

## 東京湾における栄養塩類の鉛直濃度分布の特徴\*

安藤 晴 夫\*\*・山崎 正 夫\*\*

**キーワード** ①東京湾 ②栄養塩 ③鉛直濃度分布 ④多層採水器 ⑤現存量

### 要 旨

新たな多層採水器を用いて、1999年1月と7月に東京都内湾で詳細な水質の鉛直濃度分布調査を行った。栄養塩濃度は河口域の表層で濃度が高く、またこれらの地点では鉛直濃度勾配も大きかった。全地点、全水深点の水質の総平均値を比較すると、7月の淡水混入率は1月の2.5倍、 $\text{NO}_x\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は1.2倍、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は2.4倍であり、降雨の影響を強く受けた7月の値が高かった。また、多層での観測結果から上下2層平均値と全層平均値を計算して比較した結果、両者は比較的よく一致し、今回の調査結果では、既存の2層データを用いて栄養塩現存量を推定することが可能であると考えられた。

### 1. はじめに

東京湾ではCODの総量規制が開始されて20年以上が経過し、湾全域からの発生負荷量は当初に比べCOD、リン(P)が約1/2に、窒素(N)は約3/4に削減されたと見積もられている<sup>1)</sup>。しかし、その間に実施された水質測定結果では、こうした水質汚濁防止施策に見合う明確な水質の改善傾向は認められず、東京湾における水質環境基準の達成率は今日でも夏季を中心に依然として満足できる状況には至っていない。そのため2000年度に国の中央環境審議会はN、Pを新たな規制対象項目に加えた第5次総量規制の実施を答申した。

筆者らはこれまで統計数理研究所、横浜市環境科学研究所、千葉県環境研究センターと共同で、1970年代から蓄積されている公共用水域の水質測定結果を整理・統合して東京湾水質データベースを作成し、これに統計的な手法を適用して東京湾の水質の長期的な変動傾向の解析や平面分

布の推定などを行ってきた<sup>2-5)</sup>。そしてその一環として、流入負荷量削減対策等の効果を定量的に評価するために、既存の水質測定データから東京湾の栄養塩現存量を推定し、その長期的変遷の状況を明らかにすることを試みている。

東京湾内の栄養塩現存量を求めるためには、湾内を水質的に同等と見なせる水域に分割し、水域ごとに栄養塩の全層平均濃度を推定する必要がある。その場合、栄養塩濃度が表層から底層まで直線的に変化していることが明らかであれば、全層平均値は、表層と底層の2層平均値で置き換えることが可能である。しかし、東京湾の湾奥部では、河川水の流入やプランクトンの異常増殖、底泥からの汚濁物質の溶出や巻上げなどの影響によって表層と底層の水質はとくに変化が著しく、全層平均値を単純な2層平均値で推定した場合、誤差が大きいことが予想される。多層での水質観測データがあれば、全層と2層の両平均値を計算、比較

\*Vertical Profiles of Nutrient Concentration in Tokyo Bay

\*\*Haruo ANDO, Masao Yamazaki(東京都環境科学研究所)The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection

し、その誤差の大きさを見積もることが可能である。しかし、これまで東京湾では数多くの調査が実施されてきたにもかかわらず、栄養塩のように採水が必要な水質項目については、表層と底層以外の水深での測定データはほとんど報告されていない。したがって本研究を進めるうえでは、多層で栄養塩濃度を観測することが不可欠であると考えられた。また、こうした水質の鉛直濃度分布の観測結果は、水深方向を10層以上にも分割・モデル化して実施されている今日の水質予測計算の検証用データとしても有用性が高いと思われる。

従来から必要性が認識されていたにもかかわらず、センサーで観測できる一部の項目を除き、沿岸海域では、ほとんど水質の鉛直分布調査が行われてこなかった主要な理由としては、容易に多層試料を採取できる方法がなかったことが挙げられる。

このような背景から、筆者らは、まず、簡便で精度良く多層採水が行える方法を模索し、試行錯誤のすえ、まったく新たな仕組みの多層採水器を開発した。そして、それを用いて東京湾で栄養塩濃度の詳細な鉛直分布の観測調査を行ってきた。ここではその多層採水方法について簡単に紹介するとともに、観測結果から明らかになった東京湾湾奥部の栄養塩類の鉛直濃度分布の特徴について報告する。

## 2. 同時多層採水器について

### 2.1 従来法の問題点

水面下の海水を採取する場合、バンドン採水器や北原式採水器が広く使用されている。しかし、これらの採水器を多層採水に使用する場合には、①採水操作を反復して行うため、採水層数が多くなると、作業に多大な労力と時間がかかる、②船が流された場合、順次水深を変えて採水を行うと、地点が少しずつ移動してしまう、③流れで採水器が浮き上がった場合、実際に採取した試水の層順が逆転している恐れがある、などの問題があった。とくに東京都の沿岸海域では、船舶の往来が激しいため長時間調査船を停止させて採水作業を行うことが難しく、実際に容量約1Lの北原式採水器で多層採水を行った経験では、水深が15mを超えると、5層以上の多層採水は、時間的にも労力

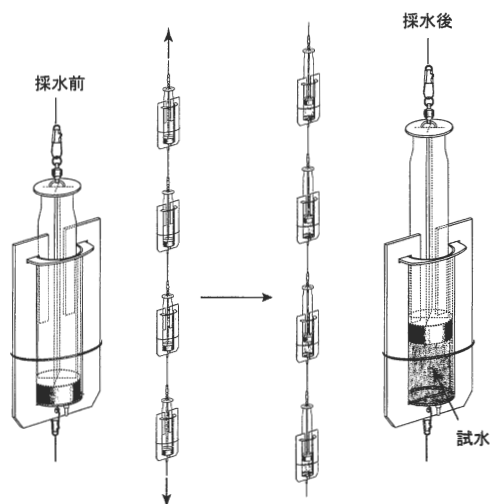


図1 採水セルの仕組み

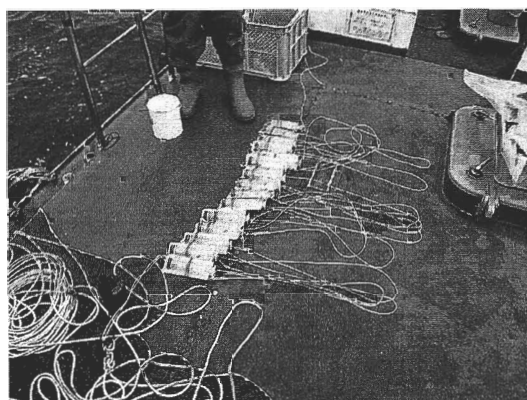


図2 多層採水調査時の状況

的にも困難であることがわかった。

このように従来法では多層採水が難しいため、次に述べる多層採水器を開発した。

### 2.2 同時多層採水器の概要

この採水器は、ポリプロピレン製注射器を改造して作成した採水セル(図1)を直列に連結した構造で、一回の操作で多層の試水を同時に採取することができることが特徴である。採水に要する時間は層数が多くなってもほとんど変わらず、水深25m、水深間隔1m程度で多層採水を行っても、15分程度の短い時間で完了する。なお、各層の採水量は最大で約100mLであるが、栄養塩や金属元素などを分析するには十分である。この採水器の詳細な構成についてはすでに報告した<sup>6,7)</sup>。

図2は、調査時の様子を示したもので、採水

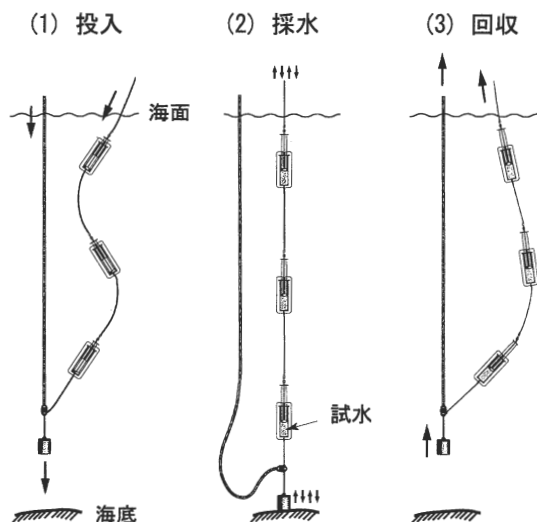


図3 多層採水の手順

は以下に述べる手順で行った(図3)。

- ① 採水セルに連結した錘(約5kg)を別のロープで吊るして、船からゆっくりと着底するまで下し、それと同時に採水セルをそれを結ぶロープをたるませた状態で順次水面下に投入する。
  - ② 着底後、錘を下ろしたロープはたるませておいて採水セル側のロープを引き、小刻みに上下させてしばらく錘の重量をかけ、各層の採水セル内に試水を吸引する。
  - ③ ロープで錘を引き上げるの合せて上層の採水セルから順番に船上へ回収する。
- この一連の操作により多層採水が完了する。

### 3. 栄養塩鉛直濃度分布調査の結果と考察

#### 3.1 調査方法

1999年の1月5~8日と7月6~9日にそれぞれ東京都内湾の31地点で水質調査を行った。調査方法は次の通りである。

前述の同時多層採水器を使用し、水深間隔1~1.5mで各層から約60mlずつの試水を採取した。得られた試水は船上でポリビンに移し、クーラーボックスに入れて実験室に持ち帰った後、直ちにフィルター(アセチルセルロース製、孔径0.45 $\mu$ m)でろ過し、分析するまで冷暗所に保存した。試料の分析にはオートアナライザ(ブラン・ルーベ TRAACS-800)を用い、硝酸性窒素( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亜硝酸性窒素( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、アンモニア性窒素( $\text{NH}_4\text{-N}$ )、リン酸性リン( $\text{PO}_4\text{-P}$ )の濃度を測定した。

N)、リン酸性リン( $\text{PO}_4\text{-P}$ )の濃度を測定した。

#### 3.2 調査時期の気象状況

1月の調査では、それ以前の1カ月間と調査期間中、まったく降雨がなかった。一方、7月の調査では、それ以前の10日間に約150mmの降雨が記録され、調査の初日にも4mmの降雨があった<sup>8)</sup>。すなわち、1月は降雨の影響を全く受けていない冬季の水質であったのに対して、7月は降雨の影響を強く受けた夏季の水質と言える。降雨の影響の違いは、調査開始前日の河川流量からも明らかで、荒川(秋ヶ瀬)の流量は1月4日は12 $\text{m}^3$ /秒、7月5日は89 $\text{m}^3$ /秒と報告され<sup>7)</sup>、7倍も異なっている。

#### 3.3 栄養塩の鉛直濃度分布の地域的特徴

表1に、各水質項目の全地点、全水深点での総平均値を示す。このうち淡水混入率は、外洋水の塩分を35として、 $100 \times (35 - \text{塩分}) / 35$ の式で定義した。降雨の影響がなかった1月には、調査海域全体で約8%淡水が混入していたと推定された。それに対して降雨の影響を強く受けていた7月の淡水混入率は約20%で、1月の2倍以上淡水が流入していたと考えられた。栄養塩のうち、 $\text{NO}_x\text{-N}$ ( $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ の和)と $\text{NH}_4\text{-N}$ の平均値は、7月が1月の約1.2倍であった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ では7月の平均値が1月の約2.4倍と計算され、淡水混入率と同様な比で変化した。

全採水点が調査海域の空間全体におおむね均等に分布していると仮定すると、1月と7月の全平均値の比は、そのまま現存量の比を示していると考えられる。したがって、この2回の調査では、 $\text{NO}_x\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ に比べて $\text{PO}_4\text{-P}$ の現存量変化が大きかったと考えられる。

図4、5は1月と7月の溶存性無機態窒素(DIN:

表1 1月と7月の平均水質の比較

	総平均値		比 7月/1月
	1月	7月	
水温( $^{\circ}\text{C}$ )	12.4	21.4	—
塩分	32.0	28.2	0.88
淡水混入率(%)	8.4	19.3	2.29
$\text{NO}_x\text{-N}$ (mg/l)	0.44	0.55	1.25
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	0.24	0.28	1.17
DIN (mg/l)	0.68	0.83	1.22
$\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/l)	0.032	0.078	2.44

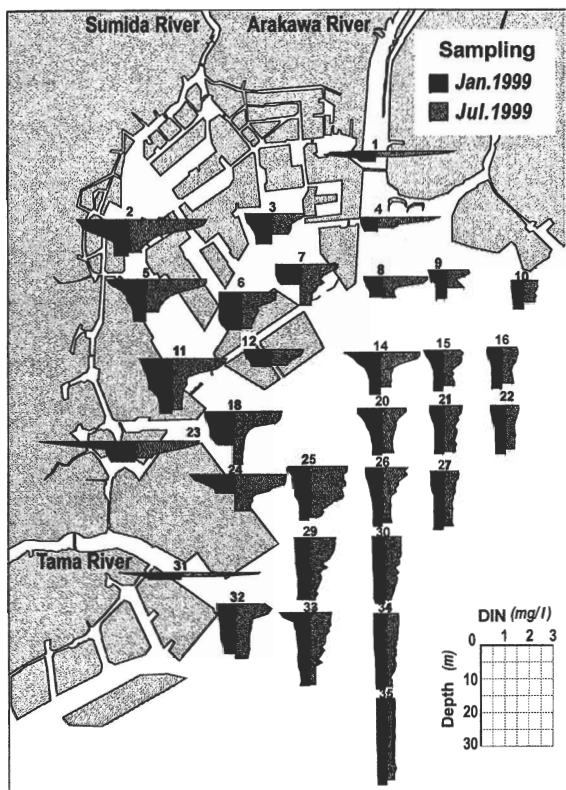
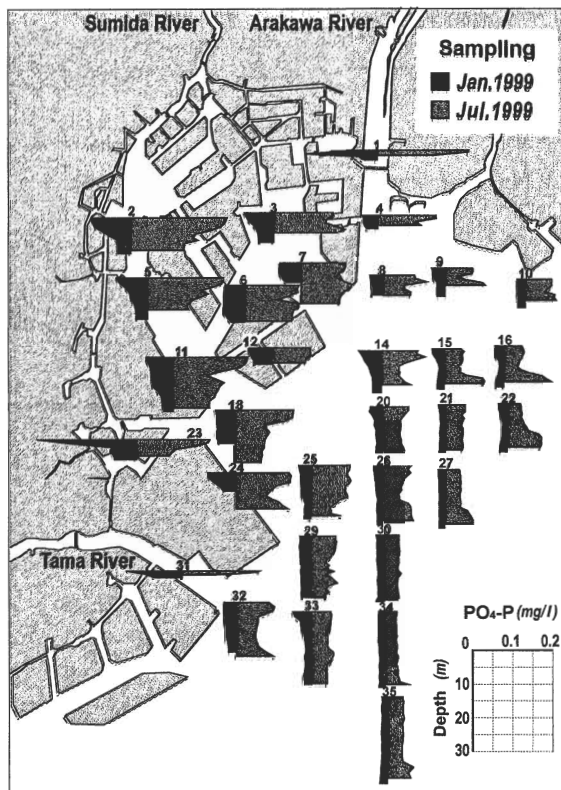


図4 DINの鉛直濃度分布

図5 PO<sub>4</sub>-Pの鉛直濃度分布

NO<sub>x</sub>-N と NH<sub>4</sub>-N の和) と PO<sub>4</sub>-P の鉛直濃度分布の地域特性を明らかにするために、31地点の濃度プロファイルを図にまとめたものである。各地点のグラフで、縦軸は水深、横軸は1月(左側)と7月(右側)の栄養塩濃度、その上の数字は地点番号を示している。

DIN は1月、7月の調査とも、河川の河口域に位置する St. 1, 2, 31や森ヶ崎水処理センターの流路運河に接する St. 23の表層での濃度が他の地点に比べて非常に高い傾向が認められた。また、これらの地点では栄養塩の鉛直濃度勾配が非常に大きいことも特徴で、高濃度の水が表面を覆うように存在し、少し下の層では濃度が大きく低下することが分かった。このことは、水質調査時にスクリーによる下層水の巻上げや、流れによる採水器の浮上に細心の注意が必要であることを示している。さらに、DIN 中の NH<sub>4</sub>-N の割合が約40~50%を占めて他の地点より高く、下水処理水の影響をより強く受けているものと考えられた。

PO<sub>4</sub>-P の1月の測定結果は、上層から下層へと次第に濃度が下がる傾向で、全体的に DIN の結果と非常に良く似た鉛直濃度分布を示した。一方7月の調査結果では、1月に比べて上層、下層とも濃度が高く、また上下層間の濃度差が DIN に比べて小さく、荒川河口域の St. 3, 9, 15, 16, 27など、表層より底層の濃度の方が高い地点も認められた。この調査時の下層の DO 濃度は、中央防波堤内側海域(隅田川河口域)の St. 2, 5, 11, 3, 6, 7と荒川河口域で千葉県寄りの St. 15, 16では0.5mg/l以下であり、貧酸素状態であったことが報告されている<sup>11)</sup>。一般に、海底付近の DO 濃度が2mg/l以下になると、底泥からの PO<sub>4</sub>-P 溶出量が著しく増加することが知られており、これらの地点では、貧酸素化によって下層の PO<sub>4</sub>-P 濃度が上昇したと考えられた。

図6は、隅田川河口に位置する St. 2の7月の淡水混入率と NH<sub>4</sub>-N 濃度および PO<sub>4</sub>-P 濃度との関係を散布図で示したものである。NH<sub>4</sub>-N は

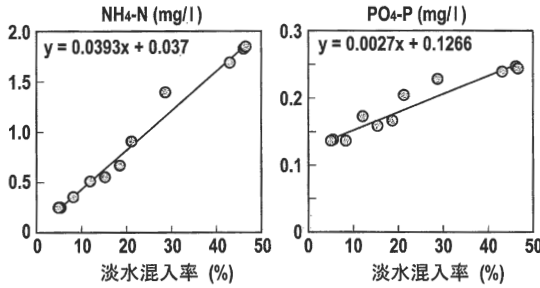


図6 淡水混入率と水質の関係

淡水混入率が0のとき濃度が0に近く、淡水混入率に比例して直線的に上昇している。このことからその起源がほとんど陸水に由来すると考えられる。この図で淡水混入率を100%に外挿するとNH<sub>4</sub>-N濃度は3.9mg/lと計算された。隅田川下流部(両国橋)のNH<sub>4</sub>-N濃度は、同年の6月と8月にそれぞれ3.48mg/l, 4.17mg/lと報告されており<sup>10)</sup>、7月はこれらの平均的な値であると仮定すれば、この外挿値は河川水中の濃度とよく一致する。

一方、PO<sub>4</sub>-Pは、淡水混入率を0に外挿しても比較的高い値を示している。また淡水混入率が

高いと濃度が上昇する傾向も認められる。このことから、PO<sub>4</sub>-PはNH<sub>4</sub>-Nと異なり、陸水由来のほかにも起源があると考えられ、それは前述のように、主に底泥からの溶出によるものと推測される。

### 3.4 2層平均値と全層平均値の比較

栄養塩濃度の多層での観測結果を用いて、地点毎に最上層と最下層の平均濃度(2層平均値)と全水深点の平均濃度(全層平均値)を求め、31地点について散布図に表した(図7)。図中の直線は2層平均値と全層平均値が1:1の点を結んだもので、この線より上側では全層平均値が2層平均値より高く、下側では低いことを示している。図7によれば、全般的に2層平均値と全層平均値はおおむね1:1の直線上にのっており、両者は比較的よく一致していると考えられる。しかし、図4、5に見られるように各地点における鉛直濃度分布は、直線的な変化ではなく、凹凸のある曲線的な変化をしている。したがって2層のみのデータでは、実際の鉛直濃度分布の状況を正確に把握することは難しいが、2層平均値は、上下層間の凹凸部がうまく相殺されて、結果的に全層平均値と比

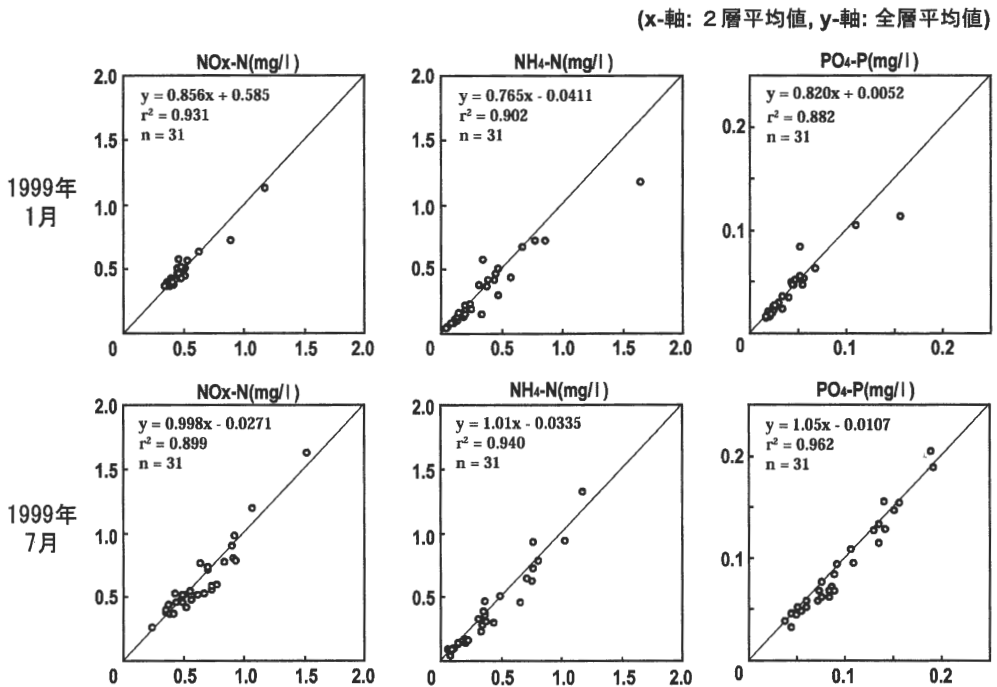


図7 2層平均値と全層平均値の比較

較的よく一致する結果となっている。ただし、こうした関係が多くの場合に成り立つことを確かめるためには、さらに継続した調査が必要である。

#### 4. おわりに

これまで東京湾で同時多層採水器を使用して水質調査を行い、詳細な水質の鉛直濃度分布が非常に容易に観測できることが確かめられた。東京湾の栄養塩現存量を考えた場合には東京都以外の海域についても、水質の鉛直濃度分布を把握する必要がある。このため2001年度から、横浜市、千葉県、神奈川県の研究機関と共同で、東京湾全域を対象に栄養塩の鉛直濃度分布状況の調査を行っている。

なお、本報告の一部は、第34回日本水環境学会年会(2000年岡山)で発表した<sup>11)</sup>。

また、本報で述べた採水方法は「同時多層採水器」として、平成11年12月に特許を出願した(特願平11-376977)。

\*

謝辞 東京湾での採水調査にあたっては、東京都環境保全局水質監視課(現環境局環境評価部広域監視課)の皆様に多大のご協力を頂いたことをこ

こに記し、これらの皆様に感謝を申し上げます。

#### —参考文献—

- 1) 関東地方環境対策推進本部水環境部会東京湾分科会：平成9年度東京湾水質調査報告書，p.31，1999
- 2) 安藤晴夫：東京湾の富栄養化機構の研究(その8)水質測定データ共通ファイルの作成，東京都環境科学研究所年報1990，118-119
- 3) 二宮勝幸，柏木宣久，安藤晴夫：東京湾における水温と塩分の空間濃度分布の季節別特徴，水環境学会誌，19(6)，480-490，1996
- 4) 二宮勝幸，柏木宣久，安藤晴夫：東京湾におけるCODとDOの空間濃度分布の季節別特徴，水環境学会誌，19(96)，741-748，1996
- 5) 二宮勝幸，柏木宣久，安藤晴夫，小倉久子：東京湾におけるCODとDOの空間濃度分布の季節別特徴，水環境学会誌，20(7)，457-467，1997
- 6) 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(4)，238-242，2000
- 7) 安藤晴夫，山崎正夫，鯉淵幸生，小倉久子：新たな多層採水法による東京湾湾奥部の栄養塩鉛直濃度分布調査結果について，東京都環境科学研究所年報2000，38-44
- 8) 東京都気象月報(平成10年12月，平成11年1，6，7月)，東京管区気象台
- 9) 河川流量月報(平成11年1，7月)，水資源開発公団
- 10) 公共用水域及び地下水の水質測定結果(平成11年度)，東京都環境保全局
- 11) 安藤晴夫，山崎正夫，木村賢史：東京都内湾における栄養塩現存量の推定，第34回日本水環境学会講演集，p.122，2000