

流入量予測に基づく汚水及び雨水ポンプの最適制御

Optimal Control of Sewage and Rain Pumps Based on Influent Flow Prediction

流入量変動が大きい合流式下水道の汚水・雨水ポンプを合理的に運転するため、次の二つのモデルを開発した。(1)流入量予測モデル：降雨量と過去の流入量とから1時間先までの流入量を重回帰分析手法に基づき推定する。(2)準最適ポンプ運転スケジュール決定モデル：予測流入量、ポンプ井上下限水位及び管内貯溜量から定まる帯状領域を通り、切換頻度や消費電力量の少ないポンプ運転曲線を求める。これらのモデルをフィールドにおける1年分のデータに基づき検証した。流入量予測では平均絶対誤差を管渠容量の数パーセントと小さくでき、また、ポンプ運転では切換頻度を人間による実運転の場合の数分の一にできることが分かった。これにより、ポンプ運転の効率向上と自動化に一步近づいたと言える。

加藤修嗣* Kaiō Shūji
 塩谷 真** Shioya Makoto
 白石敦子** Shiraiishi Atsuko
 柏木雅彦*** Kashiwagi Masahiko
 尾崎正道**** Ozaki Masamichi

1 緒 言

日本の多くの都市では、汚水と雨水を同じ管渠に流す合流式下水道を採用している。そのため、ポンプ場への流入量は、降雨時と非降雨時とでは数倍も異なる¹⁾。降雨時の流入量は短時間に大幅に変化するが、管渠の容量は、豪雨時に雨水を何時間分も溜められるほど大きくないため、流入した分だけ汲み上げなければ管渠から路上やポンプ場内へ溢水することになる。逆に、雨が止んで流入が減った時にはそれに応じて揚水量を減らさなければ、ポンプが空気を吸入することになり好ましくない。

溢水や空気吸入のない雨水ポンプの始動・停止をするのに、従来は、運転員の豊富な経験と勘に頼っていた。運転員はポンプ井水位の動きを観察して始動・停止するといったフィード・バック的操作だけでなく、雨量や過去の流入量などから今後の流入量を予測して始動・停止するフィード・フォワード的操作をする(図1)。

晴天時には流入量や水質は季節や曜日ごとにほぼ決まったパターンの日内時間変動をする¹⁾。この変動は、処理場に対する負荷変動に相当し、処理効率を下げる原因となる。また、水量変動が激しいとポンプやその制御用機器の始動・停止頻度が高まり、短寿命化につながるるとともに、むだなエネルギーを消費することもある。

処理効率を高め、かつ消費エネルギーの少ない経済的なポンプ運転をするために、管渠の貯溜可能容量を利用して負荷を平滑化することが考えられる²⁾。この時、流入量の日内変動が予測できればポンプの運転を決めやすくなる。

以上述べたように、ポンプの運転にはいろいろな評価基準が考えられるが、それらをまとめて表1に示す。

このように、下水道では、降雨時・晴天時を問わず、流入量の把握とポンプの最適な運転の決定が重要である。そこで、(1)ポンプ場への流入量予測モデル³⁾と、(2)準最適ポンプ運転スケジュール決定モデル⁴⁾を開発した。予測に関しては、降雨時用に限定して述べる。晴天時に比べると、流入量変化の仕方が多様なため予測する価値が高いからである。晴天時の予測は、その主目的が負荷平滑化であることも考えると、基本的には日内時間変化パターンの抽出に帰せられる。これに

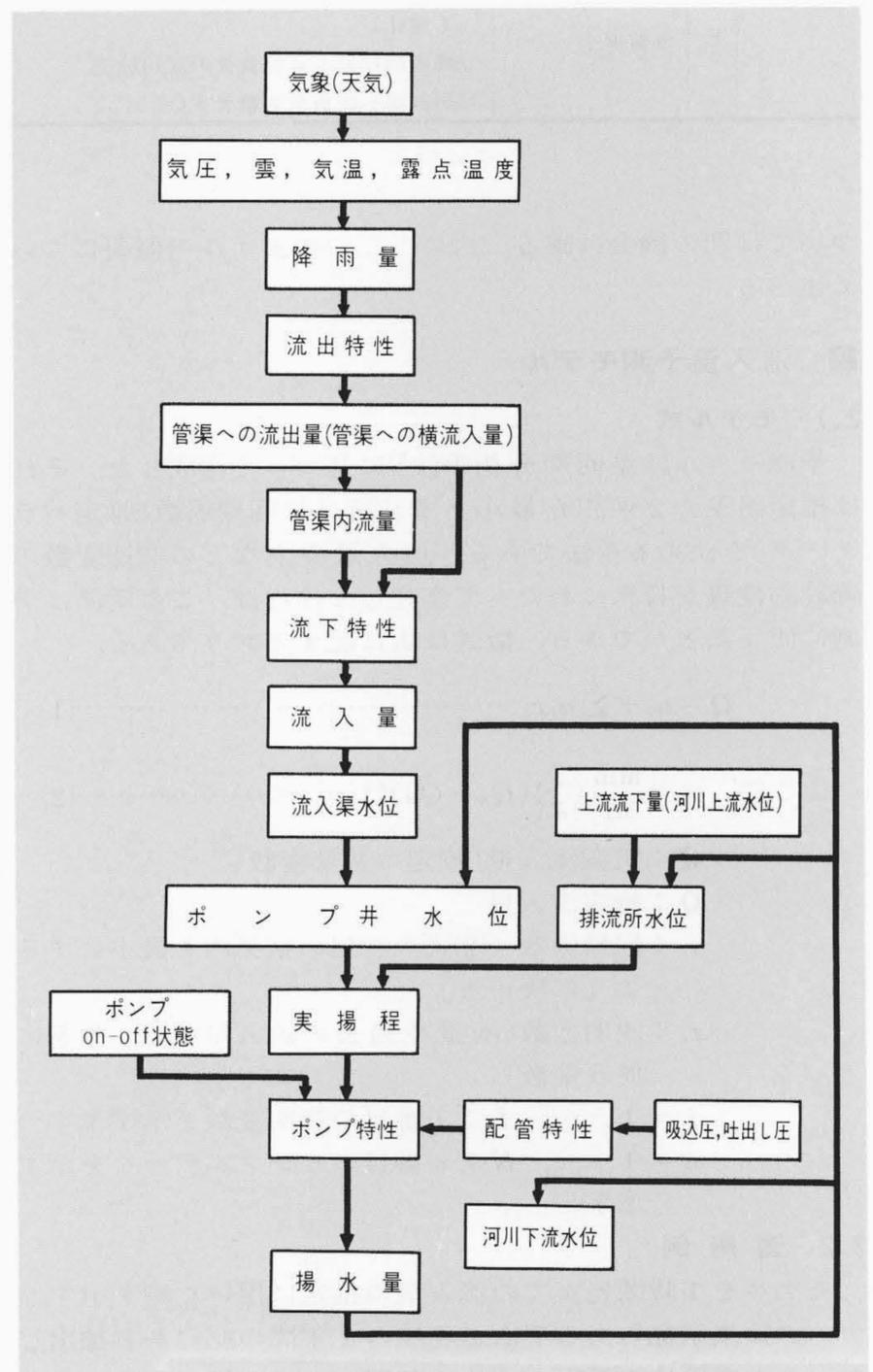


図1 ポンプの始動・停止を決める要因とそれらの因果関係 始動・停止は、ポンプ井水位の動きを観察しフィード・バック的に行なうだけでなく、雨量や過去の流入量などから今後の流入量を予測してフィード・フォワード的に行なう。

* 東京都下水道局整備拡充部電機設計課 ** 日立製作所システム開発研究所 *** 日立製作所大みか工場 **** 日立製作所システム技術本部

表1 ポンプ運転方法の評価基準 評価基準には溢水防止など、制約条件的なもの、機器長寿命化など、重要度で順位付けのできる、いわゆる評価基準とがある。

大項目	目的・理由	内容
制約条件	1. 溢水防止	(1)路上浸水, 共同溝浸水(ポンプ所外) (2)沈砂池床上冠水(ポンプ所内)
	2. ポンプ故障防止	(3)ポンプ井水位異常低下→空気吸込
	3. ポンプ始動不能防止	(4)同時始動時の時間間隔の短すぎ→母線バンク
評価基準	4. 機器長寿命化	(5)特定ポンプの始動・停止頻度大 } ローテーションルール不良 (6)特定ポンプの運転時間大 } (7)再始動までの時間間隔短い。
	5. 運転員の時間的余裕	(8)始動までの時間的余裕少ない。 } 始動・停止水位水位設定幅, その他運転ルールの不良 (9)停止までの時間的余裕少ない。 }
	6. 経済性の向上	(10)不必要な運転により運転コスト寿命を悪化させる(管内貯溜などを考慮しない)。
	7. 水質保全	(11)流速低下による管内沈降堆積(管渠特性も変化) (12)降雨時初期汚染質負荷の河川放流 (13)処理場への負荷変動大きい。

については別の機会に譲る。次に、二つのモデルの概要について述べる。

2 流入量予測モデル

2.1 モデル式

予測モデルは重回帰分析手法⁵⁾に基づいて作成した。それは推定誤差の2乗和が最小となるように回帰係数(推定パラメータ)を決める手法である。流入量や雨などの関連変数の統計的性質が将来にわたって変化しなければ、この手法は予測に使うことができる。数式は次に記すとおりである。

$$\hat{Q} = a_0 + \sum_{i=1}^I a_i x_i \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{ここに } a_i = \min_{a_i} \left(\sum_{n=1}^N (Q_n - \hat{Q}_n)^2 \right) \dots\dots\dots(2)$$

- Q : 実測流入量(推定の基準変数)
- \hat{Q} : 推定流入量
- a_i : 回帰係数 [(2)式の右辺の括弧内を最小にするように決める]
- x_i : 説明変数(雨量や過去の流入量など、推定に使う変数)
- $i = 1, \dots, I$: i 番目の説明変数を示す添字
- $n = 1, \dots, N$: n 番目のサンプルデータを示す添字

2.2 適用例

モデルを1時間先までの流入量の推定に用いた例を示す。データは東京都のある下水処理場の1年間の記録から抽出した。入力変数は(1)管渠の寸法や配置とポンプ吸水井水位から算出した管渠内貯溜量, (2)ポンプ揚水量, それに, (3)1観測点の雨量である。管渠内に流量計を設置していないため、回帰係数算出時に使う流入量データは図2に示す流れ図に従って計算した。

推定の基準変数と説明変数を表2に2ケース示す。両ケースとも流入量は雨量の1次又は2次関数の1次遅れまでを考

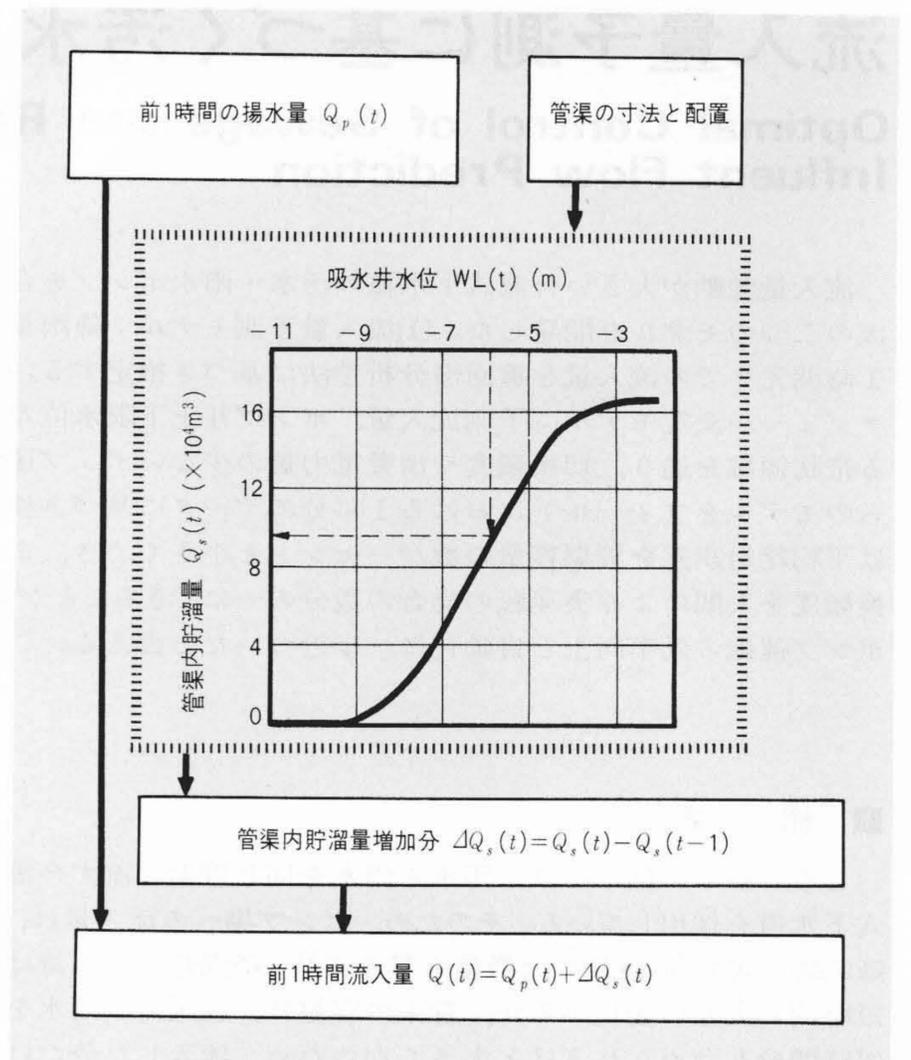


図2 流入量の計算方法 管渠内に流量計を設置していないため、回帰係数算出時に使う流入量データは、管渠の寸法や配置及び吸水井水位、揚水量から計算する。

表2 基準変数と説明変数 流入量の推定は、雨量の1次又は2次関数の1次遅れまでを考慮し、それを過去の流入量で滑らかに補正する方法をとった。

	ケース1		ケース2		Q(t)との相関係数	
	必要	不要	必要	不要		
基準変数	Q		Q(t)		1.00	
説明変数	X ₁		Q(t-1)		0.74	
	X ₂		Q(t-2)		0.63	
	X ₃		Q ² (t-1)		0.69	
	X ₄	R(t)				0.65
				R(t-1)		0.64
	X ₅			R(t-2)		0.56
X ₆	R ² (t)				0.50	
				R ² (t-1)	0.45	
データ					1,632時間(68日)	
	Q(t): 前1時間流入量					
	R(t): 前1時間雨量					

慮し、それを過去の流入量で滑らかに補正して算出する方法をとった。ケース1は、モデルを実際の予測に使用するとき、雨量の予測値が必要となる点でケース2と異なる。基準変数と説明変数間の相関係数も同表中に示す。

重相関係数及び各種の推定誤差を表3に示す。相対誤差の絶対値の平均は33%以下、標準偏差は1.73以下である。更に、

表3 重相関係数と推定の誤差 相対誤差の絶対値の平均は33%以下、標準偏差は1.73以下である。また、推定誤差の絶対値の平均は4,670m³以下である。

重相関係数	ケース1			ケース2		
	平均	分散	標準偏差	平均	分散	標準偏差
推定誤差 (×10 ³ m ³)	0.00	46.3×10 ³	6.80	0.00	60.9×10 ³	7.80
推定誤差 流入量	-0.15	1.74	1.32	-0.17	1.81	1.34
推定誤差 (×10 ³ m ³)	4.29	27.9×10 ³	5.28	4.67	39.1×10 ³	62.5
推定誤差 流入量	0.32	1.67	1.29	0.33	1.73	1.31

推定誤差の絶対値の平均は4,670m³以下であるが、これは管渠の貯溜容量(160,000m³)に比べて十分小さいと言える。

流入量の推定結果を図3にグラフで示す。ケース1の推定流入量はピークで実測値によく追従する。ケース2では雨の型によってはよく一致する場合もあるが、概して立上りやピークで約1時間の遅れを生ずる傾向にある。追従性を良くするには、例えば、データのサンプリング間隔を1時間から10分ぐらいに短くするとか、雨量測定点を管渠の十分上流に置くなどの方法が考えられる。

3 準最適ポンプ運転スケジュール決定モデル

3.1 モデルの機能

既に述べたように、ポンプは降雨時には溢水や空気吸入を起こさないように、晴天時には始動・停止頻度や消費エネルギーなどを小さくするように、最適な運転を行なうことが特に重要である。しかし、技術的な課題は、どちらの場合でも、ある制約条件下で評価関数を最適(最大・最小)にするポンプの始動・停止タイミングを決めること(スケジュール決定)である。本節では、この課題を揚水量がポンプの運転台数で変更される場合についてはほぼ解決したモデルについて述べる。そのモデルを解とアルゴリズムの性質から、準最適ルート探索システム〔Quasi-optimum Routing System(以下、QRS法と略す)〕と呼んでいる。

合流式下水道では、晴天時の流入量に比べて通常大きな管渠容量があるため、管渠をポンプ場への流入量の変動を吸収するバッファとして利用できる(図4参照)。QRS法は、管渠をバッファとし、かつ流入量が予測できることを前提とした上で、管渠内水位につけた制約条件を満たし、かつ始動・停止頻度や消費エネルギーなどの評価関数を小さくする運転スケジュールを決定する機能を持っている。

3.2 基本概念

ポンプ運転スケジュールとしては、管渠内水位が上下限内に収まるようにする必要がある。そのために、流入量とポン

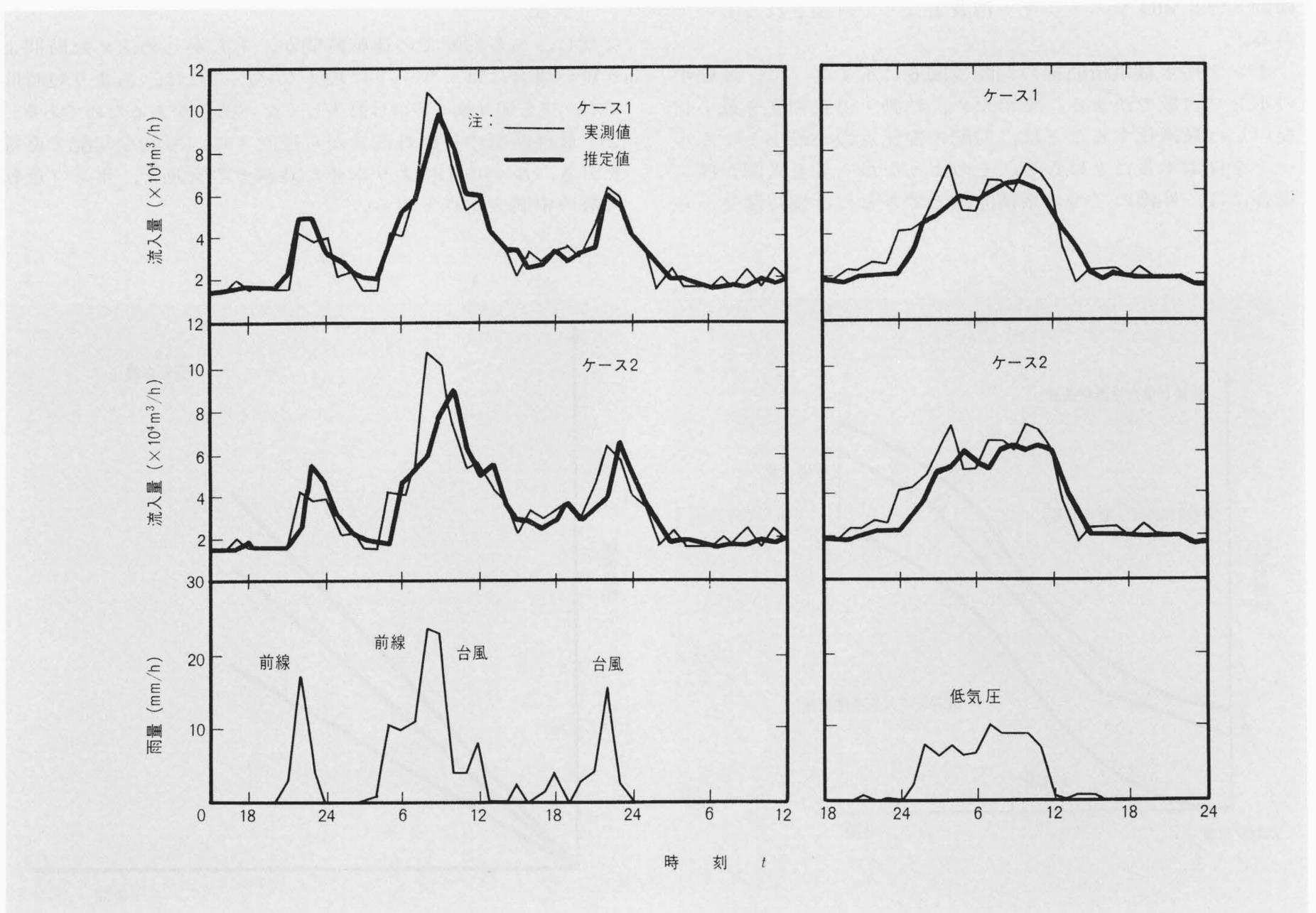


図3 流入量推定結果例 ケース1の推定流入量は、ピークで実測値によく追従する。ケース2では、約1時間の遅れを生ずる傾向にある。

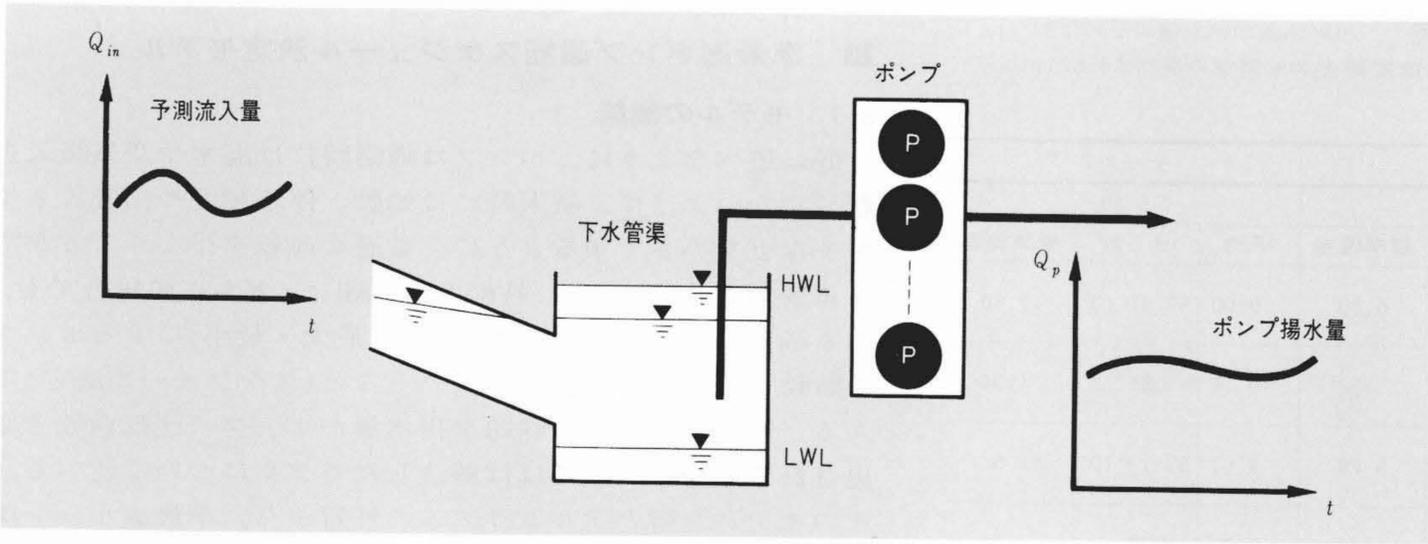


図4 下水道システム 大きな管渠をポンプ場への流入量の変動を吸収するバッファとして利用できる。

ポンプ揚水量の曲線を図5に示すように時間累積曲線の形で取り扱うと都合がよい⁶⁾。なぜならば任意の時刻での水位が貯溜量の形で図上から容易に読みとれるからである。貯溜量はポンプ揚水量累積曲線(曲線1)と流入量累積曲線に管渠容量を加えた曲線(曲線2)との差で表わされる。水位の上限と下限は、それぞれ流入量累積曲線(曲線3)と曲線2に相当する。水位に関するこれ以外の制約条件があれば、それらは上下限曲線を管渠容量からくる制約の範囲内で変形させることにより容易に考慮できる。流入量の予測誤差の影響も上下限曲線の間隔を狭くすることにより減らすことができる。こうして問題は、二つの累積曲線(曲線2, 3)の間を通る最適なルート(曲線1)を探索することになる。ここで言う最適性は始動・停止頻度やエネルギー消費量などで評価されるものである。

ポンプ揚水量累積曲線の勾配は図6に示すように、運転中のポンプ台数で決まる。そのため、始動・停止頻度を最小化ないしは最適化することは、勾配の変化点数が最小となるルートを探索することになる。そのようなルートを人間が探す場合には、外側の二つの累積曲線とできるだけ長時間交わら

ないような直線を引こうとするのが自然である。やむをえず交わった場合には、交わった点で勾配を変えて前と同様に直線を伸ばしていく。QRS法のルート探索アルゴリズムとしては、このようなヒューリスティックな方法を採用した。具体的には、次の三つのルールを適用する。

(1) ポンプ台数により規定される、すべての可能な勾配で、初期貯溜量の値より直線を引く。それぞれの直線が、外側の二つの累積曲線のどちらかと交差したら、その直前で勾配を変更する。こうして、次の条件が成り立つまでポンプ運転曲線のルートを次々と探索していく。

- 勾配変化点数が設定値を超える、又は、
- ルートが運転スケジュール計算期間の最終時刻まで到達する。

ただし、ある勾配での運転時間が、あらかじめ決めた時間より短い場合には、ルートに加えない。これは、あまり短時間でポンプを切り換えるのは好ましくない場合があるためである。

(2) 最終時刻の目標貯溜量から逆向きに、可能な勾配で直線を引き、ルール(1)により求めた直線との交点を、ポンプ運転台数の中間変化点とする。

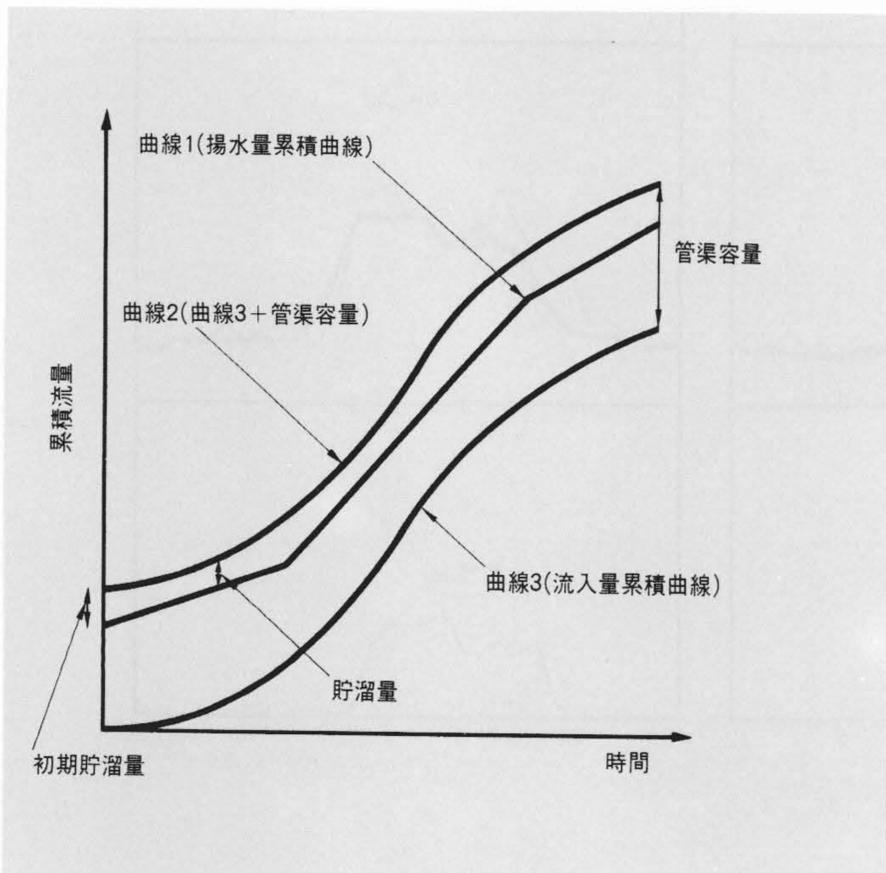


図5 QRS法の基本概念 流入量とポンプ揚水量の曲線を、時間累積曲線の形で取り扱う。

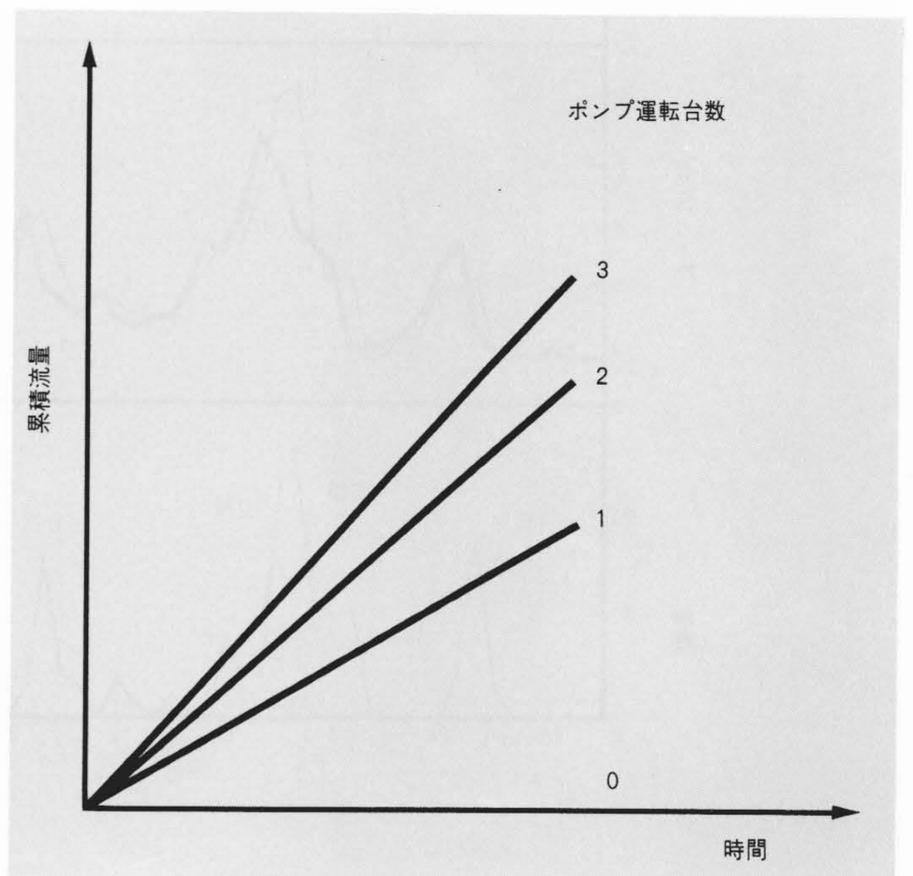


図6 ポンプの揚水特性 揚水量累積曲線の勾配は、ポンプの運転台数に依存する。

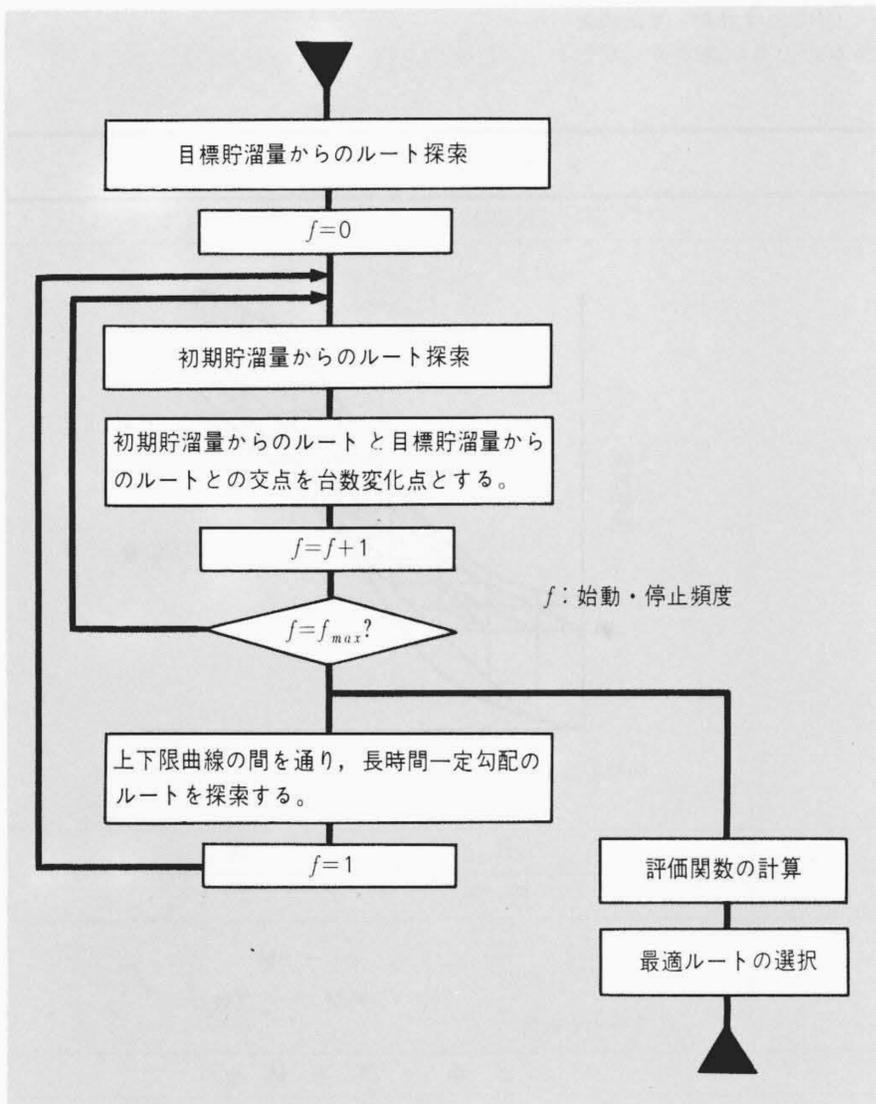


図7 QRS法の全体流れ図 ポンプの運転ルートを探した後、各ルートに対して評価関数を計算し、それを基に最適ルートを選択する。

(3) ポンプ運転の可能な勾配を持ち、外側の二つの累積曲線の間を通る、長時間一定勾配の直線もルートに加える。初期貯溜量からのルートとの交点が、中間変化点となる。

これらのルールにより探索したルートの中から、始動・停止頻度が一定以下の、ないしは低いほうから幾つかのルートを残しておく。

ルートが求まると評価関数を計算する。QRS法はポンプ運転に関するほとんどすべての形の評価関数を扱うことができる。例えば、

- (1) ポンプの延べ切換台数
- (2) エネルギー消費量
- (3) ポンプ揚水量の変化量
- (4) 特定のポンプの運転時間
- (5) 単位揚水量当たりのエネルギー消費量

などである。評価関数は始動・停止頻度が許容頻度内にあるすべてのルートについて計算する。評価関数が最小となるルートを選択し、それを問題の解とする。

以上に述べたQRS法の全体流れ図を図7に示す。

3.3 特徴

QRS法は準最適解を出す。それは最適化技法の代わりにヒューリスティックなアルゴリズムを採用したからである。そのため、理解しやすく、結果の修正も経験や勘を取り入れて容易にできる。また、ダイナミック・プログラミングを使って最適化する方法⁶⁾とも異なり、時間軸を離散化しなくて済むので、ポンプ始動・停止時刻を任意にとれる。更に、ほとんどの場合、始動・停止頻度が一定値以下という条件を付けるので記憶容量(大部分はルートの記憶に使う)も小さくて済む。QRS法では多くの準最適解が、図8に示すように計

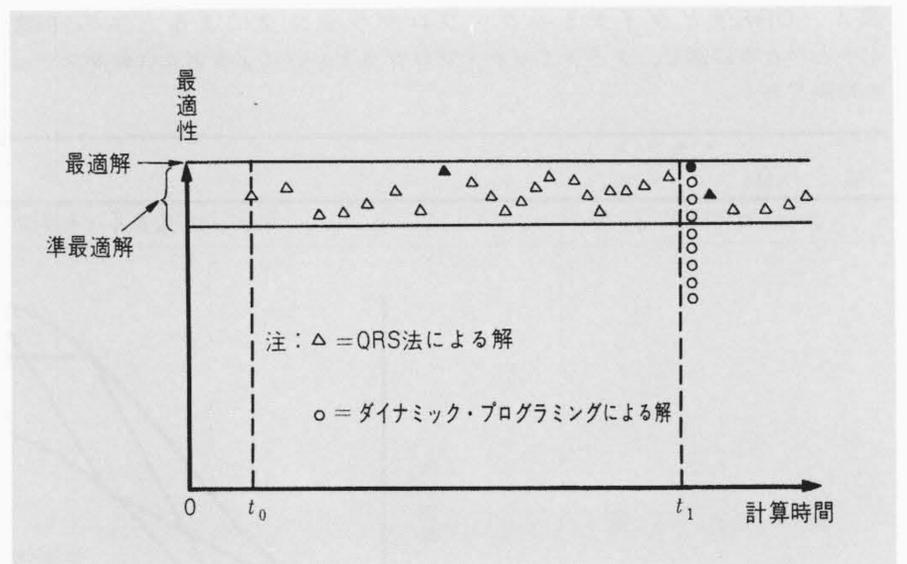


図8 QRS法とダイナミック・プログラミングによる方法の解の求まり方 ダイナミック・プログラミングによる方法では、一定計算時間経過後一度に最適解が求まるが、QRS法では準最適解が計算開始直後から次々と求まる。

算開始直後から次々と求まる。初めのほうで求まった解ほど、一般には始動・停止頻度が低い運転に対応する。このため、一つの解が求まったら計算をいつやめてもよい。更に、評価関数をルートが一つ求まるごとに算出し優れたルートだけを残すようにできるため、記憶容量や計算時間を大幅に減らすことができる。これらのことから、QRS法はミニコンピュータでも取り扱うことができ、実用的と言える。以上に述べた特徴を、ダイナミック・プログラミングを使う方法⁶⁾と比較して表4に示す。

3.4 適用例

QRS法を東京都のある下水処理場のポンプ運転スケジュール決定シミュレーションに適用した。所要記憶容量は0.6K語であった。結果の一例を人間による実運転の場合とともに図9に示す。始動・停止頻度はQRS法と実運転とで、それぞれ2回と13回であった。また、単位揚水量当たりのエネルギー消費量は両者でほぼ同じであった。

4 結 言

ポンプ所への流入量予測と経済的なポンプ運転スケジュール決定のための実用的なモデルをそれぞれ開発した。

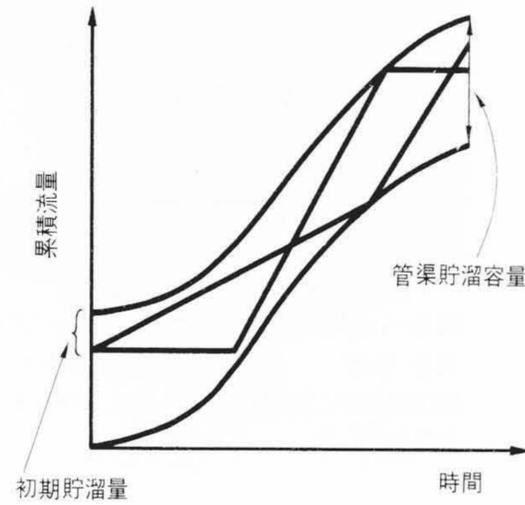
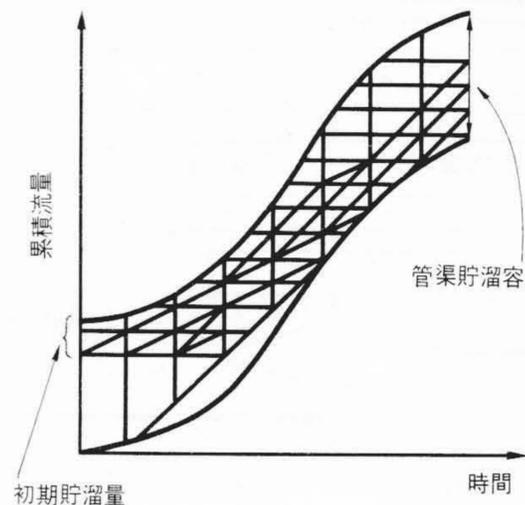
(1) 予測モデル

- (a) 重回帰分析に基づき、1時間先までの流入量を推定する。
- (b) 入力変数は、管渠内貯溜容量、ポンプ揚水量、1点観測降雨量である。
- (c) 実データによる検証例では、推定誤差の絶対値の平均が4,670m³以下で、管渠容量160,000m³に比べて十分小さい値を得た。

(2) 運転スケジュール決定モデル

- (a) 細長い領域を通り抜ける折線(ルート)を探索する段階と、最小の評価関数を与えるルートを選択する段階から成る。
- (b) 領域は流入量予測値と管渠貯溜可能容量で決まる二つの時間的累積曲線により規定される。
- (c) 予測誤差の影響や、その他の制約条件は領域の幅や形にしわ寄せすることによりある程度考慮できる。
- (d) 探索はヒューリスティックなアルゴリズムで行なうので、解は完全に最適ではないが記憶容量や計算時間が少なく済む。

表4 QRS法とダイナミック・プログラミングによる方法の特徴比較 QRS法は始動・停止頻度が小さいときに適し、ダイナミック・プログラミングによる方法は時間ステップ数が少ないときに適する、などの特徴がある。

項目	方法	Q R S 法	P D P 法
アルゴリズム		ヒューリスティック, 最長ルート探索	DP: 台数切換パターンにペナルティを与える。
説明図			
解の最適性		準最適	最適
台数変更時刻		任意	時間ステップごと
所要メモリと適用条件		N^f に比例 $f \rightarrow$ 小で適用 (N : ポンプ台数 f : 始動・停止頻度)	$T \cdot N^2$ に比例 $T \rightarrow$ 小で適用 (N : ポンプ台数 T : 時間ステップ数)
ポンプ特性の線形化		不要 \rightarrow 誤差発生せず	必要 \rightarrow 誤差発生
その他		途中で計算打ち切り可能	途中で計算打ち切り不可能

注: QRS法=Quasi-Optimum Routing System
PDP法=Penalized Dynamic Programming

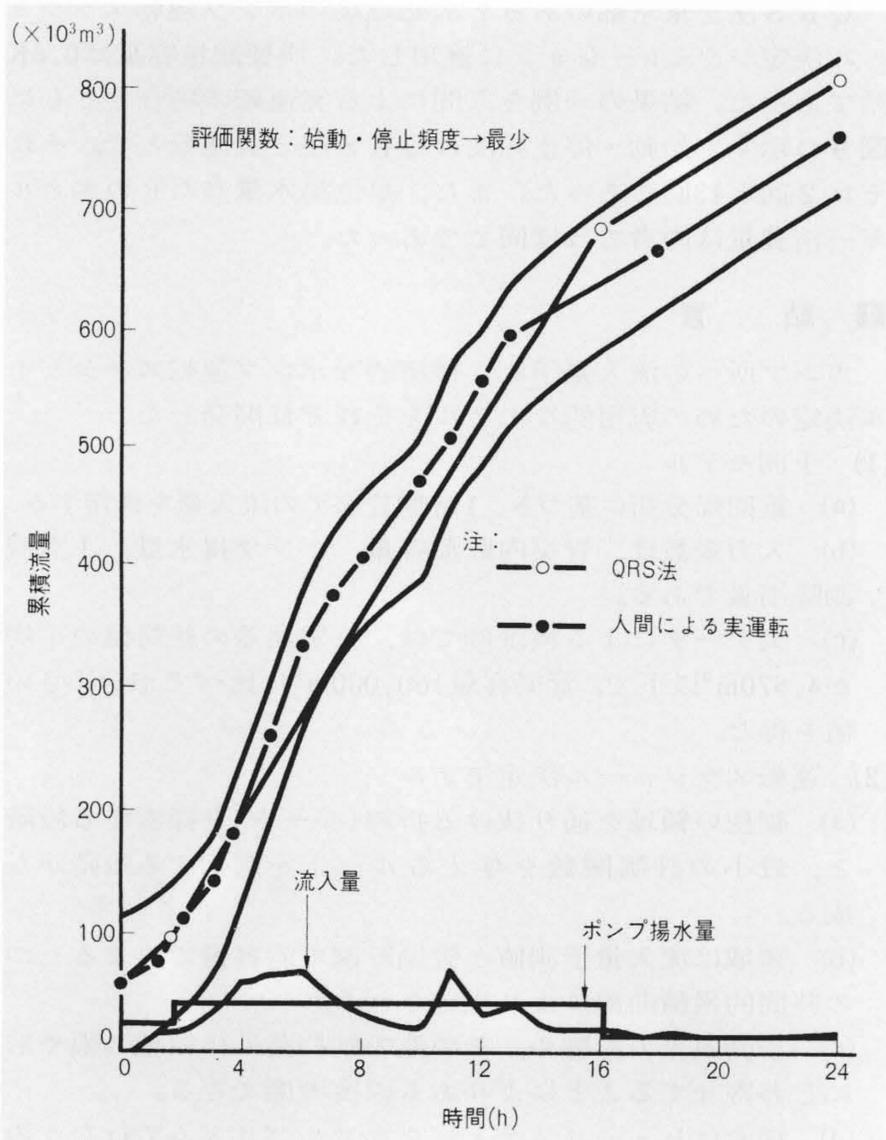


図9 QRS法の適用例 始動・停止頻度は、QRS法と人間による実運転とでは、それぞれ2回と13回であった。

(e) 評価関数としては、ポンプの始動・停止頻度やエネルギー消費量など、各種のものを単独であるいは組み合わせで採用できる。

(3) 両モデルの結合

ポンプ運転の効率を高め、また自動化するにはこれらのモデルを結合する。そのためには、流入量予測の精度とどれくらい先まで予測できればポンプ運転がうまくできるかの検討が更に必要である。管渠やポンプ井の容量、各ポンプの容量や始動・停止時の過渡特性、流入量の変化速度などを総合的に考慮して行なうことになるが、これは今後に残された課題である。

参考文献

- 1) 小出, ほか3名: 下水道システムの数式モデルとシミュレーション, 日立評論, 57, 113~118 (昭50-2)
下水流入量の変動の原因とその実例及び流入量予測の各種の方法を示している。
- 2) 松本, 塩谷: 上下水道の総合管理システム, 計測と制御, 16, 1, 57~63 (昭52-1)
- 3) 加藤, 塩谷, 田沼: 流入下水量の変動パターンの解析, 第12回下水道研究発表会講演集, 507~509 (昭50-4)
- 4) 大成, 塩谷, 白石: 流入量予測に基づくポンプの準最適運転台数決定方法, 第13回下水道研究発表会講演集, 536~538 (昭51-5)
- 5) 奥野, ほか3名: 多変量解析法, 日科技連 (1971)
- 6) 松本, ほか2名: ペナルティー付ダイナミックプログラミングの開発とポンプ台数制御を含む水系の最適配分計画への適用, 昭和50年電気学会全国大会, 2058~2059 (昭50)
ダイナミック・プログラミングによるポンプの運転台数決定方法について述べている。