河川の汚染負荷量とその流入地点の同定および水質推定: 擬似観測量の導入によるアプローチ

大 住 晃*・小見山 資 朗**・渡 邊 雅 彦***
柏 木 正 隆**・高 津 知 司****

Identification of Pollutive Load and its Discharged Location and Estimation of Water Quality
for Polluted Rivers: An Approach Using Pseudo-measurements

Akira OHSUMI*, Shiro KOMIYAMA**, Masahiko WATANABE***,
Masataka KASHIWAGI** and Tomoji TAKATSU****

A joint method is proposed for estimating the water quality in terms of BOD and DO and identifying both unknown magnitude and discharged location of the polluted load from noisy measurements on the BOD and DO. In order to detect the discharged load, the innovation process for the water quality plays an important role, and the idea of pseudo-measurement is introduced to identify the unknown magnitude of the pollutive load for both cases of the point-source and nonpoint-source loads. The joint estimation and identification method is tested by simulation studies.

Key Words: water quality, BOD, DO, identification of unknown input, detection of location, pseudo-measurement

1. 緒 言

近年環境問題が声高に叫ばれている。国土の狭いわが国では経済発展とともに都市部への人口集中化が進み、それに伴って高密度化された都市域ではさまざまな要因によって環境汚染が進行しつつある。特に水環境では、公共下水道の整備が進められてきているが、それでも除去できない汚濁物質が数多くあるといわれている。生活排水や工場廃水、あるいは農業廃棄物に起因する負荷などによって河川が汚染されている。これらの負荷に対して、汚染発生が特定の地点である場合の負荷

はポイント負荷 (point-source load), また一地点に特定できず面的に分布する場合のそれはノンポイント負荷 (nonpoint-source load) と呼ばれている。^{1), 2)} これらの汚染負荷は、たとえば肥料や農薬あるいは家畜の排泄物などが排水路を通じて降雨時などに河川に流入するなどの負荷、大気中の浮遊物や排気ガス、煤塵、粉塵あるいは車輛などによるタイヤかす、アスファルトかすなどが降雨に溶解して生成される負荷、鉱山廃水や安全対策が不十分な貯蔵タンクからの油や溶剤などの漏れなどによる負荷、あるいは事故や不法投棄などによる汚染負荷などが含まれる。これらの水質汚染は水質事故と呼ばれ、近年増加傾向をみせ河川の水質の管理の面からも深刻な問題となってきた。³⁾

著者らはすでに、汚染河川の自然浄化のメカニズムを河川の汚染の度合いを示す生物化学的酸素要求量 (biochemical oxygen demand, BOD) と溶存酸素量 (dissolved oxygen, DO) の2つの指標に基づいて考察し、不連続な観測地点で取得された測定データに基づいて河川の水質の状態推定問題を考察した。^{4)~6)} そこでは、汚染負荷は一定値でその大きさと流入区間は既知であると仮定していた。負荷についてはそれを受ける場所などはある程度は予測できても、現実には水質事故はいつどこで発生するか正確にはわからないのが通例である。例えば流入地点があらかじめ特定されていたとしても、日によって汚染物質が流出するかどうか不明な場合もある。また、交通事故などによりその積載物の河川への不測

* 京都工芸繊維大学名誉教授

** 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
京都市左京区松ヶ崎御所道町

*** 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科; 現、日立マクセル (株) 京都事業所 京都府乙訓郡大山崎小泉

**** 国土交通省北陸地方整備局国営越後丘陵公園事務所
長岡市青葉台一丁目

* Professor Emeritus of Kyoto Institute of Technology

** Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto

*** Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology; Present Address: Hitachi Maxell, Ltd., Koizumi, Ohyamazaki, Otokuni-gun, Kyoto

**** Echigo Hillside National Government Park Office, Hokuriku Regional Development Bureau, Ministry Land, Infrastructure and Transport, Aobadai, Nagaoka (Received December 19, 2006)

の流入,あるいは不法投棄などの汚染も起こり得る.本論文では,BODとDOの測定データに基づいてこのような水質事故による汚染源の特定とその負荷量の同定,さらに水質の推定の問題に焦点を絞り,それらに対するシステム工学的なアプローチを試みる.著者らの知る限り,この問題をシステム工学的に取り扱った研究はこれまでにない.

本論文では,文献5),6)で確立したBODとDOに関する水質状態モデルに基づいて,上述のポイント負荷とノンポイント負荷の2つの場合について,汚染源の特定と負荷の大きさ,さらに水質の推定問題についてのひとつのアプローチを提案する.不規則雑音を受ける測定データから未知負荷入力を同定するという問題は一種の逆問題(inverse problem)になっており,本論文ではこれを未知負荷に対する観測量を仮想的に創生することによって同定-推定を同時に解決するひとつのアプローチを提案する.

2. 水質方程式と問題の記述

著者らは文献5),6)においてBOD $L(x)$ [mg/ℓ]とDOの飽和値 DO_{sat} からの不足量(DO-deficit) $D(x)$ [mg/ℓ]が満たす数式モデルを導出した.河川の流れ方向に(1次元) x 軸をとり($x > 0$),流速 U が一定であるとする,それはつぎの連立微分方程式によって与えられる.

$$\frac{dL(x)}{dx} = J_1 L(x) - \frac{1}{k_1 + k_3} J_1 p(x) - \frac{1}{k_1 + k_3} J_1 g_1 \gamma_1(x), \quad L(0) = L_0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dD(x)}{dx} = & J_2 D(x) + \frac{k_1}{k_2 - k_1 - k_3} (J_1 - J_2) L(x) \\ & + \frac{1}{k_2} J_2 a \\ & - \frac{k_1}{k_2 - k_1 - k_3} \left(\frac{1}{k_1 + k_3} J_1 - \frac{1}{k_2} J_2 \right) p(x) \\ & - \frac{k_1}{k_2 - k_1 - k_3} \left(\frac{1}{k_1 + k_3} J_1 - \frac{1}{k_2} J_2 \right) g_1 \gamma_1(x) \\ & - \frac{1}{k_2} J_2 g_2 \gamma_2(x), \quad D(0) = D_0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, $\gamma_1(x)$, $\gamma_2(x)$ はBOD, DOに対する不規則外乱であり,正規性白色雑音によってモデル化され,また $p(x)$ は河川に流入する汚染物質の量(以下負荷と呼ぶ)である.パラメータ k_1 , k_2 , k_3 はそれぞれ脱酸素係数(deoxygenation coefficient) [1/day],再曝気係数(re-aeration coefficient) [1/day]および沈降や吸着などによるBOD除去係数(removal coefficient) [1/day], a は水中の藻や植物の光合成による酸素増加量 [mg/ℓ/day]であり, g_1 , g_2 は定数係数である.また, J_1 , J_2 は

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \frac{U}{2\varepsilon} \left\{ 1 - \sqrt{1 + \frac{4\varepsilon k_0}{U^2}} \right\} \\ J_2 &= \frac{U}{2\varepsilon} \left\{ 1 - \sqrt{1 + \frac{4\varepsilon k_2}{U^2}} \right\} \quad (k_0 = k_1 + k_3) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

で与えられる負の定数である.ここで, $\varepsilon > 0$ は河川の流れに関する移流拡散係数 [km²/day]である.

(1), (2) 式は不規則外乱を受けない定常水質方程式^{5)~7)}

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 L(x)}{dx^2} - \frac{U}{\varepsilon} \frac{dL(x)}{dx} - \frac{k_1}{\varepsilon} L(x) - \frac{k_3}{\varepsilon} L(x) \\ + \frac{1}{\varepsilon} p(x) &= 0 \\ \frac{d^2 D(x)}{dx^2} - \frac{U}{\varepsilon} \frac{dD(x)}{dx} - \frac{k_2}{\varepsilon} D(x) - \frac{a}{\varepsilon} \\ + \frac{k_1}{\varepsilon} L(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

の安定解を求め,それに不規則外乱 $\gamma_1(x)$, $\gamma_2(x)$ を付加した(安定な定常)水質モデルである.(3)式の J_1 , J_2 は(4)式のそれぞれの特性方程式の負根である.

負荷 $p(x)$ については,本論文ではつぎの2つの場合についてそのモデルを考える.不測の水質事故などの発生によりほとんど1点とみなせる場所において負荷を受けるポイント負荷と農業排水などのようにある程度の流域幅をもって負荷を受けるノンポイント負荷の2つの場合である.負荷の数学モデルとして,ポイント負荷に対しては,地点 x_{in} において一定の大きさ p_0 (> 0) の負荷を受けるものとする, $p(x)$ はディラックのデルタ関数を用いて

$$p(x) = p_0 \delta(x - x_{in}) \quad (5)$$

と表現できる.また,ノンポイント負荷に対しては区間 $[x_{in}, x_{out}]$ において負荷を受けるものとする,

$$p(x) = p_0 \{u_S(x - x_{in}) - u_S(x - x_{out})\} \quad (6)$$

と表現できる.ただし, $u_S(\cdot)$ は単位階段関数である.

本論文では,(5)式あるいは(6)式のように負荷を受ける(1),(2)式を河川の水質の状態を表わす(x に関する)ダイナミクスとみなす.そこで,状態量ベクトルを $z(x) = [L(x), D(x)]^T$ (T は転置記号)と定義すると状態空間表現はつぎのようになる.

$$\frac{dz(x)}{dx} = Az(x) + b_1 + b_2 p(x) + G\gamma(x) \quad (7)$$

ここで, $z(0) = [L_0, D_0]^T (= z_0)$, $\gamma(x) = [\gamma_1(x), \gamma_2(x)]^T$ であり,また

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ \frac{k_1}{k_2 - k_0} (J_1 - J_2) & J_2 \end{bmatrix}, \quad b_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{k_2} J_2 a \end{bmatrix} \\ b_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{k_0} J_1 \\ -\frac{k_1}{k_2 - k_0} \left(\frac{1}{k_0} J_1 - \frac{1}{k_2} J_2 \right) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$G = \begin{bmatrix} -\frac{1}{k_0} J_1 g_1 & 0 \\ -\frac{k_1}{k_2 - k_0} \left(\frac{1}{k_0} J_1 - \frac{1}{k_2} J_2 \right) g_1 & -\frac{1}{k_2} J_2 g_2 \end{bmatrix}$$

である. $w(x)$ を (x に関する) ウィーナ過程 $w(x) = \int_0^x \gamma(\xi) d\xi$ (共分散マトリクスを Q とする) とし, (7) 式を (伊藤) 確率微分方程式によって書き直すつぎのようになる.⁸⁾

$$dz(x) = [Az(x) + b_1 + b_2 p(x)] dx + G dw(x) \quad (8)$$

BOD $L(x)$ と DO $D(x)$ に関するデータは地点 $\{x_k\}_{k=1,2,\dots}$ ($0 \equiv x_0 < x_1 < x_2 < \dots$) において

$$y(x_k) = Hz(x_k) + v(x_k) \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

のように取得されるものとする. ただし, $y(\cdot)$ は $L(x), D(x)$ に関する 2 次元観測量ベクトル $y(\cdot) = [y_L(\cdot), y_D(\cdot)]^T$ であり, $H = \text{diag}\{h_1, h_2\}$ ($h_1, h_2 > 0$) とする. $\{v(\cdot)\}$ は 2 次元観測雑音で正規性白色雑音系列 $v(x_k) \sim N[0, R]$ としてモデル化し, それらは $\{w(x)\}$ と独立であると仮定する.

汚染負荷の流入点 x_{in} あるいは流入区域 $[x_{in}, x_{out}]$ と負荷の大きさ p_0 が既知であれば, 河川の水質 $L(x), D(x)$ は (8) 式と (9) 式に対して構成されるカルマンフィルタによって容易に推定できる.^{8),9)} 本論文では, 負荷の大きさ p_0 と流入地点 x_{in} (さらに x_{out}) はいずれも未知であるとする. したがって, これらの同定と状態量 $L(x), D(x)$ の推定を同時に行なう問題について考察する.

3. 負荷流入の検知とその流入地点の特定

負荷は (5) 式あるいは (6) 式のように仮定しているから, (1) 式より明らかなように状態量 $L(x)$ はインパルス応答あるいはステップ応答として得られる. したがって, $L(x)$ は本来 x の増加とともに減少するのが負荷の流入により阻止され, 一旦上昇する. このような現象を的確に捉えることができれば, 負荷の流入地点の特定が可能になる. Fig. 1 はノンポイント負荷に対する $L(x)$ と $D(x)$ のようすを模式的に示したものである (ただし, 不規則雑音の影響はないとして図示している). 本論文では, この $L(x)$ の増加現象をイノベーション過程によって検知することにする.

考え方を明瞭にするために, 負荷は 1 点 $x = x_{in}$ (ただし x_{in} は未知) において流入するものと想定する. このとき, 負荷の流入があるかないかはそれが検知されて初めて認識されることから, その検知方法についてまず考察する. 負荷の流入が全区間 ($0 < x$) にわたって無いと想定したモデルを考える. (8) 式において $p(x) \equiv 0$ としたときの解を $z_f(x)$ ($= [L_f(x), D_f(x)]$) (添字 f は “load-free” の意味) とすると, これは次式に支配される.

$$\begin{aligned} dz_f(x) &= [Az_f(x) + b_1] dx + G dw(x), \\ z_f(0) &= z_0 \end{aligned} \quad (10)$$

Fig. 1 Profiles of BOD and DO subject to a nonpoint load (solid curves) where the load is discharged during the interval $[30, 35]$ [km] (the dashed curves show the load-free case)

そこで, 観測地点 $x = x_k$ におけるイノベーション過程

$$\nu(x_k) = y(x_k) - H\hat{z}_f(x_k|x_{k-1}) \quad (11)$$

を考える. $\hat{z}_f(x_k|x_{k-1})$ は $x = x_{k-1}$ 地点までに得られた観測データに基づく $z(x_k)$ の (1 段) 予測値であり, これは (10) 式と (9) 式に基づいて構成されるつぎの (2 次元) カルマンフィルタによって生成される.

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{z}_f(x|x_k)}{dx} &= A\hat{z}_f(x|x_k) + b_1, \\ \hat{z}_f(x|x_k)|_{x=x_k} &= \hat{z}_f(x_k|x_k) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_f(x|x_k)}{dx} &= AP_f(x|x_k) + P_f(x|x_k)A^T \\ &+ GQG^T, \quad P_f(x|x_k)|_{x=x_k} = P_f(x_k|x_k) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\hat{z}_f(x_k|x_k) = \hat{z}_f(x_k|x_{k-1}) + K_f(x_k)\nu(x_k) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} K_f(x_k) &= P_f(x_k|x_{k-1})H^T[HP_f(x_k|x_{k-1})H^T \\ &+ R]^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_f(x_k|x_k) &= P_f(x_k|x_{k-1}) \\ &- K_f(x_k)HP_f(x_k|x_{k-1}) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで, $Q = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2\}$, $R = \text{diag}\{\sigma_{v1}^2, \sigma_{v2}^2\}$ とする.

このカルマンフィルタはすべての $x > 0$ において負荷の流入はないとして導出されているから, もし実際にある地点において負荷の流入があればその状態量は観測値 $y(x_k)$ に反映され, イノベーション過程は ((9) 式) を (11) 式に代入して

$$\nu(x_k) = H\{z(x_k) - \hat{z}_f(x_k|x_{k-1})\} + v(x_k) \quad (17)$$

と表わされる. $\hat{z}_f(x_k|x_{k-1})$ は状態量 $z(x_k)$ の推定値ではなく $z_f(x_k)$ のそれであることから, 推定誤差 $z(x_k) - \hat{z}_f(x_k|x_{k-1})$ は大きくなり, それに伴って $\nu(x_k)$ 自体も大きくなる. そこで, この現象を捉えることによって流入地点の特定を行なう.

このイノベーション過程に基づいてつぎのような関数を定

義する。

$$r(x_k) = \|\nu(x_k)\|^2 \quad (18)$$

ここで、記号 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルム記号である。この関数 $r(x_k)$ を負荷検知関数 (pollution load detector) と呼ぶことにする。このようにイノベーション過程に基づいてシステム状態量の異常変動を検知する方法は文献10)においても試みられている。

負荷の流入をこの関数値がある閾値を超えることによって判定し、その地点を x_{in} の同定値 $\hat{x}_{in}$ とする。観測地点 x_k が x_{in} に一致するか、あるいは極く近傍であればほぼ正確に x_{in} が特定できるが、一般には $\hat{x}_{in} > x_{in}$ となって特定地点決定に遅れを生じることになる。負荷の流入が終わると BOD $L(x)$ は減少に転じ、また推定誤差も小さくなることから汚染検知関数 $r(\cdot)$ も減少する。

4. 負荷量 p_0 の同定と水質の推定

本章ではポイント負荷の場合について考察する。負荷の大きさ p_0 は一定値であると仮定していることから、それを $p_0(x)$ と表記すれば

$$\frac{dp_0(x)}{dx} = g_3 \gamma_p(x) \quad (x > 0) \quad (19)$$

と表現できる。ここで、 $\gamma_p(x)$ は平均零、分散パラメータ σ_3^2 の正規性白色雑音であり、 g_3 は係数である。本来は $dp_0(x)/dx = 0$ とすべきであるが、未知パラメータの同定に対してはそれを不規則雑音によって変動を与えるほうが同定しやすいことが指摘されている¹¹⁾のと、不確定要素を考慮することによって厳密な拘束を緩めるという意味からこのようなモデルにする。そこで、 $x = \hat{x}_{in}$ 以後新しい状態変数 $z_0(x) = [z^T(x), p_0(x)]^T (= [L(x), D(x), p_0(x)]^T)$ を定義し、(8)、(19) 式よりつぎの拡大システムを構成する。

$$dz_0(x) = [A_{0\delta} z_0(x) + b_0] dx + G_0 dw_0(x) \quad (20)$$

ここで、 $w_0(x) = [w^T(x), w_p(x)]^T$ ($w_p(x) = \int_0^x \gamma_p(\xi) d\xi$),

$$A_{0\delta} = \begin{bmatrix} A & b_2 \delta(x - \hat{x}_{in}) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad b_0 = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G_0 = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & g_3 \end{bmatrix}$$

であり、 $\hat{x}_{in}$ は前章で特定した x_{in} に関する値である。

マトリクス $A_{0\delta}$ の中にデルタ関数が現れるが、これは負荷を $p(x) = p_0(x) \delta(x - \hat{x}_{in})$ としたことによるのであって、形式的な表現である。実際的には、十分小さな $\Delta x (> 0)$ をとり、 $\delta(x - \hat{x}_{in})$ を

$$\delta(x - \hat{x}_{in}) \cong \frac{1}{\Delta x} \{u_S(x - \hat{x}_{in}) - u_S(x - \hat{x}_{in} - \Delta x)\} \quad (21)$$

によって近似する。

(20) 式の拡大システムに対して観測モデル (9) 式、これを

$$y(x_k) = [H \ 0] z_0(x_k) + v(x_k) \quad (9)'$$

と表現して、(20) 式と (9)' 式とによってカルマンフィルタを構成すれば、状態量 $L(x)$, $D(x)$ の推定と負荷量 p_0 の同定が同時に行なえることになる。しかし、後にシミュレーションでみるように (Fig. 7), この方法による p_0 の推定精度は悪い。その理由は、負荷量 p_0 に関する測定が直接行なわれずに状態量 $L(x)$ あるいは $D(x)$ を通して間接的に行なわれることによる。

負荷量 p_0 を推定する問題は、観測出力から未知入力と同定するという逆問題になっている。そこで、本論文では未知負荷量 p_0 の同定を効率よく行なうために、それに関する何らかの情報を得る方法を考えることにする。 p_0 に関する先験的な情報や拘束条件などがあればそれらを有効に利用することも可能であろうが、一般的にはこれはあまり期待できない。われわれが知り得る情報としては、(1) 式あるいは (2) 式に示されているように p_0 が $L(x)$ や $D(x)$ の変化分、すなわち $dL(x)/dx$ あるいは $dD(x)/dx$ に寄与するということだけである。そこで、本論文ではこの情報を有効に利用することにする。

Fig. 1 からわかるように、負荷による変化は $D(x)$ よりも $L(x)$ のほうが大きい。なぜなら、原方程式 (4) をみれば明らかのように、負荷は $L(x)$ には直接入力として影響を与えるが、 $D(x)$ には $L(x)$ を通して二次的に作用することからも明らかである。そこで、(1) 式を用いることにする。

(5) 式の表現を (1) 式に代入すると

$$\frac{dL(x)}{dx} = J_1 L(x) - \frac{1}{k_0} J_1 p_0 \delta(x - x_{in}) - \frac{1}{k_0} J_1 g_1 \gamma_1(x) \quad (22)$$

となるから、この式の解は次式のように与えられる。

$$L(x) = L(x_0) e^{J_1(x-x_0)} - \frac{1}{k_0} J_1 p_0 \int_{x_0}^x e^{J_1(x-\xi)} \delta(\xi - x_{in}) d\xi - \frac{1}{k_0} J_1 g_1 \int_{x_0}^x e^{J_1(x-\xi)} \gamma_1(\xi) d\xi \quad (23)$$

$x_0 (< x)$ は $(x_0 < \hat{x}_{in})$ となるような任意の地点である。右辺第2項の積分は超関数 $\delta(\cdot)$ の性質を用いて

$$\int_{x_0}^x e^{J_1(x-\xi)} \delta(\xi - x_{in}) d\xi = e^{J_1(x-\xi)} \Big|_{\xi=x_{in}} u_S(x - x_{in})$$

となるから、 $x > x_0$ に対して

$$L(x) = L(x_0) e^{J_1(x-x_0)}$$

$$-\frac{1}{k_0} J_1 p_0 e^{J_1(x-x_{in})} u_S(x-x_{in}) + \{\text{noise}\} \quad (24)$$

が得られる ($\{\text{noise}\}$ 項は (23) 式右辺の最終項を表わす). これより $x_{in} \leq x$ に対して

$$p_0 = \frac{k_0}{J_1} \{L(x_0) e^{-J_1(x_0-x_{in})} - L(x) e^{-J_1(x-x_{in})}\} + \{\text{noise}\} \quad (25)$$

の関係式を得る. したがって, この式の右辺の $L(x)$ と x_{in} がわかれば p_0 は (雑音分は除外して) 原理的に得られることになる. そこで, p_0 の同定を行なうために, この式を用いる.

$\hat{x}_{in} \leq x$ である観測地点 $x = x_k$ における $L(x)$ に関する観測データ $y_L(x_k)$ を用いて

$$p_0(x_k) = \frac{1}{h_1} \frac{k_0}{J_1} e^{-J_1(x_0-\hat{x}_{in})} \{y_L(x_0) - e^{-J_1(x_k-x_0)} y_L(x_k)\} + \{\text{noise}\} \quad (26)$$

と表現する. x_0 としては $\hat{x}_{in}$ より前の地点をとる. そこで, 右辺第 1 項は既知量であるから, それを

$$y_p(x_k) = \frac{1}{h_1} \frac{k_0}{J_1} e^{-J_1(x_0-\hat{x}_{in})} \{y_L(x_0) - e^{-J_1(x_k-x_0)} y_L(x_k)\} \quad (x_0 < \hat{x}_{in} \leq x_k) \quad (27)$$

として, (26) 式を書き直すと $x_k \geq \hat{x}_{in}$ に対して

$$y_p(x_k) = p_0(x_k) + v_p(x_k) \quad (28)$$

の表現を得る. ここで, $v_p(x_k)$ は (26) 式右辺の $\{\text{noise}\}$ 項とは関係なく表記したものである. この表現において, $y_p(x_k)$ を新しい観測値, また $v_p(x_k)$ を改めて観測雑音とみてそれを正規性白色雑音とする. そこで, $y_0(x_k) = [y^T(x_k), y_p(x_k)]^T$ ($= [y_L(x_k), y_D(x_k), y_p(x_k)]^T$) とすると, (9) 式に代って

$$y_0(x_k) = H_0 z_0(x_k) + v_0(x_k) \quad (29)$$

を得る. ここで,

$$H_0 = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

であり, $v_0(x_k)$ は 3 次元の正規性白色雑音である.

上述のように新しく導入した観測値 $y_p(\cdot)$ を擬観測値 (pseudo-measurement) と呼ぶ. 著者のひとりには, 速度と針路を不規則に変更する移動体のトラッキングにこの擬観測値の導入を試み, 好成績を上げている.^{12), 13)} 擬観測値をどのように導入すればよいのかについては特に決まった方法はないが, 前述のように, 直接的には測定データが得られない物理量を推定 (同定) したいときに, その物理量が支配される法則 (たとえば, そのダイナミクス) や拘束条件式などを, 観測者がその事実を (当然成り立っているものとして) “観測している” とみなすことが有効である. 本論文では, 負荷量

(未知入力) と $L(x)$ (出力) との間に (25) 式のような関係式が常に成り立っているはずだとみなした.

上述の議論により, (28) 式を用いた (29) 式は $x_k \geq \hat{x}_{in}$ に対してのみ定義されるから, $0 < x_k < \hat{x}_{in}$ に対しても同様な擬観測値を導入しておけば, 状態方程式 (20) と観測方程式 (29) に対する (3 次元) カルマンフィルタが全区間にわたって構成できることになる. そこで, 負荷流入量が検知されるまでの区間 $0 < x_k < \hat{x}_{in}$ に対しては擬観測値を

$$y_p(x_k) = \frac{1}{h_1} \frac{k_0}{J_1} e^{-J_1(x_k-\mu-x_k)} \{y_L(x_{k-\mu}) - e^{-J_1(x_k-x_{k-\mu})} y_L(x_k)\} \quad (x_k < \hat{x}_{in}) \quad (30)$$

として定義する. ここで, μ は正整数である. これと (27) 式との違いは, (27) 式の $\hat{x}_{in}$ を x_k で置き換え, さらに x_0 を x_k より μ 個前の観測地点 $x_{k-\mu}$ で置き換えた点である. 区間 $0 < x_k < \hat{x}_{in}$ では負荷は未だ特定されていないから, それ (すなわち x_{in}) が現地点 x_k ではないかと一つずつチェックしながら擬観測データを創生していることに相当する.

したがって, 全区間 ($0 < x$) において (3 次元) カルマンフィルタはつぎのように構成される.⁹⁾

(i) 観測データ取得地点 ($x = x_k$) での推定値:

$$\hat{z}_0(x_k|x_k) = \hat{z}_0(x_k|x_{k-1}) + K(x_k) \{y_0(x_k) - H_0 \hat{z}_0(x_k|x_{k-1})\} \quad (31)$$

$$K(x_k) = P(x_k|x_{k-1}) H_0^T [H_0 P(x_k|x_{k-1}) H_0^T + R_0]^{-1} \quad (32)$$

$$P(x_k|x_k) = P(x_k|x_{k-1}) - K(x_k) H_0 P(x_k|x_{k-1}) \quad (33)$$

(ii) それ以外の地点 ($x_k < x < x_{k+1}$) での推定値:

$$\frac{d\hat{z}_0(x|x_k)}{dx} = A_{0\delta} \hat{z}_0(x|x_k) + b_0, \quad \hat{z}_0(x|x_k)|_{x=x_k} = \hat{z}_0(x_k|x_k) \quad (34)$$

$$\frac{dP(x|x_k)}{dx} = A_{0\delta} P(x|x_k) + P(x|x_k) A_{0\delta}^T + G_0 Q_0 G_0^T, \quad P(x|x_k)|_{x=x_k} = P(x_k|x_k) \quad (35)$$

ここで, システム雑音 $w_0(\cdot)$ および観測雑音 $v_0(\cdot)$ の共分散マトリクス Q_0, R_0 はそれぞれ

$$Q_0 = \text{diag}\{Q, \sigma_3^2\} = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2\}, \\ R_0 = \text{diag}\{R, \sigma_{v3}^2\} = \text{diag}\{\sigma_{v1}^2, \sigma_{v2}^2, \sigma_{v3}^2\}$$

とする. ここで, Q, R についてはある程度それぞれの先験的な情報を用いて設定することになるが, $\sigma_3^2, \sigma_{v3}^2$ についてはそれらの情報はないのでシミュレーションなどによって適当な値に設定する.

5. ノンポイント負荷に対する同定

ノンポイント負荷に対しても前章のポイント負荷の場合と同様な考え方で負荷量の同定を行なうことができる。¹⁴⁾

負荷量 p_0 に対するモデル (19) を考慮した拡大システムは, (20) 式に代わって

$$dz_0(x) = [A_{0\chi} z_0(x) + b_0] dx + G_0 dw_0(x) \quad (36)$$

となる。ここで,

$$A_{0\chi} = \begin{bmatrix} A & \chi b_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

であり, χ は $\chi = 1$ ($\hat{x}_{in} \leq x < \hat{x}_{out}$), $= 0$ (otherwise) を意味する指標である。 $\hat{x}_{in}$ は 3. で述べた方法によって特定した負荷流入地点であり, また $\hat{x}_{out}$ は負荷の流入が終わったと判断された地点である。この指標 χ は, 負荷入力区間 $[\hat{x}_{in}, \hat{x}_{out})$ のみに存在することから必然的に導入される。

さて, p_0 の同定にあたっては擬似観測量をつぎのように導入する。(6) 式を (1) 式に代入すると

$$\begin{aligned} \frac{dL(x)}{dx} = & J_1 L(x) - \frac{1}{k_0} J_1 p_0 \{u_S(x - x_{in}) \\ & - u_S(x - x_{out})\} + \{\text{noise}\} \end{aligned} \quad (37)$$

であるから, $L(x)$ はステップ応答として与えられる。よって, (37) 式より, 区間 $[x_{in}, x_{out})$ では

$$p_0 = k_0 L(x) - \frac{k_0}{J_1} \frac{dL(x)}{dx} + \{\text{noise}\} \quad (38)$$

という関係式が得られるから, $L(x)$ と $dL(x)/dx$ がわかれば原理的に p_0 がわかることになる。そこで, 区間 $[x_{in}, x_{out})$ 内に観測地点が数箇所あると仮定して, その区間内の $x = x_k$ において $L(x)$ に関する観測データを用いて

$$\begin{aligned} p_0(x_k) = & \frac{k_0}{h_1} y_L(x_k) - \frac{k_0}{J_1} \frac{y_L(x_k) - y_L(x_{k-1})}{h_1(x_k - x_{k-1})} \\ & + \{\text{noise}\} \end{aligned} \quad (39)$$

と表現すると, 右辺の最初の 2 つの項は既知量であるから, それを $y_p(x_k)$ とおく。すなわち

$$\begin{aligned} y_p(x_k) := & c_1 y_L(x_k) + c_2 y_L(x_{k-1}) \\ = & p_0(x_k) + v_p(x_k) \end{aligned} \quad (40)$$

ここで

$$\begin{cases} c_1 = \frac{k_0}{h_1} \left\{ 1 - \frac{1}{J_1(x_k - x_{k-1})} \right\} \\ c_2 = \frac{k_0}{J_1 h_1 (x_k - x_{k-1})} \end{cases}$$

とすると, (39) 式より (28) 式と同じ表現が得られる。(推定された) 負荷流入区間 $[\hat{x}_{in}, \hat{x}_{out})$ 外では $p_0 \equiv 0$ としていることから, 擬似観測値 $y_p(x_k)$ は (28) 式に代って

$$y_p(x_k) = v_p(x_k) \quad (41)$$

とする。したがって, 以下 4. と同様の議論ができる。

残る問題は, 負荷の流入が終了した地点 x_{out} をどのようにに特定するかである。Fig. 1 に示したように, x_{in} から x_{out} の区間では $L(x)$ は (雑音分は除いて) 直線的に増加し, x_{out} から急激に減少に転じる。したがって, 適当な閾値を設定してその減少を捉えることによって地点 x_{out} の特定が可能になる。

6. シミュレーション例

前章 3, 4 および 5. において述べた負荷の検知による負荷流入地点の特定法と負荷の大きさの同定を含めた状態の推定は総合的に行なわれるため, その手順についてまず述べる。

(i) [初期値の設定] 推定値の初期値 $\hat{L}(0) = \hat{L}_0$, $\hat{D}(0) = \hat{D}_0$ を設定し, また $\hat{p}_0(0) = 0$ とする。

(ii) [観測データの取得] k 番目の観測地点 $x = x_k$ において観測データ $y(x_k) = [y_L(x_k), y_D(x_k)]^T$ を取得する。さらに, この観測データをもとに, 擬似観測値 $y_p(x_k)$ を生成する。ポイント負荷の場合には負荷が検知される地点まで ($x_k < \hat{x}_{in}$) は (30) 式によって, 負荷の検知後 ($x_k \geq \hat{x}_{in}$) は (27) 式によって生成し, またノンポイント負荷の場合には (40) 式によって生成する。

(iii) [負荷の検知とその流入地点の特定] (2 次元) カルマンフィルタ (12)–(16) 式によって推定値 $\hat{z}_f(x_k|x_{k-1})$ を求め, (11) 式のイノベーション過程 $\nu(x_k)$ から負荷検知関数 $r(x_k)$ を (18) 式によって計算する。この値があらかじめ設定した値を超えなければその地点まで負荷の流入は無いと判断し, もし超えれば $x = x_k$ を流入地点であると特定し, それを $\hat{x}_{in}$ とする。

(iv) [状態量 $L(x)$, $D(x)$ の推定と負荷量 p_0 の同定] ポイントあるいはノンポイント負荷いずれに対しても, (3 次元) カルマンフィルタ (31)–(35) 式により状態量 $z_0(x) = [L(x), D(x), p_0(x)]^T$ の推定値を求める。

この手順に従い, 河川に流入する未知負荷の場所とその負荷量の同定および状態量 BOD と DO の推定のシミュレーションを実施する。全長 120 km 程度の河川を想定し, 河川の特性を示す各パラメータをそれぞれ $\varepsilon = 50$, $U = 43.2$, $k_1 = 0.4$, $k_2 = 0.6$, $k_3 = 0.05$, $a = 0.5$, $g_1 = g_2 = 1.2$, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 50$, $L_0 = 12$, $D_0 = 3$, $DO_{sat} = 9.0$ とした。

A. ポイント負荷の場合.

負荷の大きさは $p_0 = 100$ [mg/ℓ] であり, 流域地点を $x_{in} = 29.5$ [km] において流入するものとした。デルタ関数の近似で用いた Δx を $\Delta x = 0.1$ [km] とした。負荷の流入がありそうな区域を $[25, 40]$ と想定し, その間では観測データを 1 km おきに, それ以外では 10 km おきとした。観測に関するパラメータは $h_1 = h_2 = 100$, $\sigma_{v1}^2 = \sigma_{v2}^2 = 100$ とした。また $p_0(x)$ -過程に対しては $g_3 = 0.01$, $\sigma_3^2 = 50$; 擬似観測に関しては $\sigma_{v3}^2 = 100$ とした。 p_0 の同定にあたっては,

Fig. 2 Profiles of BOD and DO and their estimations (top), and estimation errors (bottom)

負荷の流入地点が特定されるまでは (30) 式における μ の値を $\mu = 1$ として、またそれが特定された後は (27) 式の x_0 を $\hat{x}_{in}$ の直前の観測地点を用いた。カルマンフィルタの初期値は $\hat{z}_0 = [11.7, 2.7, 0]^T$, $P_{L0} = 5$, $P_{D0} = 3$ と設定した。

Figs. 2~7 がシミュレーション結果である。Fig. 2 上図は BOD と DO の推定の様子を示したもので、それぞれの真値を実線で、推定値を破線で示している。同下図はそれぞれの推定誤差分散と負荷量 p_0 の同定の誤差分散を示したもので、観測地点を他に比べて密に配置した区間 [25, 40] では BOD と DO の推定誤差は小さくなっているが、負荷量に対するそれは全区間でほぼ同程度の大きさを示していることがわかる。負荷検知関数 $r(\cdot)$ の振舞いを示したのが Fig. 3 である。 $x = 30$ [km] あたりで急激に大きな値をとり、たとえば閾値を $r = 2 \times 10^4$ と設定すれば負荷流入地点の推定値は $\hat{x}_{in} = 29.3$ [km] と特定される。Fig. 4 は、シミュレーションで生成した 100 本の BOD と DO 過程に対する $r(\cdot)$ の平均をとった様子を示したもので、やはり負荷流入地点において明瞭に大きな値をとることがわかる。Fig. 2 の BOD のようすをみただけでは負荷の流入地点はわからないが、負荷検知関数の振舞いを観察することによって明瞭に特定できる。

Fig. 5 は $x = \hat{x}_{in}$ 以降 10 地点における p_0 の同定値をプロットした図である。雑音の影響によってばらつきがみられる。Fig. 6 は p_0 に対する 100 本の推定値の平均値をプロットした図で、負荷流入地点により近い地点での推定値のほう

Fig. 3 Behavior of the pollution load detector for a point-source load which is discharged at $x_{in} = 29.5$ [km]

Fig. 4 The 100 sample-mean behavior of the pollution load detector for a point-source load which is discharged at $x_{in} = 29.5$ [km]

Fig. 5 Identification of the unknown point-source load using pseudo-measurement (the true value of p_0 is 100 [mg/l])

が真の値に近いことがわかる。このことから、Fig. 5 に示されたような 10 個の平均値をとることにどれだけの意味があるかということになるが、現実には Fig. 2 の上図のような 1 本の見本過程しか得られないことから、(確率過程で行なわれるエルゴード仮説⁸⁾のように) 1 見本過程についての平均値をとることも有効であることを Fig. 5 は示唆している。ちな

Fig. 6 Identification result obtained by the 100 sample runs (the true value of p_0 is 100 [mg/l])

Fig. 7 Identification result of unknown p_0 by the Kalman filter constructed from (29) and (9)' without using any pseudo-measurement

みに, Fig. 5 の 10 個の平均値は 106.6 [mg/l] で p_0 の真値に近い値を与え, 未知負荷量の同定がよく行なわれているといえる. Fig. 7 は擬観測量を導入しないで (すなわち (20) 式と (9)' 式からカルマンフィルタを構成することによって) p_0 を同定した結果である. p_0 の同定は全くできていないことがわかる.

B. ノンポイント負荷の場合.

負荷流入区域を $[x_{in}, x_{out}] = [30, 35]$ とし, その他の必要なパラメータは A の場合と同じに設定した.

シミュレーション結果を Figs. 8~11 に示す. Fig. 9 をみれば, $x = 30$ [km] 過ぎあたりから負荷検知関数は急激に上昇し $x = 35$ [km] あたりで減少しだすことがみてとれる. たとえば, 閾値を $r = 2 \times 10^4$ ととれば, これを超える地点は $\hat{x}_{in} = 30.4$ [km] と特定できる. また, 検知関数が減少し始める地点を $\hat{x}_{out} = 36$ [km] とすると, ほぼ正確に負荷流入区間が特定できる.

Fig. 10 は p_0 の同定の様子を示したものであり, よく真値を同定していることがわかる. また, Fig. 11 は 100 個の見本過程からの同定の平均値を図示したものである. なお, Figs. 10, 11 においては, 本来 p_0 は正の値であるので同定値

を正の値のみにすべきであるが, ここでは同定の様子をみるために負の値も許して図示している.

ノンポイント負荷の場合には, 5. で述べたように負荷流入区間内では観測地点は数箇所設定されると仮定している. そこで, 観測地点間隔を等間隔と仮定してその取り方によって同定精度がどのようになるかをみている. 設定した負荷流入区間 $[30, 35]$ において観測間隔を 0.5 km おきに配置し, 100 本の見本過程により得られた平均値はつぎのようになった.

Observation Interval [km]	Identified Value
0.5	9.89
1.0	10.17
1.5	9.75
2.0	9.23
2.5	7.10
3.0	8.18
3.5	1.02
4.0	3.47
4.5	0.98

この結果より, 観測地点間隔が狭い程 (したがって, 観測データ数も多い) よい同定結果が得られることがわかる.

Fig. 8 Profiles of BOD and DO and their estimations (top), and estimation errors (bottom)

7. 結 言

本論文では、汚染負荷が流入する地点あるいは区間の特定とその負荷量の同定を、河川の水質に関する主要な指標である BOD と DO の推定問題に含めて考察した。

本論文の目的は、水質の状態推定、汚染負荷の検知とその入力地点の特定、さらに負荷入力の大さきの同定を同時に解決するアプローチを確立することであった。未知の汚染負荷の大さきの同定については、通常よく用いられる方法に拡大システムを構成してカルマンフィルタによって未知入力の大さきと状態量の推定を同時に行なうというアプローチがとられる。本論文ではそれに加えてさらに未知入力である汚染負荷に対する観測情報を擬似的に創生するというアプローチを提案した。この擬似観測量というアイデアはシステムに介入する未知パラメータの同定問題に対する有力な解決法を与えることが本論文によって示された。この擬似観測量を導入するという方法は今後システム同定問題解決のひとつの有力なアプローチとなるものと思われる。

なお、負荷流入地点の特定は、3.において述べたように負荷検知関数を導入してその振舞いにより行なったが、状態量が正確に推定できるならば理論的な決定が可能である。たとえば、ポイント負荷の場合には (24) 式で与えられる $L(x)$ に対して、

$$\Delta_L(x) := L(x) - L_f(x) \quad (42)$$

を定義する。ここで、 $L_f(x)$ は全区間 ($0 < x$) にわたって負荷がないとしたときの $L(x)$ の解、すなわち ((24) 式において $p_0 \equiv$ として)

$$L_f(x) = L_0 e^{J_1 x} + \{\text{noise}\} \quad (43)$$

である (ここで、 $\{\text{noise}\}$ 項は (24) 式のそれと同じ)。したがって、 $\Delta_L(x)$ は

$$\Delta_L(x) = -\frac{1}{k_0} J_1 p_0 e^{J_1(x-x_{in})} \quad (x \geq x_{in}) \quad (44)$$

で与えられる。これより、

$$e^{J_1(x-x_{in})} = -\frac{k_0}{J_1} \frac{1}{p_0} \Delta_L(x)$$

両辺の対数をとって

$$x_{in} = x - \frac{1}{J_1} \ln \left[-\frac{k_0}{J_1} \frac{1}{p_0} \Delta_L(x) \right] \quad (x \geq x_{in}) \quad (45)$$

が得られる。したがって、 $\Delta_L(x)$ 中の $L(x)$ と p_0 が正確にわかれば x_{in} が解析的に求まることになるが、これらの推定精度は観測地点を如何に密にとるにかかっている。したがって、実用的な観点からいえば、3. で述べた負荷検知関数を用いるほうがよいと思われる。

参 考 文 献

- 1) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂，東京 (1990)

Fig. 9 Behavior of the pollution load detector for a nonpoint-source load which is discharged during the interval [30, 35] [km]

Fig. 10 Identification of the unknown load using pseudo-measurement (the load with $p_0 = 10$ [mg/l] is discharged in the interval [30, 35] [km])

Fig. 11 Identification result obtained by the 100 sample runs (the true value of p_0 is 10 [mg/l])

- 2) W.W. Nazaroff and L. Alvarez-Cohen: *Environmental Engineering Science*, John Wiley, New York (2001)
- 3) 水質事故については、たとえば yahoo のウェブサイトを検索すると数多く見出される。
- 4) M. Kashiwagi, A. Ohsumi and M. Watanabe: Reinforcement and Analysis of Self-Purification of a River Subjected Multiple-Source of Pollution, *Proc. IWA Leading-Edge Conf. on Water and Wastewater Treatment Technologies (LET 2005)*, Sapporo, June (2005)
- 5) A. Ohsumi, M. Kashiwagi, M. Watanabe and T. Takatsu: Estimation of Self-Purification of Polluted Rivers Based on the Stable Water Quality Equations, *Int. J. Innovative Computing, Information and Control*, **2**-5, 959/970 (2006)
- 6) 柏木, 大住, 渡邊, 高津: 汚染河川の自然浄化の解析, 強化および推定: システム工学的アプローチ, 計測自動制御学会論文集, **42**-11 (2006)
- 7) J.M. Gundelach and J.E. Castillo: Natural Stream Purification under Anaerobic Condition, *J. of WPCF*, **48**-7, 1753/1758 (1976)
- 8) 大住晃: 確率システム入門, 朝倉書店, 東京 (2001)
- 9) A.H. Jazwinski: *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, New York (1970)
- 10) 澤田祐一: イノベーション過程に基づいた柔軟片もち梁の衝突発生時のオンライン検知, システム制御情報学会論文誌, **17**-8, 349/357 (2004)
- 11) C.K. Chui and G. Chen: *Kalman Filtering; with Real-Time Applications*, Third Ed., Springer, Berlin (1999)
- 12) A. Ohsumi and S. Yasuki: Tracking of a Maneuvering Target Considering its Kinematic Constraints, *Intelligent Automation and Control—Recent Trends in Development and Applications*, Vol.9 (Eds: M. Jamshidi, P. Borne and J.S. Jamshidi) (Proc. 4th Biannual World Automation Congress (WAC2000)), TSI Press, Albuquerque, NM, 407/416 (2000)
- 13) 大住, 安木, 平田, 井尻, 長山, 佐々木: 針路と速度を不規則に変更する移動体の拡張カルマンフィルタによるトラッキング, システム制御情報学会論文誌, **14**-10, 490/498 (2001)
- 14) 大住, 渡邊, 小見山: 汚染河川の自然浄化の強化とカルマンフィルタによる推定, 第50回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, 京都, 85/86 (2006)

[著者紹介]

大住 晃 (正会員)

1943年生。69年京都工芸繊維大学大学院修士課程修了。同年同大学生産機械工学科助手。同助教授を経て89年同機械システム工学科および大学院工学科学研究科教授。2006年大学改組に伴い大学院工学科学研究科(機械システム工学部門)教授。2007年停年により退職。京都工芸繊維大学名誉教授。その間、83年文部省在外研究員(長期)として、米国ハーバード大学応用科学科に留学。主として確率システム理論を中心に、信号検出、推定、システム同定、柔軟構造物のモデリングと制御などの研究に従事。2007年5月より宮崎大学工学部情報システム工学科教授。京都大学工学博士。82年計測自動制御学会論文賞、2001年システム制御情報学会論文賞および砂原賞、2005年計測自動制御学会著述賞受賞。システム制御情報学会、IEEE、SIAMなどの会員。

小見山 資 朗

2006年京都工芸繊維大学工学学部卒業。現在同大学博士前期課程在学中。環境問題に関心をもつ。

渡 邊 雅 彦

1981年生。2006年京都工芸繊維大学大学院修士前期課程修了。現在(株)日立マクセル勤務。在学中は環境問題に関心をもつ。修士(工学)。

柏 木 正 隆 (学生会員)

1949年生。73年京都工芸繊維大学大学院修士課程修了。同年東レ(株)に入社。製造設備の開発に従事。技術課長職を歴任。退社後、(株)ゴーシュー技術主査として設備開発を担当。その後、滋賀県立瀬田高等学校常勤講師を経て、滋賀県立八幡工業高等学校電子情報科勤務のかたわら、京都工芸繊維大学大学院博士後期課程に社会人学生として入学。2007年修了。博士(工学)。環境問題に関心をもつ。システム制御情報学会、IWAなどの会員。

高 津 知 司 (正会員)

1961年生。87年京都工芸繊維大学大学院修士課程修了。同年建設省土木研究所研究員。同省中部地方建設局、同省中国地方建設局、本州四国連絡橋公団、国土交通省関東地方整備局機械施工管理官、(財)日本建設情報総合センター首席研究員を経て、2005年国土交通省北陸地方整備局国営越後丘陵公園事務所長、2007年4月本州四国連絡高速道路(株)設備課長となり現在に至る。その間京都工芸繊維大学大学院博士後期課程に社会人入学し、2003年修了。92年科学技術庁より独国ルール大学客員研究員として派遣。茨城大学工学部非常勤講師を務め、国土交通行政に従事しながら確率システムの同定と制御の研究活動を行なう。92年日本建設機械化協会準会長賞受賞。システム制御情報学会、日本機械学会などの会員。博士(工学)。