

Hiroshima만에서의 질소, 인의 분포 및 수치

김도희⁽¹⁾

Distributions and Budgets of Nitrogen and Phosphorus in Hiroshima Bay

by
Do-Hee Kim⁽¹⁾

요약

1991년 1월부터 1993년 12월에 걸쳐 Hiroshima만 내부와 만 중앙부에서 질소 및 인의 분포와 수치를 조사했다. 총질소 및 총인의 유입 부하량은 각각 870 tonN/month과 129 tonP/month으로 그중 79%의 총질소 및 84%의 총인이 Hiroshima만 해역으로 유입되고 있었다. 유입 하천수중의 평균 TN/TP의 원자비는 15, DIN/DIP 원자비는 21이었다. 만 전체에서의 PON/POP의 원자비는 8~14 (평균 11)이었고 DIN/DIP의 원자비는 8~18 (평균 12)였다. 각 해역간의 해수 교환량으로부터 계산된 총질소와 총인의 교환량은 585 tonN/month와 106 tonP/month이 만 내부로부터 만 중앙부로 유출되고, 만 중앙부에서는 62 tonN/month와 107 tonP/month가 만 외부 해역으로 유출되고 있는 것으로 평가되었다. 질소 및 인의 수치로부터 계산된 총질소 및 총인의 침강량은 만 전체에서는 각각 $9.83 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$ 와 $0.27 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$ 였고, 만 내부에서는 각각 $8.54 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$ 와 $0.25 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$ 였으며, 만 중앙부에서는 각각 $10.1 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$ 와 $0.27 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$ 로 계산되었다. Hiroshima 만 내의 질소 및 인의 체류시간은 각각 112일로 계산되었다.

Abstract

Distributions and budgets of nitrogen and phosphorus in inner and central areas of Hiroshima bay were investigated for three years from January 1991 to December 1993. The mean loadings of nitrogen and phosphorus flowed into the entire bay were 870 tonN/month and 129 tonP/month, respectively. About 79 % of nitrogen and 84 % of phosphorus loadings were flowed into the inner area. The TN:TP and DIN:DIP atomic ratios of the discharged freshwater were about 15 and 21, respectively. The PON:POP and DIN:DIP atomic ratios of seawater in the bay varied

(1) 정회원, 목포해양대학교 해양환경공학전공

from 8 to 14 with a mean value of 11, and from 8 to 18 with a mean value of 12, respectively. Estimated fluxes of nitrogen and phosphorus based on the exchange of seawater were 585 tonN/month and 106 tonP/month, respectively, from the inner area to the central area, whereas those fluxes were 62 tonN/month and 107 tonP/month, respectively, from the central area to Akinada. When the remainders of nitrogen and phosphorus subtracted outflows from inflows should be sunk, sink fluxes of nitrogen and phosphorus per surface area of the entire bay would be about $9.83 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$ and $0.27 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$, respectively. In the central area, the remainders of nitrogen and phosphorus were greater than those in inner area. The residence times of nitrogen and phosphorus were estimated to be about 112 days, respectively, in the entire of Hiroshima Bay.

Keywords: budget, distribution, Hiroshima Bay, nitrogen, phosphorus

1. 서론

연안은 육지로부터 영양염류가 풍부하게 공급되기 때문에 생물생산이 활발한 해역이다. 육지로부터 유입되는 질소 및 인 등의 무기 영양염은 1차 생산에 의해 유기화, 현탁화되어 침강, 퇴적되고 그 일부는 상위의 동물플랑크톤으로 이동됨과 동시에 일부는 만 외부로 유출된다. 이는 지형과 해황 특성과 밀접하게 관계된다. 예를 들면 어느 정도의 많은 영양염이 공급되더라도 그것이 곧바로 만 외부로 유출된다면 생물생산에는 이용되지 못할 것이다. 따라서 유입되는 영양염류가 생물생산에 이용되기에는 충분한 체류시간이 요구된다. 그러나 폐쇄성이 강한 해역의 경우에는 체류시간이 너무 길면 해수와 영양염류가 정체되어 고농도로 증가함에 따라 부영양화 및 일부 종의 플랑크톤이 대량 번식하는 적조가 발생하게 되는 등 수질을 악화시켜 해수의 이용을 저해하고 오히려 유용 수산생물의 생산을 저해시키는 요인이 되기도 한다.

따라서 만 외부와의 물질교환을 포함한 만 전체의 물질수지와 만 내에서 그들의 분포와 원자비를 파악하는 것은 해역의 생물생산과 해양의 수질 관리에 있어 대단히 중요한 문제이다. 특히, 해역에서 질소는 인과는 달리 탈질산화에 의해서 질소가스로 변화되어 대기 중으로 방출되기도 한다. 또한 내만으로 유입하는 하천수의 수질에 따라서 해역내의 수질이 변화되며 특히 해역 내에서의 질소와 인의 구성 비율이 변화되어 식물플랑크톤의

종 구성에 영향을 끼쳐 결국에는 해양 생태계 전체에 나쁜 영향을 미치기도 한다.

굴 양식과 김 양식 그리고 해조류 양식이 이루어지고 있는 Hiroshima만은 Seto 내해 중에서 폐쇄성이 가장 심한 만의 하나로 알려져 있으나 아직까지 질소와 인과 같은 영양염의 수치에 관한 조사 연구가 이루어지지 않고 있어, 본 연구에서는 Hiroshima만을 만 내부와 만 중앙부로 구분해서 하천수의 유입량과 질소 및 인의 유입 부하량, 해역에서의 형태별 질소와 인의 분포와 그 구성비에 관해서 조사하였다. 또한, 만 내부와 만 중앙부 및 외부 해역간의 해수교환에 따른 질소와 인의 교환량을 각각 구하였으며 나아가서 각 해역에서의 그들의 체류시간도 각각 구하였다. 이와 같이 Hiroshima만을 대상으로 한 친 생물원소인 질소와 인의 분포와 수치 및 체류시간에 관한 연구는 연안 해역의 생물생산과 수질 관리에 있어서 중요한 자료로 이용될 것으로 생각된다.

2. 방법 및 재료

2.1 조사 해역

Hiroshima만은 만 내부가 Yashiro섬과 Kurahashi섬으로 둘러싸여 Seto내해에서도 폐쇄성이 가장 심한 만 중의 하나로 만 내에는 여러 개의 섬들이 산재하고 있어 해수교환이 나쁜 해역이다. 또한 이 해역에는 굴 양식을 비롯한 수산업이 성행하고 있으며 Hiroshima시를 통과하는 Ohta강과 Iwaguni시를 통과하는 Nishiki강 등을 포함하여

육상으로부터 많은 영양물질이 유입되고 있어 부영양화와 적조가 자주 발생되고 있다(廣島縣,1994). 橋本 등1994]은 Hiroshima만의 해황을 시공간적으로 해석한 결과 만 내부로에서 만 입구까지 여러 수질인자들이 큰 차이를 보이고 해황 특성도 Hashirajima해협을 경계로 큰 차이를 보인다고 보고하고 있어, 본 연구에서는 Hiroshima만을 만 내부와 만 중앙부로 구분하여 조사했다.

만의 면적은 축척이 1:25000인 해도의 해수면을 가로 세로 각 1 km 간격의 정방 격자로 구분하고 각 격자들의 면적을 합산하여 구하였고, 만의 체적은 1 km의 정방 격자 구간별 면적에 각 해당 격자의 수심을 곱해서 합산했다. 그 결과 만 전체 면적은 986 km², 만 내부 면적이 142 km²,

만 중앙부의 면적이 844 km² 였다. 만의 전체 체적은 21.7 km³, 만 내부의 용량이 2.10 km³, 만 중앙부의 용량이 19.6 km³ 였다

2.2 하천수 및 질소, 인의 유입 부하량

Hiroshima만 안쪽으로는 Ohta강을 포함한 10개의 하천으로부터, 만 중앙부로는 Nishiki강을 포함한 4개 하천으로부터 하천수가 유입되고 있다. 하천수 유입량은 “流量年表”(日本河川協會, [1991], [1992], [1993])에서 인용했고, 유입 하천수중의 총질소(TN)와 총인(TP)의 농도는 “公共水域の水質測定結果”(廣島縣, [1991], [1992], [1993])에

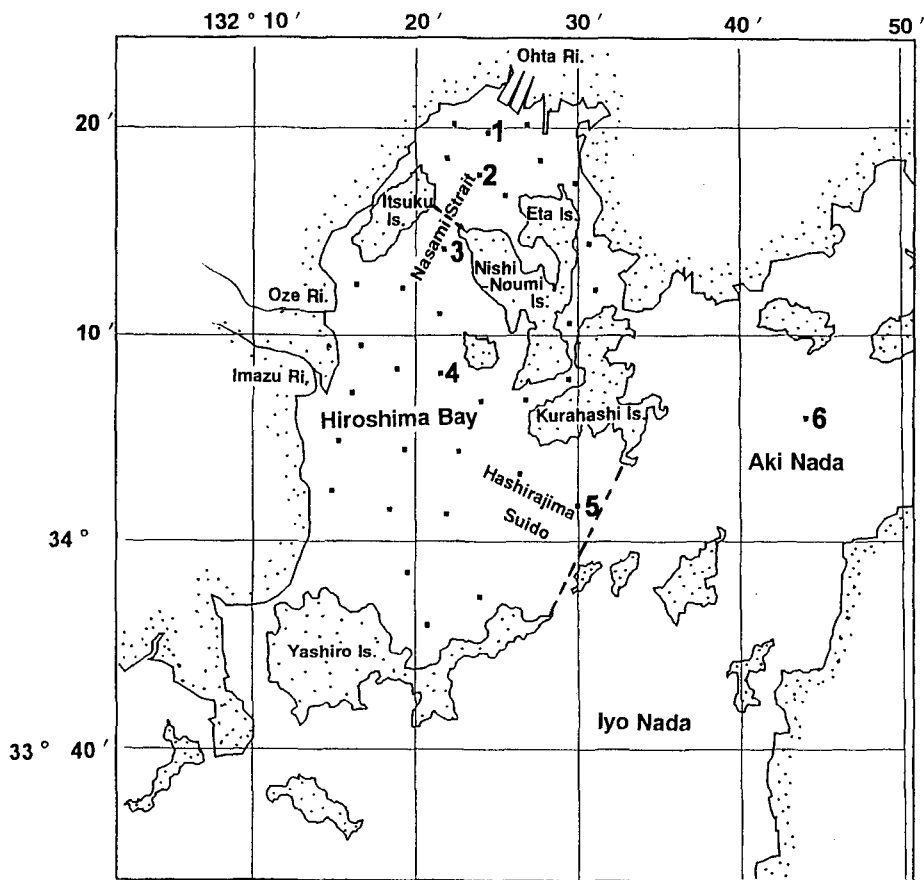


Fig. 1 Locations of sampling stations in Hiroshima Bay, Japan. The dots and those with numbers indicate the stations where salinity and nutrient measurements were carried out from January 1991 to December 1993, respectively

서 인용하여 하천유량과 질소 및 인의 농도를 곱해서 1991년 1월부터 1993년 12월까지 월별 Hiroshima만 내부와 만 중앙부로 유입되는 총질소 및 총인의 유입 부하량을 구했다. 이렇게 구한 하천의 유입량 이외에도 도시하수 및 산업폐수로부터 유입하는 총질소와 총인의 유입 부하량은 遠藤 [1978] 가 보고한 Hiroshima만으로 유입하는 총질소 및 총인의 유입 부하량 중 도시하수, 산업폐수 및 하천의 유입 부하량이 유입 총량에 차지하는 각각의 비율을 기준으로 해서 추정하여 계산하였다.

강우에 의한 질소 유입 부하량은 Kurahashi 측정소에서 1991년 1월부터 1993년 12월까지 관측된 강우량 (日本氣象廳, [1991], [1992], [1993]) 과 단위 강수량중의 각 형태별 질소농도 0.35 NH₄⁺-N mg/l 및 1.23 NO₃⁻+NO₂⁻-N mg/l (日本化學會, [1992]) 로부터 계산했다.

2.3 해수 중 질소와 인의 분포 및 계절 변화

각 형태별 질소와 인의 계절분포는 Hiroshima대학 수권환경학 연구실에서 1991년 1월부터 1993년 12월까지 연 4회 계절별로 분석된 자료를 이용했다. 만 내부 해역은 관측점 1번과 2번 지점에 해당되고, 만 중앙부 해역은 관측점 3, 4, 5번 지점, 만 외부 해역은 관측점 6번인 Akinada해역에 해당된다 (Fig. 1). 각 정점별 수심 0, 5, 10, 20, B-2 m (저층 2m)에서 채수해서 여과 (Millipore HA, 0.45 μmφ)한 후 냉동 보존해서 실험실로 옮겨 암모니아질소는 Indophenol법 (Sasaki and Sawada, [1980])으로, 아질산 질소와 질산질소는 Cu-Cd 환원법 (APHA·AWWA·WPCF, [1980]) 및 NED법 (Bendschneider and Robinson, [1952])으로 분석했고 인산 인은 Molybden blue (日本海洋學會, [1980])법으로 분석했다. 입자성 유기인 (POP)은 과염소산 가압분해법과 Molybden blue법 (Strickland and Parsons, [1972])으로 분석했으며, 용존성 총인 (DTP)은 과황산칼리 가압분해법 (Koroleff, [1983])으로 분석했다. 또한 GF/F 여과지 (Whatman)로 여과된 시수의 입자성 유기질소 (PON)는 CHN 분석기 (Yanako, MT-3)로 분석했다. 여기서 춘계는 3~5월, 하계는 6~8월, 추계는 9~10월, 동계는 12~2월로 구분해서 계절변동을 조사했다.

각 형태별 질소와 인의 현존량의 계산은 Hiroshima현 수산시험장에서 1991년 1월부터

1993년 12월까지 2, 4, 6번 지점의 표층과 저층에서 관측된 자료를 이용했다. 단 DTN 자료는 Kagawa대학의 해양자원 화학연구실에서 1993년 10월과 1994년 1월, 4월 및 6월에 지점 2, 4의 수심 0, 5, 10, 20, B-2m 에서 채수하여 고온 촉매산화법 (Sugimura and Suzuki, [1988])으로 분석된 자료를 이용했다. 또한 지점 6의 DTN 및 PON 자료는 1993년 10월부터 1994년 6월까지 Hiroshima대학 수권환경학 연구실에서 연 4회 계절별로 측정된 자료를 이용했다. 계절별로 측정된 POP, PON 및 DTP 자료를 매일 자료로 이용하기 위해 계절별 자료를 선형보간법을 이용해서 매일 자료로 구했다. 용존성 유기질소 (DON)는 DTN에서 DIN값을 뺀 것으로 DOP는 DTP에서 DIP를 뺀 것으로 했다. 또한 총질소 (TN)는 DTN과 PON을 합한 것으로, 총인 (TP)은 DTP와 POP을 합한 것으로 했다. 각 인자의 매일 관측일자가 각기 다르기 때문에 우선 전후 월의 관측치를 이용해서 매일 1일 치를 선형보간법에 의해서 구하고 이것을 깊이 방향으로 하중 평균해서 각 지점의 평균농도를 구했다. 따라서 각 해역별 각 형태별 질소와 인의 현존량은 각 해역별 평균농도와 각 해역의 체적을 곱해서 구했다.

2.4 해수 교환량과 질소 및 인의 교환량

보존 물질인 염분을 지표로 해서 만 내부와 만 중앙부 그리고 만 외부 해역간의 해수 교환량을 계산하고, 그 해수 교환량을 기초로 해서 총질소와 총인의 교환량을 구했다. 각 해역의 월평균 염분농도의 변화는 하천수의 유입과 증발, 강우 및 각 해역간의 해수교환에 의해서 좌우되기 때문에 식 (1)과 같이 표현된다 (柳 등, [1985]).

$$V_1(\Delta S_1/\Delta t) = Q_1(S_2 - S_1) - F_1 \cdot S_1 - R_1 \cdot S_1 \quad (1)$$

$$V_2(\Delta S_2/\Delta t) = Q_2(S_3 - S_2) - Q_1(S_2 - S_1) + F_1 \cdot S_1 - (F_1 + F_2)S_2 - R_2 \cdot S_2 \quad (2)$$

여기서 t는 시간 (1개월), S₁는 만 내부에서의 평균 염분농도, S₂는 만 중앙부에서의 평균 염분농도, S₃는 만 외부에서의 평균 염분농도, V₁는 만 내부의 체적, V₂는 만 중앙부의 체적, Q₁는 만 내부와 만 중앙부와의 1개월간의 해수 교환량 (m³/month), Q₂는 만 중앙부와 만 외부와의 1개월간의 해수 교환량 (m³/month), F₁은 만 내부로

의 하천수 유입량 (m^3/month), F_2 는 만 중앙부로
 의 하천수 유입량 (m^3/month), R_1 은 만 내부에서
 의 1개월간 강수량과 증발량과의 차 (m^3/month),
 R_2 는 만 중앙부에서의 1개월간 강수량과 증발량과

의 차 (m^3/month)이다.

염분농도는 같은 기간에 第六管區 海上保安本
 部 [1991], [1992], [1993] 에서 Hiroshima만과
 Akinada의 34개 정점 각층 (0, 5, B-2m)에서 측정

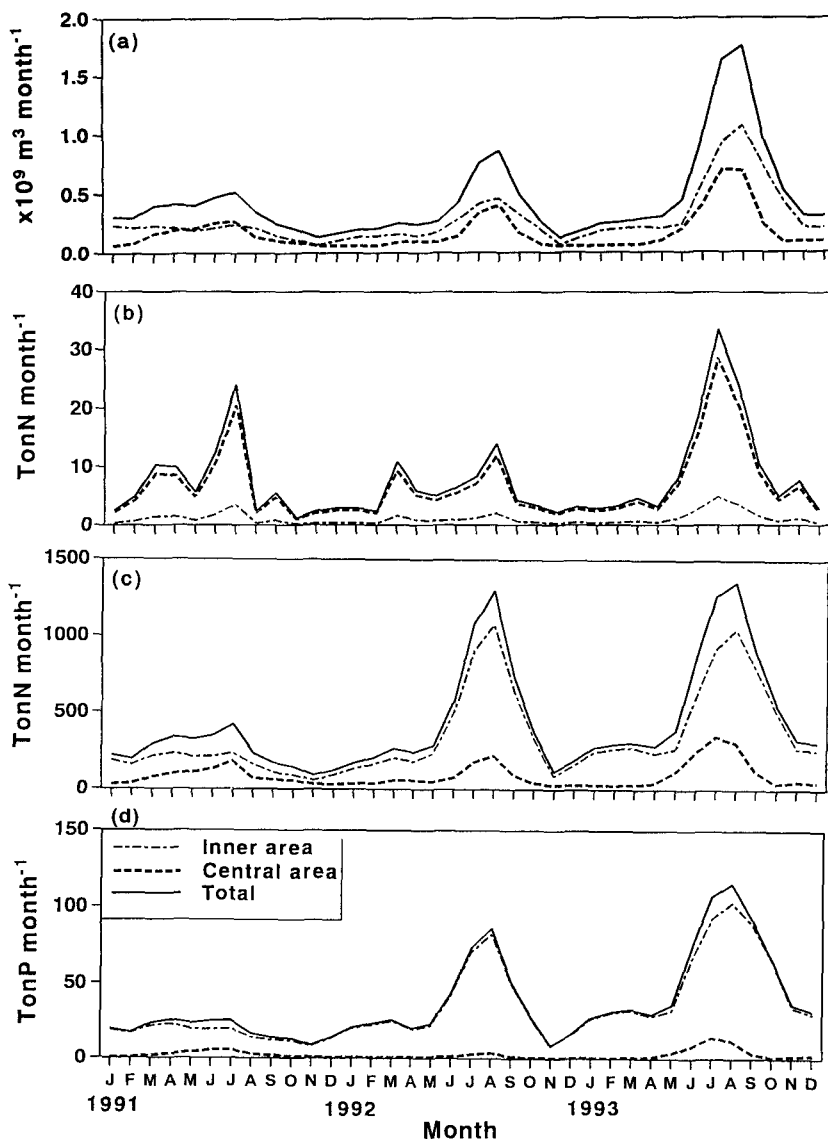


Fig. 2 Monthly variation of (a) fresh water inflow, (b) DIN loading from rainfall, (c) nitrogen loading and (d) phosphorus loading into the inner and central areas of Hiroshima Bay from January 1991 to December 1993

Hiroshima만에서의 질소, 인의 분포 및 수치

한 자료를 이용했다. 이 자료도 선형보간법을 이용하여 매월 1일치로 구한 후 깊이 방향으로 하중 평균해서 각 정점의 평균농도를 구했다. 같은 기간의 강수량의 자료는 기상청연보 (日本氣象廳, [1991], [1992], [1993])에서 인용했고, 증발량 자료는 田中·中島 [1975]가 조사한 결과를 인용

하여 강수량과 증발량의 차를 순 강수량으로 계산했다,

이상의 각 해역의 체적, 하천수 유입량, 각 해역에서의 평균 염분농도, 순 강수량 등을 식(1)과 식(2)에 대입해서 월평균 해수 교환량을 구했다. 또한 각 해역간의 총질소와 총인의 교환량은 측정

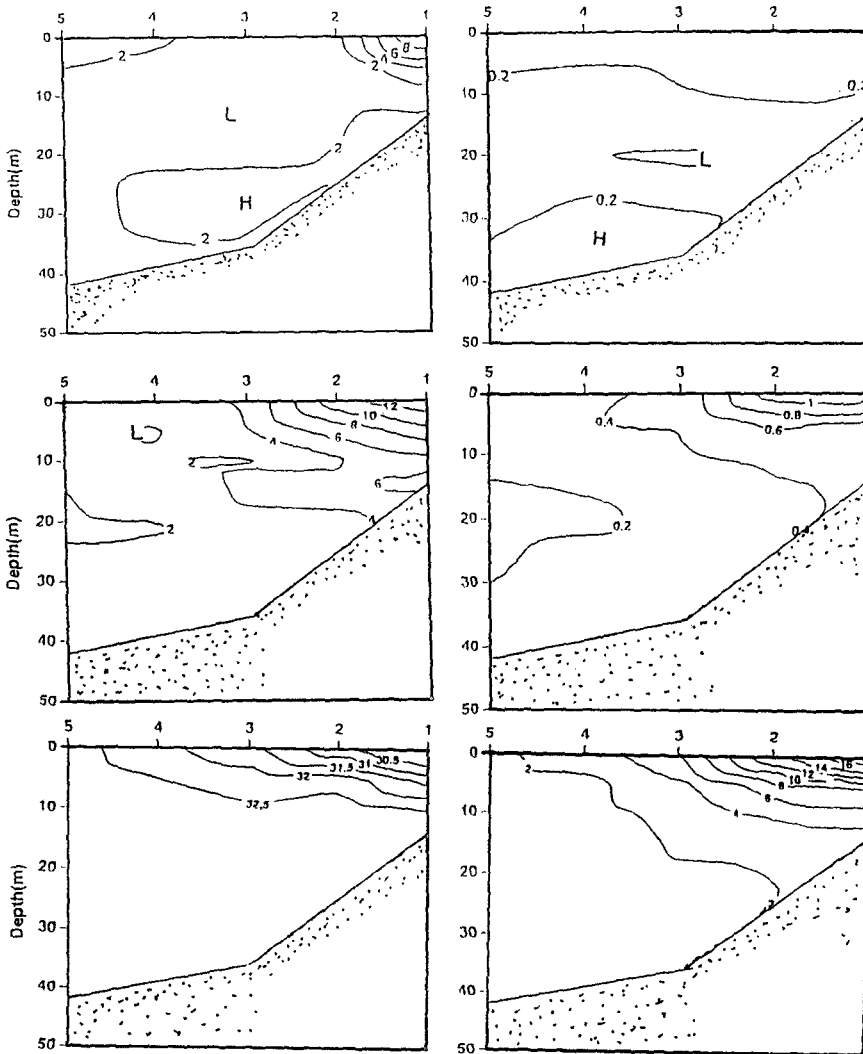


Fig. 3(a) Distribution of PON, POP, DIN, DIP and salinity, chlorophyll-a in water column of Hiroshima Bay in the stratified season (The stratified seasonal mean value from January 1991 to December 1993)

된 매월의 총질소 및 총인의 농도와 앞서 구한 해수 교환량을 식(3)과 식(4)에 대입해서 구하였다.

만 내부와 만 중앙부와의 총질소 및 총인의 교환량 :

$$\Phi = Q_1 (C_2 - C_1) \quad (3)$$

만 내부와 만 외부와의 총질소 및 총인의 교환량 :

$$\Phi = Q_2 (C_3 - C_2) \quad (4)$$

여기서 C_1 는 만 내부에서의 총질소 및 총인의 농도, C_2 는 만 중앙부에서의 총질소 및 총인의 농도, C_3 는 만 외부에서의 총질소 및 총인의 농도이다.

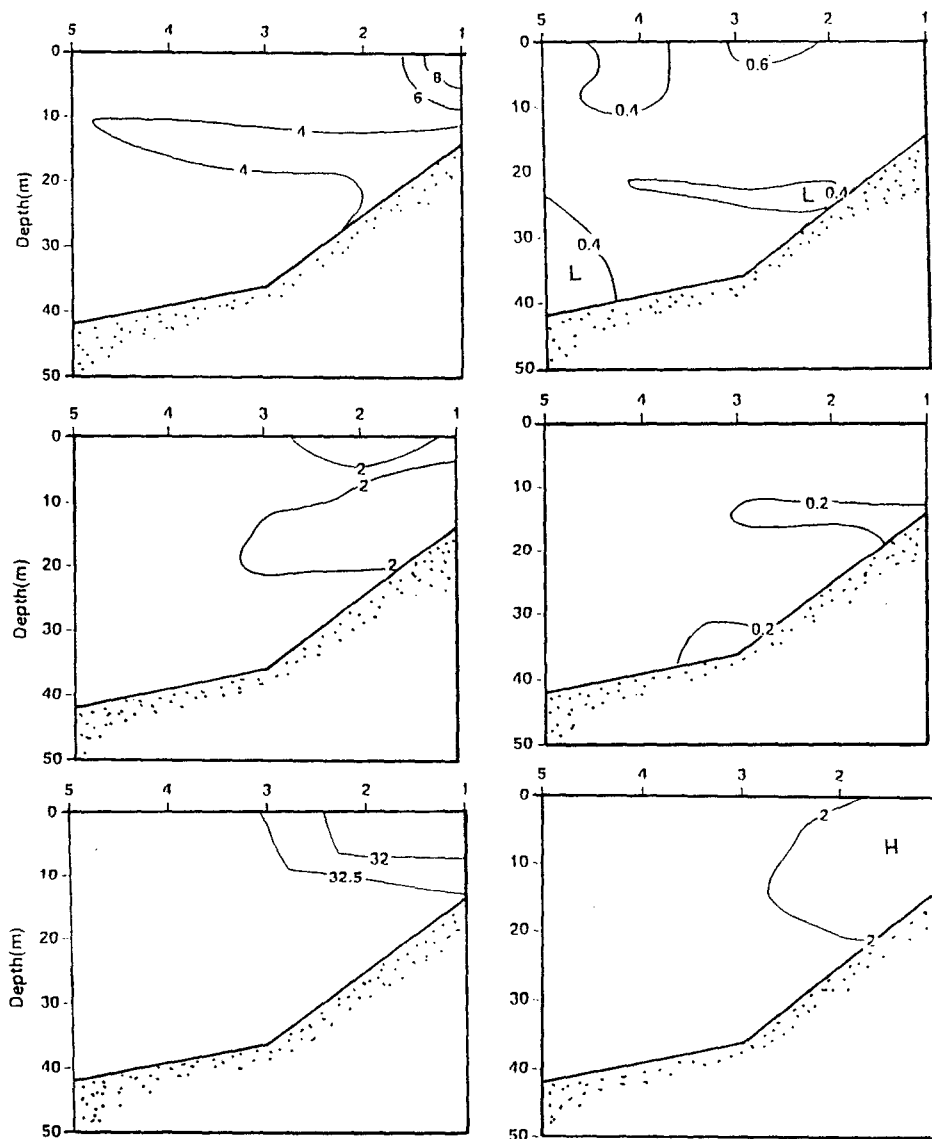


Fig. 3(b) Distribution of PON, POP, DIN, DIP and salinity, chlorophyll-a in water column of Hiroshima Bay in the mixing season (The mixing seasonal mean value from January 1991 to December 1993)

3. 결과 및 고찰

3.1 하천수, 질소 및 인의 유입 부하량

하천수 유입량은 장마가 길었던 1993년도에 많았고, 계절적으로는 하계에 많았으며 동계에 적은 양이 유입되고 있었다. 3년간에 걸쳐 히로시만 전체에 유입되는 평균 하천수 유입량은 0.453×10^9 m³/month 이었고 그 중 0.280×10^9 m³/month (62%)가 만 내부로 유입되고 나머지 0.172×10^9 m³/month는 만 중앙부로 유입되고 있었다 (Fig. 2a).

강우에 의해서 유입되는 용존성 무기질소 (DIN= $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$)는 만 전체로는 평균 7.72 tonN/month으로 그 중 만 내부로 평균 1.11 tonN/month, 만 중앙부로는 평균 6.61 tonN/month이 유입되고 있었다 (Fig. 2b). 이와 같은 결과는 遠藤 등 [1978] 이 보고한 Hiroshima만에서의 강우에 의한 질소 유입량 (연평균치 15 tonN/month)보다 다소 적은 양이었다. 강우에 의해서 유입되는 것을 포함해서 총질소 및 총인의 전체 유입량의 변동은 하천수 유입량의 변동과 유사하게 나타났다 (Fig. 2 a, c, d).

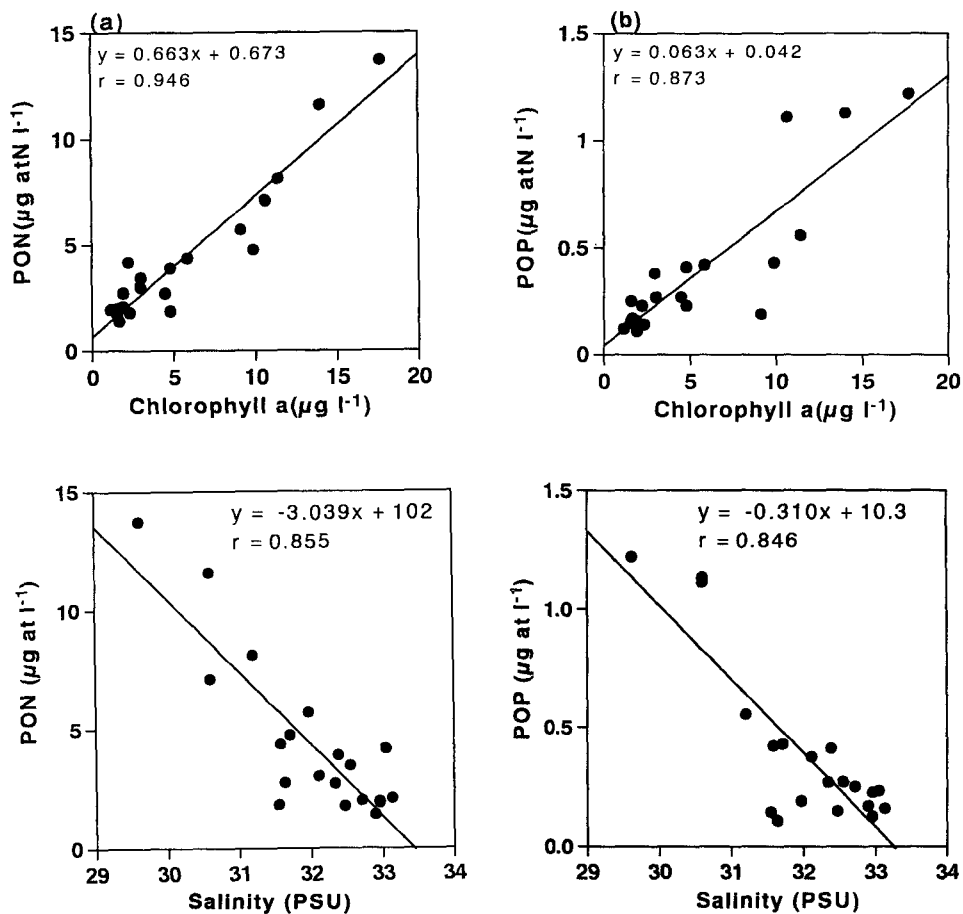


Fig. 4 Relationships between Salinity, chlorophyll-a and PON, POP in surface seawater of Hiroshima Bay (Annual mean values from January 1991 to December 1993)

월평균 총질소의 유입량은 870 tonN으로 그 중 686 tonN/month (79%)은 만 내부로 유입되고 있었고 나머지 184 tonN/month는 만 중앙부로 유입되고 있었다. 총인의 유입량은 129 tonP/month으로 그 중의 대부분인 109 tonP/month (84.3%)가 만 내부로 유입되고 나머지 20 tonP/month만이 만 중앙부로 유입되고 있었다. 유입부하가 만 중앙부에서보다 만 내부에서 크게 나타난 것은 Hiroshima만 내부의 면적 및 체적이 만 중앙부에 비하여 아주 작은 반면에 유입되는 하천 유량 및 총질소와 총인의 유입부하량은 상당히 크기 때문이다. 연평균 하천 유입량 중의 TN/TP의 원자비는 15, DIN/DIP 원자비는 21이었다. 이번 결과의 TN 및 TP 유입 부하량은 中西·浮田가 1978년에 원 단위법으로 구한 결과 (840 tonN/month)와 거의 비슷한 값을 보였다. 단 일반적으로 계산에 이용되는 공공수역의 수질 측정 자료는 맑은 날이 계속되는 수질이 안정된 날에 측정되는 사실과, 1979년 하계 1주간의 집중 호우시 Ohta강의 하천 유입량이 본 해역으로의 연간 총유입량의 21%를 차지한다는 연구 결과 (湯淺, [1990])에 근거하여 볼 때, 본 결과는 홍수시의 담수 유입량이 포함되지 않았기 때문에 여기서 구해진 TN 및 TP의 유입 부하량은 홍수량을 고려할 경우보다는 다소 과소평가 되었을 것으로 생각된다.

3.2 각 형태별 질소 및 인의 현존량

만 내부에서의 연평균 TN의 현존량은 397 ton이었고 그 중 DIN은 104 ton (26.2%), DON은 147 ton (37.0%), PON은 146 ton (36.8%)이 함유되어 있어 각 형태별 질소가 비슷한 비율로서 존재하고 있었다. 만 내부에서의 연평균 TP의 현존량은 64 ton이었고 그 중 DIP는 20 ton (31.3%), DOP는 16 ton (25.0%), POP는 28 ton (43.8%)으로 DOP가 조금 낮게 분포하고 있었다. 한편, 만 중앙부에서의 연평균 TN의 현존량은 2766 ton이었고 각 형태별 질소의 구성비중 DIN는 824 ton (29.8%), DON은 1231 ton (44.5%), PON는 711 ton (25.7%)으로 DON의 양이 다소 많았다. 또한 만 중앙부에서 연평균 TP의 현존량은 418 ton으로 그 중 DIP는 159 ton (38.0%), DOP는 99 ton (23.7%), POP는 160 ton (38.3%)으로 만 내부와 마찬가지로 DOP의 양이 조금 낮았다. 총질소의 현존량 중 만 내부에서 12%, 만 중앙부에서 88%가 존재하고 있으며 총인의 현존량은 만 내부에서 13%, 만 중앙부에서 87%를 차지하고 있었다.

3.3 질소와 인의 분포 및 계절변동

수층의 연직적인 물리 구조가 서로 다른 성층기 (5월과 8월)와 혼합기 (1월과 10월)로 구분해서 3년간 각 형태별 질소와 인의 연직적인 분포를 Fig. 3a와 Fig. 3b에 나타냈다. PON, POP 및 DIN의 분포는 염분의 분포와 마찬가지로 성층기에 만 내부의 표층에서 높았고, 만 입구의 저층에서 낮았다. 하천수로부터 공급되는 DIN 및 DIP의 많은 양이 조류에 의해서 섭취되었으나 하천수 중의 DIN/DIP 원자비가 하계에 31, 동계에 18로 높게 나타나고 있는 것으로 보아 DIP가 먼저 고갈되는 것으로 생각된다. 한편, 혼합기에는 표면 해수의 냉각에 의해서 수층의 연직적인 혼합이 이루어져 각 형태별 질소와 인 모두 수층별 연직적인 농도차가 뚜렷하게 나타나지 않았으나 DIN만이 만 내부 표층에서 $6 \mu\text{g-at}/\ell$ 보다 높은 농도를 보였다. 이는 앞서 기술한 유입 하천수중의 DIN/DIP 원자비가 높은 것과 관련있는 것으로 생각된다.

하천수가 유입하는 인근 해역에서의 Chlorophyll-a 농도와 염분농도와는 높은 역의 상관 관계 ($r=-0.86$)가 나타났고 PON, POP 농도와 염분농도와도 각각 $r=-0.86$, $r=-0.85$ 으로 높은 역의 상관 관계가 나타났다. 한편, PON, POP 농도와 Chlorophyll-a 농도와는 각각 $r=0.95$, $r=0.87$ 으로 높은 정(正)의 상관 관계를 보였다 (Fig. 4). 그러나 하천수가 유입하는 하천 인근 해역을 제외한 Hiroshima만 전역에서의 DIN, DIP 농도와 염분농도와는 명확한 관계가 나타나지 않았다 ($r=0.20$ 이하). 그 이유는 하천수로부터 공급되는 DIN 및 DIP가 식물플랑크톤에 섭취되어 증식됨으로써 Chlorophyll-a와 PON, POP가 증가되었기 때문으로 생각된다.

Hiroshima만 내부와 만 중앙부에서의 3년간의 평균 DIN, DIP 및 PON, POP의 계절별 농도 변화를 Fig.5에 나타냈다. PON과 POP의 농도는 춘계에서 하계에 걸쳐 높고 추계와 동계에는 낮은 경향을 보였다. 이와는 반대로 DIN와 DIP의 농도는 추계에서 동계에 걸쳐 높은 경향을 보였다. 즉 봄부터 여름까지는 온도의 상승에 따라 퇴적물 중의 미생물에 의한 유기물의 분해가 활발하여 퇴적물로부터 영양염의 용출이 증가하고, 강수량의 증가에 따라 육상으로부터의 영양염의 공급이 가장 많은 시기로 식물플랑크톤의 증식이 촉진되어 DIN 및 DIP가 흡수되는 반면, PON 및 POP의 농도는 증가하기 때문으로 생각된다. 이와는 반대로

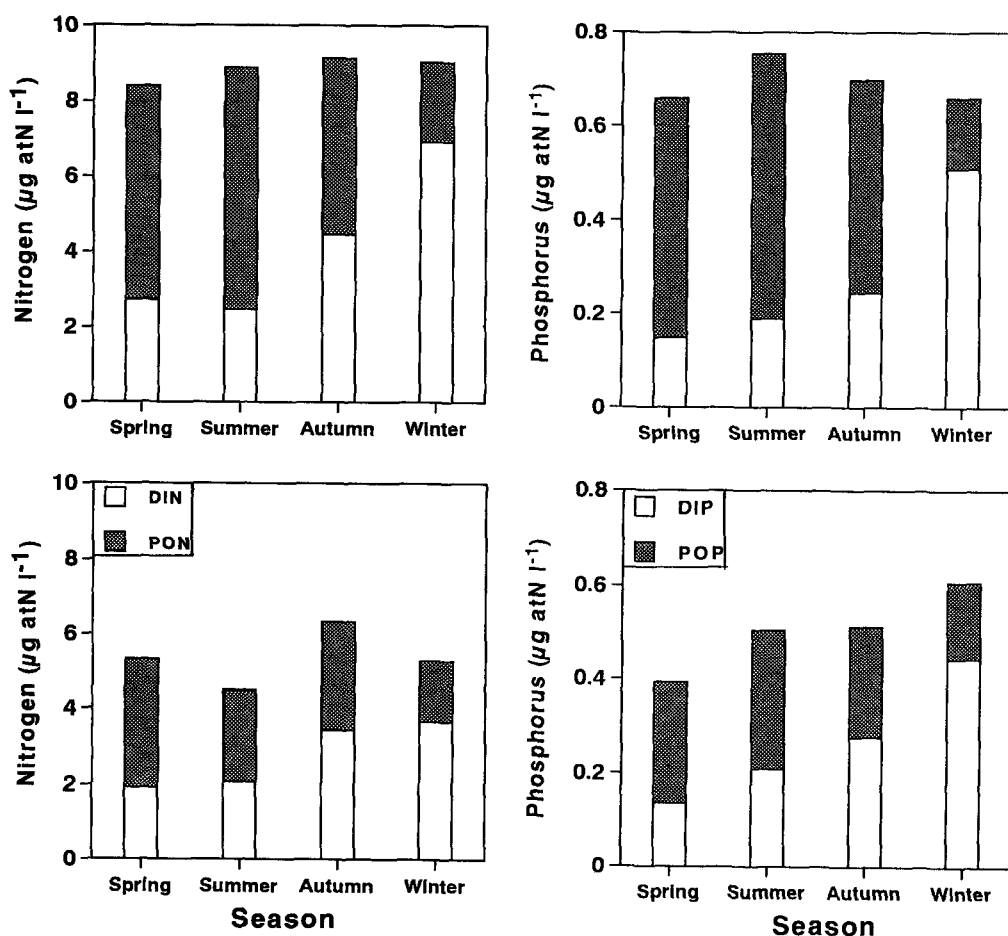


Fig. 5 Seasonal changes in various forms of nitrogen (in right) and phosphorus (in left) in the water column of the inner (upper) and the central (lower) areas of Hiroshima Bay (Annual mean concentrations from January 1991 to December 1993)

가을부터 겨울까지의 기간에는 강수량의 감소에 따라 육상으로부터 영양염의 공급량이 적고, 수운의 감소에 따라서 식물플랑크톤의 증식이 억제되어 DIN과 DIP의 섭취 속도가 감소되어 여름 보다는 PON 및 POP 농도가 낮게 나타나는 것으로 생각된다.

각 정점별 깊이 방향으로 하층 평균한 3년간의 연평균 DIN의 농도는 만 내부와 만 중앙부에서 각각 $4.14 \mu\text{g-atN}/\ell$ 과 $2.77 \mu\text{g-atN}/\ell$ 이었고, DIP의 농도는 두 해역에서 모두 $0.27 \mu\text{g-atP}/\ell$ 로, DIN의 농도는 만 내부와 만 중앙부간 농도 차

가 나타났으나 DIP의 농도는 해역간 농도 차가 나타나지 않았다. 이는 앞서 언급했듯이 DIN 및 DIP의 연직적인 농도 분포에서도 동일한 경향을 보였다 (Fig. 3a and Fig. 3b). 연평균 PON의 농도는 만 내부와 만 중앙부에서 각각 $4.71 \mu\text{g-atN}/\ell$ 과 $2.59 \mu\text{g-atN}/\ell$ 였고, POP 농도는 두 해역에서 각각 $0.42 \mu\text{g-atP}/\ell$ 와 $0.24 \mu\text{g-atP}/\ell$ 였다.

만 내부와 만 중앙부에서 PON/POP 원자비는 8~14 였으며, 연평균치는 두 해역 모두 11이었다 (Fig. 6). 이는 Redfield et al. [1963] 가 보고한 일반 해역에서의 해양 플랑크톤의 평균적인 N/P

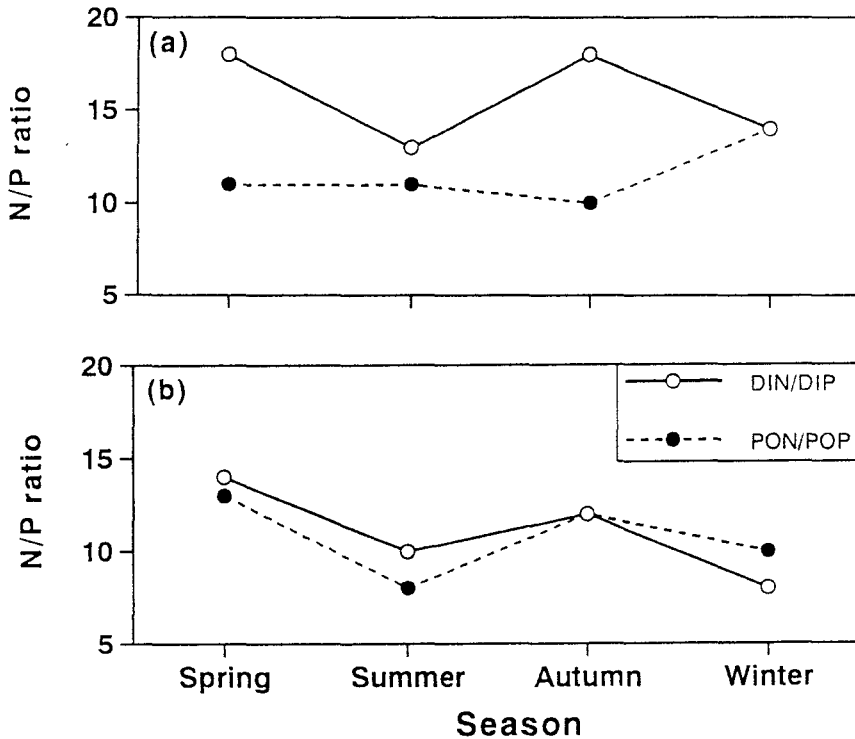


Fig. 6 Seasonal changes in DIN/DIP and PON/POP atomic ratios in (a) the inner area and (b) the central area of Hiroshima Bay from January 1991 to December 1993

원자비인 16보다 낮은 수치로 나타났다. 佐佐木 [1991] 는 1980년 5월, 6월, 7월에 Tokyo만에서 관측 조사한 PON/POP 원자비는 상층에서는 10.8, 저층에서는 11.3 이라고 보고했고, 門谷·岡市 [1987] 는 Osaka만에서 PON/POP 원자비가 11.6, Harima해역에서는 13.4이라고 보고하였다. 이들의 값들은 금번의 Hiroshima만에서의 PON/POP 원자비와 거의 비슷한 값을 나타내고 있다.

한편, 만 내부와 만 중앙부에서의 DIN/DIP 원자비는 8~18의 범위로 변동하였고 연평균치는 만 내부에서 15, 만 중앙부에서 11로 만 전체에서는 12로 나타났다. 이와 같은 N/P원자비로 볼 때, Hiroshima만에서는 질소가 조류 증식을 제한하고 있는 것으로 추측되었다. 또한 만 중앙부에서보다 만 내부에서 높게 나타난 이유는 유입 하천수중의 DIN/DIP비가 높게 나타나고 있기 때문으로 생각

된다. 佐佐木 [1991] 가 Tokyo만에서 조사 보고한 DIN/DIP 원자비는 표층에서 94.3, 저층에서는 29.6이었고, 門谷·岡市 [1987] 은 DIN/DIP원자비가 Osaka만에서는 19.8, Harima해협에서는 15.0 이라고 보고했다. 이와 같은 결과는 최근 고도처리에 의한 오폐수중의 인의 제거와 무인세제의 사용 등에 의해서 해역으로의 인의 유입량은 매년 감소하고 있는 반면, 질소의 유입량은 변함없이 증가하고 있기 때문에 연안 해역에서의 DIN/DIP 원자비는 외해에서 보다 높게 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 이번 Hiroshima만에서는 다른 내만과는 달리 DIN/DIP원자비는 그다지 높지 않았다. 높은 DIN/DIP원자비의 하천수가 Hiroshima만 해역으로 유입한 후 해역 자체에서는 그 원자비가 낮게 나타나고 있는 이유는 해역 내에서의 패류양식과 해조류 등의 수산물 양식 및 탈질산화에 의해서 인에 비해서 질소가 더 많이 섭취 제거되고

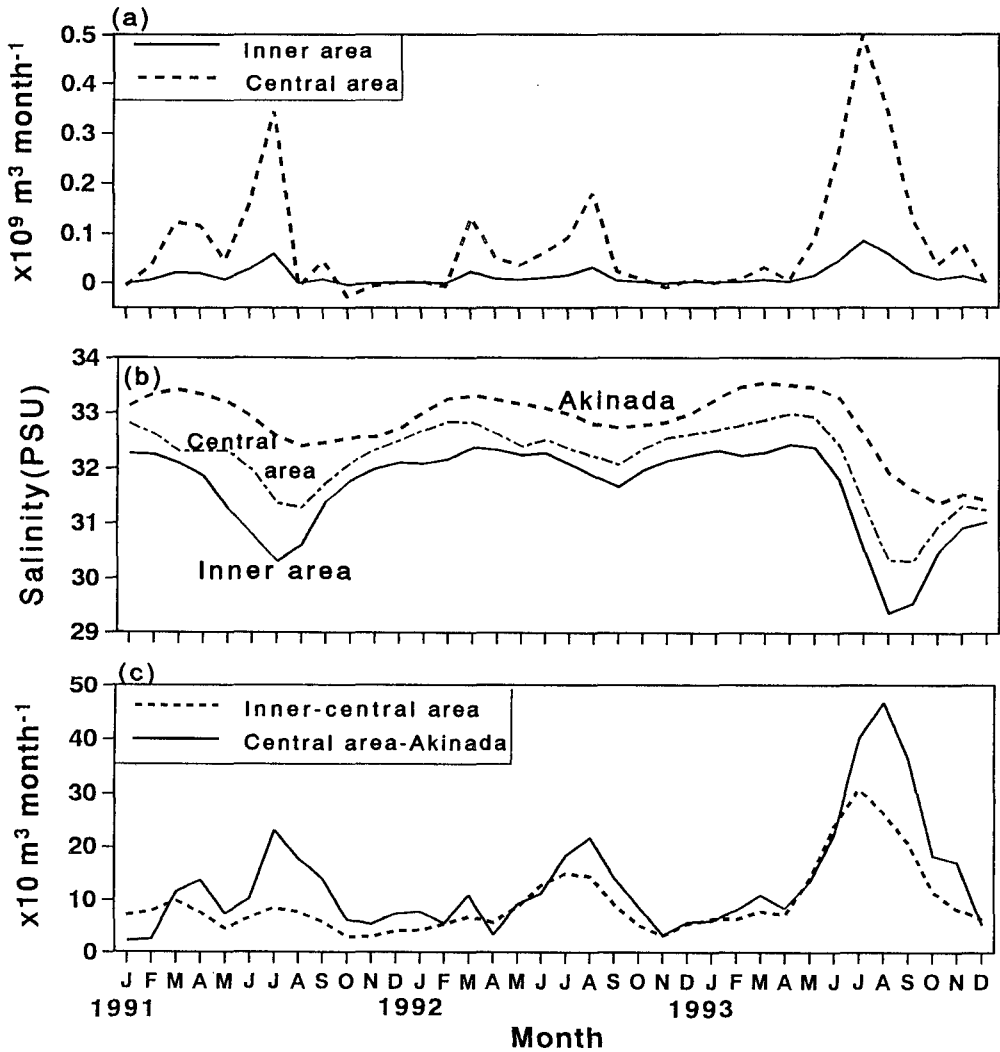


Fig. 7 Variations of (a) net precipitation (rainfall minus evaporation), (b) salinity and (c) sea water exchange in the inner and central areas of Hiroshima Bay, and Akinada from January 1991 to December 1993

있기 때문으로 생각된다. 이와 같은 Hiroshima만의 조사 결과는 이전의 조사 결과와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 예를 들면 瀧本 등 [1991] 은 Hiroshima만 내부 해역에서 조류 증식에 대해 빛, 수온 및 무기 영양염등의 영향을 조사한 결과, 연간 저층에서는 햇빛이, 동계에는 수온이, 하계에는 DIN이 조류의 증식을 제한한다고 보고했다. 한편, 山本 [1984] 는 1972년부터 1981년까지 Seto

내해의 각 해역에서 화학성분을 측정된 결과 Hiroshima만 에는 특히 DIN이 낮다고 보고했다. 또한 李 등 [1995] 은 1994년 6월에 Hiroshima만 하구역에서부터 Ise만 및 Bungo해협을 통해 태평양에 이르는 해수표면의 DIN 및 DIP 농도를 측정 한 결과 Hiroshima만 내부에서 만 중앙부까지는 DIN/DIP 원자비가 4~9 로 상당히 낮고, 만 내부와 하구역을 제외하고는 질소가 식물플랑크톤의

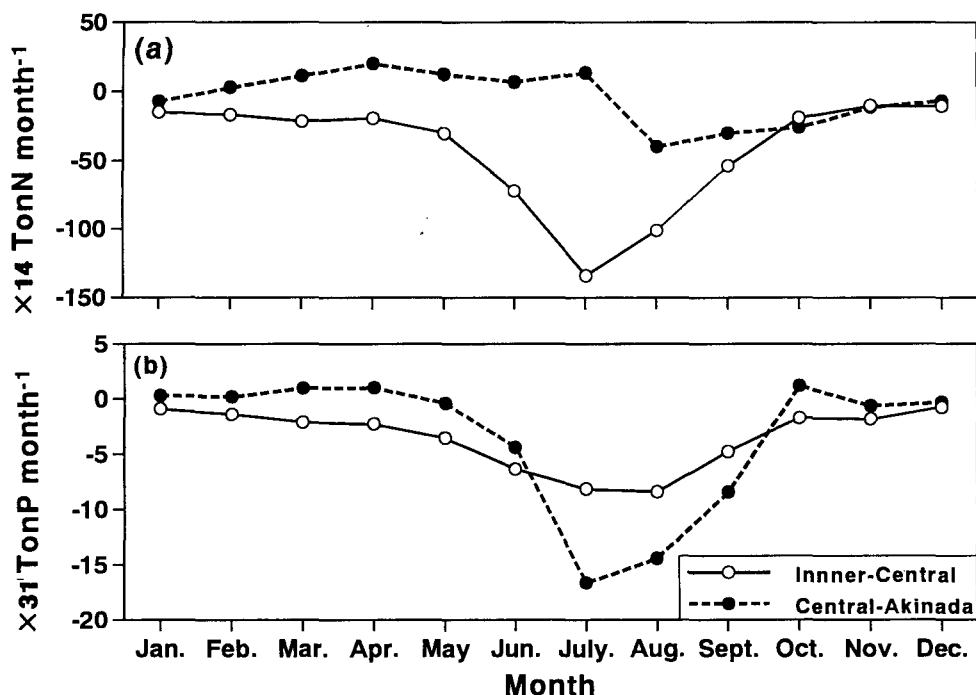


Fig. 8 The net exchanges of total nitrogen in inner-central areas of Hiroshima Bay and central areas of Hiroshima Bay-Akinada during January 1991 to December 1993 (monthly mean values for 3 years)

증식을 제한하고 있다고 보고했다.

3.4 해수 교환량 및 질소, 인의 교환량

강수량에서 증발량을 뺀 순 강수량은 봄부터 여름에 걸쳐서는 언제나 강수량이 많은 정(正)의 값을 보이고, 가을에서 겨울까지의 기간에는 아주 낮아 부(負)의 값을 보이는 경우도 가끔 있었다. (Fig. 7a). 염분 농도의 분포는 만 내부에서 만 외부에 걸쳐 상당히 큰 농도 차이를 보여, 만 내부로의 담수 유입이 많다는 것을 보여주고 있었다 (Fig. 7b). 계절별 염분의 농도는 하계에 낮았고 특히 1991년 7월과 1993년 8월과 9월에 낮았다. 이는 Fig. 2에서 보여주고 있듯이 장마 시 강수량이 많았기 때문으로 생각된다. 강수량에 의한 해역에서의 염분 농도의 감소는 강우시보다 약 1개월 정도 늦게 나타나는 경향을 보였다.

평균적인 해수 교환량은 만 내부와 만 중앙부 사이에서 $9.47 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{month}$, 만 중앙부와 만 외

부 해역간에는 $13.2 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{month}$ 로 매년 강수 및 하천 유입이 많은 하계에 많은 해수가 교환되고 있었다 (Fig. 7c). 해수교환에 따른 각 해역간의 총질소와 총인의 교환량은 많은 부분이 하계에 유출되고 있는 것으로 나타났다 (Fig. 8 a,b). 이는 하계에 해역으로 유입한 하천수는 해역의 성층현상으로 인하여 저층수와 연직혼합이 제한되고 상층수의 이류를 가속화함으로써 질소와 인을 만 외부로 유출시키기 용이하기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 동계에서 춘계에 걸쳐서는 오히려 미소하나마 외부해역에서 만 중앙부로 질소와 인이 유입되는 현상도 나타났다. 3년간 평균한 총질소 및 총인의 월평균 교환량은 만 내부에서 만 중앙부로 585 ton의 질소 및 106 ton의 인이 유출되고, 만 중앙부에서 만 외부해역으로는 62 ton의 질소 및 107 ton의 인이 유출되고 있는 것으로 밝혀졌다.

Hiroshima만 내부와 만 중앙부에 걸쳐 질소 및 인의 수지를 Fig. 9a, b에 정리하여 나타냈다. 하

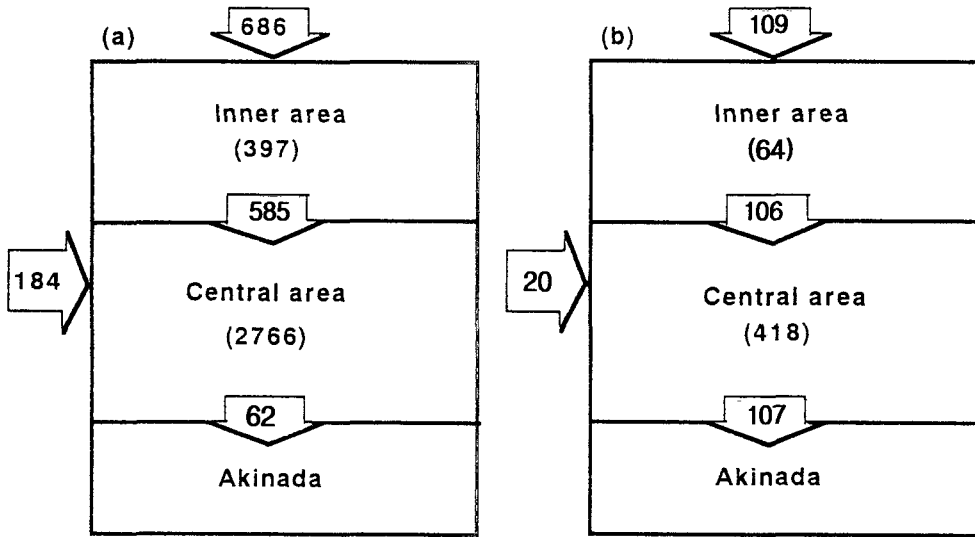


Fig. 9 The budget of nitrogen and phosphorus in Hiroshima Bay. Values in arrow mark mean fluxes (ton/month), and those in parenthesis mean standing stocks (ton N) from January 1991 to December 1993

천으로부터 Hiroshima만으로 유입하는 총질소 및 총인의 유입부하량은 각각 870 ton N/month와 129 ton P/month으로 그 중 79%의 총질소와 84%의 총인이 만 내부로 유입하고 있다. 만 내의 총질소 및 총인의 현존량이 끊임없이 변동되고 있겠으나 그 변동폭을 포함하여 만 내의 현존량을 정상상태라고 가정하면 육상, 강우 및 인접 해역으로부터의 총질소 및 총인의 유입량과 유출량과의 차는 각 해역에 있어서의 침강량으로 남을 것이다. 이렇게 계산한 총질소의 침강량은 만 내부에서 $8.54 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$, 만 중앙부에서 $10.1 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$ 로 Hiroshima만 전체에서는 $9.83 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$ 으로 계산되었다. 한편, 총인의 침강량은 만 내부에서 $0.25 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$, 만 중앙부에서 $0.27 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$ 으로 만 전체에서는 $0.27 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$ 으로 계산되었다. 그러나 이와 같은 질소 및 인 침강량의 전부가 저층에 퇴적되지는 않을 것이다. 즉, 침강된 질소와 인의 일부는 다시 수층으로 용출된다든지 탈질산화 및 생물 등에 의해서 해역으로부터 유출될 것으로 생각된다. 예를 들면 Kim et al. [1997]에 의하면 1994년 8월부터 1995년 5월까지 Hiroshima만 내부와 만 중앙부의 퇴적물에서 측정한 연평균 탈질산화 속도는 각각 $17.2 \mu\text{g}$

$-\text{atN/m}^2 \cdot \text{hr}$ 와 $10.7 \mu\text{g-atN/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 Hiroshima만 전체에서는 $14.0 \mu\text{g-atN/m}^2 \cdot \text{hr}$ 이라고 보고하고, 이와 같은 탈질산화 속도와 Hiroshima만 표면적으로부터 계산한 탈질산화에 의해 대기 중으로 방출하는 질소량은 만 내부에서 24.6 tonN/month , 만 중앙부에서 91.0 tonN/month 으로 만 전체에 대해서는 139 tonN/month 에 해당된다고 보고하고 있다. 이와 같이 탈질산화 및 어획에 의해서 제거되는 질소량을 고려하면 앞서 계산된 질소와 인의 침강량은 다소 감소될 것으로 예상된다. 본 결과치는 柳 등 [1985]이 Osaka만에서 같은 방법으로 구한 질소 및 인의 침강량 ($12.0 \text{ gN/m}^2 \cdot \text{yr}$ 및 $0.58 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$)과 비슷한 결과를 보였다.

질소 및 인의 유입량에 대한 만 내에서의 질소 및 인의 침강량의 비율은 질소의 경우, 만 내부에서 15%, 만 중앙부에서 92%였고, 인의 경우에는 만 내부에서 3%, 만 중앙부에서 18%로서 만 내부에서 보다 만 중앙부에서 많은 양의 질소와 인이 침강되고 있었다. 이는 만 중앙부가 만 내부에 비해 만의 용량 및 면적을 갖고 있기 때문이며, 어획 및 탈질산화 등에 의해 많은 양의 질소 및 인이 만 중앙부에서 더 많이 손실되고 있기 때문이라고 생각된다.

한편, 질소 및 인의 유입량에 대한 유출량의 비율은 질소의 경우, 만 내부에서는 85.3%, 만 중앙부에서는 8.1%가 만 외부해역으로 유출되고 있었고, Hiroshima만 전체에 대해서는 유입량에 대해 7.2%의 양이 유출되고 있었다. 인의 경우에는 만 내부에서는 유입량의 97.2%가 만 중앙부로, 만 중앙부에서는 유입량의 84.7%가 만 외부 해역으로 유출되고 있으며 만 전체에 대해서는 유입량의 82.8%가 유출되고 있었다. 이상의 결과로 보아 질소의 경우에는 탈질산화 및 생물에 의해 빠르게 섭취되어 만 내에서 질소의 침강량과 제거량은 많은 대신 인은 부유물질 등에 흡착되어 외부 해역으로 많은 양이 유출되는 것으로 판단되었다. Hiroshima만에서 이와 같은 질소와 인의 거동은 유입하천수 중의 낮은 TN/TP 원자비가 해역에서는 그 원자비가 점점 증가하는 이유중의 하나가 아닌가 생각된다.

각 해역에서의 질소 및 인의 현존량을 1개월간의 총 유입 부하량으로 각각 나눈 질소와 인의 평균 체류시간은 질소의 경우 만 내부에서 17일, 만 중앙부에서 110일, 만 전체에서는 112일 이었다. 한편, 인의 경우에는 만 내부에서 18일, 만 중앙부에서 99일이었고 만 전체에서는 질소와 동일하게 112일 정도로 계산되었다. 이는 柳 등 [1985] 이 보고한 Harima해협 (질소: 140일, 인: 360일)에서의 체류시간 보다는 짧고, Osaka만에서의 체류시간 (질소: 75일, 인:50일) 보다는 긴 체류시간을 보였다.

후 기

본 연구에 있어 많은 조언과 지도를 해주신 Hiroshima대학 수권환경학연구실의 松田 治교수와 山本 民次조교수님께 깊은 감사를 드리며, 관측과 시험분석에 많은 협조를 하여주신 Hiroshima 대학 수권환경학연구실의 실원과 실습선 Toyoshiomaru (豊潮丸)의 승무원 여러분께도 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] APHA·AWWA WPCF, 1980, Standard Method for the Examination of Water and Waste Water, 15th ed., American Public Health Ass., Washington D.C., 370-373.
- [2] Bendschneider, K. and Robinson, R. J., 1952, A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, Vol. 11, 87-96.
- [3] Kim, D. H., Matsuda, O. and Yamamoto, T., 1997, Nitrification, denitrification and nitrate reduction rates in the sediment of Hiroshima Bay, Japan. *J. of Oceanogr.* Vol. 53, 317-324.
- [4] Koroleff, F., 1983, Total organic nitrogen. pp. 162-173. In *methods of seawater analysis*. Bull. Fish. Res. Bd, Canada, 167 (2 eds), 311 pp.
- [5] Redfield, A. C., Ketchum, B. H. and Richards, F. A., 1963, The influence of organisms on the composition of sea-water. pp. 26-77, In *The Sea.*, Vol. 2, ed, M.N.Hill, Wiley Interscience, New York.
- [6] Sasaki, K. and Sawada, Y., 1980, Determination of ammonia in estuary. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, Vol. 46, 319-321.
- [7] Strickland, T. D. H. and Parsons, t. R., 1972, *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Bull. Fish. Res. Bd, Canada, 169(2nd Ed), 311 pp.
- [8] Sugimura, Y. and Suzuki, Y., 1988, A high temperature catalytic oxidation method of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of liquid samples. *Mar. Chem.* Vol. 24, 105-131.
- [9] 廣島縣水産試験場, 1991, 1992, 1993, 廣島縣水産試験場 研究報告書, 93-95.
- [10] 廣島縣, 1994, 廣島縣環境白書, 71-72.
- [11] 廣島縣, 1991, 1992, 1993, 公共水域の水質測定結果, 643 pp.
- [12] 橋本 俊池·松田 治·山本 民次·米井 好美, 1994, 廣島灣の海況特性, 廣島大學生物生産學部紀要, Vol. 33, 9-19.
- [13] 中西 弘·浮田 政夫, 1978, 環境における窒素, リンの循環とその制御, 環境創造, Vol. 8, 225-234.
- [14] 門谷 茂·岡市 友利, 1987, 大阪灣·瀋磨灣の C, N, P循環におけるプランクトンの役割, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 25, 158-164.
- [15] 山本 克之, 1984, 瀬戸内海における化學成分の平均分布. 神戸海洋氣象臺報氣, 202, 1-21.
- [16] 田中 正昭·中島 湯太郎, 1975, 燻難の海面における熱收支, 京大防災研究所年報, 18, 89-98.
- [17] 日本河川協會, 1991, 1992, 1993, 流量年表, 317-332.

- [18] 日本氣象廳, 1991, 1992, 1993, 氣象廳年報 34 pp.
- [19] 日本化學會, 1992, 陸水の化學. 日本化學會編, Vol. 14, 69-78.
- [20] 日本海洋學會, 1980, 海洋環境調査法, 恒成社厚生閣, 東京, 666 pp.
- [21] 日本海洋學會, 1986, 沿岸環境調査マニュアル(底質・生物偏). 恒成社厚生閣, 80-84. 東京.
- [22] 第六管區海上保安本部. 1991, 1992, 1993, 海洋概報(沿岸海況調査, 廣島灣), 7-9.
- [23] 佐佐木 克之, 1991, プラクトン生態系と窒素, リン循環. 沿岸海洋研究ノート, Vol. 28, 129-139.
- [24] 滝本 和人・向井 哲雄・紫田 輝一・小林 聲, 1991, 廣島灣北部域における藻類繁殖に對する制限因子の検討. 用水と廢水, Vol. 33, 12-18.
- [25] 李 英植・向井 哲雄・龍本 和人・岡田 光正, 1995, 瀬戸内海西部域, 太平洋における植物プラクトン群集のサイズ構造とその制限營養鹽生に關する研究. 水環境學會誌, Vol. 18, 717-723.
- [26] 柳 哲雄・紫木 秀之・武岡 英降, 1985, 瀋磨灣・大阪灣の鹽分, 窒素, リン收支, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 22, 159-164.
- [27] 遠藤 拓郎・木村 友博・村上 影男, 1978, 廣島灣北部域の窒素收支. 廣島市の水産振興に關する調査分析報告書, 廣島水産研究會, 55-57 pp.
- [28] 湯 淺 一郎・上鳥 英機・宝田 盛康・橋本 英資, 1990, 廣島灣における夏季の河川流量變化の河川水分散への影響, 水産海洋研究, Vol. 54(2), 129-136.