

# 印旛沼における水質悪化要因の分析と 水質改善案の検討

A Study on Clarification of Water Quality Deterioration Factors and Validation of  
Improvement Alternatives in the Inba Marsh Basin

大関祐次郎<sup>1</sup>・古川巖水<sup>2</sup>・伊藤一正<sup>3</sup>・渡辺眞道<sup>4</sup>・宮本守<sup>5</sup>・吉川勝秀<sup>6</sup>

Yujiro OZEKI, Izumi FURUKAWA, Kazumasa ITO, Masamichi WATANABE,  
Mamoru MIYAMOTO and Katsuhide YOSHIKAWA

- 1正会員 工修 日本技術開発株式会社 (〒531-0072 大阪府大阪市北区豊崎5-6-10)  
2正会員 千葉県県土整備部 (〒260-8667 千葉県千葉市中央区市場町1-1)  
3正会員 工博 株式会社建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)  
4正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)  
5正会員 工修 日本大学理工学部社会交通工学科 (〒274-0063 千葉県船橋市習志野台7-24-1)  
6正会員 工博 日本大学理工学部社会交通工学科 (〒274-0063 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

Urbanization in Japan has in recent years had considerable implications for the nature environment. In the Inba Marsh Basin, urbanization has had negative repercussions for the water environment. The Chiba prefectural government has been taking action for the regeneration of the Inba Marsh Basin.

The purpose of this study is to facilitate improvements to the Inba marsh basin. The study analyzed factors for water quality deterioration associated with changes in the water cycle mechanism in the Inba Marsh Basin based on local observed data. As a result of the analysis, the inflow of water from the Tone River, reconstruction from spring water and stored rainwater were identified as potential strategies for improvement. A model was constructed to analyze the effects of the improvements quantitatively.

**Key Words :** Inba Marsh Basin, Water Transmission, Water Quality

## 1. 序論

利根川水系の印旛沼流域は、489.8 km<sup>2</sup>、流域内人口73万人を有し鹿島川や神崎川などからなる流域である(図-1)。印旛沼流域は昭和28年の印旛沼土地改良区の認可に次いで国営印旛沼干拓事業に指定され、印旛沼の一部が干拓され営農面積の拡大政策が進められた。さらに、当該地域は首都圏の近郊であったこと、千葉市と隣接していたことなどから市街化が急速に進み、土地利用の変化とも相俟って、水循環機構が大きく変化し、印旛沼の水質は現在水道水源および湖沼水質特別措置法で指定されている湖沼において全国でワースト1となる状態にまで劣化している。

そこで、千葉県は平成13年に印旛沼の水質改善を目的とした「水循環健全化会議」を設け総合的な再生に着手した。

健全な水質の確保とは親水性の向上、生態系の保全・回復を確保することであり、地域の活性化や水辺の有効利用、生物多様性等が達成され、環境インフラとしての価値が高まると考えられる。本研究では、印旛沼の水質改善に資す

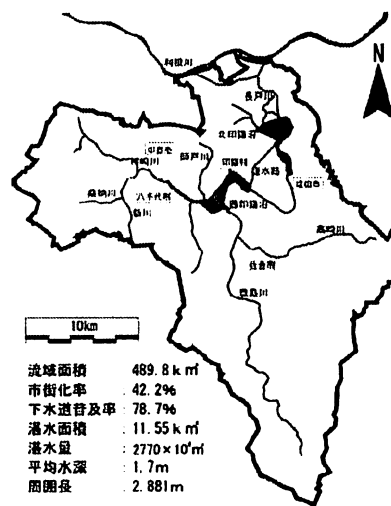
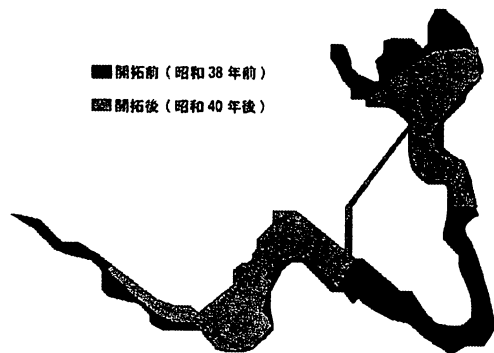


図-1 印旛沼流域とその諸元

るために、現地観測のデータを基に、印旛沼流域の水文特性を明らかにし、その結果から水質悪化要因を把握し印旛沼の水質改善対策とその効果について検討を行った。



図－2 印旛沼流域と沼の形状の変化

## 2. 印旛沼と流域の変遷

### (1) 沼の形状変化

昭和38年に開始された印旛沼の大規模干拓事業により、かつては1つの湖沼であった印旛沼は北沼と西沼の2つに分離され、捷水路で連結される現在の形状になった(図－2)。また、流域内人口の増加や干拓による水田面積の増加に伴う取水量増大に対応するため、沼の上下流に機場を設け、水源を確保すると共に干拓効果を得るために沼水位を一定にする揚排水操作を行うなど、利水状況が変化した。

### (2) 流域の変遷

流域内人口は、1965年(昭和40年)頃は約30万人であったが、2000年(平成12年)には約70万人に増大した。これに伴い、印旛沼流域の市街地割合は、1965年から2000年の35年間で約4.4倍に拡大した。特に1965年から1985年までの間は都市化が急激に進んでいる事がわかる(図－3)。以下本論文では市街地の割合を市街化率とする。

### (3) 印旛沼の水質の変化

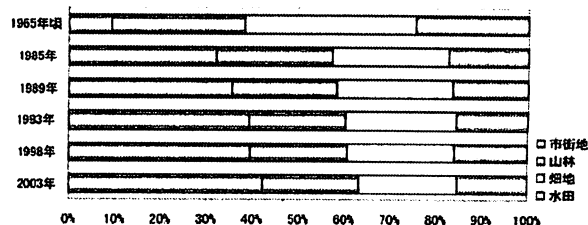
図－4、5は北沼と西沼のCOD実測値の経年変化である。近似直線は正の傾きを示し、年とともにCOD値が増大し、水質が悪化傾向にある事がわかる。また、北沼と西沼どちらも1970年代後半にCOD値が上昇しており、印旛沼流域の土地利用変化と関係があると考えられる。

### (4) 水文量的変化

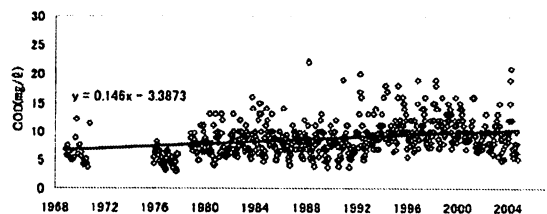
#### a) 印旛沼流域の水文量的変化

図－6は、各支川の観測流量および上下水道の実績流量をもとに印旛沼流域の昭和40年代と平成11年の年間水収支を算出したものである。これから印旛沼流域における水収支は市街化に伴い大きく変化している事がわかる。

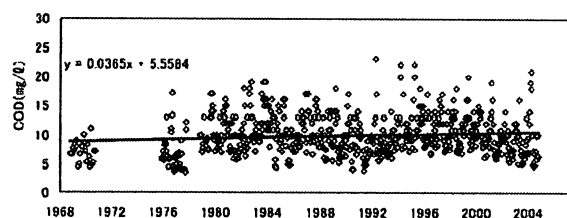
地表面流出量は35年間で約3倍に増大しているが地下水涵養量が減少し湧水量も減少し、他に流域外に排水される量が増大し水収支は複雑化している事がわかる。この間に印旛沼流域は人口増加や工業用地の拡大等があり、工業用水や生活用水が増大するとともに生活雑排水が増加した。その結果、現在では利根川から導水を行い、水量の一部を下水として流域外に放流する収支となっている。



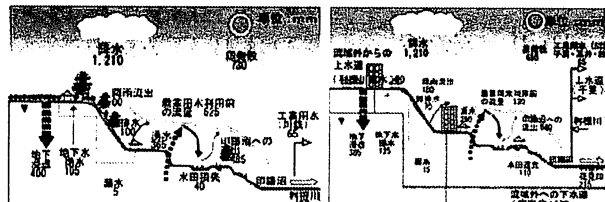
図－3 印旛沼流域の昭和40年代初頭と近年の土地利用形態



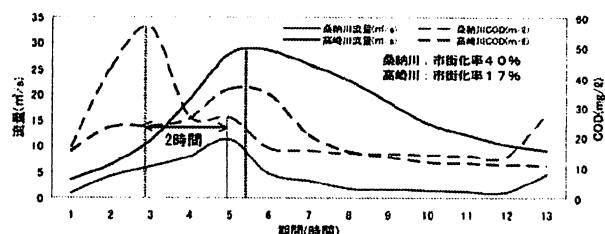
図－4 北沼の水質の経年変化(COD)



図－5 西沼の水質経年変化(COD)



図－6 昭和40年代と平成11年の水文量の比較  
(左：昭和40年代・右：平成11年)



図－7 市街化率による汚濁負荷流出形態の変化

#### b) 市街化による流出特性の変化

図－7は平成16年7月16日の降雨時の市街化率が異なる2つの小流域における河川流量と負荷流出量の関係を示したものである。市街化率の低い鹿島川は流量と負荷量のピークが同時に生起するのに対し、市街化率の高い桑納川では、負荷量のピークから2時間遅れて流量のピークが発生している。

図－8は単位面積あたりの流量と負荷量の関係を対数で

示したものであり、市街化が進行した流域ほど降雨初期のファーストフラッシュが顕著に現れ、流量より負荷量のピークが早く到達し、このことから、ファーストフラッシュ時の汚濁負荷流出量が多いことが明らかである。

### 3. 水質悪化要因と改善策

流域の水収支と土地利用の変遷から水質が悪化した要因として以下が推定される。

#### (1) 干拓による滞留時間の増加

図－9、10は印旛沼の流速分布を干拓前後の地形に基づき算定した結果である。計算は各々の形状に対し、MIKE21を用いて平面2次元解析を行ったものであり、境界条件として平成13年までの過去10年間の印旛沼への流入・流出量を与えている。

干拓前の印旛沼は西沼から北沼へ向かって沼全体が流動している事がわかる。しかし、干拓後の現在は北沼の流動がほとんど見られない。これは、主な流入河川である新川と鹿島川の流入地点近傍に上水道や工業用水道の取水口が設けられた事から、流入してきた流量の大部分が取水され、北沼に流入する水量が減少した事によると推定される。このことから、沼の形状変化と取水の変化が北沼の流動を小さくし、滞留時間が増加したことが示唆される。

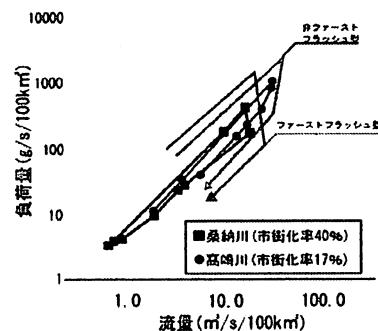
この課題に対する改善策として、手賀沼で用いられた例を参考に、利根川から導水し北沼に流動を生起させ、さらに水質を改善する案が考えられる。かつて利根川の治水計画には、洪水流量を印旛沼経由で東京湾に放流する利根川放水路計画(3000 $\text{m}^3/\text{s}$ )が立案されていた。現在の計画においても1000 $\text{m}^3/\text{s}$ の放水路計画があり、この治水目的の計画を水質改善にも併用する案である。

#### (2) 市街化率の増加による汚濁負荷流出の増加

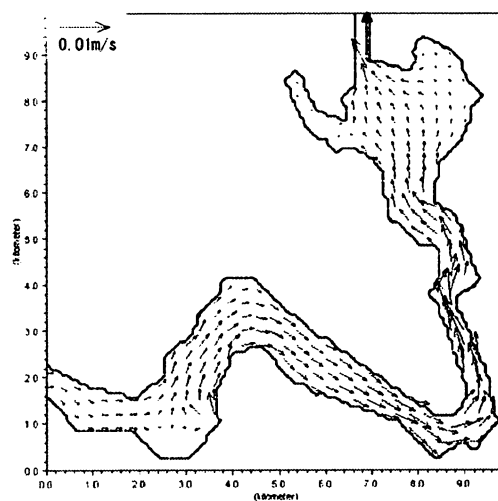
図－11は印旛沼流域の各支川流域の市街化率と単位面積あたりの年間汚濁負荷流出量の関係を示したものである。これより市街化率が高いほど汚濁負荷流出量が高くなる事がわかる。つまり市街化の進展にあわせて表面流出量が増大しノンポイント汚濁負荷流出量の増加となったこと、人間活動増大も負荷流出量増加に起因した事が推定され、現地では富栄養化によるアオコの発生なども見られている。

これに対する対策として、印旛沼流域の市街化の進んだ地域に地下浸透のための施設を設け、かつての湧水量を復元することにより市街化に伴う表面流出量の縮減と同時に汚濁負荷の減少をはかる方法を提案する。

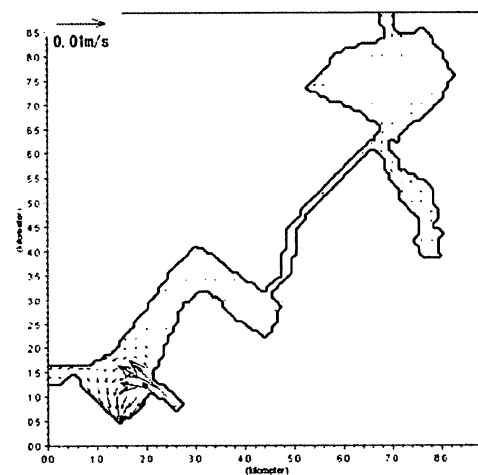
流域の年間水収支の分析から都市化による地下水涵養量の減少、併せて湧水量の減少と表面流出量の増大が明らかであり、さらに都市化された流域の降雨初期の表面流出(ファーストフラッシュ)による汚濁の増大も明らかである。特に市街化率の高い地域はファーストフラッシュによる汚濁負荷流出量が顕著であることから、高濃度の負荷流量を一時貯水し、浄化処理後に放流する施策を並行する事により印旛沼への流入負荷量をさらに減少し水質改善をはかる事が可能と考えられる。



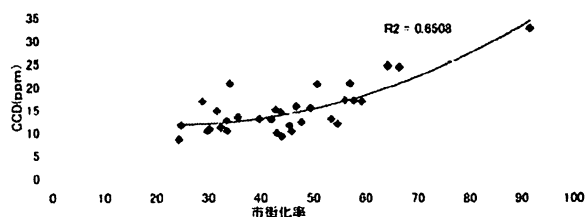
図－8 市街化の変化による流出波形の変化



図－9 開拓前の印旛沼の流速分布



図－10 現在の印旛沼の流速分布の比較



図－11 市街化率と汚濁負荷量の関係(平成17年度)

#### 4. 完全混合モデルによる改善案の検討

提案した改善案の効果を、一定のボリュームの希釈水が一様に分布すると仮定した完全混合モデルを用い、CODの変化として定量的に把握した。計算条件は図-12に示すとおりで、流量・水質の年平均値を境界条件として用いた。

##### (1) 利根川導水の効果

現在、利根川から印旛沼には20 m<sup>3</sup>/sのポンプ取水施設（酒直機場）がある。当該施設で出水時など利根川に余剰の見られる期間に最大20 m<sup>3</sup>/sの導水を行うとしてCOD変化を推算した。その結果、1年間継続するとCODは8.00ppmから4.72ppmに減少し、7日間の運転でも9.34ppmから8.26ppmに減少する事が判明した。

##### (2) 湧水の効果

昭和初期には流域の多くで出現していた湧水量を流域水収支の分析結果から1.39m<sup>3</sup>/s、COD4ppmと推算し、この量が地下浸透対策により復元できたものとして、印旛沼への流入量として与え、1年を通じたCODの変化を推算するとCODが8.00ppmから6.57ppmまで減少する結果が得られた。

##### (3) ファーストフラッシュ対策の検討

市街化率の高い新川流域の雨天時の汚濁負荷量を50%削減できると仮定し、CODの変化を推算した。その結果、1年間の変動でCODは8.00ppmから6.04ppmに減少する結果が得られた。

#### 5. 生態系モデルの適用

印旛沼の水質問題ではCODでの評価のみならず、富栄養化に伴うアオコ発生対策も重要となり、植物プランクトンの増殖過程等を含む生態系のモデルを印旛沼流域に適用し対策の評価を試みた。

##### (1) 導水の実現性

###### a) 導水量の検討

完全混合モデルによる改善策評価では利根川からの導水案が最も効果的であった。さらに導水は沼の流動化を生起させ、滞留に伴うアオコ発生を抑制する効果も得られる。ここでは、導水の確実性を検証すべく、アオコ発生の想定される7月から10月の利根川の実測日平均流量と正常流量とを比較し導水の可能期間を検討した。結果は図-13のとおりで年度ごとに変動はあるが半数以上の割合で正常流量に加えて50m<sup>3</sup>/s以上の流量が確保できる事がわかる。

また、導水施設として利根川合流部には既に20m<sup>3</sup>/sの酒直機場があり、流量が確保できれば施設を増設することなく導水することも可能である。

###### b) 導水水質の検討

図-14は平成9年から13年の過去5年間の利根川、印旛沼及び新川の年平均水質の値を比較した結果である。これより利根川のCOD値は印旛沼より低いが、リン・窒素の値は高いことが分かる。このことから、リン・窒素の値は導水による希釈効果はない事がわかる。しかし、導水する

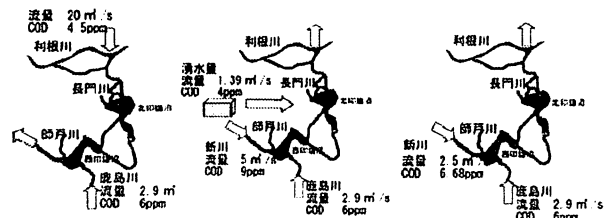


図-12 完全混合モデルの計算条件

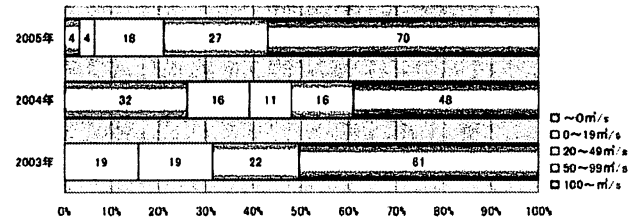


図-13 利根川の正常流量以上の流量の内訳(7月～10月)

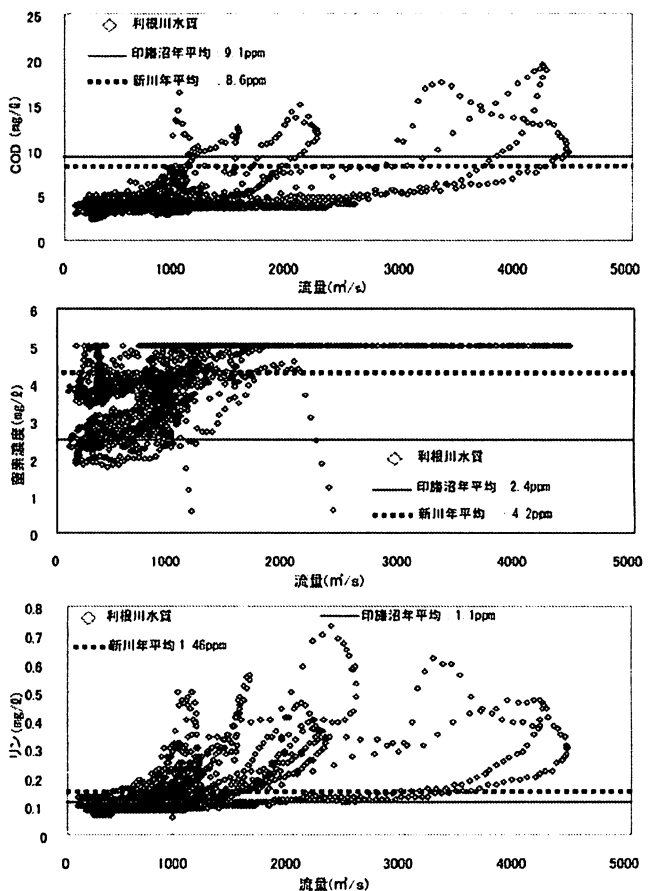


図-14 利根川における洪水時の流量と負荷量の関係(布川)

ことにより流動が発生し滞留時間が短縮され水質改善効果を見込む事が可能となる。

##### (2) 生態系モデルの概要と再現性の検証

植物性プランクトン等の生態系項目を含む平面2次元の水理解析ソフトは図-15のとおりでMIKE2Iである。モデル式の流動に関しては式(1)、(2)、(3)の連続式と運動量方程式を用いている。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_g f V V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} + \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega_g \quad (3)$$

ここに  $h(x, y, t)$ : 水深  $d(x, y, t)$ : 単位時間水深,  $\xi(x, y, t)$ : 水位,  $p$ : 水圧,  $q(x, y, t)$ : 水深平均係数,  $C(x, y, t)$ : ジェシー係数,  $g$ : 重力加速度,  $f(V)$ : 風の摩擦係数,  $V, V_x, V_y(x, y, t)$ : 風速,  $\Omega(x, y)$ : コリオリ力,  $P_a(x, y, t)$ : 気圧  $\rho_w$ : 水の密度,  $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ : 有効せん断応力,  $x, y$ : 距離である。

物質輸送に関しては(4)の移拡散流方程式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t} (hc) + \frac{\partial}{\partial x} (uhc) + \frac{\partial}{\partial y} (vhc) = \frac{\partial}{\partial x} \left( h \cdot D_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \cdot D_y \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) - F \cdot h \cdot c + S \quad (4)$$

ここに  $C$ : 合成集中係数,  $u, v$ : 流速,  $h$ : 水深,  $D_x, D_y$ : 拡散係数,  $Q$ : 流量,  $F$ : 消滅係数である。

クロロフィル  $\alpha$  の発生式については主な式を下記の(5), (6), (7), (8)に示した

$$CH = prch - dech - sech \quad (5)$$

$$prch = myci \times prpc \quad (6)$$

$$dech = CH / PC \times depc + qrpc \quad (7)$$

$$sech = CH / PC \times sepc \quad (8)$$

ここに、 $CH$ : クロロフィル  $\alpha$ ,  $prch$ : クロロフィル  $\alpha$  の発生量,  $dech$ : クロロフィル  $\alpha$  の死滅量,  $sech$ : クロロフィル  $\alpha$  の沈下量,  $myci$ : 光による葉緑素生産係数,  $CH / PC$ : 植物性プランクトン量のクロロフィル  $\alpha$  濃度,  $depc$ : 植物性プランクトンの死滅量,  $qrpc$ : 植物性プランクトンの捕食量,  $sepc$ : 植物性プランクトンの沈下量である。

境界条件および気象条件は、実測値および実測値から推算した値を用いている。計算に用いたパラメータは文献<sup>6)</sup>から得られた値を参考に感度分析を行い印旛沼の値を決定した。主要なパラメータを表-1に示した。

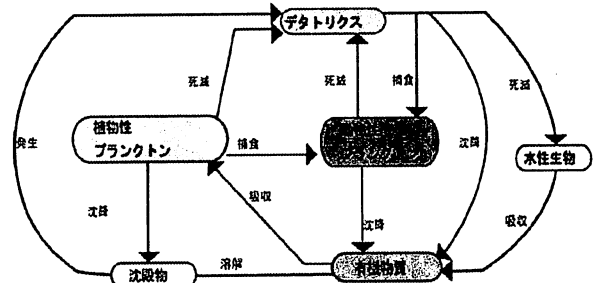


図-1 5 モデルの概念図

表-1 印旛沼の主要パラメータ

|                  |                    |                       |
|------------------|--------------------|-----------------------|
| 最大比増殖速度          | 陸藻                 | 1 (1/d)               |
|                  | その他植物性プランクトン       | 1.5 (1/d)             |
| 植物性プランクトンの自己死亡定数 |                    | 0.2 (1/d)             |
| 植物性プランクトンの捕食速度   |                    | 0.1 (1/d)             |
| 窒素濃度に関する影響変数     | 窒素の吸収の半飽和定数        | 0.4 gN/m <sup>3</sup> |
|                  | 植物性プランクトンの細胞内リンの濃度 | 0.07 gN/g(c)          |
| リン濃度に関する影響変数     | リンの吸収の半飽和定数        | 0.4 gP/m <sup>3</sup> |
|                  | 植物性プランクトンの細胞内窒素の濃度 | 0.002 gP/g(c)         |

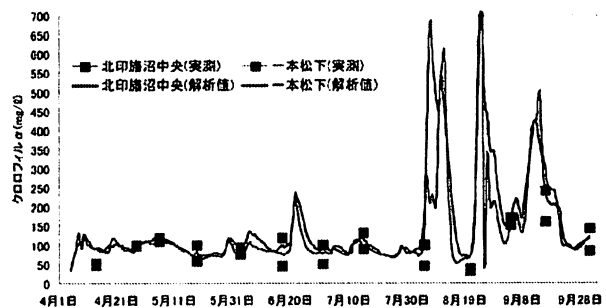


図-1 6 モデルの検証結果

図-1 6 は2003年の4月から10月までのクロロフィル  $\alpha$  の再現検証結果である。北印旛沼中央、本松下ともに定性的な傾向が一致している事がわかる。

## 6. 生態系モデルによる導水効果の評価

### (1) 導水量の変化によるクロロフィル $\alpha$ の発生量

利根川からの導水がアオコ削減にもたらす定量的な効果を確認するため、生態系モデルを用いて導水量とクロロフィル  $\alpha$  の発生量を比較した。

図-1 7 は導水量を変化させた時のクロロフィル  $\alpha$  発生量の分布図である。20m<sup>3</sup>/sを導水した時の北沼と導水しない場合の西沼のクロロフィル  $\alpha$  の値がほぼ同じである事がわかる。印旛沼は図の左側の西沼を上流として流量が流入し徐々に右側の北沼に向かって流動する。導水が無い場合は西沼に流入するリン・窒素が北沼に向かって流下する途中で徐々に滞留しクロロフィル  $\alpha$  に変化してゆく。一方で導水があると、北沼から西沼への流動が発生し、西沼内で滞留が発生しクロロフィル  $\alpha$  に変化している事がわかる。

図-1 8 は検証計算時にクロロフィル  $\alpha$  の値が最も高かった2003年9月16日の水理諸元、気象諸元を対象に、導水量の違いによるクロロフィル  $\alpha$  の計算結果を時系列で示したものである。導水なしよりも導水量が20m<sup>3</sup>/s程度あるときのクロロフィル  $\alpha$  の値が局部的に高くなることを示しており、導水量によってはクロロフィル  $\alpha$  の発生を助長

する可能性を示している。しかし、今回の検討結果からは導水量の増加とともにクロロフィルαの発生量は減少しており、印旛沼全体では20m<sup>3</sup>/s以上導水した場合、クロロフィルαの発生を抑制する効果が確認できた。

## (2)導水時期によるクロロフィルα抑制の検証

ここでは利根川の流量変化がクロロフィルαの発生量にどのように関係するか検討した。

図-19の波形は利根川の流量から正常流量を差し引いた波形と印旛沼のクロロフィルαの発生ピークとを重ねて示したものである。この図から、利根川流量の減少時にクロロフィルαの発生量がピークの場合(CASE1)、利根川流量が通減した時にクロロフィルα発生量がピークの場合(CASE2)、利根川流量が豊富でクロロフィルαの発生がピークとなる場合(CASE3)を検討対象期間として導水量とクロロフィルαの値を比較した。

図-20からCASE2では導水により発生が抑制されていることが確認され、CASE3では全体のクロロフィルα値が小さくなる事が確認でき、クロロフィルαの増加時に導水することが効果的である事がわかる。

## 7. 結論

1) 現地観測データから印旛沼水質悪化要因として以下が明らかとなった。

- ・干拓による湖沼の分断や水位一定の人工操作が沼水の滞留時間につながった事が明らかとなった。
- ・市街化が表面流出の増大をもたらすと共に負荷流出の増加も引き起こしており、雨天時のファーストフラッシュが水質に強く影響していることが明らかとなった。

2) 水質改善案の定量的な評価のため水質の完全混合モデルと、アオコ発生対策案を検討しうる生態系を含む水理モデルを、それぞれ構築できた。

3) 印旛沼水質改善策として以下の効果を明らかにした。

- ・利根川導水、流域浸透、負荷量削減の改善案は、いずれもCODで希釈効果を有する。
- ・20m<sup>3</sup>/s程度の導水量では水質が悪化する可能性のあることが明らかとなった。
- ・導水量が40m<sup>3</sup>/s以上であれば、大きな水質改善効果がみられ、アオコ発生の抑制効果のある事も確認できた。
- ・導水はアオコの発生する期間に行う事が、より効果的である事が明らかとなった。

## 謝辞

本研究を取りまとめるにあたりデータを千葉県県土整備部、パンフィックコンサルタンツ、利根川下流河川事務所から提供いただきました。

また、数値解析で使用したモデルであるMIKE21およびEco Lobについてはデンマーク水理研究所との共同研究として使用させていただきました。ここに記し、謝意を表します。

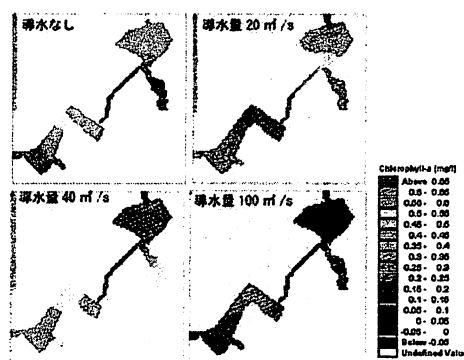


図-17 導水量の違いによるクロロフィルαの発生分布

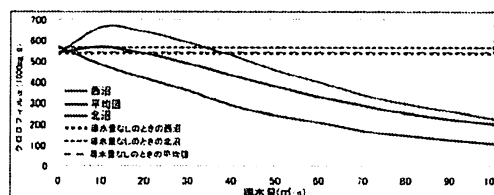


図-18 導水量の変化によるクロロフィルαの発生量

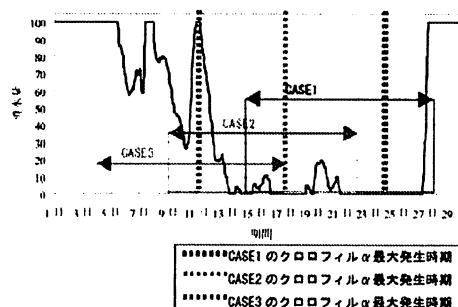


図-19 導水時期の検証における導水量

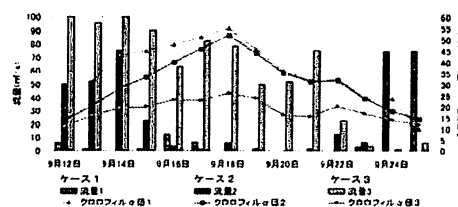


図-20 導水時期の変化によるクロロフィルα発生抑制

## 参考文献

- 1) 渡辺眞道, 大関祐次郎, 古川巖水, 吉川勝秀: 印旛沼流域における水循環特性に関する一考察 河川技術論文集 vol.13, pp. 19-22 2007年
- 2) 大関祐次郎, 吉田正彦, 吉川勝秀, 渡辺眞道: 『印旛沼再生に関する一考察』第62回年次学術講演会講演概要集、II-50、pp. 99-100、2007、9
- 3) 吉川勝秀: 人・川・大地と環境、技報堂出版、2003年
- 4) 千葉県: 平成18年度水循環健全化会議資料
- 5) 土木学会水理委員会: 水理公式集、土木学会、1999年
- 6) 上原浩ら: 沼の形状および水状況の変化が沼の流動に及ぼす影響、土木学会第57回年次学術講演会、pp. 279-280

(2008. 4. 3受付)