

遺伝アルゴリズムとファジィ制御を用いた 合流式下水道ポンプ操作の高度化

ADVANCED PUMP OPERATION IN COMBINED SEWER SYSTEMS USING GENETIC ALGORITHMS AND FUZZY CONTROL

八木俊策¹・芝 定孝²
Shunsaku YAGI and Sadataka SHIBA

¹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)

²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)

In the present study, fuzzy logic control and genetic algorithms are applied to achieve advanced pump operation in combined sewer systems. Pumping rates are determined by fuzzy inference and fuzzy control rules corresponding to input variables. Genetic algorithms are used to automatically improve the fuzzy control rules through the genetic procedures of selection, crossover, and mutation. The effects of different fitness functions and learning conditions are investigated using a stormwater runoff model.

Conclusively, it is found that current pump operation can be improved by adding sewer water quality to the input variables and the fitness function; the improved operation can reduce not only floods in the drainage area but also pollutant loads discharged to the receiving waters.

Key Words : fuzzy control, genetic algorithms, evolutionary computation, pump operation
combined sewer overflows, stormwater drainage

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、現場のオペレータに対する支援システムの必要性が高まっている。一方、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、試行錯誤的にファジィ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、さらに入力変数や制御目的が増すにつれ、ルールの作成や更新は極めて困難になってくるという問題があった。

そこで本研究では、遺伝アルゴリズムによってファジィ制御ルールを自動的に求める方法^{4) 5) 6)}を適用して、合流式下水道ポンプ場における雨水・汚水ポンプ操作の高度化について検討した。

2. 雨水汚濁流出システムとポンプ場の概要

雨天時における合流式下水道ポンプ場の役割は、図-1に示すように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超えたり、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

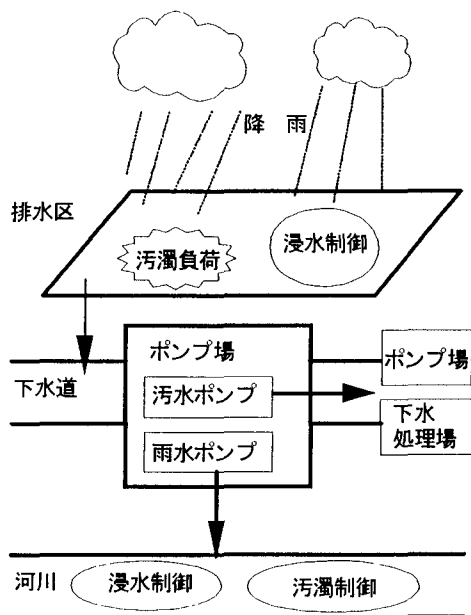


図-1 雨水汚濁流出システムとポンプ場

雨強度、下水管水位、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、ポンプ操作量を決定している。

本研究ではポンプ場におけるオペレータの操作をファジィ制御でモデル化し、また雨水汚濁流出システムについては、大阪府下の合流式下水道排水区を対象として作成されたものを用いた¹⁾。

3. 雨水・汚水ポンプのファジィ制御

Zadehのファジィ集合⁷⁾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⁸⁾⁹⁾。ここで取り扱っている雨水汚濁流出システムにおけるポンプ操作もそのような問題に含まれると考える。

(1) 入出力変数とメンバーシップ関数

入力変数は下水管水位（ゲート前水位）、降雨強

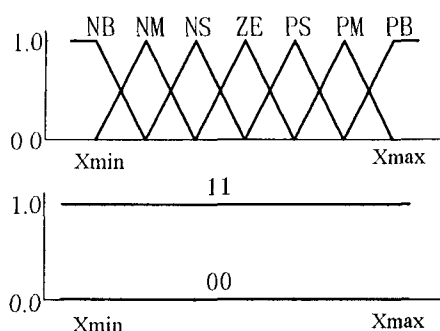


図-2 ファジィラベルとメンバーシップ関数

度、放流先河川水位、下水水質であり、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。本研究ではファジィラベルとしてNB、NM、NS、ZE、PS、PM、PBおよび11、00の9個を用いた。これらのメンバーシップ関数を図-2に示す。Xmin、Xmaxはそれぞれ各変数の最小値および最大値である。ここでは、降雨強度（0～50mm/hr）、下水管水位（0.5～5.0m）、河川水位（0～3.0m）、下水水質（0～200g/m³）としている。ラベル11はメンバーシップ値が常に1であり、ラベル00は常に0の値を持つ。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。

(2) ファジィ制御ルール

「もし下水管水位（X1）が高く、かつ降雨強度（X2）が最大レベルのときには、ポンプ操作量（Y）を最大にする」とか「もし下水管水位が低く、かつ雨が止んだときには、ポンプを止める」・・・といった言語的表現は、ファジィ制御ルールとして、次のように表される。

IF $X1 = PB$ $X2 = PB$ THEN $Y = PB$
IF $X1 = NB$ $X2 = NB$ THEN $Y = NB$

.....

(3) ファジィ推論法

ファジィ推論にはMin-Max一重心法を用いた、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(grade)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⁹⁾。

4. 遺伝アルゴリズムによるファジィ制御ルールの自動生成

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^{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。

(1) ファジィ制御ルールの遺伝子表現

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、

- 1: *IF* $X1 = PB$ $X2 = PM$... *THEN* $Y = PB$
- 2: *IF* $X1 = NB$ $X2 = NS$... *THEN* $Y = NB$
-
- N : *IF* $X1 = ZE$ $X2 = PS$... *THEN* $Y = ZE$

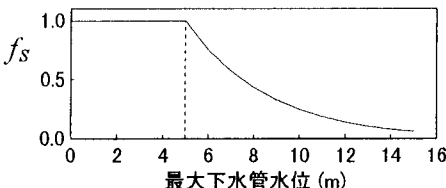
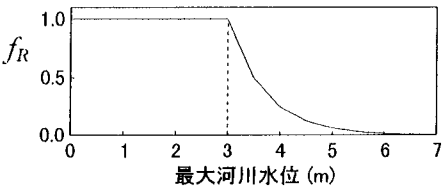
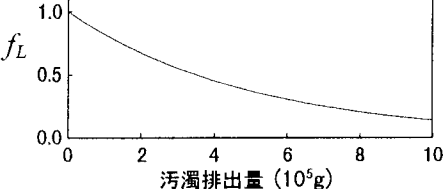
このルールベースの遺伝子列を次のように表現する．

$$R_A : \begin{matrix} (PB, PM, ..., PB) & (NB, NS, ..., NB) & ... \\ A_1 & A_2 & ... \\ (ZE, PS, ..., ZE) \\ A_N \end{matrix}$$

(2) 適応度

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、現行型と改良型それぞれのポンプ操作について表－1に示すように与え

表－1 入力変数と適応度 (現行型・改良型)

	現行型	改良型				
入力変数	降雨強度 下水管水位 河川水位	降雨強度 下水管水位 河川水位 下水水質				
適応度 f	$f = \alpha \cdot f_s + \beta \cdot f_R + \gamma \cdot f_L$					
	α	β	γ	α	β	γ
	0.5	0.5	0.0	0.5	0.2	0.3
	  					

ている．すなわち現行型のポンプ操作では、ある降雨に対して最大下水管水位が5 m以下、最大河川水位が3 m以下になるように操作された場合、適応度が最大値1.0となるように定めている．一方、改良型の場合、さらに適応度に汚濁排出量を加えているので、単に下水管水位や河川水位だけでなく、雨水ポンプによる汚濁排出量を低下させるような操作でなければ適応度を高めることはできない．

ただし、ここでいう現行型というのは必ずしも現場の熟練オペレータの操作を意味しているのではない．すなわち、現行のポンプ場において、通常、計測されている入力情報にもとづく操作を現行型としている．実際、熟練オペレータはこれらの情報以外にも、たとえば経験や勘にもとづく降雨予測や初期汚濁を考慮している．

(3) 遺伝オペレーション

a) 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を選択確率として、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 (ルールベース) 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．

b) 交叉

2つの個体の遺伝子列を確率的に決定される位置で切断し、相互に入れ替えて新たな遺伝子列を作る操作である．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番目のルールの間交叉位置がある場合、次のようになる．

$$R_A : A_1 A_2 | A_3 A_4 \dots A_N$$

$$R_B : B_1 B_2 | B_3 B_4 \dots B_N$$

⇓ 1点交叉 ⇓

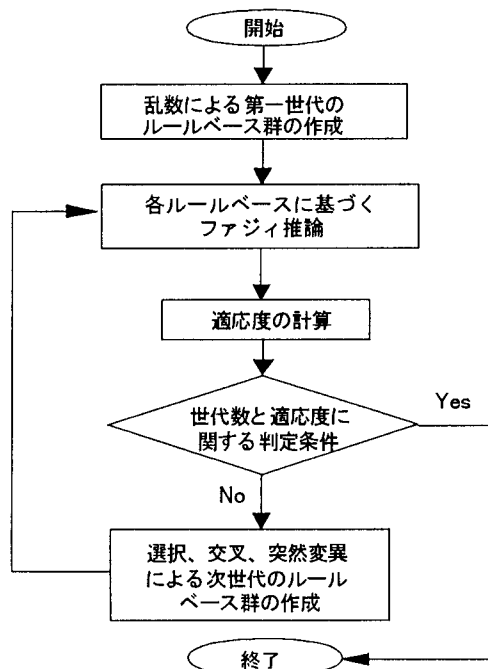
$$R'_A : A_1 A_2 B_3 B_4 \dots B_N$$

$$R'_B : B_1 B_2 A_3 A_4 \dots A_N$$

ある個体 (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．本研究では1.0としている．

c) 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．本研究では0.1とした．



図－3 遺伝アルゴリズムによる計算手順

(4) 遺伝アルゴリズムによる計算手順

遺伝アルゴリズムを用いてファジィ制御ルールを計算する手順を図－3に示す。まず乱数によって第1世代の個体群、すなわちファジィルールベース群を作成する。つぎにある降雨パターンに対して、雨水汚濁流出モデルを用いて、各ルールベースにもとづくポンプ操作を行い、最大下水管水位、最大河川水位、汚濁排出量などを求める（参：図－6）。その操作結果に対する適応度を表－1の方法で計算する。もし適応度が1.0になるか、または世代数があらかじめ設定した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、再び同様の計算を繰り返す。

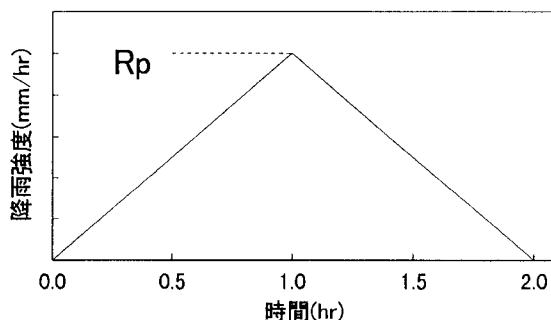
5. 合流式下水道ポンプ操作の高度化

ここでは上述の方法を用いて、表－1に示した現行型・改良型の比較を行い、雨水・汚水ポンプのより高度な操作が可能になることを示す。

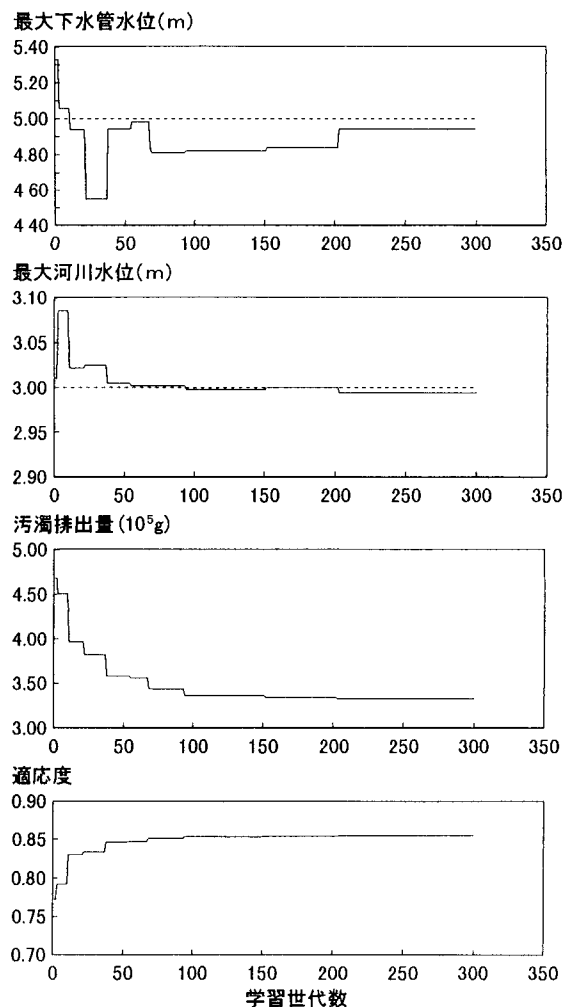
(1) ファジィ制御ルールの学習過程とその結果

本研究で用いた降雨パターンを図－4に示す。降雨継続時間を2時間とし、最大降雨強度 R_p を10mm/hr～40mm/hrとして与えた。

$R_p=30\text{mm/hr}$ に対する学習過程を図－5に示す。学習が進むにつれて、最大下水管水位は5m以下、最大河川水位は3m以下という条件を満たしつつ、汚濁排出量が次第に減少していることがわかる。この



図－4 計算に用いた降雨パターン



図－5 学習過程の一例 ($R_p=30\text{mm/hr}$)

例の場合、学習世代数が200を超えてからはそれほど顕著な適応度の上昇はみられないので、300世代で計算を打ち切った。

つぎに上記の学習によりえられた制御ルールによるポンプ操作結果を図－6に示す。降雨初期の高濃度下水は汚水ポンプにより、つぎのポンプ場または下水処理場に送られている。そして下水水質がやや低下し、下水管水位が上昇して1mを少し超えた段階で、雨水ポンプが稼働し始めている。この場合、汚水ポンプは最大能力 ($0.67\text{m}^3/\text{sec}$) で稼働してい

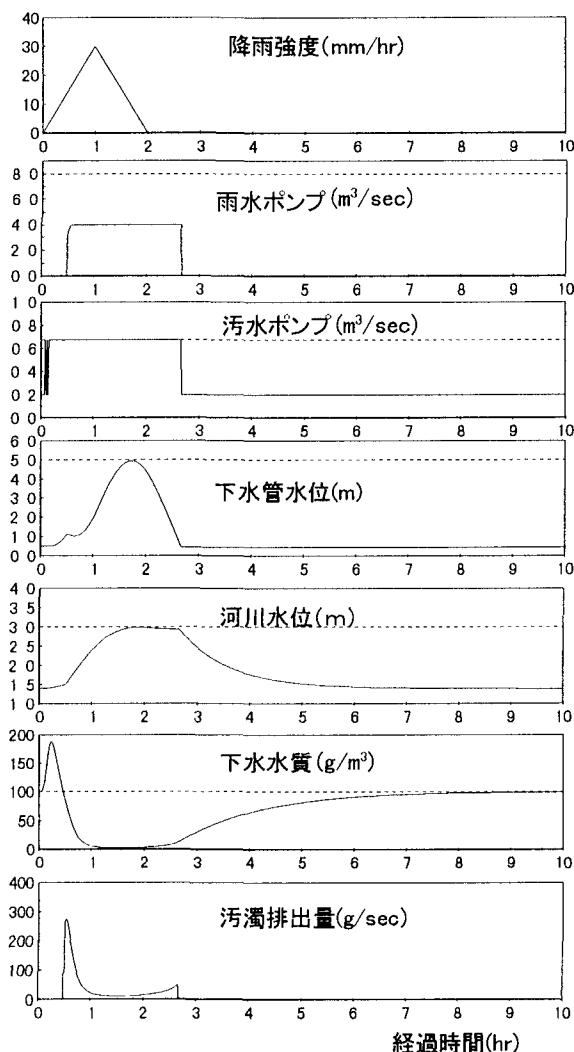


図-6 ポンプ操作結果の一例 (学習世代数=300)

るのに対し、雨水ポンプは最大能力 ($8\text{m}^3/\text{sec}$) の半分程度となっている。これはできるだけ雨水ポンプによる汚濁排出を減少させるという目的にかなった操作となっている。

一方、ある程度の時間経過の後には、下水水質が低下しているので、下水管水位が 1m 以下であっても、雨水ポンプによる排除が行われている。そして雨水流入が終了して下水管水位が低下してくると雨水ポンプは停止し、汚水流入量に相当する流量が汚水ポンプにより排出されて定常状態となる。

このような雨水・汚水ポンプの操作方法は、現場の監督者やオペレータへのヒアリング結果によく似ている。実際には下水水質は常時計測されていないのでポンプ操作時に参照することはできないが、初期汚濁を経験的に考慮しているためと推察できる。このような熟練オペレータの操作方法に近い制御ルールが遺伝アルゴリズムで求められた点は注目に値すると考える。

(2) 学習結果の汎用性

ある降雨条件で学習した制御ルールがそれ以外の

降雨に対して、どの程度の汎用性をもつかについて検討した結果を表-2に適応度で示している。たとえば $R_p=10\text{mm/hr}$ という学習条件 (300世代) で得られた制御ルールを $R_p=15, 20, \dots, 40\text{mm/hr}$ という評価条件に対して用いた場合、その適応度はそれぞれ、 $0.82, 0.67, \dots, 0.51$ となり、それらの平均適応度が 0.67 であったことを示している。学習条件 $10 \sim 40\text{mm/hr}$ を比較してみれば、より強い降雨による学習結果のほうが平均適応度は高くなっていることがわかる。

一方、学習条件として複数の降雨、すなわち最大降雨強度 $R_p=10, 20, 30, 40\text{mm/hr}$ を用いた場合も示してある。この結果から明らかなように、単一の降雨パターンによる学習よりも複数の降雨による学習結果のほうが、汎用性はより高くなる。もちろんこの結果はある程度、定性的に予測できることでもあるが、実用に際してはより広範囲の条件下で学習させることが必要といえる。

なお表中のイタリック表示は学習条件と評価条件が同じ場合を示している。

表-2 学習条件と学習結果の汎用性

最大降雨強度 R_p (mm/hr)		学習条件				
		10	20	30	40	10, 20, 30, 40
評価条件	10	<i>1.00</i>	1.00	0.84	0.87	<i>1.00</i>
	15	0.82	0.95	0.87	0.86	0.87
	20	0.67	<i>0.92</i>	0.86	0.79	<i>0.90</i>
	25	0.59	0.76	0.86	0.85	0.88
	30	0.54	0.55	<i>0.85</i>	0.78	<i>0.86</i>
	35	0.52	0.45	0.64	0.70	0.71
	40	0.51	0.40	0.56	<i>0.74</i>	<i>0.71</i>
平均適応度		0.67	0.72	0.79	0.80	0.85

(3) ポンプ操作の高度化

表-1に示すように降雨強度・下水管水位・河川水位を入力情報として浸水制御を目的とした操作を現行型とし、それに下水水質を加え、さらに汚濁制御をも考慮した操作を改良型として、両者を比較検討した。ここでは学習条件として最大降雨強度 $R_p=10, 20, 30, 40\text{mm/hr}$ という複数の降雨パターンを用い、300世代までの学習を行った。その結果を図-7に示す。

最大降雨強度 R_p が 30mm/hr 以下の場合、現行型・改良型いずれも最大下水管水位は 5m 以下、最大河

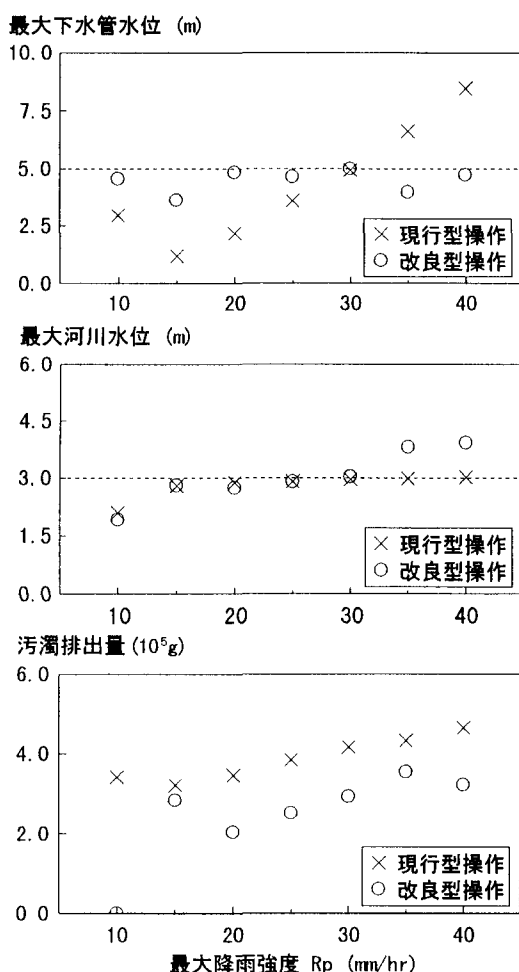


図-7 現行型・改良型操作の比較

川水位は3 m以下という条件を満たしている。しかし、汚濁排出量については改良型操作の方が少なくなっている。これは図-6の例からもわかるように、雨水ポンプを抑制して降雨初期の高濃度下水を下水管内にできるだけ貯留し、汚水ポンプを最大にして排除しているためである。

一方、Rpが30mm/hrを超える場合についても、最大下水管水位と汚濁排出量に関しては改良型の方が優れている。改良型で最大河川水位がやや高くなっている理由の一つは、適応度に含まれる最大河川水位の重み係数(表-1: $\beta=0.2$)が他の因子よりも小さいので、河川水位を低下させるルールが強化されなかったためと考えられる。しかし、それ以外にも学習世代数、乱数系列等の影響もありうるので、今後さらに検討が必要である。

以上の結果より、入力情報に下水水質を加え、適応度に汚濁排出量を加えて学習した制御ルールによる改良型操作によって、より高度な雨水・汚水ポンプ操作が可能となることがわかる。

6. 結論

本研究では合流式下水道ポンプ場における雨水・汚水ポンプの操作にファジィ制御を適用し、その制

御ルールを遺伝アルゴリズムにより求める方法について検討した。その結論を要約すれば、つぎのようになる。

- 1) 選択・交叉・突然変異で構成された遺伝アルゴリズムにより、200~300世代の計算でほぼ妥当な制御ルールが自動的に作成できる。
- 2) 学習結果の汎用性に関しては、より強い降雨、より多様な降雨パターンを用いた方が汎用性は高くなる。
- 3) ポンプ操作のための入力情報として降雨強度、下水管水位、河川水位のみでなく、さらに下水水質を加えることにより、浸水制御と汚濁制御を同時に行う、より高度な操作が可能となる。

謝辞：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)の一部として実施された。ここに記して謝意を表す。

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) 八木俊策, 芝定孝: 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, 水工学論文集, No. 41, pp.167-172, 1997.
- 6) 八木俊策, 倉敷三樹男: 遺伝アルゴリズムとファジィ理論を用いた合流式下水道ポンプ操作手法の開発, 下水道協会誌論文集, Vol.34, No.413, pp.84-96, 1997.
- 7) 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.
- 8) Sugeno, M.(ed.): *Industrial Applications of Fuzzy Control*, North-Holland, 1985.
- 9) 寺野寿郎他編: 応用ファジィシステム入門, オーム社, 1989.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 米澤保雄: 遺伝的アルゴリズム, 森北出版, 1993.

(1997. 9. 30受付)