

汽水湖中海における貧酸素水塊形成時の硝化・脱窒*

清家 泰**・奥村 稔**・藤永 薫**・黒住 誠司**

Nitrification and Denitrification in Anoxic Water
in the Brackish Lake NakaumiYasushi Seike, Minoru Okumura, Kaoru Fujinaga
and Seiji Kurozumi

汽水湖中海では、湖心部(水深, 6.8 m)の下層において、貧酸素水塊形成時の8月から9月にかけて高濃度の亜硝酸イオンが生成するという特徴的な現象が観測される。この亜硝酸イオンの挙動に着目し、その生成要因を究明するとともに、無機態窒素(アンモニウムイオン, 亜硝酸イオン, 硝酸イオン)の変動メカニズムについて現場観測, 室内および現場実験により検討した。

中海は浅い湖であるにもかかわらず、中層付近に形成される塩分躍層により成層化が発達している。そのため、夏季、塩分躍層以深では、溶存酸素が消費され貧酸素水塊が形成される。それに伴い、アンモニウムイオンの生成が見られるが、次いで、アンモニウムイオンの減少に伴う亜硝酸イオンの生成・蓄積が見られた。貧酸素水塊におけるこの亜硝酸イオンの生成は、潮汐によって日本海海水(豊富な酸素を含有)が流入する際、酸素が供給されることの影響を受け、アンモニウムイオンが酸化されること(硝化反応)に起因すると考えられた。硝酸イオンへの酸化が進まないのは、中海が浅い水域であるため光阻害を受けやすいことが主要因と考えられた。さらに、総無機態窒素が減少するのは、硝化により生成した亜硝酸イオンが、底泥界面において脱窒されるためと考えられた。

An interesting phenomenon, accumulation of nitrite, was found out in anoxic water in hypolimnion at the central part (6.8 m depth) of the brackish Lake Nakaumi during summer season (Aug. to Sept.). The main factor on nitrite production was examined by field survey, laboratory and *in situ* experiments. The mechanism for variation of inorganic nitrogen such as ammonium, nitrite and nitrate were also examined.

Though Lake Nakaumi is a shallow lake, it was stratified with a remarkable halocline which usually developed at a depth of 3 to 4 m. Anoxic water was observed in hypolimnion in summer season. After ammonium increased highly with decreasing dissolved oxygen, a high concentration of nitrite was accumulated with decreasing ammonium. From the present study, it was concluded that the accumulation of nitrite in anoxic water was mostly due to nitrification induced by an increase of dissolved oxygen, supplied with inflowing of sea water resulting from tidal current. The nitrifying activities from nitrite to nitrate measured under the light condition were significantly lower than in the dark condition. This result suggested that no production of nitrate was due to photoinhibition for nitrite oxidizing bacteria resulting from the shallow lake. It was also suggested that nitrite produced by nitrification was denitrified in water-sediment system, resulting in a decrease of total inorganic nitrogen in hypolimnion.

キーワード：亜硝酸イオン, 硝化, 脱窒, 貧酸素水塊, 汽水湖, 中海

1. はじめに

湖沼生態系において窒素は、窒素固定・有機化、アンモニア化、硝化、硝酸還元(脱窒を含む)等により様々な化学形態に変換され、かつ各々の反応が相互に絡み合うため、その変動は非常に複雑なものとなる。何れの反応もそれ相応に重要であるが、湖沼生態系の窒素バランスにおいては硝化・脱窒が特に重要な反応であること、その脱窒にとって重要な部位は底泥と水の境界層である

ことが指摘されている¹⁾。このように、湖沼生態系における窒素の役割を理解するためには、底泥も含めた湖水中の窒素サイクルの機構を正確に把握する必要がある。著者らはこれまで窒素の挙動に着目し、汽水湖中海における窒素代謝を系統的に把握することを目的として検討してきた^{2)~5)}。

本稿では、これまでの研究成果を踏まえ、中海の無機態窒素(NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-)の季節変動をもたらし要因について考える。特に、中海湖心(水深6.8m)の下層(4 m以深)において例年のように観測される興味深い現象、

* 1997年2月3日受領, 1997年2月12日受理

** 島根大学総合理工学部

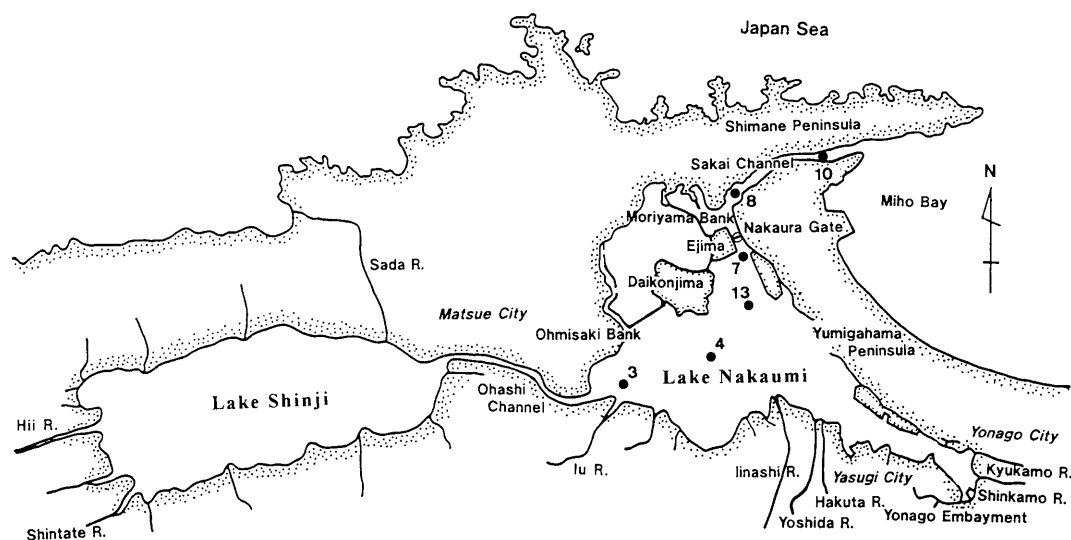


Fig. 1 Map of Lakes Nakaumi and Shinji showing the observational stations(●).

すなわち貧酸素水塊形成時の8月から9月にかけて高濃度の NO_2^- が生成する(NH_4^+ の減少を伴うが NO_3^- の生成は見られない)現象に着目し、これら無機態窒素の変動要因・変動メカニズムについて考えてみたい。

2. 中海の地理環境の概要と環境特性

2-1. 地理環境

中海は島根、鳥取両県にまたがる我が国で5位の広さをもつ湖(汽水湖としてはサロマ湖につき第2位)であり、大橋川を介して宍道湖(第7位)と連なっている(Fig. 1)。島根半島および弓ヶ浜半島によって日本海と隔てられているが、長さ7.5 km、幅0.3 kmの境水道で日本海とつながっている。

中海の満水面積は約97.5 km²、総貯水量は約 5.21×10^8 m³である。主な流入河川には、大橋川の他に飯梨川、伯太川、意宇川などがある。このうち斐伊川～大橋川を経て大橋川より中海へ流入する水量は中海への年間総流入量の約70%を占める⁶⁾とされている。

中海の水深は約80%が7 m以下(湖心の水深6.8 m、平均水深5.4 m)と浅い⁷⁾。湖底は大橋川河口から東に向かって緩やかな傾斜をなし、大根島の南東、弓ヶ浜半島の西側に当たる水域の水深が最も深く、8 m内外である(浚渫跡地を除く)。

2-2. 水温・塩分・溶存酸素

水深の浅い中海では、夏季の底層水温は約25°Cまで上昇する(Fig. 2A)。春季(15°C)との水温差が10°Cもあることから分かるように、その季節変動は表層のみならず底層においても大きい。また、表層と底層の水温差は3～5°Cと小さく水温躍層は微弱である^{6,8)}。

上層(0～2 m)の塩分は、主として河川からの流入量に依存して変動しその変動幅は大きい(Fig. 2B)。特に梅雨期の7月には低下する傾向を示す。下層(4～6 m)では7月を除いてその変動幅は小さく、特に底層(6 m)でその傾向が強い。中層付近に塩分躍層を形成し成層化しており、このため、中海が浅い水域であるにもかかわらず、平常時には鉛直混合は上層のみで起こり、全層の

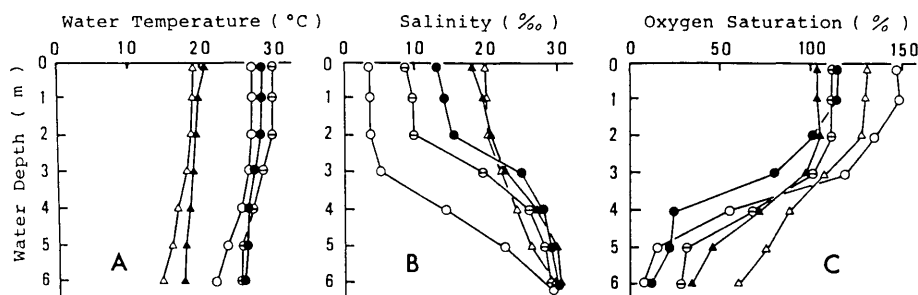


Fig. 2 Vertical distributions of water temperature (A), salinity (B) and oxygen saturation (C) at the central part of Lake Nakaumi (Sta. 4) from May to September in 1981. Sampling date; 11 May (△), 3 June (▲), 6 July (○), 3 August (◐), 2 September (●) (Seike *et al.*, 1986³⁾).

混合は起こりにくい特徴を有する^{6,8)}。

DO (溶存酸素) は上層では植物プランクトンの活発な生産を反映して過飽和であるのに対し、塩分躍層以深では急激に減少する (Fig. 2C)。これは、塩分躍層が溶存物質の鉛直輸送を阻害する⁶⁾ことから、底層水および底質の有機物の分解に伴う酸素消費量を補えないためと考えられる。しかし、底層水には夏季 (7~9月) においても、なお10~30%程度のDOが存在し、無酸素状態までは呈していない。これは、Fig. 3に示されるように、中浦水門から中海湖心にかけて底層水のDOが上昇する現象がしばしば観測される^{4,9)}ことから、潮汐によりDOの豊富な日本海水が中浦水門を通して中海の底層に進入することにより、酸素が供給されるためと考えられる。

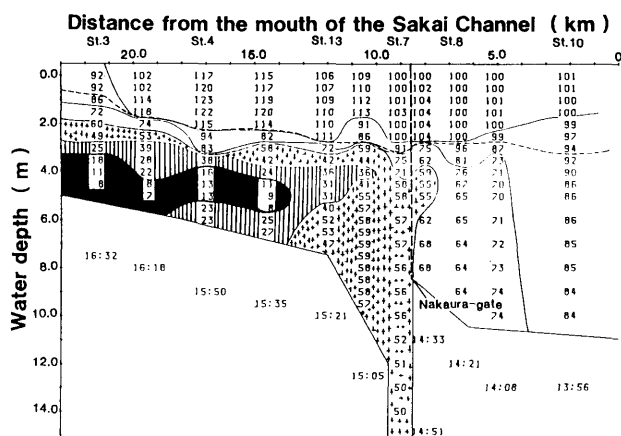


Fig. 3 Distributional pattern of DO saturation observed at the cruise of 30 November, 1981. A broken line represents a halocline (Ohtake *et al.*, 1984⁹⁾).

2-3. 無機態窒素・無機態リン

下層の無機態リン (PO_4^{3-}) は6月から9月にかけて、湖底泥からの溶出に由来し顕著に増加するという極めてシンプルなパターンを示す⁴⁾のに対し、無機態窒素 (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) は、冬季 (1~3月) に NO_3^- 濃度が著しい増加傾向を示す⁵⁾ことその他、比較的低いDO (10~30%) 条件下にある夏季 (7~9月) の下層においては、まず NH_4^+ が増加し、その後 NH_4^+ の減少に伴う NO_2^- の増加、と同時に総無機態窒素 (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) が減少する⁴⁾といった特徴的な季節変動を示す (Fig. 4)。

本稿のメインテーマである夏季下層の季節変動については後述するとして、ここでは冬季における NO_3^- の蓄積現象について述べる。その NO_3^- の増加要因およびメカニズムは次のように考えられる。著者らは ^{15}N トレーサー法を用い、植物プランクトン群集による NH_4^+ および NO_3^- の取り込み活性を現場で1年間にわたり測定す

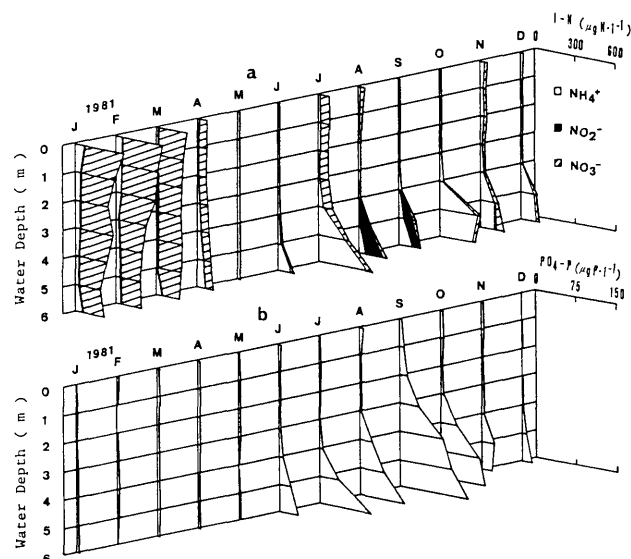


Fig. 4 The depth-time distributions of NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- (a) and PO_4^{3-} (b) at the central part of Lake Nakaumi (Sta. 4) in 1981.

ることにより、植物プランクトンの取り込み活性が水温に大きく影響されること、および暗条件下では植物プランクトンは NO_3^- を利用できないこと等を捉えた²⁾。さらに、珪藻 *Skeletonema costatum*, *Cyclotella* sp. および渦鞭毛藻 *Prorocentrum minimum* は NO_3^- に優先して NH_4^+ を利用し、 NH_4^+ が低濃度のときには NO_3^- を利用することを明らかにするとともに、この NH_4^+ の優先性が中海に出現する植物プランクトン種全般についていえることを示した²⁾。さらに、中海が汽水湖であることを生かした解析により、 NO_3^- 濃度と Cl^- 濃度との間に逆相関性のあることを見だし、上層水中の NO_3^- が主として流入河川水に由来することを明らかにした⁵⁾。これらのことから、冬季における NO_3^- の増加現象は、水温の低下や日照時間の減少といった気象条件に基づく植物プランクトンの取り込み活性の低下に加え、 NO_3^- に優先して NH_4^+ を利用する植物プランクトンの性質を反映し、流入してきた NO_3^- が利用されにくいいため、そのまま湖水中に残存、蓄積されやすいというメカニズムによるものと考えられる。

3. 中海の硝化特性

前述したように、中海湖心の下層 (4~6 m) では8月から9月にかけて NO_2^- の増加・蓄積現象が例年のように観測される。これは、汽水湖中海の夏季下層における特徴的な現象であり、本水域の窒素循環を把握する上で重要な反応と考えられる。一般に、 NO_2^- は、Fig. 5の硝化および硝酸還元の反応経路が示すように、 NH_4^+ から NO_3^- への酸化過程、あるいは NO_3^- の還元過程の間体として生成される。したがって、この両過程による

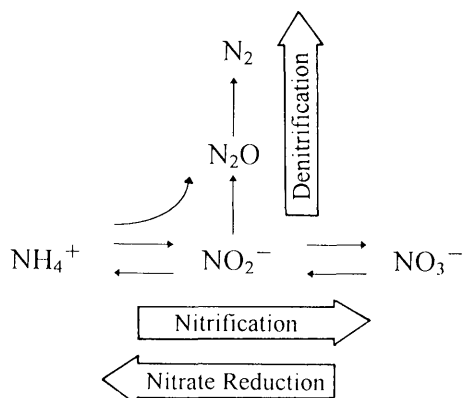


Fig.5 Production routes of inorganic nitrogen by nitrification and denitrification

生成が考えられるが、中海の場合、 NO_2^- の発現前に高濃度の NH_4^+ は観測されるものの、 NO_3^- は観測されないことから (Fig. 4 参照)、本水域で生成される NO_2^- は硝化反応由来である可能性が高い。しかし、 NO_2^- の蓄積時期の DO が 10~30% 程度であることをみると (Fig. 2 参照)、このような貧酸素条件下で果たして十分な硝化が起こるかどうかの疑問が残る。また、この NO_2^- が硝化由来であるとすれば、なぜ、中間体である NO_2^- までの反応でストップし、 NO_3^- への酸化が進まないのかについても疑問が残るところである。それらのメカニズムを究明するために以下の検討を行った。

3-1. 硝化活性に及ぼす DO の影響

前述したように、10~30% (DO%) 程度の貧酸素条件下で果たして十分な硝化が起こり得るかどうかは疑問が残るところである。そこで、この点を明らかにするために、各 DO 条件 (14.1~97.4%) に設定し、 ^{15}N 希釈法を用いて硝化と硝酸還元の同時測定¹⁰⁾ を行い検討した。本実験は、底泥-底層水系で行い、基質である NO_3^- およ

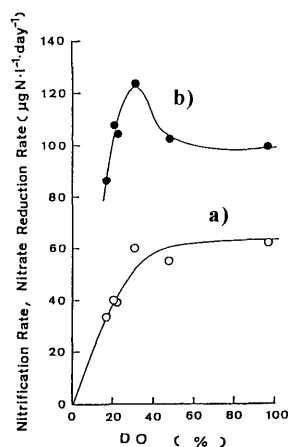


Fig. 6 Nitrification rate (a) and nitrate reduction rate (b) at various saturation percentage of dissolved oxygen (Seike *et al.*, 1986⁴⁾).

び NH_4^+ の初期濃度は、それぞれ $200 \mu\text{g}^{15}\text{N}\cdot\text{l}^{-1}$ および $530 \mu\text{gN}\cdot\text{l}^{-1}$ の条件で行った。ここでは、硝化に関する結果のみについて述べ、硝酸還元 (脱窒) については後述する。

硝化活性は DO が約 30% になるまでは顕著に増加するが、その後ほぼ一定になる傾向を示し (Fig. 6-a)、比較的低い DO 条件下でも硝化が十分起こることを示した⁴⁾。これより、中海湖心の夏季下層の DO 条件下で硝化反応が十分起こり得ることが確認された。

3-2. 硝化活性に及ぼす照度の影響

硝化活性と照度との関係を検討するために、 NO_2^- が

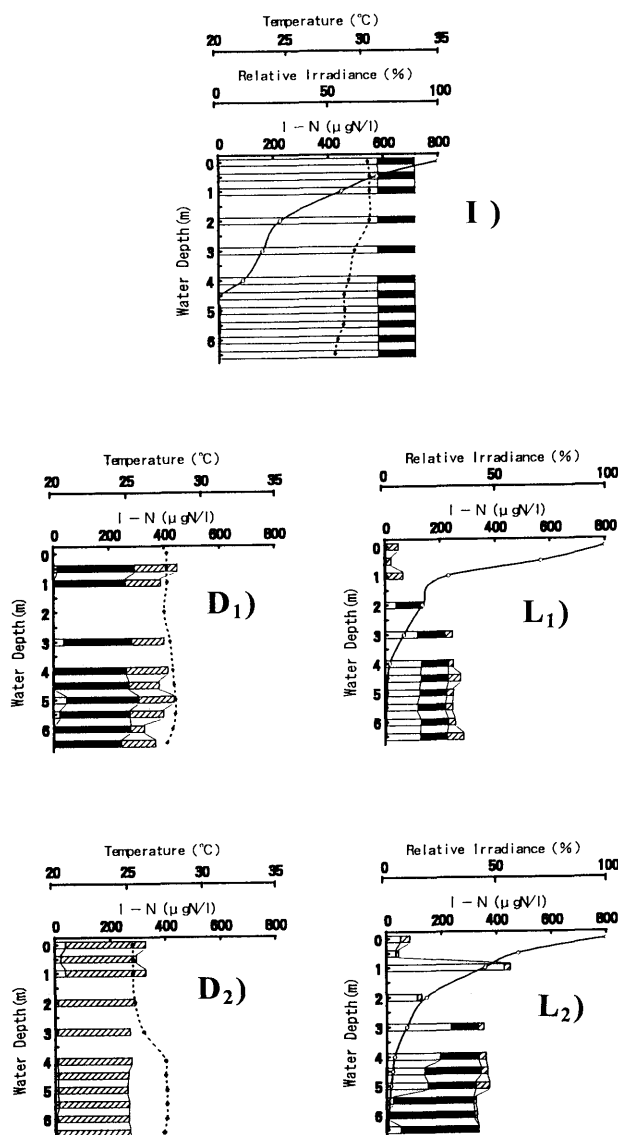


Fig. 7 Effect of light intensity on nitrification activity by *in situ* incubation experiment. Vertical distributions of NH_4^+ (□), NO_2^- (■), NO_3^- (□), relative irradiance (○) and water temperature (●) in the dark (D) and light (L). I, Initial data; D₁ and L₁, after incubation for 6 days; D₂ and L₂, after incubation for 13 days.

蓄積される時期を選び中海湖心において現場実験を行った(1995年9月)。底層水(6.5m)を採取し、明・暗のDO瓶(100 ml)に分取した後、明瓶と暗瓶の各々を各水深(0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 m)に吊るしインキュベートすることにより検討した。その結果、暗瓶については、6日後に NO_2^- の増加が起これと同時に一部 NO_3^- に酸化され(Fig. 7D₁)、さらに13日後にはほとんど全てが NO_3^- にまで酸化された(Fig. 7D₂)。一方、明瓶については、13日後の水深4~6.5 mにおいて、 NO_2^- が増加・蓄積され、かつ深くなるほど濃度増加が著しい傾向を示した(Fig. 7L₂)。しかし、 NO_3^- にまでは変換されず、フィールド観測の結果(Fig. 4 参照)と一致した。この結果は、 NO_2^- の蓄積現象に水中照度の強弱が大きく関与していることを示すものと考えられる。

4. 中海の脱窒特性

4-1. 脱窒活性に及ぼす影響因子の影響

脱窒活性に及ぼすDOの影響についてアセチレン阻害法による検討を行った。湖底泥(湿泥) 5 gと底層水15 mlを密封培養瓶(70 ml)に入れ、気相の酸素量(O_2/N_2)を0から23%の範囲で変化させ、静置条件下で実験を行い検討した(Fig. 8)。その結果、脱窒活性は気相の酸素量の増加に伴い若干の抑制効果は認められるものの、空気と同程度の酸素量でも無酸素条件下の約70%の活性を示した³⁾。一般に、脱窒細菌が通性嫌気性細菌であり、好気条件下では脱窒が阻害されることを考えると、Fig. 8の結果は興味深い。この原因を明らかにするために、気相が窒素ガスと空気について、それぞれ静置条件下と攪拌条件下で活性を調べた(Fig. 9)。各々の脱窒活性は、気相が窒素ガスで静置条件のもの(a_1 および b_1)を1.0としたときの相対速度で示し、かつ用いた基質 NO_3^- ($a_1 \sim a_4$)と NO_2^- ($b_1 \sim b_3$)とに分けて示している。その結果、

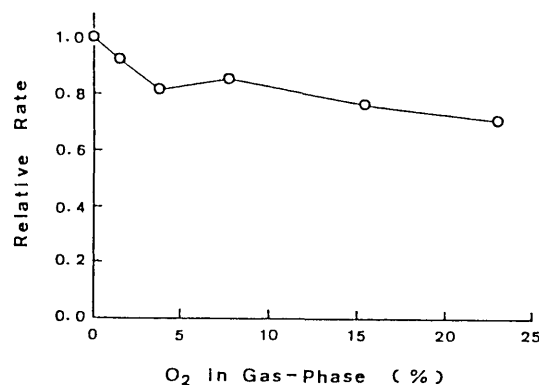


Fig. 8 Effect of oxygen concentration in gas-phase on the denitrification activity under non stirring condition at 30°C (Seike *et al.*, 1986³⁾).

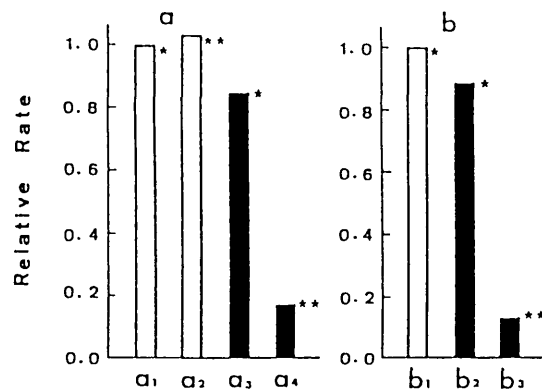


Fig. 9 Effect of oxygen concentration in gas-phase on the denitrification activity under stirring(**) or non stirring(*) conditions. Experimental conditions: gas-phase, N_2 (□) or air (■); temperature, 30°C (Seike *et al.*, 1986³⁾).

攪拌条件下、気相が空気のとときの活性は、それぞれコントロール(a_1 および b_1)の17%(a_4)および13%(b_3)程度であり、いずれもかなり抑制された。それに対し、気相が空気でも静置したものは、それぞれ85%(a_3)および89%(b_2)脱窒され、嫌気培養のもの(a_1 , a_2 および b_1)に近い活性を示した³⁾。これらの結果は、中海のような還元性の強い底泥においては、その底泥直上に十分な酸素が供給されても嫌氣的微小環境が維持され、基質(NO_3^- , NO_2^-)が供給されれば、十分脱窒しうることを示す興味深い結果である。

また、グルコースなど有機物の添加による促進効果が認められなかったことから、中海底泥中には脱窒細菌が利用できる溶存有機物が豊富に存在することが示唆された³⁾。そして脱窒活性は、主として NO_2^- , NO_3^- 濃度と温度に影響を受けることが分かった³⁾。これより、現場の水温と NO_2^- および NO_3^- 濃度から夏季の脱窒速度を見積もったところ、約 $12.0 \text{ mgN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の値を得た³⁾。

4-2. 硝化-脱窒

^{15}N 希釈法を用い、底泥-底層水系において各DO条件下(14.1~97.4%)で硝化と硝酸還元の同時測定を行い、硝化-脱窒に及ぼすDOの影響について検討した(Fig. 6)。前述したように、硝化活性はDOが約30%になるまで顕著に増加し、それ以上のDO量でほぼ一定となった。一方、硝酸還元活性はDOが約30%になるまでは顕著に増加した(Fig. 6b)。これは、30%(DO%)における硝化速度が約 $60 \mu\text{gN} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ であり、14%における硝化速度の約2倍であったことから、硝化によって $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 濃度が増加したことに起因するものと考えられる。また、DOが50%以上では減少するものの、DO飽和時においても比較的高い活性(最大活性の約0.8)を示したが、これは、実験後の底泥の酸化層が表層数mm

のみで認められたことから、底泥直上水中の DO が飽和であっても底泥中には嫌気部が維持されていたためと考えられる。また、硝化・脱窒の一連の反応は比較的低い DO で十分起こること、さらに、その最適 DO は約30%であることが示唆された⁴⁾。しかし、底泥を含まない底層水のみでは、DO の多少に係わらず、硝化および硝酸還元いずれも確認できなかった⁴⁾。これは、底泥中の細菌数に比べ底層水中の細菌数が極めて少ないことによると考えられ、硝化・脱窒反応には湖底泥が重要な役割を担っていることが示唆される。

以上の結果より、前述の夏季下層において見られる無機態窒素の挙動、すなわち、 NH_4^+ の減少に伴う NO_2^- の増加、と同時に総無機態窒素が減少するという現象 (Fig. 4 参照) は、硝化・脱窒の一連の反応に起因するものと結論づけられる。さらに、この硝化-脱窒が、8月から9月にかけての TIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$ 比の低下 (Fig. 4 参照) に寄与しているものと考えられる。

また、夏季における下層水中の TIN 濃度の経年変動をみると、1981年以降に減少傾向を示しているのが認められた (Fig. 10a)。これは、海水に由来する酸素の供給が森山堤防 (Fig. 1 参照) の建設 (1981年) によってより顕著になったことの影響を受け、底泥界面における硝化

一脱窒の一連の反応にとって好条件が生じたことを反映するものと考えられる。このことは、1981年以降において TIN にしめる $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ 濃度の割合が増加傾向を示し、かつ TIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$ 比が減少傾向を示している (Fig. 10b) ことから支持される。

5. ま と め

汽水湖中海の夏季下層における無機態窒素の変動メカニズムを次のようにまとめることができる。中海は中層付近に強固な塩分躍層を形成しているため、浅い湖であるにもかかわらず成層化が発達している。そのため、塩分躍層以深では水温が上昇し微生物による有機物の分解活動が活発化する5月頃から DO の急激な減少が見られ、やがて貧酸素水塊を形成する。それに伴って、底層水および湖底泥からの分解・溶出に由来する NH_4^+ の増加が起こる。通常は、DO 消費がさらに進み無酸素状態になるため、 NH_4^+ の継続的な増加・蓄積が見られるものと考えられる。しかし、中海では、潮汐により豊富な酸素を含有する日本海海水が底層に進入することによってある程度酸素が供給されるため、中浦水門から湖心部にかけての底層では、夏季においても無酸素状態を呈することは極めてまれである。これを受けて硝化反応が起こり NH_4^+ の減少に伴う NO_2^- の増加がみられるものと考えられる。 NO_3^- への酸化が進まないのは、前述したように、中海が比較的浅い水域であるため光阻害を受けやすいことが主要因であると考えられる。硝化による NO_2^- への変換にとどまらず、総無機態窒素 (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) が減少するのは、前項4で述べたように、さらに脱窒反応が、特に底泥界面において進行するためと考えられる。このような硝化-脱窒の一連の反応による浄化機能は、下層水中の豊富な栄養塩 (N, P) の有光層への供給に対する塩分躍層の抑制作用^{2),6)} とともに、汽水湖である中海が有する重要な特性といえる。

参 考 文 献

- 1) Chan, Y. K., and N. E. R. Campbell (1980): Denitrification in Lake 227 during summer stratification. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **37**, 506-512.
- 2) 清家泰・近藤邦男・伊達善夫・石田祐三郎 (1986): 汽水湖中海における窒素代謝 I—植物プランクトンによる無機態窒素の取り込み. *陸水雑*, **47**, 121-132.
- 3) 清家泰・近藤邦男・伊達善夫・石田祐三郎 (1986): 汽水湖中海における窒素代謝 II—夏期における底泥表層部での脱窒特性. *陸水雑*, **47**, 133-141.
- 4) 清家泰・近藤邦男・伊達善夫・石田祐三郎 (1986): 汽水湖中海における窒素代謝 III—低酸素濃度下における硝化・脱窒. *陸水雑*, **47**, 269-278.
- 5) Seike, Y., K. Kondo, H. Hashitani, M. Okumura, K. Fu-

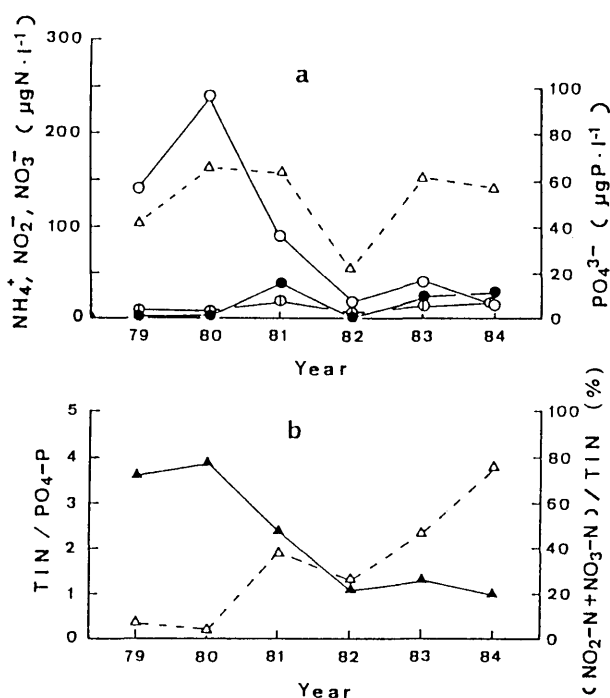


Fig. 10 (a) Yearly changes in summer-mean (Jul.-Sept.) concentrations of NH_4^+ (○), NO_2^- (●), NO_3^- (◐), and PO_4^{3-} (△) in hypolimnion water at Sta. 4 in 1979-1984. (b) Changes in summer-mean ratio of TIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$ (▲) and $(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- - \text{N})/\text{TIN}$ (△) in hypolimnion water at Sta. 4 in 1979-1984 (Seike *et al.*, 1986⁴⁾).

- jinaga and Yoshio Date (1990): Nitrogen metabolism in the brackish Lake Nakanoumi. IV. Seasonal variation of nitrate nitrogen. *Jpn. J. Limnol.*, **51**, 137-147.
- 6) Ohtake, H., Y. Seike, A. Takeda, K. Kondo and Y. Date (1982): A quantitative analysis of phosphorus cycle in the shallow brackish lake Nakanoumi, Japan. *Arch. Hydrobiol.*, **94**, 286-301.
- 7) Ohtake, H., K. Kondo, Y. Seike and Y. Date (1982): Seasonal and areal features of the lagoonal environment in Lake Nakanoumi, a shallow coastal lagoon in Japan. *Hydrobiologia*, **97**, 15-26.
- 8) 近藤邦男・清家泰・橋谷博 (1994): 汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割. *陸水雑*, **55**, 47-60.
- 9) Ohtake, H., S. Kato and Y. Date (1984): The role of tides in removing phosphorus from Lake Nakanoumi, a coastal lagoon in Japan. *Arch. Hydrobiol.*, **99**, 443-462.
- 10) Koike, I. and A. Hattori (1978): Simultaneous determinations of nitrification and nitrate reduction in coastal sediments by ^{15}N dilution technique. *Appl. Environ. Microbiol.*, **35**, 853-857.

質 疑 応 答

問：森山堤防の建設により中海湖心底層の DO が増加した機構は何か？ (中央水研, 佐々木 克之)

答：底層 DO の増加は、豊富な酸素を含有する日本海海水の流入によってもたらされる(本文参照)。海水の進入経路を見ると、森山堤防(1981年3月完成)の建設前には、大根島の北側(本庄工区)に向かうルートと中浦水門(1974年12月完成)を通して中海に進入するルートの2つに分かれていた(Fig. 1 参照)。それが、森山堤防の建設により後者のルートに1本化したため、新鮮な海水の進入の度合いが増し、湖心部まで到達するようになったのではないかと考えられる。このことは、1981年以降に湖心部の底層で DO 増加がしばしば観測されるようになったことから支持される。

問：色々な化学反応の速度があると思うが、流れを考え

た場合には、例えば、潮汐、天気、気候のどのスケールでどの反応を考えたらよいのか？

(広島大・工, 日比野 忠史)

答：自然界における化学種の変動要因は、①物理的因子が直接作用する場合(例えば希釈)、②物理的因子が化学的な反応に作用する場合(例えば、還元的環境から酸化的環境への変化に伴う Fe(II) から Fe(III) への酸化)、③物理的因子がまず生物学的な反応(例えば生物活性)に作用し、次いで、化学種の反応に作用する場合等、様々なケースが考えられ、かつ反応のタイムスケールも異なる。一般に、上記の例では、①の反応が最も速く、③が最も遅いと考えられる。本稿のテーマである夏季の硝化、脱窒については上記③のケースに相当すると考えられるが、DO の供給に潮汐による海水の流入が関与すること、硝化に光の因子が関与することを考え合わせれば、日オーダー(もし可能であれば数時間間隔)で観測するのが望ましいといえる。しかし、現実的には、観測が天候に左右されることや、化学種を測定する場合には測定技術上の問題もあることから、観測頻度を密にすることには限界があると考えられる。今回のように、反応のメカニズムを知る目的のように定性的なものの見方でよい場合には、タイムスケールを少し長めにとっても目的は達せられると考える。

問：貧酸素水塊の内部での脱窒の可能性について？

(通産省・工技院・資環研, 左山 幹雄)

答：我々のデータからは、貧酸素水塊内部での脱窒を裏付ける結果は得ていないので、今のところ、底泥界面における反応が主流だと考えている。水中での脱窒反応は(硝化由来の N_2O は別として)、木崎湖の例に見られるように完全に無酸素化しないと進行しないのではないかと考えている。