〈論文〉

雄物川の低水・渇水時における水質特性について

Fluctuation characteristics of water qualities in the period
of water shortage of the Omono River

羽 田 守 夫*   佐 藤   悟*   松 本 順一郎**
Morio HANEDA   Satoru SATO   Jun-ichiro MATSUMOTO

Abstract

In the period of the water shortage during summer, the fluctuation characteristics of water quality in river is different from those of the other seasons. This is due to the fact that the solar radiation is so strong in this period that water temperature rises gradually and reaches 25-26°C.

In this study, the changes in the discharge, the velocity of flow, the quantity of solar radiation and the water temperature during this period of the water shortage are investigated and at the same time, the changes in the concentration of Chl-a, COD, SS, $\text{PO}_4\text{-P}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ are investigated. As the results of the two investigations of 1981 and 1984, it is known that the Chl-a concentration increases suddenly as the discharge decreases and that the concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ decreases gradually with the increase of the Chl-a concentration. It is also known that the Chl-a load in this period is influenced greatly by the cumulative product of the values of the water temperature and the quantity of the solar radiation of the previous three days.

Key words: Chl-a load, droughty water-discharge, summer, water temperature, quantity of solar radiation

1. 緒 言

河川の低水流量時や渇水流量時に、水質が低下することは汚濁河川、低汚濁河川を問わず良く知られている。これは、わが国では人為的な汚濁物質が河川へ流入することが避けられないことや、特に夏期の低流量時には水分の蒸発散、水温の上昇等が生じ、これに伴い藻類活動が活発になることなどのためと思われる。現に、富栄養化した湖沼などで夏期に水質が低下する現象はしばしば報告されている。これらは、蒸発、濃縮などの物理的現象に、藻類活動などの生物学的現象が積み重なることによって生じていると思われ、それ故河川の水温、流量、日射量などの水文・気象因子が大きく関係していると思われる。そしてこのことが、同じ渇水時でも、季節や河川によって水質変化が異なることを明瞭にしている主な原因と考えられる。

我々は、秋田県中央部を流れる一級河川、雄物川について長年水質調査を続けてきた¹⁾²⁾。雄物川は、まだ

汚濁の進行していない清浄な河川と言え、水質汚濁も下流のごく一部を除けば大きな問題は生じていないが、夏期の渇水時には、藻類活動によると思われる特異な現象が観察されることも事実である³⁾。従って、将来の水質予測を行なう上でこの点を解明することは重要と思われ、また同様な河川の水質汚濁機構を検討する上でも有効と思われる。このような観点から、本論では夏期の低水・渇水流量時の水質変化に与える水文・気象因子の影響について、マクロではあるが他の時期と比較しながら検討を行った。

2. 雄物川の概況と用いた資料

2.1 雄物川流域と調査方法

雄物川流域の概要を Fig. 1 に示した。雄物川は、秋田、山形県境の大仙山に源を発する延長133.1km、流域面積約4,950km²の一級河川である。流域は、林業、農業を主とした農村地帯で、主要な産業は臨海部の秋

* 秋田工業高等専門学校土木工学科 〒011 秋田市飯島文京町 1-1, Department of Civil Engineering, Akita National College of Technology, 1-1, Bunkyo-cho, Iijima, Akita 011 Japan

** 東北大学工学部土木工学科 〒980 仙台市荒巻字青葉, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Sendai 980 Japan

Fig. 1 The Omono River basin.

田市にほとんどが位置している。このため人為的な汚濁源としては、中流部に位置する人口約4万人の大曲、横手、湯沢の3市のみと言ってよく、下流部の一部を除いて清浄な河川である。

用いた資料は、1981年と1984年の7～8月のそれぞれ1ヶ月間、1日1回採水し分析する連続水質調査で得られたものである。またこの他に、同年秋の1ヶ月間の資料及びこれまで長年にわたって得られた資料も比較のために随時用いている。採水地点は、河口から約4 km 上流の秋田市仁井田浄水場で、採水時刻は81年はほぼ正午ごろ、84年は午前9時ごろである。水質分析項目は、濁度、SS、DS、塩素イオン、pH、全COD、溶解性COD、BOD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、Chl-a 等である。また水文・気象因子として、気温、水温、降水量、日射量を調べ、流量についてはやや上流の椿川地点のH-Q曲線から求めた。

2.2 雄物川の流況⁴⁾

雄物川の椿川地点における1978～82年の5年間の最大、豊水、平水、低水、渇水、最小及び年平均流量を

まとめてTable 1に示した。これによると、年平均流量は5年間の平均で $245\text{m}^3/\text{sec}$ と大きく、流量の豊かな河川であることがわかる。また、低水流量は $94\sim 141\text{m}^3/\text{sec}$ の範囲で平均 $119\text{m}^3/\text{sec}$ 、渇水流量は $51\sim 94\text{m}^3/\text{sec}$ の範囲で平均 $55\text{m}^3/\text{sec}$ であり、ほぼ $120\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の流量が低水・渇水流量の範囲と言える。次にこの地点の平均流速は、流量が 120 、 100 及び $60\text{m}^3/\text{sec}$ の時、それぞれ約 45 、 40 及び $31\text{cm}/\text{sec}$ と計算することができる。平均的な流下時間を概算するために、これらの流速が河川全体にわたって一定であると仮定すると、前述の流量の時の流下時間はそれぞれ約 3.4 、 3.9 及び 5.0 日と求められる。従って、低水流量以下の流量の時、雄物川の流下時間はほぼ3～5日と考えてよいと思われる。

3. 夏期と秋期のCODの変動特性

まず、COD濃度の変動特性について一般的な傾向を把握するために、COD濃度と流量との関係を季節別に検討した。Fig. 2(a), (b)には、これらの関係を夏期及び秋期についてそれぞれ示した。夏期は、1975年と1978～81年の7月～8月の間の各1ヶ月間の計5ヶ月間の資料で、同様に秋期は、1974年と1977～81年の10月～11月の間の各1ヶ月間の計6ヶ月間の資料である。これによると、CODの濃度は、一般的に流量が増すと増大し、夏期の増水時には特に大きくなる傾向を示すことがわかる。これは、増水時には汚濁物質が流集してくることや、河床の滞積物質が巻き上げられ、流下してくることなどによると思われる。また、低水流量以下の流量範囲では、秋期は急激にCOD濃度が減衰する傾向が強いのに反し、夏期は濃度が低下しないばかりか、やや上昇気味になるなど明らかに異なる傾向も認められる。この秋期の低水流量時の濃度の減少傾向は、SSについても同様に認められた。このような水質濃度の夏期と秋期の変動特性の違いは、秋期は流量が比較的安定しているが、夏期は豪雨による洪水が生じる反面、水温が高く渇水も生じやすいというよう

Table 1 Droughty water-discharge of the Omono River

year	discharge ($\text{m}^3/\text{sec.}$)						annual average
	maximum	95-day	185-day	275-day	355-day	minimum	
1978	1,167	253	154	102	51.1	40.6	216
1979	3,331	263	185	141	83.3	60.3	250
1980	2,954	275	177	134	75.4	60.6	251
1981	2,283	354	200	126	93.5	73.1	284
1982	2,017	286	147	93.5	54.8	48.2	226
average	2,350	286	173	119	71.6	56.6	245

(a) Summer

(b) Autumn

Fig. 2 Relationship between COD concentration and discharge.

な水文現象の季節変化に大きな関係を持っていると思われる。

次に、CODの変動特性を負荷量の面から検討することにし、これを Fig. 3(a), (b)に示した。これによると、Fig. 2に示されたCOD濃度の変動特性の季節による違いが、より明瞭に認められる。この場合、夏期の低水流量以下の流量範囲でCOD濃度はやや上昇気味であったが、負荷量でみると流量減少と共に増加することはなく、直線の勾配がやや緩やかになっているのが認められる。従って、COD負荷量としては流量減少と共に減ずる傾向に変化はないことが確認されたが、この勾配が夏期と秋期とでは、低水流量以下の範囲では明らかにそれ以上の範囲の傾向と逆になっており、何等かの水質汚濁機構の違いによるものと考えられる。

このような夏期渇水時のCOD濃度の増加傾向は、他の時期及び他の水質項目には認められない特異なもので、この原因としては排水の流入、水分の蒸発によ

(a) Summer

(b) Autumn

Fig. 3 Relationship between COD load and discharge.

る濃縮、河床からの溶出、藻類活動による再生産等が考えられるが、特定することは困難である。なお、この時期のBOD濃度にも、COD程ではないが同じような傾向がみられた。このように、夏期の低水流量時には、流量の変化だけでは説明の困難な原因によって水質の変化が特徴付けられていると言え、本稿ではこの現象に与える水温、日射量等の水文・気象因子の影響についてより詳細に検討を行なった。

4. 低水・渇水流量時の水質特性

4.1 1981年夏と1984年夏の水質変化

1981年7月6日～8月5日の1カ月間の降水量、日射量、水温、流量、Chl-a、SS、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、T-IN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、COD及びBODの日変化をFig. 4に示した。この1ヶ月間は、後半に連続して11日間降雨のない暑い日が続き、日射量が大きかったために水温が急上昇して流量も減少を続け、典型的な渇水状況を呈したのが大きな特徴である。この渇水時期の後半からChl-a濃度の急上昇がみられ、一方栄養塩としての $\text{PO}_4\text{-P}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度はこの間わずかながら減少を続けた。しかし、CODやBODの濃度は絶対値も小さく、大きな変化はみられないという結果であった。

Chl-aの濃度は、22日目から上昇を始め、この時を初日とすると9日目には最大値約 $16\mu\text{g}/\text{l}$ まで増加し、10日目には降雨による増水のため減じている。水温は、初日は約 22°C であったが、連日約 $25\text{MJ}/\text{m}^2$ の強い日射量のため急激に上昇し、Chl-a濃度のピーク時には $26\sim 27^\circ\text{C}$ まで達している。この水温の上昇パターンとChl-aの増加パターンとは良く類似しており、Chl-a濃度が $10\mu\text{g}/\text{l}$ を越えたのは、水温が約 26°C を越えた時であった。また流量は、この間初日の $150\text{m}^3/\text{sec}$ から8日目には最少の $73.5\text{m}^3/\text{sec}$ まで減少し続けてい

Fig. 4 Daily changes in the concentration of water qualities and in the values of the hydrometeorological factors of a month in summer, 1981.

る。その後少量の降雨があり、10日目には約 $160\text{m}^3/\text{sec}$ まで回復するという経過であった。一般に河川のChl-a濃度は、流量に対し大きな円形に近い時計回りのループを描くことが多い。これは、降雨流出時に河床等の藻類が剥離し、流出することによることが多いので、この例のように流量の減水時にこれだけのChl-a濃度の連続的な増加が観測されたことは稀と言える。それだけ水温や日射量などの環境因子が重要な役割を果たしたと考えられる。

次にFig. 5には、1984年7月12日～8月10日の1ヶ月間のChl-a濃度の日変化を、Fig. 4と同様にpHの日変化も含めて示した。この1ヶ月間は、前半に洪水、後半に渇水と夏期特有の流況を呈した。即ち、6日目の流量約 $1,100\text{m}^3/\text{sec}$ の洪水の後流量は急激に減衰し、14日目には $100\text{m}^3/\text{sec}$ を下回っている。その後少量の降雨のため流量はやや増加したが、また23日目まで降雨がなく、 $50\text{m}^3/\text{sec}$ 前後まで流量は低下した。そしてこの後も引き続き無降雨期間が1週間程続き、ほぼ最小流量に近い $50\text{m}^3/\text{sec}$ 前後の流量にはほとんど変化はなかった。Chl-aの濃度は、18日目の約 $3\mu\text{g}/\text{l}$ から21日目までの3日間に急上昇し、最大値約15

Fig. 5 Daily changes in the concentration of water qualities and in the values of the hydrometeorological factors of a month in summer, 1984.

$\mu\text{g}/\text{l}$ に達した。その後はやや減じたが、最終日まで約 $10\mu\text{g}/\text{l}$ 前後の濃度を維持している。この期間の水温は、18日目から 25°C を越え、最終日まで 26°C 前後の値を維持した。日射量は、Chl-a 濃度が急上昇した3日間は $25\text{MJ}/\text{m}^2$ 近い大きな値であったが、その後は $20\text{MJ}/\text{m}^2$ 前後で、81年の増水時よりもやや小さい値であった。N や P の濃度は、81年と比べ流量がかなり小さかったこともあり高めの濃度であった。Chl-a 濃度が急増した時期の前後は、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、T-IN とともに全体としては濃度が減少する傾向を示しているが、両者の間に明瞭な相関はみられなかった。COD についても、全 COD、溶解性 COD とともに $1\sim 2\text{mg}/\text{l}$ とほとんど変化がみられず、81年と同様の傾向であった。

81年と84年に共通していることは、降雨がなく流量が低下して低水流量以下になった状況で、強い日射量により水温が上昇し、3日～1週間という短期間で Chl-a 濃度が急上昇したことである。そして兩年とも Chl-a 濃度の最大値は約 $15\sim 16\mu\text{g}/\text{l}$ とほぼ等しく、水温も 25°C 以上、強い日射量に関係していることも共通と言える。丹保等⁹⁾、山間の極めて清浄な河川で、冬期においても強い日射量により活発な藻類活動が生じ、日周変化のため pH が 9.0 を越えることもあることを報告している。84年の調査での pH は $7.3\sim 8.8$ の間で、通常の7前後の値と比べやや高く、しかも前半の 7.5 前後から18日目以降は平均で 7.97 と 8 に近い高い値であった。丹保等によると、日周変化による pH の最大値は、午後4時～6時頃生じると報告されているが、本調査の採水時刻が午前中であったことを考えると、これ以上の高い値を示していたことも十分に考えられる。しかし、このようなことも影響しているためか、Chl-a 濃度と pH 値との間には、明瞭な相関は認められなかった。一方、兩年のこの期間の流量は、81年の $73\sim 150\text{m}^3/\text{sec}$ に対し84年が $51\sim 71\text{m}^3/\text{sec}$ とかなり少ない。また Chl-a 濃度がピークに達するまでの期間も81年の約7日に対し、84年は約3日と短いなどの相異点も同時に認められる。これらは、兩年の水文・気象条件の違いによるものと思われ、水質の変化にこのような環境因子が密着に関係していることを示していると考えられる。

4.2 Chl-a と流量

1981年と84年のそれぞれ1ヶ月間の Chl-a 濃度と流量との関係をまとめて Fig. 6 に示した。これによると、Chl-a 濃度は、流量が約 $200\text{m}^3/\text{sec}$ 以上の範囲では通常 $1\sim 2\mu\text{g}/\text{l}$ 前後の値であるが、増水時には $3\sim 6\mu\text{g}/\text{l}$ に増加すること、増水一減水時の濃度の変化は、大きな時計回りのループを描くことなどがわか

Fig. 6 Relationship between Chl-a concentration and discharge.

る。また、流量が $200\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の範囲では濃度は徐々に増加し、ある流量以下で急激に増大することも認められる。この流量は、81年は約 $150\text{m}^3/\text{sec}$ 、84年は約 $70\text{m}^3/\text{sec}$ と異なるが、Chl-a の最大の濃度は前述のように $15\sim 16\mu\text{g}/\text{l}$ と共通であった。一般に、夏期、河川の Chl-a 濃度が増大するのは付着藻類の剝離によると考えられている⁹⁾が、Fig. 5 に共通してみられる低流量時の減水時の濃度の増大も、付着藻類の増殖とそれに伴う剝離によると思われる。この現象が河川の流量、即ち流速や流下時間に関係していることは Fig. 5 から予想できるが、この関係は一樣ではなく、他の環況因子にも大きく依存していることも、81年と84年の Chl-a 濃度の増加曲線の相違からも推察することができる。また、Chl-a 濃度の最大値がほぼ同じであることは、流下時間や日射量、水温等の環境因子は無限に増大するわけではなく自ずと限度があること、この河川の流域の状況に大きな変化がみられないことなどから十分に予想される。なお、これまでに観測されている Chl-a の最大濃度は約 $20\mu\text{g}/\text{l}$ であるが、これは増水時の値で、この影響がなければ、本河川の当地点においては $15\sim 16\mu\text{g}/\text{l}$ という値が Chl-a 濃度のほぼ限界値と考えて良いと思われる。

4.3 Chl-a と窒素、リン

一般に、湖沼において富栄養湖と貧栄養湖を区分する窒素とリンの濃度は、それぞれ $0.15\text{mg}/\text{l}$ および $0.02\text{mg}/\text{l}$ と言われる⁷⁾。何等かの人為的汚濁物質の流入が避けられない我国の河川では、この数値以下の河川は少ないと思われ、雄物川についても同様である。従って、条件さえ許せばこの面から河川の水質汚濁が進む可能性は常にあると思われる。一方、丹保等⁹⁾は、

窒素やリンの濃度のごく低い上流の清浄な河川でも、環境因子の影響によっては藻類の増加が生じることを示し、この意味では河川における窒素とリンの意味は小さいと言えるかも知れない。ここでは、Chl-a 濃度の増加期間の比較的長かった1981年の後半の約10日間について、Chl-a 濃度と環境因子や栄養塩である N、P との関係を検討した。

Fig. 7 に Chl-a 濃度と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関係を示した。これによると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、前半の0.2~0.35 mg/l からやや上昇して約0.4mg/l になった後、最後の10日間については Chl-a 濃度の急増に対応して一貫して減少を続け、約0.26mg/l まで低下している。

Table 2 には、最後の10日間について Chl-a 濃度と環境因子及び各水質濃度との相関係数を示したが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ との相関係数は最も高い0.935の値であ移た。10日間という短期間の数値ではあるが、その他の窒素関係項目については、T-IN が負のやや高い相関を示したものの、 $\text{NH}_4\text{-N}$ についてはほとんど相関はないという結果であった。

同様に Fig. 8 には、1ヶ月間の Chl-a 濃度と PO_4 濃度との関係を、比較のため秋期1ヶ月間のデータを含めて示した。これによると、Chl-a 濃度と PO_4 濃度との関係は、夏期、秋期とも大きな差はなく、濃度の増加と共にやや Chl-a 濃度が増える傾向もみられる。が、夏期の最後の10日間については、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合と同様に PO_4 濃度の減少と共に Chl-a 濃度は急増しており、特異な現象であることが認められる。即ち、Chl-a 濃度の急増は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ や PO_4 の濃度自体によるものではなく、これら栄養塩の存在の下に環境因子によって持たされたもので、 $\text{NO}_3\text{-N}$ や PO_4 濃度の減少はその結果と考えられる。Table 2 によると、Chl-a 濃度と PO_4 濃度との相関係数は-0.869と高く、P/N とも0.733と比較的高かったが、T-P との相関は比較的小

Fig. 7 Relationship between Chl-a concentration and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration.

Fig. 8 Relationship between Chl-a concentration and PO_4 concentration.

Table 2 Correlation coefficients between the Chl-a concentration and the concentration of the other water qualities and those between the Chl-a concentration and the hydrometeorological factors

items	correlation coefficient
discharge	-0.606
velocity of flow	-0.618
quantity of solar radiation	-0.525
cumulative quantity of solar radiation	0.924
water temperature	0.788
T-P	0.408
T-IN	-0.662
P/N	0.733
$\text{NH}_4\text{-N}$	-0.151
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.935
$\text{PO}_4\text{-P}$	-0.869
BOD	0.485
COD-T	-0.163
COD-S	-0.169
COD-P	-0.048
E220	-0.960
SS	-0.275

さかった。また、BOD や COD, SS などの水質項目と Chl-a 濃度との相関は全て小さく、Chl-a 濃度の増加もこの程度では COD の濃度変化まで及んでいないことも示されている。

次に Chl-a 濃度との相関が高かったのは、環境因子の中で0.924を示した累加日射量と0.788の水温であった。日射量は、藻類活動に必須のものであるが、当日の日射量との相関は小さく、累加量との間に高い相関を示したのが特徴である。日射量は勿論水温上昇の原因であるが、藻類が増殖するためにはある一定の日数

が必要であることを示している。また水温は、生物化学反応に於て基本的な量であり、正の相関は当然予想される。このようにみると、81年夏の渇水期の最後の10日間は、十分なN、Pの存在の下、一定期間の連続した強い日射量により水温が上温し、藻類活動が活発になって増殖と剥離が生じ、これが上流から流下することによってChl-aの濃度が急増したと解釈される。84年も、流量などの違いはあれ無降雨期間、強い日射、水温の上昇など共通の因子があり、同様の現象により生じたと考えられる。そこで次に、これら環境因子の影響について検討しよう。

4.4 Chl-a と水温

1981年と84年の夏、それぞれ1ヶ月間のChl-a濃度と水温との関係を、比較のために81年秋の1ヶ月間の資料と共にFig. 9に示した。これによると、水温が22℃以下の範囲では、Chl-a濃度の増加がみられるのは全て出水時であり、これを除くと水温に関係なくほぼ1～2 μg/lの濃度であることがわかる。水温が22℃を越えると、ややChl-a濃度が増加し始め、本調査の結果では、水温が25℃を越えると急上昇がみられることが共通に認められる。また、この上昇のパターンは全く同じではなく、これ以上の水温ではChl-a濃度が水温に比例して線形的に増加するわけではないことも認められる。従ってこのような水温の範囲では、他の因子も影響し合ってChl-a濃度の変化が生じていると思われる。このように、Chl-a濃度の変化に水温が重要な役割を果していることは事実であるが、両者の関係は必ずしも一定ではなく、日射量の影響も含めて考える必要があると思われる。

4.5 Chl-a と日射量

1981年と84年の、それぞれChl-a濃度の増加が始まった日以降のChl-a累加流出負荷量と累加日射量との関係をFig. 10に示した。81年が9日、84年が13日、計22日間の資料を用いている。これによると、両

Fig. 9 Relationship between Chl-a concentration and water temperature.

Fig. 10 Relationship between the cumulative Chl-a load and the cumulative quantity of solar radiation.

者の間には密接な関係があるが、この関係は年により異なることがわかる。まず81年については、初日の水温は約23℃であったが、約25MJ/m²程の強い日射量の日がその後6日程続いて水温はさらに26℃に達した。この間流量は減少したが、Chl-a流出負荷量は増大し続け、累加流出負荷量と累加日射量との間にはきれいなべき曲線の関係が認められ、この関係式は次のように得られた。

$$\Sigma L_c = 2.25 \times 10^{-3} \cdot (\Sigma I)^{2.33} \quad (1)$$

ここに、 ΣL_c : Chl-a累加流出負荷量(kg)

ΣI : 累加日射量(MJ/m²)

これに対し84年は、初日の水温がすでに26℃に達し、強い日射量の日が初めの3日間は続いたが、その後は約20MJ/m²のやや弱い日射量の日が連続した。最初の3日間は81年と同様のChl-a累加流出負荷量の上昇曲線を示したが、その後次第に勾配が緩やかになり、6日目以降はほぼ一直線の関係がみられる。初期の累加流出負荷量の曲線形の違いは、スタート時の水温の差によると思われる、水温の高い84年の方が初めは上昇曲線の勾配が大きい結果を示した。しかし、その後の相違は、両年の水温にほとんど差がないことから日射量の違いによると思われる、約250kgの累加流出負荷量に達するのに81年は6日費やしているのに対し、84年は7日と1日余分にかかっている。一方この時点までの累加日射量は、ほぼ等しい約150MJ/m²であった。

このように、両年の曲線形の違いは、藻類の増殖やその流出に日射量と水温が強く影響していることを示

している。即ち、両者が個々に影響しているというよりも、複合して影響を与えていると考えられる。勿論、水温と日射量とは互いに独立なものではなく、水温は日射により上昇し、またある一定値以上の水温になるためには流量が少ななければならないというように、これら環境因子の間には密接なつながりがあることも事実である。そこで次に、これらの因子を簡単に表現し得る量を考え、Chl-a 流出負荷量との関係について検討した。

4.6 Chl-a 流出負荷量と環境因子

河川において、無機態栄養塩から植物プランクトンが生成される基礎生産は、湖沼とは異なり主として河床の礫上に付着する藻類によって行なわれるのが特徴である⁸⁾。この増殖に影響を与えるのは、植物プランクトン現存量、リンや窒素などの栄養塩濃度、水温、日射量など⁷⁾多くのものがあり、河川では流速の影響も大きい⁸⁾と言われる。植物プランクトンが増殖すると、これらによる有機物の内部生産も生じ、CODが増加することも知られている。このような関係を表わす式として、1例として次の式が与えられている⁷⁾。

$$\frac{dc}{dt} = G_c \cdot C \quad (2)$$

$$G_c = f(I, T) \cdot \frac{P_I}{k_P + P_I} \cdot \frac{N_I}{k_N + N_I} \quad (3)$$

式(2)を植物プランクトンの増殖を示す式と考えると、速度係数 G_c は N と P の濃度及び環境因子としての水温と日射量に関係する関数 $f(I, T)$ の積として与えられる。この中で、後者 $f(I, T)$ に関して、茅野等⁹⁾は、関数 $f(I, T)$ をそれぞれの比率の関数の積として与え、また森北等¹⁰⁾は指数関数の積で与えている。ここでは、水温と日射量の影響を別々に考察することが困難なこと及び、一方が大であれば他方が小であっても増殖は進むというように両者は相補う関係にあることなどから両者の積を取るものとした。またその量も、河川での藻類の増殖やはく離、その流下を考えると1日だけの量よりも何日間かに渡る累加量が重要であると考え、この量が Chl-a 流出負荷量に与える影響についてマクロではあるが次の式が成立すると考えて検討を行った。

$$L_c = a \left[\sum_{t=t_1}^{t_2} I(t) \cdot T(t) \right]^n \quad (4)$$

ここに、 L_c : Chl-a 流出負荷量(g/sec)

$I(t)$: t 日の日射量(MJ/m²)

$T(t)$: t 日の河川水温(°C)

t_1, t_2 : 累加すべき日(日)

a, n : 係数

まず初めに、累加日数についての検討を行なった。

これには、流量が少なくかつ安定している期間の資料を選択して検討することにし、流量150m³/sec 以下かつ日降雨量 3 mm 以下を基準とした。これには、Chl-a 濃度が急増した期間を中心に81年の 8 日間と84年の15日間、計23日間が含まれるが、累加量の比較的小さかった84年の 3 日間を除く20日間を検討対象とした。

Table 3 には、水温と日射量との累加日数を4日前から当日までの間で様々に組合わせた時の L_c と、この累加量との間の相関係数を示した。これによると、3~4日前から1日前か当日までの3~5日間の累加量と L_c との相関が良く、1~2日間の累加量との相関は比較的小さいことがわかる。これは、3~5日間が2.2で述べた低水流量以下の時の本河川の流下時間にほぼ相当すること及び、流出負荷量には流量が関係し、この流量は藻類の増殖に大きな影響を持つ水温と特に渇水時に負の高い相関を示し、また水温は日射量と正の高い相関があるというように、相互に密接に関連していることなどのためと思われる。最も高い相関を示した回帰式は次のように求められ、この関係を Fig. 11 に示した。

$$L_c = 1.41 \times 10^{-16} \left[\sum_{t=-3}^{-1} I(t) \cdot T(t) \right]^{4.84} \quad (5)$$

ただし、 $1,400 \leq \sum I(t) \cdot T(t) \leq 1,950$

Fig. 11 によると、水温と日射量との累加量が約

Table 3 Influence of the number of days on the correlation coefficient between the Chl-a load and the cumulative product of the values of water temperature and quantity of solar radiation

No.	Correlation Coefficient	Number of Days	($t_1 - t_2$)
1	0.912	3 days	(-3 - -1)
2	0.898	4 days	(-3 - 0)
3	0.848	5 days	(-4 - 0)

Fig. 11 Relationship between the Chl-a load and the cumulative product of the values of water temperature and quantity of solar radiation of the previous three days.

1,400(°C・MJ/m²)まではChl-a流出負荷量は約0.2(g/sec)とほぼ一定であるが、これを越すと徐々に増大する傾向があること、及び流量などの環境条件の異なる2年のデータが、ばらつきはあるもののほぼ1つの曲線で表わすことが可能であることなどが認められる。従って、増水時を除けば、河川の夏期渇水時のChl-a流出負荷量を、この式に環境因子を与えることによってマクロではあるが評価することが可能であり、この時期の水質変動特性を考える上で有用と思われる。

なお、式(2)の速度係数 G_c には、この他にも影響を与える因子があるものと思われる。また、計算に当って日射量には水中照度を用いる方がよく、Chl-a流出負荷量についても河床の現存量やその種類、CODとの関係等についても知る必要があるが、これらについては今後検討を行なう必要があると考えている。

5. 結 論

雄物川の夏期の低水・渇水時における水質特性について、2年間の水質調査データを基に、主に流量、水温、日射量などの水文気象因子とクロロフィルa流出負荷量との関係について検討を行なった。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 低水・渇水流量が同じでも、夏期と秋期では水質変動特性は異なり、夏期のCOD負荷量には、流量減少と共に減ずる割合が小さくなる傾向が認められる。
- (2) 夏期の低水・渇水流量時の一定の時期には、クロロフィルa濃度が急増する現象が認められ、これはこの時期の高い水温と日射量により河床の藻類が増殖し、その剝離により流下してくるためと思われる。
- (3) 河川のある地点におけるクロロフィルa流出負荷量には、河川水が流下してくる間に受ける日射量とその結果生じる水温とが大きく影響を与えている。本研究においては、ほぼ流下時間に相当する3～4日間の水温と日射量の積の累加量が重要な因子であると認められた。
- (4) クロロフィルa流出負荷量とこの累加量との関係について実験式が求められ、本研究では過去3日間

の累加量が約1,400(°C・MJ/m²)を越すと、クロロフィルa流出負荷量が増加する傾向のあることが認められた。

謝 辞

本研究を行なうに当たり、多大な御協力を頂いた本校卒業研究生の諸君及び米谷裕技官に厚く御礼申し上げます。

(原稿受理 昭和60年5月2日)

引 用 文 献

- 1) 羽田守夫(1977)雄物川の水質の変動特性とそのモデル化, 土木学会論文報告集, No.265, 73-81.
- 2) 羽田守夫, 松本順一郎(1983)雄物川における流出負荷量の推定とその特性について, 土木学会論文報告集, No.340, 107-116.
- 3) 羽田守夫, 佐藤悟(1984)雄物川における低水流量時の水質特性について, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要第2部, 705-706.
- 4) 建設省河川局編(1982)流量年表, 日本河川協会, 東京.
- 5) 丹保憲仁, 芳賀卓, 庵谷晃(1984)冬期の藻類活動による河水pHの変動—大雪山麓の忠別川における高pHの出現—, 水道協会雑誌, 53, No.11, 20-28.
- 6) 小林節子(1982)着生微生物の剝離による河川水質への影響, 水質汚濁研究, 5, 329-339.
- 7) 村上健(1982)§19水質汚濁「最新下水道ハンドブック」(最新下水道ハンドブック編集委員会編), 1471-1481, 建設産業調査会, 東京.
- 8) 沖野外輝夫(1976)富栄養化調査法, 5-62, 講談社, 東京.
- 9) 茅野秀則, 篠崎守, 田村賢治, 中久喜康秀(1984)水生植物による水域浄化システムの基礎的研究(その1)—水生植物による水質浄化シミュレーションモデルについて—, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要第2部, 885-886.
- 10) 森北佳昭, 振井茂宏, 三浦進(1985)ダム貯水池水質の予測と保全対策について, 第29回水理講演会論文集, 365-370.