

下水処理場の建設にともなう沿岸域水環境の 変化の予測と評価

室 田 明*・中 辻 啓 二**

1. ま え が き

本文で報告する環境アセスメントの事例は 1974~78 年に実施された「沿岸埋立による新垂下水処理場（神戸市）の建設と操業¹⁾」にともなうものである。計画地点の海域は明石海峡東口に面し、その流動場は明石海峡の潮流を駆動力として変化と活性に富んでいる。その結果、環境水質も良好で COD 2 ppm 以下の A 類型があてはめられている。生態系にあっては魚類・藻類とも豊かで、且つ阪神間唯一の海水浴場である須磨海岸を間近に控えていることから、ビッグプロジェクトに劣らぬ環境影響調査が実施された。

環境アセスメントの目的は予め設定された環境保全目標を満たすか否かの予測・評価で終ることなく、科学的知識と実施設計の有機的な結合で、計画を合理的に実施するための総合的評価をすることにある。しかしながら、生態系への影響や人間生活への影響を具体的に論ずることは難しい。科学的知見に基づいて客観的に評価できる物理環境変化に関してさえ、予測の方法も評価基準も未だ明確であると言えないのが現状である。

本文では先述した環境アセスメントを具体例に選び、海面埋立および下水処理水の放流が沿岸域水環境に及ぼす影響の予測・評価法を検討する。ただし、アセスメント技法の詳細を言及することは避けて、採用した技法を選択するに至った考え方、方法論ならびにアセスメントを実施する過程での問題点、対応策等について考察する。

2. 埋立計画の概要

対象とする新垂下水処理場計画は最終的に 245,000 m³/日 の処理能力を有する処理場を建設するための用地を海面埋立工事により造成するものである。埋立位置は図-1 に示す大阪湾北部の明石海峡東口に面しており、埋立面積は沖合方向に約 250 m、沿岸に沿って約 1430 m にわたる約 36.7 ha である。

計画によれば、COD 2 ppm 以下の現況水質の海域に

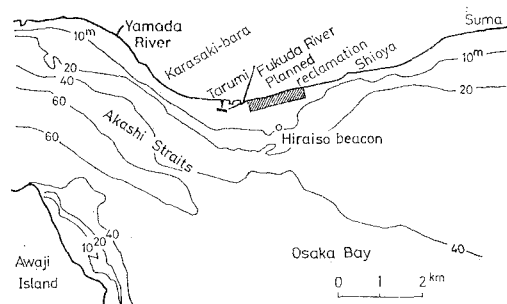


図-1 下水処理場の埋立計画地点

COD 13.3 ppm の処理水を放流することになり、最大 3.26 ton COD/日 の汚濁負荷が加わる。このため、本計画の着手に際して、埋立地の形状、放流型式と放流水の拡散状況との関係を、とりわけ有力な藻場を形成している平磯灯標付近の現況水質に及ぼす影響を事前評価する必要がある。

3. 現地観測結果

海洋環境変化の予測にあたっては、まず最初に対象海域の現況の把握が重要であり、流況特性、乱れの構造ならびに拡散特性を時間・空間スケールを勘案して検討しなければならない²⁾。幸いにも対象海域においては流速の長時間連続観測、平面流況の観測、塩分・COD 濃度の測定等、周到な現地調査が神戸市当局により再三実施されている。その結果をまとめるとつぎのようである。

(1) 潮 流

対象海域の流れを支配する最大の駆動力は明石海峡を通り北西-南東軸上を往復する速度の大きい潮流である。一方、この海域の流況を特徴づける流況パターンは、福田川河口から平磯を含む沖合海域にかけて、東流時に発生する左旋反転流の存在（図-2(a) 参照）である。すなわち、古来から「塩屋・垂水に干潮なし」といわれ、沿岸部では東向きあるいは西向きの流れにかかわらずほとんどの時間帯で西向きに流れると信じられている。潮流図からも西流時間が平均 16 時間に対して、東流時間は 8 時間程度であることからうかがわれる。この結果は図-2(b) の表層恒流図にも明確に現われている。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

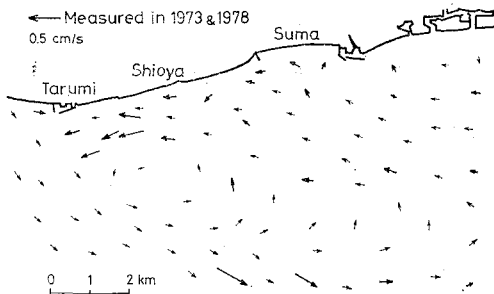


図-2 (a) 明石海峡東流最強後2時間の表層潮流

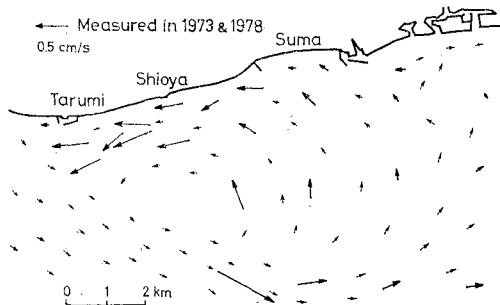


図-2 (b) 垂水沖の表層恒流図

この原因は舞子海岸の唐崎鼻の突出地形により後流域が形成されるためと推定されているが、隣接する垂水漁港の防波護岸の形状もその傾向を助長しているという見方もある。結果として、明石海峡を東流する比較的良好な水質の水塊が須磨海岸の海水を涵養していることになり、この海岸が阪神間唯一の海水浴場として市民の利用度も高く、大阪湾の水環境の劣化傾向にもかかわらず良好な水質を保全している理由とも考えられている。

また、大阪湾に接する対象海域南縁では右旋環流の外縁が触れ、この海域の流況に一定の影響を与えている。この右旋環流は大阪湾規模の潮流流況により海底地形の影響で発生しているものと考えられる。それは左旋反転流とともに半日周期で流動する比較的稳定した流れであり、恒流パターンへの貢献度は高い。

(2) 拡散特性

拡散係数の算出のために、1975年10月9日に現地で漂流板を流して航空写真観測を行った。漂流板間の相対位置の時間変化をラグランジュ流に追跡した結果、対象海域では潮流と左旋反転流の移流効果が卓越しており、拡散係数はせいぜい $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーであることがわかった。また、漂流板は時としてあひるの散歩のごとく一列に並んで移流することもあり、拡散係数の値が負となる場合もあった。このことより湧昇流や沈降流の存在もうかがわれ、この海域は海底地形や海岸線形状の影響を受ける複雑な三次元流動を呈していると推察できる。

(3) 水質特性

対象海域では水質の経年変化を調べる定点調査に加えて、水質の平面分布を季節別に得ることを目的とした全海域を網羅する特別調査が多数回実施されている。調査結果のうち COD の平面分布について示せば、東部海域が $1.4 \sim 1.6 \text{ ppm}$ と高く、西部海域では 0.8 ppm 以下と低い。全体として東高西低型である。すなわち、対象海域での水質分布は明石海峡から流入する播磨灘の良質の水塊と大阪湾湾奥での汚濁の進んだ水塊とが潮流により移流されてぶつかり、混合することによって決定されていることがこの調査からも明確に読み取ることができる。全体として環境基準値 2 ppm を満足しており、拡散能の高い流況場であるといえる。

4. 流動ならびに拡散場のモデリング

前項の現況の把握より、新垂水下水処理場からの放流処理水は左旋反転流の生成および移動の影響を顕著に受けて、一部は沿岸部の後流域に滞留し、また一部は反転流によって移流されて海域の乱れあるいは海峡主流の乱れで海域全体に拡散されることが予想される。それゆえ、流動に関しては、左旋反転流が海面埋立による海岸地形の変更によりどの程度の影響を受けるかを把握する必要がある。また、拡散予測は潮流およびそれに伴って副次的に発生する流れを時間単位で変動する非定常な流れとして把握し、水質濃度分布の時々刻々の変化を予測する必要がある。

このような複雑な流況パターンをシミュレートするには、対象海域を大阪湾全体に拡大して明石海峡以西からの流入特性と大阪湾規模の潮流循環特性を再現することが前提になるが、現在の計算機の能力では到底行い得ない。そこで、図-3の流れ図に示すように、埋立地の突出による潮流の局所的な変化は水理模型実験により評価し、広い海域に発生する環流を含む潮流変動は数値計算により予測した。また、両者の結果を有機的に結合して流況パターンを求め、水質拡散予測の移流項として採

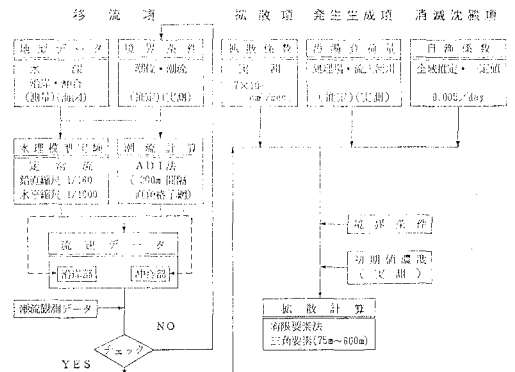


図-3 水質拡散予測の流れ図

用した。

流動場は湧昇流や沈降流の存在も予想される活性に富む複雑な流れであること、また拡散追跡の時間スケールが月程度あるいはそれ以下の短い時間であることから、成層場といった三次元的な配慮は必要でないと考えられる。したがって、流動ならびに拡散現象の支配方程式はよく知られた水深方向に積分した一層二次元モデルとなる。水質拡散予測の流れ図を示したのが図-3である。

5. 局所的な流況変化の把握——水理模型実験

埋立による海岸地形の変更が現況潮流に及ぼす影響を把握するために、潮時別に定常流の水理実験を行った。用いた水槽は $27\text{ m} \times 4\text{ m}$ であり、水平ならびに鉛直縮尺はそれぞれ $1/1000$, $1/160$ である。実験結果の一例を図-4に示す。同図は埋立の影響が最も顕著に観られる東流最強時の流況である。水理模型実験の結果はつぎのように要約される。(i) 東流時には潮流は沖合に押し出され、現況において単一であった環流が二つに分割される。環流の規模は東西方向に 1.5 倍程度大きくなる。(ii) 全潮時を通しての潮流パターンの変化は小さい。

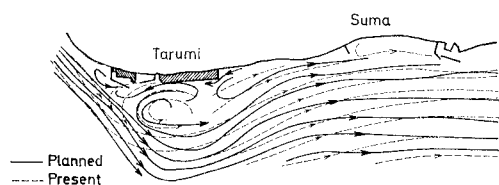


図-4 埋立地形による潮流変化(東流時)

6. 流動と水質拡散の予測——数値計算

(1) 数値計算法

新田公式³⁾によれば、放流処理水の拡散範囲は放流流量から半径 3.5 km の半円水域となり、計算範囲の決定にあたって一応の目安となる。埋立地東方 5~6 km 地点には水質の点から重要な須磨海水浴場がある。また、西側の明石海峡部は境界条件を設定するうえで淡路島も範囲の中に取り込んでおくのが都合がよい。さらに、右旋環流の再現の必要性等より、最終的には図-5に示すように埋立予定地より東方 7 km, 西方 5 km および沖合 5 km と三方に開いた海域を計算範囲とした。

その結果、左旋反転流を再現するためには沖合境界 B_s で潮流の流速変動を与えなければ、再現は不可能となる。また、東西境界 B_E , B_W では海峡主流の往復潮流を再現するために潮位変動を与えなければならない。結局、潮流計算にとっては極めて不安定で収束性も悪くなる境界条件を選ばざるを得なくなった。これに対処するために、潮流計算には Alternative Direction Implicit 法を採用した。計算は空間間隔 200 m の直角格子網、時

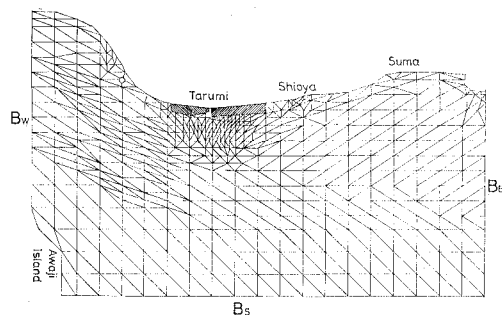


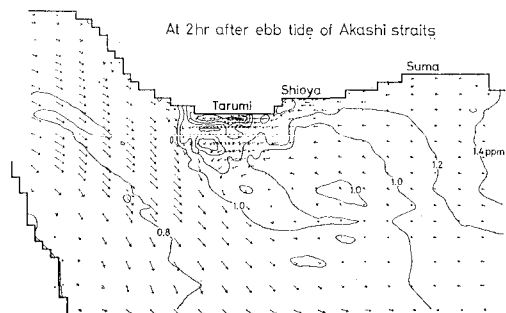
図-5 数値計算の範囲と拡散計算用有限要素網

間間隔は 30 秒で離散化した。

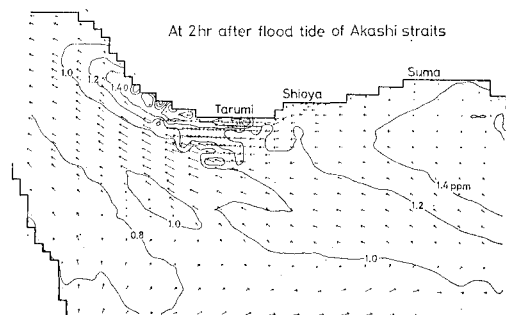
放流口近傍の局所的な拡散状況を詳細に記述するために、拡散計算は任意形状の要素網を構成して計算できる有限要素法を採用した。要素網は図-5に示すように 75 m から 600 m の大きさの三角形要素の連結で構成されており、一次近似で 451 節点・805 要素である。要素網は潮流流況を十分に考慮して配置した。また、処理場および河川からの負荷条件は排出要素を用い、排出量を要素内に均等に分布させて与えた⁴⁾。

(2) 数値計算の結果

潮時毎の流況パターンおよび COD 濃度分布の一例を図-6に示す。放流位置は埋立地点より沖合 100 m であり、放流水濃度は COD 3.26 ppm である。各潮時における左旋反転流の成長・消滅過程は、沖合への拡がり



(a) 東流最強後 2 時間



(b) 西流最強後 2 時間

図-6 潮流流況ならびに COD 濃度分布図

が実測結果と比較していくらか弱いものの、現況を極めて良好に再現している。これは沖合境界 B_s において実測に基づく潮流調和定数を重ね合わせて与えた右旋環流の寄与が大きいものと考えられる。

埋立による海岸地形の変更は東流時の流況に多少の変動を強いるのみであり、全般的な潮流パターンは現況地形の場合とほぼ変わらない。変化した点は東流時に発生する左旋反転流の位置であり、現況地形の場合と比較して東流最強時に西南西へ約 400 m 移動し、東流最強後 2 時間で北東へ約 100 m の移動をしている。しかし、反転流の規模ならびに支配領域はほとんど変化していない。

つぎに、COD 濃度分布の時間変化は潮流パターンに追従した挙動を示すことが明らかになった。すなわち、西流時には埋立地点からの放流水は沿岸沖 500 m に沿って舌状に西進し、山田川沖近傍まで到達する。他方、東流時には初めは東進するものの、しだいに成長する左旋反転流によって阻まれ、埋立地付近に押し止められてやがて沖合に移流される。図には示さないが、一潮時平均した濃度分布図を比較すれば、海面埋立ならびに下水処理水の放流の影響が現われているのがわかる。

ここで問題となるのは、放流処理水による水環境への影響の評価を“どの程度の時間尺度”を基準に行うかである。図-5 の範囲の拡散予測においては 60 潮時以上の繰り返し計算になると、物理機構に増して東西境界での COD 濃度差が有効に働くものと推量される。今回のシミュレーションでは放流処理水の局所的な影響範囲を把握することを目的としているので、12 時間平均濃度が 5% 以内に擬似収束する時点で計算を停止して、現況水質分布との差から影響範囲を算出する試みを行った。また、同時に生物相への影響度を把握するために、平磯灯標での濃度の時間変化を比較した。図-7, 8 にその一例を示す。

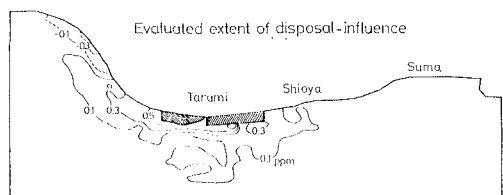


図-7 一潮時平均により求めた影響範囲

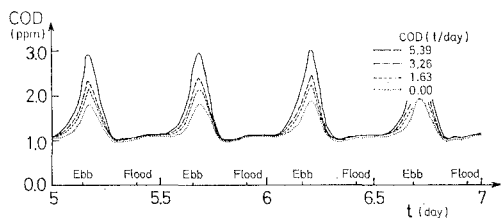


図-8 平磯灯標における COD 濃度の時間変化

これらの結果を検討すると、現況水質の分布と対比して基本的パターンには大きな変動はないが、埋立地周辺の海域では海面埋立ならびに処理水放流の影響が認められる。将来ケースと現況との濃度分布の主な相違点は埋立地沖での等濃度線の沖出しと、垂水漁港より西海岸沿いの汚濁帯の出現にあると思われる。しかしながら、濃度が増加する度合は 0.1~0.5 ppm の範囲であり、環境基準値 COD 2.0 ppm を十分満たしている。また、一方では下水道整備により山田川からの負荷量 2.46 ton/日 が消滅していることも見逃せない現象である。

つぎに、図-8 に示す平磯灯標付近の COD 濃度の時間変動には、潮汐変動と等しい約 6 時間周期の変化が明瞭に認められる。ピーク濃度の出現潮時は明石海峡東流最強後 1 時間に相当する。また、計算結果の全てのケースに同様の傾向が認められる。これは福田川河口付近の後流域で放流処理水が一時的に滞留し、潮時が左旋反転流の発生する東流最強時近くなると、反転流によって沖に流出することに原因している。その結果、平磯付近の濃度は周期的に変動する。負荷量が 0.0 のときにも同様の傾向がみられることから、この現象は現況の海岸地形に起因するものであろう。

7. アセスメント結果の評価と代替案の検討

6. で図示したケース以外は (i) 放流処理水が埋立地と新垂水漁港造成地の護岸で囲まれる閉鎖水域内に捕捉され滞留するために、水質が現況より悪化すること、(ii) 平磯灯標における最大 COD 濃度が十分に良好なものでないこと、が判明した。そこで、(1) 垂水漁港東側の埋立造成を中止し、且つ西側突堤は透過型として閉鎖水域の海水滞留を軽減する、(2) 埋立護岸からの処理水の表層放流方式を底層放流方式に変更し、放流口位置を 100 m (10 m 水深) あるいは 1500 m (25 m 水深) に沖出しするという代替案が提示され、再び水質拡散の予測・評価が行われた。

その結果、沖出し 100 m 位置からの底層放流で初期強制混合による放流水の希釈倍率が 7.4 倍以上の場合においては、先の問題点を解消でき、環境への影響をできるだけ抑制できることが判明した。沖出し 1500 m の底層放流では放流処理水が明石海峡潮流により直接的に移流され、他のいかなるケースよりも抜群の拡散効果を示している。しかし、大延長の海底放流管を敷設するに当たっての建設上の問題点、また操業時の維持管理を勘案すると、経済面の評価からも採用するには至らなかった。

8. 放流拡散器の設計——水理実験による検討

浅水海域において底層放流された密度差の大きいフォーストブルームは水表面および海底面の影響を受けるこ

ともあり、その挙動に関して有益な知見がほとんどないのが現状である。上述の希釈倍率を満たし、周囲の環境条件に適合させて支障なく操業できる放流設備を設計するためには、水理実験による検討が是非とも必要である。そこで、実験設備の関係からフォーストブルームの挙動特性、拡散特性ならびにブルーム間の相互干渉を実験的に検討し、流れ場での拡散特性は数値計算を併用して検討した⁵⁾。

その結果、浅水海域での放流処理水の混合希釈を高めるためには、ブルーム形態で流動する径路を可能な限り長くするような放流条件が適切であることが分った⁶⁾。そのためには、放流管口径を小さく、且つ密度フルード数を小さくして水平方向に放流する多孔管拡散器が望ましい。12基の放出孔（口径 0.5 m）を 6 m 間隔に設置した場合に、日平均最大 192,000 m³/日の放流流量に対して 8.3 倍の希釈倍率が得られることが分った。もちろん、流れのある場合にはブルームの径路が長くなり、8.3 倍以上の希釈効果が期待される。水理実験結果に基づいて設計された多孔管拡散器を写真-1 に示す。

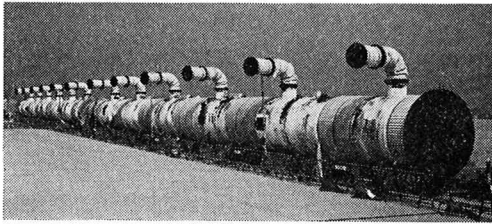


写真-1 新垂下水処理場の中放流多孔管拡散器

9. あとがき

上述した環境アセスメント結果の指針に基づき、沿岸埋立ならびに下水処理場の建設が神戸市下水道局により 1979～83 年に実施され、1984 年から操業を開始している。操業に先立って 1983 年 10 月 9 日に実施した現地実測によれば、潮流の影響のない時間帯で測定された放流水塊の塩分濃度は 30.8‰ であった。その値は希釈倍率に換算すると 22 倍に相当する。この測定結果は水質拡

散予測で設定した初期強制混合による希釈倍率 7.4 倍を上回るものであり、あらゆる潮時において放流処理水が周辺環境に与える影響はほとんどないことを証明するものである。

本文では現地観測、水理実験と数値計算とが相補して用いられた環境アセスメント例について述べた。沿岸海域過程の物理的モデリングにおいてもいくつかの未解決な問題点を残しているが、三手法の有機的な結合ならびにフィードバックが重要であることが明らかになった。そのなかでも、現地観測が対象海域の物理学的過程を把握するうえで、また現象の時間・空間スケールを考慮して予測法を展開するうえで必須である。そのためには、環境変化の事前予測調査は当然のこととして、建設後においても現地で環境事後調査を継続的に実施することが物理過程の理解向上と予測法の改善に繫ると考える。

謝 辞：本研究は神戸市下水道局から(財)災害科学研究所に委託されたものである。数値計算に際しては(財)電力中央研究所 伊藤剛先生、和田明先生の有益な助言を得た。また、現地観測や資料提供に関しては神戸市下水道局ならびに吉沢博主幹の多大な協力を得た。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 神戸市：新垂下水処理場計画に係る環境保全に対する措置，273 p.，1983.
- 2) 和田 明：海岸における水理現象の規模の評価，水理観測における規模の評価に関する研究報告書，土木学会水理委員会，pp. 29～39，1981.
- 3) 新田忠雄：海洋域における工場廃水の希釈と拡散について，用水と廃水，6 巻，pp. 416～422，1962.
- 4) 中辻啓二・和手信泰・安永通晴：移流分散現象の数値シミュレーションにおける排出条件と境界条件について，第 24 回海岸工学講演会論文集，pp. 438～442，1977.
- 5) 災害科学研究所：新垂下水処理場処理水放流の最適方式の選定およびその拡散効果の確認，105 p.，1982.
- 6) 室田 明・中辻啓二・石田悦一：浅水海域に放流される下水処理水の混合希釈特性について，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 604～608，1982.