

矢作川下流域における 水温変動と生物一次生産特性

WATER TEMPERATURE VARIATION AND PRIMARY PRODUCTIVITY AT DOWNSTREAM REACH OF THE YAHAGI RIVER

戸田祐嗣¹・松永紘昌²・辻本哲郎³

Yuji TODA, Hiromasa MATSUNAGA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

²非会員 工修 名古屋市 (〒460-8508 名古屋市中区三の丸三丁目)

³フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

The active uptake of river water for the water utilization in the Yahagi River has decreased the river discharge, which might affect the water temperature and the river ecosystem. In the present study, the effects of the water uptake on water temperature and primary productivity of periphyton were investigated at the downstream reach of the Yahagi River by field observations and numerical simulations. The results of the field observation shows that the thermal conduction from river water to river bed was much smaller than the net radiation, and therefore the temporal and spatial variations of river water temperature were mainly induced by the heat exchange between air and water. The computational results show that the increase of the river discharge reduced the spatial and the temporal variations of water temperature through the change of heat capacity of river water, and the primary productivity of periphyton decreased with river discharge.

Key Words : Water temperature, heat budget, river discharge, intake, periphyton, primary production

1. はじめに

矢作川は、その中流・下流域に広大な農業地帯を抱え、灌漑期には農業用水供給のため河川水の取水が行われている。河川水の取水は、取水地点より下流側河道における河川流量、水深、川幅を低下させる。このような河川水理特性の変化は、単位河道区間の河川水の熱容量を変化させるため、取水による河川流量の変化は河川水温の形成機構に影響を与える。また、河川水温が変化すると河川水中に生息する生物の生理活性が変化するため、河川水質や生物生産量に影響を与えることが予想される。

そこで本研究では、明治用水頭首工からの取水により平水時の河川流量が低下している区間(河口より10km~34km)を対象に、河川流量の変化が河川水温、生物一次生産に与える影響を明らかにする事を目的とする。まず、現地観測(水温観測、微気象観測)、実験より矢作川下流域における水温形成機構を明らかにする。観測結果に基づいて一次元水温

解析モデルを構築し、構築されたモデルを用いて、明治用水による取水が河川水温へ与える影響を明らかにする。また、河道内物質循環モデル¹⁾に流量変化に伴う河川水温変化を取り入れ、河川水温の変化が藻類一次生産や水質に与える影響について検討す

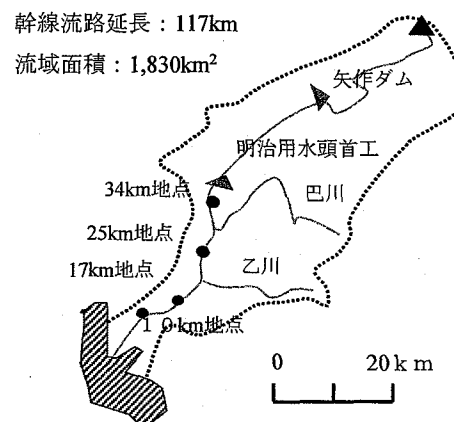


図-1 観測対象地(矢作川)

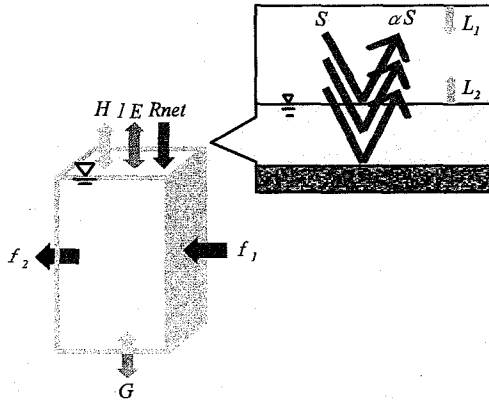


図-2 河川の熱収支の概念図

る。

2. 現地観測及び実験

(1) 研究対象地の概要

研究は愛知県を流れる矢作川を対象として実施した。矢作川では河口より約34.6km上流側の地点に明治用水頭首工（受益面積は豊田市内11市町村，約10,190ha）があり（図-1），農業用水などのために灌漑期には30m³/sの河川水の取水が行われている。この取水の影響により，明治用水の下流側河道では平水時の流量が10～20m³/sまで減少している。本研究では，潮汐の影響を受けない河口より10km地点から明治用水頭首工までの区間を研究対象地とし，現地観測及び実験を行った。

(2) 河川における熱収支の概要

図-2に河川における熱収支の概念図を示す。河道区間内の単位底面積を持つ水柱に対して大気，河床面との鉛直方向の熱のやり取りを考えると，水面では R_{net} ， H ， IE ，河床では G が熱の供受を行っている²⁾。ここに R_{net} は正味放射量（W/m²），顕熱 H は大気と河川水との温度差によって生じる熱量（W/m²），潜熱 IE は水表面からの蒸散の際に奪われる熱量（W/m²），河床伝熱量 G は河床から河川水あるいは河川水から河床へ伝わる熱量（W/m²）のことである。正味放射量 R_{net} は水面での短波，長波放射の差であり，次式で表される。

$$R_{net} = (1 - \alpha)S + L_1 - L_2 \quad (1)$$

$$L_1 = \varepsilon R_a = \varepsilon \sigma (0.51 + 0.066 \sqrt{e_a}) T_a^4 \quad (2)$$

$$L_2 = \varepsilon \sigma T_w^4 \quad (3)$$

ここに S は日射量（W/m²）， α ， S は水面，水中あるいは河床で反射されたもので α （=0.05）は反射率

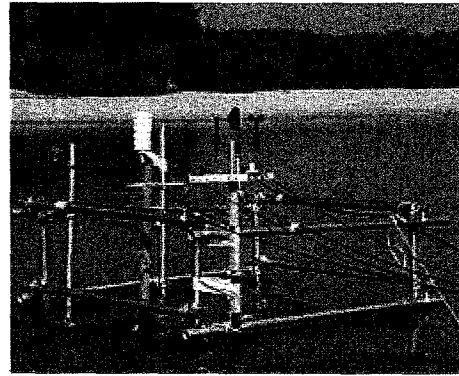


図-3 微気象観測写真

表-1 微気象観測機器一覧

観測機器	観測項目	高さ (河床が基準)	測定間隔
3杯風速風向計	風向・風速	160cm	10秒
温湿度計	温湿度	160cm	10秒
放射温度計	水表面温度	160cm	10秒
熱流板	河床伝熱量	-1cm	10秒
日射計	日射量	160cm	5分
放射収支計	放射収支	160cm	5分

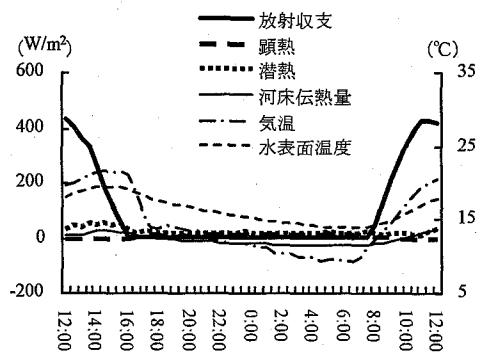


図-4 微気象観測の結果（2006.11.3～11.4）

（アルベド）である。 L_1 は大気からの長波放射量（W/m²）， R_a は快晴時の大気長波放射量（W/m²）であり，Bruntの式を用いた。 ε は射出率（=0.97）であり， T_a は気温（°C）である。 L_2 は水面からの長波放射量（W/m²）であり， σ はステファン・ボルツマン定数（=5.67051×10⁻⁸）， T_w は水表面温度（°C）である。この正味放射量が水柱に入ってくる正味のエネルギーであり，その一部が顕熱 H ，潜熱 IE ，河床伝熱量 G に分配され，残りが水柱に吸収される。流下方向について考えると，水柱に上流側から流入する熱量と下流側へ流出する熱量があり，前述の鉛直方向の熱収支と上下流の熱収支の残差が水柱の水温を上昇するのに使われる熱量である。

(3) 微気象観測

矢作川下流域における河川水温の形成機構を明ら

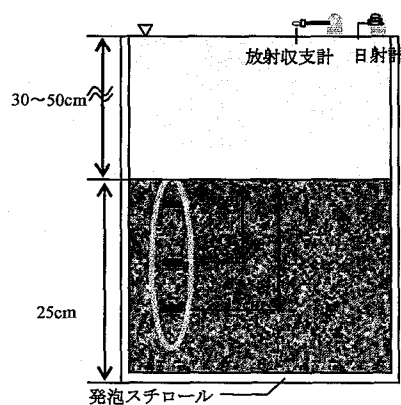
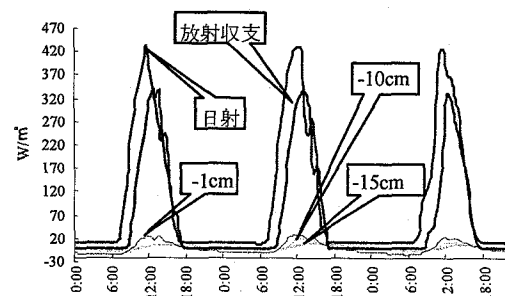


図-5 河床伝熱に関する実験装置の概要図

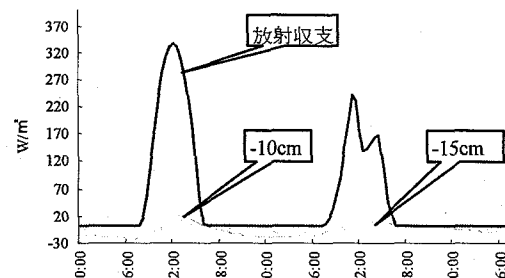
かにするため、河口より17km地点の河道内において微気象観測（熱収支計測）を行った。水深60cmの場所に機器（図-3）を設置し（熱流板は水深30cmの場所に設置）、2006年11月3日11:30～4日12:30に実施した。当日は快晴であり、観測期間中における水位の変動はほとんどなかった。観測項目は風向・風速、温湿度、水表面温度、河床伝熱量、日射量、放射収支であり、熱流板は河床から深さ1cmのところに埋設し、その他の機器は河床から160cm（水面から1m）の高さに設置した。測定間隔は日射計・放射収支計が5分毎の積算値、その他の機器が10秒毎の瞬間値である（表-1）。潜熱、顕熱については、風速計、温湿度計の計測結果からバルク法²⁾により算出した。

観測により得られたデータを整理し、単位河床面積上の熱収支（水面及び河床）を示したものが図-4である。ただし放射収支の値は水柱を加熱する場合が正であり、顕熱、潜熱、河床伝熱量の値は水柱を加熱する場合が正であり、顕熱、潜熱、河床伝熱量の値は水柱を加熱する場合が負である。図-4から、顕熱は日中気温が水表面温度よりも高いため値が負となり水柱を加熱し、夜間値が正となり水柱から熱を奪っている。潜熱は水面における水蒸気圧が大気における水蒸気圧よりも時間を問わず高いため常に正の値をとり、水柱から絶えず熱を奪っている。河床伝熱量は日中水柱が十分に温められているため正の値をとり、夜間は日中に十分温められた河床から水柱へ熱が伝達され負の値となっている。河床伝熱量のこの働きは水温の振幅を減衰させる効果があると考えられる。今回の観測では顕熱、潜熱、河床伝達熱量は放射収支に比べ非常に小さく、放射収支の大部分は水柱に吸収された。

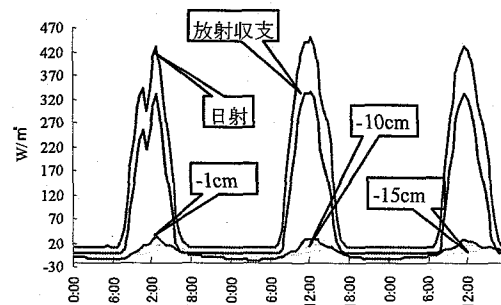
今回の観測では潜熱、顕熱、河床伝熱量は放射収支に比べ非常に小さかった。顕熱、潜熱は観測期間中の風速が弱かったため、バルク法を用いての正確な推定が難しく、一般的に報告されている値より少し小さくなったと考えられる。河床伝熱量は今回の



(a) 2007/1/10～1/12（水深50cm）



(b) 2007/1/19～1/21（水深40cm）



(c) 2007/1/13～1/15（水深30cm）

図-6 河床伝熱量に関する実験結果

観測では十分な日射があったにもかかわらず放射収支と比べ小さかったことから、河川水温への影響が小さいことが分かった。ただし、熱流板を砂州に近い水深30cm程度の場所に設置したため、伏流水などによる局所的な熱輸送の影響を受けている可能性がある。

(4) 河床伝熱量に関する実験

微気象観測の結果では、放射収支量と比較して河床伝熱量が小さいと観測された。しかし実河川では伏流水などによる河川水、河床との熱交換が局所的に生じている可能性があり、熱流板が偶然そのような地点に設置されると測定結果に大きく影響してくる可能性が考えられる。そこで図-5に示す装置を用いて、伏流水の影響を取り除き水と河床との熱伝導に関する実験を行なった。設置したのは熱流板、放射収支計、日射計である。河床材料は矢作川17km

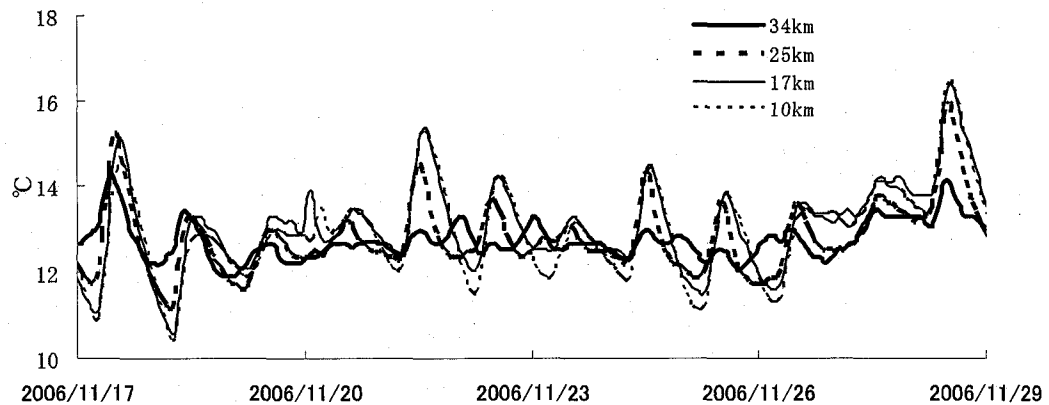


図-7 流下に伴う河川水温の変化

地点から採取してきたものを使用し、水槽内の水は水道水を使用した。実施期間は2007年1月10日から同年1月21日までである。2007年1月10日から1月12日は水深50cm, 同年1月13日から1月15日は水深40cm, 同年1月19日から1月21日は水深30cmの3つの期間に分けて測定した。熱流板は河床から1cm, 10cm, 15cmの深さに1つずつ計3つ設置した。測定間隔は10秒である。また水槽の側面や底面が大气との熱交換を行うことを防ぐため、約5cmの発泡スチロールを断熱材として使用し、側面と底面を覆った。

結果を図-6(a)～(c)に示す。どのケースでも河床伝熱量は日射量、放射収支量(水深30cmは日射計のトラブルにより計測できなかった)に比べ非常に小さな値であった。また、異なる水深による河床伝熱量の違いも見られなかった。

(5) 水温観測

矢作川下流域の水温変化を把握するために、対象区間内4ヶ所において防水型水温記録計 (Stow Away Tidbit Temp Logger, Onset) を河道内に設置した。水温計を設置したのはそれぞれ河口から10km, 17km, 25km, 34km (明治用水直下) の地点であり (図-1), それぞれ日中の日当たりが良い場所に、河川の水位変動により水表面から露出する事がないよう設置した。測定間隔は3分であり、測定期間は10km, 17km, 34km地点が2006年9月15日から2007年1月10日まで、25km地点が2006年11月12日から2007年1月5日までである。

測定結果を図-7に示す。観測結果から明治用水では水温の変動の振幅が小さく、下流に流下するに従って振幅が大きくなることが分かる。本観測および実験の結果から、本観測対象河川の水温形成において河床伝熱の効果は小さいことから、河川水温の変化は主に大気との熱交換によって引き起こされる。日中は日射による加熱、夜間は潜熱、顕熱による冷却の効果が移流に伴って表れ、流下に伴う水温振幅

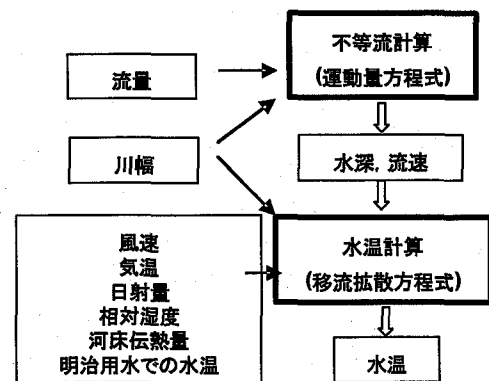


図-8 水温解析のフローチャート

の増加が引き起こされていることが分かる

3. 水温解析

本章では矢作川下流域(河口より10～34km)における水温特性を再現するため、前章の現地観測及び実験の結果を考慮し、流下方向に川幅の変化を考慮した1次元水温解析モデルを構築し、明治用水による取水の影響を検討する。

図-8は1次元水温解析モデルの計算フローチャートである。本解析では各時間における流量を与え、定常状態における不等流計算を行い、計算対象区間内の各場所における水深、流速を算出する。算出した水深、流速を用い、1次元の河川水温の移流拡散方程式により各時間、各場所における水温を算出する。

(1) 計算条件

河口より10～34km区間を計算対象領域とし、その24kmの区間を241メッシュに分割した。また時刻みを15秒として解析を行った。計算期間は水温の観測データがある2006年9月15日～2007年1月5日と

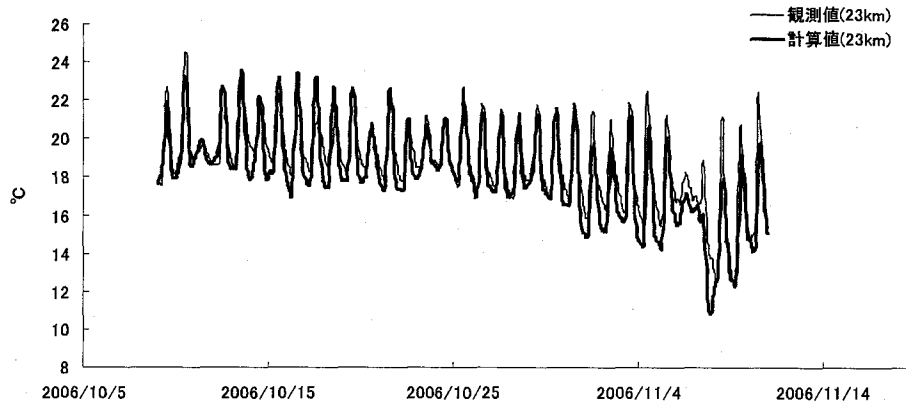


図-9 河川水温の解析値と観測値との比較

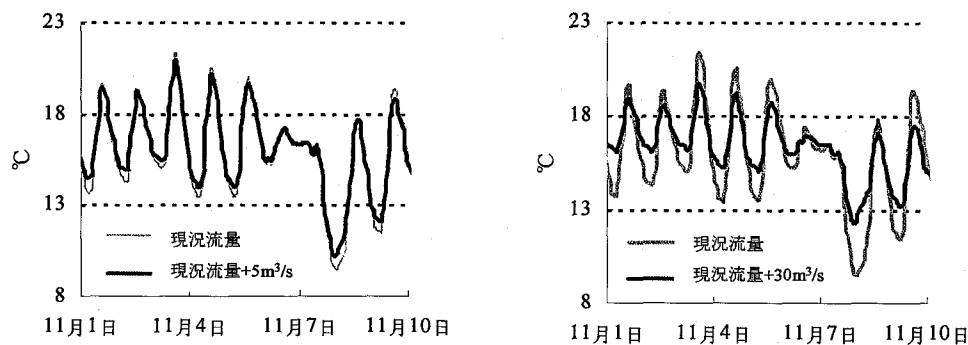


図-10 流量の変化に伴う河川水温の変化

した。

初期条件として明治用水における水温観測値を空間的に一様に初期値として与えた。上流端の境界条件として明治用水の水温観測値の時系列データを与え、下流端の境界条件は水温の空間勾配がゼロとなるようにした。

流量は河口より13km地点に位置する木戸水位流量観測所より算出した。計算期間中のある一日について正午に日平均流量の観測値を与え、その翌日正午までの流量を線形的に変化させることによって、流量を連続的に変化させ、河川水の熱容量が不連続に変化することを避けた。断面は矩形を仮定し、上流端の明治用水から米津観測所がある下流端まで80m～150mの範囲で下流へ向かって川幅が広くなるよう線形的に変化させた。

(1) 不等流計算

水温解析の第1段階として定常状態での不等流計算を行い、計算区間内の各場所における時間毎の水深を算出する。不等流計算は運動量方程式を用い下流端から上流へ向かって計算した。なお、各時間の流量からマニング式を用い下流端水深を与えた。

(2) 水温計算

水温計算には不等流計算より求めた水深、流速と以下に示す1次元移流拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial B h T_w}{\partial t} = -\frac{\partial B h U T_w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(B h D_x \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + B \frac{T E}{c_w \rho_w} \quad (4)$$

ここに、 T_w は水温(°C)、 D_x は拡散係数、 $c_w \rho_w$ は水の熱容量($=4.2 \times 10^6 \text{ J/K/m}^3$)である。 $T E$ は単位面積あたりの水面及び河床でのエネルギーフラックス(W/m^2)であり、正味放射量、潜熱、顕熱、河床伝熱量の合計値である。正味放射量、潜熱、顕熱を算出する際に必要となる風速、気温、相対湿度、日射量は気象庁のホームページ³⁾より取得した(風速、気温は観測地点の岡崎から、相対湿度、日射量は観測地点の名古屋から取得した)。また前章で得た河床伝熱量の河川水温形成への影響は小さいという結論から、計算に際して今回は観測値をそのまま用いることとした。

(3) 水温解析モデルの妥当性

図-9は17km地点における水温の観測値と計算値である。観測値と計算値に多少の誤差はあるものの、時間方向への水温変動特性など比較的良好に再現できていると言える。

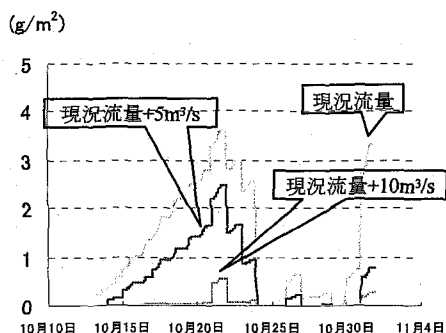


図-11 流量の変化に伴う河床付着藻類量の変化

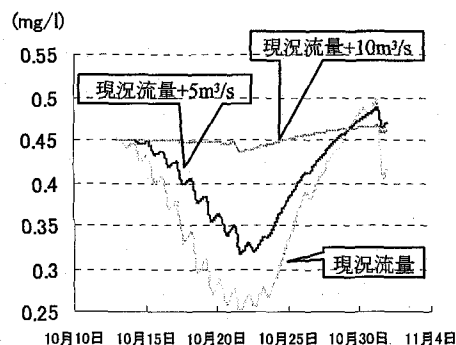


図-12 流量の変化に伴う硝酸態窒素濃度の変化

(4) 明治用水による水温への影響

明治用水による取水が河川水温へ及ぼす影響を検討するため、明治用水による取水量を制限した状況を想定し、計算で用いる上流端からの流入流量を現況流量から $5\text{m}^3/\text{s}$ 、 $30\text{m}^3/\text{s}$ 増加させた場合の計算を行った。計算結果を図-10に示す。図より、現況流量から $30\text{m}^3/\text{s}$ の流量増加を行った場合の方が、 $5\text{m}^3/\text{s}$ 増加の場合よりも現況流量との差が大きく、また河川水温の振幅が小さくなっていることが分かる。本解析では、河床伝熱が放射収支に占める割合は小さい。従って、河川水の加熱・冷却は主に大気との熱交換で生じており、その熱交換量は矩形断面を仮定した本解析において河川流量の変化に伴う変化が殆どない。一方で河川流量が増加すると、単位面積河床上における水柱の持つ熱容量が増加する。この熱容量の変化によって、流量の大きな場合の方が、温まりにくくあるいは冷めにくくなり、河川水温の時間変化の振幅が減少したと考えられる。 $30\text{m}^3/\text{s}$ 戻した計算を行った場合では、現況流量での水温と $2\sim 3^\circ\text{C}$ 程度差が生じており、矢作川下流域における水生生物の生態やその生理活性の変化に伴う水質の変化などに影響を与えている可能性が示唆される。

4. 物質循環モデル

(1) 物質循環モデルの概要

戸田らは砂河川における物質循環について、付着藻類、付着性他栄養生物、無機栄養塩、DO、懸濁態物質を考慮した物質循環モデルを構築している。このモデルでは、水温を観測値から近似した正弦曲線で与えているが、水温解析より得られた水温を与え明治用水の取水による影響（水温変動、流量変動）が生物一次生産に与える影響について検討した。

(2) 結果及び考察

河川流量の変化に伴う河床付着藻類量の変化に関する数値解析結果を図-11に示す（計算期間は2006年10月13日～10月31日）。図より、河道内の流量が

多くなるほど藻類量が減っていることが分かる。河川流量が増加することは、①河床材料の移動頻度が上昇し付着藻類の繁茂を抑制する、および前章で述べたとおり②水温の時間的変動の振幅を小さくする、という2つの効果があり、両者とも藻類の生産力を低下させるように作用する。その結果として、河川流量の増加により藻類現存量が小さくなっている。図-12に流量変化に伴う硝酸態窒素濃度の変化を示す。河川流量が増加すると、前述のとおり、河床生物量が減少するため硝酸態窒素濃度の時間的な変化が小さくなっていることが分かる。

5. まとめ

本研究より得られた主たる知見を以下に示す。

- 1) 矢作川下流域における河川水温の形成機構には、河川水面での熱交換が支配的である。
- 2) 明治用水による取水を制限し、河道内に $30\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量を戻した場合、現況流量と比べ $2\sim 3$ 度程度の水温変化を生じる。
- 3) 河道内物質循環モデルを用いて、河川流量が付着藻類の一次生産に与える影響について検討したところ、河道内に流量を復元した場合、1次生産量が減少することが分かった。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発（代表：辻本哲郎）」および文部科学省科学研究費若手研究(B)（代表：戸田祐嗣，課題番号：19760336）の補助を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 戸田祐嗣，辻本哲郎，池田拓朗，多田隈由紀：砂河川における河床付着藻類の繁茂とそれによる水質変化，河川技術論文集，第12巻，pp.25-30，2006。
- 2) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，1994。
- 3) 気象庁電子閲覧室(2006-2007)（岡崎，名古屋），<http://www.data.kishow.go.jp/etm/index.html>

(2007.4.5受付)