

(8) 地球温暖化が水需要に及ぼす影響に関する考察

A Study on Water Demand Changing Under The Conditions of Global Warming

角哲也*・安達孝実*・清水康生**

Sumi Tetsuya, Adachi Takami, Shimizu Yasuo

ABSTRACT; Effects of the Global Warming on water resources systems have to be studied both to water demand system and water supply system. Up to this time, many studies were performed only for the supply system. But water demand system is also affected directly or indirectly. The change of water consumption alters a design maximum water consumption and a design intake rate. This matter changes not only the water source facility system but also the reliability of water supply. Thus the influences on water demand system by Global Warming are very serious. In this paper, we investigate a relationship between temperature and water consumption. Through a study of Temperature-Demand curve defined in this paper, we prove that their relationship is quadratic. Analysis of the temperature distribution reveals that there are some regional characteristics with regard to average temperature. Finally we propose a model to estimate water demand under several scenarios and evaluate the change rate of water demand from present by the Global Warming.

KEYWORDS; Global Warming / Water demand / Temperature-Demand curve / Quadratic / Temperature distribution / Demand estimation model

1. はじめに

水資源システムを水文循環システムと水供給システム及び水需要システムから構成される¹⁾と考えると、地球温暖化²⁾が水資源システムに与える影響にはシステム相互及びシステム内において様々なものが考えられる^{3) 4) 5)}。水資源への影響を考える場合には、水文循環の変化を人間に係わる需要と供給の両面から考察することが必要である。従来の研究は、河川流況やダム容量、利水安全度への影響といった水供給システムに対する研究が中心であった^{3) 4)}。しかし、温暖化により水需要システムも直接的または間接的に影響を受けることが予想される。例えば、直接的影響としては、気温上昇に伴う飲料等の生理的需要量や水使用行動への影響及びライフスタイルの変化等が考えられ、間接的影響としては、エネルギーの節約要求によって生じる生活環境が需要に与える影響が考えられる。需要量の変化は、計画取水量の変更をもたらし、水供給システムを構成する水道施設やダム等の水源施設の計画に影響を及ぼし、利水安全度にも影響するものである。このように考えた時、温暖化による水需要の量的な変化がどの程度のものであるかを明確にしておくことは重要な課題である。

本稿では、気温と需要量の関係についての基礎的な分析を行い、温暖化した時の需要量の大きさを定量的に推計することを試みたものである。まず、2. では、気温と需要量との関係の定式化を行うために、気温の季節変化と需要量との関係を地域的な差異や用途の種別を考慮して分析し、同定された関係式の各係数について地域的な特性から考察した。3. では、気温の分布型について分析を行い、温暖化後の気温分布について仮定を設けることにより温暖化シナリオを作成し、温暖化が需要量に与える影響について検討を行った。

*: 建設省土木研究所(Public Works Research Institute, Ministry of Construction)

** : (株) 日水コン(Nihon Suido Consultants Co. LTD)

2. 都市用水における水使用量と気温との関連分析

2. 1 気温の季節変動と水使用量

気温と水使用量の関係については幾つかの分析事例がある^{6) 7) 8)}。水使用量の大きさは気温の変化だけでなく、下記に示す特性により変化することが知られている⁷⁾。各要因が水使用量の増加要因として働くか減少要因となるかは地域の特性により異なってくると考えられる。

長期変動：人口増減やライフスタイルの変化に伴う原単位の増減による変動

季節変動：気温等の年間周期変動の影響による変動

週間変動：一週間の生活周期による変動

特殊変動：正月、盆、暮れ等の特殊日の変動

偶然変動：天候、気温、湿度等の日々の変化に伴う変動

(1) 都道府県別の月単位水使用量と平均気温

気温と水使用量との関係の地域的な違いをみるため、北海道から沖縄県まで全国の12の都道府県を選定し、これらについて月単位水使用量と気温との関係を分析する。月別水使用量は昭和40年から平成3年までの27年間の上水道給水量とし、気温は県庁所在都市の月平均気温を分析に用いる。

分析に際し、給水人口の増加による水使用量への影響を除くため月別水使用量を給水人口で割戻し原単位として扱うものとする。また、ライフスタイルの変化等による長期的な需要増加の影響を除くため、連環比率法(link-relatives method)⁹⁾で基準化した月別変動指数(年平均を100とした指数)を求めた。気温については、分析期間が30年程度と温暖化の時間スケールと比較して小さいため、観測値をそのまま月単位で平均化する。以上より気温と需要量の関係を調べるが、気温の増加・減少と需要量の増加・減少の関係を変化の履歴を含めて調べるため、水使用量変動指数を縦軸に気温を横軸にとり図1に示す気温・需要量曲線(Temperature-Demand Curve 以下T-D曲線と称する)を作成した。

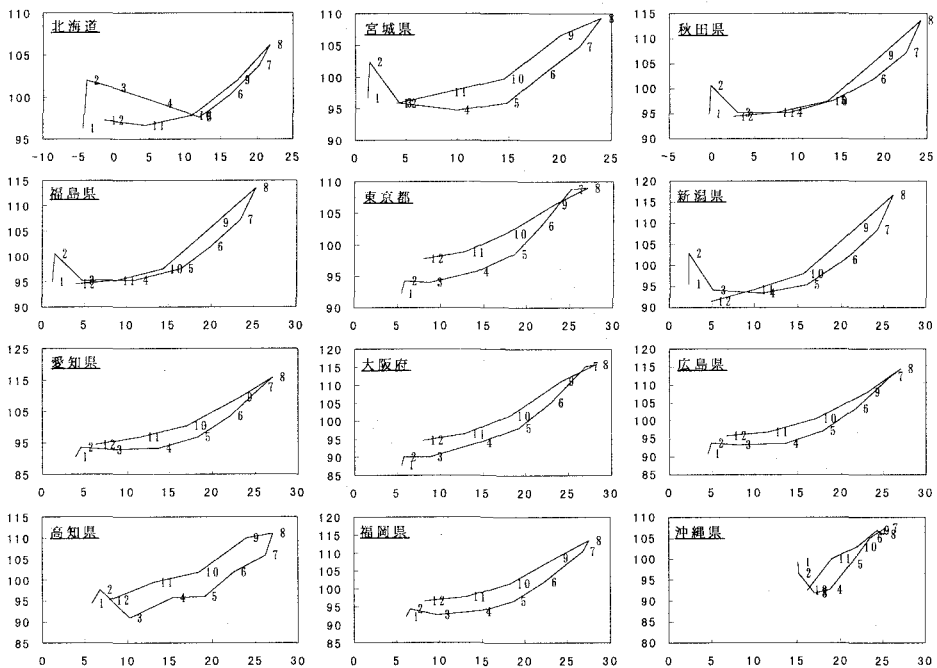


図1 都道府県におけるT-D曲線 (Temperature-Demand Curve)
(縦軸：水使用量変動指数、横軸：平均気温、図中の数値は月)

同図より次のことがわかった。

- ① T-D曲線は、程度の差はあるが気温上昇期と下降期の両方で共に下に凸な形状を呈している。
- ② 同じ気温であっても上昇期（4～8月）と下降期（9～11月）では水使用量の大きさに差があり、上昇期よりも下降期の方が大きい。

これらは、共に水使用者の水使用行動が関係し、行動が気温の変化よりも時間遅れを伴っている（水使用行動に慣性力がある）ためと推察されるが、その実証的分析は今後の課題とし、本稿では、気温と需要量との対応関係、すなわち①の曲線形状について注目した分析を進めるものとする。

（2）都市別の日単位水使用量と平均気温

ここでは日単位水使用量で気温と需要量の関係について分析を行う。分析は図1に示す気温変化の地域特性^{10）11）}を考慮し北海道旭川市、愛知県名古屋市の旭川市及び沖縄県那覇市の3都市を選定した。日単位データであるので需要量に影響を及ぼすことが知られている、天候（晴天と雨天）、曜日（平日と休日）という観点^{7）}から条件を分けてクロスプロットし、気温との対応関係を調べるものとした。この時、水使用量は、年度末の給水人口で割り戻すことにより人口増加による影響を除いている。また、渇水による給水制限時及び事故時のデータは除いた。これらの中から平均気温と水使用量の関係を図2に示す。

この結果、天候および曜日の条件を変えても、水使用量の大きさは変化するものの、気温が高くなると原単位が増加するという傾向が認められた。そして、この対応関係は直線的なものではなく、2次曲線に近いものである。これらの結果から、平均気温と水使用量には2次曲線に対応する関係が存在すると推察される。

（3）月単位用途別水使用量と平均気温

前項の分析に使用した水使用量は上水道水使用量であり、使用用途からみると、家庭用水とその他の用水（業務・営業用水、工場用水、その他）から構成されている。そこで、いずれの用途でも前述のような水使用量と気温との2次的な関係が言えるのかについて調べる。先述の旭川市と名古屋市及び那覇市の3都市について、月単位の水使用量を家庭用水とその他の用水に分けて気温との関係をT-D曲線として描くと図3のようになる。同図より、気温が上昇するに従い水使用量が増加していることは両用途共に明確であり、いずれの用途においても2次曲線で表される傾向を示している。以上より、上水道においては気温と水使用量に2次曲線に対応する関係が存在するものと考えられる。

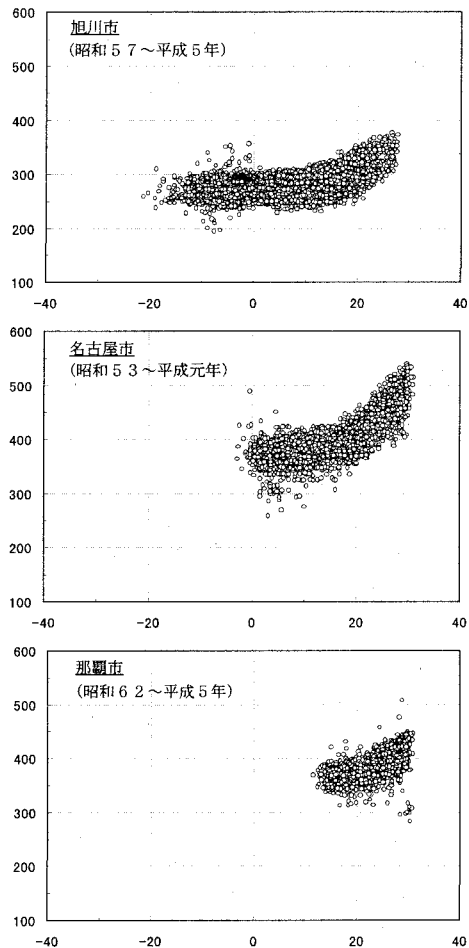


図2 気温と水使用量の関係
（縦軸：一人一日使用水量（ℓ）、横軸：気温℃）

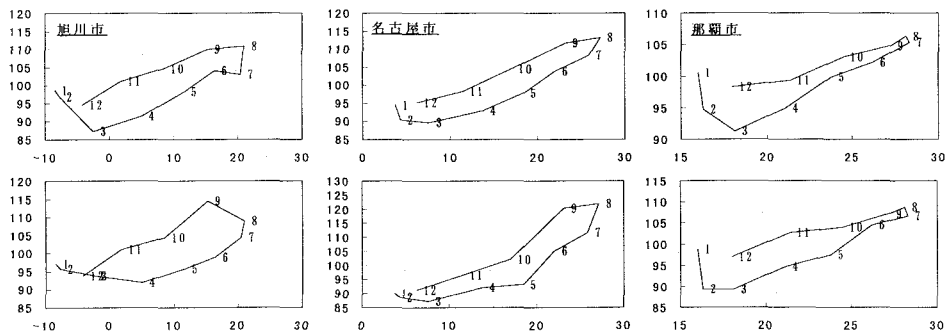


図3 用途別にみたT-D曲線

(縦軸：水使用量変動指数、横軸：平均気温、図中の数値は月、上段：家庭用水、下段：その他の用水)

2. 2 気温を用いた水使用量の定式化

ここでは水使用量を気温の関数として表すことを試みる。2-1で分析したT-D曲線の形状や各都市の日単位給水量と気温との対応関係を考慮し、水使用量(D)と気温(T)の関係を次式のように仮定する。

$$D(T) \propto T^2$$

2. 1の通り、高温域では水使用量が気温Tの二乗に比例することが傾向としてとらえることができるが、低温域では高温域ほどの明確な特徴を確認することができない。図1～3からわかるように、低温域の水需要量増加は一部地域に確認されるもので、その要因も高温域の水需要量増加が人間の生理現象や産業活動に起因するのに対して、低温域の水需要量増加は上述の要因に加え、凍結防止用水等に起因するものと考えられる。そのため、低温域と高温域の近似式の感度は異なるかも知れないが、低温域・高温域を一元化して示せるように、水使用量(D)を次式で定義することとした。

$$D(T) = a(T - T_m)^2 + b$$

ここに、係数aは水使用変化量の気温勾配を示し、該当気温での単位気温当たりの水需要量を決定する係数となっている。係数bは水使用量D(T)が最小となる水使用量の大きさを示し、これを基準水使用量と考えることとした。なお、係数 T_m は基準水使用量を与える気温である。

上記のような水使用量推定式の係数を、日水使用量Dと日平均気温Tのデータから多項式近似により同定する。なお、水使用量としては、原単位を用いるものとする。分析結果を表1に示す。同表より以下のことがわかる。ただし、分析結果は上式を実績データの範囲内で適用したものである。

○回帰式の当てはまりは、名古屋市が最も良好であり、重相関係数は0.85となっている。次いで那覇市0.66、旭川市0.59である。採用した説明変数によって目的変数を説明することの有意性は、得られた多項式の分散分析の結果からわかるが、偏回帰係数が0という仮説は、いずれも危険率1%で棄却されている。

○標準偏回帰係数をみると、平均気温の自乗の項(t^2)がいずれの都市でも平均気温の項(t)よりも水使用量に対して影響の大きい項となっている。

表1 水使用量の気温による多項式近似

	説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	重相関係数
旭川市	t^2	0.0606	0.4108	0.588
	t	0.4950	0.2082	
	定数項	272.22	—	
	分散分析	分散比 $F_0(VR/VE) = 1061$ $F(2, \infty, 0.01) = 4.61 \quad \therefore F_0 > F$		
名古屋市	t^2	0.2191	1.4349	0.846
	t	-2.9272	-0.6190	
	定数項	382.11	—	
	分散分析	分散比 $F_0(VR/VE) = 5046$ $F(2, \infty, 0.01) = 4.61 \quad \therefore F_0 > F$		
那覇市	t^2	0.1618	1.4868	0.658
	t	-4.1301	-0.8375	
	定数項	392.51	—	
	分散分析	分散比 $F_0(VR/VE) = 949$ $F(2, \infty, 0.01) = 4.61 \quad \therefore F_0 > F$		

注) VR:回帰による不偏分散、VE:回帰からの不偏分散

2. 3 係数の同定値からみた地域特性

分析結果より前述のa、b及び T_m を整理すれば表2の通りである。同表より各都市の相違について考

察すると、次のことがわかる。

- ①係数aの最も大きい都市は名古屋市0.22で、次いで那覇市0.16、旭川市0.06となっている。
- ②基準水使用量を与える気温 T_m は、旭川市が-4.1℃、名古屋市6.7℃、那覇市12.8℃で低緯度都市であるほど高くなっている。これを各都市の平均気温と比較すると、各都市とも T_m が年平均気温に対して約10℃低くなっている。
- ③基準水使用量を示す係数bは、社会構造、水源構成、過去の渇水経験などの地域特性が強く影響することが考えられるが、今回の3都市においては旭川市271ℓ/人/日、名古屋市372.3ℓ/人/日、那覇市366ℓ/人/日となっており、年平均気温が比較的高い都市で水使用量が大きくなる結果となった。

表2 多項式近似による係数の推定結果

都市	係数a	係数b	係数 T_m
旭川市	0.0606	271.2	-4.08
名古屋市	0.2191	372.3	6.68
那覇市	0.1618	366.1	12.76

3. 温暖化による増加需要量の推計

3. 1 需要量推計モデル

前述のように気温と需要量は、2次式で対応付けられるが、その係数は地域により異なる。温暖化により気温分布が変化した後のa、bの変化を想定するには、気温に着目した構造分析の事例をさらに重ねることが必要であり、ここでは固定として取り扱う。

本稿では、温暖化後の需要量を推計するために、年間を通じての気温と需要量の関係から図4のようなモデルを考えるものとする。同図では、現状の水需要構造を固定して、気温だけが温暖化によりその分布形状が変化すると考えて

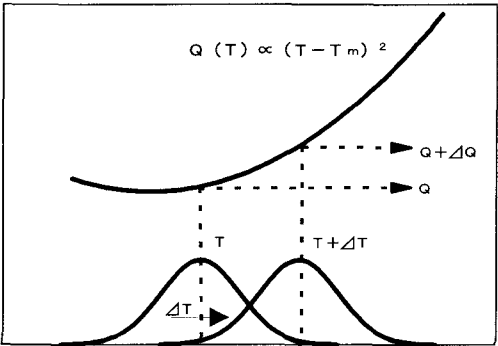


図4 温暖化後の需要量推計の考え方

いる。同モデルでは、2次曲線の最小値を与える気温（ T_m ）を境に単位気温上昇当たりの需要量が増加する気温帯と減少する気温帯に分かれる。需要量の大きさは、この気温帯のどの部分に発生日が分布するかという点と2次曲線の勾配aの大きさによって決まってくる。

3. 2 温暖化後の気温分布の仮定

温暖化が進行した場合、平均気温は2～3℃上昇すると予測されている²⁾。しかし、その時の年間を通じての気温分布がどのようになるかは現在のところ十分な知見がない。図4に示されるように需要量を推計するには気温の分布を仮定する必要があるため、ここでは、気温分布について温暖化シナリオを作成するための分析を行った。まず、旭川市、名古屋市及び那覇市における昭和40年から平成6年までの過去30年間の気温データについて1℃刻みで気温分布型を調べた結果を図5に示す。

都市により分布形状は異なるが、いずれの都市でも年間気温分布は双山型に近い分布型である。これは季節によりその分布が異なり、それらが重なってこのような形状を呈していると考えられる。その期間として年間を高温期（5～10月）と低温期（11～4月）に分けてみると（図5）、2つの期別分布は正規分布に近く、年間平均気温が高いほど2つの期別分布は接近し級間分散が小さくなる。そして、各期の気温のばらつき、すなわち級内分散も小さくなる傾向を示す。各都市の平均気温とその標準偏差、級内分散・級間分散を比較すると表3に示すようであり、上述した内容が確認できる。以上より、平均気温が高い地域ほど気温分布が収斂してくる傾向（気温の収斂性と呼ぶ）があると考えられる。

表3 気温分布の基本統計値

	旭川市			名古屋市			那覇市		
	高温期	低温期	年間	高温期	低温期	年間	高温期	低温期	年間
平均気温	15.5	-2.5	6.6	22.3	8.0	15.2	26.4	18.7	22.5
標準偏差	5.5	6.1	10.7	4.3	4.6	8.4	2.3	3.2	4.8
級内分散	33.8		-	20.1		-	7.8		-
級間分散	81.6		-	50.5		-	14.8		-
全分散	-		115.4	-		70.6	-		22.6

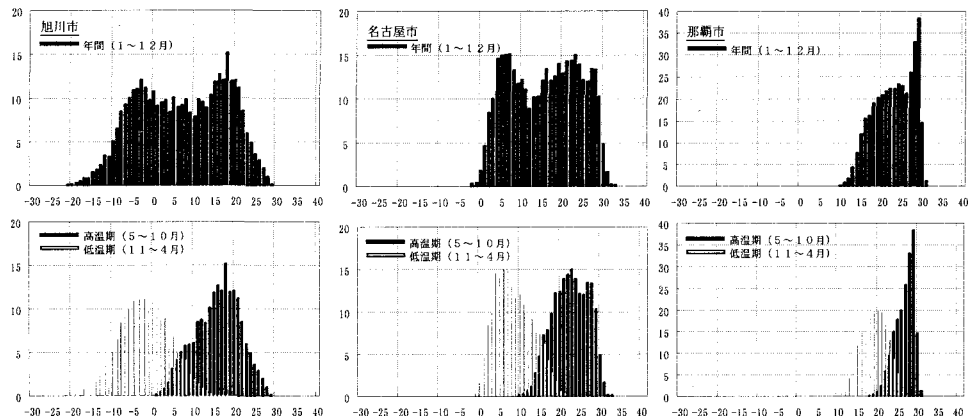


図5 都市の年間気温分布と高温期、低温期の気温分布（縦軸：年間換算の発生頻度（日数）、横軸：気温℃）

3. 3 需要量の推計

温暖化後の気温分布型として次の3つのシナリオを想定する（図6）。

シナリオ1：分布形状は現状のままで平均気温の温暖化（ ΔT ）分だけ高温部に移動した分布

シナリオ2：現状の気温分布を高温期と低温期に分け、各分布に正規分布をあてはめ、級間分散が小さくなると仮定した分布

シナリオ3：級間分散だけでなく高温期と低温期の2つの分布の級内分散も小さくなると仮定した分布

各ケースについて温暖化後の需要量を推計し、温暖化を想定しない場合（実績及び正規分布を仮定することにより求められる需要量）と比較する。この時の需要量は、年間需要量と一日最大需要量について調べるものとした。ただし、ここで算出する一日最大需要量とは、図4に示した気温の年間発生頻度分布で高温部

側からの累積発生日数が1日となるまでの需要量の積算値である。なお、正規分布の当てはめの誤差は、一日使用水量ではいずれの都市でも1%以下であったのに対して、一日最大水使用量では名古屋市8.8%、旭川市4.5%、那覇市3.7%と大きいものであった。しかしながら、一日最大需要量は、利用量率を一定と考えるならば計画取水量と見なすことのできる値であり、水供給施設の施設基準値として用いられる需要面における鍵となる水量であることを考え、誤差は大きいが敢えて試算を行うものとする。温暖化後の需要量の増加率を図9と図10に示す。また、平均気温が3℃上昇した時の需要量の増加率をシナリオ毎に整理した結果を図11に示す。同図より、以下のことがわかる。

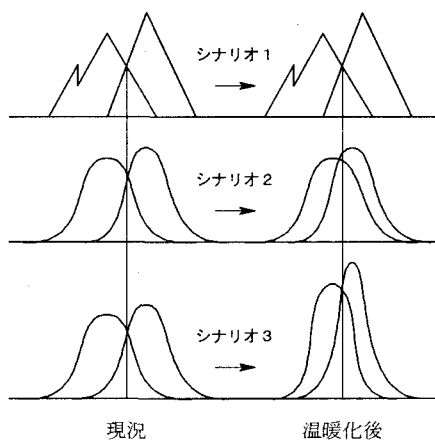


図6 各シナリオのイメージ

①年間需要量の増加率をシナリオ別にみると、現状の気温分布形を固定した場合が最も高く、温暖化に伴う気温の収斂性を考慮すると増加率は低下する。需要量は、最高3.2%（名古屋市）、最低で1.2%（旭川市）の増加を示している。これを地域特性である平均気温との関係でみると、旭川市から名古屋市にかけては、需要の増加率は高くなるが、那覇市の増加率は名古屋市とほぼ同じである。

②一日最大需要量の増加率をシナリオ別にみると、年間需要の場合と同様に現状の気温分布を固定した場合が最も高く、気温の収斂性を考慮すると増加率は低下する。需要量は、最大6.8%（名古屋市）、最低でも2.2%（旭川市）の増加を示している。これを平均気温との関係でみると、旭川市から名古屋市にかけては、需要の増加率は高くなるが、那覇市では逆に増加率は低下している。この傾向は温暖化による気温上昇が2℃以下の場合にも言えることである。この理由は、那覇市の2次曲線の勾配aが名古屋市よりも小さいためと考えられる。

③年間需要量はどのシナリオでもほぼ様に増加していくが、一日最大需要量の方は増加傾向に多少の違いが認められる。これは想定した気温分布の最も高温部の部分が平均気温の上昇や標準偏差の縮小の影響を受け易く、かつ2次曲線もより勾配が大きくなる位置にあるためと考えられる。

4. おわりに

本稿では、まず、気温と需要量の関係について分析し、両者の定式化を試みた。次いで、年間の気温分布について分析を行い、最後に、温暖化後の気温分布の形として3つのシナリオを立て需要量への影響の大きさを推計した。分析結果を要約すれば以下のとおりである。

- ①気温と需要量の関係は、いずれの地域でも2次関数で対応付けられる関係が認められた。
- ②需要量を平均気温の2次関数として記述すると、曲線の傾きa、曲線の最小値b、最小値を与える気温 T_m が地域特性を表している。係数aは水使用変化量の気温勾配を示すものであり、名古屋市、那覇市、旭川市の順で大きい結果となった。係数bは水需要量の最小値を示し、これを基準水使用量と呼ぶこととしたが、これは名古屋市、那覇市、旭川市の順で大きい結果となった。 T_m については、旭川市、名古屋市、那覇市と緯度が低い地域程高くなるが、平均気温と比較すると T_m が約10℃低い値を示す結果となった。
- ③日平均気温の年間頻度分布は、双山型を呈する。この双山分布は、高温期（5～10月）と低温期（11～

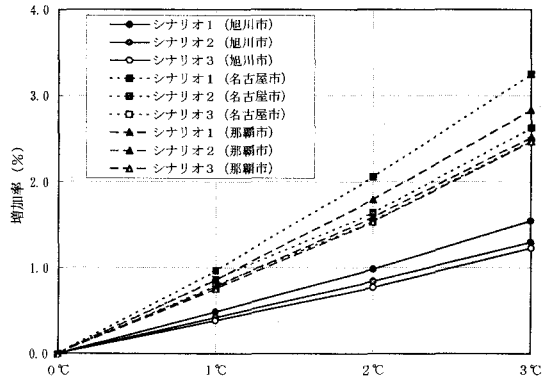


図9 温暖化による年間需要量の変化

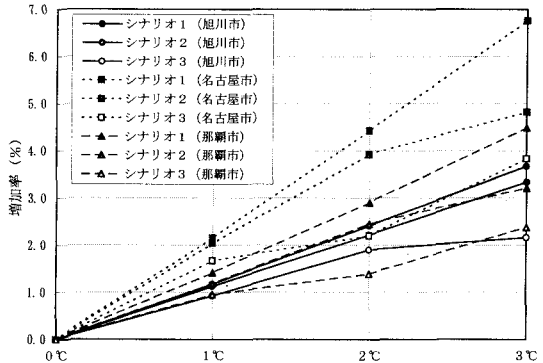


図10 温暖化による一日最大需要量の変化

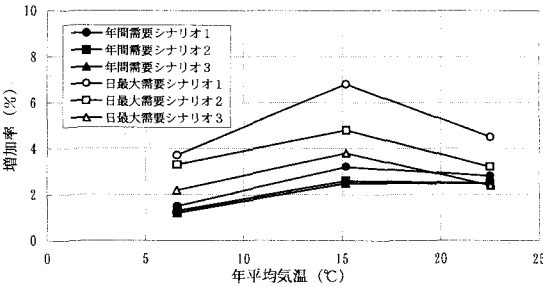


図11 都市の平均気温と需要の増加率

4月)で分けると各々正規分布型を呈する。平均気温が高い地域では、両分布の級間分散、級内分散が共に小さくなる傾向が認められ、平均気温が高くなると気温分布が収斂することが確認された。

- ④ 2次関数で表される現状の水需要構造を固定した条件で温暖化後の気温分布を仮定し、需要量の増加率を推計した。気温分布として、現状の分布形としたシナリオ1、高温期と低温期の分布として正規分布を仮定し級間分散が小さくなると仮定したシナリオ2、さらに、級内分散も小さくなると仮定したシナリオ3を考えた結果、需要量の増加率は、年間需要量で1.2～3.2%、一日最大需要量では2.2～6.8%であった。最大増加となるのはシナリオ1で、シナリオ2、シナリオ3の順に増加率は低下した。

今後の課題としては、気温と需要量の関係について、係数a、bの同定結果をみると名古屋市が最も大きく、平均気温が最高である那覇市よりも大きい値となり、また、両都市と旭川市を比較すると大きな相違があることが明らかとなった。この結果を「平均気温が高くなると、気温上昇に伴う水需要増加量、基準水使用量はともに大きくなる」と解釈することも考えられるが、本稿では結論できなかった。この点に関しては、主要都道府県を対象に月単位使用量を用いて行った全国的な分析を試みている¹⁰⁾が、現在までのところ明確な傾向は見い出せていない。今後は、都市単位の分析事例を増やし、特に水需要構造そのものについての検討を進め、さらに温暖化による水需要構造の変化をも考慮したシナリオを考えてみたい。

また、T-D曲線は、気温下降期の需要量の方が気温上昇期よりも大きくなることがわかった。この理由として、水使用行動における慣性力・履歴性の影響が考えられるが、今後、詳しく分析を行う必要がある。

本稿では、上記のような課題は残るが、地球温暖化により水需要量がどの程度変化するか¹¹⁾の定量的な推計モデルを提案できたと考える。今後、IPCC報告等から得られる地域的なより具体的な知見を条件として、需要量変化の定量的な評価を行なっていくことが必要である。

最後に、本稿を作成するにあたりご議論頂いた、建設省上田悟氏、廣瀬昌由氏、(株)日水コン渡辺晴彦氏に謝意を表します。

【参考文献】

- 1)清水康生,横江義之,蔵重俊夫,杉山裕:地球温暖化による水需要変化が水資源管理に与える影響についての考察,地球環境シンポジウム講演集,PP.246-253,1993.
- 2)霞ヶ関地球温暖化問題研究会編訳,IPCC地球温暖化レポート,中央法規出版,1991.
- 3)廣瀬昌由,丹羽薫,宮井貴大:地球温暖化が進行した場合に水資源に及ぼす影響に関する考察,第37回水工学論文集,pp.201-206,1993.
- 4)小尻利治:地球温暖化が及ぼす利水システムの安全度への影響評価に関する研究,第4回水資源に関するシンポジウム前刷集,pp.11-20,1992.
- 5)与田博恭,今田俊彦:地球環境問題と水道事業経営に関する一考察,NSC研究年報,VOL.18,NO.1, pp.279-288,1993.
- 6)住友恒:都市における上水需要量の変動特性についてー需要の季節変動の分析ー,土木学会論文報告集,第197号,pp33-42,1972.
- 7)小泉明,稲貝とよの,千田孝一,川口士郎:多元ARIMAモデルによる水使用量の短期予測,水道協会雑誌,VOL.57,NO.12,pp.13-20,1988.
- 8)渡辺晴彦,張昇平,山田良作:ニューラルネットワークによる日水需要量の予測,NSC研究年報, VOL.18, No.1, pp199-208,1992.
- 9)根岸卓郎:理論応用統計学,養賢堂,pp.230-233,1983.
- 10)安達孝実,柏井条介,角哲也:水道用水需要に及ぼす平均気温の影響,第51回土木学会年次学術講演会,pp750-751,1996.
- 11)安達孝実,柏井条介,角哲也:水需要に与える気温分布特性の影響に関する考察,水文・水資源学会研究発表会,pp58-59,1996.