

폐쇄성 내만에서의 Estuary 순환의 중요성

김종인 · 류청로
부경대학교 해양공학과

Dynamics of Estuarine Circulation in Semi-closed Inner Bay

JONG-IN KIM AND CHEONG-RO RYU

Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

KEY WORDS: Estuarine circulation 하구순환, Semi-closed inner bay 폐쇄성 내만, 3-D baroclinic flow model 3차원 Baroclinic 흐름모델, Tidal residual current 조석잔차류, Suspended solids particles 부유토사입자, Settling velocity 침강속도, Sedimentation characteristics 퇴적특성

ABSTRACT: In the present study, we conducted numerical experiments using a three-dimensional baroclinic equation model and a Lagrangian method for clarifying the hydrodynamics in Osaka Bay under the yearly mean discharge and visualizing the behaviour of particles of different settling velocity discharged from Yodo River and sedimentation pattern on the sea bottom. Particles are transported from the Yodo River to the south direction by the residual circulation of the bay head at the first stage, and after most of suspended solids particles are settled down at any layer and returned in the south-east coastal area through bottom layers by an estuarine circulation. The results show that estuarine circulation plays an important part of suspended solids transportation in the Osaka Bay.

1. 서 론

오사카만과 같이 폐쇄성이 강하고 육지로부터 대량의 하천수가 유입하는 내만의 하구 주변해역에 있어서는, 해수와 하천수사이의 밀도차에 의해 형성되는 밀도성층이 발달해서 상층과 하층의 흐름은 유형이 서로 다른 유동특성을 나타낸다. 이러한 연직방향의 유동구조특성에 의한 흐름이 항 내의 물질수송에 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 오사카만과 같이 Yodo river, Yamato river 등의 크고 작은 하천이 유입하는 폐쇄성 내만에 있어서는, 성층 효과뿐만 아니라 지구자전의 효과가 작용하여 복잡한 유동구조가 형성된다. 따라서 이러한 유동구조특성으로 인하여 만 내 물질의 거동특성 또한 크게 변화한다.

그러므로 본 연구에서는 오사카만의 연직유동구조를 검토하기 위하여 3 차원 baroclinic 흐름에 대한 수치실험을 실시하였다. 이 수치실험을 통하여 얻어진 유동장 및 확산장 중에 토사의 대표입경이 0.001 mm ~ 0.008 mm 인 3종류의 수치입자를 Yodo river 하구부로부터 방류하여 각 입자의 침강속도를 고려한 3 차원 Lagrangian 입자추적실험을 실시하였다. 그 결과를 근거로 하여 Estuary 순환이 오사카만 내의 물질수송에 어떠한 역할을 하는가에 대하여 규명하고자 한다.

2. 수치실험의 개요

좌표계는 cartesian coordinate system을 사용하며, 평균해면의

한 점을 원점으로 잡고 연직방향으로 z축을 잡는다. 3차원 유동을 지배하는 기초방정식은 질량, 운동량 및 스칼라량의 보존칙을 근거로하여 유도된다. 스칼라량의 보존칙으로서는 수온편차 및 염분편차의 확산방정식이다. 비압축성 유체에 대해 시간 평균한 후의 기초방정식은 김 등(1999)과 같다.

차분 격자망에는 김 등(1999)에 나타내고 있는 바와 같은 staggered grid를 사용한다. 이 격자망을 사용하면 각 변수의 정의위치 및 대상으로 하는 control-volume이 각각 달라진다. 따라서 각 변수의 정의는 다음과 같이 정한다. 이 결과 ζ , P , ρ , T , S 의 정의위치는 동일 직선상에, 또한 U , V 는 동일평면상에 정의하고, x , y 방향으로 각각 반 격자씩 비껴서 정의된다.

차분방정식의 유도는 Sugihara et al.(1987), Iwasa(1983)에 의해 채용된 control-volume법을 사용한다. 즉 운동방정식에 있어서, 시간에 관해서는 원칙적으로 중앙 차분(leap frog method)을 쓰고, 이류항에 대해서는 전진차분법으로, 확산항에 대해서는 이류항 및 Coriolis항의 시간 step 보다 1 step 늦은 값(즉 $2\Delta t$ 의 시간간격의 전진차분을 취한 값)을 택한다. 왜냐하면 중앙차분에서는 확산항을 다른 항과 같은 시간 step의 값을 써서 계산하면, 항상 불안정하기 때문이다(Sugihara · Onishi, 1978)4.

수온 및 염분의 확산방정식에 대해서도 운동방정식과 같은 가정하에 차분화한다.

흐름장의 계산에는 가중평균 파라메타를 사용한 음해법을, 또 수온 및 염분의 산정에는 완전 양해법에 의거하여 계산한다. 가중평균 파라메타는 흐름의 안정성을 고려해서 0.75로 한다. 또, 시간의 차분화에 중앙차분을 사용하므로 이때 발생하는 계산결

Table 1 Conditions for numerical simulation

Item	Simulation condition
Time interval	30 sec
Horizontal mesh interval	1 km
Vertical direction resolution(14 levels)	2 m, 2 m, 2 m, 2 m, 2 m, 2 m, 2 m, 2 m, 2 m, 2 m, 4 m, 6 m, 10 m, 10 m
Summer atmospheric condition(7, 8)	· Air Temp.: 26.8 °C · Vapor pressure: 26.2 hPa · Cloud: 6.7
Sea boundary condition(7,8 mean)	· Seawater Temp. : 22.0 °C · Salinity : 32.0 ‰
Discharge boundary condition	· Temperature : 28 °C · Salinity: 20 ‰ · Sigma-t : 22.508
Tide	M2
Drag coefficient	· Sea floor: 2.6×10^{-3} · Wall: 1.0×10^{-3}
Horizontal eddy coefficient	SGS Model : 50 ~ 0.1 m ² /sec
Vertical eddy coefficient	Neutral cond. : 0.005 m ² /sec
Coriolis parameter	$8.21 \times 10^{-5}/\text{sec}(N35^\circ)$
Total computing time	60 tides

과의 오차를 소거하기 위하여 30 steps에 1번 Matsumo 방법에 의해 시간의 차별화에 전진차분을 도입한다.

수치계산에서 대상으로 하는 대상영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 오사카만을 중심으로 Akashi channel과 Kitan channel을 포함한 64 km × 64 km 인 해역을 대상으로 하였다. 계산조건은 Table 1에 나타난 바와 같이 계산격자간격은 수평방향으로 1 km, 연직방향으로 수심 20 m 까지는 2 m 간격이며, 그 보다 깊은 해역에서는 4 m, 6 m, 15 m, 15 m 의 14층으로 분할하여 계산하였다. 이 계산에서 사용한 3 차원 Baroclinic 흐름의 수치모델 및 와동점성계수 등의 계 계수는 Nakatsuji 등(1994) 과 같다. 하천수의 유입량으로서 Yodo river 의 평균유량 271 m³/s 만을 고려하여 3 차원 Lagrangian 입자추적실험을 실시하였다. 대상으로 한 조위변동은 반일주조(M2 분조) 만을 대상으로 하였다. 수치입자의 이동에 영향을 미치는 물리량은 Baroclinic 흐름의 수치계산 등으로부터 얻어진 입의 시간, 입의 점에 있어서의 3 방향유속과 와동확산계수이다. 3 방향의 유속에 대해서는 수치입자의 침강속도를 고려한 연직방향의 이류효과를, 와동확산계수는 정규난류를 발생시켜서 확률적인 확산효과를 도입하였다. 수치입자의 방류방법은 10,000 개의 입자를 일시에 Yodo river 하구에서 방류하였다. 입자추적실험시 사용한 입자의 대표입경은 0.001 mm ~ 0.008 mm 범위의 3 종류의 입자를 선정

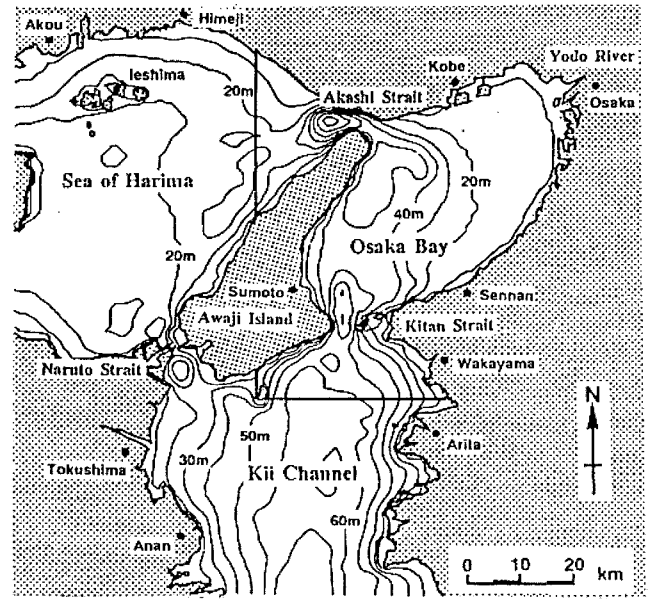


Fig. 1 Map of bottom topography and computation domain

하였으나, 수치실험결과 입경이 $\phi = 9\mu\text{m}$ 입자의 거동 및 퇴적분포는 입경이 $\phi = 10\mu\text{m}$ 과 $\phi = 8\mu\text{m}$ 입자의 중간정도의 거동 및 퇴적분포를 나타내었으므로 $\phi = 10\mu\text{m}$ 과 $\phi = 8\mu\text{m}$ 입자의 거동 및 퇴적분포특성을 중심으로 논의하였다. 또한 입자의 형상은 구형으로 가정하였다. 이 때 수치입자의 입경은 ϕ 척도 (입경이 $1/2^\circ$ mm 로서 표시되는 ϕ 값) 로서 구분하고, 각 입자의 침강속도는 Hoshika 등(1994) 이 오사카만 내의 3개 정점에서 실측을 통하여 구한 식 $W_d = 4.14 \times D^{0.91}$ 에 의거하여 산출하였다. 여기서, D는 토사의 직경을 나타낸다

3. 수치실험결과 및 고찰

3.1 Yodo river 평상유량 방류 시 오사카만 내의 유동 특성

Fig. 2는 Yodo river 평상유량시의 수표면으로부터 1 m, 5 m, 9 m 의 수심에서의 조석잔차류의 유속벡터를 나타낸 것이다. 수심 1 m 층에서는 타 수심에서의 유속에 비하여 보다 큰 유속을 나타내고 있으며, Yodo river 하구로부터 남쪽 및 남서쪽을 향하는 유동장이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 수심 5 m 층에 있어서는, 오사카만 북동부해역에 시계방향으로 회전하는 환류가 형성되고 있다는 것을 알 수 있다. 한편, 수심 9 m 층에서는 상층부를 통해서 하구로부터 남쪽 및 남서쪽을 향하는 유량을 공급하기 위하여 만의 내측(동쪽)을 향하는 흐름이 형성되고 있다.

Fig. 3는 front를 직교하는 단면 A 내의 조석 잔차류의 연직분포를 나타낸 것으로 동쪽해안으로부터 약 17 km 떨어진 해역에 tidal front 가 형성되고 있음을 알 수 있다.

특히, 표층으로부터 수심 6 m 사이의 층을 통해서 서쪽을 향해서 흐르는 유량을 공급하기 위하여, 수심 9 m 이하의 층을

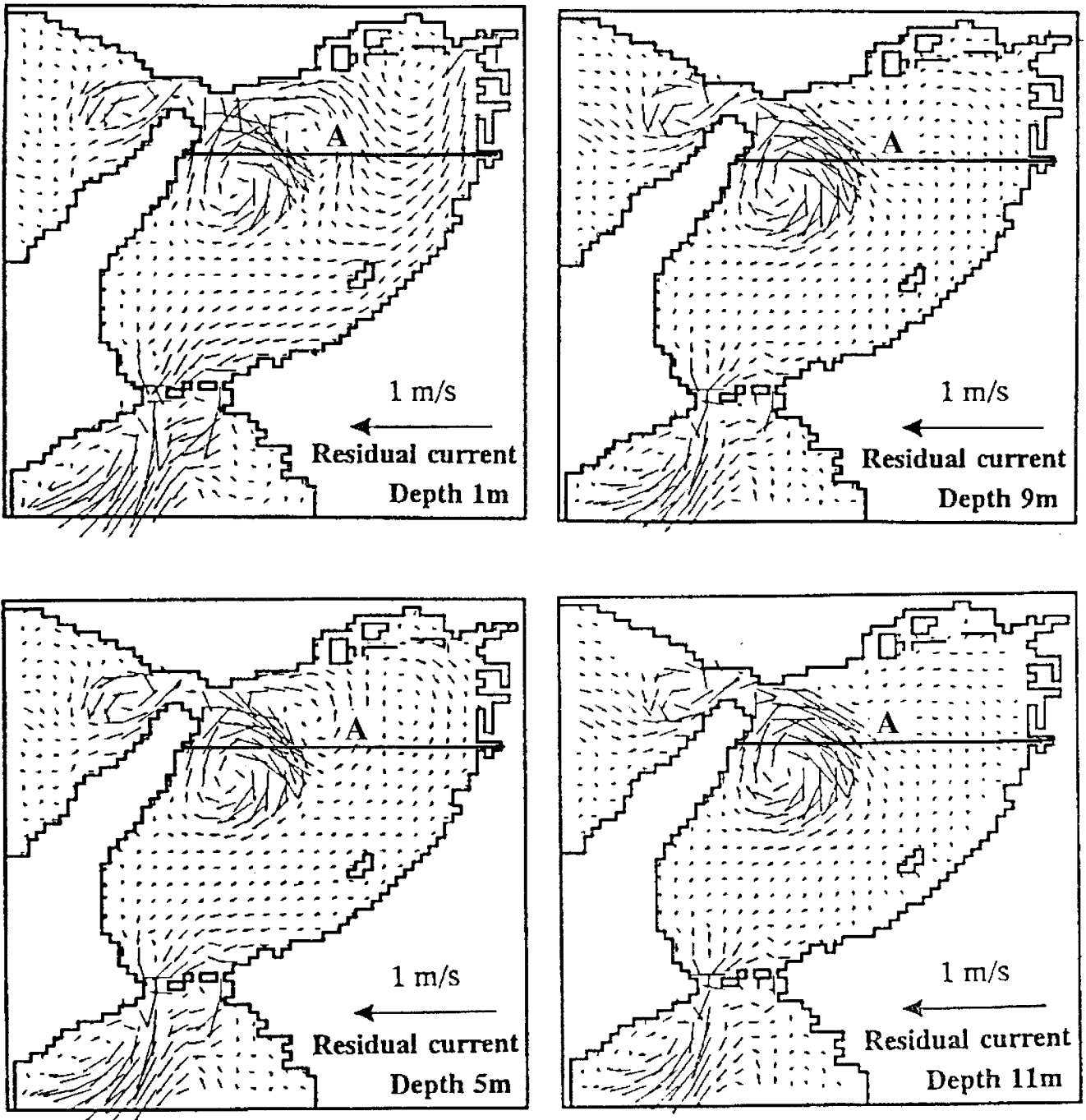


Fig. 2 Tidal residual current at the depth of 1 m, 5 m, 9 m, and 11 m in Osaka bay

통하여 만의 내측을 향하는 흐름이 형성되고 있다는 것을 뚜렷이 볼 수 있다. 이상의 결과를 이용하여 예측해 볼 수 있는 것은 하천을 통하여 폐쇄성 만내로 유입되는 부유토사 및 부유성 오염물질 등은 표층을 통하여 front 가 형성되고 있는 해역까지 이류된 후, 혼합 및 침강하면서 하층의 흐름에 의하여 수송될 것이라는 것을 예측할 수 있다.

3.2 입경 $\phi=10(0.0015 \text{ mm})$ 인 입자의 거동특성

Fig. 4은 입자추적실험 개시로부터 5, 10, 15, 30 조석후의 입자군의 수평 및 연직분포를 나타내고 있다. 평면상에 입자의 거동을 3차원적으로 표현한다는 것은 어려운 일이므로, 수심방향으로 적분한 수평분포와 Fig. 2의 연직방향 단면 A에 정사형한 연직분포를 동시에 나타내었다. Yodo river 하구에서 방류로부터 5조석 후의 입자군은 Yodo river 하구로부터 남서방향으로 향할 후, 수표면 으로부터 수심 6 m 사이의 층을 통하여 북서방향으로 운반된다. 이때 표층에 위치하고 있는 입자군은 입자

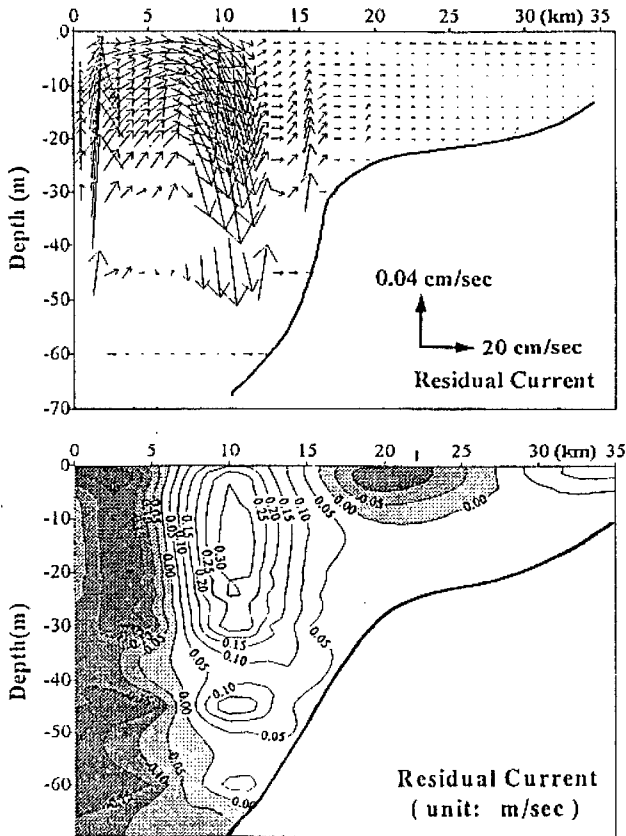


Fig. 3 The vector and the velocity distribution of the north and the south direction of the tidal residual current on the vertical cross-section along A-line shown in Fig. 1

의 중량에 의한 침강속도보다 수평방향의 흐름의 영향을 크게 받아 수평방향으로 확산되나, 연직방향으로는 침강 및 확산되지 않고 있으며, 해저에 침강하여 퇴적한 입자는 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다.

10 조석 후에 이르면, 입자군은 Kobe 주변해역을 통과하여 Akashi channel 부근해역까지 도달하고, 시계방향으로 회전하는 Okino-Se 환류에 휘말려들고 있는 입자군과 Rokko islands 부근해역으로부터 남쪽방향으로 확산되고 있는 입자군으로 분리되고 있다는 것을 알 수 있다. 이 때의 입자군의 연직분포로부터 보면, 동쪽해안으로부터 약 22 km 떨어진 해역에 tidal front 가 형성되고, 그 아래를 통해서 입자군이 동쪽으로 운반되고 있다는 것을 명백히 알 수 있다. 게다가 15 조석 후가 되면, 이러한 양상은 한층 더 뚜렷이 볼 수 있다. 20 m의 등 수심선 부근해역에 분포하고 있던 입자군이 또 다시 만 내측으로 되돌아와서, 수심 5 m ~ 15 m 사이의 층에 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 30 조석 후에는, 만의 서쪽해역에 분포하고 있는 입자군은 Akashi 해협과 Kii 해협을 연결하는 해역에 존재하는 강한 조류와 연직혼합에 의하여 오사카만 전 해역으로, 또한 연직방향으로도 확산되어간다. 수심 8 m ~ 15 m 사이의 층을 통하여 만의 내측을 향하던 입자군의 일부는 상층류에 의하여 연행되고, 상층류의 하부수심에 잔류중인 입자군은 남서방향을 향하는 저층류에 의하여 만의 동쪽해안을 따라서 운반되고 있다는 것을 알

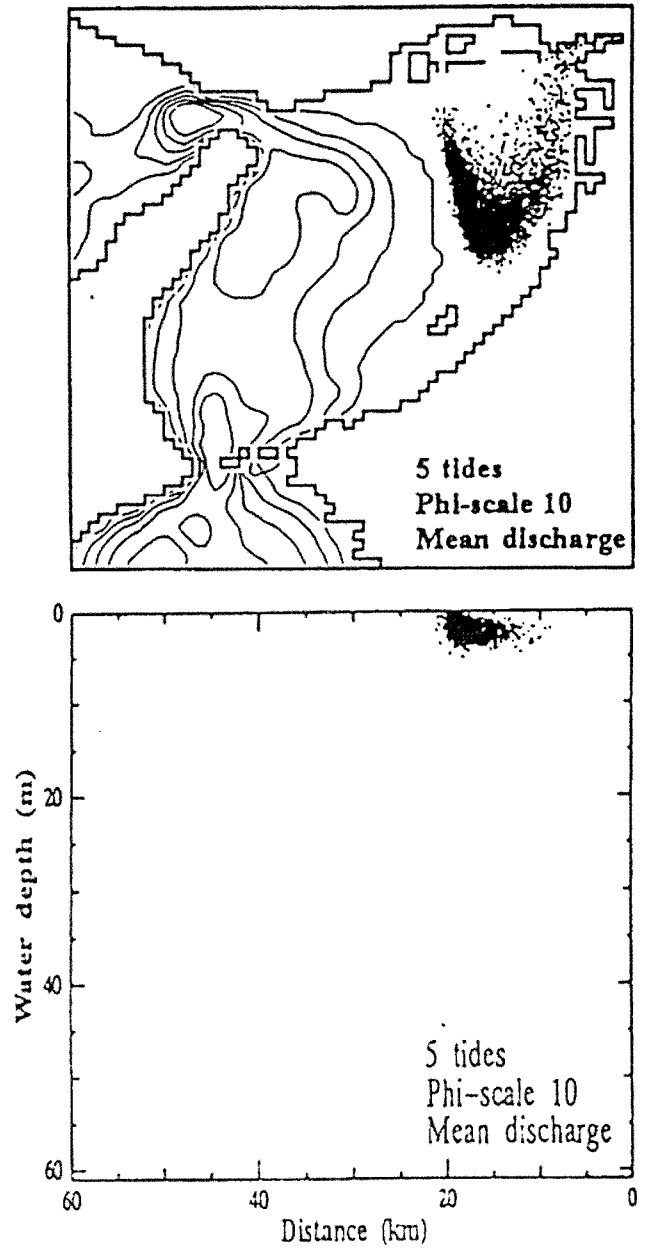


Fig. 4(a) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 10$ in 5 tides

수 있었다.

3.3 입경 $\phi = 8(0.0015 \text{ mm})$ 인 입자의 거동특성

Fig. 5는 $\phi=8$ 인 입자군의 조석 변화에 따른 수평 및 연직분포를 나타낸 것이다. 5조석 후 $\phi=8$ 인 입자군은 $\phi=10$ 인 입자군에 비하여 침강속도가 크기 때문에 하구전방해역에 형성되고 있는 저층류에 의해서 운반되고, 입자군의 선단부는 Izumiootsu 까지 도달한다. 이 때 연직방향으로는 수심 10 m, 12 m, 14 m 및 16 m의 수심에 도달하여 횡봉의 형태로 나타나, 대부분의 입자군은 수심이 10 m ~ 18 m의 해저에 퇴적하고 있음을 알 수

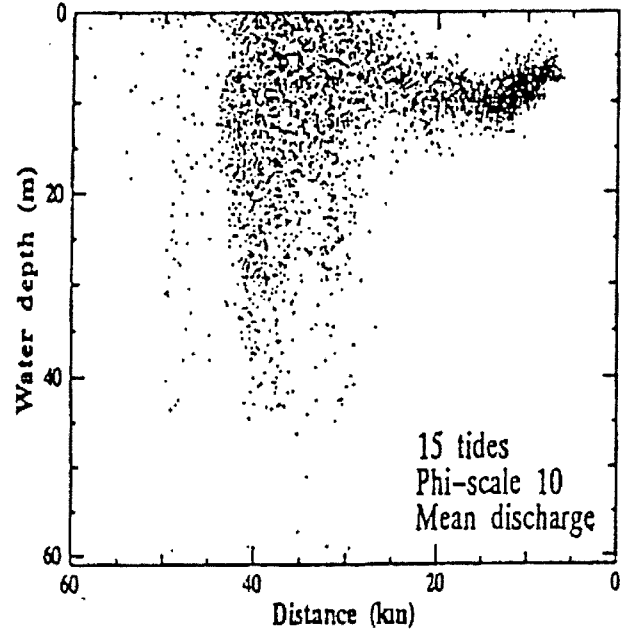
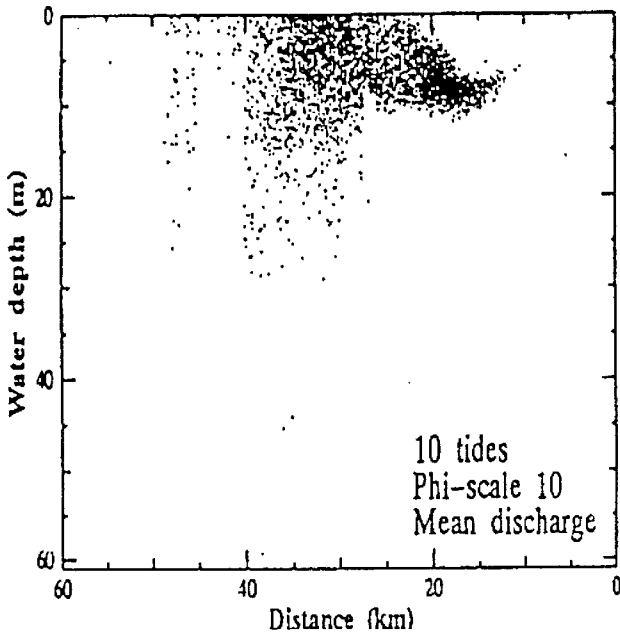
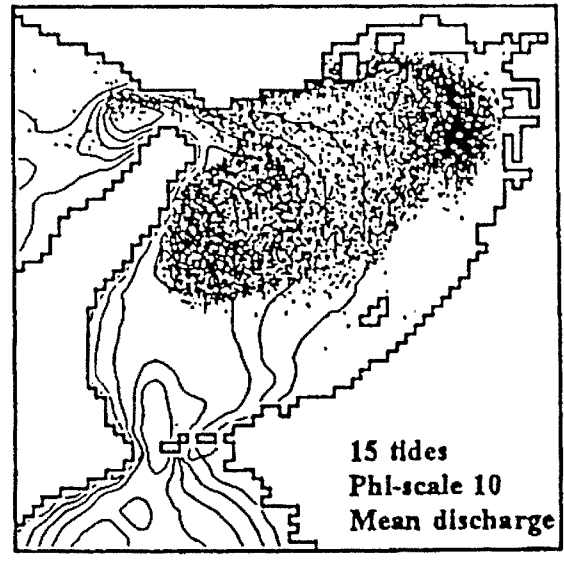
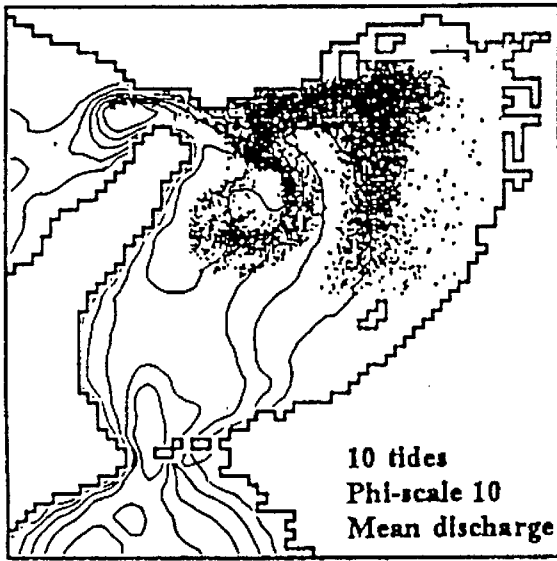


Fig. 4(b) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 10$ in 10 tides

Fig. 4(c) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 10$ in 15 tides

있다. 반면, 30 조석 후에는 $\phi=8$ 인 입자군의 대부분은 수심 20 m 이하의 해저에 퇴적하여 흐름에 의해서 이동하지 않고 있음을 알 수 있다.

이상의 계산결과로부터 오사카만에 있어서도 Estuary 특유의 연직순환이 존재하고, 그 유동에 의하여 물질수송이 이루어지고 있다는 것을 명백히 알 수 있다. 따라서 하천수 유입 및 제반 기상요인으로 인하여 밀도성층이 발달하고 있는 해역에서 침강속도를 가진 부유물질 및 오염물질의 확산범위 예측할 경우에는 필수적으로 연직방향의 유속 및 대상물질의 침강속도를 고려하여 한다는 것을 알 수 있다.

3.4 Yodo river 평유량시 입자군의 퇴적특성

Fig. 6은 입경척도가 $\phi=10$ 과 $\phi=8$ 인 입자군의 30 조석 후의 퇴적분포를 나타낸다. $\phi=10$ 인 입자군의 퇴적영역은 Akashi 해협 및 Okino-Se 근방에 분포하고 있음을 알 수 있다. 또 하나의 퇴적영역은 Rokko islands 전방해역으로부터 오사카 항을 통해서 관서공항도에 걸쳐 더 상으로 10 m ~ 12 m 사이의 수심을 가진 해저에 원호 상으로 퇴적하는 것과는 달리, $\phi=8$ 인 입자군의 경우에는 오사카 남향으로부터 Izumiotu 사이에 해안으로부터 수심 18 m까지의 해저에 퇴적하는 특징을 나타내고 있다. 입자의 크기에 따라 이러한 퇴적영역의 차이가 크게 나타나고 있는 것은 Yodo river 하구로부터 하층부에 존재하는 저층류의 유

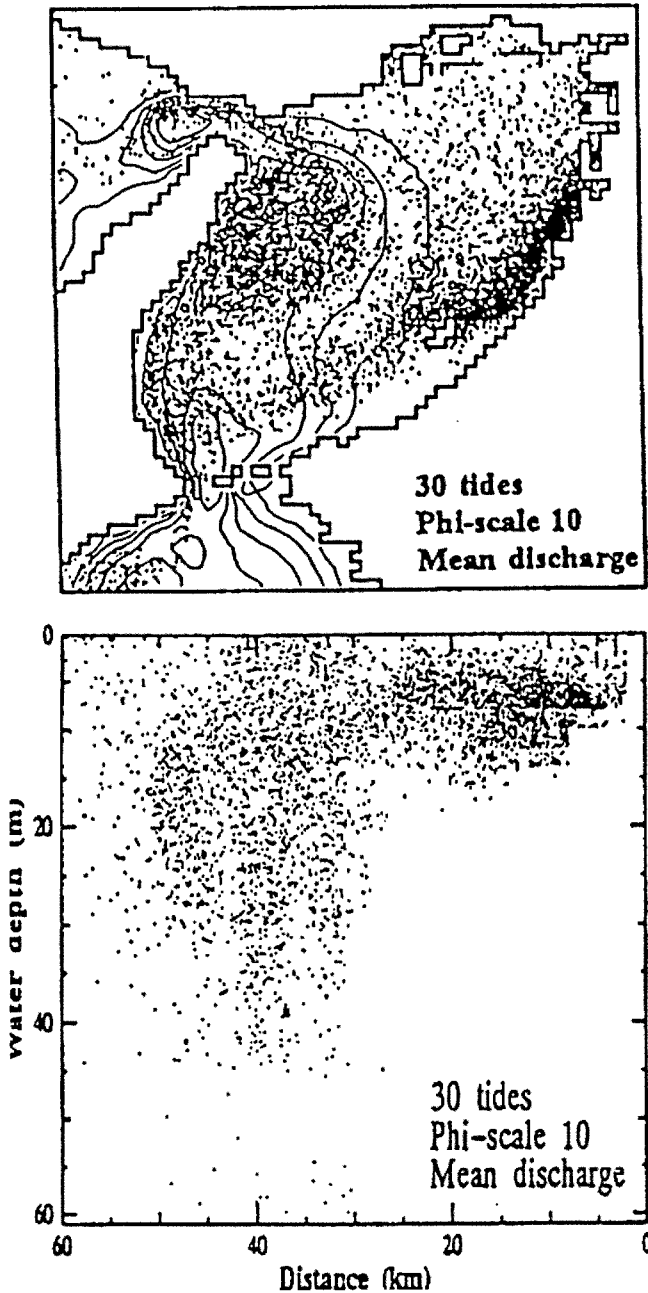


Fig. 4(d) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 10$ in 30 tides

유속크기와 각 입자가 가지는 침강속도의 차에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연직방향의 유동구조를 가시적으로 나타내기 위하여 Yodo river 로 부터 토사입자와 같은 침강속도를 가진 수 치입자를 방류하여 추적하는 수치실험을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

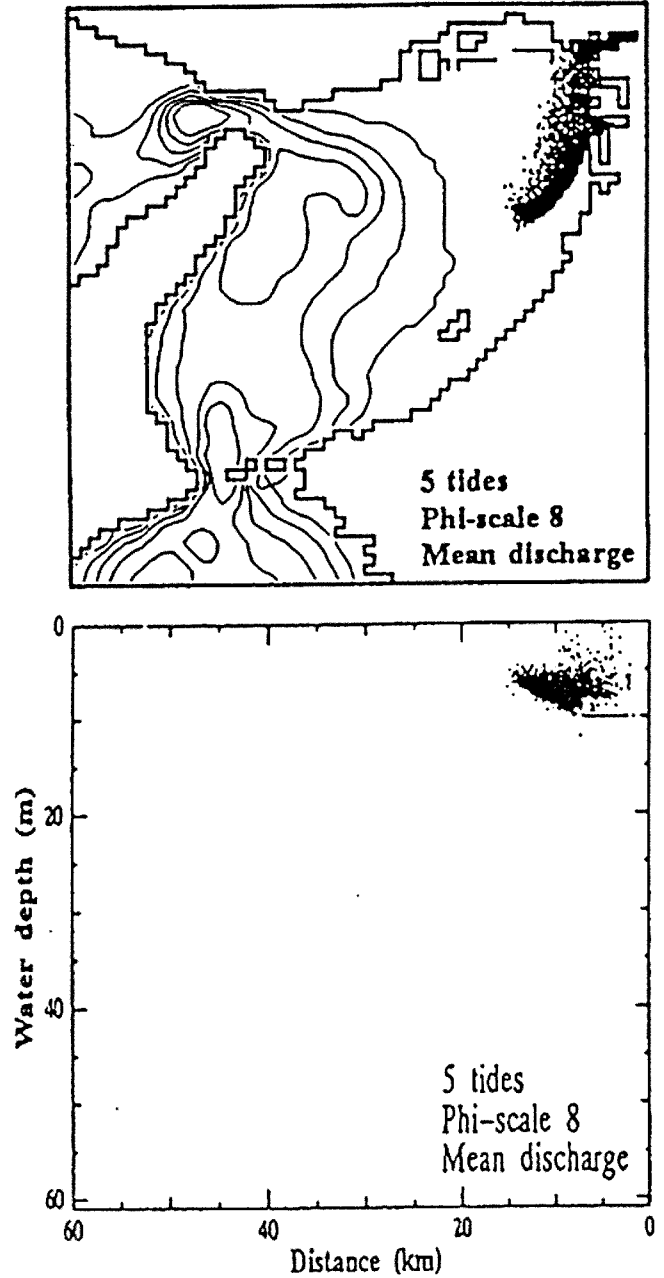


Fig. 5(a) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 8$ in 5 tides

- (1) 오사카만의 내만 측 해역에서는, Yodo river 등의 하천수가 유입됨으로써 밀도성층이 발달하여 상층부와 하층부에서는 서로 다른 흐름이 형성된다.
- (2) Yodo river 로부터 방류된 입경척도가 $\phi=10$ 인 입자는 만 내측해역의 상층부를 통하여 Nishinomiya 환류에 의하여 운반되고, Kobe 연안, 뿐만아니라 Akashi해협 · Okino-Se 해역까지 확산 된다. 한편, 이동과정에서 tidal front 주변해역에서 그 아래의 수 심으로 침강한 입자는, 하층류에 의하여 Yodo river 하구 · 동부 해안방향으로 수송된다.

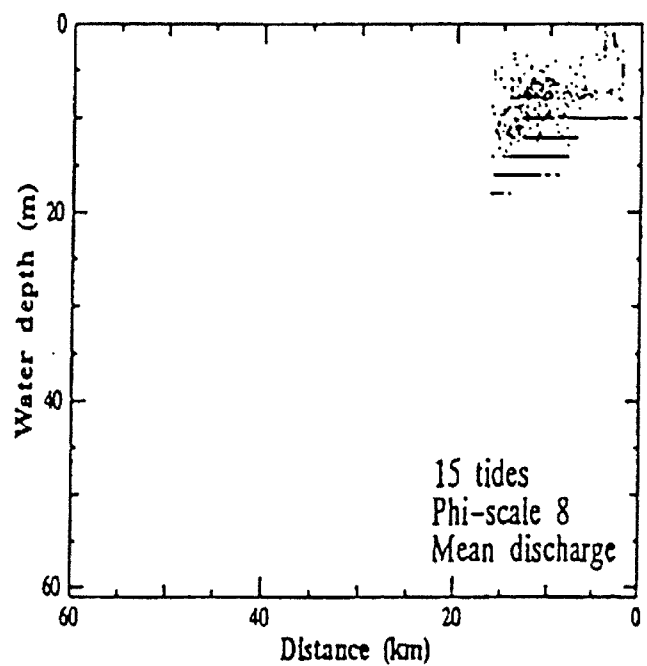
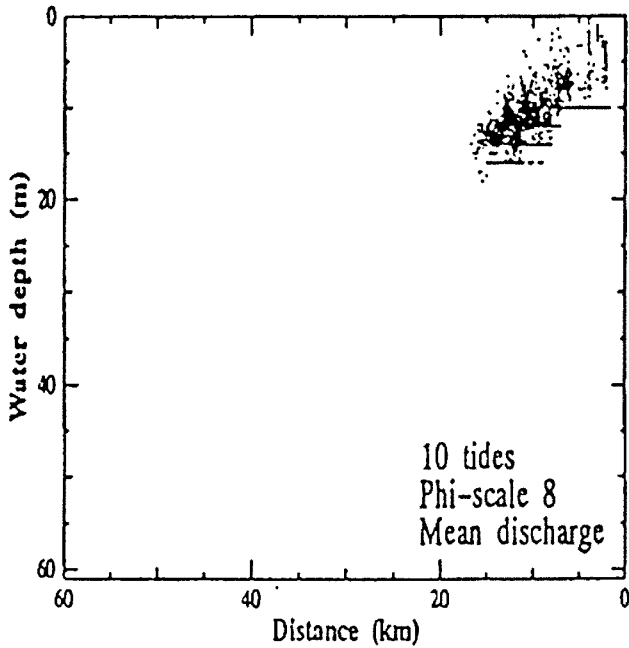
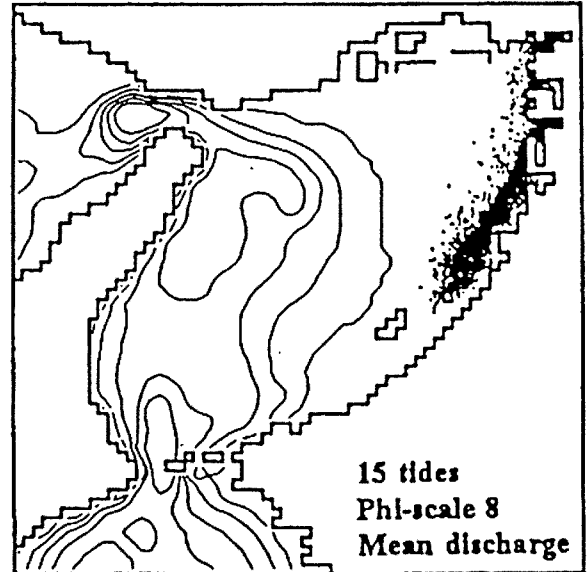
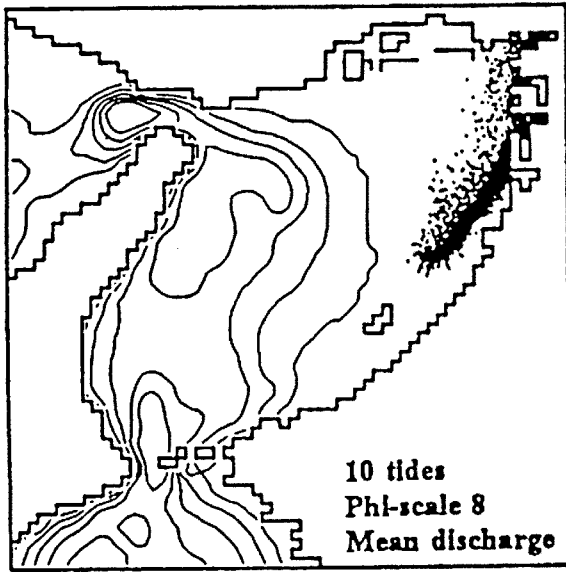


Fig. 5(b) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 8$ in 10 tides

Fig. 5(c) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 8$ in 15 tides

(3) 입자입경이 $\phi = 8$ 인 입자는 $\phi = 10$ 인 입자에 비하여 침강속도가 크기 때문에 빨리 해당수심까지 침강하여, 각각의 수심에 해당하는 하층류에 의하여 만 내측과 동부해안에 근접하면서 남서방향으로 수송된다.

이상의 결과로부터 오사카만의 물질수송에 대해서는 하천수 유입으로 인하여 야기되는 밀도성층에 의한 유동의 연직구조 및 조석간차류가 중요한 역할을 하고 있다는 것을 알 수 있었다.

따라서 밀도성층이 발달하고 있고 폐쇄성이 강한 해역에 있어서 해양수질환경을 정도 높게 예측하여 해양생태계 model을 구축하기 위해서는 장기간에 걸친 수질자료의 Data base화가 필요

하며, 하구주변해역의 현장관측자료를 체계적으로 분석하여 수리학적특성을 정도 높게 파악해 둘 필요가 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 김종인, 김현주(1999). "3-D 밀도류모델을 이용한 고온·고염수의 확산해석, 한국해양공학회지 제13권 제3-2호, pp 3~13.
한국기계연구원(1997). 해상플랜트 실험역 시험장 적지조사보고서. 134p.

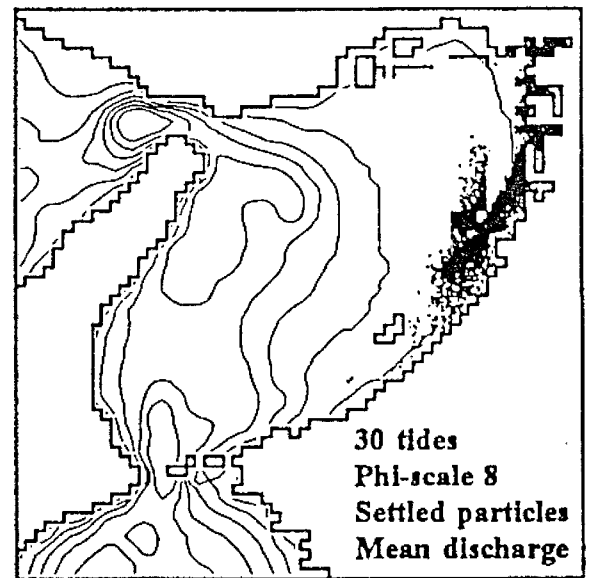
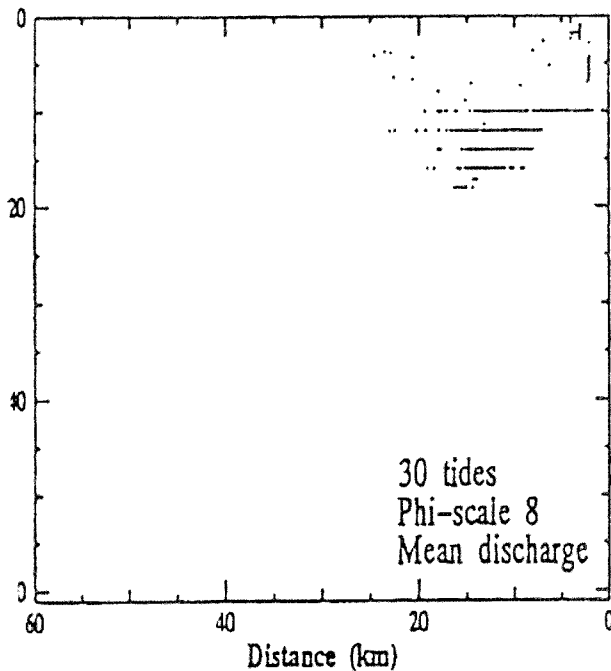
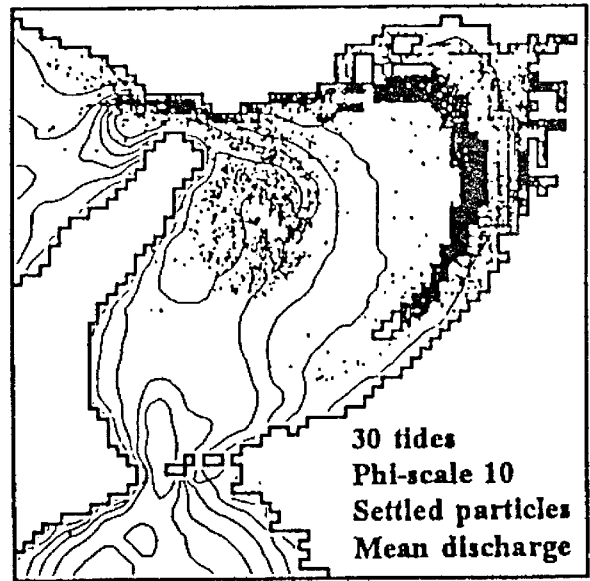
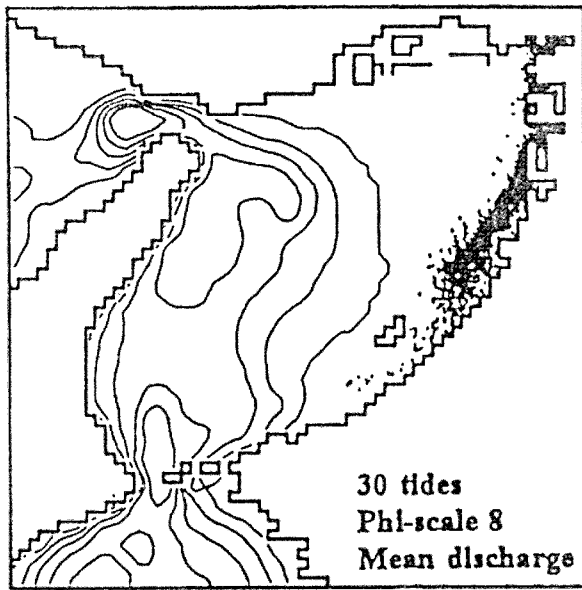


Fig. 5(d) The horizontal and the vertical distributions of particles of $\phi = 8$ in 30 tides

Fig. 6 Distribution of sedimentation of settled particles of $\phi = 10$ and $\phi = 8$ in 30 tides

金種仁(1997). “大阪灣における河川からの流入土砂の輸送・堆積機構にする研究”, 大阪大學工學博士學位論文, p 160.
 岩佐義朗・井上和也・呵部徹(1983). “琵琶湖湖流の3次元的な解析”, 京都大學防災研究所年報, 第26号, B-2, pp 531~542.
 彬ノ原伸夫・大西行雄(1987). “環境科學として海洋學2”, 數值解析(第15章), 東京大學出版會, pp 234~271.
 中辻啓二(1994). “大阪灣における殘差流系と物質輸送”, 水理學シリーズ 94-A-9, A-9-1-A-9-28.

村上眞裕美・大西行雄・原島省・國司秀明(1987). “Seto内海における水溫”, 鹽分分布のSimulation, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 15, No. 2, pp 130~137.
 星加章・谷本熙巳・三島康史(1994). “大阪灣における懸濁粒子の堆積過程”, 海の研究, Vol. 3, No. 6, pp 419~425.

2001년 9월 12일 원고 접수
 2001년 10월 17일 수정본 채택