

埋設データロガーによる熱塩環境計測手法を応用した 河口部砂州の洪水時流出観測 -実測による技術的可能性検討-

Applicability of measurements of thermo-saline environment on/in sand bar by buried data-loggers to observation of disintegration process of sand bar due to flood flow

清野聡子¹・宇多高明²・前田耕作³・山田伸雄⁴・真間修一⁵
Seino, Satoquo, Takaaki Uda, Kosaku Maeda, Nobuo Yamada and Shu-ichi Mama

¹ 正会員 農修 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科助手 (〒153-0041 東京都目黒区駒場 3-8-1)

² 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

³ 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科 (〒153-0041 東京都目黒区駒場 3-8-1)

⁴ パシフィックコンサルタンツ (株) (〒819-0004 福岡県福岡市姪浜町 33-1)

⁵ (財) リバーフロント整備センター (〒102-0075 東京都千代田区三番町 3-8)

Field observation of heat and salinity on/in sand bar by using buried data-loggers was carried out in the Yasaka river mouth in Oita Prefecture in order to obtain environmental data of spawning ground of horseshoe crab *Tachypleus tridentatus*. Temporal changes in salinity and temperature on the surface and 15cm below the ground level have been measured at 20 minutes intervals since July, 1997. During the observation, large flood occurred on September 16 due to heavy rainfall of Typhoon 9719 and sand bar was partly eroded out due to flood flow. During this flood rapid decrease in underground temperature as well as rapid change in salinity was measured due to the exposure of the apparatus to the surface. Exact erosion time was observed, implying that this method can be applied to the observation of disintegration process of river mouth bar due to flood flow.

Key words: Flood flow, salinity, temperature, underground, erosion, river mouth, pore water, field observation.

1. まえがき

洪水観測は、河川工学上および防災科学上高い重要性を有している。その観測のために様々な方法論が開発されてきているが、その大半は洪水時に集中的に機能が発揮されることを目的とする。しかしながら、最近の河川環境保全の高まりの中で、洪水時のみではなく、通常時の河川環境をも観測により明らかにする必要性が増大している。ここでは、洪水という非常時と、平常時の河川環境を観測可能な手法を考案し、実際に洪水観測に成功したのでその結果を報告、考察し、その技術的可能性を示す。この観測手法は、河口域に生息する絶滅危惧生物の保全対策立案のための、河川環境の継続観測が主たる目標であった。

「生きている化石」として知られているカブトガニ (*Tachypleus tridentatus*) は、瀬戸内海や九州北部の内湾の干潟などに広く生息していたが、高度成長期に広範囲に行われた埋立などにより環境が激変した結果、現在では絶滅危惧種とされるほどに生息数が減少している。全国的に見ても生息域は限られているが、大分県守江湾に

注ぐ八坂川はカブトガニの野生個体群の現存する数少ない生息場の一つである。カブトガニは、7月から9月の大潮時を中心に海岸や河口部の砂州の地表面下約15cmに産卵し、約60日間以上の発生期間を経る。孵化した幼生は潮流などにより分散し、干潟で脱皮を繰り返しながら生育することが知られている。しかし、卵塊が埋められている地点の局所環境に関する具体的なデータは十分でない。このことから、筆者ら¹⁾は、八坂川の河口中州にデータロガーを設置して砂州の熱塩環境の連続観測を実施した。この結果、自然環境下では潮汐変動に応じた1日約2回の緩やかな洗浄作用を受け、しかもかなり長い時間湿潤ではあるが浸水していない状態に置かれていることが証明された。また、物理環境の定量的把握により、地表面のように大きな温度差を受けず、緩和された温度条件を利用できること、また産卵場所では潮汐変動に応じた卵の洗浄作用が活用でき、卵塊周辺の水が入れ替わることから十分な酸素の供給を受け、卵が腐敗から守られることなども明らかになった。一方、観測中の1997年9月16日には台風19号に伴う大洪水が発生したが、環境計測を目的とした計測器に洪水時における砂

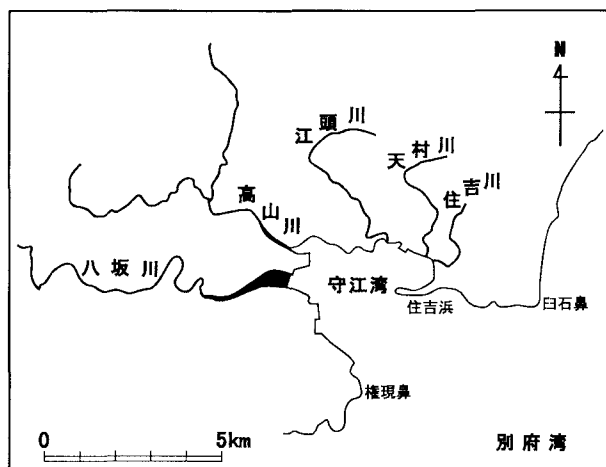


図-1 大分県八坂川および守江湾の位置図

州流出時刻が正確に記録されていることが見い出された。

洪水時の河床変動観測手法については、ポールに金属性のリングを取付けて洪水前の河床面に設置し、洪水時の河床低下に追従したリング位置の低下量を調べて洪水時における最深河床高をとらえる方法、光波測距儀により時々刻々のホバークラフトの平面位置を測定するとともに、それに積載した音響測深機により洪水時における任意地点の河床の深さを測定する木下ら²⁾の方法、あるいは河床面に立てた砂面計により砂面変動をとらえる方法などがあるが、未だ十分な成果が上がっていないのが現状である。これらの観測が成功していない理由は、流下するゴミが計測器に絡まって抵抗が増すことだけではなく、洪水流中に露出して設置された計測器が強い流れの作用を受けるために、計測器の設置に困難を来すことも一因として指摘される。

こうした状況にはあるものの、依然として洪水中における河床変動を直接的に観測することは河床変動の数値計算手法の精度向上のためにも必要なことである。本研究では環境計測手法によって砂州の侵食に関する情報を集めることに偶然成功したが、この方法をさらに発展させ、上述の各種観測法のように洪水流中に計測器を設置する手法と発想を逆にして、下流部河道の砂州の砂面下に計測器を予め埋め込んでおき、それによって計測されたデータから砂州の侵食状況を調べる新しい観測法としての可能性について考察する。研究成果の一部はすでに報告³⁾したが、本研究では現地データに加えて洪水時の平面2次元流れの数値計算も行って、熱塩観測データによる洪水時の砂州変動観測への応用法について考える。

2. 観測地の概況と観測方法

観測は大分県の八坂川河口で行った。八坂川は図-1に示すように別府湾北部に位置する面積5.0km²の小規

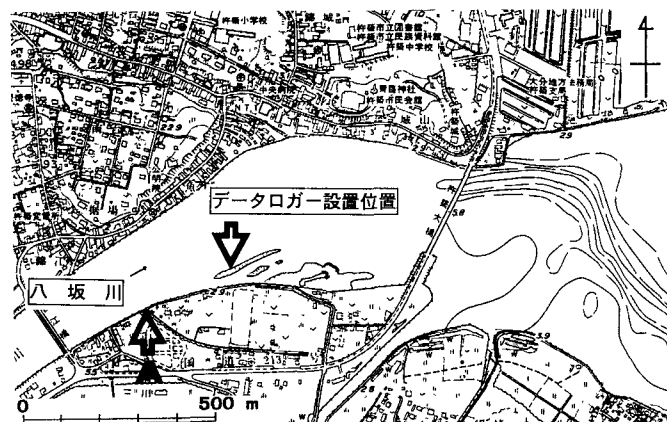


図-2 八坂川河口部砂州におけるデータロガーの設置位置

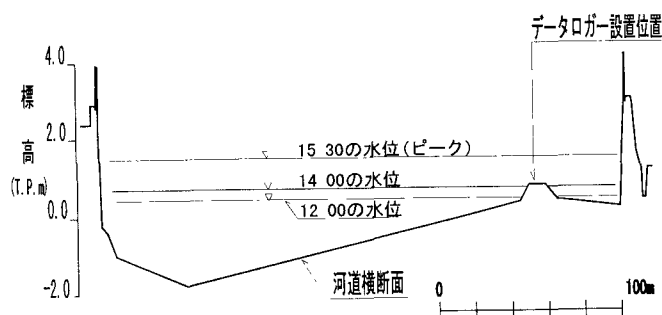


図-3 データロガー設置位置付近における河床横断形と洪水時の水位変化

模な湾である守江湾に流入している。八坂川流域では、1997年9月16日、台風19号に伴う集中豪雨により大洪水が生じた。この洪水による杵築市における家屋の被害は床上浸水118棟、床下浸水72棟、また田畑の冠水は210haに及んだ⁴⁾。洪水のピーク流量は、洪水痕跡調査から約1,500m³/s(河口から7.2kmの原原橋地点)と推定されている。

砂州変動観測は、温度・塩分センサーを内蔵した小型メモリー式連続計測器(データロガー:MDS-CT、アレック電子製)を用いた。温度センサーは間隙水の有無に係わらず計測値を出す、塩分センサーの方は電気伝導度によるため間隙水がないとゼロ値を示す。そのため、ゼロ値の解析にあたっては潮汐変動を考慮し、間隙水が脱したのか塩分ゼロかを判定した。

観測は図-2,3に示すように八坂川河口部右岸近傍の幅約10m、長さ約200mの砂州で行った。この付近はカブトガニの産卵地であることが過去の調査^{5),6)}で明らかにされている。データロガーの設置位置は、T.P.約0.8mの高さを持った砂州の、河心側斜面の標高約0.5mの地表面と地表面下15cmである。設置地点付近で実施した河床材料調査によれば、河床材料の中央粒径は約0.5



写真-1 八坂川河口部の空中写真(1997年9月30日14時撮影)

mm の細砂である。データロガーは地中に埋設しコンクリートブロックにロープで結んで地中に固定した。観測は1997年6月から開始し、現在も継続中である。データのサンプリング間隔は20分である。

写真-1には洪水後の1997年9月30日撮影の観測地点を含む八坂川河口部の空中写真を示す。図-2および写真-1に矢印で示す位置がデータロガーの設置地点である。

データロガーを設置した砂州と右岸の間にはもう1列の砂州(幅約10m、長さ約120m)が見られ、これらの間には幅約15mの細長い水路が形成されている。八坂川は図-2及び写真-1に示すように点A付近から川幅が急増しており、明らかに洪水時の掃流力が低下する。データロガーの設置地点は、点Aから流路をそのまま下流方向に延長したかのようにして伸びた砂州である。砂州の右岸側の細長い水路より右岸側には杵築大橋を挟んで下流方向へと規模の大きな湾曲部内岸側砂州の発達をみる。この砂州の存在と、左岸の湾曲とによって八坂川は杵築大橋では左岸側に大きく縮流されて流れている。また、この写真は洪水直後に撮影されたものであるために、杵築大橋の橋脚による洗掘の影響が下流方向に伸びていることが見て取れる。

3. 砂州中の温度・塩分の観測結果

八坂川河口砂州における温度・塩分の観測は、砂州の地表面と地表面下15cmで行った。以下では温度をT、塩分をSとし、地表面と地表面下15cmでの測定値をそれぞれ添字0、15で表す。例えば地表面下15cmにおける塩分は S_{15} と表記する。

図-4は、1997年8月31日から9月20日における T_0 、 T_{15} の経時変化である。温度変化には日射に応じた周期変動を示す期間と、際立った周期性が消失し不規則な変動を伴いながら温度が低下する期間とに分かれる。 T_0

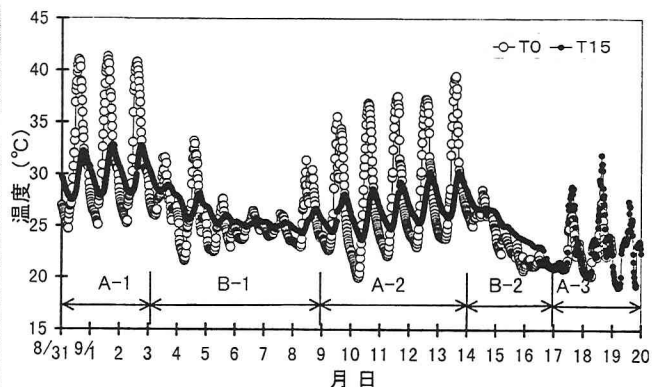


図-4 八坂川河口砂州における T_0 と T_{15} の経時変化

表-1 晴天時(A)の温度環境

月日	最高温度(°C)			最低温度(°C)			日較差(°C)	
	T_0	T_{15}	時間遅れ	T_0	T_{15}	時間遅れ	T_0	T_{15}
A-1								
8/31	41.1	32.2	3:40	24.7	27.6	2:40	16.3	4.6
9/1	41.3	32.9	4:00	25.1	27.9	2:00	16.2	4.9
9/2	40.8	32.8	3:40	25.3	28.2	2:20	15.5	4.6
A-2								
9/10	36.9	28.6	3:40	20.0	23.7	2:40	17.0	5.0
9/11	37.5	29.3	2:20	22.1	24.7	3:00	15.4	4.5
9/12	37.3	30.3	3:40	23.0	25.4	2:20	14.3	4.9
9/13	39.5	30.2	2:40	23.8	25.9	2:20	15.7	4.4
平均	39.2	30.9	3:22	23.4	26.2	2:28	15.8	4.7

が周期変動を示す期間は8月31日～9月2日、9月9日～9月13日、9月17日～9月20日の3期間に分かれる。以下では、 T_0 が周期変動を示す期間をAとし、発生順にA-1、A-2、A-3と区別する。一方、 T_0 と T_{15} が不規則変動を伴いながら温度が低下する期間としては、9月3日～9月8日と9月14日～9月16日の2期間がある。同種の変化を示す意味からこの期間をBと称し、発生順にB-1、B-2と区別する。期間Aの温度特性を表-1に示す。なお、期間A-2のうち、9月9日は依然として過渡的な温度変化を示すので省略し、残りの4日間の特性をまとめている。

期間Aは、晴天時の日射に伴う温度変化を示しており、日較差が大きい。期間A-1、A-2では、 T_0 の最高温度の発生時刻から3時間22分±19分(N=7)の遅れをもって T_{15} が温度変化を繰り返している。しかし、期間A-3では T_{15} が T_0 より高くなるという逆転現象が起きている。この原因については後述する。期間Bは、降雨時の温度変化を示している。この期間、地表面も地表面下も変動を有しながらも次第に温度が低下する。しかし詳細に見ると、期間B-1では連続的な変動であるが、期間B-2では9月16日に T_{15} の急激な減少が観察される。これは洪水によって砂州がフラッシュされたことに起因していると考えられる。

図-5には期間A-1における T_0 、 T_{15} および地表面塩分(S_0)の経時変化を示す。塩分は潮汐変動に伴う砂

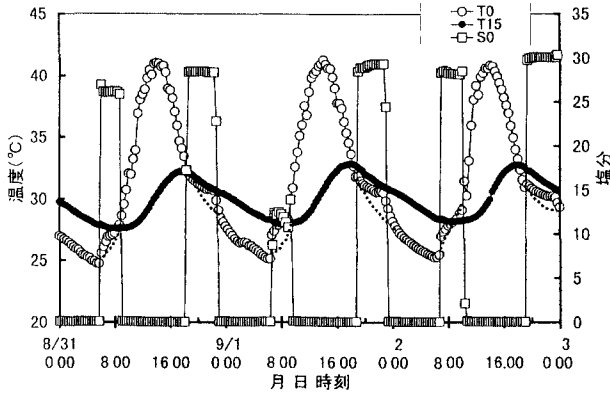


図-5 期間A-1における T_0 、 S_0 および T_{15} の経時変化

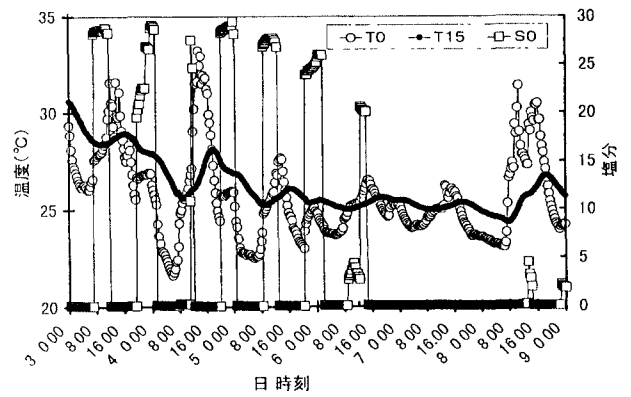


図-6 期間B-1における T_0 、 S_0 および T_{15} の経時変化

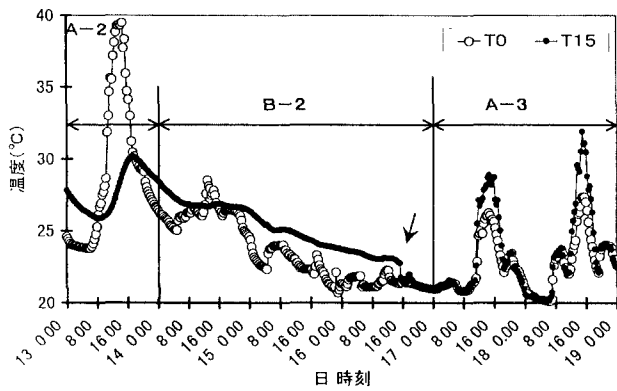


図-7 期間B-2前後における T_0 、 T_{15} の経時変化

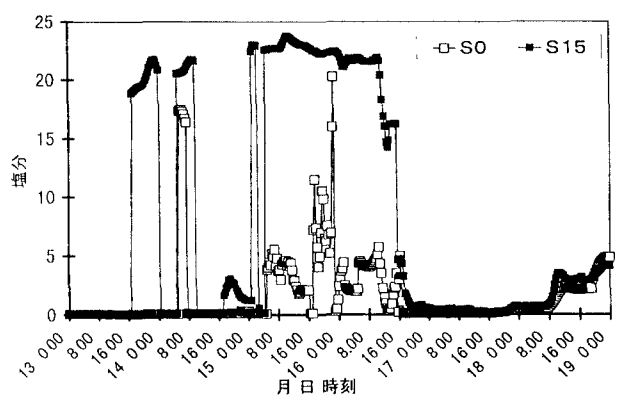


図-8 期間B-2前後における S_0 、 S_{15} の経時変化

州への塩水の侵入状況を表すよい指標である。図-4に示した T_0 は単純な周期的変化に見える。しかし図-5に示すように T_0 は最高温度に達したのち温度が低下するものの、夕刻から夜にかけて停滞期を有し、その後再び低下している。全く同様に午前中にも温度上昇の停滞期がある。そしてこれらの停滞期には S_0 の急激な上昇と明瞭な対応関係が見られる。 S_0 は急上昇する以前は0であり、ステップ状の変化が起きている。また、 S_0 の急激な増加と同じタイミングで T_0 の急上昇も生じている。このことは、砂州表面の温度より水温の高い塩水がこの瞬間に砂州表面に到達したことを表している。 T_0 の変化と比較して T_{15} は振幅が小さく、緩やかな変動を示す。砂州表面への塩水の到達による著しい温度上昇は見られないが、緩やかな温度停滞期は有している。結局、八坂川河口砂州では、地表面下においても日射に伴う温度変化とは別に、高温の海水が砂州へと浸入することに伴う温度上昇が生じていることが分かる。

図-6には期間B-1における T_0 、 S_0 および T_{15} の経時変化を示す。図-5に示したように、よく晴れた日には T_0 の最高温度が 41.3° まで上昇したのと比較すると、9月3日、4日の13:40に T_0 がそれぞれ最高温度(31.6 、 33.2°)に達する点は似ているが、最高温度は低い。しかし、9月3日～5日の夜に典型的に見られるように二次のピークを持って急上昇している。温度上昇が起

た時刻には S_0 が0.1から19.6程度まで急上昇している。このことは、二次の温度ピークは砂州の地表面温度より高温の海水が上げ潮時に浸入したことを意味する。そしてこの期間が曇りまたは雨であったことに起因して日射によって与えられる熱量が小さいために、海水の浸入に伴う熱量の変化が相対的に著しく現れたと考えられる。また、9月3日および9月4日の昼間温度の急上昇には、日射だけでなく上げ潮時の高温の塩分の浸入による効果もあったと考えられる。

図-7、8には期間B-2を挟む9月13日～19日における T_0 、 T_{15} 及び S_0 、 S_{15} の経時変化を示す。9月16日15:20～15:40の間、地下15cmでは降雨の影響で徐々に低下していた温度が 1.0° C急落した(図-7の↓参照)。これと同じ時間に、 S_{15} は20分(測定間隔)で11.6急減した。このような温度塩分環境の激変は、洪水流によって砂州が流失したことを強く示唆する。少なくともこの時刻以前における T_{15} の緩やかな変化と比較して、ごく短時間における急激な温度低下は、データロガーを埋設していた地中環境が一挙に変化したことを意味する。しかも図-8によれば、この変化が生じた後両地点の塩分は9月18日0時までほぼ0となったが、このことはこの間八坂川の洪水流が流下していたことと良く一致し、洪水流によって砂州の上層が削り取られ、その後は洪水流が流下したと考えれば理解できる。以上より、この時刻を

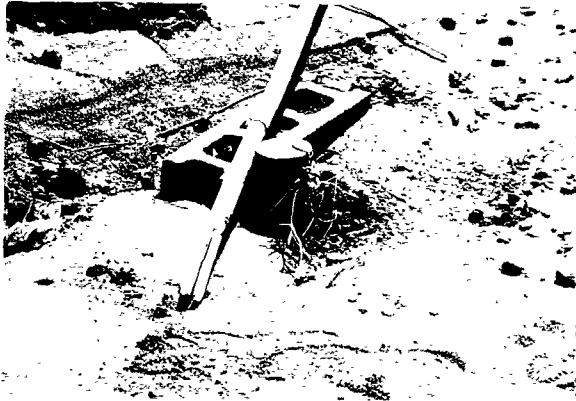


写真-2 地表面下15cmに埋設したデータロガーの露出状況

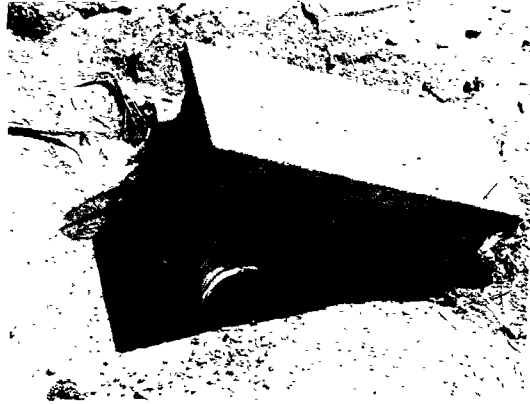


写真-3 下流へ移動し、固定用のブロックの下になったデータロガー

もって河床材料が急激に流出し、計測器が押し流された時点と判断できる。9月17、18日、 T_{15} は T_0 より高温となり、上層下層で温度の逆転現象が起きている。砂州の温度変化は、主として日射による熱が地下に伝導する現象であることを考えると、この結果は理解しがたい。その理由は以下のように考えられる。まず、地表面に設置したデータロガーは洪水流により写真-2,3に示したように下流へ押し流され、その上に固定用のブロックが覆い被さっていた。このためセンサー部は太陽光に対して陰になり、そのため日射が遮られて温度上昇が妨げられた。一方、地表面下15cmに設置したデータロガーは洪水によって表層の砂がはぎ取られた結果、地表面に露出することになり、洪水前における地表面とほぼ同じ温度変化を示すようになったと考えられる。

4. 洪水流の数値計算

洪水時における砂州周辺の流速場の変化を明らかにするために、潮位と流量ハイドログラフを与えて2次元不定流計算を行った。計算範囲は、河口の上流14kmに位置する八坂橋から河口までとし、計算領域を25mメッシュで分割した。計算定数のうち、粗度係数は河道においては0.035、干潟においては0.030、氾濫原では0.3とした。図-9には洪水時の潮位変化と、河口から7.2km

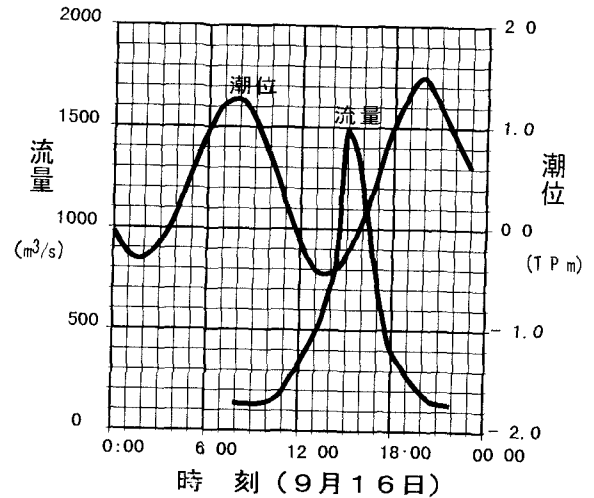


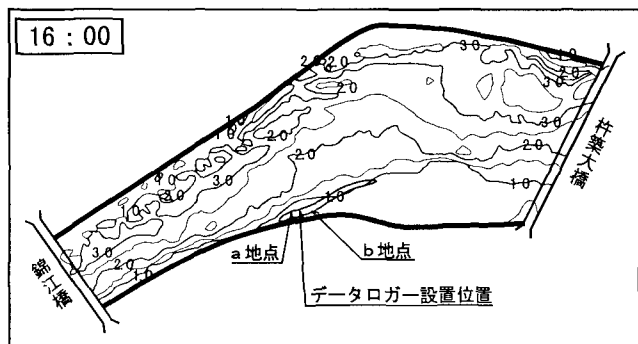
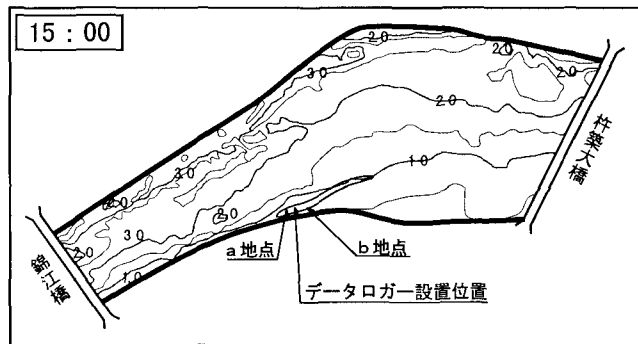
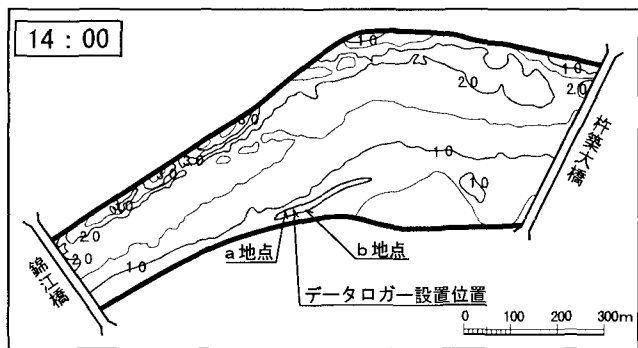
図-9 潮位変化とハイドログラフ

上流の出原橋で観測された流量ハイドログラフを示す。最干潮は13～14時に生じたのに対し、流量のピークはほぼ15時に起きている。したがって洪水は最干潮から上げ潮時に発生したことになる。なお、流量観測は14時の1,080 m^3/s までであり、それからピーク流量までは洪水痕跡からの推定流量である⁴⁾。図-10には、9月16日洪水時のピーク流量となった15時を挟む、14時から16時の流速の平面分布を示す。洪水流はデータロガーを設置した砂州より上流では直線的に流れているが、この砂州の下流でも直進傾向を保っている。このため砂州の下流端付近では流れの剥離が起き、杵築大橋までの間に死水域が形成されている。図-10ではとくに流速1mのコンターの挙動が注目される。このコンターの位置は、14時では砂州の河心側にあったが、15時では砂州上へと移動した。すなわち、砂州上が高流速となったことがわかる。その後、16時での流速分布は15時とよく似ているが流速分布に乱れが生じている。

図-11にはデータロガー設置箇所近傍の2地点（25mメッシュ）での流速の経時変化を示す。洪水流量の増加とともに流速が次第に増加したが、9月16日の15時20分～30分に流速の急速な増加が生じている。この時刻は、データロガーの温度・塩分の変化から推定された砂州流出の推定時刻とよい一致を示す。このことから、洪水流の計算結果から見てもデータロガーによる観測結果の妥当性が裏付けられる。

5. 考察

本研究では八坂川河口部の砂州中に塩分・温度計を内蔵したデータロガーを設置することにより、洪水時の砂州のフラッシュ時刻を正確に測定可能なことを現地観測により明らかにした。この方法は、観測計器が地中に埋設されていることから、設置された計測器が洪水流による強い外力を受けないという利点がある。また本研究では表面と地表面下15cmにのみ計測器を設置したが、さ



数値の単位 : m/sec

図-10 洪水流の数値計算結果

らに多くの計測器を水平または鉛直方向に配列して地中に埋め込めば、砂州流出の時間的変化をも観測可能と考えられる。その意味で砂州の侵食を観測する新しい観測法になりうると考えられる。また、一般に大洪水の発生頻度は小さいので、通常の観測では洪水待ちをする間全くデータが取れないことも多いが、ここで提案した方法では、通常時には砂州を巡る地中環境のデータを自動、かつ連続観測することができる。そしてこれらのデータは河川環境の時間的ないし季節的変動を理解する上で有効な資料となるはずである。これは他の手法と比較して大きな利点となる。

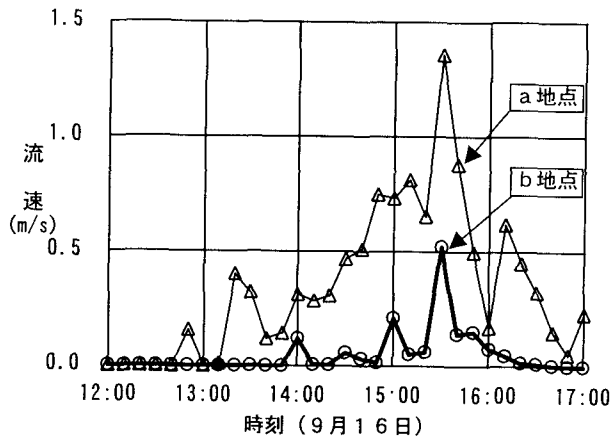


図-11 データロガー設置箇所最近傍の2地点での流速の経時変化

謝辞

本研究を進めるに際し、大分県土木建築部河川課と別府土木事務所にご協力を頂いた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 清野聡子・前田耕作・宇多高明・山田伸雄・真間修一 (1998) : カプトガニ産卵場の局所環境の観測-大分県八坂川河口の例, 第53回年講演概要集, CS, pp. 208-209.
- 2) 木下良作・志村一夫・山崎文明 (1991) : 洪水時河床音響調査へのホバークラフトの利用, 水工学論文集, 第35巻, pp. 691-694.
- 3) 清野聡子・宇多高明・前田耕作・山田伸雄・真間修一 (1998) : 埋設データロガーによる洪水時砂州流出の現地観測, 第53回年講演概要集, pp. 774-775.
- 4) 清野聡子・宇多高明・前田耕作 (1998) : 地域固有の価値観, 歴史性, 稀少生物と河川改修-大分県八坂川の例, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp. 171-176.
- 5) 清野聡子・前田耕作・日野明日香・宇多高明・真間修一・山田伸雄 (1998) : カプトガニは何故その岸辺に産卵するのか? -産卵地の地形・堆積物・波・流れの特性-, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1091-1095.
- 6) 清野聡子・宇多高明・真間修一・三波俊郎・芹沢真澄・古池剛・前田耕作・日野明日香 (1998) : 絶滅危惧生物カプトガニの生息地として見た守江湾干潟の地形・波浪特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1096-1100.

(1998. 9. 30 受付)