

廣島灣에서의 잔차류와 물질수송의 수치모형실험

이 인 철

日本通商産業省工業技術院 中國工業技術研究所

A Numerical Simulation of Residual Current and Material Transportation in Hiroshima Bay, Japan

IN-CHEOL LEE

Chugoku National Industrial Research Institute, 2-2-2 Hiro-Suehiro, Kure, Hiroshima 737-0197, Japan

KEY WORDS: Residual current 잔차류, Euler-Lagrange model 오일러-라그랑쥐 모델, Material transportation 물질수송, Estuarine circulation 하구순환류, Rear-time simulation 실시간 수치모형실험, Hiroshima Bay 廣島灣

ABSTRACT: In order to clarify the seasonal variation of the residual current and the material transportation process in Hiroshima Bay, JAPAN, the real-time simulation of residual current and particle tracking by using the Euler-Lagrange model were carried out. The calculated tidal current, water temperature, and salinity showed good agreement with the observed ones. The residual currents showed a southward flow pattern at the upper layer, and a northward flow pattern at the lower layer. The flow structure of the residual current in Hiroshima Bay is an estuarine circulation affected by density flow and wind driven current. The residual current plays an important role of material transportation in the bay.

1. 서 론

廣島灣은 일본의 굴생산지로 널리 알려져 있으며, 그 굴생산량은 일본전국의 67 %를 점유하고 있다. 특히, 굴 양식장이 밀집되어 있는 만의 북부해역(NH해역)은 1급하천인 太田川(Fig. 1의 13)을 비롯한 약 10 여개의 중소하천과 7개의 하수처리장이 집중되어 있어 육역으로부터 유입되는 다량의 하천수 및 오염물질이 쉽게 축적되기 쉬우며, 해수교환성이 약하여 부영양화가 지속적으로 진행되고 있는 실정이다. 따라서 여름철 심층기에는 표층에서 유독성 플랑크톤에 의한 적조 또는 폐독현상의 발생이, 저층에서는 빈산소수괴 현상이 만성적으로 발생되고 있어 굴양식 및 수산생태계 환경에 악영향을 초래하고 있다.

이러한 적조플랑크톤의 분포는 해역의 흐름에 지배되기 때문에 적조 및 폐독현상의 피해를 예측하기 위해서는 해역에서의 유동구조와 흐름이 물질수송에 미치는 역할 등을 규명할 필요가 있다.

廣島灣에서 마비성폐독의 원인종인 *Alexandrium*屬 cyst분포가 底泥中에서 고밀도로 나타난 영역이 유속 5 cm/sec 이하의 정체성해역과 잘 일치하고, 만내에는 남북방향으로 탁월한 바람장에 의해 발생되기 쉬운 연직순환류가 유독성 적조플랑크톤cyst의 증대와 분포역의 확대에 미치는 영향이 크다고 보고하고 있다(高杉 등, 1998). 또한, 廣島灣에 있어서는 연안의 담수영향역에서 나타나는 하구순환류(estuarine circulation)가 영양염의 물질수송이나 생물생산의 항상성 유지에 중요한 역할을

담당하고 있다고 보고되어 있다(谷本 등, 1999; 山本 등, 2000). 그러나, 廣島灣의 잔차류구조 및 물질수송과정에 있어서의 하천수나 바람의 영향 등 만내의 유동장과 물질수송의 계절적인 변동특성에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 유동구조의 비정상적 외력요소(하천유량, 기온, 바람장, 일사량 등)의 실시간의 시공간적인 변화를 고려, 廣島灣에서의 잔차류 구조와 육역으로부터 유입되는 오염물질의 수송과정에 대하여 오일러-라그랑쥐 모델을 이용하여 계산하고, 하계·동계의 잔차류특성 및 물질수송과정에 미치는 하천수나 바람 등에 의한 영향에 관하여 수치모형실험을 통하여 검토하였다.

2. 수치실험방법

2.1 대상해역과 모델개요

廣島灣은 남북 약 55 km, 동서 약 30 km의 타원형 내만으로 해역면적 약 1,000 km², 체적 27 km³이며, 남향으로 만구부를 가진 많은 섬과 육지로 둘러싸인 해역이다. Fig. 1은 廣島灣의 계산격자구성과 담수유입점, 조류검증점 및 수질관측점을 나타낸 것이다. 수치모델의 격자는 수평방향으로는 1 km×1 km의 크기로 분할하고, 연직방향으로는 廣島灣의 년평균투명도가 약 4 m~8 m정도인 점을 고려하여 수면으로부터 8 m까지를 2 m 간격으로 4층, 8~20 m사이를 4 m씩 3층으로 분할하고 나머지 20 m이상의 수심을 1층, 총 8층으로 구분하였다. 모델의 좌표

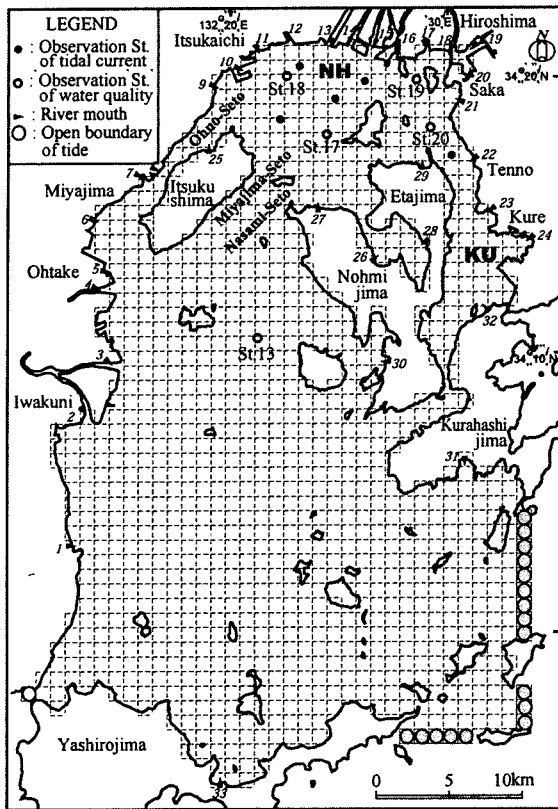
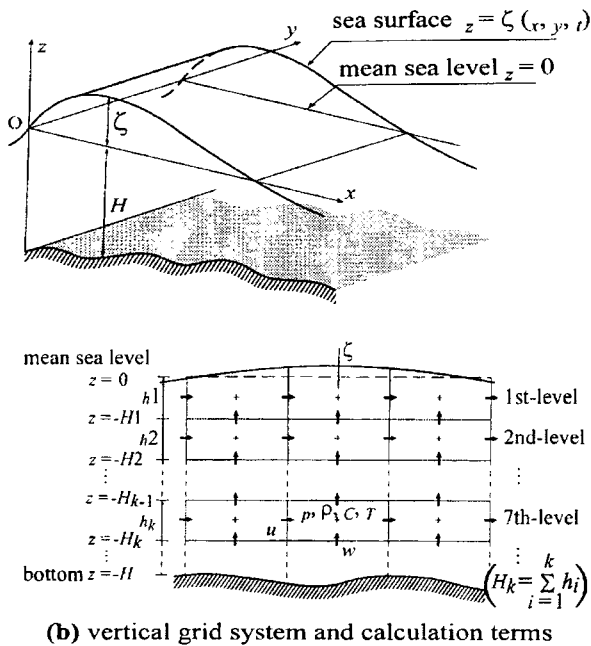


Fig. 1 Calculation grid system and observation stations in Hiroshima Bay. NH and KU denote the northern coastal area of Hiroshima Bay and Kure Bay, respectively



(b) vertical grid system and calculation terms

Fig. 2 The coordinate system(a) and vertical grid system and calculation terms(b) in the numerical model

계, 층분할 및 격자계의 제물리변수는 Fig. 2와 같다.

본 연구에서의 수치모형실험은 유동장을 계산하는 유체역학 모델에 의한 잔차류계산과 유동장에 있어서 입자를 추적하는 물질수송모델에 의한 입자확산의 계산으로 구성된다. 유동장 계산모델은 연직방향으로 Boussinesq근사를 가정하여 층별의 연직방향으로 적분한 Navier-Stokes운동량 방정식과 연속식, 수온·염분의 이류확산방정식, 해수의 밀도와 수온·염분을 관련시킨 상태방정식을 기초식으로 하는 연직다층의 Level 모델(李 등, 2000)을 이용하였으며, 물질수송의 계산모델은 Euler-Lagrange기법에 의하여 계산하였다(Yanagi *et al.*, 1983).

2.2 경계조건

유동장의 경계조건은 육역과 해역과의 연직경계면에서는 Non-slip조건을 적용하고, 자유수면에서의 바람응력과 해저면에서의 마찰력은 각각 식(1)과 식(2)와 같이 설정하였다. 또한, 수면에서의 열교환은 식(3)과 같이 고려하였다.

$$(\tau_{k-1/2}^x, \tau_{k-1/2}^y) = (\tau_s^x, \tau_s^y) = (\rho_a \gamma_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \rho_a \gamma_a^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}) \quad (1)$$

$$(\tau_{k+1/2}^x, \tau_{k+1/2}^y) = (\tau_b^x, \tau_b^y) = (\rho_0 \gamma_b^2 u_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}, \rho_0 \gamma_b^2 v_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}) \quad (2)$$

$$q_{k-1/2} = q_s = q_0 - q_e - q_c - q_r \quad (3)$$

여기서, τ_s^x, τ_s^y 는 자유수면에서의 x,y방향의 바람응력 (N/m^2), τ_b^x, τ_b^y 는 해저면에서의 x,y방향의 마찰력 (N/m^2), γ_b^2 는 해저마찰계수(= g/C^2 ; $C = h^{1/6}/0.026$), γ_a^2 는 해면마찰계수(=0.001), ρ_a 는 공기밀도 (kg/m^3), W_x, W_y 는 x,y방향의 풍속 (m/sec), q_s 는 수면에서의 열교환량 ($J/m^2/sec$), q_0 는 수면에서의 수면반사를 제외한 일사량 ($J/m^2/sec$), q_e, q_c, q_r 는 증발, 열전도, 유효역복사에 의한 손실열량 ($J/m^2/sec$)이다. 개경계에서의 조위는 식 (4)와 같이 강제진동으로 주어졌다.

$$\zeta(t) = \sum_i f_i \zeta_i \cos \{ (V_0 + u)l_i + \omega t - k_i \} \quad (4)$$

여기서, 첨자 i 는 조석분조의 종류를 나타내고, $\zeta(t)$ 는 경계격자의 조위, f 와 $(V_0 + u)$ 는 천문인수, ζ 는 조위진폭, k 는 지각, ω 는 각속도, t 는 시간이다. 또한, 조석분조는 관측치(海上保安廳, 1983)중의 주요 4분조인 M_2, S_2, O_1 및 K_1 분조를 고려하였다. 그리고, 개경계에서의 수온·염분의 경계조건은 계산대상 기간에 있어서 Fig. 1의 St.13에서의 월별관측치(廣島縣水産試驗場, 1996~1997)를 참고로 하여 정현함수로 주었다.

2.3 계산조건

해면에서의 열수지계산을 위한 기상조건은 기상월보(日本氣象協會, 1996~1997)의 기온, 일사량, 습도, 雲量, 풍향·풍속 등의 일별관측치를 이용하였으며, 해면에서의 바람응력의 계산에는 풍향·풍속의 매시간별 연속관측치를 이용하였다.

육역으로부터의 담수유입량은 廣島灣에서 가장 큰 負荷源인 太田川과 小瀬川(Fig. 1의 4)을 비롯하여 2급하천인 錦川(Fig. 1의 2) 등 20개의 중소하천과 13개소의 하수처리장을 포함한 33개의 유입점에서의 일별유입량을 외부입력조건으로 하였다(李

등, 2000). Fig. 3은 계산에 이용한 기상자료와 담수유입량의 일변화를 나타낸다.

유동장의 재현은 1997년 1월4일~1월18일(15일간)의 조류 및 조위를 $\Delta t=30$ sec로 계산하여, 15일간의 연속조류관측치(高杉, 1998)와 비교, 검증하였다. 또한, 수온·염분의 계산은, 유향도와 조류타원에 의한 유동장계산의 검증 후, 구해진 1년의 유동장과 외력요소(기상조건, 하천유량 등)의 관측치(Fig. 3)를 가지고 1996년 4월1일~1997년 3월31일까지 매일의 실시간 수치모형실험을 실시하였다. 그리고, 만내의 수온·염분의 초기치는 수질관측치(廣島縣水産試験場, 1997)를 토대로 설정하였다.

잔차류계산은 하계(1996년 7월26일~8월9일)와 동계 (1997년 1월4일~1월18일)의 15일간을 상정하여 밀도일정 및 무풍상태의 조건하에서 廣島灣의 지형에 의한 조석잔차류를 계산하여 관측치와 검증한 후, 밀도 및 풍향·풍속의 조건을 변화시켜 수치모형실험을 실시하였다. Table 1은 본 연구의 수치모형 실험조건을 나타내며, Fig. 4는 계산기간중의 풍속의 시계열변화를 나타낸다. 한편, 물질수송의 계산은 Table 1에 나타낸 바와 같이 하계(1996년 7월26일~8월9일)와 동계 (1997년 1월4일~1

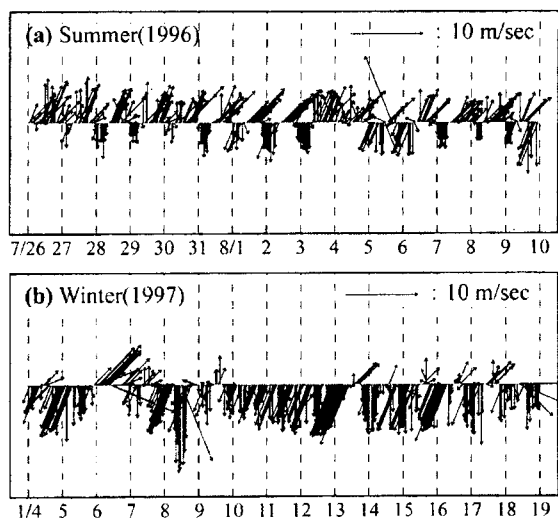


Fig. 4 Time series of wind velocity of Summer(a), Winter(b) during the numerical simulation

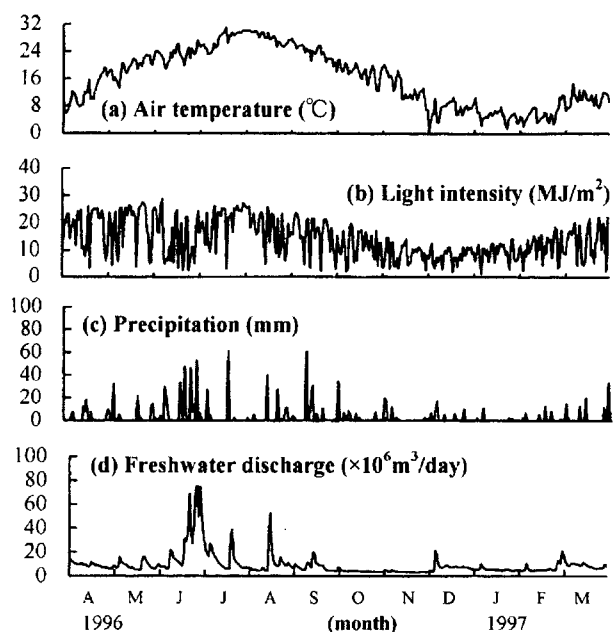


Fig. 3 Daily change of air temperature(a), light intensity(b), precipitation(c) and freshwater discharge(d) during the numerical simulation period in Hiroshima Bay

Table 1 The numerical simulation case of residual current and material transportation in this study

Content	Residual current		Material transportation	
	Summer	Winter	Summer	Winter
the period of simulation	July 26~ Aug.9,1996	Jan.4~ Jan.18,1997	July 26~ Aug.1,1996	Jan.4~ Jan.10,1997
Case	ρ W	Calculate Fig. 4(a)	Calculate Fig. 4(a)	Calculate Fig. 4(b)

ρ is density of seawater, W is wind velocity of equation(1).

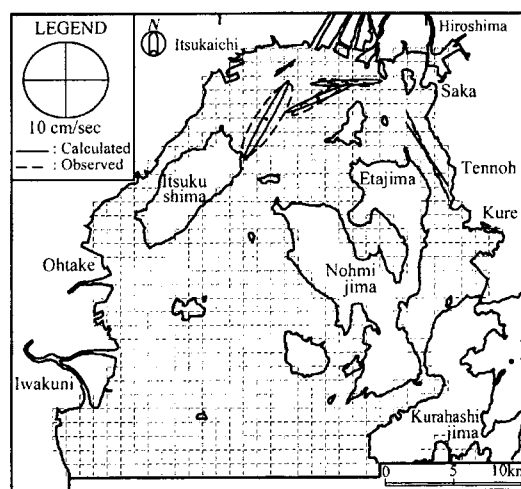


Fig. 5 Comparison of calculated and observed tidal current ellipses on M_2 tidal constituent in Hiroshima Bay

월10일의 각각 7일간을 상정하여 계산하였다. 물질(입자)의 방류는 만내측에서 Kure灣(KU해역)에 이르는 16개소의 유입점 Fig. 1의 9~24)에서 담수유입량 $10,000 m^3$ 을 1개의 입자로 가정하여, 계산기간중에 유입량에 대응하여 연속적으로 방류하는 것으로 설정하였으며, 입자방류 개시후의 3일과 7일경과후의 입자의 수평적 공간분포를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 및 수온·염분의 계산

조류의 관측치와 계산치로부터 작성한 조류타원의 일례를 Fig. 5에 나타내었다. 그림 중의 조류계산치는 관측수심(수면하

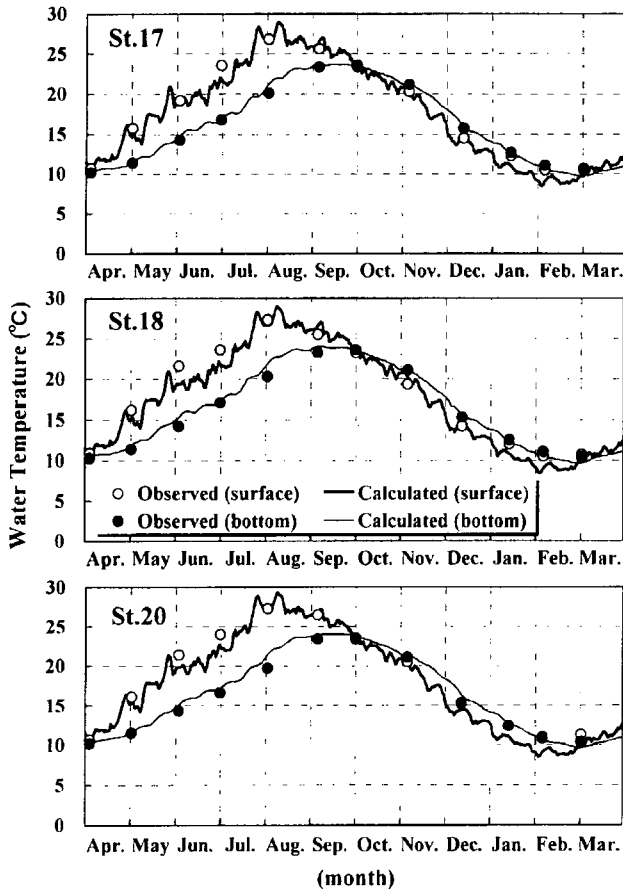


Fig. 6 Comparison of calculated water temperature with observed one in Hiroshima Bay

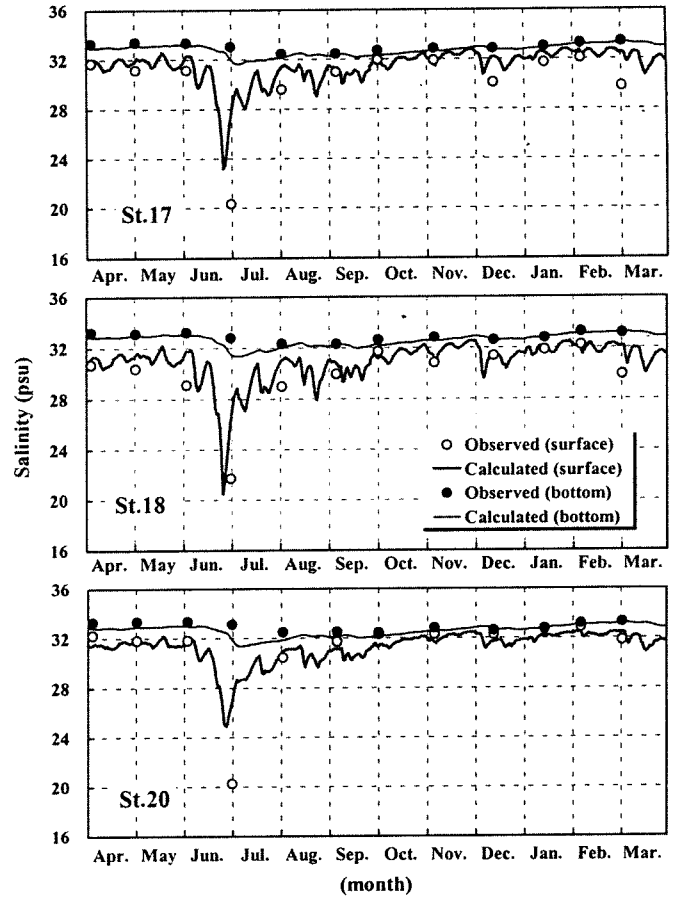


Fig. 7 Comparison of calculated salinity with observed one in Hiroshima Bay

5 m)과 같은 수심층에서의 계산치를 조화분해하여 얻은 M₂분조의 결과이다. 이 결과를 비롯하여 조류관측치(점선)과 계산치(실선)는 쉼 조석분조의 검증점에 있어서 잘 일치하였으며 현황의 관측치와 양호한 재현성을 보였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 수온 및 염분의 계산결과를 나타낸다. Fig. 1의 수질관측점에서 廣島灣에서의 표층과 저층의 수온변동은 전검증점에서 성층기(4월~9월)와 순환기(10월~3월)에 걸쳐 관측치와 계산치는 거의 일치하는 경향으로 나타났으며, 성층기에는 표층과 저층의 수온차가 약 5°C전후로서 성층이 뚜렷하게 형성됨을 알 수 있었다. 한편, 廣島灣에서의 염분관측치의 월변화(Fig. 7)를 보면 6월~9월에 걸쳐 표층에서의 염분저하가 현저하고, 특히 Fig. 3(d)에 나타난 바와 같이 담수유입량이 가장 많은 6월말에는 모든 관측점에서 아주 낮은 염분값이 관측되었다. 이러한 경향은 수치모형실험에서도 거의 재현되었으나, St.17과 St.20에서의 강우시의 최저염분농도까지는 이르지 않았다. 그러나, 연간을 통해서 염분의 변화양상과 만내측에서 육역으로부터 담수유입의 영향을 크게 받는 경향 등은 관측치의 변화와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

3.2 잔차류의 계산

Fig. 8은 해수밀도와 풍향·풍속의 변화(Fig. 4)를 고려한 조

건에서의 하계 및 동계의 잔차류 수평분포를 나타낸다. 하계의 잔차류(Fig. 8(A))는 상층에서는 太田川하구에서 Miyajima-Seto와 Nasami-Seto를 통하여 남하하여 Itsukusima의 동쪽연안을 따라서 외해로 유출하는 양상을 나타냈으며, 하층에서는 Kurashijima의 서부연안에서 빠른 흐름으로 북상하여 Nohmijima의 서쪽연안을 따라 NH해역으로 유입되는 양상을 나타냈다. 이것은 NH해역내의 밀도가 낮은 해수가 만외로 유출됨에 따라 이를 보충하기 위해 밀도가 높은 남부해역의 해수가 하층을 통하여 유입하는 흐름의 2층구조를 나타내고 있는 것으로서, 伊勢灣(藤原 등, 2000)이나 大阪灣(藤原, 1997)에서 보이는 하구순환류의 구조와 일치하는 것으로 나타났다. 한편, 동계의 잔차류(Fig. 8(B))에 있어서는 전체적으로 하계와 비슷하게 상층유출과 하층유입의 2층구조의 흐름을 보였으나, 상층에서는 북풍이 탁월함에 따라 취송류의 영향으로 하계에 비해서 만내측에서 만서쪽(Iwakumi방면)으로 약간 빠른 남서류로 유출하는 양상을 보였으며, 하층에서는 만서쪽으로부터 만동쪽으로 흘러 외해로 유출하고 일부는 증력순환에 의해 Nohmijima의 서부연안을 따라 북상하는 경향을 나타내었다. 또한, NH해역과 KU해역은 상층과 하층 모두 하계에 비하여 흐름이 현저하게 빠르게 나타나는 것을 감안할 때, 이들 해역의 유동에서는 바람과 밀도변화에 의한 영향이 지배적임을 유추할 수 있다.

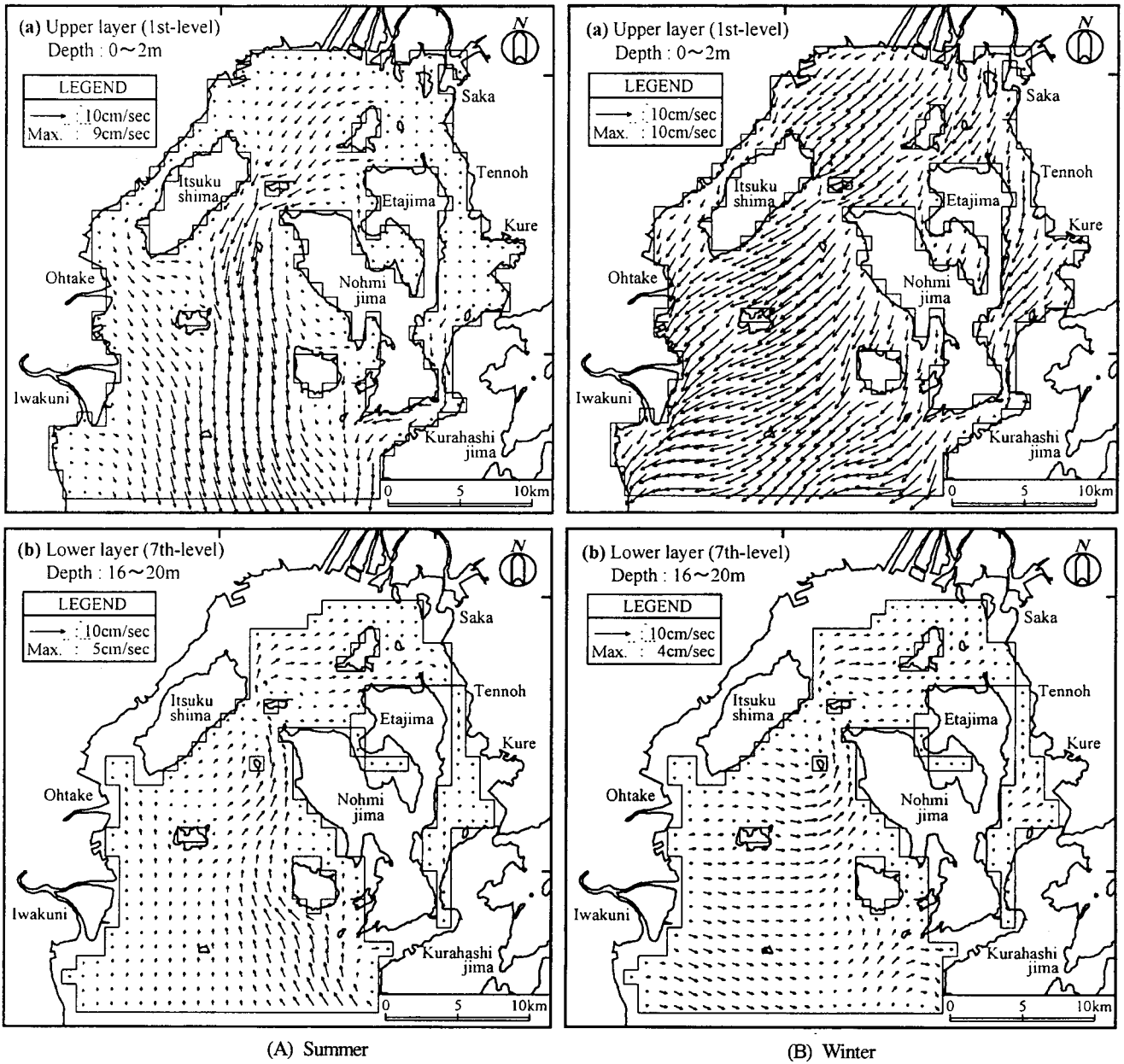


Fig. 8 Calculated residual current is Summer(A) and Winter(B) by the numerical simulation

이상의 잔차류의 수치모형실험으로 부터 廣島灣에서는 하천 수에 의한 밀도류와 북풍에 의한 취송류의 중첩으로 인하여, 만내측에서는 상층에서 외해로 유출하고, 하층에서는 만외부에서 만내측으로 유입하는 연직순환류가 발생하기 쉬운 해역으로서, 연간을 통해서 하구순환류의 형성빈도가 높은 해역인 것으로 나타났다.

3.3 물질수송의 계산

Fig. 9는 廣島灣에서 적조가 빈번하게 발생하는 해역(주황색 영역)과 흐름의 진폭이 5 cm/sec 이하의 정체성이 강한 해역(점선타원역)을 나타낸 것이다. 廣島灣에서의 적조는 정체성이 강한 NH해역의 만내측에서 Ohno-Seto에 걸쳐서 자주 발생하

고, 최근에는 Etajima灣에서도 대량발생하고 있다. 따라서 이러한 해수의 흐름에 의한 물질수송과정과 적조의 발생해역과의 관련성에 대하여 고찰하였다.

Fig. 10은 입자확산모델에 의해 계산된 하계와 동계에 있어서 물질수송과정의 수평적인 공간분포를 나타낸 것이다. 하계의 입자확산(Fig. 10(a))은 입자방류 개시후 3일까지는 만내측의 적조발생해역에 체류하고, 7일경과 후에 Miyajima-Seto의 부근해역으로 확산되는 경향을 보였으나, 동계의 입자확산(Fig. 10(b))은 북서풍의 영향으로 3일정도에 Miyajima-Seto의 부근해역으로 확산되어 7일경과 후에는 Itsukushima 동부연안을 따라 외해로 확산되는 양상을 보였다. 특히, 정체성이 강한 KU해역은 하계에는 물질수송이 거의 나타나지 않은데 비해서 동계에는

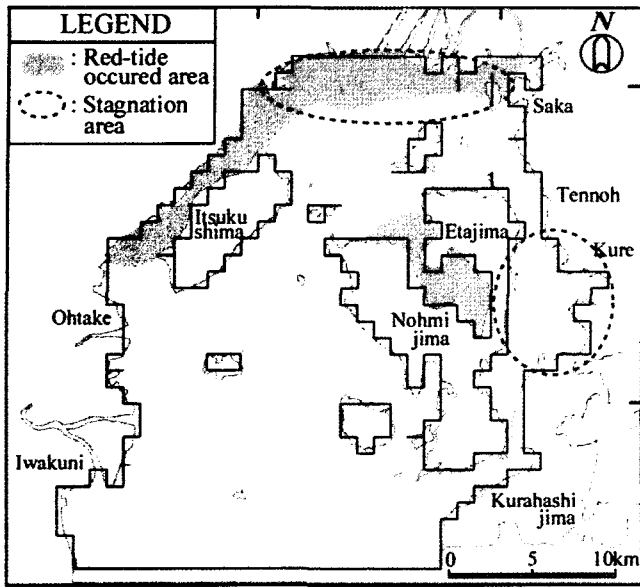


Fig. 9 Distribution of areas where frequently red-tide occurred (shaded area) and stagnation area less than current velocity of 5 cm/sec (broken ellipse area)

만구를 향하여 확산되어 가는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

이상의 결과를 잔차류의 계산결과(Fig. 8)와 함께 고찰해 보면, NH해역 및 KU해역과 같은 정체성이 강한 해역에서의 물질수송과정은, 하계에는 하천수에 기인한 밀도류, 동계에는 해상풍에 의한 취송류 등에 지배되기 쉬우며, 이들 양자간의 균형에 의해 하계에서 동계에 걸쳐 물질수송과정이 크게 변화하고 있는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

廣島灣에 있어서 잔차류의 구조와 육역으로부터 유입하는 오염물질의 수송과정을 오일러-라그랑쥐 모델을 이용하여 계산하고, 하계·동계의 잔차류특성 및 물질수송과정에 미치는 하천수나 바람 등에 의한 영향에 대하여 수치모형실험을 통하여 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 조류의 관측치와 계산치는 검증점에서 잘 일치하였으며, 수온·염분의 계산결과는 성층기의 수온 및 염분약층, 강우시의 상층염분의 저하 등 관측치의 계절변동과 거의 일치하여 양호한 재현성을 얻었다.
- (2) 廣島灣은 하천수에 의한 밀도류와 북풍에 의한 취송류의 중첩으로 인하여 상층에서 외해로 유출하고, 하층에서 만내측으로 유입하는 연직순환류가 발생하기 쉬우며, 연간을 통해서 하구순환류의 형성빈도가 높은 해역임을 알았다.
- (3) 廣島灣의 물질수송과정은 하계에는 밀도류, 동계에는 취송류에 지배되기 쉬우며, 이들 양자간의 균형에 의해 하계에서 동계에 걸쳐 물질수송과정이 크게 변화하고 있는 것으로 나타났다.

앞으로, 본 연구에서 확인된 廣島灣에서의 연직순환류가 만나

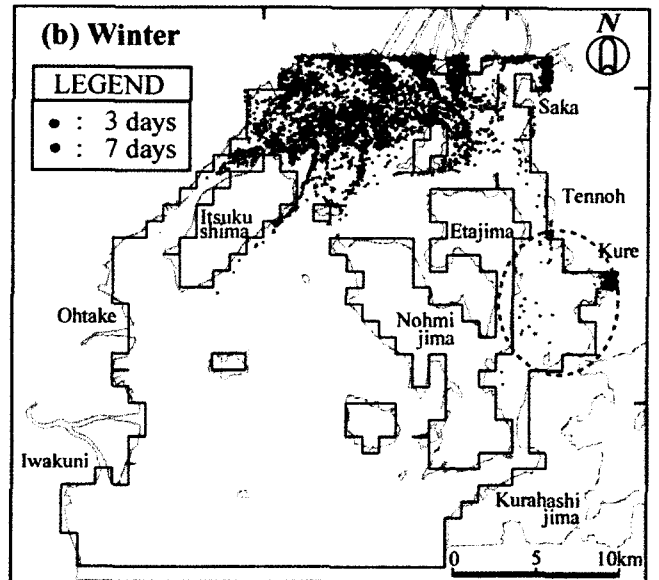
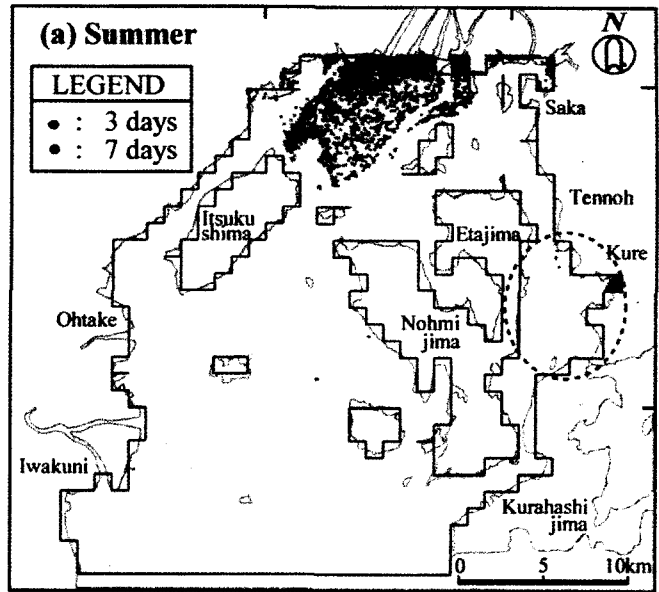


Fig. 10 Simulated spatial distribution of material transportation by the particle tracking modelling

의 유독성 적조플랑크톤의 수송에 미치는 영향과 바람에 의한 해역의 교란에 의한 해저퇴적물의 재부상과정에 있어서 플랑크톤 cyst의 수송에 미치는 영향 등을 예측할 필요가 있다. 이를 위해서는 현장관측과 병행하여 적조의 발생해역에서의 입자거동 및 수심변화에 따른 입자거동의 수치모형실험에 대한 지속적인 연구,검토가 요구된다.

참 고 문 헌

Yanagi, T., Tsukamoto, H., Inoue, H. and Okaichi, T. (1983). "Numerical simulation of drift cards dispersion", La mer, Vol. 21, pp 218~224.

- 高杉由夫, 埜口秀昭, 安田秀一(1998). “廣島灣における風による鉛直循環流と底泥プランクトンシスト分布”, 水産海洋研究, 第62卷 第3號, pp 187~198.
- 谷本照巳, 星加 章, 三島康史(1999). “廣島灣北部海域の開口部における夏季の流動と物質輸送”, 海と空, 第74卷 第4號, pp 127~136.
- 山本民次, 芳川 忍, 橋本俊也, 高杉由夫, 松田 治(2000). “廣島灣北部海域におけるエスチュアリー循環過程”, 沿岸海洋研究, 第37卷 第2號, pp 29~36.
- 李 寅鐵, 星加 章(2000). “リアルタイムシミュレーションによる廣島灣の流況および水溫・鹽分の豫測”, 中國工業技術研究所報告, 第54卷, pp 21~31.
- 海上保安廳(1983). “日本沿岸潮汐調和定數表”, pp 86~90.
- 廣島縣水産試験場(1997). “廣島縣水産試験場事業報告”, 漁場環境調査結果, 1996年 4月~1997年 3月.
- 日本氣象協會(1996~1997). “氣象月報”, 廣島地方氣象台.
- 藤原正幸, 藤原建紀, 大橋行三, 杉山陽一(2000). “伊勢灣の秋季の殘差流”, 海の研究, 第9卷 第2號, pp 91~100.
- 藤原建紀(1997). “淡水影響域におけるエスチュアリー循環流と生物・物質輸送”, 海と空, 第73卷 第1號, pp 23~30.

2000년 8월 17일 원고접수

2001년 2월 2일 수정본채택