環境システム研究論文集　Vol.38, 2010年10月

# 管路システムの故障リスク対策における経済性比較

渡辺 晴彦[1*]・小泉 明[2]・沼田 篤男[2]・森 正幸[1,2]

[1](株)日水コン 中央研究所 (〒163-1122 新宿区西新宿 6-22-1)
*E-mail:watanabe_h@nissuicon.co.jp
[2]首都大学東京大学院・都市環境科学研究科(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

地下埋設物である水道・下水道の管路は故障発見のために調査を行う必要があるが，故障箇所数が面的にどのような分布をしているかは事前にはわからない．本研究はその確率分布に関する情報をもとに，調査を行うか，改良工事を行うか，あるいは放置するかという3つの対策判断をモデル分析する方法論を提案する．具体的には，故障箇所数を与件とした線形費用モデルによる総費用比較を行い，対策の優劣を図上で可視的に判断する．さらに，故障箇所数を超幾何分布とBayes推定による確率分布でモデル化し，情報がない場合と一部調査による情報がある場合の費用比較方法を示す．ケーススタディを通して，費用単価の違いにより管路ごとに調査,工事,放置の選択を行うことができ，想定した工事箇所数に対し経済的な調査箇所数を判断する方法としての有効性を確認した．

***Key Words :*** *pipeline network system, failure risk management, economical comparison, factorization, hyper-geometric distribution, Bayesian inference.*

## 1. はじめに

水道・下水道などの管路は地下埋設物であり，その老朽化や損傷、漏水などの故障(以下，不具合と称する)の発見は地表構造物に比べると困難さが増すといえる．これは,直接目視しにくいことに起因しており，結果的に地表面に現れる陥没や破裂などにより判明することも多い．地表面に現れるような不具合は人的あるいは経済的被害をもたらすことから，これを軽減するために何らかの調査を行って不具合を発見する対策が採られている[1),2)]．

漏水対策としては，すべての管路を事前調査することを前提として，調査時間間隔を経済的に最適化する方法が提案されている[3)]．しかし，老朽化対策については，近年管内カメラ調査などが導入されてきているものの，事前調査を前提とすることは少なく，経過年数，重要性，緊急対応性にもとづき工事対象管路を絞り込んで対策を講ずることが多い．事前調査の経済的有効性については，信頼性工学における点検政策の分析[4)]があるが，基本的には時間的な不具合発生を前提に調査間隔の最適性を対象としている．

面的に分布している地下埋設物のどこが不具合となっているかは事前には不明であり，調査をした結果，ほとんど問題がない場合も生ずる．一方で，不具合が頻繁に生ずる場合もありうる．不具合の割合が高そうな場合には，調査せずに直接改良工事をしたほうが経済的であるかもしれない．逆に低そうな場合には，調査する費用と工事する費用，および不具合によるリスク被害の関係によって判断が異なると思われる．

本研究では，管路などの地下埋設物の不具合箇所数がどのような確率分布となるかによって，調査を行うか，改良工事を行うか，あるいは放置するかという3つの対策判断をモデル分析する方法論[5)]を提案する．具体的には，まず，不具合箇所数を与件とした場合の線形費用モデルを元に費用比較を行い，各種費用の単価によって対策の優劣を判断する指標の図化を行う．次に，不具合箇所数が与件の場合に調査して不具合が発見される確率を超幾何分布としてモデル化する．そして，一部調査の結果はBayes推定による事後確率として不具合箇所数の推定精度を向上させることを示す．その上で，一部調査結果による情報がある場合とない場合の総費用期待値の比較を行って，経済性を判断する本質的な条件を導出する．最後に水道管路に関するケーススタディを通して，本研究の有効性を確認する．

## 2. 不具合箇所数が与件の場合のモデル化

対象地域が$n$箇所に分けられ，うち$x$箇所に不具合があるものとする．対策として次の3つを想定する．

① $y$箇所調査して不具合が判明した場所だけ改良する．

② 調査はせずに，$z$箇所の改良を行う．

③ 放置する．

第2の方法は，不具合箇所の数が多い場合に採用されるだろうことが直観的にわかる．今，調査には1箇所あたり$a$の費用，改良工事には1箇所あたり$b$の費用がかかり，対策で改良されずに残った不具合箇所により1箇所あたり$c$のリスク費用が生ずるものとする．このとき，それぞれの期待費用$C_1$，$C_2$，$C_3$は，次式のようにモデル化される．

$$C_1 = ay + b\cdot\frac{xy}{n} + c\cdot\left(x - \frac{xy}{n}\right) \tag{1}$$

$$C_2 = bz + c\cdot\left(x - \frac{xz}{n}\right) \tag{2}$$

$$C_3 = cx \tag{3}$$

$C_1$と$C_2$の大小関係について，その差分を整理すると次式のようになる.

$$\begin{aligned}
&C_1 - C_2\\
&= \left\{ay + \frac{b}{n}xy + cx - \frac{c}{n}xy\right\} - \left\{bz + cx - \frac{c}{n}xz\right\}\\
&= ay + \frac{b-c}{n}xy - bz + \frac{c}{n}xz
\end{aligned}$$

ここで，$X \equiv x/n$とおくと，

$$\begin{aligned}
&= y\{(b-c)X + a\} + z(cX - b)\\
&= y(cX - b)\left\{\frac{(b-c)X + a}{cX - b} + \frac{z}{y}\right\}\\
&= cy\left\{X - \frac{b}{c}\right\}\left\{\frac{z}{y} - \left(\frac{\dfrac{bc - b^2 - ac}{c^2}}{X - \dfrac{b}{c}} + \frac{c-b}{c}\right)\right\}
\end{aligned}$$

さらにここで，

$$\phi(X) \equiv \frac{\dfrac{bc - b^2 - ac}{c^2}}{X - \dfrac{b}{c}} + \frac{c-b}{c} \tag{4}$$

とおくと，次式のように因数分解できる.

$$C_1 - C_2 = cy\left\{X - \frac{b}{c}\right\}\left\{\frac{z}{y} - \phi(X)\right\} \tag{5}$$

このため，$C_1$と$C_2$の大小は，$y > 0$を仮定すれば，$X - \frac{b}{c}$と$\frac{z}{y} - \phi(X)$の正負に依存することになる.

また，$C_1$と$C_3$の大小関係については，

$$\begin{aligned}
C_1 - C_3 &= \left\{ay + \frac{bxy}{n} + cx - \frac{cxy}{n}\right\} - cx\\
&= ay + \frac{bxy}{n} - \frac{cxy}{n}\\
&= y\left(a + \frac{b-c}{n}x\right)
\end{aligned}$$

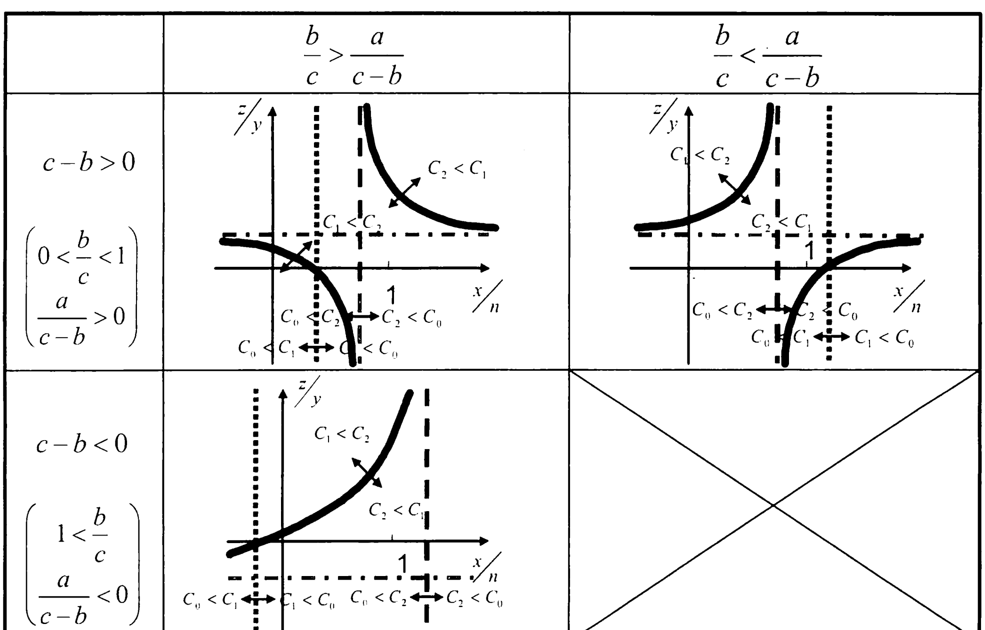


図-1 3直曲線の位置関係

$$= y(b-c)\left(X-\frac{a}{c-b}\right) \tag{6}$$

より，$b-c$ と $X-\dfrac{a}{c-b}$ の正負に依存する．

さらに，$C_2$ と $C_3$ の大小関係については，

$$\begin{aligned} C_2 - C_3 &= \left\{bz + cx - \frac{cxz}{n}\right\} - cx \\ &= z\left(b - \frac{cx}{n}\right) \\ &= cz\left(\frac{b}{c} - X\right) \end{aligned} \tag{7}$$

となることより，$X-\dfrac{b}{c}$ の正負に依存する．

すなわち $C_1$，$C_2$，$C_3$ の大小関係は $X-\dfrac{z}{y}$ 空間において，$X=\dfrac{b}{c}$，$\dfrac{z}{y}=\phi(X)$，および $X=\dfrac{a}{c-b}$ の3直曲線の位置関係に規定されることになる．これらの条件を整理すると次の3ケースとなる．

$c>b$

$$\begin{pmatrix} 0<\dfrac{b}{c}<1 \\ \dfrac{a}{c-b}>0 \end{pmatrix} \cdots \begin{cases} \dfrac{b}{c} > \dfrac{a}{c-b} \Leftrightarrow bc-b^2-ac>0 & (8) \\ \dfrac{b}{c} < \dfrac{a}{c-b} \Leftrightarrow bc-b^2-ac<0 & (9) \end{cases}$$

$c<b$

$$\begin{pmatrix} \dfrac{b}{c}>1 \\ \dfrac{a}{c-b}<0 \end{pmatrix} \cdots \begin{cases} \dfrac{b}{c} > \dfrac{a}{c-b} \Leftrightarrow bc-b^2-ac<0 & (10) \\ \dfrac{b}{c} < \dfrac{a}{c-b} \cdots \times \end{cases}$$

これを $X-\dfrac{z}{y}$ 空間上で図化し，費用の大小関係を示したものが図-1 である．さらに，調査，工事，放置の 3 種の費用のうち最小となる範囲を示したものが図-2 である．図-2 より，調査，工事，放置の選択条件は次のようにまとめられる．

● ケース A1

$c>b$ の場合，$\dfrac{b}{c}>\dfrac{a}{c-b}$ ならば，

・ $X<\dfrac{a}{c-b}$ のとき，放置する．

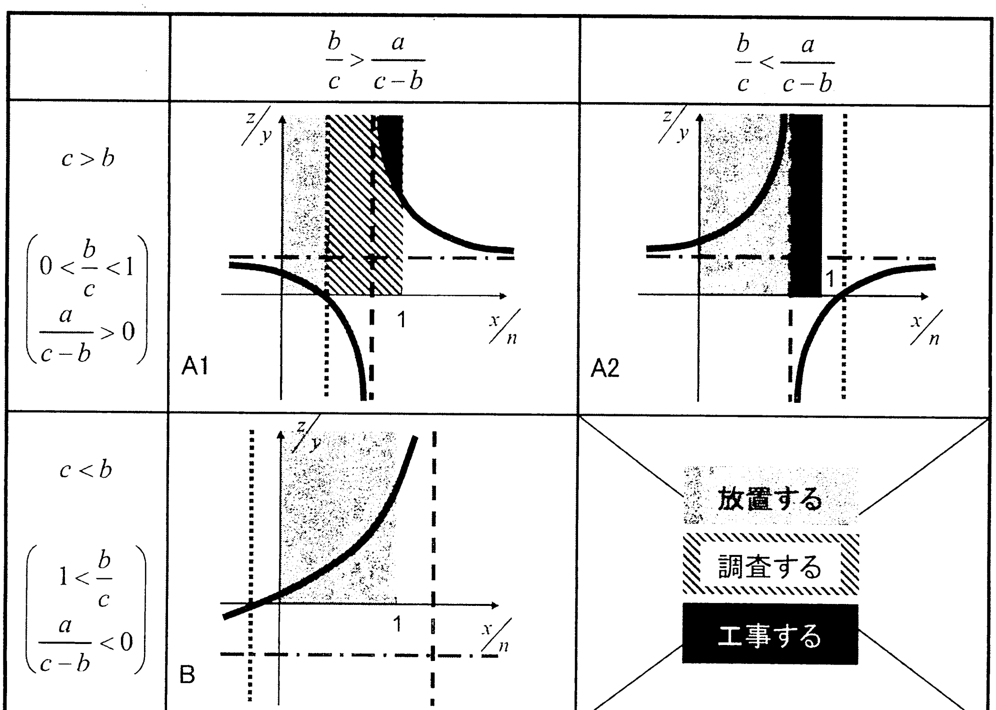


図-2 ケース別の対策選択

・$\dfrac{a}{c-b} < X < 1$ のとき，調査する．さらに，

$\dfrac{z}{y} > \phi(X)$ のときは工事する．

● ケース A2

$c > b$ の場合で，$\dfrac{b}{c} < \dfrac{a}{c-b}$ ならば，

・$X < \dfrac{b}{c}$ のとき，放置する．

・$X > \dfrac{b}{c}$ のとき，工事する．

● ケース B

$b > c$ の場合，放置することが経済的である．

すなわち，工事単価 $b$ が被害単価 $c$ より高い場合は，放置が選択される．そうでない場合において，調査の可能性があるケース A1 が選択されるのは，調査費用単価 $a$ が次式を満たす場合である．

$$a < b - \frac{b^2}{c} \tag{11}$$

## 3. 不具合箇所数の確率分布推計

$n$ 箇所のうち $x$ 箇所が不具合とわかっている（場所は不明，数だけわかる）場合，$y$ 箇所調査して，$z$ が不具合と判明する確率 $P(y,z\,|\,n,x)$ は，次式の超幾何分布[6]であらわすことができる．

$$P(y,z\,|\,n,x) = \frac{{}_xC_z \cdot {}_{n-x}C_{y-z}}{{}_nC_y} \tag{12}$$

一方，$y$ 箇所調査して，$z$ が不具合と判明したとき，全体の不具合箇所が $x$ となる確率 $P(n,x\,|\,y,z)$ は Bayes の定理[7]により，次式で示される．

$$P(n,x\,|\,y,z) = \frac{P(y,z\,|\,n,x)P(n,x)}{\sum_{x=0}^{n} P(y,z\,|\,n,x)P(n,x)} \tag{13}$$

ここで，$P(n,x)$ は，不具合箇所数が $x$ となる事前確率であり，あらかじめ主観的に設定しておく．当初は，何も解らないとすると，$x$ が 0 箇所，1 箇所，2 箇所，…，n 箇所となる場合がみな同じ確率で生ずると見なして，$P(n,x) = 1/(n+1)$ と扱うことになる．

例えば，全体200箇所に対して，10箇所調査した場合の不具合箇所数の事後確率分布は図-3 に示すようになる．発見箇所が 0 の場合でも，80 箇所までは不具合となる可能性があるが，当初（無情報）の設定確率がすべて約 0.5%（1/201）であったことに比較すれば，確率分布が特定化されてきているといえよう．

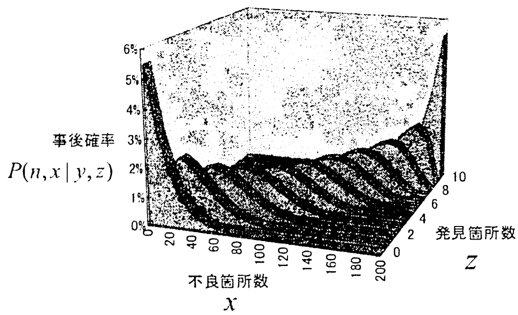


図-3 箇所数分布確率の推計（$y=10$）

## 4. 不具合箇所数情報による経済性への影響

上記の検討は不具合箇所数があらかじめわかっている場合であるが，実際には，事前にわかっていることは少ない．不具合箇所数が $x$ となる確率 $P(n,x)$ について，情報がない場合には，$P(n,x) = 1/(n+1)$ とし，一部 $y'$ 箇所調査を行い $z'$ 箇所不具合と判明したときの事後確率が求められている場合には，$P(n,x) = P(n,x\,|\,y',z')$ として，総費用の期待値を考える．

### (1) 調査，工事，放置における情報有無の影響

● 放置

式(3)より，情報無しの場合には，次式となる．

$$\begin{aligned} E(C_3)\big|_{nothing} &= \sum_{x=0}^{n} cx \cdot \frac{1}{n+1} \\ &= \frac{c}{n+1}\sum_{x=0}^{n} x = \frac{c}{n+1}\cdot\frac{n(n+1)}{2} \\ &= \frac{cn}{2} \end{aligned} \tag{14}$$

情報がある場合には，次式となる．

$$E(C_3)\big|_{investigation} = \sum_{x=0}^{n} cx \cdot P(n,x\,|\,y',z')$$

$$= c\sum_{x=0}^{n} x \cdot \frac{P(y', z' \mid n, x)P(n, x)}{\sum_{x=0}^{n} P(y', z' \mid n, x)P(n, x)}$$

$$= c\sum_{x=0}^{n} x \cdot \frac{\dfrac{{}_x C_{z'} \cdot {}_{n-x} C_{y'-z'}}{{}_n C_{y'}} \cdot \dfrac{1}{n+1}}{\sum_{x=0}^{n} \dfrac{{}_x C_{z'} \cdot {}_{n-x} C_{y'-z'}}{{}_n C_{y'}} \cdot \dfrac{1}{n+1}}$$

$$= c \cdot \frac{\sum_{x=0}^{n} x \cdot {}_x C_{z'} \cdot {}_{n-x} C_{y'-z'}}{\sum_{x=0}^{n} {}_x C_{z'} \cdot {}_{n-x} C_{y'-z'}}$$

ここで,

$$\lambda(n, y', z') \equiv \frac{\sum_{x=0}^{n} x \cdot {}_x C_{z'} \cdot {}_{n-x} C_{y'-z'}}{\sum_{x=0}^{n} {}_x C_{z'} \cdot {}_{n-x} C_{y'-z'}} \qquad (15)$$

と定義すると, 次式を得る.

$$E(C_3)\,|_{investigation} = c\lambda(n, y', z') \qquad (16)$$

● 調査

式(1)より, 情報無しの場合には, 次式となる.

$$E(C_1)\,|_{nothing} = \sum_{x=0}^{n} \left\{ ay + b \cdot \frac{xy}{n} + c \cdot \left( x - \frac{xy}{n} \right) \right\} \cdot \frac{1}{n+1}$$

$$= ay + \frac{by + c(n-y)}{n(n+1)} \sum_{x=0}^{n} x$$

$$= ay + \frac{by + c(n-y)}{n(n+1)} \cdot \frac{n(n+1)}{2}$$

$$= ay + \frac{by + c(n-y)}{2} \qquad (17)$$

一部調査の情報ありの場合には, 次式となる.

$$E(C_1)\,|_{investigation}$$

$$= \sum_{x=0}^{n} \left\{ ay + b \cdot \frac{xy}{n} + c \cdot \left( x - \frac{xy}{n} \right) \right\} \cdot P(n, x \mid y', z')$$

$$= ay + \frac{by + c(n-y)}{n} \sum_{x=0}^{n} xP(n, x \mid y', z')$$

$$= ay + \frac{by + c(n-y)}{n} \cdot \lambda(n, y', z') \qquad (18)$$

● 工事

式(2)より, 情報なしの場合には, 次式となる.

$$E(C_2)\,|_{nothing} = \sum_{x=0}^{n} \left\{ bz + c\left( x - \frac{xz}{n} \right) \right\} \cdot \frac{1}{n+1}$$

$$= bz + \frac{c(n-z)}{2} \qquad (19)$$

情報がある場合には, 次式となる.

$$E(C_2)\,|_{investigation} = \sum_{x=0}^{n} \left\{ bz + c \cdot \left( x - \frac{xz}{n} \right) \right\} \cdot P(n, x \mid y', z')$$

$$= bz + \frac{c(n-z)}{n} \cdot \lambda(n, y', z') \qquad (20)$$

従って, $E(C_i)\,|_{nothing} > E(C_i)\,|_{investigation}$ $(i = 1,2,3)$ となる条件は, どの場合にも $\lambda(n, y', z') < n/2$ となることである. $\lambda(n, y, z)$ の形状は図-4 に示す. $\lambda/n < 1/2$ となるのは, 図-5 において破線で囲まれた範囲であり, 工事箇所数 $z$ が調査箇所数 $y$ の半分未満の場合である. 半分を超えると, 一部調査の情報は経済的には意味を持たなくなると言える.

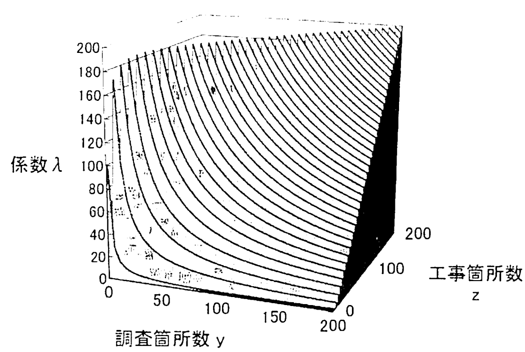


図-4 $\lambda(n, y, z)$ の形状 $(n = 200)$

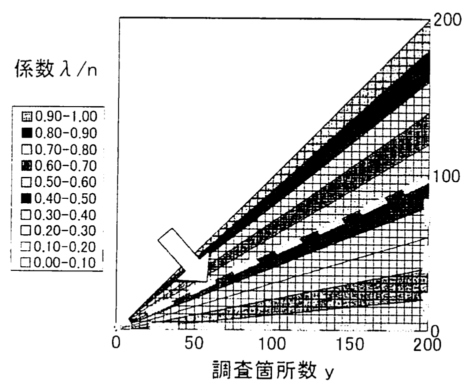


図-5 $\lambda(n, y, z)/n < 0.5$ の範囲 $(n = 200)$

(2)工事量を同じとした場合の情報有無の影響

$y$ 箇所調査を行い，不具合を発見した $z$ 箇所を工事する場合の費用 $\tilde{C}_1$ は，

$$\tilde{C}_1 = ay + bz + c(x - z) \tag{21}$$

と示されることから，その期待値は次式となる．

$$\begin{aligned} &E(\tilde{C}_1)|_{investigation} \\ &= \sum_{x=0}^{n} \{ay + bz + c(x - z)\} \cdot P(n, x \mid y, z) \\ &= ay + bz - cz + c\sum_{x} x \cdot P(n, x \mid y, z) \\ &= ay + bz + c\{\lambda(n, y, z) - z\} \end{aligned} \tag{22}$$

一方，調査をせずに $z$ 箇所工事する場合の期待費用である $E(C_2)|_{nothing}$ との差分を整理すると次式となる．

$$\begin{aligned} &E(C_2)|_{nothing} - E(\tilde{C}_1)|_{investigation} \\ &= \left\{bz + \frac{c(n-z)}{2}\right\} - \left[ay + bz + c\{\lambda(n, y, z) - z\}\right] \\ &= \frac{c(n + z - 2\lambda(n, y, z)) - 2ay}{2} \end{aligned} \tag{23}$$

すなわち，

$$\begin{aligned} &E(C_2)|_{nothing} > E(\tilde{C}_1)|_{investigation} \\ &\Leftrightarrow c\{n + z - 2\lambda(n, y, z)\} > 2ay \\ &\Leftrightarrow \frac{n + z - 2\lambda(n, y, z)}{2y} > \frac{a}{c} \end{aligned} \tag{24}$$

となる．

$$\eta(n, y, z) \equiv \frac{n + z - 2\lambda(n, y, z)}{2y} \tag{25}$$

とすると，図-6 のような形状を示す．等高線は図-7 のようになる．同図を用いて，費用単価 $a$，$c$ の値により，調査後工事が有利となる範囲を規定することができる．

## 5. ケーススタディ

ここでは，水道管路を想定したケーススタディを行う． 対象とするのは，給水人口約 3 万人の地域である[8]．

### (1) 費用単価について

給水区域内には口径 150mm～400mmの管路が配置されている．工事および被害の費用単価を試算すると次のような結果となる．

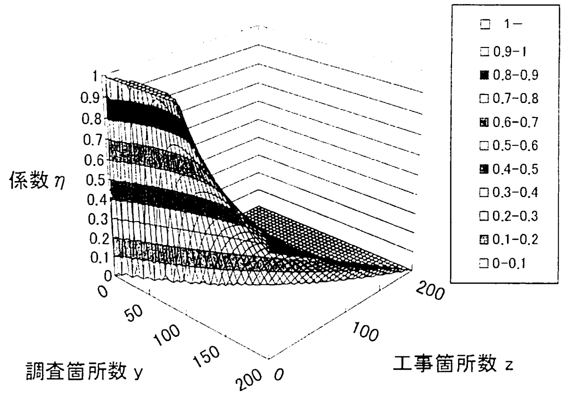


図-6 $\eta(n, y, z)$ の形状

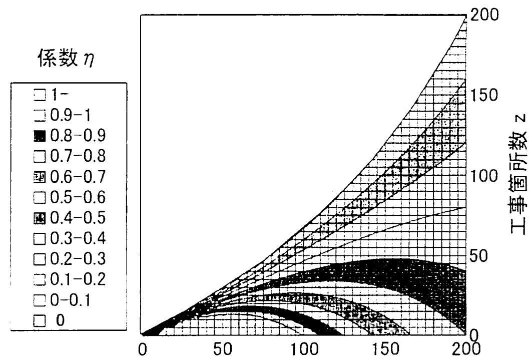


図-7 $\eta(n, y, z)$ の等高線

● **工事費用**[8]

ダクタイル鋳鉄管による管路更新を想定し，公表されている積算資料[9]をもとに 100m 一括施工した場合の工事費用を見積もると，口径により 79～147 千円/mとなった．緊急修繕を行う場合には，一括更新の 5 倍の単価を想定すると，1 管体あたりの修繕工事では 2000～4400 千円/回となる．

● **放置被害**[8]

生活用水，都市活動用水について，給水制限率による被害原単位をもとに推計する．ここで被害原単位は既往マニュアル[10]をもとにしており，給水制限率は小棚木ら[11]の方法に基づいている．管路事故による断減水被害額は，老朽化状況による事故の発生回数とネットワーク上の位置関係による断減水量により異なるが，1 箇所あたり 453 千円～1.48 億円の被害が見込まれた．

● **調査費用**

管内カメラによる調査を想定し，調査会社等からヒアリングしたところ，消火栓から上下流 20mを調査する費用は 1 回あたり数十万円程度という情報を得た．以下ではこの価格オーダーを参考値として扱う．

### (2) 調査，工事，放置の選択について

表-1 に，対象管路の一部について費用単価$b$，$c$を示し，図-2 における判定条件を整理した．$b<c$ の条件を満たす場合には，調査の必要性を判定する本質的な条件である式(11)より$b-b^2/c$を試算し，これより調査単価が安ければ A1 と判断される．同表では$a=1500$千円と仮定して，判定結果を示した．

表-1 管路別の費用と対策判定の例
（調査単価$a=1500$とした場合の判定）

| 管路 No. | 口径 [mm] | 延長 [m] | 更新単価 [千円/m] | b 緊急修繕費 [千円/回] | c 断減水被害 [千円/回] | b<c | $b-b^2/c$ | 判定 | a/c |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 400 | 900 | 147 | 4,400 | 148,310 | Yes | 4,269 | A1 | 0.010 |
| 11 | 200 | 740 | 88 | 2,200 | 4,335 | Yes | 1,084 | A2 | 0.346 |
| 14 | 400 | 1,000 | 147 | 4,400 | 144,685 | Yes | 4,266 | A1 | 0.010 |
| 19 | 150 | 980 | 79 | 2,000 | 453 | No | -6,830 | B | 3.311 |
| 21 | 300 | 760 | 114 | 3,400 | 2,208 | No | -1,836 | B | 0.679 |
| 22 | 300 | 900 | 114 | 3,400 | 3,595 | Yes | 184 | A2 | 0.417 |
| 25 | 300 | 320 | 114 | 3,400 | 70,140 | Yes | 3,235 | A1 | 0.021 |
| 32 | 250 | 600 | 100 | 2,500 | 453 | No | -11,297 | B | 3.311 |
| 37 | 200 | 750 | 88 | 2,200 | 9,029 | Yes | 1,664 | A1 | 0.166 |
| 39 | 150 | 240 | 79 | 2,000 | 5,904 | Yes | 1,322 | A2 | 0.254 |
| 40 | 250 | 660 | 100 | 2,500 | 18,059 | Yes | 2,154 | A1 | 0.083 |

図-8 は，A2 となる管路 No.11 の判定図を示したものである．不具合箇所率が 50%（$X=b/c$）までなら放置し，それ以上なら工事するという選択になる．

図-9 には，A1 となる管路 No.37 の判定図を示す．不具合箇所率が 24%（$X=b/c$）までなら放置であるが，それ以上は調査が有効となる．工事箇所数が調査箇所数の 75%（$z/y=(c-b)/c$）を超える予定の場合には，調査無しに工事をするほうが経済的となる．

図-10 には上記の判定を管路図で示した．配水基地からの代替ルートがない管路は A1 に，ある管路は B に位置づけられ，その中間が A2 となる傾向にある．このように，管路ごとにリスク対策の方向性を決めることが可能となる．

現場条件によっては調査費用，工事費用が幅を持つことが想定されるが，その場合には表-1 における判定が複数となる可能性がある．図-8，図-9 も形状が変化するため，リスク対策の方向性が変わることになる．

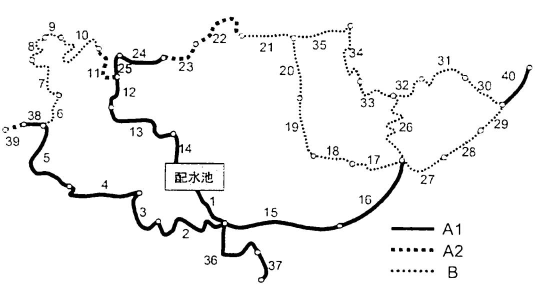


図-10 判定結果の管路図[7]（数字は管路 No.）

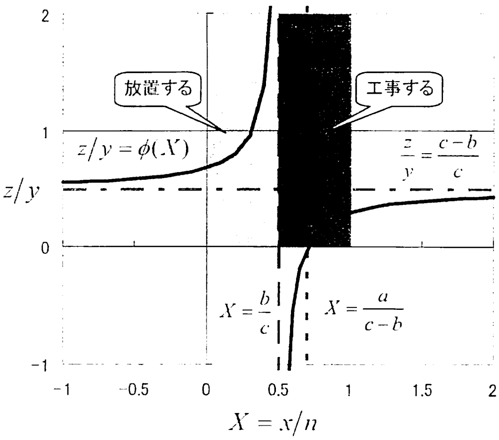


図-8 A2 判定の例（管路 No.11）

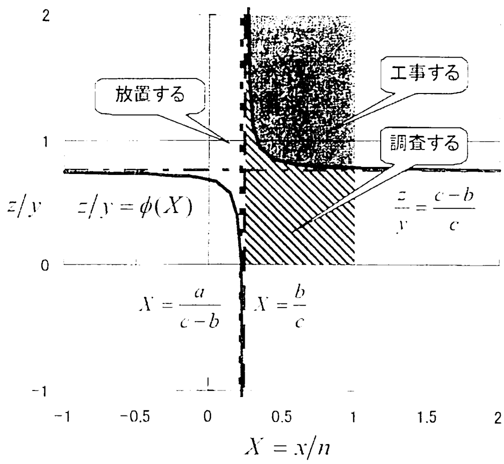


図-9 A1 判定の例（管路 No.37）

### (3) 同じ工事量の場合における不具合箇所数情報の有無による影響

A1 に位置づけられた管路 No.37 を対象に図-7 の$\eta(n,y,z)$を試算すると，$\eta>a/c=0.17$となり，図-11 の破線で囲まれた範囲となる．調査箇所数の 7 割以下の工事箇所数であれば経済的と言える．表-1 より，A1 に位置づけられた管路の$a/c$はほとんど 0.2 以下であり，全数に近い調査をしても経済的となる．

一方，A2 の場合には，0.3～0.4 の値をとり，工事箇所数に最大値が生ずる．調査箇所数を多くするなら発見箇所（工事箇所）は少ないと経済的とならないことがわかる．

調査単価が相対的に安くなると，経済的な範囲が増え，調査箇所数，工事箇所数とも増加していく．これは選択の幅が広がることを意味すると考えられる．

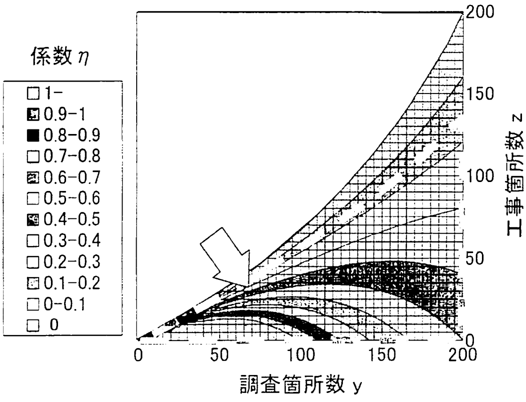


図-11 $\eta > 0.17$ の範囲(管路 No.37)

## 6. おわりに

本研究では，面的に分布する地下埋設物について，その不具合箇所の割合に関する情報が，不具合リスクを軽減するための総費用にどのような影響を及ぼすかをモデル分析した．この結果次の結論を得た．

(1) 調査，改良工事，放置被害の単価により，不具合箇所の割合と調査・工事の比を軸とした2次元図上で，対策選択が可能となる．

(2) 一部調査を行い事後確率を得ることで不具合箇所数の分布推定精度は向上する．しかし，一部調査による情報が，必要費用期待値の削減に寄与するのは，工事箇所数が調査箇所数の 1/2 未満となる場合である．

(3) 各種単価の関係により，管路ごとに調査，工事，放置の対策選択の方向性を整理できる．

(4) 想定した工事箇所数に対する経済的な調査箇所数を設定することができる．

今後の課題としては，費用モデルを非線形とした場合の影響分析，一部調査を繰り返した場合のモデル展開などがあげられる．

### 参考文献

1) 日本水道協会：水道維持管理指針，送・配水施設，pp.407-476, 2006.
2) 日本下水道協会：下水道維持管理指針，管路施設，pp.95-243, 2003.
3) 細井由彦，城戸由能，市平雅美：漏水調査と修理のモデル，環境工学研究論文集，Vol.36, pp.371-378, 1999.
4) 三根久，河合一：信頼性・保全性の基礎数理，日科技連，pp.152-173, 1984.
5) Watanabe, H.: A Study on Economical Planning of Pipeline Replacement, International Symposium for The 100th Anniversary of Korean Water Distribution Network Society, University of Seoul, 2009.
6) 和達三樹，十河清：キーポイント確率統計，岩波書店，pp.38-41, 1993.
7) 松原望：意思決定の基礎，朝倉書店，2001.
8) 森正幸，稲員とよの，小泉明，渡辺晴彦，沼田篤男：モンテカルロ法を用いた水道管路更新計画の評価，環境システム研究論文集，Vol.37, pp.1-8, 2009.
9) 全国簡易水道協議会：水道事業実務必携 平成21年度改訂版 第2部国庫補助事業歩掛表，pp.27-45, 2009
10)厚生労働省健康局水道課：水道事業の費用対効果分析マニュアル，2007.
11)小棚木修，小泉明，渡辺晴彦：ネットワーク構造に着目した水供給システムの安定性の評価に関する研究，環境システム研究論文集，Vol.30, pp.257-263, 2002.

# ECONOMIC COMPARISON ON FAILURE RISK MANAGEMENT OF PIPELINE NETWORK SYSYEM

Haruhiko WATANABE, Akira KOIZUMI, Atsuo NUMATA, and Masayuki MORI

Pipeline network system such as water supply and sewerage requires investigation for finding failures in pipelines. As number of failed spots is unknown preliminarily, amount of investigation is also unknown. This paper gives a methodology for decision information making dealing with economical amount of investigation, through three alternatives comparison among improving with / without investigation and neglecting failures.

Linear cost models with a variable of number of failed spots are defined for the alternatives with unit cost parameters such as cost of improving, cost of investigation and damage of neglecting. Factorization of cost differences illustrates visual decision making in case cost parameters information is given. Hyper-geometric distribution and Bayesian inference defines posterior probability distribution of number of failed spots using partially investigated results. Case study examines differences of expected cost between two cases with no information on failure and with some information obtained by partial investigation. Economical amount of investigation is given according to assuming number of improving in case study.