



中小都市を対象とした  
緊急時の給水計画分析システムの開発

(11555143)

平成11年度～平成13年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (B) (2)) 研究成果報告書

平成15年3月

研究代表者

2749 284  
奥村 誠



広島大学大学院工学研究科助教授)

中小都市を対象とした  
緊急時の給水計画分析システムの開発

(11555143)

平成11年度～平成13年度科学研究費補助金  
(基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書



平成15年3月

研究代表者

奥村 誠

(広島大学大学院工学研究科助教授)

## はしがき

1995年1月の阪神淡路大震災では最大断水戸数126万戸に及び、水道の復旧まで91日間を要した。市民の安心な生活を支えるためには、水道施設の耐震性を高めたり、系統の2重化により信頼度を高めることが望ましいが、その建設には莫大な費用と期間がかかり、財政基盤が弱く土地利用の密度も高くない中小都市にとっては実際的な方法ではない。

これらの都市では、ハードな施設の増強に頼るのではなく、被災時の緊急対応をうまく取ることにより、その影響を最小限に押さえる方策が必要となる。その際、農地などの自然的土地利用や優れた自然環境が残存していることに着目すれば、農業用水や井戸水などの代替水源を利用できる可能性がある。しかし、自然水源を利用するためには、需要に見合った水量が得られるか、水質上の問題はないか、水使用場所まで運搬できるかを検討することが必要である。

本研究は、交通工学、衛生工学、水資源工学などの立場からの知見を総合し、中小都市に即した緊急時の給水計画のあり方と、その立案の効率化のためのシステムの開発を目的として企画されたものであり、平成11年度から平成13年度の3年にわたり科学研究費補助金を受けることができた。

本研究での検討内容は以下の通りである。

まず、これまでの交通工学、衛生工学、水資源工学などの研究成果を踏まえて、基本的な分析ツールの開発を行った。第1に代替水源としての可能性の高い地下水利用を念頭におき、地震時の地上・地下構造物の破損により新たな汚染源が発生した場合の飲用可能性を検討するためのシミュレーション方法を開発するとともに、簡便水質測定法の精度の検討を行った。簡易法は測定値をやや過大評価する傾向にあるものの公定法との良い一致を示し、大腸菌群試験紙により下水管破損による汚染を推定できることがわかった。第2に緊急給水作業に対する道路ネットワーク、耐震配水池、井戸水での代替の効果を検討するため、給水車による飲料水の配送計画モデルを作成した。これにより地理的に中心にある配水池とその周辺道路の耐震化の効果は高いが、給水点の密度の減少は総配送距離・時間を逆に増加させる場合も存在し、給水車の容量の増大と組み合わせる必要があることがわかった。

次いで、東広島市西条地区を対象に、収集した各種のデータを地理情報システム上に整理するとともに、それを用いた具体的な検討を進めた。まず、残存井戸における地下水位と流向流速調査に基づいて利用可能水量の検討を行った。井戸の残存数は経年的にかなり減少しているものの、量的には低水期においてもほぼ必要な地下水が確保できることが明らかとなった。つぎに汚染シミュレーションに基づく汚染拡散を踏まえた簡易水質検査井

戸の選定方法の検討、人口と井戸の分布を踏まえた緊急給水点配置の計画モデルを加え、緊急時の簡易水質測定体制、給水点の設置、給水車の配備を事前に立案する手順を整理してそのシステム化の可能性を検討・整理した。

具体的な知見は以下の通りである。第1に地下水の季節的な量的変動にかかわらず、緊急時に必要な水量はほぼ確保できる。第2に芸予地震時に断水した広島県島嶼部では、日常的に井戸水を用いている世帯を中心にかなりの井戸水が飲用に使われていた。第3に汚染シミュレーションを用いれば、井戸の汚染リスクが計算でき、その影響を最小にするような検査井戸が選定できる。第4に使用可能井戸を踏まえて緊急飲料水の配送を考えれば、一定のコスト削減が可能である。

ただし、いずれの問題も複雑な計算を内包するものであり、現時点でパソコン上の簡便な検討システムを構築することは困難であることも明らかとなった。

本報告書は、以上の研究成果を取りまとめたものであるが、以下の2つの理由によりその公表に遅れが生じた。1つは平成13年3月24日の芸予地震の発生である。地震による水道システムの破損とそれに対する緊急給水の状況を実際に調べ、問題点を明らかにする必要が生じたが、この地震の影響は広島県の本土側では小さく、調査の範囲を交通の不便な瀬戸内海島嶼部に広げる必要が生じた。第2の事態は平成13年度後半の研究代表者のブラジル派遣による不在である。幸い、他の研究分担者が精力的に研究を遂行したが、帰国が2月末となり、研究成果を国内外の学会で発表する計画や研究成果報告書のとりまとめ方針の策定が十分に行えなかった。以上のことより、本報告書の公表に1年の遅れが出たことに対し、深くお詫びを申し上げる次第である。

なお、本報告書の付録として、先行研究の成果、関連研究の成果、およびこのテーマに関連して実施した高校生を対象とする公開講座のワークブックを掲載している。あわせてご一読いただき、活用の幅が広がることを期待している。

本研究の遂行に当たり、ご助力をいただいた研究分担者の先生方、現地調査と計算作業を進めた広島大学学生の北原充氏（現在岡山県）、中島和樹氏（現在日本道路公団）、田中亮子氏（現在広島大学大学院博士前期課程）に心より感謝いたします。また、ヒアリングにご協力をいただいた関係諸機関の方々、アンケート調査にご協力をいただいた東広島市および芸予地震被災地の住民の方々に謝意を表するとともに、この報告書が、今後の中小都市の防災性の向上にいささかでも貢献することができれば、研究代表者として望外の幸せです。

平成15年3月  
広島大学大学院工学研究科  
奥村 誠

## 研究組織

研究代表者：奥村 誠(広島大学大学院工学研究科助教授)  
研究分担者：小松登志子(広島大学大学院工学研究科助教授)  
研究分担者：開發 一郎(広島大学総合科学部教授)  
研究分担者：杉恵 頼寧(広島大学大学院国際協力研究科教授)  
研究分担者：藤原 章正(広島大学大学院国際協力研究科助教授)  
研究分担者：岡村 敏之(広島大学大学院国際協力研究科助手)  
研究分担者：大東 延幸(広島工業大学建設工学科講師)  
研究分担者：塚井 誠人(広島大学大学院工学研究科助手)

所属は平成14年3月現在

## 交付決定額(配分額)

(金額単位 千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成11年度	3,400	0	3,400
平成12年度	1,800	0	1,800
平成13年度	1,000	0	1,000
合計	6,200	0	6,200

## 研究発表

### (1) 学会誌等

Tsukai M. and Okumura M.: Highway network and geographical advantage as freight center locations, 2001,10, Proceedings of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 4, pp. 527-541.

塚井誠人・奥村 誠・下荒磯司：避難勧告への信頼度と避難行動，2001.11，土木計画学研究論文集，No.18，pp.311-316.

奥村 誠・シャーミムMハック：観測地価と詳細地理情報に基づく土地利用モデル，2002.11，都市計画論文集，No.37，pp.103-108.

### (2) 口頭発表

奥村 誠・塚井誠人：井戸水の利用と防災用品の備蓄に関する調査，2000.1，京都大学防災研究所研究発表会，3-15.

山中 勤・開発一郎：河川流域の水環境データベースに関する地理学的研究－広島県黒瀬川流域の事例，2000.9，日本地理学会秋期学術大会.

大東延幸：坂の多い都市の都市活動の制約に関する基礎的研究，2000，日本建築学会大会学術講演概要集，F 1，555-556.

大東延幸・新田広行：災害時の避難意識と行動に関する一考察，2001.5，土木学会中国支部研究発表会発表概要集，53，533-534.

小松登志子・奥村誠・福島武彦・北原充：緊急時地下水利用システムの検討，2001.5，土木学会中国支部研究発表会発表概要集，53，739-740.

奥村 誠：避難のための情報と信頼度，2001.7，安全工学シンポジウム予稿集，31，101-104.

中島和樹・奥村誠・塚井誠人：車両巡回モデルによる緊急時給水体制の分析，2001.9，土木学会年次学術講演会講演概要集CDROM，56-IV，462-463.

開発一郎・山中 勤・奥村 誠・小松登志子・吉越昭久・古藤田一雄：西条盆地の地下水動態の四半世紀変化，2001.10，日本地下水学会 2001 年秋季講演会

田中亮子・小松登志子・奥村 誠：地下水利用における汚染予測システム，2002.5，土木学会中国支部研究発表会発表概要集，54，685-686.

中島和樹・奥村 誠・Haque, S.M：地震時緊急給水における行政の水配送と住民の水運搬の間のトレード・オフ，2002.9，土木学会年次学術講演会講演概要集CDROM，57，IV-298.

奥村誠・塚井誠人・小松登志子：地震時水質検査井戸の選定問題に関する一考察，2002.9，土木学会年次学術講演会講演概要集CDROM，57，VII-297.

中島和樹・奥村 誠・塚井誠人：緊急給水に対する事前防災対策の効果分析，2002.11，土木計画学研究講演集CDROM，Vol.26, No.213.

#### 先行研究発表

奥村 誠：近代的システムによる安全性確保の限界－水道システムを例として－：災害に強いまちづくりのための社会システムの構築成果報告書，京都大学防災研究所，pp.106-110，1997年

奥村 誠・吉田英雅：震災時の水運搬能力と水利用，第 32 回土木計画学シンポジウム論文集，pp.137-142，1997 年

奥村 誠：緊急時の物資輸送における生活用水の位置付け，土木学会流域水マネジメント研究小委員会報告書，1999 年

# 目次

はしがき

第1章	緊急時における生活水の重要性	1
	1. 他栄養的生態系としての都市	
	2. 輸送能力の想定	
	3. 輸送需要の想定	
	4. 緊急物資の輸送能力から見た都市の限界規模	
	5. まとめ	
第2章	代替水源としての地下水利用	6
	1. 災害時における上下水道の被災状況及び水利用状況	
	2. 井戸水利用に関する各地の防災計画	
	3. 緊急時地下水利用における地下水汚染の検討	
	4. 地下水利用可能性の検討に関する既往の研究	
	5. 東広島市西条盆地の地下水の利用可能性	
第3章	芸予地震時における水利用	18
	1. 芸予地震時の断水状況及び各地の給水状況	
	2. 地震後の水利用状況アンケート調査	
	3. 阪神淡路大震災の断水時水利用状況のアンケート結果との比較	
第4章	地震時の地下水質シミュレーション	28
	1. 汚染物質拡散の移流分散方程式によるシミュレーション	
	2. 汚染源・井戸の位置の想定	
	3. モデルケース1	
	4. モデルケース2	
	5. モデルケース3	
第5章	水質モニタリング井戸の選定方法	47
	1. 基本的な考え方	
	2. 検査井戸選定の手順	
	3. 仮想的な計算例	
	4. まとめ	
第6章	緊急給水計画モデル	50
	1. 給水計画検討の必要性	
	2. 物資輸送計画に関する既往の研究	

3.	最適化モデルによる給水計画問題の定式化	
4.	給水車巡回問題の解法	
5.	数値計算例	
6.	まとめ	
第7章	緊急給水計画モデルの東広島市への適用	70
1.	設定条件と給水点配置問題	
2.	基本ケースの給水計画	
3.	配水池の破壊による影響	
4.	落橋による影響	
5.	まとめ	
付録A(先行研究)		
A 1.	震災時の水運搬能力と水利用	77
A 2.	近代的システムによる安全性確保の限界－水道システムを例として－	83
付録B(関連研究)		
B 1.	井戸水の利用と防災用品の備蓄に関する調査	89
B 2.	緊急時地下水利用システムの検討	91
B 3.	観測地価と詳細地理情報に基づく土地利用モデル	93
付録C(関連教育活動)		
C 1.	高校生対象公開講座ワークブック	99



# 第1章 緊急時における生活水の重要性

阪神淡路大震災以降、ライフラインをはじめとするインフラの耐震性についての研究が精力的に進められた。また、緊急時の対応について多くの議論がなされている。特に飲料水、生活用水は生活を営む上で必需のものであり、2000年を迎える直前のY2K問題に関する小渕首相から国民へのメッセージにおいても、各家庭における備蓄が呼びかけられ、実際多くのスーパーではポリバケツやボトル水が売れたという報道がある。しかしながら緊急事態に備えてどの程度の水を確保すべきなのか、それは食料よりも優先すべきなのか、あるいはもし水を輸送するとすれば緊急時の物資輸送の中でどのような位置を占めるのかという観点からの考察は十分でないように思われる。

本章では、地震をはじめとする自然災害時における都市に着目し、その活動をサポートするための都市の外部から供給すべき物資の量とその中で生活水の重要性を明らかにする。

## 1. 他栄養的生態系としての都市

現在の都市においては通常、家庭の水道の蛇口をひねれば必要なだけの水は供給されるし、コンセントを差せば電気を使うことができる。食料もお金さえ出せば近隣の商店で有り余るほどの量を買うことができる。しかしながらこれらの水、エネルギー、食料、その他の物資はすべて都市の中で生み出されているのではなく、外部の地域からの流入に依存している。排水、ごみ、廃熱はまた、都市の外部に放出される。すなわち生態学的に見れば都市は自給不可能な「他栄養的生態系」に他ならない。上下水道、電気ガス、そして食品や物資の物流システムが都市と外部の地域との間の流出入を支え、都市の存在を可能にしているのである。

緊急時には、この流出入を支えているインフラがその機能を失う。日常時に流入に頼る量が多い都市ほど、その緊急対応は困難となるであろう。水資源計画という立場からは、主に日常時の水の需要と供給の機能のバランスに着目して議論がなされてきたが、日常時に無理な流動のないシステムを構築することが、緊急時の都市の存立にとってもプラスになると考えられる。しかしその一方で、水利用システムに人工的な水質管理操作等を組み込むと、緊急時における脆弱性が増す危険性もある。以上のことから、流域水管理システムのあり方を考えるに際して、緊急時のシステムの機能保全を視野に入れておくことの意義が大きいと考える。

本稿はその出発点として、被災都市の外周をまたぐ輸送能力を概算し、緊急時の都市の存立に必要な水、エネルギー食料、その他の物資の量と比較することを通じて、緊急時の水管理の重要性を明らかにすることを目的とする。さらにそれらをもとに、緊急時の

安全性から見た都市規模の限界値について考察する。国土庁の防災基本計画の中では、被災後の状況を(1)救急期、(2)応急期、(3)復旧期の3段階に分けそれぞれの段階の輸送対象の想定を行っている。以下ではこのうちの(2)応急期について検討する。時間的なイメージは被災後4日目～10日目である。

## 2. 輸送能力の想定

ここではライフラインが全て機能を失ったと仮定し、道路上のトラックによる輸送に絞って検討する。被災地域の外周線を横切る道路一本あたりの輸送能力は以下の式で表される。

$$(S/N)=W \times C \times E / 100 \times K \times t \quad (1)$$

ここで、W；トラック積載量(t/台)、C；交通容量〔大型車換算〕(台/hr)、E；大型車混入率(%)、K；通行可能な道路の割合、t；通行可能時間(hr)、N；道路の本数である。これらのパラメータを以下のように阪神大震災時のデータから想定する。

### (1)道路状況の想定

宇野らによる、阪神大震災後の被災リンクの調査とネットワークの形状を考慮した容量への影響の研究により、発災後半月のネットワーク容量は平常時の1/3であるとしている。よって通行可能な道路の割合；K=1/3を用いる。

### (2)交通状況の想定

阪神大震災後4日目の芦屋市と須磨区の国道2号の航空写真から交通流に占める大型車の割合を調べた結果、4トントラックの占める割合が最も多く、トラック混入率は約30%となった。よって、トラックの積載量；W=4(t)、大型車混入率；E=30%を用いる。

### (3)交通容量の想定

走行速度は実績から時速15km/hとし、大型車の混入率が30%として交通容量を求め、C=623台/hrとする。以上から、通行可能時間；t=24hrとし、道路一本あたりの輸送能力を求めると、S/N=5952(t/日)となる。

ここでは4トン級の比較的大きな車両での輸送を想定しているので、使用できる道路は国道や主要地方道等の幹線道路に限られる。神戸市の場合N=11であるから輸送可能量Sは5952×11=65472(t/日)となる。

これを人口P=15,000人で割ると、一人当たりの輸送可能量sは以下ようになる。

$$s = S / P = 65472 / 150000 = 438(\text{kg/人日}) \quad (2)$$

### (4)その他の要因が交通容量に与える影響

震災時には沿道建物の倒壊や駐車車両の放置による車線幅員、側方余裕幅の減少が、輸送能力は0.65倍程度になる。自動二輪車と自転車1割ずつ混入すれば0.9倍になる。また交差する方向の交通を規制できず、仮に上記の道路の方向の交通が通行できる時間が0.5倍になれば、その分輸送能力は落ちる。さらに大型車の輸送能力には勾配も影響する。以

上の悪条件が重なれば、輸送可能量は 0.19 倍に落ち、一人当たり輸送可能量は 84(kg/人日)程度となる。

### 3. 輸送需要の想定

防災基本計画では緊急輸送の内容を被災後 3 段階に分けて以下のように想定している。第 1 段階では被害状況の把握と二次災害の防止、救命・救助活動に重点が置かれる。第 2 段階では上記の内容に加えて、食料、水等生命の維持に必要な物資の輸送、傷病者および被災者の被災地外への輸送、および輸送施設の応急復旧等に必要な人員および物資の輸送を挙げている。第 3 段階として、上記の内容に加えて、災害復旧に必要な人員および物資と生活必需品の輸送を挙げている。しかし、「被災の状況、緊急度、重要度を考慮して交通規制、応急復旧、輸送活動を行うものとする。」と述べられているにすぎず、具体的な物資の内容や量についての記述はない。また、阪神大震災時における物資量の調査は有用な情報であるが、過不足が見られ、実績値をもって必要物資と考えることに限界がある。

以下では統計データより、日常の生活に使われている食料、水、エネルギーの量を算定する。さらにこれらに基づいて、被災後 4 日目～10 日目の被災地での生活に必要な物資の量を算定する。食料のうちの食べられない部分、容器や包装の量は家庭ゴミの量より推定する。さらに被災時においては、通常電気、ガスの形で得ているエネルギーを石油の形で輸送すると考え、熱当量で換算して重さの単位で表す。

#### (1) 日常で使われている食料、水、エネルギーの量

近年の統計データより人口あたりの使用量を算出した。食料：1590 (g/人日)、ごみ：980 (g/人日)、上水道使用量：350(kg/人日)、家庭用電力・ガスの量：4926(kcal/人日) (石油換算で、428 (g/人日))。

以上の合計より日常の輸送量は 353(kg/人日)となる。したがって(2)式で求めた一人当たりの輸送可能量の範囲に収まっている。ただし、2.(4)で述べたような悪条件が発生すれば、輸送できなくなる可能性がある。重量に着目すれば、通常は水道というパイプラインで運ばれているため目立たないものの、水が 99%を占め、圧倒的に大きいことがわかる。

#### (2) 災害時に最低限必要な物資の量

基礎代謝エネルギー量から、人の食物必要量は生体重 kg あたり 40(kcal/日)である。食物が動物または植物であり生体重 1(g)あたり 2(kcal)の熱量が含まれているから、体重 70kg の成人を考えれば食料：1.4(kg/人日)必要となる。(1)で用いた食料対ごみの比率より、ごみ 860 (g/人日)である。阪神大震災後の調査実績より、最低限の洗濯、トイレ、手洗いの水を含め、水の使用量を 10(kg/人日)とする。ガスは利用できないと仮定し、日常の電力のうち照明・炊飯・ラジオ等に使われている 737(kcal/人日)を石油により確保するとしてエネルギー：64 (g/人日)と考えた。以上の合計は、12.3(kg/人日)であり、(1)の日常の必要

量と比較すると約 1/29 となっている。さらに衣料品・薬品・食器・布団など、被災により新規に必要な物資のうち被災後 1 週間までに必要とされる物資の量を、阪神大震災時の救援物資量の実績値を参考に 2.3(kg/人日)と算定した。これを加算して、災害時に最低限必要な物資の総量は 14.6(kg/人日)となる。

重量的には 2. で求めた輸送可能量を下回っていることから、今回検討した都市の外側の断面では輸送力が不足するという問題は起きにくいと考えられる。水が占める割合は 68% であり、やはり高い割合を占めている。耐震化を施した水道施設や井戸など、被災地内の自己水源が確保できれば、輸送量をかなりの程度減少させることができる。

#### 4. 緊急物資の輸送能力から見た都市の限界規模

以上の検討内容を前提として、災害時における被災地外から被災地内への輸送能力という観点から、安全な都市規模を検討する。都市規模が大きくなるとそれにつれて被災地の広さも大きくなるため、輸送に利用できる主要道路の本数も変化する可能性がある。地域の周囲を横切る道路本数  $N$  は、道路ネットワークの形状によって異なる。

##### (1) 被災地域を中心として一定本数の放射道路のみが存在する場合

この場合、道路本数は被災地の大きさによらず一定となり、輸送能力から見れば最も厳しい仮定となる。神戸市に合わせて  $N=11$  と仮定する。よって輸送可能量は神戸市と同じく  $S=5952 \times 11=65472$ (t/日)となる。

これを一人当たりの輸送需要量  $d=14.6$ (kg/人日)で除することにより、最大都市規模は、 $P=S/d=448$  (万人) となる。

##### (2) 国土上に等間隔にグリッド上のネットワークがある場合

より一般的なネットワーク形状として、国土上にほぼ等間隔にグリッド状のネットワークが整備されている場合を仮定する。この場合人口密度が一定であれば被災地の面積は人口に比例し、周囲を横切る道路の本数は周囲の長さ、すなわち面積の平方根に比例する。つまり、

$$N = n \times \sqrt{P/p} \quad (3)$$

ここで、 $n$  ; 基準地域の主要道路の本数、 $p$  ; 基準地域の人口と表される。基準を神戸市とし、 $p=150$  万人、 $n=11$  とする。輸送可能量は以下のように計算できる。

$$S = 5952 \times 11 \sqrt{P/1500000} \quad (t) \quad (4)$$

$dP=S$  となる限界人口  $P$  を求めると、 $P=1350$  万人となる。

#### 5. まとめ

神戸市の道路ネットワークでは、人口 1 人当たり 89~438(kg/日)の物資を輸送できたことになり、日常時の生活物資を運ぶのには十分であるが、もし水をトラックで運搬すると

考えれば需要を満たすことはできない。但し、輸送物資を被災者の最低限の生活を守るための物資に限れば、輸送能力は十分に確保されている。

また、神戸市と同等のネットワークの場合、緊急物資輸送が可能な都市規模の限界は450～1350万人である。首都圏は既にこの限界に近い。物資に占める水の割合がきわめて大きいことから、自己水源の確保が是非とも必要である。

## 第1章 参考文献

- 1) 国土庁防災局(1997)：防災基本計画，中央防災会議， pp.36-37.
- 2) 早川康弘・木村東一・森川健・松井貞次郎(1997)：生活支援物資及び復旧資材・廃棄物の動向，阪神淡路大震災調査研究論文集， pp.515-522.
- 3) 宇野伸宏・飯田恭敬・谷口栄一・牛場高志(1997)：阪神・淡路大震災後の道路網の機能低下と交通規制の影響，阪神淡路大震災調査研究論文集， pp.203-208.
- 4) 神戸新聞総合出版センター(1995)：航空写真集 阪神・淡路大震災.
- 5) 廃棄物学会(1995)：ごみ読本， p.29，中央法規出版.

## 第2章 代替水源としての地下水利用

阪神淡路大震災のような大規模な災害が起きたときのライフラインの寸断、特に上水道の寸断は人々の生活に多大な影響を及ぼし、改めて水の重要性を認識させるものとなった。その経験から、防災計画の見直しや井戸を新設する都市が増えてきている。2001年3月に安芸灘で起きた芸予地震後の調査でも、阪神淡路大震災の教訓から小学校に緊急用の井戸を新設した都市や、校庭や公園の地下に耐震性貯水槽を設置した都市があることがわかった。神戸市や東京都も非常用井戸の設置など、緊急時の給水に対する対策はどの都市でも重要視されている。年に数ヶ所で起こっている渇水に対しても、井戸水は代替水源として広く認識されるようになってきている。

しかし、井戸を設置している都市でも、水質調査は年に1回、または設置してから全く調査していない都市がほとんどであった<sup>1) 2)</sup>。緊急用井戸があっても、法律による水質のレベルや、使用頻度など、井戸に対する管理システムがまだ十分に整っていない自治体が大半を占めている。

本章では、地震による災害をとりあげ、被災時における地下水の利用についての実態と取り組みを整理する。

### 1. 災害時における上下水道の被災状況及び水利用状況

#### 1) 日本における地震災害の歴史及び水被害状況の変化<sup>3)</sup>

地震における断水被害が深刻化してきたのは、近代化の水利用システムが整備されてからである。表2-1に歴史上の日本の地震時における給水問題をまとめた。

表 2-1 日本の地震時における給水状況

西暦	地震	給水状況
1854年	安政の大地震	M8クラスの大地震といわれているが、当時のボランティアの支援の中に給水はなかった。これは当時の水利用が地震被害の受けにくい河川・地下水を利用していたためである。
1921年	東京で強震	近代水道の受けた最初の大規模被害。この地震で東京は3日間の断水となったが、前代未聞のパニックとなった。
1923年	関東大震災	旧玉川上水路は応急修理によって通水は問題なかったが、導水ポンプが停電のため運転できなかった。また、ポンプの復旧後も配水管に多数の破損があり、断

		水は全期間で2ヶ月かかった。
1964年	新潟地震	地震による停電で給水ポンプが停止し、新潟市全域が断水した。当時井戸水を使用していた家庭では水質検査を行い、飲用できる井戸では一般開放もしていた。これが「井戸ブーム」をつくり、水を求める人の列を生み出した。またこのときの水道普及率は80%であり、井戸も多く残存していたと思われる。
1968年	十勝沖地震	26000世帯が断水した。当時この地域では自家用井戸水の利用世帯が非常に多く、給水活動がスムーズに行われ、人々の飲料水の確保に効果をもたらした。
1978年	宮城県沖地震	7000世帯で断水した。この地震での水利用のアンケート結果では、給水車15%、近所の井戸水等のもらい水が30%であった。また、水洗トイレの水不足も取り上げられた。
1983年	日本海中部地震	22187世帯断水した。給水は約3週間行われた。また、遊休井戸等の水質検査も多く行われ、およそ半数が飲用に適していた。

## 2) 阪神淡路大震災

### 上下水道の被災と復旧<sup>4)</sup>

1995年1月、兵庫県南部で震度7の地震がおこった。このときの阪神淡路大震災時の断水戸数は130万件、上水道の完全復旧は3ヶ月を要した。この原因は主要ポンプ場、浄水場の損傷が大きかったことや、配水管・給水管に無数の破断が生じ、漏水箇所の特定に時間を要したことがあげられる。また、道路の損壊、交通渋滞により復旧調査・作業が遅れたことなども影響している。

下水道被害は、8市18箇所の下水処理場、47箇所のポンプ場、下水管渠があげられる。特に被害が多かったのは下水管渠であり、また自然流下方式であるため被害箇所が分かりにくく、上水道の復旧にやや遅れる形で進められた。

### 井戸水・湧水の利用状況<sup>4) 5) 6)</sup>

地震後、各地での確保水源は様々であり、市販水（ペットボトル）、給水車、井戸水、河川水、再生水などがあげられる。その中で、地震後各地で火災が発生したが、消火に使用した水源は消火栓・防火水槽に次いで井戸が多く使用されている。また、地震後数日間の確保水量が最も多かったものも井戸水であり、非常時の水源として極めて重要であったことがわかる。

さらに兵庫県西宮市南部は地表下3~5mの極めて浅い浅層地下水が豊富であり、「宮水」として酒造用水源として利用されていた。そのためその保護保全は昔からきめ細やかに

われており、平素から過剰揚水に注意して管理されてきた。また帯水層が主に砂層であり、井戸の構造も強固であることから、宮水地帯周辺部には地震による被害が殆ど見受けられなかったのであった。このためこれらの井戸水が2ヶ月以上も提供され、住民の命の水として支えてきた。このほか農業用水やタクシー会社の洗車用の井戸水など様々な形で被災者に地下水が提供された。

### 3) 鳥取県西部地震

#### 上下水道の被災と復旧<sup>2)7)</sup>

2000年10月にマグニチュード7.3の鳥取県西部地震が発生した。負傷者は全体で182人、中・四国の県で被害が起きた。鳥取県では断水が2市10町、5744戸数であり、完全復旧までには1週間以上かかった。公共下水道では鳥取県で33箇所(施設クラック、管渠隆起・破損等)、境港市下水道センター内の場内配管破損、洗浄用給水施設で被害があった。都市下水路では鳥取県内で2箇所(水路壁傾斜)被害があった。

#### 水利用状況<sup>8)</sup>

鳥取地震の影響で鳥取県西部の約10ヶ所の水源に濁りが確認された。その中でも会見町の水源である滝山水源は約一週間濁りが続き、その間飲料水が不足する事態が起きた。町では自衛隊と協力して給水車による応急給水を開始した。この水源である湧水は地震の揺れなどで濁ることがあり、回復には揺れが収まった後、最低一週間以上が必要となる。そこで同町ではライフライン確保のため、新たな地下水型の水源確保を検討している。

また、溝口町では水道水の代替給水に備え、耐震性貯水槽を町給食センターに隣接した溝口小駐車場に埋設していた。これは阪神淡路大震災で耐震性貯水槽が消火用と飲料水の給水源として役立ったことに着目した対策であった。

本地震では道路の寸断も少なく、給水活動も迅速に行えたこと、水道施設も早急に回復したことから、地下水を応急給水として利用することはほとんどなかった。しかし、緊急時に備えて地下水利用の計画を立てる検討は必要と思われる。

## 2. 井戸水利用に関する各地の防災計画

全国の都市で井戸水(地下水)を応急給水計画に取り入れている都市は多い。その中で一部の都市の井戸に関する給水計画例を表2-2にあげる。

表2-2より飲料水の確保という点からみると、貯水施設(配水池等)の耐震化や、公共施設(学校・庁舎等)に受水槽や高架水槽を設置するなどの対策方法を多くの都市が採用している。その中で、地下水が果たす役割は主に生活用水として行政側では認識されている。その方向で対策を立てられているのが一般的である。



表 2-2 各都市の井戸に関する応急給水計画例 1) 2) 9) 10)

都市	設置場所	井戸の条件・用途	その他
埼玉県 狭山市	市内 8 地区	災害用給水井戸として使用	非常用発電機で地下 200mの深井戸から汲み上げている。 40 項目の水質検査を年に 1 回行っている。
	一般家庭（民間井戸） ：119 ケ所 工業用井戸 ：14 ケ所	防災井戸として使用	10 項目の水質検査を 年 1 回行っている。
埼玉県 和光市	井戸所有者（個人の井戸）、民間施設 ：5 ケ所の井戸	災害用臨時給水拠点（井戸所有者と市が協定を結んでいる）	・地震発生後 65 時間以上：配水池へ送水 ・地震発生後 72 時間以上：供給可能
千葉県 船橋市	市内 144 ケ所	「井戸水提供の家」として指定	所有者に直接給水をお願いする。
	市内 18 ケ所	災害時用井戸	地下 100~150m から汲み上げ、毎時 12t の水が供給可能。
東京都	区・市：189 ケ所 個人：3687 ケ所	非常用災害井戸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・災害時の代替水源として給水するため、地下水を揚水する。</li> <li>・地盤沈下予防のため非常時以外の使用を禁止する。</li> <li>・地下水の水質把握のため、毎年経年的なモニタリング調査を行っている。</li> </ul>
	杉並区・練馬区等 小中学校	井戸	
	国分寺市内の公園	手押しポンプ	
兵庫県 神戸市	市内	非常用災害井戸 ：「災害時市民開放井戸登録制度」により指定	一定条件を満たしている井戸を対象としている。 登録された井戸は井戸マップに登録されている。

### 3. 緊急時地下水利用における地下水汚染の検討

本節では、地震における断水時の地下水利用について考えられる地下水汚染を検討する。これらは主に阪神淡路大震災における下・排水処理施設破損による地下水汚染、またガソリンスタンドやクリーニング店等の事業所被害からの有害物質流出による地下水汚染可能性をみていく。

#### 1) 下・排水処理施設破損における地下水汚染可能性<sup>11) 12)</sup>

下・排水処理施設において、多く被害が見られた施設は、最終沈殿池、最初沈殿池、曝気槽の順であり、最終沈殿池では過半数の施設に被害が生じている。このため東灘処理場では110日間運河を利用した簡易処理で対応され、芦屋処理場でも14日間滅菌のみの処理で対応された。また、下水管の管路被害延長は約316kmであり、管渠の被害形態は管体の周方向クラックと破断、管軸方向のクラック、継手のずれと引抜け、取り付け管の突出、勾配と線形の変化、人孔の破損等があげられる。この地震での特徴的な管渠被害として、幹線管渠にも多く被害がみられたこと、伏せ越し管が多く破断したこと、他の地震では殆ど報告のない管軸方向のクラックがあげられる。

阪神淡路大震災では上水道の被害は大きく取り上げられたが、下水道関連には関心が薄く、排水処理システムがライフラインとして認識されていないことが浮き彫りとなった。それと同時に緊急時地下水を利用する場合、都市部の地下に張り巡らされた下水管破損による地下水汚染可能性の認識の低さも示した。

まず下水道の被害として最も重要な問題がトイレであった。これは断水となってからトイレ洗浄水が供給されなくなり、排泄物が生活の場に蓄積するという衛生的問題であった。これが夏場のことであれば、伝染病などの非常に重要な問題が生じたと思われる。またこの他に、下水処理施設の損傷による処理能力の低下、下水管路の損傷による汚水の漏出、排泄物のマンホールへの排出、河川での洗濯などがあげられる。これらの被害から本来処理施設での処理を経て放流されていた汚濁物質が、直接土壌や水系に放出され水質汚染を引き起こした可能性がある。その事例として、被害の大きかった東灘下水処理場は復旧まで運河を仕切って設定した仮沈殿池に下水を放流せざるを得なかった。また、上・下水道管の破損により、通水した水道水中に下水管から漏れ出した汚水が混入したという報告もある。これらから下・排水処理施設の被害が環境への負荷を与えたことは明らかである。

実際に地下水を使用する場合、下・排水処理施設の破損による汚染可能性は重要な問題として考えられるべきことを示唆している。

#### 2) 事業所施設破損における地下水汚染可能性<sup>13)</sup>

阪神淡路大震災はあらゆる構造物に被害を及ぼしたが、その中でも事業所等で有害物質が漏れ出し土壌汚染や地下水汚染などの震災地質汚染と呼ばれる被害が発生した。そこで

表 2-3 ドライクリーニング店の震災地質汚染調査結果

ドライクリーニング所における調査総数	377 (件)
ドライクリーニング所における震災地質調査	
調査総数	194 (件)
検知事業所数(地下空気汚染あり)	55 (件)
濃度範囲 (テトラクロロエチレン 31 件)	2~5000ppm
(石油系 24 件)	30~400ppm
汚染地質試料を採取した事業所数	2
うち汚染が確認された数	2
濃度範囲 (テトラクロロエチレン)	0.006~39 mg/l
(トリクロロエチレン)	0.005~0.51 mg/l
(1,1,1-トリクロロエタン)	0.009~40 mg/l
(ベンゼン)	0.68 mg/l
ドライクリーニング店の被害状況調査	
調査総数	466 (件)
全壊または半壊	177 (件)
軽微な損壊	64 (件)
被害なし	225 (件)

表 2-4 ガソリンスタンドの震災地質汚染調査結果

ガソリンスタンドにおける調査総数	277 (件)
ガソリンスタンドにおける震災地質汚染調査	
地質汚染調査の実施件数	97 (件)
検知事業所数 (地下空気汚染あり)	1 (件)
濃度範囲 (ガソリン)	2ppm
汚染地質試料を採取した事業所数	1 (件)
うち汚染が確認された数	1 (件)
濃度 (ベンゼン)	0.015mg/l
ガソリンスタンドの被害状況調査	
調査総数	154 (件)
全壊または半壊	13 (件)
軽微な損壊	49 (件)
被害なし	92 (件)

日本水環境学会では調査団が結成され、調査対象を簡便で高精度の調査ができる揮発性有害物質に限定し、それらを取り扱うクリーニング店とガソリンスタンドで調査が行われ、有害物質の漏れや流出が確認された。表 2-3, 2-4 に各調査の震災地質汚染調査結果を示す。

クリーニング店の調査の結果、いずれの項目も土壌環境基準値を超過していた。簡便な調査であったため実際には被害件数や濃度範囲を大きく上回ることが予想される。また、ガソリンスタンドの調査では被害件数が 1 件とクリーニング店と比較しても軽微な被害であった。この原因として、調査の現地入りが震災後 150 日を経過した時期であり、殆どの店が復旧していた等があげられる。しかし震災直後の調査では側溝に油膜が浮いていたなど、配管破損で油による地質汚染が確認された事例もあった。

震災から 1 年後、本格的に震災地質汚染調査が行われた。この調査ではこれまで調査してきた内容を進めていくとともに、有害物質の地下水への移動・拡散の実態なども検証している。この調査では震度 7 が帯状に分布した「震災の帯」と呼ばれる地域の中にあり、ドライクリーニング機械が破損しテトラクロロエチレンが流出した事業所を対象に調査がなされた。

調査地域の地質環境は地表面下 0.1~1.6m の地層は泥炭層であり、透水性は悪い。また地表面下 2.0m 以降の地層は風化花崗岩が主体の透水性の良い地層であり、地下水が存在している。そしてこの調査結果によると、有害物質は震災後 1 年を経過してもその多くは低透水性の部分に局所的に残留していること、そしてその一部は地下水中に移動・拡散していることが判明した。

これらの被害場所の多くは「震災の帯」から遠く離れており、地下水流動系からの水資源問題へ発展していく可能性はない。しかし、「震災の帯」やその南側では、地下水面が浅く地層の透水係数が大きく、浸入した有害物質は短時間での移動・拡散が起きやすい。よって震災時この地域のような地質環境でひとたび汚染が発生すれば、大規模な地下水汚染問題へと発展する可能性が十分考えられる。

#### 4. 地下水利用可能性の検討に関する既往の研究

災害時に代替水源として地下水利用を検討している都市は増加してきている。そこで緊急時地下水利用可能性に関する既往の研究について述べる。

##### 1) 生活用水の運搬

吉田<sup>14)</sup>は阪神淡路大震災時の水供給・運搬状況を過去（江戸～大正時代）と比較し、緊急時における水供給システム方法を考察するとともに、現代都市の特徴を鮮明にすることで対策の考察を行っている。まず震災時の生活用水量は 1 世帯（平均 3 人と仮定）で最低限水量 60l と報告している。これは 1 度に運搬できる水量ではなく、3 回に分けて運搬するとすれば 139m が運搬可能距離の限界であると算出している（成人男性対象）。しかし阪神

淡路大震災時の給水点は各家庭で平均 352m であったため、運搬能力からみて必要な水量を緊急給水によってのみ確保することは不可能であると確かめており、これらの給水点からの運搬能力を踏まえた対応策が必要と主張している。次に過去の時代との水利用の比較を行っている。まず上水は主に河川・井戸水であり、使用水量は現代よりはるかに少なかったこと、トイレは汲み取りであったこと、風呂は江戸時代以前では蒸風呂であり、水を殆ど使用しない時代であったことがわかる。これらの比較から現代の給水条件が緊急時にとって対策が必要な部分が多数あることを浮き彫りにしている。

## 2) 緊急時地下水利用システムの検討

水道法に規定されている項目の水質検査は、上水試験法（公定法）に基づいて、水道事業者や地方公共団体の検査機関が実施することと定められている。しかし地震時など緊急時の場合、即座に水質を調査する必要があるため、簡易な検査方法が求められる。そこで東京都水道局の田口<sup>15)</sup>は水道水の事故に簡易水質測定法を用いるという提案に着目し、北原<sup>2)</sup>は公定法と簡易水質測定法を実施・比較し、測定値の比較、精度の違い、適用性を検討している。

簡易水質測定法では水質管理上基礎的な 10 項目（省略不可能項目）のみ検査を行った。その結果、簡易法では飲用として使用するには結果に不安が残るものの、生活用水としての利用に関しては保証できる方法であることがわかった。よって緊急時に水質を評価する手法として活用できる結果となった。

また、この簡易水質測定法を用いて、民家井戸の汚染状況を調査した。これは下水中では大腸菌群は高濃度に含まれており、災害時に汚水が拡がり、地下水に希釈されても他の塩素イオン、硝酸性窒素などと比較して明らかに井戸水が汚染されたと判断できるためである。

## 3) 防火井戸としての地下水の利用<sup>16)</sup>

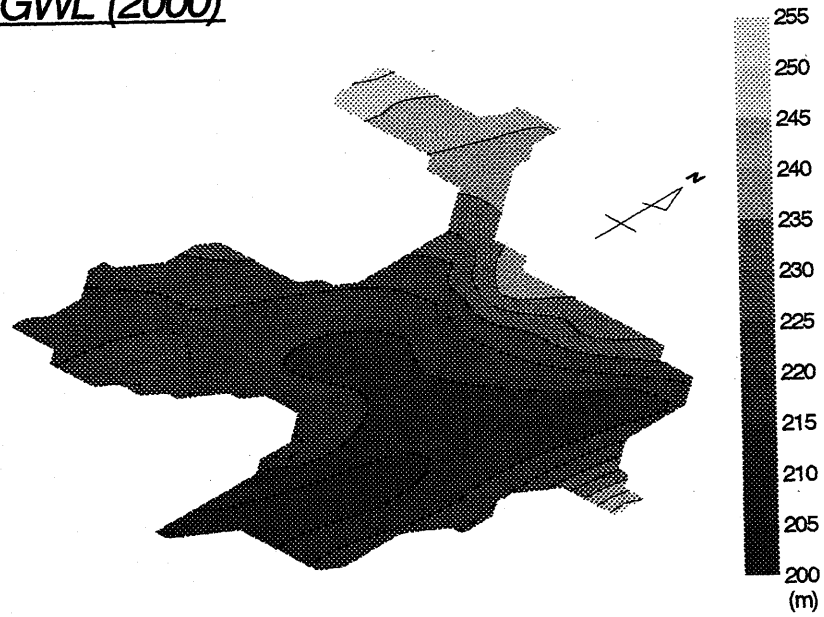
静岡県防災情報研究所の井野は、阪神淡路大震災時で耐震性貯水槽が未整備のため消火用水が不足したことに着目し、地下水を防火井戸として活用することを提案している。災害時、都市部では火災による二次災害による多大な被害が発生する恐れが考えられる。また、道路の寸断により消防車等が通行できない可能性も十分考えられることから、現地で消火用のための水源を調達するための手段として考えている。

## 5. 東広島市西条盆地の地下水の利用可能性

### 1) 地下水動態調査の意義

酒都である東広島市西条盆地の地下水は地域の水資源や緊急時（災害時）の水の確保のために重要であり、学問的にも湖成層からなる流域の地下水涵養や地下水流動機構は興味

GWL (2000)



GWL Diff. (2000 - 1974)

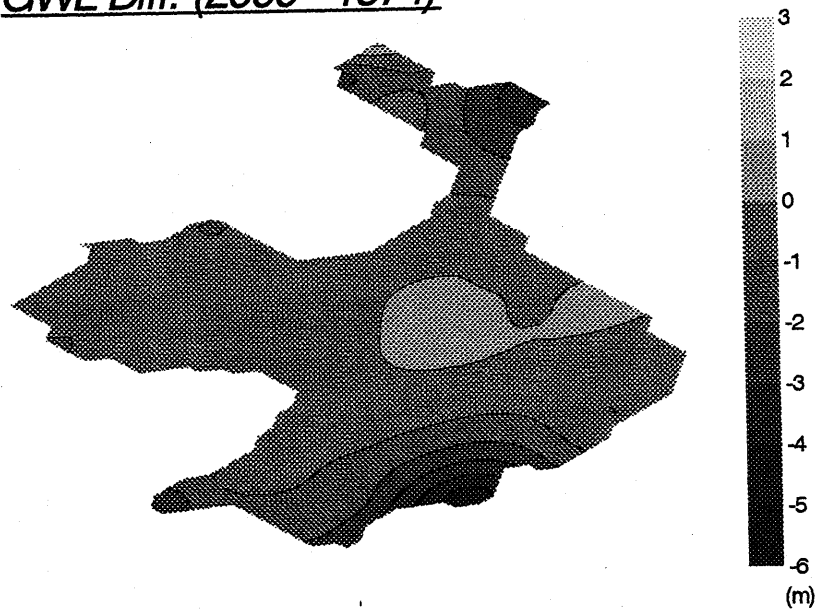


図 2-1 地下水位分布（上図：2000年、下図：2000年 - 1974年）

のあるところである。また 1980 年代から急速に都市化が進み、この影響が地下水にどのように影響がみられるのかも重要と思われる。筆者らは昭和 49 年以来、本流域の地下水流動を調べており、全流域については 25 年振りに測水調査を行なったので、都市化との関連を含めてその結果について報告する。

## 2) 地下水動態調査の方法

1974年冬(2月)と2000年夏(8月)と冬(12月)に黒瀬川西条盆地市街地流域において浅井戸と池の水位、電気伝導度、pH、RpH、水温を測定した。また同時に2000年については採水を行い、水質分析(ICP分析)によって主要無機イオンを測定した。土地利用については航空写真と地形図を基に現地調査を行って把握した。

## 3) 地下水動態調査の結果

西条盆地の都市化が進み、ここ20年間で水田の減少や商工業地・住宅地の増大により、地表面条件は大きく変わり、面積的には透水性地表面は本研究対象地において20%以上少なくなっていたことが現地調査により明らかとなった。それに伴い浅井戸も減り、現存のものは1974年の約70%となっていた。

地下水ポテンシャル分布から計算された地下水流動パターンは、1974年と2000年では大きな変化はなく、基本的には黒瀬川に流出するような流動系を呈していた。

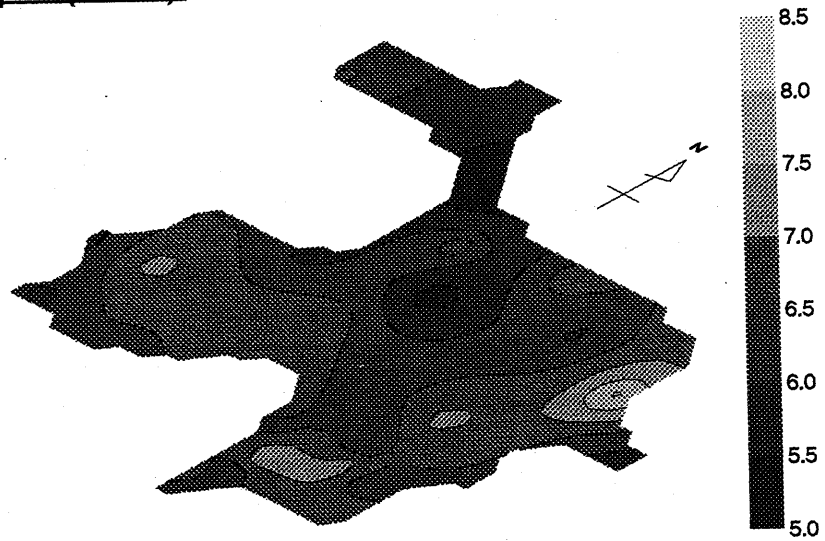
1974年と現在の地下水ポテンシャル分布を比較すると、最高で6mを超える地下水位の低下が御菌宇低地でみられた(図2-1の南東部分)。気象月報のデータから見ると、西条盆地のここ20年間の降水量の変動率は±20%以下であり、また一方的に年間降水量が減少しているわけでもなく、さらに一方的に年平均気温が上昇しているわけでもない。このあたりは山林や農地だったところがほとんど住宅地や工業地になっており、地下水のくみ上げや開発に伴う非透水面の増加(アスファルト面の増大)による地下水涵養能力の低下を招いていることが、地下水位の低下の主要な原因であると考えられる。

電気伝導度の両年の測定結果に顕著な違いはなかったが、pHは西条盆地の東側で量的にも分布パターンにも大きな違いが見られ(図2-2)、都市化の影響と思われる結果を示している。

## 4) 地下水利用の可能性

以上のように、井戸の残存数は経年的にかなり減少し、部分的には地下水面の低下が見られるものの、西条盆地全体の涵養量と想定される緊急時の地下水量を比較すると、量的には低水期においてもほぼ必要な地下水が確保できると考えられる。

pH (2000)



pH Diff. (2000 - 1974)

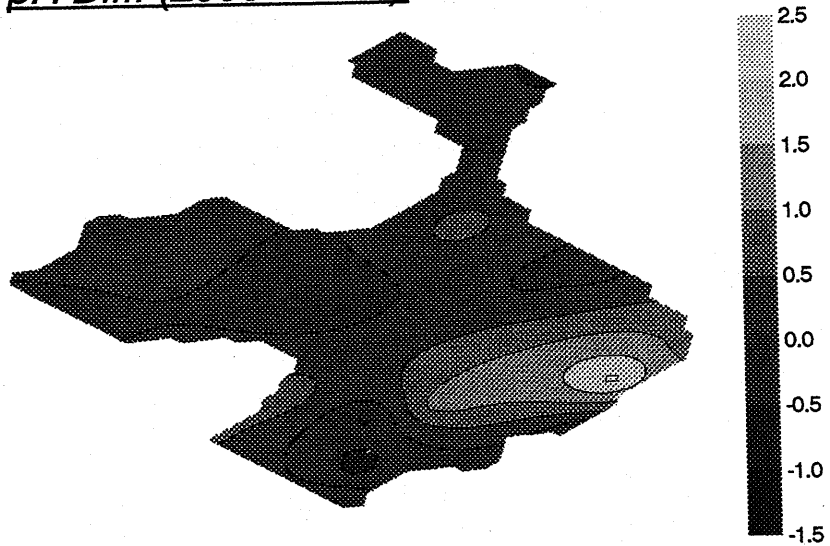


図2-2 pHの分布 (上図：2000年、下図：2000年 - 1974年)

第2章 参考文献

- 1) 狭山市役所：狭山市応急給水計画、1997、4
- 2) 北原充：広島大学工学部土木工学課程卒業論文「緊急時地下水利用システムの検討」、2000.3.
- 3) 島谷幸宏・萱場祐一・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」月間「河川」



- 4) (社)日本水環境学会：「阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策」報告書、1997.6.
- 5) 山田啓一：「都市と水—災害時の用水確保を考える」、都市問題、第87巻第7号、1996.
- 6) 高岡祥夫：「宮水の保全活動について—阪神大震災と宮水の状況—」、水環境学会誌第24巻第1号
- 7) 内閣府：「平成12年鳥取県西部地震について」
- 8) 日本海新聞：「検証鳥取県西部地震」
- 9) わが国の地下水 その利用と保全：国土庁長官官房水質源部水質源政策課地下水対策室監修、地下水政策研究会編著、pp106~108、大成出版社
- 10) 飯田輝雄：「災害時の井戸水利用と地下水保全」
- 11) 高田志朗：「ライフラインの被害と対応」、地盤工学会誌 平成8年2月号 第44巻第2号
- 12) 藤田正憲・宗宮功・貫上佳則・池道彦：「阪神・淡路大震災における下・排水処理システムへの影響」、水環境学会誌 第19巻第5号
- 13) 鈴木喜計：「震災地質汚染と国境なき調査団」、資料環境対策 1996年 vol.32 No.13
- 14) 吉田英雅：広島大学工学部土木工学課程卒業論文「生活用水の運搬—過去と震災時を対象として—」、平成8年
- 15) (社)日本水環境学会：水環境学会誌「水質簡易測定技術の開発状況とその応用」Vol.21, No.5, pp2~21, 1998
- 16) 井野盛夫：「静岡県における東海地震の給水対策」

## 第3章 芸予地震時における水利用

実際緊急時ではどの程度地下水の重要性が認識されているのかについて、2001年3月におきた芸予地震時の被災状況及び地下水に関する防災計画について聞き取り・アンケート調査を行った。本章ではその調査内容と結果を述べる。

### 1. 芸予地震時の断水状況及び各地の給水状況<sup>1)</sup>

#### 1) 芸予地震時の上水道の被害

2001年3月24日15時27分頃、安芸灘を震源地としてマグニチュード6.4の地震が発生した。この地震により、負傷者156名(死者2名)、構造物の倒壊や、道路のひび割れなどの被害が起きた。その中の上水道の被害について、広島県太田川から取水され、呉市などから島嶼部経由、川尻町経由に送水している水道管が地震の揺れにより3ヶ所にわたり破損した。この破損により、この水道管による配水地域が断水になる事態が起きた。表3-1に断水地域・期間・世帯数をあげる。

表3-1 主な断水地域・断水期間・断水世帯数

断水地区	断水世帯数	断水期間
呉市	21000世帯	3月24日~25日(1日間)
三原市	5000世帯	3月24日22:30~26日1:20(1日間)
川尻町	3600世帯(全域)	3月25日0:00~26日17:00(2日間)
熊野町	125世帯	3月24日~25日16:00(1日間)
下蒲刈町	1000世帯(全域)	3月24日~25日夕方(1日間)
蒲刈町	1200世帯(全域)	3月24日~26日昼(2日間)
豊浜町	1000世帯(全域)	3月24日~28日16:00(4日間)
豊町	1400世帯(全域)	3月24日~27日16:30(3日間)
大崎町	1800世帯(全域)	3月24日~28日8:40(3日間半)
木江町	1400世帯(全域)	3月26日~27日6:30(1日間)
東野町	1260世帯(全域)	3月24日22:00~27日7:40(2日間半)

#### 2) 各被災地の応急給水の聞き取り調査結果

聞き取り調査の調査期間は9月25~28日であり、表3-1で述べた地域行政機関の水道課でそれぞれ行った。以下にその内容を示す。

##### (1) 呉市

本地震で最も断水戸数の多い呉市では、自衛隊、水道局の給水車計17台が出動し

た。

これらの給水車数と隊員・職員数から給水拠点が決定された。また給水ルート  
の決定方法は宮原浄水場・水道局・阿賀北6丁目の3ヶ所を補水地点とし、給水拠点  
内を往復した。給水地点は18ヶ所、出動回数は135回、総給水量は185tと断水規  
模の大きさがうかがえる。しかし復旧は約1日と早く、大きな混乱は起こらなかつ  
た。

(2) 三原市

地震後、中之町水源池（浅井戸）の濁度が20度を越えたため送水を停止した。当  
時、中之町基幹配水池に約2000m<sup>3</sup>の貯水量があり、その水を漏水の多かった市内  
の密集地に送水したため、中之町では断水期間が3300戸数で一日以上続いた。25  
日には西宮配水池系より通水したが、引き続き高所300戸が断水であった。また、  
その地区に福山・三原所有の給水車合計9台で給水を行っている。しかし、断水戸  
数が少数だったため、総給水量は20t以下であった。

(3) 川尻町

25日0時に断水はしたものの、本町では配水池に残った水を同日昼頃まで配水し  
ていた。このため給水車13台、給水地点10ヶ所の体制をとったが、総給水量40.1t  
と少なく、配水時間帯に各自で取水していたと考えられる。

(4) 熊野町

断水による被害はマンションの受水槽が破壊した1件のみであり、給水車が出動  
することはなかった。断水地域での給水方法は、軽トラックで20lの給水タンクを6  
つ断水区域へ運搬している。

(5) 下蒲刈町

本町では24日の夜中の完全断水までに各自で取水をしており、復旧するまで節水  
してしのいでいた。呉市からの給水はすべて配水池に補水し、自衛隊からの給水は1  
日のみであった。給水点は固定せず、給水タンクを積んだ車で島中を回った。また、  
給水ポイントにポリタンクを置き、水がなくなれば補給するなど、臨機応変に対応  
していた。

(6) 蒲刈町

断水地区4地区のそれぞれの配水池から給水車に補給していた。給水車は軽トラ  
ックにポリタンクを積んだもので、16ヶ所の公共施設を回った。また防火水槽を洗  
浄し、その容量90tを自衛隊の給水船から給水し、補給用として保管していた。断  
水期間は実質長い地区で半日であった。

(7) 豊浜町

断水地区4地区の内、1ヶ所（港）にポリタンク（自衛隊所有4つ）を置き、後の  
3地区は給水車で回った。0.5tのポリタンク2個を積んだ車1台と0.5tのポリタン  
ク1個を積んだ車3台を給水車として使用した。自衛隊の給水船からは、この給水

車の補給として給水（113t）を受けた。断水期間は25~28日の4日間と芸予地震の断水地域では長引いた町であった。この理由として町内の水道本管が破損したための27日の午後までの本管修理と、その後の漏水確認に時間がかかったことが考えられる。

(8) 豊町

本町では完全断水になる前の時間帯に各自で取水をしていた。給水は断水地区4地区のうち9ヶ所で行った。しかし町内の本管系統の漏水はなく、復旧も早かった。そのため給水に関するたいした混乱もなく、自衛隊の給水船からは個人が直接給水したが、水が余る状況であったため、その水を配水池までポンプアップして貯水していた。

(9) 大崎町

給水車は福山・尾道から1台ずつ借り（0.75t, 1t）、本町が所有している4台の計6台で町内を時間制で回った。そのうち、町役場前は常に給水タンクを設置しておき、いつでも給水可能の状態にしていた。また、病院・老人ホームには随時給水車が行き、給水を行った。自衛隊からの給水は、配水池の水量は節水により1週間程度の量であったことと、給水を配水池までポンプアップする労力を考慮して断った。また、町内の水道本管に破損はなく、呉市からの本管系統の水道管を修理・検査しながらの復旧であった。

(10) 木江町

給水方法に時間配水制（完全断水なし）を選択しており、給水車は所有しておらず、芸予地震でも使用しなかった。これは断水期間から一日の給水量を逆算し、一日の給水する時間帯を決める対策であり、本地震後では一日一時間給水を行った。3ヶ所の各配水池から時間給水を行い、高台の地区まで水が供給されない苦情もあった。自衛隊の給水船からは50tを1回のみ受けており、配水池までポンプアップして貯水した。町内の水道本管に破損はなく、復旧も1日であった。

(11) 東野町

本町では25日に時間給水制を選択し、一日で計5時間給水を行った。この後、県の本管の修理の見通しが不明であり、貯水量も減少してきたことから26日では給水車によって給水を行っている。この給水では時間を決め、給水車6台で9地区内の1~2ヶ所に午前・午後1回ずつ回った。自衛隊からの給水は防火水槽の容量40tのみを受け、補水していた。町内の水道本管の破損はなかったが、太田川水系では最も端の町であることから、復旧が4日と遅れた。

この地震後で各地の応急給水経緯の中で共通した点は、平成3年9月に発生した台風19号の教訓が生きているところである。この台風による塩害で島嶼部は停電・断水状態が長期間続き、当時は給水車等による給水が行われていた。この給水ルートが今回の地震後の

給水活動にも使われており、スムーズに対応できたという自治体が多い。また、民間の人々も各自でポリタンクの常備、風呂に水を貯めるなどという取水を自主的に行っていた。

### 3) 芸予地震時の水利用状況

#### 調査地域の日常時の井戸利用状況

各被災地の水道課で日常時の井戸利用状況の聞き取り調査を行った。その結果、水道法による規定基準を達している井戸水は少なく、自治体独自で管理している井戸は少ない。井戸は民間個人で所有しているものに限られている地域が多数を占めた。その中で三原市中之町では水源に伏流水、つまり地下水を全域に利用している。熊野町では阪神淡路大震災の教訓により、小学校に非常時用井戸を設置している。しかしこの井戸は日常では使用しておらず、水質検査も新設時の1回のみである。また、川尻町では井戸所有者が他の地域より比較的多く、行政側でも災害時に備えて井戸の水質検査を行うよう呼びかけている。豊浜町でも個人井戸の他に共同井戸があり、その井戸周辺の人が利用している。しかしほとんどの自治体は、住民は飲用ではなく、生活用水として井戸水を利用しているとの認識を示した。

#### 調査地域の応急給水計画

主な調査地域での応急給水計画を表 3-2 に示す。この計画には代替水源として井戸を利用する自治体は少なく、基本的に井戸を使用しない方針をとる自治体が多数を占めた。また、どの自治体でも防火水槽、消火栓、配水池等を主な応急給水として考慮しており、ポリタンク・ポリ容器を常備している。

表 3-2 調査地域の主な応急給水計画

呉市	<ul style="list-style-type: none"> <li>・給水車：17台（トラック、軽4輪車等）</li> <li>・給水タンク、ポリ容器、ポリ袋常備</li> <li>・耐震性貯水槽（100t）を公園・校庭の地下に埋設している</li> <li>・非常用給水パック製造装置</li> </ul>
三原市	<ul style="list-style-type: none"> <li>・宮浦浄水場（総合移転予定）に中之町基幹配水池・沼田東基幹配水池から送水する事業計画がある。これが完成すれば、災害時にも三原市全域に16時間の配水が可能となる。</li> </ul>
川尻町	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小学校に防火水槽を新設中</li> <li>・ろ過装置を設置し、消火栓の水を緊急時に飲水として利用する</li> </ul>

## 2. 地震後の水利用状況アンケート調査

### 1) 芸予地震の断水時水利用状況のアンケート

今回の地震による水利用状況の中で、主な利用水源は何か、実際に井戸水がどれほど使われていたのか、また日常的に使用されているのかなどの無記名アンケート調査を行った。記入後、A4 用紙両面を返信封筒に入れ、郵便ポスト投函により回収する方式とした。アンケート対象地域・配布数を表 3-3 に示す。呉市では大規模な断水世帯数の多さ、川尻町では井戸保有率の高さ、大崎町・豊浜町では断水期間が長かったことを考慮して対象地域を選定した。計 1300 通のアンケート票を住宅のポストに配布し、そのうち 487 通の回答があった（回収率は 37.5%）。

アンケートの項目は次のようである。

- ① 利用水源種（給水車、市販水、井戸水（自宅）、井戸水（自宅以外）、その他）
- ② 水利用方法（使用していない、飲用、調理、トイレ、その他）
- ③ 井戸水を使用した人への項目：断水時の井戸水の総使用量
- ④ 井戸水を飲用しなかった人への項目：なぜ飲用しなかったのか  
：水質が不安だったので・他の水源を利用・その他
- ⑤ 断水時の一人一日当たりの水利用量
- ⑥ 自宅に井戸を所有している人への項目
  - ・ 日常的に井戸を使用しているのか。また、その用途を記述
  - ・ 井戸の水質検査は定期的に行っているか

表 3-3 アンケート対象地域・配布数

アンケート対象地域	呉市	川尻町	大崎町	豊浜町
断水期間	1 日間	2 日間	3 日間半	4 日間
断水世帯	2100 世帯	3600 世帯	1800 世帯	1000 世帯
アンケート配布数	300 通	400 通	300 通	300 通

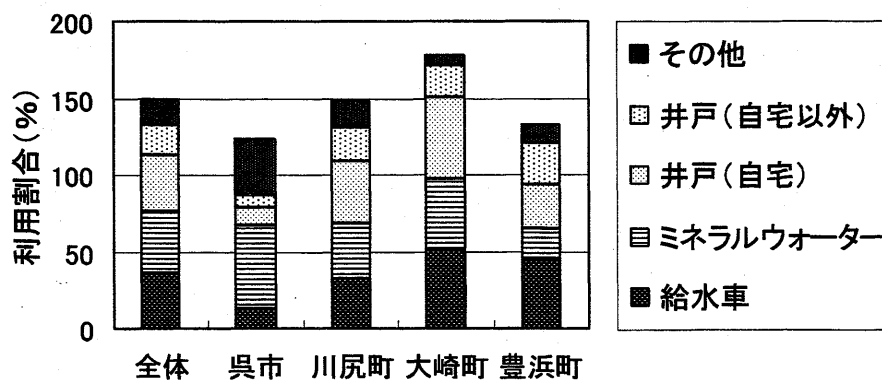


図 3-1 芸予地震 断水時の水源種利用割合

回答されたアンケートを地区別に分け、利用水源を集計した結果が図 3-1 である。利用割合が 100%を超えているのは、アンケート中の回答項目が重複しているためである。これらの結果から、配布地区全体では井戸（自宅・自宅以外）の利用割合は 56%を超えている。地区ごとの差はあるが、断水時の地下水利用が多数あったことがわかる。

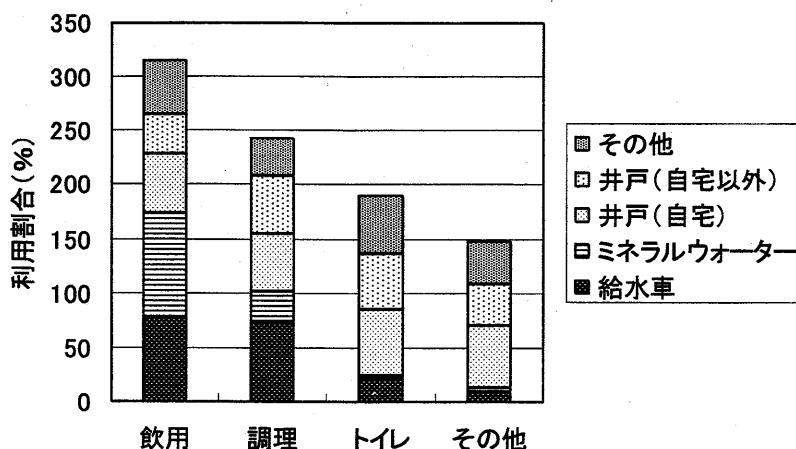


図 3-2 芸予地震 水源種の利用用途割合

図 3-2 より給水車やミネラルウォーターは主に飲用や調理に使用されていることがわかる。一方井戸水は、利用用途に関わらず割合に変動があまり見られない。このことから緊急時に井戸水を利用する場合、用途の多様性があることがわかる。

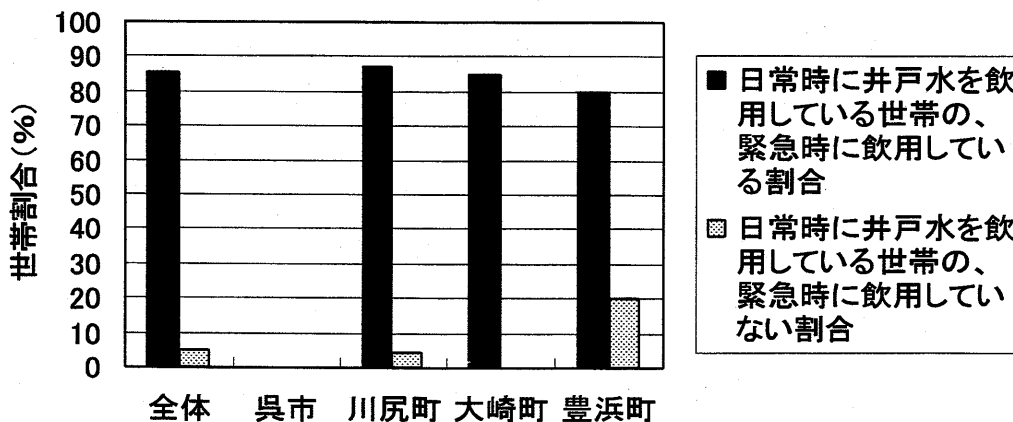


図 3-3 緊急時における自宅の井戸水の飲用状況

図 3-3 では日常時の井戸水の飲用状況ごとに、緊急時における自宅の井戸水の飲用状況を比較している。このグラフから、井戸水を日常飲用している世帯は緊急時も飲用すると答えた世帯が多数を占めた。すなわち、日常時井戸水を利用している世帯の方が緊急時における地下水利用率が高く、また緊急時の代替水源として、飲用だけでなく生活用水とし

でも、井戸水が有効利用できる可能性があると考えられる。

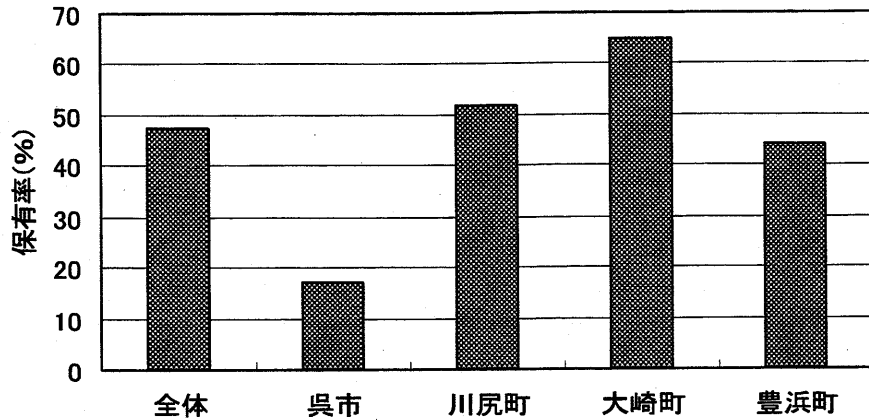


図 3-4 自宅の井戸保有率

図 3-4 には各市町村ごとの自宅の井戸保有率を比較している。歴史的に水不足に悩んできた瀬戸内地域の島嶼部や沿岸の傾斜地では井戸の保有率が高いが、その結果が大崎町、川尻町、豊浜町に現れており、約半数の世帯に井戸がある。新しく市街地が拡大して住宅の立地が進んだ呉市では井戸の所有率は低い。

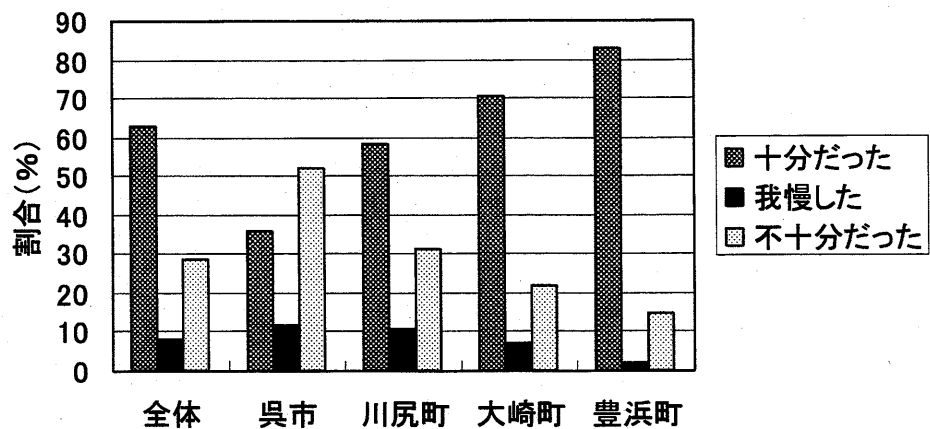


図 3-5 給水量に関する感想

図 3-5 では、呉市では給水量が不十分だったという割合が十分だったという割合を超えているが、豊浜町では十分だったという割合が不十分だったという回答の約 6 倍近くとなっており満足度が高い。この要因として断水人口、情報伝達の遅れなど様々なことが考えられるが、島嶼部の方が都市部より給水された水が余分に余った地域が多く、図 3-4 に示すように井戸保有率も高かったことから、給水車等を利用することなく、緊急時の水を自らで調達した世帯が多い。つまり、井戸水を利用しているか、していないかの違いがこの



結果に關与していると考えられる。

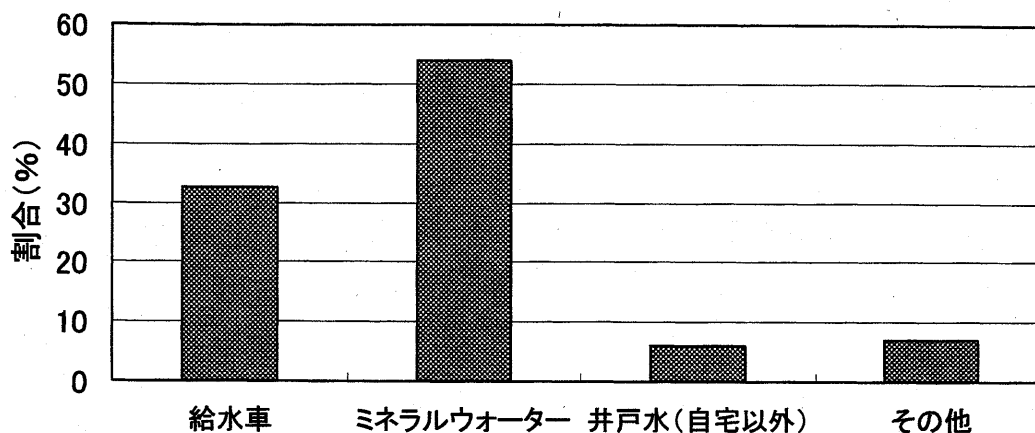


図 3-6 緊急時井戸水を使用していない井戸保有者が飲用した別水源の内訳

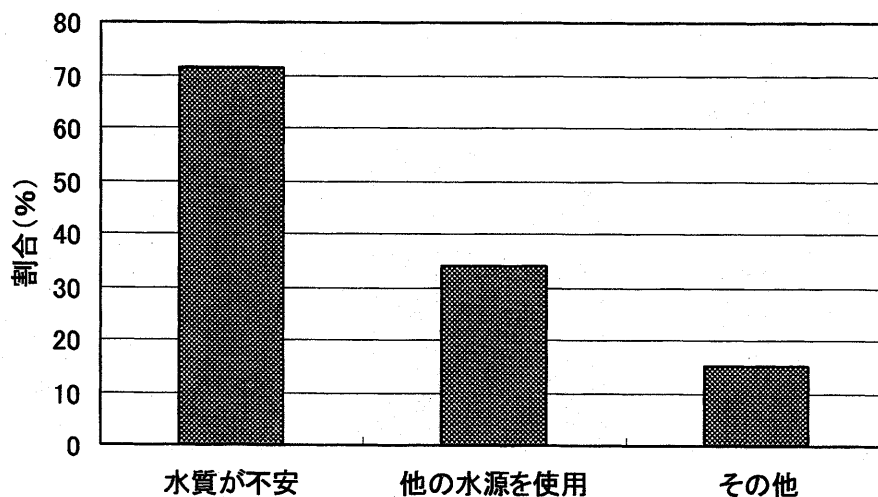


図 3-7 井戸の保有者が緊急時に井戸水を飲用しなかった理由

図 3-6 では井戸保有者が緊急時に飲用した水の水源を示している。この結果から、飲用水源にミネラルウォーターが多く使用されていることがわかる。

また図 3-7 では井戸保有者が緊急時に井戸水を飲用しなかった理由を示す。この結果から、水質が不安という項目の回答が圧倒的に多い。このことから緊急時に井戸水を利用する場合の最も関心の高い項目の一つとして、地下水の水質の把握があげられる。

### 3. 阪神淡路大震災の断水時水利用状況のアンケート結果との比較

芸予地震では、地震規模が M6.8 と大規模だったにもかかわらず、上水道に関しては断水期間が最長 4 日と小規模な被害にとどまった。小規模な断水のアンケート結果から地下水利用の有効性を分析しても信憑性が十分ではないと考えられる。そこで、1995 年 1 月に起きた阪神淡路大震災における断水時の水利用状況のアンケート結果<sup>2)3)</sup>と比較することで、断水の規模で地下水利用状況に違いがあるかを調べた。

表 3-4 断水規模の比較

	芸予地震	阪神淡路大震災
断水期間 (最長)	4 日	10 週間
断水世帯	3 万 8 千世帯	123 万世帯

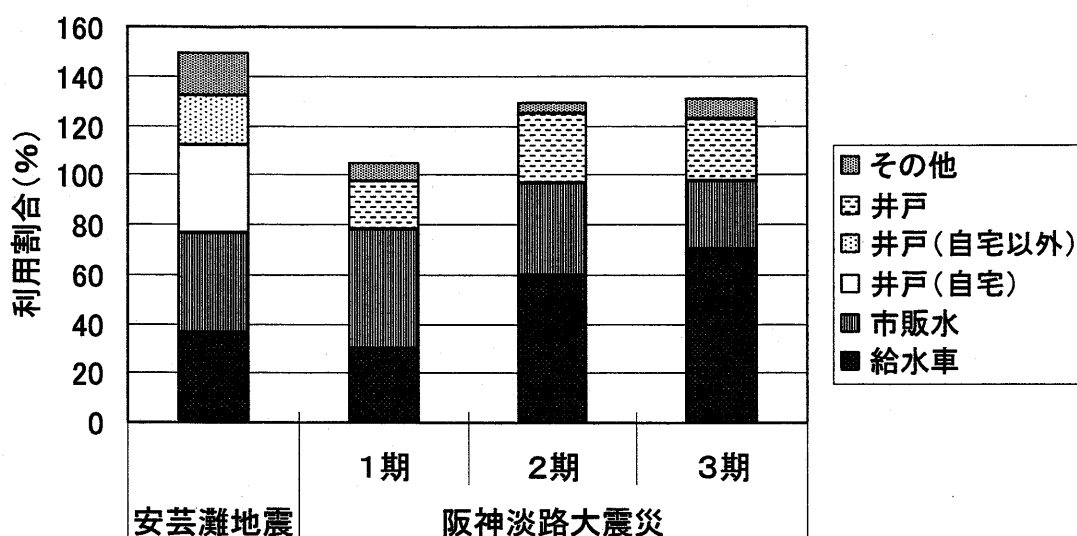


図 3-8 芸予地震と阪神淡路大震災の水利用状況の結果比較

芸予地震では井戸を自宅・自宅以外と分けてアンケートを行ったが、阪神淡路大震災では井戸という項目で一括されている。また、100%を超えているのは、両方とも重複して回答されているからである。

阪神淡路大震災の調査では、①震災数日間の停電等で混乱している時期 (第 1 期)、②その後の約 1 週間以内で電気が復旧し給水車等による救援が整いつつあるまでの時期 (第 2 期)、③第 2 期以降、水道が復旧するまでの期間で、救援活動が定着した時期 (第 3 期) の、3 期間に分けて質問されている。

芸予地震は阪神淡路大震災の第 2 期に相当する状況だと考えられる。表 3-4 では両者の

断水規模を比較しているが、断水期間では約 18 倍、断水人口では 32 倍の差がある。また図 3-8 の阪神淡路大震災の第 2 期を見ると、井戸の利用率は 20%を超えている。

阪神淡路大震災による被災地は都市部型地震であったため、上水道普及率は 100%に近い数値であった。よって 20%の人が井戸を利用したということは、断水時非常に地下水の需要が大きかったことを示す。

また、井戸の利用率を第 1 期～第 3 期までみると、ほぼ 20～30%であり、他の利用水源種が期ごとに利用率が変化しているのとは対照的である。このことから、地下水が緊急時に対し、重要であることがわかる。また、芸予地震でも利用率が高く、断水規模に関わらず地下水が緊急時に多く利用されているといえる。

### 第 3 章 参考文献

- 1) 大阪管区気象台：「平成 13 年(2001 年)芸予地震」大阪管区気象台地震解説資料 別冊、平成 13 年 3 月
- 2) (社)日本水環境学会：「阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策」報告書、1997. 6.
- 3) 山田啓一：「都市と水—災害時の用水確保を考える」、都市問題、第 87 巻第 7 号、1996.

## 第4章 地震時の地下水質シミュレーション

緊急時に地下水を利用する場合、最も重要な項目として地下水質の把握があげられる。そこで本章では災害発生後に井戸水（地下水）を利用する場合の各井戸の水質を把握する方法として、下水管、浄化槽などの汚染源が地震時に破壊されたとして、汚染物質の移流分散のシミュレーションを行う方法を確立する。

### 1. 汚染物質拡散の移流分散方程式によるシミュレーション

#### 1) 地下水の種類

地下水は浅層地下水（不圧地下水）、深層地下水（被圧地下水）の二つに分けられる。

浅層地下水は自由地下水面を有する帯水層中の地下水を指し、手動式ポンプでも汲み上げ可能で、汲み上げてもすぐ補給される性質を有する。その反面汲み上げ量は深層地下水に比べて少なく、気候変動の影響を受けやすく、水源として量的に不安定である。また、深層地下水は加圧層の下に続く帯水層中の地下水を指し、汲み上げ量は浅層地下水に比べ多く、水源としても量的に安定している性質を持つ。その反面電気ポンプ等の施設費用が高く、さらにこのポンプがなければ使用不可能である。そして汲み上げられた後補給されるまでに時間を要する。

本章の汚染拡散シミュレーションでは想定される汚染源からの汚染被害を受けやすい浅層地下水を対象として行う。深層地下水については、地表面下と帯水層の間に不透水層を有していることから、災害後から短期間で汚染が到達するとは考えにくく、また鉛直深くにあるので到達するまで汚染濃度が減少する可能性がある。その理由から深層地下水の汚染可能性については考慮しないものとする。

#### 2) 移流分散方程式<sup>1) 2)</sup>

地中の地下水物質輸送モデルは、大きく流動方程式と移流分散方程式から構成される。

流動方程式を解くことにより地下水位分布を求め、ダルシーの法則を適用して地下水流速の分布を算出する。この流速分布を移流分散方程式及び浸透方程式に入力して解くことで、濃度分布が得られる。

現象の実態をより正確に評価するには、モデリングの信頼性を高める必要があり、そのためにはより多くの現場の透水係数分布と濃度分布の測定データが不可欠である。しかし本研究では汚染源や井戸の位置をモデルケースによって想定し、破壊パターンも意図的に決定するという初期条件の曖昧性から、単純なモデルでパラメータを評価し、汚染の拡散を予測することにした。以下に使用した2次元移流方程式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad - (4.1)$$

$C$  : 汚染物質濃度、 $u, v$  :  $x, y$  方向の流速、 $D_x, D_y$  :  $x, y$  方向の分散係数  
 $t$  : 時間、 $x, y$  : 土壌内距離

### 3) 移流分散方程式の離散化<sup>3)4)</sup>

本研究のシミュレーションは、微分演算子を差分商で置き換える差分法で行った。

移流分散方程式を差分法で離散化するとき、以下のような方法がある。まず簡単のため、(4.1)の式を  $x$  方向のみで考える。このとき、(4.1) 式は以下のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad - (4.2)$$

ここで基本的な差分法について述べる。

Taylor の定理より(4.2)の右辺を展開すると、

$$C_{i+1,n} = C_{i,n} + \Delta x \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,n} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)_{i,n} + \dots \quad - ①$$

$$C_{i-1,n} = C_{i,n} - \Delta x \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,n} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)_{i,n} + \dots \quad - ②$$

① - ②から近似的に、

$$\text{移流項} \quad \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,n} = \frac{C_{i+1,n} - C_{i-1,n}}{2\Delta x}$$

①+②から同様に、

$$\text{拡散項} \quad \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)_{i,n} = \frac{C_{i+1,n} - 2C_{i,n} + C_{i-1,n}}{(\Delta x)^2}$$

同じ方法で左辺を展開すると、

$$\text{非定常項} \quad \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right)_{i,n} = \frac{C_{i,n+1} - C_{i,n-1}}{2\Delta t}$$

これらの差分法を中心差分という。

また、この差分法のほかにも、

$$\left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,n} = \frac{C_{i+1,n} - C_{i,n}}{\Delta x} \quad - \text{前進差分}$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{i,n} = \frac{C_{i,n} - C_{i-1,n}}{\Delta x}$$

— 後退差分

などがあげられる。

さらにそれぞれの項に適した方法で離散化していく。

(1) 非定常項

Euler 的時間進行法で離散化すると次式のように時間に対して 1 次元に離散化される。

$$\frac{C^{n+1} - C^n}{\Delta t} = f(C^n)$$

これより精度の良い解法は他にもあるが、計算が複雑になるため、本研究ではこの方法を使用する。

(2) 分散項

この項は一般的に中心差分で近似される。中心差分は非定常項、移流項では離散化は中立だが必ずしも安定であるとはいえない。しかし一般に微分の階数が偶数次元のを離散化するには中心差分が適切である。

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \rightarrow D \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{(\Delta x)^2}$$

(3) 移流項

流れを安定に解析するには移流項に現れる 1 階微分を高精度に計算しないと解は発散する。従って離散化で問題となるのは移流項の処理である。そこで移流項を中心差分で微分すると離散化の安定性は中立だが、数値拡散項が発生する。そして移流項及び拡散項を共に中心差分近似すると拡散項の数値誤差は小さいが、移流項の数値誤差が支配的となり、数値解は不安定になる。

よって移流項の離散化は風上差分で行う。風上差分とは運動方程式の対流項を上流方向から差分化する方法であり、次数精度があがっていくごとに精度も良くなる。この方法で移流項を離散化すれば比較的安定となる。なぜなら風上差分は、中心差分で発生した数値拡散項も含めて表された方法であるからである。しかし 1 次精度の風上差分ではこの数値拡散項が大きくオーバーダンピングしてしまい、離散化には高精度風上差分スキームが必要となる。そこで本研究では 3 次精度の風上差分である UTOPIA 法を適用する。

$$\text{一次精度の風上差分} \quad \left(u \frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \begin{cases} u_i \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta x} (u_i \geq 0) \\ u_i \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta x} (u_i \leq 0) \end{cases}$$

UTOPIA 法

$$\left(u \frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = u_i \frac{-C_{i+2} + 8(C_{i+1} - C_{i-1}) + C_{i-2}}{12\Delta x} + |u_i| \frac{C_{i+2} - 4C_{i+1} + 6C_i - 4C_{i-1} + C_{i-2}}{12\Delta x}$$

それぞれの離散化方法で 2 次元移流分散方程式を離散化する。また本研究では地下水の流向と平行に x 軸を、この流向に垂直に下水管が走っていると想定してこれを y 軸とすると、y 方向の流速  $v=0$  となり、離散化すると式(4.3)のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\Delta t} = & - \left\{ u_i \frac{-C_{i+2}^n + 8(C_{i+1}^n - C_{i-1}^n) + C_{i-2}^n}{12\Delta x} + |u_i| \frac{C_{i+2}^n - 4C_{i+1}^n + 6C_i^n - 4C_{i-1}^n + C_{i-2}^n}{12\Delta x} \right\} \\ & + D_x \frac{C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} + D_y \frac{C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n}{(\Delta y)^2} \end{aligned} \quad (4.3)$$

これを展開し、 $n+1$  時間の汚染濃度分布を求めて、シミュレーションを行う。

$$\begin{aligned} C_i^{n+1} = & C_{i,j}^n - \frac{c}{12} \left\{ C_{i+2,j}^n + 8(C_{i+1,j}^n - C_{i-1,j}^n) - C_{i-2,j}^n + C_{i+2,j}^n - 4C_{i+1,j}^n + 6C_{i,j}^n - 4C_{i-1,j}^n + C_{i-2,j}^n \right\} \\ & + d_x \left\{ C_{i+1,j}^n - 2C_{i,j}^n + C_{i-1,j}^n \right\} + d_y \left\{ C_{i,j+1}^n - 2C_{i,j}^n + C_{i,j-1}^n \right\} \\ \left( c = \frac{u\Delta t}{\Delta x}, d_x = \frac{D_x\Delta t}{(\Delta x)^2}, d_y = \frac{D_y\Delta t}{(\Delta y)^2} \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

式(4.4)の安定条件として

$$c^2 \leq 2d \leq 1$$

また、これより安定な結果を出す条件

$$c \leq 2d \leq 1$$

があげられる。この条件を満たしていないと解は発散し、収束しない。

#### 4) シミュレーションの精度

式(4.4)の結果の精度を 1 次元移流分散方程式の解析解を用いて確かめた。(式(4.5)) そのグラフを図 4-1 に示す。このとき  $\Delta x=1(\text{m})$ ,  $\Delta y=1(\text{m})$ ,  $\Delta t=1(\text{hr})$  とする。

$$C_i^{n+1} = \frac{C_i^n}{2} \left[ \exp\left(\frac{(1-A)un}{2D}\right) \operatorname{erfc}\frac{n-Aut}{2\sqrt{ut}} + \exp\left(\frac{(1+A)un}{2D}\right) \operatorname{erfc}\frac{n+Aut}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (4.5)$$

境界条件 :  $C(0,t) = C_i^n = \text{const}$

:  $C(x,0) = 0$

$A = \sqrt{1 + (4Dk_1/u^2)}$ ,  $k_1$  = 一次反応係数 (ここでは  $k_1 = 0$  とし、 $A = 1$  となる)

$u$  : 流速(m/hr)  $n$  : 距離(m)  $D$  : 分散係数  $t$  : 時間(hr)

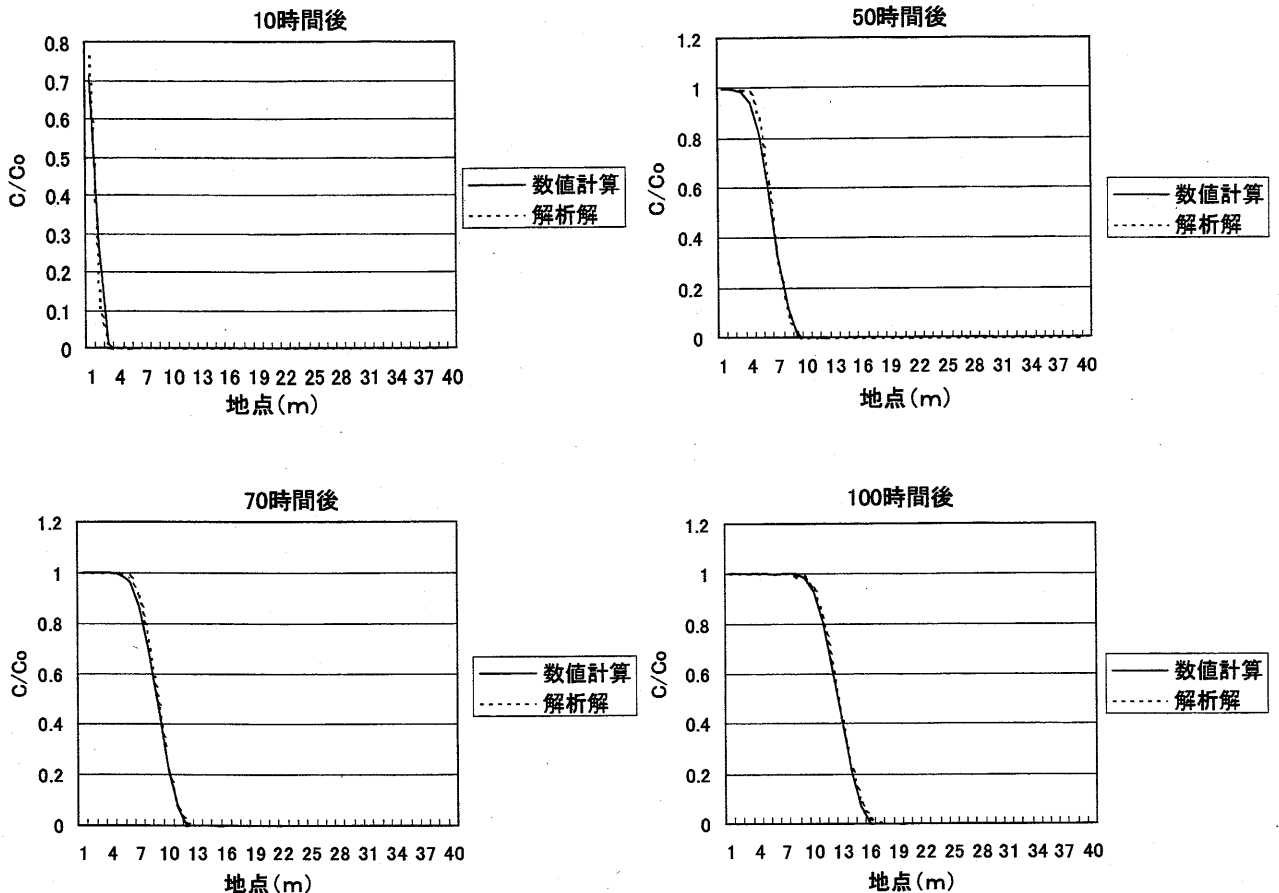


図 4-1 1次元移流分散方程式の数値計算と解析解の比較

この結果と、1次元移流分散方程式(4.2)の解析解を照らし合わせると、ほぼ一致していることから、シミュレーションの結果の精度としては十分利用できると思われる。

## 2. 汚染源・井戸の位置の想定

第2章で述べたように、阪神淡路大震災では、処理場や事業所からの沈殿池・薬品貯蔵庫の破損に伴う有害物質の流出による地下水汚染の可能性が指摘されている。本節ではこれらのような汚染源を想定し、災害後地下水中に汚染物質が流出した場合の地下水汚染状況を、条件を変えてシミュレーションを行い、比較・考察する。



### 1) 想定する汚染源

本節では汚染源として、下水管を線源とし、処理場・浄化槽を点源と想定し、シミュレーションを行う。なお、ガソリンスタンドに存在する汚染物質であるガソリンは難溶性であり、濃度分布の計算が不可能なため、本節では想定される汚染源としては扱わない。

### 2) シミュレーションを行う上での仮定

以下に今回シミュレーションを行う上での仮定条件を示す。

- ・ 100(m)×100(m)の範囲内で行う
- ・ 範囲内の流速(u)、分散係数(D)は前もって測定済みであり、既知である
- ・ 地下水の揚水によって地下水流速は変化しない
- ・ 下水管は地下水流向に垂直である
- ・ 2次元流れであり、地盤は均質かつ飽和である
- ・ 指標となる汚染物質は大腸菌とする
- ・ 汚染源の破壊場所、井戸の位置はモデルとしてランダムに配置する
- ・ 破壊場所からの汚染物質流入は濃度で考え、大腸菌濃度 100(万 MPN/1ml)とする
- ・ 破壊場所からの汚染物質濃度はどれも均一とし、2時間連続流入とする
- ・ 点汚染源についても汚染物質濃度は均一とし、2時間連続流入とする
- ・ 流入する汚染水量についての水収支は考慮しない
- ・ 地下水は浅層地下水とする

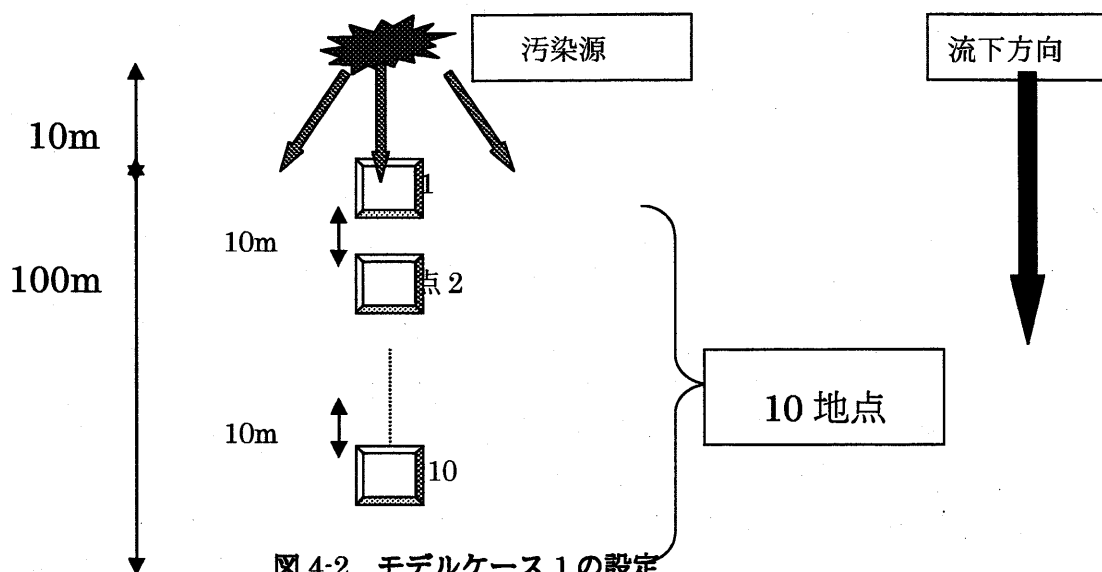
またこのシミュレーションの指標の汚染物質を大腸菌にする理由について、この菌は下水中に平均 1ml 中 100(万 MPN)という高濃度で存在し、災害時に地下水中に下水が流出するとかかなりの汚染が広がる恐れがある。緊急時に地下水を生活用水として利用する場合、水浴用水の基準で大腸菌濃度を考えると 100ml 中 1000MPN であり、下水中の濃度の 10 万分の 1 である。この点からみても、災害時の地下水質の汚染状況を把握する指標として適していると考えられる。

また、下水中に含まれている他の物質については、塩化物イオンなどのように基準としてはそのままの濃度で問題ないものもあり、汚染の拡がりを確認できる指標としての使用は難しいと思われる。

### 3. モデルケース 1

複数の汚染源を想定してシミュレーションを行う前に、**図 4-2** のような汚染源とそこから 10m ずつ離れた 10 地点に井戸がある単純なケースを想定する。各井戸の汚染濃度の時間経過を、条件を変えながら比較・検討する。汚染源と地点 1 は 10m の間隔があり、地点ごとの間隔も 10m である。また条件とは流速、分散係数、その比(D/u: dispersivity 単位

(m))のことを指し、これらを変えることによって、汚染物質の移流分散にどの程度影響してくるのかを検討する。



井戸の鉛直線上に汚染源を置くことによって、緊急時に各井戸が汚染物質によって汚染された場合、汚染物質が通り過ぎる最も長い期間が計算によって求められる。また、汚染源が鉛直線上からずれた場合も想定し、どの程度の範囲までが各井戸に汚染物質が到達可能距離であるか検討する。

### 1) 分散係数の影響に関する考察

流速と分散係数の関係は、以下の式<sup>18)</sup>で表される。

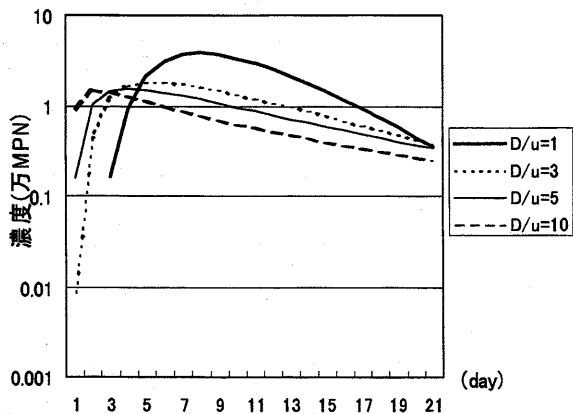
$$D = \eta * 0.66 * Re^{1.2} \quad (Re = u * d / \nu \quad \eta = \text{動粘性係数})$$

$u$  = 流速、 $D$  = 分散係数であり、この式から互いに独立ではなく、関連があることがわかる。ここでは流速 1(m/day)と固定し、分散係数を変化させることでこの比  $D/u$  を変えていき、図 4-2 の配置、そして汚染物質濃度 100(万 MPN)の条件でモデル計算を行った。このとき、 $D/u=1,3,5,10$  で比較を行う。なお、カラム実験での  $D/u$  の値は 0.1 程度であることがわかっている。しかし、それはカラム内に土を敷き詰め行う実験であり、実際の地盤ではカラム内より不均一で大きい間隙が多いと考えられる。このことから災害発生時、起こり得る極限の地盤状況を  $D/u=10$  と想定し、その値までの様々な比を取って計算を行う。その結果を図 4-3 のグラフに示す。生活用水として利用する場合、その基準は地下水における大腸菌の濃度の 10 万分の 1 である。そこで下水中の大腸菌濃度が 100(万 MPN)流出したとき、0.001 (万 MPN) が基準となる。つまり、井戸水の濃度(万 MPN)が 0.001 以上になるまで、あるいは 0.001 以下になったときに地下水が利用可能となる。

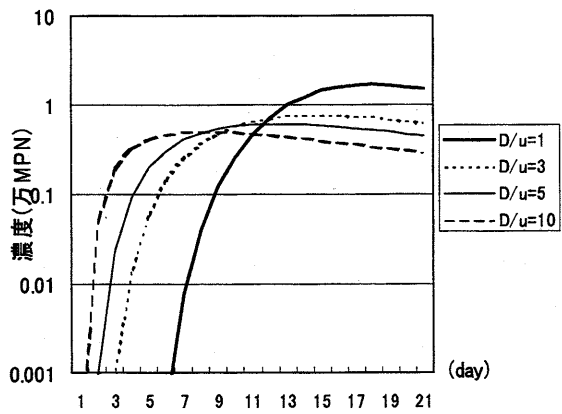
図 4-3 の対数グラフ上の値を表す線で、途中から途切れて値がでてくるものがあるが、

これはその日数まで汚染濃度が0であることを示している。

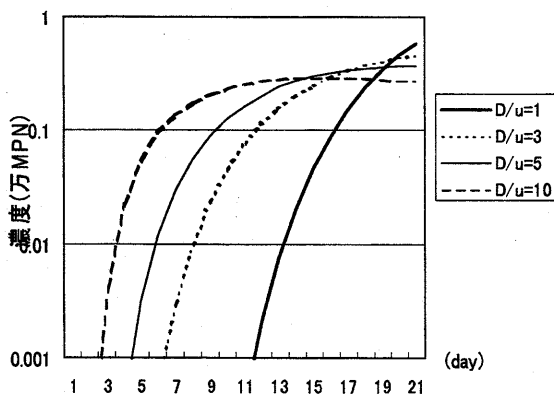
この比較から考察されることは、地点別にみると、地点1（汚染源から10m）の場合にはどのD/uでも汚染はほぼ初期に到達し、差はみられないが、地点3（汚染源から30m）では、D/u=1では汚染到達時期は12日に対し、D/u=10では汚染到達時期は2日と、10日間の差がでてきている。地点7（汚染源から70m）では、D/u=1では21日間の間にはまったく汚染が到達しないことに対し、D/u=10では汚染到達時期は14日である。つまりこの地点ではu=1及びD/u=1~4程度の地盤ならば汚染の心配はしなくてもよいということがわかる。このことから実際緊急時に井戸水を使用する場合には、同じ流速であっても分散係数の値を考慮に入れなければ汚染が到達するまでの使用可能期間にかなりの違いが出るのがわかる。



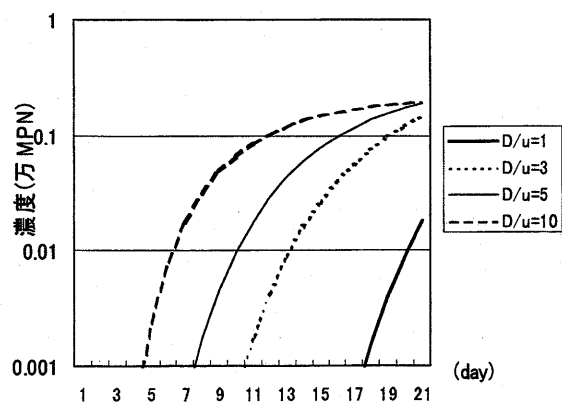
(1) 地点1



(2) 地点2

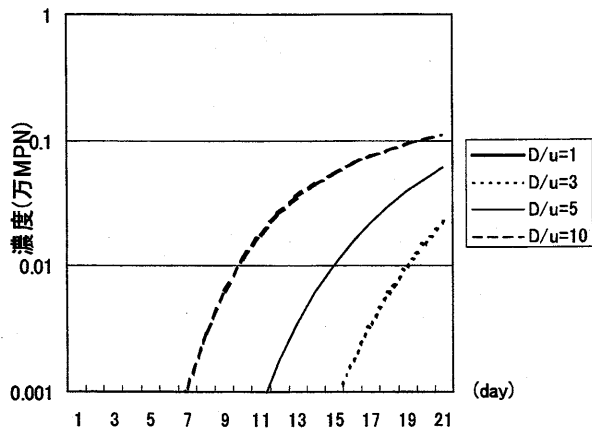


(3) 地点3

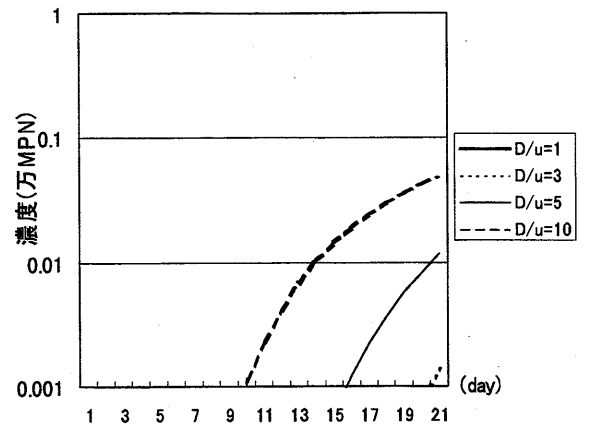


(4) 地点4

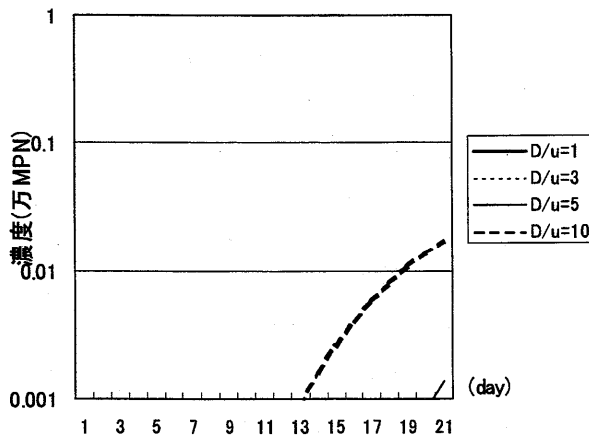
図4-3 流速1(m/day)・D/uを変化させたときの汚染濃度の経時変化



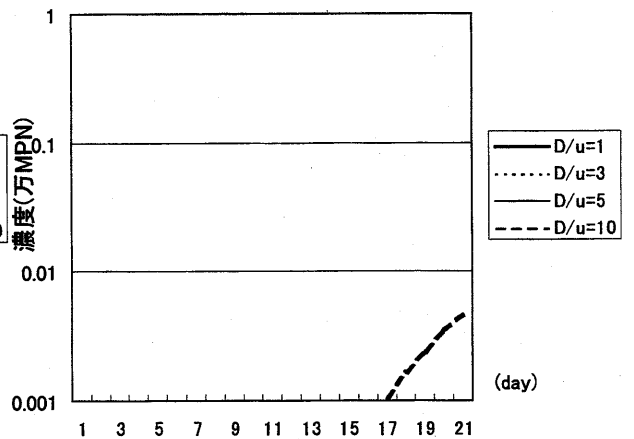
(5) 地点5



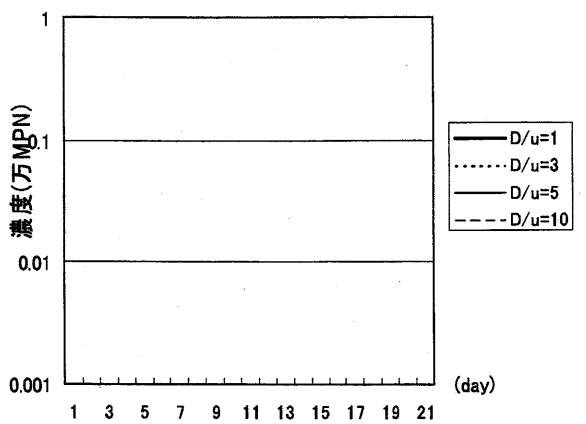
(6) 地点6



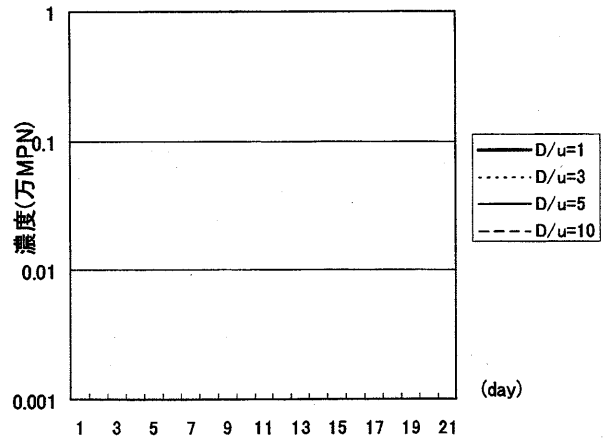
(7) 地点7



(8) 地点8



(9) 地点9



(10) 地点10

図4-3 流速1(m/day)・D/uを変化させたときの汚染濃度の経時変化(5-10)

## 2) 流速の影響に関する考察

ここでは流速と分散係数の比  $D/u$  を一定とし、流速、分散係数を変えていき、比較・考察する。流速は東広島市内で観測された範囲で  $1\sim 7(\text{m/day})$  を考え、計算する。また、 $D/u=1$  と固定することから、分散係数もその条件に合わせた値として仮定する。これらの条件から計算した結果を図 4-4 に示す。境界条件やグラフの見方は図 4-3 と同様である。

この比較から考察されることは、地点 1 (汚染源から 10m) では汚染が到達するまでの期間はほぼ初期にあり、その違いはあまりないが、地点 3 (汚染源から 30m) では  $u=1$  のときの汚染到達時期は 12 日に対し、 $u=7$  のときの汚染到達時期は 2 日と 10 日の差がでていいる。地点 7 (汚染源から 70m) では  $u=1$  のとき汚染到達時期は 20 日、 $u=7$  のときの汚染到達時期は 6 日と 2 週間の差が出ている。

これらのシミュレーションから、対象地域の普段からの流速・分散係数の調査・測定が、この手法で緊急時に水質を評価する場合、最も重要なパラメータとなることがわかる。

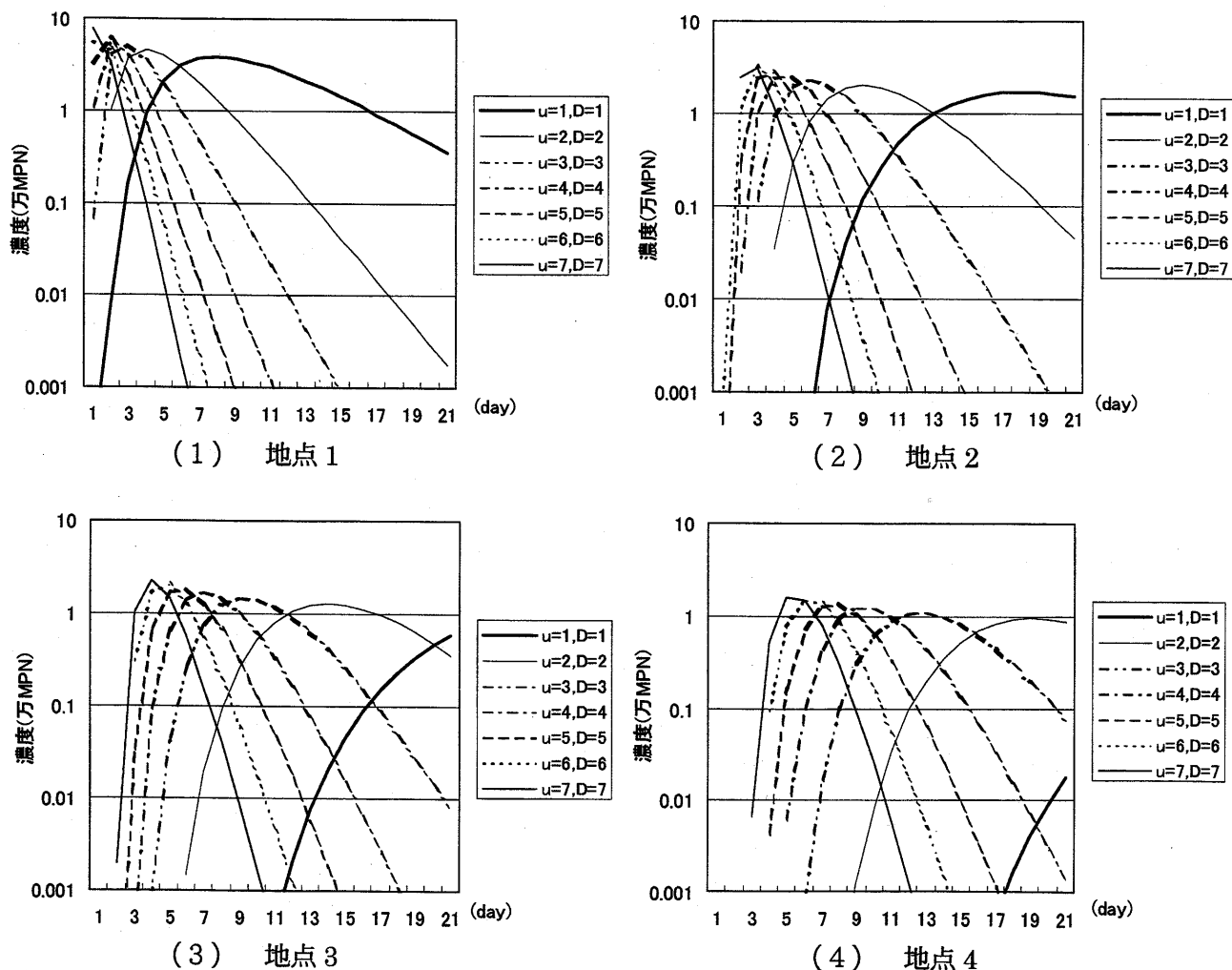
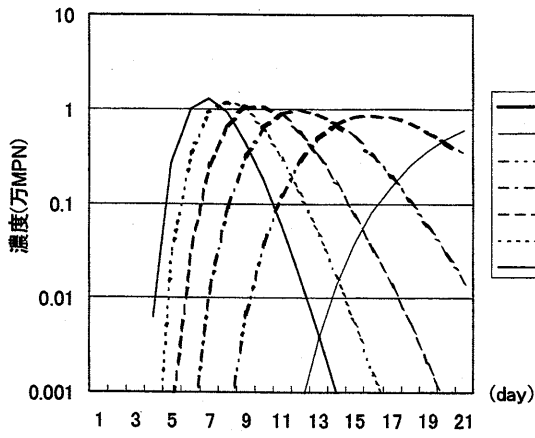
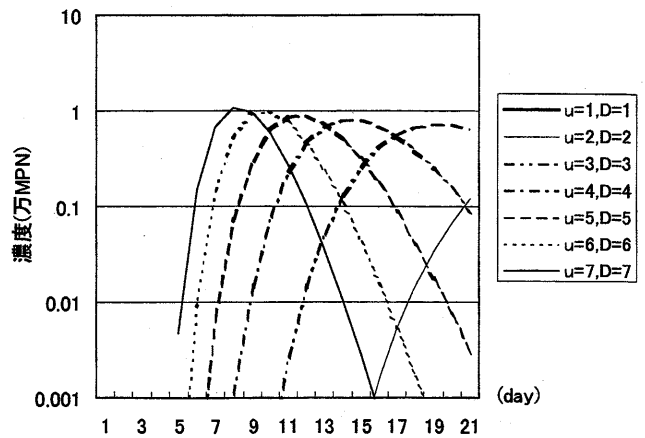


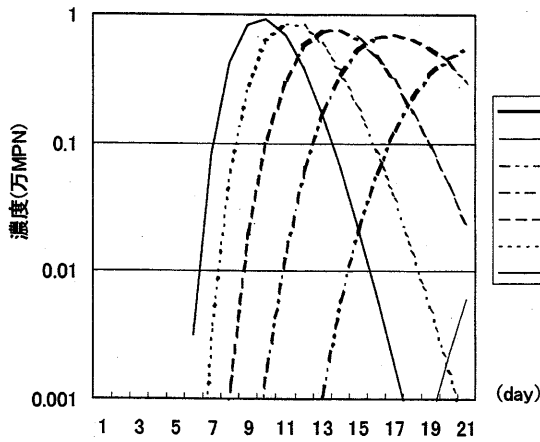
図 4-4  $D/u=1$  と固定・流速を変化させたときの汚染濃度の経時変化 (1-4)



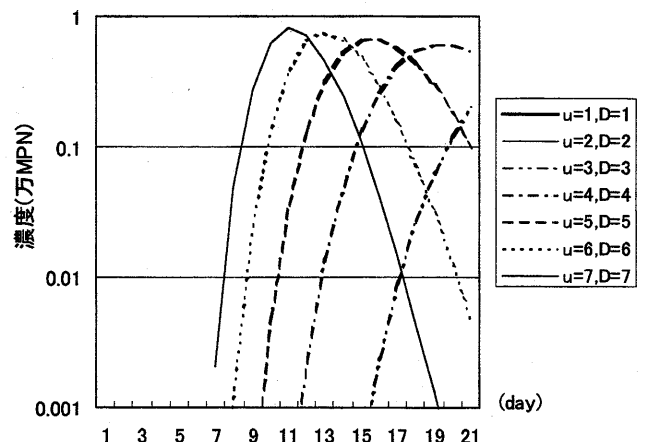
(5) 地点 5



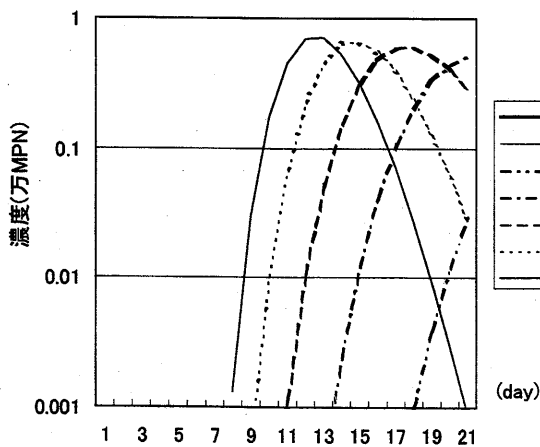
(6) 地点 6



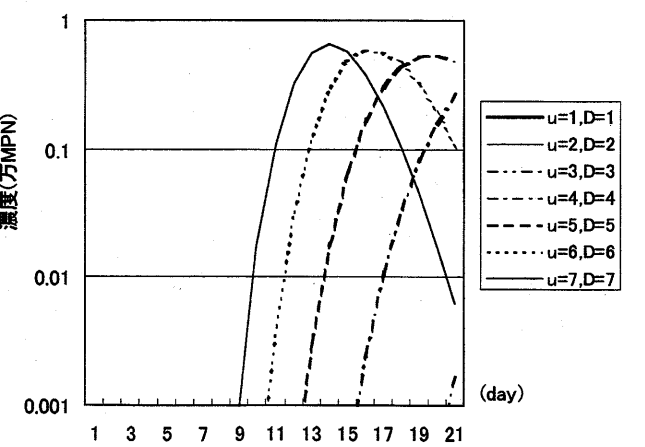
(7) 地点 7



(8) 地点 8



(9) 地点 9



(10) 地点 10

図 4-4 D/u=1 と固定・流速を変化させたときの汚染濃度の経時変化 (5-10)

### 3) 各地点に影響を及ぼす汚染源の位置範囲

モデルケース 1 では各地点の鉛直線上に汚染があると仮定しているが、この汚染源を水平線上に移動させた場合、汚染物質が到達する範囲を予測する (図 4-5)。このとき各井戸に基準以上の汚染を及ぼすような汚染源の範囲を表 4-1 に示す。ここでは 21 日間の間に短期間でも汚染物質濃度の値が基準値より上になった場合は影響があったとみなす。また流速、分散係数を変えて、結果を比較・考察する。比較する指標は、図 4-5 に示した  $x_m$  (汚染源の位置範囲) である。

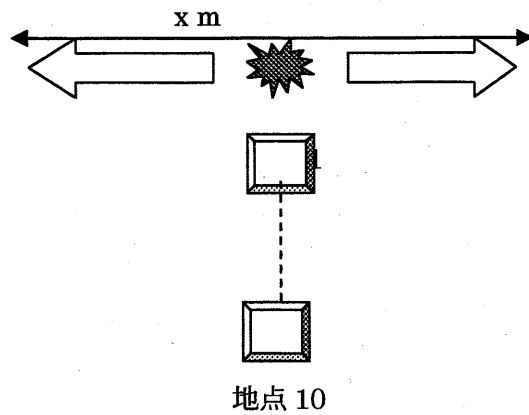


図 4-5 汚染物質到達範囲の予測

(1) 流速  $u=1(\text{m/day})$  に固定し、 $D/u(\text{m})$  を変化させた場合

表 4-1 汚染源の位置範囲(m)

	$u=1, D=1$	$u=1, D=3$	$u=1, D=5$	$u=1, D=10$
地点 1	15	25	31	43
地点 2	17	25	33	43
地点 3	15	25	31	43
地点 4	9	23	29	43
地点 5	0	17	25	39
地点 6	0	0	19	35
地点 7	0	0	3	31
地点 8	0	0	0	21
地点 9	0	0	0	0
地点 10	0	0	0	0

表 4-1 から、 $D/u(\text{m})$  が大きくなっていくほど汚染源からより離れた地点にまで影響が及ぶことがわかる。また汚染源により近い地点が広い影響範囲を持ち、同じ地点でも  $D/u(\text{m})$  が大きいほど影響範囲は広い。

(2)  $D/u(m)=1$  に固定し、流速  $u(m/day)$  を変化させた場合

表 4-2 汚染源の位置範囲(m)

	$u=1, D=1$	$u=2, D=2$	$u=3, D=3$	$u=4, D=4$	$u=5, D=5$	$u=6, D=6$	$u=7, D=7$
地点 1	15	15	13	15	15	15	17
地点 2	17	19	17	19	19	19	19
地点 3	15	21	19	21	21	21	21
地点 4	9	23	21	23	23	23	25
地点 5	0	21	25	25	25	25	27
地点 6	0	17	27	27	27	27	29
地点 7	0	9	25	29	29	29	31
地点 8	0	0	23	29	31	31	33
地点 9	0	0	17	29	31	31	35
地点 10	0	0	5	27	33	33	35

表 4-2 より、各地点ごとに流速で比較してみると、位置範囲の差は流速によってあまり変化はみられない。しかし流速ごとに地点別で比較すると、汚染源の位置範囲は広がっていき、その地点は汚染源から離れていくことがわかる。このことから実際に井戸のある地点が汚染源から離れた位置にあっても、その汚染源の種類が例えば下水管など、どこが破壊されているかわからない汚染源の場合、必ずしも安全であるとはいえない。

#### 4. モデルケース 2

##### 1) モデルケース 2 の設定

モデルケース 1 では一つの汚染源から鉛直線上の地点を対象としてシミュレーションを行ったが、ここでは複数の汚染源（下水管破壊による線汚染源・排水処理施設などによる点汚染源）を想定してシミュレーションを行う。このとき、下水管（線汚染源）破壊は継ぎ手など壊れる可能性が高い場所を 3 ケ所、点汚染源を 2 ケ所想定する。また、仮定井戸の位置もランダムに配置し、汚染物質濃度の経時変化を比較・考察する。このとき汚染源は全て破壊され、汚染物質が流出するという最悪の状況を想定して行う。また仮定条件は冒頭に述べたものと同様とする。なお、モデルケース 2 の汚染源と井戸の位置関係を図 4-6 に示す。

##### 2) 分散係数の影響に関する考察

モデルケース 1 と同様、 $D/u(m)$  を変えてシミュレーションを行う。その結果を図 4-7 に示す。この結果から考察されることは、例えば地点 a の場合、 $D/u$  が小さいときは 21 日間



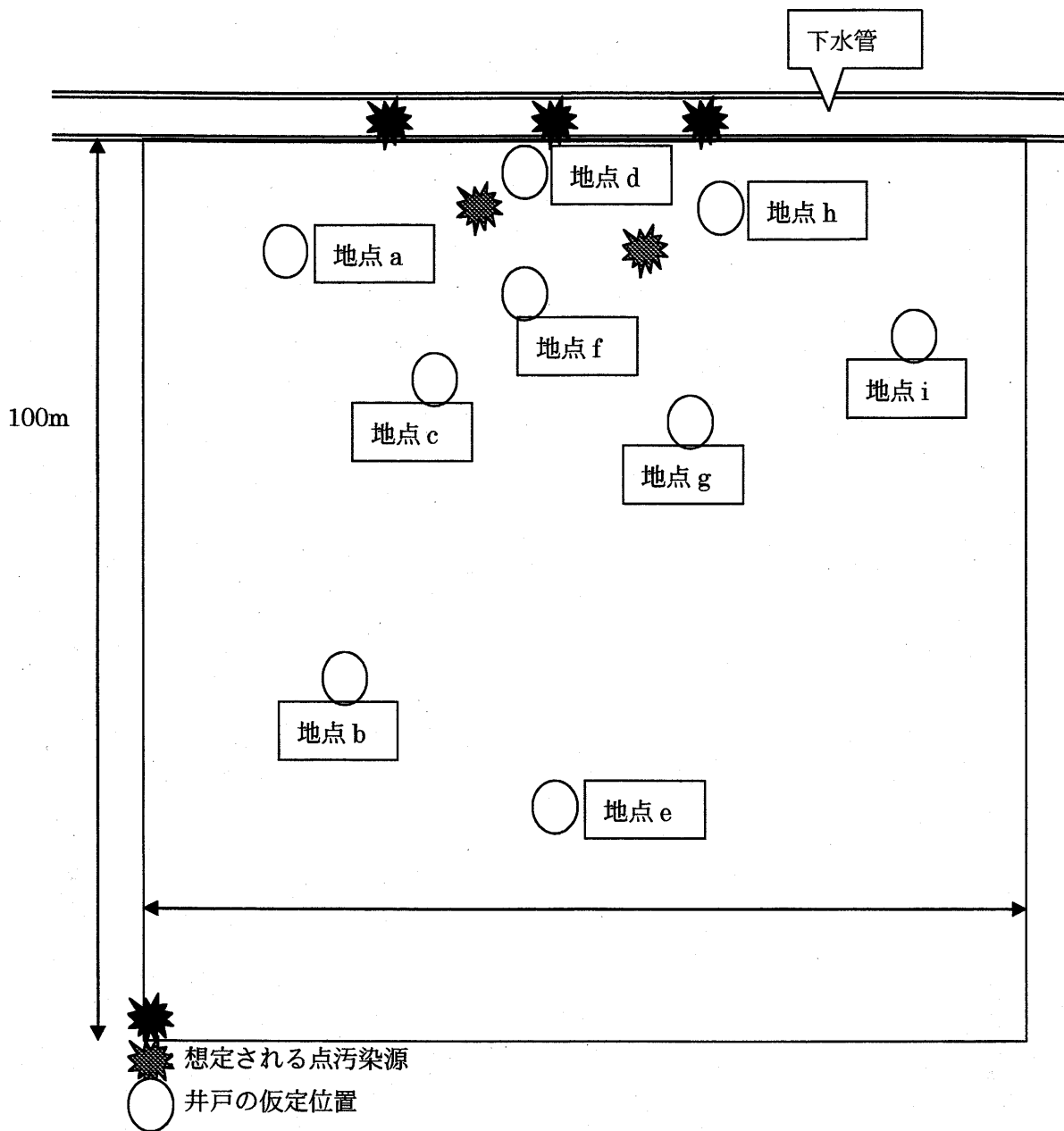
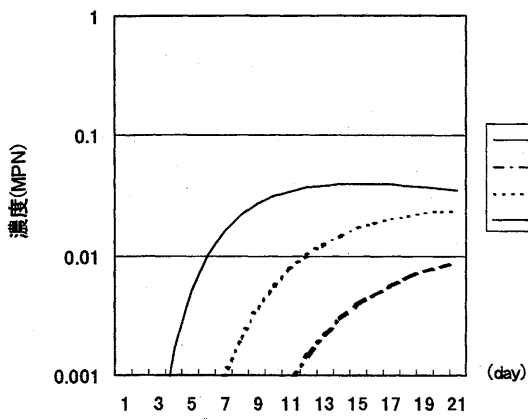
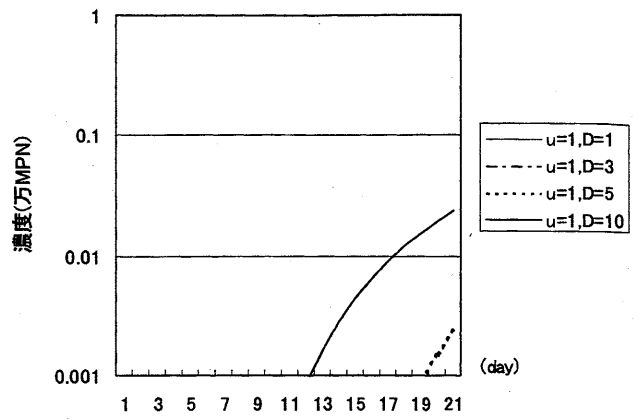


図 4-6 モデルケース 2 の設定

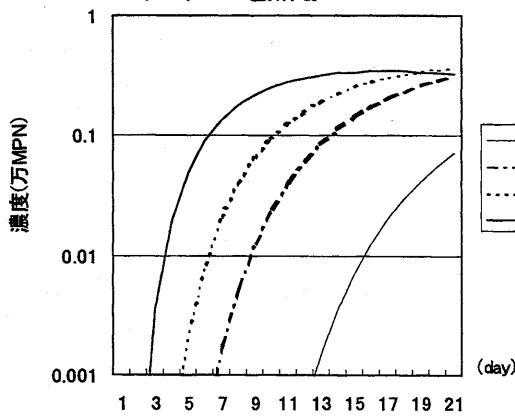
まったく汚染物質は到達しなかったが、 $D/u=10$  などのときは 3 日目には汚染が到達している。このように、単に地下水流速の大小で安易に各地点への汚染到達時期を決定できないことがわかった。



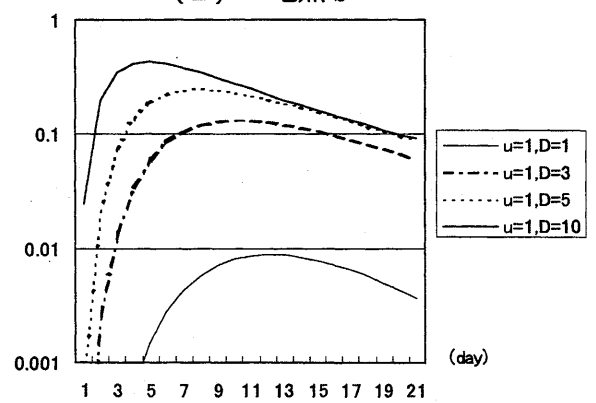
(1) 地点 a



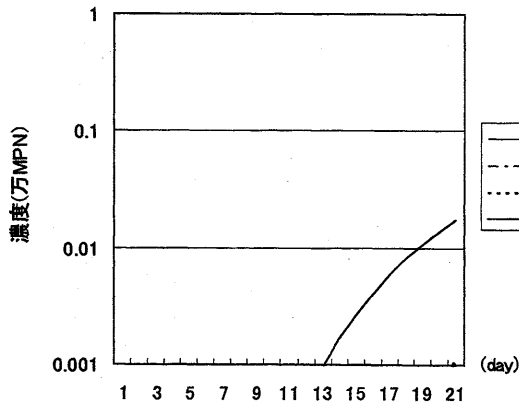
(2) 地点 b



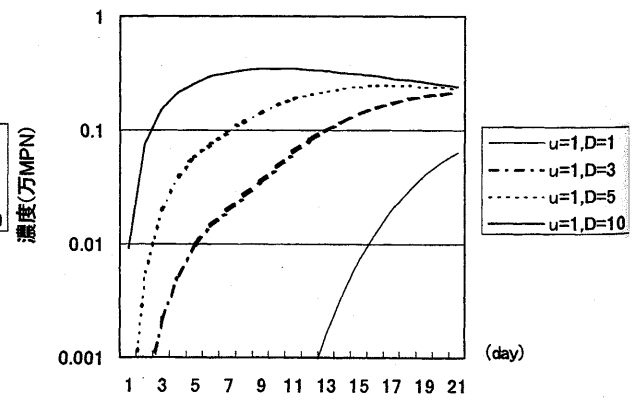
(3) 地点 c



(4) 地点 d

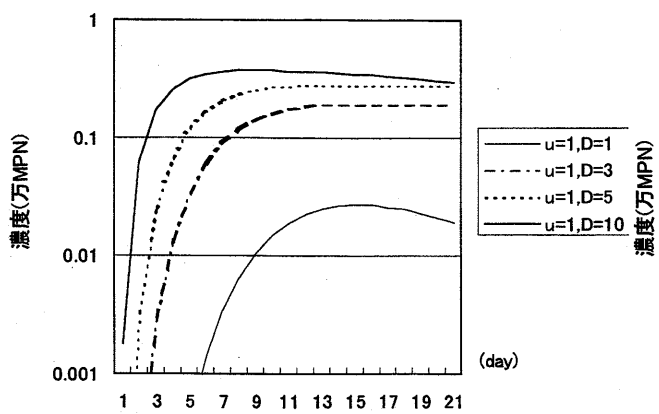


(5) 地点 e

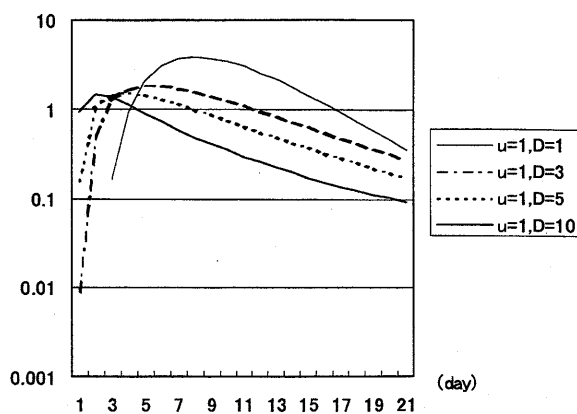


(6) 地点 f

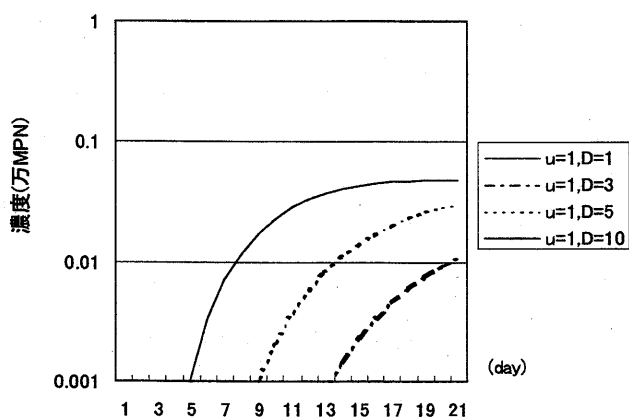
図 4-7 流速 1(m/day) · D/u を変化させたときの汚染濃度の経時変化 (a - f)



(7) 地点g



(8) 地点h

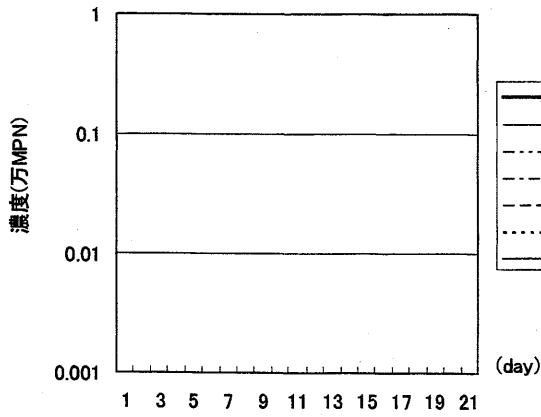


(9) 地点i

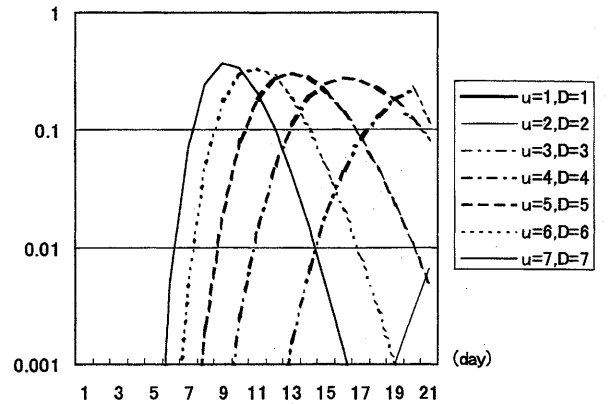
図4-7 流速1(m/day)・D/uを変化させたときの汚染濃度の経時変化 (g-i)

### 3) 流速の影響に関する考察

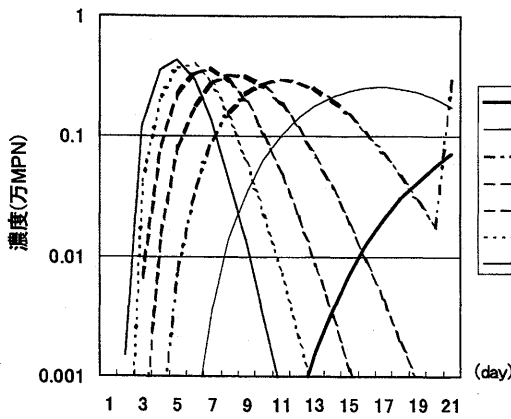
モデルケース1と同様、流速を1~7(m/day)と変えてシミュレーションを行う。その結果を図4-8に示す。例えば地点aで図4-7と図4-8を比較してみると、図4-7ではD/u(m)が大きくなるにつれて汚染の到達も早くなるが、図4-8では流速が大きくなっても基準以上の汚染はまったく到達していないことがわかる。このことから地点によって流速とD/u(m)の重要度が変わってくるといえる。また地点fではu=7のときの汚染到達時期は1日であり、汚染通過日は8日間である。一方u=1のときは21日間井戸使用不可であることがわかる。また地点gでは複数の汚染源の影響が出ていることがわかる。つまり、各地点から最短の汚染源とその周りの汚染源を把握することで、複数の汚染源がある場合でも汚染の到達時期と通過期間の推定が可能であることがわかる。



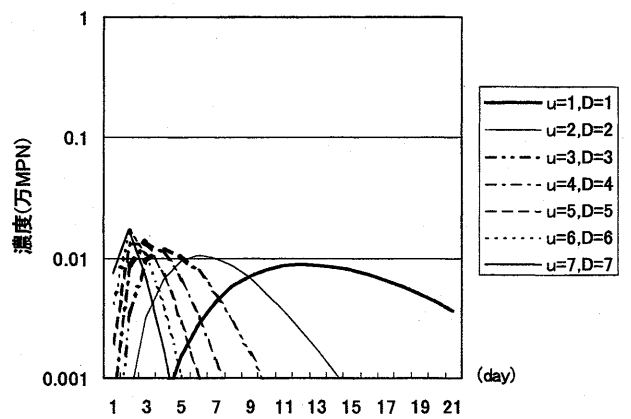
(1) 地点 a



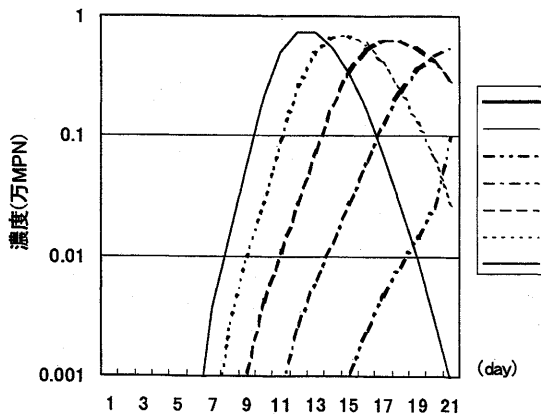
(2) 地点 b



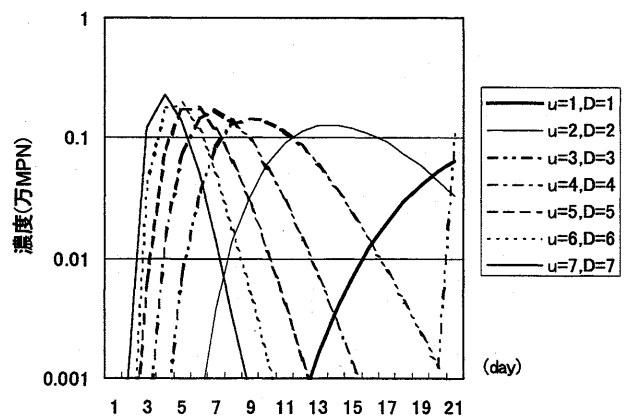
(3) 地点 c



(4) 地点 d

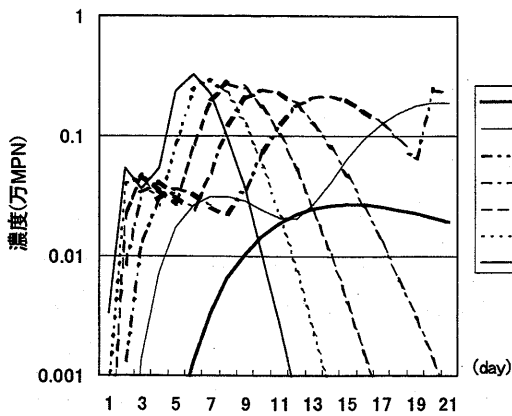


(5) 地点 e

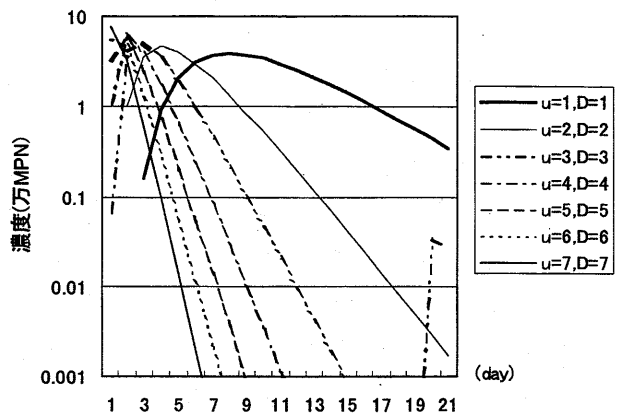


(6) 地点 f

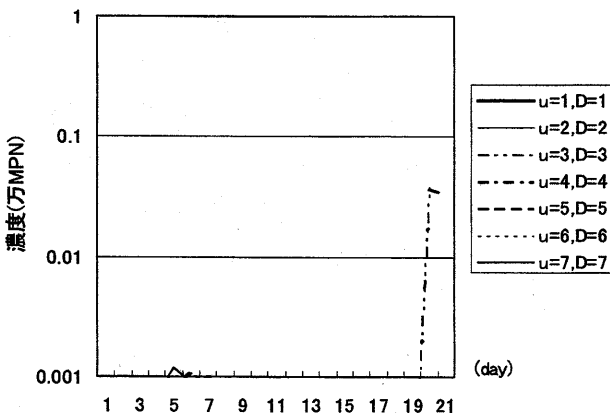
図 4-8 D/u=1 と固定・流速を変化させたときの汚染濃度の経時変化 (a - f)



(7) 地点 g



(8) 地点 g



(9) 地点 i

図 4-8  $D/u=1$  と固定・流速を変化させたときの汚染濃度の経時変化 (g-i)

#### 4) モデルケース 2 の問題点

モデルケース 2 で主な問題となるのが下水管破壊場所と実際の災害時における地盤状態の予測である。まず下水管破壊場所の予測であるが、阪神淡路大震災では下水管の被害形態として伏せ越し管の破断、継手のずれと引き抜け、取り付け管の突出が多かったことがあげられる。このことから、下水管でも破壊しやすい部分と破壊しにくい部分があり、この情報を、下水管路の空間的な破壊確率分布の推定に用いることができる。また、シミュレーションの予測精度を高めるためには、普段から入力条件となる対象地域の地盤条件(流速・分散係数・土の種類など)を調査・測定しておくことが必要である。

また、他にも汚染物質濃度の移流分散で 3 次元ではどういう分布になるのか、地震の影響で不透水層に破断による間隙が発生し、深層地下水まで汚染が到達する可能性が考えられ、これらについても今後の検討が必要である。

## 5. モデルケース 3

### 1) モデルケース 3 の設定

実際に災害が発生したとき、下水管の破壊場所を特定することは難しい。このケースでは下水管の破壊場所を特定せず、下水管本体が全て破壊すると考え、各流速・分散係数ごとに 1 日ごとの到達地点・通過地点のラインを引いていく。この分析により、どの場所が破壊されているか不明であっても、各地点にいつ汚染が到達し、また汚染が通過するかについて最も安全側の予測がつく。この方法を北原<sup>5)</sup>は、災害マップとして利用することを提案している（付録 B2 を参照）。なお、このケースでの点汚染源は 2ヶ所で、モデルケース 2 と同様の位置とする。

### 2) モデルケース 3 の問題点

モデルケース 3 では、地下水の汚染可能性を最大限（最も安全側）に考え、井戸への汚染到達を予測する。この場合汚染範囲内にある井戸は全て使用不可としてしまうため、井戸の利用可能性を常に小さく見積もることになる。この問題についても今後の検討が必要である。

## 第 4 章 参考文献

- 1) 大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会：「大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会中間報告書 大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術（I）<スコーピングの進め方>」H12.8
- 2) 川端淳一：「地下水モデリングのためのデータ解析手法の基礎 4. 地下水環境状態のモデリング 4.2 物質移行パラメータの測定・評価手法」、地下水学会誌 第 43 巻第 1 号 23~35
- 3) 棚橋隆彦：「はじめての CFD—移流拡散方程式—」、1996 年 10 月 15 日、(株)コロナ社発行、pp20~21、pp248~264
- 4) 棚橋隆彦：「CFD 数値流体力学」、平成 5 年 4 月 10 日、(株)アイピーシー発行
- 5) 北原充：広島大学工学部土木工学課程卒業論文「緊急時地下水利用システムの検討」、2000

## 第5章 水質モニタリング井戸の選定方法

地震による上水道機能の停止時の緊急対応コストを圧縮するためには、飲料水や生活用水に地下水を充当することを考え、地震発生後井戸水の簡易水質検査を行うことを考える。本章では、空間的に近接する井戸の汚染の間の相関性を利用して、少数の井戸の検査により地域内の多くの井戸の飲用可能性を判定できるような、効率的な検査井戸（群）を選定する方法を考察する。第4章で述べた地下水汚染シミュレーションを中軸とし、埋設下水管の破損による汚染の事前発生確率を用いて緊急給水のための期待費用を算定し、検査費用との和を最小化することで、効率的な水質検査井戸を事前に求められることを仮想的な数値例を用いて示す。

### 1. 基本的な考え方

本研究で想定する地震時には、工場等からの有害物質の流出や埋設下水管の破壊による大腸菌等のし尿由来の汚染が考えられる。前者は貯留量の目視等により破損が推定できその地点を中心とする汚染範囲を推定することが容易であるのに対して、後者の埋設下水管の破壊は位置を特定することがきわめて困難である。もちろん近年では、地理情報システムによる埋設構造物の管理や地盤情報に基づく構造物の破壊確率の推定手法も研究されつつあり、ある程度の量の汚染が継続的に発生し得るような構造上弱点となる位置を列挙することは可能となるにしても、具体的な破壊位置を特定することは困難である。

一方、地震発生後に新たに井戸を掘る可能性は少ないから、水質を検査できるのは既存の井戸に限られる。ある井戸で地震発生後一定時間後に水質を検査した結果、指標物質が検出されれば、その井戸の上流側の下水管上に汚染源が存在する可能性が高く、検査井戸を通る主流速線に近い他の井戸も飲用ができない程度の汚染が到達している可能性が高い。逆に検出されなければ、その上流側の下水管は破損しておらず、主流速方向に隣接する他の井戸も飲用できる可能性が高い。複数の井戸を同時に検査することにより、汚染井戸の存在範囲を確率的に絞り込むことができ、結果として他の井戸の飲用可能性を判定できることになる。

ここでは安全側を考慮し、水質検査の結果から飲用可能性が完全には保証できない井戸に対して、その背後圏の人口に対して給水車等による緊急給水を実施すると仮定し、その期待費用を見積もる。水質検査費用と緊急給水の期待費用が最小となるような測定井戸の組み合わせを求めることが、ここでの課題となる。

## 2. 検査井戸選定の手順

- (1) 対象地域の透水係数、分散係数、透水層厚、傾斜、流速、流向などのパラメータを入手する。
- (2) 飲料水を得る可能性のある井戸を列挙し、ティーセン分割により背後圏人口（給水量）を算定する。
- (3) 下水施設データから破損候補点を列挙し、その事前破壊確率を与える。
- (4) 破壊点の組み合わせごとの事前確率を計算する。その破壊条件の基で第4章で開発したような2次元移流拡散方程式による汚染シミュレーションを実施して、一定時間後の水質検査時（例えば2日後）と取水時（例えば3日後以降）の全井戸の濃度の計算値を求め、検出の有無と飲用の可能性を求める。
- (5) 検査井戸の組み合わせを仮定する。例えばn個の井戸を検査する場合、検査結果は $2^n$ 通り存在する。(4)で列挙した各事象を、検査結果ごとにグループ化し、各検査結果の発生確率を算定する。各検査結果に含まれる事象の全てに対して飲用可能となっている井戸を抽出する。それ以外の井戸は飲用不可と判断し、その背後圏の人口に対応する緊急給水費用を計算する。

検査結果ごとの確率と給水費用から期待値を求め、これに検査費用を加えて総期待費用を算定する。

- (6) 総期待費用が最小となる検査井戸の組み合わせを選び出す。

## 3. 仮想的な計算例

ここでは第4章のモデルケース2と同じ状況を仮定する。すなわち、**図5-1**のように流速： $7(\text{m}/\text{day})$ 、分散係数： $7(\text{m}^2/\text{day})$ の場に5つの汚染源と5つの井戸が存在し、各井戸の検査費用は10（千円）、背後圏給水費用は100（千円）とする。結果は**表5-1**のようで、総期待費用を最小化する検査井戸は、(b,c,d)または(b,c,e)となる。

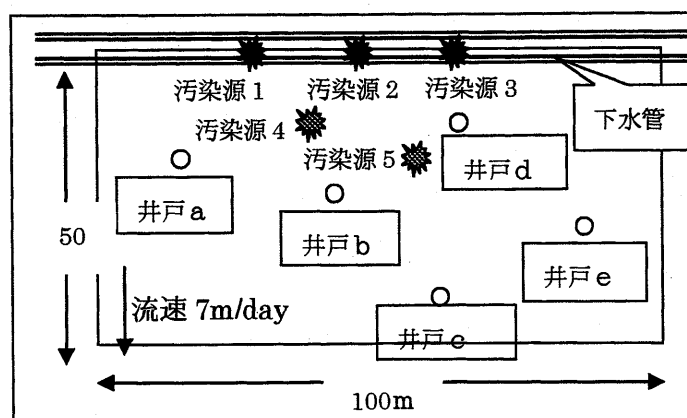


図5-1 想定する地域



表 5-1 汚染パターンごとの検出可能性・飲用可能性と検査井戸（案）の費用比較

汚染パターン(汚染源)						2日目検出井戸					3日目飲用不能井戸					検査井戸(案)						総期待	
1	2	3	4	5	生起確率	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	数	費用	
0	0	0	0	0	0.0133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500
0	0	0	0	1	0.0667	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	392.8
0	0	0	1	0	0.0667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	392.8
0	0	0	1	1	0.0334	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	2	2	402.8
0	0	1	0	0	0.0667	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	451.4
0	0	1	0	1	0.0334	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	2	2	344.1
0	0	1	1	0	0.0334	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	2	2	344.1
0	0	1	1	1	0.0222	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	3	3	354.1
0	1	0	0	0	0.0667	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	451.4
0	1	0	0	1	0.0334	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	2	2	344.1
0	1	0	1	0	0.0334	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	2	2	344.1
0	1	0	1	1	0.0222	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	3	3	354.1
0	1	1	0	0	0.0334	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	2	2	402.8
0	1	1	0	1	0.0222	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	3	3	295.5
0	1	1	1	0	0.0222	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	3	3	295.5
0	1	1	1	1	0.0167	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	4	4	305.5
1	0	0	0	0	0.0667	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	510
1	0	0	0	1	0.0334	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	2	402.8
1	0	0	1	0	0.0334	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	402.8
1	0	0	1	1	0.0222	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	3	3	412.8
1	0	1	0	0	0.0334	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	2	2	461.4
1	0	1	0	1	0.0222	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	3	3	354.1
1	0	1	1	0	0.0222	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	3	3	354.1
1	0	1	1	1	0.0167	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	4	4	364.1
1	1	0	0	0	0.0334	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	2	2	461.4
1	1	0	0	1	0.0222	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	3	3	354.1
1	1	0	1	0	0.0222	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	3	354.1
1	1	0	1	1	0.0167	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	4	4	364.1
1	1	1	0	0	0.0222	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	3	3	412.8
1	1	1	0	1	0.0167	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	4	4	305.5
1	1	1	1	0	0.0167	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	4	4	305.5
1	1	1	1	1	0.0133	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	5	5	315.5

#### 4. まとめ

第4章で開発した地下水汚染シミュレーションを中軸として、汚染の事前発生確率を用いて効率的な水質検査井戸を事前に求める方法を提案できた。今後の展開として、より現実的な事例計算を行うこと、VaR基準を用いた場合の検討、破壊地点の情報が加わった場合の事後的な確率更新方法の検討などが考えられる。

#### 第5章 参考文献

- 1)小松, 奥村, 福島, 北原: 緊急時地下水利用システムの検討, 第53回土木学会中国支部研究発表会概要集, p.739-740(2001)

## 第6章 緊急給水計画モデル

行政が被災後迅速に給水体制を整えるには、緊急時に重要な配水池や道路の耐震化などの事前の防災対策の検討が必要である。本研究では、給水計画上の支障になりそうな様々な被災状況が、どの程度給水体制に悪影響を及ぼすかを定量的に評価できるシミュレーションモデルを用いることで、個別の障害要因の影響の大きさを明らかにする。具体的には、給水点配置モデルと給水車巡回モデルの複合モデルを開発する。仮想都市にモデルを適用し、被災しない場合と、被災した場合の総巡回距離の差によって、様々な被災状況の給水体制に及ぼす影響の評価を試みる。

### 1. 給水計画検討の必要性

都市災害発生後から3日目までは、ゴールデンズリーデイズと呼ばれ、水は飲料水よりも主に、人命救助や、消火作業などに充てられる。本格的な給水活動は3日後となる。阪神大震災の直後、上水道は165万戸も断水<sup>1)</sup>し、しばらくの間復旧しなかった。現在、最も多く普及している配水管であるダクタイル鋳鉄管及び鋼管は、災害時の割れ、折れは少ないが、継手が抜けて水が漏れてしまうため、配水することができなくなる。最近では、継手が伸縮し離脱しない構造になっている耐震継手管の工事が進んでいるがまだ十分とはいえない<sup>2)</sup>。

上水道が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ないため、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、実態に即してい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。そのため、具体的な事後の対応手順を前提にした検討がなされることは少ない。しかし、自治体は、様々な災害状況に対して頑健な事前対策を行わなければならない。事前対策として施設の耐震化を考えると限られた予算の中で、より効果の高いものから耐震化していくために、それぞれの配水池や道路の、給水体制における重要さを定量的な検討に基づいて明らかにする必要がある。

本章では、都市災害後の中期の給水計画を例に、緊急時の給水体制をふまえて、事前対策を行うための手法を提案する。緊急時給水計画を複合問題、すなわち給水点配置問題と給水点巡回問題と考えて、これらを数理計画問題として定式化し、緊急時の給水体制をシミュレーションできるモデルを用意する。このモデルを用いて、道路の寸断や事前の防災対策によって、必要な給水車台数がどの程度変化するかを観察する。

## 2. 物資輸送計画に関する既往の研究

### 1) 緊急時の物資輸送計画のシミュレーション分析

中川ら<sup>3)</sup>は京都市を取り上げ、時系列的物資輸送交通シミュレーションを適用している。このシミュレーションは、車両配分や交通規制等の事前に準備可能な政策と、災害の規模によって異なる道路リンク被害を外生変数として、道路リンク混雑状況と物資供給達成率を求めている。その結果、交通規制のみでは地域全体に対応することは不可能であること、車両配分を事前に行うと輸送時間の短縮に効果的であることを示し、緊急路の確保や交通量配分の誘導が必要であるとしている。しかし、被災地域内の物流拠点が考慮されておらず、全物資の域外からの直接輸送が仮定されており、その仮定の妥当性について課題が残されている。

岡部ら<sup>4)</sup>は、仙台市を想定した仮想都市上で、物資の総配送時間最小化問題を定式化し、シミュレーションを行った。この分析では、被災地域内に物資の中継地点を設けて輸送を効率化することを考慮している。中継基地の容量と積み替え時間、緊急路の走行速度を外生変数として与え、配送時間と中継基地の配置、利用避難所数を求めている。その結果、緊急路の走行速度向上のために交通規制を迅速に行える体制、人員配置等の積み替え時間短縮政策が必要なことを示した。中継基地を設けると輸送時間が短縮できることがわかり、その際の候補地の選定が重要であると述べている。しかし、災害直後は車両不足が懸念され、所要時間最小化のみに主眼を置いてのピストン輸送の実行は困難であるため、シミュレーションで検討した計画の実行可能性に問題がある。

徳永ら<sup>5)</sup>は、緊急物資輸送計画を車両配分計画と輸送経路計画の複合計画と位置付けて、仮想都市を対象にした物資輸送時間の最小化問題を遺伝的アルゴリズムで解いている。これにより、緊急時に人為的にコントロール可能である車両や人員の配分、交通規制は有効であることを明らかにした。この研究では緊急路の選択や緊急路の走行速度、積み下ろし時間等に注目して配送の効率性や避難所(物資供給先)間の、公平性からの分析が行われている。

### 2) 緊急時の給水に関する既存の研究

細井ら<sup>6)</sup>は、様々な水道の地震対策を多角的に整理し、個々の対策の位置付けを明らかにすることを試みた。水道の本格復旧までの応急給水に必要な要件を整理した。また、管路を中心とした配水池の耐震化の効果を、給水点を巡回にかかる距離の改善の程度によって検討した。

### 3) 焼きなまし法を巡回配送問題に適用した研究

狭間ら<sup>7)</sup>は、都市部での物流を効率化するために、配車配送問題を定式化し、焼きなまし法を用いてモデルの求解を行った。モデルの制約条件は顧客の時間的な条件や目的を考

慮した焼きなまし法を使って考案している。ここでは、顧客に時間帯制約と、顧客のタイプの違い(配送と集荷の2つのタイプ)であり、車両が複数回利用可能な場合や、複数の中継地がある場合についてモデルの求解を行った。

#### 4) 本研究の特徴

緊急時の物資輸送計画にシミュレーション分析を適用した研究例では、災害発生後、配送を行う時の車両配分や交通規制、配送の効率性など、その場でどのような対応を行うかについて着目した分析が多く、被災状況は外生的に想定されていた。しかし、実際の地域を対象として緊急時の輸送計画を検討する場合、被災状況(どこで、どんな施設が、どの程度破壊したか)が物資輸送に最も影響を及ぼす。

したがって、たとえ被災状況を正確に予測できなくても、物資輸送に甚大な影響を及ぼすような致命的な被災の影響を最小限に食い止めるための対策を、災害時ではなく事前に行う必要がある。以上の観点は、細井の研究においてみられるものの、モデルを用いたシミュレーション分析を適用して検討した例は見られなかった。

よって本研究では、緊急時給水計画を取り上げて、被災状況の変化に対して頑健な事前対策の立案を、被災後の給水体制のシミュレーション分析を通じて検討するための手法を提案する。

### 3. 最適化モデルによる給水計画問題の定式化

本研究では、最適化モデルを用いたシミュレーションを通じて、被災状況の違いに対して頑健な事前対策を立案する手法を提案する。具体的には、この問題を給水点配置問題と給水車巡回問題の複合問題と考える。ここではまず、2つのモデルの位置付けを示し、モデルを定式化する。次に、給水車巡回モデルを解く(焼きなまし法; Simulated Annealing)アルゴリズムについて説明する。

#### 1) 事前対策の立案方法

以下に、本研究で用いる用語を定義する。

- **給水点**：給水車が停車して住民に水を給水する拠点。住民は居住地から最寄りの給水点で給水を受けて、家や避難所まで自力で水を運ぶ。
- **配水池**：給水車が水を補給する場所。緊急時の給水活動のための水源とする。ここで定義する配水池は、調整池や、浄水場などの施設も含む。
- **ループ**：給水車が配水池を出て各給水点で水を給水し、また配水池に水を補給するために戻ってくるまでの、配水池-給水点-配水池間の巡回を表す。
- **巡回路**：給水車が配水池と全給水点を回る時の巡回のしかた。
- **総距離**：巡回路の距離。給水車の総走行した距離を表す。

2. で論じたように、震災等の緊急時に、実際に破壊する地点や道路を正確に予測することは不可能である。道路の寸断や配水池の破壊など、給水計画上の支障になりそうな様々な被災状況が、どの程度悪影響を及ぼすかを定量的に評価できるシミュレーションツールを用いることで、個別の障害要因の影響の大きさを明らかにすることができる。この結果を用いて、事前に影響の大きな障害要因に対して道路や配水池の耐震化などの対策を施しておけば、重大な障害要因の発生を防いだり、その影響を抑える対策を事前に講じることができる。

(1)給水点配置問題

例として、居住地が図 6-1 のように分布している場合を考える。ある給水点候補地から水が運搬可能な範囲を円で示している。住民は、運搬可能な範囲に給水点が 2 つ以上あれば、最も近い給水点に水を汲みに行くとする。以上の仮定の下で、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。

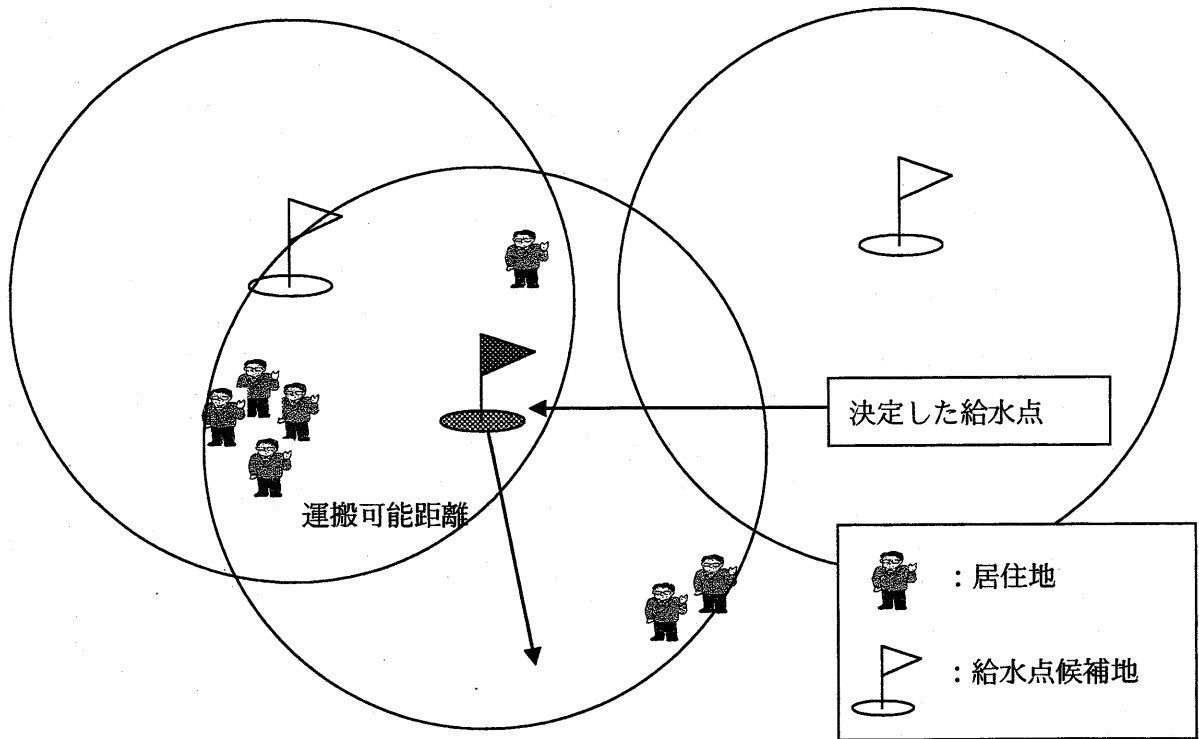


図 6-1 運搬移動距離をカバーリング半径とした給水点決定方法

(2)給水車巡回問題

先の給水点配置問題によって決定した給水点を、何台かの給水車が巡回する。各給水点を受け持つ居住地の人口から、その給水点の需要量を算出する。図 6-2 では、給水点の大きさが給水量を表す。各給水点への給水によって給水車の積載残量は減少し、残量が次に配る予定の給水点よりも少ないときは、最寄りの配水池で水を補給する。このような条件の下で、総移動距離を最小にする給水車巡回路を求める。

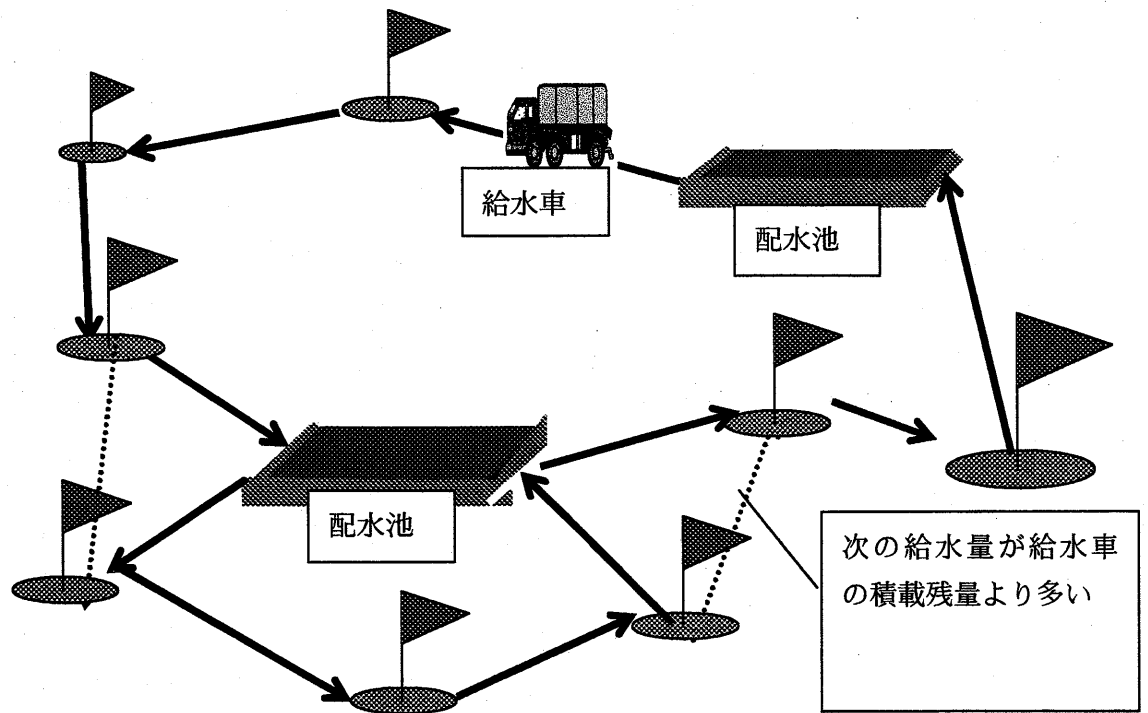


図 6-2 給水車の最小巡回路作成方法

## 2) 給水点配置モデルの定式化

給水点配置問題とは、複数の給水点の候補地の中から、全住民を移動可能距離内に収めるように、かつ、できるだけ少ない数の給水点を配置する問題である。本研究の給水点配置問題は、離散的空間内の各点に移動距離と施設立地コストの和を最小化するように施設を配置する、施設配置問題の中の集合被覆問題に当たる。この問題は、OR の分野で研究が蓄積されている。集合被覆問題とは、すべての利用者の移動費用が限界以下で、かつ、建設費用が最小になるように施設を配置する問題である。この問題の定式化に於いて給水点配置問題を定式化する。

$$\text{目的関数} \quad \min \sum_{j \in J} f_j y_j \quad (6-1)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{j \in \{k | c_{ik} \leq c_{\max}\}} y_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (6-2)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (6-3)$$

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、モデルの解であり、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とする。 $y_j$ は整数である必要があるため、この問題は整数計画問題となる。制約条件(6-2)式は、どの対象地区の人々も限界移動距離 ( $C_{max}$ ) 以内となるように給水点を設置することに対応している。

目的関数(6-1)式の最小化によって、制約条件(6-2), (6-3)式の条件を満たし、建設費用が最小となる、つまり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。

### 3) 給水車巡回モデルの説明

本研究の給水車巡回問題も先の問題と同様、ORの分野で研究が進められている。この問題はセールスマンが得意先を巡回する時の最短路を得る問題：巡回セールスマン問題<sup>8)</sup>にあたり、次のように定式化されている。

$$\text{目的関数} \quad \min \sum_{i, j \in I} X_{ij} Z_{ij} \quad (6-4)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{i \in I} Z_{ij} = 1 \quad j \in I \quad (6-5)$$

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

$$\sum_{i \in I_L} W_i \leq b \quad (6-7)$$

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 をとる整数変数である。

制約条件 (6-5), (6-6)式は、どの給水点に対しても必ず給水車が水を配りに来て、必ずその給水点から離れるという条件式である。これら 2 つの条件を考慮することは、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(6-7)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。

目的関数(4)式の最小化により(6-5), (6-6), (6-7)式の制約条件を満たし、かつ総移動距離が最小となるような巡回路 $Z_{ij}$ を得る。

この問題も整数計画問題となっている。

本章では、ここで定式化した 2 つの問題のうち給水点巡回問題に焦点を当てて分析を行う。その理由は、道路の寸断や配水池の破壊などの被災状況は、給水点の配置ではなく給水車の巡回に影響を及ぼす障害要因であり、行政の事前対策も道路や配水池の耐震化に焦点を絞って行われると考えられるからである。そこで、本章では給水点の位置を所与とし、給水車が全ての給水点を給水して巡回する時の巡回路の総距離を最小にする給水点巡回問題を用いたシミュレーションを行う。実際の地域を対象にした給水点配置問題については 7 章で述べる。

#### 4. 給水車巡回問題の解法

巡回問題を解くためのアルゴリズムをいくつかあげ、本研究で焼きなまし法を用いた理由を説明する。巡回路探索方法として、次のような方法が提案されている。

##### 1) 全探索法

これは文字通り、全巡回路を調べる方法である。このアルゴリズムの利点は、必ず最適な巡回路が探索できることである。しかし、巡回セールスマン問題で都市数を  $n$  個とすると、組み合わせを考えると全部で、 $n!/2$  種類の巡回路が存在する。したがって、たかだか数十都市の巡回路を考える問題ですら、全ての巡回経路を探すと莫大な時間を要する。

##### 2) ランダムサーチ

このアルゴリズムは、ランダムに巡回路を作成して順に総距離をチェックし、それまでで最も良い解と比較してより短くなった場合にのみ、その巡回路を採用していく方法である。しかしこの方法では、探索回数を多くしても解が良くなる保証はなく、計算には全探索とほとんど変わらない時間を要する。

##### 3) 遺伝的アルゴリズム

このアルゴリズムは、自然界の遺伝の法則を真似て作られたもので、巡回路を遺伝子型に直し、自然淘汰、交差、突然変異という遺伝的操作を行うことによって近似解を探索する方法である。この手法は、巡回の情報をうまく遺伝子型に変換することができれば、比較



的に短い時間で近似解を探索することができるという利点がある。

#### 4) 焼きなまし法<sup>9)</sup>

焼きなまし法は、金属を高温に熱して、徐々に温度を冷まして安定な状態にするプロセスからヒントを得て作られたアルゴリズムである。この方法は、金属のエネルギーを最小化の対象となる目的関数と考え、金属が安定（平衡）になった時の状態とその時のエネルギーを調べることによって、最適値を探索する。数学的には、温度の違いによって金属の状態が変わる現象を目的関数の状態遷移ととらえると、遷移確率を温度パラメータ  $T$  で制御することに等しい。すなわち、温度の値が大きい時に状態遷移の確率が大きく、温度の値が小さい時に状態遷移の確率が小さくなるよう設定する。温度パラメータを、初期の高い値から低い値へと徐々に下げることによって、エネルギーの安定点である目的関数の最適値を探索する。焼きなまし法の長所として、局所解に陥りにくく広範囲の探索が可能である点や、応用がきやすいという点があげられる。この方法は、遺伝的アルゴリズムと同様に比較的短い時間で近似解を探索することができる。

本研究では、様々な被災状況を想定し、くり返しシミュレーションを行う必要があるため、計算時間は短いことが望ましい。以上の4つの近似解法の中で、比較的短時間に最適解が得られる方法は、遺伝的アルゴリズムまたは、焼きなまし法である。遺伝的アルゴリズムでは、遺伝子型に巡回の特徴を的確に反映させる必要がある。しかし、本研究のように途中で配水池に立ち寄るなどの複雑な巡回パターンを、効率的に遺伝子型に変換することは難しく、複雑な変換方法をとるとその部分の処理に時間がかかって計算時間が長くなる。これに対して焼きなまし法は、遺伝子型を必要としていないためアルゴリズムが比較的単純である。よって本研究では、焼きなまし法を用いた巡回路の探索を行うこととする。

#### 5) 焼きなまし法のアルゴリズム

まず、各点に一度ずつ立ち寄る単純な巡回路の場合を例にして、狭間らの研究において提案された最短巡回路を得るための焼きなまし法のアルゴリズムを改良した方法を説明する。配水池を0、給水点を1~6の数字で表す。初期巡回路(図6-3左、0-1-2-3-4-5-6-0)を適当に与え、次に0以外の2つの都市をランダムに選び、その間の順番を逆転して、元の場所に戻す。(図6-3には、2と5を選んだ例を示す)

並び替えた新しい巡回経路の総距離が短くなっていれば新しい巡回路を採用する(図6-3右)。また、新しい巡回路の総距離が長くなってしまっても、

$$\exp\left(-\frac{\text{新しい総距離}-\text{古い総距離}}{T}\right) \quad (6-8)$$

の確率で、新しい巡回路を採用する。

最初の段階では、温度パラメータ  $T$  を大きく設定しているため、式(6-8)の確率は大きく、新しい総距離と古い総距離の差が大きくても、巡回路の更新が頻繁に起こる。温度パラメータ  $T$  が小さくなってくると、式(6-8)の確率は小さくなり、新しい総距離と古い総距離との差が大きい時には更新されなくなるので、総距離の長い巡回路に更新される確率は小さ

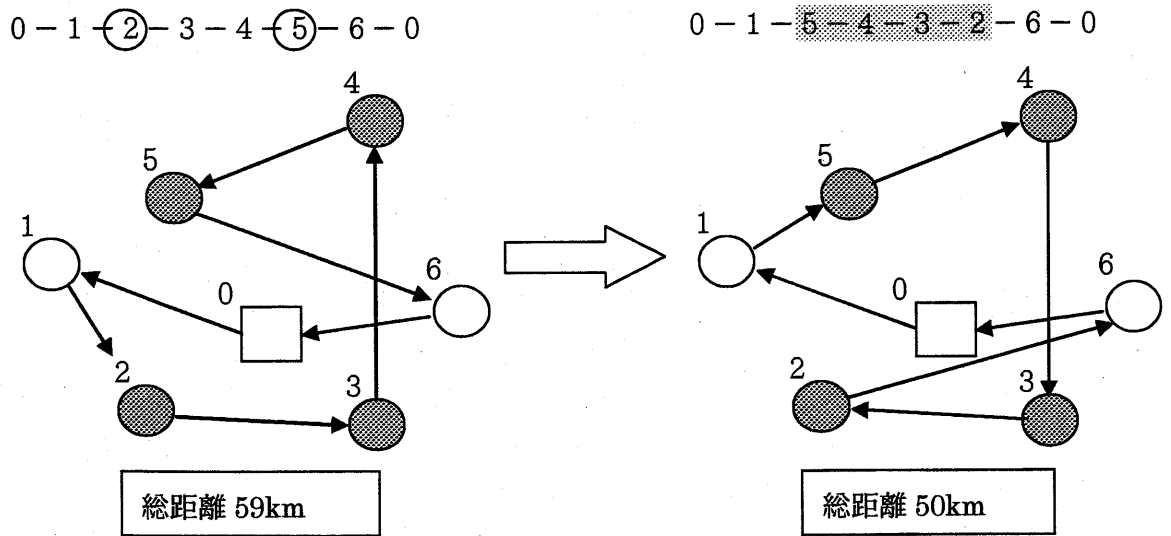


図 6-3 巡回路の並び替え

くなる。焼きなまし法では、初期温度  $T(0)$  から始めて、同じ温度で巡回路の更新を何度か繰り返す、所定の回数を終えると温度を下げる。温度の下げ方は温度低下率  $dt$  ( $0 < dt < 1$ ) を  $T$  に乗じて、 $T(1) = T(0) \cdot dt$  とする。以上の更新プロセスを温度パラメータ  $T$  が  $T\text{-end}$  に等しくなるまで続ける。

本研究では、給水車が水を配る場合の巡回問題を扱うため巡回の途中で水の補給のために配水池へ立ち寄ることを考慮する必要がある。すなわち次の給水点の給水量が給水車の積載残量を超えた場合に、各配水池への往復距離すなわち、

(現在の給水点～配水池)間の距離 + (配水池～次の給水点)間の距離  
を各配水池で求め、その中で総距離が最小になるような配水池を水の補給場所に決める。これを図で表したのが、図 6-4 である。

したがって本研究では、単純な巡回路の決定(途中で立ち寄りがない場合)に用いられる焼きなまし法で求まる総距離を、上記の方法で修正して評価する。なお、焼きなまし法の解の更新は、総距離の差のみに基づいて行われるため、以上の変更を行って求解しても近似解を得ることができる。図 6-5 に本研究で用いるアルゴリズムのフローチャートを示す。

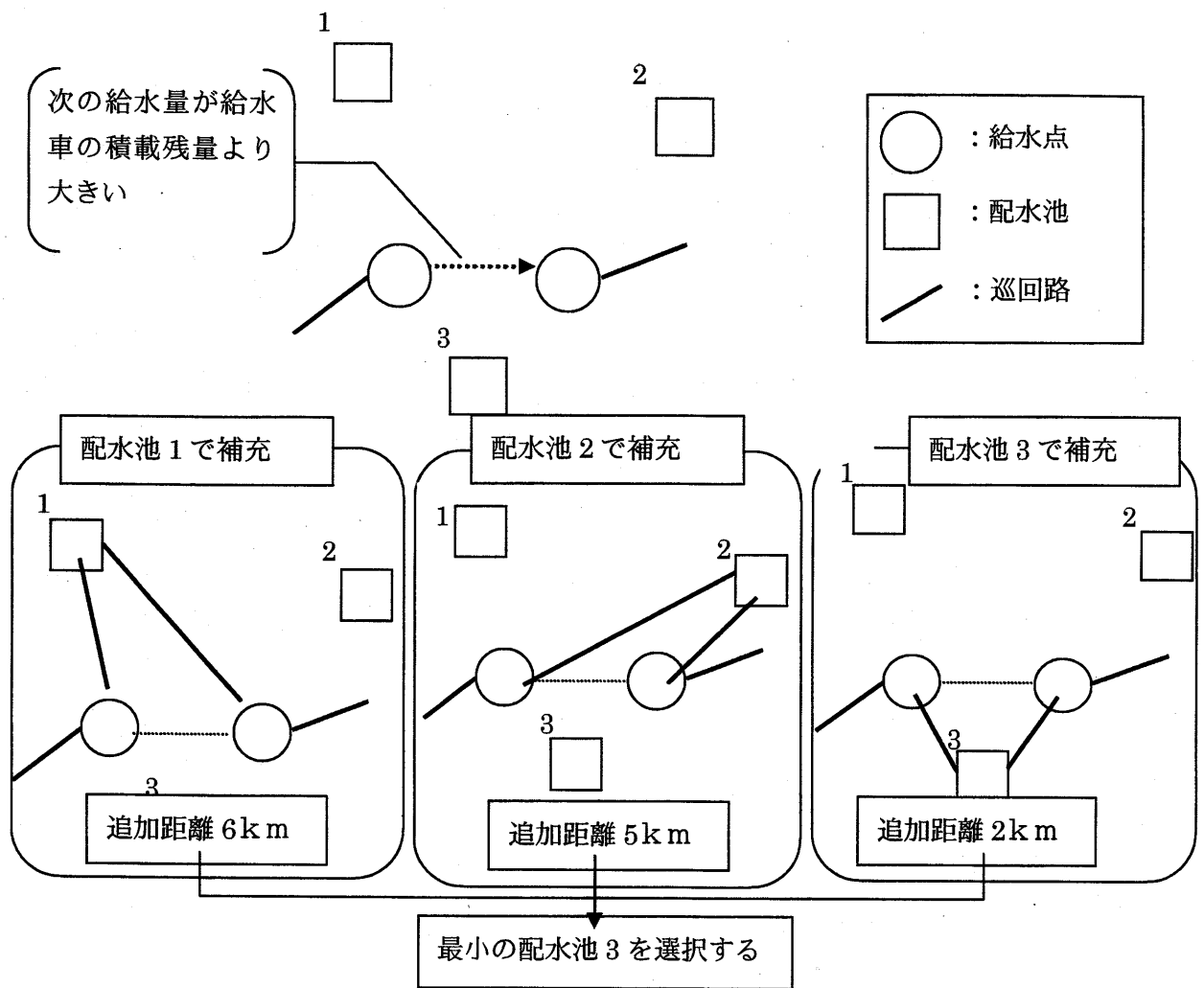


図 6-4 給水車の水の補給時の配水池の選択方法

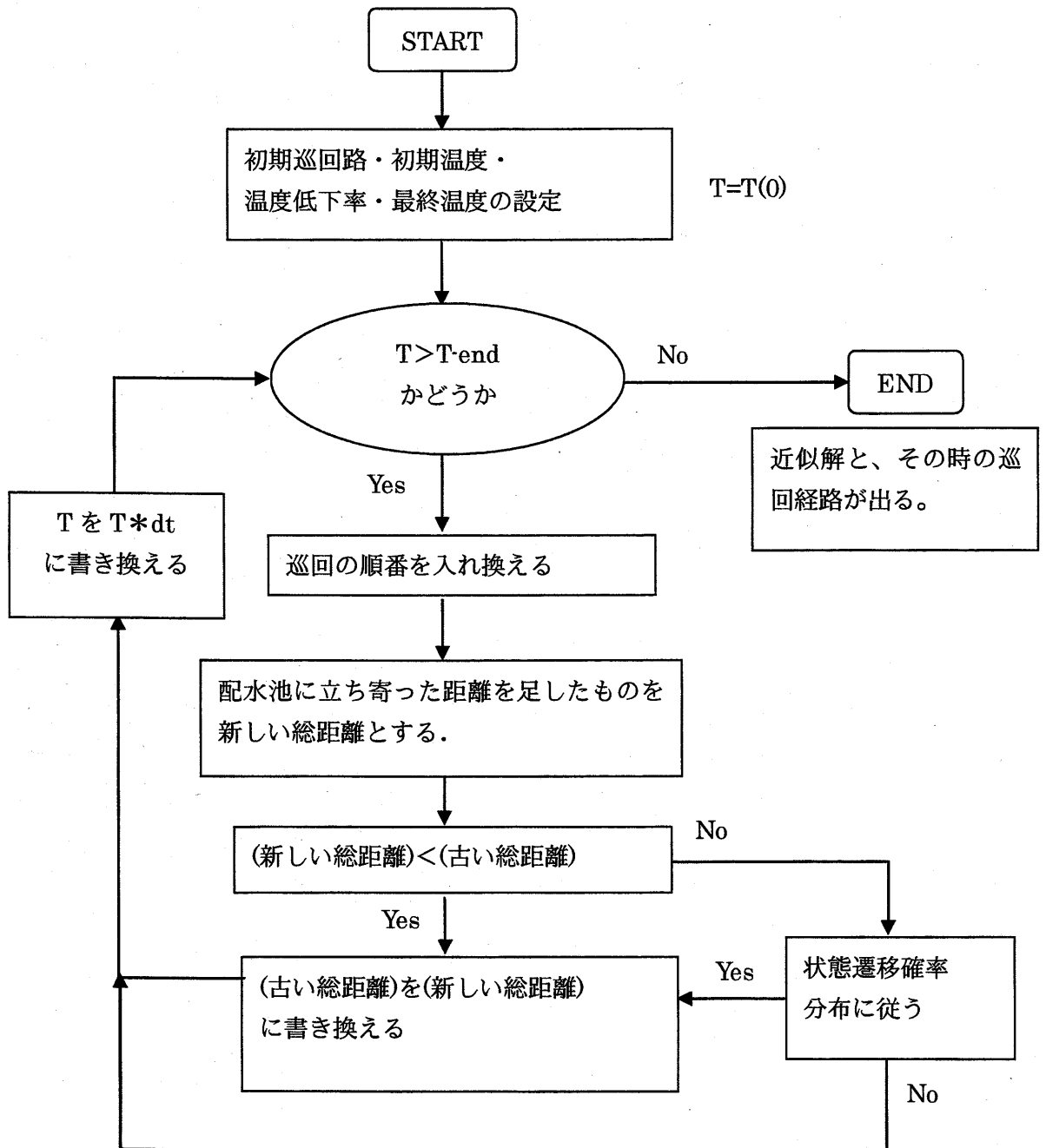


図 6-5 本研究で用いたプログラムの流れ

## 5. 数値計算例

ここでは 3. で定式化した給水車巡回モデルを 4. で説明した焼きなまし法を用いて解き、条件を変えてシミュレーションすることで、様々な被災状況の下における総輸送距離や、巡回路、必要な給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。

### 1) モデルの入力データ

本研究では、提案した手法の一般的な適用可能性を検討することを目的としているため、以下のような仮想都市を設定して分析を進める。なお、実際の都市で検討を行う場合はモデルの入力データを実データに基づいて設定すればよい。例えば、GIS(地理的情報システム)を用いて、地点間距離に実ネットワーク上の距離を設定すればよい。本研究で手法の有効性が確認できれば、手法を実空間上の問題に適用することは容易である。(東広島市への適用例を7章に示す。)

設定した仮想都市を図6-6に示す。この仮想都市は、100個の給水点および4個の配水池のX座標、Y座標を一様乱数によって計104点発生させている。図の大きい丸が配水池を表し、小さい丸が給水点を表している。

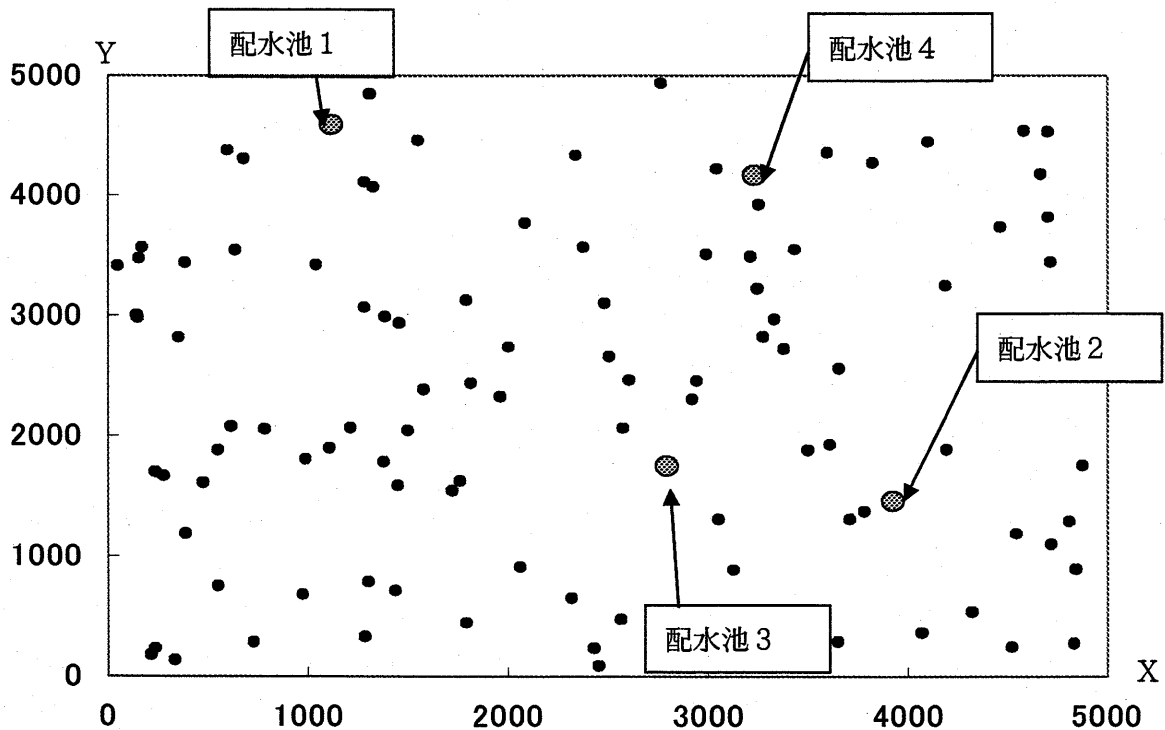


図6-6 本研究で使う仮想都市

また、シミュレーションの前提として、給水の諸パラメータを以下のように設定する。

- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) 一般の道路の走行速度         | 12km/h                |
| 2) 一人当たりの水の需要量        | 10 ㍓/日                |
| 3) 給水車 1 台当たりの運用時間    | 8 時間/日                |
| 4) 配水池で給水車が水の補給にかかる時間 | 10 分/回                |
| 5) 給水点で給水にかかる時間       | 1 分/10 ㍓              |
| 6) 住民の居住密度            | 100 人/km <sup>2</sup> |

### 一般道路の走行速度

震災等の緊急時には、路面の損傷、沿道家屋の倒壊による車線幅の減少、交通渋滞などの要因により、道路の走行速度は著しく低下する。塚口ら<sup>10)</sup>は、阪神淡路大震災時の2時点のステレオ空中写真を用いて、車両の移動距離を測定し、撮影間隔で除することにより速度を求めている。これによると、車両が高密度荷存在する区間においては時速1kmに満たない区間が多数存在する一方で、比較的流動状況が高い区間においては、時速が20~30km程度であったと報告している。よって、平均速度は時速12kmとする。

### 一人当たりの水の需要量

人の生存に対して1日に最低限必要とする飲み水の量は3ℓ/日・人であるとされている。また震災後の調査によれば、洗濯、手洗い、トイレの効率的な使用などにより飲み水以外に必要な水が、7ℓ/日・人程度であると考えられる。よって、10ℓ/日・人とする<sup>11)</sup>。

### 給水車1台当たりの運用時間

給水作業は、被災者の生活や給水作業中の運転手の交代や、準備等にかかる時間を考慮すると日中の間しか行うことができない。よって、1日の運用時間を8時間とした。

### 配水池で給水車が水の補給にかかる時間

ポンプの性能を考慮して、標準的な値として、1t車の給水車の容量を満杯にするのにかかる時間を10分とする。

### 給水点で、給水にかかる時間

専用の給水車以外の給水車は、電動モータでポンプを動かし、住民に給水すると思われる。よって、給水車の持つポンプの性能を1分/10ℓとする。

### 住民の居住密度

郊外の住宅地を想定している。よって、1km<sup>2</sup>あたりの住民の数を100人とする。

## 2) 温度低下パラメータの設定

焼きなまし法では、温度の低下パラメータに関して問題に即した値に設定する必要がある。以下に温度の設定(初期温度  $T(0)$  および、最終温度  $T\text{-end}$ 、温度低下率  $dt$  の設定)を変えて計算した結果を比較する。なお実際は、3つのパラメータ(初期温度、最終温度、温度低下率)は相互に影響を及ぼしあうため、個別に設定値の良さを議論することはできない。そこで3つのパラメータの全ての組み合わせに対して焼きなまし方の計算を60回ずつ実施し、各回で得られた近似解をプロットしその分布を用いて最適性の検討を行った。以下の説明は簡単のため、各パラメータを基本設定値から個別に動かした時の効果について述べる。

### 初期温度 $T(0)$ の設定

初期温度の設定は、計算の初期段階でより劣った(総距離の長い)巡回路が得られた場合の、巡回路の更新確率に影響する。温度が高すぎるとより劣った解への更新が頻繁に起こるため、計算時間が長くなり、温度が低すぎるとあまり更新がされないため、計算時間は

短い解が、局所解(より劣った解)に陥りやすい。初期温度を 1000 とした時と、50 とした時では、得られる解の分布にあまり顕著な差は見られなかったが、これ以上温度を下げると解が局所解に陥りやすくなった。よって、初期温度を 50 とした。

### 最終温度 T-end の設定

最終温度の設定は、計算の打ち切りに影響する。最終温度が高すぎるとまだ、より良い解が得られるような更新が続いているにもかかわらず、計算が打ち切られるため、さらに良い解が得られる可能性が残る。最終温度が低すぎると、更新がストップした状態で無駄に計算を続けることになる。最終温度を 0.001 とした時と、0.0001 とした時では、0.0001 とした時の方が最適解に近い所に解の分布が集中していて、分布が良くなっていることが分かった。また、最終温度をこれ以上上げても解の分布にあまり変化が見られなかったため、最終温度を 0.0001 とした。

### 温度低下率 d t の設定

温度低下率は、どのくらいの速さで温度を下げるかを表すパラメータであり、前回の温度に対する次の温度の比として、定義される。温度低下率は、初期温度と最終温度の間の解の探索ピッチに影響する。温度低下率が高すぎると、初期温度は、ゆっくり最終温度に到達するため、計算時間が長くなり、温度低下率が低すぎると、素早く最終温度に到達するため探索のピッチが荒くなって、もう少し高い温度を維持して更新した時に得られる、より良い解を実現できなくなる。温度低下率を 0.999 とした場合と、0.9999 とした場合は、0.9999 とした場合の方が良い結果が出ることが分かった。よって、温度低下率は 0.9999 とした。

## 3) 分析結果

### (1)基本ケース

まず、4つの配水池とも容量が無制限で使える状況(基本ケース)を考える。この状態を想定した時の総巡回距離は 90.9(k m)、配水池 1、配水池 2、配水池 3、配水池 4 での水の使用量はそれぞれ、4040 ㍓、3480 ㍓、11980 ㍓、4650 ㍓となった。(表 6-1)

表 6-1 基本ケースの計算結果

	総距離	ループ数	所要時間	車の台数	配水池1	配水池2	配水池3	配水池4
基本	90928	27	52.33	6.54	4040	3480	11980	4650

なお表中の給水車の台数は、シミュレーション結果である総距離、ループの数をもとに、1) で設定した給水車の速度および、配水池で水を補給にかかる時間、給水点で給水するのにかかる時間、給水車 1 台あたりの運用時間を用いて、次のようにして求める。

$$(\text{総給水時間}) = (\text{総距離}) / (\text{給水車の速度})$$

$$+ (\text{ループの数}) * (\text{配水池で水を補給するのにかかる時間})$$

$$+ (\text{対象地区の総給水量}) / (\text{給水点での単位時間の給水量})$$

$$(\text{給水車台数}) = (\text{総給水時間}) / (\text{給水車 1 台当たりの運用時間})$$

このケースの巡回路を図 6-7 に示す。図 6-7 より、配水池 3 の使用水量が最も多いことに対応して、図中の点線で囲まれた範囲（配水池 3 の左側の部分）には、巡回路が密集していることが分かる。

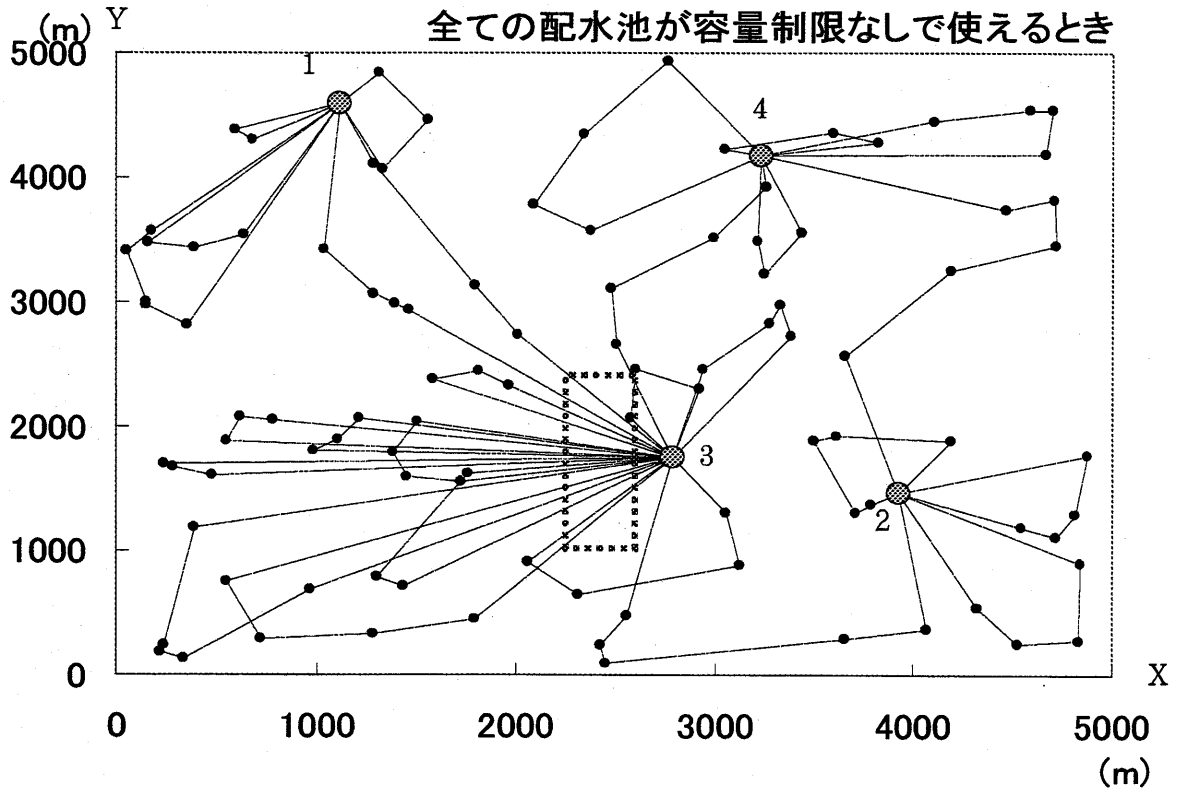


図 6-7 4つの配水池の使用可能水量を無制限とした場合の巡回路(基本ケース)

(2)各配水池が使えない場合

4つのうち1つの配水池が破壊して水を補給できない状況を表現するため、各配水池の水量の残量を0とし、その他の条件は、基本ケースと同じとして求解した。その結果を表 6-2 に示す。基本ケースで最も多く水を補給している配水池 3 が破壊した時の総距離の増加量が最大であり、総距離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。このときの巡回の様子を図 6-8 に示す。ある配水池が破壊したことによって、近くの配水池に水量が転換されてそれぞれ増加するが、配水池 1 が破壊した時の配水池 2 の使用水量は減少する結果となった。



表 6-2 各配水池が 1 つずつ壊れた時の状態の結果

	総距離	ループ数	所要時間	車の台数	配水池1	配水池2	配水池3	配水池4
基本	90928	27	52.33	6.54	4040	3480	11980	4650
池1が使用不可能	101934	26	53.08	6.63	0	2250	14310	7590
池2が使用不可能	95760	26	52.56	6.57	4290	0	14340	5520
池3が使用不可能	109655	26	53.72	6.72	8680	9360	0	6110
池4が使用不可能	102973	27	53.33	6.67	6100	4540	13510	0

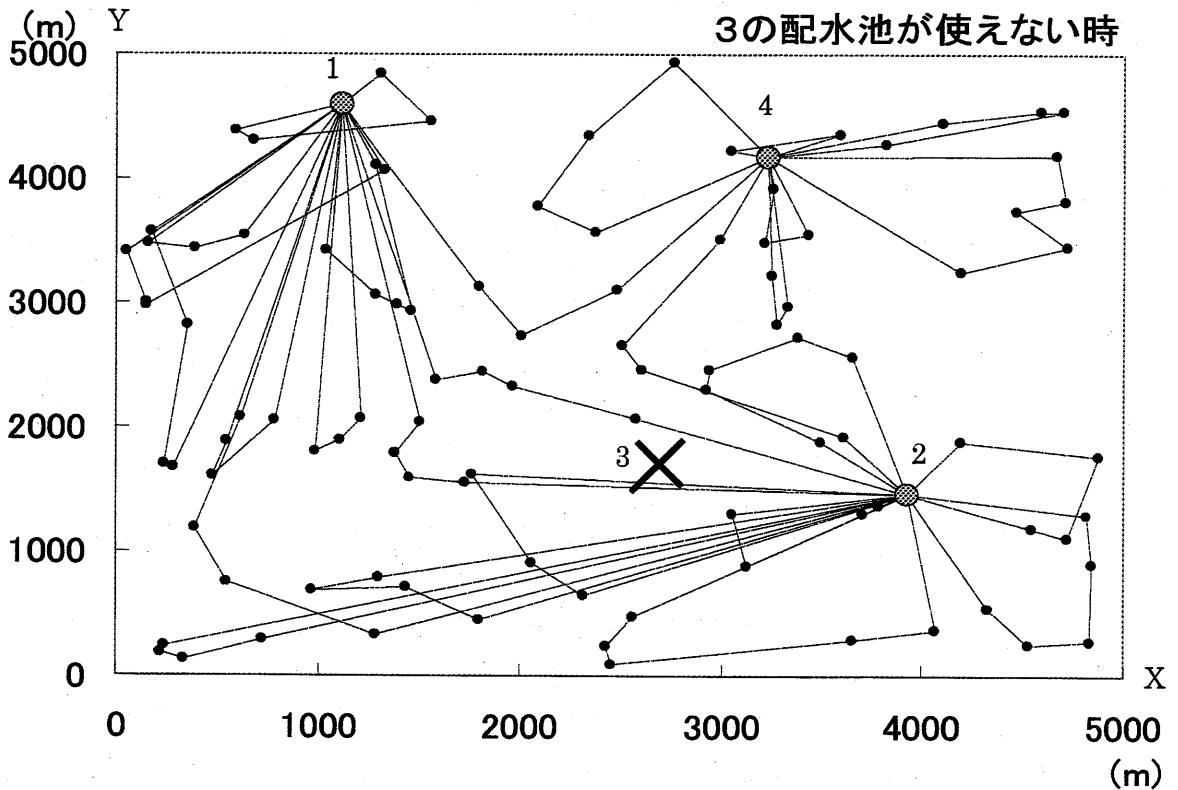


図 6-8 配水池 3 が破壊した時の巡回路

(3) 配水池 3 の使用可能水量が減少した場合

基本ケースにおいて最も水の補給に使われている配水池 3 について、一部破壊して使用可能水量が減少した場合の巡回路を求めた。シミュレーションは基本ケースの巡回路における配水池 3 の水の使用量 11920 に対して、80%、50%、20%に使用可能水量が減少した状況を想定した。また配水池 3 以外の配水池には使用可能水量の制限はないものとした。結果を表 6-3 に示す。配水池 3 の使用可能水量が 80%以下になると、配水池 2 への転嫁量が急に大きくなる。

表 6-3 配水池 3 が使用制限を受ける時の結果

使用可能割合	総距離	ループ数	所要時間	車の台数	配水池1	配水池2	配水池3	配水池4
基本(100%)	90928	27	52.33	6.54	4040	3480	11980	4650
80%使用可能	92435	27	52.45	6.56	5070	4340	9460	5280
50%使用可能	97977	27	52.91	6.61	6120	6240	5740	6050
20%使用可能	105722	26	53.39	6.67	7320	8710	1830	6290
全く使えない	109655	26	53.72	6.72	8680	9360	0	6110

配水池 3 の使用可能水量と総距離との関係を図 6-9 に示す。この図から、容量と総距離との関係は非線形である。使用可能水量が 80% を切ると、総距離が大きく伸びることが分かる。

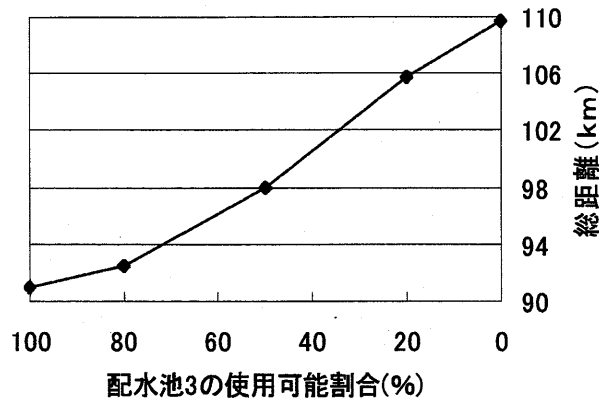


図 6-9 配水池 3 の使用可能水量と総距離の関係

(4) 使用頻度の高い給水ルートが寸断された場合

次に、給水ルートが密集している道路区間が寸断された場合の巡回路を求めた。基本ケースで最も給水ルートが密集している ( $X=2500, 1500 < Y < 2500$ ) の範囲 (図 6-10 の黒い太線部分) が寸断された場合を計算するために、各地点間を結ぶ直線がこの範囲と交わる場合にはその距離を十分大きな値に変更して給水点間距離のデータを与える。表 6-4 に示すように基本巡回路に対する総距離の伸びは大きく、それは、配水池 4 が全く使えない状況と同等の損失であることが分かった。図 6-10 に示した巡回路からも明らかのように、配水池 3 の代わりに配水池 1 の水が使用されている。

表 4-4 道路が部分寸断した時の結果

	総距離	ループ数	所要時間	車の台数	配水池1	配水池2	配水池3	配水池4
基本	90928	27	55.31	6.91	4040	3480	11980	4650
道部分寸断	104187	26	55.86	6.98	8270	3630	5780	6470

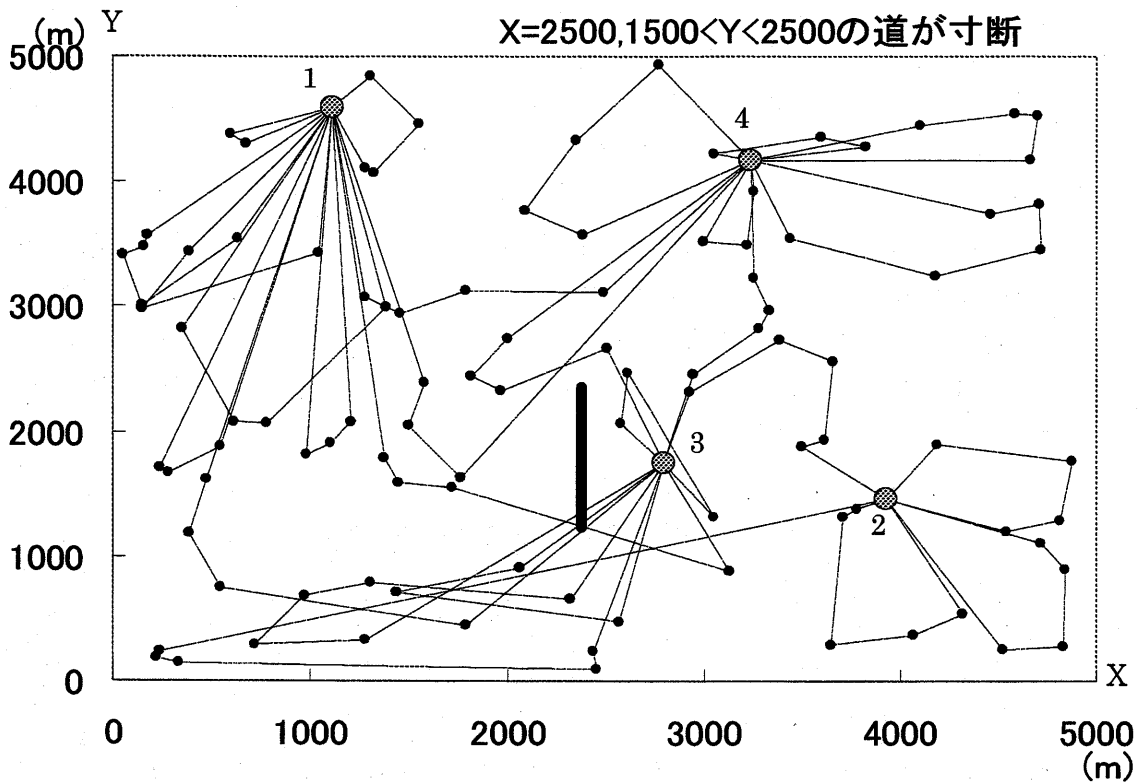


図 6-10 道路が部分寸断したときの巡回路

(5)給水点を集約した場合

次に、給水点を集約した場合を考える。空間上の給水点の個数を 100 個から 50 個に集約する。単純に給水点を減らして各点での給水量を増加させるとそれが給水車の容量を越えるために、実行可能解が得られなくなる危険性がある。そこで、次の方法で行った。

被集約点(間引かれる給水点)をランダムに選びその座標を集約点(最寄りの給水点の座標)と等しくする。この方法を用いると、1つの給水点の需要水量が給水車の容量を超えることがない。結果を表 6-7 に示す。

基本のケースと比較すると、単に給水点を集約すると総距離はむしろ増加することが分かった。これは、間引いたケースにおいて移動距離を節約するには各集約点を 1 回のループで巡回する必要があるが、集約点の需要水量の和が給水車の容量とうまく合致しない結果、途中で配水池に戻って、水の補給をする必要が生じてしまったためであると考えられる。

表 6-7 基本ケースと集約した時の結果

	総距離	ループ数	所要時間	車の台数	配水池1	配水池2	配水池3	配水池4
基本・車1t	90928	27	52.33	6.54	4040	3480	11980	4650
集約・車1t	91378	28	52.53	6.57	5110	3750	11020	4270

#### (6)給水車の容量を変えた場合

基本ケースと、給水点を集約したケースについて、給水点の容量を1tから2t, 4t, に変更した場合について計算した。給水点を総距離を表 6-8 で比較している。給水点の容量が大きくなると配水池に戻る必要が小さくなり、ループ数が少なくなるため総距離はかなり小さくできる。また、給水点を集約した場合の給水車容量不足に起因する問題点が解決しているため、容量の増加の効果は基本ケースよりさらに大きい。このように複数の施設の組み合わせにより効果が大きくなる交互作用が見られる。ただし、1t車の1ループあたりの所要時間が2時間弱であるのに対し、4t車では1ループあたり、7時間程度かかっていることから、もし何らかの理由で遅れが生じた場合に当日に給水できなくなる地点が多く発生する危険性があり、信頼性の問題が発生すると考えられる。

表 6-8 給水点を集約し、給水車容量を変化させた時の結果

	総距離	ループ数	所要時間	車の台数	配水池1	配水池2	配水池3	配水池4
基本・車1t	90928	27	52.33	6.54	4040	3480	11980	4650
基本・車2t	61454	13	49.70	6.21	4870	3820	11570	3890
基本・車4t	47054	7	48.84	6.10	4780	3930	7870	7570
集約・車1t	91378	28	52.53	6.57	5110	3750	11020	4270
集約・車2t	61503	15	50.38	6.30	4990	3640	10970	4550
集約・車4t	37092	7	48.01	6.00	5460	3790	7840	7060

## 6. まとめ

以下にシミュレーションを通じて得られた知見をまとめる。

- 1) 基本ケース(配水池が破壊していない時)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。すなわち耐震化の必要性が高い。
- 2) 基本ケース(通路寸断がない時)の利用頻度の高い場所が破壊して地域の分断が起こると、その巡回時間が大きく伸びる。ただし、地域内に複数ある配水池が均等に分かれるような分断の場合は、総巡回距離は大きく伸びない。
- 3) 給水点の個数よりも、給水車容量の方が、総距離への影響が大きい。
- 4) 給水車の積載容量を増やさずに、単に給水点を集約すると、1つの給水点あたりの需要水量が増加するため一度で運搬できなくなり、逆に総巡回距離が伸びる場合がある。

本研究で用いたモデルでは、給水車が配水池を出発してから、水を配り、配水池に戻るまでの1ループの運用時間に関する制約条件は加えていない。シミュレーション結果の中には、1ループの走行時間が8時間を越えているものもあった。これでは配水池の近くにある給水点と遠くにある給水点との間の給水時間に大きな開きがあり、あまり現実的でない。運用時間の制約を考慮できるようにモデルを改良する必要がある。また、本研究では考慮しなかった給水点配置問題についてもモデルを適用して解を求め、給水車巡回モデル

と統合してシミュレーションを行うことで、井戸水の利用や水の運搬用具の準備等を行った場合の水の運搬可能距離の変化の影響を含めた、総合的な緊急時給水計画のシミュレーションを行うことができる。

さらに本研究で提案した手法を、道路ネットワーク、配水池の位置や住民の分布等のデータを用いて実際の地域に適用することにより、具体的な事前対策について実行可能性を含めた検討を行うことができる。

## 第6章 参考文献

- 1) 日本トイレ協会：トイレパニック，日経大阪 PR 企画出版部，pp29，1996 年
- 2) 森田正三：大震災を教訓にした神戸市水道耐震化計画とその推進状況，阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集，pp689-704，1997 年
- 3) 中川大，若山真樹，伊藤雅：シミュレーションを用いた審査維持の緊急物資輸送計画に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.14，pp353-360，1997 年
- 4) 岡部和弘，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・論文集，No.15，pp323-328，1998 年
- 5) 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(2)，pp541-544，2000 年
- 6) 細井由彦・城戸由能・喜多秀行・山内：豊水道の地震対策とその評価，阪神・淡路大震災に学ぶー土木計画学からのアプローチー阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集，pp681-688，1997 年
- 7) 慶応義塾大学管理工学科川嶋研究室 HP：多様な条件のついた配送計画問題の文字列型モデルを用いた近似解，<http://prius.she.ae.keio.ac.jp/Group/Logistics/>
- 8) 増井忠幸・百合本茂・片山直登：ロジスティックスの OR，槇書店，1998 年
- 9) 長尾智晴：最適化手法，昭晃堂，pp121-127，2000 年
- 10) 塚口博司・川村智司・中辻清恵・戸谷哲男：空中写真を用いた発災直後における道路交通状況に関する分析，阪神・淡路大震災に学ぶー土木計画学からのアプローチー阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集，pp259-266，1997 年
- 11) E. P オダム：基礎生態学，pp73，培風館，1997 年

## 第7章 緊急給水計画モデルの東広島市への適用

第6章では、上水道の寸断時を想定して、緊急給水点の配置問題とその間の給水車による巡回配送問題を定式化し、ヒュー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提案した。本章では、この計算手法を東広島市西条地域に適用して、モデルの適用性を示すとともに、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。

### 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7-1)をとりあげ1:2500数値地図から道路網を抽出した。また、国土数値情報土地利用ファイルの100mメッシュのうち住宅が存在するメッシュを抽出し、国勢調査1kmメッシュの人口をその中の100mメッシュに配分して居住地の分布を与えた。その他の前提条件は以下のようなものである。

- 1)一般の道路の走行速度 12km/h
- 2)住民一人当たりの水の需要量 3ℓ/日
- 3)配水車1台当たりの容量 4t/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/10ℓ

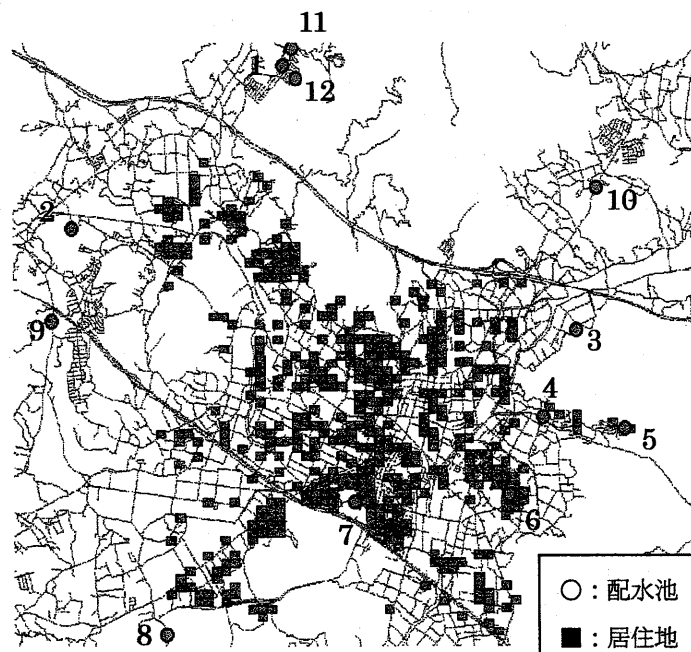


図7-1 対象とする地区の居住地と配水池の位置

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。この問題は整数計画問題であり最適解を求めるための計算手間は膨大である。ここでは Erlenkotter が提案した双対上昇法と、双対調整法<sup>1)</sup>を用いて近似解を得る。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 7-2 のようになった。

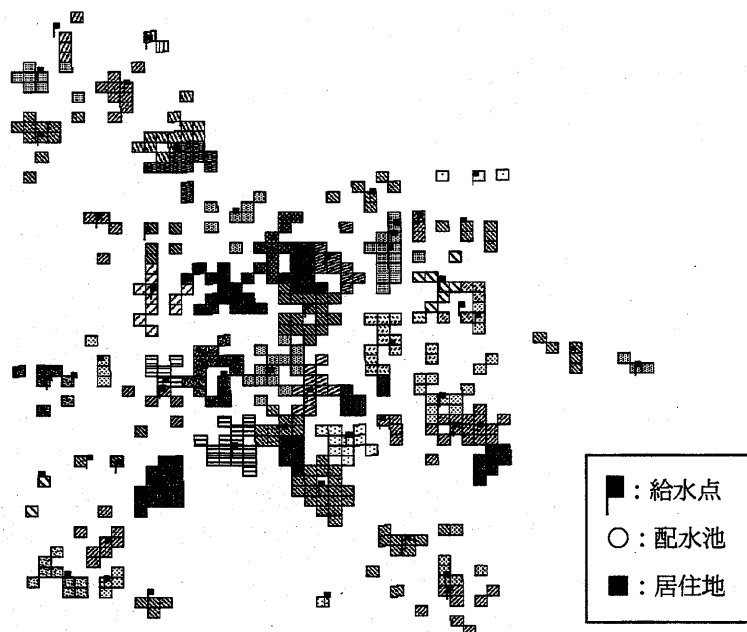


図 7-2 給水点の配置パターン

## 2. 基本ケースの給水計画

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まったく破壊していない状況で配水車巡回問題を解いた結果、12 カ所のうち 8 カ所の配水池が使われていた。この解を基本ケースと呼び、図 7-3 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ことを表している。この図から配水池 7 から北方向と西方向へ向かう道路の使用回数が特に高いことが分かる。表 7-1 に基本ケースにおける各配水池での水の使用量を示す。

次に、この基本ケースをもとに設定を変えて巡回問題を解き、総巡回距離や、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検討する。

表 7-1 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(m <sup>3</sup> )	3.3	13.2	3.7	15.2	1.4	22.5	72.5	10.2

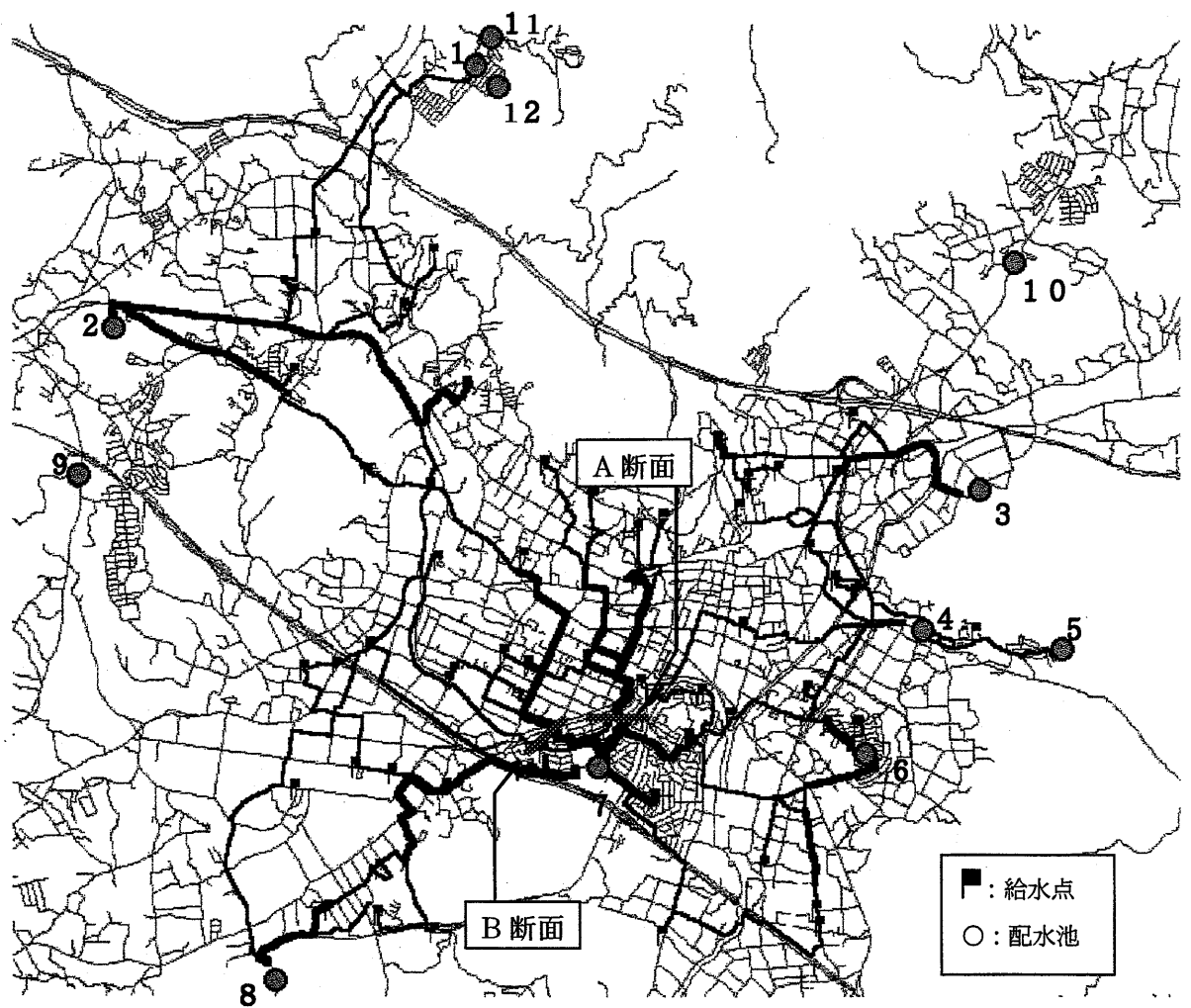


図 7-3 基本ケースの巡回の様子



### 3. 配水池の破壊による影響

基本ケースで使用された8つの配水池がそれぞれ、震災時に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7-2に示す。表7-1と表7-2の比較により、基本ケースで最も多く水を補給していた配水池7が破壊した時、総配水時間の増加量が最大であるほか、配水池の破壊による総配水時間の伸びは基本ケースにおける使用量の順番にほぼ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。

図7-4に配水池7が破壊した時の巡回の様子を示す。図7-4より、配水池7から配水池6などの周りの配水池へ水を補給する場所を切り替えて巡回している様子が分かる。そして、基本ケースでは使用されなかった配水池9が使用されていることが分かる。また、配水池の破壊によって、道路の使用頻度が大きく異なることが分かる。水の補給回数が多い配水池の周りほど、同じ道路の使用頻度が高くなるためである。

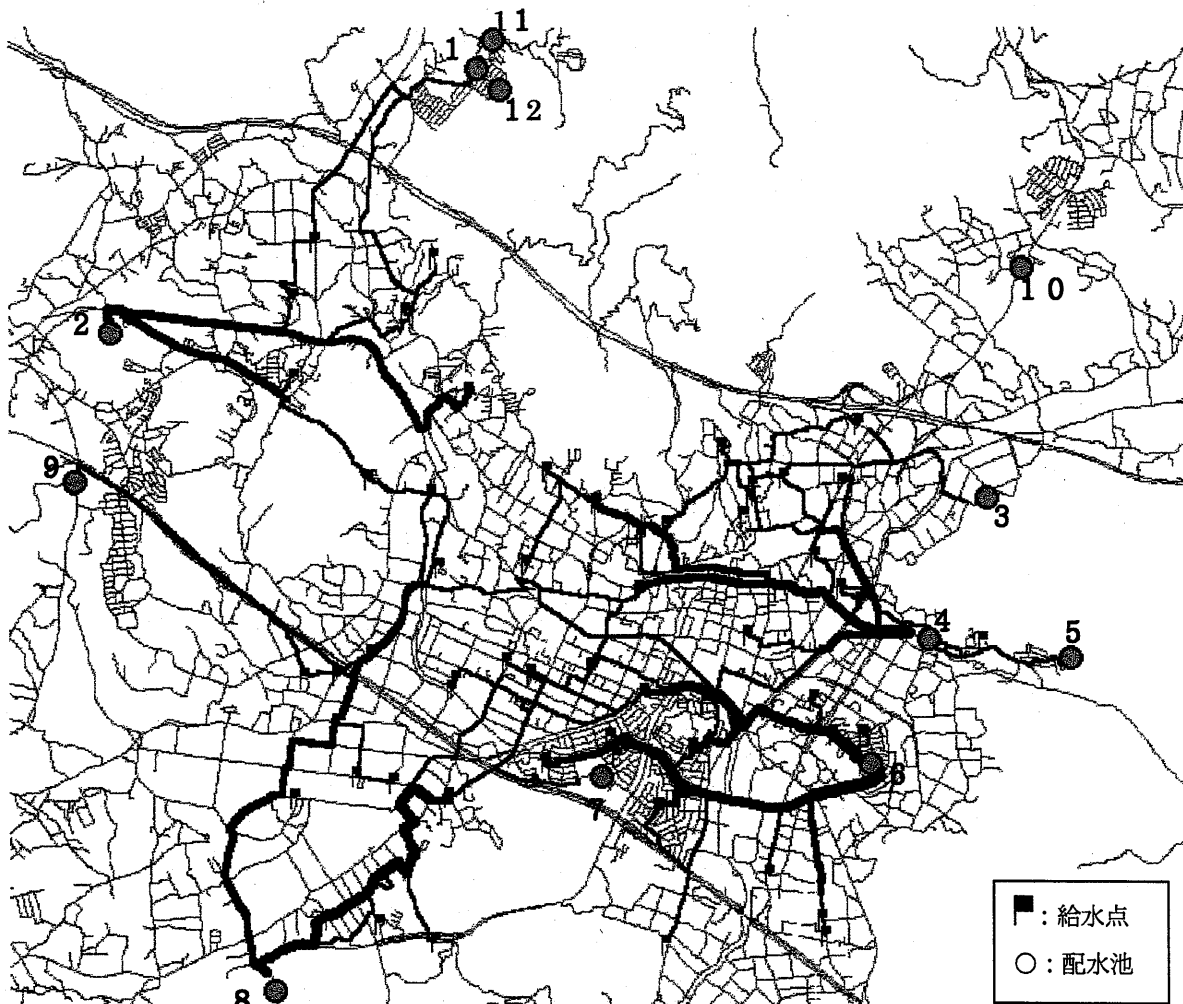


図7-4 配水池7が破壊した時の巡回の様子

表 7-2 各配水池が壊れた場合の結果

破壊配水池	総巡回距離(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 7-3 で多く使われていた配水池 7 から北と西に伸びる道路上の A 断面と B 断面にある橋がそれぞれ落橋した場合と、両方の地域の橋が同時に落橋した場合の計算結果を表 7-3 に示す。表 7-3 より、A, B 断面の橋がそれぞれ単独で寸断されても、総巡回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と思われる。

図 7-5 に、基本ケースの A, B 断面の巡回の様子を、図 7-6 に、A, B 両断面で同時に橋が落橋した場合の巡回の様子を拡大して示す。後者から分かるように広範囲で橋が寸断されると、遠回りの代替路しか存在しなくなるために、総巡回距離が大きく増加する。また、いずれのケースでも、配水活動に必要な配水車の台数に変化はなく 32 台であった。

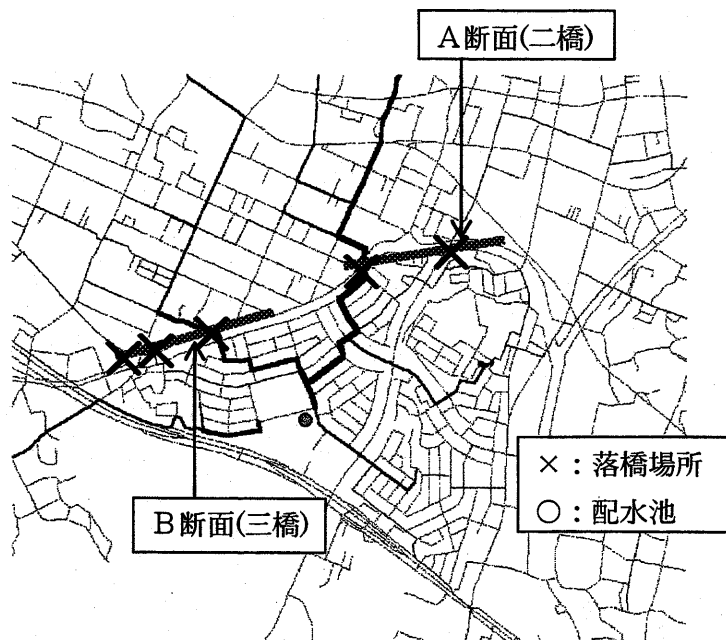


図 7-5 基本ケースにおける巡回図 (拡大図)

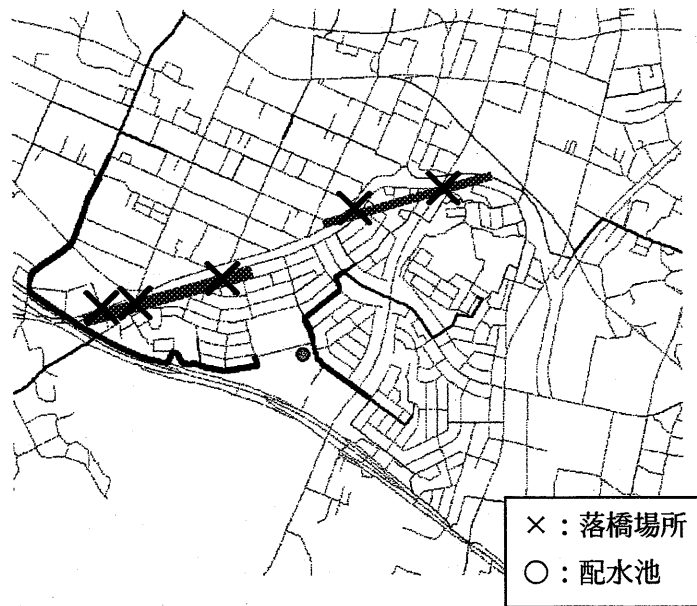


図 7-6 A B断面落橋時の巡回図

表-3 A, B地域で落橋した場合の結果

落橋断面	総巡回距離(km)	総配水時間(h)	配水車数(台)
基本ケース	149.7	254.22	32
A断面	149.7	254.22	32
B断面	151.2	254.34	32
A&B断面	160.6	255.13	32

## 5. まとめ

本研究では事前の防災対策が緊急時給水作業に及ぼす影響を明らかにするため、配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、そのような配水池ほど耐震化の必要性が高い。
- ・ 配水池の利用回数や、道路の使用頻度は、被害の組み合わせによって大きく異なるため、耐震化を考える時は、利用頻度の高い配水池と、その周辺の道路を同時に耐震化しなければならない。
- ・ 落橋で道路が寸断されても、その寸断地域が狭ければ、総巡回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、総巡回距離は悪化する。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。

本手法の計算に必要なデータは、GIS（地理情報システム）により生成されるが、本計算例の場合には地点間のネットワーク上の距離算出の計算量が多く、PCでは実行できなかったため、EWSを使用した。また、焼きなまし法による巡回計画問題も、PCでは計算時間がかかりすぎるという問題があった。これらの制約はPCの性能向上により早晚解決されると思われるが、現状ではPCベースで計算システムを構築することは困難であることがわかった。

## 第7章 参考文献

- 1) Erlenkotter,D: A dual based procedure for uncapacitated facility location, Operations Research, Vol.26, pp.992-1009,1978.
- 2) 増井忠幸、百合本茂、片山直登：ロジステックスのOR、楳書店、1998.
- 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、土木学会論文集、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・論文集、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・論文集、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.

## 付 録

### 付録A(先行研究)

- A 1. 震災時の水運搬能力と水利用
- A 2. 近代的システムによる安全性確保の限界－水道システムを例として－

### 付録B (関連研究)

- B 1. 井戸水の利用と防災用品の備蓄に関する調査
- B 2. 緊急時地下水利用システムの検討
- B 3. 観測地価と詳細地理情報に基づく土地利用モデル

### 付録C (関連教育活動)

- C 1. 高校生対象公開講座ワークブック (2002年8月)