

13. 業務指標を用いた気候変動に対する 小規模水道事業体の脆弱性評価

渡辺直子^{1*}・矢部博康²・小池亮²・森本達男²・荒巻俊也³・滝沢智¹

¹ 東京大学工学系研究科都市工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

² パシフィックコンサルタンツ株式会社 上下水道部/PFI・PPPマネジメント部
（〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5）

³ 東洋大学国際地域学部国際地域学科（〒112-0001 東京都文京区白山2-36-5）

* E-mail: naoko_w@env.t.u-tokyo.ac.jp

気候変動は水資源の量・質・分布を変化させ水道事業に直接・間接に影響を与える。特に小規模な水道事業体では、利用可能な水源の数や種類が少なく深刻な影響を受ける可能性が高い。本研究は給水人口5万人以下の小規模上水道事業を対象とし、水道事業ガイドラインに定義されている業務指標を用いて気候変動に対する脆弱性等を地図上に表して地域的な分布や特徴を明らかにするとともに、上水道事業体を脆弱性のタイプにより類型化して脆弱性をもたらす主な要因を検討した。脆弱性が高いと評価される事業体は全国に存在し個々の事業体の実情に応じた対応策が必要であること、高齢単身世帯の割合が高く、かつ渇水時における持続的な給水能力が低いと評価される地域が存在し対策の必要性が高いことがわかった。

Key Words : climate change, small-scale water supply utilities, performance indicator, vulnerability

1. はじめに

気候変動の影響は世界的に顕在化しつつあり、様々な分野への影響が懸念されている¹⁾。特に、水資源に関しては、量、時間的・空間的な分布、質、また水需要に対して直接的に大きな影響を与える可能性がある¹⁾。この結果、飲料水・生活用水、都市活動用水などの供給に直接的に²⁾、また、農業・食糧生産、エネルギー・産業、健康などを通して副次的に、多大な影響を人間社会に及ぼすことが考えられる。我が国の水利用量約831億m³/年の約2割にあたる生活用水は、主に上水道、簡易水道、専用水道により供給されているが³⁾、気候変動の影響は小規模な水供給システムにおいてより顕著である可能性が高い。

本調査では、水供給システムのうち、小規模（給水人口5万人未満と定義する）の上水道事業体を対象とし、気候変動に対する脆弱性を調べるため、小規模上水道事業体に関するデータを解析・地図情報化し、地域ごとの情報を全国レベルで評価することを目的とする。

2. 解析手法

(1) 調査対象となる小規模水道事業体

平成20年度末現在、上水道事業は、日本の給水人口97.5%のうちの93.0%にあたる118,980千人に給水をしており⁴⁾、小規模上水道事業は給水人口、給水量、処理能力ともに上水道事業の2割弱、給水面積では45%をカバーしている（表-1）。事業体あたりの平均施設能力は約1万2千m³/日と、大規模上水道事業体の平均施設能力13万2千m³/日の10分の1以下である一方、管路延長に関しては29.0%を保有している。水道料金について比較をすると、小規模上水道事業体の方が給水原価、供給単価ともに30から35円高くなっており、また、給水原価と供給単価の差も大きくなっている。水道事業体、水道利用者ともに財政的な負担が小規模上水道事業の方が大きいことがわかる。

水源別の取水量を規模毎に比較すると（図-1）、大規模上水道事業体ではダムと河川水を主とする表流水が7割以上を占めるのに対し、小規模は井戸水が54.2%と大きく、次いで河川水（21.6%）となっている。上水道事業体ごとの平均の水源の種類数は、大規模が2.2であるのに

対し小規模は1.7となっており、また、取水量の9割以上を単一種類の水源に依存している事業体の割合は大規模が13.7%であるのに対し小規模は42.5%であり、小規模上水道事業体は利用している水源の種類が少なく、またその水源への依存度が高い。

表-1 水道事業の中での小規模上水道事業の特徴
(厚生労働省、水道統計、平成20年度)³⁾

項目(単位)	大規模 ¹⁾	小規模 ²⁾	上水道事業体総計
給水人口 (千人)	98,188	20,791	118,980
(%)	82.5	17.5	100.0
上水道事業体数	428	1,086	1,514
(%)	28.3	71.7	100.0
給水量 (千 m ³ /年)	1,254,498	2,598,656	1,513,9154
(%)	82.8	17.2	100.0
現在給水面積 (km ²)	47,959.46	39,106.60	87,066.06
(%)	55.1	44.9	100.0
施設能力 (千 m ³ /日)	56,152	12,724	68,876
(%)	81.5	18.5	100.0
管路延長 (km)	431,004	175,775	606,759
(%)	71.0	29.0	100.0
平均給水原価 (円)	73.4	109.1	94.6
平均供給単価 (円)	72.1	104.9	90.3

- 1) 給水人口5万人以上の上水道事業体
2) 給水人口5万人未満の上水道事業体

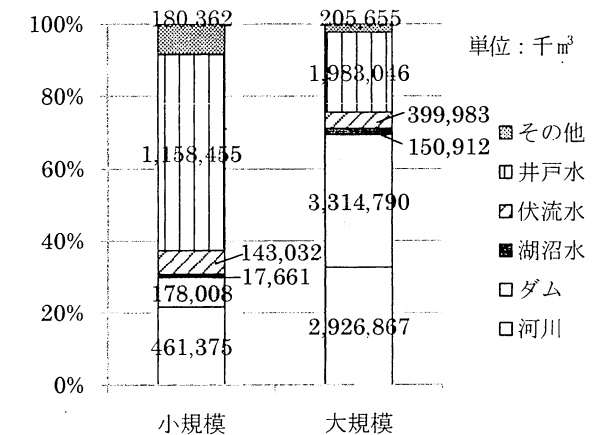


図-1 水源別取水量(平成20年度)

(2)検討項目

気候変動により、水資源にはさまざまな影響が出る可能性が予測されているが^{2, 5)}、本調査では、
a)降雨パターンの変化による渇水頻度増加への対応能力、
b)渇水の影響を吸収する可能性のある配水施設の余裕度、
c)濁度、富栄養化の増加などの水質の変化への対応能力、
d)気候変動に適応するための財源の健全性
の4点について各上水道事業体の脆弱性を評価する。評価は、水道統計⁴⁾をもとに、平成20年度の業務指標

(Performance Indicator、PI)をベースに全国の小規模上水道の現状及び課題の把握を行った。PIは上水道事業体が行っている業務を水道事業ガイドラインJWWAQ100⁶⁾に定義された方法により定量化したもので、本調査では、137項目のPIのうち、水源、配水、水質、経営と関連すると考えられる5, 6, 3, 2項目それぞれを評価対象とした(表-2)。

表-2 抽出したPI

PI 番号	業務指標	H20 25%値	75%値
a)水源に対する影響評価項目			
1001 ¹⁾	1ー水源利用率(%)	36.3	52.6
1002	水源余裕率(%)	27.7	70.4
1003	原水有効利用率(%)	78.4	92.3
1004	自己保有水源率(%)	42.2	100.0 ⁹⁾
4101	地下水率(%)	7.7 ¹⁾	89.7 ⁹⁾
b)配水に対する影響評価項目			
2001	給水人口一人当たり貯留飲料水量(L/人)	142.0	280.0
2002	給水人口一人当たり配水量(L/人)	312.0	407.0
2004	配水池貯水能力(日)	0.8 ³⁾	1.4 ⁵⁾
2006	普及率(%)	96.7	99.9
2205	給水拠点密度(箇所/100km ²)	10.0	83.4
5107 ¹⁾	1ー漏水率(%)	91.1 ⁶⁾	96.8 ⁹⁾
c)水質に対する影響評価項目			
1017 ²⁾	ダム・湖沼以外の水源の割合(%)	41.3 ⁷⁾	100.0 ⁹⁾
2303 ²⁾	急速ろ過(%)	0.0 ⁸⁾	0.0 ⁸⁾
2305 ²⁾	活性炭処理率(%)	0.0 ⁷⁾	100.0 ⁹⁾
d)経営に関する影響評価項目			
3014	供給単価(円/m ³)	140.2	213.8
3015	給水単価(円/m ³)	136.6	222.7

- 1) 数値が高い方が評価が高くなるよう1からPI値を差し引いた値を用いた。
2) 「JWWAQ100:2005」対象外。本調査において設定。
3) 評価には、75%値(100.0%)の代わりに90.0%を設定。
4) 評価には、25%値、75%値の代わりに50.0%、90.0%を設定。
5) 評価には、水道ビジョン⁷⁾より25%値、75%値の代わりに、0.5、1.0を設定。
6) 評価には、水道ビジョン⁷⁾より25%値、75%値の代わりに95.0%、98.0%を設定。
7) 評価には、25%値、75%値の代わりに30.0%、95.0%を設定。
8) 評価には、25%値、75%値の代わりに10.0%、95.0%を設定。

(3)評価・類型化方法

a)CPIによる評価

PI指標による評価は、2つの異なるPIを組み合わせ、Combined Performance Indicator (CPI)として評価した。それぞれのPI指標について25%値未満、25%から75%値、75%値以上に3分類し、2つのPI指標を組み合わせた3×3のマトリックスにより、小規模上水道事業体を分類した。なお、例外的に25%値、75%値以外を設定した場合もあり、詳細は表-2に示してある。1084の小規模上水道事業体を対象とし、それぞれのCPI項目について、L1(最も評価が低い)からL9(最も評価が高い)までの評価を行った。表-

表-3 CPI 評価項目と指標の考え方

第1指標（主指標）		第2指標（副指標）	指標の考え方
a) 水源に関する CPI 評価			
1001' 1-水源利用率	1003	原水有効利用率	渇水時の給水力の強弱
1002 水源余裕率	1001'	1-水源利用率	渇水時の水源の強弱
1002 水源余裕率	1003	原水有効利用率	渇水時ピーク水量に対する原水の有効性の強弱
1002 水源余裕率	2004	配水池貯留能力	渇水時における持続的応急給水能力の強弱
1002 水源余裕率	4101	地下水率	渇水時の持続的給水能力の強弱
1003 原水有効利用率	5107'	1-漏水率	渇水時の給水制限下での水量有効性の強弱
1004 自己保有水源率	4101	地下水率	渇水時の水源運用性と水源の安定性
b) 配水に関する CPI 評価			
1004 自己保有水源率	1003	原水有効利用率	渇水時の水源運用性と水道システムの量的効率性
1004 自己保有水源率	2004	配水池貯留能力	渇水時の水源運用性と応急給水能力
2001 給水人口一人当たり貯留飲料水量	2004	配水池貯留能力	給水制限下における飲料水量の確保度
2001 給水人口一人当たり貯留飲料水量	2205	給水拠点密度	応急給水活動の容易性
2002 給水人口一人当たり配水量	2006	普及率	給水制限下における市民生活の弾力度・適応度
c) 水質に関する CPI 評価			
4101 地下水率	2303	急速ろ過率	濁度上昇時の適応力の強弱
1017 水源種別-ダム湖沼及び水道用水供給以外	2306	活性炭処理率	富栄養化に対する適応力の強弱
d) 運営に関する CPI 評価			
3014 供給単価	3015	給水原価	新たな事業への取り組みやすさ

*: 数値が高い方が評価が高くなるよう1からPI値を差し引いた値を用いた。

下線は総合評価に用いたCPI。

3にCPI評価に用いたPI指標の組み合わせを示す。また、表-3のCPIのうち下線で表した項目を抽出し、a) 水源、b) 配水、c) 水質、d) 経営について平均してCPIの総合評価を行った。

b) クラスタ分析による評価

表-2のPIのうち、PI間の相関の高い水源余裕率、給水人口1人当たり配水量、供給単価、漏水率を除き、給水人口を加えたものを標準化して変数とした。クラスタ分析は、ウォード法、ユークリッド距離に基づき、Matlab Statistical Toolbox (Math Works社)を用いて行った。また、分析の際には、他の上水道事業体のPI値の分布と比較して異常値と判断される9事業体(主に民間上水道事業体)を除く1076事業体を対象とした。

3.結果と考察

(1) CPI評価

小規模上水道事業体の渇水に対する脆弱性を表わすため、CPI評価を行った。その評価結果の一例として、図-2に渇水時原水有効力(水源余裕率と原水有効利用率を組み合わせた評価)を示す。図中、白抜き部分は簡易水道及び専用水道地域、灰色の部分は給水人口5万人以上の区域で解析対象範囲外である。都道府県ごとの評価では、全てがレベル4 (L4) からL9の範囲内にあるものの、上水道事業体ごとの評価では北海道から九州まですべての地方に「水源に余裕がなく原水の有効

率が低いため、渇水時の原水有効利用力は極めて低い(L1)と評価される水道事業体が存在し、気候変動への適応可能性は上水道事業体ごとのばらつきが大きいことがわかる。この傾向は評価した全てのCPIに共通で、地方、都道府県ごとの対策ではなく、個々の上水道事業体の実情に応じた対応策が必要であることがわかった。

5万人以下の上水道事業体のL9からL1までのレベルごとの事業所数を比較すると(表-4)、配水に関するCPI評価は全体的に高く、小規模の上水道事業体は配水能力に余裕がある傾向にあり渇水時の影響を配水施設で吸収できる事業体が多いことがわかる。一方、経営に関するCPI評価はL2以下と評価される上水道事業体の割合が高くなっており、対応策が必要な場合の財源の確保が課題となる。

(2)CPI総合評価

水源、配水、水質、運営に関しCPIを総合的に評価するため、それぞれの項目についてCPIの得点を式(1)のように平均化した。CPI総合評価を地方ごとに図-3に示す。

$$\begin{aligned} \text{CPI}_{\text{overall}} = & 1/3 \sum (\text{水源に関するCPI得点}) \\ & + 1/3 \sum (\text{配水に関するCPI得点}) \\ & + 1/2 \sum (\text{水質に関するCPI得点}) \\ & + (\text{運営に関するCPI得点}) \quad \cdots (1) \end{aligned}$$

地方ごとに平均化してしまうと大きな差は出ないが、

平成22年度 気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する分析

【渇水時原水有効力】

【評価基準の考え方(A003)】

分類			第1指標 (主指標) 水源余裕率 (%)	第2指標 (副指標) 第2指標 原水有効 利用率(%)	考 察	評価
ハターン1 (%)以上	水源余裕率は 70.4以上	水源水量に 十分なゆとり があり渇水に 強い。	ハターン 1-1 ハターン 1-2 ハターン 1-3	ハターン 1-1 ハターン 1-2 ハターン 1-3	水源には十分な余裕があり、原水の有効利用率も非常に 高いため、渇水時の原水有効利用力は極めて高い	L9
					水源には十分な余裕があり、原水の有効利用率も高いた め、渇水時の原水有効利用力は非常に高い	L8
					原水の有効利用率は低い、水源には十分な余裕がある ため、渇水時の原水有効利用力は高い	L7
ハターン2 (%)以上	70.4 70.4 70.4	水源水量に ゆとりがある が、その余裕 は少ない。渇 水にはある程 度対応可能。	ハターン 2-1 ハターン 2-2 ハターン 2-3	ハターン 2-1 ハターン 2-2 ハターン 2-3	水源には余裕があり、原水の有効利用率も非常に高いた め、渇水時の原水有効利用力は比較的高い	L6
					水源に余裕はあるものの原水の有効利用率は中位ある ため、渇水時の原水有効利用力は中位である	L5
					水源にはある程度の余裕があるが、原水の有効利用率も 低いことから、渇水時の原水有効利用力は比較的低い	L4
ハターン3 (%)未満	27.7 27.7 27.7	水源水量に ゆとりがな い。特に、表 流水を水源と する場合は渇 水に弱い。	ハターン 3-1 ハターン 3-2 ハターン 3-3	ハターン 3-1 ハターン 3-2 ハターン 3-3	原水の有効利用率は非常に高いが水源に余裕はなく、渇 水時の原水有効利用力は低い	L3
					原水の有効利用率も比較的低く水源にも余裕はないた め、渇水時の原水有効利用力は非常に低い	L2
					原水の有効利用率も低く水源にも余裕はないため、渇水 時の原水有効利用力は極めて低い	L1

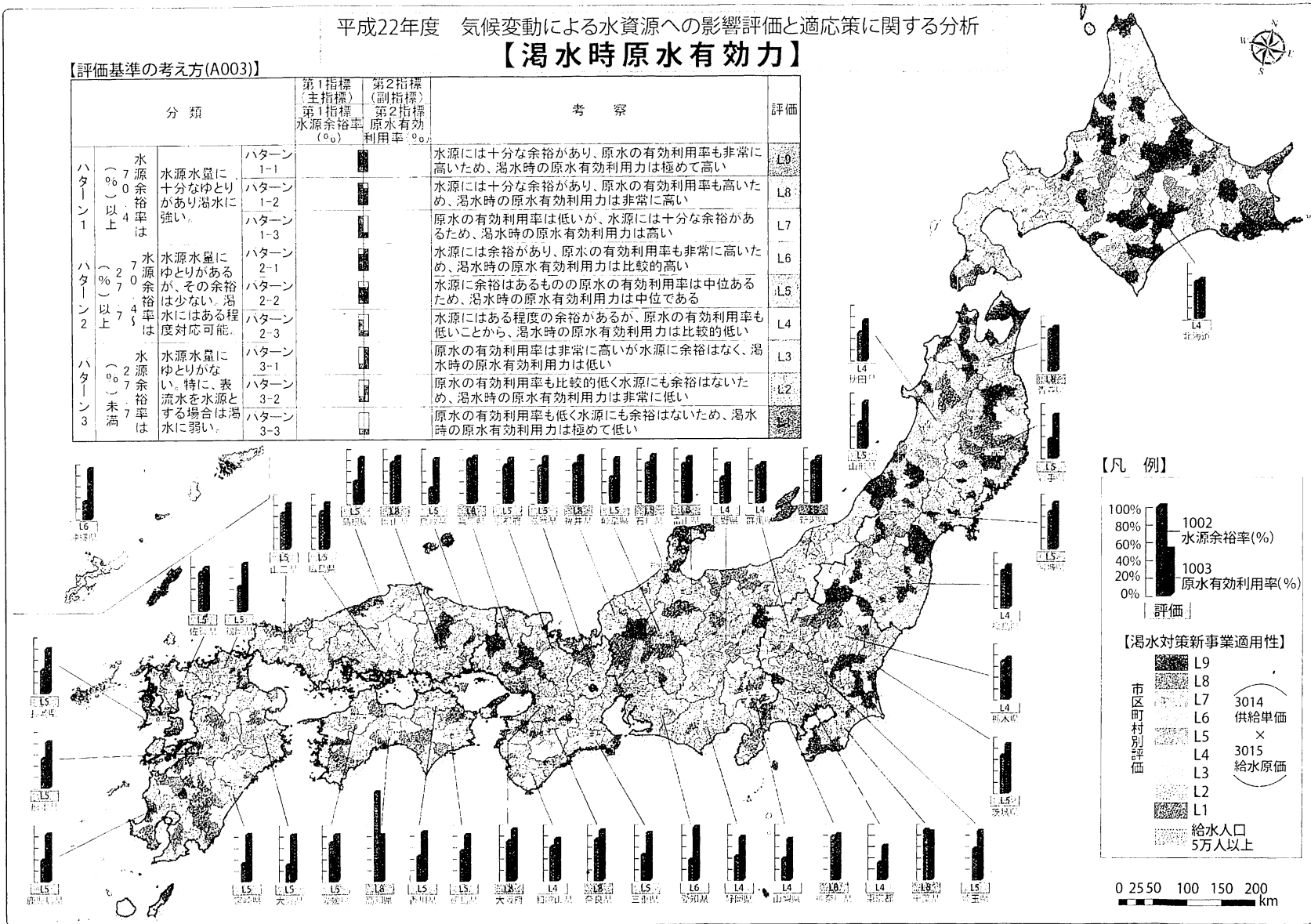


図-2 CPI評価結果例 渇水時原水有効力(水源余裕率×原水有効利用率)

表-4 CPI による評価結果

第一指標 PI	第二指標 PI	L9	L8	L7	L6	L5	L4	L3	L2	L1	合計
a) 水源に関する CPI 評価											
水源利用率	× 原水有効利用率	58	124	94	93	269	146	44	141	115	1084
水源余裕率	× 水源利用率	217	72	3	51	374	74	8	62	223	1084
水源余裕率	× 原水有効利用率	66	127	99	89	261	149	40	146	107	1084
水源余裕率	× 配水池貯水能力	174	99	19	243	228	28	106	160	27	1084
水源余裕率	× 地下水率	117	29	146	194	53	252	118	30	145	1084
原水有効利用率	× 漏水率	148	25	22	304	31	199	187	15	153	1084
自己保有水源率	× 地下水率	276	75	335	80	28	79	73	9	129	1084
b) 配水に関する CPI 評価											
自己保有水源率	× 原水有効利用率	74	314	298	36	111	40	85	109	17	1084
自己保有水源率	× 配水池貯水能力	313	324	49	110	72	5	100	91	20	1084
給水人口一人当たり貯留飲料水量	× 配水池貯水能力	506	262	3	17	219	33	0	6	38	1084
給水人口一人当たり貯留飲料水量	× 給水拠点密度	222	406	143	81	126	62	11	19	14	1084
給水人口一人当たり貯留飲料水量	× 普及率	126	201	55	83	234	144	33	96	112	1084
c) 水質に関する CPI 評価											
地下水率	× 急速ろ過	97	43	270	43	118	117	250	46	100	1084
ダム湖沼以外	× 活性炭処理率	18	7	591	8	20	206	18	9	207	1084
d) 経営に関する CPI 評価											
供給単価	× 給水原価	246	63	0	70	358	63	7	52	225	1084

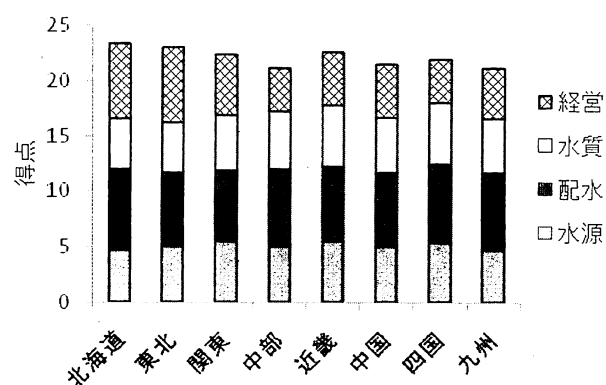


図-3 地方ごとのCPI総合評価

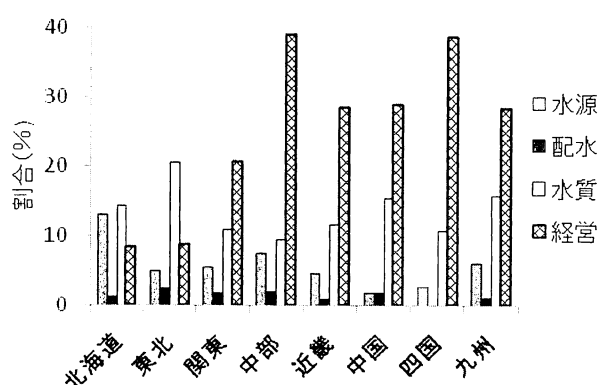


図-4 L2以下と評価された水道事業体の割合

総合点では北海道、東北地方が得点が高く、中部、中国、四国、九州地方で得点が低くなっている。

それぞれの地方で、水源、配水、水質、経営についてそれぞれ脆弱だと考えられるL2以下となった事業体の割合を比較すると(図-4)、経営、次いで水質について脆弱だと考えられる上水道事業体の割合が高くなっている。また、特に水源については北海道で、水質については東北地方でL2以下の上水道事業体の割合が高い。配水については全ての地方でL2以下の割合が非常に低く全国的に余裕のあることがわかる。経営については中部、近畿、中国、四国、九州地方で3から4割と、給水原価が比較的高い上に、供給単価を上回っている水道事業体の割合が非常に高くなっている。

(3) クラスター評価

PIを入力値としたクラスター分析により小規模上水道事業体を8つのクラスターにグループ化し、それぞれのクラスターの特徴を分析した(図-5、表-5)。クラスター1→3→4→5→8→7→2→6の順で、上水道事業規模が大きくなる傾向があり、また、2,6は水道用水供給事業からの受水団体となっている。クラスター7は、水源が表流水やダムで活性炭をほぼ全量に対して使用しており、最も気候変動に対する脆弱性が懸念される。クラスター4は、平坦部が少なく給水面積が小さいという特徴があり、九州地方に多く分布している。また、水道用水供給事業からの受水と自己水である地下水を有するクラスター6,8は、関東地方に多く分布している。

表-5 クラスター化したグループの特徴

クラスター	特 徴	サブグループの特徴	傾 向				
			規模	水源	配水	水質	経営
1	規模は比較的小さいが、地下水率が低く表流を 50%程度使用している。給水原価が高い。		小	△	◎	△	×
3	原水有効利用率が低い。給水原価が安く、供給単価ともバランスしており財政的な余力がある。	地下水率が比較的低く、表流水が必要であるため、渇水や降雨の影響を受けやすい。配水池貯留能力、給水拠点密度は高く、配水システムは比較的強い。		○	△	△	◎
4	河川上流部や半島地域など平地が少ない地域に多く分布し、給水面積が小さいため、給水拠点密度が高い。給水原価は比較的高いが、供給単価とバランスしている。			○	○	○	○
5	地下水率、普及率が高く、給水原価、供給単価ともに低い。			◎	△	◎	◎
8	地下水率は比較的高く、浄水受水も行っている。普及率が 50～70%と低く、また給水原価が高い。	地下水率が高い。配水池貯留能力、給水拠点密度は低い。		◎	○	○	×
7	表流水やダム等を水源とし、活性炭をほぼ全量に対して使用している。給水原価は高い。	水源はほぼ表流水であるため渇水時に、また水質的に影響を受けやすい。配水池貯留能力は非常に高いが、給水拠点密度は低い。		×	◎	×	×
2	小規模上水道の中では比較的規模が大きく、ほぼ全量を浄水受水している。給水原価は高い。	水道用水供給事業からの浄水受水への依存度が高い。給水原価が高く、有効利用率も高い。配水池貯留能力は低い。		×	△	○	×
6	小規模上水道の中では比較的規模が大きく、ほぼ半量を浄水受水している。残りは主に地下水。給水原価は比較的高い			△	◎	◎	△

備考 ×→△→○→◎の順に気候変動に対しての適応力が強い。

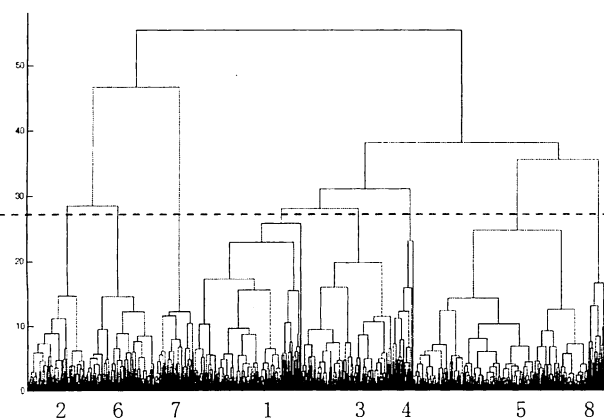


図-5 クラスター分析結果樹形図

分析結果より点線の位置でクラスター1からクラスター8にグループ化。

4. まとめ

給水人口 5 万人以下の小規模の上水道事業体は、上水道事業のうち、人口、給水量で 17%程度、給水面積で 45%に給水を行っており、日本の上水道事業の中で重要な役割を担っている。これらの上水道事

業体を、気候変動への適応力という観点から、PIを組み合わせる脆弱性について評価を行った。水源における渇水への頑強性、濁度上昇、富栄養化への対応という視点からの評価では、水道事業体ごとにばらつきが大きく、評価の高いものから低いものまで全国に分布する結果となった。適応策としての水源の確保や上水処理の拡充などは、各水道事業体の実情に応じて行う必要がある。配水施設の能力については全般的に評価が高く、渇水の際には配水施設を貯留施設として利用することで対応できる可能性がある。一方、家庭用水の原単位は減少傾向にあり、また、人口の減少が見込まれている上水道事業体も多いため、今後、配水能力が過大となる可能性もあり、滞留時間の増加に加えて気温上昇が起きた場合などの水質への影響について、今後検討していく必要がある。さらに、経営に関する評価は特に中部以西で低く、人口、給水量の減少が見込まれる状況の中で、気候変動への適応を含む今後の水道事業の展開に際し、財源確保が厳しい状況にあることがわかった。

謝辞：本研究は、環境省の環境研究総合推進費（S-8）により実施された。

参考文献

- 1) IPCC, Climate Change 2001: the scientific basis. Cambridge University Press: 2001.
- 2) Delpla, I.; Jung, A. V.; Baures, E.; Clement, M.; Thomas, O., Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. Environment International, Vol. 35, pp. 1225-1233, 2009.
- 3) 水資源部, 国. 土. 水. 水の利用状況.
http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/c_actual/actual03.html.
- 4) 厚生労働省健康局水道課, 水道統計. 平成 20 年度.
- 5) Murdoch, P. S.; Baron, J. S.; Miller, T. L., Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. Journal of the American Water Resources Association, Vol. 36, pp. 347-366, 2000.
- 6) 日本水道協会, 水道事業ガイドライン. 2005.
- 7) 厚生労働省健康局, 水道ビジョン改訂版. 平成 20 年.