

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	捷水路が設置された河道湾曲区間の水理特性と水理模型実験の改良に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	市山誠
Author(English)	Makoto Ichiyama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9676号, 授与年月日:2014年11月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:石川 忠晴,山中 浩明,木内 豪,中村 恭志,浅輪 貴史
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9676号, Conferred date:2014/11/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

捷水路が設置された河道湾曲区間の水理特性と  
水理模型実験の改良に関する研究

環境理工学創造専攻

市山 誠

捷水路が設置された河道湾曲区間の水理特性と  
水理模型実験の改良に関する研究

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

環境理工学創造専攻

09D533220 : 市山 誠

指導教官 : 石川忠晴教授

# 捷水路が設置された河道湾曲区間の水理特性と 水理模型実験の改良に関する研究

## 目 次

1. 序論	1-1
1.1 研究の背景	1-1
1.2 捷水路に関わる既往の研究, 調査業務	1-2
1.3 研究目的と構成	1-5
2. 水理模型実験業務の現状と課題	2-1
2.1 実河川の治水上の問題と水理模型実験の役割	2-1
2.2 河川水理模型実験業務の現状	2-2
2.3 業務事例によ検討	2-5
2.4 水理実験業務の課題と改良	2-13
3. 捷水路を設置した湾曲河道の水理特性に関する実験	3-1
3.1 検討概要	3-1
3.2 実験の概要	3-1
3.2.1 実験装置の概要	3-2
3.2.2 実験条件	3-3
3.2.3 計測方法	3-4
3.3 実験結果	3-9
3.3.1 水位縦断形の特徴	3-9
3.3.2 平面流速分布の概要	3-10
3.3.3 分流部および合流部の流況把握	3-15
3.3.4 2次流および底面流向	3-17
3.3.5 分流部周辺の水面変動	3-25
3.4 まとめ	3-33

# 捷水路が設置された河道湾曲区間の水理特性と 水理模型実験の改良に関する研究

## 目 次

4. 捷水路野外大型水理模型実験の改良	4-1
4.1 検討の概要	4-1
4.2 実験装置	4-2
4.2.1 模型の概要	4-2
4.2.2 模型縮尺	4-3
4.3 実験条件	4-4
4.4 計測方法	4-5
4.4.1 縦断水面形の計測	4-5
4.4.2 水面流況の計測	4-5
4.4.3 底面流況計測	4-7
4.4.4 水位と水面流速の時空間分布計測	4-8
4.5 実験結果1：捷水路設置時の流況の概要	4-11
4.5.1 縦断水面形の特徴	4-11
4.5.2 水面流況の特徴	4-12
4.6 実験結果2：捷水路設置に伴う流況変化	4-14
4.6.1 水面流況の変化	4-14
4.6.2 底面流況の変化	4-17
4.7 実験結果3：分流部における水位，流速の時空間変動	4-18
4.7.1 水位の変動特性	4-18
4.7.2 流向変動と水位変動の関係	4-22
4.7.3 周期的水面変動の検討	4-24
4.8 まとめ	4-31
5. 結論と今後の課題	5-1
5.1 結論	5-1
5.2 模型実験の改良に伴う費用効果	5-6
5.3 今後の検討課題	5-7

参考文献

## 1. 序論

### 1.1 研究の背景

戦後の治水事業は、頻発する洪水被害と水需要に対して 1964 年に制定された新河川法によって水系一貫の河川管理が進められた。1997 年の河川法改正では河川環境の保全と整備が加わり、河川整備計画では具体的な整備内容が決められた。河川整備における治水では、外力は自然現象である洪水であり、整備区間の河道の状況は様々である。そのため、河道設計や河川工作物の設計における流況変化の予測や施設諸元の検討では、河道地形や施設形状を縮尺模型に再現した水理模型実験がしばしば実施されている。

河川を対象とした模型実験は、模型延長が数十メートルから 100m を超えるような大型模型となることも珍しくない。相似則に基づいた水理模型実験は、複雑な水理現象を再現し直接観察し計測できる特徴を持っており、コンピュータシミュレーション技術が進んだ現在にあっても実務上有用な水理検討手法である。一方、実務の水理模型実験には次のような問題がある。

大型水理模型実験は、模型製作や計測に多くの費用を必要とする。表 1-1 は、捷水路を対象とした大型模型実験費用の内訳の概要である。約 45% が模型製作、55% が計測作業や計測値の整理や図化に要する実験実施費用、残り約 5% が総合検討と称する個別の問題を検討するための費用となっている。個別の問題とは、捷水路では分流比率や適切な水路規模などである。

ただし、計測内容は検討対象施設周辺の局所的流況変化の計測が多く、施設形状の改良に関するものが中心となっている。その結果、水理現象を理解する上で重要と考えられる河道全体の流況変化や 3 次元的流況に関する計測が不十分なものとなっている。

表 1-1 捷水路を有する河道の模型実験費用

	捷水路実験業務		備考
	直接費(万円)	比率(%)	
河道模型設計製作費	930	44	模型改造除く
予備実験および検証実験	140	7	
本実験	980	46	
総合検討, 考察	75	4	
合計	2, 125	100	諸経費別

河川の水理模型実験において共通する計測項目は、流量、水位、流速、および流況である。流量は、電磁流量計が使用される場合もあるが、越流水深から推算する検定

堰<sup>1</sup>が一般的である。水位計測は、静的に水面位置を計測するポイントゲージが一般的であり、動的な水位計測として、サーボ式水位計や容量式波高計等が使用される。流速計にはピトー管やプロペラ式流速計等があるが、電磁流速計は扱いが簡単であるなどの理由でよく使用されている。流況観察は、スケッチや写真から近年はデジタルビデオが主流となっている。このように、デジタルビデオ等の導入はあるが、計測機器は大きく変わってはいない。

また、検討対象が異なる場合でも計測項目や計測手法およびデータ整理方法は概ね共通しており、新しい計測技術やデータ整理手法の研究、導入が少なく、従来からの計測手法が継承されている。そのため、水理現象を詳細に理解した検討のための改良が少ないと考えられる。このような問題は、次のような状況に起因すると考えられる。

実務の水理模型実験では、実施時に学術論文等を参照し実験計画を立案する事もある。学術論文は情報を入手しやすいが、基礎的な特性を解明したものが主である。一方で、河川工学的検討や計測の留意点を一般に入手することは難しい。これは、実務の水理模型実験の知見は業務成果であるため一般に情報が流通し難いためと考えられる。また、水理現象をこれまで以上に詳細に計測するには、多くの費用や技術が必要となると、実務者が考えている為と思われる。

本研究は、一般的に多くの費用を必要とすると考えられる河道水理模型実験において、単独の支川合流などに比べて流況が複雑でありより多くの検討費用を必要すると考えられる湾曲河道区間に設置される捷水路に焦点をあて、河川工学的検討ポイントや新たな計測手法、およびデータ整理方法について検討する。

捷水路は、河道の分流と合流の両方を有した治水施設である。学術研究では、分流又は合流について個別に扱われたものは多くあるが、分合流を有する捷水路の検討ポイントや基本的な水理特性について検討されたものは見当たらない。捷水路が設置された河道の河川工学的検討ポイント、基本的水理特性を示すことにより、治水上の課題を見落とすことなく、効率的な水理模型実験業務の遂行が可能になると考えられる。

## 1.2 捷水路に関わる既往の研究、調査業務

洪水疎通能力が不足する河道屈曲部において、地形条件等の影響で河積拡大が困難な場合、屈曲部の上下流をつなぎ、洪水の一部をバイパスすることがある。このような治水施設を捷水路と称しており、日本全国に比較的多く分布している。岩屋<sup>2</sup>は、放水路とのその諸元を放流形態、水路構造、水防体制の項目で分類しており、その中の水路形態Ⅴが捷水路に該当する。水路形態Ⅴは、「放流先が放流対象河川と同一の幹河川上で行う洪水処理」と定義されている。この水路形態Ⅴに分類される捷水路は、河川管理上河川水路と扱われているものだけで、全国に15箇所整備されている。

捷水路は、分流部と合流部の両方を有しているところに特徴があるが、表 1-2 と表

1-3 に示すように学術的には河川分流部と合流部を個別に扱った研究が中心となっている。例えば、河川分流では、分流比の決定が主な目的となり、基礎水路や実河川を対象に実験や数値解析が行われている。川合と芦田<sup>3)</sup>は、流量配分比や流砂量配分比が水理条件や水路の平面条件によってどの様に変化するか、Y型分岐<sup>4)</sup>と湾曲分岐を対象とした実験を行っている。堀田等<sup>5)</sup>は、河川分流の流況把握に準3次元解析手法を採用することにより、数値解析による分流点付近の詳細な流況を表現、評価する方法を提案している。更に、北村と松原<sup>6)</sup>は、利根川から江戸川への分派点に準3次元解析手法を適用し、実務的な分派率の検討を行っている。また、村岡等<sup>7)</sup>は、分流角度90度において、拡散物質の分配率や濃度分布特性について検討している。

河川合流部では、板倉や本間が基本的な水理特性について初期の検討を行っている。板倉等<sup>8)</sup>は、直角合流する水路を対象に実験と解析を行い、合流点直下に形成される死水域の形状に相似性のあることを示している。本間等<sup>9)</sup>は、平行合流について流れの機構解明を目的とし単純な矩形断面水路による実験を行っている。

数値解析技術の発展と共に乱流モデルによる河川合流部の検討が行われている。玉井<sup>10)11)</sup>等は、 $k-\epsilon$ 乱流モデル<sup>12)</sup>を用いてY型合流水路の断面流速分布特性を検討している。三木等<sup>13)</sup>は、Y型合流の水面形を1次元解析により検討している。大本等<sup>14)</sup>は、Y型合流における大規模渦の構造を実験的に検討している。また、河川平行合流における2次流特性と流砂特性を実験水路により検討している<sup>15)</sup>。岩佐等<sup>16)</sup>は、実河道を対象に合流部の横分散に関する数値実験により検討している。更に、実河川の合流部に関する研究では、西村<sup>17)</sup>や福岡<sup>18)</sup>等が江の川の三川合流地点を対象に非定常3次元解析を行い、数値解析モデルの実河道への適用性を検討している。合流部における河床変動は、河村<sup>19)</sup>や石川・長谷川<sup>20)</sup>が1次元解析により検討している。

表 1-2 河道の合流に関わる主な研究

タイトル	年次	著者
河川合流点における流れの機構の研究	1969	板倉 忠興
河川の合流に関する基礎的研究	1971	本間 仁
河川合流部における河床変動	1972	河村 三郎
河川合流部の水理学的研究	1976	三木 秀夫
乱流モデルによる河川合流部の流れの予測	1987	玉井 信行
河川合流部における流れと横分散	1990	岩佐 義郎
山地河川における分岐・合流流路の変動機構	1991	長谷川 和義
河川合流部の三次元乱流特性	1992	松尾 誠
河川合流部の洪水流と河床変動	1993	西村 達也
河川合流部における二次流構造と流砂特性	1995	大本 照憲
河川合流部の洪水流と河床変動の非定常3次元解析	1995	福岡 捷二

表 1-3 河道の分流に関わる主な研究

研究タイトル	年次	著者
河川分流部における拡散物質の輸送について	1975	村岡 浩爾
河川分流における流量・流砂量配分比に関する実験的研究	1981	芦田 和男
準三次元数値解析手法の河川分流への適用	1997	堀田 哲夫
江戸川流頭部における計画分派の可能性について	2007	北村 匡

表 1-4 河道の分合流に関わる主な研究

タイトル	年次	著者
雄物川 大曲捷水路の水理検討報告	1967	建設省 土木研究所
分合流設計における水理実験の例(旧建設省 土木研究所における実施実験例)	1970	須賀 堯三
捷水路に於ける河床変動計算	1985	黒木 幹男
最上川大淀地区の河道計画に関する検討	1995	建設省 土木研究所
平成 18 年 7 月豪雨時の川内川洪水解析と押込分水路の影響の検討	2008	川池 健司
百間分水路模型実験報告	1979	建設省 土木研究所
横田川分水路の分派機能に関する模型実験	2010	佐賀県

分流と合流を有する捷水路は、学術論文として情報は殆ど流通していない。これは、捷水路に関する検討が業務として実施されているためと考えられる。表 1-4 は捷水路に関わる検討資料を示しており、殆どが実施設計の設計を目的として行われている。表中の旧建設省土木研究所において実施された捷水路の検討は、技術資料<sup>21)22)23)24)</sup>としてまとめられているため比較的情報を得やすい。しかし、業務成果としての実験検討結果は、松本等<sup>25)</sup>による報告のように詳細な検討内容を知ることが困難である。また、表 1-4 の土木研究所技術資料は、模型実験による捷水路諸元の決定を目的として、捷水路設置時の基本的な特性については記述されていない。

以上の事から、捷水路が設置された河道の基本的な水理特性を検討する事は、今後の捷水路の検討において有益な情報となり、模型実験の効率的な実施にも繋がるものである。

## 1.3 研究目的と構成

### 1.3.1 研究の目的

従来の業務として実施されている河川の水利模型実験は、施設の形状や分流比等の諸元検討が優先されている。しかし、それ以外に河道全体の流況変化の把握や詳細な水路特性の把握に基づく検討が必要である。何故なら、河道全体の流況変化は元来河道が有する水利特性の変化の現れであり、治水上の問題を見落とさないための重要な情報であるためである。ただし、業務である水利模型実験は、効率性も重要であり、労力や時間の無駄を無くし、流れの変化に関する情報を得る必要がある。そのためには、予め対象とする施設設置時の河川の基本的水利特性を知っておく必要がある。

よって本研究の目的は、河川の基本的水利特性を踏まえた模型実験の実施が、治水上の問題を見落とすことなく効率的に検討するものであり、水利模型実験業務のレベル向上のための改良となることを示すことである。更に、治水上の問題把握を行うための計測方法の改良を目的とする。本研究は、大きく分けて次の2段階で行う。

先ず捷水路を有する湾曲河道を例とし、水利模型実験における基本的水利特性、即ち検討ポイントを水路実験により抽出する。本研究が捷水路を対象とする理由は、捷水路の基本的水利特性が学術研究によって示されていないためである。

次に、大型水利模型実験を対象とし、基本的水利特性を踏まえた実験計測によって既往の水利模型実験では十分検討できていない治水上の問題を検討可能であることを示す。更に、計測手法の工夫や改良、およびデータ整理方法を検討する。ここで、河川の大型模型実験は、室内の基礎的実験に比べて次のような計測上の制約を受ける。それは、野外であることが多いため天候の影響を受けやすいこと、計測範囲が広いこと、業務であることから実施期間制約を受けやすい、一等である。よって、詳細である一方で効率的な計測、データ整理方法が必要である。

### 1.3.2 本論の構成

本論文の構成は以下の通である。

第1章の「序論」では、業務として実施される水利模型実験の課題についてその背景と概要を示す。また、捷水路に関する学術的な研究が行われていないことを文献調査の結果により示す。

第2章の「水利模型実験業務の現状と課題」では、支川合流と捷水路の二つの実験業務を例に挙げ模型実験を発注する側の課題、模型実験業務を実施する側の課題をしめす。

第3章の「捷水路を設置した湾曲河道の水利特性に関する実験」では、捷水路を有する河道湾曲部を対象とし、断面形、平面形を一般化した水路による実験を実施する。そして、流況変化、河床材料の移動、および水面変動に着目して基本的水利特性を抽出する。

第4章「捷水路野外大型水理模型実験の改良」では、実河道を対象とし、捷水路を有する大型模型実験による第3章で得られた基本的水理特性に基づいた実験を行う。即ち、第3章で見られた捷水路の基本的水理特性によって、既往の模型実験業務では把握できていない治水上の問題を検討する。また、大型模型実験における計測において制約の大きい水面形の時空間分布の計測について新たな計測とデータ整理方法を示す。

第5章では、前章までの研究内容を総括すると共に、水理計測手法の開発や改良に関する今後の検討課題、河川の水理実験業務の改良による河川技術者と発注者の質的向上について述べる。

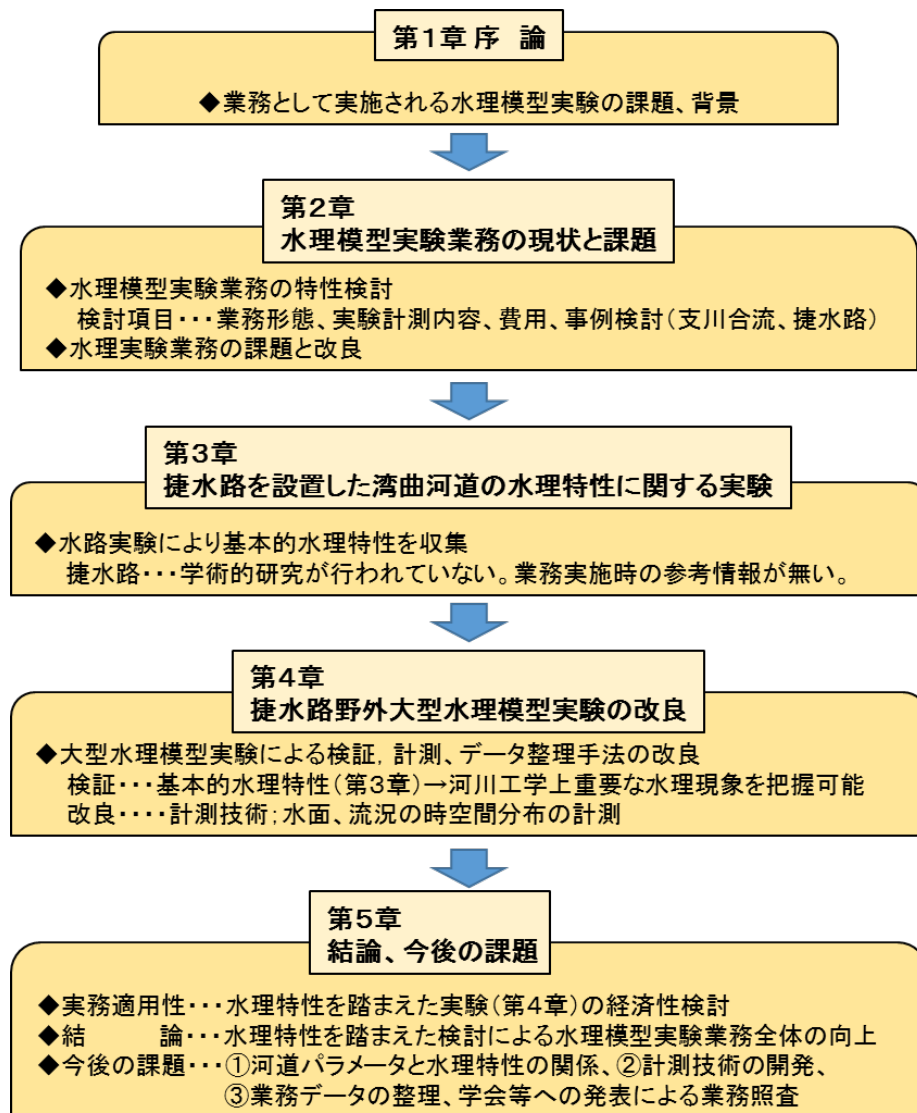


図 1-1 本論文の構成

## 2. 水理模型実験業務の現状と課題

### 2.1 実河川の治水上の問題と水理模型実験の役割

日本の市街地の多くは、洪水時の河川水位より低い低平地に集積しており、堤防からの溢水や堤防の決壊による氾濫被害をうける可能性が高い。日本の治水対策は、国や地方自治体等によって実施されている。近年は、集中豪雨や大規模災害に対応するために、洪水予警報システム等のソフト対策とハード対策（洪水を安全に流下させるための河道拡幅、築堤、放水路や捷水路の整備、およびダムや遊水地等の貯留型の施設）を組み合わせた防災・減災対策が進められている。ただし、直接我々の生命や財産を守るためのハード対策は、重要であり、今後も着実な治水施設の整備が必要である。

ハード対策としての治水施設の設計は、先ず水路断面形や施設の概略形状を検討する「概略設計」が行われる。概略設計では、不等流計算（定常1次元）<sup>26</sup>による水位低減効果等が検討され、次に「詳細設計」が行われる。ここで、治水施設の設計では、流水と土砂の両方の挙動に注意をはらわなければならない。河川は、主に自然の営力によって形成されたものであり、常に変化している。そこに治水施設を設置する場合は、施設近傍の変化だけでなく、周辺河道の流況変化に注意する必要がある。

以下の3項目は治水上問題であるが、施設近傍と河道全体の両面で水理現象を詳細に把握した設計を行う必要がある。なお、本節に記述する設計は水路形状や施設の形状を検討する水理設計を意味しており、堤防の土質や施設のコンクリートの応力を検討する構造設計ではない。

- 河川地形が複雑な場合に流れの3次元性が強くなり、水衝部と称される流れの集中が発生し堤防や河岸の決壊につながる。
- 治水施設周辺の流れが滑らかで無い場合、施設の損傷やエネルギーロスによる上流河道の水位上昇につながる。
- 河床の土砂移動に伴い次のような問題が生じる。
  - 1) 水衝部では局所洗掘が発生し堤防や護岸が不安定となる。
  - 2) 土砂が集積する場所では、疎通断面が減少し水位の上昇につながる。
  - 3) 構造物周辺では局所洗掘により施設が不安定となる。

図 2-1 は、水理現象を把握手法のイメージであり、河道模型実験と平面 2 次元や 3 次元の数値解析が詳細設計に用いられる。その中で、河道模型実験は次のような長所を有していることから、業務では現在も有用な検討手法とされている。

- 1) 相似則を満足した模型実験は、流れや土砂移動の再現に対するモデルの信頼性が高い
- 2) 水理現象を直接観察し計測可能であり、現象の理解が容易
- 3) 治水施設は、社会的説明を求められる場面が多い。模型実験は、水理現象を直接見られるため、河川や水理の専門家以外にも理解しやすく、説得力がある

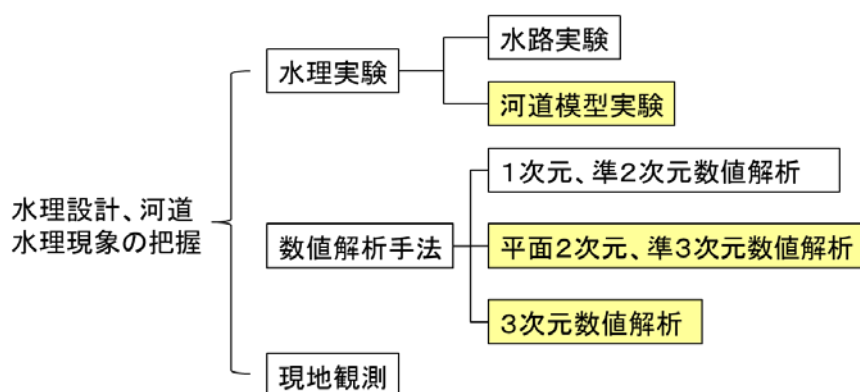


図 2-1 河道水理現象の主な把握手法

## 2.2 河川水理模型実験業務の現状

### 2.2.1 実験業務の検討手順

水理模型実験は、河川構造物の計画、設計、および河道計画において水位や流況、河床変動を検討するための技術的手段の一つである。業務における水理模型実験の、検討区間の延長は、国の直轄管理河川の場合数 km から 10km 近くなる。模型の空間縮尺は、1/50 から 1/100 で設定されることが多く、大型の模型施設となる。また、野外に設置される場合が多いという特徴を持っている。実験模型の製作は多くの時間と費用を要し、計測作業にも多くの費用が必要となることから、模型実験業務では一般的である。したがって、実験計画は、単に計測項目やデータ整理方法を示すだけでなく、模型実験によって治水上の問題を見逃さないような詳細な計測や検討ポイントを踏まえた実験計画である必要がある。

図 2-2 は、旧建設省土木研究所が平成元年にまとめた「河川水理模型実験の手引き」<sup>27)</sup>に示されている実験計画のフロー図である。現在もこの手引きは、水理実験業務の参考となっている。この手引きは、事前の資料収集、検討項目の議論を踏まえた上での実験計画作成の重要性を記している。

しかし、一般的な業務における水理実験計画では、図 2-2 の模型製作以降の検討内容を定型的にとらえ、河川の水理特性を踏まえた実験計画となっていないことが多いと思われる。図 2-4 は、その典型的な実験業務のフローの事例である。模型完成後の予備実験や検証実験は、水理現象の特徴を事前検討し計測計画やデータ整理方法を決定するために重要であるが、このフロー図は予備実験の回数が少なく、十分な情報が実験から得られないと思われる。次にフロー図は、施設改良実験として導流堤周辺の局所的な改良を示しており、河川の水理特性をどのようにとらえ、模型実験に反映するか、また模型実験から河川の水理特性を把握することが示されていない。

上述に示したように、業務における実験計画は、詳細な流況や水理特性を得るような実験計画となっておらず、施設設置前と設置後における水衝部の形成のような流況変化、および土砂移動状況、このような治水的問題を見落とす可能性を持っている。

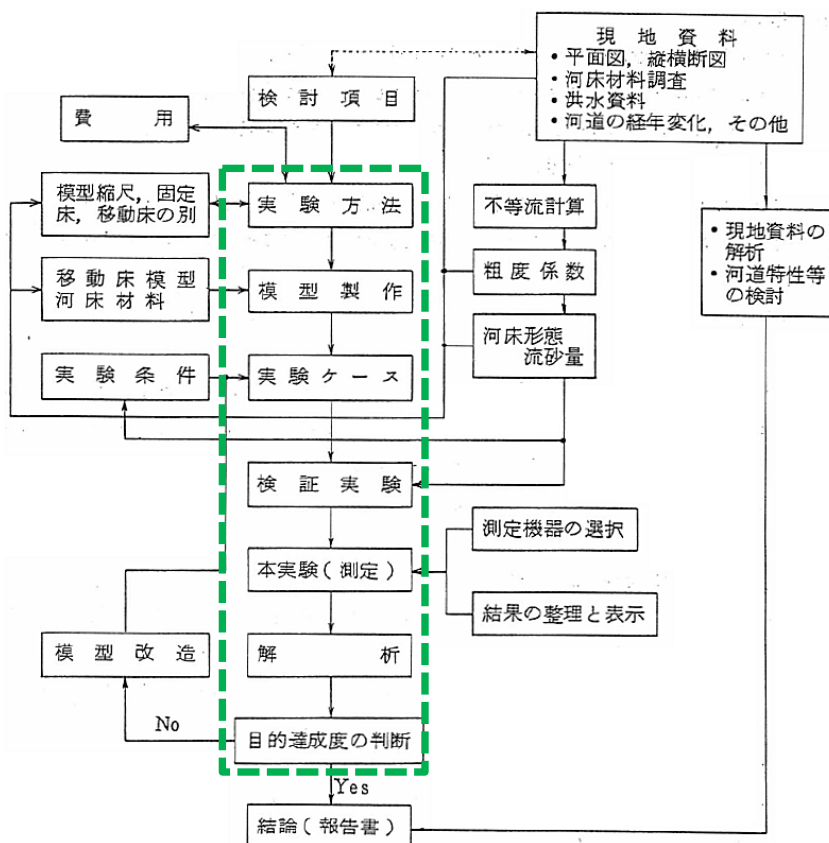


図 2-2 実験計画のフローチャート 27

## 2.2.2 計測内容と業務発注形態

本節は、実業務における計測内容やデータ整理項目、業務仕様書の内容から水理模型実験業務の課題を検討する

表 2-1 は、河川水理模型実験に共通する計測項目を示している。水位、流量、流速、流向は計測器による計測、平面流況は近年 PIV<sup>28, 29</sup> (Particle Image Velocimetry) による計測も行われているが、染料の流下状況の観察による定性評価も主要な計測手法の一つとなっている。実河川の河床材料を砂等で模型に再現したいわゆる移動床模型<sup>30</sup>では、土砂移動状況の計測が行われる。この計測は、通水前後の河道横断測量による河床形状の変化や河床変動量の把握として行われる。以上の計測内容は、模型実験業務に共通するものであり、実験対象施設によってその内容は殆ど変わっていない。

実験業務の計測結果の整理方法は、業務の仕様書の中で明確に示されていないことが多い。これは、模型実験業務がプロポーザル業務<sup>31</sup>として発注されているためと考えることができる。表 2-2 は、実験業務における仕様書の事例である。その 1 はデータの考察について、その 2 はデータの整理について記されているが、具体的な内容までは示されていない。データの考察や整理は、受注者（実験実施者）が提案した内容で行うことになっている。

本来プロポーザル業務では、実験実施者が提案する計測方法やデータ整理方法は、実験対象の基本的な水理特性を踏まえた内容であるべきである。しかし、そのような計測方法やデータ整理方法になっていない場合がある。そして、表 2-1 に示した共通する計測項目によって検討されており、治水上の問題を見落とす可能性がある。

表 2-1 模型実験計画の主な計測項目

計測項目	計測位置	アウトプット	備考（計測／目的）
水位	左右岸沿い 河道中央	最高水位縦断図	定量的／施設効果
流量	模型途中 模型上下流境界	分流量、分流比	〃
流向、流速	代表断面	横断流速ベクトル	定量的／施設の影響
平面流況	一定区間	水面ベクトル 染料流下写真	定性的 問題の有無・考察
土砂移動状況	代表断面	河床横断形状 堆積状況写真	〃

表 2-2 河道模型実験業務の特記仕様書事例（抜粋）

<p>実験業務(その1)</p> <p><b>第25条 総合検討</b></p> <p>水理模型実験で得られた結果を整理し、安全性（治水効果）、経済性、施工性等を総合的に評価し、最適な対策方針を決定する。</p>
<p>実験業務(その2)</p> <p><b>第21条 実験及び測定資料の整理</b></p> <p>分水路やその周辺の河道掘削などの対策工を対象に、対策工を決定するための実験等を行い、実験等で得られた結果を整理・図化する。実験項目および実験ケース数は以下の合計ケース22ケースとする。</p>

## 2.3 業務事例による検討

### 2.3.1 実験対象施設による検討内容の比較

一般的な河道水理実験として実施頻度が多いと考えられる支川合流を検討した業務、実施頻度が少ない水理実験として捷水路設置を検討した実験業務の例を示す。

#### (1)支川合流を対象とした模型実験<sup>32)</sup>

実験目的は、洪水時に支川からの流れを滑らかに合流させ、支川の水位上昇を抑えるための合流形状を決定することである。実験概要は次のとおりである。

実験対象区間は、延長 2.0km の本川河道と右支川である。模型縮尺は 1/60 とし、低水路部分は現地の河床材料の粒径を縮小した移動床模型となっている。図 2-3 に実験の模型の概況写真を示す。検討流量は実績洪水流量とし、実流量で 5,000～6,000m<sup>3</sup>/s の複数ケースを設定している。

実験業務全体の検討の流れは、図 2-4 に示すとおりである。このフロー図は、業務報告書の内容に基づき筆者が作成したものである。これは、**エラー！参照元が見つかりません。**に示した一般的な実験業務フローと同様である。

計測内容は、水位縦断形、水面の流況、河床高横断形状である。これらの計測内容に基づき、支川合流部における導流堤の長さや高さを比較している。つまり、支川合流にともなう河道全体の詳細な流況変化や水理特性に関する議論は報告書の中には無く、局所的な施設改良が主体となっている。支川合流部周辺における 3 次元流況の計測、流況の考察が改善点と言える。

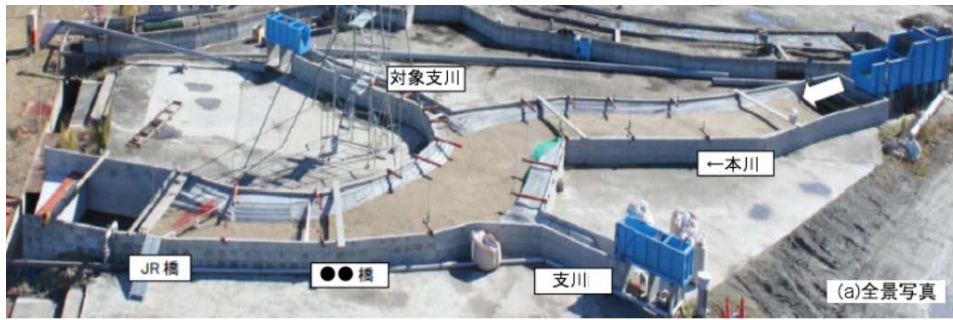


図 2-3 支川合流実験の概要<sup>32</sup>

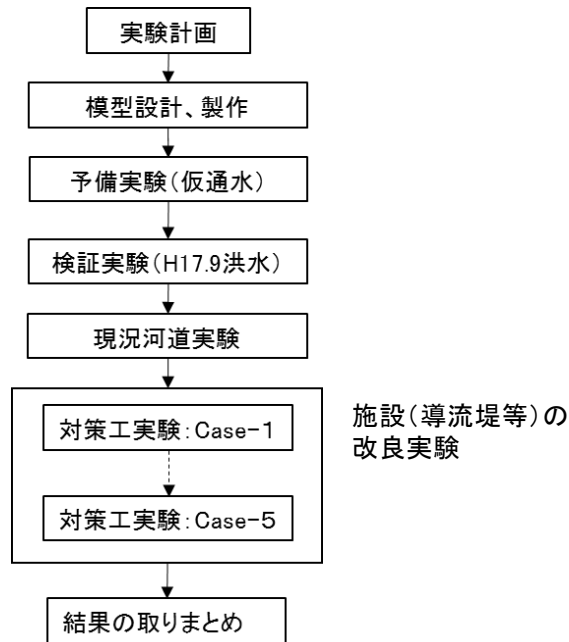


図 2-4 検討内容のフロー図

表 2-3 水理実験業務における比較検討表

実験ケース	C1-1	C2	C3
導流堤長	L=95m	L=150m	L=520m
導流堤高	T. P. +94. 5m	T. P. +94. 5m	T. P. +94. 5m
支川水位	目標水位をわずかに上回る.	目標水位を満足する.	目標水位を満足する.
本川水位	本川への影響は小さい.	同左	導流堤上流で HWL を上回る.
流況	導流堤先端付近は、流速が早く、過流が生じる.	導流堤先端付近の流況は、C1 案に比べ改善する.	導流堤先端付近は、本川の河道幅が狭くなり始める箇所であり、水位上昇が生じる.
河床変化	導流堤先端付近は、流速が速く過流が生じる。河床洗掘が生じる.	C1 案に比べ改善するが、河床洗掘は生じる.	導流堤中間で河床洗掘が生じるが、先端付近の洗掘は生じない.
総合評価	支川での目標水位を満足しない.	支川での目標水位を満足し、本川への影響も小さい.	支川での目標水位は満足するが、本川の HWL を上回る.
	—	—	—

## (2)捷水路の設置を対象とした模型実験<sup>33</sup>

実験目的は、過去の洪水による浸水実績のある河道湾曲部上流の水位を低下させる目的で計画され、実験業務前の机上検討によって設計された捷水路の形状を決定することである。実験概要は次のとおりである。

図 2-5 は、実験模型の全景写真である。実験対象区間は、本川蛇行区間とその上下流の直線河道区間の延長 3.6km、および本川蛇行部の最短部を結ぶ延長約 300 m の捷水路である。模型縮尺は 1/70 とし、模型全体は表面をモルタルで仕上げたコンクリート製である。河道形状は横断測量に基づき現況の地形が再現されている。図 2-5 に実験模型の概況写真を示す。検討流量は検討区間の河川整備計画流量  $4,000\text{m}^3/\text{s}$  を設定している。

捷水路を有する河道の模型実験は、前出(1)の支川合流のような既存の河道形状を改良する模型実験に比べて多くは計画されない。したがって、捷水路の設置に共通する水理特性に関する知見が無い状態での計測と考察となる。また、第 1 章に記したように、同様の捷水路の検討は、業務として実施されているため、実験における知見が学術論文のように流通していないという課題も有している。このような状況下での計測事例から模型実験業務の課題を以下に示す。

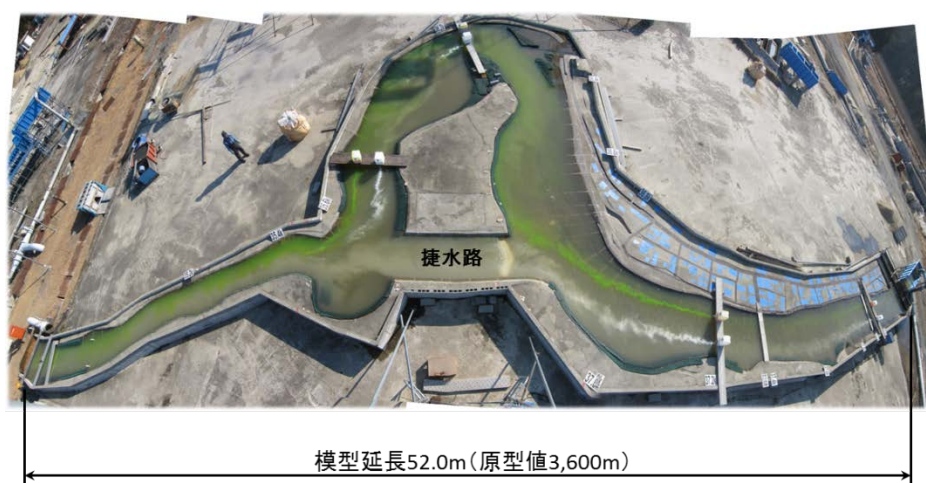


図 2-5 分合流実験の概要

### 1)流速ベクトルの計測

図 2-6 は、本川蛇行区間周辺において電磁流速計を用いて計測された流速ベクトルである。計測は、捷水路設置前の現況河道と捷水路設置後の河道に対して実施されている。ここで、特徴的なことは、業務では施設完成後の問題把握が中心のため、施設設置後の計測を重点的に行っていることである。捷水路設置後の計測は、捷水路を含めた河道区間全体に対して一定間隔の位置において横断流速ベクトルを計測し図化している。一方、現況河道では捷水路が計画される位置の分流点、合流

点付近においてそれぞれ2断面，本川湾曲区間では1箇所のみで横断流速ベクトルの計測を行っている。

図 2-6 に示した捷水路を設置したケースは，机上検討された捷水路形状を対象とした原案実験であり，この後捷水路の分流部の擦り付け形状を改良するような改良実験を行っている。よって，この業務において流況変化を考える基本は，捷水路設置前の現況河道ではなく，捷水路を設置した原案ケースの実験といえる。つまり，施設設置を対象とした実験業務では，施設設置前の計測が散漫となり，本来の河道が有する流況からの変化を捉えにくい問題を有している。

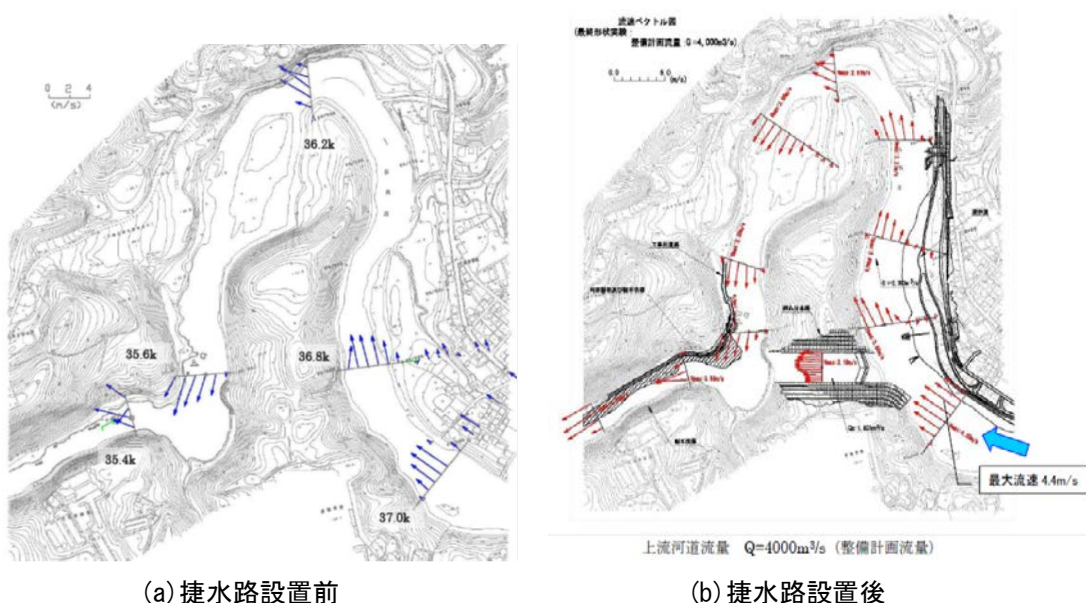


図 2-6 流速ベクトルの計測例（施設設置前後） 33

## 2)計測方法の工夫

この実験業務では，流況把握に対する計測技術上の工夫は見られるが不十分といえる。図 2-7 は，捷水路周辺における水面流速ベクトルの計測状況である。1)に示した流速計測では，計測が散漫となるため PIV による流況把握を行っており，工夫が見られる。捷水路設置を対象とした実験であるため，捷水路，分流部，合流部に着目した計測となっている。しかし，流況に対する考察は，図中の吹き出しに記載されているように，死水域や流速の増減を示す程度となっており，捷水路設置前と設置後の計測結果を個別に検討している。

つまり，元々の河道に於ける主流の流下位置が，施設設置によってどの様に変化したかというような本質的な流況変化に対する考察とそれに対応した計測が不足しているといえる。

図 2-8 は，染料の投入による主流位置の観察方法状況である。これは，実験業務において流況の可視化手段としてよく利用される手法である。この実験業務で

は、捷水路の分流点と合流の流況に着目しており、染料を連続的に横断方向に投入し横断流速分布を可視化する工夫が見られる。しかし、捷水路設置前の河道に対しては同様の計測が行われていないため、捷水路設置に伴う流況変化の考察が不足している。

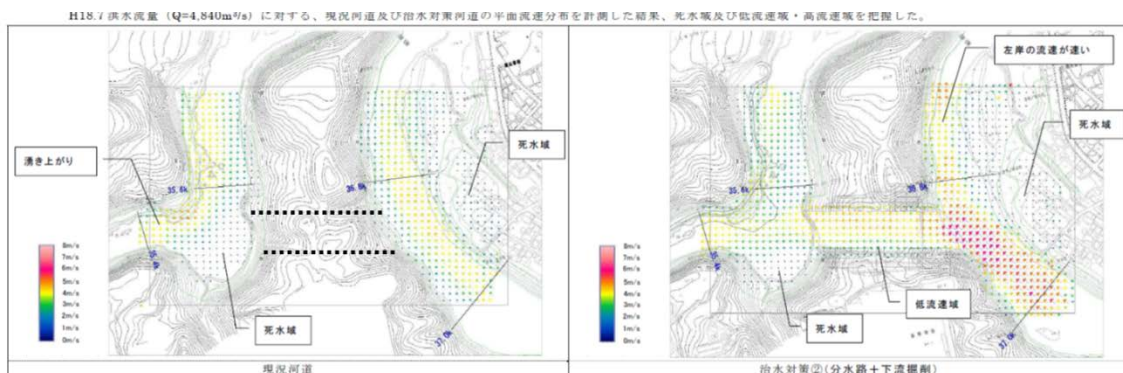


図 2-7 PIVによる水面の流速ベクトル（施設設置前後）<sup>33</sup>

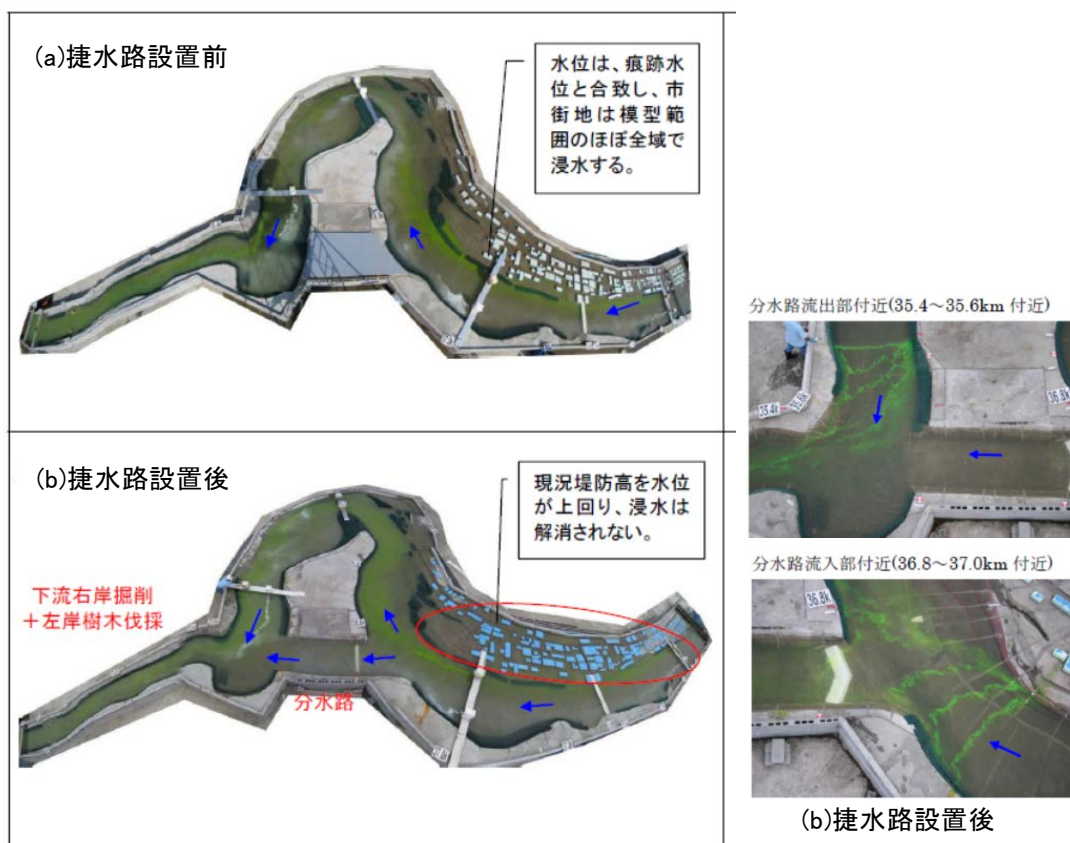


図 2-8 流況観察の為の染料投入状況<sup>33</sup>

本節に示した実験業務は、固定床模型であるため河床変動に対しては、次のような工夫を行っている。準移動床実験として、モルタル製の河床上に10mmの厚さで敷き均した $\phi 1.0\text{mm}$ の石炭粉の移動状況により土砂移動状況を推定している。図2-9は、この実験結果を写真で示した例である。実験結果の考察として、捷水路設置によって分流後の本川で土砂堆積が進む事を確認している。しかし、分流による本川の掃流力の減少によるものとする1次元的な考察にとどまっている。

以上のように、分流と合流を有する捷水路設置を目的とした検討業務では、流況計測や河床変動の検討において計測の工夫が認められる。しかし、本質的な河道の水理特性である流況の施設設置前（現況）から設置後の変化に着目した計測が十分出来ていない、実河道の流れは本来3次元的な運動であるがそれに着目した計測、観測ができていないなどの課題を示している。ここで、流れの3次元的な運動に対する計測とは、断面内の2次流の計測や底面付近の流速分布や土砂移動の計測を意味する。

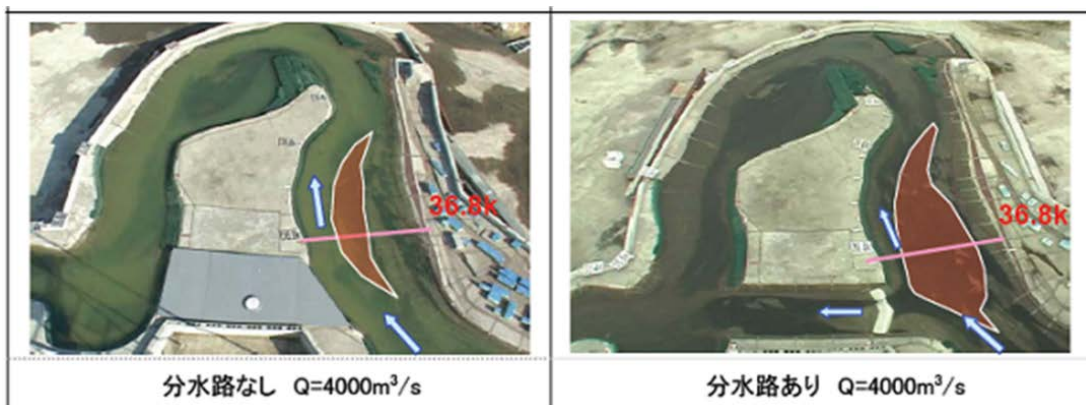


図 2-9 準移動床実験による土砂堆積状況の検討状況<sup>33</sup>

### (3)検討内容の比較

表 2-4 は、検討目的が異なる二つの実験業務の事例を比較しており、両者の計測内容に共通する部分が多い。捷水路の設置を対象とした実験業務の計測は、水面流況を可視化する染料の投入位置を分流部と合流部で行う事や軽量河床材料（石炭粉）を用いた準移動床実験の実施等、支川合流実験に比べて工夫されている。しかしこれは、新たに水路を設置するということから、流況が複雑となること、分流部や合流部では流況変化が大きいということが経験上想定しやすいためと考えられる。よって、両実験業務ともに水理特性を踏まえた計測やデータ整理が不十分と思われる。

次に業務仕様書の内容を比較すると、その計測項目は共通する内容となっている。表 2-5 は、業務の特記仕様書の抜粋である。特徴は、計測項目や計測方法、データ整

理方法が具体的に仕様書には示されていないことである。これは、業務の発注形態がプロポーザル業務であるため、業務の実施方針や方法を実験実施者側からの提案として行うためである。実験業務の実施方針、計測方法が提案によるため、それらに対する事前の知識、知見による工夫や着目が必要である。しかし、二つの実験業務は、計測内容や着目点に大きな違いがない状態となっている。

表 2-4 二つの模型実験業務における計測内容

計測項目	①支川合流実験	②捷水路設置実験	計測器
水位	最高水位	最高水位	ポイントゲージ
流量	合流量	分流量, 分流比	量水槽(検定堰)
流向, 流速	計測無し	横断流速ベクトル	電磁流速計
平面流況	水面ベクトル(PIV) 染料流下写真	水面ベクトル(PIV) 染料流下写真	ビデオ, カメラ
土砂移動状況	河床横断形状 堆積状況写真	軽量河床材料を敷設し 堆積位置を観察	地形測量, カメラ

表 2-5 水理模型実験業務の仕様書

①支川合流実験		②捷水路実験																																									
<p>第23条 模型製作</p> <p>最新の測量データ及び簡易的な測量成果を基に目的別に縮尺の異なる二つの模型を製作するものとする。</p> <p>①景観模型</p> <p>～中略～</p> <p>②大型模型</p> <p>景観模型で抽出した対策工の効果を検証することを目的として、水理実験模型を製作する。模型縮尺は、景観模型の2倍の1/60程度とし、模型製作の範囲は、球磨川 52k400～54k400、小川合流点～0k500、輪川 合流点～0k250 までとする。</p> <p>なお、詳細については、実験計画を作成し、調査職員と協議のうえ決定するものとする。</p> <p>第24条 水理模型実験</p> <p>①景観模型</p> <p>～中略～</p> <p>②大型模型</p> <p>景観模型で抽出した対策案について、大型模型でその効果を検証することを目的として実施する。</p> <p>実験ケースは、実績洪水または河川整備計画相当流量、計画高水流量を対象として、次の7ケースとする。なお、実験ケースの追加など、変更が生じる場合は、調査職員と協議するものとする。</p> <p>1. 検証実験(実績洪水) 1ケース                  2. 現況河道実験(河川整備計画相当流量、計画高水相当流量) 2ケース                  3. 対策案河道実験(河川整備計画相当流量、計画高水相当流量) 2ケース                  4. 最終案河道実験(河川整備計画相当流量、計画高水相当流量) 2ケース                  計7ケース</p>	<p>第19条 模型設計</p> <p>実験計画に基づき、給排水装置を含む模型の設計を行う。実験模型は推込分水路を含む河道 34 k 600 から 38k000 の範囲について、縮尺 1/70 程度とする。模型は、岩河床で製作し現況河床に差し上げると共に、分水路や河道拡張の改造工事が容易に行えるように設計する。</p> <p>第20条 模型製作及び製作管理</p> <p>模型設計図に基づき模型を製作するとともに製作管理を行う。</p> <p>第21条 実験及び測定資料の整理</p> <p>分水路やその周辺の河道掘削などの対策工を対象に、対策工を決定するための実験等を行い、実験等で得られた結果を整理・図化する。実験項目および実験ケース数は以下の合計ケース22ケースとする。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>検討項目</th> <th>河道条件</th> <th>流量条件</th> <th>治水対策</th> <th>河床条件</th> <th>ケース数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①予備実験</td> <td>現況河道</td> <td>当該区間流下能力流量</td> <td>—</td> <td>固定床</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>②検証実験</td> <td>現況河道</td> <td>検証洪水流量</td> <td>—</td> <td>固定床</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>③現況河道実験</td> <td>現況河道</td> <td>計画流量</td> <td>—</td> <td>固定床</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>④治水対策実験</td> <td>計画河道</td> <td>計画流量</td> <td>原案3案</td> <td>固定床</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>⑤治水対策改良実験</td> <td>計画河道</td> <td>計画流量 中規模流量</td> <td>改良案3案</td> <td>固定床 固定床+移動床</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>⑥最終形状実験</td> <td>計画河道</td> <td>計画流量 中規模流量</td> <td>最終形:1案</td> <td>固定床 固定床+移動床</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	検討項目	河道条件	流量条件	治水対策	河床条件	ケース数	①予備実験	現況河道	当該区間流下能力流量	—	固定床	1	②検証実験	現況河道	検証洪水流量	—	固定床	1	③現況河道実験	現況河道	計画流量	—	固定床	1	④治水対策実験	計画河道	計画流量	原案3案	固定床	3	⑤治水対策改良実験	計画河道	計画流量 中規模流量	改良案3案	固定床 固定床+移動床	12	⑥最終形状実験	計画河道	計画流量 中規模流量	最終形:1案	固定床 固定床+移動床	4
検討項目	河道条件	流量条件	治水対策	河床条件	ケース数																																						
①予備実験	現況河道	当該区間流下能力流量	—	固定床	1																																						
②検証実験	現況河道	検証洪水流量	—	固定床	1																																						
③現況河道実験	現況河道	計画流量	—	固定床	1																																						
④治水対策実験	計画河道	計画流量	原案3案	固定床	3																																						
⑤治水対策改良実験	計画河道	計画流量 中規模流量	改良案3案	固定床 固定床+移動床	12																																						
⑥最終形状実験	計画河道	計画流量 中規模流量	最終形:1案	固定床 固定床+移動床	4																																						

### 2.3.2 模型実験業務に掛かる費用

既往の模型実験業務が何に重点を置いているか検討するために、業務費用の内訳を検討する。前節に示した支川合流実験と捷水路に関する実験業務に対し、模型製作、実験の実施、および考察に関する費用を調べた。表 2-6 は、その結果である。費用は水理模型実験業務全体費用から諸経費と技術経費を除いた直接費の概数を示している。

実験費用の内訳は、直接費用の約 40%が模型製作費である。実験計測は、施設形状を改良する検討である「施設検討実験」に多くのケースを設定し直接費用の約 30～40%の費用を投じている。表中の総合検討は、実験結果の分析や考察であるが、全体費用の数パーセントとなっている。

表 2-6 水理模型実験に関わる費用

	①支川合流実験業務		②捷水路実験業務		備 考
	直接費 (万円)	比率 (%)	直接費 (万円)	比率 (%)	
河道模型, 設計製作費	816	38	929	44	模型改造除く
予備実験	161	8	62	3	1 ケース
検証実験	161	8	76	4	1 ケース
現河道実験	323 (2 ケース)	15	76 (1 ケース)	4	
施設検討実験	646 (4 ケース)	30	906 (20 ケース)	43	
総合検討, 考察	32	1	75	4	
合 計	2, 139	100	2, 124	100	諸経費等別

表 2-7 は、捷水路、支川合流以外の水理模型実験業務を含んだ実験費用の比率を模型設計製作費、予備実験および検証実験費、本実験費、総合検討の 4 項目で示したものである。これらの比率は、筆者が所属するパシフィックコンサルタンツ(株)がプロポーザル業務において参考見積もりとして算出した費用に基づいている。このデータによると模型設計製作費は、全体費用の 44～74%、平均 60%を占めており模型設計製作に多くの費用がかかっていることが解る。予備実験は、3～12%、平均 6%の比率となっており本実験着手前の情報収集、検討が十分にできていないと推察される。なお、富士川第二橋梁の業務は、予備実験と検証実験の費用が本実験に含まれていたため、全て本実験費用とした整理した。

本実験に掛かる費用は、業務の目的によって検討ケース数が異なるため、その費用比率は 11～46%の幅を持っており、平均 30%の費用をかけている。一方、実験結果

の考察や分析，水理現象の理解を行う総合検討の費用比率は平均 4%と最も少ない。捷水路であれば分流量，支川合流であれば導流堤形状の決定といった事業に直結する検討内容が中心のため比較的少ない費用になっていると思われる。模型実験から得られる河川全体の水理特性や施設設置による流況等の変化に関するデータ整理や分析を行ったうえで治水上の問題を検討し，施設形状を決定できるように費用を投入すべきである。逆にいえば，そのような提案をできていないことが問題である。

表 2-7 水理模型実験費用の内訳比率

業務略称	川内川	球磨川	五ヶ瀬川分派施設	江戸川	大橋川	円山川中野郷遊水地	富士川第二橋梁	矢作古川	
分類	捷水路	支川合流	河道分流	河道分流	河道	遊水地	河道・橋脚	河道分流	平均値
河道模型設計製作費	44	44	58	66	74	46	68	84	60
予備実験及び検証実験	7	6	7	2	9	12	0	3	6
本実験	46	46	30	25	12	37	30	11	30
総合検討(考察)	4	4	5	7	6	5	3	2	4
合計	100	100	100	100	100	100	100	100	100

## 2.4 水理実験業務の課題と改良

河川の水理実験業務の課題をまとめると以下のとおりである。これらは，予め治水上の問題に関わる基本的水理特性の情報を踏まえた模型実験手法に業務を改良する必要があることを示している。

### (1) プロポーザル業務における提案の不足

河川の水理模型実験は，建設コンサルタント業務として発注される。平成 6 年からプロポーザル（技術提案書）方式が国土交通省で導入<sup>31</sup>されると，国が発注する模型実験業務はプロポーザル方式の場合が多くなっている。

プロポーザル業務では，計測方法やデータ整理方法が河川の特性に合わせて提案されるべきであるが，そうではなく，依然として共通する定型的な内容となっている（参照：2.3 業務事例による検討）。

### (2) 実験業務の計画段階の課題

水理模型実験は，治水上の問題を詳細に検討する手段であるため，実験計画は河川の水理特性を踏まえたものでなければならない。しかし，実際の業務はそうではなく，定型的な実施内容である場合が多い。その結果，治水上の問題を見落とす可能性をもっている。

### (3)計測手法の改良不足

流況や水位、および土砂移動状況の計測内容は、実験対象にかかわらず概ね共通している。2.3の捷水路の模型実験事例では可視化染料の投入方法等で工夫は行われているが、それは捷水路の基本的な水理特性を踏まえたものとはなっていない。

例えば、既存の計測機で水位計測を行う場合は、主にポイントゲージによって静的水位を縦断方向に等間隔で計測している。水位計測機はポイントゲージ以外にも以下のような種類の計測機や手法<sup>27, 34</sup>があるが、計測機の選定が十分検討されていない。

- ① ウェーブフォロワー（フロート式、電気抵抗式、超音波、圧力式 等）
- ② モアレ縞法
- ③ ステレオ式水位測定

流速計による流速測定は、水平2成分の電磁流速計による計測が主体である。流速計にも、ピトー管、2次元や3次元の超音波流速計、電波流速計、など複数の計測方法<sup>27, 35</sup>があり、流況に合わせた選定が必要である。計測位置は、縦断方向には河川管理上設定された距離標毎、横断方向には等間隔で計測しており、河道全体の流況の特徴を踏まえた計測点配置となっていない（参照：図 2-6）。

以上のように、河川の水理特性を踏まえた計測手法の改良検討が不足しているといえる。

### (4)水理特性を踏まえた検討への費用投入

既往の水理模型実験業務の費用を整理した結果、予備実験と実験結果の考察および分析の費用比率が平均4%と6%、と少ないことを示した（参照：2.3.2）。

予備実験では、河川全体の水理特性を十分検討し、計測手法の改良検討が必要である。実験結果の考察では、治水上の問題を見落とさないようなデータ整理や分析を行い、今後の類似する模型実験に活用可能な水理特性の整理が必要である。

### 3. 捷水路を設置した湾曲河道の水理特性に関する実験

#### 3.1 検討概要

業務として実施される河川水理模型実験において、本川河道と支川の合流や分流、放水路等の比較的検討されることが多い施設では、検討や計測の着目点、水理現象の基本的特性を経験的に得やすい。2章で示した支川合流などは、参考となる合流に関する学術論文が多くあり、研究内容の中から現場に対応した知見を見いだすことが可能である。

一方、河道湾曲部に計画される捷水路は分流と合流の両方を有するという特徴を持っているが、学術的研究がこれまで行われていない。また、捷水路を対象とした大型模型実験が頻繁に検討されるものでは無いため、業務としての実験実施者が経験的情報を得る機会は少ない。したがって、基本的水理特性を踏まえた計測計画やデータ整理の実施や適切な水理現象の理解が難しくなっていると考えられる。その結果、実験計測が散漫となり河川工学上の本質的課題を見落とす可能性があり、計測漏れに対する追加計測や再計測により実験計測の効率も悪くなると考えられる。

このように、実業務の河川水理模型実験において、予め検討ポイントや基本的水理特性に関する情報を得ておくことは、本質的な問題を見落とさないためと業務の効率の点で重要である。捷水路は、第1章で示したとおり、基礎的な研究が無く、業務成果として通常国や自治体である発注者のみに報告されているため、基本的水理特性に関する情報を入手することが困難である。また、筆者が知り得る実験業務を見ると、実態は対象とする施設形状の改良に重点をおいた実験であるため、基本的水理特性に関する整理や考察は行われていない。よって、本研究は、断面や平面形状を簡略化した基礎水路を形成し、水路実験によって水面形や流況および底面の土砂移動を計測、観察することで捷水路を有する河道湾曲部の基本的水理特性を検討する。

#### 3.2 実験の概要

本研究で扱う捷水路は、新たに水路を設けることでこれまで一本の河道に対して分流部と合流が現れるため流況変化が顕著な施設である。本章では、矩形断面の湾曲水路に捷水路を設置して分合流水路を形成した。主たる検討は捷水路設置前との流況の比較である。検討のポイントは、流況変化に伴う死水域の形成、主流線の変化による河岸の水衝部の変化、およびそれらに伴う横断方向土砂輸送の変化である。なお、実験水路の形状を実河道に近い地形形状や大型模型実験と同じ形状とせず、単純な水路形状を採用した理由は次のとおりである。

実施施設を対象とした大型模型実験は、いずれも個々の地形条件における検討であるため、その流況には各河川の固有条件がもたらす効果と、分合流の基本的性質が複

合して現れていると考えられる。例えば，模型実験によって把握される水衝りの特性には，捷水路設置による平面形状変化と，分合流付近の河道の縦断形状と横断形状の効果が複合して現れていると考えられる。このような地形固有の特性を極力排除し，捷水路の基本的な水理特性を明確にしていくには，単純な断面形状において分合流の基本的性質を把握することが有効であると考えられる。

### 3.2.1 実験装置の概要

実験水路の平面形状を図 3-1 に示す。左側が上流である。代表断面形状は，図 3-2 に示すとおりである。主水路は水路湾曲区間の上流側と下流側に各 500cm と 300cm の直線区間があり，水路湾曲区間は，曲率半径 100cm の円弧を組み合わせた約 600cm の本川水路となっている。直線区間，湾曲区間共に断面形状は矩形である。水路幅は，直線区間が上流側と下流側共に 50cm，湾曲区間は分流点および合流点の 1 湾曲区間で 50cm から 35cm に変化し，最小水路幅は，35cm である。

捷水路は長さ 400cm の直線形で，水路中心は上下流の主水路の中心線と共通している。断面形状は本川水路と同様に矩形とし，水路幅は 30cm で一定としている。水路床は全て水平である。

なお，図 3-3 は通水中の水路湾曲区間の写真であり，水路底面は合板床で，側壁はベニヤ製の直立壁である。水路内は，黒色でペンキ塗装されている。これは，PIV に使用する流況画像の取得に於いて水面トレーサの判読を容易にするための工夫である。

実験実施時の流量は上流端のバルブで調整され，幅 90cm の全幅堰を取り付けた量水槽で計測される。また下流端水深は起伏堰で所定水位に調整される。

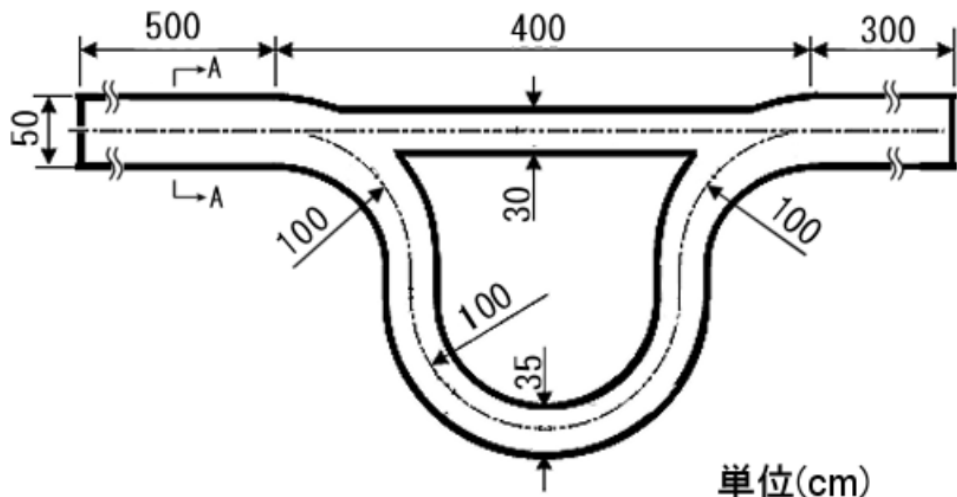


図 3-1 実験水路平面図

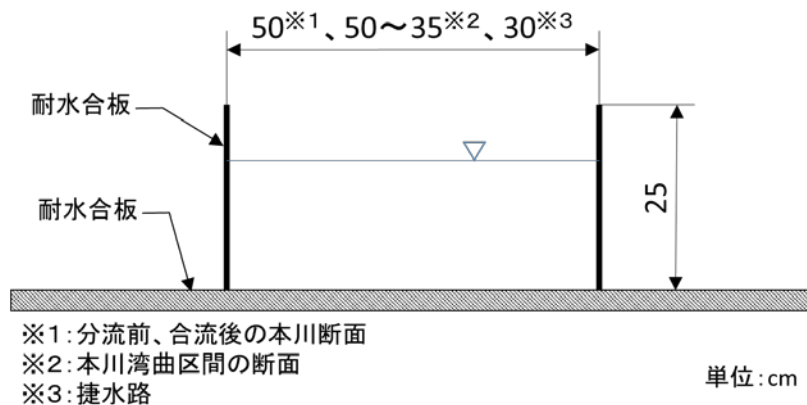


図 3-2 実験水路断面図

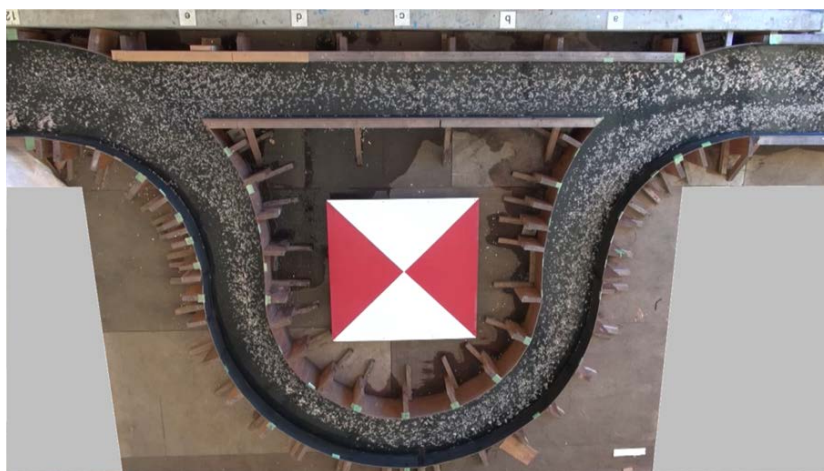


図 3-3 実験水路の外観写真

### 3.2.2 実験条件

実験条件を表 3-1 に示す. Case-1 は捷水路を設置した場合, Case-2 と Case-3 は本川のみの場合である. PIV による計測を有効に行うこと等から, 予備実験を行い, 河道湾曲や断面変化に伴う水面の激しい揺動が生じないような条件を調べ, Case-1 と Case-2 では流量を 19.5 l/s, 下流端水深を 11.3cm とした.

Case-3 の流量は, Case-1 の本川湾曲部の流量に等しい値(11.0 l/s)とした. ここで, Case-1 における分流量は, 捷水路中央部において流下方向の断面流速分布を計測結果から捷水路の流量を推定し, 分流前流量との差分を本川湾曲部流量として求めた.

また下流端水深は, Case-1 で推定された粗度係数( $n=0.017$ )と流量比から設定した. なお, 表 3-1 のフルード数は下流端水深に対して計算したもので, 流れは全区間で常流である.

表 3-1 実験条件

	水路条件	捷水路床高 (cm)	通水流量 (l/s)	下流端	
				水深(cm)	フルード数
Case-1	本川+捷水路	0.0	19.5	11.3	0.33
Case-2	本川のみ	—	19.5	11.3	0.33
Case-3	本川のみ	—	11.0*	10.5	0.21
Case-4	本川+捷水路	5.0	19.5	11.3	0.33
Case-5	本川+捷水路	7.5	19.5	11.3	0.33

※ Case-1 で計測した捷水路通過流量を通水流量から差し引いて設定

実際の河道状況に対比させて言えば，“現河道（捷水路建設前）”の河道疎通能力が 11.0 l/s であり，新たな計画河道疎通能力 19.5 l/s を確保するために捷水路を建設するという設定である．なお，Case-4 と Case-5 は 3.3.5(1)における水面変動に関わる実験条件である．

### 3.2.3 計測方法

#### (1)水面の縦断形計測

ここでの水位計測の目的は，水路全川における捷水路の有無による平均的な水面形状の変化の把握である．予備実験において 10Hz のサンプリングタイムで水位の時系列をサーボ式水位計<sup>36)</sup>によって計測した．その結果は図 3-4 に示すとおりであり凡そ  $\pm 0.5\text{m} \sim 1.0\text{mm}$  で変動している．相対的に変動が大きい場所は分流部の測線 4（参照：図 3-6）である．このように水位の変動は認められるが，一定の水位周辺で変動していると判断されるため，実験業務において一般的に使用されるポイントゲージによって静的に水位計測し水位縦断形を得るものとした．水位の計測位置は，図 3-5 に●で示すように水路中心軸線上に置き，本川では 1.0m 間隔，捷水路で 0.5m の間隔で水深と水位を計測した．

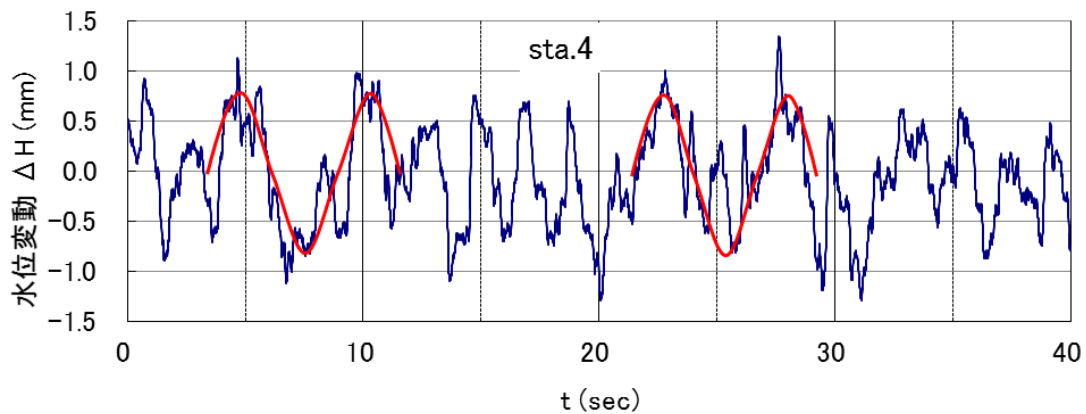
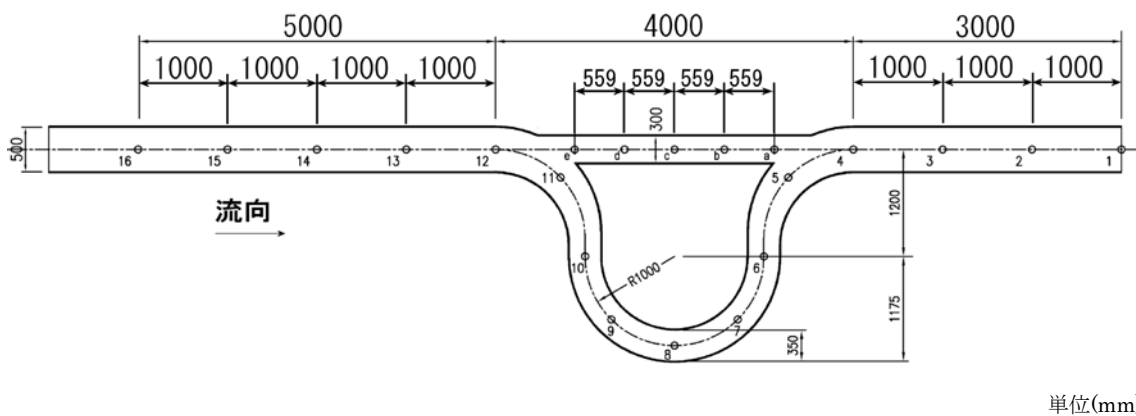


図 3-4 水面変動の時系列



単位(mm)

図 3-5 水面形の計測位置

## (2)断面内流速分布の計測

図 3-6 に示す 23 断面において、主流速 ( $u_x$ ) および横断方向流速 ( $u_y$ ) の断面内分布を計測した。計測には 2 次元電磁流速計(KENEC 社製室内実験用 I 型<sup>37</sup>: 以下、流速計)を用いた。流速計のセンサー部は直径が約 4.0mm、長さ約 10mm の円筒形である。電磁流速計は、側壁や水路床に流速計のセンサーが接近しすぎると計測値が影響を受けるとされているため、図 3-7 に示す位置で計測した。

計測位置は、横断方向には 5 側線とし、左右端測線は側壁から 5cm の離隔を確保した位置としてその内側を 4 等分した。なお主水路直線部と湾曲部および捷水路で水路幅  $b$  は異なっている。鉛直方向には、水路床から 1.0cm、5.0cm、10.0cm の 3 層を標準とした。ただし、Case-3 では最上端の計測位置が水面に接近し、センサー周辺に気泡が発生し計測値が大きく変動し気泡の影響が生じていると判断されたため、気泡が見

えなくなり計測値の変動が解消された水路床から 9cm の位置とした。

流速計からの信号は、A/D変換したのちデータロガー（パソコン）に収集した。データ収集条件は、サンプリング間隔が 10Hz, 収集時間は 1 計測点あたり 30 秒間とした。

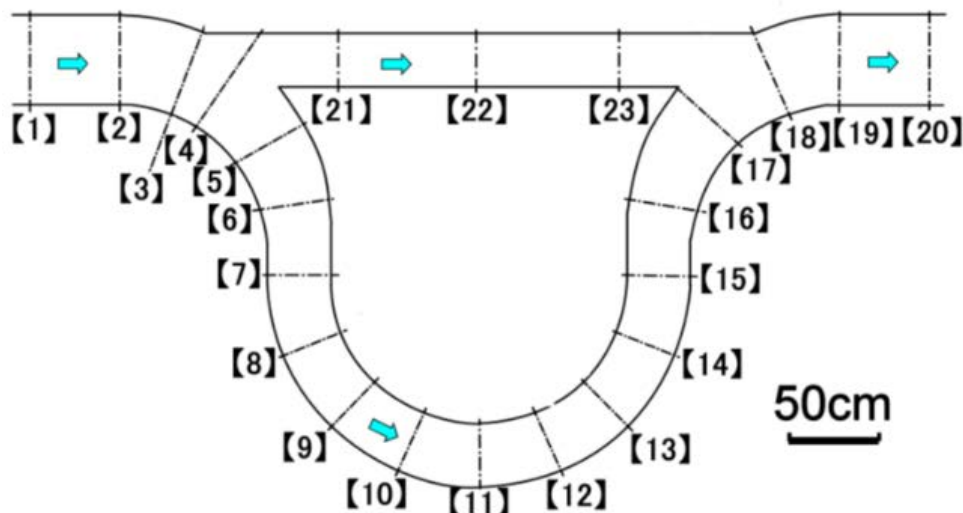


図 3-6 断面流速計測測線

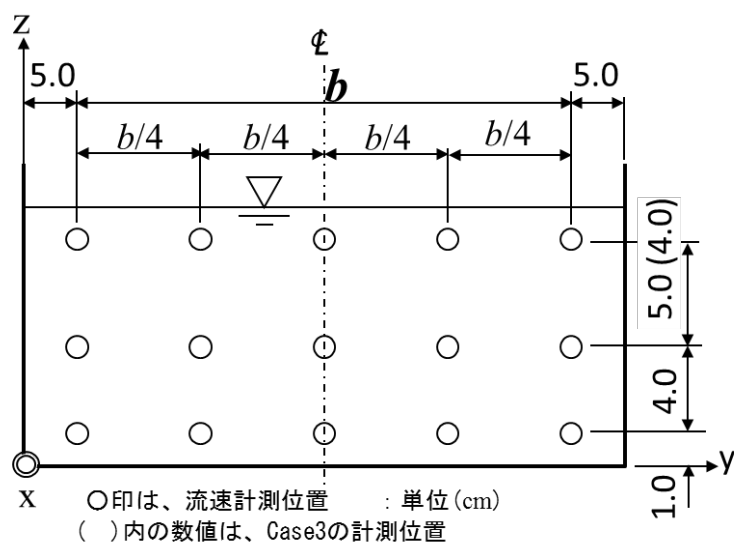


図 3-7 断面流速計測位置

### (3)水面流速分布の計測

流速計では、一定範囲の流速と流向を同時に計測することが出来ない。また、水面の詳細な流況を得るには非常に多くの計測点を必要とするため現実的ではない。そこで、水面流速分布の計測には、流況を撮影した画像を解析<sup>38</sup>する PIV を用いた。流況を可視化する水面トレーサには、5mm と 15mm 目のふるいの間に残ったおが屑を使用した。図 3-10 の左側の写真に水面トレーサに用いたおが屑のサンプルを示す。おが屑は、入手とサイズ調整が容易であるため実務でもしばしば利用される。また、色が白色系であり水路を対比色とすることでPIVにおいて判読し易いなどのメリットがある。

PIV に使用する画像の取得は、水路脇に設置した足場上の高さ 5m の位置に設置したデジタルビデオカメラ(SONY 製 HDR-CX720VX3)によって行った。このビデオカメラの有効画素数は 1440×1080 ピクセル、撮影時間間隔は 1/30 秒である。

取得した流況のビデオ画像は、次の前処理を行った後に PIV 解析を実施した。まず、ビデオ動画から 1/30 秒毎の静止画を抽出する。静止画像は、斜め画像であるため、撮影画角内に設置した標定版(90cm×90cm)を基準として正射影に変換する。次に、二値化処理によりトレーサを明確化する。水路内を黒色に塗装しているため、おが屑の水面トレーサは白色で強調される。

正射影後の分流部の PIV 解析格子を図 3-8 に、合流部の PIV 解析格子を図 3-9 に示す。解析格子サイズは全て 2.5cm×2.5cm である。

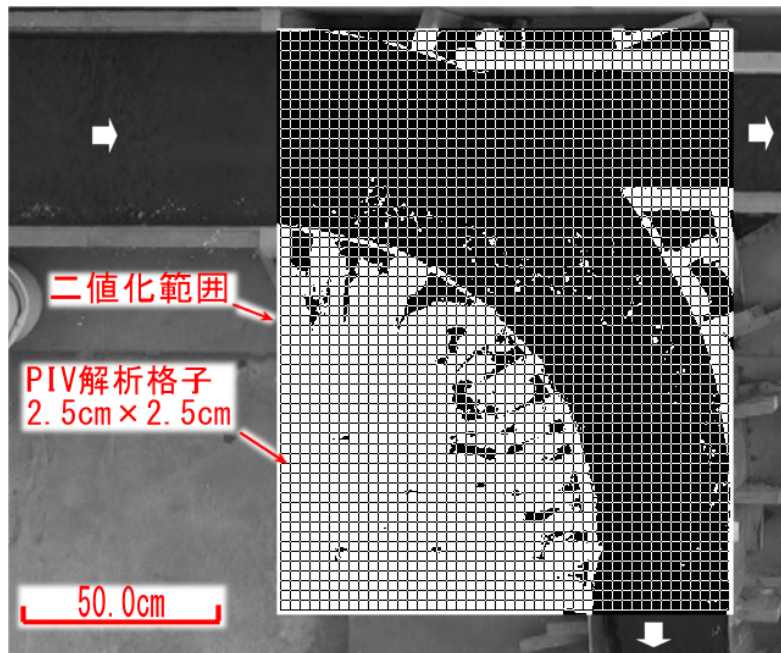


図 3-8 PIV 解析格子 (分流部)

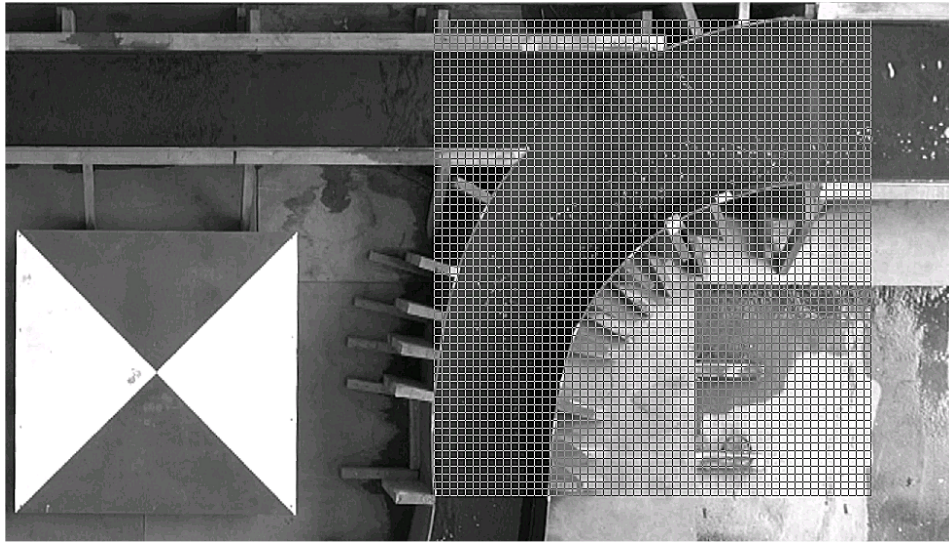


図 3-9 PIV 解析格子 (合流部)

#### (4)底面流況の可視化

実験水路は固定床であるが，底面の流況から河床材料の移動傾向を推定できる．そこで，次のような底面を移動するトレーサ（以降，“底面トレーサ”と呼ぶ）により底面流況の可視化を行った．図 3-10 右側の写真が，底面トレーサのサンプルである．

底面トレーサは，粒径 4～5mm，比重 1.8 の球形であり，プラスチック樹脂の表面を石膏でコーティングしたものである．この底面トレーサは，流れと全く同じには移動しないが，砂等の実際の河床材料よりは容易に転動するので，流況把握が可能である．底面トレーサを上流から投入し，水面流況の場合と同じ方法でデジタルビデオカメラによって流下状況を撮影した．撮影された動画から静止画を抽出した．静止画の抽出時間間隔は，底面トレーサの移動速度が流速に比べて小さいため，0.5 秒とした．この静止画を一枚の画像に重ね合わせることで，各粒子の移動軌跡が現れ，これの画像をモノクロに変換し底面トレーサを明瞭化した後に肉眼で移動状況を判読した．

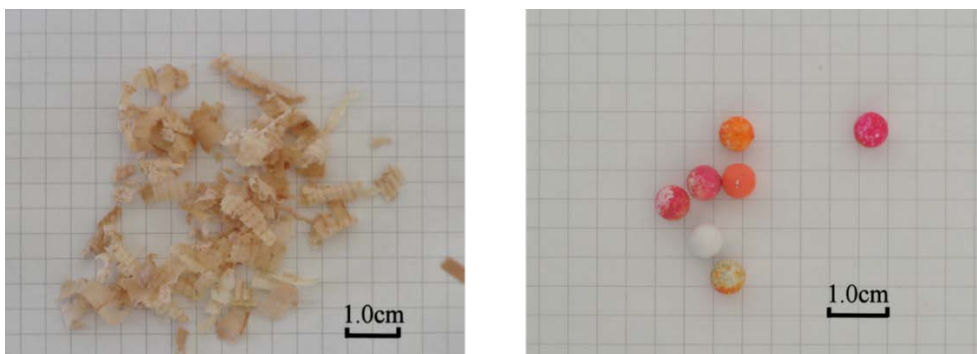


図 3-10 水面，底面トレーサの写真

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 水位縦断形の特徴

各ケースの水位縦断形を図 3-11 に示す。横軸は本川に沿った縦断距離で、矢印(a)は分流点、矢印(b)は合流点を示し、その間が湾曲部となっている。また図中の赤い横軸スケールは、Case-1 に対応した捷水路に沿った流下距離である。

実際の河道での捷水路設置を想定して Case-3, Case-2, Case1 の順で水面形を検討する。

Case-3 は、緑色の線であり現河道に現状流量が流下した条件である。流れが常流であるため、水路幅の狭い湾曲部で水位が低下する。しかし、上流部と下流部の直線区間における水面形は同一線上にある。

Case-2 は、ピンク色の線であり現河道に計画流量が流下した条件に相当する。この場合、Case3 に比べて流量が増加しているため、水深が増加しているが、水路幅の狭い湾曲部での水位低下が大きくなっている。したがって流速は増大するので水頭損失が大きくなるため、上流側の堰上げが著しくなる。

Case1 は、本川水位を黒、捷水路水位を赤で示している。河道と流量の条件は、捷水路を設置した新河道に計画流量が流下した状態に相当する。本川と捷水路のどちらの水位も滑らかに変化しており、Case-2 から水面形が改善されている。分流点(a)から合流点(b)までは水面がわずかに上昇しているが、これは本川と捷水路の合計幅が上下流の直線部より広がっているからである。

以上から、水位縦断のポイントは次のとおりである。水面勾配の変化点は分流部および捷水路で生じ、捷水路設置によって水位面形が一定となる。ただし、捷水路と本川湾曲区間の疎通面積と分流前後の本川の疎通面積の関係によって水面形に変化が生じる。

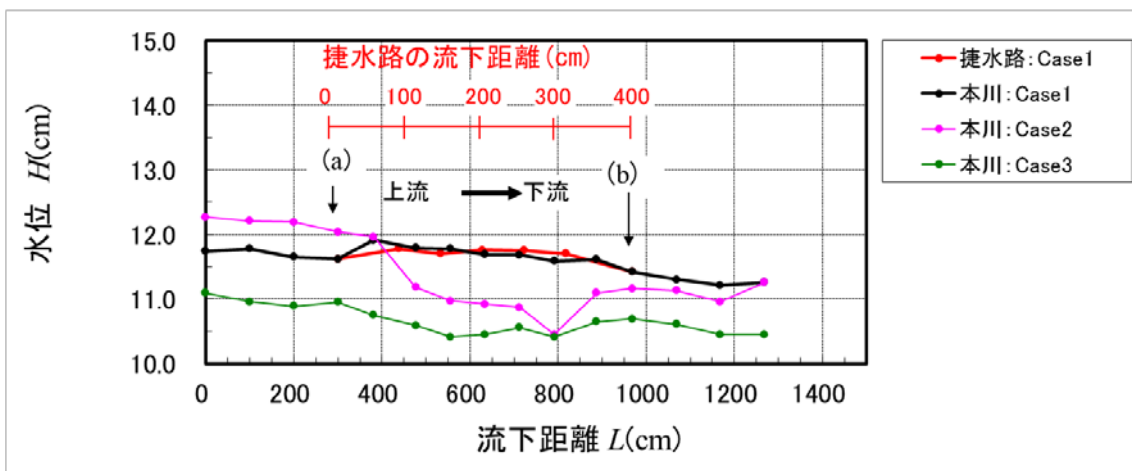


図 3-11 本川および捷水路の水位縦断図

### 3.3.2 平面流速分布の概要

#### (1)水面の流況

図 3-12 は、トレーサを水路上流から一様に投入し、全川にわたり流下した時の画像ある。

Case-1 では、分流地点から下流の本川右岸側にはトレーサが殆ど流下しておらず、死水域となっており、水面の湧き上がりが観察された。合流部の直上流から合流点にかけてもトレーサが無い領域となっており、低流速で湧き上がりが観察された。

Case-2 では、本川蛇行部の流量増加により流速が速くなっている様子が観察されたが、図 3-12 (b) に示すようにトレーサは水面全体を流下し死水域は見られなかった。また、Case-1 で見られた分流部内岸側における湧き上がりも観察されなかったことから、Case-1 に比べて 2 次流強度が弱く主流が卓越していると言える。

Case3 の本川湾曲部の流量は、Case-1 と概ね同じであるが、分流部と合流部に死水域は観察されなかった。

以上から捷水路設置により横断流速分布の変化が大きく、2 次流強度の増加が予想される。

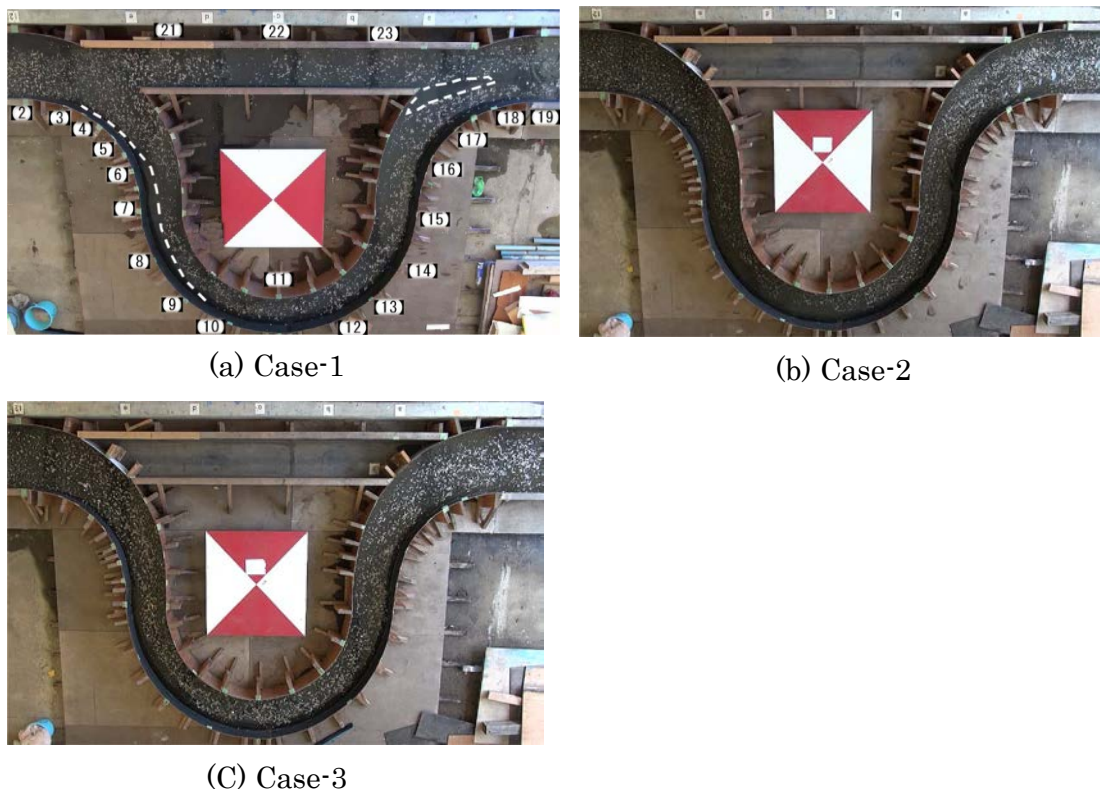


図 3-12 水面の流況

## (2)平面流速分布

水面流況の観察におけるケース毎の流況変化を定量的に把握するために、流速計による計測を行った。

流速計によって計測された水面近傍、1/2 水深付近、底面付近の流速ベクトルを図 3-13, 図 3-14, 図 3-15 に示す。ベクトルの色は、流速の絶対値を示している。水路外沿いの【 】数列は計測断面番号を示している。水面付近の流速分布には、以下の傾向が全ケースにみられる。すなわち、直線部から湾曲部に入ると主流が右岸から左岸に移行し、そのまま湾曲部内岸（左岸）に沿って流れ、湾曲部出口に近い変曲点から右岸に移行する。

しかし、その程度は捷水路のある Case-1 において特に顕著である。図 3-13 の①の矢印で示す領域で死水域が形成され、主流は急角度で左岸に向かい、断面-5 付近に水衝部が生じている。これに対して Case-2 と Case-3 では水衝り角度は比較的小さい。また Case-1 では②で示す位置でも死水域が形成され、主流が右岸寄りになる傾向が強い。Case-2 と Case-3 は流量の違いにより流速絶対値に差が出ているが、流れのパターンは類似している。本川湾曲区間の断面-7 から断面-15 の間では、主流は湾曲部内岸を流下しており、その傾向は全ケースに見られる。ただし、Case-3 では断面-15 の右岸側において流速が 30cm/s 以上に増加しているが、Case-1 の本川湾曲区間の流速は 20~30cm/s の領域となっている。これは、捷水路の無い Case-3 では流下方向の主流が卓越し湾曲間の最短距離を流下しながら加速するが、捷水路を設置した Case-1 では二次流により流れが横断方向に一様化するためと考えられる。

図 3-14 に示す 1/2 水深付近の平面流速分布は、Case-1 では分流直後の内岸（測線 5）では流下方向の流速が殆ど無くなり湧き上がりの生じていることを示唆している。Case-2 は、流速の絶対値が大きいため横断方向の流速差は生じているが死水域となるような低流速は生じていない。Case-3 の本川湾曲部の流速値のオーダーは Case-1 と概ね同じであるが、分流直後の内岸側の流速が違っている。即ち、Case-3 では横断方向に一様な流速分布となり二次流が弱くなっているといえる。

図 3-15 に示す底面付近の流速分布では、分流部において捷水路設置の特徴がよく現れている。即ち、捷水路設置前の Case-2 と Case-3 では水路の湾曲に沿った流速ベクトルとなっているが、捷水路を設置した Case-1 では分流直後で内岸に向かう横断方向の流速ベクトルが強くなっている。

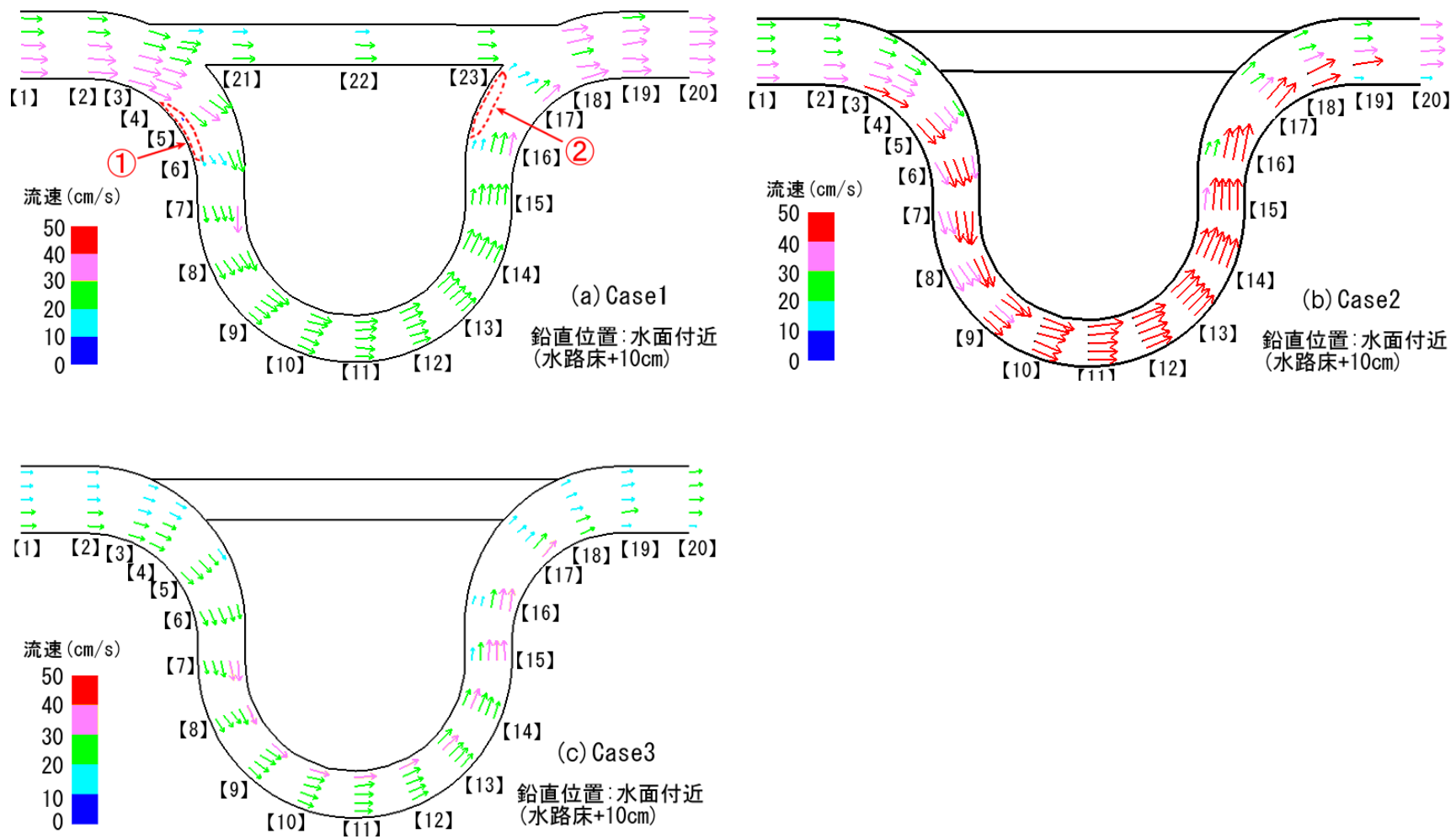


図 3-13 水面近傍の平面流速分布

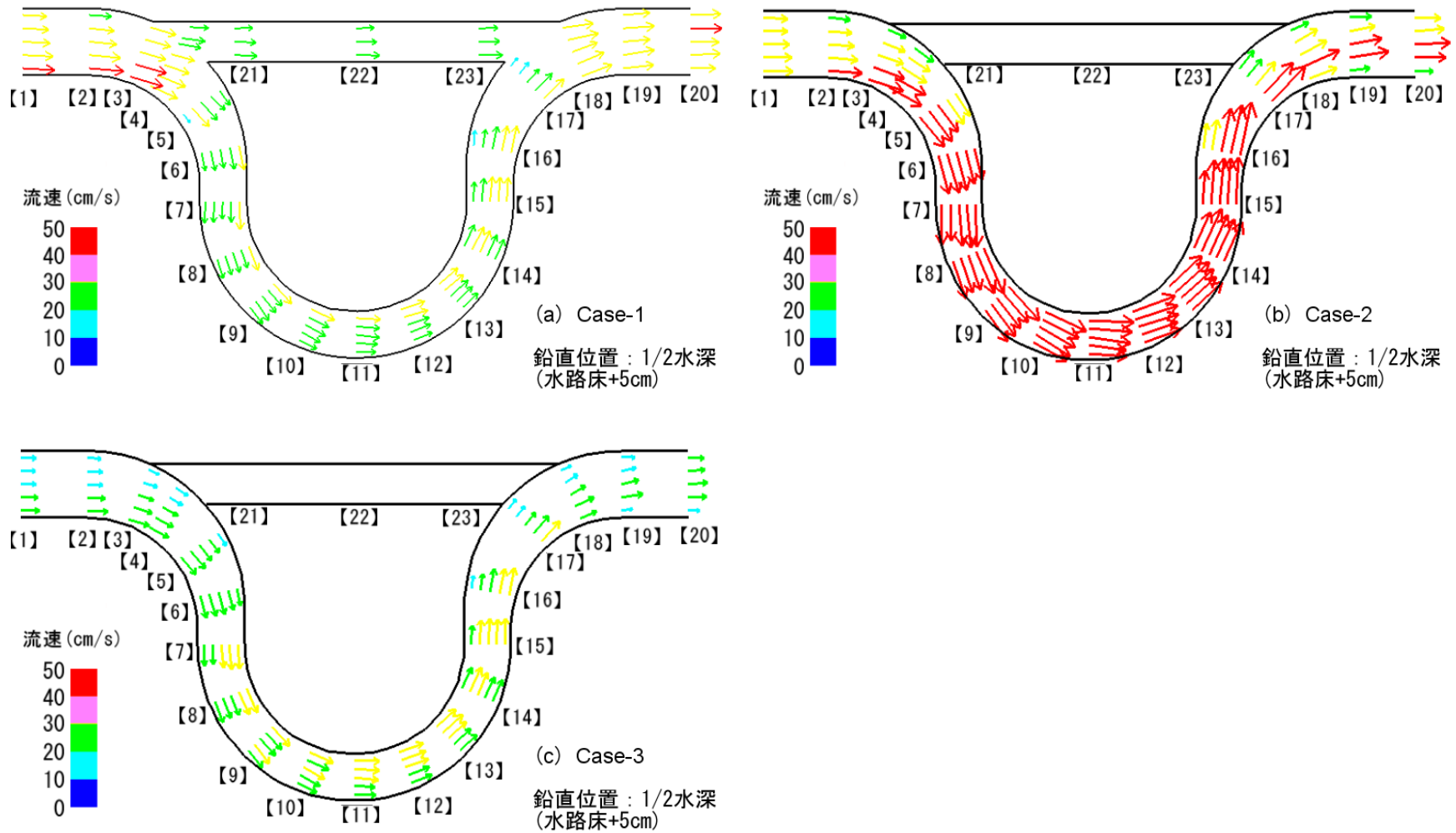


図 3-14 1/2 水深付近(水路床から 5cm)の平面流速分布

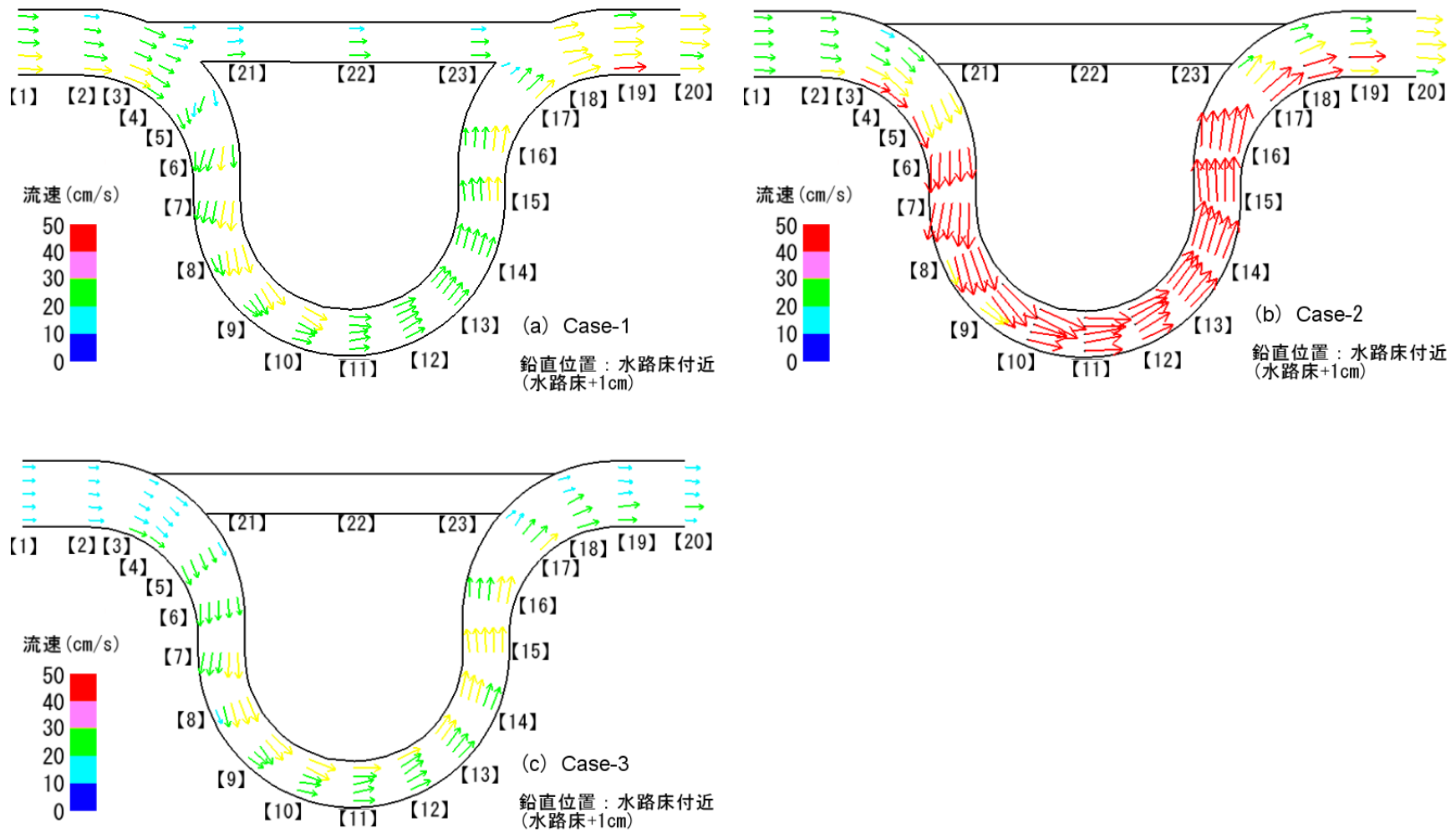


図 3-15 底面付近（水路床から 1cm）の平面流速分布

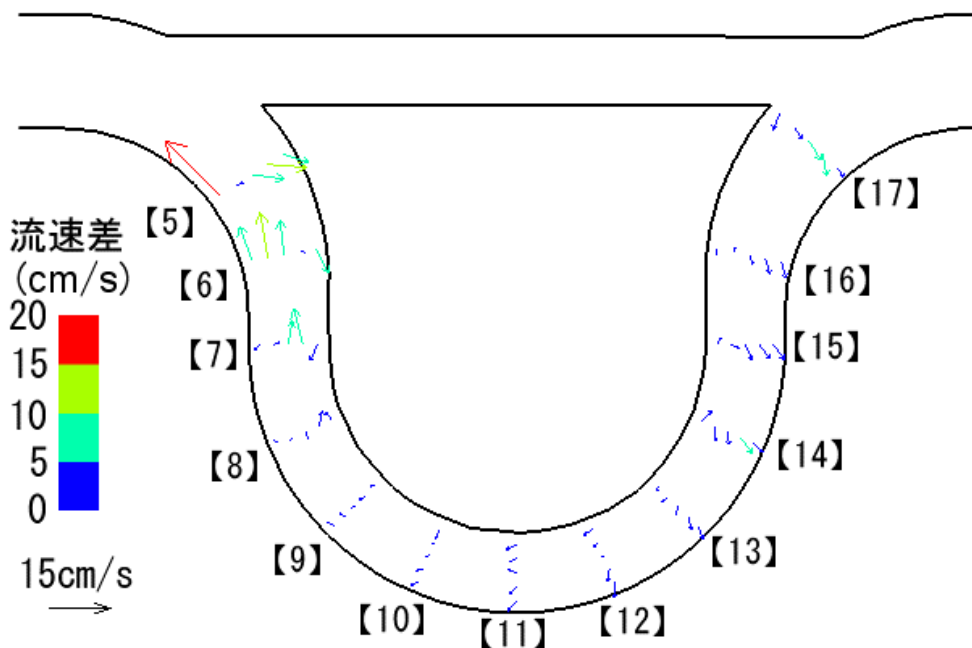


図 3-16 捷水路の有無による流速差ベクトル (Case1—Case3)

本川湾曲区間の流量が概ね同じでありながら，分流部と合流部における流況の違いが顕著な Case-1 と Case-3 をさらに詳細に比較する。

捷水路のある Case-1 と捷水路のない Case-3 を比較するために，図 3-13 の(a)から(c)の流速を引いた差のベクトルを求めた。流量が両者で同じである湾曲部での差ベクトルの結果を図 3-16 に示す。断面 5～断面 7 で特に顕著な差がみえる。これは前述の死水域の形成によるものであり，同様に断面 15～断面 17 にも差がみられるが，こちらは比較的小さい。

### 3.3.3 分流部および合流部の流況把握

流速計による平面流況の結果から流況変化の顕著な，分流部の水衝り角度の変化，合流部の死水域の発生を詳細な水面流速分布により検討する。

流速計は，計測点を増やすと時間を要し，更に同時計測が出来ない問題があるため，PIV により水面流況計測を行った。水面トレーサは，水衝部の下降流によって水面下に潜り込まないため，水面全体にトレーサを投入すると外岸で側壁沿いの流速が卓越し，水衝部を正確に把握できないことが流速計の流速ベクトルと PIV による流速ベクトルの比較によって判った。図 3-17(a)は，水面全体にトレーサを投入した場合の PIV による流速分布である。分流後の本川において，実線で示した流線は平行となっており，水衝部を明瞭にとらえていない。図 3-17(b)は，(a)の流速分布を赤色ベクトルで示し，流速計によるベクトルを緑色で重ねた図である。緑色の流速計によるベクトルは，測線 5 において左岸側壁に向いており，水衝部が形成を示している。

そこで、主流部にトレーサを投入して外岸部へのトレーサの集積による水面流向への影響を回避し、その画像をPIV解析することで水衝部の変化を検討することとした。

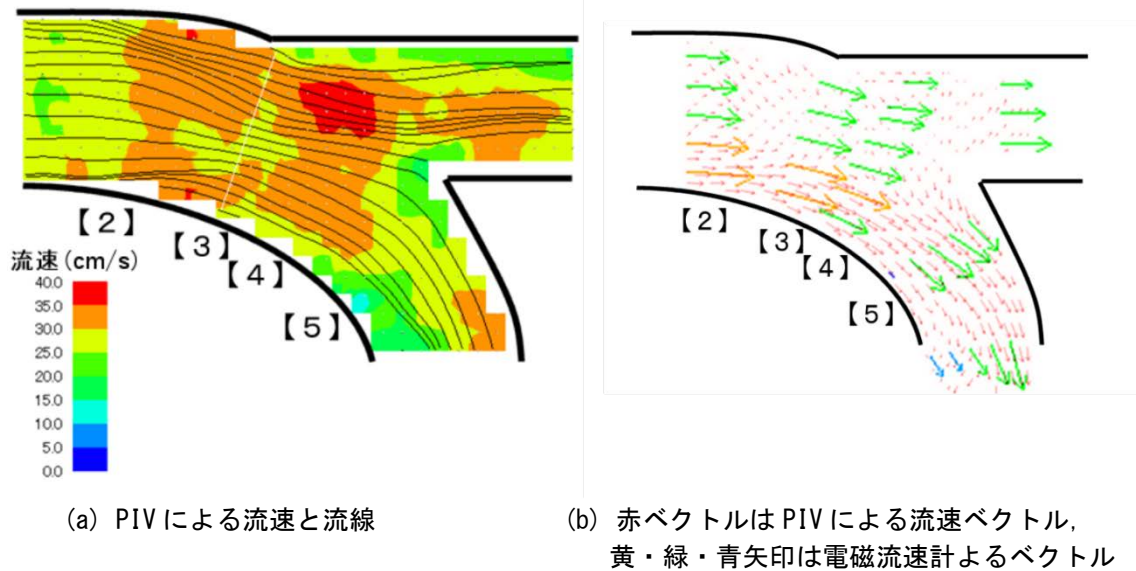


図 3-17 トレーサを全域に投入した時の流況 (PIV)

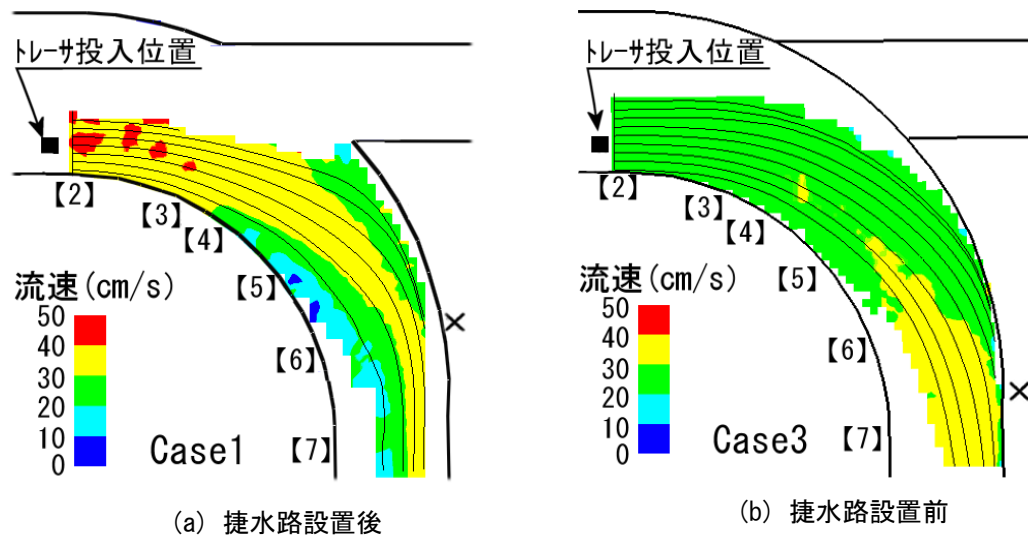


図 3-18 分流部の流速と流線 (PIV)

図 3-18に■で示す場所からトレーサを連続投入し、岸沿いに集積しない範囲でPIV解析した。色は流速絶対値、実線は流線を示している。Case-1では、case-3に比較して水衝りが顕著になることがわかる。合流部に対する同様の解析結果を図 3-19 に示す。ここでは断面 15 の手前においてトレーサを3箇所から投入している。湾曲部の外岸側（左岸側）での死水域の形成および右岸側への流れの集中は、捷水路設置後の

Case-1 において顕著であることがわかる。前出の図 3-12 (a) においてトレーサのない領域が水路中央に生じていたことを考え合わせれば、この右岸側への流線の集中は水路中央での湧昇流によっていると考えられる。

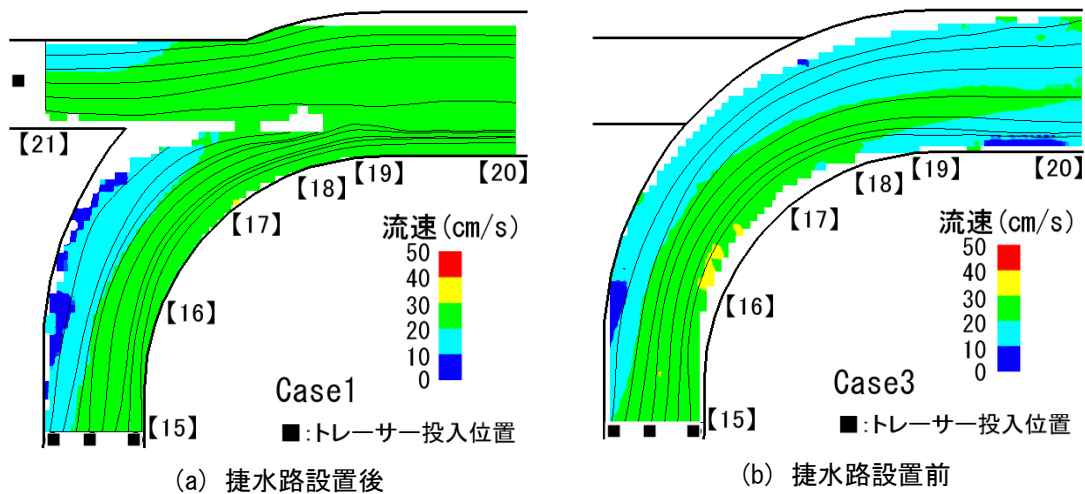


図 3-19 合流部の流速と流線 (PIV)

### 3.3.4 2次流および底面流向

#### (1)断面流速分布

図 3-20(a), (b)と図 3-21(a), (b)は、流速計による横断方向流速成分を描いたものである。それぞれは、図 3-16 で示した流速ベクトルの差が顕著であった分流部の断面 3～断面 7 と合流部の断面 15～断面 19 の流速分布を示している。

断面 3 と断面 4 は分流点に位置する。Case-1 と Case-3 の鉛直流速分布は似ているが、Case-1 の流速が図面左側即ちマイナス方向にシフトしている。特に水面付近においてマイナス流速となっており、水面付近の流れが捷水路に流れ込んでいることを示している。断面 5 から断面 7 では、表層において右岸から左岸、底層において左岸から右岸への流れが生じているが、捷水路を有する Case-1 の方が Case-3 に比べて水面と底面の流速差が大きくなっている。また、側壁付近に比較して水路中央部で大きな流速が発生していることから、左岸では沈み込みが生じ、右岸では湧き上がりが生じていると考えられる。このことは、図 3-18 に示した PIV 解析の結果と合致している。

合流点上流の断面 15 と断面 16 の流速分布には捷水路の有無による顕著な違いは現れていない。合流点の断面 17 と断面 18 では、水路中央部の水面付近においてプラスの流速増加が見られる。これは、底面からの湧昇流によるものと考えられ、PIV による水面流速分布と対応している。合流部下流の断面 19 では、Case-1 の鉛直流速分布

が Case-3 よりもプラス側，即ち右岸側にシフトしており，合流部下流側での水衝部の形成に対応している。

図 3-22 の(a)～(c)では，流速計で得られた水面付近の流速(赤)と底面付近の流速(黒)を重ねて示している。これから，分流部の断面-5 から断面-7 にかけて，両者の流向が著しく異なることがわかる。すなわち水面付近では左岸向きの流れが卓越するのに対し，底面近傍では右岸向きの流れが卓越し，その傾向は Case-1 において特に顕著である。これは，流速が大きく直進性の強い表層流が捷水路により多く流れ込む様になり，それを補償するために底層流が湾曲水路に多く流入するためと考えられる。

一方，合流点付近の断面 18 では，水路中央部において底面付近の流速(黒)が収束し，水面付近の流速(赤)が発散していることがわかる。すなわち水路中央で湧昇流が発生していると考えられる。これは，湾曲部の断面 16 において表層流よりも流速が大きく直進性が強い底層流が，合流点付近に収束するためと考えられる。

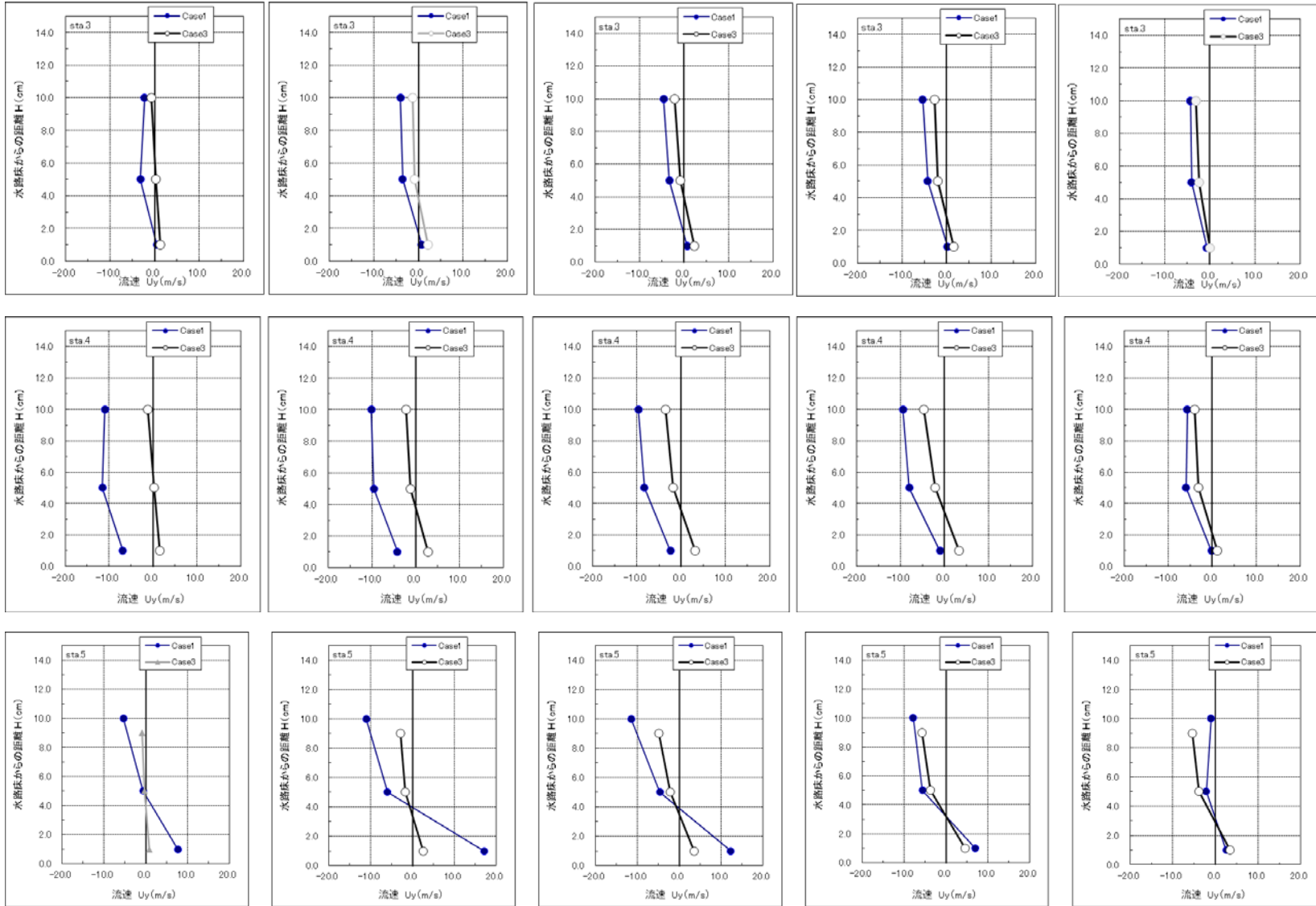


図 3-20(a) 分流部の横断方向流速の鉛直分布 (断面 3, 4, 5)

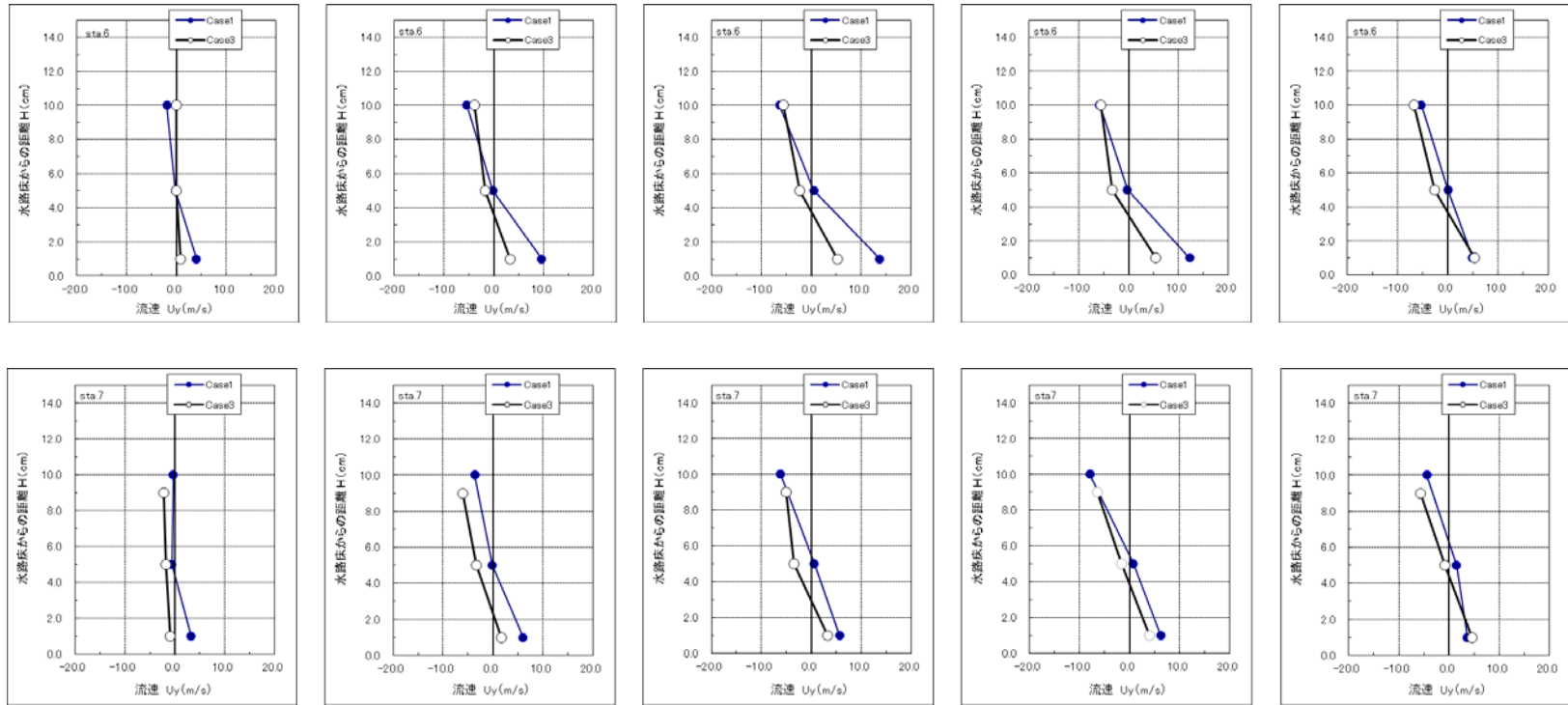


図 3-20(b) 分流部の横断方向流速の鉛直分布 (断面 6, 7)

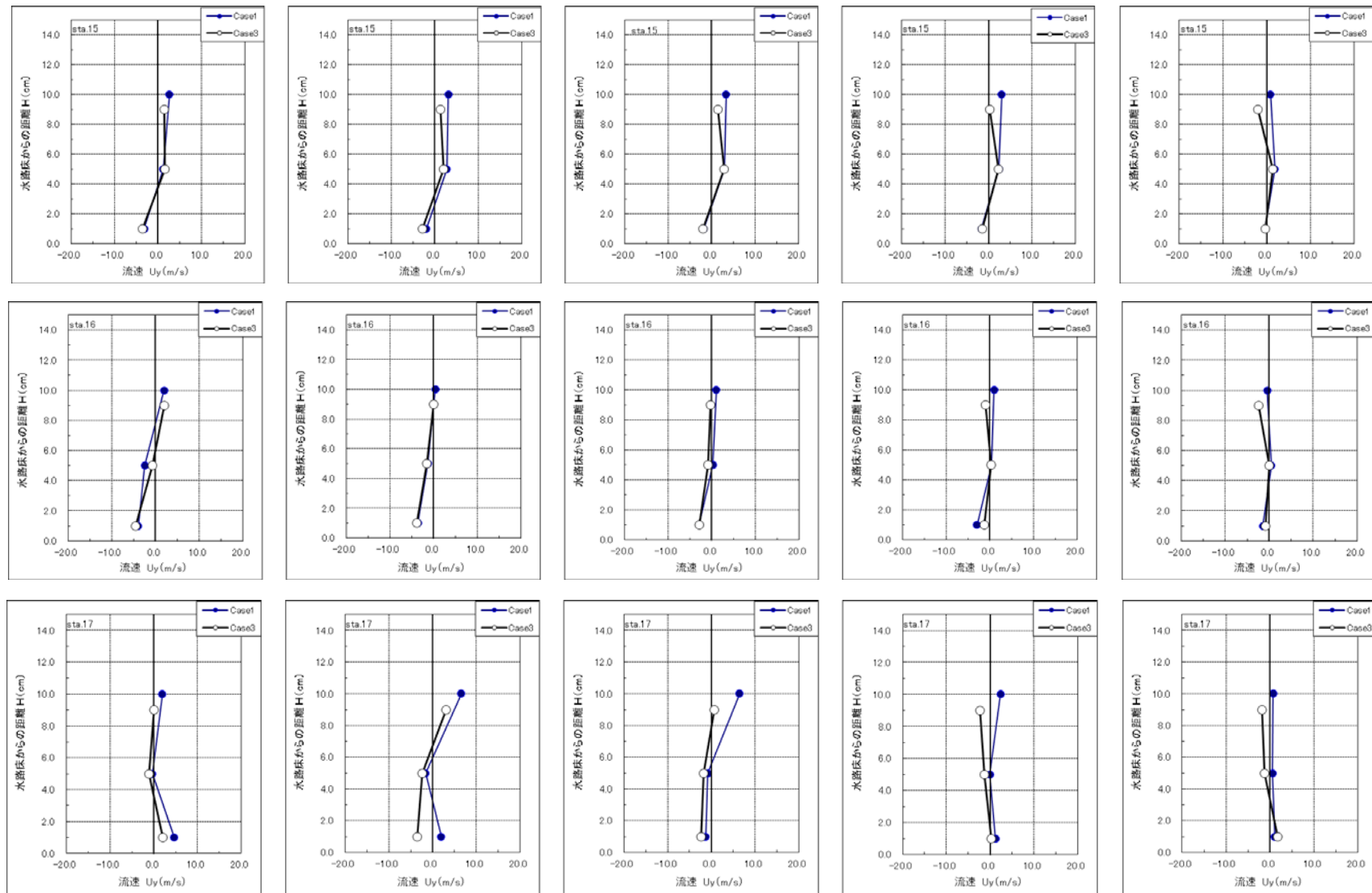


図 3-21(a) 分流部の横断方向流速の鉛直分布 (断面 15, 16, 17)

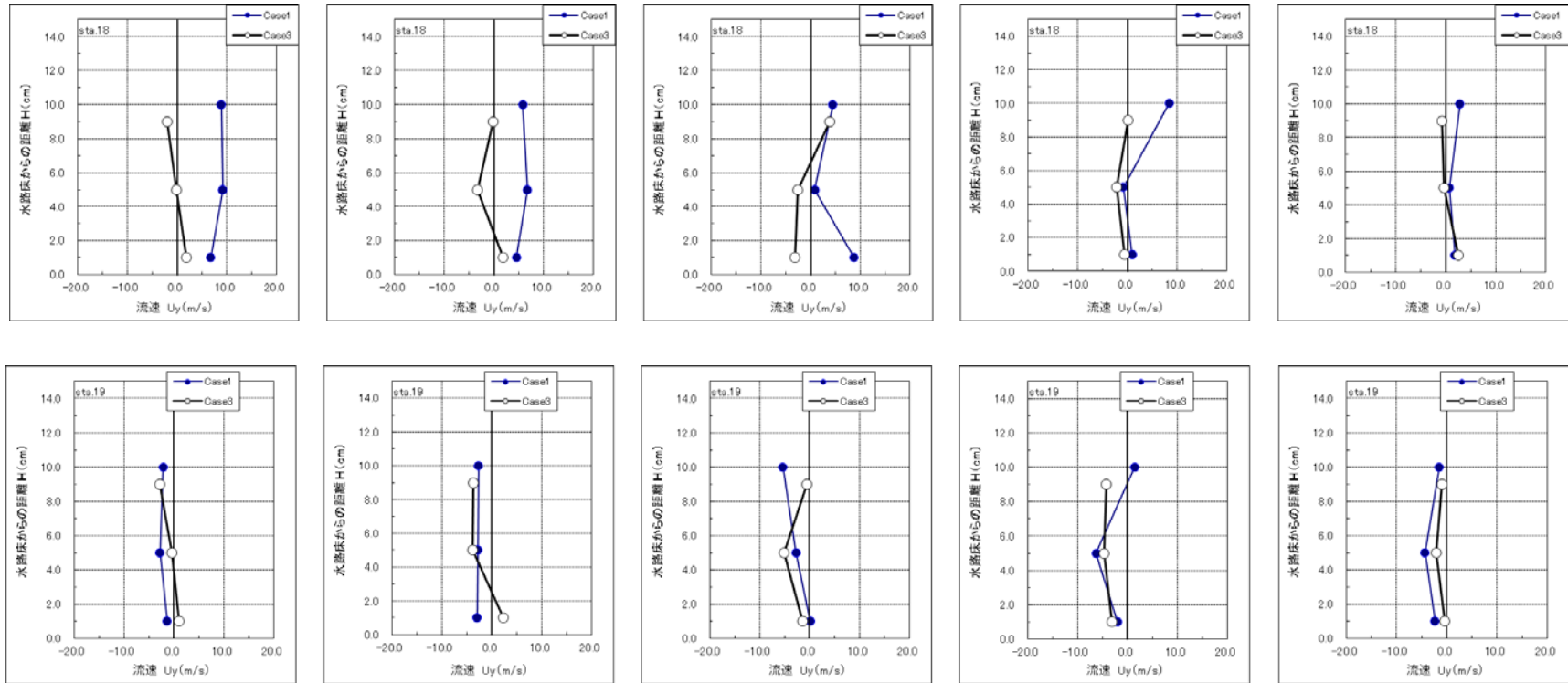


図 3-21 (b) 分流部の横断方向流速の鉛直分布 (断面 18, 19)

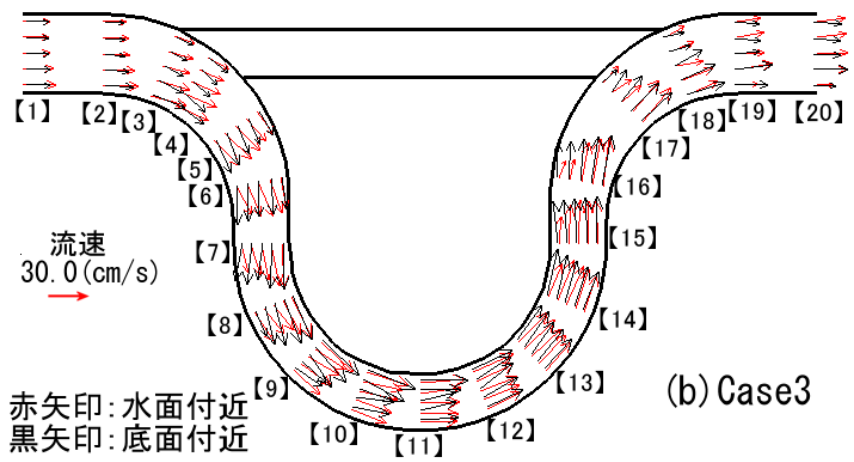
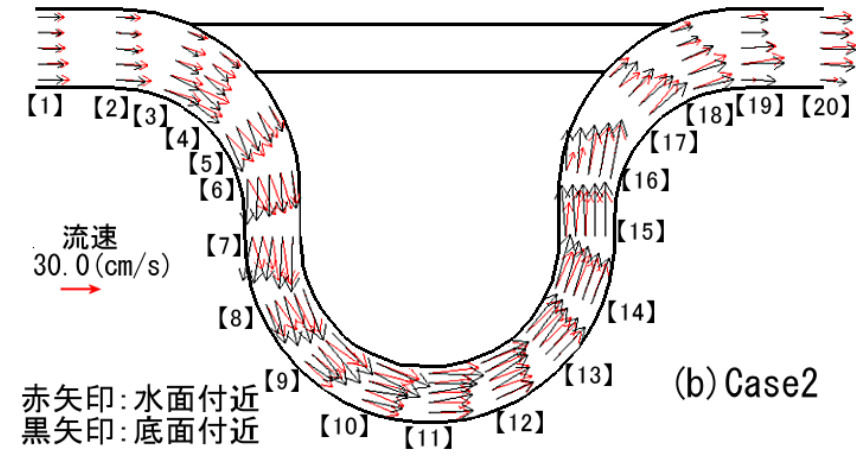
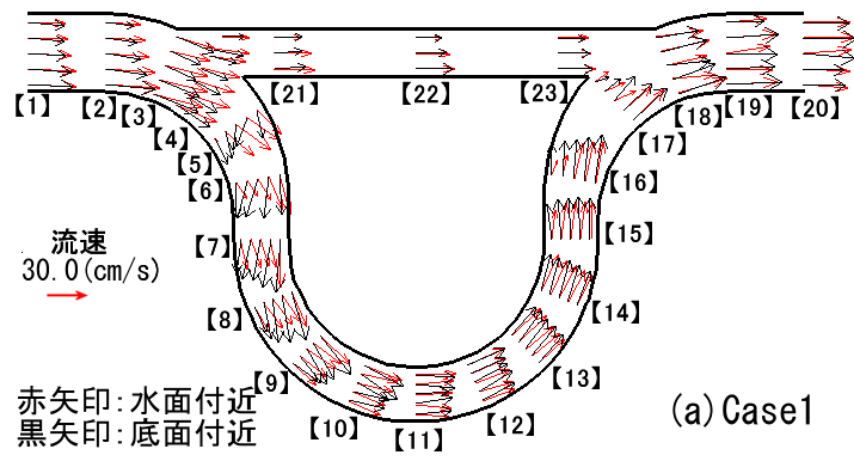


図 3-22 水面と底面の平面流速分布

## (2)底面の流況

捷水路設置時の横断方向への流れの偏倚，2次流強度の増加は河床材料の移動と関係するため，底面トレーサによる底面流況観察を行った。

図 3-23 は，底面トレーサの粒子位置を 0.5 秒毎に 10 秒間(21 画像)追跡した結果を重ね描きしたもので，図(a)が Case-1(捷水路あり)，図(b)が Case-3(捷水路なし)である。また上段は断面 2 の直上流右岸側で粒子を投入した場合，下段は断面 5 の直上流左岸側から投入した場合である。

Case-3 に比べて Case-1 では，トレーサ軌跡の水路軸に対する角度が，分流点直下流で大きくなるのがわかる。また，断面 5~6 の右岸側壁沿いに集積し，移動が緩慢になっている。このことは，捷水路設置後(Case-1)には分派点直後で2次流強度が増加し，右岸壁沿いで強い上昇流が生じてことを示唆している。また，その部分で堆積が生じ，固定砂州が発達するものと推察される。

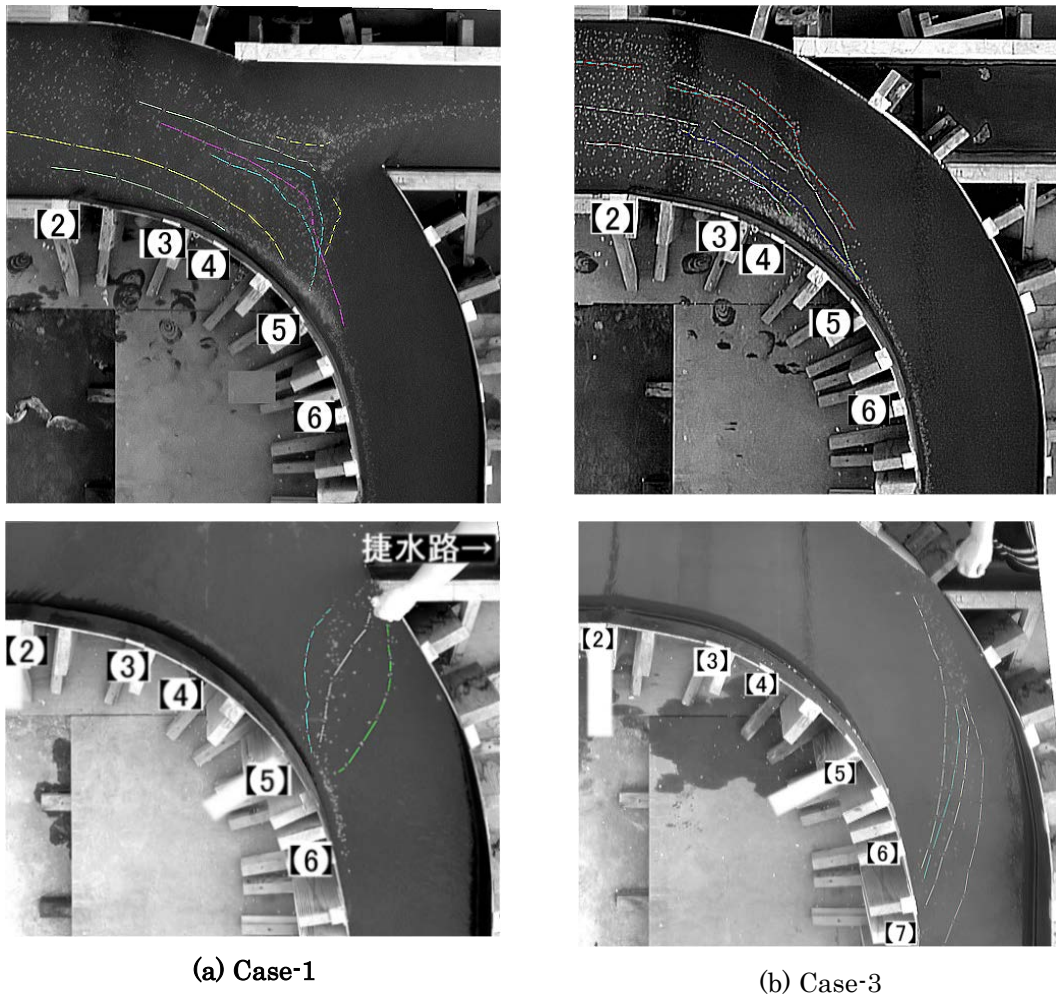


図 3-23 分流部の底面トレーサの移動軌跡

同様に合流点付近での底面流況を図 3-24 に示す．ここでは図中に◆で示す位置からトレーサを連続投入し，0.5 秒毎の画像を 41 枚重ねた．画像中に見える小さな白い点が粒子であり，白い点線は目視で描いた包絡線である．

Case-1 では断面 17 付近で包絡線の幅が広がっているが，この辺りで粒子の移動が緩慢になり運動を停止する粒子も多くなっている．その後は水路直線部では包絡線の間が狭くなっていく．このことは水路床上の流線が収束し，上昇流が生じていることを示唆している．

一方，Case-3 では，一旦左岸側寄った粒子が断面 19 以降で水路中央に戻り，包絡線の間隔はやや広がっている．ただし停止する粒子はなかった．この原因は，湾曲の反転による 2 次流の変化と，直線部で水路幅が上昇していることによると考えられる．以上から，捷水路設置に伴う河床変動が以下のように推察される．すなわち旧河道 (Case-3) では湾曲部(狭窄部)から直線部に入り河積が増加した地点で堆積が生じやすいが，新河道(Case-1)では捷水路合流直前において堆積が促進される．

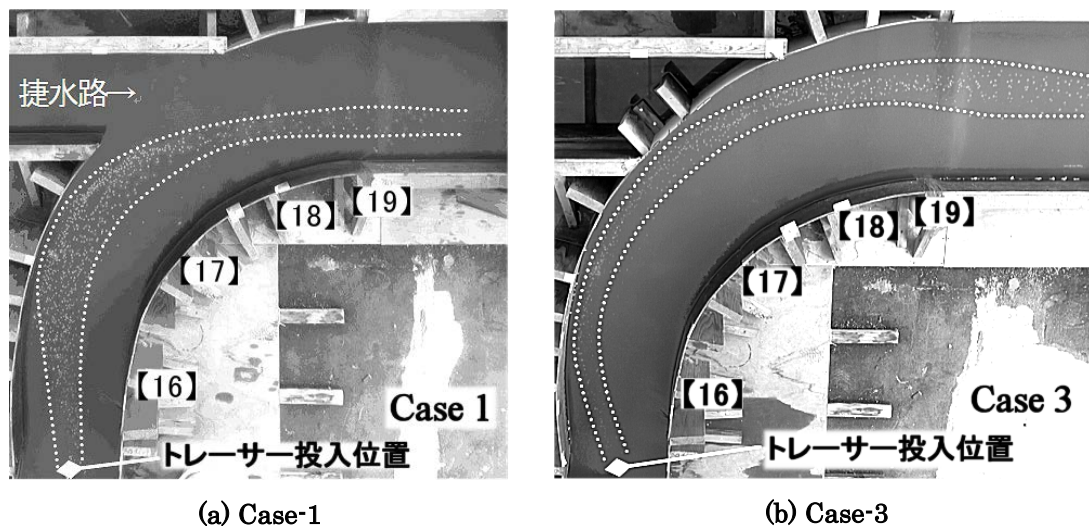


図 3-24 合流部の底面トレーサの移動軌跡

### 3.3.5 分流部周辺の水面変動

予備実験におけるサーボ式水位計による水位時系列の計測では，平均水位の変動は殆ど無い．そのため，平均的水面形の計測はポイントゲージによって行った．しかし，図 3-25 に示す水位変動時系列を視ると周期的変動があるように思われる．そこで，本章の水路の簡易な改造による条件変更を実施し，水面変動について検討した．

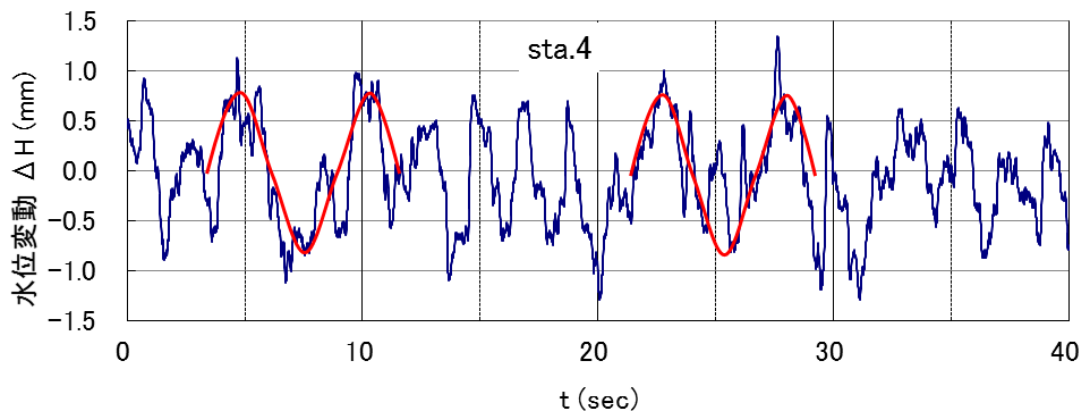


図 3-25 水面変動の時系列 (測線 4)

#### (1) 検討条件

実験の境界条件は定常（流量一定，下流端水位一定）であるが捷水路周辺では周期的な変動が観察される．分合流部の 3 次元的な流れに起因するものとも思われるため，捷水路と水位変動の関係について検討する．

捷水路は，2 次流強度の増加等が確認されている分流と合流の複雑な流れを有しており，流下距離の異なる水路が接続されている．そのため捷水路周辺で不安定（変動）となっていることも考えられる．実河道では河道形状，捷水路の接続形状も様々であるが，多くの水路形状を実験することは，水路実験でも効率的でない．そこで，捷水路への流下し易さによる流況変化に着目し，捷水路の床高を変化させることで擬似的に捷水路への流下し易さ再現する．実験ケースは，表 3-1 中の Case-4 と Case-5 に示すとおりである．

#### (2) 実験結果

図 3-26～図 3-28 は，分流点上流(側線 2)，分流点(側線 4)，分流点直下流(側線 5)，本川湾曲部中間点(側線 11)，および合流部(側線 19)の水位変動時系列を示している．水面変動の計測位置による違いは，次のとおりである．分流点上流では水面変動は±0.5mm 程度である．分流点付近の水面変動は，約±1.0mm となり明らかに分流前よりも水面変動が大きくなっている．更に下流の本川および合流点では再び±0.5mm 以下の変動となっている．よって，水面変動は分流点周辺で相対的に大きくなっており，その時系列は周期的変動が観察される．

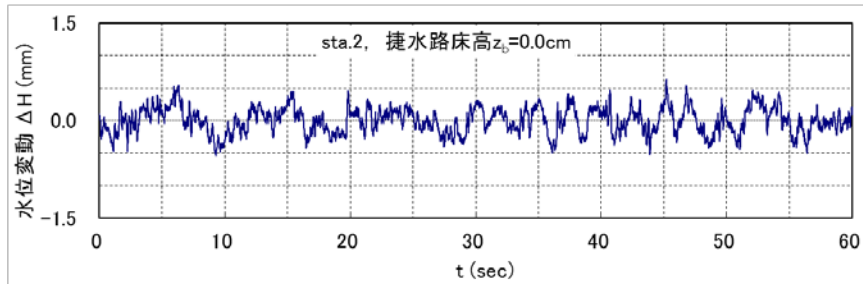
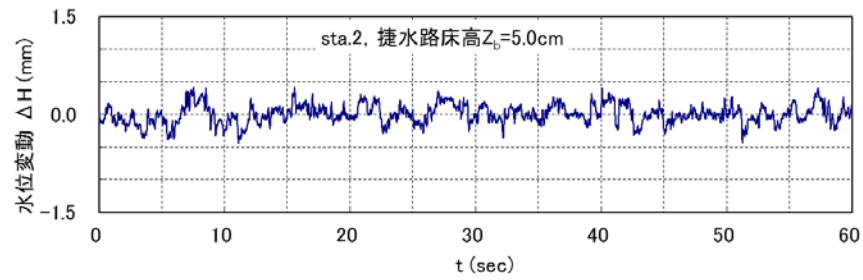
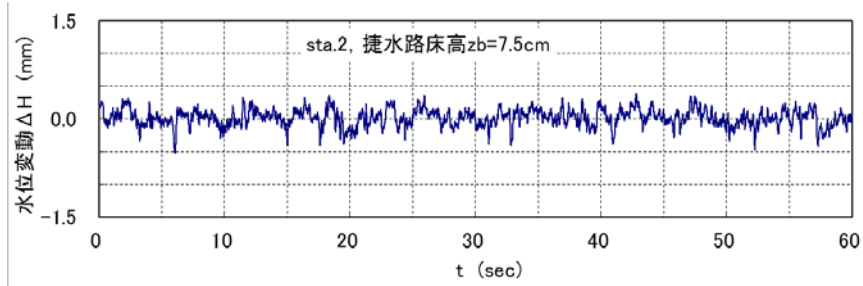


図 3-26 水面変動の時系列, 測線 2

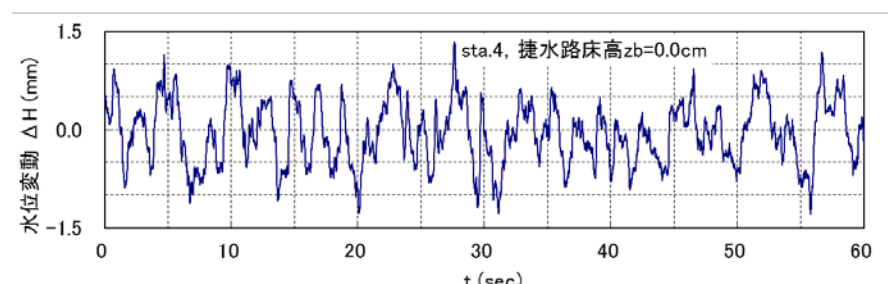
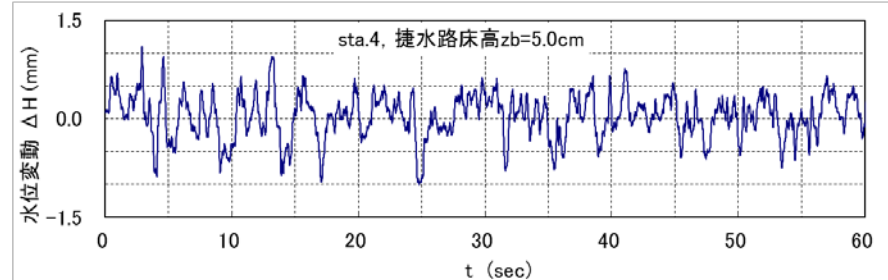
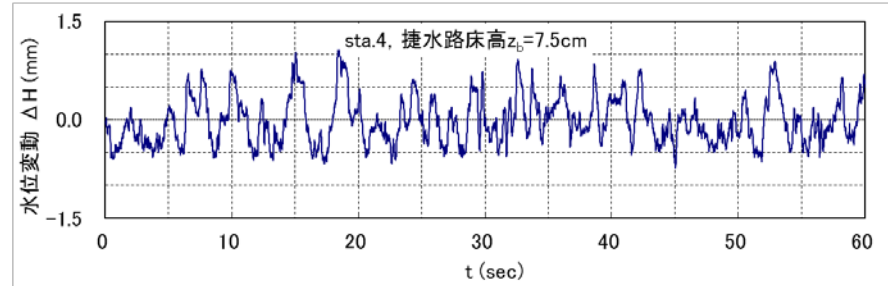


図 3-27 水面変動の時系列, 測線 4

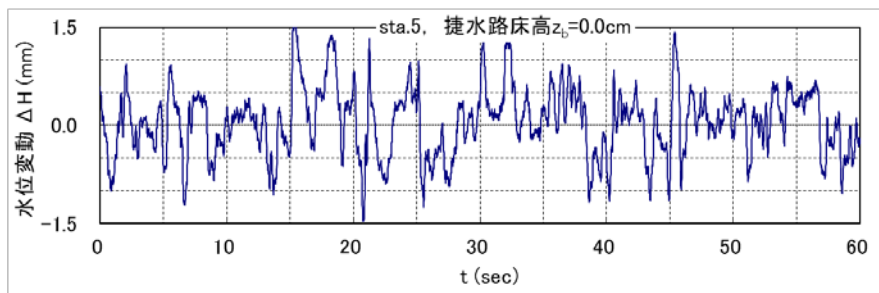
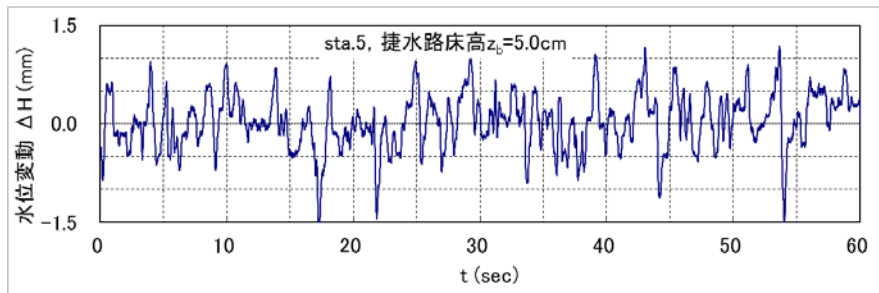
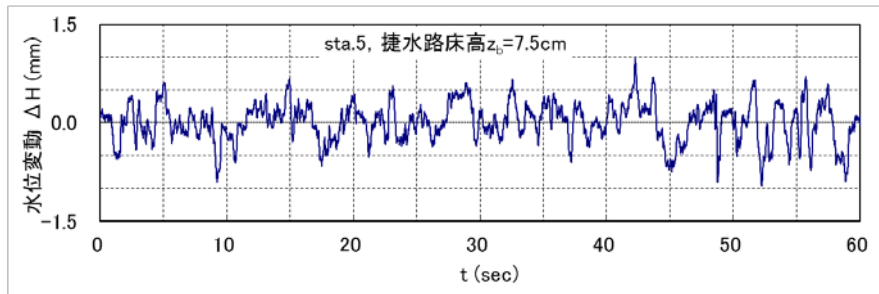


図 3-28 水面変動の時系列, 測線 5

次に、分流前の側線 2，分流点付近の側線 4 と側線 5 の波形について、捷水路の床高の違いによる水面変動を考察する。表 3-2 は、水位変動の二乗平均平方根 (RMS) を整理したものである。分流前の側線 2 では捷水路床高による水位変動の RMS の違いは 0.1mm 以下であり殆ど変化がないといえる。分流点付近の側線 4 と側線 5 では、捷水路床高が 0.0cm から 5.0cm に高くなることによって水位変動の RMS が 0.09～0.13mm に減少しており、捷水路へ流入し易いほど水位変動が大きくなっている。これは、捷水路へ流入し難くなると一般的な湾曲河道の流れに近づき安定するためと考えられる。言い換えると捷水路に流入しやすい場合には、3.3.4 で論じたように 2 次流強度が強くなり、死水域での湧き上がりなどが生じるために水面変動が大きくなるものと推察される。分流後本川の死水域に近い側線 5 の水面変動が分流点の側線 4 よりも大きいことがそれを示している。

表 3-2 水位変動の RMS

	捷水路敷高 (cm)	水位変動の RMS(mm)		
		測線 2	測線 4	測線 5
Case-1	0.0	0.19	0.48	0.51
Case-4	5.0	0.14	0.35	0.42
Case-5	7.5	0.14	0.37	0.29

分流点付近の水面変動には周期的変動が観察されるため、水面変動波形のパワースペクトルを検討した (参照：図 3-29)。捷水路床高が 0.0cm 即ち本川水路と同じ高さの場合には 7～8 秒付近で周期が卓越している。この卓越周期は、延長 300cm の捷水路で生じるセイシュの周期 7.7 秒に対応している。捷水路床高が高くなるに伴い卓越周期の振幅は小さくなっている。例えば、側線 5 では捷水路床高が 0.0cm, 5.0cm, 7.5cm と高くなるに従い、卓越周期の振幅が約 500, 300, 200 と小さくなっており、捷水路からの水面変動が分流部に伝わり難くなっていると推察される。

次に、水面変動とともに底面付近の流況変化を検討する。底面付近の流況検討には前出と同様に底面トレーサを投入しその流下軌跡から底面流況を推定する。図 3-30 は、捷水路床高が 7.5cm と 0.0cm の底面トレーサの軌跡を対比したものである。捷水路床高が高くなり捷水路へ流入し難くなると分流点で生じていた横断方向への底面流速の偏倚が小さくなっている。また、湾曲部外岸から内岸に向かう流れはあるが、観察によると内岸へのトレーサの集積は殆ど無かった。つまり、捷水路に流入し難くなると 2 次流強度が弱まり、底面流速の偏倚も緩くなるため対岸への土砂輸送が少なくなることを示している。

図 3-31 は、水面の流線を対比している。捷水路床高が高くなることによって流線

が湾曲部外岸において平行となっており，水衝部やそれに伴う流れの潜り込みは更に下流側となっていると思われる．つまり，単湾曲河道の流況に近づくと共に2次流強度も弱まる傾向であるといえる．これは，流況が安定すると考えることが出来，捷水路への流入がし難くなると水面変動が小さくなる傾向に対応している．

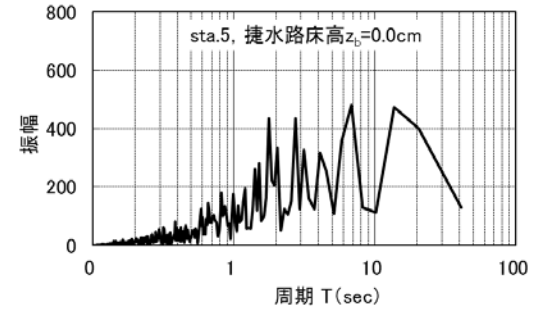
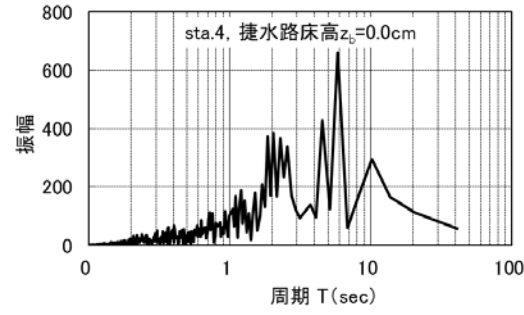
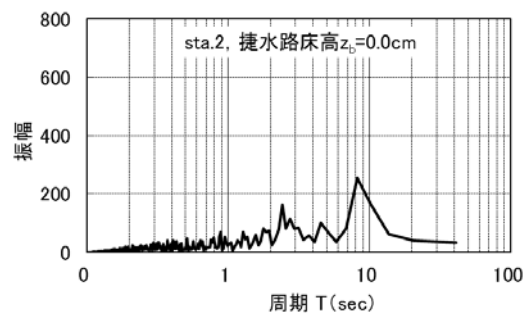
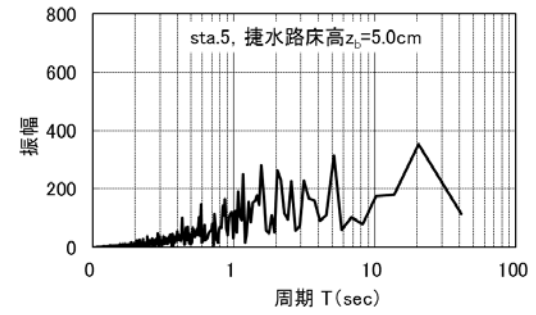
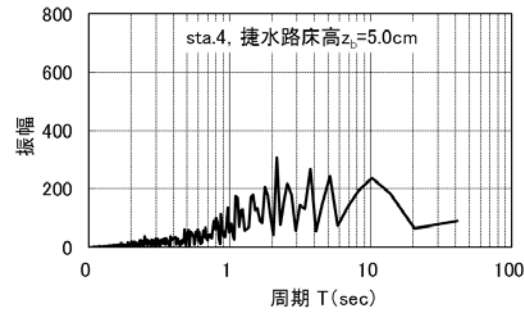
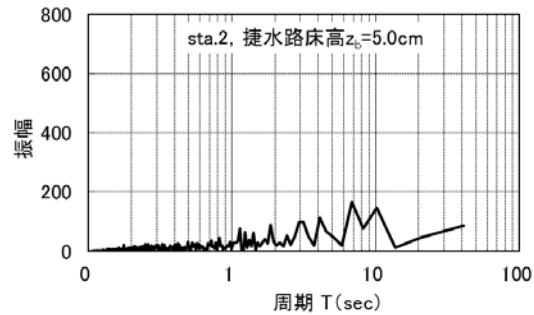
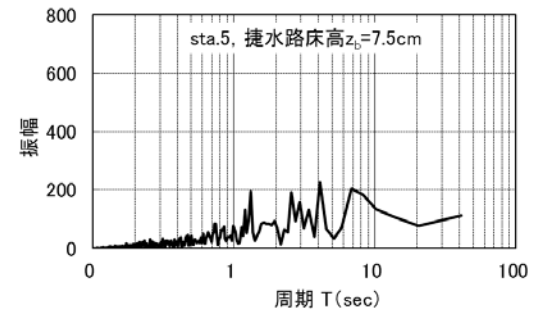
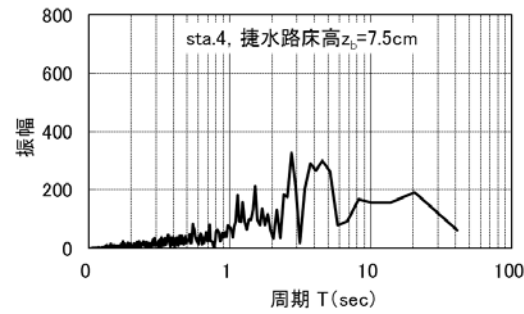
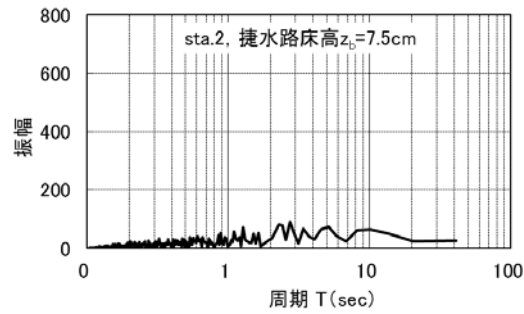
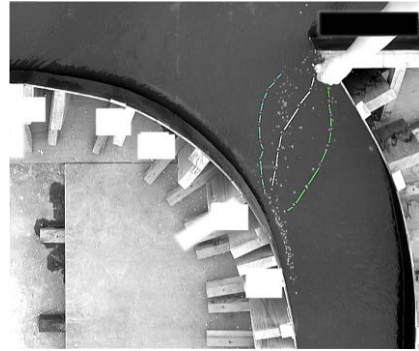
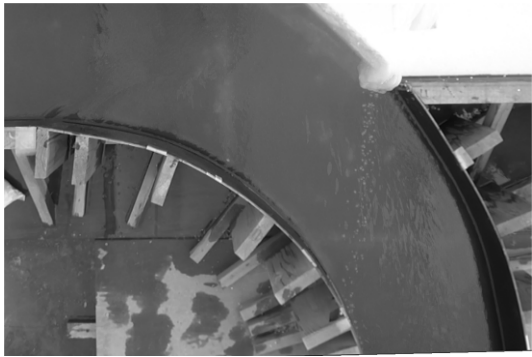
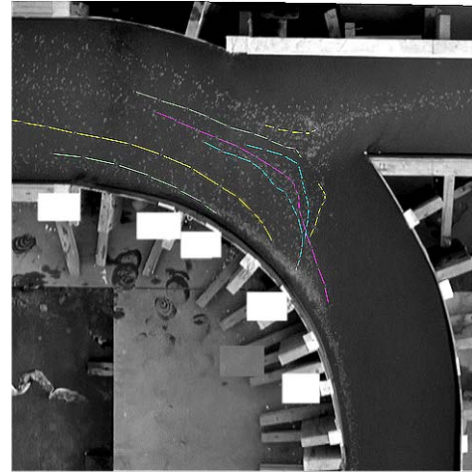


図 3-29(a) 水面変動の  
パワースペクトル, 測線 2

図 3-29 (b) 水面変動の  
パワースペクトル, 測線 4

図 3-29 (c) 水面変動の  
パワースペクトル, 測線 5



(a) 捷水路床高  $z_b=7.5\text{cm}$

(b) 捷水路床高  $z_b=0.0\text{cm}$

図 3-30 底面トレーサの流下軌跡

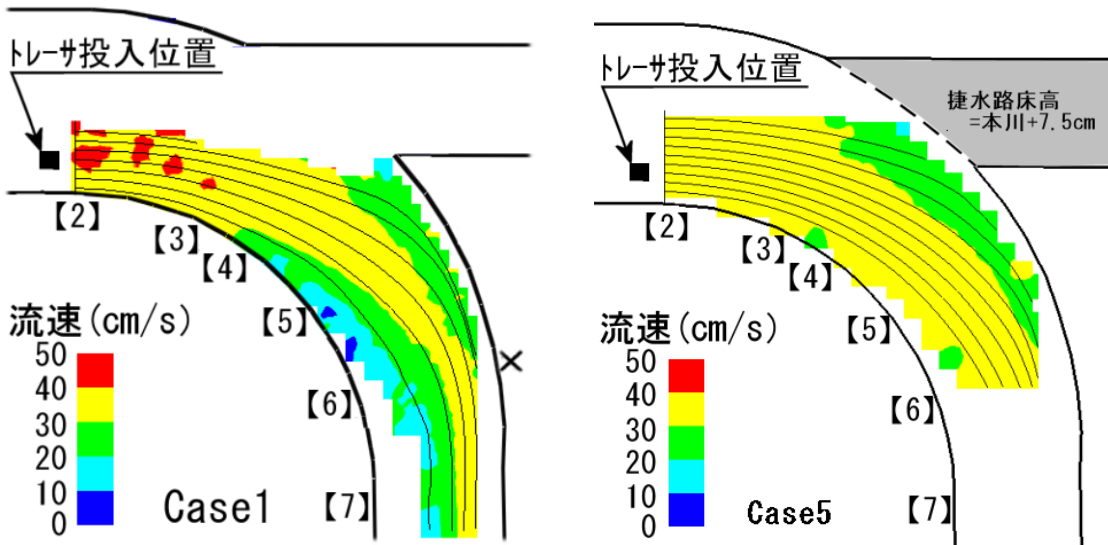


図 3-31 捷水路高の違いによる水面流況の比較

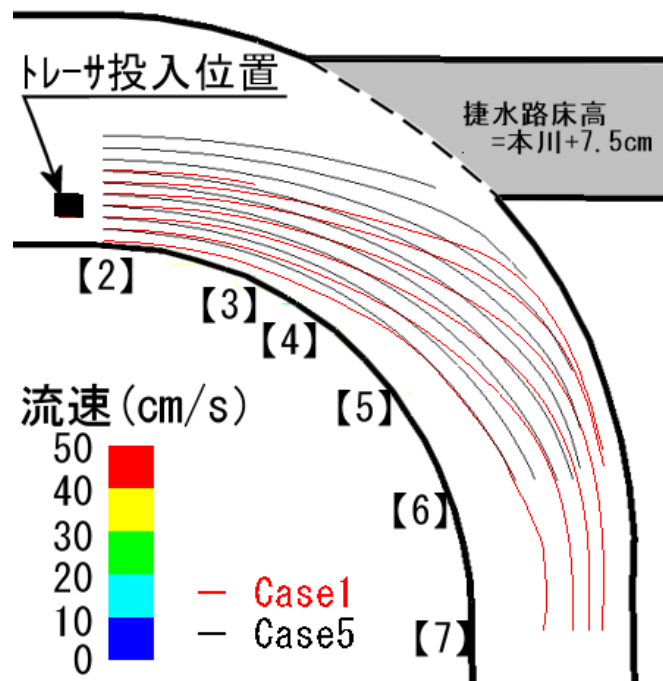


図 3-32 水面流況（流線）の比較

### 3.4 まとめ

水路実験によって、捷水路を有する湾曲河道の水理特性に関する特徴的知見が得られた。湾曲河道区間を捷水路によって短絡すると本川河道に比べて捷水路の水面勾配は急になる。その結果、上流からの流水は捷水路に流れ込みやすくなるという基本特性を捷水路は持っている。さらに、本川河道の流水も捷水路に引き込むように作用する。この流下形態によって分流部から合流部にかけて、特徴的な流況が生じる。

上流からの流れは、主流が湾曲河道では湾曲部内岸側をつなぐ最短距離を流下するが、捷水路設置により次の流況特性を示す。

- 分流部における水衝部の形成，死水域の拡大  
捷水路設置により，流速が大きく直進性の強い表層流が捷水路に流れ込む様になり，それを補償するために底層流が湾曲水路に多く流入する。このため捷水路分流直後に水衝部が形成され，対岸には広い死水域ができる。
- 分流部における2次流による土砂移動傾向の変化  
水衝部では沈降流，死水域では湧昇流が発生している。このような流れの作用により，土砂が捷水路分派点对岸に急角度で輸送され，固定砂州の発達が予想される。

- 水面変動の変化

捷水路の設置により分流部周辺、特に分流直後の位置において水面変動幅が大きくなる。この変動には、周期性が観察される捷水路のセイシュの周期と対応しておおりの捷水路の水面変動が分流点まで伝播していると考えられる。なお、実験水路は形状が単純であり、本来流れが安定傾向であるが、実河道では河道形状も複雑であり変動が生じやすいと思われる。

本川湾曲区間の流況は、捷水路の有無に依らず湾曲部内岸側を主流が流下する。ただし、捷水路の無い場合には上流からの流れは河道湾曲区間の最短距離を流下するため合流部の上流側の変曲点において流れが加速する。一方、捷水路設置時は上述の分流部の流況によって本川湾曲部の流速が横断方向に一様となり、合流部上流側での流速の増加は起きていない。そして、合流部では次のような流況が生じる。

- 死水域の発生、水衝部を形成

捷水路合流点の上流において死水域が広がり、対岸に水衝部が形成される。これは、本川湾曲部の流れが捷水路からの流れの側面に衝突し湧昇流が生じる事とそれに伴い本川の主流線が対岸に偏倚する為である。

- 土砂移動傾向の変化

捷水路合流点の上流の死水域では、底面トレーサの移動が緩慢となることが観察された。これは死水域に対応しており、実河道ではこの領域における砂州の発達が予想される。

実験による知見を実河道に対応して考えると実務上次のような留意点に対応している。

- 分流部と合流部の湾曲部本川に生じる死水域は、それに伴い砂州の発達が予想される。これらは、洪水を安全に流下させる河道断面の不足につながる。
- 主流線の変化や水衝部形成は、護岸設置範囲を検討する場合に流況変化を考慮した護岸配置の検討が必要であることを示している。
- 分流点周辺の水面変動は、堤防余裕高の不足や通常護岸が設置されない余裕高部分に対する防護を検討する必要がある現象である。

本章で得られた知見は、捷水路の基本的な水理特性であると共に河川工学上重要な知見であるが、既往の学術研究では確認されていない。その理由は、次のように考えられる。既往の学術研究は、単独の分流や合流に関するものが多くあるが、分流と合流の両方を有する捷水路に関する基礎的研究は見あたらない。また、学術研究は、直線水路同士の分流または合流を扱っており、湾曲河道を有する捷水路に比べて2次流の影響が小さいためと考えられる。

## 4. 捷水路野外大型水理模型実験の改良

### 4.1 検討の概要

第3章では、矩形断面の湾曲水路に捷水路を設置し分合流実験水路を形成し、捷水路の基本的な水理特性を検討した。本研究において水路実験を行った理由は、次の2点である。第一に、湾曲河道に設置される捷水路に関する実験が、実業務として実施されているため、水理特性に関する知見が殆ど一般に流通せず情報を入手し難いことである。第二は、学術研究としての捷水路の基本的な水理特性が、これまで検討されていないことである。第3章の水路実験による検討の結果、次の基本的な水理特性が得られた。分流部では、捷水路分流直後に水衝部が形成され、対岸には広い死水域が形成される。水衝部では沈降流、死水域では湧昇流が発生しており、固定砂州の発達が予想される。捷水路設置に伴い水面変動幅が大きくなり、周期性を持っている。本川湾曲区間では、捷水路の有無に依らず主流は湾曲部内岸側を流下するが、捷水路の無い場合には上流側の変曲点において流れが加速する。一方、捷水路設置時は本川湾曲部の流速が横断方向に一様となり、合流部上流側での流速の増加は起きていない。さらに合流部では次のような流況が生じる。捷水路合流点の上流において死水域が広がり、対岸に水衝部が形成される。捷水路合流点の上流の死水域は、実河道では砂州の発達が予想される。

上記の基本的な水理特性は、単純な水路形状によるものであり、複雑な河道地形を有する実河道では、これらの基本的特性の発生状況が水路実験と異なると考えられる。よって、複雑な河道地形の影響を受ける実河川を想定した大型模型実験において、水路実験と同様の流況変化等が生じているか検討する。また、第2章に示したとおり、捷水路に対する既往検討は、基本的な水理特性を踏まえた計測や検討とはなっていない。基本的な水理特性を踏まえて計測・観察された水理現象が、河川工学上、治水上どのような意味を持つか検討する。また、流況変化に関わる検討ポイントを事前に得ていることにより、従来の検討業務に対して少ない時間や労力を加えることで流況に関する詳細な知見が得られることが期待される。

さらに、大型模型実験は計測領域が基礎実験に比べて広いという課題的特徴を有しており、従来の業務における計測では詳細な計測が実施されているとはいえない。特に、水面形の時空間分布の計測が困難である。従来の実験業務における水面形の計測は、代表点における連続計測が主体であり、空間分解能が粗く詳細な変動特性や流況変化との対応は検討されることは少ない。第3章の水路実験における水面変動の最大値は、 $\pm 1.0\text{cm}$ 程度と小さいが、河道の大型模型の縮尺は数十分の1から100分の1であり、実河道では無視できない変動となると考えられる。よって、大型水理模型実験の改良を目的とし、水面形の時空間分布の計測と流況との対応に関する計測方法、およびデータ整理方法を検討する。

## 4.2 実験装置

### 4.2.1 模型の概要

実河道に対する検討は、パシフィックコンサルタンツ株式会社つくば技術研究センター（茨城県つくば市作谷）に設置されている分水路の大型水理模型（以降、模型と称する）を使用した。施設名称は分水路となっているが、その水理構造は湾曲河道区間に設置された捷水路となっている。本模型実験は、机上検討によって基本設計された捷水路の形状について、時間平均的な流況に基づいた最適な捷水路形状を検討するために実施されたものである。検討業務は2010年度に終了し存知されたいたものである。この模型は、本川蛇行区間の最短部を直線の捷水路で結んだ典型的な捷水路の形状を有している。よって、第3章の水路実験で得られた知見の検証には適当な施設である。本章の研究は、業務終了後に放置されていたこの模型を修復、整備し実施した。

模型の全景を図4-1に示す。写真右側が上流であり、業務では実洪水による浸水状況の検討を目的とした氾濫原が再現されている。模型は野外に設置されており、模型の表面はモルタルで製作された固定床模型となっている。模型延長は約50mで実河道の延長3.6kmを再現している。模型の本川河道は、横断測量データに基づき測量時点の河道形状を再現している。模型の河道地形コンター図を図4-2に、模型諸元を表4-1に示す。捷水路は、模型の中央付近に位置し延長が4.0mの直線である。断面形状は、底幅0.9m、側壁の勾配が1:0.5の台形である。捷水路の水路床は水平で、本川の滞筋部よりも高くなっている。

模型上流端は給水装置に接続されており、給水管に取り付けたバルブ操作によって流量調整を行う。流量は、幅90cmの全幅堰を取り付けた量水槽で計測する。模型の下流端には起伏堰が設置されており、これにより下流端水位を所定の高さに調節する。その下流は施設内を循環する排水路に接続されている。

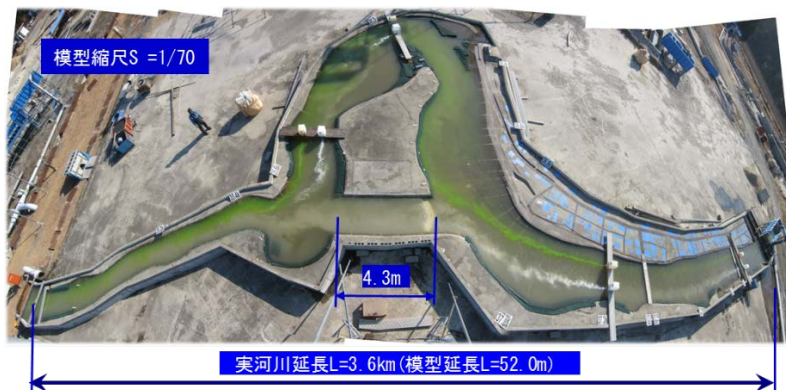


図 4-1 模型の外観写真

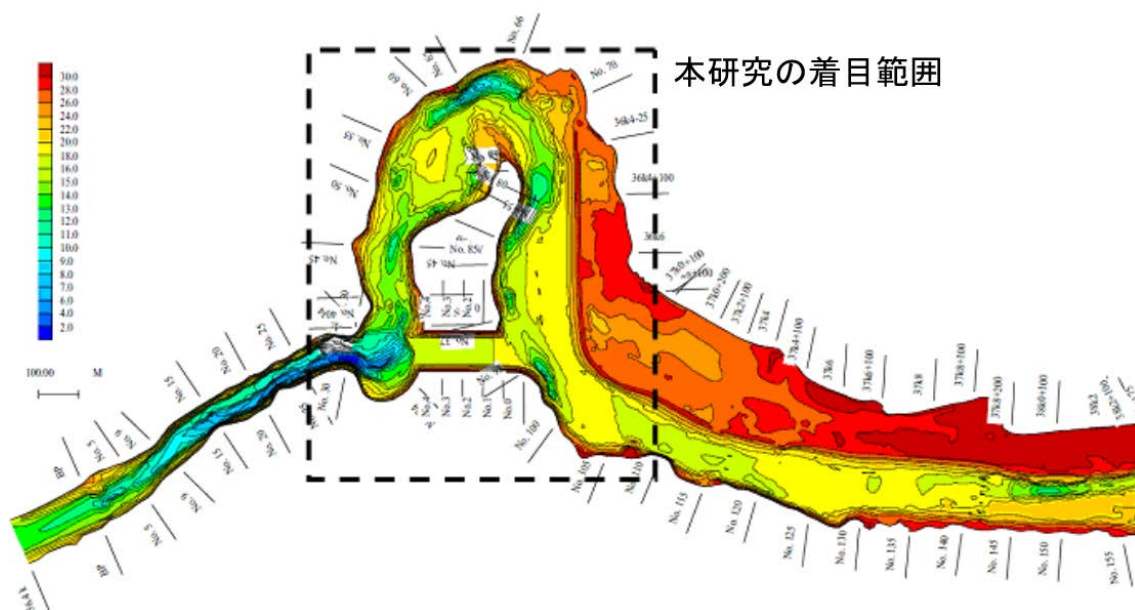


図 4-2 実験模型の地形コンター図

#### 4.2.2 模型縮尺

模型は、フルード相似則<sup>39, 40</sup>に準じて設計、製作されている。模型の水平と鉛直の縮尺は 1/70 であり、模型と原型が幾何学的に相似したいわゆる無歪み模型と称される模型である。フルード相似則は、流れに対して重力の影響が卓越する場合に、それが相似するようにフルード数（慣性力と重力の比）を原型と模型で等しくする相似則である。フルード相似則にしたがうと、空間縮尺が水平鉛直ともに 1/N の場合、流速は  $1/N^{1/2}$ 、流量は  $1/N^{5/2}$  となる。

模型縮尺設定の制約条件は、水理的にはレイノルズ数  $Re$  が十分大きい乱流状態であること、施設の給排水能力や用地面積の制約、計測機器が設置可能な大きさであることである。

本模型の場合は、給水流量を最大 1000 l/s 程度、用地最大延長 100m 以内等の制約で縮尺 1/70 が決定されている。なお、縮尺 1/70 で表 4-1 の流速、水深におけるレイノルズ数は、凡そ 85,000 である。また、例えば模型縮尺を 1/50 とすると延長は 100m 以内となるが、流量は約 2700 l/s となり施設の給水能力を超えてしまう。

表 4-1 実験模型の諸元

基本量	模型縮尺	単位	基本量		備考
			原型値	模型値	
長さ	1/70	m	3, 600	51.4	
水深	1/70	m	10.0	0.143	
流速	1/70 <sup>1/2</sup>	m/s	5.0	0.598	
流量	1/70 <sup>5/2</sup>	m <sup>3</sup> /s	4, 000	0.098	河道整備流量
粗度係数	1/70 <sup>1/6</sup>	s/m <sup>1/3</sup>	0.040	0.020	計画粗度

#### 4.3 実験条件

実験条件は表 4-2 に示すとおり、捷水路を設置した Case-1 と捷水路を設置前の本川のみを流下する Case-2 の 2 ケースである。Case-1 の流量条件である分流前の本川流量は、98.0ℓ/s とした。この流量は、原型値で 4, 000m<sup>3</sup>/s となり当該実河川における捷水路のある宮之城地点の河道整備計画流量<sup>41</sup>である。捷水路設置前を想定した本川のみ流下のケースでは 47.0ℓ/s、原型値で 1, 900m<sup>3</sup>/s を通水流量とした。この流量は、Case-1 において捷水路の断面流速分布と水深を計測し、捷水路通過流量である 51.0ℓ/s を求め、上流からの通水流量 98.0ℓ/s から 51.0ℓ/s を減じた値である。模型下流端水位は、水位(H)・流量(Q)関係（河口からの不等流計算）を模型下流端に設定した。

実験順は、Case-1 の捷水路設置ケースから行っているが、実河道に当てはめると次のとおりである。先ず、Case-2 の流量が本川湾曲区間の疎通能力である。そこに、河道流量を流下させる治水対策として捷水路を設置した状態が Case-1 である。なお、捷水路が無い状態で河道整備計画流量が流下した場合には、河道湾曲部の上流において堤防からの溢水が生じる。本研究の予備実験においてもその状態が確認されたため、計測対象から除外した。

表 4-2 実験条件

	水路条件	流 量		下流端水位
		原型値 (m <sup>3</sup> /s)	模型値 (ℓ/s)	
Case-1	本川+捷水路	4, 000	98.0	H-Q
Case-2	本川のみ	1, 900	47.0	"

## 4.4 計測方法

### 4.4.1 縦断水面形の計測

基本的情報として、研究対象区間である捷水路分流部上流から合流部下流側までの水面形を得るために、水位の縦断形を計測する。水位計測点は、縦断方向には実河道で 200m、模型では 2.85m 間隔の低水路中央部付近とした。通常、実際の河川では数百メートル毎に設置された距離標において水位を管理しており、模型実験業務の計測ではこの距離標における計測が基本となる。本模型の原型である川内川の距離標間隔は、200m である。図 4-3 の●印が水位計測位置である。水位計測には、模型上に渡した計測架台からポイントゲージにより静的な水面高を計測した。

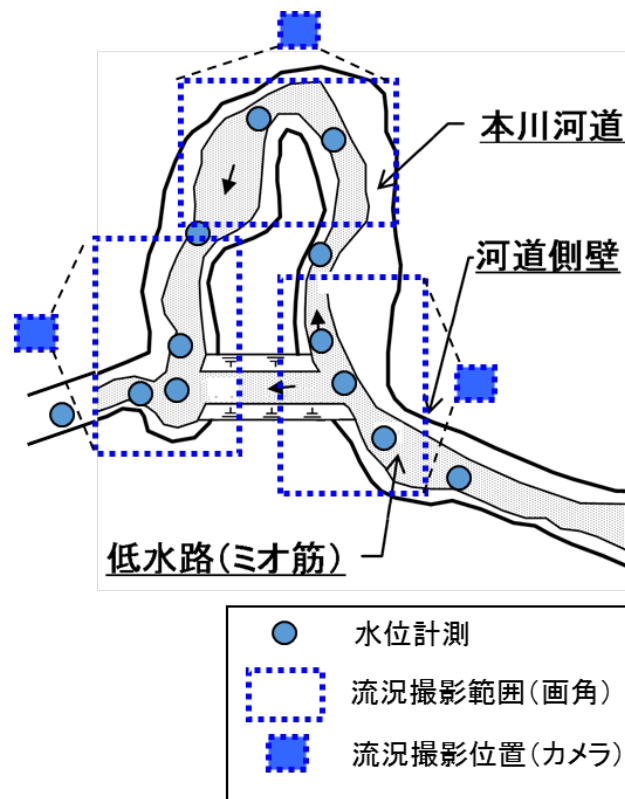


図 4-3 水位計測位置，水面流況の撮影範囲

### 4.4.2 水面流況の計測

水面流況の計測には、広範囲において同時計測可能な流況画像を PIV 解析する方法を採用した。ただし、模型の捷水路と蛇行区間の範囲が広いこと、全域の流況を一度に撮影するには 20m 以上の高所からの流況撮影が必要となる。通常の実験業務では、流況撮影に 4～5 段のローリングタワーを使用しており 10m 程度の高さとなる。これ以上の高さになると大がかりな足場となると共に高所作業の危険性が高まるからである。そこで、分流部、湾曲部、合流部の 3つの領域に分けて流況撮

影を実施する。図 4-3 の点線四角形で囲った部分が凡その流況撮影範囲である。

上記 3 箇所からの流況撮影には、デジタルビデオカメラ (CCD 600 万画素) を使用した。また、後述する流況と水面変動の検討においては、より精度の高い画像を得るためにデジタル一眼レフカメラ (CCD 1200 万画素) による連続撮影を行った。

PIV 解析は、実河川の洪水時であれば濁った水面の濃淡によっても解析可能であるが、模型実験は殆ど濁りが無いために、水面の流況を可視化するためのトレーサが必要である。本研究では水面トレーサに木工用電動鉋から発生したオガ屑を使用した。オガ屑のサイズは、31mm 目と 51mm の篩の間に残ったものを使用した。オガ屑は、入手のし易さとサイズ調整が容易であるメリットがある。また、他のトレーサとして染料、アルミ粉も考えられたが次のような問題がある。染料は、業務において目視による主流の可視化等に使用されているが、水深方向にも拡散するので表面流速が明確に捉えられない。アルミ粉は、流下中に凝集して帯状に分布することや、粒径が小さいため模型下流における回収が困難となるとともに、排水による環境への影響も懸念される。

図 4-4 は、流況と水面変動の検討にける PIV 解析格子の例である。PIV に先立ち斜め画像の正射影化を行っている。画像の正射影可における 20cm×20cm の赤白塗装の標定盤を配置した。

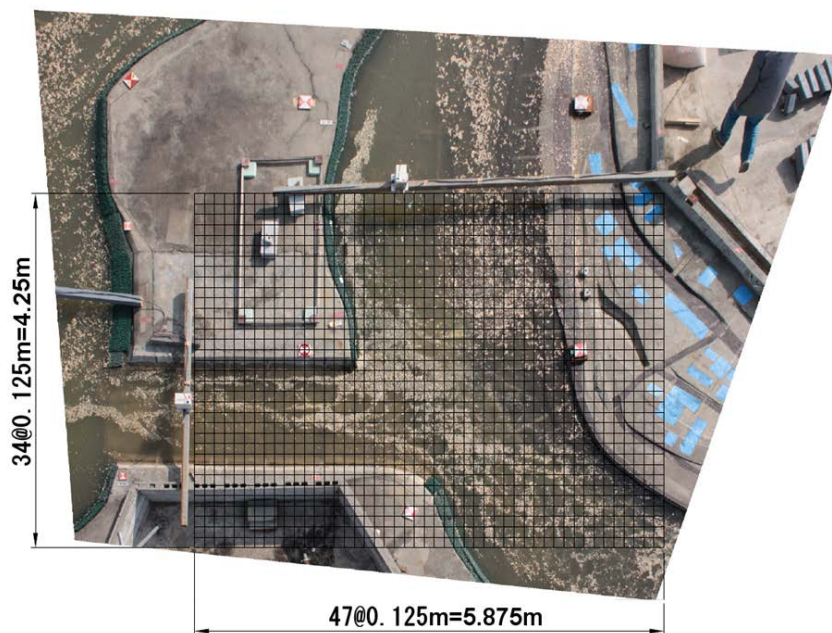


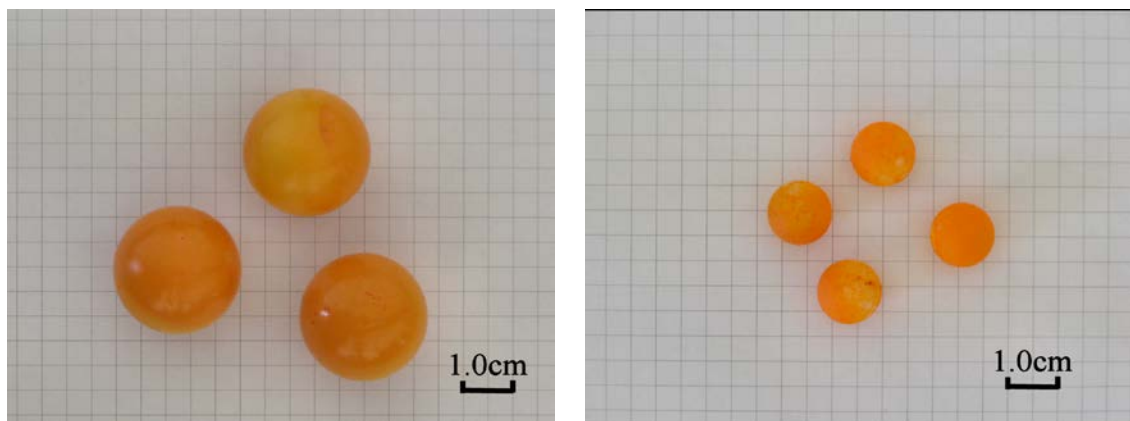
図 4-4 PIV 解析格子図

#### 4.4.3 底面流況の計測

捷水路の設置による2次流強度の増加による土砂移動の変化を、第3章の水路実験と同様の底面トレーサの観察によって検討する。比重が1.0以上で底面を転動する球体を上流側から投入し、高所からその移動軌跡をビデオカメラに記録する。実験に使用した底面トレーサは、比重1.2、直径が1.0インチ(2.5cm)と0.5インチ(1.3cm)の二種類の樹脂球である。図4-5は、底面流況観測に使用した底面トレーサの写真である。

模型は実河道形状を再現しているため、河道横断方向に河床勾配を有しており、球体の底面トレーサが重力の影響で河床の低い場所に集まりやすくなると問題がある。第3章の水路実験は、底面が平坦であるため底面流況に対する応答性はよいが、実河道では河床形状の影響が問題となる。そこで、大小2種類のトレーサによって河床の流況や土砂移動傾向を考察するようにした。つまり、直径2.5cmのトレーサは底面近傍の流れの抗力を受けやすい比較的流況の大きい河床材料に対応し、直径1.3cmの小径の底面トレーサは小粒径の河床材料に対応する。この2種類の底面トレーサによって総合的に土砂移動傾向を検討する。図4-6に底面トレーサの撮影動画から切り出した静止画を示す。

土砂移動の検討範囲は、第3章の水路実験においてその特性が確認された分流部周辺とした。大型実験模型の観測範囲が広いため約10.0mの高所からの撮影を行う。底面トレーサのサイズが水路実験のそれに比べて大きい理由は、高所からの判読を容易にするためでもある。更に、高所からのトレーサの認識がし易いように蛍光色を樹脂球に塗装した。



(a)  $\phi=2.5\text{cm}$

(b)  $\phi=1.3\text{cm}$

図 4-5 底面流況観測に用いたトレーサ



図 4-6 底面トレーサによる観察状況

#### 4.4.4 水位と水面流速の時空間分布計測

##### (1) 水位変動の分布

第3章のサーボ式水位計における水位の時系列計測において、捷水路設置に伴い分流部周辺で水面変動が大きくなる傾向が計測された。また、その水面変動の波形には周期性が認められた。大型模型の分流部では、水面幅が広い場所で1.5~2.0mとなり、湾曲部内岸では平面渦が観察された。このような事から、水位が平面的な分布や変動成分を持っていることが考えられ、水位変動計測が必要である。

第三章の実験水路は、水路幅が50cm~30cmに一様に変化し、水路床が平坦で横断面方向の平均水深の変化が小さいため、水路幅中央で水位変動計測を行っている。しかし、大型模型は次の理由よりの水面変動の空間分布の計測が必要である。それは、大型模型の分流部は、水面幅が流下方向に不規則に変化すること、河床地形（参照；図4-2）より横断方向の平均水深変化があること、分流部対岸の湾曲部内岸に平面渦が確認されたこと、一である。

ここで、分流部周辺の全水面に水位計を配置することは、費用や設置時間等から現実的な方法ではなく、模型実験計測の改良とはいえない。室内に設置された一樣断面の路実験であれば、大型模型に比べて計測範囲を限定し、計測機器を全水面に配置することも不可能では無いと考えられる。しかし、本研究の模型で横断方向に5点程度(20~30cm 間隔)とし分流部周辺に計測機を配置しようとするとならば100台必要となる。この場合、計測機の架台や配線が煩雑になる、模型が野外設置のた

め計測機の維持管理が難しい、一等の実務上の問題が生じる。このような場合の通常業務では、代表地点水位変動から空間分布を考察することとなる。これでは、水位変動の空間分布を定量的にとらえたことにはならない。

野外大型模型実験では上述のような制約があるため、基礎実験の詳細な計測手法は、模型実験で採用されない場合、模型実験手法の改良が進まないという問題が起きている。例えば、基礎実験では、開水路凹部<sup>42</sup>や合流部<sup>43, 44, 45</sup>、水制工周辺<sup>46</sup>の詳細な流速計測をPIVによって行っている。これらは、トレーサに比重1.02、粒径50ミクロンのナイロン樹脂を用いている。また、計測面をレーザーシートによって照射し、トレーサを明確にしている。微細なトレーサやレーザーシートを用いた計測は、そのままでは、野外大型模型実験で使用できない。水位の時空間計測は、基礎実験では試みられている<sup>47</sup>。ただし、流水を白濁させ、LCDプロジェクターにより水面にパターンを投影しCCDカメラでステレオ計測する、という複雑な装置であり、野外模型実験には適さないといえる。

模型実験手法の改良が進まないと問題に対して、本研究は、台数に制約のある水位計測装置の組合せと、水面変動の周期性に着目した水面時空間分布の計測手法を検討した。その詳細は以下に示すが、この手法は実務の河川模型実験では初めての計測手法である。

水面時空間分布計測は、水位時系列計測とデータ解析によって構成される。本節では、水位時系列計測手法の内容を示す。データ解析方法の詳細は、4.7.3に詳述する。水位時系列の計測は、分流部周辺を対象に8台のサーボ式水位計（以下、水位計）を用いて行う。図4-7に示す(a)と(b)の2地点に水位計を1台ずつ置き、残りの6台を用いて図に示す(A)から(O)の15測線で水位変動を1測線ずつ計測する。移動計測の測点数の合計は90となる。水位計のサンプリング間隔は10Hzで行い、各測線の計測時間は10分とした。これらの異なる時間帯に6箇所ずつ計測した水位の時系列に対し、地点(a)の変動波形の位相を基準にして変動成分の面的な特性を整理する。

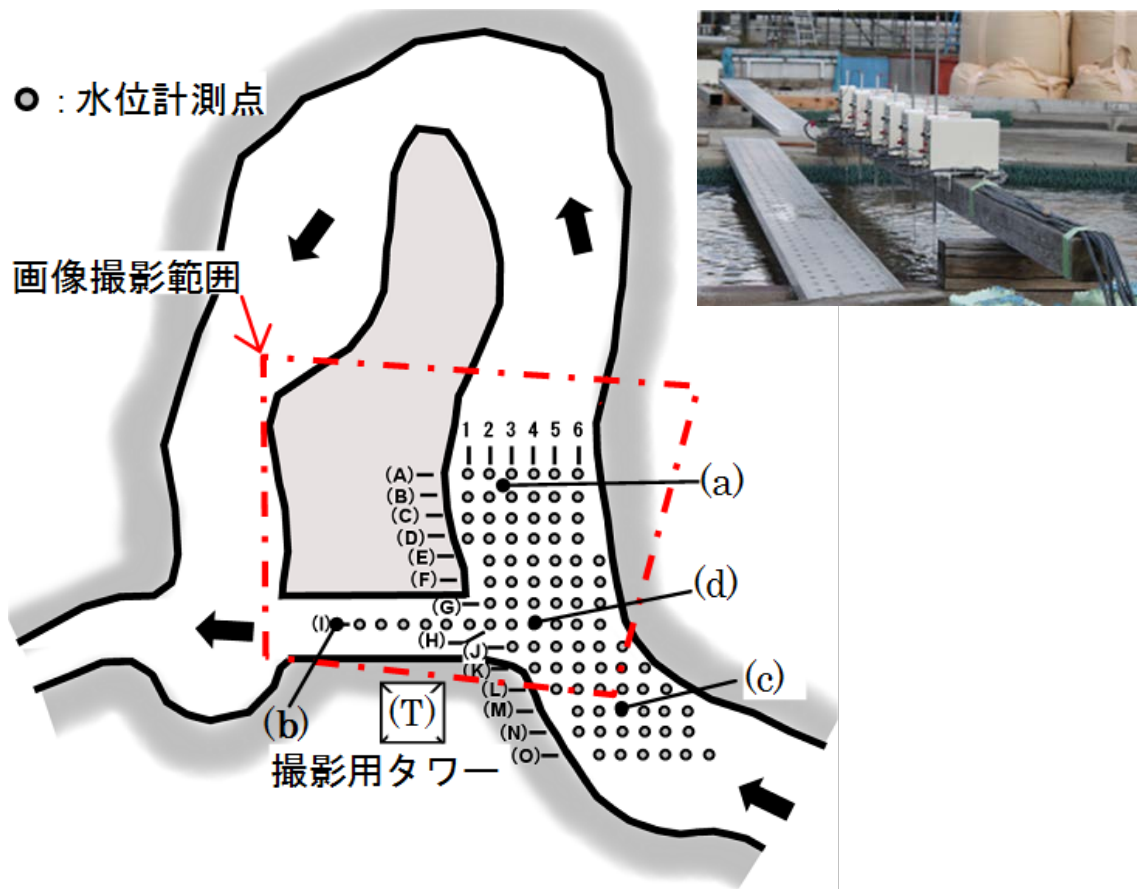


図 4-7 分流部周辺の流況と水面変動計測

## (2)流速変動

分流部における水面変動の計測対象区間の流速変動を面的に捉えるために、PIVを用いた。水面流況の PIV 計測ではビデオカメラを用いたが、ここでは広い範囲の画像を高解像度で得るため、デジタル一眼レフカメラによる連続撮影を試みた。使用したデジタル一眼レフカメラは canon 製 EosX3 で 1/4 秒間隔で静止画像を収録した。撮影範囲と画像の例は、図 4-8 に示すとおりである。画像は俯角  $67^\circ$  の斜め画像である。両岸にある赤白の平板（実寸は  $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ ）は、画像を鉛直正射影に変換するための長方形に配置したマーカーである。室内の基礎水路実験では、水路に正対した撮影が容易であるが、屋外の大型模型実験で水面对して垂直な撮影が難しいため射影変換に関わる設備が必要となる。

なお、流速計測の際にも水位変動計測と同じ基準地点(a), (b)にサーボ式水位計を設置し、水位変動を計測している。これにより、水面の時空間分布と流速分布の対応を把握することが可能となる。ここに示した水面の周期変動を利用して水面流速の時間変化と水面時空間変動を関係づける計測手法は、実務の河川模型実験では初めてである。



図 4-8 デジタル一眼レフカメラによる水面流況の例

## 4.5 実験結果 1 : 捷水路設置時の流況の概要

### 4.5.1 縦断水面形の特徴

本川河道と捷水路全川の水位縦断形を図 4-9 に示す。縦軸の水位は、模型縮尺  $S=1/70$  から実河道での水位で示している。横軸は本川に沿った縦断距離を実河道の距離標で示している。横軸  $36.7\text{km}$  付近は分流点,  $35.5\text{km}$  付近が合流点であり、その間が湾曲河道部となっている。また、図中の赤い横軸スケールは、Case-1 に対応した捷水路に沿った流下距離である。

実際の河道での捷水路設置を想定して捷水路設置前の Case-2, 設置後の Case1 の順で水面形を検討する。

Case-2 は、緑色の線であり現河道に現況河道の疎通能力相当の流量が流下した条件である。流れ常流であり、上流部の河道直線区間から合流部下流の  $35.4\text{km}$  地点までにおける水面形は同一線上にある。なお、 $35.2\text{km}$  付近からは河道幅が狭まり流速が増加するため水位が低下している。

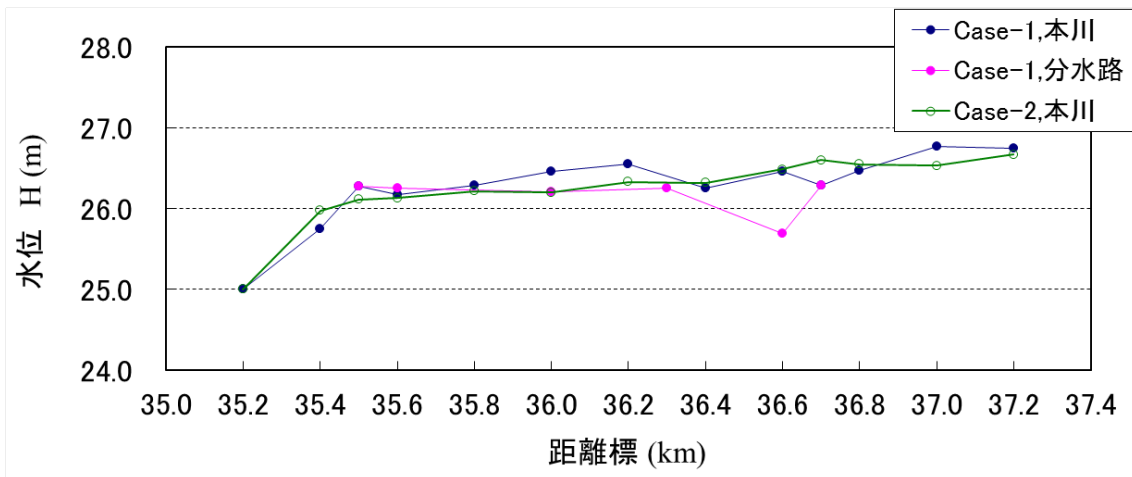


図 4-9 本川および捷水路の水位縦断面図

捷水路を設置した Case-1 は、本川水位を黒線、捷水路水位を赤線で示している。実河道を想定した河道と流量の関係は、捷水路を設置した新河道に河道整備計画流量が流下した状態に相当する。分流点 36.7km 地点から上流では捷水路の効果により流量が約 1/2 の Case-1 の水位と同程度となっている。分流点から合流点までは水面が上昇している。これは、分流点で本川河道の流量が急激に減少し流速が低下したためと考えられる。また、捷水路の入口付近では、捷水路への流れ込みによる速度水頭の増加により水面勾配が急になっている。このような捷水路入口付近の水面勾配の変化は、第 3 章の水路実験にも現れている。

以上から、水位縦断面のポイントは次のとおりである。水面勾配の変化点は分流部および捷水路で生じる。分流後の本川河道は、水面勾配が緩くなるため土砂堆積が懸念される。

#### 4.5.2 水面流況の特徴

##### (1) 水位の空間分布

4.4.4 に示したサーボ式水位計を用いた計測手法による各測点の計測結果を 10 分間平均し、図 4-10 にコンター図として示す。この図は、右下が上流であり、左側の捷水路と上方向の本川河道に分流する。分流部上流では、本川左岸側の水位が高くなっている。これは上流から捷水路にかけて河道が右方向に湾曲しているための堰上げである。捷水路への流入部で水位が急速に低下し、分流後の本川左岸では水位が局所的に高くなっている。この水位分布により、本川河道に沿ってきた流れが流向を変え、捷水路の運動量を獲得していると考えられる。

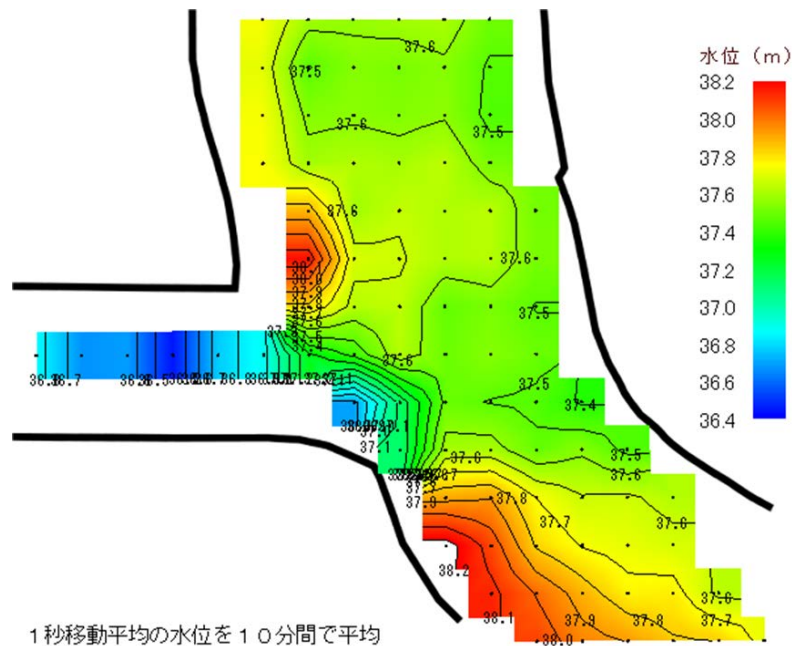


図 4-10 時間平均水位の平面分布

一方、本川の中央から右岸側では、コンター線の間隔が広がっており、ほとんど水平の水面形となっている。この部分では、次項にのべるように流速が相対的に小さく、特に右岸側では水平渦を伴う死水域となっている。

## (2)水面流向の空間分布

分流部における PIV 解析の概要は、次のとおりである。 4.4.4(2)に記述したとおり、図 4-8 のような斜め画像を図 4-4 のように鉛直正射影に変換した。図 4-4 に示すように、分流地点近傍の  $5.9\text{m} \times 4.3\text{m}$  の領域を  $12.5\text{cm}$  角の格子に区切り、格子ごとに流速値を求めた。格子数は  $47 \times 34 = 1598$  点である。600 秒間に得られた 2400 画像について PIV 解析を行った。試行計算の後、相関窓を  $65 \times 65$  ピクセル、検索範囲を  $130 \times 130$  ピクセルとした。

図 4-11 に示すような流速の時間変動を、PIV 解析の計測格子の全てにおいて得ている。この 2400 画像から得られた各計測点での流速変動の時間平均を図 4-12 に示す。図中の色が流速の絶対値を、矢印が流向を示している。本川中央の高速流の大部分は加速しながら分水路に流れ込み、一部が分流後の本川左岸沿いを流下している。なお、捷水路床が本川の滞筋部の河床に対して高いことも、捷水路内流速が本川に比べて大きい一因と考えられる。捷水路から下流の本川中央部および右岸側の流速は非常に小さく、いくつかの平面渦の形成が認められる。図の最下流部では断面の右岸側半分で逆流が生じており、左岸側の順流部に合流している。目視観察によれば、この逆流は河道幅の 3 倍の長さの循環流を形成している。

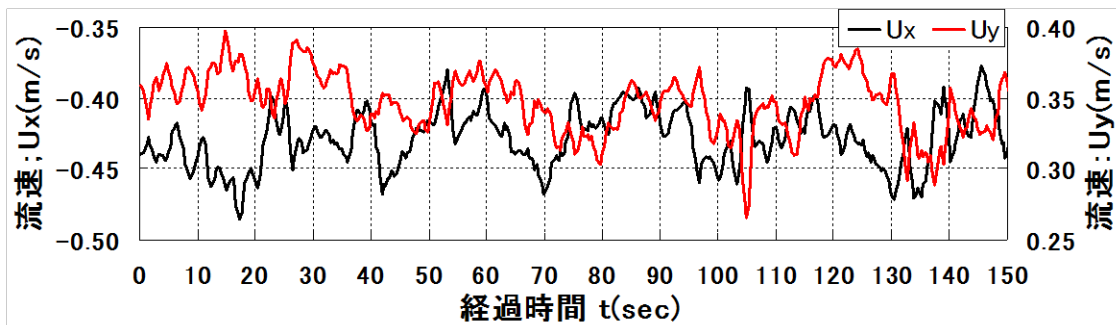


図 4-11 PIV による分流部の水面流速変動：図 4-7，地点(d)

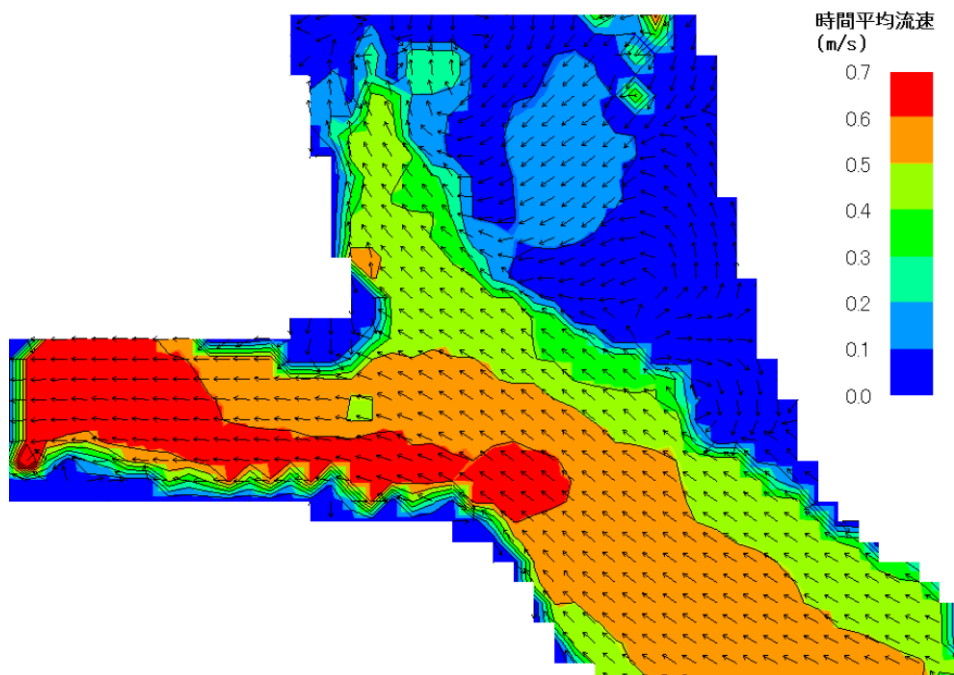


図 4-12 時間平均の水面流速分布

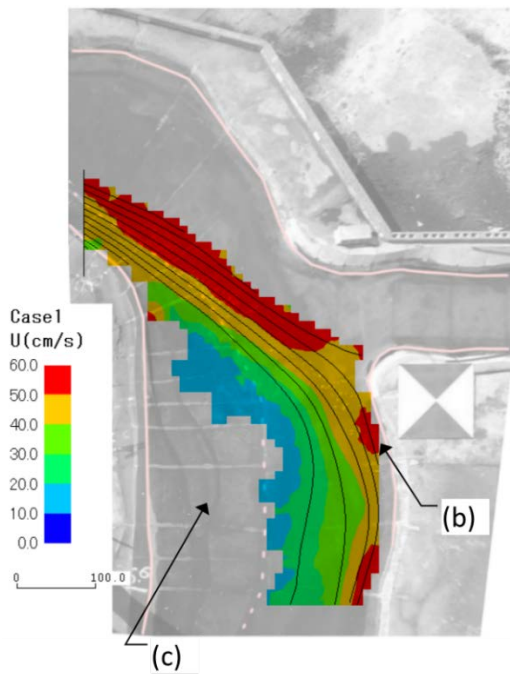
#### 4.6 実験結果 2：捷水路設置に伴う流況変化

##### 4.6.1 水面流況の変化

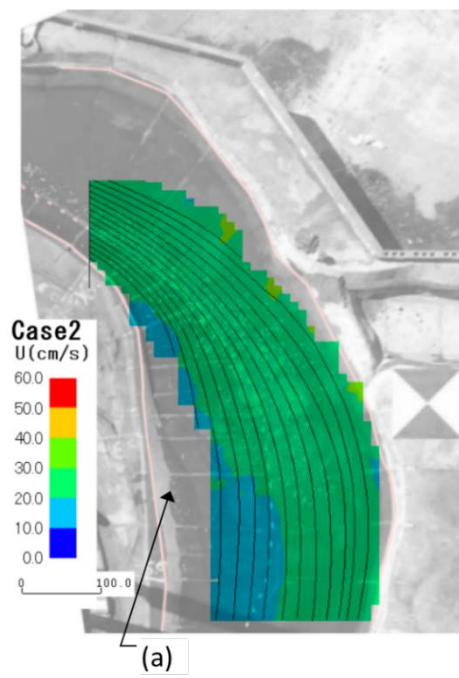
図 4-13，図 4-14 は，PIV 解析による水面流況を示している。カラーコンターは流速の絶対値，黒実線は図の左である上流側からの流線を示している。第 3 章の水路実験の知見を踏まえて，水面トレーサが相互干渉しないように分流点上流側の主流部に水面トレーサを投入している。その結果，カラーコンターが描かれていない領域は，上流からの水面トレーサが流下していない領域に対応している。以下に，分流部と合流部のそれぞれの流況について考察する。

図 4-13 は、捷水路分流部における捷水路を設置した Case-1 と本川のみ流下の Case-2 の水面流況を示している。捷水路に分流しない流況の流線は等間隔であり、分流地点上流では流線密であるが、分流点付近からの河道の拡がりに合わせて等間隔に拡がっている。分流部右岸側のカラーコンターの無い領域は、水面トレーサが流下していない領域であり死水域[図中(a)]といえるが、その領域は、河道幅の 1/4 程度である。捷水路が設置された場合は、分流直下流[図中(b)]において流線が接近し、流速が 50cm/s～60cm/s に増加している。流線が接近した場所は水衝部であり、水面流の潜り込みが生じていると考えられる。また、分流点对岸には水面トレーサが流下しない死水域が拡がっており、その幅は河道幅の 1/2 程度でありである[図中(c)]。この領域では、低流速の平面渦が観察された。50cm/s～60cm/s の流速を実河道に当てはめると、本模型の空間縮尺 1/70 に対してフルード相似則による流速縮尺は  $1/70^{0.5}$  となり、実河道における流速は、4.2m/s～5.0m/s となる。流速 4.0m/s 以上では石系やコンクリート製の法覆工、所謂護岸が必要とされており<sup>48</sup>、分流点下流に形成される水衝部における流速増加は護岸を必要とする規模といえる。

次に、図 4-14 は捷水路合流部周辺の水面流況を図示している。PIV 解析のトレーサは、本川の上流側、図では下側の本川において左岸、水路中央、右岸の 3 箇所から時間をずらして投入している。捷水路が無い場合には、湾曲部内岸側の主流が合流点付近で湾曲部外岸に移動する[図中(a)]。また、合流部は凹んだ平面形状を有しており、この領域では低流速の循環が生じている。この循環は、青色コンターの中央に収束しており、この部分から流れが潜り込み、下流河道に流下していると考えられる。このように、水面流況ではあるが詳細な計測によって水面下の流況を推察可能である。図 4-14 の左図は、捷水路を設置した時の水面流況である。PIV 解析のトレーサは、本川の上流側、図では下側の本川において左岸、水路中央、右岸の 3 箇所、更に捷水路の水路中央付近から時間をずらして投入している。捷水路が設置により、凹み地形の循環は無くなり、捷水路の流れによって本川湾曲部の流れは右岸側に偏倚している[図中(b)]。また、捷水路からの流れと本川からの流れが合流する図中の[図中(c)]では流速が周辺より遅くなり、その後流線が平行となる[図中(d)]付近で加速している。これは、第 3 章の水路実験で観察された合流部での湧き上がりと同様の現象が実河道で生じ、湧き上がった流れが合流後の河道に加速しながら流下していると考えられる。また、合流部下流側の加速した流速は 50cm/s～60cm/s であることから、分流部の水衝部と同様に実河道では無視できない流速であり、護岸を検討する必要がある。

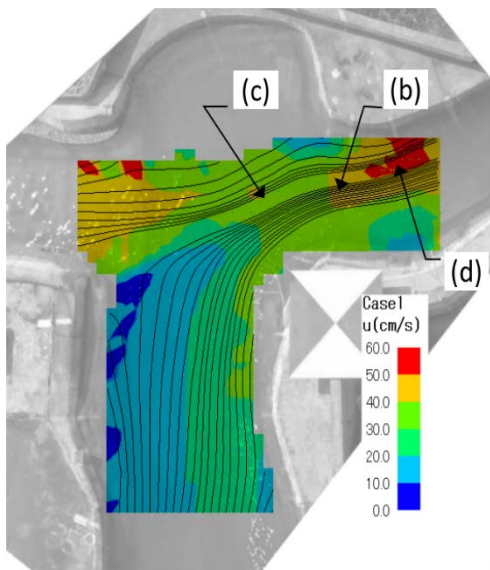


(a) 捷水路有り, Case-1

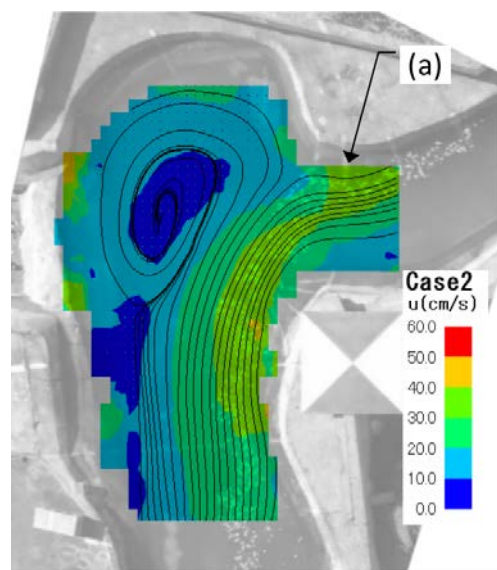


(b) 捷水路無し, Case-2

図 4-13 分流部の水面主流線



(a) 捷水路有り, Case-1



(b) 捷水路無し, Case-2

図 4-14 合流部の水面主流線

#### 4.6.2 底面流況の変化

図 4-15 と図 4-16 は、2種類の底面トレーサの流下軌跡を示している。写真の左上が上流側であり、ここから横断方向に凡そ 20cm 間隔、数秒毎に底面トレーサを投入しその流下状況を高所からビデオカメラで撮影した。約 60 秒間のビデオ画像から 0.5 秒毎の静止画像を取り出し、それを重ね合わせることで底面トレーサの軌跡を図示した。オレンジ色の底面トレーサの軌跡が密集している部分は、トレーサの動きが緩慢となっている領域であり、実際の河床材料では堆積域に対応する。この観察手法は、第 3 章において直径約 5mm の底面トレーサによる観察手法と同様であるが、撮影距離が 10m に達することから、トレーサの大きさ等を工夫し大型模型実験に適用している。

図 4-15 は、捷水路への分流が無い場合の底面トレーサの流下軌跡状況である。上流部に於いて横断方向に一定幅で投入された底面トレーサは河道が湾曲し始める分流付近において、外岸側と内岸側の二つの経路に集まる。[図中(a)] に示す外岸側では河床最深部に近い河岸から一定の距離を保って流下している。これは外岸側の 2 次流の影響で最深部から内岸側に抗力を受けているためと思われる。分流点付近で内岸側に集まったトレーサは、その下流側 [図中(b)] から再び拡がりながら流下している。特に重量の軽い  $\phi 1.3\text{cm}$  のトレーサの流況状況が一樣である。また、湾曲部内岸側のトレーサの軌跡間隔が一定の部分が多く、滞留が認められなかった。これは、河床材料の堆積が起きにくいことに対応している。

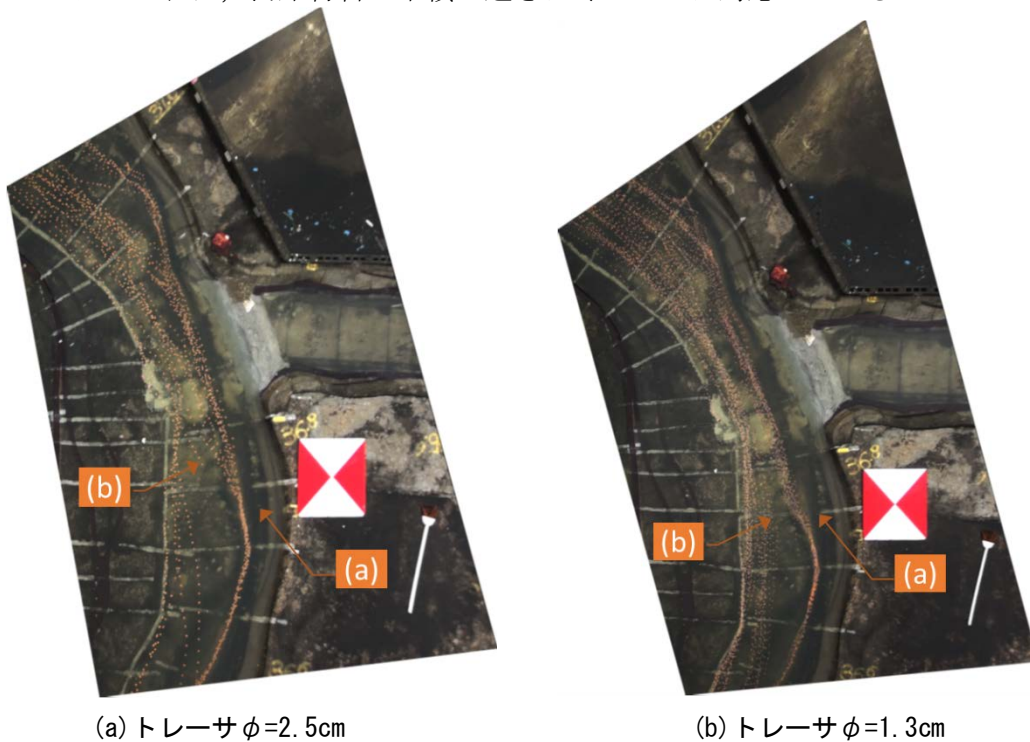
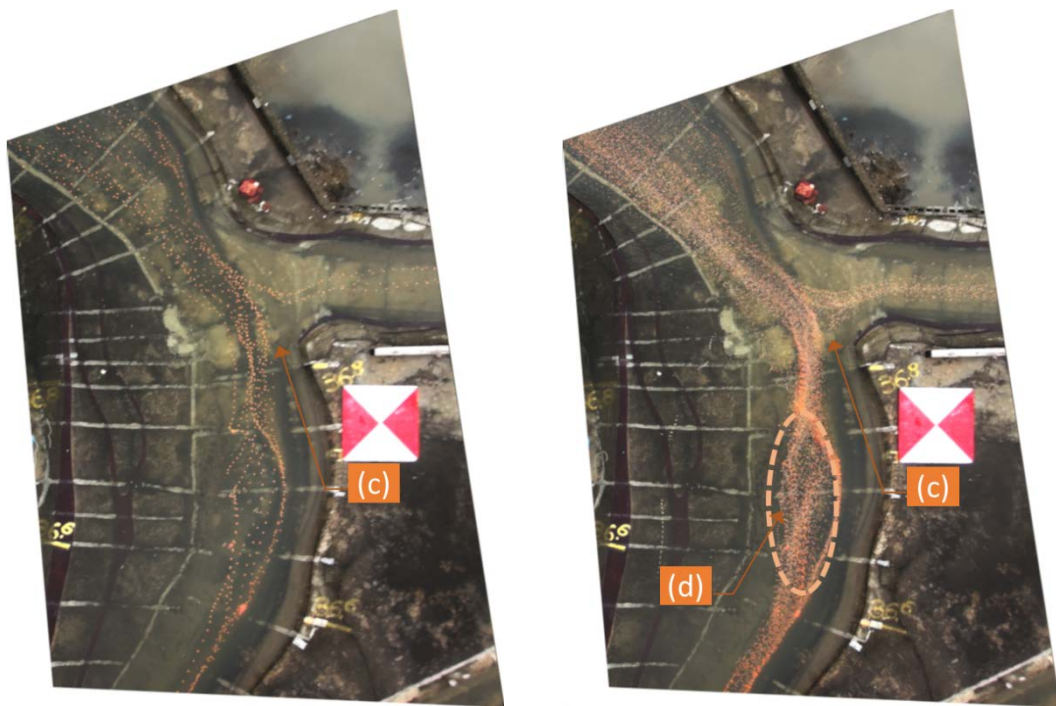


図 4-15 分流部に於ける底面トレーサの軌跡，捷水路無し



(a) トレーサ  $\phi=2.5\text{cm}$

(b) トレーサ  $\phi=1.3\text{cm}$

図 4-16 分流部に於ける底面トレーサの軌跡，捷水路有り

図 4-16 は，捷水路を設置したケースの底面トレーサの流下状況である．上流側から流下してきたトレーサは，分流点に直進し捷水路と本川に分かれて流下しているが，その多くは本川側を流下している．そして，分流直後の [(c)地点] においてトレーサの対岸への偏倚が見られる．そして，[領域(d)] 周辺でトレーサ軌跡の間隔が詰まっており，滞留が生じている．トレーサは球体であり，土砂に比べて軽いため抗力により最終的には下流側に移送されるが，実河道を想定した河床材料の場合には [領域(d)] 周辺において堆積が生じるものと考えられる．

#### 4.7 実験結果 3 : 分流部における水位，流速の時空間変動

##### 4.7.1 水位の変動特性

###### (1) 基準点の水位変動特性

図 4-7 に示した(a)，(b)，(c)3 地点の水位時系列を図 4-17 に示す．分流部の本川下流の地点(a)では周期 25 秒程度の変動が見られる．振幅は 0.6cm で模型の空間縮尺 1/70 を想定した実河道では約 40cm に相当する．また捷水路出口付近の地点(b)では 10 秒程度の周期の変動が見られ，その振幅は 1.2cm であり実河道の想定では，約 80cm である．模型内の横断平均水深は 20cm のオーダーであり，上

記の水位変動は3~6%の水深変化に対応するので、流向、流速を変動させるに十分の大きさといえる。

一方、捷水路上流側の地点(c)では周期2, 3秒程度の変動が卓越している。模型河道幅が180cm、平均水深が20cmであることから、地点(c)の変動は河道横断方向のセイシュに対応するものと思われる。

次に、(a)、(b)、(c)各地点の10分間の時系列データを用いてスペクトル解析(FFT<sup>49</sup>)を行った結果を図4-18に示す。地点(a)では25秒程度を中心にした変動(以下、長周期変動という)が卓越している。一方、地点(b)では10秒程度の変動(以下、短周期変動という)が卓越するが、地点(a)で見られる長周期変動もわずかに含まれている。また地点(c)では短周期変動は明確でないが、長周期変動はわずかながら存在するようである。以上より、分流部周辺では周期25秒程度の長周期変動と周期10秒程度の短周期変動が存在すること、短周期変動は捷水路内に限られるが長周期変動は捷水路下流の本川から捷水路および分流部上流域に侵入していることが推測される。

図4-1に示した模型で分流部と合流部の本川湾曲区間長は約20m、平均水深は約20cmであることから、セイシュの周期は約28秒となり地点(a)における長周期変動と概ね同じ長さの周期である。また分水路の区間長は約4.0m、平均水深は約12cmであることから、セイシュの周期は約7.4秒となり地点(b)の短周期振動に対して短い。しかし、分水路の区間長を本川の河心部までと見なせばセイシュの周期は約9.5秒となり、短周期振動の周期に近い値となる。これより周期変動は、河道の形状に規定された振動と考えられる。

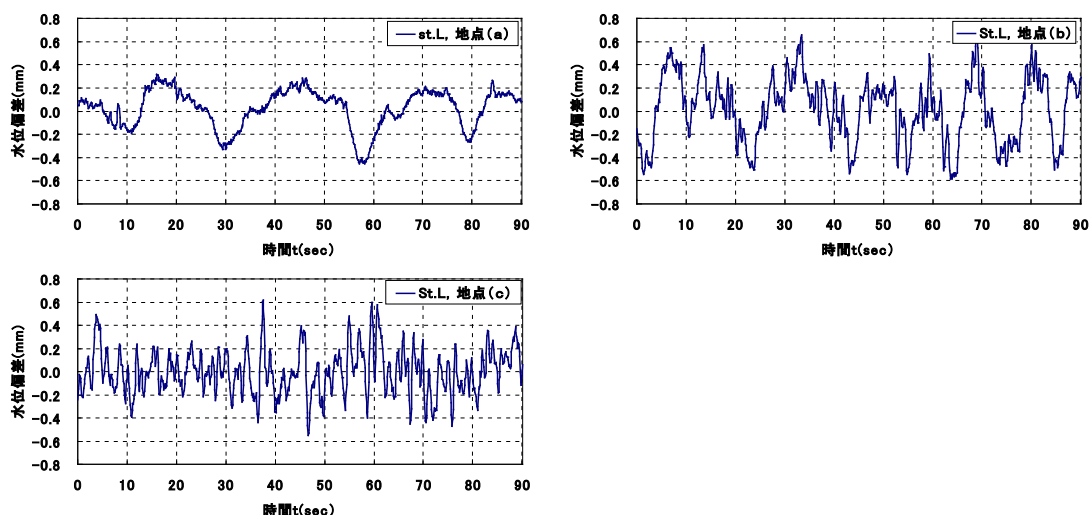


図 4-17 本川と分水路の水位変動

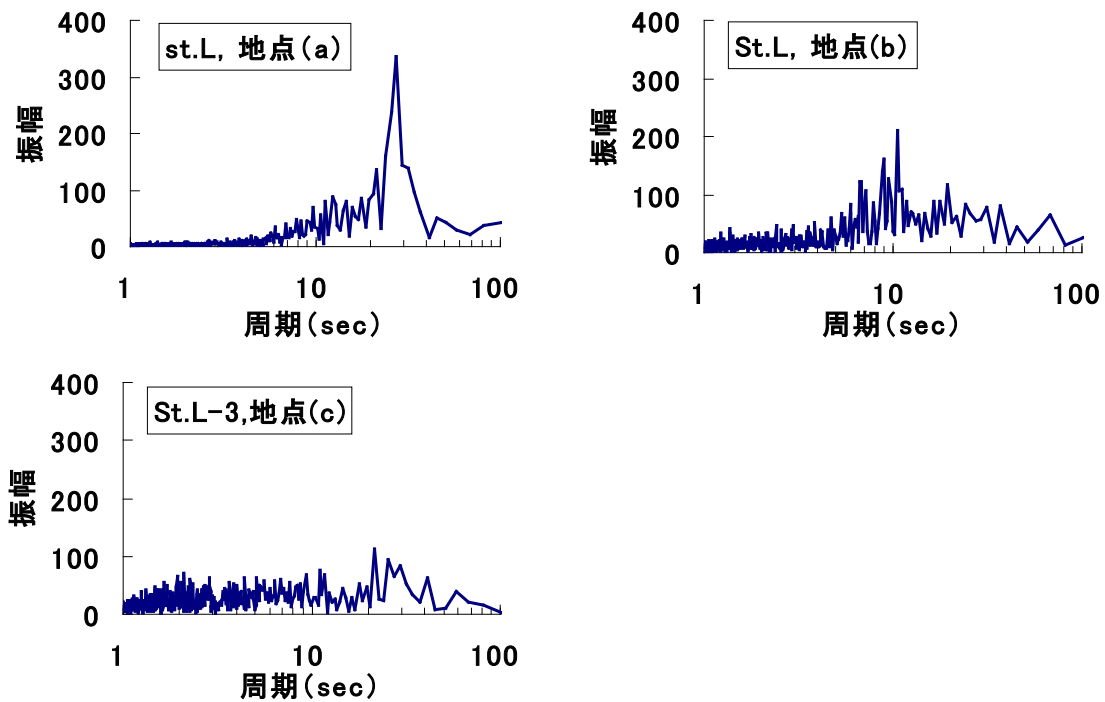


図 4-18 水位変動のスペクトル

## (2) 分流部周辺の水位変動特性

ここでは、水位計測点全てに対して FFT を実行した結果について示し、分流部周辺の水位変動特性について考察する。

図 4-19 は、最大振幅の発生周波数、所謂卓越周波数の分布を示している。黄色系が約 10 秒以下の短周期の周波数、緑から青が約 14 秒以上の長周期の周波数である。分流点周辺の卓越周波数の分布は、分水路から分流部上流では約 10 秒、分流後の本川では約 24 秒の周波数に分かれている。分流点付近は、その両者が存在している。

更に、長周期変動と短周期変動の境界である約 15 秒を境としたエネルギー分布を検討する。図 4-20 は、周期が 1.0～15.0 秒の全エネルギーの分布である。15 秒以下の短周期のエネルギーは捷水路から分流前本川に分布している。図 4-21 に示す 15 秒～100 秒の長周期のエネルギーは分流後の本川に分布している。これらから、分流点が水位の周期変動の節点となっていると考えられる。

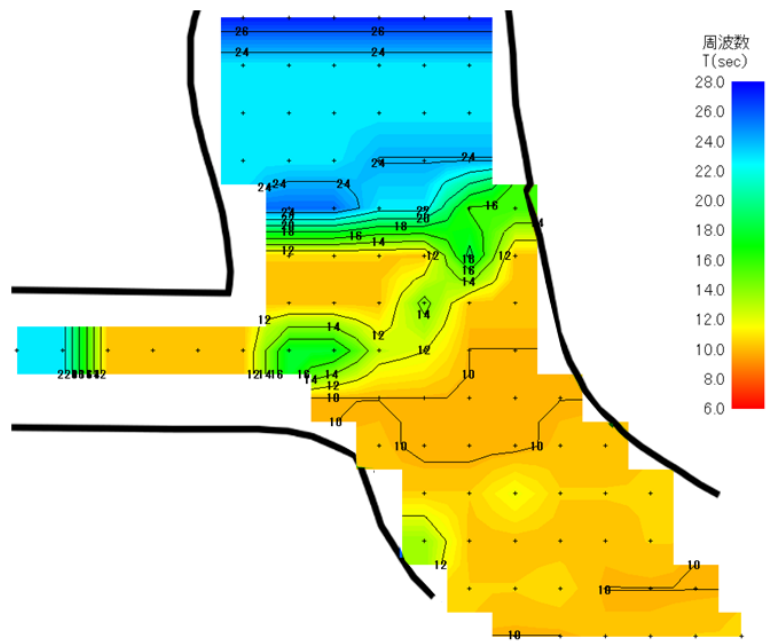


図 4-19 最大振幅の発生周波数 (卓越周波数)

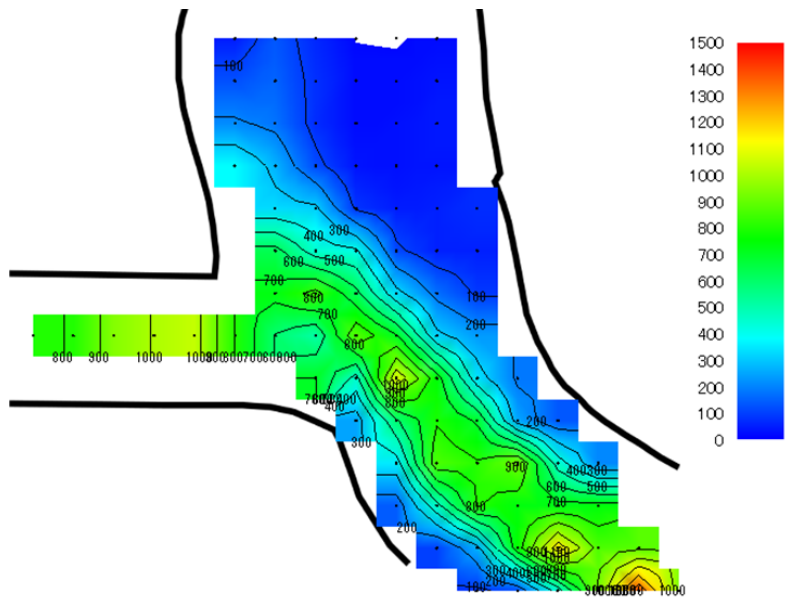


図 4-20 周期 1.0~15.0 秒の全エネルギー

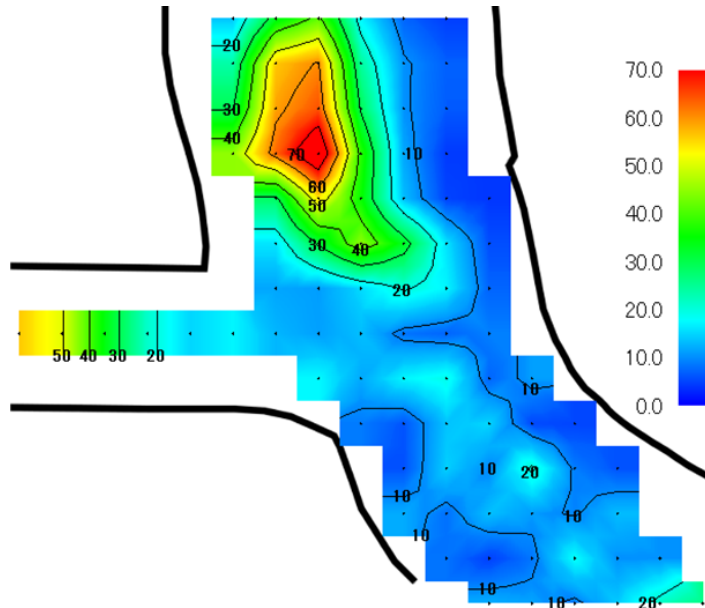
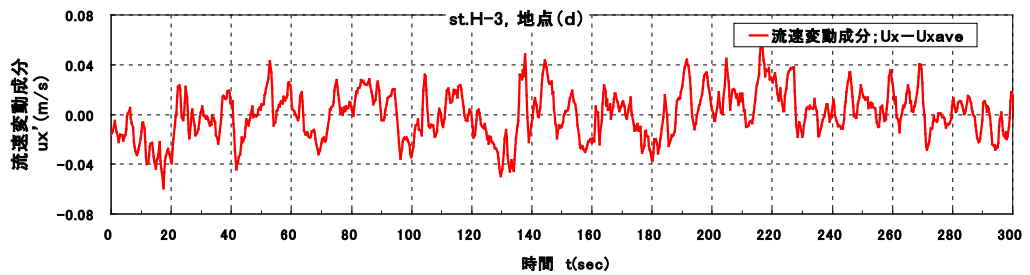


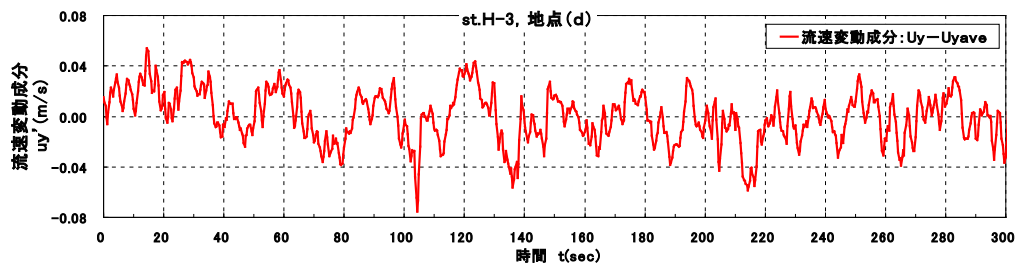
図 4-21 周期 15.0~100 秒の全エネルギー

#### 4.7.2 流向変動と水位変動の関係

図 4-7 における分流点 [地点(d)] での流速変動成分 ( $u_x'$ ,  $u_y'$ ) の時系列図 4-22 に示す。



(a) x 軸方向の流速変動成分



(b) y 軸方向の流速変動成分

図 4-22 流速変動成分の時系列

周期 25 秒程度の長周期変動のあることが判読される。両流速変動成分の相関を図 4-23 に示す。相関の中心点（緑丸： $u_x=-0.42\text{m/s}$ ,  $u_y=0.34\text{m/s}$ ）は平均流速，ピンクの直線は平均流向である。変動成分の大きさは平均流速の 7%程度だが，流向は $\pm 4^\circ$ 程度の広がりを持っている。そこで流向の時間変動時系列を $(u_x', u_y')$ から作成した。その結果を図 4-24 に赤線で示す。図中の青線は分流部下流本川の地点(a)における水位時系列である。両者の波形は非常に似ており，相互相関から時差を求めると約 1.9 秒で，その時の相関係数は-0.59 である。

PIV 解析から求めた流速時系列と水位データ時系列から捷水路の地点(b)における流量変動時系列を求めた。そのスペクトルを図 4-25 にピンク色で示す。図中の青線は図-7 に示した同地点の水位変動スペクトルである。流量変動は 20~30 秒の周期帯で大きくなっていることがわかる。このことから本川の周期 25 秒程度の長周期変動が分流比に影響を及ぼしていると推察される

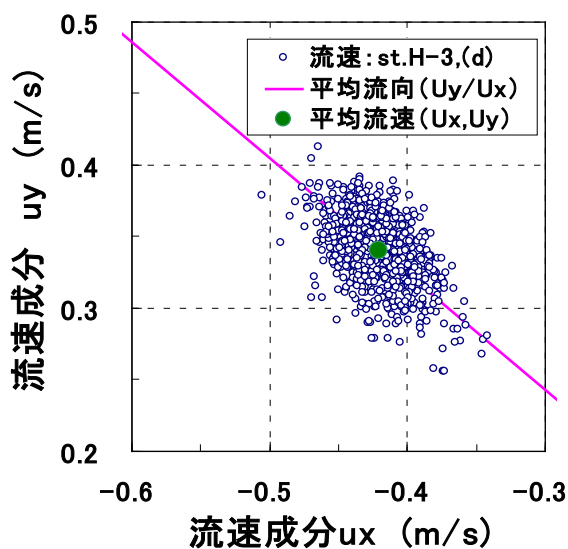


図 4-23 流速変動成分の相関，地点(d)

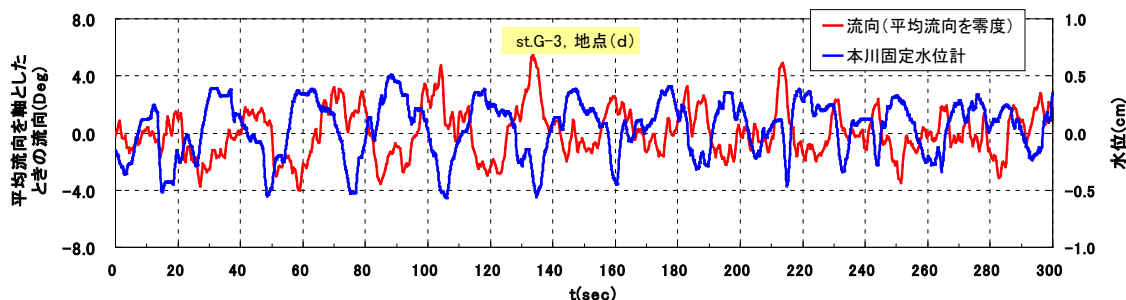


図 4-24 分流部 [地点 d] の流向変動と分流後 [地点(a)] の水位変動

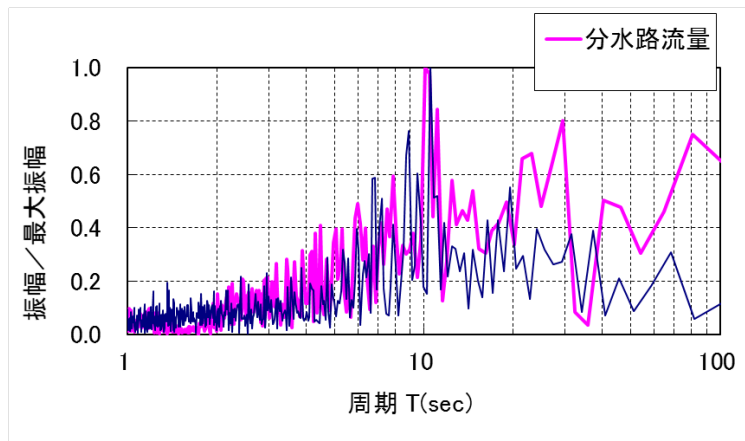


図 4-25 分水路流量の時間変動，地点(b)

#### 4.7.3 周期的水面変動の検討

##### (1)長周期変動の解析方法

本節では，4.4.4(1)で示したサーボ式水位計によって計測された時系列水位のデータ整理方法を詳述する．6 台のサーボ式水位計を一式として 15 回の異なる時間帯に計測された水位変動の時空間的な分布を検討するために，約 25 秒の長周期変動に着目し，次の解析を行った．

まず，地点(a)の全水位変動について FFT を実行した結果，卓越周期が 24.1 秒であった．よって，本節ではこの周期 24.1 秒の長周期時間変動の空間構造について以下のように解析した．前述のように，水位計測は横断測線ごと 6 点ずつで行われているため，同一時間での空間構造解析はできない．そこで全ての計測で共通に取られている地点(a)の水位データを基準とし，長周期変動の位相をあわせて解析を行う．

まず，図 4-24 に一例を示した地点(a)の水位計測データについて，次式で定義される  $\langle f^g(T) \rangle$  の絶対値が最大となる時刻  $T$  を求める．

$$\langle f^g(T) \rangle = \int_T^{T+T_0} f(t)g(t)dt / \sqrt{\int_T^{T+T_0} g(t)^2 dt}$$

式 4-1

ここに， $t$  は時間， $T_0$  は 24.1 秒， $T$  は 1 周期積分の開始時刻， $f(t)$  は観測時系列， $g(t)$  は  $\sin(2\pi t/T_0)$  すなわち周期  $T_0$  の sine 関数である．この演算により，周期 24.1 秒の波が最も顕著な時間帯を選択できる．

続いて，各地点で選択した時間を含む  $2T_0$  の範囲で水位時系列を切り出し，次式

で定義される  $\langle X_i^g(\tau) \rangle$  を最大にするように時差  $\tau$  を決定する.

$$\langle X_i^g(\tau) \rangle = \int_T^{T+T_0} X_i(t+\tau)g(t)dt / \sqrt{\int_T^{T+T_0} g(t)^2 dt}$$

式 4-2

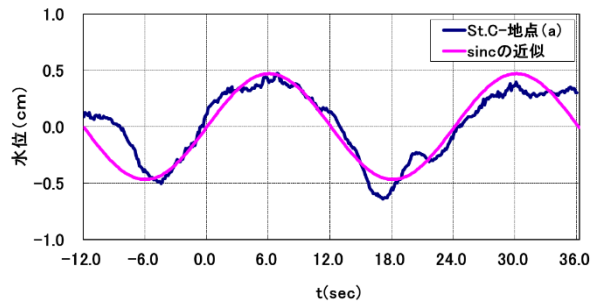
ここに、 $X_i(t)$ は、対象とする水位時系列である。この演算により、地点(a)における周期 24.1 秒の変動成分について、その大きさと、地点(a)の水位変動に含まれる同じ周期成分との時差  $\tau$  とが決定できる。この時の  $\langle X_i^g(\tau) \rangle$  が対応する振幅である。

## (2)解析結果

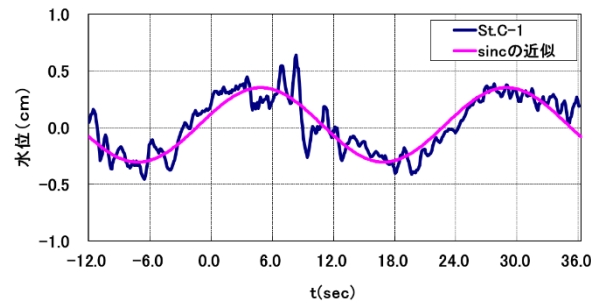
解析例として、図 4-26 に測線 C と測線 I の各 3 点の結果を示す。上段は基準地点(a)の波形、下 3 段が各地点の波形である。全地点の解析結果を合成し、図 4-27 に基準地点(a)の正弦波形の位相を基準に半周期 (12.0 秒) の水面変動を 1/8 位相ごとに示す。また、図 4-28 の赤色破線で示した本川河道断面の最深部の縦断側線(a)に沿った各位相の水位縦断波形を図 4-29 に示す。捷水路から捷水路中心軸に沿って本川河道まで延長した縦断測線(b)の各位相の水位縦断波形を図 4-30 示す。

図 4-29 から、長周期波動は下流側から左岸沿いに遡り、分流点の直下流で右岸側に伝播して減衰していることがわかる。また図 4-30 より、測線 E までは進行波として上流側に伝播するが、測線 F より上流では振幅が小さく、定在波的になっている。一方、捷水路では、測点 I-5 までは進行波として流れを遡るが、測点 I-6 より上流では不明確になっている。

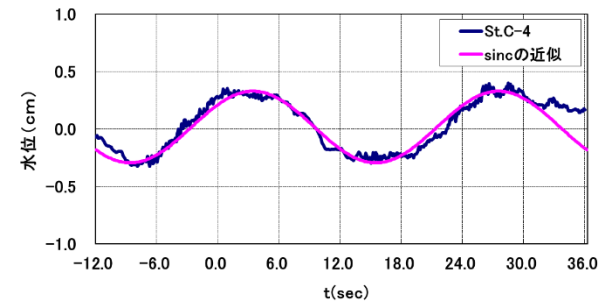
以上のように、本川および捷水路とも水面変動は分流点 (測点 H-3) まではほとんど伝わっていないが、下流部の水位変化によって水面勾配は周期的に変化している。図 4-24 に示した流向変化の長周期変動は、このために生じていると考えられる。



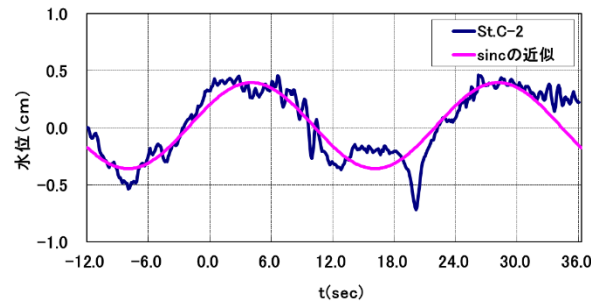
基準地点 (a)



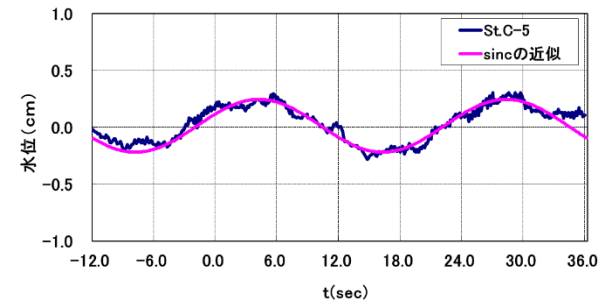
測点 C-1



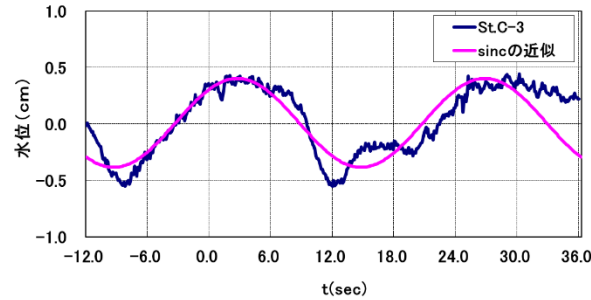
測点 C-4



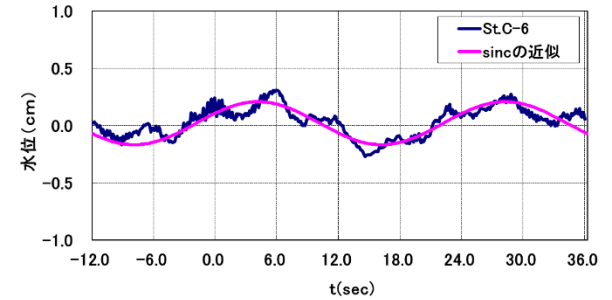
測点 C-2



測点 C-5



測点 C-3



測点 C-6

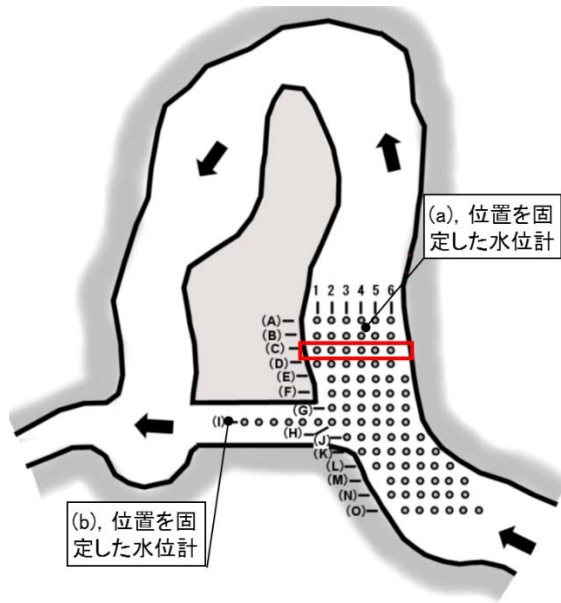
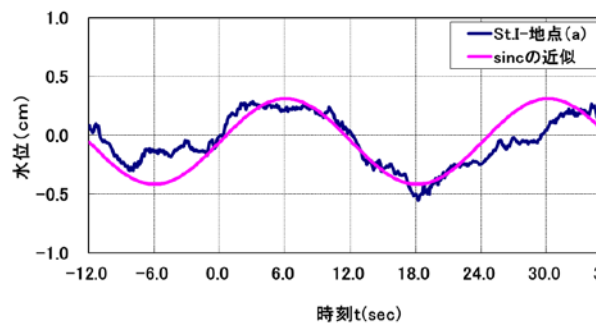
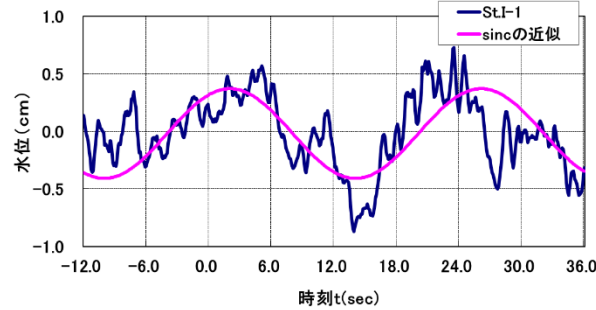
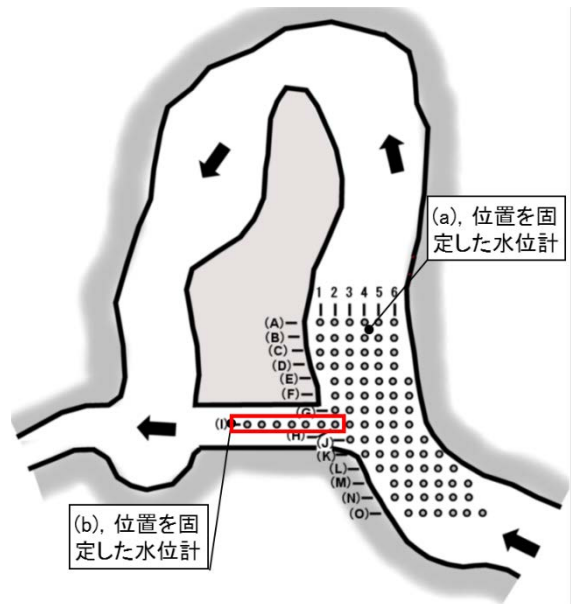


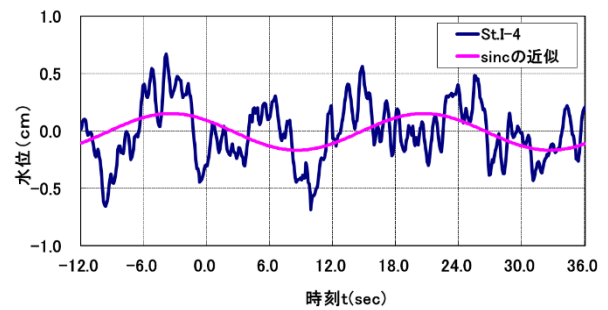
図 4-26(a) 長周期変動の解析例, 測線 C



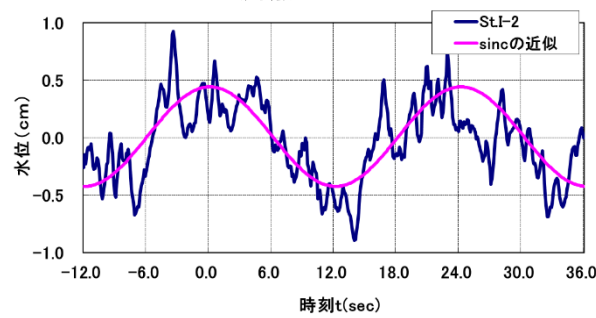
基準地点 (a)



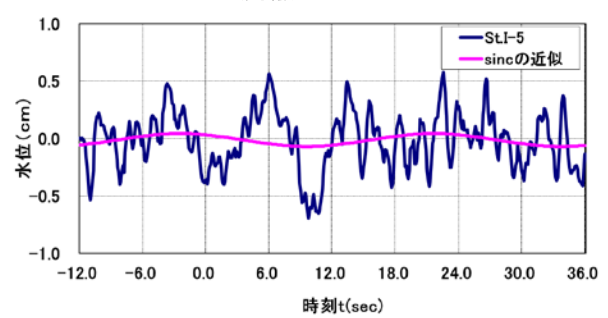
測点 I-1



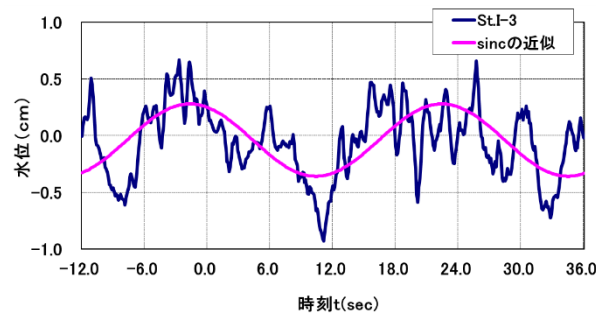
測点 I-4



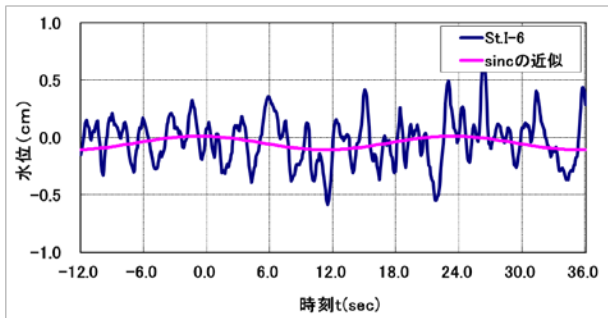
測点 I-2



測点 I-5



測点 I-3



測点 I-6

図 4-26(b) 長周期変動の解析例, 測線 I

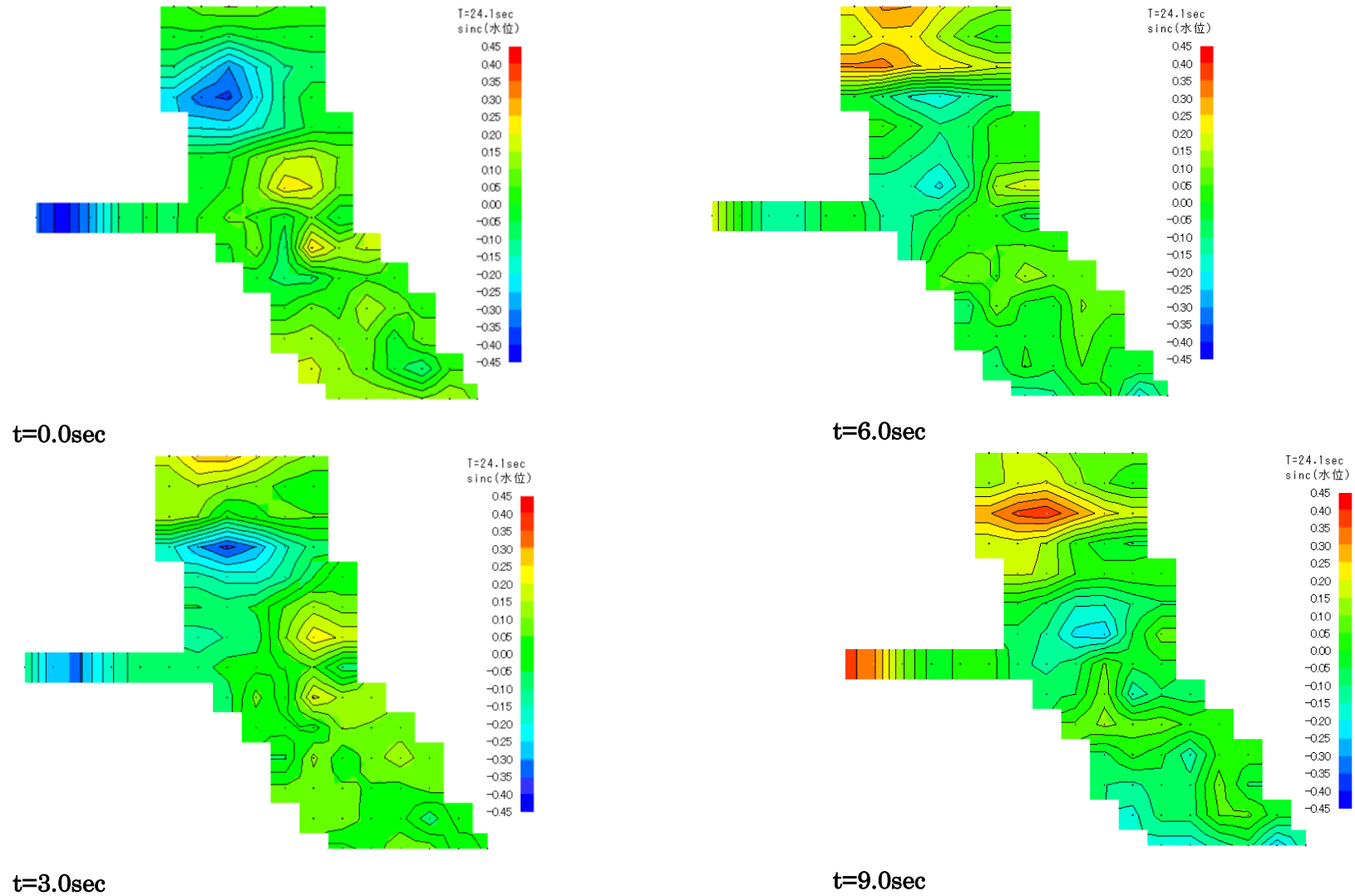


図 4-27(a) 長周期正弦波形 (T=24.1sec) の水面変動

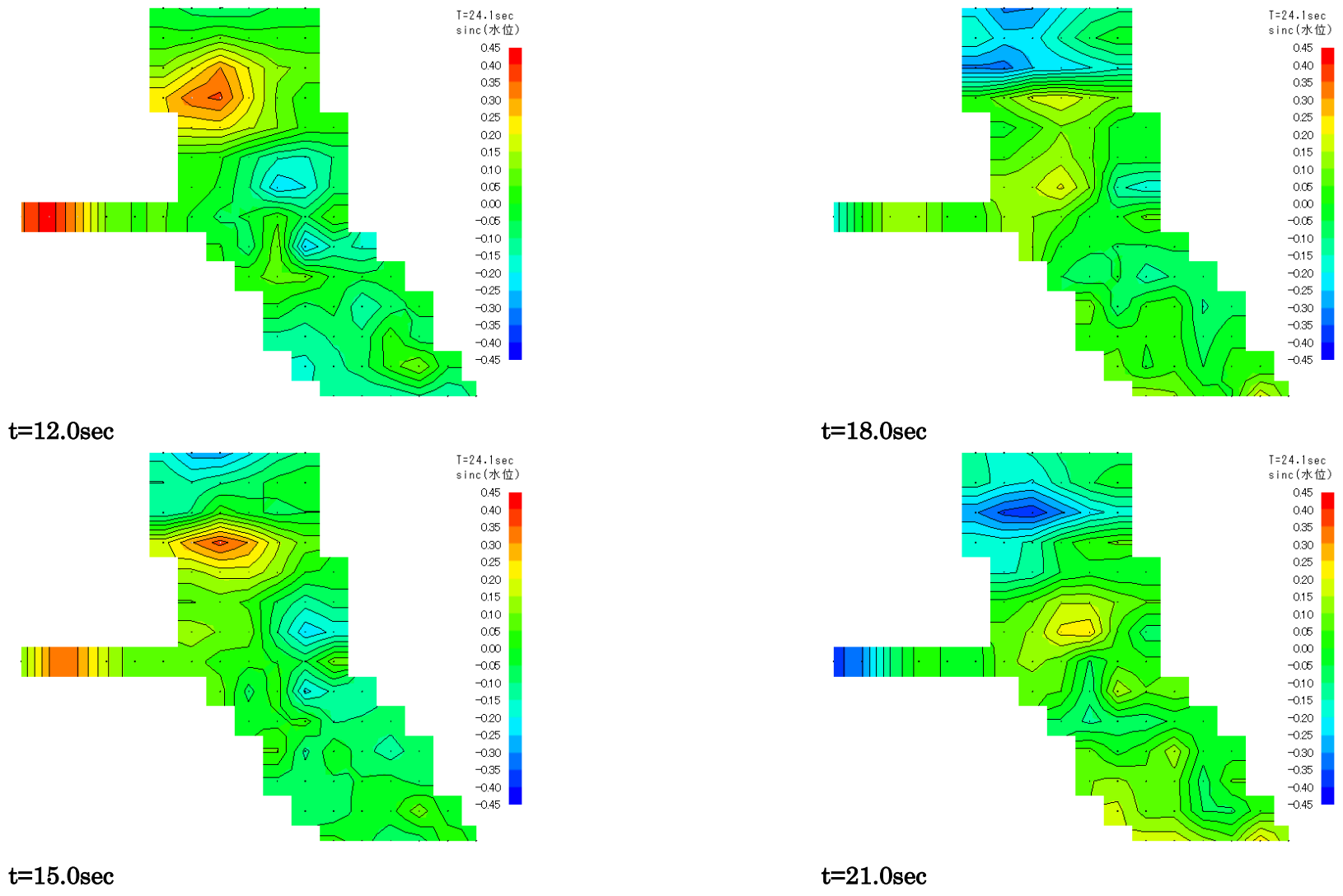


図 4-27(b) 長周期正弦波形 (T=24.1sec) の水面変動

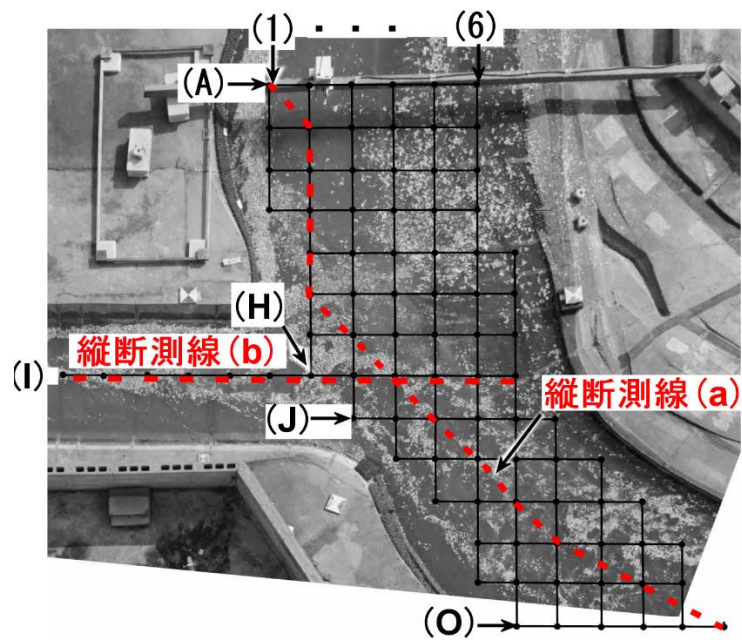


図 4-28 水位縦断図の測線位置

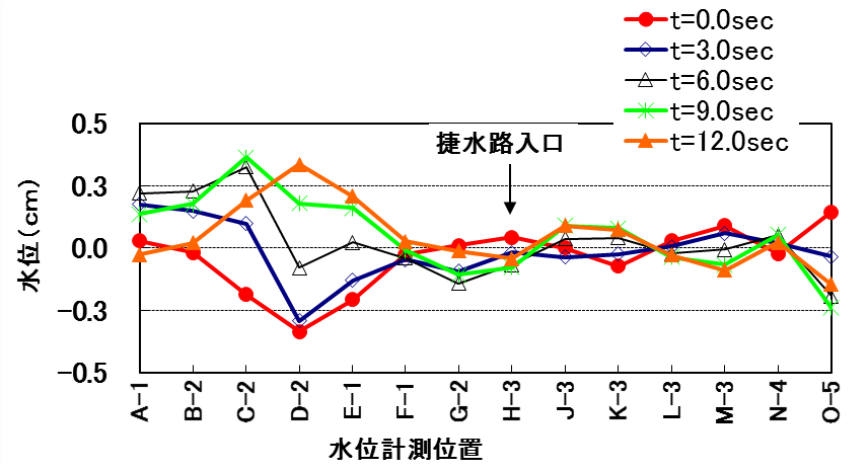


図 4-29 水位縦断の位相変化, 縦断測線(a)

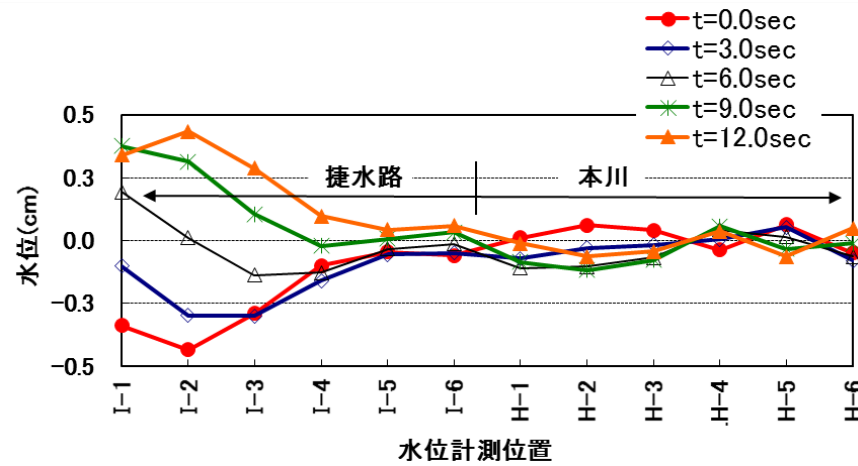


図 4-30 水位縦断の位相変化, 縦断測線(b)

## 4.8 まとめ

### (1)捷水路設置に伴う流況変化

湾曲河道区間に捷水路を設置した場合の水理現象として、水路実験と同様の以下の流況変化が確認された。分流部と合流部に形成される水衝部における流速は、実河道では 4.0m/s から 5.0m/s の高速流に対応しており、護岸の検討が必要な流速である。このような河道設計上重要な情報は、基本的水理特性に基づく計測と検討によって得られたものである。

- 分流部下流側に水衝部が形成され対岸側の死水域の範囲が拡大する。
- 合流部上流外岸側で死水域が拡大、捷水路と本川の合流部において流水の湧き上がり、主流線の偏倚が起きる。土砂移動に関わる流況変化

### (2)河床の流況変化

捷水路設置に伴う底面付近の流況変化によって土砂移動傾向を検討した。その結果、水路実験と同様に以下の底面流況が確認された。分流部湾曲部内岸への土砂堆積傾向を樹脂製の底面トレーサを観察することにより、比較的容易に検討できた。実質の検討時間は、実験準備と底面トレーサの観察に 0.5 日、底面トレーサの軌跡図化等に 0.5 日ときわめて短時間である。既往の検討業務では、軽量河床材料を全川に敷き均しその移動状況を測量する大がかりな準移動床実験を実施していることを第 2 章で示した。これに比較すると、河床材料の移動に関する基本的特性を踏まえた計測手法故に、土砂堆積という河道疎通能力に関わる重要な情報を効率よく検討できたといえる。

- 分流点で捷水路と本川に分かれる底面トレーサの内、その多くは本川側を流下する。これは、第 3 章で推察された水面の流体がその直進性によって捷水路に流れ込み、それを補償するために底面流が本川に流れ込むことに対応している。
- 分流点下流の本川側では底面トレーサは外岸から内岸側に偏倚しており、水路実験で検討された 2 次流強度の増加に対応している。
- 本川湾曲部内岸での底面トレーサの滞留は、土砂堆積や砂州の発達を示唆しており、水路実験における知見と同様である。

### (3)水位の時空間変動の計測，データ整理方法検討

大型水理模型実験において時空間的な計測が難しい水位について新たな計測方法とデータ整理方法を検討し，水位の変動特性を把握した．その結果，以下の手法で水位変動と流速変動および両者の関係を解析可能であることがわかった．

- 複数のサーボ式水位計をセットとして用い，横断測線単位で時系列データを収集する．同時に変動の大きな基準地点で時系列データを得ておき，その変動の位相を基準として各横断測線のデータを解析した．
- 流速については，タワーに取り付けた高解像度のデジタルカメラにより連続的に画像を収録し，鉛直正射影画像に変換した後 PIV 解析を行う．トレーサは，31mm 目と 15mm 目の篩で選別したオガ屑が有効であった．

### (4)分流部における水位，流速の時間変動

実河道で生じる分水路付近の流れの変動について，(3)の新たな計測とデータ整理方法により次の点が明らかになった．

- 水位の長周期変動は本川で卓越し，短周期変動は分水路で卓越し，本模型の場合 25 秒と 10 秒であった．長・短期の波の進行速度とセイシュの周期を検討した結果，水位変動の伝わり方は水路延長と平均水深に規定される長波と考えられた．なお，変動周期の値は，流量規模に伴う水深や流速によって変化するものと考えられるため，個別の施設や水理条件毎に検討する必要がある．
- 分流点付近での流向変化は，本河道模型では $\pm 4^\circ$ で長周期変動している．これに伴い分流量も変動していると考えられる．このことから，長周期変動は，水位と分流量の連成振動と推測される．
- 分流点から下流の本川河道と捷水路内において水面変動が卓越しており，最大 $\pm 0.4\text{cm}$ であった．この変動幅を模型縮尺から換算すると実河道では **56.0cm** となり，河川工学上無視できない水面変動である．つまり，通常河川堤防の余裕高は風浪や河道自体から生じる波による水位上昇を考慮したものであるが，捷水路設置時には更に長周期変動に伴う水位上昇を考慮する必要がある．

第 3 章の水理実験では，断面形状が単純であること等から流れ安定傾向であり比較的規模の小さな水面変動であった．しかし，実河道を再現した大型模型実験では，本川河道を伝播する長周期変動と捷水路を伝播する短周期変動の存在が確認されたことから，捷水路の基本的な水理特性として水面変動があるといえる．

## 5. 結論と今後の課題

### 5.1 結論

河川の水利模型実験は、数値計算技術が発達した現在にあっても実務上有用な水利検討である。それは、水利模型実験が複雑な流況を再現し直接観察、計測できることや数値計算に対して検証データを提供できる事等による。河道計画検討や河川施設設計は、水利現象の基本的な理解の下、治水上の課題や施設の安全性に関わる問題に対して見落としの無いことが重要である。本研究の第2章では、次のような課題のあることを示した。単独の河道合流や分流のように学術研究が多く存在する模型実験業務では、基礎的学術研究から共通する基本的水利特性を整理し業務に活用できるが、実際の業務では定型的な業務内容の場合が多くなっている。さらに、基礎的学術研究が行われていない捷水路では基本的水利特性の理解にたった業務実施が難しく、結果として施設の局部的な改良検討や定型的な計測となっている。よって、業務レベルの向上のための河川の水利特性を踏まえた実験業務への改良が必要である。

本研究の第3章は、捷水路を有する湾曲河道の基本的水利特性の把握を目的とし、単湾曲の河道平面、矩形断面形状を有する水路を用いた基礎実験を行った。その結果、捷水路特有の基本的水利特性が得られた。

更に第4章は、第3章で得た基本的水利特性に基づいた野外大型模型実験を行い、既往検討では十分検討されていなかった治水上課題（流況や土砂移動の変化）を効率よく把握出来ることを示した。そして、基本的水利特性の一つである分流部周辺の水面変動に対して、水面形の時空間分布の計測を行った。この計測は、河川の大型水利模型実験では例が無く、計測範囲の広さによる困難が伴った。この問題に対し、本研究は、限られた数の計測機による詳細な水位計測とデータ整理方法を見だし、計測手法の改良による詳細な水利特性把握の重要性を示した。

図 5-1 は、本研究全体のイメージをフロー図に示したものである。章毎の結論を次に示す。

#### (1)第2章「水利模型実験業務の課題」

実河川の治水上の問題は、水衝部の形成、水位上昇、流況変化、土砂移動に伴う河床の洗掘や堆積である。河川の水利模型実験は、治水施設の詳細設計時に施設形状を決定する手段として用いられるが、実際の業務は、河川の基本的特性を踏まえた実験内容となっていないことを事例により示した。そして、以下の課題に対して、河川の基本的水利特性を踏まえた模型実験業務への改良が必要なことを示した。

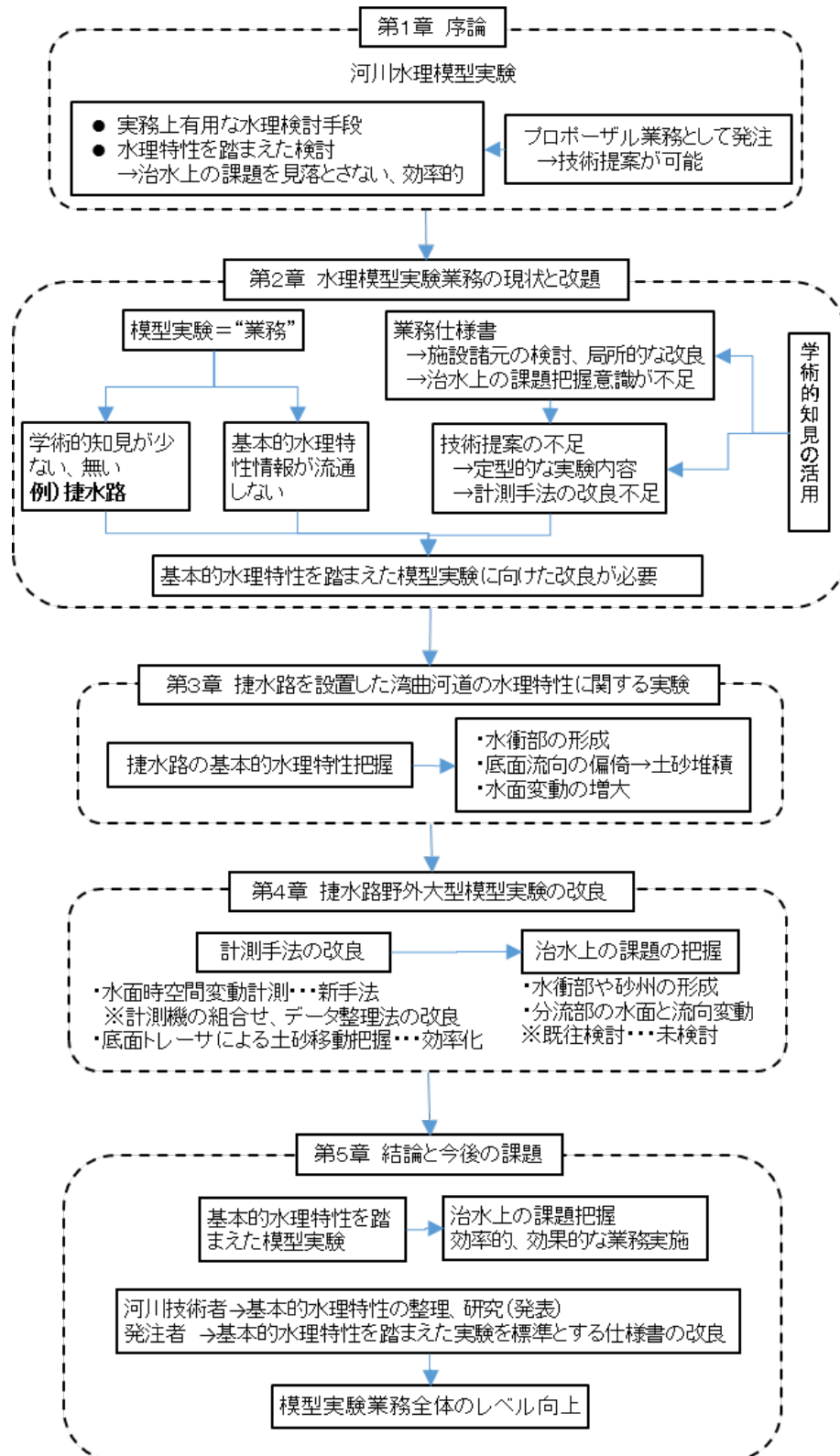


図 5-1 本研究の全体像

- 河川の水利模型実験は、平成6年以降プロポーザル業務として発注されることが増えているが、計測方法やデータ整理方法が河川の特性を踏まえたものとなっていない。
- 実験業務の手順が定型的である場合が多く、その結果治水上の問題を見落とす可能性がある。
- 実験対象に関わらず共通する計測内容となっており、水利特性を踏まえた計測手法の改良検討が不足している。
- 基本的水利特性の収集や計測手法の改良検討のための予備実験、実験結果の考察に投じる費用が業務費用全体の4～6%と小さい。

### (2)第3章「捷水路を設置した湾曲河道の水利特性に関する実験」

捷水路は、合流と分流がセットで存在し、湾曲河道区間の概ね最短部を接続する特徴を有している。分合流部は河道湾曲部に位置するため最初から湾曲河道の特性を有している。その結果、単独の分流や合流とは異なる次のような流況が生じる。

- 湾曲河道区間を捷水路によって短絡すると本川河道に比べて捷水路の水面勾配が急になり、上流からの流水は捷水路に流れ込みやすくなる。
- 本川湾曲河道の流水も捷水路に引き込むように作用する。
- 本川河道の湾曲により2次流が生じやすくなる。

上記の流況により、分流部から合流部にかけて、の特徴的な流況が生じる。これらが、捷水路特有の基本的水利特性である。既往の学術研究には、単独の合流や分流に関するものが多くあるが、本研究で示す水利特性は確認されていない。その理由は、学術研究の殆どは直線水路同士の分流または合流であり、湾曲河道を有する捷水路の分流部や合流部に比べて2次流の影響が小さいという、基本条件の違いによるものと考えられる。

捷水路分流部の水利特性を以下に示す。

- 捷水路設置により、流速が大きく直進性の強い表層流が捷水路に流れ込む様になり、それを補償するために底層流が湾曲水路に多く流入する。このため捷水路分流直後に水衝部が形成され、対岸には広い死水域ができる。実河道では、護岸配置検討が必要となる。
- 分流部に於ける底面流の偏倚により、土砂が捷水路分流点对岸に急角度で輸送され、固定砂州の発達が予想される。実河道では、洪水を安全に流下させる河道断面の不足につながる。

- 捷水路の設置により分流部周辺，特に分流直後の位置において水面変動幅が大きくなる．この変動には，周期性が認められる．実河道では，余裕高の不足やその防護の検討につながる．

本川湾曲区間の流況は，捷水路の有無に依らず湾曲部内岸側を主流が流下するが，以下の特徴がある．

- 捷水路の無い場合には上流からの流れは河道湾曲区間の最短距離を流下するため合流部の上流側の変曲点において流れが加速する．
- 捷水路設置時は，分流部の流況によって本川湾曲部の流速が横断方向に一様となり，合流部上流側での流速の増加は生じない．

合流部では，以下の水理特性がある．実河道で対比してみれば分流部と同様に，水衝部の形成は護岸の配置検討に，砂州の発達は洪水を安全に流下させる河道断面の不足につながる．

- 捷水路合流点の上流において死水域が広がり，対岸に水衝部が形成される．これは，本川湾曲部の流れが捷水路からの流れの側面に衝突し湧昇流が生じる事とそれに伴い本川の主流線が対岸に偏倚する為である．
- 捷水路合流点の上流の死水域では，底面トレーサの移動が緩慢となっており，実河道では砂州の発達が予想される．

### (3)第4章「捷水路野外大型水理模型実験の改良」

#### 1)計測手法の改良

既往の河道模型実験業務は，検討対象に関わらず概ね同様な計測方法やデータ整理方法となっていることを第2章で示した．また，基礎実験における詳細な計測手法は，実務の模型実験の制約（広い計測範囲，野外設置等）があるため，応用されることが少ないという実態がある．

本章は，第3章で得られた基本的水理特性を把握すること，野外設置の大型模型に対して効率的かつ業務として現実的な計測手法であること，を念頭に計測手法の改良を行った．水位と流速に対しては，計測機の組合せと水位変動の周期性に着目し，水位変動の時空間分布計測法と水面流速分布を水面時空間変動に対応させる方法を検討した．土砂移動に対しては，効率的に土砂移動傾向を把握する手法を検討した．ここで水面の時空間変動計測手法は，実務の河川模型実験では，これまで行われていなかった手法である．

#### a)水位の時空間変動計測とデータ整理方法

水位の時空間変動と水面流速変動および両者の関係を次の手法によって解析可能な事を示した．

複数のサーボ式水位計をセットとして用い，横断測線単位で時系列データを収集す

る。本研究では6台を1セットとした。そして、同時に変動の大きな基準地点で時系列データを得ておき、その変動の位相を基準として各計測セットのデータを解析する。流速分布は、高所から収録した画像のPIV解析により得る。このとき、水位変動と同様の基準地点において水位時系列データを計測することにより水位の時空間変動との対応をとる。

#### b)河床の流向把握

分流部湾曲部内岸への土砂堆積傾向の検討に対して、樹脂製の底面トレーサの移動をビデオに記録し、トレーサの移動軌跡を可視化することにより、比較的容易に底面流向を検討可能である事を示した。この手法は第3章の底面流況観測で用いた手法であるが、底面トレーサは実河道の地形の影響により低い場所に集まる問題があった。この問題に対して、流体力を受けやすい大粒径と実際の河床材料に近い小粒径の樹脂球を組み合わせることで底面流況を推定した。

実質の検討時間は、実験準備と底面トレーサの観察に0.5日、底面トレーサの軌跡図化等に0.5日ときわめて短時間であり、有効な実験手法である。

### 2)捷水路の基本的な水理特性に基づく実験結果

下記に示す流速値や変動周期は、本研究における事例研究の一つの条件によるものであるが、第3章で得られた捷水路の基本的な水理特性である”水衝部の形成”，”分流部の二次流による対岸への土砂堆積”によって、既往検討では十分に検討されていない治水上の問題をとらえており、模型実験業務の改良となっている。その模型実験の改良によって得られた治水上の問題を以下に示す。

#### a)流況変化と河床の土砂移動

- 湾曲河道区間に捷水路を設置した場合の水理現象として、水路実験と同様の流況変化が確認された。分流部と合流部に形成される水衝部における流速は、模型縮尺から換算すると実河道では4.0m/sから5.0m/sの高流速となっており、護岸の検討が必要な流速である。

既往検討は、染料で分流流況の可視化を行っているが、水衝部の形成をとらえていない(参照：図2-8, 図2-9)。これは、分流部下流に水衝部が形成されることや、流れの潜り込みが生じるという基本的な水理特性に関する情報が与えられない場合、拡散しながら水面を流下する染料による水衝部の把握は難しいためと考えられる。

- 分流部周辺において、捷水路設置に伴う底面付近の流況変化による土砂移動傾向を検討した結果、水路実験と同様の特性が確認された。つまり、本川湾曲部内岸での底面トレーサの滞留が、土砂堆積や砂州の発達を示唆するものであった。

既往検討は、全河床に薄く敷設した石炭粉の移動により洗掘と堆積場を検討し、捷水路設置による洪水後の分流部対岸の堆積場の拡大をとらえている。しかし、石炭粉の使用は、相似則の問題、土砂の移動過程を把握することが難しいと

いう問題、を有している。これに対して、底面トレーサの観察は、河床材料の移動傾向を容易に把握できるため、実務上有効な計測手法である。（参照：図 2-10）

#### b) 分流部の水面変動

- 分流点から下流の本川河道と捷水路内において水面変動が卓越しており、最大  $\pm 0.4\text{cm}$  であった。この変動幅を模型縮尺から換算すると実河道では  $56.0\text{cm}$  となり、河川工学上無視できない水面変動である。
- 分流部周辺に発生する水面変動には、本川で卓越する長周期変動と、捷水路で卓越する短周期変動の 2 つが在る。本研究で用いた模型では、その変動周期は約  $25\text{sec}$  と約  $10\text{sec}$  であった。
- 分流部の水面流速の流向、分流量、水位は、同様の長周期変動となっており、長周期変動は分流部の水位と分流流量の連成振動と推察される。

上記の知見は、第 3 章で示された捷水路の基本的な水理特性に対して、水位時空間変動の計測手法を工夫することによって把握されたものである。一方、既往の模型実験業務は、水位の時空間変動を取り扱っていない。これは、模型上流端の流量条件と下流端の水位条件が定常であるため模型内部も定常であるという考えと、本研究で得られたような捷水路の基本的な水理特性に関する情報を事前に持っていなかった、ことによるものと考えられる。基本的な水理特性に基づく実験が、いかに重要であることを示した結果となっている。

## 5.2 模型実験の改良に伴う費用効果

第 4 章で使用した大型水理模型の業務としての実験費用は、第 2 章において示したとおり模型製作費を含めた直接費は 2, 125 万円である。本研究で検討した模型実験の改良に伴う検討について、その費用を表 5-1 のとおり概算した。模型実験改良による検討は以下の 3 点である。

- ① PIV による水面流況変化の検討
- ② 底面トレーサの観測による土砂移動傾向の検討
- ③ 分流部における水面の時空間変動の検討

表 5-1 模型実験の改良に伴う検討費用

内訳書 直接人件費, 水位変動計測・解析					平成25年度単価		
作業項目	技師区分	技師A	技師B	技師C	技術員	金額 (円)	摘要
		38,900	31,500	26,200	21,800		
1. 機材調整				0.5	0.5	24,000	
2. 機材設置				0.5	0.5	24,000	
3. 計測			0.5	0.5	0.5	39,750	
4. 解析・図化			5.0	2.5		223,000	
(合計)			5.5	4.0	1.5	310,750	

内訳書 直接人件費, 水面と底面流況計測・解析					平成25年度単価		
作業項目	技師区分	技師A	技師B	技師C	技術員	金額 (円)	摘要
		38,900	31,500	26,200	21,800		
1. 機材調整				0.5	0.5	24,000	
2. 実験準備			0.5	0.5	0.5	39,750	
3. 水面流況・底面計測			0.5	0.5	0.5	39,750	
4. PIV,PTV解析・図化			2.0	1.0		89,200	
(合計)			3.0	2.5	1.5	192,700	

①と②は続けて検討するものと考え、合わせて20万円となる。③の水位の時空間変動の計測は、約30万円となった。これらは1ケース辺りの費用であり、捷水路の有無による2ケースを想定すると、模型実験の改良に伴う検討費用は凡そ100万円となる。この費用は、実験業務の当初全体費用の5%程度である。実験条件が増えればこの費用も増加するが、模型実験業務全体費用に対して少ない費用である。また、国土交通省が発注する設計業務の設計変更額の上限は当初発注額の20~30%程度であり、模型実験の改良に伴う検討費用は現実的な値といえる。

実河道に設置する捷水路は、河道形状、河床勾配、分流位置、更に分流比率等も異なる。第3章で得た水理特性の“現れ方、強度”は異なると考えられる。しかし、実験業務における検討ポイントを示したことで、それに合わせた計測方法を示したことで、更にそれらの検討費用が従来の実験業務費用に対して少ない費用で実施可能であることが示されたことにより、河川に関する水理実験業務の改良と効率化が進むものと考えられる。

### 5.3 今後の検討課題

水理模型実験は、現象を直接観察できるという特徴をもち、目的を明確にし、適切に計画、実施することにより、数値シミュレーションよりも信頼される側面がある。特に水理学や河川工学の専門家以外に対しては、模型実験は解り易い検討手段で

ある。一方で、場所、時間、費用を多く必要とするという短所もあるが、水理模型実験は河川工学に関わる業務において将来も活用される検討手段と考えられる。

本研究の成果は、捷水路を有する湾曲河道に対して基本的水理特性を検討し、新たな計測、データ整理方法を提案することで河川水理模型実験の改良と効率化に寄与するものである。しかし、本研究の検討条件は、時間や場所の制約により全ての実河川に完全に対応するものではない。また、計測技術も常に改良や開発の努力が必要である。以下に今後の検討課題を記す。

### (1)河道諸元による水理特性の変化の検討

捷水路が計画される河道湾曲部の諸元は様々である。河道湾曲部のパラメータとしては、蛇行度、延長、分流点と合流点の距離、断面形状、縦断勾配等が考えられる。

例えば、本川湾曲部と捷水路の延長の関係は、第2章や第4章に示した川内川では捷水路延長約300mに対して本川延長が約1,200m、4.0倍である。第3章の実験水路は本川延長が約6mに対して捷水路延長2.5m、2.4倍である。第4章の実河道模型は、第3章の実験水路の約60%の水路延長比率で湾曲河道を短絡している。ここで、本川河道と捷水路の延長比率は、第4章で検討された長周期変動の伝播時間等に影響すると考えられる。また、本川河道の平面形状は水路実験では曲率半径が一定の単湾曲の組合せであるが、第4章の実河道模型では分流点上流や合流点で屈曲している。河道の平面形状は、水衝部の形成位置や二次流強度の変化に影響すると考えられる。一方で、捷水路が上流側の水位低下を目的に、河道湾曲区間を短絡する考え方は基本的に変わらないと考えられることから、捷水路に生じる基本的水理特性は変わらないと推察される。

ただし、本研究で得られた基礎的水理特性の発生モードや強度が、河道パラメータの違いによって、変化すると思われる。よって、河道パラメータと基本的水理特性の発生状況を学術的、系統的に研究することにより、実河道への適用性が向上するものと考えられる。

### (2)計測技術の検討、開発による非定常現象に対応した検討

本研究では、水面形の周期変動に着目した水位の時空間変動の計測とデータ整理方法を示した。この手法は、数の限られた計測器によって水面変動の検討を可能とする手法であるが、次の2つの課題がある。第1は、それぞれの水面変動が同時に計測されていないことである。第2は、水位変動計測と水面流況の計測が同時でないことである。両者とも本研究では、長周期変動に着目して基準地点で同期を図ることで対応しているが、変動特性が明瞭でない場合にはこの手法の適用が困難となる。そのため、既往研究理論や最新の計測技術を活用した水面変動の同時計測技術の開発が今後の課題である。

例えば、森，山田等<sup>50</sup>はレーザスキャナによる実河川の水位計測を検討している。この研究では、水面ではレーザーが乱反射するため、浮子の3次元位置を計測することにより水面位置としている。その結果、平均的な水面勾配の計測は可能であるが1mmオーダーの精度を求める河道模型実験にそのまま利用できるものではない。ただし、水面にレーザーを反射する膜を形成する等の工夫により直接水面計測が可能とも考えられるため、今後の水位計測技術開発の1つのヒントである。

水面形と流況の時空間分布の今後の技術開発によって、非定常現象に対応した検討が進歩すると考えられる。

### (3)業務データの整理による業務の効率化・高度化

本研究の目的の一つは、河川の水理模型実験（以下、模型実験）が業務として実施されるため、基本的水理特性に関する情報を得る事が難しいという課題であった。捷水路は、業務としての模型実験が少なく、学術研究も行われていないため、本研究は捷水路について基礎的水理特性を水路実験により検討し、その活用によって効率よく治水上重要な水理現象を把握出来ることを示した。このことは、定型的な業務内容が多い河道模型実験業務の改良である。

現在の模型実験業務の殆どは、技術提案型のプロポーザル業務として発注されている。したがって、基礎実験等の知見に基づく技術提案が可能であり、既に技術的向上がみられるはずである。しかし、実際の模型実験業務は、定型的な実験内容であったり、計測手法の工夫や改良が十分行われていなかったり、と技術向上が図られているとは言い難い。それには、次の二つの理由が考えられる。

- 模型実験を行う河川技術者が、基礎的水理特性に基づく検討が業務の質的向上につながることをプロポーザルでアピールしていない。
- 業務発注者は、施設諸元決定を優先し、本質的な治水上の問題把握に意識が向かない傾向がある。

今後は以下の積み重ねによって、水理模型業務に携わる河川技術者と業務発注者である国や自治体職員の意識や技術レベルが向上し、河川水理模型実験全体の改良と改善が進むものとする。

- 既往の模型実験成果の中から、類似する検討対象施設毎に共通する水理特性に関する情報を整理し、新規業務に寄与する知見を得る。
- 新規業務では、詳細な流況や水位の計測、施設設置前後の流況の変化に着目した実験により基本的水理特性の抽出を行い、その結果を学会等に発表、報告する。学会等への発表の意義は、次の二つと考えることができる。

- 1) 査読等の第三者による評価を受けることで、業務成果が一般に認められるものとなる。また、業務発注者においては業務の技術的照査にもなる。
  - 2) 業務から得られた知見が一般に流通しやすくなり、水理模型実験業務全体のレベル向上となる。
- 基本的水理特性を踏まえた検討を水理模型実験業務の標準とし、仕様書の内容を改善する。例えば、以下のような事項である。
    - 1) 同種施設の基本的水理特性に関する情報収集を仕様書に含める
    - 2) 現況河道実験において水理特性を十分に把握出できるような時間と費用を確保する
    - 3) 業務中の計測解析手法の改良提案を受け付ける内容とする、即ち設計変更の内容として明記する

## 参考文献

---

- 1 土木学会：水理公式集〔平成 11 年版〕：pp.241\_243：丸善（株）：1999
- 2 岩屋隆夫放水路の地域特性：河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集：Vol.4：1998
- 3 芦田和男等：河川分流部に於ける流量・流砂量配分に関する実験的研究：土木学会年次学術講演会講演概要集 第 2 部：Vol. 30 卷：1981
- 4 R. J. Hardy, S. N. Lane and D. Yu: Flow structures at an idealized bifurcation: a numerical experiment: John Wiley & Sons, Ltd.:2011
- 5 堀田哲夫等：準三次元数値解析手法の河川分流への摘要：土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部：Vol. 58 卷：1997
- 6 北村 匡等：江戸川流頭部における計画分派の可能性について：年次学術講演会講演概要集：Vol. 62 卷：2007
- 7 村岡浩爾等：河川分流部における拡散物質の輸送について：水理講演会論文集：Vol. 25 卷：1975
- 8 板倉忠興：河川合流部における流れの機構の研究：土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部：Vol. 41 卷：1969
- 9 本間 仁：河川の合流に関する基礎的研究：土木学会年次学術講演会講演集 第 2 部：Vol. 26 卷：1971
- 10 玉井信行：k- $\epsilon$  モデルによる河川合流部の流れの解析：水工学論文集：Vol. 34 卷：1990
- 11 玉井信行：乱流モデルによる河川合流部の流れの予測：土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部：Vol. 48 卷：1987
- 12 Launder, B.E. and Spalding, D.B.: Comp. Math. Appl. Mech. Eng., pp.269\_289: 1974
- 13 三木秀夫：河川合流部の水理学的研究：水工学論文集：Vol. 39 卷：1976
- 14 松尾 誠：河川合流部の三次元乱流特性：土木学会年次学術講演会講演概要集 第 2 部：Vol. 31 卷：1992
- 15 大本照憲：河川合流部における二次流構造と流砂特性：水理講演会論文集：Vol. 31 卷：1995
- 16 岩佐義郎：河川合流部における流れと横分散：水工学論文集：Vol. 39 卷：1990
- 17 西村達也：河川合流部の洪水流と河床変動：土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部：Vol. 46 卷：1993
- 18 福岡捷二：河川合流部の洪水流と河床変動の非定常三次元解析：水工学論文集：第 39 卷：1995
- 19 河村三郎：河川合流部における河床変動：土木学会年次学術講演会講演概要集 第 2 部 Vol.27 卷：1972

- 
- 20 長谷川和義：山地河川における分岐・合流流路の変動機構：土木学会年次学術講演会講演概要集第2部：Vol.47 巻：1991
- 21 建設省土木研究所：雄物川大曲捷水路の水理検討報告：土木研究所資料：第298号：1967
- 22 建設省土木研究所：最上川大淀地区の河道計画に関する検討〔I〕：土木研究所資料：第3326号：1995年
- 23 建設省土木研究所：最上川大淀地区の河道計画に関する検討〔II〕：土木研究所資料：第3488号：1997年
- 24 建設省土木研究所：百間分水路模型実験報告〔III〕—分流点構造に関する水理検討—：土木研究所資料：第1449号：1979
- 25 (株)建設技術研究所，松本良一等：横田川分水路の分派機能に関する模型実験：土木学会第65回年次学術講演会：2010
- 26 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：改訂新版 建設省河川砂防技術基準（案）同解説 調査編：pp.113\_147：山海堂：1997
- 27 建設省土木研究所：河川水理模型実験の手引き：土木研究所資料 第2803号：1989
- 28 Grant, I.:Particle Image Velocimetry , SPIE Engineering Press, MS99:1994
- 29 Pickering, C.J.D. and Halliwell, N.A.:Particle image velocimetry : a new field measurement technique, Optical Measurement in fluid Mechanics, Inst. Phys. Conf. Series, Bristol :Adam Hilger :1985
- 30 須賀堯三 編著：水理模型実験：山海堂：pp.19：1990
- 31 設計コンサルタント業務等成果の向上に関する懇談会：建設コンサルタント業務等におけるプロポーザル方式および総合評価落札方式の運用ガイドライン：pp.1\_3：2009
- 32 パシフィックコンサルタンツ(株)：平成24年度 小川合流点処理水理模型実験および詳細設計業務：業務報告書：2012
- 33 パシフィックコンサルタンツ(株)：虎居地区治水対策詳細検討業務：業務報告書：2007
- 34 笠木伸英，西岡通男，日野幹雄，保原充，編集：流体実験ハンドブック：pp.482\_489：朝倉書店：1997
- 35 笠木伸英，西岡通男，日野幹雄，保原充，編集：流体実験ハンドブック：pp.460\_469：朝倉書店：1997
- 36 東京計測株式会社：<http://www.tokyokeisoku.co.jp/seihin/seihin01/hk101.htm>
- 37 株式会社 KENEK：<http://www.kenek-co.com/>
- 38 笠木伸英，西岡通男，日野幹雄，保原充，編集：流体実験ハンドブック：pp.187\_198：朝倉書店：1997
- 39 須賀堯三 編著：水理模型実験：山海堂：pp.8\_14：1990
- 40 土木学会：水理公式集 昭和60年度版：pp.109\_111：1980
- 41 国土交通省九州地方整備局：川内川水系河川整備計画【国管理区間】：pp.66\_67：2009

- 
- 42 宮本仁志, 神田徹, 藤田一郎, 池上迅: PIVによる開水路凹部流れの計測および数値解析: 水工学論文集, 第41巻: pp.1049\_1054: 1997
- 43 門田健, 田中俊史, 藤田一郎: 小角度で合流する開水路流の三次元性: 水工学論文集, 第53巻: 2009
- 44 門田健, 田中俊史, 藤田一郎: 固定床および移動床における小角度合流部の流れと局所洗掘の特性: 水工学論文集, 第54巻: 2010
- 45 藤田一郎, 戸田敦士, 田中俊史: 平行合流および10度合流の開水路流れにおける三次元構造の違い: 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_811-I\_816: 2012
- 46 富永晃宏, 井嶋康二: 越流型水制工周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果: 水工学論文集, 第46巻: pp.475\_480: 2002
- 47 藤田一郎, 椿涼太: ステレオ水面計測法とPODを用いた側岸凹部流れの水面振動構造の解析: 水工学論文集第49巻: 2005
- 48 国土交通省水管理・国土保全局防災課長: 「美しい山河を守る災害復旧基本方針」(ガイドライン)改訂版: pp.67\_69: 2014
- 49 中村尚吾: デジタルフーリエ変換: 東京電気通信大学出版社: 1989
- 50 森昭彦, 山田正等: 3Dレーザスキャナを用いた河川表面流速と水面勾配計測: 土木学会第59回年次学術講演会: 2004