

大阪湾の沖ノ瀬の形成機構と残差流系との関連性

金 種 仁*・中 辻 啓 二**・村 岡 浩 爾**

1. はじめに

大阪湾の海底地形の特徴は、浅い緩勾配の東部海域と水深の深い西部海域に分けられる。両海域を分断するように、20 m の水深に沿って潮汐フロントが発達している。大阪湾に流入する河川のなかで90%以上の河川が東部海岸に存在する。それらの河川の中で淀川の年平均流量が大阪湾に流入する総河川流量 (417.6 m³/sec) の約40%を占める。また、大阪湾に流入する土砂の中で77%は主として洪水時に流入すると言われている。(星加ら, 1994) 淀川の河川水によって大阪湾に流入する土砂は洪水により河口から遠く離れた海域まで一旦輸送され、沈降する。しかし、その大半は海底近傍の流れによって再び湾奥に運搬される。最終的には、淀川から流入する土砂は大阪湾東部海岸線に平行な形状で堆積して、現在の東部海域の地形が形成されている。(金ら, 1996) これは河川流量の多い閉鎖性海域に特徴的にみられるエスチュアリー循環による海底部近傍の輸送である。(Nakatsuji・Fujiwara, 1997) しかしながら、淀川から流入する土砂の中で粘土を除いた大部分の土砂は大きな沈降速度のために東部海域の海底に堆積し、沖ノ瀬周辺の海域まで輸送されないことが分かった。(金ら, 1996) 西部海域の海底地形で興味あることは、水深が60~80 m の深い海域にあって基盤岩から高さ約31 m の小高い山のような地形の存在である。それは沖ノ瀬と称され、その周辺は良好な漁場になっている。

しかし、今までの研究において、①沖ノ瀬を形成している微細砂の供給源はどこなのか? ②どのような経路で輸送され、沖ノ瀬を形成しているのか? ③流動特性との関連は? 等に関して全く不明である。そこで、本研究では沖ノ瀬とその周辺海域の底質の供給源を推定することを目的に、3次元バロクリニック流れの計算を行い、また、沖ノ瀬とその周辺の海底地形を形成している堆積物と同じ中央粒径の粒子を明石海峡の播磨灘側の海底から放流して3次元ラグランジュ流の粒子追跡を行った。

2. 沖ノ瀬の海底地形と海底堆積物の特性

2.1 沖ノ瀬の位置と海底地形

大阪湾は瀬戸内海と紀伊水道によって外洋と繋がっている。砂の山である(図-1参照)沖ノ瀬は明石海峡から東南方向に約12 km 離れた位置に存在する。大阪湾西部海域の特徴は流動が比較的激しいことである。図-2は音波探査によって沖ノ瀬から東に向かう測線に沿って調査した海底の地層を示している。(藤原・中田, 1990) 基盤岩水深60 m 以下に存在し、沖ノ瀬の基盤は急勾配になっている。基盤岩を覆っている沖ノ瀬の堆積物の厚さは約35 m に達している。

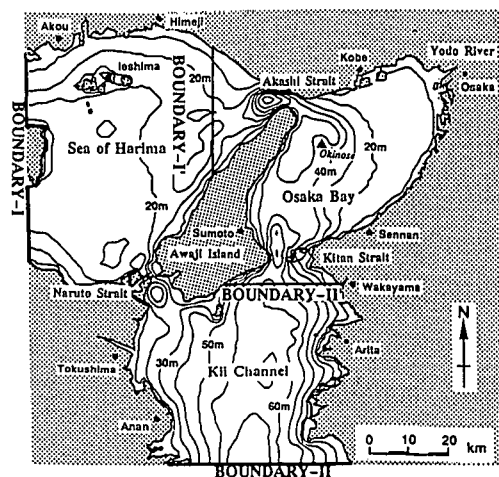


図-1 大阪湾の海底地形

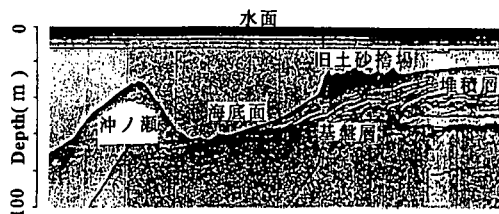
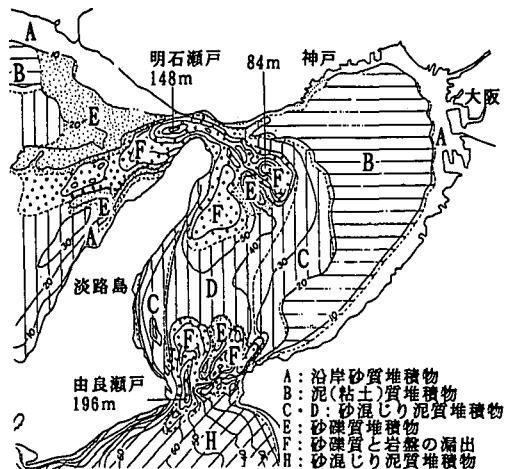


図-2 大阪湾の海底の地層・堆積状況 (出典: 藤原建紀, 1990)

* 学生会員 大阪大学大学院工学研究科
 ** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科



図一3 大阪湾の海底地形と堆積物 (出典：海底地盤, 1995)

2.2 沖ノ瀬とその周辺海域の表層堆積物特性

図一3は大阪湾とその周辺海域の堆積物の分類を示している。同図より、沖ノ瀬は $\phi=4\sim6$ である砂れき質の堆積物で構成されていることが分かる。この粒径と同じ土砂の海域は、播磨灘側の明石川河口付近(図一3のE部分)の15m~20mの水深の海域と淡路島の北西沿岸の水深5m~20mの海域に認められる。この表層堆積物の分布特性から、沖ノ瀬を構成している土砂の供給源は両海域であろうと推察できる。

3. 数値実験の内容

粒子追跡実験では沖ノ瀬の底質の供給源と考えられる播磨灘を含むことと明石海峡周辺の境界条件の影響を直接に受けないようにする必要がある。したがって、計算対象領域は、図一1に示すように大阪湾を中心として紀伊水道や播磨灘の小豆島を含む106 km四方に海域を設定する。計算格子間隔は水平方向に1 km、鉛直方向には水深20 mまでは2 m間隔で、それより深い海域では4, 6, 15, 15 mの全14層位に分割した。境界条件として、播磨灘と紀伊水道の開境界で半日周期(12時間)の振幅(播磨灘西北部: 38~39 cm, 播磨灘西南部: 36~39 cm, 紀伊水道南部: 46 cm)と位相差(播磨灘側: 330° , 紀伊水道側: 174°)を潮汐変動として与え、また成層化を考慮するために、淀川で河川流量(571 m³/s)と海水表面(20°C)で熱収支を与えた。粒子の移動に係わる物理量はパロクニック流れの数値計算から得られる任意時刻、任意位置における3方向の流速と渦拡散係数である。前者に対しては粒子の沈降速度も考慮した移流効果を、後者には正規乱流を発生させて確率的な拡散効果を導入した。例えば、沖ノ瀬とその周辺海域の底質の供給源を把握するため、沖ノ瀬の底質の粒径に相当する土砂の存在

する明石川河口と淡路島沖の海底面近傍(水深10~20 m)で粒径が $\phi=3$ (0.188 mm), 4(0.094 mm), 5(0.047 mm), $\phi=6$ (0.023 mm), 7(0.012 mm)の粒子をそれぞれ5,000個ずつ放流する。各粒径の粒子が持つ沈降速度(W_d)は星加ら(1994)の式の中で $W_d=7.53 \times D^{0.97}$ の式に基づいて算出した。

4. 数値実験の結果とその考察

4.1 大阪湾における残差流特性

図一4は大阪湾における夏期の60潮汐目の流動を1潮汐積分して得られた潮汐残差流の計算結果を示す。水深がそれぞれ1 m, 5 m, 9 mである。同図で明瞭に認められる大阪湾の残差流の特徴は、明石海峡を挟んだ大阪側の時計廻りの環流(通称、沖ノ瀬環流)と播磨灘側の反時計廻りの環流である。両者はいずれの水深においても認められることから潮流の非対称性と地形により惹起される潮汐残差流である。ことに、沖ノ瀬環流は直径が14 kmに及ぶ環流であり、その残差流の流速は潮流の絶対値に匹敵するほどである。また、沖ノ瀬環流の東北方向に時計廻りの循環が水深1 m~5 mとにおいて認められる。この環流は沖ノ瀬との渦対として発達したものと予想できる。しかしながら、9 m水深にはこの環流は認められない。その原因はおそらく水深が浅い水域に発達した渦循環が海底部の底部摩擦によって消失したと考えられる。淀川からの河川水は水表面近傍でブルーム的性状を保ちつつ、南方向、さらに南西方向に流れているのが分かる。さらに、閉鎖性内湾の特徴として知られている時計廻りの環流が、湾奥部の5 m水深で発達しているのが認められる。通称西宮沖環流と呼ばれ、その流速値は約0.3 m/sにも及ぶことがNakatsuji・Fujiwara (1997)によって指摘されている。

4.2 粒径 $\phi=4$ (0.094 mm)の粒子の挙動特性

a) 明石川河口周辺の海底で放流した場合

図一5は粒子追跡実験の開始から1, 3, 5潮汐後の粒子群の水平ならびに鉛直分布を示したものである。本来3次元的挙動を提示すべきであるが、3次元的に表現することは難しいことから、水深方向に積分した水平分布と東西方向の鉛直断面に正射影した鉛直分布として表現した。放流開始から1潮汐後には、粒径が $\phi=4$ (0.094 mm)である粒子群は反時計廻りの環流により放流海域から西方向に拡がる。水深9 m~17 mの間の海底部から放流した粒子群は、全水深にかけて分布している。粒子は沈降速度を持っているにもかかわらず水表面まで上昇して浮かんでいる粒子も見られる。これは反時計廻りの環流が海底地形により変形された流れによるものと考えられる。1潮汐後から大阪湾に流入が始まり、3潮汐後には605個(全放流粒子の12.1%に相当)の粒子が大阪

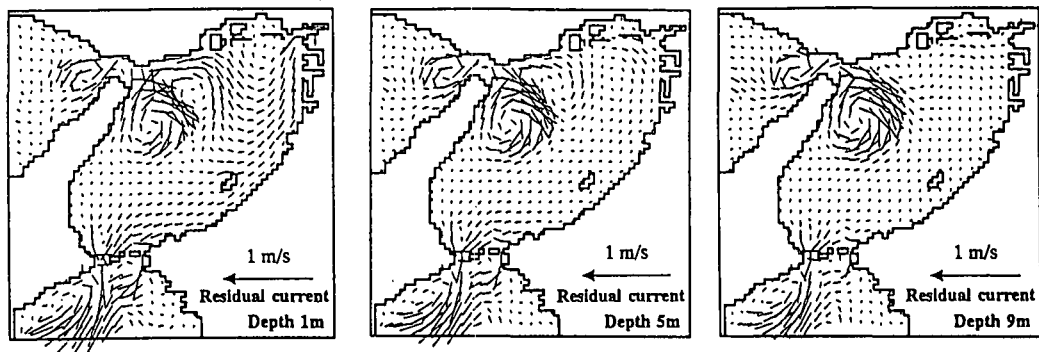


図-4 大阪湾におけるの水深 1 m, 5 m, 9 m における残差流の流速ベクトル

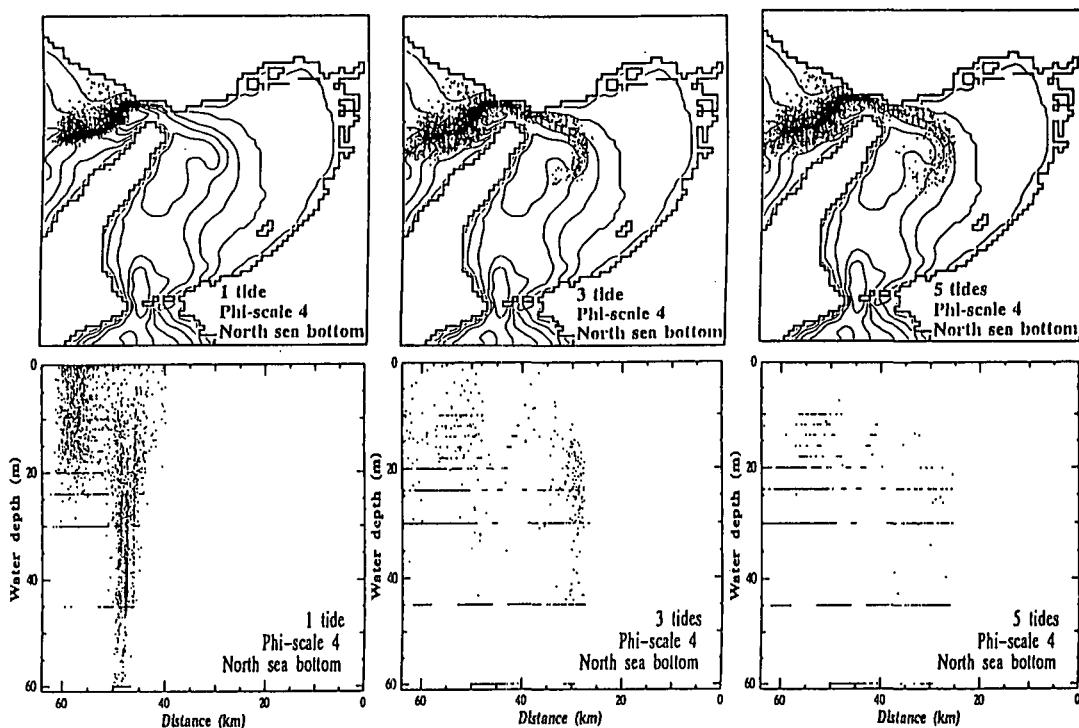


図-5 明石川河口周辺の海底から放流した $\phi=4$ の粒子群の水平・鉛直方向の拡がり特性

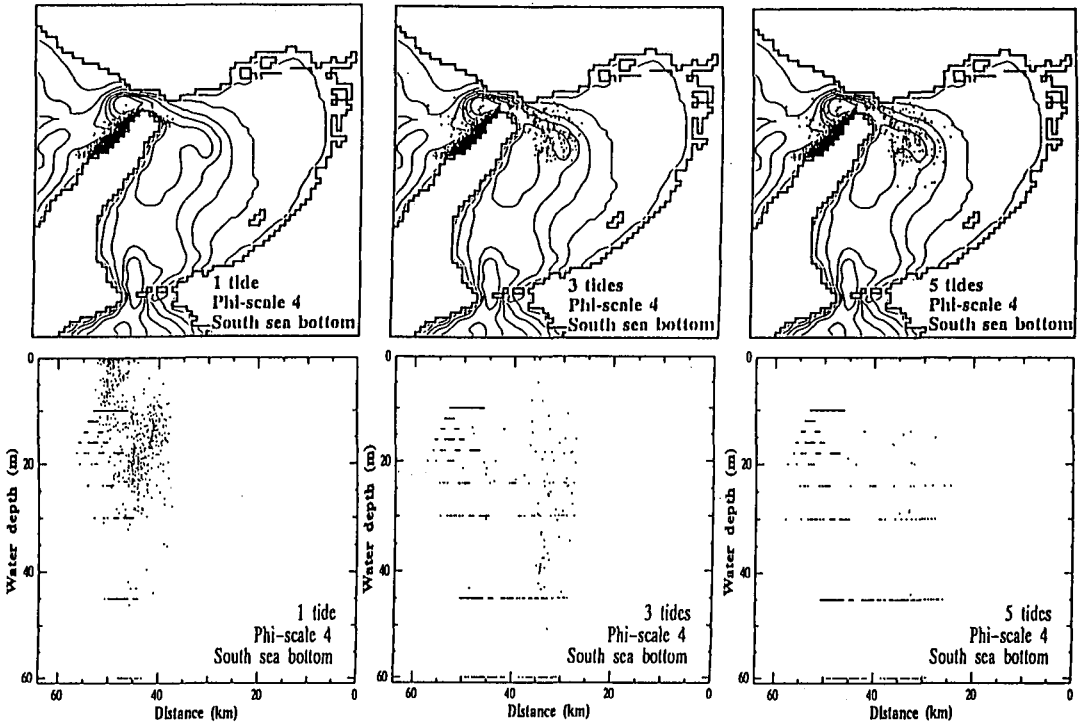
湾に輸送される。そのうち 14 個は沖ノ瀬環流に巻き込まれ、沖ノ瀬に堆積する。

また、投入から 5 潮汐後には、大阪湾内に流入した粒子は 621 個 (12.4%) に増えても、沖ノ瀬に分布する粒子の数には変化はない。鉛直分布をみると、水深 10 m～60 m の間に沈降して横棒として現れている。

b) 淡路島北西沿岸の海底で放流した場合

図-6 は淡路島北西沿岸の水深 3 m～15 m の海底面の 10ヶ所で粒子を放流してから 1, 3, 5 潮汐後の粒子群の水平ならびに鉛直分布を示したものである。1 潮汐後、大部分の粒子群は淡路島北西海岸に沿って分布してい

る。このとき、大阪湾内に見られる粒子は 145 個であり、水深 8 m～45 m の間に存在する。しかし、3 潮汐後になると、大阪湾に存在する粒子の数は 256 個に増加し、そのうち 8 個の粒子が沖ノ瀬近傍の海域に存在する。このとき、播磨灘に存在する大部分の粒子は 10～60 m の水深に沈降している。そして、大阪湾に分布する粒子は、鉛直方向には表層から水深 60 m まで分布しているのが認められる。一方、5 潮汐後には、ほとんどの粒子群は海底に沈降している様子を表している。このとき、256 個の粒子が大阪湾に堆積し、そのうち 12 個の粒子が沖ノ瀬の海域に堆積している。



図—6 淡路島北西海岸の海底から放流した $\Phi=4$ の粒子群の水平・鉛直方向の拡がり特性

4.3 粒径 $\Phi=3$ (0.188 mm), $\Phi=5$ (0.047 mm) の粒子の挙動

粒径が $\Phi=3$ (0.188 mm) の粒子の場合、明石川の河口周辺の水底から放流した粒子群の中で 343 個 (6.9%) の粒子が明石海峡の北部海岸に沿って大阪湾に流入し、速い沈降速度のため沖ノ瀬環流の影響を受けない水深で沈降し、沖ノ瀬までとどかず明石海峡周辺の水底に堆積してしまう。しかし、淡路島の北西沿岸の水底から放流した粒子群は、明石海峡の南側を通じて 325 個 (6.5%) の粒子が大阪湾に流入し、沖ノ瀬環流により運ばれ、沖ノ瀬とその周辺海域に拡がりながら堆積する。そのうち 27 個の粒子が沖ノ瀬に止まっている。

また、粒径が $\Phi=5$ (0.047 mm) の粒子の場合には、明石川河口周辺の水底から明石海峡の北側の海岸に沿って大阪湾に流入した粒子群は 803 個 (16.1%) に達する。その粒子群は沖ノ瀬環流に巻き込まれ輸送され、沖ノ瀬周辺の水底に半円状に堆積する様子を表し、その粒子の中で 15 個の粒子が沖ノ瀬に堆積する。しかし、淡路島の北西沿岸の水底で放流した粒子群のうち、341 個 (6.8%) の粒子しか大阪湾に流入されない。この場合には、明石海峡の全水深に拡がり、沖ノ瀬環流の中心部に巻き込まれ、30 個の粒子が沖ノ瀬近傍の水底に堆積する。これらの結果から、粒径 (沈降速度) と放流する海域によってその輸送経路や堆積域が異なっているのがわかる。粒径

が $\Phi=3$ の粒子の場合には、淡路島の北西海岸から放流された粒子が沖ノ瀬を形成することには貢献している。また、粒径が $\Phi=5$ (0.047 mm) の粒子の場合にも、明石川の河口部の水底から放流した場合と比較して、淡路島北西海岸の水底からの堆積物が沖ノ瀬を生成することに 2 倍以上も貢献していると認められる。

4.4 粒径 $\Phi=6$ (0.023 mm), $\Phi=7$ (0.012 mm) の粒子の堆積特性

図—7 は淡路島の北西海岸と明石川の河口付近の水底から粒径 $\Phi=6$ の粒子群を放流してから 30 潮汐後の水底面の堆積分布を示している。明石川河口の水底から投入した粒子群の大部分は播磨灘側に止まっている。しかし、明石海峡を通して大阪湾に流入した粒子は、粒径が $\Phi=6$ の粒子は 823 個 (16.5%), $\Phi=7$ の粒子は 802 個 (16%) もあり、沖ノ瀬環流の周辺海域まで拡がって堆積している。そのうちのそれぞれ 16 個と 18 個の粒子が沖ノ瀬に堆積する。一方、淡路島の北西海岸から放流した 5000 個の粒子のうち、粒径 $\Phi=6$ の粒子は 325 個 (6.5%), 粒径 $\Phi=7$ の粒子は 344 個 (6.9%) の粒子が大阪湾の流入し、それぞれ 27 個と 28 個の粒子が沖ノ瀬に堆積する。図—8 は大阪湾における底層の堆積物の中央粒径値の分布を示したものである。 Φ の値が 7 より大きい粒径の懸濁粒子物は淀川から流入され、大阪湾奥部の東海岸線に平行な沿岸付近の海域に堆積するのは既に述

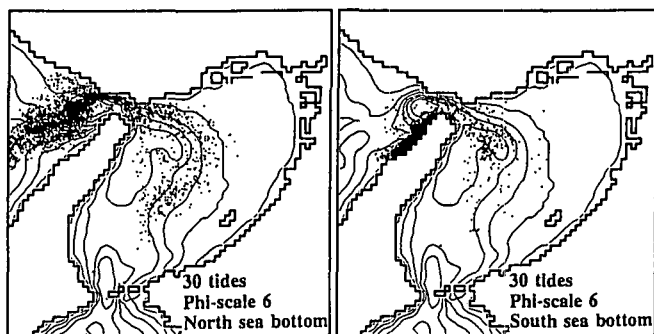
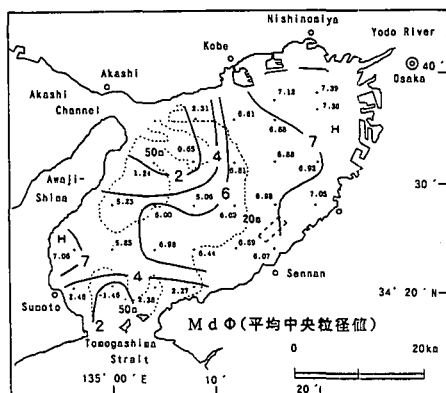
図-7 粒径が $\phi=6$ の粒子群の堆積分布

図-8 大阪湾における海底堆積物の中央粒径値の分布 (出典: 星加ら, 1994)

べた (Nakatsuji, et al. 1996). しかし, 粒径 $\phi=6\sim7$ の堆積物はどこから供給されたのかに対しては不明な点が残されていた. 図-7 からみると粒径 $\phi=6$ の粒子が堆積している海域は 図-8 の中央粒径値が $6\sim7$ の間の海域とよく対応している. この結果から, 大阪湾の海底地形は, 河川からの流入される土砂のみならず, 播磨灘から明石海峡を通じて供給される土砂により形成されているのがわかる.

5. まとめ

本研究では, 沖ノ瀬とその周辺海底の底質になっている粒径が $\phi=3, 4, 5, 6, 7$ の土砂の供給源を推測し, その輸送ならびに堆積機構を解明するために, 沖ノ瀬の底質と同じ粒径分布を示す播磨灘の明石川河口付近の海底と淡路島の北西沿岸海域の海底から 5 種類の粒径の粒子群を放流する三次元粒子追跡実験を実施した. 5 種類の粒径の粒子群のシミュレーション結果から播磨灘の側から大阪湾に流入する土砂は, 明石海峡を通して流入する速

い潮流により大阪湾に流入し, 沖ノ瀬環流により運ばれることが予想できる. 沖ノ瀬を構成している播磨灘の明石川の河口付近と淡路島の北西海岸付近の海底 (水深 $10\sim20$ m) の底質は強い潮流により大阪湾に流入し, 沖ノ瀬環流に取り込まれて沖ノ瀬に堆積することが認められた. したがって, 沖ノ瀬の底質の粒径 $\phi=3, 4, 5$ の粒子は播磨灘の明石川の河口付近と淡路島の北西海岸付近の海底 (水深 $10\sim20$ m) から供給されて, 沈降速度が大きいため, あまり拡がらなく沖ノ瀬環流の中心部に入り, 沖ノ瀬周辺の海域に堆積する.

一方, 粒径 $\phi=6, 7$ の粒子群は沖ノ瀬環流の外部の流れにより運ばれ, 沖ノ瀬と 20 m の等水深線の間に半円状に堆積し, 大阪湾における同粒径の堆積物分布をよく説明していることから, 同粒径の土砂は明石海峡からの速い潮流とともに播磨灘の方から流入されたものと予測できる.

参考文献

- 金 穂仁・中辻啓二・村岡浩爾 (1996): 大阪湾の底質特性と淀川洪水時の挙動特性との関連性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 336-340.
- 谷本照巳・星加 章 (1994): 大阪湾と江田内湾における懸濁粒子の沈降速度, 海の研究, Vol. 3, No. 1, pp. 13-20.
- 土質工学会関西支部 (1995): 海底地盤-大阪湾を例として, pp. 59-71.
- 中辻啓二・末吉寿明・山根伸之・藤原建紀 (1994): 三次元粒子追跡による流動構造の解明, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 326-330.
- 中辻啓二 (1994): 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水理学シリーズ 94-A-9, 1~28.
- 中辻啓二・藤原建紀 (1995): 大阪湾におけるエスチュアリー循環機構, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 396-400.
- 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫 (1989): 大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 209-213.
- 藤原建紀・中田英昭 (1990): 大阪湾の流動特性と水質・底質との関連, 海洋気象学会, 海の気象, 35 巻, 5・6 号別刷, pp. 58-70.
- 星加 章・谷本照巳・三島康史 (1994): 大阪湾における懸濁粒子の堆積過程, 海の研究, Vol. 3, No. 6, pp. 419-425.
- 星加 章 (1995): 沿岸域の内部生産と有機汚染の現状, 公開シンポジウム沿岸環境管理の将来像, 瀬戸内海を中心として, pp. 29-37.
- Nakatsuji, K. and Fujiwara T. (1997): Residual baroclinic circulation in semi-enclosed coastal sea, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 362-373.
- Nakatsuji, K., Kim, J. I. and Muraoka, K. (1996): Behaviour of suspended solids discharged from Yodo River in Osaka Bay, Hydrodynamics, Chwang, Lee and Leung (eds), Balkema, pp. 703-708.