

# 自然災害時における社会インフラの復旧過程と わが国水道事業の業務実績評価に関する 定量的データ分析

河瀬 雄司, 前野 祐助, 大山 達雄

地震、津波、台風、洪水など、わが国は各種自然災害に最も頻繁に見舞われる国の一つである。一般市民にとって生命、生活に必須とされる飲料水を供給する任務を有する水道事業は基幹的公益事業としても最重要なものである。本稿では自然災害時における社会インフラの復旧過程とわが国水道事業の業務実績評価に関する定量的データ分析を行う。最初に主要な社会インフラとしての電気、ガス、水道、通信ラインの復旧過程がそれぞれどのような特徴を有しているかを明らかにする。次に、わが国水道事業の業務実績評価を目的として、業務実績指標(WPI)を構築し、それに基づく実証的定量的データ分析を行う。実証分析にあたっては、クラスター分析、主成分分析の適用に基づく結果を紹介する。

キーワード：自然災害、水道事業、業務実績指標、地域特性分析、クラスター分析、主成分分析

## 1. わが国水道事業の概要

わが国において2017年度に水道を利用している人々は全国で1億2,416万人となり、総人口の98.0%に当たり、ほぼ全国民が何らかの形で飲料水の供給を受けていることになる。わが国の水道事業者は水道法に基づいて水質基準に適合した、きれいで安全な水を常時安定して供給することが求められている。大都市の水道では、大量の水を確保する必要があるため、ほとんどの水源をダム貯留水や河川水などの表流水に依存している。1975年度には年間取水量に対するダムの依存率は約22%であったが、2017年度には約48.0%となり、ダムに依存する割合が増大している。配水池の有効容量は、2017年度には約3,627万 $m^3$ であるが、配水池貯留時間(配水池有効容量÷計画一日最大給水量×24時間)は、1975年度の5.9時間から、2017年度には14.5時間となっている。近年では、水道水源の水質悪化などから、高度浄水処理方法も採用されている。

水道水1 $m^3$ 当たりの生産費用は、職員給与費、支払利息などの割合が減少しているなかで、減価償却費などの割合が増えている。これは、老朽化した施設の再構築や、水質の安全性と水道水源の安定を確保する

ためのダムへの投資、また水源の水質悪化に伴う高度浄水処理などの導入がコストアップの要因として考えられる。水道事業は、水道利用者からの料金で施設を建設し経営していくという考え方から独立採算制を原則としている。そのため水道事業ごとに料金が異なる。水道料金格差の要因には、水源の種類や場所、水道施設の建設時期、事業規模、さらに人件費や施設の維持管理費などの違いが挙げられる。また、水道利用者が1ヵ月に支払う水道料金の家計支出に占める割合の平均は約0.7%(月平均1,938円)である。

水道は国民生活に欠かすことのできない施設であるが、耐震性の強化や老朽化施設の更新などの課題を抱えている。将来の水道事業は、情報公開を進め、水道利用者の理解と協力を得ながら、必要な対策を着実に進めていかなければならない。厚生労働省は、2004年6月に「水道ビジョン」を策定し、今後の日本の水道の将来像とそれを実現するための施策、工程などを示した。その後、水道を取り巻く環境は、人口減少、水道施設老朽化の問題に加え、東日本大震災による重大被害経験など、大きく変化した。厚生労働省では、このような環境の変化を受け、これまでの水道ビジョンを抜本的に見直し、50年、100年先の将来を見据えた、新たな「新水道ビジョン」を策定、公表し、2013年度からは、関係者がその基本理念を共有しつつ、「安全」「強靱」「持続」の観点から、連携、挑戦の姿勢をとりつつ、水道の理想像の具現化に向けた各種の実現方を推進している。

本稿では、次節で電気、ガス、水道、通信といった

かわせ ゆうじ, まえの ゆうすけ  
(株)メタウォーター

〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 JR 神田万世橋ビル

おおやま たつお  
政策研究大学院大学

〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1

表 1 阪神・淡路大震災における公益事業別被害世帯数と復旧所要日数

公益事業	被害世帯数	復旧所要日数
電気	2,600	6
ガス	855.9	84
水道	495.3	90
通信ライン	101.66	14

電気、ガス、水道は世帯数 (単位:1,000),  
通信はライン数 (単位: ライン本数)

社会インフラの重大自然災害時における復旧過程を数理モデルを用いて分析する。3 節では、水道事業の事業実績評価の実証分析として水道事業における業務実績指標 (WPI) を構築し、それに基づく地域別特性を明らかにすべく、業務実績評価結果を紹介する。4 節では、クラスター分析と主成分分析の適用による業務実績指標に基づくわが国水道事業の背景にある地域特性分析を紹介する。最後の 5 節は本稿のまとめと結論とする。

## 2. 社会インフラの自然災害時における復旧過程

本節では、電気、ガス、水道、通信といったわが国の主要な社会インフラ施設の重大自然災害時における復旧過程を実際のデータを用いて計量的に分析し、それらの状況、過程を説明する数理モデルを構築し、検証する。1995 年の阪神・淡路大震災において、電気は地震発生後わずか 6 日で復旧したものの、ガスと水道は復旧にほぼ 3 ヶ月を要し、通信ラインに関しては、ほぼ 2 週間を要したといわれている [1, 2]。表 1 に阪神・淡路大震災時の公益事業別の被害世帯数と復旧に要した日数を示す。

阪神・淡路大震災時 (神戸市) における停電世帯数、断水世帯数の復旧過程を分析する。社会インフラを構成する電気、ガス、水道、通信が自然災害によって大きな被害を受けた場合の復旧過程を、横軸に災害発生後の経過日数、縦軸に停電世帯数、断水世帯数、ガス供給停止世帯数、通信ライン断絶本数などをとって表示する。

最初に電気の復旧過程を表す数理モデルは、以下の多項式モデルを用いて表現できる。

$$y = ax^b \quad (1)$$

$a, b$ : パラメタ

したがって電気、水道に関する復旧過程の数理モデルのパラメタの推計値は、式 (1) を下式のように変換

表 2 阪神・淡路大震災時 (神戸市) の断水世帯数の推移に対するパラメタ推計値

パラメタ	電気 停電世帯数	パラメタ	水道 (神戸) 断水世帯数	水道 (阪神淡路) 断水世帯数
$\log a$	5.5902 (28.93) (0.00)	$a$	-141.47 (-47.067) (0.00)	-298149.7 (-29.19) (0.00)
$b$	-2.7261 (-17.668) (0.00)	$b$	600.1533 (56.80) (0.00)	1247439.4 (35.58) (0.00)
$R^2$	0.9842	$R^2$	0.9664	0.9838
$n$	5	$n$	77	16

$R^2$ : 補正調整  $R^2$  値。 ( ) 内数値は、上段:  $t$  値、下段:  $P$  値、 $n$ : データ数

したうえで推計される。

$$\log y = \log a + b \log x \quad (2)$$

上式におけるパラメタ  $b$  の推計値は、以下に示すように、変数  $x$  の変数  $y$  に対する弾力性を表すことがわかる。

$$\left(\frac{dy}{y}\right) / \left(\frac{dx}{x}\right) = b$$

断水世帯数の復旧過程を表す数理モデルは、以下の多項式モデルを用いて表現できる。

$$y = a \log x + b \quad (3)$$

$a, b$ : パラメタ

上式におけるパラメタ  $a$  の推計値を用いて、以下に示すように、変数  $x$  の変数  $y$  に対する弾力性を表すことがわかる。

$$\left(\frac{dy}{y}\right) / \left(\frac{dx}{x}\right) = \frac{a}{y} \quad (4)$$

上記の式 (1), (3) で与えられるパラメタ  $a, b$  の推計値は表 2 のように与えられる。

表 2 に得られたパラメタ推計値の基づく数理モデルによる推計値と実測値データを停電世帯数、断水世帯数に対して、それぞれ図 1, 図 2, 図 3 に示す。これらのグラフから、いずれのデータに対しても実測値と推計値とがかなりよく合致しているのがわかる。特に図 1 に与えられる停電世帯数の場合は、実測値と推計値とがほぼ合致しているのがわかる。なお図 3 のグラフにおいて、断水世帯数が 0 になるのは、推計数理モデルから  $y = -141.47 \log x + 600.1533 = 0$  を解くことによって、 $x = \exp(4.2433) = 69.57$  から、ほぼ 70 日のように得られる。阪神・淡路大震災に対する断水世帯数の推移モデルのパラメタ推計値に基づいて得られる数理モデルにおいて、断水世帯数が 0 になるのは、推計数理モデル式から  $y = -298149.7 \log x + 1247439.4 = 0$

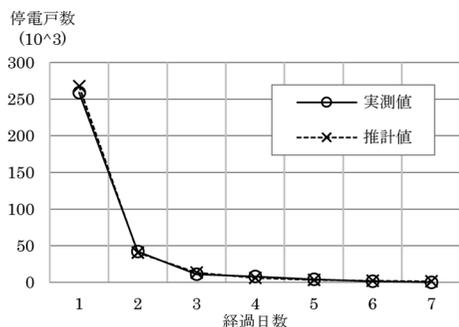


図1 停電世帯数の数理モデルの実測値と推計値

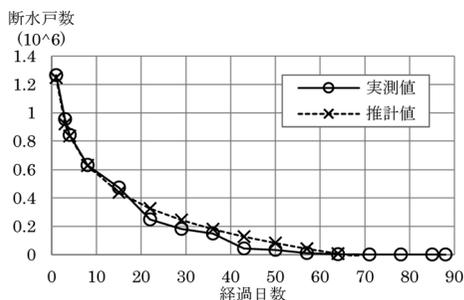


図2 阪神・淡路大震災における断水世帯数の推移モデルの実測値と推計値

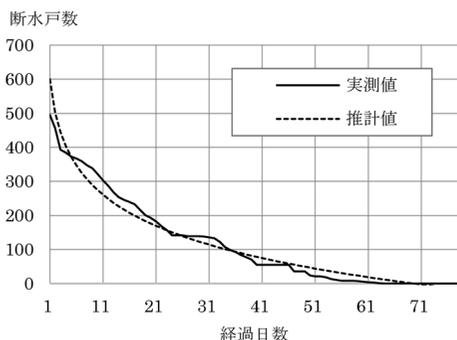


図3 神戸市における断水世帯数の推移モデルの実測値と推計値

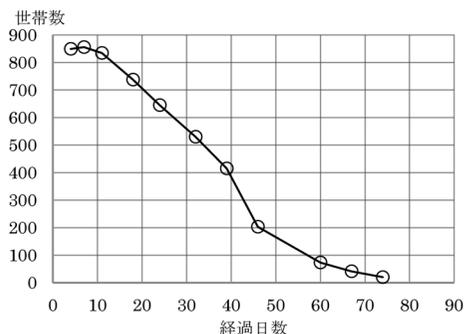


図4 ガス停止世帯数の推移

を解くことによって、ほぼ  $x = \exp(4.1839) = 65.62$  から、ほぼ 65 日のように得られる。

阪神・淡路大震災時の神戸市の停電世帯数、断水世帯数のデータに対するパラメタ  $a$ 、 $b$  の推計値は表 2 のように与えられる。したがって神戸市の停電世帯数の復旧過程を表す数理モデルは、次の数式で与えられる。図 1 は停電世帯数の数理モデルの実測値と推計値を示したものである。

$$y = 2.589x^{-2.726} \quad (5)$$

わが国の社会インフラの自然災害時における復旧過程は、大きく 2 種類の数理モデルによって表されることがわかる。電気、水道、ガス、通信ラインの 4 種類の社会インフラのうち前 2 者に関しては下に凸な曲線として与えられるのに対して、後 2 者に関しては、阪神・淡路大震災時のガス停止世帯数、通信ライン断絶本数に関する復旧過程のデータはそれぞれ図 4、図 5 のように与えられ、上に凸な曲線に続く下に凸な曲線によって与えられることがわかる。

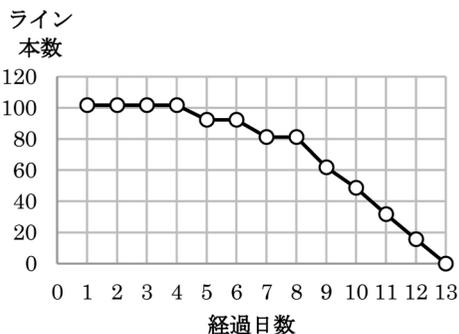


図5 通信ライン断絶本数の推移

### 3. わが国水道事業の事業実績評価に関する実証分析

#### 3.1 水道事業における業務実績指標 (WPI) の構築

わが国の水道事業運営における業務実績指標 (WPI, Work Performance Indicator) について、指標構築のための概念設計に基づく実証分析を行う。WPI の構築に当たっては、水道事業運営のレジリエンス評価への可能性を探ることを目的として、水道事業運営を i) 事業経営、ii) 施設・設備、iii) 事業運営の三つの側面か

ら眺め、業務実績評価を行うことによって全体的、総合的な評価を行うことを目指す。主要な使用データは「水道統計要覧」(2002–2016, 日本水道協会)とする。なお、レジリエンス評価はそれを実施することによって、対照的概念としての脆弱性、危険度評価に通ずると考えられる。したがって、それらの間の相互関連についても考察、検討を加える [3–8]。

水道事業運営における経営的側面については、上水道事業の一事業当たり給水収益は給水人口が 100 万人以上の大都市圏では 56,125 百万円 (平成 (H)29 年度) であるのに対して、給水人口が 1 万人以下の小規模町村においては 170.40 百万円 (H29 年度) というように約 330 倍もの大きな差を有している。一方、供給単価を比較すると、給水人口が 100 万人以上の大都市圏では 182.60 円 (H29 年度) であるのに対して、給水人口が 1 万人以下の小規模町村においては 187.97 円 (H29 年度) となる。さらに、供給単価については、給水人口が 50 万人以上 100 万人未満の中規模都市圏では 153.75 円 (H29 年度) となって最も安くなることがわかる。また給水原価に対しても、供給単価とほぼ同様の傾向が見られる。このような給水収益、供給単価、給水原価の格差がどのような要因に起因するものであるかを探るためにも、水道事業運営状況を表す WPI データの構築、分析、検証が必要かつ重要となる。

導水管、送水管と配水管の本管、支管の延長距離の総和としての管路総延長 (km) を都道府県別 (H29 年度) に比較すると、管路総延長が長いのは北海道が 35,978.5 km, 愛知が 41,588.7 km, 東京が 29,207.2 km となり、また短いのは鳥取が 4,677.9 km, 高知が 4,278.0 km, 山梨が 5,422.0 km となっている。一方、これらの地域の管路総延長 (km) のうちで耐震管割合 (%) が高いのは東京が 41.8%, 富山が 28.4%, 青森が 24.5% となり、また低いのは茨城が 6.2%, 鹿児島が 7.8%, 長崎が 6.2% となっている。法定耐用年数を超過している管の割合 (%) が高いのは神奈川が 24.1%, 大阪が 30.5%, 香川が 22.3% となり、また低いのは沖縄が 8.7%, 岩手、栃木、茨城が 9.2% となっている。管路総延長 (km) のうちで耐震管割合 (%) が低い、あるいは法定耐用年数を超過している管の割合 (%) が高いといった都道府県は、重大な自然災害の発生時の影響を大きく受けることが予想される。そのような意味においても、これらの量に基づく WPI については、注意する必要がある。

表 3 に示す水道事業運営状況を表す WPI 構築のための対象の評価基準と評価項目に基づいて、本指標 WPI を分類別、評価項目別に定義し、計算する手順 1–3 を

表 3 水道事業運営状況を表す業務実績指標 (WPI)

分類	評価項目
事業経営	予算額、職員数
	営業収益 (億円)、営業費用 (億円)、 営業収益/営業費用
	給水収益 (千円)
施設・設備	管路総延長 (導水管、送水管、配水管, km)、 施設能力 (1000m <sup>3</sup> /日)
	耐震管割合 (%)
	法定耐用年数超過管割合 (%)
	給水人口、普及率 (%)
事業運営	供給単価 (円)、給水単価 (円)
	技術職員割合 (%)

以下に示す。

手順 1: 分類  $i \in I$ , 評価項目  $j \in J$ , 指標対象項目  $p \in P$  の指標値 ( $x_{ijp}$ ) をもとに平均値 ( $\mu_{ij}^x$ ), 標準偏差 ( $\sigma_{ij}^x$ ) を求める。ここで集合  $I, J, P$  はそれぞれ分類の集合  $I = \{1, 2, \dots, m_x\}$ , 評価項目の集合  $J = \{1, 2, \dots, n_x\}$ , 指標対象項目の集合  $P = \{1, 2, \dots, t_x\}$  を表す。表 3 に示した分類、評価項目では、 $m_x = 3$  に対応する。

手順 2: 指標対象項目に対応する指標値 ( $x_{ijp}$ ), 平均値 ( $\mu_{ij}^x$ ), 標準偏差 ( $\sigma_{ij}^x$ ) をもとに下式に基づく基準化操作を行い、指標項目別の基準値  $z_{ijp}$  を得る。

$$z_{ijp} = \frac{x_{ijp} - \mu_{ij}^x}{\sigma_{ij}^x}, \quad i \in I, j \in J, p \in P \quad (6)$$

$z_{ijp}$ : 分類  $i \in I$ , 評価項目  $j \in J$ ,  
指標対象項目  $p \in P$  の基準化指標値

$x_{ijp}$ : 分類  $i \in I$ , 評価項目  $j \in J$ ,  
指標対象項目  $p \in P$  の指標値

手順 3:  $i \in I$ , 分析対象項目  $k \in K$ ,  $p \in P$  の指標値 ( $w_{ikp}$ ) を下記の定義式に基づいて得る。

$$w_{ikp} = \frac{1}{n_x} \sum_{j \in J_k} z_{ijp} \quad i \in I, k \in K, p \in P \quad (7)$$

分類  $i \in I$ , 評価項目  $j \in J$ , 指標対象項目  $p \in P$  に関するデータ ( $x_{ijp}$ ) をもとに、上記の計算手順に基づいて指標項目別の基準値  $z_{ijp}$  を計算し、さらには、上記の  $k \in K$  に対して、指標対象項目  $p \in P$  指標値 ( $w_{ikp}$ ) が得られる。なおここで、 $k \in K$  に関する評価を実施するに際しては、 $j \in J$  に対して集合  $J$  の部分集合  $J_k$  に含まれる基準値  $z_{ijp}$  を用いる。このことは、指標対象項目  $p \in P$  指標値 ( $x_{ijp}$ ) から  $k \in K$  に対して、指標対象項目  $p \in P$  が  $i \in I$  に対してどのような位置にあるか、さらには指標対象項目  $p \in P$  を  $i \in I$  に対して計量的に評価する場合にはどのようにすれば

表4 地域別都道府県の構成

地域	都道府県
HOKD	HKD
TOHK	AMR, IWT, MYG, AKT, YGT, FKM
KANT	IBK, TCG, GNM, STM, CHB, TKY, KNW
CHUB	NGT, TYM, IKW, FKI, YMN, NGN, GFU, SZK, ACH
KINK	MIE, SHG, KYT, OSK, HGO, NRA, WKM
CHUG	TTR, SMN, OKM, HRM, YMG
SIKK	TKM, KGW, EHM, KCH
KYUO	FKK, SGA, NGS, KMT, OIT, MYK, KGM, OKW

表5 地域別各変数の実測値 (H29 年度)

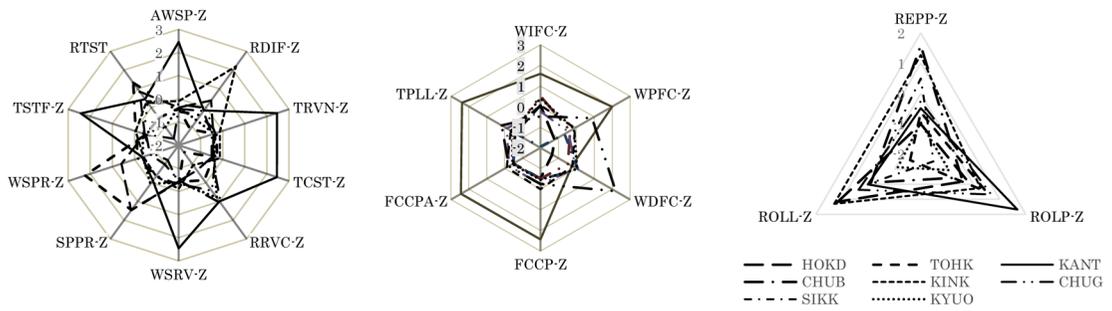
地域・変数	AWSP	RDIF	TRVN	TCST	RRVC	WSRV
HOKD	51785	97.345	1072205	965644	0.9800	1023782
TOHK	46279	95.597	1147920	1076581	1.0018	1109019
KANT	464014	96.745	10805182	10113192	1.0486	10008844
CHUB	72139	96.883	1383482	1315958	1.0252	1339631
KINK	91288	99.430	2078544	1941132	0.9683	2048533
CHUG	26987	96.444	1546801	1561200	0.9394	1546654
SIKK	42690	96.704	864475	777641	1.0528	887301
KYUO	56062	96.133	1192815	1156040	1.0403	1178757
地域・変数	SPUP	WSPR	TSTF	RTST	TPLL	
HOKD	216.00	232.000	22.000	0.3950	363419	
TOHK	215.50	332.000	20.167	0.3512	400104	
KANT	177.14	175.571	136.286	0.3824	1280981	
CHUB	150.67	146.222	24.111	0.3768	508890	
KINK	171.57	172.143	38.286	0.3789	439485	
CHUG	171.20	186.800	38.200	0.4096	594322	
SIKK	156.25	153.750	19.750	0.3168	342044	
KYUO	181.38	173.625	25.375	0.3360	407296	

よいかを示唆している。

### 3.2 業務実績指標 (WPI) に基づくわが国水道事業の地域別業務実績評価

前節に示した WPI に基づく業務実績評価をわが国の八つの地域 (北海道 (HOKD), 東北 (TOHK), 関東 (KANT), 中部 (CHUB), 近畿 (KINK), 中国 (CHUG), 四国 (SIKK), 九州沖縄 (KYUO)) 別に実施することによって, わが国水道事業者の地域特性を探索。表 4 に地域別都道府県の構成を示す。H29 年度における表 3 の評価対象に対する各変数の地域別原データを表 5 に示す。ここで用いる変数は, それぞれ平均給水人口 (AWSP), 普及率 (RDIF), 総収益 (TRVN), 総費用 (TCST), 総収益総費用比 (RRVC), 給水収益 (WSRV), 供給単価 (SPUP), 給水原価 (WSPR), 総職員数 (TSTF), 技術系職員比 (RTST), 管路総延長 (TPLL) を表す。各地域に対する各変数の平均値は, それぞれの地域に含まれる都道府県別の平均値とする。これらの変数に対応する H29 年度データを式 (6) に基づいて基準化することによって得られる値 (以下,  $z$ -値) に基づいて分析を行う。各変数の  $z$ -値に基づく地域別の各種評価対象 WPI 平均値を図 6 に示す。

図 6(a) の経営関連 WPI 値に関しては, KANT が RTST, RDIF, WSPR, SPPR 以外のすべての変数に関して, 他地域の  $z$ -値を遥かに凌ぐ最大値をとっている。KANT が他地域と比較して同様あるいはより低い  $z$ -値を有しているのは普及率, 給水原価あるいは供給単価といった地域間格差の小さな変数であることがわかる。また RDIF に関しては KINK が最大値を示し, SPPR に関しては HOKD, TOHK が他地域を遥かに凌ぐ最大値をとっている。技術系職員の比率を表す RTST に関しては, CHUG, HOKD が高い  $z$ -値を示し, KYUO, SIKK が他地域よりかなり低い値を有することがわかる。そして収益と費用の比率を表す RRVC に関しては, KANT, SIKK, KYUO が高い値を示し, CHUG, KINK が他地域よりかなり低い値を有することがわかる。給水単価を表す WSPR, SPPR に関しては, 他地域と比較して CHUB, SIKK がいずれの価格に関しても安価であることがわかる。図 6(b) の施設・設備関連 WPI 値に関しては, KANT が配水施設数を表す WDFC 以外のすべての変数に関して最大値をとる。取水, 浄水の施設数, 能力, そして管路総延長のすべてにおいて KANT が他地域を大きく凌いでいるのがわかる。もう一つ特徴的なことは, CHUG が WPFC, WDFC の浄水配水施設数に関して他地域を大きく凌いでいることである。また一方, HOKD 地域が施設数 WPFC, WDFC に関して他地域よりかなり少ないこと, そしてまた SIKK 地域が WIFC に関して極端に少ないことも顕著である。図 6(c) の脆弱性関連 WPI 値に関しては, KANT がこれまでの経営関連, 施設・設備関連の WPI 値の平均値に見られたような顕著な傾向は見られないのが特徴的である。耐震浄水施設の割合を示す変数 REPP に関しては, CHUB, KINK 地域が他地域と比較してかなり大きな  $z$ -値をとり, SIKK がそれに次いでいる。耐用年数を超過する浄水設備能力を表す ROLP に関しては, KANT, CHUG, KINK 地域が他地域と比較してかなり大きな  $z$ -値をとり, 設備の旧態が示される一方で, SIKK が最小値をとり, かなり新規設備を有していることがわかる。耐用年数を超過する管の割合を表す ROLL に関しては, KINK, HOKD 地域が他地域と比較してかなり大きな  $z$ -値をとり, CHUG がそれに次いでいる。一方, TOHK, KYUO は他地域と比較してかなり  $z$ -値が低いこともわかる。



(a) 地域別経営関連

(b) 地域別施設・設備関連

(c) 地域別脆弱性関連

図 6 WPI 値の平均値 (H29 年度)

表 6 クラスタ分析適用ケースの設定

Case	評価対象項目
I	平均給水人口 (AWSP), 総給水人口 (TWSP), 普及率 (RDIF)
II	平均給水人口 (AWSP), 総給水人口 (TWSP), 管路総延長 (TPLL)
III	管路総延長 (TPLL), 総収益 (TRVN), 総職員数 (TSTF)
IV	総収益総費用比 (RRVC), 総収益 (TRVN), 総職員数 (TSTF)

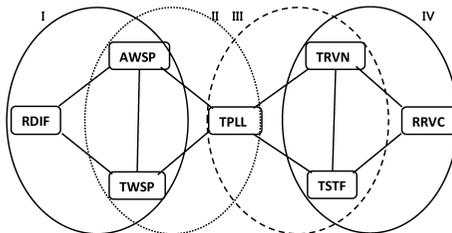


図 7 各ケースを構成する変数の組

#### 4. 業務実績指標に基づくわが国水道事業の地域特性分析

##### 4.1 クラスタ分析に基づく都道府県マクロデータ分析

わが国の都道府県マクロデータを対象としてクラスタ分析を行うことによって都道府県独自あるいはそれらの間の地域特性を探る。表 3 に示したいくつかの評価項目に対するわが国の 47 都道府県の値をもとにクラスタリングを行い、47 都道府県を四つのクラスターに分類する。クラスタリングに当たっては、K-平均法を用いる。なおここで用いる変数はすべてそれぞれの原データを式 (6) に基づいて標準化 (基準化) したものとす。したがってすべての変数は数量的単位を有していないことから、変数間の相対的相互比較が可能となる。それぞれ 3 変数からなる表 6 に示す四つ

表 7 クラスタ別の要素数 (都道府県数) とその割合 (%)

Case I			Case II		
クラスター	要素数	割合 (%)	クラスター	要素数	割合 (%)
1	1	2.13	1	1	2.13
2	7	14.89	2	8	17.02
3	14	29.79	3	13	27.66
4	25	53.19	4	25	53.19
合計	47	100.00	合計	47	100.00

Case III			Case IV		
クラスター	要素数	割合 (%)	クラスター	要素数	割合 (%)
1	1	2.13	1	1	2.13
2	1	2.13	2	7	14.89
3	16	34.04	3	19	40.43
4	29	61.70	4	20	42.55
合計	47	100.00	合計	47	100.00

表 8 各ケースに対するクラスターの重心の座標

Case I				Case II			
Cluster	AWSP	TWSP	RDIF	Cluster	AWSP	TWSP	TPLL
1	6.562	4.024	1.011	1	6.562	4.024	1.649
2	0.180	1.608	0.642	2	0.147	1.505	1.685
3	-0.192	-0.348	-1.304	3	-0.163	-0.164	0.261
4	-0.206	-0.416	0.510	4	-0.225	-0.558	-0.741

Case III			Case IV				
Cluster	TPLL	TRVN	TSTF	Cluster	RRVC	TRVN	TSTF
1	6.461	6.566	6.450	1	-0.894	6.566	6.450
2	1.051	0.984	1.327	2	-1.638	0.016	0.072
3	0.051	-0.061	-0.032	3	0.868	-0.179	-0.179
4	-0.287	-0.227	-0.251	4	-0.206	-0.164	-0.178

のケース I, II, III, IV を設定する。表 6 に示す四つのケース I, II, III, IV の各ケースに対する変数の組の内訳とそれらの間の相互関係を図 7 に示す。

表 6 に示すそれぞれのケースに含まれる変数の組の H29 年度データに対してクラスタ分析を適用する。クラスタ分析の各ケースに対する適用結果を以下に示す。表 7 は各ケースに対するクラスター数を 4 とした場合のクラスター別の要素数 (都道府県数) とその割合 (%) を示す。表 8 は各ケースに対するそれぞれ

のクラスターの重心の座標を示したものである。

Case I, Case II は、表 6 に示すように、平均給水人口 (AWSP)、総給水人口 (TWSP)、普及率 (RDIF)、管路総延長 (TPLL) という四つの変数の都道府県別 H29 年度データを用いていることから、表 3 に示した WPI 分類項目のわが国の水道事業運営の規模を表す WPI 指標であるとみなすことができる。ここで RDIF (%) は給水人口を全人口で除した割合を表す。Case I, Case II の結果からは、以下のようなことがわかる。

- i) クラスタ 1 は Case I, Case II のほぼすべての変数において四つのクラスターの中の最大値となる。TPLL は Case II においてクラスター 2 とほぼ同様の値を有し、四つのクラスターの中で 2 番目に大きい。クラスター 1 の要素は TKY のみである。
- ii) クラスタ 2 は Case I ではすべての変数において四つのクラスターの中で重心座標が 2 番目に大きい。Case II では AWSP, TWSP の 2 変数において重心座標がクラスター 1 について 2 番目に大きく、TPLL は最大となる。クラスター 2 に含まれる要素は Case I では TKY を除く首都圏 3 県 (STM, CHB, KNW)、わが国の主要大都市である札幌、名古屋、大阪、神戸を含む HKD, ACH, OSK, HGO である。Case II ではこれらに九州の最大都市である福岡 (FKK) が加わる。
- iii) クラスタ 3 はすべての変数において四つのクラスターの中で重心座標がクラスター 1, 2 に次いで 3 番目である。クラスター 3 に含まれる要素は、Case I では東北圏 (IWT, AKT, FKM)、首都圏周辺 (IBK) と中部中国圏 (TYM, GFU, HRM, YMG)、そして四国九州圏 (EHM, KCH, FKK, SGA, KMT, OIT) などからなる。Case II では東北圏 (MYG, FKM)、首都圏周辺 (IBK, TCG, GNM, NGT) と中部中国圏 (NGN, GFU, SZK, MIE, HRM, OKM)、そして四国九州圏 (KGM) などからなる。
- iv) クラスタ 4 は、すべての変数において四つのクラスターの中で重心座標が最小である。RDIF のみはクラスター 1, 2 に次いで 3 番目である。クラスター 4 に含まれる要素は、大都市を有していない遠隔県である。
- v) クラスタ 1 の正値が突出して大きいこと、各クラスターの重心座標はクラスター 1 と 2 のみが正値をとり、クラスター 3 と 4 は負値をとる。クラスター 1, 2 に含まれる要素とクラスター 3,

に含まれる要素との間には大きな格差がある。

Case III, Case IV は、表 6 に示すように、総収益 (TRVN)、総職員数 (TSTF)、管路総延長 (TPLL)、総収益総費用比 (RRVC) という四つの変数に基づいている。表 3 に示した WPI 分類項目のわが国の水道事業経営の効率を表す WPI 指標であるとみなすことができる。Case III, Case IV の結果からは、以下のようなことがわかる。

- i) クラスタ 1 は Case III の場合にすべての変数 TRVN, TSTF, TPLL において重心座標が最大値となる。Case IV については、変数 TRVN, TSTF についてはクラスター 1 が最大であるが、変数 RRVC については四つのクラスターの中で最小値である。
- ii) クラスタ 2 は Case III ではすべての変数において四つのクラスターの中で重心座標がクラスター 1 に次いで 2 番目に大きい。Case IV では TRVN, TSTF の 2 変数において重心座標がクラスター 1 について 2 番目に大きく、変数 RRVC は最小となる。クラスター 2 に含まれる要素は Case III では首都圏 KNW のみである。Case IV では中京圏 (ACH, MIE) とその他 TTR, SGA, KMT, OKW などである。
- iii) クラスタ 3 は Case III の場合、TRVN, TSTF, TPLL のすべての変数において重心座標がクラスター 1, 2 に次いで 3 番目に大きい。Case IV では TRVN, TSTF の 2 変数において最小である。クラスター 3 に含まれる要素は、Case III では首都圏周辺 (IBK, TCG, GNM, STM, CHB) と中部中国圏 (SZK, ACH, MIE, OKM, HRM, YMG) などからなる。Case IV では北海道・東北圏 (HKD, AMR, AKT, FKM)、首都圏周辺 (TCG, GNM, CHB, NGT) と中部近畿中国圏 (NGN, GFU, SZK, OSK, YMG)、そして四国九州圏 (NGS, OIT, KGM) などからなる。
- iv) クラスタ 4 は、Case III の場合、TRVN, TSTF, TPLL のすべての変数において重心座標が最小である。Case IV では TRVN, TSTF の 2 変数において重心座標が最小である。クラスター 4 に含まれる要素は、大都市を有していない遠隔県である。
- v) Case III, Case IV のいずれにおいても、変数 RRVC を除いてクラスター 1 の正値が突出して大きいこと、さらに各クラスターの重心座標についても変数 RRVC を除いてクラスター 1 と 2 の

みが正值をとり、クラスター 3 と 4 は負値をとるのがわかる。

## 5. 主成分分析に基づく都道府県マクロデータ分析

わが国の水道事業運営を i) 事業経営, ii) 施設・設備,

表 9 固有値と寄与率

主成分	固有値	寄与率	累積寄与率
1	4.103	0.4559	0.4559
2	1.311	0.1456	0.6015
3	1.227	0.1364	0.7379
4	0.964	0.1071	0.8450
5	0.620	0.0689	0.9139
6	0.517	0.0575	0.9714
7	0.241	0.0268	0.9982
8	0.013	0.0015	0.9997
9	0.003	0.0003	1.0000

表 10 主成分別変数別負荷量 (固有ベクトル係数)

変数	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
TRVN	0.473	0.121	-0.088	-0.017
RRVC	-0.083	-0.063	0.465	-0.818
TSTF	0.478	0.092	-0.064	-0.001
RTST	0.096	0.326	0.681	0.243
TSLR	0.319	-0.266	-0.103	-0.381
TPLL	0.474	0.088	-0.097	-0.022
REPL	0.152	-0.476	0.519	0.345
SPPR	0.054	0.735	0.091	-0.086
TWSP	0.423	-0.147	0.097	0.004

iii) 事業運営の三つの側面から眺めるとき、これらの諸活動は表 3 に示したような各種要因項目によって表される。本節では、そのようなわが国の水道事業運営の諸活動を決定する要因がどのようなものであるかを探ることを目的として、全国都道府県マクロデータとして、総収益 (10<sup>6</sup>, TRVN), 総収益総費用比 (RRVC), 総職員数 (10<sup>3</sup>, TSTF), 技術系職員数比 (RTST), 総給与 (TSLR), 管路総延長 (TPLL), 耐震管路長比 (REPL), 平均供給単価 (SPPR), 平均給水人口 (AWSP), 総給水人口 (TWSP) の九つの変数のデータを対象として、主成分分析を適用する。

三つの変数 TRVN, TSTF, TPLL の間の相関係数が 0.98 以上とかなり高く、また三つの変数 RRVC, RTST, SPPR については、これらの変数と他の変数との間の相関係数はすべて 0.0 近辺にあり、かなり低いことがわかる。一般に原データが割合あるいは率を表す場合、それらの間に大きな格差がない場合にはデータの基準化によって格差が拡大されることに起因するものと思われる。表 9 に固有値と寄与率を示す。固有値は主成分得点の標準偏差に相当することから、主成

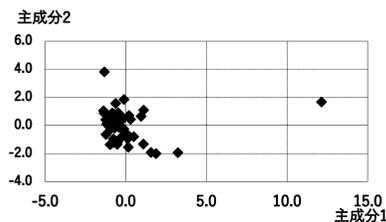


図 9 主成分得点 1-2 の散布図

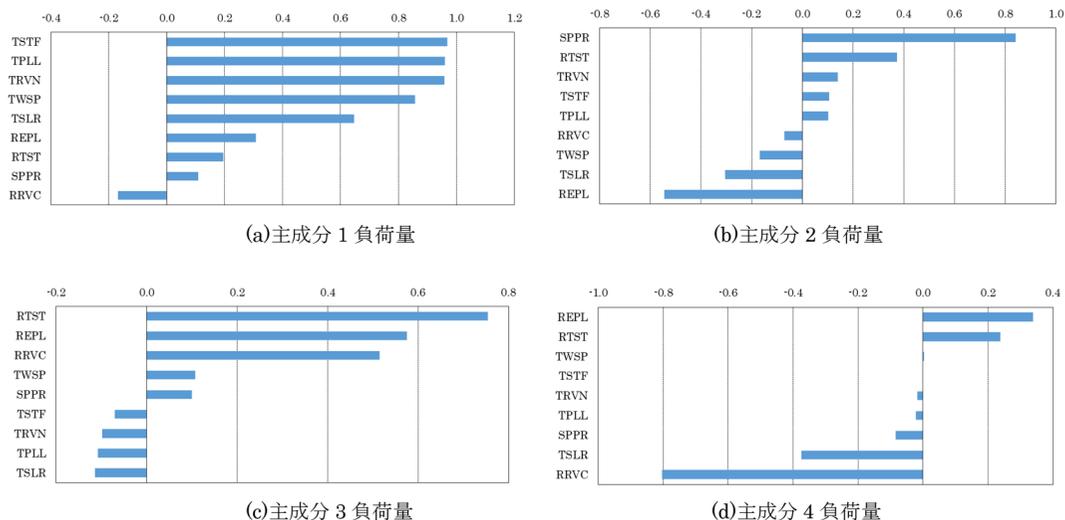


図 8 主成分負荷量

分の有する情報量を表すことになるので、本分析では固有値がほぼ 1.0 以上、そして累積寄与率がほぼ 85% となるべく、主成分個数を 4 個として分析を進めることにする。表 10 は四つの主成分に対する各変数の係数、負荷量を示したものである。ここで主成分負荷量は固有ベクトル係数に固有値の平方根を乗じて得られる。図 8(a)–(d) はそれぞれの主成分に対して各変数の負荷量を降順に示したものである。

主成分 1 については、図 8(a) から三つの変数 TSTF, TPLL, TRVN, そして TSLR といった水道事業運営の設備、職員といった物的・人的資源の大きさを表す変数が大きな値をとり、SPPR, RRVC などの事業運営の効率を表す変数が小さな値をとっていることから、主成分 1 は水道事業運営の規模を表す要因であるといえる。主成分 2 については、図 8(b) から変数 SPPR, TTST といった水道事業運営の技術系・人的資源に基づく供給単価の大きさを表す変数が大きな値をとり、TSLR, REPL などの事業運営の費用を表す変数が小さな値をとっていることから、主成分 2 は水道事業運営の技術による経営健全化を表す要因であるといえる。主成分 3 については、図 8(c) から三つの変数 RTST, REPL, RRVC といった水道事業運営に伴う技術に関する物的・人的資源の大きさと経営効率を表す変数が大きな値をとり、TRVN, TSLR, TPLL などの事業運営の規模を表す変数が小さな値をとっていることから、主成分 3 は水道事業運営の技術による運営効率化を表す要因であるといえる。主成分 4 については、図 8(d) から二つの変数 REPL, RTST, といった水道事業運営の技術に関する物的・人的資源の大きさを表す変数が大きな値をとり、TSLR, RRVC などの事業運営の費用、収益を表す変数が小さな値をとっていることから、主成分 4 は水道事業運営に伴う技術の質を表す要因であるといえる。以上からもわかるように、水道事業運営に関しては、事業規模が最大の要因であることは事実であるものの、技術に関して、物的・人的資源、そしてその効率化、質の向上が重要であることを示唆しているといえる。

図 9 は主成分 1 と主成分 2 に対する得点の散布図を示したものである。図 9 から、主成分 1 の値が突出して大きいのは TKY であること、それに次いで KNW, OSK, ACH, そして STM, SZK がそれに続いているのがわかる。これら以外の都道府県はほぼ一様である。主成分 2 の値については、NGS, MYG, AMR といった遠隔県が大きな値を有し、KNW, OSK, ACH が小さな値を有し、それら以外はほぼ一様である。KNW,

OSK, ACH といった大都市を有する都道府県は技術に基づく物的資源は少ないものの、平均給与、管の耐震化といった側面で経営健全化を図っていることを示唆している。

## 6. おわりに

本稿 1 節でわが国水道事業の概要を説明し、2 節では、阪神・淡路大震災における電気、ガス、水道、通信を分析対象として、社会インフラの自然災害時における復旧過程を数理モデルを用いて分析することによって、モデルの一般性とこれらの各種社会インフラ間の相異を明らかにした。これらの結果は、わが国の都市防災・減災政策を考えるうえで有用な情報を提供することになる。3 節では、わが国の水道事業運営を i) 事業経営、ii) 施設・設備、iii) 事業運営の三つの側面から眺め、水道事業の事業実績評価の実証分析を行った。水道事業における業務実績指標を構築し、それに基づく地域別業務実績評価によって地域特性、地域間格差を計量的に分析した。4 節では、クラスター分析の適用によって評価対象項目の組合せに基づく業務実績指標値を用いて、わが国の都道府県特性を明らかにした。さらに、主成分分析の適用によって、わが国の水道事業運営にあたって、背景にある特性要因が何であるかを明らかにした。このような分析とアプローチは、社会インフラ全般のレジリエンス評価を通して全体的、総合的な評価を行うことを目指し、可能とするものである。

## 参考文献

- [1] Y. Kawase and T. Oyama, “Statistical data analyses for investigating recent major earthquakes and mitigating their damages in Japan,” *International Journal of Operational Research Nepal, APORS2018*, **2**, pp. 75–93, 2019.
- [2] Y. Kawase and T. Oyama, “Reviewing restoration processes for the damaged social infrastructures in Japan and building a performance indicator to design disaster mitigation policy,” In *Conference Proceedings of Asian Association of Management Science and Applications*, pp. 18–33, 2019.
- [3] Japan Water Works Association (2001–2016), *Water Statistics*. Retrieved from, <http://www.jwwa.or.jp/index.html> (2019 年 12 月 25 日閲覧) .
- [4] A. Nafi, J. Tchong and P. Beau, “Comprehensive methodology for overall performance assessment of water utilities,” *Water Resour Manage*, **29**, pp. 5429–5450, 2015.
- [5] V. R. Shinde, N. Hirayama, A. Mugita and S. Itoh, “Revising the existing Performance Indicator system for small water supply utilities in Japan,” *Urban Water Journal*, **10**, pp. 377–393, 2013.

- [6] D. Kumawat and R. Sharma, "An empirical study for sustainable policy intervention in urban drinking water supply management using performance indicator," *International Journal of Business Continuity and Risk Management*, **9**, pp. 362–384, 2019.
- [7] E. A. Donkor, "Effect of customer satisfaction on water utility business performance," Technical report TR-2013-2, January 25, DOI: 10.5942/jawwa.2013.105.0114.
- [8] H. Alegre, "Performance Indicators for Water Supply Systems," *Drought Management Planning in Water Supply Systems*, E. Cabrera and J. Garcla-Serra(eds.), Water Science and Technology Library book series (WSTL, vol. 32), pp. 148–178, 1999.