

広島湾北部海域の酸素収支に関わる物理、生物・化学過程の評価

川 口 修・高 辻 英 之

Evaluation of the effect of physical and bio-chemical process on the oxygen budget in Northern part of Hiroshima Bay

Osamu KAWAGUCHI and Hideyuki TAKATSUJI

広島湾北部海域では夏季になると底層の溶存酸素濃度が低下し、たびたび貧酸素水塊が形成されることが知られている¹⁾。このような貧酸素水塊は二枚貝や多毛類といったベントス^{2),3)} やスズキなど魚類⁴⁾ へと影響することが知られており、生態系全体への影響が危惧される。そのため貧酸素化に対する何らかの対策が求められている。

海水中の溶存酸素濃度は、物理的移流、拡散による酸素の移動（物理過程）と、生物、化学的な供給および消費（生物・化学過程）のバランスによって決定されている。そのため、これらの過程による酸素フラックスの定量的見積もりは、貧酸素化の原因究明と対策立案における重要な参考資料となる。広島湾の物理過程について、山本ら⁵⁾ は広島湾北部のボックスモデルを構築し、河川流入によるエスチュアリー循環が広島湾の恒常性（富栄養化時には希釈へ、貧栄養時には栄養塩供給へと働く）に重要な役割を果たしていることを示した。また、橋本ら⁶⁾ は同様のボックスモデルを用い、エスチュアリー循環に伴う隣接海域からの栄養塩供給によって広島湾の生物生産が大きく影響されることを示した。すなわち、太田川という大きな河川を持つ本海域では、エスチュアリー循環による隣接海域からの酸素供給によって底層の酸素濃度が大きく影響される可能性は高い。高辻¹⁾ は同様の視点から、過去10年間（1995～2004年）のエスチュアリー循環流量と底層の溶存酸素濃度との関係を調査し、エスチュアリー循環流量が $30\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ 以上ある場合に貧酸素化していないことを示した。高辻¹⁾ の解析は、貧酸素化が起きないことに対する状況証拠を示しているのであるが、これに量的解釈を加えることで、言わば物的証拠を得ることができる。また、もしエスチュアリー循環が広島湾底層における溶存酸素濃度の上昇を一義的に決

定しており、この関係が量的に明らかにされれば、河川流量の調節による貧酸素化防止技術の開発に大きく貢献できることが期待される。生物・化学過程については、広島湾北部海域の有光層は10～31m（季節変動を含む）⁷⁾ であり、海底付近まで純生産が正であることが伺える。しかしながら夏季においては、海水中の植物プランクトンや有機懸濁物量が多いため、有光層が小さくなると同時にその呼吸、分解過程における酸素消費が光合成や物理過程による酸素供給を上回って貧酸素化していることが考えられる。

本研究では、以上のような物理過程、生物・化学過程による酸素収支をボックスモデルから見積もり、それらを比較することによって溶存酸素濃度の変化に及ぼす各影響を評価することを目的とした。

材料および方法

広島湾北部海域は、山本ら⁵⁾ にならない物理・化学的な環境特性から水平的に2つ、鉛直的に2つのボックス（上層：水深0～5m、下層：水深5m～海底）に分け、ボックス1と2の表層、下層をそれぞれ、BOX1U、BOX1LおよびBOX2U、BOX2Lとした。また、ボックス1に隣接する呉湾海域の上層をBOXKU、下層をBOXKL、ボックス2に隣接する広島湾中央部海域の上層をBOXCU、下層をBOXCLとした（図1、2）。また、江田島湾は湾口部が狭く海水交換量も小さいと考えられるためここでは無視した。広島湾北部海域下層における酸素収支は、以下のように表される。

$$dO_{1L}/dt = \Delta P_1 + \Delta B_1 \quad (1)$$

$$dO_{2L}/dt = \Delta P_2 + \Delta B_2 \quad (2)$$

ここで、 O_{1L} 、 O_{2L} はそれぞれ BOX1L、BOX2L の溶

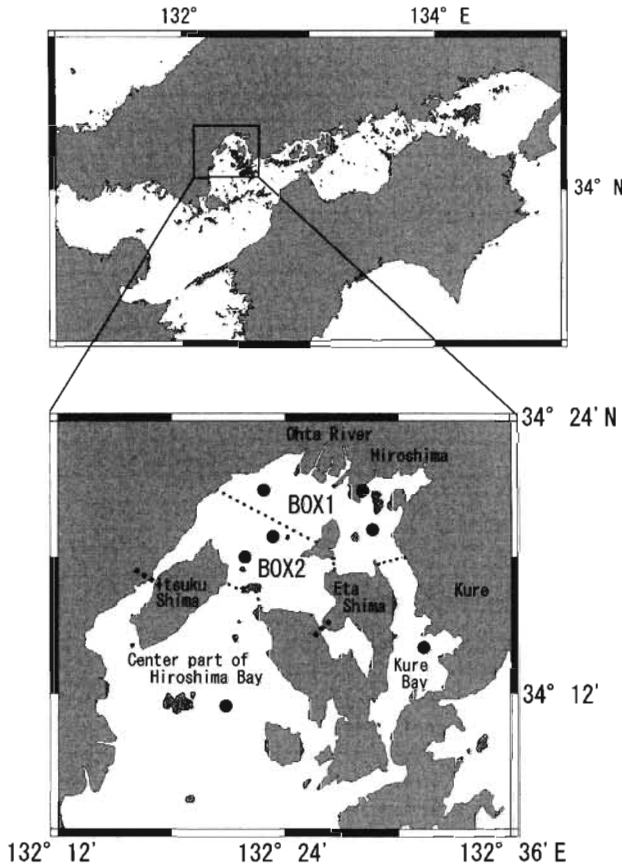


図1 広島湾北部海域の海岸図とボックスの設定
黒丸は浅海定線調査の観測点を示す

存酸素濃度 ($t\ O_2\ m^{-3}$) である。また、 ΔB_1 , ΔB_2 はそれぞれ BOX 1 L, BOX 2 L の生物・化学過程による酸素収支 ($t\ O_2\ d^{-1}$) であり、植物プランクトンの光合成による酸素供給や呼吸による消費、海水中や底泥での有機物分解に伴う酸素消費過程のバランスの結果を表している。さらに、 ΔP_1 , ΔP_2 はそれぞれ BOX 1 L, BOX 2 L の物理過程（移流と拡散）による酸素収支 ($t\ O_2\ d^{-1}$) であり、それぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta P_1 = & A_{12L} Kh_{12L} (O_{2L} - O_{1L}) / X_{12} \\ & + A_{1KL} Kh_{1KL} (O_{KL} - O_{1L}) / X_{1K} \\ & - A_{V1} K_{V1} (O_{1L} - O_{1U}) / Z_1 \\ & + U_{12L} A_{12L} O_{1L} - U_{V1} A_{V1} O_{1L} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = & A_{2CL} Kh_{2CL} (O_{CL} - O_{2L}) / X_{2C} \\ & - A_{12L} Kh_{12L} (O_{2L} - O_{1L}) / X_{12} \\ & - A_{V2} K_{V2} (O_{2L} - O_{2U}) / Z_2 \\ & + U_{2CL} A_{2CL} O_{CL} - U_{12L} A_{12L} O_{2L} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 A_{12L} , A_{1KL} , A_{V1} , A_{2CL} , A_{V2} はそれぞれ BOX 1 L-BOX 2 L 間, BOX 1 L-BOXKL 間, BOX 1 U-BOX 1 L 間, BOX 2 L-BOXCL 間, BOX 2 U-BOX 2 L 間の断面積 (m^2), Kh_{12L} , Kh_{1KL} , Kh_{2CL} はそれぞれ BOX 1 L-BOX

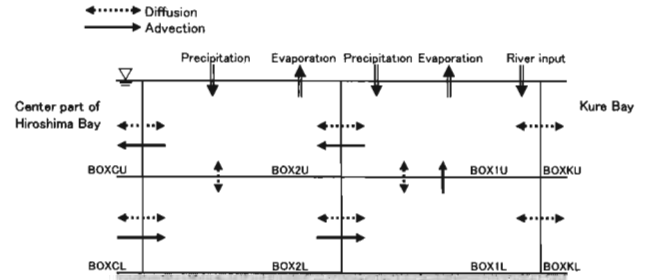


図2 広島湾北部海域におけるボックスの概念図

2 L 間, BOX 1 L-BOXKL 間, BOX 2 L-BOXCL 間の水平拡散係数 ($m^2\ d^{-1}$), K_{V1} , K_{V2} はそれぞれ BOX 1 U-BOX 1 L 間, BOX 2 U-BOX 2 L 間の鉛直拡散係数 ($m^2\ d^{-1}$) を示す。 X_{12} , X_{1K} , X_{2C} , Z_1 , Z_2 はそれぞれ BOX 1 L-BOX 2 L 間, BOX 1 L-BOXKL 間, BOX 2 L-BOXCL 間の水平距離 (m) および BOX 1 U-BOX 1 L 間, BOX 2 U-BOX 2 L 間の鉛直距離 (m) を示す。 U_{12L} , U_{V1} , U_{2CL} はそれぞれ BOX 2 L から BOX 1 L, BOX 1 L から BOX 1 U, BOXCL から BOX 2 L への平均移流流速 ($m\ d^{-1}$) を示し、ここでは山本ら⁵⁾ にない、ボックス 1 から呉湾海域への移流は考慮しなかった。 O_{1U} , O_{1L} , O_{2U} , O_{2L} , O_{KL} , O_{CL} はそれぞれ BOX 1 U, BOX 1 L, BOX 2 U, BOX 2 L, BOXKL, BOXCL の溶存酸素濃度 ($t\ O_2\ m^{-3}$) を示す。このうち、ボックス間の断面積や水平距離、鉛直距離など湾の形状に関するパラメータについては山本ら⁵⁾ の値を用いた。また、山本ら⁵⁾ に従い太田川の河川流量からエスチュアリー循環流量 (U_{12L} , U_{V1} , U_{2CL}) を、塩分収支より拡散係数を算出した。このとき、太田川河川流量は国土交通省太田川河川事務所提供データより、気温、風速、水蒸気圧および降雨量は気象観測電子閲覧室（気象庁：<http://www.data.kisyuu.go.jp/>）より得られたものを用いた。また、海域の水温、塩分、溶存酸素濃度は、広島県が1995～2004年に毎月1回月上旬に行った浅海定線調査のうち7つの定点（図1）で得られた値^{15), 16)} を用いた。拡散係数を求める計算はタイムステップを0.1日（144分）として1995年から2004年まで計算し、10年分の値を得た。 dO_{1L}/dt および dO_{2L}/dt は、浅海定線調査データによって得られた溶存酸素濃度の経月変化より当月と次月との差から求めた。さらに、これらを用いて式（1）および式（2）より1ヶ月毎の ΔB_1 および ΔB_2 を算出した。

結 果

広島湾北部海域の各ボックスおよび呉湾、広島湾中央部海域の上層及び下層（図1, 2）における1995年から

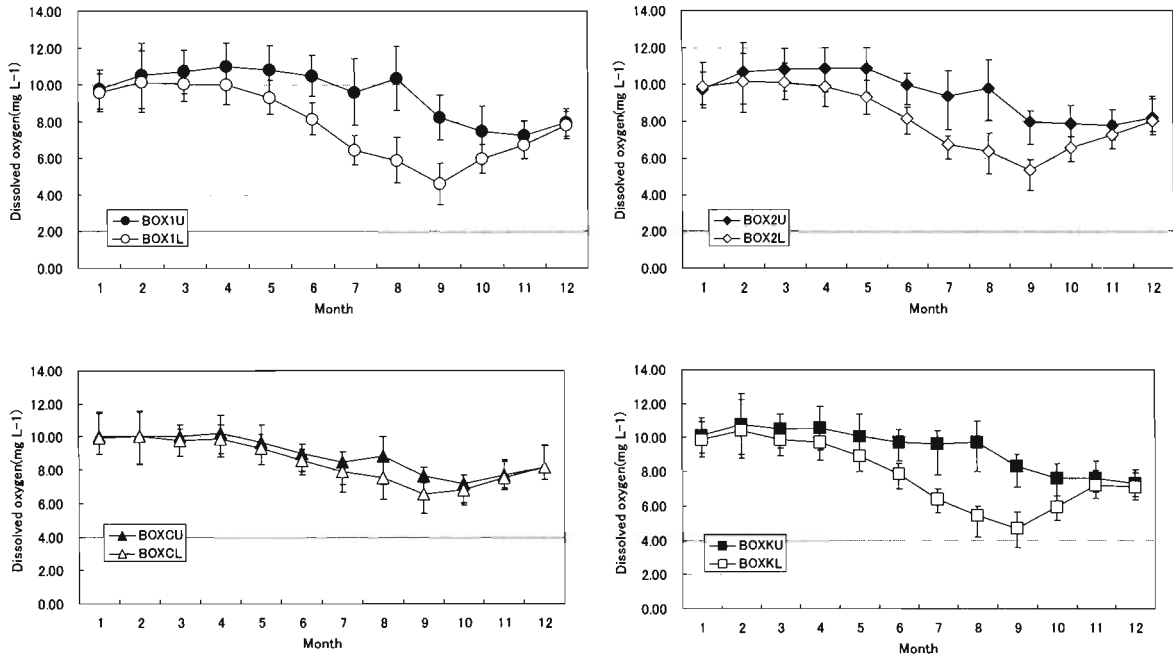


図3 各ボックスにおける上層および下層の溶存酸素濃度の月変化

2004年の平均的な溶存酸素濃度の経時変化を図3に示した。広島湾北部海域および呉湾，広島湾中央部海域において，上層における溶存酸素濃度は最も低下した月でも $8 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ 程度存在しており，常にはほぼ飽和状態であることが分かった。一方，下層では5月頃より濃度の低下しはじめ，9月に最低となり $4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ を下回ることもあった。その後，濃度は上昇し冬には上層とほぼ同程度になった（図3）。

1995年から2004年の10年間における水平拡散係数および鉛直拡散係数の平均値を図4に示した。ここで求めた拡散係数によって推定される塩分は，夏季における一部の上層塩分とBOX2における一部の下層塩分を除いてほぼ実測値を再現することができた（図5）。水平拡散係数は3月頃から低下し始め，5月，6月，7月に最も低い値を示し，その後上昇して9月以降 $600 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ 程度で推移した（図4）。鉛直拡散係数は1月に最も高く $0.002 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ 程度であるが，2月には $0.0005 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ 程度まで急激に低下した。その後さらに緩やかに低下して5月から8月にかけて低い値をとった。その後，9月に $0.0005 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ 程度まで急な上昇が見られ，10月以降12月まで $0.0005 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ を超えて推移した。

物理過程と生物・化学過程による溶存酸素濃度変化に対する影響を比較するため， ΔP と $\Delta P + \Delta B$ との関係を春（3～5月），夏（6～8月），秋（9～11月），冬（12～2月）別にそれぞれのボックスで比較した（図6）。BOX1において，冬と秋では，ほとんどの場合 ΔP も $\Delta P + \Delta B$ も正の値をとり，且つ，直線 $y = x$ よりも x

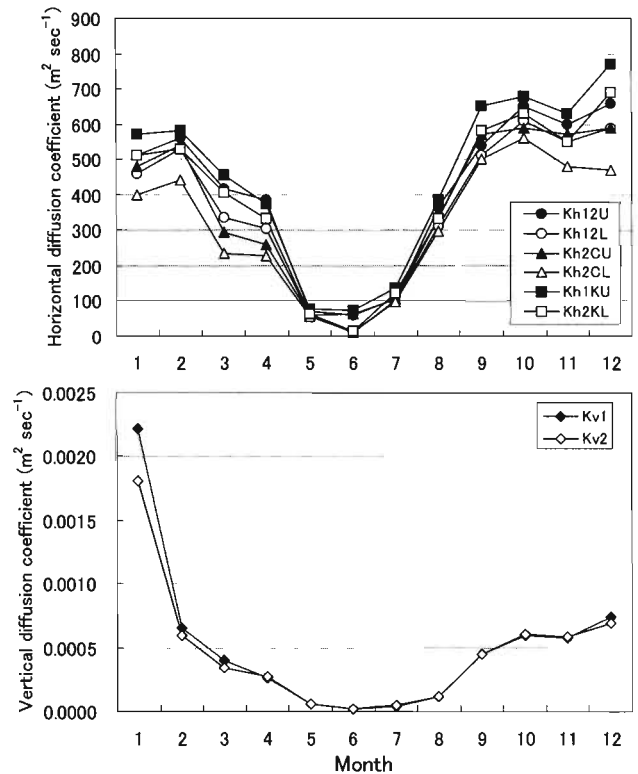


図4 塩分収支から見積もられた1995～2004年の平均的な水平拡散係数（上図）および鉛直拡散係数（下図）の月変化

座標側に位置していた。すなわち，生物・化学過程によって酸素は消費（ $\Delta B < 0$ ）されるが，物理的過程による酸素供給があるため（ $\Delta P > 0$ ），海水中の溶存酸素濃度が上昇する傾向にあった（ $\Delta P > |\Delta B| > 0$ ）。一方，春と夏では， ΔP が正の値， $\Delta P + \Delta B$ が負の値をとった。すなわち，物理的過程による酸素供給があるも

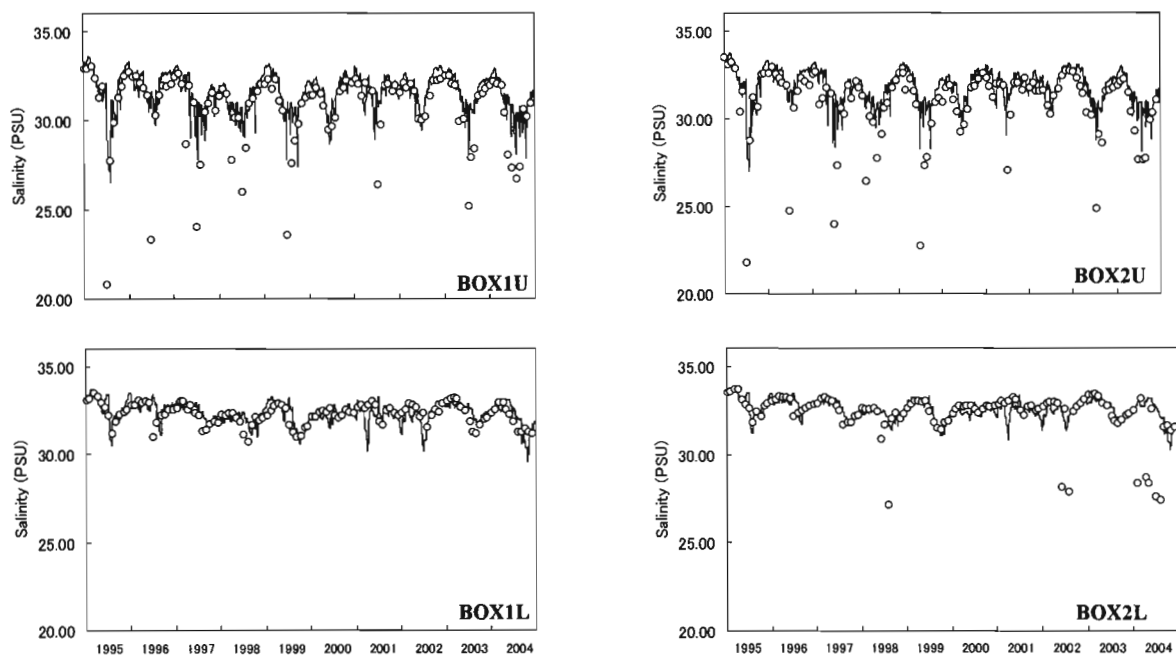


図5 1995～2004年における塩分の実測値（白丸）と計算値（実線）

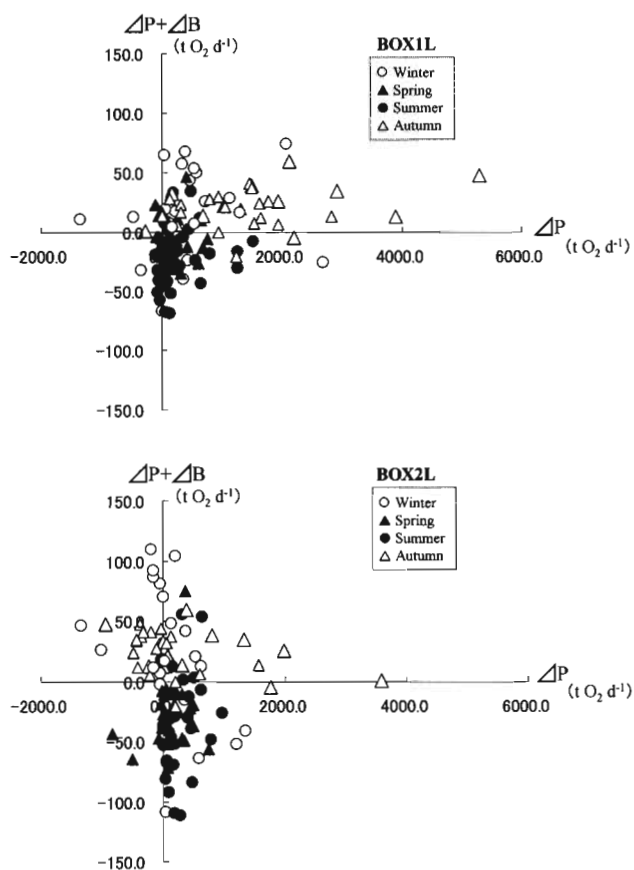


図6 物理過程による酸素フラックス (ΔP) と酸素濃度変化 ($\Delta P + \Delta B$) の関係

の ($\Delta P > 0$)、生物・化学過程による酸素消費 ($\Delta B < 0$) が物理的酸素供給を上回るため ($|\Delta B| > \Delta P > 0$)、海水中の酸素濃度が低下する傾向にあった。BOX 2 において、冬と秋では酸素濃度が物理的な酸素供給に

よって上昇する場合と、生物・化学的な酸素供給によって上昇する場合があった。春と夏については BOX 1 とほぼ同様の傾向であった。

BOX 1 および BOX 2 の下層における10年間の平均的な月毎の酸素収支を図7に示した。鉛直拡散による酸素フラックスは、年間を通じて常に上層から供給される傾向にあり、5月、6月、12月の両ボックスおよび、1月、7月の BOX 2 において他の月より一桁小さい値をとった。一方、9月に最も大きな値を示し、このときの水平拡散や移流による酸素フラックスと比較しても大きな値であった。水平拡散による酸素フラックスは2月から7月にかけて他の過程による酸素フラックスと比較しておよそ1桁小さく、一方、8月、9月に大きかった。移流による酸素フラックスは、年間を通じて他の過程による酸素フラックスと比較して1桁から3桁大きな値をとる主要なフラックスであり、特に3～7月において $1000 \text{ t O}_2 \text{ d}^{-1}$ 前後と大きな値をとった。しかしながら、各ボックスにおける流入フラックスと流出フラックスの差は小さく、移流がボックス内の酸素濃度に及ぼす影響は比較的小さかった。生物・化学過程による酸素フラックス（酸素収支）は1月、11月、12月の BOX 2 L 以外全て負の値をとり、特に BOX 1 L の8月から11月までの酸素消費が顕著に高かった。

考 察

本研究によって広島湾北部海域下層の酸素収支が定量的に見積もられた。当初、エスチュアリー循環によって

湾下層に酸素が供給され、酸素濃度の増加へ大きく寄与していることが期待された¹⁾。しかしながら、雨が多く、水平的な酸素濃度勾配も大きくなりだす6月や7月を除いて、エスチュアリー循環によるボックスへの酸素流入フラックスと流出フラックスの差（移流による酸素供給）が小さいため、酸素濃度の増加へあまり貢献していないことがわかった（図7）。6月や7月においても、拡散

による上層からの酸素供給とはほぼ同程度であり、また、これが生物・化学的な酸素消費と比較して一桁小さい値であることから、湾北部全体の貧酸素化を防止する過程としてはあまり重要でない。広島湾北部海域下層では9～10月にかけて酸素濃度が上昇するが、これは移流によるものではなく上層から拡散によって輸送される酸素による（図7）。いずれにせよ、河川流量の調節による貧

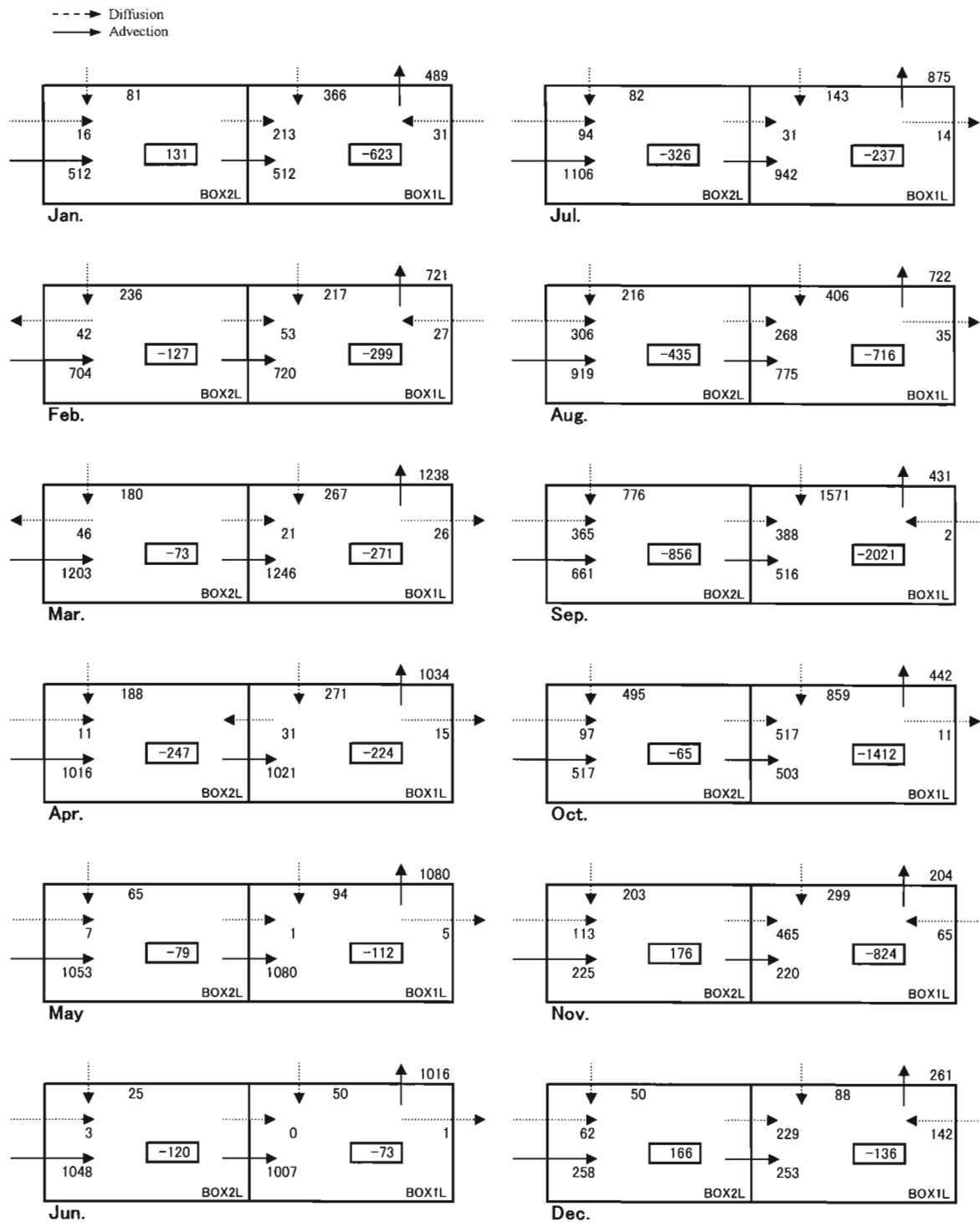


図7 広島湾北部下層における酸素収支図。実線矢印および点線矢印はそれぞれ移流と拡散による酸素フラックスを示し、ボックス内の四角で囲まれた値は生物・化学過程による酸素消費（または供給）を示す

酸素化の解消は困難であると判断される。

本研究において設定した生物・化学過程による酸素収支（ ΔB ）は、植物プランクトンの光合成による酸素供給や呼吸による酸素消費、水中の有機物の分解に伴う酸素消費、海底泥による酸素消費など様々なプロセスの結果である。いずれにしても、本研究において BOX 2 L の11～1月を除いて常に ΔB が負の値をとっており（図7）、有機物分解による酸素消費が光合成による酸素供給を上回っていることが示唆される。また、春、夏において生物・化学過程による酸素消費が物理的酸素供給を上回っていたことから（図6）、春と夏における溶存酸素濃度の減少は水中や海底泥による酸素消費によるということが分かった。すなわち、我々が貧酸素化の防止のためにできる現在最も現実的である対策は水中または海底泥による酸素消費を抑制することである。

これまで、定量的な見積もりはなされなかったものの、定性的には上記のことが既に分かっていた。そのため、貧酸素化の防止対策として既に様々な泥質改善対策が行われてきた。例えば、イトゴカイによる底泥中有機物の除去⁸⁾や、覆砂による有機物に富んだ底泥の隔離⁹⁾、カキ養殖場下に人工的な分解棚を吊り下げてカキの糞や偽糞を好気分解させる手法¹⁰⁾などはこれにあたる。そこで、本研究をもとに上記のような底質改善によってどの程度の貧酸素化の抑制が期待できるか？どの程度の規模で対策を行えばよいのか？について考察してみる。Seiki *et al.*¹¹⁾は、広島湾において底泥の酸素消費速度を季節ごとに測定しており、これに広島湾北部海域それぞれのボックス面積を乗じて広島湾北部海域における底泥の酸素消費速度を見積もると表1のようになる。一方、本研究から見積もられた各ボックス下層における生物・化学的酸素消費速度は表2のようにまとめられる。これらを比較すると各ボックスにおける生物・化学的酸素消費に対

して底泥による酸素消費はおよそ1割程度であり、むしろ底泥以外のものによる酸素消費が大きいことがわかる。すなわち、底質改善を行い底泥からの酸素消費を全く無くしても全体の生物・化学的酸素消費に対して1割しか貢献できないことを意味している。周防灘においても室内実験結果を用いた収支解析によって、底泥による酸素消費は、下層全体の酸素消費に対しておよそ25%しか寄与していないことが報告されており¹²⁾、このような現象が瀬戸内海において特別ではないことを示している。よって、今後、貧酸素化防止対策を講じるにあたっては単純に底泥による酸素消費抑制のみを対象とするのではなく、水中での酸素消費も包括的に考慮しなければならない。

これまで、水中の有機物による酸素消費の抑制対策は積極的な対策として特に講じられてこなかったものの、富栄養化対策による間接的な効果が期待されてきた。瀬戸内海は富栄養化した代表海域であり、これまで瀬戸内海環境保全特別措置法（1973～）等によって富栄養化が軽減されてきた¹³⁾。むしろ、近年では貧栄養化しているとの指摘もあり¹³⁾、一次生産すなわち水中での有機物生成は減少してきたと考えられる。ここで、議論しなければならないのは、底泥による酸素消費が割合としては小さく、また、陸域からの負荷が減少しているにもかかわらず、なぜ広島湾において貧酸素化がいっこうに軽減しないのかである。一つは、特別措置法以降成層期に限ると広島湾のクロロフィル量は減少しないどころかむしろ1998年までは上昇している傾向にある¹⁴⁾。この原因については分からないが、広島湾における有機物生成がむしろ増加していることによって、植物プランクトン由来の酸素消費が減少していないと考えられる。また、広島湾と同様に貧酸素化が顕著である周防灘西部における解析によれば、上層からの沈降物（一次生産由来の有機物と

表1 底泥による酸素消費速度（Seiki *et al.* 1994より計算）。

		Spring	Summer	Autumn	Winter
BOX 1	Sediment oxygen demand (tO_2 BOX 1 L day^{-1})	22	30	28	15
BOX 2	Sediment oxygen demand (tO_2 BOX 2 L day^{-1})	21	28	27	14

表2 ボックスモデルから見積もられた生物・化学過程による下層の酸素消費速度。

		Spring	Summer	Autumn	Winter
BOX 1	Biological and chemical oxygen demand (tO_2 BOX 1 day^{-1})	202	342	1419	353
BOX 2	Biological and chemical oxygen demand (tO_2 BOX 1 day^{-1})	133	294	248	-57

想定される)による酸素消費は下層水による酸素消費のおよそ3%であり、海水中での酸素消費は上層からの沈降物ではなく、海底から巻き上がった懸濁物によるものが多いことが示されている¹²⁾。すなわち、陸域からの負荷を削減し、仮に一次生産が低下したとしても海底泥の巻き上がりによって海水中に有機物が負荷されれば、海水中における酸素消費はほとんど変化しないであろう。以上から、今後、植物プランクトンの発生量や底泥の巻き上がりと貧酸素化について、年による違いを見ながら解析する必要がある。そして、広島湾における貧酸素化についてどちらの寄与が大きいかを明らかにすることによって、貧酸素化対策の方向性について確立していきたい。

謝 辞

本研究において国土交通省太田川河川事務所より太田川流量の資料を提供していただいた。ここに御礼申し上げます。

文 献

- 高辻英之 (2005) : 広島湾で発生する貧酸素水塊について. 広島水試研報, **23**, 23-25.
- 風呂田利夫 (1988) : 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物群集に与える影響について. 沿岸海洋研究ノート, **25**, 104-113.
- 今林博道 (1989) : 富栄養海域における底生群集と貧酸素水塊の相互作用. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 119-128.
- 石井光廣・加藤正人 (2005) : 東京湾の貧酸素水塊分布と底びき網漁船によるスズキ漁獲位置の関係. 千葉水研研報, **4**, 7-15.
- 山本民治・芳川 忍・橋本俊也・高杉由夫・松田 治 (2000) : 広島湾北部海域におけるエスチュアリー循環過程. 沿岸海洋研究, **37**, 111-118.
- 橋本俊哉・上田亜希子・山本民治 (2006) : 河口循環流が夏季の広島湾北部海域の生物生産に与える影響. 水産海洋研究, **70**, 23-30.
- 橋本俊哉・多田邦尚 (1997) : 広島湾における光学的特性. 海の研究, **6**, 151-155.
- 堤 裕昭・門谷 茂 (1993) : 漁場養殖場直下に堆積したヘドロ (有機汚泥) に対する生物浄化の試み. 日水誌, **59**, 1343-1347.
- Horie T. (1991) : Numerical modeling for the prediction of sedimentary improvement by sand capping over a contaminated seabed. J. Hyd. Res., **29**, 829-850.
- 川口 修・山本民治・松田 治・橋本俊也・高山晴義 (2004) : 人工中層海底を用いたカキ養殖場底質への有機物負荷軽減策の検討. 日水試, **70**, 722-727.
- Seiki T., H. Izawa, E. Date and H. Sunahara (1994) : Sediment oxygen demand in Hiroshima Bay. Wat. Res., **28**, 385-393.
- 神園真人・江藤拓也・佐藤博之 (1996) : 周防灘南西部の浅海域下層における酸素収支. 海の研究, **5**, 87-95.
- Yamamoto T. (2003) : The Seto Inland Sea-eutrophic or oligotrophic? Mar. Poll. Bull., **47**, 37-42.
- 平田 靖 (2000) : 広島湾のクロロフィル量変化. 第2回広島湾研究集会. 水産海洋研究, **64**, 293-297.
- 広島県水産試験場 (1996~2000) : 観測資料 (漁況海況予報等浅海定線観測資料). 広島県水産試験場事業報告 平成7年度~平成11年度.
- 広島県水産試験場 (2001~2005) : 観測資料 (漁場環境調査結果). 広島県水産試験場事業報告 平成12年度~平成16年度.