

## 不完全情報下における内水排除施設運用に関する研究

### —— 観測系に水理学的特性を考慮したモデル ——

田中成尚\*・多々納裕一

\*株式会社 日水コン

### 要 旨

都市の内水排除の排除施設を効果的に運用する場合、観測システムを明示的に考慮して運用ルールを決定することが重要であり、筆者らはルールの決定が部分観測下の最適制御問題として定式化でき、有限な状態量の関数として定義可能であることを示した(田中他, 1999)。しかし、複雑な内水排除システムでは厳密な最適制御ルールを求めることは難しい。本稿ではモデルの実用的な近似解法として観測方程式を用いた方法を提示する。

キーワード：内水排除，最適運用，確率DP，観測方程式

#### 1. はじめに

都市の内水排除の問題は集中豪雨による浸水被害の発生と、都市域から排出される面源負荷による河川の汚染である。我が国の都市域では内水排除用の施設の整備は充分とはいえないが、既に多くの施設が整備され供用している。こうした施設を浸水対策のみならず汚濁対策として活用することが望まれる。なぜなら、内水排除用の施設は5年から10年に一度に発生する降雨を計画降雨としているため、年間多数発生する降雨時には施設能力に余裕が生じており、この余裕を活用し、小降雨時に都市の表面を洗い流す雨水を貯留し、降雨終了後に処理・放流することで、従来対象としていた浸水対策以外の効果も期待できるからである。その際、問題となるのが施設の運用計画の立案方法である。

上述の多目的運用を効果的に実施しようとする、多くの正確な観測情報が必要であり、さらにはそうした情報に対する制御ルールを設計することが必要とな

る。従来こうした制御ルールの設計には、観測情報が完全に得られるという条件のもとで制御ルールの設計を行う方法が用いられていった。しかし、都市域の内水排除施設は地下に建設されることが多く、全ての地点の水位や流量を観測することは困難である。さらに、都市域の内水排除施設内の水理挙動は大河川の場合が1時間単位の変化であるのに対して、5分程度と極めて短く、たとえ多くの水位や流量を観測したとしてもこれを速やかに伝達するための高速情報伝達手段の構築も費用効果の面で問題となる。

したがって内水排除施設の運用計画は情報が完全に得られないとの条件のもとで考えるべきである。このように考えることで、観測情報の価値の計測が可能となり、観測システムの構築も含めた効果的な運用計画の立案が可能と考えられる。

さて、不完全観測情報下の最適制御問題は最適解が有限な情報の関数として定義できないことが知られており、最適制御問題の定式化は可能であるが、制御ルールを得ることは不可能とされてきたため、この分野

の研究はあまりなされていなかった。しかし、田中(1999)らは観測が部分的であり、現象が自然法則等の既知の法則に基づき、これを正確に計算可能であるとすれば、最適制御ルールは有限な観測情報の関数として定義可能であることを示した。その際、非線形なシステムにおいても解を得ることが可能という観点から確率ダイナミックプログラミング(SDP)を用いて定式化を行った。本稿は以上のモデルの適用性について数値実験を通して分析を行うとともに、より実用性を高めるための最適制御の近似解を与えるモデル(以下「サブ・オプティマルモデル」と呼ぶ)について提示するものである。

## 2. 部分観測情報下における最適制御問題

### 2.1. 部分観測情報下における

#### 最適制御問題の定式化

部分観測情報下における最適制御ルールの厳密な設計はFig. 1に示すように、確率変数である流入量を入力とし、内水排除施設内の水の流れを解析し、これを部分的に観測し、この情報にもとづいて未観測の状態量を推定し、制御の結果得られる状態量から求められる被害期待値を最小化するよう行う必要がある。このようなシステムを考慮した場合の問題として流れを記述する数式が非線形であり、最適制御の求解が難しいことと、観測情報が完全に得られない場合の制御問題の最適制御ルールが有限な観測情報の関数として記述できないという2つの問題を克服する必要がある。

まず、非線形システムに対する求解の問題は厳密性を一部欠くものの、離散値の問題(確率ダイナミックプログラミング)として解析することにより解を得ることは可能である。一方、部分観測性の問題についても田中ら(1999)の研究で特殊な条件であれば有限な観測情報の関数として定義可能であることが示されている。すなわち、部分観測の値が誤差無しで観測できると仮定して良く、さらに現象を再現するシステム方程式の誤差が無視できる場合は有限な過去の観測情報から未観測の状態量の生起確率を推定できるため、最適制御ルールは有限な観測情報に定義できる。

以上の条件は実際の内水排除施設運用を考える上で仮定可能な条件であると考えられる。例えば水位の観測であれば計測誤差はほとんど無視可能であり、また、施設内の水の流れの解析技術も高いレベルにまで到達している。

部分観測における最適制御

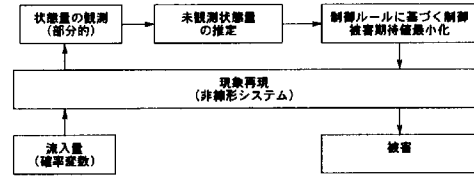


Fig. 1 Optimal control system under partially observed information

部分観測情報下における最適制御問題の定式化は以下のとおりである。まず、 $N$  個のタンクから構成される放水路に対して  $M$  観測可能な場合の最適制御システムは確率DPを用いて次のように定義できる。有限の観測によって得られる情報をベクトルで以下のように表す。

$$\tilde{\mathbf{I}}^k = (\mathbf{Z}^{k-1}, \mathbf{Z}^{k-2}, \dots, \mathbf{Z}^{k-L}, U^{k-1}, U^{k-2}, \dots, U^{k-L}) \quad (1)$$

ここで  $\tilde{\mathbf{I}}^k$  は  $k$  期のインフォメーションベクトル、 $\mathbf{Z}$  は貯水量の中の観測可能な貯水量の集合を、 $L$  は最適制御を有限な観測情報の関数として定義するための過去にさかのぼる観測情報の期間数を表す。これらの記号を用いて最適制御問題を解くために必要となる同時生起確率分布を以下のように定義する。

$$\Pr(\mathbf{S}_{k+1} = \mathbf{s}_{k+1}, \mathbf{S}_k = \mathbf{s}_k, \dots, \mathbf{S}_{k-L} = \mathbf{s}_{k-L} \mid \tilde{\mathbf{I}}_k = \tilde{\mathbf{i}}_k, U_k = u_k) \quad (2)$$

式(2)は流入量の集合  $\mathbf{W}_{k+1}, \mathbf{W}_k, \dots, \mathbf{W}_{k-L}$  の同時生起確率が定義されていればシステム方程式から決定される。この確率を用いて最適制御問題は以下のように定義できる。

$$V_k(\tilde{\mathbf{i}}_k) = \min_{0 \leq u_k \leq u_{\max}} \left[ \sum_{\mathbf{s}_k} \{g(\mathbf{s}_k, \mathbf{z}_k, u_k) \cdot Q(\mathbf{s}_k \mid \tilde{\mathbf{i}}_k, u_k)\} + \beta \cdot \sum_{\mathbf{z}_{k+1}} \{V_{k+1}(\tilde{\mathbf{i}}_{k+1}) \cdot R(\mathbf{z}_{k+1} \mid \tilde{\mathbf{i}}_k, u_k)\} \right] \quad (3)$$

$$Q(\mathbf{s}_k \mid \tilde{\mathbf{i}}_k, u_k) = \sum_{\mathbf{a}_k / \mathbf{s}_k} P(\mathbf{a}_k \mid \tilde{\mathbf{i}}_k, u_k) \quad (4)$$

$$R(\mathbf{z}_{k+1} \mid \tilde{\mathbf{i}}_k, u_k) = \sum_{\mathbf{a}_k / \mathbf{z}_{k+1}} P(\mathbf{a}_k \mid \tilde{\mathbf{i}}_k, u_k) \quad (5)$$

ここで  $\mathbf{a}_k$  は未知変数の集合で

$\mathbf{a}_k = \{\mathbf{z}_{k+1}, \mathbf{s}_{k+1}, \mathbf{s}_k, \dots, \mathbf{s}_{k-L}\}$ 。また  $\mathbf{a}/\mathbf{b}$  は集合  $\mathbf{a}$  の中から  $\mathbf{b}$  を除いた集合で  $\mathbf{a}/\mathbf{s}_k$  は  $\mathbf{a} - \{\mathbf{a}/\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_k\}$  を満たす。

### 2.2. 被害期待値の算定モデル

さらに、最適制御を採用した場合の被害期待値は下式によって算定可能である。最適制御を定義するために必要な有限観測情報  $\tilde{\mathbf{i}}_k$  に対する被害期待値を  $\Gamma$  とお

くと

$$\Gamma = \sum_{\tilde{i}_k} \nu(\tilde{i}_k) \cdot \Phi(\tilde{i}_k) \quad (6)$$

ここで  $\Phi(\tilde{i}_k)$  は観測情報  $\tilde{i}_k$  の定常生起確率であり、以下のように計算できる。なお、ここでは1期前（これを  $l=1$  表現する）の情報に最適制御が定義できるとした場合について示しておく。まず、最適制御ルールより、

$$\Phi_1(u_k | \mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) = \delta(\mu(i_k) - u_k) \quad (7)$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

次に、状態の遷移確率をシステム方程式と流入量の同時生起確率  $\theta(\mathbf{w}_k) = \Pr(\mathbf{W}_k = \mathbf{w}_k)$  から求める。

$$\begin{aligned} \Phi_2(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \\ = \theta((x_k^1 - x_{k-1}^1) / \Delta t - q_{k-1}^1 + u_{k-1}, (x_k^2 - x_{k-1}^2) / \Delta t + q_k^1) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $q_k^i = f(x_k^{i-1}, x_k^i)$  である。

式(7)および式(8)より、

$$\begin{aligned} \Phi_3(\mathbf{x}_k, u_k | \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \\ = \Phi_1(u_k | \mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \cdot \Phi_2(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

さらに、式(9)を用いて定常生起率  $\Phi_4(\mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1})$  を下式を満たすように求める。

$$\begin{cases} \Phi_4(\mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) = \Phi_3(\mathbf{x}_k, u_k | \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \cdot \Phi_4(\mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \\ \sum_{\mathbf{x}_k} \sum_{u_k} \Phi_4(\mathbf{x}_k, u_k) = 1, \Phi_4(\mathbf{x}_k, u_k) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

下式により情報ベクトルの定常確率を得る。

$$\Phi_5(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) = \Phi_2(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \cdot \Phi_4(\mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \quad (11)$$

最後に情報ベクトルに対する定常確率を周辺分布を集計して求める。

$$\Phi(\mathbf{z}_k, \mathbf{z}_{k-1}, u_{k-1}) = \sum_{\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_{k-1}} \Phi_5(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k-1}, u_{k-1}) \quad (12)$$

さらに観測システムの種類を  $\xi$  とおき、その場合の被害期待値を  $\Gamma(\xi)$  とおくと観測システム  $\xi_1, \xi_2$  へ改善した場合の効果は式(13)のように表わされる。

$$\Gamma(\xi_1) - \Gamma(\xi_2) \quad (13)$$

## 2.3. 数値事例

式(1)～式(5)で示したモデルの数値事例として最もシンプルなFig. 2に示す2段タンクの場合をTable 1に示す。Fig. 2中  $\bar{Q}_k^1 = f(Z_k^1, S_k^2)$  は上下流の間を流れる流量を表わし、これは両タンクの貯水量のみの関数として表わされる場合を示している。また、Table 1では放流能力  $u_{cap}$  を 60, 40, 20m<sup>3</sup>/S の場合と、上下段の両方のタンクを観測した完全観測の場合と、下段タンクのみを観測した部分観測の場合について被害期待値を示している。これより、本モデルを用いることで観測情報の価値を以下のように評価できる。

完全観測の場合と不完全観測の場合の比較では、完全観測の場合の方が不完全観測の場合に比較して被害期待値が小さくなる。また、放流能力が大きいくほど完全観測を行うメリットが大きくなることがわかる。具体的に、部分観測 20m<sup>3</sup>/s から部分観測の 40m<sup>3</sup>/s へ変更した場合の改善は 181.39 から 29.35 への被害軽減と格段に大きな効果を示すが、部分観測 40m<sup>3</sup>/s から部分観測の 60m<sup>3</sup>/s へ変更した場合の改善は 29.35 から 21.46 とわずかである。さらに、部分観測 40 m<sup>3</sup>/S の完全観測とした場合の被害の軽減は 29.35 から 20.38 となり、部分観測に対する放流量の増加 (60m<sup>3</sup>/S) に比較して大きいことが示される。

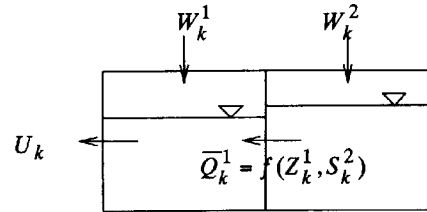


Fig. 2 Basic model under partially observed information

Table 1 Numeric experiment for optimal control under partial observation

| 被害期待値 | 放流能力m <sup>3</sup> /S |       |        |
|-------|-----------------------|-------|--------|
|       | 60                    | 40    | 20     |
| 完全観測  | 14.73                 | 20.38 | 116.36 |
| 部分観測  | 21.46                 | 29.35 | 181.39 |
| 比率    | 146%                  | 144%  | 156%   |

## 3. サブ・オプティマル制御

### 3.1. サブ・オプティマル制御の設計

前章で提示した厳密なモデルを現実問題に適用する場合に解決すべき課題点がある。すなわち、確率ダ

イナミックプログラミング(SDP)を適用することによる本質的な問題として、雨水排水施設の水利現象を精度よく解析するためには排水施設を細かいメッシュに分割することが必要であるが、その場合に状態量の数が多くなり、計算量が爆発的に増加し、計算不能に陥るという問題があげられる。この状態量の次元の増加による計算量増大は「次元の呪い」と呼ばれる種類の問題でありこの問題に対する解決方法を提示しなければ本モデルの実用性は低いと言わざるをえない。そこで数学的な厳密性を一部放棄する反面、実用性を向上させる方法として、制御ルール決定問題と、観測精度向上問題を分離する方法を提示する。すなわち、最適制御ルールを解析が可能となる状態量の数に対して定めておき、次いで、この状態量を観測情報と観測方程式を用いて推定して制御を行う方法である。この方法を採用すると、状態量の推定誤差が小さくなるにしたがって、被害最小化となることが保証される。そこで、このような制御方法を「サブ・オプティマル制御」と呼ぶことにする。

サブ・オプティマル制御の設計方法はFig. 3の上段に示すように、状態変数の数の減少と、最適制御問題の求解の容易さを考慮して状態量の合計のみに着目したシステムにおける最適制御ルールの設計を行う。状態量の合計のみを取り扱うことにより、施設内の内部の複雑な水の流を解析する必要がなく、連続式のみに着目して制御ルールが設計できる。このような制御ルールの設計は従来、多くの研究が行われてきた方法である。

一方、施設内の水の流れの非線形性を表わすものとして、Fig. 3中段に示すように観測方程式を導入する。図中のシステムは先に設定した合計貯水量に対する制御ルールの基で、流入量時系列を与えて数値解析を行うことにより、部分的な状態量から全体の状態量を推定する観測方程式のパラメータを決定する。その際観測方程式の式形が重要な事項となる。

最後に、Fig. 3下段に示すように設計した制御ルールと観測方程式を用いた数値解析により被害を推計し、これを同様な合計状態量に対する数値解析の結果得られる被害と比較することで、構築したサブ・オプティマル制御システムの妥当性を評価する。

### 3.2. 水文学的特性を考慮した観測方程式

状態推定方程式は観測された水位から幹線内の貯留量 $y$ を推定するための方程式である。これは複数の観測地点から推定するため下式のように定義する。

$$\tilde{y} = f(h_1, \dots, h_n), \quad h_1 \text{ はポンプ場地点の水位}$$

ここで $\tilde{y}$ : 観測水位 $h_1, \dots, h_n$ から推定した貯水量。ここで関数 $f$ を水文学特性として水面形状に着目した次のようなモデルを用いる。Fig. 4に観測方程式を構成するための水面形状を示す。

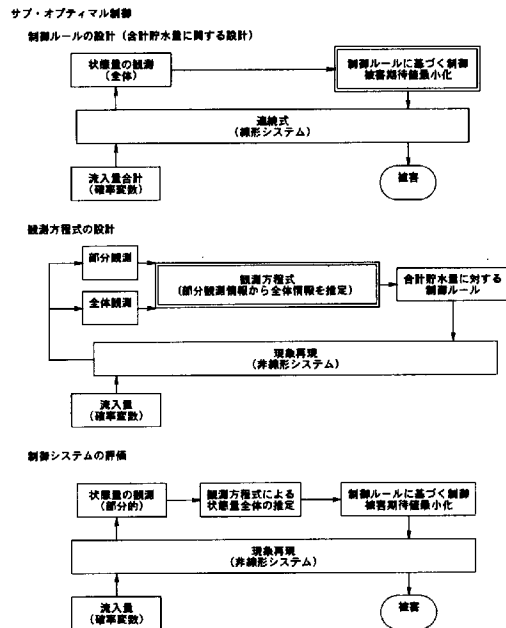


Fig. 3 Design for sub-optimal control system under partially observed information

図中 $h_1, h_2$ は水位計設置地点における観測された水深であり、その中間の $h_1$ から距離 $\ell_1$ だけ上流にさかのぼった地点に変曲点が存在し、その水深は $h$ である。ここで観測地点 $h_1, h_2$ 間の距離は $L$ である。この関係式より観測地点間の貯水量は式(14)で表される。

$$S = B \cdot \ell_1 \cdot \left( \frac{h_1 + h}{2} \right) + B \cdot (L - \ell_1) \cdot \left( \frac{h + h_2}{2} \right) \quad (14)$$

ここで断面は矩形を考えており、その幅を $B$ とする。これを未知数である $h$ と $\ell_1$ を分離するよう展開すると式(15)のようになる。

$$S = B \cdot \ell_1 \cdot \left( \frac{h_1 - h_2}{2} \right) + B \cdot L \cdot \left( \frac{h + h_2}{2} \right) \quad (15)$$

これと線形結合の式(15)を比較すると $h$ と $\ell_1$ は係数 $a, b$ を用いて式(16)、式(17)のように記述できる。

$$S = a \cdot (h_1 - h_2) + b \quad (16)$$

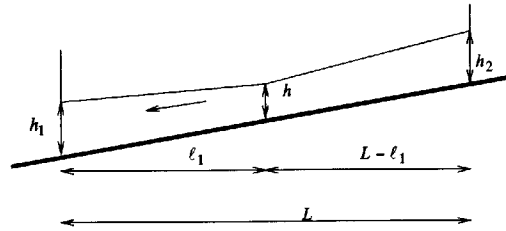
$$\ell_1 = \frac{2 \cdot a}{B}, \quad h = \frac{2 \cdot b}{B \cdot L} - h_2 \quad (17)$$

すなわち式(16)、式(17)の形で、様々な条件の水面形を近似(誤差2乗最小化等により)することで変

曲点を1つ含む非線形な水面形の近似を行うことになる。さらに、実際の排水システムで行われている流末1地点の場合においても精度よく近似できる必要がある。この場合への対応を考慮して1地点の場合の式(18)を加えて式(19)のように定義する。

$$\tilde{y} = c \cdot h_1 + d \quad (18)$$

$$\tilde{y} = c + a \cdot h_1 + \sum_{i=1}^{N-1} b_i \cdot (h_i - h_{i-1}) \quad (19)$$



$h_1, h_2$  : 観測した水深,  $h$  : 水面形変曲点の水深,  
 $l_1$  : 水面形変曲点の位置

Fig. 4 Shape of water surface to formulate observation equations

### 3.3. 数値事例

Fig. 5は内径6.5mの円管で勾配1/18,000の地下放水路においてVAR(1)のモデルで発生させた流入量に対し、設計制御ルールによって操作をおこなった一次元不定流解析による数値実験結果から、5地点観測の場合の真の貯水量と観測方程式による推定貯水量の関係を示したものである。これより、式(19)は簡単な式形にもかかわらずかなり高い精度を有することが確認できる。

次に、実際に多く埋設されている内径4m、延長5kmの幹線を3個のタンクに分割し、観測情報の価値の計測を行った事例をTable 2に示す。表中の $w_{tc}$ 、 $\sigma$ はそれぞれ流入量規模と、流入量の生起確率を正規分布とした場合の標準誤差であり、以下のとおりである。

まず、流入量の確率モデルは式(20)に示すVAR(1)のモデルとして作成した。

$$\begin{aligned} W_k^1 &= a^{11}W_{k-1}^1 + a^{12}W_{k-1}^2 + a^{13}W_{k-1}^3 + e_k^1 \\ W_k^2 &= a^{21}W_{k-1}^1 + a^{22}W_{k-1}^2 + a^{23}W_{k-1}^3 + e_k^2 \\ W_k^3 &= a^{31}W_{k-1}^1 + a^{32}W_{k-1}^2 + a^{33}W_{k-1}^3 + e_k^3 \end{aligned} \quad (20)$$

ここで $a^{ij}$ は定数、 $e_k^i$ はランダム擾乱である。

上記モデルのパラメータは対角要素以外の係数を全て0.1に固定し、対角要素は任意の同一係数を与えることとした。この対角要素の係数設定に際して、まず、

式(20)から求めた遷移確率(21)を求め、次いで式(22)の定常生起確率を求める。さらに、この定常生起確率を用いて3個のタンクへの合計流入量に対する生起確率を式(23)を用いて算定する。

$$P(w_k | w_{k-1}) = \Pr(W_k = w_k | W_{k-1} = w_{k-1}) \quad (21)$$

$$\pi(w_{k-1}) = \sum_{w_{k-1}} P(w_k | w_{k-1}) \cdot \pi(w_{k-1}) \quad (22)$$

$$\Pr(WT = wt) = \sum_w \pi(w) \cdot \delta(wt - \sum_{i=1}^N w^i) \quad (23)$$

対角要素の係数はこの流入量合計の定常生起確率をもとに定める。その基本的な考え方は、式(24)のとおりである。

$$\frac{\Pr(WT > 0)}{\Pr(WT \geq w_{tc})} = g \quad (24)$$

ここで、式(24)の分子は流入量が発生する確率であ

り、分母は流入量が規模 $w_{tc}$ を超過する確率であり、式は流入量の発生確率と所定の流入量規模超過確率の比を表している。この比をここでは $g$ とおき、これが任意の値となるよう対角要素の係数を決定する。ここで $g$ は、年間の降雨日数が約60日であり、規模 $w_{tc}$ が5年に1度程度発生する場合と同等の比率であるとして式のように300に設定した。

$$g = \frac{60 \cdot 365 \times 5}{365 \cdot 1} = 300 \quad (25)$$

Table 2のサブ・オプティマル制御によって観測情報の評価は下記のとおりであることがわかる。

完全観測の場合のサブ・オプティマル制御の累積被害は放流能力の増加とともに大幅な被害の軽減となり、特に流入量規模が大きいほど改善量は大きくなることわかる。次に最下流のタンクのみ観測するz1観測の場合と、最下流と最上流のタンクz1, z3観測の場合の被害を比較すると、 $u_{cap} = 20 \text{ m}^3/\text{S}$ の場合で差が無く、 $u_{cap} = 40 \text{ m}^3/\text{S}$ 、 $60 \text{ m}^3/\text{S}$ と放流能力が大きくなるにつれて被害が縮小することが確認できる。 $u_{cap} = 20 \text{ m}^3/\text{S}$ の場合は流入量の規模(所定の確率の流入量)に対して放流能力が圧倒的に小さいため、観測情報を加えることは必要ではなく、放流能力の増強が必要であるといえる。一方、 $u_{cap} = 40 \text{ m}^3/\text{S}$ 、 $60 \text{ m}^3/\text{S}$ の場合は観測情報を加えることによって被害の軽減が期待できることがわかる。すなわち、放流能力が大きな施設においては観

測情報を追加することが有効な手段になることがわかる。

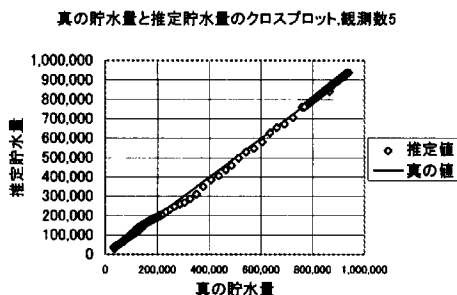


Fig. 5 Estimation of total volume for using observation equation

Table 2 Estimated damage for sub-optimal control  
累積被害  $\times 10^6$

| wic | $\sigma$ | $u_{cap}$ | サブ・オプティマル制御 |          |               |
|-----|----------|-----------|-------------|----------|---------------|
|     |          |           | 完全観測        | $z^1$ 観測 | $z^1, z^3$ 観測 |
| 100 | 5        | 20        | 5.06        | 5.06     | 5.06          |
|     |          | 40        | 0.46        | 1.75     | 0.51          |
|     |          | 60        | 0.01        | 0.18     | 0.02          |
| 140 | 5        | 20        | 9.48        | 9.48     | 9.48          |
|     |          | 40        | 2.50        | 2.51     | 2.63          |
|     |          | 60        | 0.09        | 0.11     | 0.09          |

#### 4. 結論および今後の課題

本稿では、部分観測下における最適制御ルール of の設計が有限な観測情報に対して定義可能であるものの、この問題の厳密解を得ることが困難であることを考慮し、より実用性の高い、制御ルールの設計と観測方程式の設計を別々に行う、サブオプティマル制御方法を提案した。その際、制御ルールとして、状態量の合計に着目し、確率 DP を用いた制御ルールを、観測方程式としては、高い精度の観測が可能な水位から貯水量を推定するための水面形近似の観測方程式を提示した。

ついで、このサブオプティマルな制御について、VAR(1) の流入量モデルを用いて発生させた長期間の流入量時系列データに対する数値実験を行い、その有効性および特性について分析を行った。結果次のような特徴がわかった。

- ① 観測方程式として 2 つの直線から構成される観測方程式の貯水量推定精度はその式形が極めて単純であるにもかかわらず高い精度を有することを確認した。
- ② サブ・オプティマル制御は多くの場合、被害を軽減する有効な方法であり、このルールに

基づいて制御ルールを設計したシステムを用いて、観測情報追加の価値を計測できることを示した。

- ③ 観測情報追加の効果は流入量規模に比較して、施設能力がある程度大きい場合に大きく、我が国都市域の内水排除施設の整備レベルを考えれば、従来どおりの放流能力増加のみではなく、観測情報追加による整備レベルの向上を検討することが重要であることが確認できた。

今後の課題として下記事項について分析を行うことが必要である。

- ④ 厳密な最適制御ルールを推定するための解析方法の開発
- ⑤ サブ・オプティマルモデルと厳密な最適制御モデルの解析結果の比較によるサブオプティマルモデル適用条件の明確化
- ⑥ より、実流域に近い複雑な内水排除システムへの本モデルの適用等があげられる。

#### 参考文献

- 蔵重俊夫・田中成尚(1992)：大規模下水道による内水排除施設運用計画に関する一考察，環境工学研究論文集，Vol. 29，pp. 47-57.
- 田中成尚・多々収裕一(1999)：不完全情報下における内水排除施設運用に関する研究－状態量の部分観測性に着目して－，京都大学防災研究年報第 42 号，pp81-90.
- 八木俊策(1996)：合流式下水道ポンプ場におけるファジィ制御ルールの学習に対する遺伝アルゴリズムの適用，ファジィシステムシンポジウム講演論文集，Vol. 12，pp. 837-840.
- Dimitri, P. Bertsekas (1995): Dynamic programming and optimal control vol. 1, MIT Press.
- Kurashige, T. and N. Tanaka (1994): Expert system for inner basin drainage, in K. W. Hipel and L. Fang (eds.) Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering, Vol.4, Kluwer, pp.309-320.
- Tanaka, N. and H. Tatano(2000), A performance evaluation method of monitoring systems for inner-basin drainage under imperfect observation, Hydrological Processes.vol.14, pp621-638.

# **A Sub-Optimal Operation Model of Urban Drainage Systems under Partially Observable State Information**

Naruhisa TANAKA\*, Hirokazu TANANO\*\* and Norio OKADA\*\*

\*Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Nihon Suido Consultants Co., LTD.

## **Synopsis**

Major issues of urban drainage system control are design of control policy and monitoring system. Given a monitoring system, mathematical programming model to obtain an optimal control policy is formulated as a partially observable MDP problem. It was shown in the authors' previous paper (Tanaka, et.al. 1999) that the optimal operation policy takes the form of mapping from finite a point in state space to release volume. However, for real world problems, dimensions of state vectors tend to large enough as to prohibit direct application of the model. In order to cope with this problem, this paper presents an approximate method as to obtain sub-optimal operation policy under partially observable state information. This method contains an observation equation, which is formulated by considering hydrological characteristics. Numerical examples are also provided as to demonstrate its applicability to large-scale real world problems.

**Keywords:** Inner-Basin Drainage, Optimal Control,, Stochastic dynamic programming, observation equation