

諫早湾調整池における降雨時の非点源汚濁負荷流出量の予測と評価に関する研究

北島雄太*・田中晃司**・松永 学**
野口正人**・西田 渉**・鈴木誠二**

Prediction and Evaluation of Pollutant Runoff Loads into the Regulation Pond at Isahaya under Rainfall Condition

by

Yuta KITAJIMA*, Koji TANAKA**, Manabu MATSUNAGA**,
Masato NOGUCHI**, Wataru NISHIDA** and Seiji SUZUKI**

At Isahaya of Nagasaki in Japan, a big project for constructing a sea-dyke and reclaimed land has just been finished, and the inner part of Isahaya bay becomes an enclosed water body. Then, in order to avoid eutrophication in the pond, integrated water management over a watershed for the water region called regulation pond should elaborately be pursued.

For reducing the pollutant runoff loads from the watershed, washoff rate of each pollutant from non-point sources should be made clear, based on the hydrological condition of watershed. So, considering the geographic condition shown by GIS data, pollutant runoff rates from non-point sources are investigated considering a time series of rainfall, i.e. the antecedent and current ones.

For the above-mentioned purpose, field observation of water quality has been progressed, especially under the rainfall condition. In addition, authors already proposed the mathematical mode (Noguchi et al., 2005, 2006), which can evaluate the pollutant runoff rates from diffuse sources if model parameter will appropriately be identified.

In this paper, observed data of total nitrogen (T-N) as pollutants are shown. Furthermore, efficiency of the above-mentioned model has been discussed for prediction and evaluation of runoff loads.

Key words: *diffuse pollution, field observation, mathematical model, non-point sources, T-N*

1. 研究の目的

近年、河川や内湾などの閉鎖性水域では様々な発生源の汚濁物質が流入し、水質悪化が問題となっている。これらの汚濁は家庭排水や工場排水といった点源汚濁と流域に面的に広がった非点源汚濁とに分けられる。前者は、汚濁の発生源が特定できる汚濁であり、全国各地で下水

道整備が行なわれたことにより、削減されつつある。一方、後者の汚濁は、晴天時に自動車による煤塵が蓄積し、さらには農地の肥料などが存在するため、それらが降雨時に雨水とともに水域に流出し水環境面での問題を引き起こしている。

通常、汚濁削減のために下水道整備が実施されるが、

平成19年12月17日受理

*大学院生産科学研究科博士前期課程環境システム工学専攻

(Graduate student, Department of Environmental Systems Engineering)

**社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

非点源汚濁は流域に広く分布しているため、一般に下水道での対策が困難である。そのため、英語圏では Best Management Practices (BMPs)の課題として鋭意研究が進められ実用に供されている。滞留地、滞水池、人工湿地等々の施設が建設され、非点源汚濁負荷対策が進められている。この種の対策の効率を向上させるためにも、とりわけ降雨時における流域からの非点源汚濁負荷流出量を適切に予測し評価することが重要になっている。

本研究では、諫早湾調整池流域を対象として流域から流出する非点源汚濁の流出機構を明らかにし、汚濁量の定量的評価に資することを目的としている。

2. 研究対象領域

本研究では図-1 に示された諫早湾調整池流域を対象としている。1997年4月14日に諫早湾奥部は潮受け堤防で締め切れ、湾内水は外海と隔絶された。この潮受け堤防の設置により、調整池では淡水化が進んでいる。諫早湾調整池は流域面積が249km²であり、11河川が調整池に流入している。その中には長崎県唯一の一級河川である本明川も含まれる。

上述されたように、諫早湾調整池は潮受け堤防の建設により諫早湾奥部を締め切って造られた。そのため、調整池は閉鎖性水域になっており、流域からの汚濁を直に受けるため、十分な汚濁負荷対策が実施されないときには当然のことながら富栄養化等による水質の悪化が懸念される。既に長崎県では「諫早湾干拓調整池水質保全計画(第2期)」¹⁾を策定し、数種の汚濁流出抑制方を検討中である。また、干拓事業の実施機関である農林水産省においても旧来の内部堤防建設予定地に設けられた潜堤の上部への植栽や南部排水門付近のヨシ進出工の施工等を行っている。これらの汚濁流出抑制方策の効果を向上させるためにも、流域からの汚濁流出機構を明らかにせねばならない。

なお、研究対象とされた諫早湾調整池流域は土地利用が一様ではなく、全体的に森林が多くを占めているが、



図-1 干拓地前面に広がる諫早湾調整池

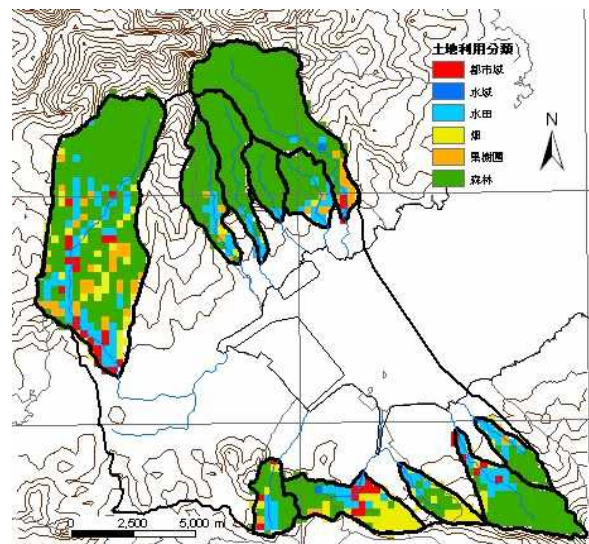
それ以外にも田畑・果樹園・水域・都市域等が含まれる。したがって、土地利用の違いにより汚濁流出の状態も大きく変化することが容易に推察できる。

図-2 に諫早湾調整池に流入する11河川と土地利用分類の結果を示した。

3. 観測の概要

従来、水質観測は降雨の影響がない天候の下で行なわれてきた。しかし、本研究で取り上げている非点源汚濁は一般に、晴天時に流域全体に蓄積された汚濁が主として降雨時の表面流によって剥離され、水域へと運ばれる。したがって、非点源汚濁の流出機構を明らかにするためには、降雨時の水質観測が欠かせない。

簡単に推察できるように、諫早湾調整池の流域は広く、降雨時の水質観測はさほど容易なことではない。そのため、表題に係る研究が土木学会の「流域管理と地域計画の連携に関わる共同研究」に採択された「閉鎖性水域での健全な水環境の実現に関する研究(平成18~20年度)(研究代表者:野口正人)の一環として進められたのを契機に関係行政機関等との連携が図られた。すなわち、上記の共同研究を実質的に支えており、また、本明川を管理している国土交通省九州地方整備局長崎河川国道事務所や、諫早湾干拓事業の実施機関である農林水産省九州農政局諫早湾干拓事務所、



境川	二反田川
湯江川	有明川
田島川	千鳥川
小江川	山田川
深海川	土井川(山田川)
本明川	

図-2 諫早湾調整池に流入する河川と土地利用状況

さらには(財)長崎県建設技術研究センター(NERC)等の機関とは各レベルでの提携がされた。降雨時の観測は、その時期が事前に把握できないため種々の困難が伴うが、いずれにしても降雨時の観測は長崎大学の研究グループと諫早湾干拓事務所、及び(社)長崎県食品衛生協会の担当者が中心になって実施された。とくに、平成19年7月4日の観測は長崎大学の研究グループの主力メンバーが国際水工学会での研究発表のためにヴェニス(イタリア))に出張していたため、農林水産省の担当者らにより行われた。

所期の研究目的を達成するためには調整池に流入する11河川のすべてで水質観測を実施するのが望ましいが、人手や経費の面で困難である。そのため、観測は主として境川、深海川、本明川、二反田川、山田川を中心に進められた。なお、全体の観測地点の位置は図3に示された。

4.L-Q式による汚濁流出量の評価

汚濁流出量を予測する際にしばしば、流量と汚濁負荷量との関係式、いわゆるL-Q式が用いられる。

$$L = a Q^b \quad (1)$$

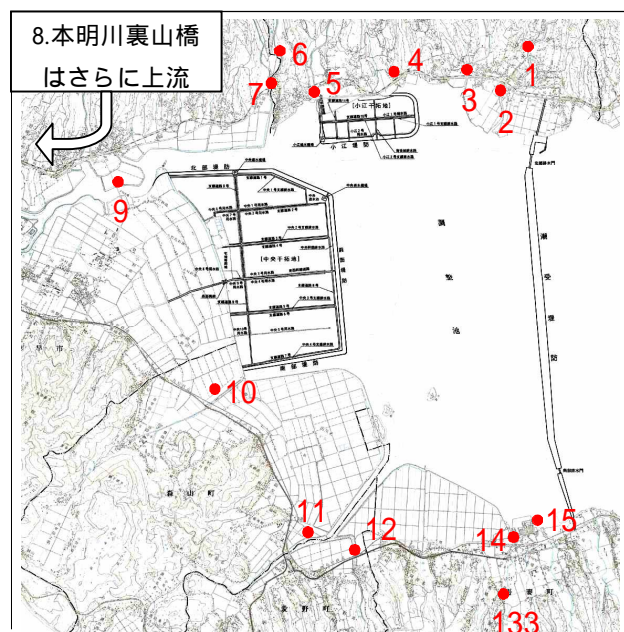
ここに、 L : 汚濁負荷量(g/s)、 Q : 流量(m³/s)、 a, b : 流

域の状態に変化する係数、である。

L-Q式はその形から明らかなように流量と汚濁負荷量との間に一価関係が存在することを仮定しているが、この仮定は厳密には成立しない。すなわち、流域の土地利用の違いにより洪水の増水期と減水期とは同一の流量に対して流出量は正確には同一でない。この問題に対しては次節で取り上げることにする。

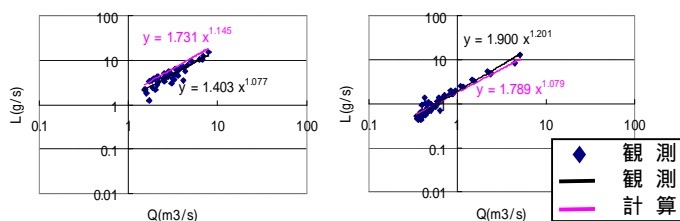
通常、流域の状態に応じた汚濁負荷流出量を厳密に求めることは困難であり、一般にはL-Q式を用いて汚濁流出量の算定を行う。この場合、L-Q式の係数 a, b は観測資料を用いて決定される。しかし、前述されたように降雨時の水質観測が難しいため、いずれの場所においても水質観測資料を十分に揃えるという訳にはいかない。したがって、水質観測が十分に行われていない流域でもL-Q式を合理的に算定することが重要になっている。このような理由から、著者らは既に存在している水質観測資料を活用して、重回帰分析を用いてL-Q式の係数を適切に同定する方法を提案している。
2) ここでは詳しい説明を省き、図4に二三の結果を示すに止める。

ここに、図中の凡例で観測値とされたデータは、図の上段の本明川や山田川では実際のものに対応している。しかし、下段の田島川や有明川では実際には水質観測がされていないため、近隣の河川の観測値を指している。また、観測とされた直線は上述された観測値を用いて得られた回帰曲線を表しており、計算とされた直線は重回帰分析により同定された係数のL-Q式で算定された曲線を表している。後者の計算による結果は、対象地点での水質観測データを直接的には用いていない。図4より明らかなように、上段に示された



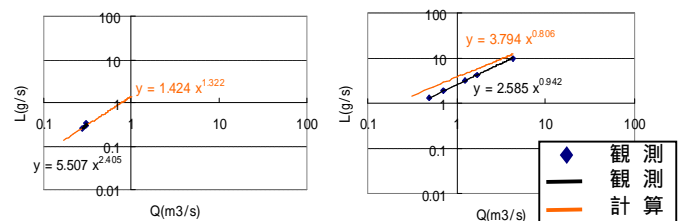
No	河川名	地点名	No	河川名	地点名
1	境川	昭栄橋下流	11	有明川	鉄道橋下流
2	境川	境川橋下流	12	千鳥川	千鳥橋下流
3	湯江川	湯江川橋	13	山田川	菟塚橋
4	田島川	鉄道橋	14	山田川	神幸橋下流
5	小江川	小江橋	15	土井川	田川原川合流後
6	深海川	ポンプ場横			
7	深海川	鉄道橋			
8	本明川	裏山橋			
9	本明川	不知火橋			
10	二反田川	鉄道橋			

図3 観測地点位置



本明川天満公園前(洪水期)

山田川菟塚橋(洪水期)



田島川鉄道橋(洪水期)

有明川鉄道橋(洪水期)

図4 各観測場所でのL-Q曲線(洪)

河川に対しては、重回帰分析から得られた計算値は、観測値から求められた回帰曲線に酷似している。これは、それぞれの土地利用面積の割合が、L-Q 式を算定するにあたり、非常に重要な要素であることを示している。下段の河川ではそもそも水質観測データが存在していないため、計算値と観測値との比較はできない。そのため、上述されたことを考慮すれば計算及び観測とされた直線が一致しないのは当然であり、田島川や有明川のL-Q式としては計算結果に近いものと推察される。

以上のことから、観測データが少ない地点においても土地利用の状態を考慮することによって、実用的には十分な精度でL-Q式が算出できることが示された。

5. 非点源汚濁負荷流出解析^{3,4)}

非点源汚濁負荷流出量を適切に見積もるためには表面流と同様に流域に堆積した汚濁に対しても基礎方程式を解く必要がある。一次元流で考えるとそれぞれの汚濁に対して保存式は以下のように表すことができる。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\zeta CUh) = q^{(s)} + q^{(b)} - \zeta w_0 C \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma h_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\zeta \sigma v_p h_p) = -q^{(b)} + \zeta w_0 C \quad (3)$$

ここに、 C ；汚濁濃度、 U ；速度成分、 h ；水深、 ζ ；汚濁輸送量に対する補正係数であり、 $q^{(s)}$ と $q^{(b)}$ は表面、底面、それぞれからの単位面積、単位時間あたりの汚濁負荷横流入量である。さらに、 w_0 ；沈降速度、 ζ ；補正係数、 σ ；堆積汚濁物質の密度、 h_p ；堆積層の厚さである。通常、式(3)の左辺第二項は小さいものとして無視できる。

また、式(2)と式(3)は表面流、堆積汚濁の層、それぞれにおける汚濁の基礎方程式になっている。これらの式を解くために $q^{(b)}$ にあたる汚濁の剥離係数は適切に見積もらねばならない。そのため、剥離されにくさという考えを堆積汚濁に対して適用した。鉛直方向に剥離されにくさ、すなわち $h_a(y,t)$ を想定し、以下の式で評価した。

$$h_a(y,t) = h_{a,\infty} + (h_{a,s}(t) - h_{a,\infty}) \cdot e^{-\sigma y} \quad (4)$$

ここに y 軸は上方向が正である。さらに、 $h_{a,s}(t)$ と、 $h_{a,\infty}$ はそれぞれ、現在、ならびに、堆積厚さが十分に大きいときの剥離されにくさを表している。図5にそれらの関係を示す。ここに、表面の剥離されにくさは堆積汚濁に関係し、逐次変化するものとした。

流域に堆積した汚濁が降雨により剥離し、輸送され

る量が雨水流の大きさとともに流域の状態に影響されることは容易に推察できる。汚濁を剥離するエネルギーは本来的には雨水流により作用する底面せん断応力で求められるべきであるが、流量に比例するものとした。また、剥離量は上述の剥離されにくさの関数として計算される。すなわち、これらのエネルギーを等しく置けば次式が求められる。

$$\gamma_1 Q(t) = \gamma_2 \int_{-d(t)}^0 h_a(y,t) dy \quad (5)$$

ここに、 $Q(t)$ ；流量、 $d(t)$ ；単位時間当たりの堆積層の減少厚さ、 γ_1 、 γ_2 ；比例係数である。式(5)の右辺に式(4)を代入し、最終的に減少厚さ $d(t)$ を求めることができる。これに、流域面積(A)を乗じることで、単位時間当たりに流域から剥離される汚濁負荷量； $L(t)$ が求められ、汚濁濃度； $C(t)$ は以下のようにして計算できる。

$$C(t) = L(t) / Q(t) \quad (6)$$

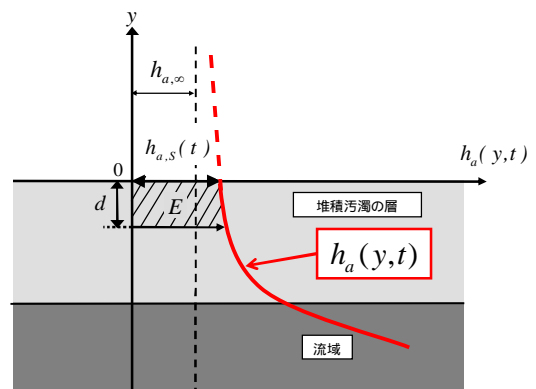


図5 堆積汚濁の剥離されにくさ(概念図)

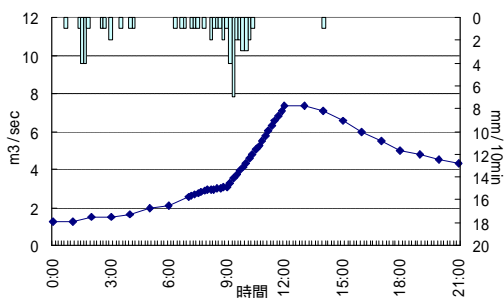
6. 結果と考察

前節まででは、降雨時に諫早湾調整池に流入する非点源汚濁負荷流出量の算定法について述べた。ここでは、降雨の規模が大きく、流出汚濁量の時間的変化がしっかりと観測された平成19年7月4日の農林水産省のデータを用いて、対象流域における非点源汚濁負荷流出機構について検討する。図6には、境川(昭栄橋)、深海川(ポンプ場横)、二反田川(鉄道橋)、山田川(菟塚橋)の4個所で測定された流量と、全窒素(T-N)の濃度と汚濁量が降雨量とともに示された。これらの図において濃度と汚濁量、を示す軸はスケールが一樣には取られていない。ともかく、山田川や二反田川といった諫早湾の南部に位置する河川では、降雨時の汚濁負荷流出量が北部のものに対して著しく大きくなっている。このような汚濁流出特性は平常時の水質観測結果からも明らかにされているが⁵⁾、出水時にも同様

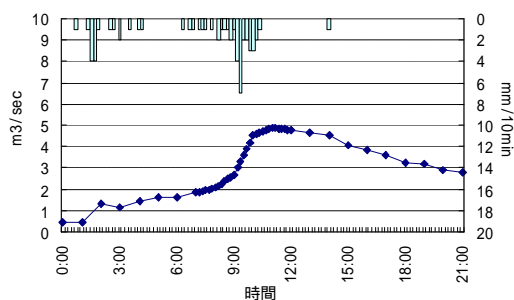
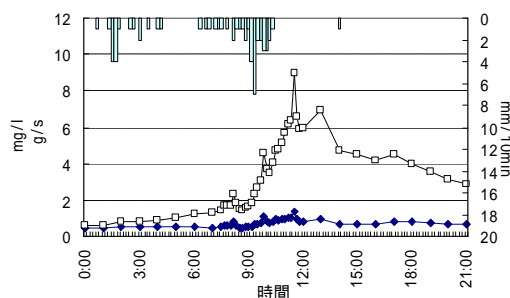
の傾向が存在することが示された。

次に、前節で取り上げられた数値モデルを用いて算出した境川における流出汚濁量(T-N)の計算結果を一

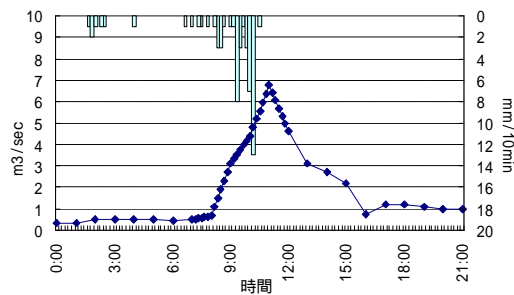
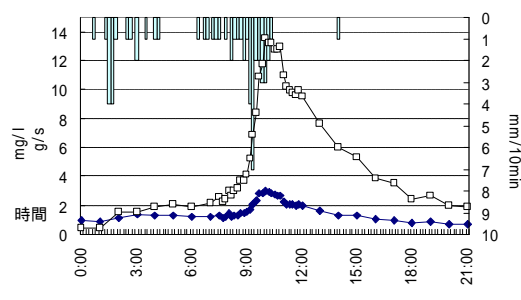
例として図 7 に示す。計算結果は観測値を精度良く再現しており、本モデルを用いて降雨時の汚濁流出量の予測が可能であるといえる。ただし、汚濁負荷のピー



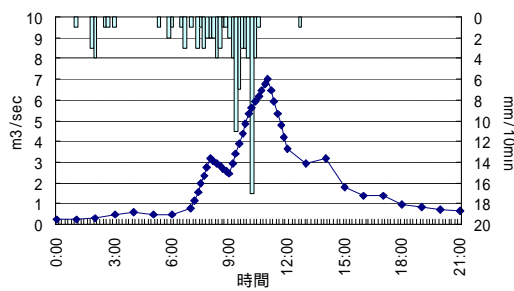
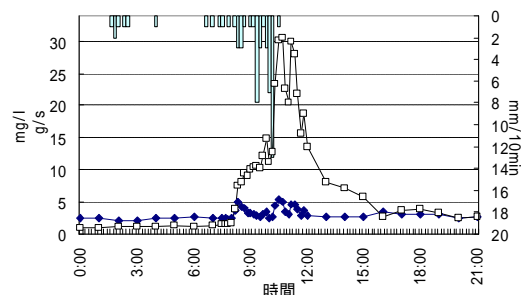
境川 昭栄橋



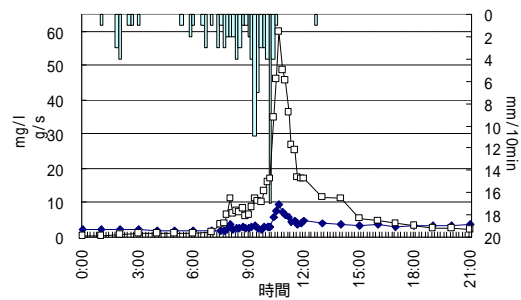
深海川 ポンプ場横



二反田川 鉄道橋



山田川 菟塚橋



■ 降雨量 mm/10min
◆ 流量 m3/sec

■ 降雨量 mm/10min
◆ T-N (mg/l)
□ T-N (g/s)

図 6 境川、深海川、二反田川、山田川の降雨量、流量、T-N 濃度、T-N 汚濁量の時間的変化（平成 19 年 7 月 4 日）

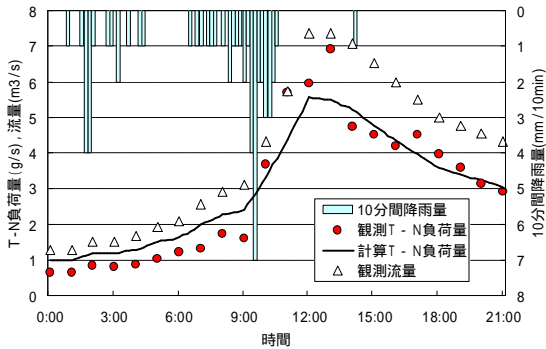


図-7 流出汚濁量(T-N)の計算結果(境川)

クの時間が約1時間、値として、20%ほどのずれがある。今後、土地利用や剥離係数等のパラメータを適切に評価することで、より高精度に汚濁流出量の予測が可能になると考えられる。

7. 結論

諫早湾調整池のような閉鎖性水域においては、健全な水環境を達成するうえで非点源汚濁負荷対策が欠か

せない。対象地域を始めとして閉鎖性水域を有する同様な流域で今後、各種の汚濁負荷流出抑制方策(BMPs)が実施されることは間違いなからう。それらの方策の効率を向上させるためにも、流域からの非点源汚濁負荷流出量を適切に予測し、その評価に基づいて妥当な汚濁流出抑制方策を選択し、鋭意実施することが期待されている。

本論での検討により、以下の結論を得た。

- 1) 「流域水質管理」の観点から、降雨時の非点源汚濁負荷流出量を適切に予測することが重要になっている。
- 2) 降雨時の非点源汚濁負荷流出量は必ずしも流量の一価関数として表されないため、流域の土地利用状態や先行降雨、現行降雨といった一連の降雨の影響を考慮して汚濁負荷流出量を評価せねばならない。
- 3) 上述されたことにも拘わらず、実用面からは汚濁負荷流出量と流量との関係、いわゆるL-Q式は一定の役割を果たす。そのため、L-Q式に含まれる係数を目的関数として、流域の土地利用の割合を説明変数にした重回帰分析を行えば、水質観測データが存在しない場所でも妥当なL-Q式が得られることが示された。
- 4) 汚濁量として全窒素(T-N)を取り上げれば、降雨時の流出量は第5節で示された数値モデルにより予測が可能となる。ただし、予測精度を高めるためには、モデルに含まれたパラメータを適切に評価することが重要になる。

謝辞：

本研究を進展させるために、論文中に示された多数の機関と連携して仕事を行った。また、既述の土木学会の「流域管理と地域計画の連携に関わる共同研究」では、国土交通省九州地方整備局長崎河川国道事務所の関係各位に多大のご支援を戴いた。また、本研究の経費の一部は、河川環境管理財団による平成18,19年度の河川整備基金(代表者:野口正人)によっている。降雨時の水質観測を実施するうえでは、農林水産省九州農政局諫早湾干拓事務所の関係各位に多大のご支援を戴いた。また、(財)長崎県建設技術研究センター、及び(社)長崎県食品衛生協会からも多大のご支援を頂戴した。これらのすべてに係る関係各位に深甚なる謝意を表します。

最後に、本論ではそのデータが直接には取り上げられなかったが、降雨時の数回の水質観測に快く協力して戴いた長崎大学工学部社会開発工学科河川工学研究室の学生諸氏に心よりお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 長崎県(2003):諫早湾干拓調整池水質保全計画(第2期), pp.1-100.
- 2) 野口正人・西田渉・鈴木誠二・末光優一・伊藤洋介(2007):L-Q式の合理的算定法に基づく非点源T-N負荷流出量の評価,土木学会年次学術講演会予稿集,CD-ROM.
- 3) M. Noguchi, N. Morio, W. Nishida and M. Furue (2005): Pollutant runoff under wet weather conditions from diffuse pollution in an urban area, Sustainable Water Management Solutions for Large Cities, IAHS Publisher, pp.185-195.
- 4) M. Noguchi, W. Nishida, K. Kawaike, M. Furue, K. Ikeda and M. Nishikawa (2006): Prediction for runoff loads of Total Nitrogen from non-point sources under the wet weather condition, Proc. of 10th Int. Specialized Conference on Diffuse Pollution and Sustainable Basin Management, IWA, Istanbul, Turkey, CD-ROM (R-117).
- 5) 野口正人・西田渉・川池健司・野村佐和美・淵上雄作(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.