都市小河川における付着藻類群落と生育環境

Succession of Epilithic Algae and Water Quality Environment in Urban Small Streams

阿部早智子¹、妹尾 孝¹、堀 昌善¹、須藤隆一²

¹仙台市衛生研究所／〒984-0002 仙台市若林区卸町東2-5-10

²生態工学研究所／〒983-0841 仙台市宮城野区原町3-2-55

SACHIKO ABE¹, TAKASHI SENOO¹, MASAYOSHI HORI¹, and RYUICHI SUDO²

¹Sendai City Institute of Public Health/Wakabayasiku, Sendai, 984-0002, Japan

²Institute of ecological engineering/Miyaginoku, Sendai, 983-0841, Japan

Abstract

The survey was conducted to clarify the succession of the epilithic algal communities in two small streams (the River Tsunaki and the River Zaru) during Apr. 1997 – Apr. 1998. The riverhead of two streams is almost same. The River Tsunaki is a branch of the River Hirose, a symbolic river in Sendai City, receiving the ozonated sewage effluent. While the River Zaru is a branch of the River Natori, receiving the effluents from housing developments.

The epilithic algae and water quality were investigated at eight sites (three in the R. Tsunaki and five in the R. Zaru) every month. The average of water temperatures were 11 – 18 °C, velocities were 0.25 – 1.12 m/s. The average concentrations of BOD were 0.7 – 1.2 (the River Tsunaki), 0.6 – 2.2 mg/l (the River Zaru). The many nutrient concentrations were constantly high at the downstream site in the R. Tsunaki by the sewage effluent.

The average amounts of chl *a* were 76 – 470 mg/m². The amounts of chl *a* were tended to increase during winter. Among the algal species identified (77 species in the River Tsunaki) and (80 species in the River Zaru) *Homoeothrix janthina*, *Stigeoclonium lubricum*, *Rhoicosphenia abbreviata*, *Nitzschia inconspicua* and *Cymbella minuta* dominated. At the site of rapid velocity the filamentous algae dominated, and at the sites of upper 0.5 m/s velocity the relative abundance of filamentous algae and the velocity related in high ratio ($r=0.70$). And it was found that the epilithic algal communities in each river divided four groups during a year by cluster analysis bases on C_Π similarity and the sewage effluent effected the epilithic algal communities.

The present results showed the efficiency of algal community for monitoring river environments.

Key words : epilithic algal community, sewage effluent, ozonation, *Homoeothrix janthina*

1. はじめに

わが国の河川は欧米諸国に比べ、長さが短く急流であると言われている。そのため、河川は降雨により氾濫を繰り返し、多大な被害を及ぼす厄介なものとなってきた。

洪水対策のためダムが盛んに建設され、治水・利水中心の河川づくりが行われてきたが、近年、住民が水辺で安らげる「親水性」が掲げられるようになった。昭和47年に全国に先駆けて東京都江戸川区に古川親水公園がつくられた後、各地に親水公園が盛んにつくられるようにな

り人が水辺に近づきやすくなったが、更に人工化した河川に自然の生態系に富んだ環境を取り戻そうと「多自然型川づくり」が提唱され始めた。多自然型川づくりの定義は平成2年に建設省から出された通達によると、「河川が本来有している生物の良好な生育環境に配慮し、あわせて美しい自然景観を保全あるいは創出する事業の実施をいう」となっている。また、河川管理上留意すべき点として「生物多様性」の確保と健全な生態系が必要とされている。

生態系は、生物群集を中心とした生物と非生物的環境との物質循環系のことであり、様々な環境要因により多様な生態系が形成される。大都市の汚濁の進んだ河川については多くの検討がなされているが、比較的清浄な水質が保たれている地方の小河川についての報告は少ない。本研究は、平均水温が低く、流程、流量が小さいBOD値が1～2 mg/l程度の小河川で形成される生態系を明らかにするため、水源が同位置地域にある仙台市内の2小河川（綱木川と筑川）を対象として、生態系で最も低次の食物連鎖を構成している付着藻類について藻類群落の化学組成、種構成、および生育環境の検討をおこなった。

2. 綱木川、および筑川の概要

綱木川、筑川とも、水源を仙台市西部の太白山近辺に発する流程2.75km（綱木川）、6.2km（筑川）、流域面積4.6km²（綱木川）、8.2km²（筑川）、最下流での流量0.33m³/s（綱木川調査時の平均）0.41m³/s（筑川調査時の平均）程度の小河川である。綱木川は仙台市のシンボリック河川である広瀬川の中流域に、筑川は名取川の下流域にそれぞれ流入する。広瀬川と名取川は筑川流入後、合流して太平洋へ注ぐ。

綱木川は、広瀬川に流入する200m上流でオゾン消毒された下水処理場処理水が1993年4月から流入しており、流入量は操業当初は2,000m³/日であったが、その後放流量が増加し調査時は当初の3倍の6,000m³/日となっていた。一方、筑川には団地排水、病院排水等が流入する他、名取川の分水流が流入している。また、途中で農業用水として取水されている。2河川とも、中流域まで多自然型河川改修工事が行われており、1999年度まで工事が継続される予定である。

3. 調査方法

3.1 調査期間

調査は、1997年4月から1998年4月（綱木川）、1997年5月から1998年4月（筑川）まで月1回の頻度で実施した。ただし、河川改修工事中の筑川の1地点（'98年2月）については水が流れていなかったため調査不能であった。

3.2 調査地点

綱木川3地点、筑川5地点の計8地点である。各地点の位置関係はFig. 1に示す通りである。T1は綱木川の上流域で、T2はT1から約1km下流でオゾンで消毒された処理水の流入直後、T3はその100m程下流で広瀬川に流入する直前の地点である。Z1は筑川の上流域で自然観察の森内に位置する。Z2はZ1の1.2km下流、Z3はZ2の1.5km下流、Z4はZ3の0.85km下流、Z5はZ4の2km下流で名取川に流入する0.45km上流の地点である。

3.3 調査項目

水質の調査項目は、水素イオン濃度（pH）、生物化学的酸素要求量（BOD）、全有機炭素（TOC）、懸濁物質（SS）、塩素イオン（Cl）、導電率（EC）、総窒素（T-N）、アンモニウム態窒素（NH₄-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、硝酸態窒素（NO₃-N）、総リン（T-P）、リン酸態リン（PO₄-P）、 $\lambda = 260\text{nm}$ の紫外外部吸光度E260の13項目とした。また、現場で、水温、流速を測定した。試験方法は、JIS K 0102¹⁾、および上水試験方法²⁾に従った。

付着藻類は、河床の石（2個）から、5cm四方の型枠（コアドラート）を用いて表面の付着物をすべてブラシでこすり落としたものを試料とした。試料を定量した後、その一部をガラス繊維ろ紙（ADVANTEC GC 50、およびワットマン GF/C）で濾過し、乾燥重量（DWとする）、強熱減量（ILとする）、クロロフィルa（chl.a）量を求めた。なお、110℃、2時間加熱後の重量差を乾燥重量、450℃、3時間加熱後の重量差を強熱減量とした。chl.aの測定は、試料を一定量濾過したガラス繊維ろ紙を、90%アセトンで抽出後、吸光度を測定するユネスコ法に依った³⁾。また、様々な大きさで構成されている現場付着藻類群落量を明確に把握するため、現場の石上に付着し数多く計測された緑藻の *Cloniophora* sp. を単離培養したものと下水処理水の流入後計測され始め増加の傾向がある珪藻の *Nitzschia palea* の乾燥重量、細胞数

Fig. 1 Sampling sites of the River Tsunaki and the River Zaru.

と chl. *a* の関係式を求め、それによる評価も併せておこなった。

藻類試料にホルマリンを 3% になるよう添加したものを種類の同定試料とし、その一定量 (0.05 ml) をとり、600 倍で検鏡し種の同定と種ごとの細胞数の計測を行った。同時に硫酸で処理したプレパラートを作成し、種の同定に用いた。

また、藻類調査の結果より生物生育環境の偏りを Shannon (1948) の式⁴⁾による多様性指数 (Diversity index) で、また地点間の生物群落の類似性を木元⁵⁾による類似度指数 C_H に基づくクラスター分析により検討した。

4. 結果、および考察

4. 1 河川水質

各地点での水質の平均、最大、最小、および標準偏差の値を Table 1 に示した。

水温は地点ごとの平均が、綱木川が 12~18℃、筑川が 11~16℃ で筑川は上流から下流にいくに従い上昇したが、綱木川は下水処理水が流入する T 2 で T 1 に比べ平均で 6℃ 高く、特に冬期には筑川では 3℃ の差であったのに対し、綱木川では 13℃ の差がみられた。流速は、筑川の下流地点の Z 4 が平均 1.12 m/s の射流地点であったのを除き、平均で 0.25 (Z 1) ~ 0.50 (Z 3) で、水深は

10.3~21.3 (綱木川)、7.7~17.0 cm (筑川) であった。

pH は、平均 7.5~8.7 の範囲で綱木川 3 地点と筑川の Z 1 の平均は 7.5~7.9 とほぼ中性であったのに対し、Z 2 から Z 5 までは 8.2~8.7 とアルカリ側によっていた。

BOD 値は、綱木川の平均が 0.7~1.2 mg/l、筑川が 0.6~2.2 mg/l で 2 河川とも上流域の BOD 値は同程度で、流量が少なく河床が安定する冬期に高くなる傾向を示した。

SS は、河川改修工事の影響を受けており、T 2 と T 3 では時折 30~40 mg/l 以上になることがあったが、常時高濁度の水質ではなかった。

生活排水の流入の指標となる Cl 濃度は、下水処理水の影響を受ける T 2、T 3 は T 1 (13 mg/l) に比べ平均で約 5 倍 (67、62 mg/l) の高い値を示し、T 2 と T 3 は同様の推移を示していた。また、Z 1 は T 1 と同程度の濃度 (14 mg/l) を示し、'98 年 3 月を除き常時他の地点より低い濃度であった。Z 1 を除く 4 地点は同様の推移を示し、Z 2 が常時高い値 (平均: 35 mg/l) を示していた。

窒素、リンは綱木川が下水処理水の影響を大きく受け、T 1 での T-P 濃度の平均が 0.03 mg/l であるのに対し、T 2、T 3 の平均値はそれぞれ 0.46、0.38 と 10 倍以上の高濃度で、T 2 と T 3 は Cl 同様、同じ様な推移を示していた。T-N についても同様の傾向を示し、処理水の流入により平均で 3 倍の濃度上昇が認められた。筑川は

Table 1 Water anality in each sampling site

(1)

	T1				T2				T3			
	AVG	MAX	MIN	SD	AVG	MAX	MIN	SD	AVG	MAX	MIN	SD
W.T. (℃)	12	21	0	7	18	24	11	4	16	25	7	6
Velocity (m/s)	0.36	0.63	0.12	0.14	0.33	0.45	0.19	0.09	0.33	0.43	0.18	0.08
pH	7.6	8.8	6.8	0.5	7.5	7.7	7.2	0.1	7.7	8.2	7.5	0.2
BOD (mg/l)	0.7	1.3	0.2	0.4	1.2	2.6	0.6	0.6	1.2	1.9	0.7	0.4
TOC (%)	1.9	2.4	1.3	0.3	3.3	4.5	2.6	0.5	3.0	3.7	2.6	0.3
SS (%)	1.8	16	<0.5	4.3	3.6	28	<0.5	7.8	6.6	40	<0.5	11
Cl (%)	13	19	11	3	67	100	44	14	62	110	37	19
EC (μS/cm)	130	180	86	27	360	460	280	41	350	510	270	61
T-N (mg/l)	0.76	1.10	0.44	0.17	2.80	4.00	1.50	0.65	2.40	3.20	1.40	0.53
NH ₄ -N (%)	0.02	0.05	0.01	0.01	0.03	0.08	0.01	0.02	0.03	0.05	0.01	0.01
NO ₂ -N (%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NO ₃ -N (%)	0.61	0.89	0.28	0.17	2.30	3.50	1.10	0.63	2.00	2.70	1.10	0.49
T-P (%)	0.03	0.05	0.02	<0.01	0.46	0.98	0.05	0.32	0.38	0.89	0.04	0.28
PO ₄ -P (%)	0.02	0.04	<0.01	0.01	0.44	0.98	0.04	0.32	0.36	0.89	0.03	0.28
E ₂₆₀	0.10	0.13	0.08	0.02	0.09	0.10	0.08	<0.01	0.10	0.12	0.08	0.01

(2)

	Z1				Z2				Z3			
	AVG	MAX	MIN	SD	AVG	MAX	MIN	SD	AVG	MAX	MIN	SD
W.T. (℃)	11	20	2	6	13	22	5	6	14	24	4	6
Velocity (m/s)	0.25	0.74	0.11	0.17	0.29	0.42	0.14	0.08	0.50	0.71	0.29	0.14
pH	7.9	8.7	7.6	0.3	8.3	9.0	7.7	0.4	8.2	8.6	7.9	0.2
BOD (mg/l)	0.6	1.3	<0.2	0.4	1.0	2.1	0.4	0.5	1.8	3.1	0.9	0.7
TOC (%)	2.3	3.0	1.3	0.5	2.7	3.0	2.3	0.2	2.8	3.6	2.2	0.3
SS (%)	0.9	3.4	<0.5	1.1	4.4	41	<0.5	12	1.7	7.7	<0.5	2.2
Cl (%)	14	33	9	7	35	47	25	7	31	42	23	6
EC (μS/cm)	220	300	150	45	500	650	350	80	450	580	380	62
T-N (mg/l)	0.67	1.00	0.15	0.25	1.30	1.80	0.96	0.23	1.80	2.10	1.40	0.19
NH ₄ -N (%)	0.02	0.05	0.01	0.01	0.02	0.05	0.01	0.01	0.23	0.56	0.08	0.14
NO ₂ -N (%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.08	<0.01	0.02
NO ₃ -N (%)	0.50	0.78	0.01	0.21	1.10	1.50	0.78	0.22	1.30	1.50	0.76	0.21
T-P (%)	0.03	0.07	0.01	0.02	0.05	0.09	0.02	0.02	0.14	0.35	0.07	0.08
PO ₄ -P (%)	0.02	0.04	<0.01	0.01	0.04	0.09	0.01	0.02	0.13	0.34	0.06	0.08
E ₂₆₀	0.11	0.15	0.08	0.02	0.10	0.12	0.09	0.01	0.11	0.12	0.09	0.01

(3)

	Z4				Z5			
	AVG	MAX	MIN	SD	AVG	MAX	MIN	SD
W.T. (℃)	15	29	48	16	30	4	8.6	
Velocity (m/s)	1.12	2.00	0.83	0.34	0.41	0.67	0.15	0.15
pH	8.6	9.4	7.8	0.5	8.7	9.9	8.1	0.6
BOD (mg/l)	1.7	3.1	0.7	0.7	2.2	3.9	1.1	0.9
TOC (%)	2.7	3.2	2.2	0.3	2.6	3.4	2.0	0.4
SS (%)	3.9	8.0	<0.5	2.9	7.3	28	1.5	6.8
Cl (%)	25	33	19	4	24	33	19	4
EC (μS/cm)	350	410	240	47	280	360	190	46
T-N (mg/l)	2.00	3.00	1.30	0.44	1.60	2.50	0.82	0.49
NH ₄ -N (%)	0.09	0.52	0.01	0.14	0.08	0.45	0.01	0.12
NO ₂ -N (%)	0.04	0.06	0.02	0.01	0.03	0.04	0.01	<0.01
NO ₃ -N (%)	1.50	2.20	1.00	0.37	1.20	2.00	0.55	0.46
T-P (%)	0.11	0.16	0.05	0.04	0.09	0.12	0.06	0.02
PO ₄ -P (%)	0.09	0.14	0.05	0.03	0.06	0.09	0.04	0.02
E ₂₆₀	0.11	0.13	0.09	0.01	0.10	0.12	0.08	0.01

T-N、T-Pとも上流のZ1が最も低く流下するに従い高くなる傾向があったが、Z3で時折T-P濃度が高くなることがあった。特に、河川改修工事中の'98年3月はT-Pが0.35mg/lと高い値を示していた。形態別窒素濃度は $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ とも筑川のZ3から下流で高くなる傾向にあり、特に'98年1月にはZ4、Z5で $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が0.52、0.45mg/lと平均の6倍程度の高い値であった。一般に流量が少なくなり、また硝化細菌の活動も抑えられる冬期に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなることが知られている⁶⁾。事実、綱木川に処理水を放流する処理場の調査では、水温や槽の違いによらず亜硝酸細菌 $3\sim7\times10^8$ (MPN)、硝酸細菌 $1\times10^8\sim2.3\times10^9$ (MPN) 計測され、冬期に硝化速度が低下するのは、硝化細菌が減少するのではなく個々の亜硝酸細菌、硝酸細菌の活性が低下するという報告がある⁷⁾。

4. 2 紫外外部吸収からみた河川水質

河川水の有機物は、生物が利用しうる生物易分解性有機物とフミン質類のような生物が利用しにくい生物難分解性有機物に大別される。前者はBOD値で、後者は紫外外部260nmの吸光度(1cmセルの値)E260の値であらわしうることから、E260値から河川水質の評価を試みた。

フミン質類は分子量が1,000~1,500D以上のフミン酸と数百D以下のフルボ酸に大別できる。分子量が1,000~1,500D以上のフミン酸を主体とした高分子部分の生

物難分解性有機物は $\text{TOC}/\text{E260}\approx20$ 程度を示し、分子量が500~600D以下のフルボ酸を主体にした低分子部分は $\text{TOC}/\text{E260}\approx50$ 程度と言われている⁸⁾。周辺が樹木で覆われている上流域のT1、Z1の $\text{TOC}/\text{E260}$ がほぼ20程度と、分子量の大きい有機成分から成り立っていると言える。流下するに従い筑川は $\text{TOC}/\text{E260}$ が平均24.7~26.1と自浄作用等により分子量の小さい成分へと変わっていくが、綱木川はオゾンで処理された下水処理水が多量に流入するため、流入直後のT2では平均37.6、T3は31.8と分子量の比較的小さい生物難分解性成分が占めるようになった。分子量が1,500D程度以下の生物難分解性・易分解性共に水系から凝集等の処理で除去が困難であることから下水の高次処理で除去できない有機物が大量に河川に流入していることが窺える。

次式⁸⁾により生物難分解性の炭素量を求め、E260との関係を見ると、

$$\text{生物難分解性炭素量} = \text{TOC} - \text{BOD} \times 0.375$$

筑川は $r=0.65$ ($n=59$) と高い相関を示した (Fig. 2) が、綱木川は相関が認められなかった。綱木川を地点ごとにみるとT1は $r=0.79$ ($n=13$) と高い相関が得られたが、処理水流入後のT2、T3は相関が認められなかった。オゾン処理により高分子構造が低分子化されるが、原水の質により生物分解性は異なるため相関が認められなかったと思われる。

Fig. 2 Relationships between E260 and non available organic carbon (NAOC) in the River Zaru

4. 3 付着藻類群落

1) 付着物の乾燥重量、強熱減量、および chl. *a* 量

付着物の乾燥重量は付着膜を形成する有機物、および無機物の総量であるが、綱木川が平均で45 (T 1) ~ 110 (T 2) g/m²で、筑川が94 (Z 1、Z 5) ~ 170 (Z 2) g/m²で、冬期に高くなる傾向にあった。また、筑川は5地点とも'97年11月に急激に値が低くなったが、これは降水量の少なかった10月(降水量11.5mm: 平年降水量103.4mm)に形成された藻類膜が11月の降雨(降水量133.5mm: 平年降水量69.1mm)により剥離したためと、水生昆虫が孵化して飛翔したためと思われる。

強熱減量は付着膜中の有機物量を示すが、各地点での平均値は、12 (T 1)、26 (T 2)、19 (T 3)、13 (Z 1)、37 (Z 2)、18 (Z 3)、26 (Z 4)、15 (Z 5) g/m²と乾燥重量の23~42%を占めていた。強熱減量が、流速の増加とともに減少すると言う報告⁹⁾があるが、流速が1.0m/s以上では強熱減量が低くなる傾向が見られた。BODが1~2 mg/l程度の清浄な水質が保たれている都市小河川では、付着物量は流速とともに他の要因にも影響されていると思われる。

藻類の現存量の指標である chl. *a* の各地点での平均値は、180 (T 1)、260 (T 2)、76 (T 3)、140 (Z 1)、470 (Z 2)、140 (Z 3)、300 (Z 4)、150 (Z 5) mg/m²であった。綱木川は3地点とも'98年3月に最大値を示し、特にT 1は1,700mg/m²と最高値であった(Fig. 3)。この時期は、水温が上昇し始める頃で、降雨も少なく河床が安定しており、水生昆虫等による摂食も少なくなる為と考えられる。筑川も冬期に chl. *a* 量が多い傾向が認められた。

夏期(1996年8~9月)にT 2に人工基物を設置し、

基物上に形成された藻類群落を検討したところ chl. *a* 量は4週間後に最大値150~200mg/m²であったが⁸⁾¹⁰⁾、今回の調査でも9月は130mg/m²と同程度の値であったことより、下水処理水流入後のT 2における夏期の chl. *a* 量は150~200mg/m²程度であると言える。

一方、筑川は7~9月の夏期を除き約1ヶ月間隔で chl. *a* 量の増減が観察された(Fig. 4)。多摩川、千曲川等の流量の大きな河川でもほぼ1ヶ月^{11,12)}で最大 chl. *a* 量に達するといわれているが、地方の都市小河川でも約1ヶ月周期で藻類群落の形成、剥離が繰り返されていると言える。

一般に、有機汚濁が多少見られる中流から下流にかけての chl. *a* 量は100~500mg/m²程度であるといわれており、多摩川、千曲川、荒川等の都市河川で100~500mg/m²が、条件によっては15,000mg/m²という高濃度の chl. *a* の計測されている¹³⁻¹⁵⁾ことより、調査2河川は典型的な chl. *a* 量を示す都市小河川と言える。また、景観的に良好な chl. *a* 量の限界値は100~150mg/m²とされている¹⁶⁾が、T 1、T 3はほぼ年間を通して、T 2は8、9、11月だけ満足していた。一方、筑川は5~9月はほぼ各地点とも良好な景観と言えたが、その後は月により変動した。特に生活排水の影響を強く受けているZ 2は9月以降'98年4月まで毎月300~1,400mg/m²、平均660mg/m²の良好な景観とはほど遠い chl. *a* 量であったことから、藻類の増殖量がその生育環境の水質を強く反映していると言える。

2) 分離した藻類の乾燥重量、細胞数、chl. *a* からみた現場藻類量の評価

様々な種類や大きさから構成されている現場藻類量を、より総合的にかつ明確に把握するため緑藻の *Cloniophora* sp. と珪藻の *Nitzschia palea* の乾燥減量(DW)と chl. *a*

Fig. 3 Seasonal changes of chl. *a* in the River Tsunaki

Fig. 4 Seasonal changes of chl.a in the River Zaru

量、および細胞数と chl.a 量 (*Nitzschia palea* のみ) の関係式を求め、換算した。*Cloniophora* sp. は、綱木川で夏期に石の上に糸状に長くたなびいて数多く計測された藻類で、現場で採取したものを単離培養したものである。一方、*Nitzschia palea* (Kützinger) W. Smith 487 は国立環境研究所から譲渡されたものを使用した。

それぞれの関係式は次のとおりである。

- ① 分離した *Cloniophora* sp. の DW と chl.a 量の関係式

$$I L \text{ (mg)} = 130 \times (\text{chl.a mg}) - 0.79 \quad (3.1)$$

- ② *Nitzschia palea* (Kützinger) W. Smith の DW と chl.a 量の関係式

$$I L \text{ (mg)} = 112 \times (\text{chl.a mg}) + 0.032 \quad (3.2)$$

- ③ *Nitzschia palea* (Kützinger) W. Smith の細胞数と chl.a 量の関係式

$$\text{細胞数} (\times 10^6 \text{ cells}) = 710 \times (\text{chl.a mg}) + 0.52 \quad (3.3)$$

現場で採取した石上の付着物の chl.a 量を上記の式にあてはめて総量的評価をすると、*Cloniophora* sp. 量として平均 9.9~34 (綱木川)、19~61 g/m² (筑川) の乾燥重量に換算できた。また、*Nitzschia palea* 量として平均 8.4~29 (綱木川)、16~52 g/m² (筑川) の乾燥重量に、 $5.3 \times 10^{10} \sim 1.9 \times 10^{11}$ (綱木川)、 $1.0 \times 10^{10} \sim 3.3 \times 10^{11}$ cells/m² (筑川) の細胞数に換算できた。2 河川の実際の細胞数は $5.6 \times 10^9 \sim 9.8 \times 10^{10}$ (綱木川)、 $3.7 \times 10^9 \sim 1.0 \times 10^{11}$ cells/m² (筑川) であった。日本の河川の付着藻個体数は、1970 年までは 1 m² あたり $2 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9$ とされ、横浜市内の河川では 1975 年¹⁷⁾には $2.0 \times 10^9 \sim 1.7 \times 10^{10}$ 、1996~97 年の調査では平均 4.6×10^{10} と報告されており¹⁸⁾、調査 2 河川の藻類数が若干多いといえる。

3) 出現種

綱木川の出現種は 77 種 (珪藻 68 種、緑藻 5 種、藍藻 4 種)、筑川は 80 種 (珪藻 69 種、緑藻 8 種、藍藻 3 種) であった。珪藻類が最も多く計測され全出現種 (97 種類) の 88% を占めており、そのなかでも *Navicula* 属 (27 種)、*Nitzschia* 属 (10 種)、*Gomphonema* 属 (9 種) の出現種が多かった。また、調査期間中に数多くの地点 (延べ地点数 98) から計測されたのは、*Nitzschia inconspicua* (79.6%)、*Homoeothrix janthina* (69.4%)、*Rhoicosphenia abbreviata* (68.4%)、*Nitzschia palea* (58.2%)、*Cymbella minuta* (53.1%) であった。

4) 代表種

各調査時に最も出現細胞数が多かった代表種を Table 2、3 に示した。

綱木川上流域の T 1 と筑川上~中流域の Z 1~Z 3 までは、珪藻が代表種となる月が多く、特に Z 1 は '98 年 3 月を除き全て珪藻が代表種となった。これに対し、下水処理水流入後の T 3 と常時流速が 1 m/s 以上の Z 4 では全て藍藻の *Homoeothrix janthina*、*Oscillatoria tenue*、緑藻の *Stigeoclonium lubricum* と垂直方向に伸びる糸状藻類であった。これは、流速が常時大きい地点では基盤に強固に付着する糸状藻類が場を占有してしまうため、基盤への付着力が弱い種が種間競争に負けてしまうためこのような結果になると思われる。

一般的に珪藻は低温で生育しやすく、汚濁が進んでいない水域や群落形成初期に多く出現するが¹⁹⁾、T 1 で '98 年 2 月、3 月に代表種となった *Cymbella minuta* は *Cymbella* 属のなかで最も普通に観察される種で、汚濁に対し感受性が高く、きれいな水域の指標種である。また、T 1 で 9 月に *Cocconeis placenticula* が代表種となったが、*Cocconeis* 属は生物膜の形成過程の最初に出現し、粘質物を分泌して石の表面に全面で着生する¹⁹⁾。'97 年は 7 月中

Table 2 Dominant epilithic algae in the River Tsunaki

Dates	T1	T2	T3
Apr. '97	<i>Cymbella minuta</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
May	<i>Achnanthes japonica</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Oscillatoria tenue</i>
June	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>	<i>Stigeoclonium lubricum</i>
July	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Aug.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Sep.	<i>Cocconeis placentula</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Stigeoclonium lubricum</i>
Oct.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Nov.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Dec.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Chroococcus</i> spp.	<i>Homoeothrix janthina</i>
Jan. '98	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Feb.	<i>Cymbella minuta</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Mar.	<i>Cymbella minuta</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Oscillatoria tenue</i>
Apr.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Oscillatoria tenue</i>	<i>Stigeoclonium lubricum</i>

Table 3 Dominant epilithic algae in the River Zaru

(1)

Dates	Z1	Z2	Z3
May '97	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	<i>Stigeoclonium</i> sp.	<i>Homoeothrix janthina</i>
June	<i>Melosira varians</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
July	<i>Melosira varians</i> <i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>
Aug.	<i>Achnanthes lanceolata</i>	<i>Stigeoclonium</i> sp.	<i>Cocconeis placentula</i>
Sep.	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	<i>Achnanthes lanceolata</i> <i>Rhoicosphenia abbreviata</i> <i>Stigeoclonium</i> sp.	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>
Oct.	<i>Amphora veneta</i>	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>
Nov.	<i>Amphora veneta</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Dec.	<i>Nitzschia inconspicua</i>	<i>Navicula radiosa</i> v. <i>nipponica</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Jan. '98	<i>Amphora veneta</i>	<i>Navicula radiosa</i> v. <i>nipponica</i>	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>
Feb.	<i>Diatoma vulgare</i>	<i>Diatoma vulgare</i>	
Mar.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Diatoma vulgare</i>	<i>Navicula gregaria</i>
Apr.	<i>Amphora veneta</i> <i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>

(2)

Dates	Z4	Z5
May '97	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
June	<i>Oscillatoria tenue</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>
July	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Aug.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Sep.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>
Oct.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Melosira varians</i>
Nov.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Dec.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>
Jan. '98	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>
Feb.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Nitzschia inconspicua</i>
Mar.	<i>Homoeothrix janthina</i>	<i>Homoeothrix janthina</i>
Apr.	<i>Cladophora</i> sp.	<i>Homoeothrix janthina</i> <i>Nitzschia inconspicua</i>

旬から8月にかけて降雨が少なかった(降水量21mm: 平年降水量158mm) ことより、安定した藻類膜が形成された後、剥離し、再び9月に生物膜が形成されていったと思われる。これは、8月の付着物の強熱減量(16g/m²)とchl. *a* 量(90mg/m²) が小さいことから窺える。Z1からZ3では *Rhoicosphenia abbreviata* が代表種になる回数が多かった。また、Z1は他の地点と異なり、珪藻の *Amphora veneta*, *Melosira varians*, *Achnanthes lanceolata*, *Nitzschia dissipata* と言った種が代表種となっていた。*Melosira varians* は茶筒のような細胞がつながって長い糸状の群体をつくる珪藻で環状に並んだ粘液孔が石等に触れたときに粘液糸を出して付着する着生種²⁰⁾で貧腐水からβ-中腐水域までの清浄な水質で流れのゆるい所に分布する種である。他の代表種も貧腐水からβ-中腐水域までの清浄な水質に生育する種類である^{21, 22)}が、'98年2月にZ1で、2、3月にZ2で代表種であった *Diatoma vulgare* は、富栄養化した所で特に冬季に多く出現する種²³⁾と言われている。下水処理水流入直後のT2で代表種となった小型種の *Nitzschia inconspicua* はきれいな水域から汚れた水域まで広範囲に出現する指標種²³⁾で、下水処理水が流入した当初の'93年から'94年にかけての調査でも多数計測されており²⁴⁾、'93年の6月には代表種となっていた。この種は荒川の下流域のZ5でも代表種になる月が多かった。また、T2で下水処理水が流入する前後に30~40%出現し代表種であった²⁴⁾、きれいな水域の指標種である *Rhoicosphenia abbreviata*²³⁾は、今回の調査では0.7~4.8%と出現割合が急減していたが、下水処理水による栄養塩、流速の増加によるものと思われる。

調査途中で低水路の多自然型川づくりの河川改修工事がおこなわれたZ5では、改修工事中の9月には *Nitzschia inconspicua*, *Nitzschia romana* が27.3、18.2%出現したが、改修直後の10月には *Melosira varians* (20.7%)、*Nitzschia palea*(13.8%)、*Synedra ulna* v. *contracta* (13.8%) が優占していた。これら改修中、後に数多く計測された *Nitzschia* 属、*Synedra* 属は、一般に生物膜形成初期に出現する傾向にある²⁵⁾。その後、11月には、日本の河川で安定した藻類群落が発形成された時の優占種といわれる *Homoeothrix janthina*²⁶⁾ が47.6%計測され代表種となったことより、工事後約2ヶ月で藻類群落が安定したと言える。

5) 藻類群落の多様性

多くの種類が生育している生物群集自体、さらには生態系自身が重要であるとされており、第3種の存在により2種類間の関係が大きく変わることが示されている²⁷⁾。

多様性は藻類の生育する環境のかたよりを知る目安となり、一般に環境がかたよってくるとそれに適応できる種類のみが優占してくるため、多様性は小さくなる。多様性指数値(H')はShannon(1984)の式を用いて算出した。

各地点での平均値は2.5(T1)、2.0(T2)、2.3(T3)、2.6(Z1)、3.3(Z2)、2.6(Z3)、1.9(Z4)、2.5(Z5)と1.9~3.3の多様性値を示した。両河川の上流域のT1とZ1は、共に平均が2.5、2.6と同程度の多様性値であったが、T2と常時流速の大きいZ4の平均値は、他の地点に比べ2.0、1.9と低く、下水処理水の流入や大きい流速により特定の少数の種類が優占する藻類群落を形成したため多様性が低下していると言える。同様の結果は、1996年の8月~9月にかけて行った人工基物を使った検討でも得られている¹⁰⁾。

6) 地点間の類似度指数とクラスター分析

地点間の藻類群落の類似性を見るため、木元による類似度指数(C_{II})を求めた。また、この値によって似通った藻類群落が発形成されている群を検討するため、群平均法²⁸⁾によるクラスター分析をおこなった。

(1) 綱木川の藻類群落

綱木川の藻類群落を以前調査した'93年3、4、5、6、'94年4月も含めて検討をおこなった。'93年から'94年と'97年4月から'98年4までの藻類群落は、T1では'97年4月、'98年2、3月に *Cymbella minuta* が代表種となり、以前の調査時のT1と似通った藻類群落を形成していたが、T2とT3では流入前の群落とは異なり下水処理水が付着藻類群落に明らかに影響を与えていた(Fig. 5)。

'97年4月からの地点別の藻類群落を見ると、T1では大きく3つのグループにわけられた。1つ目のグループは、'97年4月、'98年2、3月のグループ、2つ目は'97年5、9月のグループ、3つ目はその他の月であった。1つ目は *Cymbella minuta* が優占した藻類群落が発、3つ目は *Homoeothrix janthina* が優占した群落が発、2つ目はその他の種が優占した藻類群落が発形成されていた。

下水処理水の流入直後のT2でも、3つのグループに大別できた。1つ目は、'97年6、11月、'98年2月のグループ、2つ目は'97年12月のグループ、3つ目はその他の月であった。1つ目のグループは *Nitzschia inconspicua* が優占した藻類群落が発、3つ目は *Homoeothrix janthina* と *Oscillatoria tenue* が優占した群落が発、2つ目はその他の種が優占した藻類群落が発形成されていた。

T3は、2つに分けられた。1つ目は'97年8、9月、

Fig. 5 Dendrograms of the cluster analysis based on $C_{nsimilarity}$ in each survey in the River Tsunaki

'98年4月で、2つ目はその他の月である。1つ目は *Stigeoclonium lubricum* と *Homoeothrix janthina* が、2つ目は *Homoeothrix janthina* と *Oscillatoria tenue* が優占した藻類群落形成されていた。

綱木川全体としてみると、大きく4つの藻類群落地点、月別に形成されていた。

(2) 筑川の藻類群落

地点別の藻類群落を見ると、Z1、Z2、およびZ3が似通った藻類群落を年間を通して形成していた (Fig. 6)。Z4は、'98年2月だけがZ5と似通った藻類群落を形成していたが、他の11ヶ月は季節を問わず常時似通った藻類群落を形成していた。また、Z4は綱木川の3地点と高い類似性を示し、類似度が0.8以上であった回数が44/156 (T1)、73/156 (T2)、60/156 (T3) と多く、似たような藻類群落形成されていたと言える。筑川の最下流のZ5で川幅を狭く、蛇行部分をつくる低水路の河川改修工事が'97年9月始め~10月末にかけて

Fig. 6 Dendrograms of the cluster analysis based on $C_{nsimilarity}$ in each survey in the River Zaru

おこなわれた。工事中の9月は *Nitzschia inconspicua*、*Nitzschia romana* が27.3、18.2%出現し、改修直後の10月には *Melosira varians* (20.7%)、*Nitzschia palea* (13.8%)、*Synedra ulna* v. *contracta* (13.8%) が優占し他の月とは異なる藻類群落形成されていたことがクラスター分析から明らかとなった。

筑川全体としてみると、綱木川同様4つの藻類群落地点、月別に形成されていた。

これらのことより、河川の付着藻類群落により過去に遡り下水処理水および河川改修工事の影響や効果を評価しうる。

4. 4 河川環境と付着藻類

調査2河川の生態系を形成している生育環境と付着藻類について、その関係を検討した。

1) 栄養塩類と付着藻類との関係

河川水中の総無機態窒素濃度 ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$)

-N)、リン酸態リン濃度と付着藻類の現存量としての chl. *a* 量との関係を Fig. 7、8 に示した。愛知県内河川において chl. *a* 量と栄養塩濃度にかんがりのばらつきがあるものの正の相関が認められるという報告がある²⁹⁾が、全体的にばらつきが大きく明確な相関は見られなかった。

2) 流速と付着藻類との関係

付着藻類の現存量の大小を決定する要因として流速とのかかわりあい報告されていることより^{9, 29)}、流速と chl. *a* 量との関係を見たが、chl. *a* が低量に偏り栄養塩同様明確な関係は見られなかった。しかし、流速が 1.0m/s 以上では chl. *a* 量は低くなる傾向があった。

また、流速の速い所で糸状藻類が多く観察されている^{30, 31)}が、今回の調査でも同様の状況が見られたことより、流速と急流および急流から緩流に生息している糸状藻類 (*Homoeothrix janthina*, *Oscillatoria tenue*, *Stigeoclonium lubricum*, *Stigeoclonium* sp., *Cladophora* sp., *Cloniophora*

sp., *Diatom vulgare*) の出現頻度 (%) の関係をみたが、低流速の地点が多かったため分布に偏りが見られたが、流速が 0.5m/s 以上の地点では相関係数が 0.7 と高い相関が得られ、流速が一定以上になる地点では糸状藻類が優占的に生育することが明らかとなった (Fig. 9)。

ま と め

比較的清浄な水質が保たれている東北地方の小河川で形成される生態系を明らかにするため、水源が同位置にある仙台市内の 2 河川 (綱木川、および笹川) で、水質と付着藻類群落の変遷を年間を通して観察した。綱木川は途中でオゾン消毒された下水処理水の流入を受け、笹川は、団地排水等が流入する都市小河川である。この結果、次のことが明らかとなった。

1. 河川水の BOD 値は綱木川 (平均 0.7~1.2mg/l)、笹

Fig. 7 Relationships between total inorganic nitrogen and chl. *a*

Fig. 8 Relationships between phosphate phosphorus and chl. *a*

Fig. 9 Relationships between velocity (≥ 0.5 m/s) and the ratio of filamentous algae

川 (平均 $0.6 \sim 2.2 \text{ mg/l}$) で、冬期に高くなる傾向を示した。また、下水処理水が流入する綱木川は、流入後の地点の水質はその影響を受け、栄養塩、塩素イオンは処理水と同様の推移を示した。

2. 紫外部吸収 (E260) から河川水質をみると、2河川とも上流域は分子量の大きいフミン酸を主体とした高分子の生物難分解性の有機物成分から成り立っており、流下するに従い、また下水処理水の流入により低分子化されていることが明らかとなった。

3. 藻類の現存量の指標であるクロロフィル *a* (chl. *a*) 量は、平均 $76 \sim 470 \text{ mg/m}^2$ で冬期に多い傾向があった。出現種は、綱木川77種 (珪藻68種、緑藻5種、藍藻4種)、筑川80種 (珪藻69種、緑藻8種、藍藻3種) で、*Nitzschia inconspicua*, *Homoeothrix janthina*, *Rhoicosphenia abbreviata*, *Nitzschia palea*, *Cymbella minuta* の出現回数が多く、2河川とも日本の河川で最も普遍的に出現するとされる *Homoeothrix janthina* が最も多く代表種となった。

4. 栄養塩濃度と付着藻類量 (chl. *a* 量) とは、ばらつきが大きく明確な相関は見られなかったが、流速が 1.0 m/s 以上の地点では、chl. *a* 量は低くなる傾向がみられた。また、流速が 0.5 m/s 以上の地点では、糸状藻類の出現頻度と流速との間で高い相関 (相関係数 0.7) が得られ、流速が一定以上の地点では糸状藻類が優占的に生育するといえる。

5. 下水処理水は、藻類群落にも影響をあたえていた。処理水が流入し始めた前後 ('93年3月~'94年4月) の頃の藻類群落と '97年度の藻類群落を類似度 C_{II} で比較すると、流入の影響を受ける地点は明らかに異な

った藻類群落が形成されていた。また、河川改修工事がおこなわれた地点では、工事終了後、約2ヶ月で安定した藻類群落が形成されたことが明らかとなった。

引用文献

- 1) 日本規格協会: JIS K 1012 (1998)
- 2) 厚生省生活衛生局水道環境部会監修: 上水試験法 1993年版、795pp. (1993)
- 3) 西條八東、三田村緒佐武: 新編湖沼調査法、230pp.、講談社サイエンティフィク、東京 (1995)
- 4) Shannon C. E.: A mathematical theory of communication, The Bell System Technical Journal, 27, 379-423, 623-656 (1948)
- 5) 木元新作: 動物群集研究法 I — 多様性と種類組成一、生態学研究法講座14、1-192、共立出版、東京 (1976)
- 6) 市川 新: 水汚染の機構と解析 — 環境科学特論一、多摩川における汚濁物質の収支、85-124、産業図書、東京 (1978)
- 7) 大友義弘、奥田善昭、佐藤章史、土家秀樹: 広瀬川浄化センターの窒素処理、第33回下水道研究発表会講演集、546-548 (1996)
- 8) 土木学会衛生工学委員会: 用水・廃水の物理化学的処理に関する研究分科会報告書 (1992)
- 9) 橘 治国、森口明彦、井上隆信、木村直人、大室敏: (1) 河床生物膜の組成と水質浄化能 — 都市内河川で例として —、衛生工学研究論文集、24、1-11 (1988)
- 10) 阿部早智子、須藤隆一: 人工基物上に形成される付着藻類群落に与える下水処理水の影響、日本水処理生物学会誌、34 (2)、15-26 (1998)
- 11) 相崎守弘: 富栄養河川における付着微生物群集の発達にともなう現存量および光合成量の変化、陸水学雑誌、41 (4)、225-234 (1980)
- 12) 桜井善雄: 千曲川中流域における河床 periphyton

- による有機物生産と河川水質への寄与、信州大学環境科学論集、7、25-32 (1985)
- 13) 財団法人水源地環境整備センター編：水辺の環境調査、483pp.、技報堂出版、東京 (1994)
 - 14) Aizaki M. : Seasonal changes in standing crop and production of periphyton in the Tamagawa River, Jap. J. Ecol, 28, 123-134 (1978)
 - 15) 渡辺義人、西江敬一、桜井正人：河川の付着性微生物による有機物の生成、用水と廃水、17 (6)、685-692 (1975)
 - 16) Welch E. B., Jacoby J. M., Horner R. R., and Seeley M. R. : Nuisance biomass levels of periphytic algae in streams, Hydrobiologia, 157, 161-168 (1988)
 - 17) 福島 博、小林艶子、大野正夫、福島 悟：鏡川の生物と環境に関する総合調査、27-54 (1977)
 - 18) 福島 悟、黒田陽子、斎藤大介、高橋秀幸：横浜市内を流れる河川における付着藻類の分布状況：(1996~1997年)、横浜の川と海の生物 (第8報・河川編)、横浜市環境保全局、193-209 (1998)
 - 19) 秋山 優、有賀祐勝、坂本 充、横浜康継共編：藻類の生態、627pp.、内田老鶴圃、東京 (1986)
 - 20) 大貝政治、松井敏夫、奥田武男、塚原 博：珪藻4種の着生部の微細構造と着生構造について、水産大学校研究業績、33 (1)、27-35 (1984)
 - 21) 日本の水をきれいにする会編：水生生物相調査解析結果報告書 (1980)
 - 22) 日本生態学会環境問題専門委員会編：環境と生物指標 2、61-96、共立出版、東京 (1975)
 - 23) 横浜市公害研究所編：水域生物指標に関する研究報告、348pp. (1989)
 - 24) 阿部早智子、加藤丈夫、伊藤善通、横林一彦、宮崎圭三：下水処理排水の河川生物相に与える影響、日本水処理生物学会誌、32 (1)、51-59 (1996)
 - 25) 田中志穂子、渡辺仁治：日本の清浄河川における代表的付着藻類群集 *Homoeothrix janthina*・*Achnanthes japonica* 群集の形成過程、藻類、38、167-177 (1990)
 - 26) 伯耆晶子、渡辺仁治：川床の付着藻類群集組成および構造に基づく群集形成過程への考察、日本水処理生物学会誌、18 (2)、16-23 (1982)
 - 27) 川那部浩哉：生物界における共生と多様性、205pp.、人文書院、東京 (1996)
 - 28) 加藤和弘：多変量解析を用いた珪藻群集の生態研究、珪藻学会誌、7、1-8 (1992)
 - 30) 田中庸央：都市近郊河川における富栄養化(1) 汚水が河床層の基礎生産に及ぼす影響、水処理技術、16 (4)、31-35 (1975)
 - 31) 久納 誠、丹羽 薫：糸状藻類の溶解性オルトリン酸態リンの吸収能における濃度および水温依存性、水環境学会誌、20 (4)、269-277 (1997)
 - 32) 丹羽 薫、久納 誠：糸状藻類活用システムの原理と設備例、ダム技術、93、27-35 (1994)
- (受付 1999. 10. 1)
(受理 1999. 12. 22)