

数値計算による大阪湾の海水交換に関する研究
 ～兵庫県南部沖地震が大阪湾の環境に及ぼす影響について～

A Numerical Simulation Study on the Tidal Exchange at the Osaka Bay
 - On the Effect of Seabed Displacement due to the Kobe South Earthquake -

犬飼直之*・早川典生**・宝田盛康***

by Naoyuki Inukai, Norio Hayakawa and Moriyasu Takarada

Abstract: It has been reported that the seabed in the Akashi Strait, a crucial entrance to the Osaka Bay, has risen 5 m due to a recent major tremor, a scale believed to be certain to cause a major change in the residual circulation of the Osaka Bay. The present study investigates tidal exchange phenomenon carrying out a float dispersion study using both square-shaped model bay and Osaka Bay. The result shows that either embankment or seabed swelling does affect the major circulation and hence tidal exchange of a bay.

keywords: tidal exchange, residual circulation, float dispersion

1. はじめに

大阪湾中央部には大きな右回転の循環流が存在するが、通産省中国工業技術研究所の水理実験¹⁾によると、明石海峡に堤防を設置すると流れが改変し、大阪湾全体の流れが逆転してしまう。このように、明石海峡付近は大阪湾全体の流れを決定しているといえる海域であり、かつ小さな変化が大きく流れの変化を起こしてしまうような非常にデリケートな海域である。ところが1995年1月17日に兵庫県南部地震が発生し、新聞²⁾によると明石海峡の海底に地震が原因と思われる5メートルの段差が発見された。大阪湾にとって非常に重要な海域で生じたこのような地形の変化が、大阪湾内の流れにどれくらいの変化を与えるか、つまりこの変化が大阪湾の環境を改変するか否かを確認する必要がある。本研究ではまず基礎実験湾で数値実験を行い、湾口付近の流れや海水交換の機構を理解してから大阪湾の流れの計算を行い、明石海峡が大阪湾の流れにどのような影響を与えているかその機構を理解し、さらに地震による地形の変化が本当であれば、その変化が大阪湾の流れにどのような影響を与えるかを数値実験により求めることを目的とする。

2. 研究内容

まず大阪湾と同じ規模の、水深が一様な矩形湾で数値実験を行った。計算手法は差分法で陰解法に属するADI法を利用し、水平二次元の単層流れとした。計算は大阪湾で卓越しているM2潮で潮流計算を行い、求められたEuler流場にフロート(標識粒子)を放出し、Lagrange的に粒子追跡をおこない、流れを可視化した。また同時にせん断、回転、伸縮、発散を求めた。次に大阪湾についてM2潮で全域の流れを計算し、矩形湾実験と同様な方法で実験を行った。また大阪湾の潮流計算と粒子追跡結果は中国工業技術研究所の水理実験¹⁾と比較した。また、地震で変化したと想定した地形で潮流計算を行い、流れの変化や海水交換の変化を調べた。

3. 流れの基礎方程式とフロートの運動方程式

水平二次元単層流れにおいて、①. 流体は非粘性非圧縮性である。②. 圧力は静水圧分布である。③. 鉛直方向の流れの時間的、場所的変化量は無視する。と流れを仮定すると、長周期波の運動方程式と連続の式は近似的に次式でそれぞれあらわされる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h) C^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h) C^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h) u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h) v] = 0 \quad (3)$$

*正会員 (株)アイ・エヌ・エー海岸環境部 (〒112 東京都文京区関口1-44-10)

**正会員 長岡技術科学大学工学部建設系

***正会員 通産省中国工業技術研究所

上式で求められた流れは運動方程式と連続式を差分化し、各格子点で流速と水位変動を求める手法であり、得られた解はEuler的な流れである。しかし、海水交換などを考えるとき、水粒子がどのように移動するかLagrange的に追跡する必要がある。そこで、潮流計算で求められたEuler流れに、水粒子に相当するフロート（標識粒子）を放出し、それがどのように移動していくかをLagrange的に追跡することとした。

i 番目のフロートの時間 t_{m-1} における位置を $X_i(t_{m-1})$ とすると、フロートの移動速度と潮流場の関係は次式であらわされる。

$$d X_i / d t = U(X_i(t), t) \quad (4)$$

式(4)を時間 t について t_{m-1} から t_m まで積分しTaylor級数に展開すると次式のようになる。

$$X_i(t_m) = X_i(t_{m-1}) + \int [U(X_i(t), t) + \dots] dt \quad (5)$$

式(5)において、時間間隔が小さいことから、右辺第2項までを残しより高次の項を省略する。また、この式では移流だけで乱れや分子拡散などの拡散を考慮しておらず、物質の平均した移動を求める式である。よって拡散を考慮する場合は、式(5)中に乱れの項 $a \gamma$ を加える。

$$X_i(t_m) = X_i(t_{m-1}) + \int U(X_i(t), t) dt + a \gamma \quad (a: \text{比例定数}, \gamma: \text{乱数}) \quad (6)$$

比例定数 a は点源染料拡散理論で、染料が点源から単位時間中に移動する距離の分散と(6)式より求まる係数で、 $a^2 = 2 K d t$ (K : 拡散係数) である。乱数は (γ, γ^2) を与える、ここで γ : 平均, γ^2 : 分散である。本研究では(0, 1)の正規乱数を与えることとした。以上、式(5)または(6)へ潮流計算結果の流速を用いて計算することにより、フロートの位置を求め、その運動を追跡することができる。本研究では大阪湾の粒子分布図では式(6)を、それ以外の粒子追跡図などでは式(5)を利用した。

4. 計算条件

実験湾と大阪湾における計算条件を表-1に示す。

表-1 計算条件

諸元	矩形湾（実験）	大阪湾
計算対象領域		昭島-海南以北、東二見-江井以東の海域
格子間隔	2 km	2 km
水深	30 m一様水深	海図より読み取り
タイムステップ	180秒	180秒
コリオリ力	なし	$f = 2\omega \sin \phi$, $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60)$ $\phi = 35.5^\circ \text{ N}$
粗度係数	$C = (1/n) \times (h)^{1/6}$, $n = 0.026$	
強制水位 振幅、位相差	振幅: 0.5m, 位相差: 0, 波種: cos波	昭島、海南、東二見、江井における 潮汐調和定数
1周期の長さ	12時間	12時間
河川流入	なし	なし

なお、地震後、明石海峡付近で5mの隆起があったと仮定し、図-1に示すように幅2km×長さ4kmの範囲で現況の水深よりも5m水深を浅くした。

5. 計算結果、考察

①. 矩形湾：

図-2に潮流計算より求めた潮汐残差流図を示す。図-3に粒子放出後から2周期までの粒子分布の変化図を示す。また、図-4に南流最大時の粒子分布・発散・伸縮・せん断・回転を示す。図-2より、湾口部を中心にして線対称に循環流が生成していることがわかる。また、図-3より、海水は湾口の両端から流出していることがわかる。また、図-4より粒子の移動経路は伸縮とせん断に主に依存していることがわかる。

②. 大阪湾：現地形における潮流計算を図-5に示す。図は明石海峡において東流最大流速時である。また、図-6(1)と図-6(2)に現況と地震後の想定地形における潮汐残差流図をそれぞれ示す。次に図-7(1)と図-7(2)に現況と地震後における10周期間粒子追跡図をそれぞれ示す。また、図-8(1)に粒子放出時の粒子配置図を、図-8(2)と図-8(3)に地震前と地震後の5周期後の粒子分布図をそれぞれ示す。さらに明石海峡と友が島水道を境界とする大阪湾内外の海水交換を求めたので、結果を表-2に示す。

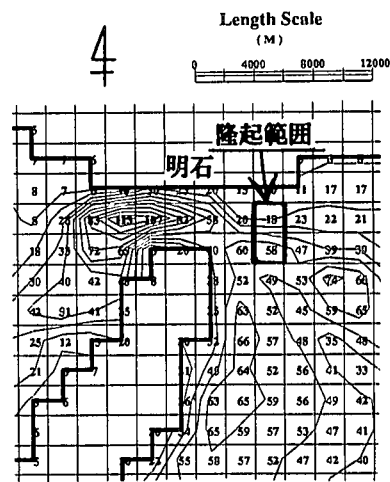


図-1 隆起範囲(明石付近)

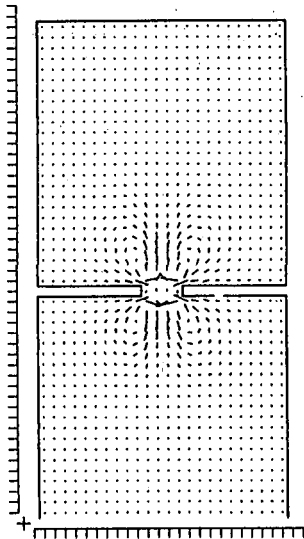
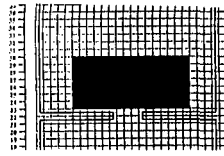
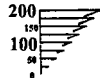
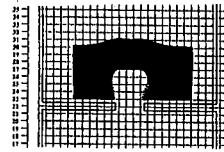


図-2 矩形湾の潮汐残差流

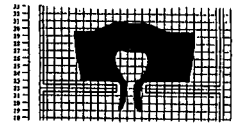
潮汐残差流
Vector Scale
(CM/SEC)



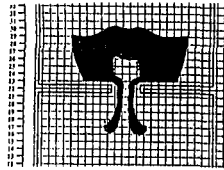
放出時 (北流最大)



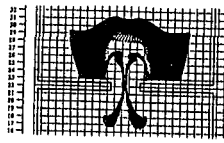
1/4周期 (憩流)



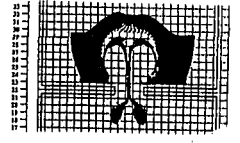
1/2周期 (南流最大)



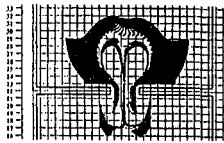
3/4周期 (憩流)



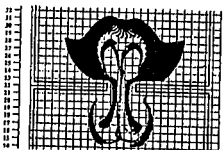
1周期 (北流最大)



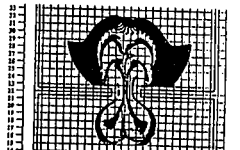
5/4周期 (憩流)



3/2周期 (南流最大)

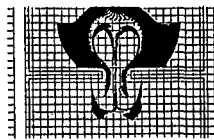


7/4周期 (憩流)



2周期 (北流最大)

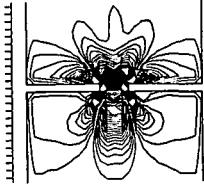
図-3 粒子分布の変化 (放出~2周期後)



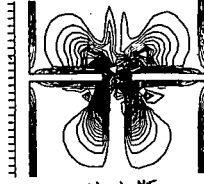
3/2周期 (南流最大)



発散



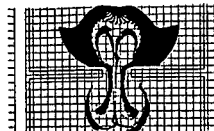
伸縮



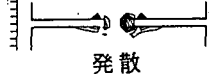
せん断



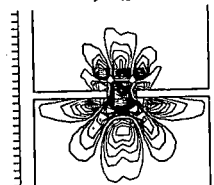
回転



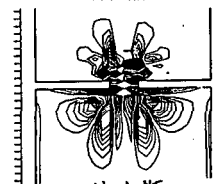
7/4周期 (憩流)



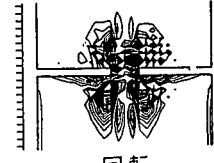
発散



伸縮



せん断



回転

図-4 粒子分布・発散・伸縮・せん断・回転

(放出後 3/2周期, 7/4周期)

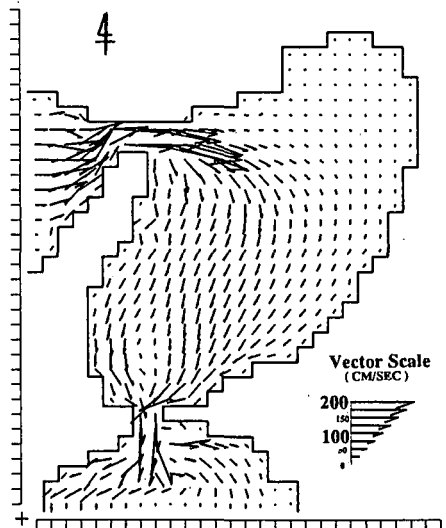


図-5 潮流計算結果 (明石付近東流最強時)

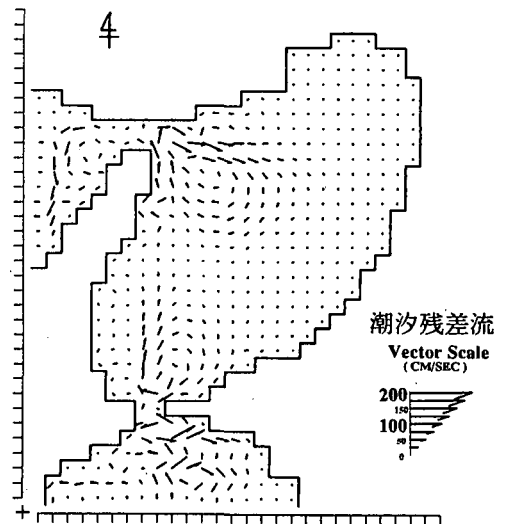


図-6 (1) 潮汐残差流 (現況)

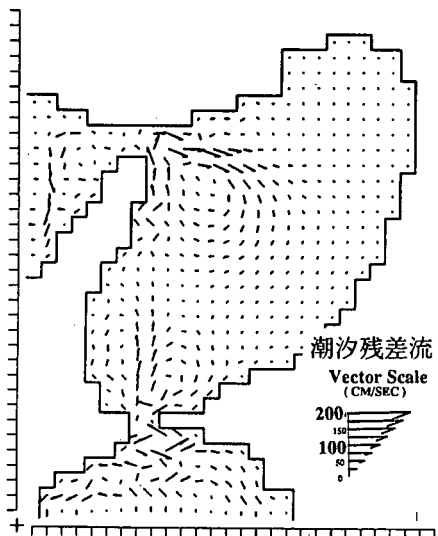


図-6 (2) 潮汐残差流 (地震後)

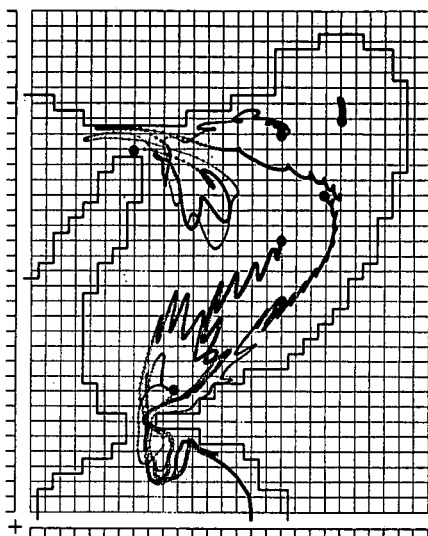


図-7 (1) 粒子追跡結果
(10周期間、現況)

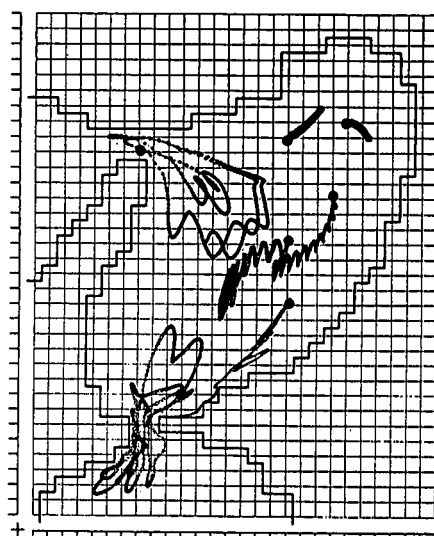


図-7 (2) 粒子追跡結果
(10周期間、地震後)

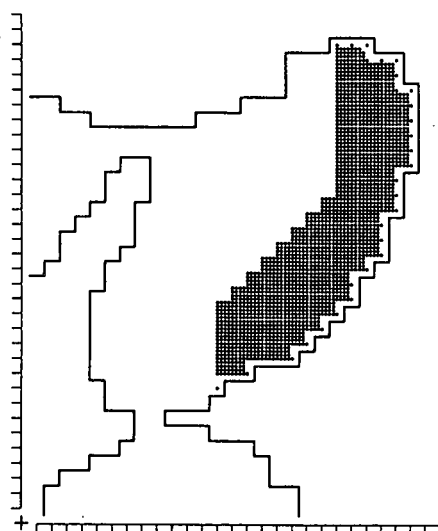


図-8 (1) 粒子分布 (放出時)

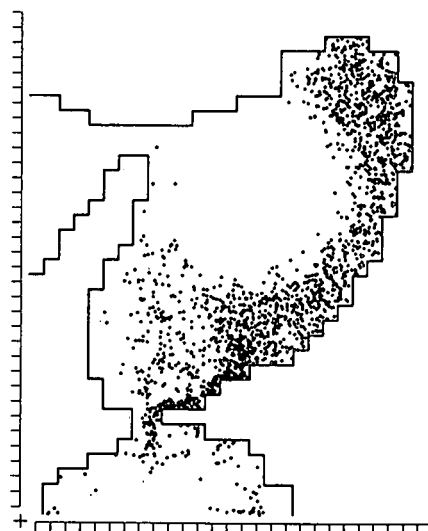


図-8 (2) 粒子分布
(5周期後、現況)

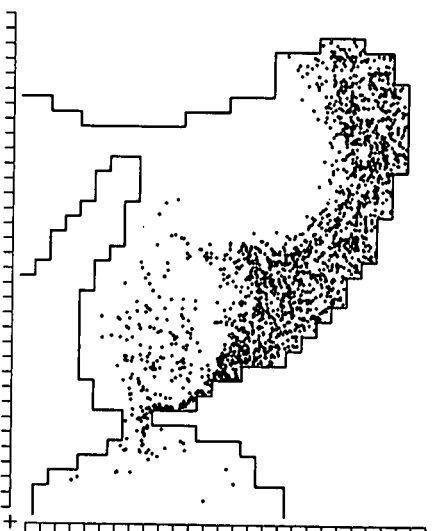


図-8 (3) 粒子分布
(5周期後、地震後)

表-2 海水交換による大阪湾内水の半減曲線

マーカ数/始めのマーカ数

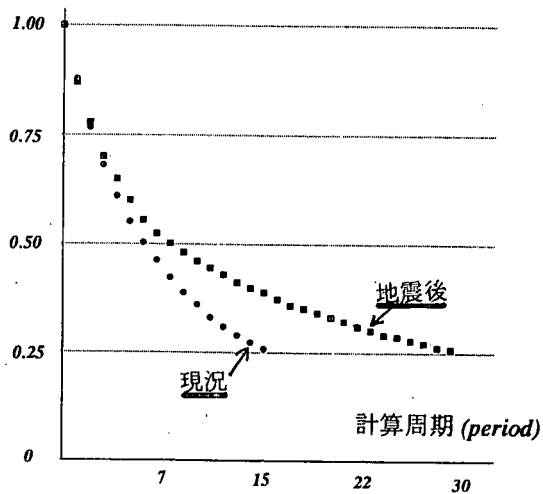


図-5より、明石海峡付近では最大流速は2 m/sec弱であり、湾中央部では流速が大きい、湾奥部ではほとんど流速がない。また、図-6(1),(2)の潮汐残差流でも、湾中央部に大きな循環流があるのに対し、湾奥部ではほとんど流れがないことがわかる。図-7(1)と(2)比較すると、現況の地形で明石海峡で放出した粒子は10周期後には湾右側まで移動しているのに対し地震後の地形では同地点で放出した粒子は湾中央部を循環しているだけである。また、現況で湾右側から放出した粒子は10周期後には友が島水道から流出してしまっているのに対し、地震後では同地点から放出した粒子は湾中央部まで移動しただけである。また、湾奥部では、流れが逆転してしまっている。さらに図-8(2)と(3)を比較しても、地震後の方が循環流に規模が小さくなっていることがわかる。次に、表-2より地震後の海水交換は半減期は7周期から9周期へ、1/4減期は15周期から30周期へと悪くなった。これから、湾中央部よりも湾奥部の海水交換が悪くなっていることがわかる。これらの結果より、地震後は大阪湾の循環流の規模が小さくなっていることがわかる。

6. 主要な結論

基礎矩形湾：

- ・粒子追跡より湾口部の海水交換の過程を可視化した。
- ・放出した粒子群の運動は主に伸縮とせん断の影響を受けている。

大阪湾：

- ・明石付近での水深の変化による流れのシアが大阪湾の循環流に影響を与えている。
- ・明石海峡付近の海底に隆起が生じた場合、大阪湾の潮流の湾奥方向への流速が弱くなり、潮湾中央部での汐残差流の規模は弱くなり、循環流の性質が変わる。
- ・大阪湾の海水交換は地震後、半減期で7周期から9周期へ、1/4減期で15周期から30周期へ変化する。

◎大阪湾の流れを決定しているといえる明石海峡付近において発生した兵庫県南部地震は大阪湾全体の環境を変化させてしまう恐れがあり、より精密な測量と対応策を検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1)塩沢孝之ら；中国工業技術試験所報告，8，1992
- 2)日本経済新聞，p13，25. Jan. 1995
- 3)宇野木早苗ら；海洋技術者のための流れ学，東海大学出版会，1990
- 4)柳哲雄；沿岸海洋学-海の中でのものはどう動くか-，恒星社厚生閣，1989
- 5)Kaneko, Y., Horie, t., Murakami, K. ; Numerical Simulation on Tidal Currents and Pollutant Dispersion due to Alternating Direction Implicit Method. -Application to Osaka Bay-, Report of the Port and Harbour Research Institute, 14, No. 1, 1975
- 6)Yanagi, T. and Yoshikawa, K. ; Generation Mechanisms of Tidal Residual Circulation, J. Oceanogr. Soc. Japan, 39, 156-166, 1981. 6)Robinson, I. S. ; Tidal vorticity and residual circulation, Deep-See Research, 28A, No. 3, 195-212, 1981.
- 7)Zimmerman, J. T. F. ; Dynamics, Diffusion and Geomorphological Significance of Tidal Residual Eddies, Nature, 290, 549-555, 1981.
- 8)Cheng, R. T. and Casulli, V. ; On Lagrangian Residual Currents With Applications in South San Francisco Bay, California, Water Resources Research, 18, No. 6, 1652-1662, 1982.
- 9)宝田盛康；自然水域における拡散・分散過程とその模型手法に関する研究，科研費総合A報告(No. 02302065)，210-221.
- 10)伊藤剛ら；土木工学における数値解析/流体解析編，株式会社サイエンス社，1974.
- 11)水本久夫；微分積分学の基礎，培風館，1983.
- 12)國司秀明ら；潮流による海水交換(オイラー・ラグランジュの手法を用いた数値実験)，科研費B報告(No. 00446039)，1982.
- 13)森正浩；数値計算による広島湾の流れと物質の移動に関する研究，長岡技術科学大学研究報告No. 15, 1994