

魚類等の生息環境における流れの多様性に関する研究

Stream diversity of aquatic environment for fish and some habitats

馬場 仁志*・巖倉啓子**

Hitoshi BABA, Keiko IWAKURA

1. はじめに

河道内に生じる多様な流れを表現するには、目的、空間のスケールなどによって異なる定義や指標を用いる。治水目的で流れを論ずるには、ほとんどの場合一次元的表現で十分であり、局所的に渦や 2 次流などの次元の高い流れの解釈が必要となる。生物の生息環境にとっては、流水の状態(流速、水深、水圧などの空間的・時間的多様性)および流水空間の多様性(流水を含む河道及びその周辺の構成物質、素材などの空間配置)が重要な生活環境の形成要素であり、特に魚類の生息に関しては、水面上のカバーや底質状況を含めた微環境とその配置様式が大きく関与している¹⁾。しかし、微環境における流れの状態とその配置様式を、生物生息環境に作用する機能に着目して計測した例は少なく、複雑な流れを補足可能な次元の高い計測技術が必要である。また、瀬・淵などの流れの状態を定義する言葉はいまだ統一的解釈として通用せず、共通の客観的指標および計測手法が不足している²⁾。

本研究は、流水中に生息する魚類・底生動物の生活環境を決定する流れの理学的構造(流速、水深、流速および水圧の変動)を空間的に計測し、その特性が生物生息環境のなかでどのような機能を有しているかを解明する研究の初歩的段階にある。このうち本報告は、北海道内の13河川における魚類・底生動物の生息実態調査および流況測定結果と、豊平川における魚類生息環境調査と乱流および動水圧の測定結果から、魚類や生物の生息環境と流れの多様性との関係について考察するものである。

2. 研究方法

本研究は河道の形状特性および流れの計測と、水中生物の観察および捕獲による生息密度等の計測結果を基礎データとし、調査河川の範囲によって、「広域調査」と「集中調査」に分けられる。

広域調査は、複数の異なる河川環境に生息する魚類・底生動物の生息密度調査と同調査地点における水理環境の把握を目的とし、北海道内の9水系 13 河川の計 52 地点において 1996 年 7 月に行った。調査地点は、木工沈床や水制工などの近自然工法を用いて瀬・淵を人工的に形成した箇所の近傍や、自然状態で瀬・淵が形成されている流れを選び、目視観察による魚類の生息調査を行なった。各調査区間では状況の異なる 4 地点を選定して投網による魚類の捕獲調査を行なった。計測項目は、魚類捕獲からは、①捕獲魚種、②捕獲数、③魚体長、④胃内容物、水理環境測量からは、①水深、②表面流速の各空間分布、③河床勾配・河床材料、その他の生息生物調査からは、コドラート設置による①底生動物、②流下動物、③付着藻類の各の生息密度、である。調査は出水の直後や渇水時を避け、安定した流況の日中 10 時と夜間 20 時を標準として行った。

集中調査は、特定個所に注目した魚類の水中観察と流れの精密な計測からなり、石狩川支流の豊平川で 1996 年に木工沈床を用いた多自然型工法による整備が行なわれた箇所において、1997 年 10 月に行った。計測項目は、魚類生態として①生息魚種、②生息密度、③行動などの観察、理学的項目として①河道形状、②流速(3 次元)の分布、③動水圧の分布、である。調査は、流況が安定している時期に、岸からの観察と潜水による魚類の生息状況および行動観察を数日間に渡って継続したあと、同じ箇所において精密な流速や動水圧の空間分布測定を行なった。

3. 魚類と底生動物の生活場と流れの多様性(広域調査結果から)

3.1. 捕獲魚類と流れの場

確認された魚種は 8 目 10 科 31 種であった。主な捕獲魚種としては、ウグイ、エゾウグイ、フクドジョウ、ウキゴリが多く、問寒別川、後志利別川、尻別川などではサクラマスが捕獲された。すべての調査地点で生息が確認されたのはウグイ類、フクドジョウであり、これら 2 種の占める割合が捕獲数の半数を超える調査地点が 10 箇所ある。

目視観察からは、魚種によって好む空間に違いが見られ、また魚体の大きさと流速との間に相関関係が認められたほか、エディーなどの流速の小さな領域に比較的多くの魚数が確認できた。これらの魚類生息空間における流水条件の違いを調べるために、全調査個所で観察されたウグイの生息密度と流れの多様性との関係を考察した。

キーワード: 魚類、水生生物、生息環境、多様性

* 開発土木研究所環境水工部河川研究室 室長(〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目, h.baba@ceri.go.jp)

** 北海道開発局建設部河川計画課 計画第3係長(〒060 札幌市北区北8条西2丁目)

流れの多様性を表現する方法としては、流速などの空間分布をスペクトル密度分布として表現する方法³⁾や、瀬、淵などの定性的空間分類に当てはめて測量やスケッチなどから表現する方法⁴⁾、画像解析による方法⁵⁾などがある。ここでは、広域的に多数の調査箇所を短期間で客観的に調査するために、表面流速(一部断面流速分布)の測定と、標準的な横断測量による河床形状の計測を併用したスケッチを行なった。

得られた捕獲調査箇所の表面流速分布(2次元流速ベクトルの絶対値)、および水深分布をもとに、それぞれの平面コンター図を作成した。図-1に石狩川における水深コンター図の一例を示す。図中の円は、魚類捕獲調査を行った地点であり、各調査地点の中心から半径5mの円で囲まれる範囲である。また、●、▲はそれぞれ目視観察によるウグイ、フクドジョウの遊泳地点である。この範囲内における流水の理学的指標として流速、水深の最大値、最小値およびその差(流速幅、水深幅とする)を用いると、ウグイの生息密度との関係からウグイの生息に適した流れの特性を表現することが出来る(図-2)。

最深・最浅水深とウグイの生息密度を比較すると、最深水深0.4~2.6mの範囲で観察されたウグイの生息密度に明瞭な違いは見られないが、最浅水深との関係では、浅い空間が存在するほどウグイ生息密度の高い空間がみられ、特に水深0~0.5mの非常に浅い流れが存在する環境がウグイの生息しやすい空間であると思われる。

水深幅と生息密度との関係では、水深幅が小さい場合は生息密度が低い範囲に測定値が集中しているのに対し、水深幅が大きいほど生息密度の分布範囲が広がっている。これは、「水深の浅い部分と深い部分が混在している空間ほど、ウグイにとって適した生息空間である」ことを示すものと考えられる。

一方、流速については、最高流速が大きい空間(2m/s弱)で生息密度が高い測定値が得られている。また、最低流速の小さい空間に生息密度の高い測定値がある。これは、瀬の出口のエディー上流端や落ち込みのような急な流れの近傍などに、ウグイが集中して遊泳している状態が観察されていることを反映している。

流速幅と生息密度の関係をを見ると、これらの性質が一層明確に表現されている。すなわち、「流れの緩やかな部分と流れの早い部分が混在した空間は、ウグイの生息密度が高くなりうる空間である」と考えられる。

3.2. 底生動物

ウグイに関して検討したのと同様な手法で、底生動物の生息密度を解析した(図-3)。なお、底生動物は河川水辺の国勢調査で定められた調査法により、サーバーネット等を用いた河床面積0.5㎡あたりに生息する底生動物である。河川によって生息動物種に違いがあるものの、主な底生動物はユスリカ、ヨコエビ、クシゲマダラカゲ

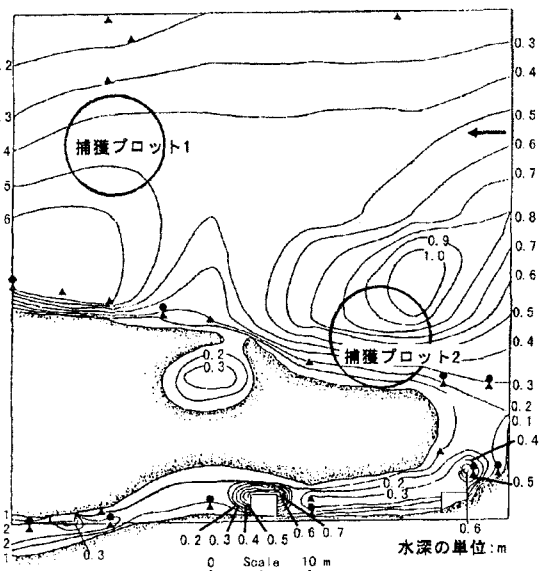


図-1 水深コンター図の例(石狩川上流)

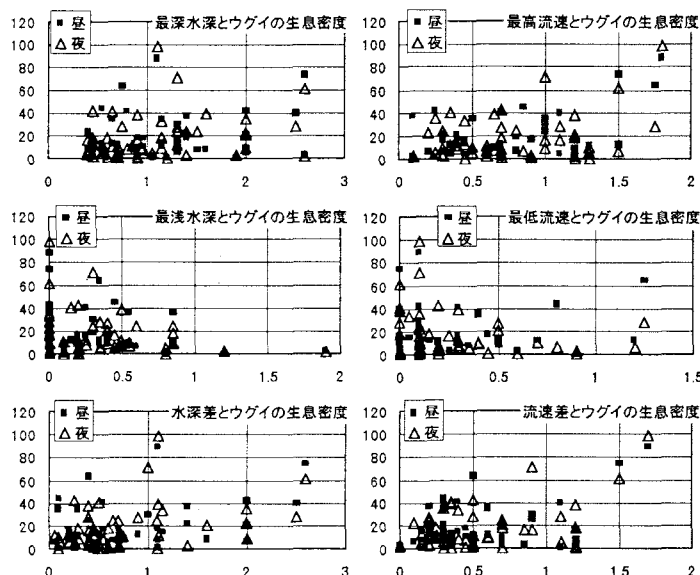


図-2 水深・流速関連指標(横軸:m, m/s)とウグイの生息密度(縦軸:尾数/プロット)との関係

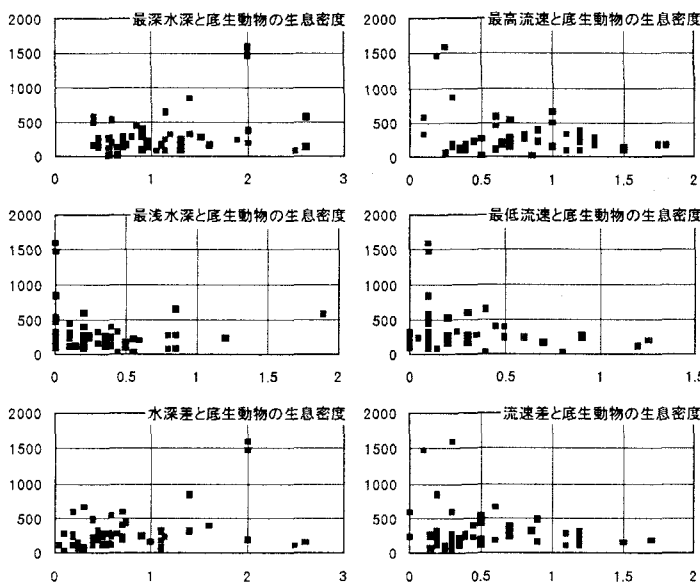


図-3 水深・流速関連指標(横軸:m, m/s)と底生動物の生息密度(縦軸:個体数/トラップ/プロット)との関係

ロウ、ウスバヒメガガンボであり、このほか貧毛類、ミズミズ属、トビゲラ、エゾマダラカゲロウなどである。

最深・最浅水深と底生動物の生息密度の関係は、ウグイの生息環境と同様の分布形をしており、水深幅が大きい場合に生息数の多い空間が存在している。

しかし、流速に関してはウグイの生息環境で見られた関係とはまったく異なる関係が見られた。最高流速と生息密度の関係では、最高流速が小さい空間において高い生息密度が観測されている。また、最低流速に関しても同様に、小さい流速の環境に生息密度の高い底生動物の分布が観測されている。流速幅と生息密度の関係を見ると、ウグイの場合に見られた関係とは逆のパターンが現れていることが明らかである。

これらのことから、底生動物が集中する流れの状態とは、「流速が遅く、周辺にも流速の早い場が存在しない単調な空間」であることがわかる。

3.3. 底生動物および魚類の生息密度と流れの多様性

以上の検討では「流水の状態および流水空間の多様性」を評価する指標として、流速と水深に着目した評価手法の提案とそれによる評価を行ってきた。遊泳魚類を代表するウグイと底生動物について同手法を適用した結果、全く異なる流れの構造を選択していることが検証できた。これは、流れの多様性が生物種の生息空間に対して、生活史の各段階における棲み分けの場を提供していることを示す具体的な観測値である。

また、今回の調査では昼と夜の生息空間の違いについても計測した。ウグイについて解析した結果、最小流速の小さな空間では夜になると生息数が増加し、最小流速の大きな、すなわち全体的に流れの強い空間では昼になると生息数が増加することを確認した(図-4)。また、夜の生息環境では、流速幅の大きな流れの場にも生息空間が広がっており、夜間でも完全な静水よりは流れが近傍にある空間を好むものと考えられる。

河床材料粒径の調査結果からは、フクドジョウの生息密度が代表粒径=101~102 の範囲で最も高い生息密度が計測されたが、その他の魚種および底生動物では、相関関係は見られなかった。これは、流れの多様性を決定する要素は、生物種によっても異なることを裏づけるものである。また、種の違いによる生息空間の棲み分けには、流水および河床状態などを含む流れの多様性が影響因子となっていることを示すものである。

しかし、今回提案した流れの多様性の簡易的表現は、流れについての概要を把握する手軽な手法ではあるものの、エディーやボイルなどの流水構造の詳細や乱流の影響などが表現できないために、さらに詳細な生態学的空間の機能を解明するためには限界がある。複雑な流れの状態をより的確に表現することは水中生物の生息環境を知る上で必要な技術であり、これらの調査には3次元の流速分布やその変動を計測し、表現する必要がある。

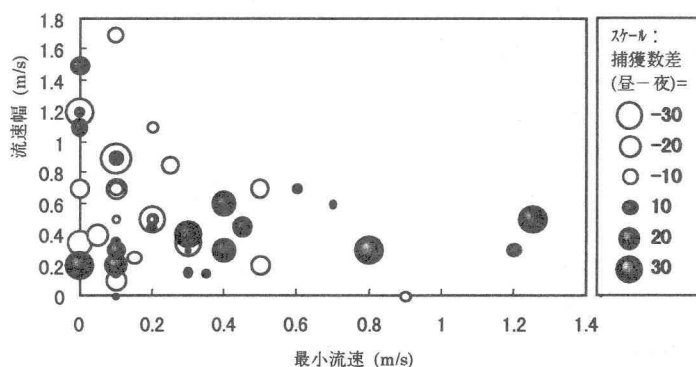


図-4 流れの状態と昼と夜の捕獲数の差(ウグイ)

4. 乱流構造および動水圧と魚類の行動との関連性 (集中調査結果から)

4.1. 調査地点の概要

より詳細な流れの多様性を計測するために、筆者らは3次元流速計と動水圧計を用いて、典型的な魚類生息環境における流れの場の計測を行なった。

動水圧は、魚類が流れを選択する、あるいは流れに反応する際の流水の理学的刺激には、流速・流向だけでなく、乱流や空間の微地形により生じる微細な水圧変動も含まれているとの仮設をもとに計測を試みたものである。

調査地点は石狩川支流豊平川にかかる環状北大橋下流(Kp10.2km)左岸の近自然工法(1996年度工事、木工沈床など)施工個所で、施工後1年以上を経て中州の形成や河岸の土砂堆積・洗掘などが落ち着き、魚類の生息環境として良好と思われる地点である。河岸部は盛土上のヤナギ埋枝工により調査時点で樹高1~3mのヤナギが生育している。その前面に約1×1mの木工沈床が流心に向かって凸型に配置され(写真-1)、多様な流れの発生を生起している。木工沈床は根固ブロック上に配置され、内側は粒径15~30cmの礫で中詰めされている。根固ブロックの河岸寄りには砂礫が堆積しており、流心側は最大で1m程度の河床洗掘が見られた。河床砂礫は流心部が10cm程度の礫、流れの緩やかな河岸部がシルトである。現況河床勾配は前後200mにおいて約1/900、調査時の水面勾配は前後40mで約1/180である。



写真-1 調査地点(豊平川)

4.2. 魚類生息状況

現地計測に先立ち、潜水およびビデオ観察による魚類の生息状況の確認を行なった結果、ウグイ類、遡上中のシロザケ、フクドジョウ、ウキゴリ、スナヤツメの 5 種の魚類およびカワエビを確認した(図-5)。観察の結果、魚類の利用度が高い場所として、①流心部の底層、②木工沈床により形成されたエディークの表層部、③木工沈床によってワンド状に囲まれた緩流部、④木工沈床の礫や丸太の隙間、⑤河道の引き込み部にあたり流速が非常に小さい底層部、が抽出された。

4.3. 流速の 3 次元計測

魚類観察の結果から、流れが多様に変化し魚類の生息位置と行動が観察可能な範囲を約 8m × 5m の調査区として設定し、この中に測定点を縦断方向に 4、横断方向に 2~5、合計 15 点設け(St.1.1~1.5、St.2.1~2.4、St.3.1~3.5、St.4.1~4.2、位置は図-5または図-6参照)、各測定点につき水面から 10cm 下を表層、1/2 水深を中層、河床から 10cm 上を底層として流速と動水圧を測定した。3 次元流速計は、超音波式小形センサーで、サンプリング周波数は 1Hz とした。図-5に各層別の 3 分間平均流速(平面 2 次元成分)を示した。

計測区間は、流れが木工沈床の凸部にあって下流側にエディークを形成しており、エディークフェンス(主流とエディークの境目)に沿ってボイル(上昇流)が見られるなど、複雑な流況を呈している。流心部の流速は、中層部で最も大きく、その向きはほぼ主流線に沿っている。表層部の流速は、流心で最も大きく(約 0.8m/s)、河岸に近いほど小さい。特に木工沈床の下流側は、急激に流速が小さくなっている。最上側の計測地点では、表層部と下層部のベクトルが主流線に対してねじれた状態(スパイラルフロー)が発生している。ウグイ、フクドジョウ、シロザケが観察された下流側の底層部は、その空間を取り囲む中層部や上流側および左岸側に比べて流速が小さい。

3 次元流速ベクトルの 2 次元投影時系列変動を、平面的には表層部と底層部について、縦断的には流心と第 3 断面についてそれぞれ表示した(図-6)。

最上流側の流心では河岸方向に偏流して振動が小さいが、その下流側では左右に細かく振動している。流心から 1 断面河岸より(St.1.2~St.4.2)では、流向が激しく変動している。この位置は、目視によるエディークフェンスの形成位置と一致している。

さらに河岸よりの木工沈床の背後部では、大きなエディークが形成されており、左岸から流心に向かう流速 0.1~0.2m/s の流れが計測されている。

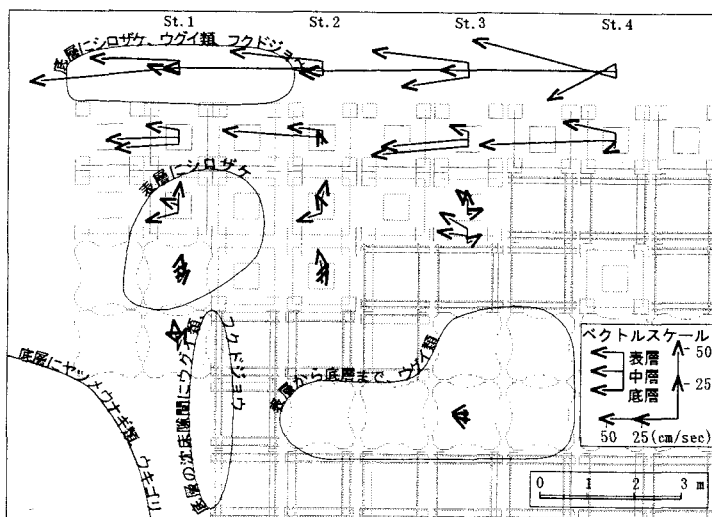


図-5 魚類の生息場所と平均流速分布(平面図)

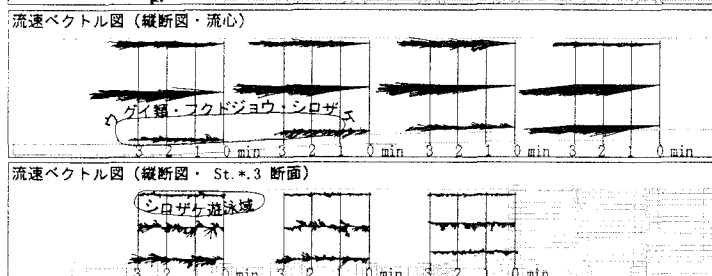
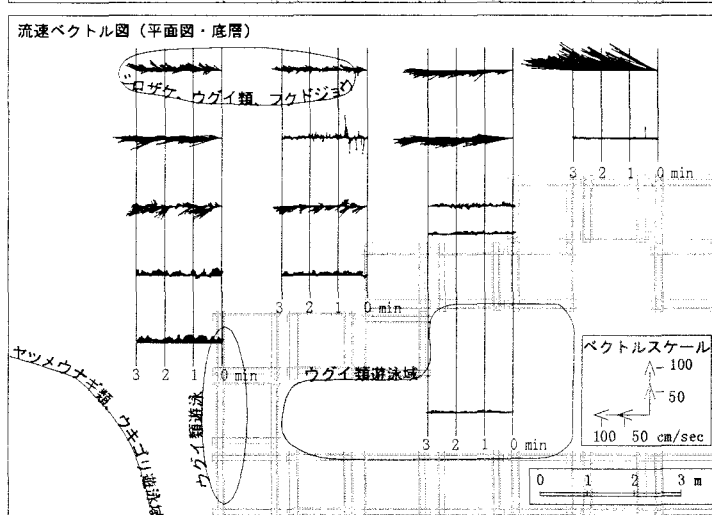
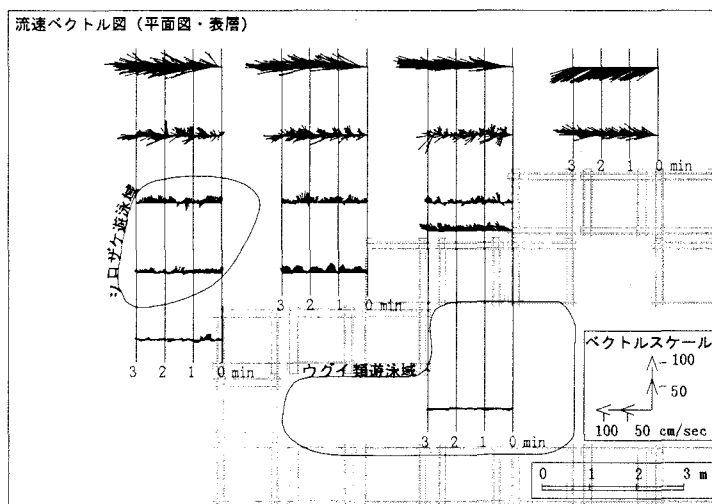


図-6 流速ベクトル時系列変化 上から表層部の平面図、底層部の平面図、流心部の縦断図、エディークの縦断図

この流速ベクトルの向きは、変動周期 20～30 秒で変動しており、目視によるボイルの発生周期とほぼ一致している。参考までに、大規模渦の発生によるボイルの周期を Jackson による式 ($T \cdot U_{\max}/h = 7.6$) で計算すると、 $T = 15 \sim 30 \text{sec}$ である。

シロザケがホバリングしていた St.1.3、St.1.4 付近は、このような流心に向かうゆっくりとした変動を伴う流れの中で最も流速の小さなエリアである。

底層においては、流心の St.4.1 で流速約 1m/s のほぼ一定方向の流れが観測されたが、その下流側では流速が小さくなっており、St.1.1～St.2.1 では流向の乱れが大きくなっている。このエリアは、シロザケ、ウグイ、フクドジョウが観察された河床であり、砂礫が洗掘された局所的な深みになっている。その左岸よりの測点では、流向の乱れが小さくなり、左岸方向に偏流した流速約 0.5m/s が観測されている。これは、底層で左岸方向へ潜り込む 2 次流を捕らえたものである。

左岸よりの St.1.3～St.3.3 断面では、流心付近での様子とは逆に、表層で最も流速の小さな空間が存在し、中層、底層では流速ベクトルの激しい変動を含む約 0.2～0.3m/s の流速が発生している。シロザケがホバリングしていた空間は流速の小さな表層である。

4.4. 動水圧の分布と魚類の行動

魚類にとって、感知物理量としての動水圧がどの周波数領域にあるかは不明であるが、0.1～1000Hz の振動を対象に、固有振動数 2kHz のセンサーを用いた水圧変動測定を行なった。

測定値から最大エントロピー法によるパワースペクトルを求めた結果(最下流側の St.1.1～St.1.5 横断面の例を図 7 に示す)、魚類の遊泳空間と周辺の空間とでは、スペクトル密度分布形に明確な違いが見いだされた。シロザケが遊泳していた St.1.3、St.1.4 の表層では、1Hz 以下の低周波成分が若干高い以外は、動水圧のスペクトルは水面上のコントロールデータと差がない(静穏)。しかし、この空間を取り囲むすぐ横の St.1.2 表層、あるいは直下の St.1.3 中層では、安倉かに高いスペクトル密度が存在し、その傾きは、-1.5～-2.0 程度となっている。



写真 - 2 動水圧測定器具

また、流心部底層で、ウグイ、フクドジョウ、シロザケが上流側に向かってホバリングしながら遊泳していた St.1.1 では、やはり低い動水圧でスペクトルの傾きが -1.0 に近い空間が存在し、それを取り囲む領域で高い動水圧が観測され、傾きは前記と同様に -1.5～-2.0 程度となっている。

一般に乱流粘性理論から導かれるエネルギー・スペクトル (Heisenberg) は、慣性小領域において周波数の $-5/3$ 乗則を満たすことが知られている⁶⁾。これは、今回計測した乱流部分の動水圧スペクトルの平均的波形に近い。現実の河川の乱流においては波数成分間のエネルギー伝達を通じて乱れエネルギーの拡散が生起していると思われる、木工沈床などの河床河岸地形によって生み出されたエネルギーの高い領域から、局所的には等方性乱れの領域を経て伝達されるエネルギーが静穏域で減衰していると考えられる。したがって、魚類が集合している空間は、乱れのエネルギーが小さな空間であるとともに、きわめて近い空間からのエネルギー伝達が行われている。

一方、小形のウグイ類が遊泳していた木工沈床に囲まれた領域 (St.3.5) では、中層～底層で 1～20Hz 程度の低周波スペクトル密度が高くなっている。木工沈床を矩形の障害物と仮定した場合のストローハル数 (fU/d) が 0.12 程度⁷⁾、流速 $U = 0.1 \sim 0.2 \text{m/s}$ 、物体の径 (沈床群の大きさ) $d = 5 \sim 10 \text{m}$ とすると物体背後に発生する渦の周波数 f は約 3～12Hz となることから、木工沈床によって形成された遅い流速の乱流成分に起因すると考えられる。

一般に、 $1/f \sim 1/f^2$ 型のパワースペクトルをもつゆらぎ現象は、自然界に数多く見られ、その傾きによって、快適～不快などの人間をはじめとする生物の感覚が支配されることが明らかにされている⁸⁾。水中での水圧変動は、高周波部分が人間の知覚としては「音」として捉えられるが、低周波部分も直接体を感じる振動刺激である。

流速・流向の変動が魚類の行動基準に影響すると考える場合、魚体の異なる部分で感知する流体圧力の差、およびその周波数成分が、行動基準を左右する刺激を与えている可能性がある。

パワースペクトルの傾きを、水圧のゆらぎとすると、 $1/f$ に近いスペクトルの空間は静穏であり、 $1/f^2$ に近いスペクトルの空間は、激しい乱れとしての刺激を与えているであろう。しかし、魚類の感覚および空間選択の嗜好に対する動水圧やスペクトル型の具体的な意味については、今のところ不明である。

5. おわりに

本研究では、水中生物生息環境に対して流れの多様性が密接な関係を有していることを計量的に明らかにしたが、生態学的にそのメカニズムを解き明かすには現段階で至っていない。しかし、生物種によって異なる流れの状態を嗜好するばかりでなく、空間特性の多様性にも影響を受けていることは、種の棲み分けや、生活史上の空間移動に対する、複雑な流れの作用を解明する糸口となる。また、動水圧の空間特性と生息空間の相関が見られたことは、流

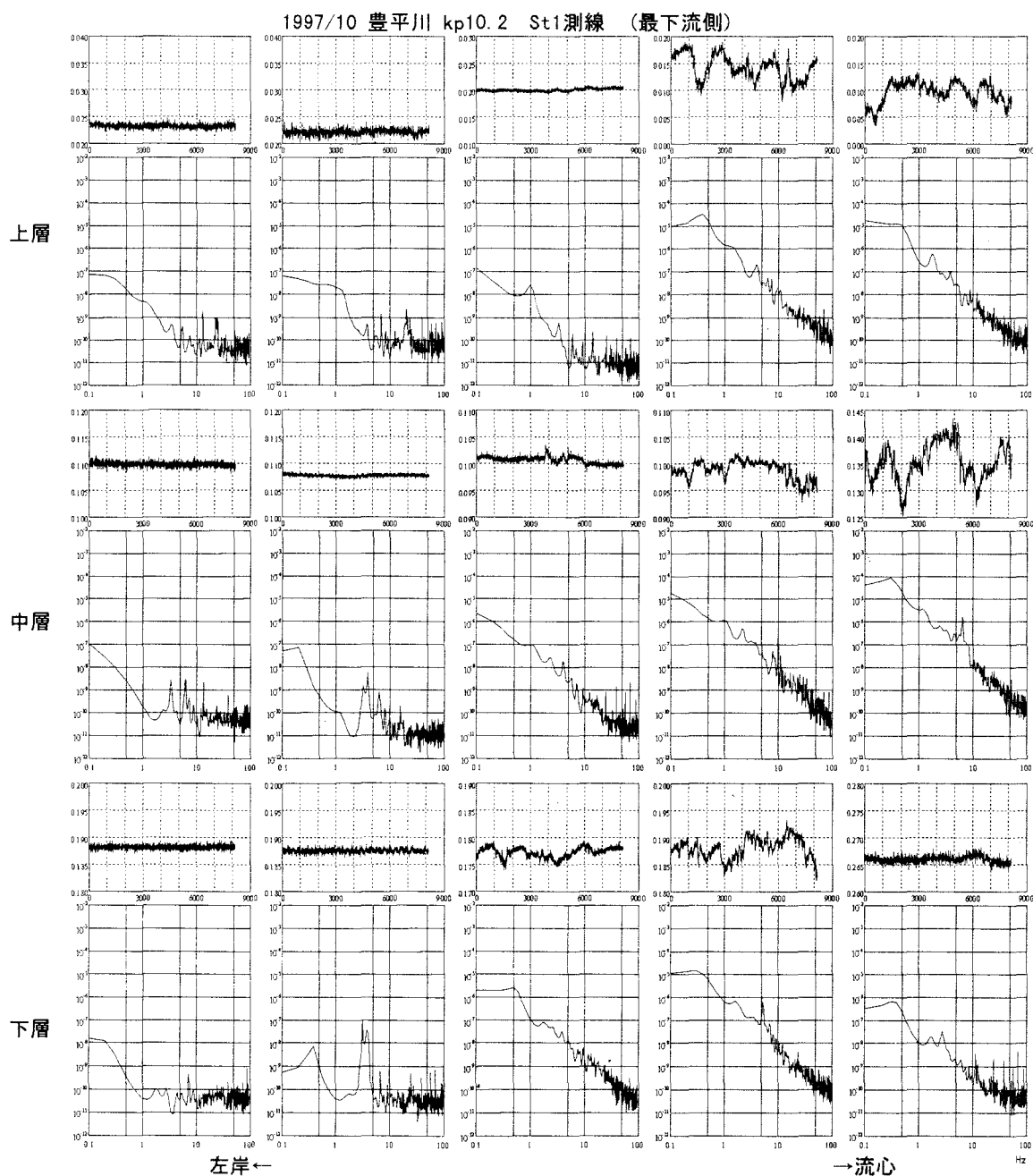


図-7 St1 測線(最下流側断面)の動水圧とパワースペクトル

れの構造や多様性が、水中生物にとっての空間の「快適さ」に影響を及ぼしていることを示唆する。

今後は、より詳細な生態観察と流れの計測を行い、実証的な流れの機能解明を進める必要がある。さらに、流れの多様性を形成する要素として、流速や水深、水圧だけではなく、河床材料、河岸部植生、河畔林、といった要素のほか、水温、気温、風、水質、濁度、などの環境要素も分析したい。

- 1) 井上幹生・中野 繁(1994):小河川の物理的環境構造と魚類の微生息場所. 日本生態学会誌, 44, pp151-160, 1994 年
- 2) 馬場仁志(1996):流れの状態を表す言葉と流れの複雑さの機能について. 開発土木研究所月報 No.523, pp.21-27, 1996 年 12 月
- 3) 日野幹雄(1975):スペクトル解析. 朝倉書店
- 4) 玉井信行・水野信彦・中村俊六(1993):河川生態環境工学. 東京大学出版会, pp253-257
- 5) 藤田一郎(1992):画像解析による流れの解析. 東海地区水工学研究会講演資料.
- 6) 巽 友正(1986):乱流現象の科学. 東京大学出版会, pp165-221
- 7) 土木学会(1985):水理公式集, pp36-37
- 8) 武者利光(1980):ゆらぎの世界 自然界の $1/f$ ゆらぎの不思議. 講談社ブルーバックス