

濁水の光量制限が河川付着藻類増殖に及ぼす影響に関する室内実験

Laboratory Studies on the Effect of Light Limitation by Turbid Water on the Growth of Attached Algae

林 文 慶 新 保 裕 美 田 中 昌 宏

要 約

河川工事や堆砂のフラッシュ放流などに伴う濁り制御方法を検討するために、河川の付着藍藻(ユレモ)および付着珪藻(ツメケイソウ)の増殖に対する濁水および土砂堆積による光量制限の影響を室内実験で調べた。水温 20℃で培養した付着藻類の増殖限界照度(補償光度)は、ユレモでは 283lx ($5.66 \mu\text{mol/s/m}^2$)、ツメケイソウでは 88lx ($1.76 \mu\text{mol/s/m}^2$)で、ユレモの増殖に必要な最低の照度はツメケイソウの約3倍である。また、光遮断による藻類増殖影響について、ユレモのほうが影響を受けやすく、4週間以上の光遮断を受けると増殖能力が半減した。一方、ツメケイソウでは7週間の光遮断影響を受けても増殖能力の低下があまりなかった。数段階のSS濃度における濁水(カオリン)の消散係数を計測し、付着藻類の増殖限界照度および増殖に必要な最大値の照度となる水深とSSの関係性を求めた。この関係式より、水面下の照度が 10000lx ある場合、河川水のSSが 18ppm 以下に管理できれば、水深 2m まで付着藻類増殖に必要な 5000lx の照度を確保することができる。また、光遮断の影響を受けた付着藻類増殖の減少量とアユの日間摂餌量を試算し、その影響度合について考察した。

目 次

- I. はじめに
- II. 照度の低下・光遮断による付着藻類の増殖影響
- III. 濁水の消散係数計測実験
- IV. 付着藻類の増殖照度となる水深とSSの関係
- V. 光遮断影響による付着藻類生産減少量の試算
- VI. おわりに

I. はじめに

洪水、河川工事および排砂などに伴う濁水や水質の急激な変化は、河川生態系に影響を及ぼすため、主に魚類や水生昆虫などの高等生物を指標に、その影響の調査、評価が実施されてきた^{1~4)}。しかし、河川食物連鎖の一次生産者であり、河川水中の栄養塩除去の役割を持つ付着藻類⁵⁾に対する影響については現場調査資料が多く見られるものの、室内での詳細な検証実験に関する報告は見当たらない。そこで、著者らは、河川工事や堆砂のフラッシュ放流などに伴う濁りの制御方法を検討するために、濁水発生による付着藻類の増殖への影響を把握するための室内実験を行った。

一般に、濁水が発生すると、河床の石に付着している藻類に以下のような物理的な影響を与えると考えられる (Fig. 1)。

- ① 濁りが日射を遮断して藻類の光合成を妨げることによる増殖への影響。
- ② 土砂が藻類表面に堆積して藻類の光合成を妨げることに

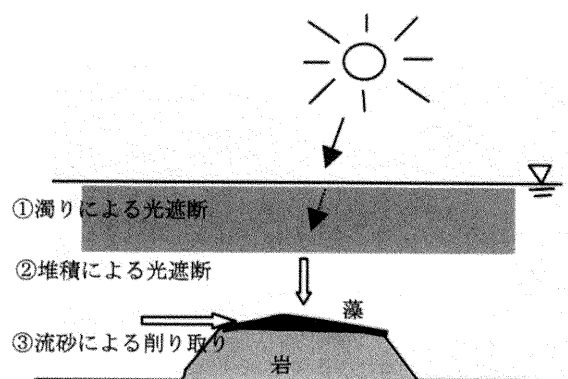


Fig. 1 排砂による付着藻類の影響
(Schematic Diagram of Environmental Impacts on Attached Algae by Sediment Flushing)

る増殖への影響。

- ③ 水流または流れている土砂により付着藻類が削り取られる影響。

本実験では、付着藻類の増殖を左右する主因である照度の低下および光の遮断の影響(上述した①と②の影響)について調べた。また、濁りによる水中消散係数を測定し、付着藻類の増殖限界照度および増殖に必要な最大値の照度となる水深とSS(Suspended solid; 懸濁物質)の関係性を求めた。さらに、光遮断による藻類増殖減少量がアユの摂餌量に対する影響度合を考察した。

キーワード: 濁水, 付着藻類, 照度, 光遮断, 増殖係数, 消散係数

II. 照度の低下・光遮断による付着藻類の増殖影響

1. 藻類培養

本実験に供する付着藻類の種類および入手先を Table 1 に示す。この2種類の付着藻類は河川でよく観察される藻類で、アユの餌にもなっている^{6~7)} (Photo 1 と 2)。両藻類の保存および大量培養は国立環境研究所の推奨培地 (Csi) を用いて約 2000lx, 12 時間毎明暗 (12h. LD), 20℃ の条件を設定した恒温室で行った。また、ツメケイソウの培地にはメタ珪酸を添加して調製した。

Table 1 実験の供試藻類
(Species of Attached Algae for the Experiment)

種類	和名	分類	入手先
<i>Oscillatoria</i> sp.	ユレモ	藍藻類	財団法人応用微生物学研究奨励会
<i>Achnanthes minutissima</i>	ツメケイソウ	珪藻類	国立環境研究所微生物系統保存施設

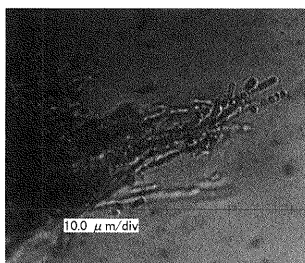


Photo 1 ユレモ
(*Oscillatoria* sp.)

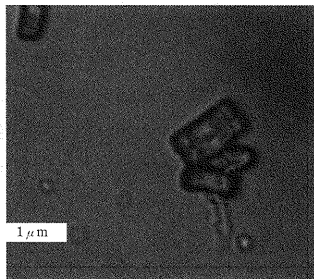


Photo 2 ツメケイソウ
(*Achnanthes minutissima*)

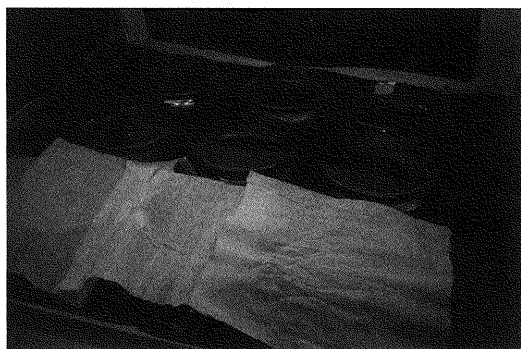


Photo 3 照度相違の付着藻類培養実験
(Culture of the Attached Algae under Different Light Intensities)

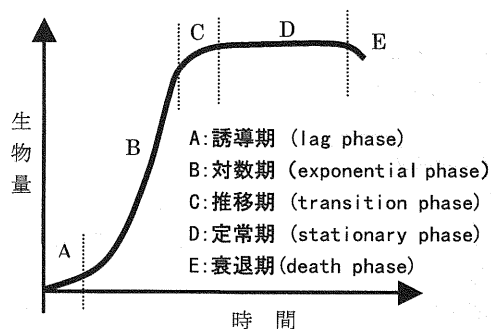


Fig. 2 一般的な藻類の増殖曲線
(Generalized Growth Pattern of Algal Culture)

2. 照度と付着藻類増殖の関係

(1) 方法

付着藻類の増殖限界照度を把握するために、既知乾燥重量の付着藻類 40mL をガラスシャーレ (直径 9cm, 深さ 2cm) に収容し、20℃ の恒温室で遮光膜による照度 (200~4000lx) 数段階の調整および 12h. LD 条件で 8~12 日間の培養実験を行った (Photo 3)。各照度条件において、培養開始時、培養一定期間中に付着藻類の乾燥重量を測定した。藻類の増殖乾燥重量は、シャーレで付着した藻類をブラシで洗い落として培養液をガラスファイバーろ紙 (孔径 1.2 μm) でろ過し、110℃, 12 時間乾燥後の藻類残存ろ紙重量と乾燥ろ紙重量との差で求めた。両付着藻類の増殖 (乾燥重量の増加) を表すのは、Fig. 2 に示す一般的な藻類増殖曲線の対数期に増えた生物量とし⁸⁾、その増殖量(Y)を式(1)に表す。

$$Y = a \cdot e^{bX} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Y: 生物量 (藻類乾燥重量)

a: 培養開始時の生物量

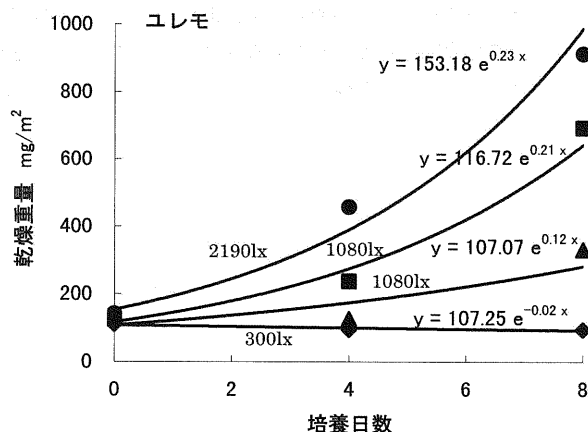


Fig. 3 各照度における藍藻の増殖量
(Growth of the Blue-Green Alga under Different Light Intensities)

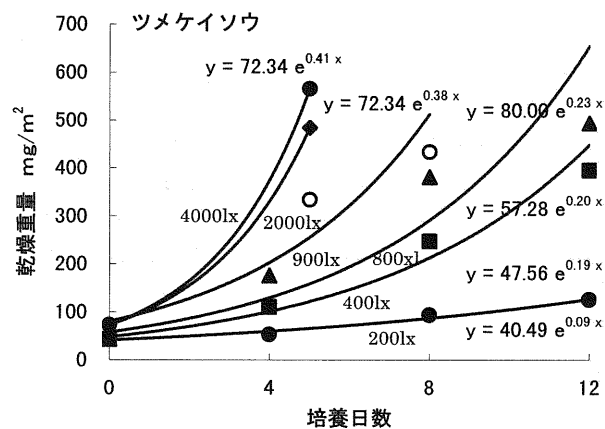


Fig. 4 各照度における藍藻の増殖量
(Growth of the Brown Alga under Different Light Intensities)

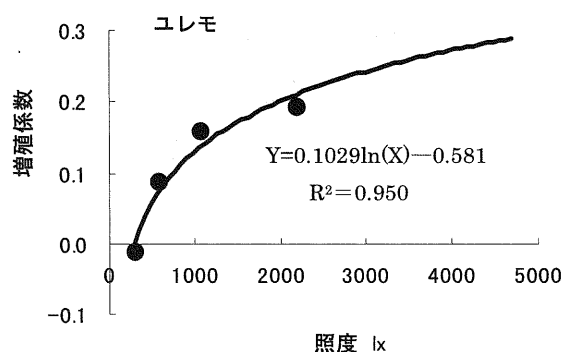


Fig. 5 照度と藍藻増殖係数の関係
(Relation between Light Intensities and the Blue-Green Algal Growth Coefficient)

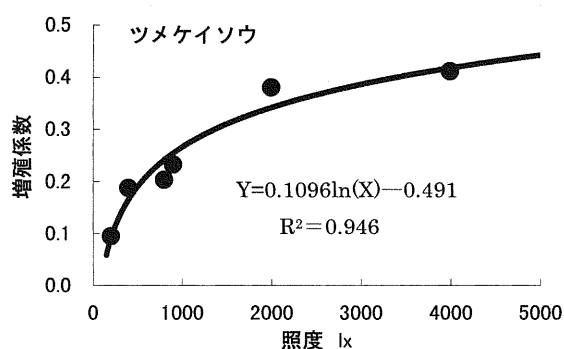


Fig. 6 照度と珪藻増殖係数の関係
(Relation between Light Intensities and the Brown Algal Growth Coefficient)

b: 増殖係数

X: 時間

(2) 結果

照度相違による両付着藻類の増殖を式(1)の曲線で表して (Fig. 3 と 4), 各照度に対する両付着藻体の増殖係数(b)を求めた。そして、これらの増殖係数と照度の関係を、植物プランクトンの光合成—光曲線⁹⁾に当てはまる近似曲線式で描き、両付着藻類の増殖限界照度(補償光度)を求めた (Fig. 5 と 6)。ユレモの増殖限界照度は283lxで、ツメケイソウは88lxである。すなわち、付着藍藻であるユレモの増殖では、付着珪藻であるツメケイソウの約3倍多くの照度を要求することがわかった。なお、両付着藻類の増殖限界照度を $\mu\text{mol/s/m}^2$ に変換すると¹⁰⁾、それぞれ、5.66 (ユレモ) と 1.76 (ツメケイソウ) である。

3. 光遮断を受けた付着藻類の増殖

(1) 方法

既知乾燥重量の藻類40mLをガラスシャーレに收容し、そのシャーレをアルミホイルで包み、光遮断を施した (Photo 4)。20℃の恒温器で一定期間 (0, 4, 8, 12, 21, 28, 35, 42日間) 放置後、照度1400lx; 12h. LDの条件で藻類培養を12日間行った。培養開始時、4, 8, 12日

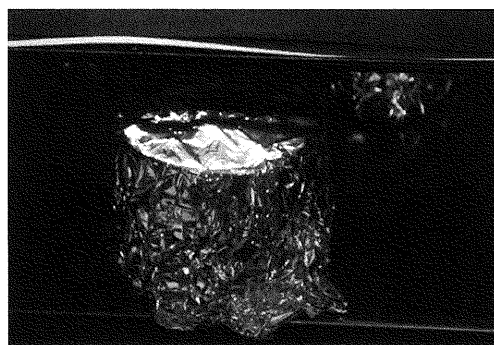


Photo 4 アルミホイル包装での光遮断
(Light Interception using Aluminum Foil)

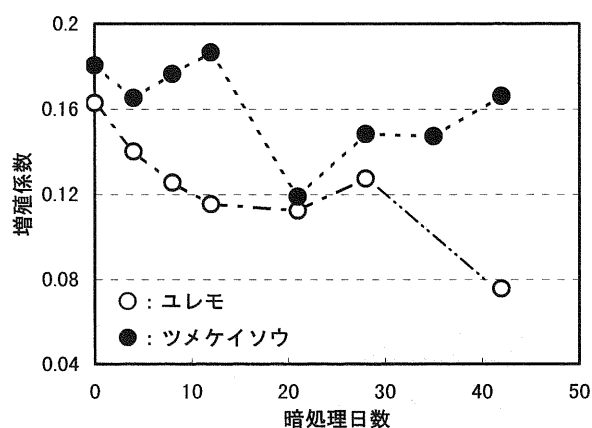


Fig. 7 光遮断処理後の両付着藻類の増殖係数
(Growth Coefficient of the Attached Algae after Several Interval Periods of Light Interception)

目に増殖した藻類重量を上述した乾燥重量測定方法で求め、両付着藻類の増殖係数を式(1)で算出した。

(2) 結果

両付着藻類の光遮断処理日数と処理後の藻類増殖係数の関係を Fig. 7 に示す。付着藍藻類であるユレモでは、光遮断していなかった藻類に対して光遮断処理を受けた藻類の増殖係数は著しく下がり、光遮断処理 8~28 日間では約 1/4, 28 日間以降の光遮断処理では約 1/2 まで増殖係数が低下した。一方、付着珪藻類であるツメケイソウでは、光遮断 12 日間までの増殖係数に顕著な変化はなかったが、それ以降には増殖係数が若干低下した。このようにツメケイソウはユレモに比べて光遮断の耐性強いといえる。

III. 濁水の消散係数計測実験

1. 方法

Fig. 8 と Photo 5 に示すような装置を組立て、カオリン (中央粒径 0.003mm) を用いて、4 段階 (18~73ppm) の SS 濃度に調整した実験水中の光量子を測定して水中光減衰率を求めた。実験の SS 調整に用いた水は水道水である。実験の光源は 150W のハロゲンランプで、水面下の照度を約 400lx と設定し、光源の拡散を極力減らす

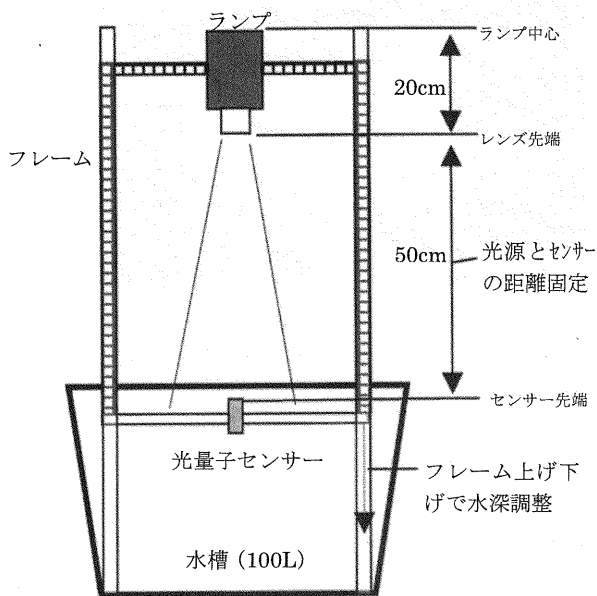


Fig. 8 水中光減衰の測定装置
(Apparatus to Measure Underwater Light Extinction)

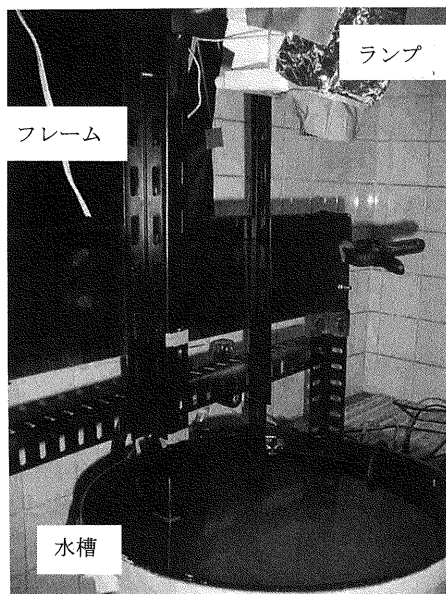


Photo 5 水中光減衰測定状況
(View of Underwater Light Extinction Measurement)

ために、光源と光量子センサーの距離を固定し、水面直下、10, 20, 30cmの深度を変えて水中の光量子を測定した。光量子センサー (LI-Cor. Inc. 製) は400~700nmの波長範囲の光量子数を測定するものである。なお、実験中、水の濁りを常に均等になるように攪拌し、また、水槽の裏側を黒色にして光の反射を防いだ。式 (2b)¹¹⁾ により水中光減衰率および消散係数を求めた。なお、これらの計算は、光量子の測定データ ($\mu\text{mol/s/m}^2$) を照度 (lx) に変換して行った¹⁰⁾。

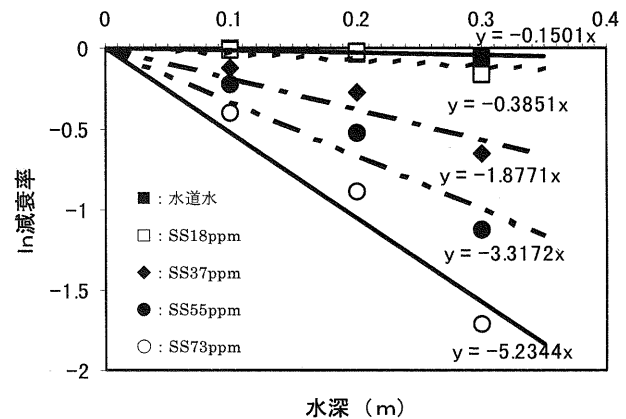


Fig. 9 カオリンの各 SS 濃度における深度と水中光減衰率の関係
(Relation between Water Depth and Light Extinction Rates)

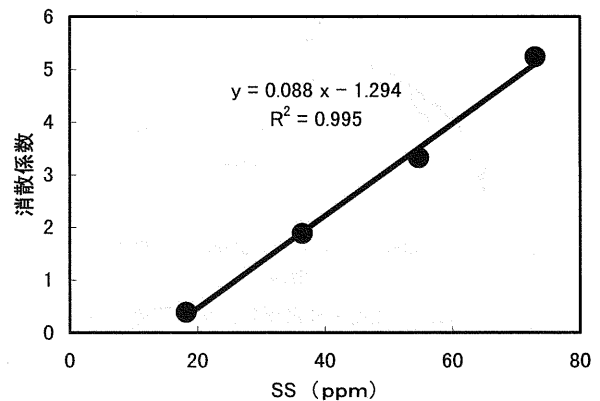


Fig. 10 SS と消散係数の関係
(Relation between SS and Extinction Coefficient)

$$I_z / I_0 = \exp(-cz) \quad (2a)$$

$$c = -\ln(I_z / I_0) / z \quad (2b)$$

ここで、 I_0 : 基準とする光強度 (照度 lx)

I_z : 距離 z を透過した光の強度 (照度 lx)

c : 消散係数

z : 透過距離 (水深 m)

2. 結果

各 SS 濃度の水中光減衰率を水道水の光減衰率で補正し、Fig. 9 に示す。そして、SS 濃度の水中光減衰率と深度の関係を近似曲線に描き、それらの傾きを消散係数とした。また、付着藻類の増殖限界照度となる SS と水深の関係を明らかにするために、SS と消散係数の関係を直線近似したところ、Fig. 10 に示すように高い相関が得られた。

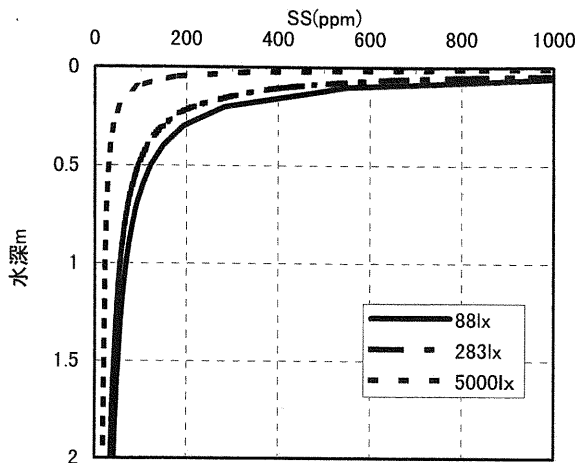


Fig. 11 水面直下の照度が10000lxある場合の各付着藻類増殖に関わる照度となる水深とSSの関係
(Relation between SS and Algal Growth Ability Water Depth under Circumstances of Irradiance below Water Surface of 10000lx)

IV. 付着藻類の増殖照度となる水深とSSの関係

照度低下による付着藻類の増殖速度に与える影響実験の結果から、ユレモおよびツメケイソウの増殖限界照度が、それぞれ283lx, 88lxであることを把握した。また、Fig. 4と5に示す照度とユレモおよびツメケイソウの増殖係数との関係式より、5000lxの傾き（増殖係数の変化率）が概ね 2×10^{-5} となり、両付着藻類の増殖（20℃；12h. LDの条件）に最大値の照度とした。以下の式(3)より、仮に水面下の照度が10000lxある場合、ユレモの増殖限界照度である283lx、ツメケイソウの増殖限界照度である88lxおよび両付着藻類の増殖最大値の照度であると考えられる5000lxとなる水深とSSの関係をFig. 11に示す。すなわち、SS濃度が18ppm以下になると、水深2mまで付着藻類の増殖に必要な5000lxの照度を確保することができる。

$$SS = (-\ln(I/I_s)/Z + 1.294)/0.088 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

I_s : 水表面で反射・粒子散乱によりエネルギーが失われた後の光強度（水面下の照度 1x）

I : 藻類が存在する場所での光強度（照度 1x）

Z : 水面からの深さ

1.294: SSから消散係数を求める式の切片 (Fig. 7参照)

0.088: SSから消散係数を求める式の傾き (Fig. 7参照)

V. 光遮断影響による付着藻類生産減少量の試算

仮に、Fig. 7に示すような光遮断の影響を受けた場合、付着藻類の増殖量の減少や河川魚生産量にはどのぐらい影響を及ぼすかについて窒素元素 (N) として試算した (Table 2)。この試算では、両付着藻類の現存量は、小林¹³⁾が調査した河川底生藻の現存量の最大値100mg/DW m^2 を参考にした。研究室で大量培養し、分析した両付

Table 2 光遮断影響を受けた両付着藻類の生産量の試算
(A Trial Calculation of the Attached Algal Production under Light Limitation)

種 類	ユレモ (藍藻類)	ツメケイソウ (珪藻類)
増殖係数		
光遮断0日	0.16	0.18
光遮断42日	0.08	0.16
藻類現存量mg/ m^2	100	100
乾燥増重量DW mg/ m^2 /day		
光遮断0日	234.7	239.4
光遮断42日	216.7	234.7
乾燥減少重量DW mg/ m^2 /day	18.0	4.7
藻類窒素含量 μg /DW mg^a	17.2	10.8
窒素減少量N μg / m^2 /day	310.4	51.2
アユ日間摂餌率（体重湿重量に対して）%	40	
アユ個体当たりの湿重量 g	50	
アユ日間摂餌窒素量 g^b	0.3	
アユ日間摂餌窒素量に対する藻類窒素減少量の割合%	0.1	0.02

a): 室内大量培養両付着藻類の窒素量をケルダ法分析で求めた。

b): $100g$ アユ日間窒素摂餌量 = 摂餌率 $\times$ 魚乾重量¹²⁾ $\times$ 窒素含量

着藻類の窒素含量を用いて日間単位面積当たりの窒素減少量を算出した。また、アユの日間摂餌率は体重（湿重量）の30～50%と報告され^{5, 14)}、成熟個体の湿重量は30～100 g¹⁵⁾で、この計算では摂餌率を40%、体重の湿重量を50gとした。これより、アユ個体当たりの日間摂餌窒素量に対する付着藻類増殖減少窒素量を占める割合を求めた。大まかな試算であるが、この結果より、照度制限因子を20℃、42日間受けても、河川魚（アユ）の餌料資源への影響を回避できると示唆される。

VI. おわりに

室内実験から得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 着藍藻ユレモおよび付着珪藻ツメケイソウの増殖限界照度（水温20℃）を求め、それぞれ、283lx(5.66 $\mu mol/s/m^2$)と88lx(1.76 $\mu mol/s/m^2$)であった。
- ② ヌレモは増殖のためにツメケイソウより高い照度を必要とする。そのため、ユレモは光の遮断（水温20℃）による影響を比較的受けやすく、4週間以内の光遮断では、光遮断を受けていないときの増殖係数に比べて1/4減少し、それ以上になると1/2以下となった。ツメケイソウについては、6週間光遮断しても、光遮断を受けていないときの増殖係数に比べて1/10の減少であった。
- ③ 本実験に得られたカオリンの消散係数は、SSと高い相関関係を示した。
- ④ 両付着藻類の増殖に関わる照度となる水深とSSの関係を求めた。これらにより、両付着藻類増殖における水深およびSSの

許容範囲を把握することができた。

- ⑤ 光遮断の影響を受けた付着藻類増殖の減少量とアユの日間摂餌量を試算し、その影響度合について考察した。

本実験は、光量制限による河川付着藻類の増殖影響を明らかにすることで、河川工事における濁り制御やフラッシュ放流などの方法の検討において重要な参考資料になると思われる。長期間の濁りについては、ユレモとツメケイソウの生息水深に応じて、増殖に必要とする照度となるSSを考慮して濁り制御することが可能になる。一方、短期間（1.5カ月間以内）の濁りについては、高濁度や堆積によって全く光が遮断された状態であっても、ユレモとツメケイソウに与える影響は比較的小さいものと考えられる。したがって、土砂を含んだフラッシュ放流をした場合でも、堆積物を短時間で洗い流すことで、藻類への影響を軽減できるものと考えられる。ただし、フラッシュ放流により藻類が剥ぎ取られることから、藻類の更新のサイクルを考慮する必要がある。

今後、これらの試験結果をより精度の良いものにするためには、光の水中消散係数の測定には現地の土砂を用いて行う必要がある。また、光条件以外、付着藻類の増殖に左右される水温や栄養塩⁹⁾など条件の影響を検討し、さらに、Fig. 1 に示す③流れによる付着藻類の削り取り影響並びに河川に生息する付着藻類の現存量などの実態を現地調査で把握する必要がある。これらの実験と調査を行って、付着藻類生息の影響を的確に評価できるような手法の開発を目指す所存である。

参考文献

- 1) 角 哲也；ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理，ダム技術，No. 127，(1997)，pp. 30-38.
- 2) 藤田正治，澤田豊明，水山高久，木下篤彦；砂防ダムからの排出土砂の移動とそれが溪流影響に与える影響，水工学論文集，第44巻，(2000)，pp. 1215-1120.
- 3) 木下篤彦，藤田正治，水山高久，澤田豊明；排砂に伴う濁水によるイワナへの影響評価法，水工学論文集，第44巻，(2003)，pp. 1129-1134.
- 4) (社)土木学会；ダム貯水池堆砂・濁水への取り組みと課題，(2001)，p. 121.
- 5) 宗宮 功；自然の浄化機構，技報堂出版，1990.
- 6) 西村和紀，安東生雄；付着藻類の増殖測定方法とアユによる摂餌状況，日本水産学会誌，57(3)，(1991)，pp. 391-396.
- 7) 三友清史，小林 弘；荒川産アユ2尾の消化器官から得た珪藻，埼玉県自然史博物館研究報告，第12号，(2002) .
- 8) Vernon Sato; The development of a phytoplankton production system as a support base for finfish larval rearing research, Proceedings of a U. S. -Asia Workshop [Rotifer and Microalgae culture systems], (1991).
- 9) 秋山 優，有賀祐勝，坂本 充，横浜康継（共編）：藻類の生態，内田老鶴圃，1986.
- 10) Luning, K.; Light in biology of seaweeds, Lobban, C. S. and Wynne, M. J., Eds., University of California Press, Berkeley, (1981), pp. 326-355.
- 11) 日本海洋学会編集；海洋環境調査法，恒星社厚生閣発行，(1985)，pp. 128-129.
- 12) 香川 綾（監修）；四訂日本食品成分表，科学技術庁資源調査会・編，1993.
- 13) Kobayashi, H.; Productivity in sessile algal community of Japanese mountain river. Bot. Mag. Tokyo, 74, (1961), pp. 877-878.
- 14) 財団法人リバーフロント整備センター（編）；川の生物図典，山海堂，(1996)，pp. 368-369.
- 15) 財団法人日本水産資源保護協会（編）；水生生物生態資料，(1980)，pp. 33-37.