

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

COMPREHENSIVE MEASURES IN AN URBAN CATCHMENT AREA
FOR RESTORATION OF WATER ENVIRONMENT IN LAKE INBA-NUMA

二瓶泰雄¹・市原翔平²・吉田拓司³・宮子雄太⁴・林薫⁵
・上原浩⁶・東海林太郎⁶・湯浅岳史⁶

Yasuo NIHEI, Shohei ICHIHARA, Takushi YOSHIDA, Yuta MIYAKO, Kaoru HAYASHI,
Hiroshi UEHARA, Taro SHOJI and Takashi YUASA

¹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)

²非会員 学(工) 中央三井アセット信託銀行(元東京理科大学学部生)

³非会員 修(工) 八千代エンジニアリング㈱(元東京理科大学大学院生)

⁴学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

⁵非会員 学(工) 千葉県県土整備部河川環境課(〒260-8667 千葉市中央区市場町1-1)

⁶正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ㈱(〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

For restoration of water environment in Lake Inba-numa, we studied the performance of rainwater-infiltration inlet and storm-water reservoir as measures in an urban catchment area of Lake Inba-numa. We have conducted field measurements for water cycle and pollutant load in urban areas with and without infiltration measures. Also the inflow and outflow loads of pollutants were measured in a storm-water reservoir. The results indicate that the surface runoff ratio and specific pollutant load in the urban area with infiltration measures were appreciably smaller than that without the measures. The inflow pollutant loads were significantly reduced in the storm-water reservoir. These facts indicate that these measures works well for reduction of non-point sources and restoration of spring water.

Key Words : Lake Inba-numa, water environment, non-point source, rainwater-infiltration inlet, storm-water reservoir

1. 序論

水道水源として水質汚濁度ワースト上位の千葉県印旛沼では、下水道整備等の点源負荷対策の継続的な実施に関わらず、現在でもCODは10mg/l程度となっており、依然として汚濁化されている¹⁾。印旛沼における水質汚濁化が継続する要因の一つとしては、流域の都市化により、市街地を起源とする面源負荷が増加していることや、アスファルト面等の不浸透面の増加に伴う雨水浸透量の減少や湧水の枯渇などが挙げられる^{1), 2)}。

都市域における面源負荷には自然的・人為的要素が複雑に関与し、また面源負荷自体が“広く薄く”不浸透面上に分布・集積しているため、市街地の汚濁物質動態は不明な点が多い^{3)~6)}。また“広く薄く分布している”という面源負荷の特徴に配慮した負荷削減対策を構築する必要があるが、現在までのところ効率性・有用性が高い面源負荷削減策は確立されていない³⁾。

一方、市街地における湧水保全・再生策として、これまで様々な雨水浸透施設が導入されている。特に、屋根

雨水を地中に浸透させる「雨水浸透マス」は湧水量増大や洪水流出抑制、地下水の涵養量増大等の効果が確認されている^{7), 8)}。一般に晴天時においてマスの浸透能試験は行われているが、実際の降雨時におけるマスの雨水浸透状況は調べられておらず、マス浸透能の実態は不明な点が多い。また雨水浸透マス設置により、市街地流域の表面流出特性が変化し、結果として面源負荷も変わると考えられるが、これに関する定量的検討は皆無である。

本研究では、印旛沼の水環境再生を目的として、市街地流域における水収支・汚濁負荷の実態を把握すると共に、市街地流域対策に関して総合的に検討することを試みる。この流域対策として、雨水浸透マスと雨水調整池という2種類の施設の効果を検討する。そのため、印旛沼流域において雨水浸透対策を進めている都市小流域とその対策が皆無である流域を一つずつ取り上げ、そこでの水収支・汚濁負荷調査や雨水浸透調査を通して、雨水浸透マスによる湧水再生効果と面源負荷削減効果を検討する。また、上記の雨水浸透対策を行っていない流域の流末地点に設置されている雨水調整池を対象として汚濁

物質の流入・流出量調査を実施し、雨水調整池による面源負荷削減効果を把握する。なお本研究は印旛沼再生のため千葉県が行う「印旛沼流域水循環健全化緊急行動計画」の「みためし行動」¹⁾の一部として実施されている。

2. 現地観測の概要

(1) 研究対象サイト

本研究では、雨水浸透対策に違いがある二つの都市小流域を研究サイトとする。まず、雨水浸透対策が施されている観測サイトは、印旛沼流域南西部の佐倉市に位置する「加賀清水湧水池」とその流域である(図-1)。加賀清水湧水池は、かつては豊富な湧水が存在したが、近年、流域の著しい都市化により湧水が枯渇する日もある。湧水池流域の面積は12.7haであり、土地利用特性の大部分は宅地と道路である。このエリアは、印旛沼再生のための雨水浸透促進を目的としたモデル地域¹⁾であり、雨水浸透マスは2007年度末時点で約220基設置されている。雨水浸透マスとしては、図-2に示すように、マスの周囲がポーラスコンクリート製のものとプラスチック製のものが用いられている。以下では、便宜上、前者をコンクリート型マス、後者をプラスチック型マスと呼ぶ。マスの設置年度としては、コンクリート型マスは1997～2004年、プラスチック型マスは2005年から現在まで設置されている。コンクリート型マスでは、流入した雨水が全方向に地中へ浸透する。一方、プラスチック型マスは流入口と流出口が仕切りで隔てられた二重構造であり、内部に汚濁物質トラップ用にガラスカレットを有しているなど、目詰まりしにくい構造となっている。

雨水浸透対策が施されていない都市小流域として、図-1の上部に示される「加賀清水調整池」流域を観測サイトとして選ぶ。これは、宅地造成に伴って2001年に建設されており、その流域面積は2.96ha、調整池の底面積と容積はそれぞれ1851m²、4894m³である。この流域の土地利用状況の大部分も宅地と道路であり、湧水池流域と同じである。この調整池流域では、湧水池流域と異なり、雨水浸透対策が行われておらず、また、流域の土地利用特性も類似しているため、両流域における水収支や主に面源負荷となる汚濁負荷量を比較することで、これらに対する雨水浸透マスの設置効果が抽出可能となる。

なお、図-1中緑色で示される湧水池流域の範囲は表面流出水の集水域であり、地下水の涵養域(同図中青線)とは異なる。ここでは調整池流域と比較する上で、便宜上、表面流出水の集水域を湧水池流域とする。

(2) 観測方法

上記の湧水池流域と調整池流域を対象として、市街地流域の水収支と汚濁物質動態、マスの雨水浸透状況・設

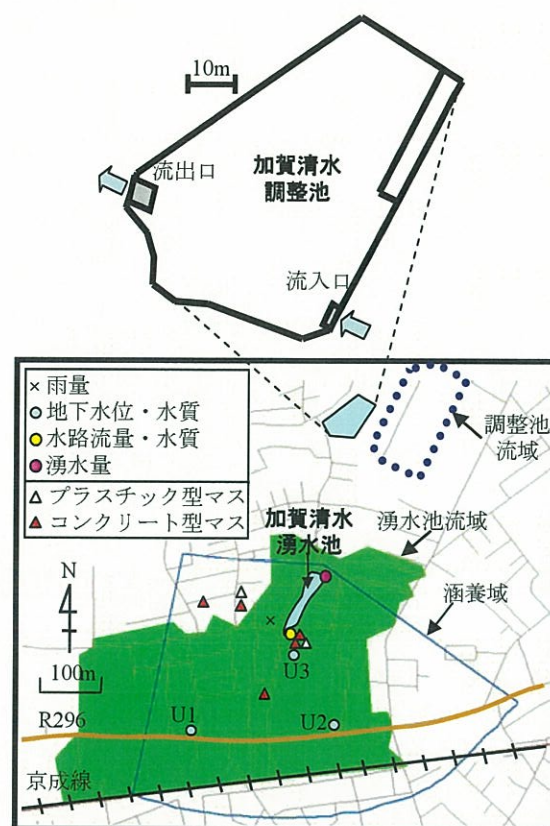


図-1 研究対象サイトと各観測地点の位置(加賀清水湧水池と加賀清水調整池とそれらの流域)

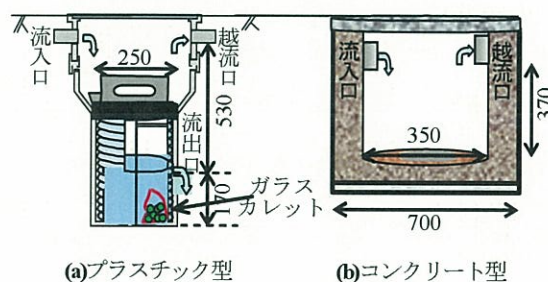


図-2 雨水浸透マス(単位:mm)

置効果、調整池の汚濁負荷削減効果を調べるために現地観測を実施する。以下に、流域毎に観測概要を述べる。

a) 湧水池流域

市街地流域の水収支及び汚濁物質動態を把握するために、湧水池流域では、雨量、地下水位・水質、湧水量、表面流出量及び汚濁負荷量に関する長期連続観測を実施している。雨量の計測は、図-1中×印の1地点に設置された転倒マス式雨量計により行われた。地下水については、3地点の井戸に小型水位計(Diver, Eijkelkamp社製もしくはU20 Water Level Logger, Onset社製)と水温塩分計(Compact-CT, JFEアレック株製)を設置し、地下水位と水質(水温・電気伝導度)を連続計測した。湧水に関しては、湧水池下流端に設けられた三角堰において水位を観測し、堰の流量公式より湧水量を求める。流域全体

からの表面流出量及び汚濁負荷量調査としては、流末地点に観測点を設けられなかったため、湧水池脇の排水路1地点（集水面積7.1ha、図-1中黄色丸印）に水位計を設置し、別途作成したH-Q式から流量を求める。また、この地点には自記式濁度計（Compact-CLW、JFEアレック（株）製）も設置し、濁度を連続計測する。別途、濁度とSSの相関関係を求め、この相関式より濁度をSSに換算して、降雨時に流出する汚濁物質の大部分を占める懸濁物質の指標となるSS負荷量を把握する。観測期間としては、雨量・地下水・湧水の計測が同時に行われているのは2006年から現在までであり、排水路の流量・濁度計測は2007年から現在まで行われている。なお、降雨時に排水路にて採水観測も行ったが、ここでは省略する。

雨水浸透マスの実降雨時の浸透状況を知るために、浸透マス底面に小型水位計を設置し、雨水浸透マス内の水位連続観測を行った。観測場所は観測許可が得られたところから選定された7戸の住宅地（図-1中の△印）に設置されている計11基の浸透マス（コンクリート型6基、プラスチック型5基）である。観測期間は最も長い地点で2007年9月から2008年1月までである。

b) 調整池流域

調整池の面源負荷削減効果及び雨水浸透対策が施されていない流域の表面流出・汚濁負荷特性を把握するために、調整池流域の流末地点である調整池流入口及び流出口を観測地点とする。ここでは、水位（流量）と濁度の連続観測を行う。ここで用いる測定器は、基本的に湧水池流域と同じである。観測期間は2007年8月から現在までである。調整池流入口における流量と濁度から換算されたSS負荷量を求めて、その結果を湧水池における排水路の結果と比べて、雨水浸透マス設置が流域の水収支や汚濁負荷に及ぼす影響を評価する。また、調整池の流入・流出口におけるSS負荷量を比較することにより、調整池内での懸濁物質トラップ効果を算定し、最終的に懸濁物質起源の面源負荷の削減効果を評価する。

3. 観測結果と考察

(1) 地下水環境と湧水特性

湧水池流域において計測された地下水環境と湧水量を特徴を把握するために、2006年10月から2007年末までの日雨量、日平均の地下水位・水温、湧水量の時間変化を図-3に示す。この地下水データは、Stn.U2の結果である。これより、地下水位は22.8~25.0m（地表面下2.7m~4.9m）の範囲で変化しており、地下水面が地面近くで推移している。大きな降雨イベント時には、地下水位は1m以上も上昇し、かつ、その応答が極めて早いことが分かる。このような水位変化は同じ関東ローム層が堆積する武蔵野台地で観測された“鋸歯型”に類似している⁹⁾。

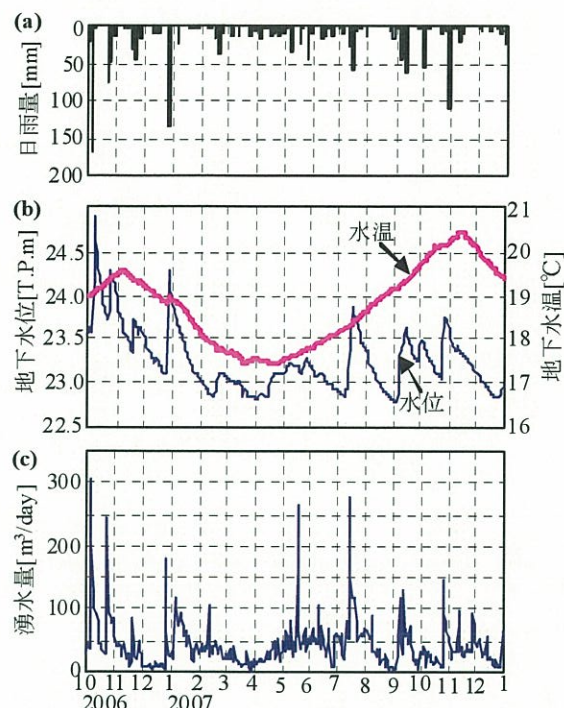


図-3 日雨量(a)と地下水位・水温(b)、湧水量(c)の経日変化（地下水位・水温：Stn.U2）

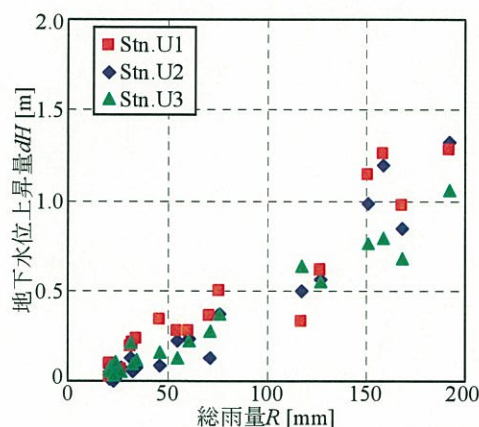


図-4 降雨時の総雨量Rと地下水位上昇量dHの関係

また、地下水温は、主として季節変動が卓越しており、降雨イベントに呼応して変化している様子は見られない。一方、湧水量は、大きな降雨イベント時に急激に増加し、地下水位と連動した変化をしている。以上より、大きな降雨イベント時には、降雨はそのまま地下に浸透して涵養水となり、もともと地中に存在していた涵養水が押し出され湧水となったものと推察される。

上述した降雨イベント時の地下水位上昇量を詳細に検討するために、各イベント時の総雨量Rと地下水位の上昇量dHの相関図を図-4に示す。ここでは、地下水位観測を行った3地点の観測結果から、総雨量が20mm以上の結果のみを抽出している。これより、各地点における水位上昇量dHは総雨量とともにほぼ直線的に大きくな

っており、総雨量が 150mm 以上となると水位上昇量は 1m を超えるところも観測されている。そこで、 dH と総雨量 R の近似直線 ($dH = aR - b$, a と b は係数) を観測点毎に算出したところ、比例係数 a は 5.3~7.1 となった。これを有効間隙率⁹⁾ に換算すると 0.10~0.13 と非常に小さい。このように、降雨時の急激な水位上昇や小さな有効間隙率は、別の関東ローム層でも確認されており⁹⁾、湧水池流域では降雨浸透能が高く、雨水浸透対策の効果が現れやすいエリアであることが示唆された。なお、この降雨直後の地下水位急上昇のメカニズムはいくつか検討されているが、現状では不明確な点が残されている⁸⁾。

(2) 実降雨時におけるマスの雨水浸透状況

実際の降雨時におけるマスの雨水浸透状況を把握するために、総雨量 110mm が観測された 2007 年最大の降雨イベント (2007 年 10 月 27 日) における 10 分間雨量と雨水浸透マス内の水位の時間変化を図-5 に示す。ここでは特徴的なコンクリート型マス 2 基とプラスチック型マス 2 基の結果を抽出している。この水位の基準面はコンクリート型の場合にはマス底面、プラスチック型の場合には流出口高さとする。なお、図中には、コンクリート型マスの越流水位は示されているが、プラスチック型の越流水位 (=53cm) は省略されている。これより、コンクリート型マス①では降雨に対応して大きく水位が上昇し、長時間にわたり越流水位を超えている。この場合には、マスに流入した屋根雨水は全て地中に浸透できず、一部は表面流出することとなる。残りのコンクリート型マス②や 2 つのプラスチック型マスの水位は、降雨強度と共に増減するが、いずれも越流水位を超えていない。

上記と同じ雨水浸透マスを対象として、各降雨イベント時における最大水位と最大 10 分間雨量の相関図を図-6 に示す。ここでは、観測期間中に生じた 13 の降雨イベントを対象とし、同じ最大 10 分間雨量となったイベントでは、それらの最大水位の平均値を表示している。これを見ると、コンクリート型マス①の最大水位は、雨量が 0.5mm の時にはコンクリート型マス②よりも小さいものの、雨量と共に急激に上昇し、最大 10 分間雨量が 2.0mm の時には越流水位に達している。また、プラスチック型マス①においても、最大 10 分間雨量が 3.0mm 以下ではもう一つのプラスチック型マス②と同程度の最大水位であるが、それ以上の雨量となると急激に最大水位は上昇する。一方、コンクリート型マス②やプラスチック型マス②では、最大水位は最大 10 分間雨量ともに概ね直線的に増加しており、ここで示していないマスでも類似した傾向が確認されている。コンクリート型マス①とプラスチック型マス①のように非線形的に水位が上昇する要因としては、降雨量が増加すると、マス周囲の土壌が一時的・局所的に飽和するためである。この飽和状態が生じるの

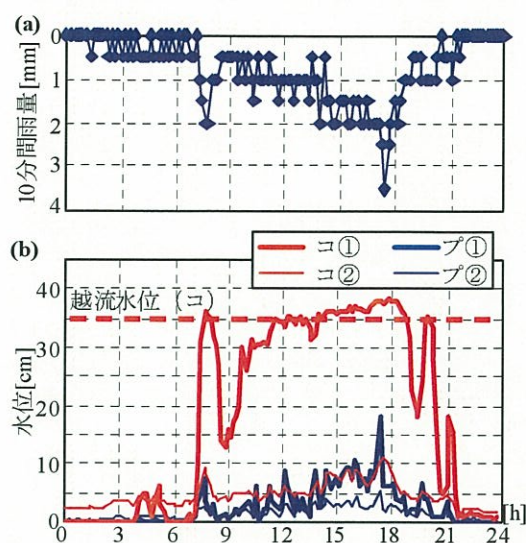


図-5 10 分間雨量(a)と浸透マス内の水位(b)の時間変化 (2007/10/27, 図中の「コ」と「プ」はそれぞれコンクリート型マス、プラスチック型マスを示す)

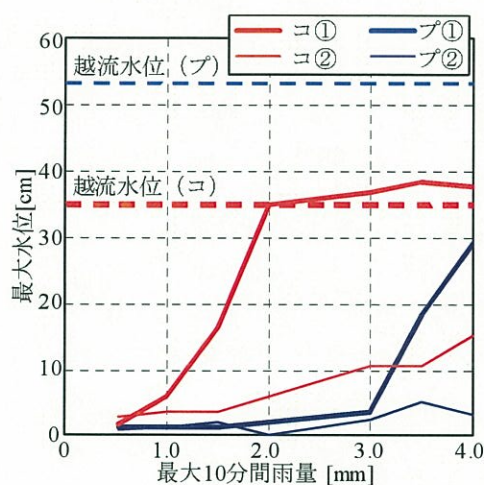


図-6 最大水位と最大 10 分間雨量の関係

はマスの立地条件に依存し、例えば敷地の塀際にマスが設置される場合や十分に締め固められて造成された宅地の場合には、マス周囲が局所的に飽和し易い状況となる。

また、図-6 より、コンクリート型マスの最大水位はプラスチック型よりも全般的に大きい。この傾向は他のマスの観測結果からも確認されている。このようにコンクリート型マスの浸透能が相対的に低いのは、マスの設置期間が長く、かつ、メンテナンスが全く行われていないこと、さらにプラスチック型マスは目詰まりしにくいためである。コンクリート型マス内には、場所によっては庭からの土砂やゴミ等が堆積していた。これよりマスの雨水浸透機能を維持するには、定期的なメンテナンスや庭からの土砂などの流入防止策を雨水浸透マスに施す必要がある。なお、浸透マスのタイプや設置位置により浸透能の差はあるが、11 基の浸透マスのうち越流水位を

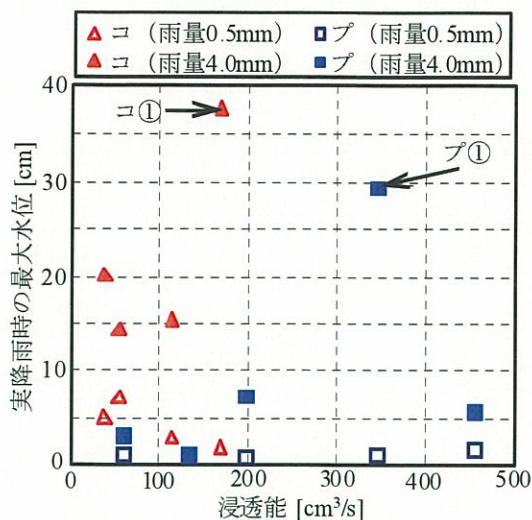


図-7 浸透能に関する晴天時試験結果（横軸）と実降雨時における最大水位（縦軸）の関係（全浸透マスを対象として、最大10分間雨量が0.5mmと40mmにおける最大水位を表示している）

超える水位が観測されたのはコンクリート型マス①のみである。他の10基のマスでは、流入雨水を全て地下に浸透させており、観測した降雨強度の範囲では、大部分のマスは雨水浸透機能を十分果たしていると言える。

実降雨時におけるマスの雨水浸透状況と晴天時の浸透能試験結果を比較したものを図-7に示す。ここでは、晴天時に浸透マス内に水を注ぎ、水位が基準面より10cmから5cmまで低下する時間を計測し、得られた水位低下速度にマスの断面積を掛けたものを浸透能とする。また図中には最大10分間雨量が0.5mmと4.0mmにおける最大水位の結果を表示している。最大10分間雨量が0.5mmの場合（同図中白抜き△、□）、一般的に晴天時の浸透能と共に最大水位は減少する右肩下がりとなり、晴天時の浸透能と実降雨時の水位データは定性的に対応する。一方、最大10分間雨量が4.0mmの場合には、右肩下がりの傾向はなく、データはばらつく。これには、図-6で示された降雨時の最大水位が大きいコンクリート型マス①やプラスチック型マス①の結果も目立つが、それ以外のデータの変化も大きい。これはマス周囲における土壌水分状況が晴天時と豪雨時で異なることに起因している。以上より、晴天時の浸透能データは、雨量が大きい実降雨時の状況とは異なる可能性が高いことが示唆された。

（3）雨水浸透対策の有無による表面流出・汚濁負荷特性の違い

上記のように良好な浸透能が確認された雨水浸透マスの設置効果を大局的に調べるために、雨水浸透対策を行っている湧水池流域と未対策の調整池流域における表面流出特性を比べた結果を図-8(a)に示す。図の横軸は各降雨イベントにおける総雨量、縦軸は流出高（=累積流量

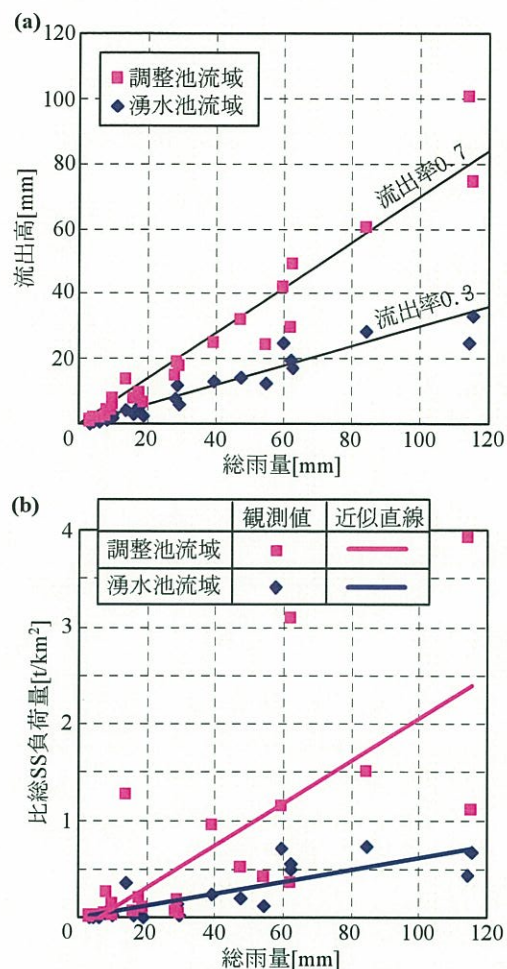


図-8 各降雨イベント時における総雨量と流出高 (a) 及び比総SS負荷量 (b) の比較

／流域面積）である。ここでは、両流域で同時観測が行われた2007年8月から2008年6月までの結果を表示している。これより、一般的に、湧水池流域の流出高の方が調整池流域よりも小さい。流出率（=流出高／総雨量）で見ると、調整池流域では流出率が0.7程度と一般的な市街地流域の結果と一致するが、湧水池流域の流出率は約0.3となる。この流出率の違いは、湧水池流域に設置された屋根用雨水浸透マスに加えて、国道296号沿いに浸透トレンチ等の各種浸透施設の設置効果が現れたものと考えられる。なお、これらの流出率の差の定量的検討については、今後行う予定である。

次に、雨水浸透対策の有無による流域からの汚濁負荷特性の差を見るために、上記と同じように、湧水池流域と調整池流域における総汚濁負荷量と総雨量を図-8(b)に表示する。ここでは、総汚濁負荷量として、降雨時に汚濁負荷の大部分を占める懸濁物質の指標となるSSを取り上げ、各降雨イベント時における比総SS負荷量（=総SS負荷量／流域面積）を示す。データのばらつきは大きいものの、一般的に調整池流域における比総SS負荷量の方が湧水池流域よりも大きく、表面流出特性と同じ傾向

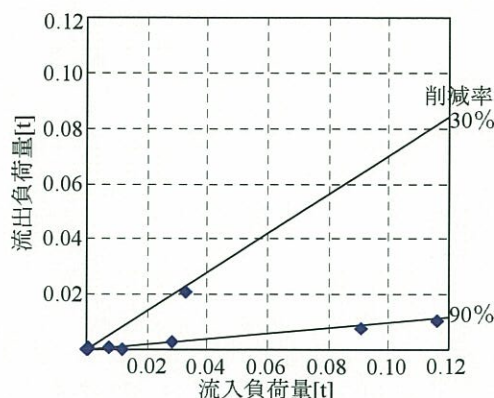


図-9 調整池における流入及び流出総SS負荷量の比較

である。近似直線で比べても、同様の結果が確認される。以上より、雨水浸透対策を促進している市街地流域では、未対策の流域よりも流出率が抑制されるのみならず、懸濁物質起源の汚濁負荷が大幅に削減され、雨水浸透マス等の浸透対策が印旛沼環境再生のための流域対策として有用であることが実証された。

(4) 雨水調整池における面源負荷削減効果

雨水調整池の面源負荷削減効果を調べるために、降雨時において雨水調整池に流入・流出する汚濁負荷量を比べる。前節と同様に、汚濁負荷量としてSS負荷量を降雨イベント毎に計算し、その流入口及び流出口における総SS負荷量の相関図を図-9に示す。ここでは、2007年8月～11月における10回の降雨イベントの結果を表示する。また、調整池による汚濁負荷の削減率（ $1 - \text{流出負荷量} / \text{流入負荷量}$ ）が30、90%に相当する線も図示する。これより、一つの降雨イベントを除いて、流入負荷量が流出負荷量を上回る。削減率としては、概ね30～90%の範囲に入り、上記期間中の全降雨イベントの総量で見ると、85%という高い値に達する。このように雨水調整池における土砂トラップ機能は極めて高く、これは、著者らが別途行っている調整池内の堆積負荷調査でも確認されている¹⁰⁾。降雨時には、汚濁物質は土砂と共に輸送されることから、雨水調整池により市街地から輸送される栄養塩や有機物も相当量がトラップされ、印旛沼流域の面源負荷削減に大きく寄与するものと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- 1) 湧水池流域では、大きな降雨時に地下水位が急上昇する「鋸歯型」の地下水位変化が確認され、高い浸透能を有していることが示唆された。
- 2) 実降雨時には雨水浸透マス内の最大水位は降雨強度と共に線形的に増加するマスと非線形的に急激に変化するマスが存在した。後者の要因としては、マス

周囲土壌が飽和状態となっているものと推察される。また、多くのマスでは、流入した屋根雨水は越流せずに地下に浸透していることが確認された。

- 3) 晴天時におけるマスの浸透試験結果は、豪雨時の雨水浸透状況とは異なる可能性が高い。
- 4) 雨水浸透対策を促進している市街地流域では、未対策流域よりも流出率が抑制されると共に、懸濁物質起源の汚濁負荷は大幅に削減され、雨水浸透マス等の浸透対策が流域対策として有用である。
- 5) 雨水調整池におけるSS負荷量の削減率は30～90%と高く、雨水調整池は市街地起源の面源負荷削減に大きく寄与するものと考えられる。

なお、ここでは一試験流域における結果を示したのみであるが、今後この成果を印旛沼流域全体に展開する必要がある。そのため、雨水浸透マスや雨水調整池の機能や面源負荷削減効果を幅広い条件下で調べる予定である。

謝辞：本研究は、千葉県による「印旛沼流域水循環健全化緊急行動計画」の「みためし行動」の一つである「市街地・雨水浸透系WG」の一部として行われている。本WGの座長である増田学園常務理事・堀田和弘先生をはじめとするWGのメンバーの方々には有益なご助言を頂いた。また、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、特に柴田秀爾氏、佐々木秀馬氏、正木登氏、川端佳憲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) 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。
- 2) 山田彦彦，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。
- 3) 山田淳：面源負荷一その現状と課題一，環境技術，Vol.29，No.7，pp.496-501，2000。
- 4) 和田彦彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版，pp.1-214，1990。
- 5) 国松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.1-266，1989。
- 6) 海老瀬潜一：汚濁物質の降雨時流出特性と流出負荷量，水質汚濁研究，Vol.8，No.8，pp.31-36，1985。
- 7) (社)日本水環境学会編：日本の水環境 3 関東・甲信越編，技報堂出版，pp.91-102，2000。
- 8) 日本地下水学会編：雨水浸透・地下水涵養，理工図書，pp.50-105，2001。
- 9) 東京地下水研究会編：水循環における地下水・湧水の保全，信山社サイテック，pp.1-245，2003。
- 10) 宮子雄太，二瓶泰雄，上原浩：雨水調整池による面源負荷削減効果に関する基礎的検討，土木学会年講演演習集，Vol.62，pp.101-102，2007。

(2008.9.30 受付)