

利根川上流ダム群の導水ネットワークに関する研究

The network operation of reservoirs

in the upstream of Tone-Gawa(River)

瀬戸心太¹, 松崎浩憲², 玉井信行³

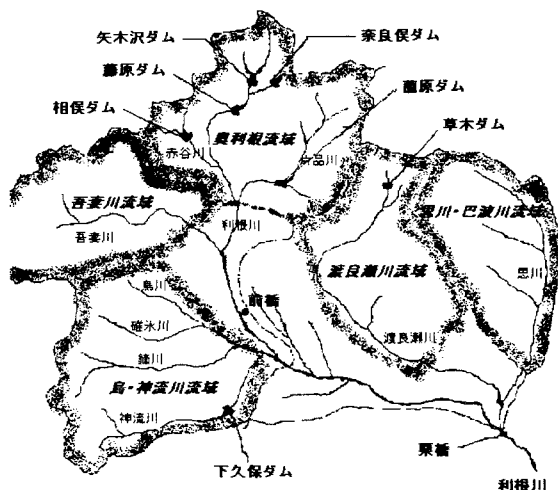
Shinta SETO, Hironori MATSUZAKI, Nobuyuki TAMAI

1. はじめに

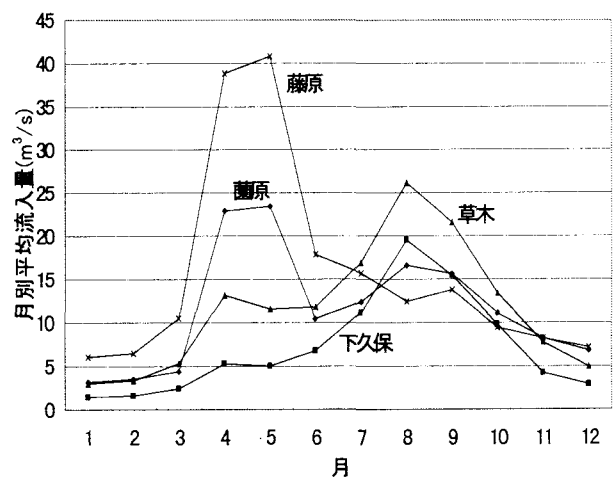
首都圏では、近年頻繁に渇水が起こっている。首都圏で使用される水の半分以上は、利根川から取水している。このため、利根川上流域の多目的ダムをより有効に活用することが求められている。

利根川上流域は、気候や水文特性によって、図—1に示すように、5つの小流域に分けられている。このうち、奥利根流域に5つ、渡良瀬川流域に1つ、烏・神流川流域に1つ多目的ダムが作られている。図—2に、各ダムへの流入量の季節特性を示す(1977年から1991年の平均値)。奥利根流域のダムは、融雪期の出水が多い。草木ダム・下久保ダムは、台風による夏から秋の出水が多くなっている。

「導水ネットワーク」とは、ダムの間を導水管でつないでネットワークを作る計画である。冬から春にかけては、満水状態のダムから、空き容量の多いダムへ導水し、夏の渇水期に、その水を下流に放流する。この計画は、流域全体に目を向けることで、かぎられた水と既存の施設を有効に活用しようというものである¹⁾。



図—1 利根川上流域流域図



図—2 各ダムへの流入量の季節特性

キーワード：渇水問題，導水ネットワーク，実時間操作，流量予測，決定論的カオス

1 東京大学大学院学生 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

(〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1, seto@water.iis.u-tokyo.ac.jp)

2 (株)建設技術研究所 東京支社河川本部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

応募時：東京大学助手 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

3 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2. 決定論的カオス理論による流量データの予測

本論文では、経済性を考慮した導水路の選択と、今回新たに分析を行なった実時間操作のための流量予測、放流ルール作成、実時間シミュレーションについて述べる。

まず、決定論的カオス理論を用いたダムへの流入量（および河川の流量）予測について述べる。

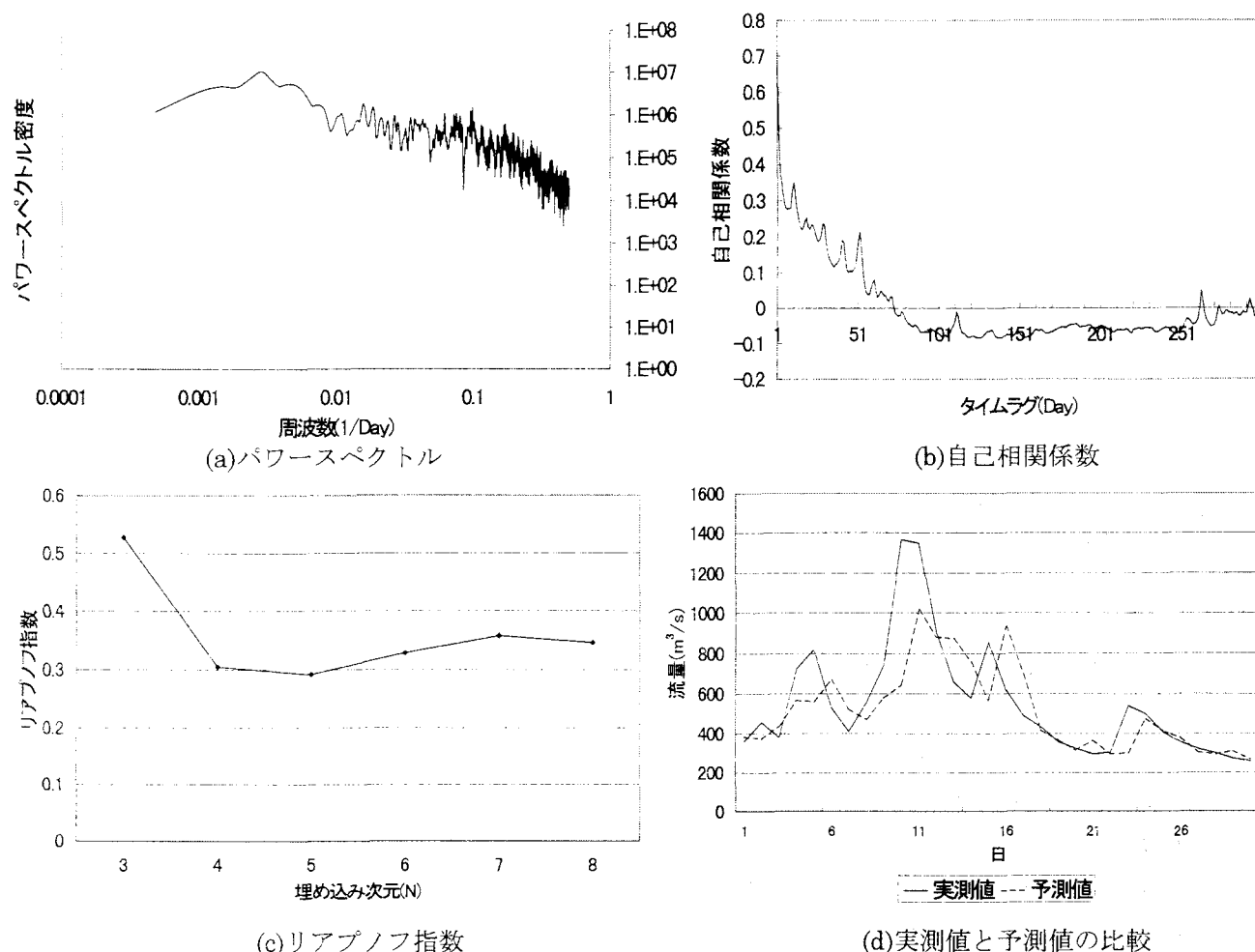
「決定論的カオス」とは、一見不規則な振る舞いを示すが、実際には非線型の決定論的な法則に支配されており、初期値を与えれば、将来が一意的に決まっているデータのことである。しかし、初期値のわずかな違いが時間とともに拡大していくため、その予測は短時間先にかぎられるという特徴がある。

決定論的カオス予測を、実際の時系列データに適用する場合には、そのデータが「決定論的カオス」の性質を持っていることを示さねばならない。これには、①スペクトル解析②自己相関係数③リアプノフ指数の3つを用いる²⁾。①と②は、対象とする時系列データが、周期的でないことを確認するためのものである。つまり、スペクトル解析の結果ピークをとる明確な周波数が見つからず、また自己相関係数はタイムラグの増大にしたがって、0に収束することが求められる。③のリアプノフ指数は、その値が正であれば、カオスの特徴である「初期値の微妙な違いが、時間とともに大きく増大される」という性質をみだす。

図—3の(a)から(c)は、栗橋（利根川中流域にある流量観測地点）における日単位の流量データ（1989年4月から1994年12月）が、決定論的カオスであることを示すものである。

決定論的カオスである時系列データの予測手法は、複数存在するが、ここでは Gram-Schmidt の直交化法を用いる方法を採用した（紙面の都合上、予測の詳細な手順については省略する）。

図—3の(d)は、同地点の1993年9月の流量データの実測値と予測値の比較である。



図—3 流量データが決定論的カオスの性質を持っていることの判定と予測結果

表—1は、決定論的カオス予測による予測精度を、実測値と予測値の相関係数を用いて表したものである。予測の難しい点は、洪水時前後の年間10点前後である。平常時については、決定論的カオスによる流量予測は、かなり良い予測精度を持っているといえる。

表—1 決定論的カオスによる流量の予測精度

N	全データを対象としたもの					洪水時のデータは除いたもの				
	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8
1984年	0.808	0.836	0.835	0.835	0.819	0.862	0.895	0.894	0.893	0.877
1985年	0.704	0.75	0.734	0.619	0.765	0.780	0.839	0.767	0.700	0.901
1986年	0.758	0.77	0.758	0.733	0.728	0.944	0.960	0.936	0.913	0.915
1987年	0.826	0.742	0.77	0.805	0.801	0.904	0.812	0.843	0.867	0.863
1988年	0.856	0.876	0.876	0.834	0.816	0.876	0.892	0.906	0.877	0.856
1989年	0.753	0.738	0.768	0.719	0.706	0.875	0.856	0.872	0.822	0.806
1990年	0.555	0.602	0.572	0.622	0.598	0.816	0.863	0.831	0.89	0.789
1991年	0.727	0.711	0.689	0.732	0.697	0.867	0.861	0.811	0.863	0.846
1992年	0.772	0.733	0.761	0.731	0.718	0.878	0.87	0.864	0.848	0.832
1993年	0.765	0.793	0.793	0.8	0.786	0.874	0.876	0.875	0.888	0.881
通算	0.729	0.739	0.739	0.721	0.727	0.857	0.87	0.855	0.845	0.856

なお、予測のための埋め込み次元の値としては、N=5程度を用いれば良いと思われる。

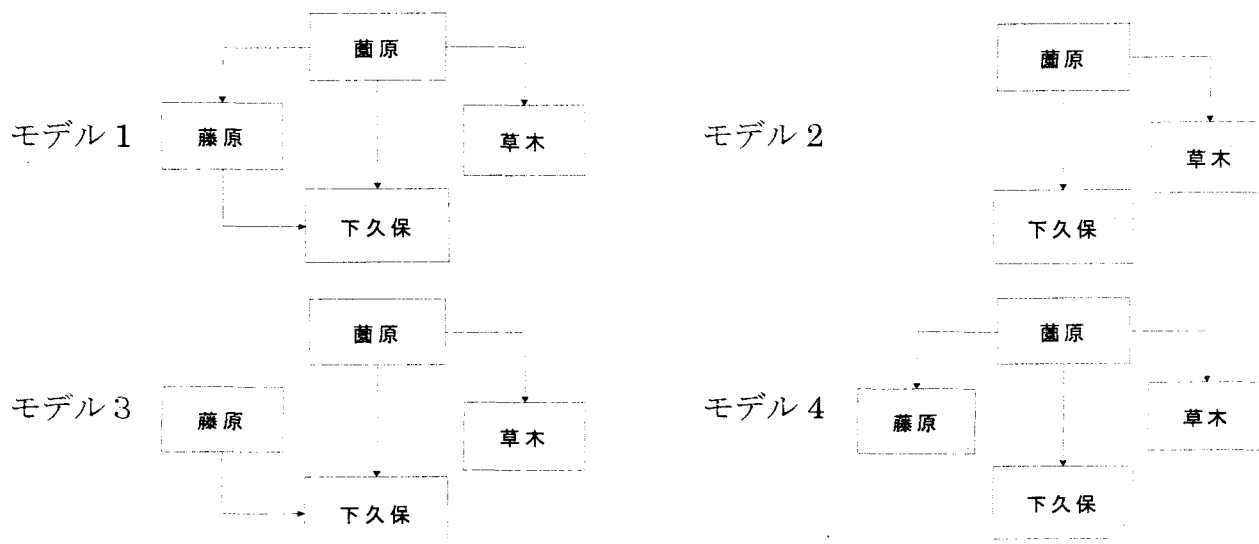
3. 導水路の選択

3. 1 導水路の候補

導水路の選択は、経済的な効果と費用を比較して行う必要がある。まず、各ダムの上流を調べて、導水路は標高の高いダムから低いダムへを行うことにした。

利根川上流域には7つの多目的ダムがある（図—1参照）。矢木沢ダム・奈良俣ダムはその無効放流が直下の藤原ダムに流れ込むことから導水の必要はないと判断した。相俣ダムは、同じ流入量の傾向を持つ藤原ダムと比べて規模が小さいことからはずした。

そこで、残った藤原・菌原・下久保・草木の4つのダムについて、地理的条件（直線で導水路を建設できるか）を考慮に入れて、モデル1のネットワークを考えた。これは、4本の導水管からなっている。この導水管がすべて必要かどうかを調べるために、一部の導水管を取り除いたモデル2～4をあわせて用意した（図—4参照）。この4つのネットワークを使った場合の渇水年の導水量と建設費用について検討する。



図—4 導水ネットワークとして検討した4つの場合の図示

3. 2 導水量の概算

各モデルを用いた場合の導水量の計算は、SD（システム・ダイナミックス）を用いて行った。まず、各ダムの月単位の余剰量と空き容量を計算する。導水する側のダムに余剰量 Q_1 があり、導水される側のダムに空き容量 Q_2 がある場合は、 $\min(Q_1, Q_2)$ が導水量となる。なお、導水管ごとの優先順位はあらかじめ決められており、それにしたがう。各ネットワークを用いた場合の、渇水年の年間導水量および夏期渇水用総導水量（4～6月に行われた導水量）を表—2に示す。

表—2 導水結果の比較（上段は年間総導水量、下段は夏期渇水用総導水量、単位 1000m³）

	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
1978年	152,697 55,716	136,442 55,716	152,697 55,716	135,440 55,716
1979年	262,819 81,801	130,297 70,511	232,020 81,801	160,324 70,511
1987年	38,064 13,523	24,541 0	38,064 13,523	24,541 0
1990年	98,654 14,673	96,307 14,673	98,654 14,673	98,250 14,673

3. 3 建設費用の概算と導水路の決定

この結果を見ると、モデル1とモデル3、モデル2とモデル4が似た結果を示している。つまり、菌原ダムから藤原ダムへの導水路はほとんど使われていないことを示している。したがって、ネットワークの候補は、モデル2とモデル3にしばらく絞られる。

モデル2とモデル3について、実際に建設する場合の費用を概算した。導水路の総延長は、モデル2が 85km、モデル3が 169km となった。20m³/s 程度の圧力トンネルを使用すると、建設費用は、モデル2が 758 億円、モデル3が 1480 億円となった。これらの値は、渇水対策用に、新たにダムを建設する場合よりも割安である。したがって、モデル2の導水ネットワークの建設が有効な方法であると言える。

4. 放流ルール作成

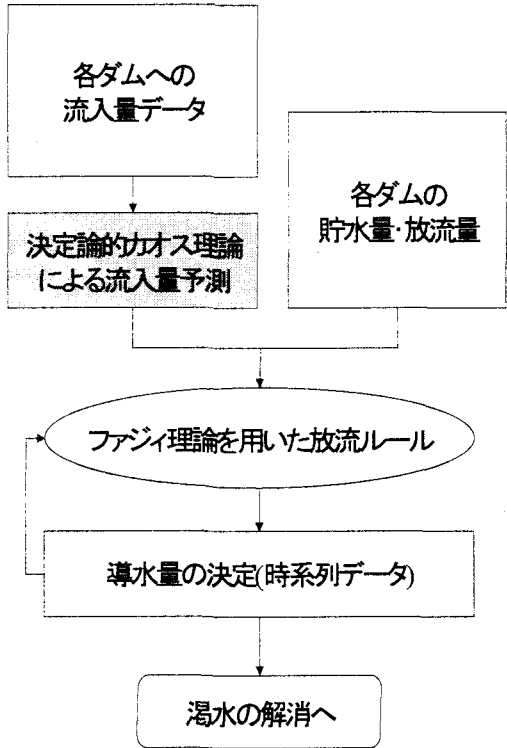
次に、実時間での放流ルールを提案する。もととなる流入量などのデータが日単位のものであるため、導水量も日単位で決めることになる。1日後の導水量を決定するためには、ダムの現在の状態（貯水量）ではなく、1日後の状態を予測したものを、入力として使うことが望ましい。そこで、決定論的カオス理論により、1日後の流入量予測を用いて、1日後の各ダムの貯水量を予測する。

ダムの現在の空き容量から、1日後の流入量をひき、1日後の予測空き容量とする。1日後に空き容量の少ないダムから、多いダムへと導水を行う。この「1日後の予測空き容量」を入力とし、「1日先の導水量」を出力とする放流ルールをファジィ推論の形式で作成した。放流ルールの基本的な形は、図—6に示すようにした。A1,A2,B1,B2,C1,C2 のパラメータの設定に際しては、8ケースを用意した（表—3参照）。また、このシミュレーションの結果を評価する基準としては、次の4つが考えられる。

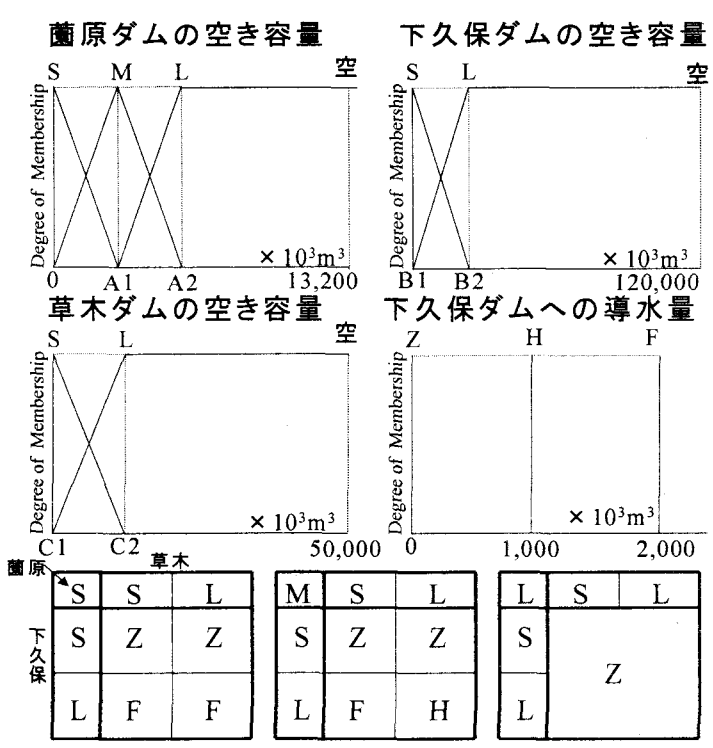
- ①導水する側のダムの危険性（維持流量が確保できるか）
- ②導水される側のダムの危険性
- ③渇水の解消率＝渇水期の放流量の増加分／その年の取水制限量のうち利根川の負担分
- ④ネットワークの回転率＝（各ダムへの流入量合計＋総導水量）／各ダムの冬期利水容量合計

このうち、②は、（流入量予測を誤った場合）導水により下流側のダムが制限水位を超える危険性のことをさすが、導水量の規模は洪水の規模と比べて小さく洪水対策上の問題は少ない。また、水資源の面からも、下流に流れる水の量としては一定である。よって、②は心配する必要はない。一方、①は、過剰な導水のより、導水する側のダムの貯水が低下し、維持流量が確保できなくなるといった問題である。今回は、逆方向への導水は考えていないため、この①は重視する必要がある。

効率性の評価としては、③と④のうち、③を採用する。①の条件から、CASE5,6,7 はダム容量が0となるケースがあるので、不採用となる（表—4 参照）。残った5ケースのうち、もっとも渇水の解消率が高くなる CASE1 を採用した（表—5 参照）。



図－5 シミュレーションの流れ



図－6 放流ルール

表－3 パラメータの設定(単位:1000m³)

CASE		A1	A2	B1	B2	C1	C2
1	夏期	0	750	0	20,000	0	10,000
	冬期	0	3,000	0	20,000	0	10,000
2	夏期	0	750	5,000	20,000	5,000	10,000
	冬期	0	3,000	5,000	20,000	5,000	10,000
3	夏期	0	750	0	85,000	0	30,000
	冬期	0	3,000	0	120,000	0	50,000
4	夏期	0	750	5,000	85,000	5,000	30,000
	冬期	0	3,000	5,000	120,000	5,000	50,000
5	夏期	0	1,500	0	20,000	0	10,000
	冬期	0	6,000	0	20,000	0	10,000
6	夏期	0	1,500	5,000	20,000	5,000	10,000
	冬期	0	6,000	5,000	20,000	5,000	10,000
7	夏期	0	1,500	0	85,000	0	30,000
	冬期	0	6,000	0	120,000	0	50,000
8	夏期	0	1,500	5,000	85,000	5,000	30,000
	冬期	0	6,000	5,000	120,000	5,000	50,000

表—4 菌原ダムの年間最低貯水量(単位:1000m³)

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8
1978 年	74.52	74.52	74.52	74.52	0.00	0.00	74.52	65.59
1979 年	533.86	674.40	674.40	656.44	435.02	200.89	600.86	515.12
1987 年	290.40	290.40	290.40	290.40	253.04	253.04	286.55	290.40
1990 年	215.34	215.34	215.34	215.34	0.00	0.00	0.00	25.63

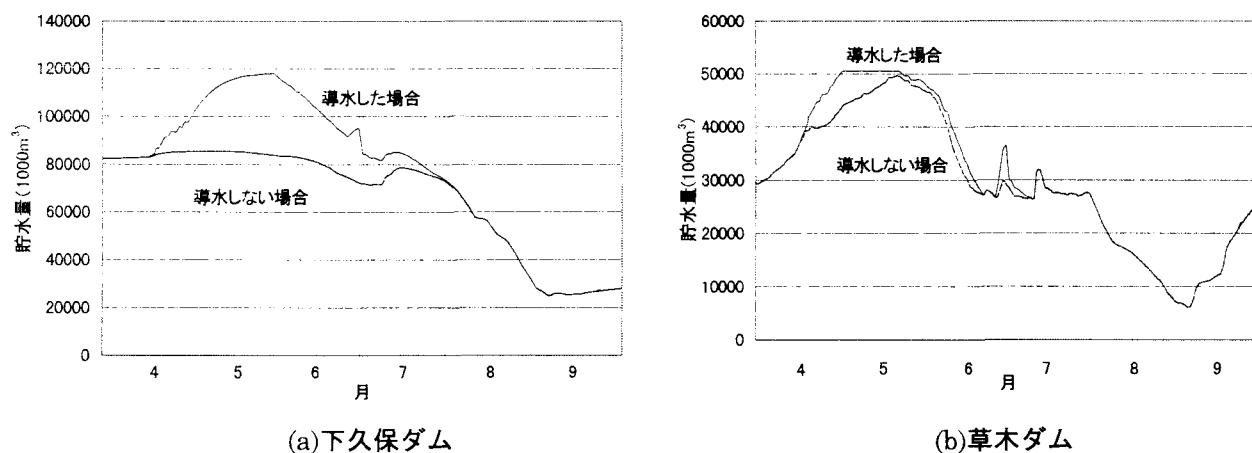
表—5 渴水解消率(単位:1000m³, %)

CASE	利根川負担分	1	2	3	4	5	6	7	8
1978 年	55,890	76	71	54	47	78	76	61	53
1979 年	36,900	116	119	91	89	128	125	94	90
1987 年	87,600	20	19	12	10	38	34	24	19
1990 年	57,330	37	33	22	15	42	38	27	19

5. 導水ネットワークの実時間操作のシミュレーション結果

今回提案した放流ルールによるシミュレーションの結果を示す。

1978 年と 1979 年の渇水に関しては、大部分が解消されている。1987 年と 1990 年の渇水については、2 割程度の解消にとどまった。1978 年の導水される側のダムの貯水量変化について図—7 に示す。



図—7 1978 年に対する貯水量の変化のシミュレーション結果

なお、渇水の起きなかった 1991 年に適用してみたところ、導水量はほとんどなかった。

6. まとめ

河川の流量データおよびダムへの流入量データが決定論的カオスの性質を持っていることを利用し、決定論的カオス予測による 1 日先の流量予測を試みた。年間 10 日前後の洪水時を除いては、良好な予測結果が得られた。

利根川上流域のダム間に導水ネットワークを建設した場合、どの程度渇水が解消されるかについて調べた。まず、SD を用いた概算によって、導水路を選択したのちに、カオス予測とファジィ推論を用いたより細かなルールによるシミュレーションを行うという方法を取った。選択された導水ネットワークは、菌原ダムの水を下久保ダムおよび草木ダムへと送る 2 本の導水管からなっている。この導水ネットワークで、実時間操作のシミュレーションを行ったところ、近年に起こった渇水の規模を減少させることに成功した。

参考文献

- 1) 小林広道：東京大学工学部土木工学科卒業論文，1997。
- 2) 合原一幸、五百旗頭正：カオス応用システム，朝倉書店，1995。