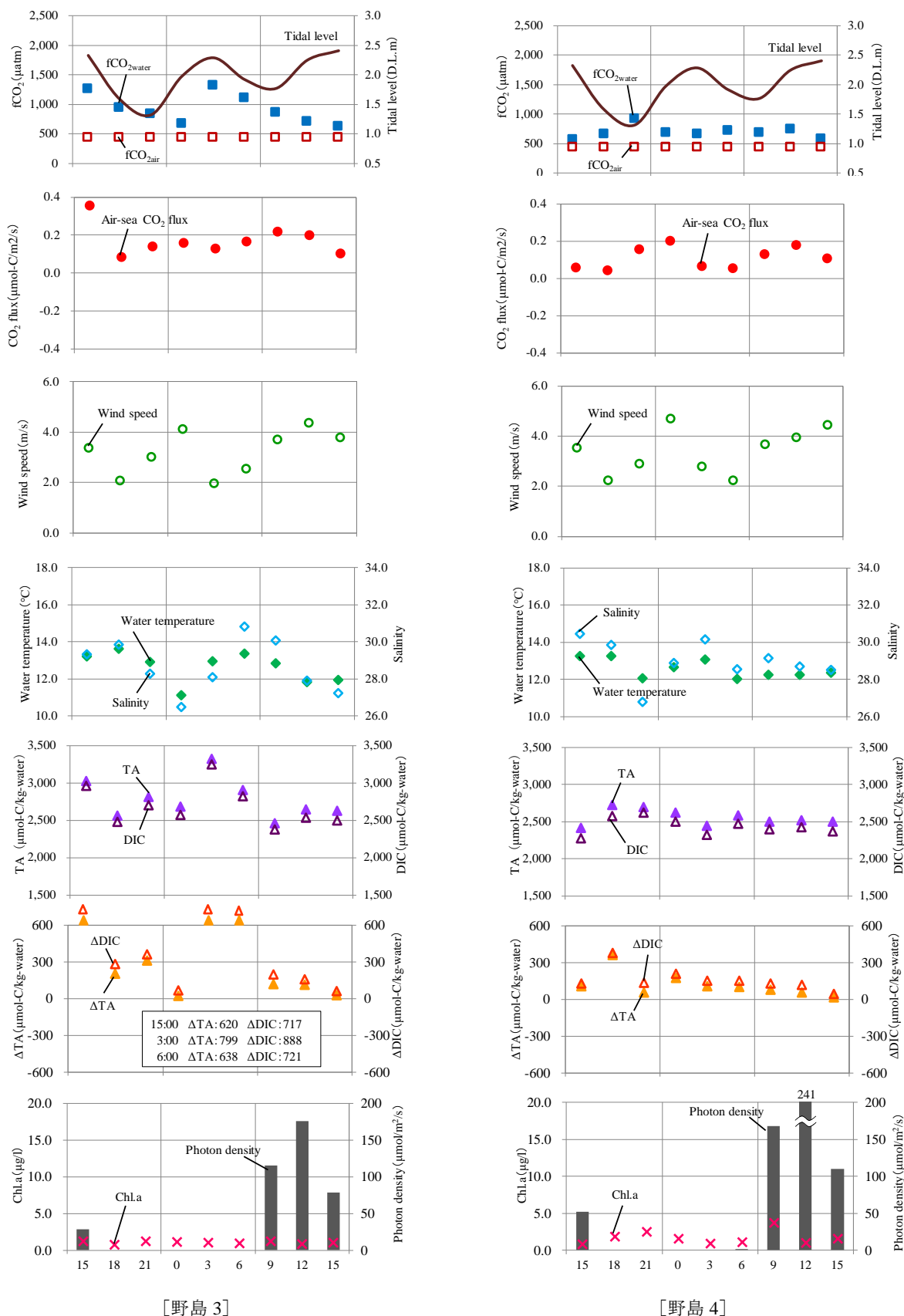


図-3.15(2) 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因の連続観測結果【冬季: 12/21~22】
 縦軸: CO₂分圧, 潮位, 大気-海水間 CO₂フラックス, 風速, 水温, 塩分, TA, DIC, ΔTA, ΔDIC, Chl.a, 光子量子密度, 横軸: 時間, 白抜き赤点: 海水中 CO₂分圧, 青点, 大気中 CO₂分圧, 茶線: 潮位, 赤点: 大気-海水間 CO₂ フラックス, 白抜き緑点: 風速, 緑点: 水温, 白抜き青点: 塩分, 紫点: TA, 白抜き紫点: DIC, 橙点: ΔTA, 白抜き橙点: ΔDIC, 赤点: Chl.a, 黒棒線: 光子量子密度

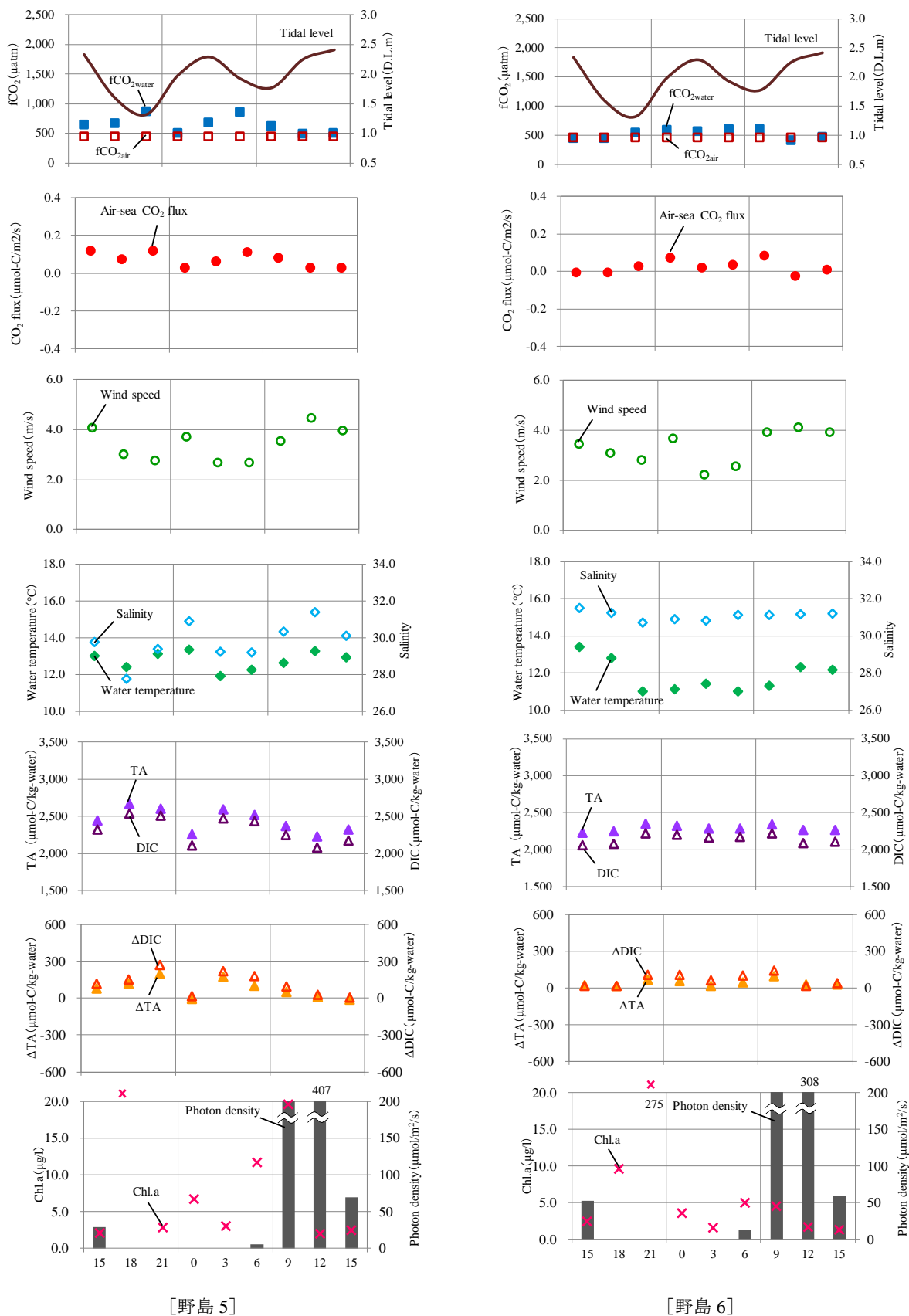


図-3.15(3) 大気-海水間 CO₂フラックスと各環境要因の連続観測結果【冬季：12/21~22】

縦軸：CO₂分圧，潮位，大気-海水間 CO₂フラックス，風速，水温，塩分，TA，DIC，ΔTA，ΔDIC，Chl.a，光量子密度，横軸：時間，白抜き赤点：海水中 CO₂分圧，青点，大気中 CO₂分圧，茶線：潮位，赤点：大気-海水間 CO₂フラックス，白抜き緑点：風速，緑点：水温，白抜き青点：塩分，紫点：TA，白抜き紫点：DIC，橙点：ΔTA，白抜き橙点：ΔDIC，赤点：Chl.a，黒棒線：光量子密度

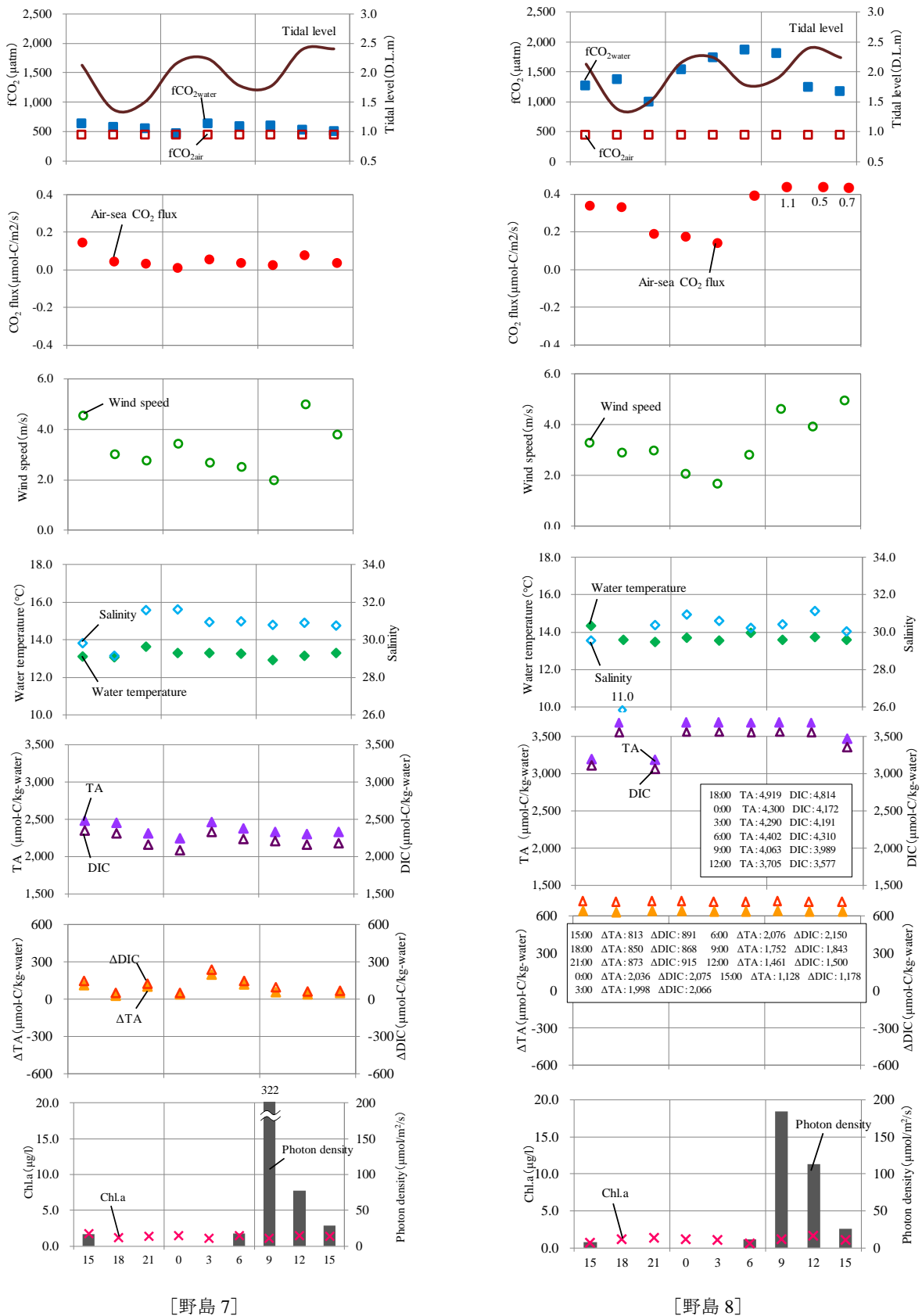


図-3.15(4) 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因の連続観測結果【冬季: 12/21~22】

縦軸: CO₂分圧, 潮位, 大気-海水間 CO₂ フラックス, 風速, 水温, 塩分, TA, DIC, ΔTA, ΔDIC, Chl.a, 光量子密度, 横軸: 時間, 白抜き赤点: 海水中 CO₂ 分圧, 青点, 大気中 CO₂ 分圧, 茶線: 潮位, 赤点: 大気-海水間 CO₂ フラックス, 白抜き緑点: 風速, 緑点: 水温, 白抜き青点: 塩分, 紫点: TA, 白抜き紫点: DIC, 橙点: ΔTA, 白抜き橙点: ΔDIC, 赤点: Chl.a, 黒棒線: 光量子密度

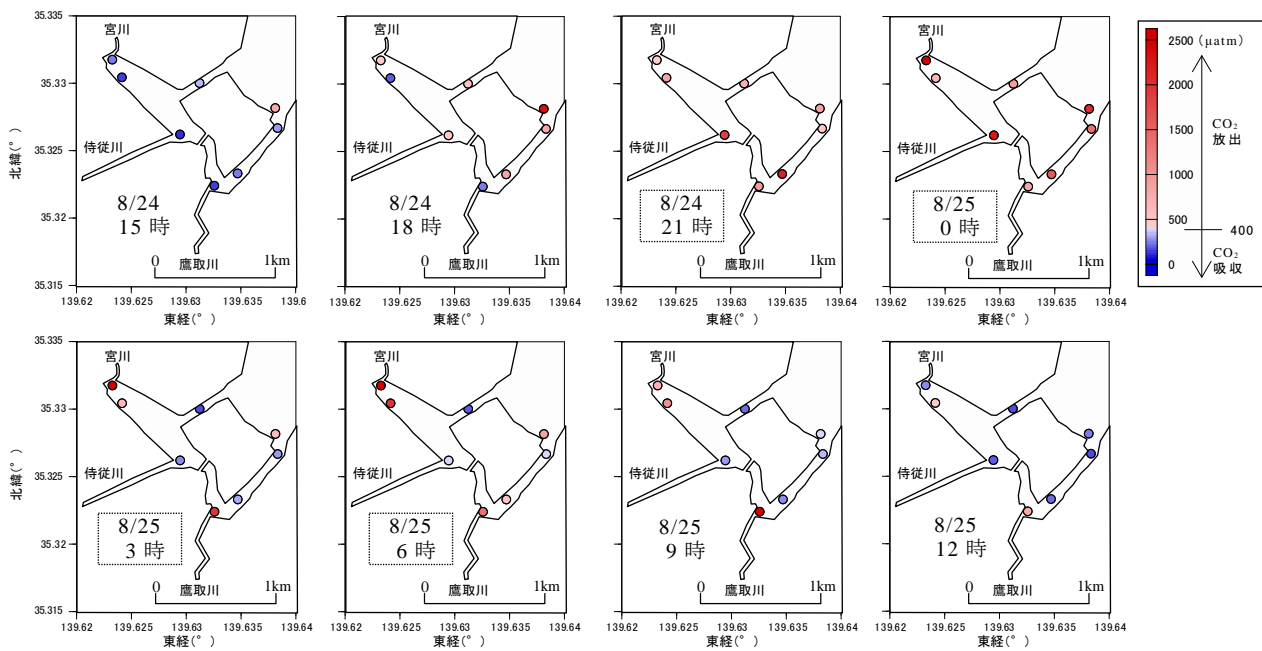


図-3.16 平潟湾内における海水中 CO₂分圧の時空間分布の日周変化 (8/24:15時～8/25:12時)

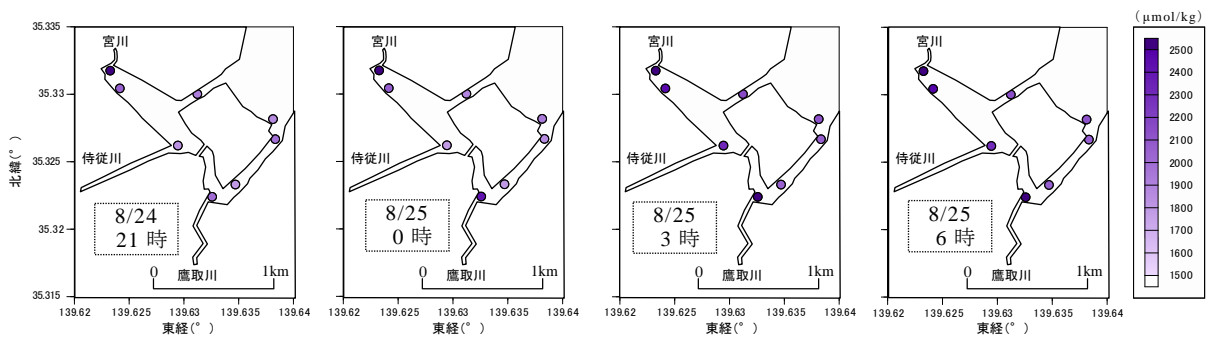


図-3.17 平潟湾内における TA の時空間分布の日周変化 (8/24:21時～8/25:6時のみ抽出)

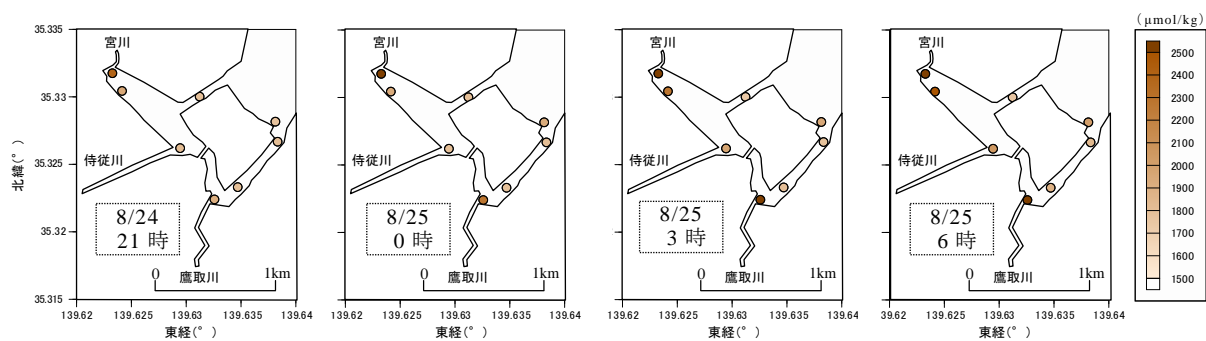


図-3.18 平潟湾内における DIC の時空間分布の日周変化 (8/24:21時～8/25:6時のみ抽出)

3.5 石垣島名蔵湾における連続観測

(1) 観測概要

a) 観測場所

本観測水域は、亜熱帯に位置する潟湖干潟であり、陸域負荷と生物活動の影響の両方が捉えやすい閉鎖的な場であることを理由に、名蔵アンパル（北緯24°23'49"，東経124°08'35"）を選定した。

沖縄県石垣島の南西部に位置するアンパル干潟は南北に約1km，東西に約0.5kmの長さがあり，東からは名蔵川が注ぎこみ，北西部には名蔵湾に通じる出口がある。周囲はマングローブと海岸林に覆われ，カニ類をはじめとし

た多様性に富んだ豊かな生態系が保持されている。一方で近年の名蔵川流域では，戦後の畑地への土地利用転換が進んだため干潟へ赤土が流出し，特に名蔵河口部の両側では赤土堆積の進行が顕著にみられ，周囲に比べて標高が高くなっている。こうした地形変化による干潟内流動の変化に伴って浮遊性の有機物の輸送・着床特性が変化しており，生物相に及ぼす影響が危惧されている。

これらの湖内環境を勘案し，多変量解析に適した幅広い環境データを測定・収集するために，観測地点は湾内に流入する河川（名蔵川等），名蔵アンパル，名蔵湾を繋ぐ境界部に設定した（図-3.19，表-3.4参照）。

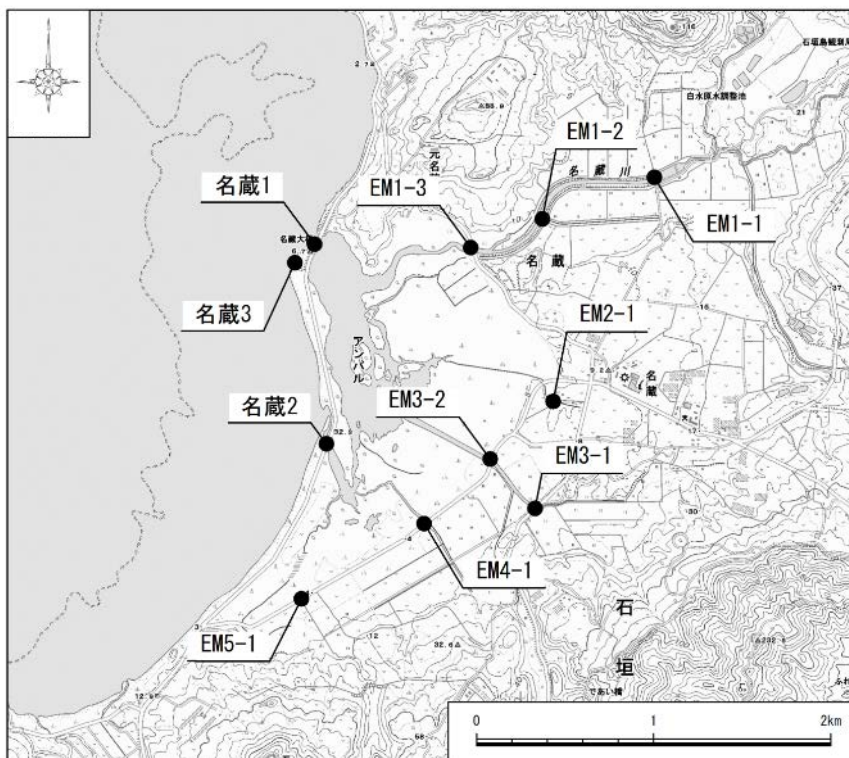


図-3.19 観測位置

表-3.4 観測地点

区分	地点 No.	地点箇所
名蔵アンパル	名蔵 1	北側河口
	名蔵 2	南側河口
名蔵湾	名蔵 3	湾内
流入河川 (名蔵川等)	EM1-1	名蔵川 (上流)
	EM1-2	名蔵川 (中流)
	EM1-3	名蔵川 (下流)
	EM2-1	流入支川 (上流)
	EM3-1	流入支川 (上流)
	EM3-2	流入支川 (中流)
	EM4-1	流入支川 (上流)
EM5-1	流入支川 (上流)	

b) 観測時期・項目・分析方法

観測時期は、2015年7月(名蔵1~名蔵2で1時間毎の移動連続観測, 河川・外海水は観測期間中1回)とし, 気象, 水質データ等を測定・収集した。観測項目は, 風速, 水温, 塩分, 全アルカリ度 (TA), 溶存無機炭素濃度 (DIC), 光量子密度, クロロフィルa (Chl.a), 海水中CO₂分圧 (fCO_{2water}), 大気中CO₂分圧 (fCO_{2air})とした。風速は気象庁 石垣測候所の観測データを用い, 水平成分の高度補正を行った。水温と塩分は水温・塩分計 (Compact-CT, JFEアドバンテック社製), 光量子密度は照度計 (MDS-MkV/L, JFEアドバンテック社製), クロロフィルaはクロロフィル濁度計 (Compact-CLW, JFEアドバンテック社製)を用いて測定した。TA, DIC測定用サンプルは250mlのSchott Duran瓶で採取され, 200μlの塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定した。これらは, フロースルー型の炭酸系分析装置 (MDO-02, 紀本電子社製⁴³), もしくはパッチ型分析装置 (ATT-05, 紀本電子製)を用いて測定した。大気中CO₂分圧は国立環境研究所の波照間ステーション

のデータを用い, 海水中CO₂分圧は炭酸系の化学的平衡関係 (DIC, TA) による間接的な計算方法⁵³)で算出した。

観測時期及びサンプル数等は, 表-3.5に示すとおりである。

c) 大気-海水間CO₂フラックスの測定手法

大気-海水間CO₂フラックスは, バルク法 (2.2参照)を用いて算出した。

d) ΔDIC, ΔTAの算出方法

生物による光合成や呼吸・分解の影響が無い場合, 溶存無機炭素濃度 (DIC) は境界地点濃度 (河川水と外海水)の単純な混合割合から決定される。このため, 実際の採水サンプルから得られたDICから塩分の内挿値 (河川境界地点と外海境界地点のデータを結んだ線)を減じた値を生物過程による炭素増減量ΔDIC (μmol-C/kg-water)と見なすことができる。この生物による呼吸・分解及び光合成に起因する炭素増減量は, 正の場合は従属栄養的な環境 (呼

表-3.5 観測時期・サンプル数等

		7月28日~30日	
		サンプル数	サンプル頻度
名蔵アンパル	名蔵1	25	1時間間隔
	名蔵2	25	
名蔵湾	名蔵3	1	
流入河川 (名蔵川等)	EM1-1	1	
	EM1-2	1	
	EM1-3	1	
	EM2-1	1	
	EM3-1	1	
	EM3-2	1	
	EM4-1	1	
	EM5-1	1	
合計		59 サンプル	

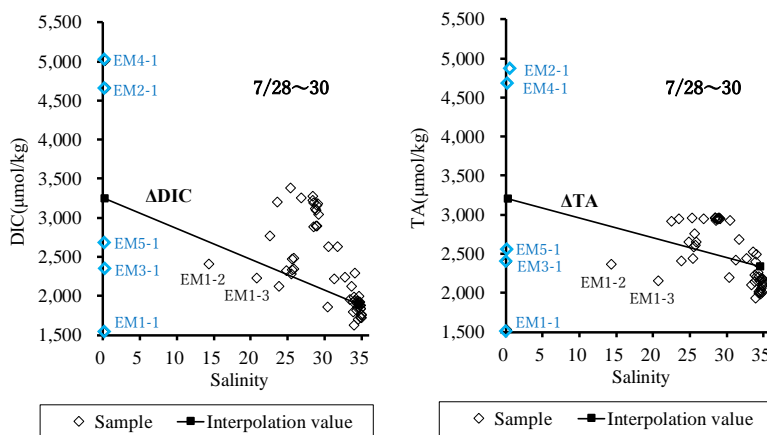


図-3.20 ΔDIC, ΔTAの算出結果【夏季】。縦軸: DIC, 横軸: 塩分, 白抜き黒点: 採水サンプル, 黒点: 境界地点, 白抜き水色点: 河川側境界地点, 黒線: DICと塩分の内挿値

吸・分解活動>光合成活動), 負の場合は独立栄養的な環境(光合成活動>呼吸・分解活動)を意味する。

また, 全アルカリ度(TA)も同様に石灰化等の影響が無い場合, TAは境界地点濃度(河川水と外海水)の単純な混合割合から決定される。実際の採水サンプルから得られたTAから塩分の内挿値(河川境界地点と外海境界地点のデータを結んだ線)を減じた値を石灰化によるアルカリ度増減量 ΔTA ($\mu\text{mol-C/kg-water}$)と見なすことができる。この石灰化等に起因するアルカリ度増減量は, 正の場合は炭酸カルシウム(CaCO_3)の溶解, 負の値は CaCO_3 の析出を意味している。

この ΔDIC , ΔTA の算出結果は, 図-3.20に示すとおりである。

(2) 観測結果

a) 夏季

夏季の観測結果(名蔵1~名蔵2で1時間毎の移動連続観測)は, 図-3.21に示すとおりである。海水中 CO_2 分圧は $3,033 \pm 1,243 \mu\text{atm}$, 大気中 CO_2 分圧は $399.6 \pm 0.0 \mu\text{atm}$, 大気-海水間 CO_2 フラックスは $1.88 \pm 0.98 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ となり, 概ね海水から大気へ放出傾向にあった。また, 水温と塩分について, 高水温($32.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$)と高塩分(30.9 ± 1.1)の環境にあった。TA ($2,479 \pm 102 \mu\text{mol/kg}$)とDIC ($2,341 \pm 153 \mu\text{mol/kg}$)は, ややTAの方が高かったが同様な変動傾向を示し, ΔTA ($47.0 \pm 83.1 \mu\text{mol/kg}$)と ΔDIC ($301.5 \pm 125.9 \mu\text{mol/kg}$)はともに変動幅が大きかった。また, 風速 ($4.5 \pm 0.2 \text{ m/s}$), クロロフィル*a* ($1.2 \pm 0.2 \mu\text{g/l}$), 光量子密度 ($242 \pm 135 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)も日周期変動が確認された。

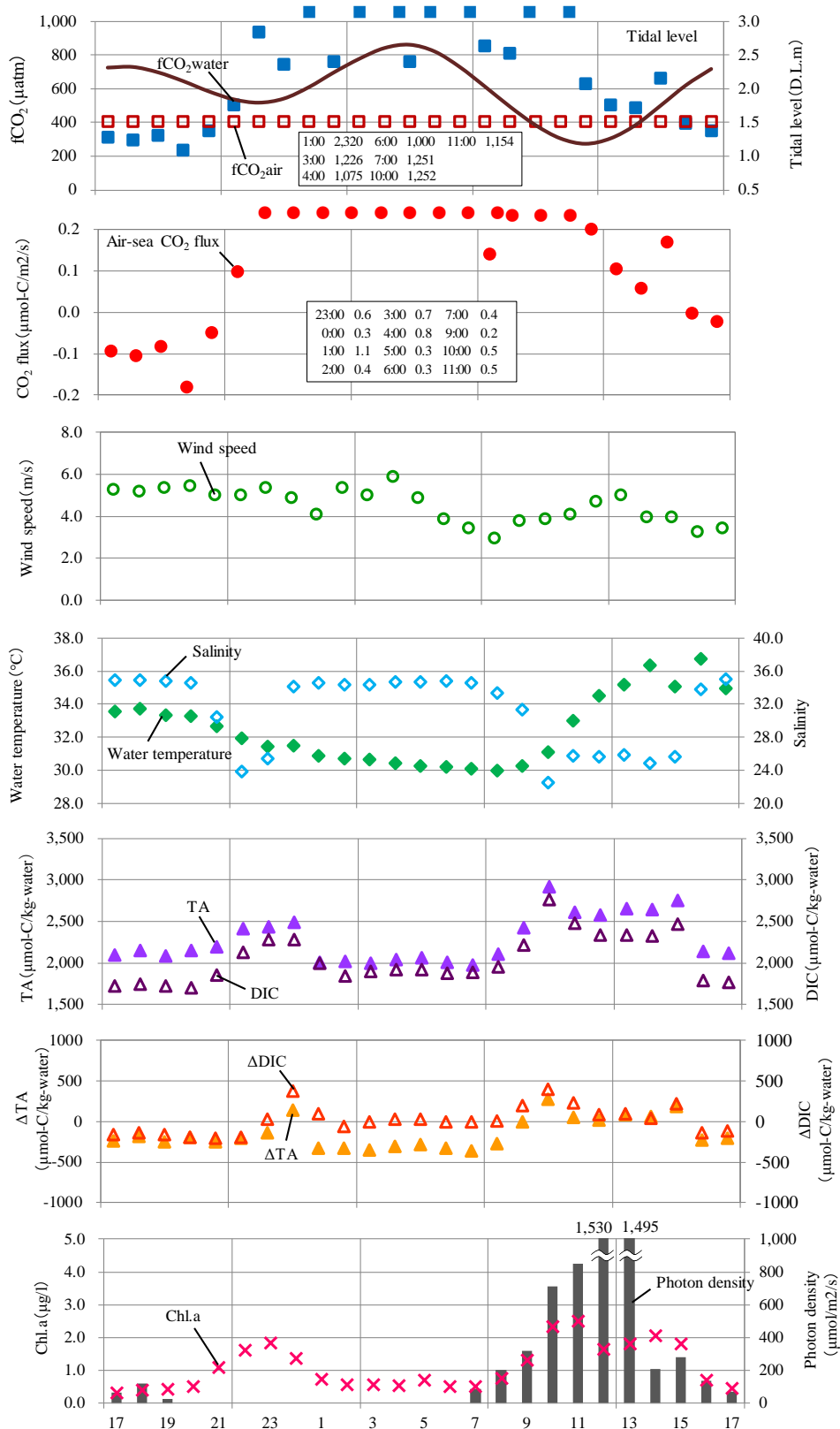


図-3.21(1) 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因の連続観測結果 (名蔵 1) 【夏季: 7/28~29】
 縦軸: CO₂分圧, 潮位, 大気-海水間 CO₂ フラックス, 風速, 水温, 塩分, TA, DIC, ΔTA, ΔDIC, Chl.a, 光量子密度, 横軸: 時間, 白抜き赤点: 海水中 CO₂ 分圧, 青点, 大気中 CO₂ 分圧, 茶線: 潮位, 赤点: 大気-海水間 CO₂ フラックス, 白抜き緑点: 風速, 緑点: 水温, 白抜き青点: 塩分, 紫点: TA, 白抜き紫点: DIC, 橙点: ΔTA, 白抜き橙点: ΔDIC, 赤点: Chl.a, 黒棒線: 光量子密度

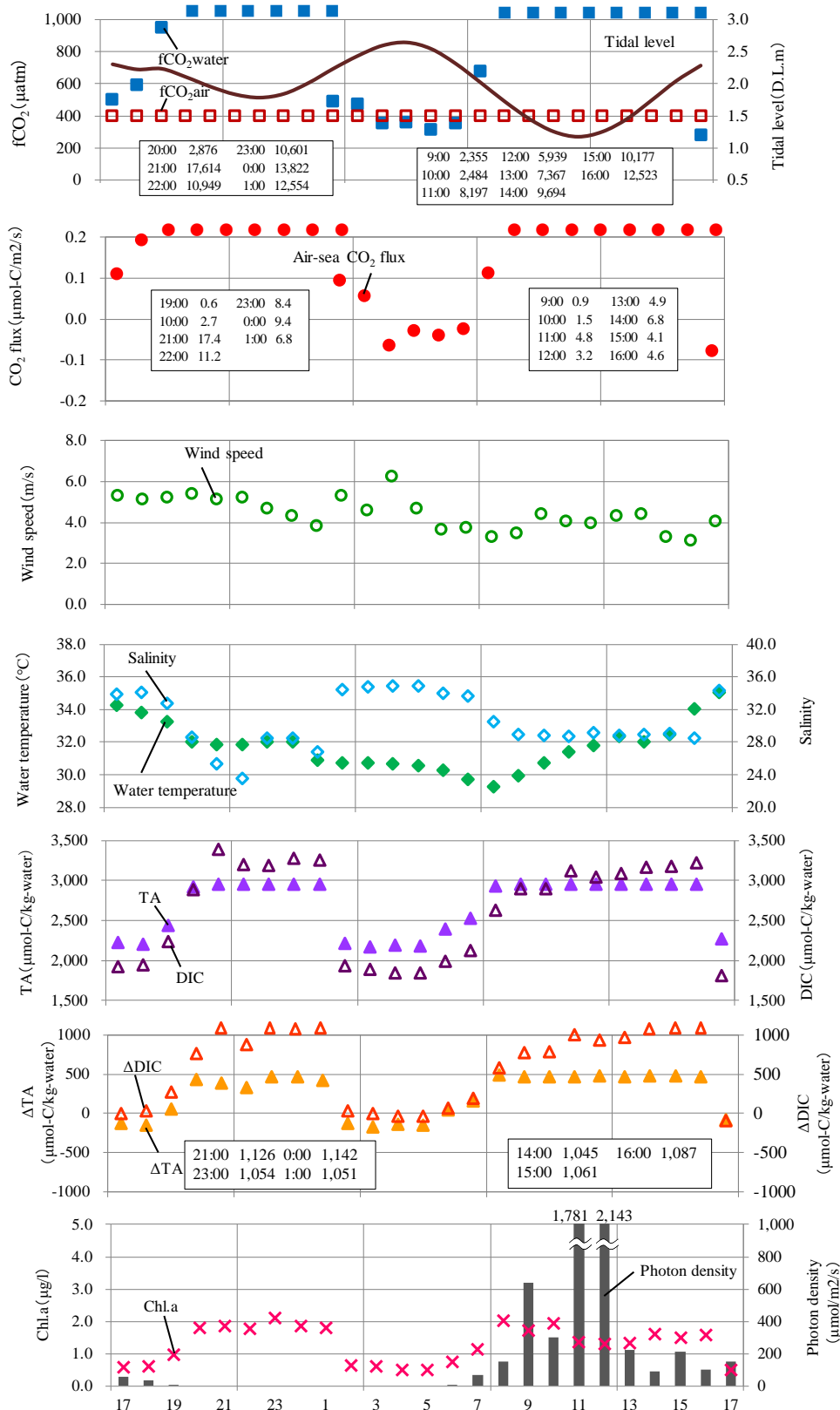


図-3.21 (2) 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因の連続観測結果 (名蔵 2) 【夏季: 7/28~29】
 縦軸: CO₂ 分圧, 潮位, 大気-海水間 CO₂ フラックス, 風速, 水温, 塩分, TA, DIC, ΔTA, ΔDIC, Chl.a, 光量子密度, 横軸: 時間, 白抜き赤点: 海水中 CO₂ 分圧, 青点, 大気中 CO₂ 分圧, 茶線: 潮位, 赤点: 大気-海水間 CO₂ フラックス, 白抜き緑点: 風速, 緑点: 水温, 白抜き青点: 塩分, 紫点: TA, 白抜き紫点: DIC, 橙点: ΔTA, 白抜き橙点: ΔDIC, 赤点: Chl.a, 黒棒線: 光量子密度

3.6 統計解析

計測手法の検討において、各手法の特徴の整理を行ったが、どの手法も一長一短があるため、データの活用を図るためには、単純化・汎用性の向上を目指した統計解析の利用が不可欠となる。

また、大気-海水間 CO₂ フラックスの動態は、物理過程・化学過程・生物過程の全てを含んでおり、非線形で複数の相互作用を伴っていることから、統計論的モデル (Stochastic Model) を用いた検討が必要となる。

北海道風蓮湖 (広域・連続データ)、北海道コムケ湖 (広域データ)、東京湾走水海岸 (連続データ)、横浜平潟湾：野島干潟について、データ採取地点ごとの統計解析を行った。

統計解析は、R 3.1.2⁵⁷⁾又は IBM SPSS Amos 22.0.0 のソフトウェアを使用した。

(1) 解析手法

a) パス解析

大気-海水間 CO₂ フラックスに影響を与える要因とその影響度の検討を行った。パス解析は、各変数に与える因果関係の強さを示しており、大気-海水間 CO₂ フラックスに対し、プラスの影響は海水から大気への CO₂ の放出、マイナスの影響は大気から海水への CO₂ の吸収を表している。

b) 一般線形モデル (GLM)

現地で得られた測定データについて、統計学的な解析手順を検討し、最終的に予測式を構築するという一連の統計論的モデルの予測手法を提案した。

(2) 北海道風蓮湖 (広域・連続データ)

a) 相関係数

大気-海水間のCO₂フラックスと各環境要因 (風速、水温、塩分、TA、DIC、生物過程による炭素増減量) の相関関係を把握するために、単相関、偏相関、重相関の関係について整理・解析を行った。各相関係数は表-3.6に示すとおりである。

i) 単相関係数

単相関係数は、単純に2変数の相関関係を見る際に用いられる。このため、2変数以外の要因の影響も内包されており、見かけ上の相関となる。大気-海水間CO₂フラックスとの単相関について、相関が高かった環境要因は、風速と生物過程による炭素増減量であった。これは時系列変化の結果においても、同様な変動をしており、見かけ上の

表-3.6 相関係数

	大気-海水間 CO ₂ フラックス	風速	水温	塩分	TA	DIC	生物過程による 炭素増減量
大気-海水間 CO ₂ フラックス	0.69**	-0.59**	-0.37**	0.17*	0.11	0.32**	0.53**
風速	-0.41**	0.72**	0.46**	-0.38**	-0.31**	-0.50**	-0.57**
水温	0.13	0.24**	0.75**	-0.14	0.07	-0.22**	-0.58**
塩分	-0.15	0.00	-0.14	0.94**	0.88**	0.90**	0.34**
TA	-0.30**	-0.06	0.48**	-0.12	0.98**	0.92**	0.26**
DIC	0.30**	-0.01	-0.31**	0.53**	0.89**	0.99**	0.57**
生物過程による 炭素増減量	-0.07	-0.08	-0.03	-0.44**	-0.65**	0.78**	0.90**

注1) 上三角行列 単相関係数 下三角行列 偏相関係数 対角成分 重相関係数を示している。
注2) *はp<0.05有意水準、**はp<0.01有意水準を示している。

相関は高いことがうかがえる。

ii) 偏相関係数

偏相関係数は、複数の要因が相互に関連している時、特定の2変数間の関係を、他の要因の影響を除去して評価するために用いられるものである。大気-海水間CO₂フラックスと各環境要因の偏相関について、風速は単相関と同様に高かったが、次にTAとDICの相関が高くなった。これらの環境要因は、直接的にCO₂フラックスに影響を及ぼしていることが予想される。

iii) 重相関係数

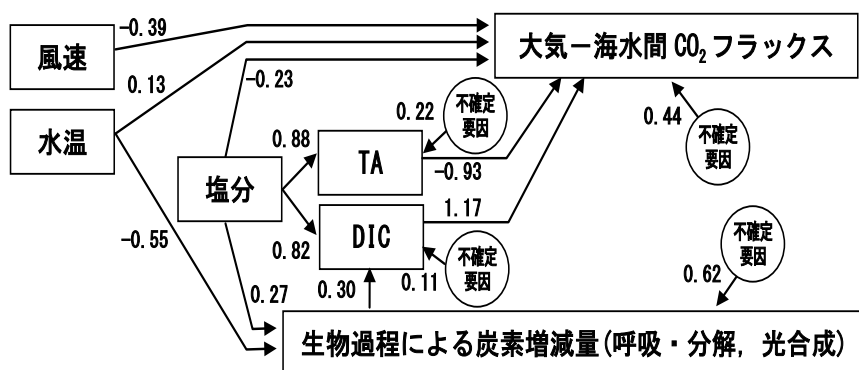
重相関係数とは、ある変数を残りの変数で予測しようとする時、その説明率を表す係数である。重相関係数が特に高かった項目は、TAとDICであった。これらの項目は、他の変数によって殆ど説明できることがわかった。

b) パス解析

i) パス解析結果

大気-海水間のCO₂フラックスに影響を及ぼす環境要因を検討するため、パス解析を試みた (図-3.22参照)。パス係数は、各変数に与える影響の大きさと因果関係を示しており、大気-海水間のCO₂フラックスに対し、プラスの影響は海水から大気へCO₂の放出、マイナスの影響は大気から海水へのCO₂の吸収を表している。

パス解析の結果、大気-海水間CO₂フラックスに対する影響度が大きい環境要因はTAとDICであり、TAは負のパス係数 (-0.93)、DICは正のパス係数 (1.17) であった。この2つの要因は、塩分と正のパス係数 (0.88, 0.82) の関係にあった。一方、風速は大気-海水間CO₂フラックスに対し負の影響 (-0.39) となった。また、水温、塩分の直接的な影響は、0.13、-0.23であり、それら自体がCO₂フラックスに与える影響は大きくなかった。



注) 図中の数値はパス係数 (標準化係) 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-3.22 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因のパス解析結果

ii) 炭酸系イオンに関する考察

水中の溶存CO₂濃度の変動は, 陸域からの炭素流入や生物活動の他に, 平衡状態にある炭酸水素イオン (HCO₃⁻) と炭酸イオン (CO₃²⁻) による緩衝作用の影響を受けやすい. 大気-海水間CO₂フラックスに対する影響が大きかったDICとTAは, これらの炭酸系イオンと関係している. DICとTAの化学式は, 式(3), (4)に示すとおり, 水中CO₂濃度, 炭酸水素イオン (HCO₃⁻), 炭酸イオン (CO₃²⁻) 等で表わされる. [X]は, 炭酸水素イオンと炭酸イオン以外のイオン寄与分を示しており, 水酸化イオンや四ホウ酸イオン等の陰イオンと水素イオン等の陽イオンが該当する.

$$DIC = [CO_2] + [HCO_3^-] \quad (3)$$

$$TA = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [X] \quad (4)$$

TAは炭酸平衡系によるCO₂濃度への緩衝力の目安であり, TAが高い海水よりも低い淡水などの条件下では, CO₂濃度の増減が大きくなる傾向を示した. また, DICもTAとほぼ同様の変動を示し, 相関も高かったことから, 本対象水域では水中の炭酸水素イオンと炭酸イオンが多く含まれ, TAやDICの濃度を規定していたことが予想される.

iii) 交換係数・溶解度に関する考察

大気-海水間CO₂フラックスに係る交換係数と溶解度は, 風速, 水温, 塩分を用いて算出される. ここで, 大気-海水間のCO₂フラックスと風速, 水温, 塩分の間を見ると, 直接的な影響は風速が最も大きい. 一方, 塩分はTAやDICを介し, 水温は生物過程による炭素増減量 (呼吸・分解, 光合成) からDICを介し, それぞれ間接的な影響があることがうかがえる.

iv) 生物過程による炭素増減量に関する考察

大気-海水間CO₂フラックスに対する影響が最も大きかったDICは, 生物過程による炭素増減量 (呼吸・分解, 光合成) とやや正のパス係数 (0.30) の関係にあった. この生物過程による炭素増減量は, 水温 (-0.55) や塩分 (0.27) からの影響も受けているが, それ以外の不確定要因 (0.62) が大きかった. これは, 海草の繁茂状況 (植生長さや密度の違いによる光透過率への影響等) や日射量などの諸要因が考えられる.

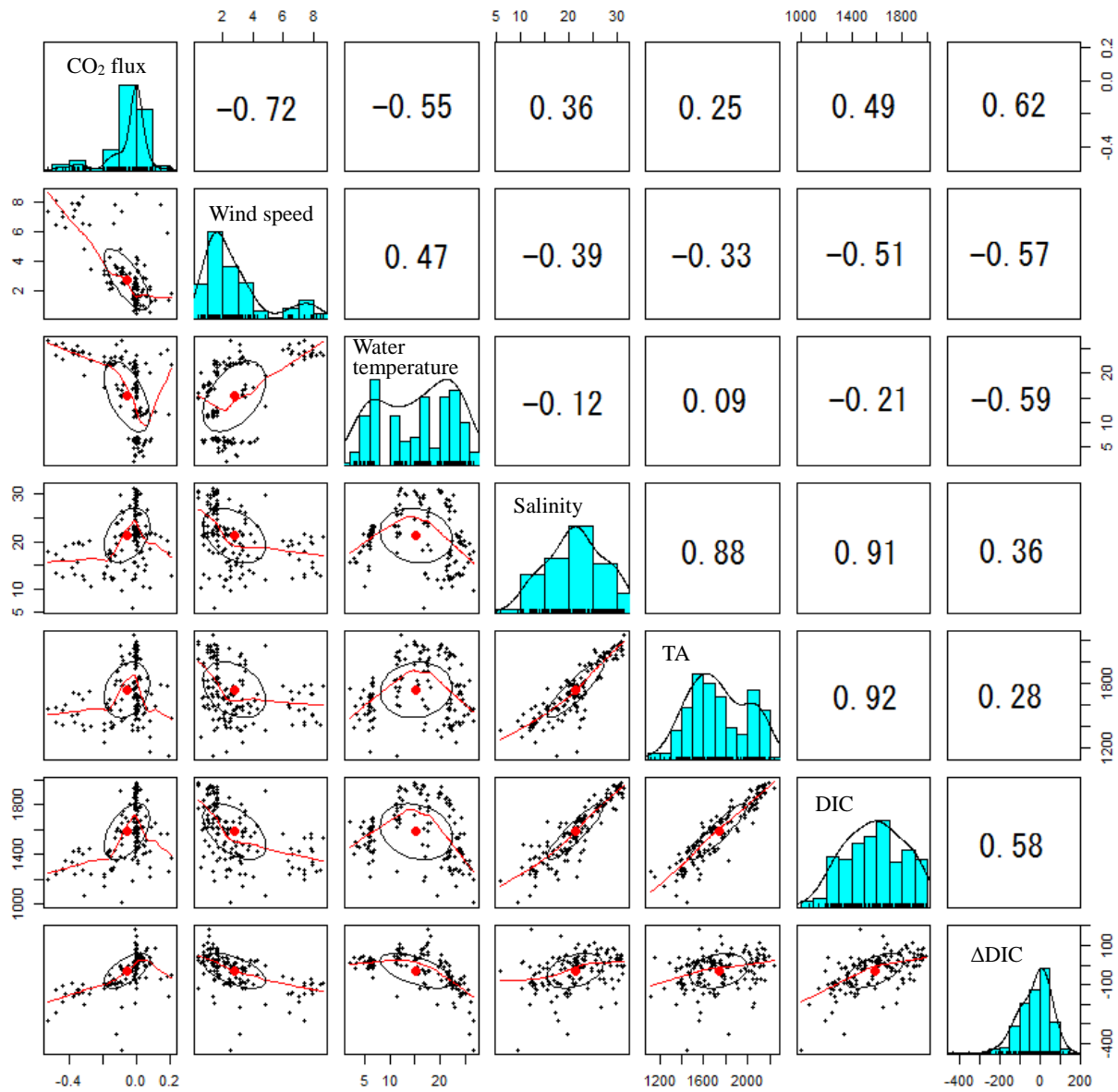
c) データ構造の把握

現地事例のデータ構造を把握するために, 変数間の対散布行列, 樹木モデル, 一般化加法モデルを用いた解析を行った.

i) 散布図行列

用いる変数が2つ以上で, かつ量的データを扱う場合, 全ての変数を組み合わせた散布図行列 (図-3.23 参照) を作成することで, データ間の関係性を視覚的に把握することができる. 各変数のヒストグラムから, 大気-海水間CO₂フラックス (-0.06 ± 0.02 (平均値 ± 95%信頼区間, 以下同じ) μmol/m²/s), 塩分 (21.3 ± 0.9; 本論文では, 塩分は無次元数として表記する), TA (1,734 ± 41 μmol/kg), DIC (1,584 ± 36 μmol/kg), 生物過程 (-28.9 ± 14.0 μmol/kg) は, 概ね単峰性分布となりピークは平均値付近にあった. 一方, 水温 (15.3 ± 1.1 °C) は多峰性分布となり, 季節変動を含めた幅広いサンプリングデータとなった.

次に, 各変数間の相関関係を見ると, 大気-海水間CO₂フラックスに対し, 風速, 水温は負の相関 (-0.72, -0.55), 塩分, TA, DIC, 生物過程は正の相関 (0.36, 0.25, 0.49,



注 1)上三角行列は単相関係数, 下三角行列は対散布図 (赤線: 平滑化曲線, 95%信頼限界楕円とその中心の赤点を含む), 青棒グラフの対角成分はヒストグラム (カーネル確率密度を含む) を示している。

注 2)各変数の単位は, CO₂フラックス(μmol/m²/s), 風速(m/s), 水温 (°C), 塩分(-), TA(μmol/kg), DIC(μmol/kg), ΔDIC (生物過程) (μmol/kg)である。

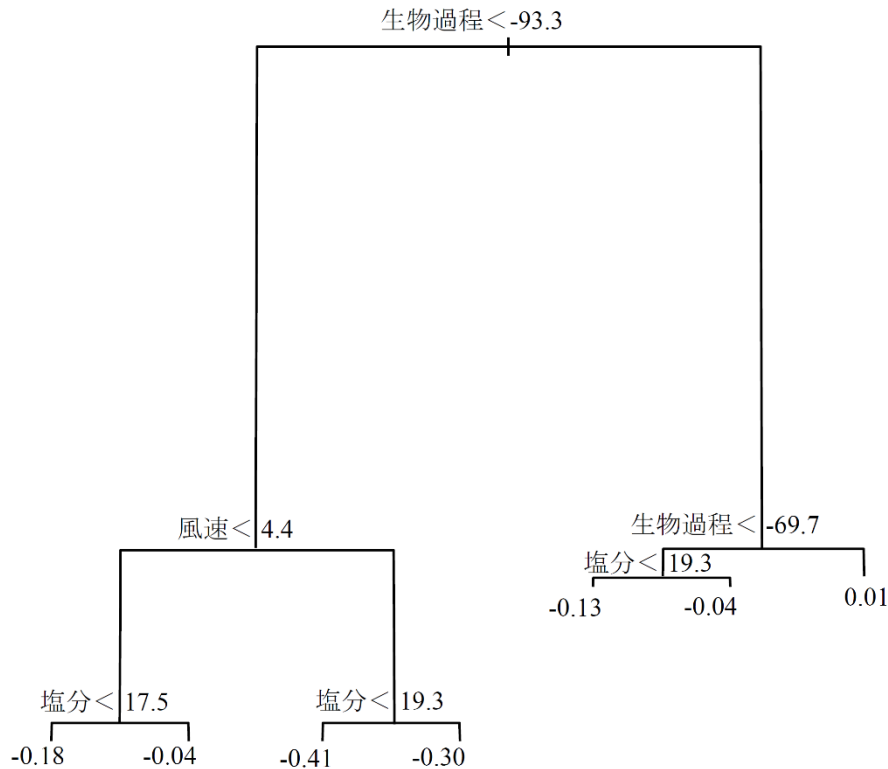
図-3.23 大気-海水間 CO₂フラックスと各環境要因のパス解析結果

0.62)であった。また、塩分、TA、DICの間に強い相関(概ね0.9程度)がみられた。これは、大気-海水間CO₂フラックスを目的変数とした予測モデルの構築では、塩分、TA、DICの多重共線性による影響が予想される。一方で、TAとDICはともに海水中に含まれる炭酸水素イオン(HCO₃⁻)などの影響を受けるため、塩分で概ね説明できると考えられる。このため、ここでTAとDICを説明変数から除

外することとした。

ii) 樹木モデル (Tree model)

大気-海水間CO₂フラックスと各環境要因(生物過程、塩分、水温、風速)との関係性を把握するために、樹木モデル⁵⁸⁾を用いた解析を行った。樹木モデルは、モデルの構築が簡易で頑健な点、説明変数間の交互作用が表現され



注 1) 樹の頂点からスタートし、各ノード（節）で示される各変数の環境条件を満たせば左に、満たさなければ右に進み、最終的にターミナルノード（樹木図の末端は、分類された CO₂ フラックスの各平均値）に到達する。

注 2) 各変数の単位は、CO₂ フラックス(μmol/m²/s)、風速(m/s)、塩分(-)、生物過程(μmol/kg)である。

図-3.24 CO₂ フラックスに対する樹木図

る点、解釈が容易である点などで優れている。樹木の枝（縦線）の長さは、尤離度の減少度合いに比例し、それが長いほどその要因による分離が重要であることを示している。

樹木モデルで解析した結果（図-3.24参照）、最も重要な説明変数は生物過程であり、CO₂ フラックスの各平均値を説明するために、大きく2つに分類する閾値（-93.3 μmol/kg）が設けられた。生物過程が小さくなると（<-93.3 μmol/kg）、風速の有意な影響が次に示され、風速が大きいほど（>4.4 m/s）、CO₂ フラックスの平均値のマイナス傾向が強まった。また、塩分も低くなるほど、CO₂ フラックスの平均値はマイナス傾向となった。なお、生物過程が大きくなると（>-69.7 μmol/kg）、CO₂ フラックスの平均値は0.01 μmol/m²/s となり、ややプラスに転じた。

iii) 一般化加法モデル（GAM）

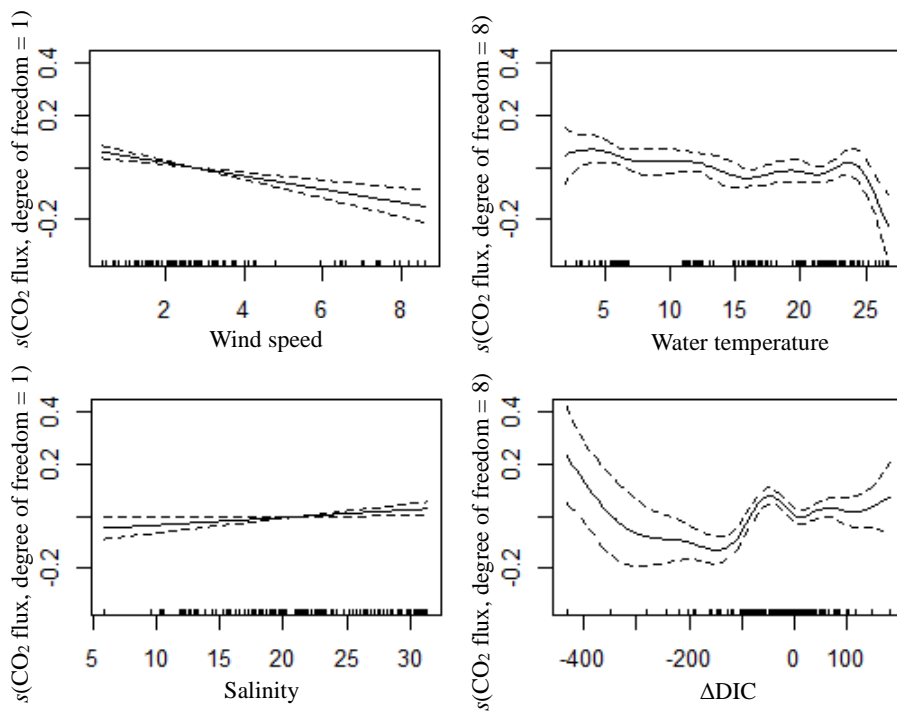
一般化加法モデル（Generalized Additive Model ; GAM）とは、目的変数と説明変数との関係をノンパラメトリックな平滑化関数を用いて表現するモデルである。すなわ

ち、母集団の分布型（例えば、正規分布等）についての仮定を設けずに、平滑化スプラインで表現する手法である。もし、明確な関係性（例えば、曲線等）が見られた場合は、多次元での回帰が可能となる。このため、本解析では目的変数と説明変数の関係性を調べるために、一般化加法モデル（GAM）を用いた検討を行った。

モデル解析の結果（図-3.25参照）、風速と塩分は線形に近い構造と仮定できたが、水温と生物過程（ΔDIC）では非線形性が強い複雑な構造であった。しかしながら、モデル検討では、予測モデルの複雑化を回避するため、全て線形（一般線形モデル）で扱うこととした。

d) 一般線形モデル

データ構造の把握を踏まえ、大気-海水間CO₂ フラックスに及ぼす生物過程、塩分、水温、風速の影響について、一般線形モデル（General Linear Model, family = gaussian, link関数 = identity）を適用し、CO₂ フラックスの予測モデルの構築を試みた。



注1)縦軸はCO₂フラックス，sは平滑化法としてスプライン関数を指定していることを表し，横軸は各環境要因（風速，水温，塩分，生物過程），グラフ内の実線は平滑化スプライン，破線は95%信頼区間を示している。
 注2)各変数の単位は，CO₂フラックス(μmol/m²/s)，風速(m/s)，水温(°C)，塩分(-)，生物過程(μmol/kg)である。

図-3.25 平滑化関数を用いた一般化加法モデルの適用結果

i) 予測モデルの構築

大気-海水間CO₂フラックスを目的変数，生物過程，塩分，水温，風速を説明変数の候補としたモデル選択を行った。モデル選択では，各々の説明変数について全ての組み合わせの16通りについてモデルを作成した。本検討では各要因の単独効果を把握するために，交互作用を含む項は扱わなかった。なお，サンプル数(n=152)とフルモデルにおける説明変数の数(n=4)との比が40未満となったため，赤池情報量基準(AIC)にかかるバイアスを補正したAIC_cを用いた。各モデルに対し，AICの差Δ_iをAIC_i-AIC_{best}，モデルiが最良な予測モデルとして選択される確率をAkaike weight (w_i)として算出した。

これらのモデルの中で，AIC_cが最小となるものが最良となるが，1つのベストモデルでは不確実性を伴うため，推定の偏り(バイアス)が生じる可能性がある。このようなモデル選択による推定の偏りを低減するために，信頼集合(Δ_i<4)を用いた複数モデルによる推定を行った。なお，Δ_i>4のモデルは，真のモデルを近似することが殆ど無いとされている。また，各説明変数の選択確率は，信頼集合において説明変数が含まれているw_iを足し合わせることで求められる。このようなw_iで重み付けされたモデル平均手法を用いて，係数推定とその標準偏差，バイアス

を求めた。

大気-海水間CO₂フラックスに関するモデル推定結果は，生物過程，水温，風速の影響(選択確率:1.00，バイアス:0.1)を強く支持し，塩分(選択確率:0.50，バイアス:0.5)の影響をやや支持した(表-3.7参照)。すなわち，生物過程や塩分の上昇に伴いCO₂フラックスはプラス(水中から大気へ放出)方向，水温と風速の上昇に伴いCO₂フラックスはマイナス(大気から水中へ吸収)方向になることを支持した。これらを踏まえ，大気-海水間CO₂フラックスの予測モデルについて，式(5)のように定式化した。

$$\begin{aligned} \text{大気-海水間CO}_2\text{フラックス} &= 0.0003 \times \text{生物過程} \\ &+ \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}}\right) + 0.0006 \times \text{塩分} - 0.0032 \times \text{水温}(\text{°C}) - 0.0295 \times \\ &\text{風速}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + 0.0739 \end{aligned} \quad (5)$$

ii) 感度分析

次に，本予測モデルの確率論的な評価を行うため，各環境要因(生物過程，塩分，水温，風速)が大気-海水間CO₂フラックスに与える影響度の分析(感度分析)を行った。他のパラメータを平均値に固定した上で，1パラメータずつ現地観測で得られた範囲内で変化させ，その変動幅を

表-3.7 予測モデル結果

	生物過程	塩分	水温	風速	[切片]	AICc	Δ_i	w_i
AIC best	x		x	x	x	-309.2	0.00	0.54
	x	x	x	x	x	-308.5	0.67	0.38
選択確率	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00			
$\bar{\beta}$	0.0003	0.0006	-0.0032	-0.0295	0.0739			
SE($\bar{\beta}$)	0.0000	0.0003	0.0002	0.0028	0.0141			
バイアス	0.1	0.5	0.1	0.1	0.2			

注) 選択されたモデルに含まれる説明変数を「x」で表している。 Δ_i : $AIC_i - AIC_{best}$, w_i : Akaike weight, β : モデル平均された係数推定値, SE (β): β の標準誤差, バイアス: $SE(\beta) / |\beta|$ を示している。

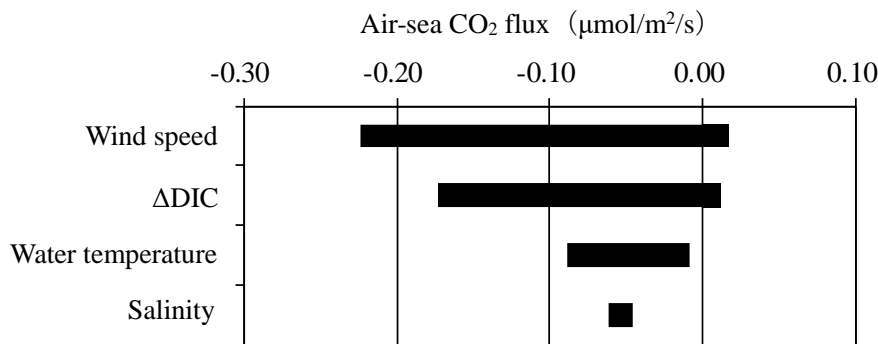


図-3.26 感度分析結果 (トルネードチャート)
縦軸: 風速, ΔDIC (生物過程), 水温, 塩分, 横軸: 大気-海水間 CO₂ フラックス
注) 各環境要因の変化に伴い, 大気-海水間 CO₂ フラックスが変動する幅を示しており, 変動幅の大きい要因から順に上から並べている。

図-3.26 感度分析結果 (トルネードチャート)

縦軸: 風速, ΔDIC (生物過程), 水温, 塩分, 横軸: 大気-海水間 CO₂ フラックス

トルネードチャートに示した. 感度分析の結果, 風速の変化が最も大きく大気-海水間CO₂フラックスを変動させ, 続いて生物過程, 水温の影響がみられた (図-3.26参照). 一方, 塩分による変動幅は小さく, CO₂フラックスに与える影響は小さかった.

(3) 北海道コムケ湖 (広域・連続データ)

a) パス解析

i) モデルの設定

大気-海水間 CO₂ フラックスに影響を及ぼす要因を分析するため, パス解析を試みた. パス解析は, 各変数に与える影響の大きさと因果関係を示しており, 大気-海水間 CO₂ フラックスに対し, プラスの影響は海水から大気への CO₂ の放出, マイナスの影響は大気から海水への CO₂ の吸収を表している.

大気-海水間 CO₂ フラックスの算出方法は, 大気と海水間の CO₂ 分圧差 (fCO₂), 交換係数, 溶解度を用いている. 関連する環境要因としては, 風速, 海水中の水温, 塩

分, 炭酸系イオン (TA, DIC) が挙げられるため, それらを CO₂ フラックスへの直接パスとして結んだ. ただし, 風速については CO₂ フラックスの大きさのみを決めるため, 理論上, 風速と CO₂ フラックスの絶対値は正の関係となる. このため, 風速から CO₂ フラックスへのパスは, CO₂ フラックスの絶対値に対する風速の影響度として扱った. 次に, 間接パスとして, 塩分から炭酸系イオン (TA, DIC) への影響, 水温や塩分からの「生物過程による炭素増減量 (呼吸・分解, 光合成)」への影響を結んだ. なお, 光量子密度, 大気及び海水中 fCO₂, DIN, DOC, Chl.a については, これらを含んだ解析の試算を事前に行ったが, 各パスの影響度は小さく, 必ずしもモデル全体の適合度を大幅に向上させるものでは無かったため, 本解析では除外した. 以上を勘案し, パス解析に係る構造方程式を全体モデルに示すように設定した (図-3.27 参照).

ii) 解析結果

大気-海水間 CO₂ フラックスに対する直接的な影響度

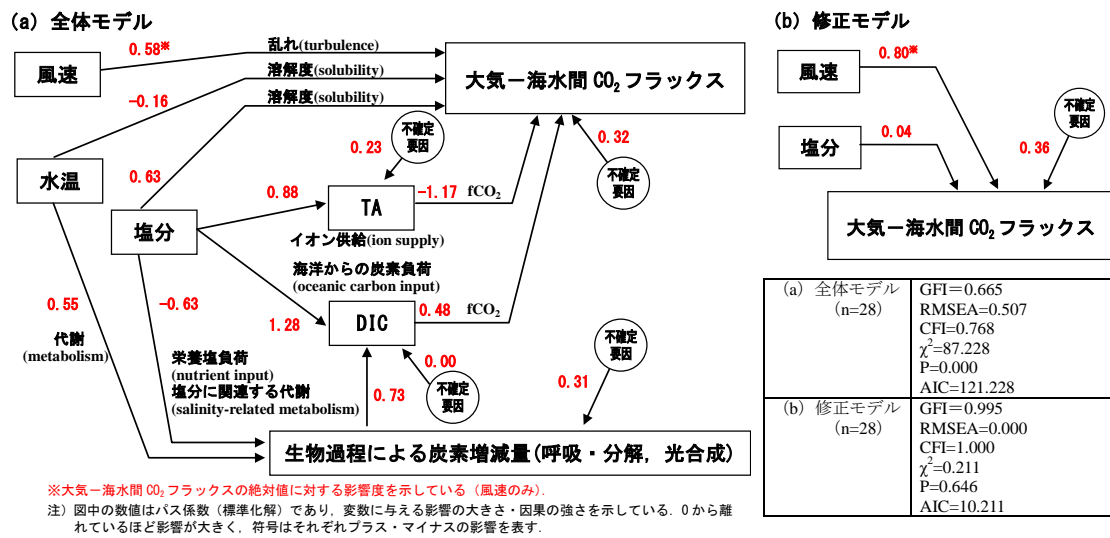


図-3.27 大気-海水間 CO₂ フラックスの要因分析

が大きい要因は、TA、塩分、風速、DIC であり、TA は負のパス係数 (-1.17)、塩分、風速、DIC はそれぞれ正のパス係数 (0.63, 0.58, 0.48) を示した。一方、水温による直接的な影響は -0.16 と小さく、水温自体が CO₂ フラックスに与える影響は大きくなかった。

次に、大気-海水間 CO₂ フラックスに対する間接的な影響として、「生物過程による炭素増減量(呼吸・分解, 光合成)」が挙げられ、DIC への正のパス係数 (0.73) を示した。また、「生物過程による炭素増減量(呼吸・分解, 光合成)」へのパスとして、生物過程等に関連する水温と塩分が挙げられ、各々の影響度 (0.55, -0.63) もやや大きかった。

iii) モデル適合度に関する評価

本モデルで示された各パス係数(標準化解)は全て $p < 0.05$ で有意となった。しかし、全体モデルの適合度は、 $GFI = 0.665$ (< 0.900)、 $RMSEA = 0.507$ (> 0.100) となる等、高いものではなかった。各々の因果関係のパスは有意であったが、サンプルサイズに応じたモデル全体の適合度を向上させるため、modification indices を用いてパスの削除・修正を行った。パスの修正の結果、 $GFI = 0.995$ (> 0.900)、 $RMSEA = 0.000$ (< 0.100)、 $CFI = 1.000$ (> 0.950)、 $\chi^2 = 0.211$ ($p = 0.646$)、 $AIC = 10.211$ となり、モデルの適合度は許容されるものとなった。環境要因として風速と塩分が残り、風速の影響が大きく占める結果となった。なお、塩分については、炭酸系イオンによる影響や生物過程による影響等がそれぞれ相互に打ち消し合い、結果的に

トータルとしての影響が小さくなったと考えられる。

なお、大気-海水間 CO₂ フラックスに係る不確定要因は、どちらのモデルも 0.3 以上となり、他の環境要因や検討すべき項目が不足している可能性がある。このため、今後は他の測定・文献データ等の収集も含めた統合的な検討を行うとともに、モデルの精度向上が必要である。

b) 一般線形モデル

大気-海水間 CO₂ フラックスに及ぼす風速、水温、塩分、生物過程の影響について、一般線形モデル (General Linear Model, family = gaussian, link関数 = identity) を適用し、CO₂ フラックスの予測モデルの構築を試みた。

i) 予測モデルの構築

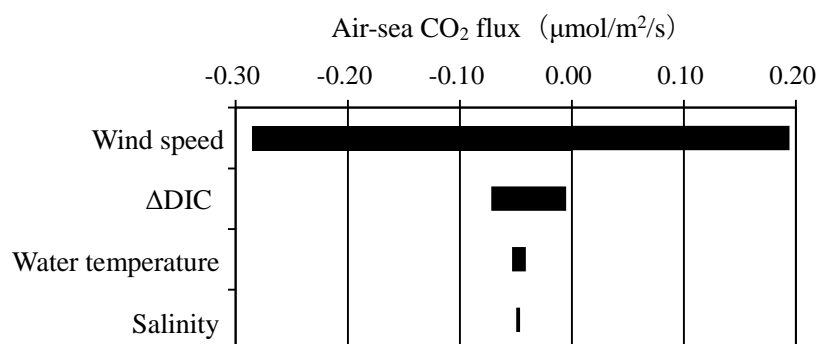
大気-海水間 CO₂ フラックスを風速、水温、塩分、生物過程を説明変数の候補としたモデル選択を行った。モデル選択では、各々の説明変数について全ての組み合わせの 16 通りについてモデルを作成した。本検討では各要因の単独効果を把握するために、交互作用を含む項は扱わなかった。なお、サンプル数 (n=28) とフルモデルにおける説明変数の数 (n=4) との比が 40 未満となったため、赤池情報量基準 (AIC) にかかるバイアスを補正した AICc を用いた。各モデルに対し、AIC の差 Δ_i を $AIC_i - AIC_{best}$ 、モデル i が最良な予測モデルとして選択される確率を Akaike weight (w_i) として算出した。

これらのモデルの中で、AICc が最小となるものが最も予測が良いモデルとなるが、1 つのベストモデルでは不確

表-3.8 予測モデル結果

	生物過程	塩分	水温	風速	[切片]	AICc	Δ_i	w_i
AIC best	x			x	x	-40.2	0.00	0.33
				x	x	-39.8	0.40	0.27
			x	x	x	-38.0	2.28	0.10
	x		x	x	x	-37.6	2.60	0.09
	x	x		x	x	-37.4	2.82	0.08
		x		x	x	-37.2	3.03	0.07
		x	x	x	x	-36.4	3.88	0.05
選択確率	0.43	0.43	0.43	1.00	1.00			
$\bar{\beta}$	-0.0001	0.0001	-0.0007	0.0546	0.0264			
SE($\bar{\beta}$)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023	0.0016			
バイアス	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1			

注) 選択されたモデルに含まれる説明変数を「x」で表している。 Δ_i : $AIC_i - AIC_{best}$, w_i : Akaike weight, β : モデル平均された係数推定値, SE (β): β の標準誤差, バイアス: $SE(\beta) / |\beta|$ を示している。



注) 各環境要因の変化に伴い、大気-海水間 CO₂ フラックスが変動する幅を示しており、変動幅の大きい要因から順に上から並べている。

図-3.28 感度分析結果 (トルネードチャート)

縦軸: 風速, Δ DIC (生物過程), 水温, 塩分, 横軸: 大気-海水間 CO₂ フラックス

実性を伴うため、推定の偏り (バイアス) が生じる可能性がある。このようなモデル選択による推定の偏りを低減するために、信頼集合 ($\Delta_i < 4$) を用いた複数モデルによる推定を行った。なお、 $\Delta_i > 4$ のモデルは、真のモデルを近似することが殆ど無いとされている。また、各説明変数の選択確率は、信頼集合において説明変数が含まれている w_i を足し合わせることで求められる。このような w_i で重み付けされたモデル平均手法を用いて、係数推定とその標準偏差、バイアスを求めた。

大気-海水間 CO₂ フラックスに関するモデル推定結果は、風速の影響 (選択確率: 1.00, バイアス: 0.0) を強く支持し、生物過程, 塩分, 水温 (選択確率: 0.43, バイアス: 0.1~0.2) の影響をやや支持した (表-3.8 参照)。特に、風速が CO₂ フラックスの大きさを決めることを支持した。これらを踏まえ、大気-海水間 CO₂ フラックスの

予測モデルについて、式(6)のように定式化した。

$$\begin{aligned} \text{大気-海水間CO}_2\text{フラックス} = & -0.0001 \times \text{生物過程} \\ & \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}}\right) + 0.0001 \times \text{塩分} - 0.0007 \times \text{水温}(\text{°C}) + 0.0546 \times \\ & \text{風速}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + 0.0264 \end{aligned} \quad (6)$$

ii) 感度分析

次に、本予測モデルの確率論的な評価を行うため、各環境要因 (風速, 水温, 塩分, 生物過程) が大気-海水間 CO₂ フラックスに与える影響度の分析 (感度分析) を行った。他のパラメータを平均値に固定した上で、1パラメータずつ現地観測で得られた範囲内で変化させ、その変動幅をトルネードチャートに示した。感度分析の結果、風速の変化が最も大きく大気-海水間 CO₂ フラックスを変動させ、

続いて生物過程の影響がみられた(図-3.28参照)。一方、水温や塩分による変動幅は小さく、CO₂フラックスに与える影響は小さかった。

(4) 東京湾走水海岸(連続データ)

a) パス解析

i) モデルの設定

連続観測の時系列データからは不明確であった大気-海水間CO₂フラックスの日周期変動とその環境要因の関係を明らかにするために、統計的手法(パス解析)を用いた。パス解析は、各変数に与える因果関係の強さを示しており、大気-海水間CO₂フラックスに対し、プラスの影響は海水から大気へのCO₂の放出、マイナスの影響は大気から海水へのCO₂の吸収を表している。大気-海水間CO₂フラックスは、大気-海水間のCO₂分圧差、交換係数、溶解度を用いて算出する方法である。CO₂フラックスに関する環境要因として、風速、海水中の水温・塩分、fCO_{2water}、fCO_{2air}が挙げられ、それらを直接パスとして結んだ。ただし、風速についてはCO₂フラックスの大きさのみを決めるため、理論上、風速とCO₂フラックスの絶対値は正の関係となる。このため、風速からCO₂フラックスへのパスは、CO₂フラックスの絶対値に対する風速の影響度として扱った。次に、fCO_{2water}へのパスとして、海水中の水温、塩分、炭酸系イオン(TA, DIC)を結んだ。また、「生物過程(呼吸・分解、光合成)による水中炭素増減量」へのパスとして、呼吸・分解、光合成に関する海水中の水温、

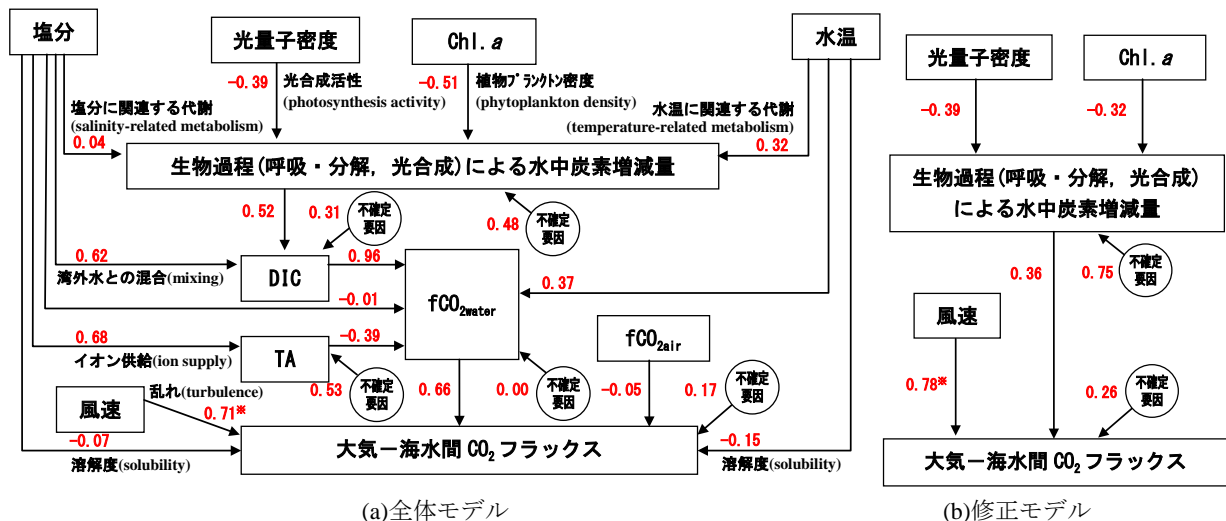
塩分、光量子密度、Chl.aを結んだ。これらを全て勘案した結果、本パス解析に係る構造方程式を設定した(図-3.29参照)。

ii) 解析結果

全体モデルのパス解析の結果、大気-海水間CO₂フラックスに影響を与える主な直接的要因のパスとして、海表面の乱れに関連する風速(0.71)とfCO_{2water}(0.66)が挙げられた。ただし、風速はCO₂フラックスの絶対値に対する影響度であり、本ケースでのCO₂フラックスは概ね吸収となっているため、吸収を強める方向に働いていると考えられた。一方、fCO_{2water}に影響を与える要因として、DIC(0.96)が大きく寄与し、DICと正の関係にある塩分(0.62)と「生物過程による水中炭素増減量」(0.52)は、間接的にCO₂フラックスに影響を及ぼしていると推定された。また、光量子密度もしくはChl.aが増加すると、一次生産が活発になり水中炭素量が減少する関係にあった。なお、水温や塩分がCO₂フラックスに及ぼす直接的な影響は小さく、炭酸系イオン(TA, DIC)や生物過程等との関係の方が強かった。

iii) モデルの適合度評価

本モデルの各パス係数(標準化解)について、全てp < 0.05で有意となった。またモデル全体の評価基準として、GFI(適合度指標)、AIC(赤池情報量基準:統計モデルの当てはまりの良さ)を用いた。GFIは1に近いほどモデルの



※大気-海水間CO₂フラックスの絶対値に対する影響度を示している(風速のみ)。

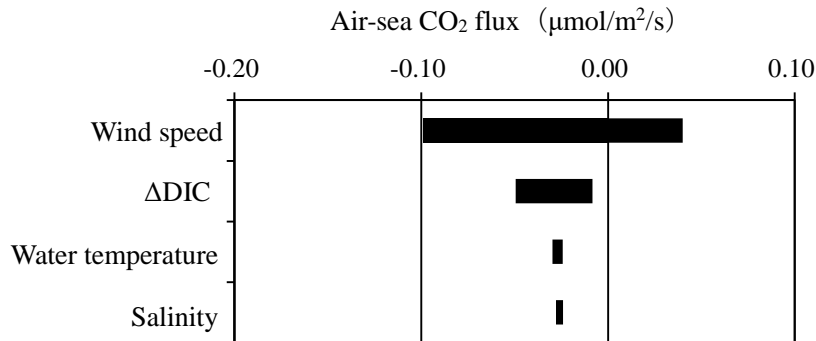
注) 図中の数値はパス係数(標準化解)であり、変数に与える影響の大きさ・因果の強さを示している。0から離れているほど影響が大きく、符号はプラス(海水から大気へのCO₂の放出)、マイナス(大気から海水へのCO₂の吸収)の影響を表している。

図-3.29 大気-海水間CO₂フラックスと各環境要因のパス解析結果

表-3.9 予測モデル結果

	生物過程	塩分	水温	風速	[切片]	AICc	Δ_i	w_i
AIC best	x		x	x	x	-554.6	0.00	0.34
	x			x	x	-554.3	0.31	0.29
	x	x	x	x	x	-554.2	0.44	0.27
	x	x		x	x	-552.1	2.49	0.10
選択確率	1.00	0.50	0.50	1.00	1.00			
$\bar{\beta}$	0.0002	-0.0030	-0.0004	0.0223	0.1301			
SE($\bar{\beta}$)	0.0000	0.0008	0.0001	0.0012	0.0265			
バイアス	0.0	0.3	0.1	0.1	0.2			

注) 選択されたモデルに含まれる説明変数を「x」で表している。 Δ_i : $AIC_i - AIC_{best}$, w_i : Akaike weight, β : モデル平均された係数推定値, SE (β): β の標準誤差, バイアス: $SE(\beta) / |\beta|$ を示している。



注) 各環境要因の変化に伴い、大気-海水間 CO_2 フラックスが変動する幅を示しており、変動幅の大きい要因から順に上から並べている。

図-3.30 感度分析結果 (トルネードチャート)

縦軸: 風速, ΔDIC (生物過程), 水温, 塩分, 横軸: 大気-海水間 CO_2 フラックス

説明率が高く、良いモデルと判断される。一方でAICは小さいほど、データの当てはまりが良いとされている。本モデルでは、 $GFI=0.48$, $AIC=992$ となり、適合度が高いといえるものではなかった。各々の因果関係のパスは有意であり、因果関係自体を否定するものではないが、サンプルデータに対する適合度の向上を図るため、modification indicesを用いたパスの修正・削除を行った。その結果、修正モデルの適合度は、 $GFI=0.93$, $AIC=38$ となり、大幅に改善された。修正モデルでは、 CO_2 フラックスへのパスとして、物理的な要因としての「風速」、生物化学的な要因としての「生物過程による水中炭素増減量」が結ばれた。また、この生物過程には、光量子密度とChl.aがマイナスの関係として残ったことから、比較的強固なパスとして重要であることが示唆される。なお、不確定要因のパス係数が大きくなった理由として、適合度向上に伴う環境要因(塩分、水温等)の削除によって、それらの要因による影響が不確定要因に含まれたためと考えられる。

b) 一般線形モデル

大気-海水間 CO_2 フラックスに及ぼす風速、水温、塩分、生物過程の影響について、一般線形モデル (General Linear Model, family = gaussian, link関数 = identity) を適用し、 CO_2 フラックスの予測モデルの構築を試みた。

i) 予測モデルの構築

風速、水温、塩分、生物過程を説明変数の候補として、大気-海水間 CO_2 フラックスのモデル選択を行った。モデル選択では、各々の説明変数について全ての組み合わせの16通りについてモデルを作成した。本検討では各要因の単独効果を把握するために、交互作用を含む項は扱わなかった。なお、サンプル数 ($n=98$) とフルモデルにおける説明変数の数 ($n=4$) との比が40未満となったため、赤池情報量基準 (AIC) にかかるバイアスを補正したAICcを用いた。各モデルに対し、AICの差 Δ_i を $AIC_i - AIC_{best}$ 、モデルiが最良な予測モデルとして選択される確率を

Akaike weight (w_i) として算出した。

これらのモデルの中で、AICcが最小となるものが最も予測が良いモデルとなるが、1つのベストモデルでは不確実性を伴うため、推定の偏り（バイアス）が生じる可能性がある。このようなモデル選択による推定の偏りを低減するために、信頼集合 ($\Delta_i < 4$) を用いた複数モデルによる推定を行った。なお、 $\Delta_i > 4$ のモデルは、真のモデルを近似することが殆ど無いとされている。また、各説明変数の選択確率は、信頼集合において説明変数が含まれている w_i を足し合わせることで求められる。このような w_i で重み付けされたモデル平均手法を用いて、係数推定とその標準偏差、バイアスを求めた。

大気－海水間CO₂フラックスに関するモデル推定結果は、風速と生物過程の影響（選択確率：1.00、バイアス：0.0～0.1）を強く支持し、塩分と水温（選択確率：0.50、バイアス：0.1～0.3）の影響をやや支持した（表-3.9参照）。特に、風速がCO₂フラックスの大きさを決めることを支持した。これらを踏まえ、大気－海水間CO₂フラックスの予測モデルについて、式(7)のように定式化した。

$$\begin{aligned} \text{大気－海水間CO}_2\text{フラックス} &= 0.0002 \times \text{生物過程} \\ &\left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}}\right) - 0.0030 \times \text{塩分} - 0.0004 \times \text{水温}(\text{°C}) + 0.0223 \times \\ &\text{風速}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + 0.1301 \end{aligned} \quad (7)$$

ii) 感度分析

次に、本予測モデルの確率論的な評価を行うため、各環境要因が大気－海水間CO₂フラックスに与える影響度の分析（感度分析）を行った。他のパラメータを平均値に固定した上で、1パラメータずつ現地観測で得られた範囲内で変化させ、その変動幅をトルネードチャートに示した。感度分析の結果、風速の変化が最も大きく大気－海水間CO₂フラックスを変動させ、続いて生物過程の影響がみられた（図-3.30参照）。一方、水温や塩分による変動幅は小さく、CO₂フラックスに与える影響は小さかった。

(5) 横浜平潟湾：野島干潟

a) パス解析

i) 夏季結果（図-3.31参照）

パス解析の結果、大気－海水間CO₂フラックスに影響を与える主な直接的要因のパスとして、fCO_{2water} (0.90) が挙げられた。fCO_{2water}に影響を与える要因として、 ΔDIC (0.69) と ΔTA (-0.66) が大きく寄与していた。また、Chl.aが増加すると、一次生産が活発になり ΔDIC が減少する関係にあった。全体モデルの適合度はGFI=0.66、AIC=291

であったが、修正モデルではGFI=0.95、AIC=31となり、主に塩分に起因するfCO_{2water}と ΔDIC が残った。

ii) 冬季結果（図-3.32参照）

パス解析の結果、大気－海水間CO₂フラックスに影響を与える主な直接的要因のパスとして、fCO_{2water} (0.94) が挙げられた。fCO_{2water}に影響を与える要因として、 ΔDIC (0.80) と ΔTA (-0.71) が大きく寄与していた。また、光量子密度やChl.aが増加すると、一次生産が活発になり ΔDIC が減少する関係にあった。全体モデルの適合度はGFI=0.74、AIC=312であったが、修正モデルではGFI=0.94、AIC=50となり、主に光量子密度、Chl.a、水温に起因する ΔDIC からのfCO_{2water}などが残った。

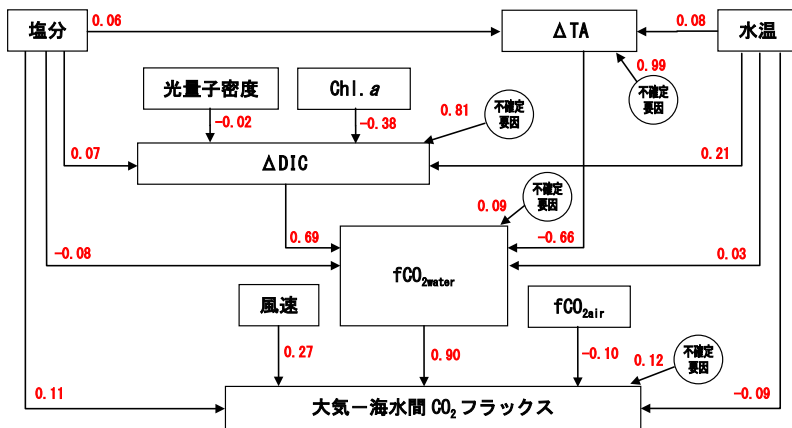
b) 一般線形モデル

i) 夏季結果

風速、水温、塩分、生物過程を説明変数の候補として、大気－海水間CO₂フラックスのモデル選択を行った。モデル選択では、各々の説明変数について全ての組み合わせの16通りについてモデルを作成した。本検討では各要因の単独効果を把握するために、交互作用を含む項は扱わなかった。なお、サンプル数 (n=65) とフルモデルにおける説明変数の数 (n=4) との比が40未満となったため、赤池情報量基準 (AIC) にかかるバイアス補正をした AICc を用いた。各モデルに対し、AICの差 Δ_i を $\text{AIC}_i - \text{AIC}_{\text{best}}$ 、モデル i が最良な予測モデルとして選択される確率を Akaike weight (w_i) として算出した。

これらのモデルの中で、AICcが最小となるものが最も予測が良いモデルとなるが、1つのベストモデルでは不確実性を伴うため、推定の偏り（バイアス）が生じる可能性がある。このようなモデル選択による推定の偏りを低減するために、信頼集合 ($\Delta_i < 3$) を用いた複数モデルによる推定を行った。なお、 $\Delta_i > 3$ のモデルは、真のモデルを近似することが殆ど無いとされている。また、各説明変数の選択確率は、信頼集合において説明変数が含まれている w_i を足し合わせることで求められる。このような w_i で重み付けされたモデル平均手法を用いて、係数推定とその標準偏差、バイアスを求めた。

<全体モデル>



<修正モデル>

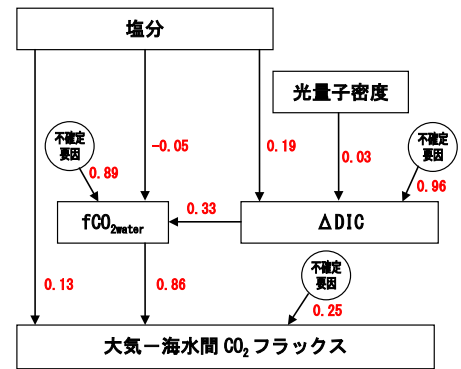
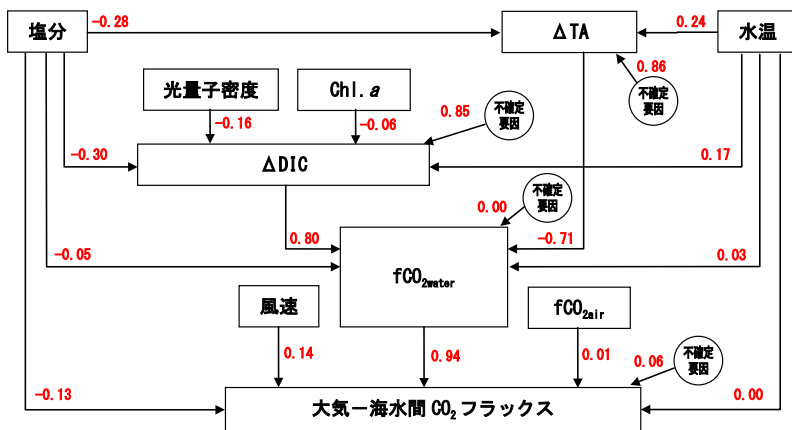


図-3.31 大気-海水間 CO₂フラックスと各環境要因のパス解析結果【夏季】

<全体モデル>



<修正モデル>

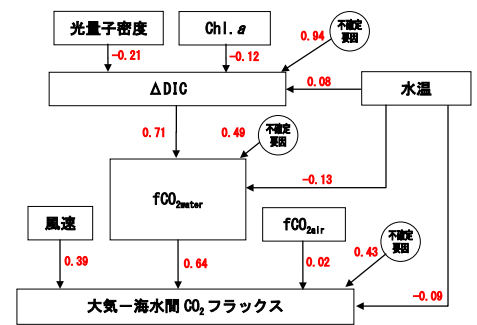
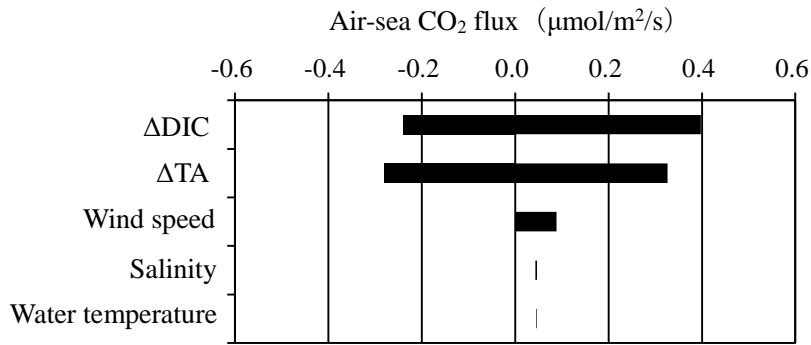


図-3.32 大気-海水間 CO₂フラックスと各環境要因のパス解析結果【冬季】

表-3.10 予測モデル結果

	ΔDIC	ΔTA	塩分	水温	風速	[切片]	AICc	Δ _i	w _i
AIC best	x	x			x	x	-94.5	0.00	0.37
	x	x				x	-93.4	1.18	0.20
	x	x	x		x	x	-92.3	2.21	0.12
	x	x		x	x	x	-92.1	2.40	0.11
選択確率	1.00	1.00	0.25	0.25	0.75	1.00			
$\bar{\beta}$	0.0008	-0.0007	0.0006	0.0004	0.0074	-0.0075			
SE($\bar{\beta}$)	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0009	0.0054			
バイアス	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.7			

注) 選択されたモデルに含まれる説明変数を「x」で表している. Δ_i: AIC_i-AIC_{best}, w_i: Akaike weight, β: モデル平均された係数推定値, SE(β): βの標準誤差, バイアス: SE(β) / |β| を示している.



注) 各環境要因の変化に伴い、大気-海水間 CO₂ フラックスが変動する幅を示しており、変動幅の大きい要因から順に上から並べている。

図-3.33 感度分析結果（トルネードチャート）

縦軸：ΔDIC（生物過程）、ΔTA、風速、塩分、水温、横軸：大気-海水間 CO₂ フラックス

大気-海水間CO₂フラックスに関するモデル推定結果は、ΔDIC、ΔTA、風速の影響（選択確率：0.75~1.00、バイアス：0.1）を強く支持し、塩分、水温（選択確率：0.25、バイアス：0.3）の影響をやや支持した（表-3.10参照）。大気-海水間CO₂フラックスの予測モデルについて、式(8)のように定式化した。

$$\begin{aligned} \text{大気-海水間CO}_2\text{フラックス} = & 0.0008 \times \Delta\text{DIC} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}} \right) - \\ & 0.0007 \times \Delta\text{TA} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}} \right) + 0.0006 \times \text{塩分} + 0.0004 \times \text{水温} \\ & (\text{°C}) + 0.0074 \times \text{風速} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) - 0.0075 \end{aligned} \quad (8)$$

次に、本予測モデルの確率論的な評価を行うため、各環境要因（ΔDIC、ΔTA、風速、塩分、水温）が大気-海水間CO₂フラックスに与える影響度の分析（感度分析）を行った。他のパラメータを平均値に固定した上で、1パラメータずつ現地観測で得られた範囲内で変化させ、その変動幅をトルネードチャートに示した。

感度分析の結果、ΔDICとΔTAの変化が大きく大気-海水間CO₂フラックスを変動させ、続いて風速の影響がみられた。一方、塩分と水温による変動幅は小さく、CO₂フラックスに与える影響は小さかった（図-3.33参照）。

ii) 冬季結果

大気-海水間CO₂フラックスを風速、水温、塩分、生物過程を説明変数の候補としたモデル選択を行った。モデル選択では、各々の説明変数について全ての組み合わせの16通りについてモデルを作成した。本検討では各要因の単独効果を把握するために、交互作用を含む項は扱

わなかった。なお、サンプル数（n=56）とフルモデルにおける説明変数の数（n=4）との比が40未満となったため、赤池情報量基準（AIC）にかかるバイアス補正したAICcを用いた。各モデルに対し、AICの差Δ_iをAIC_i-AIC_{best}、モデルiが最良な予測モデルとして選択される確率をAkaike weight（w_i）として算出した。

これらのモデルの中で、AICcが最小となるものが最も予測が良いモデルとなるが、1つのベストモデルでは不確実性を伴うため、推定の偏り（バイアス）が生じる可能性がある。このようなモデル選択による推定の偏りを低減するために、信頼集合（Δ_i<3）を用いた複数モデルによる推定を行った。なお、Δ_i>3のモデルは、真のモデルを近似することが殆ど無いとされている。また、各説明変数の選択確率は、信頼集合において説明変数が含まれているw_iを足し合わせることで求められる。このようなw_iで重み付けされたモデル平均手法を用いて、係数推定とその標準偏差、バイアスを求めた。

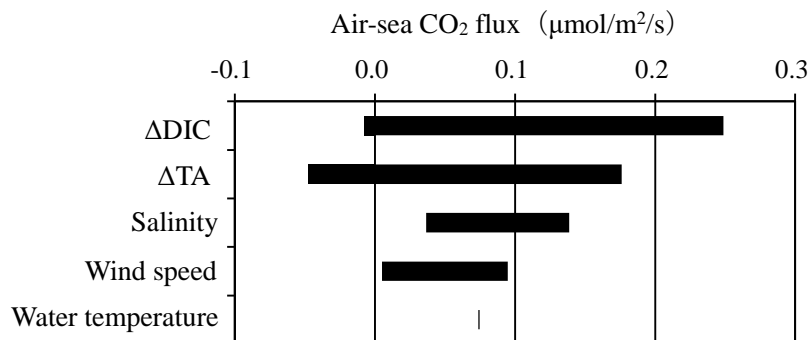
大気-海水間CO₂フラックスに関するモデル推定結果は、ΔDIC、塩分、風速の影響（選択確率：1.00、バイアス：0.1~0.2）を強く支持し、ΔTA、水温（選択確率：0.33~0.67、バイアス：0.2~0.3）の影響をやや支持した（表-3.11参照）。大気-海水間CO₂フラックスの予測モデルについて、式(9)のように定式化した。

$$\begin{aligned} \text{大気-海水間CO}_2\text{フラックス} = & 0.0005 \times \Delta\text{DIC} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}} \right) - \\ & 0.0004 \times \Delta\text{TA} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}} \right) - 0.0200 \times \text{塩分} + 0.0003 \times \text{水温} \\ & (\text{°C}) + 0.0098 \times \text{風速} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) + 0.6018 \end{aligned} \quad (9)$$

表-3.11 予測モデル結果

	ΔDIC	ΔTA	塩分	水温	風速	[切片]	AICc	Δ _i	w _i
AIC best	x	x	x		x	x	-192.8	0.00	0.49
	x		x		x	x	-191.1	1.73	0.21
	x	x	x	x	x	x	-190.3	2.55	0.14
選択確率	1.00	0.67	1.00	0.33	1.00	1.00			
$\bar{\beta}$	0.0005	-0.0004	-0.0200	0.0003	0.0098	0.6018			
SE($\bar{\beta}$)	0.0001	0.0001	0.0024	0.0001	0.0012	0.0731			
バイアス	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1			

注) 選択されたモデルに含まれる説明変数を「x」で表している。Δ_i: AIC_i-AIC_{best}, w_i: Akaike weight, β: モデル平均された係数推定値, SE (β): βの標準誤差, バイアス: SE (β) / |β| を示している。



注) 各環境要因の変化に伴い、大気-海水間 CO₂フラックスが変動する幅を示しており、変動幅の大きい要因から順に上から並べている。

図-3.34 感度分析結果 (トルネードチャート)

縦軸: ΔDIC, ΔTA, 塩分, 風速, 水温, 横軸: 大気-海水間 CO₂フラックス

次に、本予測モデルの確率論的な評価を行うため、各環境要因 (ΔDIC, ΔTA, 風速, 水温, 塩分) が大気-海水間 CO₂フラックスに与える影響度の分析 (感度分析) を行った。他のパラメータを平均値に固定した上で、1パラメータずつ現地観測で得られた範囲内で変化させ、その変動幅をトルネードチャートに示した。

感度分析の結果、ΔDIC, ΔTA の変化が大きく大気-海水間 CO₂フラックスを変動させ、続いて塩分, 風速の影響がみられた。一方、水温による変動幅は小さく、CO₂フラックスに与える影響は小さかった (図-3.34 参照)。

c) 「都市排水・生物過程等による影響」を考慮したパス解析の再設定

i) モデルの設定

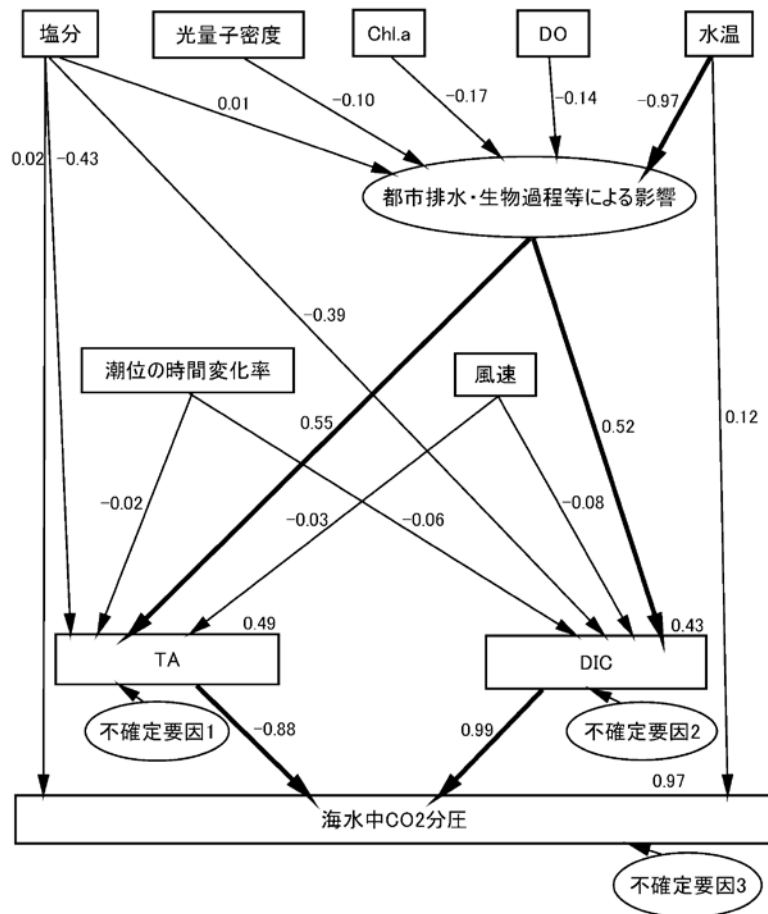
海水中CO₂分圧に影響を及ぼす環境要因の相対的な影響度を把握するため、夏季・冬季を含めた観測データのパス解析 (n=144) を行った。パス図では、各変数に与える影響の大きさとその因果関係を示した。主な影響要因として、塩分, 光量子密度, Chl.a, DO, 水温からの影響を

包括した「都市排水・生物過程等による影響」を潜在変数 (直接観測できない仮定上の変数) として設定し、物理過程として潮位の時間変化率 (式(10)参照, 潮位η, 単位時間t), 風速を考慮した上でTAやDICを経由して、海水中CO₂分圧へパスを結んだ。これらを勘案し、パス解析に係る構造方程式を図-3.35に示すように設定した。

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{t}(\eta_n - \eta_{n-1}) \quad (10)$$

ii) 解析結果

パス解析の結果 (図-3.35 参照), 海水中 CO₂分圧に影響を与える主な直接的要因のパスとして TA (-0.88) と DIC (0.99) が挙げられ、塩分 (0.02) や水温 (0.12) からの直接的影響は小さかった。また、DIC の増加は海水中 CO₂分圧を上昇させ、逆に TA の増加はイオン化 (CO₂ から HCO₃⁻等への解離) が促進されるために海水中 CO₂分圧を低下させるという効果が確認され、これらの相関によって非常に高い決定係数 (R²=0.97) が与えられること



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-3.35 パス解析結果【夏季・冬季：全データ】

がわかった。次に TA・DIC への主な影響要因のパスとして、「都市排水・生物過程等による影響」(0.55, 0.52) が挙げられ、潮位の時間変化率(-0.02, -0.06)や風速(-0.03, -0.08)からの影響は小さかった。このことから、物理過程である潮位変化や風速の影響が水質に与える影響は小さく、湾内の移流・拡散の効果が小さいことが示唆された。「都市排水・生物過程等による影響」への主な影響要因のパスとしては、水温(-0.97)が殆どを占め、塩分(0.01)、光量子密度(-0.10)、Chl.a(-0.17)、DO(-0.14)による影響は非常に小さかった。水温による影響が最も大きかった理由として、季節変化や人工的な排水による水温変化とともに、それらの変化に伴う生物過程の変化にも関連していることが考えられた。なお、人工的な排水自体を対象とした CO₂ 分圧と水質特性の関係についての研究事例は非常に乏しく、他の影響要因などの検討が必要となる可能性がある。このため、今後は排水を対象とした測定・データ等の収集・検討を行うとともに「都市排水・生

物過程等による影響」の解明が必要である。

iii) 滞留時間の推定・考察

物理的な要因である移流・拡散の効果を検討するために、保存量である湾内の塩分の時間変化を利用して滞留時間を推定した。滞留時間の算出式は式(11)に示すとおりであり、湾内平均塩分 C 、境界塩分 C_0 、単位時間 t 、滞留時間 T_r とした。

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T_r} (C_0 - C) \quad (11)$$

滞留時間を算出した結果、約 30 時間程度(夏季: 36.2 時間, 冬季: 32.5 時間)となり、パス解析で推定されたとおり閉鎖性が高かった。つまり、海水中 CO₂ 分圧に与える移流・拡散の効果は小さく、都市排水や生物過程による効果が大きいことが裏付けられた。

3.7 まとめ

日本の浅海域における現地観測事例（亜寒帯、温帯、亜熱帯の代表例）の整理及び観測データを用いた統計解析（パス解析、一般線形モデル）を行った。現地観測にて、大気-海水間 CO_2 フラックスを推定した。また、大気-海水間 CO_2 フラックスに影響を及ぼす環境要因（風速、水温、塩分、全アルカリ度 (TA)、溶存無機炭素濃度 (DIC)、生物過程による炭素増減量 (ΔDIC)) の相対的な影響度を把握するために、統計解析を用いた分析を行った。その結果、観測場所により詳細は異なるが、主に、①風速、②流入負荷、そして③生物過程（呼吸・分解、光合成）から影響を受けることがわかった。

北海道風蓮湖において現地調査を実施し、大気-海水間 CO_2 フラックスを推定した。そして、 CO_2 フラックスとその変動要因（風速、水温、塩分、TA、DIC、生物過程による炭素増減量）との関係性（時系列変化、単相関・偏相関等）について検討した。また、変動要因の相対的な影響度を把握するために、多変量解析（パス解析）を行った。解析の結果、大気-海水間 CO_2 フラックスに影響を及ぼす環境要因として、湖内の代表的な水質指標である塩分に起因する DIC と TA が挙げられた。また、 CO_2 フラックスは風速からの直接的な影響、DIC を介した生物過程（呼吸・分解、光合成）からの間接的な影響も受けていることが示唆された。

北海道コムケ湖において現地調査（春季、夏季）を実施し、大気-海水間 CO_2 フラックスの空間分布特性の把握を行った。また、大気-海水間 CO_2 フラックスに影響を及ぼす環境要因（風速、水温、塩分、TA、DIC、生物過程による炭素増減量）の相対的な影響度を把握するために、パス解析を用いた分析を行った。その結果、大気-海水間 CO_2 フラックスは、湖央付近を中心に大気から海水中へ CO_2 の吸収となっており、①風速、②塩分に起因する流入負荷、そして③湖内の生物過程（呼吸・分解、光合成）から影響を受けることがわかった。

走水海岸のアマモ場において、7月と12月の大潮期に48時間の連続観測を行った結果、海水中 CO_2 分圧は大気中 CO_2 分圧よりも低く推移し、大気-海水間 CO_2 フラックスは概ね大気から海水への吸収傾向にあった。また、統計解析を用いることで、大気-海水間 CO_2 フラックスとその環境要因の体系的な因果モデルを構築し、それらの関係性や影響度の強弱を一目で判断することが可能となった。全体モデルの解析の結果、風速と海水中 CO_2 分圧が主な直接的影響要因として抽出された。また、間接的な影響としては、海水中の一次生産が活発になることよって、DIC の減少や海水中 CO_2 分圧の低下に繋がり、大気

から海水への CO_2 吸収が強化されると考えられる。これらの要因が、潮汐や日周期といった時間スケールにおける大気-海水間 CO_2 フラックスを規定する要因として重要であることがわかった。また、本研究結果について、陸と海の境界条件が特定でき、生物過程による炭素増減の把握が可能なケースでは、他海域でも同様の手法を適用できると考えられる。

神奈川県横浜市南部に位置する平潟湾は、野島水路等で接続された東京湾に通じる都市型浅海域である。本研究では、平潟湾における海水中 CO_2 分圧の時空間的な日周変化を把握し、その変動要因について検討することを目的とした。始めに、平潟湾内で昼夜観測を実施した結果、海水中 CO_2 分圧は夏季に大気中 CO_2 分圧よりも低くなる場所が確認されたものの、冬季は安定的に高く推移し、概ね海水から大気への放出傾向にあった。次に、海水中 CO_2 分圧に係る環境要因の影響度を把握するためにパス解析を行った。解析の結果、潮位変化や風速による影響は小さく、主に水温に起因する「都市排水・生物過程等による影響」を受けて、DIC と TA の作用により、海水中 CO_2 分圧の変動をほぼ説明できることがわかった。

4. 国内の様々な浅海域における海水中 CO_2 分圧と統計モデル（一般化線形モデル）による予測

4.1 統合統計モデルの必要性及び目的

これまで国内の様々な浅海域（亜寒帯～温帯～亜熱帯の海草場、干潟、サンゴ礁）で海水中 CO_2 分圧が計測されているが、それらを総括した解析や CO_2 分圧の推定手法は確立されていない^{8), 22)}。また、海水中 CO_2 分圧は、呼吸・分解、光合成、石灰化といった生物化学的な変化を含んでおり、非線形かつ多変量の相互作用を伴った複雑な集合体となる。このことから、統計論的モデル (Stochastic Model) を適用し、統合統計モデルを構築することにより、海水中 CO_2 分圧の動態を説明するための重要な環境要因の抽出を行う必要がある。

そこで本研究では、2010年～2015年に現地観測を実施するとともに、それら観測データの統計解析を行うことにより、国内の様々な浅海域における海水中 CO_2 分圧の現況を推定し、重要な環境要因を抽出することを目的とした。

4.2 各観測場所の地域環境特性

(1) 各観測場所の特徴

海水中 CO_2 分圧と関連する環境要因について、現地観測を行った。対象サイトは、北海道 風蓮湖、コムケ湖、

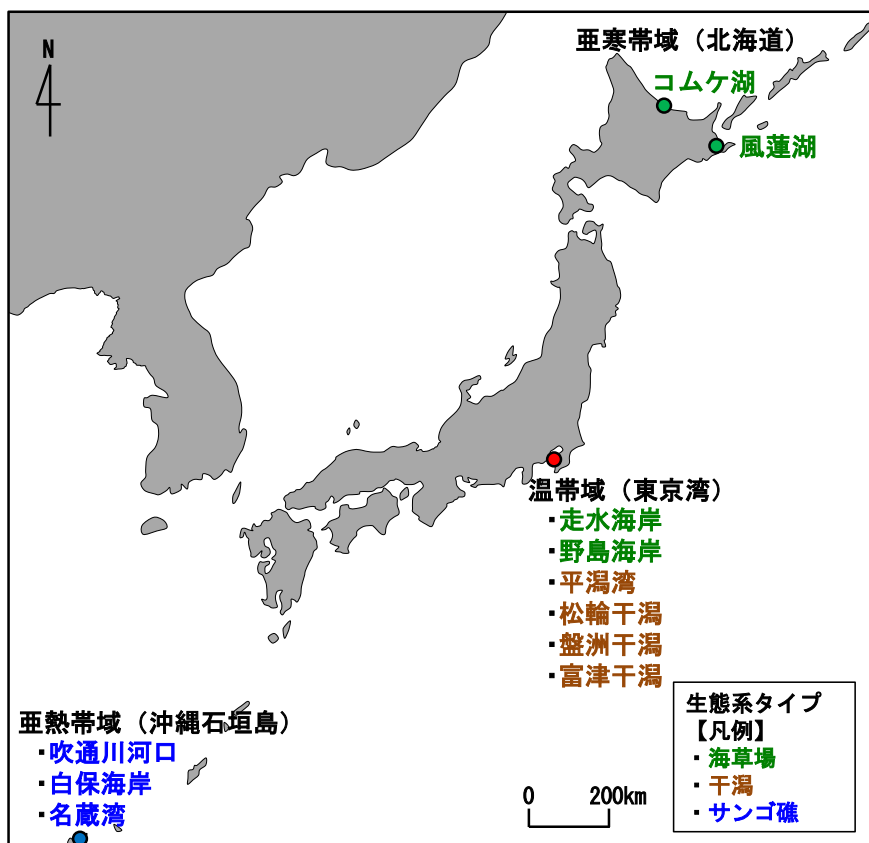


図-4.1 位置図

東京湾 走水海岸，野島海岸，平潟湾，松輪干潟，盤洲干潟，富津干潟，沖縄石垣島 吹通川河口，白保海岸，名蔵湾の計11箇所(サンプル数 n=467)である(図-4.1参照)。

a) 北海道 風蓮湖

日本の亜寒帯に属する風蓮湖(北緯43° 19' 46.5"，東経145° 15' 27.8")は，根室半島と野付崎の間に位置する潟湖(約60.5 km²)で河口付近に位置する海草場(水域の約7割がアマモ場³⁸⁾)である。2010年8月，11月，2011年6月～11月に48時間連続観測及び平面移動観測を実施した⁴⁷⁾。

b) 北海道 コムケ湖

風蓮湖と同様に，北海道内のコムケ湖(北緯 44° 15' 30"，東経 143° 30' 20")は，オホーツク海沿いに3つの湖盆が連なる汽水湖である。湖内環境としてアマモ場が生育するとともに，ホッカイベビ，ホタテガイ，アサリ，カキなどの水産資源の養殖も行われている。2013年5月，8月に平面移動観測を実施した⁵⁹⁾。

c) 東京湾 走水海岸

日本の温帯に属する神奈川県横須賀市の走水海岸(北

緯 35°15'53"，東経 139°43'34")は，東京湾の希少な天然アマモ場群落として残存している。走水海岸は水深約2m以浅の静穏域に，約4haのアマモ場が大小のパッチを形成しながら安定的に維持されている⁴⁹⁾。2013年7月，12月に48時間の定点連続観測を実施した⁶⁰⁾。

d) 東京湾 野島海岸

神奈川県横浜市の野島海岸(北緯 35°19'48"，東経139°38'09")は，東京湾西岸最北に位置し，横浜市内唯一の自然海岸の砂浜である。小規模なアマモとコアマモの群落があり，近年拡大しつつある⁶¹⁾。2013年5月に平面移動観測を実施した。

e) 東京湾 平潟湾

神奈川県横浜市南部に位置する平潟湾(北緯 35° 19' 43"，東経 139° 37' 41")は，金沢湾を通じて東京湾に通じる閉鎖性内湾である。野島水路及び野島運河の2本的水路で接続され，近郊の野島海岸を中心にアサリの生息がみられる。2015年8月，12月に3時間毎の移動連続観測を実施した。

f) 東京湾 松輪干潟

神奈川県三浦市の松輪干潟（北緯 35° 08' 38"，東経 139° 39' 48"）は、江奈湾奥に位置し、波は穏やかで泥湿地が広がっており、ヨシが生育し所々に浜や磯が見受けられる。2013年6月に平面移動観測を実施した。

g) 東京湾 盤洲干潟

盤洲干潟（北緯35° 24' 12"，東経139° 53' 50"）は、東京湾の東岸に位置する前浜干潟であり、規模は長さが8km、沖側に約2kmの大きさを持ち、地形勾配は約0.001と傾斜の緩やかな砂質干潟である⁶²⁾。また、東京湾におけるアサリ、ノリの主生産地となっており、漁業生産の場としてだけでなく、潮干狩りなどの親水の場としても利用されている⁶³⁾。2013年6月に平面移動観測を実施した。

h) 東京湾 富津干潟

富津干潟（北緯35° 18' 56"，東経139° 47' 36"）は東京湾内湾の干潟群の最南に位置し、北東に流れる小糸川の河口付近から西の富津岬までに突き出した砂洲の北側にある⁶⁴⁾。2013年6月に平面移動観測を実施した。

i) 石垣島 吹通川河口

日本の亜熱帯に属する吹通川河口（北緯24° 29' 18"，東経124° 13' 47"）は石垣島西岸に位置し、岸から沖に向けてサンゴ礁が連なっている。2013年7月に平面移動観測を実施した。

j) 石垣島 白保海岸

白保海岸（北緯24° 22' 57"，東経124° 15' 19"）は石垣島東岸に位置し、アオサンゴの大群落をはじめ、いくつかの種類の造礁サンゴ群集がリーフ上に存在している。2013年7月に平面移動観測を実施した。

k) 石垣島 名蔵湾

石垣島の南西部に位置する名蔵湾（北緯24° 23' 49"，東経124° 08' 35"）は南北に約1km、東西に約0.5kmの長さがあり、東からは名蔵川が注ぎ込み、周囲はマングローブと海岸林に覆われている。2015年7月に1時間毎の移動連続観測を実施した。

(2) 現地観測取得データ

a) 観測項目・分析方法

各観測場所において、海水中CO₂分圧、水温、塩分、全アルカリ度 (TA)、溶存無機炭素濃度 (DIC) のデータセットを取得し、併せて生物過程による炭素増減量(ΔDIC)、

石灰化によるアルカリ度増減量 (ΔTA) を算出した (表-4.1参照)。また、地域特性である生態系タイプについても、海草場、干潟、サンゴ礁に分類した。海水中CO₂分圧は、CO₂濃度計 (CO2-09⁵²⁾、紀本電子社製) による計測、もしくは炭酸系の化学的平衡関係 (DIC, TA) による間接的な計算手法⁵³⁾で算出した。水温と塩分は水温・塩分計 (Compact-CT, JFEアドバンテック社製) を用いて計測した。TA, DIC測定用サンプルは、250mlのSchott Duran瓶で採取し、200μlの塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定した。これらは、フロースルー型の炭酸系分析装置 (MDO-02⁴³⁾、紀本電子社製) もしくはパッチ型分析装置 (ATT-05, 紀本電子社製) で測定した。

b) 海水中CO₂分圧

観測場所ごとの海水中CO₂分圧は、風蓮湖、コムケ湖、走水海岸、野島海岸で概ね大気中CO₂分圧 (約400ppm) より低く、松輪干潟、盤洲干潟、富津干潟、吹通川河口、白保海岸で高い傾向にあった。海水中CO₂分圧は、場の特性や環境変化に影響を受けやすく、水質環境や生物活動に深く関係しているものと予想される。

c) 生物過程による炭素増減量 (ΔDIC)

生物過程による炭素増減量 (以下、ΔDICと呼ぶ) とは、淡水と外海水の単純混合以外の生物過程によって影響を受けるDICの増減量のことであり^{17), 47), 59), 60)}、正の値は呼吸・分解活動、負の値は光合成活動が卓越することを意味している。

d) 石灰化によるアルカリ度増減量 (ΔTA)

石灰化によるアルカリ度増減量 (以下、ΔTAと呼ぶ) とは、淡水と外海水の単純混合以外の石灰化などによって影響を受けるTAの増減量のことであり、正の値は炭酸カルシウム (CaCO₃) の溶解、負の値はCaCO₃の析出を意味している。

e) 生態系タイプ

各観測場所は生態系別に概ね3種類に分類され、風蓮湖、コムケ湖、走水海岸、野島海岸は「海草場」、平潟湾、松輪干潟、盤洲干潟、富津干潟は「干潟」、吹通川河口、白保海岸、名蔵湾は「サンゴ礁」と設定した。各生態系タイプの主な基礎生産者として、植物プランクトンや貝類などに加え、藻場は海草藻場、干潟は底生微細藻+海草藻場、サンゴ礁はサンゴ+海草藻場を想定した。

表-4.1 現地観測データ取得一覧（亜寒帯域，温帯域，亜熱帯域）

観測場所	生態系タイプ	サンプル数	海水中CO ₂ 分圧 (μatm)	水温 (°C)	塩分 (-)	ΔDIC (μmol/kg)	ΔTA (μmol/kg)
風蓮湖	海草場	150	350±30	15.3±1.2	21.3±0.9	-62.0±18.7	-29.1±22.6
コムケ湖	海草場	26	249±138	14.5±2.8	21.2±4.2	-230.3±85.2	16.7±119.3
走水海岸	海草場	98	291±12	19.8±1.0	32.0±0.1	-36.5±9.0	9.5±4.9
野島海岸	海草場	8	134±114	23.4±0.4	30.5±0.5	-311.7±206.2	-1.1±21.9
平潟湾	干潟	121	642±76	19.6±1.2	28.7±0.3	65.8±32.5	29.6±31.7
松輪干潟	干潟	5	687±359	25.2±1.9	30.7±2.1	8.9±101.0	44.9±48.8
盤洲干潟	干潟	5	710±174	24.4±0.6	22.7±7.5	27.6±15.6	50.3±88.8
富津干潟	干潟	8	456±286	25.3±0.9	31.7±0.5	-85.6±108.7	-45.9±27.5
吹通川河口	サンゴ礁	6	707±152	31.1±0.7	33.8±0.2	17.5±14.9	-111.3±21.9
白保海岸	サンゴ礁	5	630±212	31.9±1.8	33.4±0.2	-48.4±177.7	-132.1±113.2
名蔵湾	サンゴ礁	35	680±140	32.3±0.7	32.0±1.3	24.8±51.0	-123.5±56.5

注) 表中の数値は，平均値±95%信頼区間を示している。

4.3 データ構造の把握

(1) 散布図行列 (Pairs. Panels)

用いる変数が2つ以上で，かつ量的データを扱う場合，全ての変数を組み合わせた散布図行列（図-4.2 参照）を作成することで，データ間の関係性を視覚的に把握することができる。データ解析には，R 3.1.2⁵⁷⁾のソフトウェアを使用した。各変数のヒストグラムから，海水中 CO₂ 分圧 (445 ± 31 (平均値 ± 95%信頼区間，以下同じ) μatm)，塩分 (27.0 ± 0.6)，DIC (1,823 ± 33 μmol/kg)，ΔDIC (-28.2 ± 14.8 μmol/kg)，ΔTA (-10.6 ± 14.1 μmol/kg) は単峰性分布となり，ピークは平均値付近となった。一方，水温 (19.5 ± 0.7 °C)，TA (2,036 ± 34 μmol/kg) はやや多峰性を含んだ分布となった。ここで水温に注目すると，幅広い分布となっていることから，季節間や高・低緯度帯も加味された多様なサンプリングデータであることがわかる。

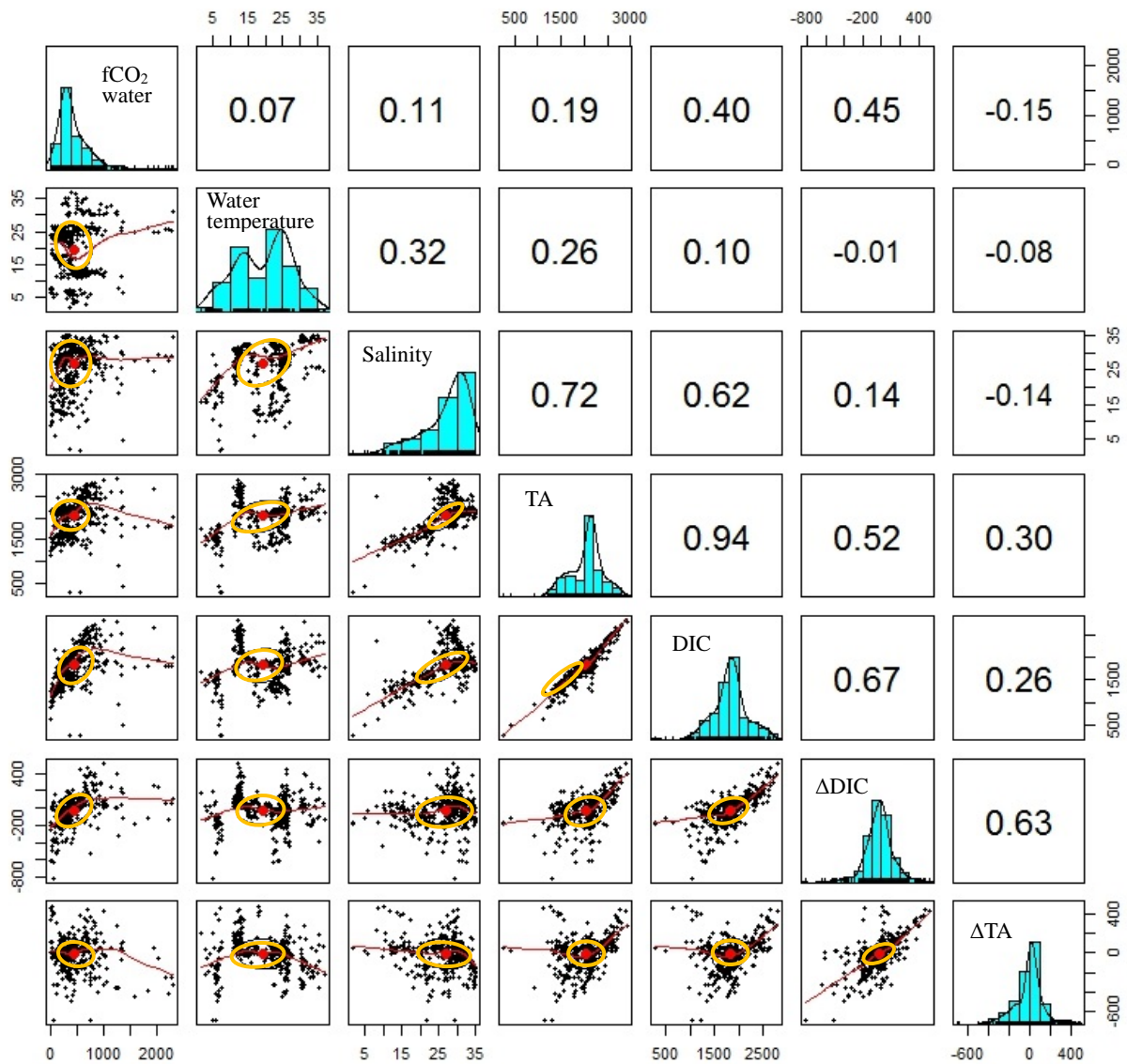
次に，各変数間の相関関係をみると，海水中CO₂分圧に対し，ΔDIC，DICは正の相関 (0.45, 0.40) となり，水温，塩分，TA，ΔTAの相関 (0.07, 0.11, 0.19, -0.15) は弱かった。また，TAとDICの間に強い相関 (0.94) がみられた。これは，海水中CO₂分圧を目的変数としたモデル構築の場合，TAとDICの多重共線性による影響が懸念される。一方で，TAとDICはともに海水中に含まれる炭酸水素イオン (HCO₃⁻) などの影響を受けるため，塩分で概ね説明可能と考えられる。このため，ここでTAとDICを説明変数から除外することとした。

(2) 海水中CO₂分圧とΔDICの関係性

目的変数 (海水中CO₂分圧) と説明変数 (水温，塩分，ΔDIC，ΔTA) の関係性を把握するにあたり，最も相関の高かったΔDICに注目した。ΔDICと海水中CO₂分圧の関係は図-4.3に示すとおりであり，指数関数に近い構造であることが仮定できた。また，目的変数は0以上の連続値をとることから，次章の現況推定モデルの検討ではガンマ分布を仮定した確率分布で扱うこととした。

4.4 統計解析を用いた現況推定モデルの構築

データ構造の把握に基づき，海水中CO₂分圧に及ぼす水温，塩分，ΔDIC，ΔTA，観測場所，生態系タイプの影響について，一般化線形モデル (Generalized Linear Model, family = Gamma, link関数 = log) を適用し，CO₂分圧の現況推定モデルを構築した。統計解析は，データ解析と同様のソフトウェアを使用した。なお，本解析による各影響要因について，「水温」は緯度・地域特性，「塩分」は河川・海水の流入特性，「ΔDIC」は呼吸・分解・光合成といった生物過程，「ΔTA」は石灰化，「観測場所」は環境以外の要因，「生態系タイプ」は海草場・干潟・サンゴ礁の生態系の特性を意味するものとしている。



注 1) 上三角行列は単相関係数, 下三角行列は対散布図 (平滑化曲線, 95%信頼限界楕円とその中心を含む), 対角成分はヒストグラム (カーネル確率密度を含む) を示している.

注 2) 各変数の単位は, 海水中 CO₂ 分圧(μatm), 水温 (°C), 塩分(-), TA(μmol/kg), DIC(μmol/kg), ΔDIC(μmol/kg), ΔTA(μmol/kg)である.

図-4.2 変数間の対散布図

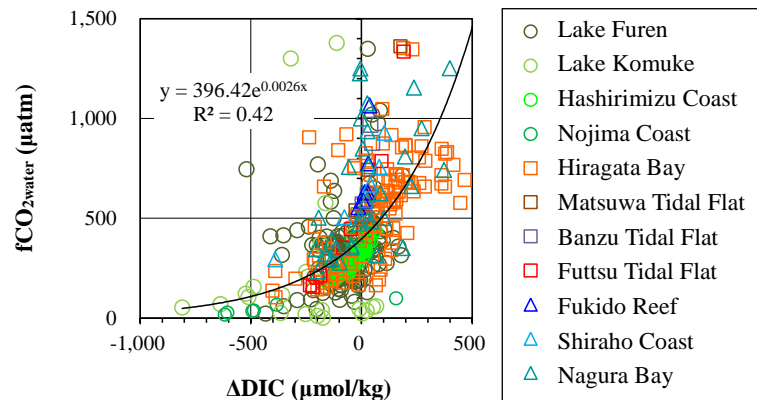


図-4.3 ΔDIC と海水中 CO₂ 分圧の関係

縦軸：海水中 CO₂ 分圧，横軸：ΔDIC，白抜き濃緑丸：風蓮湖，白抜き薄緑丸：コムケ湖，白抜き黄緑丸：走水海岸，白抜き緑丸：野島海岸，白抜き橙四角：平潟湾，白抜き茶四角：松輪干潟，白抜き紫四角：盤洲干潟，白抜き赤四角：富津干潟，白抜き青三角：吹通川河口，白抜き水色三角：白保海岸，白抜き青緑三角：名蔵湾

(1) 連続変数（水温，塩分，ΔDIC，ΔTA）のみ考慮

全観測場所における海水中CO₂分圧を統一的に説明するモデルを構築するため，まず始めに連続変数（水温，塩分，ΔDIC，ΔTA）のみを説明変数の候補としたモデル選択を行った．海水中CO₂分圧に関するモデル推定結果は，式(12)に示すとおり，塩分，ΔDIC，ΔTAが選択された．

$$\text{海水中CO}_2\text{分圧}(\mu\text{atm}) = \exp(-0.017 \times \text{塩分} + 0.005 \times \Delta\text{DIC} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}}\right) - 0.004 \times \Delta\text{TA} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}}\right) + 6.473) \quad (12)$$

ここで，実測値と推定値の比較は図-4.4に示すとおりである．モデルの評価基準として，R²（決定係数），AIC（赤池情報量基準：統計モデルの当てはまりの良さ）を用いた．R²は大きいほど実測値と推定値の相関が高い．一方，AICは小さいほど，データの当てはまりが良いとされている．本モデルでは，R² = 0.67，AIC = 5,870.7となった．

(2) 連続変数+カテゴリー変数（観測場所）考慮

次に，上記以外の要因を考慮するため，カテゴリー変数（観測場所）を付加した一般化線形モデルの解析を行った．海水中CO₂分圧に関するモデル推定結果は，式(12)に示すとおり，塩分，ΔDIC，ΔTA，場所係数が選択された．

場所係数は，風蓮湖 = -0.656，コムケ湖 = -0.350，走水海岸 = -0.521，野島海岸 = -0.211，平潟湾 = -0.445，松輪干潟 = 0.104，盤洲干潟 = 0.000，富津干潟 = -0.336，吹通川河口 = -0.477，白保海岸 = -0.369，名蔵湾 = -0.759と算出され，R² = 0.76，AIC = 5,806.3となった．この場所

係数については，規則性などは確認されず，観測場所ごとの固有値となっており，統合モデルの一般性に欠けると懸念される．

(3) 連続変数+カテゴリー変数（生態系タイプ）考慮

カテゴリー変数として，観測場所の代わりに生態系タイプを付加した一般化線形モデルの解析を行った．解析の結果，式(13)に示すとおり，塩分，ΔDIC，ΔTA，生態系係数が選択され，R² = 0.75，AIC = 5,841.6となった（図-4.5参照）．

$$\text{海水中CO}_2\text{分圧}(\mu\text{atm}) = \exp(-0.018 \times \text{塩分} + 0.005 \times \Delta\text{DIC} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}}\right) - 0.004 \times \Delta\text{TA} \left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}}\right) + \text{生態系係数} + 6.386) \quad (13)$$

生態系係数は，海草場 = 0.050，干潟 = 0.259，サンゴ礁 = 0.000と算出されたことから，海水中CO₂分圧の相対的な大小関係と概ね整合がとれたものとなった．

(4) 感度分析

本推定モデルの確率論的な評価を行うため，各説明変数（塩分，ΔDIC，ΔTA，生態系係数）が海水中CO₂分圧に与える影響度の解析（感度分析）を行った．他パラメータを平均値で固定し，1パラメータずつ現地観測データの80%レンジ（上下位10%を除く）で変化させ，その変動幅をトルネードチャートに示した．

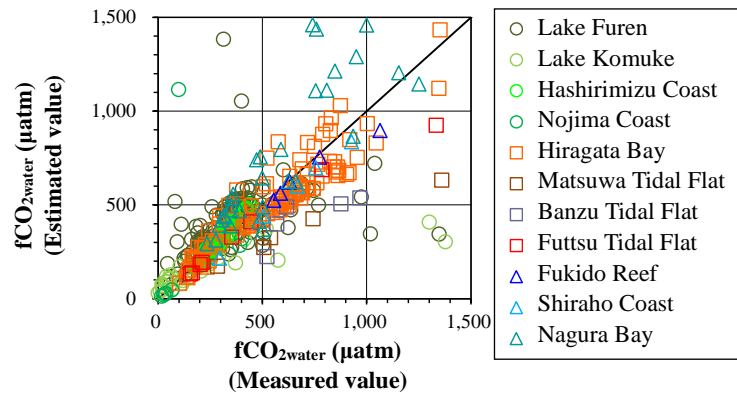


図-4.4 実測値と推定値の比較（連続変数のみ）

縦軸：海水中 CO₂ 分圧（推定値），横軸：海水中 CO₂ 分圧（実測値），白抜き濃緑丸：風蓮湖，白抜き薄緑丸：コムケ湖，白抜き黄緑丸：走水海岸，白抜き緑丸：野島海岸，白抜き橙四角：平潟湾，白抜き茶四角：松輪干潟，白抜き紫四角：盤洲干潟，白抜き赤四角：富津干潟，白抜き青三角：吹通川河口，白抜き水色三角：白保海岸，白抜き青緑三角：名蔵湾

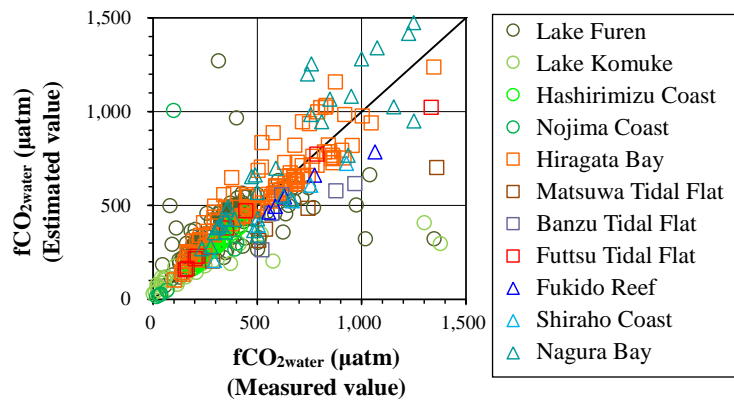
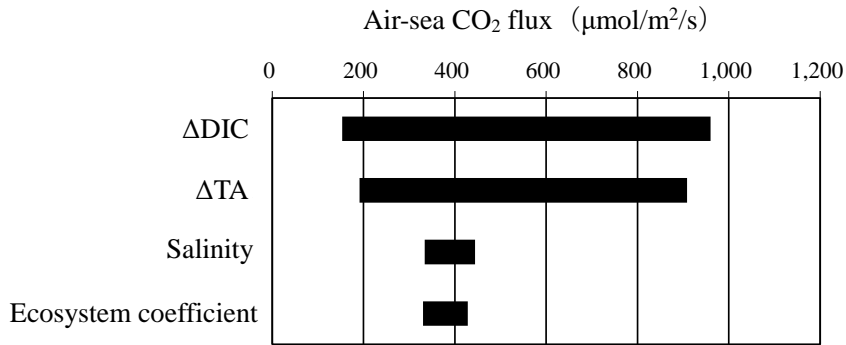


図-4.5 実測値と推定値の比較（連続変数+生態系タイプ）

縦軸：海水中 CO₂ 分圧（推定値），横軸：海水中 CO₂ 分圧（実測値），白抜き濃緑丸：風蓮湖，白抜き薄緑丸：コムケ湖，白抜き黄緑丸：走水海岸，白抜き緑丸：野島海岸，白抜き橙四角：平潟湾，白抜き茶四角：松輪干潟，白抜き紫四角：盤洲干潟，白抜き赤四角：富津干潟，白抜き青三角：吹通川河口，白抜き水色三角：白保海岸，白抜き青緑三角：名蔵湾

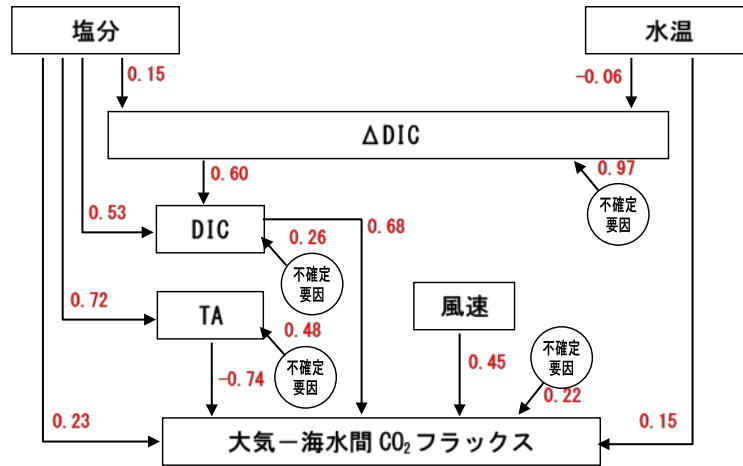


注) 各環境要因の変化に伴い、大気-海水間 CO₂ フラックスが変動する幅を示しており、変動幅の大きい要因から順に上から並べている。

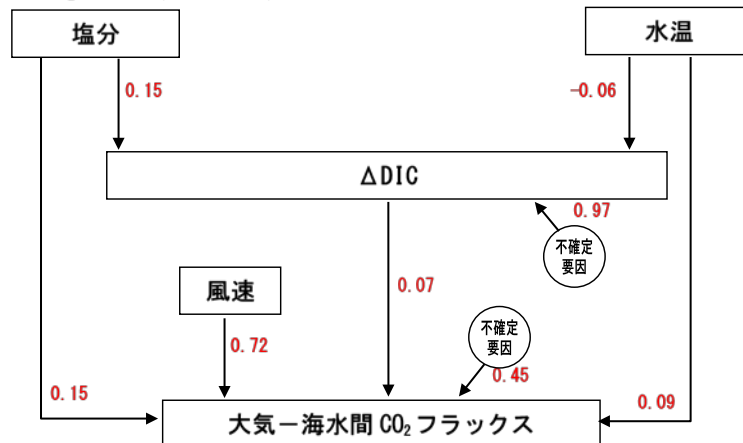
図-4.6 感度分析結果 (トルネードチャート)

縦軸：ΔDIC, ΔTA, 塩分, 生態係数, 横軸：大気-海水間 CO₂ フラックス

【全体モデル】 n=467, GFI=0.72, AIC=1,285



【修正モデル】 n=467, GFI=0.88, AIC=199



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-4.7 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因のパス解析結果 (全データセット)

感度分析の結果（図-4.6参照）、 ΔDIC と ΔTA が海水中 CO_2 分圧を大きく変動させていることがわかった。一方、塩分と生態係数による変動幅は小さく、 CO_2 分圧に与える影響は小さかった。

(5) パス解析結果（全データセット）

パス解析の結果は、図-4.7に示すとおりである。修正モデルでは CO_2 フラックスへのパスとして、物理的な要因としての風速、生物化学的な要因としての水温、塩分、 ΔDIC が結ばれた。全体モデルの適合度は $\text{GFI}=0.72$ 、 $\text{AIC}=1,285$ であったが、修正モデルでは $\text{GFI}=0.88$ 、 $\text{AIC}=199$ となり、大幅に改善された。

4.5 まとめ

国内の主要な浅海域生態系（海草場、干潟、サンゴ礁）において、海水中 CO_2 分圧とその規定要因に関する項目（水温、塩分、生物活動など）を計測し、それらの現地観測結果（引用データを含む）の統合によって、海水中 CO_2 分圧の統一的な推定式を構築し、海水中 CO_2 分圧の動態を説明するための重要な環境要因の抽出を行った。

海水中 CO_2 分圧は、生物活動自体を示す指標である ΔDIC や ΔTA との関係性が強く、共に重要な影響要因となった。 ΔDIC は、海水中の生物活動を表していることから、プラス方向（呼吸・分解活動）になると海水中 CO_2 分圧を高め、マイナス方向（光合成活動）になると低下させている。併せて、石灰化（サンゴの成長など）も、 CaCO_3 の析出及び海水中 CO_2 分圧の上昇に寄与していると考えられる。一方で、観測場所（地理・地形）や生態系タイプなどの影響は比較的小さいと考えられるが、海水中 CO_2 分圧の動態に係る推定精度を向上させるためには、このような固有データの収集・蓄積も重要になってくると考えられる。

なお、水温による影響については、個々の観測場所においては、呼吸などの生物活動によって海水中 CO_2 分圧に直接影響を及ぼしていると考えられるが、国内の全てのデータセットを用いて統計解析を行った際には、亜寒帯~温帯~亜熱帯までの緯度の違いによる平均水温の差が大きくなるため、水温による海水中 CO_2 分圧への影響が弱まったと考えられる。

今後の課題として、観測データの精度向上と均質性の確保が挙げられる。 ΔDIC や ΔTA は、河川水と外海水の単純混合割合で説明できない DIC と TA の差分を算出しているため、河川・外海境界地点の設定が非常に重要となってくる。このため、陸域負荷による影響などを精度良く適切に見積もる必要がある。また、今回の取得データにお

いては、観測場所ごとのサンプル数の相違や日周期変動（夜間）データの不足が生じており、平面移動観測だけでは把握しきれない低塩分域（海水中 CO_2 分圧の日変化が大きい場所）をターゲットとした連続観測の充実が必要となる。

5. 結論

「ブルーカーボン」とは、海洋生物の作用によって海中に取り込まれた炭素のことである。地球上の生物が吸収する CO_2 のうち、海洋生物は陸上とほぼ同じ割合以上の CO_2 を吸収しており、浅海域（ごく浅い沿岸部）の生態系は海洋で貯留される炭素の約8割であることが提唱された。そこで、本研究では温室効果ガスの削減等の「緩和策」の1つとして、海洋に存在する炭素の総称「ブルーカーボン」に関して、浅海域における大気-浅海域間の CO_2 のやりとりに着目した。本研究では、物理過程（水塊の移流拡散、風速、潮位変化等）、化学過程、生物過程（光合成、呼吸等）を考慮し、海水中 CO_2 分圧に及ぼす影響を検討するために統計解析を適用し、海水中 CO_2 分圧の現況推定モデルを構築することを目的とした。

日本の浅海域における現地観測事例（亜寒帯、温帯、亜熱帯の代表例）の整理及び観測データを用いた統計解析（パス解析、一般線形モデル）を行った。現地観測にて、大気-海水間 CO_2 フラックスを推定した。また、大気-海水間 CO_2 フラックスに影響を及ぼす環境要因（風速、水温、塩分、全アルカリ度（ TA ）、溶存無機炭素濃度（ DIC ）、生物過程による炭素増減量（ ΔDIC ））の相対的な影響度を把握するために、統計解析を用いた分析を行った。その結果、観測場所により詳細は異なるが、主に、①風速、②流入負荷、そして③生物過程（呼吸・分解、光合成）から影響を受けることがわかった。

国内の主要な浅海域生態系（海草場、干潟、サンゴ礁）において、海水中 CO_2 分圧とその規定要因に関する項目（水温、塩分、生物活動など）を計測し、それらの現地観測結果の統合によって、海水中 CO_2 分圧の統一的な推定式を構築し、海水中 CO_2 分圧の動態を説明するための重要な環境要因の抽出を行った。海水中 CO_2 分圧は、生物活動自体を示す指標である ΔDIC や ΔTA との関係性が強く、共に重要な影響要因となった。 ΔDIC は、海水中の生物活動を表していることから、プラス方向（呼吸・分解活動）になると海水中 CO_2 分圧を高め、マイナス方向（光合成活動）になると低下させている。併せて、石灰化（サンゴの成長など）も、 CaCO_3 の析出及び海水中 CO_2 分圧の上昇に寄与していると考えられる。

6. あとがき

本研究成果について、陸と海の境界条件が特定でき、物理過程や生物過程による影響の把握が可能なケースでは、他海域でも同様の手法を適用できると考えられる。世界第6位の長い海岸線に沿って広大な浅海域を有する日本にとって、アマモ場等を含む海草場のCO₂吸収能力を維持・拡大できるような環境要因の新たな知見等を蓄積・確立することができれば、今後の気候変動対策の有効なオプションとして大きく貢献することができる。

また、日本の沿岸域を地域ごとに区分することで全てボックスモデル化し、各観測場所の現地データ・数値計算結果を整理・体系化することにより、日本全国版のCO₂分圧の推定に繋がっていくと考えられる。

なお、本研究では海水中CO₂分圧の日周期変化に着目した解析が主であるため、トータルとして炭素がどのくらい隔離・貯留が行われているかを算出することは困難であると考えている。無機炭素以外の有機炭素の変動、大気と海面のやりとり、海水中と海底面のやりとり、外海との海水交換等について、少なくとも年スケールでの検討を行うことにより、今後算出が可能になると考えられる。

今後の温暖化への対応として、水温の変化等の累積値により、例えば、アマモが経年的にどの程度成長するかについて見積もることは可能である。アマモ場全体のバイオマス量は推定となるが、外的要因、気温、風などが分かれば、将来の海水中CO₂分圧モデルの開発など、今後の温暖化への適用方法について検討することが必要となってくる。

(2020年4月24日受付)

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費(JP18H04156)と環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-14の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) IPCC : Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, *Ippc fifth assessment report : Climate change 2013*, 1535p, Cambridge University Press, New York, 2013.
- 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 CO₂, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, pp.552-560, 2011.
- 4) Fourqurean, J.W., Duarte, C.M., Kennedy, H. *et al.* : Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock, *Nature Geoscience*, 5, pp.505-509, 2012.
- 5) Watanabe, K., Kuwae, T.: How organic carbon derived from multiple sources contributes to carbon sequestration processes in a shallow coastal system?, *Global Change Biology*, 21, pp.2612-2623, 2015.
- 6) Raymond, P.A., Cole, J.J. : Gas exchange in rivers and estuaries: Choosing a gas transfer velocity, *Estuaries*, 24, pp.312-317, 2001.
- 7) Borges, A.V., Delille, B., Schiettecatte LS, Gazeau F, Abril G, Frankignoulle M : Gas transfer velocities of CO₂ in three European estuaries (Randers Fjord, Scheldt, and Thames), *Limnology and Oceanography*, 49, pp.1630-1641, 2004.
- 8) Borges, A.V., Delille, B., Frankignoulle, M. : Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystem counts, *Geophysical Research Letters*, 32, pp.1-4 L14601, doi:14610.11029/12005GL023053., 2005.
- 9) Borges, A.V., Schiettecatte, L.S., Abril G. *et al.* : Carbon dioxide in European coastal waters, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70, pp.375-387, 2006.
- 10) Jiang, L.Q., Cai, W.J., Wang, Y. : A comparative study of carbon dioxide degassing in river- and marine-dominated estuaries, *Limnology and Oceanography*, 53, pp.2603-2615, 2008.
- 11) Laruelle, G.G., Dürr, H.H., Slomp, C.P., Borges, A.V. : Evaluation of sinks and sources of CO₂ in the global coastal ocean using a spatially-explicit typology of estuaries and continental shelves, *Geophysical Research Letters*, 37, L15607, doi:15610.11029/12010GL043691, 2010.
- 12) Cai, W.J. : Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO₂ sinks or sites of terrestrial carbon incineration?, *Annual Review of Marine Science*, 3, pp.123-145, 2011.
- 13) Chen, C.T.A., Huang, T.H., Chen, Y.C., Bai, Y., He, X.,

- Kang, Y. : Air-sea exchange of CO₂ in world's coastal seas, *Biogeoscience Discuss*, 10, pp.5041–5105, 2013.
- 14) Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, P. *et al.* : Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean, *Nature Geoscience*, 6, pp.597–607, 2013.
- 15) Amann, T., Weiss, A., Hartmann, J. : Inorganic Carbon Fluxes in the Inner Elbe Estuary, Germany, *Estuaries and Coasts*, DOI 10.1007/s12237-014-9785-6, 2014.
- 16) Chen, C.T.A., Huang, T.H., Fu, Y.H., Bai, Y., He, X. : Strong sources of CO₂ in upper estuaries become sinks of CO₂ in large river plumes, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, pp.179–185, 2012.
- 17) Tokoro, T., Hosokawa, S., Miyoshi, E. *et al.* : Net uptake of atmospheric CO₂ by coastal submerged aquatic vegetation, *Global Change Biology*, 20, pp.1873–1884, 2014.
- 18) Kuwae, T., Kanda, J., Kubo, A., Nakajima, F. *et al.* : Blue carbon in human-dominated estuarine and shallow coastal systems, *Ambio*, 45, pp.290–301, 2016.
- 19) Smith, S.V. : Marine macrophytes as a global carbon sink, *Science*, 211, pp.838–840, 1981.
- 20) Frankignoulle, M. : Field-measurements of air sea CO₂ exchange, *Limnology and Oceanography*, 33, pp.313–322, 1988.
- 21) Barrón, C., Duarte, C.M., Frankignoulle, F., Borges A.V. : Organic carbon metabolism and carbonate dynamics in a Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow, *Estuaries and Coasts*, 29, pp.417–426, 2006.
- 22) Koné, Y.J.M., Abril, G., Kouadio, K.N., Delille, B., Borges, A.V. : Seasonal variability of carbon dioxide in the rivers and lagoons of ivory coast (West Africa), *Estuaries and Coasts*, 32, pp.246–260, 2009.
- 23) Crosswell, J.R., Anderson, I.C., Stanhope, J.W. *et al.* : Carbon budget of a shallow, lagoonal estuary: Transformations and source-sink dynamics along the river-estuary-ocean continuum, *Limnology and Oceanography*, 62, S29-S45, 2017.
- 24) Weiss, R.F. : Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a nonideal gas, *Marine Chemistry*, 2, pp.203–215, 1974.
- 25) Gazeau, F., Duarte, C.M., Gattuso, J.P. *et al.* : Whole-system metabolism and CO₂ fluxes in a Mediterranean Bay dominated by seagrass beds (Palma Bay, NW Mediterranean), *Biogeosciences*, 2, pp.43–60, 2005.
- 26) Wanninkhof, R. : Relationship between wind-speed and gas-exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, 97, pp.7373–7382, 1992.
- 27) de la Paz, M., Gómez-Parra, A., Forja, J. : Inorganic carbon dynamic and air-water CO₂ exchange in the Guadalquivir Estuary (SW Iberian Peninsula), *Journal of Marine Systems*, 68, pp.265–277, 2007.
- 28) Borges, A.V., Frankignoulle, M. : Daily and seasonal variations of the partial pressure of CO₂ in surface seawater along Belgian and southern Dutch coastal areas, *Journal of Marine Systems*, 19, pp.251–266, 1999.
- 29) Alwin, D.F., Hauser, R.M. : The Decomposition of Effects in Path Analysis, *American Sociological Review*, 40, pp.37-47, 1975.
- 30) 所立樹, 渡辺謙太, 田多一史, 桑江朝比呂 : 港湾におけるブルーカーボン (CO₂ 吸収と炭素隔離) の計測手法のガイドライン, 港湾空港技術研究所資料, No.1309, 29p, 2015.
- 31) McGillis, W. R., Edson, J. B., Ware, J. D., Dacey, J. W. H., Hare, J. E., Fairall, C. W. and Wanninkhof, R. : Carbon dioxide flux techniques performed during gasex-98, *Marine Chemistry*, 75, pp.267-280, 2001.
- 32) Tokoro, T., Kayanne, H., Watanabe, A., Nadaoka, K., Tamura, H., Nozaki, K., Kato, K. and Negishi, A. : High gas-transfer velocity in coastal regions with high energy-dissipation rates, *Journal of Geophysical Research*, 113, doi:10.1029/2007JC004528, 2008.
- 33) 近藤純正 : 風, 地表面に近い大気 of 科学, 東京大学出版会, 東京, pp.82-108, 2000.
- 34) 桑形恒男, 近藤純正 : 西日本アメダス地点における地表面粗度の推定, 天気, Vol.109, pp.15-18, 1991.
- 35) 桑形恒男, 近藤純正 : 東南北部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定, 天気, Vol.109, pp.55-59, 1990.
- 36) 近藤純正, 桑形恒男, 中園信 : 地域代表風の推定法, 自然災害科学, Vol.10-3, pp.171-185, 1991.
- 37) Jähne, B., Heinz, G. and Dietrich, W. : Measurement of the diffusion-coefficients of sparingly soluble gases in water, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, 92, pp.10767 -10776, 1987.
- 38) 環境省自然環境局 : 第 7 回自然環境保全基礎調査, 浅海域生態系調査 (藻場調査) 報告書, pp.30-31, 2008.
- 39) 吉元豊 : 風蓮湖—その自然と開発保護 (その 1) , 北海道の自然と生物, 5, pp.68-84, 1991.

- 40) 八戸法昭, 石川清, 高坂智, 長野満: 風蓮湖水質環境の現状と問題点, 北海道大学衛生工学シンポジウム, pp.353-358, 1993.
- 41) 山本潤, 牧田佳巳, 山下彰司, 田中仁: 風蓮湖に陸域からの汚濁負荷が及ぼす影響に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1006-1010, 2007.
- 42) 門谷茂, 真名垣友樹, 柴沼成一郎: 酪農業の進展と風蓮湖の生物生産構造変化, 沿岸海洋研究, 第 49 巻, 第 1 号, pp.59-67, 2011.
- 43) Watanabe, A., Kayanne, H., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., Kudo, S., Kimoto, H., Tsuda, M. and Dickson, A. G. : A rapid, precise potentiometric determination of total alkalinity in seawater by a newly developed flow-through analyzer designed for coastal regions, *Marine Chemistry*, 85, pp.75-87, 2004.
- 44) 所立樹, 細川真也, 三好英一, 門谷茂, 茅根創, 桑江朝比呂: 沿岸域のブルーカーボンと大気中 CO₂ の吸収との関連性に関する現地調査と解析, 港湾空港技術研究所報告, 第 52 巻, 第 1 号, 49p, 2013.
- 45) 丸谷靖幸, 中山恵介, 駒井克昭, 渡辺謙太, 三好英一, 一見和彦, 桑江朝比呂: コムケ湖における現地観測結果を用いた湖内の流動特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.1228-1233, 2013.
- 46) 吉江祐人, 丸谷靖幸, 中山恵介, 駒井克昭, 新谷哲也, 渡辺謙太, 一見和彦, 桑江朝比呂: コムケ湖における水質及び流動特性の解明, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.1176-1181, 2014.
- 47) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂: 北海道風蓮湖における大気-海水間 CO₂ フラックスに影響を及ぼす要因, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.1252-1257, 2013.
- 48) Hunt, C. W., Salisbury, J. E., Vandemark, D. and McGillis, W. : Contrasting carbon dioxide inputs and exchange in three adjacent New England estuaries, *Estuaries and Coasts*, 34, pp.68-77, 2011.
- 49) 工藤孝浩・秋元清治: 横須賀市走水海岸アマモ場における春・夏季の魚類相について, 神奈川県水産技術センター研究報告, 第 6 巻, pp. 35-40, 2013.
- 50) Dickson, A.G., Sabine, C., Christian, J.R. : Water sampling for the parameters of the oceanic carbon dioxide system, In: *Guide to Best Practices for Ocean CO₂ Measurements*, Pices Special Publication 3, Sidney, 2007.
- 51) Kimoto, H., Nozaki, K., Kudo, S., Kato, K., Negishi, A., Kayanne, H. : Achieving high time-resolution with a new flow-through type analyzer for total inorganic carbon in seawater, *Analytical Sciences*, 18, pp.247-253, 2002.
- 52) Saito, H., Tamura, N., Kitano, H., Mito, A., Takahashi, C., Suzuki, A., Kayanne, H. : A compact seawater pCO₂ measurement system with membrane equilibrator and nondispersive infrared gas analyser, *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 42, pp.2025-2033, 1995.
- 53) Zeebe, R.E., Wolf-Gladrow, D. : Equilibrium. In: *CO₂ in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*. Elsevier, Amsterdam, 83p, 2001.
- 54) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 茂木博匡, 桑江朝比呂: 国内の様々な浅海域における海水中 CO₂ 分圧の実測と統計モデルによる予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.1333-1338, 2015.
- 55) 柵瀬信夫, 林文慶, 越川義功, 中村華子, 工藤孝浩, 関口昌幸, 相原健彦, 早川厚一郎, 村橋克彦: 横浜市平潟湾野島水路開放に伴う生物動態調査, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp.183-188, 1999.
- 56) 越川義功, 大槻晃, 萩原清司, 柵瀬信夫: 横浜平潟湾における遮水壁撤去による塩分, 底質環境と底生生物相の変化, 環境科学会誌, 13(3), pp.357-367, 2000.
- 57) 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.
- 58) Clark, L. A. and Pregibon, D. : Tree-based models. In Chambers, J.M. and Hastie, T.J. eds. *Statistical Models in S*, California, Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, Pacific Grove, pp. 377-419, 1992.
- 59) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 茂木博匡, 桑江朝比呂: 北海道コムケ湖における大気-海水間 CO₂ フラックスの空間分布特性と要因分析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.1188-1193, 2014.
- 60) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 茂木博匡, 桑江朝比呂: アマモ場における大気-海水間 CO₂ フラックスの連続観測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_1191-I_1195, 2014.
- 61) 工藤孝浩, 滝口直之, 柵瀬信夫: 横浜市平潟湾流域の魚類相と人為的環境改変, 神奈川県水産総合研究所研究報告, 第 7 号, pp.135-148, 2002.
- 62) 古川恵太, 藤野智亮, 三好英一, 桑江朝比呂, 野村

宗弘, 萩元幸将, 細川恭史: 干潟の地形変化に関する現地観測—盤洲干潟と西浦造成干潟—, 港湾空港技術研究所資料, No.965, 30p, 2000.

- 63) 野村宗弘, 中村由行: 盤洲干潟における潮汐に伴う水質変動に関する現地観測, 水環境学会誌, 第 25 巻, 第 4 号, pp.217-225, 2002.
- 64) 山北剛久, 仲岡雅裕, 近藤昭彦, 石井光廣, 庄司泰雅: 東京湾富津干潟における海草藻場の長期空間動態, 保全生態学研究, 第 10 巻, 2 号, pp.129-138, 2005.

港湾空港技術研究所報告 第59巻 第1号

2020.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Field Observation and Statistical Analyses of the Fugacity of Carbon Dioxide in Shallow Coastal Waters
Kazufumi TADA, Tatsuki TOKORO, Kenta WATANABE, Hirotada MOKI, Tomohiro KUWAE... 3
2. Fundamental Study on Harbor Waves Sheltered by Impermeable Submerged Breakwater
Katsuya HIRAYAMA, Yuuki HAMANO, Junya NAGANUMA..... 66