

河川湾曲部における二次流の分布に関する現地観測

Field observation on the distribution of secondary flow in a meandering river

山田 正¹・池永 均²・内島 邦秀³・竹野 顕⁴・志村 光一⁵

Tadashi YAMADA, Hitoshi IKENAGA, Kunihide UCHIJIMA,

Akira TAKENO, Kouichi SHIMURA

1. はじめに

二次流による川の横断方向への土砂輸送は、河床の洗掘によるため、河床が局所的に低下したり、側岸の底部の洗掘による上部の崩落をもたらす。このような河床・河岸に影響を与える二次流の強度を評価することは河床の洗掘・堆積量を見積もる上で非常に重要になる。近年、二次流の河床洗掘に関する研究は室内実験や数値計算によって比較的単純な形状で多数なされるようになってきた。しかしながら、実河川の湾曲部について精密な流速観測や河床形状の測定はあまり行われておらず、実河川湾曲部における二次流が河床・河岸に及ぼす影響は現地レベル



図-1 網走川湾曲部の全景

においては未だ十分に解明されていない。そこで、本論文は実河川湾曲部において精度の高い現地観測を行い、そこから得られた観測結果に基づいて考察を行ったものである。

2. 観測地の概要および観測方法

2. 1 観測地の概要 現地観測地は図-1に示す北海道東部に位置する網走川の湾曲部であり、現在までに現地観測を1996年4月、8月、1997年4月、11月、1998年4月の計5回行っている。網走川を現地観測場所とした背景は湾曲部と網走湖の間で常時流量を測定しており正確な流量を算定できることにある。網走川の特徴は融雪期に融雪出水により、洪水に類似した流れができる河川であること、上流からの土砂が網走湖によって遮られるために実質上の土砂供給がないこと、また感潮河川であるため満潮時にはオホーツク海から海水が遡上してくることである。湾曲部の諸状況として、外岸は全て草原で覆われている。内岸はコンクリート直立護岸となっているが、最大湾曲部付近（測線②～⑫）には砂州と草原が存在する。底質は、最大湾曲部（測線⑨）の外岸では底泥が存在せず貝殻（シジミ）が密に存在し、最大湾曲部付近（測線⑥～⑧）の内岸側では約85%の細砂（0.075～0.425mm）を含んだ泥がある。最大湾曲部（測線⑧）の外岸にわんどがあり、その水深は一樣に約40cmである。また湾曲部の入り口付近（測線①）に長さ100mのわんどがあり、この水深は最大で70cmである。この2ヶ所のわんどには流速がほとんどなく約50cmの泥が堆積している。

キーワード：河川湾曲部、二次流、螺旋流、二次流強度、河床形状

^{1, 5} 中央大学理工学部（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）, yamada@hyd.civil.chuo-u.ac.jp

² 日本工営(株)（〒300-1245 茨城県稲敷郡茎崎町高崎 2304）, a5312@n-koei.co.jp

³ 北見工業大学工学部（〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地）, 940000@cc.kitami-it.ac.jp

⁴ 中央大学大学院（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）, yamada@hyd.civil.chuo-u.ac.jp

2. 2 観測方法

図-2に示す測線①～⑮にワイヤーを張り、ワイヤーに沿って魚船で移動しながら魚群探知機（周波数107kHz）により河床横断面の可視化を行った。また、測線①、④、⑦、⑨、⑬、⑭、⑮においてADCP（RD Instrument社 2400kHz）を用いて湾曲部内の流速観測を行った。また、二次元電磁流速計、プライス式流速計を用いて流速を測定した。

3. 湾曲部の河床形状

図-3は魚群探知により得られた測線①～⑮の河床形状を示す。各測線（②～⑬）の間隔は20mである。図-3より湾曲部入り口付近に位置する測線①、②においては、平坦な河床形状となっている。測線③～⑧へ向かうにつれ河床は外岸掘れを形成しており、測線⑧の20m

下流の測線⑨においては内岸掘れ、測線⑩～⑮においては徐々にお盆型の河床形状を成す。ここで特徴的なことは、測線⑧では外岸掘れ、測線⑨において内岸掘れとなっており約20mの間で最深部が急激に外岸方向から内岸方向へ変化していることである。これは以下に示す図-5より測線⑧から⑨の間が水衝部であることが推察され、流れの方向が急激に変化しているためであると考えられる。

図-4は測線②～⑬までの河床形状のコンター図である。この図-4からも図-3と同様に湾曲部特有の外岸

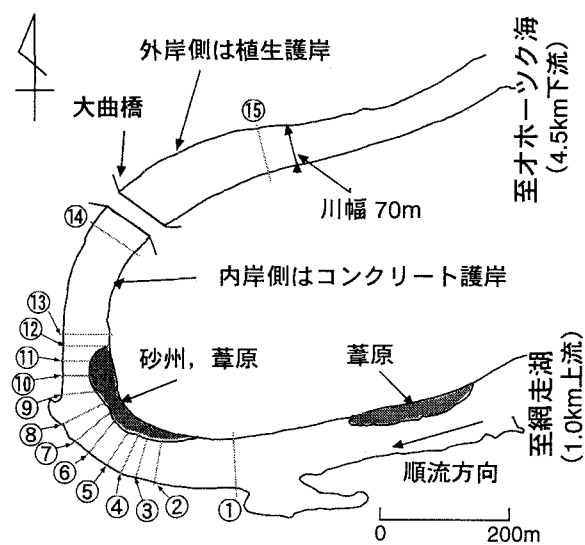


図-2 湾曲部の平面図と観測測線

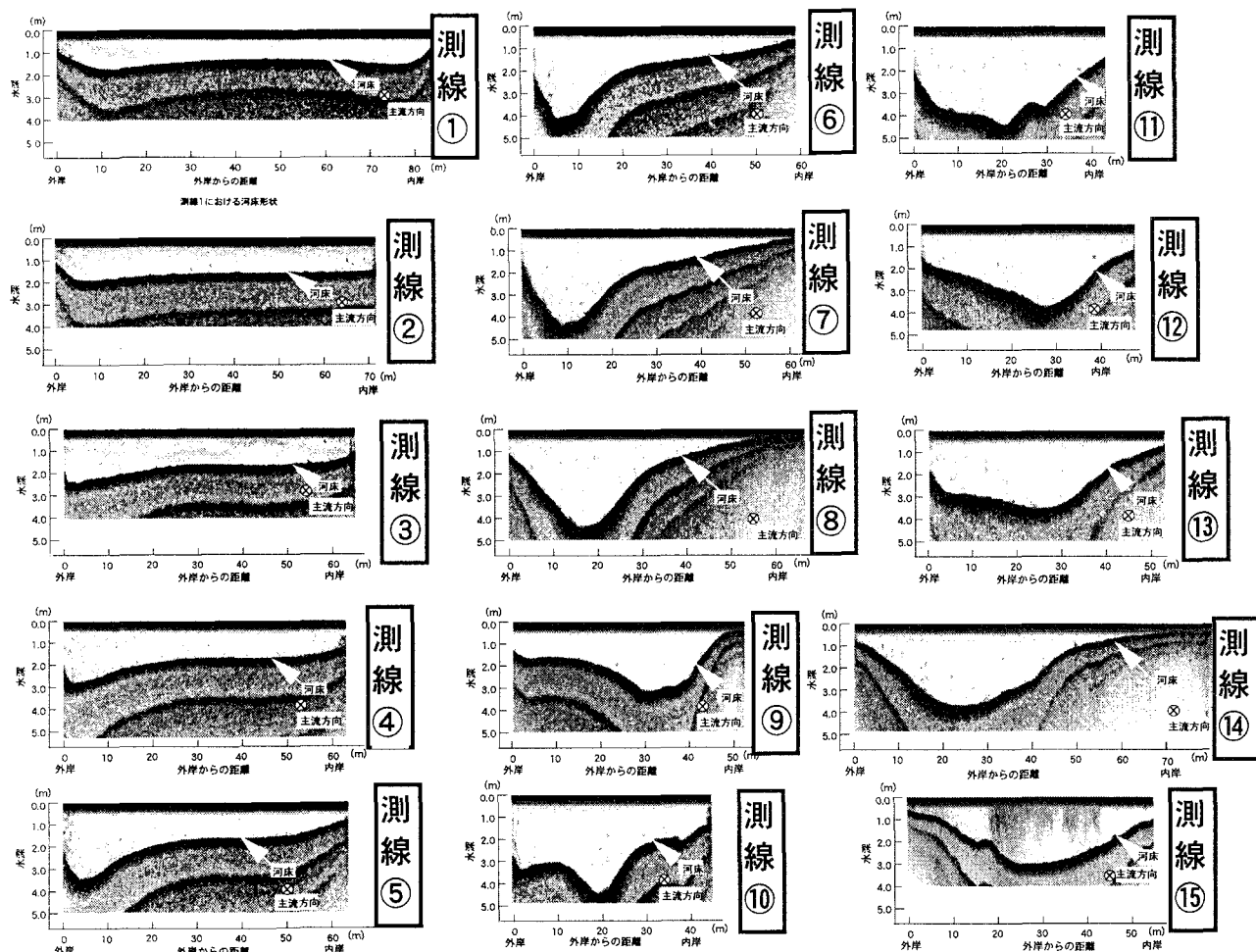


図-3 魚群探知器を用いて測定された湾曲部の河床形状とその変化（測線①～⑮）

掘れが湾曲部入り口付近に形成されている。また、測線⑧と⑨を境に最深河床部の位置が外岸から内岸に急激に移っていることがわかる。

4. 湾曲部流れにおける流速観測の結果

4. 1 湾曲部全域の流れ

図-5は各測線における流速ベクトルである。これより測線⑨における流れの向きが外岸では内岸方向であるため、測線⑧から⑨の間が水衝部であることが推察でき、流れが急激に変化していることがわかる。また、この水衝部の存在がわんどを形成させ、測線⑧と⑨の河床形状を急激に変化させている要因であると考えられる。

4. 2 各観測測線における主流速と二次流

図-6,7,8,9,10 は各測線における順流時の主流方向流速コンター図と主流方向流速分布、二次流ベクトルを示したものである。各流速分布は上流側からみたものである。ここでは二次流の定義として河道軸に沿う方向の流れを主流、河道軸に対して直角方向の流れを二次流としている。湾曲部内で測線④,⑦,⑨が湾曲部の中でも曲率の大きな場所であるため、螺旋流が発生しており外岸掘れを形成している。湾曲部の入り口である測線①では河床形状が平らであり局所的な深掘れはみられない。これは二次流が螺旋流を形成していないために河床の洗掘に対して影響を及ぼしていないためである。湾曲部の下流部（測線⑬,測線⑭,測線⑮）には顕著な螺旋流はみられない。

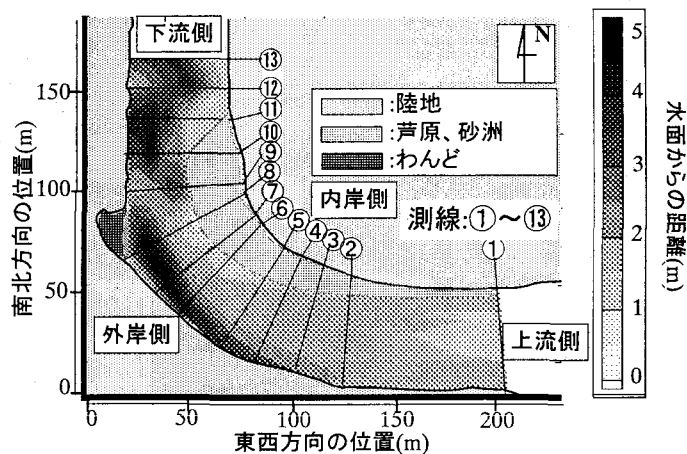


図-4 河川湾曲部の河床形状コンター図(測線①～⑬)

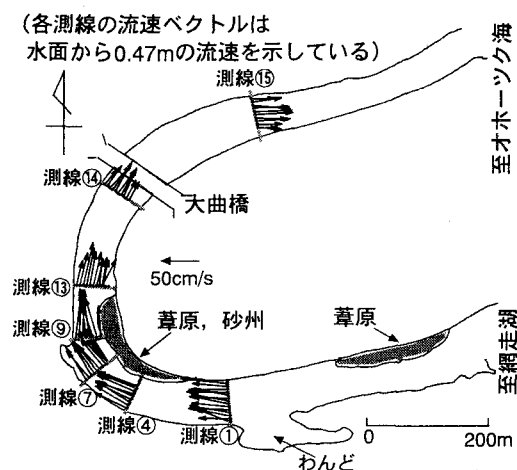


図-5 湾曲部全域の流れの平面分布

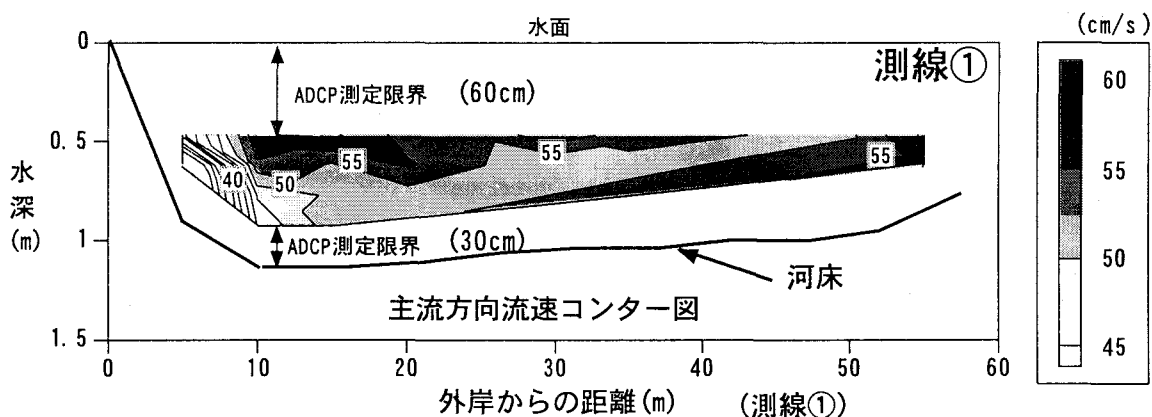


図-6a 測線①における主流速コンター図 (ADCP による結果, (30 秒平均))



図-6b 測線①における主流方向流速分布

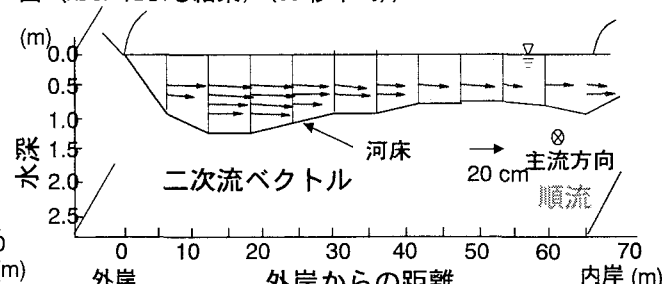


図-6c 測線①における二次流ベクトル

測線④は湾曲部の入口付近である。図-7c の二次流ベクトル図より外岸側で螺旋流が発生している。湾曲部特有の外岸掘れが形成されている位置と螺旋流の発生位置が一致している。

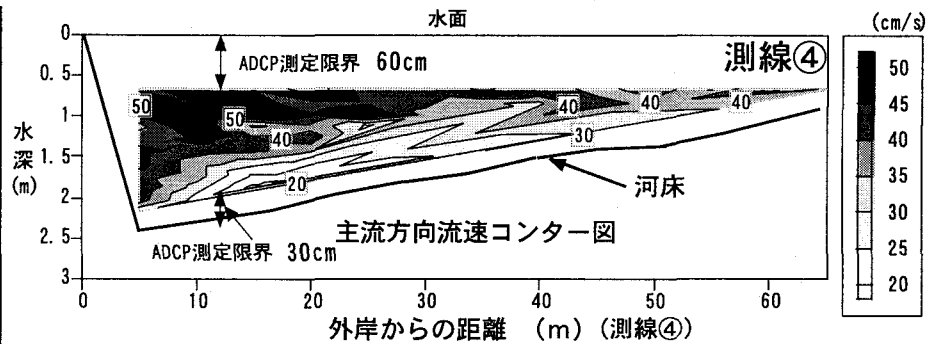


図-7a 測線④における主流速コンター図 (ADCP による結果(30 秒平均))

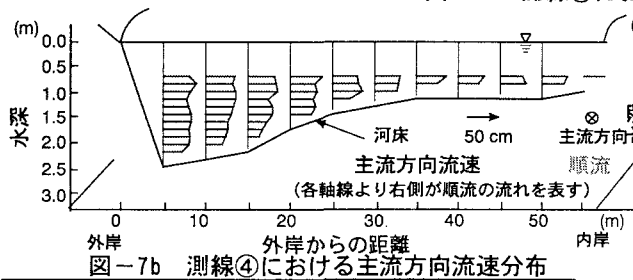


図-7b 測線④における主流方向流速分布

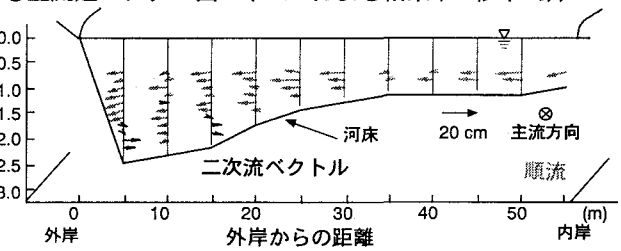


図-7c 測線④における二次流ベクトル

測線⑦は湾曲部の中央付近であり、湾曲の中で最も水深が深い。主流速コンター図から外岸側において流速が大きいことがわかる。外岸が崖状になっており、ヒサシが形成されているとが目視により確認された。(河床形状測線③～⑦の外岸参照)

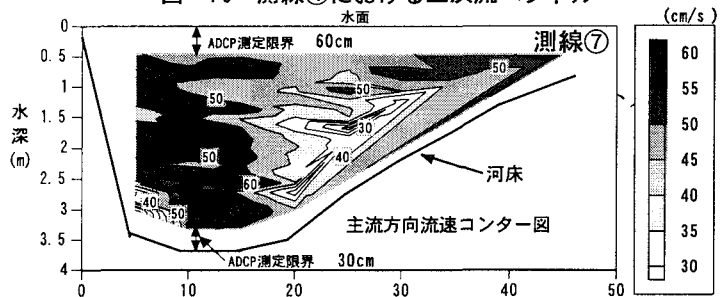


図-8a 測線⑦における主流速コンター図 (ADCP による結果(30 秒平均))

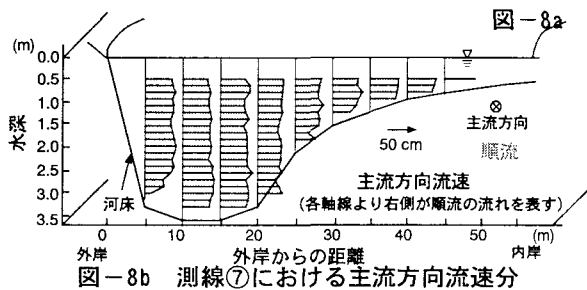


図-8b 測線⑦における主流方向流速分布

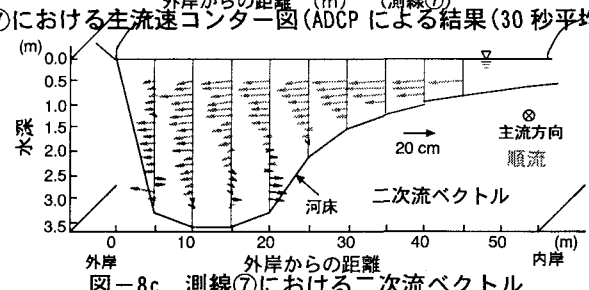


図-8c 測線⑦における二次流ベクトル

測線⑨は水衝部の下流地点である。流速は各測線の中でも最も大きく 70cm/s 以上ある。二次流ベクトル図より内岸付近に明瞭な螺旋流が形成されている。螺旋流が発達している場所では主流方向流速が河床付近において減速していない。

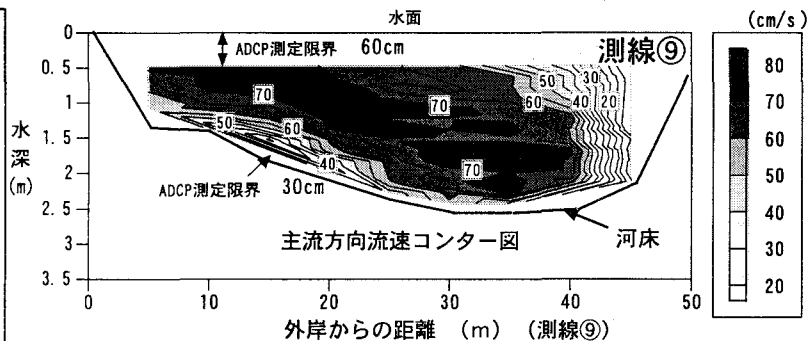


図-9a 測線⑨における主流コンター図 (ADCP による結果)

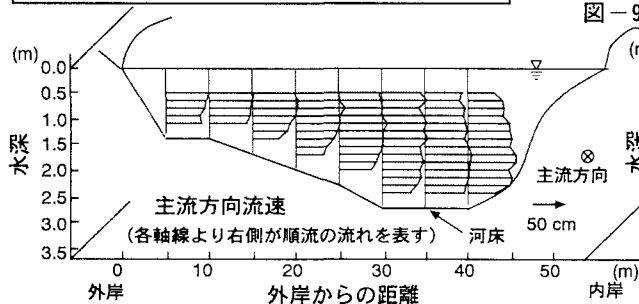


図-9b 測線⑨における主流方向流速分布

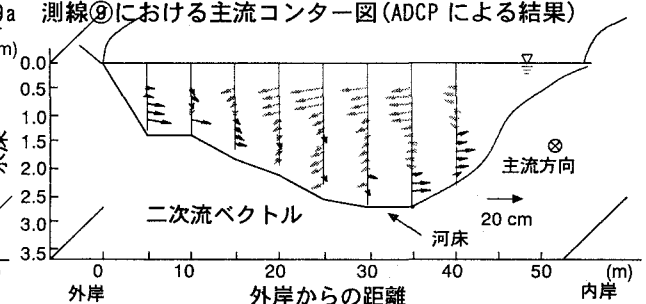


図-9c 測線⑨における二次流ベクトル

図-10 は湾曲部の出口付近に位置する測線⑭の流れを示す。主流方向の最大流速は外岸側ではなく、河道中央部である。二次流は外岸方向に卓越している。それにも関わらず外岸が深掘れしていないのは螺旋流が弱いためであると考えられる。

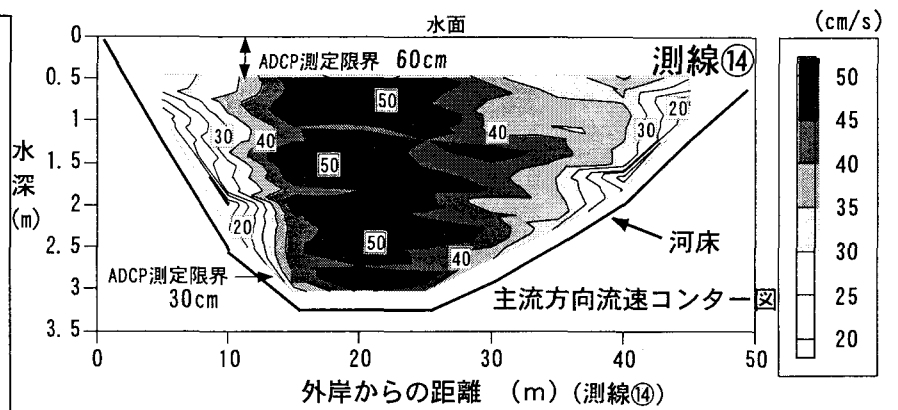


図-10a 測線⑭における主流コンター図 (ADCP による結果)

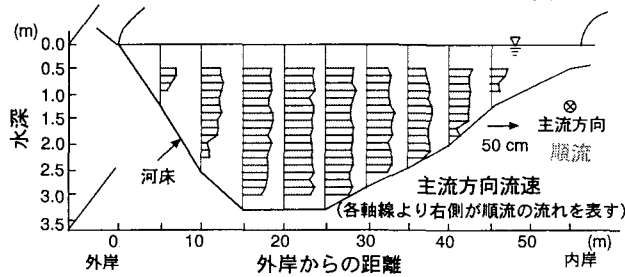


図-10b 測線⑭における主流方向流速分布

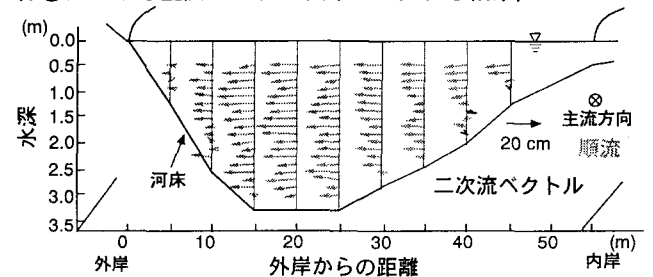


図-10c 測線⑭における二次流ベクトル

5. 二次流強度

二次流の強さを評価するため、石川ら¹⁾による研究手法を参考にして二次流強度を算出する。二次流の定義として水深方向に平均した流向を主流方向、主流方向に対して直角方向の流れを二次流とする。これは先に示した流速分布図の定義とは異なり、同一測線上の各々の観測ポイントにおいて主流、二次流の向きが異なる。二次流強度は各水深で得られた二次流(v)の和を水深と主流速(U)で除して無次元化したものと定義される。二次流強度の算定式(図-11)より、螺旋流のような水深方向に流れの向きが異なる流れであると二次流強度は高い値を示す。

5. 1 二次流強度と河床形状の関係

図-12は各測線の横断方向における二次流強度の分布を示す。図-12と河床形状図より測線④, ⑦, ⑨における深掘れの位置と二次流強度の強い位置が一致している。測線④, ⑦, ⑨の共通事項は、曲率が大きく、局所的な深掘れが存在していることである。それに対し、測線⑬, ⑭, ⑮のような局所的な深掘れがない場合においては二次流強度はほぼ一定の低い値を示す。螺旋流の発生地点においては二次流強度が強く、その地点における河床は局所的に深くなっている。また、二次流強度の弱い地点での河床形状は局所的な深掘れがみられず、お盆型の河床形状を成している。

6. 乱れ強度

図-13, 14, 15はそれぞれ測線⑨, ⑬, ⑭における外岸からの距離、水深、流向の異なる場合の乱れ強度を示したものである。

ここで乱れ強度を $\sqrt{q'^2} = \sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}$

平均流速 U

$$U = \frac{1}{h} \int_0^h u \cdot dz$$

二次流強度 I

$$I = \left(\frac{1}{h} \int_0^h |v| \cdot dz \right) / U$$

図-11 二次流強度の算定式

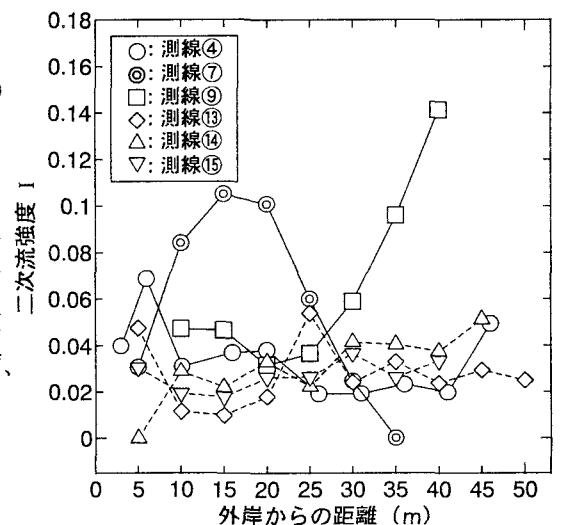


図-12 各測線における二次流強度の分布

と定義している。図-13は順流時（流速40cm/s）の乱れ強度を示しており、乱れ強度は水深方向にほぼ一様である。図-14は逆流時（流速20cm/s）の乱れ強度を示しており、下層における中央部と内岸の乱れ強度鉛直分布が外岸の乱れ強度鉛直分布より強くなっている。図-15は逆流から順流時への遷移時における乱れ強度を示す。流速は上層で順流（30cm/s）、下層で逆流（15cm/s）である。上層より下層の方が乱れ強度が強く下層の乱れ強度は合成流速よりも大きくなることもある。

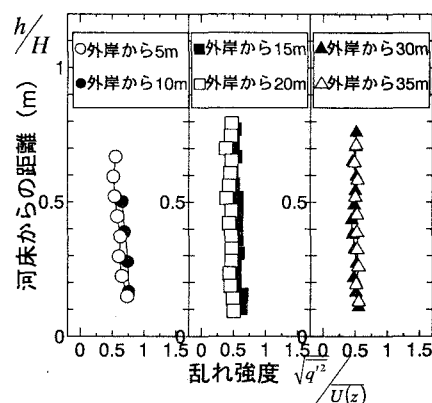


図-13 順流時における乱れ強度（測線⑭）（3分平均）

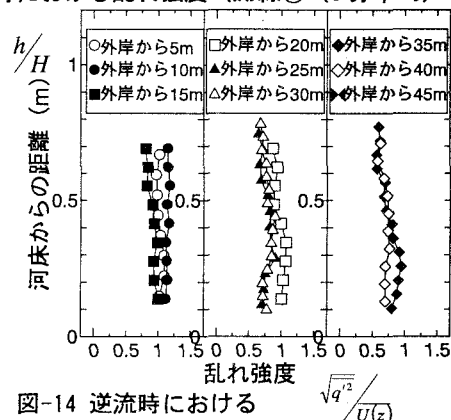


図-14 逆流時における乱れ強度（測線⑨）（3分平均）

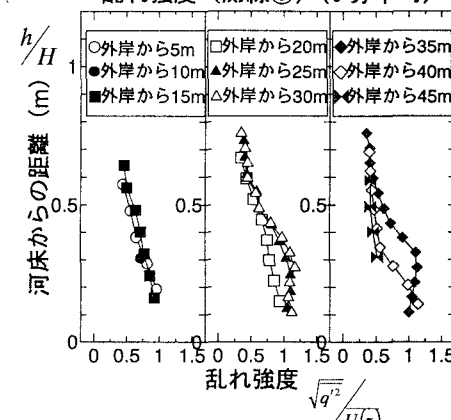


図-15 順流時から逆流時への遷移時における乱れ強度（測線⑬）（3分平均）

7. ADCPと二次元電磁流速計の比較

図-14は測線⑦におけるADCPと二次元電磁流速計の流速・流向を示したものである。図に示すものは多数計測した中の一例である。各流速計により測定した流速の差は最大で ± 7 cm/s、流向の差は最大で $\pm 12^\circ$ であった。この差はADCPと二次元電磁流速計の測定位置、測定時間の差異によって生じたものと考えられる。この結果より、ADCPにより得られた流速の妥当性を検証できた。

8. まとめ

- 1) ADCPにより二次流（螺旋流）を鮮明にとらえることができ、二次流は湾曲部の測線④（入り口付近）、測線⑦、測線⑨（最大湾曲部）で発生し、最大水深部において顕著に現れている。
- 2) 魚群探知器により河床形状を鮮明に可視化できる。これにより網走川河川湾曲部全域の詳細な河床形状が得られた。その結果、最大湾曲部（測線⑧と⑨の間）を境に上流側（測線④～測線⑧）の河床は外岸側で局所的に深掘れしており、下流側（測線⑨～⑮）の河床は外岸掘れを形成しておらず、お盆型の河床形状であった。
- 3) 河床の局所的な深掘れの位置と二次流強度の強い位置が一致している。このことから、二次流強度を算出することにより、二次流が河床・河岸に及ぼす影響を評価することができる。
- 4) 乱れ強度は順流時には鉛直方向に様な値を示すが、逆流時及び遷移時には上層に比べ下層の乱れ強度が大きく、合成流速よりも大きくなることもある。

- 5) ADCP と二次元電磁流速計の測定値を比較した結果、ADCP により得られた流速の妥当性が検証できた。

謝辞：本現地観測は北見工業大学の学生の協力と、北海道開発局網走開発建設部の関係者の皆様からの多大なる援助により遂行された。著者らはここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 石川忠晴・金舜範：湾曲部の2次流に関する基礎的研究，土木学会論文報告集第375号/Ⅱ-6，PP. 143-149，1986

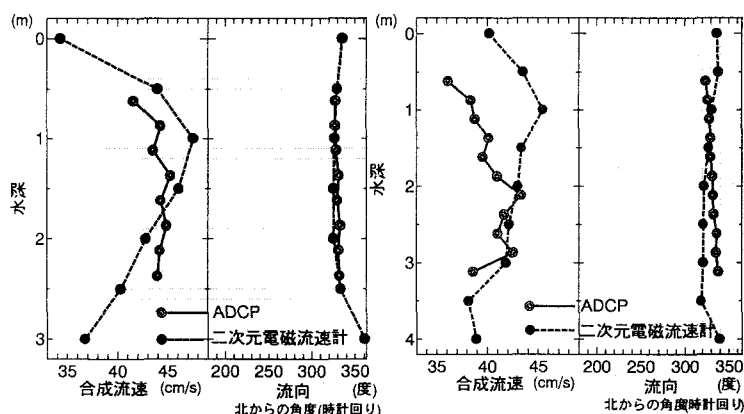


図-16 ADCP と二次元電磁流速計の比較，測線⑦，1分平均
(左から順に外岸側から 5m, 10m 地点)