

閉鎖性水域へ流出する汚濁量の削減方策の検討 ＜諫早湾調整池とその流域＞

STRATEGIES FOR REDUCING THE POLLUTANT RUNOFF LOADS INTO A CLOSED
WATER BODY <REGULATION POND OF ISAHAYA AND ITS WATERSHED>

浦 里実¹・野口正人²・渕上雄作¹

Satomi URA, Masato NOGUCHI and Yusaku FUCHIGAMI

¹ 学生会員 長崎大学大学院 生産科学研究科博士前期課程 (〒852-8521 長崎市文教町 1 番 14 号)

² フェロー会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1 番 14 号)

At Isahaya of Nagasaki, Japan, a big project called construction of sea-dyke and reclamation project is now going on. It is well known that deterioration of water quality has been frightened in a closed water body, if runoff load of pollutants is not sufficiently controlled. In this paper, pollutant runoff loads from the watershed into the regulation pond of Isahaya are first identified, classifying those from point and non-point sources. On the other hand, it becomes very urgent to reduce the pollutant runoff loads, so efficiency of constructed wetland as one of the Best Management Practices (BMPs) is briefly discussed, based on a field observation and an experiment in campus of Nagasaki University. Finally, some discussion has been done, related to a strategy for reducing the pollutant runoff loads into the regulation pond of Isahaya.

Key Words: Constructed wetland; diffuse pollution; Isahaya Bay; reed; total nitrogen; water quality management

1. 序論

最近、海苔の不作問題とも関連して、“豊饒の海：有明海”の状況について種々の側面で議論が進んでいる。また、それとも関連して、「諫早湾干拓事業」に大いなる関心が寄せられている。その事業の賛否はともかく、大規模プロジェクトにより多少とも自然界への影響が避けられないことは容易に想像できる。ここで大切なことは、その種の仕組みを明確にし、その影響が「壊滅的」な水準に到達することを未然に防止・軽減することであろう。

上述したことから、本論では、諫早湾調整池とその周辺を対象にして、流域からの汚濁負荷流出量について評価し、その削減方策について検討する。

2. 非点源汚濁負荷流出

(1) 諫早湾調整池流域の概要

長崎県諫早市には県内で唯一の一級河川である本明川が流れている。この河川は、1957(昭和32)年7月25日に日雨量 1,109 mm の未曾有の豪雨に襲われ、「諫早大洪水」を引き起こしたことで良く知られている。もともと、最近では、本明川が流出する諫早湾で進められている「諫早湾干拓事業」が世間の耳目を集めていることは周知のとおりである。本事業はそもそも、「長崎県南部総合開発事業」といった農業振興のための大干拓構想によっているが、その後、新県土の造成とともに防災を目的に加え、1989年11月に事業が着工された。とりわけ、1997年4月14日には、潮受堤防の締め切りが実施され、堤防内部の水域である調整池が外側の諫早湾と切り離されることになった。その後、諫早湾調整池が典型的な閉鎖性水域となり(写真-1)、水質悪化を防止・軽減することが重要な課題になった。

「諫早湾干拓事業」では当初の計画が数度にわたり変更されているが、現在の計画では締め切り面積が 35.42 km²であり、その内訳は、干拓面積：9.42 km²、調整池面積：26.00 km²となっている。また、流域面積は 249 km²



写真-1 諫早湾調整池

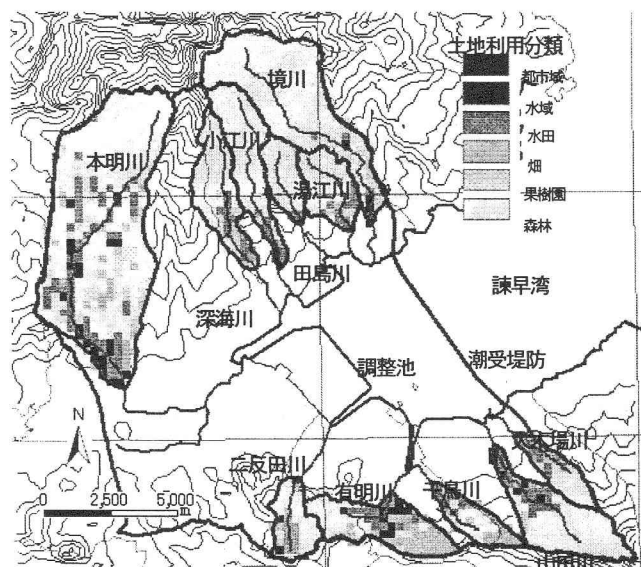


図-1 諫早湾調整池

であり、図-1 に示されたように、本明川を始めとして、境川、二反田川、山田川といった小河川が多数、調整池に流入している¹⁾。調整池を取り巻く流域は、北側は多良山系五家原岳に、また、南側は雲仙山麓に広がっており、森林主体の土地で、その他では水田・畑・果樹園等の土地利用が進んでいる。いずれにしても、諫早湾調整池の水質を良好に保つためには、流域からの汚濁負荷流出抑制が強く望まれている。

(2) 非点源汚濁負荷の空間分布

流域からの汚濁流出抑制を取り上げた場合、点源汚濁とともに非点源汚濁をも抑制の対象にせねばならない。当該流域は、諫早市を除いて多くが下水道未整備地域である。そのため、早急な下水道の整備が望まれているが、まずは点源汚濁対策が先行せざるを得ない。一方、調整池のような閉鎖性水域で真剣に水質保全を図るためには、非点源汚濁対策が欠かせないことは当然である。

上述された観点で、既に著者らは諫早湾調整池流域か

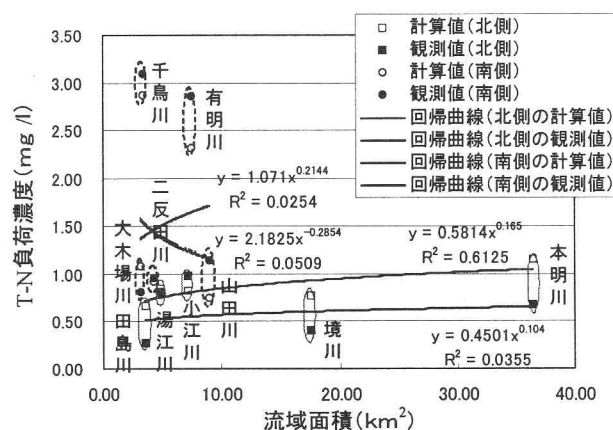


図-2 流出水のT-N負荷濃度

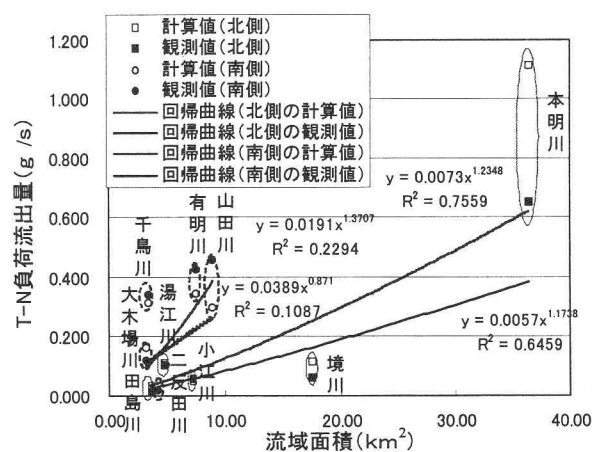


図-3 各河川におけるT-N負荷量

らの非点源汚濁流出に関して、全窒素(T-N)を取り上げて検討している^{2),3)}。ここでは、諫早湾調整池の流域をそれぞれの河川流域毎に分割し、流出水の全窒素濃度ならびにその総量を、諫早湾調整池流域の河川を北側(境川、湯江川、田島川、小江川、本明川、深海川)と南側(大木場川、山田川、千鳥川、有明川、二反田川)とに分けて、図-2、図-3に示すように求めた¹⁾。これらの図からわ

かるように、諫早湾調整池流域では明らかに、北側と南側とでは汚濁負荷流出特性が大きく異なっているが、土地利用や降雨の状況を考慮した汚濁物質が、流域から剥される (washoff detachment) との概念を導入し、その剥離量に基づいて求めた計算値は観測値とも良く一致していることがわかる。これらの結果によれば、調整池の北側は森林主体の土地でもあり、T-N 濃度は小さい。他方、南側は水田や畑が広がり、市街化された地域も多いため、場所によっては T-N 濃度が大きくなっていることがわかる。

(3) 調整池へ流出する点源・非点源由来 T-N 負荷量

諫早湾調整池の水質保全を取り上げた場合、調整池流域からの汚濁量を把握することが重要になる。前述されたように、調整池の北側と南側とでは汚濁流出の状況が異なるため、ここでは便宜的に、現在の本明川流域と調整池の北側と南側の地域とに分けて、点源ならびに非点源由来 T-N 負荷量を見積もることとした。これらの地域のうち、一級河川である本明川は水質観測資料も多く、平成 13 年から平成 14 年 7 月末のデータを用いて作成した L-Q 曲線が既に求められている⁴⁾。一方、調整池の北側と南側の流域から流出する T-N 負荷量は前述されたとおりである。ただ、これらの図は公共水域で測定された観測値を用いて資料整理がされているため、降雨の影響がある資料も含まれているとは言っても、基本的に晴天時の観測資料が使われている。そのため、雨天時の T-N 流出負荷量を求めなければならない。これらについては、現在、長崎市の都市河川流域で観測を実施中であるが⁹⁾、いずれにしても、ここでの目的に対しては、 $L=aQ^b$ の形の L-Q 曲線で T-N 流出負荷量を推定することができる。非点源由来 T-N 負荷量の予測制度を高めるためには、L-Q 式に含まれる係数の a 、 b を適切に評価せねばならないが、ここでは、本明川の値に準拠するとともに、調整池の北側と南側から流出する T-N 負荷量の比率を、前述された結果から求めた。

上述の方法で計算された T-N 流出負荷量の日変化は図-4 に示すとおりである。なお、図-4 は 2003 年の本明川の流量時系列を基にして、ハイトグラフから各地域での流量ハイドログラフを求め、T-N 負荷量に対するロードグラフを求めたものである。表-1 に、各地域の年間の T-N 負荷流出量を、点源ならびに非点源からの内訳がわかる形で示した。これらの数値は、その算出方法を考えれば妥当なものと思われるが、検証を兼ねて、これらの T-N 負荷量を基にして調整池の T-N 濃度の概略値を計算した。図-5 には、調整池における T-N 濃度の観測値と計算値との比較がされている。ここでの計算は、調整池を一つのタンクとした概略的なものであり、調整池内部での詳細な水質変化機構を考慮したものではない。ただ、計算と実測とで得られた T-N 濃度のポリュートグラフを類似させるため、冬季と夏季とで、沈降と吸着を考慮した生成

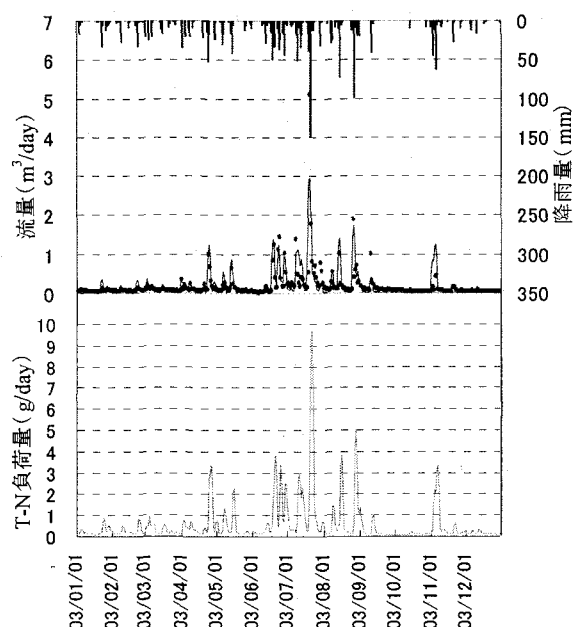


図-4 ハイトグラフ、ハイドログラフ、ロードグラフ

表-1 T-N 年間流出負荷量

	点源由来 T-N 年間 流出負荷量	非点源由来 T-N 年間 流出負荷量	合計
	(t/y)	(t/y)	(t/y)
本明川流域	45.6	73.3	118.9
北側	2.0	55.0	57.0
南側	63.2	92.7	155.9

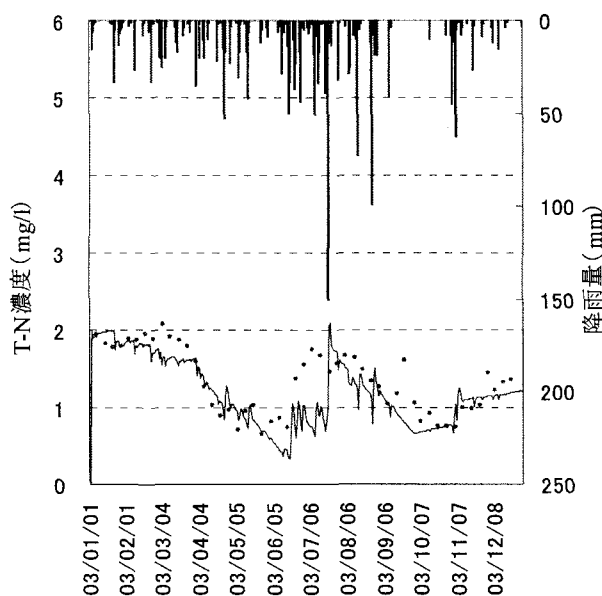


図-5 調整池の T-N 濃度の変化

項の一次反応係数の値を変化させている。図-5 から明らかなように、降雨に伴い調整池の濃度が上昇するか下降するかは、汚濁流出の影響か、希釈効果か、いずれが卓越するかによっている。水質観測は精々、1週間に1度の割合で実施されているため、個々の降雨による詳しい変化は不明である。ただ、7月22日の大きな降雨では多分に希釈効果が卓越しているが、T-N 流出負荷量の計算ではL-Q式を用いているため、流出量が過大に見積もられている。このような降雨に対してもT-N 流出負荷量を精度良く計算するためには、平均的なL-Q曲線が使用できないことは論を待たない。なお、環境事前評価で設定されているT-Nの環境基準値は1.0 mg/lであり、環境基準達成のために格段の努力が求められていることは自明のことであろう。

3. 人工湿地を用いた水域浄化

(1) 人工湿地の概要

前述されたことから、水域を清澄に保つためには流域からの非点源汚濁負荷の未処理での流出を、極力、削減せねばならない。このようなことから、欧米諸国等では、点源汚濁を抑制する下水道システムの整備を受けて、非点源汚濁対策に本格的に取り組み始めている⁷⁾。このような Best Management Practices (BMPs) としては、滞留地 (detention basin)、滞水池 (retention pond)、人工湿地 (constructed wetland) 等の典型的な施設の他、スワール (swale) や自宅敷地内での簡易汚濁処理施設まで、規模も様々である。最近、雨水処理 (stormwater treatment) を取り上げた「都市域雨水排除の国際会議」(International Conference on Urban Drainage: ICUD) 等で人工湿地に大いなる関心が向けられているのは、わが国における自然再生事業の動向とも無縁ではない。

一般に、水辺には水生植物が生えており、棲み分けの違いで、①抽水植物、②浮葉植物、③沈水植物、等と分類されているが、いずれの植物であっても、水生植物が生育するために窒素やリン等の栄養塩を必要とすることは言うまでもない。また、水生植物が繁茂した湿地では、(1)植物群落による捕捉、(2)土壌や根の部分(根圏)での濾過や吸着、(3)水生植物に棲む微生物による有機物の分解や硝化・脱窒等、物理的・化学的・生物学的な諸側面から水質が浄化されている⁸⁾。これらのことは人工湿地においても、ある程度言えるものと思われるが、何よりもその湿地で如何に豊かな生態系が形成されているかが、水域浄化に大きく関与しているものと考えられる。著者らは、最近数年間、ヨシ植栽水路での水質浄化実験等を行い⁹⁾、平成16年からは、10m×100m規模の植栽水路を作成し、長崎市の西部下水処理場で実機への移行実験を開始している。本論では、紙面の都合もあり、対象としている諫早湾調整池での水質観測結果を主として

取り上げる。

諫早湾調整池流域からは、前述されたようなT-N負荷の流出があり、有効な対策を講じなければ、良好な水環境が保たれないおそれがある。そのため、本論で取り上げようとしているBMPsとしての有効な対策が求められている。また、調整池でも、水生植物を活用した水域浄化が図られようとしている。すなわち、現在の内部堤防前面には、ヨシ、ヒメガマ等の水生植物が繁茂し¹⁰⁾、さらには、旧内部堤防予定地点の潜堤上には、ヨシ等の水生植物を植栽する計画になっている。これらについても、前述されたような水質浄化の働きが期待されている。

(2) 水質浄化の定量的評価

湿地での水質浄化の様子を明らかにするためには、当該水域での生態系についての十分な把握が必要になる。すなわち、質量保存式は一般に次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_{(j)} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + Source \quad (1)$$

ここに、 C は対象物質の濃度であり、他の記号は慣用のものである。湿地での物質輸送に対して(1)式を適用したとき、右辺最終項の沈降や吸着等を考慮した生成項の評価が大いに問題になることは言うまでもない。ここでは、移流項、拡散項を省略し、生成項も単純に生成・消滅の効果で表せば、(1)式は以下のように書き改められる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = P - k_1 C \quad (2)$$

ここに、 P は単位時間、単位体積あたりの生成量であり、消滅量は一次反応式(k_1 :一次反応係数)で表現できるものとした。一定の P の値に対して、上式は容易に解くことができ、流入濃度(C_{in})と流出濃度(C_{out})との差は次式で表される。

$$\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} = \left(1 - \frac{P}{k_1 C_{in}}\right) (1 - e^{-k_1 t_{det}}) \quad (3)$$

対象物質が全窒素(T-N)等の栄養塩であるときには、(3)式は汚濁物質除去率を表している。実際に湿地内での流れを考えれば、一次反応係数は $k_1 = w_0 / h$ と見なされる。ここで、 w_0 :沈降速度(m/s)、 h :水深(m)である。(3)式より、汚濁物質の沈降速度が大きくなるとか、水深が小さくなれば、汚濁物質除去の効果が高まることがわかる。勿論、流れの勢いに比較して水深が浅すぎるときには、底泥の巻き上げにより汚濁物質濃度が高まることは容易に察せられる。また、流入水の汚濁物質濃度が大きいほど、あるいは、滞留時間(t_{det})が長いほど、汚濁物質除去効果が高くなることも良く知られている。なお、(2)式で $P = 0$ とすれば、次式が求められる。

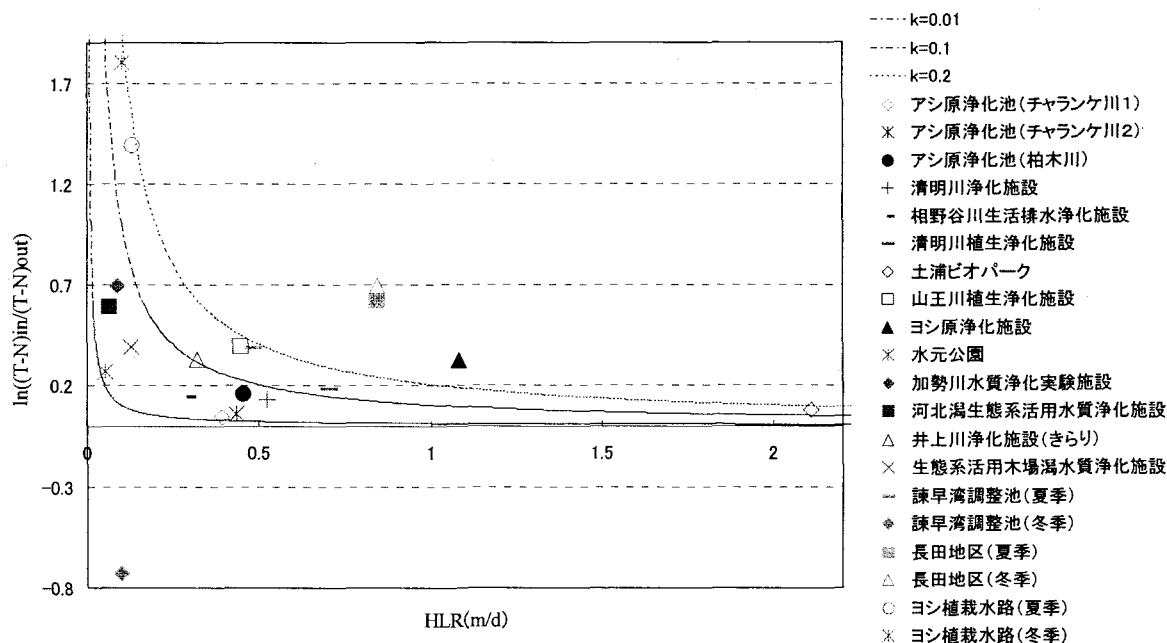


図-6 分解速度定数k

$$C_{out} = C_{in} e^{-k/HLR} \quad (4)$$

ここに、 $k = k_1 h$ と置かれており、分解速度定数と呼ばれる。また、 $HLR = h/t_{det}$ は面積負荷速度である。

本節の考察より、分解速度定数(k)は、流れに含まれる汚濁物質の沈降速度(w_0)に等しいことがわかる。勿論、この場合の沈降速度には、各種の水質浄化の効果を含んでいることは当然である。

(3) 分解速度定数

前述された分解速度定数は、しばしば、人工湿地の水域浄化効率を評価する際になどに用いられる。人工湿地には、①表面流れ方式、②浸透流れ方式等が上げられるが、その方式の違いによって水域浄化の効率が変化することも容易に推察できる。ここで、水生植物を活用した水質浄化施設に関して、全国に存在する施設の水質浄化効率を取り上げて¹¹⁾、分解速度定数の違いによる流入水と流出水の T-N 濃度の比を示せば、図-6 のようである。図-6 より明らかなように、流入水と流出水の T-N 濃度の比は面積負荷速度(HLR)や分解速度定数(k)により変化している。ただ、ここで注目すべきことは、面積負荷速度の値が同じであっても水質浄化の程度はそれぞれの水域で様々に変化することである。

著者らは、水生植物による水域浄化効率を調査するため、①本明川不知火橋地点(長田地区)、②諫早湾調整池の内部堤防前面、③長崎大学構内の植栽水路、を対象にしてヨシ植栽による水質浄化の程度を調べた。これらの

観測・実験の詳細については記述を省略するが、夏季と冬季との結果を先のものと同じく、図-6 に示した。種々の理由から、季節変化が必ずしも正確に定量的に評価されていないが、大凡の分解速度定数の値について理解することができる。

4. 諫早湾調整池への T-N 流出負荷量の削減方策

上述したことから、諫早調整池における T-N 流出負荷量の削減方策を検討した。BMPs の一つである人工湿地の大きさによる非点源由来 T-N 負荷削減量の変化を図-7 に示した。図-7 は、それぞれ本明川、北側、南側の流域の汚濁物質削減率とその効果を発揮するに要する容積の関係を示している。今回は、下水道の普及により、点源由来 T-N 負荷量が段階的に削減されることや、調整池内での植物または藻類による生産量が減少させられることを考慮して、非点源由来 T-N 流出負荷量の 1 割削減を目標にした。図-7 より、非点源由来 T-N 流出負荷量の 1 割削減に効果的な容積は、本明川が 110,000 m³、北側で 45,000 m³、南側で 90,000 m³ となった。BMPs 施設の稼働回数もそれに準ずる形となった。南側や本明川は都市化が進んでおり、流出する T-N 負荷量も多い結果によると考えられる。このことから、よりたくさんの非点源由来の T-N が流出している本明川や南側において BMPs の施設を設置するほうが、北側に設置するよりも効果的に汚濁物質を除去できると言える。

今回、点源・非点源由来の T-N の流出を把握し、ある程度の汚濁物質削減方策を明らかにすることができた。

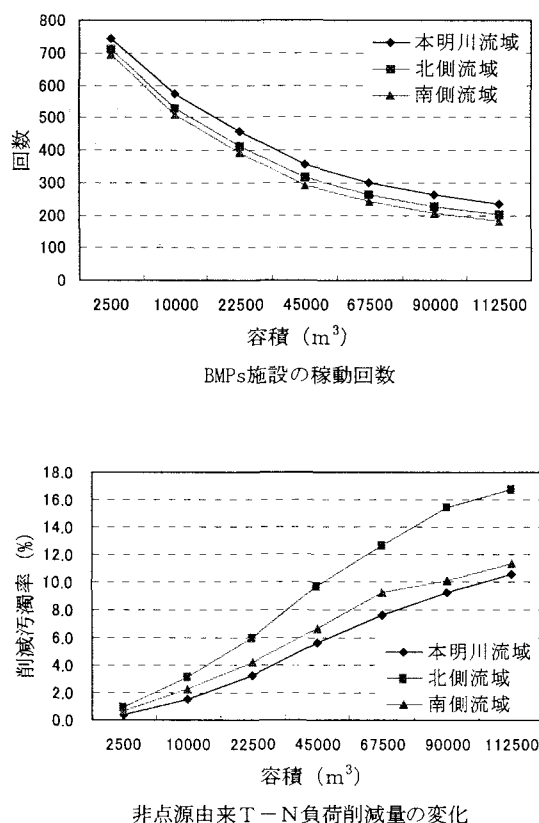


図-7 人工湿地の大きさによる非点源汚濁削減量の変化

しかし、今回の検討においては、1日のT-N流出負荷量を時間毎の値として一様に分割したことから、降雨時に大きな値となるファースト・フラッシュなどは考慮されなかった。非点源由来T-N負荷削減を行うにあたり、今後共、降雨の大きさによる影響を考慮し、検討していくことが求められる。

5. 結論

諫早湾調整池に代表されるような閉鎖性水域では栄養塩を始めとした汚濁物質が、流域から未処理で流入してくることを、極力、防がねばならない。そのため、本論では、諫早湾調整池流域からの汚濁負荷流出の状況を、全窒素(T-N)を例に取り上げて検討した。併せて、人工湿地により非点源由来T-N流出負荷量の抑制を図ることを目指して、人工湿地を用いた汚濁物質除去効率について検討するとともに、想定された規模の施設で、どの程度の汚濁物質の削減が可能かを調べた。湿地の汚濁物質除去効率を絶えず最高水準に維持することは容易なことではないが、一般に考えられる規模の施設を建設することによっても、調整池の水質がかなり改善されることが推察された。

謝辞：最後に本研究を進めるにあたり、流量資料や調整池の水質資料に関しては、国土交通省長崎河川国道事務所、農林水産省九州農政局より提供を受けた。また、両機関には現地での観測に際しても多大なご支援を頂戴した。また、本研究の一部は、平成15年度の河川整備基金(代表者：野口正人)、並びに、(株)建設技術研究所の資金援助を受けて実施された。ここに記して関係各位に深甚の謝意を表します。また、現地で採取した試料の計測に当たっては、(社)長崎県食品衛生協会のご協力を得た。最後に、本論文を仕上げるに際して、末光優一君(卒業研究生)を始めとした長崎大学工学部社会開発工学科河川工学研究室の職員・学生諸氏には大いにご支援戴いた。心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 野口正人, 西田渉, 川池健司, 野村佐和美, 洲上雄作(2003): 流域からの汚濁負荷流出抑制, 平成15年度長崎大学公開講座, 未来指向型の水環境整備, pp.135-149.
- 2) 野村佐和美, 野口正人, 西田渉, 水野良宣(2003): GISデータを用いた非点源汚濁負荷流出量の予測と評価, 水工学論文集, 第47巻, pp.1021-1026.
- 3) M. Noguchi, W. Nishida, S. Nomura and Y. Fuchigami (2003): Estimation of Non-Point Pollutant Runoff Considering the Detachment Rate, 30th IAHR Congress, Urban and Rural Water Systems for Sustainable Development, pp.707-714.
- 4) 諫早湾干拓地域環境調査委員会資料(2002): 流入負荷量の算定結果.
- 5) Masato Noguchi, Nobuki Morio and Sawami Nomura(2004): Estimation of Diffuse Pollution at Urban Area Completely Installed by Sewer System, CDProc.8th Int. Conf.on Diffuse Pollution, pp341-348
- 6) Masato Noguchi, Nobuki Morio, Wataru Nishida and Masakazu Furue (2005): Pollutant runoff from the diffuse pollution in urban area under the wet weather condition, 7th IAHS Scientific Assembly. (In printing)
- 7) G. Minton (2002): Stormwater Treatment, Resources Planning Associates.
- 8) 稲森悠平編著(1998): 生活排水対策, 産業用水調査会, pp.303-310.
- 9) 野口正人, 吉田光, 白川純子, 牟田耕平(2002): 水生植物を用いた水域浄化効率に関する一考察, 長崎大学工学部研究報告, 第32巻, 第59号, pp.167-170.
- 10) 長崎県(2004): 第23回諫早湾干拓地域環境調査委員会説明資料, pp. I-456-462.
- 11) (財)河川環境管理財団・河川環境総合研究所(2000): 植生浄化施設の現状と事例, pp.1-91

(2004. 9. 30 受付)