

大阪湾における大規模埋立開発が三次元流動構造に与える影響評価

Effects of Water Front Project on Three-Dimensional Baroclinic Flow System in Osaka Bay

中辻啓二*・末吉寿明**・村岡浩爾***・山見晴三****

Keiji Nakatsuji, Toshiaki Sueyoshi, Kohji Muraoka and Seizo Yamami

Large scale reclamation projects have been planned and constructed in coastal waters such as Osaka Bay and Tokyo Bay. It is of importance that the scheme of impact assessment must be established from the view point of long-term and whole circumstances of bays. In this study, three-dimensional numerical experiments are carried for the environmental assessments of two hypothetical big reclamation of coastal waters shallower than 15m or 18m. The physical indexes for the assessment are Okinose residual circulation and the front phenomena. The results show that in the case of reclamation depth of 18m the front is significantly affected by project.

Keywords : (Impact Assessment, Water Front Project, 3-D Baroclinic Flow Model)

1. はじめに

近年、大都市圏周辺の臨海部地帯はウォーターフロントの名の下にかつてない大規模な開発（再開）ブームに襲われている。大阪湾や東京湾に代表される閉鎖性内湾においても埋立開発が盛んに行われ、海岸地形は大きく変化した。埋立開発は都市圏の過密化に加えて生活産業廃棄物の処理等の必然的要請もあり、年々その面積を増加させる傾向にある。それにともなう海域の環境資源の価値や許容量に大きな変化があるのは当然の帰結であろう。世界の閉鎖性海域における赤潮・貧酸素水塊の発生や東京湾の青潮被害は生態系からの警鐘であると見てとれる。最近では、都市問題に関連した経済的、社会的、また余暇開発的な利用の方法のみに議論が集中しており、大阪湾や東京湾全体を観た適正な水環境（自然）の保全や創出の見地から総合的な評価が行われた例は少ない。開発の規模の増大、影響の範囲の増加から考えても、長期的、広域的な視野に立って閉鎖性内湾の自然環境が開発行為によってどのように変化するかの物理現象の理解と、環境管理や政策の立案・決定過程への得られた知見の提供が第一義的に必要である。

沿岸海域の流動や物質移動の研究は従来は多分に海洋学の分野であった。しかし、現象が明らかになるにつれて工学的な色彩が濃くなってきた。例えば、大阪湾の物質輸送に支配的な恒流パターンがわずか2kmの防波堤の建設で大きく変化するという中工試の水理実験結果（樋端ら¹⁾）は確かに工学であり、熱収支による成層化の度合が生物活性や化学反応を促進するのは生物・化学過程が水質の分布に影響を及ぼす証左である。今必要であるのは、沿岸海洋学よりはむしろ逼迫状況にある沿岸海域の環境問題に対して多角的な検討から解決策を模索する工学の取り組みである。

著者が Estuarine Engineering（河口・沿岸域環境工学）を提唱する根拠はそこにある。著者はここ数年大阪湾を対象にして、つぎの項目について数値実験を行ってきた。①3次元バロクリニックな流れの数値実験による大阪湾の流動・水塊構造の解明と物質輸送過程の支配要因の分析、②大規模埋立の潮流系、潮汐残差流系や水環境に及ぼすインパクト評価、③大阪湾の埋立開発が残差流系やフロント構造に及ぼす影響評価、④沿岸域の流動・拡散現象の可視化法の開発。大阪湾では10m水深の海域の埋立は既に完了し、さらに大水深で大規模の人工島の計画が立案されつつある。着眼点は大阪湾全域の水環境とともに埋立開発によって生じる湾奥部の残存水域の水環境の変化予測である。本研究では大阪湾の物理現象の三次元数値実験を行い、仮想的な埋立開発が流動や密度構造に及ぼす影響を与えるかに関して検討する。

2. 大阪湾の流動・水塊構造

大阪湾は北北東に長軸約 60km、南南西に短軸約 30kmのほぼ楕円形をした内湾である。北西の明石海峡により

* 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科（〒565 吹田市山田丘2-1）

** 学生員 大阪大学大学院生 工学研究科土木工学専攻 前期課程2年

*** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工修 清水建設(株) 土木本部設計第1部造成第2グループ

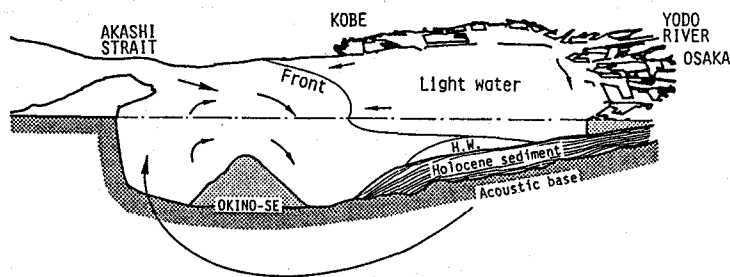


図-1 大阪湾の流動・水塊構造：上半分は鳥瞰図；下半分は断面図
(Fujiwara & Nakata²⁾より抜粋)

瀬戸内海と、南の紀淡海峡により紀伊水道、太平洋と連絡している。水深は東部から西部に至るほど深さを増し、淡路島付近には水深 40m～70m の海谷がある。大阪湾はこのように半閉鎖性内湾となっており、潮流の停滞域になっている湾奥部には河川等を通して流入する汚濁物質により汚染が進行し、汚泥が堆積している。海底汚泥から溶出する汚濁負荷は大きい。

Fujiwara & Nakata²⁾ が大阪湾での実測データに基づいて描いた大阪湾の流動・水塊構造を図-1 に示す。上半分は空から眺めた鳥瞰図、下半分は断面図である。湾内の流動は、河川水の流入と夏季の表面の加熱によって成層の発達する湾東部と、明石海峡からの速い潮流と強い混合のために夏季でも成層しない湾西部とに分けられる。その境界に発達するのが潮汐フロントであり、20m 海深に沿って大阪湾を縦断して帯状に広がっているのが観測されている。もう一つの流動は、明石海峡からジェット状に流入する流れが地形性要因と潮流流動の非線形性によって形成する沖ノ瀬環流であり、その中心の海底が土砂の堆積によって浅瀬となっているのは興味深い。この循環流に引きずられ、密度流により強化される泉南沖の恒流帯や、密度流と地球自転によって生じる西宮還流の存在も実測から指摘されている。

3. 数値モデルの概要

(1) 基礎方程式

三次元密度流数値モデルは本質的に中辻ら³⁾と同じである。すなわち、静水圧近似ならびにブーシネ近似を仮定すると、密度流を支配する基礎方程式は質量、運動量および密度偏差の保存則に基づいて、次式のように記述することができる。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{DU}{Dt} - fV = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{DV}{Dt} + fU = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g \quad (4)$$

$$\frac{D\Delta\rho}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Delta\rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Delta\rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \Delta\rho}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W \frac{\partial}{\partial z} \quad (6)$$

ここに座標系は、海域の基準面内の西向きに x 軸、南向きに y 軸さらに基準面に直交する鉛直軸の上向きに z 軸とする。U、V、W はそれぞれ平均流速の x、y、z 方向成分、P は圧力、 ρ は密度、 ρ_a は基準密度、 $\Delta\rho$ ($=\rho - \rho_a$) は密度偏差、g は重力加速度である。 ε_x 、 ε_y 、 ε_z ならびに K_x 、 K_y 、 K_z はそれぞれ x、y、z 方向の渦動粘性係数と渦拡散係数である。

運動量と密度の鉛直方向乱流輸送は渦動粘性係数および渦拡散係数を用いて平均流速あるいは平均密度の局所勾配との積で表現する。成層効果は鉛直方向の乱流輸送係数 ε_z および K_z の項で考慮され、勾配型リチャードソン数 R_i の関数として表される。成層化関数に関して数多くの経験式が提案されているが、中辻ら⁴⁾にしたがって渦動粘性係数 $\varepsilon_z / \varepsilon_{zN}$ については Webb の提案式、乱流 Schmidt 数 ε_z / K_z については Munk-Anderson の提案式を適用する。すなわち、これらの関数形は次式で表される。

$$\varepsilon_z / K_{zN} = (1 - 5.2 R_i)^{-1} \quad (7)$$

$$K_z / \varepsilon_z = (1 + 10 / 3 R_i)^{-3/2} / (1 + 10 R_i)^{-1/2} \quad (8)$$

ただし、 ε_{zN} ($= 1 \text{ cm}^2/\text{s}$) は均質流体の鉛直方向渦動粘性係数である。また、水平方向の渦動粘性係数は海峡部での流れの乱れエネルギーが大きいことを考慮して、海峡部では $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、灘部では $5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ とする。

(2) 大阪湾モデルの計算

大阪湾モデルでは 紀伊水道の北緯 $33^\circ 50'$ 以北、播磨灘の東経 $134^\circ 19'$ 以東の大阪湾とその周辺海域を対象とした。明石・紀淡の両海峡の通過流量の精度を高く評価し、且つ計算誤差が大阪湾に及ぶことを避けるために、計算領域は広く設定してある。差分格子間隔は水平方向に 1 km 、鉛直方向に 7 層 (2, 4, 6, 8, 10, 15, 15m) で分割した。差分時間間隔は 30 秒である。

潮流は 12 時間周期の余弦波の水位変動を開境界で与えることにより生起させた。潮汐変動は大阪湾南部海岸性状調査報告書⁵⁾ に基づいて平均大潮の振幅 ($47 \sim 67 \text{ cm}$) と位相差を与えた。密度流に関しては淀川からの陸水の流入として平均流量 ($205 \text{ m}^3/\text{s}$) を与えた。河川水の 7、8 月の平均水温 26°C 、および塩分濃度 0‰ から、河川水の密度を 0.997 kg/m^3 とした。海表面からの浮力流入 (29.7 cal/s/m^2) は降水量、蒸発量、熱流入量から算定した。熱流入量は村上ら⁶⁾ の式により 7、8 月平均の日射量、有効逆放射量、潜熱、顕熱の輸送量を算定して求めた。

4. 大阪湾で観られる潮汐フロントと恒流系に関する数値実験

潮流・密度流系の計算では、河川からの陸水流入と水表面からの熱による浮力の負荷により計算時間にともなって増大するために、完全な定常状態を得られない。そこで密度分布の時間変化が前の潮汐の計算と比べて小さくなった、36 潮汐目の計算結果に対して考察を行った。大阪湾の潮流系、密度流系ならびに恒流系を平均大潮を対象に検討した結果を図-2、3 に示す。図-2 は明石海峡東流最強時と西流最強時の表層での流速ベクトルと密度分布を示す。東流時に流入した沖ノ瀬 (図中の×印) 付近の水塊は、潮時が変わっても、東南方向に流れ続ける循環流を形成しているのが観測される。両者の流速ベクトルの方向の違いが潮汐残差流の形成に直接的に影響している。図-3 はフロントを横切る方向に観測線 (図-2 に実線で示す) をとって鉛直断面の密度分布を示す。水平方向の原点は海深 20 m であり、正符号は湾奥方向、負符号は沖合い方向を示す。湾奥部では層をなして拡がっており、成層の厚さは約 5 m である。等密度差線が水表面と直交するのがフロントの特徴である。図-3 から海深 20 m 線に沿って形成される「潮汐フロント」の存在が数値実験で明瞭に追認できた。

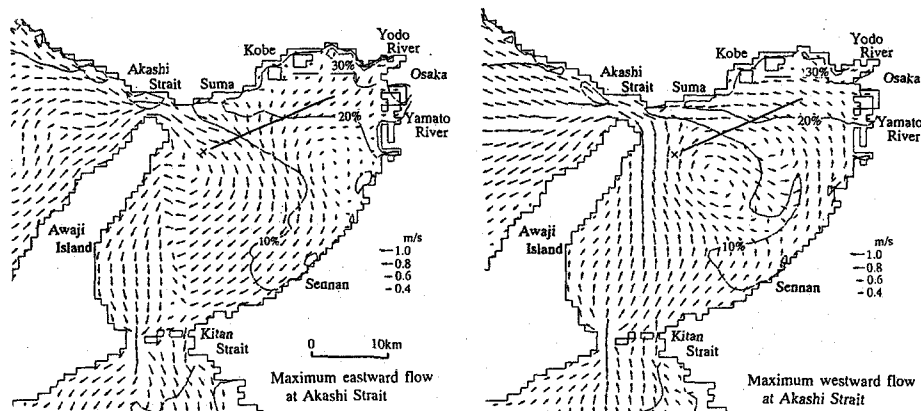


図-2 明石海峡東流最強時と西流最強時の流況と密度分布 (水面下 1 m)

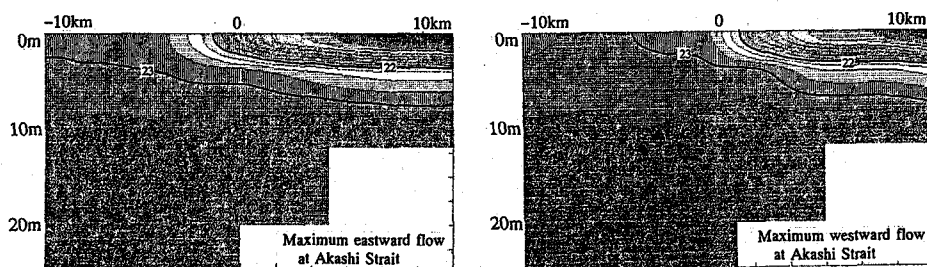


図-3 フロントを横切る鉛直断面の密度分布（単位は σ_t ）

長期間にわたる物質輸送を考えるとときには残差流系が支配的になることはよく知られている。図-4は大阪湾に4本のマーカーを設置して明石海峡の東流最強3時間前からの移流状況を追跡したものである。潮流で運ばれる物質は1周期後には元の位置に戻ってくるはずであるが、図に示されるように12時間後の物質の分布は初期状態とは非常に異なった分布を示している。つまり、マーカー粒子は大阪湾中央部で南東方向に長軸を有する楕円状に拡がっている。明石海峡からジェット状に流入する東流時の強い潮流のために、粒子群は沖ノ瀬を取り囲むように時計回りに移動して大阪湾に滞留することになる。この傾向は2周期後の分布にも認められる。つまり、大阪湾での物質の移動には往復流の潮流系よりもむしろ残差流成分が寄与していることがわかる。もう一つの特徴は、マーカーの粒子群が20m海深のフロントを越えて湾奥へ移動・拡散しないことである。これには河川からの陸水の流入に惹起された密度流が関与している。以上の数値実験結果および数多くの実測結果から沖ノ瀬環流と潮汐フロントは、大阪湾の恒流系の形成や大阪湾での物質輸送に重要な役割を果たしていると考えられる。

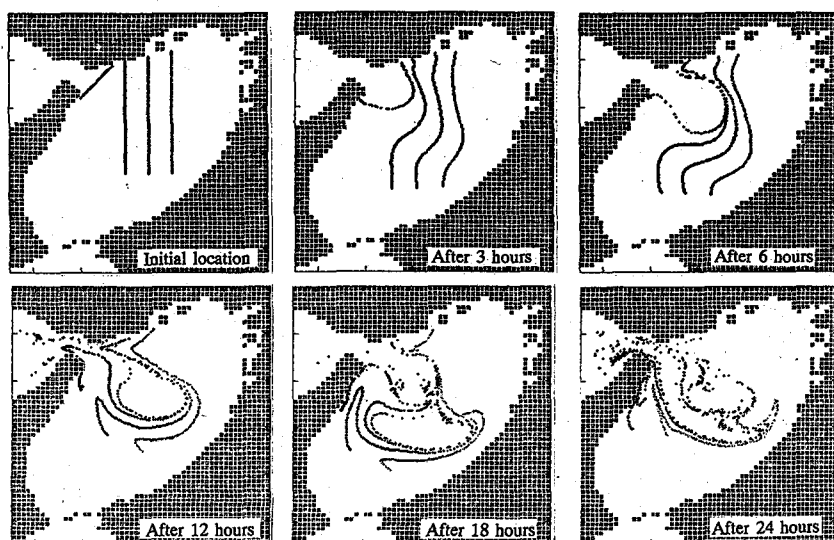


図-4 大阪湾の水表面に設置したマーカー粒子の輸送過程

数値実験で得られた潮流流速の変動時系列を湾内の主要な点で調和分析して、残差（ $R_{..}$ ）成分、半日周潮（ M_2 ）成分と1/4日周潮（ M_4 ）成分の寄与を求めた。その結果を表-1に示す。観測点は図-5に示している。開境界で M_2 潮汐を与えたにも係わらず、 $R_{..}$ や M_4 成分が大きくなっている。図-5中の上と下の値はそれぞれ第3層（-9m）の潮流の振幅で除した残差流と潮汐残差流を表す。100%を越える値は、残差流系が潮流系よりも大きな流速になっていることを意味する。また、上と下の値を比較することによって、密度流が残差流系の生成に寄与する程度が分かる。同図より、次のことが分かった。①恒流系は潮流系と比較して微弱な流れではない。②大阪湾の恒流分布は、明石海峡からの潮流に支配される沖ノ瀬環流（潮汐残差流）、河川からの陸水の供給により供給される湾奥部の密度流系の恒流、さらに沖ノ瀬の外縁から泉南沖にかけての潮流により形成され、密度流によって強化される東岸恒流帯に分類できる。③海峡周辺では潮流の非線形性によって2倍振動数の1/4日周潮の流動成分が生起されている。

以上のことから、大阪湾の潮流系、密度流系ならびに恒流系流動を形成する物理機構が本数値モデルで再現できることが分かった。

表-1 潮流変動の調和分析の結果

Station	Baroclinic tidal flow			Barotropic tidal flow		
	Res.	M2	M4	Res.	M2	M4
1	52.7 48.4	77.2 62.2	19.6 15.1	48.6 45.4	68.0 61.7	16.1 14.2
3	38.1 32.7	27.0 16.2	3.8 1.4	29.3 26.1	19.6 16.2	2.2 1.3
4	19.1 14.6	20.6 10.1	2.2 0.5	13.2 10.5	12.9 10.1	1.1 0.6
5	14.8 9.1	57.1 39.8	3.1 1.4	9.5 7.8	41.3 35.6	1.2 0.8
8	28.2 6.1	33.5 24.2	6.7 5.6	11.2 8.7	29.0 21.6	5.5 4.7
9	1.5 1.4	3.6 2.9	0.4 0.4	2.5 1.8	3.8 2.9	0.3 0.2

unit : cm/s

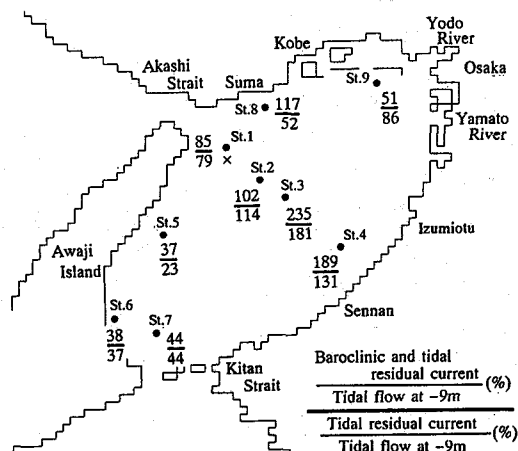


図-5 恒流に及ぼす密度流の効果

5. 大阪湾の埋立が恒流系と潮汐フロントに及ぼすインパクト評価

本節では三次元密度流数値モデルを用いて湾奥部海域の大規模埋立てを想定した数値実験を行い、大阪湾内の流動特性に与える影響を検討する。前節において潮汐フロントと沖ノ瀬環流が大阪湾の流動および物質輸送を考える上での物理的指標であることが確認できた。そこで、この2つの指標をもとに大規模埋立の影響評価を行う。埋立形状としては水深15m以浅、18m以浅の湾北東部の海域の埋立を想定する。埋立による大阪湾の面積と容積の減少率は、15m水深埋立時には26%、11%、また18m水深埋立時には36%、20%程度である。また、埋立想定による淀川河口の位置は真っ直ぐに延伸するものと仮定し、方向性を考慮して河川水を放流する。

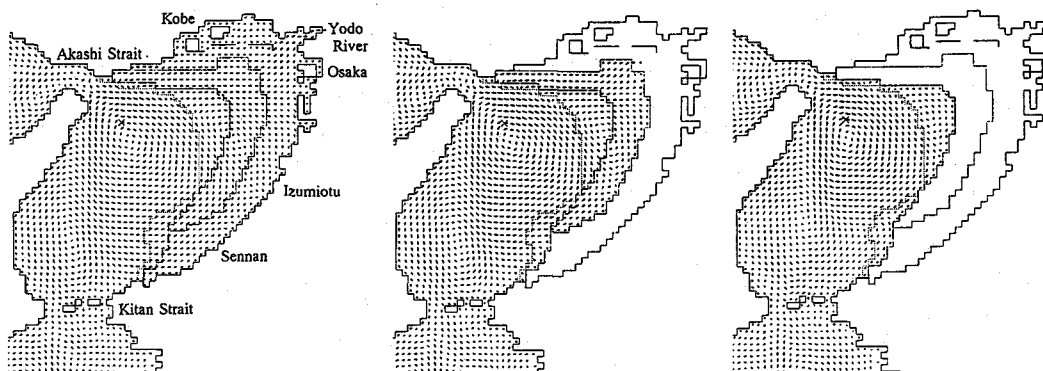


図-6 埋立前後の表層での恒流分布

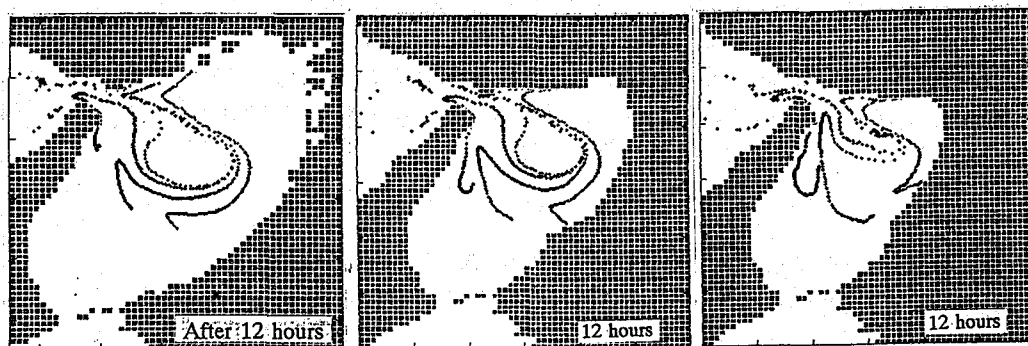


図-7 埋立前後のラインマーカーの12時間後の分布形態

図-6は現況地形と埋立(15mと18m以浅)時の表層での恒流分布の比較を示す。湾西部で時計廻りの沖ノ瀬環流がいずれの計算結果にも認められ、海深20m線に沿うように円弧を描いている。その直径は現状地形でのそれと同程度である。図-5に示した観測点1~3での恒流流速は現状地形の値と比較して約10%小さくなっていた。15mと18mとの違いはそれほど認められなかった。また、循環流が全層において観られることから、沖ノ瀬環流は明石海峡からの流入に支配された潮汐残差流であることが分かる。したがって、大阪湾内の埋立の影響は小さいものと推察できる。

図-7は埋立による残差流系の流動変化を調べるために海表面にトレーサー粒子を大阪湾を縦断するように配置して追跡実験を実施し、その一潮汐(12時間)後の状態を示したものである。沖ノ瀬環流が大規模に発達しているため、潮流の振動流成分よりも残差成分が卓越し、トレーサー粒子はこの環流を取り囲むようにその初期状態と大きく異なった分布形態を示す。また、15m以浅の埋立の場合には湾内の流動や密度分布に及ぼす影響は小さかったが、18m以浅の埋立では河川水と海水との混合希釈がかなり小さくなり、湾奥部に停滞する傾向にある。密度構造に及ぼす埋立の影響は大きい。埋立による海域面積の減少が湾内水の低密度化を進めている。

つぎに、潮汐フロントに及ぼす影響を比較したのが図-8、9である。それぞれ図-2に示す潮汐フロントを横断するようにとった観測線にしたがって、水平密度分布およびその空間水平密度勾配を示したものである。図-9の密度勾配はフロント強度の指標として理解できる。図の横軸の原点は20m水深線であり、負号は湾奥方向、正号は沖合い方向を表している。15m海深の埋立のフロント位置と強度は現状地形の場合とほとんど変わらない。しかし、18m埋立時の場合にはその位置は約5kmほど湾西方向に移動し、さらに鋭さは2倍程度強化されているのが分かる。

以上のことから、沖ノ瀬環流と潮汐フロントを指標にすれば、18m埋立の大阪湾の流動に与える影響は大きいことが分かった。

6. あとがき

三次元数値計算を用いて大阪湾北東部での大規模埋立開発を想定した数値実験を行い、沖ノ瀬環流と潮汐フロントを物理的指標として埋立開発による湾内の流動・水環境に及ぼす影響のインパクト評価を行った。その結果、18m以浅の海域を全て埋立した場合に大阪湾の流動・水塊構造に及ぼす影響が非常に大きいことが分かった。このことは18m以浅の埋立時には湾奥部の密度流系による流動の支配が強化されたことを意味しており、埋立が大阪湾海域の水環境に対して多大な影響を及ぼすことを示唆している。

参考文献

- 1) 樋端保夫 他：中国工業技術試験所研究報告，8号，p.172，1991
- 2) Fujiwara, T. and Nakata, H. : Marine Pollution Bulletin, vol.23, pp.675-678., 1991
- 3) 中辻啓二・山見晴三・末吉寿明・藤原建紀：海岸工学論文集，39，pp.906-910.，1992
- 4) 中辻啓二・山本信弘・山見晴三・室田 明：海岸工学論文集，38，pp.186-190.，1991
- 5) 運輸省第三港湾建設局関西空港調査室：大阪湾南部海岸性状報告書，pp.276-331.，1980
- 6) 村上真裕美・大西行雄・原島 省・國示秀明：沿岸海洋研究ノート，vol.15，No.2，pp.130-137，1978

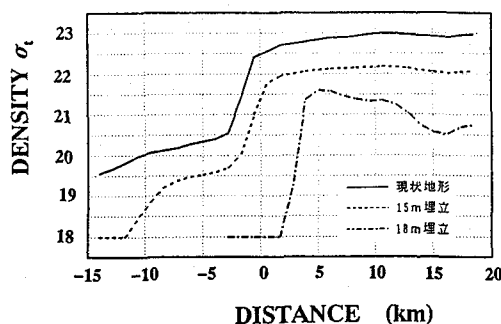


図-8 フロント断面の水平密度分布

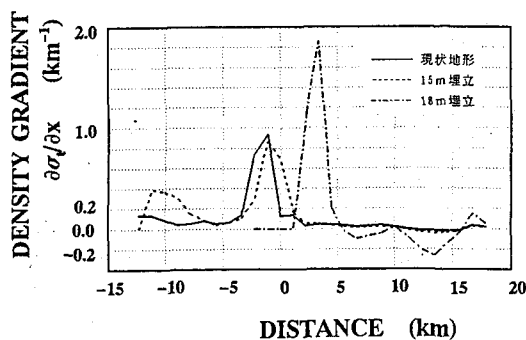


図-9 フロント断面の水平密度勾配