

潜在自然型河川の特性と それに関する研究・河川管理の在り方について¹

Potential Nature in Riverine Environment and Evaluation Techniques of Habitat for Nature-Oriented River Works

玉井信行²・松崎浩憲³・白川直樹⁴

Nobuyuki TAMAI, Hironori MATSUZAKI and Naoki SHIRAKAWA

1. はじめに

1995年3月の河川審議会答申では河川生態系の重要性が力説され、その保全が河川事業に対して求められた。また、96年12月の答申では、今後の河川整備を「河川整備基本計画」と「河川整備計画」とに分けて論ずることが必要であるとされている。この答申に沿って河川法の改正が審議されており、現在は河川整備計画の骨組みが従来とは大きく変わる重要な転換期に当たっている。

河川は基本的に自然環境の一つの要素であることを考えると、今後の河川整備の方向は「河川の自然度を保全することである」ということが出来る。そこで本論文では、最初に河川が有している本来的な自然特性が何であるかを考察する。

次に問題となるのが、計画を定めるときの客観的な判断基準を導びくことである。「河川整備基本計画」においては、各水系で確保すべき治水・利水の安全度を国土政策として各水系の重要度に応じて定め、統一ある国土の骨格を定めることになる。一方、「河川整備計画」は20～30年の間に暫定的に実施する事業の計画を定めることになる。この計画では一定期間内におけるダム、堤防等の具体的な整備を定めることになり、治水経済評価の見直しを始めとし、従来具体的には行われてこなかった利水、環境面における費用便益分析を開発し、適用することが要請されて来ると考えられる。

本論文では前述のような認識に立ち、今後の計画を立てるに際して重要となる環境因子の定量化について考察した。すなわち、潜在自然特性をどのように捉えるか、環境要因の経済評価をどのように考えたらいいか、自然様態の河道の確率的な変動をどう捉えるかを例に取り上げた。またそうした学術的な成果と河川管理をどのように関連付けて行くべきかを論ずる。

2. 河川の潜在自然特性について

今日的潜在自然とは、自然因子については現在の条件を変えずに、人為的な活動のみを止めたときに出現する自然である¹⁾。この概念は絶対的な原始自然を定義するのではなく、現在までの人間の営為が加わっていることを前提とした、相対的な概念であるところに特徴がある。この概念を用いれば、時間軸の原点は色々な時代に置くことが出来るので、日本やヨーロッパなどのように人為的な影響が広範囲に及んでいるような地域に適した概念であると言える。河川に元々在った自然を復元しようとするときに直ぐ問題になるのは、どの時代の自然を目標にしたらいいか、という課題であり、これを定量的に論ずることが出来る論理体系が必要になる。例えば50年前が好ましい状態にあった、と仮定する。50年前における今日的潜在自然を考え、それ以後の人間の営為が加わった現在の状態と比較する。現状の自然環境と50年前の時点での今日的潜在自

1 キーワード：河川，潜在自然，流況変化，環境流量，経済評価，不確定性

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

3 東京大学助手，工学系研究科社会基盤工学専攻（同上）

4 東京大学大学院博士課程2年，工学系研究科社会基盤工学専攻（同上）

然状態との差異を見れば、50年間の人間の営為により惹き起こされた自然環境の変形を知ることが出来る。

そしてまた、50年前に目に見えた自然環境そのものを再現することが、潜在自然状態を復元することにはならないことに注意する必要がある。それは生物群集は遷移をするので、既に遷移の平衡状態にあったものは50年前の瞬間的な状態が最終的な状態であると考えることが出来るが、遷移の途中にあったものは50年前の環境条件の下での平衡状態を理論的に予測する必要がある。

このように考えるとき、河川が有している本来の自然の動的な特性は何であろうか。これが潜在自然状態を考えると時の良い指標となるであろう。ここでは水理・水文分野における特性を考察する。先ず第1に河川には洪水もあれば、渇水もある。大洪水ともなれば破壊的な力を流域に及ぼすが、こうした大変動にも耐えることが出来る種が生き延び、新しい遷移の過程が始まり、平衡状態に向けて展開してきたわけである。従って、「自然現象による攪乱と更新」、が河川の動特性の基本である。このような変動が生ずるときに、流域の各部分がどのように連結しているかにより、水、栄養塩、土砂などの流域内の分布が定まる。自然状態であれば、こうした連結を妨げるものは殆どなく、「縦断方向、横断方向の連続性」が第2の自然特性であると言える。また河川の特徴は、その境界が移動する物質で構成されているところにある。そのために礫の河原、砂の中州、粘土質の河岸、瀬と淵などの多様な形状が現れる。これに基づいて流れも多様となり、こうした水域の物理的な多様性が、生物の多様性を支える基礎となっていると考えられる。従って、自然特性の第3として「河床形態の多様性」を挙げることが出来る。

3. 洪水の脈動に及ぼす貯水池建設の影響

ここでは人為的な影響が加わったときに洪水の脈動がどのように変化するかについての例を、渡良瀬川の高津戸測水所の資料により分析する²⁾。これは自然現象の攪乱に関わる課題である。資料は流量年表（建設省）の日流量であり、1977年の草木ダム完成前の10年間、完成後の11年間を用いた。建設の前後で集水域の年平均雨量には変化は見られない。図-1に建設前、図-2に建設後の代表的な例を示す。この2つは多雨年を示すが、小雨の年の傾向も同様である。

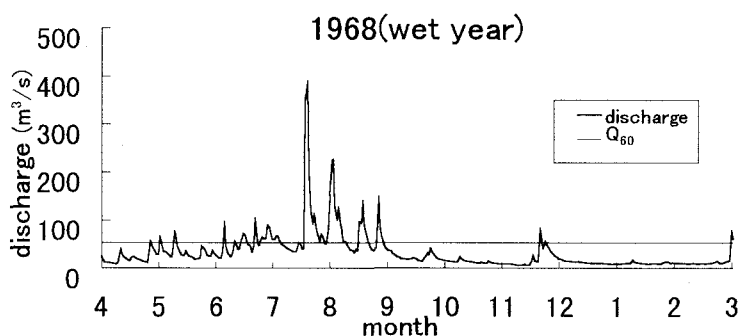


図-1 草木ダム建設前（1968年）の日流量時系列と Q_{60}

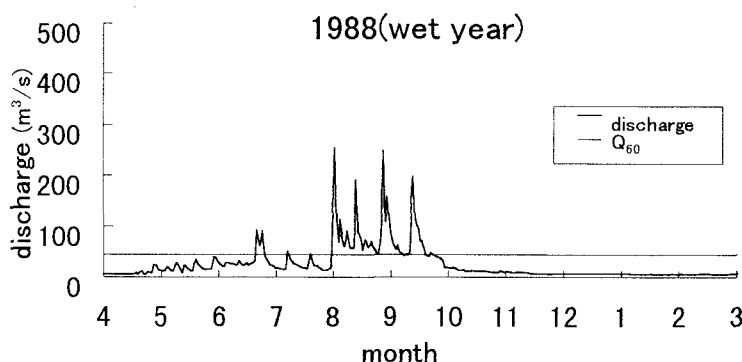


図-2 草木ダム建設後（1988年）の日流量時系列と Q_{60}

ここで Q_{60} について説明する必要がある。これは年間で 60 番目の流量を示す。60 番目を選んだ理由は、月に 1 回程度の洪水で、河床に沈積したシルトを掃流して欲しい、という生態学者及び漁業関係者の要望を聞いているからである。こうした洪水の継続期間を約 5 日と予測した結果、年間で 60 番目以上の流量が約 12 回生じ、これが河床の清掃に有効な働きをすると見なすことが出来る。このような河床の藻類への作用を考えると Q_{60} を超える洪水を生態的フラッシュ流量とよび、この生起形態を見ることにした。

図-1, 2 を見ると貯水池の建設後には Q_{60} を超える洪水の数が少なく、特に春と冬に出現しなくなった様子が分かる。図-3 は生態的フラッシュ流量の年間の生起回数を、貯水池の建設前後に分けて示したものである。実線で結んだものが草木ダム下流の高津戸地点の資料であり、点線で結んだものは利根川本川の栗橋の資料である。図-3(a)では高津戸と栗橋での生起回数は同じ領域にあるが、図-3(b)で、草木ダム建設後には高津戸での生態的フラッシュ流量の生起回数が栗橋における値を下回っていることが分かる。栗橋は上流のダムから離れており、ダム下流の残留域も大きいので、ダム建設の影響を直接的には受けておらず、生起回数が観測期間を通じてほぼ変わっていないと見る事が出来る。流量時系列の自己相関解析では、建設前後に殆ど差が認められないので、 Q_{60} は流況の変化を示す指標として採用できると考えられる。また、 Q_{60} は豊水年と渇水年では流況を反映して自動的に変化するので、この点でも適用性が広いと考えられる。

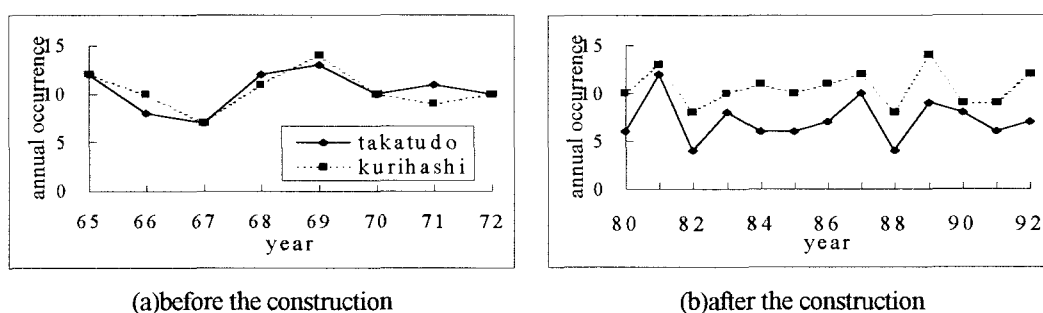


図-3 生態的フラッシュ流量の年間生起回数の比較²⁾

ここでは貯水池の建設による河川流況の変化を見てきた。治水・利水を考える人間の営為により、自然の攪乱の代表である洪水の脈動が変化していることを実証的に示した。

4. 環境用水の経済評価の試み

発電ダムの下流の減水区間が環境上大きな話題となり、維持用水の放流が始められたのは最近の大きな変化である。これは上流、下流の連続性に関わる課題に分類できる。しかしながらここでは物理的な評価でなく、維持用水を例に取り、環境用水の経済評価に向けて基礎的な分析を示すこととしたい。

昭和 63 年から建設省と通産省の合意によって、水力発電所では水利権の更新時に維持流量の放流が事実上義務づけられることとなった。これに基づき、利根川水系では片品川や吾妻川の発電所などで維持流量の放流が行われているが、その一つに岩本発電所がある。岩本発電所は利根川と赤谷川から取水しており、両方の取水口において平成 5 年から維持流量を放流している。このうち赤谷川の取水口では、集水面積 184km^2 に対して $0.240\text{m}^3/\text{s}$ を放流しており、これは 100km^2 あたりの比流量にして $0.130\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ に相当する³⁾。

赤谷川の上流にある相俣ダムで、多目的ダム管理年報を資料としてこの維持流量のコストの試算を行った。この場合、維持流量は発電者が発電取水の一部を取水口から川に放流することで確保しているため、維持流量のコストはこの発電取水の損失分にほぼ等しいと考えられる。相俣ダムの流域面積は 110.8km^2 で、 $0.130\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ という比流量で計算すると $0.144\text{m}^3/\text{s}$ になる。この値を維持流量と想定した。使用した資料は 1981 年から 1991 年までのデータである。例として、1990 年の流況を図-4 に示す。これはダムからの放流量で、発電取水とダム放流の和である。59 日間は放流量が 0 となっており、この間は発電をしていない。この年は、満水放流も 32 日行っている。維持流量を放流した場合に発電が失う流量は、年間 365 日から発電

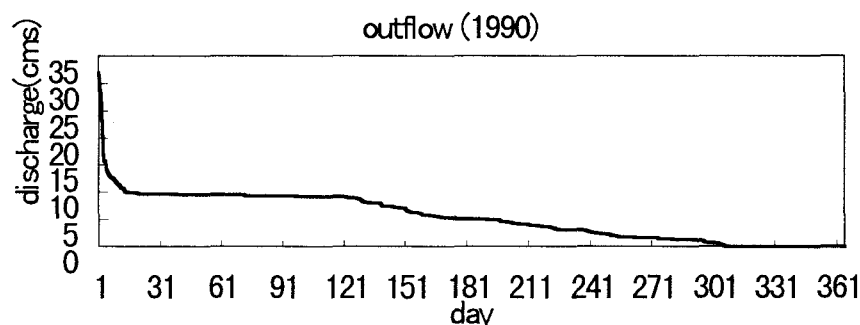


図-4 相俣ダムにおける日放流量（1990 年）

をしなかった日数と満水放流をした日数を除外した 274 日間の流量である。これは、 $0.144(\text{m}^3/\text{s}) \times 3600(\text{s}) \times 24(\text{h}) \times 274(\text{日}) = 341 \text{ 万 m}^3$ になる。この年に相俣発電所が使った実績の水量は 16,263 万 m^3 であるので、維持流量は約 2.1%に相当する。

同様の計算を 10 年間にわたり行った結果を図-5 に示す。1983 年はデータ欠損である。維持流量は、発電所の使用水量の 1~3%にあたっている。

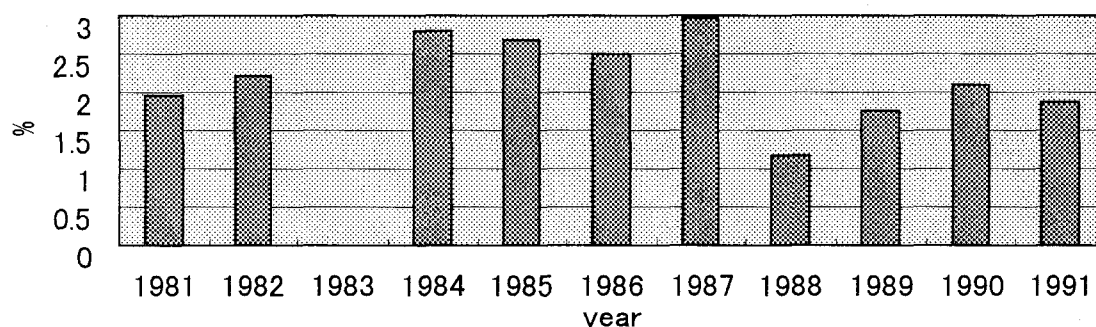


図-5 維持流量の使用水量に対する比³⁾

使用水量は、次式により出力と関係づけられる。

$$P = gQH_e\eta_t\eta_g \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

ここに、 Q ：水量、 H_e ：有効落差（相俣発電所では 91.0m）、 η_t ：水車の効率、 η_g ：発電機の効率である。使用水量と発電量はほぼ線形の関係にある。よって、2%の使用水量の減少は 2%の発電量の減少につながる。相俣発電所の 10 年間の平均年発電量は 28,414MWH であるので、その 2%は 568MWH となる。1kWH が 20 円にあたるとして計算すると、年 1,136 万円になる。これが相俣ダムでの維持流量のコストである。このように考えると、維持用水として放流された水の単位水量当たりのコストは 3 円/ m^3 程度である。これは東京の飲料水の 130 円/ m^3 とか、最近の新規利水の開発費用 100 円/ m^3 のオーダーに比すと、相当低い値であることが分かる。

5. 河床形態の変動と洪水防御堤防の安全性について

河川の特徴は、その境界が移動する物質で構成されているところにある。そのために河床形態が多様になり、多様な生息域を提供していることは「河川の潜在自然特性」で見た通りである。従って、現実の河道においては、土砂の堆積や洗掘により横断面の形状や縦断面方向の勾配は複雑な形となり、計画において採用されている整然とした幾何学形状からの乖離が生じている。これらの変化が計画高水位に対してどのような影響を与えるであろうか。この節ではこうした問題意識に立ち、鬼怒川において距離標の 45km から 58km にわたる 13km の区間において、断面形状の不規則性を考慮した場合に、水理量の不確実性により計画高水位

を超過する確率がどのように影響を受けるかを調べた。断面測量の資料は 500m 間隔である。

治水計画において洪水防御堤防の高さを信頼性解析によって決定しようとする時には、水路の通水能がシステムの抵抗 R に当たり、計画洪水流量が外部から加わる負荷 L となる。この二つの量の差($R - L$)を評価関数 M とすれば、 M が正の領域では計画は安全であり、 M が負の領域では計画は危険であり、元々の計画の治水安全度は確保できないことを意味している。

$$M = \frac{A^{5/3}}{nP^{2/3}} - \frac{Q}{S^{1/2}} \quad (2)$$

この評価関数に影響を与える断面形に関わる量は、断面積 A と潤辺 P である。ここに、 n はマンニングの粗度係数、 Q は設計流量、 S は河床勾配である。

これらの量に関する基本的な変化は、鬼怒川の考察領域では次のようにまとめられた。

$$A = a(h - h_0)^2 \quad (3)$$

$$P = p_M(h - h_0) \quad \text{for } h_0 < h < h_F \quad (4)$$

$$= p_F(h - h_0) \quad \text{for } h_F < h \quad (5)$$

ここに、 a , p_M , p_F は個々の場合の断面形状により定まる定数であり、 h , h_0 と h_F は図-6 に示されている。

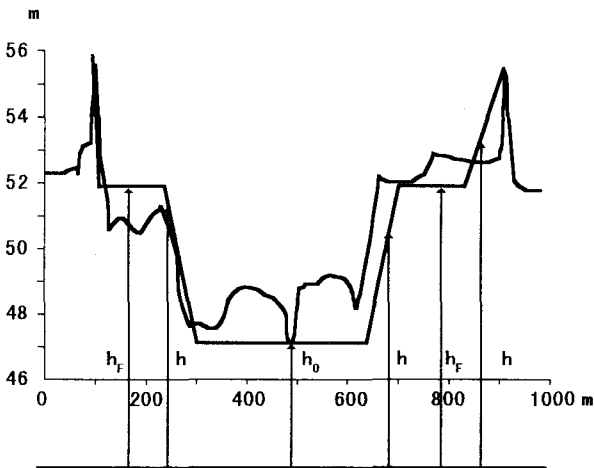


図-6 代表的な断面形状と記号の意味

表-1 水理量の代表値

	h	h_0	h_F	n	a	p_F	Q	S
平均値	25	10	15	0.035	26	7	5500	.001

関連する水理量の平均値を表-1 に示す。変動係数は簡単のために、全ての量について 5% と仮定した。変動は正規分布に従うと仮定する。ここで、マンニングの粗度係数は水位と共に緩やかに変化すると仮定した⁴⁾。

こうした条件の下での複合確率の確率密度関数の等値線を示したのが図-7 である。負荷と抵抗の特定の組み合わせに対して、この等値線の下を体積を足し合わせたものが危険側では超過確率、安全側では非超過確率となる。

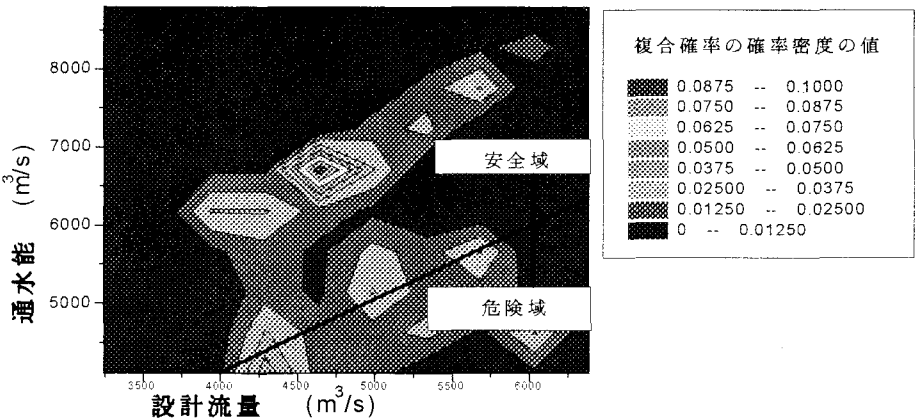


図-7 複合確率の確率密度関数の等値線⁵⁾

6. 考察とまとめ

河川の自然特性として第2章において、1) 自然現象による攪乱と更新、2) 縦断方向・横断方向の連続性、3) 河床形態の多様性を挙げた。しかしこれらの3つは独立しているわけではない。人間の営為により1つの要因が変化すると、他の因子にも影響を与え、河川の生息域が自然状態から離れて行くことを加速することになる。例えば、堰やダム建設により縦断方向の連続性が影響を受け、第3章では流量時系列が変化し、洪水の脈動の振幅が小さくなり、脈動の周期が長くなっていることを見た。本論文では、生態的な観点という新しい立脚点に立ち、新しい成果が定量的に得られることを示した。こうした流況の変化は、中州に植生が侵入・繁茂し易くなり、中州の固定化を招くことに繋がっている。従って、河床形態も影響を受けることになる。そして、流れが集中した流路は移動床であるために浸食され、深くなった水路からは氾濫は殆ど生ずることなく、横方向の連続性が変化する。このように河川は有機体の如くその一部が影響を受けると、その影響は全体へと伝わって行く。上記の3つの特性は河川という巨象を3つの面から見た表現である。1つが影響を受けると3つ全てに影響が現れる。この意味で、本論文で取り上げた河川の自然特性は、有機体を構成する本質的な部分であるということができ、潜在自然を構成する因子と言えよう。

縦断方向の連続性を回復するために、堰やダムからの維持流量の放水が望まれていることを第4章で述べた。発電ダムの水利権更新の際に、河川管理者は維持流量の放流を指導している。水利権保有者は飽くまで既得権を主張することなく、放流を了解しているのが現状であり、これはとりも直さず維持流量が河川環境を保持するために必要であるという社会的な合意が出来ていることを意味している。本論文では、現況の維持流量回復のための費用を算定し、これが他の利水に比しかなり安い費用で可能となっていることを示した。ここで示した経済評価は関係者の合意が得られている因子について実証的に行ったものであり、定量化の難しい分野において社会的な合意形成を得る際に参考になると考えられる。

流送土砂が断面をどのように変形させて行くか、またその変化の時系列や確率を与えることは現在の土砂水理学を持ってしても不可能である。しかし計画者はこうした課題に答えなければならない。本論文では土砂輸送の結果として生ずる現象の特性を考慮することにより、結果として土砂輸送により生ずる河道の不規則性・不確定性を評価する手法をまとめた。断面形の不確定性を考慮すると、確定論的に与えられた洪水流量だけの通水能を有する河道を建設しても、破壊の超過確率が存在することが分かる。変動の確率と超過確率を関連付けることにより、破壊の超過確率を一定の値以下に抑えるためには、断面形の変動をどのような範囲に抑えることが必要であるかを知ることが出来る。これは河道断面形の変形をどう管理するかの際に、有力な解を与えてくれる手法となる。

本論文の標題に示したように、自然特性を基本に据えて河川を見ることにより、研究者は河川水理学の新しい課題を見出すことが出来るし、実務者は河川水理学や河川工学の新しい知見を河川計画・河川事業の設計に活かすことが出来る。著者達は本論文により、この実例を示し得たと考えている。こうした基線を体系的に示すことが、研究と実務の間に生じている溝を埋め、河川生態環境を定量的に評価できる新しい世紀の河川工学の基礎となる。

参考文献

- 1) 玉井信行：河川技術は環境倫理学にどう答えるか，電力土木，No.265，pp.3-10，1996.
- 2) Tamai, N., Emura, Y., Matsuzaki, H.: A network operation of reservoirs for enhancement of the ecological flushing discharge, Proc. 27th Congress, IAHR, 1997 (in press).
- 3) 白川直樹，松崎浩憲，玉井信行：発電ダムにおける環境用水のコストと環境経済，水資源シンポ1997（印刷中）.
- 4) Samuel, P.G. Uncertainty in flood levee prediction, Hydra 2000, Vol.1, pp.567-572, Thomas Telford, London, 1995.
- 5) Rahman, M.M. And Tamai, N.: Annual Meeting of JSCE, 1997 (in print).