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

相 崎 守 弘

Changes in Standing Crop and Photosynthetic Rate attendant on the Film Development of Periphyton in a Shallow Eutrophic River.

Morihiro AIZAKI

Abstract

Microbial succession and changes in photosynthetic rate attendant on the film development of periphyton were investigated using artificial substrata in a shallow eutrophic region of the mid-stream of the Tamagawa River. Bacteria played the role of pioneer colonizer in the periphyton development. Algae joined the community after formation of bacterial colonies on substrata and dominated in the mature stage. Algae accounted for about 80 percent of the periphyton community in maximum and 50-70 percent in carbon weight under ordinary conditions in spring. Total numbers of aerobic heterotrophic bacteria were 10^7 - 10^9 cells/cm² and 10^{10} - 10^{12} cells/gC in the mature stage. A number of sulfate-reducing bacteria were also found in that stage. Photosynthetic rates of sessile algae varied widely with film development of periphyton. They showed 3-20 mg·O₂/mg·chl.-a·hr in the early stage and 1-3 mg·O₂/mg·chl.-a·hr in the mature stage. An extremely low photosynthetic rate was found just before the exfoliation of periphyton occurred.

1. は じ め に

付着微生物群集は、湖沼や河川の沿岸帯や河床における生産者および分解者として重要な位置を占めている。特に浅く流れの速い河川では、石礫上の付着微生物群集が有機物の生産および分解のほとんどを担っている。付着微生物群集はその中に生産者である藻類、分解者である細菌類、および消費者である原生動物類や比較的大型な水棲昆虫類をも含むヘテロな系であり、厚さわずか数ミリの膜内に1つの生態系が凝縮されている。このような付着微生物群集は、富栄養化した河川では非常に短期間で増殖と剝離をくりかえしており (AIZAKI, 1978)、また群集を構成している細菌類や藻類の増殖速度も非常に速い (AIZAKI, 1979)。そのため、その現存量や代謝活性は常に変化しており、一定のものとしてはとらえられない。このような変化は付着微生物群集の増殖によって微生物膜が次第に厚くなり、膜内部の環境条件が変わるために引き起こされるものと考えられる。したがって、河川における付着微

生物群集の現存量や機能を知るためには、微生物膜の発達にともなうこれらの変化を知る必要がある。本研究では、このような短期間での変化を明らかにするために、日本の代表的富栄養河川である多摩川中流部において、人工基質をもちい、付着微生物量および光合成速度の付着膜形成にともなう変化を測定した。

本研究を行なうにあたっては東京都立大学手塚泰彦博士、林秀剛氏、滝井進博士、西野泰子氏らをはじめとする多くの方がたから助言、協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

2. 調査地点および方法

多摩川は東京都の南西部を流れる長さ約 100 km、流域面積約 1,200 km² の河川である。近年、流域の開発により多量の都市廃水が流入するようになり、汚濁の著しい河川として知られるようになった (古井戸・土屋, 1970; 土屋他, 1970; TEZUKA *et al.*, 1974)。

調査はこのような多摩川の中流部で行なった。調査地点は丸子橋の上流約 2 km の地点で、巾約 100 m、

深さ約 30cm, 流速 0.6~1.0 m/秒程度の浅瀬である。河床は直径 10~20 cm 程度の石礫であった。調査は 1972 年から 1974 年にかけて行なったが、その間の水質は前報 (AIZAKI, 1978, 1979) を参照されたい。

実験は主に塩化ビニール製の板およびスライドガラスを使用して行なった。塩化ビニール板は 5 cm × 5 cm のものを用い、測定誤差を少なくするために表面をやすりで処理し、表面粗度を増加させた。これらの基層を鉄製のアングルに固定し、面が流れに対して平行ではば水平になるように水中へ沈めた。1 回の実験には 10~20 枚のスライドガラスと 15~30 枚の塩化ビニール板を使用した。これらの基層は 2~4 日の間隔で採取し、ぬれた状態を保って実験室へ持ち帰った。スライドガラスは顕微鏡観察、塩化ビニール板は付着微生物現存量および光合成量の測定用の試料とした。現存量および光合成量の測定方法の詳細は前報 (AIZAKI, 1978) に記載したので簡単に述べる。付着物は塩化ビニール板から剥ぎ落とし、一定量の純水に懸濁させ、その一部をガラスファイバーフィルター (ミリポア社, AP 20) でろ過後、乾燥重量、炭素量およびクロロフィル量の測定試料とした。乾燥重量は 80°C, 48 時間乾燥後測定した。炭素量は C・H・N コーダ (柳本社) で測定し、炭素量の 2 倍を有機物量とした。クロロフィル量は UNESCO/SCOR 法で測定した。また、懸濁した付着物の一部は 20 kc の超音波粉砕機 (梅田電気社) で 30 秒間処理し、細菌数計数用の試料とした。全従属栄養細菌数は桜井培地 (桜井, 1967) を用い、混釈法によって 20°C, 14 日間培養後に計数した。硫酸塩還元細菌数は河合 (1969) に準じて MPN 法で測定した。光合成速度は付着物が塩化ビニール板に付着したままの状態、特製の容器 (9 cm × 5.3 cm × 4 cm) に入れ、付着物と同時に採取してきた河川水を満たし、現場水温に保ちながら 500 ワットの電球で光照射し、スターラーで攪拌しながら容器内の溶存酸素量の変化を溶存酸素計 (東芝ベックマン社) で測定して求めた。

3. 結 果

1. 顕微鏡観察

付着微生物膜の形成過程を調べるために顕微鏡による観察を行なった。浸漬したスライドガラスにまず最初に付着したのは、各季節に数回行なった観察では、常に細菌類であった。これらの細菌類のうち、付着層形成の初期に増殖してコロニーを形成する細菌が付着膜形成に重要な役割を果たしているように思われた。

Fig. 1. Early stage of periphyton development in the midstream of the River Tamagawa. Microcolonies of bacteria were found on a microscopic slide glass. The slide was submerged for 7 days in river water in spring. (×200).

(Fig. 1). *Sphaerotilus* sp. のような糸状の細菌も同時に付着し、後期における厚い付着膜の形成を担う役割を果たした。

細菌類がある程度付着すると河川水中のデトリタスもトラップされるようになり、付着膜の形成を促進した。形成された細菌膜は基層表面の流速を弱めるためか、次に運動性のある繊毛虫類や珪藻類が現れることが多かった。特に珪藻は細菌のコロニーに体を突っ込むような形で増殖していることが多かった (Fig. 2.)

Fig. 2. Mid-stage of periphyton development in the midstream of the River Tamagawa. Algae joined the community. The slide was submerged for 18 days in river water in spring. (phase contrast, ×1000).

細菌膜が形成されると、*Vorticella* sp. や *Epistylis* sp. のような固着性の原生動物もかなり増殖してきた。また、*Stigeoclonium* sp. や *Gomphonema* sp. のような固着性の藻類もこのころより増加し始め、最終的には *Stigeoclonium* sp. が優占種になることが多か

Fig. 3. Changes of dry weight and organic matter attendant on film development of periphyton in the midstream of the River Tamagawa. A, Mar. 1972; B, Aug. 1972. The experiment was stopped halfway due to the riparian work near the station. C, Oct. 1972; D, Jan. 1973; E, May 1973; F, Jul. 1973. Symbols: $\circ$ —, dry weight; $\bullet$ —, organic matter content.

った。ネマトーダや Chironomidae の幼虫といった小型動物は層がかなり厚くなってから現れた。

2. 現存量の変化

A. 乾燥重量および有機物含量

層形成に伴う付着物量の変化を調べるために、1972年春から1973年夏にかけて数回実験を行なった。結果をFig. 3に示す。付着物の増加の様子は各季節とも似通っていたが、現存量が急激に増加し始めるのに要する日数、最高値に達するまでの日数、および現存量の最高値等に違いが見られた。図から明らかな如く、付着物量は最高値に達した後、急激な減少を示した。これは付着物の剥離によるものである。そのため、微生物の成長曲線にみられる遅滞期、対数増殖期、静止期、死滅期のうちFig. 3の増加曲線には後の2つの期間、静止期、死滅期が見られなかった。すなわち、汚

濁河川の付着微生物群集は対数増殖期のすぐ後に剥離するというサイクルを繰り返していることがわかった。

このような増殖および剥離の1サイクルに要する日数は春季および秋季では約1ヵ月、夏季では約2週間、冬季では約40日以上であった。付着物乾燥重量は春季に最も高くなる傾向があり、得られた最高値は約190 g dry wt./m²であった。この値は、藻類の増殖に最適な5月に行なった実験で得られた。他の季節では約80~130 g dry wt./m²程度まで増加後剥離した。現存量の測定は1枚ないし2枚の付着板を使用して行なったが、板ごとの違いは層形成の初期および剥離後ではあまり大きくなかった。しかし、現存量が最高値に近くなり、厚い付着物膜を形成している時にはかなりの違いが見られた。このような違いは付着物の一部の剥離によるものと思われた。

付着物中の有機物含量には各季節とも大きな変化は見られず、約30~40%を示した。ただし、Fig. 3-Bの実験では、実験期間中に上流で土木工事が始まり、その影響で無機物量が増加した。このような測定結果から付着物重量の半分以上は無機物であることがわかったが、これらは比重がかなり大きいため、体積的には付着物層のほとんどが有機物、すなわち、付着性微生物によって占められていた。Fig. 3から計算された付着微生物群集の増加速度は、炭素量に換算して、夏季では約2 g·C/m²·day、その他の季節では約1 g C/m²·day程度であった。しかし、最も増殖に適した条件が与えられた場合には、Fig. 3-Eにみられるように、約3 g·C/m²·dayという非常に大きな値を示した。

B. 藻類量

Fig. 4に付着微生物膜の形成に伴うクロロフィルa量の増加曲線を示す。図から明らかな如く、藻類が急激に増殖し始めるまでにかかなり長い遅滞期が存在した。この遅滞期の長さは水温と密接な関係が見られた(Fig. 5)。顕微鏡観察では、ある程度の細菌膜が基層上に形成された後に藻類の増加が見られたことから、この遅滞期間は基層上に細菌膜を形成するのに要する時間と思われた。すなわち、細菌や藻類の増殖速度と水温の間に高い相関関係が見られることから(AIZAKI, 1979)、冬季では長い遅滞期間を必要とし、夏季には短い遅滞期間で藻類が増殖するものと思われた。おおまかな計算ではこの遅滞期間は細菌の約18~20回の分裂に要する時間と一致した。

クロロフィルaの増加曲線は、乾燥重量の場合と同様に、通常の成長曲線に見られる静止期、死滅期を欠

Fig. 4. Changes of chlorophyll-a amount attendant on film development of periphyton in the midstream of the River Tamagawa. A, Mar. 1972; B, Aug. 1972. The experiment was stopped halfway due to the riparian work near the station. C, Oct. 1972; D, Jan. 1973; E, May 1973; F, Jul. 1973.

Fig. 5. Relationship between the water temperature and the length of lag periods before the rapid increase of chlorophyll in periphyton occurred.

き、現存量が最高値に達した後、剥離によって急激に減少した。この増加曲線は Fig. 3 に示した付着物中の有機物含量の曲線と良い一致を示した。このことは、付着微生物群集中に占める藻類の割合が非常に高いことを示すものと考えられた。クロロフィル a 量の最高値は季節によってかなり異なるが約 $400\sim 500 \text{ mg} \cdot \text{chl. a}/\text{m}^2$ 程度の値が多かった。しかし、条件さえ整えば、Fig. 4-E に見る如く、約 $1,500 \text{ mg} \cdot \text{chl. a}/\text{m}^2$ という非常に高い値を示す場合もあった。

以上の如く、付着物中に多量の藻類の存在が明らかになったので、次に付着物中の藻類の割合および、その層形成に伴う変化を検討してみた。前述した如く、付着微生物群集中には藻類の他に多量の細菌や原生動物、デトリタス等を含むことから、藻類だけの量を求めるには多少の工夫が必要である。ここでは、クロロフィル a の濃度を炭素量に換算するという方法で付着物中の藻類量の割合を算出した。藻体中のクロロフィル a 含量は栄養状態や光条件などにより変化するので (STEELE and BAIRD, 1962, 1965)、実験的にその換算係数を求めた。すなわち、従属栄養的な微生物群集

Fig. 6. Relationship between carbon and chlorophyll-a amount of sessile algae in spring. Carbon amount of sessile algae was determined by subtracting carbon weight on the reverse surface from that on the obverse surface of the substratum. The periphyton community on the reverse surface was almost entirely constituted by heterotrophic microorganisms.

の現存量は付着板の裏面と暗状態に保った付着板表面とで、層形成初期ではあまり違いがなかったことから(相崎, 未発表), 層形成初期の付着板表面の付着物炭素量から付着板裏面の付着物炭素量を差し引くことによって藻類の炭素量を求め, その値とクロロフィル a 量との関係から単位クロロフィル量当りの炭素量を求めた。その結果を Fig. 6 に示す。

なお, ここで用いた値は, 藻体中のクロロフィル a 含量の季節的变化を考慮して春季に得られた値のみを使用した。その結果, 両者の間に高い相関関係が認められ, 換算係数として $18.2 \text{ mgC/mg} \cdot \text{chl. a}$ という値が得られた。この値を用いて Fig. 4-E および F の実験の層形成に伴う藻類の付着物中に占める割合の変化を計算した。その結果を Fig. 7 に示す。この結果,

Fig. 7. Changes in algal contents in the periphyton community in terms of organic carbon attendant on the film development. Symbols: ○—, May 1973; ●—, Jul. 1973.

炭素量では春季に最高時で, 付着微生物中の約80%を藻類が占め, その他の時でも約50~70%を占めていることが分かった。また, 夏季には, 付着微生物中に占める藻類の割合は最高値で55%, 通常は40~55%と春季に比べるとかなり低い値になった。しかし, この場合は, 換算係数を春季と同じ値を用いているので, 過少に評価している可能性が高い。

C. 細菌量

Fig. 8 に付着微生物膜形成に伴う細菌数の変化を示す。全従属栄養細菌数はクロロフィルがほとんど検出されない層形成初期で $2.4 \times 10^7 \text{ cells/cm}^2$ であった。この値は湖沼や河川水中の値と比較すると極めて高い値であり, 付着微生物膜の形成初期における細菌

Fig. 8. Changes in numbers of aerobic heterotrophic bacteria and sulfate-reducing bacteria in periphyton community attendant on the film development. Symbols: ▲—, heterotrophic bacteria, Jan. 1973; ○—, heterotrophic bacteria, Apr. 1974; ●—, sulfate-reducing bacteria, Apr. 1974.

類の役割の大きさを予想させた。冬季と春季を比較すると現存量の変化の様子は類似していたが, 冬季の方が厚い膜が形成された後で高い細菌数を示した。最高値は春季で $7 \times 10^8 \text{ cells/cm}^2$, 冬季で $1.2 \times 10^9 \text{ cells/cm}^2$ であった。Table 1 に各季節における細菌数を単位面積当りと単位炭素量当りで示した。単位面積 (cm^2) 当りでは $10^7 \sim 10^9$ の間を, 単位炭素量 (g) 当りでは $10^{10} \sim 10^{12}$ の間を変化していた。

Fig. 8 には絶対嫌気性細菌である硫酸塩還元細菌数の変化も示したが, 厚い付着膜が形成された段階では $2.4 \times 10^4 \text{ cells/cm}^2$ という非常に多い硫酸塩還元細菌が存在していた。このことは, 微生物膜内部のかなりの部分が嫌気的条件にあることを示している。

3. 光合成活性の変化

層形成に伴う付着性藻類の一次生産の変化を Fig. 9

Table 1. Number of aerobic heterotrophic bacteria in periphyton community grown on artificial substrata in several seasons.

Sampling time	Submerged period of substrata (days)	Number of heterotrophic bacteria	
		(cells/cm ²)	(cells/g. C)
Mar. 1972	15	2.4×10^8	3.4×10^{11}
Aug. 1972	5	6.8×10^7	1.1×10^{11}
Oct. 1972	9	1.4×10^8	2.7×10^{11}
Feb. 1973	18	3.8×10^8	7.9×10^{11}
Feb. 1973	24	1.2×10^9	1.1×10^{12}
May 1974	12	2.0×10^8	2.5×10^{11}
May 1974	25	7.0×10^8	6.2×10^{11}

Fig. 9. Changes in photosynthetic rate (net production) and respiration rate of periphyton community attendant on the film development. Photosynthetic rates were determined at about 20,000 lux and *in situ* water temperature without scrapping off the periphyton from the substrata. A, Jul. 1973; B, May 1973. Symbols: $\circ$ —, photosynthetic rate (net production); $\bullet$ —, community respiration rate.

に示す。純生産量は層形成初期ではクロロフィルa濃度 (Fig. 4-F, E) とよく対応した変化を示した。最高値は春季でも夏季でもあまり変わらず約 $700 \text{ mg} \cdot \text{O}_2 /$

Fig. 10. Changes in chlorophyll amount and photosynthetic rate ($P_g^{\max}$) of periphyton community attendant on the film development. Photosynthetic rates were determined at about 20,000 lux and *in situ* water temperature without scrapping off the periphyton from the substrata. Symbols: $\bullet$ —, chlorophyll in May 1973; $\circ$ —, photosynthetic rate in May 1973; $\blacktriangle$ —, chlorophyll in July 1973; $\triangle$ —, photosynthetic rate in July 1973.

$\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ であった。一方、呼吸量は純生産量に比べると比較的变化が少なく夏季では約 $100 \text{ mg} \cdot \text{O}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$ 、春季では $100 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{O}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$ の間を変動した。呼吸量が春季に高かったのは、藻類の現存量が高く、河川水との接触面積が大きかったためと思われる。純生産量は最高値に達した後急激に減少した。これは付

着物の剥離によるものではない。藻類の現存量は非常に高いにもかかわらず生産量のみ減少したものである。

この関係を更に詳細に検討してみた。Fig. 10 は単位クロロフィル当りの総生産量とクロロフィル a 濃度の層形成に伴う変化を示したものである。光合成量は附着初期で $3\sim 20 \text{ mgO}_2/\text{mg}\cdot\text{chl. a}\cdot\text{hr}$ とかなり高い値を示したが、附着膜が厚くなるに従って低下し

Fig. 11. Relationship between chlorophyll-a and photosynthetic rate ($P_g^{\max}$) of algae. The plots were joined with lines in the order of substrata sampling. Dotted line, May 1973; solid line, July to September 1973.

Fig. 12. Relationship between chlorophyll-a and photosynthetic rate of sessile algae at water temperature of $25\sim 30^\circ\text{C}$ and light intensity of 20, 000-23, 000 lux.

Fig. 13. Last stage of the periphyton development in the midstream of the River Tamagawa. A large number of bacteria adhered to the *Stigeoclonium* sp. The slide was submerged for 42 days in river water in spring. ($\times 100$).

$1\sim 3 \text{ mg}\cdot\text{O}_2/\text{mg}\cdot\text{chl. a}\cdot\text{hr}$ 程度になった。特に、附着物が剥離する直前は急激な低下を示し、 $0.1\sim 0.6 \text{ mgO}_2/\text{mg}\cdot\text{chl. a}\cdot\text{hr}$ という非常に低い値となった。附着物の剥離後は再び上昇し、急激な低下を示す前のレベルまで回復した。

Fig. 11 は藻類現存量と生産量の関係を示すが、この図から現存量と生産量の間には以下のような3段階の関係が見られることがわかった。第1は現存量の増加とともに生産量も増加する期間、第2は生産量は一定もしくは著しく減少するが、現存量はなお増加する期間、第3は生産量はかなり低い値で一定し、現存量が著しく減少する期間である。

第1の期間は最も理解しやすいが、第2の期間は附着物が層構造をとることによって層内部への光の供給が抑えられ、有光層中の藻類量が一定になるために生産量も一定になるものと考えられる。Fig. 12 にクロロフィル a 濃度と光合成量との関係を示すが、クロロフィル a 量が約 250 mg/m^2 に増加しても生産量は約 $1, 100 \text{ mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 以上の値にはならなかった。また、現存量が高くなると生産量が著しく低下することが多かった。このような現存量の高い時の生産量の減少の原因としては、共存する細菌類などの影響による藻類の活性の低下が考えられた。Fig. 13 に剥離する直前の附着物中の *Stigeoclonium* sp. を示すが、藻体の表面にびっしりと細菌が附着している様子がわかる。このような現象は附着物の剥離直前にはしばしば観察された。第3の期間は附着物が剥離してゆく期間であるが、クロロフィル a 量が約 200 mg/m^2 まで減少すると生産量も現存量も再び増加し始める傾向を

示した。この値は Fig. 12 の生産量が一定になるクロロフィル a 量とよく一致している。このことから、クロロフィル量が 200 mg/m^2 まで減少すると付着膜の下層まで光が到達するようになり、下層での光合成によって層内部が好気的になるため、付着力が回復するものと考えられる。以上のことは、嫌気性の硫酸塩還元細菌が付着物の剝離によって、全従属栄養細菌もより急激に減少していることから裏付けられる (Fig. 8)。

4. 考 察

付着微生物膜の形成過程の顕微鏡的観察や現存量の変化に関しては河川を始め湖沼や海洋および散水汙床等についてかなり多くの研究がある (MADSEN, 1972; MACK *et al.*, 1975; 坂本, 1976; JORDAN and STALEY, 1976)。付着微生物膜中には生産者である藻類の他消費者、分解者である原生動物、細菌類等も含まれている。このような微生物の組成は環境条件の変化によって当然変わるものと考えられる。従属栄養生物である細菌類の量は基質である有機物の供給量によって決まる。

湖沼のように有機物が主として藻類の一次生産から供給される場合には、細菌量は藻類量によって決められる。桜井 (1975) は富栄養化の進んだ諏訪湖において藻類量に対する細菌量を 5~15% と報告している。一方、河川においては有機物の供給源として、藻類による光合成生産の他に陸上からの供給が考えられる。特に都市近郊の河川では都市廃水中に多量の有機物が含まれている場合が多く、大きな有機物の供給源となっている。

多摩川もこの例外でなく実験地点の河川水中に BOD 値で、冬季で $15\sim 32 \text{ mg/l}$ 、夏季で $5\sim 10 \text{ mg/l}$ という多量の有機物が含まれていた (AIZAKI, 1978)。そのため、スライドガラスや塩化ビニール板等の人工基層を河川水中へ沈めた場合、しばらくの間は細菌類が付着微生物群集のほとんどを占めてしまう。このことは、今回の顕微鏡観察からも明らかであるし、有機物の多い散水汙床の付着物でも同様な結果 (MACK *et al.*, 1975) が報告されている。このように付着微生物膜形成過程の初期において細菌が優占するのは、増殖速度が藻類に比べてかなり早い (AIZAKI, 1979) ことと、増殖に必要な有機物を藻類に依存しなくてもよいからと考えられる。

しかし、JORDAN and STALEY (1978) によれば汚濁河川に比べて有機物濃度がかなり低い湖沼において

も、基層を浸漬した場合には初めに細菌類が増殖する。ZoBELL (1943) は固体表面が有機物を濃縮する機能をもつため、細菌類の増殖に適した環境になると報告している。これらを考え合わせると、付着微生物膜の発達段階の初期では細菌類が付着膜形成に主たる役割を果たすものと考えられる。

付着微生物膜の形成に伴って藻類量が増加し、多い時にはその約 80% を占めていることが今回の研究で明らかになった。しかし、この付着物中の藻類量も河川水中の有機物濃度に応じて変化することが予想される。すなわち、外部からの有機物供給の多い所では従属栄養生物が多くなり、藻類量は低下するものと考えられる。このことは、多摩川の上流部や下水路化した都内の河川での調査 (相崎, 未発表) からも推測される。この調査では、付着物炭素量に対するクロロフィル a 量の比 (%) は多摩川の上流部では $0.8\sim 1.7\%$ であったが、中流部では $2.2\sim 2.5\%$ 、都内の下水路化した河川では $0.2\sim 0.4\%$ であった。このことは、河川の水質によって付着物中の藻類と従属栄養微生物の比が変化することを示すものである。したがって、同一地点でも水質の変化に応じてこの比が変わることが予想される。

今回の調査でも水質の悪化する夏季や冬季には付着物中に占める藻類量が低下していた。しかし、クロロフィル量を藻類量に換算する方法は藻体中のクロロフィル含量が季節や栄養状態等により変化するので、一定の換算係数を各季節を通じて使用することには無理がある。PERSONS *et al.* (1961) や DARLEY (1977) によれば培養した藻類の炭素量と chl. a 量の比は 19 から 100 程度の値をとっており、特に、栄養が豊富な場合には $22\sim 26$ 程度の値を示している。これらの値に比べると、今回得られた $18.2 \text{ mg-C/mg-chl. a}$ という値は若干低い。しかし、春季で、新鮮な栄養塩が常に供給される流水条件であることを考慮すれば、この時期の値としては妥当なものと考えられる。

本研究では、この値をそのまま夏季にも適用したが、夏季には藻類炭素量とクロロフィル a 量の比はもっと高くなると予想される。また、層形成の初期と後期でも換算係数を変える必要があるかもしれない。今後、これらの面で、更に検討する必要がある。これとは別に全菌数から細菌量を推定する方法もある。桜井 (1975) によれば細菌の 1 細胞は約 $0.025 \times 10^{-12} \text{ g}$ の炭素量に相当する。TEZUKA *et al.* (1974) によれば多摩川の調査地点付近の付着物中の全菌数と生菌数の比は約 10 倍である。これらの値を使用して Table 1

に示した細菌量の付着物中に占める割合を求めると約 5~28 % になった。今回の研究では全菌数の測定は行なわなかったが、今後このような面からの解析も必要と思われる。

河川での一次生産の研究は ODUM (1965) や McCONNELL and SIGLER (1959) 等の研究以来かなり行われてきた (WETZEL, 1975; AIZAKI, 1978)。しかし、層形成との関連でとらえた研究は筆者の知る限りではない。湖沼や海洋における一次生産の測定の場合、生産量の深さが問題になる。付着藻類の場合も同様に生産量の厚さを知る必要がある。しかし、湖沼等の場合と違って付着物の種々の厚さの照度を測定することは非常に困難である。TOMINAGA and ICHIMURA (1966) はスライドガラスに藻類を付着させ、透過光が表面光の 1 % の値になった時のクロロフィル a 量を測定し、生産層中の藻類量を推定している。彼らの実験では約 200 mg/m² が生産層中のクロロフィル a 量であった。有賀 (1973) はいろいろな水域の生産層中のクロロフィル a 量をまとめているが、それによると富栄養湖で 100~290 mg/m²、培養した藻類で最高 900 mg/m² と見積もっている。今回の実験では付着物中のクロロフィル a 量が約 250 mg/m² を越えても、生産量は一定の値より増加しなかった。このことは、多摩川の付着物においても生産層中のクロロフィル a 量がおおよそ 250 mg/m² 程度であることを示している。この値は、他の水域での値と非常に近似しており、水界での生産構造を知るうえで興味のある結果である。

植物プランクトンの光合成速度を比較する場合、光飽和条件下での光合成速度 ($P_g^{\max}$) が重要である。有賀 (1973) によれば各種水域での $P_g^{\max}$ は貧栄養湖で 0.1~1 mgC/mg·chl. a·hr、中栄養湖で 1~3 mgC/mg·chl. a·hr、富栄養湖で 2~6 mgC/mg·chl. a·hr である。今回の実験では、浸漬初期の付着膜があまり厚くない段階では、炭素量に換算 ($O_2 \times 1/2.67$) して、1.1~7.5 mgC/mg·chl. a·hr と富栄養湖に匹敵もしくはそれ以上の速度であったのに対し、付着膜が厚くなると 0.4~1.1 mgC/mg·chl. a·hr と貧栄養湖の値に近くなった。更に付着物が剝離する直前では 0.04~0.3 mgC/mg·chl. a·hr と極めて低い値を示した。このことは、付着藻類が層形成初期には河川水中の豊富な栄養塩類を利用して高い生産速度を示すが、層形成の進行に伴って付着膜内部への光の透過が制限され付着膜中の藻類の平均光合成速度は低下することを示している。しかし、付着物の剝離直前に見られ

る著しい光合成速度の低下はこのような理由では説明できない。このような現象は層内部の従属栄養的な分解過程での細菌類の作用や代謝産物による阻害等の複雑な要素が関係すると考えられ、今後更に詳しく検討する必要がある。

摘 要

典型的な富栄養河川である多摩川中流部で付着微生物膜発達過程の観察を浸漬したスライドガラスおよび塩化ビニール板を用いて行ない、その間の現存量および光合成速度の変化を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 付着膜の形成は細菌類によって始められ、ある程度の細菌膜形成後に藻類、原生動物類が増殖を開始し、最終的には藻類が優占した。
- 2) 付着物の増加曲線は季節変化を示したが、最高値は 80~130 g dry wt./m² 程度のことが多かった。付着物中の有機物量は約 30~40 % であった。
- 3) 基層を河川水に浸漬した後藻類が急激に増殖し始めるまでの期間の長さは水温と高い相関を示した。クロロフィル a 量の最高値は約 400~500 mg chl. a/m² のことが多かった。
- 4) 春季における付着物中の藻類量は全有機物量の最高値で約 80 %、通常 50~70 % であった。
- 5) 付着物中の全従属栄養細菌数は $10^7 \sim 10^8$ cells/cm²、 $10^{10} \sim 10^{12}$ cells/gC 程度のことが多かった。また、付着膜発達過程の初期にも多量の細菌が存在した。厚い付着膜形成後には多量の硫酸塩還元細菌が検出され、層内部がかなり嫌氣的であることを示した。
- 6) 光合成速度は付着膜の発達とともに大きく変化し、春季および夏季で、膜形成初期では 3~20 mgO₂/mg·chl. a·hr であったのが、膜形成にともなって 1~3 mgO₂/mg·chl. a·hr まで低下した。特に付着物が剝離する直前には 0.1~0.6 mgO₂/mg·chl. a·hr という非常に低い値となった。
- 7) 藻類現存量と光合成速度の間には膜の発達にともなって以下のような 3 段階の関係がみられた。

- ① 現存量も生産量も増加する期間、② 生産量は一定もしくは著しく減少するが、現存量は増加する期間、③ 生産量はかなり低い値で一定し、現存量が著しく減少する期間。

文 献

- AIZAKI, M. (1978) : Seasonal changes in standing crop and production of periphyton in the

- Tamagawa River. *Jap. J. Ecol.*, 28: 123-134.
- AIZAKI, M. (1979): Growth rates of microorganisms in a periphyton community. *Jap. J. Limnol.*, 40: 10-19.
- 有賀祐勝 (1973): 水界植物群落の物質生産Ⅱ. 一植物プランクトン. 共立出版社.
- DARLEY, W. M. (1977): Biochemical composition. p. 198-223. In: D. WERNER (ed), *The Biology of Diatoms*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- JORDAN, T. L. and J. T. STALEY (1976): Electron microscopic study of succession in the periphyton community of Lake Washington. *Microbial Ecol.*, 2: 241-251.
- 古井戸良雄・土屋隆夫 (1970): 多摩川の水質汚濁の現状と対策. 用水と廃水, 12: 40-44.
- 河合 章 (1969): 硫黄化合物の代謝に關与する細菌群の計数法. p. 295-300. 陸水生生物生産研究法. 講談社.
- McCONNELL, W. J. and W. F. SIGLER (1959): Chlorophyll and productivity in a mountain river. *Limnol. Oceanogr.*, 4: 335-351.
- MACK, W. N., J. P. MACK and A. O. ACKERSON (1975): Microbial film development in a trickling filter. *Microbial Ecol.*, 2: 215-226.
- MADESEN, B. L. (1972): Detritus on stones in small streams. In: U. MELCHIORRI-SANTOLINI and J. W. HOPTON (ed), *Detritus and its role in Aquatic Ecosystems. Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 29 suppl. 385-403.
- ODUM, H. T. (1956): Primary production in flowing waters. *Limnol. Oceanogr.*, 1: 102-117.
- PARSONS, T. R., K. STEPHENS and J. D. H. STRICKLAND (1961): On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters. *J. Fish. Res. Bd. Canada*. 18: 1001-1016.
- 桜井善雄 (1967): 水中の一般細菌数検定法に關する 2, 3 の検討. 日本水処理生物学会誌, 2: 21-27.
- 桜井善雄 (1975): 湖沼における細菌と藻類の量的關係. p. 35-51. 微生物の生態 2. 東京大学出版会.
- 坂本 充 (1976): 生態遷移Ⅱ. 共立出版社.
- STEELE, L. H. and I. E. BAIRD (1962): Carbon-chlorophyll relations in cultures. *Limnol. Oceanogr.*, 7: 101-102.
- STEELE, L. H. and I. E. BAIRD (1965): The chlorophyll-a content of particulate organic matter in the northern north sea. *Limnol. Oceanogr.*, 10: 261-267.
- TEZUKA, Y., Y. WATANABE, H. HAYASHI, S. FUKUNAGA and M. AIZAKI (1974): Changes in the standing crop of sessile microbes caused by organic pollution of the Tamagawa River. *Jap. J. Ecol.*, 24: 43-49.
- TOMINAGA, H. and S. ICHIMURA (1966): Ecological studies of the organic matter production in a mountain river ecosystem. *Bot. Mag. Tokyo*, 79: 815-829.
- 土屋隆夫・古井戸良雄・梶沼孟彦・川原浩・味村昭・田辺孝・横島章・牧野宏 (1970): 多摩川の総合調査結果について. 用水と廃水, 12: 1094-1108.
- WETZEL, R. G. (1975): Primary production. P. 230-247. In: B. A. WHITTON (ed), *River Ecology*. Univ. California Press, Berkeley and Los Angeles.
- ZOBELL, C. E. (1943): The effect of solid surfaces upon bacterial activity. *J. Bacteriol.*, 46: 39-56.
- (著者: 相崎守弘, 東京都立大学理学部, 東京都世田谷区深沢; Morihiro AIZAKI, Department of Biology, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University, Setagaya-ku, Tokyo. 現住所: 国立公害研究所水質土壌環境部, 茨城県筑波郡谷田部町; Present address: Water and Soil Division, The National Institute for Environmental Studies, P. O. Yatabe, Ibaraki 305).

1980年4月25日 受理