The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	家庭の水使用形態の変化を考慮した渇水被害の最小化のための貯水池運用に関する研究
Author(s)	津田, 守正
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34422
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

家庭の水使用形態の変化を考慮した渇水被害の最小化のための貯水池運用に関する研究

津　田　守　正

２０１３年１２月

大阪大学大学院工学研究科

目 次

第１章　序論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1　概説 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.2　研究の目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
1.3　本論文の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7

第２章　家庭の水需要量と給水制限時の追加節水量の定量評価 ・・・・・・ 8
2.1　緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
2.2　渇水時の使用水量の定量評価手法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
2.2.1　水道における渇水対応の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
2.2.2　給水制限時の追加節水量の定量評価手法 ・・・・・・・・・・・・・・・・12
2.3　高松市，松山市の水使用の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 14
2.3.1　高松市の水使用の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
2.3.2　松山市の水使用の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16
2.4　高松市，松山市における用途別使用水量の定量評価 ・・・・・・・・・・・・・ 18
2.4.1　家庭用，業務用日使用水量の推計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
2.4.2　回帰モデルの適用方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30
2.4.3　回帰モデルの適用結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・36
2.4.4　水需要量と給水制限時の追加節水量の経年変化 ・・・・・・・・・・・・・47
2.5　結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 52

第３章　給水制限時の家庭の経済的被害の定量評価 ・・・・・・・・・・・・55
3.1　緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
3.2　家庭の水使用行動のモデル化による経済的被害の評価 ・・・・・・・・・・・ 56
3.2.1　給水制限時の家庭の水使用行動 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・56
3.2.2　モデルの概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
3.2.3　実渇水への適用方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61

3.2.4　モデルの再現結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
3.2.5　実渇水時の追加節水量と経済的被害の推計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・68
3.3　水使用形態の変化に伴う経済的被害の変化の推計 ・・・・・・・・・・・・・・・ 69
3.3.1　推計方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69
3.3.2　推計結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69
3.3.3　モデルの不確実性の評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・70
3.4　結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・72

第４章　水需要抑制策を講じた場合の水需要量の将来予測 ・・・・・・・・・ 75
4.1　緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 75
4.2　水需要抑制策を講じた場合の水使用形態の変化 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 76
4.2.1　水使用形態の経年変化の動向 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・76
4.2.2　水需要抑制策の効果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・80
4.3　水の再利用による水需要抑制効果の推計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・81
4.3.1　松山市の節水型機器購入補助制度の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・81
4.3.2　補助制度による水需要抑制効果の推計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・82
4.4　節水型機器の普及促進による水需要抑制効果の将来予測 ・・・・・・・・・・・ 84
4.4.1　節水型機器の普及促進による水使用機器の買い替え行動の変化 ・・・・・・84
4.4.2　将来予測の方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・86
4.4.3　予測結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・88
4.5　結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92

第５章　渇水被害最小化のための貯水池運用の方向性 ・・・・・・・・・・・96
5.1　緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 96
5.2　渇水時の貯水池運用の方向性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 97
5.3　石手川ダムの貯水池運用のモデル化の方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 98
5.3.1　石手川ダムの貯水池運用の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・98
5.3.2　モデル化の方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
5.4　計算結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・101
5.4.1　再現計算 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・101
5.4.2　水使用形態，給水人口等の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・103
5.4.3　給水制限強度の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・106
5.4.4　節水型機器の普及を促進した場合の将来予測 ・・・・・・・・・・・・・・・108
5.4.5　気候変動の影響予測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・111

5.5　結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・115
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・116

第６章　結論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・118

謝辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・123

関連論文 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・124

第１章　序論

1.1　概説

近年，家庭における水の再利用や，節水型機器の普及など，家庭の水使用形態が変化している．このため，家庭の使用水量は減少傾向にある．**図 1.1** に我が国の生活用水使用量の推移を示す．ただし，生活用水には家庭用水のほか，営業用水や事務所用水，公共用水や消火用水等の都市活動用水も含まれている．1965 年度における 1 人 1 日平均使用量は 169 リットルであったが，1995 年度には 322 リットルとほぼ倍増した．しかし，その後，1995 年度頃を境として，横ばいから微減傾向にあり，2009 年度には 296 リットルとなった．将来的には人口減少もあいまって生活用水使用量の減少が予想される．

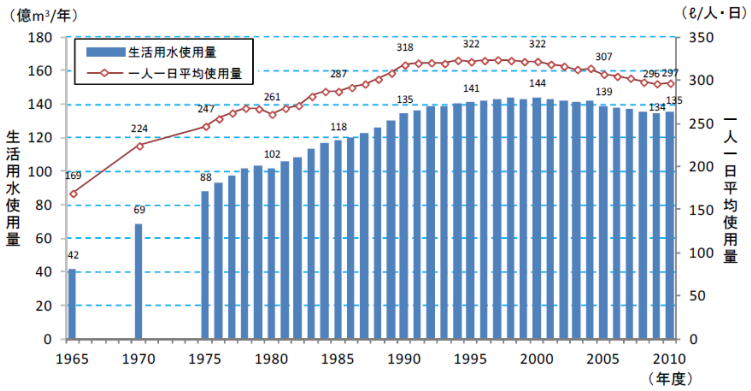


図 1.1　生活用水使用量の推移（国土交通省，2013）

図 1.2 に，我が国における最近 30 年間の渇水の発生状況を示す（国土交通省，2013）．この図でいう渇水とは，上水道の減断水があった年をいっている．全国の多くの地域でこの 30 年間に渇水が発生しているが，特に赤で着色された香川県高松市や愛媛県松山市付近などの地域では，30 年間のうち 8 ヶ年以上も渇水が発生している．四国では，渇水頻発地域というイメージが，観光振興や企業の誘致などの面で地域経済への足かせになっているという指摘もあり，現在においても渇水対策が重要な課題となっている．四国水問題研究会が，四国での居住経験がない人に対して行ったアンケート（四国水問題研究会，2011）によると，約 55%の人が四国には渇水が多いというイメージを持っており，そのうち約 40%が，渇水中の四国には観光に行かないと答えている．

こうした渇水頻発地域だけでなく，2013 年には利根川水系で河川からの取水制限が行われるなど，近年の少雨傾向により，全国各地で渇水が発生する傾向にある．将来の気候変動による渇水規模，頻度の拡大の可能性も考慮して，長期的視点のもとで対策を講じることが重要である．このためには，家庭における水使用形態の変化が，生活用水の使用量や，生活用水等に水の補給を行うダム貯水池の運用に，どのような影響を及ぼすかを解析しなければならない．

一方で，近年の環境意識の高揚を背景として，節水型機器の普及促進策等の水需要抑制策が注目を集めている．こうした施策の実施により，家庭の水使用形態の変化は加速する．水需要抑制策とあわせて，ダム貯水池の運用を変えることで，より効果的な貯水池運用が可能になるかもしれない．

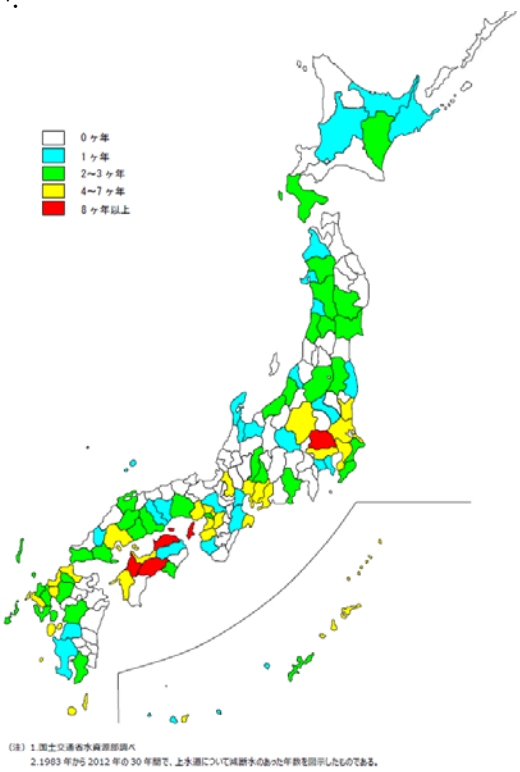


図 1.2　最近 30 年間における渇水の発生状況（国土交通省，2013）

ここで，一般的な渇水時の貯水池運用について述べる．少雨により河川流況が悪化し，河川からの上水道用水，農業用水等の取水が困難になると，貯水池から水の補給が行われる．貯水池からの補給により，貯水池の貯水量が減少すると，長期的な渇水に備えるために，関係者の協議のもとで，河川からの取水制限が実施され，貯水量の温存が計られる．同時に，水道事業者により，市民への節水の呼びかけや，減圧給水，時間給水といった給水制限が行われる．こうした対応は，一般的に既往最大規模の渇水等を念頭に行われる．貯水池が枯渇した場合，必要な水量を確保するために，用途間，自治体間の水の転用がなされたり，新たな井戸の掘削や河川からの取水設備の追加設置等がなされるなど，多大な行政コストが必要になる．

給水制限が実施されると，水道の蛇口から出る水の勢いが悪くなったり，蛇口が使える時間が制限される．家庭での水使用に，より多くの時間や労力が必要となり，水使用が抑制される．水の再利用等の対応も行われる．このような，給水制限時において，平常時よりも追加的に行われる節水行動のことを，本研究では「追加節水」と呼び，平常時に行われる節水と区別する．追加節水により得られる節水量を，本研究では「追加節水量」と呼ぶ．

河川からの取水制限強度は，通常，農業や工業での利用よりも，家庭の水使用を優先する形で設定される．そのため，給水制限により，家庭においてどの程度の追加節水がなされるかにより，取水制限強度の設定が影響され，その結果，貯水池運用にも影響を及ぼす．家庭の追加節水により，貯水池からの水の補給量が抑制されると，貯水池が枯渇に至るまでの期間が先延ばしされる．この間の降雨により貯水量が一定の水準まで回復すれば，取水制限，給水制限は解除される．少雨が継続し，貯水池からの補給をさらに抑制する必要が生じた場合には，より厳しい取水制限，給水制限が導入されていく．

家庭の水使用形態の変化により，平常時の家庭の需要量が減少すると，貯水池からの補給量は少なくて済む．その結果，貯水量が減少しにくくなり，取水制限，給水制限の頻度が少なくなる．一方で，水使用形態の変化により，逆に貯水池が枯渇しやすくなる可能性がある．節水型機器の導入が進んだことにより，洗濯やトイレ等の 1 回あたりの使用水量は減少するが，これは，給水制限期間中において，家庭で水使用回数を抑制したとしても，得られる追加節水量が減少することを意味する．さらに，日常的な節水行動が浸透すると，給水制限時に使用水量をさらに切り詰めることが困難となる（村川ら, 2002).

よって，水需要抑制策の実施状況も考慮しつつ，家庭の水使用形態の変化に対応して，家庭の被害を最小化できるような，貯水池運用を考えなければならない．しかし，こうしたことについては，これまで十分に検討されてきていない．その理由としては，主に以下の 3 つの課題が考えられる．

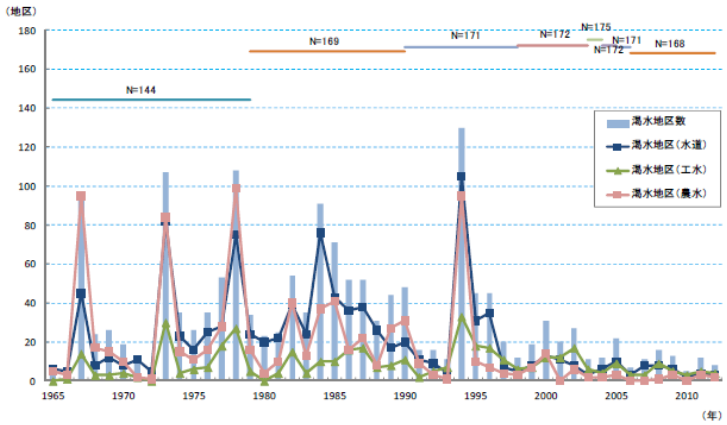
1 点目は，給水制限時の家庭の使用水量の変動が，十分に解析されていないことが挙げられる．家庭の水使用形態の変化が，給水制限頻度や貯水池枯渇頻度等に及ぼす影響を解析するには，給水制限未実施時の需要量や，給水制限時の追加節水量を，水道の用途別に分

けて定量評価する必要がある．しかし，通常，自治体レベルの水道の日単位の使用水量は用途別に集計されておらず，家庭や業務等，様々な用途での使用を含む，給水量として集計されている．家庭用や業務用に区分された集計としては，水道料金を計算するために集計される調定水量があるが，月単位の集計であり，自治体によって集計方法がまちまちである．我が国では，給水制限の強度は降雨状況等に応じて，数日単位で細かく調整されるため，日単位などの細かい間隔で，給水制限時の使用水量を解析することが求められる．家庭に量水器を設置し，日使用水量を把握する調査も実施されているが（国土交通省, 2009），貯水池運用まで含めた解析を行うには，自治体レベルの日使用水量が必要である．また，水道の給水量に占める家庭用の比率は，経年的に変化していることから，将来の貯水池運用を検討する際には，給水量を用途別に区分して解析することが必要である．

2 点目は，給水制限による家庭の被害が十分に解析されていないことが挙げられる．渇水時の最適な給水制限強度の設定を考える上で，給水制限による家庭の被害を定量評価する必要がある．給水制限時の水の再利用に伴う労力や所要時間等を表現し，給水制限による経済的被害を評価するモデルが提案されているが（多々野ら, 1990; 岡田ら, 1991），課題の 1 点目に挙げたように，我が国では用途別日使用水量のデータが不足していることや，給水制限下における家庭の水使用行動の実態が，十分に解析されていないこと等により，実渇水への適用は少ない．

特に，2000 年以降，時間給水を伴う渇水の発生は限られており，知見が不足している．**図 1.3** に各種用水の渇水発生地区数（国土交通省, 2013）を示す．ここでの渇水とは，水道用水については，水道事業者が減圧給水，時間断水により給水量の削減を行った場合であり，工業用水については，工業用水道事業者が減圧給水，時間断水により給水量の削減を行った場合，あるいは需要者に節水率を定めて節水を求めた場合である．農業用水については，河川等の流況の悪化あるいは取水制限に伴い生育不良が生じた場合である．1990 年代までは，1973 年，1978 年，1984 年，1994 年など，大規模な渇水が多くの年で発生した．たとえば，1994 年渇水時には，**表 1.1** のように多くの自治体で，長期間の断水等の厳しい給水制限が実施された（細田, 1996）．しかし，2000 年に入ってからは，2013 年に沖縄県の久米島町や座間味村で夜間断水が実施されたものの，時間給水が実施された例は少なく，時間給水時の水使用行動についての知見が不足している．

課題の 3 点目として，将来の水需要量や，水需要抑制策による使用水量の変化を予測することが困難であることが挙げられる．1990 年代までは，シャワーや水洗トイレなどの水使用機器の家庭への導入が，水使用形態に大きく影響していたが，これらの普及がほぼ飽和状態に達した現状において，今後は，古くなった機器から新しい機器への買い替えを考慮しなければならない．このような，機器の買い替えの効果については，これまでのところ十分に解析されていない．将来においては，技術開発の進展や生活様式の変化などにより家庭における水の使われ方が大きく変化することも考えられるため，水需要量の将来予測には多くの不確実性が含まれる（清水ら, 2012）．



(注) 1.国土交通省水資源部調べ
2.全国を 1965～1978 年は 144、1979～1989 年は 169、1990～1997 年は 171、1998～2003 年は 172、2004 年は 175、2005 年は 172、2006 年から 171、2007 年から 168 の地区に分割して集計した。
3.同一地区で水道、工水、農水のうち複数の減断水が行われた場合もあるので、それら 3 用途の総和が必ずしも渇水発生地区数となってはいない。

図 1.3　各種用水の渇水発生地区数（国土交通省，2013）

表 1.1　1994 年渇水における主な都市の断水（細田，1996）

市町村名	時間給水実施期間	1 日当たり最大断水時間（実施期間）
姫路市	8 月 22 日～11 月 24 日	6（8 月 22 日～11 月 24 日）
倉敷市	8 月 9 日～9 月 28 日	16（8 月 25 日～9 月 28 日）
福山市	8 月 16 日～9 月 28 日	12（8 月 16 日～9 月 28 日）
三原市	7 月 21 日～9 月 6 日	19（7 月 21 日～7 月 26 日）
尾道市	7 月 22 日～9 月 8 日	20（7 月 26 日～8 月 20 日）
因島市	7 月 18 日～9 月 8 日	20（7 月 25 日～8 月 20 日）
高松市	7 月 11 日～9 月 30 日	19（7 月 15 日～8 月 15 日）
松山市	7 月 26 日～11 月 25 日	19（8 月 21 日～10 月 21 日）
伊予市	7 月 20 日～11 月 8 日	20（9 月 1 日～10 月 23 日）
福岡市	8 月 4 日～6 月 1 日	12（9 月 1 日～10 月 25 日）
北九州市	9 月 12 日～10 月 10 日	6（9 月 12 日～10 月 10 日）
佐世保市	8 月 1 日～3 月 6 日	20（8 月 26 日～9 月 14 日）

1.2　研究の目的

本研究においては，家庭の水使用形態の変化に対応し，近年，注目を集めている水需要抑制策の導入効果も考慮して，渇水被害を最小化するための貯水池運用の方向性について検討する．主として香川県高松市，愛媛県松山市を対象として，前述の 3 点の課題を念頭に，以下の事項を検討するものである．

1) 自治体等において集計されておらず，推計方法が確立されていない，家庭の日使用水量を，自治体レベルで推計する方法を検討し，給水制限未実施時の需要量や，給水制限時の追加節水量を定量評価する．

2) 給水制限時の水の再利用に伴う労力等から，実渇水を例に家庭の経済的被害を定量評価する．

3) 近年，社会において注目されている，節水型機器普及促進策の水需要抑制策としての有効性を検討する．

4) 貯水池運用も含めて家庭の水使用をモデル化し，給水制限頻度や，給水制限時の家庭の経済的被害，他用途等の水利用への影響や，気候変動による気象特性の変化も考慮して，渇水被害を最小化するための貯水池運用の方向性を検討する．

1.3　本論文の構成

本論文は，本章を含めて 6 章から構成される．各章の内容を以下に示す．

第 2 章では，高松市，松山市を例に，平常時および給水制限時の家庭用，業務用の日使用水量を定量評価し，1994 年と 2000 年以降の渇水時の比較を行う．

第 3 章では，高松市，松山市の家庭の水使用行動をモデル化し，給水制限時の水の再利用に伴う労力等から，経済的被害を定量評価し，年代間の比較を行う．

第 4 章では，高松市，松山市を対象に，節水型機器の普及促進策を講じた場合の水使用行動の変化や，節水型機器普及率の変化を推計し，水需要抑制のための節水型機器普及促進策の有効性を検討する．

第 5 章では，松山市の石手川ダムの貯水池運用を含めて，家庭の水使用をモデル化し，将来の気候変動の影響を踏まえて，渇水被害を最小化するための方向性を検討する．

第 6 章では，本研究により得られた結果をまとめるとともに，今後の課題を述べ，結論とする．

参考文献

岡田憲夫・多々納裕一・小林潔司・並河光夫（1991）: 渇水時の水消費行動のモデル分析, 京都大学防災研究所年報, No.34B-2, pp.127-144.

国土交通省（2013）: 日本の水資源, 平成 25 年版.

国土交通省近畿地方整備局淀川水系総合調査事務所（2009）: 淀川水系断水社会実験報告書.

四国水問題研究会（2011）: 四国地域の渇水イメージ調査の紹介, 第 14 回四国水問題研究会資料.

清水聡行・東佑亮・谷口久美子・山田淳（2012）: 多変量解析法を用いた家庭用水の需要予測に関する一考察, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.1, pp.72-83.

多々野裕一・岡田憲夫・小林潔司（1990）: 給水制限が水消費行動に与える影響に関する研究, 水資源研究センター報告, Vol.10, pp.43-59.

細田三朗（1996）: 取水制限と制限給水 - 平成 6 年渇水の実態 - , 水道協会雑誌, Vol.65, No.4, pp.2-17.

村川三郎・西田勝・北山広樹・西名大作・周南・宮山博司（2002）: 福岡市の住宅団地 10 年間における水使用構造の比較, 日本建築学会計画系論文集, No.554, pp.47-53.

第２章　家庭の水需要量と給水制限時の追加節水量の定量評価

2.1　緒言

渇水時の貯水池運用を考えるうえで，給水制限未実施時の使用水量（需要量）と，給水制限が実施された場合に，家庭や事業所等において普段からの節水に加えて，どの程度の追加的な節水がなされ，上水道の使用水量がどの程度抑制されるか（追加節水量）が重要である．

これまで，角ら（1996）は，給水制限が実施されなかった場合の，水道の需要量を重回帰分析より推計し，給水制限時の給水量と比較することで，給水制限による使用水量の抑制効果を解析した．また，鈴木ら（1996）は，渇水に対する社会的関心の高揚により，上水道の給水量がどの程度抑制されるかを検討した．これらの研究は，上水道の給水量を対象としたが，上水道の給水量は家庭や業務など様々な用途に利用され，給水量に占める各用途の比率は経年的に変化する．よって，上水道の給水量を用途別に区分することで，より詳細な解析が可能となる．特に，渇水時には業務用や農業用，工業用の水使用よりも，家庭の水使用に対して優先的な配慮がなされるため，家庭の水使用の特徴を把握することが，将来の貯水池運用の方向性を検討するうえでも重要である．

しかし，上水道の給水量は，水道事業者において，用途別に集計されておらず，用途別日使用水量の自治体レベルの集計値は存在しない．水道料金を計算するために，月単位で集計されている調定水量は，用途別に区分されているが，渇水時に数日単位できめ細かく調整される給水制限の効果を，月単位のデータで解析するのは難しい．そこで，本研究では，調定水量を用いて給水量に占める用途比率を推計し，日給水量に乗じることで，用途別日使用水量を推計する方法を提案する．この方法を，香川県高松市，愛媛県松山市に適用し，家庭用，業務用に区分して，日使用水量を推計する．さらに，この推計結果に対して，気象要因，週変動，月変動，年変動，給水制限強度を考慮した回帰モデルを適用し，給水制限未実施時の需要量や，給水制限による追加節水量について，1994 年と 2000 年以降の渇水時の比較を行う．

2.2　渇水時の使用水量の定量評価手法

2.2.1　水道における渇水対応の概要

渇水時には給水制限等により上水道の給水量を一時的に減らして，水源に貯められた水を温存し，その間の降雨による貯水量の回復を期待しつつ，長期的な被害を最小化するという方策がとられる．

例えば，高松市の 2013 年渇水時の発表資料（2013）によると，高松市では，主要水源である早明浦ダムの貯水量におおむね連動して，関係者の協議により実施される取水制限と対応する形で，**表 2.1** のような渇水対応が実施される．

こうした対応のうち，国内外において実施される，主な渇水対応の特徴について整理する．我が国においては，主に水道事業者や自治体等により，節水広報や，減圧給水，時間給水といった給水制限，自治体間や用途間での水融通，プール使用やガソリンスタンドでの洗車の使用制限・自粛要請等の対応が講じられる．他国においては，使用水量を抑制するための一時的な水道料金の値上げ等も実施される．こうした対応の実施においては，水量の点だけでなく，実施に伴い生じる被害，公平性，強制力や監視の容易さ，実行可能性についても考慮が必要である．

表 2.1 高松市の渇水対応（高松市（2013）発表資料より作成）

	第一次渇水対応	第二次渇水対応	第三次渇水対応
実施時期	第三次取水制限開始後/ 早明浦ダム貯水率 30%	第四次取水制限開始後想定/ 早明浦ダム貯水率 15%	第五次取水制限開始後想定/ 早明浦ダム貯水率 0%
渇水対策本部	渇水対策本部および看板の設置 本部会議の開催		
給水制限	水圧調整（減圧率 25.9%）	・水圧調整（減圧率 33.3%） ・幹線バルブ操作 ・合併町（香南町・香川町・国分寺町）の減圧調整	水圧調整（減圧率 33.3%）
報道機関への情報提供	報道機関への随時資料提供	報道機関への随時資料提供	報道機関への随時資料提供
節水啓発	・節水啓発チラシの配布 ・節水啓発懸垂幕の設置 ・自主減圧実践啓発ポスターの掲示 ・NHK地上デジタルデータ放送への渇水情報掲載依頼 ・市庁内放送および上下水道局電話保留音源による節水啓発広報 ・有線放送・防災無線・CATV（文字放送）による節水啓発広報	・消防広報車による出火防止の巡回広報 ・防火対象物の防火管理者等への火災予防の徹底等依頼	
節水依頼	・市職員，上下水道モニター，上下水道事業特別協力員への節水協力依頼 ・国・県・市有施設，大口使用者，大手不動産業者への節水協力依頼 ・各コミュニティ協議会長，各地区（校区）連合自治会長への節水協力依頼 ・市公用車の洗車自粛および市有施設（直圧施設のみ）での自主減圧実践要請	・香川県石油商業組合高松支部およびガソリンスタンドへの洗車自粛要請 ・大口使用者への自主減圧実践要請（直圧施設）および訪問流入弁絞込み	・市営プールへの営業自粛要請 ・市立学校へのプール使用自粛要請 ・私営プールへの営業自粛または営業時間短縮要請
緊急水源対応		市内土地改良区理事長等への取水協力依頼	
応急給水対応		出水不良地区への応急給水の実施	応急給水所（28 箇所）の随時開設
その他	・再生水給水所の開設，再生水の利用促進広報 ・井戸水水質検査手数料の減額（1/2）実施 ・消防渇水対策本部の設置	・「公共の井戸」，「善意の井戸」の開設 ・消火出場体制の強化	・高松市干害応急対策（農業用井戸掘削等の補助）事業の実施 ・渇水対策緊急融資（中小企業の事業資金）事業の実施

(1) 節水広報

水道事業者や自治体等による節水広報としては，マスコミを通じた広報，広報看板や，のぼりの掲示，巡回車による放送，広報誌での節水を呼び掛ける記事の掲載，各戸へのチラシの配布等が実施される．また，受水槽を持つマンションでは，減圧給水が実施された場合でも，各戸の給水圧が変化しないことから，住民に対して各戸の給水栓の絞り込みを促すチラシ配布等も行われる．国や自治体等により渇水対策本部が設置されたり，取水制限や給水制限等が強化されると，マスコミ等により報道され，市民への周知がなされる．新聞報道等により，渇水に対する社会的関心が高まると，自主的な節水が行われ使用水量は減少するといわれている（鈴木ら, 1996).

(2) 給水制限（減圧給水，時間給水）

上水道の給水量を強制的に減少させるため，水道事業者により，水道の給水圧を減圧する減圧給水や，水道の給水時間を制限する時間給水（断水）が実施される．渇水の初期の段階では，減圧給水が行われるが，渇水が進行すると，夜間断水や時間給水が実施される．本管による給水圧，給水時間のコントロールのほか，家庭ごとの止水栓の絞り込みによる減圧，断水が実施される場合もある．

減圧給水，時間給水による水道の給水量の節水量は，1994 年の渇水を対象とした研究によると，最大でも需要量の 40%程度であり，給水時間や給水圧から想定される量よりも少ない（角ら, 1996). このため，渇水が長期化した際の給水制限の効果は限定的である．

本管の仕切弁等による減圧給水や時間給水では，平地部に比べて高台等で水の出が悪くなり，給水車からの給水に頼らなければならなくなるなど，居住地による公平性に問題が生じる場合がある．また，1994 年渇水時には，時間給水時に病院における透析のための水が確保できなくなるといった問題が生じた．これらに配慮するため，家庭ごとの止水栓の開閉や，水道メータに制限パッキンを挿入することによる給水制限が行われることもある．1994 年渇水時に，西宮市北部地域では，家庭ごとの止水栓の絞り込みが行われ，各家庭で蛇口 1 栓程度が使用できるように調整された（勝矢, 1997). 長崎市では，水道メータに制限パッキンを挿入することによる減圧が実施され，佐世保市においては，止水栓の開閉による時間給水が行われた（細田, 1996).

時間給水が実施されると，特定の業務への影響が大きく生じる．松山市の 1994 年渇水時には，午後 4 時から午後 9 時の間のみ，水道が利用できる時間給水が実施されたため，会社等から直接帰宅する人が多く，飲食業に多大な影響が生じた．また，観光への影響や，各種のイベントが中止された．学校等では食器洗浄の必要がないメニューが提供された．このように，時間給水は社会的な影響が大きいこともあり，1994 年渇水以降，渇水対策としてはほとんど実施されていない．また，減圧給水や時間給水により，水道の給水量が抑制されると，水道事業者の収入が減少する．水道事業は通常，自治体等により運営されているため，水道事業の収支の悪化は最終的に地域住民の負担に帰着する．

(3) 水融通

渇水時においては，農業用水や工業用水，発電用水に比べて，水道用水に対する優先的な配慮がなされる．自治体等の水源状況に応じた水融通もなされる．たとえば，1994 年，2005 年，2008 年の香川県における渇水時には，以下のような用途間調整が行われた．

- 各市町の自己水源の状況に応じて，早明浦ダムを水源とする香川県営水道から，各市町への供給量を調整．
- 香川県のあっせんにより，香川用水の農業，工業用水を水道用水に転用．
- 早明浦ダムの枯渇時に，人道的措置として，発電事業者が所有する早明浦ダムの発電専用容量の貯留水を，水道用水として緊急的に供給．
- 香川県の工業用水専用ダム（府中ダム）の貯留水を水道用水として利用．

さらに近年では，平成の大合併等による自治体の広域化を背景として，合併自治体内での広域的な水利用が行われるようになってきている． 2008 年の香川県の渇水では，香川県の主要水源である早明浦ダムの利水貯水量がゼロになるという事態に陥ったにもかかわらず，合併後の市町間での広域的な水運用がなされた結果，時間給水が回避された．

こうした水融通は，互譲の精神のもとで行われている．しかし，農業用水や工業用水の利用者は，余剰の範囲で水道用水に対して水融通を行っているのではなく，自らの活動に影響が生じながらも，人道的な観点から水を提供している．例えば，1994 年の香川県の渇水時には，農業用水の減少により農家の出役，出費は，通常年の数倍以上に達したといわれている（長町, 1995). 工業用水の受水企業についても，生産調整や売上の減少といった影響が生じた（大西, 1995). こうした状況のもとで水道用水への優先的な配慮がなされることについては，公平性の上で問題がある．

我が国では，河川法により有償の水融通は禁止されているが，有償の水融通制度により期待される効果や，制度設計に関する研究が行われている（谷本ら, 2003; 岡ら, 2004).

(4) 用途別使用制限

自治体により特定用途の水使用が制限されたり，自粛が要請される場合がある．我が国では，公営プールの使用禁止や，ガソリンスタンドにおける洗車の自粛要請等が行われる．アメリカ，オーストラリア等では，各家庭において，散水やプール用水など，屋外で使用される水量が多く，こうした用途の使用回数や使用機器の制限がなされる．こうしたことを背景として，アメリカ，オーストラリア等においては，屋外用水の制限強度と使用水量抑制効果を把握するための研究（Kenney et al., 2004; Kenney et al.,2008）が行われている．また，水道料金の値上げと比較した用途別使用制限の有効性について，多くの研究が行われている．その概要については，次の（5）水道料金の値上げで述べる．

(5) 水道料金の値上げ

我が国では，渇水時の使用水量の抑制のための，水道料金の値上げは行われていない．アメリカでは長期の渇水期間中に水道料金体系を変更するような渇水対策も講じられている（Kenney et al.,2008).

各国において，水道料金の値上げや，給水制限，用途別使用制限の渇水対策としての有効性を比較するための，様々な研究が行われている．用途別使用制限や時間給水等と，水道料金の値上げの経済性を比較した研究（Woo, 1994; Roibás et al. 2007; Grafton et al., 2008; Olmstead et al., 2009）や，屋外用水の使用制限や水道料金の値上げの有効性を包括的に比較した研究（Burness et al., 2005; Mansur et al., 2012）等がある．

用途別の使用制限や時間給水等に比べて，水道料金の値上げによる価格メカニズムに委ねることで，個々の利用者が与えられた状況の中で，それぞれの選好に応じて最も合理的な行動をとることが可能であり，より経済的であると主張する研究がある．水道事業は公的主体により運営されるため，水道料金の値上げにより得られた自治体の収入の増加は，地域住民に還元される点も利点として挙げられている．

一方で，水道料金の値上げと屋外用水の使用制限との比較においては，屋外用水は価格弾力性が高いことや，監視が容易であること，水道事業者が使用水量を抑制したいときに即座に導入できることも含めて，現状の様々な制約のもとでは，屋外用水の使用制限がより現実的であるという指摘がある．水道料金を値上げしても，支払い時期は値上げの数か月後になるため，利用者が値上げの影響を認識し，水使用行動を変化させるまでに時間がかかることも指摘されている．水道料金の値上げは，水使用の多くが生活維持のためである，低所得層の支出の増大など，公平性での配慮が必要であるという意見もある．

また，水道料金の値上げと屋外用水の使用制限の使用水量抑制効果は追加的でなく，これらを同時に行った場合の抑制量は，それぞれを単独で行った場合の抑制量を合計したものよりも少ないといわれている．

2.2.2　給水制限時の追加節水量の定量評価手法

前項で述べた渇水対応のうち，我が国では渇水初期においては節水広報，給水制限，用途別使用制限が実施される．こうした対応を実施しても，必要な水量が確保されない場合には，用途間，自治体間の水融通が実施される．節水広報，給水制限，用途別使用制限は，おおむね給水制限強度に連動して強化，緩和される．よって，本検討では，給水制限強度を，水道事業者等により講じられる，各種の渇水対応の強度を代表する指標として用いる．

ここで，これまで用いられた，水道の給水制限時の追加節水量の定量評価手法の特徴について整理する．

給水制限時の追加節水量は，一般的に，給水制限等が実施されていなかった場合に想定される需要量の推計値と，給水制限時の使用水量との比較により評価される．従来，こうした評価は，上水道の給水量ベースでなされている（角ら, 1996)．しかし，上水道の給水量

は，家庭用，業務用等の様々な用途に利用される．上水道に占める各用途の比率は，経年的に変化しており，都市によっても異なる．そのため，年代間，都市間の比較をする場合においては，用途別に区分して解析する必要がある．国外においては，自治体レベルの給水量のデータでなく，家庭レベルの詳細な水道使用水量データを用いた解析も行われている（Roibás et al. 2007; Kenney et al., 2008）が，国内における同様の手法の適用例は限られている．

また，用いるデータの集計期間として，月単位のデータを用いる場合（Renwick, 2000; Kenney et al., 2008）や，日単位のデータを用いる場合がある（角ら, 1996; Kenney et al., 2004; Grafton et al., 2008）．アメリカ，オーストラリアなど海外の渇水のように給水制限が複数年間にまたがる場合には，月単位でのデータでも十分と考えられる．しかし，我が国では，給水制限が複数年にわたる例は少なく，減圧給水や時間給水の強度は，降雨や水源等の状況に応じて，数日単位できめ細かく変更される．よって，貯水池運用の検討等への活用を見据えて，追加節水量の解析を行う場合には，日データ等を用いることで，より詳細な解析が可能と考えられる．一方，上水道の給水量は日単位で集計されているものの，家庭用，業務用等の用途別に区分されていない．水道料金の計算のために集計されている，調定水量は用途別に区分されているが，月単位であり，給水制限強度に伴う追加節水量の変動を詳細に把握できない．また，自治体ごとに集計方法がまちまちであり，都市間の比較が困難である．

次に，給水制限が未実施だった場合に想定される需要量の推計方法には，大きく 2 つの方法が適用されている．一つは，給水制限等が実施されていない複数年の平均使用水量を用いる方法であり（鈴木ら, 1996）．他方は，気象要因，給水制限の強度等を説明変数とした回帰モデルを用いる方法である（角ら, 1996; Kenney et al., 2004）．前者は簡便ではあるが，給水制限が実施される時期は，通常，降雨が少なく，気温が高い傾向がある．これは水需要を増大させる要因となるため，給水制限が未実施だった場合の水需要が過小評価され，その結果，追加節水量が過小評価される可能性がある（Kenney et al., 2004）．後者の方法は，気温や降水量，水使用行動の経年的な変化を表現する説明変数を用いることで，上記の課題に対応できる．

以上を踏まえて，本研究では，上水道の日給水量と調定水量を組み合わせて，用途別日使用水量を推計する手法を提案する．この推計結果に対して回帰モデルを適用し，給水制限時の使用水量と，給水制限が未実施だった場合の需要量の定量評価を行う．これより，給水制限による追加節水量の経年変化を把握するとともに，年代間，都市間，用途間の比較を行う．以上の手法を，高松市，松山市に適用する．

2.3　高松市，松山市の水使用の概要

2.3.1　高松市の水使用の概要

(1) 高松市の水使用状況

高松市の年平均降水量は約 1,082 ㎜と，全国平均の約 1,600 ㎜に対して約 7 割程度である．人口は約 42 万人であり，香川県の人口の約 4 割を占める．人口密度は 1,118 人/km^2 である（**表 2.2**）．1 世帯当たり人口は，平均 2.41 人である．

高松市の上水道の水源は，高松市内に存在するダム，溜池等の自己処理水源と，香川用水を通じて流域外から導水される吉野川上流，高知県の早明浦ダムに区分される．2009 年において，自己処理水源の割合が 41%，香川用水の割合が 59%であり（高松市，高松市水環境基本計画，2011 年），他流域からの導水に多くを依存している．

1926 年以降の給水人口の推移は，**図 2.1** の通りである．給水人口は，1945 年の終戦以降，経済成長の進展とあわせて右肩上がりで増加した．2005 年には，市町村合併が実施され，給水人口が約 2 割増えた．

図 2.2 に，人口と給水人口の 5 年ごとの推移を示す．1950 年頃より人口の増加を上回る速度で給水人口が増加した．1990 年代以降，人口に占める給水人口の割合は 95%を越え，2010 年には 98%に達した．

表 2.2　高松市の主要諸元

人口	419,429 人
世帯数	174,278 世帯
面積	375.1km^2
人口密度	1,118 人/km^2
年平均降水量	1,082 ㎜

人口，世帯数，面積：平成 22 年（2010 年）国勢調査

年平均降水量：気象庁 AMeDAS，高松地点の 1981 年～2010 年の平均

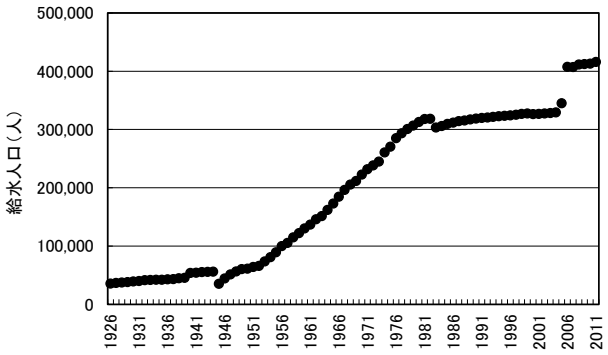


図 2.1　高松市の給水人口の推移
（高松市データより）

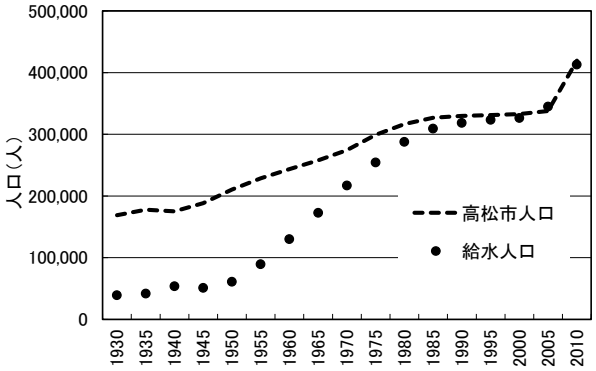


図 2.2　高松市の人口と給水人口の比較
（人口は国勢調査，給水人口は高松市データ）

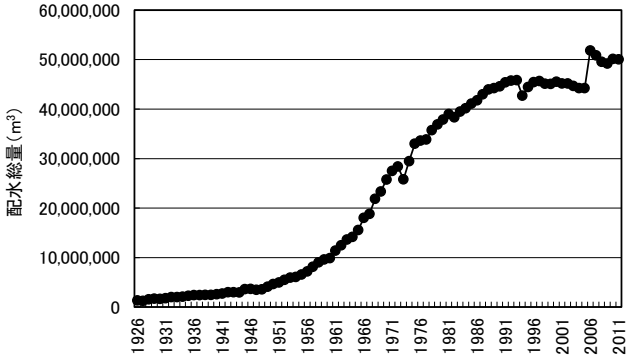


図 2.3　高松市の配水総量の推移
（高松市データより）

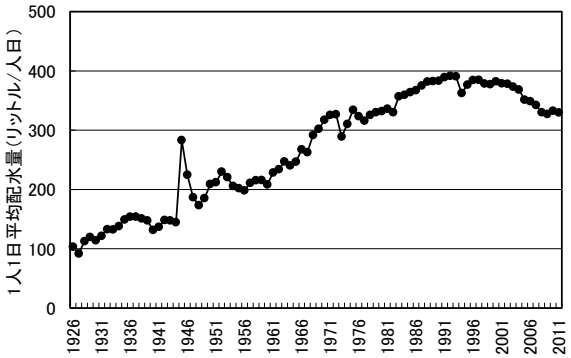


図 2.4　高松市の 1 人 1 日平均配水量の推移

表 2.3　高松市の主な給水制限

	給水制限期間	制限日数	最大制限内容
1994 年渇水	1994 年 7 月 9 日～1994 年 11 月 13 日	128 日	5 時間給水
2005 年渇水	2005 年 6 月 22 日～2005 年 9 月 6 日	77 日	26%減圧給水
2007 年渇水	2007 年 5 月 24 日～2007 年 7 月 17 日	55 日	26%減圧給水
2008 年渇水	2008 年 7 月 26 日～2008 年 11 月 25 日	123 日	33%減圧給水
2009 年渇水	2009 年 6 月 14 日～2009 年 8 月 10 日	58 日	26%減圧給水
2013 年渇水	2013 年 8 月 11 日～2013 年 9 月 4 日	25 日	26%減圧給水

水道用水の配水総量の推移を，**図 2.3** に示す．1945 年の終戦以降，配水総量は増え続け，特に 1960 年以降の高度成長期には大きく増えた．配水総量は 1993 年頃にピークとなり，その後は徐々に減少していたが，2005 年の市町村合併により約 500 万 m^3 増えた．1973 年の高松砂漠（讃岐砂漠）といわれる渇水，1994 年の列島渇水時には，一時的に配水総量が大きく減少した．

配水総量を給水人口で割り算出した，1 人 1 日平均配水量の推移を，**図 2.4** に示す．1 人 1 日平均配水量は徐々に増加し，特に 1960 年代以降の高度成長期に急激に増えたが，1993 年頃をピークに減少傾向にある．1 人 1 日平均配水量は，**第 1 章図 1.1** に示す生活用水の 1 人 1 日平均使用水量と対応している．高松市の変化傾向は，全国における変化傾向と同様であるが，全国のピークが 1995 年頃の 1 人 1 日当たり約 322 リットルであったのに対して，高松市のピークは約 390 リットルと大きい．1973 年と 1994 年は渇水により落ち込んでいる．1945 年に大きく増えているのは，空襲による漏水の影響である．

(2) 高松市の渇水の発生状況

1994 年以降に実施された主な給水制限は，**表 2.3** のとおりである．1994 年夏の渇水では，早明浦ダムの利水貯水量が枯渇し，水道の給水制限日数は 128 日間，断水日数は 69 日間に

及んだ．このとき，最も厳しい期間には 1 日 5 時間給水という給水制限がなされた．2005 年，2007 年，2008 年，2009 年，2013 年渇水時には最大 33%の給水制限が実施されたものの，時間給水は実施されていない．2005 年，2008 年渇水時にも，早明浦ダムの利水貯水量がゼロになったが，自己処理水源の賦存量が多く，用途間の水融通等の対応が行われた結果，時間給水は回避された．

2.3.2　松山市の水使用の概要

(1) 松山市の水使用状況

松山市の年平均降水量は約 1,315 ㎜と，全国平均約 1,600 ㎜の約 8 割であるが，高松市と比べて約 2 割大きい．人口は約 52 万人，人口密度は 1,206/人 km^2 であり，これらも高松市と比べて若干多い（**表 2.4**）．1 世帯当たり人口は，平均 2.31 人であり，高松市と比べて若干少ない．

松山市の水道の水源は，2005 年に合併した旧北条市，旧中島町を除くと，市内に存在する石手川ダムと重信川の伏流水を起源とする地下水とに二分される．重信川水系河川整備計画（国土交通省四国地方整備局, 2008）によると，水源依存率は石手川ダムが約 52%，伏流水が約 11%，地下水が約 37%の割合であり，石手川ダムへの依存率が高い．主要な貯水池に約半分を依存している点は，高松市と同様であるが，石手川ダムが自市の流域内に所在する点については高松市と異なる特徴である．

人口と給水人口の推移は，**図 2.5** の通りである．給水人口は 2003 年まで微増が続き 444,100 人に達したが，その後，2005 年 1 月に松山市と北条市，中島町が合併したため，469,600 人まで大きく増えた．2004 年に策定され，2005 年に需給予測が見直された松山市長期的水需給計画基本計画（2004）では，給水人口（旧中島町を除く）は 2015 年度まで増加すると見込まれおり，518,300 人に達すると推計されている．

図 2.6 に，配水総量の推移を示す．配水総量は 1993 年頃をピークに減少傾向にあり，これは高松市と同様の特徴である．1994 年の大渇水では，石手川ダムの貯水量がゼロになったこと等により，厳しい給水制限が行われた結果，配水総量は大きく落ち込んだ．

表 2.4　松山市の主要諸元

人口	517,231 人
世帯数	224,178 世帯
面積	429.05km^2
人口密度	1,206 人/km^2
年平均降水量	1,315 ㎜

人口，世帯数，面積：平成 22 年（2010 年）国勢調査

年平均降水量：気象庁 AMeDAS，松山地点の 1981 年～2010 年の平均

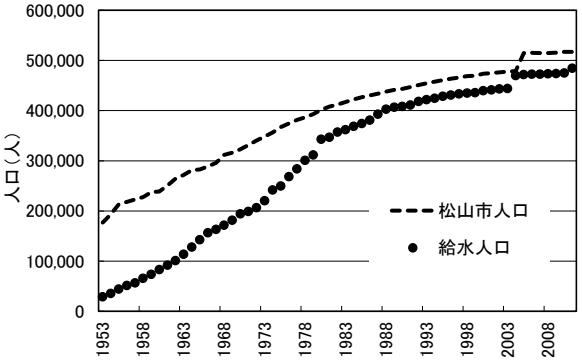


図 2.5　松山市の人口と給水人口の比較
（松山市データより）

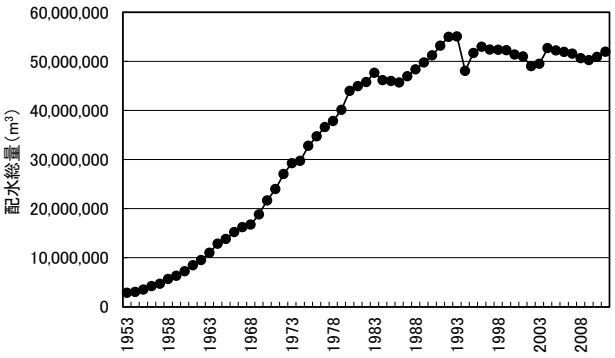


図 2.6　松山市の配水総量の推移
（松山市データより）

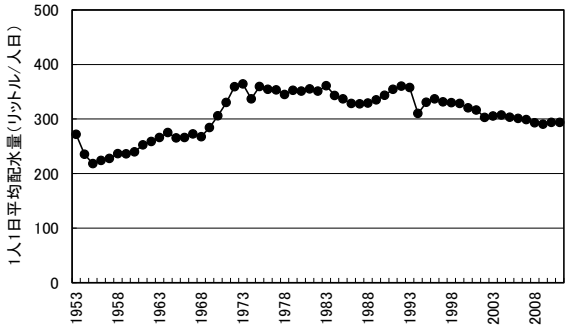


図 2.7　松山市の１人１日平均配水量の推移

図 2.7 に，配水総量を給水人口で割り算出した，1 人 1 日平均配水量の推移を示す．1 人 1 日平均配水量は，1970 年頃から横ばい，微減傾向に転じている．**図 1.1** に示す全国平均が 1995 年頃から，**図 2.4** に示す高松市が 1993 年頃から減少に転じたことに比べると，減少に移行する年代が早い．1994 年，2002 年の渇水時には減少が確認される．

(2) 松山市の渇水の発生状況

近年の主な給水制限を**表 2.5** に示す．1994 年の渇水では，1994 年 7 月 11 日から減圧給水が開始され，1995 年 5 月 1 日まで，295 日もの長期間にわたり給水制限が実施された．石手川ダムの利水貯水量がゼロとなり，厳しい制限が課された 1994 年 8 月 22 日から 10 月 21 日までの約 2 か月間は，1 日の給水時間が午後 4 時から午後 9 時までの 5 時間に制限された．この間，石手川ダムの堆砂容量内の貯留水の利用や，高知県仁淀川水系の面河ダムの工業用水を，松山市の上水道用として転用するなどの対応がなされた．1994 年の渇水を受けて，1997 年から節水型機器の購入補助制度が設けられ，水需要の抑制に取り組まれている．

2002 年，2007 年，2008 年，2009 年，2012 年，2013 年の渇水時には最大 25%または 50%の減圧給水が実施され，時間給水は実施されていない．

表 2.5　松山市の主な給水制限

	給水制限期間	制限日数	最大制限内容
1994 年渇水	1994 年 7 月 11 日～1995 年 5 月 1 日	295 日	5 時間給水
2002 年渇水	2002 年 9 月 2 日～2003 年 4 月 8 日	219 日	50%減圧給水
2007 年渇水	2007 年 6 月 12 日～2007 年 7 月 5 日	24 日	50%減圧給水
2008 年渇水	2008 年 8 月 8 日～2008 年 10 月 6 日	60 日	50%減圧給水
2009 年渇水	2009 年 5 月 22 日～2009 年 7 月 2 日	42 日	50%減圧給水
2012 年渇水	2012 年 6 月 8 日～2012 年 6 月 20 日	13 日	25%減圧給水
2013 年渇水	2013 年 6 月 17 日～2013 年 6 月 21 日	5 日	25%減圧給水

2.4　高松市，松山市における用途別使用水量の定量評価

2.4.1　家庭用，業務用日使用水量の推計

(1) 用途別日使用水量の推計方法

高松市，松山市の水道用水の用途別日使用水量を，日給水量，調定水量をもとに，家庭用，業務用に区分して推計する．調定水量は家庭用，業務用，湯屋用（公衆浴場用）等の用途別に，月単位で集計されている．本研究では，湯屋用も業務用に含めた．

高松市，松山市ではともに，上水道の各契約者の検針は，2 か月に 1 度の頻度で実施される．検針対象は市内を 2 地区に区分し，1 か月交替で行われる．1 回の検針で 2 か月分の使用水量が量られる．検針は，毎月 1 日から 25 日くらいまでの間に，契約者毎に順次実施される．各月の検針に基づく用途別の合計量が，調定水量として月ごとに集計される．ここでは，n 月のある用途の調定水量を T_n と表し，n 月の日数を d_n とする．

n 月のある用途の使用水量 S_n は，当月（n 月）と翌月（$n+1$ 月），翌々月（$n+2$ 月）の調定水量に反映される．逆に，n 月のある用途の調定水量 T_n は，前々月（$n-2$ 月）と前月（$n-1$ 月），当月（n 月）の使用水量を反映している．そこで，使用水量 S_n の推計値 $\widehat{S_n}$ を求めるため，T_n，T_{n+1}，T_{n+2} を用いる．

調定水量 T_n を分割し，n 月内の使用水量の推計値を $\widehat{T_n}(n)$，$n-1$ 月内の使用水量の推計値を $\widehat{T_n}(n-1)$，$n-2$ 月内の使用水量の推計値を $\widehat{T_n}(n-2)$ とする．検針時に各契約者は，それぞれ，$d_{n-2}+d_{n-1}$ 日間の使用水量が計られる．その月に検針された契約者の，$d_{n-2}+d_{n-1}$ 日間の使用水量がすべて均一であったと仮定すると，$\widehat{T_n}(n)$，$\widehat{T_n}(n-1)$，$\widehat{T_n}(n-2)$ は，以下のように算出される．

$$\widehat{T_n}(n) = \frac{25T_n}{2(d_{n-2}+d_{n-1})} \tag{2.1}$$

$$\widehat{T_n}(n-1) = \frac{d_{n-1}T_n}{(d_{n-2}+d_{n-1})} \tag{2.2}$$

$$\widehat{T_n}(n-2) = \frac{(2d_{n-2}-25)T_n}{2(d_{n-2}+d_{n-1})} \tag{2.3}$$

以上より，n 月の使用水量の推計値 $\widehat{S}(n)$ は (2.4) 式により推計される．

$$\widehat{S_n} = \widehat{T_n}(n) + \widehat{T_{n+1}}(n) + \widehat{T_{n+2}}(n) \tag{2.4}$$

家庭用，業務用に区分して $\widehat{S_n}$ を推計し，月給水量に占める用途比率を推計する．この月別用途比率を日給水量に乗じることで，用途別日使用水量を推計する．

(2) データ

高松市は 1991 年 4 月から 2008 年 12 月まで，松山市は 1991 年 4 月から 2007 年 10 月までの期間を対象に解析を行った．解析に用いた日給水量，月調定水量は，それぞれ各市より直接入手，あるいは統計書等の公表値を用いた．松山市は 2005 年 1 月に市町村合併が行われたが，合併前の松山市（現松山地区）のみを対象とした．

(3) 用途別日使用水量の推計結果

(1) の方法により推計した高松市の家庭用日使用水量を，**図 2.8** に示す．**図 2.9** に給水制限が実施された 1994 年，2005 年，2007 年，2008 年と，それぞれの前年，前々年の同時期の推計結果を示す．このうち，1994 年，2005 年，2008 年は早明浦ダムの利水貯水量がゼロになった．

各年とも，給水制限が実施された期間は，前年，前々年の同時期と比べて使用水量が少ない．また，1994 年に時間給水が実施された期間の使用水量は，減圧給水のみが実施された期間と比べて使用水量が少ない．時間給水が一時的に解除され，減圧給水のみが実施された，8 月 20 日から 9 月 3 日までの使用水量が，前年，前々年と同程度まで増加しており，時間給水による使用水量の抑制効果が大きいことが確認される．減圧給水が解除された 1994 年 11 月 13 日以降も，しばらくは使用水量が少ない傾向が続いている．こうした特徴は 2005 年，2007 年，2008 年渇水にはみられず，渇水の規模による特徴と思われる．2007 年は，早明浦ダムの利水貯水量が枯渇せず，給水制限が実施された期間が約 2 か月と短かったこともあり，他の給水制限時と比べて使用水量の減少量が小さい．

1994 年 7 月 1 日から 14 日頃までは使用水量が前年，前々年と比べて大きく不自然である．これは，給水制限時の追加節水量は業務用の方が大きいため，7 月 15 日から 5 時間給水といった厳しい給水制限が開始されたことに伴い，月途中から給水量に占める家庭用の比率が上昇したことが原因と思われる．本手法では，各月の用途比率は一定と仮定してお

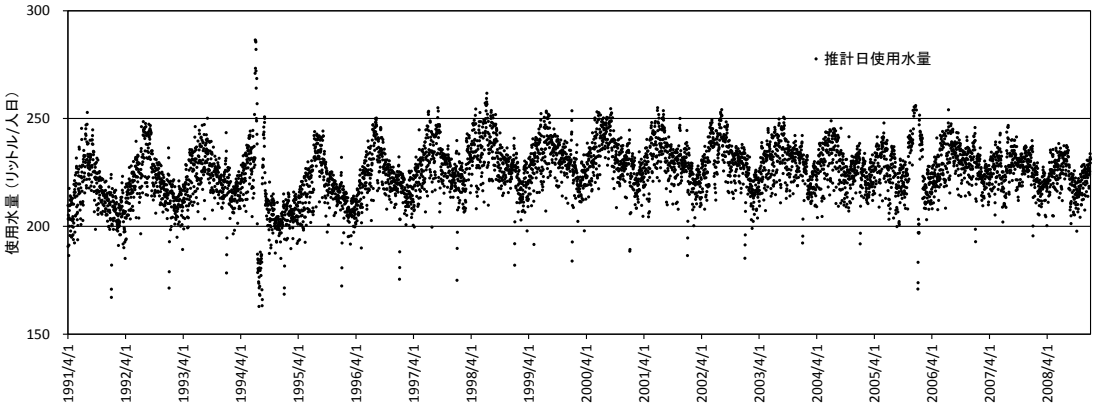
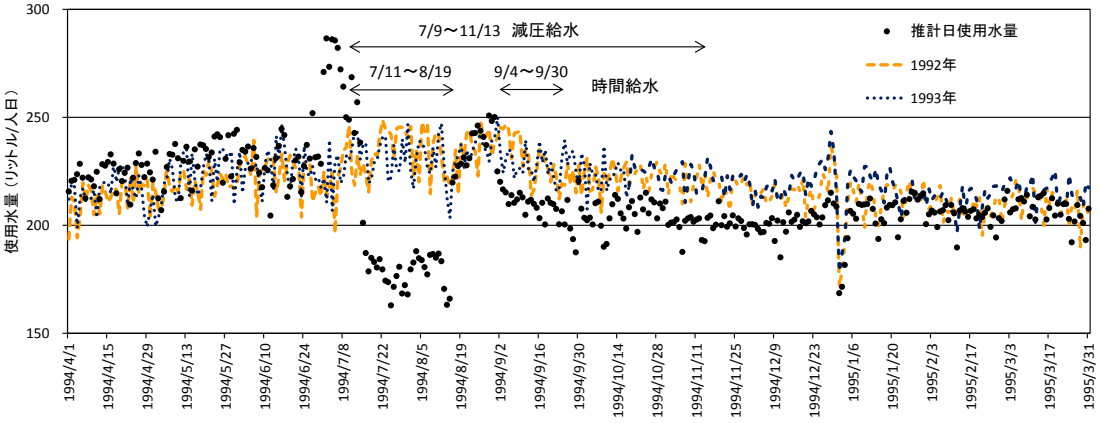
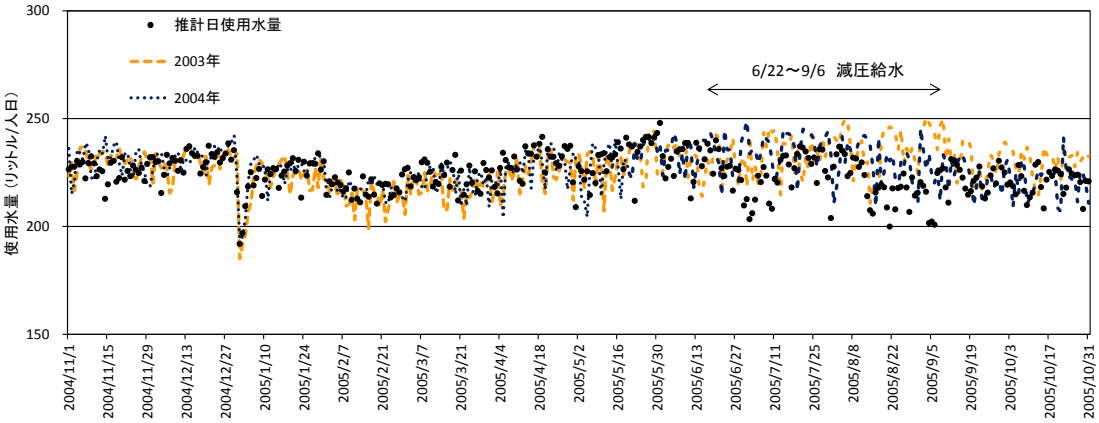


図 2.8　日使用水量の推計結果（高松市・家庭用）



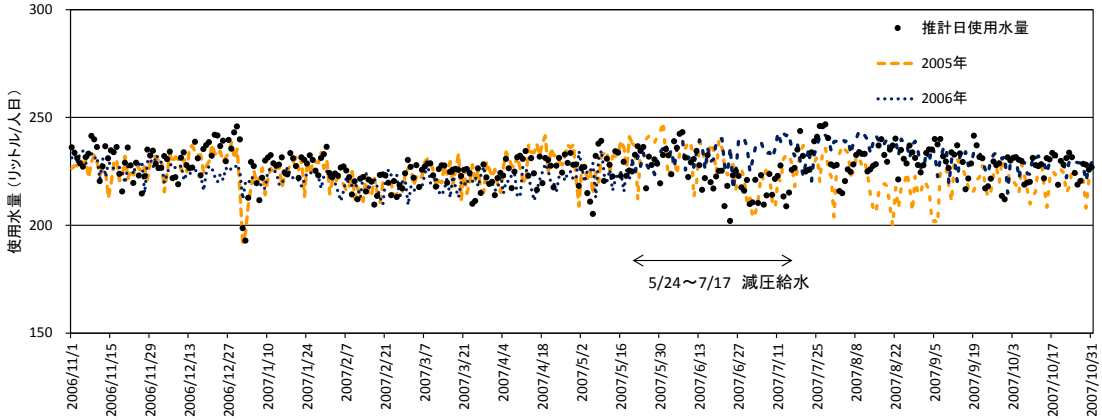
(a) 1994 年渇水



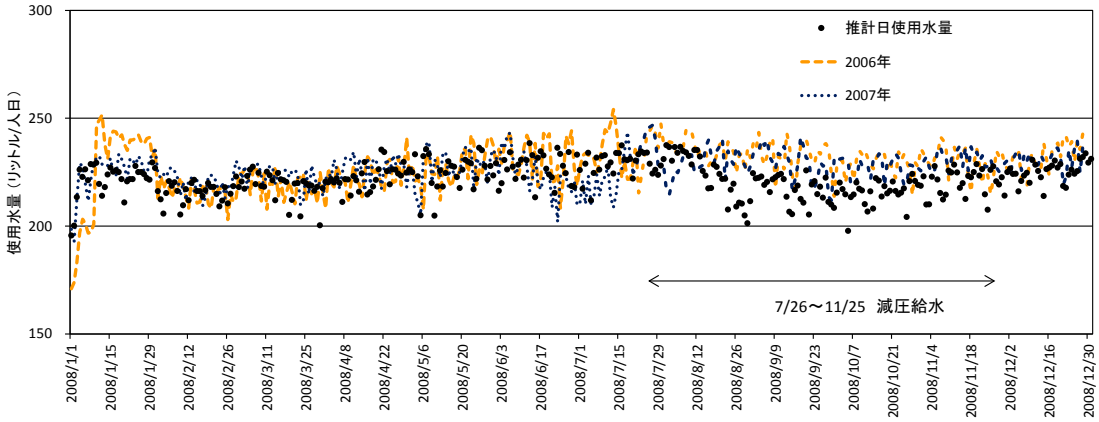
(b) 2005 年渇水

図 2.9（1）　渇水時の使用水量の推計結果（高松市・家庭用）

（次項に続く）



(c) 2007 年渇水



(d) 2008 年渇水

図 2.9（2）　渇水時の使用水量の推計結果（高松市・家庭用）

（前項より続く）

り，月内の変化は考慮していない．このため，家庭用の比率が上昇した 7 月については，このような不自然な変動が生じたものと思われる．時間給水が一時的に解除された 8 月 20 日から 9 月 3 日の間についても，同様の事象が生じている可能性があるが，7 月と比べると変動は不自然ではない．

図 2.10 に，高松市の業務用日使用水量の推計結果を示す．**図 2.11** に給水制限が実施された 1994 年，2005 年，2007 年，2008 年と，それぞれの前年，前々年の同時期の使用水量推計結果を示す．

家庭用と同様に，1994 年に時間給水が実施された期間の使用水量は，減圧給水のみが実施された期間と比べて少ないが，時間給水が一時的に解除された 8 月 20 日から 9 月 3 日までの使用水量は，前年，前々年の使用水量よりも少なく，家庭用との相違がみられる．減圧給水が解除された 1994 年 11 月 13 日以降も使用水量が少ないことは家庭用と同様である．

また，早明浦ダムが枯渇せず，給水制限が実施された期間が，約 2 か月と短い 2007 年は，他の給水制限が実施された時期と比べて使用水量の減少量が小さいことについては，家庭用と同様である．

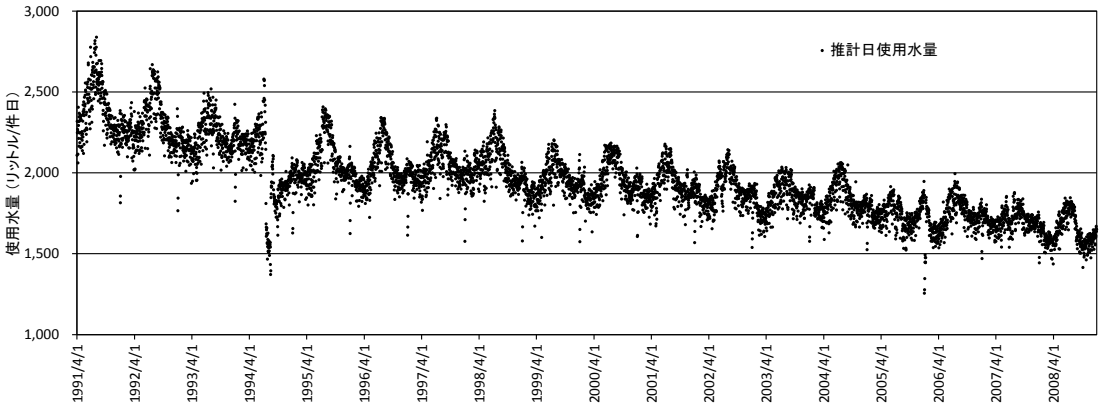
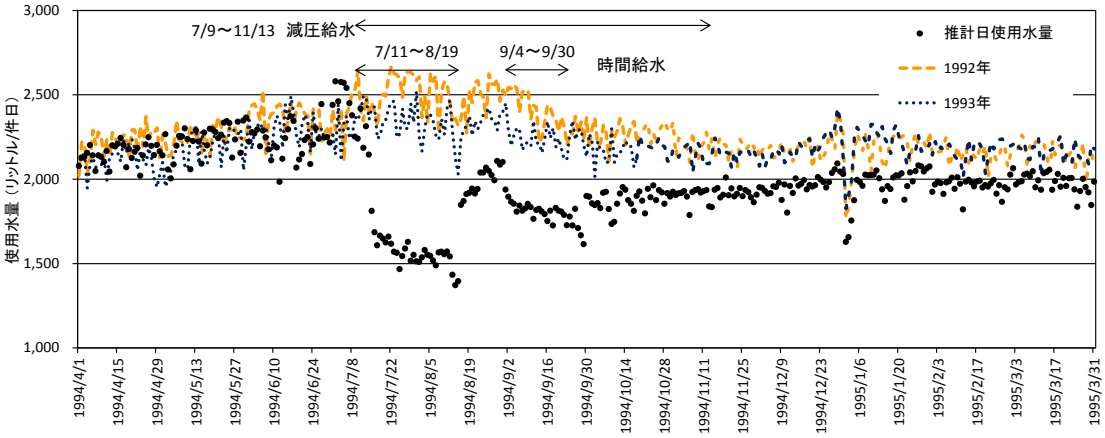
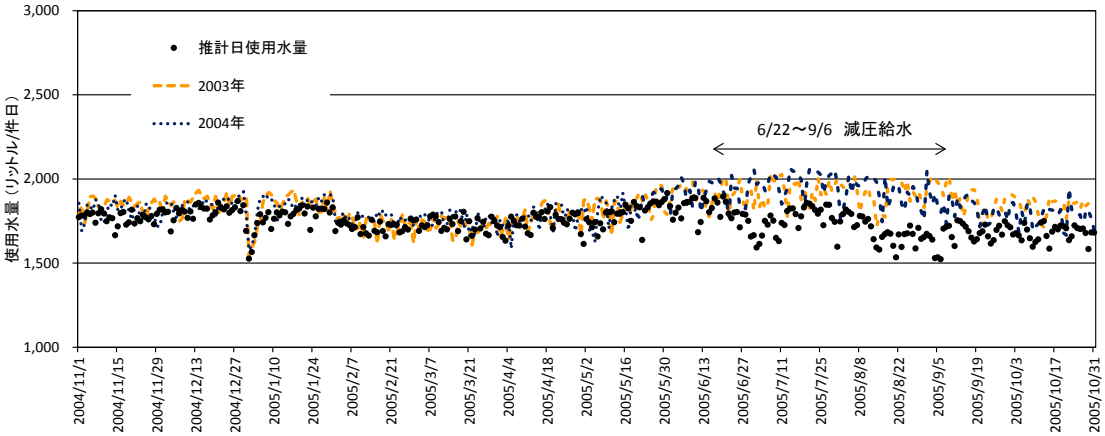


図 2.10　日使用水量の推計結果（高松市・業務用）



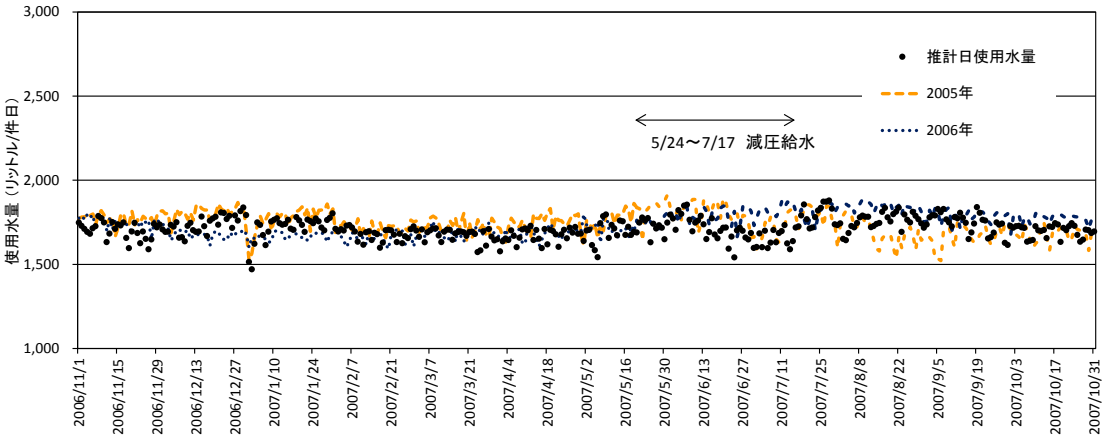
(a) 1994 年渇水



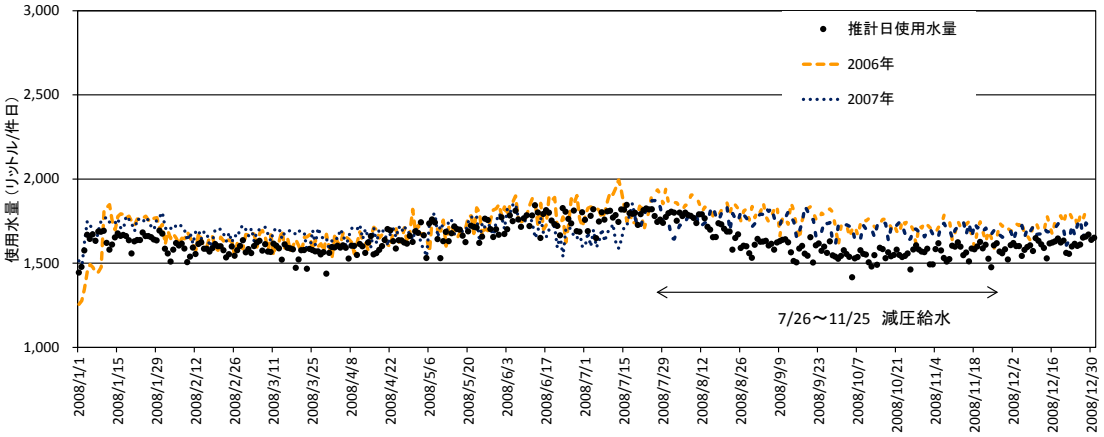
(b) 2005 年渇水

図 2.11（1）　渇水時の使用水量の推計結果（高松市・業務用）

（次項に続く）



(c) 2007 年渇水



(d) 2008 年渇水

図 2.11 (2) 渇水時の使用水量の推計結果（高松市・業務用）
（前項より続く）

図 2.12 に，松山市の家庭用日使用水量の推計結果を示す．**図 2.13** に給水制限が実施された 1994 年，2002 年，2007 年と，それぞれの前年，前々年の同時期の使用水量推計結果を示す．

1994 年に時間給水が実施された期間は，減圧給水のみが実施された期間よりも使用水量が少なく，高松市と同様，時間給水による使用水量の抑制効果が大きいことが確認される．1995 年 5 月に給水制限が解除された以降も，使用水量が少なく，引き続き節水が継続されたと考えられる．このような特徴は，2002 年，2007 年渇水時には顕著でなく，高松市の家庭用，業務用と同様，1994 年渇水時のみにみられた．

2002 年渇水，2007 年渇水ともに，減圧率 50%の減圧給水が実施されたが，2007 年渇水は給水制限期間が約 1 か月と短かったため，使用水量の変化が小さい．これより，使用水量には給水制限強度だけでなく，給水制限の継続日数も影響している可能性がある．

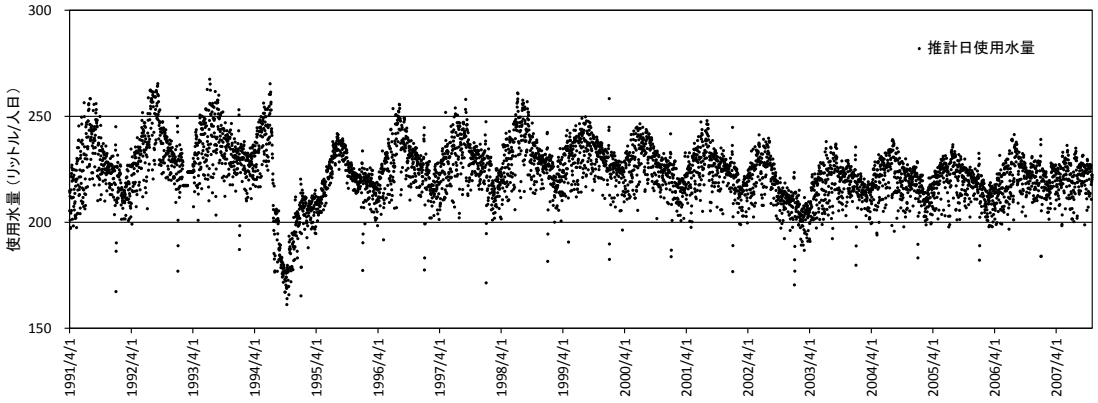
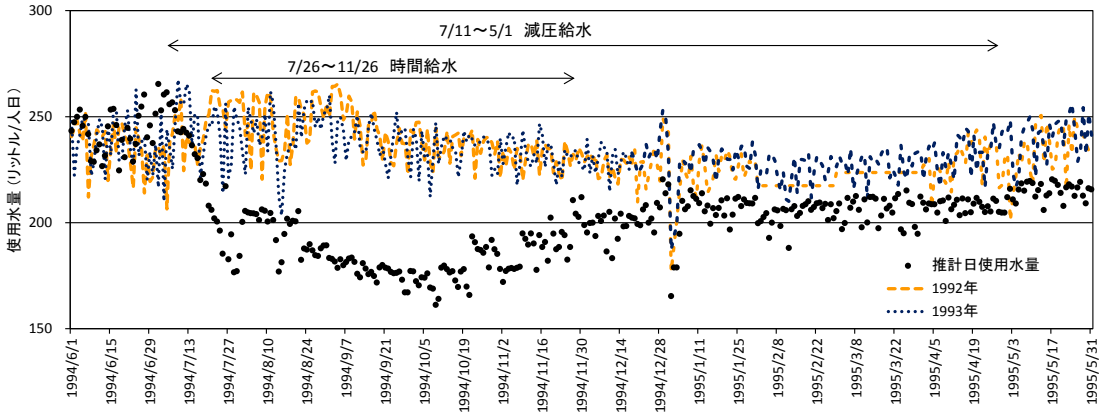
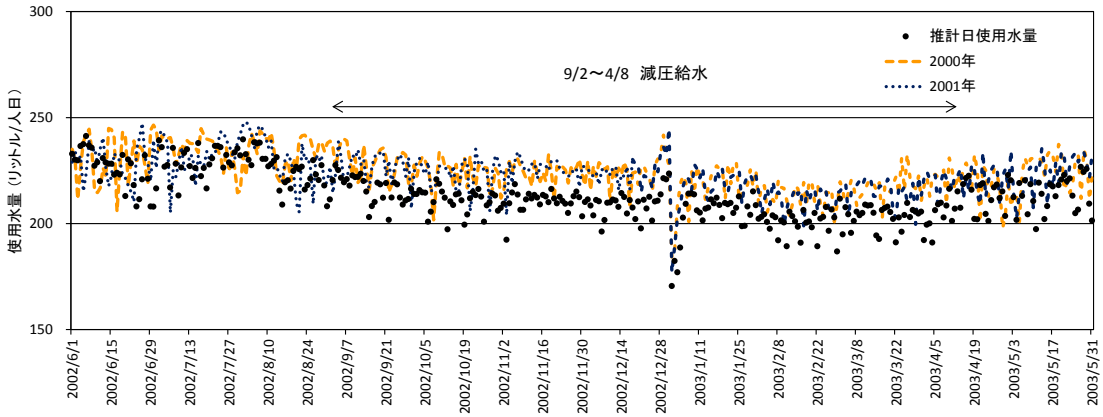


図 2.12　日使用水量の推計結果（松山市・家庭用）



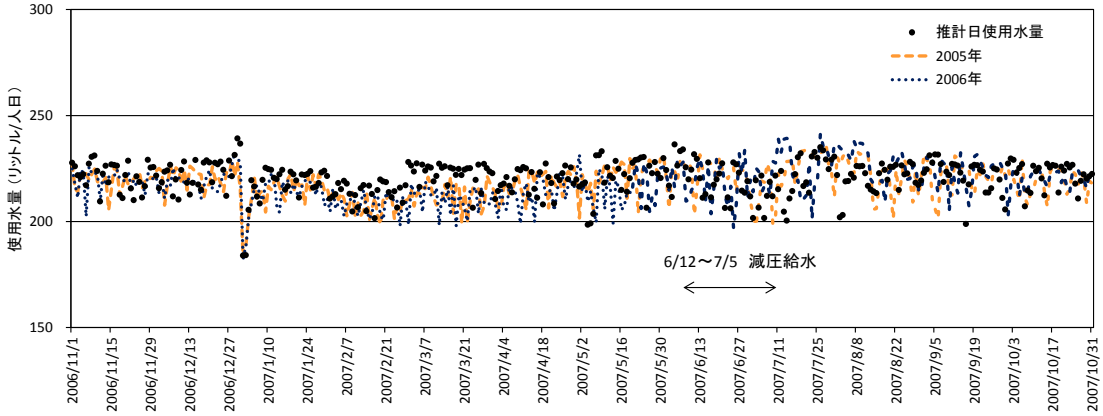
(a) 1994 年渇水



(b) 2002 年渇水

図 2.13（1）　渇水時の使用水量の推計結果（松山市・家庭用）

（次項に続く）



(c) 2007 年渇水

図 2.13 (2)　渇水時の使用水量の推計結果（松山市・家庭用）

（前項より続く）

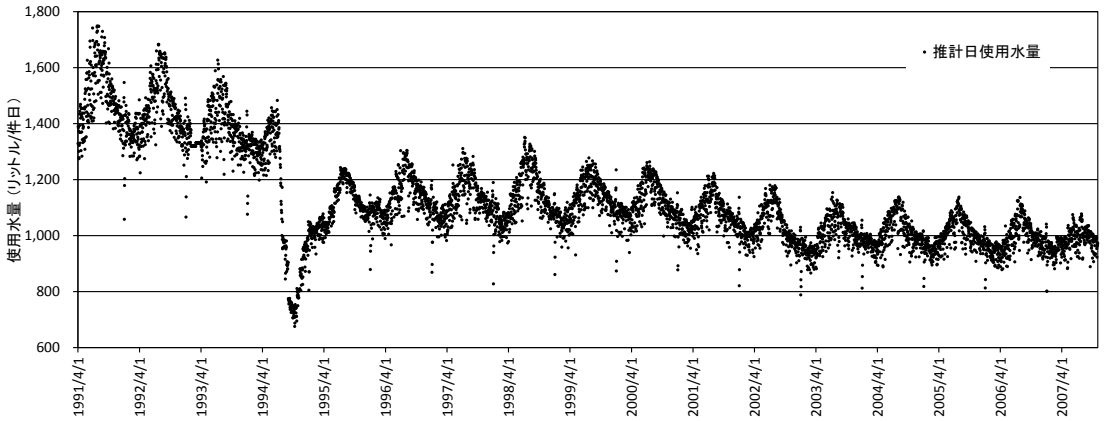
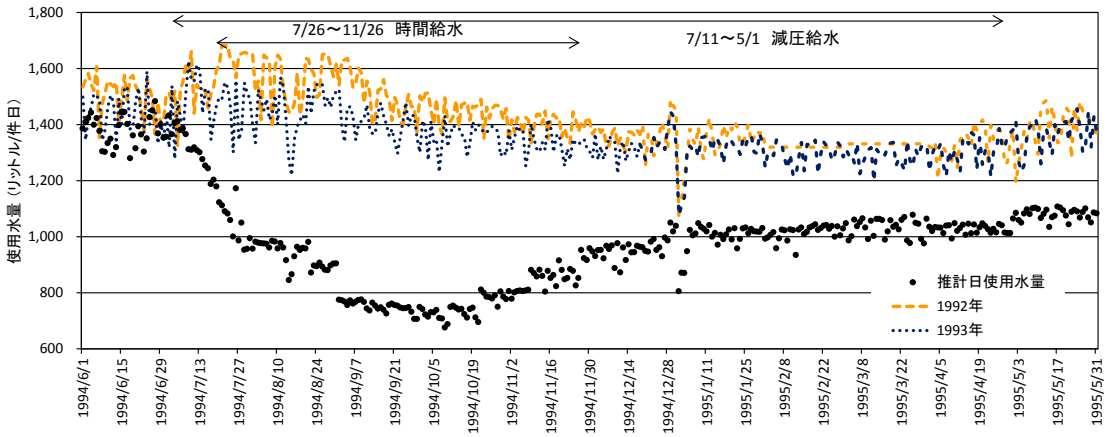


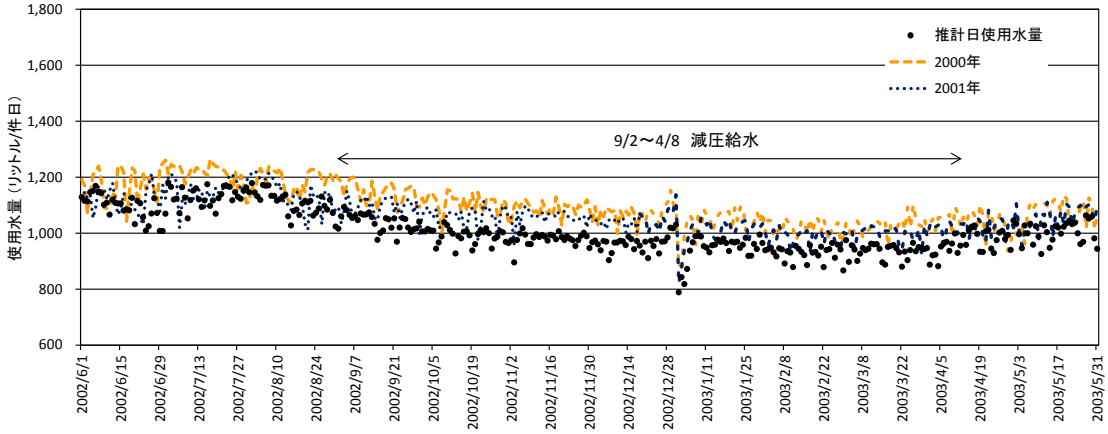
図 2.14　日使用水量の推計結果（松山市・業務用）

図 2.14 に，松山市の業務用日使用水量の推計結果，**図 2.15** に給水制限が実施された 1994 年，2002 年，2007 年と，それぞれの前年，前々年の同時期の使用水量推計結果を示す．

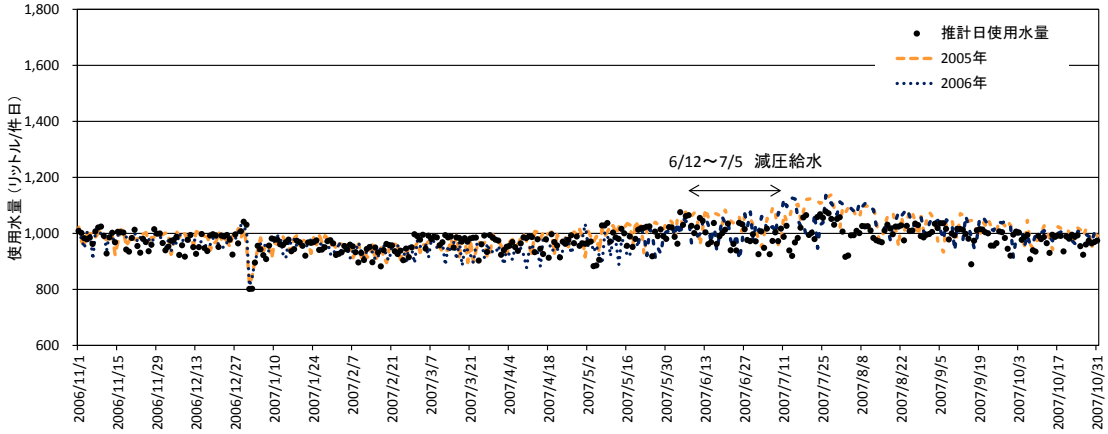
家庭用の特徴と同様，1994 年に時間給水が実施された期間は減圧給水のみが実施された期間よりも使用水量が少なく，時間給水による追加節水量が大きいことが確認される．高松市の家庭用，業務用，松山市の家庭用と同様，1994 年渇水時のみ給水制限が解除された後も使用水量が少ない．2007 年渇水は給水制限期間が約 1 か月と短かく，使用水量の変化が小さい点についても，家庭用と同様である．



(a) 1994 年渇水



(b) 2002 年渇水



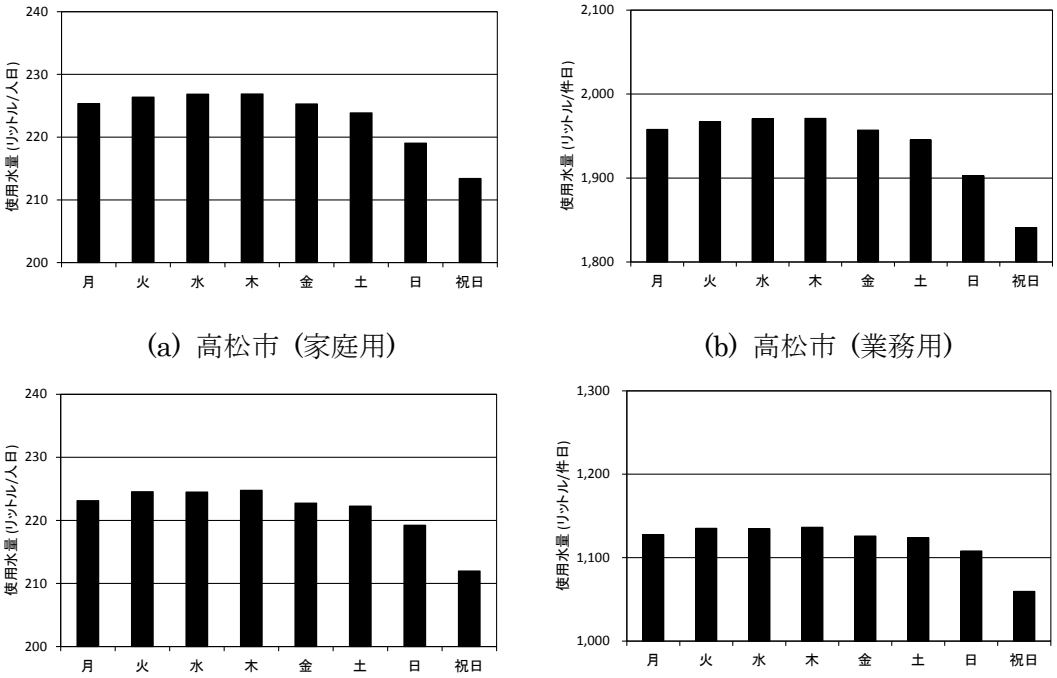
(c) 2007 年渇水

図 2.15　渇水時の使用水量の推計結果（松山市・業務用）

(4) 用途別日使用水量の週変動，月変動の推計結果

用途別日使用水量を用いて集計した，週変動，月変動の特徴を整理する．**図 2.16** に各都市の家庭用，業務用日使用水量の週平均を示す．各曜日から祝日は除き，祝日は祝日のみで集計している．両都市，両用途とも，火曜，水曜，木曜に使用水量が多く，日曜，祝日は少ない傾向がみられる．週変動は，給水量の日変動が反映されているため，各都市における両用途の特徴は類似している．

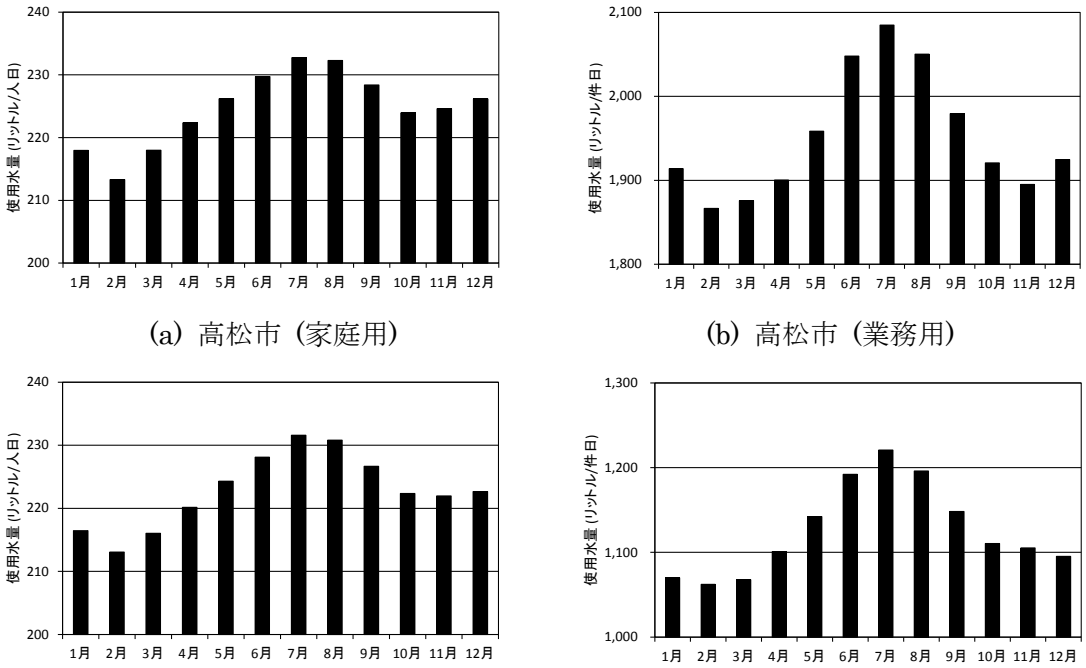
図 2.17 に，各都市の家庭用，業務用日使用水量の月平均を示す．家庭用，業務用ともに 7 月が最も多く，2 月が最も少ない変動を示す．ただし，高松市の業務用は，11 月と 2 月に使用水量が少ない特徴がみられる．両都市とも，家庭用の 10 月，11 月，12 月の使用水量には大きな違いがない．



(a) 高松市（家庭用）　(b) 高松市（業務用）

(c) 松山市（家庭用）　(d) 松山市（業務用）

図 2.16　週平均日使用水量



(a) 高松市（家庭用）　(b) 高松市（業務用）

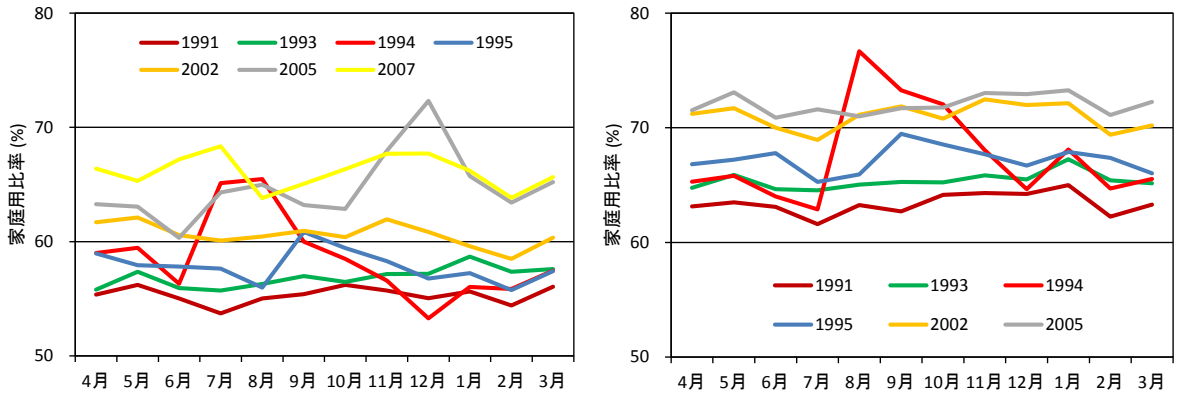
(c) 松山市（家庭用）　(d) 松山市（業務用）

図 2.17　月平均日使用水量

(5) 給水量に占める家庭用の比率

用途別月使用水量より算出した，主な年の上水道の給水量に占める家庭用の比率を，**図 2.18** に示す．両都市を比較すると，高松市と比べて松山市の方が家庭用の比率が高い特徴がある．家庭用比率の年平均は，1991 年の高松市は 55%，松山市は 63%であったが，2005 年の高松市は 65%，松山市は 72%であり，家庭用比率が経年的に増加している．これは，(6)で述べるように，業務用使用水量の経年減少量が家庭用と比べて大きいことを反映している．

両都市ともに，1994 年の 7 月から 9 月のように厳しい給水制限が実施された月は，家庭用比率が高まる．1994 年の高松市において，給水制限が実施されていない 6 月の家庭用比率は 56%であったが，時間給水が実施された 7 月，8 月は約 65%まで上昇した．減圧給水が実施された 2005 年 6 月から 9 月，2007 年 5 月から 7 月では，家庭用比率の顕著な上昇は確認されなかった．松山市も同様に，1994 年渇水において，給水制限が実施されていない 6 月の家庭用比率は 64%であったが,時間給水が実施された 8 月には 77%まで上昇した．高松市と同様，減圧給水が実施された 2002 年 9 月以降はこのような変化はみられない．1994 年渇水のような厳しい渇水時には，業務用の使用自粛が要請されることなど，家庭用に比べて業務用の方が，給水制限時の追加節水量が多いことが，このような相違が生じた原因と思われる．



(a) 高松市　　(b) 松山市

図 2.18　給水量に占める家庭用の比率

以上のことから，渇水時の水使用の特徴を，都市間，年代間で比較する際には，用途比率を考慮することが重要である．

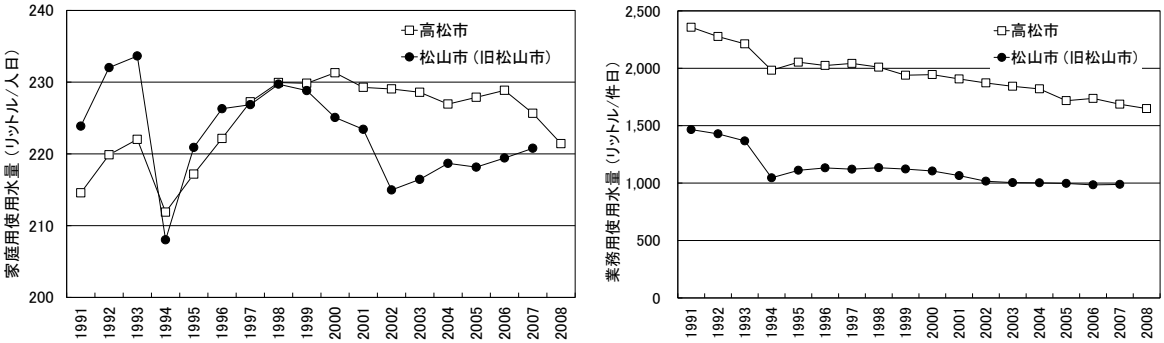
(6) 用途別年使用水量の推計結果

用途別月使用水量を合計して算出した年使用水量を**図 2.19** に示す．

図 2.19(a) の家庭用をみると，高松市の 1991 年の使用水量は 214.6 リットル/人日，2008 年は 221.4 リットル/人日であり，17 年間で約 3%増加した．ピークは 2000 年の 231.3 リットル/人日と思われる．1994 年，2005 年，2007 年，2008 年は給水制限による減少がみられる．松山市の 1991 年の使用水量は 223.9 リットル/人日，2007 年は 220.8 リットル/人日であり，16 年間で約 2%減少した．1994 年渇水の影響で，その後の数年間にわたり使用水量が減少したため，ピークは明確ではないが，1993 年頃と思われる．高松市に比べてピークが生じた時期が早い特徴がある．また，1991 年から 2000 年以降にかけて，高松市の使用水量は増加したことに対して，松山市は減少しており，両都市で相違がみられる．1994 年，2002 年には給水制限の影響で使用水量が大きく減少している．両年とも，1994 年以降の数年間は給水制限が実施されていないにも関わらず，使用水量が減少しており，1994 年渇水の経験を踏まえて家庭において節水行動が継続して行われたと考えられる．

この間，高松市では 2000 年に水道料金の改定が行われ，松山市では，1996 年，2001 年に行われた．料金改定により，いずれも平均的な水道料金単価は増えたものの，家庭用使用水量には際立った変化は見られない．

図 2.19(b) の業務用については，両都市とも経年的に減少傾向にある．高松市の 1991 年は 2,356.7 リットル/件日，2008 年は 1,648.7 リットル/件日であり，17 年間で約 30%も大きく減少した．松山市の 1991 年は 1,465.9 リットル/件日，2007 年は 988.6 リットル/件日であり，こちらも 16 年間で約 33%減少した．各年とも，松山市に比べて高松市の使用水量の方が多く，両都市の業務用の用途の差異等を反映していると思われる．厳しい給水制限



(a) 家庭用　　(b) 業務用

図 2.19　用途別年使用水量

が実施された 1994 年の使用水量は減少し，家庭用と同様，その後の数年間の使用水量が若干減少している．それ以降に給水制限が実施された年については，高松市の 2005 年に減少が見られるものの，そのほかの年には顕著な減少はみられない．また，家庭用と同様，水道料金改定による際立った減少はみられない．

2.4.2　回帰モデルの適用方法

前項で推計した用途別日使用水量を対象に，気象要因，週変動，月変動，年変動，給水制限強度を説明変数とした回帰モデルを適用し，日使用水量の特徴を解析する．回帰モデルの構造は，家庭用と業務用で区分する．

(1) 家庭用日使用水量の回帰モデル

t 日の家庭用日使用水量 q_{ht} を (2.5) 式に示す回帰モデルにより表現する．

$$\begin{aligned} ln(q_{ht}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(press_t) + \beta_2 \ln(servt_t) + \beta_3 rain_t + \beta_4 temp_t + \beta_5 weekday_t \\ + \beta_6 sunday_t + \beta_7 holiday_t + \beta_8 \sin(2\pi\, month_t/10) + \beta_9 \cos(2\pi\, month_t/10) \\ + \beta_{10} \ln(toilet_t) + \varepsilon_t \end{aligned} \tag{2.5}$$

給水制限の影響については，減圧給水の強度が反映される水道の給水圧 $press_t$ と，時間給水の強度が反映される水道の給水時間 $servt_t$ を用いた．これ以外に渇水対策として講じられる，節水広報や用途別使用制限等については，減圧給水や時間給水にあわせて，強化，緩和されると考えられることから，上記 2 変数を，給水制限強度の代表とした．

気象要因については，$rain_t$ および $temp_t$ により表現した．$rain_t$ は降水の有無を表すダミー変数であり，日降水量 10 ㎜以上の場合は 1，降雨なしの場合 0 とした．$temp_t$ は気温の影響であり，解析期間における当該月の月平均日最高気温と，t 日の日最高気温との偏

差を用いた．偏差を用いた理由は，(2.5) 式の右辺第 9，第 10 項で表現している月変動と，月平均日最高気温が相関すると思われることから，この相関を除去するためである．また，日最高気温を用いたのは，使用水量は，日中の気温に影響されると思われるためである．

週変動については，$weekday_t$，$sunday_t$，$holiday_t$ の 3 つのダミー変数を用いた．$weekday_t$ は，使用水量が増加する火曜，水曜，木曜を表現するものである．使用水量が減少する日曜，祝日については，$sunday_t$，$holiday_t$ により表現した．

月変動は，右辺第 9，第 10 項により sin，cos 関数で表現した．$month_t$ は t 日の月である．1 月から 9 月までは個別に扱ったが，前項で示したように，10 月，11 月，12 月の月平均使用水量はほぼ同等であるため，一括して扱った．

経年的な節水型機器の普及状況や節水行動の普及状況については，各年度において想定される，平均的なトイレ 1 回あたりの使用水量 $toilet_t$ により代表した．トイレ 1 回あたりの使用水量を代表とした理由は，家庭における節水状況を反映しており，経年的に連続変化していると考えられるためである．

ε_t は誤差項である．

この回帰モデルでは，水道料金の影響を明示的に扱っていないが，前項でみたように，水道料金改定による使用水量への影響は顕著ではなく，料金改定により水道料金単価は増加傾向にあり，この影響も $toilet_t$ により代表させた経年変化に含まれると考えられる．

(2) 業務用日使用水量の回帰モデル

t 日の業務用使用水量 q_{ct} を (2.6) 式に示す回帰モデルにより表現する．

$$\begin{aligned} ln(q_{ct}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(press_t) + \beta_2 \ln(servt_t) + \beta_3 rain_t + \beta_4 temp_t + \beta_5 weekday_t \\ + \beta_6 sunday_t + \beta_7 holiday_t + \beta_8 \sin(2\pi\, month_t/12) + \beta_9 \cos(2\pi\, month_t/12) \\ + \beta_{10} \ln(year_t) + \varepsilon_t \end{aligned} \tag{2.6}$$

(2.6) 式の構造は，月変動を表現する右辺第 9 項，第 10 項，経年変化を表現する右辺第 11 項以外は，家庭用の回帰モデルと同じである．

給水制限の影響については，家庭用と同様，減圧給水の強度が反映される水道の給水圧 $press_t$ と，時間給水の強度が反映される水道の給水時間 $servt_t$ を用い，節水広報や用途別使用制限等も含めた給水制限強度の代表とした．

気象要因については，$rain_t$ および $temp_t$ により表現しており，$rain_t$ は降水の有無を表すダミー変数，$temp_t$ は解析期間における当該月の月平均日最高気温と，t 日の日最高気温との偏差である．

週変動は，使用水量が増加する火曜，水曜，木曜を表現する $weekday_t$，使用水量が減少する日曜，祝日を表現する $sunday_t$，$holiday_t$ の 3 つのダミー変数により表現した．

月変動は，右辺第 9，第 10 項により sin，cos 関数で表現した．$month_t$ は t 日の月であり，家庭用のように 10 月から 12 月を一括として扱わず，月毎に区分した．

経年的な節水型機器の普及や節水行動の普及状況については，各年度の西暦 $year_t$ により代表させることとした．

ε_t は誤差項である．

(3) パラメータの推定方法

パラメータ推定は，両都市ともにそれぞれ，前期，中期，後期の 3 期間に区分して行った．1994 年渇水までを前期，1994 年渇水後の数年間を中期，以降を後期とした．各期間の開始日，終了日を，**表 2.6** に示す．これは，前項で述べたように，1994 年渇水後の数年間は，給水制限が実施されていなかったにも関わらず，使用水量が他の年と比べて少なく，この前後で区分することが適当と思われるためである．

前項で述べたように，高松市の 1994 年 7 月上旬は，その後の給水制限が緩和された期間と比べて使用水量が多いなど，不自然な変動が見られたため，7 月を回帰モデルのパラメータ推定から除外した．なお，8 月についても同様の事象が生じている懸念があるが，7 月に比べて使用水量の不規則な変動が顕著ではなく，8 月を除外すると検討データが不足するため，そのまま用いた．

水道の給水圧 $press_t$，給水時間 $servt_t$ については，**表 2.7** の値を用いた．1994 年渇水時の時間給水期間中の減圧率の一部については，想定値を用いている．高松市については，時間給水中の減圧率のデータが得られなかった．時間給水が実施された前後は，26%の減圧が行われていたことから，時間給水中においても同じ値を用いた．松山市については，「平成 6 年松山の渇水記録」(松山市, 1995) によると，8 月 22 日から実施された 5 時間給水以降は，水道が使用できる時間帯の給水圧は，平常時と同程度に設定された．しかし，この期間においても，家庭における蛇口からの吐出量の調整や，水の再利用の継続など，水道が減圧された時と同様の行動が取られたと考えられる．そこで，この期間の給水圧の値を変化させて，回帰モデルのパラメータの推定を行い，決定係数が最大となる給水圧を用いることとした．給水圧を減圧給水以外の対応も含めた給水制限の強度を表す代表としているため，このような補正を行うことが妥当と判断した．

気象要因を表す $rain_t$，$temp_t$ については，高松地点および松山地点の AMeDAS 観測値の日降水量，日最高気温より算出した．

平均的なトイレ 1 回あたり使用水量 $toilet_t$ は，**第 4 章**で示す機種別普及率を考慮した推計値を用いた．

表 2.6　各期間の開始日，終了日

	開始日	終了日	備考
高松市（前期）	1991 年 4 月　1 日	1994 年 11 月 13 日	1994 年渇水の給水制限解除日まで 1994 年 7 月は除く
高松市（中期）	1994 年 11 月 14 日	1998 年 3 月 31 日	
高松市（後期）	1998 年 4 月　1 日	2008 年 12 月 31 日	
松山市（前期）	1991 年 4 月　1 日	1995 年 5 月　1 日	1994 年渇水の給水制限解除日まで
松山市（中期）	1995 年 5 月　2 日	1999 年 3 月 31 日	
松山市（後期）	1999 年 4 月　1 日	2007 年 10 月 31 日	

表 2.7（1）　給水制限の設定値（次項に続く）

(a) 高松市，1994 年渇水

期間	給水制限内容	給水圧（%）	給水時間（時間）	備考
8 月 1 日～8 月 15 日	5 時間給水	74（想定）	5	想定
8 月 16 日～8 月 19 日	14 時間給水	74（想定）	14	想定
8 月 20 日～9 月 3 日	26%減圧	74	24	
9 月 4 日～9 月 30 日	17 時間給水	74（想定）	17	想定
10 月 1 日～11 月 13 日	26%減圧	74	24	

(b) 高松市，2005 年渇水

期間	給水制限内容	給水圧（%）	給水時間（時間）	備考
6 月 22 日～6 月 27 日	7%減圧	93	24	
6 月 28 日～8 月 10 日	18%減圧	82	24	
8 月 11 日～9 月 6 日	26%減圧	74	24	

(c) 高松市，2007 年渇水

期間	給水制限内容	給水圧（%）	給水時間（時間）	備考
5 月 24 日～6 月 7 日	7.4%減圧	92.6	24	
6 月 8 日～6 月 16 日	18.5%減圧	81.5	24	
6 月 17 日～7 月 17 日	25.9%減圧	74.1	24	

(d) 高松市，2008 年渇水

期間	給水制限内容	給水圧（%）	給水時間（時間）	備考
7 月 26 日～8 月 2 日	7.4%減圧	92.6	24	
8 月 3 日～8 月 14 日	18.5%減圧	81.5	24	
8 月 15 日～8 月 20 日	25.9%減圧	74.1	24	
8 月 21 日～10 月 10 日	33.3%減圧	66.7	24	
10 月 11 日～11 月 25 日	25.9%減圧	74.1	24	

表 2.7 (2)　給水制限の設定値（前項より続く）

(e) 松山市，1994 年渇水

期間	給水制限内容	給水圧（%）	給水時間（時間）	備考
7 月 11 日～7 月 19 日	25%減圧	75	24	
7 月 20 日～7 月 25 日	50%減圧	50	24	
7 月 26 日～7 月 28 日	16 時間給水	50	16	
7 月 29 日～7 月 31	12 時間給水	50	12	
8 月 1 日～8 月 21 日	8 時間給水	50	8	
8 月 22 日～10 月 21 日	5 時間給水	60（家庭用） 50（業務用）	5	想定
10 月 22 日～11 月 8 日	8 時間給水	60（家庭用） 50（業務用）	8	想定
11 月 9 日～11 月 26 日	12 時間給水	60（家庭用） 50（業務用）	12	想定
11 月 27 日～5 月 1 日	10%減圧	60（家庭用） 50（業務用）	24	想定

(f) 松山市，2002 年渇水

期間	給水制限内容	給水圧（%）	給水時間（時間）	備考
9 月 2 日～10 月 27 日	25%減圧	75	24	
10 月 28 日～4 月 8 日	50%減圧	50	24	

(g) 松山市，2007 年渇水

期間	給水制限内容	給水圧（%）	給水時間（時間）	備考
6 月 12 日～6 月 26 日	25%減圧	75	24	
6 月 27 日～7 月 5 日	50%減圧	50	24	

各期のパラメータや前期と後期を比較したパラメータの変化については，ｔ検定により有意水準 1%，5%での検定を行った．

なお，通常の回帰モデル（OLS）を用いたパラメータ推定を行い，誤差項の自己相関，偏自己相関を確認したところ，1 次の偏自己相関が大きかった．例として，**図 2.20** に，松山市（前期）の家庭用日使用水量の OLS 残差の自己相関と偏自己相関を示す．そこで，Cochrane=Orcutt 法を用いた一般化最小二乗法により，1 次の系列相関を考慮することとした．

本検討では，高次の系列相関については考慮していない．本検討と同様に，日データを用いて解析を行った，Kenney et al.(2004) の検討では，日使用水量の回帰モデルにおいて，降水量，気温，1 次のラグ変数を説明変数としている．より複雑な回帰技術を用いることで，

厳密性を向上させることができるが，給水制限の効果を解析するうえでは許容可能と判断されている．同様に，日データを用いた，角ら（1996），Grafton et al.(2008）では，系列相関についての記述がなかった．以上も踏まえて，本研究では，影響が大きいと考えられる，1 次の系列相関のみを考慮することとした．

推定したモデルにおける誤差項の 1 次の系列相関については， t 検定を行った．標本数 T のもとで，誤差項の k 次の自己相関を $\hat{\rho}(k)$ とすると，$\sqrt{T}\hat{\rho}(k)$ が t 分布に従う．ここでは，有意水準 5%で検定した．なお，パラメータ推定値を用いた場合の t 値による系列相関の検定においては，判定の有効性が低下するといわれており，適用性に関する課題は残る．参考として Durbin-Watson 比についても確認した．

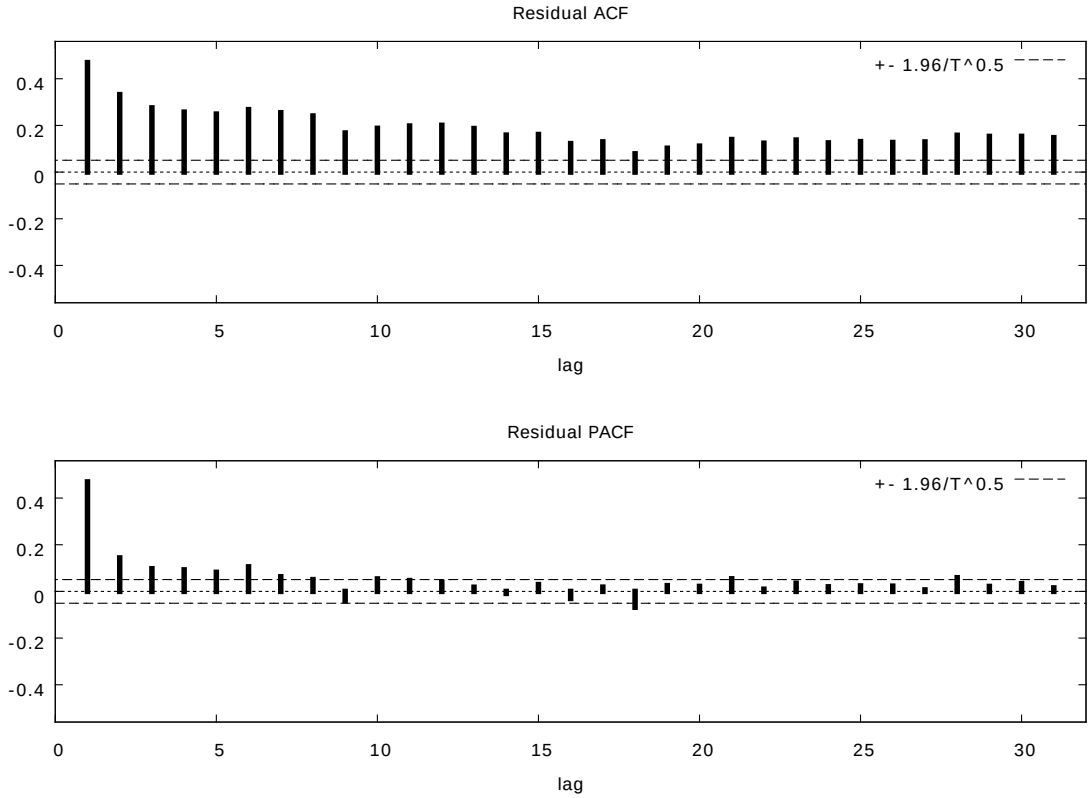


図 2.20　松山市（前期）の家庭用日使用水量の OLS 残差の自己相関，偏自己相関

2.4.3　回帰モデルの適用結果

(1) 高松市（家庭用）

前期（1991 年 4 月 1 日から 1994 年 11 月 13 日まで), 中期（1994 年 11 月 14 日から 1998 年 3 月 31 日まで)，後期（1998 年 4 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日まで）の各期間のパラメータ推定結果と t 値，前期から後期へのパラメータの変化とその t 値を**表 2.8** に示す.

自由度修正済み決定係数は，前期は 0.58，中期は 0.53，後期は 0.43 であり，経年的に値が低下した．1 次の系列相関は各期とも 5%水準で確認されない.

前期に比べて後期は，減圧給水による追加節水量が減少したものの，5%水準で変化が確認できなかった（β_1）．ただし，これには，前期からは，1994 年 7 月のデータを除いていること等が影響している可能性がある.

気象要因の影響として，降雨日にも使用水量が減少しにくくなり（β_3），日最高気温が高くても使用水量が増加しにくくなった（β_4）．すなわち，使用水量が日々の気象による影響を受けにくくなった.

火，水，木の使用水量の増加量は大きくなり（β_5），日曜，祝日の使用水量の減少量が小さくなった（β_6，β_7）.

経年的な使用水量の減少は緩やかになった（β_{10}）.

図 2.21 に，回帰モデルをもとに計算した，給水制限未実施時の需要量と給水制限実施時の使用水量の予測結果を，推計日使用水量とあわせて示す．**図 2.22** に各渇水年の予測結果を示す．これより，回帰モデルは推計日使用水量を概ね再現できていると判断される.

表 2.8　パラメータの推定結果（高松市・家庭用）

(a) 前期　　自由度修正済み決定係数 0.58　　系列相関に関するt値　　−0.478　D−W比　2.02

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	0.774	0.194	0.139	−0.039	0.005	0.003	−0.030	−0.038	−0.059	−0.004	1.069
t値	4.886 **	9.118 **	14.294 **	−14.739 **	15.236 **	1.909 *	−14.806 **	−9.474 **	−25.079 **	−1.832	10.651 **

(b) 中期　　自由度修正済み決定係数 0.53　　系列相関に関するt値　　−0.895　D−W比　2.09

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	6.064	−	−	−0.037	0.004	0.006	−0.026	−0.036	−0.046	−0.001	−2.512
t値	29.329 **	− −	− −	−13.134 **	12.598 **	3.475 **	−13.261 **	−9.389 **	−18.611 **	−0.697	−15.811

(c) 後期　　自由度修正済み決定係数 0.43　　系列相関に関するt値　　−1.330　D−W比　2.04

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	2.054	0.178	−	−0.031	0.004	0.006	−0.025	−0.022	−0.039	−0.002	0.042
t値	73.623 **	12.410 **	− −	−21.415 **	24.799 **	6.275 **	−24.751 **	−11.242 **	−25.870 **	−1.967 *	4.387 **

(d) 前期から後期への変化

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
変化	1.280	−0.016	−	0.008	−0.001	0.003	0.005	0.015	0.020	0.001	−1.027
t値	45.879 **	−1.102	− −	5.577 **	−4.573 **	2.627 **	4.817 **	7.586 **	13.219 **	0.871	−107.02 **

**1%有意，*5%有意

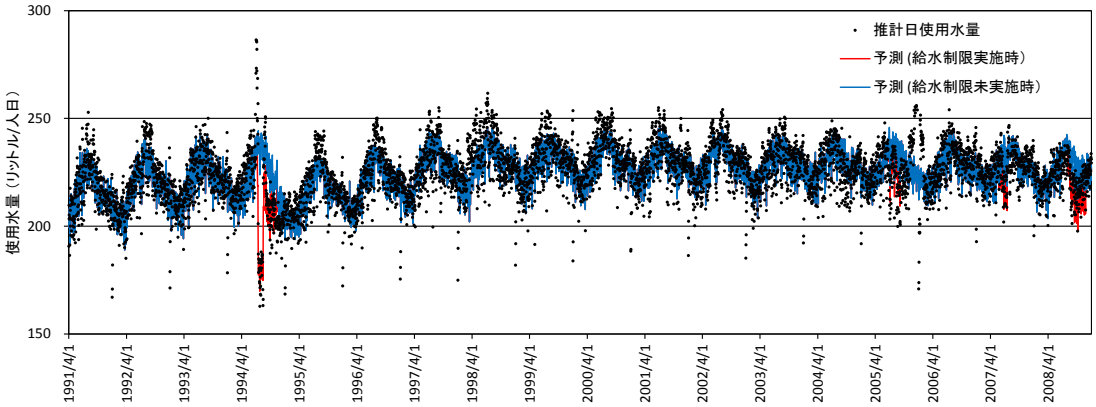
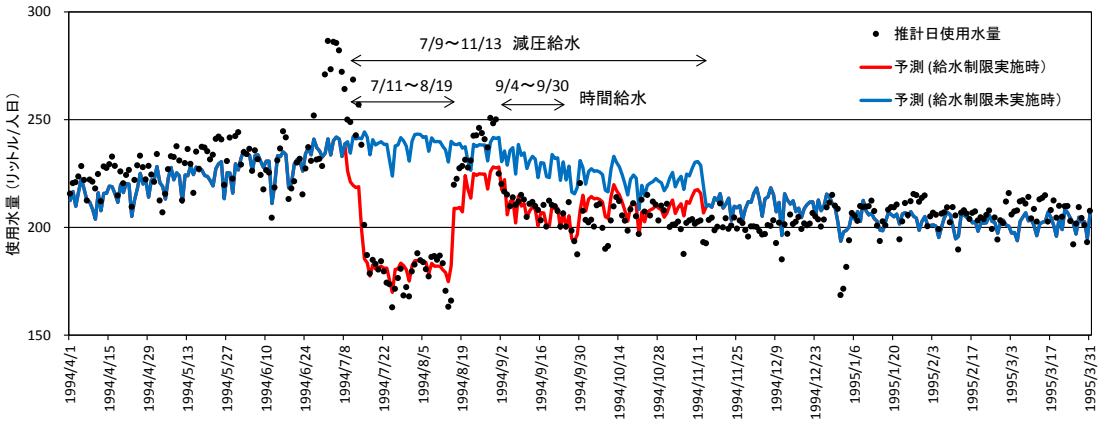
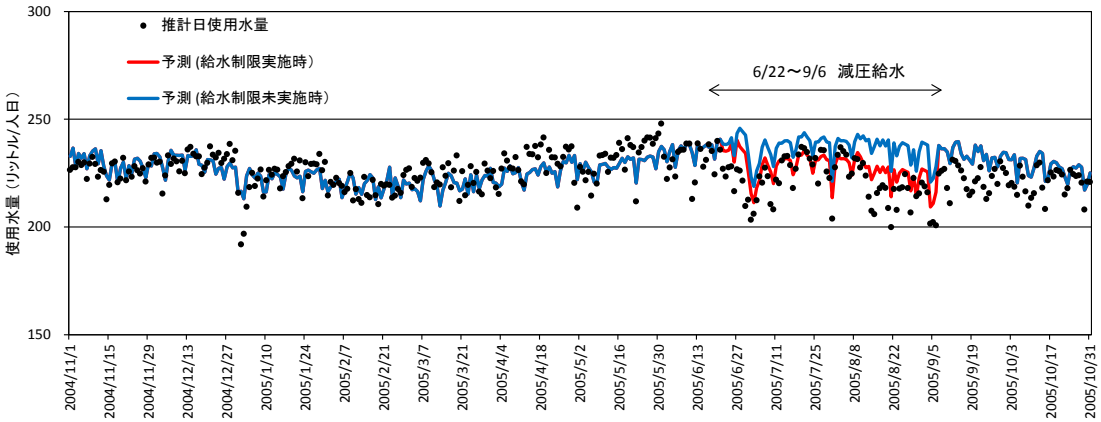


図 2.21　家庭用使用水量の予測結果（高松市）



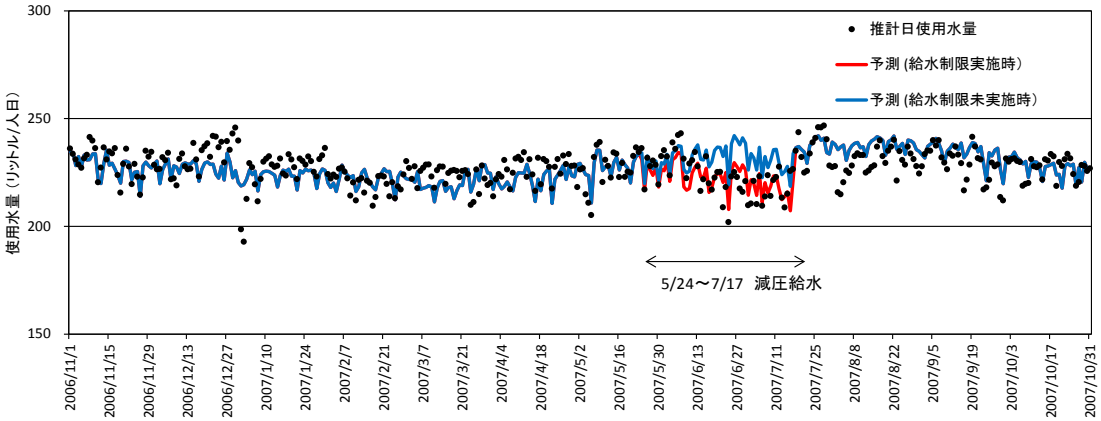
(a) 1994 年渇水



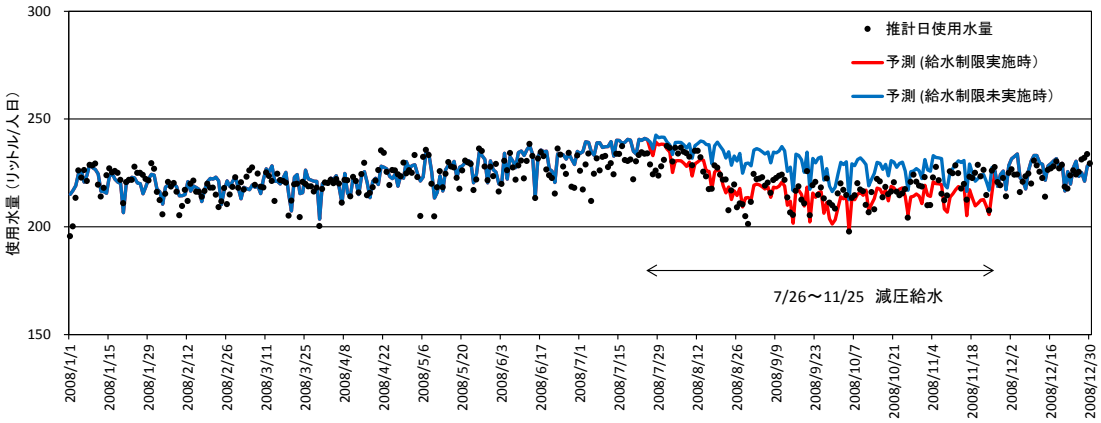
(b) 2005 年渇水

図 2.22（1）　給水制限の影響の予測結果（高松市・家庭用）

（次項に続く）



(c) 2007 年渇水



(d) 2008 年渇水

図 2.22 (2) 給水制限の影響の予測結果（高松市・家庭用）
（前項より続く）

(2) 高松市（業務用）

前期（1991 年 4 月 1 日から 1994 年 11 月 13 日まで), 中期（1994 年 11 月 14 日から 1998 年 3 月 31 日まで), 後期（1998 年 4 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日まで）の各期間のパラメータの推定結果と t 値，前期から後期へのパラメータの変化とその t 値を**表 2.9** に示す.

自由度修正済み決定係数は，前期は 0.69，中期は 0.46，後期は 0.59 であった．家庭用と異なり，前期，後期，中期の順で値が高かった．1 次の系列相関は，前期は 5%水準で確認されなかったが，中期，後期は 5%水準で確認された.

前期に比べて後期は，減圧給水による追加節水量が小さく（β_1)，この変化は 1%水準で有意であった. 家庭用ではこの変化は 5%水準でも有意ではなく, 家庭用との相違がみられた. β_1 は給水圧の変化率に対する使用水量の変化率に相当するが，後期は前期に対して約 43%まで減少した.

気象要因に対する使用水量の変化や，週変動，経年変化の傾向は，家庭用と同様であった．すなわち，降雨日にも使用水量が減少しにくく（β_3），日最高気温が高くても使用水量が増加しにくくなった（β_4）．また，火，水，木の使用水量の増加量は大きくなり（β_5），日曜，祝日の使用水量の減少量が小さくなった（β_6，β_7）．経年的な使用水量の減少は，家庭用と同様，緩やかになった（β_{10}）．

図 2.23 に，回帰モデルをもとに計算した，給水制限未実施時の需要量と給水制限実施時の使用水量の予測結果を，推計日使用水量とあわせて示す．**図 2.24** に各渇水年の予測結果を示す．回帰モデルは推計日使用水量を概ね再現できていると判断される．

表 2.9　パラメータの推定結果（高松市・業務用）

(a) 前期　自由度修正済み決定係数 0.69　系列相関に関するt値　−1.815　D−W比　2.10

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	212.290	0.513	0.182	−0.039	0.005	0.004	−0.030	−0.035	−0.045	−0.043	−57.580
t値	15.073 **	17.892 **	15.954 **	−14.737 **	14.884 **	1.948 *	−15.179 **	−8.868 **	−17.214 **	−17.111 **	−14.940 **

(b) 中期　自由度修正済み決定係数 0.46　系列相関に関するt値　−2.924　D−W比　2.16

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	22.483	−	−	−0.036	0.004	0.006	−0.026	−0.032	−0.045	−0.038	−6.324
t値	1.724	− −	− −	−13.104 **	12.670 **	3.297 **	−13.602 **	−8.408 **	−15.424 **	−12.810 **	−1.488

(c) 後期　自由度修正済み決定係数 0.59　系列相関に関するt値　−4.781　D−W比　2.15

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	102.122	0.223	−	−0.030	0.005	0.006	−0.025	−0.020	−0.042	−0.035	−36.245
t値	45.054 **	12.725 **	− −	−21.477 **	26.306 **	6.119 **	−25.205 **	−10.088 **	−24.206 **	−21.079 **	−44.200 **

(d) 前期から後期への変化

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
変化	−110.17	−0.289	−	0.008	−0.001	0.002	0.005	0.015	0.003	0.008	21.335
t値	−48.603 **	−16.479 **	− −	5.872 **	−2.908 **	2.336 *	5.378 **	7.794 **	1.620	4.694 **	26.018 **

**1%有意，*5%有意

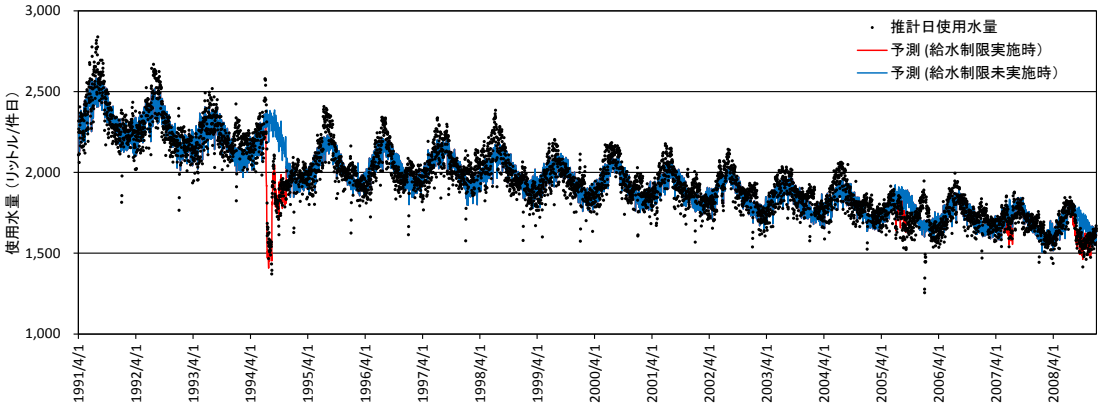
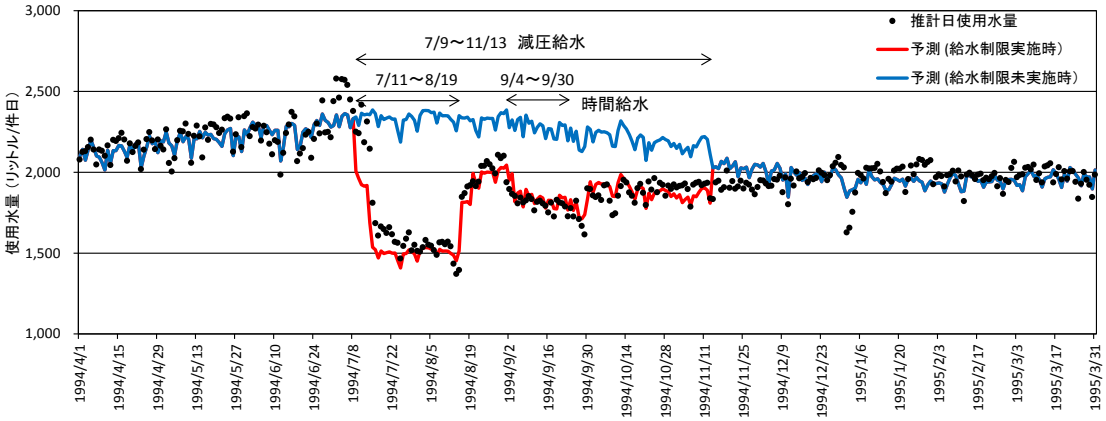
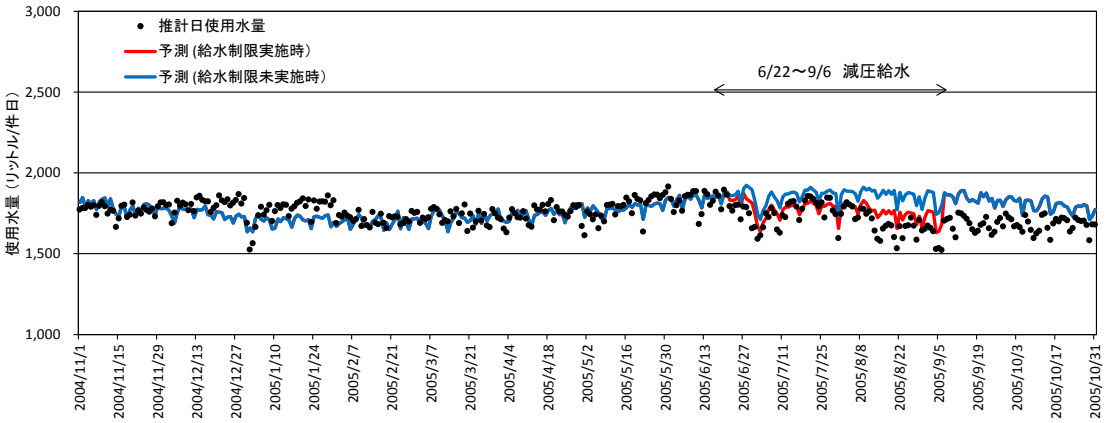


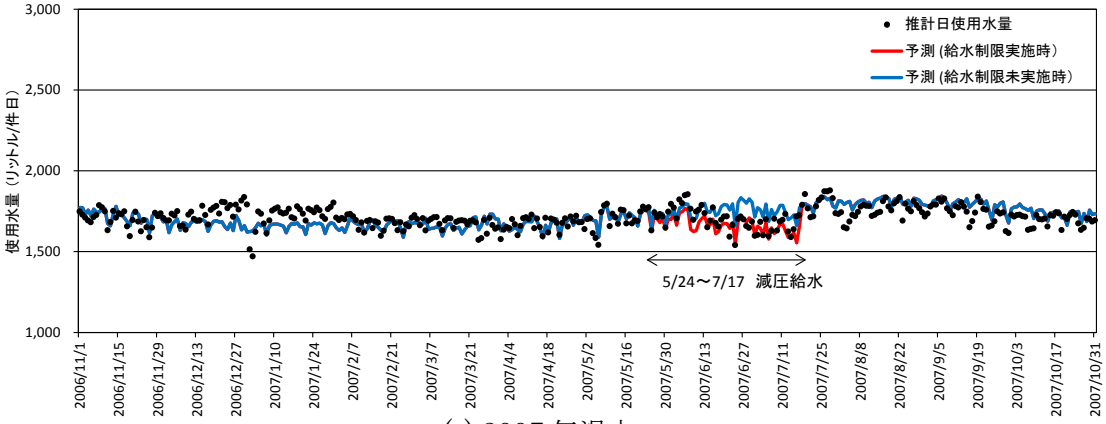
図 2.23　業務用使用水量の予測結果（高松市）



(a) 1994 年渇水



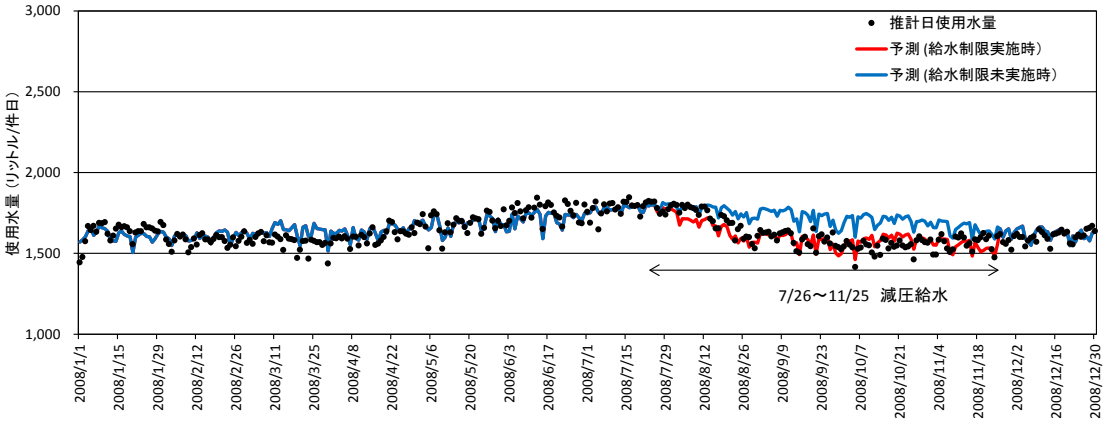
(b) 2005 年渇水



(c) 2007 年渇水

図 2.24 (1)　給水制限の影響の予測結果（高松市・業務用）

（次項に続く）



(d) 2008 年渇水

図 2.24（2） 給水制限の影響の予測結果（高松市・業務用）

（前項より続く）

(3) 松山市（家庭用）

前期（1991 年 4 月から 1995 年 5 月 1 日まで），中期（1995 年 5 月 2 日から 1999 年 3 月 31 日まで），後期（1999 年 4 月 1 日から 2007 年 10 月 31 日まで）の各期間のパラメータの推定結果と t 値，前期から後期へのパラメータの変化とその t 値を**表 2.10** に示す．

自由度修正済み決定係数は，前期は 0.66，中期は 0.54，後期は 0.50 であり，高松市の家庭用と同様，近年に近づくほど決定係数の値は小さくなった．ただし，高松市と比べて全体的に決定係数は高かった．1 次の系列相関は各期とも 5%水準で確認されなかった．

前期に比べて後期は，減圧給水による追加節水量が小さくなった（β_1）．高松市の家庭用では，この変化が有意ではなかったが，松山市は 1%水準で有意であった．これより，後期には給水圧の変化率に対する使用水量の変化率は，前期に対して約 53%まで減少した．

気象要因による影響については，高松市の家庭用，業務用と同様に，使用水量が日々の気象による影響を受けにくくなった．すなわち，降雨日にも使用水量が減少しにくく（β_3），日最高気温が高くても使用水量が増加しにくくなった（β_4）．

一方で，週変動については，高松市の家庭用，業務用と異なり，火，水，木の使用水量は増加しにくく（β_5），日曜の使用水量は減少量しやすく（β_6），祝日の使用水量は減少しにくくなった（β_7）．

経年的な使用水量の減少が緩やかになった（β_{10}）点については，高松市の家庭用，業務用と同様である．

図 2.25 に，回帰モデルをもとに計算した，給水制限未実施時の需要量と給水制限実施時の使用水量の予測結果を，推計日使用水量とあわせて示す．**図 2.26** に各渇水年の予測結果を示す．回帰モデルは推計日使用水量を概ね再現できていると判断される．

表 2.10　パラメータの推定結果（松山市・家庭用）

(a) 前期　　自由度修正済み決定係数 0.66　　系列相関に関するt値　　−0.866　D−W比　2.04

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	0.259	0.159	0.128	−0.052	0.005	0.008	−0.017	−0.036	−0.051	−0.006	1.449
t値	1.015	15.351 **	20.951 **	−19.067 **	13.866 **	4.033 **	−7.783 **	−8.477 **	−18.883 **	−2.816 **	7.763 **

(b) 中期　　自由度修正済み決定係数 0.54　　系列相関に関するt値　　0.612　D−W比　1.97

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	4.883	−	−	−0.046	0.004	0.009	−0.015	−0.036	−0.050	0.004	−0.617
t値	32.852 **	− −	− −	−18.000 **	13.847 **	5.063 **	−6.900 **	−9.153 **	−28.614 **	2.537 *	−7.469

(c) 後期　　自由度修正済み決定係数 0.50　　系列相関に関するt値　　0.316　D−W比　1.99

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	2.959	0.085	−	−0.048	0.004	0.007	−0.020	−0.027	−0.032	−0.002	0.145
t値	156.392 **	17.217 **	− −	−29.445 **	18.224 **	5.749 **	−15.031 **	−11.157 **	−25.651 **	−2.126 *	18.130 **

(d) 前期から後期への変化

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
変化	2.70	−0.074	−	0.004	−0.001	−0.001	−0.003	0.009	0.019	0.004	−1.304
t値	142.710 **	−14.916 **	− −	2.286 *	−6.950 **	−1.308	−2.053 *	3.605 **	15.155 **	3.947 **	−163.11 **

**1%有意，*5%有意

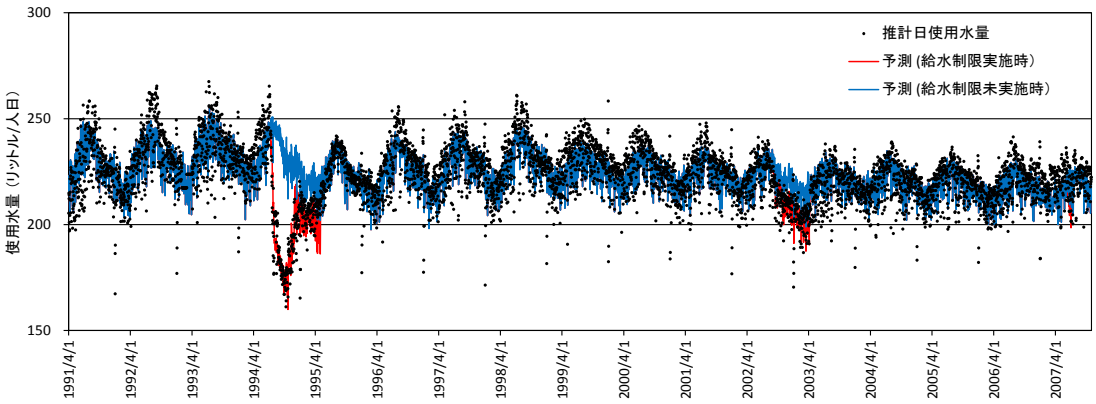
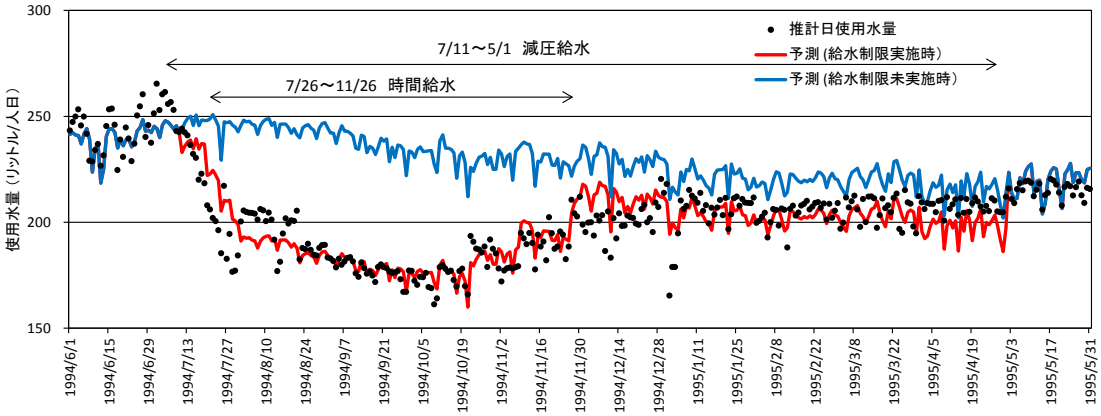
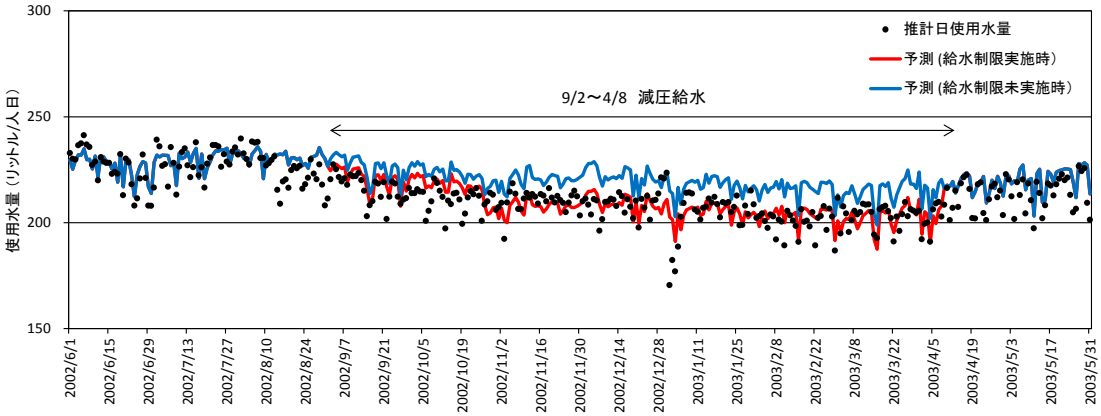


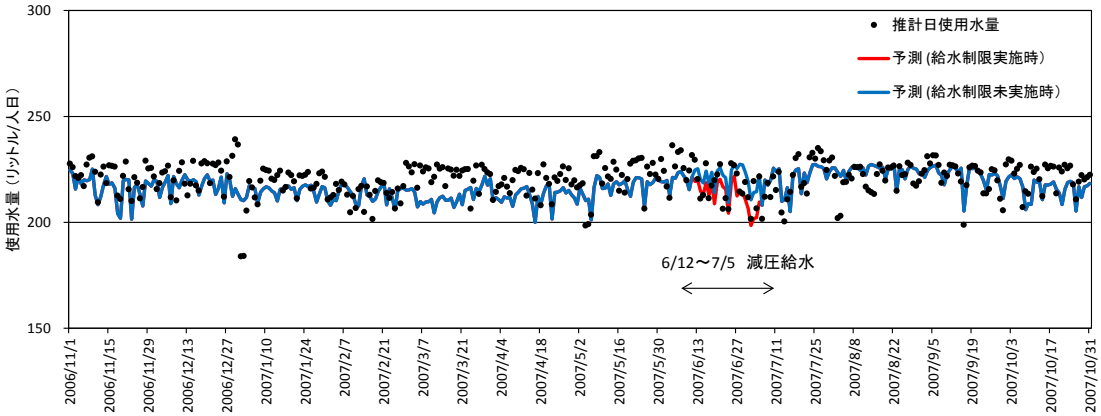
図 2.25　家庭用使用水量の予測結果（松山市）



(a) 1994 年渇水



(b) 2002 年渇水



(c) 2007 年渇水

図 2.26　給水制限の影響の予測結果（松山市・家庭用）

(4) 松山市（業務用）

前期（1991 年 4 月から 1995 年 5 月 1 日まで），中期（1995 年 5 月 2 日から 1999 年 3 月 31 日まで），後期（1999 年 4 月 1 日から 2007 年 10 月 31 日まで）の各期間のパラメータの推定結果と t 値，前期から後期へのパラメータの変化とその t 値を**表 2.11** に示す．

自由度修正済み決定係数は，前期は 0.88，中期は 0.60，後期は 0.66 であり，家庭用よりも全体的に高い値であった．家庭用と異なり，前期，後期，中期の順で決定係数が高く，高松市の業務用と同じ傾向であった．1 次の系列相関は各期とも 5%水準で確認されなかった．

前期に比べて後期は，減圧給水による追加節水量が小さくなった（β_1）．給水圧の変化率に対する使用水量の変化率は，前期に対して約 25%まで減少した．家庭用の約 53%と比べて，さらに小さくなっており，家庭用よりも業務用の方が，減圧給水実施時に使用水量が減少しにくくなった．これは，高松市における家庭用と業務用の関係と同じ特徴である．

気象要因の影響については，高松市の家庭用，業務用や，松山市の家庭用と同様に，降雨（β_3），日最高気温（β_4）の影響を受けにくくなった．

また，家庭用と同様，火，水，木の使用水量は増加しにくく（β_5），日曜の使用水量は減少量しやすく（β_6）なったものの 5%水準で有意ではなかった．祝日の使用水量は減少しにくくなった（β_7）．これは，高松市の業務用とは異なる傾向であった．

経年的な使用水量の減少は，高松市の家庭用，業務用，松山市の家庭用と同様に緩やかになった（β_{10}）．

表 2.11　パラメータの推定結果（松山市・業務用）

(a) 前期　　自由度修正済み決定係数 0.88　　系列相関に関するt値　　−1.685　D−W比　2.09

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	257.794	0.320	0.244	−0.051	0.005	0.009	−0.017	−0.035	−0.056	−0.055	−68.132
t値	16.219 **	30.118 **	35.791 **	−18.786 **	14.062 **	4.284 **	−8.023 **	−8.144 **	−19.911 **	−20.708 **	−16.078 **

(b) 中期　　自由度修正済み決定係数 0.60　　系列相関に関するt値　　−0.423　D−W比　2.02

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	5.705	−	−	−0.046	0.005	0.009	−0.014	−0.031	−0.059	−0.044	−0.332
t値	0.506	− −	− −	−17.874 **	13.512 **	4.953 **	−6.923 **	−7.876 **	−30.543 **	−22.810 **	−0.134

(c) 後期　　自由度修正済み決定係数 0.66　　系列相関に関するt値　　−1.329　D−W比　2.04

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
推定値	163.540	0.081	−	−0.047	0.004	0.006	−0.019	−0.024	−0.046	−0.041	−38.588
t値	51.281 **	13.773 **	− −	−28.908 **	18.023 **	5.393 **	−15.039 **	−9.879 **	−34.321 **	−29.784 **	−50.152 **

(d) 前期から後期への変化

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
変化	−94.25	−0.238	−	0.003	−0.001	−0.002	−0.002	0.010	0.010	0.014	29.544
t値	−29.555 **	−40.262 **	− −	2.130 *	−6.545 **	−1.954	−1.586	4.143 **	7.184 **	10.508 **	38.40 **

**1%有意，*5%有意

図 2.27 に，回帰モデルをもとに計算した，給水制限未実施時の需要量と給水制限実施時の使用水量の予測結果を，推計日使用水量とあわせて示す．**図 2.28** に各渇水年の予測結果を示す．これより，回帰モデルは推計日使用水量を概ね再現できていると判断される．

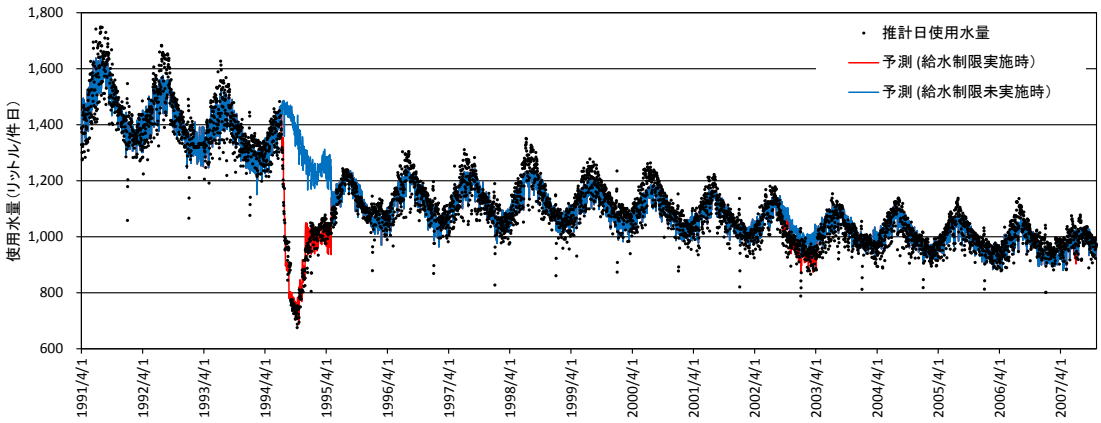
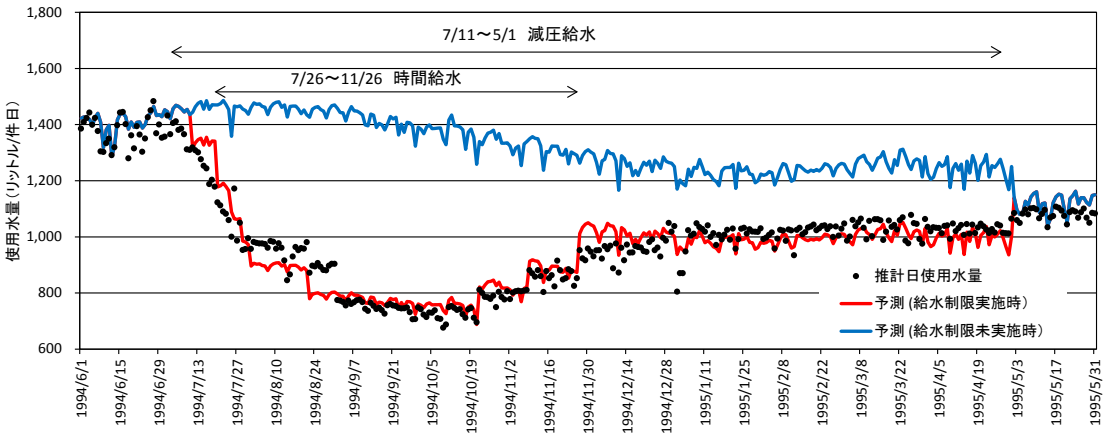
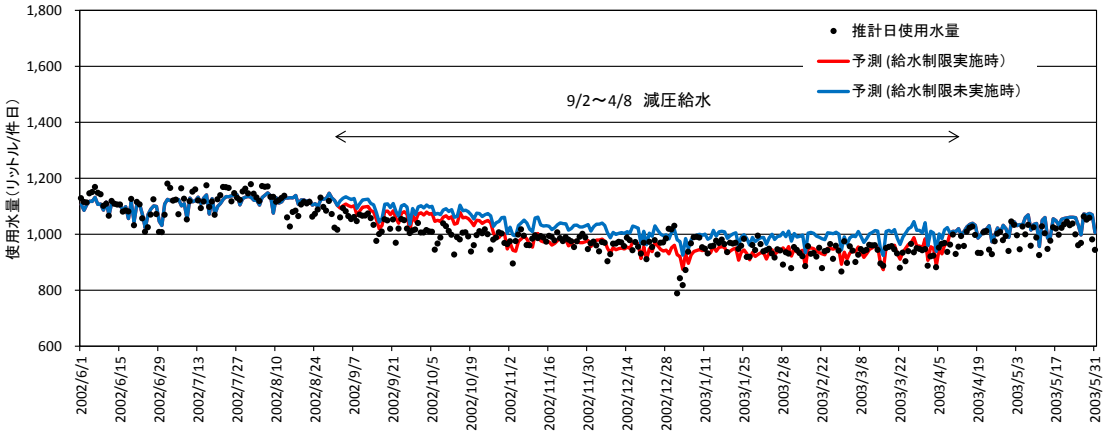


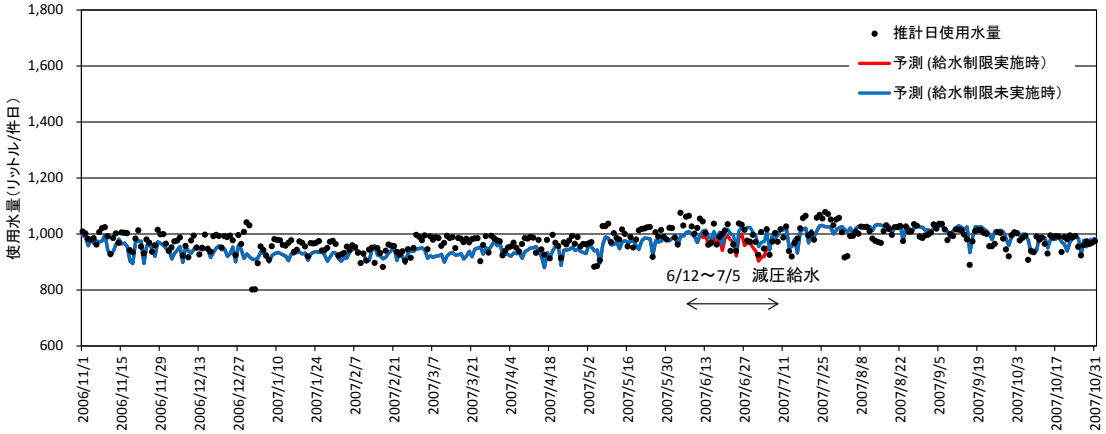
図 2.27　業務用使用水量の予測結果（松山市）



(a) 1994 年渇水



(b) 2002 年渇水



(c) 2007 年渇水

図 2.28　給水制限の影響の予測結果（松山市・業務用）

2.4.4　水需要量と給水制限時の追加節水量の経年変化

前項の結果より，高松市の業務用，松山市の家庭用と業務用については，1994 年渇水時と比べて，2000 年以降の渇水時は，減圧給水が実施された場合の追加節水量が減少する傾向が有意に確認された．高松市の家庭用についても，有意ではなかったものの追加節水量が減少する傾向がみられた．

本項では，回帰モデルを用いて 1994 年と 2007 年の給水制限未実施時の水需要量と，給水制限が実施された場合の追加節水量の比較を行う．比較は降雨がなく，日最高気温の月平均からの偏差もなく，平日（月，金，土）という条件で行った．1994 年については前期，2007 年については後期のパラメータを用いた．

まず, 中間期（10 月), 夏期（7 月), 冬期（2 月）において, 給水制限が未実施の状態から，減圧給水率が 10%刻みで 50%まで強化され，さらに，減圧給水 50%に加えて 6 時間，12 時間，18 時間の断水が実施された場合を想定した．ただし，1994 年以降，両市では時間給水は行われていないため，時間給水の計算は 1994 年のみを対象に行った．

次に，使用水量の月変動をみるため，給水制限未実施時と 50%の減圧給水時における月ごとの計算を行い，1994 年と 2007 年の比較を行った．

(1) 家庭用

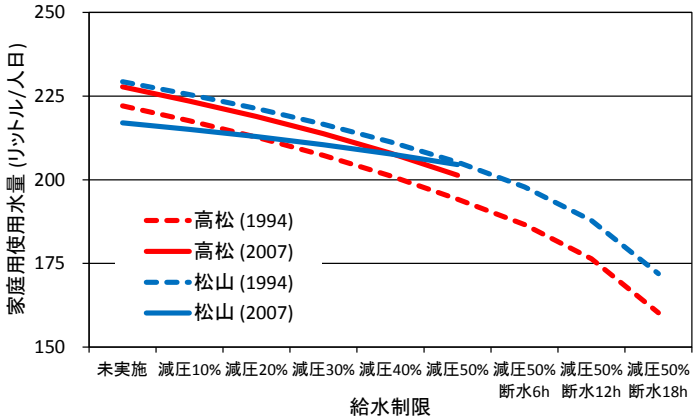
図 2.29 に給水制限強度が変化した場合の家庭用使用水量を，中間期，夏期，冬期に分けて示す．

高松市については，給水制限未実施時の需要量は，各期とも 1994 年より 2007 年の方が大きく，中間期は 5.6 リットル/人日，夏期は 1.1 リットル/人日，冬期は 9.3 リットル/人日の差があった．夏期の差が，中間期，冬期と比べて小さかった．減圧給水時には，中間期，冬期においては，1994 年の使用水量よりも 2007 年の使用水量の方が数リットル大きく，夏期については，両年ともほぼ同等である．よって，特に中間期，冬期については，1994 年よりも 2007 年の使用水量が多く，渇水に対するリスクが増している可能性がある．

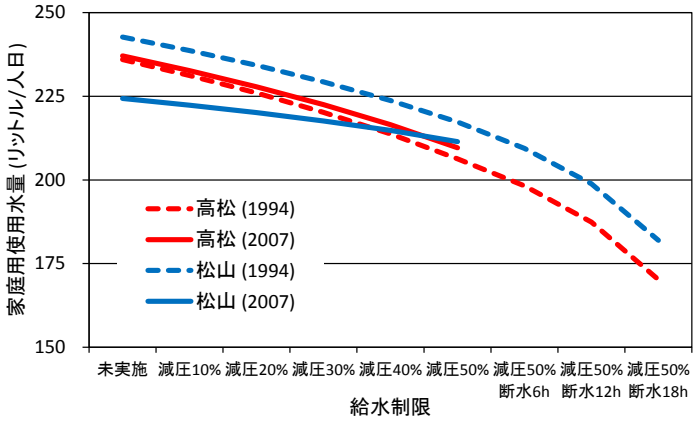
松山市については，給水制限未実施時の需要量は，中間期，夏期，冬期のいずれについても，1994 年より 2007 年の方が少ない．両年の差は，中間期は 12.3 リットル/人日，夏期は 18.3 リットル/人日，冬期は 8.6 リットル/人日であり，中間期，冬期に比べて夏期の差が大きかった．全体的に需要量が増加した高松市については，中間期，冬期に比べて夏期の増加量が小さかったが，全体的に需要量が減少した松山市では夏期の減少量が大きく，夏期がほかと比べて，近年に減少している点で，両市は同様の特徴であると考えられる．

松山市では，給水圧の変化に対する使用水量の変化率が 2007 年は 1994 年の約 53%まで低減したことを受けて，減圧の強化にともない，両年の使用水量は急速に接近する．このため，冬期においては，減圧給水率が 40～50%以上になると，両年の使用水量が逆転し，2007 年の使用水量の方が 1994 年よりも大きくなる．中間期については，減圧率 50%になると, 両年の使用水量の差はほとんどない. 夏期については, 減圧率 50%の場合でも, 2007

(a) 中間期（10 月）



(b) 夏期（7 月）



(c) 冬期（2 月）

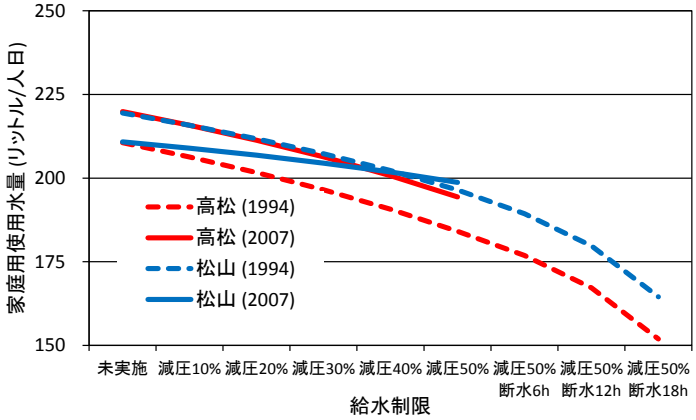
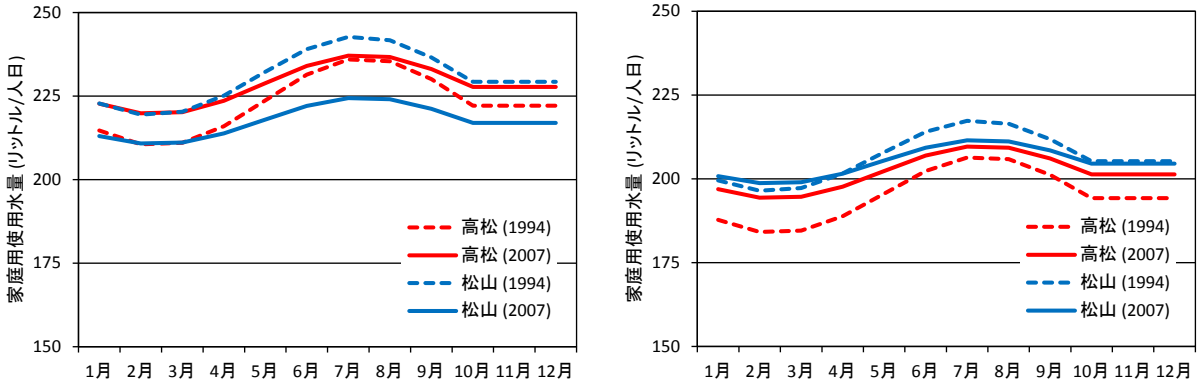


図 2.29　給水制限に伴う使用水量の変化（家庭用）

年の使用水量が 1994 年よりも 5.8 リットル/人日大きいが，両年の使用水量は接近している．

図 2.30 に給水制限未実施時と，50%の減圧給水時の使用水量の月別推計結果を示す．給水制限未実施時において，高松市では，1994 年 7 月と 2 月の使用水量の差は 25.4 リットル/人日であったが，2007 年は 17.2 リットル/人日となり，約 68%まで縮小した．同様に松山市の 1994 年 7 月と 2 月の使用水量の差は 23.3 リットル/人日であったが，2007 年の差は 13.5 リットル/人日となり，約 58%となった．すなわち，両市とも年間の使用水量の変



(a) 給水制限未実施時　　(b) 50%減圧給水時

図 2.30　家庭用使用水量の月別推計結果

動が小さくなる傾向が確認された．

50%の減圧給水が実施された場合，高松市においては，年間を通じて 1994 年よりも 2007 年の使用水量が大きい．しかし，この差は夏場よりも冬場の方が大きく，7 月における両年の使用水量の差は 3.3 リットル/人日であったが，2 月における両年の使用水量の差は 10.2 リットル/人日であり，比較的冬場の差が大きい．松山市においては，夏場は 2007 年のほうが小さいが，冬場の 1 月から 3 月は逆転し，1994 年よりも 2007 年の方が大きい．2007 年 7 月の使用水量は 1994 年 7 月より 5.8 リットル/人日小さいが，2007 年 2 月は 1994 年 2 月より 2.2 リットル/人日大きい．このことから，冬場の渇水に対してリスクが大きくなっている可能性がある．

以上より，給水制限による追加節水の効果を考える場合においては，使用水量の月変動を考慮することも重要である．ただし，本検討においては，給水制限のパラメータは 1 年間を通じて同一の値を用いており，季節や月によって区分していない．これについては，さらにデータを蓄積したうえで検討を行う必要がある．

両都市ともに，厳しい給水制限が課された場合の使用水量は，近年の方が大きくなる可能性があり，渇水時に水源を温存するための給水制限の効果が低減していると考えられる．

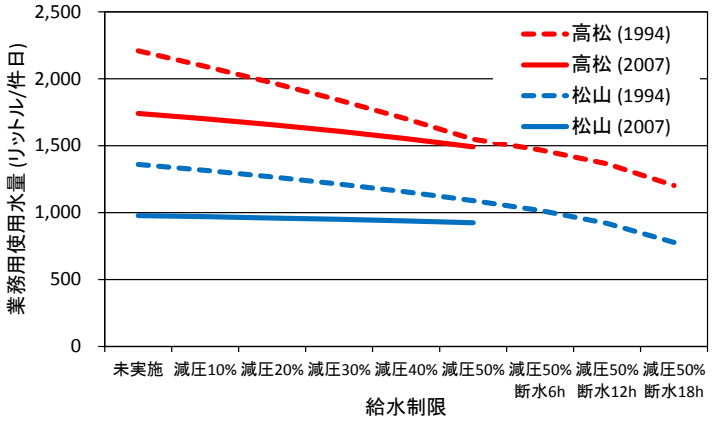
また，両都市で，給水制限未実施時の需要量，給水制限時の追加節水量の経年変化に相違がみられたが，これは，各都市の気象特性や世帯構成，渇水対策として講じられている施策の差異等を反映したものと考えられる．しかし，これらの要素が水使用量に対してどのように作用したかは，今後の課題である．

(2) 業務用

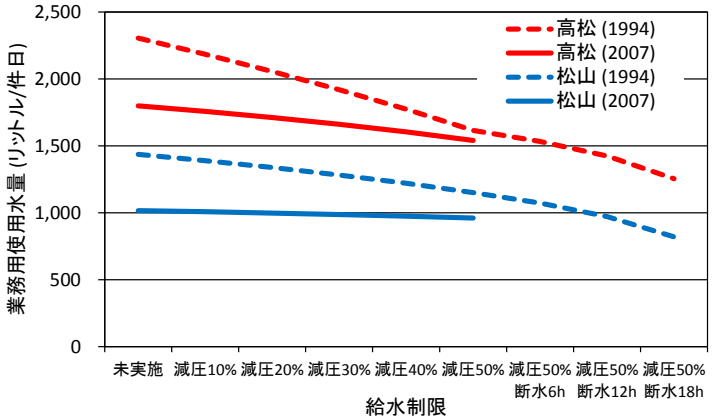
図 2.31 に，中間期，夏期，冬期において，給水制限強度が変化した場合の業務用使用水量を示す．高松市，松山市ともに同様の特徴を示しており，給水制限未実施時の需要量は，1994 年よりも 2007 年のほうが少ない．高松市において，中間期の両年の差は 468 リット

ル/件日，夏期の差は 506 リットル/件日，冬期の差は 425 リットル/件日であった．松山市の中間期における両年の差は 382 リットル/件日，夏期の差は 420 リットル/件日，冬期の差は 332 リットル/件日であった．

(a) 中間期（10 月）



(b) 夏期（7 月）



(c) 冬期（2 月）

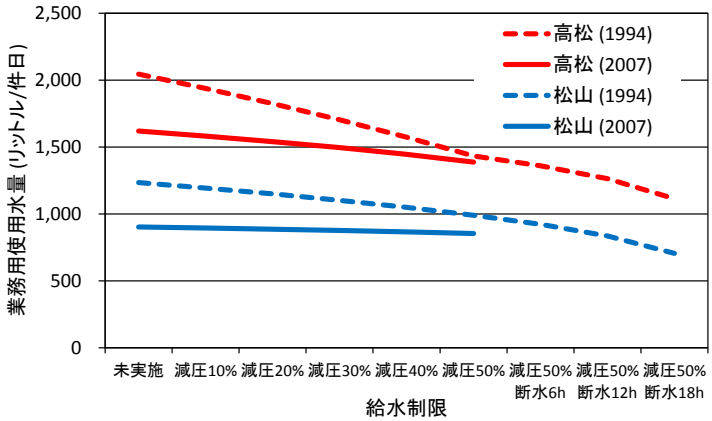
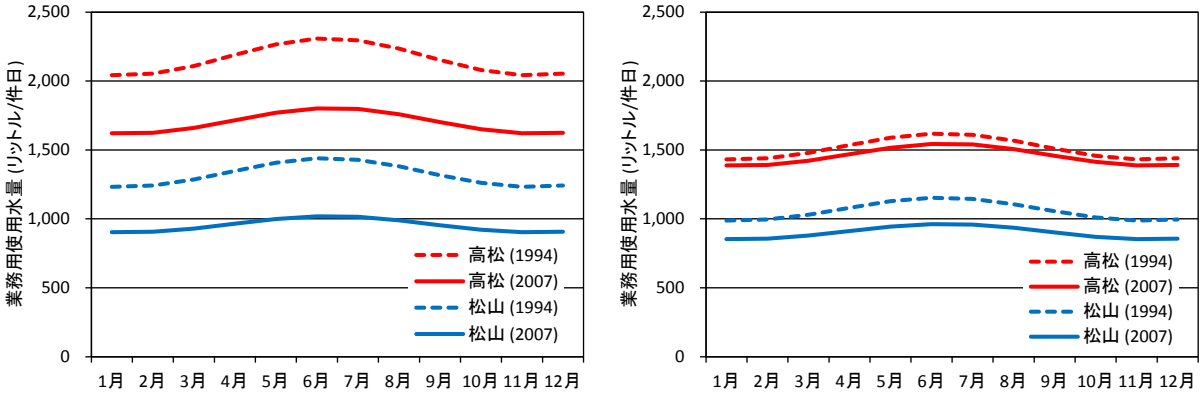


図 2.31　給水制限に伴う使用水量の変化（業務用）



(a) 給水制限未実施時　　(b) 50%減圧給水時

図 2.32　業務用使用水量の月別推計結果

2007 年の給水圧の変化率に対する使用水量の変化率が，1994 年に対して高松市は 43%，松山市は 25%になったことを受けて，減圧の強化にともない両年の使用水量は急速に接近し，減圧率が 50%程度まで強化されると，両年の使用水量は同程度となる．

図 2.32 に給水制限未実施時と，50%の減圧給水時の使用水量の月別推計結果を示す．前述のとおり，給水制限未実施時において，1994 年と比べて 2007 の使用水量は少ないが，50%の減圧給水が実施された場合，両年の使用水量は接近する．ただし，家庭用のように両年の大小関係が逆転することはない．

2.5　結言

香川県高松市，愛媛県松山市を例に，家庭用，業務用の用途別に，平常時の需要量と，給水制限時の追加節水量の定量評価を行った．家庭用，業務用の日使用水量を推計するため，上水道の日給水量に対して，月単位で用途別に集計されている調定水量より推計した用途比率を乗じる方法を提案した．この推計結果に対して，気象要因，週変動，月変動，年変動，給水制限強度を考慮した回帰モデルを適用し，1994 年と 2000 年以降の渇水時の比較を行った．本章の主な結論は，以下のとおりである．

1) 上水道の給水量に占める家庭用水の比率は，経年的に上昇している．また，1994 年渇水時のように，時間給水などの厳しい給水制限が実施されると，一時的に家庭用水の比率が上昇する．よって，給水制限未実施時の需要量や，給水制限時の追加節水量の特徴について，都市間，年代間の比較を行う際には，用途別に区分することで，より詳細な解析が可能である．

2) 高松市の 2007 年の家庭用水の需要量は，1994 年に比べて年間を通じて増えている．特

に冬場の増加量が大きく，１人１日当たり９リットル以上増加した．松山市の需要量は，年間を通じて１人１日当たり約８リットル以上減少した．両都市とも，需要量は降雨や気温によって影響されにくくなり，夏場と冬場の使用水量の差が縮小した．減圧給水による追加節水量は，高松市では変化が見られなかったが，松山市は変化率が約 53%まで小さくなっており，減圧給水を強化することによる追加節水量が減少した．夏場と冬場の需要量の差が縮小したため，松山市の 2007 年の冬場の給水制限時の使用水量は，1994 年時を上回る可能性がある．よって，給水制限時の貯水池運用を考える上で，月変動を考慮することも重要である．両都市の相違は，各都市の気象特性や世帯構成，渇水対策として講じられている施策の差異等を反映したものと考えられる．両都市ともに，厳しい給水制限が課された場合の使用水量は，近年の方が大きくなる可能性があり，渇水時に水源を温存するための，給水制限の効果が低減していると考えられる．

3) 2007 年の高松市，松山市の業務用需要量は，1994 年に比べて大きく減少した．また，家庭用と同様，降雨や気温により需要量が影響されにくくなった．減圧給水による追加節水量は，高松市で 43%，松山市で 25%まで小さくなり，減圧給水を強化しても，家庭用と比べてさらに，使用水量は減少しにくくなった．そのため，50%の給水制限が実施された場合の使用水量は，年代間で大きな差がない．

参考文献

大西昌平（1995）: 香川県における平成 6 年夏季渇水の経過と対応，工業用水, No.440, pp.55-63.

岡徹・高木朗義（2004）: 節水と地域間の水融通による渇水リスク分散方法に関する基礎的分析，土木計画学研究・論文集, Vol.21, No.2, pp.375-384.

勝矢淳雄（1997）: 渇水時における市民の節水意識とその効果，環境衛生工学研究，Vol.11，No.3, pp.207-210.

鈴木健司・岡田憲夫・池淵周一（1996）: 渇水に対する社会的関心の活性度の指標化とその変動過程に関する考察－平成 6 年大渇水を事例として，土木計画学研究・論文集, No.13, pp.369-380.

角哲也・柏井条介・安達孝美（1996）: 渇水における給水制限と水使用量の関係，土木技術資料，Vol.38, No.10, pp.38-43.

国土交通省近畿地方整備局淀川水系総合調査事務所（2009）: 淀川水系断水社会実験報告書.

国土交通省四国地方整備局（2008）：重信川水系河川整備計画【重信川の河川整備（国管理区間）】.

高松市（2011）: 2011～2030 年度高松市水環境基本計画.

高松市（2013）：高松市渇水対策本部の設置および今後の渇水対応について, 2013.8.16.

谷本圭志・森田浩和（2003）：水融通の制度の設計に関する一考察，土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.2, pp.305-312.

長町博（1995）：平成 6 年夏期渇水と香川用水の対応，農業土木学会誌, Vol.63, No.1, pp.59-62.

細田三朗（1996）：取水制限と制限給水 - 平成 6 年渇水の実態 - , 水道協会雑誌, Vol.65, No.4, pp.2-17.

松山市（2004）：松山市長期的水需給計画基本計画（概要）.

松山市公営企業局（1995）：平成 6 年松山の渇水記録.

Burness, S., J. Chermak and K. Krause (2005): Western municipal water conservation policy: The case of disaggregated demand, Water resources research, Vol.41, W03011.

Grafton, R. Q. and M. B. Ward (2008): Prices versus rationing: Marshallian surplus and mandatory water restrictions, The economic record, Vol.84, s57-s65.

Kenney, D. S., R. A. Klein and M. P. Clark (2004): Use and effectiveness of municipal water restrictions during drought in Colorado, Journal of the American water resources association, Vol.40, No.1, pp.77-87.

Kenney, D. S., C. Goemans, R. Klein, J. Lowrey, and K. Reidy (2008): Residential water demand management: Lessons from Aurora, Colorado, Journal of the American water resources association, Vol.44, No.1, pp.192-207.

Mansur, E. T. and S. M. Olmstead (2012): The value of scarce water: Measuring the inefficiency of municipal regulations, Journal of urban economics, Vol.71, pp.332-346.

Olmstead, S. M. and R. N. Stavins (2009): Comparing price and nonprice approaches to urban water

conservation, Water resources research, Vol.45, W04301.

Renwick, M. E. and R. D. Green (2000): Do residential water demand side management policies measure up? An analysis of eight California water agencies, Journal of environmental economics and management, Vol.40, pp.37-55.

Roibás, D., M. Á. García-Valiñas and A. Wall (2007): Measuring welfare losses from interruption and pricing as responses to water shortages: An application to the case of Seville, Environmental and resource economics, Vol.38, pp.231-243.

Woo, C. (1994): Managing water supply shortage: Interruption vs. pricing, Journal of public economics, Vol.54, pp.145-160.

第３章　給水制限時の家庭の経済的被害の定量評価

3.1　緒言

前章で解析したように，近年は給水制限が実施された場合の家庭の追加節水量が減少している．これは，家庭における風呂，トイレ，洗濯，キッチン，洗面等の水使用形態の変化を反映したものと考えられる．よって，渇水時に被害を最小化するための貯水池運用や，上水道の給水制限ルールを決定するうえで，家庭の水使用形態の変化を考慮することが，長期的な水源開発を進める観点からも重要である．このため，給水制限による水量確保のための労力の増加や，利便性の低下も含めて，家庭の被害を定量評価する必要がある．

これまで，我が国においては，ミクロ経済学の知見等をベースに給水制限時の家庭の水使用行動をモデル化し，給水制限による経済的被害の評価や，水使用形態の変化が及ぼす影響等を予測するモデル分析が行われているが（森杉ら，1985；多々納ら，1990；岡田ら，1991；伊藤ら, 2002；細井ら, 2002)，実際の渇水に適用した研究は少ない．その理由の一つとして，水道の日使用水量は用途別に集計されておらず，給水制限時の家庭用水の使用水量を，詳細に把握することが困難であったことが考えられる．しかし，前章の手法で推計した家庭用日使用水量を用いることで，実データを用いて渇水被害を評価することができる．

そこで，本章では，前章の手法で推計した家庭用日使用水量を用いて，家庭における水使用行動をモデル化し，香川県高松市，愛媛県松山市の過去の渇水に適用する．そして，給水制限時の水の再利用に伴う労力等から経済的被害を定量評価し，都市間，年代間の比較を行う．

3.2　家庭の水使用行動のモデル化による経済的被害の評価

3.2.1　給水制限時の家庭の水使用行動

まず，給水制限時の家庭の水使用行動について，既往調査結果をもとに整理する．

(1) 1994 年渇水（松山市）

1994 年の松山市の渇水では，1 日の給水時間が午後 4 時から午後 9 時までの 5 時間に制限される給水制限が実施された．給水制限時の家庭での対応について，松山市によりアンケートが実施されている（松山市, 1997）．このアンケートによると，給水制限時には多くの家庭において，風呂水が散水や洗濯，トイレ，掃除等の用途に利用された．風呂水を洗濯に利用した割合は 80.6%，トイレに利用した割合は 67.6%と，非常に高い割合であった．また，風呂水は，散水（44.2%），掃除（61.8%）等にも利用された．

洗濯のすすぎ水は，散水（28.6%），トイレ（18.8%），掃除（21.0%）等に再利用された．この当時，家庭において使われていた洗濯機は 2 層式洗濯機が主流であり，洗濯水の再利用が容易であったことを反映していると考えられる．このほか，台所排水が散水（43.6%），掃除（4.2%）に利用された．

(2) 1994 年渇水（西宮市）

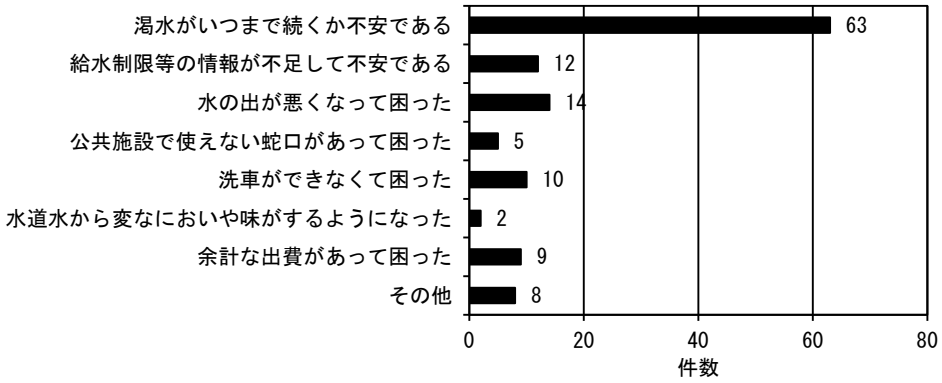
1994 年渇水時に西宮市北部地域では，各家庭ごとに蛇口 1 栓が使える程度まで，止水栓の絞り込みがおこなれた．このとき，市民に対してアンケート調査が行われている（勝矢, 1997）．これによると，約 54.7%の家庭で洗車回数や散水頻度の抑制が実施され，洗濯のまとめ洗い（平常時 37.2%の実施率に対して 30.4%増），風呂の残り湯の再利用（平常時 45.9%の実施率に対して 27.7%増）等の対応がなされた．

(3) 2008 年断水社会実験（京都市，松原市）

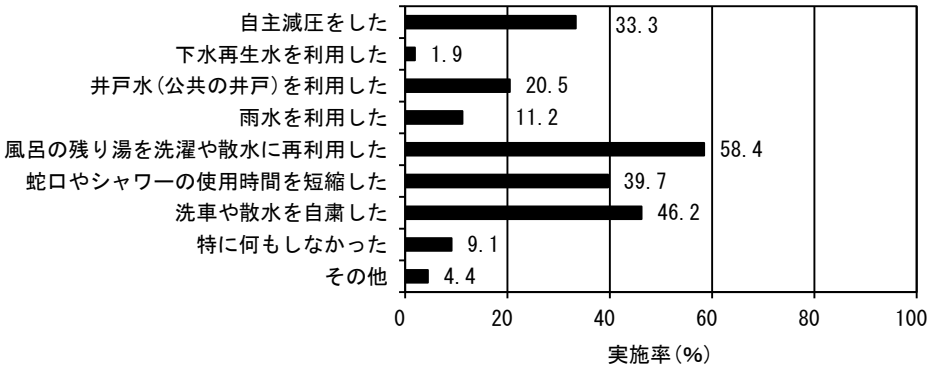
2008 年に，国土交通省により淀川水系の京都市，松原市を対象に，最大 12 時間の仮想的な断水状態を想定し，一般家庭における水使用行動が調査された（国土交通省，2009）．炊事や洗濯については，実施される時間帯が断水を避けた時間帯に移行するため，回数にほとんど変化がなかった．一方，風呂やシャワーについては，時間調整がされるものの，使用水量が減少することが確認された．トイレや洗面については，断水時間中に使用するための対応として，汲み置きによる水の確保が行われたが，断水時間が長くなるにしたがって，使用回数，使用水量が減少することが確認された．

(4) 2009 年渇水（高松市）

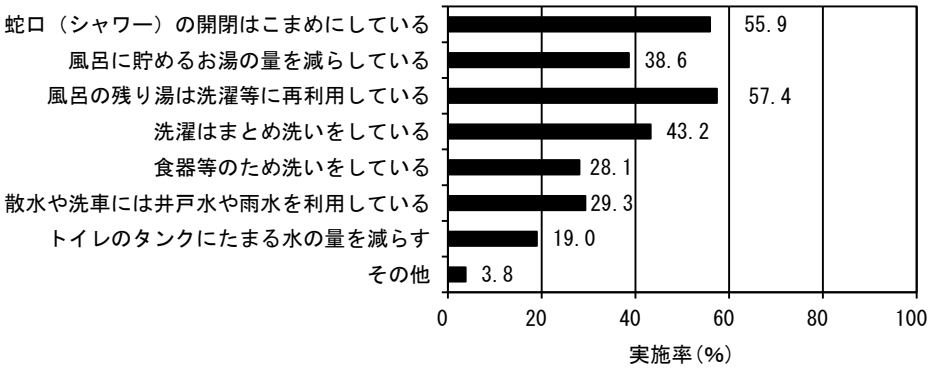
高松市の 2009 年渇水では，25.9%の減圧給水が実施された．高松市により市民に対するアンケート調査が実施され，474 件回収が回収された（高松市, 2009）．このアンケート結果をもとに作成したグラフを，**図 3.1** に示す．回答者の 44.9%が給水制限の影響は「全くな



(a) 渇水（給水制限）による具体的な影響



(b) 渇水時に行った節水方法



(c) 普段の生活での節水の具体的内容

図 3.1　高松市 2009 年渇水のアンケート結果
（高松市（2009）アンケート結果より作成）

かった」，42.6%が「あまりなかった」と回答した．一方，10.1%が「ときどきあった」，1.7%が「大いにあった」と回答した．具体的な影響としては，渇水がいつまで続くか不安であるという回答が 63 件（13.3%）と多かった．

渇水時の節水方法としては，風呂の残り湯の再利用が最も多く，277 件（58.4%)で実施された．次いで，洗車や散水の自粛が 219 件（46.2%)，蛇口やシャワーの使用時間の短縮が 188 件（39.7%)，自主減圧が 158 件（33.3%）であった．一方で，普段の生活においても，風呂の残り湯の再利用は 272 件（57.4%）で実施されており，通常時と渇水時の差は小さかった．

以上の各調査結果より，1990 年代から 2000 年代にかけて生じた，水使用形態の変化に伴う給水制限時の水使用行動の変化として，以下のようにまとめられる．

1）洗濯における行動の変化

1994 年の西宮市北部地域のアンケートのように，給水制限時には，多くの家庭で洗濯のまとめ洗いが行われる．

風呂水の再利用については，1994 年渇水時，近年の渇水時ともに実施された．特に，松山市の 1994 年渇水時には，約 8 割の家庭が洗濯への利用，約 6 割がトイレへの利用を行っている．西宮市の 1994 年渇水時でも，約 7 割の家庭で風呂水が洗濯に利用されており，厳しい渇水時には，約 7 割から 8 割の家庭で，風呂水が洗濯に再利用される．一方で，2009 年の高松市の渇水時には，もともと約 6 割の家庭において普段から風呂水の再利用が実施されていたこともあり，渇水時の追加的な実施は少なかった．これには，高松市の 2009 年渇水時の減圧率が 25.9%と低かったことも関係している可能性がある．しかし，首都圏でのアンケートでは，1991 年から 2010 年の約 20 年間で，風呂水の再利用率は，25.1%から 58.2%まで上昇している（山田，2011）ことからも，普段から節水しているため，渇水時に風呂水の再利用を追加して実施する余地は縮小していると考えられる．

2）洗濯水の再利用

1994 年渇水時の洗濯機は 2 層式洗濯機が主流であったため，松山市のアンケート結果にみられるように，洗濯後のすすぎ水をトイレや掃除等に再利用するという行動がみられた．一方で，高松市の 2009 年渇水時のアンケート結果では洗濯水の再利用については言及されていない．これは，全自動洗濯機の普及に伴い，洗濯水の再利用が困難になったことを反映していると考えらえる．

3）断水時間中の水利用

2008 年の淀川水系の断水社会実験の結果より，近年においても断水時間中にはトイレや洗面のために，水の汲み置きが実施されることが確認される．炊事については，時間帯がずらされるため，使用水量には変化が生じない可能性がある．一方，風呂やシャワーについては，時間帯をずらすことが困難な場合もあり，使用水量が減少すると予想される．

3.2.2　モデルの概要

渇水による経済的被害については，個々の部門がこうむる直接被害，物価の変化や失業率等への影響を通じて他部門に伝播する間接被害，生態系や人々の健康への影響といった，市場外の被害に区分され，各被害を評価するための様々な手法が提案されている（Logar et al., 2013）.

家庭における経済的被害については，水道料金や給水制限強度と使用水量との関係を反映した需要関数より算出する方法（Woo, 1994; Roibás et al., 2007; Grafton et al., 2008; Mansur et al., 2012），CVM により給水制限の回避に対する支払意志額を求める方法（Cooper et al., 2011）等が適用されている．需要関数を用いる方法は，自治体レベルの集計データを用いて解析したもの（Woo, 1994; Grafton et al., 2008）と，家庭レベルのデータを用いて解析を行ったもの（Roibás et al., 2007; Mansur et al., 2012）に区分される．家庭レベルのデータを用いた研究では，家庭の選好の相違を考慮した詳細な解析ができるが，データ入手が困難であると思われる．

各部門の直接被害のみでなく，間接被害，家庭における被害といった市場外の被害を含めて，実際の渇水時の被害を包括的に評価した研究では，家庭における被害が他部門に比べて大きかったという報告もある（Martin-Ortega et al., 2012）．ただし，この研究で対象とされたオーストラリアでは，家庭の屋外用水の使用量が多く，渇水時にはこれらの使用が制限されるという特徴があり，我が国とは若干状況が異なる．

我が国において，森杉ら（1985）は，渇水の危険性を取り入れた期待効用関数を用いて，渇水軽減効果を金銭換算する方法を提案した．細井ら（2002）は，水道事業体の費用便益分析を行うため，一般均衡分析の枠組みを用いた経済的評価を行った．多々納ら（1990），岡田ら（1991），伊藤ら（2002）は，家庭における水使用行動をモデル化し，給水制限時における水使用行動と家庭の効用の関係を示した．このモデルでは，家庭に導入された水使用機器の性能や，高齢化による労力の増加等についても評価できる．

本研究は，上記の多々納ら（1990），岡田ら（1991）のモデルをベースに，異なる 2 つの地域，年代で生じた渇水時の，家庭における水使用行動をモデル化し，都市間，年代間の水使用形態の相違による渇水被害の差異を検証することとした．多々納ら（1990），岡田ら（1991）のモデルは，家庭における水使用行動を，各種水使用サービスの 1 回あたりの費用の最小化と，水使用サービスや合成財の消費による効用最大化問題として捉えている．これは，Becker (1965) の家計生産関数のフレームワークに従ったものである．

岡田ら（1991），伊藤ら（2002）を参考に，水使用サービスの生産技術は，(3.1) 式に示す CES 型生産関数により表現した．CES 型生産関数は，投入要素の代替性を水使用サービスごとに設定できる．水使用サービス i は，キッチン，風呂，洗濯，トイレ，洗面の 5 種類に区分した．

$$z_i = (c_x {x_i}^{a_i} + c_t {t_i}^{a_i} + c_g {g_i}^{a_i})^{(1/a_i)} \tag{3.1}$$

ここに, z_i : サービス i の実施回数, x_i, t_i, g_i : 水, 時間, 市場財の投入量, c_x, c_t, c_g, a_i : パラメータ.

サービス i の 1 回あたり費用 π_i は (3.2) 式より求められる. また, サービス i を 1 回実施するために必要な水量 $\hat{x}_i$ は, (3.3) 式より求められる.

$$\pi_i = \left\{ c_x \left(\frac{p+\tau\omega}{c_x}\right)^{r_i} + c_t \left(\frac{\omega}{c_t}\right)^{r_i} + c_g \left(\frac{q_i}{c_g}\right)^{r_i} \right\}^{(1/r_i)} \tag{3.2}$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p+\tau\omega}{c_x}\right)^{r_i - 1} \pi_i \tag{3.3}$$

ここに, p : 水の価格, τ : 単位水量当たりの獲得所要時間, ω : 賃金率, q_i : 市場財の価格である. なお, $r_i = a_i/(a_i - 1)$ とおいた.

家庭における予算制約 Y のもとで, 最大の効用が得られるよう, 各サービスの実施回数や合成財の消費が決定される. 各サービスの実施回数は, サービス毎の自己価格弾力性, サービス間の交叉価格弾力性が任意に設定できる, トランス・ログ型逆数間接効用関数を用いて表現した. (3.4) 式に間接効用関数の形を示す.

$$\ln h(\varphi) = \sum_i \alpha_i \ln \varphi_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \beta_{ij} \ln \varphi_i \ln \varphi_j \tag{3.4}$$

なお, $h(\varphi) \equiv \frac{1}{v(\varphi)}$, $\varphi = \left(\frac{\pi_1}{Y}, \frac{\pi_2}{Y}, \dots \frac{\pi_5}{Y}, \frac{1}{Y}\right)$, $v(\varphi)$: 間接効用関数, α_i ・ β_{ij} : パラメータ.

規模に関して収穫不変であると仮定すると, サービス $i\ (i = 1, \cdots, 5)$ の実施回数 z_i, 合成財の消費 z_6 は, (3.5) 式より計算される.

$$z_i = \frac{{\varphi_i}^{-1}\left(\alpha_i + \sum_{j=1}^{6} \beta_{ij} \ln \varphi_j\right)}{\sum_{j=1}^{6} \alpha_j + \sum_{j=1}^{6} \sum_{k=1}^{6} \beta_{jk} \ln \varphi_k} \tag{3.5}$$

渇水時には, 水源の貯水量を温存するために減圧給水や時間給水等の給水制限が行われ, 単位水量当たりの獲得所要時間 τ が増える. サービス i の 1 回あたり費用 π_i が増えることで, 各サービスの実施回数が変化し, 各サービスや合成財の消費により得られる効用が減少する. 本研究では, 効用の変化を (3.6) 式に示す等価変分 EV により金銭換算し, 渇水被害として評価することとした. 等価変分は, 現行の予算制約 Y^0, 渇水時の価格 π' での効用が, 渇水がない場合の価格 π^0 のもとで無差別となる予算制約 $\mu(\pi^0; \pi', Y^0)$ と, 現行の予算制約 Y^0 との差である. 等価変分は施策の評価等において用いられる指標であり, これを用いることで, 年代間の渇水被害を金銭タームで比較できる.

$$EV = Y^0 - \mu(\pi^0; \pi', Y^0) \tag{3.6}$$

3.2.3　実渇水への適用方法

高松市の 1994 年，2005 年，2007 年，2008 年渇水と，松山市の 1994 年，2002 年，2007 年渇水を対象に，自治体における平均的な個人を想定して，モデルパラメータの推定を行った．各家庭に導入された水使用機器の性能や，水の再利用の実施状況等，個々の家庭の選好を反映するには，家庭の属性等に応じて個別にパラメータを推定することが望ましいが，そのために必要なデータが入手できていないことから，自治体ごとの代表的個人を想定した．

対象渇水の概要は，**第 2 章表 2.3**，**表 2.5** のとおりである．対象渇水は都市，年代，給水制限方式により 4 つのグループに区分し，パラメータ推定はグループごとに行った．高松市の 1994 年渇水と松山市の 1994 年渇水はそれぞれ単独で扱い，高松市の 2005 年，2007 年，2008 年渇水と，松山市の 2002 年，2007 年渇水をそれぞれグループとして扱った．

給水制限未実施時の単位水量当たりの獲得所要時間 τ_0 は，1h/m³ とした．減圧給水率 s の減圧給水が実施された場合，$\tau = \tau_0(1/(1-s))^{1/2}(\mathrm{h/m^3})$ に変化すると仮定した．時間給水が実施された場合は，2008 年の国土交通省断水社会実験の結果を参考に，断水時間中のトイレ，洗面の使用水量に相当する水量の溜め置きが実施されると仮定し，想定される所要時間を加えて τ を算出した．

家庭用日使用水量は，前章で示した日給水量に対して用途比率を乗じる方法で求めた．ただし，高松市の 1994 年 7 月の家庭用日使用水量は，前章で述べたように不自然な増減が生じたため，7 月からの時間給水が継続して行われた 8 月とあわせて補正を行った．7 月に不自然な増減が生じた理由は，7 月 15 日より，午後 4 時から午後 9 時のみ水が使用できる 5 時間給水が開始され，給水量に占める家庭用の比率が変化したと考えられることに対して，月間を通じて一定の家庭用の比率を用いたためと考えられる．前章では回帰モデルの推定からは 7 月のデータを除外したが，本章では，より多くのデータを活用するため，7 月 14 日までと，15 日以降で給水量に占める家庭用の比率を変えて，家庭用日使用水量を推計し，その推計結果を用いることとした．7 月 14 日までは前年，前々年の同時期の比率の平均値を用い，15 日以降は月使用水量との整合性から求めた．8 月についても同様の補正を行った．これにより，家庭用日使用水量の推計値の不自然な増減は解消されたものの，7 月 14 日から 8 月 15 日まで 9 時間給水や 5 時間給水といった制限が実施された期間の使用水量が，その後，給水制限が緩和された期間と比べて多いという状況が生じた．この期間の使用水量が多かった原因として，本格的な時間給水が開始されたばかりであり，水の溜め置きが多く実施された可能性があることや，7 月 25 日以降の台風 7 号や台風 14 号等の降雨により，早明浦ダムの貯水率が一時的に改善傾向にあったことが挙げられる．よって，7 月 14 日から 8 月 15 日までの期間については解析から除外した．

同強度の給水制限期間中の家庭用日使用水量の平均値が表現できるように，各サービスの 1 人 1 日当たり回数 z_i，1 回あたり使用水量 $\hat{x}_i$ を推計し，それらが再現できるように生産関数，間接効用関数のパラメータを推定した．これらは，節水型機器の普及状況や性

能を勘案して定めた．給水制限未実施時の洗濯やトイレの 1 回あたり使用水量は，節水型洗濯機や節水型トイレによる経年的な減少量を考慮して定めた．トイレを例に述べると，1 回あたり使用水量は水洗化率と標準使用年数，機種別の販売開始年を考慮して，1994 年松山市は 1 回あたり 12.2 リットル, 2002 年, 2007 年は 1 回あたり 9.3 リットルと設定した．風呂についてはシャワーの普及に伴い使用水量が増加したと仮定した．キッチン，洗面については，ほとんど経年変化はないと考えた．推計した給水制限未実施時の各サービスの 1 人 1 日当たり回数，1 回あたり使用水量，1 回あたり時間，市場財価格を**表 3.1** に示す．

表 3.1　給水制限未実施時の各サービスの使用回数，使用水量等の推計値

(a) 高松市・1994 年渇水

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
1 人 1 日当たり回数	2.62	1.37	1.1	4.85	2
1 回あたり使用水量（リットル）	18.5	31.1	74.0	10.4	4.5
1 回あたり時間（時間）	0.3	0.5	0.5	0.05	0.05
1 回あたり市場財価格（円）	3	15	10	1	1

(b) 高松市・2005，2007，2008 年

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
1 人 1 日当たり回数	2.62	1.37	1.1	4.85	2
1 回あたり使用水量（リットル）	20.0	44.6	68.2	7.3	4.5
1 回あたり時間（時間）	0.3	0.5	0.5	0.05	0.05
1 回あたり市場財価格（円）	3	15	10	1	1

(c) 松山市・1994 年渇水

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
1 人 1 日当たり回数	2.62	1.37	1.1	4.85	2
1 回あたり使用水量（リットル）	17.6	29.4	71.9	12.2	4.2
1 回あたり時間（時間）	0.3	0.5	0.5	0.05	0.05
1 回あたり市場財価格（円）	3	15	10	1	1

(d) 松山市・2002，2007 年渇水

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
1 人 1 日当たり回数	2.62	1.37	1.1	4.85	2
1 回あたり使用水量（リットル）	19.0	34.5	63.4	9.3	4.3
1 回あたり時間（時間）	0.3	0.5	0.5	0.05	0.05
1 回あたり市場財価格（円）	3	15	10	1	1

サービス 1 回あたり時間，市場財価格については，以下のように想定し，各都市，各年代とも同一の値を用いた．キッチンの 1 回あたり所要時間は，炊事 15 分，食器洗い 5 分と想定し，20 分（0.3 時間）と想定した．消費財は，台所用洗剤（300 円）を，1 月 1 本を消費すると仮定し，1 日当たりの消費回数を約 3 回として，1 回あたり 3 円を計上した．風呂の 1 回あたり所要時間は 30 分（0.5 時間）と想定した．消費財は 1 月あたり石鹸 2 個（2 個×100 円），シャンプー・リンス等 1 本（500 円）を消費すると仮定し，1 日当たりの消費回数を約 1.5 回として，1 回あたり 15 円を計上した．洗濯の 1 回あたり所要時間は 30 分（0.5 時間）と想定した．消費財は 1 月あたり洗剤 1 個（300 円）を消費すると仮定し，1 日当たりの消費回数を約 1.1 回として，1 回あたり 10 円を計上した．トイレの 1 回あたり所要時間は 3 分（0.05 時間）と想定した．消費財は 1 月あたりトイレットペーパー1.5 個（1.5×100 円）を消費すると仮定し，1 日当たりの消費回数を約 5 回として，1 回あたり 1 円を計上した．洗面の 1 回あたり所要時間は 3 分（0.05 時間）と想定した．消費財は 1 月あたり石鹸 0.5 個（0.5×100 円）を消費すると仮定し，1 日当たりの消費回数を約 2 回として，1 回あたり 1 円を計上した．

水道単価 p については，各都市の平均的な水道料金から，高松市の 1994 年渇水時は 120 円，2005，2007 年，2008 年渇水時は 136 円，松山市の 1994 年渇水時は 103 円，2002 年，2007 年渇水時は 110 円と設定した．

賃金率 ω については，厚生労働省により公表された，香川県，愛媛県における地域別最低賃金を参考に，一律 600 円/h とした．なお，比較のため 3.3.3 において，賃金率 ω が 1,200 円/h と，倍増した場合の計算を行っている．

給水制限中の各サービスの実施回数，使用水量については，1994 年渇水時の松山市，西宮市北部地域，2009 年の高松市のアンケート結果や，2008 年の国土交通省の断水社会実験の結果を参考に推計し，これにあわせて生産関数，間接効用関数のパラメータを推定した．

時間給水中の汲み置きによる単位水量当たりの所要時間については，以下の方法で算出した．トイレについては断水 1 時間中の実施回数を 0.2 回（1 日 4.85 回÷24 時間）とし，1 回あたり 5 リットルの汲み置きが行われると仮定した．洗面については，断水 1 時間中の実施回数を 0.08 回（1 日 2 回÷24 時間）とし，1 回あたり 2 リットルの汲み置きが行われると仮定した．この汲み置きした水をトイレや洗面に利用するための運搬に要する時間として，1m^3 につき 1 時間が余分に必要になると考え，総所要時間を使用水量で割りかえすことで単位水量当たりの獲得所要時間を算出した．水の運搬速度は，標準として用いた 1h/m^3 との比較のため 3.3.3 において，0.5h/m^3 の場合についても計算を行った．

生産関数のパラメータ推定値を**表 3.2** に示す．

表 3.2　生産関数のパラメータ推定値

(a) 高松市・1994 年渇水

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
a_i	−2.70	−100.00	0.03	0.19	−100.00
c_x	1.42E−06	1.09E−152	1.59E−01	4.64E−01	3.71E−236
c_t	3.55E−02	7.01E−31	8.43E−01	1.38E+00	6.91E−131
c_g	1.53E−02	4.45E−02	2.75E−02	2.60E−02	2.92E−02

(b) 高松市・2005，2007，2008 年

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
a_i	−1.04	−100.00	−100.00	−16.00	−100.00
c_x	1.27E−03	8.10E−137	3.33E−118	9.61E−36	2.02E−236
c_t	2.60E−01	6.80E−31	6.57E−31	1.26E−21	6.90E−131
c_g	1.52E−02	4.31E−02	2.78E−02	2.75E−02	2.91E−02

(c) 松山市・1994 年渇水

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
a_i	−1.88	−100.00	−0.79	−0.43	−100.00
c_x	3.16E−05	4.35E−155	1.77E−02	3.27E−02	2.15E−239
c_t	9.53E−02	7.05E−31	4.83E−01	2.09E−01	6.97E−131
c_g	1.54E−02	4.47E−02	2.77E−02	2.52E−02	2.94E−02

(d) 松山市・2002，2007 年渇水

	キッチン	風呂	洗濯	トイレ	洗面
a_i	−4.30	−100.00	−100.00	−100.00	−100.00
c_x	2.72E−09	4.37E−148	2.05E−121	1.24E−204	1.99E−238
c_t	5.17E−03	6.97E−31	6.67E−31	6.29E−131	6.95E−131
c_g	1.53E−02	4.42E−02	2.82E−02	2.66E−02	2.94E−02

間接効用関数のパラメータ推定値を，**表 3.3** に示す.

表 3.3（1） 間接効用関数のパラメータ推定値（次項に続く）

(a) 高松市・1994 年渇水

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
1.253	2.004	0.077	0.106	0.062	−2.502

	β_{i1}	β_{i2}	β_{i3}	β_{i4}	β_{i5}	β_{i6}
β_{1j}	−0.220	0.000	0.000	0.000	0.000	0.220
β_{2j}	0.000	−0.330	0.000	0.000	0.000	0.330
β_{3j}	0.000	0.000	−0.001	0.000	0.000	0.001
β_{4j}	0.000	0.000	0.000	−0.020	0.000	0.020
β_{5j}	0.000	0.000	0.000	0.000	−0.014	0.014
β_{6j}	0.220	0.330	0.001	0.020	0.014	−0.585

(b) 高松市・2005，2007，2008 年

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
2.313	2.426	0.483	−0.083	−0.031	−4.107

	β_{i1}	β_{i2}	β_{i3}	β_{i4}	β_{i5}	β_{i6}
β_{1j}	−0.420	0.000	0.000	0.000	0.000	0.420
β_{2j}	0.000	−0.400	0.000	0.000	0.000	0.400
β_{3j}	0.000	0.000	−0.070	0.000	0.000	0.070
β_{4j}	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000	−0.031
β_{5j}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	−0.011
β_{6j}	0.420	0.400	0.070	−0.031	−0.011	−0.848

表 3.3 (2)　間接効用関数のパラメータ推定値(前項より続く)

(c) 松山市・1994 年渇水

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
1.675	2.369	0.258	0.122	0.083	−3.507

	β_{i1}	β_{i2}	β_{i3}	β_{i4}	β_{i5}	β_{i6}
β_{1j}	−0.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300
β_{2j}	0.000	−0.393	0.000	0.000	0.000	0.393
β_{3j}	0.000	0.000	−0.032	0.000	0.000	0.032
β_{4j}	0.000	0.000	0.000	−0.024	0.000	0.024
β_{5j}	0.000	0.000	0.000	0.000	−0.020	0.020
β_{6j}	0.300	0.393	0.032	0.024	0.020	−0.769

(d) 松山市・2002，2007 年渇水

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
0.673	1.074	0.008	−0.089	−0.031	−0.634

	β_{i1}	β_{i2}	β_{i3}	β_{i4}	β_{i5}	β_{i6}
β_{1j}	−0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110
β_{2j}	0.000	−0.170	0.000	0.000	0.000	0.170
β_{3j}	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	−0.010
β_{4j}	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	−0.034
β_{5j}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	−0.012
β_{6j}	0.110	0.170	−0.010	−0.034	−0.012	−0.224

3.2.4　モデルの再現結果

各渇水の単位水量あたりの獲得所要時間 τ と，1 人 1 日当たり家庭用使用水量の関係を**図 3.2** に示す．実線，点線がモデル計算値であり，参考として，実データ（同一給水制限期間中の家庭用日使用水量の平均値）をプロットした．給水制限未実施時（$\tau = 1$）の使用水量との差が，給水制限による追加節水量であり，これが大きいほど，渇水の長期化に備えるための水源の温存量をより多く確保することができる．

高松市の給水制限未実施時の使用水量は，1994 年が 232.0 リットル/人日であったが，2005，2007，2008 年は平均して 232.9 リットル/人日と若干増えた．一方，2005，2007，2008 年は，**図 3.2** のモデル計算値の傾きが 1994 年の約 7 割となった．このような変化が生じた理由としては，水使用形態の変化や給水制限方式の違いが考えられる．

松山市では，給水制限未実施時の使用水量は，1994 年が 233.4 リットル/人日であったが，

2002 年，2007 年は 220.5 リットル/人日と約 6%小さくなった．また，モデル計算値の傾きは，約 3 割に縮小した．高松市と同様，水使用形態の変化，給水制限方式の違いのほか，2002 年，2007 年渇水時はそれぞれ 2 段階の給水制限が実施されたのみであり，検討に用いたデータ数が少なかったことが影響している可能性がある．

近年は τ の値が小さく，τ が大きい場合の使用水量は，外挿によって求めたため精度の低下は否めないが，水使用形態や給水制限方式の変化等により，両都市とも給水制限の強化に対する追加節水量の変化は小さくなる傾向がみられた．特に松山市では，平常時の使用水量が減少したことにより，渇水発生頻度は減少すると考えられるが，より大規模な渇水が生じた場合に被害が拡大する可能性が考えられる．このため，長期的な需要抑制策を検討する際には，渇水発生頻度と，渇水被害，給水制限による水源の温存量を含めて評価することが重要である．

図 3.3 に，単位水量当たりの獲得所要時間 τ と，等価変分との関係を示す．高松市，松山市ともに，τ が同一の場合の等価変分は，1994 年よりも近年の方が若干大きかった．ただし，高松市の 1994 年渇水時の τ の最大値は約 1.2 h/m^3 であったが，τ が 1.2 h/m^3 のときの等価変分は，1994 年，近年ともに 27 円/人日であり，年代による相違は見られなかった．同様に，松山市の 1994 年渇水時の τ の最大値は約 1.6 h/m^3 であったが，τ が 1.6 h/m^3 のときの等価変分は，1994 年が 73 円/人日，近年が 76 円/人日であり，大きな差がなかった．両都市ともに水使用形態が変化したものの，給水制限の強度が同程度であれば渇水被害には大きな違いが見られなかった．なお，等価変分自体は，賃金率 ω の設定により影響され，本検討は賃金率を 600 円/h とした場合の数値であることに留意する必要がある．

図 3.4 に，1 人 1 日当たり家庭用使用水量と等価変分の関係を示す．前述のとおり，近年については，データが得られた範囲の傾向をもとに推測した結果ではあるが，追加節水量に対する等価変分の変化量が，1994 年よりも近年のほうが大きい．

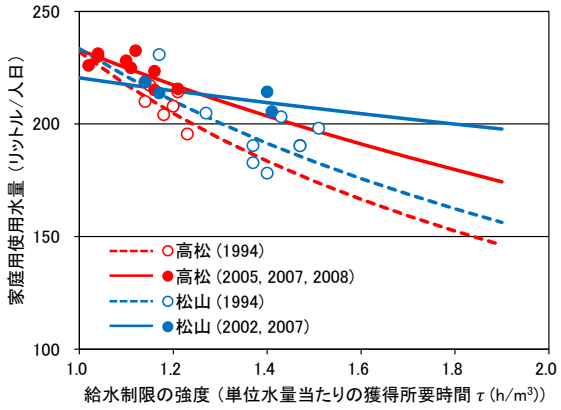


図 3.2　単位水量当たりの獲得所要時間 τ と家庭用使用水量の関係

（実線，点線：モデル計算値，プロット：実データ）

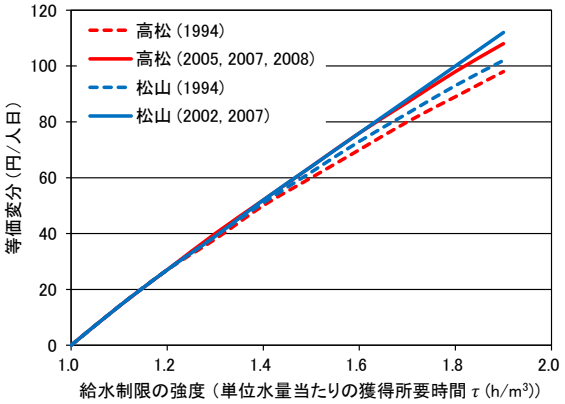


図 3.3　単位水量当たりの獲得所要時間 τ と等価変分の関係

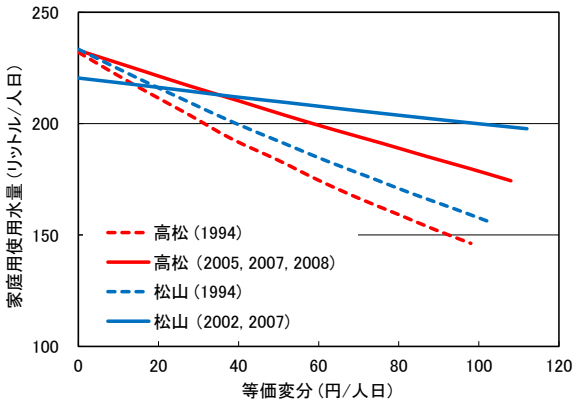
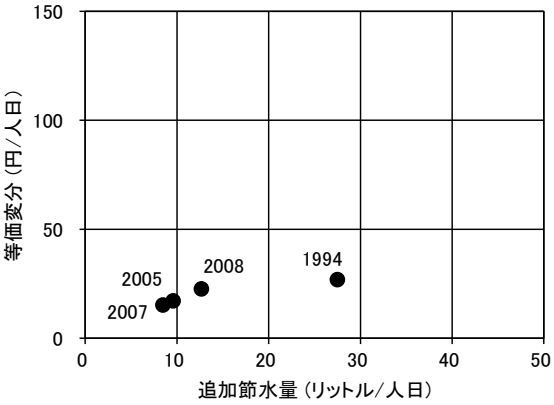
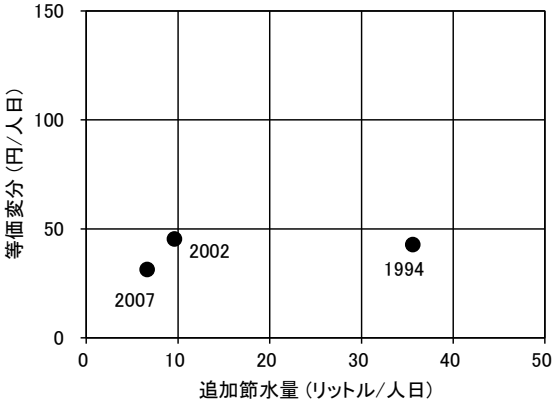


図 3.4　等価変分と家庭用使用水量の関係



(a) 高松市



(b) 松山市

図 3.5　追加節水量と等価変分の比較

3.2.5　実渇水時の追加節水量と経済的被害の推計

実渇水時の給水制限期間中の追加節水量の平均値と，等価変分の平均値の関係を図 3.5 に示す．

高松市の計算結果を図 3.5(a)に示す．1994 年渇水時の τ の平均値は 1.20h/m³，2005 年渇水時は 1.12h/m³，2007 年渇水時は 1.11h/m³，2008 年渇水時は 1.16 h/m³ であった．1994 年渇水時と 2008 年時の τ はほぼ同程度であったが，1994 年渇水時の等価変分は 26.8 円/人日，2008 年渇水時は 22.6 円/人日と，2008 年渇水時は 1994 年渇水時の 84%であり，ほぼ同程度であった．一方で，追加節水量は 1994 年渇水時が 27.5 リットル/人日であったのに対して，2008 年渇水時が 12.7 リットル/人日であり，2008 年渇水時は 1994 年渇水時の 46%しかない．これは，前項で整理したように，近年は，追加節水量に対する等価変分の変化量が大きくなったためと考えられる．追加節水量の変化に対する等価変分の変化は，1994 年渇水時は 1.0 円/リットルであったが，2005 年，2007 年，2008 年渇水時はいずれも 1.8 円/リットルであり，約 1.8 倍まで増えた．

松山市の計算結果を図 3.5(b)に示す．1994 年渇水時の τ の平均値は 1.33h/m^3，2002 年渇水は 1.35 h/m^3，2007 年渇水は 1.24 h/m^3 であり，1994 年渇水時と 2002 年渇水時はほぼ同程度であった．等価変分は 1994 年渇水時が 42.8 円/人日，2002 年渇水時が 45.3 円/人日であり，ほぼ同程度であったが，1994 年渇水時の追加節水量が約 36 リットル/人日であったのに対して，2002 年渇水時の追加節水量は約 10 リットル/人日であり，1994 年渇水時の約 3 割に減少した．追加節水量の変化に対する等価変分の変化の平均値は，1994 年渇水時は 1.2 円/リットルであったが，2002 年，2007 年渇水時はいずれも 4.7 円/リットルと約 4 倍まで増え，高松市と比べても変化が大きかった．

以上より，両都市とも近年の水使用形態の変化や給水制限方式の相違等により，同程度の渇水被害であっても，追加節水量が小さくなる傾向が確認された．

3.3　水使用形態の変化に伴う経済的被害の変化の推計

3.3.1　推計方法

近年（高松市の 2005 年，2007 年，2008 年，松山市の 2002 年，2007 年）の水使用形態のもとで，1994 年渇水と同規模の渇水が生じた場合を想定して，渇水による経済的被害と追加節水量を試算した．給水制限ルールの相違による被害と追加節水量の変化を比較するため，以下の 2 つのシナリオを想定した．

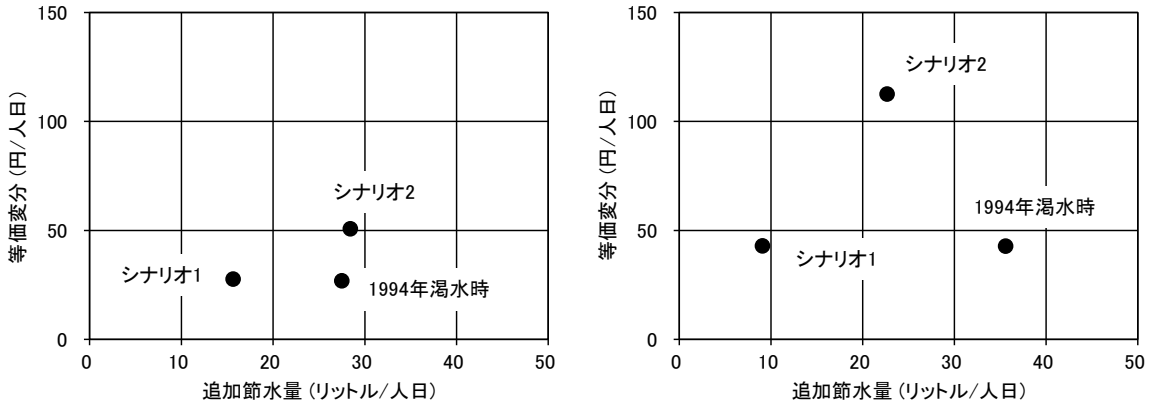
シナリオ 1 は，1994 年渇水時と同程度の厳しい給水制限が実施されると想定し，1994 年渇水時の τ を用いて，追加節水量と等価変分を算出したものである．これより，1994 年と近年の水使用形態による違いを比較した．

シナリオ 2 は，給水制限時の使用水量が 1994 年渇水時の使用水量と同程度になるように，期間ごとの給水制限強度が強化され，その結果として追加節水量が増加した場合を想定し，τ を変化させたものである．これは，渇水被害が変化することを許容し，水源の貯水量の温存を優先して，給水制限強度が設定された場合を想定したものである．ただし，前節で述べたように，1994 年渇水時に比べて近年の渇水時の実際の τ は小さく，τ が 1994 年渇水時と同程度まで大きくなった場合の追加節水量や等価変分は，τ が小さい場合に得られた傾向を外挿して推計している．

3.3.2　推計結果

高松市の結果を図 3.6(a)に示す．シナリオ 1 の等価変分は 27.6 円/人日であり，1994 年渇水時と同程度であったが，追加節水量は 15.7 リットル/人日であり，1994 年の約 57%まで減少した．シナリオ 2 の等価変分は 50.8 円/人日であり，1994 年の 26.8 円/人日に対して約 1.9 倍に増加した．

松山市の結果を図 3.6(b)に示す．シナリオ 1 の等価変分は，42.8 円/人日であり 1994 年渇水時と同程度であったが，追加節水量は 9.1 リットル/人日と，1994 年渇水時の約 26%



(a) 高松市　　(b) 松山市

図 3.6　近年に 1994 年渇水が生じた場合の追加節水量と等価変分

まで大幅に減少した．シナリオ 2 の等価変分は 112.6 円/人日であり，1994 年の 42.8 円/人日に対して約 2.6 倍まで増えた．

以上より，近年において，1994 年渇水時と同程度の厳しい給水制限強度が課された場合，渇水被害は 1994 年渇水時と大きく変わらないにも関わらず，渇水が長期化した場合に備えて貯水量を温存するための追加節水量が大きく減少する可能性がある．貯水量を温存するために，給水制限強度を厳しく設定すると，渇水被害が大きく増加することになる．よって，渇水時の使用水量の抑制策や貯水池運用計画の立案においては，渇水被害と貯水量予測に基づき，注意深く給水制限率を設定する必要性が増している．また，より効果的に使用水量を抑制するための対策メニューを検討することも重要である．

なお，本章では通常時の需要量が減少した場合の渇水の発生頻度の低減については考慮していない．長期的な水資源計画の検討においては，通常時の需要量の減少による渇水発生頻度の変化も含めて，渇水被害を評価する必要がある．渇水の発生頻度については，貯水池運用を考慮して推計する必要があり，**第 5 章**で貯水池運用も含めたモデル化を行い検討する．

3.3.3　モデルの不確実性の評価

モデルの不確実性を評価するため，モデルの主要パラメータが変化した場合の計算結果への影響について評価する．ここでは，松山市を例に検討を行う．

(1) 汲み置きした水の運搬速度が変化した場合

汲み置きした水の運搬速度が標準的な設定値（1.0m³/s）の 0.5 倍（0.5m³/s）に変化し，より多くの時間が必要とされる場合を考える．**図 3.7** に単位水量当たりの獲得所要時間と家庭用使用水量，等価変分の関係を示す．運搬速度が 50%に減少した場合，より多くの時

間が必要とされるため，1994 年渇水時の単位水量当たりの獲得所要時間の変化に対する家庭用使用水量の変化率は，約 85%に減少する．さらに，1994 年の等価変分は標準の場合よりも大きくなる．すなわち，運搬速度が減少することで，1994 年渇水と近年の渇水の差は小さくなる．よって，貯水池運用の検討等においては，より遅い運搬速度を用いることで，追加節水量が小さく，時間給水時の被害が大きく算出され，より安全側の配慮が可能である．

(2) 賃金率 ω が変化した場合

賃金率 ω が，標準的な設定値（600 円/h）の 2 倍（1,200 円/h）になった場合を考える．単位水量当たりの獲得所要時間と家庭用使用水量の関係については，標準時と比べて大きな相違はない．**図 3.8** に単位水量当たりの獲得所要時間と等価変分の関係を示す．同一の単位水量当たりの獲得所要時間であっても，等価変分は標準時の約 2 倍となる．よって，賃金率の設定により経済的被害が大きく影響されることに，留意が必要である．

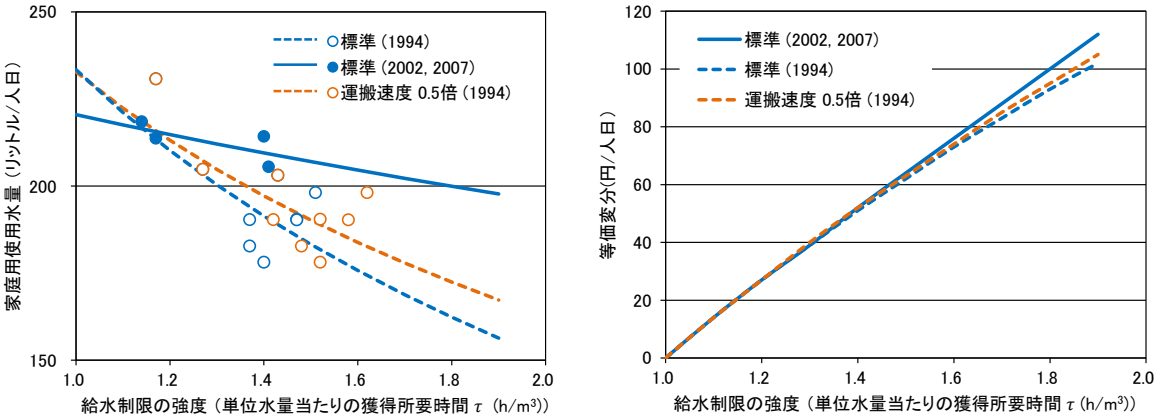


図 3.7　単位水量当たりの獲得所要時間，家庭用使用水量，等価変分の関係（運搬速度 0.5 倍）

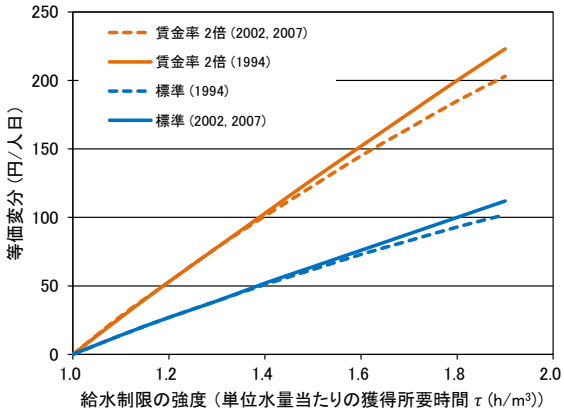


図 3.8　単位水量当たりの獲得所要時間と等価変分の関係（賃金率 2 倍）

3.4　結言

本章では，高松市，松山市の家庭の水使用行動をモデル化し，給水制限時の水の再利用に伴う労力等から，経済的被害の定量評価を行った．得られた主な結論は以下のとおりである．

1) 1994 年渇水時と 2000 年以降の渇水時を比べると，同程度の給水制限が実施された場合の経済的被害に大きな差はないものの，2000 年以降の渇水時の追加節水量は小さく，渇水の長期化に備えて，水源の貯水量を温存する効果が低減している．ただし，この結果には，水使用形態のほか，時間給水と減圧給水という給水制限方式の違いも影響している可能性がある．

2) 長期的な渇水対策として需要抑制策等の施策を講じた場合には，平常時の水需要量だけでなく，給水制限による追加節水量や，経済的被害が変化する可能性があるため，水需要量の減少による渇水発生頻度の変化と，渇水時の被害を含めて評価する必要がある．

3) 近年において，仮に 1994 年渇水時と同程度の厳しい給水制限が課された場合，経済的被害は 1994 年渇水時と同程度であるが，水源の温存量は減少すると推計された．より厳しい給水制限が課された場合，水源の温存量は増えるが，それに伴い大きな経済的被害が生じると推計された．このため，渇水時の給水制限率の設定や渇水対策メニューの選定においては，被害と水源の温存量を考慮して慎重に行う必要性が増してきている．

4) 近年は 1994 年渇水時のような厳しい給水制限は課せられておらず，緩い給水制限のデータを用いて解析を行った．今後，データの蓄積とともに，予測精度向上に向けた方策の検討も必要と考える．

参考文献

伊藤禎彦・植松京子・住友恒（2002）: ライフスタイル変化を考慮した家計の水消費行動のモデル化，第 30 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.1-10.

岡田憲夫・多々納裕一・小林潔司・並河光夫（1991）: 渇水時の水消費行動のモデル分析，京都大学防災研究所年報, No.34B-2, pp.127-144.

勝矢淳雄（1997）: 渇水時における市民の節水意識とその効果，環境衛生工学研究，Vol.11，No.3,

pp.207-210.

国土交通省近畿地方整備局淀川水系総合調査事務所（2009）: 淀川水系断水社会実験報告書.

高松市（2009）:「渇水の影響に関するアンケート」集計結果.

多々野裕一・岡田憲夫・小林潔司（1990）: 給水制限が水消費行動に与える影響に関する研究, 水資源研究センター報告, Vol.10, pp.43-59.

細井由彦・小池淳司・増田貴則・飯田奈穂（2002）: 水道事業における費用効果分析に関する考察, 環境システム研究論文集, Vol.30, pp.379-390.

松山市市民部女性政策課（1997）: 松山市の消費者行政.

森杉寿芳・大島伸弘（1985）: 渇水頻度の低下による世帯享受便益の評価法の提案, 土木学会論文集, No.359/Ⅳ-3, pp.91-98.

山田勲（2011）: 最近の家庭洗濯の実施状況と消費者意識 - 2010年洗濯実態調査より -, 繊維製品消費科学会誌, Vol.52, No.12, pp.35-42.

Becker, G. S. (1965): A theory of the allocation of time, The economic journal, Vol.75, No.299, pp.493-517.

Cooper, B., M. Burton, and L. Crase (2011) : Urban water restrictions: Attitudes and avoidance, Water resources research, Vol.47, W12527.

Grafton, R. Q. and M. B. Ward (2008): Prices versus rationing: Marshallian surplus and mandatory water restrictions, The economic record, Vol.84, s57-s65.

Logar, I. and J. C. J. M. van den Bergh (2013): Methods to assess costs of drought damages and policies for drought mitigation and adaptation: review and recommendations, Water resources management, Vol.27, pp.1707-1720.

Mansur, E. T. and S. M. Olmstead (2012): The value of scarce water: Measuring the inefficiency of municipal regulations, Journal of urban economics, Vol.71, pp.332-346.

Martin-Ortega, J., M. González-Eguino and A. Markandya (2012): The costs of drought: the 2007/2008 case of Barcelona, Water policy, Vol.14, pp.539-560.

Roibás, D., M. Á. García-Valiñas and A. Wall (2007): Measuring welfare losses from interruption and pricing as responses to water shortages: An application to the case of Seville, Environmental and resource economics, Vol.38, pp.231-243.

Woo, C. (1994): Managing water supply shortage: Interruption vs. pricing, Journal of public economics, Vol.54, pp.145-160.

第４章　水需要抑制策を講じた場合の水需要量の将来予測

4.1　緒言

近年，水使用機器の節水性能の向上や，社会における環境意識の高揚，気候変動にともなう気象変化を背景として，家庭における節水型機器の普及促進等の水需要抑制策が，渇水対策として注目されている．

愛媛県松山市では，1997 年から節水型機器の購入補助制度を設けて，水需要の抑制に取り組んでいる．2010 年 12 月には「チーム水・日本」の行動チームとして，「巧水スタイル推進チーム」が発足し，節水型ライフスタイルが国レベルで推進されている．また，2009 年より住宅の省エネ化を主眼として開始された住宅エコポイント制度，あるいは復興支援・住宅エコポイント制度では，節水型便器への改修も対象となっており，エコ商品購入のためのポイントが付与されている．

過去においては，生活様式の近代化に伴う水使用機器の普及により，家庭用水の需要が増減していたが，水洗トイレや洗濯機，シャワー等が多くの家庭に普及した現在においては，風呂水の再利用等の人々の水使用行動の変化や，これまで設置されてきた機器がどのようなタイミングで，どのような性能の機器に買い替えられるかが，将来の水需要を予測するうえで重要となる．

そこで，本章では，節水型機器の普及促進策を講じた場合の水使用行動の変化や，節水型機器普及率の変化を推計し，水需要抑制のための節水型機器普及促進策の有効性を検討する．愛媛県松山市で実施されている節水型機器購入補助制度を例に，洗濯時の風呂水再利用に対して，制度が及ぼした影響を推計する．また，香川県高松市を対象に，節水型トイレの普及促進策を講じた場合を想定し，機器の買い替えによる，将来 20 年間のトイレ使用水量の予測を行う．

4.2　水需要抑制策を講じた場合の水使用形態の変化

4.2.1　水使用形態の経年変化の動向

家庭用水の需要量は個人の嗜好や節水意識，家計，ライフスタイル，周囲の節水状況や自治体への信頼感等，様々な要因により影響される．過去の渇水経験等の地域特性も重要な要因となる．

Grafton et al. (2011) は，OECD10 ヶ国（オーストラリア，カナダ，チェコ，フランス，イタリア，韓国，メキシコ，オランダ，ノルウェー，スウェーデン）を対象に，どのような要因が水使用に影響するかを調べた．その結果，平均水道料金が高いほど使用水量が少なくなることや，節水型トイレの導入による節水効果が示された．また，環境への関心の高さは，節水型機器の導入率に影響し，間接的に使用水量に影響を及ぼすことを示した．さらに，環境への関心の高さは，節水行動にも影響すると述べた．

我が国でも，福岡市において 1989 年と 1999 年で，年代層や戸建て・集合住宅の区分による水使用構造の変化について調べた結果（村川ら, 2002）によると，風呂の追い炊き機能の普及等による風呂の湯張頻度の減少や，シャワーの普及に伴う入浴スタイルの変化など，機器の普及に伴うライフスタイルの変化が，水使用に影響を与えたことが指摘されている．また，経年的に，使用水量は水道料金の影響を受けにくくなっているといわれている（村瀬ら, 2005).

将来において，水使用に影響を及ぼす要因や影響の変化を予測することが困難であるという指摘がある（清水ら, 2012）ものの，将来予測を行う際には，節水型機器の普及を考慮することが重要である（White et al., 2004; Nakagawa et al., 2009）と考えられる．最近では，節水型トイレの買い替えを考慮して，1990 年から 2020 年までの CO_2 排出量を予測した研究例もある（豊貞ら, 2013).

ここで，これまで，我が国で進んできた水使用機器の普及に伴う水使用形態の変化について，洗濯，トイレ，キッチン，入浴に分けて整理する．

(1) 洗濯

図 4.1 に, 内閣府の消費動向調査（2004, 2013）より作成した, 全国の一般世帯における，洗濯機，衣類乾燥機の普及率の推移を示す．1983 年から 2004 年までの間については，全自動洗濯機とその他の洗濯機が分けて集計されている. 洗濯機の普及率は 1970 年には 90%を超え，それ以降は微増から横ばい傾向が続いた．全自動洗濯機の普及率は，1983 年には 32%であったが，1990 年頃から急速に普及が進み，2004 年には 87%に達し，横ばい傾向に移っている．逆に，その他の洗濯機の普及率は 1983 年には 69%であったが，2004 年には 17%まで低下した．衣類乾燥機の普及率は 2012 年で 32%であり普及過程にある．

1966 年から 1993 年までの推計（細井ら, 1997）によると，全自動洗濯機の使用水量が増加傾向にあったことなどから，１人 1 日当たり洗濯用水量は，約 40 リットルから約 50 リ

ットルに増加したと推計されている．

しかし，その後，2000 年頃からは，使用水量を抑制したドラム式洗濯機，節水型洗濯乾燥機の普及が進んできた．総務省の平成 21 年全国消費実態調査（2010）によると，2009 年には，全国，総世帯における乾燥機一体型ドラム式等洗濯機の普及率は 31%に達している．

節水型洗濯機の効果について，2006，2007 年の調査（竹﨑ら，2009）によると，実家庭において従来の全自動洗濯機（標準使用水量 105 リットル～136 リットル）を斜めドラム洗濯機（標準使用水量 69 リットル）に取り換えた場合，洗濯使用水量が 60%削減され，設置前の平均 67.5 リットル/人日が，平均 26.0 リットル/人日まで減少するという結果が得られている．

1990 年代以降，全自動洗濯機が普及したことで，洗濯水やすすぎ水の再利用行動の頻度が顕著に減少した（村川ら, 2002）．一方で，全自動洗濯機の普及とともに，洗濯回数の減少が進んでおり，普段から洗濯のまとめ洗いがなされるようになっている．これには，近年の洗濯機の大型化等も関係していると思われる．山田（2011）によると，首都圏における調査では，1 週間の洗濯回数は，1991 年には平均 10.9 回であったが，2010 年には平均 9.2 回に減少した．また，洗濯における風呂水の再利用率は，1991 年の 25.1%から 2010 年には 58.2%に増加した．同様に，横須賀市でのアンケート調査によると，風呂水と水道水を併用する割合が，1995 年の 38.5%から 2005 年の 44.0%へと 10 年間で約 5.5%増加した．

夏場と冬場の洗濯回数の差については，清水ら（2008）の滋賀県における調査によると，1994 年，1995 年の調査結果と 2002 年，2003 年，2004 年の調査結果の間には大きな変化はなく，夏場の洗濯回数は通年に対して 2 割程度多いことが確認されている．

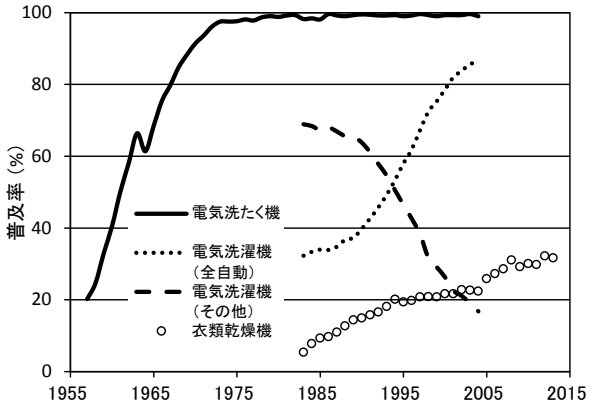


図 4.1　洗濯機等の普及率（内閣府・消費動向調査（2004，2013）より作成）

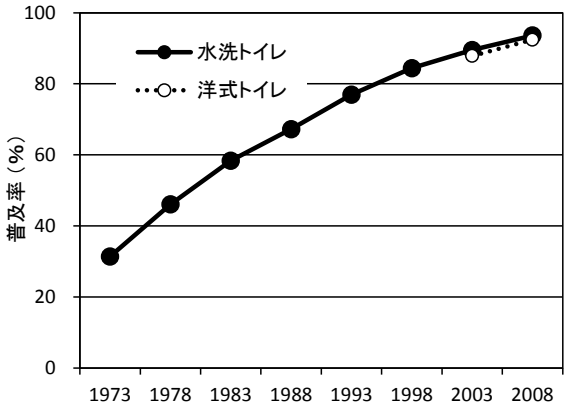


図 4.2　水洗トイレ等の普及率（住宅統計調査等より作成）

(2) トイレ

総務省（総務庁，総理府）の住宅統計調査等（1979, 1984, 1990, 1994, 2001, 2006, 2010）をもとに作成した，全国の水洗トイレ，洋式トイレの普及率を**図 4.2** に示す．水洗化率は 1973 年には 31%であったが，2008 年には 94%まで上昇している．2008 年においては，このうちほとんどが洋式トイレである．

技術開発の進展により，トイレの 1 回あたり使用水量は低減傾向にある．市場シェアの 6 割を占める T 社では，1976 年度以降に 13 リットル型トイレが販売され始め，1994 年度から大 10 リットル・小 8 リットル型，1999 年度から大 8 リットル・小 6 リットル型，2006 年度から大 6 リットル・小 5 リットル型，2007 年度からは大 5.5 リットル・小 4.5 リットル型，2009 年度から大 4.8 リットル・小 4 リットル型が販売され始めた．このように近年では節水型トイレが主流になってきている．

竹﨑ら（2009）の 2006，2007 年の調査によると，実家庭において従来型便器（大 10 リットル～8 リットル）を大 6 リットル型の節水型便器に交換することで，トイレの使用水量が平均約 20%減少し，設置前の平均 35.4 リットル/人日が平均 27.7 リットル/人日に変化した．

さらに，最近では，水を全く使用しないコンポスト型トイレが発売されるようになってきている．

(3) キッチン

近年，家庭における食器洗い機の普及が進んできているが，内閣府の消費動向調査（2013）によると，**図 4.3** に示すように，2013 年の全国の一般世帯における食器洗い機の普及率は 30.6%であり，横ばい傾向にある．

食器洗い機を用いた場合，手洗いに比べて使用水量が少なくて済むといわれているが，竹﨑ら（2009）の 2006，2007 年の調査によると，実家庭に食器洗い乾燥機を設置しても，

使用水量に顕著な変化はみられなかった．これは，食器洗い乾燥機で洗う前に，予備的に食器洗浄が行われる場合があること等の理由によると推測されている．一方で，松山市で食器洗い乾燥機の補助制度を利用した多くの家庭では，使用水量が減ったとの報告もある(松山市, 2004).

(4) 入浴

1980 年以降，シャワーの普及が進んだ結果，1995 年には入浴における 1 人 1 日当たり使用水量が 50 リットル以上増加したと推計されている（細井ら, 1997).

また，シャワーの普及に伴い，人々の入浴方法が変わってきており，夏場は風呂の入れ替えを行わず，シャワーのみで済ませる人が増えている．2005 年の横須賀市によるアンケート調査では，夏場は風呂の入れ替えを行わない割合が 34.4%であったが，それ以外の季節では 6.2%であった．2006 年度の今治市のアンケート（2008）では，夏期にシャワーのみで済ませる割合は 16.8%，冬期は 2.34%であった．清水ら（2008）の滋賀県における調査でも，1994 年，1995 年に比べて，2002 年，2003 年，2004 年は，夏場の風呂の湯張り回数が約 3 割減少している．

近年, 節水型シャワーヘッドが販売されるようになっているが, 竹﨑ら（2009）の 2006, 2007 年の調査では，実家庭において，標準型シャワーを，従来品比 15%減（メーカー試算）の節水型シャワーに取り換えても，入浴における使用水量に顕著な変化は確認されなかった．この理由は，浴槽への湯張り等，シャワー以外の使用水量も多かったためと推測されている．

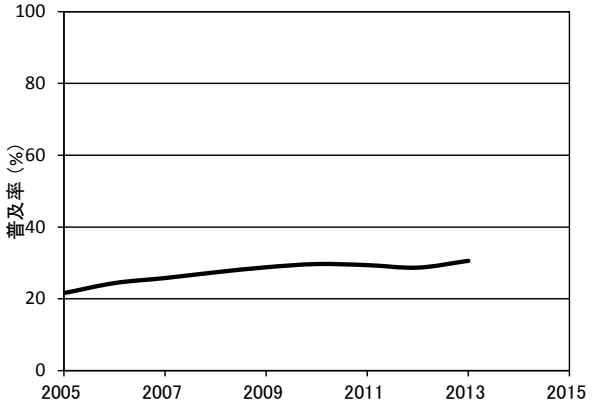


図 4.3　食器洗い機の普及率（内閣府・消費動向調査（2013）より作成）

4.2.2　水需要抑制策の効果

節水型機器の普及促進による水需要抑制策は，国内外で実施され，その効果が検証されている．オーストラリアの Sydney WATER では，事業実施のライセンスの条件として，節水施策による節水目標が設定されており，節水型機器（食器洗い機，雨水タンク）の購入補助制度等，さまざまな水需要抑制策が講じられている．

アメリカのフロリダ州，マイアミ州で実施されている，節水型シャワーヘッドへの交換や，節水型トイレ，節水型洗濯機の購入補助制度による節水効果を検証した研究によると，節水型機器の導入により全体的に使用水量が減少したことが示されている．また，単一の機器を導入した世帯に比べて，複数の機器を導入した世帯の使用水量が少ないことが示された（Lee et al., 2011）．アメリカにおいて，2000年から2003年の間に，節水型のトイレや洗濯機等への更新の補助を受けた96世帯を対象にした調査では，世帯人数が多い世帯ほど補助制度による節水効果が大きかったことが指摘された（Suero et al., 2012）.

我が国においても，竹﨑ら（2009）は，2006，2007 年に 6 世帯の戸建住宅を対象に，斜めドラム洗濯乾燥機，食器洗い乾燥機，節水シャワー，超節水便器（大 6l，小 5l）を設置し，設置前後の給水量を比較した．これにより，節水型機器設置前の総給水量は平均 245.0 リットル/人日であったが，設置後は 198.2 リットル/人日であり，約 20%削減された．斜めドラム洗濯乾燥機の節水効果が高く，洗濯における使用水量の削減率は約 60%であった．また，超節水便器によるトイレ使用水量の削減率は約 20%であった．一方で，食器洗い乾燥機や，節水シャワーへの交換によっては，顕著な変化は確認されなかった．以上のように，節水型機器の導入による，個々の家庭における使用水量の変化については検証が進んできているものの，渇水被害への影響を考える上では，自治体レベルでの効果検証が重要である．

どのような水需要抑制策を講じるかにより，得られる節水効果は大きく異なるといわれている（Renwick et al., 2000）．スペインにおける研究では，節水型機器の導入に熱心な家庭は，必ずしも節水行動には熱心でないという指摘もある（Aisa et al., 2012）．水需要抑制策の効果を発揮するには，地域の特徴を考慮して，地域に受け入れられやすい方策を実施することが重要である（Kampragou et al., 2010）. 地域の特徴に応じて水需要抑制策を進めていくうえで，政府による意識付けが重要であるという指摘もある（Fielding et al., 2012）. さらに，実行する施策の選定においては，節水効果だけでなく，経済性，節水効果の事前予測の可能性，公平性，監視の容易さや強制力，政策的実効性を考慮する必要がある（Olmstead et al., 2009）.

4.3　水の再利用による水需要抑制効果の推計

4.3.1　松山市の節水型機器購入補助制度の概要

松山市で実施されている節水型機器購入補助制度を例に，制度による水使用行動の変化と，水需要抑制効果を推計する．

松山市では，1997 年 6 月から家庭用バスポンプ，風呂水吸引ポンプ付節水型洗濯機の購入，シングルレバー式湯水混合栓への改造を対象として，補助制度が導入された．2002 年 10 月から 2010 年 3 月までは，食器洗い乾燥機の購入も補助対象とされた．補助制度の概要は，以下のとおりである．

・家庭用バスポンプ：購入金額の 2 分の 1 で上限は 2,000 円．

・風呂水吸引ポンプ付節水型洗濯機：5,000 円．

・シングルレバー式湯水混合栓（改造に対する補助）：3,000 円．

・食器洗い乾燥機：購入金額・据付費の 2 分の 1 で上限は 20,000 円．

これらのうち，家庭用バスポンプ，風呂水吸引ポンプ付節水型洗濯機は，1 世帯につき，いずれか 1 回しか補助を受けられない．その他の機器の補助についても，それぞれ 1 世帯につき 1 回である．

松山市から提供を受けたデータより，1997 年度から 2008 年度までの補助件数を整理した結果を，**図 4.4** に示す．洗濯機の補助件数は，1997 年度から 2005 年度までは，毎年増加傾向にあったが，その後は減少傾向にある．家庭用バスポンプの補助件数は，1997 年度が最も多く，約 3,000 件であったが，年々減少傾向にあり，2008 年度の補助件数は年間約 200 件であった．シングルレバー式湯水混合栓への改造の補助件数は，年間 100 件から 300 件程度で推移しており，他の機器と比べて少ない．食器洗い乾燥機は，補助が開始された 2002 年度の補助件数が最も多く，年間約 5,000 件であったが，その後は減少傾向となり，2008 年度の補助件数は約 2,300 件であった．2009 年度に設置目標台数 27,000 台に達したため，2009 年度末で，食器洗い乾燥機の補助は終了となった．

補助制度による各年度までの累計普及率を推計した結果を**図 4.5** に示す．洗濯機については，1997 年度から 2008 年度までの 12 年間で，約 26%の世帯に補助が実施された．内閣府により実施されている消費動向調査（2013）によると，2008 年 3 月における一般世帯の電気洗濯機の平均的な買い替えサイクルは 8.7 年である．よって，12 年間で各世帯の洗濯機が平均 1.4 回買い替えられたことになるが，補助制度を利用した割合はその 2 割程度と少なかった。この理由の一つとしては，補助金額が最大 5 千円と少額であることから，利用する世帯が少なかったのではないかと考えられる。また，補助件数が補助制度開始後 9 年後の 2005 年度頃をピークに減少したのは，平均的な買い替えサイクルを反映したものと推察される．

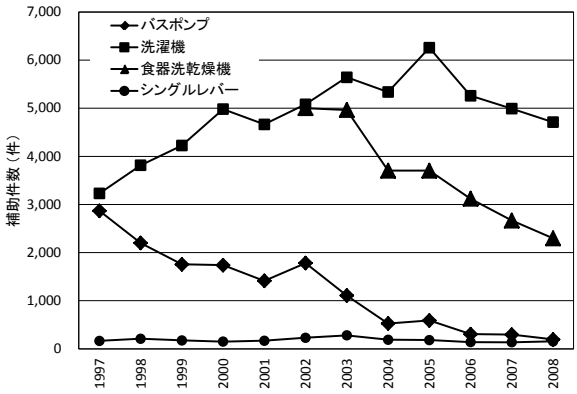


図 4.4　補助件数の推移

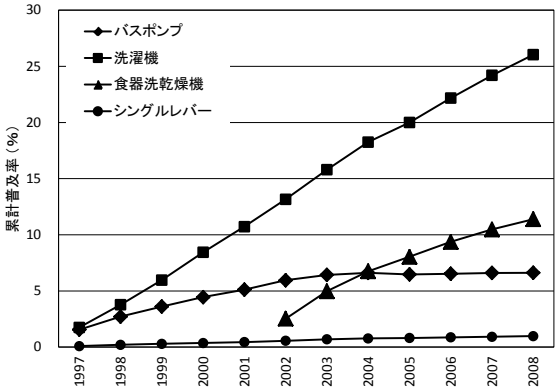


図 4.5　補助制度による累計普及率の推移

家庭用バスポンプは 12 年間で約 7%の世帯に補助が実施された．洗濯機と家庭用バスポンプは，いずれかの補助しか受けられないため，洗濯機と家庭用バスポンプをあわせて，12 年間で約 33%の世帯に対して洗濯に関する補助が実施されたことになる．シングルレバー式湯水混合栓への改造の補助が行われた世帯の割合は 1%程度と低い．食器洗い乾燥機の補助は 2002 年度からの 7 年間で約 11%の世帯が利用した．

以上より，対象機器や補助金額，補助率により，補助制度の利用件数が大きく異なることから，節水効果と住民のニーズも踏まえて，補助対象機器等を柔軟に選定していくことが重要と考えられる．

4.3.2　補助制度による水需要抑制効果の推計

補助制度による家庭用水の水需要抑制効果を推計する．ここでは，補助制度の効果として，家庭用バスポンプと風呂水吸引ポンプ付節水型洗濯機の導入による風呂水再利用頻度の増加を考える．洗濯機への補助金額は5,000円と少額であるため，より高度の節水性能を有する上位機種が購入されることによる節水効果は見込まない．シングルレバー式湯水混合栓への改造については補助件数が少ないこと，食器洗い乾燥機については竹﨑ら (2009) による実家庭での設置前後の水量調査において，差異がみられなかったことから，その効果を除外する．なお，前述のとおり，実際には松山市で食器洗い乾燥機の補助を受けた多くの家庭では，使用水量が減ったとの報告もある (松山市, 2004).

当該年度の家庭用使用水量に対して，補助制度が未実施だった場合の増加量を加えることで，補助制度が未実施であった場合の家庭用使用水量を推計した．補助制度が未実施だった場合の増加量は，洗濯での風呂水再利用の実施者と未実施者の使用水量の差の推計値に対して，前年度までに補助を受けた世帯の割合を乗じることで推計した．なお，より正確に補助制度の効果を評価するには，補助を受けた世帯のうち補助制度が未実施だった場合でも風呂水再利用を実施するようになったと想定される割合や，補助を受ける前から風

呂水再利用を実施していた割合を差し引く必要があるが，これらをゼロと仮定している．このため，補助制度の効果が過大評価されている可能性は否めない．

風呂水再利用の実施者と未実施者の使用水量の差は，以下の方法で推計した．洗濯の 1 回あたり使用水量は，従来型洗濯機を想定し，140 リットルと仮定した．洗濯開始時の注水量が節水されると考え，風呂水再利用時の節水率は 30%と仮定した．2006 年度の今治市のアンケート（今治市，2008）を参考に，1 日当たり洗濯回数，風呂水再利用の頻度を設定した．アンケートは，今治市の一般家庭における水道利用者を対象に行われ，2,397 通が回収された．1 週間のうち自宅の洗濯機での洗濯日数を問う質問への回答から， 1 週間あたりの洗濯日数を平均 5.40 日と推計した．また，平日，休日別の洗濯実施日における洗濯機使用回数への回答を平均し，洗濯実施日の洗濯回数を 1.45 回と推計した．5.40 日×1.45 回÷7 日=1.12 より，1 日当たりの平均的な洗濯回数を 1.1 回と推計した．風呂の残り湯を利用している回答者のうち，約 7 割が毎回使用していると回答していることから，風呂水再利用頻度は 70%とした．

図 4.6 に，1997 年度から 2006 年度までの 1 人 1 日当たり家庭用使用水量と，補助制度が未実施だった場合の推計値を示す．使用水量が最も多かった 1998 年度の使用水量が 229.7 リットル/人日であるのに対して，2006 年度は 219.4 リットル/人日であり，10.3 リットル（減少率 4.5%）減少した．このうち，1998 年度から 2005 年度までの 8 年間の節水型機器購入補助制度による減少量は，3.2 リットル/人日であり，1998 年度の使用水量の約 1.5%に相当する．これは，この間の減少量の約 31%に相当する．残りの約 69%の要因としては，補助制度による PR 効果，節水型機器の普及等も考えられる．また，一方で，家庭における風呂水再利用率が上昇した結果，将来においては，さらなる風呂水再利用率の上昇が困難になる可能性がある．

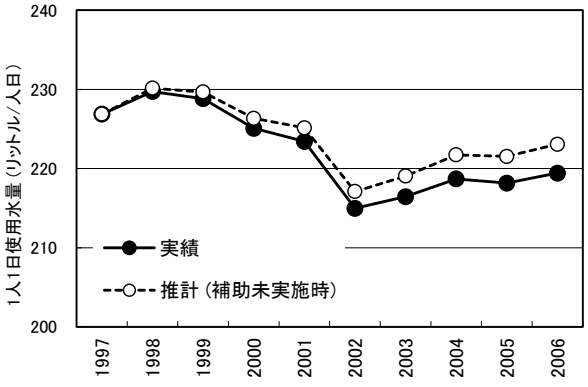


図 4.6　補助制度の有無による 1 人 1 日当たり家庭用使用水量の相違

4.4　節水型機器の普及促進による水需要抑制効果の将来予測

4.4.1　節水型機器の普及促進による水使用機器の買い替え行動の変化

本節では，節水型機器の普及促進策を講じた場合の機器の買い替え行動の変化や，節水型機器の普及率の変化を推計し，水需要抑制効果の将来予測を行う．高松市に節水型トイレの普及促進策を導入した場合を想定し，トイレ使用水量の将来予測を行う．

4.2 で述べたとおり，現時点において，家庭における水使用機器の普及率は非常に高く，総務省（2010）の平成 21 年全国消費実態調査によると，2009 年の全国の洗濯機の普及率は 98%であった．また，同じく総務省の平成 20 年住宅・土地統計調査（2010）によると，2008 年の全国の住宅における水洗トイレの普及率は約 94%，洋式トイレの普及率は約 92%と推計される．よって，将来の家庭用水の需要量を予測する場合には，これらの機器がどのように買い替えられるかを予測することが重要である．

豊貞ら（2011）により，全国の 5,230 名を対象として，2010 年に実施されたアンケート調査によると，トイレの平均的な買い替えサイクルは 19.6 年であった．このうち，買い替え理由の 39%が汚れや故障等によるものであったが，30%は機能やデザイン，節水性能のために買い替えがなされている．また，買い替え理由が，節水・省エネ，機能・デザイン向上の場合の買い替えサイクルは，17.4 年から 18.3 年であり，平均よりも早く買い替えられている．

内閣府の消費動向調査（2013）によると，2013 年 3 月における一般世帯の電気洗濯機の平均使用年数は 9.0 年であり，買い替え理由の 76.8%が故障，11.2%が上位品目，6.2%が住居変更となっており，節水性能向上のための買い替えを促進する余地が残されている．

機器の購入補助制度等により，節水型機器の普及が促進された場合の買い替え行動の変化として，2 通りを考える．1 つは，機器の買い替えサイクルが短縮されるという変化であり，もう 1 つは，通常の場合に比べて，より使用水量の少ない機種が購入されるという変化である．これらによる使用水量の変化を考える．

(1) 機器の買い替えサイクルが短縮される場合

豊貞ら（2011）によると，節水性能を重視する世帯では，平均よりも短いサイクルで買い替えが実施されていることから，節水型機器の購入補助制度等により，買い替えサイクルが短縮されると考えられる．

図4.7に買い替えサイクルの短縮による，社会全体の平均使用水量の変化について模式的に示す．機器の買い替えサイクルが T 年であると仮定すると，ある時点において社会に普及している機器は，その時点から T 年前までの間に購入されたものである．各年に機器を買い替える世帯数が一定であった場合，T 年間に購入された機器の使用水量の平均が，その時点における社会の平均的な使用水量となる．

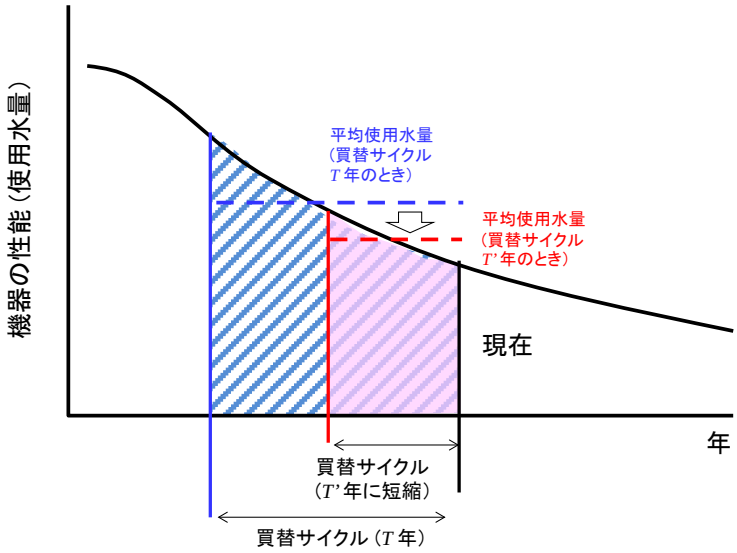


図4.7　買い換えサイクルが短縮された場合の平均使用水量の変化の模式図

これに対して，節水型機器の普及促進策等により機器の買い替えサイクルが T' 年（$T'<T$）まで短縮された場合，ある時点から T' 年前までの間に購入された機器が社会で使われていることになり，技術開発等により，機器の使用水量が経年的に減少している場合，その時点における社会の平均使用水量は買い替えサイクルが T 年の場合よりも小さくなる．

(2) より使用水量の少ない機種が購入される場合

機器の買い替えが実施される場合において，必ずしもその時点で購入可能な最も使用水量の少ない機種が購入されるわけではないため，そうした機種が購入される比率が上昇すると，使用水量が減少する．図4.8に使用水量の少ない機種が購入される比率が上昇した場合の，社会全体の使用水量の変化について模式的に示す．買い替えサイクルが T 年であれば，購入される機器の使用水量が少ないほど，現在時点で使用されている機器の平均使用水量は少ない．

トイレについては，従来のタンク型トイレより使用水量が少ないタンクレストイレは，一般的により高額であり，補助制度等により，こうした機種が購入される比率が高まることで，節水効果が高まる可能性がある．

また，他国において導入されているラベル制度等も，使用水量が少ない機種の購入を促す効果が期待される．

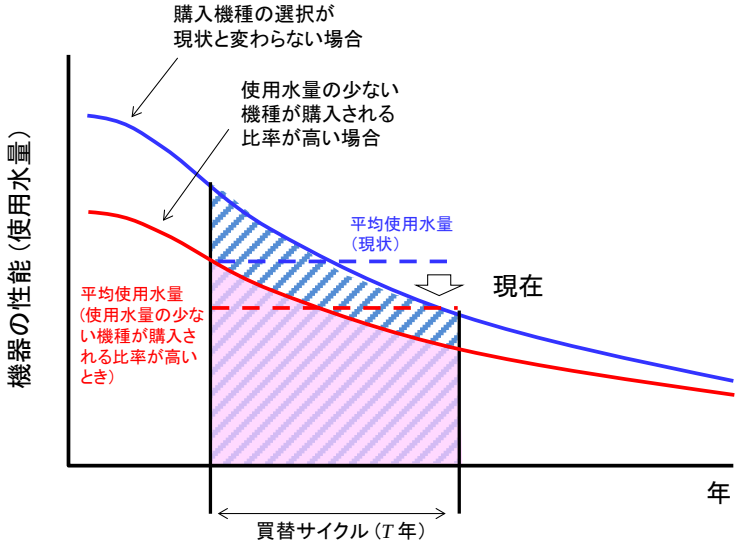


図4.8　使用水量の少ない機種が購入される比率が上昇した場合の平均使用水量の変化の模式図

4.4.2　将来予測の方法

高松市を対象に，1976 年度から 2010 年度までのトイレの機種別普及率を再現し，機器購入時において最新型機種が購入される比率を推計した．これを使って，2008 年度を起点に 20 年後の 2028 年度までの，社会におけるトイレの平均使用水量を予測した．さらに，節水型機器の普及促進策等が導入され，トイレの買い替え行動が変化した場合の平均使用水量を予測した．

なお，トイレを対象とした理由は，世帯数の変動による 1 人 1 日当たり使用水量への影響が少なく，1 回あたりの使用水量が機器の性能により規定され，洗濯機のように風呂水再利用等，機器の性能以外の要因で使用水量が左右されにくく，比較が容易なためである．

(1) 過去のトイレ使用水量の再現方法

高松市の 1976 年度から 2010 年度までの水洗化率を，総務省（総務庁，総理府）の住宅統計等（1979, 1984, 1990, 1994, 2001, 2006, 2010）をもとに推計した．住宅統計等では，市町村別の住宅の水洗化状況が 5 年毎に集計されていることから，線形補間により 1 年ごとの水洗化率を推計した．

次に，1976 年度から 2010 年度までの各年について，トイレの機種別普及率を推計した．水洗化世帯数の増加によるトイレの新規購入数と，前回設置してから買い替えサイクル T 年が経過したことによる買い替え世帯数を合計し，各年のトイレ購入数を求めた．ここでは，豊貞ら（2011）の調査結果を参考に，トイレの買い替えサイクル T は 20 年と仮定した．各年のトイレ購入数に対して，最新型機種が購入される比率を乗じ，最新型機種の購入数

を算出した．最新型機種が購入されない場合は，1 世代前の機種が購入されると仮定した．

こうして推計した機種別購入数を用いて，各年の機種別普及率を算出した．機種別普及率に対して，機種別の 1 人 1 日当たりの標準使用水量を乗じることで，社会におけるトイレの平均使用水量を推計した．

機種別の販売開始年は，T 社の HP を参考に，1975 年度までは 20 リットル型トイレのみが販売され，1976 年度以降に 13 リットル型が販売され始め，1994 年度から大 10 リットル・小 8 リットル型，1999 年度から大 8 リットル・小 6 リットル型，2006 年度から大 6 リットル・小 5 リットル型，2010 年度から大 4.8 リットル・小 4 リットル型が販売され始めたと仮定した．T 社を代表としたのは，1990 年代以降の衛生陶器の市場シェアは，T 社が 6 割以上を占めている（日経シェア調査等）ためである．なお，2007 年度に販売され始めた大 5.5 リットル・小 4.5 リットル型は，2006 年度に販売され始めた大 6 リットル・小 5 リットル型と使用水量の差が小さいため省略した．大 4.8 リットル・小 4 リットル型は 2009 年度から販売され始めたが，普及型のタンク式が販売され始めた 2010 年度からとした．1975 年度は 20 リットル型便器が 100%普及していたと仮定した．家庭におけるトイレの使用回数は，空気調和・衛生設備データブック（2003）を参考に，1 人 1 日あたり大 1.05 回，小 3.80 回とした．

最新型機種が購入される比率を変えて算出した機種別普及率と，2008 年 8 月に一般社団法人日本衛生設備機器工業会により，全国を対象に行われたアンケート調査による，機種別普及率の調査結果との比較から，最新型機種が購入される比率は 7 割と推計し，以降の検討ではこの比率を基準とした．

(2) 将来予測の方法

2008 年度から 2028 年度までのトイレの平均使用水量の予測方法を述べる．ここでは，世帯数は一定と仮定し，水洗化率は一律 95%を用いた．水洗化されていない 5%の世帯におけるトイレの買い替えは使用水量に反映されないため，使用水量に 0.95 を乗じた．

1976 年度から 2010 年度までの各年において，前述した機種別の販売開始年と最新型機種が購入される比率，1 人 1 日当たりトイレ使用回数を用いて，各年に買い替えを行った世帯における使用水量を推計した．

そして，1976 年度から 2010 年度にトイレの買い替えを行った世帯における使用水量の回帰式を作成した．技術開発の進展については，ロジスティック曲線が適合する（弘岡，2003）ことから，(4.1) 式のロジスティック曲線により，t 年に買い替えを行った世帯におけるトイレ使用水量 $x(t)$ の回帰式を作成した．

$$x(t) = \frac{K}{1+e^{at+b}} \tag{4.1}$$

ここで，K：飽和定数，$a, b,$：パラメータ．

この回帰式を用いて，2028年度までの各年のトイレ買い替え世帯におけるトイレ使用水量を予測した．

買い替えサイクル T 年の場合の，t 年のトイレの平均使用水量 $q(t)$ は，(4.2) 式より予測した．

$$q(t) = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} x(s)ds \tag{4.2}$$

(4.1) 式を (4.2) 式に代入して得られる (4.3) 式より，社会におけるトイレの平均使用水量 $q(t)$ を予測した．

$$q(t) = \frac{K}{aT}\ln\left\{\frac{1+e^{a(t-T)+b}}{1+e^{at+b}}\right\} + K \tag{4.3}$$

以上を用いて，トイレの買い替えサイクル T が短縮された場合と，最新型機種が購入される比率が変化した場合の平均使用水量を予測した．機器の買い替えサイクルについては，買い替えサイクル T が, 20年から, 15年, 10年と短縮された場合の平均使用水量を (4.3) 式より予測した．実際には，ある年に買い替えサイクル短縮のための施策が講じられた場合，社会全体で買い替えサイクルが短縮するまでには，相当の期間が必要と考えられるが，この期間は考慮せず，社会全体の買い替えサイクルは，はじめから15年あるいは10年であったと仮定した．

最新型機種が購入される比率は，7割を基準として，8割，9割，10割と上昇した場合を考えた．それぞれ1976年度から2010年度までに機器の買い替えを行った世帯における使用水量を算出し，これに対して (4.1) 式の K，a，b を推定し，(4.3) 式より平均使用水量 $q(t)$ を算出した．

4.4.3　予測結果

(1) 過去の機種別普及率とトイレ使用水量の再現結果

住宅統計等より，高松市の 1976 年度から 2010 年度までの水洗化率を推計した結果は，**図 4.9** のとおりである．水洗化率は 2008 年度に 95%に達したと推計された．

トイレの購入時において，最新型機種が購入される比率は，2008 年 8 月に日本衛生設備機器工業会により，全国を対象に行われたアンケート調査による機種別普及率の調査結果と，比率を変えた場合の 2008 年度の普及率の推計結果との比較から，7 割と推計した．**図 4.10** に，最新型機種が購入される比率を 6 割，7 割，8 割と変えた場合の推計普及率と日本衛生設備機器工業会による調査結果をあわせて示す．

1976 年度から 2010 年度までの，トイレの機種別普及率の推計結果を**図 4.11** に示し，各年のトイレ平均使用水量の推計結果を**図 4.12** に示す．1976 年度以降，水洗化人口の増加に伴い，1 人 1 日あたり平均使用水量は増加したが，1993 年度の 62.0 リットルをピークに，

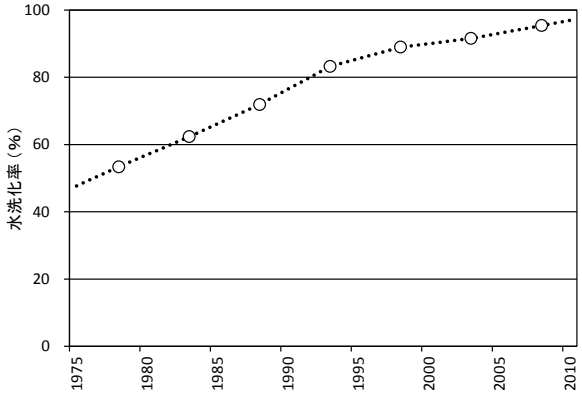


図4.9　高松市の水洗化率の推移

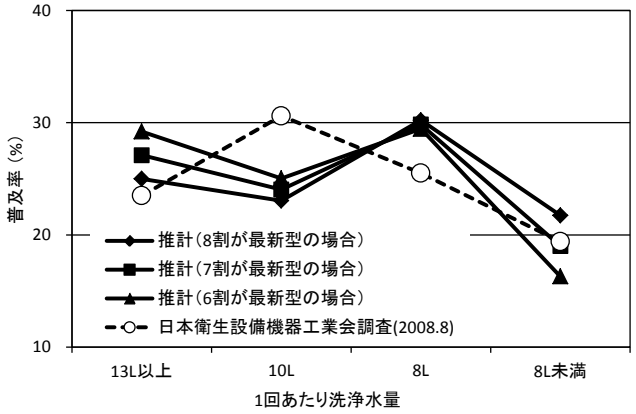


図4.10　水洗トイレの機種別普及率（2008年）

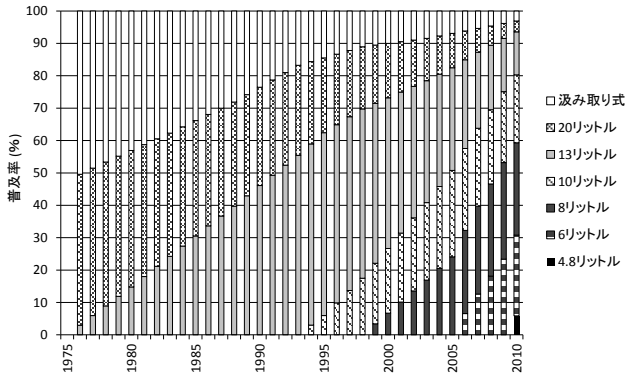


図 4.11　トイレの機種別普及率の推計結果

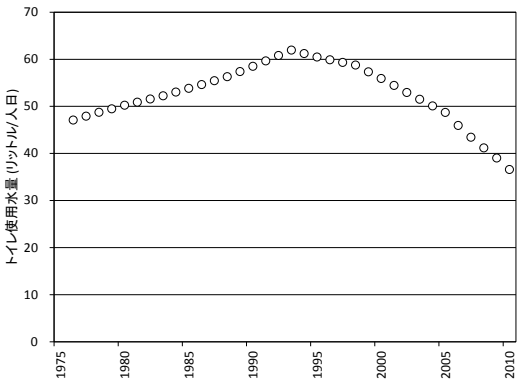


図4.12　トイレの平均使用水量の推計結果

2008 年度には 41.2 リットルまで減少したと推計された．

1993 年度にピークとなった理由としては，水洗化率の伸びが減速傾向になったことや，1994 年度から大 10 リットル，小 8 リットルの節水型トイレが販売され始めたことが考えられる．

(2) 将来のトイレ使用水量の予測結果

1) 普及促進策を講じない場合

水洗化率 95%，最新型機種が購入される比率を 7 割とし，1976 年度から 2010 年度までにトイレの買い替えを行った世帯における使用水量から，(4.1) 式のロジスティック曲線のパラメータ（K，a，b）をそれぞれ（121, 0.064，−0.940）と推定した．そして，2028 年度までの各年にトイレの買い替えを行った世帯における使用水量を予測した．結果を**図 4.13** に示す．黒点は，2010 年度までの各年度にトイレの買い替えを行った世帯の使用水量である．

(4.3) 式より買い替えサイクル T が20年の場合のトイレ平均使用水量を予測した結果を，

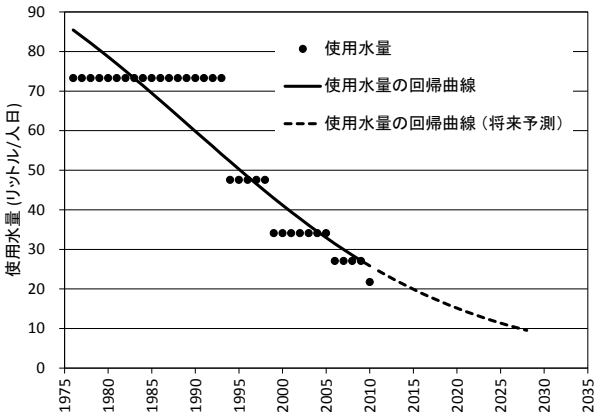


図 4.13　各年度のトイレ買い替え世帯における使用水量の予測結果

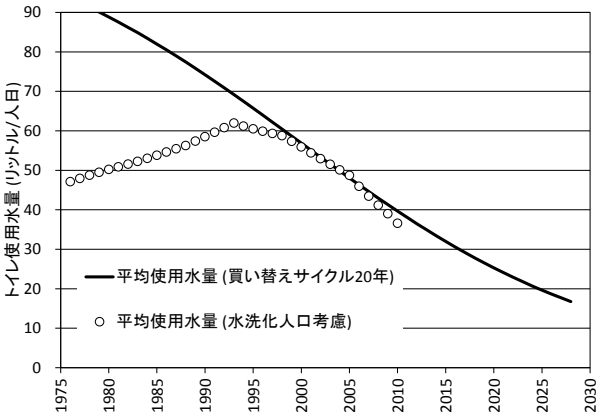


図 4.14　買い替えサイクル 20 年の場合のトイレ平均使用水量の予測結果

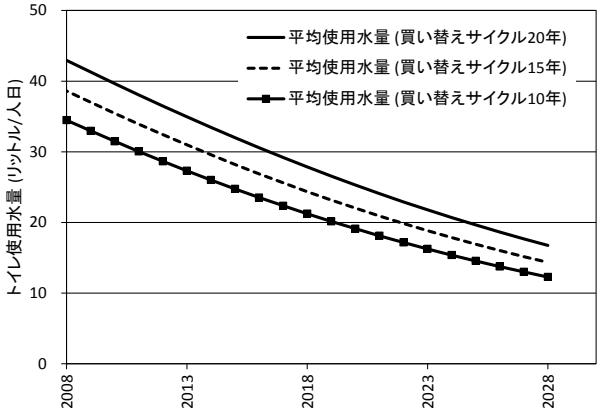


図 4.15　トイレの買い替えサイクルが短縮された場合の平均使用水量の予測結果

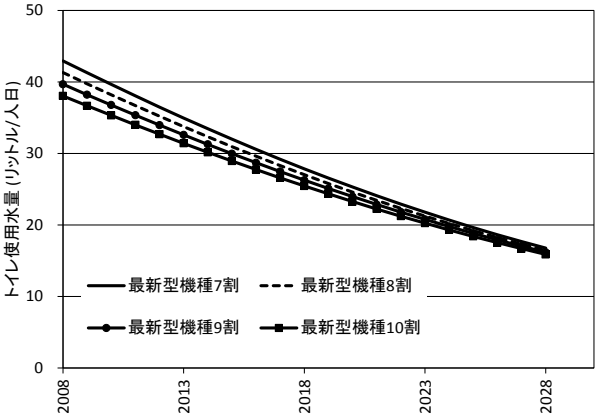


図 4.16　最新型機種が購入される比率が上昇した場合の平均使用水量の予測結果

図4.14の曲線に示す．白点は，**図4.12**で示した水洗化人口の変化を考慮した場合の平均使用水量である．1998年度以降は回帰式より予測した平均使用水量と水洗化人口を考慮した平均使用水量は類似した傾向で変動している．2008年度におけるトイレの1人1日平均使用水量は, 回帰式から推計した値が42.9リットル, 水洗化人口を考慮した値が41.2リットルと, ほぼ同程度である．

この回帰式を用いて，買い替えサイクルが 20 年，最新型機種が購入される比率が 7 割の場合の 2028 年度の 1 人 1 日平均使用水量を 16.8 リットルと予測した．2008 年度の 42.9 リットルに対して，半分以下になると予測された．

2)　買い替えサイクルが短縮された場合

買い替えサイクルが 20 年から，15 年，10 年と短縮された場合の，トイレの平均使用水

量の予測結果を**図 4.15** に示す.

買い替えサイクルが 20 年の場合, 2028 年度の平均使用水量は 16.8 リットル/人日であったが，買い替えサイクルが 15 年まで短縮された場合は 14.3 リットル/人日であり，買い替えサイクルが 20 年の場合と比べて 2.5 リットル/人日減少する．買い替えサイクルが 10 年まで短縮された場合は 12.3 リットル/人日であり，買い替えサイクルが 20 年の場合と比べて 4.5 リットル/人日減少する．すなわち，施策未実施の場合の減少量 26.1 リットル/人日よりも約 17%減少する.

3) 最新型機種が購入される比率が上昇した場合

買い替えサイクルを 20 年とし，最新型機種が購入される比率が 7 割から，8 割，9 割，10 割と上昇した場合のトイレの平均使用水量の予測結果を**図 4.16** に示す. 最新型機種が購入される比率が 7 割，8 割，9 割，10 割の場合の（4.1）式のロジスティック曲線のパラメータ（K，a，b）は，それぞれ，(121, 0.064，−0.940)，(115, 0.063，−0.940)，(110, 0.062，−0.913)，(104, 0.061，−0.912）と推定した.

最新型機種が購入される比率が 7 割の場合，2028 年度の平均使用水量は 16.8 リットル/人日であったが，10 割の場合でも 15.9 リットル/人日であり，0.9 リットル/人日（約 3%）しか差がなかった.

2008 年度において，最新型機種が購入される比率が 10 割の場合の平均使用水量は 38.0 リットル/人日であった. 7 割の場合の 42.9 リットル/人日に対して 4.9 リットル/人日の差があったが，20 年後においては差が小さくなった．この理由は，機器の性能向上に伴う使用水量の減少が経年的に鈍化すると予想されるためである.

これまで, 流下抵抗の低減や, 水の圧力と電気エネルギーを組み合わせた洗浄方式の導入などによりトイレ使用水量は減少してきた（清水ら, 2009）が，将来のトイレ使用水量の抑制には限界があると推察される．将来においては，使用水量が少ない機種への買い替えを促進する施策により得られる平均使用水量の抑制効果は現在に比べて小さくなると考えられるため，さらに平均使用水量を抑制するためには，水を使用しないコンポスト型トイレの家庭における普及拡大等，従来とは別の方策を考えることも重要である.

4.5 結言

本章では，節水型機器の普及促進策を講じた場合の水使用行動の変化や，節水型機器普及率の変化を推計し，水需要抑制のための節水型機器普及促進策の有効性を検討した．愛媛県松山市で実施されている節水型機器購入補助制度を例に，制度が洗濯時の風呂水再利用率の変化に及ぼした影響を推計した．また，香川県高松市を対象に，節水型トイレの普及促進策を講じた場合を想定し，機器の買い替えによる，将来 20 年間のトイレ使用水量の

予測を行った．得られた主な結果は，以下のとおりである．

1) 松山市において，1997 年より導入された節水型機器購入補助制度を例に，洗濯における風呂水再利用率の変化をもとに，水需要抑制効果を推計した．その結果，1998 年度から 2006 年度までの 8 年間の家庭用使用水量の減少量のうち，約 3 割は補助制度の効果であると推計された．補助制度による減少量は，1998 年度の使用水量の約 1.5%に相当する．ただし，風呂水再利用率が上昇したことに伴い，さらなる再利用率の上昇が困難になる可能性についても考慮が必要である．

2) 高松市に節水型トイレの普及促進策を導入した場合を想定し，トイレ使用水量の将来予測を行った．機器の買い替え行動の変化として，機器の買い替えサイクルの短縮，より使用水量の少ない機種への買い替えの促進を想定した．こうした施策を実施しなかった場合でも，2008 年度に比べて 2028 年度のトイレの使用水量は半減すると予測される．ただし，トイレの買い替えサイクルが通常の 20 年から 10 年まで短縮されると，施策未実施の場合に比べてトイレの使用水量はさらに約 17%減少し, 使用水量が少ない機種への買い替えが促進されると，約 3%減少すると予測された．これより，節水型機器の普及促進が，水需要の抑制に有効であると考えられる．

3) 機器の普及促進により，買い替えサイクルの短縮や，使用水量が少ない機種への買い替えが促進されると仮定したが，これらをどのようにして促進するかについても検討が必要である．買い替えサイクルの短縮等を実現するには，多くの家庭での買い替え行動の変化が必要とされる．よって，どのような方法で多くの家庭の買い替え行動の変化を促すかが課題となる．これを考えるために，これまで実施されている，復興支援・住宅エコポイントや，松山市の節水型機器購入補助制度等の検証が望まれる．

参考文献

一般社団法人日本衛生設備機器工業会: 節水に関する意識調査結果,
http://www.sanitary-net.com/trend/research.html (2013 年 12 月 24 日アクセス).

今治市水道部 (2008): 「水道事業に係る市民アンケート調査」の結果.

空気調和・衛生工学会 (2003): 空気調和・衛生設備データブック, 株式会社オーム社, p.252.

清水聡行・吉村啓介・山川幹人・山田淳 (2008): 生活用水需要予測のための需要構造調査とその要因分析, 環境工学研究論文集, Vo.45, pp.571-578.

清水聡行・東佑亮・谷口久美子・山田淳（2012）: 多変量解析法を用いた家庭用水の需要予測に関する一考察, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.1, pp72-83.

清水康利・豊貞佳奈子（2009）: 節水便器への改修の環境負荷削減・経済性評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No.152, pp.9-13.

総務省（1994）: 平成 5 年住宅統計調査報告.

総務省（2001）: 平成 10 年住宅統計調査報告.

総務省（2006）: 平成 15 年住宅統計調査報告.

総務省（2010）: 平成 20 年住宅・土地統計調査.

総務省（2010）: 平成 21 年全国消費実態調査.

総務庁（1984）: 昭和 58 年住宅統計調査報告.

総務庁（1990）: 昭和 63 年住宅統計調査報告.

総理府（1979）: 昭和 53 年住宅統計調査報告.

竹﨑義則・山海敏弘（2009）: 戸建住宅における節水機器の使用効果に関する研究 - 節水機器設置前後の給水の水量変化に関する実験的研究（その 1）- , 日本建築学会環境系論文集, Vol.74, No.644, pp.1145-1154.

豊貞佳奈子・出嶋聡・小代禎彦・清水康利（2011）: 水まわり住宅設備機器の使用期間調査, 空気調和・衛生工学会論文集, No.172, pp.1-7.

豊貞佳奈子・清水康利・飯尾昭彦・坂上恭助（2013）: 節水便器普及による環境負荷削減効果の定量化研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.193, pp.1-8.

内閣府（2004）: 消費動向調査.

内閣府（2013）: 消費動向調査.

日経産業新聞編（2011）：日経シェア調査 195〈2012 年版〉，日本経済新聞社.

弘岡正明（2003）：技術革新と経済発展 - 非線形ダイナミズムの解明 - ，日本経済新聞社.

細井由彦・城戸由能・竹本志保（1997）：家庭における水とエネルギーの消費に関する研究，水道協会雑誌，Vol.66, No.3, pp.26-35.

松山市公営企業局（2004）：松山市水道史　50 年のあゆみ.

村川三郎・西田勝・北山広樹・西名大作・周南・宮山博司（2002）：福岡市の住宅団地 10 年間における水使用構造の比較，日本建築学会計画系論文集, No.554, pp.47-53.

村瀬勝彦・中村昭・川崎秀明（2005）：生活用水における水需要構造と価格の分析，水工学論文集，No.49, pp.475-480.

山田勲（2011）：最近の家庭洗濯の実施状況と消費者意識 - 2010年洗濯実態調査より - ，繊維製品消費科学会誌, Vol.52, No.12, pp.35-42.

横須賀市：平成 17 年度　水使用についてのアンケート調査結果報告.

Aisa, R. and G. Larramona (2012): Household water saving: Evidence from Spain, Water resources research, Vol.48, W12522.

Fielding, K. S., S. Russell, A. Spinks and A. Mankad (2012): Determinants of household water conservation: The role of demographic, infrastructure, behavior, and psychosocial variables, Water resources research, Vol.48, W10510.

Grafton, R. Q., M. B. Ward, H. To and T. Kompas (2011): Determinants of residential water consumption: Evidence and analysis from a 10-country household survey, Water resources research, Vol.47, W08537.

Kampragou, E., D. F. Lekkas and D. Assimacopoulos (2010): Water demand management: Implementation principles and indicative case studies, Water and environment journal, Vol.25, Issue 4, pp.466-476.

Lee, M., B. Tansel and M. Balbin (2011): Influence of residential water use efficiency measures on household water demand: A four year longitudinal study, Resources, conservation and recycling, Vol.56, pp.1-6.

Nakagawa, N., M. Otaki, T. Aramaki and A. Kawamura (2009): Influence of water-related appliances on projected domestic water use in Tokyo, Hydrological research letters, 3, pp.22-26.

Olmstead, S. M. and R. N. Stavins (2009): Comparing price and nonprice approaches to urban water conservation, Water resources research, Vol.45, W04301.

Renwick, M. E. and R. D. Green (2000): Do residential water demand side management policies measure up? An analysis of eight California water agencies, Journal of environmental economics and management, Vol.40, pp.37-55.

Suero, F. J., P. W. Mayer, D. E. Rosenberg and M. ASCE (2012): Estimating and verifying United States households' potential to conserve water, Journal of water resources planning and management, Vol.138, pp.299-306.

Sydney WATER : Water Conservation and Recycling Implementation Report 2008-09.

White, S., G. Milne and C. Riedy (2004): End use analysis: Issues and lessons, water science & technology: Water supply, Vol.4, No.3, pp.57-65.

第５章　渇水被害最小化のための貯水池運用の方向性

5.1　緒言

家庭の水使用形態の変化にともなう渇水被害の変化を予測し，対応策を考えるうえで，渇水規模や頻度の変化を考慮に入れる必要がある．それには，貯水池運用を含めて考えなければなければならない．厳しい渇水時には，貯水池等の水は家庭の水使用に対して優先的に配分されるため，家庭の水使用形態の変化が貯水池運用にも大きく影響する．

松山市においては，家庭の水使用形態の変化により，平常時の水需要量が減少したものの，給水制限による追加節水量は減少した．家庭の平常時の水需要量が少なくなると，水需要を充足させるために行われる，貯水池からの補給は少なくて済む．そのため，貯水池の貯水量が低下しにくくなり，給水制限の頻度が低減する．一方で，給水制限による追加節水量が減少すると，給水制限を実施しても貯水池からの補給量を大きく減らすことができない．その結果，貯水池が枯渇する頻度が増加する可能性がある．過去の渇水の事例をみると，貯水池が枯渇に至ると，家庭の水使用を優先的に充足するために，他部門の水使用が制限されたり，他部門や他自治体からの水融通が行われるなど，多大なコストが生じる場合がある．

その一方で，節水型機器の普及促進策等により，平常時の家庭の水需要を抑制することが可能である．こうした施策とあわせて，他用途等への影響も考慮しつつ，家庭の渇水被害を最小化するための，貯水池運用を考えることが重要である．渇水被害の最小化を考える上で，給水制限により生じる家庭の経済的被害等を定量評価する必要がある．

本章では，愛媛県松山市の石手川ダムの貯水池運用を含めて，家庭の水使用をモデル化し，家庭の水使用形態の変化が貯水池運用にどのような影響を及ぼし，その結果，家庭の渇水被害等がどのように変化するかを推計する．そして，将来の気候変動の影響も踏まえて，渇水被害を最小化するための貯水池運用の方向性を検討する．

5.2　渇水時の貯水池運用の方向性

貯水池運用を考慮した渇水被害軽減策の研究例としては，アメリカ南部のリオグランデ流域を対象とした研究（Booker et al., 2005）等がある．また，計画段階から貯水池の信頼性を評価する検討も行われてきている（多々納ら, 1991）.

平常時の需要量が抑制されると，渇水時に使用水量をさらに抑制することが困難になると指摘されている（Kenney et al., 2004）．よって，水需要抑制策により生み出された貯水池等の容量を，他用途に転用する場合，例えば利水容量を洪水調節容量や不特定容量等に振り替える場合には，このようなことに留意する必要がある．

渇水被害軽減策が効果を発揮するまでには，長期間が必要とされることから，将来の気候変動の影響を考慮することも重要である．**図 5.1** に示す，文部科学省等（2012）により整理された，過去からの長期的な降雨の動向をみると，日降水量 1.0 ㎜以上の年間日数は減少傾向にある．また，**図 5.2** に示す，気象庁（2013）による無降雨日数の将来予測では，多くの地域において年間無降水日数が増加すると予測されている．こうしたことは河川の流量にも影響し，特に西日本において，河川の渇水流量が低減するという予測もある（立川ら, 2011）．河川の渇水流量の低減は，水需要を充足するための貯水池運用に影響を及ぼすことから，貯水池運用も考慮した水需給への影響も検討されている（小槻ら，2013a; 小槻ら，2013b）．2012 年度には，国土交通省により「気候変動による水資源への影響検討会」が設けられて，貯水池運用を考慮した渇水被害の影響予測も始められた．

一方で，気候変動の影響により，洪水規模等の増大も予想されることから，渇水や，洪水時の対応を含めて，貯水池等の容量を有効活用するための検討が重要である．

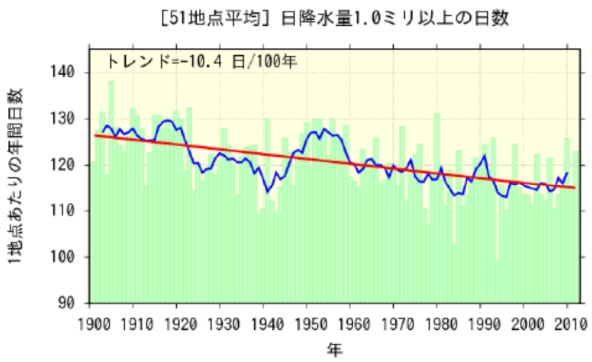


図 5.1　日降水量 1.0 ㎜以上の年間日数の変化（文部科学省等，2012）

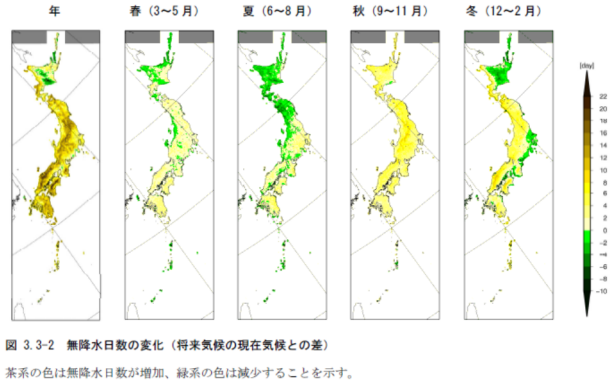


図 5.2　無降水日数の変化（気象庁，2013）

5.3　石手川ダムの貯水池運用のモデル化の方法

5.3.1　石手川ダムの貯水池運用の概要

石手川ダムは，愛媛県松山市に所在する，国土交通省所管の多目的ダムである．**図 5.3** に石手川ダムの貯水容量配分を示す．総貯水容量は 1,280 万 m^3 であり，利水容量が 630 万 m^3，洪水調節容量が 430 万 m^3，堆砂容量が 220 万 m^3 である．利水容量の内訳は，松山市の上水道用 500 万 m^3，かんがい用（農業用水用）130 万 m^3 である．利水容量からは，既得灌漑のための補給も行われる．

渇水により石手川ダムの貯水量が減ると，国，県，市，関係利水者により構成される，石手川ダム渇水調整協議会の協議のもとで取水制限が実施され，石手川ダムから河川への補給量が抑制される．1991 年度から 2007 年度までの 17 間で，取水制限（自主節水を除く）が実施された年は，1992 年度，1994 年度，1995 年度，1996 年度，1997 年度，1998 年度，2000 年度，2001 年度，2002 年度，2003 年度，2005 年度，2007 年度の 12 年間あり，半分以上の年で取水制限が実施されている．これらのうち，上水道の給水制限が実施されたのは，1994 年度～1995 年度，2002 年度～2003 年度，2007 年度の 3 回である．これら 3 回の取水制限の経緯を**表 5.1** に示す．

1994 年度～1995 年度の渇水時には，1994 年 8 月 26 日から 10 月 16 日までの間において，石手川ダムの利水容量が底をつき，堆砂容量内の貯留水からの取水が行われた．このうち，堆砂容量内の貯留水も底をついた 9 月 25 日から 9 月 28 日までの間においては，高知県仁淀川水系の面河ダムの工業用水から，松山市の水道用水への転用がなされた．

2002 年度～2003 年度の渇水，2007 年度の渇水では，石手川ダムの利水容量は枯渇には至らなかった．

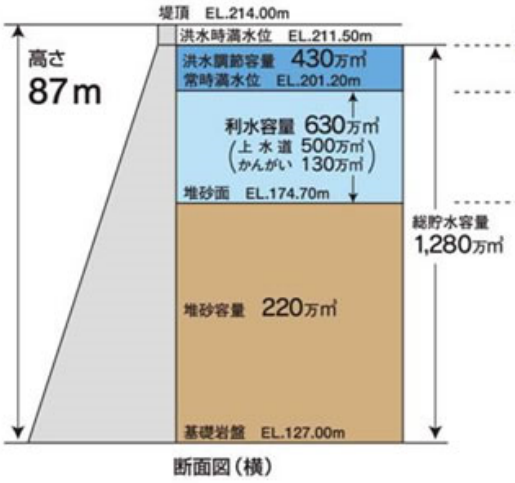


図 5.3 石手川ダムの貯水容量配分（石手川ダム HP より）

表 5.1　主な年の石手川ダム取水制限の経緯

(a) 1994 年度～1995 年度渇水

年月日	取水制限率			備考 （上水道の給水制限）
	上水道	農水	灌漑	
1994 年 6 月 24 日	20%	20%	10%	
1994 年 7 月 5 日	25%	25%	20%	25%減圧給水（7/11～）
1994 年 7 月 13 日	35%	35%	40%	
1994 年 7 月 19 日	40%	58%	40%	50%減圧給水（7/20～）
1994 年 7 月 23 日	40%	67%	42%	16 時間給水（7/26～） 12 時間給水（7/29～）
1994 年 8 月 1 日	42%	67%	42%	8 時間給水（8/1～） 5 時間給水（8/22～）
1994 年 8 月 30 日	35%	67%	42%	
1994 年 9 月 25 日	29%	67%	42%	
1994 年 10 月 5 日	29%	83%	73%	8 時間給水（10/22～） 12 時間給水（11/9～）
1994 年 11 月 26 日	25%	83%	73%	10%減圧給水（11/27～）
1995 年 1 月 20 日	23%	83%	24%	
1995 年 4 月 11 日	36%	91%	－	
1995 年 5 月 1 日	解除	解除	解除	給水制限解除（5/1）

(b) 2002 年度～2003 年度渇水

年月日	取水制限率			備考 （上水道の給水制限）
	上水道	農水	灌漑	
2002 年 6 月 27 日	5%	5.5%	10%	
2002 年 7 月 17 日	10%	11.1%	30%	
2002 年 8 月 1 日	15%	50%	50%	
2002 年 8 月 20 日	15%	55%	50%	25%減圧給水（9/2～）
2002 年 10 月 6 日	15%	33%	33%	50%減圧給水（10/28～）
2002 年 11 月 18 日	18%	50%	50%	
2003 年 1 月 31 日	25%	66.7%	66.7%	
2003 年 4 月 9 日	解除	解除	解除	給水制限解除（4/9）

(c) 2007 年度渇水

年月日	取水制限率			備考 （上水道の給水制限）
	上水道	農水	灌漑	
2007 年 6 月 4 日	10%	45.5%	10%	25%減圧給水（6/12～）
2007 年 6 月 15 日	13%	16.7%	20%	
2007 年 6 月 22 日	18%	27.8%	25%	50%減圧給水（6/27～）
2007 年 6 月 29 日	18%	27.8%	35%	
2007 年 7 月 1 日	30%	33.3%	35%	
2007 年 7 月 6 日	解除	解除	解除	給水制限解除（7/6）

5.3.2　モデル化の方法

松山市の家庭における水使用も含めて，石手川ダム貯水池の利水運用をモデル化する．家庭の水使用形態や上水道の給水制限強度を踏まえて，家庭用，業務用使用水量を算出し，農業用水等の補給も踏まえて，石手川ダム貯水池運用を計算する．モデル化の期間は，1991 年 4 月から 2007 年 10 月までの約 17 年間とし，計算間隔は日単位とする．

石手川ダムの流入量，石手川ダム以外の水源からの上水道の取水量は実績値を用いた．

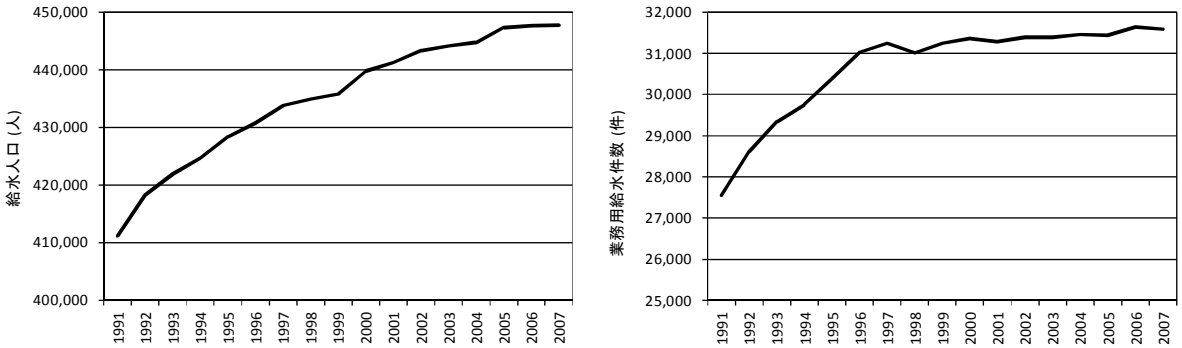
石手川ダムからの農業用水，既得灌漑への補給量は，取水制限が未実施だった場合の補給量の推計値を基準とし，取水制限率を乗じることで算出した．取水制限率は，過去の貯水量と取水制限率との関係をもとに作成した推計式を用いた．なお，入手した石手川ダムの実績日放流量は，用途別に区分されていないため，取水制限が未実施だった場合の補給量は，農業用水等の年間の基本的な取水パターン等をもとに推計した．

上水道の家庭用，業務用使用水量は，**第 2 章**で検討した気象，週変動，月変動，経年変化，給水制限を考慮した回帰モデルを用いて，家庭用の 1 人 1 日あたり使用水量，業務用の 1 件 1 日あたり使用水量を予測し，給水人口，業務用給水件数を乗じて算出した．回帰モデルの構造は，第 2 章（2.5）式，(2.6) 式のとおりである．回帰モデルのパラメータについては，**第 2 章表 2.10**，**表 2.11** のパラメータを用いた．給水人口，業務用給水件数の推移を，**図 5.4** に示す．

上水道の給水制限強度は，石手川ダム貯水量と過去の実際の給水制限強度の関係から作成した推計式より算出した．実際には，石手川ダム貯水量から減圧給水や時間給水の強度が直接決定されるのではなく，河川における上水道の取水制限率や，その他の水源の賦存量も踏まえて決定されるが，給水制限強度は石手川ダム貯水量と概ね連動していると考え，貯水量と給水制限率の関係から直接求めた．

減圧給水と時間給水の強度をもとに単位水量当たりの獲得所要時間を計算し，**第 3 章**で示した等価変分により金銭換算し，家庭における渇水被害の経済的評価を行った．多々納ら（1991）は，渇水継続期間が長いほど不足により生じる渇水被害は大きくなると仮定したが，本検討では継続期間に関わらず，給水制限強度のみで経済的評価を行った．

なお，実績を踏まえて，減圧給水率は最大 50%，断水時間は最大 19 時間までとした．石手川ダムの貯水量がゼロ（枯渇）になった場合においても，これらの値を用いた．これは，1994 年の渇水において，石手川ダム貯水池が枯渇した場合でも，堆砂容量内の貯留水の取水や，他用途からの転用等により，上水道の取水は優先的に確保されたことを反映したものである．高松市の渇水事例においても，早明浦ダムの枯渇時にも上水道には優先的な配



(a)　給水人口　　(b)　業務用給水件数

図 5.4　給水人口，業務用給水件数の推移

慮がなされた．こうした対応を行うためには，農業用水や工業用水等，他用途の使用抑制に伴う経済的被害や，多大な行政コストが生じると予想される．本検討においては，他用途等への影響については，貯水池枯渇日数により評価を行った．

渇水被害を抑制するための方策として，給水制限強度の設定方法を変えた場合と，節水型機器普及促進策を実施した場合についての検討を行った．

5.4　計算結果

5.4.1　再現計算

石手川ダムの貯水池運用モデルの再現性を確認するため，各年の給水人口，気象条件等を用いた計算を行った．計算ケースは以下のとおりである．

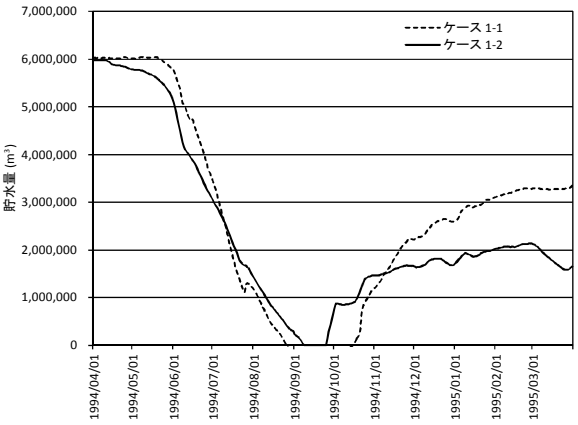
ケース 1-1：　実績データを用いた計算

ケース 1-2：　各年の給水人口，気象条件等を用いた再現計算

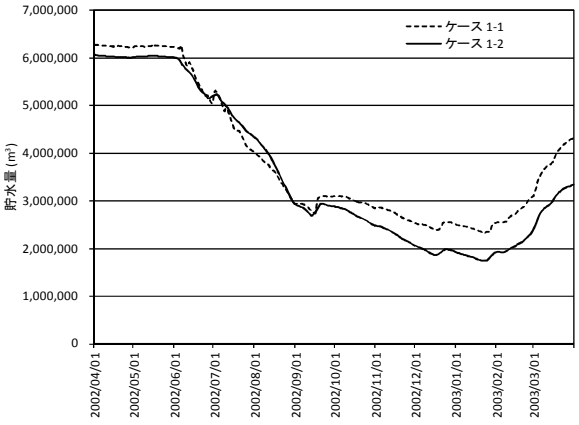
ケース 1-1 は，石手川ダムの貯水量や上水道の給水量，給水制限率等として実績値を用い，それらをもとに，等価変分や期間ごとの給水制限日数等を計算したものである．ケース 1-2 において，家庭用，業務用使用水量の予測式は，1996 年 3 月 31 日までは，**表 2.10**，**表 2.11** の前期のパラメータを用い，その後，1999 年 3 月までは中期のパラメータ，以降は後期のパラメータを用いた．

図 5.5 に 1994 年度と 2002 年度の貯水量と，1 人 1 日当たり家庭用使用水量の計算結果を示す．**表 5.2** に給水制限日数，貯水池枯渇日数，等価変分の計算結果を，1994 年度，2002 年度，全期間に分けて示す．

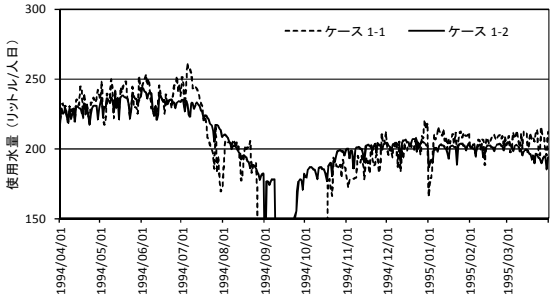
図 5.5 より，ケース 1-2 はケース 1-1 に比べて，1994 年度の 11 月以降の貯水量が若干少な目であるものの，貯水量，家庭用使用水量の変動を全体的に再現できていると考えられる．**表 5.2** より，ケース 1-2 は，ケース 1-1 と比べて給水制限日数が若干多くなるものの，貯水池枯渇日数は，少なく計算される傾向がある．等価変分は，1994 年度については 2 割程度大きく，2002 年度は 2 割程度小さく算出された．全期間では 4 割程度大きく算出された．こうした差異が生じた理由としては，本モデルの減圧給水率，時間給水率，取水制限率は全期間，各月とも一律のルールで計算したが，実際にはその時期の水需要状況等により，その都度設定されるためと考えられる．5.4.3 以降で貯水池運用を変えた場合の比較を行う上で，基準とするルールはより単純な方が望ましいことも含めて，この程度の再現性で許容可能と判断した．



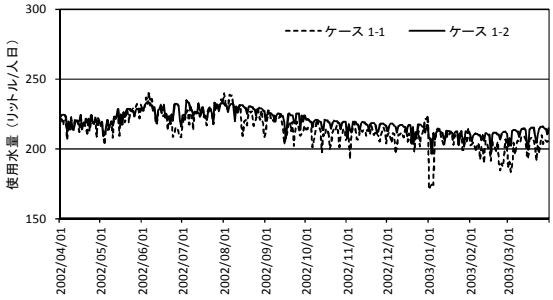
(a) 貯水量（1994 年度）



(b) 貯水量（2002 年度）



(c) 家庭用使用水量（1994 年度）



(d) 家庭用使用水量（2002 年度）

図 5.5　貯水量，家庭用使用水量の再現計算結果

表 5.2　給水制限日数，貯水池枯渇日数，等価変分の再現計算結果

		ケース 1-1	ケース 1-2
1994 年度	給水制限日数（日）	264	313
	給水制限日数率（%）	72.3	85.8
	枯渇日数（日）	51	18
	枯渇日数率（%）	14.0	4.9
	1 人当たり等価変分（円/人）	12,416	14,191
	合計等価変分（千円）	5,272,380	6,026,123
2002 年度	給水制限日数（日）	211	287
	給水制限日数率（%）	57.8	78.6
	枯渇日数（日）	0	0
	枯渇日数率（%）	0	0
	1 人当たり等価変分（円/人）	9,335	7,580
	合計等価変分（千円）	4,138,206	3,360,214
全期間	給水制限日数（日）	538	2,397
	給水制限日数率（%）	8.9	39.5
	枯渇日数（日）	51	18
	枯渇日数率（%）	0.8	0.3
	1 人当たり等価変分（円/人）	24,130	34,927
	合計等価変分（千円）	10,451,380	15,020,110

5.4.2　水使用形態，給水人口等の影響

1990 年代から 2000 年代にかけて生じた，水使用形態，給水人口，業務用給水件数の変化による家庭の渇水被害，石手川ダム貯水池運用への影響を把握するため，水使用形態，給水人口等が，1994 年度から 2007 年度に変化したことによる比較を行う．家庭用，業務用使用水量の推計式のパラメータとして，1994 年度は**第 2 章表 2.10**，**表 2.11** の前期（1994 年渇水まで）を用い，2007 年度は後期（1999 年以降）を用いる．**第 2 章**で示したように，家庭用，業務用ともに，1994 年と比べて 2000 年以降の渇水時には，平常時の需要量は減少したものの，給水制限実施による追加節水量が減少した．1994 年度の給水人口は 424,644 人，2007 年度は 447,700 人であり，2007 年度の方が約 5%多い．給水件数については，1994 年度は 29,752 件，2007 年度は 31,582 件であり，大きな変化はない．計算ケースは以下のとおりである．

ケース 2-1：水使用形態 - 1994 年度，給水人口等 - 1994 年度
ケース 2-2：水使用形態 - 1994 年度，給水人口等 - 2007 年度
ケース 2-3：水使用形態 - 2007 年度，給水人口等 - 1994 年度
ケース 2-4：水使用形態 - 2007 年度，給水人口等 - 2007 年度

図 5.6 に貯水量と 1 人 1 日当たり家庭用使用水量の計算結果を示す．**表 5.3** に給水制限日数，貯水池枯渇日数，等価変分の計算結果を 1994 年度，2002 年度，全期間に分けて示す．

ケース 2-1 とケース 2-2 の比較，ケース 2-3 とケース 2-4 の比較は，給水人口が 5%増加したこと等による変化である．これより，給水制限日数，枯渇日数，等価変分ともに増加する．

ケース 2-1 とケース 2-3 の比較，ケース 2-2 とケース 2-4 の比較は，同一の給水人口等のもとで，水使用形態が 1994 年度から 2007 年度の状態に変化した場合の比較である．1994 年度の流況においては，ケース 2-1 よりもケース 2-3 の枯渇日数が約 31%多く，ケース 2-2 よりもケース 2-4 の方が約 8%多い．水使用形態の変化により枯渇日数が増加している．これは，**図 5.6(a)** にみられるように，ケース 2-3，ケース 2-4 の 1994 年 8 月以降の貯水量の低下速度が，ケース 2-1，ケース 2-2 よりも早いためである．これは，厳しい給水制限が実施された場合の家庭用の追加節水量が減少したことを反映している．一方で，7 月頃まで，ケース 2-3 とケース 2-4 は，ケース 2-1，ケース 2-2 と比べて，貯水量が多く，給水制限強度が緩いこともあり，年間を通じた等価変分は，ケース 2-3，ケース 2-4 の方が，ケース 2-1，ケース 2-2 よりも少ない．また，2007 年の水使用形態における冬期の給水制限時の使用水量は，1994 年度の水使用形態における使用水量より多いため，ケース 2-3，ケース 2-4 は 10 月以降の貯水量の回復が遅い特徴がみられる．

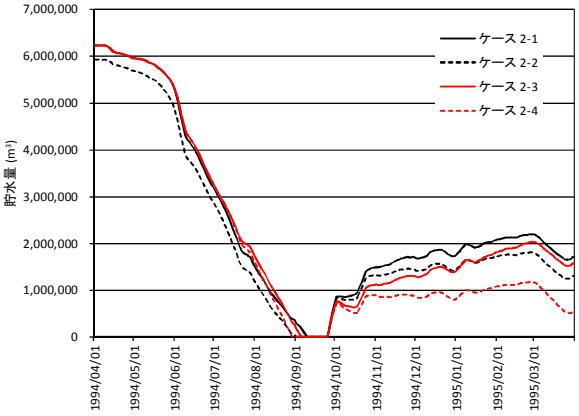
2002 年度の流況においては，いずれのケースも貯水池の枯渇は生じない．**図 5.6(b)** にみられるように，水使用形態が 2007 年度の状態であるケース 2-3，ケース 2-4 は，1994 年度の状態であるケース 2-1，ケース 2-2 と比べて，平常時の水需要量が少ないため，貯水量が減少しにくい．このため給水制限強度が全体的に緩く，等価変分は減少する．ケース 2-1 とケース 2-3 の合計等価変分の差は約 1,803 百万円である．1994 年度の流況下でのケース 2-1 とケース 2-3 の合計等価変分の差は，約 245 百万円であり，2002 年度の流況の方が，水使用形態の違いによる経済的被害の差が大きい．

全期間の計算結果をみると，2007 年度の水使用形態であるケース 2-3，ケース 2-4 は，ケース 2-1，ケース 2-2 に比べて給水制限日数が少ないものの，枯渇日数は多い．

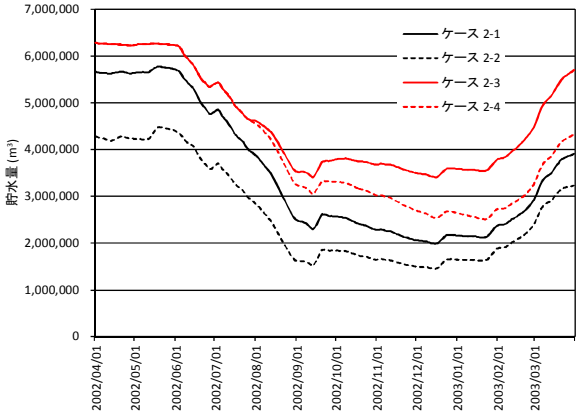
以上の結果をあわせて考えると，1994 年度から 2007 年度までの変化としては，平常時の水需要量が減少し給水制限が実施されにくくなったものの，給水制限による追加節水量が減ったため，貯水池が枯渇しやすくなったことと，給水人口等が増加したことが，複合したものととなっている．ケース 2-1 とケース 2-4 を比較すると，1994 年度のような厳し

い流況下においては，貯水池が枯渇しやすくなったことと，給水人口が増えたことにより，枯渇日数，等価変分が増えている．2002 年度のように，流況がそれほど厳しくない場合は，給水人口が増えたことよりも，平常時の水需要量が減少したことが大きく影響し，給水制限日数，等価変分が減少している．全期間については，以上の特徴を反映し，給水制限日数は約 36%減少，枯渇日数は約 69%増加，等価変分は約 22%減少している．

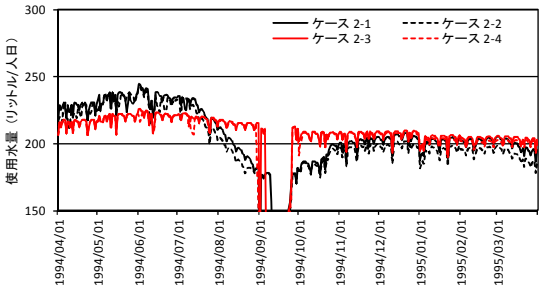
以上より，水使用形態の変化，給水人口の増加により，大規模な渇水が生じた場合の渇水被害が増大する可能性がある．よって，将来の貯水池運用や給水制限ルールを検討する際には，特に大規模な渇水を対象として検討する重要性が増している．



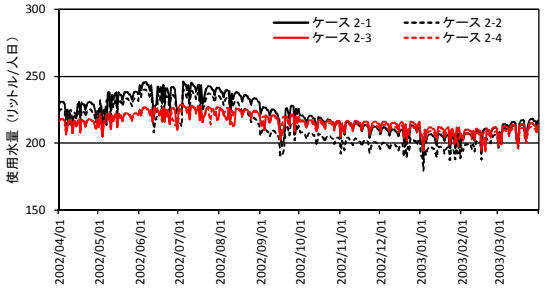
(a) 貯水量（1994 年度）



(b) 貯水量（2002 年度）



(c) 家庭用使用水量（1994 年度）



(d) 家庭用使用水量（2002 年度）

図 5.6　水使用形態，給水人口等が変化した場合の貯水量，家庭用使用水量の比較

表 5.3　水使用形態，給水人口等が変化した場合の計算結果の比較

		ケース 2-1	ケース 2-2	ケース 2-3	ケース 2-4
1994 年度	給水制限日数（日）	307	322	307	307
	給水制限日数率（%）	84.1	88.2	84.1	84.1
	枯渇日数（日）	16	25	21	27
	枯渇日数率（%）	4.4	6.8	5.8	7.4
	1 人当たり等価変分（円/人）	13,877	15,462	13,301	14,785
	合計等価変分（千円）	5,892,785	6,922,337	5,648,190	6,619,245
2002 年度	給水制限日数（日）	297	365	276	284
	給水制限日数率（%）	81.4	100.0	75.6	77.8
	枯渇日数（日）	0	0	0	0
	枯渇日数率（%）	0	0	0	0
	1 人当たり等価変分（円/人）	7,903	12,103	3,658	5,630
	合計等価変分（千円）	3,355,962	5,418,513	1,553,348	2,520,551
全期間	給水制限日数（日）	3,132	4,642	1,758	2,008
	給水制限日数率（%）	51.6	76.5	29.0	33.1
	枯渇日数（日）	16	25	21	27
	枯渇日数率（%）	0.3	0.4	0.3	0.4
	1 人当たり等価変分（円/人）	40,284	73,045	24,351	29,993
	合計等価変分（千円）	17,106,361	32,702,247	10,340,506	13,427,866

5.4.3　給水制限強度の影響

2007 年度の水使用形態，給水人口のもとで，給水制限強度を変化させた場合の比較を行う．本検討では，貯水量がある水準まで低下した後に給水制限が開始され，貯水量の低下に応じて強化されていくと仮定しているが，貯水量の低下に対する給水制限強度の強化割合を，実績から想定される割合を標準として，0.5 倍，1.0 倍（標準），2.0 倍と変化させる．この割合が大きいほど，給水制限強度が厳しく設定されることになる．計算ケースは以下のとおりである．なお，ケース 3-2 は，前項のケース 2-4 と同じである．

ケース 3-1：貯水量低下に対する給水制限強度の強化割合　0.5 倍（緩い）

ケース 3-2：貯水量低下に対する給水制限強度の強化割合　1.0 倍（標準）

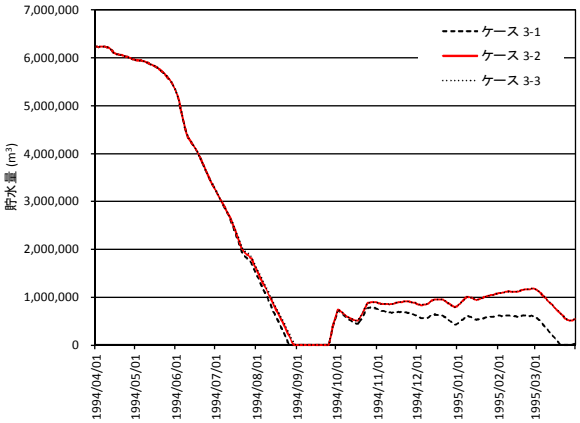
ケース 3-3：貯水量低下に対する給水制限強度の強化割合　2.0 倍（厳しい）

図 5.7 に貯水量と 1 人 1 日当たり家庭用使用水量の計算結果を示す．**表 5.4** に給水制限日数，貯水池枯渇日数，等価変分の計算結果を 1994 年度，2002 年度，全期間に分けて示す．

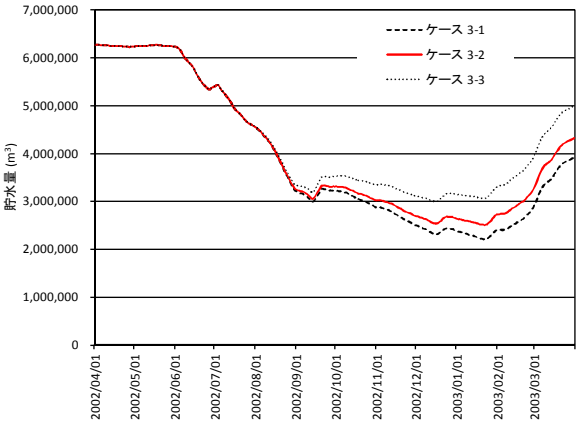
1994 年度の流況の場合，給水制限日数は各ケースとも差がない．貯水池枯渇日数は給水制限強度が厳しいケース 3-3 は，ケース 3-2 とほぼ同じであるが，給水制限強度が緩いケース 3-1 は枯渇日数が約 4 割増えた．しかし，等価変分は給水制限強度が緩いほど少なく，ケース 3-1 はケース 3-2 の約 56%である．

2002 年度の流況では，どのケースも枯渇は生じず，給水制限日数は各ケースとも同じである．等価変分は給水制限強度が緩いほど少なく，ケース 3-1 はケース 3-2 の約 50%である．

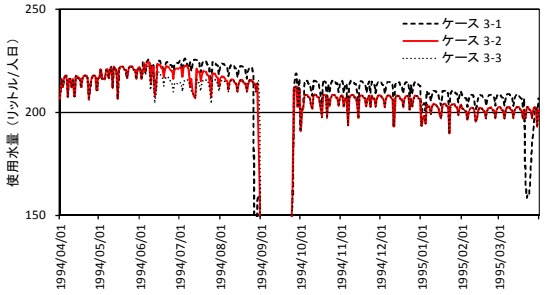
全期間でみると，給水制限強度が緩いほど，給水制限日数や枯渇日数は増加するものの等価変分は減少する．ケース 3-1 とケース 3-2 を比べると，ケース 3-1 の給水制限日数はケース 3-2 とほぼ同程度であるが，枯渇日数は 44%多く，等価変分は 46%少ない．よって，貯水池の枯渇頻度の増加を考慮せず，家庭の経済的被害のみを考慮するならば，給水制限強度は緩いほど良い．しかし，実際には，このような運用を行うためには，貯水池が枯渇した場合でも家庭の水使用を優先するために，他用途における使用の抑制や用途間の転用のための行政コストの発生が予想される．本検討では給水制限強度を変えた場合の他用途への影響は，貯水池枯渇頻度の変化をもとに評価しているが，枯渇日数の増加により生じ



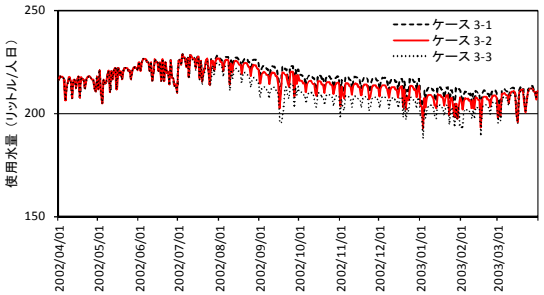
(a) 貯水量（1994 年度）



(b) 貯水量（2002 年度）



(c) 家庭用使用水量（1994 年度）



(d) 家庭用使用水量（2002 年度）

図 5.7　給水制限強度が変化した場合の貯水量，家庭用使用水量の比較

表 5.4　給水制限強度が変化した場合の計算結果の比較

		ケース 3-1	ケース 3-2	ケース 3-3
1994 年度	給水制限日数（日）	307	307	307
	給水制限日数率（%）	84.1	84.1	84.1
	枯渇日数（日）	39	27	26
	枯渇日数率（%）	10.7	7.4	7.1
	1 人当たり等価変分（円/人）	8,342	14,785	15,963
	合計等価変分（千円）	3,734,713	6,619,245	7,146,635
2002 年度	給水制限日数（日）	284	284	284
	給水制限日数率（%）	77.8	77.8	77.8
	枯渇日数（日）	0	0	0
	枯渇日数率（%）	0	0	0
	1 人当たり等価変分（円/人）	2,798	5,630	10,942
	合計等価変分（千円）	1,252,665	2,520,551	4,898,733
全期間	給水制限日数（日）	2,037	2,008	1,918
	給水制限日数率（%）	33.6	33.1	31.6
	枯渇日数（日）	39	27	26
	枯渇日数率（%）	0.6	0.4	0.4
	1 人当たり等価変分（円/人）	16,220	29,993	45,205
	合計等価変分（千円）	7,261,695	13,427,866	20,238,277

る家庭用以外の被害と，家庭における経済的被害を含めた包括的な評価（細井ら，2002; Martin-Ortega et al., 2012）も必要である．こうした評価を行う際には，**第 3 章 3.3.3** で検討したように，渇水による経済的被害は，賃金率の設定によって大きく変化する点に留意が必要である．

5.4.4　節水型機器の普及を促進した場合の将来予測

節水型機器の普及促進策の導入を想定し，2025 年度の将来予測を行う．給水人口，業務用給水件数は，2025 年度の推計値を用いる．国立社会保障・人口問題研究所（2008）により予測された松山市の将来推計人口を**図 5.8** に示す．将来推計人口は，2010 年の 515,577 人をピークに，2025 年には 489,854 人と，2010 年に対して約 5%減少すると推計されている．2035 年には 456,509 人と，2010 年に対して約 11.5%減ると推計されている．2012 年の旧松山市の人口比率（約 94%）と，人口に対する給水人口の比率 99.7%が，将来においても変化しないと仮定し，2025 年度の松山市の給水人口を約 459,000 人と推計した．業務用給水件数は，近年，横ばいにあるため，2025 年度の業務用給水件数は，2007 年度の業務用給水件数と同じと仮定した．

2025 年度の家庭用，業務用の 1 人 1 日当たり使用水量は，回帰モデルにおける，後期(1999 年以降) のパラメータを用いて推計した．これは，将来においても回帰モデルの構造は大きく変化しないと仮定したものであるが，この点については不確実性が大きい．

回帰モデルでは，トイレ 1 回あたり使用水量を各年の節水型機器の普及状況等の代表としている．2025 年度のトイレ 1 回当たり使用水量については，**第 4 章**の買い替えサイクルを考慮して予測する方法より推計した．

また，節水型機器普及促進策の実施を想定し，節水型機機器の買い替えサイクルが半分になった場合についても計算を行った．節水型機器の普及促進により，家庭の水使用形態が全体的に変化し，その結果としてトイレの買い替えサイクルが半分まで短縮されたという想定である．2025 年度のトイレ 1 回あたり使用水量は，節水型機器普及促進策を講じない場合は 4.1 リットル，買い替えサイクルが半分になる場合は 3.0 リットルと予測した．さらに，買い替えサイクルが半分になったうえ，給水制限強度が標準の 0.5 倍まで緩和された場合と，2 倍まで強化された場合を考えた．

計算ケースは以下のとおりである．比較として 2007 年度の水使用形態の計算結果についても示す．ケース 4-1 は，前々項のケース 2-4，前項のケース 3-2 と同じである．

ケース 4-1　2007 年度の水使用形態

ケース 4-2　2025 年度の水使用形態

ケース 4-3　2025 年度の水使用形態，買い替えサイクルが半分になる場合

ケース 4-4　2025 年度の水使用形態，買い替えサイクルが半分になり，
貯水量低下に対する給水制限強度の強化割合　0.5 倍（緩い）

ケース 4-5　2025 年度の水使用形態，買い替えサイクルが半分になり，
貯水量低下に対する給水制限強度の強化割合　2.0 倍（厳しい）

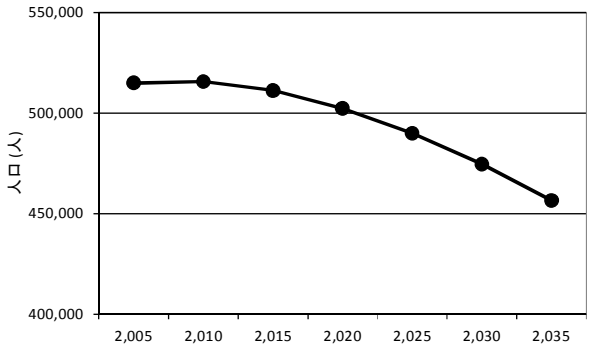


図 5.8　松山市の将来推計人口
（国立社会保障・人口問題研究所，2008 より作成）

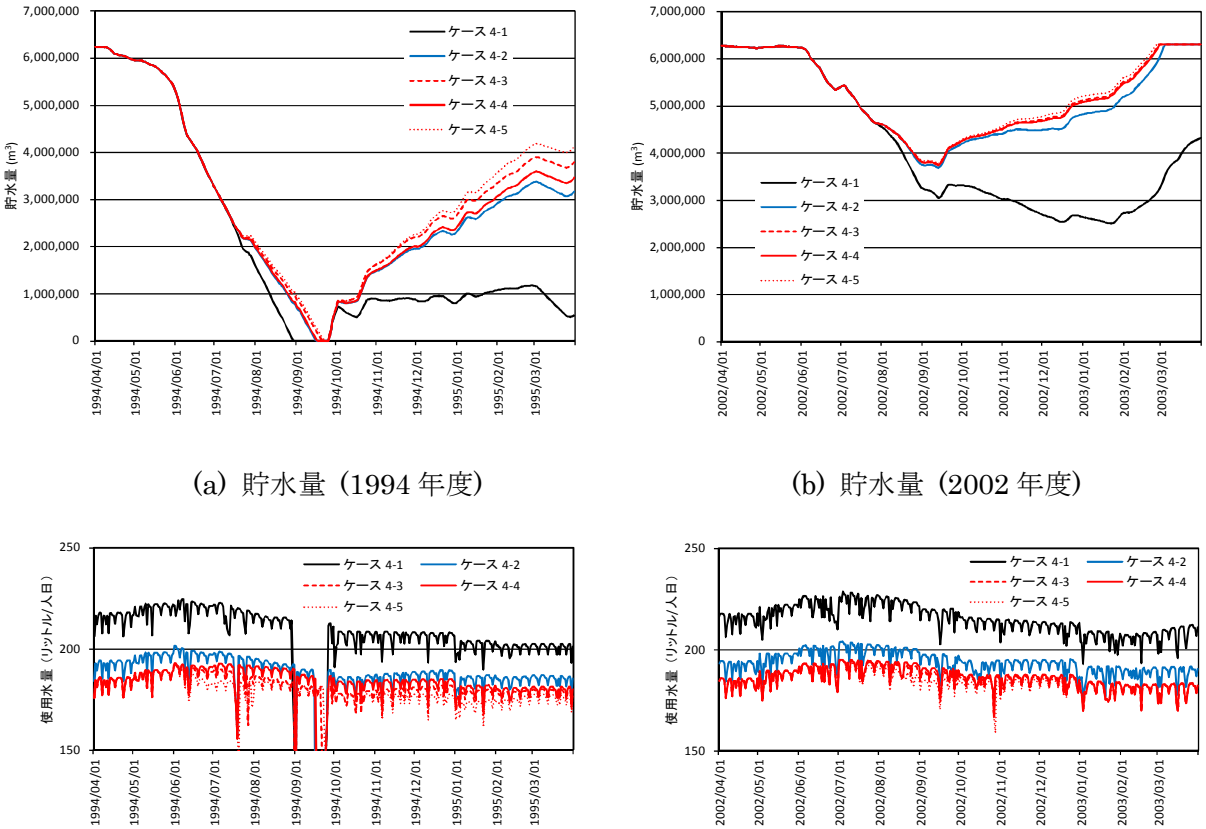
図 5.9 に貯水量と 1 人 1 日当たり家庭用使用水量の計算結果を示す．**表 5.5** に給水制限日数，貯水池枯渇日数，等価変分の計算結果を 1994 年度，2002 年度，全期間に分けて示す．

まず，ケース 4-1 とケース 4-2 を全期間で比較すると，給水人口の減少と 1 人 1 日あたり使用水量の減少により，ケース 4-2 はケース 4-1 に対して，給水制限日数は 82%，枯渇日数は 37%，等価変分は 67%まで減少する．

ケース 4-2 とケース 4-3 を比較すると，節水型機器の普及に伴う水需要の抑制により，全期間のケース 4-3 の枯渇日数は，ケース 4-2 に対して 50%，等価変分は 93%まで減少する．

ケース 4-4 は水需要の抑制とあわせて，給水制限強度が緩和されるため，ケース 4-3 と比べて全期間の貯水池枯渇日数は増えるものの，施策未実施の状態であるケース 4-2 よりも枯渇日数が少ない．さらに，等価変分はケース 4-2 の約 47%と大幅に少ない．

ケース 4-5 は，給水制限強度が厳しく設定されるため，枯渇日数はケース 4-3 より減少するものの，等価変分が増え，1994 年の流況や全期間においては，ケース 4-1 よりも増えている．



(a) 貯水量（1994 年度）　(b) 貯水量（2002 年度）

(c) 家庭用使用水量（1994 年度）　(d) 家庭用使用水量（2002 年度）

図 5.9　節水型機器の普及を促進した場合等の貯水量，家庭用使用水量の比較

表 5.5　節水型機器の普及を促進した場合等の計算結果の比較

		ケース 4-1	ケース 4-2	ケース 4-3	ケース 4-4	ケース 4-5
1994 年度	給水制限日数（日）	307	307	307	307	307
	給水制限日数率（%）	84.1	84.1	84.1	84.1	84.1
	枯渇日数（日）	27	10	5	9	3
	枯渇日数率（%）	7.4	2.7	1.4	2.5	0.8
	1 人当たり等価変分（円/人）	14,785	11,850	10,930	5,474	15,807
	合計等価変分（千円）	6,619,245	5,439,150	5,016,870	2,512,566	7,255,413
2002 年度	給水制限日数（日）	284	240	228	231	223
	給水制限日数率（%）	77.8	65.8	62.5	63.3	61.1
	枯渇日数（日）	0	0	0	0	0
	枯渇日数率（%）	0	0	0	0	0
	1 人当たり等価変分（円/人）	5,630	1,947	1,700	842	3,536
	合計等価変分（千円）	2,520,551	893,673	780,300	386,478	1,623,024
全期間	給水制限日数（日）	2,008	1,654	1,636	1,642	1,628
	給水制限日数率（%）	33.1	27.3	27.0	27.1	26.8
	枯渇日数（日）	27	10	5	9	3
	枯渇日数率（%）	0.4	0.2	0.1	0.1	0
	1 人当たり等価変分（円/人）	29,993	19,738	18,359	9,264	31,024
	合計等価変分（千円）	13,427,866	9,059,742	8,426,781	4,252,176	14,240,016

よって，ケース 4-4 のように，節水型機器普及促進策とあわせて，給水制限強度を緩和することで，給水制限日数，貯水池枯渇日数，等価変分のすべてにおいて，節水型機器普及促進策が未実施の場合より改善することが可能である．特に，等価変分は普及促進策が未実施の場合に比べて，約 47%まで減少している．枯渇日数の増加に伴う他用途等への影響を抑えつつ，家庭の経済的被害を大幅に緩和することができる．ただし，本検討では施策の実施に要する費用を考慮しておらず，費用を含めた評価が必要である．

5.4.5　気候変動の影響予測

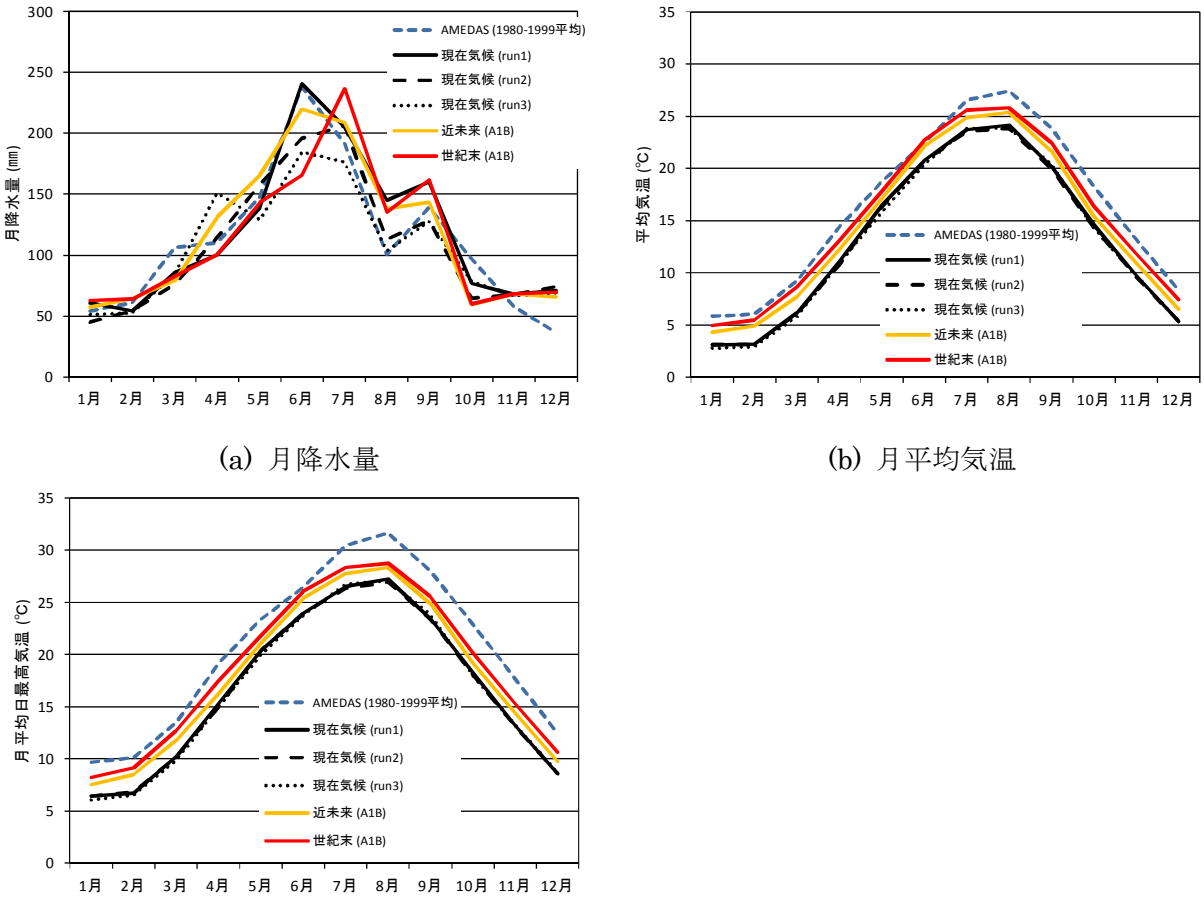
気候変動の影響について，近未来（2046 年～2065 年），世紀末（2080 年～2099 年）の気候条件による将来予測を行う．水使用形態，給水人口，給水件数については，2025 年度の推計値を用いた．気候変動シナリオは IPCC-SRES シナリオのうち，AR4 - A1B シナリオを用いた．

将来気候における石手川ダム流入量については，過年度の実績流入量に対して，気候モデルにおける現在気候の月平均降水量に対する，将来気候の変化率を乗じて算出した．石手川ダム以外の水源からの取水量等は，補正等を行わずそのまま用いた．石手川ダムの洪

水調節容量，利水容量等の貯水池容量配分，あるいは，利水容量のうち，上水道用，かんがい用の容量配分は，将来においても現在と同じと仮定した．これについては，将来の洪水被害の拡大や，かんがい用需要量の変化も踏まえた変更の可能性も含めて検討が必要である．

家庭用，業務用使用水量の予測において，日最高気温の月平均からの偏差については，気候モデルの計算結果から想定される月平均日最高気温の現在気候に対する偏差を一律で加え，気温上昇による使用水量の増加を加味した．

気候モデルの計算結果は，IPCC の Data Distribution Center より入手した．気候モデルは，現在気候（1980 年～1999 年）における月降水量，気温の変化傾向が，松山の特徴を概ね再現していることから，CSIRO-MK3.0 を用いた．このモデルは，オーストラリアの Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation により作成されたものであり，このうち，現在気候（run1，run2，run3）及び A1B シナリオにおける計算結果を用いた．松山の AMeDAS 観測値と，気候モデルによる月降水量，月平均気温，月平均日最高気温を比較した結果を図 5.10 に示す．



(a) 月降水量

(b) 月平均気温

(c) 月平均日最高気温

図 5.10　気候モデルによる降水量，月平均気温，月平均日最高気温の比較

月降水量については，現在気候（1980 年～1999 年，run1~run3）の値は，いずれも 6 月に降水量が多く，冬場に少ない傾向であり，AMeDAS 観測値と同様の変動である．また，9 月の台風期に降水量が増える傾向についても同様である．近未来（2046 年～2065 年），世紀末（2080 年～2099 年）についても，現在気候と大きな違いはない．現在気候における年平均降水量は，run1 が平均 1,406 ㎜，run2 が平均 1,298 ㎜，run3 が平均 1,274 ㎜であり，3 者の平均値は 1,326 ㎜である．近未来は年平均 1,400 ㎜，世紀末は年平均 1,350 ㎜であり，現在気候の 3 ケースの変動の範囲内に含まれる．しかし，世紀末については，4 月から 6 月までの降水量が現在気候に比べて少なく，7 月から 9 月までが多い．すなわち，降雨のピークが少し後ろの月にずれている特徴がある．

月平均気温については，現在気候（1980 年～1999 年，run1~run3）の値は，AMeDAS 観測値と比べて，年平均約 3℃低いが，年間の増減傾向は同等である．近未来は，現在気候と比べて年平均 1.3℃高い．世紀末は，年平均 2.1℃高く，気温が上昇する傾向である．

月平均日最高気温については，現在気候（1980 年～1999 年，run1~run3）は，AMeDAS 観測値と比べて，年平均約 3.8℃低いが，これについても月平均気温と同様，年間の増減傾向は同程度である．近未来は，現在気候と比べて年平均 1.3℃高く，世紀末は，年平均 2.1℃高い．

計算ケースは以下のとおりである．

ケース 5-1　現在気候

ケース 5-2　近未来（2046 年～2065 年）

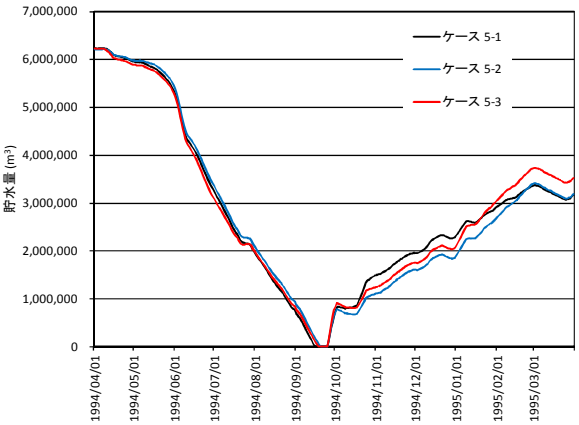
ケース 5-3　世紀末（2080 年～2099 年）

なお，ケース 5-1 は，前項のケース 4-2 と同じである．

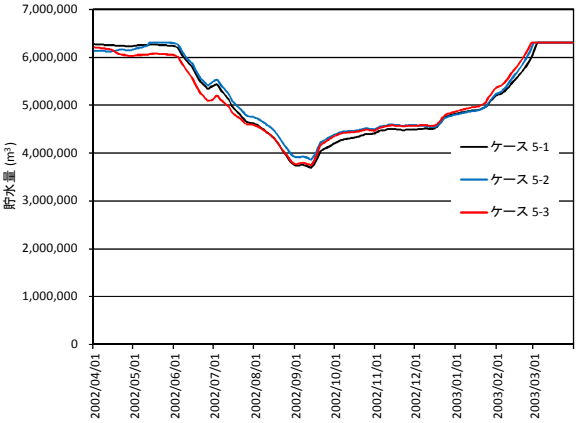
図 5.11 に貯水量と 1 人 1 日当たり家庭用使用水量の計算結果を示す．**表 5.6** に給水制限日数，貯水池枯渇日数，等価変分の計算結果を 1994 年度，2002 年度，全期間に分けて示す．

ケース 5-2 (近未来)，ケース 5-3 (世紀末)と，ケース 5-1 (現在気候) には，大きな違いはない．よって，将来気候においても前項で検討したように，節水型機器の普及促進とあわせて給水制限強度を緩和するという対応により，貯水池枯渇頻度の増加を抑えつつ，渇水被害を軽減するという対応が有効であると考えられる．ただし，本検討では，月単位の気候変動データを用いたことや，石手川ダム以外の水源からの取水量等については，気候変動の影響を考慮していないことなど，精度向上の余地がある．

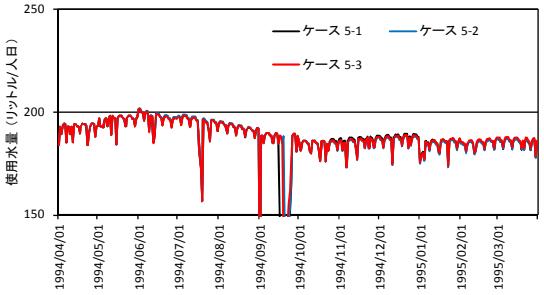
また，本検討は渇水のみを考えたが，渇水被害だけでなく，洪水被害の抑制も含めて，有効な貯水池容量配分や貯水池運用ルールを検討することも重要である．



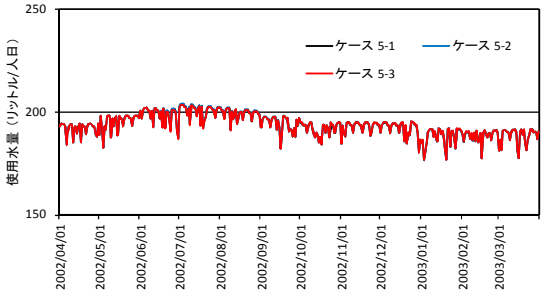
(a) 貯水量（1994 年度）



(b) 貯水量（2002 年度）



(c) 家庭用使用水量（1994 年度）



(d) 家庭用使用水量（2002 年度）

図 5.11　現在気候，将来気候における貯水量，家庭用使用水量の比較

表 5.6　現在気候，将来気候における計算結果の比較

		ケース 5-1	ケース 5-2	ケース 5-3
1994 年度	給水制限日数（日）	307	305	309
	給水制限日数率（%）	84.1	83.6	84.7
	枯渇日数（日）	10	6	8
	枯渇日数率（%）	2.7	1.6	2.2
	1 人当たり等価変分（円/人）	11,850	12,463	12,056
	合計等価変分（千円）	5,439,150	5,720,517	5,533,704
2002 年度	給水制限日数（日）	240	234	238
	給水制限日数率（%）	65.8	64.1	65.2
	枯渇日数（日）	0	0	0
	枯渇日数率（%）	0	0	0
	1 人当たり等価変分（円/人）	1,947	1,759	1,891
	合計等価変分（千円）	893,673	807,381	867,969
全期間	給水制限日数（日）	1,654	1,602	1,591
	給水制限日数率（%）	27.3	26.4	26.2
	枯渇日数（日）	10	6	8
	枯渇日数率（%）	0.2	0.1	0.1
	1 人当たり等価変分（円/人）	19,738	19,636	19,282
	合計等価変分（千円）	9,059,742	9,012,924	8,850,438

5.5　結言

本章では，愛媛県松山市の石手川ダムの貯水池運用を含めて家庭の水使用をモデル化した．これを用いて，家庭の水使用形態の変化が貯水池運用に及ぼす影響や，家庭の渇水被害の変化を推計した．さらに，将来の気候変動の影響を踏まえて，渇水被害を最小化するための貯水池運用の方向性についても検討した．得られた主な結論は，以下のとおりである．

1) 1990 年代に比べて 2000 年代は，給水人口が増加したものの，給水制限未実施時の需要量が減ったため，給水制限頻度が減少した．このため，家庭の被害総額は減少した．一方で，給水制限時の追加節水量が減少したことと，給水人口が増えたことが相まって，貯水池の枯渇頻度が増加した．よって，小規模な渇水時の被害は緩和されるものの，1994 年渇水のような厳しい渇水時の被害が拡大する可能性があると推計された．これより，水資源計画等の検討においては，特に大規模渇水への対応が重要になったと思われる．

2) 給水制限が緩く設定されると，給水制限頻度や枯渇頻度は多くなるものの，家庭の被害総額は少なくなると推計された．貯水池が枯渇すると，家庭用水を優先的に確保するために，家庭用水以外の水使用が抑制されるなど，多大な行政コストが発生する可能性がある．よって，他用途等の被害と，家庭の被害を含めて，包括的な評価を行うことが重要である．

3) 節水型機器の普及に伴う水需要の減少と，給水人口の減少により，約 10 年後の被害総額は，現在よりも減少すると考えられる．さらに，節水型機器普及促進策等を講じることで，貯水池枯渇頻度，渇水被害を抑制することが可能である．そこで，節水型機器普及促進策が未実施だった場合に想定される，貯水池枯渇頻度を上回らない範囲で，渇水時の給水制限強度を緩く設定する運用を行うことで，他用途等への影響を抑えつつ，家庭の被害総額を低減できると考えられる．ただし，本検討では，施策の実施に要する費用を考慮していないことに留意が必要である．

4) 近未来（2046 年～2065 年），世紀末（2080 年～2099 年）の降雨，気温の変化を踏まえて，貯水池運用，渇水被害を推計したところ，気候変動による変化は明確に確認できなかった．ただし，本検討は月単位の気候モデルデータを用いたこと等，計算精度の向上の余地がある．また，将来の洪水規模等の拡大や，かんがい用需要量の変化等の可能性も踏まえて，貯水池容量をより有効に活用するための検討が必要である．

参考文献

気象庁（2013）: 地球温暖化予測情報　第 8 巻, IPCC 温室効果ガス排出シナリオ A1B を用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測.

小槻峻司・田中賢治・小尻利治（2013）: 気候変動が日本の水資源に与える影響推計（Ⅰ）-日本全域水資源モデルの開発 - , 水文・水資源学会誌, Vol.26, No.3, pp.132-142.

小槻峻司・田中賢治・小尻利治（2013）: 気候変動が日本の水資源に与える影響推計（Ⅱ）-水需給・米生産変化と適応策 - , 水文・水資源学会誌, Vol.26, No.3, pp.143-152.

国立社会保障・人口問題研究所（2008）: 日本の市区町村別将来推計人口（平成 20 年 12 月推計）－平成 17 年(2005)～47 年(2035)－.

多々納裕一・岡田憲夫・河合一（1991): 渇水の継続期間を明示的に組み込んだ貯水池運用計画モデル，土木計画学研究・論文集, No.9, pp.173-180.

立川康人・滝野晶平・藤岡優子・萬和明・キムスンミン・椎葉充晴（2011); 気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測，土木学会論文集 B1（水工学）, Vol.67, No.1, pp.1-15.

細井由彦・小池淳司・増田貴則・飯田奈穂（2002): 水道事業における費用効果分析に関する考察，環境システム研究論文集, Vol.30, pp.379-390.

文部科学省・気象庁・環境省（2013): 気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート『日本の気候変動とその影響』2012 年度版.

Booker, J.F., A. M. Michelsen and F. A. Ward (2005): Economic impact of alternative policy responses to prolonged and severe drought in the Rio Grande Basin, Water resources research, Vol.41, W02026.

Kenney, D. S., R. A. Klein and M. P. Clark (2004): Use and effectiveness of municipal water restrictions during drought in Colorado, Journal of the American water resources association, Vol.40, No.1, pp.77-87.

Martin-Ortega, J., M. González-Eguino and A. Markandya (2012): The costs of drought: the 2007/2008 case of Barcelona, Water policy, Vol.14, pp.539-560.

第６章　結論

家庭における水の再利用や節水型機器の普及といった，水使用形態の変化を踏まえて，渇水被害を最小化するための貯水池運用の方向性について検討した．渇水時には，貯水池等の水は，家庭の水使用に対して優先的に供給されることが多いため，家庭の水使用形態の変化が，貯水池運用に大きく影響する．水使用形態の変化により，平常時の家庭の需要量が減少すると，貯水池からの補給量は少なくて済む．その結果，貯水池の貯水量は減りにくくなり，取水制限，給水制限の頻度が減少する．一方で，節水型機器の普及により，洗濯やトイレ等の 1 回あたり使用水量が減少すると，渇水時にこれらの使用回数が抑制されたとしても，得られる追加節水量は縮小する．また，普段から水の再利用が実施されると，渇水時に水の再利用を追加的に実施する余地が縮小する．そのため，給水制限が実施されても，家庭の使用水量を大きく抑制することができず，貯水池の枯渇頻度が増加する可能性がある．

一方で，近年注目を集めている節水型機器の普及促進策等の水需要抑制策により，給水制限未実施時の家庭の需要量が抑制されると，給水制限頻度や貯水池枯渇頻度が低減する可能性がある．こうした施策とあわせて，渇水時の給水制限強度の設定を変えることで，家庭の経済的被害を抑制できる可能性がある．以上について考えるため，主として香川県高松市，愛媛県松山市を例として，以下の 4 点について検討を行った．

1 点目は，自治体等において集計されておらず，推計方法が確立されていない，家庭の日使用水量を，自治体レベルで推計する方法を検討し，給水制限未実施時の需要量や，給水制限時の追加節水量を定量評価することである．通常，自治体レベルの水道の日使用水量は，家庭や業務における使用を含む，給水量として集計されている．降雨状況等に応じて，数日単位で強度が細かく調整される給水制限の影響を解析するには，日程度の細かい間隔で，給水制限時の家庭の使用水量を解析することが求められる．また，給水量に占める家庭用水の比率は経年的に変化しており，厳しい給水制限が実施された場合は，一時的に比率が変化することから，都市間，年代間の比較を行う際には，給水量を用途別に区分することで，より詳細な解析が可能である．

2 点目は，給水制限時の水の再利用に伴う労力等から，家庭の経済的被害を推計し，実渇水を例に定量評価することである．これにより，家庭の水使用形態の変化の影響を把握する．

3 点目は，近年，社会において注目されている，節水型機器普及促進策の水需要抑制策としての有効性を検討することである．

最後に，4 点目は，貯水池運用も含めて家庭の水使用をモデル化し，給水制限頻度や，給水制限時の家庭の経済的被害，気候変動による気象特性の変化も考慮して，渇水被害を最小化するための貯水池運用の方向性を検討することである．

各章の主な内容は，以下のとおりである．

第 1 章では，本研究の背景，目的を述べた．

第 2 章では，香川県高松市，愛媛県松山市を例に，平常時および給水制限時の家庭用，業務用の日使用水量を定量評価し，1994 年と 2000 年以降の渇水時の比較を行った．家庭用，業務用の用途別日使用水量を推計するため，上水道の日給水量に対して，月単位で用途別に集計されている調定水量より推計した用途比率を乗じる方法を提案した．この推計結果に対して，気象要因，週変動，月変動，年変動，給水制限強度を考慮した回帰モデルを適用し，1994 年と 2000 年以降の渇水の比較を行った．

高松市の 2000 年以降の家庭用水の需要量を，1994 年と比べると，夏場は大きな違いがないものの，冬場は 1 人 1 日当たり 9 リットル以上増加した．松山市の需要量は，年間を通じて 1 人 1 日当たり約 8 リットル以上減少した．両都市とも，需要量は降雨や気温に影響されにくくなり，夏場と冬場の変動が縮小した．減圧給水による追加節水量は，高松市では変化が見られなかったが，松山市は変化率が 53%まで小さくなり，減圧給水を強化することによる追加節水量が減少した．このため， 2000 年以降の冬場の給水制限時の使用水量は，1994 年時よりも大きくなる可能性がある．よって，給水制限時の貯水池運用を考える上で，月変動を考慮することも重要である．両都市の相違は，各都市の気象特性や世帯構成，渇水対策として講じられている施策の差異等を反映したものと考えられる．一方で，両都市ともに，厳しい給水制限が課された場合の使用水量は，近年の方が大きくなる可能性があり，渇水時に水源を温存するための，給水制限の効果が低減していることを，定量的に明らかにした．

2000 年以降の高松市，松山市の業務用需要量は，1994 年に比べて大きく減少した．家庭用と同様，需要量は降雨や気温により影響されにくくなった．減圧給水による追加節水量は，高松市で 43%，松山市で 25%まで小さくなり，家庭用と比べてさらに，減圧給水を強化しても使用水量は減少しにくくなった．そのため，50%の給水制限が実施された場合の使用水量は，年代間で大きな差がない．

第 3 章では，高松市，松山市の家庭の水使用行動をモデル化し，給水制限時の水の再利用に伴う労力等から，経済的被害を定量評価し，年代間の比較を行った．

1994 年渇水時と 2000 年以降の渇水時を比べると，同程度の給水制限が実施された場合

の経済的被害に大きな差はないものの，2000 年以降の渇水時の追加節水量は小さく，渇水の長期化に備えて，水源の貯水量を温存する効果が低減した．ただし，この結果には，水使用形態のほか，1994 年渇水時には減圧給水に加えて時間給水が実施され，近年の渇水では減圧給水のみが実施されたという，給水制限方式の違いも影響している可能性がある．

近年において，仮に 1994 年渇水と同規模の厳しい渇水が発生し，同程度の厳しい給水制限が課された場合，家庭の経済的被害は 1994 年渇水時と同程度であるが，追加節水量が小さく，水源に温存される貯水量は 1994 年渇水時と比べて減少すると推計された．水源の温存量を確保するために，より厳しい給水制限が課された場合，水源の温存量は増えるものの，より大きな経済的被害が生じると推計された．このため，渇水時の給水制限強度の設定や渇水対策メニューの選定においては，家庭における被害と水源の温存量を考慮して慎重に行う必要性が増してきている．

第 4 章では，節水型機器の普及促進策を講じた場合の水使用行動の変化，節水型機器普及率の変化より，水需要抑制のための節水型機器普及促進策の有効性を検討した．

松山市の節水型機器購入補助制度を例に，洗濯における風呂水再利用率が変化したと想定し，水需要抑制効果を推計した結果，1998 年度から 2006 年度までの 8 年間の家庭用水の需要量の減少量のうち，約 3 割は 1997 年より導入された補助制度の効果であると推計された．補助制度による減少量は，1998 年度の使用水量の約 1.5%に相当する．ただし，風呂水再利用率がすでに上昇したため，今後のさらなる再利用率の上昇は困難になる可能性がある．

また，高松市において節水型機器の購入補助制度が導入された場合を想定し，機器の買い替えサイクルの短縮，使用水量が少ない機種への買い替えによる，トイレ使用水量の将来予測を行った．こうした施策が導入されなかった場合でも，2008 年度に比べて 2028 年度のトイレの使用水量は半減すると予測された．ただし，買い替えサイクルが通常の 20 年から 10 年まで短縮されると，施策未実施の場合と比べて使用水量はさらに約 17%減少し，使用水量が少ない機種への買い替えが促進されると，約 3%減少すると予測された．これより，節水型機器の普及促進策が，水需要の抑制に有効であると考えられる．一方で，買い替えサイクルの短縮や，使用水量が少ない機種への買い替えを促進する方策についても検討が必要である．

第 5 章では，松山市の石手川ダムの貯水池運用も含めて家庭の水使用をモデル化し，家庭の水使用形態の変化が貯水池運用に及ぼす影響や，家庭の渇水被害の変化を推計した．さらに，将来の気候変動の影響も踏まえて，渇水被害を最小化するための方向性を検討した．

1990 年代から 2000 年代にかけて，家庭用水や業務用水の水需要が減り，平常時の貯水量が減少しにくくなったため，給水制限頻度は減少した．この結果，渇水時の被害総額は減少した．一方で，給水制限時の追加節水量が少なくなり，給水人口が増えたことから，貯水池枯渇頻度が増加した．よって，近年においては，1994 年渇水のような厳しい渇水へ

の対応の重要性が，増してきていると考えられる．

また，給水制限強度の設定が緩いほど，貯水池枯渇頻度は多くなるものの，家庭の被害総額は少なくなると予測された．しかし，貯水池が枯渇すると，家庭用水を優先的に確保するため，家庭用水以外の水使用が制限されるなど，多大な行政コストが発生する懸念がある．よって，こうした点を含めた包括的な評価も必要である．

約10年後においては,節水型機器の普及に伴う水需要量の減少と給水人口の減少により，渇水時の家庭の被害総額は現在よりも少なくなると予測された．さらに，節水型機器の普及促進等の水需要抑制策を導入することで，施策未実施の場合と比べて，貯水池枯渇頻度を低減できると予測された．そこで，節水型機器普及促進策が未実施であった場合に想定される貯水池枯渇頻度を上回らない範囲で，渇水時の給水制限強度を緩く設定するような運用を行うことで，他用途等への影響を抑えつつ，家庭の被害総額を低減できることを示した．

近未来（2046年～2065年),世紀末（2080年～2099年）の降雨,気温の変化を踏まえて，貯水池運用，渇水被害への影響予測を行った結果，気候変動による顕著な変化は確認できなかった．ただし，本検討は月単位の気候モデルデータを用いたこと等，計算精度向上の余地が大きい．

以上のとおり，本研究は，実データを用いて家庭用日使用水量の推計を行い，給水制限時の貯水池運用の詳細な解析を行った．また，これまで実施例の少ない，給水制限時の家庭の経済的被害の解析を，実渇水を対象に行った．主として，高松市，松山市を対象に検討を行ったが，近年，全国的に少雨が続く傾向がある．節水型機器の普及促進策等の水需要抑制策が効力を発揮するまでには長い時間がかかる．よって，気候変動の影響も考慮して，将来を見据えた渇水対策を，早期に講じていくことが重要である．地域の特性に応じた施策を講じていくうえで，まずは，地域の水使用の特徴を把握することが重要であり，本研究の解析方法が適用できる．さらに，給水制限による経済的被害を定量評価し，貯水池運用の方向性を検討するうえで，本検討の手法が有用であると考えられる．多くの地域における知見を重ねることで，渇水対策の方向性がより明確になっていくものと思われる．

本研究で示したように，水道の給水量を用途別に区分することで，平常時の需要量や給水制限時の追加節水量の特徴を，解析することができるが，本研究では，給水量に占める家庭用使用水量の比率は，月単位で集計された調定水量から推計している．渇水時には，給水制限強度は数日単位できめ細かく調整されるが，本手法では月内の家庭用使用水量の比率の変化を精度よく推計することはできない．これについては残された課題である．

また，他国においては，自治体レベルの水道の給水量データだけでなく，渇水時を含む家庭レベルの水道料金計算書や，家庭における用途別使用水量の実測データを用いて，渇水時の使用水量の変化や渇水被害の解析が行われている．我が国では同様の解析事例は限定される．こうした解析を行うことで，給水制限時の家庭の水使用行動に関する理解が深まり，渇水被害軽減策の検討に有用と考えられる．

本検討では，家庭の渇水被害を経済的評価し，その他の用途等への影響は，貯水池枯渇頻度の変化をもとに推計した．農業用水や工業用水，洪水調節，発電等，多くの用途に利用される貯水池運用を考える上で，各用途の被害についても経済的評価を行うことが有用である．また，渇水対策の有効性を評価する際には，対策に必要とされる費用についても考慮が必要である．さらには，気候変動による影響も踏まえて，より有効な貯水池容量配分や貯水池運用ルールを検討するための，包括的な評価手法を確立することが必要である．

謝辞

本研究を遂行するに当たり，終始，多方面にわたり熱心なご指導とご助言を賜った大阪大学大学院 西田修三教授に深甚なる感謝の意を表します．また，論文の草稿に目を通して頂くとともに，貴重なご指摘を賜りました，大阪大学大学院 青木伸一教授，大阪大学大学院 土井健司教授，大阪大学大学院　荒木進歩准教授に深く感謝の意を表します．

本研究の内容について，数々の有益なご教示を頂いた大阪大学大学院 入江政安准教授，大阪大学大学院 中谷祐介助教に深く謝意を表します．そして，社会システム学講座ゼミ等において，多くのご助言を頂いた大阪大学大学院　飯田克弘准教授，大阪大学大学院　貝戸清之准教授には，深く謝意を表します．

放送大学 鈴木基之客員教授，放送大学 岡田光正教授には，放送大学大学院に在学中より，有益なご意見や暖かい励ましを頂きました．香川大学 石塚正秀准教授には有益なご意見を頂くとともに，博士課程進学に対して後押しを頂きました．ここに感謝します．

本研究にともに取り組んで頂き，データ処理等で多大なご協力を頂いた，三島怜子さん，宇城明輝君に深く感謝いたします．

今回，研究活動の遂行をご理解頂きました職場の皆様には，深く感謝の意を表します．爲沢長雄様，柏木順様，北牧正之様ほか多くの方から，暖かい励ましを頂き，後押しを頂きました．野中樹夫様からは，研究の取り組み方等について多くの有益なご助言を頂くとともに，励ましを頂きました．深く感謝いたします．

社会人学生として研究を遂行できたのも，多くの方々のご支援とご協力によるものであります．ここに深く感謝いたします．

関連論文

津田守正・西田修三・入江政安（2012）: 水道の需要抑制による渇水被害軽減効果の定量解析，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.68，No.4，I_1441-I_1446.

津田守正・西田修三・入江政安（2012）: 渇水被害軽減のための節水型トイレ普及促進による節水効果の推計，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.6，Ⅱ_33-Ⅱ_40.

津田守正・西田修三・入江政安（2013）: 家庭の水使用形態の変化を考慮した渇水被害の定量解析，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69，No.4，I_1663-I_1668.

Tsuda, M., S. Nishida and M. Irie (2013): Quantification of drought damages by water supply restrictions considering the change in household water consumption characteristics, Proceedings of the 5th IWA-ASPIRE Conference & Exhibition, The International Water Association - Asia Pacific Region Grouping.