

# 農業用水の配分アルゴリズムに関する一考察\*

山本 勝・菰田 孝\*\*・沼田忠晃\*\*\*

経営工学科  
(1977年8月26日受理)

## A Study in Optimum Algorithm to Apportion Irrigation Water

Masaru YAMAMOTO, Takashi KOMODA and Tadateru NUMATA

Department of management Engineering  
(Received August 26, 1977)

In this paper, to rationalize irrigation water we organize it as a total system and then propose the optimum method to manage it effectively. Above all we apply this systems approach to I-region as a model case and show that this approach holds valid in rationalizing irrigation water. This optimum algorithm to apportion irrigation water is mainly composed of linear programming section, water forecast section, tank model section and so on. We had also programmed this optimum algorithm by means of FORTRAN Language and simulated it in many cases. As the result it is shown that we can rationalize the irrigation water system effectively.

### 1. はじめに

水資源は、人間の社会的・経済的活動を支えている基本的物質の一つである。また、水資源は自然界を循環しており、自然の循環系を破壊しない限り永続的利用が可能である。しかし、現在では、水資源の有限性ならびに水需要の急激な増大により、水供給限界をまえた広義の水資源開発が必要になってきた。とくに、わが国の水不足は、安定成長期においてもいぜん、深刻な問題であり、ダム建設といった量的対策ばかりでなく、水利用の合理化といった質的、抜本的対策が必要となってきた。このように、水需給のひつ迫を生じてきた原因の一つは、種々の開発計画において、水に対する配慮を軽視し、その結果、水需要が発生してから水資源開発を行なうといった、いわば無計画な後追いの水資源開発を行ってきたことに起因している。従って、今後は、これまでのような需要追従型指向の水供給計画を改め、水資源の有限性を認識し、きびしい水需給ギャップの現状と将来の供給

限界をふまえた水資源開発計画を進めなければならない。

以上の社会的・者然的背景から、本論文では、とくに、水総需要量の大半を占める農業用水に焦点をあて、農業用水の合理化を目標に、システムズ・アプローチの立場から農業水資源システムをトータル・システムとしてとらえ、農業水資源の最適な水配分アルゴリズムを中心に、農業用水の合理的な配分方法を提案する。とくに、ここでは、モデル・ケースとして I-地域（農業中心地域）を対象に行なった事例研究について報告する。

### 2. システム概要ならびに設計手順

本論文では、モデル地域として I-地域\*\*\*\*をとりあげ、そこにおける農業用水を中心とした水資源配分問題について考察を行なっている。当地域の水系、水利施設および農業規模の概要は図1に与えられる。なお、当地域に関する詳細な紹介は頁数の関係上、ここでは割愛する。

図1より明らかのように、このモデルには既存ならび

\* 本論文は菰田孝の修士論文の一部に基づくものである。

\*\* 富士通株式会社。

\*\*\* 社団法人中部開発センター。

\*\*\*\* 当地域は農業主体の産業構造を有しており、農業用水の合理化は重要な課題となっている。

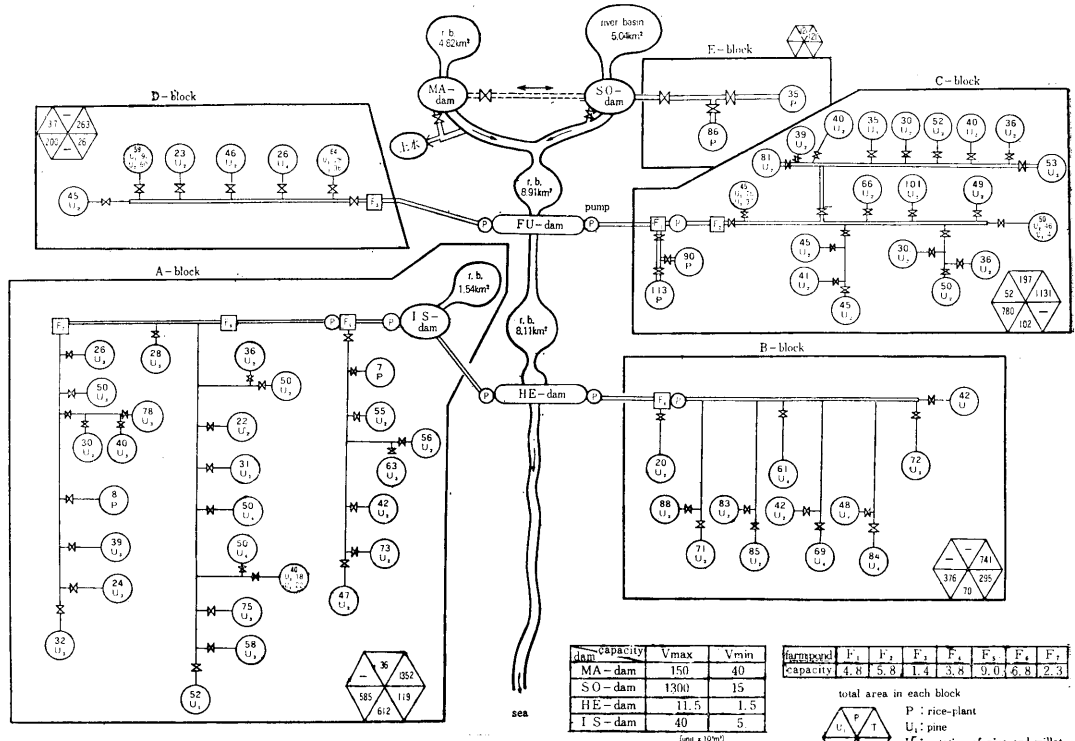


Fig. 1 Outline of I-region as a model case

に新設予定を合わせて、5つのダムがネットワークを構成している。なお、便宜上、本論文のシミュレーションモデルでは、MA-ダムおよびSO-ダムを一つのダム(M-ダムと呼ぶ)として取り扱う。また、FU-ダム(正確には、頭首エ)は貯水能力が無い。さらに、当地域には、AブロックからEブロックまでの5ブロックからなる圃場があり、そこで作られる作物の種類により、圃場は水稲用(略して、Pと書く)、パインの単作用(U<sub>1</sub>)、パインとサトウキビの輪作用(U<sub>2</sub>)、サトウキビ用(U<sub>3</sub>)および牧草用(U<sub>4</sub>)とに類別される。又、各作物の平均消費水量(単位: mm/日)は、作物の種類ならびに月別により与えられる。同様に、かんがい効率、作物の最大土壌保留値なども与えられている。又、当地域でのかんがい方法として、水田(P)は、連続かんがい方式を、又、パイン、キビ、牧草は、間断かんがい方式を採用するものとし、パイン、キビはその圃場を、それぞれ8つのブロックに等分し、1度に8日分の水量をかん水する。牧草は、圃場の半分を放牧地とするため、かんがい対象と

なる面積は、1/2でありこれを8つのブロックに等分する。又、シミュレーション単位は一日とし、当地域の計画基準年・昭和44年(1/10確率年)の諸データ\*\*を用いてシミュレーションを行なう。

なお、当地域における農業用水の合理化を目的とした、最適な水配分計画は、図2に示すようなシステム設計手順に従って実施される。

### 3. 最適な水配分アルゴリズム

#### 3.1 諸定義ならびに準備

本論文における最適な水配分アルゴリズムとは、つぎなる評価基準を満たすものをいう。

- 評価基準 (1): ダムの余裕貯水量を常に保つ。
- 評価基準 (2): ダムの下限を保障する。
- 評価基準 (3): 圃場への有効雨量を考慮する。
- 評価基準 (4): 各圃場に対して平等な水配分を行なう。
- 評価基準 (5): 年間平均の圃場満足度を最大にする。

なお、ダムの下限保障とは、ダムの運用管理を存続す

\* MA-ダム(貯水能力 1300万m<sup>3</sup>とSO-ダム(貯水能力 15万m<sup>3</sup>)は通水しており、両ダムで一つのダム機能をもつ、とみなすことができる。

\*\* Table. 1を参照。

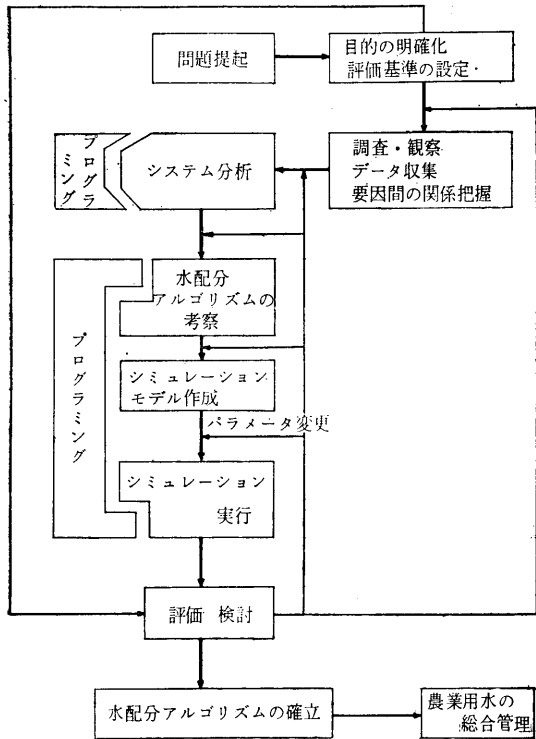


Fig. 2 Procedure of system design

るために設けられたもので、 $n$ 年1月1日におけるダム貯水量が、翌年の $(n+1)$ 年1月1日においても、その量を保っていることを意味する。

3.2 水配分アルゴリズム概要

図3に示されるI地域ダム水系において、今、各ダム

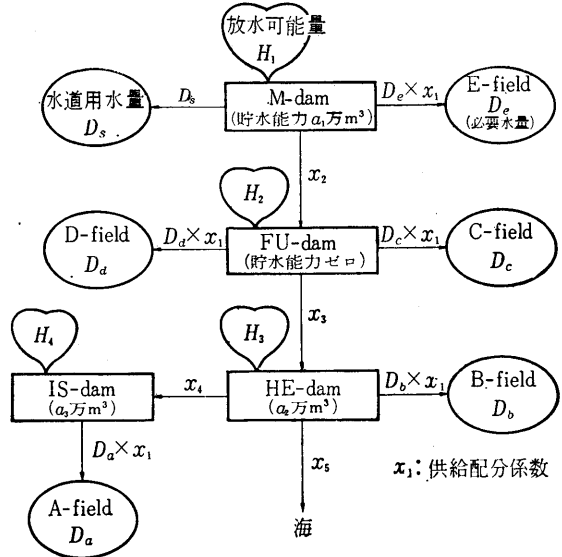


Fig. 3 Dam network of I-region

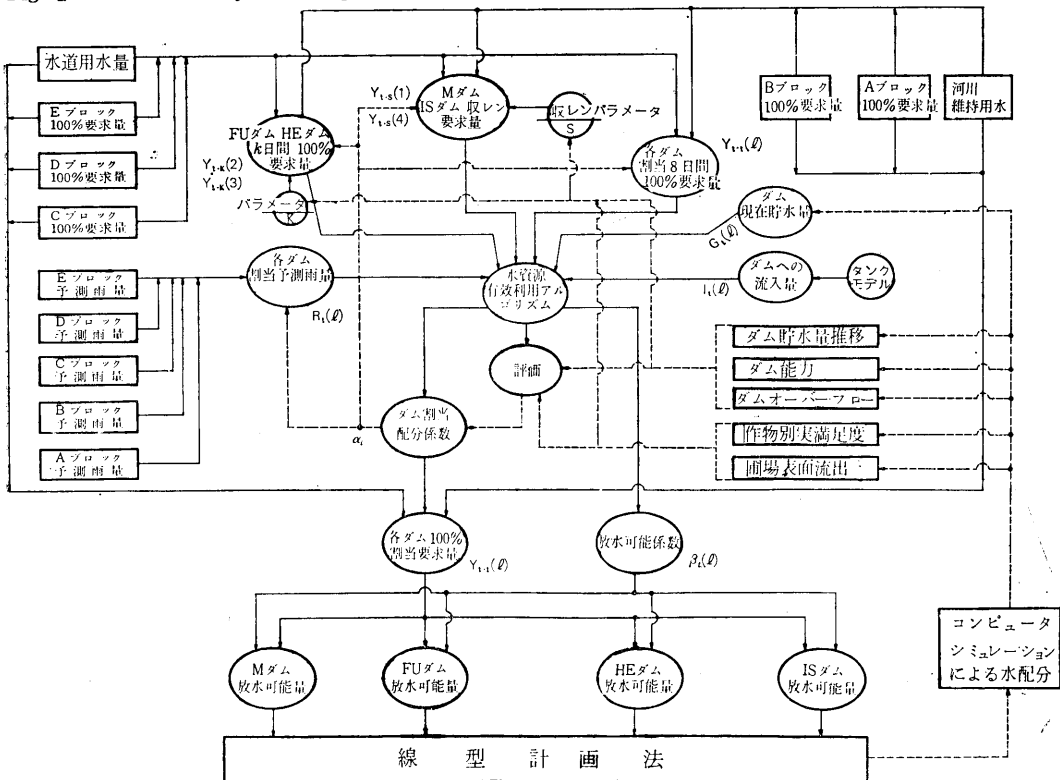


Fig. 4 Corrective diagram of each factor

の放水可能量および各圃場の必要水量が求まっていると仮定すれば、これらの制約条件のもとで、共通な圃場供給配分係数  $\alpha_1$  を最大とする解を、線型計画法を用いて容易に求める事ができる。しかし、一般に、各圃場に降る有効雨量を考慮することにより、各圃場の必要水量が計算される。又、同様に、各ダムにおける放水可能量を求めるためには、いくつかの要因算定式を用意する必要がある。これらの要因関連図は、図4に与えられる。なお、図4における主要因、地域パラメータおよび水資源有効利用アルゴリズムは、つぎのように定義される。

<主要因> :

- (1)  $I_t(l)$ ; タンクモデル<sup>2)</sup>による  $t$  時点の  $l$  ダムへの流入量の推定値。
- (2)  $G_t(l)$ ;  $t$  時点の  $l$  ダムにおける貯水量。
- (3)  $\alpha_i$ ; ダム割当配分係数\*
- (4)  $R_t(l)$ ;  $t$  時点の  $l$  ダムに割り当てられた予測雨量値。
- (5)  $Y_{t,1}(l)$ ;  $t$  時点の  $l$  ダムに割り当てられた当日の100%要求量。
- (6)  $Y_{t,k}(l)$ ;  $t$  時点の  $l$  ダムに割り当てられた当日以後  $k$  日間の100%要求量\*\*。
- (7)  $Y_{t,s}(l)$ ;  $t$  時点の  $l$  ダムに割り当てられた取レン要求

量\*\*\*。

<地域パラメータ>

パラメータ  $K$ , 取レンパラメータ  $S$ , ダム割当配分係数は、それぞれ地域特性に依存した地域固有のパラメータである。

<水資源有効利用アルゴリズム>

$$P1_t(l) = \frac{G_t(l)}{Y_{t,s}(l)} \quad \text{但し, } l=1, 4 \quad (1)****$$

$$P1_t(l) = \frac{G_t(l)}{Y_{t,k}(l)} \quad \text{但し, } l=2, 3 \quad (2)$$

$$P2_t(l) = \frac{R_t(l)}{Y_{t,1}(l)} \quad \text{但し, } l=1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

$$P3_t(l) = \frac{I_t(l)}{Y_{t,1}(l)} \quad \text{但し, } l=1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

$$P_t(l) = P1_t(l) + P2_t(l) + P3_t(l)$$

上式により計算された各値をもとに、図5に示すフローチャートに従って各ダムの放水可能量が合理的に計算される。なお、このときの各変数の値と放水可能係数との関係は図6に与えられる。

以上のプロセスに従って決定された放水可能係数  $\beta_t(l)$

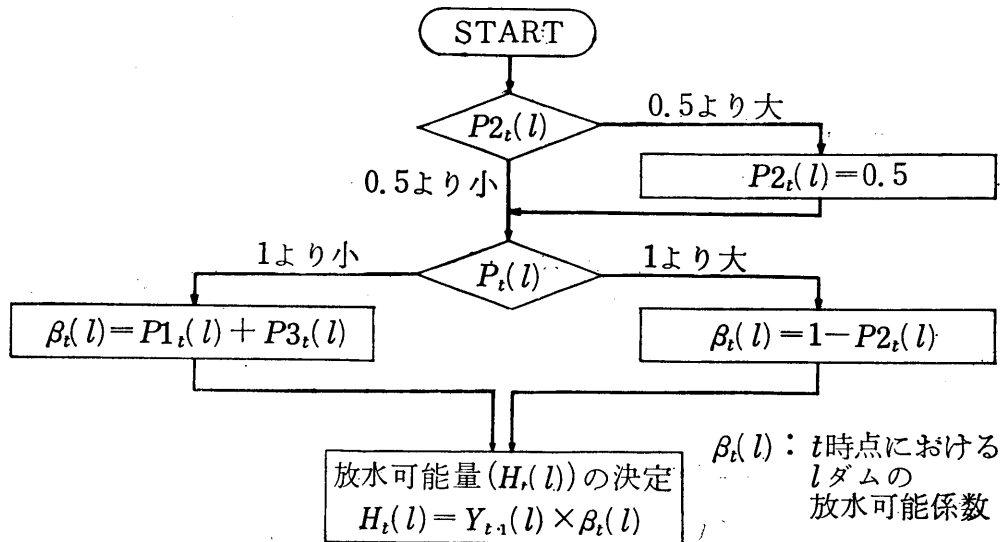


Fig. 5 Flow-chart of algorithm to obtain the factor  $\beta_t(l)$

\* ダム割当配分係数とは、それぞれの水要求源（各圃場、水道用水、河川維持用水）の  $l$  ダムに対する供給依存割合を意味する。

\*\* 任意の  $t$  に対し、 $k$  は固定。

\*\*\* 取レン要求量は、当日以後  $s$  日間の水要求量であり、任意の  $t$  に対し  $s$  は可変。尚、 $s$  は、以下のように定義される。

$g_1=1, f_1=s, g_n=g_{n-1} + \frac{1}{2}f_{n-1}, f_n = (\frac{1}{2}f_{n-1} + \frac{1}{2}f_{n-1} \cdot \frac{1}{2}) = \frac{3}{4}f_{n-1}$  のとき、 $g_n \leq t < g_{n-1}$  であるような  $n$  を求め、

(i)  $t = g_n$  のとき、 $s = f_n$

(ii)  $g_n < t < g_{n-1}$  のとき  $s = f_n + g_n - t$  とする。

\*\*\*\*  $l=1, 2, 3, 4$  は、それぞれ  $M$ -ダム、 $FU$ -ダム、 $HE$ -ダムおよび  $IS$ -ダを示す。

(i)  $P_i(l) < 1$  のとき

(ii)  $1 < P_i(l)$  のとき

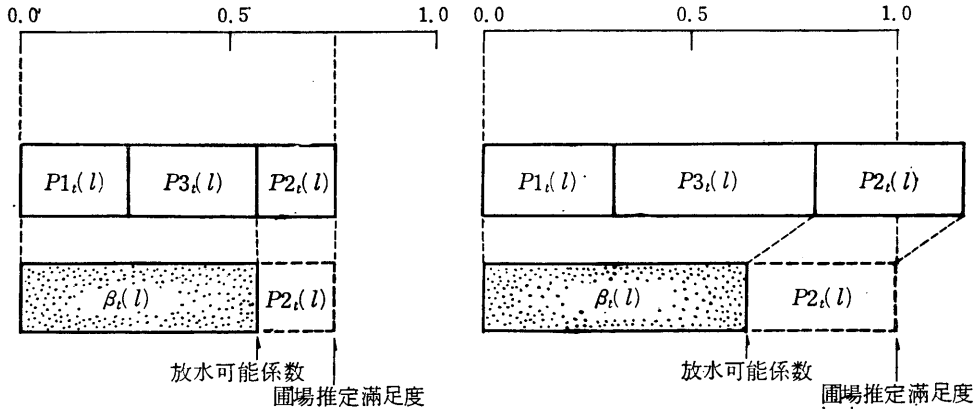


Fig. 6 Illustration for the factor  $\beta_i(l)$

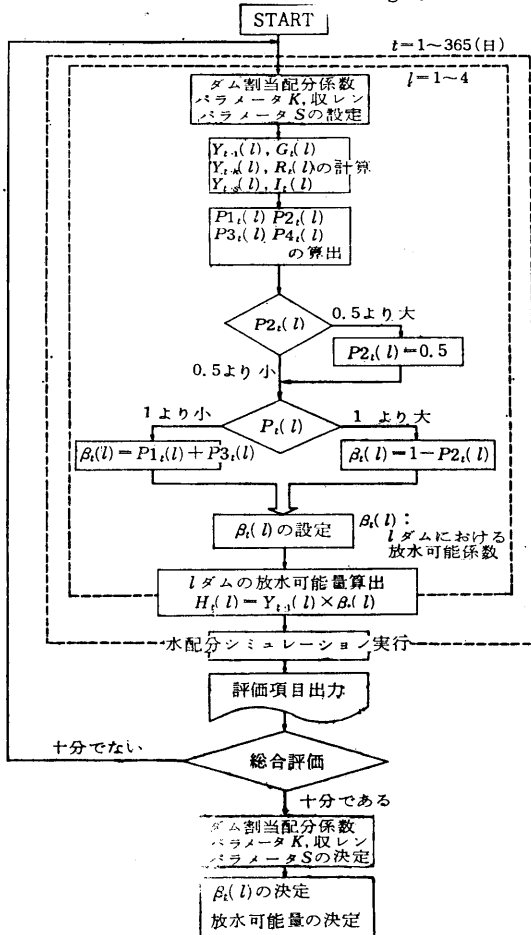


Fig. 7 Flow-chart to determine the factor  $\alpha_i$ , K and S

に、ダム割当 100% 要求量  $Y_{i,1}(l)$  を乗ずることにより、各ダムの放水可能量が決定され、つづいて、線型計画法により詳細な水配分方法が決定される。なお、この水配分アルゴリズムにおいて、パラメータ  $K$ 、取レンパラメータ  $S$  およびダム割当配分係数は、図 7 に示すように任意の初期値を設定しておき、シミュレーションを実行しながら、前述の評価基準に従って初期値を修正していくことにより最適値を得る。又、 $I$ -地域の農業水利条件、水利施設条件を考慮した詳細な水配分シミュレーション・モデルは、図 8 に与えられる。このモデルに従って FORTRAN 言語でプログラミングを行った。なお、プログラム・フローチャートの概略は、図 9 に示される。

4. シミュレーション結果および評価

本節では、表 1 に示す当地域の計画基準年の昭和44年(1/10確率年)のデータを用いて、前節で述べた水配分アルゴリズムに従って実行したシミュレーション結果について考察を行う。

まず、評価基準(1)および(2)に関しては、ダムの貯水量推移を管理する方針として、最大貯水能力を有する  $M$ -ダム、および、最大受益面積の  $A$  圃場をかかえる  $IS$ -ダムに対し、余裕貯水量を保ち、下限を保障すると同時に、年間を通して安定したダム貯水量推移を示すよう管理しており、シミュレーション結果から、取レンパラメータを  $S=200^*$  とした時に、図 10 に示すような良好な結果を得た。又、 $HE$ -ダムに関しては、貯水が極めて小さく、従って、当ダム流域流入量が多い時などは、ダムからのオーバー・フローが生ずることがある。ゆえに、水損失

\* このとき、前述の式 (1) は、 $P_{1i}(l) = G_i(l) / Y_{i,200}(l)$  となる。

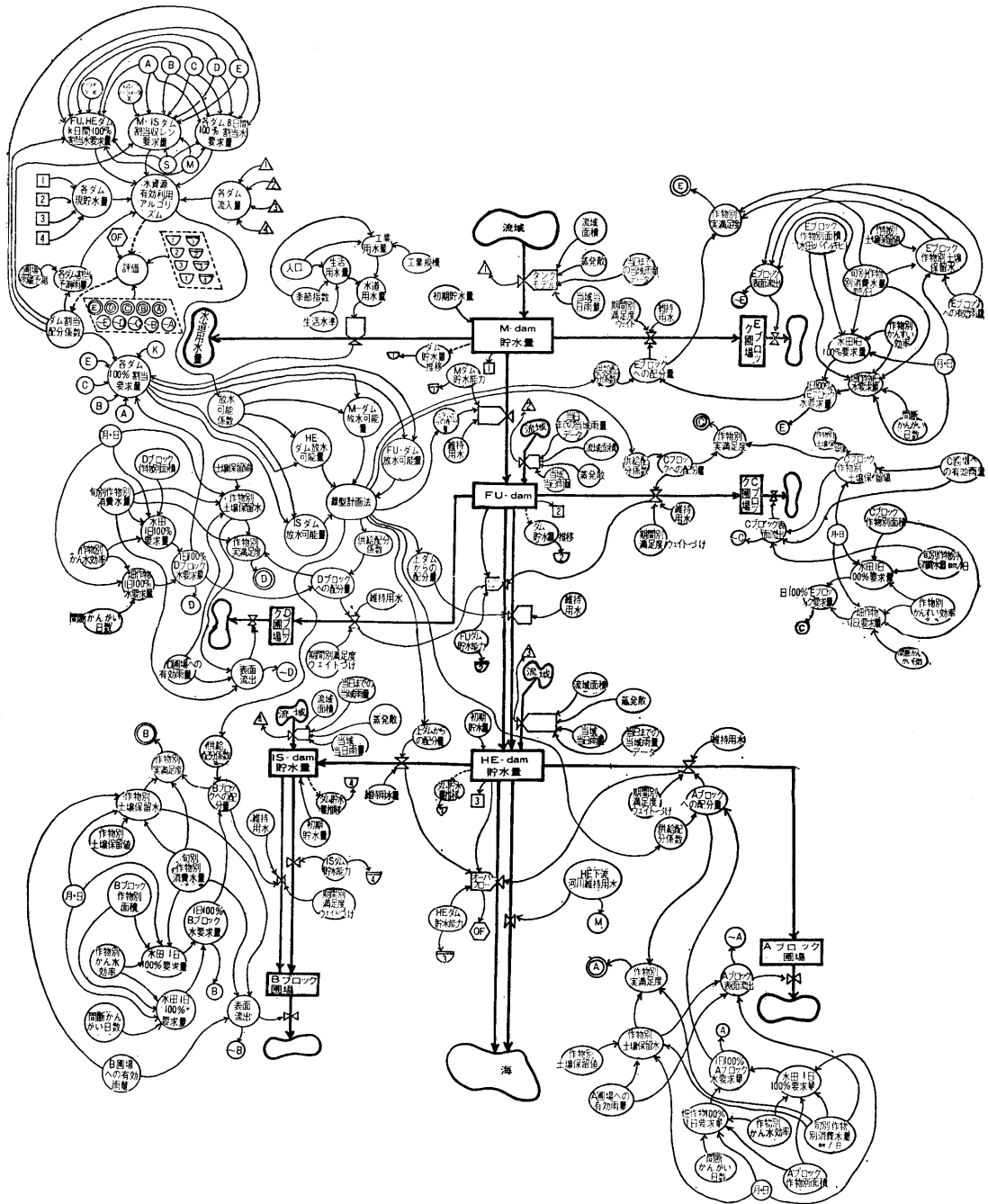


Fig. 8 System dynamics model to apportion irrigation water

を押さえ、圃場満足度を高めるためには、当ダムの貯水量推移は、余裕貯水量を保ち、かつ、大きな変動推移を示すよう管理するのが望ましく、シミュレーション結果から、図10に示すように、パラメータ  $K=5^*$  とした時が最も良い値を得ることが分る。

評価基準(3)に関しては、本論文で提案する水配分アルゴリズムでは、各圃場への降雨量を予測しながら水供給を行っており、その結果、供給配分係数より圃場実満足度が大幅に高くなっていることが判った。又、降雨時の有効雨量予測をとり入れた水配分アルゴリズムを用いて水

\* このとム、式 (2) は、 $P_{1t}(I) = G_t(I) / Y_{t.5}(I)$  となる。

Table. 1 Data used to simulate

確率年	1/10年	1/2年
昭和年	44年 (シミュレーション年)	
年間総雨量	1939mm	2417mm
年間有効雨量	1284mm	1660mm
年間最大連続無効雨日数	32日	25日
かんがい期総雨量	1456mm	1800mm
かんがい期有効雨量	960mm	1247mm
かんがい期最大連続無効雨日数	32日	21日

供給を行うことにより、年間およそ 1600万 $m^3$  の水節約が可能であることがシミュレーション結果から明らかになった。

評価基準(4)に関しては、水配分アルゴリズムにおいて、各ダムでの放水可能量を決定した後、線型計画法を用いて、各圃場に対して、最大な共通供給配分係数  $x_1$  で水配分を実施している。

最後に、評価基準(5)に関しては、有効雨量を考慮しダムからの水損失を押えれば、圃場満足度があるというものでもなく、降雨には季節的変動があり、それらをダムで制御することにより、年間を通じて圃場満足度を高くすることが可能となる。この時、ダム割当配分係数  $\alpha_i$ 、パラメータ  $K$ 、取レンパラメータ  $S$  の値が重要な影響を及ぼす。M-ダム初期貯水量と圃場満足度に関するシミュレーション結果は表 2 に与えられる。

以上により、本論文で提案する水配分アルゴリズムにより農業用水における大幅な合理化が可能となる。なお、

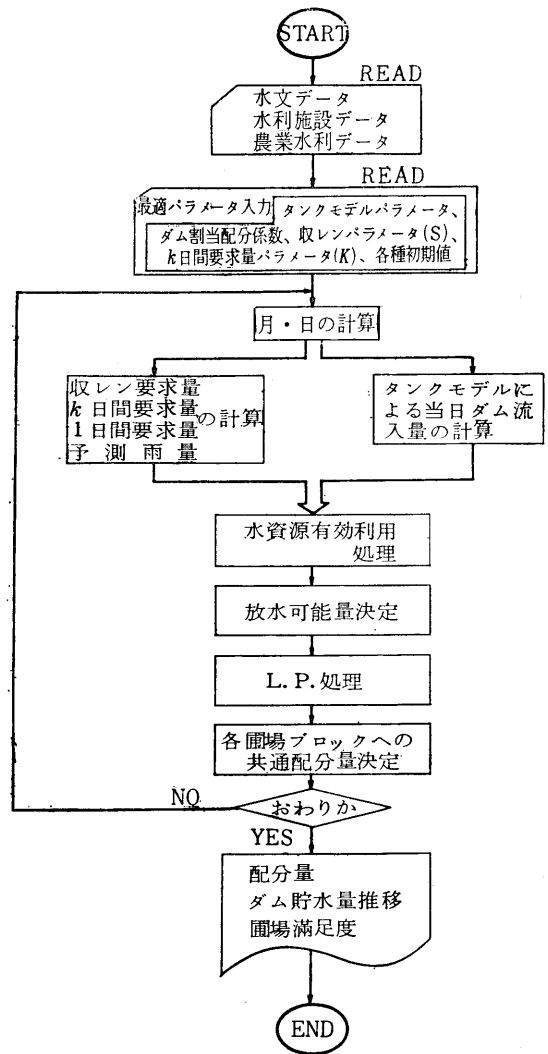


Fig. 9 Flow-chart of programming to apportion irrigation water

Table. 2 Some results of computer simulation

	M-dam の貯水量推移					年間平均圃場満足度		
	初期貯水量 [ $10^4 m^3$ ]	末期貯水量 [ $10^4 m^3$ ]	年間最大貯水量 [ $10^4 m^3$ ]	年間最小貯水量 [ $10^4 m^3$ ]	最大貯水量振幅 [ $10^4 m^3$ ]	P [%]	$U_1$ [%]	$U_2, U_3, U_4$ [%]
Case. 1	100	285	293	92	201	65	91	90
Case. 2	300	420	438	242	196	67	91	90
Case 3	600	710	718	518	200	67	92	91
Case 4	900	911	1004	733	271	70	93	93
Case 5	1200	1210	1304	1034	270	70	93	93

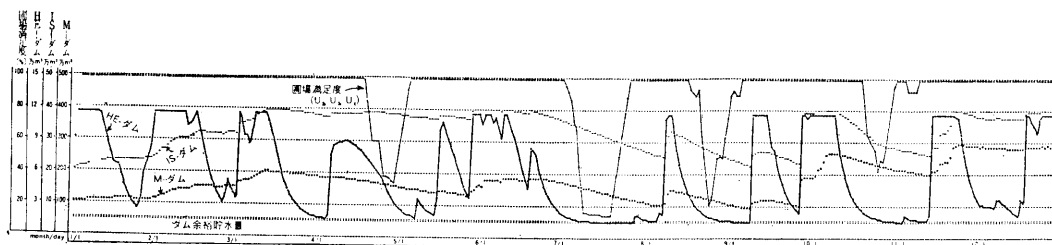


Fig. 10 The output of computer simulation in the case that the initial stock  $G_0$  (1) of M-dam is 100 ten thousand  $m^3$

この水配分アルゴリズムを他地域に適用するにあたっては、当地域の水利特性に応じたモデルを設定し、その地域に最も適したパラメータを求め、本論文で前述したと同様のアプローチでもって当地域における最適な水配分が可能である。ゆえに、ここで提案する水配分アルゴリズムは十分に汎用性があることが分る。

## 5. おわりに

本論文において、農業かんがい組織をトータル・システムとしてとらえ、農業用水の合理化を目的に、農業用水の最適な水配分方法を中心に考察を行った。とくに、本論文では、I-地域をモデル・ケースとして、その適用方法ならびにシミュレーション結果の評価について詳細な検討を行った。この結果、本論文で提案する水配分アルゴリズムに従って、農業用水の総合管理を行うことにより、水資源の合理化が可能であることが証明された。又、ここで提案した水配分アルゴリズムならびに合理化のためのアプローチは、他地域においても、農業水利条件、水利施設条件などの地域特性を考慮することにより、十分に適用可能であり、汎用性があるものと思われる。水需給がひつ迫してきている今日、水利用の合理化対策、水節減対策は重要な問題である。とくに、本論文で考察した農業用水は、水需要の大半を占めており、これまでのような慣行的水利権が第一次優先する水配分計画を改め、将来の水需給ギャップを十分に認識した上で、農業用水の積極的な合理化対策、つまり、科学的な水配分管理を行わなければならない。この時、農業用水の合理化手段として、水利施設などのハード・ウェア面での開発は著しく発達している。これに対して、本論文で提案したように水資源のトータルの管理体系を確立させることは、農業用水のハード・ウェアおよびソフト・ウェアの両者を密に連結し、貴重な水資源の有効利用を可能とし、広義の水資源開発に貢献するものと確信する。なお、

本論文で提案した水配分アルゴリズムには、細かい点に関しては、なお多くの問題が残されており、今後の研究が期待される。

謝辞 本研究を進めるにあたり、数々のご協力をいただいた 日本技研(株)の大山英治氏に深謝する。又、本研究のモデル設計に際し、数々の貴重な資料を提供して頂いた I-地域の関係者の方々に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 山本莊毅：“水文学講座 水文学総論” 共立出版
- 2) 菅原正己：“水文学講座 流出解析” 共立出版
- 3) 岩井重久他：“応用水文統計学” 森北出版
- 4) 渡辺一司他：“インダストリアル・ダイナミックス” 東洋経済
- 5) 塚塚宏太郎：“システム工学の動向”，農業土木学会誌，Vol. 40, No. 7, pp. 472~457
- 6) 緒形博之：“情報処理とシステム化の課題”，農業土木学会誌，Vol. 40, No. 7, pp. 447~451
- 7) D.W.Eoyd: “Simulation via Time-partitioned Linear Programming”: a ground and Surface Water Allocation Model for the Gallatin Valley of Montana” 1974 Winter Simulation Conference
- 8) W.I.-pai & L. Tung: “Optimal Irrigation Quantity and Frequency”, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. 8776, March, 1972
- 9) 菟田孝, 山本勝：“水資源最適利用におけるシステムズ・アプローチ”，日本オペレーションズリサーチ学会，中部支部発表会 March, 1977