

## 河川水温の電気アナログモデル化の試み

新 井 正

### 1. はじめに

河川水温の研究は、ヨーロッパ・アメリカにおいては河川の結氷との関係において、日本では稲の冷水被害との関係において進められてきた。最近では、特にアメリカにおいては、河川沿岸に建設された火力・原子力発電所の温排水の冷却に関して研究される場合が多い。これらの研究の手法の主な傾向は、ある一定の河川区間のなかで水温がどのように変化するかという問題、すなわち区間内水温変化の問題である。これは、元来は流下にとまらぬ水温上昇の問題であるから、区間上昇度と呼ばれている。そして、熱収支解析によって区間上昇度を推定する方法が、この分野の多くの研究の傾向であった(新井・西沢, 1974)。多くの研究において、水面熱収支の解析はなされたものの、問題とする区間に流入する支流水・地下水などの影響は考慮されることが少なく、それが区間上昇度の推定値に誤差をもたらしていた。西沢(1966)はこの点に注目し、河川水温に及ぼす支流水や地下水の影響が大きいことを示した。河川水温の形成には、水面熱収支のほか側方から水塊としてもち込まれる熱量も関与し、後者がはるかに卓越する場合も考えられる。

特定区間の区間上昇度を扱う場合であれば、上にのべた各要素を丹念に測定すればよい。しかし、扱う区間が広がってくると、このような研究手法は現実には適用できなくなる。広い流域内の全ての地点で、多くの要素を測定することは不可能である。流域全体を扱う場合には、従来の手法とは異った原理が必要とされるであろう。

最近、河川の地形要素あるいは流域の土地利用が、河川水温に影響を与えていることが認識されつつある。ここでは広い水系の水温形成に関して、流域の地形要素と水温に関する解析方法の一つの試みについてのべる。流域の地形要素、例えば水系の形状、水系網の構成、河床勾配、標高などは、河川水温に大きな影響を及ぼしている。ここではその一部として、水系の形状と水系網の構成とをとりあげ、河川水温との関係を考える。ここでべる電気アナログモデルの研究は着手したばかりのもので、まだアイディアの域を出ていない。充分な計測・検証はなされていないが、察知的研究として発表する。

### 2. 水系網の構成と水温との関係についての考え

水系網の構成(水系の形状を含む)は、河川水温にどのような影響を与えているのであろうか。Fig.1は、き

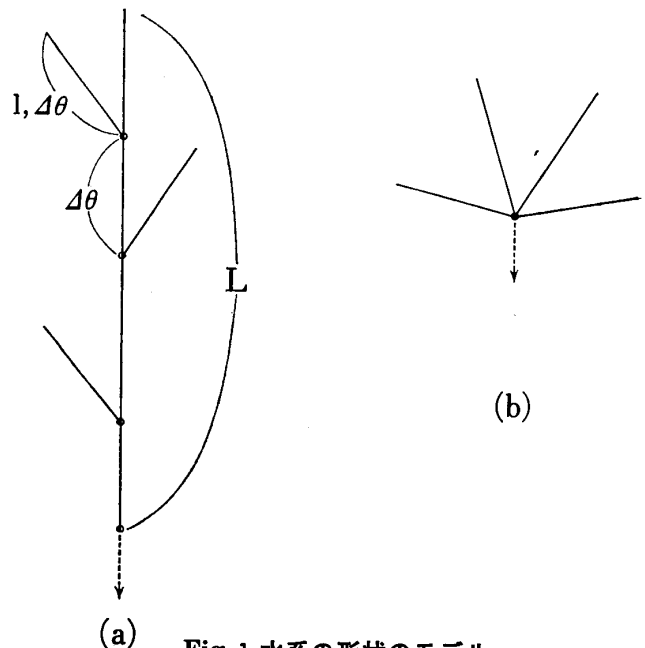


Fig.1 水系の形状のモデル

わめて概念的にこの関係を表わした図である。図中の(a)、(b)の水系は、それぞれ4本の外側リンクを持ち、分岐率も4.0である。しかし、その結合の仕方が異なっているために、(a)では羽毛状水系に、(b)では放射状水系になっている。それぞれの支流の長さおよび面積は、ほとんど等しいものとする。現実には(b)のような水系は存在しないであろうが、ここではモデルとして示してある。

水温上昇の面からみると、(a)の水系では合流点と合流点の間の内側リンクの水温上昇が加わり、流域の出口における水温は(b)水系の場合よりも高くなるであろうと考えられる。(a)水系では、それぞれの水源から出発する水は、長い流下距離を持つためである。以上の考察は全く模型的なものであるが、現実にもこれに近い場合が存在するであろうと考えられる。このような点が、以下にのべる電気アナログモデルのアイディアの出発点であった。

### 3. 電気アナログモデルの考え

次に Fig.1 にもとづいて、水温上昇の電気アナログモデル化についてのべる。

河川のある単位区間内（距離あるいはリンクの区間）の水温上昇を  $\Delta\theta_j$  とする。区間  $j$  の解釈は、長さに関する要素であれば何でもよいであろう。 $n$  ケの区間を通過する水塊の水温上昇 ( $\Delta\theta_n$ ) は、模型的に考えると次のようになる。

$$\Delta\theta_n = \sum_{j=1}^n \Delta\theta_j \quad (1)$$

それぞれの区間における  $\Delta\theta_j$  は、上流と下流とでは異なるであろう。 $\Delta\theta_j$  の小さな変動を無視し、例えば、もし  $\Delta\theta_j$  が水流の各次数によって近似的に一定な値をとるのであると考えるならば、いろいろな形でのモデル化が可能となる。電気アナログモデルの考えの基礎は、以上のような仮定にもとづいている。

水温変化の電気アナログ化には、多くの方法が考えられる。まず第一に、水温上昇を電圧 ( $V$ ) におき替える方法が考えられるであろう。この場合には、各水流の区間を、それぞれの次数に応じた電池で結びつけることを考えればよいであろう。そして、 $\sum \Delta\theta_j = \sum V_j$  と考え、水系網と同じ線系の回路を作ればよいであろう。簡単に考えられることは、放射状水系では並列になるので電圧は上昇せず、羽毛状水系では直列部分になる中間リンクがあるために電圧が上昇するであろうという事である。このようなモデルは理解はしやすいが、作業の費用・手数からみて、好ましいものではない。

次に、河川水温を電気抵抗 ( $R$ ) あるいはそれによる発熱量 ( $q$ ) として表現することもできる。ここでは、電気抵抗によるモデル化を考える。

流下にとまらう河川水温の変化 ( $\Delta\theta$ ) は、次のように表わすことができる。

$$\Delta\theta = c \cdot \rho \frac{\alpha}{u \cdot d} (\theta_{\infty} - \theta_0) \quad (2)$$

ここで、 $c$  は水の比熱、 $\rho$  は水の密度 ( $c \cdot \rho$  とともに 1 とする)、 $\alpha$  は係数、 $u$  は流速、 $d$  は平均水深、 $\theta_{\infty}$  は平衡水温、 $\theta_0$  は出発点水温である。各区間の  $\Delta\theta$  を抵抗におき替えるわけであるが、仮りに、 $\theta_0$  が一つの流域内で全ての外側リンクの出発点に対して同じであると仮定すれば、モデルは単純化することができる。すなわち、水温変化に係わる要素は  $\alpha/u \cdot d$  および区間の数あるいは河川長 ( $l$ ) のみになり、水流の地形要素のみで水温を考えることができるようになる。ただし、この要素は平面的なもののみである。(2) 式のなかの水流に関する要素  $1/u \cdot d$  は、次のように書き改めることもできる。

$$\frac{1}{u \cdot d} = \frac{T}{d} \quad (3)$$

$T$  は、単位距離を流下するのに要する流下時間である。

(2) 式において、 $\alpha(\theta_{\infty} - \theta_0)$  を電位差に、分母の ( $u \cdot d$ ) を電流 ( $I$ ) におき替えてみる。この類推は直観的にもわかりやすいと思われる。すなわち、オームの法則によって、 $\Delta\theta$  を次のように置き替える。

$$\Delta\theta \propto \frac{V}{I} = R \quad (4)$$

水温差のポテンシャルが電位差になり、水流の条件（それは値が大きいと  $\Delta\theta$  を小さくさせる）が電流として表現できる。水塊が通過する  $n$  ケの区間については、抵抗 ( $R$ ) を加算すればよいであろう。

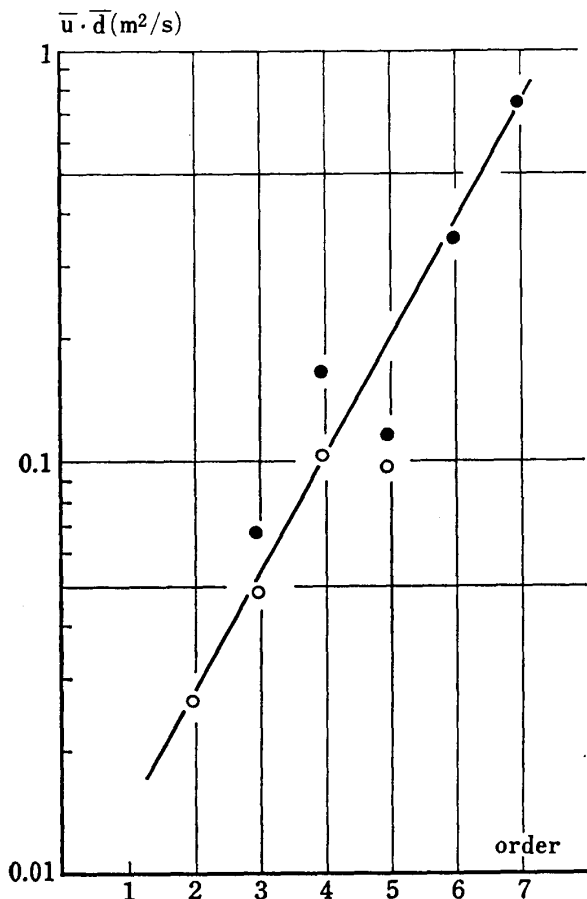
$$\Delta\theta_n \propto \sum_{j=1}^n R_j \quad (5)$$

抵抗による電気アナログモデルには、また異った考え方もできる。もし ( $\theta_{\infty} - \theta_0$ ) が、一つの流域内で全ての水源について等しいと仮定し、また係数  $\alpha$  が全ての流れの区間で一定であると仮定すると、水温は  $1/u \cdot d$  と  $l$  のみによって決定されることになる。この場合に、 $1/u \cdot d$  あるいは  $\alpha/u \cdot d$  は、(2) 式の水温のポテンシャル ( $\theta_{\infty} - \theta_0$ ) にかかる総合的な係数とみなすこともできる。水温上昇が大きい地域は、 $1/u \cdot d$  が大きく、 $u \cdot d$  のそれぞれが小さい地域である。 $1/u \cdot d$  あるいは  $\alpha/u \cdot d$  を係数と考え、この係数の性格を明らかにしておき、モデルの基本として採用することもできる。ここでは、 $1/u \cdot d$  を抵抗におきかえ、水温上昇の類推を試みることにする。なお、流域全体の場合の扱いは、(5) 式と同じである。

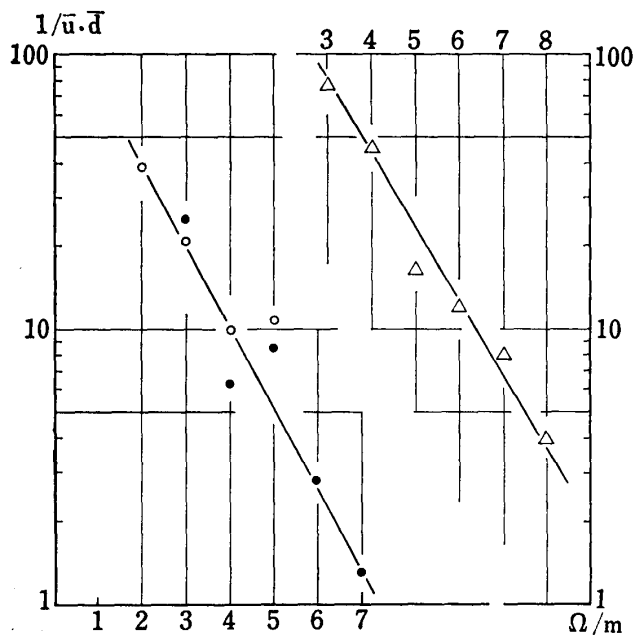
### 4. 電気アナログモデルの作成

河川の水深や流速が、一河川内の位置によって、あるいは水流の次数によって変化する事実に関しては、いくつかの報告がある (Leopold et als., 1964)。一般的な傾向として、岩石の多い上流の渓谷では流速はおそく、また水深も浅い。平均流速が早いのは岩石が少なくなり、粗度が小さくなる中・下流である。水深も、水量の多い中・下流で深くなる。これらの事実は、河川を眺めただけでも理解することができる。

ここで、上・中・下流の関係を表現するために、水流の次数を利用する。さきにのべた  $u \cdot d$  と次数の間には一定の関係があり、若干の資料を整理した結果は Fig.2 に示した。Fig.2 は利根川水系と入間川水系とにおける次数と  $u \cdot d$  との関係である。同じ関東地方の河川であるという理由も考えられるが、両者の一致はよい。 $u \cdot d$  は、次数があがると大きくなる。1次の谷についての資料がないのは、地形図上の1次の谷にはふつう水流が見



**Fig. 2 水流の次数と (u · d)**  
 u: 流速 d: 水深  
 ●: 利根川水系 (山辺による)  
 ○: 入間川 (水島による)



**Fig. 3 次数と 1/u · d および実験に用いた抵抗値**  
 △: ニクロム線抵抗値

られないためである。Fig. 3 の左側には、Fig. 2 の値の逆数、すなわち  $1/u \cdot d$  と次数との関係が示されている。前項の第3番目の考えにしたがい、 $1/u \cdot d$  の傾向に合う

ように抵抗値をえらび、アナログモデルを作成する。

抵抗線としてはニクロム線を使い、各次数ごとにその太さ、すなわち抵抗値を変え、Fig. 3 の  $1/u \cdot d$  の傾向に合うように線をえらんだ。その結果の次数と抵抗値との関係は Fig. 3 の右側に示してある。線の太さは相対的なものであるから全く適当に決めればよいのであるが、ここでは工作のしやすさ、測定器の精度および費用を考え、0.1~0.6mmφ の線をもちいた。適当な線が入手できなかった場合には、抵抗値は若干の偏りを生じている。

一方、地図上に画かれた水系図を次数別に色別けし、それぞれの次数ごとに太さを変えてニクロム線をはりつけ、最後に全体を結線する。実際には地図上にエスロン板をおき、その上にニクロム線を熱でとかしてつけてある。また、今回の作業では、恒常水流が存在しないと考えられる第1次・第2次の谷は省略された。

このモデルの利点として、水流の長さが地図上で忠実に再現される点あげられる。まえにのべた距離あるいは区間の数には、地図上のニクロム線の長さそのものが相当する。また、この図上で、計測したい地域や地点を簡単に見出すことができるのも利点の一つであろう。

さききのべたように、このモデルでは熱的寄与が大きい部分で抵抗が大きく作られている。もし熱的な寄与がゼロであれば、抵抗もゼロにならねばならない。熱的な寄与がゼロになるような状態は、例えば発電所の水路トンネルの場合にみられる。水路トンネル内の水温変化は  $10^{-2} \sim 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}$  のオーダーにあり、ゼロとみなしうることが従来の研究によって知られている。このような場合のモデルは、抵抗線を普通の導線につなぎ替えることで表現することができる。後でのべるように、水路トンネルの築造ともなる水温変化の推定には、このモデルは有効な手段となるであろう。以上のように、このモデルはいくつもの利点を持っている。

今回の測定は抵抗値のみであったが、前項の第2番目のモデルとしてのべたように、 $(\theta_w - \theta_0)$  に適当な電圧を与え、その低下量で水温上昇を類推することもできる。なお、今回の測定にはデジタルマルチメーター (FULKE-8600-1) をもちいた。

### 5. 二・三の測定例

実際のモデルは、九頭竜川水系について作られた。水系全体についての測定はまだ行なわれていないが、実施した一部地域の測定例についてのべる。Fig. 4 は九頭竜川水系の支流、皿川 (S)、滝波川 (T)、石徹石川 (I)、打波川 (U) についての測定結果である。ここに示した値 ( $\sum \sum R_{ij}$ ) は、各水源から谷の出口までの抵抗値の総計であるが、この場合  $j$  を谷の次数、 $i$  を各次数の水流の次数と考えればよいであろう。Fig. 4 の上の図は  $\sum \sum R_{ij}$

と流域面積 ( $S$ ), 下の図は  $\sum\sum R_{ij}$  と本流の長さ ( $L$ ) との関係を示したものである。なお、ここで使っている流域面積, 河川長は, いずれも 1/50,000 地形図上での計

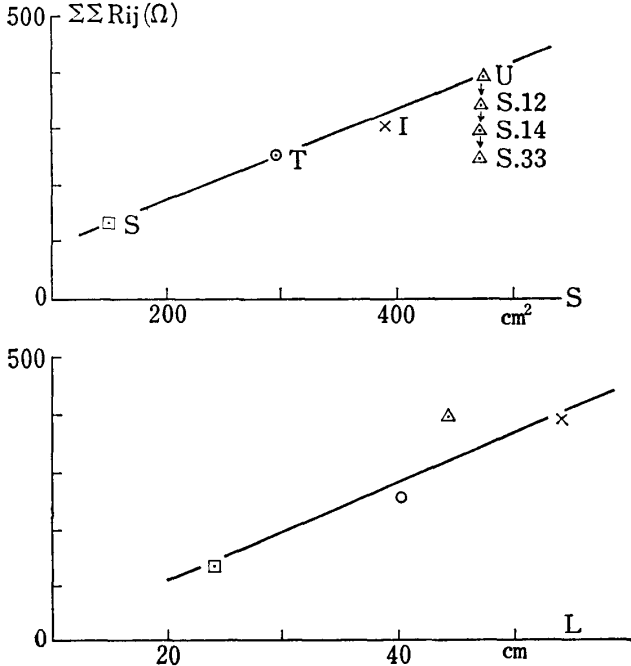


Fig. 4 流域内の各水源に対する抵抗値の合計 ( $\sum\sum R_{ij}$ ) と流域面積 ( $S$ ) および本流長 ( $L$ )

測値である。このような形で資料を整理してみると, 抵抗値の総計は, 流域面積との関係が良いことがわかる。この解釈は, 次のように考えられる。このモデルのような単純化を考えた場合, 水温上昇に大きく寄与するのは, モデルのうえで抵抗値の大きい低次数の水流であると云える。このモデルで扱った最低次数 (第3次) の抵抗値は, 7 次の値の約10倍であることは Fig. 3 から知ることができる。現実の河川の  $1/u \cdot d$  の値についても同様で

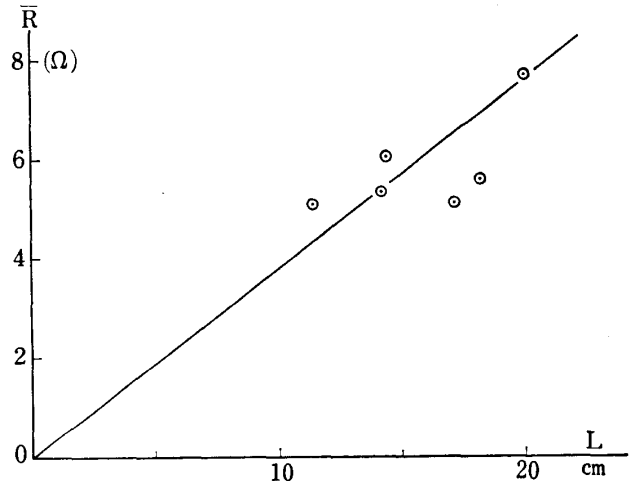


Fig. 5 水源1ヶあたりの平均抵抗値 ( $\bar{R}$ ) と本流長 ( $L$ )

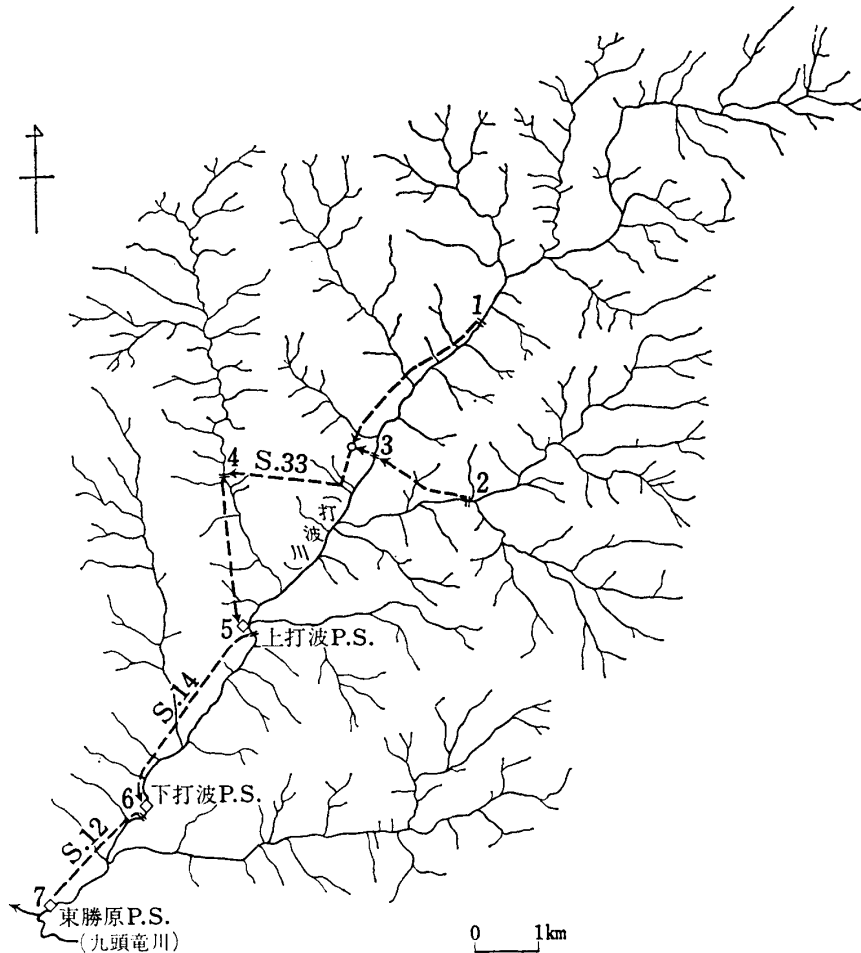


Fig. 6 打波川の水系

あることは、同じ図から読みとることができる。水温形成には低次数の水流の寄与が大きいのであろうと考えられる。流域の水源の数( $P$ )は、各次数の谷の面積が大きく変わらないと考えれば、谷の全面積に比例すると考えられる。それ故、 $\sum\sum R_{ij}$  は谷の全面積に比例し、Fig. 4のような結果が得られたのであろう。

以上のように  $\sum\sum R_{ij}$  は面積に比例するので、さきに Fig. 1 に示した仮説を検証するには適当ではない。そこで、水源1ヶあたりの抵抗値(平均抵抗値)

$$\bar{R} = \sum\sum R_{ij} / P \quad (6)$$

によって、本流の長さ( $L$ )との関係を示したのが Fig. 5 である。この図では、一部の資料は Fig. 4 に使われた水系を分割して計測した値がもちいられている。 $\bar{R}$  によれば、傾向線は  $L=0$  で  $\bar{R}=0$  となり、 $L$  の増加とともに抵抗値も増加し、結果に矛盾がなく、Fig. 1 の仮説を検証しているように考えられる。なお、流域面積と  $L$  によって作られる無次元数、すなわち、流域の形状係数と  $\bar{R}$  あるいは  $\sum\sum R_{ij}$  との間には満足すべき傾向が得られていない。これらに関する検討は今後の課題としたい。

Fig. 6 には、今回測定された流域のうち、打波川の水系図を示した。図中  $P.S.$  と示した地点は発電所で、点線は発電用の水路トンネルである。この流域では、昭和12年に東勝原<sup>かどほら</sup>発電所が作られ、続いて昭和14年には下打波発電所が作られた。昭和33年には複雑な溪流取水による上打波発電所が作られている。さきにのべたように、取水路が全て水路トンネルであると仮定し、この水路区間における原河川への放流残水がないものと仮定する。以上の仮定にもとづいて、図中の1~7の地点で(特に1~6において)抵抗線を切断し、抵抗の小さい導線につけ替える。このような操作によって、水路トンネルをモデル上で再現し、それによって生ずる水温変化を推定することができる。すなわち、上流からの水は全て水路トンネルに流入し、この間では水温上昇はなく、発電所地点で残流区間の支流水と混合する状態が再現できる。残流区間で本川に流入する支流の結線は、そのままにし

ておく。このようにして測定された打波川発電所建設の影響は、Fig. 4 に示してある。

Fig. 4 によれば、発電所がない場合  $400\Omega$  ぐらいであった  $\sum\sum R_{ij}$  は、昭和12年、14年、33年と順を追って低下した。その低下量は全体で約  $150\Omega$  で、30%に近い。打波川の水温の記録はないが、この手法で水路トンネルによる水温の低下を、ある程度推定することができるであろう。

## 6. 今後の問題

この研究はまだ着手したばかりの段階で、十分な検証はなされていない。今後の重要課題は、現地観測との対応と、それにもとづく係数の決定である。さきにのべた流域の形状係数の問題もある。また、水路トンネル区間の問題については、残流の扱い方に検討の必要がある。モデルはあくまでもモデルであり、この手法で再現できない場合も多いと思われる。しかし、ここで示した手法は、水系全体からみた河川水温の成立機構を考える場合に、問題整理のためのよい指針になるように思われる。

なお、実験を行なうに際して、田辺修一君(当時立正大、大学院生、現在荒巻事務所勤務)および小菅裕子さんにお手伝いいただいた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 新井 正、西沢利栄(1974) 水温論、共立出版  
 西沢利栄(1966) 河川水温に及ぼす湧水、支流水および融雪水の影響、水温に関する研究報告、No. 3、63~70  
 水島 斉(1974) 溪流の流速、立正大地理学科昭和48年度卒業論文  
 山辺功二(1971) 水流の水理幾何についての一考察、水温の研究、Vol. 15, No. 2, 31~37  
 Leopold, L. B., Wolman, M. G. and J. P. Miller (1964) Fluvial processes in geomorphology, Freeman and Comp. Press