

低次生態系モデルを用いた大阪湾の堆積有機物量の推算と 栄養塩負荷対策の底質改善効果に関する研究

環境水域工学分野 坪井 研

Abstract

大阪湾のような閉鎖性海域では、依然として水環境の改善が十分に進んでいない。その原因の一つに、陸域から過剰な栄養塩が流入することにより、植物プランクトンが大量増殖し、その後有機物として堆積することが理由として挙げられる。そこで、本研究では、低次生態系モデルを用いて、年間における大阪湾の流動・水質および堆積有機物の分布特性・季節変動を推算した。また、栄養塩の流入負荷対策による底質環境改善効果の予測を実施した。その結果、堆積有機物は、大阪湾湾奥部および東岸沿岸域に堆積しやすいという結果が得られた。また、栄養塩負荷対策の効果については、大阪湾全体における年間堆積有機物量の削減量を比較すると、流入負荷を 50%削減したケースが最も効果が高く 2118tC と予測された。

1 研究背景

大阪湾のように背後に大都市を抱えた閉鎖性海域では、水質が改善された水域が一部に見られるものの、依然として水環境の改善が十分に進んでいない。

後背地に大都市が存在すると人口や産業の集中による有機物や栄養塩などの汚濁物質が過剰に流入する。これより、植物プランクトンが大量増殖し、赤潮が発生する。さらに、大量増殖した植物プランクトンは、枯死し有機物として沈降し、海底上に堆積する。堆積した有機物は微生物の作用で分解され、その際に酸素が消費され、貧酸素化が生じることによって、水利用、水生生物などの生育・生息に障害が生じており、生態系の劣化が進行しているという問題を抱えている。

このように、陸域からの過剰な栄養塩の流入による一連の富栄養化現象により、多くの有機物が堆積することは、水質や生態系に悪影響を与える現象であり、その有機物量を抑制することは、水質を保全していく上で重要である。

既往研究では、星加ら¹⁾は、大阪湾における懸濁態有機物 POC のうち、植物プランクトンが起因している内部生産有機物の割合が、夏季で 85%以上、冬季で 80%以上が内部生産起源であることを示した。このことより、植物プランクトン等の低次生物が堆積有機物に大きな影響を及ぼすことが分かる。

また、水質改善を予測するため数値シミュレーションという手法が使用される。中辻ら²⁾は、陸域からの負荷量の変化が水質に及ぼす影響について検討を行った。韓ら³⁾は、覆砂や浚渫の底質改良を行った場合に

水質、底質がどのように変化するかを定量的に検討し、それらの改善効果について評価している。

しかしながら、これらの検討では、海域内の栄養塩濃度や COD に関する言及にとどまり、大阪湾における堆積有機物の空間分布特性や季節特性等の湾スケールでの検討は、なされていない。また、今後の大阪湾の水質を保全していく上で、河川からの栄養塩負荷対策が堆積有機物にどの程度効果をもたらすかについてもほとんど知見がない。

そこで、本研究では、低次生態系モデルを用いて、年間における大阪湾の流動・水質および堆積有機物の分布特性・季節変動を推算し、さらに、栄養塩の流入負荷対策による底質環境改善効果を予測する事を目的とする。

2 数値モデルの概要

本研究で用いた数値モデルは、中電 CTI が開発したモデルツール群のうち、流動モデル COSMOS と低次生態系モデル EUTROP である。

2.1 流動モデル

本モデルは、3次元マルチレベル流動モデルで、浅水近似を仮定した運動方程式、連続の式、水温および塩分の拡散方程式、輸送方程式などの基礎方程式から構成されている。

2.2 低次生態系モデル

本モデルは、沿岸海洋の低次生態系を対象として、表-1に示す12の生態的構成要素(コンパートメント)を物質の拡散方程式に組み込むことで構成される。

表-1 低次生態系モデルの構成要素

NO	記号	項目名	単位
1	PHY	植物プランクトンの現存量	mgC/m ³
2	SQP	植物プランクトンP保持量	μmol/L
3	SQN	植物プランクトンN保持量	μmol/L
4	ZOO	動物プランクトンの現存量	mgC/m ³
5	POC	POCの現存量	μmol/L
6	DOC	DOCの現存量	μmol/L
7	PO ₄	リン酸態リン濃度	μmol/L
8	NH ₄	アンモニア態窒素濃度	μmol/L
9	NO ₂	亜硝酸態窒素濃度	μmol/L
10	NO ₃	硝酸態窒素濃度	μmol/L
11	DO	溶存酸素濃度	mg/L
12	SS	SS濃度	mg/L

2.3 計算条件

2.3.1 流動モデル

計算領域

計算領域は図-1に示すように大阪湾を中心とした60km四方を対象とする。水平方向の計算格子は、1kmメッシュとし、鉛直方向の計算格子は、全20層の不当間隔格子を用い、第1~10層の層厚は2.0m、第11~14層は5.0m、第15~19層は10m、第20層は31mと設定した。海底地形は、海上保安庁の深浅測量データ(日本水路協会)をもとに作成した。計算のタイムステップは、5秒に設定した。

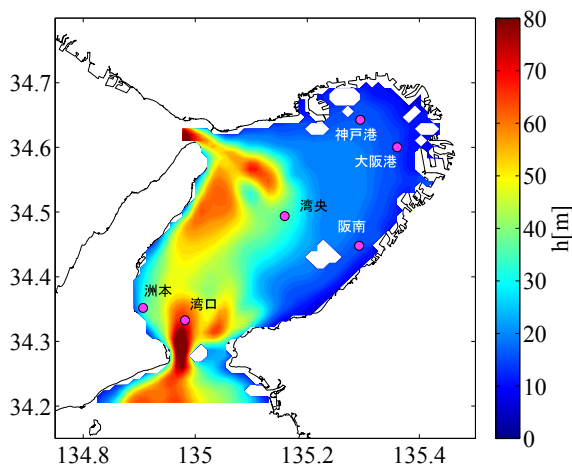


図-1 計算領域と水深

計算期間

計算期間は、年間における大阪湾の季節特性を把握するため、2010年1月1日から12月31日の1年間とし、助走期間として2009年11月1日から2009年12月31日までの2ヶ月間を与えた。

初期条件

水温・塩分の初期条件として、2009年11月に実施された浅海定線調査を利用して、各観測地点のデータを空間的に補間して与えた。

河川流入条件

大阪湾に流入する主要河川である淀川と大和川の2河川からの河川水の流入を考慮し、流量、水温、塩分(=0[psu])について条件を与えた。各河川の流量は、国土交通省近畿地方整備局の淀川河川事務所、大和川河川事務所が実施した水位・流量観測データを使用した。淀川の流量は枚方観測所、大和川の流量は柏原観測所における2010年の暫定流量データの速報値を利用した。水温に関しては、国土交通省の水文水質データベースより入手した。淀川の水温は枚方観測所、大和川の水温は遠里小野橋のデータを使用した。

開境界条件

南側境界の紀淡海峡では、潮位については気象庁和歌山観測所の潮位を使用し、水温・塩分に関しては、大阪府水産試験場による大阪府水産試験場事業報告を参考にした。西側境界の明石海峡では、潮位については海上保安庁による潮汐推算の値を用いた。水温と塩分については、兵庫県立農林水産技術総合センターの明石市二見観測局の値を使用した。

気象条件

気象条件における気温、降水量、相対湿度に関しては気象庁神戸観測所のデータを使用し、風向・風速については、各月の平均値を用い、雲量に関しては一定値を与えた。直達日射量については気象庁大阪観測所のデータを用いた。

2.3.2 低次生態系モデル

計算領域、計算期間、初期条件については流動モデルCOSMOSと同じとした。

河川流入条件

栄養塩濃度(NH₄, NO₃, NO₂, PO₄, DO濃度, SS濃度, 懸濁態有機物(POC), 溶存態有機物(DOC))について条件を与えた。各河川の栄養塩濃度(NH₄, NO₃, NO₂, PO₄), DO濃度, SS濃度は、国土交通省の水文水質データベースを使用し、淀川の水質については枚方観測所、大和川の水質は柏原観測所における観測データを利用した。

開境界条件

境界条件は、流動計算と同様に明石海峡と紀淡海峡で与えた。PHY, PO₄, NH₄, NO₃, NO₂, DO, SSについ

では、明石海峡では浅海定線調査、紀淡海峡では瀬戸内海総合水質調査のデータを使用した。

3 数値モデルの再現性検証

3.1 流動モデルの再現性検証

3.1.1 表層残差流

図-??に夏季における一潮汐間の6m層潮汐残差流の水平分布を示す。大阪湾で見られる代表的な残差流は、湾西部に発達する反時計周りの沖ノ瀬環流と湾東部を紀淡海況の方まで南下する東岸恒流帯である。本計算結果からもこの二つの残差流が確認できた。

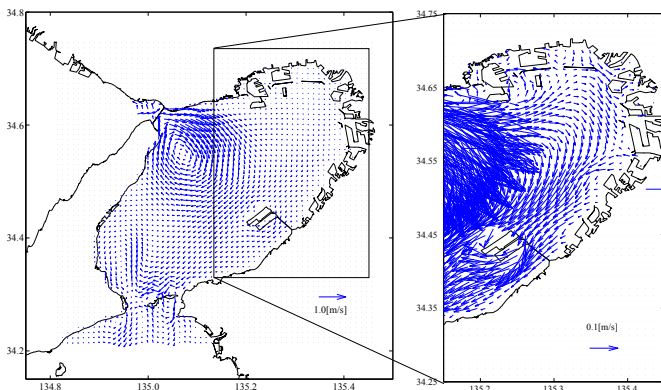


図-2 夏季における一潮汐間残差流(左：沖ノ瀬残差流，右：東岸恒流帯)

3.1.2 夏季の表層水温に関する水平分布

水平分布については、2010年2月、5月、8月、11月に実施された浅海定線調査のデータを使用する。今回は紙面の都合上、夏季の表層水温に関する水平分布について言及する。図-3に夏季の表層水温の水平分布を示す。なお、計算結果は浅海定線調査が実施された日の日平均値である。観測結果、計算結果共に湾口から湾奥にしたがって水温が上昇する傾向が見られた。なお、他の季節(2, 5, 11月)でも、観測結果と計算結果の傾向は良好に一致した。

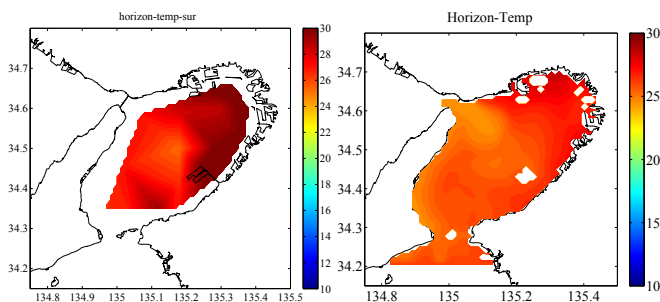


図-3 夏季における表層水温の空間分布(左：観測結果，右：計算結果)

3.1.3 水温に関する鉛直プロファイルの時系列変化

水温に関する鉛直プロファイルの時系列変化の再現性を確認するために、大阪湾水質定点自動観測データ配信システムの観測データと比較を行った。観測地点は、神戸港波浪観測塔、阪南沖窪地、洲本沖浮標の3地点を比較対象として選定した。なお、紙面の都合上阪南沖窪地の結果は省略する。図-4に神戸波浪観測塔における年間の水温鉛直プロファイル時系列変化を示す。観測結果では6月過ぎから成層が形成され始め、10月ごろから再び混合され成層が破壊されている。一方、計算結果をみると観測結果と同じ時期に成層期、混合期が形成されている。なお、阪南沖窪地の結果においても同様の傾向を示していた。図-5に洲本沖浮標における年間の表層水温の時系列変化を示す。水温に関しては年間を通して、良好に一致した。

以上より、本数値モデルにおける流動特性や水温の水平分布・鉛直プロファイルの時系列変化が、観測結果と良好に一致することを確認した。

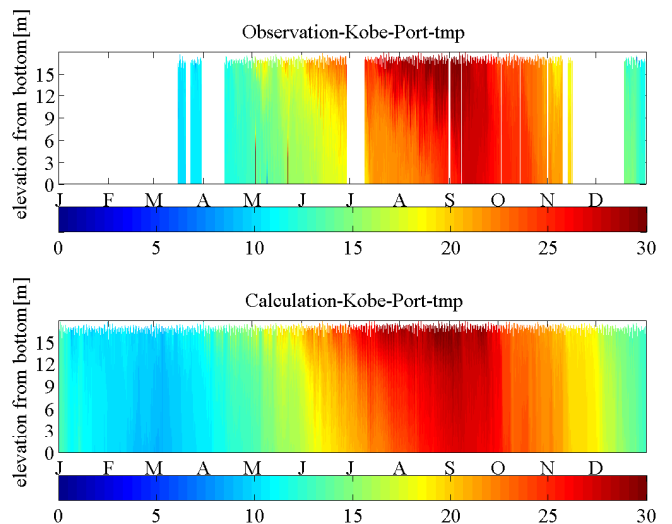


図-4 神戸波浪観測塔における水温鉛直プロファイルの時系列変化(上：観測結果，下：計算結果)

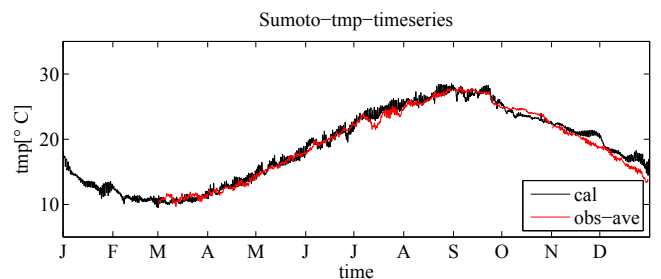


図-5 洲本沖浮標における表層水温の時系列変化(黒：計算結果，赤：観測結果)

3.2 低次生態系モデルの再現性検証

本モデルの再現性を検証するため、植物プランクトン(以下PHY)現存量の時系列変化とその水平分布を確認した。

3.2.1 表層植物PHY現存量の時系列変化

表層PHY現存量の時系列変化の検証については、大阪湾水質定点自動観測データ配信システムを使用した。比較対象地点は、神戸波浪観測塔、大阪港波浪観測塔、阪南沖窪地、関空MT局の4地点を選定した。なお、観測結果については、一カ月の月平均値を用いている。ただし、全ての観測結果において1,2月の結果が欠測し、阪南沖窪地は8,9月も欠測している。

図-6に観測結果と計算結果と示す。両結果共に、夏季にPHYが増加し、冬に減少する傾向を示している。ただし、計算結果では、夏季の阪南沖窪地において過大評価、冬季の大阪港において過小評価となった。これは、栄養塩の過大評価や種・サイズによる植物プランクトンの分画を行っていない事が原因と考えられる。

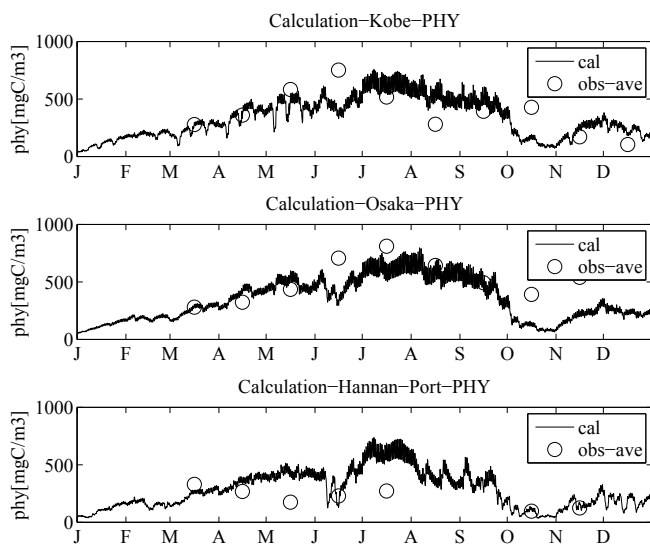


図-6 表層植物プランクトン現存量の時系列変化

3.2.2 夏季の表層PHY現存量に関する水平分布

水平分布については、2010年2月、5月、8月、11月に実施された浅海定線調査のデータを使用する。今回は紙面の都合上、夏季の表層PHYについて言及する。図-7に表層PHYの観測結果を示す。観測結果では、神戸沖から海岸線に沿って阪南沖まで高い傾向にある。一方、計算結果では、表層PHYが観測結果よりも沖側に広がって高く、過大評価された結果となった。以上より、観測結果と計算結果の水平分布の傾向が概ね一

致した。今回は夏季の表層PHYのみとしたが、他の季節や項目でも概ね一致する計算結果となっている。これより、本モデルは、水質および低次生物の特性を検討するために、有効であると考えられる。

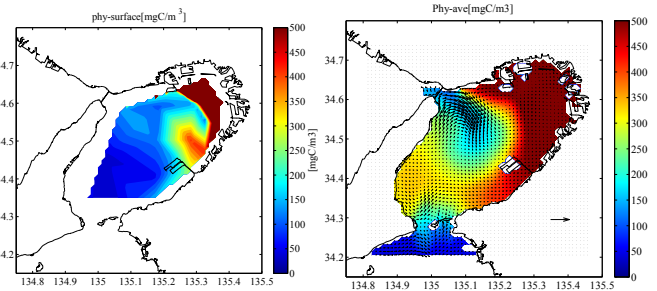


図-7 植物プランクトンの空間分布(左:観測結果, 右:計算結果)

4 大阪港における堆積有機物の推算

第3章で妥当性を確認した低次生態系モデルを用いて、大阪湾における年間の堆積有機物量の推算を行う。

4.1 計算条件

本章における計算条件は、2.3に準ずる。

本章で扱う堆積有機物量の定義は、本モデルで定義した植物プランクトン(PHY)と懸濁態有機物(POC)が海底に堆積する量とする。

4.2 計算結果

4.2.1 計算領域内の累積堆積物量

一年間における計算領域内に蓄積した堆積有機物量は、38109[tC]と推算された。星加ら⁴⁾は、実測より、大阪湾の堆積速度と堆積物中の陸起源および内部生産有機物濃度から年間堆積有機物量を算出し、その結果63000[tC]とした。本モデルと約25000[tC]差があるが、これは本モデルでは低次生態系しか考慮しておらず、高次の生物による堆積物量を考慮していない点や、与えている陸起源の有機物量が星加ら⁴⁾の研究の1/10であったことが考えられる。本モデルによる計算結果はこうした理由と、オーダーレベルでは傾向を捉えているという点で、計算結果は妥当であると考えられる。

4.2.2 堆積有機物量の空間特性

図-8(b)に、一年間に累積した堆積有機物の空間分布の計算結果を示す。これより、大阪湾奥部、神戸沖および東岸沿岸部において有機物が堆積しやすい傾向

にあることが分かる。門谷ら⁵⁾による、大阪湾全域における表層堆積物中の有機炭素量の空間分布(図-8の(a))と比較すると、湾口に従って高くなる傾向が良好に一致した。しかし、計算結果の分布では、観測結果と比較すると、沖合の方に広がらず、海岸線に沿った分布を示している。これは、観測結果と違い、高次の生物や有機物の再懸濁を考慮していない点が考えられる。なお、本計算では、年間における堆積物フラックス量を対象としているが、門谷ら⁵⁾の知見では、表層堆積物中の有機態炭素を対象としている点で異なることに注意されたい。堆積物量と空間特性に関する計算結果と既往知見の比較より、堆積物量はオーダーレベルで一致し、空間分布も定性的に傾向を捉え、十分ではないが、妥当性のある結果と考えられる。

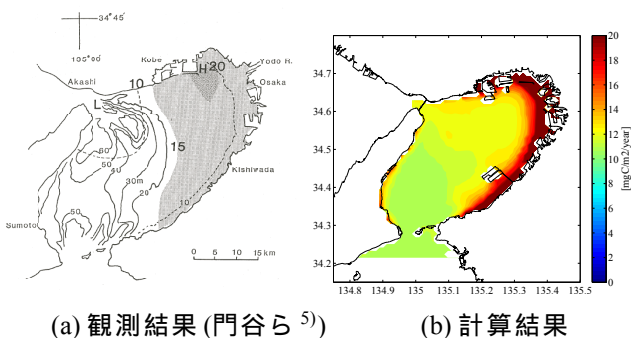


図-8 年間の累積堆積物量の空間分布

5 大阪湾への栄養塩負荷対策の底質改善効果の予測

本章では、淀川・大和川からの栄養塩流入負荷対策による底質環境改善のシミュレーションを行う。

5.1 栄養塩負荷対策について

栄養塩負荷対策としては、大きく分けて「流入負荷の削減」「流入負荷の空間的分散化」「流入負荷の時間的分散化」の3種類を実施する。

流入負荷の削減については、植物プランクトンが増殖すると、堆積有機物量は増加するので、流入させる栄養塩の負荷を削減し、植物プランクトンの増殖を抑制するという想定の下、実施した。

空間的分散化については、第4章の堆積有機物量の空間分布より、湾奥部および東岸沿岸域において局所的に堆積しやすいことが分かった。また、第3章の計算結果より、湾奥部において植物プランクトンの増殖に必要な不可欠な水温、栄養塩が高い傾向にある。陸域からの栄養塩流入を、湾奥と比較して貧栄養で水温が低い湾口付近に空間的分散化を図ることで、大阪湾へ

の総流入量を変化させずに、どのような効果があるかを狙いとする。実際の事例として、ボストン湾における沖合への下水処理水の放流等がある⁶⁾。

図-9に淀川・大和川からの栄養塩負荷量の時系列変化を示す。これより、現況の河川からの栄養塩負荷は、植物プランクトンが増殖しやすい夏季に多く流入していることがわかる。そこで、夏季の栄養塩負荷量の一部を、水温が低くなり植物プランクトンの活性が抑えられる冬季に時期をずらして流入し、堆積有機物量を削減させるという想定のもと実施する。実際に実施するにあたっては、干潟造成による栄養塩のストックや夏季に栄養塩を吸収したアオサ等を回収し、冬に再度放出する方法等が考えられる。

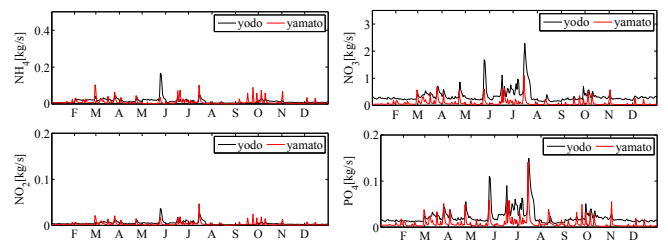


図-9 淀川、大和川からの栄養塩負荷量の時系列変化

5.2 計算条件

本章の計算条件は、河川からの栄養塩負荷条件以外は、第3章で行った計算と同様に与える。表-2に、各ケースにおける栄養塩負荷条件を示す。なお、Case0は、各ケースからCase0の結果を差し引き、陸域負荷による堆積有機物量を算定するために計算した。

表-2 各ケースの計算条件 [(1) 観測値 (2) 平均値]

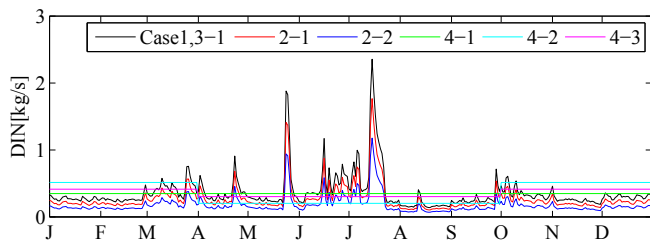
Case	淀川負荷量	大和川負荷量	分散方法	総量
0	0 %	0 %	-	0 %
1	100 % (1)	100 % (1)	-	100 %
2-1	75 %	75 %	-	75 %
2-2	50 %	50 %	-	50 %
3-1	50 %	50 %	洲本	100 %
4-1	100 % (2)	100 % (2)	-	100 %
4-2	75 % (2)	75 % (2)	夏 冬	100 %
4-3	50 % (2)	50 % (2)	夏 冬	100 %

5.3 計算結果

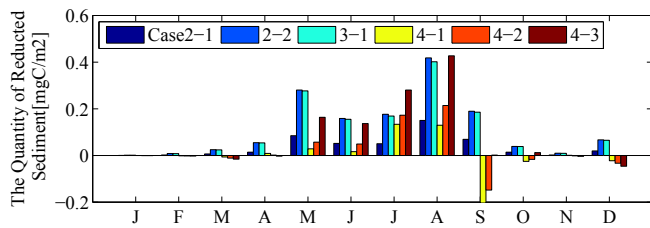
図-10に、各ケースの流入負荷量および月別地点別の堆積有機物の削減量を示す。選定した地点は、図-1に示す。紙面の都合上、大阪港、湾央、湾口について

示す。地点別にみると、大阪港で最も削減量が多かった。また、淀川、大和川から距離が離れるほど、それぞれの対策の効果が小さくなるのが分かった。季節特性としては、どの地点、どのケースでも夏季に対策の影響が大きく、冬季に小さくなる傾向にあった。図-11に、大阪湾全体における年間堆積有機物量の削減量を示す。削減量が最も多かったのは、流入負荷を50%削減したCase2-2で約2118[tC]であった。

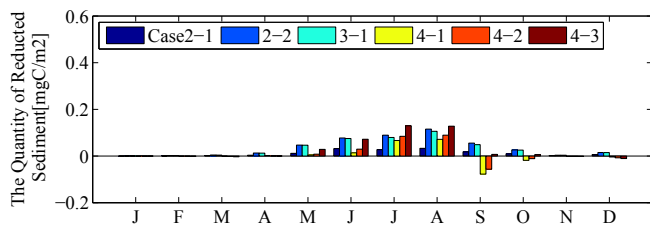
また、流入負荷量は現況と変わらないが、空間的分散化を実施したCase3-1が約2022[tC]、時間的分散の場合は、夏季の50%分を冬季に負荷したCase4-3が最も効果が高く、約1522[tC]削減された。図-12に、各ケースにおける地点別年間堆積有機物の削減量を示す。全てのケースにおいて最も効果が高かったのは、大阪港と阪南港であった。効果が小さかった湾口と比較すると差が大きいケースで、約8倍の効果の違いがあった。



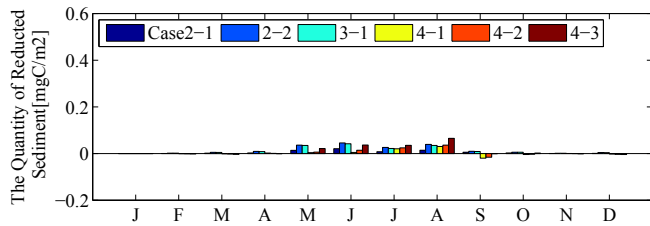
(a) 各ケースの栄養塩流入負荷量の時系列変化



(b) 大阪港



(c) 湾央



(d) 湾口

図-10 栄養塩流入負荷量と月別堆積有機物の削減量

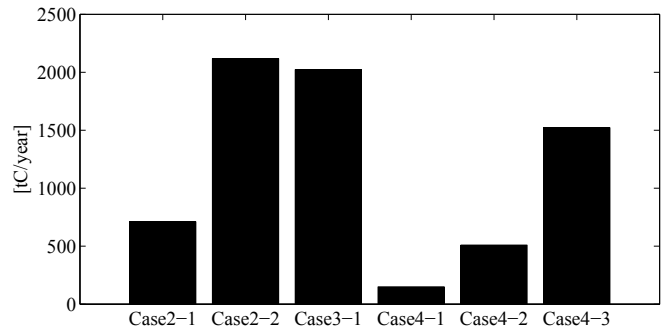


図-11 各ケースにおける堆積有機物量の削減量

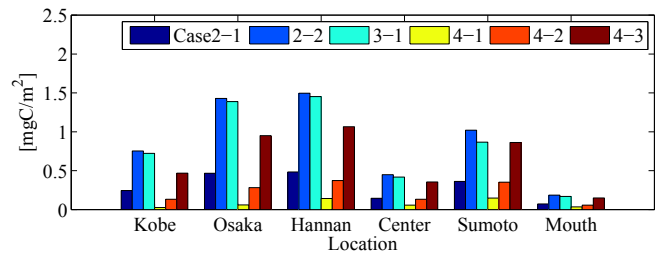


図-12 各ケースの地点別堆積有機物量の削減量

6 結論

- 堆積有機物は、湾奥部および東岸沿岸域に堆積しやすいと予測された。
- 湾全体における年間堆積有機物量の削減量を比較すると、流入負荷を50%削減したケースが最も効果が高く2118[tC]と予測された。また、空間的分散化を実施したケースでは2022[tC]、時間的分散化(50%)のケースは、1522[tC]削減された。現況と流入負荷量が変わらない空間的・時間的分散化で効果がみられた。
- 栄養塩対策効果の空間特性は、対策を実施した湾奥部から遠ざかるほど、効果が小さく、季節特性としては、夏季に対策の効果が大きく、冬季に小さいという結果が得られた。

参考文献

- [1] 星加章・谷本照己・三島康史(1998):大阪湾における富栄養化と内部生産有機物水環境学会誌, 1998, 21(11), 765-771
- [2] 中辻啓二・韓銅珍・山根伸之(2003):大阪湾における汚濁負荷量の総量規制施策が水質保全に与えた科学的評価, 土木学会論文集, 741(7), 69-87
- [3] 韓銅珍・山本行高・中辻啓二(2001):大阪湾の底泥の覆砂・浚渫による水質・底質改善効果の検討 海岸工学論文集, 48(2), 1281-1285
- [4] 星加章(2005):瀬戸内海の環境保全 海洋化学研究, 18(2), pp. 53-57
- [5] montani S・Mishima Y・Okaichi T Scavenging processes of marine particles in Osaka bay marine pollutin bulletin emecs, 1990
- [6] 佐々木敦(2010):海外における閉鎖性海域の環境改善の取り組み~ボストン湾を例として~, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 7-12.

討議等

討議 [遠藤徹助教]

栄養塩流入負荷の時間的分散化により、植物プランクトンが減少したという結果を得たが、利用されなかった栄養塩は、翌年に持ち越され、その年の春から夏に植物プランクトンが増加するのではないか。

回答：今回は一年間の計算を対象としたために、冬季に分散化した栄養塩が、翌年の植物プランクトン現存量に及ぼす影響について検討は行っていない。しかし、ご指摘の通り、その可能性は十分に考えられる。

なぜなら、分散化して栄養塩負荷量が増えた分、現況の栄養塩濃度よりも高くなるため、植物プランクトンが増加する可能性はあり、ひいては、堆積有機物量の増加は考えられる。

討議 [遠藤徹助教]

栄養塩負荷対策を3パターン実施したが、どの対策が最も効果的なのか。

回答：現実的な実施となると、技術面、費用面、環境影響評価等様々な点から言及しなければならない。しかし、今回は、栄養塩負荷対策による堆積有機物量の削減量の検討しか行っていないので、その観点からの判断であることを最初にお断りする。

「流入負荷の削減」「空間的分散化」「時間的分散化」のうち、最も堆積有機物の削減量が多かったケースは、「流入負荷の削減」であり、この対策がもっとも効果があると考えられる。しかし、現実的なことを考えると、これまでも総量規制が行われており、さらに大阪府の下水整備も2010年時点で94.3%まで進んでいるので、これ以上の削減は困難であると考えられる。

一方「空間的分散化」「時間的分散化」の場合を考えると、栄養塩の総流入負荷量が現況と変わらないが、対策を実施することにより削減効果はみられる。「空間的分散化」については、ボストン湾等で下水処理水の沖合放流が実施されており、過去の事例がある。また「時間的分散化」についても、干潟の造成や、夏季にアオサなどの海藻を利用し、栄養塩を吸収した後、冬季に放流する等が考えられる。

以上、計算の結果より最も効果の高かったのは「流入負荷の削減」であるが、今後は、技術面や費用面等を考えて総合的に判断する必要があると考える。

討議 [貫上佳則教授]

懸濁態有機物のうち、植物プランクトン由来の有機物

の割合が、80%以上という知見があるが、これは、植物プランクトンの枯死等も含まれているのか。

回答：含まれる。補足として、懸濁態有機物とは、一般的に植物プランクトンや動物プランクトン等の生物群とそれらが枯死した後の非生物群の両方を含んでいる。本モデルでは、便宜上、低次生態系の構成要素を、生物群と非生物群に分画している。

討議 [貫上佳則教授]

堆積有機物に大きな影響を及ぼす植物プランクトン現存量が定量的には再現出来ていないが、これは堆積有機物量にどのような影響を及ぼすのか。

回答：本モデルでは、定性的な再現性しか得られたが、ご指摘の通り、定量的な再現性は得られていない。本モデルではパラメーターの値など不確実性を含むため、精度に限界はあるが、オーダーレベルの検討や傾向を捉えることはできる。

また、観測結果と計算結果の差が、堆積物量に及ぼす影響については、検討を行っていない。これは、低次生態系モデルでは、各構成要素が複雑に相互作用しているために、植物プランクトンの増加がそのまま堆積有機物量の増加につながるとは限らない。

討議 [矢持進教授]

湾口部における「空間的分散化」については、一定の効果が得られたとあるが、都市内湾奥で分散化を実施した場合の効果はどうか。

回答：本研究では、湾口における「空間的分散化」のみの検討しか行っていないので、正確にお答えすることはできない。しかし、ご指摘の湾奥部における空間的分散化を行ったは、今回検討した湾口部で行った場合よりも効果が小さくなることが予想される。なぜなら、湾奥部と湾口部の環境特性の違いとして、湾奥部では、夏季に水温が高く、栄養塩濃度も高いため、植物プランクトンが増殖しやすい環境である。また、成層も形成されやすく、流動も停滞しやすいという特徴が挙げられる。一方、湾口部では、湾奥部と比較すると、夏季の水温は低く、栄養塩濃度も低い。また、成層も形成されにくく、紀淡海峡からの海水の交換も顕著であることから、植物プランクトンが増加しにくい環境であることが推察される。

このため、湾奥部で空間的分散化を行った場合は、湾口部で行った場合よりも効果が小さくなることが予想される。