

## 福岡市水資源管理支援システム

九州大学環境システム科学研究センター 河村 明

九州大学環境システム科学研究センター メラブテン タレク

九州大学環境システム科学研究センター 神野 健 二

### 1. はじめに

水は、自然環境の根幹となって多様な生態系を支えている。人類の歴史も、水の恵みのもとで始まっており、人々の生活、文化、経済などは、水に支えられて発展してきた。今日、水は人間社会の存立基盤をなす基本的かつ貴重な資源として認識され、都市の発展においても、水は重要な制約要因となってきている。さらに、近年都市圏において渇水は頻発する傾向にあり、しかもひとたび渇水が発生すると、その経済的、社会的な影響は甚大なものとなっている。しかし水資源の開発は、貯水池適地の不足、地球環境及び生態環境保全上の制約から容易に進まない状況にある。また、二酸化炭素などの温室効果ガスの増加による地球温暖化や、酸性雨など、地球規模の気候変動および近年頻発する傾向にある異常気象の発生も、将来の水資源確保という点からみて不安定な要因として懸念されている。

以上のような水資源を取り巻く状況を鑑みると、給水システムの信頼性は水資源の計画や管理・運用にとってきわめて重要な課題であるにも関わらず、想定外の厳しい渇水や水需要の急速な増加などによる給水能力の低下は、特に水需給の逼迫した都市圏においては焦眉の問題であり、避けて通ることのできない問題である。この場合、既存の給水システムや水資源システムを有機的に統合管理し、適切な水資源運用を行うことにより、渇水被害や渇水リスクを大幅に軽減することができると考えられる。

ところで、今日の都市圏の水給水システムは大規模かつ複雑化する傾向にあり、多地点の降雨・流量などの水文データや貯水池・取水場・浄水場における水利権や施設能力などの過去・現在の膨大なデータを解析し、将来の状況などを推定・予測しながら、複数の受益者間の利水調整を実行し、水資源管理・運用を最適に行うことは至難の業である。

そこで本研究では、様々な想定渇水シナリオに基づく水資源システム最適管理のための情報を提供し、政策者の的確な判断を支援する水資源管理のための意志決定支援システムを、通常のパソコン上でユーザーフレンドリーなビジュアル表示によるインターフェイスにより構築することを目的としている。

### 2. 対象地域の水資源状況

研究対象とする福岡市は、九州・西日本の中心都市として発展し、その市域面積は約337km<sup>2</sup>、人口は平成9年現在約130万人(日本第8位)であり、年間降水量は約1,600mmと全国平均よりもやや少なくなっている。福岡市は、元々地勢的に水資源に恵まれておらず、このため急増する人口に対し、小規模な水資源開発を数多く行うことにより、水需要増に対処してきた。Fig.1に示すように、現在、福岡市は近郊の4つの河川、7つのダムおよび域外の筑後川から導水しており、施設能力は704,800m<sup>3</sup>/日となっている。しかし、筑後川を除くといずれも二級河川であり、ダム容量も充分とはいえず、都市の規模に比べ水資源には余裕がないのが現状である。過去においても11回もの給水制限を実施しており、特に、昭和53年の福岡大渇水においては、給水制限日数は287日に及び、渇水評価指標(節水率×給水制限日数)は8,160%日と、これまでの全国の渇水の最大を記録している。また、平成6年渇水時にも給水制限日数は295日(渇水評価指標は5,123%日)と過去最長を記録

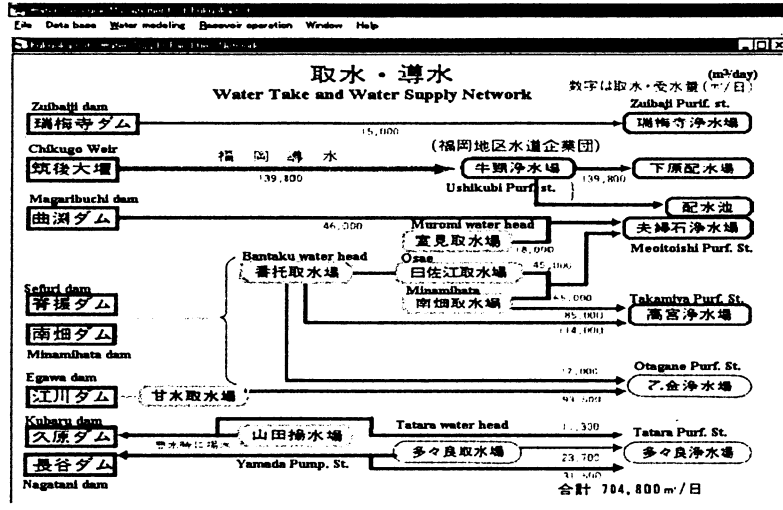


Fig.1 Principal structure of the Fukuoka City water supply network.

している<sup>2), 3)</sup>.

### 3. 意志決定支援システムの構成<sup>4)~7)</sup>

水資源管理における意志決定支援システム(Decision Support System, 以下DSSと記す)の概念は10年以上前に提案されている<sup>5)</sup>。しかしながら、コンピュータテクノロジーの発展に伴い、総合的で実用的なDSSが開発されたのは比較的最近のことである。特に実際の水資源管理システムへのDSSの開発・適用は余り例がない。本研究では実際の福岡市を対象としてDSSを構築した。本DSSはFig.2に示すように、①ユーザーフレンドリーなビ

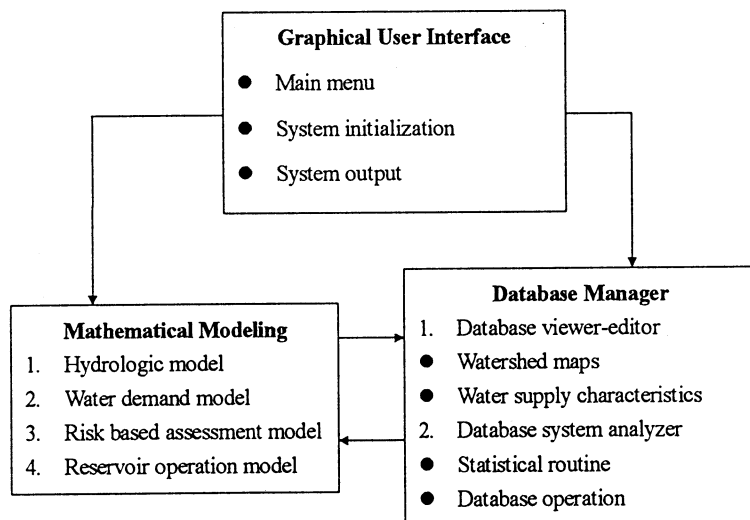


Fig.2 Decision support system structure.

ジュアル表示によるインターフェイス (Graphical User Interface, 以下GUIと記す), ②データベースマネージャ, ③数学モデルの3つの主要コンポーネントから構成されている。

### 3.1 ユーザーフレンドリーなビジュアル表示によるインターフェイス(GUI)

ユーザーフレンドリーなビジュアル表示によるインターフェイス(GUI)は, DSSの構築においては重要な問題である。インターフェイスのデザインは, ユーザがDSSから必要な情報を引き出し, DSSのもつ様々な機能を使いこなす上で, 大きな影響を及ぼすからである。このため, 構築したDSSは, ユーザーフレンドリーでかつユーザが必要な情報に容易にアクセスできるように配慮した。そしてユーザと必要な情報を相互に関連づけるのがGUIである。Fig.3に示すように, 全てのDSSのコンポーネントは, 構築したDSSソフトウェアのメインメニューから呼び出される。メインメニューからGUIにより呼び出された, 種々のモデルなどの画面表示の例をFig.4に示している。なお, 本DSSは, 通常のパソコンを用いたWindows 95/98上で構築されており, 13MBのハードディスク容量が必要である。また, GUIはMicrosoftのVisual Basicを用いてプログラムしている。

### 3.2 データベースマネージャ

DSSのデータの質とその扱いやすさは, 数学モデルの実行・応用, 特に実際問題に適用する前段階のキャリブレーションや検証において重要な役割を果たす。このためデータベースマネージャは本DSSの他のコンポーネントと密接に関連づけるよう構築しており, データコミュニケーションネットワークの役割を担っている。ユーザは, このデータマネージャを介して, 通常の統計処理, 様々な時間間隔毎のデータの累積値, ある特定のデータの選択, データのプロットや表作成などが容易にできる<sup>8)</sup>。例えば, Fig.5の福岡市給水マップより, 目的の貯水池, 水源, 浄水場をクリックすることにより, その場所のデータをグラフとしてあるいは値そのものとして参照すること

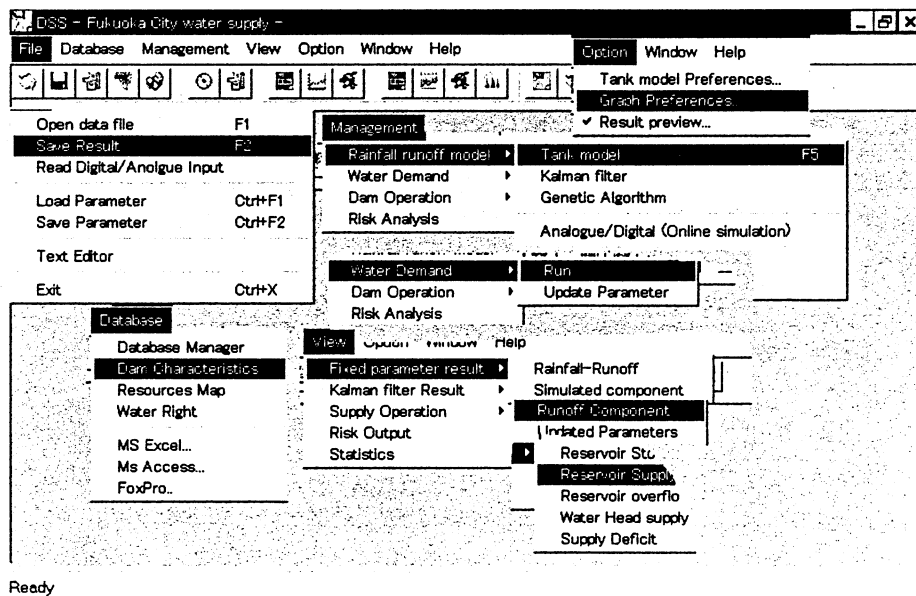


Fig.3 Decision support system graphical user interface: main menu.

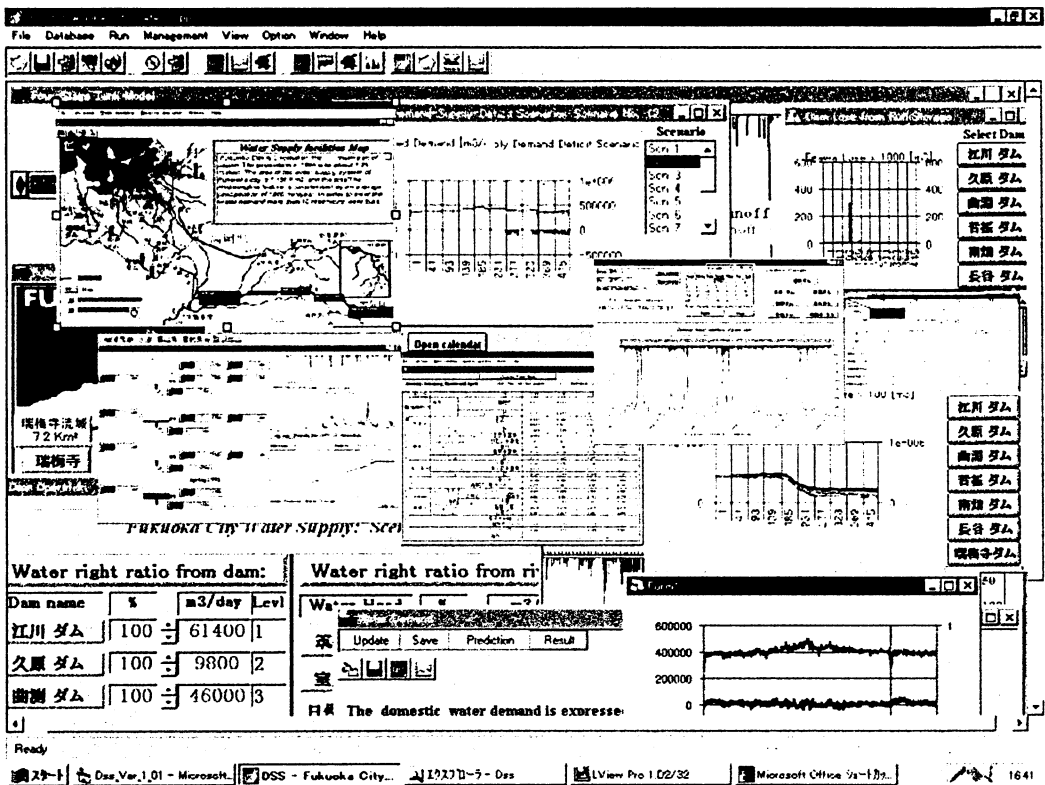


Fig.4 Environment and graphical user interface of the DSS for Fukuoka City water resources management.

ができる。さらに、本データベースマネージャにより、DSS上のデータを、例えばMicrosoft ExcelやAccessなどのソフトと容易にデータ交換ができ、それらのソフト上でデータの抽出などの変換が可能である。参考として、Fig.6にデータ選択画面をしてしている。

### 3. 3 数学モデル

数学モデルは、本DSSの骨格を成すものである。数学モデルとしては、降雨流出解析モデル、水需要予測モデル、渇水リスク評価モデル、貯水池操作モデルから構成されている。

#### 降雨流出解析モデル

本DSSで採用している流出モデルは直列4段タンクモデルである。このタンクモデルの16個の未知パラメータは、データベースマネージャでデータを選択した後、ユーザーフレンドリーなビジュアル表示によるパラメータ入力を用い、計算流出結果の状況を見ながら、ユーザが試行錯誤で最適なパラメータを決定していくのに用いられる(Fig.7)。また、拡張カルマンフィルターにより、実時間でパラメータを変更していくオプションも用意されている。本流出解析モデルの詳細は参考文献9)を参照されたい。

#### 水需要予測モデル

本モデルは、福岡市水道の日需要量(日配水量)を予測するモデルであり、以下のような線形回帰式で表現

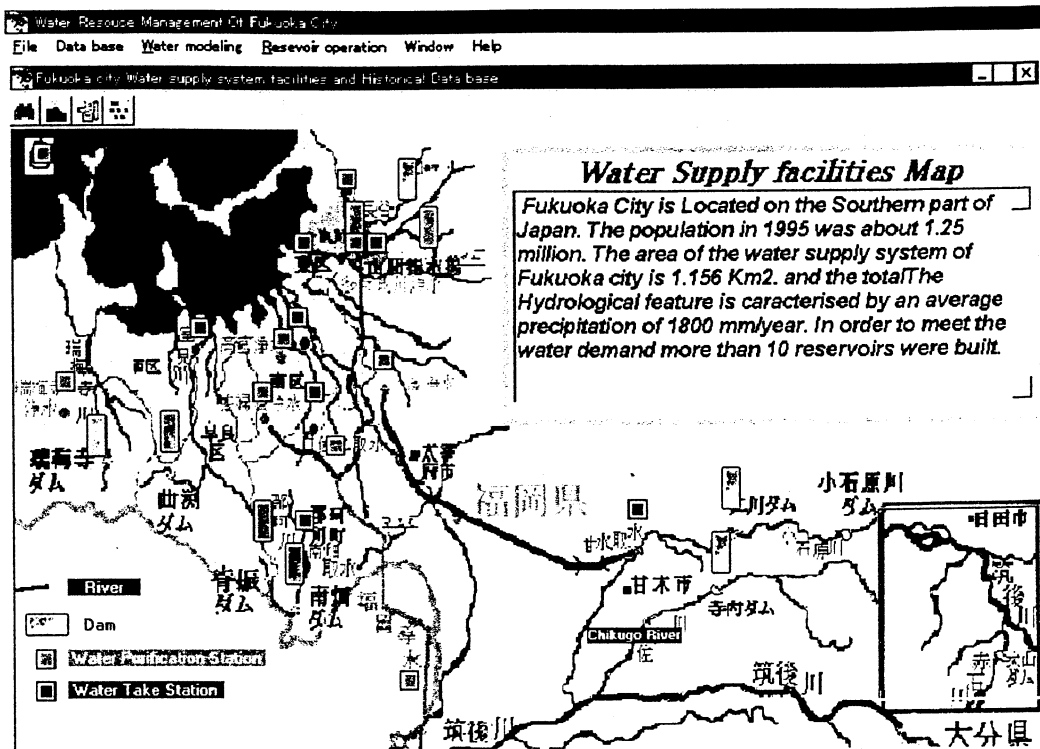


Fig.5 Water supply system of Fukuoka City.

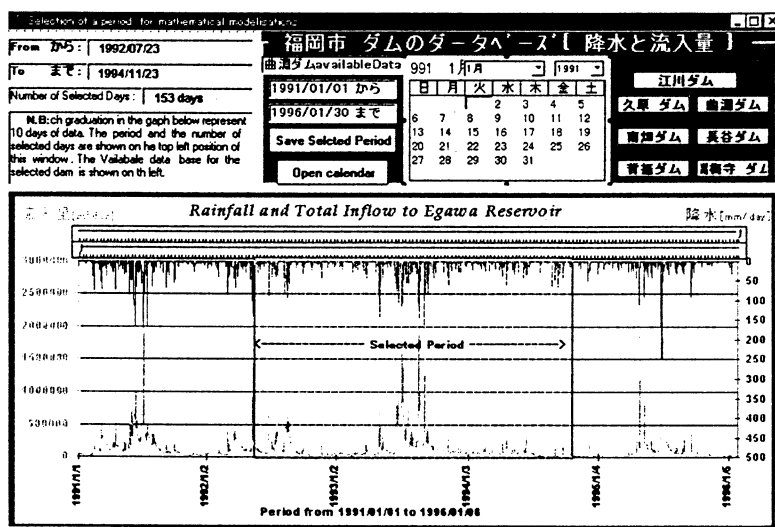


Fig.6 Database manager: graphical data selection interface.

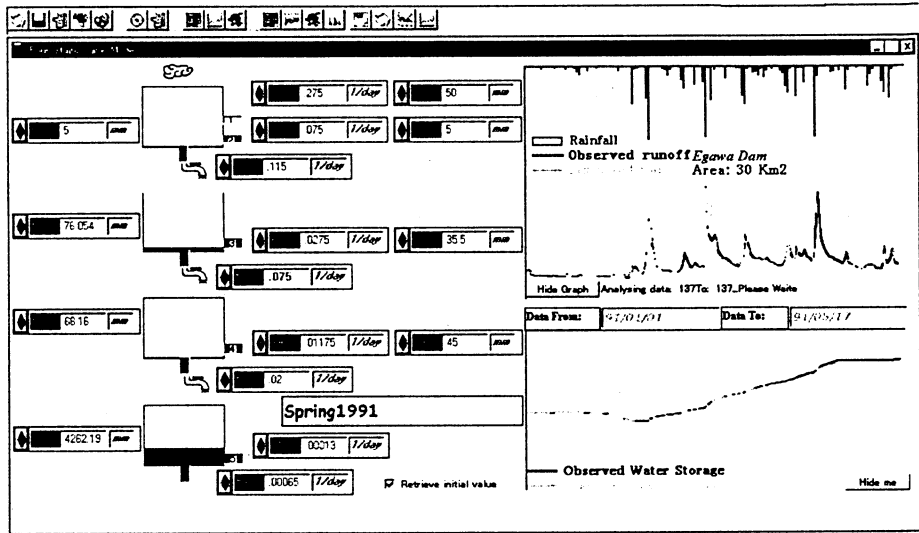


Fig.7 Four-stage tank model interface: results from a rainfall-runoff analysis of the Egawa reservoir.

している。すなわち、本モデルは線形トレンドに月係数、特殊日係数を考慮した簡単な式となっている。

$$Wd(t) = trend * t + MDD * Mcoef * Dcoef \quad (1)$$

ここに、 $t$ : 期間ははじめからの日数(day),  $Wd$ : 福岡市日水需要量( $m^3/day$ ),  $MDD$ :  $t=0$ における線形トレンドの値( $m^3/day$ ),  $Mcoef$ : 月係数(無次元),  $Dcoef$ : 特殊日係数(無次元)。

式(1)のモデルパラメータはFig.8に示すインターフェース画面により、ユーザが容易に変更できる。なお、本モデルの福岡市に対するパラメータ値(デフォルト値)については、参考文献10)を参照されたい。Fig.9に、本モデルを用いた福岡市の1991年1月1日から1996年1月30日までの水需要量予測結果を示す。なお、同図には、実際の水需要量および予測誤差も図示している。Fig.9より、平成6年渇水で給水制限を行った期間では大きな予測誤差が生じているのが分かる。この予測誤差が給水制限期間中の水不足量に対応するものと考えられる<sup>5)</sup>。

#### 渇水リスク評価モデル

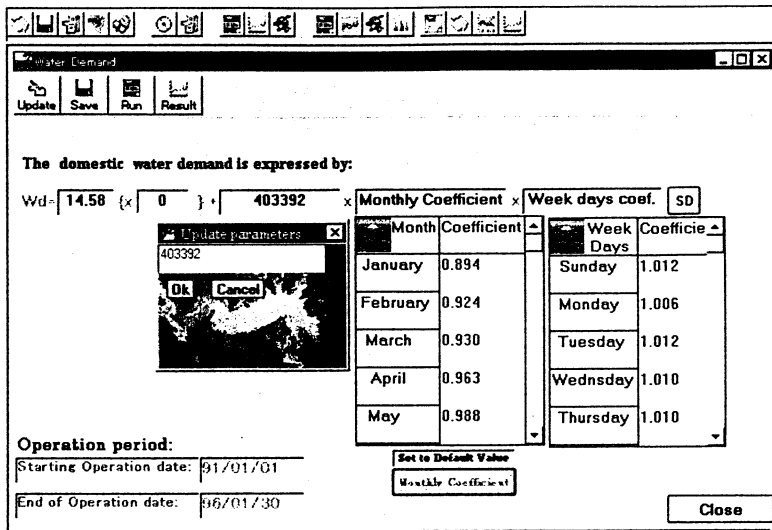
水資源システムの利水安全度を評価する指標はいくつか提案されている。本DSSでは、渇水時における多水源システムの運用評価には、信頼度(Reliability)、回復度(Resiliency)、脆弱度(Vulnerability)そして渇水リスク指標(Drought Risk Index, 以下DRIと記す)の4つの指標を用いることとする。

信頼度 $Rel$ は対象とする水資源システムが水不足なく運用される確率として次式で表される。

$$Rel = \frac{NS}{T} \quad (2)$$

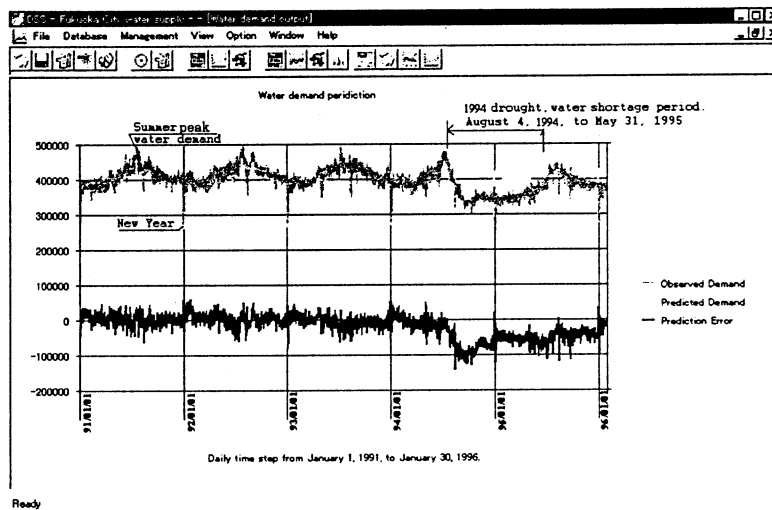
ここに、 $T$ : 対象期間(day),  $NS$ : 対象期間のうち給水が100%行われた日数(day)。信頼度リスクは $(1-Rel)$ で表される。

回復度は $Res$ は、水資源システムが一旦給水制限を余儀なくされた状態に陥った場合に、正常状態に回復する確率として表現され、どのくらい早く正常な状態に回復できるかを表す指標であり、次式で計算される。



Ready

Fig.8 Water demand model interface.



Ready

Fig.9 Daily domestic water demand, observed and predicted demands, and prediction error for the period extending from January 1, 1991, to January 30, 1996.

$$Res = \frac{NFS}{NFF} \quad (3)$$

ここに、 $NFS$ :対象期間中に給水制限から正常状態に回復した日数(あるいは、正常状態から給水制限に陥った日数)(day),  $NFF$ :対象期間の給水制限の日数(day). なお、回復度リスクは $(1-Res)$ で表される。

脆弱度 $Vul$ は、給水制限を行った期間での平均水不足率として次式で表される。

$$Vul = \frac{\sum_{i=1}^T (WD_i - WS_i)}{\sum_{i=1}^T WD_i} \quad (4)$$

ここに、 $WD_i$ :対象期間中のある日 $i$ の水需要量( $m^3/day$ ),  $WS_i$ :対象期間中のある日 $i$ の給水量( $m^3/day$ ).

最後に、 $DRI$ は上記3つの指標の重み付き線形結合として次式で定義する。

$$DRI = w_1(1-Rel) + w_2(1-Res) + w_3 Vul \quad (5)$$

ここに、 $w_1, w_2, w_3$ :各リスクに対する重み係数で、 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ .

なお、リスク指標の詳細は、参考文献10), 11)を参照されたい。

### 貯水池操作モデル

本モデルは、複数ある取水源(7ダムからの取水, 4つの河川取水, 筑後導水)から、水需要を考慮しながらどのように取水するかを、Fig.10の貯水操作画面によりまず与え、それに従って、各取水源の水利権やダムの連続の式を満足するように運用するモデルである。そして、本貯水池操作モデルによる給水システムの運用評価を、前述の4つのリスク指標( $1-Rel$ ), ( $1-Res$ ),  $Vul$ ,  $DRI$ (いずれも値の最小値は0で最大値は1である)を用いて行うこととする。本貯水池操作モデルの詳細については参考文献5), 11)を参照されたい。さらに、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, 以下GAと記す)を用いた渇水リスクを最小にする操作を探索するオプションも追加している(参考文献7), 11)を参照)。

Water right ratio from dam:				Water right ratio from rivers:		
Dam name	%	m3/day	Level	Water Head	%	m3/day
江川ダム	100	68900	4	筑後川weir	40	54120
久原ダム	100	9800	6	室見取水場	100	58900
幽淵ダム	100	46000	5	日佐江取水場	100	0
青瀬ダム	100	15020	2	香托取水場	100	142200
南畑ダム	100	60079	3	多々良取水場	100	30600
長谷ダム	100	27100	7	Total Supply from rivers [m3/day]:		284920
蔵持時ダム	100	11700	1			
Total supply from dams [m3/day]:		238599				4000

Risk indices weights		Risk Thresholds	
Reliability:	0.30	Reliability > :	0.60
Resiliency:	0.23	Resiliency > :	0.50
Vulnerability:	0.33	Vulnerability < :	0.05

Re-view scenario:

Fig.10 Risk assessment and reservoir operation interface.



## 4. 適用例

### 4.1 渇水シナリオシミュレーション

本DSSを用いて、種々の降水パターンの条件の下で、渇水シナリオシミュレーションを実行し、福岡市の給水システムの渇水リスクを評価してみよう<sup>5)</sup>。ここでは、2つの降水条件の場合を取り上げる。すなわち、ケース①筑後川流域で渇水となり、福岡市では渇水とならなかった平成4年、ケース②福岡市、筑後川流域ともに大渇水となった平成6年渇水の期間を考える。そして、筑後導水が0%から100%まで制限された場合のシナリオに対するシミュレーション結果をFig.11に示している。Fig.11より、ケース①の場合、筑後導水が80%制限されても渇水リスクは0で給水制限に陥ることはないが、ケース②の場合、筑後導水が60%よりも制限されると渇水リスクが生じていることが分かる。そして、筑後導水が100%制限され、導水が全く行われない場合は、ケース①の $DRI=0.1$ に対し、ケース②で $DRI=0.4$ と4倍も高くなっていることが分かる。なお、渇水シナリオシミュレーションでは、渇水リスクのみならずダム貯水量変化なども同時に表示されることを付記しておく。また、これ以外の渇水シナリオに対するシミュレーション結果については参考文献4)に詳しい。

### 4.2 GAを用いた最適操作の探索

平成6年渇水期間(1994年1月1日から1995年5月31日)について、GAを用いて各種水源からの最適取水の探索を試みた。この場合の適応度(評価関数)としての渇水リスクの指標として、期間内の $DRI$ を最小とすることとした。また、他の指標( $I-Rel$ ), ( $I-Res$ ),  $Vull$ に対しては、ある一定の許容限度を設け、その許容限度内で解を探索した。Fig.12に100世代までの適応度としての各リスク指標の結果を示している。この図より、世代が進むに

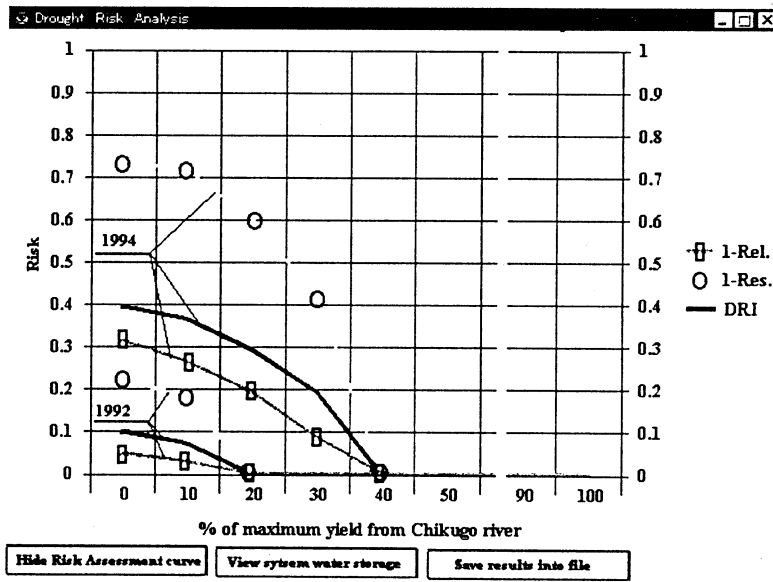


Fig.11 Fukuoka City water supply performance as a function of the water yield from the Chikugo river basin for the weather conditions of 1992 and 1994.

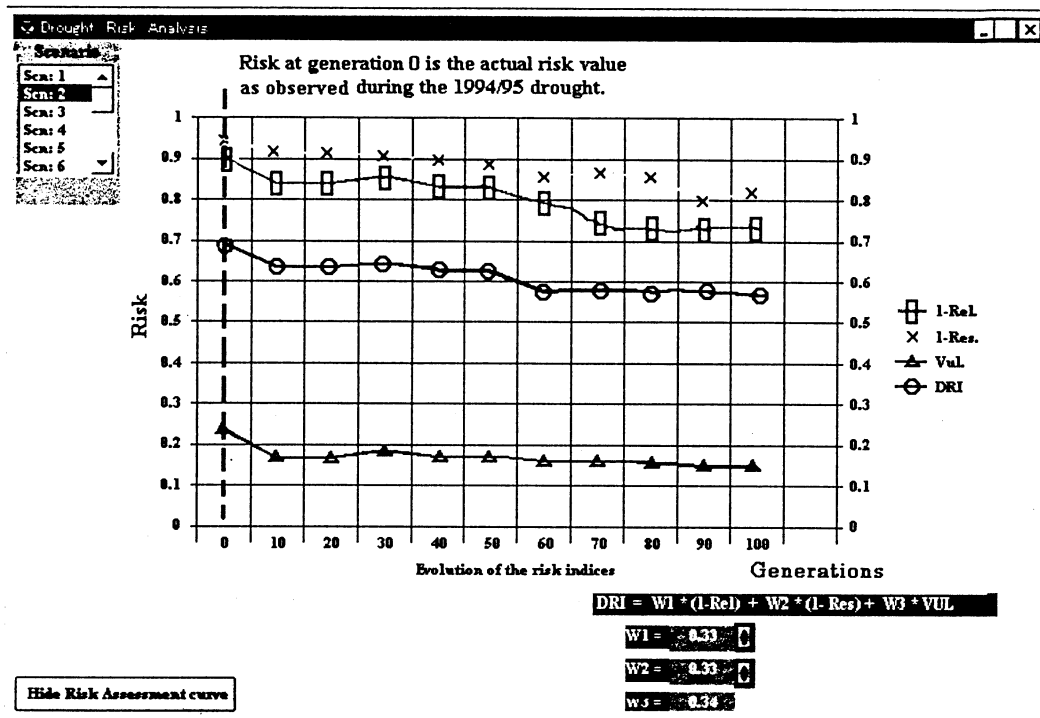


Fig.12 Variation of the risk indices as a function of the number of generations at the end of the operation period extending from January 1, 1994, to May 31, 1995.

連れてリスクが少しづつ減少しているのが分かるが、著しい改善は見られなかった。なお、GAを用いた最適操作の探索についての詳細は参考文献7), 11)を参照されたい。

#### 4. むすび

本研究では、様々な想定渇水シナリオに基づく水資源システム最適管理のための情報を提供し、政策者の的確な判断を支援する水資源管理のための意志決定支援システムを、通常のパソコン上でユーザーフレンドリーなビジュアル表示によるインターフェイスにより構築した。これを実際に用いた結果、①本DSSの貯水池操作モデルを用いて、渇水リスクシミュレーションを行うことにより、各水源からの最適な取水量が容易に求められた。②構築した意志決定支援システムにより、従前の方法に比べ著しく、より簡単に、早く、正確に、様々な渇水シナリオに対するシミュレーションが行えた。③構築した意志決定支援システムは、ユーザーフレンドリーなインターフェイスを用いることにより、容易かつ速やかに数学モデルモジュールやデータベースにアクセスできた。④福岡市の渇水を対象とした適用結果より、構築した意志決定支援システムが他都市の給水システムの渇水管理を著しく改善する可能性が示された。

現在、複雑化した水資源システムを適切に運用することは焦眉の問題となっているが、支援システムが提供されることは希である。そこで、本研究で示した実際の水資源システムを対象としたDSSが、他の水管理システムにも適用されることを望むものである。

## 【参考文献】

- 1) Kawamura, A., Jinno, K., Ogata, C. and Oka, I.: Integrated water resources development and management in Fukuoka Metropolitan Area. *Proc. of the Int'l Workshop of Integrated Water Resources Management in Urban and Surrounding Areas at Gelsenkirchen*, 17.1-17.12, 1994.
- 2) 河村 明:平成6年渇水－地域別の事例・福岡市－昭和53年福岡大渇水との比較, 土木学会誌, 第80巻第9号, p.96, 平成 7年 8月.
- 3) Kawamura A. and Jinno, K. : Integrated water resources management in Fukuoka Metropolitan Area. *Environmental Research Forum*, 3&4, pp.97-109, 1996.
- 4) Merabtene, T., Jinno, K., Kawamura, A. : Integrated decision support system for drought risk management of water supply system. *Proc. of the 11th Congress of the IAHR-APD*, pp.109-118, 1998.
- 5) Merabtene, T., Jinno, K., Kawamura, A. and Olsson, J. : Drought management of water supply systems: a decision support system approach. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 58(4), pp.183-197, 1998.
- 6) Merabtene T., Jinno, K. and Kawamura, A. : Decision support system for optimal drought management of Fukuoka City water resources: Application to the 1994/95 drought conditions. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 43, pp.157-162, 1999.
- 7) Kawamura A., Merabtene T. and Jinno, K. : Development of integrated decision support system for the water supply system in Fukuoka, Japan. *Handbook & Proceedings of the Water 99 Joint Congress*, Vol.1, pp.341-347, 1999.
- 8) Merabtene, T., Jinno, K., Kawamura, A. and Matsunaga, T. : Decision support system for the water resources management. *Proc. of the 5th Symposium on Water Resources*, pp.461-466, 1997.
- 9) Merabtene, T., Jinno, K. and Kawamura, A. : Interactive user interface for rainfall-runoff analysis by tank model. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 57(3), pp.107-120, 1997.
- 10) Xu, Z., Jinno, K., Kawamura, A. Takesaki, S. and Ito, K. : Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Water Resources Management*, 12, pp.13-30, 1998.
- 11) Merabtene T., Jinno, K. and Kawamura, A. : Development of a risk assessment decision support system for optimal control of water supply systems. *Proc. of Award-Winning Papers of International Water Supply Symposium in Tokyo '98*, pp.105-112, 1998.