

環境概念を軸とした河川工学について

Emerging Concept of Environmental River Engineering

玉井 信行

Nobuyuki Tamai

東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

Dept. of Civil Engineering, The University of Tokyo

1. はじめに

水工学夏期研修会の特別講演は、日頃自分が関わっている研究の内容をまとめるだけではなく、歴史的であれ、将来に関わることであれ水工学全体に関わる洞察であるとか、哲学を語ることが望ましいと考えてきた。今回の講演では最近筆者が関わっている「河川生態環境工学」の基礎となる概念、自然環境に関する規範、及びそれに関連して生態学の重要な概念を取りまとめた。これらを通して新しい河川工学の基本的な骨組みを示したい。さらに、今後の展開に対応できるような水理委員会の活動の拡充に関して私見を述べたい。この特別講演が 21 世紀の河川工学に基礎を与え、水工学関係者の将来に良い刺激となることを念願している。

2. 環境をどう捉えるか

2.1 課題と規範はどう変化してきたか

1896 (明治 29) 年の河川法は、日本が近代的な法治国家として歩み出し、憲法を初めとして一連の法律の整備を進めた頃に制定されている。また、明治 10 年代の後半から、20 年代に掛けては水害が頻発していた。国の主産業である農業、それを支える農地を安全に守ることが国の発展のために重要である、という認識の下に制定されたものといえる。慣行水利権を認めたことはこうした背景を象徴的に示しており、「大河川の治水」がこの法律を貫く中心課題であった。1964(昭和 39)年の大改正では、水系一貫主義を中心として、各水系ごとに治水と利水を共に含む工事実施基本計画の策定を義務づけた。これは経済の高度成長期を迎えて、都市用水の需要増大が見込まれる中で、水資源開発の重要性を河川管理の中に位置づけたものと言える。その後、経済成長の結果が人口の都市集中、土地利用の激しい変化をもたらし、都市水害を激化させると共に、河川環境の悪化を招いた。

その後の環境に関する河川事業の推移を表 1 に示す。表 1 には河川審議会の答申、河川局からの通達、河川事業、ダム事業の主なものを示してある。1960 年代には経済の高度成長に伴って多くの水域で水質汚濁が進行した。この時代の汚濁負荷は点源からの放出が主なものであった。環境庁の創設、水質汚濁防止法の制定、オイルショックによる経済活動の減速、下水道の進展などにより、70 年代には点源からの汚濁負荷は急速に減少した。しかし、一般家庭排水、山林・農地などの面源からのチッソ・リンの流入を防ぐことは出来ず、80 年代以降は湖・貯水池などの停滞水域での富栄養化が課題となった。70 年代には高度成長の過程で生じた都市の膨張に伴う課題が出現した。環境面では都市の水辺の喪失が課題となり、「親水」が取り上げられた。この段階では、専ら人間が水辺に近付くことが出来るような対策が考えられた。

河川の実務に「環境」が初めて登場したのは、1981 年の河川審議会の答申である。しかしこの時も河川環境は狭い範囲で考えられており、人間にとっての快適性が追求されていた。生物に関する理解は限定的で

表 1. 河川工学における環境に関わる主要な動き及び事業(玉井、1998a)

河川審議会答申など	河道・水路に関わる事業	ダム・貯水池に関わる事業
1981 河川環境の管理の原則 1983 通達：河川環境に関する基本計画策定	1969 河川の浄化事業	1975 ダム周辺環境整備事業
1988 通達：発電所からの維持流量放流	1987 ふるさとの川モデル事業 1987 流水保全水路整備事業 1988 桜づつみモデル事業	1987 特定貯水池総合保全整備事業 1988 ダム湖活用促進事業
1990通達：多自然型川づくり 1990 河川水辺の国勢調査	1989 せせらぎふれあいモデル事業 1990 レイクフロント整備事業	1989 レクリエーション湖面整備事業 1990 レクリエーション多目的ダム事業
1991 今後の河川工事にに関する原則	1991 魚が上りやすい川づくり推進モデル事業	
1992 109の一級河川における河川環境の監視制度	1993 清流ルネサンス21 1993 よみがえる水辺づくりモデル事業	1993 ダム水環境改善事業 1993 ダム貯水池水質保全事業
1994 通達：環境政策大綱 1994 環境法成立 1995 河川環境はいかにあるべきか	1994 総合浄化対策特定河川事業	1994ダム湖活用環境整備事業
1996 21世紀の社会を展望した今後の河川整備の基本的方向について 1996 社会経済の変化を踏まえた今後の河川制度の在り方について 1997 河川法の改正		

あり、水産資源に配慮する、という記述が見られるだけであった。こうした中で自然回復に向かって大きな一歩を進めるきっかけを作ったのは、88 年に出された建設省開発課長からの通達「発電水利権の期間更新時における河川維持流量の確保について」である。地元住民や、環境団体から要望が強かった「減水区間の解消」は、この通達により大きく前進した。90 年代に入ると、生態系を含んだ本来の意味での環境への認識が高まり、生物への配慮が前面に登場してくる。90 年に治水課長からの「多自然型川づくり」に関する通達が出され、「河川水辺の国勢調査」が始められたのはこの皮切りであった。これらの動きにより、自然環境・生物が河川技術者の日常の実務に大きく登場してきた。94 年には「環境を内部目的化する」ことを謳った「環境政策大綱」が通達されている。この年には環境法も成立し、環境への社会的関心が具体的な法律の形としてまとめられている。

この後、河川審議会は 1995 年「河川環境はいかにあるべきか」、1996 年「21 世紀の社会を展望した今後の河川整備の基本的方向について」、1996 年「社会経済の変化を踏まえた今後の河川制度の在り方について」と矢継ぎ早に答申を行い、河川は生物に生息域(ハビタット)を提供している、という概念を定着させた。これを見ると、最近では「環境への配慮」とは「人間を含めた全生態系への配慮」であるという認識となっており、これが社会的な規範であると言ってよい。こうした動向を踏まえ、1997 年の 5 月に「河川法の一部を改正する法律案」が国会で成立し、12 月に施行法が成立し、実施に移されることになった。今回の改正の骨子は、1) 目的に「河川環境の整備と保全」を加え、地域の意向を反映した河川整備計画を導入したこと、2) 異常渇水

時の円滑な水利使用の調整を管理者に義務付けたこと、3)堤防やダム貯水池周辺の一定の幅の樹林帯を、保安林制度等と調整の上、河川管理施設として適正に整備又は保全することができるよう措置したことである、とまとめることが出来る。

21 世紀の河川整備は将にこの河川法に則って進められる。しかしながら、これをどのように具体化して行くかの具体的な指針や体系、特に新しく目的に加えられた「河川環境の整備と保全に関する技術体系」に対する考察はやっと始まったばかりであり、河川管理者も模索中の段階であると考えられる。過去の事例や将来の課題を分析し、それを生み出している基本となる動向や思想を見出すのは水工学研究者の役割である。また、思想を具体的な設計に体现するための技術体系を創り上げることも我々に課せられた使命である。こうした問題意識によりこの論文を取りまとめてみたい。

2.2 「水の間」の概念

水に関わる事象を広く総合的に表す概念として、「水環境」という言葉が用いられることがある。しかし、「環境」という言葉は、主体を取り囲んでいる周辺の空間を意味し、主体とそれを取り囲む周囲との相互の関係が環境問題となる。従って、「環境」という言葉は、自己と他を明確に区別するデカルト的概念である。すなわち、近代の西欧科学技術文明の基礎を成す哲学と同じ根を持つ言葉である。そして環境問題は、この近代における科学技術の発展が惹き起こした負の結果であり、近代の「社会の発展が明るい未来を拓く」という命題が反省を迫られている。

このように考えると、環境問題の新しい地平を見出すためには、「近代」を考え直してみることに、すなわち、「環境」という用語自体を一度考え直してみる必要があろう。「水環境」というときに、この環境とは水の中を指すのであろうか、水を取巻く周囲を指すのであろうか。

「水環境」という言葉を狭い範囲に当て、これを狭義の定義とよぶことにする。この狭義の定義では、「水環境とは水を含む領域である」と考えるのである。これは水環境とは水域であり、例えば、海洋、河川、地下帯水層、湖沼、下水道等ということになる。水域において生じている環境問題は、水環境問題の内の大きな課題であるので、この狭義の定義は一応正当なものであることが分かる。しかし、これでは水域を取り巻いている、都市であるとか、森林であるとか、鳥などは水環境には入らず、最近「水環境」に関して重要であると認識されている課題の多くが欠落してしまうことになる。

次に、「水環境」を広域的に考え、これを広義の定義とよぶことにする。水環境の広義の定義は、「水環境とは、水域と、これに関係する気象、都市、生物などを総合的に含む空間」とすることが出来る。このとき、主体を取巻く空間であるという「環境」の定義を思い出してみよう。「環境」にはそれを包む周囲の空間が存在する筈である。しかし、広義の水環境は関連する因子の全てを内部に包括しているので、これを包む周囲の事象は無く、「広義の水環境」はいわば空集合に囲まれていることになる。これでは近代的な意味での「環境」の概念とは食い違うことになり、狭義の定義であれ、広義の定義であれ、デカルト的な環境の概念は現在我々が直面する課題に対しては正当な答えを与えてくれないことが分かる。

これを打破するのは「場」の概念である(玉井、1998b)。「場」それ自身には境界がない。「重力の場」という例に示されるように、対象とするものによりその範囲が定まってゆく。重力場は距離の自乗に逆比例する特性があり、その及ぶ範囲に限界はない。従って、「水の場」は、水に関わるすべての範囲を含むことと定義することが出来る。そこに存在するものすべてを自他の区別なくすべて包み込んでいるのが「場」である。最近において、河川関係で「水の場」に登場して来る因子には図1のようなものがある。特に、人間と自然との共生、環境共生型の都市構造への変革が謳われる現代にあつては、人と環境との対立を解消してゆくことが重要である。こうした状況では、特に「場」の中に人と自然がすべて含まれているという認識が、益々重要になっている。

例えば今回の河川法改正で取上げられた課題は、すべてこの「水の場」の中に含まれる。「目的」の中に

加えられた「河川環境」を広義に定義し直したものが水の場合であるので、今後考えるべき河川環境の内容としては、少なくとも「生態系のための生息域」、「流域の水循環」、「水辺環境」を含んで考えるべきであるという結論となる。また、新たな計画制度で取上げられている地域の意見の反映は、流域としての対応、ふるさとの活性化・街づくりなどの項目に含まれている。渇水対策は水循環・流域活動の課題に含まれ、樹林帯は河畔の生態系の中に含まれる。図1に示された因子は代表的なもののみであり、また、これらはそれぞれ独立なものでなく、例えば水循環は生息域と相互に関係があることに注意する必要がある。

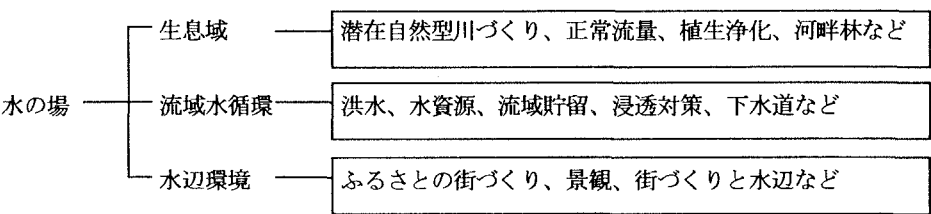


図-1 「水の場合」の概念と代表的な因子

水の場合の概念は学術的な議論の場合では正確なものであるが、社会生活の場合では、環境基本法とか河川法での河川環境であるとか、環境という用語が既に法律用語として用いられている。したがって、本論文でも、こうした通例の意味での河川環境という使い方をしている。

3. 環境の評価法

前章で環境概念、規範の変遷について述べた。次の段階としては、こうした現代的な規範に基づいて環境をどう定量的に評価するのか、が課題となる。その中でも特に河川に固有な課題については、河川工学が解答を与える責任を負っている。

3.1 自然をどう捉えるかー潜在自然概念

自然環境を論ずるときに問題となるのは、「自然」という用語に対して、各人が実に様々な意味を付与することである。自然という用語が普通名詞であることを考えれば、これは蓋し当然のことである。しかし、学術・技術の中では定義が必要になり、事業に関して多くの関係者が議論するとすれば、共通の認識が必要である。このような時に、評価の軸を与えて呉れるのが「潜在自然」という概念である(玉井・松崎・白川、1997)。

これは次のように定義できる。「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」(玉井、1998a)。

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よいか、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。

3.2 河川の自然特性と自然復元の概念

(1) 河川の自然特性

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。これが河川の潜在自然状態を考えるととき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ないので、「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。特に、横断方向の連続性は流域と河道との連続性を支配している。これは、水生生物のみでなく、陸生生物や植物にとっても重要な因子である。

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（玉井、1998a）。

表 2. 河川の自然特性の一覧

	河川の三大自然特性	代表的な現象・因子
河川の動態の 物理的特性	自然現象による攪乱と更新	洪水、渇水
	縦断方向・横断方向の連続性	水・栄養塩・土砂・生物の移動、河川回廊
	河床形態の多様性	瀬と淵、中州、河岸

河川には大きく区分して、上流、中流、下流の区分がある。上記の自然特性は、こうした区域毎に異なる特徴的な姿を現す。こうした流程に伴う変化を考えるとときには、地理上の指標を用いるのが良い。さらにまた、我々が河川景観として認識する特徴も、こうした自然の地理・地形条件と関係があるので、基本的な知識として理解しておく必要がある（玉井、1998a）。

セグメント(segment)とは、河川において、河床の勾配がほぼ一定に維持される大きな区間と定義される(山本、1994a)。表 3 に示されるように、河川は地理的特性あるいは河床勾配に対応する 4 つのセグメントに区分される。結論として、河川の沖積地においては基本的に沖積扇状地、沖積平野、三角州の 3 種類に区分される。表 3 においては、それぞれのセグメントにおいて河床勾配だけでなくその他の一般的な河川の特徴についても説明している。表 4 においては、沖積地における河川の景観的特徴を、周辺の土地利用も併せて示している。景観は自然景観が基調となるが、社会的・文化的な活動によっても強く規定される。河川は流域の社会生活、文化、及び歴史に強い影響を与える。しかし、その逆もまた真であり、流域の社会的、文化的な特徴が河川景観を規定する。例えば、扇状地の河川景観の代表は礫河原であるが、人間活動の影響で土砂供給が変われば河原の土砂の性質が変わり、それに応じて植生が変化し、河川景観が変化して行く。また、河畔林が植林されている場合には、地域の選択により林相が異なり、自然地理特性が同一な区分においても景観が大きく異なることがありうる。

表 3. 一般的なセグメント区分 (山本(1994b)に基づいて一部修正)

	渓谷における溪流	沖積扇状地	沖積平野	三角州
河岸構成物質	多数の岩石が露出	河床材料と同じ	下層は河床材料と同じ、砂、シルト、粘土の混合物	シルト及び粘土
河床材料の代表径	多様	>2.0cm	0.3mm~2cm	<0.3mm
勾配	多様	1/60~1/400	1/400~1/5000	<1/5000
蛇行の程度	多様	比較的少ない	蛇行が激しい。水深に対する幅の比率が大きい場合、独立した島が形成される。	多様
河岸の侵食	きわめて激しい	きわめて激しい	中程度	弱く、河道の位置の移動は殆ど無い
低水路の水深	多様	0.5m~3m	2m~8m	3m~8m
断面の形状	自然の河川 掘込型 単断面	掘り込み河道 有堤型 単断面または複断面	掘り込み河道 有堤型 単断面または複断面	掘り込み河道 有堤型 単断面または複断面

表 4. 河川の景観的特徴 (中村・北村(1988)に基づき一部修正)

周辺地域の特徴	自然的特性および景観的特性(括弧内)		
	沖積扇状地	沖積平野	三角州
山地、森林	溪流 (清閑)	山紫水明 (閑雅)	山紫水明型河口 (悠然)
田園、村落、小都市	湧水、源流 (浄寂、清浄)	野川、用水、霞堤 (長閑)	大河、水郷、掘割 (茫洋)
市街地、都市	山村 (孤愁)	河岸のウォーターフロント (上品)	水都、運河 (活動的、魅力的)

(2) 自然復元の概念

最近は自然度の高い川を目指して多くの事業が行われている。しかし、局所的な事業に眼が集中しており、河川域全体の動向と関連付けた発想が乏しいのが実状のように感じられる。そこで、自然復元について、修復、復元、再自然化の三つの水準があることを、改めて認識することに意味があると考えられる。以下に、この用語の意味を掲げる。

表 5. 自然復元の三つの水準 (自然復元河川工学研究会、1998)

修復 rehabilitation	局所的な活動で、改変された生態系の機能を改善する活動をいう。
復元 restoration	局所的ではあるが、河川を自然状態に戻す活動をいう。 流路の物理的状態を従来の状態に戻したり、植生を再生させたり、絶滅した種を取寄せるなどはこの水準の活動である。
再自然化 renaturalization	河川の動的な作用及び機能を自然状態へ復元させる活動を言い、流域全体に及ぶ大規模で長期的な活動をいう。

建設省の「多自然型川づくり」は、当初は護岸に着目したものが多かった。現在も局所的な事業に止っているものが多く、表5の水準では修復に属するものが多いといえよう。筆者は近年「潜在自然型川づくり」を提唱している。これは潜在自然の概念を基礎とし、河川の自然動態(表2参照)の原則を把握した上で、その原則に適応し、それを復元させる事業を指すものである。目標は表5での「再自然化」である。多自然型川づくりの進展したものとも言えるが、多自然型川づくりには「自然」とは何かに関する定義が与えられていなかったもので、別の用語を当てている。例えば、1996年春に実施された、グレンキャニオンダムからの人工洪水は、自然現象の攪乱を人為的に与え、生息域の更新を目指した、本格的な実験であった。こうした事業が、潜在自然型川づくりの例である。

3.3 人間活動による河川の自然特性への影響

(1) 河床生態保全洪水

貯水池の建設に伴い、自然現象の攪乱がどのように変化しているかを調査したものには、玉井・松崎・白川(1997)とか玉井(1998a)がある。この問題では、先ず、ダム湖の建設で河川流況に変化が生じているか否かを、どのようにして抽出するかが第一の課題であった。渡良瀬川の高津戸測水所での流量年表の資料を用いた予備的な分析によると、草木ダムの完成を含む前後の約25年間の資料に対して、通常の自己相関分析では殆ど差が現れなかった。そこで、我々は生態学的な特徴から、指標を選定することを試みた。すなわち、河床の礫の表面に生育する藻類は、月に1度以上の適切な出水が無いと質が悪くなる、ということである(このヒントは水野信彦先生との会話の中で得られたものである)。これは、1年に12回の中小規模の洪水が起こることが望ましい、と言うことを意味している。このように、河床に沈積したシルトを押し

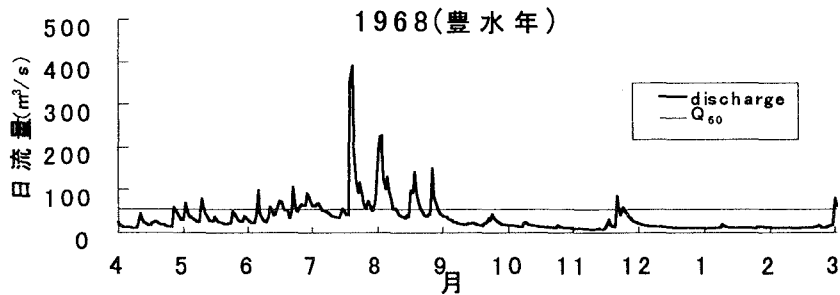


図2. 草木ダム建設前(1968年)の日流量時系列と Q_{60}

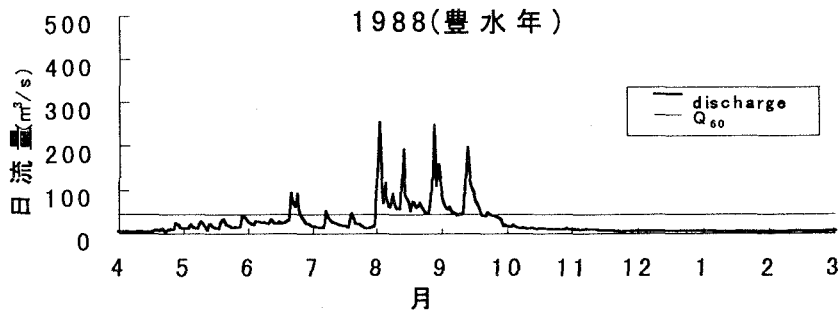


図3. 草木ダム建設後(1988年)の日流量時系列と Q_{60}

流す効果を持つ中小洪水を、「河床生態保全洪水 (Ecological Flushing Discharge)」と呼ぶことにした。この生態的保全洪水の継続期間を 5 日間と想定すると、1 年間にこの臨界値を上回るのは 60 日である。洪水継続期間の仮定は、高津戸測水所ではほぼ正しかったことを確かめている。本論文においては、 Q_{60} (1 年間で 60 番目に大きな日流量)を上回る出水を、「河床生態保全洪水」と呼んでいる。

渡良瀬川高津戸測水所における具体的な流量時系列を図 2 と図 3 に示す。図 2 はダム湖の建設前の資料、図 3 はダム湖の建設後の資料である。気象条件は年々変動するので、豊水年同士の資料を示している。また、約 25 年に亘る観測期間においては、気象条件が大きく変わったということではなく、また山間部であるのでダム湖の集水域における土地利用も大きく変化しているとは考えられない。従って、ダム湖への流入水量の時系列の統計的性質は、変化していないと考えている。図 2、図 3 において日流量 $50\text{m}^3/\text{s}$ 程度で水平に引かれた細線が Q_{60} を表している。68 年と 88 年においては、この値には大きな差は見られない。一定の径の沈泥を掃流することを考えると、河床生態保全洪水には一定の臨界値があると考えられることも出来る。しかし、気象条件は年毎に変動し、自然状態であればこれを反映して河川流況は年毎に変動する。こうした自然の攪乱条件下では、年に 12 回程度生ずる相対的に意味のある攪乱を見出すための臨界値として Q_{60} に意味があると考えられる。図 2、図 3 を見ると、ダム湖の建設前には冬を除いては、適当な間隔で河床生態保全洪水が見られている。しかしながら、ダム湖の建設後では河床生態保全洪水は夏期の出水期にしか見られなくなっていることが分かる。

図 4(a)、(b) は渡良瀬川の高津戸および利根川の栗橋における河床生態保全洪水の 1 年間の発生回数を比較したものである。高津戸は草木ダム湖のすぐ下流に位置しているが、栗橋は上流のダム群から離れており、ダム湖の建設による流況への影響は弱い。栗橋の資料に関する限り、完成の前後に著しい変化は認められないが、一方、高津戸における河床生態保全洪水の発生回数は約 2/3 に減少した。

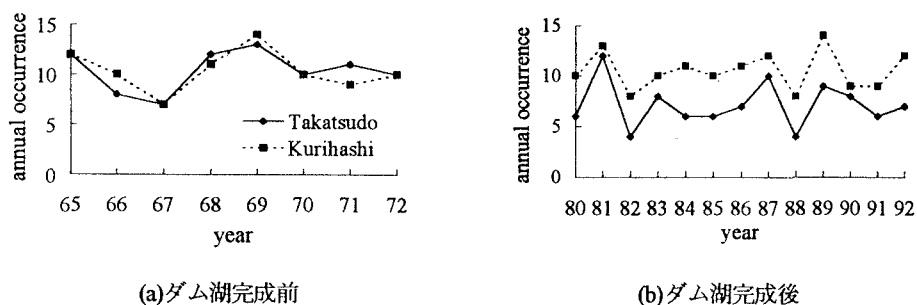


図 4. 河床生態保全洪水の 1 年当たりの発生回数比較

連続する 2 回の河床生態保全洪水の間隔についても分析を行うことが可能である。ここでは詳細は省くが、夏期(7 月～9 月)には平均の間隔は約 16 日であり、これはダム湖の建設前後で変化していない。夏期には藻類の活動、水生動物の活動も活発であるので、月に一度の洪水では少ないと言われており、この点では生物活動の高い時期には流況は殆ど変化しておらず、望ましい状態にある。しかし、小雨期(10 月から次の年の 6 月まで)では、洪水間隔が完成前の 42 日から、ダム湖の完成後は 1.5 倍程度の 64 日へと長期化している。10 月から 2 月に掛けて関東地方は自然的な干ばつ期で雨量が少ないが、都市用水の需要は年間を通じてほぼ一定であるので、ダム湖からの放流は困難である。3 月から 6 月の期間は比較的雨量は多いが、農業用水の需要も大きく、ダム湖からの放流量は少ない。上記の結果は、このような水資源利用を反映している。ダム湖からの放流を増強するためには、新たな環境用水を生み出す努力をする必要がある(Tamai et al.,1997)。

(2) 河床形態における不確定性と形態変化

土砂の移動・堆積、河床や河岸の洗掘・崩壊によって生ずる多様な河床形態は、生息域にも多くの多様さをもたらす重要な因子である。山地溪流では階段状の瀬と淵、扇状地では流路が幾本にも分かれた網流河道、中流域では湾曲部に見られる一対の瀬と淵が典型的な河川地形、自然景観を創り上げている。この項では、河床形態の基本的な不確定性と、最近の河床形態の変化の例を指摘したい。

河床形態の不確定性として報告された最初のものは定常、一定幅の水路での実験結果である(木下、1957)。この実験は一定した流量、幅 13cm、長さ 23mの直線、長方形断面水路で、一様粒径の砂を用いて行われた。木下は、このようなほぼ均一で、強力に統制された条件下でも、図 5 に示すように交互砂州の長さがきわめて幅広く分布することを発見している。この交互砂州システムにおいてそれぞれの砂州の前縁線が河道の側壁と交差して、曲率が変化する。流れが前縁線を横切るところが瀬であり、その流れが側壁に衝突し向きを変える位置が淵である。従って、図 5 においては砂州の長さは、瀬あるいは淵の間隔に対応している。瀬又は淵の間隔を水面幅で無次元化した場合には、実験値は 2~8 の間に分布しており、最頻値は 4.2、平均値は 4.5 であった。

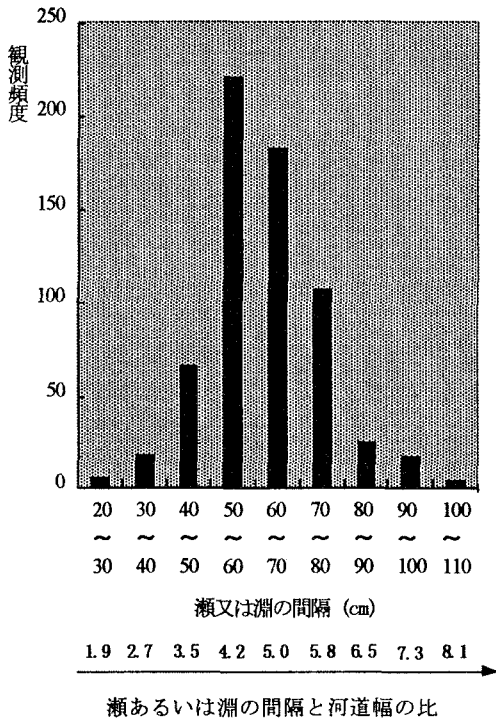


図 5. 瀬あるいは淵の間隔に関する実験結果
(木下、1957)

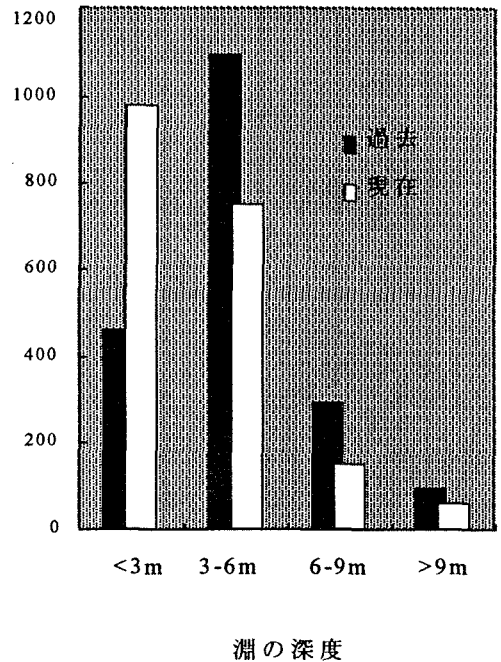


図 6. 報告された淵の数と深さ
(内水面漁場環境利用実態調査検討協議会、1987)

この結果は、沖積扇状地および沖積平野における実際の河川に拡張されている。土木研究所による全国的な調査によると、水面幅に対して交互砂州の長さは、2~11 の範囲に分布しており、最頻値は 5 であった。中流域においては、蛇行河道の一つの湾曲には一組の瀬と淵が含まれる形態が代表的である。こうした区間においては、一つの砂州の長さは、一つの湾曲の長さに等しくなる。

全国内水面漁業協同組合は、漁業者の立場から見た現在の生息域の認識に関して、会員を対象に全国的な

調査を行った(内水面漁場環境利用実態調査検討協議会、1987)。結果の一つとして、近年における淵の水深の変化を図6に示す。この図に依れば、深い淵の数が少なくなっていることを示している。過去には、深さが3m以上の淵が約2/3を占めていたが、最近では1/2以下に減少している。また淵の水深の最頻値は最近では3m未満であり、以前は3m~6mの範囲であったのと対照的である。

現時点において、河川生息域は多くの点で変化していることを指摘できる。改変の動機や圧力としては、a)河岸地帯への住民の定住に伴うピーク流量の増大や、舗装道路などの不透透区域の上流への拡大、b)洪水の疎通能力を高めるための断面形の整正や断面積の拡大、c)耕作機械の導入のための圃場整備とそれに伴う用水河川の直線化、d)小河川の直線化、e)落差工およびコンクリート護岸の採用、f)施工機械の操作性能を向上させるための巨礫の除去、などがある。日本においてはこの20~30年間に、生態系への配慮を欠き、人間生活の利便性を増すことだけを考えて行われた種々の工事が、単調で単純化された生息域を生み出すことになった。底生動物の調査を通して、河川生息域の現況評価を行なっている研究もある(谷田、1997)。さらにまた、扇状地や蛇行区間における砂礫州の形態や景観の変化には次のような事例が多くなっている。その変化の過程は、河床の低下(砂利採取、流送土砂量の減少等による)→流路の集中→更なる河床低下→砂礫州の比高の増大→洪水による冠水頻度の低下→砂礫州上の植生の遷移の増進→砂礫州の陸化、という経緯を辿るのである(辻本、1997)。これらの変化は、まさに河川の自然特性の変化であり、局所的な手直しのみで改善することは難しい。このように河川生息域の自然度を向上させるためには、潜在自然型川づくりのように、基本原則を把握し、それに基づく方策を考える必要がある。

3.4 環境倫理について

本論文では河川工学に関わる環境概念や規範の変遷、さらには河川環境の評価法を論じている。そして、川づくりにおいて自然度を高めるための原則を示してきた。こうした問題においては見解が異なることは十分に予想されるので、議論の基礎となる統一的な判断基準について了解が進んでいることが望ましい。目標を選択する根拠を与えるのが倫理学の仕事であるので、環境に関する議論をするときには環境倫理について論ずる必要が出てくる。こうした認識の下に、ここでは環境倫理学の要点と河川工学との関係をごく簡単に振り返っておきたい(玉井、1996)。

環境倫理学の主張は次の3点に要約される(加藤、1994a)。

その1は、自然の生存権の問題で、人間だけでなく、生物の種、生態系、景観などにも生存の権利があるので、勝手にそれを否定してはならないと言う主張である。環境倫理学は、生存の権利とは何かを深く問い直す必要を促しており、人間優先主義の考え方に再考を迫っている。

その2は、世代間倫理の問題であり、現代世代は未来世代の生存可能性に対して責任があるという主張である。環境を破壊し、資源を枯渇させる行為は、現代世代が加害者で、未来世代が被害者となることを意味している。そして、加害者と被害者の間には時間差があり、一方の当事者が現在は居ないという特殊な問題である。この世代間倫理には、自己決定・自由主義の原理の否定が含まれており、自己の確立を前提としてきた近代社会の根底に疑問を呈する大問題を提出している。

その3は、地球全体主義であり、地球の生態系は開いた宇宙ではなく、閉じた世界であることを自覚すべきであると言う主張である。この閉じた世界では、利用可能な物質とエネルギーの総量は有限である。その中で生存可能性の保証に優先権がある。しかも、次の世代にも選択可能性を保証しなくてはならない。配分の問題が正義にとって根本の問題となり、最後の一滴の石油を誰のために使うのが正義に適うのか、と言う難題が現われてくる。

さて、このような環境倫理学の要求に沿うことの出来る河川の状態はどのようなものであろうか。筆者は50年前の河川の自然度は、十分に高かったものと考えている。本論文で用いた用語を使えば、50年前の今日的潜在自然河川が、環境倫理学の要求を満足しているものと考えている。50年前の今日的潜在自然河川とは、

50年前の時点で、人間活動の負荷を止め、出来上がってくる河川生息域を考えることである。この時点での河川は、第3.2節で見た河川の動特性を十分に備えていたと考えられるのである。河川は自然状態では自然の攪乱の下で動的な平衡にあり、流域において連続性が成り立ち、土砂の洗掘と堆積が織り成す複雑な河川形態が多様な生息域を作り出している。多様な生息域は環境倫理学が要求している自然の生存権を満足し易いし、平衡状態は環境倫理学が要求する次世代にも同様な条件が与えられることを意味しており、流域として循環的であるのは閉じた世界が成立していることを意味するので、これも環境倫理学に合致している。このように、河川整備計画の目標を「河川が本来有している、自然の攪乱である洪水の下での動的な生態系を保全する」——これを「潜在自然型川づくり」とよぶ、3.2.(2)参照——ところに置けば、環境倫理学の要求に応えることが出来る。

3.5 生物多様性について

多様性については総論を述べることは比較的容易であるが、具体的にどのように考えるかについては多くの意見があり、かつまた定量的な判断基準を示すのは大変難しい問題である（玉井、1996）。しかし、生物の多様性については遺伝子の多様性、種の多様性、群集の多様性、生態系（生息域の多様性）のすべてを考慮する必要があることだけは指摘しておきたい。河川整備を考えるときは生息域の多様性が先ず最初に念頭に浮かぶであろうが、これは一番大きなスケールの話であり、さらに細かな世界をも考える必要がある。たとえば、川に関しても遺伝子レベルの議論が出ている例として、サケの人工孵化がある。日本ではすべて人工孵化でサケの再生産が行われているが、人工孵化だけを続けていると自然界に適応する能力の低い遺伝子を多く持つサケが増え、大局的には種としての能力が低下することが心配されている。

筆者は人間の生存が基底にあると考え、「人類の持続を可能とするような多様性を保つ」ことを基準としたい。自然物に生存権を与えよと言う環境倫理学の主張は、一粒の小麦も、一匹に牛も食うなどという主張ではない。人間が生存に必要である以上に自然破壊をする権利は正当化できないということである（加藤、1994b）。さらに、種の多様性に関して種は多ければ多いほど善であるかという課題がある。これについても生態的な側面を考えるべきであり、歴史的にその場所に居なかったような種が殖えることは避けるべきである。

3.6 生息域適性度の定量的評価

潜在自然型河川計画を確立し、これに基づく河川改修を進展させるためには、さらに定量的な評価体系が必要である。例えば、「どのような自然さが自然であるか」などの質問に答えられるような体系が必要である。幾つかの代替案の中から、生息域適性度の定量的な評価を行うための一般的な技術を開発する必要がある。このような技術は、河川改修工事の計画段階において住民が参加する際の考察や議論に、論理的で適正な基本情報を与えるために特に重要である。筆者は、生息域適性度評価を体系的に発展させるためには、流量増分式生息域評価法（Instream Flow Incremental Methodology 略して、IFIM）（Bovee, 1982）が最も期待できる概念であると考えている。生息域適性度評価は、健全な生態系を保護するための制度的側面を始めとして、流域の健全な管理に関する殆ど全ての側面を含む。生息域適性度評価の体系全体において必要とされる二次的な評価法を表6に示す。

表6. 生息域適性度評価に必要な二次的評価法と重要な因子(玉井、1998a)

必要な二次的評価法	重要な因子
水文評価法	環境流量、流域における雨量予測、水文循環の時系列

水理評価法	自然河川での3次元解析を含む数値シミュレーション
微視的生息域評価法	底質構造、複数の種における生態的圧力
巨視的生息域評価法	水質、温度
生活過程評価法	生物の生長と死
経済的評価法	河川復元や環境流量などの経済的分析
不確定性、信頼性	植生・洗掘・堆積・流心の位置などに関する不確定性
合意形成	法の構造、住民参加、表現技術

これらの二次的な評価法の内容については今後更に完成度を高める必要が有るが、ここではそれらの幾つかにつき、特徴のみを紹介する。水文評価法の一例については「河床生態保全洪水」を挙げたい。微視的生息域の評価法では、生息域適性曲線が課題となる。ここでは概念的に内容を表わすものとして図7を示す。この図は1994年の夏に愛知県が乙川で瀬と淵を含む河川区間で行なった魚類調査に基づくものであり、オイカワの捕獲尾数を用いて、採取地点の流速、水深毎に尾数を規格化して示したものである。

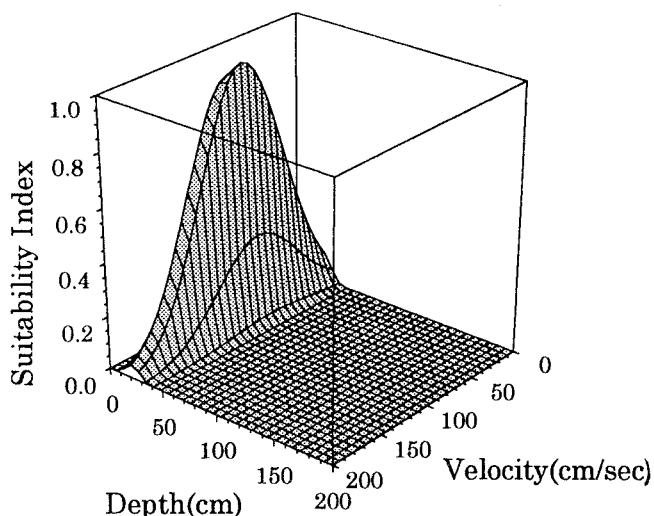


図7. 乙川における1994年夏のオイカワに対する生息域適性曲線—生息数 (Tamai et al., 1996a)

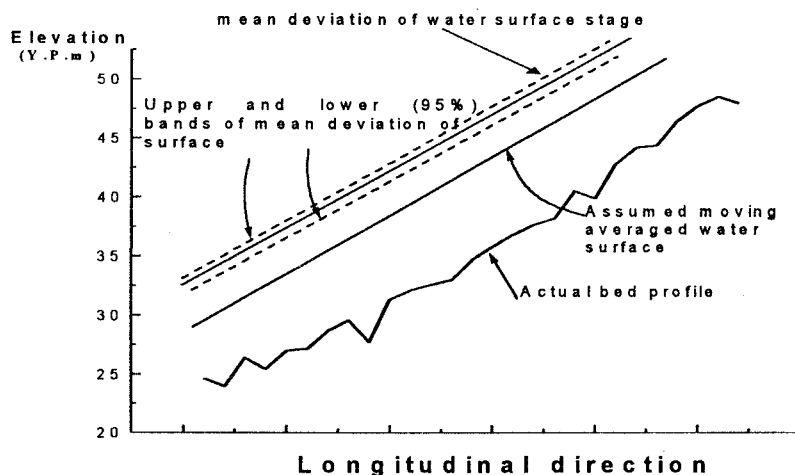


図8. 縦断形状の不規則さによる水位上昇の偏差の概念図(Tamai et al., 1996b)

生息域適性曲線は多くの段階を経て概念が進展してきたが、最終的と目される取りまとめでは4種類の定義が与えられている (Stalnaker et al., 1995)。それらは、(a)生息域適性曲線—第1類または理論的推測 (Suitability curves—Category one or literature-based) : 既往文献あるいは専門的知見に基づく理論的推測により作成された曲線。(b)生息域適性曲線—第2類または生息数 (Suitability curves—Category two or utilization) : 河川調査において観察された魚の生息(利用)数頻度分布に基づいて作成された曲線。(c)生息域適性曲線—第3類または選好 (Suitability curves—Category three or preference) : 環境的な偏りに対する補正を加えた頻度分布に基づいて作成された曲線。例えば、50%以上の魚が深さ 1m 以上の淵に生息していたとする。しかし、そのような淵は河川の 10%の領域しか占めていなかったとすると、これは明らかに魚の好みを表わしていることになる。(d)生息域適性曲線—第4類または条件付き (Suitability curves—Category four or conditional) : カバー、季節など付加的な条件を付けた上での選好曲線を指す。いずれの生息域適性曲線を使うにしても、このような生物学的な情報と河川の物理的な情報とを組み合わせ、河川改修計画の種々の代替案につき、生態的な面から定量的な評価を行うことが IFIM の目標である。

図8には不確定性・信頼性に関して考えるべき課題の一例を示す (Tamai et al., 1996b)。自然度の高い河道を保持しようとする、河道の縦横断形状は整った幾何学的な形状ではなく、現状を重視した不規則な、複雑な形状となるであろう。図8は縦断形状が不規則に変化することを前提としたとき、ほぼ様な底面勾配の水路に出現するであろう水位との偏差を論じたものである。この偏差の確率的な分布を知ることが出来れば、自然度を増した時の堤防高さの信頼性を知ることが出来る。

本節での第3の例として、河川環境の経済的評価について述べる。河川工学は公共事業の発祥の分野であり、永くその中心の分野であった。言葉を代えて言えば、河川事業は伝統的に帝王の事業であったので、経済的な分析は不要であったと言って良い。しかし、公共事業の種類も殖え、また伝統的な公共事業に加えて、国が行う事業の数もうなぎ上りに殖えてきている。こうした中で、事業の優先度とか、事業の執行順序を決めるに当たっては、経済的な分析が不可欠になって来ている。

河川事業に関する経済分析の精密化は、治水・利水の面でも必要であると考えられるが、河川環境については考え方についても未だ模

索中である。こうした問題意識の下に、筆者等 (玉井他、1998)は河川環境経済評価の枠組みを提示した。そして、河川環境整備に関わって行われてきた事業、あるいは 1988 年の発電水利権更新時の維持用水の放流に関する経済的な評価を試みた。環境用水の増強に対する支払意志額をアンケートにより求め、利根川流域に対する概算を示したものが図9である。これに依れば、良好な環境の便益は、より良い河川環境の創成を目指して多自然型川づくりを行う際の割増し費用、維持用水の放流に伴う電力売り上げの減少 (これを保障するに要する費用と考えることが出来る)、水質浄化のための植生を利用した浄化施設建設費用を上回ることが示されている。具体的な数値については更に検討することが必要であると考えられるが、良好な河川環境整備事業は、費用便益分析からも十分に意義があるものと考えられる。

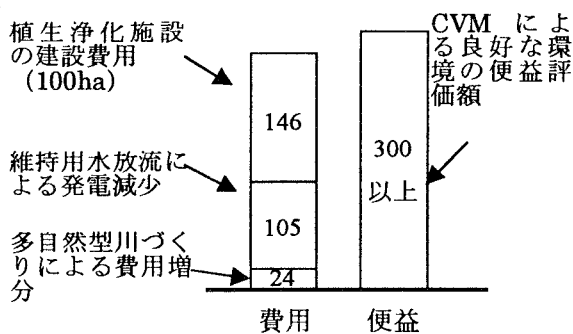


図9 利根川流域における環境関連事業の費用と便益(単位: 億円)(玉井他、1998)

4. まとめ

本論文においては、河川環境の概念を確立し、そこに含まれる河川工学上の因子をどのように技術体系としてまとめるか、を論じてきた。この結論を表7に一覧表の形で示す。ここまで述べてきたことの取り纏めに加えて、人間活動が自然や生態系に与える影響は非線形なものである、ことを認識する必要があることを強調しておきたい。基本的に非線形な系であっても、外力が小さな間はその応答は線形で近似することが出来る。人間活動の程度が弱い間はこうした関係にあった訳で、現象は可逆的であり、人間活動を取り除けば厳密に元の状態に復することが可能であった。しかし、現代の人間活動は大変大きな水準に達しており、この線形応答の臨界値を超えていると考えざるを得ない。ということは、人間活動の影響は非可逆的に自然や生態系に残ることになり、また、どのような影響であるかについては線形的な外挿では予測できず、新しい現象が出現することを意味している。水工学研究者は従来の課題を解明すると共に、新しい現象を発見する責任も負っていると考えられる。

表7. 本論文のまとめ：環境概念を軸とする河川工学

課 題	技術的課題	新しい河川法による河川整備計画の実行 河川環境の自然回復への社会的要求
	体系化すべき思想・概念	環境倫理 河川環境概念
環 境 河 川 工 学	本論文で紹介した基本概念 —技術に思想を —史的考察・分析を	水の場合 潜在自然概念 河川の三大自然特性 河川地形、自然景観 自然復元の三水準 環境倫理学 生物多様性
	本論文で紹介した技術体系	河床生態保全洪水 河床形態の不確定性 生息域評価法 微視的生息域評価法（適性曲線） 自然復元と不確定性 河川環境の経済評価

表7の河川の三大自然特性に付随して記されている「自然景観」については少し説明を追加しておきたい。現在、工学の中で用いられている「景観工学」は、自然が創り上げている「自然景観」の上に、人間活動としての「造形・意匠」が加わり、その両者の総和として創り上げられた景観を研究対象としている。本論文では自然特性の中の景観的特性を対象としているので、特に「自然」という用語を付加した。生態学方面では生息域の大局的な分類に「Landscape」という用語が用いられている。これは生息域の地形的・自然的特性を表すものとして用いられているので、「自然景観」と対応させるのが妥当であると考えられる。

辻本(1998)は水系一貫の土砂収支を対象に議論を展開するときに、これと密接に関係する概念を用いている。彼は土砂の移動を中心に据えて河相を説き、その中で発揮される治水・利水・親水・河川環境の4機能とを合わせ統合するものとして、「河川景観」で括っている。これは水系の連続性、河川形態の多様性が生態系を支えていることを表現し、且つ又人間活動の影響がこの中の因子に作用して全体が変化して行くことも論ずることが出来る優れた概念提起である。また、存在と作用とを分離しないで把握していることも実態に即しているといえる。辻本は「河川景観」という用語を生態学で用いられている「Landscape」の概念と同じとしているが、筆者には Landscape より広い適用範囲を持つ優れた用語と考えられる。学際的研究においては用語を十分に吟味して用いることが大切であるので、細かな話しではあるが、具体的な一つの例とし

て取り上げた。

本論文で述べてきた個々の部分の幾つかは、既に論文・論説として公表されている。主要なものについては参考文献に挙げた通りである。従来発表した内容は、細部についてはここに繰り返さなかったので、これらを参照して筆者の意のあるところを汲み取って欲しい。しかし、環境河川工学として一体感を持つものとしては、今回初めて取りまとめられた。

5. あとがきに代えて

「はじめに」において触れたように、特別講演の機会を活用して水理委員会活動の新しい方向について述べてみたい。委員、幹事、あるいは部会の会員を通して、今日の参加者も意見を寄せて頂くことを期待している。水理講演会は 42 回を数えて水工学論文集へと発展し、英文論文集・水理公式集の発行と並んで、最近では水シンポジウム、河川技術支援シンポジウムも盛会裡に行われている。一方、地球環境問題への水工学関係者の関与は水文分野に限られ勝ちであるし、応用生態工学研究会の発足など周辺分野の活動は活発である。水理委員会も現状に満足すること無く、活動を活性化して行くことに努力をすべき段階であると感じている。

昨年河川部会を発足させ、シンポジウムの名前にも「河川技術支援シンポジウム」を加えて、実務の技術者が参加する仕組みと雰囲気を高めて来ている。これを更に進めて、水理委員会の部会の改組拡充案を以下に示す。この改組・拡充案の本旨は、活動に関しては拡充そのものである。水理委員会の活動に興味を持ち、参画して貰える会員を新しく増やし、新しい活動はこうした層により支えてもらい、従来の水理講演会の活動等は影響を受けること無く継続することを基本としている。

改組の趣旨は、水理委員会活動への実務技術者の関心を高めるため、問題解決型の姿勢を打ち出すこと、国際活動を明示的に示すこと、さらに、技術基準に取り組む姿勢を明らかにすることである。河川技術部会では、水文部会と河川部会の区別なく課題に応じて適切な小委員会を設置する。また、国際部会、技術基準部会は現存する小委員会の位置付けを明確にすると共に、将来こうした方面での活動を活発化する基礎を与えるものである。このように新しい部会は、何も無いところに全く新しい活動を起こすものではなく、既に何らかの活動を始めているものを補強すると共に、新しい活動は芽を出しやすくし、将来的には大きくまとめられる方向を打ち出そうというものである。

表 8. 水理委員会の改組・拡充と新しい部会構成案

現在と変わらない部分	水理委員会 水理委員会幹事会 水工学論文集編集小委員会 基礎水理部会 環境水理部会 水文部会 河川部会 河川懇談会	水理講演会、水シンポジウム等 水工学論文集の編集と発行 基礎的な研究の進展 基礎的な研究の進展 基礎的な研究の進展 河川技術支援シンポジウム 共同研究の実施は技術開発部会が行う
新しい部会等 (改組・拡充する部分)	国際部会 英文論文集小委員会 アジアの河川研究小委員会 北京水利委員会交流特別小委員会 地球環境小委員会	現存 新設希望あり 現存 現存

実務畑の技術者・研究者 の参加を特に殖やす	河川技術部会 (当面河川技術を主対象とする。小委員 会の例。) 計画降雨 流出解析 潜在自然型河道計画 水理・河川構造物の信頼性設計 河岸侵食 ダム堆砂 流域管理と GIS その他河川懇談会共同研究課題が例 となる 技術基準部会 (技術開発が一段落したら取りまとめる) (小委員会の例) 水理公式集小委員会 ISO 特別小委員会 新設・廃止は適宜に行う	(小委員会は、3 年間活動したら 原則交代する。) 現存 現在委員を送っている
--------------------------	--	---

この案は筆者の私案であり、また、事前に他の人々との意見交換を行った案ではない。従って、具体的な形を取るには十分な時間が必要になると思われ、今後の議論を待ちたい。その議論を通して、水理委員会の在り方に対する活発な意見交換が起こることを期待して、問題提起を行うものである。

参考文献

- Bovee, K. D. (1982): A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology, Instream flow info. Paper, 12, U. S. Fish Wildlife Serv., FWS/OBS-82/26.
- Stalnaker, C., Lamb, B., Henriksen, J., Bovee, K., and Bartholow, J. (1995): The instream flow incremental methodology; A primer for IFIM. *Biological Report* 29, National Biological Service. U.S. Department of the Interior. 45pp.
- Tamai, N., Kim, H.R., and Kawahara, Y. (1996a): Application of the instream incremental methodology to conservation flow for freshwater fishes in Japan., *Proc. 2nd Int. Symp. on Habitat Hydraulics*, IAHR, pp.B239-B250.
- Tamai, N., Rahman, M.M., and Matsuzaki, H. (1996b): River bed level variation in Kinu river and its effect on safety margin, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 40, 219-223.
- Tamai, N., Emura, Y. and Matsuzaki, H. (1997): A network operation of reservoirs for enhancement of the ecological flushing discharge, *Proc. of the 27th Congress of IAHR*, theme D, pp.507-512.
- 加藤尚武 (1994a): 環境倫理学のすすめ (第6刷)、丸善ライブラリー、pp.1-12.
- 加藤尚武 (1994b): 環境倫理学のすすめ (第6刷)、丸善ライブラリー、pp.103-104.
- 木下良作(1957): 河床における砂礫堆の形成について—蛇行の実態の一観察—、土木学会論文集、第42号、pp.1-21.
- 自然復元河川工学研究会/翻訳・編集(1998): 自然の復元と再生のための河川工学、P.Klingeman 原著、玉井 信行監修、リバーフロント整備センター、p.24.
- 谷田一三(1997): 河川の生息場所と底生動物群集、水工学シリーズ、97-A-6、土木学会水理委員会・海岸工

学委員会、15p.

玉井信行(1996)：河川技術は環境倫理学にどう答えるか、電力土木、電力土木技術協会、pp.3-10.

玉井信行(1998a)：河川の自然特性と潜在自然型河川改修の基礎体系について、河川の自然復元に関する国際シンポジウム論文集、リバーフロント整備センター、pp.77-85（英文版も pp.1-10 に同時掲載）.

玉井信行(1998b)：河川法改正に見る「環境」問題―「水の間」を環境概念の核心に据えた河川計画の提唱、河川レビュー、春季号、No.101、pp.30-38.

玉井信行・松崎浩憲・白川直樹(1997)：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、第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、土木学会水理委員会、Vol.3, pp.231-236.

玉井信行、松崎浩憲、白川直樹（1998）：自然復元を目指す河川計画における費用・便益分析について、水工学論文集、第42巻、pp.271-276.

辻本哲郎(1997)：水系一貫土砂管理・制御と河川水理学の課題、第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、土木学会水理委員会、Vol.3, pp.127-134.

辻本哲郎(1998)：河川景観の変質とその潜在自然への回復、第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、土木学会水理委員会、Vol.4, pp.147-152.

内水面漁場環境利用実態調査検討協議会（1987）：さかなのすみよい川への設計指針(案)、内水面漁場環境利用実態調査報告書、全国内水面漁業協同組合連合会。

中村良夫・北村眞一(1988)：河川景観の研究および設計、土木学会論文集、第399号/II-10, pp.13-26.

山本晃一(1994a)：沖積河川学、山海堂、pp.11-16.

山本晃一(1994b)：沖積河川学、山海堂、p.6.