

(26) 旭川ダム貯水池の富栄養化と渇水の水質に及ぼす影響に関する研究

A STUDY ON THE EUTROPHICATION OF THE ASAHI RIVER DAM RESERVOIR
AND THE INFLUENCE OF DROUGHT ON WATER QUALITY

河原長美*・名合宏之*・高杉 滋**・安部文博***

Osami KAWARA*, Hiroshi NAGO*, Shigeru TAKASUGI** and Fumihiro ABE***

ABSTRACT; In this case study on Asahi River Dam reservoir, we discussed the relationship between hydraulic retention time and increase of phytoplankton, and the propagation of water quality in the reservoir to the downstream. Since the observation time includes the severe drought period, the influence of the drought on the water quality is also discussed. Observations were carried out from spring to late autumn in 1993 and 1994 and the Observation points are located from upstream of the reservoir to the downstream. The water quality components observed are phosphorus, nitrate, chemical oxygen demand, chlorophyll-a. The water quality in the reservoir is different from the upstream to the downstream. The chlorophyll-a increases in the reservoir, but it often decreases in the downstream in spite of the sufficient nutrients. The particulate components of COD, nitrogen and phosphorus decrease during flow down. The hydraulic retention time is a limiting factor for increase of phytoplankton in the Asahi River Dam reservoir. A retention time of at least 2 to 3 weeks is necessary for the sufficient increase of phytoplankton. This retention time can be predicted by the growth rate of phytoplankton. The water quality in the reservoir is not affected significantly by the drought since the hydraulic retention time and pollutant loads decreased.

KEYWORDS; Asahi River Dam reservoir, eutrophication, influence of drought, hydraulic retention time, water quality, observation.

1. はじめに

近年、日本各地のダム貯水池の富栄養化が問題となっており、多くのダム貯水池において、富栄養化防止対策がとられつつある。岡山県中央部を南北に流れる旭川の本川中流に位置する旭川ダム貯水池においても、富栄養化が進行しアオコなどのプランクトンの異常発生が多発している。このため、ダム貯水池の環境資源としての低下や、貯水池直下流で水道原水を取水している水道施設での異臭味が問題となっている。富栄養化の根本的な解決法は、集水域からの汚濁負荷を削減する事であるが、これには財政上の制約により長期間を要するので、貯水池の浄化を目的として曝気装置の設置が行われつつある。

本研究では旭川ダム貯水池を対象として、我々が行った現地観測結果に既存調査資料を加えて、滞留時間

*岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 (Department of Environmental & Civil Engineering, Faculty of Environmental Science & Technology, Okayama University)

**岡山県庁 (Okayama Prefectural Office)

***倉敷市役所 (Kurashiki City Office)

とプランクトンの増殖との関係、及び、ダム水質の下流への伝播に関して検討を加える。特に、調査期間中に1994年の異常渇水を含むので、この点に留意して検討を加えた。渇水時のダム貯水池の水質データを通常時の水質データと比較検討し、渇水時の特徴を明らかにしておく事は、今後の渇水におけるダム貯水池の水質管理を考える上で貴重な資料となるものと考えられる。

2. 観測方法と旭川ダム貯水池の概要

旭川流域の概要、旭川ダム貯水池の位置、および水質および流速観測地点を Fig. 1 に示す。観測地点は、旭川ダム貯水池の上流約10kmの地点からダムの下流約60kmの地点まで広がっているが、ここで解析を行ったのは主として、ダムの下流約40kmまでの地点における水質観測結果である。

旭川ダム貯水池は、旭川中流部に位置する本川ダムであり、その総貯水容量は約6000万 m^3 、平均水深は約13.6mである。栄養塩濃度からは栄養状態は富栄養と判定されるが、水温の他に滞留時間の条件が満足されないと、クロロフィル-aが数百 mg/m^3 を越えるようなプランクトンの異常増殖は必ずしも認められない。

調査は、1993年と1994年の2年間、春から初冬にかけて、ダム貯水池および貯水池の上流と下流の河川で、無降雨が少なくとも4日以上続いた日に行った。サンプリングは、ダム貯水池では、水面から、50cm、1m、以後2m間隔で鉛直方向に、河川においては、水深の中央部で、それぞれ行った。なお、河川横断方向の分布も調査したが、有意な差が認められなかったので、主流部で採水を行った。

調査水質項目は、全窒素、全リン、COD、SS、クロロフィルであり、流向・流速についても調査を行った。水質分析方法は、工場排水試験方法(JIS K0102)に基づいており、全窒素は紫外線吸光度法、全リンはペルオキシ二硫酸カリウム分解法、CODは過マンガン酸カリウムによる酸性法、SSはガラス繊維ろ紙法、クロロフィル-aはRichards & Thompsonによる方法であった。なお、溶存態は上記のろ紙によるろ液の分析により、粒子態はろ過しない試料の分析値とろ過試料の分析値との差から求めた。

3. 旭川ダム貯水池における水質の概要と調査時の水文条件

3. 1 旭川貯水池の栄養状態

旭川ダム貯水池の栄養状態次に示されるCarlson¹⁾による富栄養化指数(TSI:Trophic State Index)により判定すると、通常、いずれの項目においても50-60の間になり、富栄養段階にあると判定される。

$$TSI(SD) = 10 \{6 - \log_2(SD)\} \quad (1)$$

$$TSI(T-P) = 10 \{6 - \log_2(48/TP)\} \quad (2)$$

$$TSI(Chl) = 10 \{6 - \log_2(7.69/Chl^{0.68})\} \quad (3)$$

ここに、SD:透明度(m)、TP:全リン濃度(mg/m^3)、Chl:クロロフィル-a濃度(mg/m^3)である。

3. 2 富栄養化の制限因子、および、クロロフィルとCOD、窒素、リンとの関係²⁾

旭川ダム貯水池においては、プランクトンの極端な増殖がなければ、N/Pは10を越えており、リン制限的

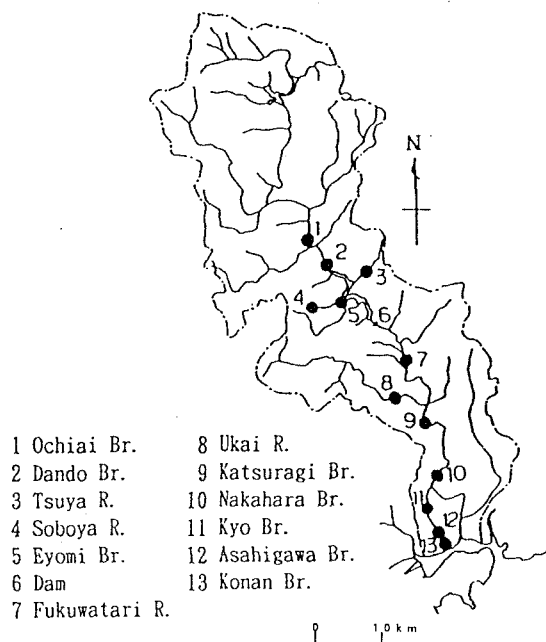


Fig. 1 Observation Points

である。しかしながら、プランクトンが増殖し、クロロフィル-*a*の濃度が高くなると、この比が低下する傾向にある。クロロフィル-*a*に対するCOD、窒素及びリンの関係は、クロロフィル-*a*が $100\text{mg}/\text{m}^3$ を越えるような高濃度領域、すなわち、プランクトンの影響が卓越する領域における、クロロフィル-*a*を従属変数、COD、窒素、リンのそれぞれを個別に独立変数とする回帰直線の勾配は、0.0317、0.239、1.09となる。これの逆数の比をとると、34:5:1程度である。クロロフィル-*a*は生きている藻類もしくは死亡していても間もないプランクトンを近似的に表し、高濃度域におけるクロロフィル-*a*と各水質成分との関係は、藻類の組成を近似表現していると考えらる。藻類の組成に関する報告によれば、40:7-8:0.7-1.1程度の値とされているが³⁾、旭川ダム貯水池での結果も、同じ程度の値である。プランクトンが高濃度になると、N/P比が低下するのは、旭川貯水池におけるプランクトンのN/P比が5程度であることが関係していると考えられる。

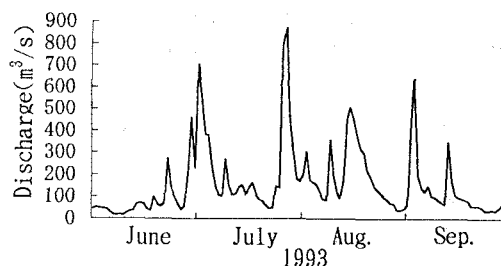


Fig. 2 River Discharges from June to September in 1993

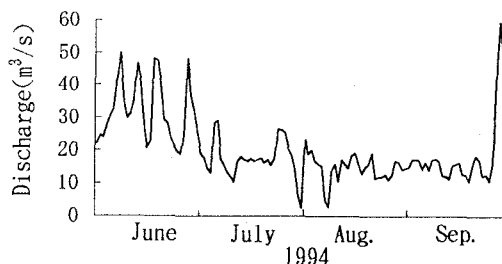


Fig. 3 River Discharges from June to September in 1994

3. 3 調査時の水文条件と水温分布

調査を行った1993年と1994年は、それぞれ冷夏多雨と異常渇水であった。旭川ダム下流約30 km地点における流量を、Fig. 2、3に示す。この地点における平水量は約 $40\text{m}^3/\text{s}$ であるので、1993年が極めて流量が多く、1994年が極めて流量が少ない事が伺えよう。旭川では通常八月に渇水流量を記録するが、1994年の雨量は、六月から八月にかけての降雨量は、最近10年間の平均雨量の約1/3であった。

Fig. 4に1993年の夏及び冬の貯水池内の水温分布を示す。夏期水温は、冷夏多雨の19

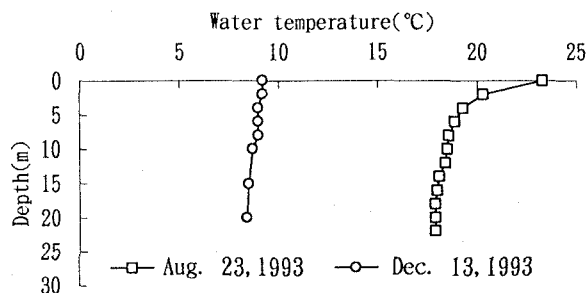


Fig. 4 Vertical Distribution of Water Temperature in The Asahi River Reservoir

93年においても成層化する。河川水は水温による密度差が関係して、その水温に対応する中層から上層にかけて流入する。そこで、5. で示す滞留時間の計算においては、夏期においてのみ温度躍層より上層の貯水池容積を用いている。これにより、計算に用いる容積は約2割減少する。

4. 流下に伴う水質変化

4. 1 全体的な特徴

ダム貯水池の水質が下流にどのように伝播するかは、流域の水質管理上重要な問題である。Fig. 5 - Fig. 8にクロロフィル-*a*、窒素、リンおよびCODの流下過程における変化を示す。貯水池内の水質は、ダムから発電用に取水される取水口の位置を考慮して、表層2mの平均を表しており、取水口直前の地点を含む。また、図中で実線は1993年のデータを、破線は1994年のデータを表し、宇甘川と記した矢印の水質

は、旭川ダム貯水池の下流における最大の支川である宇甘川が旭川に流入する直前の水質である。なお、支川の流量は、降雨直後を除けばダムからの発電用取水流量に比べて極めて少なく、宇甘川でも、発電取水流量の1/10程度である。そのため、ダム下流30km付近での河川流量は、降雨直後を除く多くの場合、発電取水流量と宇甘川の流量との和にほぼ一致しており、差が大きい場合でも2割以内の差しかない。以下では、各水質項目ごとに検討を加える。

(1) クロロフィル- a

Fig. 5にクロロフィル- aの測定結果を示す。1994年5月の観測結果を除けば、貯水池より上流のクロロフィルは $10\text{mg}/\text{m}^3$ 未満であるが、貯水池内で増加し、貯水池から放流されると減少する。貯水池内で一様にプランクトン濃度が増加するわけではなく、貯水池の中央部での濃度が高い場合と貯水池下流端での濃度が高い場合とがある。このことには、流動の影響も大きいものと推定される。なお、次項以下で示すように溶解性の窒素やリンが貯水池の下流で不足しているわけではない。クロロフィルの減少には、水力発電の流路におけるプランクトンの死滅や動物プランクトンや魚類による捕食などが考えられるが、詳細な検討は今後の課題である。

(2) COD、窒素およびリン

Fig. 6-8に観測結果を示す。全体的傾向として、ダム貯水池で高くなった各水質も、流下する間に粒子態成分を中心に濃度が減少することが認められる。旭川ダム貯水池は典型的な本川ダムであり、旭川ダムの下流における最も大きな支流である宇甘川でも通常の状態では、ダムからの放流量の1/10程度の流量しかなく、支川の影響はほとんど考えられないので、流下にともない水質が変化していると考えざるを得ない。

各水質項目ごと検討すると次のようである。

CODでは、大きく変化するのは粒子態のCODであり、溶存態は大きく変化しない。窒素でも、大きく変化するのは粒子態であり、溶存態はさほど変化しない。リンでは、溶存態も幾分変化するが、粒子態に比較してその変化は小さい。以上より、流下方向の水質変化の主たる要因は、粒子態成分の減少によると考えら

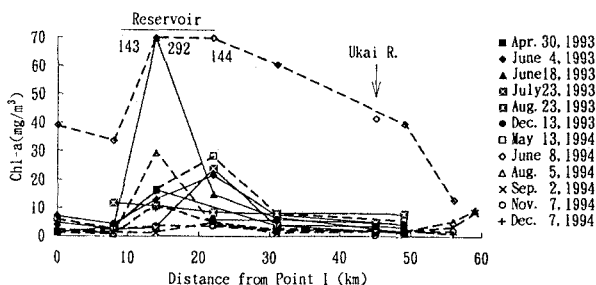


Fig. 5 Distribution of Chlorophyll-a

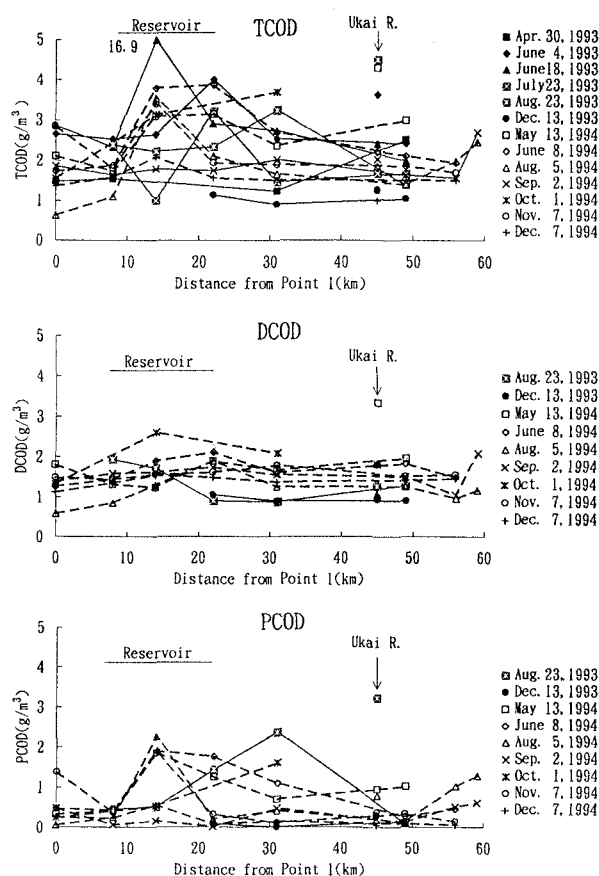


Fig. 6 Distribution of COD

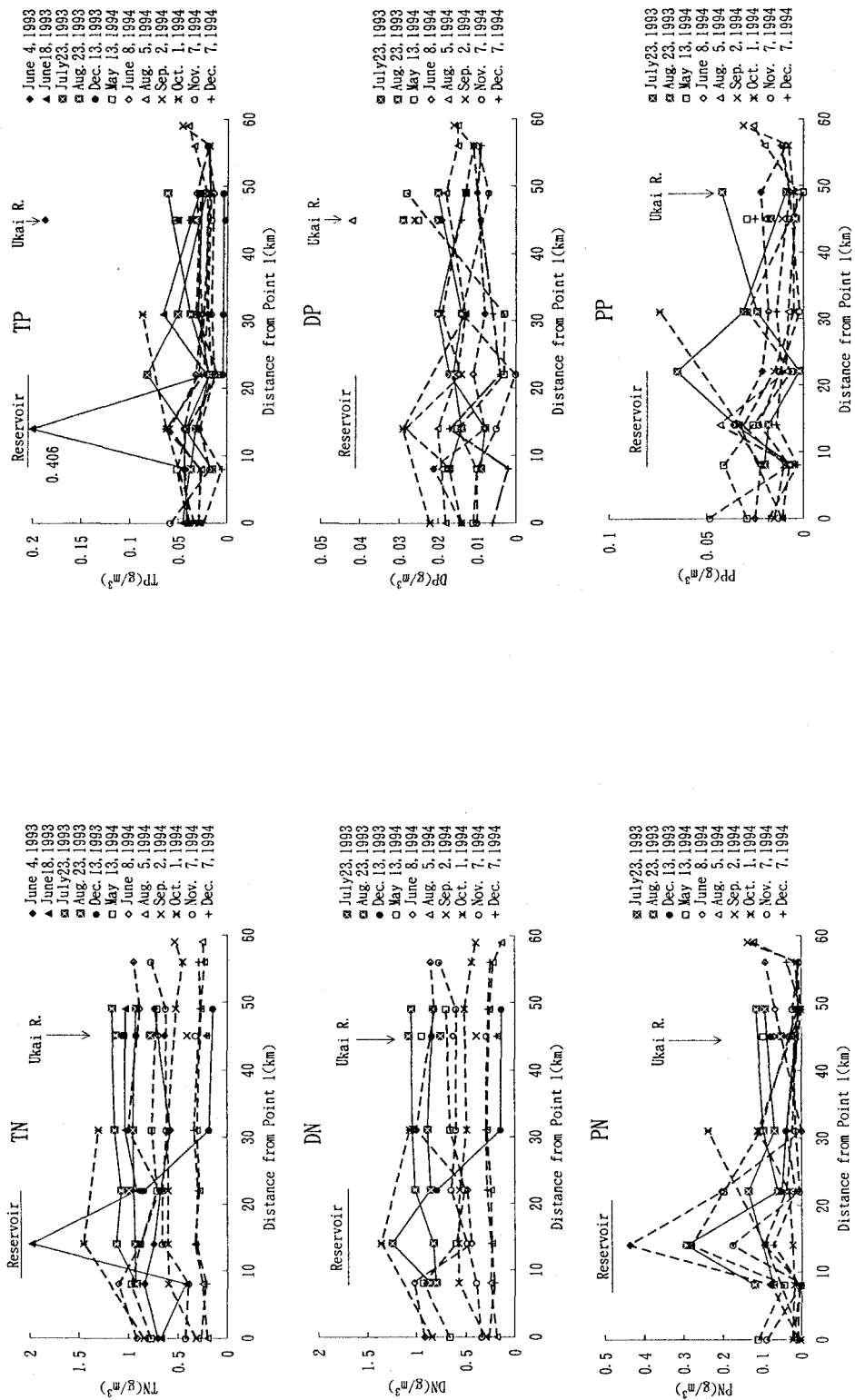


Fig. 8 Distribution of Phosphate

Fig. 7 Distribution of Nitrogen

れる。

ダム貯水池内の水質は、その上下流と比較して特別な濃度となっているが、ダム貯水池の水質が低下すると、下流の濃度も低下する傾向にあり、自浄作用を受けつつ水質伝播していると考えられる。

4. 2 渇水期における流下方向の水質変化

ここでは、渇水期の流下方向の水質変化について、冷夏多雨の1993年と比較して検討を加える。Fig. 9-12に観測結果を示す。実線は1993年のデータを、破線は1994年のデータをそれぞれ表している。

Fig. 9に示すクロロフィルについては、渇水が本格的に表れる前の6月のデータでは大きな値が表れているが、8月と9月のデータでは低くなっており、下流での幾分の増加も認められる。

CODとリンについては、明確な差を認める事が出来ない。しかし、窒素については、溶解性を中心に低い値を示している。旭川流域の人口密度は、旭川に河口域でしか排水が流入しない岡山市を除くと100人/km²程度であり、非特定汚濁源、とりわけ農地や山林の影響が大きいことが関係していると推測される。

5. 貯水池における藻類の増殖

ダム貯水池においては、湖沼でよく用いられるところのVollenweiderの式が当てはまらないことも多い。この原因には、この式が誘導される際に用いられた仮定が、ダム貯水池においては成立しないことが原因であると考えられる。

Vollenweiderの式は、①完全混合を仮定し、②これから計算されるリンの定常濃度によって、藻類の増殖が判定できることを前提として、③春季全循環期のリン濃度と、④湖沼で観測されたリンの沈降速度を使って誘導されている⁴⁾。

しかしながら、ダム貯水池の滞留時間が短い場合には、藻類の増殖速度が関係し、栄養塩濃度は十分であっても、プランクトンが十分に増殖しない事が起こりうる。この場合には、プランクトンに関する保存式から直接プランクトン濃度を予測する必要が生じる。

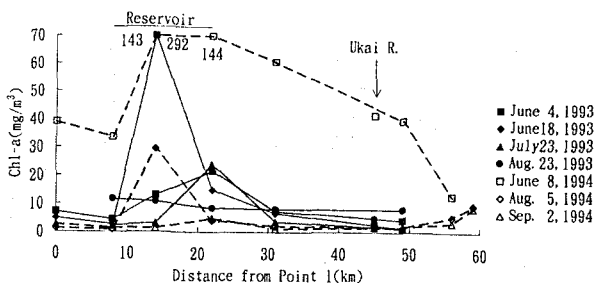


Fig. 9 Distribution of Chlorophyll-a during Drought

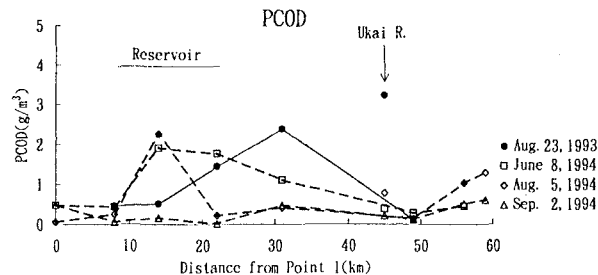
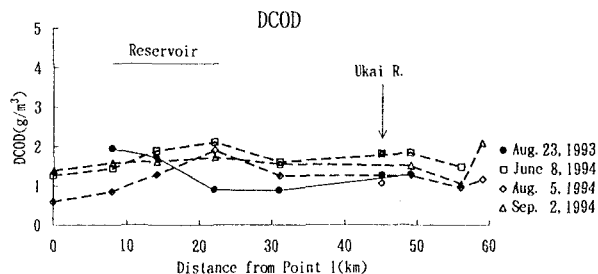
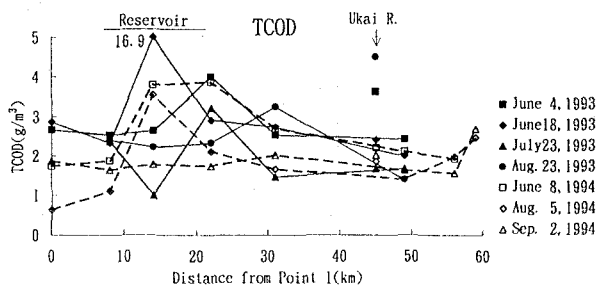


Fig. 10 Distribution of COD during Drought

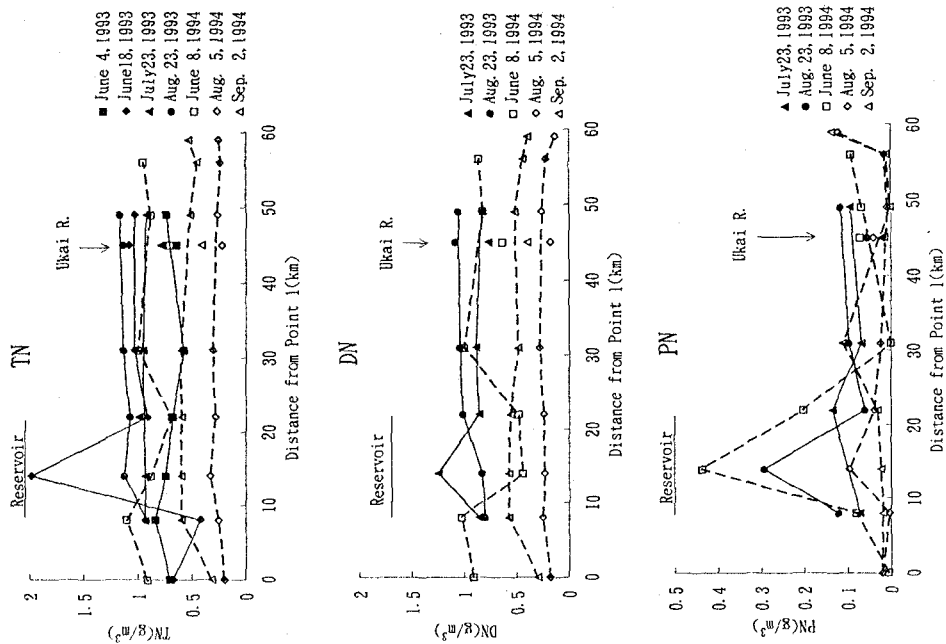


Fig. 11 Distribution of Nitrogen during Drought

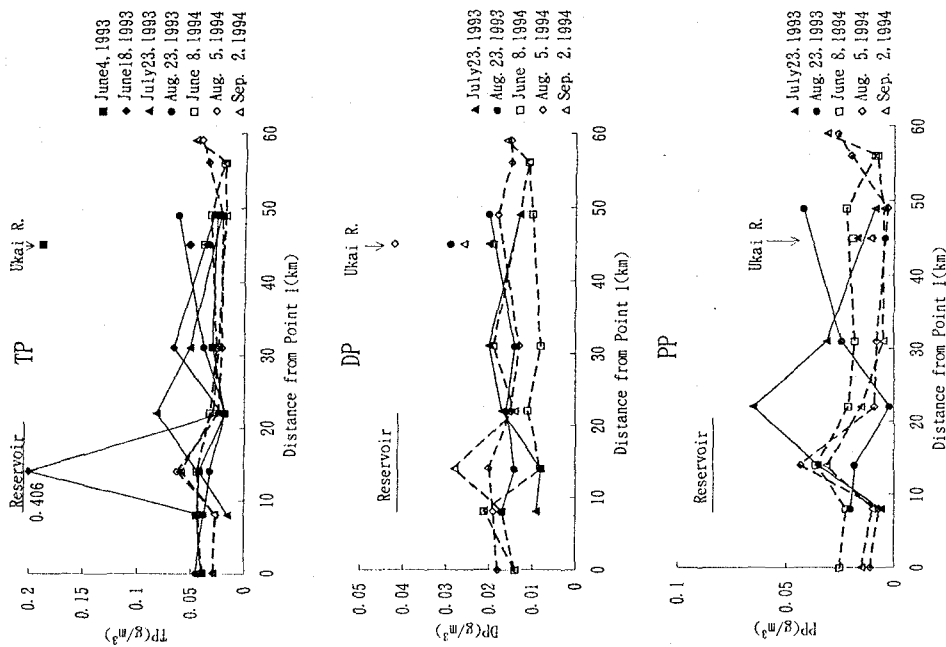


Fig. 12 Distribution of Phosphate during Drought

いま、完全混合を仮定して、プランクトン濃度 P を表すと次のようになる。

$$V(dP/dt) = Q(P_{in} - P) + V(g - d)P - AwP \quad (4)$$

ここに、 P_{in} : 流入プランクトン濃度、 Q : 流入流量、 V : ダムの容量、 g : プランクトンの増殖速度、 d : 捕食を含めたプランクトンの死滅速度、 w : プランクトンの沈降速度、 A : ダム貯水池の水面積である。ここで、定常状態を仮定し、プランクトンの沈降速度 $w=0$ として上式から P を求めると次式となる。

$$P = P_{in} / (1 - \tau G) \quad (5)$$

ここに、 $G(=g-d)$: 正味の増殖速度、 $\tau(=V/Q)$: 滞留時間である。なお、 $1 - \tau G$ が負になる条件下では、元の微分方程式は次のようになり、

$$V(dP/dt) = Q P_{in} + Q(G\tau - 1)P \quad (6)$$

栄養塩の減少により G が低下するという条件を加えない限り定常状態にはならず、濃度が無限に増加する。

Fig. 13 に温度成層を考慮した滞留時間とクロロフィル濃度との関係を示す。図中の曲線は、(5)式に流入クロロフィル濃度 P_{in} の観測値と、正味の増殖速度 G の仮定値を代入して得られた、クロロフィル濃度と滞留時間との関係である。ここで、滞留時間は、水質を測定した日より逆算して、各日流量の総和がダムの容量に一致する時間とした。大胆な仮定において得られた式ではあるが、比較的良好に旭川ダム貯水池におけるプランクトンの増殖と滞留時間との関係を再現していることが伺えよう。旭川ダム貯水池においては、プランクトンが十分増殖する

までに2、3週間程度の滞留時間が必要と考えられる。これを藻類の正味の増殖速度に直すと0.04-0.075/d程度である。

ところで、児島湖(岡山県)の富栄養化モデル⁵⁾においてある程度の適用性が確認されている次式に、観測値等を代入して計算を行うと0.05-0.07/d程度になり、植物プランクトンの死滅や動物プランクトンによる捕食を考慮すると、この値より少し小さくなるが、Fig. 13に示された仮定値とほぼ同程度の値であると判定される。

$$g = \mu_{\max} \left(\frac{N_d}{K_N + N_d} \right) \left(\frac{P_d}{K_P + P_d} \right) \left(\frac{E}{K_E + E} \right) K' \quad (7)$$

$$K' = \left\{ \frac{T}{T_s} \exp \left(1 - \frac{T}{T_s} \right) \right\}^3$$

なお、(7)式の計算においては、 $\mu_{\max}=0.35/d$ 、 $K_N=0.3g/m^3$ 、 $K_P=0.02g/m^3$ 、 $K_E=1000kcal/m^2/d$ 、 $T_s=25^\circ C$ (藍藻)、 $10^\circ C$ (珪藻)とし、観測による窒素とリンの溶存濃度、水温、および、日照時間から推定される日射量を用いている。(5)式と(7)式もしくは(7)式に代わる藻類増殖速度に関する式とを用いる事により、富栄養状態における滞留時間とクロロフィル濃度との関係を、おおそ予測出来るものと考えられる。

貯水池内にも水質分布が存在するが、本研究と平行して行った貯水池内の流動解析の結果によれば、ダムの直上流では、緩やかな上昇流が認められ、水温も低下傾向にあり、また入り組んだ形状の地点では水が淀む傾向も認められ、このような地点ではプランクトンの増殖が生じやすいことが観察されている。これらのことより、完全混合を仮定した解析には限界があることを断っておく。

Fig. 14に渇水期におけるクロロフィルの状態を、他の時期と区別して示す。渇水期においては、河

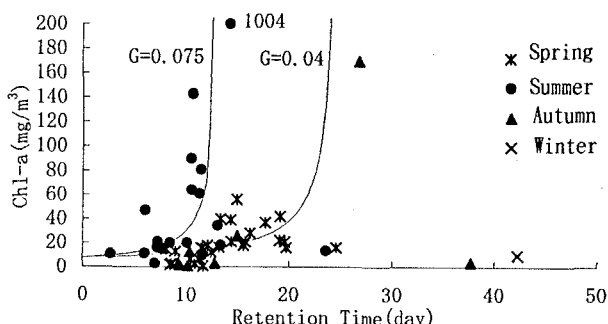


Fig. 13 Influence of Retention Time on Growth of Phytoplankton

川流量が減少するが、ダムの貯水量も減少し滞留時間は増加しない。その結果、グラフよりも明らかなように、藻類増殖に十分な時間は確保されず、藻類の増殖は必ずしも認められなかった。なお、1994年の夏はダム下流でのクロロフィルの増加が認められるものの、貯水池表面で33℃、ダム河川下流で31℃という異常な水温上昇の影響や強光阻害の可能性も否定できない。

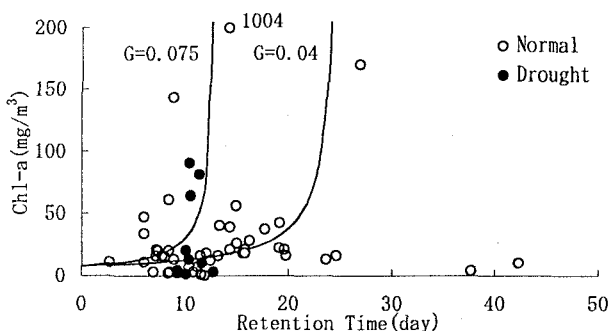


Fig. 14 Influence of Drought on Growth of Phytoplankton

6. 結論

本研究の主な結論は以下の通りである。

- 1) ダム貯水池の水質は、貯水池前後の河川水質と大きく異なる。ダム貯水池の下流側での水質濃度低下には、クロロフィル、および、COD、窒素並びにリンの粒子態成分の変化が、大きく関与している。
- 2) 旭川ダム貯水池における渇水時の水質は、CODやリンでは大差が認められなかったが、窒素では渇水時の方が濃度が低かった。
- 3) 旭川ダム貯水池では、滞留時間が藻類増殖の制限因子になっており、藻類の増殖速度を考慮すると、クロロフィル濃度をおおよそ予測しうる。なお、滞留時間以外の要因で藻類が増殖しない場合も認められた。
- 4) 渇水時には、河川流量が減少するが、同時に貯水容量も減少し、この結果ダム貯水池における滞留時間は必ずしも長くならず、藻類の異常増殖は認められなかった。

以上、主要な結論を述べてきたが、流下過程でクロロフィルが減少する理由や、渇水時における高温障害や強光阻害などの有無については検討の余地が残されている。今後、流動を含めて更に検討を進める予定である。

本研究を進めるにあたって、中国電力技術研究財団から研究助成を受け、岡山県河川課、並びに旭川ダム管理事務所の関係各位には調査の便宜を受けた。また、調査・分析に関しては当研究室の院生並びに4回生の協力を、原稿を仕上げるに際しては、本研究室の藤井忍君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Carlson, R. E.: A trophic state index for lakes, Limnol. Oceanogr., Vol. 22, pp. 361-369, 1977.
- 2) 河原長美、名合宏之、高杉滋: 旭川ダム貯水池の富栄養化機構と下流への水質伝播、環境技術、Vol. 24、No. 4、pp. 9-12、1995.
- 3) 岩佐義朗: 湖沼工学、p. 398、山海堂、1990.
- 4) Thomann, R. V. and Mueller: Principle of surface water quality modeling and control, pp. 403-407, Harper & Row, Publishers, Inc., 1987.
- 5) 河原長美、山下尚之: 誤差を含む流入汚濁負荷量を用いて同定された生態学的水質評価モデルの予測誤差、環境工学研究論文集、第29巻、pp. 135-145、1992.
- 6) 宮永洋一、白砂孝夫、安芸周一: 電力用ダム貯水池における富栄養化現象と予測、国立公害研究所(現国立環境科学研究所)研究資料、No. 24, pp. 81-109、1983.
- 7) 松岡譲: 霞ヶ浦の富栄養化モデル、国立公害研究所(現国立環境科学研究所)研究資料、第54号(R 54-84)、pp. 53-242、1984.