

# 数量化理論を用いた水道管路システム の安全性評価に関する研究

小泉明<sup>1</sup>・○荒井康裕<sup>2</sup>・稲員とよの<sup>3</sup>・新谷政秋<sup>4</sup>・中野直樹<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 首都大学東京大学院・都市環境科学研究科 教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: akoiz@tmu.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 首都大学東京大学院・都市環境科学研究科 助教 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: y-arai@tmu.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 工博 首都大学東京大学院・都市環境科学研究科 准教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: inakazu@tmu.ac.jp

<sup>4</sup>福岡市水道局 配水部 事業調整課 (〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前 1-28-15)

E-mail: jigyo.WB@city.fukuoka.jp

本研究では、水道管路の安全性を簡易に診断する手法として数量化理論Ⅱ類及びⅠ類を用い、事故リスク評価モデル及び漏水リスク評価モデルを提案した。前者の外的基準（目的変数）は配水管修理件数の有無であり、後者は漏水量の多少とした。また、モデルの説明変数として、管路材質の差異、外面被覆の有無、地形分類といった要因を検討した。そして、異なる 2 つの診断結果をどのように管路更新計画に活用すれば良いのかについて、具体的な適用事例を示しながら論じた。この結果、事故リスクに関して同一の診断結果であっても、漏水リスクを考慮することで、優先的に対処すべき箇所の設定を可能にする等、更新計画を立案する上での有用性が明らかになった。

**Key Words :** *pipeline system, risk assessment, pipeline replacement planning, quantification theory, mapping information*

## 1. はじめに

水道事業体が今後直面する最大の課題は「管路の更新」である。総額 37 兆円とも言われる水道資産の約 7 割を占める管路システム（導水、送水、配水、給水）は、高度経済成長時代に敷設されたものが多く、現在、それらの老朽化が問題となっている。管路の老朽化を放置しておけば、漏水量の増大化を招くほか、突然の出水事故や断水、給水水質の劣化、地震時等の災害時における事故リスクを高める。今後、水道管路システムの維持管理に取り組む上での重要事項として、管路の安全性を可能な限り効率的にかつ簡易に調査・診断することができる新技術の開発が挙げられる。

そこで本研究では、水道管路システムの内、管路総延長の大部分を占める配水管に着目し、その安全性評価に供する統計的な分析を試みる。以下、2. では、管路診断プロセスの概要について述べ、本研究の位置付けを明らかにする。3. では、水道管路のマッピング情報（メッシュ

データ）を活用し、配水管の修理件数の有無、並びに漏水量の多少が、管路の材質や埋設年度、土質・地形分類といった要因にどのような影響を受けているのかを分析し、4. では、数量化理論<sup>1)</sup>を用いた安全性評価モデルの構築を試みる。最後に 5. では、サンプルスコア（モデルの合成変数）を基準にしたリスク評価区分を提案するとともに、モデル検証地域でのケーススタディを試み、優先的に対策を講じるべき地区（メッシュ）の特定方法について論じる。

## 2. 管路診断プロセスと本研究の位置付け

管路更新で最も難しいところは、直接には見ることでできない地中の管路を相手にしながら、事故が生じる前に対処しなくてはならない点にある。管路の取替え工事が必要か否かは、対象となる管路の埋設環境（内的要因及び外的要因）等を的確に見極めた上で判断しなくては

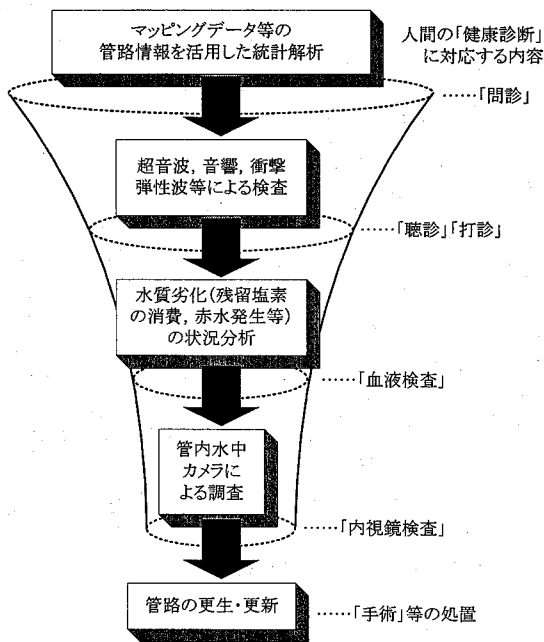


図-1 管路の更生・更新に至るまでの診断プロセス

ならない。埋設された管路の状態を調べる方法として管体調査や土質調査があるが、これらの調査が必要となる掘削は、工事費用の問題だけでなく、地上部における交通規制といった社会的弊害も伴う。今後の管路診断を考えた場合には、「非開削」で「簡易」に実施できる調査手法・技術の研究開発が必要とされる。さらに、ここで対象となる管路施設は大きなネットワークを形成しており、全域的な整備を成し遂げるためには数十年といった極めて長い年月を要する。面的な広がりを持つ水道管路に対し、どの箇所から優先的に対処すれば良いのか等、作業計画に明確な戦略性を持たせることも、長期間に亘る管路更新に取り組む上で重要となる。

以上に述べた管路更新とその診断技術は、我々人間の「健康診断」に例えて考えることができる。人間の健康診断は、いくつかの段階を経て実施される。まず、本格的な診断に入る前に「問診」を行い、医者が患者の病状の大体を判断する。「聴診」や「打診」では、患者の呼吸音・心音などを聞き取り、異常の有無が確認される。そして、「血液検査」や「内視鏡検査」等の精密検査が必要に応じて行われ、これらの診断結果を総合的に判断して手術等の処置がなされる。こうした人間の手術に至るまでの診断プロセスを参考に、管路の診断手法について系統化すると、図-1のような関係が得られる。

問診に相当する「マッピングデータ等の管路情報を活用した統計解析」は、管路の材質・埋設年度といった内的要因と、土質・地形分類を始めとする外的要因を分析し、管路の劣化・腐食状況（患者の病状）との関連性を

マクロ的に把握するものである。一方、「超音波診断法」、「音響法」や「衝撃弾性波法」の非開削診断技術は、管路の物理的特性を応用するもので、個々の管路に対する簡易的な診断を目的にしている。さらに、「水質劣化（残留塩素の消費、赤水の発生等）の状況分析」及び「管内水中カメラによる調査」は、血液検査及び内視鏡検査といったレベルの精密検査に位置付けられ、管内面（患者の体内）の様子を調べることができる。

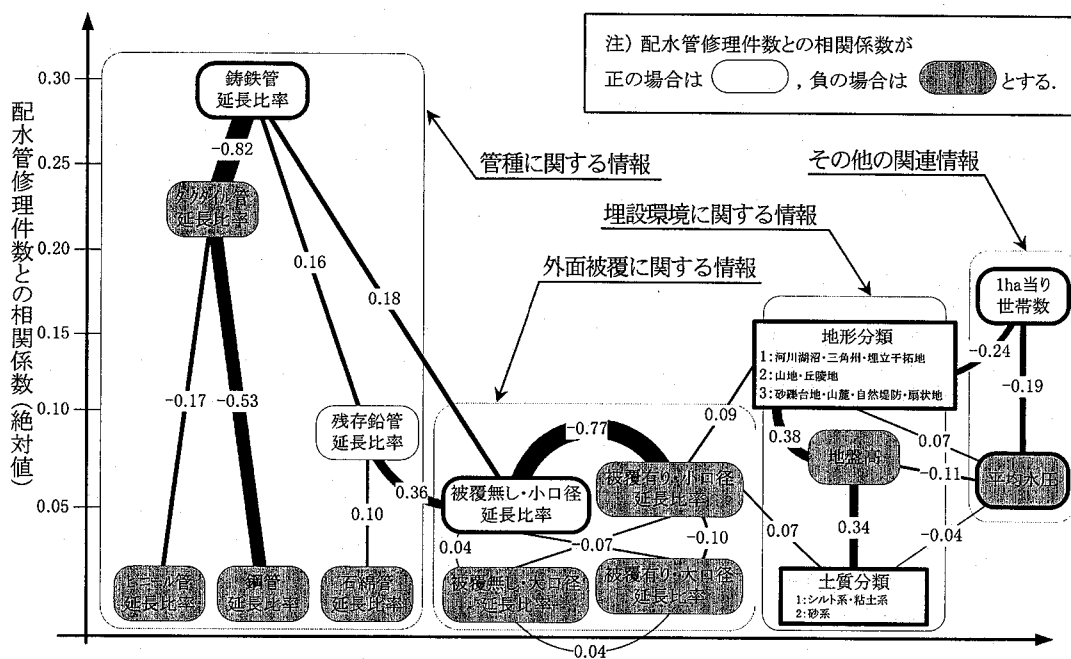
こうした一連のプロセスを踏まえ、管路の更生・更新（手術等の処置）の必要性が最終判断されることになる。厳しい財政難が今後予想される中で、莫大なコストと労力を投じて実施しなければならない管路更新には、人間の健康診断と同様に、目的やレベルに応じて診断手法を適宜選択し、それらを段階的に組み合わせて行く「管路診断プロセス」の構築が不可欠である。本研究では、個々の管路を対象にした診断方法を適用する前に、まず事故や漏水が懸念される箇所を予見し、対象地域のどこから、こういった順番で作業に取り組むのかを計画・準備するための診断手法を扱う。

### 3. 要因関連図による影響要因の抽出

#### (1) マッピング情報の概要

本論文の対象地域は、給水区域内人口：約 140 万人、同世帯数：約 65 万世帯、1 日平均給水量：約 40.6 万  $\text{m}^3$ 、配水管総延長：約 3,700km、施設能力：約 76.5 万  $\text{m}^3$ /日といった規模（平成 17 年度）を有している。分析に用いる水道管路マッピング情報は、1 つの大きさが 250m $\times$ 250m のメッシュデータである<sup>2)</sup>。データベース化された内容として、管種別・経年別の配水管延長や配水管修理件数（平成 10～15 年度）といった基本情報が含まれる他、水圧（有効水頭）や世帯数、さらには土質や地形に関する情報もメッシュ毎に整理されている。ここで、配水管修理件数の内訳は、管体、継手、弁類等に細分類されるが、本研究では全体のリスクを把握するため一括して取り扱うことにした。

また、給水管に関する修繕・漏水についても、給水管修理件数（平成 8～15 年度）や残存鉛管延長等の情報が同様にメッシュデータとして蓄積されている。特に、給水管における漏水防止量（以下、単にこれを「漏水量」と定義する）は、分水栓からメータまでの区間（給水管の一次側）を対象に平成 14 及び 15 年度に実施した漏水防止調査において、実際に発見された漏水量（単位：[ $\text{m}^3$ /日]）で、漏水箇所の修繕に伴って所定の訓練を受けた調査員の目視によって測定したものである。メッシュへの配分は、測定値をブロック（地域全体を 106 区画に分割したもの）毎に集計した上で、当該メッシュの配水管総



延長に応じて按分した数値となっている。

特に、「配水管修理件数」及び「漏水量」は、水道管路システムの機能診断・評価を考える上で留意すべき項目であることから、以降の安全性評価モデルの構築においては、各々を外的基準（目的変数）にした数量化モデル<sup>3)</sup>を作成するものとする。

なお、対象の全域を覆うメッシュ数は 5 千個以上になるが、配水管が埋設されていない地域も一部存在する。配水管延長が 0 ないし極端に短いメッシュは、今回の分析対象から除くことが望ましいとの判断から、以降では配水管延長が 100 [m] 未満のメッシュを除く、合計 3,033 個のデータを対象に扱うことにした。

## (2) 要因関連図の作成

メッシュデータに含まれる様々な項目に関して、まず各々の関連性を把握した上で、次章4.で構築するモデルの説明変数として採用すべき項目を抽出する。具体的には、各項目の相関分析を行い、その中から代表的なものをいくつか取り上げ、図-2のような要因関連図<sup>4)</sup>を作成した。この図では、縦軸に配水管修理件数との相関係数の絶対値を取り、図の上部に位置する項目ほど配水管修理件数に対する相関が高いことを表現している。また、図中の項目間をつなぐ線の太さは、当該項目間の相関係数の大小を相対的に表現している。こうした要因関連図を用いることにより、配水管修理件数との関係を考慮しつつ、項目全体の関連構造を的確に捉えることができる。

なお、いくつかの項目にある「延長比率」とは、全て

配水管延長 [m] に対する百分率 [%] を意味し、「土質分類」及び「地形分類」は、管路に対する腐食影響等を考慮した上で、いずれもカテゴリ化したデータを用いることとした<sup>5)</sup> (他の数量データと区別するため四角い枠で表示する)。また、対象地域におけるポリエチレンスリーブ採用が昭和 54 年 (1978 年) である点を踏まえ、本研究ではこの年度の以前と以降を区別することで、外面被覆の有無による影響を考慮に入れることにした<sup>6)</sup>。ただし、口径 300 [mm] 以下を小口径、350 [mm] 以上を大口径とした。

図-2 の配水管修理件数に関する要因関連図について考察すると、管種に関する情報である「鑄鉄管（CIP）延長比率」，続いて埋設環境・その他の関連情報である「1ha 当り世帯数」及び「地形分類」が図の上部に見られる。一方、漏水量に関する要因関連図（紙面の都合により割愛）については、管種に関する情報で「残存鉛管延長比率」が「鑄鉄管（CIP）延長比率」に比べ更に図の上部に位置することや、「1ha 当り世帯数」及び「地形分類」が先と同様、図の上部に位置していることを確認している。各項目間のつながりを踏まえ、数量化理論を用いた安全性評価モデルの構築（次章 4.）では、モデルに用いる説明変数の候補として、①鑄鉄管延長比率、②外面被覆無し・小口径（300[mm] 以下）延長比率、③残存鉛管延長比率、④土質分類、⑤地形分類、⑥平均水圧、⑦1ha 当り世帯数の計 7 項目を取り上げることにする（ただし、③は漏水量との関連が強い項目と判断し、漏水量を外的基準にしたモデルのみに使用する）、外的基準の「配水管修

表-1 アイテム・カテゴリー

| アイテム                            | k | カテゴリー            | データ数 |
|---------------------------------|---|------------------|------|
| 铸铁管(CIP)<br>延長比率                | 1 | 0%               | 2111 |
|                                 | 2 | ～10%             | 479  |
|                                 | 3 | ～20%             | 244  |
|                                 | 4 | ～30%             | 94   |
|                                 | 5 | 30%より大           | 105  |
| 外面被覆無し・<br>小口径(300mm<br>以下)延長比率 | 1 | 0%               | 560  |
|                                 | 2 | ～30%             | 1177 |
|                                 | 3 | 30%より大           | 1296 |
| 残存鉛管<br>延長比率                    | 1 | 0%               | 876  |
|                                 | 2 | ～5%              | 1379 |
|                                 | 3 | ～10%             | 562  |
|                                 | 4 | 10%より大           | 216  |
| 土質分類                            | 1 | シルト系・粘土系         | 1703 |
|                                 | 2 | 砂系               | 1326 |
| 地形分類                            | 1 | 河川湖沼・三角洲・埋立干拓地   | 1682 |
|                                 | 2 | 山地・丘陵地           | 486  |
|                                 | 3 | 砂礫台地・山麓・自然堤防・扇状地 | 865  |
| 平均水圧                            | 1 | ～50m             | 2447 |
|                                 | 2 | 50mより大           | 586  |
| 1ha当り<br>世帯数                    | 1 | ～10[世帯/ha]       | 1033 |
|                                 | 2 | ～30[世帯/ha]       | 739  |
|                                 | 3 | ～60[世帯/ha]       | 769  |
|                                 | 4 | 60[世帯/ha]より大     | 492  |

理件数」及び「漏水量」に対し、前者には数量化理論第Ⅱ類を、後者には数量化理論第Ⅰ類をそれぞれ適用する。数量化理論を適用する場合、説明変数のカテゴリー化が必要となる。本研究では、データを区分した後に各々のデータ数が極端に偏らないよう留意し、表-1に示すアイテム・カテゴリーを用いることとした。

#### 4. 数量化理論を用いた安全性評価モデルの構築

##### (1) 数量化理論の適用

配水管修理件数が1件以上のメッシュをBAD群(群1,  $n=522$ )、修理件数が無いメッシュをGOOD群(群2,  $n=2,511$ )とし、両群に関する判別モデルとして数量化理論第Ⅱ類を検討する。表-1の残存鉛管延長比率を除く6アイテムから、段階的にレンジの小さいアイテムを除き、3アイテムまで減少させた場合、表-2に示すようなレンジ順位及び判別の中率が得られた。ここでのレンジとは、各アイテムにおけるカテゴリースコアの最大値と最小値の差(絶対値)であり、この値が大きいアイテムほど、外的基準に与える影響が大きいと考える。なお、説明変数の候補として挙げたアイテムの内、「残存鉛管延長比率」については、漏水量を外的基準としたモデルに使用するので、ここでの分析には含まれていない。

一方、外的基準を漏水量とした数量化理論第Ⅰ類の適

表-2 レンジ順位及び判別の中率(配水管修理件数)

| アイテム名       | アイテム数 |      |      |      |
|-------------|-------|------|------|------|
|             | 6     | 5    | 4    | 3    |
| 1 铸铁管延長比率   | 2.45  | 2.45 | 2.46 | 2.54 |
| 2 1ha当り世帯数  | 0.75  | 0.74 | 0.74 | 0.77 |
| 3 被覆無・小口径比率 | 0.37  | 0.37 | 0.38 | 0.39 |
| 4 地形分類      | 0.27  | 0.27 | 0.28 |      |
| 5 平均水圧      | 0.02  | 0.02 |      |      |
| 6 土質分類      | 0.01  |      |      |      |
| 判別の中率       | 64%   | 64%  | 64%  | 62%  |

表-3 レンジ順位及び自由度調整済み重相関係数(漏水量)

| アイテム名       | アイテム数 |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 7     | 6     | 5     | 4     | 3     |
| 1 1ha当り世帯数  | 0.60  | 0.60  | 0.60  | 0.61  | 0.62  |
| 2 铸铁管延長比率   | 0.39  | 0.39  | 0.40  | 0.40  | 0.43  |
| 3 残存鉛管延長比率  | 0.19  | 0.19  | 0.21  | 0.22  | 0.22  |
| 4 地形分類      | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |       |
| 5 平均水圧      | 0.07  | 0.07  | 0.07  |       |       |
| 6 被覆無・小口径比率 | 0.05  | 0.05  |       |       |       |
| 7 土質分類      | 0.03  |       |       |       |       |
| $R^*$       | 0.650 | 0.650 | 0.650 | 0.649 | 0.643 |

用を試みた結果、表-3に示すレンジ順位及び自由度調整済み重相関係数 $R^*$ が得られた。なお、レンジの大きさに従ってモデルに使用するアイテム数を減少させる方法は、配水管修理件数を外的基準とした時と同様に、表-1の7アイテム(残存鉛管延長比率を含む)を用いて行った。

##### (2) 事故リスク及び漏水リスク評価モデルの決定

本研究で提案する安全性評価モデルは、実用性の観点から、できる限りシンプルの方が望ましい。そこで、最終的なモデルに使用するべきアイテム数は、要因関連図の結果等を踏まえ、4アイテムが妥当であると判断した。

両者のモデルを比較すると、共通するアイテムとして、「铸铁管延長比率」、「1ha当り世帯数」、「地形分類」が採用され、配水管の修理件数を外的基準としたモデルでは「被覆無・小口径延長比率」、漏水量を外的基準にしたモデルでは「残存鉛管延長比率」がそれぞれ追加されている。外的基準の異なるモデルを作成したものの、結果的には似通ったモデル構造となる点について、配水管・給水管双方に対し、共通した影響傾向があると解釈できる。これは、配水管・給水管の対策を一体的に行うこと、例えば、配水管の改良工事に併せて実施する給水管の取替えといった取り組みが、水道管路システムの更新を進めて行く上で1つの有効策となり得ることを示唆している。

以下では、配水管の修理件数を外的基準とした数量化理論第Ⅱ類によるモデルを「事故リスク評価モデル」と

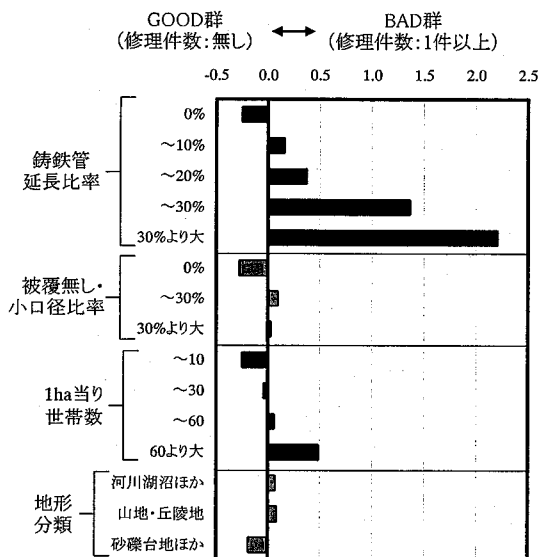


図-3 事故リスク評価モデルのカテゴリースコアグラフ

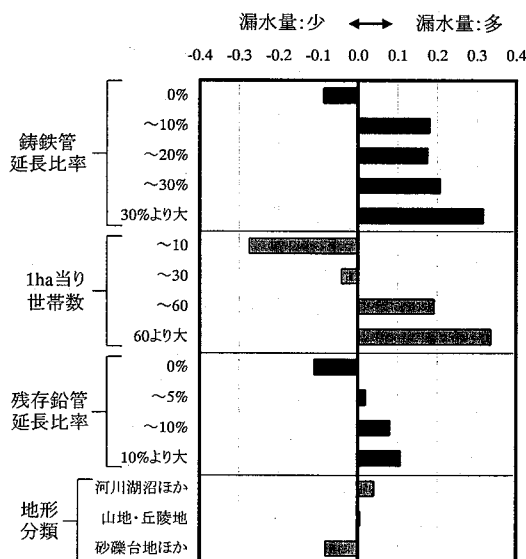


図-4 漏水リスク評価モデルのカテゴリースコアグラフ

呼ぶこととし、(1)式によって表現する。

$$Y_i = -0.2515 \times A_1 + 0.1617 \times A_2 + 0.3797 \times A_3 + 1.3695 \times A_4 + 2.2112 \times A_5 - 0.2771 \times B_1 + 0.0982 \times B_2 + 0.0306 \times B_3 - 0.2508 \times C_1 - 0.0445 \times C_2 + 0.0653 \times C_3 + 0.4914 \times C_4 + 0.0738 \times D_1 + 0.0875 \times D_2 - 0.1926 \times D_3 \quad (1)$$

ただし、 $Y_i$ ：サンプルスコア（合成変量）、 $A_k$ ：铸铁管延長比率、 $B_k$ ：被覆無・小口径延長比率、 $C_k$ ：1ha 当り世帯数、 $D_k$ ：地形分類は、各アイテムのカテゴリー  $k$  に対応したダミー変数（該当する場合「1」、しない場合「0」）をそれぞれ意味する。なお、カテゴリーの詳細は表-1 に対応し、式中の係数（カテゴリースコア）は、相関比の

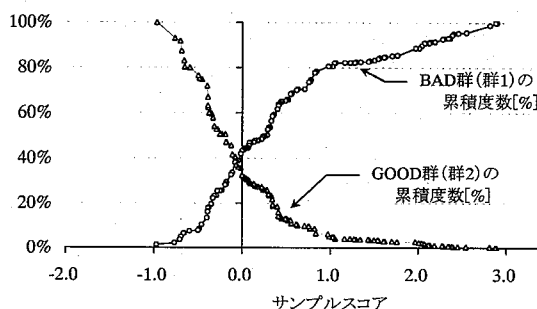


図-5 事故リスク評価モデルの累積度数グラフ

二乗（級間平方和を全平方和で除した値）を最大にするように計算されたものである。

一方、漏水量を外的基準にした数量化理論第 I 類によるモデルは(2)式で表現され、これを「漏水リスク評価モデル」と呼ぶ。

$$Y_i = -0.0863 \times a_1 + 0.1805 \times a_2 + 0.1758 \times a_3 + 0.2077 \times a_4 + 0.3165 \times a_5 - 0.2742 \times b_1 - 0.0409 \times b_2 + 0.1924 \times b_3 + 0.3363 \times b_4 - 0.1097 \times c_1 + 0.0200 \times c_2 + 0.0804 \times c_3 + 0.1079 \times c_4 + 0.0406 \times d_1 + 0.0054 \times d_2 - 0.0821 \times d_3 + 0.5384 \quad (\text{定数項})$$

ただし、 $Y_i$  はサンプルスコア（合成変量）とし、 $a_k$ ：铸铁管延長比率、 $b_k$ ：1ha 当り世帯数、 $c_k$ ：残存鉛管延長比率、 $d_k$ ：地形分類は、各アイテムのカテゴリー  $k$  に対応したダミー変数（該当する場合「1」、しない場合「0」）をそれぞれ意味する。先と同様に、カテゴリーの詳細は表-1 に対応し、式中の係数はモデルの合成変量と実測値との相関係数を最大にするように計算されたものである。なお、図-3 及び図-4 に各モデルのカテゴリースコアグラフを示す。

## 5. モデルによる診断方法の実際

### (1) サンプルスコアを基準にした診断方法

#### a) 事故リスクの評価区分について

事故リスク評価モデル（(1)式）に各メッシュのデータ属性を代入することで、当該メッシュのサンプルスコア  $Y_i$  が計算できる。このサンプルスコアが、判別的中点（ $Y_i = -0.0432$ ）より大きい場合には群 1（BAD 群）、判別的中点より小さい場合には群 2（GOOD 群）として判別される。サンプルスコアの大小と判別結果の対応関係について考えると、絶対値の小さい（判別的中点に近い）サンプルスコアよりも、絶対値の大きい（判別的中点から正及び負の方向に離れた）サンプルスコアの時の方が判別精度は良好となる。すなわち、サンプルスコアが大きいほど群 1（BAD 群）である傾向が強く、逆に、サンプルスコアが小さいほど群 2（GOOD 群）である傾向が

表-4 事故リスクの評価区分 (8段階)

| 事故リスク | 対応するサンプルスコア           | データ数 | 事故リスク | 対応するサンプルスコア            | データ数  |
|-------|-----------------------|------|-------|------------------------|-------|
| 95%   | 2.8882<br>~<br>2.3945 | 42   | 70%   | 0.8387<br>~<br>0.6169  | 162   |
| 90%   | 2.3808<br>~<br>2.0647 | 61   | 60%   | 0.5631<br>~<br>0.3989  | 244   |
| 85%   | 2.0329<br>~<br>1.6989 | 49   | 50%   | 0.3579<br>~<br>0.2830  | 236   |
| 80%   | 1.6205<br>~<br>0.9754 | 120  | 50%未満 | 0.2554<br>~<br>-0.9720 | 2,119 |

注) ここでの事故リスクとは、管路更新の優先度を定量化することを目的にBAD群(群1)の累積度数の百分率[%](図-5参照)から独自に考案した指標であり、事故の発生確率を意味するものではない点に留意する必要がある。

表-5 漏水リスクの評価区分 (4段階)

| 漏水リスク | 対応するサンプルスコア<br>(右側: 累積度数[%]の範囲) | データ数  |
|-------|---------------------------------|-------|
| A     | 0.5以下<br>50%以下                  | 1,461 |
| B     | 0.5より大<br>0.7以下                 | 367   |
| C     | 0.7より大<br>1.0以下                 | 795   |
| D     | 1.0より大<br>90%以上                 | 410   |

注) 漏水リスクはAが最も安全でDが最も危険を表わす。

強くなる。こうした傾向を確率論的に表現するため、本研究では図-5に示す累積度数グラフに基づいて検討することにする。なお、図中の群1の累積度数[%]はサンプルスコア昇順(サンプルスコアの小さい方から順番)にBAD群の累積度数を、群2の累積度数[%]はサンプルスコア降順(サンプルスコアの大きい方から順番)にGOOD群の累積度数を取り、各々の全体数に対する百分率[%]で示したものである。サンプルスコアが大きくなるに従い、群1の累積度数[%]が徐々に高まる関係が読み取れる。本研究では、この群1の累積度数[%]を、各サンプルスコアに対応する事故リスクの大きさとして捉え、表-4に示す8段階の評価区分を提案する。区分に際して留意したのは、事故リスクが80%以上の範囲で勾配が緩やかに変化している点から、これに相当する評価区分を細分化するとともに、サンプルスコアが0付近から負の領域に相当する評価区分は、数量化理論第Ⅱ類による判別では元来、群2(GOOD群)を推定する範囲となることから、これらを一括の区分として統廃合した点である。

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a1-1 | a1-2 | a2-1 | a2-2 | b1-1 | b1-2 | b2-1 | b2-2 |
| a1-4 | a1-3 | a2-4 | a2-3 | b1-4 | b1-3 | b2-4 | b2-3 |
| a4-1 | a4-2 | a3-1 | a3-2 | b4-1 | b4-2 | b3-1 | b3-2 |
| a4-4 | a4-3 | a3-4 | a3-3 | b4-4 | b4-3 | b3-4 | b3-3 |
| d1-1 | d1-2 | d2-1 | d2-2 | c1-1 | c1-2 | c2-1 | c2-2 |
| d1-4 | d1-3 | d2-4 | d2-3 | c1-4 | c1-3 | c2-4 | c2-3 |
| d4-1 | d4-2 | d3-1 | d3-2 | c4-1 | c4-2 | c3-1 | c3-2 |
| d4-4 | d4-3 | d3-4 | d3-3 | c4-4 | c4-3 | c3-4 | c3-3 |

図-6 モデル検証地域 (計64メッシュ)

表-6 モデル検証地域の概要

|                            | a地区  | b地区  | c地区  | d地区  |
|----------------------------|------|------|------|------|
| 配水管<br>修理件数 [件]            | 2.56 | 0.63 | 0.38 | 0.69 |
| 漏水量<br>[m <sup>3</sup> /日] | 1.97 | 1.07 | 0.62 | 0.88 |
| 铸铁管<br>延長比率 [%]            | 40.6 | 13.5 | 3.2  | 18.3 |
| 被覆無し・<br>小口径比率 [%]         | 37.6 | 35.8 | 37.7 | 41.2 |
| 1ha当り世帯数<br>[世帯/ha]        | 92.9 | 34.6 | 30.4 | 65.6 |
| 残存鉛管<br>延長比率 [%]           | 4.85 | 2.67 | 2.99 | 6.85 |

注) 数値は各項目の平均値を表わす。

## b) 漏水リスクの評価区分について

漏水リスク評価モデルに関しても、事故リスク評価モデルと同様に、メッシュのデータ属性を(2)式に代入することでサンプルスコア  $Y_i$  を計算することが可能である。ただし、この計算では定数項(外的基準の平均値)を加算する点で異なっており、漏水リスク評価モデルのサンプルスコアは漏水量の推定値に相当する。

先の事故リスク評価モデルで検討した内容を踏まえ、漏水リスク評価モデルに関しても同様の評価区分の提案を行う。すなわち、サンプルスコア(漏水量の推定値)が大きいほど漏水リスクは高く、対策の優先度が高いメッシュであるとの判断から、表-5に示す4段階を漏水リスクの評価区分とする。

## (2) モデル検証地域への適用結果と考察

提案したモデルの有効性を精査するため、全メッシュの中から一部の地区(以後「モデル検証地域」と呼ぶ)を選定し、評価モデルによって得られる診断結果を詳細に考察して行くことにする。具体的な場所の選定については、事故リスク評価モデルによる全域の診断結果を踏

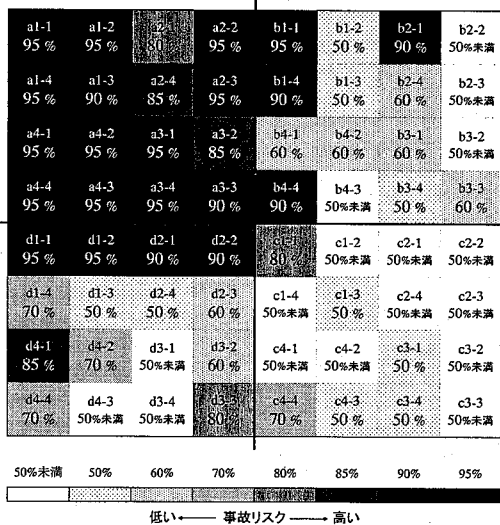


図-7 事故リスクの診断結果

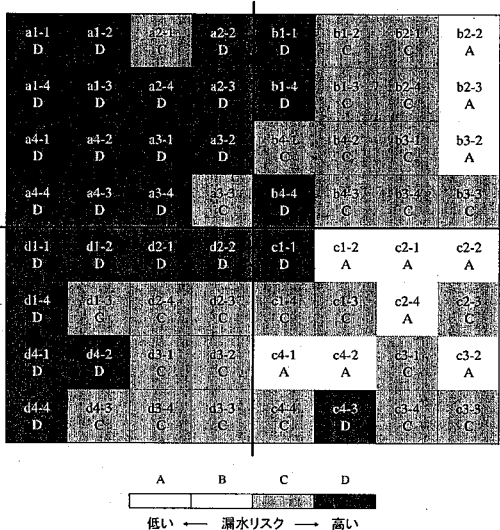


図-8 漏水リスクの診断結果

まえ、リスクの高いメッシュとそうでないメッシュが混在するエリアが適切と判断し、都心部に位置するメッシュ群を今回の候補とした。モデル検証地域の面積は、計64メッシュ分の大きさに相当する4km<sup>2</sup>である。なお、以降の分析では、モデル検証地域内のメッシュを特定する際、図-6に示す記号を便宜的に用いる。各地区の概要として、配水管修理件数、漏水量、铸铁管延長比率等の平均値を集計すると表-6のようになる。

ここで、事故リスク及び漏水リスク評価モデルを融合させた診断方法について簡潔に述べる。基本的な枠組みとして、作成した2つのモデルの内、事故リスク評価モデル（数量化理論第Ⅱ類）による診断内容を主軸に置きながら、漏水リスク評価モデル（数量化理論第Ⅰ類）の

表-7 事故リスクと漏水リスクの対応関係

| 事故リスク   |    | 漏水リスク   |    | 統合評価<br>(両リスクの融合) |
|---------|----|---------|----|-------------------|
| 該当メッシュ数 |    | 該当メッシュ数 |    |                   |
| 95 %    | 14 | D       | 14 | 95 % +            |
|         |    | C       | 0  | 95 %              |
| 90 %    | 7  | D       | 5  | 90 % +            |
|         |    | C       | 2  | 90 %              |
| 85 %    | 3  | D       | 3  | 85 % +            |
|         |    | C       | 0  | 85 %              |
| 80 %    | 3  | D       | 1  | 80 % +            |
|         |    | C       | 2  | 80 %              |
| 70 %    | 4  | D       | 3  | 70 % +            |
|         |    | C       | 1  | 70 %              |
| 60 %    | 7  | D       | 0  | 60 % +            |
|         |    | C       | 7  | 60 %              |
| 50 %    | 9  | D       | 1  | 50 % +            |
|         |    | C       | 8  | 50 %              |
| 50 %未満  | 17 | D       | 0  | 50 %未満 +          |
|         |    | C       | 7  | 50 %未満            |
|         |    | B       | 1  | 50 %未満 -          |
|         |    | A       | 10 | 50 %未満 -          |
| 計       | 64 | 計       | 64 |                   |

注) モデル検証地域には漏水リスクBは含まれていない。

結果も統合し、より多角的な評価方法を考案する。こうした融合を検討する背景には、2つの異なる視点から水道管路システムを診断することで、より効果的な管路更新の実現を目指すといった狙いがある。以下では、モデル検証地域での適用結果を具体例にしながら、両者の診断結果をどのように解釈すれば良いのかを示すこととする。

モデル検証地域の事故リスク及び漏水リスク診断結果を図示すると、図-7及び図-8のようになる。まず図-7を見ると、対象エリアの北西に当たるa地区において、事故リスク95%のメッシュが大半を占め、事故リスクが低いと診断されたメッシュは、北東のb地区及び南東のc地区を中心に存在していることがわかる。一方、図-8に関しては、漏水リスクの高いメッシュが北西のa地区に、漏水リスクの低いメッシュは北東のb地区及び南東のc地区に存在し、事故リスクと同様の傾向が確認された。以下のような実情から、モデルによる診断結果は妥当な内容であったと考える。第一に、a地区は、ターミナル駅の近隣で、多くのオフィスビルや商業店舗が立ち並ぶような場所である。そうした過密地区であるがゆえに、都市機能を一時中断させながらの工事着工が困難であり、結果的に老朽化した管路も多く残存する地区となっている。第二に、b地区及びc地区は、中心部から少し離れた場所で、東側には住宅街が広がる。当該地区においては、経年管等の更新工事が計画的に行われ、铸铁管延長比率が0%のメッシュもいくつか存在する一方で、铸铁管が残る箇所や、外面被覆が施されていない管路が部分的に存在する。

事故リスク及び漏水リスクの2つの評価モデルが、共通する3つのアイテムを説明変数に持つことにより、両者の診断結果は当然のことながら似通った傾向を示すことが確認された。しかし、事故リスクでは「外面被覆無し・小口径延長比率」、漏水リスクでは「残存鉛管延長比率」が各々の評価モデルに加わるため、実際には両者の診断結果に違いが存在することになる。そこで、2つの診断結果の相違を定量的に把握するため、各モデルの評価区分に該当するメッシュ数を集計すると、表-7のようになる。なお、同表の最右列に示す「統合評価」とは、漏水リスクが「D」の場合に「+」、 「A」の場合には「-」を付け、漏水リスク評価の結果を事故リスクに加味して定義したものである。事故リスクが「95%」となるメッシュでは全て漏水リスク「D」であることや、事故リスク「50%未満」のメッシュで漏水リスク「A」が見られることから、2つのリスク評価モデルの対応関係は概ね一致していることが確認できる。

ただし、部分的には注意が必要とされる箇所もあり、例えば、事故リスク「90%」となるメッシュでは、漏水リスクが「D」と診断される5個のメッシュ以外に、「C」と診断されるメッシュも2個ある。こうした場合には、同じ事故リスクであっても、漏水リスクの高いメッシュ(90%+)から優先的に着手することで、更新事業の効果が向上すると判断できる。さらに、事故リスク「50%未満」のメッシュに関しては、漏水リスク「A」と判定されたメッシュが10個あるのに対し、漏水リスク「C」と判定されたものは7個ある。これらの漏水リスク「C」の中には、例えばb4-3やc1-4のように、隣接するメッシュに事故リスクの高いものがある。事故リスク「50%未満」のメッシュは、全域的な更新計画を議論する上では、他のメッシュに比べて対策の優先度は低い。しかし、漏水リスクが「A」ではなく、「C」と判定されたメッシュに対しては、給水管対策の観点から優先的な対応が望まれることから、別段の取り組みが必要と言える。具体的には、事故リスクが低いメッシュであっても、漏水リスクは高く、かつ隣接するメッシュの事故リスクが高ければ、これらと一体的に更新事業を計画するといった柔軟なアプローチも有用と考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、水道管路のマッピング情報を活用しながら、事故リスク及び漏水リスクといった視点の異なる評価モデルを作成した。2つの評価モデルを併用することで、配水管の更新計画における優先順位の確定に給水管対策の要素を織り交ぜ、より総合的な診断方法を提案した。以下に、本研究で得られた主要な成果について述べる。

- 1) 管路の更生・更新に至るまでの診断プロセスについて、人間の健康診断を引き合いに出しながら述べた。管路診断の様々な手法を系統化した上で、本研究が本格的な診断に先立って行われる「問診」に相当することを示した。
- 2) 本研究で使用する水道管路マッピング情報(メッシュデータ、 $n=3,033$ )について簡潔に触れ、配水管修理件数と各データ項目との相関関係を表現する要因関連図を作成した。評価モデルに用いるべき説明変数を検討した結果、铸铁管延長比率や地形分類といった項目を候補として選択した。
- 3) 配水管修理件数の有無を外的基準にした数量化理論第Ⅱ類によるモデルを作成し、これを「事故リスク評価モデル」とした。また、漏水量の多少を外的基準に数量化理論第Ⅰ類を適用したモデルを「漏水リスク評価モデル」とした。2つの評価モデルから得られる評価点(サンプルスコア)をリスクの大きさとして捉え、事故リスクは「95%」から「50%未満」までの範囲とする8段階、漏水リスクはAからDまでの4段階によって評価区分を各々定義した。
- 4) 提案モデルの有効性を確認するため、モデル検証地域への適用を行い、事故リスク及び漏水リスクに関する各々の診断結果を詳細に比較・考察した。事故リスクで見れば同じ診断結果であっても、漏水リスクの結果を加味することで、優先順位の高い地区(メッシュ)とそうでないものとを更に峻別できる点等、2つのリスク評価モデルを併用する特長を明らかにした。

我が国の水道事業は、管路更新という大きな課題に直面するが、この局面は現有の水道管路システムをレベルアップさせる絶好の機会として捉えることもできる<sup>7)</sup>。更新計画に長寿命化・耐震化といった要素を含ませたり、水圧・水質等の質的なサービス水準の向上を目的にした管路整備の最適化<sup>8)</sup>を検討したりすることで、単に経年管を新しいものに取り替えることとは全く違った価値を創造できる。本研究で提案した診断手法が、次世代へ継承すべき水道管路施設の計画的な更新や改良の一助となれば幸甚である。

謝辞：本論文の一部は、(財)水道技術研究センターによるNewEpochプロジェクトの研究成果であることを付記するとともに、協力をいただいた(株)クボタの林光夫氏をはじめ、関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 林知己夫、駒澤勉：数量化理論とデータ処理、朝倉書店、1982
- 2) 平成16年度漏水防止調査に係る危険度評価委託業務報告書、

- 福岡市, 2004
- 3) 小泉明, 何王善, 孫躍平: 数量化理論による下水道管渠の損傷判別分析, 環境工学研究論文集, Vol.38, pp.257-264, 2001
- 4) 小泉明: 水道計画のための水需要予測の実際, 水道管路技術センター(現在, 水道技術研究センター)技術レポート No.10, pp.12-26, 1991
- 5) 横尾真子, 宮田健司, 清水宏明, 片野幸雄: 地盤情報を利用した埋設管の腐食予測方法, 第 50 回材料と環境討論会講演集, pp.85-86, 2003
- 6) 片野幸雄, 西崎耕造, 岩松潤吉: 埋設管の腐食と防食, URBAN KUBOTA, No.23, pp.52-56, 1984
- 7) 尾川毅: 水道管路の現状と方向, 水道産業新聞, 2004
- 8) 小泉明, 稲員とよの, 荒井康裕, 吉井恭一郎: 多目的HGAモデルによる配水管網システムの最適化, 環境システム研究論文集, Vol.33, pp.335-341, 2005

## RESEARCH ON SAFETY EVALUATION OF WATER PIPELINE SYSTEM USING QUANTIFICATION THEORY

Akira KOIZUMI, Yasuhiro ARAI, Toyono INAKAZU, Masaaki SHINGAI and Naoki NAKANO

In this research, we developed an accident risk assessment model and leakage risk assessment model using quantification theory so that the diagnosis of the safety of water pipeline systems may be done with ease. The external criterion (objective variable) for the first model was taken as the number of repairs done on the water pipe while that for the later model was taken as the amount of water leakage. The descriptive variables of the models were taken as the quality of the pipeline material, the presence or absence of outside covering, topographic features, and other factors. We then proceeded to describe how two different diagnostic results could be used in setting up plans to improve the pipeline as demonstrated by detailed practical examples. As a result, it became clear that diagnoses by the proposed models are helpful in improving the safety of pipelines by identifying which parts shall be given priority attention as determined in consideration of accident risk and which are also arrived at using leakage risk approach and the assessment models also prove effective in pipe replacement activities.