

# 諫早調整池における水質変化の予測と その評価に関する研究

PREDICTION OF QUALITATIVE CHANGE  
AND ITS ESTIMATION IN THE REGULATION POND AT ISAHAYA BAY

仁木将人<sup>1</sup>・西田渉<sup>2</sup>・野口正人<sup>3</sup>・橋本篤史<sup>4</sup>  
Masato NIKI, Wataru NISHIDA, Masato NOGUCHI and Atsushi HASHIMOTO

<sup>1</sup> 学生会員 長崎大学大学院修士課程 工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

<sup>2</sup> 正会員 工修 長崎大学助手 工学部社会開発工学科 (同上)

<sup>3</sup> フェロー 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (同上)

<sup>4</sup> 長崎大学工学部 研究生 (同上)

A circulation model of nutrients has been developed in order to investigate the qualitative changes of water in the flood regulation pond that is newly appeared at Isahaya Bay through constructing the sea dyke. In this model, the mass balance of phosphorus is designed regarding to the interaction between aquatic system and sedimentary system, and temporal changes of pollutant load from rivers are considered. Calculated results show that phosphorus increases due to the pollutant loads through river after the enclosure of the bay. Furthermore, concentration of phosphorus rapidly varies with the increment of desorption caused by inflow of flood. Annual average of the concentration of phosphorus almost reaches constant value in two years, and the both the mean concentration and the amount of phosphorus accumulated in the pond are strongly affected by an annual rainfall.

*Key Words : Water quality, Phosphorus, Closed water body, numerical model*

## 1. 序論

湖沼や海といった受水域の水環境をより良いものとするうえで、流域水質管理の重要性が強く叫ばれており、汚濁負荷の定量的な把握と汚濁物の受水域への流達機構の解明に関する研究が進められている。一方で、閉鎖性の強い水域では、これら流域からの汚濁負荷量とともに、内部での化学的、生物学的な変化過程が、水質に与える影響も無視できない。流域からの汚濁負荷の削減は、当該水域の利用目的や環境基準値を考慮して、適宜実施されねばならないが、それらの削減対策が、経済的かつ効果的に進められるには、受水域の水質の変化機構を明らかにし、水質の改善効果に関する評価手法を確立しておく必要がある。

長崎県の諫早湾では、諫早湾干拓事業の進展に伴って、湾奥部に調整池が造成された。当水域は、高

潮や洪水に対する地域の防災機能の強化と、干拓地への灌漑用水の供給とを主たる利用目的とするものであり、潮止め工事以後、締切堤に建設された2ヶ所の排水門を操作することで、水位は、T.P. -1.00m程度に維持されるとともに、河川水の貯留によって淡水化が進められている。調整池の諸元については、管理水位時の内水面面積と平均水深は、それぞれ22.36km<sup>2</sup>、1.02m (最大水深: 2.3m) であり、竣工後の洪水の調整容量は、約7,200万トンとされている<sup>1)</sup>。

以上のことから、調整池の水質は、流入河川の水質に大きく影響されると同時に、栄養塩の蓄積による富栄養化が懸念される。著者らは、現地観測や数値シミュレーションをとおして、干拓事業が諫早湾とその周辺水域の水環境に与える影響の把握に努めてきたが<sup>2-4)</sup>、本論では、数理モデルを用いて調整池での水質変化機構を解明しようとするとともに、水質の長期予測に関する検討を行った。

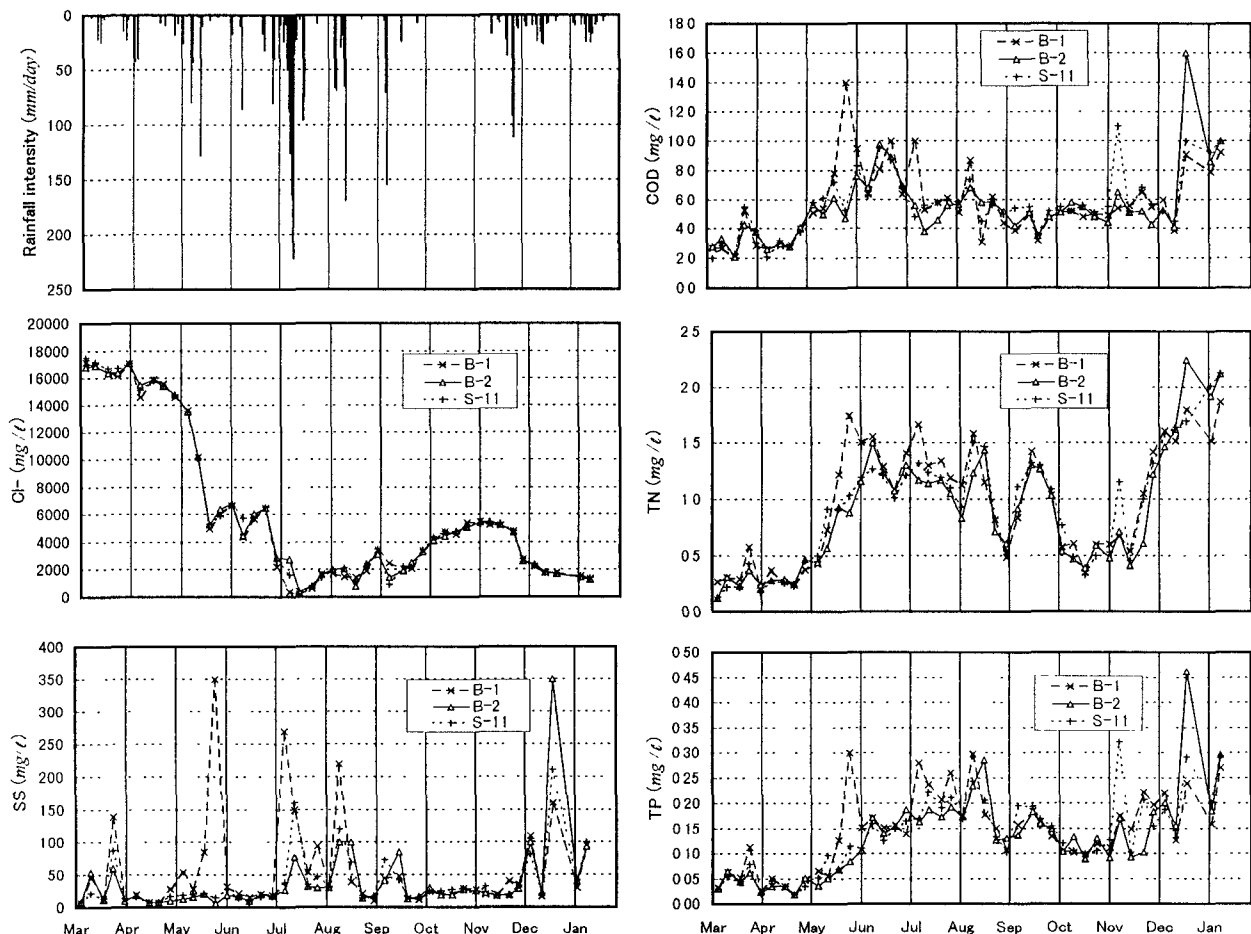


図-1 潮止め後の調整池の水質変化

## 2. 調整池の水質の現状

調整池の水質の現状について、潮止め工事の直前（1997年3月4日）から10ヶ月間（1998年1月12日）の水質変化を示せば、図-1のとおりである。なお、ここに示された値は、環境モニタリングの一環として九州農政局によって計測されたものである<sup>5)</sup>。図中に示されたB-1、S-11、B-2の各地点は、図-2に示すように、それぞれ調整池の北部、中央部、南部に位置している。これらの図から、CODや窒素、リンといった栄養塩類の濃度が、潮止め工事以降、次第に増加しており、1990～96年までのCOD、全窒素（TN）、全リン（TP）の年平均値が、 $3.0\text{mg/l}$ 、 $0.3\text{mg/l}$ 、 $0.05\text{mg/l}$ <sup>6)</sup>であったことを考慮すれば、各指標の濃度の増加が著しいことが良く分かる。TNとTPとの関係から調整池の栄養化の状態について考えれば、以前も富栄養状態であったものと考えられるが、潮止め工事後、その度合いが一層、増加しているようである。各指標の値は、観測日によって空間的なばらつきが大きくなることがあるが、全体的には、ほぼ同様な変化の傾向を示している。ここで、各水質指標の経時変化をみると、まず、 $\text{Cl}^-$ は、潮止め工事の直後に $14,000\text{mg/l}$ 以上であったが、5月、6月には、降雨の流入によって希釈され、7月には $20\text{mg/l}$ 以下

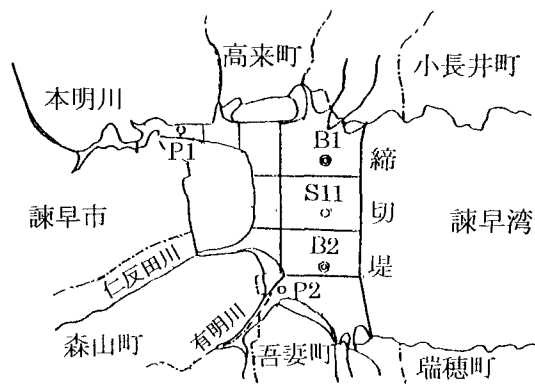


図-2 環境モニタリング地点とボックスの分割図

になっている。その一方で、降雨量の少ない10、11月には、濃度が再び増加しており、 $\text{Cl}^-$ の堤体からの浸透や水底からの溶出といった生成要因が存在しているものと思われる。CODは、5月から7月中旬にかけて増加した後、 $6\text{mg/l}$ 程度まで減少しているが、TN、TPは、10月に減少している。これらの物質は、化学的、生物学的な作用によって複雑に変化するものであり、変化の過程を明らかにすることは容易なことではないが、実測結果をもとに考察を進めれば、5月から7月にかけて雨天日が比較的多く、降雨による流域からの濁質の流入があったためと考えられる。また、SSが7～9月に $50\text{mg/l}$ （最大 $350\text{mg/l}$ ）の値を超えることが度々あったことを考えれば、SSの変化に関連した供給機構があることも推察される。こ

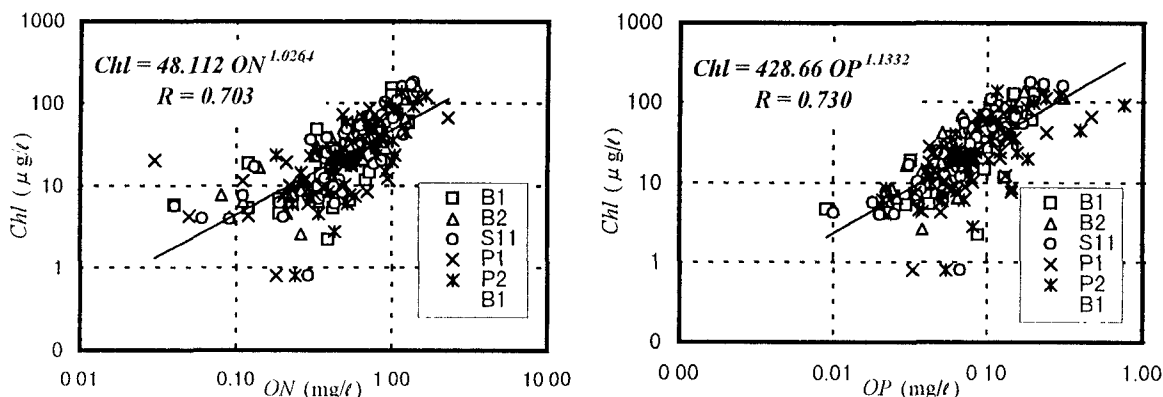


図-3 クロロフィルと有機態窒素、有機態リンの相関関係

ここで、調整池内のクロロフィル (Chl) と有機態窒素 (ON: TP-(NO<sub>3</sub>+NH<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>)), 有機態リン (OP: TP-P<sub>0</sub>) との関係を示すと図-3のとおりであり、両者には強い相関関係が見られる。富栄養状態の水域では、Chl は、TN、TP との関係で議論されることが多いようであるが、現段階では、調整池の Chl は、OP、ON との相関が TN、TP よりも強いようである。なお、Chl と TN、TP との相関係数は、Chl と TN で 0.244、Chl と TP とで 0.305 であった。植物プランクトンについては、炭素、窒素、リンに関する化学組成として Redfield 比が良く知られている。そこで、植物プランクトン中の窒素とリンは全て有機態であるとした上で、ON と OP との比率を採れば、Redfield 比と同等になっていることがわかった。これらの関係は、植物プランクトンが水域中の栄養素を摂取することで無機態から有機態への変換がなされたものと考えられるが、窒素やリンの濃度からプランクトンの現存量を精度良く求めるためには、今後、観測による種の同定を含めた検討が必要である。また、OP については、COD との相関も強く、実測値から、 $COD(mg/l) = 57.541 \cdot OP(mg/l) + 1.285$  (相関係数=0.909) なる関係式が導かれており、調整池の COD は、OP によって、概ね把握できるものと思われる。

### 3. 水質モデルの概要

実測値から、潮止め工以降、調整池では COD や窒素、リンに係る水質指標の濃度が増加していることが分かった。こうした変化は、水交換率の低下や河川からの汚濁負荷の流入によるものと考えられるが、今後、調整池内にどの程度の汚濁物質や栄養塩が蓄積されるかを明らかにすることは、調整池の適切な水の利用を図る上で重要である。本研究では、水域の富栄養化の一つの要因であり、また、調整池での Chl や COD と強い相関関係がある窒素とリンについて注目して、水質変化モデルの作成を試みた。

ここでは、水質モデルとして物質循環型モデルが採用され、以下に記す物質の変化過程が考慮された。

すなわち、水塊中の窒素とリンについて、それぞれの有機態・無機態成分は、懸濁態物質、溶存態物質として取り扱われ、植物プランクトン量は、各有機態の中を含められた。水塊中と底質との収支については、有機態物質の沈降、無機態物質の底質からの溶出が考慮された。ただし、後者については、流れの状態によって溶出速度が変化するものとしており、後述されるように調整池内での流れは数値モデルによって評価された。また、調整池では、SS が 100mg/l を越えることがあり、懸濁物の増加による植物プランクトンの活動に与える影響が考慮された。ここで、SS の変化過程では、潮止め工事前に湾奥部で行った現地観測と数値解析の結果から、底質の巻き上げと沈降とが主な変化の要因として取り上げられている。調整池の平均水深は、約 1.02m と浅いことから、水質変化モデルは、水深方向に 1 層とするボックスモデルとされた。水質のモデルに用いた収支式は、式(1)～(3)のとおりである。

#### 有機態物質 (O) の収支式

$$Vol \cdot \frac{\partial O}{\partial t} = (F_O)_m + \alpha_O \cdot Chl \cdot Vol - k_O \cdot O \cdot Vol - w_O \cdot O \cdot Area \quad \dots(1)$$

#### 無機態物質 (I) の収支式

$$Vol \cdot \frac{\partial I}{\partial t} = (F_I)_m - \alpha_O \cdot Chl \cdot Vol + k_O \cdot O \cdot Vol + \beta_O \cdot Area \quad \dots(2)$$

#### 懸濁物質 (SS) の収支式

$$Vol \cdot \frac{\partial SS}{\partial t} = (F_{SS})_m + \lambda_O \cdot Area - w_{SS} \cdot SS \cdot Area \quad \dots(3)$$

ここに、Vol: ボックスの体積、 $(F_X)_m$ : 移流量、Area: ボックスの水底面積、 $\alpha_O$ : 植物プランクトンによる I の摂取速度、 $k_O$ : 分解速度、 $w_O$ : O の沈降速度、 $\beta_O$ : I の溶出速度、 $\lambda_O$ : 土粒子の巻き上げフラックス、 $w_{SS}$ : SS の沈降速度、である。植物プランクトンの摂取速度、土粒子の巻き上げフラックス、無機態物質の溶出速度は、以下のとおりに評価した。

#### 植物プランクトン量と無機態物質の摂取速度

植物プランクトン量は Chl との相関が最も強かつ

た OP との関係を用いて算出されるものとし、また、摂取速度は、懸濁物質や水温の変化が植物プランクトンの活動に与える影響が考慮された<sup>7)</sup>。

$$\alpha_0 = \alpha_I \cdot f_{(IN,IP)} \cdot f_{(I)} \cdot f_{(T)} \qquad \cdots (4)$$

ここに、 $f_{(IN,IP)} = Min(\frac{IN}{K_{IN} + IN}, \frac{IP}{K_{IP} + IP})$ ,  $f_{(SS)} = \frac{I}{K_I + I}$ ,  $f_{(T)} = (T/T_{opt} \cdot exp(1 - T/T_{opt}))^2$  であり、 $K_{IN}, K_{IP}, K_I; IN, IP$  日射量の Michaelis 定数であり、それぞれ 0.10mg/ℓ, 0.43 mg/ℓ, 1,000kcal/m<sup>2</sup>/day とした。  $T_{opt}; f_{(T)}$  が最大となる時の水温 (25℃) である。

堆積土粒子の巻き上げフラックス、無機態物質の溶出速度  
巻き上げフラックスは土粒子の水底からの離脱に関する式<sup>8)</sup>によって評価されたが、本計算では時空間的な平滑化が大きいことから、離脱速度に関する係数は実測値と計算値との比較から決定された。溶出速度についても底質に窒素、リンが含まれること<sup>1)</sup>を考慮して以下の式で評価された。

$$\lambda_0 = (\sigma \cdot v_s / a_s) \cdot \lambda_I \cdot \tau_* \cdot (1 - 0.5 \cdot \tau_{*c} / \tau_*)^{2.9} \cdots (5)$$

$$\beta_0 = \beta_I \cdot \tau_* \cdot (1 - 0.5 \cdot \tau_{*c} / \tau_*)^{2.9} \qquad \cdots (6)$$

$\sigma, v_s, a_s$ :土粒子の密度、体積、断面積、 $\tau_*$ :無次元摩擦応力、 $\tau_{*c}$ :土粒子の移動限界時の無次元摩擦応力、 $\lambda_I$ :(=0.0007/sec)底質の巻き上げ速度、 $\beta_I$ :溶出速度(窒素 0.001mg/sec, リン 0.0005mg/sec)である。  
計算を実行するにあたり、調整池は図-2に示されるように、9つのボックスに分割された。隣り合うボックス間の移流量は、2次元平面流の数値シミュレーションモデルを用いて水門操作を考慮した計算を行い、調整池の流れが一定となった時の結果をもとに流量の配分がされた。また、降雨による河川流量の変化は、3段のタンクモデルを使って評価している。計算時間間隔は 3720sec であり、各ボックスでの初期濃度は、環境モニタリングの結果を参考にして与えた。日降雨量については、環境モニタリングと気象協会によって実測された雨量が与えられた。ただし、当日の降雨の時間分布は一様なものとして取り扱われた。

#### 4. 水質モデルの再現性

図-4には、調整池の中央部である S11 地点での SS, IP, OP の計算結果と実測値とが示されている。  
SS については、100mm/day 以上の降雨があった日に、濃度が著しく増加することが観測されているが、計算値においても SS の急激な増加とその後の低減の様子が再現されていることがわかる。ただし、無降雨日が比較的長く続いた9月下旬から11月上旬につ

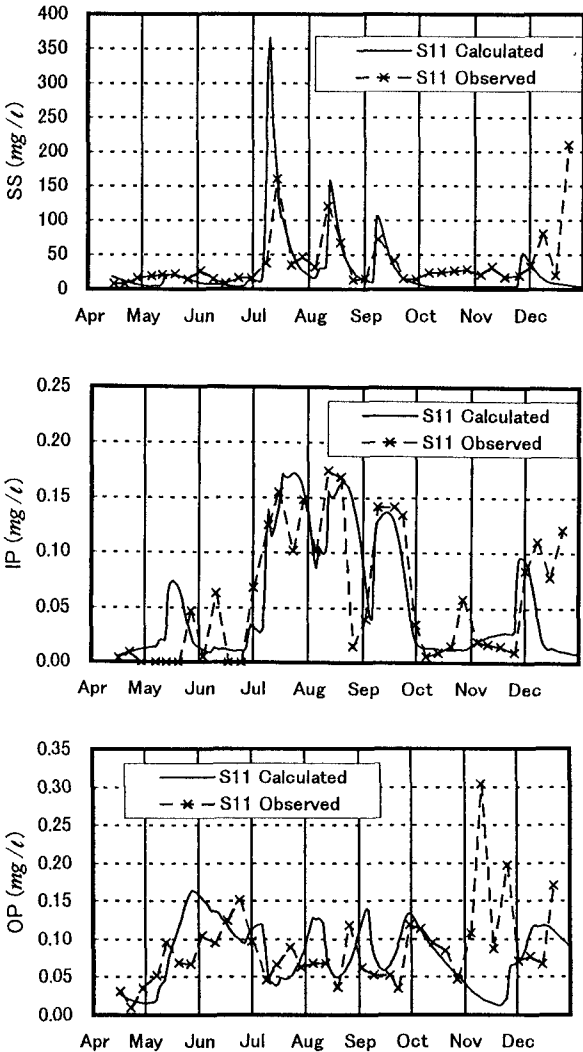


図-4 無機態リンと有機態リンの計算結果

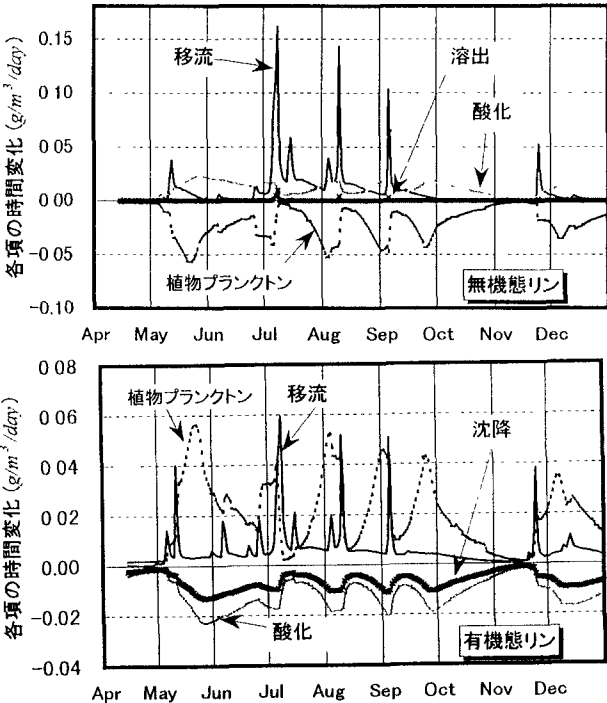


図-5 無機態リンと有機態リンの各項の時間変化

いて、本モデルは、SS を小さく評価する傾向にある。これは、SS の変化に化学的、生物学的生成や、吹送流による底質の巻き上げ等が考慮されなかったためと考えられる。IP と OP の変化について、図-5 に示される式(1)～(2)の右辺の各項の時間変化と併せて考察すると、移流によって運ばれる量は、IP、OP とも夏季に多くなっており、その増加は、降雨直後に著しい。水底からの IP の溶出量は、S11 地点ではあまり多くないが、本明川の河口域に相当する結果では、夏季に多く、水中のリンの濃度を増加させる要因の一つになっているようである。植物プランクトンの活動による OP の生成量は、降雨後に IP の濃度が高くなることで増加しており、その生成量は、OP の移流による増加量と同程度である。ただし、7 月や 8 月に日降雨量が 150mm を超える際には、懸濁物質の濃度が非常に高く、水中への日射量が減るために、植物プランクトンの生成量が減少している。その結果、OP は IP よりも数日遅れて増加し始めるようである。10、11 月には、OP の酸化量と水底への沈降量とが、植物プランクトンの生成量を上回るようになり、OP 濃度は次第に低くなっている。IP と OP の各項の生成量は、11 月の中旬には、一定値に近づいており、調整池のリンの収支が、ほぼ釣り合った状態になっていると考えられる。実測値と計算値とを比較すると、冬季における IP と OP の再現性が良くないが、潮止め工事以後に OP が次第に増加することが評価されているようである。

## 5. 水質の予測に関する検討

これまでに述べられたことから、調整池の水質に関しては、降雨後に懸濁物質や窒素、リンの濃度が著しく増加しており、また、リンは、懸濁物質の濃度にも影響を受けて変化しているものと考えられる。ここでは、水質の変化予測を行うにあたり、降雨の違いが、調整池のリンの濃度と蓄積量に与える影響について検討する。計算に用いられた降雨条件は以下に記す 9 つである。すなわち、R-1～3 では、月間降雨量として過去の平均値が与えられ、降雨日の分布が異なる、R-4～6 では、降雨日の分布は R-1～3 と等しいが、年間降雨量が 1,180mm、1,954mm、3,017mm となるように月間降雨量が一様に増減されている。R-7～9 では、1994、1995、1997 年の降雨の実測値がそのまま与えられた。

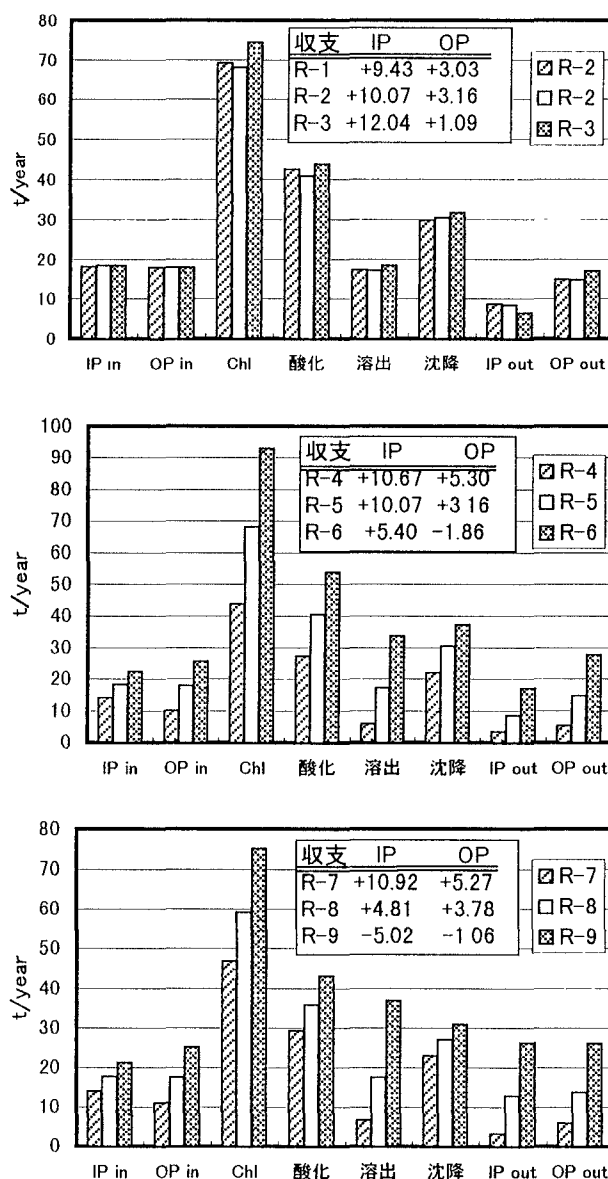
調整池における年平均濃度の変化とリンの収支は、表-1 と図-6 に示すとおりであるが、先に全体的な傾向について述べておく。調整池の IP と OP は、計算条件に拘わらず、3 年目以降に一定値に近づくようである。また、各リンの濃度を比較すると OP の

濃度が高く、TP に占める割合は約 60%以上になっている。リンの河川からの流入量と排水門からの流出量については、流入量と流出量の 1 年間の収支は、

表-1 降雨の計算条件と IP と OP の年平均濃度

|     | 降雨量<br>(mm/年) | 降雨分布    | IP(mg/l) | OP(mg/l) |
|-----|---------------|---------|----------|----------|
| R-1 | 2,011         | 1994 年  | 0.028    | 0.059    |
| R-2 | 2,011         | 1995 年  | 0.027    | 0.061    |
| R-3 | 2,011         | 1997 年  | 0.025    | 0.064    |
| R-4 | 1,180         | R-2 と同じ | 0.025    | 0.036    |
| R-5 | 1,954         | R-2 と同じ | 0.026    | 0.060    |
| R-6 | 3,017         | R-2 と同じ | 0.030    | 0.080    |
| R-7 | 1,180         | R-1 と同じ | 0.027    | 0.038    |
| R-8 | 1,954         | R-2 と同じ | 0.034    | 0.052    |
| R-9 | 3,017         | R-3 と同じ | 0.041    | 0.063    |

※計算開始後 5 年後の結果である。



※IP in, OP in は河川からの流入量、IP out, OP out は調整池からの流出量を示す。Chl は植物プランクトンによる OP の生成量を表す。

図-6 調整池のリンの 1 年間の収支

図-6のように、計算条件によって異なるが、リンは、降雨の少ない冬季から春季に調整池に留まる傾向にあり、夏季には流出する傾向にある。

つぎに、計算結果を個別に見ると、R-1~3では、IPとOPの年平均濃度は、それぞれ0.026mg/l、0.06mg/lであり、計算条件ごとの濃度の違いは少ない。調整池のリンの収支については、年間流入量が排水門からの年間流出量よりも多い。各リンの流出量を比べると、無機態リンの流出量が少なくなっているが、これは、流入水の滞留時間が長く、河川から流入したIPの多くが植物プランクトンの活動によってOPに変化したためと考えられる。これらのことから、調整池では、OPが水底へ沈降することで、リンが留まるものと予想される。R-4~6では、年平均濃度に明瞭な違いが現れており、IPでは、最大0.04mg/lの違いがある。また、リンの調整池への貯留量は、年間降雨量が増加するにつれて減少する傾向にあり、R-6では、OPの流出量が流入量よりも多くなっている。これらの結果が得られたのは、年間降雨量が増えたことで調整池へのリンの流入量が増加し、植物プランクトンによる有機態リンの生成量が増えたこと、流入水の滞留時間がR-6では、R-3の半分以下になったことが理由としてあげられる。一方、R-7~9では、リンの流入量は、それぞれR-4~6とほぼ等しいものの、年平均濃度は異なった結果になっている。とくにR-9については、流入水の滞留時間やリンの流入量はR-6とそれほど変わらないが、IPは0.012mg/l高く、OPは0.017mg/l低くなっている。さらに、調整池のリンの収支は、流入量よりも流出量が多くなっている。これは、R-9では、懸濁物質の濃度が100mg/lを超えることが度々あったことで植物プランクトンによるOPの生成量が減少し、水底への沈降量が少なくなったためである。また、IPの水底からの溶出量が増加したことにもよっている。R-6など、年平均降雨量を使って降雨量を評価する場合には、それぞれの降雨強度が平滑化されるために、降雨後の水質の変化が予測上で顕著に現れなくなつたと考えられる。

## 6. 結論

本研究では、諫早湾干拓事業によって新たに造成された調整池の水質変化機構を数理モデルを用いて明らかにしようと試みた。また、調整池の水質の長期予測に降雨条件が与える影響について検討した。その結果、調整池では、降雨後にIPの濃度が高くなり、植物プランクトンのOPの生成量が増加することで、OPが増えるものと考えられる。ただし、調整池での水質変化に懸濁物質の増加が与える影響は大きく、調整池の水質変化を明らかにするうえで降雨の影響が無視できないものと考えられる。調整池のリン

の年平均濃度は、降雨条件によって予測結果にいくつかの特徴が現れた。降雨量として過去の月平均降雨量を用いる場合、年平均濃度はほぼ一定の値になる。その一方で、年降雨量が異なる場合には、リンの流入量や流入水の滞留時間が変わるために、年平均濃度の予測結果が変化することが示された。現在、水質の予測には、過去の平均的な降雨量を使って行われるようであるが、調整池のように、降雨量の違いによる濃度変化や汚濁物の貯留量の変化が無視できない水域については、年間・月間降雨量の変化が水質変化の影響要因の一つとして考慮されねばならないと思われる。近未来を対象にした調整池の水質予測に関しては、将来の降雨予測も必要になるが、これらについては、流域の汚濁負荷の分布に関する評価、等と共に、今後検討していきたい。

**謝辞：**研究を遂行するにあたり、諫早湾締切り干拓地域で実施されているモニタリング結果を参照させて頂いた。九州農政局諫早湾干拓事務所、長崎県生活環境部環境保全課、諫早湾環境監視機構の関係各位に謝意を表します。また、本研究は、平成9、10年度の河川環境管理財団の河川整備基金(代表者：野口正人)と、平成10年度の文部省科学研究費奨励研究(A)(代表者：西田渉、No.10750391)からの助成を受けて行われた。ここに記して関係各位に深甚なる謝意を表します。さらに、柳本諭氏(現：日本工営)を初めとする本学河川工学研究室諸氏には、データの整理等を手伝って戴いたことを記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1)九州農政局諫早湾干拓事務所:諫早湾干拓事業環境モニタリング平成8年度版,パンフレット,p.22,1997.
- 2)Nishida, W. Noguchi, M and Mitsuhashi, K: Influence Analysis of a Sea Dyke on Water Environment, Proc. Int'l Conf. on Water Resour. & Environ. Res., VII, pp. 399-406, 1996.
- 3)西田渉, 野口正人, 柳本諭: 締切堤の建設に伴う湾内の水質変化予測, 水工学論文集, 第41巻, pp.457-462, 1997.
- 4)柳本諭, 西田渉, 野口正人, 仁木将人: 吹送流が調整池のSSに及ぼす影響の予測, 平成9年度日本水環境学会九州支部研究発表会講演要旨集, A(論文)-4, pp.22-26, 1998.
- 5)九州農政局諫早湾干拓事務所: 環境モニタリング資料 p 27, 1998.
- 6)長崎県保健環境部: 公共用水域及び地下水の水質測定結果 1987~1996.
- 7)佐藤敦久: 水環境工学, 技報堂出版, pp.15-26, 1987.
- 8)村上正吾, 辻本哲郎, 中川博次: 河床砂礫のPick-up rateの推定式について, 土木学会論文集, No.443, II-18, pp 9-16, 1992.

(1998. 9. 30 受付)