

ファジィセット理論を用いた 仮想流況制御プロジェクトの環境影響評価

FEASIBILITY STUDY ON ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT FOR HYPOTHETICAL FLOW CONTROL PROJECTS USING FAZZY SET THEORY

沈 一揚¹ ・ 中辻 啓二²
Yiyang SHEN and Keiji NAKATSUJI

¹博(工) 地球フロンティア研究システム (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

²正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

The concept of 'environmental standard' has been applied to coastal environmental impact assessment, EIA. The standard values have been determined for each water quality and for each divided coastal area. The achievement of improving water qualities depends on whether the values estimated by EIA are larger than the standard values or not. The uncertainty and complexity of the natural system, however, make it difficult for traditional approaches to come up with simple answers. To facilitate this integrative approach the basic concept of fuzzy set theory is introduced. In addition, the integrated evaluation function is also introduced. In the present study, the hypothetical Akashi Strait breakwater project is evaluated to test the usefulness of EIA used as a case study to examine the usefulness of this methodology: various models and data set are assembled and analyzed. Water qualities of COD, total nitrogen and total phosphorus are used to make EIA in Osaka Bay.

Key Words : *Environmental impact assessment, fuzzy set theory, flow and residual current system, water qualities, 3D baroclinic flow simulation, Osaka Bay*

1. はじめに

環境行政において1997年6月の環境影響評価法(以後、「新アセス」という)の法制化の意義は大きい。それまでは、1984年に閣議決定された「環境影響評価の実施について」(「閣議アセス」という)により、その運用で一定の効果を上げてきた反面、一定の限界もあったことは否定できない。新アセスと閣議アセスの大きな違いは、法制化自体の意義はあがるまでもないが、環境影響評価を実施するか否かを事業の規模・内容や地域の状況を踏まえて個別に判断するスクリーニング(事業の絞り込み)の導入、環境影響評価を行う方法について調査方法書を作成して、公告・縦覧・意見聴取後、事業や地域の特性に応じた環境影響評価の調査項目や方法を決定するスコーピング(評価対象の絞り込み)の導入である。そして予測の不確実性と環境影響の重大性によっては事後調査の実施(フォローアップ)が義務付けられた。

このように仕組み作りはできたものの、環境へのインパクトの影響評価をどのように行うかが課題として残っ

ている。閣議アセスでは事業者が項目ごとに設定する環境保全目標を達成できるかによる「絶対評価型」であった。しかし、新アセスでは環境影響を回避・低減できるかに対する事業者の見解を明らかにする「相対評価型」に代わった。そのなかで強調されている環境影響の回避・低減はまさしく米国のミチゲーションの発想である。環境基本法に示された生物多様性の保存やミチゲーションの導入は、生物や生態系への影響評価に力点が移動し始めていることを示唆しているものの、現行の生態系モデルの実用化にはまだまだ不明な点、未解明な点が多い。早急に信頼性の高い、高次の生態系モデルを開発する必要がある。

本文では、閣議アセスで専ら用いられてきた環境基準の概念を踏襲するが、水域を類型別に分けて異なる基準値を設定することはしない。また、個々の環境基準を単独ではなく総合的に評価する。自然現象は常にあいまいさと不確かさを併せもっていることから、環境評価にファジィセット理論の導入を試みた。アセスメントの一例として、明石海峡の地形改変による大阪湾の流況制御を採用した。(上嶋¹⁾; 石塚・中辻²⁾ 参照)

2. 環境影響評価法へのファジイ性の導入

(1) 環境基準値を用いた評価

閣議アセス法では、行政が予め設定した環境基準（環境保全目標）に照らして事業者の見解を明らかにすることが評価の基本になっていた。すなわち、アセスメントで予測した値が行政目標をクリアしているかどうかの評価対象であった。具体的に述べると、CODとDOに関しては海域をA、B、Cの3類型に、T-N（総窒素）とT-P（総リン）に関してはIからIVの4類型に分けて、水質項目毎にそれぞれの類型海域で異なる環境基準値を設定して、その達成率で環境への評価を数量化している。

例えば、CODについては、環境基準値は2mg/L以下（A類型）、3mg/L以下（B類型）、8mg/L以下（C類型）と、湾奥に向かって基準値が低くなるように設定されている。閉鎖性海域の特徴や人間の利用目的を考慮して努力目標値を低くしたとの解釈もできるが、わずか20km離れた海域で環境基準値が4倍も変わるのとは理解できない。

(2) ファジイとは

自然環境は近代科学では解明しきれない、多くのファジイ性（あいまいさ）と不確かさを併せもっており、しかも要素間の相互関係も複雑である。観測や数値計算で得られる情報も誤差を含み厳密さに欠く。また、評価価値の高い情報の中には定性的記述にとどまるデータも多々ある。例えば、毒性物質のように致死量が明瞭な数値で与えられる物質が環境や人間への影響を評価することは易しい。しかし、複合汚染にみられるように、種々の要因は単独では環境に与える影響は少ないが、ある種のものと合成すれば、異常な現象を惹起するような場合の取り扱いが難しい。

環境基準の概念では、ある海域に15の観測点があり、その中で環境基準値を満たす測定点が9点であれば、達成率は60%と判断する。しかし、海域での栄養塩分布は生物・化学的要因のみならず、種々の物理因子の影響

も受けて、それらの変動幅も大きい。流況によっては、昨日達成率が70%であったのが、本日は50%あるいは80%になる可能性も高い。かりに類型B海域の環境基準値を適用すれば、達成率は0%となるかもしれない。一見合理的に見えるが、実態とは合っていない。また、CODでは目標値に達しているが、総リンT-Pは目標値を満たしていない場合の評価をどのように考えるべきか。全ての物質の値が基準値の95%であっても、「水質は悪い」と判定されることになる。

(3) ファジイセット理論（Zimmerman³⁾）

ここでは、海域の類型区分の考え方をやめ、環境基準値も大阪湾で一定値に定める。自然現象が多くのファジイ（あいまいさ）と不確かさを含んでいる限り、その確定的方法では問題が多いことから、各水質ではなく、統合した水質群の評価法を検討する。自然現象の不確かさを考慮するために、ファジイ理論のなかでも最も単純なファジイセット理論を導入する。

その概要を図-1に示す。左図は従来型の環境基準の考え方であり、温度の基準値70℃を超えると1評価、超えなければ0評価となる。これに対して右図は、影響の度合いを0か1かの不連続な判定ではなく、0から1へと連続的に階級化を施すことによりファジイ性の導入を図る理論である。

各評価項目が0から1の数字で定量化されるから、総合評価は図-2に示すような複数の項目の相乗平均を求めることができるので容易である。もちろん、各項目の重要度が既知であれば、重みつき係数を掛け合わせることで評価の精度があがる。階級化のメンバーシップ関数の決定や総合評価関数での水質項目の評価は経験・知識とともに豊かな専門家の判断に委ねられる。ある水質は基準値をはるかに越えておれば、1評価、そのような水質がたくさんあっても、 $1 \times 1 \times 1^n$ となるから、総合的に1評価になる。一方、ある水質が基準値に達しない場合には0評価となり、他の水質が1であっても、総合的には0評価になる。関数をうまく表現できれば、単純ではあるが有用な手法である。目標値達成型との

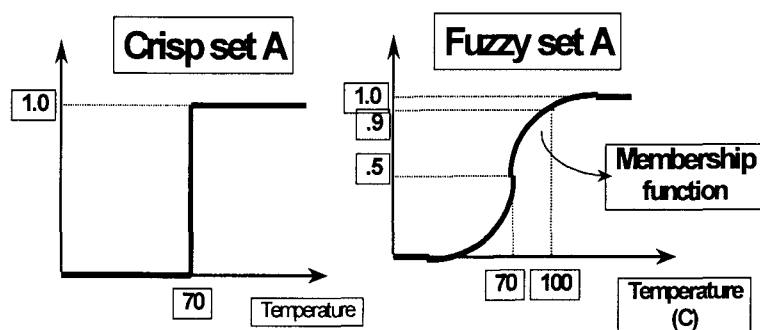


図-1 ファジイセット理論の階級化関数

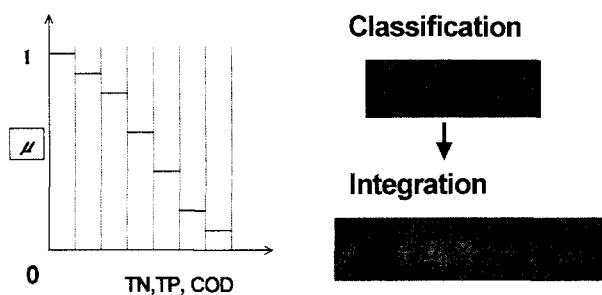


図-2 階級化と総合評価関数

表-1 メンバーシップ関数による階級化

μ	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
T-N	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2
T-P	0.14	0.12	0.01	0.08	0.06	0.04	0.02
COD	10.0	8.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0

(unit: mg/L)

比較もあるので、ここでは、COD、T-P、T-Nを対象にして、図-2と表-1に示すメンバーシップ関数(=階段型)を用いた。

3. 環境アセスメントの事例研究

通産省中国工業技術試験所は1991年に瀬戸内海水理模型の水理実験に基づいて「大阪湾の残差流パターンがわずかに数 km の構造物を明石海峡に建設することによって大きく変化する」という結果(樋端ら⁴⁾)を発表した。沿岸海域の流動や物質移動の研究は従来から多分に海洋学の分野であったが、中工試の実験は、沿岸域環境は土木工学の分野であることを示唆した点で貴重な水理実験であった。

ここでは流況制御の物理面のみならず、水質も含めた数値計算を実施して、環境影響評価を試みた。アセスメント(EIA)の一例を紹介する。なお、数値実験ならびに物理過程の影響に関する詳細は、既に石塚・中辻²⁾に報告しているので、本文では概要を述べるにとどめる。

(1) EIAのシナリオ

内湾や閉鎖性海域の物質循環に関与する流動構造に支配的な役割を果たすのは残差流系であることは周知のことである。中工試の水理実験の狙いは、大阪湾の残差流系の一つである沖ノ瀬環流を利用して、湾内流況を制御することにある。そこで、図-3に示すように、明石海峡の淡路島側から垂直に突出した、長さ2kmの構造物を設置した Case 1、対岸の本州側須磨から長さ3kmの構造物を設置した Case 2、ならびに現況の Case 0 の水理実験を実施した。水理実験では浮標追跡による流況変化と河川水による淀川河川水の拡がりを把握している。

上述のように、対象とするプロジェクトは流況制御を

目的としたものであり、埋立て等の開発行為が海域の環境に及ぼす影響を及ぼすかを評価する、換言すれば、「開発」対「環境、正確には生態系の保全」の通常の問題設定とは異なる。

そこで、問題点を明確にするために、以下のようなシナリオを想定した。

i) 水理実験をEIAのスクリーニングとして位置付け、以下のことが明らかになったとしよう。Case 1 案では、沖ノ瀬環流の規模も循環も増大し、淀川河川水は現況よりも数倍早く拡散して播磨灘に抜けるパターンとなった。Case 2 案では、沖ノ瀬環流の回転方向が現況と全く反転した。その結果、淀川河川水は神戸沖を這うように明石海峡に向かうパターンとなった。これらの結果から、大阪湾湾奥部の環境改善を優先度一位とするならば、淡路側に流況制御構造物を設置する Case 1 をアセスメント対象にするが、以下の調査も必要とする。

ii) 大阪湾の残差流系は複雑地形の下で生じる潮流を外力とする要因のほかに、水温差や塩分差に由来する密度流、地球の回転等の外力を受ける。水理実験だけでは検討し難い調査項目が多数残っている。数値実験を同時に実施してそれぞれの短所を補いつつ、現象の理解を高める。

iii) また、流況や淀川河川水の拡がり等、物理面だけの検討では不十分である。流況の変化に伴う生態系および物質循環も調査項目に加えるべきである。

iv) 現況の Case 0 は Case 1 や Case 2 の評価の相対値として必要であるが、その水質や生態系の評価が今までの水質汚濁に係わる環境基準を満たすならば、環境影響を回避するという意味で、何も実行しないという回避の代替案として考えることとする。

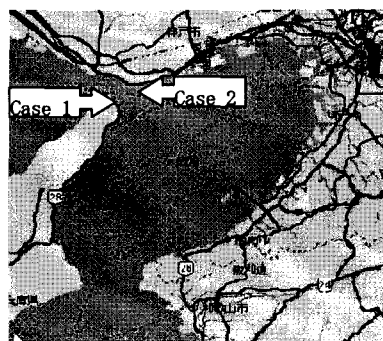


図-3 明石海峡での地形改変の試み

(2) 数値計算の概要

計算領域は大阪を原点とした64 km×64 kmの範囲であり、水平格子幅は1 km×1 km、鉛直方向には不等間隔で10層に分割した。また、紀伊水道側と播磨灘側の境界において12時間周期の潮汐変動を与えた。計算領域および流動モデルは石塚・中辻²⁾と同様である。大阪湾湾奥部の河川流量は1983～1992年中辻²⁾の淀川における8月の平均流量 241 m³/s を与えた。まず、計算条件の妥当性を

検討するためにバロトロピック流れ場における数値実験を行い、中工試水理実験の結果と比較して再現性を確認した。つぎに、淡水流入、海面熱収支、地球自転を考慮したバロクリニック流れの数値実験を実施した。

水質モデルは窒素、リン、COD、溶存酸素の生物化学的な変化過程をモデル化した低次生態系水質モデルである（山根ら⁶参照）。物質の輸送・拡散には流動モデルで求めた流速と渦拡散係数の3方向成分を各計算格子点で与えた。計算対象とする物質形態は、生物体有機物を代表する植物プランクトン量としてクロロフィルa（Chl-a）、栄養塩として無機態窒素（IN）、無機態リン（IP）、非生物体の有機物としての窒素（NL-ON）、有機態リン（NL-OP）、COD（NL-COD）、さらに溶存酸素（DO）を設定する。非生物体有機物はデトリタス態と溶存態の総称としている。水質の予測計算は25日間実施した。つぎの、つまり51周目の水質の計算結果を1周期間積分して、潮汐による変動を除去した値を考察対象とする。陸域からの栄養塩の負荷量や海底からの溶出等は夏季の代表値を用いた。

（3）数値計算結果：残差流系と栄養塩の分布

複雑地形の沿岸域における物質循環には、潮流よりも潮汐一周期間積分して得られる残差流の貢献が大きいことはよく知られている。大阪湾における残差流系の特徴は、① 淀川河川水の影響で大阪湾湾奥部の20m以浅の海域は一年中成層状態にあること、② この成層化と、エスチュアリー循環と地球自転の影響を受けて生起する気圧性循環（つまり時計回りの西宮沖環流）が海面下3mから5mの水深にのみ発達していること、③ 明石海峡の南東部の沖ノ瀬を中心に循環流の発達が見られ、それは水深方向に一様であることから地形性潮汐残差流であることである。大阪湾でのEIAの評価基準のひとつはこの残差流系がどの程度の影響を受けるかどうかである。

図-4は計算開始後26日の1周期目の残差流ベクトルと一周期間積分したCODの平面分布を水深別に表示した。図-4(a)、4(b)、4(c)はそれぞれCase 0, 1, 2に対応している。図-4(a)は現況であり、沖ノ瀬環流が全水深で、また西宮沖循環は水深5mで発達している

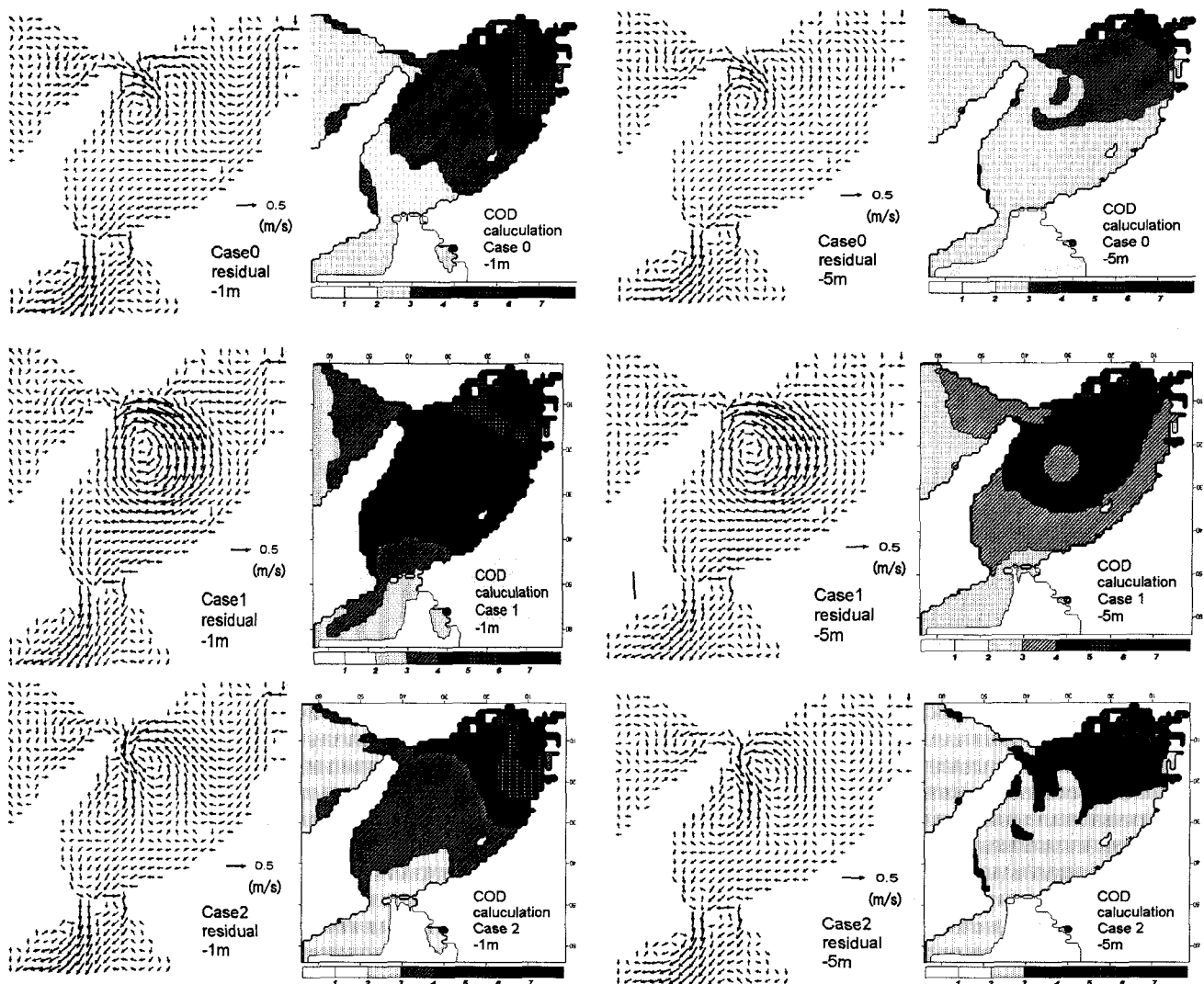


図-4 計算開始から25日後の残差流と一周期間積分したCODの平面分布（水深は海表面から1mおよび5m） 上図から下へ、図-4(a)、4(b)、4(c)はそれぞれCase 0, 1, 2に対応している。

のがよくわかる。COD分布は湾奥に向かって大きくなる傾向を示す。海表面でのCOD=4 mg/Lの等値線は東部成層海域と西部鉛直混合海域の境界に発達する潮汐フロントの位置と合致しているのは興味深い。

淡路島側に構造物を設置した Case 1 では、明石海峡からの強い潮流により形成される時計回りの沖ノ瀬環流が、現況地形の Case 0 と比較して約2倍も拡大した。また、湾奥部の成層海域の面積が現況地形と比較して縮小しており、西宮沖環流や大阪湾東岸に沿って南下する残差流も見られない。異常に拡大した沖ノ瀬環流が湾奥から流入する栄養塩を取り込むことから、海表面のCODの値は紀淡海峡の周辺海域を除いて大阪湾全域で4 mg/L以上である。水深5 mであっても、CODは全海域で3 mg/L以上、3/4程度の海域が4 mg/L以上となっている。図-4 (b)のCOD分布で丸い濃度の低い海域が認められるが、その位置はまさしく沖ノ瀬環流の中心に相当する。

本州側に構造物を設置した Case 2 では、時計回りの沖ノ瀬環流の規模が現況地形の Case 0 と比較して約1/2に縮小し、その中心位置は淡路島付近まで移動する。そして、今まで不明瞭であった反時計回りの循環が明石海峡の南東部に現れ、両者で渦対を形成しているのが分かる。明石海峡の海水交換に関連する有効幅が狭くなった。湾奥部における西宮沖環流の存在は現況と変わらない。CODの分布もほぼ同じである。

4. 環境影響評価

(1) 従来の影響評価の事例

いままで実施された環境アセスメント図書においては、「プロジェクトの前後における最大流速差および残差流速の最大値は数 cm/sであり、±10 cm/sあるいは±20 cm/sの影響範囲はその周辺海域に限られる。このことから、プロジェクトは流れに影響を及ぼすものの、その影響は軽微である。」と記載されていることが多い。科学的な検討をしながら、流れ場と水質および生態系との関係がまったく明確でないことから、このような記述に

ならざるを得ないのであろう。

水質に関しては、環境基準値が各水質項目で決定されているので、定量的な考察が可能である。図-5は水質3項目の各ケース毎の目標達成率を示している。CODと比べてT-NやT-Pの達成率が低いことが分かる。また、Case 1の達成率がすべての水質で悪いことも明瞭に理解できる。しかしながら、個々の水質の達成率が分かっても、どのケースが一番良いのかの判断を下すことは難しい。

因みに、図-6は水深5 mにおけるCODの目標達成率とその水平分布を示す。白色は基準値を満たしている海域である。3ケースともに、達成率が低く20%前後であり、図-5と同様に判別をつけ難い。興味あることは、環境目標値を満たしているのは湾奥部の類型C海域と紀淡海峡和歌山側のA類型の海域である。両者は、汚濁が慢性化した湾奥海域と、太平洋と連結している海域とであり、目標値の設定に合理性がないことを示唆している。しかしながら、一般的に解釈すれば、水質汚濁が進んでいるC類型の内湾が、目標を達成したということは、「水質がよくなった」とみなされるが、基準値が8 mg/Lでは、水質がよいとはいいがたい。この点でも環境基準の概念は矛盾を露呈している。

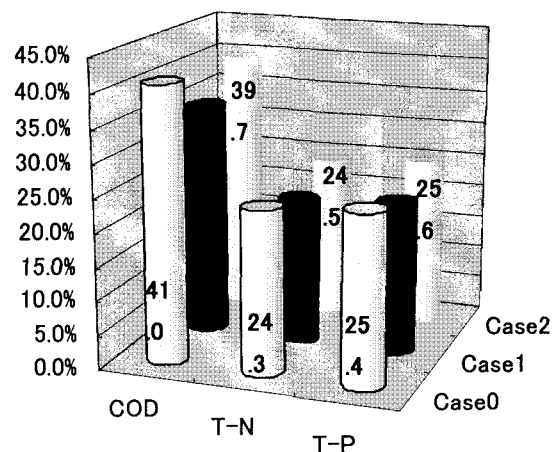


図-5 各予測ケースのCOD、T-NとT-Pの目標達成率の比較

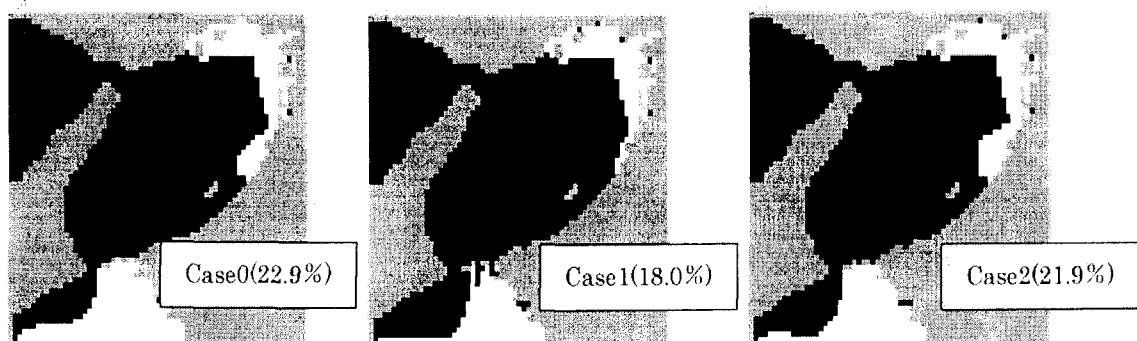


図-6 海面下5 mにおけるCOD目標達成率の分布

表-2 各層位毎の総合評価値の合計値 $\Sigma \mu$ を水深方向に累積した値 $\Sigma \Sigma \mu$ の比較

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Case 0	460.7	822.9	1149.2	1571.2	1882.6	1856.0	1820.7	1773.6	1689.9	1581.6	14608.8
Case 1	437.3	759.4	1037.5	1374.9	1637.3	1618.3	1591.9	1553.9	1507.8	1397.6	12916.3
Case 2	458.5	818.0	1143.3	1564.0	1876.9	1851.9	1818.8	1772.0	1689.2	1578.9	14571.9



図-7 全水深積分した総合評価値の水平分布 (図中の数値は総合評価の合算値を示す)

(4) ファジィセット理論による評価

表-2は各層位の各格子点で得られる総合評価値 μ (= 0~1) の合計値 $\Sigma \mu$ を水深方向に累積した値 $\Sigma \Sigma \mu$ の各ケースの比較を示す。また、図-7は全水深積分した総合した総合評価値の水平分布を示す。総合評価値は評価する格子点の数に依存するので、ここでは相対的な評価となる。したがって、図-7の表示も総合評価値の合算値は図中に示すが、分布形には等値線の値は示していない。淀川河口周辺域での値が最も大きく、河口周辺を除いては、白色から灰色へ、黒色へと海域の色が濃くなるほど、水質の基準値へ近づくことを示す。

3ケースの分布形状と合算値から判断できることは、3ケースの中で Case 1 が他の二つと比べて明らかな違いがあり、合算した値も小さい。したがって、水質に及ぼす影響の評価から、Case 1 の流況制御工法は却下される。従来型の環境基準値の手法(図-5)では、判定することは不可能であった評価である。Case 1では沖ノ瀬環流が強化され、淀川から流入してくる栄養塩を神戸側に引きずり込んでいる。図-4で見られた流動の影響が図-7にも現れている。総合評価の合算値からみて、Case 0 と Case 2 との間には有意な違いが認められないことから、両者の優先度を定めるまでには到らない。何もしないという代替案 (Case 0) も含めて検討するには、生態系への影響評価等を検討してみる必要がある。

5 あとがき

新アセス法(環境影響評価法)の施行により、わが国の環境行政は米国のミチゲーションの思想や生物多様性保存の導入により、生物や生態系の影響評価が鮮明になってきた。しかしながら、環境研究は、行政が要求する

レベルに達してないのが現状である。

本研究では、従来の環境基準の概念を踏襲するが、その評価に現れるあいまいさと不確かさを配慮するためにファジィセット理論を導入した、また複数の水質項目を一つの値で表現できる総合的評価値を提案した。明石海峡の地形改変による大阪湾の流況制御の仮想プロジェクトに適用して検討した結果、流速ならびに残差流の流れ構造より推測できる水質の分布をうまく再現できることが確認できた。さらに、水質項目の環境基準値の各個の比較では明瞭でなかった影響評価が、合理的、且つ客観的に判断できることが判った。

謝辞： 本研究の数値計算は山根伸之氏(㈱建設技術研究所)と石塚正秀氏(和歌山大学システム工学部)の協力を得た。また、平成14~16年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)：中辻啓二、課題番号14205073)の補助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 上嶋英機・田辺弘道・宝田盛康・山崎宗弘：大阪湾で構想されている大規模埋立による流動環境変化に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp. 1016-1024，1998。
- 2) 石塚正秀・中辻啓二：海峡部における人工的地形改変が内湾の流動構造に及ぼす影響の数値実験，海岸工学論文集，第48巻，pp. 1291-1296，2001。
- 3) Zimmerman, H.J.: Fuzzy Set Theory and Its Application, Kluwer Academic Publishers, 1992。
- 4) 樋端保夫ら：潮流制御による瀬戸内海環境保全技術に関する研究，中国工業技術試験所研究報告，第8号，48pp，1991。
- 5) 中辻啓二：大阪湾における残差流系と物質輸送，土木学会水理委員会・海岸工学委員会，水工学シリーズ94-A-9，28 pp. 1994。
- 6) 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二・村岡浩爾：大阪湾における水質の季節変動に関する数値実験，水工学論文集，42巻，pp. 739-744，1998。

(2003. 9. 30受付)