

熱帯モンスーン域における大規模貯水池操作のための DDC・FDC ルールカーブ

DDC・FDC Rule Curves for Large Reservoirs in Tropical Monsoon Areas

竹内 邦良*・新谷 渡**

By Kuniyoshi Takeuchi and Wataru Shintani

A set of DDC・FDC Rule Curves for Bhumibol and Sirikit Reservoirs in Thailand were developed. The concept is applicable for operation of large reservoirs in any tropical monsoon region with rice paddy agriculture. They assume that the irrigation demand for a reservoir is reciprocal to inflow to the reservoir, which was remarkably well satisfied in the Bhumibol Reservoir in Chao Phraya River Basin. DDC・FDC Rule Curves are so named since they are the solutions of a chance constraint reservoir operation model where drought duration curves(DDC) and flood duration curves(FDC) were used as deterministic equivalence of sum of future streamflows. The obtained rule curves suggested that the Chao Phraya reservoir system was not large enough to provide as much water required now. In order to hold a 5% failure rate, with the storage of 1990 and 1991, as much as 60% of supply cut may be necessary.

Keywords: DDC・FDC Rule Curves, irrigation demand, tropical monsoon, Bhumibol, Sirikit

1. はじめに

タイ王国のBhumibol及びSirikit両ダムは、1964, 72年に竣工した総貯水量135億 m^3 、95億 m^3 の大貯水池である。Bhumibol, Sirikit両貯水池の優先的な放流目的は灌漑であるが、降雨状況により灌漑用水補給の需要は異なるため、同じ月であっても年により貯水池からの放流量は大幅に違ってくる。従ってこれまでのDDCルールカーブ^{1) 2) 3)}のように水需要の季節パターンを降雨や流入量の変動に影響されない確定的なものとみなすことは、対象地域のような水田耕作用灌漑を目的とする貯水池操作のためには不适当である。そこで需要量を、降雨と密接に関連した貯水池への流入量の一次式で表すことにより、流入量、需要量いずれも確率的な変数として扱うこととし、これに基づきDDC, FDCを用いて渇水洪水両調節機能を備えた放流ルール、DDC・FDCルールカーブを作成した。

2. 研究対象地域

タイ王国のChao Phraya川デルタには、約12,000 km^2 にも及ぶ広大な水田地帯が広がっており、世界有数の米作地帯となっている。雨期にはその雨を利用して米作を行い、雨が少ない年はその補充として貯水池から放流する。乾期においてはBhumibol, Sirikit両貯水池の総貯水量から灌漑面積を決定し、貯水池補給の灌漑による米作を行う。両貯水池地点での集水面積及び平均流入量はBhumibolが26,400 km^2 , 187 m^3/s (1964-1991年平均)、Sirikitが13,300 km^2 , 172 m^3/s (1972-1991年平均)である。

* 正会員 工博 山梨大学教授 工学部 土木環境工学科 (〒400 山梨県 甲府市 武田4-3-11)

** 学生員 山梨大学大学院工学研究科 (同上)

Sirikit に比べて Bhumibol は約 2 倍の集水面積をもっているが、平均流入量は Sirikit のそれとあまり変わらない。これは Bhumibol ダム上流よりも Sirikit 上流の方が降雨量が多いこと、Bhumibol 上流には Chiang Mai という大都市があり、ダムが建設され、水田等による流域の開発が進んでいることによるものと考えられる。

3. 貯水池への流入量と放流量との関係

図-2 は、Bhumibol Reservoir における月流入量と月放流量の経年図である。タイは熱帯サバナ気候区に属し、雨期にはダムの上、下流いずれの地域にも多くの雨が降るために、貯水池への流入が多いにもかかわらず、貯水池に対する水需要は極めて少ない。一方乾期には貯水池への流入は殆どなくなるが、二期作のための灌漑用水として貯水池に頼る水需要が非常に大きくなる。そのため貯水池への流入量と放流量との間には図-2 に示すような互い違いの関係が生じている。Bhumibol, Sirikit 両貯水池は、それぞれ年平均流入量の 2.57, 1.71 年分の容量をもっており、洪水調節のための放流がおこなわれることは、ほとんどない。従って放流は利水需要に対して行われるものである。一方需要には、灌漑、発電、下流の塩害防止のための維持用水確保等があるが、灌漑需要を主として、他は副次的利用の方針がとられている。これは 1979 年に大渇水があり、発電目的による雨期の放流が乾期の水不足を招き、大きな問題になったためである。従って 1980 年以降は、放流量＝灌漑需要と

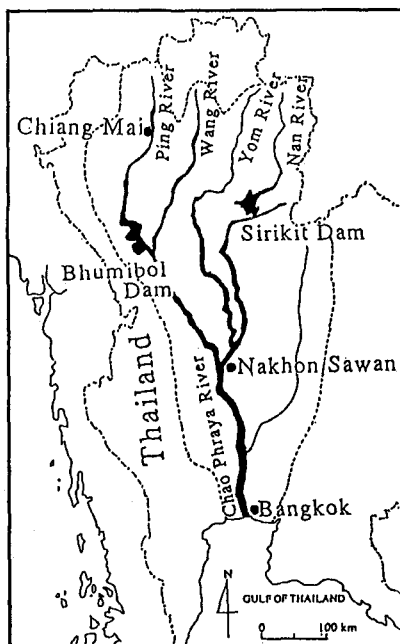


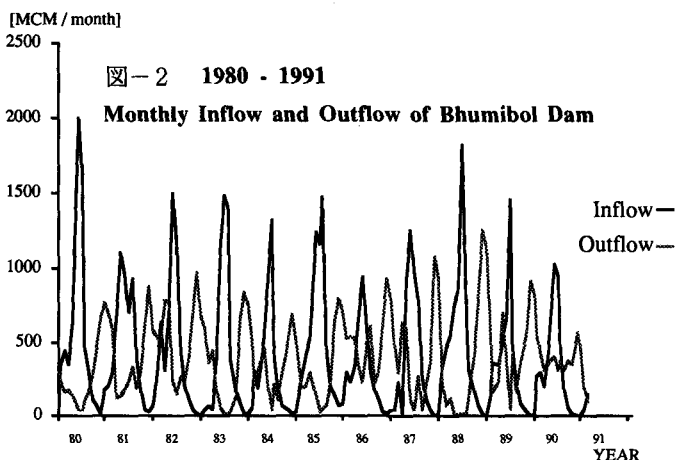
図-1 流域図

見なしてさしつかえない。そこで流入量と放流量の逆相関関係から、需要量の実態を推定することにする。

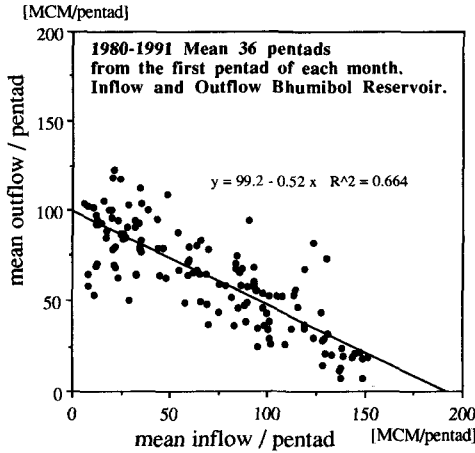
図-3 は Bhumibol Reservoir への 1980-1991 の各月の第一半旬から始まる 36 半旬平均流入量データを、同期間の 36 半旬平均放流量データと対応させたものである。ここに m 半旬平均での流入量データと放流量データを対応させ、その回帰式の傾きを $a(m)$ 、切片を $b(m)$ として表わすこととする。図-3 の場合には $y = a(36) \cdot x + b(36)$ なる回帰式が得られる。これを 36

図-2 1980 - 1991

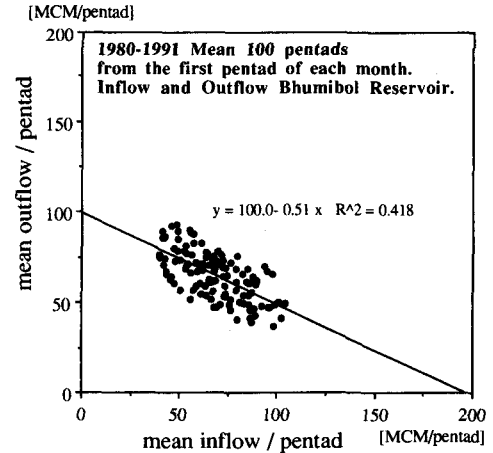
Monthly Inflow and Outflow of Bhumibol Dam



半旬平均流入量と 36 半旬平均需要量の関係であると仮定して、貯水池に対する水需要量とすることとした。図-4 は同様の作業を 100 半旬平均で行ったものを示している。この他 $m=1$ から $m=100$ まで各期間長での平均流入と平均放流との関係も調べた。この結果どの期間長の平均でみても、貯水池への流入量の多いときには、貯水池への水需要が少なく、流入量が少なくなると、水需要量が多いという傾向を、明確かつかなり安定した関係式で示すことがわかった。すなわち、いずれの回帰式もおおよそ $a(m)=-0.5$, $b(m)=100$ の近傍で特定され、わずかにずれる程度であった。そこで本論文では、この一本の回帰直線を、すべての m



図—3



図—4

に対する需要と流入の関係として用いることとした。

Sirikit に関しては Bhumibol 程の明確な関係はみられなかったが、Bhumibol から得られた傾きをそのまま援用することとした。

4. DDC・FDC ルールカーブの Chance Constrained Model 表示

τ 時点での放流制限率を C とし、この放流制限率を以後 M 半月間ずっと続けた場合でも、貯水池が涸渇する確率が β 以下、溢水する確率が α 以下に保たれるために必要な τ 時点での貯水量 V は、以下の確率制約条件を満たす解として求められる。^{3) 4)}

$$S_{\tau+m} = S_{\tau+m-1} + I_{\tau+m-1} - R_{\tau+m-1} - P_{\tau+m-1} \quad m=1, \dots, M \quad (1)$$

$$\text{Prob}\{S_{\tau+m} \leq 0\} \leq \beta \quad m=1, \dots, M \quad (2)$$

$$\text{Prob}\{S_{\tau+m} \geq V_c\} \leq \alpha \quad m=1, \dots, M \quad (3)$$

$$R_{\tau+m-1} = (1-C) \cdot D_{\tau+m-1} \quad m=1, \dots, M \quad (4)$$

$$(1/m) \cdot \sum D_{\tau+\nu} = b(m) + a(m) \cdot (1/m) \cdot \sum I_{\tau+\nu} \quad m=1, \dots, M \quad (5)$$

$$S_{\tau} = V \quad (6)$$

ここに、 Σ : $\nu=0$ から $m-1$ までの和演算、 $\tau+m-1$: 現時点 τ より m 半月後の時点、 R : 放流量、 I : 流入量、 D : 水需要、 S : 貯水量、 P : 蒸発量、 V_c : 貯水池容量、 C : 放流制限率、 $a(m)$, $b(m)$: 回帰式の傾き及び定数項、 β : 許容涸渇確率、 α : 許容溢水確率、 M : 現時点の放流量の決定に際して考慮する将来期間長である。(1)式は貯水量の連続式、(2)式は涸渇確率の制約条件、(3)式は溢水確率の制約条件、(4)式は放流ルール、(5)式はダムに対する m 半月平均水需要量を m 半月平均流入量の一次式で表したもの、(6)式は現時点 τ での貯水量が V であることをそれぞれ表す。(1)式から(6)式において β 、 α 、 C が、 m について一定とすると、以下の確率方程式に集約される。

$$\text{Prob}[V - (1-C) \cdot m \cdot b(m) + \Sigma I \cdot \{1 - a(m) \cdot (1-C)\} - \Sigma P \leq 0] \leq \beta \quad (7)$$

$$\text{Prob}[V - (1-C) \cdot m \cdot b(m) + \Sigma I \cdot \{1 - a(m) \cdot (1-C)\} - \Sigma P \geq V_c] \leq \alpha \quad (8)$$

ここで累加流入量 ΣI のみが確率変数であることに注目し、定数項を

$$p = \{V - (1-C) \cdot m \cdot b(m) - \Sigma P\} / \{a(m) \cdot (1-C) - 1\} \quad (9)$$

$$q = \{V - (1-C) \cdot m \cdot b(m) - \Sigma P - V_c\} / \{a(m) \cdot (1-C) - 1\} \quad (10)$$

と書いて書きなおすと、

$$\text{Prob}\{\Sigma I \leq p\} \leq \beta \quad (11)$$

$$\text{Prob}\{\Sigma I \geq q\} \leq \alpha \quad (12)$$

となる。 ΣI の確率分布が図—5のようなとき、
確率方程式(11),(12)の解は、以下になる。

$$p \leq \{\Sigma I\}_\beta \quad (13)$$

$$q \geq \{\Sigma I\}_\alpha \quad (14)$$

これから放流制限率 C を解くと、

$$C \geq [m \cdot b(m) + \{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\beta \cdot \{a(m)-1\} - V - \Sigma P] / [m \cdot b(m) + a(m) \cdot \{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\beta] = C^-(m) \quad (15)$$

$$m=1, \dots, M$$

$$C \leq [m \cdot b(m) + \{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\alpha \cdot \{a(m)-1\} - V - \Sigma P + Vc] / [m \cdot b(m) + a(m) \cdot \{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\alpha] = C^+(m) \quad (16)$$

$$m=1, \dots, M$$

DDC・FDC ルールカーブでは式中の $\{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\beta, \{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\alpha$ に非超過確率 β 、超過確率 α での τ 時点からは
じまる m 半旬季節別渇水豊水持続曲線(Seasonal DDC・FDC) $f_\beta(m|\tau), f_\alpha(m|\tau)$ を用いる。

$$\{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\beta = f_\beta(m|\tau) \cdot m \quad (17)$$

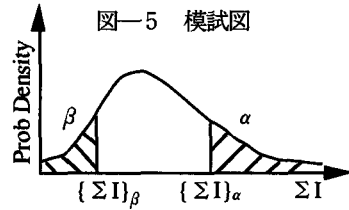
$$\{\Sigma I_{\tau+\nu}\}_\alpha = f_\alpha(m|\tau) \cdot m \quad (18)$$

このようにDDC, FDCを流入量の和の等価確定量として用いることにより、(2),(3)式の確率制約の意味は以下になる。当シーズンの渇水が確率 β 以下のもの、すなわち $T=1/\beta$ 年確率以上の渇水である場合のみ、貯水池の渇渇が許容される。また当シーズンに確率 α 以下の洪水、すなわち $T=1/\alpha$ 年確率以上の洪水があったときのみ溢水が許容される。

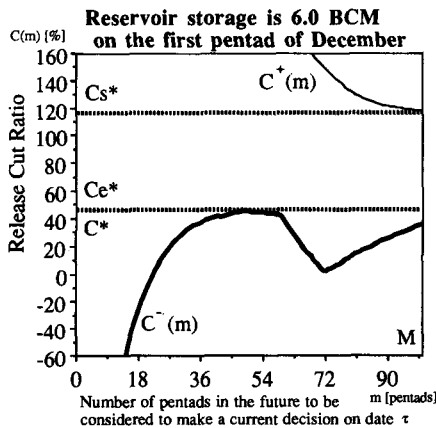
5. m - C 曲線

(15),(16)式の右辺 $C^-(m), C^+(m)$ と m との関係には、図—6から図—9のような様々な場合が現れる。これらは許容渇水確率 β を0.05、許容溢水確率 α を0.05、 M を100半旬として計算したものである。ただし図—6の $C^+(m)$ は α を0.2として計算してある。

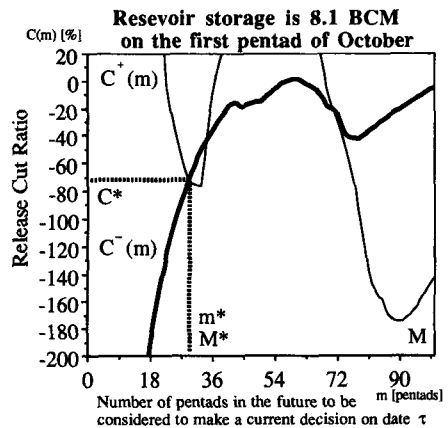
図—6のような場合には、 $C^+(m), m=1, \dots, M$ の最小値 Cs^* より小さく $C^-(m)$ の最大値 Ce^* より大きいという条件を満足する $C(Ce^* \leq C \leq Cs^*)$ の領域が存在し、そのなかで目標条件式(1)に従って最小のものを $\min C = Ce^*$ として選べば、それが解 $C^* = Ce^*$ である。しかしながらいつも図—6のようになるとは限らない。図—7から図—9のように $1 \leq m \leq M$ のいずれかの点 $m = M^*(\leq M)$ で、 $Cs^* < Ce^*$ となり、 $Ce^* \leq C \leq Cs^*$ の領域が消滅して空集合になることもある。これは、将来の考慮期間長 M が大きすぎたため制



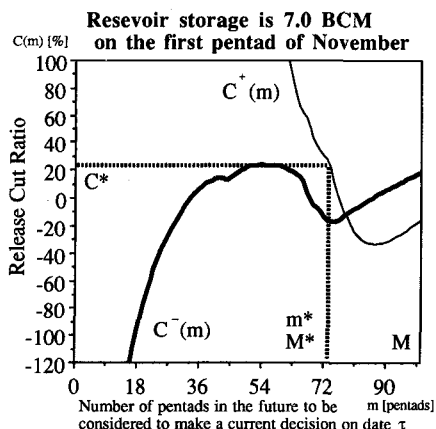
図—5 模試図



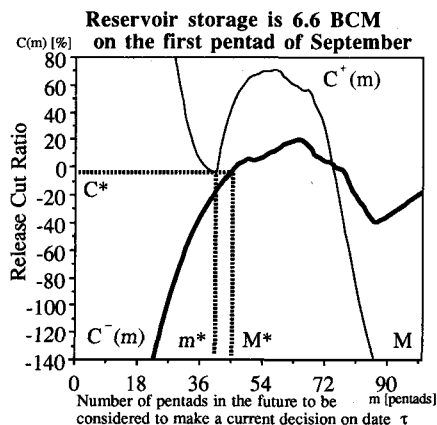
図—6 m - C 曲線



図—7 m - C 曲線



図—8 m—C 曲線



図—9 m—C 曲線

約条件を満たす解がないということである。従って将来の考慮期間長を解がある範囲にまで短縮したMがM*である。すなわちM*は、図—7においては $C^-(M^*) = C^+(M^*)$ 、また図—8、図—9においては、 $\max C^-(m) \leq \min C^+(m)$ for all $m \leq M^*$ となる期間長である。このときの解は、 $C^* = \max C^-(m) = \min C^+(m)$ $m=1, \dots, M^*$ である。M* < Mということは、貯水池の容量が小さいために、将来Mまで涸渇確率 β 以下に押え続けられるような十分大きい節水率を選ぼうとしても、その節水率では $m = m^*(\leq M^*)$ において溢水が起こってしまうために、そこまで貯水できないことを示している。

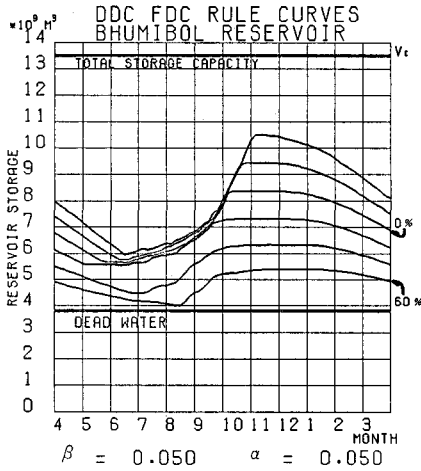
6. DDC・FDC ルールカーブと実際の貯水池の水位変動

以上の方法により算出したBhumibol, Sirikit両貯水池のルールカーブを図—10、図—12に示す。放流制限率は、-40%~60%まで20%刻みで描かれている。例えば、図—10ではBhumibolの1月初旬の貯水量が90億 m^3 であった場合の放流制限率は、-20%と指示されている。-20%とは貯水池に対する水需要量よりも20%多めに放流することを意味する。また、図—12ではSirikitの11月初旬での貯水量が50億 m^3 であった場合の放流制限は40%ということが読みとれる。つまり放流を40%カットするということである。両貯水池共通の特徴として11,12月は、これから乾期を迎え貯水池への流入が減り、水需要が増えてくるので、水位の高いうちから放流に制限が加わることになっている。一方6,7月は、これから雨期を迎え貯水池への流入が増えて水需要が減っていくので貯水池の水は溜っていく方向にある。このためかなり水位が低くなってはじめて、放流に制限が加わることになっている。以上のように両ルールカーブ、はこれらの水需給関係を明確に反映し、直感的にも合理的なルールになっている。なお許容涸渇確率 β 、許容溢水確率 α 等の選択は、ダム管理者や、行政的な判断に委ねられねばならない。

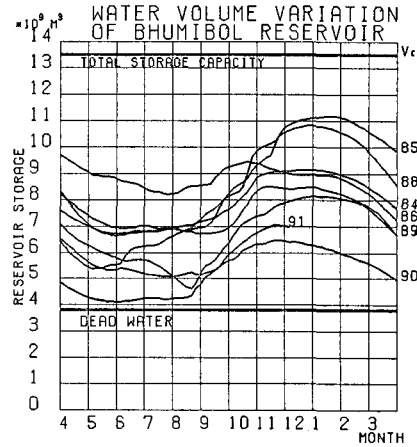
図—11、図—13は、Bhumibol, Sirikit両貯水池の実際の水位変動を示したものである。両貯水池とも年々水位が下がっていく傾向にある。これは、貯水池への流入量が近年減ってきていることや、乾期の灌漑用水の増加などによるものと考えられる。特に1991年や、図にはでていないが1992年の6月頃には、貯水量が、Dead Storageのライン寸前という危機的な状況にまで落ち込み、このためBangkokでは、塩水遡上により水道水が塩辛くなるというような事態にまでなった。しかし、図—10、図—12に示すような放流ルールに従っていれば、こうした危機的な状況になる前に大幅な放流制限が行われ、現在のような状態には至らなかったはずである。ただし本論文ではその是非、すなわち α 、 β の妥当な選択について議論することはできない。ただし客観的事実として、現今の灌漑需要では年々水位低下を招いており、1990,1991年の状態で20年確率の渇水でも渇渇しないように運転するためには、耕作期間中に約60%もの放流制限を行わなければならない状況にあると指摘することができる。

7. 謝辞

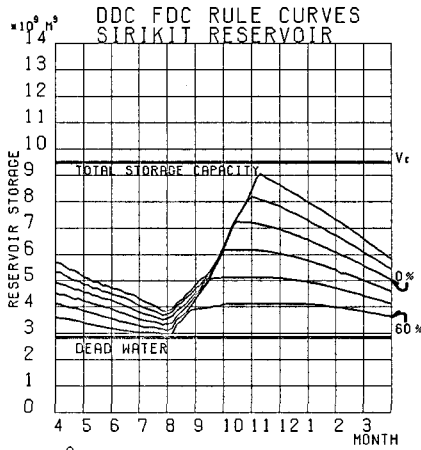
本研究に際し、タイ電力省 (Electricity Generating Authority of Thailand) 気象水文部の Kitti Naparaxwong 部長他にデータや資料の提供、ダム管理実態の説明など多大な協力を頂いた。また文部省科学研究費補助金、国際学術研究、平成3-5年 (課題番号030416016: 椎貝 博美代表) の援助を得た。記して深甚なる謝意を表する。



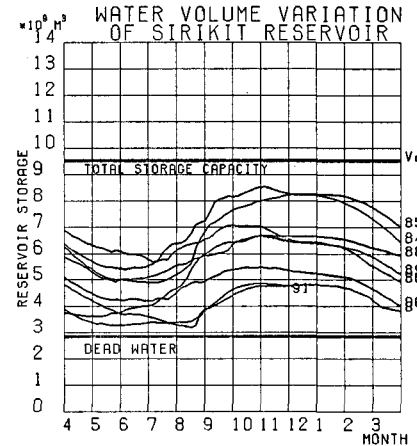
図—10 DDC・FDC ルールカーブ



図—11 実測値



図—12 DDC・FDC ルールカーブ



図—13 実測値

8. 参考文献

- 1) 竹内邦良・富田 茂・伊藤幸義：給水用貯水池のためのDDCルールカーブ，第28回水理講演会，1984，pp. 21-26.
- 2) K. Takeuchi：Chance-Constrained Model for Real-Time Reservoir Operation Using Drought Duration Curve, Water Resources Reserch, Vol.22, No.4, 1986, pp.551-558.
- 3) 竹内邦良・新谷 渡：溢水確率を考慮したDDCルールカーブ，土木学会第46回年講，1991，pp.282-284.
- 4) 新谷 渡・竹内邦良：Bhumibol および Sirikit ダム操作のためのDDC・FDC ルールカーブ，土木学会第47回年講，1992，pp.710-711.