

夏季の有明海奥部における基礎生産速度と有機懸濁物質の分解特性

Primary Production and Decomposition Dynamics of Particulate Organic Matter in the Inner Part of Ariake Bay

児玉真史¹・徳永貴久¹・木元克則²・柴原芳一³

Masashi KODAMA, Takahisa TOKUNAGA, Katsunori KIMOTO and Yoshikazu SHIBAHARA

In order to obtain the background information about characteristics of particulate organic matter (POM) in the inner part of Ariake Bay, oxygen consumption rate of bottom water including POM and primary production rate were investigated. Additionally, relationships between biochemical composition of POM and oxygen consumption capacity, controlling factor of primary production were examined. In summary, it was suggested that contribution of oxygen consumption by POM, especially originated from the marine phytoplankton, plays an important role for the formation of hypoxia in the inner part of Ariake Bay. Primary production rate were varied widely among observation dates and it was suggested that nitrogen is limiting nutrient in this area during summer.

1. はじめに

有明海奥部において夏季小潮時を中心に形成される貧酸素水塊は、重大な漁業問題、環境問題を引き起こしている。この貧酸素水塊の形成には、底泥による酸素消費のみならず、水柱中に含まれる有明海特有の浮泥、すなわち、有機物に富んだ懸濁物質による酸素消費の寄与がきわめて大きいことが指摘されている（中山ら、2003；徳永ら、2005）。懸濁物質の動態に関しては、これまで輸送という観点からの研究を中心に行われ、その水質に及ぼす影響も含めて知見が蓄積されつつある（速水ら、2006）。しかしながら、浮泥そのものの生物化学的特性に関する知見は十分とは言えず、当該海域での貧酸素水塊の発生機構解明・対策立案ならびにそのための数値シミュレーションモデル開発の障害となっている。

そこで、本研究では、貧酸素水塊の形成が著しい有明海奥部を対象とした現場調査および室内実験により、有機懸濁物質の生成および分解特性を明らかにすることを目的とした。なお、本研究の一部は、平成19年および20年に実施された環境省請負調査「有明海貧酸素水塊発生機構実証調査業務」の一環として行われた。

2. 材料と方法

(1) 懸濁物質および底泥の酸素消費速度の計測

2007年6月下旬から9月下旬にかけて、図-1に示す有明海奥部の5定点において、おおよそ週1回の頻度で

(計13回)潜水士により、底泥直上0.2mの底層水を底泥を巻き上げないように採水を行った。得られた懸濁物質を含む未ろ過の試水を実験室に持ち帰り、再曝気してDO濃度を調整した後、容量約100mlの酸素瓶に封入して暗条件、25℃で6時間培養した。培養前(0時間)と培養後(6時間)のDO濃度をウインクラ法により滴定し、両者の差から試水の酸素消費速度を計測した。さらに、実験に用いた試料について、あらかじめ450℃で4時間焼いたWhatman GF/Fフィルターに懸濁物質を捕集し、懸濁物質中の有機炭素濃度(POC)、炭素安定同位体比($\delta^{13}C$)等の量・組成等の分析を行い、酸素消費速度との関係について検討した。

また、5定点のうち、測点14では、現場においてアクリル製のチャンバー(底面積0.48m²、内容量35L)を用いて、底泥および底層水を隔離し、多項目水質計(Hydrolab社 MS4a)により隔離水塊中のDO濃度の時系列変化を計測した。さらに、底層水を容量約100mlの酸素瓶に封入して現場底層近傍の海水中で暗条件で培養

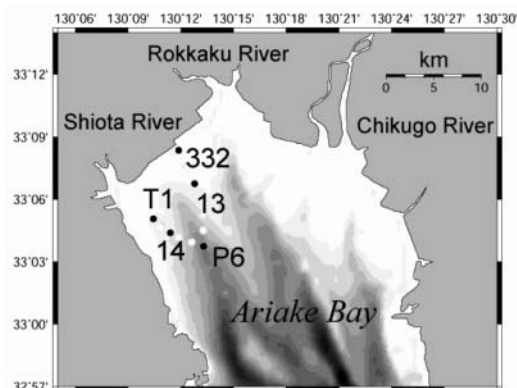


図-1 有明海奥部における調査定点

1 正会員 博(工) (独法)水産総合研究センター中央水産研究所海洋生産部
2 (独法)水産総合研究センター西海区水産研究所有明海・八代海漁場環境研究センター
3 (株)西村商会

表-1 有明海湾奥部定点14における現場実験により得られた(a)底層水および(b)底泥の酸素消費速度ならびに(c)全酸素消費に対する底層水の寄与率

Date	(a) Bottom water ($\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$)	(b) Sediment ($\text{gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	(c) Contribution of bottom water (%)
24 July, 2007	0.29	0.78	60
8 Aug. 2007	0.43	0.40	81
23 Aug. 2007	0.85	0.51	87
6 Sep. 2007	0.75	2.38	56

表-2 底層水の(a)酸素消費速度、酸素消費速度実験に用いた試水の(b)懸濁態有機炭素濃度(POC)、(c)懸濁物質中の有機炭素含量(POC/SPM)、(d)有機炭素量当たりの酸素消費速度および(e)酸素消費速度から計算したPOCの比分解速度の観測期間中の平均値

Stn.	(a) Oxygen consumption rate ($\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$)	(b) POC conc. (mgC L^{-1})	(c) POC/SPM (%)	(d) Oxygen consumption rate per POC ($\text{mgO}_2 \text{ mgC}^{-1} \text{ day}^{-1}$)	(e) Specific decomposition rate (day^{-1})
T1	0.95 ± 0.66	1.18 ± 0.56	5.8 ± 2.3	1.05 ± 1.13	0.39 ± 0.42
14	0.53 ± 0.23	0.71 ± 0.26	5.8 ± 2.9	0.80 ± 0.37	0.30 ± 0.14
P6	0.27 ± 0.14	0.56 ± 0.24	4.7 ± 2.4	0.55 ± 0.35	0.21 ± 0.13
13	0.57 ± 0.24	0.79 ± 0.30	6.4 ± 3.1	0.82 ± 0.42	0.31 ± 0.16
332	1.42 ± 1.18	2.70 ± 1.72	8.2 ± 8.7	0.58 ± 0.34	0.22 ± 0.13

し、底層水による酸素消費速度を計測した。チャンバーにより得られた隔離水塊のDO濃度低下速度、すなわち、底泥と底層水による酸素消費速度の和から、酸素瓶を用いて計測された底層水による酸素消費速度を差し引くことにより、底泥のみの単位面積当たりの酸素消費速度を算出した。

(2) 基礎生産速度の計測

2008年7月中旬から9月下旬にかけて、T1, 14, P6の3定点(図-1)において、1~2週間に1回の頻度で(計7回)Hamaら(1993)の方法にならい、以下の現場培養法により基礎生産速度の計測を行った。すなわち、表層1mから採水した試水を500mlポリカーボネイト瓶に封入し、 ^{13}C トレーサー($\text{NaOH}^{13}\text{CO}_3$)を添加して現場表層に係留し、約6時間培養を行った。培養終了後の試水について、植物プランクトンを含む懸濁物質を焼済みGF/Fフィルターに捕集し、安定同位体質量分析計を用いて植物プランクトンによる ^{13}C の取り込み量を計測して基礎生産速度を算出した。また、酸素消費速度の計測実験と同様に培養に用いた試水の懸濁物質組成ならびに栄養塩濃度の分析を行い、基礎生産速度との関係について検討した。

3. 結果および考察

(1) 底層水と底泥の酸素消費速度の比較

表-1にチャンバーを用いた現場培養実験により計測された底層水の酸素消費速度および隔離水塊全体のDO濃度低下速度から底層水の消費速度を差し引くことにより算出した底泥のみの酸素消費速度を示した。底層水の酸

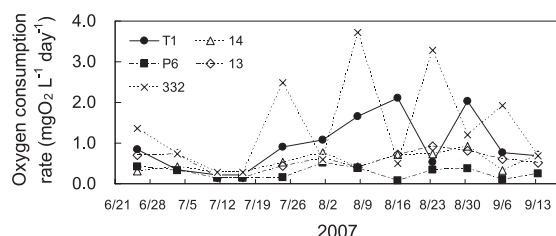


図-2 各点における底層水の酸素消費速度

素消費速度は $0.29 \sim 0.85 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ (平均: $0.58 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$)の範囲であった。一方、底泥の酸素消費速度は $0.40 \sim 2.38 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ の範囲(平均: $1.02 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)であった。ここで、底泥による消費は密度躍層より下の水塊に影響すると仮定し、水温・塩分の鉛直観測結果(徳永ら, 2009)から、底層水の厚さを4mとして底層水全体のDO低下におよぼす底層水と底泥の寄与率を比較したところ、底層水の寄与率が $56 \sim 87\%$ といずれのケースとも底泥よりも大きくなっていった。

(2) 底層水の酸素消費速度と懸濁物質組成との関係

図-2に室内培養実験により得られた各点における懸濁物質を含む底層水の酸素消費速度を示した。底層水の酸素消費速度は、最小で $0.07 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ (P6:8月16日)から最大で $3.72 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ (332:8月8日)の範囲であった。酸素消費速度の頻度についてみると、6割以上のケースで $0.6 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 、4割以上で $0.8 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ の高い酸素消費速度を示した。このうち、332では観測日ごとの差が大きくなっており、大潮期に大きく、小潮期に小さくなる変動を示した。これは、332は水深が非常に浅く、比較的大きな河川(六角川)に近いことから、大潮期の底泥の巻き上がりや河川由来の懸濁物質が影響しているものと考えられる。また、T1では7月中旬以降に大きな値を示している。T1の酸素消費速度が大きくなっている時期は、大規模赤潮の発生時期や底泥の酸化還元電位の低下時期に対応していることから(徳永ら, 2009)、赤潮によって生産された有機物が蓄積し、同時に底質の悪化も進行しているものと推察される。

表-2に各点における実験に用いた底層水の酸素消費速

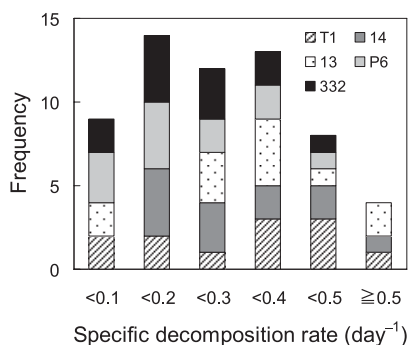


図-3 各点における比分解速度の頻度分布

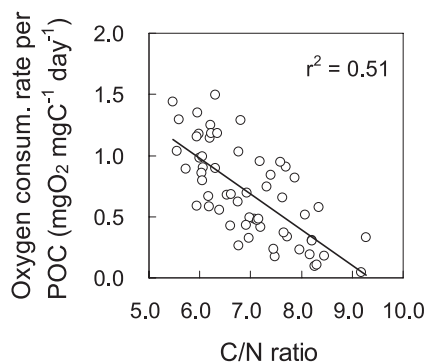


図-5 C/N比 (原子比) と有機炭素量当たりの酸素消費速度の関係

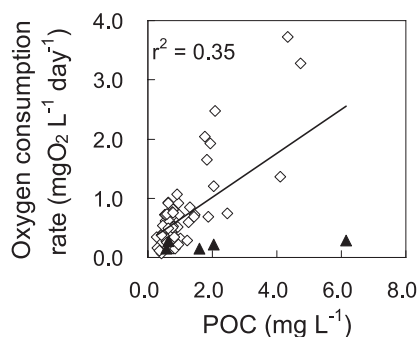


図-4 POC濃度と酸素消費速度の関係 (▲は出水直後 (2007年7月11日), ◇はそれ以外のデータ)

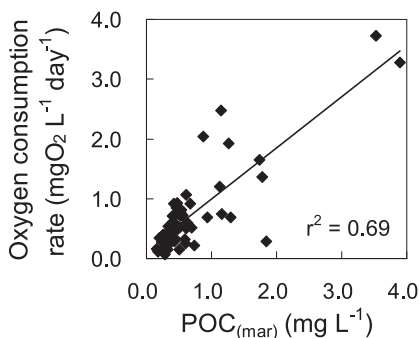


図-6 海域起源の有機炭素濃度 POC(mar) と酸素消費速度の関係

度、試水の懸濁態有機炭素濃度 (POC)、懸濁物質中の有機炭素含量 (POC/SPM) および有機炭素量当たりの酸素消費速度および酸素消費速度から計算したPOCの比分解速度の観測期間中の平均値を示した。底層水の酸素消費速度は、基本的に水深の浅いT1や332で大きく、水深の深い沖合の観測点P6で小さくなっている。これらの傾向は、POC濃度と対応がみられることから、底層水の酸素消費速度は基本的には有機物の量によって支配されていると考えられた。しかしながら、有機炭素量当たりの酸素消費速度ではやや分布が異なり、六角川河口に近い332では小さく、干潟縁辺域にあたるT1や14,13で大きくなっている。

比分解速度は0.2から0.4 day⁻¹前後の値であり、これらの有機懸濁物は数日から5日程度で分解されていると考えられる。図-3に各点における比分解速度の頻度分布を示した。この図から、干潟縁辺域であるT1, 14, 13の底層に存在する有機物は、比分解速度が大きい、すなわち易分解性である場合が多いのに対し、332やP6では、逆に難分解性の有機物が存在している場合が多いことがわかる。難分解性であることが多い点のうち、六角川河口に近い332は陸域由来、沖合で水深の深いP6ではある程度分解の進んだ有機物が存在しているためであると考えられる。

図-4に全てのデータについてPOC濃度と酸素消費速度の関係を示した。両者の間には一定の相関は認められるものの ($r^2 = 0.35$)、出水時のデータが回帰直線から大きく外れている。一方、図-5に示すように懸濁物質のC/N比と炭素量当たりの酸素消費速度 (以後、酸素消費ポテンシャル) の間には明瞭な負の相関があり、植物プランクトンの平均的な組成であるレッドフィールド比 (=6.2) に近いところで、酸素消費ポテンシャルがもっとも小さくなっている。炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ についても相関係数が小さいものの ($r^2 = 0.38$)、酸素消費ポテンシャルと正の相関があり、同様に海域起源の有機物の方が分解され易く、酸素消費ポテンシャルが高いことを示唆していると考えられた。

そこで、本調査で得られた $\delta^{13}\text{C}$ の最大値: -16.1 ‰, 最小値: -25.8 ‰ をそれぞれ海域起源、陸起源有機物のエンドメンバーとし、実験に用いた各試料の $\delta^{13}\text{C}$ 値から海域起源の有機炭素濃度 POC_(mar) を推定し、酸素消費速度との関係を図-6に示した。海域・陸起源に分離しない POC濃度との関係 (図-4) と比較すると、相関係数が大幅に高くなっていることから、懸濁物質の酸素消費速度は単なる有機物濃度ではなく、海域起源の有機物濃度に強く支配されていることが理解できる。

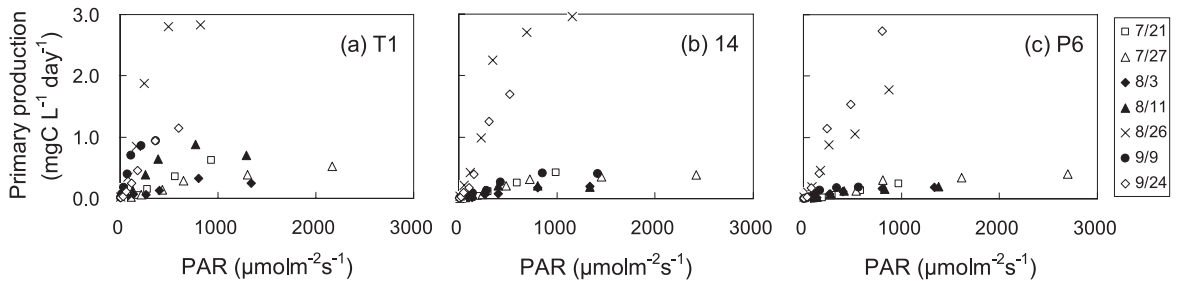
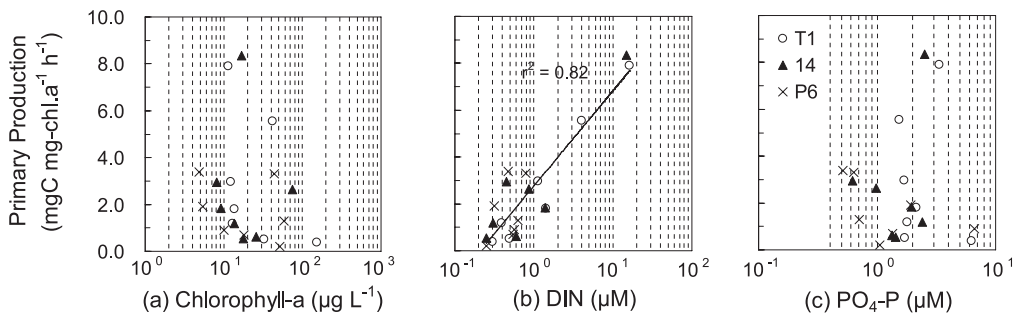


図-7 現場培養によって得られた各点における光—光合成曲線

図-8 光合成有効放射量 (PAR) が $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の時のクロロフィルa当たりの基礎生産速度 (光合成活性) と (a)クロロフィルa濃度, (b)溶存態無機窒素濃度, (c)リン酸態リン濃度との関係

(3) 湾奥西部海域における基礎生産特性

図-7に ^{13}C 法を用いた現場培養法により、光条件を7段階に変化させて得られたT1, 14およびP6における光—光合成曲線を示した。光量100%の時の光合成速度は、 $0.18 \sim 2.96 \text{ mgC L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ の範囲 ($0.90 \pm 0.93 \text{ mgC L}^{-1} \text{ day}^{-1}$, $n=21$) で大きく変動し、観測点ごとよりも観測日ごとの違いが大きくなっていた。また、いずれの測点とも7月下旬から8月上旬にかけて生産速度は小さく、8月下旬以降に高くなる傾向を示した。

ここで、基礎生産速度の支配要因について検討するため、図-8に光合成有効放射量 (PAR) が $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の時のクロロフィルa当たりの基礎生産速度 ($\text{mgC mg-chl.a}^{-1} \text{ h}^{-1}$)、すなわち光合成活性とクロロフィルa濃度、溶存態無機窒素濃度 (DIN)、リン酸態リン濃度 ($\text{PO}_4\text{-P}$) との関係を示した。図-8(a)から光合成活性についてはクロロフィルa濃度とは明瞭な相関がないことがわかる。一方、栄養塩濃度との関係についてみると、DIN濃度とは明瞭な相関があるのに対し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度とは相関がみられない。このことから、観測期間中の有明海奥部の基礎生産に対しては、窒素制限になっていたものと考えられる。実際に光合成活性が低かった7月下旬から8月中旬は、表層のDIN濃度が低い時期に対応していた。一方、

8月下旬以降の光合成活性の高い時期は表層のDIN濃度が高くなっていた。しかしながら、佐賀県有明水産振興センターの調査によると赤潮の構成種は、8月中旬までは *Chattonella* 属主体、8月下旬以降は珥藻主体であったことから (松原, 私信), 種による違いを反映した可能性もあり、この点については慎重な検討が必要である。

4. おわりに

本研究の実験で得られた懸濁物質を含む底層水の酸素消費速度は、DOが飽和した水を数日で貧酸素化させるポテンシャルを有していることを意味する。実際の現場海域では、大潮から小潮にかけて1週間程度で貧酸素化することが確認されている (徳永ら, 2009)。速水ら (2007) は、夏季の有明海湾奥部では、主に残差流によって懸濁物質が湾奥向きに輸送され、水深が5~10m前後の比較的浅い場所に集積することを報告している。本研究の結果からも、質的にも高い酸素消費ポテンシャルを持った有機物が集積していることが示唆された。この場所 (干潟縁部) は、小潮時に著しい貧酸素水塊が形成される場所の中心とも一致している (徳永ら, 2009)。

近年、有明海奥部および諫早湾では夏季に *Chattonella* 赤潮の発生とその後の比較的水深の浅い場所での著しい

貧酸素水塊の形成が観測されている。*Chattonella*属は鉛直移動によって底層の栄養塩を利用することができるため、表層の栄養塩が枯渇して珪藻類が増殖できなくなったステージで優占するものと考えられる。その後8月中旬以降に観測される著しい貧酸素水塊の形成は、この*Chattonella*赤潮とそれまでの珪藻類の増殖による膨大な有機物の供給と物理的な作用による干潟縁辺部への集積が強く影響しているものと考えられる。

8月に著しい貧酸素水塊が形成された後には、表層でのDIN濃度の回復とともに、再び珪藻類の増殖が観測されている。2008年については、8月以降に目立った出水がなかったことから、このDIN濃度の回復は、底泥からの溶出によるものと推察される。こうして再び有機物が供給されることによって、9月下旬以降も貧酸素水塊が形成されることになる。既往の報告でも有明海奥部に於いて $5.5 \text{ gC m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ という著しく高い基礎生産速度が10月に観測されている(清本ら, 2004)。このような夏から秋にかけて繰り返される赤潮～貧酸素化のいわゆる“負の連鎖”は、夏季のサルボウなどの底生生物への死にとどまらず、初秋の栄養塩を枯渇させることでノリ養殖にも少なからず影響を与えているものと考えられる。

速水(2007)は、過去30年間の夏季の浅海定線データを整理して、有明海奥部においては同じ成層強度であっても底層のDOが低下していることを明らかにし、その原因として有機物量の増加による酸素消費速度増大の可能性を指摘している。本研究で得られた底層水の酸素消費ポテンシャルは他の海域と比べて特に高いものではなかったことから(Hopkinson & Smith, 2005)、近年の著しい貧酸素水塊の形成の原因としては、速水(2007)が指摘しているように酸素消費の主体となる有機物の量そのものの増大、すなわち生産量の増加、集積機構の強化、さらには除去機能の低下が疑われる。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、中央水産研究所の市川忠史氏には実験方法ならびにデータのとりまとめについて、貴重なご助言をいただいた。また、現場調査に際しては、西海区水産研究所の長副聡氏にご協力いただいた。試料分析に際しては中央水産研究所の山田圭子氏に多大なるご支援をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 清本容子・横内克巳・木元克則・田中勝久・熊谷 香・梅田智樹・黒木善之・山本憲一(2004): 有明海表層における基礎生産量の季節変動, 2004年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p. 209.
- 徳永貴久・松永信博・阿部 淳・児玉真史・安田秀一(2005): 有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験, 土木学会論文集, 782/II-70, pp. 117-130.
- 徳永貴久・児玉真史・木元克則・柴原芳一(2009): 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性, 海岸工学論文集, 56, (投稿中).
- 中山哲蔵・佐伯信哉・時吉 学・木元克則(2003): 有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, 50, pp. 976-980.
- 速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・濱田孝治・平川隆一・宮坂 仁・大森浩二(2006): 夏季の有明海奥部における懸濁物輸送とその水質への影響, 海岸工学論文集, 53, pp. 956-960.
- 速水祐一(2007): 有明海奥部の貧酸素水塊, 一形成機構と長期変動一, 月刊海洋, 39, pp. 22-28.
- Hama, T., Miyazaki, T., Ogawa, Y., Iwakuma, T., Takahashi, M., Otsuki, A. and Ichimura, S. (1983): Measurements of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope, Mar. Biol., Vol. 73, pp. 31-36.
- Hopkinson, C. S. and Smith, E. M. (2005): Estuarine respiration: an overview of benthic, pelagic, and whole system respiration, In Respiration in aquatic ecosystems, ed. Del Girogio, P. A. and Williams, P. J. Le B., Oxford Univ. press, pp. 122-146.