

遺伝アルゴリズムを用いた合流式下水道ポンプのファジィ制御

Fuzzy Control of Pumps in a Combined Sewer Pumping Station

Using Genetic Algorithms

八木俊策*・芝 定孝**

By Shunsaku YAGI and Sadataka SHIBA

To achieve advanced control in sewer systems, operators should be provided with computer-aided control systems. In the present study, genetic algorithms were applied to the learning of fuzzy control rules used in a combined sewer pumping station. Pumping rates were determined by fuzzy logic controllers using input variables such as rainfall intensity, sewer water level, and river water level. Genetic algorithms involve the procedures of selection, crossover, and mutation. After evaluating the effects of parameters, fuzzy control rules were efficiently improved to fit pump operation conducted by human operators.

Keywords: fuzzy control, genetic algorithms, sewer, pumping station, stormwater

1. はじめに

都市化の進展にともなって、都市の水システムは大規模化・複雑化・多目的化し、また観測・予測情報も多量化・多様化しつつある。そのため種々の水関連施設においては、より高度な制御が求められつつあり、オペレータの役割がますます重要になってきている。一方、都市域における雨水汚濁流出過程に関する従来の研究は、主として自然的プロセスの解明とそのモデル化が中心であり、知識・経験・勘などにもとづいて行われている人為的操作の分析やそのモデル化については、まだ多くの課題を残している。

人間の行う知識情報処理に関する研究から生まれたAI技術は、体系的に知識を集積・学習し、推論によって問題を解決する、人間の知能の働きに近い機能をもつ計算機利用システムである。狭義にはエキスパートシステムがその代表であるが、広義にはファジィ推論やニューラルネット、遺伝アルゴリズムなどをも含む形で発展しつつある。水システム関連分野ではダム貯水池の操作や浄水場での凝集剤の注入制御などに適用され、熟練オペレータの知識や経験をうまく取り入れることによって、人間に近い操作が実現しうるとされている。

雨天時に重要な役割をもつ合流式下水道ポンプ場におけるオペレータのポンプ操作に関しては、従来より

* 正会員 工博 摂南大学助教授 工学部経営工学科

(〒572 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

** 正会員 工博 大阪大学助手 基礎工学部化学工学科

(〒560 大阪府豊中市待兼山 1-1)

ファジィ制御を用いた支援システムの検討が行われてきた^{1) 2) 3)}。その場合、主としてオペレータへのインタビューなどに基づいて、発見的、試行錯誤的に制御ルールが作成されてきた。しかしながら、オペレータの知識や経験を的確に制御ルールとして把握することは容易でなく、さらに入力変数やルール数が増すにつれ、ルールの作成や更新は極めて困難になるという問題点があった。そこで本研究では、合流式下水道ポンプ場におけるオペレータの操作記録を収集し、これを学習データとして用いた遺伝アルゴリズムを適用して、ファジィ制御ルールを求める問題について検討する⁴⁾。

2. 合流式下水道ポンプ場の概要

雨天時における合流式下水道ポンプ場の役割は、放流先公共用水域の氾濫防止や排出汚濁負荷の軽減に留意しつつ、排水区域の浸水を防止することにある。面源汚濁を含む降雨初期の高汚濁下水は、汚水ポンプによって次のポンプ場または下水処理場へ送られる。さらに流入流量が増加して所定の希釈倍率を越えたり、降雨現況や予報から流入量の増加が予想されるときには雨水ポンプにより河川などへ放流される。現場のオペレータは降雨強度、ポンプ場水位、放流先河川水位などの多入力情報にもとづき、知識・経験・勘を活かしつつ、たくみに操作量を決定している。

調査対象の排水区は計画排水面積196 h aの合流式下水道区域である。この区域はすでに全域が下水道整備され、現況の流出係数は0.66、不浸透率は68%である。ポンプ場には雨水ポンプが4台設置され、最大吐出量は8m³/秒であり、汚水ポンプは4台で、最大吐出量は0.68m³/秒である。

収集した運転記録は平成2年4月から平成3年3月までの降雨データ、ゲート前水位、放流先河川水位、汚水ポンプ吐出量のチャートおよび雨水ポンプに関する運転状況日報である。この期間のうち降雨量10mm以上、もしくは雨水ポンプが稼働した50ケースを取り上げ、10分間隔でデータを数値化し、計算機用データファイルを作成した。

3. 雨水・汚水ポンプのファジィ制御

Zadehのファジィ集合⁵⁾を制御に応用したファジィ制御は、定式化が難しくて古典的な制御法では取り扱いにくいシステムの制御に適用され、熟練オペレータに近い制御効果を示すことがすでに実証されている^{6) 7) 8)}。雨天時における合流式下水道のポンプ操作も定式化が困難な問題であり、オペレータの知識・経験による操作が行われている。

入力変数は下水管水位（ゲート前水位）、降雨強度、放流先河川水位であり、出力変数は雨水ポンプ操作量および汚水ポンプ操作量である。これらの値を表すファジィラベルとして、図-1に示すメンバーシップ関数を用いた。Xmin、Xmaxはそれぞれ各変数の最小値および最大値である。ラベル”11”は制御ルールの前件部(IF...)に、ラベル”00”は後件部(THEN...)に用いることができるようになっている。したがって、あるルールにX1=11が含まれるとき、実質的には入力変数X1がそのルールでは不必要であることを意味する。同様にY=00はそのルールが無効であることを意味する。

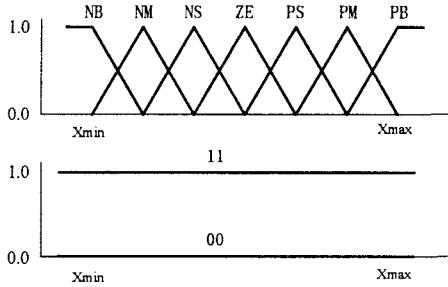


図-1 ファジィラベルのメンバーシップ関数

ファジィ推論にはMin-Max-重心法を用いた。すなわち入力値に対する前件部の各ファジィ集合のメンバーシップ値の最小値を各ルールの適合度とし、その値を後件部のメンバーシップ関数に乘じ、すべてのルールについてそれらの最大値を用いて合成する。そして、このメンバーシップ関数の重心を操作量とする方法である。

4. 遺伝アルゴリズムを用いたファジィ制御ルールの学習

遺伝アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) は、生物の遺伝と進化にヒントをえた最適化や学習のための方法であり、種々の分野への応用が試みられている^{9) 10) 11) 12)}。すなわち、求めるべき解を生物の遺伝子のようにコード化し、選択・交叉・突然変異などの遺伝的操作によって、環境への適応度を高めていく方法である。

遺伝子表現にはビットストリング表現がよく用いられるが、ここではファジィルールベースを構成する各ルールのファジィラベルをそのまま鎖状に並べた形で染色体を表現する。たとえばルールベース R_A が次のように N 個の *IF* - *THEN* ルールによって構成されている場合、

$$\begin{aligned} 1: & \text{IF } X1 = PB \quad X2 = PM \quad \dots \quad \text{THEN } Y = PB \\ 2: & \text{IF } X1 = NB \quad X2 = NS \quad \dots \quad \text{THEN } Y = NB \\ & \dots \dots \dots \\ N: & \text{IF } X1 = ZE \quad X2 = PS \quad \dots \quad \text{THEN } Y = ZE \end{aligned} \quad (1)$$

このルールベースの染色体を次のように表現する。

$$R_A : (PB, PM, \dots, PB) (NB, NS, \dots, NB) \dots (ZE, PS, \dots, ZE) \quad (2)$$

$A_1 \qquad \qquad A_2 \qquad \dots \qquad A_N$

ある個体が環境に適応する度合いを適応度(fitness)という。ここでは、ファジィ推論による計算値がオペレータの操作値に近いほど適応度が高くなるようにするため、雨水ポンプ、汚水ポンプそれぞれについて、次式によって表す。

$$f = 1 - \sqrt{(1/K) \sum_{k=1}^K (P_{k,s} - P_{k,c})^2} \quad (1/P_{\max}) \quad (3)$$

ただし、 f : 適応度 ($0 \leq f \leq 1$)、 $P_{k,s}$: オペレータの操作値、 $P_{k,c}$: ファジィ推論による計算値、 k : k 番目のデータ ($k = 1, 2, \dots, K$)、 $P_{\max}$: ポンプの最大能力。また入力条件に対応するルールが存在しない場合、ペナルティとして計算値と操作値の差を $P_{\max}$ としている。

遺伝オペレーションには選択、交叉、突然変異を用いた。

①選択：ある世代の個体群の中から、適応度の高い個体を選択して、次世代に残す操作である。ここではルーレット選択とエリート保存選択を用いた。ルーレット選択は集団のすべての個体の適応度の合計に対する、ある個体の適応度の比率に応じて、次世代に残す方法である。またエリート保存選択は、交叉や突然変異によって高い適応度をもつ個体(染色体)が壊されるのを防ぐため、ある世代において最大の適応度をもつ個体をそのまま次世代に残す遺伝戦略である。

②交叉：確率的に決定される位置で2つの染色体を切断し、相互に入れ替えて新たな染色体を作る遺伝操作である。交叉の方法には1点交叉、多点交叉、一様交叉などの方法が提案されているが、ここでは1点交叉を用いる。例えば交叉対象となるルールベース R_A, R_B の2番目と3番目のルールの間に交叉位置がある場合、次のようになる。

$$\begin{aligned} R_A : A_1 A_2 | A_3 A_4 \dots A_N & \rightarrow R'_A : A_1 A_2 B_3 B_4 \dots B_N \\ & \quad \quad \quad 1 \text{ 点交叉} \\ R_B : B_1 B_2 | B_3 B_4 \dots B_N & \rightarrow R'_B : B_1 B_2 A_3 A_4 \dots A_N \end{aligned} \quad (4)$$

ある染色体(ルールベース)が1世代で交叉の対象になる平均回数を交叉率とする。

③突然変異：ある遺伝子を確率的に対立遺伝子で置き換える操作である。ルールベースにおいては入出力変数の大きさを表すファジィラベルを別のものに置き換える操作である(例： $X2 = PB \rightarrow X2 = PS$)。ある遺伝子が1世代において対立遺伝子に置き換えられる平均回数を突然変異率とする。

遺伝アルゴリズムの計算手順を図-2に示す。まず乱数によって個体群を作成する。つぎに入力変数に対するファジィ推論値を計算し、式(3)により適応度を求める。もし適応度が目標値を超えるか、または世代数が設定値に到達した場合には計算を終了する。一方、それ以外の場合には、選択・交叉・突然変異などの遺伝操作によって次世代の個体群を作成し、再び同様な計算を繰り返す。

本研究で採用した遺伝アルゴリズムの諸パラメータと収束特性との関係について、テストデータを用いて調べた。まず入力変数が2個、ルール数が3個のルールベースによりテストデータを作成し、つぎにこのデータを用いた学習により、元のルールベースに到達する($f=1$)のに何世代の計算が必要かについて調べた。図-3は交叉率0、1、3、5、10のそれぞれについて、突然変異率を0~1.0の間で変化させた場合の収束世代数を示す。ただし計算は200世代で打ち切り、その時点で収束していない場合には、収束世代数を200で表している。収束世代数は突然変異率が0.05~0.25の間で、比較的低い値を示している。一方、交叉率については0の場合にやや収束が遅くなっているが、それ以外では大きな影響を示していない。

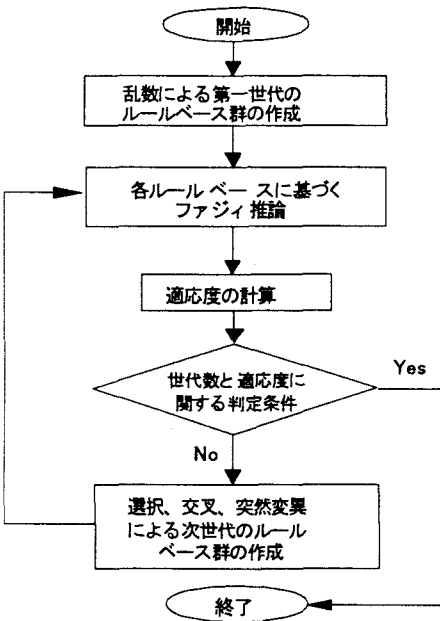


図-2 遺伝アルゴリズムの計算手順

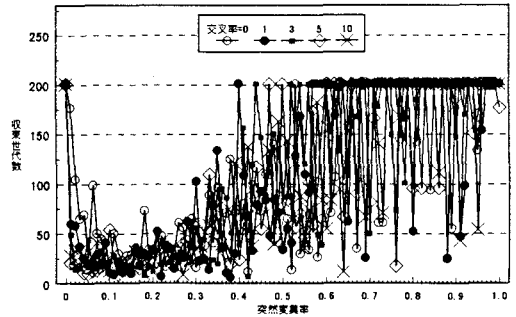


図-3 突然変異率および交叉率と収束世代数の関係

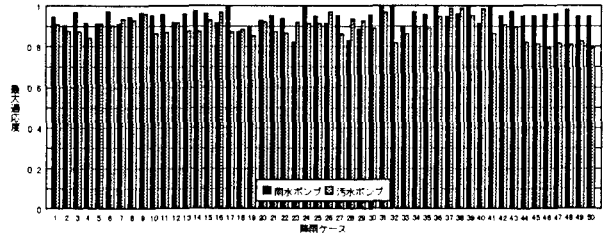
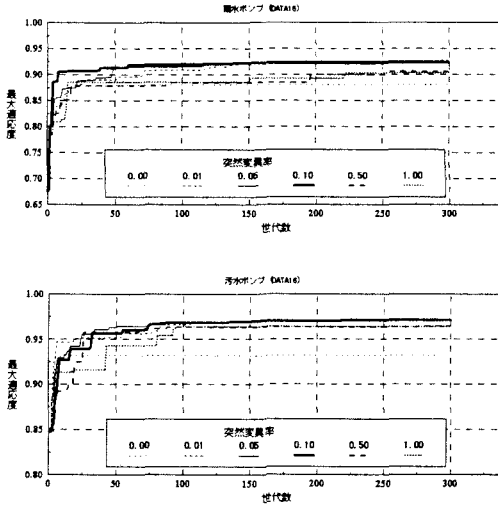


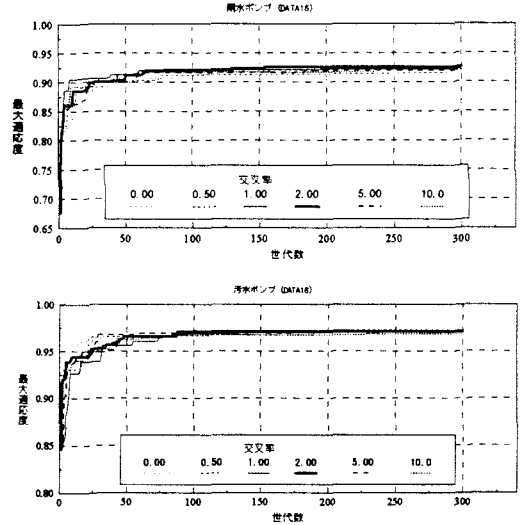
図-4 各降雨ケースに対する最大適応度(50世代)

5. 合流式下水道ポンプ場への適用結果

ポンプ場で収集した50ケースの降雨データを用いて学習させた結果を図-4に示す。この計算では入力変数として、降雨強度、下水管水位、放流先河川水位を用い、個体群の個体数(ルールベース数)は50、各ルールベースのルール数は20としている。各降雨ケースによりバラツキはあるものの、50世代までの計算で適応度は平均で0.9程度となっている。つぎに降雨ケース16について、適応度の向上に対する突然変異率の影響を300世代までの計算により調べた結果を図-5に示す(交叉率=1.0)。雨水・汚水ポンプいずれについても突然変異率が0.01~0.10の場合に比較的高い適応度を示し、それより小さくても大きくても到達した適応度は低い値となっている。とくに突然変異率が0の場合、より細かい多様化が生じないので適応度の向上に限られる。交叉率を変化させた同様の計算結果を図-6に示す(突然変異率=0.1)。交叉率によって収束の過程はやや異なるが、最終的な到達適応度にはそれほど大きな差はみられない。交叉によってルールベース間でいくつかのルールをパッケージにした形で入れ替えが生じるのに対し、突然変異の場合は各ルールの内



図－５ 収束に対する突然変異率の影響



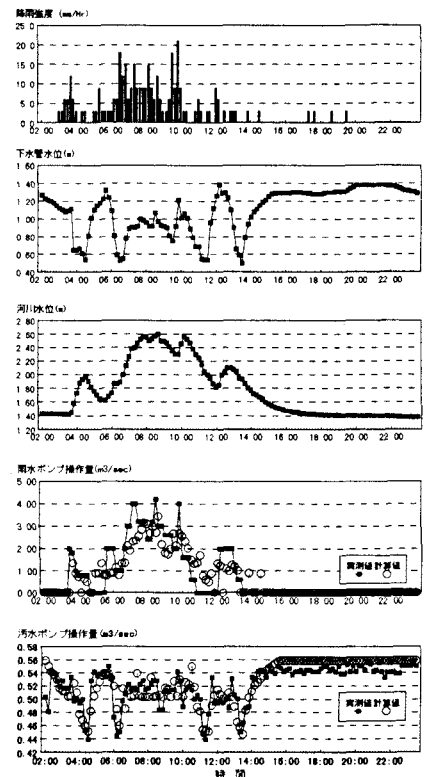
図－６ 収束に対する交叉率の影響

部に変化を生じさせる。そのため交叉により生じる多様化よりも、突然変異により生じる多様化の方がきめが細くなる。そのため最終的な適応度に対しては、突然変異の方が交叉よりも支配的になっており、図－６では交叉率の影響がほとんど表れなかったと考えられる。一方、乱数系列の影響は比較的小さかった。

図－７、図－８に雨水・汚水ポンプの実測値とファジィ制御による計算値の比較を示す。入力変数は図に示すように降雨強度、下水管水位、放流先河川水位であり、遺伝アルゴリズムの突然変異率は0.1、交叉率は1.0、個体群のルールベース数は50、ルールベースのルール数は20である。

各入力変数のファジィ分割数は"11"を含めて8であるから、入力変数が3個のとき、すべての場合についてルールを作成すると全部で $8^3 = 512$ 個必要となる。本研究ではルール数を20個に限定したが、それでも図－７、図－８に示すように、雨水ポンプ・汚水ポンプともに基本的な特徴はかなりよく表現できている。このことから逆に、オペレータは必ずしも数多くのルールに従って操作しているのではなく、いくつかの基本的ルールを臨機応変に組み合わせながら、まさに補間機能を特徴の一つとするファジィ推論に似た方式で操作しているのではないかと推察できる。したがって、現場のオペレータの操作に近いルールを求める場合には、すべての入力空間に対するルールを用意する必要はなく、人間に扱える程度の限られた基本的ルールを見いだすことで十分に対応できると考える。

つぎに、ルールとして可能な形は $8^4 = 4096$ 通りあり、そこから20個を選んでルールベースを構成する場合、組み合わせとして可能なルールベースの種類は $4096C_{20} \div 6.9 \times 10^{53}$ 通りとなる。これだけの探索空間の中から、およそ $10^3 \sim 10^4$ 種類のルールベースについての計算で上述の結果が得られるのであるから、遺伝アルゴリズムの効率のよさを確認することができる。



図－７ 雨水・汚水ポンプの実測値と計算値の比較 (1)

なお、実測値と計算値の差違については、次のような原因が考えられる。入力変数として降雨強度、下水管水位、放流先河川水位を用いているが、実際にはオペレータが経験や勘によって降雨を予測し、それに基づいて操作しているといったこともある。あるいはオペレータの個人差や熟練度の違いもあり、入力変数の値が同一の場合でも、操作量が異なることがある。さらにファジラベルの数やメンバーシップ関数を固定し、ルール数を20個に限定していることも、実測値と計算値の不一致の原因となりうる。

以上より、実測値と計算値に若干の差違が生じることは避けられないけれども、オペレータの基本的な操作、たとえば雨水ポンプの始動や停止といった点はほぼ一致しており、実際のオペレータに近い操作が遺伝アルゴリズムを適用したファジィ制御によって実現しうることが明らかになった。

なお、本研究は「大都市の水循環動態の分析に基づく水質保全に関する研究」（環境庁、瀬戸内海研究会議）の一部として実施された。ここに記して謝意を表す。

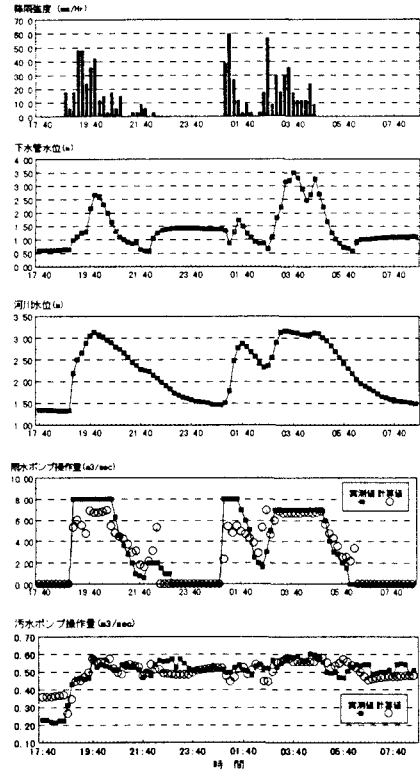


図-8 雨水・汚水ポンプの実測値と計算値の比較(2)

参考文献

- 1) 八木俊策、金子光美：「ファジィ理論を用いた合流式下水道のポンプ制御」、下水道協会誌、第26巻303号、pp.71-80、1989.
- 2) Yagi, S.: "Application of Fuzzy Set Theory to the Computer Aided Control of Pumps in Combined Sewer Systems," Proc. 5th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, pp.1269-1274, 1990.
- 3) Yagi, S.: "Fuzzy Control of Pumps in a Combined Sewer System and Its Effects on Flood and Pollution Management," Environmental Hydraulics, J. H. Lee & Y. K. Cheung (eds), pp.1443-1448, Balkema, 1991.
- 4) 八木俊策：「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」、第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.837-840、1996.
- 5) Zadeh, L. A.: "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics SMC3(1), January, pp.28-44, 1973.
- 6) 寺野寿郎他：応用ファジィシステム入門、オーム社 1989.
- 7) Mamdani, E. H.: "Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant," In Proc. IEE 121, No.12, pp.1585-1588, 1974.
- 8) Sugeno, M.(ed.): "Industrial Applications of Fuzzy Control," North-Holland, 1985.
- 9) Davis, L. (ed.): "Handbook of Genetic Algorithms," Van Nostrand Reinhold 1990, 嘉数他(訳)：「遺伝アルゴリズムハンドブック」森北出版 1994.
- 10) Karr, C.L.: "Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller Using a Genetic Algorithm," Proc. of the 4th International Conference on Genetic Algorithms, pp.450-457, 1991.
- 11) 米澤保雄：「遺伝的アルゴリズム」、森北出版 1993.
- 12) 中西祥一郎：「遺伝アルゴリズムによるファジィ制御」、システム／制御／情報、Vol.38, No.11, pp.613-618, 1994.