

研究展望

環境に関する水理学の研究展望

PERSPECTIVE OF HYDRAULIC RESEARCH ON ENVIRONMENT

楠田哲也¹

Tetsuya KUSUDA

¹ 九州大学大学院工学研究院環境都市部門 (〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
kusuda@civil.kyushu-u.ac.jp

Key Words : hydraulics, environmental research, perspective

水理学は社会的課題に対応して研究領域を拡大し続けている。発電水力、治水・治山、公害対策、環境、特に生物に関する環境へと展開してきた。その研究成果は、社会に大きく寄与した。今後は持続型社会への対応が課題になるであろう。対象領域の拡大につれ、水理学のもつ論理性の範疇での扱いでは、生物環境や持続型社会へ適用しても社会の要請に応えるには限界があり、環境学のコンセプトと如何に整合させるかが本質的課題になる。さらに、国内の課題だけでなく国際的課題への対応も求められている。

1. はじめに

水理学は「水の理（ことわり）に関する学問」である。歴史的には、経験工学として発展し種々の経験や理論的研究の成果を導入しながら体系化され、1900 年代に入って流体力学と結びついて理論的に構成された学問である。したがって、水理学は「水の挙動を理論的に明らかにし、その「理」を土木工学として利用することができるようとする学問」と定義してきた。水理学は土木工学が関わる社会基盤施設建設のための河川工学、発電水力、ダム工学、海岸工学、港湾工学、上下水道工学・廃棄物工学（衛生工学）、干拓・灌漑工学、水資源工学や地下水学の基礎となっている。さらに、土木工学の対象が水質工学、環境保全・環境創造工学、応用生態工学、景観工学など自然環境に関わる分野に新たに拡大するにつれ水理学もこれらの分野へ適用可能なように研究対象を広げてきた。そのため、水理学の研究対象領域は土木工学に対する社会の要求に応じるべく拡大し続けている。

水理学が「水の理」の研究分野から広く応用分野へと展開するとき、特に環境問題へと拡大するとき、学問としてのコンセプトが従前と同じままでは社会に受容されなくなることが起こりえる。ここでは、水理学の環境に関する主要対象分野の展開過程と現状をとりまとめ、環境工学と対比しつつ今後の研究展望とあり方について述べる。

2. 水理学の体系と史的変遷

Leonardo da Vinci (1452–1519) が水の連続式の概念を示したことにより流体力学の発展が始まった。Daniel Bernoulli がベルヌーイの定理の形を何とか作り上げたのが 1738 年、友人の Euler がオイラーの式を完全に確立したのが 1752 年、1822 年に Navier が案出し、さらに Stokes が磨きをかけてナビエ・ストークス式を樹立したのが 1845 年、流体力学発展の駆動力となる飛行機をライト兄弟が初めて実現させたのが 1903 年、Prandtl が翼理論に関わる境界層理論を示したのが 1904 年、これを用いて Blasius が境界層の問題を実際に解いたのが 1908 年、Karman がカルマン渦を理論的に解いたのは 1911 年であった。流体力学はこの後、飛行機の実用化に歩調を合わせて大きく発展した。また、Taylor が環境問題への関心なしに乱流拡散の研究成果を出し始めたのが 1921 年、Prandtl が乱流速度と乱れスケールの 2 パラメータ乱流モデルを提案したのが 1940 年代であった。環境に関わる水理学にとっての基礎現象の解明がこのとき既に着手されていた。

1930 年代は経験式をとりまとめるにより水理学が体系化され始めた時代である。1942 年発行の本間仁の高等水理学¹⁾では、「水理学とは必要な程度の流体力学を取り入れた実用的な学問」とし、第一部として水理学、第二部として流体力学が別々に記述されている。この第一部水理学に静水力学、基本定理、管路、開水路、水撃作用、地下水が含まれ、第二部流体力学に完全流体、粘性流体、波動、乱流が含まれている。この

ことから、経験工学としての水理学と理論の流体力学の統合化が模索されていたことが解る。第2次世界大戦の敗戦によりわが国の航空工学科が連合軍 GHQ の指示により廃止されたために多くの気体力学や航空力学の研究者、それを目指した学徒が土木工学科に転籍したことは、水理学の流体力学的体系化を促すことになった。その成果として、偏微分方程式論からの特性曲線法の導入、跳水・洪水波の数理的記述などがある。

しかし、当の流体力学は、1970年代後半に至ると種々の現象を説明するために解明が必要な未知の現象はなく、既存の知識の組み合わせで説明できるとして、多くの理学的研究者にとって研究対象でなくなり希薄流体など新規性のある現象を解明する分野へと変っていった。このような流れのなかで、大学の理学系学部から流体力学研究室が消えていった。

一方、水理学は社会の要請により現象の定量的説明や種々の応用の途を開拓する必要があったため、流体力学的手法を取り入れつつ発展し続けた。社会の要請の変化に応じて水理学が重点を置いてきた研究のわが国での足跡は図-1 のようにまとめられる。図示したように、およそ 25 年単位で研究の主題が移っている。なお、図中の時間軸は対象とする水理現象を支配するおよそその時間スケールを示している。研究の発展過程は各國の状況により異なるが、産業基盤の整備、生活環境の改善のように国民所得の増加に応じて順次移り変わる部分と持続型社会の建設のために時を同じくして各国に課せられるものがあり、発展途上国では後発の利益を享受しつつも現在変化が急激に起こっている。

わが国では 1930 年代から 1965 年頃まで、国力の充実のためのエネルギー供給源として発電水力が重視され、上椎葉ダム（1955）、佐久間ダム（1956）、黒部第 4 ダム（1963）などの大型ダムが建設された。この当時は、水撃作用、調圧水槽、水力機械などが主要研究事項であった。

1945 年頃から 1970 年にかけて治水・治山に重心が移った。これは第2次世界大戦により国土が疲弊していたところに、枕崎台風（1945）、カスリーン台風（1947）、ジェーン台風（1950）のような大型台風がわが国を直撃し、巨大な被害をもたらしたことが引き金になっている。治山・治水の重要さはわが国の社会基盤保全として絶えることなく今も変わらない。安全率を高めるほど経費が増加するので、現在では社会的なソフト手法を導入した防災学、減災学に比重を移しつつ発展している。第2次世界大戦後の経済発展期は、この治水・治山に欠かせない土砂輸送や移動床の研究が流体力学的手法により花開いた時代であった。

1965 年頃から各地で顕在化してきた公害問題を背景に 1975 年頃にかけて、公害対応研究が盛んになった。この時点では化学や生物学的扱いまでには入らず物理的扱いの範疇にあったが、煙突からの煙の拡散動態と着地点濃度の時空間分布や水域における排水の分散過程の定式化、平均濃度を求めるためのサンプリング時間長さ等が検討され、汚染物の濃度規制のために学問的根拠を与えた。また、火力・原子力発電所からの温排水の水域における影響が検討され、水域生物に与える影響を抑えるための排水手法や最大許容温度差など

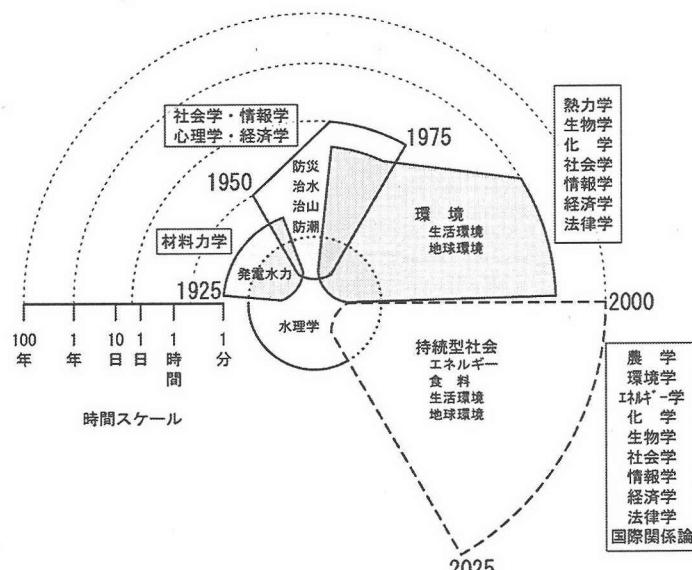


図-1 水理学の史的展開と将来

も決定された。その他、現在も続いている排水の希釈放流（ブルーム、サーマル、アウトフォール）手法、塩水楔の浸入特性の解明なども米国の影響を受けて研究された。コンピュータが発展過程にあり、記憶容量、計算速度に限界があったため、簡単で容易に推定できる手法の開発が公害対策用に求められていた。そのため、非線形現象として基礎方程式を正確に解くにはまだ至らなかった。

公害対策のための水理学としての研究が終焉をほぼ迎えた 1970 年前後から、しばらくの間は治水や公害対策のような緊急を要する社会的課題は生まれなかつた。しかし、公害対策のように負をゼロに戻すものではなく、生活環境の改善や創造というゼロを正に転ずる方策が社会の経済余剰をもとに実現可能になり、環境対応の水理学が大きく育つ時代となつた。このような動きはわが国よりは古く米国で始まり、MIT の Ippen に続く Harleman らが環境に関わる水理学研究²⁾をこの頃推し進めた。日野³⁾が Eco-hydraulics を提唱したのもこの時代である。時代の要請を背景に、1970 年頃から熱輸送・熱収支や温度差による密度成層、貯水池における濁水を回避するための選択取水・選択放流などが水質水理学としての課題となり、水流にともなう物質輸送、都市雨水排除の水理学なども研究され始めた。さらに、植生と流れや波の相互関係の現象記述も開始され環境分野への展開が始まった。しかし、小倉義光⁴⁾による穂波ウエーブの研究と植生と流れの相互作用の研究の流れは同じ線上にない。同時に、移動床の水理、海岸過程など継続して精緻化が図られた。検討対象とする時空間スケールも徐々に拡大し、湖や内湾の内部波を対象とし、それにともなう物質輸送も検討されるなど領域は広がり続け、現在に至っている。

計測装置の進歩が現象解析に及ぼす効果は劇的であり、LDV のような非接触型センサーを有する機器による影響は大きい。科学は関連の技術が進歩し、実験装置の材料が改善され、分解能や精度の高い観測結果が出始めると、そのフィードバックにより急激に進歩するときがある。このような進歩はおよそ 30 年周期で現れる。環境に関わる水理学は現在このような周辺学術技術の進歩により大きく展開している。

本稿では述べないが、水文学においても類似の展開があり、確率統計的な取り扱いから高精度でかつ詳細な観測データをもとにした物理的水文学へ移行し、さらに水利用と関係づけられた社会水文学へと展開している。

3. 環境に関わる水理学

水理学は対象分野を社会的要請に応じて発電水力、治水・治山、生活環境、地域環境と拡大してきた。これらの領域において社会的に求められる目的を達成するには、水理学に加えてより広範な学問・技術を必要とした。そして目標の社会的レベルが高まるほど、関連する学問・技術分野が広がってきた。ただ、発電水力、治水は関連学問が相対的に少なく自己完結的であるためコンセプトは単純で容易に目標を達成できた。つまり、これらは作用・応答関係が明確で論理的な関係性があるため演繹的な発想で対処できた。図-2 の最上部にこの関係を示す。しかし、図-2 の下部に示すように生活環境、地域環境、地球環境に関わる環境研究では、基礎学問として、生物学、化学、物理学、数学、社会学、経済学、法学、教育学、心理学、応用学問として、農学、土木工学、建築学、機械工学、電気工学、物質

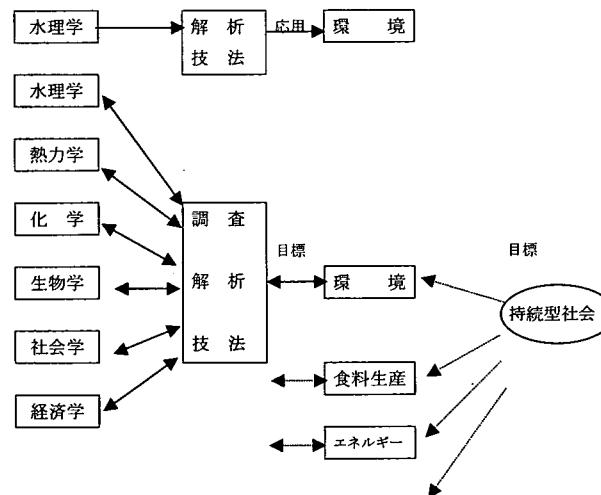


図-2 水理学の展開に伴う領域の拡大

科学、情報学、エネルギー工学、計算工学、景観・デザインなどを必要とし、水理学的検討だけでは目標を達成できず他分野の学問の助けを必要とすることが多い。これは環境の多要素性故である。また、水理学では現象解明や技術開発を研究目標としそるが、環境研究は環境を良くすることを目的とするので、学理をブラックボックスに留めても技術的に何らかの結論を出し実施することがある。この方法論は水理学の論理性とは根本的に異なる。つまり、水理学と環境研究とはコンセプトが異なる。そのため、水理学の研究対象が環境まで広がり、環境を良くすることを研究目的として詰った途端、コンセプトの変更を求められることになる。水理学の研究者は基礎的研究を行うことだけで十分で、環境改善の実務まで担当することはないという考え方もあるが、正統派の環境研究は環境研究が栄えて環境が滅ぶことを是認しない。

環境に関わる事象、特に生物を中心とする事象は相互作用が広範囲にわたり気象等の外的影響も強く受けている。このような状況のもとで、環境に人の手を加えようとするとき、作用・応答関係が事前にかなりの精度で推定できることはほとんどない。そのために人の行為後にもモニタリングし、常に行方対象に計画レベルを含めフィードバックし続け調整を続ける管理手法である適応的管理（adaptive management）が常識となっている。この手法は現行の環境影響評価においても実施されている。

環境に関わる水理学的研究には、水理学の範疇にある事象を解析・整理すること、複数の学問分野を背景に新たな発想を環境問題に適用できるように水理学を拡大するもの、および水理技術を環境問題に利用できるようにするものがある。以下この区分に従い課題

を整理し展望を述べる。

4. 環境に関わる水理学の研究展望

(1) 現在の問題点の整理

環境に関わる課題のうち水理学分野の代表的事項を水の存在状態とその場に求められる機能（プロセス）との関係として表-1に示す。表中の括弧内に示すように問題点は、現象の正確な定量的表現、複合系としての表現、時間スケールの長い現象の記述方法、空間スケールが広いときの記述方法などに分けられる。

(2) 環境に関わる水理学の課題と展望

a) 水理学が要の課題

1) 水域の分散・拡散現象

分散・拡散現象に関わる問題は物理的な水理学本来の課題である。しかし、応用の途が広く環境問題にとつては重要なユニットプロセスの一つである。単純な境界条件下での流れにおける乱流拡散や分子拡散の解析結果は1921年Taylor⁵⁾により初めて発表された。現在では、分散・拡散現象に関わる基本的考え方ほぼ明らかにされている。管路や小さな開水路での物質輸送量は、摩擦速度、水深あるいは川幅の関数としてほぼ表現可能である^{6),7),8)}が、組織渦のある沿岸域や幅広の河川、および流れのある水域での分散・拡散現象を精度良く記述できるまでには至っていない⁹⁾。ただ、この記述の精度には海域における潮目の存在など数値計算の境界条件に支配されている部分もある。東京湾、大阪湾、瀬戸内海や有明海における密度躍層のもとでの組織的大規模流動による物質輸送の正確な表現と境界条件を考慮した物質輸送の定量的表現ができれば、

表-1 水の存在状態と機能と環境に関わる水理学の課題

機能	単相・単層・特性一様		複相			複層	
	境界条件		乱流	混相	界面		
	形状	柔軟・移動					
流動・流下	複雑な形状近傍の流れ(定量的表現)	水草・海草を伴う流れ、移動床上の流れ、生物にとっての流れ(複合系)	形状抵抗、海水交換(持続性・自然エネルギー利用)	気泡混入流(複合系)	界面近傍の乱れ構造	上下層混合	
物質輸送			組織渦による輸送(実時間表現)	土砂輸送・高濁度流(複合系) 洗掘・堆積・植生を伴う流水(長時間スケール) 気泡混入堆積物(定量的表現)	大気-水間輸送 水-底床間輸送 水-植生間輸送(広大空間スケール)	内部波(長時間スケール) 塩水楔による上流への輸送(定量的表現)	
熱輸送					大気-水-底床系	上下層輸送	
反応随伴輸送			乱流下での反応	微生物反応、凝集	吸着・反応		

その効用は大きい。

また、環境影響評価や環境水質基準のために年平均値や日平均値を求めるとき平均値を求ることで支障はないが、生物にとって存在位置での物質輸送量よりはゆらぎの中での瞬間濃度とその継続時間が生死を決定することがある。つまり、生物生存にとっての影響因子である、分散・拡散現象は時間スケールのかなり短いものが効くことになる。したがって、瞬間濃度とその継続時間を確率で与えることが命題になる。

物質が排出された後の輸送過程の解析ができるようになると、逆問題として下流側地点における環境条件に適合するように排出する方法が求められるようになる。たとえば、風や流れのある海岸・湖岸や蛇行する河岸から排出された化学物質の特定の生物生息空間における瞬間濃度とその継続時間の関係を確率的に表現し生物リスクとして表示できることである。この点に関する蛇行河川において排水を放流する際の横断方向分散の最適化を図った例が¹⁰⁾ある。ただ、分散過程の逆問題は濃度が均一化する方向にあるので精度の低下は否めない。

分散物質が化学物質でなく生物のこともある。河口域や沿岸域において、底生動物である甲殻類には巣穴を作るものもあれば礫の空間をすみかとするものもある。これらの甲殻類の生活史は、孵化後ゾエア幼生となり、さらに脱皮後メガローパ幼生となり、その後成体の形態を取る。汽水域に生息するものは、この成長段階において塩分に対する選好性が変化することがある。そのような場合、水底面での塩分の鉛直方向変化を高い空間分解能で予測し、輸送を推定し制御できるようになれば保全が容易になる。鉛直方向の拡散は勾配型リチャードソン数の関数として表現されているが、現在の解析精度^{11),12),13)}では選好性を加味した生物保全にはまだ不十分である。

関連事項として、内湾の海水交換の促進は湾内に堆積しやすい物質や溶解性物質の急速な排出にとって効果が高い¹⁴⁾。分散とは逆の事象の微生物の集積については後述する。

2) 土砂輸送

流砂や漂砂による土砂輸送は移動床の水理学や海岸過程として、河道、沿岸、港湾の管理や治山・治水に欠かせない基礎過程である。陸域から海への土砂輸送は沿岸域環境保持の基礎となっている。図-3に示すように、土砂輸送は地形、流動・波動、堆積土砂、植生・構造物の影響を受ける。基礎過程として、限界掃流力^{15),16)}や掃流砂機構¹⁷⁾に加えて、砂漣、砂堆や反砂堆、および交互砂州など流況と河床形態との関係に関わる定性検討¹⁸⁾はほぼ終了している。しかし、河川や沿岸

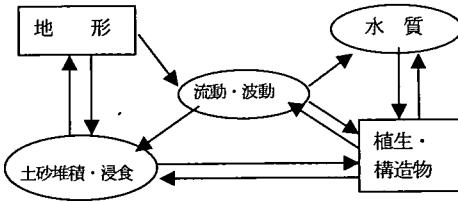


図-3 土砂輸送・地形と植生の関係

域の堆積量や洗掘量の定量的推定と空間分布予測、長期に渡る移動床や沿岸の変形推定¹⁹⁾、ダムからの大量放流による「洪水もどき」による河岸浸食とそれによる土砂堆積の予測などには依然として精度上の課題²⁰⁾を有している。

Kline²¹⁾ らによりバースティング現象が見いだされて以来、乱れの時空間構造に関する研究が精力的に進められ、現在では乱れの組織乱流構造がほぼ解明され、自由水面近傍と底床近傍の現象に大別されている。極めて短い時間スケールの事象の連続により乱れが生み出されていることが知られているが、この現象と土砂輸送が同じ時間スケールで結合されるに至っていない^{22),23)}。実用上、土砂輸送は時間平均された流速分布のもとでの定式化に留まっている。特に移動しやすい柔らかい粘着性堆積物の場合、急激に河床構造が変化するので、この結合により予測精度が向上すると思われる。

空間的に見て推定が難しいのは、河口域における堆積、沿岸の漂砂、ダムの排砂、ダム直下のアーマリングの進んだところでの洪水時の土砂輸送、小型ダム撤去時の下流域での土砂の堆積を生物にインパクトの少ないものとする手法などである。全体的に見て、平衡から非平衡へと議論を展開させ、さらに手法として利用できるほどに精度の高い表現方法の出現が待たれる。

生物保全を対象にする際には、従前の水理学が対象としていた土砂輸送・堆積量など量的な表現に加えて、生物に必要な機能の表現が求められる。たとえば、どこかに堆積している混合粒径粒子群が洪水や時化²⁴⁾により掃流され下流側に堆積するときの堆積量と粒度の空間分布、および堆積時の空隙構造と粒度分布・堆積量の関係である。「この堆積時の空隙の構造、およびその後の変化はほとんど検討されていない。河川において、ヤマメやイワナは大きな石だけの所では卵を産めず、大きな石の間に小さな砂がかんでいる必要があるし、アユの摂餌には拳大の礫が日射を受けながら適当な間隔で並んでいる必要がある（漁業組合が人力で整備しているところがある）。また、ネットを張るために浮き石が必要なカワゲラ類のような造網型水生昆虫もある。川岸の植物は河道内への侵入に際して細か目の砂が必要なものもある。海岸においては、カブトガニ

は産卵時には数 mm の砂が必要であり、幼生になった直後にはシルト質の泥土が餌場として欠かせない²⁵⁾。また、アカウミガメには冠水から逃れられる高いところにある砂地が産卵のために必要である²⁶⁾。生物生息と生息空間および流況の関係は関連要因が多く複雑である。河川・海岸の改修前後の比較から流況と生物生息空間の関係性²⁷⁾を明らかにし、生物生息空間としての必要条件を把握するのも一法である。

洪水により河道の変化が生じたり時化により海浜に変化が生じた際、生物生息空間の自己修復ができるようになると、特に複数の生物いずれもがなんとか堪えられる条件を自己修復的に作り出す手法の開発が望まれる。その際同じ位置を同じ条件にいつも保つ必要はなく、生物の移動可能範囲で類似空間が動的に確保されればよい。なお、砂と凝集性を示すシルト・粘土系のものとでは輸送現象を支配する因子が異なる²⁸⁾。さらに、土砂輸送の制御が可能になると自然河岸²⁹⁾や海岸域の保全手法を明確に示しうるようになる。

他に、都市の雨水管・污水管内における懸濁物質の堆積場所・流下量の推定、堆積防止を可能にする手法の案出はディスポーザの導入時に課題となる。

3) 高濁度流

黄河にみられる高濁度流、筑後川・六角川³⁰⁾・熊本港に見られるような高濁度水塊の移動による物質輸送や堆積現象を精度良く定量的に表現できるようになると、河道、河口、港湾の管理が計画的にできるようになる。現在のところ河岸・沿岸への堆積予測は、沈殿後の水平密度流としての移動が未解明のために精度は高くない³¹⁾。一方、熊本港に見られるように、潮汐の干満にともない高濁度水塊が移動するのを潜堤で阻止する工夫がなされ、実務上の港湾の埋没防止策はかなり進んできているものの、懸濁物質の沈降、巻上げを含む過程では、沈降速度が濃度に応じて非線形的に変化すること、流れの場での堆積物の圧密過程と表面の限界掃流力が不明であること、密度流による鉛直循環を想定しなければならないことなど課題が多い。また、水中の懸濁物質は表面に吸着性を有しているため種々の物質を吸着し、同時にバクテリアも付着している。そのため、有機塩素化合物や外因性内分泌攪乱化学物質などの化学物質の代謝に及ぼす影響は大きい。

4) 二相流

エアカーテンによる港湾における消波や汽水域における塩水楔上阻止³²⁾など、気泡流の利用が多くなってきていている。循環を強制的に作り出すことにより流れを制御しようとするものであるが、エネルギー消費に留意する必要がある。また、貯水池における藻類の増殖を防止³³⁾するために、つまり、無光層と有光層の水

塊の循環、密度成層の破壊、底層への酸素供給のために、深層曝気や浅層曝気が活用されている。密度躍層の形成のための夏季の日射によるエネルギー供給を気泡による連行エネルギーで一様化しようとするものである。理諭的予測をもう少し精度の高いものにする必要がある。

雨水管や放水路において一時に大量の水が流入すると空気が閉じこめられ、二相流となる。マンホールの蓋が数 m 瞬間に吹き飛ばされ、そこに車が落ち込む可能性があるだけでなく、汚水が市街地に溢れ衛生上の問題を引き起こすことにもなる。この研究^{34),35)}はかなり進められているが、水理学的な設計条件の確立までには至っておらず、マンホールの蓋の飛散防止構造のみが完成している。

米国³⁶⁾に引き続き、沿岸域における油分の分散輸送は 1997 年のナホトカ号の座礁を契機に、わが国では文部省の大型プロジェクト等によりかなり検討されている。しかし、風向きに強く支配される現象なので計算手法の提供にとどまっている。対策としては化学薬品を用いた無害化が工夫されている。油分の分散輸送による環境影響の水理学的検討はあまり進んでおらず、干潟堆積物中への浸透が微生物に及ぼす影響を検討したもの³⁷⁾がある程度である。

5) 密度流

汽水湖における塩水の侵入^{38),39),40)}は、貧酸素水塊の形成につながる。特に潮位や気圧変動とともにうつ運動量の推定、およびその制御法は生物生息環境保全にとって要となる。理論的には解決済みの現象であるが、環境問題として、気象条件の変動を考慮しなければならず生存リスクと関連づけた検討を必要としている。また、琵琶湖北湖の内部セイシュにより南湖に栄養塩が供給され水の華が発生することで解るよう、内部流動も重要な輸送因子である。

6) 気泡混入粒子層の挙動

わが国では 10% を越えて気泡が混入している堆積泥は見られないが比較的気温の低いところ、たとえばバルト海では珍しい存在ではない。気泡含有率は、わが国では数%が最大と思われるが、このような圧縮性のある堆積物が水流に与える影響、および堆積物の隙間水と上層水との交換による水質に与える影響についての検討はこれからの課題である。

7) 寒冷地の水理学

寒冷地では氷自身や氷と水の混相流についての知識が求められる。わが国でも研究されてはいるが、北国に限られている。河川や港湾域の結氷過程、解氷形態になった際の流下・流動過程、およびその対策が課題⁴¹⁾である。アイスジャムの流動・抵抗特性^{42),43)}や河岸

の侵食特性や植生への影響、河川において解氷が下流からではなく相対的に温暖な中間地点あるいは上流から生じる場合に氾濫を回避する手法など課題は少なくない。また、油の寒冷海域での流出は暖かいところでは粘性が大きく異なり、自然の分解速度や環境影響の態様が異なるので注意を要する^{44),45)}。

逆に、熱帯での検討も必要である。現在はマンゴロープや珊瑚礁に関わる水理・水質特性⁴⁶⁾が調べられているが、わが国の水理学を世界標準にするためにも検討対象空間の拡大が必須である。

b) 水理学と他の分野との連携が必要な課題

1) 大気-水界面のガスフラックス

大気と水の間における物質交換の研究は、Streeter-Phelps(1925)の河川における溶存酸素濃度(再曝気)や汚水処理装置における曝気のように酸素を対象物質としていた。しかし、1970年代からは河川水からのN₂Oや地下水からの有機塩素化合物の気散に見られるよう対象物質が広がってきたこと、および、全球的なCO₂収支のmissing sink算定のために海洋における研究が相対的に増加してきている。

大気と水の間における物質交換は、界面の挙動とともに液層、気層の濃度境界層を経由する物質輸送の問題に帰着する。風波のように水が受動的に運動する場合でも、雨滴や河川のように水が能動的に運動する場合でも物理学的本質は同じである。ただ、界面の存在面積や界面近傍の濃度分布が事象により異なり対象空間の総量として把握するところに工夫がいること、常に界面に存在する界面活性剤の影響を受けること(界面活性剤の分子状の膜厚(濃度)が増加すると輸送量は減少)などのために、汎用可能な結果を得るのが困難な状況にある。特に界面活性剤は1分子膜から効果を発揮し気泡特性や水面形状を変えるので、本研究には界面活性剤の分布や消長を知らなければならず、極めて学際的である。

河川における酸素移動についての検討は数多くなされ^{47),48),49)}、わが国では村上⁵⁰⁾、栗谷ら⁵¹⁾により試みられたものが初期のものである。村上は表面渦のスケールがlarge eddyにより支配されている場合を扱い、栗谷らはsmall eddyに依存している場合を検討している。最近の研究によると表面渦のスケールがlarge eddyにより支配されているときには液膜係数(気体輸送係数)が乱流レイノルズ数の-1/2乗に、small eddyに依存しているときには-1/4乗に比例することが知られている⁵²⁾。また、大気が流動する際の水面直上の乱れの計測は福津ら⁵³⁾によっても試みられている。

実務上必要なのは、ある時間間隔におけるフラックスである。実際の現象はより短い時間スケールと小さ

い空間スケールにて生じるものである反面、大気中では容易に混合されるために、大きな時空間におけるフラックスを求めるための積分操作を如何に行うかが実用上の課題となっている。

これらの点を精度よく表現できるようになると、大気-水間や汚水処理の曝気槽における酸素移動に関わる液膜係数⁵⁴⁾、碎波・噴水・降雨等における酸素供給効果、その他種々の気体の相間移動を正しく表せることになる。河川における再曝気率の推定精度はあまり良くない⁵⁵⁾。水の落下による酸素のとけ込みの問題として、河道に設置された堰からの落水による酸素供給⁵⁶⁾や雨滴および雨滴が水面に到達する際の酸素供給能なども検討されているが、精度の高い定式化に至っていない。

さらに、極めて浅い水域の水際線に向かって緩やかに風が吹くとき、岸辺近傍の水の循環形態も界面活性物質集積の影響を受け、波がある場合と水の循環形態は異なる。この現象についてはまだ検討されていない。

2) 水-底床間のフラックス

水-底床間の物質フラックスは、上層水の流速、底面形状、粒度、水温、間隙水濃度のような物理的要素に支配されるだけでなく、化学的な環境条件、たとえば酸化還元電位、共存物質、化合物の形態にも支配される。これらの検討はリンや溶存酸素についてばかりなく詳しく述べられているが、他の酸化還元に関わる鉄、マンガンなどの物質、微生物反応に支配される有機物質や硝酸イオン等の物質については定性的域を越えていない^{57),58)}。これは、堆積物の微生物学的、化学的特性が一様でないこと、現象に関わる要因が数多くあり反応系が複雑であることにもよるが、解決が求められている課題である。水面から大気への気散によるフラックスと同様、点データを面のデータとし、さらにある程度の時間積分値を求めるための手法が開発されると物質収支が取りやすくなる。

流速が限界掃流力を越えると堆積物が巻き上げられ、堆積物による反応、特に還元が起こりやすい。利根川⁵⁹⁾、荒川⁶⁰⁾、長良川などにおける観測例はあるが、より多くの現地観測によるデータの蓄積が望まれる。

3) 植生と流れ・波動

植生は柔軟性があり時間とともに変化する境界である。このような境界における流体抵抗と流速の関係^{61),62)}、植生内外の懸濁物質の沈積粒径や沈積速度の変化⁶³⁾、微小生物による物質代謝過程と速度の変化、消波機能⁶⁴⁾などが既に検討されている。また、複断面河川の植生による流動阻害率も実験されている。しかし、普遍性のある応用可能な定量的表現はこれからのが課題である。また、出水による河道形態や蛇行度の

変化が植生（沈水植物、抽水植物、陸上植物）に及ぼす影響^{65),66),67)}、逆に植生が流況に及ぼす影響の連鎖関係性を出水⁶⁸⁾や植物の生育条件と関連づけて長期間にわたる状況を推定できるようになると河岸植生の管理が計画レベルで可能となる。沿岸域、親水性護岸、潜水性港湾などにおいても同様である^{69),70)}。

物質代謝から見ると、基質供給律速の場合に水中の植生周りの乱れが大きいほど成長が速くなることはしなやかにうねることにより乱れスケールが増長されること⁷¹⁾からも容易に推察される。また、成長と剥離が相反するため最大存在量が規定されることになる。また、鮎の餌の確保、河川の流体抵抗の変化推定などにも関係している。植生と河川の熱環境の関係、さらにこの関係が生物に及ぼす影響⁷²⁾について検討が始まっている。

4) 魚道の水理学

現行の河川横断施設の2/3は遡上不可能か困難なものになっている⁷³⁾。魚道には、デニール式魚道、ロック式魚道、プール式魚道、水路式魚道をはじめ、多数のものが工夫されており^{74),75)}、年々魚類が遡上しやすくなっている。具体的な水理学的設計法もまとめられている⁷⁶⁾。複数の魚類や甲殻類の挙動特性に応じた魚道構造および材質について遡上効率をさらに向上させる手法の開発が期待されている。現在、遡上魚数の多寡で魚道の機能が評価されているが、評価手法としてこの手法は不十分である。個体群動態に基づいて河川域における魚の全体的・季節的な分布、移動や年齢構成・性比などをもとに検討できる手法⁷⁷⁾が確立されると評価をしやすくなる。なお、ECにおいて魚道の Directive が施行されている⁷⁸⁾。

また、都市河川の魚道で落水で発生する音に対し苦情が出ている例があり、発生音に対する配慮も必要となっている。

5) 生物生息の水理学

運動機能を有しない浮遊プランクトンの増殖は流れ場における滞留時間に支配される。このことは水辺の停滞水域が増殖の場になっていることから解る。ある水域における滞留可能時間の分布が推定できるようになると、湖岸の発達した湖沼における植物プランクトンの個体の変動を予測することができるようになる。また、運動する柔軟な生物、たとえば貝の吹管やイトゴカイの周りの流れ、および、これらの流れと酸素やデトリタス供給との関係は生物保全上欠かせないが、ほとんど検討されていない。水質浄化護岸における生物生息のための水理条件の検討⁷⁹⁾もこれからの課題である。

水質水理現象と生物生息の関係は数多く調べられて

いる。流域を包括的にとらえたもの⁸⁰⁾、人工海浜造成後の魚類、鳥類、水辺植生の遷移過程を検討したもの^{81),82)}などがあり、各地の状況に応じてさらにデータが蓄積されていくと思われる^{83),84)}。

水域の生物環境を評価する手続きとして River Habitat Survey (RHS) がある。これは河川の特徴と質を物理的特徴に基づいて調査・データ蓄積・解析・評価するシステムであり、1990年代に英国で考案されたものである。また、類似のものとして、Habitat Evaluation Procedure (HEP) がある。これは事業による環境インパクトを標準化し、代替案等との比較に適する手法として1980年にアメリカで開発されたものである。他に、オーストリアで開発された AUSRIVAS⁸⁵⁾などがある。PHABISYM⁸⁶⁾や IFIM⁸⁷⁾は生物にとっての流況選択用いられる。これらをもとにわが国に適した手法の開発が始まっている。河川生物環境を包括的にとらえる視点を提案しているものとして、辻本⁸⁸⁾によるものがある。より生物的な問題として、河川の流速に支配される濁りが少ないと紫外線照射量が増え、魚卵の孵化に影響する観察例⁸⁹⁾もある。

6) 反応をともなう流れ場の化学水理学

環境中では、常に溶解・析出、気散、吸着・脱着、凝集、酸化・還元、水和、イオン化、錯体形成、生物分解・合成、光合成などが生じ物質は変化している。塩分は保存物質として扱えるが、ほとんどの物質は非保存物質の扱いを必要とする。また、その反応速度は物質の濃度に依存するため、反応場への物質輸送がこの速度を支配する。したがって、物質輸送を取り扱う際には、物質保存式中にこれらの反応項を含める必要がある。なお、それぞれのプロセスは定量的にはほぼ表現されているので、定式化に困難さはない⁵⁹⁾。また、バクテリアは養分の効率的摂取のために懸濁物質に付着したり離れて浮遊したりする。これらの事象を含めることにより、環境に関わる現象をかなり扱えるようになる。

7) 微生物や微粒子の輸送現象

動物プランクトンや一部の植物プランクトンは光に反応して移動することができる。光に向かうものは走光性と呼ばれる。そのため、流体の拡散・分散だけでは説明のつかない分散を示すのが普通である。この動きは、結果的に自らの種を保つことにも寄与している。汽水域に生息する底生生物の幼生は何らかの上流への輸送機構によらなければ自らをその位置に保つことができない。この光応答により鉛直方向の位置を調整し水平移動を選択している。幼生の移動機構は生物の保全に欠かせない。

プランクトンが集積すると赤潮や水の華が生じる。

同じ個体数でも集積しないと赤潮にならない。海域における赤潮出現のデータは富栄養現象の指標ではあるが、赤潮とならなくてもかなりのプランクトン濃度になっていることがある。プランクトンが移動性を有し、かつ物理的流動と相まって集積が起こるのは、分散現象と逆である。この表現が定量的になされると水産における赤潮対策が改善されると思われる。また、プランクトンは増殖・死滅するために水塊の滞留時間が濃度を支配する関数になる。プランクトンの種によっては毒性があるために上位動物による捕食が毒物の移行をもたらすことになる。これに関しての河川での研究事例⁹⁰⁾が出始めているが、詳細はこれからの課題である。

化学物質を吸着した微粒子が内湾や河口に集積する際の空間分布と局所的濃度は魚介類の稚子魚の生育環境を支配する。特に塩分が高い水域では微粒子は凝集するので沈降特性も変化する。さらに、近年はフミン物質が高分子物質の輸送に及ぼす機能が検討され始めている。全体として、水域地形スケールの規模で物質の堆積・集積が予測でき、さらに水流の制御により堆積・集積が制御されるようになることが期待される⁹¹⁾。

8) 水質を含めた地下水の挙動

農地や林地における土壌層内の間隙水の流動と水質変化はかなり検討されている^{92),93)}。植生による吸収、化学物質の吸着や酸化還元、微生物による代謝、気散など多くのプロセスが関与するために現在多くの研究^{94),95)}がなされている。今後、化学ボテンシャルと水理学の結合によりかなり本質が明らかにされる課題が多い。また、都市域では雨水浸透時の目詰まりが、オーストラリア中東部では塩水地下水の上昇阻止が課題になっている。

地下水の流動は地下水学会を中心にかなり検討が進んでいる。流域管理の立場からは、地下水が下流水域に流出する際の量と質が必要である。全国平均で地下水による流出は20%程度と推定されているが、地域の地盤構造を考慮した流出量の推定や実測が未だ可能になっていない。

9) 生物水理学

イルカは体表面が柔軟なので剛体として仮定したときに比べかなり速く泳ぐことが可能である。また、糸状菌が固定境界に付着し流れに揺れている場合には、境界層が攪乱され流体抵抗が変化すると推察される。これらのように境界条件に関わる現象に加えて、運動機能のあるプランクトンの移動性や纖毛を有するバクテリアの運動性等個体の運動についてあまり扱われていない。現象スケールの違いによる方程式系の差違にも原因していると思われる。また、これらのモデル化も

行われていない。

生物の成育は幾つかの因子により律速されている。陸上植物の生育律速因子は、よく知られている日射量、気温、養分、水分の他に、CO₂がある。水中では、養分とCO₂の供給が水理学的に、つまり乱流輸送により規定されることになる。この種の物質移動はほとんど検討されていない。

c) 技術的課題

1) シミュレーション技術

シミュレーション技術は日進月歩であり、複雑な系のモデルや複雑な境界条件のもとでの乱流モデルを解いた例がある^{96),97)}。また、混相流を高濃度から低濃度まで連続して解けるようにする試み⁹⁸⁾や干渉の土砂輸送と水質を組み合わせたモデル^{99),100)}も開発されている。これらは極めて限られた例であるが、高濃度混相流の3次元数値解法や植生の成長を考慮した複横断面河川の出水計算など、GISを取り込んだ手法開発に対する期待は大きい。これらを汎用化し、あるいは、ユニットのソフトをシステム化して組み合わせ汎用性を増し、しかも常に改良しながら社会に供給する組織をわが国で設置し外国ソフトに対抗できるようになると、ソフト開発を支える生産基盤ができることになる。

2) 環境設計に関わる技術

環境設計に関わる技術は数多くある。ここでは代表例を示すに留める。

雨水流出：都市における内水氾濫は都市型水害として近年頻発している。河川と流域の排水計画が双方揃って無いか、あっても整合性がない、あるいは低平地にある都市の10cm単位の等高線図が公表されていないなど、検討課題が多い。都市と流域を一体として扱うための特定都市河川浸水被害対策法が2003年施行されたが、このことがその実態を物語っている。

雨水流出の計画手法として合理式¹⁰¹⁾が古くから用いられている。単純な考え方で効用の高い式であるが、限界もある。精度を高くするためには適用流域を2-3km²とするのが望ましい¹⁰²⁾とされている。水理学としては量だけでなく質に関わる流出形態もこれから課題である。この質の検討に際しては、土研式が基礎式として提案されているが、対象物質ごとに流出量を左右する蓄積量と流出形態が異なるので、さらなる検討がいる。

河川：河川水中に生息する移動性の高い生物にとって、河川は構造、水流いずれも連続していなければならない。近自然工法も河川のリーチ単位の施工では有用性が現れにくい。ワンド、瀬、淵などを組み合わせ、生息動物が妥協できる（なんとか生息できる）程度に全域を常に自動修復できる機能を持たせた河川が登場す

るのが課題である。なお、その際には、AUSRIVAS⁸⁵⁾のように河川生物環境の指標を確立させておく必要がある。さらに、山地から河川を経て沿岸に至る流砂系の管理技術を開発し、現実に適用できるようにすることも、求められている。

河口：河口では洪水を問題なく吐くために土砂を堆積させないようにしなければならない。そのため、河川砂防技術基準¹⁰³⁾では河口処理として章が設けられているが、あくまでも「処理」であり、現在改訂中のものも生物の稚子魚の生育の場としての取り扱いは十分とは言い難い。これは生物生育の場としての調査データが少ないとても原因がある。河口の土砂堆積対応に加えて、生物の生活史の中で重要な空間としての対応が必要である。

3) 環境水理 informatics

流域の環境マネジメントでは、上流から海域への水の流れに対し下流側水域が上流に求める水量、土砂量や水質の排出条件を情報の流れとして逆流させ、その情報とモデルに基づき流域単位での意志決定を可能にするための施策に対する予測とリスクを計算し意志決定者に提供することになる。残す情報は統一フォーマットに従い貯えるようとする。この過程において、GIS や RS を活用することになる。このような点を踏まえた環境水理の informatics がこれから展開するであろう¹⁰⁴⁾。

5. 将来に向けての展開

(1) 次世代水理学

水理学にとって、解明を必要とする未知の基礎現象はほとんど無いので、応用面での展開が期待されている。1997 年の河川法改定、2002 年の海岸法改定により環境に関わる水理学の研究が大きく進んだが、この環境に関わる水理学の次に登場する水理学は、持続型社会のための水理学と考えられる。ただ、法体系が整備されるのを待っての研究開始では遅すぎる。持続型社会の構築は人類がヒトに優しくする最大の課題であるので、これを目標にした水理学を一刻も早く始めることにより世界をリードすることができる。究極の持続型社会とは再生不可能エネルギーを使用せず、基本的に太陽エネルギーに依存し、かつ再生不可能資源を消費しないという条件を少なくとも満たしていかなければならぬ。我々の社会が持続型であるための十分条件とは、食糧・飲料水の安定的供給、大規模災害・戦争の回避、強力な感染症の撲滅、遺伝子の劣化回避である。ただちにこのような社会に転じることはあり得ず、徐々にその方向に向かうように社会システムの転換に努めていくこと

になる。この途中過程として、Eco-efficiency が高くなるように、そして社会リスクが低減するように技術改善を図り、さらに新規の発想による個別技術やシステム技術を開発することになる。ライフスタイルの転換、法制度の整備等により raplexity (rapid+complexity) から slowplicity (slow+simplicity) への転換が必要であるが、これらは本稿の目的を越えるのでここでは触れない。この視点にもとづくと、次世代水理学は自然エネルギー利用、リスク低減、水理学のさらなる展開に向かうと想定される。

1) 自然エネルギー利用技術

自然界から得ることができるエネルギー源には、風力、潮汐、波力¹⁰⁵⁾、潮流、温度差、水の落差、太陽光・熱、地熱などがある¹⁰⁶⁾。風力発電はオランダ、デンマークで始められ、現在では世界各地で商用化されている。潮汐発電は 1966 年にフランスのランスで実用化されて、波力発電も古くから実験されている。温度差発電は 1971 年にわが国では検討が始まり、現在佐賀大学で実験機が稼働している。僅かな水の落差を利用するマイクロ水力発電はわが国の電力会社により実用化されている。これらのように流体のエネルギーを電力に変換する方法や、圧力や運動エネルギーを電力に返還せずに直接使う方式にも工夫の余地がかなり残されている。閉鎖性水域の海水交換^{107),108)}、水中への酸素供給や深層水の上方への輸送による栄養塩供給^{109),110),111)}などがその例である。これらに加えて、広く分散するエネルギーを集約する手法がさらに検討されるようにならなければ、温暖化を避けつつエネルギー供給する道は生まれない。

ただ、これらの技術を適用する時には、周辺への波及的インパクトについて環境システム的に検討することが求められる。

2) リスク低減水理学

現象を解析したり、技術を開発しその適用先を検討するという演繹型ではなく、目的を達成するために技術やシステムを検討する帰納型の思考形態を取るとき従前とは異なる発想が生まれる可能性が高い。社会のリスクを減少させるために、水理学を如何に使えるようになるかという視点である。たとえば、近年発ガン性や外来性内分泌擾乱化学物質として問題になっているダイオキシン類は河口部に集積しやすい。これを河口部に積極的に集積させ、洪水でも流れにくく堆積させ、しかも除去対策を取りやすくするための水理学的技術開発がその例である。また、高水敷に単に周辺で見られる草木を十分生育させることは生物数を増やすことになるが生物多様性を増やすことになるとは限らない。適度な出水による乏しい植生が生物多様性を増

やすことになることもある。つまり、豊かな植生が希少生物に生存リスクを与えることもある。地域の状況を考慮し生物多様性を増やすことにつながる高水敷の水理学的設計理論は高度の河川工学¹¹²⁾であろう。

3) 水理学の流体力学的展開

土木工学はエネルギー消費密度の最も高い領域である住空間の環境問題をあらゆる角度から取り扱う総合学問分野である。したがって、土木工学の原点に戻り水理学を考えるとき、流体力学の観点から大気を見るこども一法であろう。問題のある大気を含めた都市の熱環境や湿度環境を土木工学として検討し直すこと、および、大気による汚染物質の輸送は口蹄疫のサハラ砂漠から中米への、中国から韓国・日本への輸送に見られるように、都市の物質輸送だけでなく国際的な課題でもある。

研究課題の先取りのためには、現地調査・観測による問題把握が必要である。問題の解析から一步上流に遡るという方法論の採用も考慮の余地がある。

なお、わが国の水理学は国内の要請に対応するいわゆる Domestic なものになっており、諸外国の課題に対応する International なものになっているとはいひ難い。持続型社会なる目標が具体的に登場すると研究そのものはいずれの国にも適用可能なので、自ずと国際化することになり懸念は無用であるが、現在の潮流の改善は必要であろう。

(2) 知識と技術の伝承

教育に関わる課題として、学理を身につけなければならぬ大学院生を学生時代に原理の単純な応用に終始させることは水理学の衰退を招きかねない。知的展開の少ない応用に従事する研究者は一応の根幹能力を身につけたものに限るという人材育成上の配慮も必要であろう。後継者としての若者の育成、数学的訓練、自然現象を見抜く感性の体得が可能な環境に関わる水理学的課題の選択が求められる。

謝辞:本稿をしたためるために当たり貴重なコメントを下さいました、九州大学大学院 小松利光教授、名古屋大学大学院 辻本哲郎教授、九州大学大学院 松永信博教授、九州工業大学 秋山壽一郎教授、国土交通省総合政策技術研究所 細川恭史部長、(独)土木研究所自然共生研究センター 萱場祐一所長に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 本間 仁: 高等水理学、工業図書、330p., 1942
- 2) たとえば、Harleman, D. R. F., Fisher, J. S. and Thatcher, M. L.: Unsteady salinity intrusion in estuaries, Technical Bulletin No.20, MIT, 37p., 1974
- 3) Hino, M.: Eco-hydraulics, An attempt, Proc. 17th IAHR Congress, Vol.6, pp.178-208, 1977
- 4) 小倉義光: 大気乱流論、地人書館、85p., 1955
- 5) Taylor, G. I.: Statistical Theory of Turbulence, Part 1, Proc. Royal Society, A, Vol. CLI, pp.421-444, 1935
- 6) Elder, J. W.: The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, Jour. of Fluid Mechanics, Vol.5, pp.544-566, 1956
- 7) Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H.: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, 1979
- 8) Deng, Z-Q., Singh, V. P. and Bentsson, L.: Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers, Jour. Hydraulic Engineering, Vol.127, No.11, pp.919-927, 2001
- 9) 山下俊彦、宮下将典、山崎真一、渡邊康玄: 河川から供給された物質の河口沿岸域での挙動、海岸工学論文集、第 47 卷、pp.1026-1030, 2000
- 10) Boxall, J. B., Guymer, I. and Marion, A.: Locationing outfalls on meandering channels to optimize transverse mixing, Water Environmental Management Journal, Vol.16, No.3, pp.194-198, 2002
- 11) Munk, W. and Anderson, E. R.: Notes on a theory of the thermocline, Jour. of Marine Research, Vol.7, pp.276-295, 1948
- 12) Pritchard, D. W.: Observations of circulation in coastal plain estuaries, In Estuaries (Lauff, G. H. ed.), pp.37-44, AAAS Publ. No.83, Washington DC, 1967
- 13) 中野晋、宇野宏司: 底生生物「シオマネキ」の浮遊幼生分散と塩分環境、海岸工学論文集、第 48 卷、pp.1181-1185, 2001
- 14) 山崎宗広、村上和男、上嶋英機: 流況制御による海水交換促進の技術に関する水理模型実験、土木学会論文集、No.741/VII-28, pp.29-38, 2003
- 15) Shields, A.: Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geshchiebewefung, Mitteilung der preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schifbau, Berlin, Heft 26, 1936
- 16) Einstein, H. A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, Technical Bulletin, No.1026, USDA, Soil Conservation Service, pp.1-70, 1950
- 17) Madsen, O. S. and Grant, W. D.: Quantitative Description of Sediment Transport, Proc. 15th Coastal Engineering Conference, pp.1093-1112, 1976
- 18) たとえば、長谷川和義: 蛇行流路における流れと平衡底面形状に関する研究、土木学会論文報告集、第 338 号、pp.105-114, 1983
- 19) 清水琢三: 海浜変形シミュレーション、1996 年度水工学に関する夏期研修会講義集、B コース、26p., 1996
- 20) 大杉幸功、尾澤卓思、小笠原智宏、角哲也: フラッシュ放流による河川掃流効果に関する検討、河川技術に関する論文集、Vol.6, pp.185-190, 2000
- 21) Kline, S. J., Reynolds, S. C., Schuraub, F. A., Runstadler, P. W.: The structure of turbulent boundary layers, Jour. Fluid Mechanics, Vol.30, pp.741-773, 1967
- 22) 福津家久、鬼東幸樹、倉田昌明: 平坦河床上に発生する bursting 現象に及ぼす掃流砂の影響、土木学会論文集、No.621/II-47, pp.77-90, 1999
- 23) 鈴木崇之、岡安章夫、Daniel T. Cox、片山裕之、森信人、敦賀仁: 現地碎波における底質巻き上げの間欠性と流体運動との関係、海岸工学論文集、第 49 卷,

- pp.441-445, 2002
- 24) 熊田貴之, 小林昭男, 宇多高明, 芹沢真澄, 星上幸良, 増田光一: 混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.476-480, 2002
 - 25) 清野聰子, 宇多高明: カブトガニ産卵地造成ミティレーション手法に係わる指針案の提案, 海岸工学論文集, 第 48 卷, 第 2 号, pp.1381-1385, 2001
 - 26) 渡辺国広, 清野聰子, 宇多高明: アカウミガメの産卵行動に影響を及ぼす前浜地形と海浜流の特性, 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.1151-1155, 2002
 - 27) 島谷幸広, 小栗幸雄, 萱場祐一: 中小河川改修前後の生物生息空間と魚類層の変化, 水工学論文集, 第 38 卷, pp.337-344, 1994
 - 28) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡了, 栗谷陽一: 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 第 393 号/II-9, pp.33-42, 1988
 - 29) 島谷幸宏, 萱場祐一, 皆川朋子, 千葉武生: 中小河川における天然河岸の保全手法に関する研究, 環境省平成 12 年度自然環境の管理及び保全に関する総合研究, pp.84.1-84.15, 2002
 - 30) 二渡了, 大石京子, 楠田哲也: 強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性, 土木学会論文集, No.452/II-20, pp.71-79, 1992
 - 31) Watanabe, R., Kusuda, T., Yamanishi, H. and Yamasaki, K. : Field study and modeling on the characteristics of bed mud formation process in the Rokkaku River, Fine Sediment dynamics in the Marine Environment, *Proceedings in Marine Science* 5, Elsevier, pp.513-526, 2002
 - 32) 浅枝隆, 有田正光, Pham Hong Son : エアカーテンによる塩水楔越え阻止法に関する研究, 土木学会論文集, No.572/II-40, pp.23-31, 1997
 - 33) 道奥康治, 神田徹, 大成博文, 森口昌仁, 松尾昌和, 松尾克美: 曝気形態と貯水池深層水質との関係について, 水工学論文集, Vol.46, pp.1091-1096, 2002
 - 34) 鮎川登, 三戸孝延, 町山友和: トンネル内に閉じこめられた空気が地下放水路の流れに及ぼす影響の解析, 土木学会論文集, No.726/II-62, pp.55-60, 2003
 - 35) 渡辺政広, 神田徹, 岡田将人, 神吉和夫: マンホール部に空気塊を封入する下水道管網の圧力流れ, 水工学論文集, 第 44 卷, pp.551-556, 2000
 - 36) Reed, M., Gundlach, E. and Kana, T. : A coastal zone oil spill model; Development and sensitivity studies, *Oil and Chemical Pollution*, Vol.5, pp.411-449, 1989
 - 37) Cheong, C. J. and Okada, M. : Effects of spilled oil on the tidal flat ecosystem; Evaluation of wave and tidal actions using a tidal flat simulator, *Water Science and Technology*, Vol.43, pp.171-177, 2001
 - 38) 池永均, 山田正, 向山公人, 大島伸介, 内島邦秀: 網走湖の塩水化の機構と塩淡二成層の長期変動特性に関する研究, 土木学会論文集, No.600/II-44, pp.85-104, 1998
 - 39) 鶴田泰士, 石川忠晴, 西田修三, 成田舞, 藤原広和: 小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.175-187, 2002
 - 40) 福岡捷二, 黒川岳司, 上原浩, 三浦心, 舟橋昇治: 低気圧および台風の移動形態の違いが汽水湖の流動・水質場に与える影響, 土木学会論文集, No.712/II-60, pp.137-150, 2002
 - 41) 山崎誠, 葛西秀宮, 杉田誠, 平山健一: 河川結氷の解氷と水温の関係について, 寒冷地技術論文・報告集, Vol.16, pp.519-524, 2000
 - 42) Beltaos, S. : Hydraulic roughness of breakup ice jams, *Jour. Hydraulic Engineering*, Vol.127, No.8, pp.650-656, 2001
 - 43) Shen, H. T. : Nonlinear interaction of surge waves with ice cover in river channels, P0996A AD Report, 114p., 1999
 - 44) 山口真裕, 成田秀明, 小山鴻一, 北村茂, 泉山耕, 山之内博, 藤井忍, 上田浩一, 在田正義: 寒冷海域での油流出に関する研究, 環境保全成果集, pp.74.1-74.42, 1999
 - 45) 山口真裕, 小山鴻一, 成田秀明, 澄本忠教, 若生大輔, 上田浩一, 斎田賢次郎, 在田正義, 桜井昭男: 寒冷海域での油流出に関する研究, 船舶技術研究報告, 第 37 卷, pp.343-377, 2000
 - 46) 二瓶泰雄, 青木康哲, 綱島康雄, 佐藤慶太, 西村司, 磯岡和夫: 多点連続観測に基づくマングローブ・エスチュアリーにおける流れと物質輸送特性, 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.1201-1205, 2002
 - 47) Krenkel, P. A. and Orlob, G. T. : Turbulent diffusion and the reaeration coefficient, *Jour. Sanitary Engineering Division, Proceedings of ASCE*, Vol.88, pp.53-116, 1962
 - 48) Moog, D. B. and Jirka, G. H. : Air-water gas transfer in uniform channel flow, *Jour. Hydraulic Engineering*, Vol.125, No.1, pp.3-10, 1999
 - 49) 杉原祐司, 津守博通: 気液界面における表面更新乱流の特性, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.529-534, 2002
 - 50) 村上健: 河川における再曝気, 第 6 回衛生工学研究討論会講演論文集, pp.45-82, 1970
 - 51) 栗谷陽一, 敷田和久: 開水路流れにおける表面ばつ気速度について, 土木学会西部支部研究発表会講演概要, pp.193-194, 1970
 - 52) 角野昇八, 細井由彦, 竹原幸生, 朝位孝二, 杉原裕司, 中村由行, 吉岡洋, 平口博丸, 江藤剛治, 中村忠暢: 水表面での気体輸送に関する研究の最新動向, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.269-287, 2000
 - 53) 複津家久, 吉田圭介, 牛島省: 水面上に風シアが存在する開水路流れ場における水・空気層乱流構造に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.733/II-63, pp.67-76, 2003
 - 54) Craik, S. A., Smith, D. W., Chandrakanth, M. and Belosevic, M. : Effect of turbulent gas-liquid contact in a static mixer on *Cryptosporidium parvum* oocyst inactivation by ozone, *Water Research*, Vol.37, pp.3622-3631, 2003
 - 55) Gualtieric, C., Gualtieric, P. and Pulcidoria, G. : Dimensional analysis of reaeration rate in streams, *Jour. Environmental Engineering*, Vol.128, No.1, pp.12-18, 2002
 - 56) Urban, A. L., Hettiarachchi, S. L., Miller, K. F., Kincaid, G. P. and Gulliver, J. S. : Field experiments to determine gas transfer at gated sills, *Jour. Hydraulic Engineering*, Vol.127, No.10, pp.848-859, 2001
 - 57) 李寅鉄, 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘: 水・底質モデルによる瀬戸内海の水質管理に関する研究, 土木学会論文集, No.545/II-36, pp.101-112, 1996
 - 58) 楠田哲也編著: 自然の浄化機能の強化と制御, 技報堂出版, 242p., 1994
 - 59) 鈴木伴征, 大作和弘, 横山勝英, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における濁質の浮上とそれに伴う酸素消費, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.917-922, 2002
 - 60) 本永良樹, 武内慶了, 土肥学, 山田正: 荒川感潮域における水質変動要因に関する現地観測, 水工学論文集,

- 第 46 卷, pp.929–934, 2002
- 61) Thornton, C. I., Abt, S. R., Morris, C. E. and Fis-chenich, J. C. : Calculating shear stress at channel-overbank interfaces in straight channels with vegetated floodplains, *Jour. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.126, No.12, 2000
- 62) 田村仁, 瀧岡和夫 : 可撓性に着目した藻場キャノピー周辺の流動・乱流構造に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.341–345, 2002
- 63) Hosokawa, Y. and Horie, T. : Flow and particulate nutrient removal by wetland vegetation with emergent macrophyte, *Science of the Total Environment, Supplement 1992*, pp.1271–1282, 1992
- 64) 林健二郎, 高橋祐, 重村利幸 : 湖岸や海岸に生育している水辺植生に作用する波力と消波機能の評価法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.721–725, 2002
- 65) 石川慎吾 : 揖斐川の川辺植生 I, 扇状地の河床に成育する主な種の分布と立地環境, 日本生態学会誌, Vol.38, No.2, pp.73–84, 1988
- 66) 清水義彦, 小葉竹重樹, 吉川武志 : 出水によるハリエンジュ樹林地の破壊とその規模推定に関する考察, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.953–958, 2002
- 67) Kouwen, N. and Fathi-Moghadam, M. : Friction Factors for Coniferous Trees along Rivers, *Jour. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.126, No.10, pp.732–740, 2000
- 68) Harmon, M. E. : Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems, *Advance in Ecological Research*, Vol.15, pp.133–302, 1986
- 69) 長谷川寛 : 濘場基盤に作用する海藻経由の波力について, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.153–165, 1999
- 70) Morris, P. A., Hill, N. M., Reekie, E. G. and Hewlin, H. L. : Lakeshore diversity and rarity relationships along interacting disturbance gradients; catchment area, wave action and depth, *Biological Conservation*, Vol.106, No.1, pp.79–90, 2002
- 71) 池田駿介, 金沢稔, 太田賛一 : 可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の三次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.33–43, 1995
- 72) Huang, G. : A study of impact of riparian vegetation on in-stream thermal environment, 水工学論文集, Vol.46, pp.1103–1108, 2002
- 73) 森川一郎 : 魚がのぼりやすい川づくり水深モデル事業の現状と課題, 応用生態工学, 第 3 卷, 第 2 号, pp.193–198, 2000
- 74) 鈴木正貴, 水谷正一, 後藤章 : 水田水域における淡水魚の双方向移動を保障する小規模魚道の試作と実験, 第 4 卷, 第 2 号, pp.163–177, 2001
- 75) 河村三郎 : 魚類生息環境の水理学, (財)リバーフロント整備センター, 241p., 2003
- 76) 新村安雄 : 長良川河口堰の呼び水式魚道とせせらぎ式魚道, 応用生態工学, 第 3 卷, 第 2 号, pp.169–178, 2000
- 77) 高橋剛一郎 : 魚道の評価をめぐって, 応用生態工学, 第 3 卷, 第 2 号, pp.199–208, 2000
- 78) Gumpinger, C. : Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegshilfen; Zielstellungen, Bewertungsgrundlagen und Methoden, *Oesterr Wasser-Abfallwirtschaft*, Heft 53, Nu.7–8, 2001
- 79) 河川環境管理財団 : 植生浄化施設の現状と事例, 河川環境管理財団河川環境総合研究所資料, No.3, 95p., 2000
- 80) 烏居厚志, 田淵隆一, 佐藤重穂, 竹内郁雄, 広橋俊郎, 関伸吾, 関野幸二, 吉田正則, 村上敏文 : 四万十川における環境保全型農林水産業における清流の保全に関する研究 (陸水系の水環境の保全に関する総合研究 ; 平成 12 年度), pp.27.1–27.14, 2002
- 81) 木村賢史, 西村修, 太田祐司, 三嶋義人, 柴多規夫, 稲森悠平, 須藤隆一 : 人工海浜造成後の魚類, 鳥類, 水辺植生の遷移に関する研究, 土木学会論文集, No.720/VII-25, pp.15–25, 2002
- 82) Biggs, B. J. F., Goring, D. G. and Nikora, V. I. : Subsidy and stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form, *Journal of Phycology*, No.34, pp.598–607, 1998
- 83) (財)河川環境管理財団 : 自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系の関係に関する研究, 200p., 2002
- 84) Gore, J. A., Layzer, J. B. and Mead, J. : Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years; A role in stream management and restoration, *Regulated Rivers*, Vol.17, No.4/5, pp.527–542, 2001
- 85) Murrey Darling Basin Commission : Snapshot of the Murrey Darling Basin River Condition, 48p., 2002
- 86) 中村俊六 : 魚類生息場としての河川環境, 第 40 回日本水環境学会セミナー講義録, pp.77–87, 2001
- 87) 中村俊六, テリー・ワドゥル訳 : IFIM 入門, リバーフロント整備センター, 197p., 1999
- 88) 辻本哲郎 : 河川の生態系保全機能の評価にかかる水工学, 土木学会水工学に係わる夏期研究会講義集, 第 36 卷, A 号, pp.6.1–20, 2000
- 89) 北海道水産ふ化場 : 河川水流入物質と紫外線との複合作用が水生生物に及ぼす影響調査, pp.221–227, 1999
- 90) 片山幸美, 中山恵介, 金 昊燮, 米塚佐世子, 朴虎東 : 移流拡散モデルを用いた天竜川の *Microcystis* の動態解析, 水陸学会誌, 第 64 卷, pp.121–131, 2003
- 91) 古米弘明, 中島典之 : 河川感潮域における都市域からの微量汚染物質の排出と底泥内分布について—荒川をフィールドとして—, 河川環境管理財団平成 11 年度河川整備基金事業報告書, pp.132–147, 2000
- 92) Hyer, K. E., Horenberger, G. M. and Herman, J. S. : Processes controlling the episodic streamwater transport of atrazine and other agrichemicals in an agricultural watershed, *Jour. Hydrology*, Vol.254, No.1/4, pp.47–66, 2001
- 93) 高橋雅之, 風間聰, 佐藤榮作, 沢本正樹 : 不飽和浸透解析によるヒステリシス効果の検証—二次元浸透流への適用—, 水工学論文集, 第 47 卷, pp.265–270, 2003
- 94) Selim, H. M. and Iskandar, I. K. : Modeling nitrogen transport and transformations in soils: 1. Theoretical considerations, *Soil Science*, Vo.131, No.4, pp.233–241, 1981
- 95) Iskandar, I. K. and Selim, H. M. : Modeling nitrogen transport and transformations in soils: 2. Validation, *Soil Science*, Vo.131, No.6, pp.303–312, 1981
- 96) 赤堀良介, 清水康行 : 閉鎖性水域における密度流現象に関する 3 次元乱流モデルによる数値計算, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.113–125, 2001
- 97) 楠田哲也, 巖佐庸 : 生態系とシミュレーション, 朝倉書店, 172p., 2002
- 98) 後藤仁志, Abbas Yeganeh-Bakhtiari, 酒井哲郎 : 混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析, 土木学会論文集, No.649/II-51, pp.17–26, 2000
- 99) Sohma, K., Sekiguchi, Y., Yamada, H., Sato, T. and Nakata, K. : A new coastal marine ecosystem model study with hydrodynamics and tidal flat

- ecosystem effect, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.43, No.7, pp.187–208, 2001
- 100) 山田謙男：波の影響を考慮した干潟水質予測モデルの構築と運用システムの研究開発—波の影響を考慮した干潟水質予測モデル、計算科学技術活用型特定研究開発推進事業研究会報告書, pp.98–99, 2000
- 101) 吉野文雄, 米田耕蔵：合理式の洪水到達時間と流出係数, 土木技術資料 15-8, pp.3-6, Vol.12, 1973
- 102) 谷岡康, 福岡捷二, 谷口将俊, 小山幸也：都市中小河川の洪水流出特性, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.1-12, 1998
- 103) 日本河川協会編：河川砂防技術基準（案）同解説—計画編—, 山海堂, pp.125–129, 1997
- 104) たとえば, Huang, G. H. and Chang, N. B. : Perspective of environmental informatics and systems analysis, Vol.1, No.1, pp.1–5, 2003
- 105) 土木学会エネルギー土木委員会：波エネルギー利用技術の現状と将来展望, 土木学会, 219p., 1990
- 106) 植木亨監修：環境圏の新しい環境工学；第5章, フジテクノシステム, pp.938–988, 1999
- 107) 上嶋英機：流況制御構造物設置による流況制御技術の効果検証実験—瀬戸内海大型水理模型による別府湾・大阪湾での実験結果—, 第38回海岸工学講演会論文集, pp.851–855, 1991
- 108) 上北恆男：湧昇流発生構造物の開発に関する実験的研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.342–346, 1986
- 109) 小松利光, 柴田卓也, 押川英夫, 柴多哲郎, 安達貢浩, 小橋乃子, 植田操：BaNK システムの底質輸送制御効果に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.457–462, 2002
- 110) 重松孝昌, 池田憲造, 小田一紀：貧酸素化の抑制を目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発, 土木学会論文集, No.741/VII-28, pp.57–67, 2003
- 111) 小沢大造, 平出友信, 古川慶太, 中村聰志, 小出茂雄, 国柄広志：負圧を利用した海水交換堤の用水特性の基礎的検討, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1161–1165, 2000
- 112) Wade, R. J., Rhoads, B. L., Rodriguez, J., Daniels, M., Wilson, D., Herricks, E. E., Bombardelli, F., Garcia, M. and Schwarts, J. : Integrating science and technology to support stream naturalization near Chicago, Illinois, *Jour. American Water Resources Association*, Vol.38, No.4, pp.931–944, 2002

(2003.9.10 受付)