

課題 1 (4) 印旛沼・手賀沼流入河川における凝集沈殿によるりん除去法の検討

1 経緯及び目的

閉鎖性水域では流域におけるりん除去が水質浄化に効果があることから、逆井河川浄化（りん除去）施設が手賀沼流入河川である大津川流域に設置されている。りん除去は凝集沈殿で行われているが攪拌条件や凝集剤使用量など適切な運転管理のための検討が必要とされており、今回これらについて検討した。一方、印旛沼流域では、窒素、りんの低減が求められている。流域の汚濁は本来高度処理型合併処理浄化槽や下水道の普及などにより低減させるべきものであるが、暫定的にはりん除去施設などの河川直接浄化施設の設置も有効である。このことから、りん除去施設の設置にふさわしいと考えられる候補地を検討し、そこでのりん負荷量を求めるとともに、凝集剤と汚泥処理費用を試算した。

2 方法

2.1 逆井河川浄化（りん除去）施設に関する検討

ジャーテスターは宮本理研工業(株)製 JMD-5K（回転羽径 5.9cm）を使用した。急速攪拌は 150rpm 1 分間、緩速攪拌は 30rpm 10 分間、静置時間は 10 分間とした。原則として実験ごとに上記りん除去施設流入原水(T-P 0.46~1.48mg/L)を

表 1 実験に使用した凝集剤

名称	主成分	
PAC	ポリ塩化アルミニウム	逆井りん除去施設から入手
硫酸バンド(図ではバンド)	硫酸アルミニウム	和光純薬工業(株)製(試薬)
ラサラック	AlCl ₃ (6H ₂ O)	ラサ工業(株)製
塩化第二鉄(塩鉄)	FeCl ₃	新日本製鐵(株)製
ポリ鉄	ポリ硫酸第二鉄	日鉄鉱業(株)製
ポリ鉄シリカ(図表ではシリカ)	ポリ鉄にシリカを配合	日鉄鉱業(株)製

採取し、必要に応じてりんを 1mg/L 分添加したも

のを 1L ビーカーに分取したものを供試水とした。

今回実験に使用した凝集剤を表 1 に示した。これら凝集剤は適宜希釈して使用した。注入率は鉄系凝集剤（塩鉄，ポリ鉄，ポリ鉄シリカ）は Fe 濃度，硫酸バンドとラサラックは Al₂O₃ 濃度，PAC は PAC としての濃度で計算しており，PAC100% には Al₂O₃ が約 10% 含まれている。

前処理法は酸性凝沈法（計算で M アルカリ度が 50 になるようにあらかじめ 1mol/L 塩酸を添加），過酸化水素水法（あらかじめ過酸化水素 10ppm 添加），前塩素処理法（あらかじめ次亜塩素酸ナトリウム 5ppm 添加）について検討した。原水及び処理後の全りん（以下 T-P）濃度からりん除去率を次の計算により求め，それにより評価した。

$$\text{りん除去率(\%)} = (\text{原水 T-P} - \text{処理後 T-P}) / \text{原水 T-P} \times 100$$

2.2 印旛沼流域での適用可能性の検討

県及び市町村の測定結果¹⁾から，全りん（以下 T-P）が比較的高濃度（年平均がおおむね 1mg/L 以上）で工場排水の影響がほとんどないと思われる河川（二重川，高崎川，勝田川の上流）及び測定データのない河川（桑納川支川である坪井川，駒込川，木戸川及び大穴川並びに神崎川）で調査を行い，川幅，水深，T-P，りん酸態りん（以下 PO₄-P），COD 等を測定した。

その調査結果から，T-P 濃度が高く，水量がある程度以上あると思われる地点において，再び調査を行い，流量，T-P，PO₄-P 等を測定した。

なお，桑納川支川の三咲川については，すでに当センターで詳細な調査が行われているため²⁾，そのデータを使用した。

調査から T-P 濃度が高かった三咲川及び木戸川の水を供試水とし，今回検討した中で一番安価な凝集剤と考えられるラサラック及び逆井河川浄化（りん除去）施設でも使用され比較的高価な凝集剤である PAC を用いて凝集実験を行い，そこか

ら凝集剤使用量と発生汚泥量を求め、凝集剤費用、汚泥処理費用及びりん除去量を試算した。試算の条件は、両地点において PAC、ラサラックとも最適注入率は凝集剤そのものの注入率で 50ppm～100ppm の間であることから注入率を 100ppm、三咲川で 1 時間当たりの流量が約 50m³であることから 1 日の処理量を 1,000m³/日、りん除去率は逆井のりん除去施設の設計値と同じ 80%とし、毎日運転するものとして計算した。なお、実際にはこのほかに電気代、装置のメンテナンス費用などがかかるが凝集剤費用及び汚泥処理費用と比べて少なくなると考えられるため今回は計算しなかった。

3 逆井河川浄化（りん除去）施設について

逆井河川浄化（りん除去）施設は大津川の支川に設置されている。処理方式は凝集沈殿後砂ろ過である。凝集沈殿で出た汚泥は砂ろ過で出た逆洗水と混合し、下水道放流基準を満たす水質にして



図 1 逆井河川浄化（りん除去）施設
（県土整備部パンフレットより）

表 2 河川浄化施設の諸元

処理量	11,200m ³ /日
T-P	1.9mg/L→0.4mg/L (80%除去)
SS	30mg/L→6mg/L (80%除去)
COD (参考値)	21.0mg/L→11.0mg/L (50%除去)

表 3 原水水質（2005.7.11採水）

COD	12mg/L
T-P	0.81mg/L
PO ₄ -P	0.63mg/L
アルカリ度	107

手賀沼終末処理場に送られる。

施設の諸元を表 2 に示した。処理量約 11,000 m³/日、T-P、SS は 80%除去で設計されている。

表 3 には、今回の調査で採水した施設の原水水質の実測値を示した。T-P、COD 濃度とも設計時より低くなっているのは下水道などが普及してきているためと思われる。

維持管理費のうち汚泥処理費（下水処理費）は手賀沼水環境保全協議会が負担しており、経費は年約 2,500 万円、それ以外の費用（凝集剤が半分以上、その他電気、保守点検等）は県土整備部が負担しており経費は年約 1,500 万円である。

4 結果及び考察

4.1 逆井についての検討

4.1.1 攪拌条件の検討

注入率を塩化第二鉄 5ppm、ポリ鉄 10ppm、ラサラック 5ppm、硫酸バンド 10ppm とし、攪拌は弱くて短い方が使用するエネルギーが少ないことから攪拌条件は急速攪拌 150rpm で最小限の時間と思われる 1 分、緩速攪拌は最低限の攪拌速度と思われる 30rpm とし凝集を行い、フロックを観察して適切と思われる緩速攪拌時間を決定した。

各凝集剤とも緩速攪拌 10 分程度で十分フロックが成長していることが目視で確認されたため、その後の実験では緩速攪拌は 30rpm10 分とした。

4.1.2 鉄系凝集剤における pH 上昇時の検討

鉄系凝集剤では最適凝集 pH が高いことがあるため、pH 未調整(pH6.8)のものと 9.1 程度（以下 pH9 とする。）に調整したものとで凝集実験し、濁度、色度等の比較を行った。pH 調整には水酸化ナトリウム(NaOH)水溶液を使用した。

pH9 に調整したものは濁度、色度とも pH 未調整のものに比べれば若干低下したが、それでも凝集剤由来と思われる着色により色度は原水より高くなっており、十分に改善したとは言い難かった。

4.1.3 前処理法の検討

凝集剤注入率は 4.1.1 に塩鉄 10ppm、ポリ鉄 20ppm を追加した。また新たに PAC 50ppm、ポリ鉄シリカ 16.8ppm も追加して実験した。

結果を図 2 に示す。ここで、複数回実験を行ったものについては平均値で表示し、空白は実験を行っていない。

硫酸バンドを除き前処理しない場合と比べて酸性凝沈法の方が良好だった。前塩素処理法及び過酸化水素水法は PAC 以外では改善が見られなかった。これらの結果から、供試水のりん除去に有効な前処理法は酸性凝沈法と考えられた。

4.1.4 凝集剤の最適注入率の検討

酸性凝沈法及び前処理なしにおいて、設計値であるりん除去率 80%以上となる凝集剤注入率（最適注入率）を確認した。結果を表 4 に示す。空欄は該当する実験を行っていない。

アルミ系凝集剤（PAC、硫酸バンド、ラサラック）は前処理なしの方が良好、鉄系は酸性凝沈法の方が良好であった。

硫酸バンド（前処理なし）、ラサラック（前処理なし）、塩鉄+酸性凝沈法、ポリ鉄シリカ+酸性凝沈法は十分りんが除去できると考えられる。

現在、りん除去施設では PAC の注入率を 80ppm としているが、今回の実験では 100ppm でりんが十分除去されており、施設での現状の注入率はおおむね適切であると思われた。

一方ポリ鉄は前処理なし、酸性凝沈法とも今回実験した範囲内では最もりん除去率が低かった。図 2 から注入率を 20ppm にすれば十分りんが除去できると思われるが、特に安価でもなく、また、濁度や色度が上昇することが予想され他の凝集剤より有利な点は少ないと考えられた。

なお、この実験では酸性凝沈法で最適注入率での凝集沈殿後の pH がいずれの凝集剤でも 6.1 以下となり、処理水放流等の際に注意が必要と思われた。

4.1.5 りん濃度及び凝集剤注入率の変動

りん濃度や凝集剤注入率の変動の影響を調べるため、「鉄系凝集剤（ポリ鉄を除く）+酸性凝沈法」及び「アルミニウム系凝集剤（前処理なし）」について、凝集剤の注入率を 2 倍にした場合と、りんを 1ppm 添加した場合について検討した。結果を表 5 に示す。

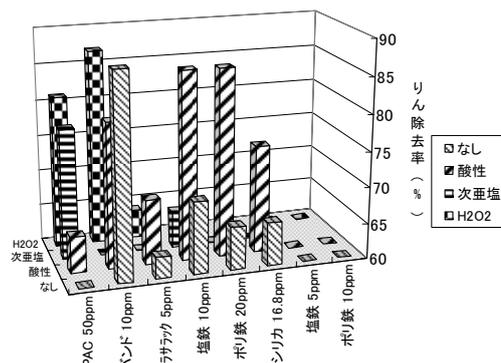


図 2 各凝集剤及び助剤でのりん除去率(%)
原水 T-P : 0.46~1.48mg/L

表 4 最適注入率検討時のりん除去率

原水T-P: 0.67~0.69mg/L	りん除去率(%)	
	酸性	処理なし
PAC50ppm	48-53	
PAC100ppm	81-91	
硫酸バンド10ppm	67-79	63-68
硫酸バンド15ppm	74-75	81-82
ラサラック5ppm	56-72	27-36
ラサラック10ppm	32-37	81-85
塩鉄10ppm	81-85	74
ポリ鉄15ppm	72	54-56
ポリ鉄シリカ10ppm	79-84	66-74
ポリ鉄シリカ15ppm	90-93	84
ポリ鉄シリカ20ppm	90-91	

表 5 りん濃度及び凝集剤注入率を変動させたときのりん除去率

	りん添加なし	りん添加あり
	T-P=0.46mg/L	T-P=1.46mg/L
PAC50ppm	59	47-54
PAC100ppm	85	82-85
硫酸バンド10ppm	70	78-88
硫酸バンド20ppm	89	88
ラサラック5ppm	24	29
ラサラック10ppm	75	76-85
塩鉄10ppm+酸	80-87	84-86
塩鉄20ppm+酸	34	39
ポリ鉄シリカ10ppm+酸	79	81
ポリ鉄シリカ20ppm+酸	90	86

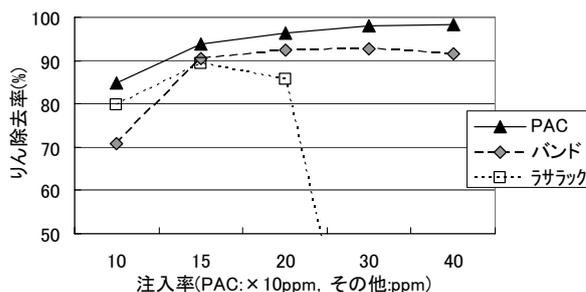


図 3 凝集剤を増加させたときのりん除去率
原水 T-P : 1.62mg/L

塩鉄では注入率 10ppm では 80%以上除去できたが、注入率 20ppm ではフロックがほとんど形成されず除去率も 30%~40%と低くなった。図 2 から塩鉄は注入率 5ppm でも除去率は 60%未満となっていたため、この条件では最適注入率の範囲が他の凝集剤より狭いと考えられた。それ以外の凝集剤では注入率を高くした方がりん除去率は高くなった。

りんを添加したものと添加しなかったものとの違いはあまりなく、今回実験した範囲でのりん濃度の変動についてはどの凝集剤でもある程度対応可能と考えられた。

4.1.6 凝集剤の注入率を増やした場合

アルミ系凝集剤については、注入率をさらに増加させたときのりん除去率を検討した。結果を図 3 に示す。PAC は検討した範囲内では注入率を増やすほどりん除去率は上昇した。硫酸バンドは、20ppm 程度で頭打ちになり、40ppm では若干低下した。ラサラクは過剰に注入するとりん除去率がマイナスになってしまった。ラサラクの T-P 含有量を測定したところ約 1000ppm であったことから、これが影響したと思われる。

4.2 印旛沼流域での適用可能性の検討

4.2.1 りん高濃度地点調査

県及び市町村の測定結果 (図 4) ¹⁾を見ると T-P が高濃度の地点は河川の最上流部であった。また、それらの河川では下流にいくほど T-P 濃度は低下する傾向が見られた。印旛沼流域では上流部の台地に住宅地、下流の低地に水田が多いことを考えると多くの河川が同様の傾向と考えられた。

第 1 回目の調査結果を表 6 に示す。この調査で T-P 濃度が高かったのは、二重川、木戸川、大穴川だった。しかし、二重川、木戸川の調査地点の流域はほとんどが下水道区域となっている。駒込川の調査地点の流域はほとんど下水道区域の上、比較的高濃度の地点では川のそばまで家が並んでおり、処理施設を設置する空間はほとんどない。大穴川流域は下水道区域が多いが、二重川や木戸

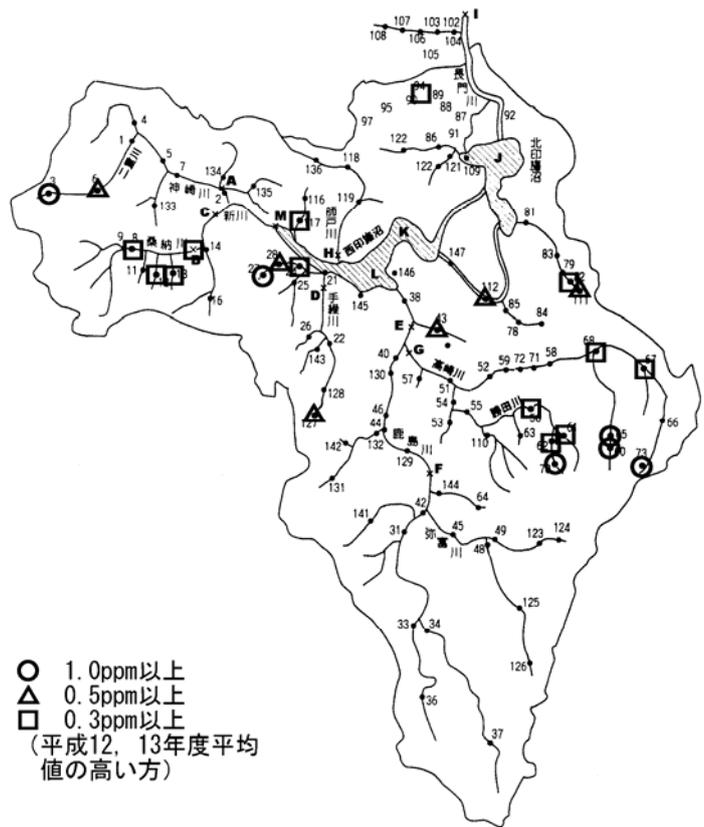


図 4 印旛沼流域水質測定地点及び T-P 高濃度地点 ¹⁾



図 5 2 回目水質調査地点

川ほどではない。なお、三咲川では住宅地は下水道区域が多いものの最上流部は下水道区域ではない。また高崎川上流部では T-P が高濃度の地点は見あたらなかったが、集水域に下水道区域でない地域があり、汚濁した排水路も見うけられたことから、小型のりん除去施設を排水路に設置することも有効かもしれないと考えられた。

第 2 回目の調査地点を図 5、調査結果を表 7 に示す。木戸川の松が丘 2-26 地先では、T-P の濃度は 1.3~1.8mg/L、負荷量は約 3kg/日となったが、

表 6 河川調査結果(1回目)

	川幅 (m)	水深 (cm)	透視度 (cm)	採水日時	pH	COD (mg/l)	T-P (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)
1 坪井川(坪井406地先)	1.5~2	20	14	2005/4/19 10:10	7.66	10	0.53	0.37
2 坪井川(古和釜町地先)	6	25	28	2005/4/19 10:25	7.74	6	0.31	0.25
3 駒込川(古和釜高校下)	1.5~2	30	>30	2005/4/19 10:45	7.69	3	0.29	0.28
4 駒込川(松が丘5-49地先)	2.5~3	10	>30	2005/4/19 11:00	7.17	10	0.75	0.50
5 木戸川(松が丘2-26地先)	4	25	26	2005/4/19 11:45	7.34	14	1.2	0.89
6 木戸川(松が丘1-39地先)	5	20	>30	2005/4/19 11:50	7.31	9	0.72	0.57
7 大穴川(大穴北8-37地先)	2	7	>30	2005/4/19 12:05	7.33	11	1.1	1.00
8 二重川橋戸橋	3.5	15	>30	2005/4/20 10:20	7.57	5	0.32	0.28
9 二重川(高野台4-1地先)	4~4.5	7	>30	2005/4/20 10:55	7.61	11	1.3	1.1
10 神崎川最上流部	1.5~2	30	30	2005/4/20 11:20	7.12	8	0.17	0.06
11 神崎川はつぎき橋	2~2.5	7	>30	2005/4/20 11:40	7.70	3	0.04	0.03
12 神崎川折立橋	5.5	22	>30	2005/4/20 11:50	7.70	3	0.04	0.02
13 勝田川上流(大関47地先)	1~1.5	6	>30	2005/4/26 11:40	7.17	8	0.46	0.35
14 高崎川上流(実の口交差点付近)	1.5	5	28	2005/4/26 13:55	7.36	8	0.31	0.22

表 7 河川調査結果(2回目)

	採水日時	pH	水温 (°C)	透視度 (cm)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	T-P (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)	流量 (m ³ /日)	T-P 負荷量 (g/日)
1 坪井川(坪井406地先)	2005/12/26 10:30	7.83	6.7	22	9	14	0.38	0.21	測定不可	
	2005/12/26 14:15	7.99	9.6	24	10	15	0.38	0.22		
2 坪井川(坪井ゴルフセンター入口)	2005/12/26 10:55	7.88	7.3	16	10	35	0.42	0.19	1300	520
	2005/12/26 14:25	7.93	7.9	23	11	8	0.39	0.22		
3 木戸川(松が丘2-26地先)	2005/12/26 11:25	7.36	10.6	8	29	53	1.8	1.2	2100	3300
	2005/12/26 14:50	7.39	10.3	14	27	20	1.3	1.1		
4 木戸川(松が丘1-39地先)	2005/12/26 12:15	7.41	10.5	24	20	15	1.2	1	680	700
	2005/12/26 15:00	7.42	10.2	28	16	21	0.9	0.76		
5 大穴川(大穴北8-37地先)	2006/3/3 11:50	7.25	12.2	>30	9	3	0.96	0.83	1900	1800

付近には下水道のマンホールがあるにもかかわらず生活排水が直接流入しているような水質であり、下水道未接続の家などがあるのではないかと考えられた。坪井川のゴルフセンター入口では T・P の濃度は 0.5mg/L 以下と河川からりんを除去するには低濃度であり負荷量も約 0.5kg/日と少なめであった。さらに坪井川は調査時には河川改修等の工事が行われており、りん除去施設を設置することは難しいと思われた。大穴川は 2 回目の調査では 1 回のみ採水したが、そのときの T・P 濃度は 0.96mg/L、負荷量は 1.8kg/日となった。三咲川は、当センターの過去の調査結果²⁾によると上流で T・P 濃度の範囲は 0.8~1.3mg/L であり、T・P 負荷量は 1kg/日前後となった。

これらの結果から、調査した範囲で候補地にふさわしいのは三咲川及び大穴川と考えられる。二重川、木戸川は今回の調査では T・P 濃度が高いが、流域のほとんどが下水道区域であるため、近いうちに T・P 濃度は減少すると思われ、りん除去施設の設置は暫定的になる。

T・P が高濃度の地点は河川の上流部と考えられ、調査していない水路や小河川でもりん除去施設が設置可能なところがあると思われるが、今回の調査では流量が最大 2,100m³/日、りん負荷量が最大 3.3kg/日であり、1カ所当たりのりん除去量がそれ以上になることは考えにくい。

4.2.2 凝集によるりん除去施設おける処理費用等の試算

①凝集剤コスト

1 日当たりの凝集剤使用量は(1,000m³/日×1,000L/m³)×(100/1,000,000) (注入率 100ppm) = 100L となる。PAC は 1m³ 当たり 35,000 円(逆井河川浄化施設実績)、ラサックは 1m³ 当たり約 10,000 円(工水佐倉浄水場実績)なので 1 年当たりの凝集剤コストは PAC で 0.1m³×35,000 円/m³×365 日 = 1,277,500 円、ラサックで 0.1m³×10,000 円/m³×365 日 = 365,000 円となる。

②汚泥処理コスト

ここで、汚泥処理方法として 2 種類想定した。一つは通常行われている方法で、脱水機を用いて

脱水し、トラック等で処分場に運搬する方法、もう一つは逆井河川浄化（りん除去）施設で行われている方法で、汚泥を基準値以下まで希釈して下水道に放流する方法である。なお、脱水機及び下水道接続に係る費用については試算しなかった。

ア. 通常の汚泥処理

凝集剤が全量汚泥になり、脱水後の含水率を80%とすると、凝集剤の約5倍量の汚泥が発生すると考えられることから1日当たり $100\text{L} \times 5 = 500\text{L} \div 500\text{kg} = 0.5\text{t}$ 、1年当たりの脱水汚泥の量は $0.5\text{t} \times 365 = 182.5\text{t/年}$ となる。下水や浄化槽の汚泥処理費用の実績をインターネットで調べたところ運搬費込みで1t当たり10,000円～30,000円程度とばらつきが大きかったが仮に中間の20,000円で計算すると $182.5 \times 20,000 = 3,650,000$ 円となる。

イ. 逆井と同様に下水道処理すると

逆井では浄化する河川水の量 $11,200\text{m}^3$ 、下水道へ送る汚水量 $1,300\text{m}^3$ で計画していることから仮に浄化する河川水の量の12%が下水道へ送られるとすると、1日当たり下水道へ送られる汚水量は 120m^3 となり、下水処理費用を52円/ m^3 （逆井河川浄化施設実績）とすると、 $120\text{m}^3/\text{日} \times 365\text{日/年} \times 52\text{円}/\text{m}^3 = 2,277,600$ 円/年となる。

③りん除去施設によるりん除去効果

T-P濃度は三咲川最上流部の値を参考に 1.0mg/L とすると、1日当たりの除去量は $1,000\text{m}^3 \times 1,000\text{L}/\text{m}^3 \times 1.0\text{mg}/\text{L} \times 0.8$ （除去率80%） $= 0.8\text{kg}/\text{日}$ となり、1年当たりの除去量は $0.8\text{kg}/\text{日} \times 365\text{日} = 292\text{kg}/\text{年}$ となる。

①～③から292kg/年のりんを除去するのに必要なコストは約260万円/年～500万円/年と考えられる。

5 おわりに

今回の実験結果から、逆井河川浄化（りん除去）施設におけるPAC注入率は適正であると考えら

れた。他の凝集剤では、ポリ鉄シリカ（酸性凝沈法ならばさらに除去できる）、硫酸バンドが適用可能と考えられた。アルミニウムの酸洗浄廃液を原料としているラサックは安価だが、pHが低いため、配管等に配慮が必要であり、T-Pが高濃度に含まれているため、過剰注入に注意する必要がある。

今回行った凝集実験では全体的にはアルミニウム系凝集剤の方がりんが良く除去できる結果になったが、アルミニウムに結合したりんは再利用が難しく、りんの再利用のためには鉄系凝集剤によるりん除去の十分な検討が必要と考えられる。

印旛沼流域でT-P濃度が高いのは、川の上流部であるため、りん除去施設を作るとしても小規模のものになる。また、生活排水由来でT-Pが高いところは下水道区域になっているところが多いことから、下水道未接続を解消することで水質が改善される可能性がある。

りん除去に必要な凝集剤及び汚泥処理費用を試算したところ、汚泥処理費用の方が高くなった。また、参考にした下水道汚泥処理費用は施設によりばらつきが大きく、費用は今回の試算よりも多くなることもあり得る。実際にりん除去施設を設置する際にはそれらを考慮する必要がある。

文献

- 1)財団法人 印旛沼環境基金：印旛沼白書 平成13・14年版。（2002）
- 2)飯村晃，清水明，小林廣茂，平間幸雄，小倉久子：印旛沼流入河川三咲川の流入負荷解析調査．千葉県環境研究センター年報第3号，pp108-109(2005)