

論文 下水管網の劣化予測と予防保全計画策定支援システムの開発・検証

宮本 文穂*¹・本下 稔*²

要旨: 本研究では、地中に敷設しているため日常点検が困難な下水管網に対して、地理情報システム(GIS)などの様々な最新 ICT 技術を組み合わせて、①特定のマンホールをモニタリングポイントとした下水管渠の損傷要因に係る環境計測データを収集し、メタ戦略による下水管網の劣化度を予測して定量的に検出するシステムの開発、②対象下水管網の余寿命を予測し、長寿命化と LCC の抑制を目的とした診断や対策工法および対策の順位付けを効率的に支援して、予防保全計画の策定支援が可能なシステムの開発、③これらを統合した下水管網の統合型予防保全計画策定支援システムを構築し、実用化を目指す。

キーワード: 下水管網, 劣化予測, 予防保全, メタ戦略, 計画策定支援システム, 硫化水素ガス

1. はじめに

日本の全国平均下水道普及率は 70.5% を超え、下水管網の総延長は 50 万 km に達していると言われている¹⁾。この内、耐用年数 50 年を経過する下水管網が今後数年間に急増する(図-1 参照)。これに加え、下水管網の主要劣化要因である硫化水素ガスによるコンクリートの腐食劣化の急激な進行で、今後道路陥没などの事故が多発することが予想され、大きな社会問題となる。現在、地中に敷設している下水管網(主としてコンクリート製)の維持管理は、管渠破損や過度の腐食劣化が原因で生じる道路陥没や汚水漏水・溢水などが発生した後の「事後保全」が主流である。しかし、今後 10 年以内に全国で数兆円規模にも及ぶ下水管網の管理・更新費用の発生が予想されることから、下水管網のライフサイクルコスト(LCC)を抑制する経済的で効果的な予防保全計画策定支援システムの開発が急務となっている。このため、現在、各自治体では、巨費を投じた点検ロボット開発や非破壊検査装置の開発に着手し、対策を講じている。しかし、

①どの時点で、②どの箇所を、③どの技術で、調査点検

または対策を行うことが適正(最適)なのかについては、熟練技術者の経験や勘によって「定性的」に判断しているのが現状である²⁾。そのため「事後保全」の件数は一向に減少せず、維持管理費は増大する一方である。このような背景から、本研究は、上記の課題を解決するために予防保全を目的とした環境計測データに基づく下水管腐食深度予測システムによる劣化予測・危険予知結果に基づく下水管網予防保全支援システム(SMS)の開発・実用化を目指すものである。

2. 下水管網予防保全支援システム(SMS)の概要と特徴

本章では、地中に敷設された点検が困難な下水管網に対し、マンホールに設置したセンサーを用いた環境計測データとメタ戦略による定量的な腐食劣化予測ならびに管渠の過度な劣化に伴う危険位置の推定などを支援する予防保全システムの概要を紹介する^{3),4),5)}(図-2 参照)。

2.1 下水管網データベースシステム

データベースシステムは、次の 3 つのサブシステムによって構成される: ①地理情報システム(GIS)を活用して、下水管渠の敷設年代、管種、管径、土被り、下水流量などの諸元データをデータベース化したシステム、②センサーによって得られた環境計測データ(硫化水素ガス濃度、気温、湿度、下水流量など)や点検によって得られた計測データをデータベース化したシステム、③センサーや診断方法、補修工法に関するデータをデータベース化したシステム、である(図-3 参照)。

2.2 下水管腐食深度予測システム

本システムでは、下水管渠の腐食が発生しやすい箇所(段差・落差の大きい箇所、伏越し管の上流部・下流吐出し部、圧送管の吐出し部などを含むマンホール箇所)に、計測箇所と要因に適した経済的で高性能なセンサーを設置し、環境計測データを自動計測して腐食深度予測

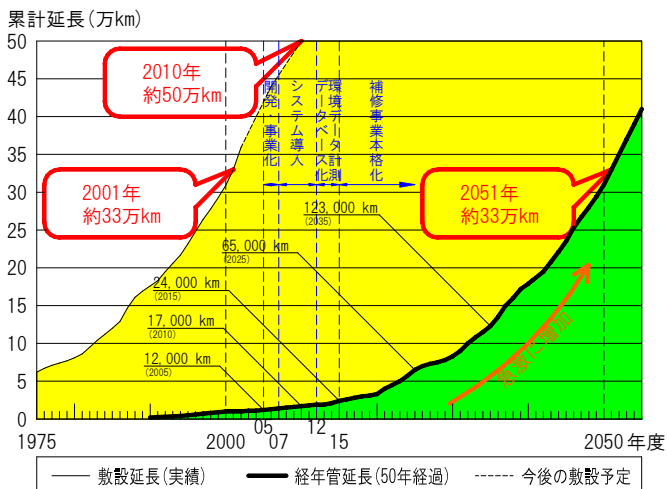


図-1 下水管網の耐用年数(50年)到達管延長の累積

*1 山口大学名誉教授 (スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL) 客員教授) 工博 (正会員)

*2 M.P.E. OFFICE 代表 技術士(建設), 博士(工学)

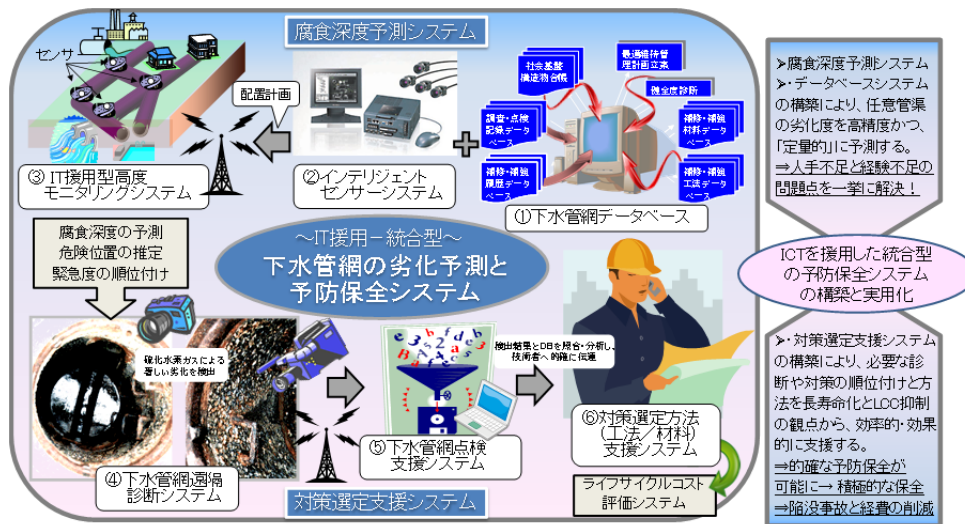


図-2 下水管網予防保全支援システム(SMS)の全体図と特徴

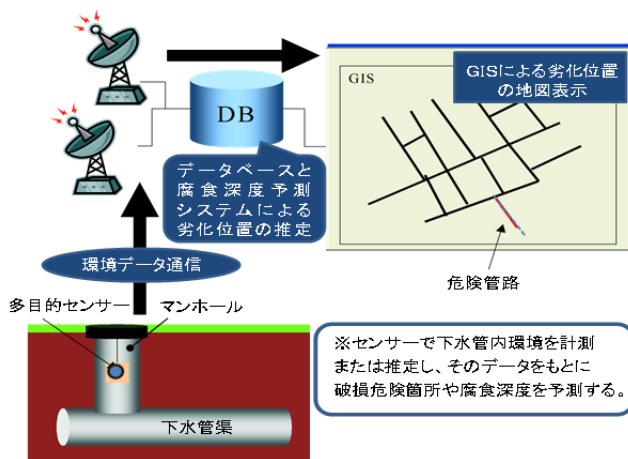


図-3 本システムの計測部および表示部の詳細

システムへ入力する。これより得られたそのデータとメのタ戦略理論（組合せ最適化の実用的近似解法）により各管渠の腐食深度を自動的に予測する^{6),7)}、ネットワーク型の高度ヘルスマニタリングシステムである。

広範囲に渡る下水管網の中から最小限の調査（データ計測）で、腐食劣化の予測および診断を必要とする下水管渠を選定するための手順を図-4に示す。また、危険度判定が必要な各函渠では、図-5に示した手順で処理する。①始点側の計測データを入力データとして、生物化学的酸素要求量（以下、BOD）、下水の温度、pHの物理データを用いて、硫化物生成速度を算定する。ここで、始点側が未測定地点の場合は、測定地点近傍のデータをもとに推定する。また推定の際、始点側に複数の管渠が流入する場合のデータ推定は、各管渠のデータに重み付けして平均値を求め、この値を使用する。重み付けは、各管渠からの下水流入量により決定することとし、下流側の管渠へ流出する際に用いるデータは算出した推定値をそのまま使用する。②算出した硫化物生成速度と始点側の溶存硫化物濃度より、終点側の溶存硫化物

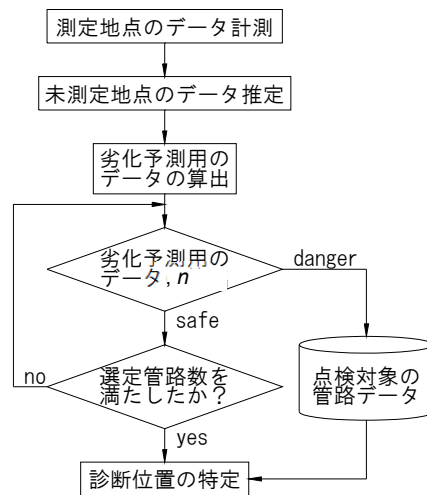


図-4 下水管渠の診断位置特定の流れ

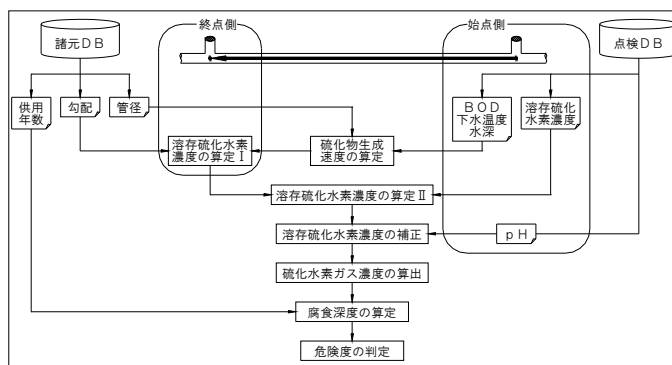


図-5 下水管渠の危険度判定手順

濃度より、下水管渠の溶存硫化物濃度を算出する。また、pHの値より下水中におけるpH-H₂Sの分子態割合の関係を利用して濃度を補正する。④溶存硫化物濃度とH₂Sの分子態の割合より硫化水素ガス濃度を算出する、⑤硫化水素ガス濃度と供用年数より腐食深度を算出し、危険度を判定する。

2.3 対策選定支援システム

腐食深度予測システムによる予測結果と耐久性診断（目視調査、機器調査、分析調査など）による計測デー

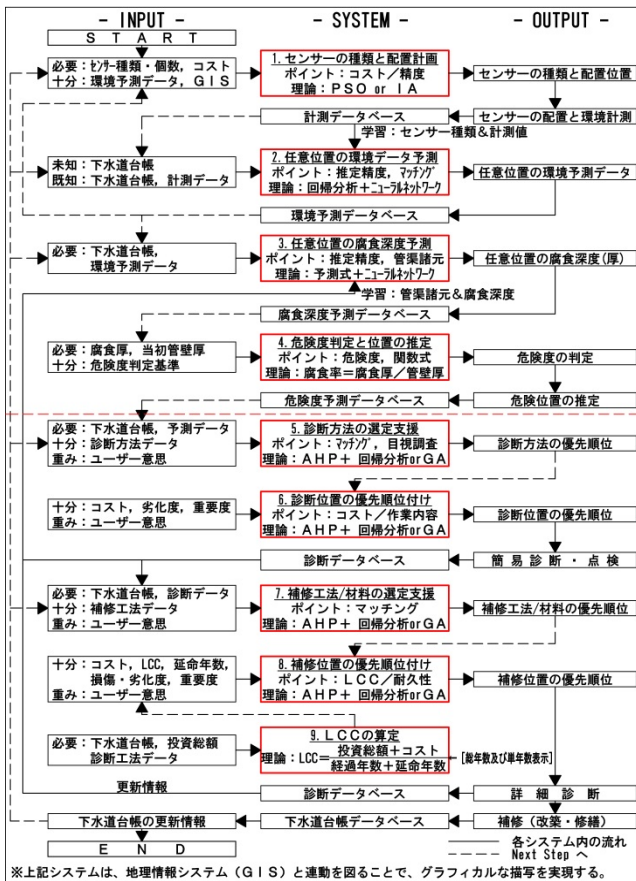


図-6 本システム内での入出力の詳細

タをもとに下水管渠の余寿命を予測し、その診断結果を用いて、限られた予算内での診断や対策の順位付けやLCCが最小となるような下水管網の対策選定を自動的に行う長寿命化メンテナンスシステムである。

2.4 統合型予防保全計画支援システム

上述した各種システムと下水管網の余寿命予測および限られた予算で診断や対策の方法選定と実施位置の優先順位付けが可能なシステムを統合して、インターネット環境の下で、Webブラウザを利用した操作が行えるようにし、計測データの収集の自動化や、出先や現場でのシステム活用を視野に入れた「統合型予防保全支援システム」を構築³⁾した(図-2参照)。本システム全体の各システムを介した入出力の詳細を図-6に示す(赤枠内の「ポイント」は着目点である)。

3. 既存下水管網への具体的適用例とシステムの検証

本章では、前章までに概説したシステムを実際の下水管網に適用し、その実用性を検討する。特に、下水管渠の腐食深度予測式と環境計測データを組み合わせて開発した腐食深度予測システムの有用性を検証する。まず、①ユーザー(自治体)が所有している下水管網のアナログ諸元データを本システムに入力して下水道台帳をデジタル化し、環境データベースを構築する。続いて、②下水管網の危険度判定を実現するため、本システムに対象とする地域の下水管渠の腐食深度状況を予測する機能を



写真-1 マンホール内への各種センサー設置例

付加したシステムの流れを具体例によって示す。なお、本研究での基本的なシステムの構築および診断対象とした地域は、山口県宇部市内の主幹線とした。また、対象マンホール内への各種センサー設置例を写真-1に示す。

3.1 GISを利用したシステム開発

今回対象とした地域の地方自治体は、管理している下水道台帳(地図+図面)がアナログまたはPDF形式であり、検索などの機能は有していない。このため、維持管理作業が極めて不便な状況にあった。今回、ArcView(以下、AV)というソフトウェアを使用して電子地図を描画し、VisualBasic(以下、VB)で開発した入力画面をインターフェースとして利用する。

AVは、空間データの可視化、検索、分析、統合および作成、編集のための高度な機能を持つ完成された高機能スタンドアローンGISとして利用されている。今回は、その姉妹品のMapObject(以下、MO)を利用し、VB6.0で以下の機能を付加したシステムを開発した: ①縮尺に応じたマップレイヤの表示、②検索ツールを取り入れた検索結果の描画、③地図印刷機能、④選択した下水管網の情報一覧表示。

3.2 環境計測データベースシステムの構築

データベースシステムは、ユーザーが入力画面から計測データを入力して、そのデータを環境計測データテーブルに書き込む。次に、腐食深度を予測する場合は、自動的に各マンホールリストテーブルと各マンホール間の下水管渠のデータテーブルから必要なデータを読み込み、計算が可能なシステムを構築した。

データベースは、以下の各テーブルから構成される: ①JIS工業コンクリート下水管渠標準データテーブル、②下水管渠の基本情報データテーブル、③実施するマンホールの情報テーブル、④毎回の計測データを入力するテーブル、⑤マンホール標準テーブル、⑥マンホールリストテーブル、⑦下水管渠計測業務区分テーブル。

データベースシステムのクエリーを図-7に示す。

3.3 腐食深度予測システムの適用

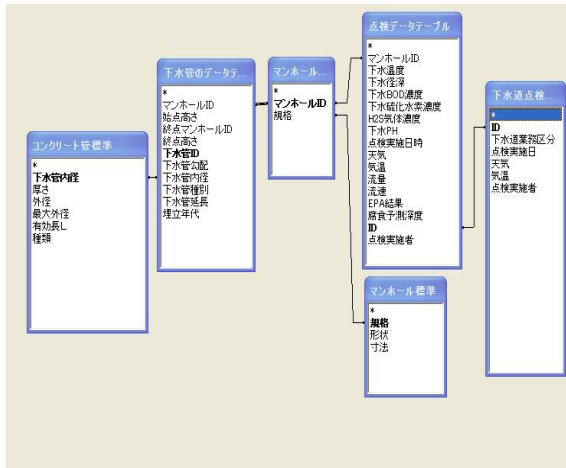


図-7 データベースシステム内のクエリー



図-8 起動画面における診断対象下水管網表示



図-9 下水管渠基本情報確認および危険箇所表示例

腐食深度予測システムは、①起動画面、②下水管網表示、③計測データ入力画面、④危険度判定結果表示画面の4つの画面から構成される。

(1) 起動画面

当画面では、最初に診断全地域地図を表示し、ユーザーが診断対象地域の詳細地図を選択して、画面下方の入力項目に、業務区分、点検実施日、天候、気温、点検実施者のデータを入力し、データベースシステムに登録する(図-8参照)。続いて画面右下の“続く”のボタンを押して、次工程画面へ進む。

(2) 下水管網表示画面

当画面では、詳細地図を表示して、計測データを入力するマンホールを選択し、下水管渠基本情報を確認する(図-9参照)。主な機能は、地図の拡大縮小、画面の移動、マンホールや下水管渠の検索、基本情報の表示、印刷などである。

(3) 環境計測データ入力画面

当画面で、計測によって得られたデータを入力して、“計算”ボタンを押すと、入力したデータがデータベースに登録される(図-10参照)。次に、上述の下水管網画面に戻って、下流側のマンホールの計測データを入力する。入力項目は、マンホールID、BOD、下水の温度、硫化物濃度、水深、pH、使用年数、気中H₂S濃度、点検実施時刻である。

(4) 計算結果の表示画面

当画面は、最始点側マンホールから最終点側マンホールまでの、全ての下水管渠の腐食深度予測の結果および危険度判定^{6),7)}を表示する(図-9画面中の腐食予測計算値参照)。また、それぞれの下水管渠の管勾配、管内径、管延長、下水流速や流量なども表示可能である。

3.4 腐食深度予測結果の検証

(1) 現地調査および分析の概要

本システムを、宇部市芝中ポンプ場を中心に図-11に示す地域に適用し、腐食深度予測および危険度判定の検証を行う。当該地域内には、70ヶ所以上のマンホールが存在する。本研究では、コンクリートの下水管渠に限定し、当該地域の主幹線のうち下水管渠の内径が変化する13ヶ所のマンホールを調査の対象とした。過去(2003年8月)に実施された調査³⁾では、13ヶ所のマンホールに対して、下水のBOD、温度、pHなど下水管渠の腐食深度予測に必要な環境データを計測されていた。対象マンホールの絞り込みは、以下の条件で行った：①開始地点、分合流マンホールなどの詳細データを収集するため、システムの構築と検証に有用な位置、②全調査地域の中で幹線路を優先して、調査の汎用性が高い位置、③幹線路に流入する支線路の下水管渠も対象となるため、支線路の腐食深度予測も可能な信頼性の高い位置、④予算や

Form1

硫化物フラックスの予測式

マンホールID 5.89

BOD 265 (mg/l)

水温 24.4 (°C)

硫化物濃度 (始端) 0 (mg/l)

水深 190 (mm)

PH 6.94

使う年数 33

H₂S濃度 (空気中) 4

点検実施時 1 時4 分

前に戻る 計算 次の計算へ

Text1

図-10 環境計測データ入力画面例

作業性などを勘案して、可能な限り計測作業が容易な調査地点。

また、今回調査したマンホールから得られた環境計測データの一例を表-1に示す。

上記のデータを利用して、前述図-6に示す手順で腐食深度予測の計算および危険度判定を行った。

(2) 計測データによる腐食劣化の予測

調査地点の中で、図-11に示す5.60番マンホールは

岬小学校区からの幹線路と笹山分区からの幹線路の合流地点として重要なマンホールであることから、ここでは5.60番マンホールのデータについて検証を行った。5.60番マンホールとその上流地点として各々5.71番(岬小学校側)と5.85番(笹山分区側)の合計3基のマンホールの環境(下水)データを計測した。そして、5.60番マンホールを中心して周囲の下水管渠の腐食劣化状況を予測した。この場合の5.60番マンホールでの下水の計測結果は：①温度：24.4(°C)、②水深：330(mm)、③流量：0.035(m³/s)、④流速：0.361(m/s)、⑤使用年数：1960年～2003年。

なお、下水管渠中の24時間のBOD計測例を図-12に示す。同図から得られるBOD推定曲線式(図-12中に表記)に基づいてBODを算出したところ、一日当たりの平均値は115.2(mg/l)となった。

当該マンホールの下流側下水管渠の解析結果を示すと、内径900mm、勾配0.4‰、下水管延長67.62mのコンクリート管渠に本システムを適用すれば、水深330mm、下水温度24.4°C、pH値が6.74の場合、硫化水素ガス濃度(最終点からの累積値)は888ppmと算出される。このガス濃度環境下で43年間継続して管渠を使用した場合、腐食深度予測値は259.9mmとなった。

(3) 硫化水素ガスおよび腐食深度予測結果の検証と考察
腐食深度予測の検証を行うため、硫化水素ガスセンサーを用いて、図-11中に示す幹線路の5.60番マンホール内の硫化水素ガス濃度を以下の測定条件で計測した：

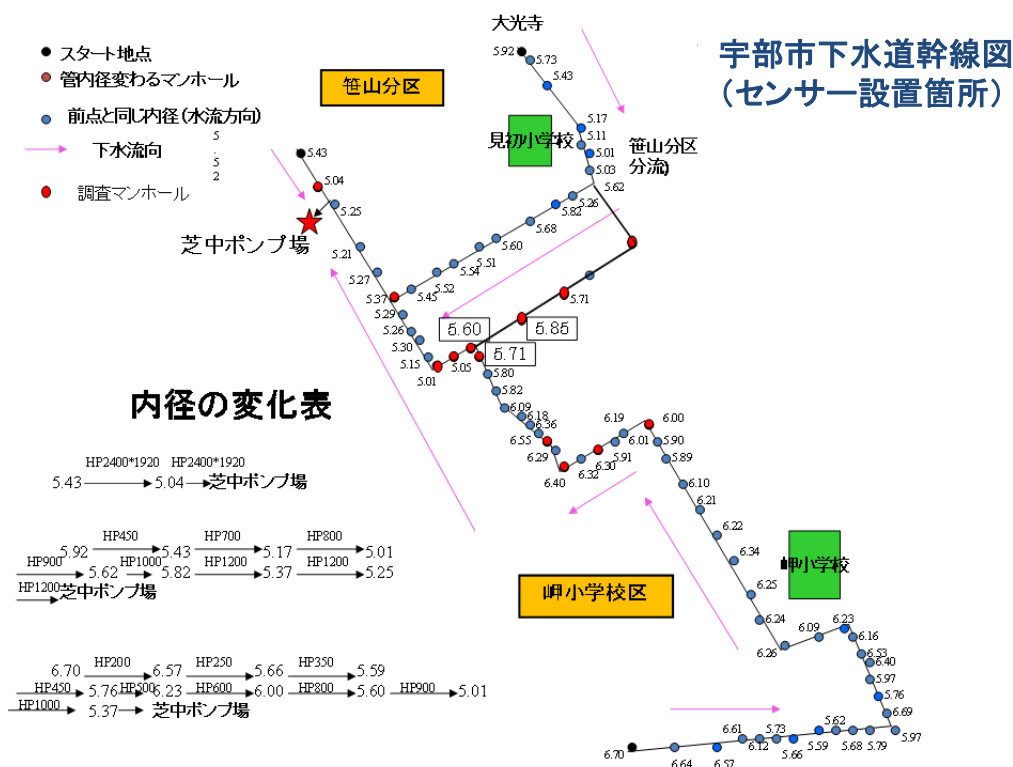


図-11 現地調査地域の下水管網とマンホール位置の例

①測定期間：8月22日午前中～10月24日午前中，②測定ロギング間隔：10分間隔，③計測方法：硫化水素濃度ガス最大値(ppm)，気温(°C)，④測定データ数：9,084回。

これらのデータのうち、晴れの気象条件のもとで検証するため、雨天の日とその後2日(合計64日間)のデータを除いて、残りの5,556回の硫化水素と気温データを分析に使用した。

硫化水素ガス濃度の全計測回数645回中、75回(11.6%)において硫化水素ガスが観測され、かなりの確率で発生していることが分かった。特に、9月9日午後には、30.8ppmの硫化水素ガス濃度が記録されていたこともあった。しかし、全測定データに基づいて算定した硫化水素ガス濃度の平均値は1.0ppm未満であり(表-1参照)、本予測システムを適用して算出した硫化水素ガス濃度はかなり大きな予測値になる傾向がみられた。今回の検証に使用した環境計測データは、主として夏季のものであるが、コンクリートの微生物腐食は湿度、温度、共生する微生物によっても変化し、また実際の下水管網では下水流の水質や流量も変化する。例えば、BODや硫酸イオンなどの水質変化は、家庭排水中心の場合、早朝から昼までの炊事、洗面、洗濯、夕方からの炊事、風呂など家庭生活と大きく関係していることが明らかになっており、下水管網は一定濃度の硫化水素ガスに曝されているわけではない。また、夏季と冬季では水温が大きく異なり、

硫化水素ガス濃度も大きく変化する。このため、このような時々刻々の変化を時系列モニターし、メタ戦略を適用することによって最適化処理する本手法³⁾の有用性は今後高まるものと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた主な結果をまとめると、以下のようになる：

- 1) 下水管網に設置されるマンホール内センサーを通して得られる環境計測データにより下水管渠の腐食深度予測を行い、道路陥没などの危険度を診断する一連の流れをシステム化した統合型予防保全支援システムの開発を行い、その実用性を既存下水管網に適用して検討した。
- 2) 環境計測データを用いて、本システムを既存の下水管網へ適用した結果、推定された硫化水素ガス濃度および予測された腐食深度の出力結果は、現地計測データと比較して高精度とは言えなかった。これは、微生物腐食によるコンクリート管渠の局所劣化が、目視点検や維持管理が困難な場所で発生しているため、腐食環境や腐食状況の蓄積データが少なく、コンクリート腐食機構予測モデルの構築が不十分である現状がある。

謝辞：本研究の実施にあたって種々ご協力頂いた宇部市下水道部の担当者の方々に深く感謝の意を表します。

表-1 現地環境計測データの例 (E: error)

調査時間 (調査項目)	9:00am (21)	9:20am (21)	9:40am (21)	9:45am (21)	9:50am (21)	9:55am (22)	10:10am (21)	10:15am (21)
マンホール番号	5.25	5.37	5.05	5.60	5.85	新マンホール	5.80	5.89
生物化学的酸素要求量, BOD (mg/l)	94	83	65	70	160	2400	190	190
溶存硫化水素濃度(ppm)	N.D.(<0.1)	N.D.(<0.1)	N.D.(<0.1)	N.D.(<0.1)	N.D.(<0.1)	N.D.(<0.1)	N.D.(<0.1)	N.D.(<0.1)
溶存酸素濃度, DO(mg/l)	0.80	0.90	1.10	1.70	0.40	2.10	1.60	2.30
pH	6.75	6.70	6.76	6.79	7.15	7.07	7.70	7.56
水温(°C)	24.0	24.4	24.4	24.4	26.7	26.5	26.9	26.6
気温(°C)	33	33	33	33	33	33	33	33
水深(cm)	23	23	30	33	22	3.5	17	12
腐食深度(mm)	E	E	E	E	E	E	E	E
マンホール開口直後のH ₂ S濃度(ppm)	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0	0	0.1

参考文献

- 1) 管路診断コンサルタント協会編：下水道管路施設改築・修繕に関するコンサルティングマニュアル(案), Var. 2, 2004.
- 2) 普賢実光：転ばぬ先の下水道危機管理講座 第7回 維持管理時代の財源確保ー2018年, 改築修繕費2兆円時代に備えてー, 環境新聞社, 月刊下水道, Vol.28, No.12, 2005.
- 3) 松川 努・宮本文穂・中村秀明：メタ戦略による下水道管路施設の保全計画策定支援システムの構築, 土木学会論文集F, Vol.66, No.4, pp.536-555, 2010.10.
- 4) 松川 努・宮本文穂・中村秀明：下水管網の予防保全計画策定における意思決定の自動化と合理化支援の提案, 土木学会論文集F, Vol. 63, No.3, 2007.
- 5) 松川 努・宮本文穂・中村秀明：下水管網に起因する道路陥没の位置推定と危険度及び原因の予測に関する手法の提案, 下水道協会誌, 45-554(2008).
- 6) 宮本文穂：下水管損傷予測方法, 特許出願公開番号; 特開 2006-183457, 日本国特許庁, 2006.7.13.
- 7) 宮本文穂：下水管網における下水管損傷予測方法及び予測装置, 特許出願公開番号; 特開 2006-183274, 日本国特許庁, 2006.7.13.

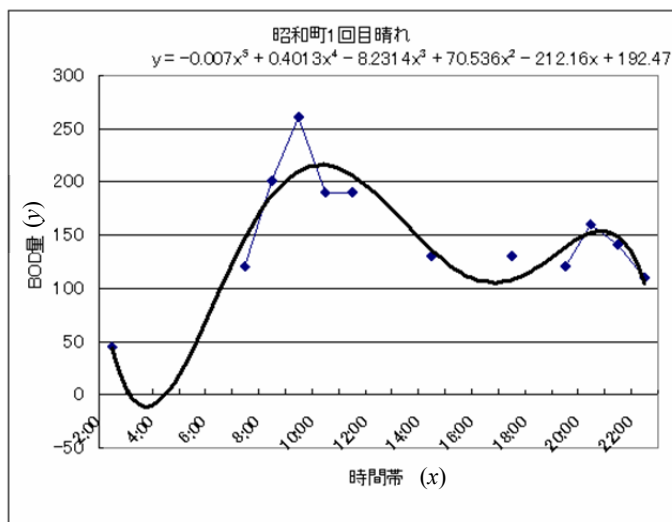


図-12 BOD の推定曲線式の例