

# 電波式流速計による河川脈動流の観測

## FIELD OBSERVATION OF THE PULSATORY FLOW VELOCITY BY RADIO CURRENT METER

山口高志<sup>1</sup>・斎藤秀晴<sup>2</sup>・森修一<sup>2</sup>・森田正人<sup>3</sup>・岩本理恵<sup>3</sup>  
Takayuki YAMAGUCHI, Hideharu SAITOH, Shuichi MORI,  
Masato MORITA, Rie IWAMOTO

<sup>1</sup>正会員 工博 河川観測技術研究所 (〒277-0863 千葉県柏市豊四季645-14)

<sup>2</sup>正会員 (株)CTIサイエンスシステム (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町1-3)

<sup>3</sup>(株)CTIサイエンスシステム (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町1-3).

Radio current meters were improved in a turbulence measurement version and pulsatory flow measurement was made every 0.3 sec in 7 reaches of 4 different rivers in order to applicability check of the version. 5 items ( $V$ ,  $V_{ave}$ ,  $E$ ,  $E_{ave}$ ,  $E_{0.3-3Hz}$  ( $E$ : Radio Reflection Intensity)) are chosen and succeeded in observation of periodical characteristics in some items and irregular signs because of bursting from the river bed.

**Key Words** : radio current meter, river pulsatory flow, bursting

### 1. 緒論

洪水流の多くは乱流で流下している。この河川乱流構造解明についての研究が進み、数値直接シミュレーション等による研究成果は、その内部構造と短時間で変化する時系列変化等を見せてくれる水準となってきた<sup>1)2)3)</sup>。一方、流水と土砂の一体管理が課題となっている今日、実河川の観測においても数値計算の検証観測や河川乱流の直接的現象観測が必要となってきた。

本報告は、電波式流速計を河川乱流の観測が可能ないようにバージョンアップして、実河川洪水流の現地観測を行い、適用性の検討を行った報告である。筆者らが電波式流速計を主眼としているのは、(1)河床地形の違いや変動による流れの変化を実用観測とするためには、多点の同時観測が必要である(廉価化も課題である)、(2)今までの経験を踏まえれば、洪水流に観測機材の投入や設置は困難な事が多く、非接触の観測の方が現実的である、(3)秒単位以下の高時間分解能の観測が必要であり、伝播速度の速い電波の利用が有効である、(4)実河川での観測であり、流速・流量の観測と同時に、流砂量、河床変動の観測等と関連性を持って進めることが可能である等の諸点である。

電波式流速計のバージョンアップの要点は次のようである。

(1)電波の発信周波数を24.2GHz(波長1.25cm)に高め、照射域の狭化や電波反射特性等の抜本の変更を行った。(2)Xフラックス主流速( $V_x$ )の観測の他に、Xフラックス以外の低流速も含めた平均流速( $V_x'$ )の観測を行えるようにした。(3)流速として0.3~3cm/secで上昇下降する長周期水面変動の観測が行えるようにした。(4)対水面間距離(水位)の観測を可能とするために、電波反射強度も観測項目とした。(5)時系列データの微分的処理が有効である出力がなされる連続観測とするために0.3sec毎の観測がなされるようにした等である。

観測は、台風に伴う出水時の多摩川(支流を含め3地点)、荒川(2地点)、利根川(1地点)及び融雪出水時の魚野川(1地点)について観測事例地点として選定し、観測を行った。

### 2. 観測機器と観測内容

#### (1) 電波式流速計の概要

電波式流速計は、橋上あるいは河岸より水面に向けて極超短波電波を照射し、その反射電波の周波数偏位量を計測するものである。写真-1(左)が電波式流速計の発信器部外観形状であり、50cmの正円形パラボラアンテナと一体化して製作されている。使用周波数は24.2GHz

で、空中線出力10mWの電波法適合技術品であり、使用に当たっての無線技術者免許は不要である。写真-1(右)が出力記録器であり、カード記録及びRS232C出力機能を搭載させている。0.3sec毎の6項目の基本項目を出力するソフトと、脈動流解析等の高度な解析ソフトがある(図-1)。

電波式流速計の観測範囲(図-2)は、水面までの高さと同様に俯角により決まる。一般の観測においては、俯角は基本的に50°(40~55°)で使用する。橋のない場合やより遠くの地点の観測を行う場合は俯角を浅くして23°で使用する。ただし、俯角が40°より浅くなると、超低周波信号の受信強度が低下する。偏角については、偏角が23°以内ではその影響は小さく、偏角約57°までは表面流速の観測が可能である。

(2) 基本出力項目 (6項目)

電波式流速計により0.3秒を1計測単位として出力される計測項目は表-1に示す6項目である。



写真-1 (左)発信器付パラボラアンテナ (右)出力記録器

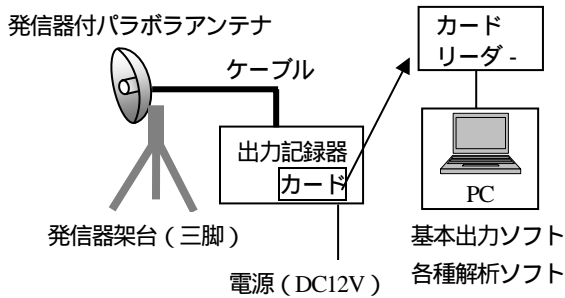


図-1 電波式流速計の構成

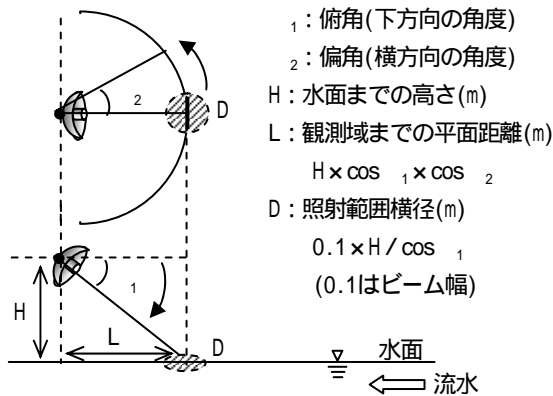


図-2 電波式流速計による観測範囲概念図

F(周波数偏位量)は、流速0.2~10m/secの範囲で流下する流水による周波数偏位量(単位Hz)である。 $F = V(\text{流速}) \times K(\text{物理量定数}) \times \cos(\text{発信器の俯角})$ で表面流速に変換される。本論文文中の流速はすべて表面流速としての記述である。断面平均流速への変換や精度については、多くの既報告に示した様に十分な実用精度を保持している<sup>4)</sup>。

FとF<sub>A</sub>の2つの周波数偏位量が出力される。これは、一定の分布をもって反射してくる偏位電波の周波数算定アルゴリズムが異なるものである。FはXフラックス主流速に対する偏位電波の卓越中心周波数である。F<sub>A</sub>はXフラックス以外の低流速部分を含めた偏位電波の算術平均的処理による中心周波数である。FとF<sub>A</sub>の2つの値の出力について、Fが基本的な計測値であり、F<sub>A</sub>は周波数偏位量が約120Hz(流速で約1.0m/sec)以上の場合のみ出力されるようになっている。(図-3)

E, E<sub>A</sub>は周波数偏位電波の信号強度である。この信号強度は、対水面間距離に反比例する信号であるが、電波式水位計としての反射時間カウントをしているものではなく、あくまで周波数偏位電波の信号強度である。また、俯角をつけての斜め方向の照射であり、距離のみで変動するのではなく、反射物体の大きさや形状等の影響も受ける性質を持つものである。

表-1 電波式流速計の基本計測項目 (6項目)

記号	計測内容	範囲	単位	摘要
F	周波数偏位量 (卓越中心周波数)	周波数 測定 範囲	Hz	Vx
F <sub>A</sub>	周波数偏位量 (算術平均)		Hz	
E	信号強度 (卓越中心周波数)	5~ 1500Hz	mV	
E <sub>A</sub>	信号強度 (算術平均)		mV	
E <sub>0</sub>	超低周波数域信号 強度	0.3~ 3Hz	mV	
Zf	超低周波数域信号 変化量	-	mV	0.3sec毎 変化量

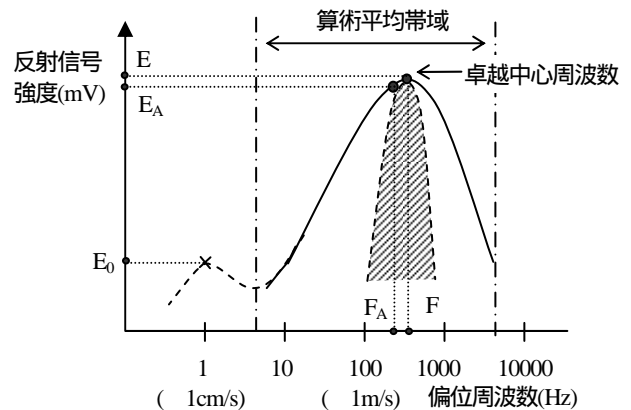


図-3 周波数偏位分布と計測信号特性概念図

$E_0$ は速さとして0.3～3cm/secのゆっくりとした水面高変動による反射波強度である。機器の特性として、0近くにバックグランド値が出現する。 $Zf$ は、 $E_0$ 信号の周期を解析するための信号であり、 $E_0$ の元信号の0.3sec毎データの差分 ( $E'_{0,t} - E'_{0,t-1}$ ) を  $0.01 \times E_B$  で除した値を出力している。

(3) 観測地点

観測は、表-2に示す7地点で行った。観測地点の選定は、観測機器適用性のチェックを目的としたものであり、水深、対水面間距離を考慮しての任意選定地点である。流速(30sec平均)の最大値が得られたのは、多摩川日野橋(流心9月7日5:54)で、6.33m/secである。

表-2 実河川での観測地点とその特性

観測地点	観測年月日	水位状況	水深	対水面間距離	河床材料
日野橋(多摩川)	H19 9.7	ピーク期	3.5m	5m	小礫
竜飛橋(多摩川)	H19 9.6	上昇期	2.5m	30m	小礫
高幡橋(浅川)	H19 7.15	ピーク期	1.0m	10m	小礫
治水橋(荒川)	H19 9.7	上昇期	12m	30m	砂
荒川大橋	H19 9.6	上昇期	4.0m	15m	小礫
栄橋(利根川)	H19 9.7	上昇期	4.0m	8m	砂
根古屋橋(魚野川)	H19 3.15	融雪期	1.0m	15m	礫

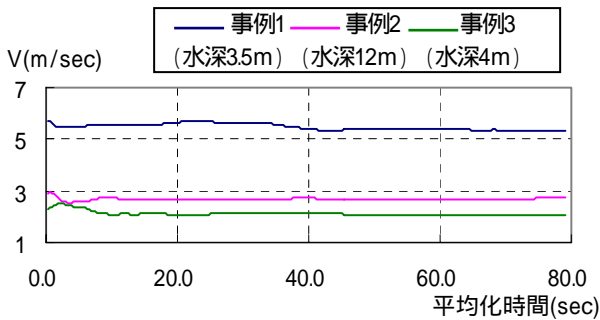


図-4 平均化時間による流速の平均値の変化 (0.3sec毎観測値)

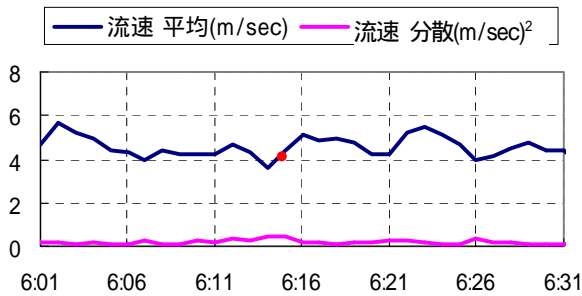


図-5 流速の時系列変化 (30sec平均化処理) (観測地点: 多摩川日野橋)

3. 観測結果の考察

(1) 流速の平均化処理時間

実河川の流速観測は、主に浮子法またはプライス流速計による時間計測による方法で行われている。そのため、「瞬間流速」といった概念の観測項目はなく、瞬間流速が測定できる流速計による観測時間は40secあるいは20sec間の平均化処理を行って流速としている。図-4は平均化時間の違いによる平均値出力の安定性を解析した図である。

図-5は多摩川日野橋における水位ピーク期の30sec平均化処理の時系列変化である。図-6は同観測時間内の3sec平均化処理を行った時系列変化である。図-7,8は図-5,6の基本出力データである。

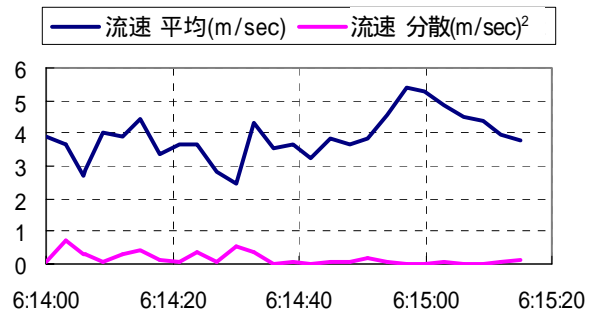


図-6 流速の時系列変化 (3sec平均化処理) (観測地点: 多摩川日野橋)

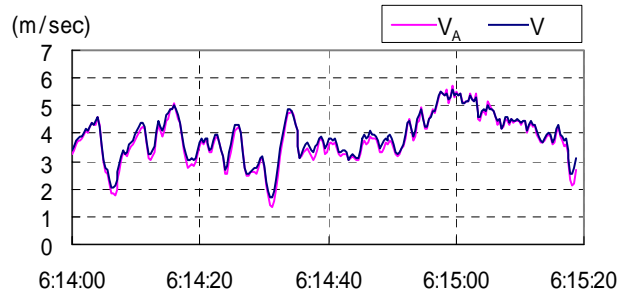


図-7 0.3sec毎の基本項目計測事例 (流速) (観測地点: 多摩川日野橋)

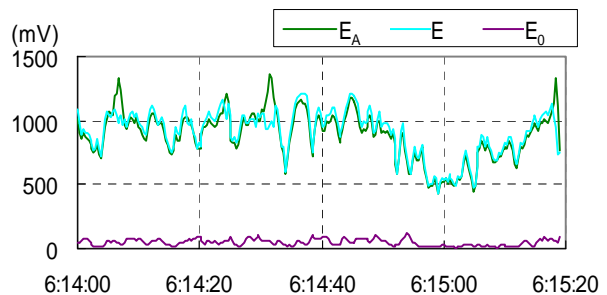


図-8 0.3sec毎の基本項目計測事例 (信号強度) (観測地点: 多摩川日野橋)

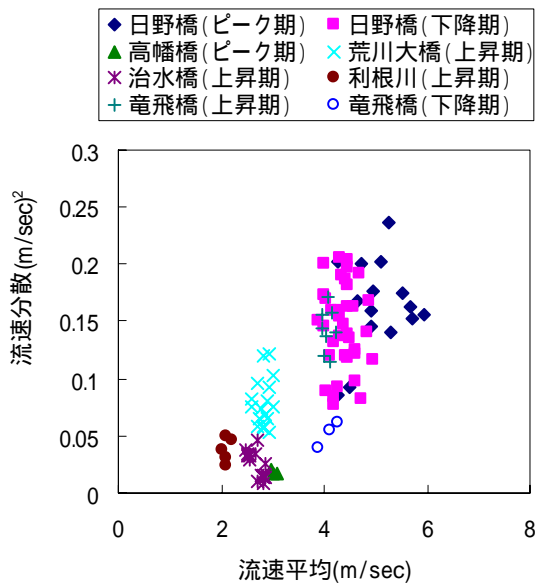


図-9 表面流速の平均と分散の関係図  
(30sec間)

## (2) 分散としての流況表示

図-9が主流速( $V_x$ )の30sec毎流速の平均と分散の相関を示したものである。流速は同じでも分散の小さい流況と大きい流況がある。平均と併せて分散の同時観測が乱流度合や鉛直流特性解析へのアプローチ可能なデータとなる可能性を示している。

## (3) $V_x$ と $V_x'$ の関係と $K_v$ (低流速増分比率)の算出

流速が約1.0m/sec以上の場合、卓越中心周波数( $F$ )と低流速域を含めた帯域の算術平均処理より算定される偏位中心周波数( $F_A$ )が観測される。Fから換算されるのは主流速( $V_x$ )である。F<sub>A</sub>から換算される流速( $V_x'$ )は低流速部を加味した流速であり、概念としては( $V_x - v'$ )となる。これを $K_v = \{V_x + (V_x - V_x')\} / V_x$ として示した値が、低流速増分比率( $K_v$ )である。2次流等の分布比や観測値にするには、1/3 ~ 2/3乗して使用する性格のものであると考えている。

FとF<sub>A</sub>は、各々独立したアルゴリズムによる計測であり、100%  $V_x > V_x'$ とならない側面を持つ。多くの実測において90 ~ 95%は $V_x > V_x'$ が維持されており、それなりの精度を持った信号特性であると考えている。

## (4) $K_v$ 値と $E_0$ の関係

図-11は $K_v$ 値と $E_0$ の変化の関係を示したものである。 $E_0$ は速度が1cm/secオーダーの鉛直流を観測しているものであり、 $K_v$ 値は主流速に対する見かけの2次流を加えた比率である。両者は同じ波形で変化している。 $E_0$ あるいは $K_v$ 値の変化は、洪水時流況の2次流観測の可能性を示していると考えられる。

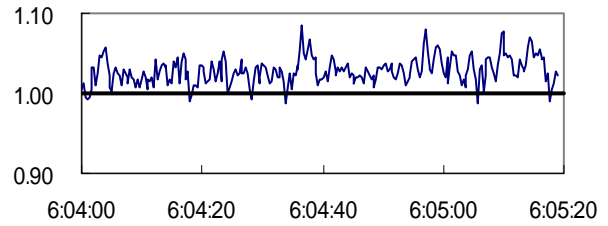


図-10  $K_v$ 変化図

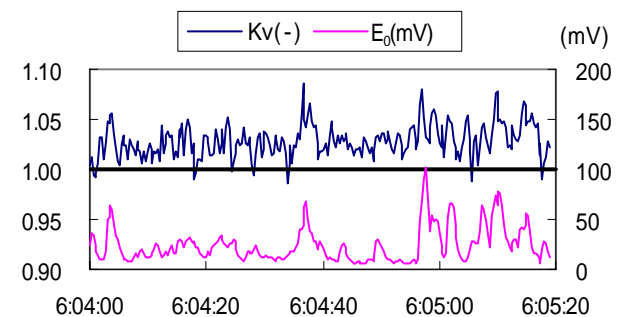


図-11  $K_v$ と $E_0$ の関係図

## (5) 信号強度変化

図-8に示すように信号強度の $E_A$ と $E$ は、当然の事であるがほぼ一致する。一方、 $E_A$ 、 $E$ と $E_0$ は必ずしも一致と呼べるべき変化となっていない。これは、 $E_A$ と $E$ が波立ちを含めた周波数の高い水位変動により変化しているのに対し、 $E_0$ はゆっくりとした長周期の水面全体の変動によるものであり、別の現象の信号であることを示している。

## 4. 洪水時脈動流速の解析

### (1) 流速と水位(電波反射強度)の変動とその周期

流れは脈動により時間的変化をしていると仮定し、その周期性の解析を行った。脈動を示す信号相対値は心電図の整理法に準じ、次式(1-1)で計算したものである。

$$EE = \left( \frac{x_{\Delta t} - x_{\Delta t-1}}{x_{\Delta t}} \right)^b \quad (1-1)$$

但し、 $EE$  : 信号相対値、 $b$  : ピーク明瞭化の係数

図-12 ~ 14は、主流速( $V_x$ )の脈動周期を示したものである。図-15, 16は、電波反射強度(水位)の脈動周期を示したものである。

図中の時間分割線が1マス20secであることより、その脈動周期は4～5secであることが分かる。この事例では、流速5m/secの日野橋地点の方が、流速3m/secの荒川大橋地点よりも脈動現象が不規則的である。

図-17, 18は、Kv値(低流速加比率)の脈動周期を示したものである。この事例では、荒川大橋では、流速と水位の脈動周期に近い周期変動となっているが、日野橋では、相対的にはより周期の短い不規則的脈動周期となっている。こうした2～3秒以上の脈動周期の発生は、平水時には見られず、乱流である事により生じている時間的変動であると考えられるものである。

図-12～18のいずれも、80秒間分の1シーンを示した図であり、より長時間の連続的のデータによるパワースペ

クトル等の解析により、並列螺旋流の解明、2次流発生、乱流維持の挙動解析等に資することが可能であると考えられるものである。

## (2) 水面変動の出現と周期

図-19～21は、Zf信号を脈動周期表示と同様の処理を行って示したものである。主流速(Vx)等の変動に比べて不規則的な出現となっている。図中の事例では、水面変動の発生は80secの観測の間に、栄橋で1回、荒川大橋で2～3回、日野橋で9回の出現となっている。この水面変動は現場での目視観察において、渦と土砂混りの水面上昇とリンクしての現象により出現しているものであり、河床のバースティングやサイクロニック渦等を捉えたものではないかと推察している。

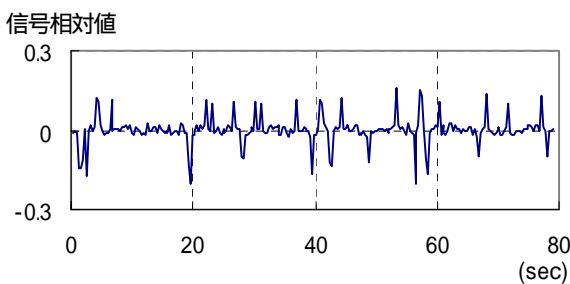


図-12 洪水流の脈動(主流速)(日野橋)

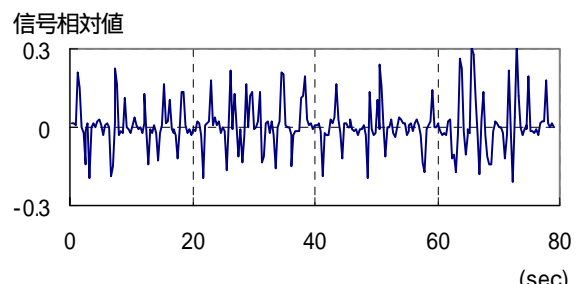


図-16 洪水流の脈動(反射強度)(荒川大橋)

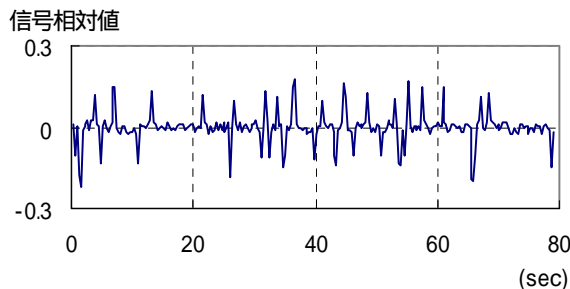


図-13 洪水流の脈動(主流速)(荒川大橋)

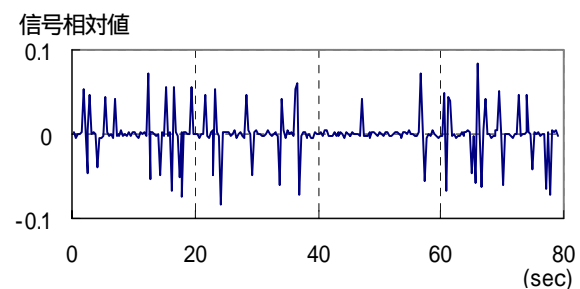


図-17 洪水流の脈動(Kv値)(日野橋)

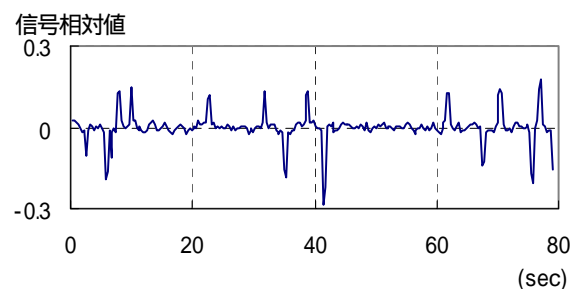


図-14 洪水流の脈動(主流速)(栄橋)

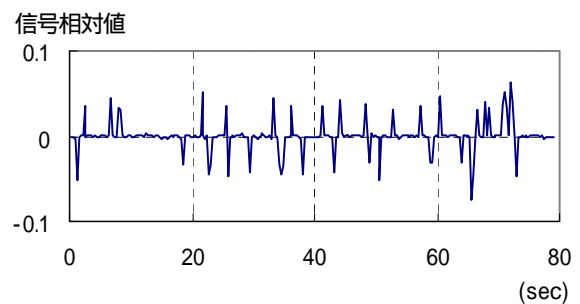


図-18 洪水流の脈動(Kv値)(荒川大橋)

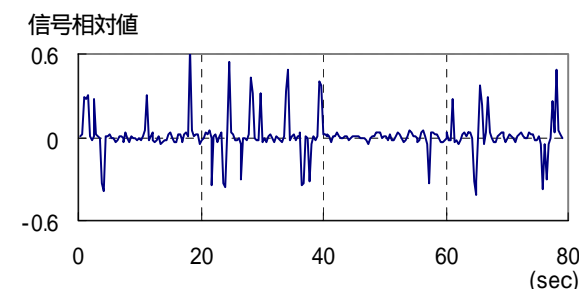


図-15 洪水流の脈動(反射強度)(日野橋)

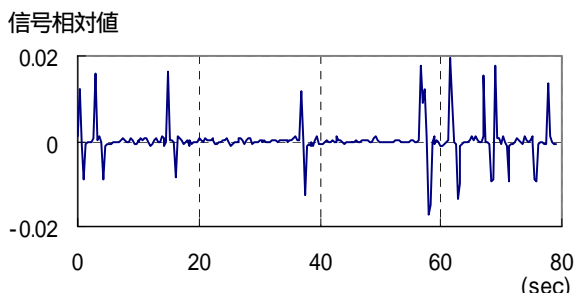


図-19 洪水流による水面変動の出現周期(日野橋)



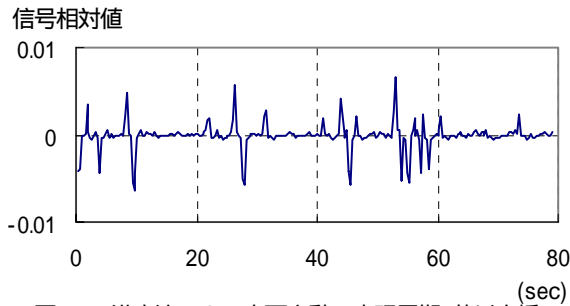


図-20 洪水流による水面変動の出現周期(荒川大橋)

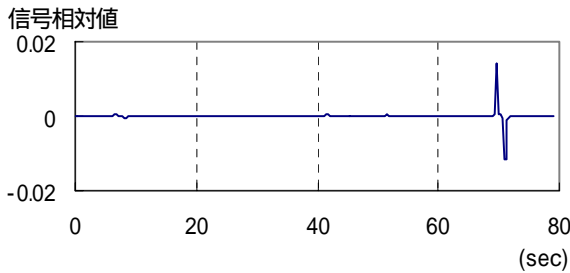


図-21 洪水流による水面変動の出現周期(栄橋)

図-22は、 $Z_f$ 信号に $E_0$ 信号を乗じて表現したものである。すなわち、表面まで到達した水面高変動に電波反射強度を乗じて示したものである。単位は電気信号上のmVとなる。乱流度、河川変動度、流砂量との関係解析や量への変換と接合等は今後の課題であると考えている。

## 5. 結論

電波式流速計を乱流としての洪水流観測に適用できるように改良を行い、実河川での適用性検討としての観測を行った。得られた知見は次の様である。

### (1) 平均流速の算定に必要な時間

0.3sec毎観測による、流速が6m/secレベルの洪水流速における平均流速化処理に必要な時間は、40secでも必ずしも充分でない観測事例も見られた。

### (2) 流速の30sec間分散値の指標化

瞬間流速の計測が可能な流速計をもとにし、平均流速として取扱う場合、洪水時の流速の大きい場合には流速(分散)値を流速(平均)のパラメータとして与えることで、乱流度等のマクロ把握に役立つのではないかと考えられる結果を得た。

### (3) 見かけの2次流比の算定

主流速( $V_x$ )と併せて低流速増分比率を示す係数( $K_v$ )を設定し、2次流の発生・維持の指標とならないかとの仮説に対する実験的観測を行い、一定の成果を得た。可能性が見出されたが、定量化は今後の課題である。

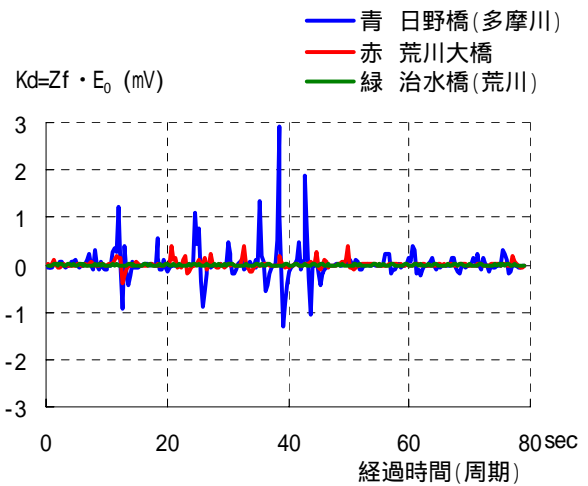


図-22 水面高変動信号レベル

### (4) 超低周波域信号による水面高変動の観測

上昇あるいは下降の速度が0.3～3cm/secのゆっくりとした水面高の変動を観測していると考えられる信号の不規則的出現を観測した。この信号が増加変動する場合は、目視の観察として渦と土砂の湧昇がなされている時に出現する信号であった。河床変動、流砂量等の観測を行う場合の適用が考えられる。

### (5) 洪水流の脈動観測

洪水流の観測においては、主流速( $V_x$ )について個々の地点毎に3～6secを周期とする変動が見られた。電波反射強度(水位)についても $V_x$ と同様に個々の地点毎に3～6secを周期とする脈動周期が見られた。低流速部を減ずる形で観測される値より得られる低流速増分比率( $K_v$ )も同様の脈動周期が観測された。今後、電波式流速計を用いる事により、河川洪水乱流の脈動周期の観測に寄与できるものと考えられる。

謝辞：本研究に使用した電波式流速計の開発及び観測にご協力を頂いた市川雅己氏、飯田友和氏に誌上より改めて御礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 巽友正監修: 乱流現象の科学 - その解明と制御 -, 東京大学出版会, 1986.
- 2) 林俊一郎, 大本照憲: DNSによる継筋河床上の組織的渦構造の研究, 日本計算工学会, 2002, 0010
- 3) 関根正人: 移動床流れの水理学, 共同出版, 2006.
- 4) 山口高志, 新里邦生: 電波流速計による洪水流の観測, 土木学会論文集, -28, pp.41-50, 1994.

(2007. 9. 30受付)