

石狩川で観測された並列ラセン流の強度分析

Intensity analysis of cellular secondary current observed in Ishikari River

(株)シン技術コンサル ○正 員 加藤晃司(Koji Kato)
 (株)シン技術コンサル 正 員 森 明巨(Akio Mori)
 志村一夫(Kazuo Shimura)
 近藤峰男(Mineo Kondo)
 森谷友博(Tomohiro Moriya)

1. はじめに

河川中央部水面の盛り上がり、1996年尻別川、1998年利根川、2006年阿賀野川の出水時に観測された(1, 2)。その要因として並列ラセン流(Cellular Secondary Current-CSC)による上昇流に着目し、石狩川においてラジコンボートに ADCP、GPS、音響測深器を搭載して流れを横断して計測された流速3成分、地点座標、河床高から CSC の強度と流れの構造の関係を調べた。CSC は burst を原動力として形成されると考えられるが(3, 4, 5)、乱流データの乏しさのため、まず、水深平均値との関係を調べることにした。

2. 方法

木下(6)は阿賀野川で観測された流速3成分に CSC の強い規則性を見いだした。図-1 は著者らが観測した主流速の等高線図の一例である。Burst はあるランダム性を持って河床付近で発生して流下しつつ水面に向かい、深さ方向の影響域は水深全体には及ばないと考えられている。しかし、実際には図からわかるように高速部と低速部が全水深に亘って一様に生ずる。木下(3)は、洪水時航空写真の表面流を解析し、boil が流下方向に列をなす傾向があることから、burst と CSC の連携作用を示唆している。宇民、上野(7)は多くの可視化実験から次のように考えた。河床近傍の渦糸群から第二次渦(burst)が誘導され、この第二次渦はその下流に別の第二次渦を誘発し、水面に達すると水面渦を形成する。このようにして多くの渦群が連携し、その総体として規則的二次流(CSC)の形成があると考えた。このような CSC の特性

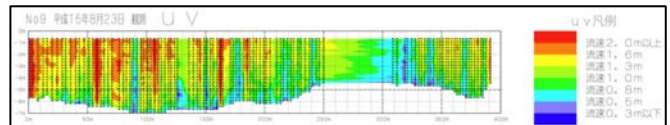


図-1 石狩川で観測された流速コンター(水平成分)

はまだ十分に解明されていないが、多くの計測結果がこれを支持している。このことから、自然河川における CSC の水理学的分析が少なく、乱流データが充分でないこともあり、まず、水深平均値との関係を調べることにし、次の2つの水深平均量を考えた。

$$w = \frac{1}{h} \int_0^h \tilde{w} dz, \quad q = \left[\frac{1}{h} \int_0^h (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) dz \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 (1, 2)}$$

h は水深、 $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$ は流速3成分(水平2成分と鉛直成分)の計測値。burst の直接的効果を w 、運動量の水平成分を q とし、CSC による河床 ($w < 0$)あるいは水面 ($w > 0$) に向かう q の 1cell 当たりの輸送 $-qw$ を、CSC により河床に働く剪断力とみなす。

横断方向に水深 scale 程度の変動を調べるので、変動 $X(=w, q)$ から $nh(n=5)$ 以上の変動 X_L を次の filter ω を使って除く (y は横断方向座標)。

$$X_L = \int_{-nh}^{nh} \omega X dy, \quad \omega = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi y}{nh} \right) \quad \text{式 (3, 4)}$$

図-2 に示す石狩川石狩大橋上流側 9 測線で、2005 年の 5/16(518m³/sec), 5/20(1692m³/sec), 5/24(773m³/sec),



図-2 ラジコンボートの航跡(破線)

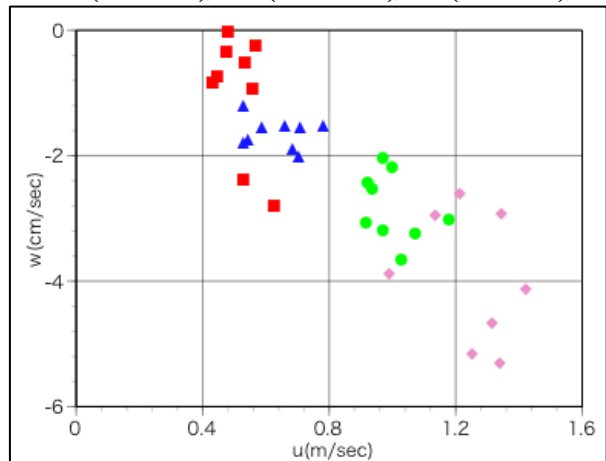


図-3 w と流下流速の全断面平均値の関係

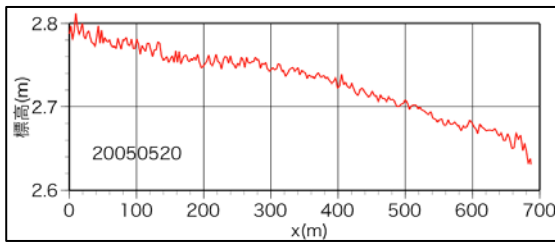


図-4 ラジコンボート漂流による GPS 水位

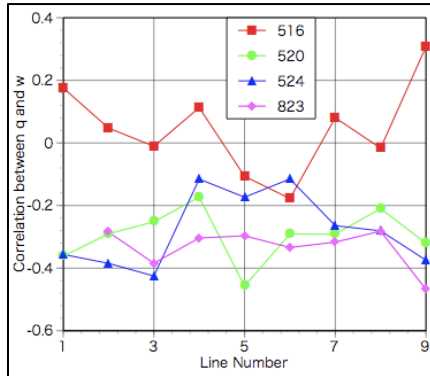


図-5 w と q の横断面内の相関

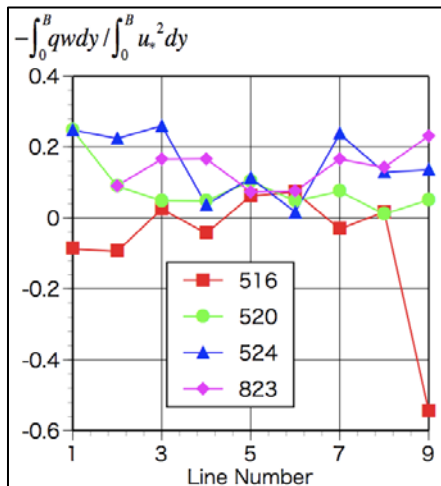


図-6 CSC による剪断力の割合

8/23(2715m³/sec) に観測された 4case を分析する。

ADCP-data には流砂効果が含まれているので(8)、ボート速度は GPS-data から求める。河流を横切るとき流れに抗してボートは若干上流側に傾く。このため ADCP から見た真下は鉛直方向からはずれ、みかけの $w(<0)$ が生ずる(図-3)。この効果の精密な除去は難しいし、ローリングやピッチングの効果も加わる。このため、後述するように q を使って CSC の 1cell を判別する。

水面勾配 i は GPS の高度 data から見積もる。図-4 はラジコンボートを漂流させて計測した GPS 水位の 1 例である。精度は 5cm 程度とされるが変動はこれより小さく、およその水面勾配は推定できそうである。 i を次のように見積もる。各横断線を 6 等分し、各区間の GPS による標高の平均値を区間標高とする。これを上、下流で結んで水面形とし、例えば、測線 2, 4 間の勾配を測線 3 の原勾配 i^0 とする。 i^0 全体の平均値を i^m とおき局所勾配、 i^l を $i^l = (i^0 + i^m)/2$ で与える。上、下流端は外挿する。

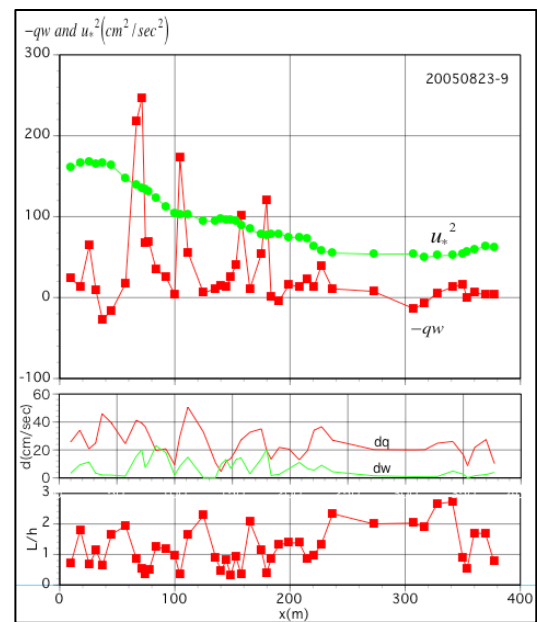


図-7 CSC の 1-cell における $-qw$ と u_*^2

3. 変動の特性

CSC の w と q は逆位相である。両者の相関は、図-5 に示すように、風波の影響が考えられる 516 の相関は乏しいが、他は-0.3 程度ある。そこで、 $-qw$ と u_*^2 を川幅で積分したものの比を見ると、図-6 に示すように 0.1 程度でそれほど大きくない。CSC の 1cell 内の $-qw$ と u_*^2 の積分値を単位長さ当たりに直して両者の分布を調べると、図-7 に示すように $-qw$ は間欠的に大きくなっている、そこで u_*^2 より大きくなっているのがわかる。このことが図-6 に現れた。1cell は、隣接する q の最大 q_{max} と最小 q_{min} の間で与える。1cell の長さ L は、図-7 の下部に示すように $L/h=0.5-2.0$ で CSC として期待される長さ h のまわりに分布している。

$$dq = q_{max} - q_{min}, \quad dw = |w(q_{max}) - w(q_{min})| \quad \text{式 (5, 6)}$$

式 5, 6 は、CSC の振幅に相当する。 $dq=0.2-0.4\text{m/sec}$ で断面の平均流速 1.4m/sec の 2 割程度でかなり大きい。 dw は du の半分くらいになる。

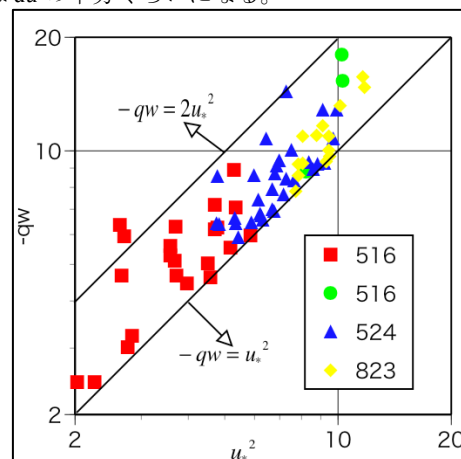


図-8 充分発達した CSC の $-qw$ と u_*^2 の関係

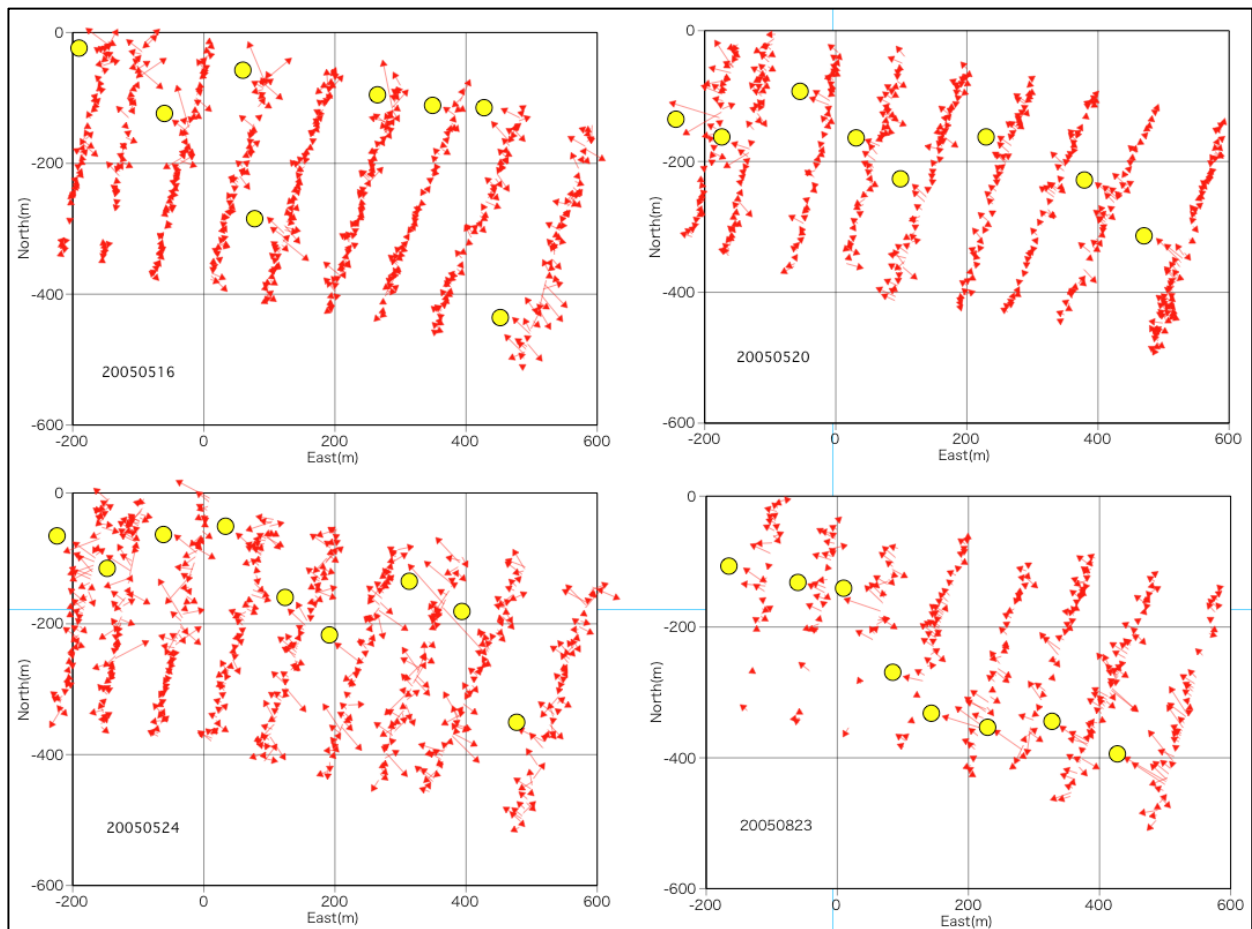


図-9 $-\text{sign}(qw)\sqrt{|qw|}$ の平面分布 (ベクトルの向きは流向、大きな所を○で標す)

図-8 は、 $-qw \geq u_*^2$ となるもののみについて $-qw$ と u_*^2 を比較したが、 $2u_*^2$ を超えるものは少ない。
 $-qw \approx u_*^2$ と見なして、全河床剪断力が CSC 形成に使われたと考える。

図-9 は $-qw$ の平面分布で局大値発生域に○印を付けた。風波の影響が強い 5/16 では、不規則に散らばっているが、5/24(773m³/sec)では流下とともに速やかに右岸に移る。流量が増大する 5/20 (1692m³/sec)では若干右岸寄りの中央部、最も流量の大きい 8/23(2715m³/sec)では左岸からほぼ中央部に至る。5/16 と 8/23 の流速ベクトル平面分布(図-10)と比べると、これらは流心部付近に

あることがわかる。以上の分析と阿賀野川と尻別川の観測データを合わせて以下のような河川における CSC の発達モデルを考えた。

4. 河川における CSC の構造

CSC は全断面に亘って分布するが、 u_*^2 が十分に大きく、強い burst を生起させる場合には、burst 群と CSC の連携作用がうまく働き、両者が一種の共鳴状態になり $O[-qw] \approx O[u_*^2]$ にまで発達する。図-11 は覆本(2)が計測した w のコンターの一例で、深さ方向への一様性が非常に強く、断面中央部全体に強い CSC が発達してい

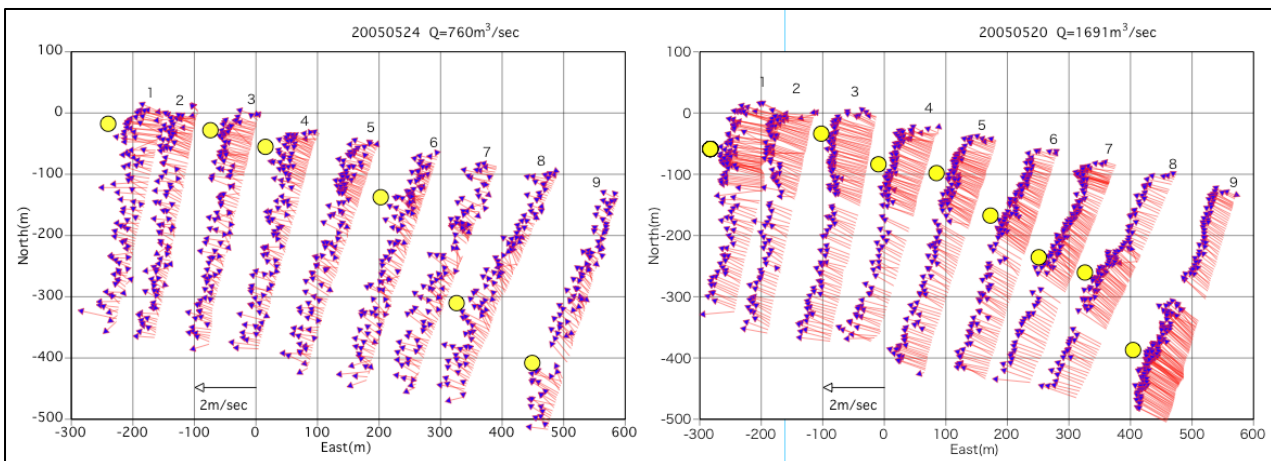


図-10 5/24, 5/20 の流速ベクトル図 (○は流心)

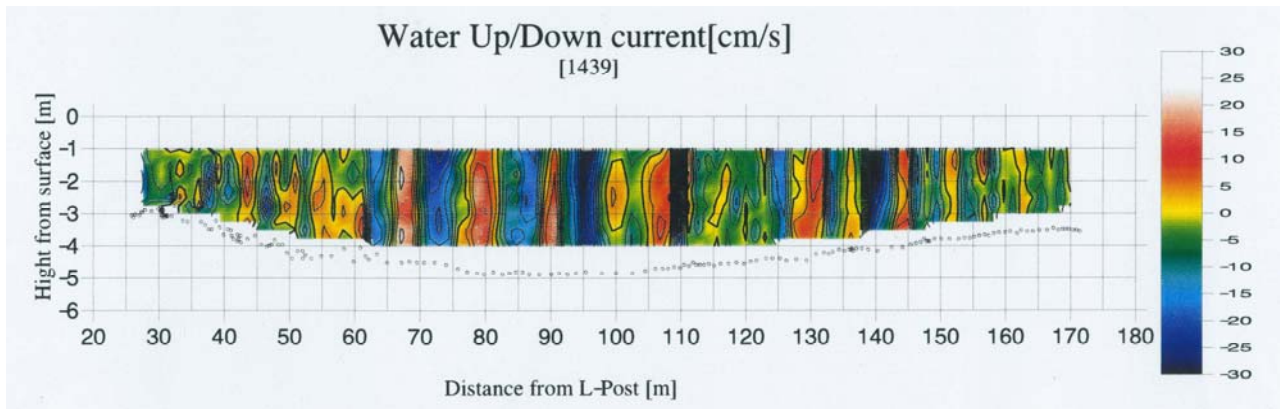


図-11 阿賀野川馬下 w 横断分布のコンター 榎本氏(北斗測量調査(株))提供

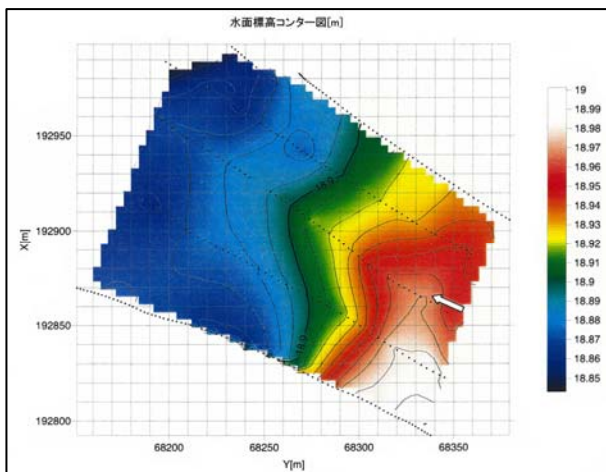


図-12 阿賀野川馬下水位コンター(1cm 間隔)
榎本氏(北斗測量調査(株))提供

る。 $i \approx 1/1000$ であり、 $h=5m$ とすると $u_*^2=0.22m/sec$ になりかなり強い流れである(今回の石狩川では最大で $0.13m/sec$ 程度)。水深に応じて限界勾配 $i_{critical}$ のようなものがあり、 $i \geq i_{critical}$ のときに断面の中央部全体で強い burst が形成されて CSC が充分に発達するものと予想される。このようなときに中央部水面の上昇が生ずるものと考えられる。図-12 はこの流れの水面高のコンターで、中央部に 1cm の水面上昇が計測されているのがわかる。図-13 は尻別川で観測された凸型水面形で、勾配は $1/1600$ である。文献(4)の実験では勾配は $1/200$ で全断面に CSC が発達している。

u_*^2 の強度が不十分な場合には、強い CSC は流心部において間欠的にしか発生しない。本研究の石狩川データでは勾配は $1/10000$ 以下でこれに相当すると思われる。実河川では $1/1000$ のオーダーの勾配があれば、出水時に強い CSC が断面中央部全体に発生して中央部水面の上昇が生ずると予想される。

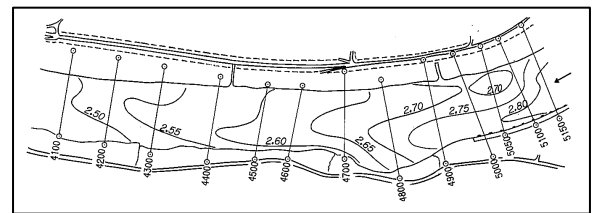


図-13 平成 8 年尻別川減水期の洪水面等高線図
シン技術コンサルと木下(1)による

参考文献

- 1) 木下良作:平成 10 年度-利根川下流部河道安定調査報告書, 1999.
- 2) 榎本幹也:阿賀野川馬下における漂流観測と流況, personal presentation, 2007.
- 3) 木下良作:航空写真による洪水流の解析, 写真測量, Vol.6, No.1, 1967.
- 4) 森明巨, 佐々木哲郎, 滑面水路で見いだされた二次流に関する実験. 第 27 回土木学会年講, 1971
- 5) 宇民正, 上野鉄男, 可視化法による大スケール乱れに関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B, 1976
- 6) 木下良作:ADCP と無人ラジコンボートで観測される洪水流量とその流れの構造について, 農業土木学会応用水理研究部会, 2003
- 7) 宇民正, 上野鉄男, 可視化法による大スケール乱れに関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B, 1976
- 8) 木下良作:ADCP(超音波流速計)による流量と流れの構造について, 河川環境管理財団研究発表会, 2006

謝辞 榎本氏(北斗測量調査(株))には貴重な資料をご提供頂いた。ここに記して謝意を表します。