

(7) 渇水に見まわれやすい流域における水資源確保対策の検討とその評価
—博多湾流域を対象として—

**Integrated Water Resources Management and its Evaluation
in a Watershed with Water Shortage**

嚴 斗鎔^{*}、楠田 哲也^{**}、石川 和也^{***}

Dooyong Eom^{*}, Tetsuya Kusuda^{**} & Kazuya Ishikawa^{***}

Abstract :In watersheds, integrated water resources management becomes a key approach to meet increasing demands of residents such as avoiding water shortage and keeping landscape around streams in urban areas favorable. Reuse of treated wastewater and utilization of groundwater following its nourishment are potential measures to be taken for supplement of water supply, augmentation of stream flow rates, and so on. Requirements of the management are minimizing cost and LCE and maximizing residents' satisfaction. The GIS is a powerful and prospective supporting tool to obtain an optimal solution of water resources management in a watershed.

The objectives of this study are to develop a planning method for an optimal system of water resources utilization including reclamation recycling, and reuse in terms of LCE and cost minimum, and to apply it to the Hakata Bay watershed with water shortage, and to obtain an optimal solution for the management.

In conclusion, desalination or alternative measures, in addition to groundwater, is inevitable to avoid water shortage in this watershed. Desalination, however, has demerits of high LCE and cost, so that neap technologies to obtain alternative water resources and to reduce water consumption are to be developed.

Keyword:Hakata bay watershed, water resources management, LCE, GIS, cost minimum

1 はじめに

近年地球温暖化、あるいは、エルニーニョ発生とは無関係とは思われない程、降水量が年ごとに大きく変化している。その結果、大量の水を消費している都市域、特に福岡市や松山市などでは2年に一度程度渇水にみまわれるようになっている。渇水を避けるため、新たな水源開発など各種の対策が求められているが、根本的な対策にはまだ至っていない。博多湾流域は都市の開発と人口増加のため水の需要も年々増加の傾向をみせているが、比較的流域面積が狭く、一人あたりの降水量も北部九州の半分しかなく、すでに流域外の筑後川から需要量の1/3程度を導水している。それ故、博多湾流域では、水資源確保の抜本的対策として海水淡水化の導入の準備が進められている。しかし、海水淡水化は水不足の問題をエネルギーとコストの問題に変えて解決しようとするものであり、他の水源確保に比べ環境負荷が大きい。したがって地球環境保全の観点からはできるだけ避けたい対策である。

そこで、本研究では流域の水資源管理のために流域の水利用形態を検討し、水利用に関する判断指標のもとに海水淡水化を含む水資源確保手段の最適選択方法及び節水のための水利用方策を検討することにする。水利用の指標には利水安全度、コスト（建設と維持管理）、環境負荷（LCE、LCCO₂）、水質などがあるが、本研究ではコスト、LCEを指標として検討を進めることにする。

Department of urban & environmental engineering, Kyushu University
6-10-1, Hakozaki, Higashiku, Fukuoka, Japan 812-8581
E-mail: *eomdy@civil.kyushu-u.ac.jp, **kusuda@civil.kyushu-u.ac.jp
電源開発（株）

2 流域特性のGISによるデータベース化と水収支の算定

流域の水管理を行うためには、流域内の各地点ごとの状況を詳しく把握しておく必要がある。雨水の浸透率、汚染物質の環境負荷量、河川流況・水質、地下水位、水質変換施設の位置、水利用量分布などがその例である。本研究では、近年急速に発達してきたGISの手法にならないデータベース化した流域特性を利用して検討を進める。この手法を用いることにより、流域水管理のための実時間に近い空間把握と地域に密着した対策を立てることが可能になる。

2. 1 GISデータの作成方法

流域特性に関わる諸元のデータベース化の方法をまず述べる。

(1) 座標系の設定

国土数値情報では、計測座標系から変換した正規化座標系で位置情報を与えている。このデータベースは、座標系を全国を共通にするために、標準地域メッシュコード体系(JIS-C6304-1976)に準拠しメッシュ区画の左下隅を(0,0)、右上隅を(1,1)としている。標準メッシュには1/20万の地勢図に相当する第1次地域区画(約80km×80km)、1/25,000の地形図に相当する第2次地域区画(約10km×10km)、第2次地域区画を縦横10等分した1/2,500に相当する第3次地域区画(約1km×1km)がある。この第3次地域区画のことを基準地域メッシュ、あるいは三次メッシュと呼ぶ。さらにこの三次メッシュを約100m×100mの細密数値情報(1/10次メッシュ)化してデータベースを構築する。一方、県や市町村の単位で地図情報を扱う場合にはUTM座標を修正した座標系による場合が多い。この座標系は、UTM座標系と同じ投影法による平面直角座標系であり、同じように取り扱える。そのため、ここではこの座標系を正規化座標系に変換して用いることにし、1/2,500の地図にはほぼ100mメッシュの1/10次メッシュ線を描き各ピクセル毎にデータベースを構築する。

(2) 対象流域の設定

博多湾流域(図1参照)の水量水質の総合管理のためには、流域の環境データベースが必要となる。そこで福岡県土木部河川課作製の流域地図をもとにし、各市町村の1/2,500(一部地域のみ1/10,000)の地図上に流域の境界を引いたものをもとに博多湾流域のピクセルを各小流域に分割した。その際、あるピクセルにおいて面積の大きい方を流域と見なした。このようにして博多湾流域の63,444個のピクセルを各小流域に分割した。

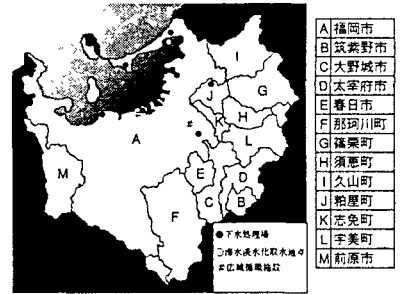


図1 流域内の行政と対象施設の位置

(3) データベースの項目

1) 土地利用: 1/10次メッシュの国土数値情報に基づき、流域の範囲に合わせて土地利用データを作成した。なお、国土数値情報の土地利用区分は12分類である。

2) 降水量分布: 国土数値情報データベースの3次メッシュ降水量データをもとに22年間の月と年平均値の資料を作製した。さらに1990年ー1995年の日単位のメッシュデータは福岡管区気象台の5カ所の気象データをもとに作製した。

3) 気温分布: 降水量分布と同じ形式に整理した。

4) 行政区界: 各市町村の1/2,500の地図上にて、行政区界を市町村単位で定めた。ただし福岡市のみ丁目単位に区分けした。そして各行政区のコード番号にしたがい入力した。

5) メッシュ別人口密度: 行政区コード毎の人口データをもとに、行政区区域界での土地利用状況に応じて人口をデータベース化した。

6) 河川流路及び水域設定: 河川とその支流を1/2,500の地図から読みとり、まずラスターデータとして記録した。読みとった小河川は、名前がついているもので、しかも長さ10ピクセル以上にわたって流れているものとした。農業用水路は水田地帯を通るもののなかで基幹の水路のみを採択した。10ピクセル以下であっても、湖沼を源とする河川は取りあげた。河川は辺を共有するメッシュ間を流れるものとした。雨水管線は市の

- 下水道課が作成したものを基に、そして、池は1ピクセルの1/4の大きさを単位ユニットとして定めた。
- 7) 高度：1/10次メッシュの四隅の値の平均値をそのピクセルの平均高度とした。
- 8) 上水使用量・下水発生量：上水給水区域別使用量をメッシュ人口密度にあわせて配分した。家庭用以外の用途の使用量も人口密度に応じて配分した。各ピクセル発生下水量は処理場別下水量を処理区域毎に配分して算定した。
- 9) 地下水賦存量：地盤図を読み込み、地盤高と沖積層の高さから不透水層上面の高さを決め、浅井戸の静水位データから 初期地下水面を推定した。

2. 2 博多湾流域の水収支

国土数値情報の1/10次メッシュ（1辺約100m）単位にて推定した降雨量を用いて算定した博多湾流域の20年間平均降雨量は1,991mm/年である。蒸発量は福岡管区気象台の日別蒸発量の年間合計が約800-820mmであることと九州地域の平均蒸発散量の平均値が約800mm/年であることを考慮し約800mm/年として計算した。流出量に基づいて博多湾流域の水収支を概算すると図2のようになる。流域の土地利用形態からみると雨水の浸透面積率は66.6%となっている。しかし、地中に浸透しても滞水層が浅く、しかも山地部では不透水性地盤が地表面まで露出している地域が多いので、地下水位は余り高くなりえず、河川や海域へ流出しやすくなっている。水道水の使用量は自己水源から約35万m³/日、流域外の筑後川から15万m³/日、計50万m³/日となっている。農業用水は慣行水利権のもとでほとんど河川から取水されているが、還元水の反復利用や農地面積の減少により使用量は明確でない。流域の発生下水量は、地下水の浸入と合流式下水道が一部にあるため、70万m³/日にものぼる。

2. 3 地下水賦存量算定

(1) 地下水

博多湾流域の地下水の賦存状況を、1/10次メッシュで区分けした地理情報をもとに算定した。まず地盤図をもとし、博多湾流域の基盤表面高度、沖積層底面高度、地表面地質のデータを入力した。データの無い部分については適当と考えられる値を設定した。また、基盤の表面を不透水層上面、井戸の静水面を不圧帯水層の水表面とした。不透水面上に存在するものは不圧帯水層と仮定し、不透水層上面と地下水表面と地質をもとに以下に述べるように地下水量を算定した。不透水層上面が地表に出ている部分からの雨水の浸透はないものとした。さらに海域と河川には一定の水深を与えた。流入には降水によるものと河川からの浸透によるものを、流出には河川と海へのものを考慮した。ここでは井戸による揚水は考慮していない。

降水による地表面からの浸透は、月毎の降水量（福岡管区気象台での観測値）と蒸発量の差を求め、その月の日数で除し、それに土地利用に合わせて設定した浸透率を乗じた値を適用し、特に水田には非灌漑期には通常の浸透率を、灌漑期には減水深から蒸発量を引いた値を用いた。地形高度、海への最短距離、河川の高度、浸透率などの中で地下水面と一番相関が高く有意なのが地形高度であったので、井戸の静水面のデータを被説明変数とし、地形高度を説明変数として回帰分析によって地下水面の初期値を求めた。その結果は次の通りである。

$$H_w = 0.9282H_g - 4.126, R^2 = 0.998$$

(ここで H_w = 地下水位, H_g = 地形高度)

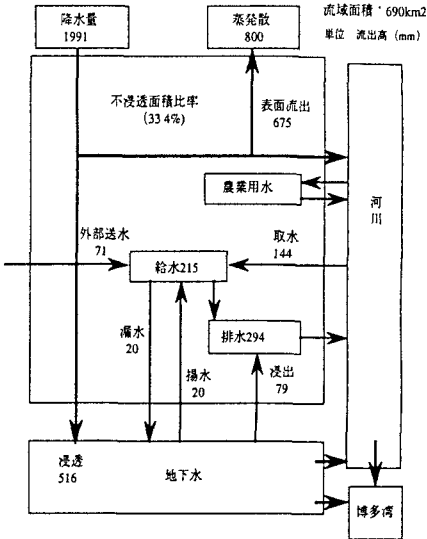


図2 博多湾流域の水収支

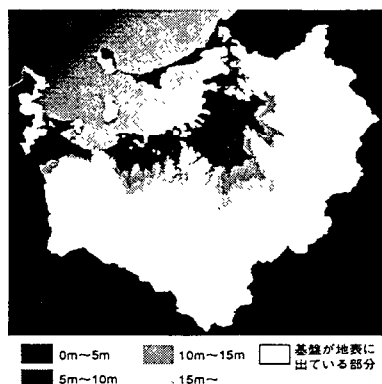


図3 渇水時の地下水位

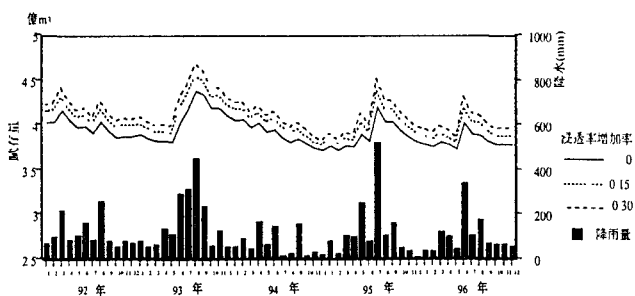


図4 降水量と地下水賦存量

そしてこの値をもとに、20年間の降水量の平均値の雨を20年間降らせた後の状態を初期状態とした。ピクセル間の地下水の移動はダルシーの法則に従うとした。以上の方法で1976年から1996年までの実際に降った降水量を与え、地下水位を算定した。図3に1994年9月（渇水年）の地下水面を示す。図4は1992年から1996年までの降水量と地下水の賦存量の関係を示したグラフである。実線は浸透率を変化させていない値、破線は土地利用の建物用地と幹線交通用地の浸透率をそれぞれ0.15、0.3だけ増加させたときの値である。0.15増加させたときが流域内の全ての舗装道を透水性舗装に変えた場合に相当する。その時の賦存量の増加分は約1,000万 m^3 であると推定される。

最大揚水可能量は、ここでは持続可能性を考慮して月別平均涵養量の50%とした。ちなみに、過去1987年から1996年までの博多湾流域での年間平均涵養量は約5,300万 m^3 /年（約14.5万 m^3 /日）であったので、平均の最大揚水可能量は7.25万 m^3 /日となる。透水性舗装を導入した場合、年間平均涵養量は約6,370万 m^3 /年（17.5万 m^3 /日）となり、一日当たり3万 m^3 ほど平均涵養量が増加することになる。また賦存量は季節毎に変動があり、一般的に梅雨時期などの大量の降水量によって賦存量は増加し、貯留効果によって地下にしばらく留まるため利用可能性が高まる。つまり地下水を大量消費できるのは夏から秋にかけてである。渇水時（例えば1994年）には図4のように降水による涵養があまり期待できない。しかし、平常時には地下水を利用することにより水道水の利用量を減らせ、間接的に渇水の対策になるので、水資源対策の一つとして検討した。対象域の浅井戸（深度30m以下）の揚水量は届け出量として5,440万 m^3 /日であった。この値には家庭用水を含めていない。流域内の水道未普及人口に水道使用量の原単位を乗じると約16,500万 m^3 /日となるので、これが全て浅井戸からの取水と仮定すると、流域内における浅井戸での地下水揚水の実績値は約22,000万 m^3 /日となる。

水資源として地下水を考える際、日揚水量の最大限度を日上水使用量の約33%と仮定した。これは、後述するように、地下水の用途を雑用水のみとしたとき全水使用量に対する雑用水使用量の割合が33%になることと一致させている。無論、涵養量がこの値を下回るとき、その値が最大揚水量としている。

3 LCEと費用の計算方法

3.1 LCEの計算

本研究においては、環境負荷の計算は基本的に積み上げ法による算定をベースとし、それを補う形で産業連関分析を用いることとした。

下水道と上水道といった具体的な構造物についての分析では、材料レベルでのミクロなデータに、個々の工法、運用等に関する施設固有のデータも加えて、それら全体を積み上げることが必要となる。しかし評価に必要な全データを材料や工法ごとに詳細に得ることは、大学の研究室レベルの研究では実際上困難であり、ある部分については産業連関分析を用いるのはやむを得ない。産業連関法で得られたマクロなデータは、各産業の最終需要が誘発する環境負荷（原単位）を求め、これに材料費や工事金額を乗じて全体の負荷を計算するこ

とで求められる。

本研究で用いる産業連関分析によって求められた原単位は、基本的に、池田らによって求められた原単位^{6),7)}を使用した。この産業連関分析で使用する原単位は、輸入材を考慮しない(I-A)⁻¹型の計算結果を用い、産業連関表としては、1985年の統合表183部門に建設部門分析用産業連関表46部門を結合したものを基本とした。単位には水道水1m³あたりに換算したもの(kcal/m³)を用いた。また、各施設の耐用年数は、土木施設50年、建築施設50年、機械設備15年、電気設備20年とした。以下に各施設のLCEと費用の算定方法と結果を示す。

(1) 再生水処理施設(広域循環)

1) 処理場の建設

福岡市内にある再生水処理施設の工事实績データからLCEと費用を推定した。全工事を土木工事、建築工事、機械設備工事、電気設備工事の4つに分類し、工事金額に産業連関分析によって得られた各工事や設備に対応する原単位を利用することによって工事全体に要するエネルギーを推定した。次に、計算によって求めた結果を耐用年数で除して1年当たりの建設エネルギーを求めた。そして年間処理水量で除すことにより、単位水量当たりのエネルギーと費用を求めた。

2) 処理場の運用

処理場の運転に要するエネルギーは各処理場の運転実績データを積み上げて求めた。

3) 管渠の建設

管渠工事のエネルギーには産業連関分析は用いず、全て積み上げ法によって計算した。工法は開削工法とし、管径と掘削深ごとに積算資料¹⁸⁾にしたがい1mごとのエネルギー原単位と費用を算定した。その値に管径毎の布設距離を乗じることによって全体のエネルギーと費用を算定し、単位水量当たりのエネルギーと費用を求めた。

(2) 再生水利用施設(個別循環)

運用部分のLCCO₂を計算した研究成果⁹⁾を参考にしてLCEを算定した。建設部分は計算対象と同規模の施設の工事金額を設定して、産業連関分析結果を用いて計算した。

(3) 海水淡水化施設¹⁹⁾

処理能力4万m³/日の海水淡水化施設の工事实績データから、再生水処理施設の計算と同様の手法で建設エネルギーを計算した。運用エネルギーは運転実績データから積み上げて計算した。

(4) 浅井戸

井戸の深度を30m、口径を0.2mと設定し、積み上げ法によって建設エネルギーを算定した。運用エネルギーはポンプによる揚水に必要な電力に原単位を乗じて求めた。揚水した水は浄水せずにそのまま使用することにし、費用とエネルギーを算定した。

(5) 上水道

上水道のLCEに関する研究成果⁹⁾を参考にエネルギー消費量を設定し、ある規模での費用とエネルギーを算定した。

(6) 下水道

再生水利用施設(広域循環)と同様に、建設部分については福岡市の工事实績データから産業連関表を用いる方法で、運用部分は運用実績から積み上げ法で計算した。計算には汚泥処理過程も含めた。

(7) 透水性舗装

建設部分、運用部分共に積み上げ法で計算した。その結果、1m²当たりの建設エネルギーは25,313kcal/m²、3年に1回の路面洗浄で消費される運用エネルギーは111kcal/m²・年であった。透水性舗装によることによる浸透率の増加を0.5とし地下水涵養量の増加分は全て用いられると仮定すると、3,059kcal/m³となった。博多湾流域内の全ての舗装道を透水性舗装に変えると、前述したように地下水涵養量が約3万m³/日増加する。

3. 2 コスト計算

計算結果がある施設についてはその値を利用し、その他の施設については実際の工事金額を基に計算した。利率を5%、30年償還としている。運用のコストも実績値から算定した。この計算結果を表1に示す。LCE計算結果を見ると電力を大量消費する施設はエネルギーも多く消費することが分かる。建設部分よりも運用部分のエネルギー消費量の占める割合が大きいので、LCEを減らすためには電力消費量の削減が重要になる。最もエネルギーを消費するのは海水淡水化施設であり、地下水を水源とする浅井戸が最小であった。コストの順とエネルギーの順には同様の傾向が見られるが、各施設間での差は小さくなっている。これはコストに占める電力の割合がLCE計算の時よりも小さいことが一因による。

表1 LCEと費用の計算結果

供給方法	LCE			コスト 円/m ³	処理能力
	建設 kcal/m ³	運用 kcal/m ³	合計 kcal/m ³		
上水道	1407 ⁵⁾	1299 ⁵⁾	2706 ⁵⁾	219 ⁵⁾	5万～10万m ³ /日
再生水（広域循環）	552	3195	3747	334	4500m ³ /日
再生水（個別循環）	648	7254 ⁶⁾	7902	376 ⁶⁾	658m ³ /日
海水淡水化	1540	12978	14518	600	4万m ³ /日
浅井戸	96	511	607	22	48m ³ /日
下水道	568	1258	1826	274	35万m ³ /日

注) コストは1990年で換算

注) 上水道のコストは福岡市全体での値

注) 下水道のコストは1000m³/日での値

4 流域における水利用特性

博多湾流域における水道水の需要は1994年までは年約2.6%の伸び率を示し、1995年には日量50万m³程度となっている。流域内の水利用形態は需要量の2/3が家庭用水で増加傾向にあり、残りは公共・サービス・製造などでその用水量は横這いか減少の傾向にある。一人一日平均給水量は昭和1978年の渇水時に310リットル程度まで激減した後、340リットルまで増加したが、1994年の渇水により再び、300リットルまで減少した（流域内日平均総使用量は図5参照）。渇水時には、減圧送水と時間給水が実施され市民生活や産業活動に影響を与えた。流域内に大きな河川がなく、河川からの取水は農業用水などの慣行水利権量が多いため、都市用水としての新しい水利権の確保は難しい状況にある。流域内の河川の上流部にはダムの適地も残り少なく、水道用水の大部分はダムから送水されているので、ダムの貯水率が下がるとそのまま渇水ないし断水につながる傾向にある。したがって、節水型都市を目指す一方で、自己水源確保のための多様な努力がなされている。しかし、流域需要量の1/3を他の流域から導水し、自己水源に問題がなくても導水側に渇水が生じると受水量が減ることになり、流域外の原因によって渇水になる可能性もある。工業用水のリサイクル率も福岡県ですでに88%に達し、節水はほぼ限界に近づいている。農業用水に関しては、河川の上流部や都市周辺部に田畑が分布しているが、以前に比べ都市化が進み農地面積は減少しているため、その減った分の水利権と農業用水利水特性を考慮した上で、他用途水への転換を目的とした水利権調整が必要である。しかし、水利権の調整は河川管理者、水利権利用者の間の協議を必要とし、渇水時など非常時を除くと余り進んでいない。

水使用者の側面で水供給形態を見ると図6のようなになる。上水の水源は主にダムと河川である。地下水は上水未普及地域の水源地と農業工業用水として使われている。地下水は賦存量は少ないものの、比較的安定した質と量を維持しているため、2章で概算したように雨水浸透

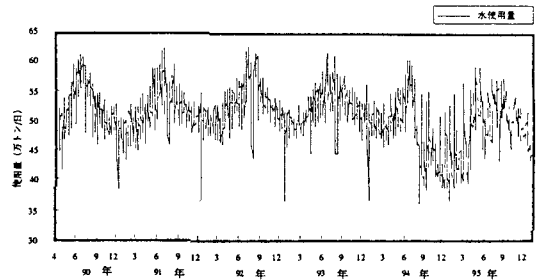


図5 博多湾流域の日上水使用量変化

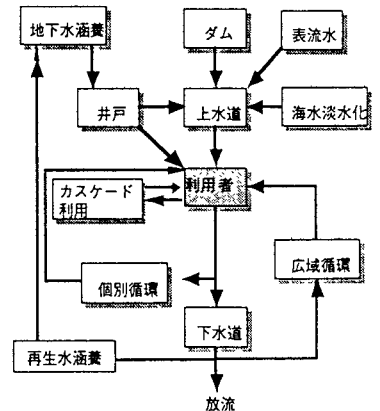


図6 水供給形態

などの対策で賦存量を増やして、質と量に応じた積極的利用策をとりうる可能性がある。下水処理水の再利用には水質を向上させるのに費用を要するが、都市域の安定した水源として位置付けが可能である。水のカスケード式利用とは、家庭内などで必要用途の水質に応じて一度使った高い水質レベルの水を低い水質レベルで再利用することである。この対策は水の大事さに関する意識を高め水需要を減らす利点もあるため実行には抵抗があるものの、渇水時にはもっとも効果のある対策の一つである。本研究では、図6の水供給形態を中心とし上水と他の水源からの水供給を検討することにし、LCEと給水費用を指標とし平常時と渇水時に分けて流域の最適な水供給システムを求めるのを試みた。

表2 家庭用水の用途割合²⁾

	使用水量比
飲料用水	1.3
炊事用水	19.8
洗面用水	3.7
風呂用水	32.4
洗濯用水	20.1
掃除用水	3.2
洗車用水	1.8
便所用水	17.7
合計	100

5 水資源確保にともなう LCE と費用の計算

5. 1 水供給方法選択手法

(1) 水供給施設の適用規模

1) カスケード式水利用

表2に家庭用水の用途別使用水量比を示す。家庭用水の最大カスケード式利用可能率は最大33%可能であると計算されているが²⁾、実行の可能性を基準に過去の経験値として実行容易レベル(15%)と実行困難レベル(30%)に設定した。

2) 再生水と地下水

広域循環の再生水は624,339m³/年(1,710m³/日)だけ送水されている(1995年度)。1995年度末で115件に送水していることから、1件当たり約15m³/日となる。福岡市内で再生水の個別循環を行っているビルは1995年度末で229件である。広域循環の1件当たりの需要量に乗じた場合、福岡市全体で1,253,775m³/年(3,435m³/日)の需要があることになる。また、博多湾流域内における家庭以外の建物での雑用水使用可能量は、一定規模(1,100m²)以上のビルを対象とした結果からみると約16,000m³/日と見積もられている。この値から広域循環、個別循環の実績値を差し引くと約11,000m³/日となり、それが今後導入できる再生水利用の可能量とし、広域循環で4,900m³/日、個別循環で6,100m³/日とした。

地下水は2章の結果をもとに算定した。日単位の計算では月涵養量の50%を揚水することにし、揚水限界量は雑用用途の最大水量とした。

3) 上水と海水淡水化など

計算の際、水道水並の水質の水を供給できる方法は一般の上水道と海水淡水化とし、地下水と再生水は雑用水用と設定した。つまり、上水道と海水淡水化水は全用途に供給でき、地下水と再生水は需要量の33%を供給できるとした。この比率は家庭用水、家庭用水以外(営業用水など)も同じ比率であると仮定した。上水の最大供給量は現在の上水供給可能量(約50万m³/日)とし、海水淡水化は現在検討されている5万m³/日の規模を想定した。

(2) 水供給の条件とシナリオ

費用、LCEなどに基づいて、表3に示すように平常時の節水対策としてのシナリオと渇水時の緊急供給対策のシナリオに分けて各対策を組み合わせたシナリオ別費用とLCEを算定し各時期の最適案を求めることにした。

平常時の条件は次の通りである。対象期間は1990年4月から1994年5月とし、その間の日別使用量を適用した。

表3 水供給方法の計算シナリオ

	平常時の節水シナリオ		渇水時の緊急供給シナリオ	
			カスケード (15%) の場合	カスケード (30%) の場合
シナリオ	1	水道のみ	1水道のみ	
	2	水道+カスケード (15%)		
	3	水道+カスケード (30%)		
	4	水道+井戸	2-1	水道+カスケード (15%)
	5	水道+広域循環	2-2	水道+カスケード (30%)
	6	水道+個別循環	3-1	水道+カ (15%) +井戸
	7	水道+海水淡水化	3-2	水道+カ (30%) +井戸
	8	水道+カ (15%) +井戸	4-1	水道+カ (15%) +井戸 +広域循環
	9	水道+循環利用+井戸	4-2	水道+カ (30%) +井戸 +広域循環
	10	水道+カ (15%) 井戸+循環利用	5-1	水道+カ (15%) +井戸 +個別循環
	11	水道+井戸+海水淡水化	5-2	水道+カ (30%) +井戸 +個別循環
	12	水道+カ (15%) +井戸+循環利用+海水淡水化	6-1	水道+カ (15%) +井戸 +個別循環+海水淡水化
	13	水道+カ (30%) +井戸+循環利用+海水淡水化	6-2	水道+カ (30%) +井戸 +個別循環+海水淡水化

水供給シナリオは表3のように13例について検討し、最適供給方法を計算した。各シナリオ別節水可能量とそれに伴う上水用のダム水源の時間変化も求めた。

渇水時の条件として、実際、渇水が生じたと見られる1994年6月から1995年7月の期間を対象とし、渇水の影響を受けない平常時の水使用量まで供給ができるように仮定し計算した。渇水期間中の平常時水使用量は、1990年-1993年に日別水使用量実績をもとに4年間の移動平均を求め、平常時の使用量とした。水源利用の順序は1. カスケード式節水、2. 地下水（井戸）、3. 上水、4. 再生水、5. 海水淡水化の順で渇水時の使用量を平常時の使用量になるまで日単位で加算していくようにした。つまり、渇水時の日不足分を列挙した対策で賄うために必要とする最小LCEと最小費用を計算した。

5. 2 平常時の水資源確保対策とそのエネルギー及び費用

平常時には各対策別水源転換によって上水水源を確保するようにした。日別節水量の計算結果を図7-1と7-2に示す。対策別の結果は図8～図10に示す。この計算結果によると、節水の効果は、一対策としては、節水量約10万m³/日のカスケード式（30%）が最も高く、全体対策案のなかではシナリオ13の場合が20万m³/日以上節水が可能となり、もっとも高くなった。地下水は日平均量で7万m³程度が利用可能で、費用とLCEも他の対策に比べ低いため、良好な水源であることが分かった。カスケード式節水のようなソフト的対策は節水効果は高く、費用とLCEは少なく済むが、対策の実施には個人レベルの参加が必要であるため、対策の効果の評価が容易ではない。本研究で適用したカスケード使用による30%節水は限界の値であり、平常時の実行可能レベルとしては15%が適用可能であると思われる。海水淡水化は一定で大量の給水が可能であるが、費用とLCEがともに最も高くなった。対策の効果は図9の通りである。各対策のLCEをみると、図10のように海水淡水化が最も高く、他の対策はほぼ一定であることがわかる。費用の場合も同じ傾向を見せており、節水量とLCE及び費用を考慮すると、単独対策では、カスケード式が、複合対策としてはシナリオ8, 9, 10が

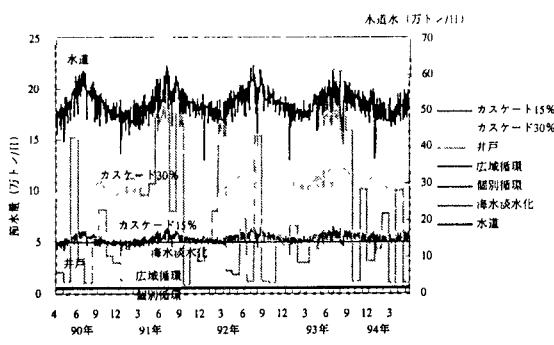


図 7-1 平常時対策別水資源確保量その 1

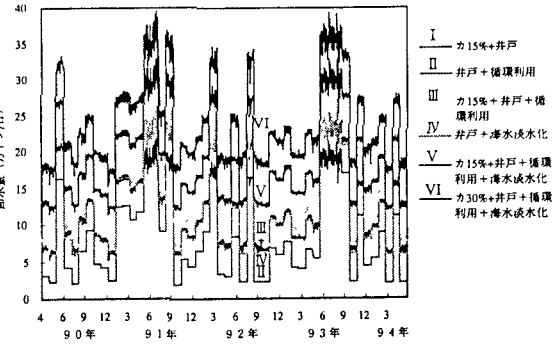


図 7-2 平常時対策別水資源確保量その 2

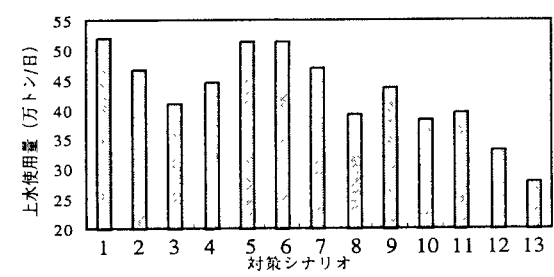


図 8 平常時対策実施後の上水量

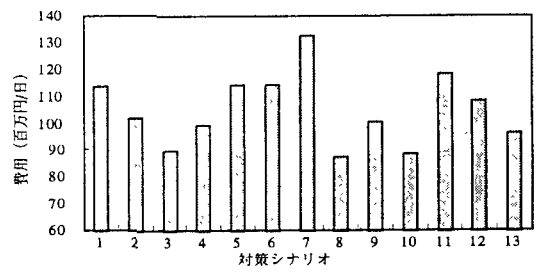


図 9 平常時対策実施後の総費用

良い。つまり、カスケード式節水を基本にし、地下水と循環利用を加える方法が、水資源の確保、LCEと費用の面で良好である。したがって、平常時には海水淡水化の操作は不要となる。

5.3 渇水時の水資源確保対策とそのエネルギー及び費用
渇水時の水源対策は水量の確保にある。表3で示したシナリオに基づいて計算した。結果を図11-1、11-2に示す。算定した結果によると、水不足になる時期は異なるが、表4のように水不足が深刻な時期には全対策を考慮しても足りない部分が生じる。カスケード式節水を15%実施したとき、各対策別最大供給量は節水分は5.7万m³/日、井戸から6.4万m³/日、循環利用と海水淡水化では設置規模まで達することになった。しかも、最大5.6万m³/日の不足分が生じ、5万m³/日規模の海水淡水化でも前回の渇水を完全に防ぐのは無理であったことが分かる。海水淡水化の稼働日数が148日間になっても、24日間不足が生じた。カスケード式による節水率を30%まであげると、水不足分は最大1.8万m³/日で、水不足日数を2日間まで減らすことが可能になるが、海水淡水化施設の稼働日数は30日間となり、稼働効率が悪くなる。海水淡水化以後の不足分についてはこのままで我慢するか、節水するか、より費用をかけて施設を増やすかの選択となる。

対策別水供給量をみると、カスケード式による効果が最も高く、次いで井戸水、海水淡水化の順である。対策にかかる総費用をみると、図12のように海水淡水化が一番高く、カスケード式は費用と消費エネルギーが不要と仮定しているの、これを除くと井戸がかなり安くなり、循環利用がそれに続くことが分かる。全渇水期間に要した供給した水の費用の総和を見ても37億円程度で海水淡水化が最も高くなった。

LCEは圧倒的に海水淡水化が大きかった。渇水対策としては、水量の確保が優先するため費用とLCEが高

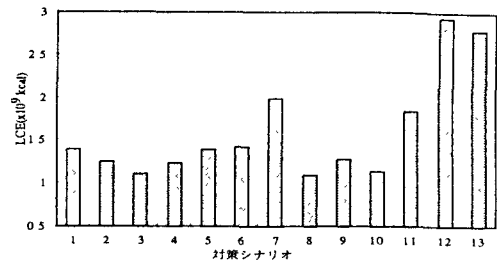


図10 平常時対策別のLCE

表4 渇水時対策別供給日数と供給量

	カスケード式		井戸		広域循環		個別循環		海水淡水化		不足分	
case	case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2
日数(426日中)	341	342	236	94	161	51	152	44	148	30	24	2
最大供給量(万m ³ /日)	57	102	6.4	6.3	0.5	0.5	0.6	0.6	5.0	5	5.6	1.8
渇水期間中総量(万m ³)	1391.2	2160.8	445.7	149.6	77.0	24.0	87.9	22.0	273.0	51.9	36.8	3.2

* 但し、case1:カスケード式15%、case2:カスケード30%適用時

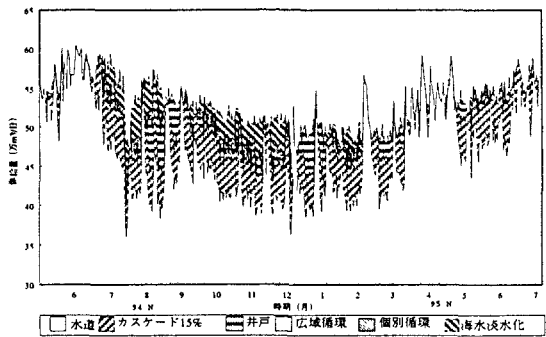


図11-1 渇水時対策別水供給量(カスケード15%)

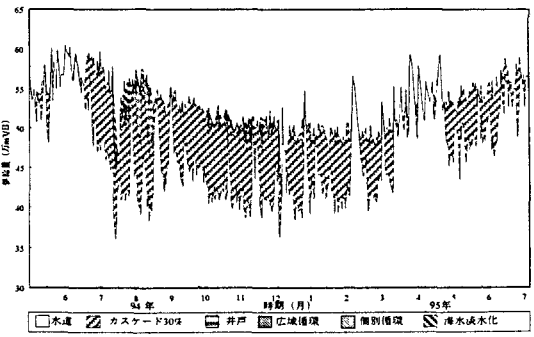


図11-2 渇水時対策別水供給量(カスケード30%)

くても、その施設を使うしかないという考え方もあるが、計算結果が示すようにあまりにも高いので、対策としての優先的採用は避けたい。

以上エネルギー最小、コスト最小の視点で渇水時の不足水量を補うための供給方法の選択について検討した。1994、1995年の渇水では、流域の平常時と渇水時の配水量の差が最大で約十数万 $\text{m}^3/\text{日}$ であったことを考慮すれば、この計算例は海水淡水化施設の導入もやむなしとなるが、平常時の地下水利用によって1日当たり十数万 m^3 の水道原水がストックされることも考慮したシナリオの採択が必要である。

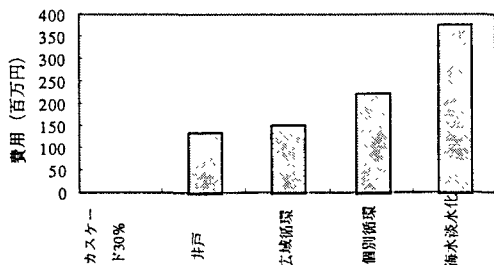


図12 渇水対策別総費用

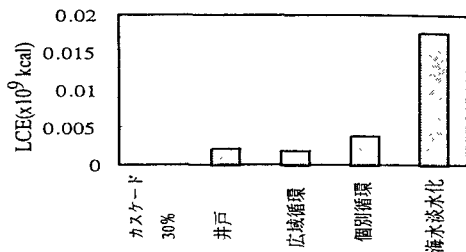


図13 渇水時対策別LCE

6 対策案の評価と考察

上水以外の水源はその質と量において異なる特徴を持っているので、渇水などに利用するためには、その質と量に合わせた水源確保計画が必要である。地下水の場合、比較的安定した水質で、降雨形態によって揚水量を変えざるをえないが、費用最小とLCE最小の面からは最も有効な水源である。しかも用途の面から検討しても、飲み水以外のほとんどの用途にそのまま利用できるため、積極的な開発が望まれる。しかし、対象流域では、水量的に多くが期待できないとして、その利用に関心が薄いのが現状である。とはいっても、常時は地下水利用により水道用水の貯水量を保つ役割を持たせることもできるし、渇水時には非常水源として位置づけられ、環境に優しくもあるので、本流域では、砂層で地盤沈下の心配もない良好な水源の一つである。これらの施設は運用部分でのエネルギー消費量やコストはあまり要しないので、貴重なものである。

本流域では、全国的にも先端的に循環利用に取り組んでいるが、実際、使用量は、限られた用途のため、増加しても1万 $\text{m}^3/\text{日}$ を若干上回る程度に留まっている。本研究の結果によると、利用可能量は少ないものの、上水と海水淡水化の間の中間の費用とLCEを示している。処理率をより上げると質的には上水並まで可能であるが、その場合には、費用とLCEがより高くなる可能性がある。海水淡水化は、本研究の結果から見ると、今まで検討した対策だけを考慮する場合、我慢あるいは節水しない限り導入せざるを得ないが、この方策は一番LCEが高く新たな環境問題を起こす可能性がある。したがって、未検討の水源ないしは施設に対しても検討する必要がある。また最大渇水期の需要に合わせ施設容量を備えれば備えるほど、その分LCEと費用は高くなる。これらのことを勘案すると、水利権の問題はあるが、広域水資源対策として他の流域からの新たな導水を考慮する必要がある。既に筑後川導水を実施している福岡都市圏の水道水のLCEと費用が海水淡水化に比べかなり低くなっていることから、長期的な安定的な水供給には有利になると思われる。

利水安全度から見ると、渇水期間の426日において水道水だけで賄える期間は少ない。渇水期間中平常時の需要量を賄うには、ここで検討してきた対策をすべて導入しても足りない。供給量だけを考える際、効果の大きい対策の順で導入するとすればカスケード式がもっとも有効で、井戸水と海水淡水化がそれに続くことになるが、安定供給の点では地下水は供給可能量の変動が大きく、用途も制限されている。安定した供給が可能な海水淡水化も上水供給量を常に維持できるようにするためならばやむをえないところである。

LCEで各水供給方法を評価した場合、運用で電力を大量消費する施設の値が大きく、今後はこの運用部分のエネルギーを抑えた省エネルギー型の施設を整備することも必要である。また各施設の規模によって単位水

量当たりのLCEやコストが変化するので、これらのことも考慮に入れ、最適な規模の施設で運用できるように検討する予定である。

7 終わりに

喝水に見舞われやすい地域において、LCEと費用を指標とした最適な水供給方法の検討と実際の例について検討してきた。喝水に見まわれたことのある地域では、平常時の水源利用形態が喝水にも影響を及ぼすため、喝水に備えた平常時の水源管理が必要である。海水淡水化施設など喝水時のための施設であっても、その施設の建設費用とエネルギーは日頃の水源利用費に含めざるを得ず、喝水時の対応が平常時の費用にも及ぶことになる。

また本研究はGISを基本データの整理に利用した流域水管理手法の一例を提示したものであるが、流域の水質水量総合管理のためにはさらに適切な判断指標と管理方法の開発が必要である。

謝辞

本研究にあたりデータを提供して下さった福岡県、福岡市をはじめとする関係団体に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 水収支研究グループ編：地下水資源・環境論—その理論と実践，共立出版，1993
- 2) 亀岡真人：博多湾流域における水循環利用可能性，九州大学工学部水工土木学科卒業論文，p.54,1997
- 3) 福岡地盤図作成グループ編：福岡地盤図，九州地質調査業協会，1981
- 4) 福岡地盤図作成グループ編：福岡地盤図（南部編），（社）福岡県地質調査業協会，1992
- 5) 水道と地球環境を考える研究会編：地球環境時代の水道，技報堂出版，p.109,1992
- 6) 地球環境に関する委員会編：持続可能な社会を支える建築設備のために，社団法人空気調和・衛生工学会，pp.227-229,1997
- 7) 福岡市水道局：福岡市水道局事業統計，1995
- 8) 楠田哲也，森山克美：費用・便益による排水処理システムの評価，環境システム研究Vol.22，pp.171-181,1994
- 9) 大西文秀，増田昇，安部大就，西脇国博，杉本三千雄，佐藤吉之：集水域を単位とした環境容量を求める新しい試み，環境情報科学 Vol.24-1，1995
- 1 0) 福岡県水資源対策局編：福岡都市圏水資源対策研究会討議資料，1995、1997
- 1 1) 福岡県編：福岡県の水道（平成7年度），1997
- 1 2) 田頭直人，鈴木勉，内山洋司：都市インフラストラクチャー構築の資源使用量と環境負荷，電力中央研究所報告，Y95011，（財）電力中央研究所，pp.59-71,1996
- 1 3) 池田秀昭，井村秀文：社会資本整備にともなう環境インパクトの定量化に関する研究，環境システム研究，Vol.21，pp.192-199，1993
- 1 4) 石川和也：水循環を考慮する都市における水使用；LCEとコストによる評価，九州大学大学院水工土木学専攻修士論文，1998
- 1 5) 建設省土木研究所地質化学部化学研究室編：資源・エネルギー環境負荷の算定手法の開発と実態調査報告書，環境庁，1993
- 1 6) 土木学会環境工学委員会編：流域水質管理システム開発小委員会報告書，1997
- 1 7) 福岡県水資源対策局編：地下水利用実態調査報告書（福岡・筑豊，平成7年度），1996
- 1 8) 下水道工事積算編集研究会編：下水道工事の積算，経済調査会，1994
- 1 9) 沖縄県企業局編：沖縄県海水淡水化施設導入計画概要，1995