環境システム研究 Vol. 26 1998年10月

地域の水ストック量を考慮した震災後の水需給バランスに関する確率評価モデル

A Stochastic Evaluation Model of Water Supply System Combined with Regional Water Stock Utilization after Earthquake

渡辺晴彦* 張 昇平** 酒井 彰***
Haruhiko WATANABE Sheng Ping ZHANG Akira SAKAI

ABSTRACT: If an earthquake occurred, water work system was likely to fail down mainly in transportation, and any kind of water demand was obliged to be supplied by other water sources, such as river, pond, and wastewater. These regional water sources are to be evaluated as not a flow but a stock because they are easily exhausted without additional replenishment. Although restoration of water work system would take main role of water supply for gradually increasing water demand, another way to utilize these regional water stock is required as preliminary work for emergency. However there were no discussion to compare the effect of restoration and preliminary works from a viewpoint of improving water supply reliability. This paper dealt with building an evaluation model of availability of regional water stock other than water works in case of earthquake emergency. Water demands after the earthquake are restricted to fire-fighting and domestic water use. Probability of mass balance between gradually increasing water demand and supply both of restoring water work and using regional water stock sources is defined on condition that demand and supply obey independent normal distribution. Case study shows indifference curve between the equipping regional water stock sources for emergency a priori and the restoring water work system a posterior.

KEYWORDS: Fire-fighting water demand, Domestic water demand, Earthquake, Water works, Water stock, Probability of supply availability, Normal distribution

1．はじめに

阪神大震災においては水道による水供給が遮断され，大きな火災被害が生ずるとともに，震災後の生活用水の水源を河川などに委ねる状況が生じた．この災害を教訓として，都市においては水供給を複数系統化することの必要性が語られている[1)2)3)4)]．この場合，水道系統の複数化のみでは不十分であり，河川や池，水路などの地域内の水(以下では「水ストック」と呼ぶ)を水源として活用することも対象とした複数化を、事前対策として実施しておくことが求められる．一方で，震災後徐々に回復する水需要に対する供給においては，水道の復旧が重要であり，他地域からの応援給水などを含めた事後対策としてできるだけ早い復旧を目指す必要がある．

しかしながら，現状においては，事前対策としての水ストックの活用と事後対策としての水道の復旧が，共通の尺度上で議論されておらず，それぞれ独立に計画されていると考えられる．このため，本研究においては，震災後消火用水が生活用水を大きく卓越する状況から，徐々に平常の需要へと回復する状況を想定し，水道および河川，水路，防火水槽などの水道以外の水ストックから水供給をおこなう場合の需給バランスを確率として定量化するモデルを構築する．数値事例分析では，事前対策として水ストックからの供給能力を担保しておくケースと事後対策としての水道の復旧ケースが，どのような場合に等確率となるかについて分析を行った．

* 日水コン環境事業部 Dept. of Environmental Engineering, Nihon Suido Consultants, Co., Ltd.
** 名城大学都市情報学部 Faculty of Urban Science, Meijo University
*** 流通科学大学商学部 Faculty of Commerce, University of Marketing and Distribution Sciences

2．震災後の水需給バランス確率評価モデルの定式化

2．1　モデルの考え方

震災直後に，通常の水供給系統（水道）が機能低下し徐々に復旧するが，その復旧期間中に水道以外の水源も利用して生活用水および消火用水需要量を確保する状況を想定する．水道以外の水源としては，河川，水路，池，防火水槽などがある．本研究では，これらの水源が貯水容量を有し，上流域からの流入や下水処理水などの補給を受けることのできるストック量として考えるものとする．ストック量が震災後何日にわたって利用可能であるかを評価するために，本研究では，対象期間中の累積水量を需給バランスの指標とする．ここで，需給バランスの評価を日毎で行う方法も考えられるが，その場合には水ストック量の時間配分（現在の需要を優先するか，今後の需要に備えるか）が問題となる．本研究では，この配分ルールについては震災後の一定期間において水量確保が図られた上で検討すべき課題として累積水量による評価をとりあげる．

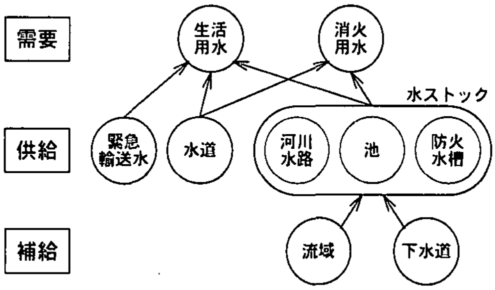

図.1　震災後の水需給

水需要としては，震災後t日までの累積値を対象とし，消火用水$f(t)$と生活用水$d(t)$を取り上げる．一方，水供給も累積値を対象とし，河川・池・防火水槽などの水ストックからの供給$q(t)$，徐々に復旧する水道からの供給$w(t)$があり，これらはすべて確率変数とする．さらに他地域から給水車などで緊急輸送される水$p(t)$があるが，これは確定変数とする．このとき，地域の水需給バランスが確保される確率を次のように定義する．

$$P(q(t)+w(t)+p(t) \geq d(t)+f(t)) = P(Z(t)=q(t)+w(t)-d(t)-f(t) \geq -p(t)) = \int_{-p(t)}^{\infty} g_Z(z)dz \tag{1}$$

ただし，$g_z(z)$：確率変数$Z(t)=q(t)+w(t)-d(t)-f(t)$ の確率密度関数である．

一方，震災後と比較するため，平常時における需要確保確率を定義する．平常時の一日単位の水量として，水道からの供給量をw，水ストックからの供給量をq，生活用水需要量をd，消火用水需要量をfとし，すべて確率変数とすると，需要が確保される確率は次式で定義される．

$$P(w+q \geq d+f) = P(Z=w+q-d-f \geq 0) = \int_0^{\infty} f_Z(z)dz \tag{2}$$

ただし，$f_z(z)$:確率変数 $Z=w+q-d-f$ の確率密度関数である．

2．2　モデル分析のための仮定

本稿では，上記の確率変数が独立正規分布に従うとした場合のモデル式を考察する．

1）平常時の水ストック量をq_0とし，平常時における1日あたり供給量qと震災後t日目までの累積供給量$q(t)$を，

$$q=\mu q_0, \quad q(t)=\left(1+r_q(t)+r_s(t)\right)q_0 \tag{3}$$

とする．前式は平常時の水ストック量の利用率がμであることを意味する．災害時には水ストックはまず全量利用され，さらに流域からの補給や下水処理水などの補給が行われるものとする．後式は震災後t日目までの総補給水量が平常時水ストック量に対し，それぞれ$r_q(t)$，$r_s(t)$倍であることを意味する．

2）水道による供給量，水ストックからの供給量，生活用水および消火用水の需要量の変動は正規分布に従うものとする．小泉ら[5]によれば，日単位での水需要量の変動は気温・天気などの不確実要因の複合として正規分布で近似可能であり，寶[6]によれば，月平均の河川流量の変動について正規分布モデルは年間を通じて適合性が良いことが報じられている．このため，水道による供給，水ストックからの供給は河川流量が主であるとすれば，消火用水需要を除いて平常時の変動は正規分布で近似可能であると考えられる．震災後の変動および消火用水については，検証する資料が得られないが，正規分布が仮定できるものとした．

$w \sim N(\overline{w},\sigma_w^2)$,　　$q_0 \sim N(\overline{q}_0,\sigma_{q0}^2)$,　　$d \sim N(\overline{d},\sigma_d^2)$,　　$f \sim N(\bar{f},\sigma_f^2)$

$w(t) \sim N(\overline{w}(t),\sigma_{w(t)}^2)$,　$q(t) \sim N(\overline{q}(t),\sigma_{q(t)}^2)$,　$d(t) \sim N(\overline{d}(t),\sigma_{d(t)}^2)$,　$f(t) \sim N(\bar{f}(t),\sigma_{f(t)}^2)$

ここで，各確率変数を独立と仮定する．消火用水と生活用水の関係を独立とみなすことは妥当である．さら

に水ストックからの供給と水需要は独立の関係にあるものとした．水道からの供給量は，取水可能量を対象とすると水需要と独立であると考えることができる．水道からの供給と水ストックからの供給は同じ河川を対象とした場合，独立とは断定できないが，水ストックには河川以外の水源も含まれることから独立を仮定した．これにより，

$$Z = w + q - d - f \sim N(\bar{z}, \sigma_z^2), \quad Z(t) = q(t) + w(t) - d(t) - f(t) \sim N(\bar{z}(t), \sigma_{z(t)}^2) \tag{4}$$

となる．ただし，

$$\begin{aligned} \bar{z} &= \bar{w} + \bar{q} - \bar{d} - \bar{f}, \quad \sigma_z^2 = \sigma_w^2 + \sigma_q^2 + \sigma_d^2 + \sigma_f^2 \\ \bar{z}(t) &= \bar{q}(t) + \bar{w}(t) - \bar{d}(t) - \bar{f}(t), \quad \sigma_{z(t)}^2 = \sigma_{q(t)}^2 + \sigma_{w(t)}^2 + \sigma_{d(t)}^2 + \sigma_{f(t)}^2 \end{aligned} \tag{5}$$

3）各水源・需要の変動係数をλとし，平常時，震災時も変わらないものする．水ストックからの供給についてはこの仮定は妥当と考えられる．水道からの供給および水需要については依拠しうるデータが得られないため，あくまで仮定である．たとえば震災後の生活用水需要が平均値として少なくなった場合の分散は平常時より小さくなると推定されるものの，変動係数としては大きくなるか小さくなるか断定できないため，一定と仮定していることになる．これにより，各確率変数の標準偏差が次のように定義される．

$$\begin{aligned} &\sigma_w = \lambda_w \bar{h}, \quad \sigma_{w(t)} = \lambda_w \bar{w}(t) \\ &\sigma_{q0} = \lambda_q \bar{q}_0, \quad \sigma_q = \lambda_q \bar{q}, \quad \sigma_{q(t)} = \sqrt{\lambda_q^2 (1 + r_q(t))^2 \bar{q}_0^2 + \lambda_s^2 r_s(t)^2 \bar{q}_0^2} \\ &\sigma_d = \lambda_d \bar{d}, \quad \sigma_{d(t)} = \lambda_d \bar{d}(t) \\ &\sigma_f = \lambda_f \bar{f}, \quad \sigma_{f(t)} = \lambda_f \bar{f}(t) \end{aligned} \tag{6}$$

4）平常時において，水道からの供給量の平均値に対する水ストック量の平均値の比をαとする．震災後における水ストックの供給能力の大きさを示す．

$$\alpha = \bar{q}_0 / \bar{w} \tag{7}$$

5）平常時における需要量の平均値に対する供給量の平均値の比をβとする．これは平常時の需要に対する供給能力の余裕を示す．

$$\beta = (\bar{w} + \bar{q}) / \bar{d} \tag{8}$$

6）震災時t日目までの生活用水平均需要量と消火用水平均需要量は，ともに平常時の一日平均生活用水需要量に対し，それぞれ$\varepsilon(t)$，$\gamma(t)$の比をとる．

$$\bar{d}(t) = \varepsilon(t)\bar{d}, \quad \bar{f}(t) = \gamma(t)\bar{d} \tag{9}$$

7）震災後における生活用水の平均需要は，図.2 に示すように日毎に直線的に増えていくものとする．すなわち，震災後 1 日目の生活用水はaで，以後毎日aずつ回復し，T日目に平常時需要量に対し$C\bar{d}$まで回復するものとする．このとき，$\varepsilon(t)$は次となる．

$$\varepsilon(t) = \frac{C}{2T} t^2 \tag{10}$$

8）震災後の防災用水については，図.3 に示すように震災発生直後（一日目）に広範囲にわたって火事が発生して消火用水需要が最大となり，その後徐々に（線形的に）減少し，t_0日目以降に平常時レベルに戻るものとする．防災用水最大需要の平均値は平常時の生活用水のKパーセントに相当し，平常時においては生活用水のk_0に相当するものとする．このとき$\gamma(t)$は次のように定義される．

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= \frac{1}{2} \frac{k_0 - K}{t_0 - 1} t^2 + \frac{K t_0 - k_0}{t_0 - 1} t, && 1 \le t \le t_0 \\ \gamma(t) &= \frac{1}{2} \frac{k_0 - K}{t_0 - 1} t_0^2 + \frac{K t_0 - k_0}{t_0 - 1} t_0 + k_0 (\mathrm{t} - \mathrm{t}_0), && t_0 < t \le T \end{aligned} \tag{11}$$

9）震災発生直後からt日目までに水道から供給される総水量$w(t)$の平均値と緊急輸送により送られてくる総水量$p(t)$はそれぞれ平常時一日平均需要量の$W(t)$倍と$P(t)$倍に相当するものとする．なお，$p(t)$については確定変数とする．

$$\bar{w}(t) = W(t)\bar{d}, \quad p(t) = P(t)\bar{d} \tag{12}$$

ただし，$W(t) = \beta \int_0^t \delta(t) dt$であり，$\beta$は前述した平常時における平均需要量に対する平均供給量の比率(供

給能力の余裕度)，$\delta(t)$はt日目の水道復旧率であり，$0 \le \delta(t) \le 1$となる確定変数である．

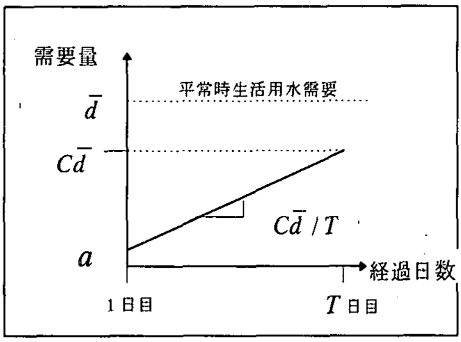

図.2　生活用水需要の発生パターン

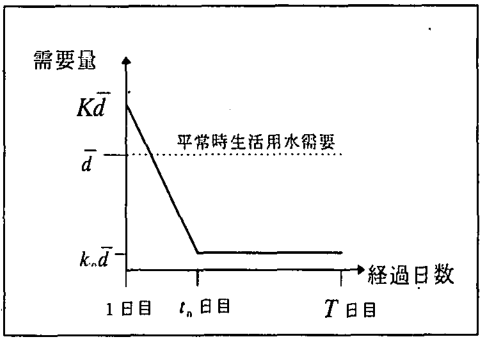

図.3　消火用水需要の発生パターン

上記設定のもとでは，需給バランスに関連する確率変数の平均値，分散は次となる．

$$\bar{z} = \overline{w} + \bar{q} - \bar{d} - \bar{f} = (\beta - 1 - k_0)\bar{d} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}\sigma_z^2 &= \sigma_w^2 + \sigma_q^2 + \sigma_d^2 + \sigma_f^2 = \lambda_w^2\overline{w}^2 + \lambda_q^2\bar{q}^2 + \lambda_d^2\bar{d}^2 + \lambda_f^2\bar{f}^2 \\ &= \left(\lambda_w^2\frac{\beta^2}{(1+n\alpha)^2} + \lambda_q^2\frac{n^2\alpha^2\beta^2}{(1+n\alpha)^2} + \lambda_d^2 + \lambda_f^2 k_0^2\right)\bar{d}^2\end{aligned} \tag{14}$$

$$\bar{z}(t) = \bar{q}(t) + \overline{w}(t) - \bar{d}(t) - \bar{f}(t) = \left(\left(1 + r_q(t) + r_s(t)\right)\frac{\alpha\beta}{1+n\alpha} + W(t) - \varepsilon(t) - \gamma(t)\right)\bar{d} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{z(t)}^2 &= \sigma_{q(t)}^2 + \sigma_{w(t)}^2 + \sigma_{d(t)}^2 + \sigma_{f(t)}^2 = \lambda_q^2\bar{q}(t)^2 + \lambda_w^2\overline{w}(t)^2 + \lambda_d^2\bar{d}(t)^2 + \lambda_f^2\bar{f}(t)^2 \\ &= \left(\left(\lambda_q^2\left(1 + r_q(t)\right)^2 + \lambda_s^2 r_s(t)^2\right)\frac{\alpha^2\beta^2}{(1+n\alpha)^2} + \lambda_w^2 W(t)^2 + \lambda_d^2\varepsilon(t)^2 + \lambda_f^2\gamma(t)^2\right)\bar{d}^2\end{aligned} \tag{16}$$

これらを需給バランスの確率評価の定義式に代入すると，平常時，震災後において水需給バランスが確保される確率は次のように表される．

$$\text{平常時}\quad P(Z \ge 0) = \int_{z_0}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\}dx\text{，ただし}\quad z_0 = -\frac{\bar{z}}{\sigma_z} \tag{17}$$

$$\text{震災時}\quad P(Z(t) \ge 0) = \int_{z_0(t)}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\}dx\text{，ただし}\quad z_0(t) = -\frac{P(t) + \bar{z}(t)}{\sigma_{z(t)}} \tag{18}$$

３．数値事例分析

３．１分析条件

前述のモデルの地域への適用においては，本来小さい地区単位とすることが望ましい．これは，現行の消防水利基準においてはほぼ4haに1カ所の水利施設（消火栓など）を設置することになっていることによる．ここでは，表.1に示すような220ha，16250人が居住する地方都市の中心部を対象とした分析を行う．同地区では河川と豊富な水量が流れる水路があり，防火水槽が50カ所設置されている．モデルパラメータの設定における考え方は次のとおりである．

- 水ストック量q_0は，低水流量時の河川流下断面，水路断面から求めた容量と防火水槽の容量の和とした．ここで，河川や水路の利用可能量の評価については，flux量による方法も考えられるが，対象区域の上下流における取水などを考えるとすべてが利用可能とは限らない．特に，小さい区域での検討においては，上下流配分が問題となる．このため、本研究では，対象区間の河川・水路を“タンク”とみなし，流量の一部が“タンク”へ補給されるとする方法を採用した．この方法は，flux量による評価に比べ可能量を少なめに評価することになる．
- 変動係数については，水道の供給量λ_wおよび生活用水需要量λ_dは，日単位の給水量データから0.05とした．河川水λ_qについては，低水流量に関する過年度データより0.17とした．消火用水λ_fについては，

0.5 と仮定した．下水処理水λ_sについては，阪神大震災において水道普及が行われていない間も地下水などの流入が確実にあることから，ばらつきなしとした[9]．

- 検討期間Tは 30 日とし，生活用水需要は 30 日で平常時に戻るものとする．これは神戸市の水道給水目標を参考とした．消火用水需要は，神戸市において震災後 1 日目に最大の発生件数となり，その後 10 日目まで 3～7 件が発生していることから，10 日以降平常に戻るものとし，$t_0=10$とした．消火の需要量は1日目で平常の生活用水需要と同量が必要となり，10 日以降はその 1 割と仮定した．この量は，阪神大震災時の神戸市の状況に比べて多めの値となっている．

表.1　対象地域とパラメータの設定

地域諸元	値	ﾓﾃﾞﾙﾊﾟﾗﾒｰﾀ	設定値
面積	220ha	λ_w	0.05
人口	16250 人	λ_q	0.17
水道取水量（$\overline{w}$）	8450m³/日	λ_d	0.05
生活用水需要（$\overline{d}$）	6500m³/日	λ_f	0.5
河川延長	1.48km	λ_s	0
水路延長	27.6km	μ	0
河川容量(低水流量時)	5696m³	C	1.0
水路容量	8832m³	T	30 日
防火水槽容量	3480m³	K	1.0
水ストック量（$\overline{q}_0$）	18008m³	k_0	0.1
$\alpha=\overline{q}_0/\overline{w}$	2.13	t_0	10 日
$\beta=\overline{w}/\overline{d}$	1.3		

本稿では，事前対策として水ストックからの供給能力を確保する方法(モデル上は補給率$r_q(t), r_s(t)$の設定にあたる)と，事後対策として水道の復旧を行う方法(モデル上は復旧率$\delta(t)$の設定にあたる)の比較を行う．事前対策については，

① 補給がないケース（初期のストック量のみ利用可能）（$r_q(t)=0$，$r_s(t)=0$にあたる）

② 下水処理水量 1300m³/日と河川容量の 10%に相当する量(570 m³/日)が毎日補給されるケース($r_q(t)=0.03t$，$r_s(t)=0.07t$にあたる)

③ 下水処理水量 1300m³/日と河川容量の 20%に相当する量(1140 m³/日)が毎日補給されるケース($r_q(t)=0.06t$，$r_s(t)=0.07t$にあたる)

の 3 ケースを取り上げる．事後対策としては，図.4 に示すような 3 ケースの復旧工程を対象とする．また，事前対策については，水ストックの容量を増やす方法（防火水槽を 2 倍とする）と補給能力を高める方法との比較も行う．

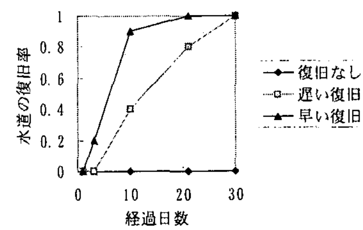

図.4　復旧ケースの設定

3．2分析結果

図.5 に事前対策，事後対策の組み合わせケースごとの需給バランス確率の挙動を示す．この確率は，0.5 のとき累積需要量の期待値と累積供給量の期待値がおおむね等しいことを意味する．従って，0.5 以上の時には，期待値として供給が需要を上回り，1 に近いほどその差異が大きいことになる．確率が 0 に近づく場合はこの逆を意味する．図から，総じて 5 日目までの確率は減少傾向となり，その後水道復旧がないと水ストックからの補給があっても確率は減少を続け，水道復旧があれば確率が増加に転ずることから，水道復旧が本質的であるといえる．なお，早い復旧の場合，20 日目には水道が 100%復旧しているが，確率が 1 とならないのはそれまでの不足の影響が残っていることによる．

また，水ストックへの補給の有無による効果は，図.6 に示すように水道復旧が遅いケースにおいて確率向上の差異が大きくあらわれ，経過日数とともに確率の差が増加する．復旧が無い場合には 15 日目ごろまで改善が増加しその後減少に転ずる．復旧が早い場合の違いは，11 日目までは確率の差が増えるがその後減少する．復旧が遅い場合に，補給の効果が高いといえる．

図.7 には，期間長別に事前対策と事後対策の組み合わせに対する需給バランス確率の等確率線を示した．これにより，たとえば 25 日目までででは「遅い復旧」で「補給 20%」とすることが，「補給なし」での「早い復旧」と等確率となるなど，事後対策と等価な事前対策がわかる．等確率線が横向きになると補給による効果が小さく，復旧による効果が大きいことを意味し，縦向きの場合は逆に補給による効果が大きく，復旧による効果が小さくなる．初期(5～10 日目まで)においては，対策をしない場合(図の左下側)はやや縦向きで，対策のレベルをあげる場合(図の右上)は横となっているが，中期までは(15～20 日目まで)，おおむね横になってくる．全期(25～30 日目まで)は復旧なしから遅い復旧まではほとんど横になり，補給の効果がないことを示しているが，図の左上では相対的に縦となっており遅い復旧での補給は，補給なしでの早い復旧と等価である．

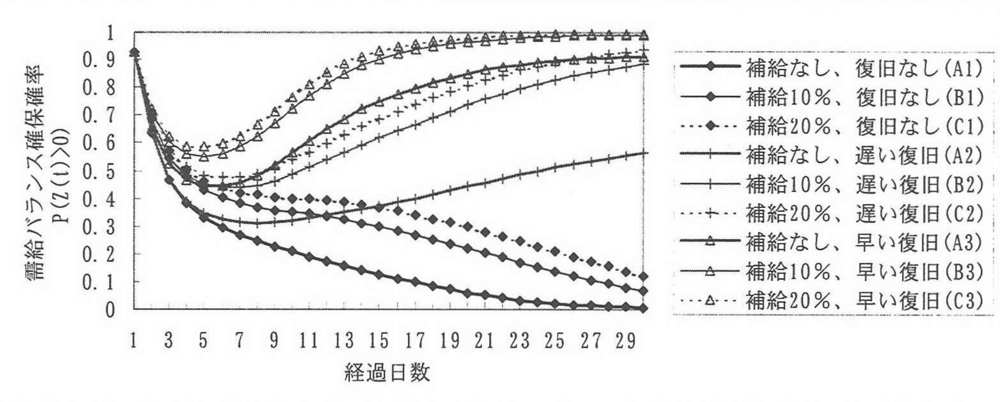

図.5　需給バランス確率の挙動

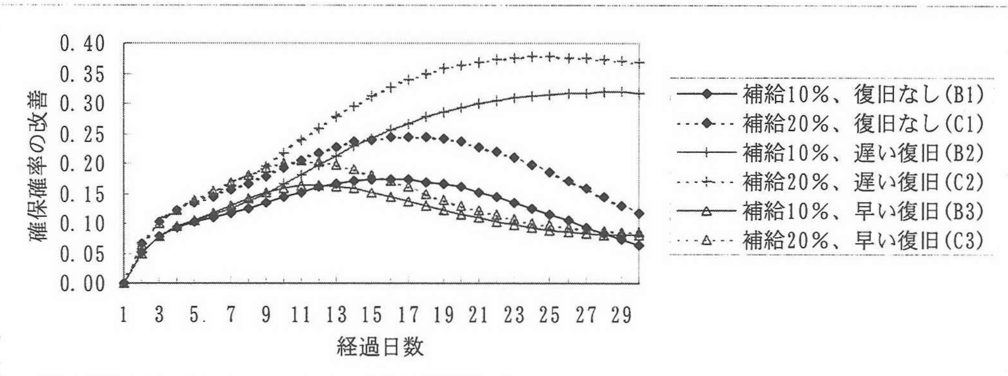

図.6　　補給によるの確保確率の改善効果（補給なしからの改善状況）

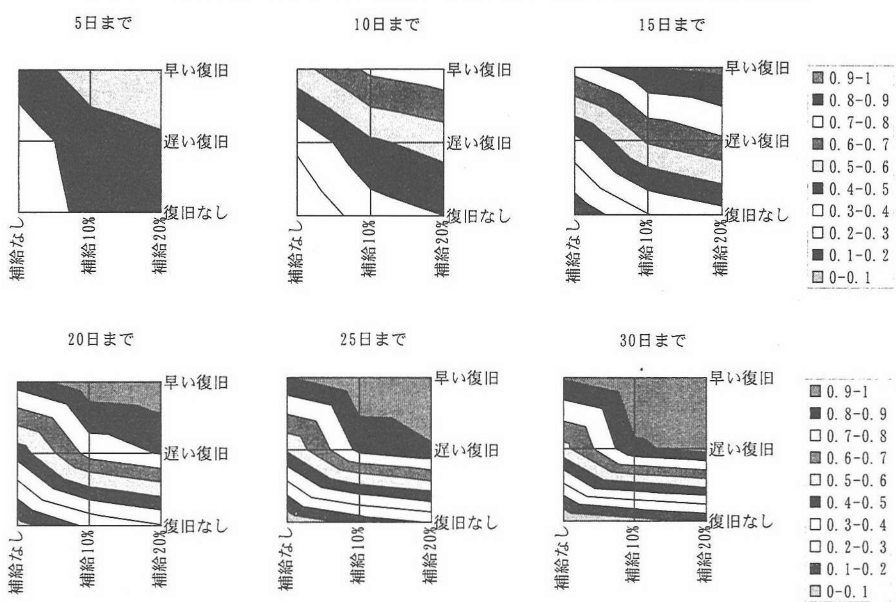

図.7　水ストック補給と水道復旧の等確率曲線(経過日数別)

これらのことから，対象地区では，遅い復旧と補給が需給バランス確率の面で等価であると考えられる．

図.8 には，事前対策として，防火水槽の容量を拡大する方法と補給を行う方法との違いを示した．防火水槽を現状の 2 倍とする対策は，水道の復旧状況によらずおおむね 10 日目までの期間で効果を持つが，その後は効果が薄れていくことを示している．

4．おわりに

本研究では，地震発生後の水需給について，水道以外の河川・水路・防火水槽などの水ストックの活用を含めた需給バランス確率評価モデルを提案した．数値事例分析をとおして，事前対策として水ストックからの供給能力を高めることと，事後対策としての水道の復旧工程を共通尺度上で分析することが可能であることを示した．特に，遅い復旧の場合に水ストックの活用が確率として等価となることがわかった．

提案したモデルは，前述したようにより小さい単位で適用することにより，都市内における水ストックの活用可能性を評価することができる．この方向でのケーススタディは今後積み重ねて行く予定であるが，課題として次のことがあげられる．

① 定義した震災時の需給バランス確率は，需要量，供給量の累積値で構成され，「期間」の確率となっている．これは，水ストック量を対象とするための考え方であるが，「日単位」の確率としたほうがわかりやすい．このためには，水ストック量に関する収支式を導入し，日々の需要量，供給量を確率変数としたモデルの修正が必要である．

② 数値事例分析では，消火用水などについてパラメータを仮定したが，実際のデータにもとづく分析が必要である．また，複数の地区を対象とした場合には，河川，水路などの水ストック量について空間的な収支式の導入が必要である．

③ 事前対策と事後対策については，需給バランスの確率評価とともに，土地条件などによる実施可能性を踏まえて，経済性の評価が必要である．

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費（基礎研究(C)(2)10680448、研究代表者：張昇平）の補助を得て行ったものである。

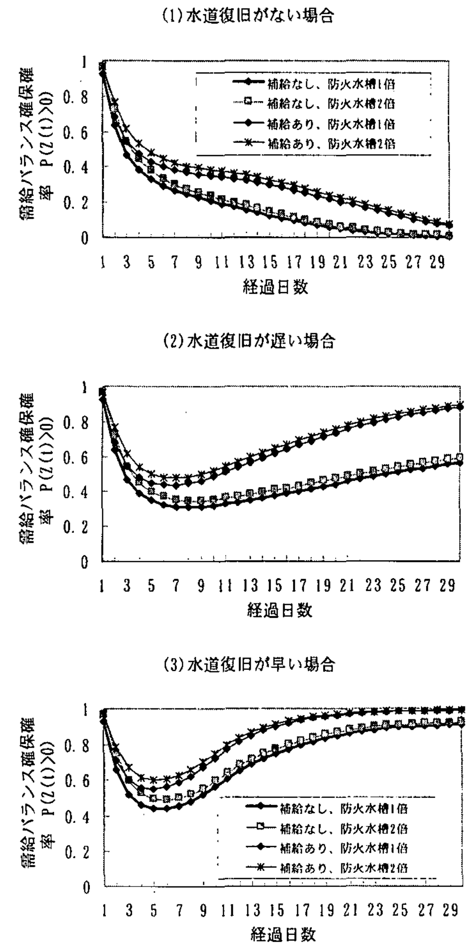

図.8　防火水槽拡大の効果

[参考文献]

1) 神戸市水道局：阪神淡路大震災水道復旧の記録，1996
2) 神戸市消防局：阪神淡路大震災における消防活動の記録，1995
3) 室崎益輝：水道被害と機能障害，安全工学 Vol.35，No,1，pp.41-49，1996
4) 島谷幸広・萱場陽一・房前和朋・保持尚志：大震災にみる河川の緊急用水・防災空間としてのポテンシャル，河川 No.587，pp.56-70，1995
5) 小泉明・稲員とよの・千田孝一・川口士郎：多元 ARIMA モデルによる水使用量の短期予測，水道協会雑誌，No.651,pp13-20，1988
6) 寶馨：水資源システムにおける確率論的モデルと手法の評価に関する研究，京都大学博士論文，1990
7) 渡辺晴彦・張昇平・岡田憲夫：都市排水の循環利用による水供給の安定化に関する研究，土木学会論文集，No.524／IV-29，　pp.121-130，　1995
8) 渡辺晴彦・張昇平・岡田憲夫：地域水利用システムの安全性・信頼性のトレードオフに関するシステム分析，第 3 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集，pp.19-26，1995
9) 坂尻好郎：下水道の被災と下水処理水の再利用，阪神大震災に学ぶ震災時の用水確保方策に関する総合シンポジウム講演集，pp.40-47，1997