海岸工学論文集，第55巻（2008）
土木学会，1226-1230

# 東京湾における流入負荷の経年変化

## Long-term Trend of Pollutant Loads into Tokyo Bay

二瓶泰雄[1]・大塚慧[2]・影山英将[3]・広瀬久也[4]

Yasuo NIHEI, Satoshi OHTSUKA, Hidemasa KAGEYAMA and Hisaya HIROSE

To clarify long-term trend of pollutant loads into Tokyo Bay from its watershed, we analyze the temporal changes of freshwater discharge and T-P, T-N and COD fluxes through rivers, sewages, industries and precipitation. Although the freshwater discharge through the rivers was dominant, sewages, industries and precipitation were also found to be important sources of freshwater. The trend analysis of pollutant loads indicates that although the pollutant loads in winter decreases appreciably, the declining trend of the pollutant loads was not found in summer, showing the appreciable differences of long-term trend of pollutant load between winter and summer. Note that the pollutant loads in summer are significantly larger than those analyzed by a unit effluent load.

## 1. はじめに

富栄養化問題を抱える東京湾の水質改善対策として，下水道整備や水質総量規制を始めとする様々な陸域環境負荷対策が行われている．原単位法による解析結果によると，上記の対策効果を反映して，流入負荷は年々減少していると報告されている（中央環境審議会，2005）．具体的には，1979年と2004年の流入負荷を比べると，CODは477t/dayから228t/day（52%削減），全窒素（T-N）は364t/dayから249t/day（32%削減），全リン（T-P）は41t/dayから19t/day（53%削減）と推移している．

しかしながら，東京湾の水質環境は近年明確には改善されておらず，水質濃度は横ばい傾向となっている．さらに，未だに赤潮や青潮が頻発しており，下層水の貧酸素化は拡大しつつある（安藤ら，2005）．上述した「湾への流入負荷量は減少している」という結果をもたらした原単位法には，高負荷となる出水時の影響が正確に考慮されておらず，また負荷量の季節変化が取り扱えない，などという問題点があり，原単位法による流入負荷評価結果には疑問が残る．

本研究では，主要河川における出水時流入負荷データ（二瓶ら，2007a；坂井ら，2008）を用いて，東京湾流域全体からの流入負荷の経年変化を把握する．具体的には，流域から河川・下水処理場・事業場・降水経由の淡水供給量やT-P・T-N・COD流入負荷の経年変化を季節別に示し，その結果を原単位法の解析結果と比較する．

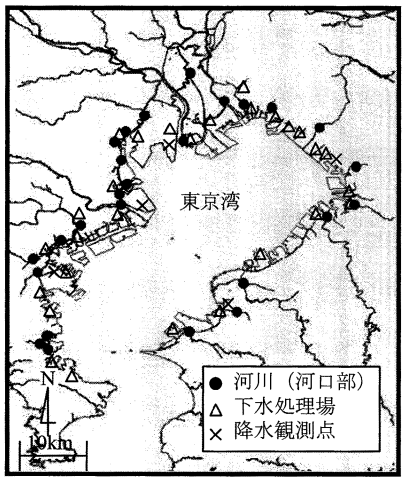


**図-1** 東京湾流入河川河口部と下水処理場，降水観測点の位置

## 2. 東京湾への流入状況

東京湾の流域面積は，江戸川に分派する利根川の分を考慮しないと約7,000km²である（貝塚，1993）．湾奥部及び西部には，大河川である江戸川（流域面積200km²），荒川（同2300km²），中川（同987km²），隅田川（同640km²），多摩川（同1240km²），鶴見川（同235km²）が集中して流入している．これらの主要流入河川における流域面積の総和は，流域全体の約8割に相当している．本研究で対象とする東京湾の範囲を富津岬から観音崎を結ぶ線の以北とすると，この領域には，大小36の河川が東京湾に流入している．このうち，公共用水域水質測定が行われているのは，上記の主要6河川を含む26河川である．**図-1**には，これら26河川における河口部（公共用水域水質

1 正会員 博（工） 東京理科大学准教授理工学部土木工学科
2 ㈱TFDコーポレーション（元東京理科大学学部生）
3 東京都（元東京理科大学学部生）
4 東京大学大学院新領域創生科学研究科社会文化環境学専攻（元東京理科大学学部生）

測定点の最下流部）を丸印で示している．後述する流入負荷量算定には，公共用水域データが存在するこの河口地点における負荷量を各河川の負荷量としている．

下水処理場としては，流域内の処理場のうち東京湾に直接放流するものが28箇所存在する．その位置は，**図-1**中の△印で示す．下水道整備率は流域全体で86%に達しており（H16年度），全国平均（70%）を上回る．

東京湾への流入源としては，河川や下水処理場に加えて，事業場や降水，地下水が考えられる．このうち地下水を経由する淡水供給量や負荷量の実測データは皆無であるため，地下水についてはここでは取り扱わない．そのため，以下では，流入源として，河川・下水処理場・事業場・降水を取り扱う．なお，流入負荷量としては，T-P・T-N・CODの3項目を対象とする．

## 3. 淡水供給量及び流入負荷量の算出方法

### (1) 河川

a)流量

河川を経由する淡水供給量，すなわち流量の算定方法としては，水位流量曲線（$H$-$Q$式）等による流量データが存在する江戸川，荒川，中川，多摩川，鶴見川では，二瓶ら(2007b)と同様に与える．また，水位の連続データは存在するが，$H$-$Q$式が無い千葉県小櫃川・小糸川・養老川では，マニングの平均流速公式と水位観測値から流量を算出する．感潮河川である隅田川に関しては，以下のように取り扱う．

$$\text{河口流量}=\text{荒川分派量}+\text{下水道放流量}+\text{支川流量}+\text{降水量}\times\text{流出率}\times\text{残流域面積} \quad (1)$$

上式の妥当性については，原田ら（2008）の直接流量計測結果に基づいて検証している．その他の17河川の流量は，流域面積と雨量，流出率を乗じて算出する．なお，淡水供給量の解析対象期間は1990～2007年とする．

b)流入負荷

主要6河川については，二瓶ら（2007a）と同様に，低水時と出水時に分けて算出する．具体的には，低水時では公共用水域水質データ（頻度：月1回）と流量の積，出水時には流量$Q$と汚濁負荷量$L$の相関式（$L$-$Q$式）を用いて，T-P・T-N・CODの流入負荷量を算出する．ここで用いられる$L$-$Q$式（$L=aQ^b$，$a$，$b$：係数）としては，坂井ら（2008）の結果に準じて与える．他の20河川については$L$-$Q$式が得られていないため，公共用水域データと流量の積により与える．各河川における流入負荷算定地点は**図-1**に示す各河川の河口地点である．流入負荷の解析対象期間は1990～2006年とし，2007年については公共用水域データが得られていないのでここでは扱わない．

なお，$L$-$Q$式中の係数$a$，$b$については，解析対象期間において同一の値を用いる．この係数の経年変化について検討するために，自動水質観測所におけるCOD連続データを用いて，$L$-$Q$式中の係数の経年変化を算出した．その結果，係数$a$，$b$には，明確な経年変化が確認されなかったので，ここでは同一の係数を採用する．この結果の詳細は，別途報告する予定である．

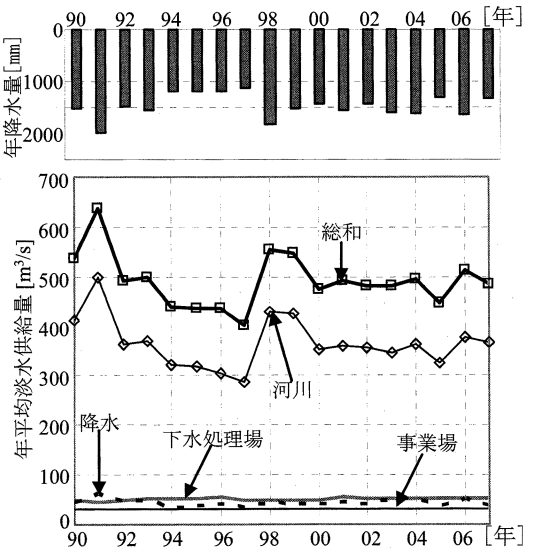


**図-2**　東京湾流域からの淡水供給量の経年変化

### (2) 下水処理場・事業場・降水

下水処理場からの淡水供給量及び流入負荷量に関しては，日本下水道協会（2006）に示されている放流量データを用いる．また，事業場からの淡水供給量は松村・石丸（2004），その水質に関しては水質汚濁物質排水総合調査結果（環境省）をそれぞれ与える．この下水処理場や事業場の結果としてはデータソースの関係により年間平均値のみ与える．なお，事業場については，2000年以降のデータしか収集できていないので，それ以前の結果は平均値を与える．さらに，降水については，湾周囲のアメダス観測点（**図-1**中の×印の5地点）の平均値を用いて，大気から湾への淡水供給量のみ与える．降水経由の流入負荷量は他と比べて小さいため，ここでは取り扱わない．

## 4. 結果と考察

### (1) 淡水供給量の特徴

流域から湾への淡水供給量を把握するために，河川，下水処理場，事業場，降水の淡水供給量とその総和の経年変化を**図-2**に示す．ここでは，1990～2007年における年平均値を対象としている．また，図中には，流域平均の年降水量も合わせて表示している．淡水供給量の合計値は401～637 $m^3/s$となっており，概ね雨量の増減と対

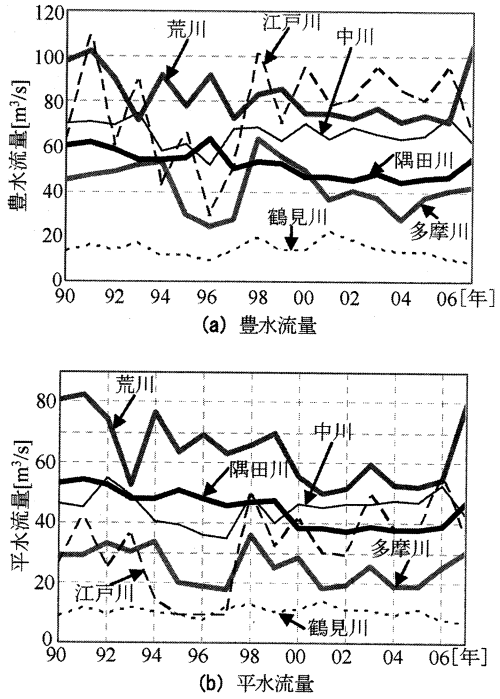


**図-3**　主要6河川河口部における流量の経年変化

応して変動している．淡水供給量の内訳としては，河川は287～499 m³/s，下水処理場は46～56 m³/s，事業場は31 m³/s，降水は33～61 m³/s となっている．上記の期間全体における平均値をそれぞれ算出し，総和に対する各淡水供給量の割合を算出した結果，河川では75.5%，下水処理場では10.5%，事業場では6.4%，降水では9.2%となっている．このように，河川からの淡水供給量が約75%となり大部分を占めているが，一方で河川以外からの淡水供給も有意である．また，これらの結果は，1997，1998年度の淡水供給量を求めた松村・石丸（2004）とほぼ同じ結果となっている．

淡水供給量が最も大きい河川に着目して，その内訳を調べる．河川全体の流量に占める主要6河川（荒川，隅田川，江戸川，中川，多摩川，鶴見川）の合計が約90%を占めるので，ここでは，主要6河川の流量に注目する．**図-3**は，1990～2007年における各河川河口部での豊水流量と平水流量の経年変化を示す．まず，豊水流量としては，荒川や江戸川，中川が卓越している．この期間の平均値の大小関係としては，荒川（83 m³/s）＞江戸川（75 m³/s）＞中川（66 m³/s）＞隅田川（52 m³/s）＞多摩川（42 m³/s）＞鶴見川（14 m³/s）となっている．一方，平水流量は約10～80 m³/s となり，河川間の大小関係は基本的には豊水流量と類似しているが，相対的に隅田川が大きく，江戸川が小さいという点は異なる．江戸川の流量変動は相対的に大きく，特に1994～1997年では降水量

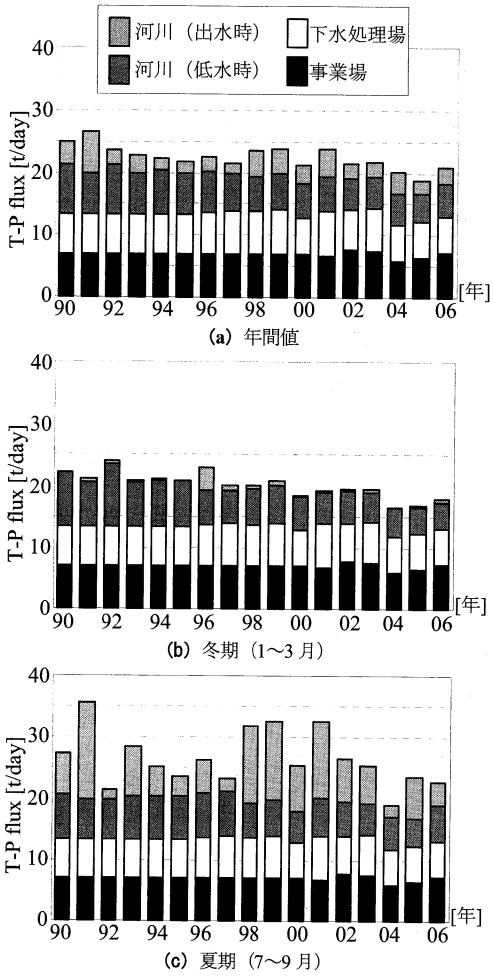


**図-4**　流域からのT-P負荷量の経年変化

が少なかったため，平水流量が維持流量程度まで低下した．一方，隅田川では下水処理水等の人工排水が多くを占めるため，降水量変化の影響が相対的に現れにくい．

以上のように，淡水供給源としては河川が約75%を占めており，その内訳としては，荒川や江戸川に加えて中川や隅田川が大きく寄与していることが明らかとなった．また，下水処理場や事業場も重要な淡水供給源となり，その寄与率は無降雨期間にはより増大する．このようなことから，東京湾の水収支を考える上では，河川のみならず，下水処理場や事業場，降水を考慮することの重要性が示された．さらに，東京湾の流動計算を行う上では，通常，淡水供給源として河川しか考慮されていないが，河川以外の淡水供給源を考慮しないと数値計算上淡水フラックスを正確には取り込んでいないこととなる．

**(2)ソース別流入負荷量の経年変化（T-P を例に）**

次に，東京湾への流入負荷量の長期変動傾向をソース別に調べるために，一例として，1990年から2006年にお

けるT-P負荷量の経年変化を**図-4**に示す．ここでは，季節別の経年変化特性を見るために，年間平均値と冬期平均（1～3月），夏期平均（7～9月）の結果を対象とする．また，負荷量をソース別に示すために，事業場，下水処理場，河川（低水時），河川（出水時）と分けて表示する．なお，事業場及び下水処理場からの負荷量データは，データソースの都合上年間平均値しか得られていないので，これらの負荷量には季節変化は含まれない．

年間平均値に着目すると，事業場は6.6～7.7t/day，下水処理場は5.9～7.2t/day，河川（低水時）は4.8～8.0t/day，河川（出水時）は1.5～6.7t/dayである．このように事業場と下水処理場経由の負荷は大きく，負荷量全体に対する寄与率の期間平均値は，事業場では31%，下水処理場では29%となる．両者の寄与率を合わせると60%となり，事業場と下水処理場における流量の寄与率（＝17%）を大幅に上回る．一方，河川の負荷量に関する平均寄与率は，低水時では27%，出水時では13%となる．このように低水時では，河川からの負荷よりも事業場や下水処理場からの負荷が大きくなっている．このようなT-P負荷量の年間平均値に関する経年変化特性は，多少の増減はあるものの，概ね漸減傾向となっている．

冬期のT-P負荷量に関しては，年間値と比べて河川（出水時）の負荷量が大幅に減少している．また，冬期負荷量の経年変化特性も，年間値と同様に，漸減傾向である．それに対して，夏期の負荷量に関しては，冬期や年間値と比べて河川（出水時）が顕著になっている．この結果，全体に対する河川の寄与率は低水時と出水時を合わせて49%に達する．さらに，特筆すべきこととしては，夏期のT-P負荷量に関する経年変化特性は，明確には減少しておらず，全体的には横ばい傾向であり，増加した期間（1998～2001年）すら見られる．このように，季節により，流入負荷の経年変化特性が異なることが確認された．

夏期のT-P負荷量の経年変化が減少せず横ばい傾向となる要因を検討する．夏期のT-P負荷量では，前述したように，出水時における河川経由の負荷量が卓越し，また，出水規模も対象期間内では大きな変化は見られない．そのため，河川（出水時）の負荷量がT-P負荷量の経年変化に大きな影響を与えている．また，低水時における河川経由の負荷に着目すると，夏期の負荷量は冬期ほど減少していない（**図-4**）．これを詳細に検討するために，主要6河川における低水時のT-Pの経年変化を**図-5**に示す．冬期では全河川においてT-Pは明確に減少しているが，夏期では濃度レベルが高い鶴見川や隅田川，多摩川では減少傾向であるものの，荒川や江戸川，中川ではT-Pは横ばい傾向である．このように，低水時におけるT-Pは，冬期には明確に改善しているものの，夏期には改善傾向が見られない河川が多い．この結果を反映して，夏期におけるT-P負荷量が横ばい傾向となったものと考えられる．以上より，夏期におけるT-P負荷量が経年的に減少しない要因としては，河川経由の負荷量が出水時・低水時共に維持されたままであることが示唆された．

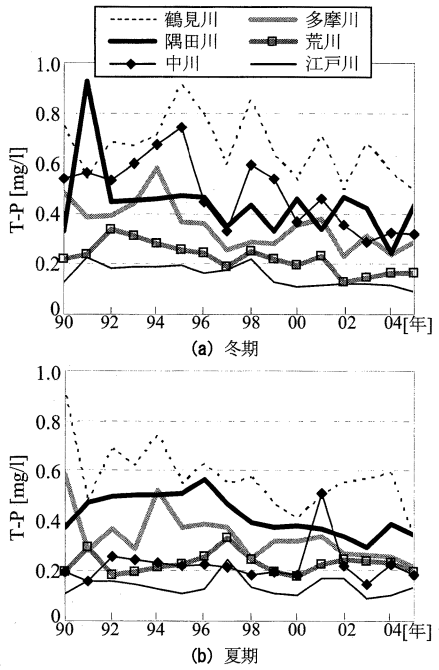


**図-5**　低水時におけるT-Pの経年変化（主要6河川河口部）

### (3) 原単位法の解析結果との比較

本研究で得られたT-P・T-N・COD負荷量の算定結果（以下，本結果と呼ぶ）と，原単位法により得られた負荷解析結果（中央環境審議会，2005）を比較したものを**図-6**に示す．この原単位法による解析結果は，水質総量規制を行う上で基礎資料として示されているものである．また，本結果に関しては，前節と同様に，年間平均値及び夏期，冬期の結果の5年間移動平均したものを表示している．原単位法の解析結果が5年毎に示されているため，本結果もそれに合わせて5年間の移動平均操作を行ったものを採用している．これを見ると，年間平均値については，3項目共に漸減傾向となっているが，T-Nについてのみ本結果と原単位法の解析結果が概ね一致している．一方，T-P・COD負荷量に関しては，本結果の方が原単位法の解析結果よりも大きくなっており，その差はCOD負荷量において顕著である．

本結果における冬期と夏期の流入負荷量に着目すると，3項目共通して，夏期における本結果は原単位法の解析結果を上回り，冬期は逆の傾向となっている．また，冬

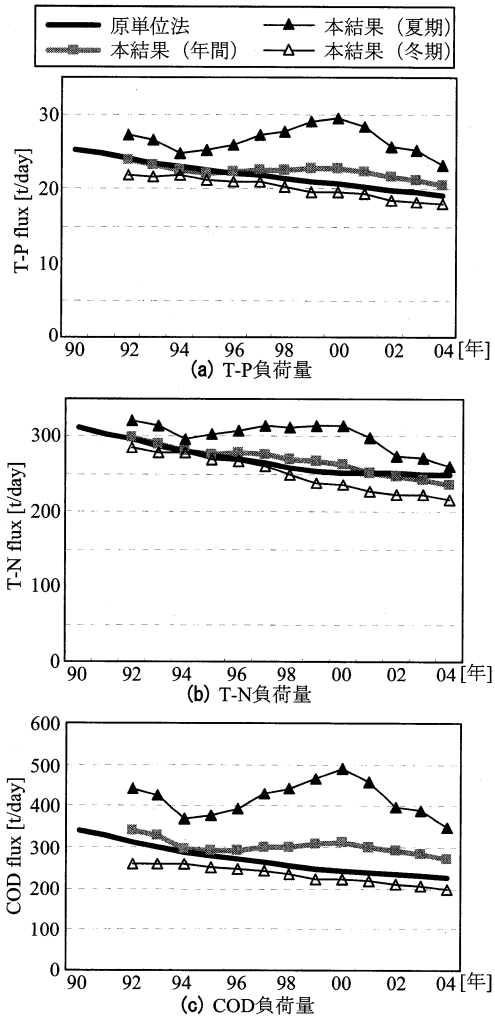


**図-6**　各負荷量に関する本結果と原単位法の解析結果の比較（本結果には5年移動平均操作を施している）

期の負荷量は，経年的に減少しているが，夏期の負荷量は2000年付近に極大値を取るなど単調には減少していない．このように，夏期と冬期では，流入負荷量そのものやその経年変化特性が大きく異なることがT-P，T-N，CODに関して明らかにされた．特に，夏期の流入負荷量は，冬期の負荷量や原単位法の解析結果を大幅に上回り，かつ，T-PやCODについては経年的に減少している様子は見られない．以上より，一般に夏期に発生する赤潮や青潮の発生頻度が経年的に減少しない要因の一つとして，陸域からの流入負荷の削減効果が夏期には現れていないためであると推測される．

## 5. 結論

本研究で得られた主な結論は，以下の通りである．

1) 1990年～2007年における淡水供給量は401～637m$^3$/sとなり，その内訳の平均値としては，河川は75.5%，下水処理場は10.5%，事業場は6.4%，降水は9.2%である．

2) T-P負荷量に対する流入源別の寄与率は，年間平均値としては，下水処理場では31%，事業場では29%，河川では40%となった．これより，流入負荷に対する事業場や下水処理場からの寄与が大きいことが示された．

3) 夏期のT-P・T-N・COD負荷量は冬期の負荷量よりも大きく，両者の差は出水時負荷が大きいT-PやCODにおいて顕著である．

4) 本結果における年間値・冬期の負荷量は，原単位法の解析結果と類似して経年的に減少している．一方，本結果による夏期負荷量に関しては，明確な減少傾向は見られず，一部増加している期間も存在している．

5) 夏期におけるT-P負荷量が経年的に減少していない要因としては，河川経由の負荷量が出水時・低水時共に経年的に減少していないためである．

6) 以上より，夏期に発生頻度が高い赤潮や青潮が現在でも頻発している要因の一つとして，流入負荷の削減効果が夏期には現れていないためであることが示唆された．

**謝辞**：公共用水域水質データは国立環境研究所「環境数値データベース」より収集した．国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所・荒川下流河川事務所，京浜河川事務所，水資源機構・利根導水総合管理所，東京都水道局には流量や水質データをご提供して頂いた．ここに記して謝意を表する．

## 参考文献

安藤晴夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・川井利雄（2005）：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，pp.141-150.

貝塚爽平編（1993）：東京湾の地形・地質と水，築地書館，pp.111-134.

坂井文子・二瓶泰雄・江原圭介・臼田美穂・重田京助・大塚慧（2008）：江戸川・荒川・多摩川・中川における出水時栄養塩・COD負荷特性，水工学論文集，Vol.52，pp.1117-1122.

（社）日本下水道協会（2006）：平成16年度版　下水道統計　行政編，2086p..

中央環境審議会（2005）：第6次水質総量規制の在り方について（答申），21p.

二瓶泰雄，江原圭介，臼田美穂，坂井文子，重田京助（2007a）：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，Vol.54，pp.1226-1230.

二瓶泰雄・高村智之・渡邊敬之（2007b）：東京湾主要流入河川における流量モニタリングの現状と課題，海岸工学論文集，Vol.54，pp.1221-1225.

原田靖生・二瓶泰雄・北山秀飛・高崎忠勝（2008）：H-ADCP計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング～隅田川を例として～，水工学論文集，Vol.52，pp.943-948.

松村剛・石丸隆(2004)：東京湾への淡水供給量と窒素・リンの流入負荷量(1997，98年度)，海の研究，Vol.13，No.1，pp.25-36.