

水難事故における河川のフェイルセーフ機能に関する研究

Study on fail-safe workability of stream condition at drowning incident

馬場 仁志*・佐藤 耕治
Hitoshi BABA, Kouji SATO

1. はじめに

近年、河川空間の整備は、豊かな自然環境としての機能を重視する方向へ転換してきた。近自然的工法が普及し、水辺の親水性も高まりつつある。また、河川法の改正は、従来の治水・利水に環境を加え、河川空間の積極的な利用と日常の管理をより充実する姿勢を明確にした。

水辺が危険な空間から親しみのもてる空間へと造りかえられつつある中で、高齢化および福祉社会の基盤整備が着々と進んでいる。今後は高齢者、幼児、障害者など、危険回避能力が小さいと考えられる人たちの水辺利用が多くなってくると考えられる。

一方、河川における水難事故で犠牲になる人数は、洪水による犠牲者数を上回る河川も多く、河川管理者の責任を問う訴訟事件に発展しているケースもある。危険性の回避は、基本的には河川利用者の自己責任において、行われなければならないことは明らかなであるが、これまで水辺に近づくことが困難であった環境において、親水施設の整備による河川内への人の誘導が人為的に促進される場合には、利用者に対する安全性への配慮が河川管理者側にも求められている¹⁾(図-1)。図中のアトラクティブ・ニューサンスとは、利用者にとって魅力も増すが、危険性も増大する場合の原因物であり、親水施設の多くは、アトラクティブ・ニューサンスを形成していると言える。

本研究は、河川が元来有している流水としての危険性、河川構造物の人間に対する危険性を分析し、そこから河川利用者のリスク軽減に資する知見を得ようとするものである。また、河川が有している事故発生時のフェイルセーフ機能(助かる可能性)を研究することにより、河川構造物、特に親水施設の計画・設計に生かすことを目標にしている。

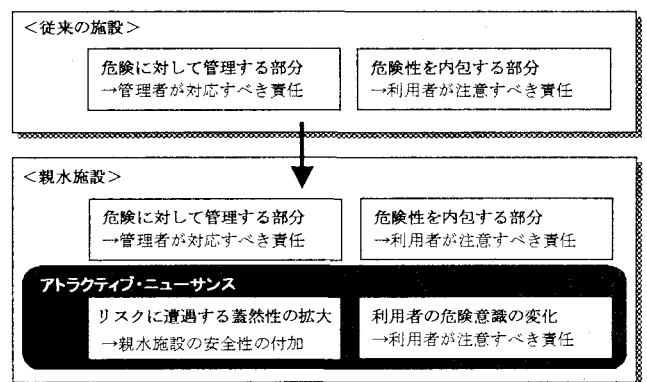


図-1 責任範囲の概念図

2. 研究方法

本研究は、河川利用者に対する様々な危険性の分析と、安全性の向上に資する方策の提案およびその効果の検証を必要とする。このうち今回は初歩的な段階として、次の二つを実施した。

①近年の道内河川における水難事故の事例を調査し、その傾向を分析した。

②水辺の利用者が多い石狩川支流豊平川における模擬水難事故の実験により、利用者が水流に巻き込まれた際の危険性を定量的に計測した。

以上の結果をもとに、豊平川における河道内の危険箇所および危険状態の分析を行い、河川構造物との関連を考察した。なお、豊平川は、札幌市の中心を流れる急流河川であり、高水敷は都市内の貴重なオープンスペースとして高度に利用されており、近年は階段式低水護岸の整備と防護柵の撤去により、水辺への人の立ち入りが進んでいる。

3. 近年の事故事例分析

北海道警察本部の資料および札幌市消防局の資料などから平成7,8年に発生した道内河川における水難事故の概要を調べた結果、平成7年に30名、平成8年に32名の方が事故に遭遇している。このうち死亡者(不明者を含む)はそれぞれ19名および12名であり、残りは救助あるいは自己脱出などにより生存している。

これらの事故の報告書からは事故現場の状況が不明確な部分も多いが、護岸からの転落など、河川構造物が関連したと思われる事例を抽出すると、全62件中少なくとも18件(自殺を除く)を数えた。特に札幌などの都市区域における河

キーワード: 水難事故、親水施設、安全性、フェイルセーフ機能

* 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)

岸からの転落事故が多い。また、床止工(頭首工、落差工などを含む)下流のバックウォッシュ(循環する逆流)に巻き込まれたケースもある。季節的な事故発生件数の違いは、5月から8月にかけての夏季に他の時期より若干増える傾向があるほか、11月にも発生件数が多い(図-2)。発生時間帯別では、日中の午後の時間帯に多く、特に正午から午後3時にかけての3時間に集中している(図-3)。

札幌市内における平成7、8年の事故事例を表-2に示す。札幌市内では、入水による自殺件数が多いことは別として、事故に遭遇した犠牲者が救助される件数も多く、河道や水流の状態、周囲の救助者の有無によって、被害者に幸運がもたらされる場合がある。このうち、中州に

表-2 札幌市内の水難事故

年 別		H7	H8
事故種別	転落	5(1)	7(1)
	入水	3	4(1)
	その他	4(1)	2
被救助者	男	5(2)	5(1)
	女	7	4(1)
	不明・誤報	0	4
救出機関等	消防	7(2)	9(2)
	警察	0	0
	合同機関	1	0
	関係者	4	2
	自力脱出	0	2

()内は死亡した件数。札幌市消防局調べ

取り残されたケースは5件あり、河道の形状によって助かったものともいえる。また、河岸の樹木にしがみついて自力で脱出したケースもある。

これらの事故分析から、河道・河岸の形状的・材料的工夫や河川構造物における形状的配慮によっては、フェイルセーフ機能(万が一の場合の、安全性の確保または向上)を生み出すことが可能であることを示唆している。

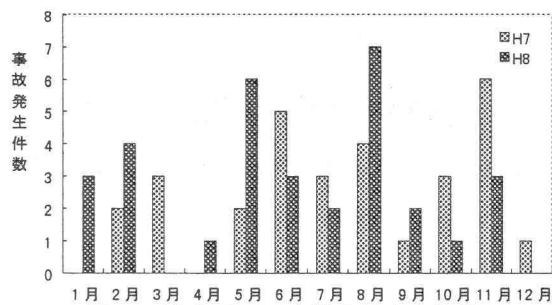


図-2 道内河川の水難事故発生件数 (月別)

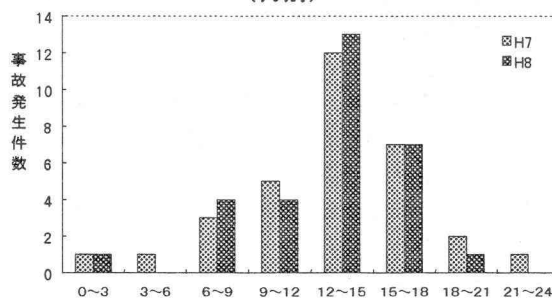


図-3 道内河川の水難事故発生件数 (時間帯別)

4. 人体模型による漂流実験

河川利用者が流水の中に入った場合、流水のエネルギー(流量・流速・水深)、流れの形態(蛇行やエディーの有無)、河床の形状、瀬や淵の形成状態、河床材料、障害物(床止工などの人工構造物を含む)の有無などによって人体に加わる危険性は異なる。したがって、水深が浅い場所でも危険性の高い状態があるなど、単純な危険性の評価は難しい。

流水にのめられた状況で、人間がどのような危険状態に陥るかは、これまで定性的あるいは経験的な説明しか為し得ていない。たとえば、床止工下流側のバックウォッシュに巻き込まれた場合には、ほとんどの場合脱出が困難で、極めて危険な状態であるとされている。また、直線的なコンクリート護岸などでは、スパイラルフロー²⁾が発生して、一度転落して流された人間が岸にあがることを困難にしているとされる。しかし、これらの経験的な記述を具体的な計測によって明らかにした事例はなく、科学的な説明が待たれていた。そこで、様々な状況下における事故発生のケースを想定し、人体模型を用いた漂流実験を行って、河道の条件と危険性の関係に関する計測を行った。

4.1. 実験の概要

実験は、札幌市を還流する豊平川の異なる河道条件を有する複数の区間において、時期(流量規模)、浮力体(ライフジャケットの有無および浮力の違い)によって実験ケースを設定し、人体模型を流水中に放してその動きを測定する方法で行った。用いた人体模型は、自動車の衝突実験に使用されるのと同様な、人体の関節構造や体重(70kg)、比重を



写真-1 Swimming Dummy

表-3 実験ケース

	場 所	浮力体 (kg)	回 数	流量(m3/sec)
① 床 止 工	KP 13.4	なし 6.5 10	各3回	18.54(H9.6.26)
			各3回	44.72(H9.6.12)
	KP 16.0	なし 6.5 10	各3回	21.9(H9.6.25)
			各3回	43.85(H9.6.11)
② 直線護岸	KP 13.4	なし 6.5 10	各3回	18.54(H9.6.26)
			各3回	44.72(H9.6.12)
	KP 18.6	なし 6.5 10	各3回	26.93(H9.6.24)
			各3回	46.56(H9.6.10)
③ 砂州河岸	KP 14.4	なし 6.5 10	各1回	18.54(H9.6.26)
			各1回	44.72(H9.6.12)
④ 合 流 点	KP 18.6	なし 6.5 10	各3回	26.93(H9.6.24)
			各3回	46.56(H9.6.10)

人間に近づけて製作されたダミー人形に、防水加工を施したものである(写真-1)。

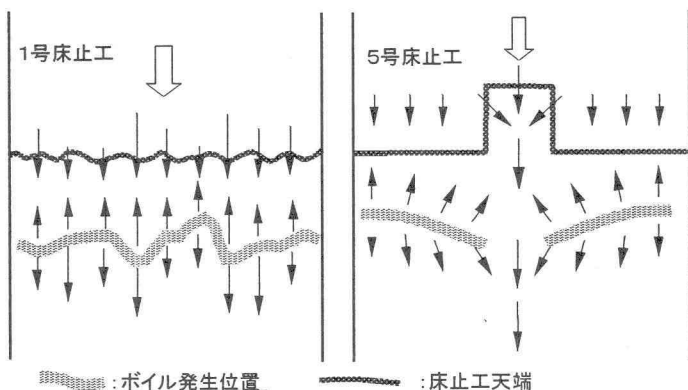
観測は、左右岸および下流の橋梁上を含む複数の個所からのビデオカメラによる流下状態の記録、スチールカメラによる記録、目視による流下状態の観察を行い、実験後に人体模型の向き、表裏、移動速度を解析した。人体模型の刻々の位置および移動速度を割り出すために、河岸には 100m おきに旗を立てた。実験時の流量は、浮子測法または流速計によって実験箇所近傍で行った。

4.2. 実験ケース

実験ケースを表-3に示す。異なる条件として選定した4か所の河道条件は、次のとおりである。

① 床止工

床止工は、事例にもあるとおり、転落事故の可能性が高い箇所である。豊平川の場合、7基の床止工が設置されているが、本実験では1号床止工と5号床止工を用いた。1号床止工(写真-2)は、天端のコンクリートおよび落差部分に不規則な凹凸があるために、下流のバックウォッシュの発生状況に強弱ができています。5号床止工は、天端のコンクリートが直線状であるが、中央部分に魚道を目的とした切り欠きが設けられており、切り欠き部分の下流には流速の早いシュートが形成されている。しかし、その部分を除く天端の下流には、一様なバックウォッシュが形成されている。全体的には、図-4のような水面流速の分布となっている。



ベクトルは水面の流速を概略表現したもので、数値的な意味を有していない。

図-4 1号および5号床止工下流の水面流況スケッチ

② 直線護岸

山鼻川合流点上流左岸では階段護岸、水穂大橋下流左岸では平面的なコンクリートブロックによる傾斜護岸であり、水際線はほぼ直線状である。いずれも護岸前面の河床には護床ブロックが敷設してあるが、実験時には水深1m程度で、土砂の堆積や深掘れなどの変化はなく、一様な直線状河岸を形成している。

③ 砂州河岸

直線護岸の条件に比べると、土砂の堆積による河床の凹凸があり、河岸には柳を主体とする植生が繁茂し、人体模型の流下に対する障害が河床河岸に多い。実験は当然のことながら意識のない人体を想定しているが、意識のある人間が流された場合には、容易に引っかかりを利用して自力脱出でき、河岸に上がりやすい条件である。

④ 合流点

山鼻川合流点に生ずる複雑な流れ。山鼻川は、水道用水のために豊平川上流の藻岩地点から導水しており、これを利用した発電利水放流も含まれるが、実験期間中は比較的流量が安定していた(実験時はいずれの日時においても約 15~16m³/s)。したがって、

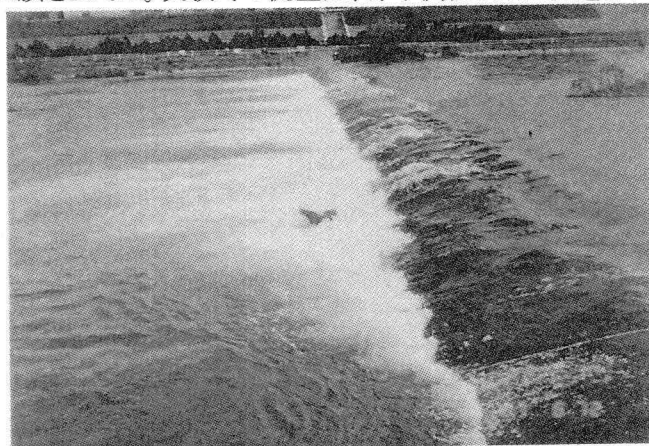


写真-2 1号床止工における実験



写真-3 5号床止工における実験

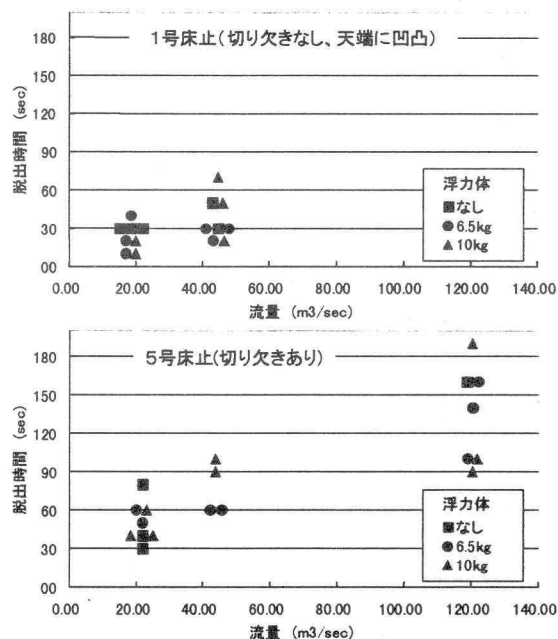


図-5 床止工バックウォッシュからの脱出時間

合流点の流況は豊平川の流量規模によって異なっている。

4.3. 実験結果

① 床止工

両床止工とも、人体模型は河岸に近い個所から放すか、直上流側から放して、バックウォッシュに落下させた。バックウォッシュに巻き込まれてから脱出するまでの時間は、床止工、流量および浮力体の違いによって、図-5のように計測された。

5号床止工では、バックウォッシュに巻き込まれている間は、床止工の堤体前面を落下するフェース部の流水に影響されて、人体模型が回転しながら床止工中央部の切り欠き部に移動していった。切り欠き部のシュートに引き込まれた際には、移動速度を増して下流に脱出した。ただし、浮力の高いケースでは、水平渦に影響されて、再びバックウォッシュに補足され、堰堤近くのホールに戻るケースがあった。脱出に要した時間は、流量が多いほど長くなっている。浮力体の違いによる脱出時間の差異は、明確には認められなかった。

1号床止工では、人体模型が中央部に移動しながら、途中にバックウォッシュの弱い個所、すなわち弱いアウトウォッシュが堰堤の近くから発生している個所で、その流れに乗って脱出した。脱出時間は、5号床止工の場合より短い。浮力体の違いによる脱出時間の差異は、ここでも明確には認められなかった。流量約 $44\text{m}^3/\text{s}$ での実験時、5号床止工のボイルの発生位置は、両岸近くでは堰堤から 3m 程度の距離で、中心のシュート近くでは堰堤から 5m 程度であり、その間は直線的に連続していた。また、同じ時期の1号床止工のボイル発生位置は、5号床止工のボイル発生位置よりも堰堤に近い部分であり、場所によって堰堤からの距離は $1\sim 5\text{m}$ と、まちまちであった。

② 直線護岸

人体模型の平均移動速度を図-6に示した。移動速度はスタートから実験終了までの間、ほぼ一定であった。浮力体の有無や浮力の大きさに関する影響は、ほとんど有用な差が見られなかった。

流量に対しては、河岸付近の流速に反映するために、同一個所では流量が大きいほど人体模型の移動速度が速い。

③ 砂州河岸

人体模型の平均移動速度を図-7に示した。人体模型は、河床の砂州や護床ブロックに引っかかるために、移動～停止を繰り返す形で流下した。停止した場合は、流れに押されながら人体の向きを変えて再び動き出すことが多い。平均移動速度は、直線護岸区間よりも小さい。また、浮力体の有無や浮力の大きさに関する影響が見られ、浮力が大きいほど平均移動速度が早い。原因は、浮力が小さい場合には、人体模型が、より水底の障害物に触れ易くなるためである。また、随所に発生しているエディリーなど、流れの形態が複雑なため、人体模型の移動位置や方位角が変動した。

④ 合流点

人体模型は、本流左岸の合流点上流から放流し、合流点を過ぎて再び本流に流されるまでの間、移動状況を観測した。図-8に流量 $=46.56\text{ m}^3/\text{s}$ 、図-9に流量 $=26.93\text{ m}^3/\text{s}$ のケースにおける人体模型移動速度および人体の方位角を示した。また、移動軌跡平面図を図-10に示した。

豊平川の流量が $46.56\text{ m}^3/\text{s}$ のケースでは、合流点上流までは、人体模型は流心に沿って緩やかな右曲がりの河道を少しずつ左岸護岸に近づきながら、体の向きを変えずに移動した。合流点に差し掛かると、反時計回りに回転しながら山鼻川出口に形成されたエディリーに引き込まれ、移動速度を落とした。山鼻川の流心に乗ると、再び移動速度を回復して、豊平川本流に押し出された。人体模型は本流の流れの左岸よりに乗り、河岸に近い位置にあった。

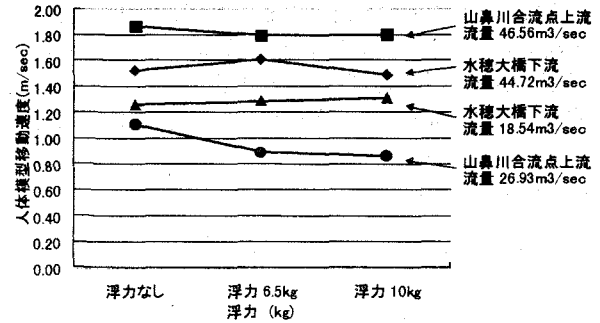


図-6 人体模型の平均移動速度(直線護岸)

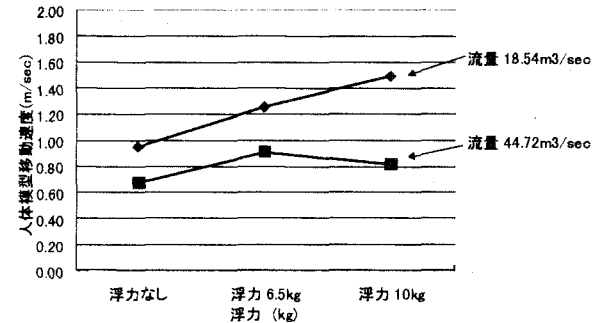


図-7 人体模型の平均移動速度(砂州河岸)

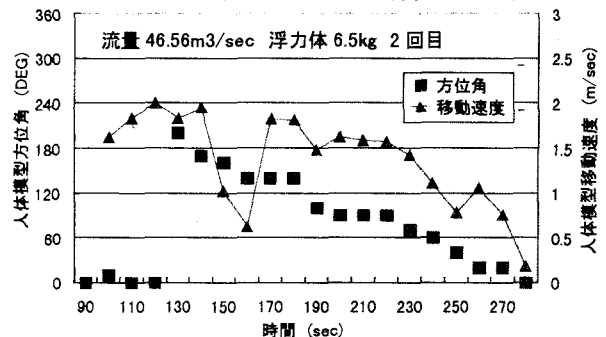


図-8 合流点での人体模型の動態例1

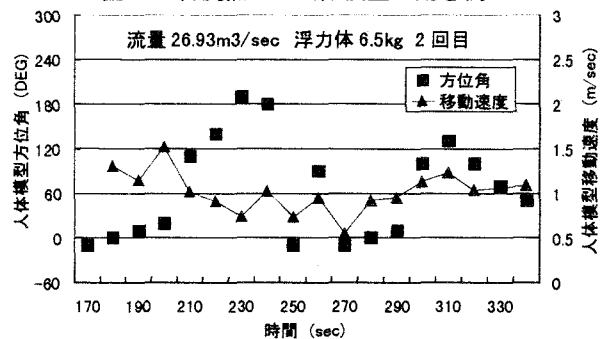


図-9 合流点での人体模型の動態例2

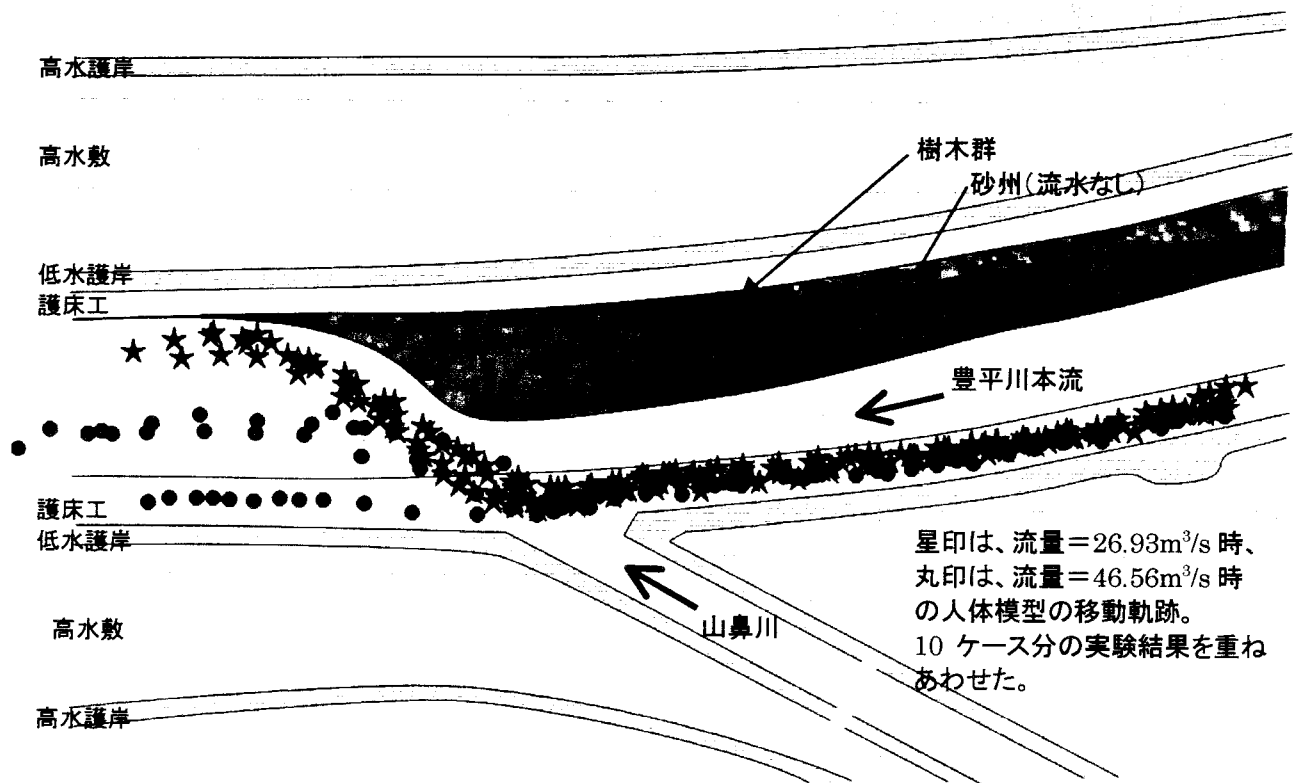


図-10 人体模型の移動軌跡平面図

一方、豊平川の流量が $26.93 \text{ m}^3/\text{s}$ のケースでは、上記のケースよりも低速で合流点に進入したあと、すぐに山鼻川の流れに押されて本流に押し出された。本流では、河道の中央付近を流下した。

4.4. 実験に関する考察

床止工の実験においては、1号、5号両方とも、ある時間内に脱出できたが、天端が直線状で、下流に一樣かつ大きなバックウォッシュが発生していた5号床止工においては、中央部のシュート部がなければ、床止工中心部まで移動した人体模型は、脱出不能となっていたと思われる。

したがって、床止工の下流に発生する流れが、「一樣なバックウォッシュとにならないような構造」を有することは、万が一の脱出時間を短くする上で有効であると考えられる。今回の実験対象とした5号床止工は、安全対策ではなくあくまで「魚道」としての切り欠きを設けられたものだが、結果的には緊急事態の対人安全性も高められたことになる。

床止工に発生するバックウォッシュでは、浮力体を体につけていたほうが危険であり、万が一巻き込まれた場合はライフジャケットを脱ぐことも脱出方法の一つ、との説がリバーレスキュー関係者の間でこれまで言い継がれていた。これは、落ち込み～ボイル～バックウォッシュを繰り返す循環流には、浮力の大きな物体ほど容易に取り込まれやすいと考えたからである。しかし、実験結果を見ると、流量 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の実験で、浮力の大きい場合に若干脱出時間を要したほかは、全体としては浮力体の有無、浮力の大きさに関しては、ほとんど差が見られなかった。むしろ流れの部分的な変化あるいは微妙なバックウォッシュの強弱によって、脱出の可能性が生まれることがわかった。

流量が大きい場合には、より脱出時間が長く、5号床止工で流量 $= 120 \text{ m}^3/\text{s}$ 超の場合、90～180秒を要している。これは、形成されるバックウォッシュが流量の増加とともに強くなり、さらに横断方向のエネルギーの差が相対的に小さくなるために、中央方向へ移動する流れの速度が小さくなるためと考えられる。90秒を超える脱出時間は、被害者の生命確保にとって、極めて厳しい数値である。

直線護岸と砂州河岸の両実験から、河床河岸の地形変化が少ない直線河岸より、地形変化や流れの変化が多い砂州河岸のほうが、人体模型の移動速度が遅く、岸へ漂着する可能性も高まるといえる。意識のある被害者を仮定すると、さらに大きな違いがあるといえる。

合流部では、本流と支流の流量規模の相対的な違いが、合流部のエディ形成および流況を決定付ける。支流に比べて本流の流量が大きい場合は、合流部支流側に大きなエディが形成され、人体模型は引き込まれる。本流の流量が小さい場合は、エディはほとんど形成されず、人体模型は止まることなく本流中央に押し出される。エディの形成における違いを生む原因は、本流と支流の水位差であり、合流部の巻き込み部分の河道形状(十分に河道幅が広く、本流より河床が低い場合)が、エディの形成を可能にしていると考えられる。

5. 河川利用者の安全性向上に関する考察

5.1. 危険の事前回避と被害軽減

河川管理研究会では、河川利用者の安全性を向上するための対策として、次の諸策を提言している。

- ① 立地の原則(親水施設を危険が増幅されるような場所に設置しないこと)
- ② 地域ニーズの把握(施設の使用方法に関する地域社会の合意形成、リスクに対する責任分担)
- ③ 情報提供(標識、表示板などによる危険情報の提供、自己責任意識の醸成)
- ④ 施設対策(親水施設の構造的配慮、植物帯の配置、危険ラインの表示、侵入規制)
- ⑤ 安全性の維持(追跡調査、河川巡視、愛護ネットワークの利用による指導)
- ⑥ 教育・啓発(教育現場を通じた教育・指導、情報開示、啓蒙)

これらは、危険防止処置として提案され、事故の事前回避のために必要な考え方に基づいている。しかし、危険性の増幅しない親水施設の立地条件は現実にはほとんど存在せず、また、表示による情報提供があっても事故が起きる可能性は依然として存在するなど、いずれの対策にも限界がある。このような場合、事前回避策のみで利用者の安全性を高めるだけでなく、事故発生時の被害軽減策および対応策も考えなければならない。

事故発生時の被害軽減策には、①状況がより深刻な事態に至らないようにするための対策(流下防止柵、浅瀬の設置、構造物の鋭角除去など)、②救助を補助するための対策(救助ロープの設置、警報ベル・通報電話の設置など)、③その他のソフト面での整備(レスキュー技術の普及、救助体制の充実、関係機関の連携強化)などが考えられる。

事例分析(表-2)のように、平成7、8年の豊平川における事故件数のうち死亡件数は2割以下であることを考えると、事前回避とともに被害軽減策がきわめて重要であることが認識できる。また、河川の利用者にとっての安全性は、流水中に落ち入らないことだけではなく、万が一水に入っても、できるだけ安全性が保てることも重要である。最近では、レクリエーションやスポーツとして流水を積極的に利用する形態も普及しつつあり、「水辺の学校」のように、積極的に流水中に入る行動も展開されている。そのような際には、事故時の被害軽減に資するための対策が重要となる。

5.2. フェイルセーフ機能

河川構造的な配慮から得られるフェイルセーフ機能の強化策として、本研究における現時点で得られた初歩的な知見を以下のようにまとめた。

- ① 床止工のバックウォッシュは脱出が困難なきわめて危険な箇所である。脱出時間を短くするためには、直線形状の天端に変化をつけてバックウォッシュを乱したり、既存の直線天端には切り欠きを設けるなど、簡易な改良でも効果が生まれると思われる。
- ② 河床河岸の変化が多い砂州河岸は、変化が少ない直線護岸と比較すると、フェイルセーフ機能が高い。河床河岸の変化を人工的に形成する、河岸に樹木を配置するなどの構造的工夫がフェイルセーフ機能を高める上で有効である。
- ③ 合流点では、エディーを形成する構造的な工夫が有効である。水制工や置き石など、簡単な河岸構造でも、ある程度の効果が発揮されると考えられる。

フェイルセーフ機能は、上記のような河川構造物的対策が、被害者自身の努力によるセルフレスキュー、周囲に人がいる場合の救助などうまく調和することでさらに強化される。したがって、河道・河岸の形態的特性と被害者・救助者の行動との関係を、人間工学的に分析する必要が生じる。今回用いたダミー人形による漂流実験は、こうした総合的な行動分析の一部、すなわち意識のない被害者の漂流ケースとして捉えることができよう。

6. おわりに

自然公物としての川は、自然であるがゆえの必然として危険を内包している。ただし、親水施設としての河川構造物を設けた場合は、利用者のリスクに遭遇する蓋然性の増大および危険意識の変化が生じるため、利用者および管理者双方に責任が拡大する。そこで、河川管理者側に拡大する責任範囲に含まれる方策を検討する必要が生じるのであり、その目標は危険性を完全に除去する、あるいは覆い隠して避けることではなく、利用者および管理者それぞれが自らの責任範囲で安全性を確保するための条件を整備することである。この中には、前節で述べたような危険性の事前回避対策が必要なことはもちろんであるが、アトラティブ・ニューサンスが発生する事実に対しては、フェイルセーフ機能を高めることも管理者側に与えられた課題となろう。今後さらに具体的な構造的な研究へと展開することにより、こうした機能を具体的に河川整備の段階で応用していくためのステップとしたい。

本研究を進めるにあたり、北海道警察本部および札幌市消防局の関係諸氏にご協力いただいた。ここに深謝の意を表する。

¹⁾河川管理研究会(1996): 親水施設における安全対策の基本的考え方について。建設省河川局, 平成8年12月

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