

下水道維持管理の充実と知的制御システム

Intelligent Control System for Sewage/Wastewater Treatment Plants

下水道は汚水や雨水の排除・処理を行うことによって、生活環境の改善、公共用水域の水質保全、洪水の防除などを図ることを目的とし、公共システムとしての高い信頼性が要求される。

一方、下水道プロセスは、微生物反応を利用したり、原料としての下水の質・量の変動、降雨状況など予測しにくい自然界からの外乱が多いためモデル化できない部分が多い。このため、日常の維持管理で熟練経験者の果たす役割は大きい。維持管理の適正化、高効率化は、今後の重要課題である。

これらを解決するため、(1) 熟練者の視覚機能の一部を代替できる水中顕微鏡と画像処理を応用したバルキング(沈降性悪化)予知、(2) 過去の履歴データに学ぶニューロ応用運転ルールの抽出、(3) 熟練者の情報利用技術を模擬したエキスパートウィンドウ、(4) ニューロ応用ポンプ運転など、知的制御システム構築のための技術、(5) コンピュータマッピングによる下水道台帳管理システム、を開発し実用化の見通しを得た。

依田 幹雄* *Mikio Yoda*
浅田 能勝* *Yoshikatsu Asada*
渡辺 昭二** *Shouji Watanabe*
圓佛伊智朗** *Ichirô Enbutsu*

1 はじめに

わが国の下水道は約70年の歴史を持ち、六次にわたる5か年計画に基づいて推進の結果、平成2年度末の処理人口普及率は44%に達している。しかし、国民の下水道に対する期待は大きく、都市計画中央審議会の答申「今後の下水道の整備と管理はいかにあるべきか」(平成2年7月)、および平成3年度からスタートする第七次5か年計画では、(1) 中小市町村の下水道整備を核とした普及率の向上、(2) 大都市の下水道の質的向上(水質保全、浸水防除)、(3) 維持管理の充実など、を柱として掲げている。

下水道施設は、休むことのない連続運転や安定運転など、公共システムとして高い信頼性が要求される。一方、下水道プロセスは、微生物反応を利用したり、予測しにくい自然界からの外乱が多い開放系である。このため、経験やノウハウに加え、洗練された勘を持つ熟練経験者の維持管理の適正化に果たす役割は大きい。しかし、近年、熟練経験者の高齢化と減少、そして、若年者の価値観の多様化、高学歴化などによる労働力不足は、次の効率的な維持管理形態の出現を示唆している。

この論文では、適正かつ効率的な維持管理を目指して、機場の運転管理を支援する知的制御技術と、システムおよびコ

ンピュータマッピングによる台帳管理システムの概要ならびにその有効性について述べる。

2 維持管理の充実と知的制御テクノロジー

2.1 画像処理応用バルキング予知技術

下水処理場では、都市から集めた下水をばっ気槽と呼ばれる池に導いて空気を吹き込み、汚濁物質(有機物)を活性汚泥と呼ばれる多種類の微生物群(凝集性微生物、糸状性微生物、原生動物など)によって化学的に分解し、沈澱池で沈澱させて上澄み水を放流している。

運転上の問題点は、糸状性微生物が増殖しすぎると活性汚泥が膨化し、見掛けの容積が増加するバルキング現象であり、活性汚泥の沈降性悪化とともに放流水質も悪化する。この回復には2週間から2か月を要するため、予知と事前対策が重要課題である(図1)。従来は沈降性の悪化を、活性汚泥単位質量当たりの沈殿体積を測定したり顕微鏡で観察していたが、微生物の微妙な変化をキャッチできなかった。

これまで、糸状性微生物と凝集性微生物を識別するための画像処理アルゴリズムを開発してきたが、さらに、微生物状態を正確に把握できる高解像度水中顕微鏡(図2)を開発し

* 日立製作所 大みか工場 ** 日立製作所 日立研究所

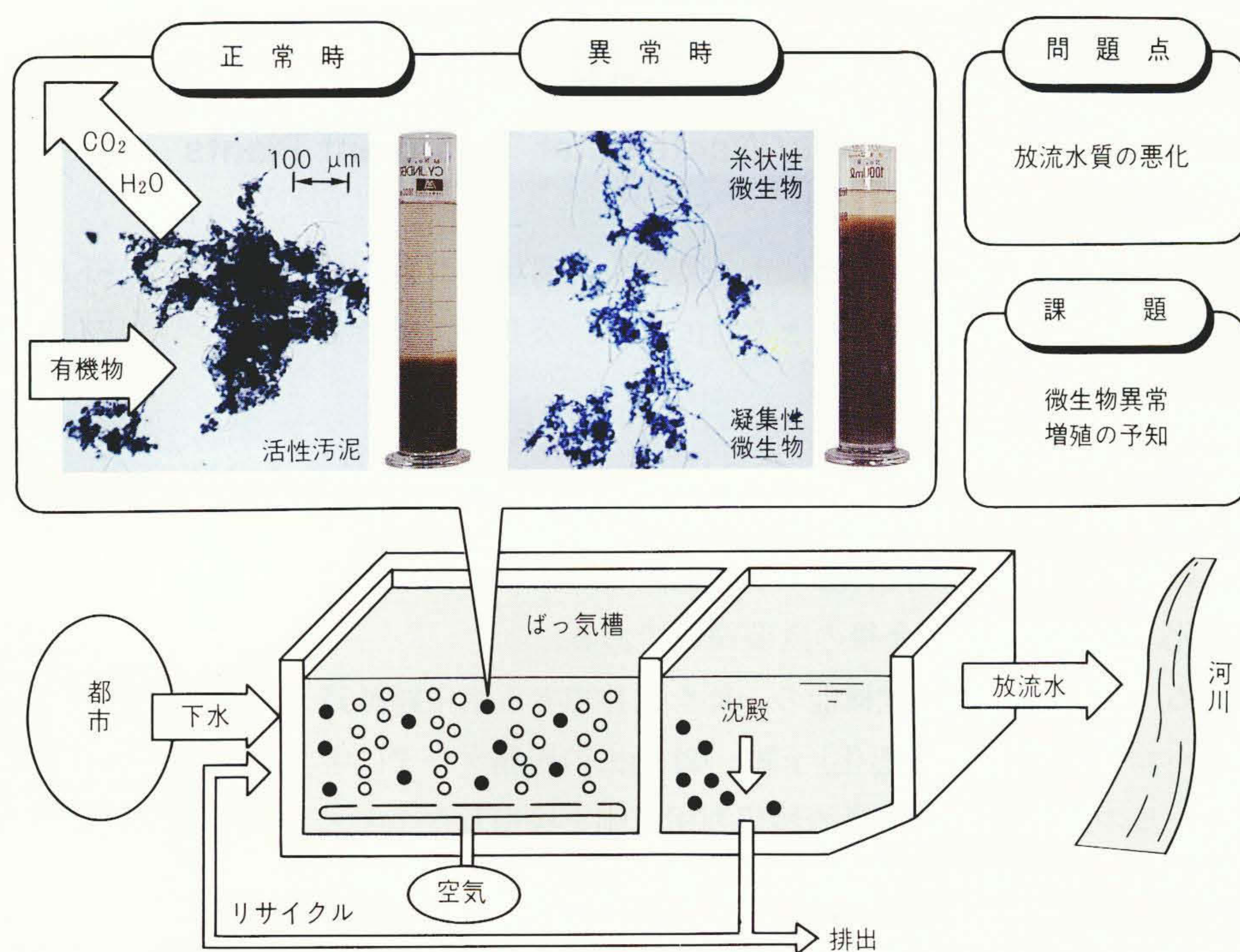


図1 下水処理場運転の問題点と課題 放流水質の悪化を防ぐには、微生物の異常増殖の事前予知が重要課題である。

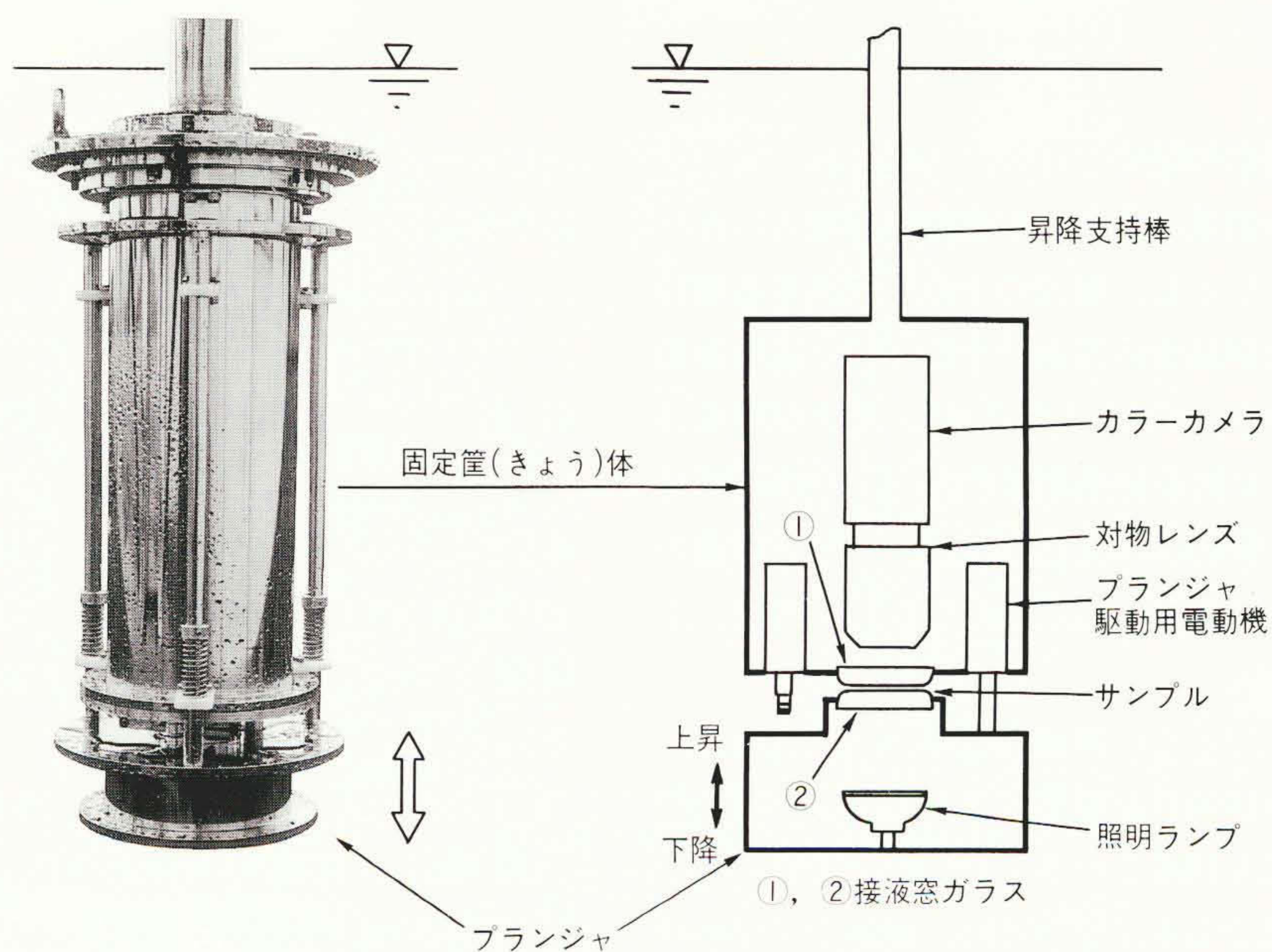


図2 水中顕微鏡の外観と構造 太さわずか1μm程度の糸状性微生物を、卓上顕微鏡並みに撮影できる。

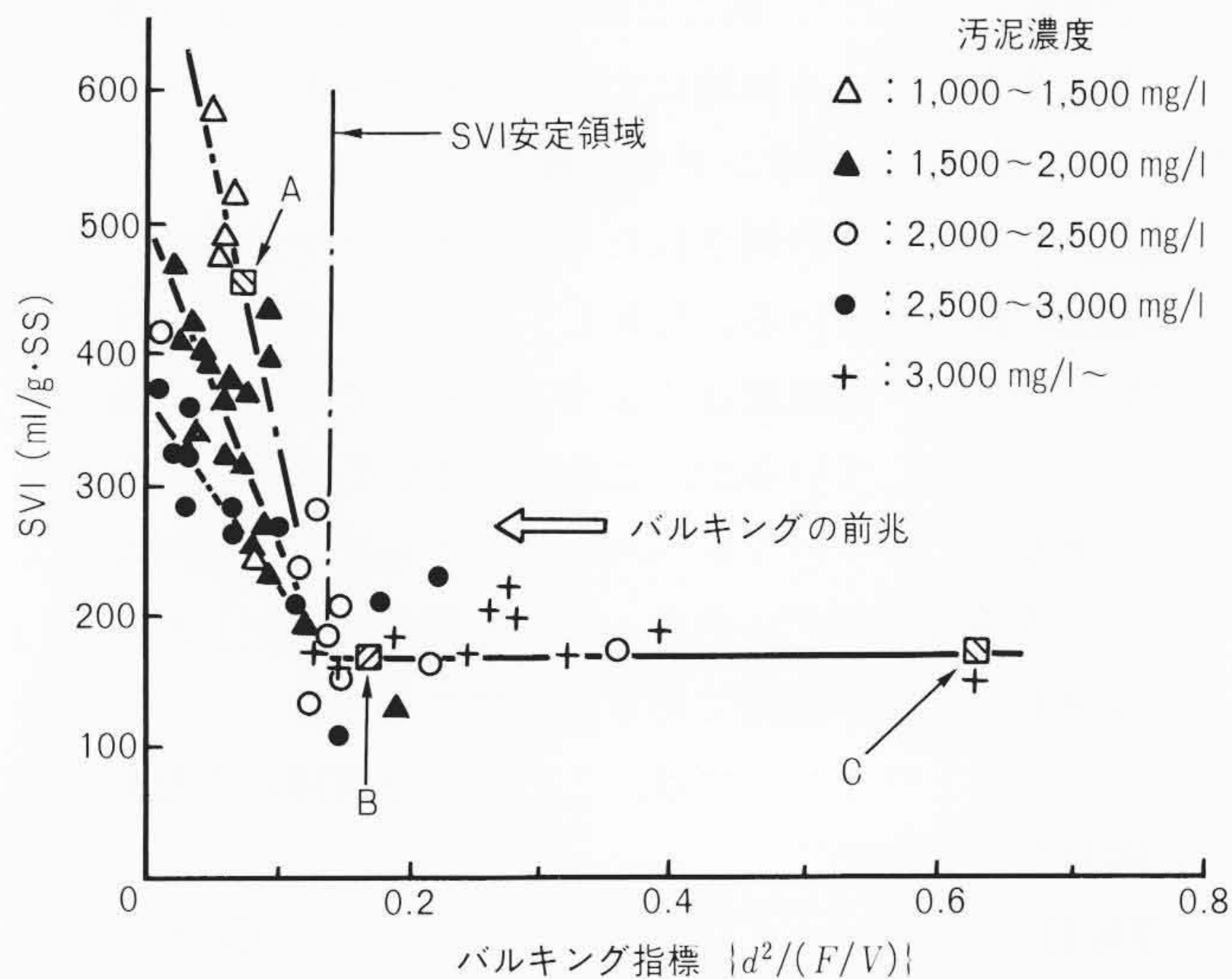
た¹⁾。この顕微鏡は、サンプル液固定装置、透過照明装置、清掃装置を持ち、太さわずか1μm程度の糸状性微生物を卓上顕微鏡並みに撮影できる。

ラボ実験と実プラントでの調査により、凝集性微生物の粒径や糸状性微生物との相対比率が、正常時と異常時とで異なることを見いだした。さらに、粒子群の沈降速度を活性汚泥

の画像処理情報で疑似表現し、沈降性を予知するバルキング指標を考案した(図3)²⁾。図4に示すように、この指標の変化傾向を監視することで、放流水質の悪化、すなわちバルキング現象を事前に予知することができる。

予知結果を制御に反映させるための放流水質制御支援システムの概念を図5に示す。このシステムは、まず水中顕微鏡

で撮影した拡大映像を画像処理し、バルキング指標を計算する。この指標値などと運転員の持つ経験的知識を連動させて推論し、放流水質を悪化させない制御方策をガイダンスする。さらに、ニューラルネットを用いて運転知識を獲得して(次章参照)、水質や水量の変動に臨機応変に対応していくシステムとすることができる。



注：略語説明など SVI；Sludge Volume Index(汚泥容量指標)
SS(浮遊固形物)
 d ；フロック形成微生物平均粒径(mm)
 F ；糸状性微生物長(mm/ml)， V ；フロック体積量(ml)

図3 バルキング指標とSVIの関係 この相関関係より、画像情報(指標)からSVIを推定できる。

2.2 ニューロ応用運転知識獲得技術

処理場の運転管理は、(1)維持管理指針、(2)生物学的知見、(3)オペレーターの経験則などの知識をベースに行われる。これらのうち、(1)、(2)の知識は、普遍性を持つものとして固定的に扱われるが、(3)の知識は処理場ごとに固有なものが多いため、運転条件の変化(経年変化、季節変動、施設変更など)に対応して動的に追加、修正して信頼性を維持する必要がある。しかし、図5でのこの可変の知識ベースの追加、修正(メンテナンス)に要する労力は、運転員にとって負担増になりかねない。これを防ぐためには、なんらかの方法で運転知識を自動的に獲得する必要がある。

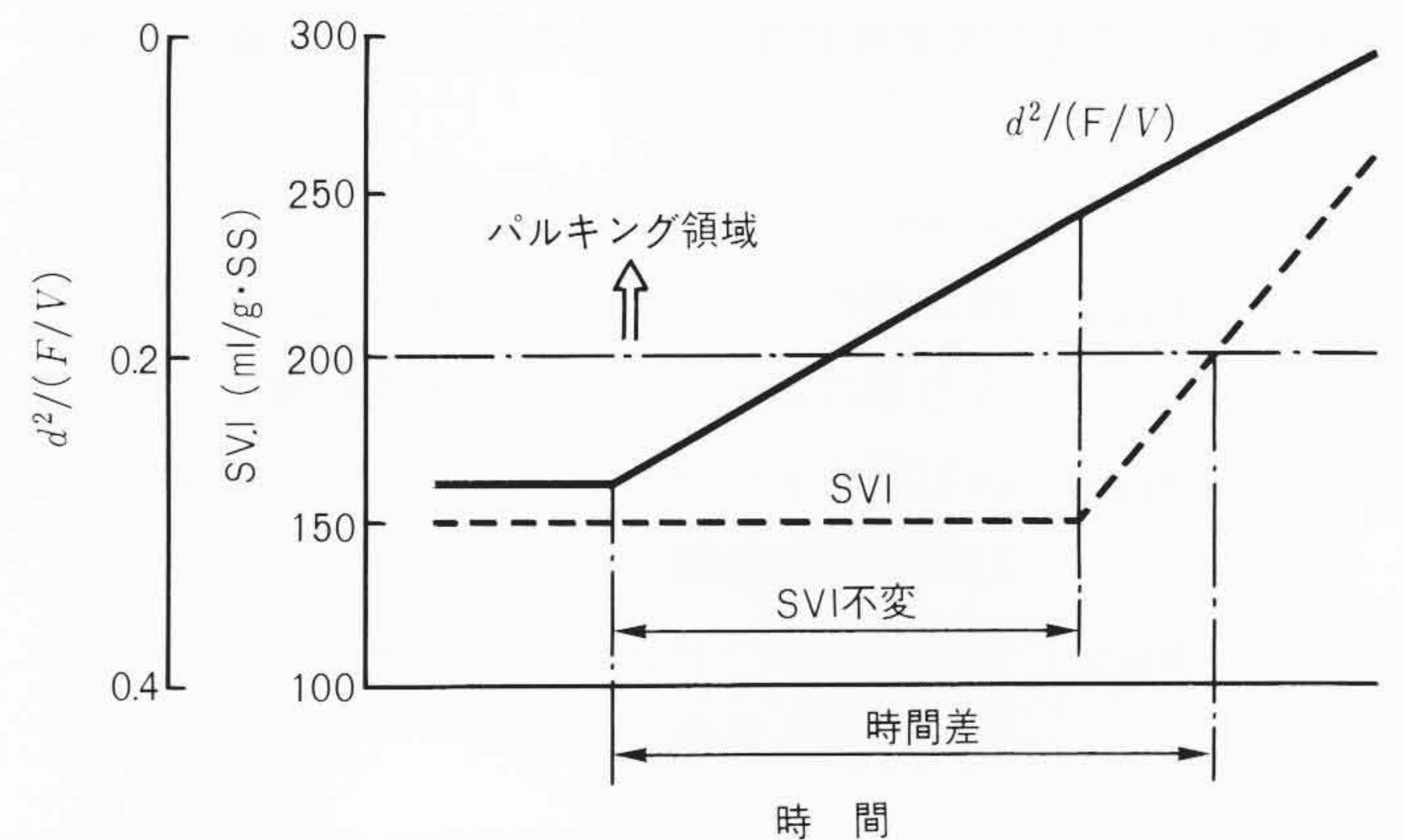


図4 バルキング指標による事前予知 バルキング指標の時間的変化を継続的に測定することにより、事前予知ができる。

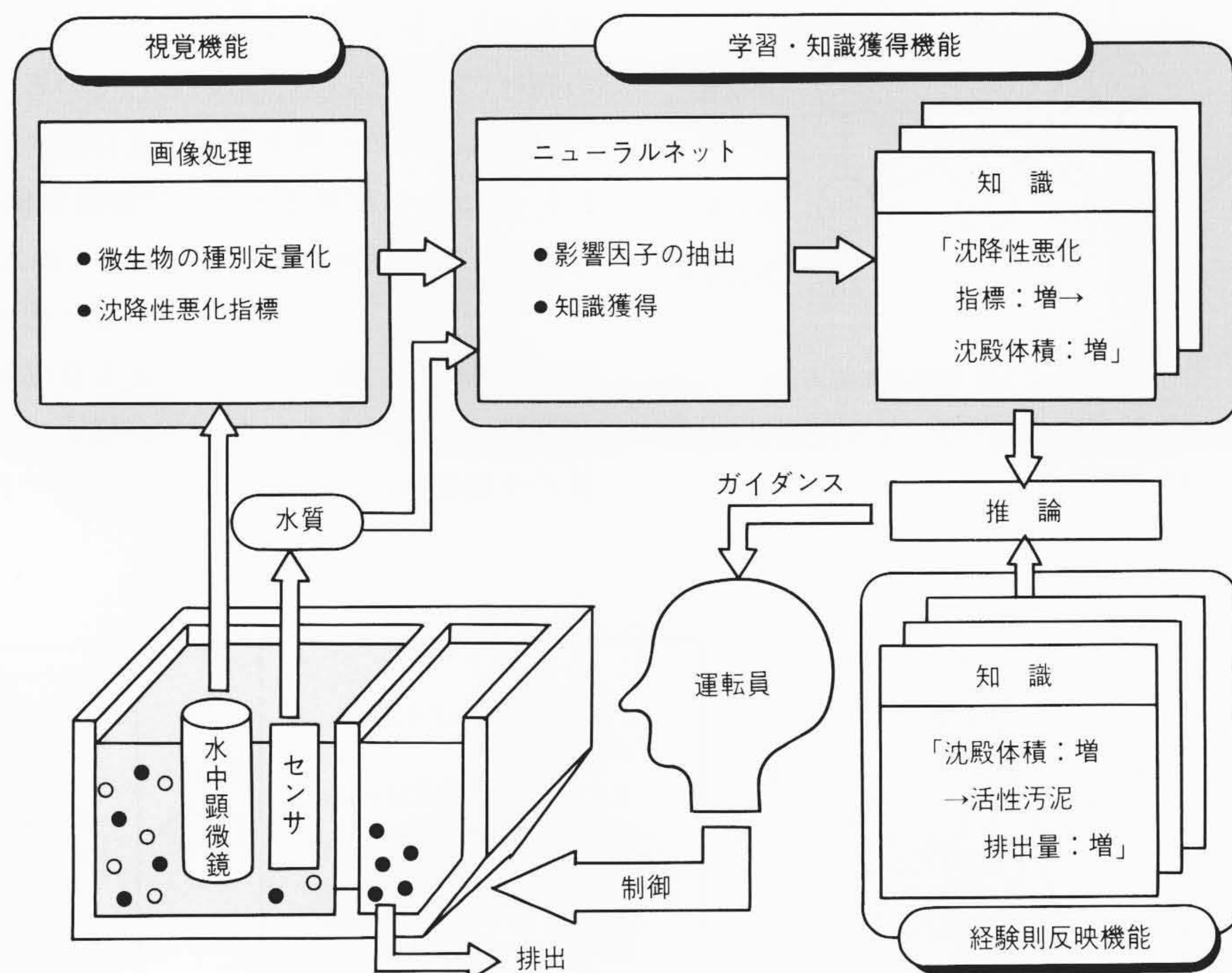


図5 下水処理場・知的運転支援システム 従来水質情報に画像から得られるバルキング指標を加え、さらに経験的知識を連動させて推論し制御方策をガイダンスするシステムである。

運転員は、経験(履歴データ)を学習して知識を獲得しながら運転に生かしている。運転員の学習機能を模擬するために神経細胞(ニューロン)の構造と機能を、工学的にモデル化したものがニューラルネットである。そのモデルを図6に示すが、ネットの基本要素であるニューロンの動作は、入力 x と重み係数 w との積和値 u を非線形変換し、出力 y として出力する。

ニューラルネットを用いた運転ルールの獲得手順を図7に示す。まず、処理場の運転履歴データをネットで学習する。学習はプロセスデータを入力層ニューロンに入力したとき、その時点のSVI(汚泥容量指標…沈降性尺度)を出力層からある誤差範囲内で出力可能にすることであり、具体的には、ニューロンの重み係数を修正する計算である。次に、学習によって得られたニューラルネットモデルを用いて、データ間の因果関係を次式の因果性尺度($C_{3k,1i}$)で評価し、知識に変換する。

$$(\partial y_{3k} / \partial x_{1i}) \propto C_{3k,1i} \equiv \sum w_{3k,2j} w_{2j,1i}$$

$C_{3k,1i}$: 出力層のニューロン $3k$ に対する

入力層ニューロン $1i$ の因果性尺度

$w_{3k,2j}$: 出力層ニューロン $3k$ と中間層ニューロン $2j$ 間の重み係数

$w_{2j,1i}$: 中間層ニューロン $2j$ と中間層ニューロン $1i$ 間の重み係数

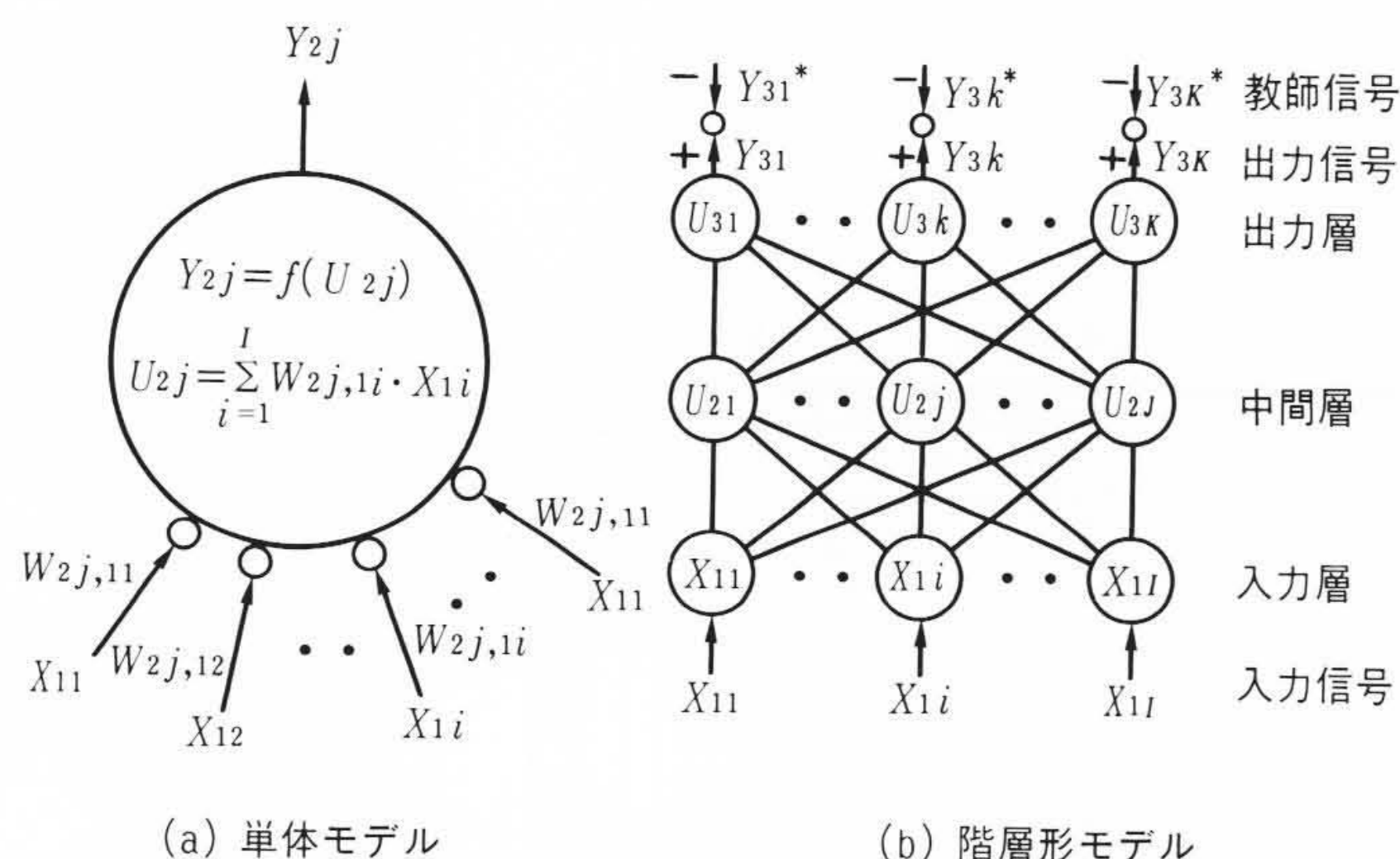


図6 ニューラルネットモデル ニューロンは、入力 x と重み係数 w との積和値 u を非線形変換し、 y を出力する。

学習に使用したデータは、水質データ16項目、糸状性微生物長、凝集性微生物個数などの画像データ8項目である。この結果、SVIは水質データと画像データによってモデル化が可能であり、例えば、

- (1) 糸状性微生物長が長くなるとSVIが上昇する、
 - (2) バルキング指標が小さくなると、SVIが上昇する、
- といった経験則に一致する知識、あるいは新たな知識を得ることが可能になった³⁾。新たな知識については、これを検証することにより、使える知識にすることができる。

2.3 エキスパートウィンドウ技術

現在、処理場では計測されたオンライン・手分析データを計算機上に保存している。しかし、このデータはそのままでは利用しにくく、運転員はくふうを凝らしてその利用効率を高めようと努力しているが、この手間はかなりのものである。また、運転員のノウハウレベルによっても利用度は異なっている。「貴重な計測データを、もっと運転に生かしたい…。」これは運転員の持つ期待であり、願望でもある。

エキスパートウィンドウは、このような期待にこたえるために開発したもので、

「運転員(エキスパート)のノウハウというレンズ(フィルタ)で見た計測データ(情報)を、窓(ウィンドウ)に写し出す」というイメージのものである。そして、このエキスパートウィンドウを用いて、計測データを「意味ある情報」に変換して運転員に提供することで、計測データを運転管理に生かすことを目的としている。

エキスパートウィンドウは、基本的な機能ごとに独立した部品として作成し、それらの組み合わせ・順序などは自由に変更でき、新たな部品も容易に付け加えられるような拡張性の高い(フレーム形式)ものとしている。

ウィンドウの一例を図8, 9に示す。

2.4 ニューロ応用雨水ポンプ運転支援技術

近年、排水区域の都市化によって雨水の不浸透域が増加し、ポンプ所では、大量の雨水が急激に流水する傾向が強くなっている(図10)。従来の水位による自動制御では、ポンプ運転が遅れ、追従できないケースが増えている。このため、運転員の手動操作に頼っているのが現状である。特に集中豪雨時

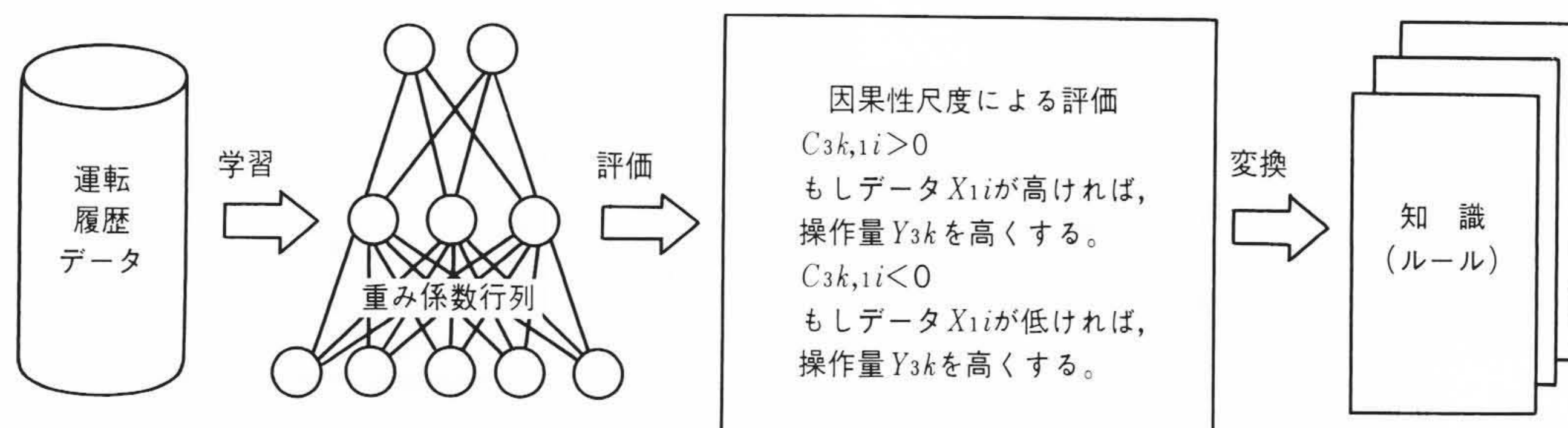


図7 ルール獲得手順 学習結果を因果性尺度で評価し、知識に変換する(履歴データに学ぶ)。

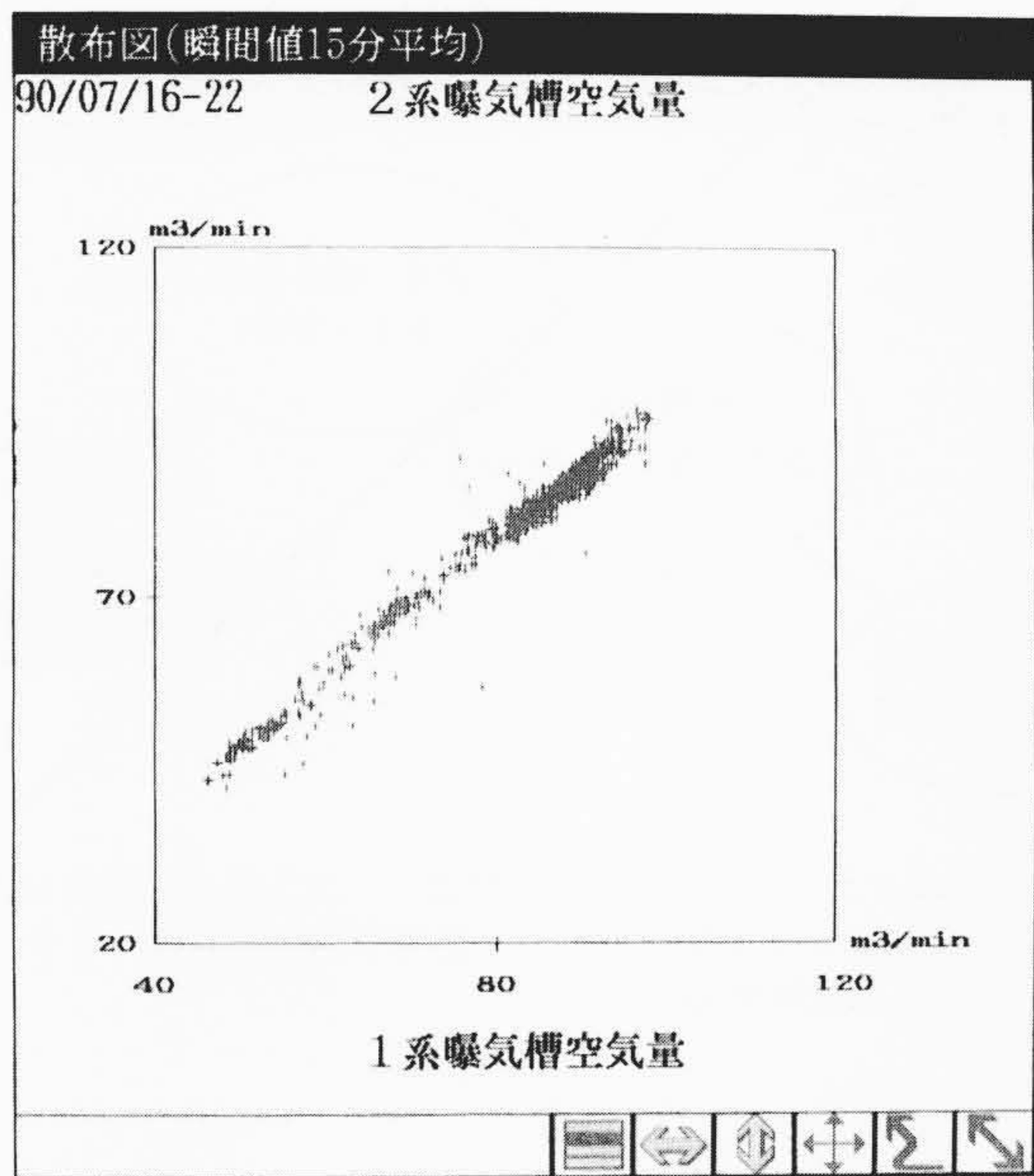


図8 エキスパートウィンドウの例—散布図 このグラフは、二つの項目の計測データを、縦軸-横軸にとり、対応する一組みの計測データごとにプロットしたものである。これにより、二つの項目のデータにどのような対応関係があるのか、視覚的に理解できる。

は、熟練運転員の技量(経験、ノウハウなど)に頼るところが大きい。また、運転員は極度の緊張感を強いられる。さらに、雨水ポンプの運転は、年間を通じて回数も少なく時間も短いため、運転技量の蓄積、伝承には難しい側面を持っている。

熟練運転員の行った良好な運転結果を、次の運転に生かすことができれば、これらの課題は解決される。これは、運転履歴データをニューラルネットで学習することによって実現できる(データを通して熟練運転員の技量を学ぶ)。

ニューラルネットの構成を図11に示すが、入力量は流入量、降雨量、吐出し量の時系列データで、過去30分間を5分間隔にサンプリングしたものとした。出力は、次時刻の吐出し量である。学習データとしては、最も多くのポンプが稼動した日からポンプの起動と停止の時刻をピックアップし、その時点の吐出し量を教師信号、その時点から過去30分間の各項目の時系列データを入力信号とするサンプルを37点作り、それらを繰り返し学習させた。

実際のポンプ所の実績データによるシミュレーション結果を図12に示す。ポンプの起動、停止のタイミングは多少異なる

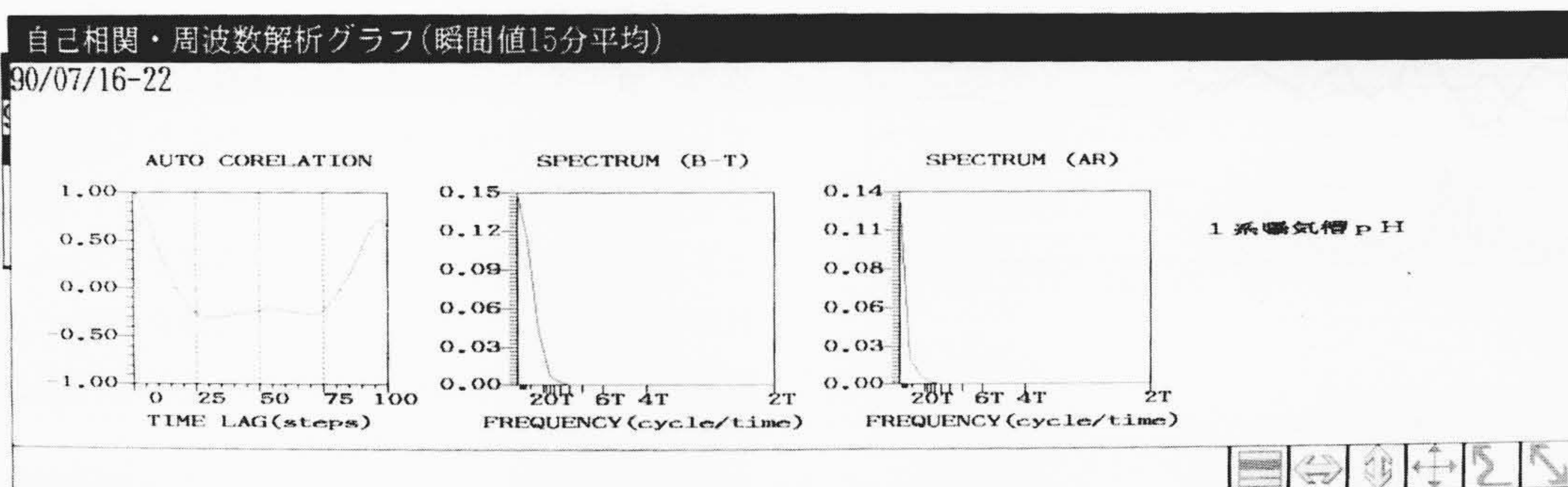


図9 エキスパートウィンドウの例—自己相関・周波数解析グラフ散布図 これらのグラフは、計測データ自身の周期的特性について解析し、グラフ化したものである。ここでは、三つの方法を用いて解析している。これにより、その計測データ自身の長い周期性・短い周期性を、それぞれ視覚的に理解できる。

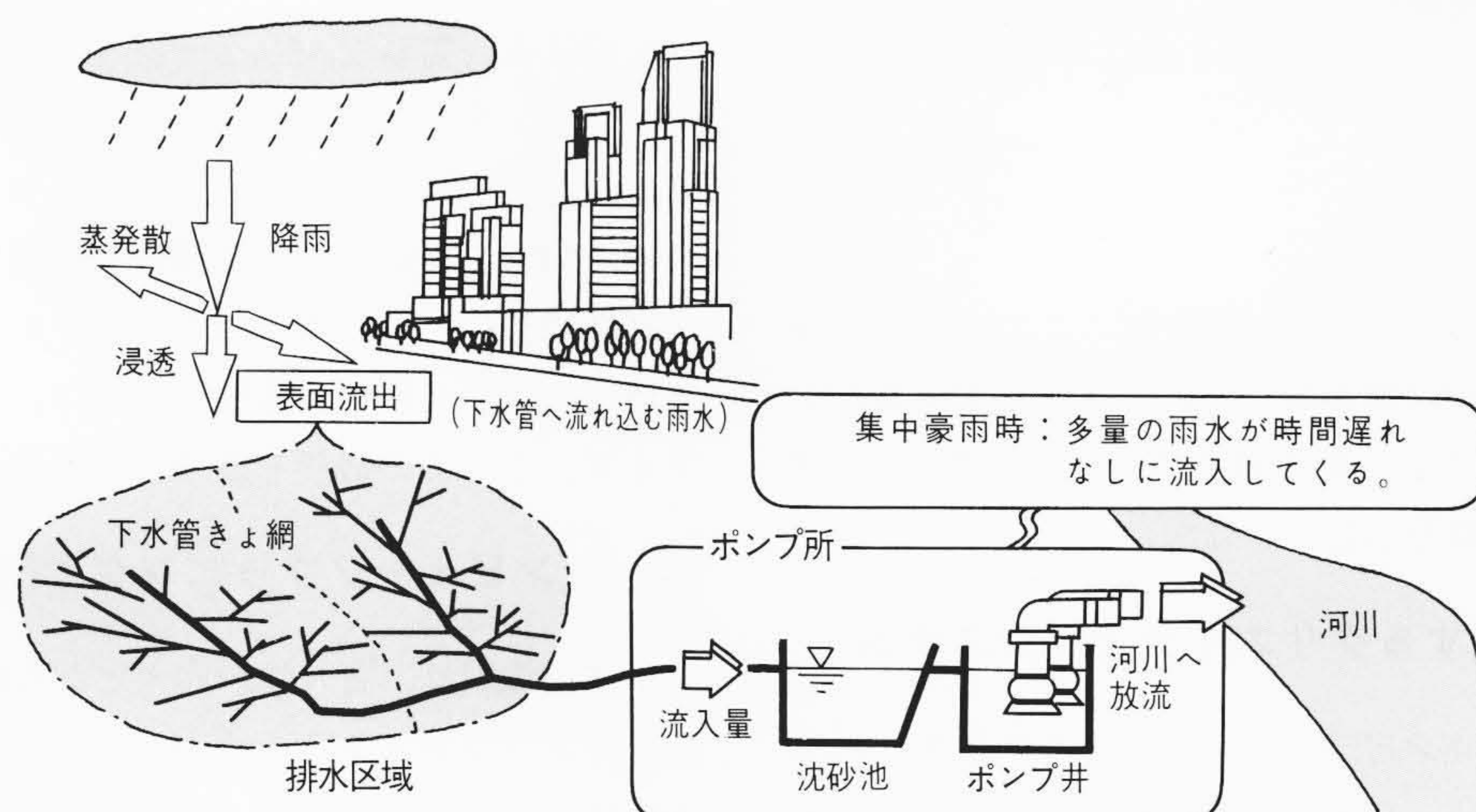


図10 ポンプ所での雨水排水 都市化により、雨水の表面流出が年々増加している。

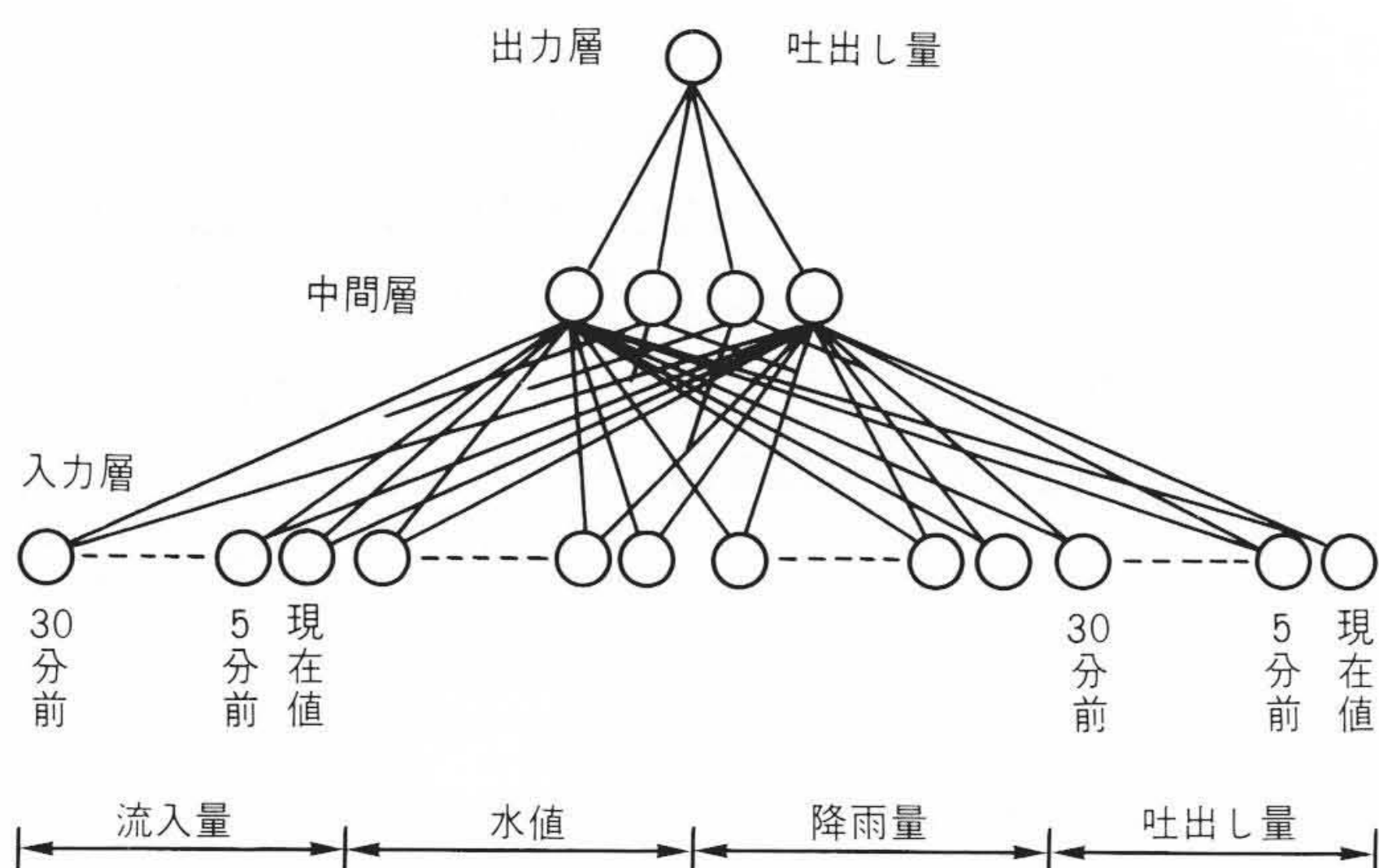


図11 ニューラルネットの構成 運転員の行っている時間的パターンを見ての柔軟な判断を模擬したニューラルネットの構成を示す。

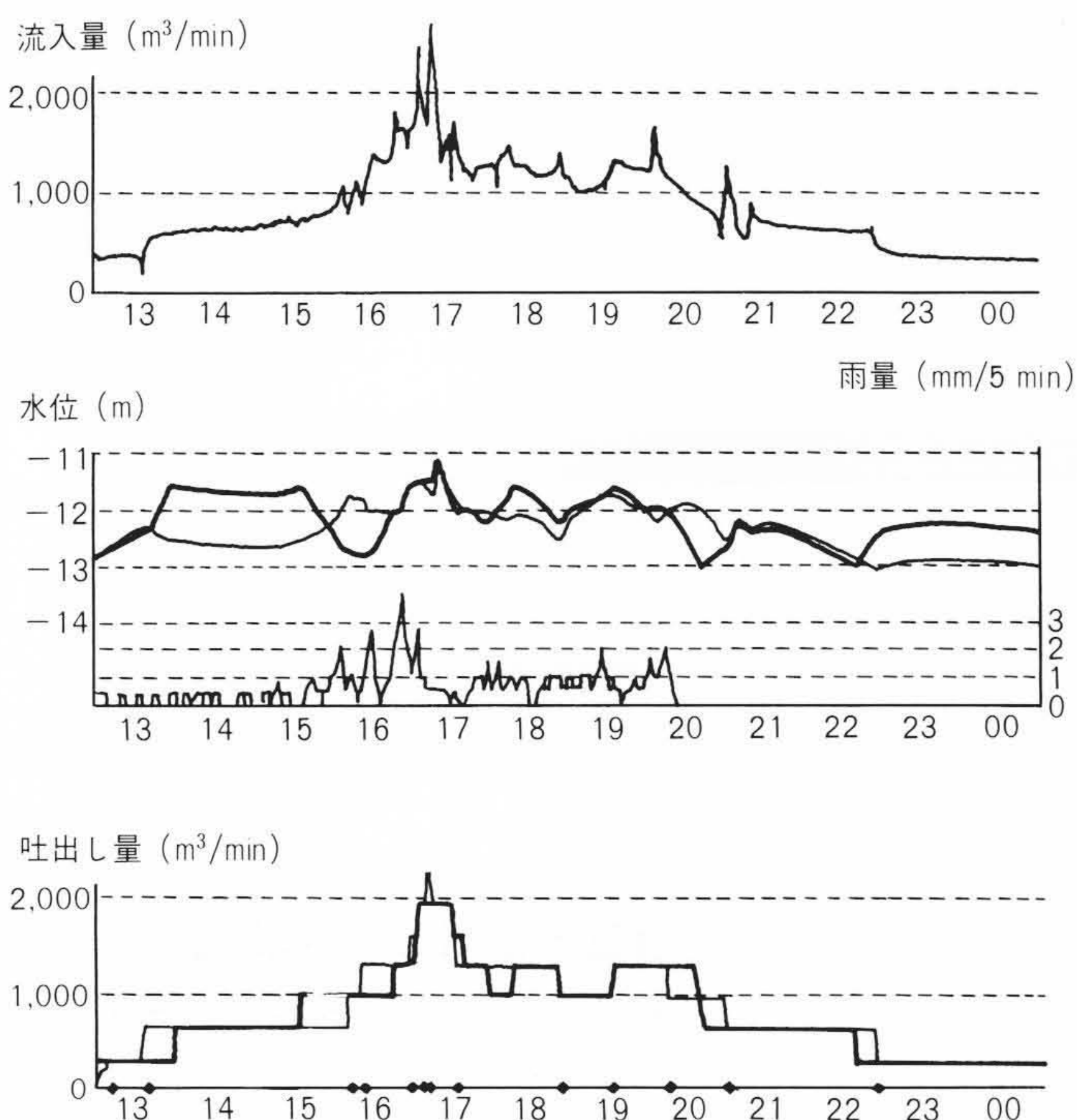


図12 シミュレーション結果 ポンプの起動、停止のタイミングは多少異なるが、回数は同じであり水位も許容範囲内（ここでは11～14 mが目安）に維持されている（細実線が実績データ、太実線がシミュレーション結果）。なお、時間軸上のマークは学習データとしてサンプルした時刻を示している⁴⁾。

るが、回数は同じであり水位も許容範囲内（ここでは11～14 mが目安）に維持されている（細実線が実績データ、太実線がシミュレーション結果）。なお、時間軸上のマークは学習データとしてサンプルした時刻を示している⁴⁾。

3 創造活動を支援するクリエイティブシステム

処理場の計装制御にコンピュータが導入されて以来、四半世紀が経過した。現在は、分散制御集中監視のコンピュータシステムの導入が定着し、制御の自動化と監視、記録の合理

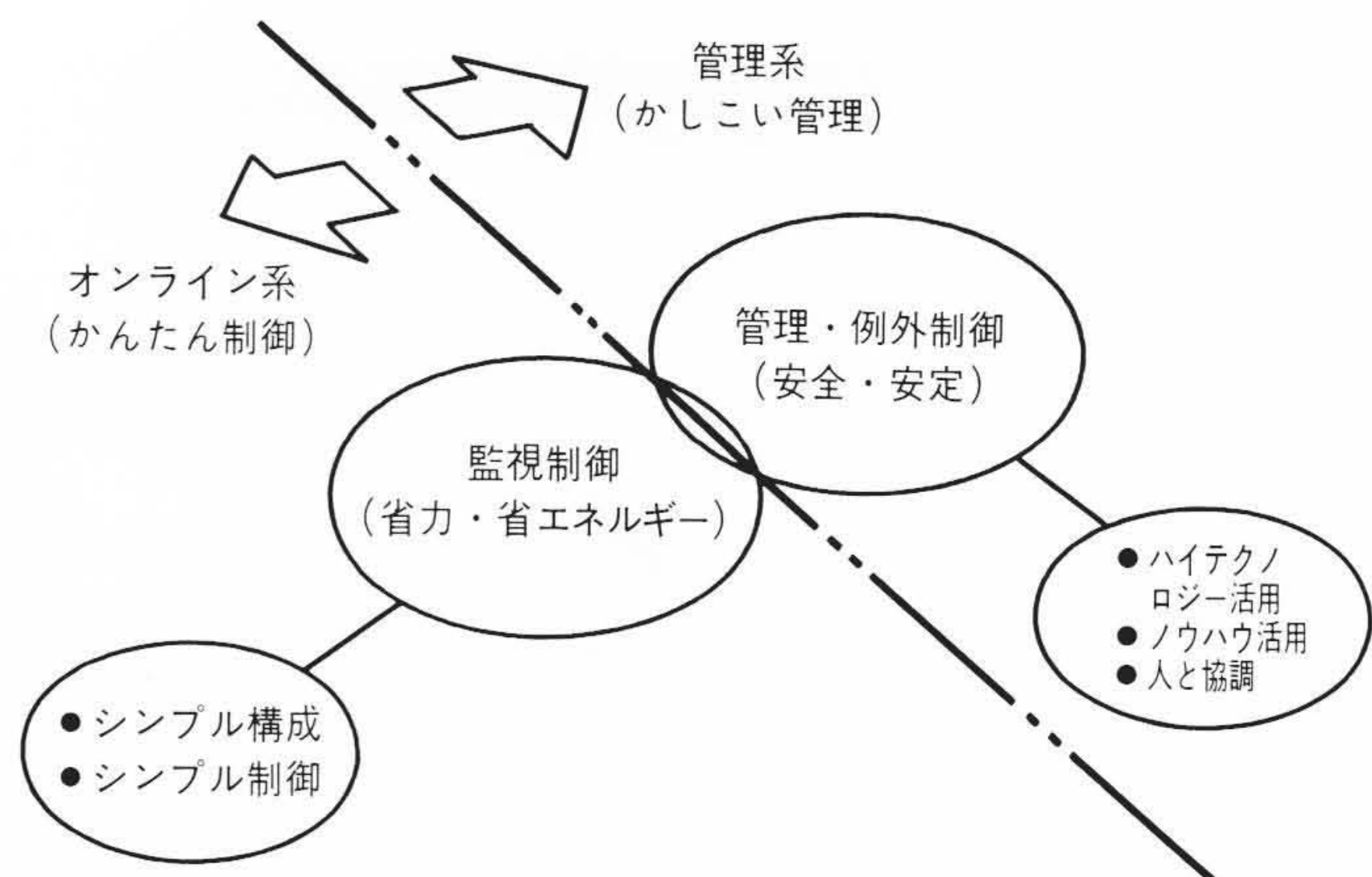


図13 クリエイティブシステム概念 オンライン系はシステム構成と制御内容をシンプルなものとし、管理や高度制御はハイテクノロジー技術と協調して実現する。

化に寄与している。反面、技術進歩の割には扱いにくく、決められたことしかできず、もう少し賢くならないかとの不満の声もある。水処理をより良い方向にもっていかこうとする人々の創造活動を支援し、システム自身も成長するクリエイティブなシステムの出現が望まれている。

このような要求にこたえるシステムの概念図を図13に示す。省力、省エネルギーの達成を目的とする監視制御機能は簡単でシンプルな技術を採用し、「かんたん制御」と言えるシステムを実現する。一方、例外処理が多く、高度の知識を必要とする業務は、ニューロ、画像処理などのハイテクノロジー技術を活用し、システム自体が知識を活用できる環境とし、処理場にかかわる人々の知的で創造的な作業を支援する「かしこい管理」システムを構築する。

具体的システム例を図14に示す。監視制御をつかさどるオンライン系はPID（比例・積分・微分）、シーケンス制御などシンプルな制御機能とし、水処理方式進歩のための試行時にも、制御定数の変更がユーザーで簡単にできる構造とする。管理系はおのものの業務ごとに使い勝手の良いワークステーションを設ける。豊富なパッケージソフトにより、ユーザーはプログラミングを意識することなく業務に活用できる。ニューロ、画像処理技術などのハイテクノロジー技術が支援するための、知的で創造的な作業環境が構築できる。

高度情報化社会への移行というトレンドの中で、情報発信基地としての処理場の監視制御室は、「エレクトロニックオフィス」としての機能を装備する必要があると考える。

4 コンピュータマッピングと下水道台帳管理

下水道施設は、普及率の向上とともに日々増え続けている。都市インフラを支える下水道が、その設置目的を達成するためには、処理場はもちろん管きょについても適正かつ効率的な維持管理がなされなくてはならない。このためには、最新

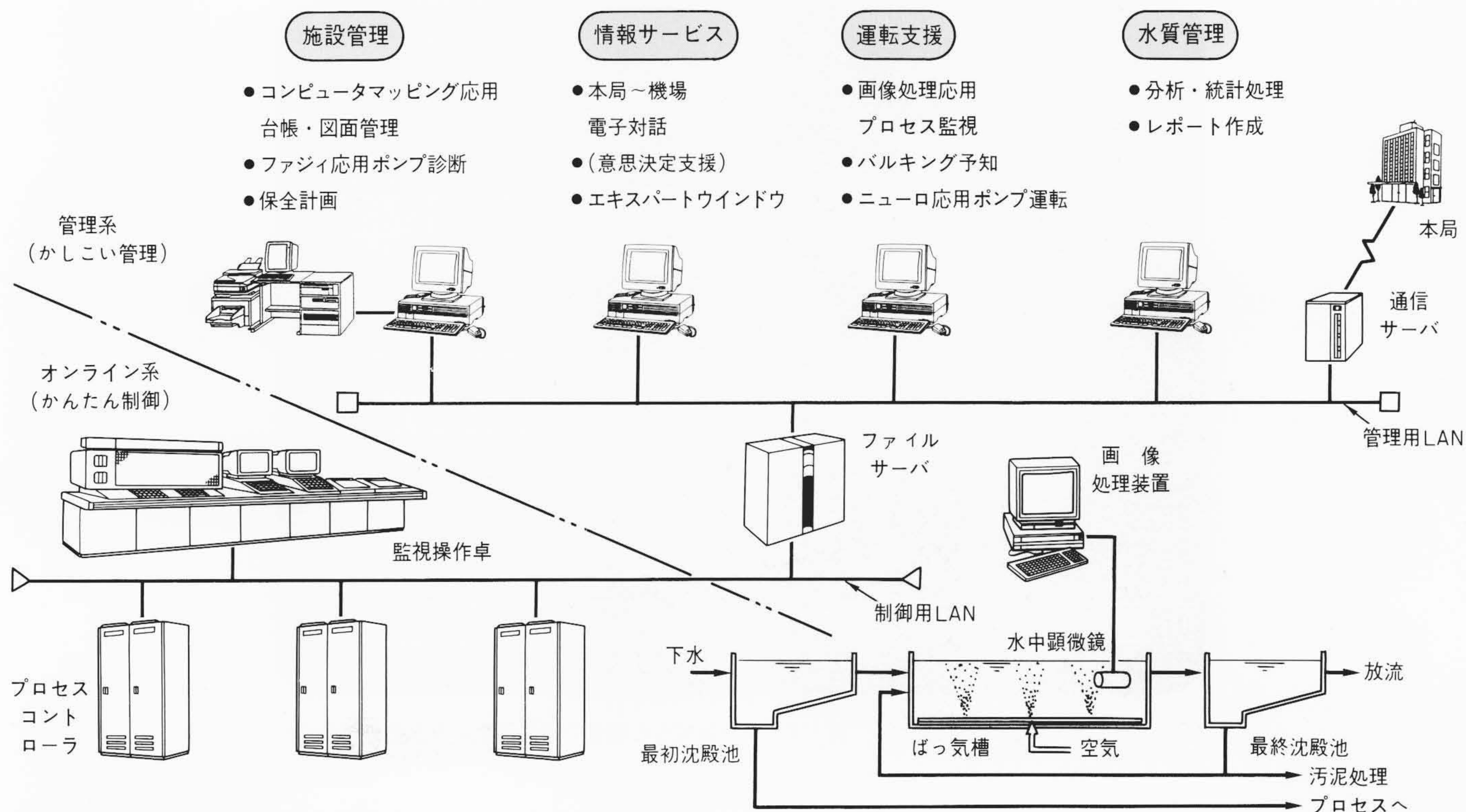


図14 システムの具体的構成例 オンライン系はシンプル制御とし、管理系はワークステーションによるフレンドリーな知的環境をねらっている。

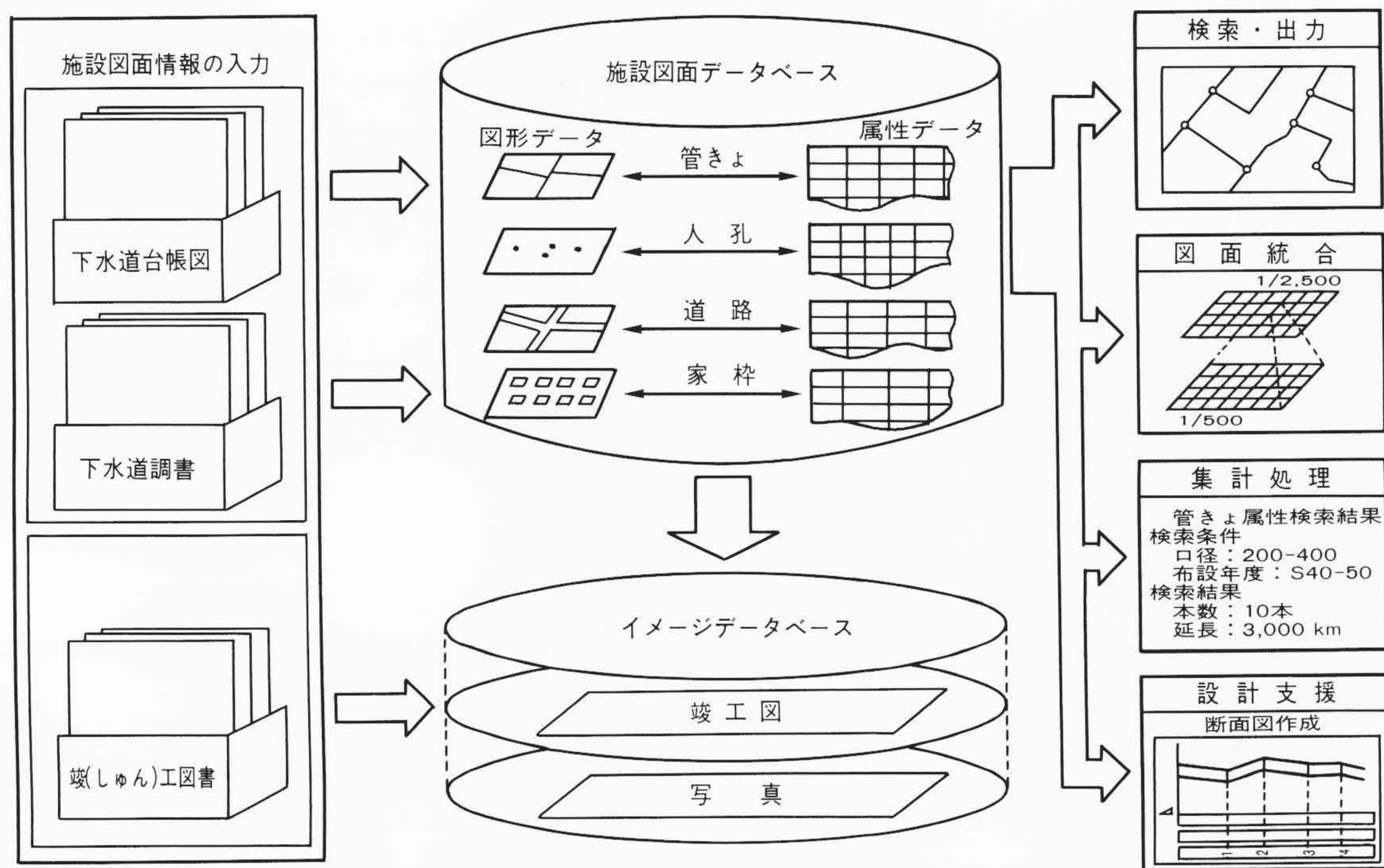


図15 システム概念図 台帳情報をデータベース化することにより、幅広い応用が図れる。

かつ精度の高い下水道台帳の整備とその活用が課題となる。しかし、台帳の調整・保管すべきデータ量は、普及率の向上とともに年々増大の一途をたどり、紙を対象にした手作業では限界にきている。

近年、飛躍的に発展したコンピュータマッピング技術は、これらの課題を解決するために有力な手段である。台帳情報は図形および属性情報から成るが、これらをコンピュータ上にデータベース化することによって、任意に検索、修正、更

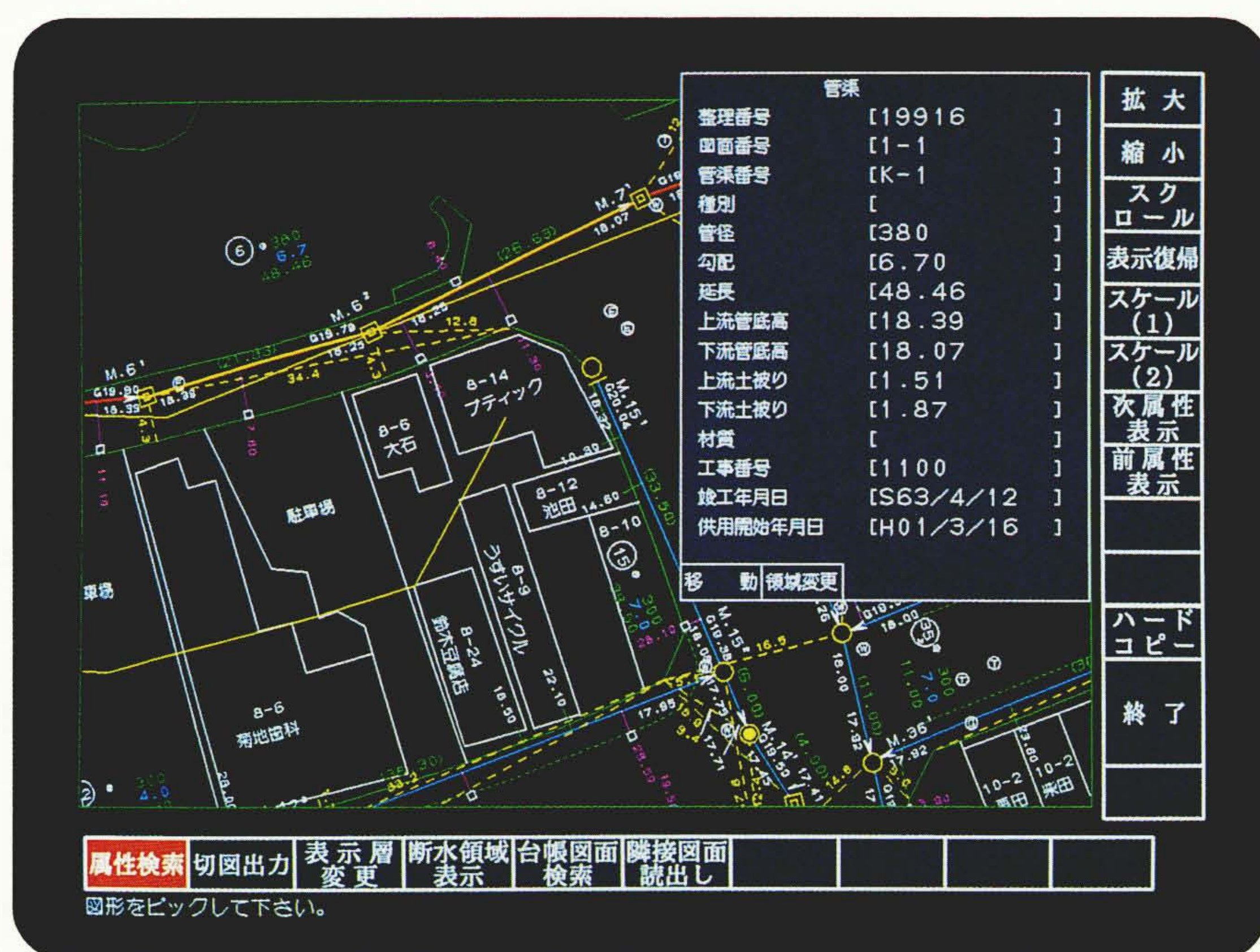


図16 属性検索結果の表示例 管きょ図形を指定した場合の属性検索例であるが、わずか数秒で得ることができる。

新などができる。そのシステム概念図を図15に示すが、中枢部である施設図面データベースは、下水道台帳・調書をデジタル化したものである。図形データは、管きょ、人孔、道路、家枠などの種類別に階層化しているため、目的に応じて任意層を組み合わせ検索・出力が可能である。また、属性情報はリレーショナルデータベースに構築し、図面情報とリンクしている。この施設データベースを利用した基本的運用業務は、図面の検索出力、図形指定による属性検索出力、条件入力による図形・属性検索出力、図形・属性の修正などである。管きょ図形を指定した場合の属性検索例を図16に示すが、わずか数秒で得ることができる。また、光ディスクファイリング装置と連動されており、竣(しゅん)工図や写真など修正、更新の少ないイメージ情報の検索ができる。さらに、これらのデータベースを利用することにより、工事図面の作成や積算など、より幅の広い業務支援が可能となった⁵⁾。今後さらに、応用機能を開発することによって、システムとしての付加価値を高めることができると確信している。

5 おわりに

下水道の維持管理を充実させるための知的制御技術について述べた。バルキング予知技術は、水中顕微鏡と画像処理装置によって、視覚情報をオンラインで定量化して制御に利用するため実プラントで検証中である。ニューロによる知識獲

得技術は、実際の履歴データの中からいくつかのルールが得られている。エキスパートウィンドウは、基本的なものの整備を終えた段階である。ニューロによる雨水ポンプ運転は、実際の履歴データでのシミュレーションが終わり、その有効性が確認された。今後これらは、知的制御システムを構築する上で不可欠な技術である。

コンピュータマッピングによる台帳管理は、すでに実用の域に入りつつあるが、維持管理の効率向上に大いに役だつことを確信している。

今後、よりクリエイティブなシステムの構築を目指して、技術開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 原，外：水中顕微鏡による下水微生物認識システム，第28回下水道研究発表会，696～698(平3-6)
- 2) 渡辺，外：画像情報を用いた活性汚泥性状の評価指標に関する実験的検討，下水道協会論文集，27，316，12～21(1990-8)
- 3) 圓佛，外：ニューラルネットを用いたプラント運転ルールの抽出に関する研究，電気学会論文集D，111，120～28(平3-1)
- 4) 栗栖，外：ニューラルネットを応用した雨水排水ポンプ運転員判断モデルの構築，第28回下水道研究発表会，785～787(平3-6)
- 5) 福島，外：設計業務と維持管理を融合した管路施設図面情報管理システム，第28回下水道研究発表会，214～216(平3-6)