創造工学の水理学の理論への応用研究

九州電力株式会社総合研究所 正員　村瀬次男

1. まえがき

創造工学は現在盛んに建設されている新しい方法の学である。中でも、“現象およびシステムの等価関係を利用する方法”は比較的整備されていて応用範囲も広い。

本研究は、上記の方法を水理学の未解決の問題に応用し、成功した、或いは成功しつつある2つの事例である。そして、両事例はいずれも自然界の水理システム——1つは線形、或いは非線形の開いたシステム、他は非線形の閉じたシステム——を対象としている。

なお、表現についてであるが、少ない紙数で多くを語らしめるため、できるだけ図および表の力を借りることにした。

2. 水文学的洪水追跡法の理論とその応用

著者は表－1に示すような等価関係を利用した。そして、これにより以下の成果を得た。

A. 水文学的洪水追跡法の理論[1),2)]

表－1　現象およびシステムの等価関係(1)

現象		河川における洪水の流下	タンクによる流量の制御
システム	機能	洪水の逓減	流量の調節
	システム（開いた系）	河道（洪水流下機構） 不定流の基本式	タンクのカスケード結合 同　システム方程式
	洪水追跡のモデル	河道素子 洪水追跡の式	同上系の等価システム 同　システム方程式
入力，出力		洪水流量	流量

(1) 水文学的洪水追跡法は理論的な追跡法であり、それは不定流の基本式から演繹される。（図－1および表－2参照）

(2) 水文学的洪水追跡法は自然河川の形状特性と河川断面のそれとを旨く利用した、なかなか味のある実用計算法である。（図－2および表－3参照）

(3) また、水文学的洪水追跡法は河道素子の洪水制御機構を一種の押し出しポンプと考えている。（図－3参照）

B. 理論の応用2例

α. マスキンガム法の理論[1),3),4),5)]

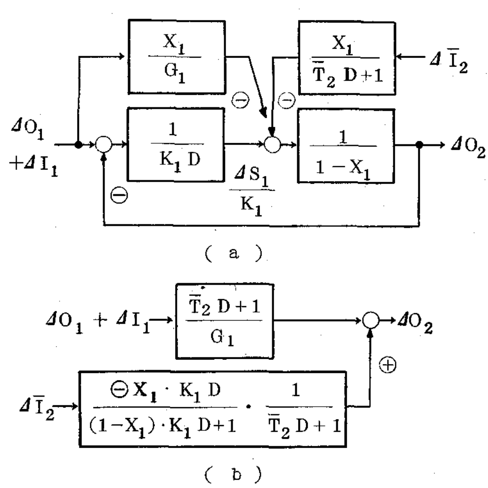
(1) マスキンガム法は、図－1（a）において、

$$G_1=(1-X_1)K_1\cdot\bar{T}_2D^2+(K_1+\bar{T}_2)D+1=0 \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\varDelta\bar{I}_2=0 \quad \cdots\cdots(2)$$

として導かれる。

(2) マスキンガム法に対する著者の解釈は初めての



図－1　水文学的洪水追跡法のブロック線図

物理的解釈であり、従来の解釈とは全然違ったものである。（表－4参照）

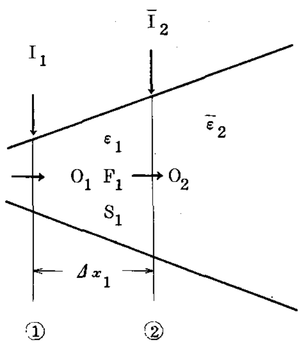
β. 洪水制御システム論

(1) 最近の社会情勢の変化※2から、ハイダムは原則として利水専用※3に考え、洪水の制御は河道で行なうべきである。多目的ダムの役割は考え直すべきである。

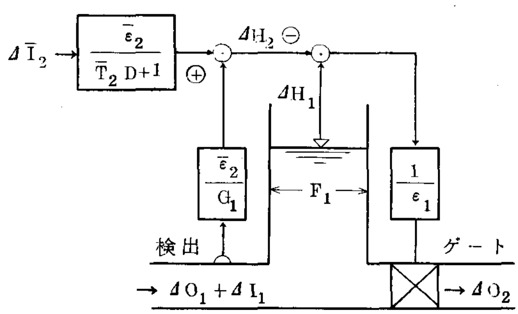
(2) また、最近洪水制御ゲートの自動化の効果を過大評価していないか。洪水のような水理現象に対しては、安全性および信頼性の面から水理的なシンセシスを考えるのが本道である。反省しないと自動化による人災が今後多発しかねない。

表－2　システム・パラメータの一覧表

	定　義　式	物理的な意味
T_k	$\varepsilon_k \cdot F_k$	$\left(\dfrac{\Delta S_k}{\Delta O_{k+1}}\right)_{\Delta S_{k+1}=0}$
ε_{k+1}	$\dfrac{\varepsilon_{k+1}}{\varepsilon_k}$	$T_{k+1} \Big/ \left(\dfrac{\Delta S_{k+1}}{\ominus \Delta O_{k+1}}\right)_{\Delta S_k=0}$
$\bar{\xi}_2$	$\xi_2 + \xi_2 \cdot \xi_3 + \xi_2 \cdot \xi_3 \cdot \xi_4 + \cdots\cdots$	$\left(\dfrac{\Delta S_2}{T_2} \cdot \xi_2 / \Delta O_2\right)_{\Delta \bar{I}_2=0}$ のゲイン
$\bar{T}_2$	※1	同　上の遅れ時間
K_1	$(1+\bar{\xi}_2) \cdot T_1$	$\left(\dfrac{\Delta S_1}{\Delta O_2}\right)_{\Delta \bar{I}_2=0}$ のゲイン 同　上の遅れ時間／$\bar{T}_2$
X_1	$\dfrac{\bar{\xi}_2}{1+\bar{\xi}_2}$	$\left(\dfrac{\Delta H_2}{\Delta H_1}\right)_{\Delta \bar{I}_2=0}$ のゲイン



図－2　水文学的洪水追跡法の河道素子



図－3　河道素子の自動制御モデル

※1 式で示すのが困難である。

※2 土地および物価の値上り、公害対策の強化（例えば、ダム放流の検討洪水として2山洪水波形の採用）、各種用水およびエネルギーの不足など。

※3 しかし、ダムの防衛上必要な洪水制御は当然行なう。

表－3　水文学的洪水追跡法の適用条件

	必要な仮定	適用条件
河川形状	$\bar{\xi}_2 = \bar{\xi}_2(\Delta x_1) < 1$	支川合流の末広河川 （Δx_1 のとり方にも関係する）
河川区間	不定流の基本式において、 加速度エネルギー 流速水頭　〃 横流入　〃 の省略	河川の中、下流部 （後の2つは摩擦損失に含めることも可能）
河川断面	$T_1 = T_1(\Delta x_1)$	拋物形状の河川断面 （等価値を採用すれば、厳密に考える必要はない）

(3) ハイダムでは F が増大する反面 ε の減小が著しく、K※4 はむしろ小さくなる。この影響を消すため洪水時に余分のゲート操作を行なう必要がある。したがって、河道のシンセシスでは K の減小を避けるのが第一である。そして、色々な非線形ファクター※5 を工夫し設計して、K の増大を計るべきである。

表－4 マスキンガム法の新解釈

		新解釈	旧解釈
適用水路		自然河川 （表－3参照）	一般水路 （X の解釈より）
マスキンガム方程式		運動方程式（力の式）	貯溜方程式
変数	I，O，S	初期値からの変分	そのままの値
	$\Delta \bar{I}_2$	考える	考えない
パラメータの物理的意味	K	同右（$\Delta \bar{I}_2 = 0$ の） （表－2参照）	貯溜係数
	X	損失水頭係数の比 （表－2参照）	容積比 （重み係数である）
X の値の範囲（$0 < X < 0.5$）		$0 < \bar{\varepsilon}_2 < 1$ の条件から求まる	別に根拠はない （むしろ、$0 < X < 1$ というなら判る）
Δx_1 の大きさ		常に適用条件を満足するようにとる	別に制約はない
Venetis の欠陥原因		マスキンガム方程式で、時定数を無視した故 （(1)式参照）	不明

(4) 図－3の表現から、河道の洪水制御作用について直観が働くことになり、水系の洪水制御システムのシンセシスが容易になる。

3. 蛇行流の形成

A. 蛇行流の形成（その1）[4),6)]

著者は表－5に示すような等価関係を発見した。そして、これにより以下の成果を得た。

(1) 河床波は河川流水が流砂によって画く非線形立体図形である。したがって、その形成には従来無視されてきた非線形ファクターの働きこそ重要である。（表－6参照）

(2) この場合は、蛇行流の形成すなわち3次元河床波の形成であり、両者の発生条件はサージタンクの安定条件に相当するものである。

(3) 椿と林の非対称性の考えはいずれも正しい。しかし、この考えは求めるべき変数（u or q）の分布の型を予め仮定しているのが難点である。（表－7参照）

B. 蛇行流の形成（その2）

著者はまた、表－8に示すような等価関係を発見して、以下の成果を得た。

(1) この場合は、発生する2つの渦の作用を正しく知ることが重要である。2つの渦の作用は水車のガイドベーンのそれと同じである。

※4 河道の洪水制御作用のメジャー。

※5 分流、越流、遊水、低いダム、複合断面など。

表－5　現象およびシステムの等価関係(2)

現象		蛇行流の形成（その1） 河床波の形成	ガバナー・サージタンク系のリミット・サイクル
システム	機能	移動床の安定化作用	水車の調速運転
	システム（閉じた系）	自然界の水理システム 自励振動系（2次元）	人工の自動制御システム 同左（1次元）
	振動系	開水路の水理系	トンネル・サージタンクの水理系
	負性抵抗（系の発散因子）	流砂系 流砂 河床波 浮流砂	ガバナー系 ガバナー 水車のガイドベーン 補助サーボモーター
	非線形ファクター	河床の剪断応力（2次元） 流砂の不動帯 移動床の厚さ	トンネルの摩擦力（1次元） ガバナーの不感帯 ガイドベーンの開度制限
環境の働き	目標値	なし	水車の基準回転数
	外乱	流量変化	負荷変化
	振動エネルギー	流水のエネルギー	サーボ機構の油圧エネルギー

(2)　本考察は、結果的には藤芳の渦のアイデアを再生したものと言える。しかし、この再生には同氏の考えを根本から修正する必要があったのである。（表－9参照）

C.　蛇行流の形成（その3）

著者はまた、表－10に示すような等価関係を発見して、以下の成果を得た。

(1)　この場合は、振動系が粘弾性体（相対的に）であるという認識が重要である。そして、応力 ― 歪特性における応力と歪の関係は、2次元のフラッターの翼の回転と変位の関係と同じである。

(2)　自励振動が発達すると、自由水面があるので水路の巾方向にサージングが生じる。したがって、この場合の蛇行流の形成も、結局はサージングの安定問題になる。

4.　あとがき

本研究の成果を要約すると次の通りである。

表－6　河床波の形成因子の一覧表

		内因			外因	
		制限子	発生条件	系の発散因子	外乱	振動エネルギー
3次元河床波	固定床が露出しない場合	河床の2次元非線形剪断応力	系が水路の巾方向に対し、不安定（h／B および I に制限あり）	流砂量の過渡特性 流砂量の定常特性 〃 の t 特性（遅れ時間） 〃 の x 特性（遅れ距離）	流量変化	流水のエネルギー
	同上が露出する場合	同上および移動床の厚さ				
2次元河床波	同上の区別あり	同上の区別あり	安定			

(1) 水文学的洪水追跡法の理論を確立し、マスキンガム法の意義を再発見した。

(2) (1)での思考過程および成果から、河道の新洪水制御論 ―― 洪水制御システムとしてのシンセンス論の体系 ―― の展開の可能性を示唆した。

(3) 蛇行流について、3種の形成因を明らかにした。そして、これら3種の蛇行流はそれぞれその規模に応じた河川蛇行の直接の成因と考えられた。（表−11）

(4) そして、蛇行流の形成はどの場合も複雑な現象※6ではあるが、基本的には2次元の自励振動現象※7として理解されることを示した。

最後に、今後の研究課題を挙げると次の通りである。

(1) K，X の非線形性を考慮して、非線形洪水追跡法の理論を確立すること。

(2) 前述の河道の新洪水制御論を展開し、体系ずけること。

(3) 蛇行流の形成についての著者の3つの説を検証※8すること。

表−7　椿と林の研究の発展

	椿と林の研究	著者の研究
問題	線形問題 （微小振動理論）	非線形問題 （リミット・サイクル）
系の発散因子	流速分布（椿） 流砂量（林） } の非対称性 非平衡（椿），遅れ距離（林）	流砂量の { 定常特性 t 特性 〃 の x 特性
制限子	考えない	河床の2次元非線形剪断応力 移動床の厚さ
結果（or 目的）	系の発散領域を求めている	河床波の形成領域を求めるのが目的
河床波の発生条件	答えず	系の水路巾方向の安定条件（微小振動の）と考える

表−8　現象およびシステムの等価関係(3)

現象	蛇行流の形成（その2）	熱板上のコーヒー沸しの振動（低温での）
システム	自励振動系（2次元）	同左（1次元）
振動エネルギー	河床の摩擦（主流による）の熱エネルギー	熱板の熱エネルギー

表−9　藤芳の研究の改造

	藤芳の研究	著者の研究
現象	自由振動（1次元）	自励振動（2次元）
河床の摩擦の熱エネルギー	渦の発生原因と考えている	エネルギー源
2つの渦による水路の巾方向のサージング	考えない	圧力差が復原力 （2つの渦は交互に縦に伸んだり横に伸んだりする）
2つの渦の摩擦力の差	復原力	飽くまで外部摩擦力と考える（負性抵抗）
制限子	考えない	河床の2次元非線形剪断応力

※6 形成システムのパラメータは定数ではなく、一般に周期的に変化する。これは系自体が変化することを意味する。

※7 この場合はパラメータを一応一定と考えてよい。

※8 式および電算機シュミレーションによって行なう。

謝　辞

本研究を発表するに当って総合研究所所長久保田克人氏、同所長代理永山盛敏氏から格別の御配慮を戴いた。ここに記して謝意を表する。

文　献

本研究の詳細は以下の各文献を参照されたい。

表－10　現象およびシステムの等価関係(4)

現　象		蛇行流の形成（その３）	各種のシミー現象
システム	システム	自励振動系（２次元）	同　左　（２次元）
	振動系	混　相　流 （浮流砂を含んだ流束）	固体の運動体
	負性抵抗	同上の粘弾性 （応力－歪特性）	同上の粘弾性 （同　左）
	制限子	河床の２次元非線形剪断応力	外部摩擦力（２次元非線形） 構造寸法からの制限
振動エネルギー		流　水のエネルギー	運動体のエネルギー

1)　著　者：洪水流の理論に関する研究，昭和４６年度研究発表会論文概要集，土木学会西部支部，１９７２．２．，pp．100～103．

2)　著　者：水文学的洪水追跡法の理論，発電水力（投稿中）

3)　著　者：マスキンガム法の理論の基礎，第２７回年次学術講演会講演概要集　第２部，土木学会，１９７２．１０．，pp．297～298．

4)　著　者：河川蛇行の成因と洪水追跡の理論，第２３回応用力学連合講演会講演論文抄録集，日本学術会議力学研究連絡委員会，１９７３．１０．，pp．２５１～２５２．

5)　著　者：マスキンガム法の理論，昭和４８年度電力気象全国大会　第３８回全国研究検討会予稿，電力気象連絡会，１９７３．１１．

6)　著　者：河川蛇行論，第２８回年次学術講演会講演概要集　第２部，土木学会，１９７３．10．，pp．２９４～２９５．

表－11　蛇行流の一覧表

	エネルギー源	流砂の働き	河川の流速	h/Bの大きさ	蛇行の波長
蛇行流の形成（その１）	１次的	要	小	小	小
〃　　（その２）	２次的	不　要	中～大		中～大
〃　　（その３）	１次的	要（浮流砂）	大	大※9	大

※9 この種の蛇行流は河床の摩擦力が大きい場合には形成されない。