残留塩素が河川の付着藻類群集に及ぼす影響

Effects of Residual Chlorine on Epilithic Algal Communities in Lotic Systems

ラン ム ゴー¹, 福島 悟², 小堀洋美¹

¹武蔵工業大学（現：東京都市大学）大学院環境情報学研究科／〒224-0015 横浜市中区牛久保3-3-1

²横浜市環境科学研究所／〒235-0012 横浜市磯子区滝頭1-2-15

HLWAN MOE ZAW¹, SATOSHI FUKUSHIMA², and HIROMI KOBORI¹

¹Graduate School of Environmental and Information Studies, Musashi Institute of Technology
/3-3-1 Ushikubo-nishi, Tsuzuki-ku, Yokohama, 224-0015, Japan

²Yokohama Environmental Research Institute
/1-2-15 Takigashira, Isogo-ku, Yokohama, 235-0012, Japan

Abstract

This study was carried out to clarify the effects of residual chlorine in two rivers on epilithic algal communities. The two rivers of this study are the Onda River and the Itachi River in Yokohama City, receiving the chlorinated sewage effluent. The epilithic algal and water quality were investigated at three sites in both rivers. The number of species of epilithic algal communities was 7 in winter and 5 in summer at the site of high TRC concentration (0.5mg/l) by the sewage effluent, and those was fewer than the number, more than 20, obtained at the site of low TRC concentration (lower than 0.1mg/l). In addition, *Chlamydomonas* sp. and *Monoraphidium fontinale*, green algae and tolerant species for chlorine, predominated at the site of high TRC concentration. However, at the site where has the low TRC concentration than 0.1mg/l down from the site of high TRC concentration, diatoms appeared predominantly and the number of species was more than 20 therefore it is confirmed that epilithic algal communities could be recovered.

In order to estimate the effects of chlorine on algal growth, artificial clay tiles were placed at each study site. The number of species of epilithic algal communities on artificial clay tiles at the site of high TRC concentration was fewer than 6 species on an average all through the two months investigation period. In addition, by removing artificial clay tiles to the site of high TRC concentration from the site of low TRC concentration, the number of species of algae was decreased, and the structure of communities was replaced the predominant species at the site of high TRC concentration. These results indicated that TRC effects on epilithic algal communities in the river.

Key words: river, treated sewage, residual chlorine, epilithic algal community

1. はじめに

日本の都市河川では、1950年代から1970年代の高度成長期に、生活排水や工場排水などが流入することにより、水質が著しく悪化した。その後、水質汚濁防止法による水質規制や、下水道の普及に伴い、河川に流入する排水

は減り、水質は徐々に改善された。横浜市内を流れる河川でも、水質の回復が進み、河川生態系において主要な一次生産者である付着藻類（以下藻類とする）の種類数や多様性が増加している¹⁾。

しかし、下水処理場から排出される処理水が流入する河川では、河川水量の多くを下水処理水が占めるように

なり、下水処理水による河川水質と水生生物への影響が懸念されている²⁻⁴⁾。下水処理は主に活性汚泥法が用いられており、処理後に次亜塩素酸ナトリウム溶液あるいは液化塩素によって消毒され^{5, 6)}、川や海などの公共用水域へ放流されている。これらの処理により、下水処理水の有機物濃度は低下するが、残留塩素が河川に生息する水生生物に悪影響を及ぼすことが指摘されている⁷⁻⁹⁾。下水処理水が藻類に及ぼす影響について、多くの研究が行われているが、それらの多くは汚濁に焦点を当てた研究である¹⁰⁻¹³⁾。残留塩素が藻類に及ぼす影響についての研究は少なく、下水処理汚水で維持されている小川¹⁴⁾、室内の水路や下水処理場の直下¹⁵⁾、ガラス管内¹⁶⁾などで検討された例はあるが、下水処理場の処理水が流入する河川を対象とし、残留塩素が河川付着藻類の群集構造と、増殖に及ぼす影響については十分な知見が得られていないのが現状である。

本研究は、残留塩素が放流先の河川の藻類群集の構造と、増殖に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、処理水の残留塩素濃度が異なる2箇所の下水処理場から排出される処理水が流入する河川の、上流と下流の広い範囲を対象として行った。

2. 方法

2.1 対象河川と調査地点

研究対象とした河川は、横浜市を流れる恩田川といたち川である (Fig. 1)。恩田川は鶴見川の支流で神奈川県横浜市を流れる全長13.1kmの河川で、上流部に下水処理

Fig. 1 Location of study sites in the Onda River and the Itachi River.

場 (成瀬クリーンセンター) の処理水が約 $77,000\text{m}^3\text{day}^{-1}$ 流入している。成瀬クリーンセンターは標準活性汚泥法により下水を処理し、塩素消毒を行っている。恩田川の調査地点として下水処理場の上流約0.7kmにSt.1、下水処理場の下流0.2kmにSt.2、下水処理場の下流約5kmにSt.3を設定した。いたち川は全長9.0kmで柏尾川と合流する。中流部には下水処理場 (栄第一水再生センター) の塩素消毒された処理水が約 $43,000\text{m}^3\text{day}^{-1}$ 流入している。いたち川の調査地点は、下水処理場の上流約0.2kmにSt.4、下水処理場の下流0.2kmにSt.5と下水処理場の下流約1.5kmにSt.6を設定した。

2.2 現地調査および水質測定項目

恩田川といたち川の各調査地点で、Pocket Colorimeter II 58700-00型 (HACH社製、DPD法) を用いて全残留塩素 (TRC)、携帯用マルチ水質測定装置 (Sension156, HACH社製) を用いて水温、電気伝導率 (EC) と pH を測定した。水質分析用の河川水は採水後、冷暗所に保存して研究室に運搬した。河川水をメンブランフィルター (Millipore HAWP 04700, 孔径: $0.45\mu\text{m}$) で濾過し、イオンクロマトグラフ (Dionex DX-120) によりアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、とリン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) を測定した。

水質調査は冬季 (2008年2月~3月) と夏季 (2008年8月~9月) に約2週間に1回の頻度で合計6回行い、得られた水質データを藻類の生育状況調査と、藻類増殖実験の水質情報として用いた。流量は電磁式流速計 (KENEK VE-10) で測定した各地点の流速、水深と流れ幅から求めた河川の断面積より算出した。恩田川のSt.1, St.2, St.3の流量はそれぞれ $0.30\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $1.18\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $1.72\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ で、いたち川のSt.4, St.5, St.6の流量は $0.10\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $0.41\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $0.72\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

2.3 藻類の生育状況調査

付着藻類のサンプルは、各調査地点の河床にある表面が平滑な礫から、 $10\times 10\text{cm}$ 内に付着しているものを、ゴム製のコドラートを礫表面に当て、赤鉛筆で枠に沿って線をひき、枠内の付着物をナイロンブラシで擦り落して採取した ($n=1$)。サンプルを蒸留水 100ml に懸濁してその 90ml を藻類の現存量としてクロロフィル *a* (Chl. *a*) の測定に供した。残りの 10ml を藻類の群集構造を評価のための試料とし、ポリビンに入れホルマリンをサンプル容量の3~5%程度加えて固定した。

Chl. *a* の測定は、藻類サンプルをメンブランフィルタ

ー (Millipore HAWP 04700) で濾過して90%アセトンで抽出し、抽出液の吸光度を分光光度計 (HITACHI 社製 U-2000) で4つの波長 (750nm, 663nm, 645nm と 630nm) の吸光度を測定し¹⁷⁾, Jeffrey & Humphrey (1975)¹⁸⁾ の式により Chl. *a* 量を求めた。藻類の群集構造の評価は一次プレパラートを用い、光学顕微鏡 (BH-2, OLYMPUS 社製) で、サンプル毎に400細胞程度の生細胞を同定して行った。種名の同定は主に Patrick & Reimer¹⁹⁾ と Krammer & Lange-Bertalot²⁰⁾ に基づいて行った。藻類サンプルの採取は、恩田川で2008年冬季 (2月5日) と夏季 (8月1日)、いたち川で2008年冬季 (2月25日) と夏季 (8月1日) に行った。

2. 4 藻類の増殖実験

藻類の増殖実験は、恩田川といたち川の各地点の川床に、人工基物 (ミカゲ石製: 21cm length, 10cm wide, 2 cm height) を2008年2月から4月の2ヶ月間設置し、その間に2週間に1回、恩田川で計4回、いたち川で計3回、人工基物の表面5×5cm内に付着しているものを採取し (n=3)、藻類の現存量の測定と群集構造の評価を行った。また、人工基物を設置して2週間後に、St.1とSt.2, St.4とSt.5の人工基物を入れ替えた。入れ替え後、恩田川で6週間、いたち川では4週間設置し、その間に2週間に1回、恩田川で計3回、いたち川で計2回、同様の調査を行った。なお、藻類のサンプルの採集、現存

量の測定と種の同定は、藻類の生育状況調査で用いた方法と同一の方法で行った。

2. 5 統計解析

各地点の藻類群集を分類するため、藻類生育調査で得られた各地点の藻類群集を用い、群平均法によりクラスター分析を行った。また、各地点の藻類群集を用いて Detrended Correspondence Analysis (DCA) による序列化を行い (PC-ORD: Windows 版5), 得られた各地点の藻類群集のDCAのスコアと、水質測定値の間の相関をピアソンの相関係数により検討し、藻類群集に影響を及ぼす要因を推定した。

藻類の増殖実験で、藻類の種類数について、地点間と調査期間を主因子として繰り返しのある二元配置分散分析 (有意水準5%) を行い、各調査時の地点間をチューキー検定による多重比較を行った。また、増殖実験で人工基物を入れ替えた後に、チューキー検定による多重比較を行った。

3. 結果

3. 1 各地点水質測定結果

恩田川といたち川の各地点の水質測定結果をTable 1に示す。冬季の恩田川といたち川の下水処理水の放流口に近接したSt.2とSt.5の水温は、 $18.3 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ と $17.4 \pm$

Table 1 Water quality at each study site in the Onda River and the Itachi River.

		Onda River			Itachi River		
		St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6
Temperature (°C)	W	12.7±2.7	18.3±1.6	12.5±3.2	10.6±3.0	17.4±1.5	15.2±2.1
	S	24.8±0.5	27.7±0.6	26.3±0.9	24.6±0.6	26.4±1.9	26.0±1.3
EC (μS/m)	W	29.5±0.6	53.2±4.7	45.7±3.7	68.6±2.1	56.1±3.9	63.4±4.1
	S	29.0±0.5	50.3±2.5	44.8±6.5	86.8±3.6	54.5±5.0	60.4±2.4
pH	W	9.6±0.4	7.1±0.2	7.8±0.1	8.0±0.3	7.0±0.0	7.6±0.03
	S	8.9±0.3	6.9±0.1	7.2±0.2	7.8±0.1	6.8±0.3	7.3±0.1
TRC (mg/l)	W	0.03±0.01	0.52±0.05	0.06±0.02	0.02±0.01	0.04±0.02	0.02±0.01
	S	0.06±0.03	0.56±0.01	0.08±0.02	0.06±0.03	0.04±0.01	0.07±0.03
NH ₄ -N (mg/l)	W	0.01±0.02	9.48±2.19	6.28±2.38	0.24±0.18	0.06±0.10	0.29±0.15
	S	0.03±0.04	9.04±1.21	6.70±1.82	0.21±0.07	0.00±0.00	0.00±0.00
NO ₂ -N (mg/l)	W	0.07±0.05	0.31±0.08	0.65±0.14	0.09±0.06	0.00±0.00	0.00±0.00
	S	0.08±0.07	0.28±0.04	0.45±0.29	0.13±0.02	0.00±0.00	0.00±0.00
NO ₃ -N (mg/l)	W	3.75±0.47	3.74±2.07	5.26±2.04	0.75±0.30	5.70±1.76	5.35±2.27
	S	3.12±0.65	1.08±0.29	1.79±1.05	1.17±0.51	6.69±0.74	6.38±1.50
TIN (mg/l)	W	3.83±0.44	12.47±0.22	13.25±4.30	1.08±0.52	5.75±1.67	5.64±2.40
	S	3.23±0.57	10.04±1.37	8.93±0.70	1.51±0.58	6.69±0.74	6.38±1.50
PO ₄ -P (mg/l)	W	0.06±0.10	0.33±0.23	0.35±0.22	0.07±0.10	0.44±0.08	0.44±0.10
	S	0.05±0.09	0.53±0.19	0.38±0.10	0.22±0.07	0.67±0.05	0.74±0.23

W: Winter, S: Summer, mean ±1SD, n=3.

1.5℃で、下水処理場の上流のSt.1とSt.4 ($12.7 \pm 2.7^\circ\text{C}$ と $10.6 \pm 3.0^\circ\text{C}$)に比べて約6℃高かった。ECは、冬季、夏季とも恩田川で下水処理場下流のSt.2とSt.3で約50 $\mu\text{S}/\text{m}$ と45 $\mu\text{S}/\text{m}$ で、上流のSt.1 (約30 $\mu\text{S}/\text{m}$)に比べて上昇した。しかし、いたち川ではそのような傾向は示されなかった。両河川のpHは、下水処理場の上流地点に比べて、下流地点ではやや低かった。恩田川のSt.2のTRC濃度は、調査期間通じて約0.5mg/lで、その他の地点に比較してその濃度は約10倍高かった。恩田川のSt.1、いたち川のSt.4、St.5とSt.6では、TINのほとんどを $\text{NO}_3\text{-N}$ が占めた。それに対して、恩田川のSt.2とSt.3では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が

TINに占める割合が大きかった。両河川の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、下水処理場の下流地点で増加した。

3.2 河川の藻類群集

藻類群集の特徴についてTable 2に示す。両河川で各地点の現存量は夏季に比べて冬季が多く、特にSt.2の現存量は716 chl. *a* mg/m²で最も多かった。種類数はSt.2で冬季と夏季に7種と5種で少なく、緑藻類の*Chlamydomonas* sp.と*Monoraphidium fontinale*の2種で群集の約70%を占め、珪藻類の*Nitzschia palea*も多く確認された。St.1で冬季に珪藻類の*Diatoma vulgaris*,

Table 2 Predominant epilithic algal species at each study site in the Onda River and the Itachi River.

Species	Onda River						Itachi River					
	Winter			Summer			Winter			Summer		
	St.1	St.2	St.3	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.4	St.5	St.6
Rhodophyceae												
<i>Audouinella</i> sp.			+								+	+
Bacillariophyceae												
<i>Achnanthes lanceolata</i>			++	+		+			+	+	++	+
<i>Cocconeis pediculus</i>				++						+		
<i>Cocconeis placentula</i>				++								
<i>Cyclotella</i> sp.							+++		+			
<i>Diatoma vulgaris</i>	++						+	+				
<i>Fragilaria pseudogaillonii</i>	+	+		+		+			++	+	++	++
<i>Gomphonema minutum</i>	+									+		
<i>Gomphonema parvulum</i>					++	+		++			+	++
<i>Gomphonema pseudoaugur</i>		+										
<i>Melosira varians</i>	+			+				+	++	++	++	+++
<i>Navicula cryptotenella</i>	+			+		+		+				
<i>Navicula gregaria</i>	+	+		+		++	+	++	+	+		+
<i>Navicula marginalithii</i>	+			+			++			+		
<i>Navicula recens</i>						+						
<i>Navicula seminulum</i>			+			++						
<i>Navicula symmetrica</i>						+						
<i>Navicula veneta</i>			++			+		++	+			
<i>Navicula viridula</i> v. <i>rostrata</i>				+						+	+	
<i>Navicula yuraensis</i>	+			+						+		
<i>Nitzschia acicularis</i>							+					
<i>Nitzschia amphibia</i>	+		++			+		+++	+++	+	+	+
<i>Nitzschia dissipata</i>							+			+		
<i>Nitzschia fonticola</i>	+		+									
<i>Nitzschia linearis</i>			+				+	+	+	+		+
<i>Nitzschia palea</i>		++	+		++	++						+
<i>Synedra ulna</i>				+								+
Chlorophyceae												
<i>Chlamydomonas</i> sp.		+++			++							
<i>Monoraphidium fontinale</i>		+++			+++	+						
<i>Scenedesmus</i> spp.		+										
Number of species	32	7	27	29	5	22	34	31	33	31	21	21
Chlorophyll <i>a</i> (mg/m ²)	207.9	716.2	426.6	14.55	107.9	62.48	385.5	326.3	251.7	18.71	41.49	106.1

+ $\geq 3\% < 10\%$; ++ $\geq 10\% < 20\%$; +++ $\geq 20\%$.

夏季に珪藻類の *Cocconeis pediculus* と *Cocconeis placentula*, St.3 で冬季に珪藻類の *Achnanthes lanceolata*, *Navicula veneta* と *Nitzschia amphibia*, 夏季に珪藻類の *Navicula gregaria*, *Navicula seminulum* と *Nitzschia palea* が優占していた。いちち川の St.4 で冬季に珪藻類の *Cyclotella* sp. と *Navicula marginalithii*, 夏季に珪藻類の *Melosira varians* が優占していた。St.5 で冬季に珪藻類の *Gomphonema parvulum*, *Navicula gregaria*, *Navicula veneta* と *Nitzschia amphibia*, 夏季に珪藻類の *Achnanthes lanceolata*, *Fragilaria pseudogaillonii* と *Melosira varians* が優占し, St.6 では冬季に珪藻類の *Fragilaria pseudogaillonii*, *Melosira varians* と *Nitzschia amphibia*, 夏季に珪藻類の *fragilaria pseudogaillonii*, *Gomphonema parvulum* と *Melosira varians* が優占していた。

3. 3 クラスター分析とDCAによる序列化

各地点の冬季と夏季の藻類群集に基づいてクラスター分析によって調査地点を分類した結果, 3つのクラスターに分類され, 分割過程をFig.2に示す。クラスター分析による第一分割では緑藻類の *Chlamydomonas* sp. と *Monoraphidium fontinale* が優占する恩田川の下処理場の処理水放流口に近接したSt.2と, その他の地点で分割された。次に, 恩田川といちち川の下処理場の上流に位置するSt.1, St.4と, 下水処理場の下流のSt.3, St.5とSt.6で分割された。

各地点の冬季と夏季の藻類群集に基づいて行ったDCAによる序列化の結果をFig.3に示す。得られた軸の固有値は1軸:0.80と2軸:0.20であった。1軸ではSt.2とその他の地点がスコア200付近で分割されており, クラスター分析の第一分割と同様の傾向を示した。2軸ではSt.2を除いてスコア110を境に夏季と冬季に分割された。

各地点のDCAの軸のスコアと水質の相関関係をTable 3に示す。1軸ではTRC ($R=0.96$) と $\text{NH}_4\text{-N}$ ($R=0.90$) がスコアとの間に強い正の相関関係が認められた ($p < 0.01$)。2軸のスコアでは水温との間に負の相関関係 ($R = -0.73$) が認められた ($p < 0.01$)。

3. 4 人工基物上の藻類群集の変化

恩田川といちち川で, 冬季に人工基物を用いて行った増殖実験期間中の現存量と種類数の変化をFig.4とFig.5に示す。調査期間を通して恩田川のSt.1とSt.3の現存量は少なかったが, St.2では人工基物を設置して4週間後

Fig. 2 Classification of algal communities based on group average method of epilithic algal communities at each study site. W; Winter, S; Summer.

Fig. 3 Ranking by Detrended Correspondence Analysis. W; Winter, S; Summer.

Table 3 Score of DCA and correlation of water quality.

	Axis 1	Axis 2
Temperature	0.31	-0.73*
pH	-0.52	0.07
EC	-0.11	0.11
TRC	0.96*	-0.07
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.90*	0.03
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.46	0.05
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.20	-0.01
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.31	-0.09

*; $p < 0.01$

Fig. 4 Algal accumulation (mean±1SD, n=3) on artificial substrata at each study site.

に約263 Chl.*a* mg/m²に急激に増加し、6週間後にピークに達し (約457 Chl.*a* mg/m²), その後、減少した (Fig. 4A)。いたち川では、St.4の現存量はSt.5とSt.6に比べて、2週間までは少なかったが、その後は各地点で現存量の差異は少なかった (Fig. 4B)。

種類数は、恩田川のSt.1とSt.3で人工基物を設置して2週間後に平均18種以上で、その後、調査期間を通して平均21種以上確認された (Fig. 5A)。一方、St.2の種類数は調査期間を通して平均6種以下と少なかった。種類数は地点間 ($F=483.6$, $df=2, 35$, $P<0.01$), 調査期間 ($F=6.9$, $df=3, 35$, $P<0.01$) で有意差が認められ、地点間と調査期間の交互作用も認められた ($F=7.16$, $df=6, 35$, $P<0.01$)。また、種類数は調査期間を通してSt.1とSt.3では有意差はなかったが、St.2とSt.1あるいはSt.3の間で有意差が認められた (チューキー検定 $P<0.01$)。

いたち川のSt.4, St.5とSt.6の種類数は、調査期間を通して平均21種以上確認された。種類数は地点間 ($F=3.59$, $df=2, 26$, $P>0.01$) と調査時期 ($F=3.19$, $df=2, 26$, $P>0.01$) でもともに有意な差はなく、それらの交互作用もなかった ($F=0.4$, $df=4, 26$, $P>0.01$) (Fig. 5B)。

各調査地点の主要な藻類の、期間中における出現回数と、相対出現頻度をTable 4に示す。種類数が少なかった恩田川のSt.2で、調査期間を通して緑藻類の

Fig. 5 Algal species richness (mean±1SD, n=3) on artificial substrata at each study site.

*Monoraphidium fontinale*が全体の半分以上を占め、珪藻類の*Gomphonema parvulum*も多く確認された。St.1で珪藻類の*Cocconeis placentula*と*Nitzschia fonticola*が、St.3で珪藻類の*Achnanthes lanceolata*と*Nitzschia amphibia*の出現頻度が大きかった。いたち川のSt.4では珪藻類の*Nitzschia dissipata*と*Nitzschia frustulum*, St.5とSt.6では珪藻類の*Achnanthes lanceolata*と*Nitzschia amphibia*の出現頻度が大きかった。

3.5 人工基物の入れ換えによる藻類群集の変化

恩田川のSt.1とSt.2, いたち川のSt.4とSt.5の人工基物を入れ換え、その後の種類数の変化をFig.6に示す。St.1の人工基物をSt.2移動すると種類数は明瞭に減少し (Fig. 6A), St.2の人工基物をSt.1に移動すると種類数は明瞭に増加した (Fig. 6B) (チューキー検定 $P<0.05$)。一方、いたち川のSt.4とSt.5における人工基物の入れ換えでは、種類数の変化は小さかった (チューキー検定 $P<0.05$) (Fig. 6C, Fig. 6D)。

Fig.7にSt.2で優占的に出現した緑藻類の*Monoraphidium fontinale*と珪藻類の*Gomphonema parvulum*の相対出現頻度の変化を表す。緑藻類の*Monoraphidium fontinale*は人工基物を設置して2週間後に約60%を占め、その後はやや減少した。珪藻類の

Table 4 The observed numbers (Onda River; four times, Itachi River; three times) of important species of algae on artificial substrata at each study site. The number in parentheses are the average of relative abundance and 1 SD; species; 3% total are not shown.

Species	Onda River			Itachi River		
	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6
Rhodophyceae						
<i>Audouinella</i> sp.			3(11.6±10.9)			3(13.8±9.7)
Bacillariophyceae						
<i>Achnanthes lanceolata</i>	4(5.2±4.4)		4(19.2±10.9)	3(6.6±4.7)	3(20.2±2.7)	3(17.0±2.6)
<i>Cocconeis placentula</i>	4(20.6±20.0)					
<i>Diatoma vulgaris</i>	4(9.9±13.4)					
<i>Gomphonema parvulum</i>		4(18.2±11.4)	4(4.4±1.9)	3(4.3±4.2)	3(11.1±4.3)	
<i>Melosira varians</i>	4(3.3±2.4)					
<i>Navicula gregaria</i>	4(6.5±1.0)		4(4.4±3.1)	3(7.7±2.7)	3(6.7±5.0)	3(5.2±3.6)
<i>Navicula margaliithii</i>				3(7.4±1.5)		
<i>Navicula seminulum</i>			4(5.1±2.7)			
<i>Navicula veneta</i>	4(3.3±1.1)		4(8.3±2.2)			
<i>Navicula viridula v. rostrata</i>					3(7.5±5.1)	3(5.3±3.2)
<i>Nitzschia acicularis</i>				3(7.6±13.1)		
<i>Nitzschia amphibia</i>	4(5.1±3.3)		4(24.2±11.9)	3(8.8±4.0)	3(19.2±9.8)	3(29.6±8.6)
<i>Nitzschia dissipata</i>				3(12.6±9.8)		
<i>Nitzschia fonticola</i>	4(21.3±7.8)			3(5.3±1.0)	3(3.5±3.0)	3(3.4±3.5)
<i>Nitzschia frustulum</i>				3(14.3±1.7)	3(5.3±4.8)	
<i>Nitzschia palea</i>				3(6.7±7.4)		
Chlorophyceae						
<i>Chlamydomonas</i> sp.		4(12.0±7.3)	4(4.6±2.9)			
<i>Monoraphidium fontinale</i>		4(61.2±9.4)	4(3.3±1.2)			
<i>Scenedesmus</i> spp.		4(5.6±6.6)

Fig. 6 Change in the algal species richness (mean±1SD, n=3) on artificial substrata in transfer experiment.

Fig. 7 Change in the relative abundance of cell number of predominant epilithic algal species (mean $\pm$ 1SD, n=3) on artificial substrata in transfer experiment.

*Gomphonema parvulum*は2週間後に約20%に増加し、その後も徐々に増加し、6週間後には約50%に達した。しかし、St.2からSt.1に移動した人工基物では、両種はほとんど確認されなかった (Fig. 7A)。一方、St.1の人工基物をSt.2に移動すると、両種の割合が明瞭に増加した (Fig. 7B)。

4. 考察

恩田川の冬季の藻類現存量は、St.1で207 Chl.*a* mg/m²、St.2では716 Chl.*a* mg/m²、St.3では427 Chl.*a* mg/m²で、St.2の現存量が多かった。また、人工基物を用いて行った増殖実験においても、St.2の現存量のピークは約450 Chl.*a* mg/m²で、St.1とSt.3の150 Chl.*a* mg/m²以下に比べて明瞭に多かった。

荒谷ら¹⁵⁾は室内水路で行った実験で、TRC濃度が0.9～5.8mg/lの範囲において、TRC濃度が高くなるにつれて、藻類現存量が減少する結果を得ている。また、Fukushima・Kanada¹⁴⁾は下水処理水で維持されている小川で、人工基物を用いて行った藻類の増殖実験で、残留塩素濃度が約2.0mg/l地点の藻類現存量は、期間(約1ヶ

月)を通して非常に少なく、20 Chl.*a* mg/m²を超えることはなかったが、下流で残留塩素濃度が0.4mg/l地点の現存量は明瞭に大きくなったことを報告している。

本研究で、恩田川のSt.2のTRC濃度は約0.5mg/lで、St.1とSt.3のTRC濃度(約0.05mg/l)に比べて非常に高かったが、藻類の現存量は減少することにはなかった。これは、TRC濃度が0.5mg/lでは藻類の現存量に影響する濃度に達していないことを示唆している。

TRC濃度が高い恩田川のSt.2の藻類の種類数は、冬季に7種、夏季には5種で、TRC濃度が低いSt.1とSt.3や、いたち川の各地点で出現した種類数(20種以上)に比べて非常に少ない。このような種類数の減少は、TRCの影響によるものと考えられる。また、St.2で緑藻類の*Chlamydomonas* sp.と*Monoraphidium fontinale*が優占的に出現した。緑藻類の*Chlamydomonas* sp.と*Monoraphidium fontinale*は塩素に耐性がある種として室内水路実験¹⁵⁾、TRC濃度が高い下水処理場の排水口や下水処理場の直下^{14, 21, 22)}などで行われた既往研究で報告されており、St.2の藻類群集は塩素の影響を強く受けていることが示された。

しかし、TRC濃度が高いSt.2の下流側に位置するSt.3

で塩素に耐性がある緑藻類が減少し、珪藻類が優占的に出現して、種類数が20種以上確認された。St.3は下水処理場の下流約5 kmにあるためTRC濃度が低くなり、それに伴って藻類群集が回復したと考えられる。

人工基物を用いた藻類の増殖実験で、恩田川のSt.1とSt.2の人工基物を入れ替えると藻類群集が大きく変化するに對し、いたち川のSt.4とSt.5の入れ替え実験ではそのような傾向が見られなかった。その要因としてTRC濃度の差異による影響であると考えられ、恩田川のSt.1のTRC濃度が約0.03mg/l、St.2では約0.5mg/lでその差異が約17倍あるが、いたち川のSt.4とSt.5のTRC濃度は約0.02mg/lと0.04mg/lで差異が小さくそのため藻類群集に変化がなかったと考えられる。

室内の水路で、塩素消毒されていない処理水に塩素を添加してTRC濃度を6段階に設定して行った実験で、TRC濃度が0.07~0.93 mg/lでの藻類群集は、緑藻類が優占する構造となり、群集を構成する種類数は少なく、多様性指数も著しく低下したことが報告されている¹⁵⁾。このような傾向は、本研究結果にも示されている。また、下水処理水で維持されている小川で、人工基物をTRC濃度が低い地点(0.1mg/l以下)から高い地点(1.5~2.0mg/l)に移動すると、人工基物上の藻類群集は珪藻類が優占する群集構造から、緑藻類の*Choricystis chodatii*と*Monoraphidium fontinale*が優占する群集構造に変化し、種類数や多様性が著しく減少することが報告されている¹⁴⁾。

本研究の対象とした下水処理水が流入する河川でも、TRC濃度が約0.5mg/l地点で、藻類の種類数が少なく、塩素耐性種の緑藻類が優占的に出現した。また、TRC濃度が低い地点から高い地点に人工基物を移動した際に、種類数が減少し、藻類群集が変化した。これらのことは、塩素消毒された下水処理水が流入する河川でも、TRCが藻類群集に影響を及ぼすことを示している。

5. まとめ

本研究は、残留塩素が放流先の河川の藻類群集の構造と増殖に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。調査は、処理水の残留塩素濃度が異なる2箇所の下水処理場の上流と下流を対象として行い、以下の知見が得られた。

藻類群集の種類数は、TRC濃度が高い(約0.5mg/l)下水処理場の放流点付近の地点で冬季と夏季に7種と5種で、TRC濃度が低い(約0.04mg/l)放流先付近の地点(冬

季31種、夏季21種)に比べて少なく、緑藻類の*Chlamydomonas* sp. と*Monoraphidium fontinale*が優占的であった。しかし、TRC濃度が0.1mg/l以下に低下すると、珪藻類が優占的に出現し、種類数が20種以上になり、藻類群集が回復することが示された。

人工基物を用いた藻類の増殖実験で、TRC濃度が高い地点における藻類の種類数は、調査期間約2ヶ月を通して平均6種以下で、TRC濃度が低い地点に比べて少なかった。TRC濃度が低い地点から高い地点に人工基物を移動すると、人工基物上の藻類の種類数が減少し、珪藻類が優占する群集から緑藻類の*Monoraphidium fontinale*が優占する群集構造に変化した。

参考文献

- 1) 福嶋悟, 2007. 都市河川における付着藻類群集の長期的変遷. 水処理技術, 48(3), pp.103-110
- 2) 相澤治郎・伊藤義秋・伊藤歩・北田久美子・海田輝之・大村達夫, 1999. 下水処理水が河川底生生物及び水環境に与える影響, 日本水処理生物学会誌, 35(4), pp.247-259
- 3) 笹尾圭哉・白崎亮・田中宏明・玉本博之, 2003. 下水処理水が放流先の生物相に与える影響, 下水道協会誌, 40(483), pp.33-37
- 4) 和波一夫・竹内健, 2008. 都市排水の環境影響に関する研究(まとめ)―河川水質・底生生物に及ぼす下水処理水の影響―東京都環境科学研究所年報, pp.38-46
- 5) 大垣眞一郎, 1988. 下水処理の消毒, 水質汚濁研究, 11, pp.282-286
- 6) 南部敏博, 2000. 排水の消毒, 水の消毒法―その2, 造水技術 Vol.26 No.3 pp.11-17
- 7) Brungs, W.A. 1973. Effects of residual chlorine on aquatic life, J.Wat.Pollut.Cont.Fed., 45 pp.2180-2193
- 8) 藤田直二, 1988. 塩素処理水の水生生物に与える影響, 用水と廃水, 30(6) pp.3-11
- 9) 竹田茂, 2004. 水の消毒に用いる塩素の水環境への排出実態と生態系への影響, Bokin Bobai Vol.32, No.10 pp.515-522
- 10) Sabater, S., Sabater, F. & Tomas X. 1987. Water quality and diatom communities in two Catalan rivers (N. E. Spain). Wat. Res, 21 pp.901-911
- 11) 福嶋悟・小市佳延, 1992. 水質の回復が河川藻類群集に及ぼす影響, 横浜市環境科学研究所報第, 16, pp.23-36
- 12) Fukushima, S., Fukushima, H. & Koichi, Y. 1994. Effects of self-purification on periphytic algal communities in lotic systems. Verh. Internat. Verein. Limnol, 25, pp.1966-1970
- 13) Abe, S. and Sudo, R. 1998. Effect of sewage effluent on periphytic algal communities on artificial substrata. Jpn. J. Water Treat. Bio, 34(2), pp.15-26
- 14) Fukushima, S., and Kanada, S. 1999. Effect of

- chlorine on periphytic algae and macroinvertebrates in a stream receiving treated sewage as maintenance water. Jpn. J. Limnol., 60(4), pp.569-583
- 15) Aaratani, Y., Tajima, A and Minamiyama, M. 2007. Relationship of nutrient and residual chlorine concentration in treated wastewater with periphytic algae grown in a stream receiving treated wastewater. Water Science & Technology Vol.55, No.1-2, pp.375-386
- 16) 阿部早智子・須藤隆一, 1998. ガラス管内の付着藻類相に与える消毒剤の効果, 日本水処理生物学会誌, 34 (4), pp.279-289
- 17) 建設省河川局, 1997. 河川水質試験法 (案) 1997年度版—試験方法編—, 技報堂出版, 東京
- 18) Jeffrey, S.W. and Humphrey, G.F. 1975. Biochem. Physiol. Pflanzen **167**, pp.191-194
- 19) Patrick, R. & Reimer, C.W. 1966, 1975. The diatoms of the United States. Vol.1-2. The Academy of Natural Sciences of Philadelphia
- 20) Krammer K, Lange-Bertalot H 1986, 1988, 1991, 1991. Bacillariophyceae. In *Süßwasserflora Von Mitteleuropa* 2/1-4 (eds Ettl H, Gerloff H, Heynig H, Mollenhauer, D). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- 21) 福嶋悟, 2004. 横浜市を流れる河川における付着藻類の分布状況, 横浜市環境創造局, 横浜の川と海の生物 (第10報・河川編), pp.157-167
- 22) 小市佳延・福嶋 悟, 2004. 河川における環境基準達成のための要因に関する研究 (第2報) 柏尾川水系, 横浜市環境科学研究所報, 28, pp.11-19
(受付 2009.11.16)
(受理 2010.4.19)