

Kitan 해협의 유동 및 수질구조에 관한 연구 A Study on the structures of flow and water quality in the Kitan strait

허재영* · 김한구** · 申辻啓二**

Jae-Yeong Huh*, Han-Gu Kim** and Nakatsuji Keiji**

要 旨 : Kitan(紀淡) 해협을 포함하는 Seto(瀬戸)내해(inland sea)에서는 COD, 인 등에 관한 총량규제가 실시됨에도 불구하고 적조현상과 빈산소 수괴 현상이 매년 발생하고 있는데, 그 원인으로서는 저니(底泥)로부터의 용출과 부영양화에 따른 1차생산의 증가가 주목되고 있다. 또한 최근의 조사결과는 수질오염의 원인이 되는 질소와 인과 같은 영양염이 육지 뿐만 아니라 태평양으로부터도 유입되고 있다는 것을 보여주고 있다. 본 연구에서는 Osaka 만과 Kii 수로를 연결하는 Kitan해협에 있어서 유동구조와 물질수송구조의 실태를 명확히 밝히기 위해 현지관측을 실시하였으며, 기 출판된 자료와 함께 연구대상 해역의 오염원인을 규명하고자 하였다. 현지조사는 1999년부터 2002년 사이에 걸쳐 실시되었으며, 자료의 획득은 각 계절을 대표하는 2월, 5월, 8월, 11월에 각각 이루어졌다.

핵심용어 : Osaka만, Kii수로, 적조, 잔차류, Kuroshio, 수질

Abstract □ The damage of water quality like red tide occurs every year inspite of the total load regulation of pollutant inflows from land such as COD, phosphorus and so on around Seto inland sea in Japan. It is attributed to the increase of primary production due to eutrophication, and the rising and settling from the sediment containing nutrient salt. Furthermore, the recent research shows that nutrient salt such as nitrogen and phosphorus, flows into Kii channel from land as well as the Pacific ocean. To investigate the distribution of water quality and flow and residual current in Kitan strait, the field observations were carried out. The field data were obtained a time each season from 1999 to 2002. The results of observations and data of other research institution are used to understand the mechanism of pollution in the strait.

Keywords : Osaka bay, Kii channel, red tide, residual current, Kuroshio, water quality

1. 서 론

내만(inner bay)과 내해(inland sea)에 다량의 질소, 인이 유입하면 식물플랑크톤의 증식(적조현상)과 빈산소 수괴 현상등의 수질문제가 발생한다. 이 때문에 본 연구가 대상으로 하는 Kitan(紀淡) 해협을 포함하는 Seto(瀬戸)내해(inland sea)에 있어서는 1973년 Seto내해 환경임시조치법이 제정된 이후 정부차원에서 수질오탁의 원인이 되는 COD, 인 등의 총량규제가 실시되어 왔다. 그 결과, Osaka(大阪)만과 Kii(紀伊)수로를 포함한 Seto내해의 전수역에 걸쳐 수질 환경이 호전되었다. Fig. 1은 Kitan해협 주변해역의 적조발생 횟수의 경년변화를 표시한 것이

다. 수질 오염이 심각했던 1970년대에 비해 적조 발생 횟수가 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 이러한 행정적 규제가 실시됨에도 불구하고 적조현상과 빈산소 수괴 현상은 매년 발생하고 있고 수질개선 효과는 기대만큼 발휘되지 않고 있는 상황이다.

이러한 원인으로서는 저니(底泥)로부터의 용출(韓, 2001)과 부영양화에 따른 1차생산(또는 내부생산)의 증가가 주목되고 있다. 또한, 최근의 연구결과에 의하면 Kitan해협의 남쪽에 위치한 Kii 수로에서는 여름철에 Kuroshio(黒潮)의 이안(離岸)·접안(接岸)상태에 따라 태평양으로부터 유입되는 수괴의 수질구조가 크게 다르다는 연구결과가 보고되고 있다. Kuroshio는 고온·저영양염인 특징을 갖는

*대전대학교 토목공학과(Dept. Civil Eng., Daejeon University, 96-3 Yongun-dong, Dong-gu, Daejeon 300-716, Korea. jghuh@dju.ac.kr)

**오사카대학 토목공학전공(Dept. Civil Eng., Osaka University)

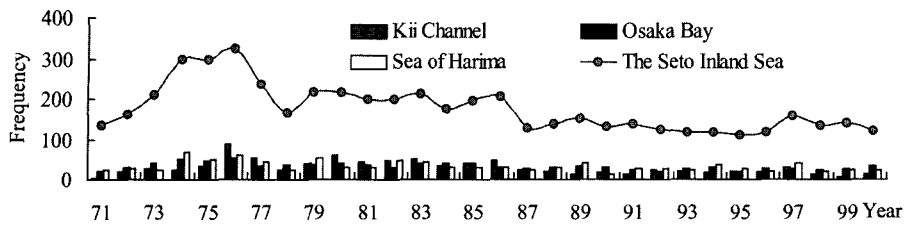


Fig. 1. The annual frequency of red tide.

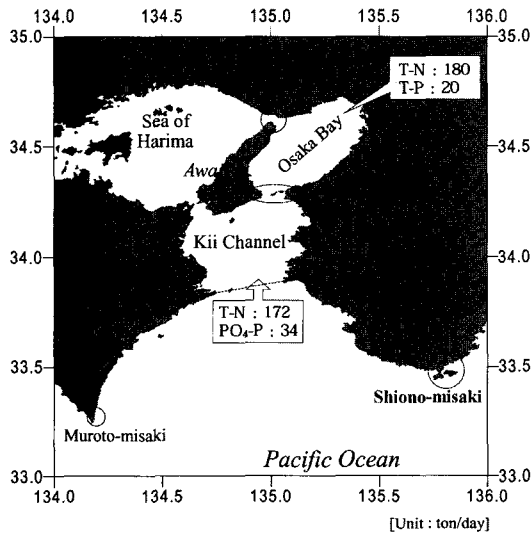
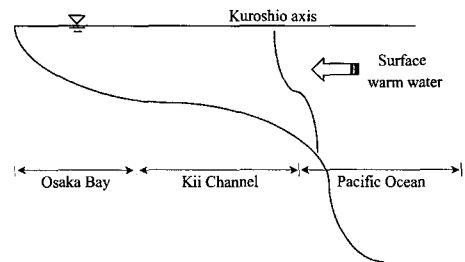


Fig. 2. Load of nutrient salt around Kitan strait.

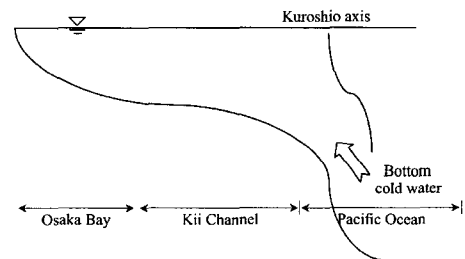
해류이다. Fig. 2에 Kitan해협 주변해역의 지형과 이 수역에서 지금까지 보고된 질소, 인 등의 유입량을 나타내었다.

門谷 등(1991)에 의해 보고된 육지부하량(질소 180 t/d, 인 20 t/d)과 藤原 등(1997)에 의해 보고된 태평양으로부터 Kii수로로 유입된 오염부하량(질소 172 t/d, 인 34 t/d)이 거의 비슷하지만, 인의 경우에는 육지 부하량보다 태평양에서 Kii수로로 유입되는 부하량이 많다는 것을 알 수 있다. 그러나, 藤原 등의 관측은 Kii수로의 남쪽에서 실시되었고 산출된 영양염의 유입은 북쪽에 위치한 Osaka만과 Harima해의 양쪽에 영향을 미치고 있다. 또한, 영양염 flux가 태평양에서 Kii수로로 유입할 때 유량의 수송 방향도 유입쪽이므로 유량이 유출할 때 영양염도 태평양으로 유출할 가능성이 있다.

竹内 등(1997)은 Kii수로의 남쪽에 위치한 Shionomisaki(潮岬)에서 Kuroshio의 중심부가 20해리(37 km)이내로 접안해 있는 경우에는 Kuroshio의 고온·저영양염의 해수가 Kii



a) Kuroshio axis within 37km from Shionomisaki ; inflow with warm water of low concentration



b) Kuroshio axis out of 37km from Shionomisaki ; inflow with cold water of high concentration

Fig. 3. Schematic diagram of water inflow from the Pacific Ocean according to the distance from Kuroshio axis to Shionomisaki.

수로 내부로 진입하고, Shionomisaki에서 Kuroshio의 중심부가 20해리(37 km)이상으로 이안해 있는 경우에는 태평양의 아표층(亞表層)으로부터 저온·고영양염의 해수가 Kii수로의 내부로 진입한다고 하였다. Fig. 3은 Kuroshio의 접안 및 이안상태에 따른 해수의 유입상태를 모식적으로 나타낸 것이다.

본 연구는 Osaka만과 Kii수를 연결하고 있는 Kitan해협에 있어서 현지관측을 통해 유동구조와 수질구조의 시·공간적 변동특성과 잔차류 구조의 해명, 물질수송의 정량화와 이러한 현상에 영향을 미치는 외적인 요인을 밝히는 것에 목적을 두고 있다.

2. 현지관측 및 천해정선 관측

74 km로 이안상태에 있었다.

2.1 현지관측의 개요

Fig. 4에 Kitan해협 주변의 관측점 위치를 나타내고, Table 1에 현지관측 상황을 나타내었다. 유향과 유속의 관측에는 ADCP(300 kHz, 600 kHz)를 사용하였고, 1999년 8월 4일에는 B1측선, 2000년 8월 7일, 2001년 8월 10일, 2002년 9월 10일에는 B3측선에 대해 1조석 이상의 단면 연속 관측을 실시하였다. 동시에 염록소센서가 부착되어 있는 STD와 CTD시스템을 이용하여 각 관측점에 있어서의 수온, 염분 등을 관측하고 2001년과 2002년에는 관측 단면내에서 채수(약30점×6회)를 실시하여 영양염(T-N, NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, T-P, PO₄-P)의 분석도 실시하였다. 관측일의 날씨는 맑았고, 바람도 거의 무풍이었다. 또한, 조류의 일조부등이 적은 날을 선택하여 관측을 실시하였다. 관측시 Kuroshio의 상태는 1999년과 2002년에는 Kuroshio의 중심부가 약 37 km로 접안해 있었고, 2000년과 2001년에는 Kuroshio 중심부가 각각 약 64 km, 약

2.2 천해정선 관측

1965년대에 접어들어 수질오염이 심각한 사회적인 문제로 부각됨에 따라, Kitan 해협 주변해역에서는 주변에 있는 4군데의 수산시험장으로부터 1972년부터 매월 정기적으로 수온, 염분 등의 일반 수질항목에 대한 관측이 실시되고 있고, 영양염 등의 특수 수질항목에 대해서도 2, 5, 8, 11월에 정기적으로 관측이 실시되고 있다. 2, 5, 8, 11월은 각각 겨울, 봄, 여름, 가을을 대표하고 있다. 그러나, 기후 등의 여건에 따라서 관측시기가 다소 달라지는 경우도 있다. 현재까지는 2000년까지의 자료가 공개되어 있다. 공개된 자료중 관측시기가 중복되어 있는 1999년 8월과 2000년 9월의 특수 수질항목 자료를 이용하여 관측 자료와 비교 검토하였다. Fig. 5는 주변 4군데의 수산시험장에 의해 관측이 실시되고 있는 Kitan해협 주변해역의 천해 정선 관측점을 나타내고 있다.

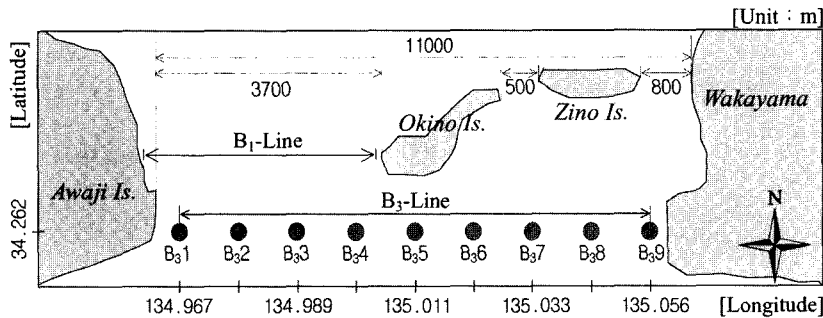


Fig. 4. Observation lines with ADCP in Kitan strait and sampling points (B31-B39) of water quality.

Table 1. A detailed account of observation in Kitan strait

year	1999	2000	2001	2002
date	Aug. 4 (05:00-18:00)	Aug. 7 (05:00-18:30)	Aug. 10 (05:00-18:00)	Sep. 10 (05:00-18:30)
observational line & point	B1 line(8 round trip) B3 line(16 round trip)	B3 line (east side-5 round trip- west side-6 round trip)	B3 line (6 round trip)	B3 line (8 round trip)
observation item	velocity, temperature, salinity	velocity, temperature, salinity, Chl.a	velocity, temperature, salinity, Chl.a, T-N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, T-P, PO ₄ -P	velocity, temperature, salinity, Chl.a, DO, T-N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, T-P, PO ₄ -P
condition of sea	neap tide	neap tide	middle tide	middle tide
condition of weather	fine, weak wind	fine, weak wind	fine, calm	fine, calm

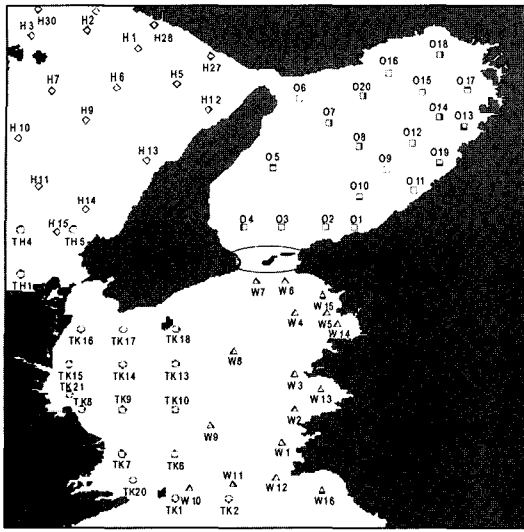


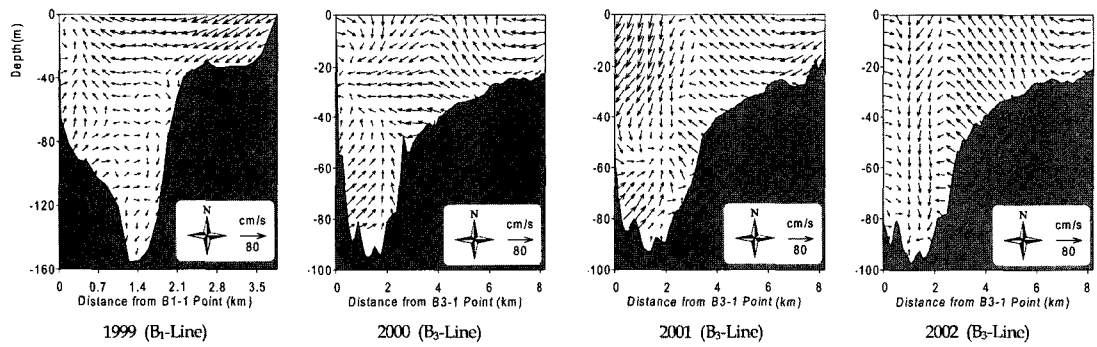
Fig. 5. Observation points of Hyogo, Osaka, Tokushima and Wakayama Prefectural Fisheries Experimental Stations around Kitan strait.

3. 유동 및 밀도구조와 이에 영향을 미치는 요인

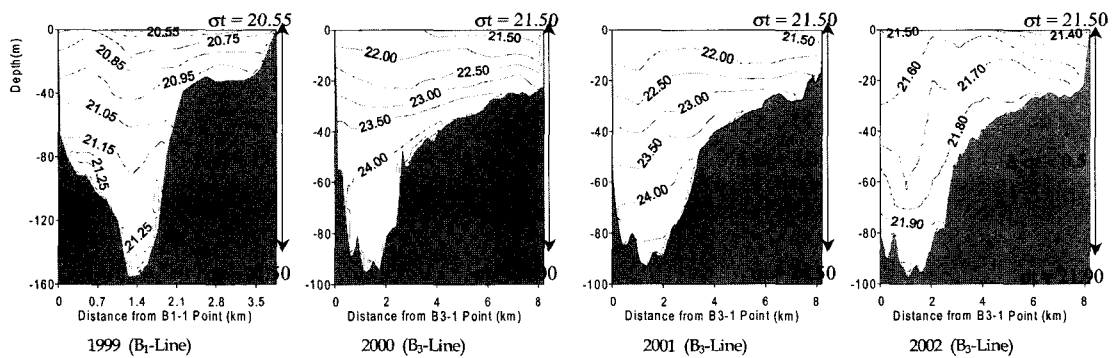
3.1 잔차류와 밀도구조

Fig. 6은 Fig. 4에 나타난 Kitan해협의 횡단면에 걸친 현지관측 결과 중 잔차류와 평균밀도 구조를 나타낸다. 종축은 수심을 나타내고, 횡축은 Fig. 4의 왼쪽 관측점으로 부터의 거리를 나타낸다. 회색으로 나타낸 영역은 해저지형을 표시하고, 수평유속은 벡터의 길이로 표시하고 있다. 벡터의 상하방향은 유속의 남북성분을, 좌우성분은 유속의 동서성분을 나타낸다.

Fig. 6(a)의 잔차류 구조를 보면 1999년의 B1측선에 있어서는 Okino Is.의 지형적인 영향을 받아서 東岸(Okino Is. 방향)에서는 남서류(약 0.6 m/s)의 유동구조를 나타내고 있다. 西岸(Awaji Is. 방향)의 전 단면에 있어서는 북류가 우세하고, 중앙단면의 표층으로부터 수심 약 50 m까지는 서류가 우세한 유동구조를 나타내고 있으며, 수심이 약 50 m 이상인 곳에서는 특정한 유동구조가 나타나



(a) Cross-sectional distributions of residual currents in Kitan strait



(b) Cross-sectional distributions of mean density in Kitan strait

Fig. 6. Cross-sectional distributions of residual currents and mean density in Osaka Bay. Indicators directed upward and downward mean inflow Kii Channel to Osaka Bay and outflow from Osaka Bay to Kii Channel, respectively.

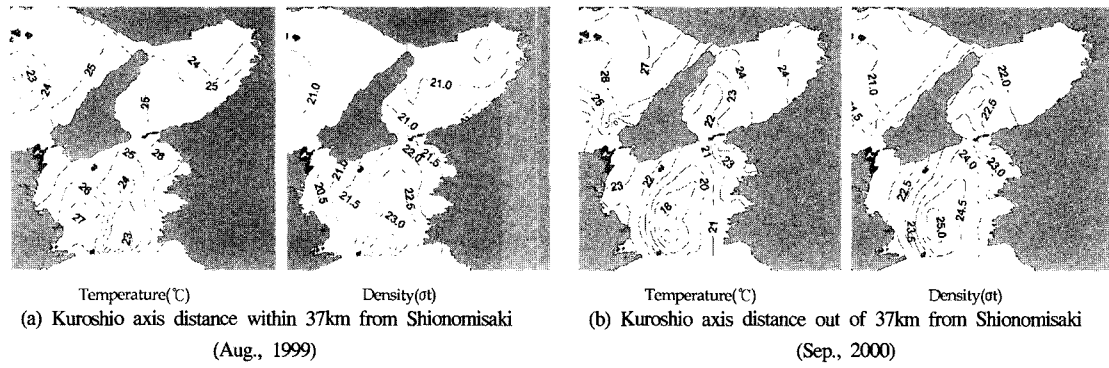


Fig. 7. Distributions of water temperature and density on the bottom around Kitan strait.

지 않고 아주 복잡한 유동구조를 나타내고 있다. B3측선의 잔차류 구조는 東岸(Wakayama방향)에서는 2000년, 2001년, 2002년의 3년간 북서류와 서류의 유동구조를 나타내고 있지만, 수심이 깊고 유속이 빠른 西岸(Awaji Is. 방향)에서는 유동구조가 매년 변동하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 Kitan 해협의 잔차류 구조가 수심이 깊고 유속이 빠른 西岸에서는 매년 변동하고 있다는 것을 동일측선에 대한 3년간의 연속 관측으로부터 알 수 있었다.

Fig. 6(b)의 1조석 평균의 밀도구조를 보면, 표층과 저층간의 밀도차가 작은 1999년과 2002년, 표층과 저층간의 밀도차가 큰 2000년과 2001년의 두 가지 양상으로 구분할 수가 있다.

먼저, 표층과 저층간의 밀도차가 작은 1999년과 2002년의 평균밀도 구조를 상세히 보면, 1999년 B1측선의 관측에서는 밀도가 표층에서 $\sigma_t=20.55$, 저층에서 $\sigma_t=21.50$ 을 나타내어 표층과 저층간의 밀도차가 $\Delta\sigma_t < 1.0$ 이고, 2002년의 B3측선의 관측에 있어서는 밀도가 표층에서 $\sigma_t=21.50$, 저층에서 $\sigma_t=21.90$ 을 나타내어 표층과 저층간의 밀도차가 $\Delta\sigma_t < 0.5$ 로 Kuroshio가 접안해 있던 1999년 여름과 2002년 여름 모두 성층구조가 붕괴되어 연직혼합이 일어난 것을 알 수 있다. 또한, 2002년에는 기온이 하강하는 9월에 관측을 실시하였기 때문에, 연직혼합이 1999년 8월관측보다 더욱 진행되어 있음을 알 수 있다.

한편, 표층과 저층의 밀도차가 큰 2000년과 2001년의 평균 밀도 구조를 보면, 표층에서는 $\sigma_t \approx 21.50$, 저층에서는 $\sigma_t \approx 24.50$ 의 밀도구조를 나타내어 표층과 저층간의 밀도차는 $\Delta\sigma_t \approx 3.0$ 으로 Kuroshio가 이안해 있던 2000년 여름, 2001년 여름 모두 강한 성층구조를 나타내고 있다.

전술한 바와 같이 Kitan해협의 남쪽에 위치한 Kii수로에서는 Kuroshio의 변동이 수온분포와 영양염 농도분포

에 영향을 미치고 있다는 연구결과가 보고되고 있다. 따라서, Kuroshio의 변동이 Kitan해협의 유동구조에 미치는 영향에 대해 검토해 보기로 한다.

3.2 잔차류와 밀도구조에 영향을 미치는 요인

Fig. 5에 표시한 천해 정선 자료를 이용하여 Kitan해협 주변해역의 저층의 수온 및 밀도구조를 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7(a)의 Kuroshio가 접안해 있었던 1999년 8월의 수온 및 밀도구조를 보면, 태평양 부근부터 고온(25.5°C), 저밀도($\sigma_t=22.0$)의 수괴가 Kitan 해협의 저층부로 유입하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(b)의 Kuroshio가 이안해 있던 2000년 9월의 수온 및 밀도구조를 보면, 태평양 부근으로부터 저온(21.0°C), 고밀도($\sigma_t=24.0$)의 수괴가 Kitan해협의 저층부로 유입하는 것을 알 수 있다.

이와 같이, Kuroshio의 접안 및 이안상태에 따라 Kii수로내의 수온과 밀도구조가 변화하는 것을 알 수 있으며, 이러한 Kii수로내의 수온과 밀도구조의 변동에 따라 Kitan해협에 있어서는 Kuroshio가 접안해 있던 1999년과 2002년 여름에는 표층과 저층간의 밀도차($\Delta\sigma_t < 1.0$)가 적고, Kuroshio가 이안해 있던 2000년과 2001년 여름에는 표층과 저층간의 밀도차(약 $\Delta\sigma_t \approx 3.0$)가 크다는 것을 알 수 있다. 이렇게 Kuroshio의 사행에 따라 Kii수로내의 밀도구조가 변동하고 이에 따라 Kitan해협에서도 잔차류 구조가 매년 크게 변동하고 있는 것으로 생각된다.

4. 수질 분포와 이에 영향을 미치는 요인

Fig. 8은 Fig. 4에 나타낸 Kitan해협의 관측선 중 B3측선의 수질 분포를 1조석동안 평균하여 나타낸 것이다. Fig. 9는 Fig. 5에 나타낸 Kitan해협 주변의 천해 정선 관

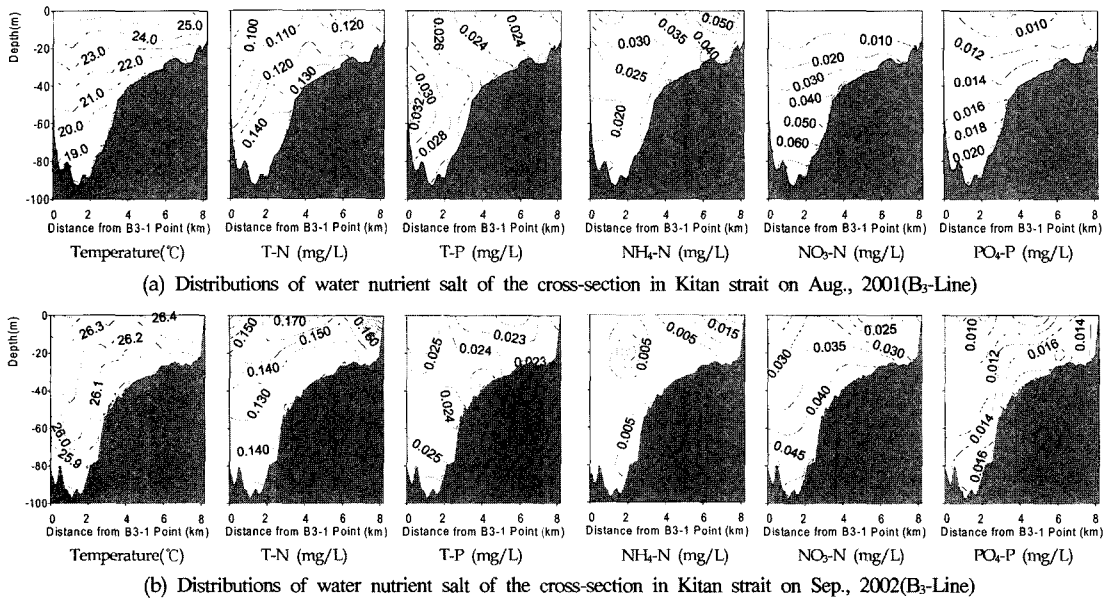


Fig. 8. Cross-sectional distributions of nutrient salt in Kitan strait.

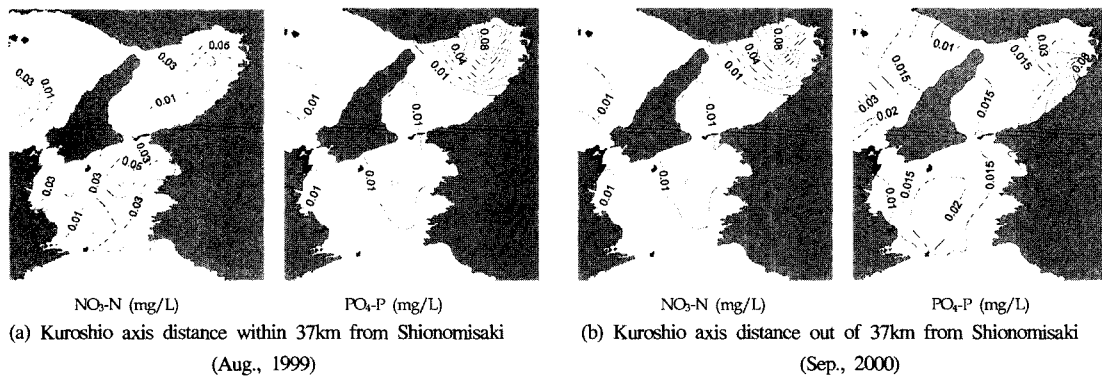
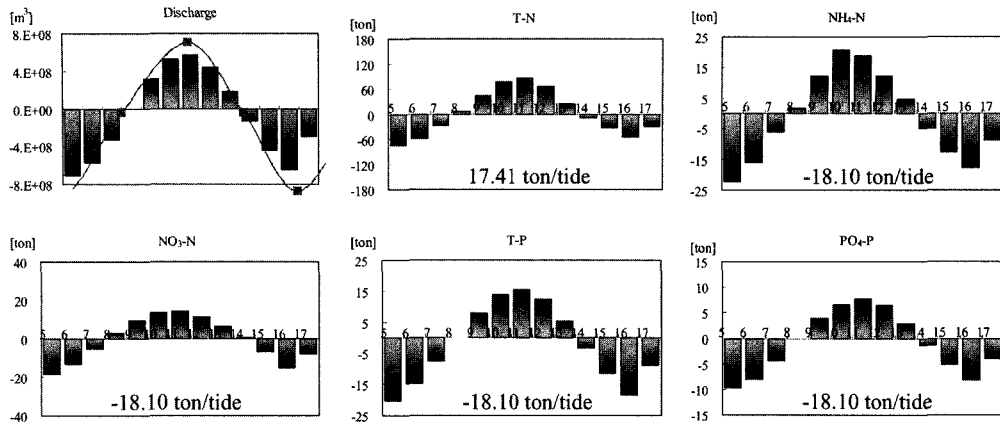


Fig. 9. Distributions of water temperature and density at the bottom layer around Kitan strait.

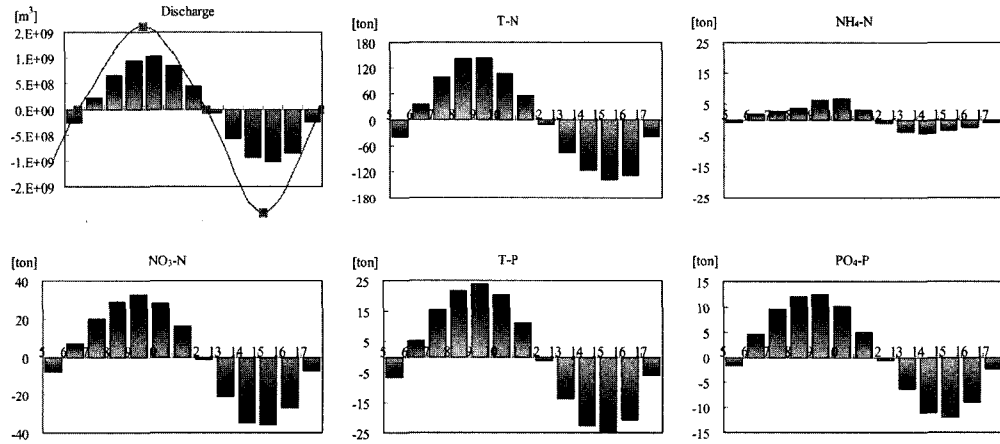
측점으로부터 관측된 자료를 이용하여 저층 영양염의 농도 분포를 나타낸 것이다.

영양염의 농도 분포를 보면, Kitan해협에서의 T-N과 T-P의 단면농도 분포는 2001년과 2002년 모두 단면내에서 농도차가 작지만, 2002년 9월에는 육지유입 부하량이 많은 東岸(Wakayama방향)의 표층에서 T-N이 0.17 mg/L의 높은 농도를 나타내고 있어, 2002년 9월 관측시에는 T-N의 육지유입 부하량이 많았음을 알 수 있다. NH₄-N의 농도분포는 2001년이 2002년보다 상대적으로 높은 농도를 나타내고 있지만, T-N과 마찬가지로 표층에서 높은 농도를 나타내고 있어, 관측시에 육지로부터의 유입 부하량이 많은 것에 기인하는 것으로 생각된다.

한편, NO₃-N과 PO₄-P의 농도분포는 저층에서 높은 농도를 나타내고 있는데, 2001년 8월 Kuroshio 이안시의 관측에서 저층에서 각각 0.07 mg/L, 0.02 mg/L의 높은 농도를 나타내고 있어 영양염의 농도분포에 있어서도 성층구조가 형성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 Fig. 7과 동시에 관측된 천해정선 자료를 이용해 Kuroshio의 접안 및 이안시의 Kitan해협 주변해역의 저층의 NO₃-N과 PO₄-P의 농도분포를 나타낸 것이다. Kitan해협 주변해역의 저층의 NO₃-N과 PO₄-P의 농도분포는 Kuroshio 이안시인 2000년 9월 관측시에 농도가 높은 것을 알 수 있다. 여름철 저층의 NO₃-N과 PO₄-P의 농도는 Kuroshio가 접안했던 1999년에는 각각 약 0.03 mg/L, 0.01 mg/L의 낮은



(a) Change of material fluxes per hour (Aug. 10, 2001)



(b) Change of material fluxes per hour (Sep. 10, 2002)

Fig. 10. Change of material fluxes per hour (+: Inflow into Osaka Bay from Kii Channel -: Outflow to Kii Channel from Osaka Bay).

농도를 나타내고, Kuroshio가 이안했던 2000년에는 각각 약 0.07 mg/L, 약 0.015 mg/L의 높은 농도를 나타내고 있다. 또한, Kuroshio가 이안했던 2000년의 Osaka만 저층의 NO₃-N의 농도분포를 보면, 하천류의 유입이 가장 큰 Osaka만의 북동쪽(0.03 mg/L)해역보다 Kii수로를 통해 유입한 남부해역에서 약 2배정도 높은 농도(0.07 mg/L)를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, PO₄-P에 관해서도 Kuroshio가 이안했던 2000년 여름 Kitan해협 주변해역에서 높은 농도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 농도 분포로부터 Kitan해협 주변해역의 영양염 농도분포 (특히, NO₃-N과 PO₄-P)는 Kuroshio의 사행에 따라 농도가 크게 변동하고 있는 것으로 추론할 수 있다. 그 결과, Kitan해협의 관측에 있어서도 Kuroshio가 이안했던 2000년과 2001년 여름에 영양염이 높은 농도를 나타내고 있

고, Kuroshio가 접안했던 1999년과 2002년 여름에 낮은 농도를 나타내고 있다고 할 수 있다. 이것은 태평양과 접해있는 Kii수로의 남부해역에서 보고된 기존의 관측결과와 일치하는 것이다. 이는 또한, 수질오탁의 원인이 되는 영양염이 육지에서 바다로 유출한다는 기존의 통념과는 상반되는 현상으로 앞으로 외양과 접해있는 내만과 내해의 수질연구에 있어 외양과의 해수교환 또는 물질수송을 고려할 필요가 있다는 점을 시사하는 것이다.

5. Kitan해협을 통한 물질수송과 flux구조

5.1 시간당 통과량과 예측조류

Fig. 10은 2001년과 2002년의 관측시에 B3측선을 1조석(12시간 25분)동안 통과한 물질량의 경시변화를 나타낸

것이다. 그림에서 마지막 막대는 25분간의 통과량을 나타내고 있다. 종축은 유량 및 flux의 양을 나타내고 횡축은 시간을 나타낸다. 유량의 경시변화와 함께 관측시의 예측조류를 함께 표시하였다. 유량 및 flux의 정·부의 부호가 바뀌는 곳과 예측조류의 0 cm/s가 일치하고 있다. 이를 경계로 상단부분은 Kii수로에서 Osaka만으로 유입하는 북류시의 조류를 나타내고 있고, 하단부분은 Osaka만에서 Kii수로로 유출하는 남류시의 조류를 나타내고 있다. 1조석동안 Kitan해협을 통과한 유량과 예측조류를 비교해 보면, 예측조류가 북류의 성격을 강하게 나타낼수록 Osaka만으로 유입하는 유량도 많아지고, 예측조류가 남류의 성격을 강하게 나타낼수록 Osaka만으로부터 유출하는 유량도 많아지는 것을 알 수 있다. 이와 같이 유량의 경시변화와 예측조류의 상관성이 높은 것으로부터 Kitan해협 주변해역은 위상차가 작다는 것을 알 수 있다. 다른 수질항목의 유입과 유출 flux를 유량의 경시변화 및 예측조류와 비교해 보아도 상관관계가 높은 것을 알 수 있었다. 각 항목의 경시변화와 함께 1조석동안 유입 및 유출한 flux를 함께 표시하였다. 여기서 '+'는 Kii수로에서 Osaka만으로의 유입을, '-'는 Osaka만에서 Kii수로로의 유출을 나타낸다.

5.2 Kitan해협의 횡단면을 통한 물질수지

채수한 샘플을 실험실에서 분석해 각 수질 항목별로 얻어진 값을 단면 내에서 시·공간 보정하고, 최종적으로 조류의 남북유속을 곱하여 1조석간의 물질 수송량을 산출하였다. 산출된 1조석동안의 물질 수송량을 Table 2에 표시하였다. 대부분의 수질항목이 유량의 수송방향과 동일한 방향을 나타내고 있지만, 2001년의 경우에는 T-N flux

가 유량의 수송방향과 다른 방향을 나타내고 있고, 2002년의 경우에는 Chl.a와 NO₃-N의 flux가 유량의 수송방향과 다른 방향을 나타내고 있다. 2000년부터 2002년까지는 Fig. 4에 표시한 B₃측선의 동일 관측선에서 1조석이상 단면 연속관측을 실시하였다. 1조석동안 Kitan해협을 통과한 유량을 보면, 2000년과 2002년에는 각각 9.81×10⁸m³/tide, 2.11×10⁸m³/tide로 Osaka만으로의 유입성분이 탁월했지만, 2001년의 관측에서는 1.09×10⁹m³/tide로 Osaka만에서 Kii수로로의 유출성분이 우세하였다.

日比野 등(2001)의 보고에 의하면 Osaka만과 Kii수로는 연간을 통해 해수가 유출하는 경향을 나타낸다. 그러나, 관측결과 중에는 이와는 상반되는 경우도 있어, 2002년을 예로 1년간 10분간격으로 예측조류를 산출하여 이 동평군을 실시한 후, 얻어진 평균유속에 관측으로부터 얻어진 Kitan해협의 횡단면적을 곱해 유량의 유입량과 유출량을 산출하였다. 그 결과, 유입이 177일, 유출이 188일로서 유출이 11일 많았고, 2002년 한해동안 유출된 평균 유량은 9.80×10⁶m³/sec이었다. 또한, 관측이 실시된 2002년 9월 10일 관측시간 동안의 예측조류를 동일한 방법으로 산출한 결과 유입성분이 우세한 것을 알 수 있었다. 다른 관측에 대해서도 동일한 방법으로 산출한 결과, 연간을 통해서도 유출성분이 많았지만 관측시기에 따라서는 유입과 유출성분이 달라지는 것을 알 수 있었다.

5.3 Kitan해협을 통한 횡단면의 flux 분포구조

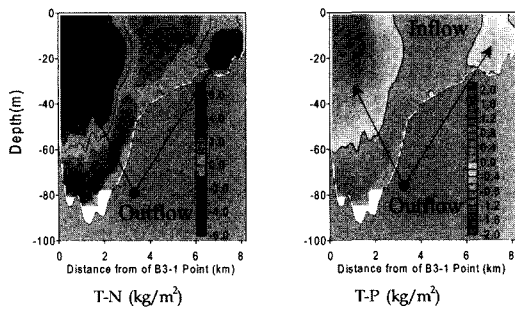
flux구조는 기본적으로 유량이 유출하면 각 수질 항목의 flux도 유출하고, 유량이 유입하면 각 수질 항목의 flux도 유입한다. 그러나, Table 2에서도 알 수 있는 바와

Table 2. Fluxes of material in the cross-section of Kitan strait.

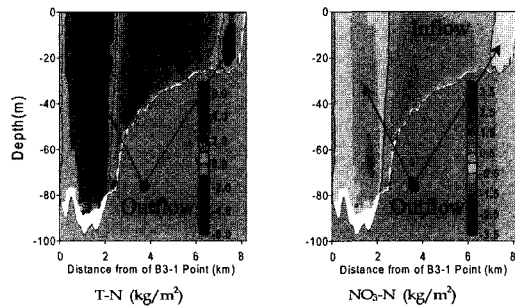
1999-B ₁ -line			2000-B ₃ -line			
Unit	Discharge m ³ /tide	Salinity ton/tide	Unit	Discharge m ³ /tide	Salinity ton/tide	Chl.a ton/tide
Total	3.82E+07	1.29E+06	Total	9.81E+08	3.10E+07	1.11

2001-B ₃ -line									
Unit	Discharge m ³ /tide	Salinity ton/tide	Chl.a ton/tide	T-N ton/tide	NO ₂ -N ton/tide	NO ₃ -N ton/tide	NH ₄ -N ton/tide	T-P ton/tide	PO ₄ -P ton/tide
Total	-1.09E+09	-3.53E+07	-1.73	17.41	-13.60	-7.63	-18.09	-18.55	-13.49

2002-B ₃ -line									
Unit	Discharge m ³ /tide	Salinity ton/tide	Chl.a ton/tide	T-N ton/tide	NO ₂ -N ton/tide	NO ₃ -N ton/tide	NH ₄ -N ton/tide	T-P ton/tide	PO ₄ -P ton/tide
Total	1.11E+08	3.63E+06	-0.72	14.17	3.35	-0.55	3.82	0.65	5.54



(a) Flux distributions in the cross-section of Kitan strait (Aug. 10, 2001)



(b) Flux distributions in the cross-section of Kitan strait (Sep. 10, 2002).

Fig. 11. Flux distributions in the cross-section of Kitan strait.

같이 반드시 이러한 경향만을 나타내는 것은 아니다. 2001년의 경우에는 유량이 유출함에도 불구하고 T-N flux는 유입하고, 2002년의 경우에도 유량이 유입함에도 불구하고 Chl.a와 NO₃-N의 flux는 유출성분이 우세하였다. 이와 같이 유량의 수송방향과 수질항목의 수송방향에 차이가 생기는 원인을 명확히 하기 위해 단면내의 flux분포를 비교해 보기로 한다.

Fig. 11은 2001년과 2002년의 관측으로부터 얻어진 B3측선의 단면 flux분포이다. Fig. 11(a)에 표시한 2001년의 T-N와 T-P의 단면 flux분포를 보면 Osaka만으로의 유입은 중앙단면과 서안의 저층을 통해 일어나고, 유출은 서안의 표층과 중층, 동안의 전 단면을 통해 일어나고 있음을 알 수 있다. 한편, T-N과 T-P의 flux구조를 보면, T-N은 저층부를 통해 다량의 flux가 유입되고 있음을 알 수 있고, T-P의 단면내 편차는 유속에 비해 작으며, 산출된 단면 flux구조는 유동구조에 의존하여 그 적산치도 유량과 동일하게 유출성분이 우세한 것을 알 수 있다.

Fig. 11(b)에 표시한 2002년의 T-N과 NO₃-N의 단면 flux분포를 보면, T-N은 중앙단면부의 표층을 통해 flux가 유입되는 것을 알 수 있다. 그러나, NO₃-N의 유입부인 중

양단면에서는 단면내의 편차가 적고, 유출부를 통해 다량의 flux가 유출하고 있다. 그 결과, T-N은 유량과 함께 Osaka만으로의 유입성분이 우세하고 NO₃-N은 Kii수로로의 유출성분이 우세한 것을 알 수 있다. 즉, flux의 유출과 유입구조는 유동구조와 단면내의 각 수질항목별 농도 분포에 따라 물질유송의 ‘정·부’의 차이가 발생하는 것임을 알 수 있다.

5.4 유동과 수질의 단면분포

유동분포와 수질의 단면내 농도 분포로부터 유량과 수질의 각 항목별 flux의 수송방향이 일치하지 않는 이유에 대해서 검토해 보기로 한다. 예로써, 2001년 8월 B3측선의 관측항목중 유동의 방향과 다른 방향을 나타내고 있는 T-N과, 유동의 방향과 동일한 방향을 나타내고 있는 T-P의 낙조류시와 창조류시(12시)의 단면내 농도 분포를 비교하기 위해 Fig. 12에 유속, T-N, T-P의 낙조류의 최강시(5시)와 창조류의 최강시(12시)의 단면분포를 나타낸다.

T-N의 농도분포는 창조류의 최강시(Fig. 12(b))에는 높은 농도를 나타내고 있고, 낙조류의 최강시와 비교해 낮은 농도로 남류가 가장 우세한 서안의 표층부에서 0.06 mg/L의 낮은 농도의 수괴가 나타나 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6(c)의 잔차류의 유속을 보면 서안의 표층에서 약 0.7 m/s의 빠른 남류가 나타나 있는 것과 관련하여 검토하면, Kitan해협의 해수교환 및 물질수송은 서안의 표층부에 나타난 빠른 남류가 중요한 역할을 하고 있는 것으로 생각할 수 있다.

유량과 동일하게 유출하고 있는 T-P를 비교해 보면, 창조류의 최강시(Fig. 12(b))에는 표층에서 저농도를 나타내고 있고, 저층에서 고농도의 분포특성을 나타내고 있다. 또한, 낙조류의 최강시와 비교해 저농도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그 결과, T-P flux는 유량과 더불어 유출성분이 우세한 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는, Osaka만과 Kii 수로를 연결하는 Kitan 해협에 있어서 유동구조와 물질수송구조의 실태를 명확히 밝히기 위해 현장관측을 실시했다. 그 결과, Kitan해협의 유동구조는 수심이 낮은 동안에서는 서류, 남서류의 일정한 유동구조를 나타내고 있지만, 수심이 깊고 조류가 빠른 서안에서는 유동구조가 매년 크게 변동하고 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 유동구조의 변동은 Kuroshio의

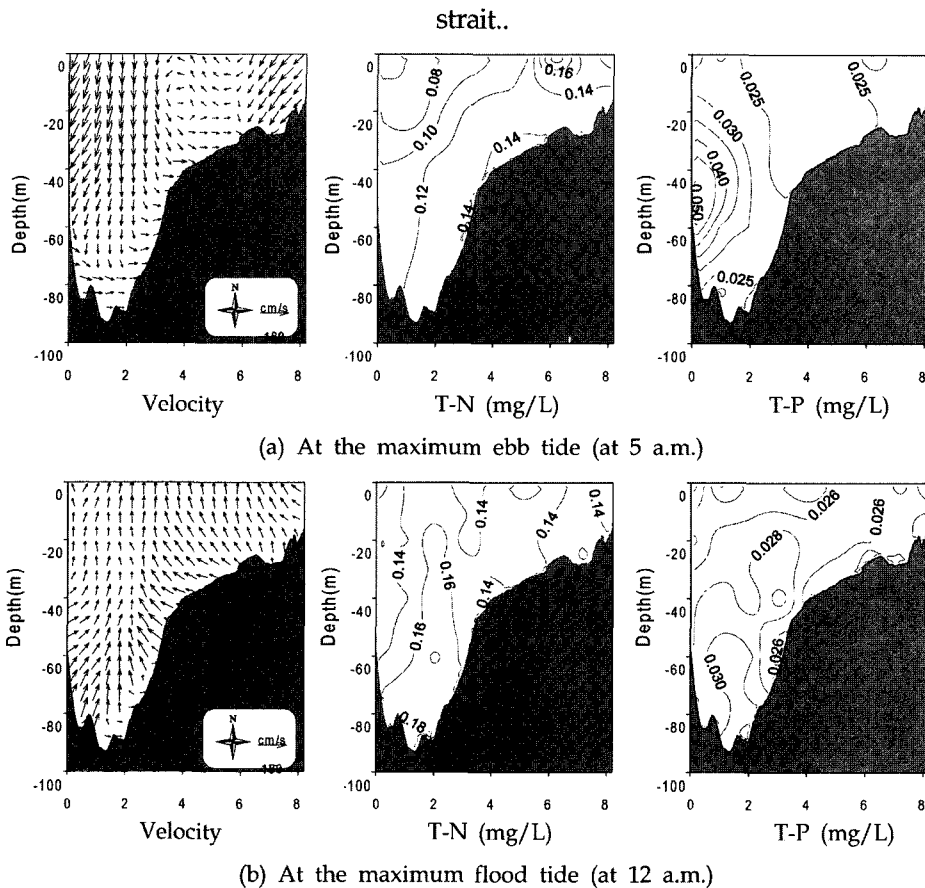


Fig. 12. Cross-sectional distributions of Velocity, T-N and T-P at the maximum flood & ebb tide in Kitan strait (Aug. 10, 2001).

사행에 따른 Kii수로내의 수온 변동 때문에 밀도구조가 변화하여 일어나는 것임을 알 수 있었다.

또한, Kitan해협 수질구조도 Kuroshio의 사행에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있었는데, 특히 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{PO}_3\text{-P}$ 는 Kuroshio의 이안시에 Kii수로에서 Kitan해협의 저층을 통해 Osaka만의 남부해역까지 진입하여 고농도를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한, Kuroshio의 이안시에 유입한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 Osaka 만에 유입하는 육지유입 농도와 비교해 볼 때 육지에서의 유입 농도보다 약 2배정도 높은 농도를 표시하고 있어서, 앞으로 Kitan해협 주변해역의 수질연구에 있어서 육지 유입량 뿐만 아니라 태평양과의 물질교환도 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

韓 銅珍, 2001. 底泥からの栄養塩の溶出機構を考慮した閉鎖

性海域の水質・底質予測モデルに関する研究, 工学博士学位論文, 大阪大学, 日本 大阪府
 竹内淳一, 中地良樹, 小久保友義, 1997. 紀伊水道に進入する表層温水と底層冷水, 海と空, 第73號, pp. 81-92.
 藤原建紀, 宇野奈津子, 多田光男, 中辻啓二, 笠井亮秀, 坂本亘, 1997. 紀伊水道の流れと栄養塩輸送, 海と空, 第73號, pp. 63-72.
 門谷 茂, 三島康史, 岡市友利, 1991. 沿岸海洋研究ノート, 第29號, pp. 13-27.
 日比野忠史, 浜走辛育, 駒井克昭, 松岡純作, 2001. 瀬戸内海における湾・灘水塊の移流・交換量の季節変動特性, 海岸工学 論文集 第48號, pp. 1036-1040.

Received October 6, 2003

Accepted December 1, 2003