

# 殿ダム貯水池における選択取水設備の 操作支援システムの開発

※矢島啓<sup>1</sup>・梶川勇樹<sup>2</sup>・Chris Dallimore<sup>3</sup>・下山茂<sup>4</sup>

<sup>1</sup>鳥取大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)  
西オーストラリア大学 Centre for Water Research 特任上級研究員

<sup>2</sup>鳥取大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

<sup>3</sup>西オーストラリア大学 Centre for Water Research (Suite 1, Level 3 470 Collins  
St, Melbourne, VIC 3000, Australia.)

<sup>4</sup>国土交通省中国地方整備局 殿ダム工事事務所 調査・品質確保課長 (〒680-0151 鳥取市国府町宮ノ  
下1221番地)



※発表者

本論文は、現在、国土交通省中国地方整備局が鳥取市内に建設中の殿ダムを対象に、ダム完成後の選択取水設備の運用のための操作支援システムを開発した内容をまとめたものである。これまでの貯水池における選択取水設備の運用は、ダム管理者の経験によるところが大きかったが、本システムが導入されれば、定量的な水質予測評価に基づいた合理的な操作が可能となる。システムは、現場におけるリアルタイムの水理水質観測データの取得管理モデル、貯水池内及びダム下流河川の水理水質予測モデル、水理水文データ予測モデルの4つを統合的に扱いかい、ダム管理者に予測結果をグラフィカルな分かりやすい情報として提供することができる。

**キーワード：** 殿ダム貯水池、選択取水設備、操作支援システム、ARMS

## 1. はじめに

日本では、1970年代後半以降に建設された多くのダムにおいて、選択取水設備（以下、SWS）が設置されている<sup>1)</sup>。また、その運用は、常時表層取水としているものが多い<sup>2)</sup>。これは冷水放流を防ぐためであるが、水量だけでなく水質においても高度な管理が求められている現在においては、表層取水が最適な運用となっているどうかは疑問である。しかしながら、水質については、物理作用のみならず化学・生物作用が絡むため、水質管理も含んだ最適運用を行うことは容易ではない。

日本のように比較的貯水池規模が小さい場合には、矢島らが検討したように、SWS運用の違いが貯水池の水質に大きな影響を与える<sup>3)4)</sup>。このため、貯水池の水質を含めた管理には、何らかの操作支援システム（以下、DSS）が必要になると考えられる。ダム貯水池を対象としたDSSは、洪水流量を対象として開発が始まった<sup>5)6)</sup>。その後、Darrellらは貯水池内の水温を対象として、鉛直1次元モデルとDP (Dynamic Programming)を組み合わせたシステムを検討している<sup>7)</sup>。Geldaらは2次元貯水池モデルを用いて、水温とSSを対象に、SWS運用の多くのシ

ナリオ計算を行い、その中から最適なものを検索するシステムを開発している<sup>8)</sup>。Westphalらは、水量と水質を対象に、複数の貯水池の運用を2次元マスバランスモデルとLP (Linear Programming)を利用した最適運用システムを作成している<sup>9)</sup>。データ収集から操作支援情報の提供までの一連の作業を自動で行うことができるDSSとして、ミラノ工科大学が開発したTwo/Le<sup>10)</sup>と西オーストラリア大学Centre for Water Research（以下、CWR）が開発したARMS (Aquatic Real-time Management System)があげられる<sup>11)</sup>。Two/Leは水量のみを対象とした管理であり、イタリアとスイス国境にあるMaggiore湖流域に適用されている。一方、ARMSは、CWRが開発した3次元貯水池水理水質計算モデルELCOM-CAEDYM<sup>9)</sup>と組み合わせられており、1週間程度の短期間を対象とし、水温の予測はもとより、濁水、植物プランクトンやクリプトスポリジウムなどの予測も行うことができる。現在、ARMSはオーストラリア国内だけでなく、諸外国でも運用されている<sup>11)</sup>。

日本においてDSSを構築する時には、洪水流入による影響を考慮するため長期間の情報提供が望ましい。このとき問題となるのが、予測計算に用いる様々な入力条件である。気象データについては、数値予報GPVを利用す



図-1 殿ダム貯水池平面図

ることも考えられるが、1週間以上の予測となると必要な時空間に対応したデータが得られない。また、実運用において、他のシステムとの連携は、運用コストの上昇やシステムの複雑化などの問題を生じる。そこで、本研究では、気象場の分類に適用実績<sup>12)</sup>がある教師なし学習アルゴリズムのニューラルネットワークシステムの一つである自己組織化マップ (Self-Organizing Map 以下 SOMと記述) を利用した予測システムを組み込んだDSSの検討を行った。さらに、ダム下流河川の水質管理も重要であることから、下流河川を対象とした、主に水温を対象とした予測モデルも構築した。

対象とするダム貯水池は、これまで著者らが検討を行ってきた鳥取県鳥取市に位置する千代川水系袋川に建設中である殿ダム貯水池とした。

## 2. 対象ダム貯水池

### (1) 殿ダムの概要

殿ダム貯水池は、平成23年完成予定の堤高75m、堤頂長294m、総貯水量1240万 $m^3$ の規模を有する国土交通省直轄のロックフィルダムである。図-1に貯水池の平面図を示す。流域面積は38.1 $km^2$ 、湛水面積は0.64 $km^2$ の比較的小規模な貯水池である。取水放流設備として、取水レベルが常時満水位と同高なゲートレス洪水吐き、発電及び利水を目的とした選択取水設備、緊急時対応の予備設備として低水放流設備が設けられている。選択取水設備は、常時満水位と最低水位間の19.8mに連続サイフォン形式のものが計画されており、表層と深水層の取水を組み合わせた異高同時取水を含んだ複雑な取水を行うことができると考えられている。

### (2) 既往の選択取水設備の運用検討

これまでに行われた検討<sup>4)</sup>では、平水時は、異高同時選択取水を行うことにより、下層の貧酸素化や表層での植物プランクトンの増殖を抑え、冷水放流の可能性も低くすることができるとともに、出水時には、常時表層取水を行うことが望ましいことが明らかにされている。但

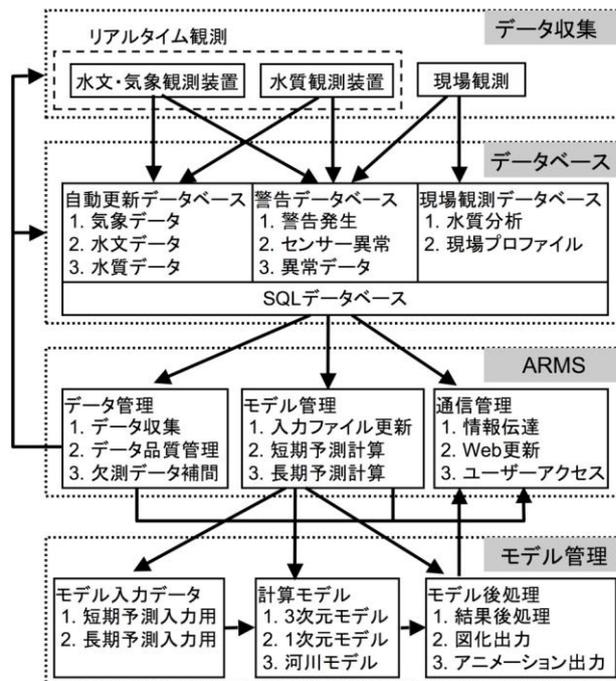


図-2 ARMSの全体構造

し、これには出水前の運用方針の切り替えという複雑な操作を伴うため、その後の検討では、基本的な運用方針として常時7mで取水する案も考えられている。

## 3. ARMSの概要

### (1) システムの概要

ARMSは、DSSの核となるシステムエンジンであり、Java言語で記述されている。そのため、様々なプラットフォームのコンピューター (パーソナルコンピューターやワークステーションなど) の、ほとんどのOS (Windows, Mac OS, Linuxなど) 上で動作することができる。ARMSで取り扱うすべてのデータは、SQL (Structured Query Language) データベースに格納されているため、利用するデータベース (MySQL, Oracle, Access, HSQLなど) 間の高い互換性を有している。

ARMSの全体構成を図-2に示す (殿ダムにおけるシステムでは未実装の部分もある)。ARMSは、“階層性”、“統合性”、“モジュール性”の3点を考慮して設計されている。“階層的”な設計とは、データソースが、上流から下流へと流れるように、データ取得 → データ品質管理 → データベースへの保存 → 数値計算用の入力ファイルの生成、という階層構造を意味する。また、観測機器を含む様々な装置、通信手段、計算モデル、データベースが一つのシステムに取り入れられている点において“統合的”である。さらに、観測装置の追加、データベースの変更、新たな分析ツール (例えば、欠測値補間アルゴリズムなど) をすぐに導入できるという点にお



図-3 シンガポール・Kranji貯水池における LDS (貯水内データ収集システム)

いて、“モジュール的”である。ARMSは貯水池の操作支援のためのインターフェースであり，“データ管理”，“モデル管理”，“通信管理”の3つの主要な機能で構成される。

ARMSに採用されている貯水池内の予測シミュレーションモデルは、3次元水理水質計算モデルELCOM-CAEDYMである。モデルの説明は後述するが、このモデルを実行するのに必要なデータは多岐にわたっており、ARMSは各種データソースに自動的に設定された時間間隔でアクセスするよう設計されている。

## (2) ARMSシステムの適用事例

ARMSの適応は、シナリオ設定に基づいた水質予測計算情報の提供による貯水池操作支援と観測データの管理システムという異なった利用の仕方がある。ここでは、次の3例を挙げる。

### a) シンガポール公共局 (Public-Utilities-Board)

シンガポール公共局が管理する2つの貯水池にARMSが導入されている。それぞれの貯水池は、流入河川の流量観測と貯水池内の水質観測システムを備えている。ARMSは流出モデルとELCOM-CAEDYMを利用して、異なった降雨シナリオに対するシミュレーションを毎日行い、それに基づいた操作支援情報の提供を行っている。また、貯水池内には、気象や水質データの取得を統合的に行うLDSというシステムが設置されている(図-3参照)。通常国内では、気象観測設備はダム管理棟に配置されることが多いが、モデルでのデータ利用を考えた場合は水面上での観測が望ましく、殿ダムにおいても同様の計測システムを計画している。

### b) シドニー流域委員会 (オーストラリア)

シドニーに上水を供給する重要な貯水池にARMSが導入されている。ARMSは、現場の観測機器を用いたリア

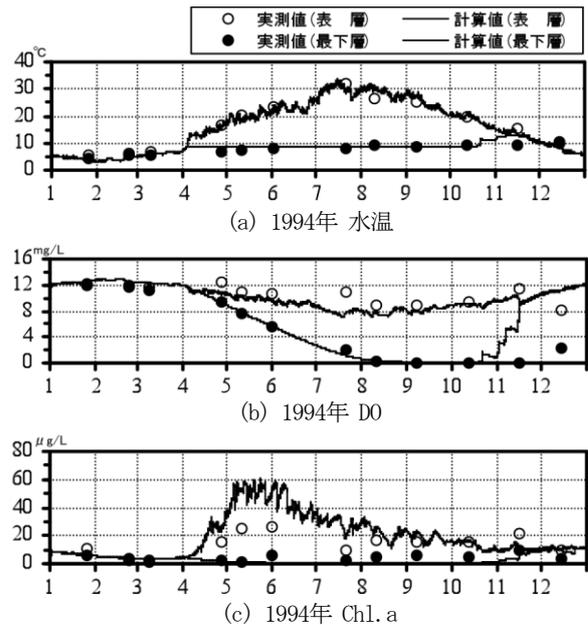


図-4 DYRESMを用いたAダムにおける各年の水温・DO・Chl.aの検証結果

ルタイム観測と流出モデル、ELCOM-CAEDYMを用いたシナリオ設定に基づいたシミュレーションを行い、取水位置決定のための情報提供を行っている。

### c) メルボルン・ウォーター (オーストラリア)

メルボルン・ウォーターは、6つの連続した上水供給用貯水池に9つの水質計測システムを設置し、ARMSを用いて、観測データの収集管理を行っている。

## 4. ARMSに用いられているモデルの概要

### (1) 貯水池水理水質予測モデルELCOM-CAEDYM

ELCOM-CAEDYMは、西オーストラリア大学CWR研究所で開発された貯水池やエスチャリーにおける水理水質予測モデルである。

ELCOM(Estuary and Lake Computer Model)はさまざまな環境外力に応じて変動する成層化された水塊の時間的挙動を解析するために適用される流体力学および熱力学の数値計算モデルである。流れ場の数値解析には、静水圧近似を仮定した非圧縮性流体に対する非定常粘性ナビエ・ストークス方程式を解いている。モデリング過程およびシミュレーション過程には大気圧、コリオリ力、潮汐、風によるせん断力、水表面における熱収支、塩分や熱量、その他のスカラー量の輸送、流入および流出を含んでいる。また、水質変動予測モデルであるCAEDYM(Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model)とリンクさせることにより、流れ、生物および化学物質の3次元的な輸送、および相互作用を解析することが可能になる。ELCOMの流体力学は、自由水面位置

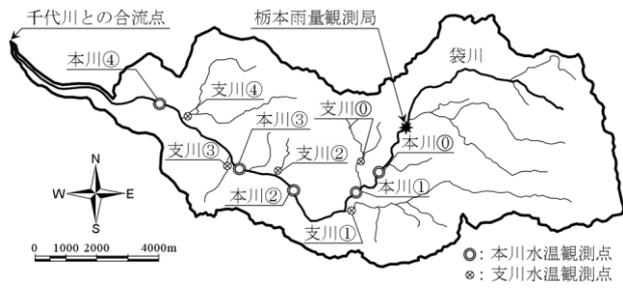


図-5 河川水温観測地点

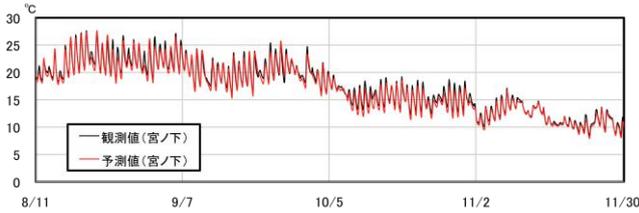


図-6 宮ノ下(本川④)における予測水温と観測値の比較

表-1 2009年夏季・秋季の計算値と実測値の絶対誤差の平均値

2009年	6 ~ 8月	9 ~ 11月
山根(本川②)	0.71 °C	0.30 °C
谷(本川③)	0.87 °C	0.53 °C
宮ノ下(本川④)	0.70 °C	0.53 °C

に共役勾配法を用いた運動量の移流をオイラー・ラグランジュ型に基づいて計算されている。塩分や水温などのスカラー量は、ULTIMATE QUICKEST差分スキームに基づいて、離散化して解を求めている。またCAEDYMにおいては、植物プランクトンはもとより、動物プランクトンやそれ以上の高次の生物相を含んだシミュレーションが可能である。但し、殿ダムにおける検討には、3種類の植物プランクトンまでを考慮している。

また、長期の水質予測計算のパラメータ検討においては、ELCOM-CAEDYMの鉛直1次元モデルバージョンとなるDYRESM(DYnamic REsevoir Simulation Model)を使用して、パラメータの同定を行っている。殿ダムは完成していないため、中国地方の規模の類似したAダムにおけるモデルの検証結果の例を図-4に示す。植物プランクトン(Chl.a)まで含めた水質の再現が良好に出来ていることが分かる。

(2) ダム下流河川の水利水質予測モデル

ダム下流河川に適応する水利水質予測モデルは、鳥取大学で開発を行った。流れの基礎方程式には、1次元不定流の連続式と運動方程式を用いた。また、1次元の熱

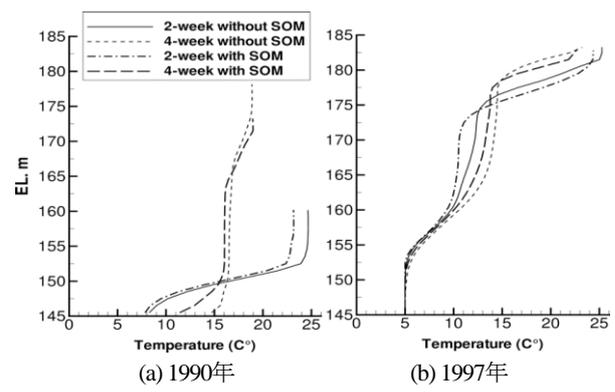


図-7 計算開始2週間および4週間後の水温分布 (常時満水位はEL. 182.8mである)

収支方程式は、佐渡らの研究における河床伝熱量を改良するとともに、低水時から高水時までの水路幅を適切に表現できるモデルを組み入れた<sup>13, 14, 15, 16</sup>。

現地では図-5に示す本川、支川それぞれ5箇所において水温計測を行った。宮ノ下(本川④)における水温予測結果と現地観測の比較図を図-6に示す。長期間の水温を良好に予測できていることが分かる。また、放流水の水温が特に注意を要する夏期と秋期の2つに分けて計算値と実測値の絶対誤差の平均値を調べたところ、ダム下流河川の水温予測は絶対誤差で1°C以下であり、実用上は十分と考えられた。

(3) 水文気象予測モデルを用いた貯水池水質予測

貯水池の予測計算を行うにあたり、流入量・流入水質や気象データの予測値が必要となる。ここでは、SOMという手法を用いることにした<sup>17</sup>。SOMは、1988年にコホネンにより開発された教師なし学習ニューラルネットワークで、入力パターン群をその類似度に応じて分類する能力を自律的に獲得するものである<sup>17</sup>。

予測モデルを検討するため、1990年8月29日6:00および1997年6月17日13:00時点における、35日先までの予測を行った。予め学習を行ったSOMマップをもとに、これに予測時刻から7日前までの観測データを入力することにより、以後の未入力データを予測結果として得、それを境界条件として、貯水池内の水質予測計算を行った。

水質予測シミュレーションの結果の中で、水質の基本項目となる水温の予測結果を図-7に示す。図中、計算開始2週間後と4週間後のSOMによる予測を用いない場合と用いた場合の結果を示した。想定した流入量の差により水位に差が生じているが、躍層より下層においてはSOM予測の有無に関わらず、予測された水温は近い分布形状を示している。

SOM予測を用いた水質予測における取水水温の平均予測誤差は、1990年の計算では-0.7°C、1997年の計算では-0.9°Cであった。どちらも平均予測誤差は1°C以内であるがこれらの予測精度から、SOM予測を利用した水質

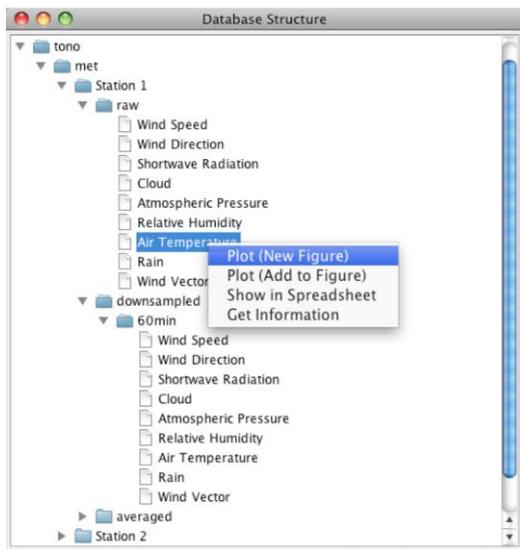


図-8 ARMS におけるデータベースの構造

予測情報は、SWSの操作支援として有効であると考えられた。

## 5. 操作支援システムの情報提供

操作支援システムにおいて重要なことは、有用な情報を分かりやすくダム管理者に提供することである。このため、ARMSではデータベースやモデルの計算結果を即座に可視化するツールを備えている。本研究においては、以下の3つの図化の設定を行った。

- ① インタラクティブな図化：データベースに納められた様々な計測データにダム管理者がアクセスし、逐次的に図化するもの。図-8に示すように、ARMSにおけるすべてのデータはデータベースソフトで管理されており、任意の項目・期間について管理者が容易に図化を行い、データを確認することができる。
- ② カスタムプロット図：ダム管理者が、定期的に見る必要のある一連のデータをすばやく図化できるようにあらかじめ設定を行ったもの。現在のシステムには、気象データ、流入流出量、水質データ、シミュレーションによる貯水池内の水温の鉛直分布図などのカスタムプロットを設定している（図-9参照）。
- ③ カスタマイズされた動画：ダム管理者が簡単にシミュレーション結果をみることができるよう、一連のシミュレーション結果が動画として自動的に作成されるもの。ユーザーは、動画におけるツールバーをコントロールすることにより、動画を再生したり、止めたりすることができる（図-10参照）。

これら一連の図化情報を用いることにより、ダム管理者は、貯水池で計測されているすべてのデータを簡単に

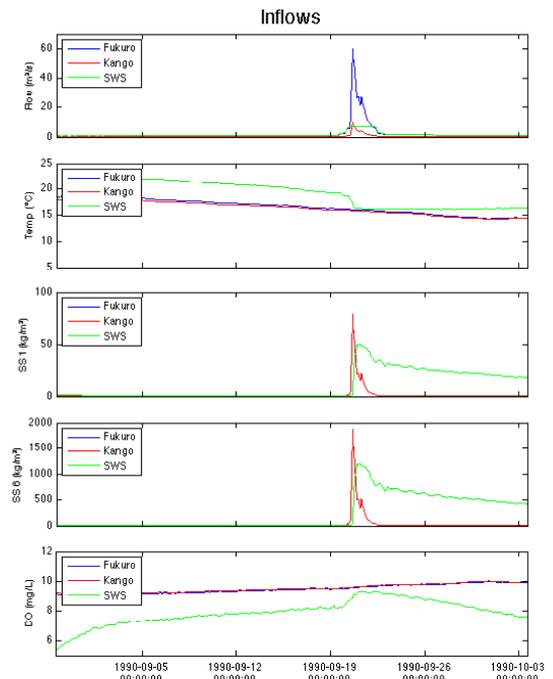


図-9 ARMSの情報提供画面例（その1）. シミュレーション結果のカスタムプロット図. グラフ上から、流入・取水量、流入・取水水温、流入・取水SS（粒径グループ1）、流入・放流SS（粒径グループ6）、流入・取水DOを表している。

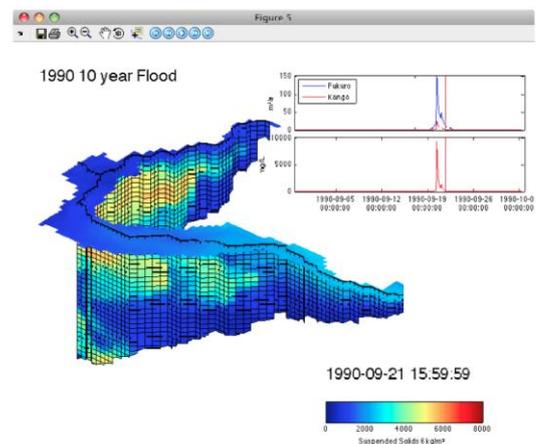


図-10 ARMSの情報提供画面例（その2）. 貯水池内でのSSに関する3次元動画

図化し把握することができるとともに、シミュレーション結果の図化により、これから発生する貯水池内での問題を予想し、貯水池操作の意志決定を支援することができる。また、シミュレーション結果の把握は、貯水池内のメカニズムを理解し、ダム操作を行うときに必要な知識獲得にもつながると考えられた。

## 6. おわりに

本研究では、殿ダム貯水池におけるSWSの操作支援システムの基本的な設計を行った。システムには、SOMを利用した水文気象予測システムを組み込み、予測結果に基づいた長期の貯水池の3次元水質予測シミュレーションを行い、有用な操作支援情報を提供することができることが明らかになった。また、ダム管理者への分かりやすい情報提供として、様々な静止画と動画情報の提供を組み入れた。これは、ダム貯水池の操作支援にとどまらず、ダム管理者の教育シミュレーターとしての役目も果たすことができると考えられる。

今後は、選択取水設備の最適操作を行うためのアルゴリズムについて検討を行っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 川崎秀明:ダム技術の動向と課題, ダム日本, No.700, pp.21-33, 2003.
- 2) 吉田延雄・中村徹:選択取水設備の運用効果について, 平成11年度ダム水源地環境技術研究所所報, pp.30-37, 2000. *Freshwater Biology*, 50 (2), 301-322, 2005.
- 3) 矢島ら:異高同時選択取水によるダム貯水池の水質保全効果に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.1135-1140, 2005.
- 4) 矢島ら:選択取水方式がダム貯水池の長期・短期の水質保全に与える影響に関する研究, 水工学論文集, 第50巻, 2006.
- 5) Al-Sabhan, W., Mulligan, M. and Blackburn, G.A.: A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW, *Comput. Envir. and Urban Syst.*, Vol.27(1), pp.9-32, 2003.
- 6) Koussis, A.D., Lagourvardos, K., et al.: Flood forecasts for urban basin with integrated hydro-meteorological model, *J.Hydrol. Eng.*, Vol 8 (1), ASCE, pp.1-11.
- 7) Darrell, G. Fontane, Hohn W. Labradie and Bruce Loftis : Optimal control of reservoir discharge quality through selective withdrawal, *Water Resour. Res.*, Vol.17, No.6, pp.1594-1604, 1981.
- 8) Gelda, R.K. and Effler, S.W.: Simulation of operations and water quality performance of reservoir multilevel intake configurations, *J. Water Resour. plan. and manag.*, 133(1), ASCE, 78-86, 2007.
- 9) Westphal, K.S, Vogel, R.M. kirshen, P. and Chapra, S.C.: Decision support system for adaptive water supply management, *J. Water Resour. plan. and manag.*, 129(3), ASCE, pp.165-177, 2003.
- 10) Soncini, S.R., Castelletti, A. and Weber, E.: Integrated and participatory water resources management -theory, Elsevier, Amsterdam, NL, 2007.
- 11) Romero, J.R., Imberger, J. Antenuccim J.P. and Dallimore, C.J. : ARMS(Aquatic Real-time Management System): An automated decision support system for reservoirs, estuaries and coastal zones, *Proce 2<sup>nd</sup> Intl. Symp. Managet. Engin. Informatics:MEI '06*, 2006.
- 12) 西山浩司ら:自己組織化マップを利用した梅雨期特有の気象場の分類, 水工学論文集, 第49巻, pp.241-246, 2005.
- 13) 佐渡公明:河川水の熱収支に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第330号, pp.69-79, 1983.
- 14) 佐渡公明, 杉山一郎:河川水温に影響する水理・気象要素に関する基礎的研究, 水工学論文集第44巻, pp.1257-1262, 2000.
- 15) 佐渡公明, 杉山一郎, 中尾隆志:河川水温の非線形解析, 水工学論文集, 第45巻, pp.991-996, 2001.
- 16) 岡部健士, 竹林洋史:正木ダム減水区間における水温分布特性とその改善案の検討, 水工学論文集, 第49巻, pp.1183-1188, 2005.
- 17) 徳高平蔵ら:自己組織化マップの応用 多次元情報の2次元可視化, 海文堂出版, 1999.