

◆ 特集：閉鎖性水域の環境保全 ◆

湖沼の面源負荷対策としての湖内湖の効果

中村圭吾* 天野邦彦**

1. はじめに

湖沼の水質対策は、下水道整備、流域対策、底泥浚渫などの対策事業のほか、湖沼水質保全特別措置法（湖沼法）などの法整備により進められてきた。それにもかかわらず環境基準の達成率は平成17年度現在53.4%と河川（87.2%）や海域（76.0%）など他の水域に比べて著しく低い水準にある¹⁾。そこで湖沼の水質対策を強化するために平成17年には湖沼法の改正が実施されている。

湖沼においては、事業所や家庭からの点源負荷のほか、農地や市街地からの面源負荷が水質汚濁の大きな原因となっているが、面源負荷はコントロールが難しく、その対応はあまり進んでいない。そこで改正された湖沼法においても、面源負荷対策として「流出水対策地区」を指定する制度が新設されている。さらに平成18年3月に、国土交通省・農林水産省・林野庁・環境省が連携して「湖沼水質のための流域対策の基本的考え方」²⁾をとりまとめるなど面源対策に向けた機運は高まっている。

しかしながら、面源負荷に対しては有効な事業メニューが少ないという問題点がある。そこで（独）土木研究所と霞ヶ浦河川事務所（国土交通省関東地方整備局）では面源負荷対策のひとつとして、湖内湖浄化法という新しい流入河川負荷対策を提案し、その技術開発を実施した。

本稿では、茨城県霞ヶ浦に建設された4つの湖内湖浄化施設の汚濁削減効果及び生態的機能を評価し、その効果を比較することにより、設計条件などを検討する。

2. 湖内湖について

湖内湖浄化法とは、湖沼などに流入する河川の河口に仕切り堤などを用いて人工的に設置された小さな水域（湖内湖）を使用して汚濁削減を図る

浄化手法をいう³⁾。琵琶湖の周辺には、「内湖」と呼ばれる小さな水域が多くあるが、その内湖が有する浄化機能を人工的に模した技術で「湖内」に設置するので「湖内湖」と名づけた⁴⁾。平成10年に霞ヶ浦河川事務所によって霞ヶ浦（茨城県）の川尻川河口に設置されたのが最初の事例である（写真-1）。主な負荷削減の機構は沈殿・堆積、分解・脱窒等で、数年に一回、湖内湖に堆積した泥土の浚渫を前提としている。

湖内湖の長所としては、①提内地の土地確保が不要、②流入水量・水質の変動が大きい河川に対応可、③生物生息場として機能する⁵⁾、の3つがある。一方、短所としては①河口環境を変化させる、②汚濁削減効果の把握が困難、③堆積土の定期的浚渫が必要、の3つが考えられる。

（独）土木研究所では川尻川の湖内湖を中心に、その後、新たに霞ヶ浦に建設された梶無川、園部川、大円寺川（北浦）の湖内湖を対象として霞ヶ浦河川事務所と協力しながら汚濁削減効果や生態系調査を実施した。霞ヶ浦の湖内湖浄化施設は、平成10年に建設された川尻川の湖内湖で一定の汚濁負荷削減効果が確認され⁴⁾、その後、平成12年に梶無川、平成14年に園部川、大円寺川に設置された。各施設の概要を表-1に、施設の位置を図-1に示す。施設の大きさは大円寺川が最小で33,400m²、園部

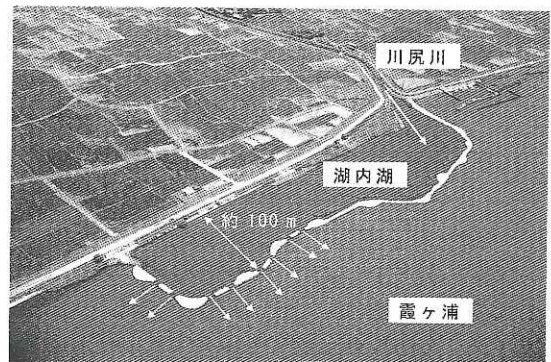


写真-1 湖内湖浄化施設（霞ヶ浦川尻川河口）

Performance of Lacustrine "Artificial Lagoon" for the Control of Diffuse Pollution

表-1 各施設の概要

	川尻川	園部川	大円寺川	梶無川
建設年	H10年	H14年	H14年	H12年
施設面積(m ²)	34,100	329,300	33,400	77,000
流域面積(m ²)	9,020,000	79,300,000	6,800,000	30,700,000
施設/流域(%)	0.38	0.42	0.49	0.25
沈殿ピット(m ³)	10,800	91,800	9,500	(設定なし)
施設容量(m ³)	21,600	175,400	67,000	160,000
平均水深(m)	0.8	0.5	0.7	1.6
(容量÷面積)				



図-1 各施設の位置

川が最大で329,300m²である。対象流量も4.4～51m³/sと施設によって大きな開きがある。

3. 汚濁削減効果の検討

3.1 検討方法

各年度の調査状況は表-2のとおりで、川尻川については平成11年～17年（ただし、平成16、17年のデータは上流の工事の影響などで異常値を示したので解析から除外した）の調査結果であるがその他の結果については2～3年間の短期調査結果である。

3.1.1 流入負荷量

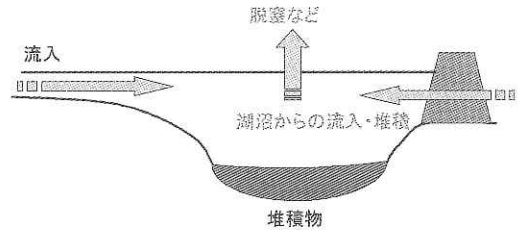
流入負荷量の算定方法について以下に簡単に記す。浄化施設の流入水量は、水位自動観測の結果及び平時（ほぼ観測期間の各月）、出水時（年数回程度）の流量観測より、各年について水位-流量式（H-Q式）を算定し求めた。

水質観測は、調査年と調査箇所により多少異なるが、原則として平時調査は観測期間中、月1回

表-2 各施設の調査内容・時期（年度）の一覧

河川名	調査項目	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17
川尻川	河川水位	●	●	●		●	○	○
	河川水質	●	●	●		●	○	○
	堆積量	●	●	●	●	●	○	○
	湖内湖水質	●	●	●		●	○	○
園部川・大円寺川	湖内湖底質	●	●	●	●	●	○	○
	河川水位					●	●	●
	河川水質					●	●	●
	堆積量				●	●	●	●
梶無川	湖内湖水質					●	●	●
	湖内湖底質					●	●	●
	河川水位					●		●
	河川水質					●		●
	堆積量					●		●
	湖内湖水質					●		●
	湖内湖底質					●		●

H16、17の○は解析していない



$$\text{除去率 (\%)} = \frac{\text{堆積物}}{\text{流入}} \times 100$$

図-2 除去率の考え方

の頻度で実施した。また年数回の出水時調査では、原則1時間ごとに採水したものを、1出水に対し10検体ほど分析し、出水時の負荷量をできるだけ詳細に評価できるようにした。このように求めた平時と出水時の流量と水質の結果から流量-負荷量の関係（以下L-Q式）を求め、水位の連続観測結果から算出した流量より流入負荷量を求めた。

3.1.2 堆積負荷量・除去率

湖内湖の流入負荷量については、連続水位測定、出水時調査などが必要ではあるが河川の水質・流量を測定することにより定量的に把握できる。しかし、流出負荷量については、流出口が複数有り（写真-1参照）、しかも平時は、湖沼から湖内湖への逆流もあるため一年を通じた流量、水質の定量的把握は現実的には困難である。そこで、ここでは一定期間内に湖内湖に新たに堆積した底泥を堆積負荷量として流入負荷量との比で除去率を求めた（図-2）。堆積量を把握するために各年11月頃に湖内湖底面の詳細な測量を実施し、その底面高の変化から、一年間で新たに堆積した堆積量を求め、含水比、堆積物に含まれる窒素やリンなど

表-3 各河川の平均流量、平均負荷量、平均水質

	①平均流量 (m ³ /s)	②負荷量 (g/s)				③水質 (mg/l)			
		SS	COD	T-N	T-P	SS	COD	T-N	T-P
川尻川	0.237	21.7	3.48	0.69	0.134	91	14.7	2.91	0.565
園部川	2.246	45.1	13.08	14.01	0.495	20	5.8	6.23	0.220
大円寺川	0.102	1.6	0.56	0.29	0.015	15	5.5	2.88	0.149
梶無川	0.916	37.1	9.66	4.75	0.200	41	10.5	5.18	0.219

表-4 各施設の流入負荷量、堆積負荷量、除去率

	川尻川	園部川	大円寺川	梶無川
流入負荷量 (t/年)	684	1422	49.5	1173
堆積負荷量 (t/年)	577	3867	426	574
除去率 (%)	84	※(272)	(861)	49
流入負荷量 (t/年)	110	412	17.7	305
堆積負荷量 (t/年)	13.2	114	7.7	24.9
除去率 (%)	12	(28)	(44)	8.2
流入負荷量 (t/年)	21.8	441	9.15	150
堆積負荷量 (t/年)	1.9	10	0.58	1.38
除去率 (%)	8.7	(2.3)	(6.3)	0.9
流入負荷量 (t/年)	4.23	15.6	0.47	6.34
堆積負荷量 (t/年)	1.07	5.1	0.26	0.57
除去率 (%)	25	(33)	(55)	9
流入負荷量 (t/年)	3.19	10.9	0.35	5.05
堆積負荷量 (t/年)	1.07	5.1	0.26	0.57
除去率 (%)	34	(47)	(74)	11

対象データ期間 (年度) H12~H15 H15~H17 H15~H17 H15、H17

※SS除去率が100%以上のものは括弧をつけた

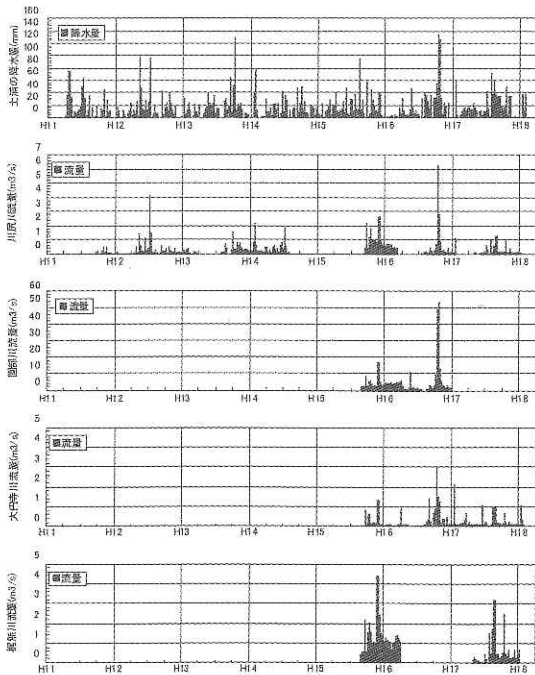
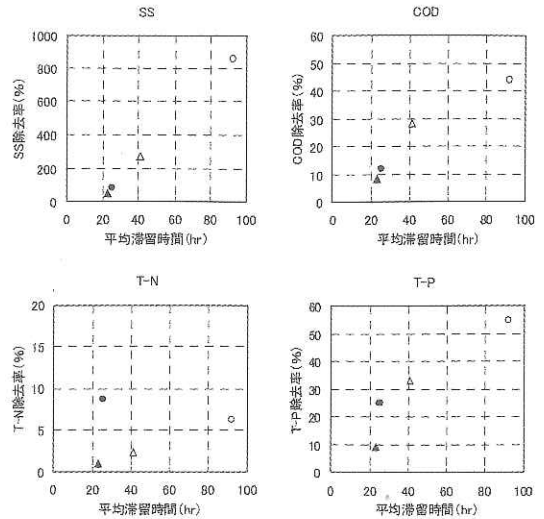


図-3 土浦市における降水量と各河川の流量



○大円寺川、△園部川、●川尻川、▲梶無川 (以下同様)

図-4 平均滞留時間 (hr) と除去率 (%)

の含有比率から各成分の堆積量を求めた⁴⁾。

図-2に示すように、脱窒などによって除去された分については考慮していない。また、堆積物には、河川からではなく、湖沼から湖内湖に流入している負荷もあるが、堆積負荷量として計算した。

3.2 湖内湖浄化施設の比較

3.2.1 流入負荷量

霞ヶ浦沿岸の土浦市における降水量及び各湖内湖浄化施設に流入する河川水量を図-3に示す。川尻川においては、平成11年から、園部川、大円寺川においては平成15年~17年、梶無川においては平成15年と17年のデータである。流量が0となっている期間は未観測である。

各河川の平時と出水時の流量、水質調査からL-Q式を求めた。表-3に各河川平均の流量、L-Q式より求めた負荷量、水質を示す。水質をみるとCOD、T-Pでは、川尻川の濃度が高く、T-Nに関しては、園部川、梶無川の濃度が高かった。

3.2.2 堆積負荷量及び除去率

堆積負荷量を流入負荷量で除した百分率を除去率とし表-4のように求めた。この結果、CODの除去率は8.2~44%、T-Nの除去率は0.9~8.7%、T-Pの除去率は9~55%となった。SSのみみると、園部川、大円寺川の除去率は100%以上となっている。これは、出水のピーク時に最大となるSS成分について流入負荷量を過小評価してしまったことが主要因と考えられる。加えて、湖沼から湖

内湖浄化施設に流入した負荷の影響も考えられる。また流域面積の小さい川尻川、大円寺川で除去率が大きく、面積の大きい梶無川、園部川では除去率が小さい傾向があった。

3.2.3 除去率を決める要因

湖内湖同様、自然の浄化機能を活用した湿地浄化法（植生浄化法）の場合、除去率は滞留時間や流入水量を施設面積で割った水面積負荷の関数であると言われている。また、Carletonら⁶⁾の研究によると、面源負荷対策として米国などで多数実施されている雨水処理湿地（stormwater treatment wetland）も長期的には湿地浄化法同様の関係があるとしている。湖内湖浄化法は施設の目的、規模からすると雨水処理湿地施設に似ており、同様の傾向があると考えられる。そこで、これらの指標を用いて湖内湖浄化の効果を検討した。

図-4は湖内湖浄化施設における平均滞留時間と除去率の関係である。実際の滞留時間は河川流量による変動が大きいが、平均値で整理するとSS、COD、T-Pの除去率は滞留時間に比例して大きくなっていることが分かる。T-Nに関しては川尻川のみ高い値となっているがその他の3点はほぼ比例関係にある。

つぎに、年間流入量を施設面積で除した水面積負荷と除去率の関係を図-5に示す。窒素においてはややばらつきがあるもののSS、COD、T-Pについては水面積負荷の増大に従い指数関数的に除去率が減少していることが読み取れる。

さらに年間負荷量を施設面積で除した負荷速度と除去率の関係を図-6に示す。図に示すように除去率は負荷速度の指数関数として比較的相関よく表現できる。

除去率との関係を比較した3つの指標の中では、理論的には、図-6に示す負荷速度が、除去率を大きく規定すると思われるが、今回比較した4つの湖内湖においては水質濃度を無視した水面積負荷と除去率の関係（図-5）も比較的良好なものであった。濃度や特性の異なるほかの湖沼において、これらの関係を使用する場合は図-6を負荷速度と除去率の関係を参考に設計するのが良いと考えられる。しかしながら、雨水調査を含む流入負荷量調査は、労力・調査費用が大きくなるので簡易には水面積負荷を用いた図-5の関係で概略設計するという手法もあるであろう。また、水質

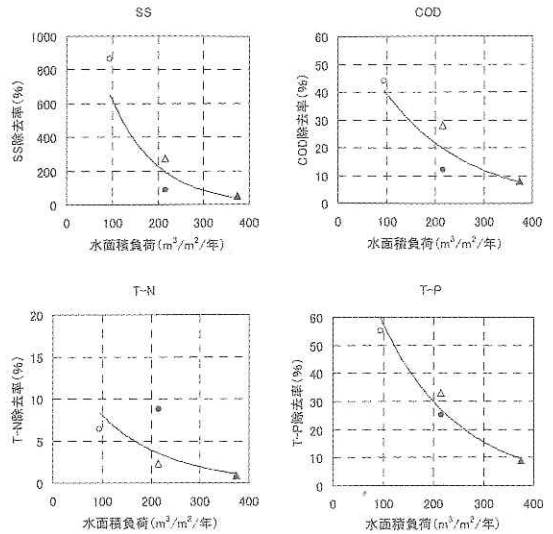


図-5 水面積負荷 (m³/m²/年) と除去率 (%)

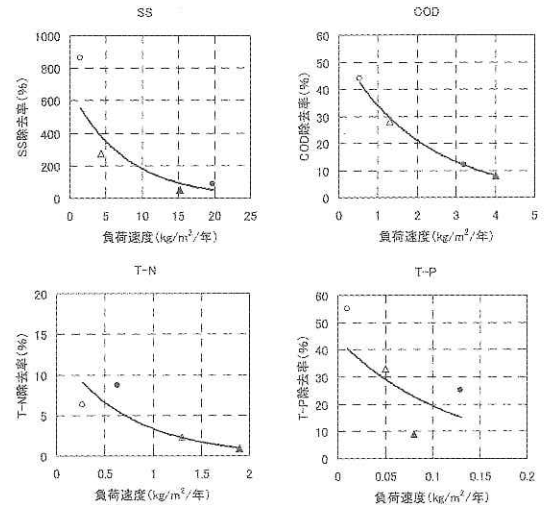


図-6 負荷速度 (kg/m²/年) と除去率 (%)

濃度を無視した水面積負荷である程度効果が表現できるということは、湖内湖浄化の浄化メカニズムとして物理的沈降が大きいことがわかる。これは、湿地浄化法に関しても同様であると考えられる。

4. 生態的効果について

4.1 概要

湖内湖浄化法は面源からの負荷削減機能とともに湖岸域における生態機能も期待されている。そこで、川尻川の湖内湖において実施した植物、魚類、底生動物、鳥類に関する調査結果の全体概要を以下に記す。

生物調査の結果を見ると、全体的に湖内湖浄化

施設内は粘土・シルトが堆積し、生物生息空間としては必ずしも良好ではなかった。ただし、鳥類については、沿岸の貴重な静穏域として、カモ類、オオバンを中心によく利用されていた。植物については静かな浅瀬を作ること沈水植物の再生を期待していたが、沈水植物は観察されなかった。ただし、波浪を抑制することによる抽水植物群落の保全効果はあったと考えられる。全体として、建設当初に生物量が減少した後、徐々に生物量が回復してきている。ただし、粘土・シルトの底質を好む底生生物、あるいは止水域に生息する魚類相に変化している。以下に各生物量調査の結果概要を述べる。

4.2 植物

川尻川において建設前の平成9年10月 (H9.10) に1回、その後H11.9、H13.8、H17.9にそれぞれ1回の調査を実施した。調査は、湖岸と湖内湖の堤体で囲まれる範囲の植物種を確認した。川尻川では、確認種数がH9~11の間に93種から42種に減少したものの、その後増加し、H17の調査では184種が確認された。湖内湖の植物相を特徴づけ、水環境の変化の影響を受けやすいと考えられる水生植物の推移を表-5に示す。水生植物については、湖内湖建設後、減少傾向であったが、H17には増加に転じ、13種が確認された。しかしなが

表-5 水生植物確認種数の経年変化

科名	種名	H9	H11	H13	H17
アカウキクサ	オオアカウキクサ				●
	マツモ	●			
	オモダカ	●	●		
	トチカガミ	●			
	ミズアオイ	●			
	アヤメ				●
	ツユクサ				●
	イネ	●			
	キシウスズメノヒエ				●
	ヨシ	●	●	●	●
	マコモ	●	●	●	●
サトイモ	ショウブ	●			●
	ボタンウキクサ	●		●	
ウキクサ	アオウキクサ	●			●
	コウキクサ	●	●		
	ウキクサ	●	●		●
ガマ	ヒメガマ		●	●	●
	ガマ		●		●
カヤツリグサ	フトイ		●	●	●
	ウキヤガラ		●		●
合計		7科12種	5科9種	4科5種	8科13種

ら、内訳をみるとオオアカウキクサ、イボクサなど水田にみられる種が増加しており、湖内湖の止水的環境を反映した結果といえる。沈水植物のマツモ、浮葉植物のトチカガミなどは確認されなくなっており、湖底の泥質化が沈水植物や浮葉植物にとって好ましくないことが原因と考えられる。ヨシなどの抽水植物は、湖内湖堤体の消波効果により保全されている。また、湖内湖の石積み堤体上にも、ゴキヅルやヤナギタデなどの一年草が確認されている。さらに堤体上には、植栽した可能性があるが、ヤナギ類も生長している。

4.3 魚類

H9の事前調査およびH11、12、13、17の5回の調査が実施されている。調査用具、調査箇所などは時期によって異なる。通常、タモ網(ときに投網)に加え定置網あるいは刺網を用いた調査であるが、事前のH9は、サデ網やはえ縄など、より多種類の漁具を使用した。調査は、夏期から秋期が多く、H11、H13は冬期の調査も実施している。調査地点は湖内湖の内外あるいは流入河川の川尻川で実施した。

H13までの調査で確認された魚類は、浄化施設内外及び河川を合わせると、タイリクバラタナゴ、モツゴ、ブルーギル等の6目10科30種であった。浄化施設内の結果のみを比較するとボラやハゼ科魚類の出現が少なくなっている。ブルーギルは湖内湖建設後、一時ほとんどみられなくなったが、H13調査では再び多く観察された。タイリクバラタナゴ、フナ類、モツゴといった止水域を好む種が、H13調査では多くみられた。河川では種数、個体数共に経時的に増加傾向が見られ、浄化施設内も建設直後と比較すると増加の傾向が表れている。H17は魚類5目10科25種、貝類3目3科3種が確認された。このうち、浄化施設内で23種の魚類が確認され、モツゴやタイリクバラタナゴの確認個体数が多かった。浄化施設外では16種の魚類が確認され、タイリクバラタナゴやアメリカナマズの確認個体数が多い結果となった。貴重種としては、タナゴ、アカヒレタビラ、オオヨシノボリの3種が確認された。

4.4 鳥類

浄化施設建設前のH9.10と建設後のH13.7およびH13.12に鳥類の調査を実施した。調査は、H9が2地点、30分の定点観測、H13が1地点、30分

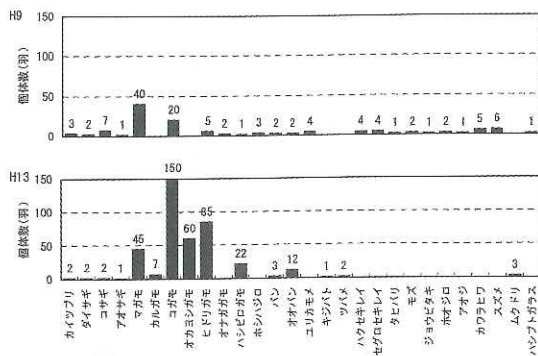


図-7 鳥類出現状況の経年比較

の定点観測および施設周辺の湖岸堤からの補足的なラインセンサスを実施した。

共に個体数の多かったのはマガモ、コガモといったカモ類であった。調査方法が異なるので比較には問題があるがH13はカモ類の個体数、種類数ともに増加した(図-7)。実際のところ湖内湖建設後、カモ類は、石積み堤や周辺に形成された砂州上で休息する個体が多く見られるようになった。湖内湖建設により新たに形成された波浪の少ない静穏環境がカモの休息場に適し、周辺のカモ類が集まってきたものと思われる。その他、繁殖にヨシ原などを利用するバン、オオバンがH13には比較的多く観察されている。

4.5 底生動物

底生動物についてはH9.11とH10.3の2回の事前調査を実施した。またH11～H13年度は8、11、3月(翌年)の3回調査、H17年度は8、2月(翌年)の2回調査を実施した。調査は、湖内湖内外の5～6地点でエクマンバージにより4回採泥し、フルイ上の生物を同定し、個体数を計数した。

H9年度からの調査で確認された底生動物は、浄化施設内外及び河川を合わせると、イトミミズ科、エリユスリカ亜科、ユスリカ属等、7綱10目11科28種であった。浄化施設内のみを見ると、浄化施設建設後のH10年度以降は、いずれの年度もミミズ綱やユスリカ属といった泥質や砂泥質に生息する、水質汚濁に強いとされる種が目立っているが、その内訳は年度によって異なっている。H11及びH12年度の傾向は似ておりミミズ綱の種が多く、H10年度ではハエ目が多くなっていた。H13年度では、イトミミズ科のみが極端に多い結果となっていた。その他の地点も合わせて、全体を経時的に見ると、いずれの地点も出現種はミミズ綱やハ

エ目がほとんどを占めており、確認種数は、砂質の浄化施設外で最も少なく、粘土シルト質の浄化施設内では、それよりもやや多い傾向があった。

5. おわりに

新しい面源負荷対策である湖内湖浄化法の汚濁削減効果の評価を実施した。その結果、除去率の平均値は、滞留時間に比例し、水面積負荷、負荷速度の増加にともなって指数関数的に減少することが分かった。また、生物に対する効果としては鳥類の生息場としては評価できるが、水生植物の生育場、魚類の生息場としては問題が多いことが分かった。今後は、浚渫を含めた浄化効果、コスト評価を行うとともに、湖内湖の考え方を応用した堤内地側の人工内湖などの降雨流出水対策を推進する必要がある。

参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局：平成17年度公共用水域水質測定結果, 2006.
- 2) 国土交通省、農林水産省、環境省：湖沼水質のための流域対策の基本的考え方、<http://www.mlit.go.jp/river/kosyo/main.pdf>.
- 3) 中村圭吾：湖内湖浄化、「陸水の事典」、日本陸水学会編集, p.167, (株)講談社, 2006.
- 4) 中村圭吾、森川敏成、島谷幸宏：河口に設置した湖内湖による汚濁負荷制御、環境システム研究論文集, Vol. 28, pp.115-123, 2000.
- 5) 西廣 淳、中村圭吾：湖岸植生帯の現状とその水質浄化機能、「エコテクノロジーによる河川・湖沼の水質浄化」、島谷幸宏、細見正明、中村圭吾編集、ソフトサイエンス社, 2003.
- 6) Carleton, J.N., Grizzard, T.J., Godrej, A.N. and Post, H.E.: Factors affecting the performance of stormwater treatment wetlands, Wat. Res. 35(6), pp. 1552-1562, 2001.
- 7) 中村圭吾、天野邦彦：湖内湖浄化の設計諸元と浄化効果について、第41回水環境学会年次講演会, p.121, 2007.

中村圭吾*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水環境
研究グループ河川生態チ
ーム主任研究員, 工博
Dr. Keigo NAKAMURA

天野邦彦**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水環境
研究グループ河川生態チ
ーム上席研究員, 工博
Dr. Kunihiko AMANO