

水深이 얇은 富營養湖에서 溶存有機物の 舉動

박 제 철

인본, 동경수신대학교 해양환경학과, 현재, 국립환경연구원 수질연구부

Dynamics of Dissolved Organic Matter in eutrophic shallow Lake Kasumigaura, Japan.

Je-Chul Park

Dept. of Marine Science, Tokyo University of Fisheries, Japan

The present address: Department of Water Quality Research, National Institute of Environmental Research

Abstract

The seasonal and spatial changes in dissolved organic carbon(DOC) in Lake Kasumigaura, a shallow and eutrophic lake, were analyzed from October 1992 to October 1995. The proportion of T-DOC was classified by labile(L-DOC) and refractory DOC(R-DOC) on the basis of long-term incubation, and fractionated the molecular weight of T-DOC by ultrafiltration. The porewater DOC were measured at sedimental surface of the central basin in order to evaluate the DOC released from the sediment. The proportion of L-DOC and R-DOC were accounted for about 15% and 85% of T-DOC in the central basin, respectively. The molecular weight(MW) distribution occupied some 60% of the low and medium MW. The horizontal variation of T-DOC concentrations trended to higher in the central basin than in the inlet of influent rivers, because of contribution by autochthonous organic carbon loading. The seasonal variation of T-DOC showed to higher summer than winter in the inlet of influent, but at the central basin it fluctuated little seasonally. During the high increase of porewater DOC in 1994 evaluated the high release possibility from the sediment surface(10cm). The present study suggests that autochthonous organic carbon loading must be controlled for improving the water quality of the eutrophic lakes.

Key word : T-DOC, L-DOC, R-DOC, ultrafiltration, porewater DOC, Kasumigaura

I. 서 론

수권에 존재하는 유기물중 약 99% 정도가 해수(seawater)에 존재하고, 나머지 부분을 담수(freshwater)가 차지하고 있다. 해양·담수에서 특히 용존유기물(Dissolved Organic Matter: DOM)은 현탁유기물(Particulate Organic Matter: POM)에 비해 현존량이 더 낮지 않으며, 탄소순환(Carbon cycle) 및 에너지순환(Energy

cycle)에도 관여하고 있어 크게 주목받고 있다¹⁾. 이러한 유기물은 1960년대 전반부터 해양화학의 중심으로 연구가 추진되기 시작해 1980년대 후반부터는 지구 규모의 탄소순환연구의 필요성이 지적되었다. 담수에서의 용존유기물에 관한 연구는 광비·유류등 중심으로 진행되어 왔으며, 이

들 보고에 의하면 담수에서의 용존유기물 농도는 해양의 농도보다는 훨씬 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 탄소순환중 용존유기물의 중요성은 해양뿐만아니라 담수에서도 지적되었으며 이에관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다^{2, 7).}

수중유기물의 측정은 화학적산소요구량(COD), 생화학적산소요구량(BOD)과 같이 간접적으로 유기물을 정량하는 방법으로부터 탄소량을 직접측정 하는 습식산화법(Wet Chemical Oxidation: WCO)⁸⁾과 고온촉매산화법(High Temperature Catalytic Oxidation: HTCO)으로 발전되어 왔다^{9).} 또한 용존유기탄소(Total Dissolved Organic Carbon: T-DOC)는 미생물 분해실험을 통해 생분해성의 용존유기탄소(Labile DOC: L-DOC)와 난분해성의 용존유기탄소(Refractory DOC: R-DOC)로 분류되고 있다^{10, 11).}

현실적으로 유기물오염 문제는 호수 부영양화와 관련하여 관심이 집중되고 있고, 상수원으로 이용되고 있는 호소·하천에서의 유기물오염은 수돗물의 맛과 질을 저하시킬 뿐만 아니라 염소처리시 발암물질인 THM을 생성시키며 정수처리시 처리비용을 증가시키는등 사회적으로 큰 문제를 야기시키고 있다. 이러한 유기물의 기원으로는 유역으로부터의 유입(Allochthonous Organic Matter)과 조류, 수생식물, 퇴적물등으로부터 생성되는 내부유기물(Autochthonous Organic Matter)로 분류된다^{12).} 그러나 본 연구대상호인 Lake Kasumigaura(가수미가우라호)는 유기물오염 증가원인이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 그리고 또한 Lake. Kasumigaura는 1986년을 경계로 과거 몇년간 대량발생 했던 *Microcystis* sp.의 현존량이 크게 줄고, *Oscillatoria* spp.등의 絲狀의 남조류가 우점하는 변화를 보이고 있다. *Oscillatoria* spp.등의 絲狀의 남조류가 우점하는 원인은 확실히 알려지지 않고 있으나 이런 조류의 우점종 변화와 유기물오염 증가 사이에 어떤 관계가 있을 것이라고 예측은 하고 있다.

본 연구는 수심이 얇고 부영양호인 Lake. Kasumigaura에서 T-DOC의 수평분포 및 계절변화를 조사하였고, T-DOC를 분자량분류 및 미생물 분해실험을 통해 L-DOC와 R-DOC로 분류하고 각각의 유기물이 어떠한 거동을 하는지 조사하였다. 또한 퇴적물표층 10cm를 코어샘플러로 채취하여 6층의 간극수(Porewater) DOC농도를 측정하여 퇴적물로부터 용출가능한 DOC량을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 조사지 개요

Lake. Kasumigaura는 일본의 수도 동경으로부터 동북방향으로 약 70km 떨어진 곳에 위치하며, 표면적 177km², 최대수심 7.2m, 평균수심 4m로 수심이 얇고 호수의 체류시간이 약 200일 정도로 비교적 긴 정체성 수역의 자연호이다. 이 호수는 부영양화가 자연적으로 진행되기 쉬운 특성을 지니고 있으며, 특히 1960년대 고도 경제성장과 더불어 수질악화가 더욱 가속되기 시작했다.

1970년대 후반 COD농도가 11.3mg/l 이었으나 1980년 초 수질보전대책으로 7.0mg/l 까지 크게 감소시켜 수질회복의 경향을 보이는데 했으나 최근들어 재차 COD가 증가하는 추세에 있으며 이와 동시에 여름철이 되면 남조류가 대량 발생하는 부영양호로도 유명하다.

2. 조사지점 및 방법

호수조사는 매월 1회, 유입수의 유입부 2지점(Takahama: St. 1, Tsuchiura: St. 2)과 분류지역 1지점(St. 3)에서 실시 하였다(Fig. 1). 시료는 컬럼 채수기(길이 2m)로 표층수를 채수하여 1l 용량의 유리용기(450℃에서 열처리한것)에 넣어 저온상태로 보존하여 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반된 시료는 GF/F 여과지(450℃에서 열처리한것)로 여과한 후, 여과액의 일부는 T-DOC 농도를 측정하고 나머지 여과액은 분자량(Molecular



Fig. 1. Sampling stations in Lake Kasumigaura.

Weight: MW)분류 및 미생물에 의한 DOC분해 실험에 이용했다.

미생물에 의한 DOC 분해실험은 GF/F 여과지 (Whatman Co.)로 여과된 여과액을 500ml 유리용기(450 ℃에서 열처리한것)에 넣어 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온암실에서 100일간 기시하였다^{10, 11)}. 이때 분해기간중 정기적으로 일

부(sub-sample)를 채수하여 DOC 농도를 측정하여 DOC 변화를 조사했다. DOC 분해실험 결과 100일 사이에 분해된 유기물을 L-DOC, 100일후 남아있는 유기물을 R-DOC로 결정했다. 즉 L-DOC 농도는 T-DOC 농도와 R-DOC 농도의 차로 나타낼 수 있다. 또한 GF/F 여과지를 통과한 bacteria 탄소는 약 $0.1 \pm 0.05\text{mg}/\ell$ 로 DOC

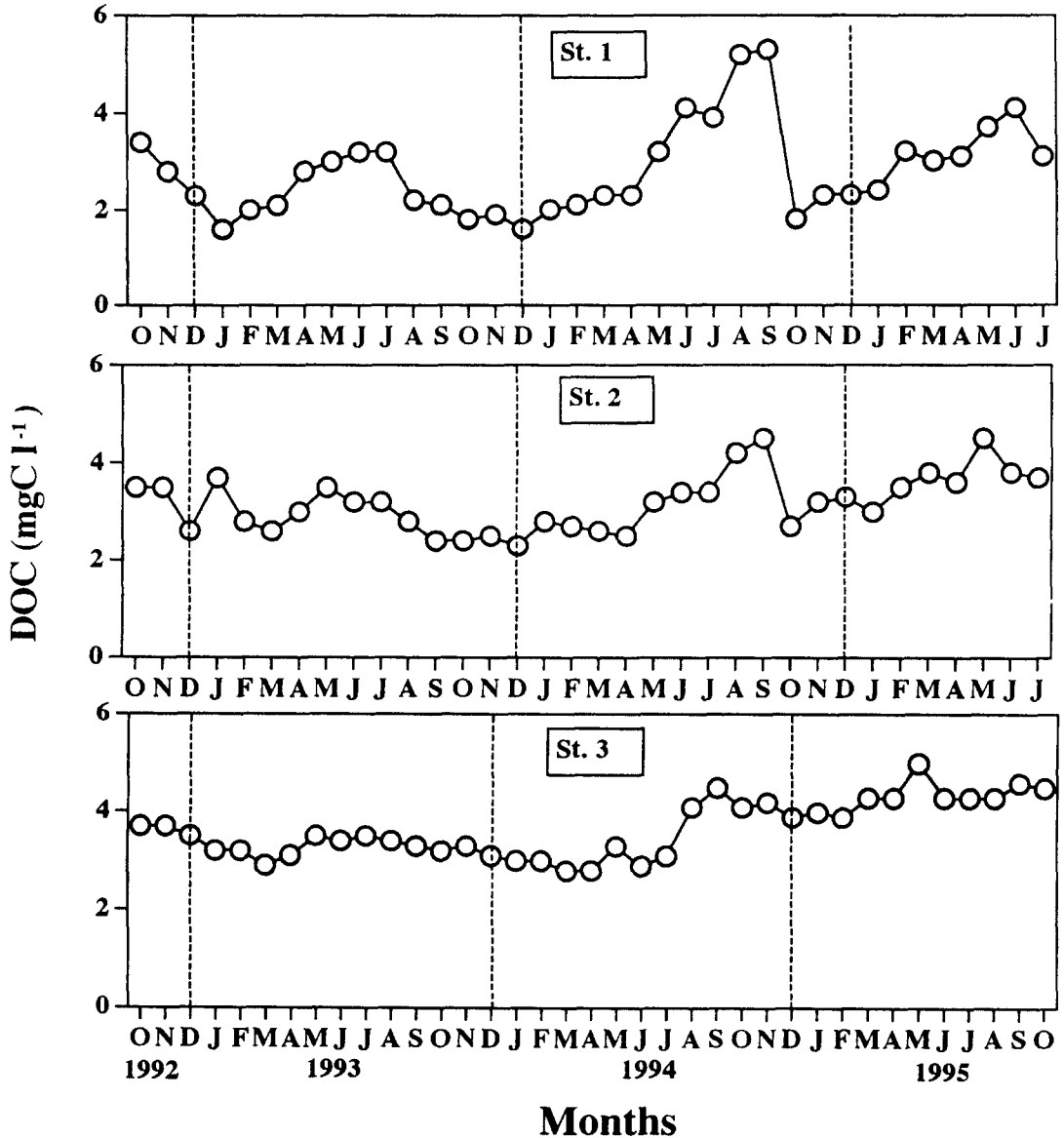


Fig. 2. Seasonal and horizontal variations of T-DOC concentrations in Lake Kasumigaura from October 1992 to October 1995.

농도에 대한 영향이 매우 작은 것으로 나타나 본 연구에서는 무시하기로 했다.

T-DOC 및 R-DOC 시료의 분자량 분류는 한외여과막(Ultrafilter)을 이용하여 분류하였다. 분자량 분류는 UH-1(MW, 1000), UK-10(MW, 10000)의 2종류의 막을 이용하였다(Toyo Co.). 분류방법은 200ml의 GF/F 여과액을 질소가스로 가압(4kgfcm⁻²)하면서 큰분자량의 UK-10부터 UH-1 순으로 여과했으며, 이때 얻어진 여과액의 DOC를 측정하였다. 따라서 DOC 분자량의 크기는 MW I>10000(고분자량), 10000>MW II(중분자량)>1000, MW III(저분자량)<1000로 분류하였다.

Lake. Kasumigaura 본류수역(St. 3)에서 퇴적물 표층에 축적된 유기물이 용존유기물로 수중에 재용출되는 것으로 가정하여, 그 잠재적인 DOC양을 조사하기 위하여 내경 4cm, 길이 30cm의 아크릴 코아를 이용하여 표층으로부터 15cm 깊이까지 조심히 10-15개 채취했다. 채취한 코아는 가능한한 유동이 없는 상태로 실험실로 운반한 후, 빠른 시간내에 6층(0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10cm)로 분리(slice) 했다. 이렇게 층별로 분리한 6층의 시료를 원심분리기(3000rpm, 10분간) 처리하여 간극수를 분리한 후, 이 간극수를 GF/F 여과지로 여과한후 여과액의 DOC를 측정하여 간극수의 DOC를 정량하였다.

DOC 분석은 시료에 염산(2N)을 첨가하여(pH 2 이하로 맞추는) Air-Zero가스로 폭기시켜 CO₂를 미리 제거한 후, 고온(680°C)축대(백금축대)가 내장된 Shimazu TOC-5000으로 측정했다. 시료 1개에 대해 총 6회 측정하였으며(DOC±0.05 mg/l), 측정값의 변동계수는 대부분 1% 이하였다. POC는 GF/F 여과지를 110°C에서 2시간 건조시킨후 Yanagimoto MT-5 CHN-analyzer로 분석했다.

III. 결과 및 고찰

1. Lake Kasumigaura에서 용존유기물의 舉動

1.1. T-DOC농도의 계절변화 및 수평분포

Lake. Kasumigaura에 있어서 T-DOC 농도의 계절변화 및 수평분포를 Fig. 2에 나타냈다. 조사는 Takahama 유입부(St. 1), Tsuchiura 유입부(St. 2)와 본류수역(St. 3)에서 실시하였다. 각 조사지점에서 T-DOC 농도는 Takahama 유입부에서 봄·여름에 2.1-5.3mgC/l (평균농도 3.6mgC/l), 가을·겨울에 1.3-3.4mgC/l (평균농도 2.3mgC/l)였고, Tsuchiura 유입부에서는 봄·여름에

2.4-4.5mgC/l (평균농도 3.5mgC/l), 가을·겨울에 2.3-3.8mgC/l (평균농도 3.0mgC/l)였고, 본류수역에서는 봄·여름에 2.9-5.0mgC/l (평균농도 3.8mgC/l), 가을·겨울에 2.8-4.5mgC/l (평균농도 3.5mgC/l) 농도를 보였다. 이와같이 유입부의 T-DOC 농도는 봄·여름에 높고, 가을·겨울에 낮은 계절변화를 보였으나 본류수역은 유입부와 같이 뚜렷한 계절변화를 나타내지 않았다. 이렇게 T-DOC 농도의 계절변동이 본류수역에서 작은 이유는 유입부에서 생성된 유기물이 하류로 이동하면서 분해되어 본류수역 T-DOC에 미치는 영향이 작았고¹⁵⁾, 또한 본류수역에서는 1차생산에 의한 T-DOC 생성량이 작기 때문인 것으로 사료되었다. 한편 Lake. Kasumigaura에서 T-DOC 농도가 유입수보다 유입부에서¹⁴⁾, 유입부보다 본류수역에서 높게 나타났는데, 이런 결과는 본류수역에서의 T-DOC가 1차생산 이외에도 어떤 다른 생성기작에 의해서 높게 나타났을 가능성을 시사하는 것이다.

1.2. L-DOC 및 R-DOC농도의 변화

T-DOC를 미생물에 의해 쉽게 분해되는 L-DOC, 분해되기 어려운 R-DOC로 분류하고, 이들 각각의 거동을 본류수역(St. 3)에서 조사 하였다(Fig. 3). 결과에 나타난 것과 같이 1993년 7월부터 1995년 10월 사이에는 L-DOC 농도가 0.2-0.5mgC/l, R-DOC 농도가 2.4-2.9mgC/l로 변동범위가 작았으나, 1994년 7월-8월을 경계로 T-DOC 농도가 약 1mgC/l 정도 큰 증가를 보였다. 이때 증가한 T-DOC중 L-DOC가 0.6mgC/l, R-DOC가 0.4mgC/l로

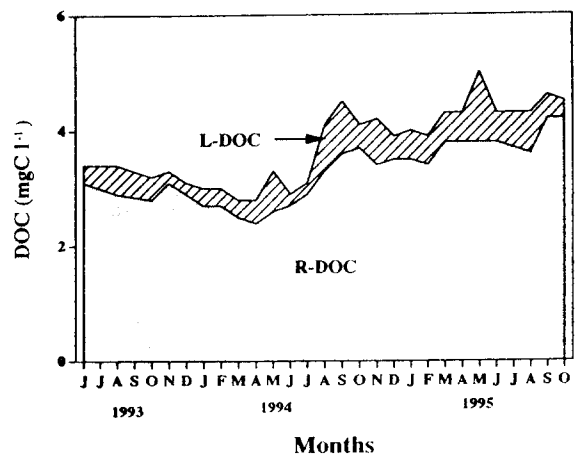


Fig. 3. Seasonal variations of L-DOC and R-DOC concentrations in St. 3 from June 1993 to October 1995.

L-DOC 부분이 많은 것으로 나타났다. 이렇게 T-DOC 농도가 갑자기 증가한 원인에 관해서는 아직 잘 알려지지 않고 있으나 호수내에서 생성되었을 가능성이 높을 것이라고 예측은 되고 있다. L-DOC는 5월에 최대농도 (1.2mgC/ℓ)를 보였으며 5월을 제외한 나머지 계절은 평균농도가 $0.5 \pm 0.2 \text{mgC}/\ell$ 로 큰변동을 보이지 않았으며, 조사기간 동안의 R-DOC 농도도 또한 평균 $3.8 \pm 0.4 \text{mgC}/\ell$ 로 작은 변동을 보였다. 이와 같이 본류수역에서의 L-DOC 및 R-DOC 농도는 가을·겨울보다 봄·여름에 약간 높게 나타났으나 뚜렷한 계절변화는 볼 수 없었다. 또한 L-DOC 및 R-DOC의 구성비율을 보면 L-DOC가 평균 15%, R-DOC가 평균 85%로 항상 R-DOC가 용존유기물의 pool인 것이 확인 되었다. 위와 같은 수층의 T-DOC중 L-DOC는 탄소순환 및 미생물 생태계의 에너지원으로 중요한 역할을 담당하는 것으로 잘 알려져 있으나¹⁴⁾, R-DOC는 유기물순환중 현존량이 크다는 것 이외에는 거의 알려진 사실이 없다¹⁵⁾.

1.3. 분자량 분류에 의한 DOC의 동태

T-DOC(L-DOC+R-DOC) 농도로 설명하기 어려운 유기물 내부성분의 동태를 분자량 분류를 통해 저분자량 (low molecular weight: MW I), 중분자량 (medium molecular weight: MW II), 고분자량 (high molecular weight: MW III)로 분류하고 이들 각각의 분자량 DOC 변동을 1994년 7월-1995년 10월까지 조사 하였다(Fig. 4). 앞에서 설명한 것과 같이 1994년부터 1995년 사이에 L-DOC 및 R-DOC 농도는 거의 변화가 없었으나 각 분자량의 DOC 거동은 아주 다른 양상을 나타냈다. T-DOC가 크게 증가한 기간(1994년 7월-8월) 동안에는 중·고분자량의 DOC가 약 35%, 저분자량의 DOC가 약 65%를 차지해 저분자량의 DOC 증가가 큰 것으로 나타났다. 그후 1995년 1월까지의 큰 변동이 없었으나 동년 2월부터 저분자량의 DOC가 감소하고 고분자량의 DOC가 크게 증가했다. 그 구성비율을 보면 고분자량이 평균 30%, 중분자량이 약 23%, 저분자량이 47%를 나타냈다. 이와 같이 1994년-1995년 사이에 T-DOC 농도 변화는 거의 없었으나 분자량의 조성은 서서히 저분자량에서 고분자량의 DOC로 변화되고 있음을 알 수 있었다.

1.4. POC/DOC 비의 계절변화

유입수의 유입부와 본류수역에서 POC와 DOC의 현존량비를 Fig. 5에 나타냈다. 조류 현존량의 영향을 받는

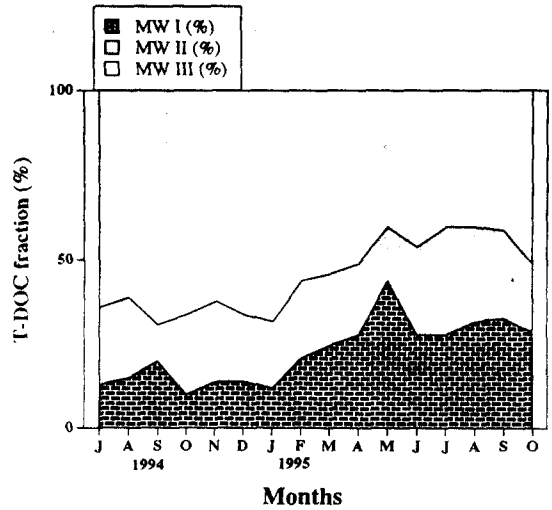


Fig. 4. Distribution of molecular weight (MW) size fraction for T-DOC in St. 3 from 1994 to October 1995. MW I > 10000, 10000 > MW II > 1000, MW III > 1000.

POC 농도는 호소전역에서 봄·여름에 높고, 가을·겨울에 낮은 계절변화를 보였다. 각 조사지점에서의 POC 농도는 Takahama 유입부에서 1.3-9.1mgC/ℓ (평균농도 4.9mgC/ℓ)로 변동이 크고, Tsuchiura 유입부와 본류수역에서는 각각 2.0-5.8mgC/ℓ (평균농도 3.6mgC/ℓ), 2.4-5.6mgC/ℓ (평균농도 4.3mgC/ℓ)로 작은 변동을 나타

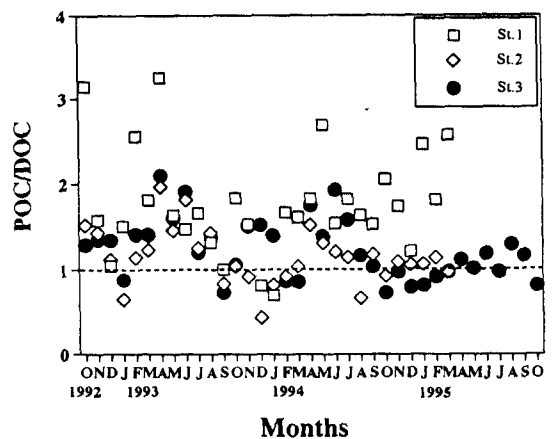


Fig. 5. Seasonal variations of POC/DOC ratio in Lake Kasumigaura from October 1992 to October 1995.

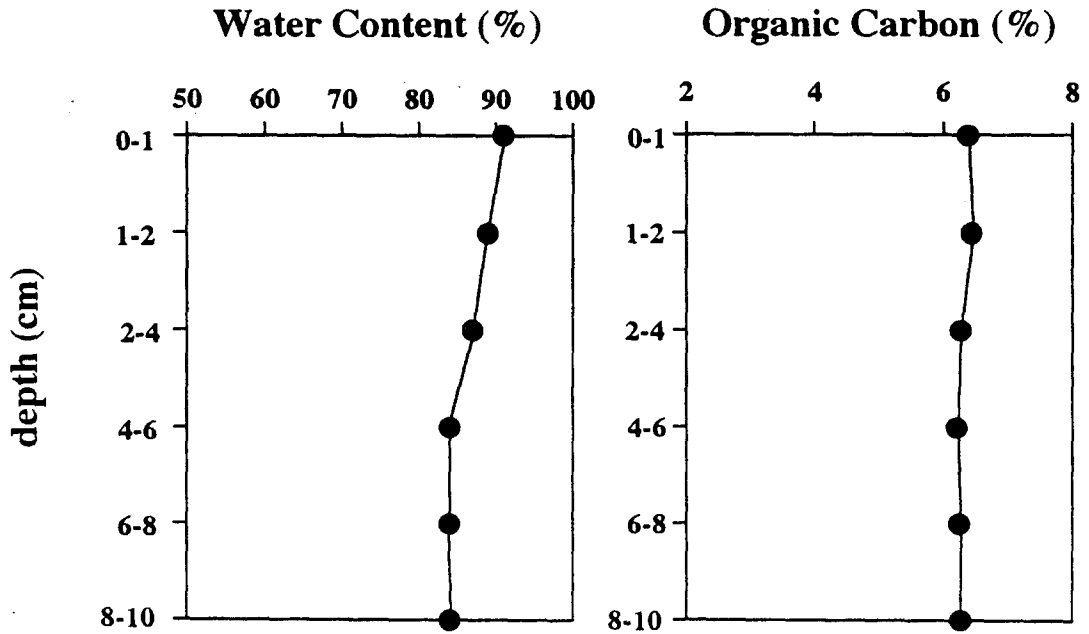


Fig. 6. Vertical distributions of water content(%) and organic carbon(%) in sediment of St. 3, collected in August, 1995.

났다. 따라서 POC 농도가 높은 봄·여름에는 POC/DOC 비가 1보다 크고, 가을·겨울에는 POC/DOC 비가 1이하가 되는 경향을 나타냈다. 본류수역에서 POC/DOC 비는 1994년 7월까지 POC 농도가 DOC 농도보다 큰 값을 보였기 때문에 1이상으로 총유기탄소(TOC)가 POC 농도에 의해 크게 좌우되고 있었으나 1994년 7월 이후에는 DOC 농도가 크게 증가한 이유로 POC/DOC 비가 1이하 값을 나타냈다. 이 기간중 POC 농도는 1994년 7월 이전의 농도와 별차이가 없었기 때문에 결과적으로 DOC 농도 증가가 TOC 농도를 증가시키는 원인이 되고 있다. 이와 같이 최근들어 POC/DOC 비가 1이하의 값을 계속해 나타내고 있다는 것은 최근 Lake. Kasumigaura의 유기물 거동에 큰 변화가 일어나고 있음을 보여주는 결과이다. 따라서 TOC 농도의 거동은 Lake. Kasumigaura 수질관리를 함에 있어 대단히 중요하며, 최근 COD 농도의 증가 원인으로 조류의 대량발생이 거론되고 있으나, 본 연구결과에서 나타난 것과 같이 조류에 의한 POC보다 내부생성에 의한 DOC에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

2. Lake. Kasumigaura의 표층 퇴적유기물

2.1. 퇴적물의 함수비 및 탄소함유량

지니의 함수비(Water contents of sediment)는 퇴적상대를 파악하는 지표로 알려져 있으며, 지니에 함유된 물(간극수)은 지니자체의 무게압축 정도에 따라 수중으로 유기물 및 영양염등을 용출시킨다고 예상하고 있다.

Lake. Kasumigaura 지니의 함수비는 최근 15년(1980년-1995년) 동안 약 91% 정도로 거의 변화가 없었다. 본류수역(St. 3)에서의 함수비와 탄소함유율 수직분포를 Fig. 6에 나타냈다. 함수비는 심층으로 갈수록 감소하는 전형적인 수직분포 경향을 나타냈으며, 심층의 함수비가 감소하는 경향은 지니자체의 무게압축 증가로 인한 원인으로 사료된다. 또한 표층의 함수비가 증가하면 심층의 함수비도 증가하는 것으로 나타났다. 탄소함유율의 수직분포는 깊이에 따라 서서히 감소하는 경향을 보이고 있으나 뚜렷한 차이는 없는 것으로 나타났다. 따라서 Lake. Kasumigaura의 퇴적유기물은 계절변화에 관계없이 유기탄소 함유량이 일정한 것으로 나타났다.

2.2 간극수(porewater)중의 DOC 농도의 계절변화
퇴적물중의 DOC 변동은 지니와 직상수(Overlying

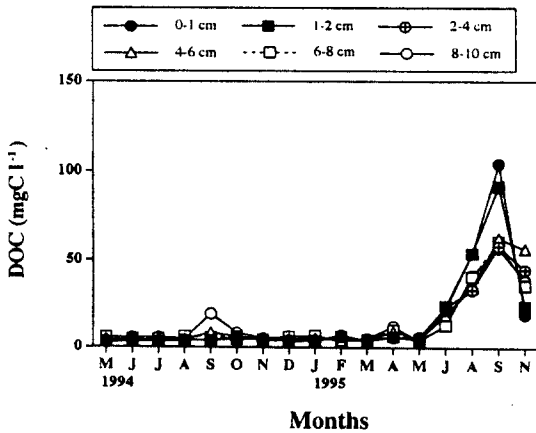


Fig. 7. Monthly variations of porewater DOC concentrations in St. 3 from May 1994 to November 1995.

water)가 집하고 있는 경계부에 생존하는 생물에 의한 분해·섭취, 농도구배에 의한 확산·용출, 지니 직접 교환에 의한 용출과정을 들 수 있다. 따라서 간극수중의 DOC는 퇴적환경 변화에 따라 용출 가능성이 높고, 호소 내 유기물순환중 내부생성 유기물 기원으로 중요한 부분으로 알려져 있다¹⁶⁾. Fig. 7에 나타난 것과 같이 인위적으로 교란이 적은 본류수역(St. 3)에 있어서 간극수 DOC 농도는 1995년 5월까지 년평균 $4.3 \pm 1.5 \text{ mgC/l}$ 정도로 계절변동이 거의 없었다. 그러나 그 이후 여름철로 접어들면서 크게 증가하여 1995년 9월 표층에서 104 mgC/l 로 최대농도를 보였다. 간극수 DOC 농도는 최대농도를 나타낸 후 1996년 3월까지 계속 감소하여 약 10 mgC/l 농도를 보였다. 간극수 DOC의 수직분포를 보면 계절변동이 거의 없던 시기에는 표층과 10cm 깊이의 DOC 농도차가 거의 없었으나 DOC가 크게 증가한 시기에는 표층이 10cm 깊이의 DOC보다 약 2-10배정도 높은 농도를 보였다. 이와 같이 1994년에 비해 1995년의 간극수 DOC 농도가 크게 증가한 이유에 관하여 여러측면에서 해석중이지만 명확히 알려진 사실은 거의 없는 상태이다. Lake. Kasumigaura는 수심이 얇고 바람이 강해 여름철에 부산소층이 형성되기 어렵고, 형성된다 하더라도 아주 짧은 기간이다. 따라서 퇴적층은 항상 호기조건이며 혐기 조건 하에서의 간극수 DOC 증가는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 간극수 DOC 농도의 큰 증가는 어떤 원인에

의해 일어난 것이 확실하며, 이런 원인의 하나로 본 연구에서는 기상조건의 변화로 분석해 보았다. 1993년의 여름은 장마기간이 평년보다 길어 냉하였으며, 이에반해 1994년-1995년에는 여름 기온이 30°C 를 넘는 기간이 길어 호수의 수온이 1993년보다 약 $5-6^\circ\text{C}$ 높았다¹⁴⁾. Lake. Kasumigaura는 수심이 얇아 퇴적층의 온도가 수온의 영향에 크게 좌우되는 특징을 보이고 있으며, 결국 호소내 수온 증가로 인해 퇴적층에서 활발한 유기물 분해가 일어나고 연쇄적으로 농도구배의 변화가 일어났을 것이라고 사료된다.

위와같이 퇴적물 표층으로부터 용출 가능성 이외에도 내부기원의 유기물로는 식물플랑크톤의 배출^{17, 19)}, 동물플랑크톤의 섭식활동에 의한 유기물생성 등이 잘 알려져 있다^{20, 21)}.

이상의 결과와 같이 유기물오염중 호수내부에서 생성되는 유기물이 대단히 중요한 것으로 나타났으나 지금까지 이러한 유기물에 관해서 정확한 평가가 이루어지지 않고 있다. 앞으로 호소에서 적절한 수질관리 및 대책을 수립하기 위해서는 내부생성 유기물을 반드시 고려해야 할 것이라고 사료된다.

IV. 결론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다:

- 1) Lake. Kasumigaura에서의 T-DOC농도는 유입하천 유입부로부터 호수중심 및 하류방향을 따라 서서히 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 T-DOC가 호수내에서 생성되는 내부생성유기물(Autochthonous Organic Matter)의 증가에 의해 호수중심부가 높은 농도를 보이는 것으로 사료된다. 하천유입부는 여름에 DOC농도가 증가하고 겨울에 감소하는 계절변화를 보였으나, 호수 중심부의 계절변화는 매우 작게 나타났다($4.3 \pm 0.6 \text{ mgC/l}$).
- 2) 호수내의 T-DOC농도중, L-DOC가 약 10~20%를 구성하고 나머지 약 80~90%를 R-DOC가 구성하고 있는 것으로 나타났으며, 구성비의 계절변화는 거의 빈번이 없었다. 한편 1년동안 호수내의 R-DOC는 총, 저 분자량이 70~80%를 차지하였다. 유입하천의 R-DOC 또한 저분자량이 80%를 차지하고 있었으나, R-DOC농도가 호수내 농도보다 낮기 때문에 호수내 R-DOC의 현존량에 공헌하는 비율은 비교적 적은

것으로 나타났다.

- 3) 1994년~1995년(수온이 30°C를 넘는 기간이 평년보다 길게 관측된 시기)에는 호수내 전역에서 T-DOC농도가 약 25% 증가했으며, 같은 시기 퇴적물 간극수중의 T-DOC농도 또한 10~20배 증가했다. 따라서 호수저층 퇴적물의 간극수가 중요한 DOC 공급원으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 일본 국립환경연구소 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 일본 동경수산대학교 Otsuki Akira 교수, 시마네대학교 Aizaki Morihiro 교수에게 감사함을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Thurman, E. M : Organic geochemistry of natural water. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1985.
2. Williams, P. M : The distribution and cycling of organic matter in the ocean. In: Organic compounds in aquatic environment. Marcel Dekker, New York, 145-164, 1971.
3. Watanabe, Y : Transformation and decomposition of photosynthetic products of lake phytoplankton. Jap. J. Limnol. 45, 116-125, 1984.
4. Munster, V. U : Investigations about structure, distribution and dynamics of different organic substrates in the DOM of lake Plubsee. Arch. Hydrobiol./Suppl. 70, 429-480, 1985.
5. Schindler, D. W., S. E. Bayley, P. J. Curtis, B. R. Parker, M. P. Stainton and C. A. Kelley : Natural and Man-caused factors affecting the abundance and cycling of dissolved organic substances in precambrian shield lakes. Hydrobiologia 229, 1-21, 1992.
6. Sondergaard, M. and N. H. Borch : Decomposition of dissolved organic carbon(DOC) in lakes. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 37, 9-20, 1992.
7. Sondergaard, M., B. Hansen and S. Markager : Dynamics of dissolved organic carbon lability in a eutrophic lake. Limnol. Oceanogr. 40, 46-54, 1995.
8. Menzel, D. D. and R. F. Vaccaro : The measurement of dissolved organic and particulate carbon in sea water. Limnol. Oceanogr. 9, 134-142, 1964.
9. Sugimura, Y. and Y. Suzuki : A high temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of liquid samples. Mar. Chem. 24, 105-131, 1988.
10. Servais, P., G. Billen and M. C. Hascoet : Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters. Water Res. 21, 445-450, 1987.
11. Park, J. C : Dynamics of dissolved organic matter in eutrophic shallow Lake Kasumigaura, with special reference to refractory DOC. Ph. D. Thesis. Tokyo Univ. of Fisheries, 1996.
12. Wetzel, R. G : Limnology. Saunders Coll. Publ. Philadelphia, 667-706, 1983.
13. Fukushima, T., J. C. Park, A. Imai and K. Matsushige : Dissolved organic carbon in a eutrophic lake: Dynamics, biodegradability and origin. Aquatic Science, 58, 139-157, 1996.
14. Baines, S. B. and M. L. Pace : The production of dissolved organic matter by phytoplankton and its importance to bacteria: patterns across marine and freshwater system. Limnol. Oceanogr. 36, 1078-1090, 1991.
15. Geller, A : Degradation and formation of refractory DOM by bacteria during simultaneous growth on labile substrates and persistent lake water constituents. Schweiz. Z. Hydrol. 47, 27-44, 1985.
16. Orem, W. H., P. G. Hatcher, E. C. Spiker, N. M. Szeverenyi and G. E. Maciel : Dissolved organic matter in anoxic porewaters from Mangrove Lake, Bermuda. Geochim. Acta, 50, 609-618, 1986.

17. Watanabe, Y : A study of the excretion and extracellular production of natural phytoplankton in Lake Nakanuma, Japan. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 65, 809-834, 1980.
18. Chrost, R. H. and M. A. Faust : Organic carbon release by phytoplankton : its composition and utilization by bacterioplankton. *J. Plankton Res.* 5, 477-493, 1983.
19. Hino, S : Extracellular release of organic matter associated with the physiological state of freshwater blue-green algae. *Arch. Hydrobiol.* 113(2), 307-317, 1988.
20. Lampert, W : Release of dissolved organic carbon by grazing zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* 23, 831-834, 1978.
21. Park, J. C., M. Aizaki, T. Fukushima and A. Otsuki : Production of labile and refractory dissolved organic carbon by zooplankton excretion: An experimental study using large outdoor continuous flow-through pond. *Canad. J. Fish. Aquat. Sci.* 54, 434-443, 1997.