

■雨水貯留浸透施設の水質改善機能

雨水調整池における市街地面源負荷削減効果

Function of storm-water reservoir on reduction of nonpoint pollutions from urban area

キーワード：雨水調整池、面源負荷、市街地、降雨時、印旛沼



二瓶 泰雄

Yasuo NIHEI
東京理科大学 理工学部
土木工学科 准教授

1. はじめに

高度成長期以降に生じた湖沼や内湾，河川における水質汚濁化の進行は一定の歯止めがかかっているものの、依然として富栄養化問題が解決されていない水域が多い。特に、湖沼や内湾の水質環境は近年横ばいで推移しており、琵琶湖等のように若干悪化している水域も報告されている¹⁾。この富栄養化現象は、様々な人為的活動に起因して、陸域で生成された栄養塩類などの富栄養化原因物質が大量に水域へ流入したために引き起こされている。

そのため、事業場の排水規制や下水道整備率の向上、下水処理の高度化により、生活排水や産業排水等の「点源負荷」は着実かつ大幅に削減されている。しかしながら、上述したように湖沼等の水質環境の顕著な改善は見られない。その要因の一つとしては、山林や農地、市街地等に面的に堆積する汚濁源である「面源負荷」が挙げられる。面源負荷は広く薄く不浸透面上に分布・集積するため、面源負荷動態は時間的・空間的变化が大きく、その実態は不明な点が多い^{2)~4)}。また、点源負荷と異なって、面源負荷起源の汚濁水を効率的に集めて処理・制御することは困難であり、面源負荷の有効な浄化・処理対策は存在しない。さらに、点源負荷の減少により、この面源負荷が汚濁負荷全体に占める割合は増加しており、実態解明が進まず削減対策が不十分な面源負荷に近年大きな関心が集まっている⁵⁾。

この面源負荷削減策として、治水用に建設されている雨水流出抑制施設の一つである雨水（防災）調整池が挙げられる。雨水調整池は、宅地開発されたエリアの流末地点に建設され、宅地から直接流出した雨水を一時的に貯留するものである。この調整池内では、水とともに一緒に運ばれてきた汚濁物質も一時的に滞留し、その間に汚濁物質中の懸濁物の一部は沈降・堆積する。そのため、雨水調整池は、一種の沈砂池として、汚濁負荷削減効果を有するものと期

待されるが、そのような観点による研究事例は十分多くない。また、雨水調整池は面源負荷対策を意図して設計されていないので、調整池内の流入口と流出口の配置が一直線上に位置するなど負荷対策面から望ましくないものも散見される。そのため、調整池内における滞留時間を増加させる簡便な工夫を施すことで負荷削減効果をより向上させることが可能になるものと期待できる。

筆者は、富栄養化問題を長年抱える千葉県・印旛沼流域を対象として、雨水調整池の面源負荷削減機能やその機能向上策に関する現地観測や現地実証実験を行っている。印旛沼は、図-1に示すように、流域全体の排出負荷は減少しているものの、面源負荷の総和は増加しており、特に、市街地起源の負荷が顕著である⁶⁾。この印旛沼流域において、多数の調整池における堆砂量調査や代表的な調整池（千葉県佐倉市・加賀清水調整池）における流入・流出負荷調査により、雨水調整池による土砂・栄養塩トラップ量や流域全体の汚濁負荷に対する調整池の負荷削減量の寄与を算定している。また、簡易流路を

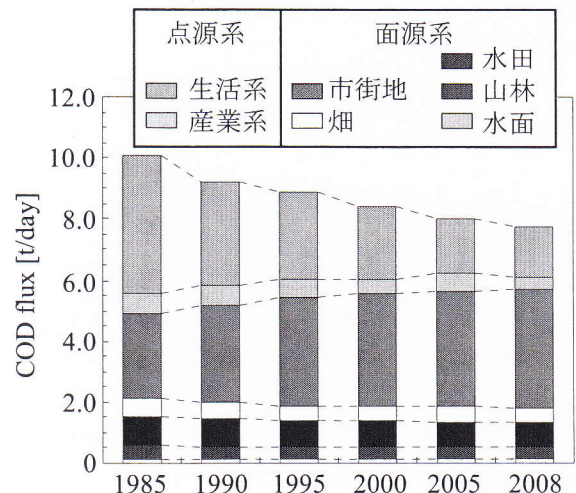


図-1 印旛沼流域における COD 排出汚濁負荷の変遷⁶⁾

設けて懸濁物質の滞留時間を長くする、という簡便な改良を施して、負荷削減効果の現地実証実験を同じ加賀清水調整池で行っている。本報では、それらの成果の一部を紹介する。なお、本報における成果の大部分は、千葉県が行う印旛沼・流域環境再生のための「印旛沼流域水循環健全化計画」の一部として行われている。

2. 雨水調整池の面源負荷削減機能

(1) 印旛沼流域及び雨水調整池設置状況

千葉県印旛沼は水表面積 11.6km²、平均水深 1.7m であり、極めて浅い湖沼である。印旛沼流域(図-2)の面積と人口はそれぞれ 541 km² と 72 万人であり、湖沼の水容積に対する人口は琵琶湖や霞ヶ浦よりも大きい。流域内の土地利用特性としては近年では市街化が進行し、最近では市街地の割合は 35% まで達している⁶⁾。印旛沼における年平均 COD は 8~10mg/l であり、水道水源として水質汚濁度ワースト上位である。この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^{6), 7)}

また、市街化が進行した印旛沼流域には、図-2 に示すように、合計 328 の雨水調整池が存在している。その調整池が抱える流域面積の合計は全体の約 10% に相当している。雨水調整池の大きさは、各調整地の流域面積等により大きく異なり、底面積は 100m² オーダーから 100000m² オーダーと非常に幅広く変化している。

(2) 現地観測方法

雨水調整池における現状の面源負荷削減機能を把握するために、①多数の調整池における堆砂量調査と、②加賀清水調整池における集中堆砂調査や流入・流出負荷調査を行った。まず、①の調査では、調整池底面の堆砂量やその底質の粒径分布や N・P 含有量を計測し、調整池における土砂・栄養塩トラップ機能を求める。堆砂量を計測する際には、長方形の木枠(38cm×30cm)を底面に置いて、木枠内の土砂を採取する。そのサンプルより乾燥質量を測定し、それを木枠面積で除すことにより、単位面積当たりの堆砂量や調整池全体の総堆砂量を算出する。各調整地における観測点数は 10 地点とする。また、採取された底質サンプルについて、レーザー一回折式粒度分析測定装置(SALD-3100、株島津

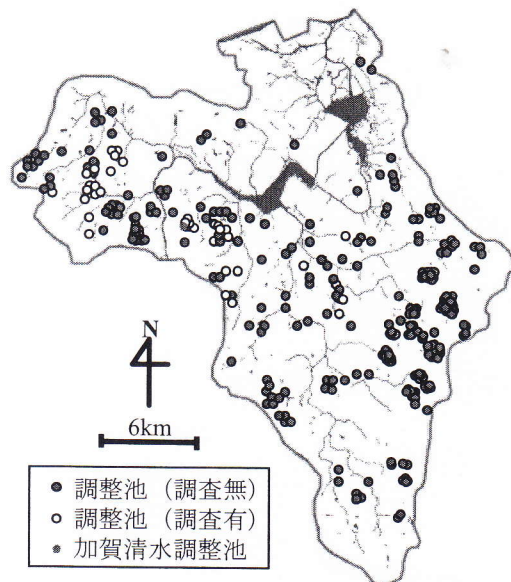


図-2 印旛沼流域における雨水調整池マップ

製作所) やオートアナライザー (swAAt、BLTEC 株製) により、それぞれ土砂粒径や底質中の N・P 含有量を分析した。観測サイトとして、図-2 に示すように、35 箇所の調整池(佐倉市: 14 箇所、八千代市: 11 箇所、船橋市: 11 箇所)とする。この観測を 2006~2008 年にかけて順次行った。

①の調査とほぼ並行して、加賀清水調整池(図-2 中の赤丸)において、約 100 地点における集中的な堆砂量調査や流入・流出口における SS 負荷量の連続観測を行った。加賀清水調整池の貯留量は 4894m³、底面積は 1851m²、集水面積は 2.94ha である。堆砂調査に関する方法や分析は①の調査と同じであり、2006 年 12 月 14 日にこの調査が行われた。また、負荷量調査では、調整池の流入口及び流出口において、水位(流量)と濁度の連続観測を行っている。用いる測定器は、小型水位計(Diver、Eijkelkamp 社製もしくは U20 Water Level Logger、Onset 社製)と自記式濁度計(Compact-CLW、JFE アレック株製)である。別途、濁度と SS の相関関係を求め、流入・流出口の SS 負荷量を求め、その差から調整池内での懸濁物質トラップ効果を算定する。観測期間は 2007 年 8 月から 2007 年 12 月までである。

(3) 結果と考察

雨水調整池における面源負荷削減効果を調べるために、各調整地における底面積 A_f と堆砂速度の相関図を図-3 に示す。ここで、堆砂速度 D_S は、全堆砂量を設置年数で除したものである。

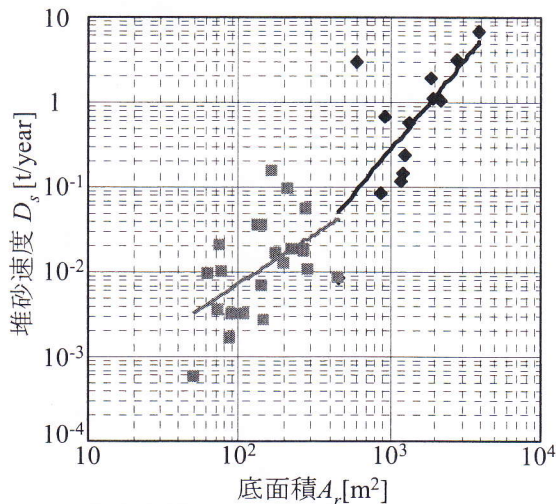


図-3 各調整地における底面積 A_r と堆砂速度 D_s (底面積 500m^2 を境に色分けして表示)

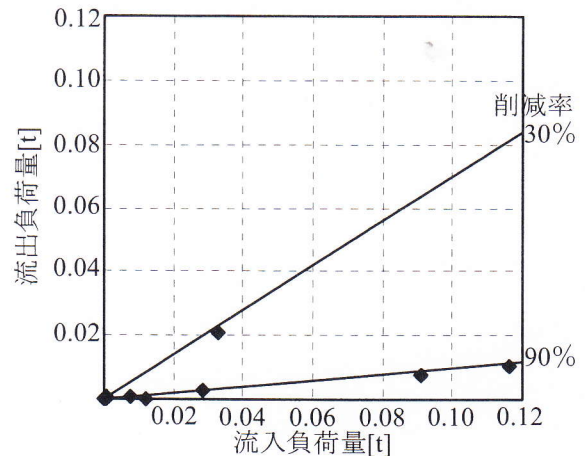


図-5 降雨イベント時における流入及び流出総 SS 負荷量の比較 (加賀清水調整池)

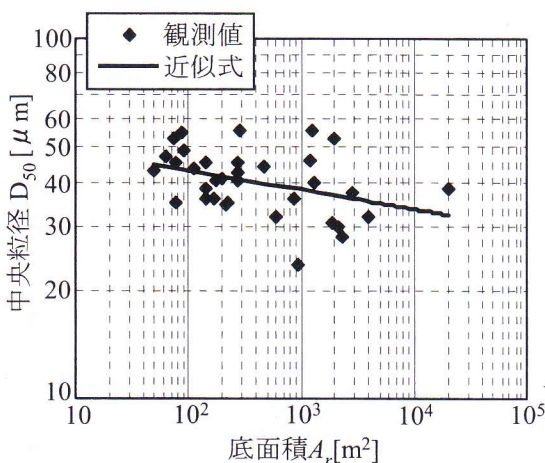


図-4 各調整地における底面積 A_r と中央粒径 D_{50}

これより、当然のことながら、底面積 A_r が増加するにつれて調整池全体の堆砂速度は増加しており、その増加率は底面積 A_r とともに大きくなっている。そこで、底面積 A_r が 500m^2 以下とそれ以上に分けると、底面積と堆砂速度の間に得られる近似式は以下ようになる。

$$A_r < 500\text{m}^2, \quad D_s = 3.63 \cdot 10^{-5} A_r^{1.15} \quad (1a)$$

$$A_r > 500\text{m}^2, \quad D_s = 1.05 \cdot 10^{-7} A_r^{2.14} \quad (1b)$$

ここで、堆砂速度 D_s と底面積 A_r の単位は、それぞれ t/year 、 m^2 である。上式のべき指数は 1.15 と 2.14 と 1 よりも大きく、底面積が大きいほど単位面積当たりの堆砂速度が大きく、調整池内では土砂がより多く堆積していることが示唆された。また、調査を行っていない調整池においても、底面積データと式 (1) より、調整池の堆砂速度を推定し得ることとなる。調整池内の底質の一例として、調整池における堆積土砂の中央粒径 D_{50} と底面積 A_r の相関図を図-4 に示す。

表-1 N・P 堆積速度に関する近似式中の係数 a , b

		T-N	T-P
$A_r < 500\text{m}^2$	a	$4.33 \cdot 10^{-7}$	$7.48 \cdot 10^{-8}$
	b	0.95	1.09
$A_r > 500\text{m}^2$	a	$2.42 \cdot 10^{-10}$	$6.99 \cdot 10^{-10}$
	b	2.12	1.86

これより、調整池内の底質粒径は概ね $20 \sim 60 \mu\text{m}$ であり、調整池内において市街地から流入した微細土砂がトラップされていることが分かる。また、底面積が大きくなるにつれて、中央粒径 D_{50} は減少している傾向が見られる。これより、底面積が大きい調整池ほど、滞留時間が増加するため、沈降速度が小さい微細土砂もトラップされていることが示唆された。

調整池内における土砂トラップ状況をより詳細に検討するために、加賀清水調整池における降雨時の流入・流出 SS 負荷量の相関図を図-5 に示す。ここでは、流入口と流出口の SS 負荷量を降雨イベント毎に計算し、各々の地点における総 SS 負荷量を表示している。なお、計 10 回の降雨イベントの結果を対象とする。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いことが示された。

図-3 に示す堆砂速度と同様に、観測値から N・P 堆積速度 D_N, D_P を算出し、底面積 A_r との相

関式を算出したところ、表-1 に示される係数 a 、 b が得られた。

$$D_N = aAr^b$$

ここでも、式 (1) と同じ単位が使用されている。これより、N・P 堆積速度は、堆砂速度と同様に、底面積と共に大きくなっており、大きな底面積を持つ調整池ほど、栄養塩トラップ機能が向上していることが分かる。この係数と印旛沼流域における全調整池の底面積データから、全調整池による N・P 負荷削減量を算出した結果を表-2 に示す。ここでは、比較のために、原単位法に基づく流域全体の面源負荷⁹⁾ 及び調整池による N・P 負荷削減率 (=N・P 負荷削減量/流域全体の面源負荷) も表示している。これより、全調整池による負荷削減率は、T-N については 3.4%、T-P については 11.3% となっている。全調整池がカバーする流域面積は全体の 10% であることを考慮すると、雨水調整池は市街地起源の T-N や T-P の相当量をトラップしており、雨水調整池は市街地の面源負荷削減に大きく寄与しているものと考えられる。

表-2 印旛沼流域の全調整池における N・P 負荷削減量及び流域全体の面源負荷との比較 (単位: t/year)

	全調整池の 負荷削減量A	流域全体の 面源負荷B	A/B [%]
T-N	26.7	783.1	3.4
T-P	4.7	42.1	11.3

3. 面源負荷削減機能向上のための改良

(1) 改良案と調査内容

前章で示したように、雨水調整池には、現状でも有効な面源負荷削減機能が備わっているが、その効果は相対的に底面積が小さい調整池では低いことが示された。そこで、雨水調整池の面源負荷削減機能をより向上させるために、調整池内に簡易流路を設けて滞留時間を増加させる、という改良を行い、その現地実証実験を試みている。研究対象としている加賀清水調整池は、流入口と流出口が一直線上に位置し、流入した汚濁物質はそのまま流出口に到達するため、汚濁物質の滞留時間の面では望ましくない。そこで図-6 に示すように、調整池の中央部に遮水シートで囲まれたかごマット (幅 1m) を設け、流入口付近ではコの字状に、その他のエリアでは流路が蛇行するようにかごマットを配置した (施工日: 2008 年 5 月末)。かごマットの高さは調整池の死水容量に相当する 0.30m である。これにより、高負荷となるファーストフラッシュの汚濁物質をより長く滞留させ、大きく負荷を削減できるものと考えられる。

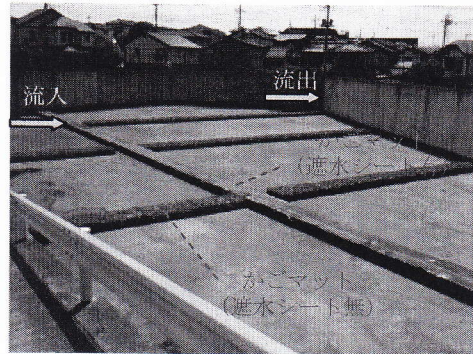
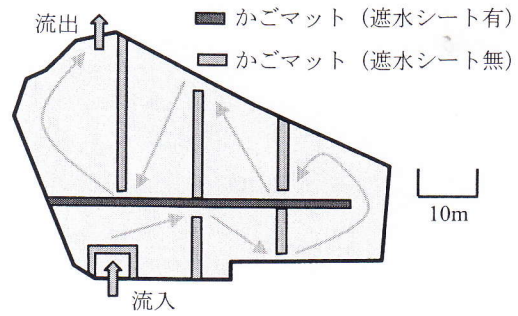


図-6 加賀清水調整池における形状と改良案 (上) と改良後の写真 (下)

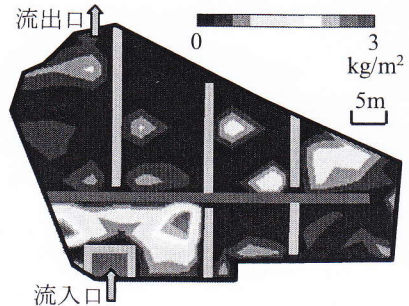


図-7 調整池内における堆砂コンター図

表-3 改良前後の負荷削減効果の比較

	改良前	改良後	
		流入口	全体
供用期間[year]	6.25	0.58	
堆砂速度[t/year]	1.24	0.68	2.40
窒素堆積速度[kg/year]	1.67	0.76	5.13
リン堆積速度[kg/year]	1.01	0.43	2.09

観測として、前章と同じ堆砂量調査を行った。ここでは、改良から約 6 ヶ月後 (2008/12/12) において、80 の調査点数を設定して行われた。

(2) 結果と考察

改良案による土砂堆積効果を調べるために、単位面積当たりの堆砂量の空間コンターを図-7 に示す。ここでは図化の関係上 3kg/m² を上限としている。調整池内の大部分ではうっすらと土砂が堆積しているが、流入口付近では土砂が集

中の堆積しており、そこでの堆砂量は 27 kg/m^2 であり突出している。流入口エリア（面積：全体の 1.4%）だけで、堆砂量は 0.39t であり、これは全体（=1.39t）の約 30% に相当し、流入口のコの字型のかごマットのみで非常に大きな負荷削減効果が表れている。また、このコ字型のかごマット周辺のブロックで大きな堆砂量が見られるとともに、大局的には流出口に近づくとつれて堆砂量は減少している。

改良案が雨水調整池の負荷削減効果をどの程度向上させたかを定量的に評価するために、改良前後における堆砂速度（=総堆砂量/供用期間）と窒素・リン堆積速度（窒素（リン）堆積量/供用期間）を表-3 に示す。ここで、改良後に関しては、全体及び流入口付近（コ字型の内側）の結果を表示する。改良後の堆砂速度としては、全体では 2.4 t/year 、流入口のみで 0.68 t/year となり、それぞれ改良前の 1.93 倍、0.55 倍という大きな値となっている。また、窒素堆積速度に関しても、全体と流入口では改良前の 3.07 倍、0.46 倍、リン堆積速度についても、それぞれ 2.07 倍、0.42 倍となっている。このようなかごマットを用いた簡易流路の設置により土砂・栄養塩の削減効果は大幅に向上したことが明らかとなった。

4. おわりに

本報では、雨水調整池における市街地起源の面源負荷削減機能について、印旛沼流域における現地調査結果を例として紹介した。ここで示したように、現状の雨水調整池においても、十分有効な面源負荷削減機能を有していること、さらに、簡易流路を用いた改良により負荷削減機能は大幅に向上することが示された。今後は、面源負荷削減機能を十分発揮する調整池デザインや維持管理方策、コスト面を考慮した簡易改良法の提起などが必要であり、現在検討中である。

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、事務局である千葉県やパシフィックコンサルタンツ株の皆様には有益なご助言を頂くと共に現地調査遂行に大変ご助力いただいた。また、現地観測や分析に対して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏、特に宮子雄太氏、坂井純氏、佐藤和博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) 山田淳：面源負荷 — その現状と課題 —, 環境技術, Vol. 29, No. 7, pp. 496-501, 2000.
- 2) 国松孝男, 村岡浩爾, 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp. 1-267, 1989.
- 3) 和田安彦, ノンポイント汚染源のモデル解析, 技報堂出版, pp. 1-214, 1990.
- 4) 武田育郎, 水と水質環境の基礎知識, オーム社, pp. 75-166, 2001.
- 5) 古米弘明, 都市域の雨天時汚濁負荷流出解析の現状と課題, 水環境学会誌, Vol. 25, No. 9, pp. 524-528, 2002.
- 6) 千葉県：印旛沼流域水循環健全化計画会議 第 17 回委員会資料, 2010.
- 7) 山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機：印旛沼・手賀沼 — 水環境への提言 —, 古今書院, pp. 1-167, 1993.