

緊急給水に対する事前防災対策の影響分析*

Analysis of the Effect of the Pre-disaster Measures for Emergent Water Supply*

中島和樹**、奥村誠***、塚井誠人****

Kazuki NAKASIMA, Makoto OKUMURA, Makoto TSUKAI

1. はじめに

阪神大震災以降、西日本でも大規模な地震が断続的に起こり、大規模な地震に備えて必要な対策を事前に検討していくことが必要となっている。上水道が破壊し復旧するまでの間は、主に給水車による給水が行われる。この間、住民が被災地で生活しなければならぬため、この時期に対応した、災害対策、防災対策が必要である。防災計画は、実態にたものであることが望ましいが、事前に災害の規模や、詳細な被災状況を予測することは不可能である。

一方で、自治体は、様々な災害状況に対して意味を持つような事前対策を行う必要がある。そのためには、事後の対応手順を前提にいくつかの状況下でその実行可能性を保証する必要がある。限られた予算の中で、施設の耐震化や、給水車などの配備を効果の高いものから選んで事前に実施するためには、それぞれの配水池や道路の施設の耐震化が作業にもたらす影響を、定量的な検討に基づいて明らかにする必要がある。

本研究は、給水点の配置問題とその間の巡回配送問題を定式化し、具体的な地域を対象に、ヒュ-リスティック解法を援用して効率的な緊急給水方法を算定する手順を確立するついでこの計算手法を用いて配水池や橋梁の耐震化が緊急時の給水作業にもたらす影響を明らかにする。

* キーワード：防災計画、GIS、計画情報

** 学生員 学士 広島大学大学院工学研究科
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1Tel&Fax 0824-24-7849)

*** 正会員 博士(工) 広島大学大学院工学研究科
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1Tel&Fax 0824-24-7849)

**** 正会員 修士(工) 広島大学大学院工学研究科
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1Tel&Fax 0824-24-7849)

2. 関連する研究と本研究の目的

物資の輸送を効率的に行うための計画問題は、従来から巡回セールスマン問題の近似解法や整数計画法問題の取り扱いなどがORの主要な研究対象として多数研究されてきた¹⁾。最近では物流費用の最小化だけでなく、都市環境の改善や在庫の不確実性の管理を含めたような多目的計画の枠組みで捉えようとするものが増えてきており、「物流計画」よりも総合的に「ロジステックス」問題として捕らえた研究も多くなってきた²⁾。このような多目的問題は厳密解を得にくいこともあり、コンピュータの計算能力の進展も寄与してGAを筆頭とするソフト・コンピューティング技術の応用が目覚ましく進んでいる³⁾。

災害時の物資の調達、配送問題に対して、このような計算モデルを適用しようとする試みも行われている^{4) 5)}。しかしながら、被災の想定によって最適解がかなり違ったものになるために、実際の災害の状況がつかめない事前の段階で災害時の最適解を求めることの意味が乏しい。基本的想定下でのシミュレーションを用意し、災害発生後に収集される情報を用いて時々刻々、最適解を求めなおして対応策を検討するツールの開発が課題となっている。

一方、求められた最適解そのものは事後に意味を持たないにせよ、多くのケースに共通する解の性質を把握することは、頑健性のある事前対策を立案する上で不可欠である。本研究では様々な被害想定が与えられた場合に、それに対応する最適解を簡便に提供する方法を確立し、それを施設の耐震化といった事前対策の立案に用いることを考える。

本研究では、緊急時の給水問題を給水点配置問題と配水車による車両巡回問題の複合問題と考える。前者は全ての居住地を運搬可能範囲内に収め、かつ、

給水点の個数が最小になる給水点の配置場所を求める問題である。後者は給水点配置問題によって決定した給水点を、何台かの配水車が巡回するときの総距離を最小にする問題である。住民の運搬可能距離の制約を与えれば給水点の個数と位置が求まる。次の車両巡回問題では、必要な配水車の台数や配水車が巡回するときの総距離が求まる。

3. モデルの定式化

(1) 給水点配置問題の定式化

全ての居住地を運搬可能範囲内に収め、かつ、給水点の個数が最小になるような給水点配置パターンを求める。これは、離散的空間内の各点に施設を配置する施設配置問題の中の、集合被覆問題に当たり、以下のような整数計画問題として定式化できる。

$$\text{目的関数} \quad \min \sum_{j \in J} f_j y_j \quad (1)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{j \in \{k \mid C_{ik} \leq C_{\max}\}} y_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

ただし、

- i : 住民の住居地
- j : 給水点候補地
- I : 全ての居住地の集合
- J : 全ての給水点候補地の集合
- f_j : 給水点の立地コスト
- y_j : j 地点に給水点を設置する場合 1
設置しない場合 0
- C_{ik} : i 地点の人々の最も近い給水点までの移動距離
- C_{max} : 限界移動距離

y_j は、モデルの操作変数であり、j 地点に給水点を設置する場合は 1、設置しない場合は 0 となる。制約条件(2)式は、どの対象地区の人々も限界移動距離 (C_{max}) 以内に含まれるように給水点を設置することを意味している。目的関数(1)式の最小化によって、給水点の個数が最小になるような給水点の配置を求めることができる。この式を双対上昇法と、双対調整法を用いて解く。

(2) 配水車巡回問題の定式化

本研究の配水車巡回問題は巡回セールスマン問題にあたり、次のように定式化される。

$$\text{目的関数} \quad \min_{Z_{ij}} \sum_{i,j \in I} X_{ij} Z_{ij} \quad (4)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{i \in I} Z_{ij} = 1 \quad j \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in I} Z_{ij} = 1 \quad i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_L} W_i \leq b \quad (7)$$

ただし、

- i、j : i 地点、j 地点の給水点
- X_{ij} : i 地点 - j 地点間の距離
- Z_{ij} : i 地点 - j 地点間を巡回する場合 1、
しない場合 0
- I : 対象とする地域の給水点の集合
- I_L : 1 ループ間の給水点の集合
- W_i : i 地点の給水点での水の需要量
- b : 給水車の積載容量

Z_{ij} はモデルの操作変数であり、i 地点 - j 地点間を巡回する場合 1、しない場合 0 をとる。制約条件(5)、(6)式は、どの給水点にも必ず 1 回給水車が来ることに対応する。制約条件(7)式は、給水車が積載した水を配って、配水池に補給に戻るまでの間の 1 ループの間で、各給水点の総需要量が給水車の容量(b)を超えないようにする条件式である。(5)、(6)、(7)式の制約条件を満たし、目的関数(4)式の総移動距離を最小にする巡回路 Z_{ij} を得る。これをヒューリスティック解法であるシミュレーティッド アニーリング (SA) 法により解く。

4. 事前対策の影響分析

(1) 設定条件と給水点配置問題

本研究では、広島県東広島市の西条地区 (図 - 1) をとりあげ、数値地図、国土数値情報土地利用ファイル、及び国勢調査メッシュから基礎的なデータを作成した。前提条件は以下のものである。

- 1) 一般の道路の走行速度 12 km / h
- 2) 住民一人当たりの水の需要量 3 ㍓ / 日
- 3) 配水車 1 台当たりの容量 4 t / 台

4) 配水車 1 台当たりの運用時間 8 時間 / 日

5) 配水車が水の補給にかかる時間 10 分 / 回

6) 給水点で給水にかかる時間 1 分 / 10 戸

まず、住民の運搬限界可能距離を 500m と設定して給水点配置問題を解いた。その時の給水点立地数は 61 箇所となり、各給水点の配置と、各給水点を受け持つ住民の居住地は図 - 2 のようになった。

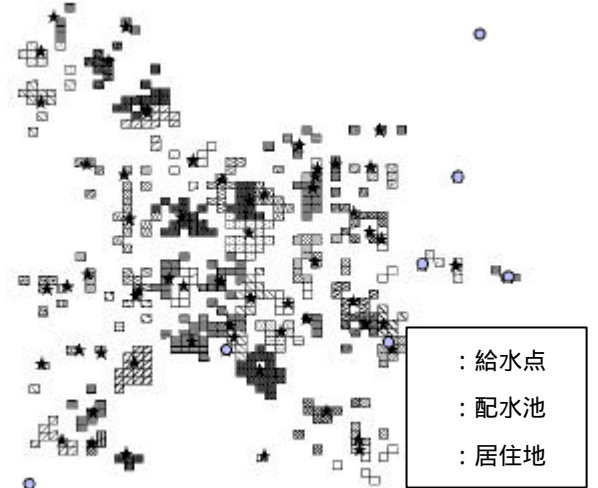


図 - 2 給水点の設置パターン



図 - 1 研究対象地区

解いた結果、12 カ所のうち 8 カ所の配水池が使われていた。以下の解を基本ケースと呼ぶ。図 3 に巡回の様子を示す。線が太いほどその道路の使用回数が多い。7 番の配水池から北と西へ向かう道の使用回数が特に高いことが分かる。表 - 2 に基本ケースにおける各配水池での水使用量を示す。次に、この基本ケースをもとに設定を変えてシミュレーションし、

表 - 1 基本ケースにおける各配水池での水の使用量

配水池	1	2	3	4	5	6	7	8
使用水量	3.3	13.2	3.7	15.2	1.4	22.5	72.5	10.2

(2) 基本ケースの解

上記の前提条件のもとで、既存の 12 カ所の配水池と道路が破壊していない状況で、配水車巡回問題を

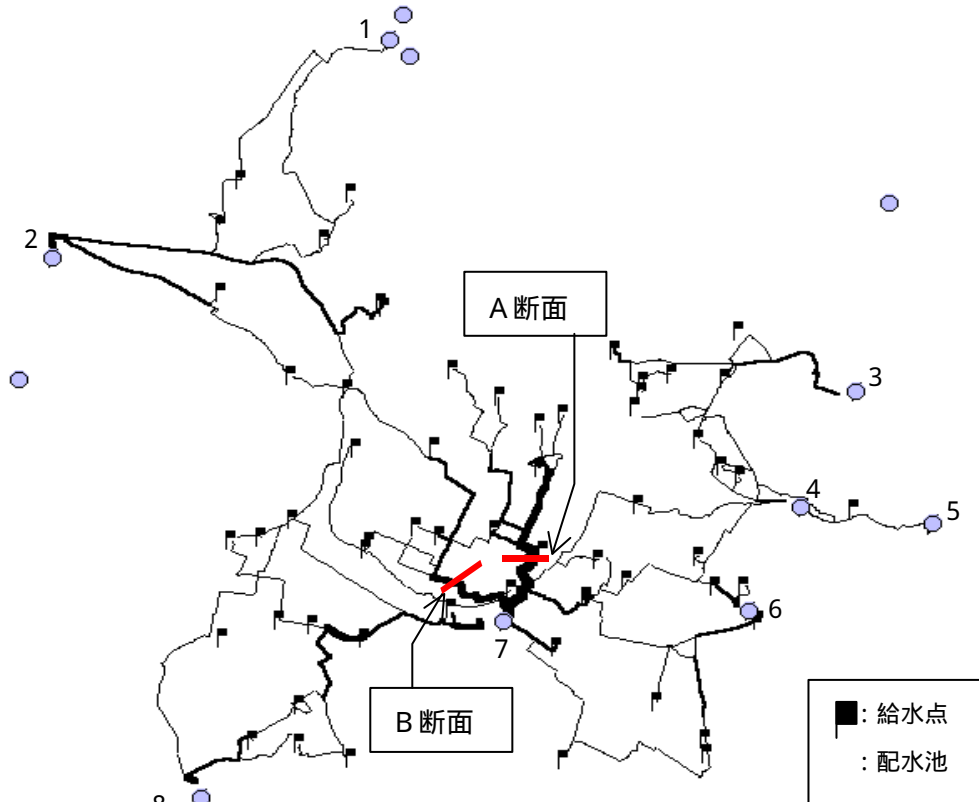


図 - 3 基本ケースの巡回の様子

総配水距離や、巡回路、必要な配水車台数がどのように変化するかを観察し、そこから事前にとることのできる対策の効果を考察する。

(3) 配水池の破壊による影響

震災時に配水池が破壊して使えなくなった状況を想定してシミュレートする。その結果を表 - 1 に示す。表中の配水池番号は、図 - 4 の配水池番号に対応している。また、表 - 1 ~ 2 により、配水池の基本ケースで最も多く水を補給している配水池 7 が破壊した時、総配水時間の増加量が最大であり、総配水時間の伸びは基本ケースにおける使用水量の順番に一致していることが分かった。また、配水活動に必要な配水車の台数は 32 台であるが、配水池 7 が破壊した時には、さらに 1 台多く必要となる。

表 - 2 各配水池が壊れた場合の結果

破壊配水池	総配水距離(km)	総配水時間(h)	配水車数(台)
基本ケース	149.7	254.22	32
1	150.1	254.25	32
2	154.4	254.61	32
3	150.5	254.28	32
4	152.6	254.46	32
5	149.9	254.24	32
6	159.2	255.01	32
7	199.5	258.37	33
8	154.9	254.66	32

(4) 落橋による影響

落橋により、道路が寸断された状況を想定してシミュレートする。図 - 3 で多く使われていたルート上にある A 断面と B 断面にある橋がそれぞれ落橋した場合と、両方が落橋した場合の計算結果を表 - 3 に示す。表 - 3 より、A, B 断面の橋がそれぞれ単独で寸断されても、総配水距離はほとんど変化しない。これは、落橋の近くに代替できるような橋があれば、道路ネットワーク全体としてはそれほどパフォーマンスが低下しないことによる。A, B 両断面の橋が両方とも落橋した場合、総配水距離が大きくなる。これは広範囲で橋が寸断されると、遠回りになる代替路しか存在しなくなるために、総巡回距離

表 - 3 A, B 地区で落橋した場合の結果

落橋地域	総配水距離(km)	総配水時間(h)	配水車数(台)
基本ケース	149.7	254.22	32
A地域	149.7	254.22	32
B地域	151.2	254.34	32
A&B地域	160.6	255.13	32

が大きく増加することを表している。また、配水活動に必要な配水車の台数は 32 台であった。

5. おわりに

本研究では事前の防災対策が緊急時給水体制に及ぼす影響を明らかにするため、給水車巡回モデルを用いて、様々な被災状況に対するシミュレーションを行った。その結果、以下の知見を得た。

- 基本ケースで利用頻度の高い配水池が破壊した時ほど、総巡回距離が伸びるため、耐震化の必要性が高い。
- 落橋で道路が寸断されても、その寸断地域が狭ければ、総配水距離はほとんど変わらない。しかし、広範囲で落橋が起ると、総配水距離は悪化する。耐震化すべき橋梁は道路ネットワーク全体への影響に基づいて選ぶ必要がある。
- 想定した被災条件では、配水池から給水点までの配送時間よりも、給水点で水の給水活動や、配水池での水の補給活動に要する時間の制約の方が大きく、配送時間の増加は、必要配水車数に影響を与えるほどのものではない。

参考文献

- 1) 増井忠幸、百合本茂、片山直登：ロジステックスの OR、槇書店、1998。
- 2) 谷口栄一、根本敏則：シティロジステックス、森北出版、2001。
- 3) 山田忠史、則武通彦、谷口栄一、多賀慎：物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用、土木学会論文誌、No. 632、IV-45、pp. 41-50、1999。
- 4) 中川大、若山真樹、伊藤雅：シミュレーションを用いた震災時の緊急物資輸送計画に関する研究、土木計画学研究・論文誌、No. 14、pp. 353-360、1997。
- 5) 岡部和広、徳永幸之、須田熙：中継基地と走行速度が救援物資配送時間に与える影響の分析、土木計画学研究・論文誌、No. 15、pp. 332-328、1997。
- 6) 首藤敦、徳永幸之：災害時緊急物資輸送計画に影響を与える要因の分析、土木計画学研究・講演集、No. 23(1)、pp. 541-544、2000。