

島嶼観光地域における渇水リスクとそのマネジメント

琉球大学 神谷大介※

1. はじめに

気候変動による水資源への影響が危惧される中、国土交通省等により1級河川を中心としてこの影響評価等が行われている。本研究の対象地域である沖縄県では現在検討中であり、水需給バランスの評価には至っていない。また、これまでの検討は社会変化による水需要量変化を十分に反映した結果とは言い難い。このために必要な水需要予測に関しても、沖縄県のような観光地域を対象とした研究はほとんど行われていない。島嶼観光地域における観光用水量に関する研究としては、水谷らの研究¹⁾ぐらいであり、これも数カ所のホテルの水使用実態を調査しただけであり、渇水リスクとの関係について述べられていない。島嶼地域における水資源問題や水資源からみた地域の持続可能性について、小林²⁾のオアフ島等を対象とした調査研究、ナミビアを対象とした研究^{3,4)}等があるが、政策的記述に留まっている。即ち、観光地域における渇水リスクに関する定量的研究は行われておらず、このような地域での気候変動による水資源への影響は研究されていない。しかし一般的には、人口規模が同程度であれば観光地域の方が水需要は多く、島嶼地域は水資源に乏しい場合が多い。さらに、島嶼地域は他地域からの水融通を行うことが困難であるため、島嶼観光地域における気候変動による渇水リスク評価の必要性は非常に高いといえる。

以上の認識の下、本研究では沖縄島における水需要の中でも特に増加が予想される生活用水と観光用水に着目し、その実態を明らかにすると共に、需要予測を行う。そして、既往降水特性の場合での渇水リスク評価を行う。さらに、地域気候モデル(RCM20)のA2シナリオ⁵⁾を用いた評価を行うと共に、節水機器の普及および雨水タンクの設置等のリスク軽減に関する計画代替案の効果について評価する。なお、沖縄島は羽地ダムの一部を除き、農業用水と水道用水の水源は異なっていること、農業用水の使用実態に関するデータが入手不可能であったことより、農業用水は考慮しない。このため、ここでの渇水リスクとは水道水の給水制限の可能性とする。

2. 沖縄島の降水特性と水供給システム

まず、1972年の本土復帰以降の名護市の降水量と給水制限実績を図1に示す。1980年代前半までは毎年の

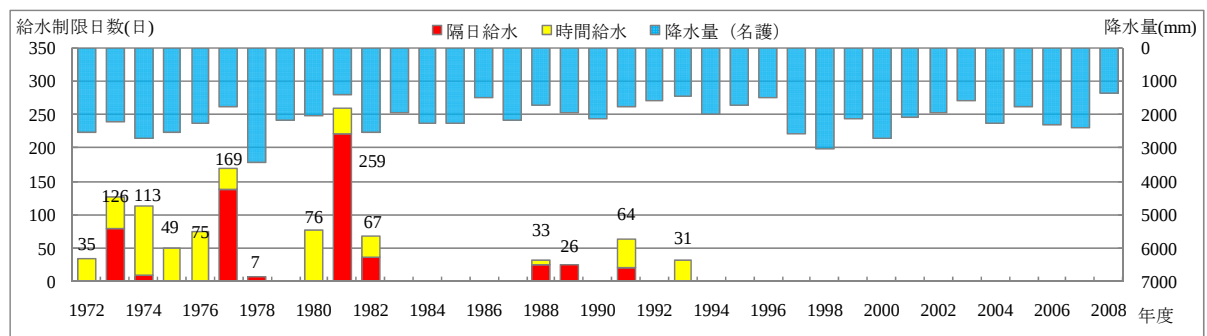


図1 名護市の降水量と給水制限実績 (1972-2008 年度)

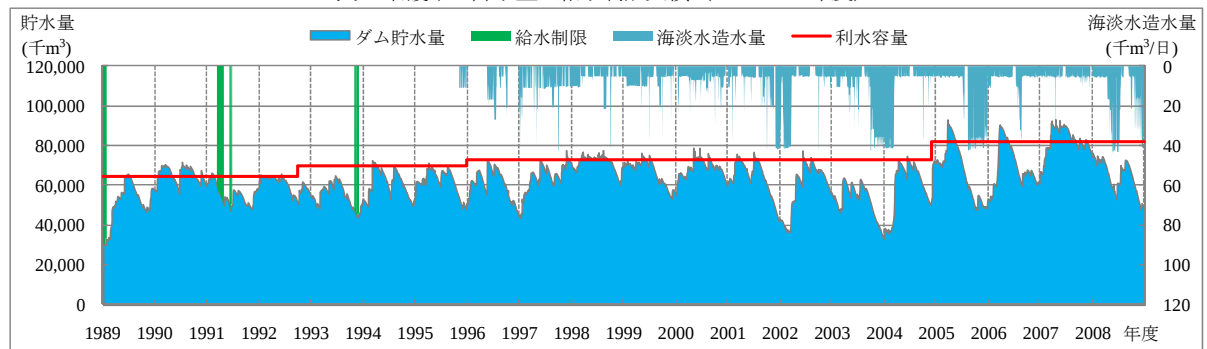


図2 ダム貯水量と海水淡水化施設造水量 (日データの推移)

ように給水制限を実施していたが、1996年倉敷ダム改修、1997年海水淡水化施設完成（能力：40千 m^3 /日）、2005年羽地ダム完成等により、1993年の夜間8時間断水以降、給水制限を実施していない。2002年6月と2004年3月には給水制限の実施を決定していたが、実施日直前の降雨により回避できた。図2より、これらの時期はそれ以前の給水制限実施時期の貯水量よりも下回っていることがわかる。また、全ダムの総貯水量が5千万 m^3 を下回ると海水淡水化施設を能力限界まで使用している。これより、海水淡水化施設の利用により、かろうじて給水制限を回避していると推察できる。

沖縄島の水源の多くは名護市以北の北部地域に位置し、この地域の降水量は1967年から記録されている。1967～2008年度における42年間の内、4番目少雨（1/10年確率相当）の1996年度（年間降水量：1493mm）を渇水基準年度とする。2001～2003年度は全て1996年度よりも年間降水量は多いにもかかわらず給水制限の可能性があった。水源別取水量は、2008年度では約73%がダムからの直接取水である。河川取水量が減少傾向にある。この理由としては、生態系への配慮として河川取水量を抑えていること、平常時の流量低下により取水ができない場合が増えたこと等が考えられる。また、ダムの全利水容量90450千 m^3 の内、灌漑用水は8840千 m^3 と1割未満である。なお、図2の利水容量には灌漑用水は含んでいない。

3. 用途別水需要の実績と予測

沖縄県では水需要用途として、都市用水（生活用・業務営業用・工場用・その他）、工業用水、原水供給がある。都市用水の2007年度の上水道における日平均用途別給水量は、生活用295.3千 m^3 、業務営業用90.3千 m^3 、工場用0.2千 m^3 、その他用33.1千 m^3 である。その他用の殆どは基地用水量である。工業用水は14.1千 m^3 /日であり、廃棄物処理場等への原水供給は0.8千 m^3 /日である。以下に、生活用水量の実績と予測、業務・営業用水の実績と内数である観光用水量の予測、これら以外の実績と予測について述べる。

(1) 生活用水量の実績と予測

図3に上水道における需要用途別給水量の変化を示す。これより、生活用水量の占める割合が非常に高いことがわかる。生活用水量は、2003年度・2004年度に一度減少しているが、これは南部水道企業団給水区域において、これまで生活用水量としていた用途が業務営業用水量に変更になったことが主たる原因である。この影響を考慮すれば微増傾向にあることがわかる。

この水量の予測にあたり、1人1日あたり生活用水原単位を被説明変数とし、これへの因果関係が高いと思われる表1の示す15指標を用いて重回帰分析を行った。これらの変数の多くは沖縄県企業局における水需要予測に用いられている変数であり、2.3.7.の3変数は沖縄県内水道担当者へのヒアリング調査から影響を与えると考えられた変数である。また、7.については沖縄県のデータを入手できなかったため、全国平均値を用いた。食器洗浄機は節水量が多い節水機器の1つであり、販売台数から普及率が判断しやすい。また、節水型洗濯機等では買い換え前後でどの程度節水されるかが明確にしにくいこと等より、食器洗浄機を節水機器普及率の指標として取り上げた。なお、これまでの著者の調査により、2008年における石垣島での普及率が12%であることが分かっており、全国平均の14%とほぼ同等であると確認ができている。

表1の各データは沖縄島内の22の上水道事業体別の値を用い、年度は国勢調査年の2000年と2005年である。重回帰分析の結果、統計的に信頼性のある回帰モデルを作ることができなかった。ヒアリング調査において、独居世帯の増加と少子化が水使用量を減少させている大きな要因だと考えられるという意見を多く聞いた。このことを反映するため、独居世帯とそれ以外を別の変数とする。独居でない世帯については、世帯人数の増加に伴って1人あたり水使用量が減少すると考えられるため、「独居世帯を除く平均世帯人数」を変数として加える。さらに式(1)で示される「少子高齢化指標 x_0 」を少子高齢化を表す合成変数として追加し、重回帰分析を行った。なお、 p_1 、 p_2 、 p_3 はそれぞれ年少人口、生産人口、高齢人口を表しており、 p_2 と p_3 の係数により、 x_0 の値が2を越えると高齢人口の割合が年少人口の割合より大きくなることを意味している。対象地域における x_0 の値は、2000年で1.93、2005年で1.97である。

$$x_0 = (p_1 + 2p_2 + 3p_3) / (p_1 + p_2 + p_3) \quad (1)$$

回帰式の分散分析結果および各変数の符号条件および検定の結果より、表2に示すモデルが作成できた。これより、少子高齢化が進行することにより使用水量は増加し、独居世帯割合および独居世帯を除く平均世帯人数の増加は使用水量を減少させることがわかる。少子高齢化の進行が使用水量の増加になる理由は、

高齢者の方が自炊をすること、自宅にいる時間が長いことが影響していると考えらる。さらに、沖縄県は共働き世帯が多く、子どものいる世帯は中食と呼ばれる総菜を買って家庭で食べるという傾向も使用水量を減らす原因と考えられる。

これで得られた結果を基に、国立社会保障・人口問題研究所の人口予測値を用いて需要予測を行った結果を図4に示す。沖縄島の人口は2007年度で125万人であったが、今後も増加し、2030年度には131万人になると予測されている。同様に、独居世帯割合は27.97から36.43へ増加、少子高齢化指標は1.98から2.12へ増加、独居世帯を除く平均世帯人数は3.46から3.34へ減少すると予測される。なお、水道料金については変化させていない。

(2) 観光用水量の推計と予測

1. 述べたように、これまで観光用水量は殆ど明らかになっていない。1つの指標として簡易水道事業における国庫補助に係る施設整備基準があるが、宿泊能力1人あたり200～300lとなっており、著者のこれまでの研究⁶⁾から、沖縄県の現状とはかけ離れた値であることが明らかになっている。また、観光用水量の実態が統計資料等より明らかでないこと、各宿泊施設の宿泊客数が不明であること、宿泊能力が規模別に集計されていること等のデータ制約があるため、ここでは宿泊能力規模別に宿泊客数1人1泊あたりの使用水量原単位を推計した。具体的には、各施設の年間使用水量について各市町村・沖縄県・宿泊施設へヒアリングを行った。年間宿泊者数が不明であるため、宿泊能力に規模別稼働率⁷⁾をかけることにより宿泊者数を設定した。これらより、宿泊者1人1泊あたり使用水量を規模別に算出した。この結果を表3に示す。なお、表中の大規模とは300人以上宿泊可能、中規模とは100～299人、小規模とは100人未満の施設を意味し、サンプル数とはデータが入手できた施設数（1施設で複数年あり）を意味する。これより、2007年度で観光客数589万人、平均滞在日数3.8日で使用水量が25.1（ $\text{km}^3/\text{日}$ ）となる。この水量は業務営業用水2007年実績90.3（ $\text{km}^3/\text{日}$ ）の内、約28%が宿泊施設で利用されていることを意味する。

沖縄県では沖縄振興開発計画の観光分野計画において、2016年度に入域観光客数1000万人、平均滞在日数4.18日を政策目標値としている。渡口はロジスティックモデルを用いた分析より、2018年から2024年の間には観光客数が1000万人に達すると予測している⁸⁾。本研究ではこの予測は行わず、観光客数が2016年に1000万人に達するように2007年度から線形で増加し、その後は一定であるというシナリオで観光用水量の予測を行う。観光客がどの規模の宿泊施設を選択するかは、2007年度の実績値より、大規模が64%、中規模が21%、小規模が15%とする。この結果、図5に示すように、観光用水量が現状の約1.9倍の48.1（ $\text{km}^3/\text{日}$ ）まで増加することになる。

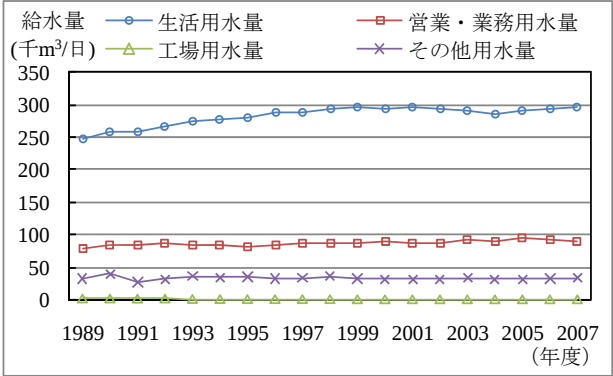


図3 上水道における需用用途別給水量の変化

表1 生活用水需要予測のための変数

1.平均世帯人数(人/世帯)	10.人口密度(人/km ²)	事業所数
2.核家族の割合(%)	11.一人あたり自動車保有台数(台/人)	
3.独居世帯割合(%)	12.1世帯あたり自動車保有台数(台/世帯)	
4.年少人口構成比(%)	13.第1次産業構成比(%)	
5.生産年齢人口構成比(%)	14.第2次産業構成比(%)	
6.老年人口構成比(%)	15.第3次産業構成比(%)	
7.食器洗浄機普及率(%)		
8.水洗化率(%)		
9.水道料金(円/10t)		

表2 生活用水量回帰分析結果

変数	係数	t 値	P 値
独居世帯割合	-1.94	-1.86	0.07
水道料金	-0.03	-2.41	0.02
少子高齢化指標	255.35	4.33	0.00
独居世帯を除く平均世帯人数	-45.97	-1.84	0.07

重相関係数 R² : 0.99 分散比 787.95 (有意確率 0.00)

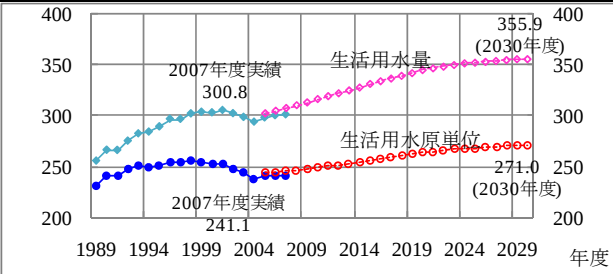


図4 生活用水量需要予測結果

(3) 生活用・観光用以外の水量予測

業務営業用水は1989年度の79.1（千 m^3 /日）から2007年度の90.3（千 m^3 /日）と11.2（千 m^3 /日）増加している。しかし、図5の推計値より、観光用水量は11.7（千 m^3 /日）増加しており、観光以外の業務営業用水は増加していないと判断できる。これより、観光用以外の業務営業用水には、沖縄県の計画値を用いる⁹⁾。なお、この値には現時点で計画されている新規開発分による増加が考慮されている。その他用水量は、1989年度から1992年度を除けばほぼ横ばいで推移している。米軍基地の水量が約85%を占めており、これを予測することは不可能であるため、1993年度から2007年度の平均値である33.0（千 m^3 /日）で一定と仮定する。工場用水はほぼ一定であるため、2007年度実績値の0.2（千 m^3 /日）で一定とする。工業用水については、図6に示すとおり事業所数は増加し続けているが、水量は増加していない。ここで示している工業用水給水量は工業用水道として給水されている水量のみであり、各工場等での回収水は含んでいない。2004年に大きく減少しているが、これは製造業の1社が工業用水を使用せず、自己水を開発したためである。また、工業で使用される水の8割以上が回収水で賄われており、膜処理等の自己水の普及によっても減少が想定される。一方で新たな工業用地の開発や那覇空港のハブ空港化等により工業用水を使用する事業所数の増加も見込まれている。また、冷却水としての利用等により、電力需要によって水量が変化する傾向もある。以上のことより、ここでは予測モデルを作成せず、沖縄県の計画値である1989年度から2007年度の最大値15.7（千 m^3 /日）で一定とする⁹⁾。原水供給を受けている事業所は1989年以降、6事業所であり、事業所数・水量共に変化がないことから、2007年度の実績値の0.8（千 m^3 /日）で一定と仮定する。

4. 渇水リスク評価とリスク回避代替案の効果

(1) シナリオ分析と評価の考え方

地域気候モデル（RCM20シナリオA2）の結果は1981年～2000年の平年値に対する予測であるが、渇水リスクを捕まえるためには、少雨の年を考慮する必要がある。このため、本研究では渇水基準年となる1996年度、給水制限の可能性があった2002年6月および2004年3月に対し、1年前からの降水量を変化させることにより、渇水リスクの評価を行うこととする。具体的には、RCM20シナリオA2に基づいて予測された南西諸島地域の月間降雨強度と1981年～2000年の月別平均降雨強度との変化率を算出する。この結果を前述の3つの期間の日単位の降水実績にかけることにより、降水特性を変化させる。また、各ダムの運用は日単位で各ダムの貯水量を計算し直し、有効貯水容量まで貯水し、これ以上は越流量として河川放流することとする。

2002年と2004年に給水制限を予定していた時の全ダムの総貯水量である33000千 m^3 を給水制限実施基準として捉え、これを下回ると給水制限になるとする。また、これまでの海水淡水化施設の運用ルールより、総貯水量が50000千 m^3 を下回ると海水淡水化施設を能力限界の40千 m^3 /日まで使用すると仮定する。

沖縄島では20河川に取水堰を設けて取水しているが、日平均取水量が1万 m^3 を超えるのは3河川しかなく、非常に小規模な河川から取水している。また、殆どの河川で流量データが無いこと、洪水時には濁水や高潮のために取水停止になること等より、降水特性と河川流量および取水量との関係を得ることができなかった。このため、想定年度の取水量実績値を降水特性変化後も用いる。地下水からの取水について

表3 施設規模別観光用水原単位の推計結果

規模	原単位(L/人泊)	95%信頼区間	サンプル数
大	744	696-792	148
中	551	507-596	109
小	253	235-271	178

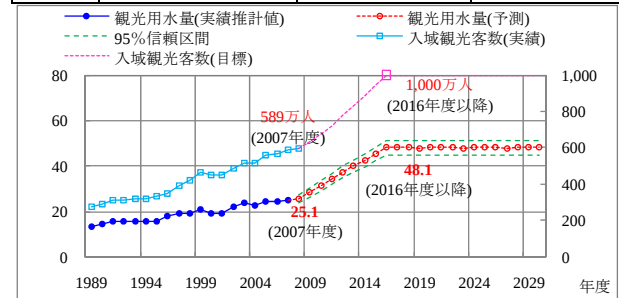


図5 観光用水量の推計値と予測結果

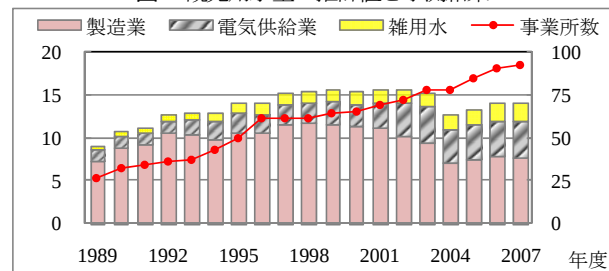


図6 工業分類別工業用水給水量と事業所数の推移

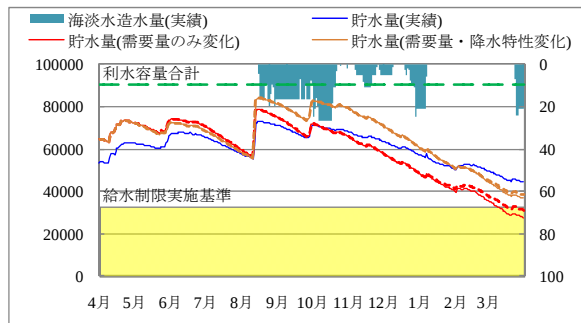


図7 1996年度を想定した分析結果

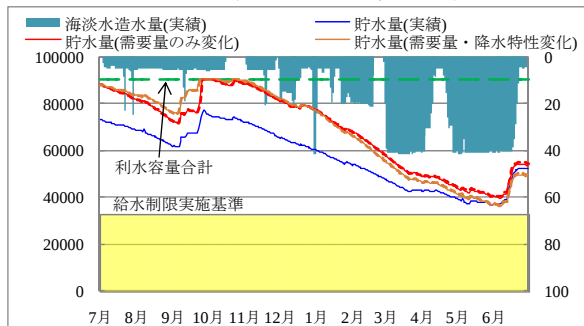


図8 2002年6月を想定した分析結果

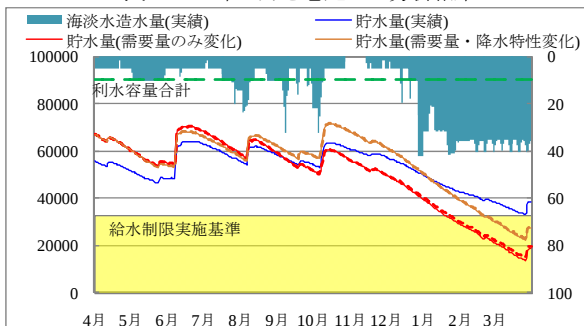


図9 2004年3月を想定した分析結果

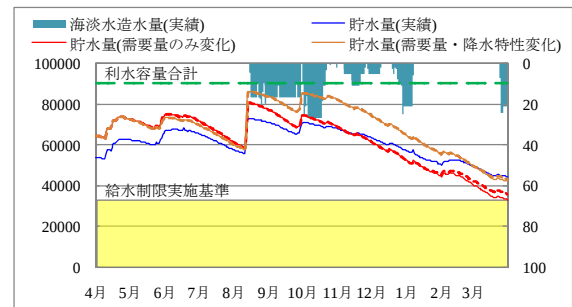


図10 1996年度を想定した分析結果（普及率増加速度1%）

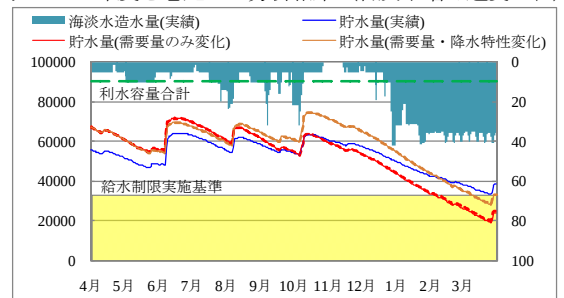


図11 2004年3月を想定した分析結果（普及率増加速度1%）

も、想定年度の取水量実績値を用いる。また、羽地ダムは2004年3月時点で完成していなかったため、分析においては他のダムの貯水率と同じと仮定して初期貯水量を設定する。また、生活用水と観光用水の需要量は2030年度を想定し、需要量は取水量ベースに換算する。この換算は、まず、浄水場や給水等における損失水量を実績値より明らかにし、取水から給水までの有効率を算出する。そして、需要量をこの有効率で除すことにより、

需要量を取水量ベースに換算する。これらを用いて渇水リスク評価を行う。

(2) 渇水リスク評価結果と考察

渇水基準年である1996年度を想定した結果を図7、2002年6月を想定した結果を図8、2004年3月を想定した結果を図9に示す。各図における「貯水量（需要量のみ変化）」は需要量のみを増加させ降水量は変化させない場合の結果であり、「貯水量（需要量・降水特性変化）」はさらに降水特性もRCM20A2シナリオによって変化させた場合の結果である。また各予測値の点線で表した結果は、海水淡水化施設をフル稼働させた場合の結果である。なお、各図の分析開始時点での貯水量が実績値と予測値で異なる理由は2005年に完成した羽地ダムの貯水量分である。これは、他のダムと同じ貯水率（全ダム貯水率）を仮定して貯水量を決定している。1996年度の結果においては、需要量のみを増加させた場合は海水淡水化施設を能力限界まで稼働させても、全ダムの総貯水量が給水制限実施基準を少し下回る結果となった。しかし、降水特性が変化すると、羽地ダムの効果もあり実施基準を上回る。2002年6月想定では、需要量・降水特性を変化させても、2002年当時と同程度の貯水量までしか下がらない事がわかる。また、この結果では降水特性を変化させない方が6月の貯水量が多くなった。これは、10月下旬において貯水率がほぼ100%を維持しており、その後の降水量は現状の方が多いためである。2004年3月想定では、2月に給水制限実施基準を下回る事になる。他の2つの結果と異なる点は、10月下旬の貯水量である。他の分析ではこの時点でほぼ満水であったが、2004年の分析では700万 m^3 程度であり、約200万 m^3 も他の年より低い貯水量となっている。さらに、12月から2月の降水量は減少することが予測されており、需要量の増加もあり、貯水量が大きく減

少しと考えられる。給水制限の可能性があった図7と図9で示した結果に節水機器普及を考慮した結果をそれぞれ図10・11に示す。なお、ここでは節水機器として食器洗い洗浄機の普及を考える。この普及率は1999年で1%、その後2002年から2006年までは年に約2%ずつ増加してきたが、2006年以降は1%の増加になっている¹⁰⁾。このため、年1%の割合で普及率が増加すると想定し、2030年度には普及率が35%になるとして分析を行った。この結果、1996年度想定の結果では、3月末で1996年度と同程度の貯水量を維持することができる。しかし、2004年3月想定の結果では、海水淡水化施設を能力限界まで稼働させたとしても給水制限実施基準を下回る結果となった。

(3) 給水制限回避のための計画代替案とその効果

沖縄島内に小・中・高校は353校あり、このうち104校で雨水タンクを設置している。全ての学校に雨水タンクを設置する事を想定する。校舎の屋根面積等を考慮し、1校あたり100m²の集水面積を仮定する。(2)の結果より、2004年3月を想定した降水特性の場合、雨水利用可能量は年間44.0千m³になる。なお、雨水タンクの容量は十分大きいとし、タンクからの越流はないものとする。つまり、最大限利用することを仮定する。さらに、再生水利用下水道事業による節水効果を考慮する。この事業は2007年に完成しており、計画需要量は1369m³/日⁹⁾である。計画需要量を使用したとして、節水量は499.7千m³である。2004年3月を想定した分析結果において、給水制限を回避するために必要な節水量は4742.8千m³/年である。この量は2004年3月の最も貯水量が少ない時点において、給水制限実施基準を上回るために節水しなければならない量を意味している。つまり、学校への雨水タンク設置と再生水利用だけでは対応できないことがわかる。この量を節水機器普及のみで対応するならば、普及率が68%以上にならなければならない。また、普及率35%で不足分を生活用水の節水で対応するならば、1人1日あたり8.8lの節水で対応できる。図4で示したように、沖縄島では生活用水の占める割合が高いため、住民の節水が最も効果がある。

5. おわりに

本研究では沖縄島を対象として、生活用水と観光用水の需要予測モデルを作成し、2030年を想定した水需要予測を行った。さらに、1/10年確率少雨年である1996年度、近年給水制限の可能性があった2002年6月および2004年3月を想定して渇水リスク評価を行った。2004年3月想定の結果では、節水機器の普及、再生水利用、学校への雨水タンク設置だけでは給水制限を回避できないことが明らかになった。また、12月から2月の降水量が減少する事を考えると、10月下旬で90%以上の貯水率が必要である。ただし、この結果も海水淡水化施設を能力限界まで使用することを前提としている。図9および図11において、降水特性と需要量を変化させた場合、海水淡水化造水量は2004年3月想定の実績値よりそれぞれ約380千m³、約250千m³増加することになる。海水淡水化の電力消費は多く、沖縄県は主として石炭火力発電であることを考慮すれば、エネルギー消費や温室効果ガス発生量という観点からは問題が大きいと考えられる。

参考文献

- 1) 水谷潤太郎・篠龍一郎・茂庭竹生：沖縄県リゾート地域水道の水需要、水道協会雑誌、第63巻6号、pp.44-54、1993
- 2) 小林徹：島嶼国（地域）における観光開発と水問題、長崎国際大学論叢、第5巻、pp.139-147、2005
- 3) Glenn-Marie Lange：An approach to sustainable water management in Southern Africa using natural resource accounts: the experience in Namibia、Ecological Economics26、 pp.299-311、1998
- 4) Klaudia Schachtschneider：Building new WDM regulations for the Namibian tourism sector on factors influencing current water-management practices at the enterprise level、 Physics and chemistry of the earth27、 pp.859-864、2002
- 5) 気象庁：地球温暖化予測情報第6巻、IPCCのSRES A2シナリオを用いた地域気候モデルおよび都市気候モデルによる気候予測、2005
- 6) 神谷大介：沖縄県の島嶼における水需要構造変化と観光の影響に関する分析、地域学研究、39巻2号、pp.267-282、2009
- 7) 沖縄県：観光要覧
- 8) 渡久地明：沖縄観光成長の法則2006、観光と情報、2006
- 9) 沖縄県企画部地域・離島課：沖縄県長期水需給計画調査関係資料
- 10) 省エネルギーセンター：家庭の省エネ大事典、2009