

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.52 No.1 March 2013

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 52 卷 第 1 号 (Vol. 52, No. 1) , 2013 年3月 (March 2013)

目 次 (CONTENTS)

1. 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
……………所立樹, 細川真也, 三好英一, 門谷茂, 茅根創, 桑江朝比呂 …… 3
(Field Measurements and Analyses of Coastal Blue Carbon and Atmospheric CO₂ Sequestration
……………Tatsuki TOKORO, Shinya HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI,
Shigeru MONTANI, Hajime KAYANNE, Tomohiro KUWAE)

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

所 立樹*・細川 真也**・三好 英一***・門谷 茂****・茅根 創*****・桑江 朝比呂*****

要 旨

将来の気候変動対策のための、大気中 CO₂ 濃度増加の抑制は喫緊の課題である。近年、気候変動対策の一つとして注目されている「ブルーカーボン」は、海洋生態系の光合成活動によって固定される炭素であり、堆積物中に蓄積されることで最大で数千年程度 CO₂ が大気中から隔離されるため、今後の気候変動対策にとって重要なオプションとなり得る。沿岸域はブルーカーボンの主要な堆積の場であり、特に海草場では、再生や保全によって、温室効果ガス削減効果も期待される。

しかしながら、ブルーカーボンの蓄積と大気中 CO₂ 濃度やその動態との関係性について、定量的な評価はなされていない。これは、沿岸域特有の複雑な炭素フローに起因している。さらに、従来の知見では、沿岸域は陸域から供給される有機物の分解の場であることから、基本的に大気中への CO₂ 放出源とみなされている。また、既存の研究は植生が無い河川域や水中では有機物の分解が卓越するマングローブや塩性湿地（すなわち、潜在的に海水から大気中へ CO₂ が放出されやすい場）に集中しており、光合成活動により水中の CO₂ 分圧を低下させ、大気中 CO₂ の吸収量の増加をもたらす可能性がある海草場については、世界的にもほとんど測定例がない。

本研究では、国内の海草場の炭素動態を現地観測し、測定値を既往研究と比較することで、海草場におけるブルーカーボンの蓄積と大気中 CO₂ 吸収との関係性を解析した。その結果、光合成活動が呼吸・分解活動よりも卓越する海草場では、従来の知見と異なり、大気中 CO₂ の吸収源であることが分かった。また、既往研究との比較から、この結果は一地域だけではなく亜寒帯・亜熱帯を含む世界規模の空間代表性を持ちうることを示された。

本研究の成果として、ブルーカーボンにより沿岸域に炭素固定という新たな価値が付加されることが挙げられる。すなわち、沿岸域が温暖化対策に貢献することを示している。さらに、陸上の森林における CO₂ 吸収に対する便益の計上と同様に、沿岸域における生態系の保全や再生のための資金源の獲得に繋がることを期待される。

キーワード：沿岸植生域の再生・保全，CO₂ 吸収，炭素隔離・貯留，海草場

* 沿岸環境研究チーム 研究官
** 元 沿岸環境研究チーム 主任研究官
*** 沿岸環境研究チーム 主任研究官
**** 北海道大学大学院 水産科学研究院 海洋環境科学分野 教授
***** 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻 教授
***** 沿岸環境研究チーム チームリーダー

Field Measurements and Analyses of Coastal Blue Carbon and Atmospheric CO₂ Sequestration

Tatsuki TOKORO*

Shinya HOSOKAWA**

Eiichi MIYOSHI***

Shigeru MONTANI****

Hajime KAYANNE*****

Tomohiro KUWAE*****

Synopsis

The mitigation of the greenhouse gases is urgent task for the future climate change initiative. The Blue Carbon, which is carbon capture by marine living organisms, is recently focused as an important factor for the climate change initiative, because the Blue Carbon sequestered in the sediment is considered to be separated from the atmosphere for thousands years.

However, the contribution of Blue Carbon sequestration to atmospheric CO₂ has been unclear because studies comprehensively analyzing the complex carbon-flows in coastal regions are few. Especially, the Blue Carbon contribution to atmospheric CO₂ cannot be determined only from the sequestration rate of the Blue Carbon in submerged aquatic plants where their photosynthetic activity uses the dissolved inorganic carbon in water, not atmospheric CO₂ directly.

In turn, coastal regions have been thought to be a source of atmospheric CO₂ due to mineralization of the organic matter supplied from land. In addition, most previous studies intended for estuaries having few vegetations, or mangroves and salt-marshes where the organic carbon decomposition is dominant in water. Thus, measurements in seagrasses, where the ecosystem production decreases the partial pressure of CO₂ in water and would increase atmospheric CO₂ influx, have been few.

In this study, we performed *in-situ* carbon-flow measurements and analyzed the relationship between Blue Carbon sequestration and atmospheric CO₂ flux in two seagrass meadows. The results indicate that autotrophic seagrass meadows would be an atmospheric CO₂ sink, contrary to the former recognition. Furthermore, this result is indicated to be able to apply the global coastal regions from comparison with former studies.

This study provokes a novel ecosystem functioning as “atmospheric CO₂ sink” for the coastal vegetations, and such an ecosystem can be a basis for the climate change initiative.

Key Words: Blue Carbon, coastal vegetations, atmospheric CO₂ sink

* Researcher, Coastal and Estuarine Environment Research Group

** Co-Senior Researcher, Coastal and Estuarine Environment Research Group

*** Senior Researcher, Coastal and Estuarine Environment Research Group

**** Professor, Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

***** Professor, Department of Earth and Planetary Sciences, the University of Tokyo

***** Head, Coastal and Estuarine Environment Research Group

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 E-mail : tokoro-t@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 水中の炭酸系の概要	8
3. 現地調査水域	8
3.1 風蓮湖	8
3.2 吹通川河口	9
4. 測定手法	9
4.1 大気-水間CO ₂ フラックス	9
(1) : 渦相関法	10
(2) : バルク法	10
(3) : フローティングチャンバー法	11
4.2 生態系全体の炭素吸収速度 (純生産速度)	12
4.3 陸域からの流入負荷	13
4.4 その他の気象・流動・水質データ	13
5. 測定結果	13
5.1 大気-水間CO ₂ フラックス	13
5.2 生態系全体の炭素吸収速度 (純生産速度)	14
5.3 陸域からの流入負荷	14
5.4 その他の気象・流動・水質データ	14
6. 考察	14
6.1 現地調査水域における炭素フロー	14
6.2 既往研究における炭素フローとの比較	17
7. あとがき	20
謝辞	23
参考文献	24
記号表	25
付録	27

1. まえがき

CO₂をはじめとする大気中の温室効果ガス濃度の上昇による気候変動は、将来の農業や漁業への悪影響や気候災害の増加などを引き起こすことが予想されており、温室効果ガスの濃度上昇対策は喫緊の課題である¹⁾。大気中のCO₂を大気から隔離・貯留するために、近年「ブルーカーボン」と呼ばれる炭素ストックが注目されている。ブルーカーボンは、海洋生態系の光合成などの活動によって固定（隔離・貯留）された炭素の総称であり、地球全体の光合成活動によって固定される炭素の55%に相当する²⁾。既存の研究では、堆積物中への有機炭素の堆積速度（図-1）がブルーカーボンの蓄積速度（トン-C/year）と捉えられており、沿岸域と外洋で年間2.11億トン-C程度蓄積されていると見積もられている³⁾（表-1）（なお、本稿の定義では、大陸棚は沿岸域に含まない）。堆積物中のブルーカーボンは最大で数千年単位で大気中から隔離されると見積もられているため^{4,5)}、沿岸域のブルーカーボンは将来の気候変動対策の重要なオプションとして近年注目を集めている^{2,3)}。ブルーカーボンの堆積の場としては海洋全体の中で沿岸域が主要であり、その速度は外洋の30倍以上と見積もられている（表-1）。特に海草場は、近年再生・保全技術が確立しつつあるため、港湾における海草場の再生や保全によって、温室効果ガス削減対策への貢献が期待される。

しかしながら、ブルーカーボンと、大気中CO₂濃度やその動態との関係性について、定量的な評価はなされていないのが現状である。これは、ブルーカーボンの一部がその場に堆積せず、外洋などの外の系に流出することや、炭素が河川を通して陸域からも流入するためである。また、海草場のような水中に植生を有する沿岸域では、植生が吸収する炭素は大気中のCO₂ではなく、水中に存在する溶存無機炭素であることに留意するべきである（図-1）。海草などによる光合成は、水中のCO₂分圧を低下させ、大気から水中へのCO₂の移動量（フラックス）の増加をもたらすものの⁶⁾、水中の溶存無機炭素の減少分と大気中CO₂の吸収量は一対一ではない。両者の関係は、炭酸水素イオンや炭酸イオンによる緩衝効果や水面の物理環境などの影響を受ける非常に複雑なものであるため、海草場のような沿岸域ではブルーカーボンの蓄積のみ注目しても、大気中CO₂の削減効果は判断できない。

従来の研究では、沿岸域はむしろ陸域から負荷された有機物の分解の場、すなわち「沿岸域は大気中へのCO₂放出源」との見方が一般的である⁷⁻⁸⁾。これは、既存の研究は植生があまり存在しない上に陸域負荷の影響が大き

い河口域や、大気中のCO₂を直接吸収し水中で有機物の分解が卓越するマングローブや塩性湿地などの植生のある沿岸域における測定例が大半であるためである（図-1）。一方、水中に植生を有する海草場のような植生のある沿岸域での大気-水間CO₂フラックスはほとんど測定されていない⁷⁻⁸⁾。前述の通り、海草場では、光合成活動により大気中CO₂の吸収量が増加すると考えられるため、このような場所では、従来の知見と異なり、大気中CO₂の吸収源である可能性が考えられる。

植生のある沿岸域は陸域負荷や生物活動（光合成・呼吸・分解）などの複数の炭素フローの影響が大きい。従って、それぞれのフローの要素を積み重ねて解析する方法では、測定精度に限界があると考えられる。本研究では、複数の炭素フローの収支である溶存無機炭素の濃度変動や大気-水間CO₂フラックスを主に実測し、それらから個別の炭素フローの定量的な解析を進めることを目的とした。現地調査では、大気中CO₂の吸収源の可能性が考えられる海草場を対象とし、大気-水間CO₂フラックス・植物による溶存無機炭素の取り込み（純生産速度）・陸域からの無機炭素負荷を測定項目とした。また、測定結果と従来の既往研究との比較により、海草場における大気中CO₂吸収のポテンシャルを評価した。

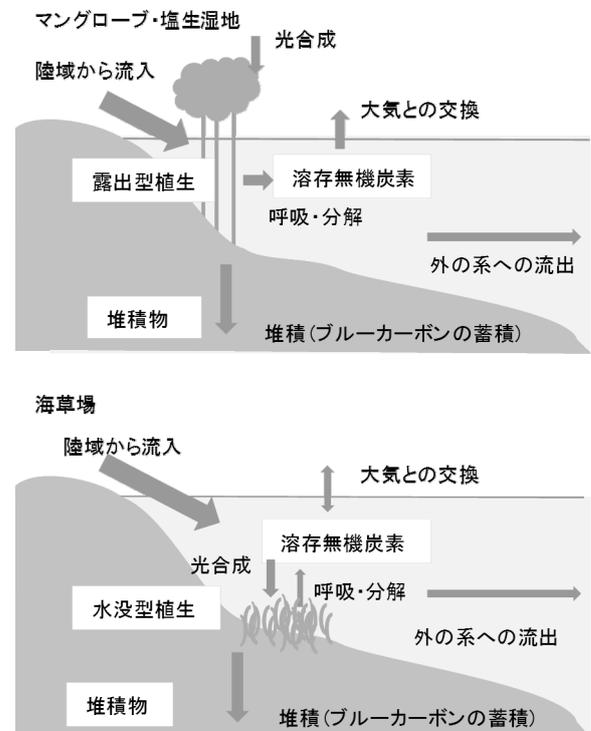


図-1 マングローブ・塩性湿地（露出型植生）と海草場（水没型植生）における炭素フローの模式図

表-1 地球全体におけるブルーカーボンの蓄積速度（堆積物中への有機炭素の堆積速度）
Nellemann *et al.*, 2009²⁾を改変 *：有機炭素が堆積する面積が大陸棚全体の10%に当たると仮定.

	分類	総面積 (百万km ²)	蓄積速度 (mmol-C/m ² /day)	総蓄積速度 (億トン-C/year)	
沿岸域	マングローブ	0.17	31.7	0.24	
	植生のある沿岸域	塩性湿地	0.4	34.5	0.60
		海草場	0.33	18.9	0.27
		計(植生のある沿岸域)			1.11
	植生のない沿岸域	河口域	1.8	11.4	0.90
		計(沿岸域全体)			2.11
大陸棚		26.6*	4.6	0.53	
外洋		330.0	4.1×10 ⁻³	0.06	

2. 水中の炭酸系の概要

水中における炭素は大きく分けて溶存無機炭素(DIC)、懸濁態有機炭素、溶存有機炭素の3種として存在するが、本研究では溶存無機炭素を対象とし、この平衡系を「炭酸系」と呼称する。

水中の溶存CO₂濃度の変動は、陸域負荷や生物活動による影響とともに、平衡状態にある炭酸水素イオン(HCO₃⁻)や炭酸イオン(CO₃²⁻)による緩衝作用の影響を受ける。水中CO₂濃度は大気-水間CO₂フラックスを規定する要因の一つであるため、水域の炭素フロー解析において水中炭酸系の平衡関係の把握は必須である。本研究では、後述する測定手法に関連する基本的な炭酸系の原則について記載する。

水中炭酸系において重要な変数は溶存無機炭素濃度(DIC)と全アルカリ度(TA)の2つである。溶存無機炭素濃度は水中の溶存CO₂、炭酸水素イオン、炭酸イオンの濃度の総和である。

$$DIC = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \quad (1)$$

全アルカリ度は、水中の電気バランスにより生じる弱酸由来の陰イオンの総量と陽イオンの総量の差で、一般的な自然界の水では下記式で示される。

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

式中の[X]は、炭酸水素イオンと炭酸イオン以外のイオンの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。一般的な水域では、全アルカリ度の9割以上は炭酸水素イ

オンと炭酸イオンであるため、[X]の寄与分は塩分などで近似して求める方法が一般的である⁶⁾。全アルカリ度は炭酸平衡系によるCO₂濃度への緩衝力の目安でもあり、同程度の溶存無機炭素濃度の増減でも全アルカリ度が低い淡水などでは、全アルカリ度が高い海水よりもCO₂濃度の増減が大きくなる。

溶存無機炭素濃度と全アルカリ度は滴定法や気液平衡法などで測定が可能であるため、これら2つの変数からCO₂濃度の算出が可能である⁶⁾。例えば、植生の影響を受けていない溶存無機炭素濃度の推定が可能な場合、全アルカリ度が既知であれば生物活動の影響を受けていないCO₂濃度の推定が可能である。

3. 現地調査水域

本稿における現地調査水域は、北海道の風蓮湖(北緯43°19'46.5"、東経145°15'27.8")と沖縄県石垣島の吹通川河口(北緯24°29'22.1"、東経124°13'40.5")である。両者とも河口付近に位置する海草場であるため、陸域負荷や生物活動の影響が捉えやすいと考えられる。また、生物活動や陸域負荷、炭酸系(CO₂の溶解度を含む)といったほぼすべての炭素フローに影響を与える水温の影響も、上記のサイトの比較から解析できる。

3.1 風蓮湖

風蓮湖はほぼ全域(57.4 km²)がアマモ場の汽水ラグーンである(図-2)。西湖盆と東湖盆を結ぶ水脈筋(水深5mほど)を除くと、ほぼ全域で浅い(1~2m程度)ラグーンには、風蓮川やヤウシュベツ川などの牧場地を經由

した河川から淡水が流入し、オホーツク海に繋がるラグーン口で海水が交換している。測定地点(水深 0.7~1.6 m)は風蓮川の河口付近で湖全体でもアマモの生息密度(アマモの乾燥重量は 10~48 g/m², 未発表データ)が高い水域であるため、陸域負荷と生物活動の影響が最も強く検出されると考えられる。なお、風蓮川周辺では厚さ 1~2 m ほどの泥炭層が確認されており、ブルーカーボンが長期間蓄積したと考えられる⁹⁾。

3.2 吹通川河口

吹通川河口(約 1 km²)はマングローブ林に隣接した海域である(図-3)。測定地点は、マングローブ内を経由している吹通川河口から、200 m ほど離れた地点に設定した。この地点にはサンゴはほとんど生息しておらず、リュウキュウアマモなどの海草が主要な植生となっている。測定点周辺の水深はほぼ全域で 3m 以下である。この水域では潮汐の影響が非常に強く、上げ潮時には吹通川を通してマングローブ林内部まで海水が遡上する。河口付近の堆積環境は非定常で、台風などのかく乱の影響を強く受ける。この水域では既存の研究でも純生産速度や大気-水間 CO₂ フラックスが計測されており、既往研究が比較的豊富な水域である¹⁰⁻¹²⁾。

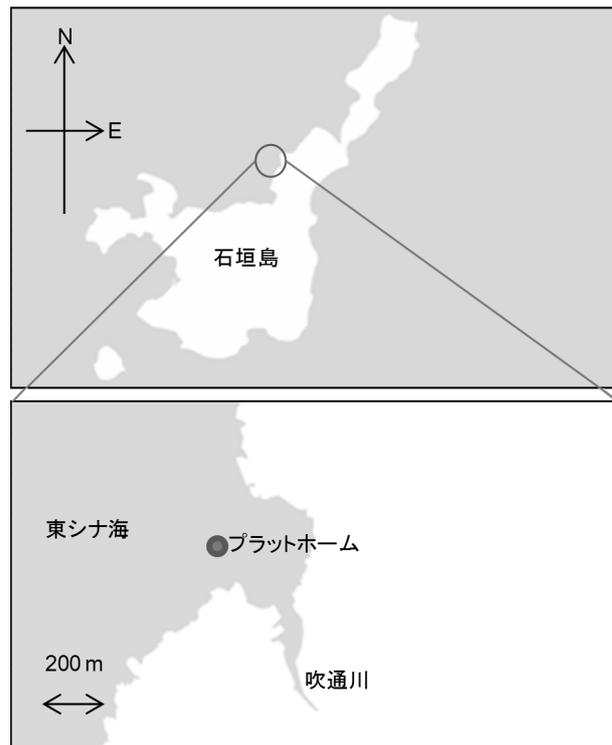


図-3 現地観測を実施した吹通川河口の位置

4. 測定手法

4.1 大気-水間 CO₂ フラックス

大気と水間の CO₂ 交換量は、3つの手法(渦相関法・バルク法・フローティングチャンバー法)を併用して測定した。それぞれの測定手法の適用場所や測定期間を表-2に示す。

表-2 大気-水間 CO₂ フラックスの測定項目一覧

	測定場所	測定期間	測定項目
渦相関法	風蓮湖	2010/7/6~8/9 2010/11/8~19	・大気中の3次元風速 ・大気中 CO ₂ 濃度
	吹通川河口	2011/7/3~8/16	
バルク法	風蓮湖	2010/8/5~7 2011/6~11 ¹⁾	・水中 CO ₂ 濃度
	吹通川河口	2011/8/15, 16	
フローティングチャンバー法	風蓮湖	2010/8/5~7 2011/7/17	・チャンバー内大気 CO ₂ 濃度
	吹通川河口	2011/8/15, 16	

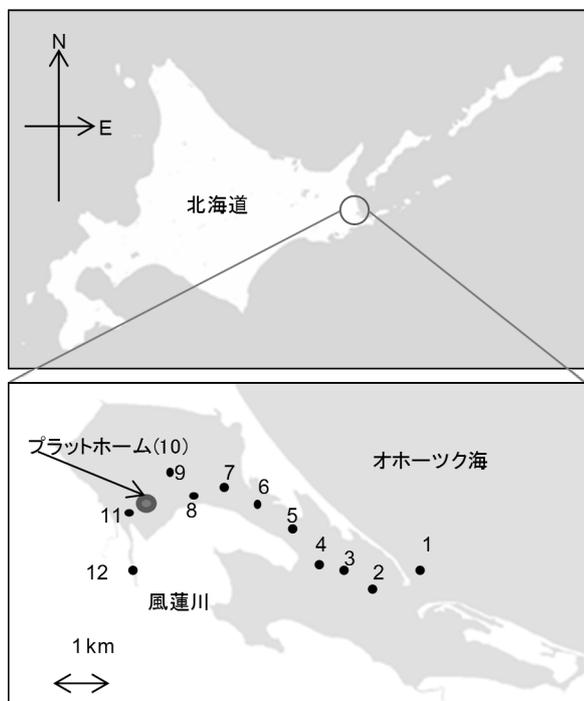


図-2 現地観測を実施した風蓮湖の位置

(1): 渦相関法

渦相関法は乱流によって輸送される物質やエネルギー量（ガス・熱など）を直接測定する手法で、無人で長期間の広範囲測定が可能のため、これまで主に陸域のCO₂や水中のO₂フラックスの測定に広く使われている¹³⁻¹⁷⁾。なお、この手法の沿岸域の適用は国内では本研究が初めてとなる。一方、渦相関法では下記に述べるWPL補正¹⁸⁾などの補正処理が煩瑣であり、特に大気-水間CO₂フラックスのような比較的小さいフラックスに関しては、データ処理に注意を要する手法である。

渦相関法によるフラックスは、それぞれのサイトの測定地点に設置したプラットフォーム上で測定した。測定に使用した主な機器は、オープンパス型のCO₂濃度計（LI-7500A, LI-COR社製）と3次元超音波風速計（CSAT-3, Campbell社製）である（図-4）。オープンパス型のCO₂濃度計は直接大気中のCO₂濃度を測定するために補正項の数を減らせるという利点があるが、霧や降雨などの大気中の水蒸気の影響を強く受けるという欠点がある。測器は、風蓮湖と吹通川河口でそれぞれ2.5~3.5 mと4~5.5 mの高さに設置した。高さの幅は潮位の変化によるものである。この設置高度から測定されるフラックスの空間スケールや範囲は、風上方向に数百mのオーダーである¹⁹⁾。風蓮湖の測定期間は2010年の7月6日から8月9日までと、11月8日から11月19日で、吹通川河口では2011年の7月3日から8月16日までである。CO₂フラックスは、下記の式から算出した。

$$F = \overline{\rho_c'w'} \cdot F_1 + \mu \frac{\rho_c}{\rho_d} \overline{\rho_v'w'} \cdot F_1 + \rho_c \left(1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d} \right) \frac{\overline{T_a'w'}}{T_a} \cdot F_2 \quad (3)$$

式中のFはCO₂フラックス（μmol-C//m²/s）、F₁とF₂はCO₂濃度計や3次元超音波風速計の設置距離やそれぞれの測定空間分解能による誤差を補正するための係数²⁰⁾である。式中の第一項はCO₂濃度ρ_c（μmol/m³）と鉛直風速w（m/s）の共分散を示しており、見かけ上のCO₂の鉛直フラックスを示す。なお、記号右肩のプライム「'」は測定期間中の平均値からの差分であることを示す。ただし、大気中のCO₂濃度は、湿度や気温の変化による空気塊の体積の変化により、実際はCO₂の移動が無くても変化しうる。式中第2項と第3項はそれぞれ湿度と気温による空気塊の体積変化の影響を理論的に補正する項（WPL補正項¹⁸⁾）に該当する。μ、は乾燥空気と水蒸気のマール比率、ρ_c、ρ_d、ρ_vはそれぞれCO₂、乾燥空気、水蒸気の濃度（μmol/m³）である。T_aは大気中の温度（K）である。

それぞれの変数は20 Hzで測定し、30 分毎にCO₂フラッ

クスを算出した。これらの設定は、大気中の乱流成分を測定するのに十分な時間分解能で、気温や日射、風向等に起因する大気-水間CO₂フラックスとは関係ない要因による寄与分を避けるために設定した。さらに、鉛直風速は座標変換し、30 分間の平均値がゼロになるように補正した。また、すべての変数にハイパスフィルター²¹⁾を適用して気温変化等による長周期変動の影響を取り除いた。

渦相関法におけるハイパスフィルターの設定は、実際に測定した鉛直風速と大気中CO₂濃度変動のコスペクトルから決定した（図-5）。なお、コスペクトルの測定周波数域（1/1800~20 Hz）の総和が鉛直風速と大気中CO₂濃度の共分散に該当する（式（3）右辺第一項から補正係数F₁を取り払ったもの）。図の例で示されるように、コスペクトルのピークは0.1 Hz（周期10 s）周辺に存在しており、低周波数域の寄与も大きい傾向であった。本研究では、低周波数域（>1000 s）の寄与をほぼ0.01 %以下になるように時間係数²⁰⁾を30 sに設定した。なお、この係数はフィルタリングの範囲調整のための係数であり、実際のフィルタリングの周期とは直接的な関係は無い。使用したハイパスフィルターにより、10 s付近の寄与分を残し（> 99 %）、30分付近の長周期変動の影響をほぼ完全に除外した（<0.01 %）。

(2): バルク法

バルク法は、大気と水の間のCO₂分圧差と、交換速度と呼ばれる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-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、現在の外洋によるCO₂吸収量もこの手法で算出されている²²⁻²³⁾。一方、風速による経験式は既存のトレーサー実験などの結果から算出されたものであり、水深や地理条件が多様な沿岸域で汎用的なものであ



図-4 渦相関法装置の外観

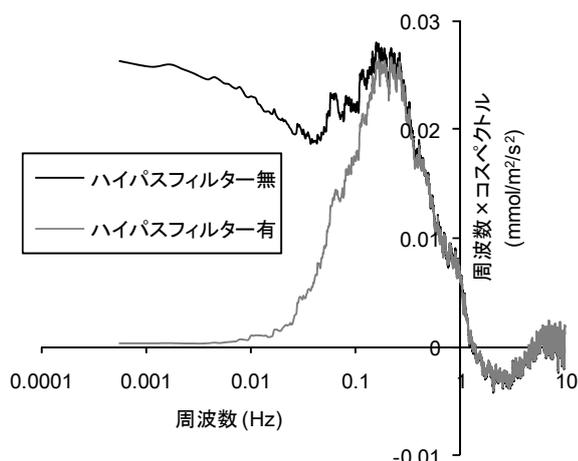


図-5 鉛直風速と大気中CO₂濃度のコスベクトルの一例
図のコスベクトルは、面積とフラックスへの寄与分が比例するように周波数を乗じている。

るかについては議論の余地がある^{10-11, 24)}。また、水中のCO₂分圧測定装置は一般的なものではなく、特に長期的な測定は比較的困難である。

この手法では、風蓮湖では2010年8月の5～7日と、11月の16～18日に1時間おきに測定した。また、後述する2011年の6月から11月にかけての採水サンプルからもCO₂フラックスを算出した。吹通川河口では、2011年8月15, 16日の昼間に不連続的に測定した。測定は上記プラットホームに係留した小型船上でした。

バルク法の計算式は下記のとおりである。

$$F = kS(fCO_{2water} - fCO_{2air}) \quad (4)$$

水中のCO₂分圧 (fCO_{2water} , μatm) と大気中のCO₂分圧 (fCO_{2air} , μatm) は、CO₂濃度計 (CO2-09²⁵⁾、紀本電子製) で測定し、溶解度は水温・塩分計 (Compact-CT, Alec社製) のデータを計算式に代入して算出した (図-6)。また、2011年の水中CO₂分圧に関しては、採水サンプルの溶存無機炭素濃度と全アルカリ度を用いた平衡計算から求めた。溶解度 S ($\text{mol-C/m}^3/\text{atm}$) は、水温と塩分から既存の経験式²⁶⁾を用いて算出した。交換速度 k (m/s) の算出は、下記の経験式²³⁾から算出した。

$$k = 0.39 \cdot U_{10}^2 \times \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-0.5} \quad (5)$$

U_{10} は水面から10 mの高さの風速で、渦相関法で使用した3次元風速の水平風速データを高度補正²⁷⁾して算出した。 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

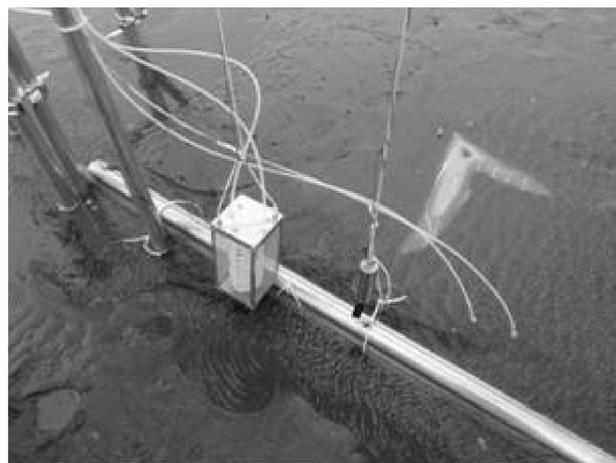


図-6. 水中CO₂濃度計の外観
CO₂濃度計ガス平衡器 (左側)
右は水温塩分計 (Alec Compact-CT)

験式²⁸⁾から算出した。CO₂フラックスは1時間おきに、上記の変数の1時間平均値から式(4)より決定した。

(3) : フローティングチャンバー法

フローティングチャンバー法では、水面に浮かべた中空の箱状の装置内部のCO₂濃度変動を連続的に測定することで、CO₂フラックスを決定する。大気-水間CO₂フラックスを簡易な手法で直接測定できる利点がある²⁹⁾。なお、この手法は、水面に物理的な影響を与えるため妥当性に関して様々な議論がなされているが、過去の研究において静穏な環境では測定結果が妥当なものであるとされている¹¹⁾。欠点として、チャンバー内の空気を測定ごとに換気する必要があるため、無人計測が困難であり、長期測定に向かないことが挙げられる。

この手法による測定は、風蓮湖では2010年8月の5～7日と、11月の16～18日に、プラットホーム周辺で1時間おきに、また、7月17日に風蓮湖内の数カ所(後述する採水点2, 8～11)でも測定した。

本研究で用いたフローティングチャンバーは、50 cm×50 cm×22 cmのポリ塩化ビニル製で、テフロンチューブを介して前述のCO₂濃度計と接続して使用した (図-7)。本稿で使用したフローティングチャンバー法では、過去の研究に基づいた複数の改良を施している。例えば、この手法では測定中の装置内部の圧力変動により、内部のCO₂濃度の測定に誤差が生じることが指摘されているが³⁰⁾、この装置では10 m程度の長さの一端が開放されているチューブをCO₂濃度計との接続ラインに繋げることで、圧力バッファーとして機能させている。また、装置内部に圧力センサーを設置しており、内部の圧力変動による影

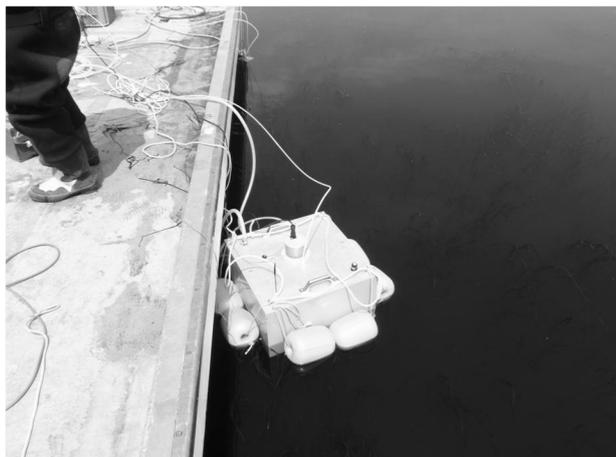


図-7 フローティングチャンバー装置の外観

響を随時モニタリングして補正している¹⁰⁾。

4.2 生態系全体の炭素吸収速度（純生産速度）

風蓮湖のような汽水域では、生物による光合成や呼吸・分解の影響がなかった場合、溶存無機炭素濃度は河川水と海水の単純な混合比から決定される。従って、実際の測定サンプルから得られた溶存無機炭素濃度と内挿値との差（本研究では ΔDIC ($\mu\text{mol-C/kg-water}$) と呼称する）を、生物による光合成もしくは呼吸・分解による増減分（純生産速度）とみなすことができる（図-8）。純生産速度（rawNEP, ($\text{mmol-C/m}^2/\text{h}$ ）は、下記式から算出した。

$$\text{rawNEP}(n) = \frac{\Delta DIC(n) - \Delta DIC(n-1)}{t(n) - t(n-1)} \cdot D_w(n) \quad (6)$$

式中の n はサンプル番号を示しており、2日間の連続採水では1時間おきに採水したため、採水順に1から47もしくは48までである（作業スケジュールの都合で夏の測定では48番目の採水は省いた）。 $t(n)$ と $D_w(n)$ サンプル n を採水した時の時間と採水場所の水深（m）を示す。河川水のサンプルは測定点に近く最も影響が強いと考えられる風蓮川から、海水のサンプルは風蓮湖開口部に接するオホーツク海から採取した。

式（6）では、採水したサンプルは1時間以上海草場で滞留していたことを前提としている。この前提の妥当性については、2次元流速計（Compact-EM, Alec社製による）の測定結果から滞留時間を検証し、確認済みである。実際に採取されるサンプルは、採取時の流向が異なるため、海草場の中の異なる領域を通過してきた水塊である。

従って、この式で算出される純生産速度（rawNEP）は、大きなばらつきを持つと考えられる。従って、最終的な純生産速度（NEP）の算出のために、rawNEPをモデルに近似させてスムージングした。純生産速度に影響を与える要因としては、光量・水温・生物量等が考えられるが、ここでは2日間という短期間に光合成と呼吸・分解に最も影響が強いと考えられる光量に注目して、下記の光量子モデル³¹⁾へ近似した。

$$\text{NEP} = P_{\max} \cdot \tanh\left(\frac{\alpha \cdot I}{P_{\max}}\right) - R \quad (7)$$

式中の I は光量子密度（ $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ ）、 P_{\max} と R はモデルにおける最大光合成速度（ $\text{mmol-C/m}^2/\text{h}$ ）と呼吸・分解速度（ $\text{mmol-C/m}^2/\text{h}$ ）である。 α は、モデルにおける光量子—純生産速度曲線の初期勾配（ $\times 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{h}$ ）を示す。これらの値は、純生産速度と同時に測定した光量子（光量子計LI-190, LI-COR社製）のデータを用いた最小二乗法で決定した。このモデルの近似により、純生産速度のスムージングのほかに最大光合成速度と呼吸・分解速度が決定できる。最終的な純生産速度の値としては、このモデルによる近似値の測定期間中の平均値を使用した。

風蓮湖における溶存無機炭素濃度サンプルの採水は、2010年8月の5～7日間と、11月の16～18日間に1時間ごと、採水の深度はおおよそ水面から50 cmほどであった。さらに、2011年の結氷期と融氷期を除く6月から11月にかけて、表層と水底付近の採水を風蓮湖内の12地点で、ほぼ月1回のペース（6/27, 7/17, 8/10, 8/24, 9/17, 10/19, 11/4）で早朝から正午の間に採水した（図-2）。なお、2011年の採水は連続でないので、 ΔDIC の算出のみである。すべてのサンプルを、250 mlのSchott Duran瓶で採取し、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。溶存無機炭素濃度の測定は、フロースルー型の炭酸系分析装置（MDO-02, 紀本電子製³²⁾）、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、両者の装置では、溶存無機炭素濃度と同時に全アルカリ度も測定した。

吹通川河口では、移流の効果が強く、採取した海水を含む水塊の海草場上における滞留時間を特定する事が困難であるため、風蓮湖で用いた純生産速度の測定手法を用いることができなかった。そこで、測定ポイント周辺の高草の変動量と葉の更新率から吸収速度を算出した。具体的には、測定地点から半径100 m内の5つ地点で採取した海草のバイオマスの変化量と葉の更新率から、海草による炭素生産速度（純一次生産量）を算出し、これを生態系全体の純生産量（純生産速度）の近似値とした。

この手法では、海草以外の生物による諸過程（陸域由来の有機物の分解や動物による呼吸など）の影響を捉えることができないという問題がある。

海草の調査では、50 cm 方形枠を用い、枠内にある海草の地上部（葉と葉鞘）と地下部（地下茎と根）すべてをサンプリングした。サンプルは水道水で洗浄して付着物（付着珪藻）などを取り除き、地上部と地下部に分別して、80°C 条件下で24 時間乾燥させた。乾燥させたサンプルについては、重量を mg の単位まで測定した。これらの測定結果を、各測点ごとに合算した。葉数についてはマーキング法³³⁾により測定した。マーキング法は、現存量測定を実施した1つの測点に対し、10 個体を1セットとして実施した。1 株の葉の束（3～5 枚の葉の束）に画鋏を用いて穴を空けてマーキングし（7月20日）、その個体の近くにポリエチレンテープを取付けた鉄筋杭を刺してポリエチレンテープと個体を結びつけた。台風の接近により海草場に攪乱が生じることが予想されたため、その直前の13 日後（8月2日）に、同じ個体を見つけ出して採取し、船上で穴がある葉とない葉の数を計数して、新たに生えた葉数を算出した。なお、マーキングは、各測点において優占する種に着目して実施した。

吹通川河口の海草の純一次生産量 NPP ($\text{mmol-C/m}^2/\text{h}$) は、海草一株の乾燥重量の平均値 W_{biomass} (mmol/m^3) と海草の葉数の変化を考慮して、下記の式から算出した³³⁾。

$$NPP = \frac{W_{\text{Biomass}} \cdot R_{c/w}}{\Delta t \cdot \left(\frac{\sum N_{\text{total}}}{\sum N_{\text{new}}} \right)} \quad (8)$$

式中の $R_{c/w}$ は、海草の炭素含有比を示す。 N_{total} は、サンプル採取時の海草一株の葉数の平均値、 N_{new} は測定期間 Δt (=13 日間) 中に新たに生えた葉の枚数である。

吹通川河口で海草の純一次生産量（純一次生産量）算出のために採取した海草は、リュウキュウアマモ (*Cymodocea serrulata*)、リュウキュウスガモ (*Thalassia Hemprichii*)、ウミシヨウブ (*Enhalus acoroides*) の3つの種に分類された。これらの海草の生産量は地上部と地下部とほぼ同じであったため、式 (8) の W_{biomass} には、地上部の乾燥重量を2倍した値を使用した。

4.3 陸域からの流入負荷

河川の流量に河川水の溶存無機炭素濃度と懸濁態有機炭素、溶存有機炭素を乗じて、陸域からの流入負荷を算出した（懸濁態有機炭素と溶存有機炭素は未発表データ）。風蓮湖では風蓮川の流量、吹通川河口では吹通川の既往研究³⁴⁻³⁵⁾をそれぞれ使用した。溶存無機炭素濃度は、純生

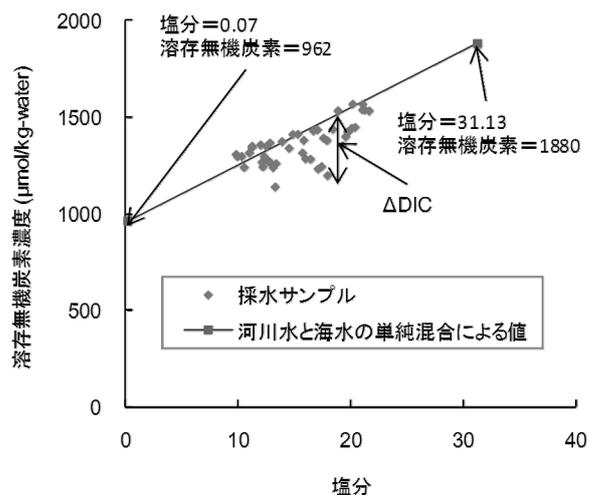


図-8 ΔDICの算出方法（プロットは、2010年8月5～7日に風蓮湖で採取されたデータ）

産速度と同様に、採水サンプルから決定した。なお、吹通川に関しては、高潮位時に海水が河川を遡上するため、低塩分時（12以下；本稿では塩分（塩分濃度）は無次元数として表記する）に測定した溶存無機炭素濃度の平均値を、河川水の溶存無機炭素濃度とした。

4.4 その他の気象・流動・水質データ

上記の炭素フローの他に、水平風速や湿度などの気象データや水温・塩分といった流動・水質データを各測定水域で測定した。測定項目・時期に関しては、別添の付録資料を参照されたい。

5. 測定結果

5.1 大気—水間CO₂フラックス

本研究では水から大気へのCO₂の放出を正のCO₂フラックス、大気中CO₂の水への吸収を負のCO₂フラックスと記載する。

渦相関法による夏季風蓮湖の大気—水間CO₂フラックスは、大気中CO₂の吸収方向であった ($-1.46 \pm 0.38 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$, 平均値 $\pm 95\%$ 信頼区間, 以下同様) (図-9)。一方、冬季では放出を示した ($0.42 \pm 0.15 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)。バルク法とフローティングチャンバー法による結果は、渦相関法と同様に、夏季風蓮湖でCO₂の吸収を示した（バルク法： $-0.12 \pm 0.09 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$, フローティングチャンバー法： $-0.07 \pm 0.03 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$) (図-10)。また、冬季では両者ともほぼゼロに近い値であった（バルク法： $0.01 \pm 0.01 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$, フローティングチャンバー法： $0.06 \pm 0.10 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)。2011年の測定結果では、6月から9月に

かけてはほぼすべての結果で大気中CO₂の吸収を示していた(図-11)。期間中の風蓮湖における大気-水間CO₂フラックスの平均値は、 $-1.76 \times 10^{-2} \pm 1.5 \times 10^{-2} \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ で、風蓮湖全体の吸収量は -382 ± 326 トン-C/年と概算できた。

吹通川河口では、平均として大気中CO₂を吸収していた($-1.00 \pm 0.11 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ 、電源装置の不調による欠測期間あり)。ただし、測定期間の前半(7/3~30)が吸収傾向($-1.24 \pm 0.12 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)であったのに対し、後半(8/6~17)では明確な吸収・放出の傾向は確認されなかった($0.06 \pm 0.12 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)。バルク法とフローティングチャンバーによる結果では、吹通川河口では放出傾向を示した(バルク法: $0.12 \pm 0.06 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ 、フローティングチャンバー法: $0.12 \pm 0.05 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)。これらの手法の測定期間は、渦相関法で放出傾向であった期間に該当していた。なお、特筆事項として8/4の前後にかけて測定サイト付近に台風が接近しており、陸域からの炭素流入負荷が一時的に増加していたことが予想された。

5.2 生態系全体の炭素吸収速度(純生産速度)

夏季風蓮湖のΔDICは明瞭な日変動を示していた一方、冬季のΔDICは明瞭な日変動はみられなかった(図-12)。光量子モデルを用いて推定した結果、夏季に独立栄養的(光合成活動が呼吸・分解活動より卓越)な環境(最大光合成速度= $50.4 \text{ mmol-C/m}^2/\text{h}$ 、呼吸・分解速度= $20.7 \text{ mmol-C/m}^2/\text{h}$ 、純生産速度 = $2.2 \text{ mmol-C/m}^2/\text{h}$)を示し、冬季に従属栄養的(呼吸・分解活動が光合成活動より卓越)な環境を示した(最大光合成速度= $0.2 \text{ mmol-C/m}^2/\text{h}$ 、呼吸・分解速度= $1.2 \text{ mmol-C/m}^2/\text{h}$ 、純生産速度 = $-1.0 \text{ mmol-C/m}^2/\text{h}$) (図-14)。2011年の移動計測では、6月から9月ではΔDICは基本的にマイナス(独立栄養的な環境)であったが、月ごとに大きなばらつきが確認された(図-15)。日中の照射時間(別海気象台のデータより)が長い6月や8月10日ではΔDICが負の方向、照射時間の短い7月や8月下旬では正の方向になる傾向がみられた(付録資料2)。一方、10月と11月は基本的に正の値(従属栄養的な環境)で、ばらつきも比較的小さかった。採水点ごとの平均値からは、2010年の測定地点を含む風蓮川河口付近(測定点10, 11)と風蓮湖開口部付近(測定点2, 3)が独立栄養的な傾向で、西湖盆と東湖盆を結ぶ水路の両端付近(測定点5, 7)が従属栄養的な傾向であった。

吹通川河口では、5つの海草場から得られた海草の乾燥重量に炭素含有比を乗じた値として $14.0 \sim 40.2 \text{ g-C/m}^2$ が得られた。式(8)における葉数の比($\Sigma N_{\text{total}}/\Sigma N_{\text{new}}$)

は $2.4 \sim 4.5$ の範囲であった。これらから算出される吹通川河口の海草場の純一次生産量の範囲は $2.4 \sim 4.5 \text{ mmol-C/m}^2/\text{h}$ の範囲であった。

5.3 陸域からの流入負荷

風蓮川の溶存無機炭素濃度は、2010年と2011年の平均値として $956 \pm 92 \mu\text{mol-C/kg-water}$ であった(平均値 ± 95%信頼区間、以下同様)。溶存無機炭素濃度は、水温など季節性の変数と相関を示さなかったため(水温との相関: $r^2 = 0.27$, $n = 10$)、本研究では風蓮湖の夏季と冬季の両方の値として上記の値を使用する。懸濁態有機炭素濃度と溶存有機炭素濃度は夏季でそれぞれ $39 \mu\text{mol-C/kg-water}$ 、 $295 \mu\text{mol-C/kg-water}$ であった(未発表データ、夏季のみ)。既往研究による河川流入量は、夏季で $4.25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 、冬季で $2.95 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ であった³⁴⁾。これらから算出される風蓮川からの無機炭素の負荷は、夏季で 48.9 ± 4.7 トン-C/day、冬季で 33.9 ± 3.2 トン-C/dayであった。POC、DOCの流入量は、それぞれ2トン-C/day、15トン-C/dayであった。

吹通川の溶存無機炭素濃度は、リーフ内の海水が遡上する上げ潮時が低く、マングローブ内の水が流出する下げ潮時に低くなる傾向がみられた($1794 \sim 2624 \mu\text{mol-C/kg-water}$)。また、低塩分時の溶存無機炭素の平均は $2341 \pm 106 \mu\text{mol-C/kg-water}$ であった。流量は、既往研究³⁵⁾では、 $1100 \sim 3500 \text{ m}^3/\text{day}$ であった(表-3)。これらから算出される陸域からの炭素負荷量は、 $0.03 \sim 0.10$ トン-C/dayである(表-3)。

5.4 その他の気象・流動・水質データ

そのほかの測定項目の結果は別添の付録資料で示す。

6. 考察

6.1 現地調査水域における炭素フロー

図-15に、本研究で得られた炭素フローをまとめて示す。夏季風蓮湖の生態系は独立栄養的な環境(光合成活動が呼吸・分解活動より卓越)となっており、陸域負荷があるものの大気中CO₂を吸収していた。

この大気中CO₂の吸収が生態系内の生物活動(生物地球化学的過程)に起因しているかどうかを確認するために、ΔDICの計算に使用した河川水と海水の混合比から内挿した溶存無機炭素濃度(図-8)と溶解度から、生物活動の影響が無かった場合の水中CO₂分圧を推定した(図-16)。その結果、CO₂分圧はほぼすべて時間において大気

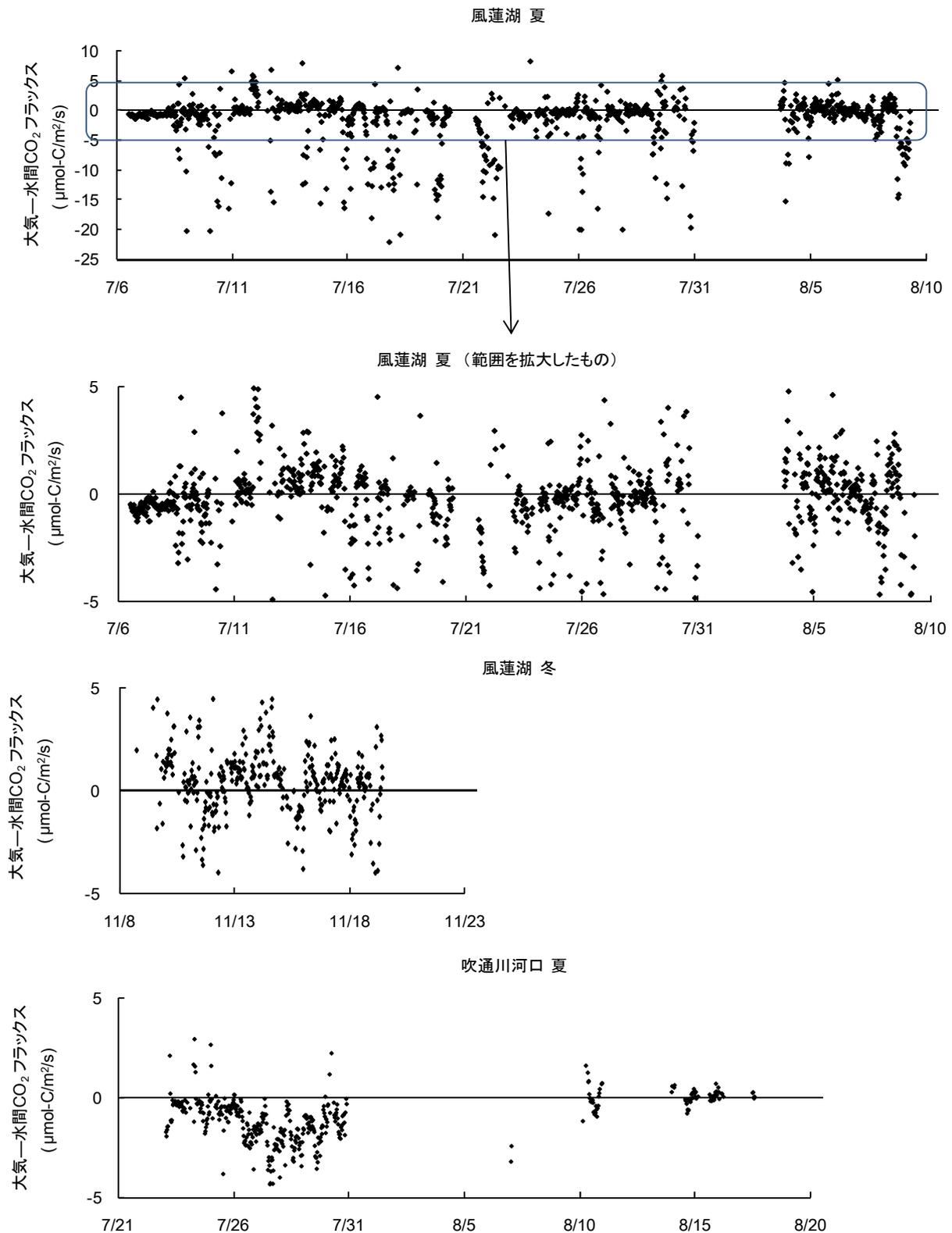


図-9 渦相関法による大気-水間CO₂フラックスの測定結果 (正の値は大気中への放出, 負の値は水中への吸収を示す)

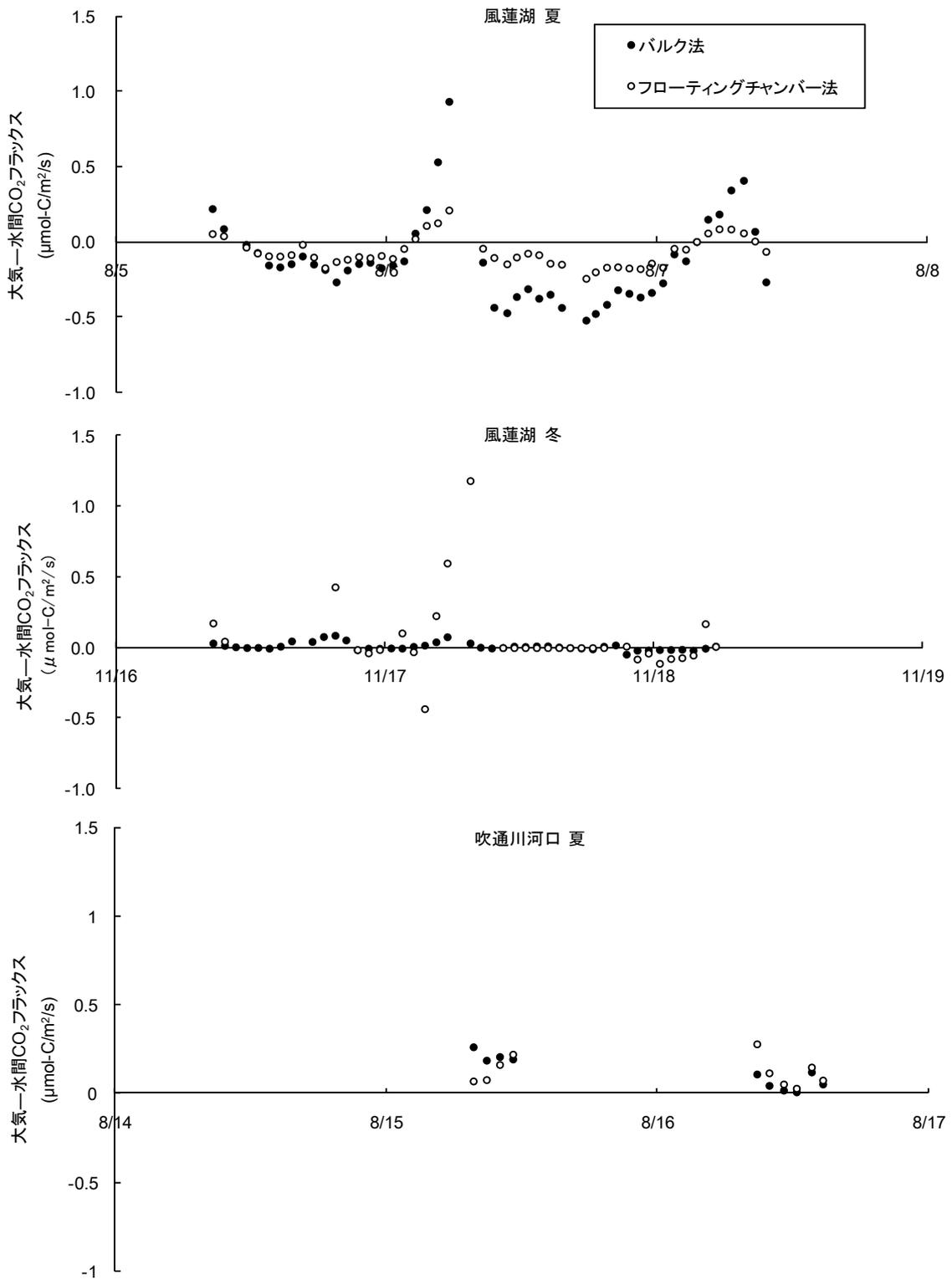


図-10 バルク法とフローティングチャンバー法による大気-水間CO₂フラックスの測定結果
 (正の値は大気中への放出, 負の値は水中への吸収を示す)

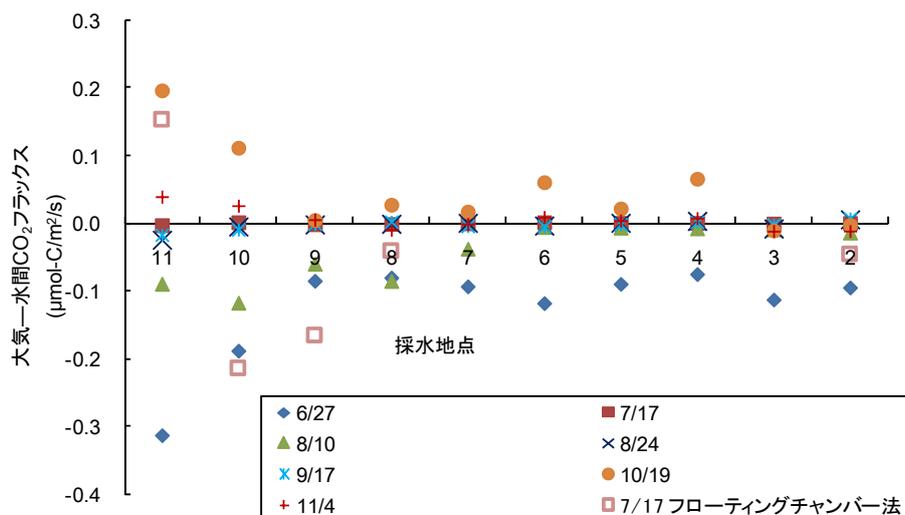


図-11 風蓮湖における2011年における大気-水間CO₂フラックスの測定結果
 (正の値は大気中への放出, 負の値は水中への吸収を示す)
 横軸は採水地点の東西の並び (図-2) に合わせて,
 左側に1 (風蓮川河口) から降順に2 (風蓮湖開口部) 間で配置した。

中のCO₂分圧よりも高かった。このことは、バルク法 (式 (4)) に従って算出した値でみると、ほぼ常に大気-水間CO₂フラックスは、大気中へのCO₂放出を示すことを意味している。すなわち、生態系の諸過程により、本来陸域からの炭素流入負荷によりCO₂の放出源であったのが、吸収源となっていたことになる。一方、冬季では生態系は従属栄養的な環境で、大気中へのCO₂放出を示していた (図-15)。

生物活動が大気-水間CO₂フラックスに大きな影響を及ぼしうることが前節で判明したことから、ここでは、ΔDICと大気-水間CO₂フラックスとの関係を検討する。2011年の各採水点 (図-2) におけるΔDICと大気-水間CO₂フラックスは、正負がほぼ一致しており (図-17)、年間を通して生態系による光合成が大気中CO₂の吸収の要因であったことが確認された。ΔDICは光合成の開始直前である夜明け前後に最大となり、光合成が終了する日没直前に最小になる。従って、本研究におけるΔDIC (早朝から正午にかけて採水) は、1日平均値と比べると同じ程度かやや正方向に偏っていることが予想される。以上を考慮すると、年間を通して真の平均値は、上記の測定値よりも低いと考えられる。すなわち、実際の大気中CO₂吸収速度は、ここで示した吸収速度よりも速い可能性が高い。

吹通川河口でも、測定結果からは独立栄養的な場となっており、大気中CO₂の吸収が確認された (図-15)。しかしながら、既存の研究では、夏季に従属栄養的な場とな

っていることや¹²⁾、大気中へのCO₂の放出が確認されており¹⁰⁻¹¹⁾、風蓮湖のような関係が常に成り立っているわけではなかった。台風の接近 (8月4日) 後に、大気-水間CO₂フラックスが放出傾向にシフトしていたことを考えると、悪天候による陸域からの炭素流入負荷の増加 (マングローブ土壌の流出など) が、生態系全体の呼吸・分解の増加と、大気中へのCO₂放出量の増加を短期的にもたらすことが予想される。また、本研究では吹通川河口における生態系全体の純生産速度は海草類の純一次生産量で代替しており、動物や微生物による呼吸・分解過程が含まれていないことも、今回の測定と既往研究との違いの原因の一つであると考えられる。

これらの結果は、陸域からの炭素流入負荷を受ける水域であっても、独立栄養的な海草場であれば、水中のCO₂分圧が大気分圧以下になり、大気中CO₂の吸収源になりうることを示している。これらは、陸域からの流入負荷により「沿岸域が大気中へのCO₂放出源」という従来の認識に見直しを迫るものである。

6.2 既往研究における炭素フローとの比較

通年の生物活動が、夏季と冬季の測定値の平均程度と仮定すると、風蓮湖では他の海草場と比べて純生産速度が低かった (表-4)。前節の結果から、海草の純生産が大気中CO₂分圧の低下と大気中CO₂の吸収量の増加をもたらしていることが判明したため、風蓮湖よりも高い純生産速度を持つ他の海草場では、より多くの大気中CO₂

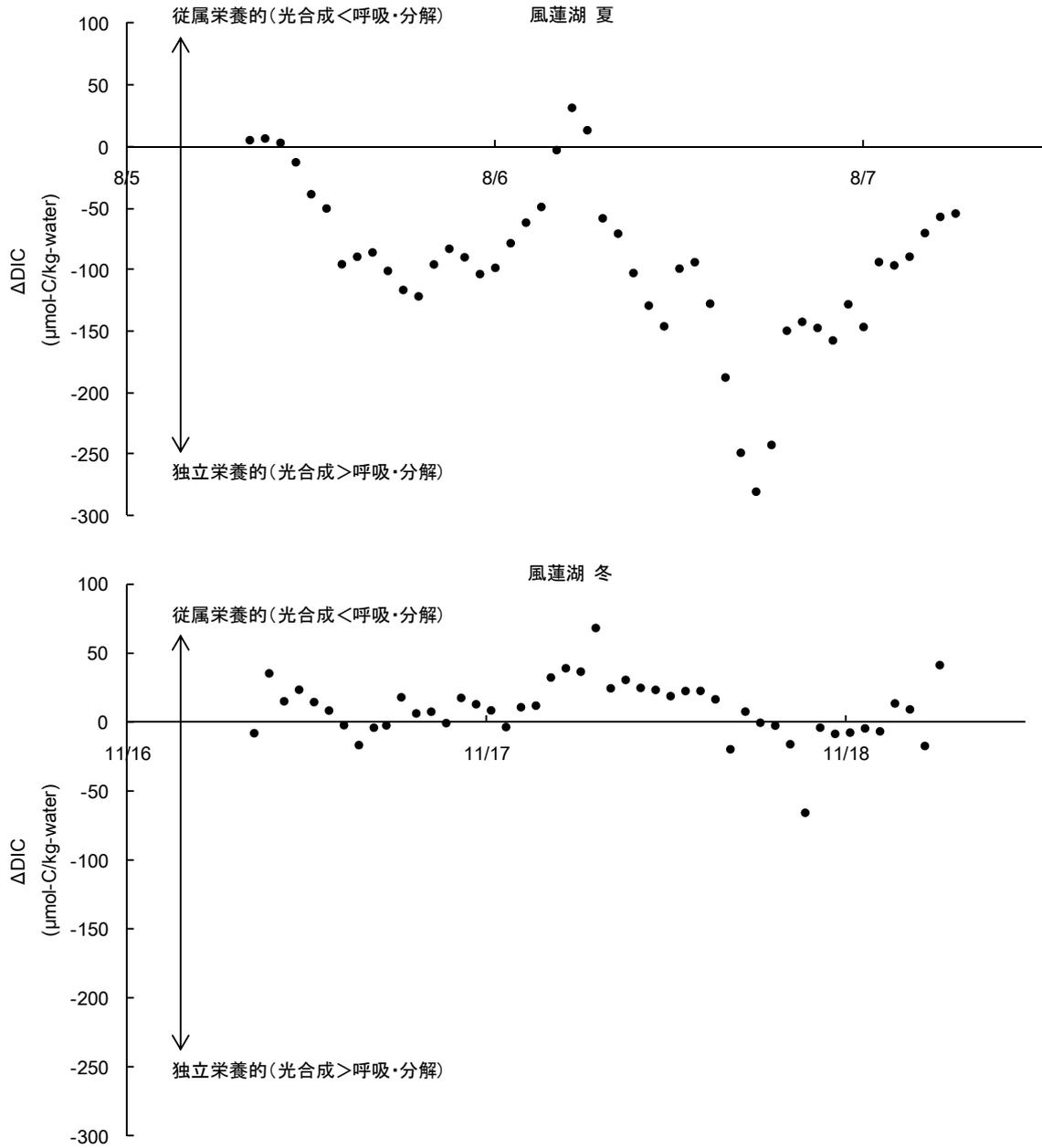


図-12 風蓮湖における夏期と冬期の ΔDIC の変動

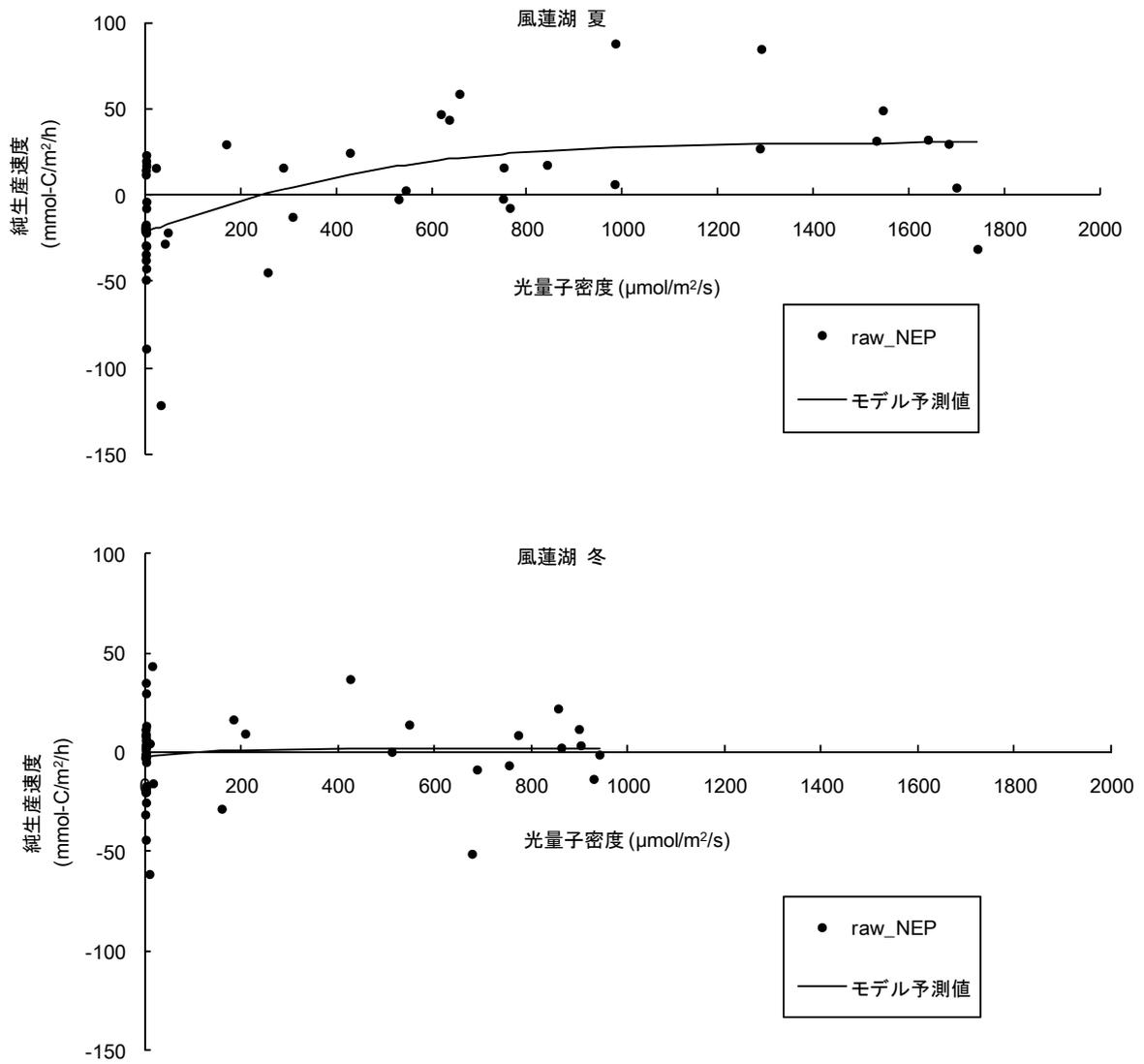


図-13 風蓮湖における，純生産速度測定値 (*raw NEP*) と光量子モデルによる近似値

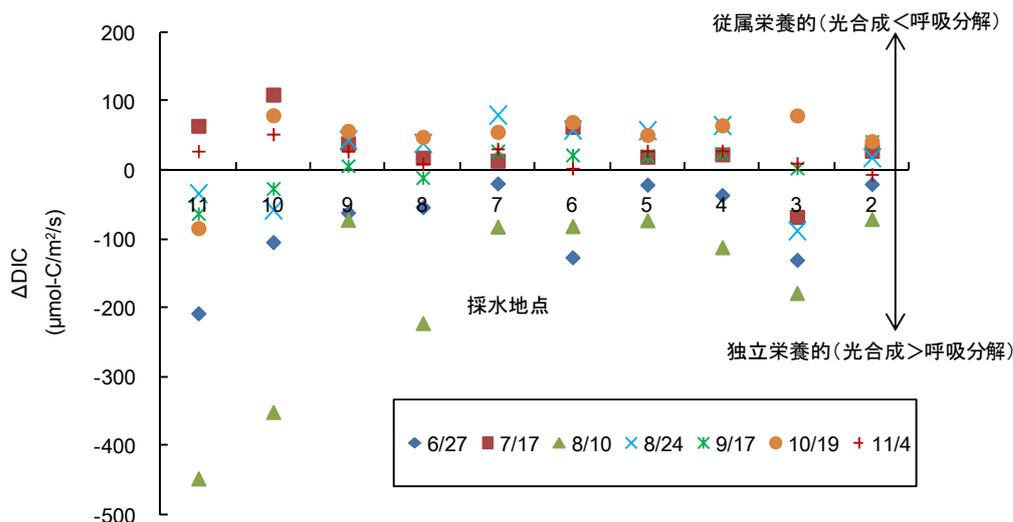


図-14 風蓮湖の2011年におけるΔDICの測定結果

縦軸のΔDICに関しては、図-8を参照。

縦軸正の値は従属栄養的な環境（呼吸・分解活動が光合成活動より卓越）、負の値では独立栄養的な環境（光合成活動が呼吸・分解活動より卓越）を示す。

横軸は図-13と同様に左側に採水地点 1 1，右側に 2 を配置した。

表-3 測定サイトにおける陸域からの炭素流入負荷

*1³⁴⁾、*2³⁵⁾：既存の既往研究 *3：平均 ± 95%信頼区間，*4：溶存無機炭素の信頼限界は計算に含めていない。
*5：未発表データ

	河川流量 (m ³ /day)	溶存無機炭素濃度 (μmol-C /kg-water)	陸域からの 流入負荷 (トン-C /day)	懸濁態有機炭素濃度 (μmol-C /kg-water)	陸域からの 流入負荷 (トン-C /day)	溶存有機炭素濃度 (μmol-C /kg-water)	陸域からの 流入負荷 (トン-C /day)
風蓮川 夏	4.25×10 ⁶ *1	956.43 ±	48.9 ± 4.7*3	39*5	2.0	295*5	15.0
冬	2.95×10 ⁶ *1	91.58*3	33.9 ± 3.2*3				
吹通川 夏	1.10 ×10 ³ ~ 3.50×10 ³ *2	2340.96 ± 105.72*3	3.09×10 ⁻² ~ 9.83×10 ⁻² *4				

を吸収するポテンシャル持っている可能性が考えられる。すなわち、本研究で示された大気中CO₂吸収速度は、世界平均からすると控えめな値である可能性がある。一方、吹通川河口では炭素フローにばらつきがあったことから、当該水域における実際にどの程度の確実性をもって吸収源といえるのかについては、課題が残った。

7. あとがき

本研究では、植生のある沿岸域が大気中CO₂の吸収源として機能しているのか、さらに沿岸域に生息している生物の諸活動が大気中CO₂濃度や動態にどのような影響を与えているのかを検証するために、国内の2つの海草場

において炭素フローを現地調査・解析した。海草場における複数の炭素フローの同時計測は世界でも例が少ない試みであり、これまで明らかになっていなかった海草場の炭素動態を明らかにするものである。また、大気-水間CO₂フラックスには、渦相関法を国内の沿岸域で初めて適用し、従来の測定法よりも大きな時間・空間代表制を持つデータを取得できた。

本研究の主要な結果は以下のとおりである。

1. 海草場のような水中に植生が存在する沿岸域では、独立栄養的な環境（光合成活動が呼吸・分解活動より卓越）の時に、水中CO₂分圧を大気中のCO₂分圧以下に低下させ、その水域は大気中CO₂の吸収源となる。

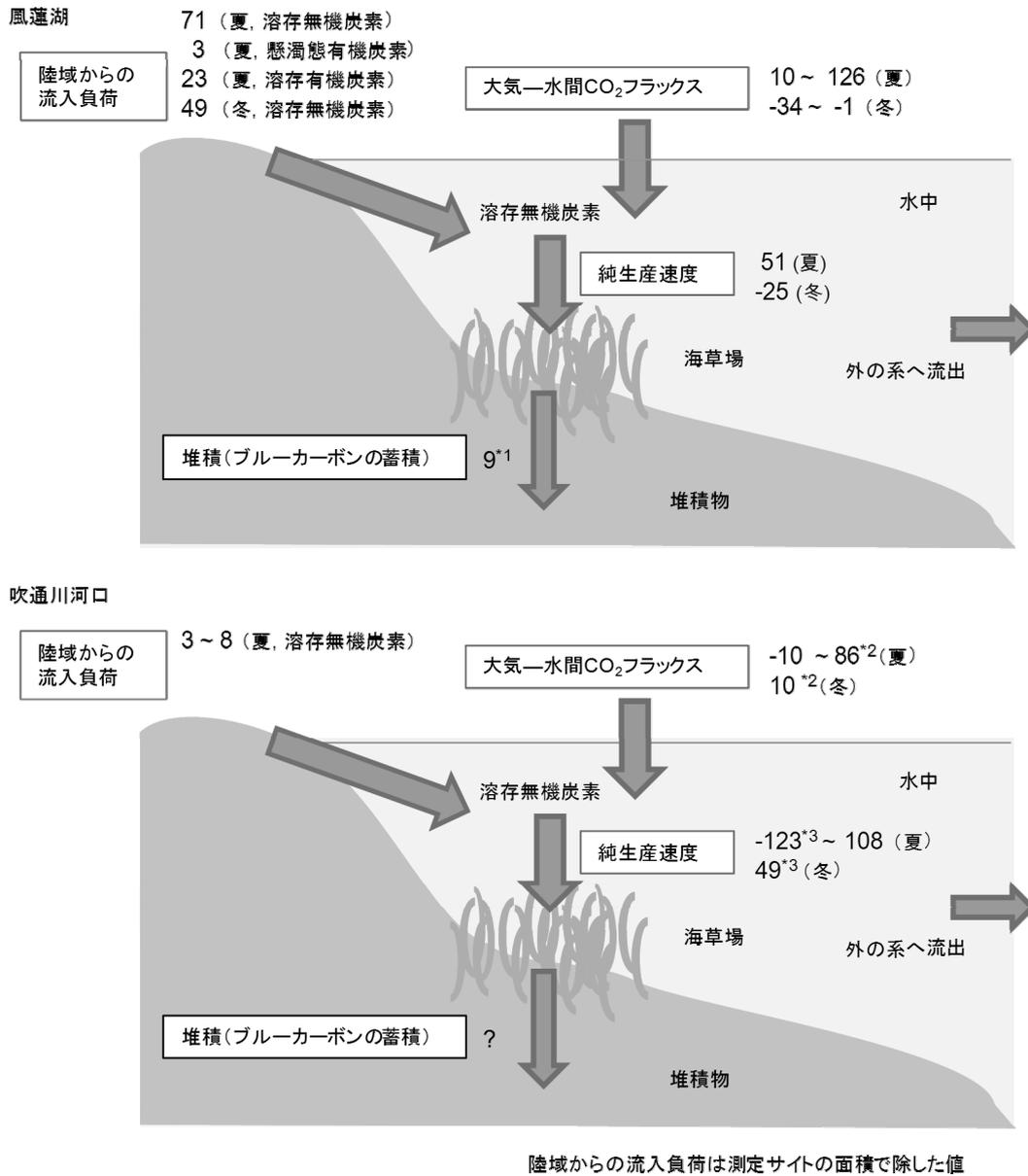


図-15 測定サイトの炭素フローのまとめ (単位はmmol-C/m²/day)

*1: 未発表データ *2: 2005年, 2006年の既往研究¹⁰⁻¹¹⁾ *3: 2002年, 2003年の既往研究¹²⁾

この図のみ, 大気—水間CO₂フラックスは矢印方向へのフローを正とする.

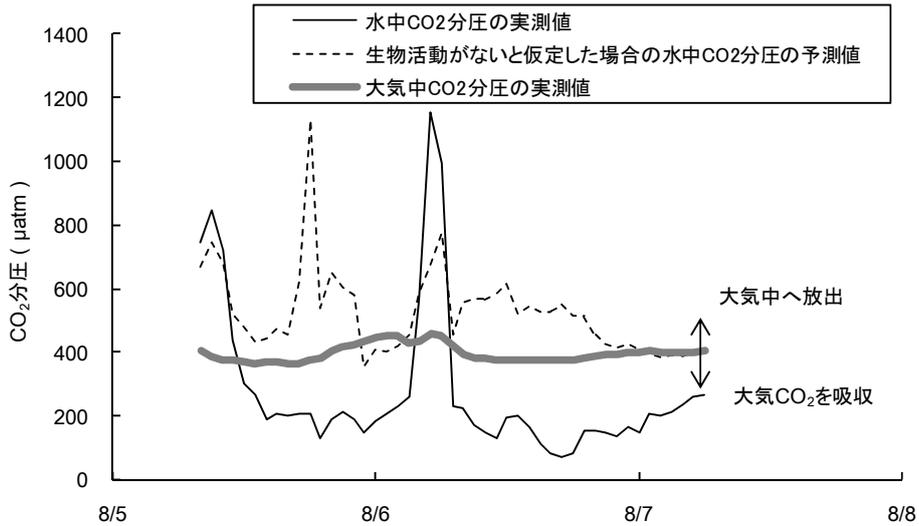


図-16 夏季風蓮湖の水中CO₂分圧の実測値と生物活動が無い場合の水中CO₂分圧の予測値、大気中CO₂分圧の実測値。CO₂分圧が大気中の分圧よりも高い場合は大気中へCO₂を放出し、低い場合は大気中CO₂を吸収する。

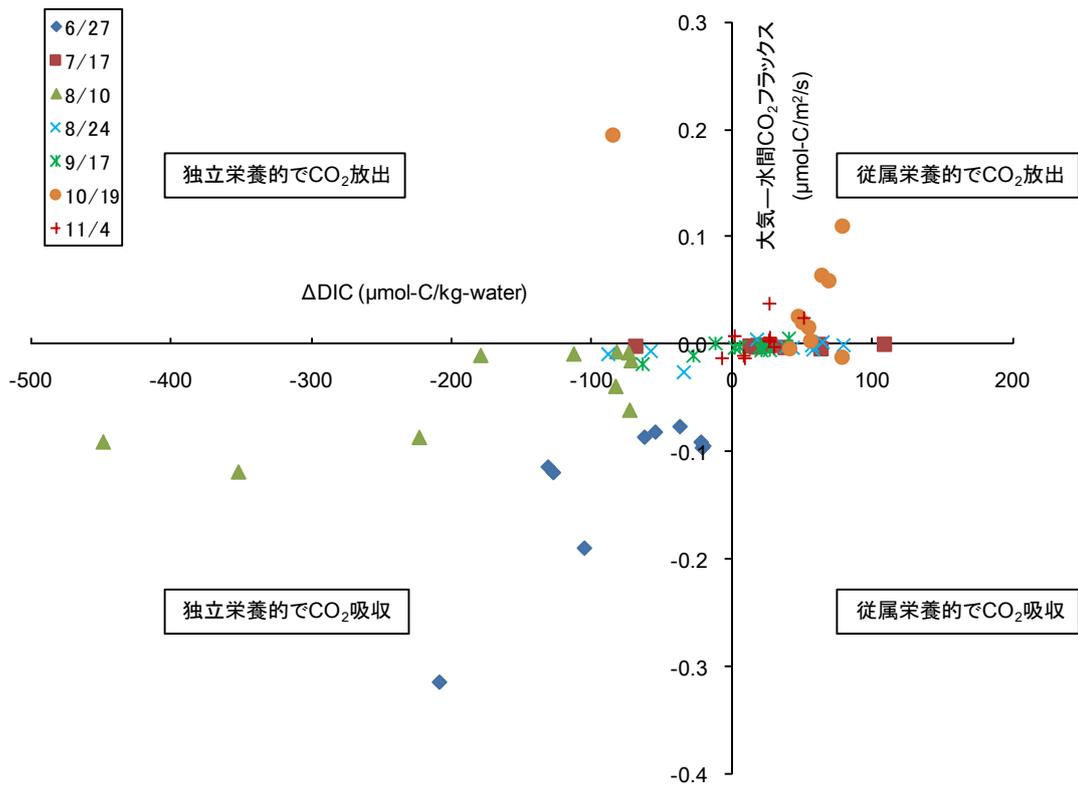


図-17 2011年のΔDICと大気-水間CO₂フラックスとの関係 (横軸正の値は従属栄養的な環境 (呼吸・分解>光合成), 横軸負の値は独立栄養的な環境 (光合成>呼吸・分解) であることを示す。縦軸正の値は大気中への放出, 縦軸負の値は水中への吸収を示す)

表-4 植生のある代表的な沿岸浅海域における炭素フローの既往研究と測定値 (単位はmmol-C/m²/day)

上段は既往研究を示す. *1³⁶⁾, 2³⁷⁾, *3³⁸⁾, 4⁷⁾, 5: 未発表データ

下段は本研究の測定サイトの値. *6¹²⁾, *7¹⁰⁻¹¹⁾は, 同サイトにおける既存の測定結果

図中のEC, FCはそれぞれ渦相關法・フローティングチャンバー法による

大気-水間CO₂フラックスの測定結果を示す.

	光合成速度	呼吸・分解速度	純生産速度	堆積速度	大気-水間 CO ₂ フラックス
マングローブ	476 ^{*1}	426 ^{*1}	50 ^{*1}	32 ^{*1}	51 ^{*4}
塩性湿地	820 ^{*1}	459 ^{*1}	361 ^{*1}	34 ^{*1}	59 ^{*4}
海草場	225 ± 22 ^{*2}	188 ± 20 ^{*2}	27 ± 11 ^{*2}	12 ^{*3}	
風蓮湖(夏)	560	509	51	9 ^{*5}	-126 (EC) ~-10 (FC)
風蓮湖(冬)	38	63	-25		1 (FC) ~ 34 (EC)
吹通川河口(夏)	331 ~ 570 ^{*6}	454 ~ 570 ^{*6}	-123 ^{*6} ~ 108	?	-86 (EC) ~ 10 (FC)
吹通川河口(冬)	230 ^{*6}	181 ^{*6}	49 ^{*6}		-10 (FC) ^{*7}

2. 亜熱帯域の海草場でも, 上記と同様の炭素フローが成り立つと予想される. しかしながら, 過去の既往研究では異なる関係性も見出されており, 現状では不確実性が高い.

3. 本研究で測定した海草場は既往研究例の平均値よりも純生産速度が低かったため, 海草場における大気中CO₂吸収量の世界平均は本研究で示された値よりも高い可能性がある.

既存の研究では, 沿岸域が「ブルーカーボン蓄積の場」と「大気中へのCO₂放出源」という一見相反する認識がなされていたが, 本研究の結果から, 独立環境的な海草場では, 「ブルーカーボンの蓄積」と「大気中CO₂の吸収」が並列に進行しうることを示した.

これらの結果により, 沿岸域における大気中CO₂の吸収量の変動要因を解明し, 沿岸域が大気中CO₂の吸収源であることに科学的根拠を与えることが可能となった. このことは, 沿岸域が気候変動対策に貢献することを意味しており, 陸上の森林のようにCO₂吸収に対する便益の付与

の検討に繋がるものである. この便益は, 沿岸域の保全や再生に必要となる新たな資金源として期待される.

(2012年11月8日受付)

謝辞

本研究における野外調査において, 北海道大学の柴沼成一郎氏と港湾空港技術研究所の井上徹教氏からの多大なご助力を頂いた. また, 野外調査の機器開発・援助において, (有)紀本電子工業の紀本英志氏・木下勝元氏と㈱メイワフォーシスの松嶋晋一氏から貴重な手助けやアドバイスを頂いた. また, 渦相關法の運用にあたって, 岡山大学の塚本修教授と国立環境研究所の近藤文義氏から, 多くのアドバイスを頂いた. 本論文の作成にあたっては, 港湾空港技術研究所の中村由行研究主監と菅野高弘特別研究官から多数の貴重なコメントを頂いた. 上記の方々に, 個々に記して心からの謝意を表する.

本研究の一部は, キヤノン財団研究助成プログラム「理想の追求」と(独)日本学術振興会科学研究費助成事業「挑戦的萌芽的研究 (No. 24656316)」(共に研究代表者:

桑江朝比呂) の助成によるものである。

参考文献

- 1) IPCC: Contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007, Ipcc fourth assessment report: Climate change 2007, Cambridge University Press, New York, 2007, 976p
- 2) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., DeYoung, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds): Blue carbon. A rapid response assesment., United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Norway, 2009, 80pp
- 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, 2011, pp.552-560
- 4) Macreadie, P. I., Allen, K., Kelaher, B. P., Ralph, P. J. and Skilbeck, C. G.: Paleoreconstruction of estuarine sediments reveal human-induced weakening of coastal carbon sinks, *Global Change Biology*, 18, 2012, pp.891-901
- 5) Mateo, M. A., Romero, J., Pérez, M., Littler, M. M. and Littler, D. S.: Dynamics of millenary organic deposits resulting from the growth of the mediterranean seagrass *posidonia oceanica*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44, 1997, pp.103-110
- 6) Zeebe, R. E., Wolf-Gladrow, D.: *Equilibrium, CO₂ in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes*, Elsevier, Amsterdam, 65, 2001, 1-139
- 7) Borges, A. V., Delille, B. and Frankignoulle, M.: Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystem counts, *Geophysical Research Letters*, 32, 2005, pp.1-4
- 8) Laruelle, G. G., Dürr, H. H., Slomp, C. P. and 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, 2010, pp.Art. No.: L15607
- 9) 大平明夫, 海津正倫, 浜出智: 風蓮湖周辺地域における完新世後半の古環境, 名古屋大学加速器質量分析計業務報告書, 4, 1993, pp.4-10
- 10) Tokoro, T., Watanabe, A., Kayanne, H., Nadaoka, K., Tamura, H., Nozaki, K., Kato, K. and Negishi, A.: Measurement of air-water CO₂ transfer at four coastal sites using a chamber method, *Journal of Marine Systems*, 66, 2007, pp.140-149
- 11) 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 C: Oceans*, 113, 2008, pp.Art. No.: C11006
- 12) Watanabe, A. (2004): Process of seawater CO₂ system formation and biological community metabolism in coral reefs and brackish estuaries, Thesis of Doctor of Science, the University of Tokyo, 210p
- 13) Berg, P., Røy, H., Janssen, F., Meyer, V., Jørgensen, B. B., Huettel, M. and De Beer, D.: Oxygen uptake by aquatic sediments measured with a novel non-invasive eddy-correlation technique, *Marine Ecology Progress Series*, 261, 2003, pp.75-83
- 14) Kondo, F. and Tsukamoto, O.: Air-sea CO₂ flux by eddy covariance technique in the equatorial indian ocean, *Journal of Oceanography*, 63, 2007, pp.449-456
- 15) Kuwae, T., Kamio, K., Inoue, T., Miyoshi, E. and Uchiyama, Y.: Oxygen exchange flux between sediment and water in an intertidal sandflat, measured in situ by the eddy-correlation method, *Marine Ecology Progress Series*, 307, 2006, pp.59-68
- 16) Lee, X., Finnigan, J. and Kyaw Tha Paw, U.: Coordinate system and flux bias error, *Handbook of micrometeorology*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2004, 33-64
- 17) Zemmeling, H. J., Slagter, H. A., Van Slooten, C., Snoek, J., Heusinkveld, B., Elbers, J., Bink, N. J., Klaassen, W., Philippart, C. J. M. and De Baar, H. J. W.: Primary production and eddy correlation measurements of CO₂ exchange over an intertidal estuary, *Geophysical Research Letters*, 36, 2009, pp.Art. No.: L19606
- 18) Webb, E. K., Pearman, G. I. and Leuning, R.: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 106, 1980, pp.85-100
- 19) Schuepp, P. H., Leclerc, M. Y., MacPherson, J. I. and Desjardins, R. L.: Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation, *Boundary-Layer Meteorology*, 50, 1990, pp.355-373
- 20) Massman, W. J.: A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems, *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 2000, pp.185-198
- 21) McMillen, R. T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain, *Boundary-Layer Meteorology*, 43, 1988, pp.231-245
- 22) 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, 2001b, pp.267-280
- 23) Wanninkhof, R.: Relationship between wind-speed and gas-exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, 97, 1992, pp.7373-7382
- 24) Raymond, P. A. and Cole, J. J.: Gas exchange in rivers and estuaries: Choosing a gas transfer velocity, *Estuaries*, 24, 2001, pp.312-317
- 25) Saito, H., Tamura, N., Kitano, H., Mito, A., Takahashi, C., Suzuki, A. and Kayanne, H.: A compact seawater pCO₂ measurement system with membrane equilibrator and nondispersive infrared gas analyzer, *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 42, 1995, pp.2025-2033
- 26) Weiss, R. F.: Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a nonideal gas, *Marine Chemistry*, 2, 1974, pp.203-215
- 27) 近藤純正: 風, 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, 東京, 2000, 82-108
- 28) 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, 1987, pp.10767-10776
- 29) Frankignoulle, M.: Field-measurements of air sea CO₂ exchange, *Limnology and Oceanography*, 33, 1988, pp.313-322
- 30) Belanger, T. V. and Korzun, E. A.: Critique of floating-dome technique for estimating reaeration rates, *Journal of Environmental Engineering*, 117, 1991, pp.144-150
- 31) Jassby, A. D. and Platt, T.: Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton, *Limnology and Oceanography*, 21, 1976, pp.540-547
- 32) 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, 2004, pp.75-87
- 33) Zieman, J. C.: Methods for the study of the growth and production of turtle grass, *thalassia testudinum konig*, *Aquaculture*, 4, 1974, pp.139-143
- 34) 北海道立釧路水産試験場: 藻場・干潟環境保全調査報告書 別海町地区周辺地域(北海道 - 1), 社団法人海と渚環境美化推進機構, 釧路, 2003, 40p
- 35) 寺田一美, 鯉淵幸生, 磯部雅彦: マングローブ水域を含む多河川同時調査に基づく物質フラックスの比較, *土木学会論文集*, B2-65, 2009, pp.1121-1125
- 36) Duarte, C. M., Middelburg, J. J. and Caraco, N.: Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle, *Biogeosciences*, 2, 2005, pp.1-8
- 37) Duarte, C. M., Marbà, N., Gacia, E., Fourqurean, J. W., Beggins, J., Barrón, C. and Apostolaki, E. T.: Seagrass community metabolism: Assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows, *Global Biogeochemical Cycles*, 24, 2010,
- 38) Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N. and Hendriks, I.: Assessing the capacity of seagrass meadows for carbon burial: Current limitations and future strategies, *Ocean and Coastal Management*, 2011,

記号表

DIC : 溶存無機炭素濃度 ($\mu\text{mol-C/kg-water}$)

$D_w(n)$: サンプル番号 n を採取した時の水深 (m)

F : 大気—水間CO₂フラックス ($\mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)

F_1, F_2 : センサーの反応速度や空間分解能等に起因する測定バイアスの補正項

fCO_{2air} : 大気中のCO₂分圧 (μatm)

fCO_{2water} : 水中中のCO₂分圧 (μatm)

I : 光子密度 ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)

k : 交換速度 (m/s)

n : 採取した採水サンプル番号

N_{total} : 海草一個体の葉数の平均値

N_{new} : 海草一個体の測定期間中に新たに生えた葉数の平均値

P_{max} : 最大光合成速度 ($\text{mmol-C/m}^2/\text{h}$)

R : 呼吸・分解速度 ($\text{mmol-C/m}^2/\text{h}$)

$R_{c/w}$: 吹通川河口の海草場の炭素含有比の平均値

S : CO₂の溶解度 ($\text{mol-C/m}^3/\text{atm}$)

TA : 全アルカリ度 ($\mu\text{mol-C/kg-water}$)

Ta : 大気中温度 (K)

t : サンプル n を採取した時の時間

$W_{biomass}$: 海草一個体の乾燥重量の平均値 (mmol/m^2)

w : 鉛直風速 (m/s)

α : 光子モデルにおける初期勾配 ($\times 10^3 \text{ m}^2\cdot\text{s/h}$)

ρ_c : CO₂濃度 ($\mu\text{mol/m}^3$)

ρ_d : 乾燥空気濃度 ($\mu\text{mol/m}^3$)

ρ_v : 水蒸気濃度 ($\mu\text{mol/m}^3$)

μ : 乾燥空気と水蒸気モル比率

Δt : 海草サンプル調査機関 (=13日)

付録

- 付録A 風蓮湖の2010年夏季における気象データ (7/6~8/14)
- 付録B 風蓮湖の2010年夏季における流動・水質データ (8/1~8/9)
- 付録C 風蓮湖の2010年冬季における気象データ (11/8~11/19)
- 付録D 風蓮湖の2010年冬季における流動・水質データ (11/8~11/13)
- 付録E 吹通川河口の2011年夏季における気象データ (7/23~8/17)
- 付録F 吹通川河口の2011年夏季における流動・水質データ (7/23~8/17)
- 付録G 採水サンプルデータ

付録A 風蓮湖の2010年夏季における気象データ

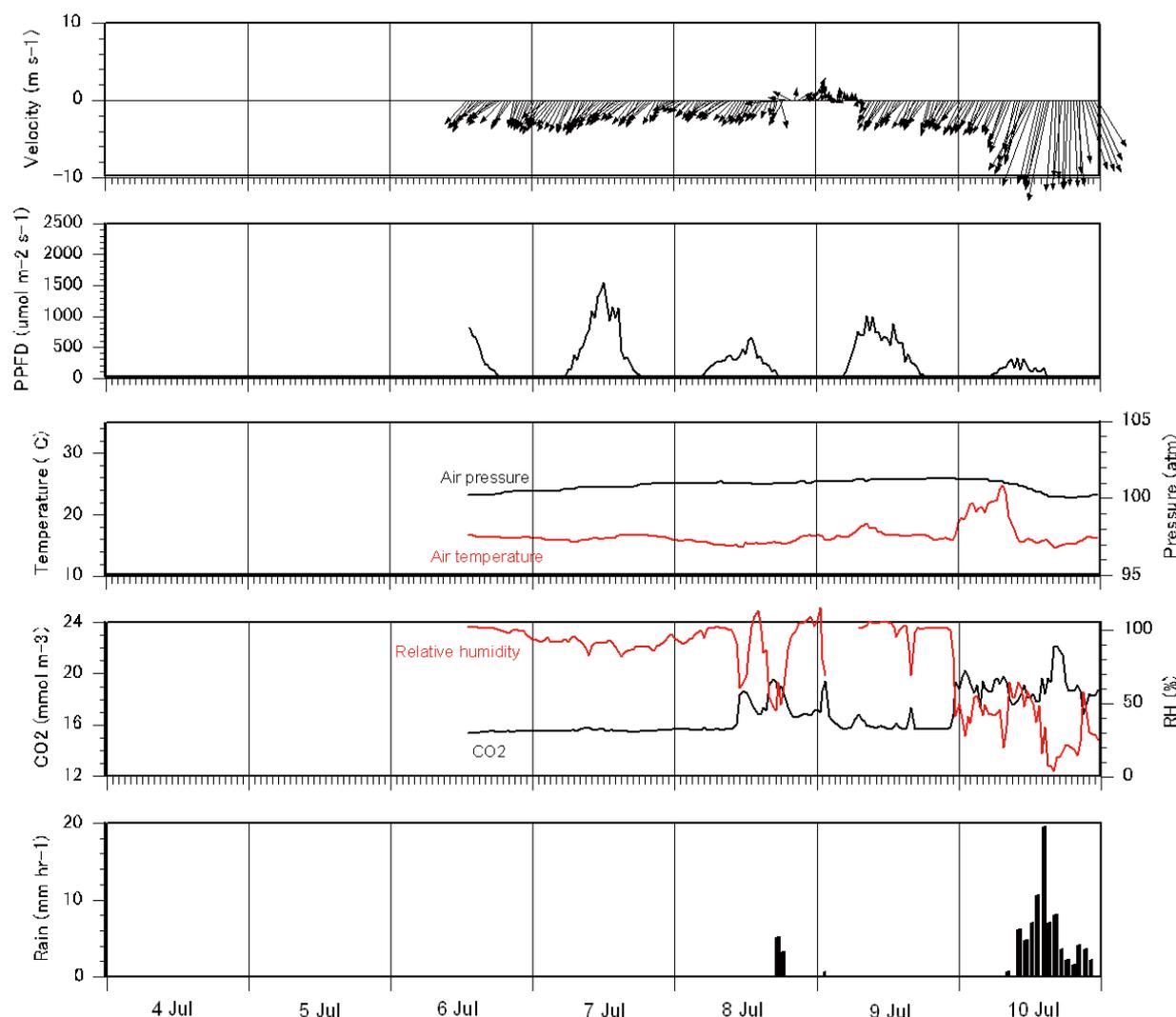


図-A.1 上段から水平風速, 光量子密度, 気温・気圧, 大気中CO₂濃度・湿度, 雨量 (雨量は別海気象台より)

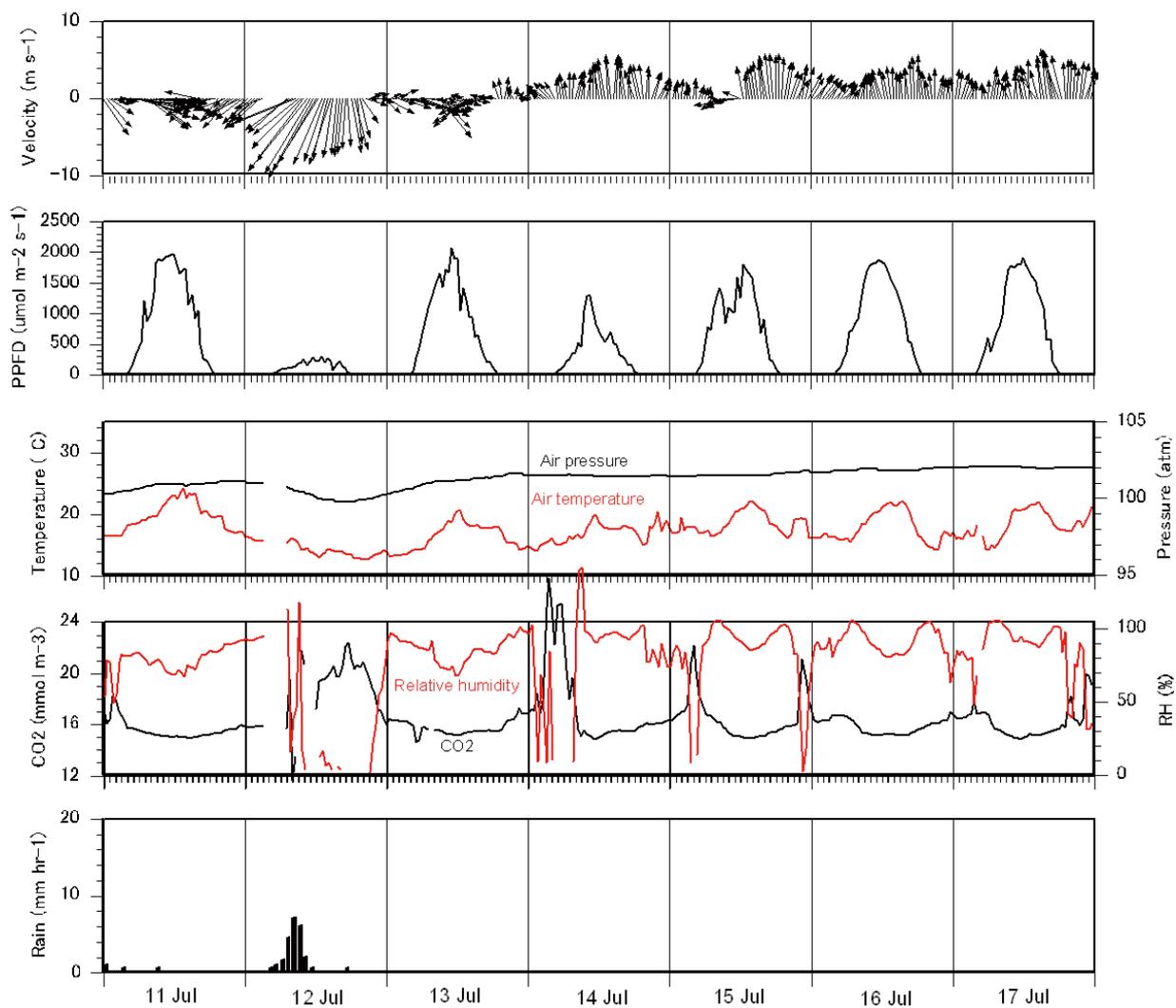


図-A.2 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中CO₂濃度・湿度，雨量（雨量は別海気象台より）

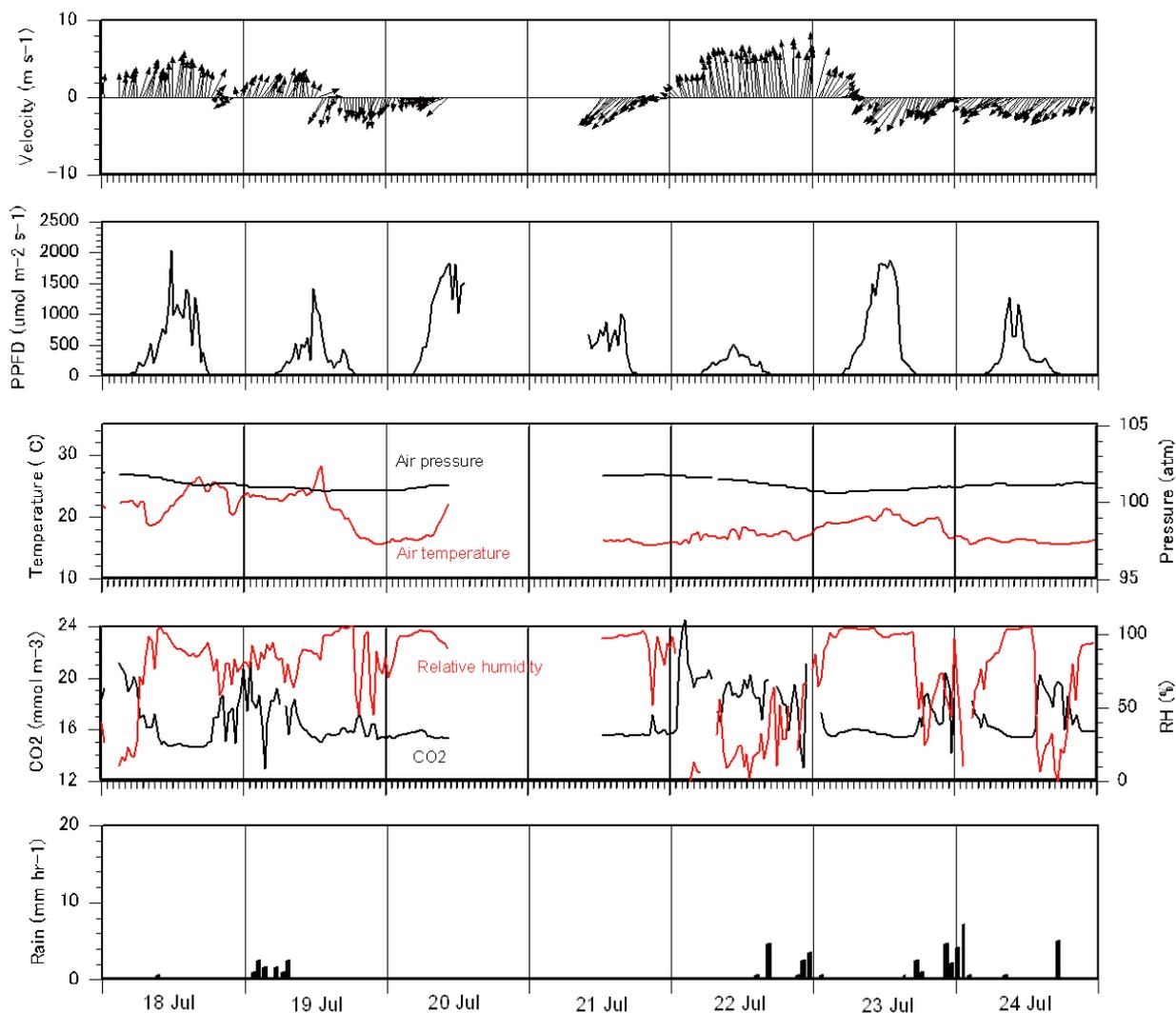


図-A.3 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中CO₂濃度・湿度，雨量（雨量は別海気象台より）

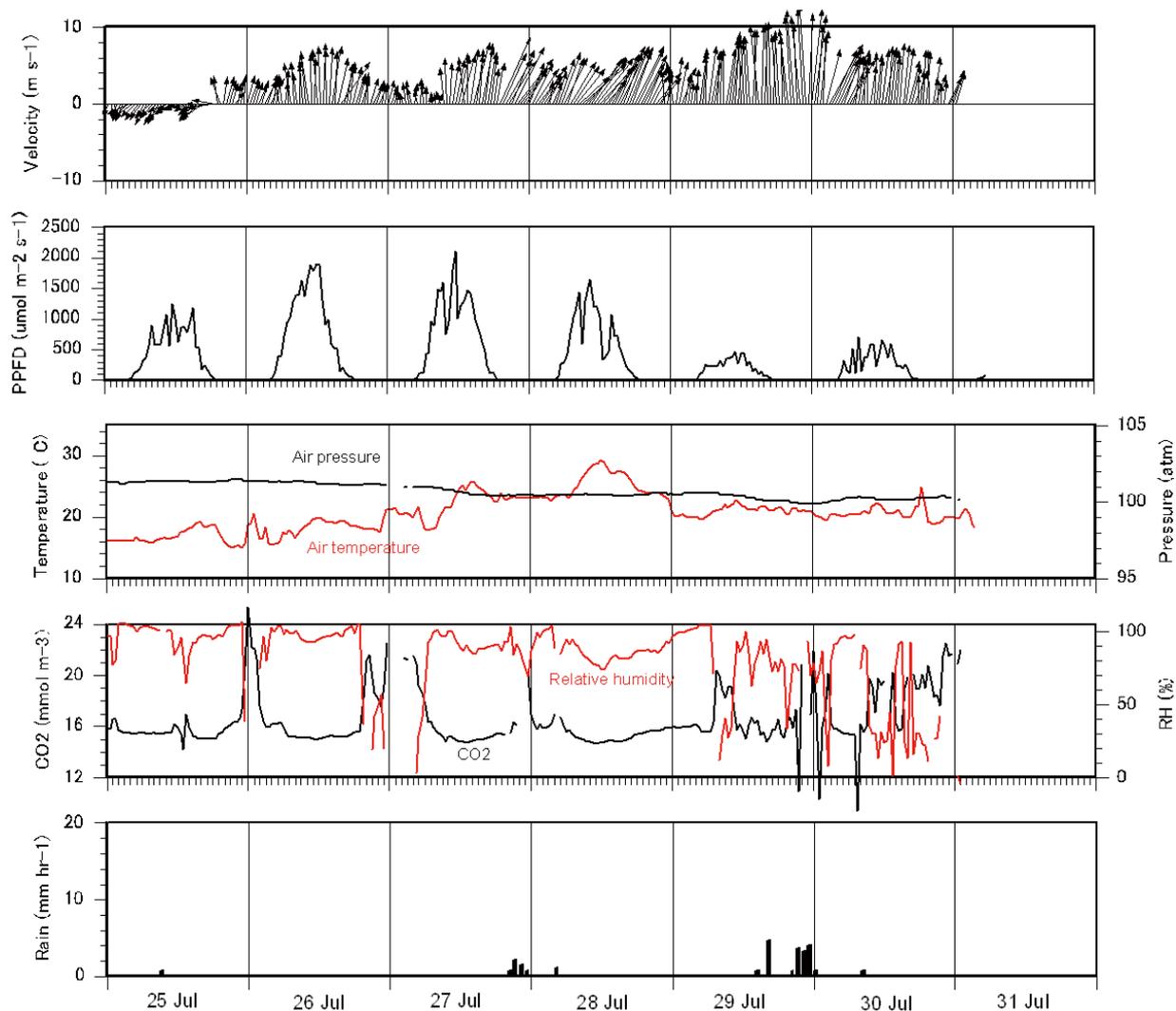


図-A.4 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中 CO_2 濃度・湿度，雨量（雨量は別海気象台より）

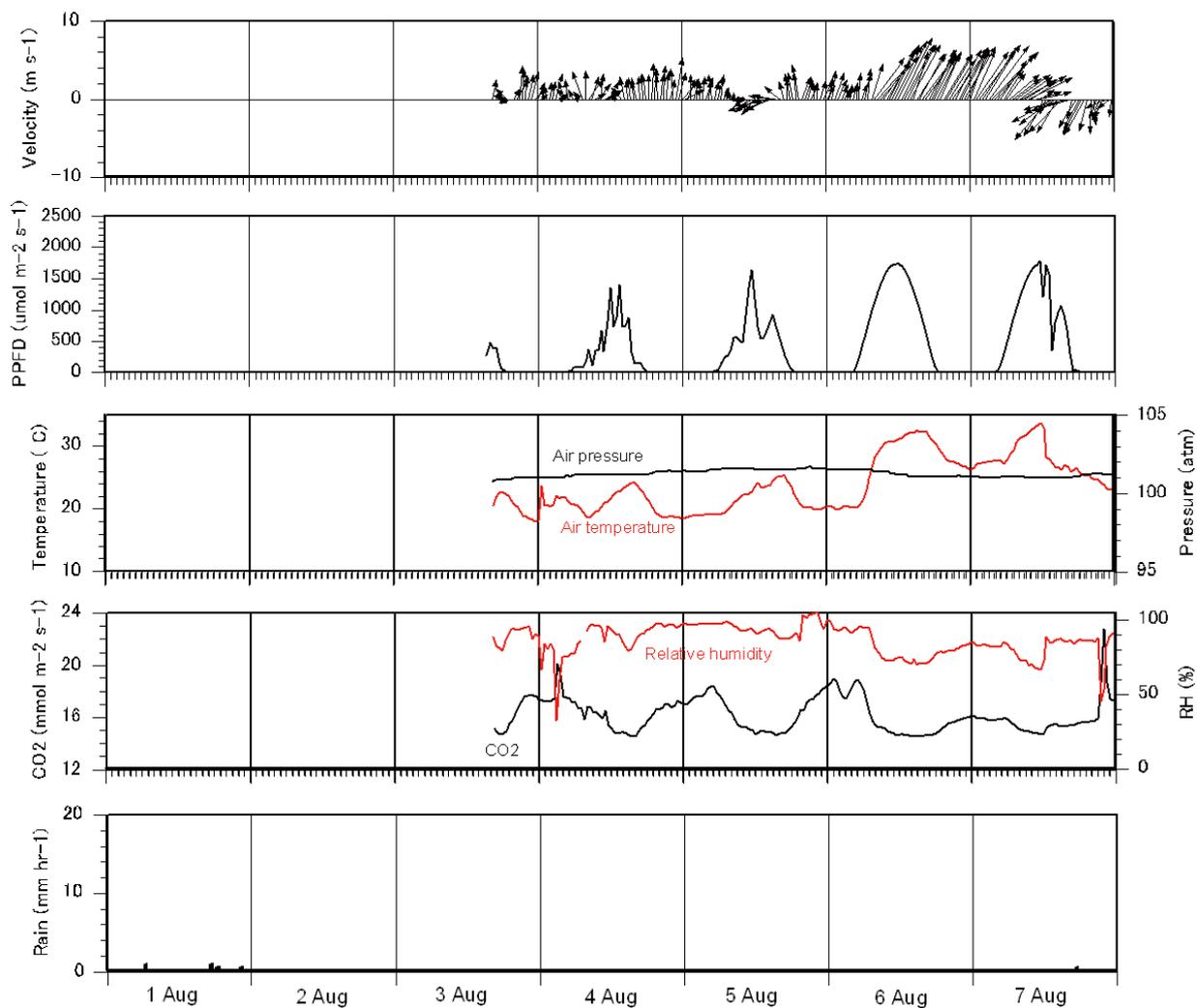


図-A.5 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中CO₂濃度・湿度，雨量（雨量は別海気象台より）

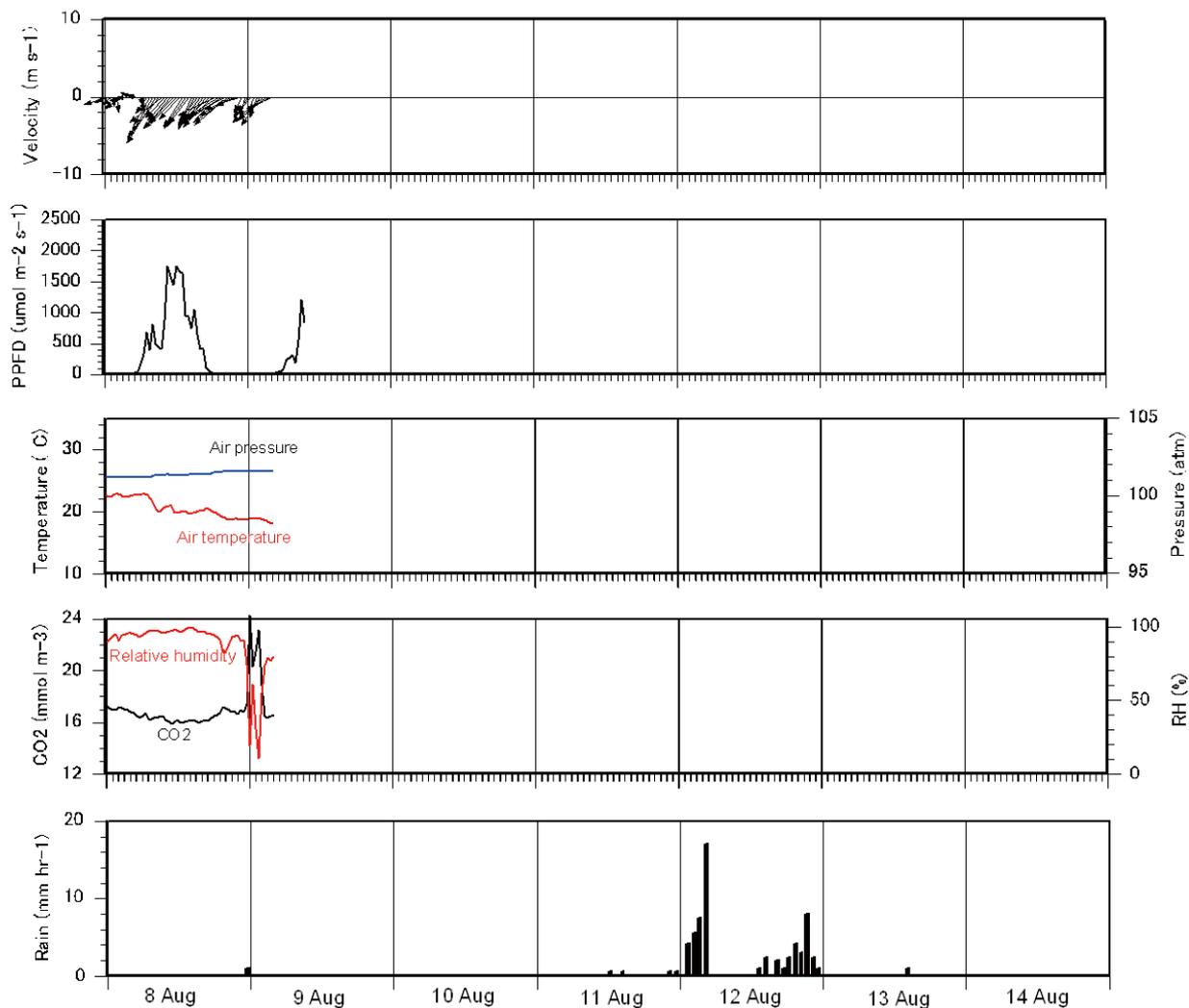


図-A.6 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中CO₂濃度・湿度，(雨量は別海気象台より)

付録B 風蓮湖の2010年夏季における流動・水質データ

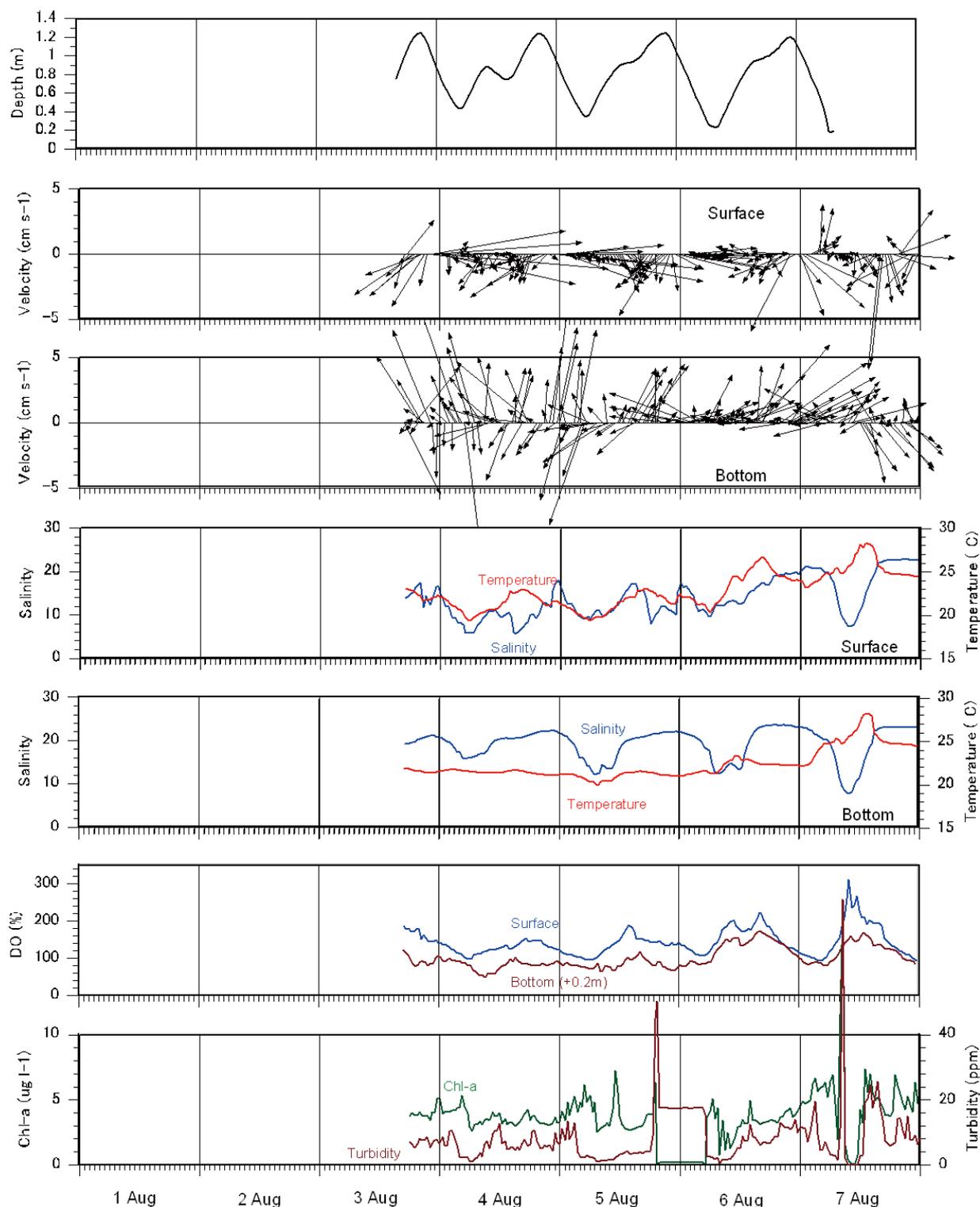


図-B.1 上段から水深、表層の水平流速、低層の水平流速、表層の水温・塩分、低層の水温・塩分、溶存酸素濃度、濁度・クロロフィル濃度（クロロフィル濃度は測定機器（Alec社製Compact-CLW）の読み値）

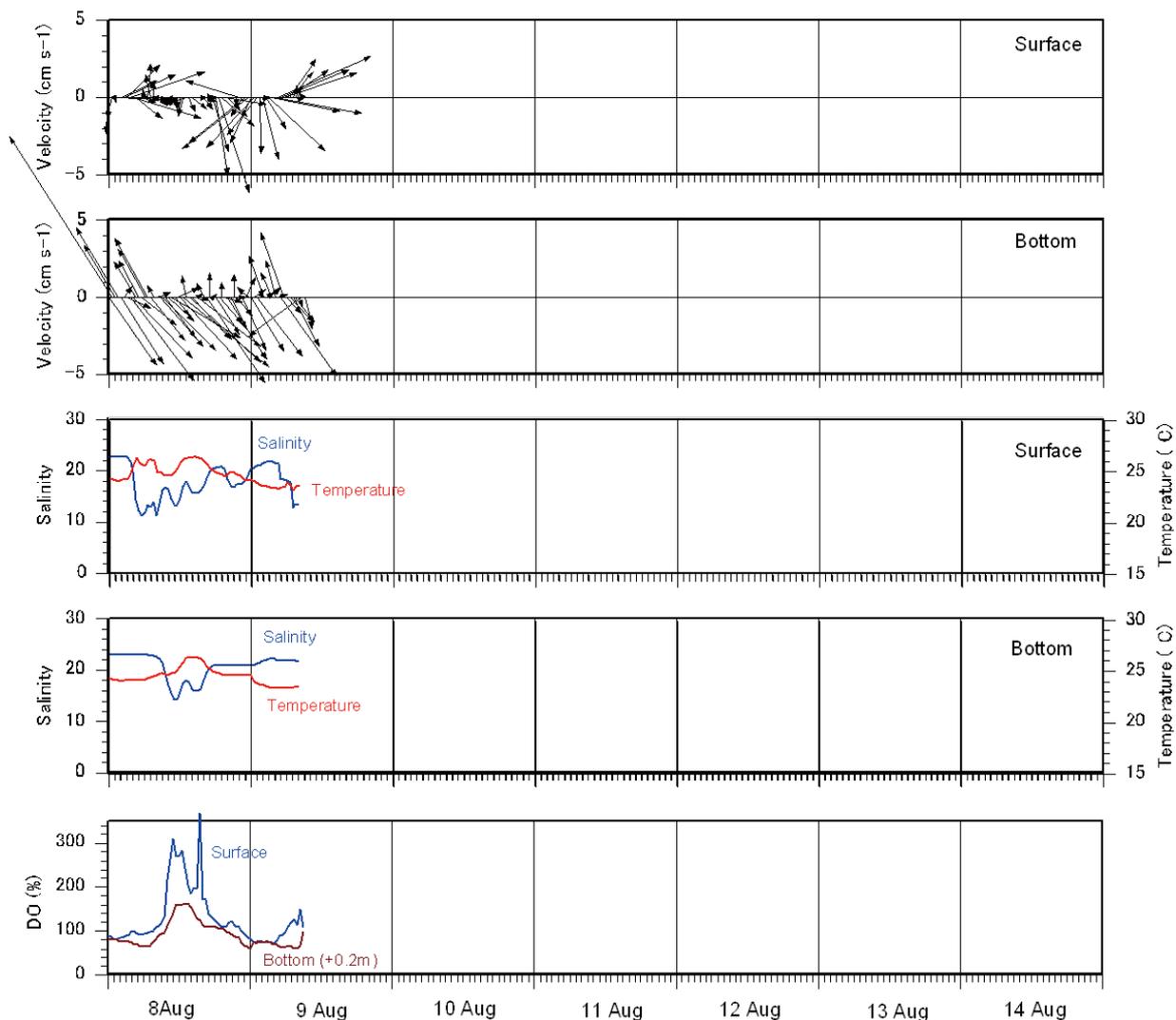


図-B.2 上段から水深, 表層の水平流速, 低層の水平流速, 表層の水溫・塩分, 低層の水溫・塩分, 溶存酸素濃度, 濁度・クロロフィル濃度 (クロロフィル濃度は測定機器 (Alec 社製 Compact-CLW) の読み値)

付録C 風蓮湖の2010年冬季における気象データ)

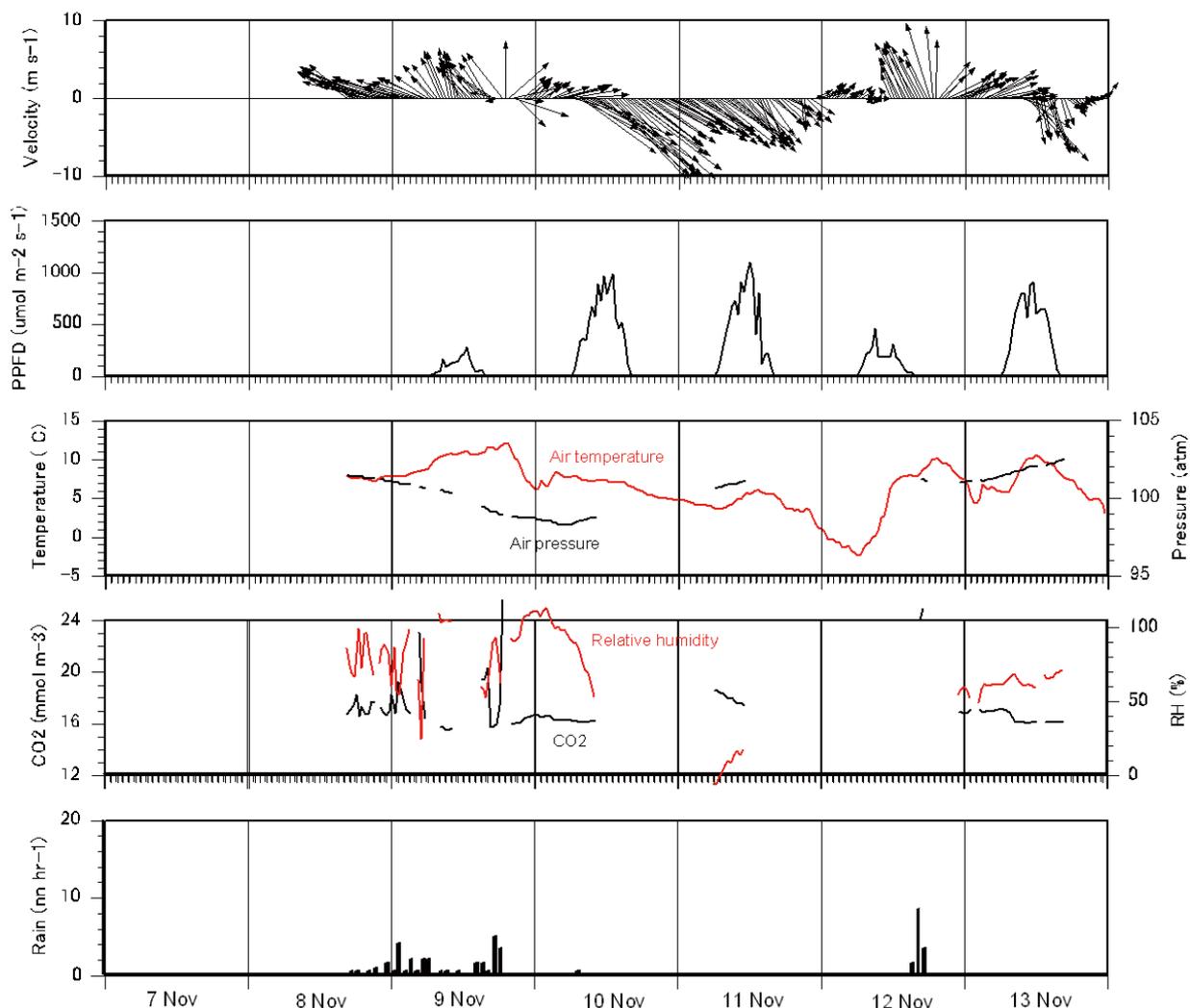


図-C.1 上段から水平風速, 光量子密度, 気温・気圧, 大気中 CO₂ 濃度・湿度, 雨量 (雨量は別海気象台より)

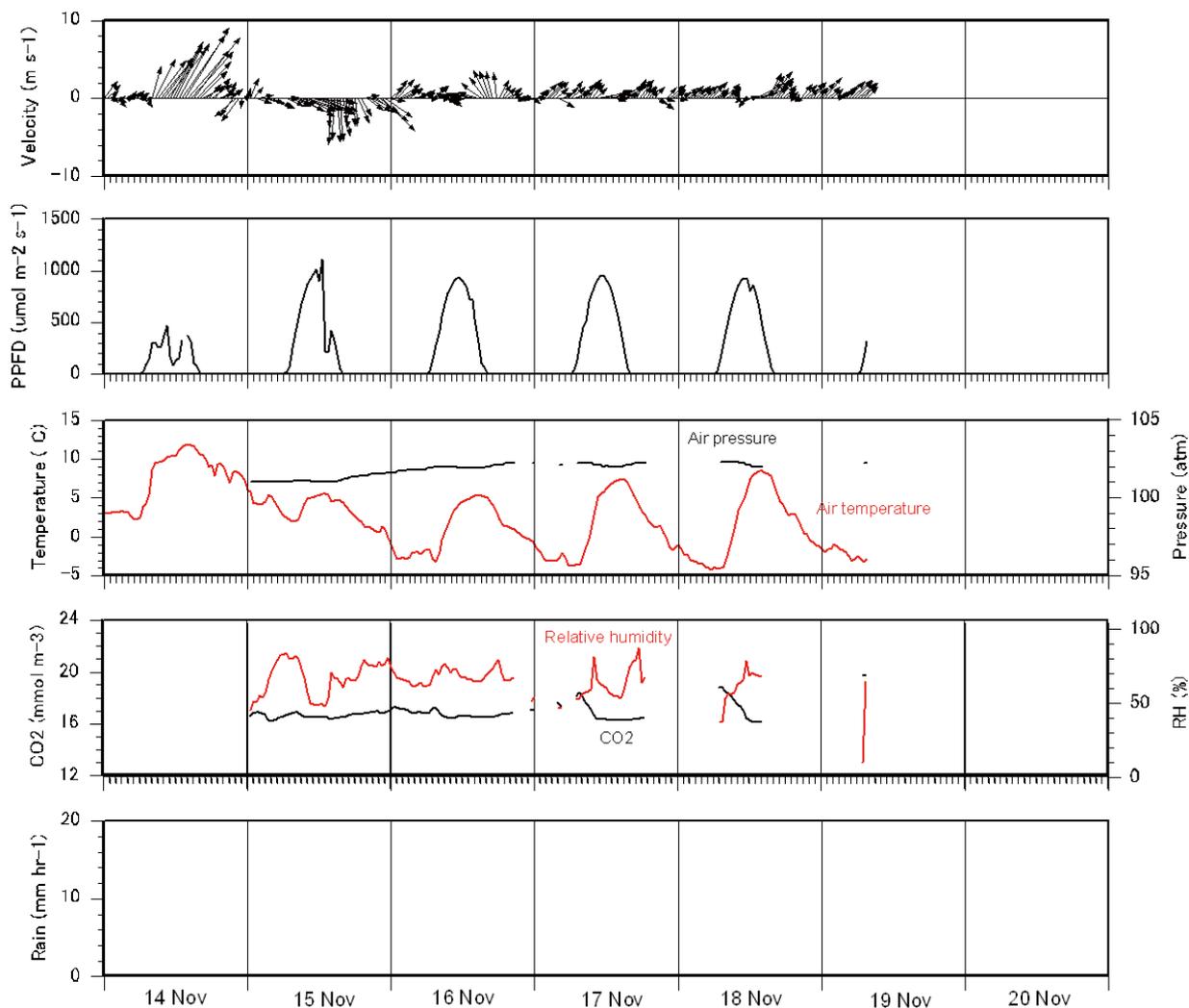


図-C.2 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中 CO₂ 濃度・湿度，雨量（雨量は別海気象台より）

付録D 風蓮湖の2010年冬季における流動・水質データ

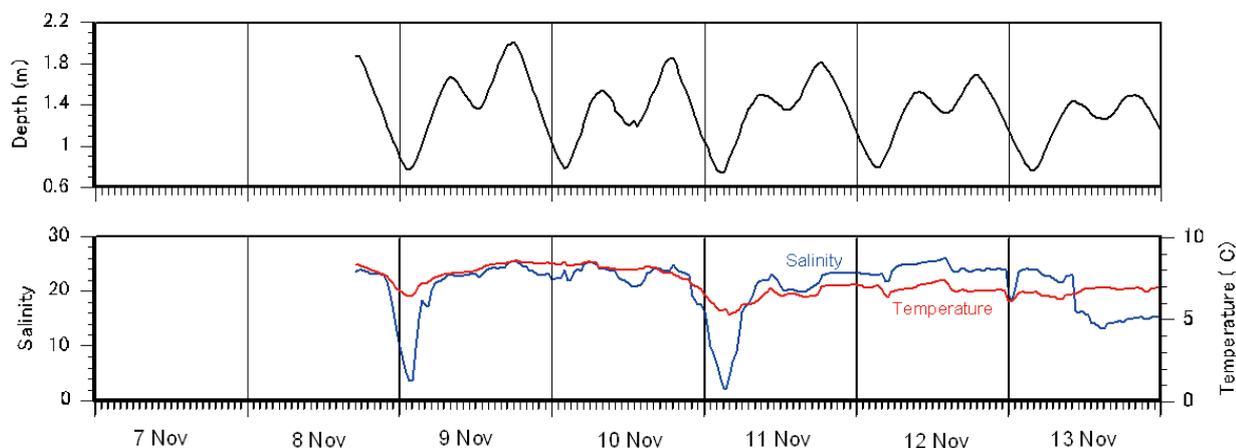


図-D.1 上段から水深，水温・塩分

付録E 吹通川河口の2011年夏季における気象データ

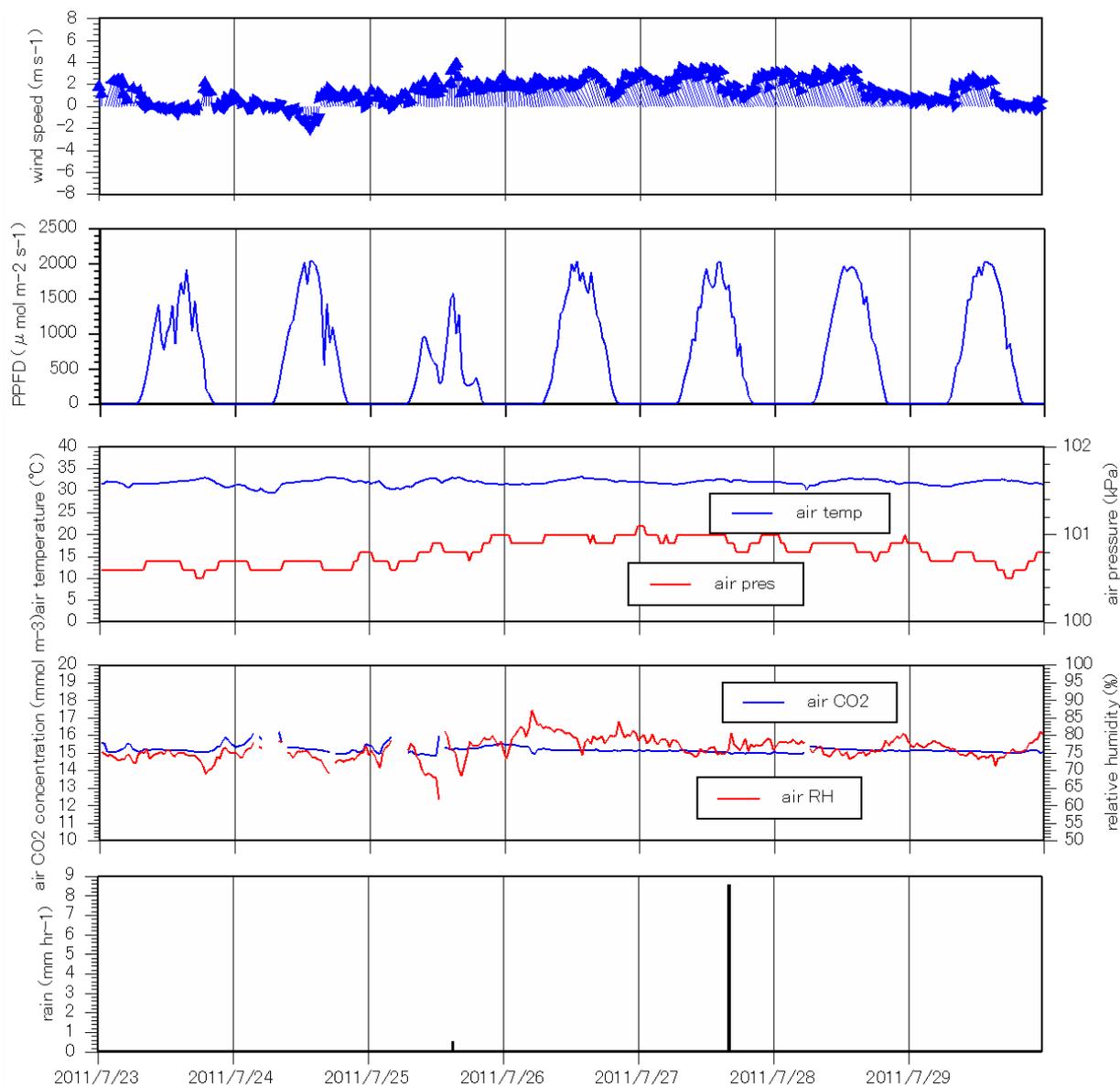


図-E.1 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中 CO₂ 濃度・湿度，雨量（雨量は伊原間気象台より）

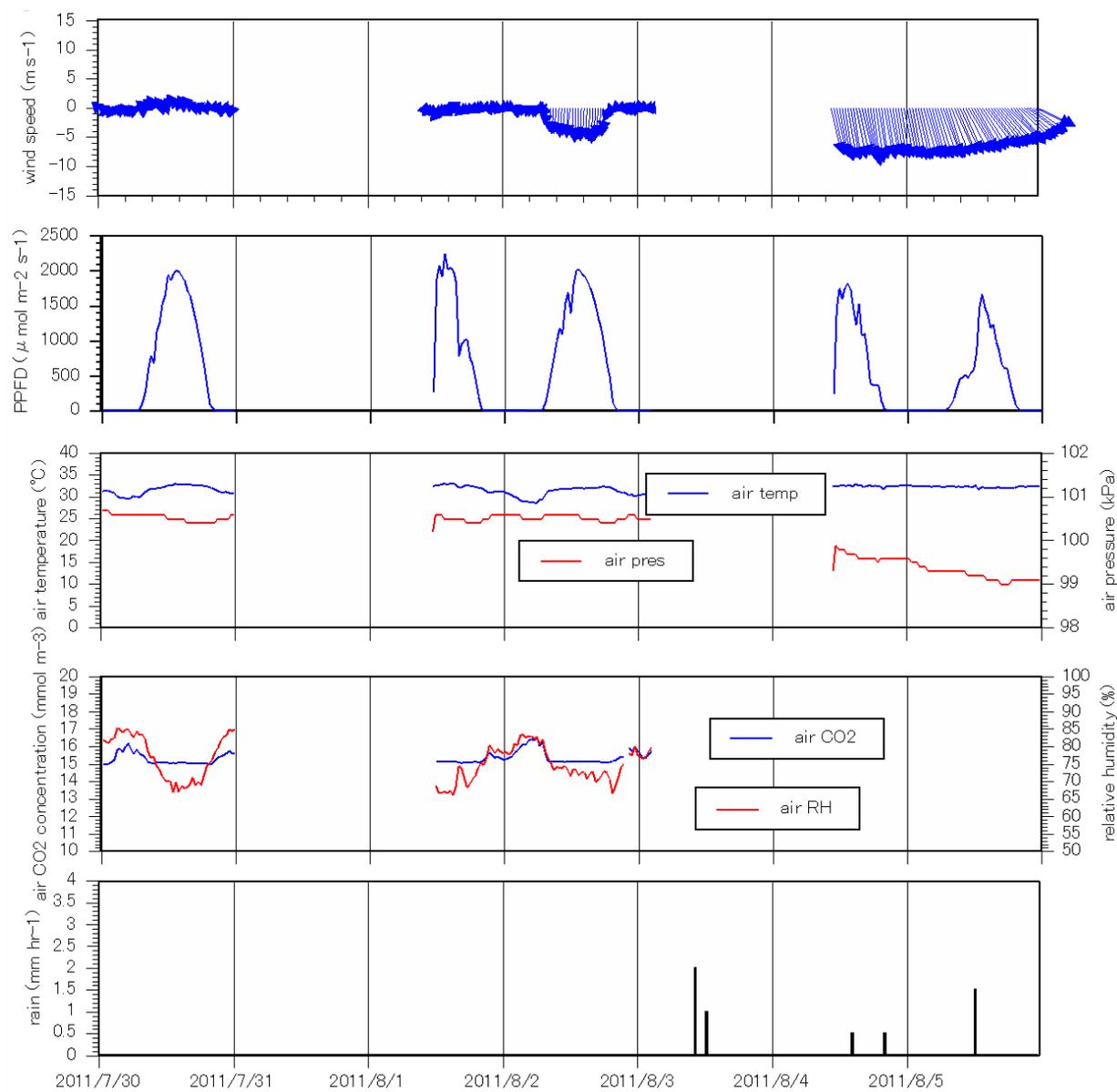


図-E.2 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中 CO₂濃度・湿度，雨量（雨量は伊原間気象台より）

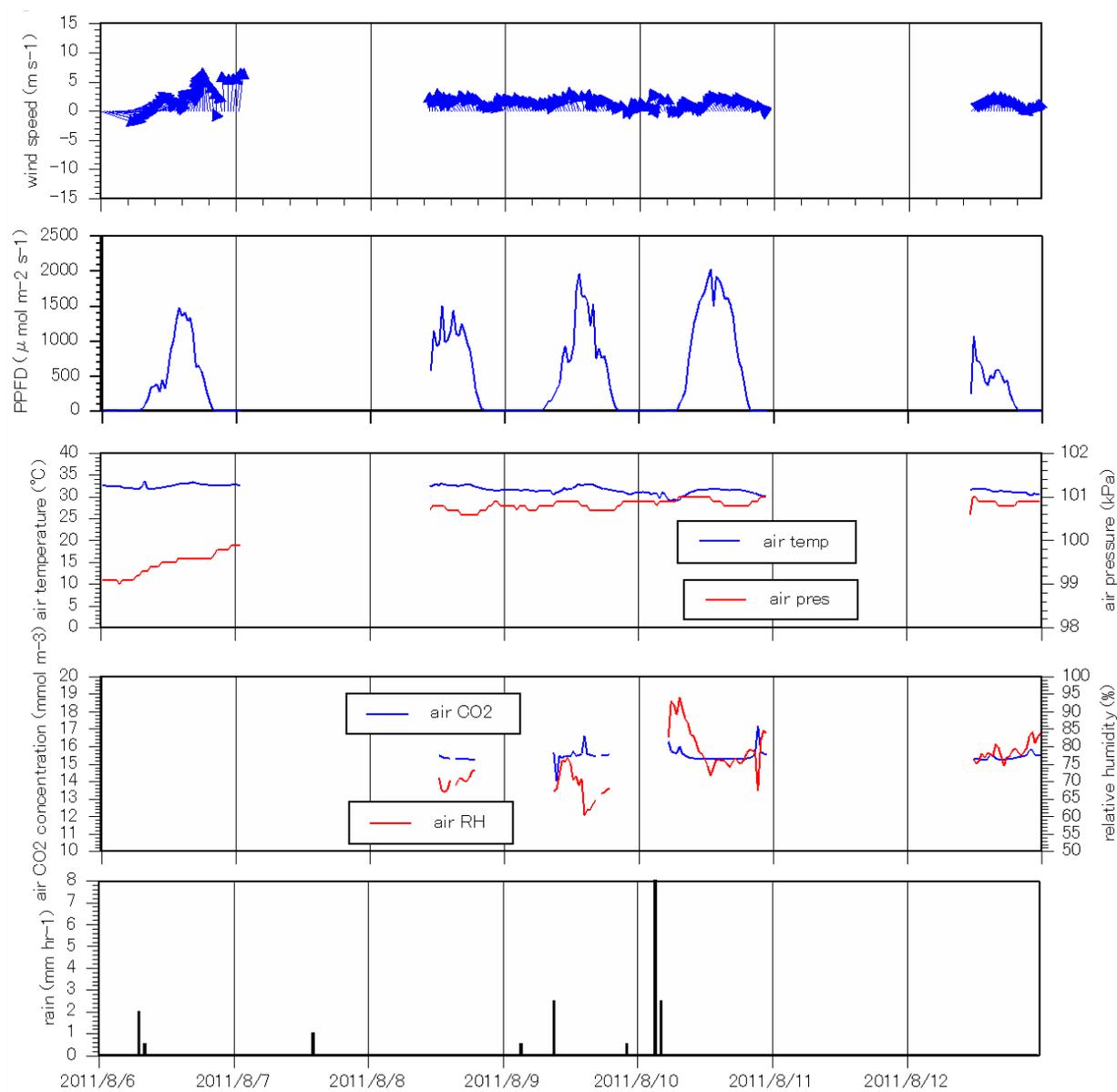


図-E.3 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中 CO₂ 濃度・湿度，雨量（雨量は伊原間気象台より）

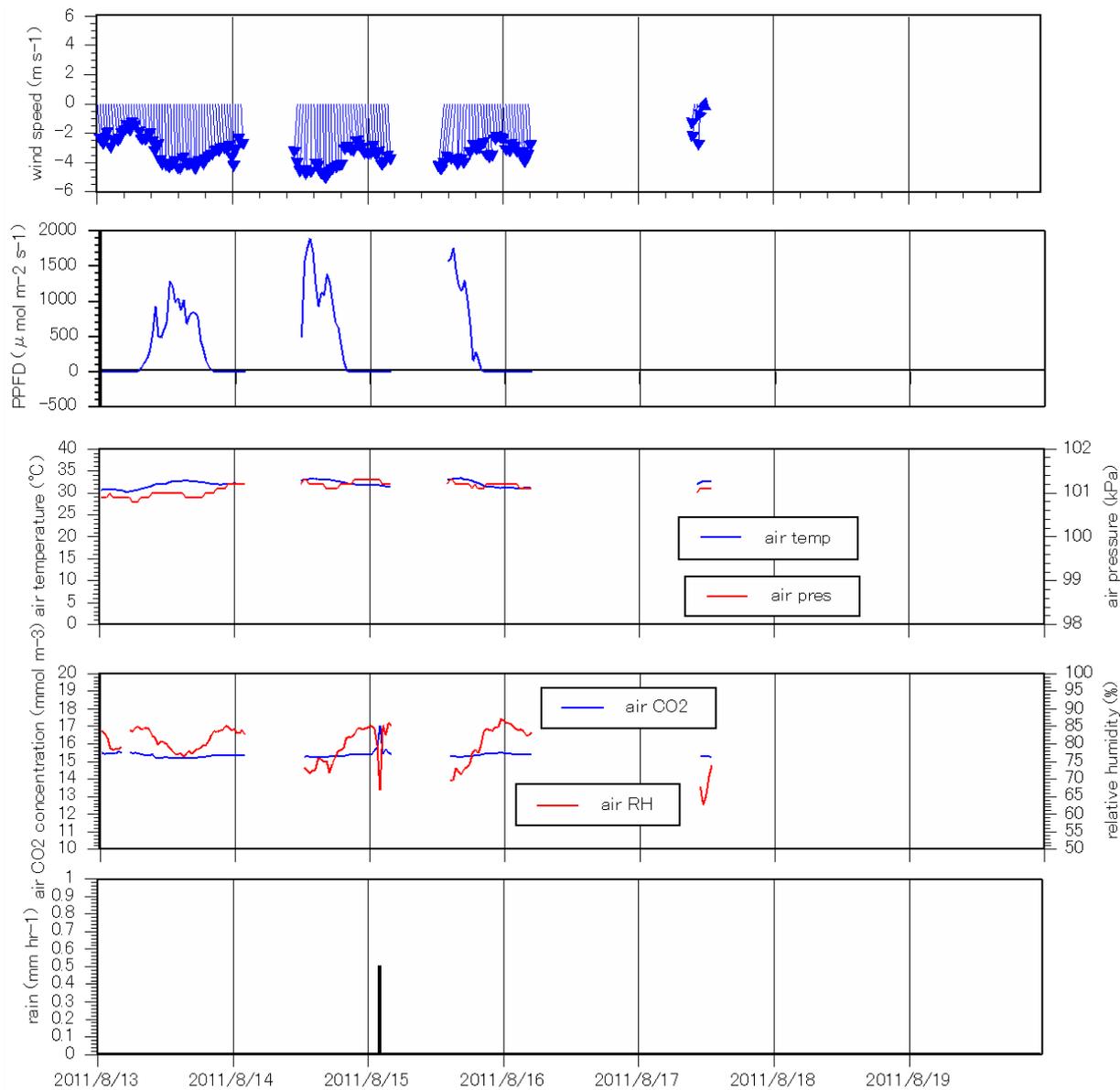


図-E.4 上段から水平風速，光量子密度，気温・気圧，大気中 CO₂濃度・湿度，雨量（雨量は伊原間気象台より）

付録F 吹通川河口の2011年夏季における流動・水質データ

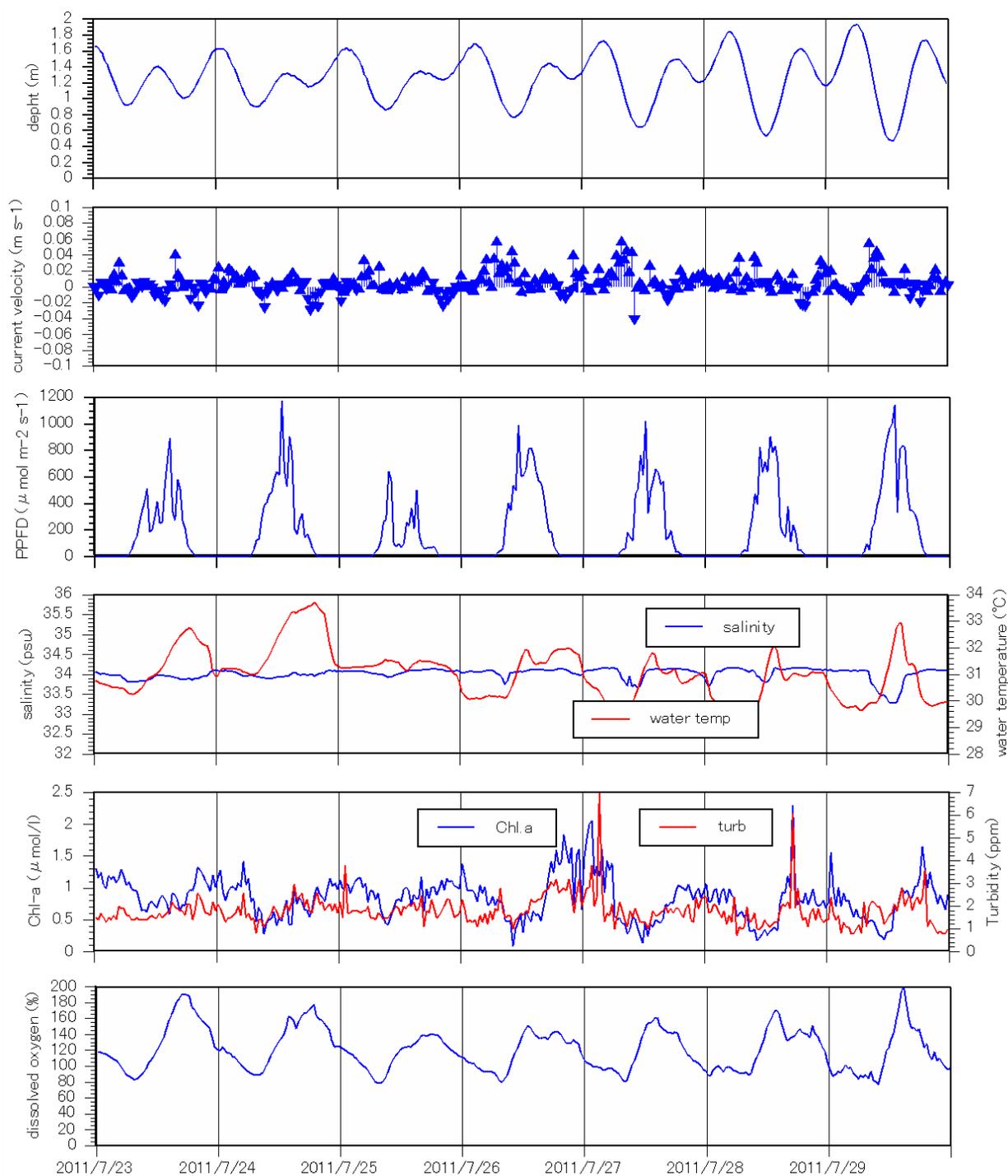


図-F.1 上段から水深、水平流速、水中光量子密度、水温・塩分、濁度・クロロフィル量、溶存酸素濃度（クロロフィル濃度は測定機器（Alec社製 Compact-CLW）の読み値）

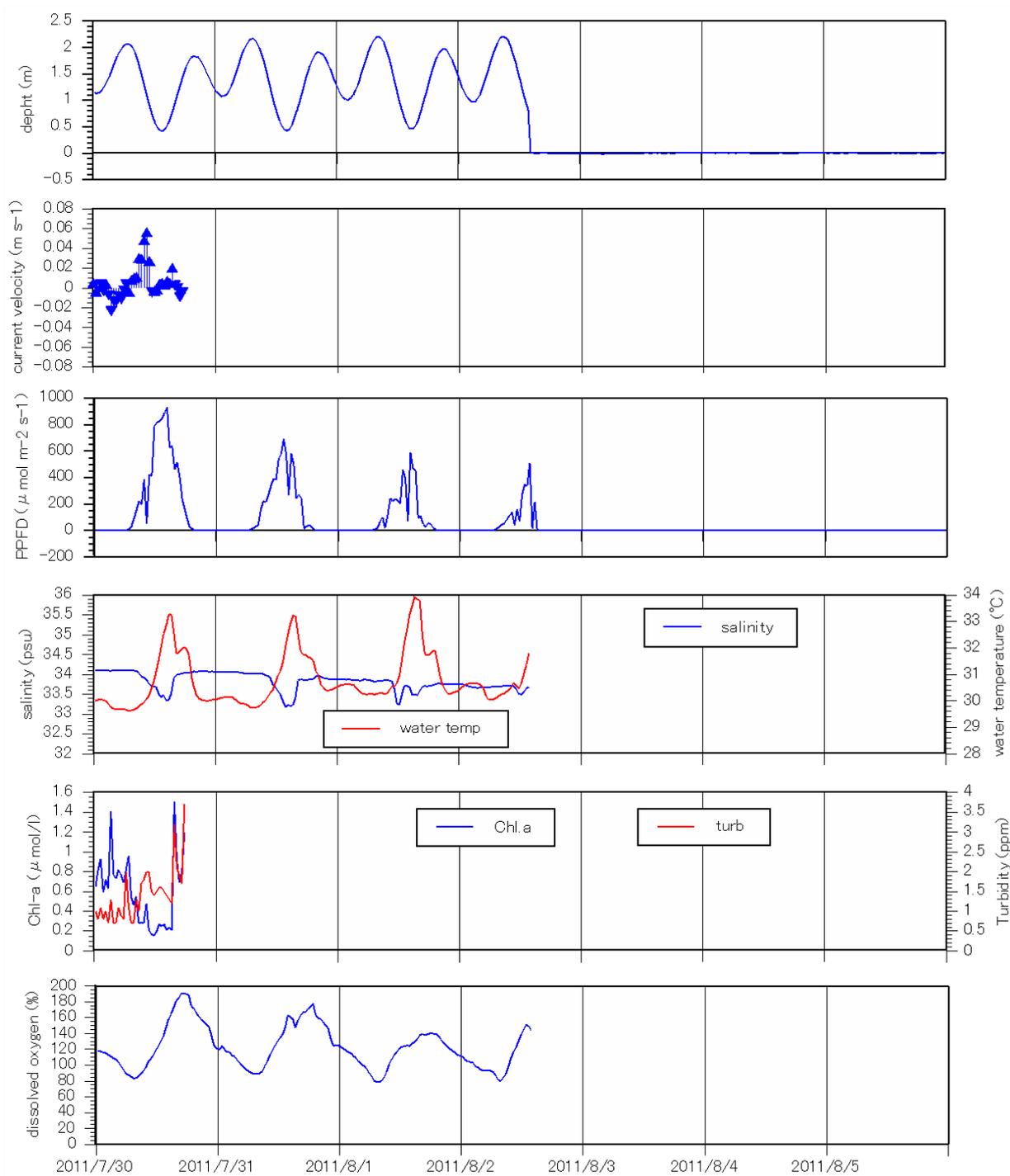


図-F.2 上段から水深，水平流速，水中光量子密度，水温・塩分，濁度・クロロフィル量，溶存酸素濃度（クロロフィル濃度は測定機器（Alec 社製 Compact-CLW）の読み値）

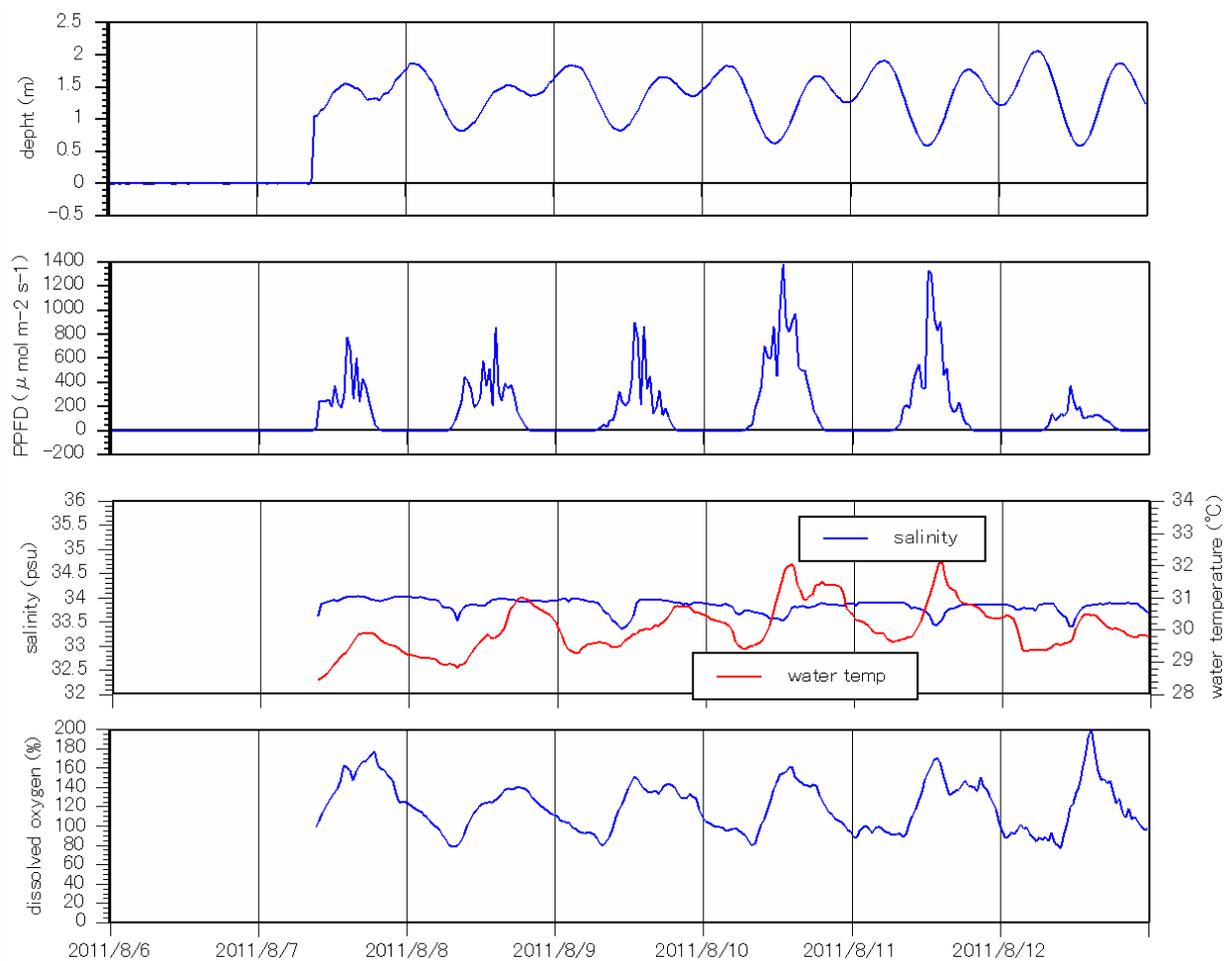


図-F.3 上段から水深，水中光量子密度，水温・塩分，溶存酸素濃度

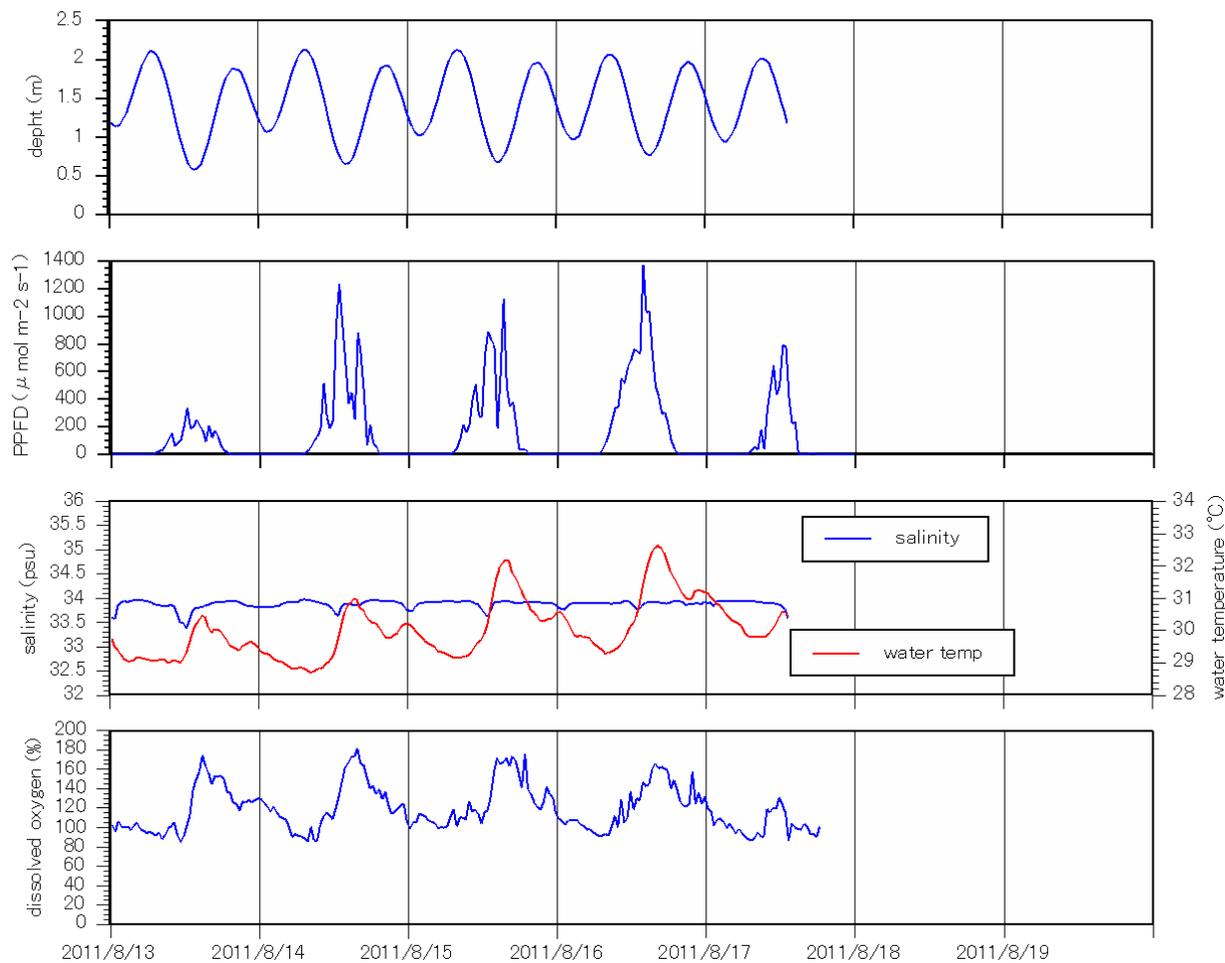


図-F.4 上段から水深，水中光量子密度，水温・塩分，溶存酸素濃度

付録G 採水サンプルデータ

表-G.1 風蓮湖の2010年夏における採水時の水質データ

サンプルナンバー n	採水時間	水温 °C	塩分	全アルカリ度 μmol-C/kg-water	溶存無機炭素 μmol-C/kg-water	CO ₂ 分圧 μatm	pH
1	2010/8/5 8:00	19.80	9.68	1308.68	1306.20	1010.15	7.68
2	2010/8/5 9:00	20.16	10.19	1292.50	1296.18	673.91	7.62
3	2010/8/5 10:00	20.60	10.86	1323.36	1314.38	534.80	7.69
4	2010/8/5 11:00	20.96	11.87	1404.97	1356.06	418.58	7.91
5	2010/8/5 12:00	21.41	13.77	1465.83	1372.97	326.96	8.06
6	2010/8/5 13:00	21.71	16.56	1562.02	1429.12	247.59	8.13
7	2010/8/5 14:00	21.94	17.46	1572.05	1390.83	199.30	8.25
8	2010/8/5 15:00	22.02	17.75	1546.17	1378.71	196.59	8.21
9	2010/8/5 16:00	23.03	15.71	1541.84	1379.15	248.07	8.23
10	2010/8/5 17:00	23.13	15.86	1427.35	1283.52	230.46	8.19
11	2010/8/5 18:00	23.33	13.16	1242.64	1137.92	206.17	8.15
12	2010/8/5 19:00	22.56	10.41	1393.67	1239.08	208.88	8.36
13	2010/8/5 20:00	22.39	12.07	1361.27	1242.22	203.99	8.21
14	2010/8/5 21:00	22.15	12.50	1384.11	1271.02	214.03	8.18
15	2010/8/5 22:00	21.78	11.99	1387.24	1266.33	243.93	8.22
16	2010/8/5 23:00	21.43	14.73	1610.64	1410.04	242.04	8.36
17	2010/8/6 0:00	22.29	18.28	1641.20	1436.62	252.43	8.28
18	2010/8/6 1:00	22.06	16.94	1607.97	1433.25	303.48	8.24
19	2010/8/6 2:00	22.02	15.18	1551.86	1410.47	370.96	8.18
20	2010/8/6 3:00	21.64	12.70	1469.96	1365.51	623.18	8.13
21	2010/8/6 4:00	21.25	11.09	1368.33	1340.16	868.45	7.80
22	2010/8/6 5:00	21.30	11.11	1332.06	1348.96	1226.38	7.51
23	2010/8/6 6:00	20.37	9.83	1281.95	1295.43	1101.23	7.55
24	2010/8/6 7:00	21.12	12.39	1459.43	1348.90	615.50	8.17
25	2010/8/6 8:00	21.79	12.19	1401.53	1295.64	388.95	8.16
26	2010/8/6 9:00	22.78	12.63	1410.41	1269.86	253.01	8.26
27	2010/8/6 10:00	23.79	13.24	1431.69	1258.36	166.47	8.33
28	2010/8/6 11:00	24.48	12.98	1426.36	1237.73	145.45	8.37
29	2010/8/6 12:00	24.13	12.67	1401.70	1267.27	231.07	8.22
30	2010/8/6 13:00	24.85	14.40	1494.71	1338.04	222.53	8.22
31	2010/8/6 14:00	25.70	15.59	1508.49	1314.02	186.34	8.29
32	2010/8/6 15:00	26.29	16.30	1548.16	1281.91	153.25	8.43
33	2010/8/6 16:00	26.61	16.97	1563.15	1231.28	110.41	8.54
34	2010/8/6 17:00	26.64	17.82	1559.95	1197.43	89.14	8.58
35	2010/8/6 18:00	26.03	17.29	1571.70	1243.67	93.61	8.53
36	2010/8/6 19:00	25.16	19.14	1592.33	1351.05	125.81	8.32
37	2010/8/6 20:00	24.51	19.42	1649.96	1398.88	169.05	8.33
38	2010/8/6 21:00	24.32	19.67	1690.96	1422.79	206.68	8.35
39	2010/8/6 22:00	24.05	19.60	1705.90	1423.17	202.33	8.39
40	2010/8/6 23:00	23.82	19.97	1691.16	1442.17	216.71	8.31
41	2010/8/7 0:00	23.94	20.27	1723.36	1446.40	206.72	8.36
42	2010/8/7 1:00	23.37	21.51	1768.95	1531.33	309.61	8.25
43	2010/8/7 2:00	23.46	21.13	1779.47	1536.02	347.84	8.27
44	2010/8/7 3:00	23.81	20.93	1770.96	1537.08	353.10	8.25
45	2010/8/7 4:00	24.06	20.95	1784.55	1565.87	430.23	8.20
46	2010/8/7 5:00	24.79	20.06	1767.11	1566.76	502.55	8.17
47	2010/8/7 6:00	24.76	18.74	1714.23	1532.23	564.48	8.16

表-G.2 風蓮湖の2010年冬における採水時の水質データ

サンプルナンバー n	採水時間	水温 °C	塩分	全アルカリ度 μmol-C/kg-water	溶存無機炭素 μmol-C/kg-water	CO2分圧 μatm	pH
1	2010/11/16 8:30	3.82	16.19	1484.81	1435.72	516.29	8.07
2	2010/11/16 9:30	4.19	18.03	1658.85	1617.97	442.30	7.97
3	2010/11/16 10:30	5.79	21.08	1671.64	1607.97	408.98	8.01
4	2010/11/16 11:30	5.92	21.24	1666.65	1612.34	381.79	7.96
5	2010/11/16 12:30	6.14	21.14	1667.56	1604.15	377.55	8.00
6	2010/11/16 13:30	6.35	21.32	1664.00	1595.14	375.21	8.02
7	2010/11/16 14:30	6.46	20.86	1681.89	1598.83	361.13	8.08
8	2010/11/16 15:30	5.88	14.68	1354.47	1323.05	583.37	7.97
9	2010/11/16 16:30	5.67	13.88	1518.14	1466.31	498.03	8.10
10	2010/11/16 17:20	5.35	13.18	1402.26	1375.47	493.71	7.98
11	2010/11/16 18:20	5.11	10.51	1508.94	1480.99	713.27	8.03
12	2010/11/16 19:20	6.13	18.58	1446.68	1419.59	769.46	7.87
13	2010/11/16 20:20	6.50	21.81	1696.92	1620.60	636.88	8.04
14	2010/11/16 21:20	6.41	21.61	1574.18	1514.37	365.42	7.98
15	2010/11/16 22:20	6.27	21.18	1654.36	1596.62	359.54	7.97
16	2010/11/16 23:20	6.21	21.42	1673.91	1607.63	368.11	8.01
17	2010/11/17 0:20	6.16	21.58	1699.56	1623.66	367.57	8.04
18	2010/11/17 1:20	6.13	21.50	1700.69	1612.50	380.03	8.09
19	2010/11/17 2:20	3.28	15.58	1502.15	1468.36	423.69	8.00
20	2010/11/17 3:20	6.13	21.56	1536.98	1497.30	457.98	7.89
21	2010/11/17 4:20	3.88	17.69	1458.91	1455.34	499.94	7.78
22	2010/11/17 5:20	2.87	16.58	1379.74	1398.86	687.49	7.66
23	2010/11/17 6:20	6.05	21.56	1152.67	1215.09	745.43	7.28
24	2010/11/17 7:20	5.78	21.65	1186.13	1273.44	565.20	7.18
25	2010/11/17 8:20	5.96	22.04	1572.51	1538.20	416.84	7.85
26	2010/11/17 9:20	6.41	22.71	1656.60	1611.45	372.07	7.89
27	2010/11/17 10:20	6.69	23.30	1688.83	1631.37	361.13	7.93
28	2010/11/17 11:20	5.81	21.58	1583.51	1545.86	401.83	7.88
29	2010/11/17 12:20	5.88	21.19	1611.15	1563.40	407.55	7.93
30	2010/11/17 13:20	6.82	23.35	1545.61	1514.80	440.27	7.81
31	2010/11/17 14:20	5.99	18.97	1583.23	1544.90	430.46	7.92
32	2010/11/17 15:20	6.06	19.84	1636.44	1581.30	410.15	7.99
33	2010/11/17 16:20	5.52	19.28	1507.93	1442.54	364.65	8.07
34	2010/11/17 17:20	5.83	20.18	1547.78	1501.61	370.28	7.95
35	2010/11/17 18:20	6.85	22.92	1467.58	1429.54	315.94	7.85
36	2010/11/17 19:20	6.70	22.43	1453.88	1416.54	413.65	7.86
37	2010/11/17 20:20	6.55	22.21	1386.37	1349.15	409.54	7.87
38	2010/11/17 21:20	6.68	22.49	1847.25	1667.46	296.56	8.34
39	2010/11/17 22:20	6.64	22.66	1768.07	1665.87	323.98	8.11
40	2010/11/17 23:20	6.61	22.86	1796.09	1683.75	325.48	8.14
41	2010/11/18 0:20	6.54	23.02	1811.87	1697.25	336.74	8.14
42	2010/11/18 1:20	6.42	23.16	1797.70	1688.97	334.88	8.13
43	2010/11/18 2:20	5.96	22.48	1663.96	1580.05	339.95	8.07
44	2010/11/18 3:20	4.76	21.51	1737.44	1658.95	320.12	8.07
45	2010/11/18 4:20	1.95	15.55	1747.78	1662.88	357.47	8.25
46	2010/11/18 5:20	3.11	15.49	1581.53	1503.67	440.54	8.23
47	2010/11/18 6:20	4.61	19.12	1591.08	1569.83	427.52	7.85
48	2010/11/18 7:00	4.06	17.81	1524.76	1481.96	no data	8.00

表-G.3 吹通川河口の2011年夏における採水時の水質データ

採水時間	水温 °C	塩分	全アルカリ度 μmol-C/kg-water	溶存無機炭素 μmol-C/kg-water	CO ₂ 分圧 μatm	pH
2011/8/15 9:41	29.19	34.05	2198.01	1918.35	688.14	7.98
2011/8/15 10:50	29.39	34.04	2204.53	1911.27	642.17	8.00
2011/8/16 7:47	29.67	34.01	2260.57	1898.32	no data	8.10
2011/8/16 13:06	30.80	33.84	2222.51	1937.74	544.46	7.96
2011/8/16 14:16	31.85	34.03	2198.16	1848.71	445.84	8.05
2011/8/16 15:17	32.46	34.04	2196.04	1820.26	399.93	8.09
2011/8/16 16:15	32.63	34.05	2193.53	1791.69	346.02	8.12

表-G.4 風蓮湖の2011年における採水時の気象データ

気温(°C)	6/27 7/17 8/10 8/24 9/17 10/19 11/4							風速(m/s)	6/27 7/17 8/10 8/24 9/17 10/19 11/4						
	1	21.9	14.1	28.6	18.1	19.7	8		7.2	1	4.8	0.4	3.1	1.2	1.6
2	21.9	14.1	27.5	18.1	19.7	8	10.3	2	4.8	0.4	2.4	1.2	1.6	1.6	1.3
3	22.9	14.1	25	18.1	19.7	8	10.3	3	3.5	0.4	1.4	1.2	1.6	1.6	1.3
4	22.9	14.1	25	18.1	19.7	10.7	10.3	4	3.5	0.4	1.4	1.2	1.6	1.6	1.3
5	22.9	14.1	28.6	18.1	19.7	10.7	10.3	5	3.5	0.4	1.4	1.2	1.6	1.6	1.3
6	22.9	14.4	25	16.1	19.7	10.7	10.3	6	3.5	1	1.4	1	1.6	1.6	1.3
7	23	14.4	28.5	16.6	21.6	10.7	11.5	7	3.3	1	3.2	0.7	1.6	1.6	1
8	23	14.4	28.6	16.6	21.6	10.7	11.5	8	3.3	1	3.1	0.7	1.6	1.6	1
9	23	14.9	28.6	16.1	21.6	12.9	11.5	9	3.3	1.2	3.1	0.7	1.6	1.3	1
10	22.1	15.1	28.6	16.6	21.6	12.9	11.5	10	4	1.1	3.1	0.7	1.6	1.3	1
11	21.9	15.1	29.1	16.7	21.6	12.9	11.5	11	4.8	1.1	2.5	1.4	1.6	1.3	1
12	12	16.2	17.3	14.5	24.6	15.2	0.1	12	2.1	1.7	0.6	1.1	1.7	2	0.2

降水量(mm)	6/27 7/17 8/10 8/24 9/17 10/19 11/4							風向	6/27 7/17 8/10 8/24 9/17 10/19 11/4						
	1	0	0	0	0	0	0		0	1	南南西	北東	南西	南	北北西
2	0	0	0	0	0	0	0	2	南南西	北東	南南西	南	北北西	西北西	北東
3	0	0	0	0	0	0	0	3	南南西	北東	南	南	北北西	西北西	北東
4	0	0	0	0	0	0	0	4	南南西	北東	南	南	北北西	西	北東
5	0	0	0	0	0	0	0	5	南南西	北東	南	南	北北西	西	北東
6	0	0	0	0.5	0	0	0	6	南南西	北東	南	北東	北北西	西	北東
7	0	0	0	0	0	0	0	7	南西	北東	西南西	西南西	南西	西	東北東
8	0	0	0	0	0	0	0	8	南西	北東	南西	西南西	南西	西	東北東
9	0	0	0	0	0	0	0	9	南西	東北東	南西	西南西	南西	南	東北東
10	0	0	0	0	0	0	0	10	南南西	北北東	南西	西南西	南西	南	東北東
11	0	0	0	0	0	0	0	11	南南西	北北東	南西	西	南西	南	東北東
12	0	1.5	0	0.5	0	0	0	12	西南西	北東	南南東	北東	北北西	南西	静穏

日照時間(hour/hour)	6/27 7/17 8/10 8/24 9/17 10/19 11/4						
	1	1	0	1	0	0	1
2	1	0	1	0	0	1	1
3	1	0	0.9	0	0	1	1
4	1	0	0.9	0	0	1	1
5	1	0	0.9	0	0	1	1
6	1	0	0.9	0	0	1	1
7	1	0	0.2	0	0.5	1	1
8	1	0	1	0	0.5	1	1
9	1	0	1	0	0.5	1	1

表-G.5 風蓮湖の2011年における採水時の水質データ

水温(°C)

	6/27	7/17	8/10	8/24	9/17	10/19	11/4
1	11.44	13.90	17.15	15.90	18.65	13.90	12.50
2	13.14	14.90	21.45	16.65	19.95	12.50	12.30
3	16.64	15.95	22.20	17.40	21.45	11.40	11.10
4	16.72	14.75	21.25	16.70	19.15	12.95	11.90
5	14.99	14.55	21.75	16.50	19.40	13.15	12.05
6	16.72	16.05	20.05	17.00	21.10	11.80	11.30
7	15.46	15.40	21.95	17.30	19.70	12.45	11.20
8	15.62	15.45	22.95	17.45	19.80	12.25	11.35
9	16.03	16.40	23.35	17.50	21.25	12.05	11.10
10	17.01	17.90	25.70	17.05	21.85	12.15	11.30
11	19.46	17.75	26.70	16.90	22.40	11.75	11.50
12	13.12	14.15	19.80	14.75	20.60	10.60	7.60

塩分

	6/27	7/17	8/10	8/24	9/17	10/19	11/4
1	31.68	31.56	31.65	31.79	32.21	32.20	32.20
2	30.11	30.85	28.99	30.13	31.26	29.32	31.36
3	24.40	29.57	29.75	27.96	28.97	25.76	27.13
4	26.13	30.95	28.27	29.41	31.71	28.99	30.22
5	24.90	31.02	26.72	29.37	31.42	30.54	30.85
6	24.01	28.26	30.37	27.03	28.25	23.46	25.83
7	21.21	29.60	27.65	24.25	30.94	27.23	25.22
8	21.68	29.98	26.60	23.58	31.10	26.23	25.94
9	19.39	27.92	24.42	20.16	27.87	23.60	23.18
10	13.25	19.97	19.86	13.06	24.84	21.58	21.97
11	12.06	16.47	9.98	5.83	20.43	19.18	21.03
12	0.05	0.06	0.10	0.07	0.07	0.05	0.05

全アルカリ度(μmol-C/kg-water)

	6/27	7/17	8/10	8/24	9/17	10/19	11/4
1	2205.41	2189.30	2215.89	2140.65	2188.43	2218.23	2177.76
2	2141.41	2189.78	2122.88	2113.68	2137.42	2154.15	2243.44
3	1904.38	2057.18	2063.23	2039.75	2058.55	1967.13	1956.58
4	2000.06	2171.68	2062.32	2143.83	2152.19	1968.55	2045.29
5	1969.07	2168.93	2053.37	2148.15	2157.04	2053.94	2095.49
6	1907.37	2086.98	2153.85	2110.35	2072.94	1708.63	1837.06
7	1800.82	2114.30	2087.58	1982.88	2144.13	1913.76	1864.46
8	1777.26	2141.08	2044.65	1949.40	2089.61	1840.92	1994.12
9	1663.48	2061.13	2025.20	1846.77	2023.92	1751.46	1746.51
10	1423.69	1780.05	1835.13	1570.40	1933.57	1584.94	1674.89
11	1339.98	1601.78	1425.40	1344.00	1792.21	1262.97	1599.88
12	835.00	966.05	1127.26	1173.95	1139.94	195.99	170.05

表-G.5 (ツヅキ) 風蓮湖の 2011 年における採水時の水質データ

溶存無機炭素濃度 (μmol-C/kg-water)

	6/27	7/17	8/10	8/24	9/17	10/19	11/4
1	1991.81	1981.25	2003.68	1972.76	1926.89	1951.61	1967.79
2	1913.32	1982.74	1863.95	1942.51	1942.86	1889.18	1932.21
3	1595.56	1842.00	1776.05	1774.59	1845.69	1798.59	1806.90
4	1752.41	1981.31	1804.75	1968.50	1936.76	1900.34	1928.42
5	1722.84	1980.28	1804.28	1959.86	1926.32	1941.88	1949.31
6	1584.93	1926.01	1888.89	1894.29	1846.32	1706.53	1756.15
7	1590.34	1924.90	1818.72	1834.57	1921.01	1827.67	1763.99
8	1573.02	1942.48	1652.06	1774.57	1886.44	1784.22	1766.25
9	1481.68	1890.25	1746.37	1680.89	1820.89	1698.60	1691.99
10	1215.20	1680.83	1351.32	1374.69	1710.39	1648.53	1676.51
11	1068.69	1512.89	1003.03	1189.63	1561.02	1398.83	1620.42
12	840.07	868.57	1199.82	1058.22	1103.12	797.01	891.71

CO₂分圧 (μatm)

	6/27	7/17	8/10	8/24	9/17	10/19	11/4
1	299.00	338.29	387.54	457.42	314.59	254.67	316.87
2	267.77	347.76	304.73	432.91	446.51	247.69	189.27
3	130.64	309.33	260.61	222.30	372.91	272.20	405.33
4	216.70	377.02	281.43	421.86	391.53	785.43	489.74
5	189.10	378.13	285.07	386.28	361.16	548.24	420.86
6	120.30	417.04	298.06	302.97	336.35	1011.08	491.98
7	180.18	358.21	273.94	392.74	375.82	542.58	419.17
8	185.54	350.86	140.52	311.47	402.26	654.32	220.11
9	179.64	387.65	234.40	270.74	368.24	622.72	557.36
10	87.01	444.05	58.37	119.04	279.26	1930.93	991.34
11	49.09	369.84	24.83	86.38	202.27	3181.47	1196.55
12	443.44	1075.96	2077.17	64.69	296.89	11398.13	12337.42

pH

	6/27	7/17	8/10	8/24	9/17	10/19	11/4
1	8.15	8.10	8.05	7.98	8.12	8.20	8.12
2	8.18	8.09	8.13	8.00	7.99	8.24	8.32
3	8.42	8.13	8.18	8.24	8.05	8.16	8.05
4	8.25	8.06	8.16	8.02	8.04	7.75	7.93
5	8.30	8.06	8.16	8.05	8.07	7.89	8.00
6	8.45	8.01	8.14	8.15	8.09	7.59	7.90
7	8.31	8.07	8.17	8.04	8.06	7.88	7.98
8	8.29	8.08	8.40	8.12	8.02	7.79	8.27
9	8.29	8.04	8.23	8.17	8.05	7.82	7.85
10	8.54	7.97	8.68	8.46	8.15	7.30	7.60
11	8.71	8.03	8.94	8.59	8.27	6.99	7.51
12	7.87	8.20	7.36	8.71	8.15	5.76	5.66

港湾空港技術研究所報告 第52巻第1号

2013.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人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/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2013) by PARI

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

この資料は、港湾空港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、複写は港湾空港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 Measurements and Analyses of Coastal Blue Carbon and Atmospheric CO ₂ Sequestration	Tatsuki TOKORO, Shinya HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI, Shigeru MONTANI, Hajime KAYANNE, Tomohiro KUWAE 3
--	---	---------

