

東京都内湾部における栄養塩類の空間分布

石井 裕一 安藤 晴夫 山崎 正夫 和波 一夫 木瀬 晴美* 牧 秀明**

(*非常勤研究員 **国立環境研究所)

要 旨

東京都内湾部において夏期および冬期に水質調査を実施し、栄養塩類の空間分布の特徴を検討した。水温、塩分、クロロフィル濃度およびDO濃度は、冬期は鉛直方向にほぼ均一であったが、夏期は上層・下層で異なり、水深の深い地点では底層は貧酸素化していた。栄養塩類濃度は沿岸や河川河口部の表層で高濃度であり、沖合に行くに従いそれらの濃度は減少する傾向であった。NO₃-N および NO₂-N は表層から底層に向けて濃度が低下あるいは鉛直方向に一樣な分布であったが、NH₄-N および PO₄-P については水深が 10m 程度より深い地点では、夏期に底層の方が上層よりも高濃度であった。栄養塩類の鉛直分布および塩分との関係から、都内湾部においては、NO₃-N および NO₂-N は陸域起源の負荷が中心であり、NH₄-N および PO₄-P は陸水流入に加え、高水温期には底泥からの溶出も寄与しているものと推察された。

キーワード：栄養塩類、鉛直分布、貧酸素、溶出、塩分

Spatial distribution of nutrient salts at coastal area of Tokyo

ISHII Yuichi, ANDO Haruo, YAMAZAKI Masao, WANAMI Kazuo, KISE Harumi*, MAKI Hideaki

(*Associate researcher **National Institute for Environmental Studies)

Summary

The spatial distribution of nutrient salts and some water quality parameters at coastal area of Tokyo in summer and winter period was investigated. Water temperature, salt concentration, chlorophyll concentration and dissolved oxygen concentration were almost same levels vertically at each sampling sites in winter period. In summer period, those parameters were changed in the upper and lower layer. The dissolved oxygen concentration at deeper site was decreased in bottom layer. Nutrient salts concentration were higher level in surface water at seacoast and/or river estuary, and those concentrations were decreased toward offshore area. NO₃-N and NO₂-N concentration were decreased toward bottom layer from surface water, or were vertically similar level. In summer period, NH₄-N and PO₄-P concentration of bottom layer were higher than of surface layer at deeper sampling sites. It was considered that the contribution of inflow loads from land area was majority for NO₃-N and NO₂-N, and the release from bottom sediment was also contributed to NH₄-N and PO₄-P concentration at coastal area of Tokyo.

Key Words : nutrient salts, vertical distribution, dissolved oxygen deficiency, release, salinity

1 はじめに

東京湾は、後背地からの多量の栄養塩負荷^{1, 2)}や底泥からの溶出^{3, 4)}などの影響により長年に亘り富栄養状態が継続している。

東京湾の水質、特に栄養塩類については、平面分布や鉛直分布、あるいは長期変動や季節変動など様々な空間的・時間的スケールで調査・解析がなされており^{5~8)}、多くの有益な知見が蓄積されている。

東京湾最奥部の東京都地先海域(東京都内湾部)では、周辺水域に比べCOD、TNおよびTPは年間を通じて高濃度であり⁹⁾、底泥からの溶出や雨天時流入負荷の影響などが指摘されている¹⁰⁾。また赤潮についても年間で90日程度の発生が記録されるなど、1970年代後半と比べても明確な改善傾向は認められず¹⁰⁾、富栄養状態が継続している東京湾においても特に水質改善が望まれる水域である。

本研究では、東京都内湾部における水質改善対策を検討するための基礎資料を得ることを目的とし、同水域において水質調査を実施した。本報では都内湾部における夏期および冬期における栄養塩類の空間分布を中心に、調査結果を報告する。

2 方法

(1) 現地調査概要

現地調査は2011年7月5日～8日の4日間(夏期調査)および2012年1月10日～13日の4日間(冬期調査)に実施した。調査地点は図1に示す東京都内湾部の31地点(St.1～35、環境基準点8地点、補助地点23地点、但しSt.13、17、19および28は欠番)とした。各調査地点において、船上より同時多層採水器¹¹⁾を用いて、底泥上1mを最下層とし、鉛直方向に概ね1～1.5mの間隔で採水した。表層水はプラスチック製バケツで別途採水した、採取した海水はそれぞれポリ瓶に移し入れ、低温状態で実験室に搬入し、水質分析に供した。夏期および冬期調査時における平均水温、各地点の水深および採水層数(表層を含む)を表1に示す。

また各地点において、採水と同時に多項目水質計(DataSonde H20, HYDROLAB)を用いて、水温、塩分、溶存酸素(DO)濃度およびクロロフィル量の鉛直分布を併せて計測した。使用した多項目水質計はタイムトリガー方式のため、計測層の間隔は降下速度によって異なる。

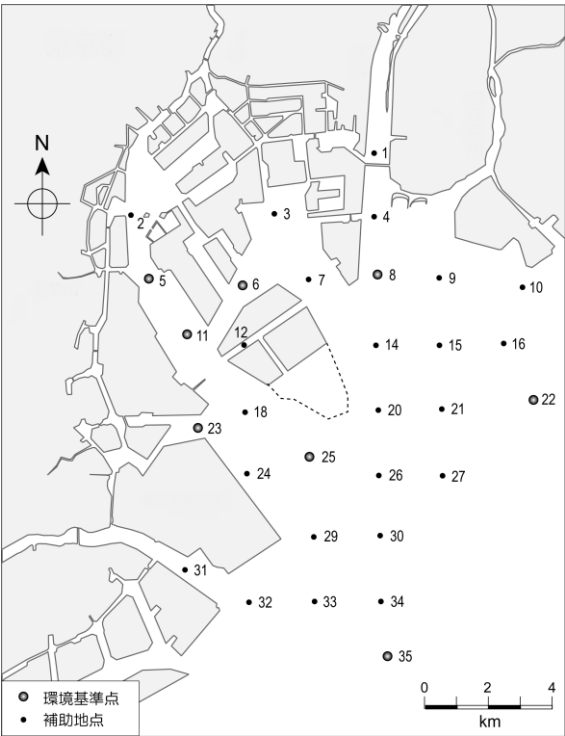


図1 調査地点図

表1 夏期・冬期調査時の平均水温と各調査地点における水深および採水層数

	夏期			冬期			夏期			冬期			夏期			冬期		
	St.	夏期	冬期	St.	夏期	冬期	St.	夏期	冬期	St.	夏期	冬期	St.	夏期	冬期	St.	夏期	冬期
平均水温(℃)		23.9	10.8															
水深(m)	1	3.5	3.8	9	7.1	7.4	20	13.0	14.1	29	16.3	16.0						
採水層数		3	4		5	5		8	9		11	10						
水深(m)	2	10.5	11.1	10	7.8	8.1	21	14.7	14.4	30	19.3	20.4						
採水層数		7	7		5	6		10	9		12	12						
水深(m)	3	6.7	6.5	11	16	17	22	14.0	14.3	31	2.6	3.4						
採水層数		6	6		11	10		9	9		3	3						
水深(m)	4	3.0	3.6	12	5.0	5.4	23	6.3	6.2	32	15.9	15.8						
採水層数		3	3		5	5		5	6		10	10						
水深(m)	5	10.9	11.6	14	9.5	10	24	11.1	11.6	33	22.1	23.0						
採水層数		7	7		7	7		8	7		15	14						
水深(m)	6	11.9	13.6	15	11.4	11.6	25	16.5	16.5	34	22.7	23.4						
採水層数		9	9		8	7		11	10		15	14						
水深(m)	7	13.6	14.2	16	11.7	12.3	26	16.4	17.3	35	24.9	26.0						
採水層数		9	9		8	8		10	11		16	16						
水深(m)	8	4.9	5.6	17	18.1	18.4	27	17.3	17.1									
採水層数		5	5		12	11		12	11									

る。後の解析では、採水層と同一深度での計測がなされていない場合は、直近の深度での計測値を代用し、栄養塩濃度等との比較を行った。多項目水質計の計測層と採

水層との深度差は夏期調査では 0.01~0.47m、冬期調査では 0.01~1.17m の範囲であった。

(2) 水質分析

実験室に持ち帰った海水サンプルは、酢酸セルロースフィルターカートリッジ (DISMIC-25CS、孔径 $0.8\mu\text{m}$ 、ADVANTEC) を用いてろ過し、栄養塩類濃度 ($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$) の分析に供した。各栄養塩類濃度はオートアナライザー (QuAatro 2-HR、BL TEC) を用い測定した。

3 結果および考察

(1) 水温、塩分、クロロフィルおよびDOの鉛直分布

夏期および冬期調査における全地点の水温、塩分、クロロフィルおよびDOの計測結果を図2に示す。夏期調査における平均水温は 23.9°C (表1) であったが、表層と底層で温度差が大きく、水深が20m以上の地点 (St.33、St.34、St.35) ではその温度差が $9.7\sim 10.7^\circ\text{C}$ (表層: $27.2\sim 28.4^\circ\text{C}$ 、底層: $17.4\sim 17.7^\circ\text{C}$) と特に大きくなっていた。冬期調査では上下層での温度差はほとんどなく、鉛直方向に一樣か、底層がやや高温となっていた。その温度差は最大でも 1.6°C (St.25) と小さなものであり、上下層がよく混合されていた。夏期の塩分は、全体として水温とは逆の傾向で、表層水でその値が低くなっていた。荒川河口域に位置する St.1、St.4 および St.8 では流入する河川水の影響を強く受けており、表層の塩分はそれぞれ 4.6、7.1 および 11.7 と低い値であった。それ以降、直線的に南下するライン (St.14—St.20—St.26—St.30—St.34—St.35) の表層塩分は、南下に伴い 20.7 から 28.5 まで順次上昇する傾向が確認された。一方多摩川河口域では、上下層の塩分に荒川河口域ほど顕著な差はなく、表層水の塩分は St.31 で 22.9、St.32 で 23.5 となっていた。クロロフィル濃度は、夏期は表層ほど高濃度であり、St.5 や St.10 ではクロロフィル濃度が $50\mu\text{g/l}$ 以上の赤潮状態^{12, 13)} であった。また水深が 17m 程度より深い層ではクロロフィル濃度が $2\mu\text{g/l}$ 程度以下と小さい値であった。一方冬期は、水温等と同様に鉛直方向にほぼ一樣に分布していた。多くの地点ではクロロフィル濃度は全層で $10\sim 20\mu\text{g/l}$ 程度の範囲であったが、St.10 および St.16 は他の地点に比べ高濃度で、下層にいくほど高濃度になる傾向が観測された。特に St.16 では水深 7.9m 以深でクロロフィル濃度が $50\mu\text{g/l}$ 以上の赤潮状態であり、最下

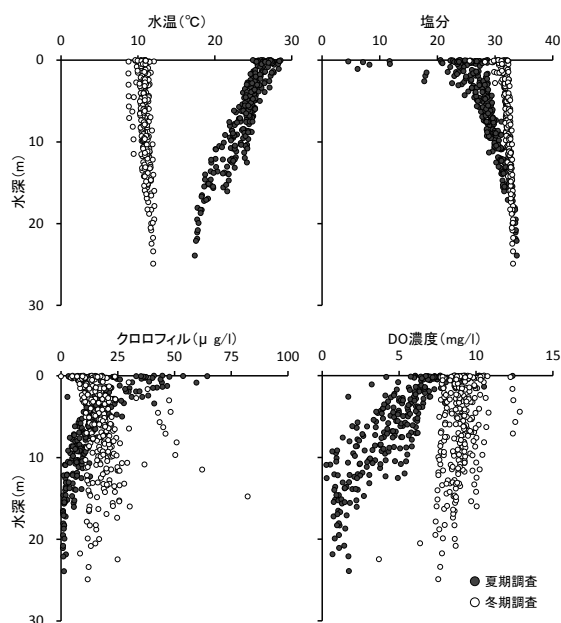


図2 夏期および冬期調査における水温、塩分、クロロフィルおよび溶存酸素鉛直分布の比較

層 (水深 11.3m) では $62.2\mu\text{g/l}$ となっていた。また St.32 の最下層で $82.3\mu\text{g/l}$ と特異的に高濃度のクロロフィルが検出されたが、その直上までの濃度が $11.8\sim 18.4\mu\text{g/l}$ の範囲で他の地点と大きな差異がなかったこと、図示はしていないが濁度も最下層のみ高い値であったことから、計測時に巻き上げてしまった底泥表層のクロロフィルを検出したものと推測される。DO濃度は夏期、冬期ともにクロロフィルと同様の傾向を示していた。夏期には水深が 10m 以上のいくつかの地点で、底層 DO濃度が 2mg/l を下回る貧酸素層が確認された。冬期にクロロフィル濃度が高濃度であった St.10 と St.16 では、DO濃度も同様に他の地点に比べ高い値を示していた。

(2) 栄養塩類の鉛直分布

図3、4、5および6に各調査地点における $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布を示す。図中の数字 (1~35) は調査地点番号 (図1) である。また検出下限値未満のデータについては、便宜上 0mg/l として図示した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は全地点全層の平均濃度は夏期調査では 0.16mg/l (範囲: $0\sim 1.11\text{mg/l}$)、冬期調査では 0.35mg/l ($0.17\sim 2.56\text{mg/l}$) であり、夏期よりも冬期の方がやや高濃度であった。全体として、夏期・冬期ともに表層で高濃度、底層で低濃度となる傾向であった。ただし沖合の地点ほどその傾向は弱く、St.21、22、26、27などは

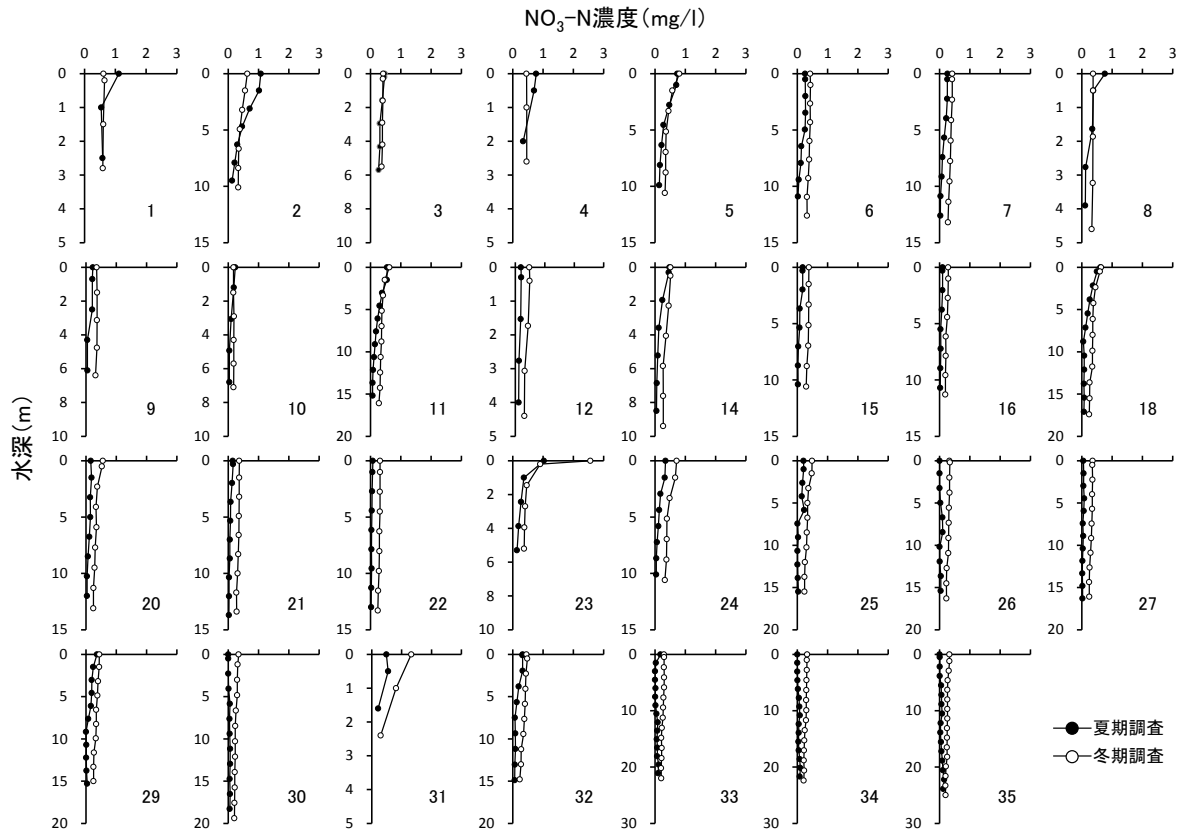


図3 夏期および冬期調査における $\text{NO}_3\text{-N}$ の鉛直分布

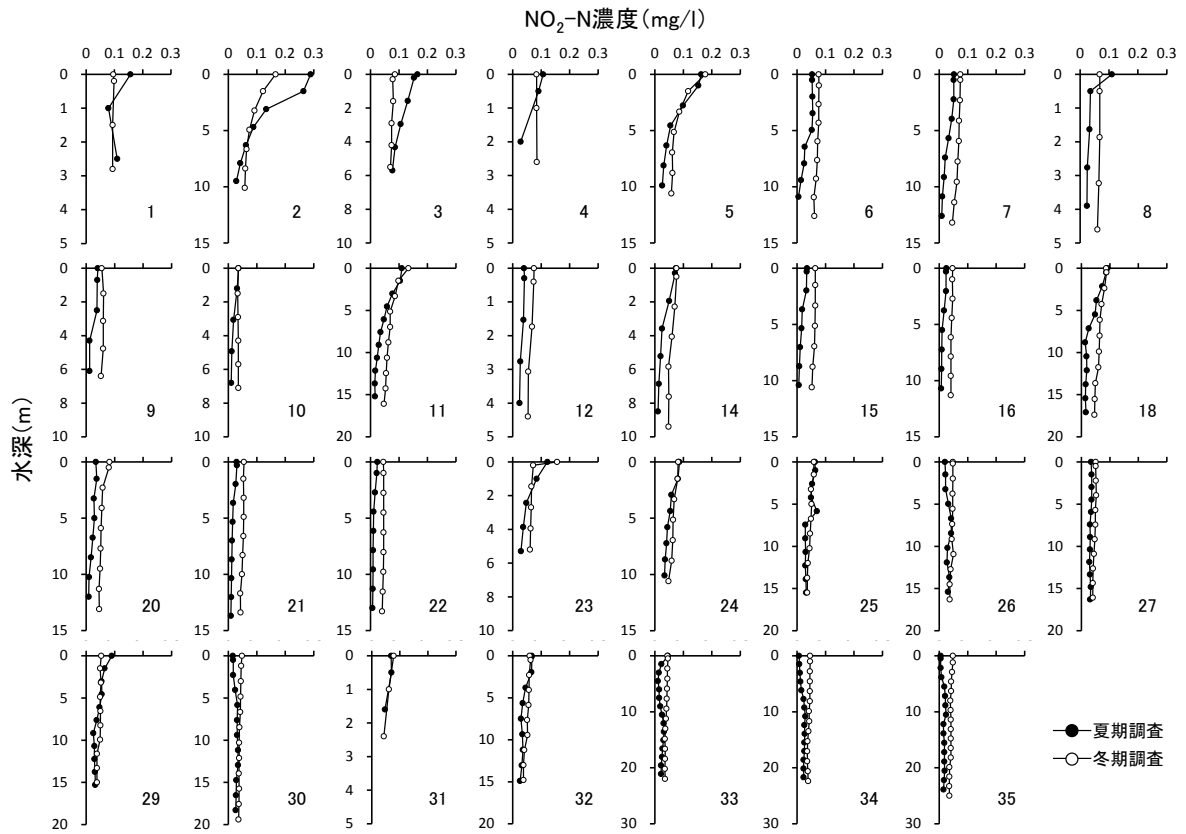


図4 夏期および冬期調査における $\text{NO}_2\text{-N}$ の鉛直分布

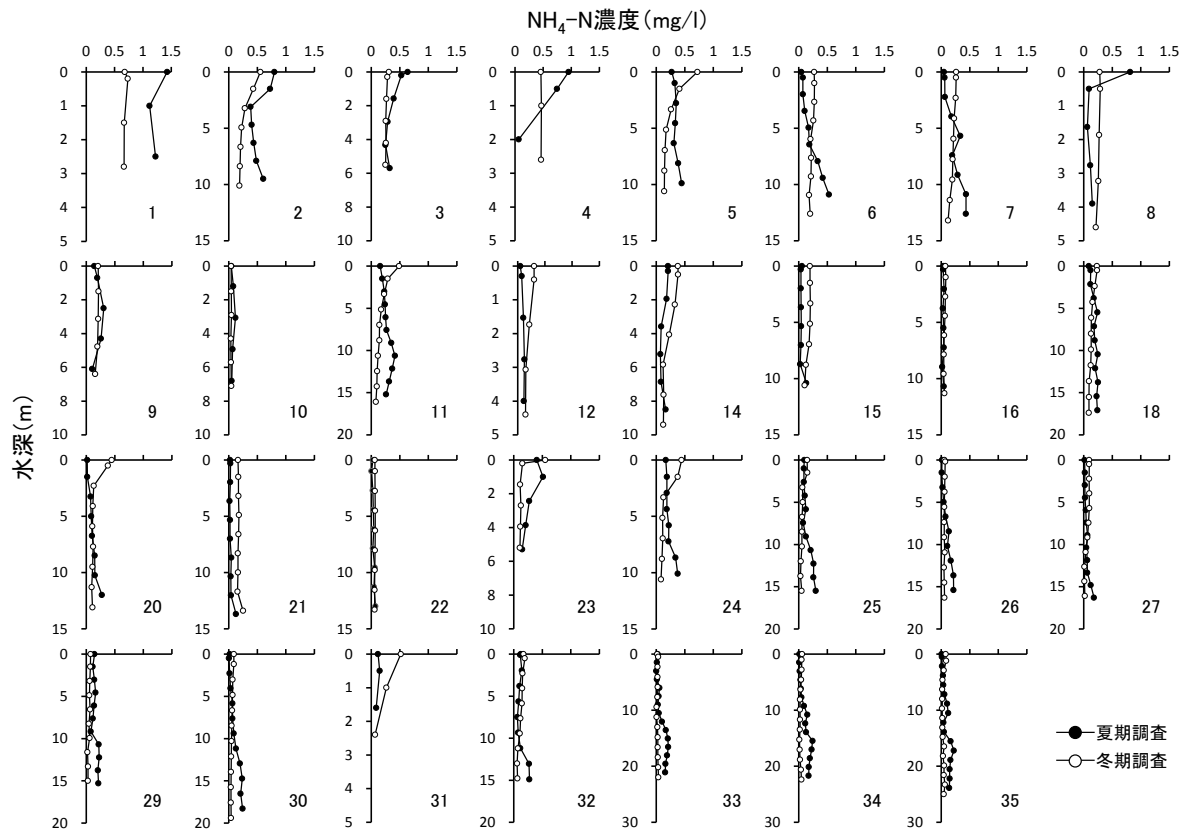


図5 夏期および冬期調査における $\text{NH}_4\text{-N}$ の鉛直分布

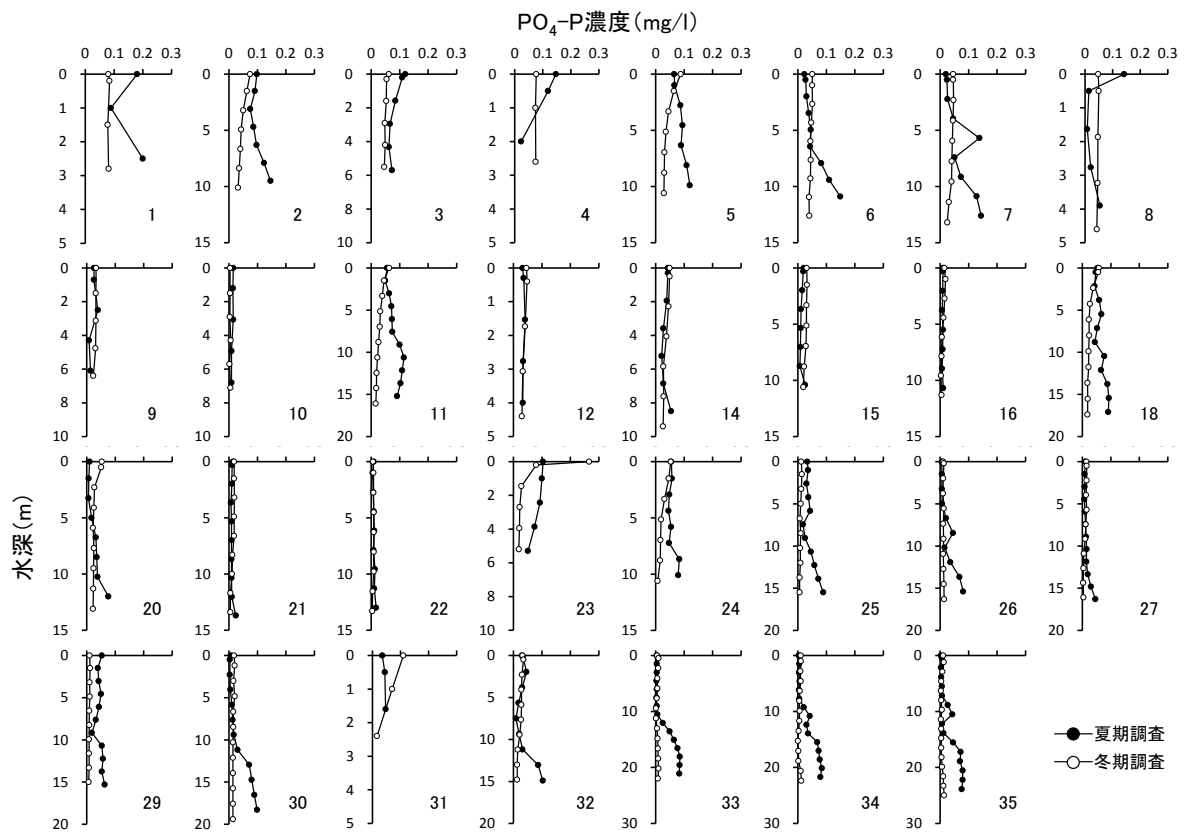


図6 夏期および冬期調査における $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布

低濃度かつ鉛直方向に一樣な濃度分布であった。 $\text{NO}_2\text{-N}$ の平均濃度は、夏期調査では 0.04mg/l (範囲: $0.01 \sim 0.29\text{mg/l}$)、冬期調査では 0.06mg/l ($0.03 \sim 0.18\text{mg/l}$) であった。鉛直分布の傾向は夏期・冬期ともに $\text{NO}_3\text{-N}$ とほぼ同様であった。 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、平均濃度は夏期で 0.174mg/l (範囲: $0.002 \sim 1.427\text{mg/l}$)、冬期で 0.144mg/l ($0.005 \sim 0.734\text{mg/l}$) であった。荒川河口に位置する St.1 は夏期に特に高濃度で、全層で 1mg/l 以上となっており、南下に伴い、表層水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は順次減少していた。また水深が 10m 程度より深い地点では、夏期に底層の $\text{NH}_4\text{-N}$ が上層よりも高濃度になっていた。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は夏期・冬期共に $\text{NH}_4\text{-N}$ とほぼ同様の傾向を示しており、その平均濃度は夏期で 0.045mg/l (範囲: $0.003 \sim 0.200\text{mg/l}$)、冬期で 0.025mg/l ($0.005 \sim 0.266\text{mg/l}$) であった。水深が深い地点では $\text{NH}_4\text{-N}$ と同様に夏期に底層の $\text{PO}_4\text{-P}$ が高濃度であった。また冬期であっても、St.1 や St.31 などの河口部の地点や St.23 など運河に隣接する地点では高濃度であった。

(3) 栄養塩類濃度と塩分との関係

夏期および冬期の栄養塩類濃度と塩分との関係を図 7 に示す。冬期調査では、いずれの地点でも塩分の変動は小さかったものの (図 2)、栄養塩類濃度は塩分に対して有意な負の相関関係を示していた ($\text{NO}_3\text{-N}$: $r=0.81$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$: $r=0.73$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$: $r=0.77$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$: $r=0.74$ 、いずれも $p<0.01$)。したがって、冬期の都内湾部の栄養塩類分布は、塩分濃度の低い陸域からの流入負荷の影響を強く受けているものと推察される。夏期の栄養塩類濃度についても冬期と同様に塩分に対して負の相関関係を示していたが、相関係数はいずれも冬期よりも小さくなっており、その傾向は特に $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ で顕著であった ($\text{NO}_3\text{-N}$: $r=0.76$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$: $r=0.59$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$: $r=0.49$ ($p<0.01$)、 $\text{PO}_4\text{-P}$: $r=0.15$ ($p<0.05$))。このことは、高塩分域で高濃度の $\text{PO}_4\text{-P}$ が観測されたことに起因するものと考えられ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ についても同様の傾向が認められた。安藤と山崎 (2001)¹⁴⁾ は隅田川河口に位置する St.2 で夏期の淡水混入率と水質との関係を検討し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の起源はほぼ陸水由来、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の起源は陸水流入に加えて底泥からの溶出があると推定している。今回の調査においては St.2 に限らず、底層で高濃度の $\text{PO}_4\text{-P}$ が観測されており (図 6)、高塩分域の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度上昇は底泥からの溶出に起因するものと考えられる。また $\text{NH}_4\text{-N}$ についても

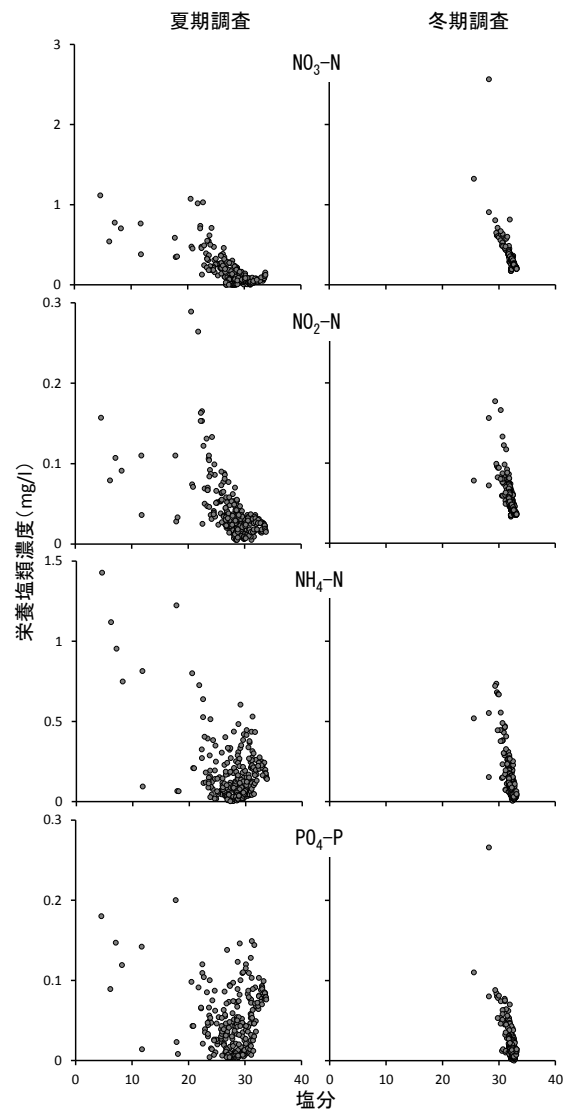


図 7 栄養塩類濃度と塩分との相関

同様に底層で高濃度であった (図 5)。水深が深い高塩分層においては、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と同様に $\text{NH}_4\text{-N}$ についても底泥からの溶出も寄与しているものと推察された。

4 まとめ

東京都内湾部において夏期および冬期に水質調査を実施し、それぞれの栄養塩類の空間分布の特徴を整理した。得られた知見は以下のようにまとめられる。

- (1) 水温、塩分、クロロフィル濃度および DO 濃度は、冬期は鉛直方向にほぼ均一であったが、夏期は上層・下層で異なり、水深の深い地点では底層は貧酸素化していた。
- (2) 栄養塩類濃度は沿岸や河川河口部の表層で高濃度

であり、沖合に行くに従いそれらの濃度は減少する傾向であった。

- (3) $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{NO}_2\text{-N}$ は表層から底層に向けて濃度が低下あるいは鉛直方向に様な分布であったが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ については水深が 10m 程度より深い地点では、夏期に底層の方が上層よりも高濃度であった。
- (4) 栄養塩類濃度の鉛直分布および塩分との関係から、都内湾部においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{NO}_2\text{-N}$ は陸域起源の負荷が中心であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ は陸水流入に加え、高水温期には底泥からの溶出も寄与しているものと推察された。

参考文献

- 1) 松村剛、石丸隆：東京湾への淡水流入量と窒素・リンの流入負荷量（1997、98 年度）、海の研究、13、pp.25-36（2004）
- 2) 二瓶泰雄、江原圭介、臼田美穂、坂井文子、重田京助：江戸川・荒川・多摩川における水質環境と流入負荷特性、海岸工学論文集、54、pp.1226-1230（2007）
- 3) 松梨史郎：東京港の夏季における窒素・リンの水―底泥間のフラックス、海岸工学論文集、43、pp.1116-1119（1996）
- 4) 鈴木昌弘、國分治代、伊藤学：東京湾における堆積物―海水間のリンの挙動、海の研究、12、pp.501-516（2003）
- 5) 二宮勝幸、柏木宣久、安藤晴夫、小倉久子：東京湾における溶存態無機窒素およびリンの空間濃度分布の季節別特徴、水環境学会誌、20、pp.457-467（1997）
- 6) 鯉淵幸生、小倉久子、安藤晴夫、五明美智男、佐々木淳、磯部雅彦：東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測、海岸工学論文集、47、pp.1066-1070（2000）
- 7) 鈴木昌弘、小川浩史：東京湾における夏季表層水中の有機態炭素・窒素・リンの分布、沿岸海洋研究、38、pp.119-129（2001）
- 8) 安藤晴夫、柏木宣久、二宮勝幸、小倉久子、井川利雄：1980 年以降の東京湾の水質汚濁状況の変遷について―公共用水域水質測定データによる東京湾水質の長期変動解析―、東京都環境科学研究所年報 2005、pp.141-150（2005）
- 9) 安藤晴夫、柏木宣久、二宮勝幸、小倉久子、山崎正夫：東京湾における水質平面濃度分布の変遷と特徴、東京都環境科学研究所年報 2002、pp.97-104（2002）
- 10) 風間真理、安藤晴夫：東京都の内湾域における窒素汚染の実態、地球環境、15、pp.171-178（2010）
- 11) 安藤晴夫、山崎正夫：新たな同時多層採水器の開発、水環境学会誌、23、pp.238-242（2000）
- 12) 安藤晴夫、風間真理：東京都内湾における赤潮プランクトンと水質について、第 46 回日本水環境学会年会講演集、p.242（2012）
- 13) 風間真理、安藤晴夫：都内湾における赤潮と貧酸素化、第 46 回日本水環境学会年会講演集、p.243（2012）
- 14) 安藤晴夫、山崎正夫：東京湾における栄養塩類の鉛直濃度分布の特徴、全国環境研会誌、26、pp.14-19（2001）