総合政策からの提言
――肱川の氾濫を教訓として――

小　林　秀　徳

A Proposal of *Sogoseisaku* aka 'The Policy Sciences' for Disaster Control

Hidenori KOBAYASHI

Abstract

To improvement in policymaking the policy sciences has been recommending civil participation in policy analysis as scarce resource input for successful studies of themselves as well as citizens demanding knowledge for good decision. A case of failure in the emergency evacuation management for a disaster control was reported. I first answer the question why they failed. Modeling and simulation techniques of system dynamics and systems thinking help make clear the fact that the caution from the authority of sheltering order saying 'Protect your life yourself' makes no sense, especially in the case of 'counter-intuitive behavior' that exists in the structure of the system. I bring out the mathematical exposition of the theorem, then make another proposal to the public from the policy scientific point of view.

Key Words
policy sciences, modeling, counter-intuitive behavior

目次

1. 総合政策の視点

2018年7月7日愛媛県大洲市において野村ダムの放流による肱川の氾濫が発生，沿川住民に人命を含む大きな被害が出た．愛媛新聞（2018年7月8日）によると「被害を受けた市民らは一気に増水してきた恐怖を語り，被害が広がらないことを願った」と云う．河川管理当局は何をしていたのだろうか．

貯水池・ダム・河川の管理には落ち度はなかったと主張するためには，短時間に想定外の大量の雨が降ったのだから仕方がないという論理が採用される．住民の安全な避難は市町村長の責任だし，気象による被災の注意警報は気象庁の責任だから云々，と責任転嫁の論理が続く．

まだ時間があると思っている間に急激に水嵩が増して逃げる暇がなかったという現象――反直観的変動性がもたらした災害は，ダムと河川の管理技術者にとっては当然科学的に予測された――避けることができたはずの事態である．それを「自分の命を守るのは自分だと弁えよ」などと遁辞を弄する究極の責任転嫁は赦すことができない．それは，危機の只中に他人を救おうと力んで命を落とした勇者を冒涜する行為である．

元凶は何あろう――管理当局における総合政策的視点の欠如である――これが本稿の結論である．そう主張することが可能となるためには，本件における反直観的変動性を管理技術者なら予測し得たという事実が証明されなければならない．加之ず，その科学的予測をどのように政策決定に反映させるかの方策を示し，以て，総合政策的視点の何たるかを自ら顕示する必要があると弁えている．

2. モデリング

ダムから放出された水は川を下って海に注ぐ――川を流れている間の水にも，ダムからの流入と海への流出がある．水門から河口の間の水路上にある水の総量を貯水池の水と同様に，川水位としてストックと捉えよう．システムダイナミックスにおけるフロウダイアグラムの描法を用いて，これを図１のような水流の構造として表現する：

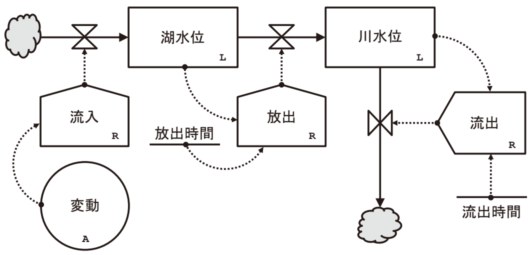

図１　１次の指数遅れの直列重層

天然の流入は長期間ほぼ一定であるが，近年来の異常気象報道は，突然の豪雨で貯水池の水嵩が急激に増大する事態の起こり得ることを警告している．この変動性が川水の流れにどのような影響を与えるかについては，シミュレーションを用いて検討することができる――そのためには，方程式で記述する必要があるが，記述される方程式は決して歴史上の事実ではなく，ものの譬えである：

```
L 湖水位.K=湖水位.J+DT×(流入.JK-放出.JK)
L 川水位.K=川水位.J+DT×(放出.JK-流出.JK)
N 湖水位=250
R 放出.KL=湖水位.K/放出時間
C 放出時間=5
```

流入は 50 トン / 分で長期間一定であり，平均遅れ 5 分間で放水すると湖水位は一定の 250 トンに保たれる――定常状態にある――と初期条件を揃えたのである．ここに衝撃的な集中豪雨があったとしよう：

```
A 変動.K=50+STEP(P/DT,3)-STEP(P/DT,3+DT)
C P=250
```

とする．ここで **TIME** = 3 で流入が P/dt（トン / 分）増えて **TIME** = 3 + dt で元に戻ったと仮定している．

dt は時間的長さがゼロに近いほんの一瞬を意味する．これで湖水位は一挙に 250 + 250 = 500（トン）にレベルアップする．

```
R 流入.KL=変動.K
R 流出.KL=DELAYN(放出.JK,流出時間,1)
C 流出時間=10
N 川水位=放出×流出時間
SPEC DT=0.05/LENGTH=40/PRTPER=1/PLTPER=0.1
```

ここで y = **DELAYN** (x, T, n) は「y は平均遅れを T とする n 次の指数遅れである」という関数を表している．n = 1 のままでシミュレーションすると，図２を得る：

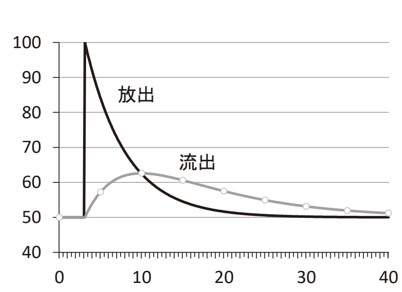

図２　１次の指数遅れ流出

流出の方程式を２次の指数遅れと３次の指数遅れに変更した場合のラン結果を各々図３に示す：

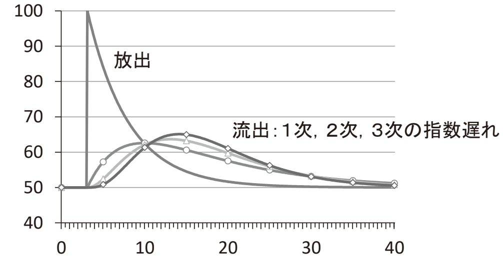

図３　各次の指数遅れ流出　１～３次

図３より一目瞭然なのは，指数遅れの次数が増えると，遅く立ち上がってピークが高くなるという――肱川被災者の「まだ時間があると思っていたらアッと言う間に水嵩が増して逃げる暇がなかった」現象は，流出における指数遅れの次数の増大によってもたらされることが解る．このことは１次から100次までの指数遅れを１図に描いた図４を見れば一層顕著だろう．

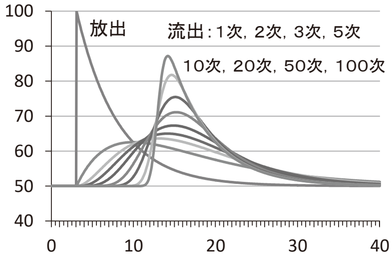

図４　各次の指数遅れ流出　１～100次

遅れの次数は，堰の増設と浚渫作業によって造られた水路上の淀みの重層化によって高くなるものである――堰や浚渫は河川の管理上必要なこと――開発の歴史が古い川ほど次数が高くなる――という，歴史遺産としてのストックの配置が決めるフロウの構造に由来する．

ダムと河川の管理者なら知っている河川の構造についての技術的知識を，避難勧告時にあるいは理科の勉強として学校で，沿川住民に伝えることは恐らく不可能であろう．

何百年に一度の天変地異でも起こらない限り知っていても役に立たないような知識は，学校で教える必要はない――と云う．だから総合政策が必要なのである．

総合政策は，想定を超える事態が起こりそうになった際に取るべき行動を具体的に指示する危機管理マニュアルを沿川住民と事前に共同制作せよ――と示唆する．自らを啓蒙する学習なくしては，いかなる危機管理方式も実効性をもたないからである．

この共同制作にはその作品である危機管理マニュアルにしたがって行動するすべての人が参加していなければならない．これを参加型政策分析などというが，こればかりは，民主主義や形式主義や儀礼やアセスメントといった政治活動とは関係なく，想定外事態の出来に際しての自らの行動を事態に関する理解の上に自分で決めておくという，誰にとっても必要な日常生活の心得のようなもの――ダイエットやワークアウトについての情報検索と同じく，日常生活の心得を正しい知識を用いて改善しようと考える人は多い．

自分の命を守るのは自分しかいないことは誰でも知っている．避難勧告が出た――だから豪雨の中で安全を確かめながら一目散に避難所に走るか――だが待てよ――家に居た方が安全ではないのか――できれば他人も助けたい――他の避難民に迷惑をかけたくない――大事なもの＝家族・隣人・仕事・愛・信頼・友情＝も手放したくない――自分だけ助かろうと先を争って良い避難場所を確保するなんて恥だ――ところで避難所に居る間の空き巣の被害は誰が補償してくれるのだ――と，まだまだ社会人としては当然な葛藤のリストは続く．

避難所であれ我が家の二階であれ，其処へ向けて一目散に走り出す前に，理性に基づく状況判断を下すのが正しいアクションである．感覚器官を通して得たデータから思考を通して判断を下すまでの時間的余裕が十分にないと，葛藤を含む意志決定問題を解く正しい状況判断に到達することができない．

時間的余裕がいかほどあるかは一人々々その居

場所によって異なるから，一律の避難勧告によって各自に正確な時間的余裕を通達することは難しい．そのため避難勧告を受けた住民は各個に時間的余裕を測らなければならない——それは自己責任ですよ——と言っているのが注意書きの趣旨である．

反直観的に振る舞う流量の変動を直観的に予測しなさいという指示は，科学的知識として反直観的変動を予測していなければならない行政の責任転嫁である．避難勧告を出すのは市町村長の判断とされているが，首長さん達には，住民と同様の直観的予測にしたがう行動しか期待されていない．

ここに多くの管理問題の共通基盤を見出すことができる：行政→末端管理者→市町村長→住民——という一方向的な責任転嫁パターンの存在と逆方向の情報リンクの欠如は到る処に見られる．このリンクなくしては，社会的相互作用が円滑に機能しない．

すべての社会善＝価値＝の形成と保有は社会的相互作用の連鎖たる社会的プロセスのもたらす結果であるとすれば，一方向的な責任転嫁を放置することによって被る価値生産上の効率性のロスは，総合政策によって補われなくてはならない．以上は，そのための譬喩の一つ＝モデルである．

3. 危機管理マニュアル

放出開始から約 10 分後にピークを迎える川の水量＝単位時間当たり流出量＝の急激な増大に対し沿川住民は備えなくてはならない——何分後に何トン / 分に水量が増えるかが予測されなければ，誰も備えようがない——貯水池管理者にできることは精々避難指示を出すことぐらいだが，それすら住民の耳に届くとは限らない．

残念なことに，川の構造が被害を大きくする可能性について，河川管理当局は十分な知識と研究を蓄積しているはずであるのに，専門的な高度の技術的知識が住民の生活を蔽う危機管理には全く反映されていない．想定の範囲内には想定を超える事態を予知する可能性を排除する指示——自分の専門性が否定されないよう注意深く身を守る本能——が含まれているからである．

避難する住民にとって，突然急激に水量が増えるという現象の発生する可能性の事前認識は生死に係る重要事項であり，氾濫現象の構造的原因についての理解は，河川の管理者にとって必修科目である——そんなことは住民も管理者も常識として知っている——ではなぜ痛ましい事故が起きたのか．

ダムの専門家，河川の専門家，危機管理の専門家，等々がお互いの領分を荒らさないように各々技術知識をいくら持ち寄っても，そこから正しいアクションが生まれることが期待されない——共通の正しい認識に到達する方法を誰も持ち合わせていない——総合政策が欠けている（いた）——からである．ここに水流の専門家を加えたとしても事態は全く改善されない．

専門家が作る危機管理マニュアルは，素人が読んでも意味が解らないし，専門家ならば知ってることしか書いてないから，専門家が読んでも意味はない．結局誰も読まないことを前提として書かれることになる．これはマニュアル一般の通弊であるが，マニュアルとは所詮そんなもの——と高を括ることが，危機管理の場合に限っては赦されない．人の命が係っているからである．

一堂に会した人々が共通の正しい認識に到達するには対話しなければならないが，バックグラウンドやコンプレックスやプライドを超えて，万人共通の正しい認識に到達する方法を持っているのは，ひとり数学のみである．

数学の善い処は専門家以外の門外漢に対しても門戸が開かれている点である——ベテランの技術者も，昨日今日の駆け出しも，同じ資格で，任意の主張の受容／却下を判定することができる．

かつて第二次大戦中に OR が華々しく登場したのは，軍事専門家より科学者の卵の方が，戦場での作戦を数学を使って改善する能力において優れていたからである．

砲術の指揮を執る軍人も数学の優等生である——弾道計算の高度な変分問題は解けるが——段列のためのロジスティックスに同じ数学を適用す

る気はない――放列指揮官たる沽券に拘るからである．OR はその鼻を明かした．

自然の猛威に曝されるダムと水系も本質は戦場と異ならない――だから，水流のことなんか何にも知らない科学者の卵が，数学を巧みに操って危機管理の作戦を立てる――という慣行が生まれることが，本当は望まれているのである．

しかし，軍事専門家のポストは軍人キャリアの栄光と挫折に密接に結びついていたし，大学に居るしか能のないような青二才に作戦主任の座を明け渡す訳にはいかないし――結局 OR は大学の数学研究室の片隅に追いやられ――将の軍にあるや王命をも受けざるところあり――と嘯く軍人官僚達の天下に戻ったという経緯がある――これが歴史である．

研究室の片隅では数学者のみにしか理解できない高度な数学の研究が今日も行われている．彼らの研究の方向が総合政策へと向かうことはない――総合政策では技術的に高度な研究成果が上がらないと，元卵だった科学者たちも勝手に極め込んでいるからであろう．

水流のアナロジィが，危機管理の展開において，まだ伸び代を残していることが解っても，その先に待っているのは OR と同じ末路――総合政策とは反対の指向にしたがう専門化・技術化・高度化の道――である．すなわち悲劇はとっくの昔に始まっていたのである．

予知の専門家などという如何わしい商売には端から用はない．モデリング & シミュレーションの専門家は必要ない．危機管理マニュアルは，そのマニュアルにしたがって行動する人々が共同で制作するものである――そうでなければ，どんなに立派な体裁の書物を拵えても，誰もそのとおりに行動すると期待できない．想定外の事態の進展する中でのアクションであるから――現場でマニュアルを参照する暇などない．その共同制作に不可欠なのは総合政策であって，決して数学者ではないのである．共同制作に科学者の卵の優等生が加わってくれたら有力な援けとなるが，居なければ無しで済ませても好い．

その危機管理マニュアルにしたがって行動すべき人は，肱川の例でいうなら沿川住民・河川管理者・ダム管理者・市町村長（消防）・県知事（警察・自衛隊）であるから，社会的相互作用の関係性を理解した上で，一冊の危機管理マニュアルを生み出す社会的プロセスを運営しなければならい――否――ならなかったのである．

モデリング & シミュレーションはシステム科学の専門技術ではなく，全員が共同で創作する作品であることを理解する必要がある――大変な作業だが，それで損害を最小限に抑えられるなら，莫大な利益をもたらす．危機管理マニュアル共同制作プロジェクトの最大のアウトプットは，参加した人々が各々自分のメンタルモデルを少しずつ改訂するという成果である――これを社会的学習という．社会的学習は社会をより善いものに更新する．

想定を超える事態が生じたとき大災害となるのは想定が間違っていた証しである．危機管理マニュアルの共同制作は，誰がやっても，現行の想定――よく知りもせず受け容れてきた――を見直す作業から始まる．間違った想定の上に建てられた社会は欠陥社会である．欠陥のない社会に更新することは誰にとってもメリットである．

災害が起こってからそれをしたのでは間に合わない社会的学習を総合政策プロジェクトとして今直ぐにでも始めるべきである――これこそが悲惨な災害から汲み取るべき歴史の教訓に外ならない．

4.　反直観的変動性 counter-intuitive behavior

モデリング & シミュレーションに用いられるモデルは，対話を通して人々に受け渡されるものでなければ，総合政策の方法を適用する援けとはならない．モデルを作るのも受け容れるのも偏にセンスである．では，センスさえあればモデルは要らないのかと問えば，答えは否である．

シミュレーションの最大の目的は，システムに固有の反直観的変動性を見つけだすことにある．その発見により，モデルの根拠たる人々のセンスに磨きをかける他山の石を得たいのである．他山

の石は石ころであれば何でも佳く，石ころに科学性を求めるのはナンセンスである．

前節で見た水流のモデルでは，科学的根拠を示さずに，次のような書き下しがなされた：

L 湖水位.K=湖水位.J+DT×(流入.JK-放出.JK)

L 川水位.K=川水位.J+DT×(放出.JK-流出.JK)

図１のフロウダイアグラムを見ながらこれを読めばダムのイメージが得られる――という根拠は，見る人のセンスであって流体力学の理論ではない．
即物的な画が欲しければ描き直しても好い：

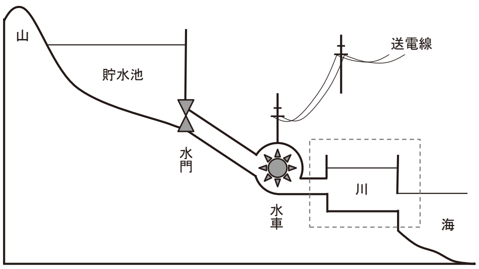

図５　代替的イメージ

図５の貯水池の部分を少し抽象化して：

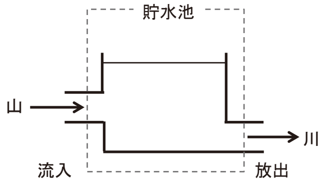

図６　代替的イメージ　貯水池部分の抽象化

と描き，貯まっている水量を測ってこれを湖水位と名づけた．放出口を開きっ放しにして流入を停めると湖水位は $z(t)=M\ e^{-r_0 t}$ という減衰曲線を描いて低下して行く．M は $t=0$ における初期値．r_0 は放出率一定とすると定数（無単位）になる．

通常の対話の上ではここで若干の齟齬をきたす恐れがある．それは単位時間当たりの放出量

$$z'(t)=\ -r_0\ M\ e^{-r_0 t}$$

もまた流率という意味で放出率（トン／分）と呼ばれるからである．

後者の意味の流率はもちろん t の関数で定数とはならない．だからと言って，用語の使い方を制限する必要はない――言葉はすべてコンテクストによって意味が確定する――ということを対話者が相互に確認するための話題とするだけで十分だからである．

流入が急激に増大して M が増大することはあり得る――現にあったから問題になったのである．r_0 が一定ならば単位時間当たり放出量 $z'(t)$ も増大する．水門の番人は水門を調節して水門-水車間の流量（トン／分）を一定に保とうとする．電力の安定供給のためである．ここに矛盾が生じる――湖水位が増えてポテンシャルが上がっているのにバルブを絞るから益々 M は増大する――と，益々バルブを絞らなくてはならなくなる．

このポジティブフィードバックを放置すると，やがて水門が圧力に耐えられなくなって破綻する――だから，そうなる前に水門を全開したのである．

全開した番人が悪いのだろうか――否．想定を超える流入の急激な増大が悪いのである．神ならぬ身の下した想定が間違っていたのだが，そんな不測の事態まで想定に入れてなければいけなかったのだろうか――否．限られた予算でそこまではできないのが人の世の常である．

想定を超える流入の急激な増大が起こりそうだという事前の察知は人間の能力でできる．事前の察知が，たとえ発生直前であったとしても，察知した時点で各自がどう行動すべきかはマニュアル化されていなければならない．咄嗟の判断に自信のある人など居ないし，正しい判断ができたとしても，逡巡したり躊躇したりといった人間らしい行動を許容する時間的余裕はないのが非常事態なのであるから．

想定の範囲内で水門-水車間の流量（トン／分）を調節するという，水門の番人がしている通常の業務は，川の水位を一定に保つという恩恵を施して，沿川住民の安全と安心に少なからず貢献してきた．これが想定の範囲を超えると凶器にもなり得るということは，できるだけ知らしめないでお

く方が，安心のためには善いことであると考えられる．

総合政策か何か知らないが，想定の範囲外のことについてアレコレ取り沙汰して危機感を煽るような政治的行為は公務員には禁じられている――その通りである．我々は想定の範囲外のことを言おうとしているのではない．危機管理マニュアルを作成しようとすれば，当然，何かが想定されているという事実を知ることになる．想定がどうなっているかは秘密ではないが，知らなければ知らないで済ませることができる．これを知らぬが仏という．我々は想定の範囲外のことを論う気はないが，範囲そのものを知っておきたいのである．

危機管理マニュアルの作成上知らなければならないことは，まず「想定」がどうなっているかについてであるが，それがすべてではない．もう一つ「構造」がどうなっているかについても知らなければならない．

図５の川の部分は，このままでは「構造」について何も表していない．例えば，もう少し詳細化して：

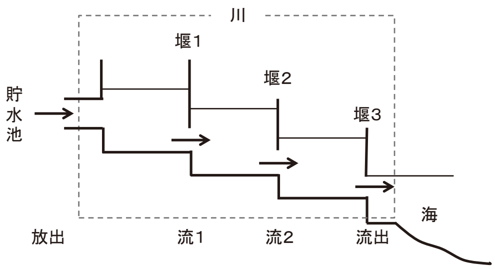

図７　代替的イメージ　川部分の詳細化

と描いてみたらどうだろう．これを

R 放出.KL=湖水位.K/T_0

R 流出.KL=堰3水位.K/T_3

R 流2.KL=堰2水位.K/T_2

R 流1.KL=堰1水位.K/T_1

L 堰1水位.K=堰1水位.J+DT×(放出.JK−流1.JK)

L 堰2水位.K=堰2水位.J+DT×(流1.JK−流2.JK)

L 堰3水位.K=堰3水位.J+DT×(流2.JK−流出.JK)

と方程式で書き，流出は放出の３次の指数遅れであると読み下した．一本の関数にまとめて

R 流出.KL=DELAYN(放出,T,3)

と書き下せば，堰 1, 堰 2, 堰 3, 流 1, 流 2 など無駄な変数名に煩わされることなく同じことを表現できる．

ここで，$T_0 = 1/r_0$（放出率の逆数）は山から流入した水が貯水池に滞留する時間＝放出までの平均遅れ＝を表わし，T は放出された水の川を下る時間＝流出までの平均遅れ＝を表わしている．ただし $T = T_1 + T_2 + T_3$ であって，これは任意の一つの堰内に滞留する時間の総和である．各堰における流出率 流 1 率 r_1, 流 2 率 r_2, 流 3 率 r_3 は

$$r_1 = 1/T_1 = r_2 = 1/T_2 = r_3 = 1/T_3 = r = 3/T$$

であって，すべて等しいものとする．

［1］ **R** 流出.KL=DELAYN(放出,T,1) の場合

前の例では

R 流入.KL=変動.K

A 変動.K=50+STEP(P/DT,3)−STEP(P/DT,3+DT)

C P=250

としたがこれは図８のような変動を表わしている．

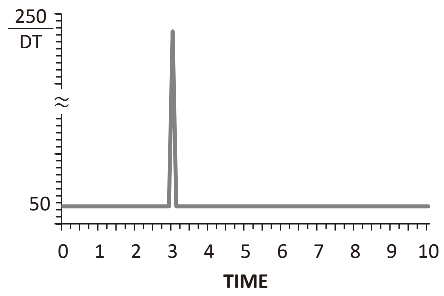

図８　流入のパルス的変動

流入 R のパルス的変動が二段階の指数遅れを経て流出となって海に注ぐとき，湖水位 $z(t)$ は $t = 3.0$ で一瞬にして 250 トンから 500 トンに増大するが，それは一定率 r_0 の放出 y により指数曲線を描いて減衰する．放出された水は川を流れ，流出時間 T を平均遅れとする一次の指数遅れ v となって海に流出する．

数学的に表現すれば，$r_1 = 1/T$ として

微分方程式：

$$\begin{cases} v' = r_1\,(y-v) \\ y' = r_0\,(R-y) \end{cases}$$

初期条件：

$$\begin{cases} v\,(0) = 50 \\ y\,(0) = 50 \end{cases}$$

の解を求めよという初期値問題になる．

$$v' = r_1\,(y-v)$$

の両辺をもう一階 t で微分すると

$$v'' = r_1\,(y'-v')$$

である．また $r_1 y = v' + r_1 v$ であるから

$$v'' = r_0\{r_1 R - (v' + r_1 v)\} - r_1 v'$$

となり非同次の定数係数２階線型常微分方程式：

$$v'' + (r_0 + r_1)\,v' + r_0 r_1 v = r_0 r_1 R \tag{1}$$

が得られる．

⑴の一つの特殊解を $f = f\,(t)$ とし，$u = v - f$ とおくと

$$\begin{aligned} &u'' + (r_0 + r_1)\,u' + r_0 r_1 u \\ &= v'' - f'' + (r_0 + r_1)(v' - f') + r_0 r_1\,(v - f) \\ &= v'' + (r_0 + r_1)\,v' + r_0 r_1 v - [f'' + (r_0 + r_1)\,f' + r_0 r_1 f] \\ &= r_0 r_1 R - r_0 r_1 R = 0 \end{aligned}$$

よって $u\,(t)$ は同次の微分方程式

$$v'' + (r_0 + r_1)\,v' + r_0 r_1 v = 0 \tag{2}$$

の解である．$v = f + u$ より，⑴の一般解は

⑴の一つの特殊解＋同次の微分方程式⑵の一般解

となることが判る．

$t > 3$ で $R\,(t) = R_0$ すなわち集中豪雨時点を除き流入一定とすれば $x = t - 3$ とおいて $x > 0$ に対し $v\,(x) = R_0$ が⑴の一つの特殊解になる．

$x = 0$ における初期条件は $t = 3$ における水位 z_0 の増大により $z\,(0) = z_0$, $y\,(0) = r_0 z_0$ へと更新されるが $v\,(0) = R_0$ とおけば，特殊解 $v\,(x) = R_0$ は $x \geqq 0$ についても成立する．

同次の微分方程式⑵の解を

$$v\,(x) = e^{\lambda x}$$

とすると⑵式は

$$\lambda^2 e^{\lambda x} + (r_0 + r_1)\,\lambda e^{\lambda x} + r_0 r_1 e^{\lambda x} = 0$$

だから，λ は２次程式：

$$\lambda^2 + (r_0 + r_1)\,\lambda + r_0 r_1 = 0$$

を満足する．この方程式を解けば根 $\lambda = -r_0, -r_1$ を得る．$r_0 \neq r_1$ ならば⑵の基本解は

$$e^{-r_0 x}, e^{-r_1 x}$$

になる．よって，同次の方程式⑵の一般解は定数 A, B を用いて $A\,e^{-r_0 x} + B\,e^{-r_1 x}$ と表される．

⑴の一般解

$$v\,(x) = R_0 + A\,e^{-r_0 x} + B\,e^{-r_1 x}$$

について $x = 0$ とおくと

$$v\,(0) = R_0 + A + B, v'\,(0) = -r_0 A - r_1 B$$

であるから，初期条件：

$$v\,(0) = R_0,\ v'\,(0) = r_1\{y\,(0) - v\,(0)\},\ y\,(0) = r_0\,z_0$$

を代入して整理すると

$$A = (r_1 R_0 - r_0 r_1 z_0)\ /\ (r_0 - r_1)$$

$$B = (r_0 r_1 z_0 - r_1 R_0)\ /\ (r_0 - r_1)$$

が求められる．

ダイナモ方程式で用いた数値例は，

$$r_0 = 1/5 = 0.2,\ r_1 = 1/10 = 0.1,\ R_0 = 50,\ z_0 = 500$$

であったから，代入して $A = -50, B = 50$ を得る．

したがって数値例の一般解は

$$v\,(x) = 50 - 50e^{-0.2x} + 50e^{-0.1x} \tag{3}$$

ただし $t \geqq 3$ である．

⑶をグラフに描くと図９を得る．

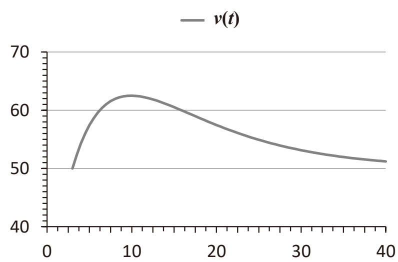

図９　１次の指数遅れ＝微分方程式の解

［２］　R　流出.KL=DELAYN（流入，T，2）の場合

放出 $y\,(x)$ の２次の指数遅れ $v\,(x)$ は

$$\begin{cases} v_1' = r\,(y - v_1) \\ v' = r\,(v_1 - v) \end{cases}$$

という２つの１次の指数遅れの直列として定義される．第２式をもう一度 x で微分すると

$$v'' = r\,(v_1' - v')$$

また第２式を展開して整理すると

$$r\,v_1 = v' + r\,v$$

よって２つの式から v_1 を消去して

$$v'' = r^2\,y - r\,(v' + r\,v) - r\,v'$$

$$\therefore\quad v'' + 2\,r\,v' + r^2\,v = r^2\,y \tag{4}$$

を得る．(4)の一般解は，前にも見たように，一つの特殊解と同次の微分方程式

$$v'' + 2\,r\,v' + r^2 v = 0 \qquad (5)$$

の一般解との和である．特性方程式は

$$\lambda^2 + 2\,r\,\lambda + r^2 = 0$$

であり解は $\lambda = -r$ の重根．したがって基本解の一つは $v(x) = e^{-rx}$ であるが，これと独立なもう一つの解を求めたいところである――なぜなら微分方程式 $u'' + P\,u' + Q\,u = R$ の独立な２つの解 $u_1(x), u_2(x)$ があれば，定数 A, B による一次結合 $A\,u_1(x) + B\,u_2(x)$ もまた解となるからである．ここではもう一つの独立な解を実際に求めることによって，その証明に代える．

(5)の一つの基本解 e^{-rx} と未知関数 $f(x)$ によってもう一つの基本解が $v = f\,e^{-rx}$ で表されるとすると

$$v' = f'e^{-rx} - r\,f\,e^{-rx},$$
$$v'' = f''e^{-rx} - 2\,r\,f'e^{-rx} + r^2 f\,e^{-rx}$$

であるから，これを(4)に代入して

$$f''e^{-rx} = r^2\,y$$

を得る．(5)式は(4)式の右辺 $r^2 y = 0$ とおいたものであったから $f'' = 0$ となる．よって $f' = C_0$．したがって $f = C_0\,x + C_1$ となり(5)の一般解

$$v(x) = C_0\,x\,e^{-rx} + C_1\,e^{-rx}$$

に到達する．ここで C_0, C_1 は任意定数である．

図９を導いた微分方程式の解法では放出率 r_0 と流出率 r_1 が $r_0 \neq r_1$ であるという前提で一般解：

$$v_1(x) = R_0 + A\,e^{-r_0 x} + B\,e^{-r_1 x}$$

を求めた．第一項の R_0 は $v_1(x)$ が一定で変化しない一つの特殊解である．$r_0 \neq r_1$ の前提が満たされるのは特性方程式が相異なる２実根または複素根をとる場合である――これに対し $r_0 = r$（重根）の場合の一般解は

$$v_1(x) = R_0 + A\,x\,e^{-rx} + B\,e^{-rx} \qquad (6)$$

であることが示された．(6)を微分すると

$$v_1'(x) = A\,e^{-rx} - r\,A\,x\,e^{-rx} - r\,B\,e^{-rx}$$

である．初期条件

$$v_1'(0) = r\{y(0) - v_1(0)\},\ y(0) = y_0 + M\,r,\ v_1(0) = R_0$$

より

$$R_0 = R_0 + B,\ A - r\,B = r\{y_0 + M\,r - R_0\}$$

であるから

$$A = M\,r^2,\ B = 0$$

である．すなわち $r_0 = r$ の場合，与えられた初期条件の下における一般解は

$$v_1(x) = R_0 + M\,r^2\,x\,e^{-rx} \qquad \text{for } x \geqq 0$$

で表される．

ここで，前に $x = t-3$ と置き換えたときと同様

$$u_2(x) = \{v_1(x) - R_0\} / M$$

と置き換えると

$$u_2(x) = r^2\,x\,e^{-rx} \qquad \text{for } x \geqq 0$$

を得る．同じ率 r による放出 $y(x)$ にも同じ変換を施し

$$u_1(x) = \{y(x) - R_0\} / M$$

としよう．すなわち

$$u_1(x) = r\,e^{-rx} \qquad \text{for } x \geqq 0$$

である．流入 $R(x)$ にも同じ変換を施し

$$u_0(x) = \{R(x) - R_0\} / M$$

としよう．すなわち

$$u_0(x) = 0 \qquad \text{for } x > 0$$

である．$x = 0$ に対しては $u_0(0) = 1/dt$ とする．

ここで $1/dt$ は∞量の流入を表していて，一瞬にして水位を０から１に高めるパルスである．以上により革めて「流出 u_2 は流入 u_0 の２次の指数遅れである」と読み直そう．２次の指数遅れ $u_2(x)$ の積分をとると

$$\int_0^\infty u_2(x)\,dx = \int_0^\infty r^2 x e^{-rx}\,dx$$

であるから，部分積分を施して

$$\int_0^\infty u_2(x)\,dx = [-rxe^{-rx}]_0^\infty - \int_0^\infty -re^{-rx}dx$$
$$= 0-(0-1) = 1$$

であることが確かめられる．これにより $u_2(x)$ を確率密度関数とする遅れの長さ x は確率変数となる．x の平均 μ は

$$\mu = E(x) = \int_0^\infty x\,u_2(x)\,dx = \int_0^\infty r^2 x^2\,e^{-rx}dx$$

で求められる．最右辺に部分積分を２回施して

$$\mu = [-rx^2e^{-rx}]_0^\infty - \int_0^\infty -2rxe^{-rx}dx$$
$$= 0-2\{[xe^{-rx}]_0^\infty - \int_0^\infty e^{-rx}dx\}$$
$$= -2\{0-[0-(-1/r)]\} = 2/r$$

すなわち同じ一定率 r で水を下流に流す堰が直列に二段階つらなったとき，新たな流入がなければ，川の水がすべて流出するまでにかかる時間 x

の確率分布は2次の指数遅れを密度関数とする定積分で表され，確率変数 x の平均 μ は $2/r$ である．すなわち流入から二段階の堰を経て海に注ぐ流出の平均遅れ T は二段各階における平均遅れ $1/r$ の2倍に等しい：

$$T=2/r$$

これを「平均遅れを T とする2次の指数遅れ」という．

［3］ **R　流出**.KL**=DELAYN**（**流入**，T，3）の場合

v_1 の1次の指数遅れである $v(x)$；$v'=r(v_1-v)$ は R_0 を引いて M で割る変換：

$$u_3(x)=\{v(x)-R_0\}\ /\ M$$

によって，新たな定義の下で3次の指数遅れとなる．この解は次のようにして求めることができる．

1次の指数遅れ

$$u_3'=r(u_2-u_3)$$

は u_2 によって時々刻々更新される指数平均 u_3 と同じであるから，その解は

$$u_3(x)=\int_0^{\infty} re^{-r\theta}u_2(x-\theta)\ d\theta$$

である．この右辺は積分変数を変換すると

$$u_3(x)=re^{-rx}\int_{-\infty}^{x} e^{r\tau}\ u_2(\tau)\ d\tau \tag{7}$$

と書くことができる．

定積分の範囲にある $x<0$ に対しては事実上 $v_1(x)=R_0$ であることにより $u_2(x)=0$ と既に与えられている．したがって

$$\int_{-\infty}^{x} e^{r\tau}u_2(\tau)\ d\tau=0$$

であるから，(7)は

$$u_3(x)=re^{-rx}\int_0^{x} e^{r\tau}u_2(\tau)\ d\tau$$

と書いて差し支えない．

被積分関数を

$$u_2(\tau)=r^2\tau e^{-r\tau}$$

で置き換えると

$$u_3(x)=re^{-rx}\int_0^{x} r^2\ \tau\ d\tau$$

を得る．

$$\int_0^{x}\tau\ d\tau=x^2/2$$

であるから，3次の指数遅れ：

$$u_3(x)=r^3x^2e^{-rx}/2$$

が求められた．

3次の指数遅れの遅れの長さの平均を求めよう．確率変数 x の平均 μ は

$$\mu=E(x)=\int_0^{\infty} xu_3(x)\ dx=\int_0^{\infty} r^3x^3e^{-rx}dx\ /2$$

で計算される．最右辺に部分積分を3回施して

$$\begin{aligned}2\mu &=[-r^2x^3e^{-rx}]_0^{\infty}-\int_0^{\infty}-3\ r^2x^2e^{-rx}dx\\ &=0-3\{[rx^2\ e^{-rx}]_0^{\infty}-\int_0^{\infty} 2rxe^{-rx}\ dx\}\\ &=-3\cdot 2\{[-xe^{-r\,x}]_0^{\infty}-\int_0^{\infty}-e^{-rx}\ dx\}\\ &=-3\cdot 2\{0-1/r\}=3\cdot 2/r\end{aligned}$$

よって

$$\mu=3/r$$

すなわち，同じ一定率 r で水を下流に流す堰が直列に三段階つらなったとき，新たな流入がなければ，川の水がすべて流出するまでにかかる時間 x の確率分布は3次の指数遅れを密度関数とする定積分で表され，確率変数 x の平均 μ は $3/r$ である．すなわち流入から三段階の堰を経て海に注ぐ流出の平均遅れ T は三段各階における平均遅れ $1/r$ の3倍に等しい：

$$T=3/r$$

これを「平均遅れを T とする3次の指数遅れ」という．

［4］ **R　流出**.KL**=DELAYN**（**流入**，T，n）の場合

以上により与えられた任意の T に対して，平均遅れを T とする k 次の指数遅れ $u_k(x)$ は平均遅れを $1/r$ とする1次の指数遅れ $r\,e^{-rx}$ の k 個の合成で

$$r=k/T$$

が成立する――という定理が $k=1, 2, 3$ について証明された．

一般に，平均遅れを T とする n 次の指数遅れは

$$r=n/T$$

$$u_n(x)=r^n\,x^{n-1}e^{-rx}/(n-1)!$$

$$n=1, 2, 3, 4, \cdots\cdots$$

で表される．数学的帰納法を使って証明しよう．

$n=k$ において成立すると仮定すれば

$$u_k(x)=r^k\,x^{k-1}e^{-rx}/\,(k-1)!$$

が成り立っている．

1次の指数遅れが $u_{k+1}'=r(u_k-u_{k+1})$ で与えられれば

$$u_{k+1}(x)=re^{-rx}\int_0^{x} e^{r\tau}\ u_k(\tau)\ d\tau$$

である．仮定により

$$u_k(\tau)=r^k\tau^{k-1}e^{-r\tau}/(k-1)!$$

であるから

$$\begin{aligned}u_{k+1}(x)&=re^{-rx}\int_0^x r^k\tau^{k-1}/(k-1)!\,d\tau\\&=\{r^{k+1}e^{-rx}/(k-1)!\}\int_0^x\tau^{k-1}d\tau\\&=\{r^{k+1}e^{-rx}/(k-1)!\}x^k/k\\&=r^{k+1}x^k e^{-rx}/k!\end{aligned}$$

である．よって $n=k+1$ に対しても与式が成り立つ．これが平均遅れを T とする $k+1$ 次の指数遅れであるということは次のように示される．

仮定により $r=k/T$ に対して

$$\int_0^\infty r^k x^k e^{-rx}/(k-1)!\,dx=k/r$$

が成り立っている．

$$\int_0^\infty r^{k+1}x^{k+1}e^{-rx}/k!\,dx$$

に部分積分を施すと

$$\begin{aligned}&\{[-r^k x^{k+1}e^{-rx}]_0^\infty-\int_0^\infty-(k+1)\,r^k x^k e^{-rx}dx\}/k!\\&=\{(k+1)/k\}\int_0^\infty r^k x^k e^{-rx}/(k-1)!\,dx\\&=\{(k+1)/k\}(k/r)=(k+1)/r\\&\therefore\int_0^\infty r^{k+1}x^{k+1}e^{-rx}/k!\,dx=(k+1)/r\end{aligned}$$

である．すなわち，同じ一定率 r で水を下流に流す堰が直列に $k+1$ 段階つらなったとき，新たな流入がなければ川の水がすべて流出するまでにかかる時間 x の確率分布は $k+1$ 次の指数遅れを密度関数とする定積分で表され，確率変数 x の平均 μ は $(k+1)/r$ である．

すなわち

$$T=(k+1)/r$$

が成立する．これを「平均遅れを T とする $k+1$ 次の指数遅れ」と呼ぶならば，n 次の指数遅れの定義に適う．

与えられた T に対して n 次の指数遅れ $n\geqq 2$ を

$$u_n(x)=r^n x^{n-1}e^{-rx}/(n-1)!$$

によって計算し

$$v_{n-1}(x)=u_n(x)\times M+R_0$$

と元に戻し，$n=1$ に対しては $0!=1$ より

$$v_0(x)=R_0+Mre^{-rx}$$

として，さらに $t=x+3$ を横軸としてグラフを描いてみよう．図 10 が得られる．

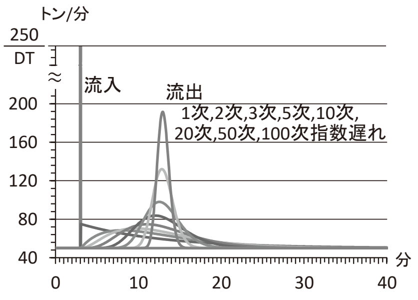

図 10　1 次～ 100 次の指数遅れ

図 4 との概形上の顕著な違いは，図 4 において 流出は放出 $y(t)$ の n 次の指数遅れを描くのに対して，図 10 では，流出は流入 $R(t)$ の n 次の指数遅れ：

$$R_0+M\times u_n(t-3)$$

を描くものであることに因る．

$x=0$ における $1/dt$ のパルスに対して n 次の指数遅れ $u_n(x)$ は次のような概形を示す：

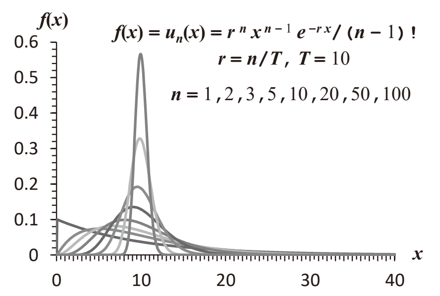

図 11　パルス $1/d\,t$ に対する n 次指数遅れ $u_n(x)$

曲線と x 軸とで囲まれた部分の面積を求めよう：

$$\begin{aligned}\int_0^\infty u_n(x)\,dx&=\int_0^\infty r^n x^{n-1}e^{-rx}/(n-1)!\,dx\\&=[r^n/(n-1)!]\int_0^\infty x^{n-1}e^{-rx}dx\end{aligned}$$

であるから，部分積分の公式により

$$\begin{aligned}\int_0^\infty x^{n-1}e^{-rx}dx&=[-\frac{1}{r}x^{n-1}e^{-rx}]_0^\infty\\&\quad-\int_0^\infty-\frac{1}{r}(n-1)x^{n-2}e^{-rx}dx\\&=\frac{1}{r}(n-1)\int_0^\infty x^{n-2}e^{-rx}dx=※\end{aligned}$$

である．もう一度部分積分を施すと

$$※=(\frac{1}{r})^2(n-1)(n-2)\int_0^\infty x^{n-3}e^{-rx}dx$$

であるから，同じ操作を $n-1$ 回繰り返せば

$$\int_0^\infty x^{n-1} e^{-rx} dx = \left(\frac{1}{r}\right)^{n-1} (n-1)!\int_0^\infty e^{-rx} dx$$

を得る．よって

$$[r^n/(n-1)!]\int_0^\infty x^{n-1} e^{-rx} dx$$

$$= r\int_0^\infty e^{-rx} dx = \frac{r}{r}$$

$$\therefore \qquad \int_0^\infty u_n(x)\,dx = 1$$

である．すなわち流出時間 x は $u_n(x)$ を密度関数とする確率変数である．平均値は

$$E(x) = \int_0^\infty x u_n(x)\,dx = [r^n/(n-1)!]\int_0^\infty x^n e^{-rx} dx$$

であるから，上と同じ操作を n 回繰り返せば

$$\int_0^\infty x^n e^{-rx} dx = \left(\frac{1}{r}\right)^n \cdot n!\int_0^\infty e^{-rx}\,dx$$

となり，これによって

$$[r^n/(n-1)!]\int_0^\infty x^n e^{-rx} dx = n\int_0^\infty e^{-rx} dx = \frac{n}{r}$$

$$\therefore \qquad \mu = E(x) = n/r$$

を得る．これが平均遅れ T と等しいとおけば

$$T/n = 1/r$$

であることが確かめられる．

分散を求めよう．2 乗の平均値を出すために

$$E(x^2) = \int_0^\infty r^n x^{n+1} e^{-rx} / (n-1)!\,dx$$

とし，平均値の計算でやったのと同じ操作により

$$E(x^2) = n(n+1)/r^2$$

を得て，次に平均値の 2 乗を引く．

これにより分散は

$$\sigma^2 = E(x^2) - \mu^2 = n(n+1)/r^2 - (n/r)^2 = n/r^2$$

と求められる．また $1/r^2 = (T/n)^2$ であるから

$$\sigma^2 = T^2/n$$

と書くことができる．

すなわち n が大きくなるにしたがって分散は小さくなり，分布の範囲が狭くなって，流出時間は平均値の回りによりタイトに集ってくる．

かくして n 次の指数遅れは図 10 に見られるようなグラフで表されるということの数学的な裏付けが得られた．分布の幅がタイトになると，総流量が同じなら，峰の頂上が高くならざるを得ない．短い時間幅であっても大量の水がドッと流れると猛威を揮う――凶器にさえなる――という事実を過去に一度もなかったことなので知りませんでした――という責任逃れは通用しないことが証明された．

そのような数学的事実は百も承知の上で，最大 80 トン / 分の流量を想定すれば良いというから，ひたすら努力して堤防整備を施してきた――それが偶々流量 90 トン / 分になったため決壊したからといって技術者の責任ではない――文句は想定を与えた人間に言え――という反論も正しくない．

堤防工事の想定は最大 80 トン / 分で一向に構わない．図 10 で一目瞭然のように，同じ放出量に対して 10 次未満の指数遅れでは 80 トン / 分を超えていない．遅れの次数が増えるのは，堰をいかほど配置するかという河川の構造設計に起因している．堰を減らしてあれば 80 トン / 分超えの急激な流出の増大は起こらなかった．ダムの水門の管理者は，河川構造を考慮した上で管理マニュアルにこのことを反映させていたか――堰と堤防の設計者は集中豪雨による貯水池の放水の急激な増大を考慮して整備計画にそのことを反映させていたか――その地点の避難指示担当者は，破壊的流出量のピークが突然 10 分後に来ることを予想していたか．

早い話しが，図 10 をその水系に即して，沿川住民も含めた共通認識として持っていたかどうか――恐らく答えは否だろう．

個々の専門家は各々の領分でしか物事を考慮しないというトンデモないコンセンサスの下では，危機管理に重大な欠陥が生じることを避けられない．構造への疑問・全体との関連性・未来イメージの共有――総合政策において最も重要なファクターが 3 つとも見事に欠落しているからである．このままでは折角の数学も何の役にも立たない．

危機管理マニュアルの不備を指摘して，実際に住民の参加に基づく危機管理マニュアルの作成を実施すれば，必ず，現行システムの重大な構造的欠陥が見えてくる――それは，専門家としてこれまで当該システムと関わってきた人たちの顔を潰す結果とは恐らくならない――責任問題へと議論が及ばないように工夫が凝らされているのが専門知識というものの特性だからである．

責任の追及と転嫁およびそれに対する逃げ口上を用意するのが危機管理ではない．マニュアルの作成に最も必要とされる科学知識の保有者は現場にいる河川管理の専門家なのであるから，遁辞の

作文に血道を上げるより，それにしたがって行動すべき人々の危機管理マニュアルの事前の制作に積極的に加わって欲しいものである．最も必要な科学知識は，現行の構造を所与のものとしたときに，その構造がもたらすシステムの振る舞いと，そこに含まれる「反直観的変動性」についての正しい事前認識である．

「まだ時間があると思っている間に急激に水嵩が増して逃げる暇がなかった」現象――反直観的変動性がもたらした災害は，ダムと河川の管理技術者にとっては当然科学的に予測された――避けることができた事態だったはずである．

5. 総合政策の展望

水流に擬えられる現象は世の中いたるところに見出される――ヒトの流れ，モノの流れ，カネの流れ，情報の流れ，等々．

道路上に流れる不規則な車列．橋があり交差路があり，渋滞に巻き込まれたり，時には事故も惹き起こされる．

車は路上を流れるばかりではない．夥しい台数の車が年々生産されて登録され，所有者が次々と代わり，古くなったら廃車される．大きなプールへと流れ込みまた流れ出す水流のように．

人間もまた同じである．いたるところに行列ができ，新たに並ぶ人，用が済んで帰る人――顔は代わっても行列は絶えない．

出生死亡の秩序もある．出生して子供となり，成長して大人となり，世にわたり，引退して高齢者人口として溜まり，何処かへと流れ出して行く．

お金も財布に入りまた出てゆくだけではない．仕入れに支払われ，売上代金となって戻ってくる．設備を購入すれば資本となり，回転させて付加価値を生み出し，設備のリプレースに再投資され，再生産のプロセスを通じて，丁度水の流れが水車を回し電力を生成し続けるように循環を続ける．

古くなったデータは新しいデータに置き換えられ，滞ることなく更新されてゆく，検索装置が常時稼働して巨大な情報の流動を惹き起こす．

これらの流れはすべて水の流れをモデルにしてアナロジィを展開することができる．共通の概念は流れの「構造」に由来する「遅れ」の重層化であり，それが時として「反直観的変動」を現出し人々の生存を脅かす．突如として全く想定していなかった変動性を唐突に顕わし，流れの畔に生を営む人々の暮しを根底から覆すのである．

現在稼働中の多くのマネジメント・システムはこうした想定外変動に事前に対処するアクションを自らの仕事として構想するコンポーネントを内部に備えていない――だから，危機管理マニュアルが必要なのである．

想定外のことが起きたらジッとして救援がくるのを待てと云う――助けを求めている人を見殺しにせよという教えが横行している．素人が下手に救援の手を延せば二次災害に繋がり余計に被害が拡大しかねない．仮令二次災害を被ろうと，他人に二次災害を及ぼそうと，愛する人のためなら自ら救援に駆け付けたいところである．とは言いながら，いざとなったら，足が竦んで動けない．と，千々に乱れる心を抱えて正しいアクションを執ることなどできはしない．

千々に乱れた心のままで正しいアクションを迫られるという，常識的アプローチが全く役に立たない状況がそこにある．我々は，一つの処方箋として，そうなる前に採っておくべき事前のアクション＝危機管理マニュアルの作成を提言した．そのために役立てられる現実的手法として，モデリングの技術的知識を提供している――それを現実に実施するアクションが総合政策なのである．

1960 年代に水流のアナロジィを社会科学研究に適用してモデリングの技術を開発した研究領域は，システムダイナミックスと呼ばれる．本稿で詳述した $\boldsymbol{n}$ 次の指数遅れは常微分方程式のエクササイズに過ぎないが，その解法について数学の教科書で扱われることはほとんどなく，一方，システムダイナミックスの教科書においては微分方程式ではなく，ダイナモ方程式が用いられるので，何れの教科書にも登場しない定理となってしまった．ただし，それは上で見たとおり水流のアナロジィを展開する上で本質的なことがらなので，敢

えてここに取り上げた次第である．

数学的素養のない普通の人々の対話を重視する総合政策の立場からすると，このような数理展開は避けるべきかも知れないが，科学技術の合理性を主張する政策当局における総合政策の欠如が災いの元凶であると極めつけるためには，万人に受け容れられる証明が必要だったのである．そのために躊躇することなく数学の力を借りた．

総合政策とは政策決定を改善するために知識を総合することである．政策決定の改善のためには普通の人々が自発的にメンタルモデルを改訂する社会的学習の機会が提供されなければならない．危機管理マニュアルの共同制作は政策決定のすべての分野で総合政策が役立つフィールドを用意している．引き続き多くの事例が総合政策研究の上に積まれることを期待している．

謝　辞

創刊号の巻頭を辱くしてから早や四半世紀が過ぎ，漸く総合政策をタイトルにした論文が書けるようになりました．総合政策学部の皆様の御厚情に深謝いたします．