

# 印旛沼流域における湧水の 栄養塩・COD 環境の把握

## NUTRIENT AND COD ENVIRONMENTS OF SPRING WATER IN CATCHMENT AREA OF LAKE INBA-NUMA

二瓶泰雄<sup>1</sup>・真茅良平<sup>2</sup>・堀田和弘<sup>3</sup>・湯浅岳史<sup>4</sup>

Yasuo NIHEI, Ryohei MAKAYA, Kazuhiro HOTTA and Takashi YUASA

<sup>1</sup>正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>2</sup>非会員 学 (工) 千葉県県土整備部 (元東京理科大学学部生)

<sup>3</sup>非会員 修 (農) 増田学園常務理事 (〒260-0006 千葉市中央区道場北1-17-6)

<sup>4</sup>正会員 修 (工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

Although water qualities of spring are an important index for restoration of water environment in Lake Inba-numa, there is little information on water qualities of spring in its catchment area. For this purpose, we collected samples of spring water at a number of measurement stations in its catchment and analyzed nutrient and COD of spring water. The results indicate that T-N and  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  of spring water were relatively larger than those of river water flowing into Lake Inba-numa, showing the appreciable load of nitrogen from spring water to Lake Inba-numa. A decreasing tendency of  $\text{NO}_3\text{-N}$  of spring water was found in the measurement areas with various land uses. We discussed the association of construction of sewerage, decrease of manure and nitrogen oxide in air to water qualities of spring.

**Key Words :** Lake Inba-numa, spring water, nutrient, COD, land use

### 1. 序論

千葉県印旛沼では、高度経済成長期以降に生じた水質汚濁問題が一定限界の範囲で推移しているものの、現段階でも水質環境は明確に改善されておらず、水道水源の湖沼としては全国ワースト上位の水質汚濁度を記録している。この水質汚濁化の主要因としては、元々、滞留時間が22日と長いことに加えて、流域からの過剰な汚濁物質流入やそれと対応して沼内の植生環境が大きく変化したことが指摘されている<sup>1)~3)</sup>。この水質環境を総合的に改善するために、千葉県は「印旛沼流域水循環健全化緊急行動計画書」を作成し、印旛沼とその流域において多くの水質改善対策を提案し<sup>4)</sup>、その一部を「みためし行動」という形で試験的に実施し、その成果を上げつつある<sup>5)~7)</sup>。

この緊急行動計画における流域再生目標として、湧水量の増加やその水質改善が掲げられている<sup>4)</sup>。印旛沼流域では、かつては湧水が豊富に見られ、それが人々の生活や農業に有効利用されていた<sup>2) 8)</sup>。しかしながら、現在では、谷津の荒廃や消失に加えて流域の急激な都市化により、湧水量が減少し、一部では湧水が枯渇している。また、農地における過剰な施肥量により、一部の湧水の窒素濃度は悪化している。このようなことから、印旛沼

を再生させるには、流域の健全な水循環を回復させることが必要不可欠である。

このように流域再生の指標である湧水に関しては、そもそも湧水自体の存在地点の把握が容易でないことや湧水量の計測には多くの労力を必要とする。そのため、湧水の水量や水質の現状に加えて、それらの長期的変遷についての実測データが限定されており、印旛沼・流域再生策立案のために必要な科学的データが乏しいのが現状であった。

それに対して、著者の一人(堀田)は、1990年代から印旛沼流域における湧水の水質調査を定期的を実施し、多くの水質データが蓄積されている。本研究では、それらのデータに最近の水質調査結果を加えて、印旛沼流域における栄養塩・COD環境の現状や長期的変遷を明らかにする。ここでは、印旛沼流域内の数多くの湧水地点において、水温などを現場計測すると共に、湧水を採取して実験室に持ち帰り窒素、リン、CODなどを分析する。また、得られた湧水の水質環境変化の要因を明らかにするために、流域内の土地利用特性及び周辺の地下水・大気環境との関係性を明らかにすることを試みる。

### 2. 現地観測の概要



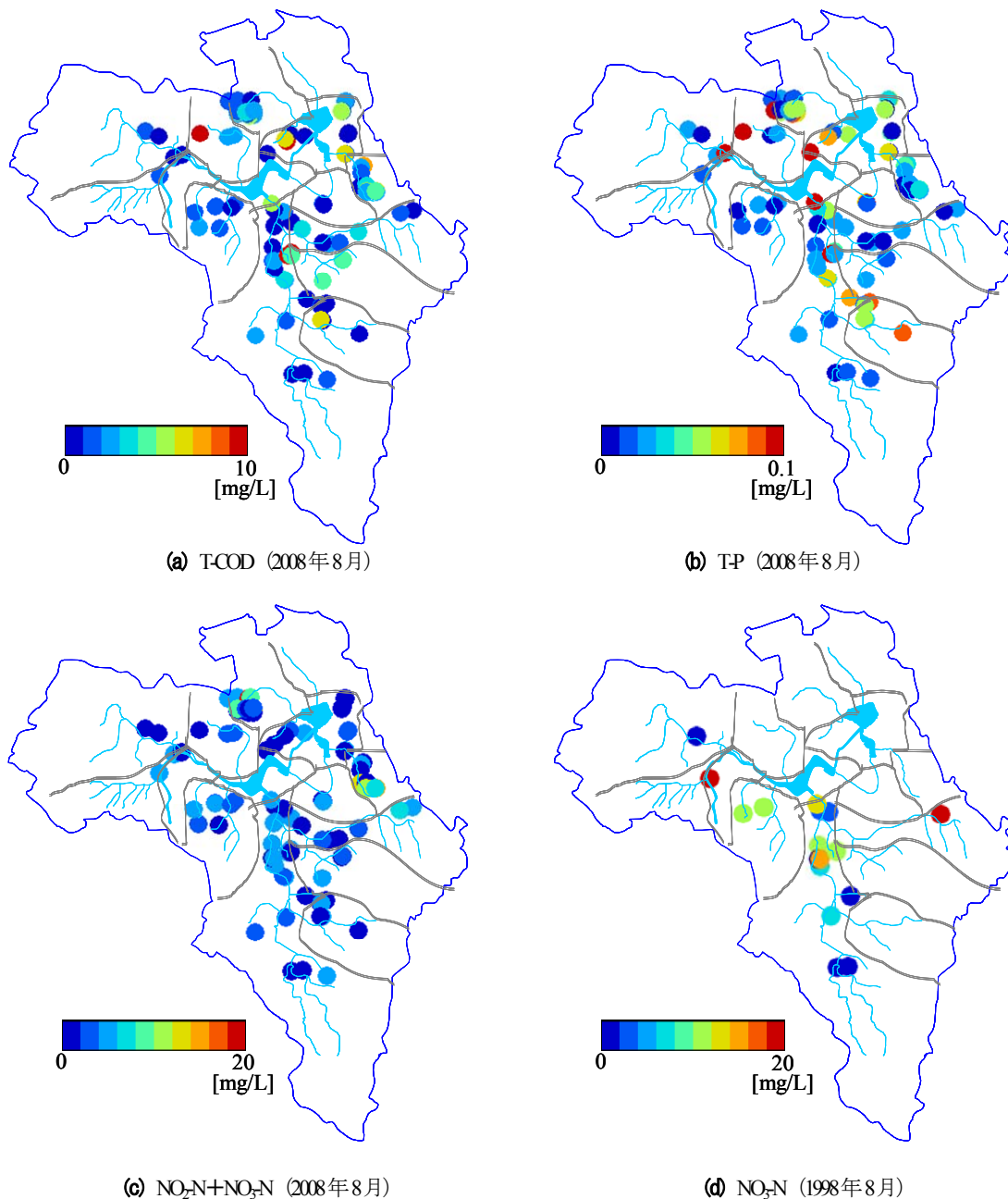


図-2 湧水の栄養塩・CODに関する空間分布

は上記の 112 点を観測点とし、測定項目も上述した内容となった。観測頻度としては、多項目水質計による現場計測は月一回行われている。一方、栄養塩・CODの観測間隔は毎月 1 回～3 年に 1 回という不定期に観測が行われており、2008 年は 8 月と 11 月のみ実施された。

また、湧水と河川水の水質環境を比較するために、2008 年 8 月の湧水観測とほぼ同時期に流入河川における水質観測も行った。観測場所としては、鹿島川 3 地点、高崎川 3 地点、手繰川 3 地点、新川・神崎川 7 地点、師戸川 3 地点などである。分析項目も湧水と同じとしている。

### 3. 観測結果と考察

#### (1) 栄養塩・COD 環境の空間分布

印旛沼流域における湧水水質環境の現況を把握するために、観測点数や項目が最も充実している 2008 年 8 月における T-COD、T-P、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  の空間分布を図-2 (a)～(c) に示す。ここでは、水質濃度の大きさを色分けした散布図の形で表示しており、観測地点が集中している領域では観測結果が一部重なって表示されている。まず、T-COD の結果を見ると、多くの地点において低濃度であり、全体の 7 割は  $3.0\text{mg/L}$  以下となっている。また、 $10\text{mg/L}$  を超える高濃度となる地点は鹿島川中流域、師戸川上流、松虫川流域の一部で見られるが、いずれも局所的であり、河川流域全体に高濃度エリアが形成されている様子は見

られない。同様に、T-Pに関しても、局所的に0.1mg/L以上の高濃度となっているが（松虫川，新川，師戸川，物木落，鹿島川下流域），全体的には低濃度（<0.04mg/L）となっている。地下水や湧水の指標となるNO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nについても、大部分の地点は0.1~4.5mg/Lと一般の環境基準（=10mg/L）よりも小さい値を記録しているが、物木落流域，江川上流域，高崎川上流域では著しく高い地点が見られた。以上のことから、高濃度の栄養塩濃度やCODが観測される地点は見られるが、それらの地点は印旛沼流域全体もしくは流入河川流域全体という大スケールにわたり存在しておらず、スポット的に散在していることが示された。

### (2) 湧水と河川水の水質環境の比較

このような湧水と河川水の水質環境を比較・検討するために、両方のデータが得られている河川流域における河川水と湧水のT-CODとT-P，T-N，NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nを図-3に示す。ここでは、2008年8月における鹿島川，高崎川，手繰川，神崎川+新川，師戸川を対象とし、各河川流域における全データの平均値を表示している。これより、河川水のT-CODは2.8~3.7mg/Lとなっているが、湧水のT-CODは1.1~4.9mg/Lと変動幅が大きい。また、両者の大小関係としては、師戸川を除いて、河川水の方が湧水よりも大きい。この師戸川の湧水観測を行った4地点のうち1地点においてT-CODが9.5mg/Lと突出して大きく、その結果を除くと、湧水のT-CODは河川水よりも小さい。次に、T-Pについても、T-CODと同様に、師戸川を除いて、河川水の方が湧水よりも大きい。また、師戸川では、T-CODが突出して大きかった湧水観測地点ではT-Pも大きく（=0.15mg/L），その影響により湧水と河川水の大小関係が変化している。

一方、T-Nに着目すると、河川水のT-Nは概ね2~6mg/Lとなっているのに対して、湧水は3~10mg/Lとなっており、図中の全河川流域において湧水の方が河川水よりも大きく、両者の大小関係はT-CODやT-Pとは大きく異なる。湧水におけるT-Nの内訳としては、溶存態窒素D-Nは約90%，懸濁態窒素P-Nは約10%であり、そのD-Nの主要部分を占めるNO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nについても、同図(d)に示すように、湧水の方が河川水と比べて同程度もしくは上回る結果となっている。印旛沼流域では、河川流量に対する湧水量の寄与は大きく、白鳥<sup>2)</sup>はその寄与率が約半分であると指摘している。その場合、上記の湧水水質計測結果より、印旛沼への窒素負荷に対する湧水起源の負荷が極めて大きいことが示唆される。

### (3) 窒素濃度の長期的変遷

湧水の水質環境に関する過去からの変遷を調べるために、観測データが長期間存在する窒素濃度を取り上げる。

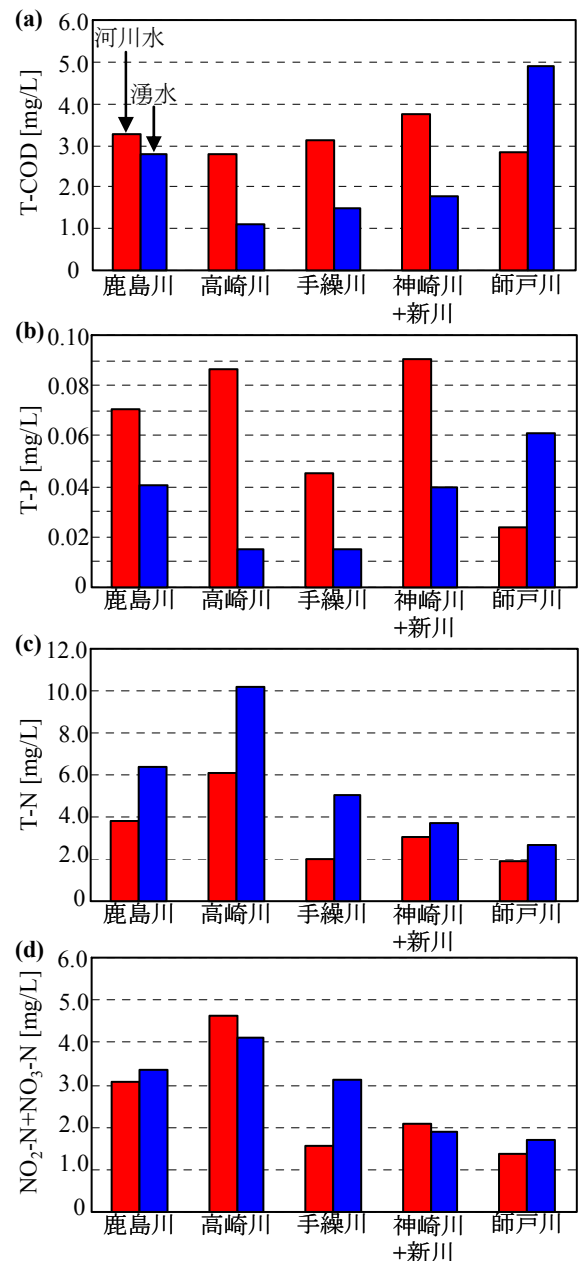
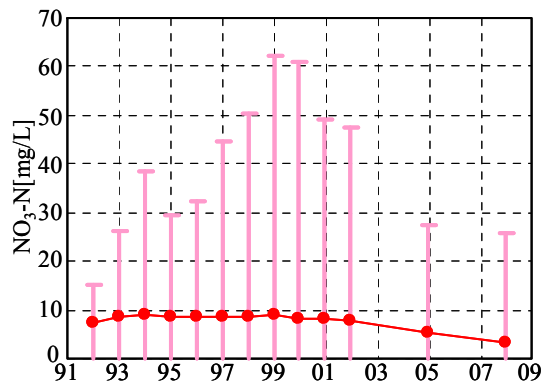


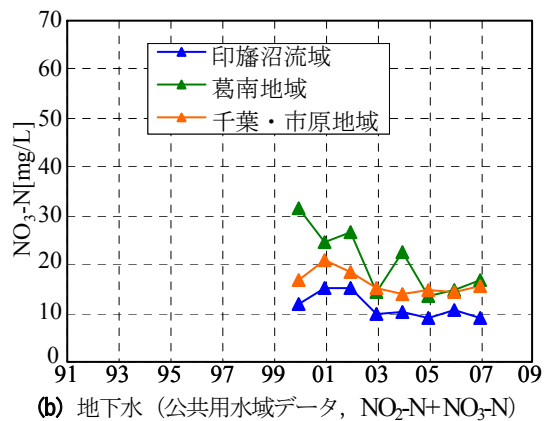
図-3 各河川流域における河川水と湧水の水質環境の比較（ここではT-COD(a), T-P(b), T-N(c), NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N(d)を対象とする）

図-2 (d) は、1998年8月におけるNO<sub>3</sub>-Nの空間分布を示している。ここで、1998年の観測点数は18地点のみであるので、2008年の結果と比べて非常に少ない。これより、1998年においても、NO<sub>3</sub>-Nが相対的に高い地点は河川流域全体ではなく、局所的・スポット的に表れており、非一様な空間パターンは2008年の傾向と類似している。また、1998年におけるNO<sub>3</sub>-Nは、18地点中17地点において2008年の結果よりも大きい。このように、2008年における湧水の窒素濃度レベルは10年前よりも流域全体にわたり低下していることが分かる。

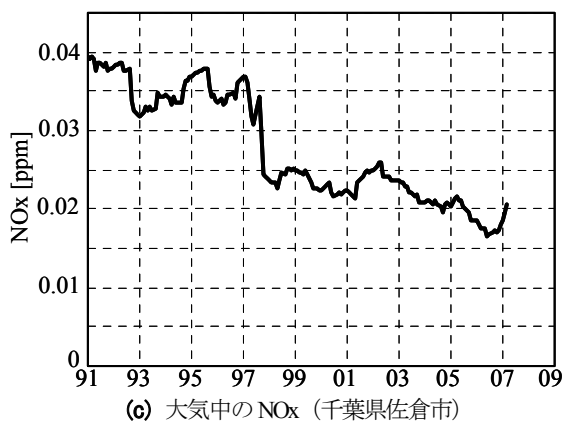
より詳細に湧水の窒素濃度に関する長期的変遷を明らかにするために、各年における湧水の水質調査全地点に



(a) 湧水（平均値と最大・最小値，2005年まではNO<sub>3</sub>-N，2008年のみNO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nを対象）



(b) 地下水（公共用水域データ，NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N）



(c) 大気中のNO<sub>x</sub>（千葉県佐倉市）

図-4 湧水・地下水・大気における窒素濃度の経年変化

における窒素濃度の年平均値および年最小値・最大値の経年変化を図-4(a)に示す。ここでの窒素濃度としては、分析方法の都合により、湧水については1992～2005年ではNO<sub>3</sub>-N，2008年のみNO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nとしている。また、比較のため、印旛沼流域及び流域外である葛南地域と千葉・市原地域における地下水の年平均値も同図(b)に表示している。この地下水データとしては、公共用水域データを用いており、期間としてはデータ公開されている2000年～2007年とし、NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nを対象とする。これより、湧水の平均値は1992～2002年まで7.3～8.9mg/Lとなりほぼ横ばい傾向であるが、それ以降は減少しており、2008年の平均値は3.3mg/Lまで低下している。湧水の最

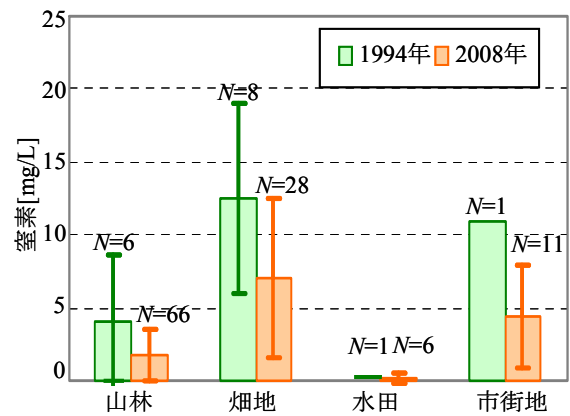


図-5 土地利用別の湧水の窒素濃度（N：地点数，1994年ではNO<sub>3</sub>-N，2008年ではNO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nを対象とする）

大値も、1999、2000年にピーク（=62mg/L）を取った後、明確に減少している傾向が読み取れる。それに対して、2000年以降しかない地下水のNO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nに関しては、いくらかの増減は見られるものの、全体的には減少傾向となっている、ということが3地域で共通している。このような地下水水質環境の長期的変化は、上述した湧水の水質環境変化と定性的には一致している。また、印旛沼流域内の地下水の窒素濃度レベルは、工業地域が集中する葛南及び千葉・市原地域の地下水よりも全般的に低く、その大きさは湧水より大きいものの10mg/Lを下回っている。以上の結果より、印旛沼流域における湧水の硝酸態窒素濃度は、長期的には改善傾向が見られ、その挙動が流域内外における地下水の硝酸態窒素の変遷と一致していることが明らかとなった。

#### （4）湧水水質環境と土地利用特性の関係

このような湧水の水質環境の形成要因を検討するために、湧水水質環境と密接に関連する土地利用状況別に湧水の窒素濃度の平均値と標準偏差を算出した結果を図-5に示す。ここでは、湧水観測地点の涵養域と想定される部分の土地利用特性を、山林・畑地・水田・市街地に分類している。また、土地利用データを手に入れた1994、2008年を対象としており、各年の窒素濃度は図-4(a)と同様に1994年ではNO<sub>3</sub>-N，2008年ではNO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nとする。図中には、土地利用毎の地点数Nも表記されており、総観測点数の違いにより、1994年のデータ数は2008年よりも少ない。これより、両年における硝酸態窒素濃度データの標準偏差は大きいものの、平均値としては、畑地>市街地>山林>水田、という大小関係となっていることが両年で共通している。畑地や市街地に関しては、1994年時点では、一般的な環境基準である10mg/Lを上回っているが、山林や水田では10mg/Lよりも小さい。特に水田では窒素濃度が小さくなっており、これは脱窒の影響を受けているものと考えられる<sup>11)</sup>。さらに、両年の窒

素濃度レベルを比べると、低濃度の水田を除くと、どの土地利用特性においても 2008 年の窒素濃度の方が 1994 年の値を下回っていることが明確に分かる。

以上の結果をまとめると、印旛沼流域における湧水の硝酸態窒素濃度は地下水と同様に経年的に減少傾向となっており、それが土地利用特性に関わらず確認されることが明らかとなった。このような硝酸態窒素濃度が減少している要因としては、農地では、畑地における施肥量の最適化や減肥が印旛沼流域で取り組まれ<sup>4)</sup>、市街地では、下水道整備事業等の生活排水対策や各種雨水浸透対策が推進されている<sup>4), 5), 7)</sup>。また、山林においても、畜産廃棄物の適正処理などが行われつつあり、これらが一定の成果を挙げているものと推察される。さらに、大気からの湿性及び乾性降水物として与えられる窒素負荷に着目して、その大気負荷のベースとなる大気中の窒素酸化物濃度NO<sub>x</sub>の経年変化を図-4(c)に示す。ここでは、印旛沼流域内の一地点(千葉県佐倉市)におけるNO<sub>x</sub>の1年間移動平均値を表示している。これより、大気中のNO<sub>x</sub>は1997年まで横ばいであるが、それ以降、減少していることが分かる。減少のタイミングやその様子は湧水や地下水とは異なるが、大局的にはNO<sub>x</sub>は近年減少傾向にあり、広域的な汚濁源となる大気負荷を減少させているものと考えられる。この結果、どの土地利用状況においても、湧水の窒素濃度が減少したものと推察される。

#### 4. 結論

本研究では、印旛沼流域環境再生の指標である湧水の水質環境の現状や長期的変遷を明らかにするために、流域内の多地点における湧水の水質調査を実施した。得られた主な結論は次のとおりである。

- 1) 湧水の栄養塩・CODの空間分布特性を調べたところ、高い栄養塩濃度やCODが観測される地点は見られるが、それらの地点は流域全体という大スケールにわたって存在しておらず、局所的・スポット的に散在している。
- 2) 湧水と河川水の水質環境を比べた結果、T-CODやT-Pについては河川水の方が湧水よりも大きいものの、T-Nは逆に湧水の方が相対的に大きいことが示された。この結果より、印旛沼への窒素負荷に対する湧水起源の負荷が大きいことが示唆された。
- 3) 印旛沼流域における湧水の硝酸態窒素濃度は、長期的に減少しており、それが流域全体で見られることが明らかとなった。また、このような湧水水質の変遷は流域内外における地下水の硝酸態窒素と一致していることが示された。
- 4) 低濃度の水田を除くと、土地利用特性に関わらず、

近年の硝酸態窒素濃度は減少傾向が見られる。この一因として、下水道整備状況の進展や施肥量の減少、大気中のNO<sub>x</sub>の減少が関係していることが示唆された。

なお、ここでは、集中的な湧水水質調査は2008年の2回しか行われていないため、現在継続してデータを収集しているところである。また、湧水水質変化の要因としては、下水道整備状況や施肥量、大気負荷を定量的に算出して総合的に検討する必要がある、今後の課題とする。

**謝辞**：現地観測及びデータ解析に対して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。本研究の一部は、下水道振興基金研究助成金(研究代表者：二瓶泰雄)によるものである。ここに記して深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機: 印旛沼・手賀沼 一水環境への提言一, 古今書院, pp.1-167, 1993.
- 2) 白鳥孝治: 生きている印旛沼 一民族と自然一, 嵩書房出版, pp.1-161, 2006.
- 3) 天野邦彦, 時岡利和: 印旛沼における底泥巻き上げ, 湖底の光環境と水生植物との相互関係, 水工学論文集, Vol.50, pp.321-1326, 2006.
- 4) 千葉県: 印旛沼流域水循環健全化 緊急行動計画書, pp.1-21, 2004.
- 5) Yuasa, T., Furukawa, I., Masuoka, Y. and Mushiake, K. 2007. Integrated action plan for Lake Inba-numa watershed management, *Chinese Hydraulic Eng. Soc. Annual Meeting*, pp.1-10.
- 6) 中村香子, 藤村葉子, 湯浅岳史, 林薫, 小倉久子: 印旛沼流域における住民と連携した流域対策の試み 一「みためし」方式による生活雑排水対策の実践一, 用水と廃水, Vol.49, No.10, pp.3-9, 2007.
- 7) 二瓶泰雄, 市原翔平, 吉田拓司, 宮子雄太, 林薫, 上原浩, 東海林太郎, 湯浅岳史: 印旛沼の水環境再生を目的とした市街地流域対策に関する総合的検討, 水工学論文集, Vol.53, pp.1093-1098, 2009.
- 8) 堀田和弘: 湧き水の保全と活用「あれ これ」, 河川文化を語る会講演集(その23), pp.9-85, 2007.
- 9) 千葉県: 印旛沼流域水循環健全化会議資料, 2009.
- 10) (社)日本下水道協会: 下水試験方法上巻 一1997年版一, 1997.
- 11) 武田育郎: 水と水質環境の基礎知識, オーム社, pp. 131-148, 2001.

(2009. 9. 30 受付)