

# 複断面蛇行流路における洪水流の水理

福岡捷二<sup>1</sup>・大串弘哉<sup>2</sup>・加村大輔<sup>3</sup>・平生昭二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博, Ph.D. 広島大学教授 工学部第四類建設系 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 北海道開発局石狩川開発建設部 (研究当時広島大学助手)

<sup>3</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻

<sup>4</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻

河川は、種々の曲率で蛇行しており、またその横断面形状は、低水路と高水敷から成る複断面形を有していることが多い。このような複断面蛇行流路では、高水敷と低水路の間で流れの交換が生じるために単断面蛇行流れと異なる水理現象が現れる。

本研究は、平坦固定床の大型実験水路を用いて複断面蛇行流れ場を詳細に測定することにより、平面流況、低水路流量、二次流分布とそれらの発達・減衰過程等複断面蛇行流れ特有の水理現象を明らかにし、これらの構造について検討している。

**Key Words** : compound meandering channel, depth of flood channel, main channel sinuosity, evolution and decay of secondary currents, discharge capacity

## 1. 序論

狭い沖積平野に高密度の人口や資産が集中する我が国では、洪水時には流れを安全に流下させると共に、平常時には安定した流路の確保、利用及び環境への配慮から一般に河川の横断面形状は複断面形にする改修が行われてきた。それ故、これまで多くの複断面流れに関する調査、研究がなされている。しかし、その多くは低水路と高水敷が直線部からなるいわゆる直線複断面流路や堤防法線と低水路法線の双方とも同位相で蛇行している流路を想定した研究が主である。河川は堤防、低水路共に蛇行度が等しいことは稀でむしろ蛇行度に差があり、また堤防法線と低水路法線の間に位相差が存在している。その結果、高水敷幅が流下方向に変化しており、低水路と高水敷の間で流れの流出入のある流れとなり、直線複断面流れや位相差のない蛇行流れとは大きく異なる。

これまでに行われてきた複断面蛇行流れに関する研究を以下に概観する。木下<sup>2)</sup>は、堤防法線と低水路法線の位相差に着目して実験を行い、表面流速と河床変動から適正な複断面蛇行河道の法線形について調べている。また、森ら<sup>3)</sup>は木下の実験結果の再現計算を行い、複断面蛇行流れの構造と河床変動について考察している。芦田・江頭ら<sup>4)</sup>は、複断面蛇行流れと単断面蛇行流路の流れと河床変動の相違点に着目して論じている。G. Kiely<sup>5)</sup>は、直線的な水路

内に設置された一定の蛇行度を有する複断面蛇行水路において相対水深 $Dr$ (=高水敷水深/低水路水深)を変化させた実験を行い、複断面蛇行流れに特有の流況を調べている。B. B. Willettsら<sup>6),7)</sup>は、円弧と直線の組み合わせにより構成される蛇行水路を用いて、低水路の蛇行度が水位・流量の関わりに著しい影響を与えることを見出している。武藤・塩野ら<sup>8),9)</sup>は、蛇行度の異なる3種類の実験水路で詳細に流速分布を測定して主流速分布、二次流の発達過程、せん断層の形成過程等乱れ構造を検討している。福岡ら<sup>10),11)</sup>は、複断面蛇行水路における堤防と低水路の位相差が流れと河床変動に与える影響に着目し、河床変動特に内岸側河床の洗掘機構について新しい知見を得ている。

これらの研究から、複断面蛇行流れにおいては、高水敷と低水路の間で流れの流出入があるために付加的な抵抗が働き、従来の単断面蛇行流れにおける水理現象とは異なる流れ場が生じる。主要な相違点としては、低水路の最大流速は内岸から内岸の最短経路に現れる、二次流セルは単断面蛇行流れのそれとは逆向きになる、河床の洗掘は主に内岸側で起こり外岸側の変動は小さいことなどが挙げられる。しかし、これらの流れの構造は、蛇行度や水理条件によって異なり特に高水敷水深、高水敷粗度、蛇行度、位相差等の諸条件の違いによる流れへの影響は十分に把握されていない。

さらに、複断面蛇行流れの現象は、水路のスケー

表-1 複断面蛇行実験に用いられた水路比較

| 実験者                                       | 低水路蛇行度                    | 相対水深 Dr              | meander belt / floodplain     | h/b              | b/B            | nr/nm   | 堤防線形 | 河床形状                    |
|---|---------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|----------------|---------|------|-------------------------|
| 木下 <sup>1)</sup>                          | —                         | 0.33<br>0.67         | —                             | 2/20<br>2/30     | 20/60<br>30/60 | —       | 蛇行   | 移動床                     |
| 芦田・江頭ら <sup>2)</sup>                      | 1.10                      | 0<br>0.27            | 60/20                         | 3/20             | 20/100         | ≒1.0    | 直線   | 平坦固定床<br>平衡固定床          |
| Kiley <sup>3)</sup>                       | 1.25                      | 0.12<br>0.25<br>0.38 | 80/20                         | 5/20             | 20/120         | ≒1.0    | 直線   | 平坦固定床                   |
| Willets and Hardwickら <sup>4)</sup>       | 1.0<br>1.2<br>1.4<br>2.04 | 0.14<br>0.29<br>0.44 | 17.4/51.3<br>—<br>—<br>100/10 | 5/17.4<br>3/17.4 | 17.4/120       | ≒1.0    | 直線   | 平坦固定床<br>bankfull 平衡固定床 |
| Sellin, Ervine and Willetsら <sup>5)</sup> | 1.37<br>2.04              | 0~0.50               | 611.6/194.5<br>856/72         | 15/120           | 120/1000       | 高水敷粗度変化 | 直線   | 平坦固定床<br>平衡固定床          |
| 武藤・塩野ら <sup>6),10)</sup>                  | 1.09<br>1.37<br>1.57      | 0<br>0.15<br>0.50    | 45.2/37.4<br>90/15<br>100/10  | 5.3/15           | 15/120         | ≒1.0    | 直線   | 平坦固定床                   |
| 福岡ら <sup>11),12)</sup>                    | 1.17                      | 0.37                 | 380/50                        | 6/100            | 100/480        | ≒1.1    | 直線   | 平衡固定床                   |

h: 高水敷高さ b: 低水路幅 B: 全水路幅 nm: 低水路粗度係数 nr: 高水敷粗度係数

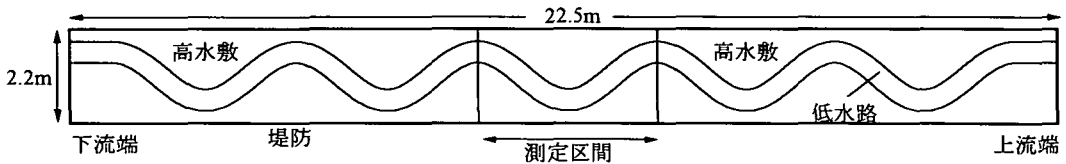


図-1 実験水路全体図

表-2 実験水路の諸元

|       |        |       |        |
|-------|--------|-------|--------|
| 水路長   | 22.5 m | 蛇行波長  | 4.1 m  |
| 全水路幅  | 2.2 m  | 蛇行長   | 4.8 m  |
| 低水路幅  | 0.5 m  | 蛇行度   | 1.17   |
| 低水路床  | 平坦固定床  | 最大偏角  | 41°    |
| 水路床勾配 | 1/600  | 高水敷高さ | 4.5 cm |

表-3 実験条件

| 実験ケース | 高水敷水深    | 相対水深Dr | 流量       |
|-------|----------|--------|----------|
| 実験 1  | bankfull | 0      | 8.3 l/s  |
| 実験 2  | 2 cm     | 0.31   | 11.5 l/s |
| 実験 3  | 4 cm     | 0.42   | 23.6 l/s |
| 実験 4  | 6 cm     | 0.57   | 46.5 l/s |

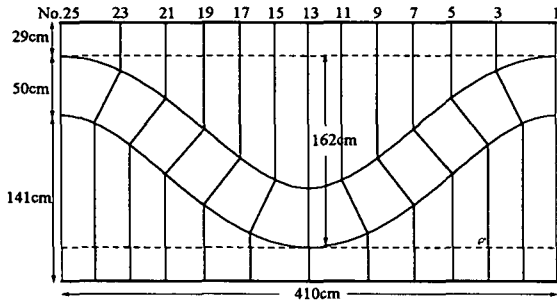


図-2 測定区間及び測定断面

ルの影響を大きく受けるものと考えられる。これまでの研究は、表-1に要約して示されているように Sellinら<sup>5)</sup>及び福岡ら<sup>11),12)</sup>を除きスケールの小さな水路を用いて行われた実験が多い。このため実河川に比して高水敷高さ/低水路幅が大きく、また低水路流れの構造に重要な影響を与える高水敷粗度に低水路と同じ滑面材質やガラス等粗度係数の小さいものを使用している。このため、実験結果に水路のスケールの効果が顕著に現れているものが多く、実河川への適用には注意を要する。

本研究は、高水敷高さ/低水路幅の比が小さく、高水敷の粗度を大きくした実河川の流れに近いスケールの蛇行水路で実験を行い、高水敷水深の変化

による流れ場への影響、低水路と高水敷の境界付近の流れ、低水路内を流下する流量、二次流分布及びその発達・減衰過程等について詳細に調べ大スケールでの複断面蛇行流れの構造をより明らかにすることを目的としている。

## 2. 複断面蛇行水路実験

### (1) 複断面蛇行水路

水路長22.5m、水路幅2.2mの鋼製の可変勾配開水路の中に木製の型枠を水路内に設置することにより図-1に示す低水路が一定の蛇行度で連続した5波長から成る複断面蛇行水路を作製した。高水敷には人

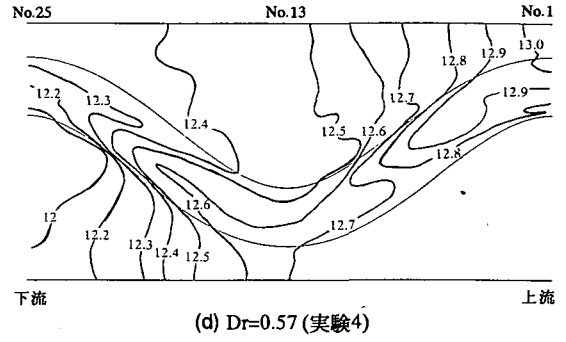
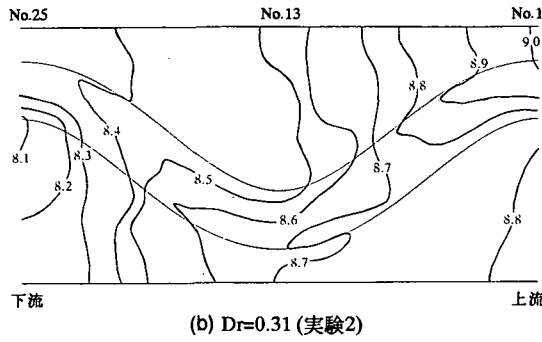
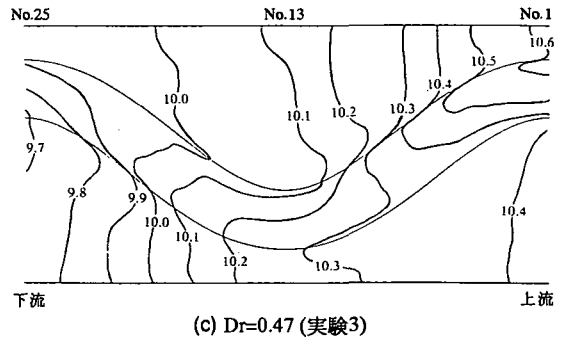
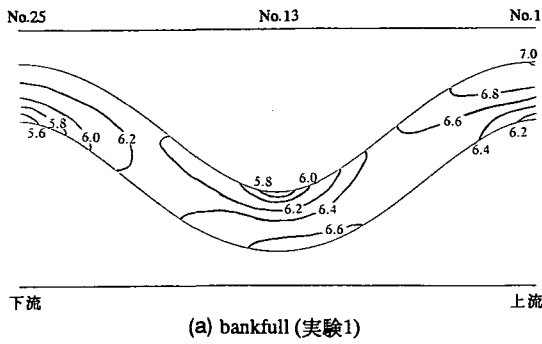


図-3 水位コンター図

工芝を貼り付け、粗度係数を低水路より大きくしている。高水敷と低水路の表面材質の粗度係数は、それぞれ0.020と0.012である。

低水路は、低水路の中心線がSine Curveに従って蛇行しており、表-2に示すように蛇行度1.17(蛇行長4.8m, 蛇行波長4.1m), 最大偏角 $41^\circ$ , その横断面形状は高水敷高さ0.045m, 低水路幅0.5mの平坦固定床を有する長方形断面である。水路の平均勾配は1/600である。

## (2) 実験方法及び条件

実験水路は、低水路が規則的に蛇行しているため、蛇行の同位相の位置では流れ場が同じと見なせる。よって、低水路中央部に沿って縦断水位を測定し、水面勾配と河床勾配がほぼ平行となる等流条件で実験を行う。測定区間は水路中央部の1波長4.1m区間を選定する。

測定断面は、図-2のように1蛇行長4.8mを24等分した25断面のうち奇数断面の13断面である。それぞれの断面内の測定ポイントを横断、鉛直方向に密に設定して詳細に流れを測定する。

水位はポイントゲージ、流速はI型、L型電磁流速計により測定する。流速のサンプリング時間は30秒間とし、1ポイントにつき1500の値をサンプリングし、その平均値を測定値とする。

実験は、高水敷高さ4.5cmに対して高水敷水深を

変化させ、相対水深 $Dr=0$ (bankfull), 0.31(高水敷水深2cm), 0.47(4cm), 0.57(6cm)の4ケースについて行う。ここで、相対水深 $Dr$ は高水敷水深/低水路水深で定義され、それぞれのケースの流量は、表-3に示す通りである。

## 3. 実験結果及び考察

### (1) 水位分布

各実験ケースにおける水位分布を図-3に示す。ここで、水位の基準点は下流端の低水路床中央部に設け、bankfull流れは2mm間隔、 $Dr=0.31$ , 0.47, 0.57の流れは1mm間隔で水位コンター線を引いている。

各実験ともに低水路内の水位は、蛇行部では遠心力の作用により外岸側が高く、内岸側で低くなっている。その横断方向の最大水位差は、bankfull流れで最大となり、その大きさは9mm、 $Dr=0.31$ , 0.47, 0.57ではいずれも3~4mmである。overbankのある流れでは、遠心力の影響が小さくなる変曲点付近で、低水路中央部の水位が高くなっている。

overbank流れが存在する場合、高水敷の水位は横断方向にはさほど変化は見られないが、縦断方向には分布を持つようになる。高水敷幅が徐々に広がる区間では水面勾配は急になっているのに対し、逆に高水敷幅が徐々に狭まる区間では水面勾配は緩くなっている。

高水敷から低水路に流れが流入する境界付近 (No.1~13で左岸側, No.13~25で右岸側)では水位差はほとんど見られず, 滑らかに流入するのに対し, 低水路から高水敷へ流出する境界付近 (No.1~13で右岸側, No.13~25で左岸側)では水位差が生じており, 特に $Dr=0.57$ で顕著に現れている。これは, 低水路から高水敷へ流出する部分では, 断面が急縮し流速が速くなるため水面が低下している。

(2) 平面流況

高水敷上に流れが存在する時, 低水路内流況は高水敷高さを境界に上層と下層に明確に分けられる。図-4~7は, 各実験における高水敷高さより上層と下層についてそれぞれ水深平均化した流速分布を示したものである。

全ケースにおいて低水路の最大曲率断面 (No.1, 13, 25)では, 最大流速は内岸側に発生しており, 各断面における最大流速発生位置を連ねると, 内岸から内岸の最短経路上に現れている<sup>(4,5,9,12)</sup>。しかし, bankfull流れ( $Dr=0$ )と高水敷上に流れが存在する $Dr=0.31, 0.47, 0.57$ の流れとでは低水路内の最大流速が内岸側に現れる要因が異なる。

bankfull流れでは, 低水路床が平坦固定床である時には蛇行部が十分長くない限り, 二次流が十分に発達できず外岸側の流速が速くなれない。このため, 最大流速は最短経路の内岸から内岸に現れる。しかし, 高水敷幅が流下方向に変化する複断面流路

では, 高水敷流れと低水路流れの間での流れの交換, 及び低水路を横断する流れによる移流効果のため最大流速が内岸側に発生し, 結果として最大流速は内岸から内岸に現れることになる。

高水敷高さを境とする上層と下層における水深平均流速を比較すると, 高水敷からの流入は低水路の上層流れに顕著な影響を及ぼしている。すなわち断面No.1~13の左岸側, 断面No.13~25の右岸側で流速は減速されており, またベクトルの向きも堤防に沿う向きに変えられている。一方下層では, 高水敷からの流入による影響は若干あるもののほとんど減速されず, 低水路に沿う流れとなっている。これは,  $Dr=0.31, 0.47, 0.57$ と高水敷水深が変化しても同様である。低水路流速の減速量とベクトルの向きの変化量には, 高水敷から流入してくる流れが低水路法線となす角度とその流速の大きさに関係している。

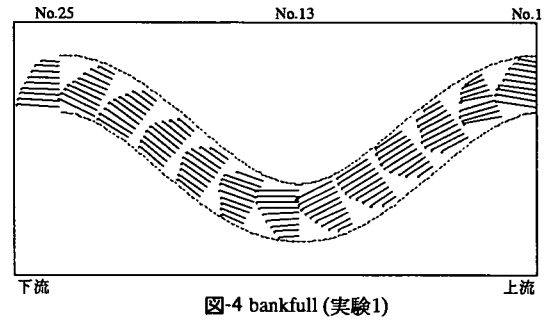
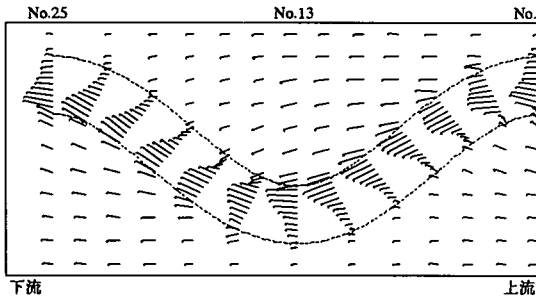
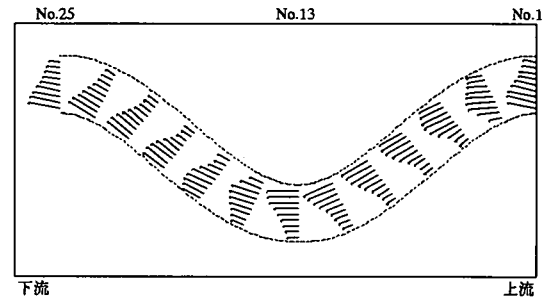


図-4 bankfull (実験1)

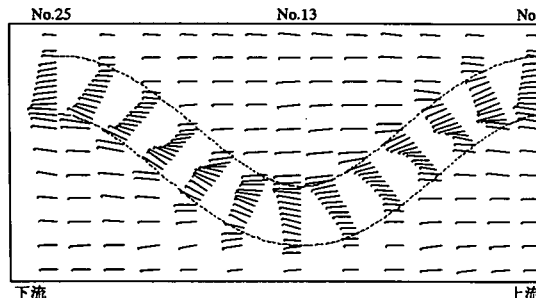


(a) 高水敷高さより上層

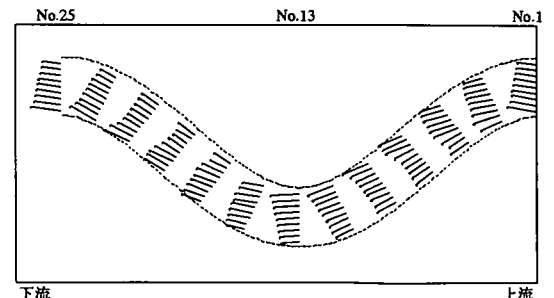


(b) 高水敷高さより下層

図-5  $Dr=0.31$ の水深平均流速分布図 (実験2)

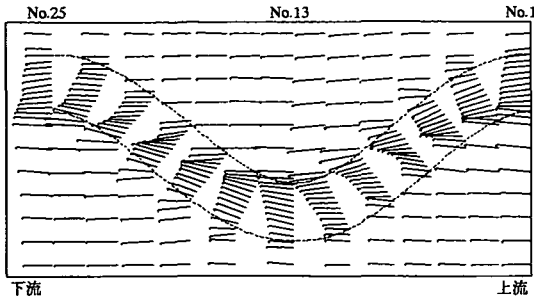


(a) 高水敷高さより上層

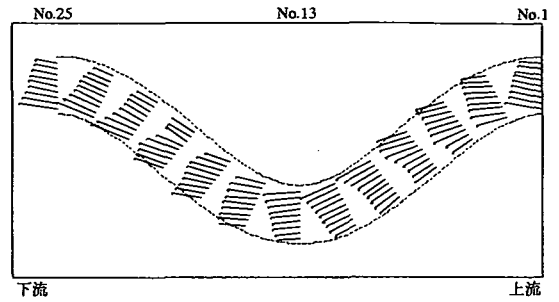


(b) 高水敷高さより下層

図-6  $Dr=0.47$ の水深平均流速分布図 (実験3)



(a) 高水敷高さより上層



(b) 高水敷高さより下層

図-7  $Dr=0.57$ の水深平均流速分布図 (実験4)

つまり、高水敷流れと低水路流れの両者の間で、主流方向に速度差がつくほど流れに働くせん断力が大きくなるため、低水路流速の減速量は増す。また、低水路法線方向に流れが速くなると流れの向きを変える力が大きくなるため、ベクトルの変化量は増す。このことは、 $Dr=0.31$ と $0.57$ を比較することにより明らかである。つまり、 $Dr=0.31$ は高水敷水深が小さいために高水敷粗度の影響を強く受けて高水敷流れは遅くなり、また低水路の速い流れに引っ張られるため低水路にかなりの角度を持って流入している。そのため、主流方向の流速に速度差が大きいつき、低水路流速の減速量は大きくなる。しかし、高水敷水深が大きくなるにつれ高水敷流れはより堤防に沿った直線的な流れとなり、流速も大きい。このため、 $Dr=0.57$ では主流方向の流速差は小さく低水路流速の減速量は小さいが、向きの変化量は大きくなっている。

このように高水敷流れが低水路へ流入することによる影響が顕著な上層は、下層よりも流速の遅い特異な分布を持つ流れとなる。

本実験での主流速分布形は、武藤・塩野ら<sup>9),10)</sup>により報告されている分布とほぼ同様な分布を示す。しかし、低水路内の平均流速の大きさは、武藤・塩野らが行った実験では3種類の蛇行度のいずれの実験においても  $V_{Dr=0.57} > V_{bankfull} > V_{Dr=0.15}$  であるのに対し、本実験では  $V_{bankfull} > V_{Dr=0.57} > V_{Dr=0.47} > V_{Dr=0.31}$  となり、bankfull流れが最も速い。この実験結果の差は、主に高水敷の粗度係数の大きさが関係している。すなわち、粗度による高水敷流れの減速の程度が低水路流れに異なる影響を与えたためである。

### (3) 低水路流量

bankfull流れ( $Dr=0$ )、 $Dr=0.31$ 、 $0.57$ の流れにおいて、低水路を流下する各断面の流量を図-8に示す。この図に示されている上層流量、下層流量、上層流量+下層流量は、それぞれ低水路部分で高水敷高さより上層を流れる流量、下層を流れる流量、及び低水路全体を流れる流量を示している。流量は流速分

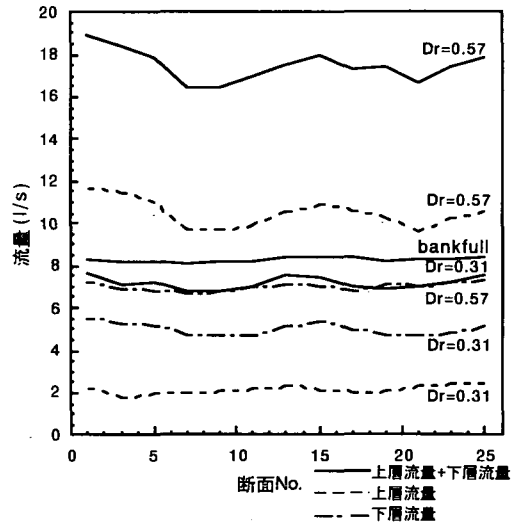


図-8 低水路を流下する流量の縦断変化

布を積分して求めている。 $Dr=0.31$ 、 $0.57$ の低水路と高水敷を合わせた全流量は、それぞれ $11.5l/s$ 、 $46.5l/s$ でありそのうち低水路部を流れている流量は平均的に $7.2l/s$ 、 $18l/s$ である。一方、高水敷上に流れがないbankfull流量は $8.3l/s$ である。

これより本実験条件では、低水路内を流れる流量はbankfull流れの時が最大になっていることが分かる。 $Dr=0.31$ においては高水敷に流れが乗った分、bankfull流れよりも河積が増加したにも関わらず低水路部分の上層流量+下層流量は少なくなっている。またbankfull流れの河積に相当する下層流量は、bankfull流れの流量と比べ著しく減少している。これは、高水敷の流れが卓越している $Dr=0.57$ の下層流量も減少量は $Dr=0.31$ よりも少ないが同様にbankfull流量よりも小さい。これは、高水敷流れと低水路流れの間で混合が激しくなり、低水路流速が減速され、その断面を流れる流量が減少したためである。つまり、この減少量には高水敷の粗度の大きさが強く関係している。

$Dr=0.31$ 、 $0.57$ では各断面での流量に差が生じ、最

大曲率断面(No.1, 13, 25)で最大流量, 変曲断面(No.7, 19)付近で最小流量となっている。この最大, 最小流量が生ずる位置は後述するように, 高水敷からの流入の影響がそれぞれ最小と最大に相当する位置である。Dr=0.57の時, 最大流量/最小流量は1.15である。また上層流量は, Dr=0.31ではほぼ一定であるが, Dr=0.57では各断面での上層流量に差が生じている。逆に下層流量は, bankfull流れの流量8.3l/sに近づきながらほぼ一定となっている。

#### (4) 二次流分布

単断面蛇行流れでは, よく知られているように遠心力的作用により水面付近で内岸から外岸へ, 河床付近で外岸から内岸へ向かう二次流セルが現れる。しかし, 高水敷上にある程度の水深の流れが存在すると, 低水路流れと高水敷流れとの間で流れの交換が生じるために単断面蛇行流れと異なる二次流セルを形成することになる。

図-9~11は, Dr=0.47, 0.31, 0.57の流れにおいて断面No.13~23の区間(図-2参照)における低水路横断面内の二次流分布を示したものである。武藤・塩野ら<sup>9,10)</sup>によれば複断面蛇行流れでは, Dr=0.05程度から二次流セルの向きが単断面蛇行流れと逆向きになることが示されている。また, 著者ら<sup>13)</sup>の実験によってDr=0.3~0.5でDrが変化してもほぼ定まった複断面蛇行流れの構造をとることが示されている。そのため, 流れ場の三次元構造はDr=0.47の流れを代表としてこの流れについてのみ, I型とL型プローブを併用して調べている。低水路法線と堤防法線の位相差により各断面内の上層には, 高水敷からの流入による低水路を横断する流れが, 下層には二次流セルが現れている。

低水路部の上層を横断する流れは, 最大曲率断面(No.1, 13, 25)で最小, 変曲断面(No.7, 19)付近で最大となっている。高水敷水深が大きくなるにつれ高水敷流れが卓越するようになり, 流れはより堤防に沿って流れる。その結果, 低水路を横断する流れが大きくなり, それに伴い二次流セルも強くなっている。

下層における二次流セルは, 高水敷水深によらずほぼ一定の大きさを持ち, その強さは高水敷水深が大きくなるほど強くなっている。二次流セルの向きについては, 最大曲率断面(No.13)では高水敷高さ付近で外岸から内岸, 河床付近で内岸から外岸の向きになっている。これはbankfull流れの二次流セルの向きとは逆向きである。次の断面ではこの向きの二次流セルは消える。断面を下流に追っていくにつれて逆向きのセルが右岸側に現れ, そのセルの大きさを徐々に増し, 変曲断面(No.19)で低水路中央付近, 次の最大曲率断面(No.25)で再び低水路下層全体に拡がっている。

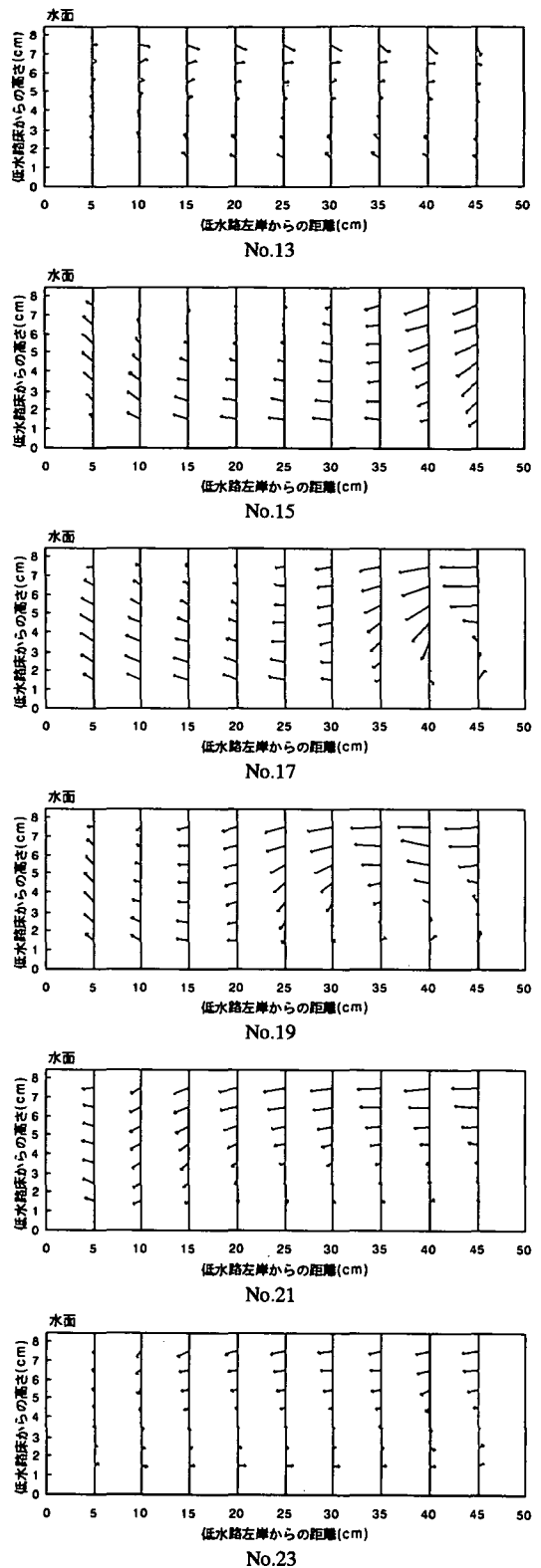


図-9 Dr=0.47の二次流分布(実験3)

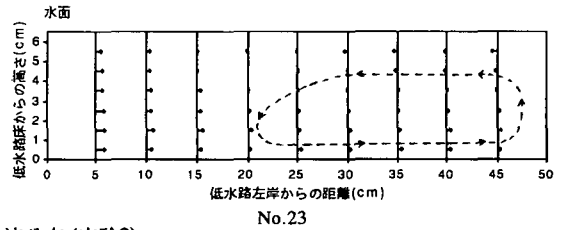
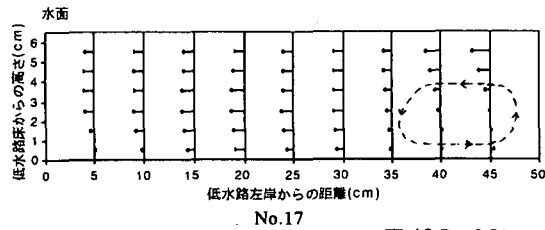
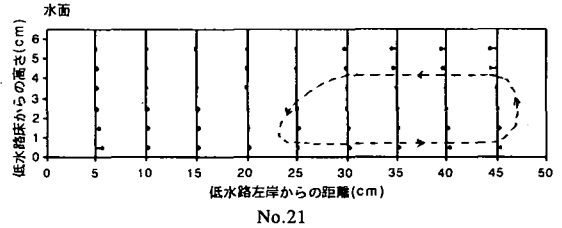
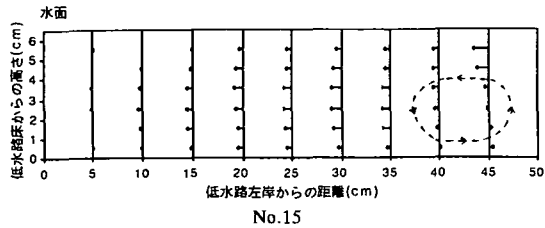
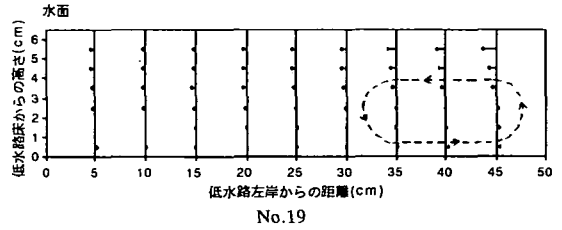
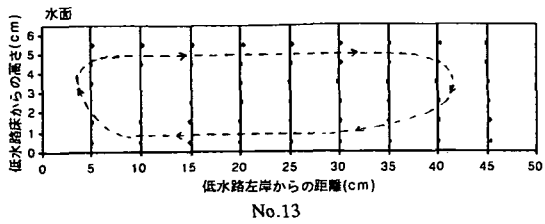


図-10  $Dr=0.31$ の二次流分布(実験2)

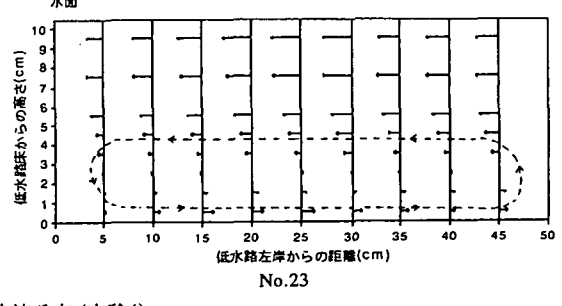
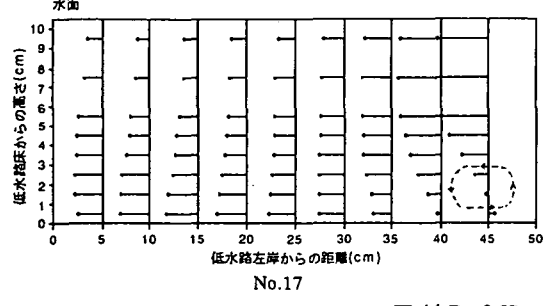
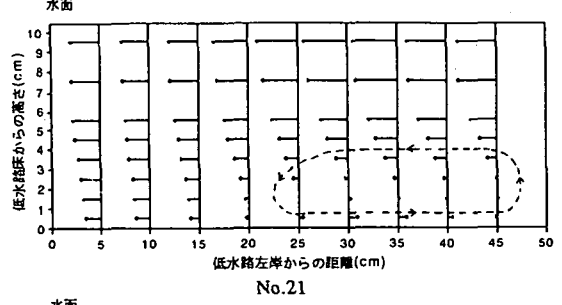
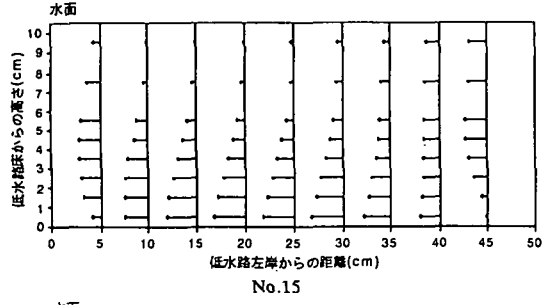
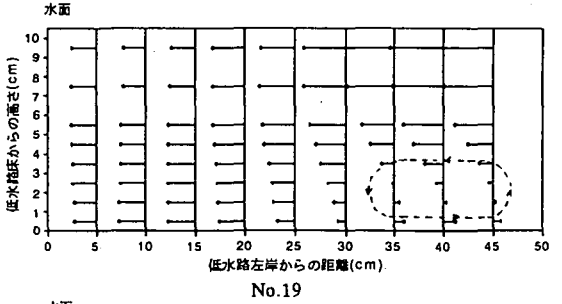
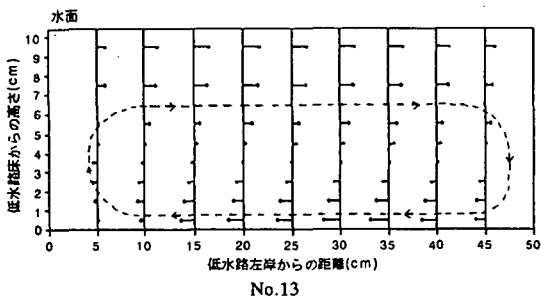


図-11  $Dr=0.57$ の二次流分布(実験4)

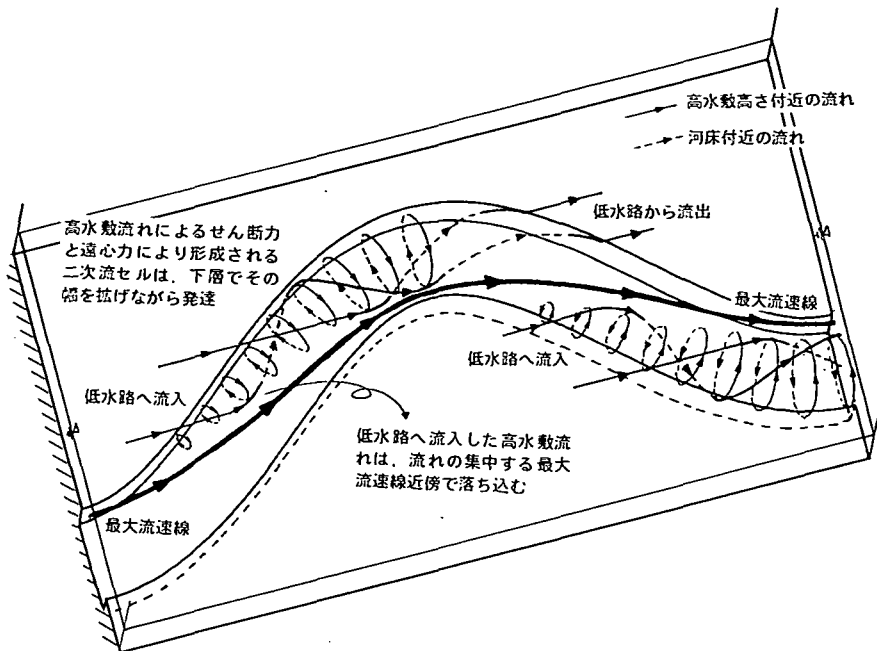


図-12 複断面蛇行流れの三次元構造

B. B. Willettsら<sup>9)</sup>は、複断面蛇行流れの二次流セルの形成は低水路を横断する流れによるせん断力に起因すると述べているが、遠心力項も二次流セルの形成に影響している。すなわち、複断面蛇行流れでは、低水路の下層の流速が上層よりも速い特異な分布を取るため、河床近くで遠心力が大きい。また、低水路を横断する流れによって高水敷高さ付近には強いせん断力が作用している。二次流セルの大きさと強さは、これらの力の大きさの兼ね合いとその作用方向により決まっている。

最大曲率断面(No.13)直下流から変曲断面(No.19)の間では、河床近くの外岸向きの遠心力と高水敷高さ付近の外岸向きのせん断力が作用している。しかし、遠心力は相対的に小さいため二次流セルはせん断力ではぼ形成されるが、この区間における2つの力の作用方向は同じ向きであるため、そのセル幅は小さい。次に変曲断面(No.19)から最大曲率断面(No.25)の間においては、河床付近の外岸向きの遠心力と高水敷高さ付近の内岸向きのせん断力が働いている。この区間は上流の区間と異なり、遠心力とせん断力の作用方向が逆向きであるため、セル幅は大きくなる。

本実験で得られた二次流分布は武藤・塩野ら<sup>9),10)</sup>の実験結果とかなり異なっている。武藤・塩野らの報告では $Dr=0.05$ 程度から複断面としての特徴を持つ流れとなり、二次流セルが低水路を横断する流れにより形成され対岸側に移流されてるのに対し、本実験では二次流セルはセル幅を拡げながら発達して

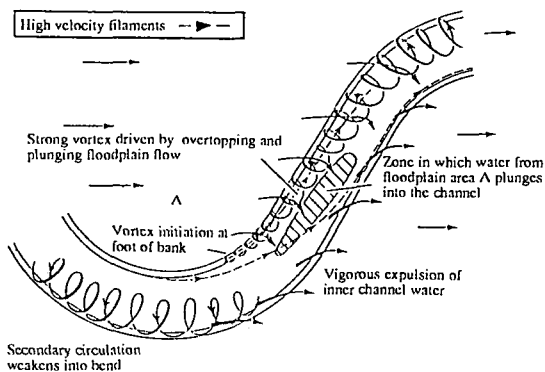


図-13 B.B. Willettsら<sup>9)</sup>による複断面蛇行流れの構造図

いる。これは表-1に示すように武藤・塩野ら<sup>9)</sup>が用いた水路は、低水路のスケールが小さいうえに、高水敷高さ/低水路幅が大きく、高水敷粗度が小さいことなどに起因して、このような流れが生じたものと考えられる。それ故、二次流の発達形成は低水路のスケールと横断面形状、特に高水敷高さ/低水路幅の値と高水敷粗度の大きさに強く影響されることが分かる。

#### (5) 複断面蛇行流れの三次元構造

前節までの測定結果を基に複断面蛇行流れの三次元構造を描くと、図-12に示すようになる。ここで、実線矢印は高水敷高さ付近の流れを、破線矢印は河床付近の流れを表している。また、比較のため



にB.B.Willettsら<sup>9)</sup>による複断面蛇行流れの構造図を  
図-13に示す。

図-12に示すように低水路へ流入する高水敷流れは、  
低水路流れと高水敷流れが集中する最大流速線  
近傍で落ち込む。二次流セルは、この高水敷流れに  
より生じるせん断力と遠心力により形成されるの  
で、最大流速線までの間でそのセル幅を上げながら  
発達している。また、低水路へ流入した高水敷流れ  
は、この二次流の流れに乗って緩やかな螺旋を描き  
ながら流下し、蛇行頂点を過ぎると外岸側の高水敷  
上に流出する。それ故、二次流セルは蛇行頂点を過  
ぎるとすぐに減衰し、減衰過程における二次流セル  
は流速分布には現れない。

B. B. Willettsらによって提案された二次流セルの  
発達・減衰過程を示す図と比較すると、二次流の螺旋  
形態及び二次流セル幅が異なる。著者らによると  
低水路へ流入する高水敷流れは、二次流の流れに乗  
って緩やかな螺旋を描きながら流下する。そして、  
減衰過程では二次流セルは瞬時に減衰するためB. B.  
Willettsらが示す様な最大曲率を過ぎて存在する二  
次流セルは見られない。また、各断面の二次流セル  
幅も大きく、高水敷流れが落ち込む最大流速線近傍  
まで広がっている。これらの相違は、B.B.Willettsら  
の水路の蛇行度が大きいこと、高水敷高さ/低水路  
幅及び横断面形状が異なること、高水敷の粗度が滑  
らかであることに起因していると考えられる。

#### 4. 結論

直線堤防と平坦固定床の蛇行低水路から構成され  
る複断面蛇行流路における流れの構造について得ら  
れた知見は以下にまとめられる。

- 1) 高水敷流れが低水路へ流入することにより、低水  
路流れに減速と向きの変化が生じる。その減速  
量と向きの変化量は、高水敷流れが低水路に流  
入する角度とその大きさに関係し、高水敷水深  
が小さいほど減速量が大きく、高水敷水深が大  
きいほど向きの変化量が大きい。それ故、高水  
敷流れに強く影響を与える高水敷粗度の役割が  
重要となる。
- 2) 1)の高水敷流れと低水路流れの混合により、低水  
路の最大流速発生位置や二次流セルの発達・減  
衰等複断面蛇行流れ特有の水理現象が現れる。  
この流れの構造は、高水敷水深の大きさに関わ  
らずほぼ同様である。
- 3) 低水路内流況を高水敷高さを境界とした上層と下  
層について見ると、上層では高水敷からの流入  
による影響が顕著であり、その流れは堤防に沿  
った直線的な向きに大きく変えられる。一方、  
下層では高水敷からの流入による影響が若干あ  
るものの低水路に沿って流れる。それ故、高水

敷高さを境界として上層と下層で異なる2つの流  
況が見られる。

- 4) 高水敷上に水が流れる場合、低水路の高水敷高  
さ付近に大きなせん断力が働く。このため、低水  
路内を流下しうる流量は減少することになり、  
その減少量は高水敷水深が小さいほど大きい。
- 5) 高水敷流れが流入することにより二次流セルが発  
達・減衰する過程を示す図を作成した。低水路  
へ流入した高水敷流れは、流れが集中する最大  
流速線近傍で落ち込む。この流れにより生じる  
せん断力と遠心力により形成される二次流セル  
は、高水敷高さを境界とした下層で最大流速線  
までの間をそのセル幅を上げながら徐々に発達  
する。蛇行頂点を過ぎると、低水路流れは外岸  
側の高水敷に流出し、それに伴って二次流も減  
衰する。

#### 参考文献

- 1) 木下良作：洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に  
関する実験的研究，文部省科学研究費「沖積河川にお  
ける洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究(代  
表 岸力)」，1988。
- 2) 森明巨，岸力：昭和56年石狩川洪水で観測された弯曲  
部河床変動の特性，水理講演会論文集，第30巻，  
pp.493-498，1986。
- 3) 芦田和男，江頭進治，劉炳義，滝口将志：蛇行低水路  
を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機  
構，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，pp.527-  
551，1989。
- 4) Kiely,G.: Overbank flow in meandering compound  
channels, the important mechanism, Int. Conference on  
River Flood Hydraulics, pp.207-217, 1990。
- 5) Willetts,B.B. and Hardwick,R.I.: Model studies of overbank  
flow from a meandering channel, Int. Conference on River  
Flood Hydraulics, pp.197-205, 1990。
- 6) Willetts,B.B. and Hardwick,R.I.: Stage dependency for  
overbank flow in meandering channel, Int. Conference on  
River Flood Hydraulics, pp.45-54, 1993。
- 7) Ervine,D.A., Willetts,B.B., Sellin,R.H. and Lorena,M.:  
Factors affecting conveyance in meandering compound  
channels, Jour. of Hydraulic Engineering, Vor.119,  
No.12, pp.1383-1398, 1993。
- 8) Sellin,R.H.J., Ervine,D.A. and Willetts,B.B.: Behaviour of  
meandering two-stage channels, Proc. Instn Civ. Engrs  
Wat., Marit. & Energy, Vol.101, pp.99-111, 1993。
- 9) 武藤裕則，塩野耕二，今本博健，石垣泰輔：複断面蛇  
行開水路流れの水理特性について(1)，京都大学防  
災研究所年報，第38号B-2，pp.561-580，1995。
- 10) 武藤裕則，塩野耕二，今本博健，石垣泰輔：複断面蛇  
行開水路流れの3次元構造について，水工学論文集，  
第40巻，pp.711-716，1996。
- 11) 福岡捷二，宮崎節夫，高橋宏尚，加村大輔：堤防法線  
と低水路法線の間位相差がある流れの水理，河道の

- 水理と河川環境シンポジウム論文集, pp.89-94, 1995.
- 12)福岡捷二, 宮崎筋夫, 大串弘哉, 加村大輔: 堤防と低水路の法線間に位相差が存在する複断面蛇行水路の流れと河床変動, 水工学論文集, 第40巻, pp.941-946, 1996.
- 13)福岡捷二, 大串弘哉, 平生昭二: 複断面蛇行水路を流下する洪水流の水理, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第2部(A), pp.256-257, 1996.

(1996.12.26受付)

## HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE FLOOD FLOW IN A COMPOUND MEANDERING CHANNEL

Shoji FUKUOKA, Hiroya OHGUSHI, Daisuke KAMURA and Shoji HIRAO

Rivers meander with various curvature. Many rivers have a compound cross section composed of main channel and flood channel. In such a compound meandering channel, there occurs exchange of flow between main channel and flood channel. Thus, the compound meandering channel flow shows hydraulic phenomenon different from that of in-bank flow.

In this paper, a large-scale experimental channel of flat rigid bed with compound meandering was used to measure flow in detail. This experiment clarified the hydraulic characteristics of compound meandering channel flow, such as three-dimensional flow structure, discharge of a main channel, growth and decay processes of secondary flow, and so on.