

霞ヶ浦流域下水道高効率窒素 ・りん除去法開発調査

1. 目的

霞ヶ浦は、我が国第二の湖であり、その水は農業用水、工業用水、上水等の各種用途に用いられている。しかし、富栄養化現象による水質汚濁が進行し、COD、T-N、T-P等の環境基準は達成されていない状況にある。

茨城県では、霞ヶ浦浄化センター（霞ヶ浦湖北流域下水道）及び潮来浄化センター（霞ヶ浦水郷流域下水道）において、嫌気-無酸素-好気法（A₂O法）あるいは凝集剤添加循環式硝化脱窒法による窒素・りん除去を目的とする高度処理を実施しているところであるが、環境基準の達成等に向けて、これらの下水処理の一層の高度化、処理水質レベルの向上が求められている。

また、現在、設計手法が確立されており、実績もあるA₂O法、凝集剤添加循環式硝化脱窒法等の窒素・りん除去法は、硝化槽にて完全硝化を図るため標準活性汚泥法と比較して長い滞留時間を要し、滞留時間の短縮化、省スペース、省エネルギー化等の課題が残されている。

以上を踏まえ、本調査では、霞ヶ浦の水質に多大な影響を及ぼす霞ヶ浦浄化センターにおいて適用可能な高効率窒素・りん除去法に関する目標処理水質、処理方式を検討、選定し、パイロットプラントにおける設計条件をとりまとめるものである。なお、作業は、霞ヶ浦流域下水道高効率窒素・りん除去検討委員会（委員長：日本大学理工学部田中教授）の審

議を踏まえつつ進めた。

2. 基本条件の整理

2.1 霞ヶ浦の自然・社会特性

霞ヶ浦は茨城県の南東に位置する湖で、西浦、北浦、北利根川、鱈川、外浪逆浦、常陸利根川より成る。湖面積は約220km²で琵琶湖に次ぐ我が国第2の大きな湖であり、湖周囲長は約252kmで我が国の湖の中で最長である。流入河川数は56河川になり、これらを含む霞ヶ浦流域は、茨城県、千葉県及び栃木県の3県45市町村にまたがり、流域面積は2,156.7km²に及ぶ。茨城県内では、平成4年度末現在、全県87市町村のうち41市町村が霞ヶ浦流域関連市町村であり、この流域面積は全県の約34%、流域人口は全県の約32%を占める。

流域の土地利用構成（湖面積を除く）は、現況ではほとんどが農耕地として開け、水田及び畑の構成比が50%近くを占めている。将来的には宅地の構成比が増加するものの、水田及び畑の構成比は40%以上を占めるものと予測されている。また、代表的な産業は、水郷地帯の稲作、レンコン（茨城県全体量で全国第1位）、養豚、コイの養殖等が挙げられる。

2.2 霞ヶ浦水域の水質状況

(1) 霞ヶ浦の水質

霞ヶ浦におけるCOD及びクロロフィルa（Chl-a）（環境基準点（8地点）平均水質）、T-N及

びT-P (環境基準地点平均水質) の経年変化をそれぞれ、図-1、図-2に示す。これによるとCOD, T-N, T-Pとも環境基準値 (湖沼A類型; COD 3 mg/l, 類型III; T-N 0.4 mg/l, T-P 0.03 mg/l) を達成するに至っていない。

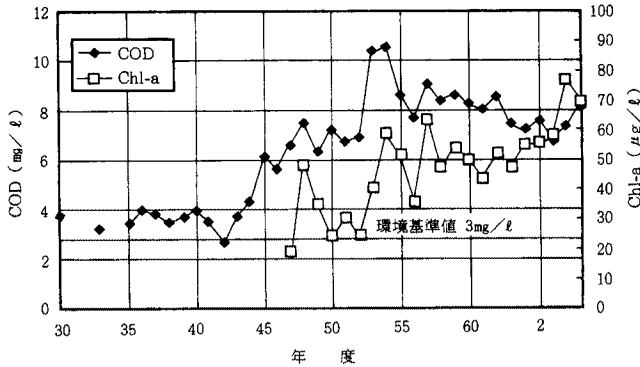


図-1 霞ヶ浦におけるCOD、Chl-aの経年変化

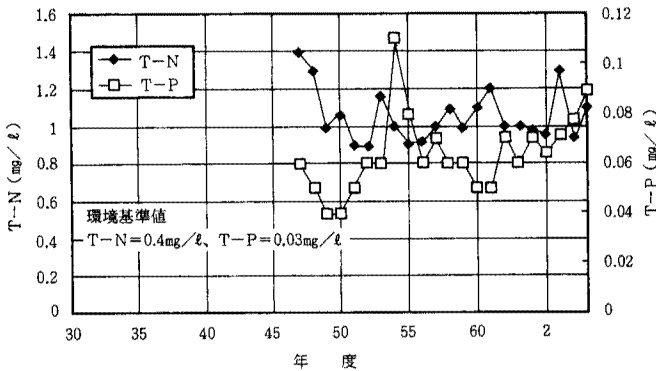


図-2 霞ヶ浦におけるT-N、T-Pの経年変化

(2) 流入河川の水質

霞ヶ浦流入河川の環境基準点及び水質基点における過去10年間 (昭和58~平成4年度) の水質平均値は、ほとんど全ての流入河川で環境基準値 (COD 3 mg/l, T-N 0.4 mg/l, T-P 0.03 mg/l) を上回っており、河川から流入する負荷の影響が大きいことがわかる。これらの流入河川のうち比較的人為汚濁の影響を受けていない非汚濁河川の水質 (過去10年間平均値) は概ね次のとおりである。

- BOD 1.6~3.1mg/l
- COD 3.6~5.0mg/l
- T-N 2.1~4.1mg/l
- T-P 0.06~0.11mg/l

2.3 霞ヶ浦における下水道計画の概要

霞ヶ浦流域における下水道普及率は、平成4年度実績で流域人口92万人に対して、約26% (処理人口23.6万人) である。この下水道の整備状況を処理水

量で表すと、全体計画処理水量の20%に満たない状況にある。

2.4 汚濁負荷の現況と将来

現況 (平成4年) と将来 (平成27年) の流入負荷量の算定結果を図-3~図-5に示す。なお、将来の流入負荷量は、次の2ケースについて計算した。

- 対策なし: 平成27年のフレーム値に対して、下水道整備を現況固定し、人口増分の排出負荷量は単独浄化槽扱いとして負荷量を算定するケース。
- 対策あり: 下水道計画区域内の普及率を100%とし、下水処理場からの排出負荷量は、現況の放流水質が維持されると想定して負荷量を算定するケース。

現況の流入負荷量はCOD31.6t/日、T-N 11.1t/日、T-P0.63t/日であり、生活系の負荷の占める割合が最も高く、総排出負荷量の40~50%を占めている。平成27年における流入負荷量については、“対策なし”の場合には、COD43.0t/日、T-N15.2t/日、T-P0.87t/日と、いずれの水質項目も現況負荷量に対して約37%排出負荷量が増加するものと見積られる。これに対して、“対策あり”の場合には、COD21.2t/日、T-N9.97t/日、T-P0.56t/日となり、下水道整備による負荷削減効果は、“対策なし”の負荷量に対して、COD51.0%、T-N35.0%、T-P35.0%の負荷削減率が見込まれる。

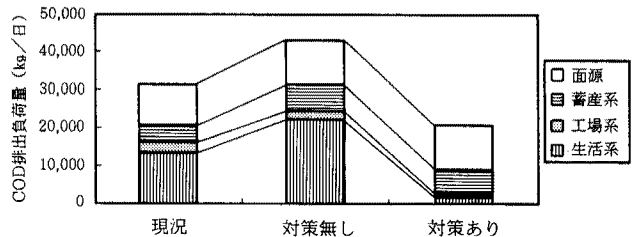


図-3 下水道整備によるCOD負荷量削減効果

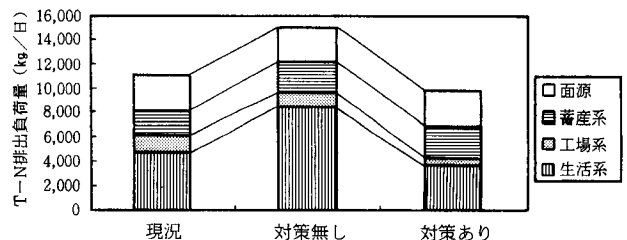


図-4 下水道整備によるT-N負荷量削減効果

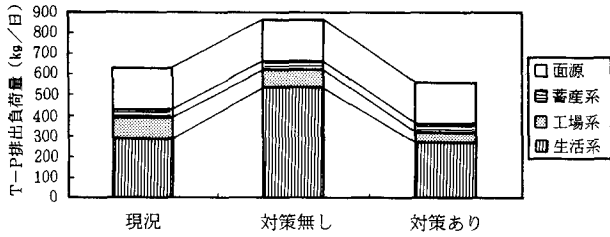


図. 5 下水道整備によるT-P負荷量削減効果

放流される水質を河川水質と同等にまで引き下げることを基本的なコンセプトとして、目標水質（年間平均値）を設定する。

また、BOD, COD, SSについては、現況の処理水質レベルを維持することを目標とし、目標水質（年間平均値）を設定する。（表-2）

表-2 目標水質（年間平均値）

水質項目	目標水質 (mg/l)
BOD	2.0
COD	8.0
SS	2.0
T-N	3.0
T-P	0.2

3. 目標水質の検討

3.1 目標水質の検討

(1) 目標水質

高度処理による窒素・りん処理状況を整理した（表-1）。処理水T-N濃度は、霞ヶ浦浄化センターを始めとする高度処理施設の運転実績では、A₂O法、循環法で概ね6.0~8.0mg/l程度、硝化・内生脱窒法で概ね3.0~6.0mg/l程度である。また、霞ヶ浦浄化センターで実施されたベンチスケール実験では、概ね2.0~3.0mg/l程度を達成している。

一方、処理水T-P濃度は、高度処理施設の運転実績では、生物学的脱りん法で概ね0.5~1.6mg/l、これと凝集剤添加を併用した場合で概ね0.2~1.2mg/lを達成している。また、霞ヶ浦浄化センター実処理施設の運転実績では、処理水T-P濃度は、0.2~0.3mg/lであり、ベンチスケール実験では、0.15mg/l程度を達成している。

これらの技術的に達成可能と思われる水質レベルは、霞ヶ浦に流入している比較的人為汚濁の影響を受けていない河川の水質レベル（T-N2.1~4.1mg/l、T-P0.06~0.11mg/l）に相当する。そこで、T-N、T-Pについては、下水処理場から

(3) 目標水質における負荷削減効果

COD, T-N, T-Pについて、霞ヶ浦に流入する負荷量の目標水質における削減効果を検討した。

（表-3）

表-3 目標水質レベルにおける負荷削減率

項目	現況 (平成4年) 負荷量 に対して	将来 (平成27年) 負荷量 (対策なし) に対して	将来 (平成27年) 負荷量 (対策あり) に対して
COD	33.5%	51.2%	0.0%
T-N	34.0%	52.0%	26.7%
T-P	28.7%	48.3%	20.7%

目標水質を確保する高度処理の導入によって、霞ヶ浦に流入する汚濁負荷のうち、将来負荷量（対策なし）に対しては概ね50%、現況負荷量に対しては概ね30%の負荷削減が期待できると考えられる。

表-1 高度処理技術による窒素・りん処理状況

項目		T-N (mg/l)	T-P (mg/l)
1.	富栄養化防止条例による排水基準	15.0	0.50
2.	霞ヶ浦浄化センター 運転実績	A ₂ O法	7.6
		凝集剤添加循環法	7.5
3.	全国の高度処理実績	循環法, A ₂ O法	6.0~7.0
		硝化・内生脱窒法	2.5~4.0
		(凝集剤を添加した場合)	-
		A ₂ O法, VIP/UCT変法	6.0~8.0
4.	霞ヶ浦浄化センター ベンチスケール実験結果	硝化・内生脱窒法, Bardenpho法	3.0~6.0
		A ₂ O法+後脱窒法 (修正Bardenpho法)	2.0~3.0

4. 処理方式の検討

4.1 目標処理水質レベルに対応可能な処理方式の検討

既往の窒素除去法の実績は、A₂O法でT-N7.0 mg/l程度、硝化・内生脱窒法でT-N5.0 mg/l程度であり、これらでは目標水質を達成することは難しい。このため、今回提示した処理水T-N3.0 mg/lを達成するための処理方策としては、既往の窒素・りん同時除去法である凝集剤添加循環法、A₂O法あるいは嫌気+硝化・内生脱窒法の後段に処理プロセスを付加することによって、処理水T-Nレベルを向上させる方法が最も現実的な対応と考えられる。

このような観点を踏まえると次のような処理方式が考えられる。

① 嫌気+多段硝化液循環法

本処理法は、単段硝化液循環法の脱窒・硝化槽を多段化したもので、最初沈殿池流出水をステップ流入することにより系内の平均MLSS濃度を高め、単段式に比べて硝化をより一層促進させることと、脱窒槽を経由せずに流出した硝化液の一部を後段の脱窒槽において脱窒させるという特性をもっている。

② 修正Bardenpho法

本処理法は、A₂O法の後段に無酸素槽と再曝気槽を付加するものであり、流入水と返送汚泥を嫌気槽に流入させる一方、硝化混合液を無酸素槽へ循環させる。A₂O法の好気(硝化)槽流出水中に残存する硝酸態窒素をさらに脱窒反応により除去することにより、窒素に関してA₂O法よりも良好な処理水質が期待出来る。

③ 嫌気+ステップ流入硝化・内生脱窒法

本処理法は、前段より順に、嫌気槽、好気槽、無酸素槽、好気槽、無酸素槽及び再曝気槽より構成されるプロセスである。基本的には、窒素除去プロセスとしての硝化・内生脱窒法を2段に配置し、その前段にりんの放出のための嫌気槽を配置する。流入水と返送汚泥を嫌気槽に流入させるが、硝化混合液の無酸素槽への循環は行わず、一方向流れのフローとなっている。また、流入水を前段の無酸素槽にステップ流入させることにより、ステップ流入させない場合と比較して前段の無酸素槽における脱窒速度及び前段の好気槽における硝化速度を速めることが可能となる。

ところで、これらの処理方式は、既往の窒素・りん同時除去法の後段に処理プロセスを付加するため、目標水質を達成するためには、既往の窒素・りん同時除去法よりも長い生物反応槽滞留時間を要することが予想される。

霞ヶ浦浄化センターでは、既存のA₂O法及び凝集剤添加循環法の水処理施設は、生物反応槽滞留時間14hrの条件にて設計されているため、滞留時間については少なくともそれと同程度、あるいはさらに短縮化した上で目標水質を達成することが必要となる。

4.2 パイロットプラントにおいて採用する処理方式の検討

目標水質レベルに対応可能な処理方式として、①嫌気+多段硝化液循環法、②修正Bardenpho法、③嫌気+ステップ流入硝化・内生脱窒法の3方式を提示したが、現在、①～③の処理フローを基本とする処理方式について、それぞれ日本下水道事業団、茨城県、土木研究所により実施あるいはベンチスケールにて実験、開発が行われている段階にある。いずれの処理方式も、硝化槽への担体投入する。また、②修正Bardenpho法は、後段の無酸素槽へのメタノール添加を前提として、生物反応槽滞留時間10hr程度で目標水質を達成することは十分期待出来る。なお、茨城県によるベンチスケール実験においては、滞留時間約10hrで目標水質を十分クリアする実績が得られている。

各処理方式については、除去特性の他に、反応槽の構造(槽数)、維持管理、経済性、消費エネルギーという観点からは多少の優劣はあるものの、現段階では総合的に判断することは困難である。また、特に消費エネルギーという点については、いずれの処理方式についても、個々の基本フローに対して省エネルギーを配慮することが必要となる。

一方、既存施設への適用性については、現在の霞ヶ浦浄化センターの水処理施設は、A₂O法、凝集剤添加循環法及び凝集剤添加標準法が各2系列の計6系列で運転されていることから、A₂O法あるいは循環法をベースとした処理方式が運転管理面も含めて適用性が高いといえる。さらに、現況ではA₂O法において短い滞留時間(約10hr)で良好な処理水質が得られており、A₂O法の延長上にある修正Bardenpho法が既存施設に対してより適用性が高いと考えられる。

以上のベンチスケール実験における実績、既存施設への適用性、さらに実験の継続性を踏まえ、パイ

ロットプラントにおける処理方式として、修正Bardenpho法を基本とした処理方式を採用することとする。(図-6)

5. 設計条件の整理・検討

5.1 水温条件

設計水温は、流入下水の月間平均水温を整理して、その最低値に定める。

平成4, 5年度の霞ヶ浦浄化センター流入水月間平均水温は、両年とも年間を通じて1~3月の水温が最も低く、15°C程度になっている。したがって、設計水温は現況の冬期月間水温値から15°Cに設定する。

5.2 水質条件

(1) 流入水質及び一次処理水質

流入水質及び一次処理水質は本浄化センターの実績値により設定する。(表-4)

表-4 実験プラントにおける設計流入水質

(単位: mg/ℓ)

水質項目	流入水質		一次処理水質			
	平成4・5年度実績値		設計水質	平成4・5年度実績値		設計水質
	年平均値	冬期平均値		年平均値	冬期平均値	
BOD	180	203	210	107	145	150
COD	97	104	110	50	63	70
SS	140	135	140	50	76	80
T-N	35.4	39.4	40.0	23.6	27.5	30.0
T-P	4.05	4.25	4.50	3.30	4.26	4.50

(2) 除去率及び放流水質

本処理方式の目標放流水質と前述の設計流入水質に対する除去率の関係は表-5のとおりである。

表-5 除去率及び目標放流水質

水質項目	一次処理水質 (mg/ℓ)	除去率 (%)	放流水質 (mg/ℓ)
BOD	150	98.7	2.0
COD	70	88.6	8.0
SS	80	97.5	2.0
T-N	30	90.0	3.0
T-P	4.5	95.6	0.2

5.3 設計水量

一般的なパイロットスケール実験の規模(処理水量)は、10m³/日以下のきものから100m³/日を超えるものまでであるが、10~30m³/日程度のもが多い。これを参考として、本実験プラント規模は、HRT=14hrの場合の規模(処理水量)を30m³/日と定める。

また、実験においては、実績より整理した当浄化センターにおける流量時間変動パターンを与える流量変動実験を実施する。

6. 実験プラント概要

6.1 実験装置概要

設計水量30m³/日に対してHRT=14hrを確保するのに必要な生物反応槽容量は下記のとおり17.6m³である。実験プラントの散気水深については、実施設と同規模にすることが困難であるため、酸素溶解に問題の無い最小限の水深として、2.0mと設定する。また、反応槽の分割、形状は、表-6のとおりとする。なお、実験装置は、フレキシブルな槽分割が出来

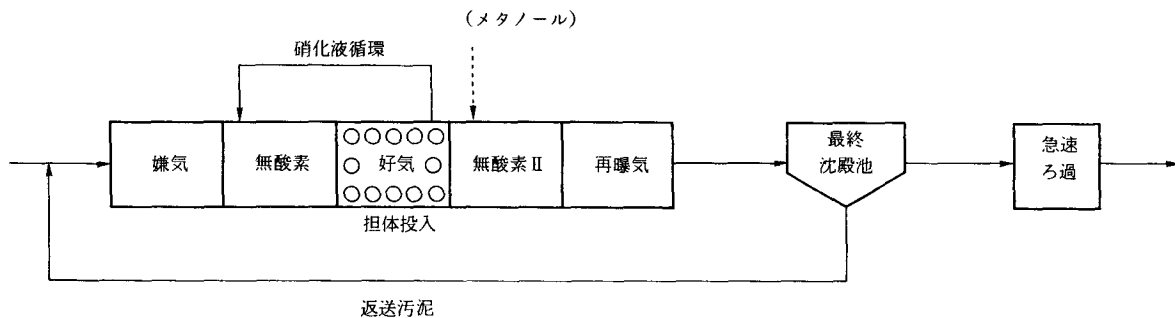


図-6 パイロットプラントにおいて採用する処理フロー

る様に生物反応槽全体を14分割し、仕切板により嫌気槽・無酸素槽・好気槽・無酸素槽Ⅱ・再曝気槽の5槽の容量を変更できる様な構造とする。

7. 実験内容

7.1 馴致、予備実験

次の項目について、馴致、予備実験を実施する。

- (1) 装置特性実験（トレーサー実験による滞留時間の把握、酸素溶解特性実験）
- (2) 活性汚泥及び担体の馴致運転
- (3) 適正DO条件下における反応阻害要因に関する検討
 - ・無酸素槽におけるDOの残存
 - ・無酸素槽Ⅱにおける絶対嫌気状態の再現
 - ・最終沈殿池における固形物のキャリーオーバーの有無等

7.2 検証実験

冬期、夏期の流入水質の条件下において、目標処理水質達成に必要な設計条件、運転管理条件を検討する。

- (1) 窒素、りん除去に関する反応速度定数等の基礎数値の把握（ベンチスケール実験結果の確認）
- (2) 流量変動条件下における処理水質の安定性の把握
- (3) 設計及び運転管理条件の決定（流量変動実験結果を受けて決定）

- MLSS, 汚泥返送比, 硝化液循環比, 担体充填率, 空気量, メタノール及び凝集剤添加量
- (4) 雨天時における処理水質の安定性の確保策

7.3 省エネルギー化に関する検討

流量変動実験結果を受けて、省エネルギー化に関する検討を行う。

- (1) 槽割変更による反応時間の短縮化
- (2) 適正薬品添加量の検討

8. 今後の予定

現在迄のベンチスケール実験において得られた知見を踏まえつつ、本調査により設定された目標水質の達成に向けて、パイロットプラントによる実証及び検討を進めていく予定である。

表-6 生物反応槽容量、分割比及び形状

	槽分割比 (-)	滞留時間 (hr)	槽容量 (m ³)	池幅 (m)	池長 (m)	有効水深 (m)
1. 嫌気槽	1	1.0	1.26	1.00 ×	0.63 ×	2.00
2. 無酸素槽	4	4.0	5.04	1.00 ×	2.52 ×	2.00
3. 好気槽	3	3.0	3.78	1.00 ×	1.89 ×	2.00
4. 無酸素槽	4	4.0	5.04	1.00 ×	2.52 ×	2.00
5. 再曝気槽	2	2.0	2.52	1.00 ×	1.26 ×	2.00
合計	14	14.0	17.64	1.00 ×	8.82 ×	2.00

- この調査に関する問い合わせは
- | | |
|------------|-------|
| 研究第一部長 | 佐藤 和明 |
| 研究第一部主任研究員 | 若山 正憲 |
| 研究第一部主任研究員 | 桑田 耕治 |
| 研究第一部長研究員 | 井上 茂治 |