

水質と川のかたちに関する環境汚染予測 — 電流モデルを題材として —

○荒木 信一¹・栗田 功²・平塚 彰³

¹学生会員 大阪産業大学大学院工学研究科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

²正会員 工博 大阪産業大学経済学部 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

³正会員 工博 大阪産業大学工学部 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

現在、人と自然（他生物）との共生を目指した多自然型河川工法が注目されている。しかし、この工法についてはこれまで定性的な成果は上げられているものの、定量的な成果についてはあまり確認されていない。水の流れに起因する要素を記号で表すことができれば、誰もが特別なシミュレーションソフトを用いることなく手軽にその流れを把握することができ、さまざまな条件下での予測・評価ができるようになり、水質からみた川のかたちの最適化を図ることができるものと思われる。そこで本研究では、水の流れを電気記号化し等価回路に組むことによるリアルタイムな環境汚染物質の拡散・予測の方法に関する定量的アプローチの検討を試みた。その結果、水質と川のかたちに関する多様な変化を数値シミュレーションによって高速かつ定量的に表すための基礎的事項を把握することができた。

Key Words: environmental pollutants, real time forecasting, electric current model, quantitative analysis

1. はじめに

現在、各地域の実情に沿った人と自然（他生物）との共生を目指した多自然型河川工法^{1), 2)}が注目されている。これは、治水対策はもちろんのこと、利水対策、さらには環境への影響に配慮しようとするものである。これにより、生物の生息、景観、人々の河川への関心などが高まるなどの成果が上げられている。しかし、これらのほとんどは定性的な成果であり、定量的なそれについては少ないのが現状である。その原因の一つとして実河川をみる場合、ある挙動に対して、その影響を確認するまでに非常に長い時間を要してしまうということが考えられる。そのため、影響を確認するまでに、さまざまな外乱要素を含むこととなり、望む成果を正確に把握することが困難となる。そこで、本研究ではリアルタイムな汚染物質の拡散に関する予測方法の検討を行った。従来用いられている物理モデルによる数値シミュレーションの多くは複雑なプログラムが必要であり、また特定のソフトが必要となってくる。さらに、計算するための細かいメッシュも必要となる。

本研究では、水の流れを電気回路による等価回路で表すことを考えた。これは、実河川に起因する各要素の役割が明確に記号で表せ、回路図をみるだけで含まれる要素とその役割がわかるといった点、迅速に反応をみることができるという点などから、この電流モデルを用いることにより、誰もが気軽にリアルタイムな環境汚染物質の拡散の評価ができるものと考えたからである。また、水流を電気の流れの現象としてみることで、コンピュータによる処理が可能となるため、水質と川のかたちに関する多様な変化を数値シミュレーションによって定量的に表すことができると考えたからである。なお、水の流れは電気の流れと違い、重力の影響を大きく受けること、また実河川での流れは複雑な構造をしていることなどを踏まえ、今回は単純な河川モデルを対象とした。

2. 電気回路について³⁾

電気回路とは抵抗、電池、コンデンサなどの回路素子をつなぎ合わせたものである。また、回路とは電流

の流れる路（閉ループ）のことであり、回路の目的は大きく2つある。一つは電力の伝達（供給・消費）であり、もう一つは信号の伝達である。このうちの電力について考えると、例えば電球（抵抗）で消費される電力は、電球に加わる電圧とそのとき電球を流れる電流の積になる。

つまり、電力を供給するということは、モーターを回す、照明をつけるといった点をはじめ、あらゆる電化・電子製品を動かすためには、電流が流れる状況をつくらなければならないということになる。したがって、電気回路を電流と電圧を負荷に与える仕組みとして考えるとき、電流を伝達できるよう閉ループであることが必須の条件となる。また、信号の伝達についても同様のことがいえる。

また、電流はよく水路を流れる水に例えられる³⁾。水は通常、水圧の差により高いところから低いところに流れ、また、気圧に関しては、空気入れでタイヤに空気を入れるのと同じで、空気入れの気圧の方が高い時にタイヤに空気が入る。この水圧・気圧に相当するものが電圧（電位）である。電流は電位差があるときに流れ、この電位差をつくるものが電源である。つまり水路では揚水機（ポンプ）にあたる。したがって、これから扱う電気回路の定義としては、①閉ループであること（電流が流れる）②電源を含むこと（電流をつくれること）③負荷を含むこと（電源・出力に対しての負荷）を考えるものとする。そして、さらにここでもう一つ付け加えると、負荷としてはいわゆる受動素子（抵抗、コンデンサ、コイル）のみを扱うこととし、また水の流れに関しても、今回は別河川からの流入や、降雨などによる流量の増大現象は考えていないので、電気回路においても能動素子（トランジスタなど）は考えないものとする。

3. 電流と水流のアナロジー

ここでは、水の流れを電気回路による等価回路で表すために、まず水の流れと電気の流れとの類似点を説明したい。

これまで述べたように、電気の流れと水の流れは非常に良く似た現象として捉えることができる。その現象を利用して目に見えない電流の流れを想像しやすくするために、「正電荷の移動」を「水の粒子の移動」と同様に考えた例がある⁴⁾。これは、「電流モデル」として導線に流れる電流をパイプ中の水の流れである「水流モデル」としてみようとしたものである。ただ、ここで注意しなくてはならないのが、導線に流れる電流とパイプ中を流れる水流は、似たような現象を示すが、物理的には同じ現象ではなく、あくまでも導線に流れる電流をわかりやすく説明する

ためのものとされている。

そこで、このことを踏まえ、また重力の影響や実河川での流れの複雑な構造を考慮した上で、今回は単純な河川モデルを対象として検討を行うことにする。

ここで、電流モデル⁵⁾と水流モデル⁶⁾の類似点をいくつか示す（表-1）。

表-1 電流モデルと水流モデルの類似点

電流モデル		水流モデル
正電荷	≒	水の粒子
電流 (I)	≒	流量 (Q)
電圧 (E)	≒	水圧 (P: ポンプ)
電力 (W)	≒	流量×水圧
抵抗 (R)	≒	せき、形状の変化 etc.
摩擦抵抗 (R)	≒	摩擦抵抗 (h_f : 損失水頭)
導線の断面積 (A)	≒	流積 (A)
スイッチ	≒	水門

ここでは、電流モデルの正電荷と、水流モデルの水の粒子が類似であるとした場合、まず、電流とは電荷の移動のことであり、電流の大きさというのは単位時間当たりに移動する電荷の量であるため、水流モデルにおける流量とよく似ている。また、電圧とは正電荷を移動させる基となる圧力であり、それは電位差によって生じる。一方、水圧とは水の粒子を移動させる基となる圧力であり、言い換えれば、水を送り出すポンプのようなものであり類似している。さらに、それらのことを電力の式において考えた場合、電力は水流モデルにおける流量と水圧との積から求められると考える。

次に、抵抗に関しては、どちらのモデルにおいても流れを妨げるものであり、また、摩擦抵抗においては、実河川を想定する場合、どちらのモデルにおいても、摩擦による抵抗が生じるものであるので類似している。しかし、水流モデルで実河川を検討する場合には、様々な外乱要素が含まれ複雑化することを念頭におくものとする。

また、導線の断面積と流積は、正電荷においても水の粒子においても同様に、移動する範囲を移動する向きに対して断面的に表したものであるので類似している。

さらに、スイッチと水門であるが、これもどちらに関しても電流や水を流したり、止めたりするためのものであるため同じような役割をしている。

以上のことから、水の流れは電気回路による等価回路を組むことによって表すことができるものとする。

4. 電気回路による水流モデル等価回路

等価回路を組むにあたり、まず図-1のようなシンプルで、かつ理想的な開水路モデルについて検討を行った⁶⁾。なお、ここでは一定の流量と流速が流れ続けるものとして考える。

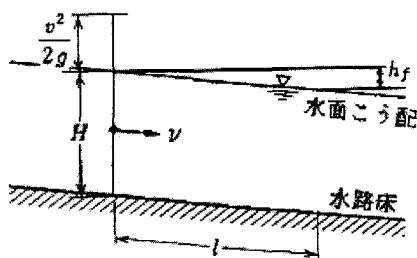


図-1 河川モデル

まず、この開水路にかかる抵抗は壁面や河床による摩擦による損失水頭と考え、式(1)によって求めた。

$$h_f = \frac{n^2 v^2}{R^3} l \quad (1)$$

ここに、
 h_f : 損失水頭 (m)
 n : 粗度係数
 v : 流速 (m/s)
 R : 径深 (m)
 l : 水路長さ (m)

次に、これを電気回路として表すと、図-2のように抵抗Rが繋がるようなかたちとなる。この抵抗Rは式(2)で求めることができる⁷⁾。



図-2 導線の抵抗 (イメージ)

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

ここに、
 R : 抵抗 (Ω)
 ρ : 抵抗率 ($\Omega \text{mm}^2/\text{m}$)
 l : 水路長さ (m)
 S : 断面積 (mm^2)

しかし、実際は水の流れが穏やかであったとしても多少のうねりがあるように、電気回路においても電圧の変化が多少は生じるものである。この変化を元に戻そうとする働きとして、電流を流そうとして電圧を掛けても、電流の増加を押さえようとする働きのインダクタンス (コイル) が、また電圧を上げようとして電流を流し込んでも、電圧の上昇を押さえる作用があるキャパシタ (コンデンサ) などのリアクタンスがそれぞれ生じる⁸⁾。

これを電気回路として表すと図-3のようになる。これらの働きは、水の流れていう水の水素結合、粘性および重力によるものである。

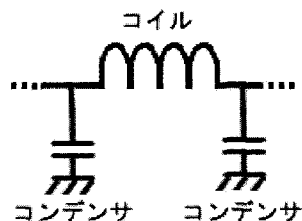


図-3 電気回路上のコイル

ここでいうコンデンサは、直流を通さない働きをする。このような直流をカットする性質を利用した回路には、特定の周波数成分だけを抽出または除去するフィルタなどがあり、周波数が低いほど抵抗値が大きくなるという性質であるコンデンサは、周波数特性を考慮しなければならない回路には欠かすことのできないものである。また、このような性質により、電気を蓄えたり放出したりする蓄電池としてのほたらきもあり、その働きを利用した回路には、電源回路の平滑回路やマイコンなどのバックアップ回路、コンデンサの充放電に要する時間を利用したタイマ回路などがある。

また、実河川においての抵抗は、これまでにでてきた電気回路という抵抗やインダクタンスが直列に並んでいるようなものであると考えられる。

$$Q = KH^{\frac{5}{2}} \quad (3)$$

$$K = 1.354 + \frac{0.004}{H} + \left(0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{W}} \right) \left(\frac{H}{B} - 0.09 \right)^2 \quad (4)$$

ここに、 Q : 流量 (m^3/s)
 K : 流量係数
 H : 越流水深 (m)
 W : せきの高さ (m)
 B : 水路幅 (m)

また、電気回路上で同じように電気の流れを妨げるものとして抵抗 R がある。これに関してはオームの法則 (式 (5)) で求めることができる。電気回路上では図 - 4 のように表すことができる。

$$R = \frac{E}{I} \quad (5)$$

ここに、 R : 抵抗 (Ω)
 E : 電圧 (V)
 I : 電流 (A)

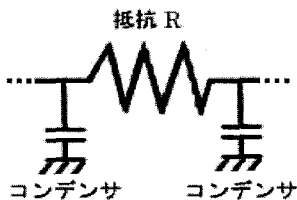


図 - 4 電気回路上の抵抗

以上のことより、水の流れを電気回路として等価回路を組むことができると考えた。実際に等価回路を組んだ場合の回路図の一例を図 - 5 に示す。

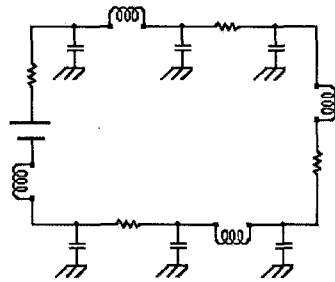


図 - 5 等価回路による回路図の一例

5. まとめ

本研究において、まず水流モデルと電流モデルにおける類似点の確認を行うことができた。また、水の流れを電気回路の等価回路を用いることにより、水の流れに起因する主要要素を記号で表すことができた。この記号を用いた回路図は、特別なシミュレーションソフトを用いることなく回路図の見方さえわかれば、誰もが手軽にその流れを把握することができる。また回路図は、その動作シミュレーションを、コンピュータ上で繰り返し・高速でできるようになる。このことより、さまざまな条件下での環境汚染物質に関する予測および評価ができるようになり、水質からみた川のかたちの最適化を図ることができると考えられる。

今後は、変化に時間を要する過渡現象などより細かな要素を含む等価回路についての検討が必要となってくる。また、地域の実情に沿った川のかたちを具体化するために、実河川でのデータを用いての電気回路上での数値シミュレーションを行い、定量的な把握に努める必要がある。

参考文献

- 1) 富野章：多自然型水辺空間の創造，信山社サイテック，2001.
- 2) リバーフロント整備センター：多自然型川づくりの取組みとポイント，山海堂，1996.
- 3) lecture 電気基礎学 (2) http://home.catv.ne.jp/~nn/ijima/lecture_kiso21.htm/
- 4) 電気の森 <http://www.asahi-net.or.jp/~qq3y-nkdo/feet/>
- 5) 西巻正朗，森武昭，荒井俊彦：電気回路の基礎，森北出版，1990.
- 6) 近畿高校土木会：考え方解き方 水理，オーム社，1998.
- 7) 永田博義：電気回路の考え方・解き方，オーム社，1998.

- 8) 「宮崎技術研究所」の技術講座「電気と電子のお話」 <http://home.c06.itscom.net/miya/series4/>

ENVIRONMENTAL POLLUTANT FORECASTING
VIEWED FROM WATER QUALITY AND FORM OF RIVER
— BY USING ELECTRIC CURRENT MODEL

Shinichi ARAKI, Isao AWATA and Akira HIRATSUKA

Naturally diverse river construction method aimed at the coexistence between man and nature (life on the earth) is now attracted. Though a qualitative result on this method has been obtained so far, a quantitative result is not well-conducted. In this study, a qualitative approach on a real time forecasting introducing a contrivance that electric current is regarded as water flow for the diffusion current of environmental pollutants has been tried. As a result, the fundamental matters for showing the various kinds of the change on water quality and form of the river can be quantitatively and rapidly grasped by numerical simulation.