

# ドップラー水象レーダーの開発製作と 河川観測への適用性研究

## DEVELOPMENT OF ROTATING DOPPLER RADAR AND ITS APPLICABILITY, TESTS FOR RIVER FLOW OBSERVATION

幸弘美<sup>1</sup>・斎藤秀晴<sup>2</sup>・丸茂義典<sup>3</sup>・若杉佳功<sup>4</sup>・山口高志<sup>5</sup>

Hiromi YUKI, Hideharu SAITOH, Yoshinori MARUMO, Yoshinori WAKASUGI and Takayuki  
YAMAGUCHI

<sup>1</sup>正会員 工修 東京建設コンサルタント 環境防災部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D 東京建設コンサルタント 環境モニタリング研究所 (〒310-0803 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 東建エンジニアリング (〒170-0004 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

<sup>4</sup>農修 東建エンジニアリング名古屋支社 (〒460-0026 愛知県名古屋市中区伊勢山2-11-3)

<sup>5</sup>名誉会員 工博 (〒277-0863 千葉県柏市豊四季645-14)

Rotating Doppler Radar is developed, rotating, emitting micro-wave to water surface, receiving its reflection echo, and observing velocity distribution, etc.

Outputs of the radar are surface velocity, main flow direction, relative water level, etc. as each address (observation time and reflecting point).

Its applicability test were done in several river fields, and the results are introduced.

**Key Words :** Doppler Radar, micro-wave, surface velocity, main flow direction, relative water level

### 1. はじめに

マイクロ波電磁波を、水面向けて連続的に回転放射し、河川等の流況を観測するレーダーを開発製作した。雨を主な観測対象とする気象レーダーとの区別、ドップラーエコーが主な計測対象である事より、とりあえず「ドップラー水象レーダー」と呼称している。

洪水流観の高度化は勿論の事、それに加えて河道浸食、河床洗掘等による河道地形の変化あるいは横断方向の土砂輸送に大きく影響するとされている大規模組織渦発生起点域の水理現象の解明や計算モデルの作成等に供用可能な観測機器の高度化が要求されている。こうした背景のなか、洪水時等においても実用的かつ安全に使用が出来る事、多測点を同時的にかつ微細時間変化での観測が出来る事を、基本要件として、非接触観測の水象レーダーの開発製作をおこなった。

観測技術による防災力の向上、流量観測の自動化といった課題に、水象レーダーが十分な効果や精度を保持して実用化される為には、標識無線局としてのレーダーの製作、高い位置での回転精度を保証するローテーター、空中線出力が高い発信器等のハード

ウェアの整備に加えて、レーダーエコーと流況観測の関係に関する推定、仮説等の精度確認、再現性チェック等に多くの研究が必要である。またレーダーの実用化は、それなりの長い期間必要である。

それに対して、河川等の任意の地点で、さまざまな流れの場面で、簡便に利用できるレーダーも必要であると考えて、空中線出力を10mWとして、無線局開設の不要化、人力運搬での簡便な利用あるいは車の屋根への搭載が可能な小型軽量化、蓄電池電源で長時間作動化の調査用水象レーダーを製作した。

製作したものは、免許不要（無線局の開設不要）のいわゆる微弱電磁波を用いての、アンテナ回転タイプレーダーである。その為、観測有効範囲が決して充分広いとはいえず、降雨の影響除去も万全ではないが、製作した装置を用いて、実験水路での基礎実験を通じてレーダーエコー（ドップラーエコー）と流況観測との関係を求め、魚野川における合同流量観測を始めとした多くの実河川で試験観測をおこない、河川観測への適用性についての知見を得た。

以下、水象レーダーの性能紹介と適用性検討（その1）の報告である。

### 2. 調査用水象レーダーの構成

水象レーダーは、マイクロ波電磁波を水面に向けて回転放射し、帰ってくる電波を分析することで、水の流れの状態を推定、観測する装置である。原理的には、周波数24GHzのCW電磁波を俯角23°で放射し、流水面で反射、散乱するレーダーエコー（ドップラーエコー）の受信強度、卓越周波数等を計測して、表面流速等の流況を推定、観測する。

### (1) レーダー装置の構成

水象レーダーは、発信モジュール付パラボラアンテナ、データ転送器、ローテーター及び出力表示器（PC）の4種の個別品で構成される。発信モジュールは電波法という技術適合品である。個別品は、別々に梱包輸送が可能であり、現場での結線と組立による利用が可能である。ルーフキャリアのある自動車の屋根への搭載も可能である。

図-1、2がレーダー装置の構成図である。シングルアンテナタイプが標準装置である。面分布の観測が必要な場合は俯角を変えた3アンテナタイプとしての使用する。この場合において、発信モジュール毎の周波数の違いが、変化する周波数偏位量に比べてはるかに大きく、3台並列利用が可能である。

写真-1がその外観である。写真中のパラボラアンテナの径は50cmである。写真の回転棒に取付けているデータ転送器は、蓄電池と近距離信号伝送器を内蔵しており、出力表示器（PC）とは、無線で信号のやり取りがなされる。出力表示器（PC）は離れた場所、たとえば車の中で受信が可能である。

### (2) レーダー装置使用時の選択設定項目

水象レーダーは、アンテナを回転させて使用するのが一般的である。流量観測地点での20秒間平均流速の観測やボイル発生域等の特定地点の微細細時間での観測を行う場合は、アンテナ回転無しでの利用が可能である。俯角は自在に変更可能である。

アンテナ回転利用時で、ユーザーレベルでの観測条件の選択設定項目は、回転方向と回転スピードである。河岸からの観測も考慮して、時計回り回転と

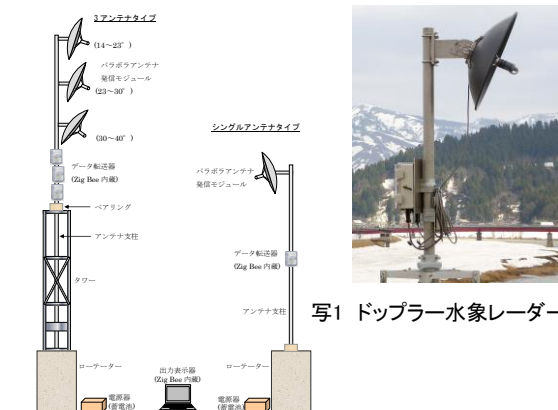


図1 ドップラー水象レーダー構成図

反時計回り回転が選択できる。回転速度は1回転が60～150秒の範囲で設定可能である。1回転6

0秒の回転速度での使用が標準である。ちなみに90秒で1回転の速度で使用すると、アンテナ位置を中心に約0.5度毎の観測密度なる。

### (3) 観測時のリアルタイム観測図の表示

レーダーを回転させながら出力表示器（PC）画面に出力されるのはリアルタイム観測図である。その表示内容は測点位置と、表面流速暫定値（偏角補正前値）である。アンテナを一回転毎にチェックする方位センサーの検知時刻をスタート時刻番地として、その後の回転経過から次のスタート時刻番地までの1回転分データが1単位データである。1単位データのない状態の出力で暫定値の表示である。

観測として流速が十分な精度を保持される有効な偏角範囲は、主流軸の±30～45°の範囲である。

リアルタイム観測図は、流れ方向角度を0°としてその±45°の範囲の出力となっている。

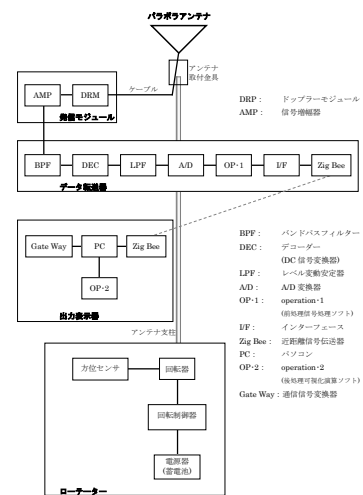


図2 ドップラー水象レーダーのパーツ構成図

## 3. レーダーエコーと流況観測の関係

水象レーダーは俯角をつけて、の電磁波の放射であり、流水面（あるいは地面、RC構造物等）にあたり、反射、散乱したものが、レーダーエコーとして受信している。このレーダーエコーが河川の流速や流況の現象とどのような関係あるかを推定し、キャリブレーションをおこない観測値に変換して出力している。

### (1) 測点位置の推定

測点位置は、指向性の高いパラボラアンテナ付発信器から放射する電波は直進するとして、俯角と偏角からの三角関数による算定をしている。俯角はアンテナの取り付け角度である。上流向き観測と下流向き観測では、放射電磁波の反射、散乱の特性に多少の違いがあり、各々にアンテナ設置俯角に対する補正係数が必要で、それを考慮して算定している。

偏角はローテーターについている方位チェックセ

ンサーの向きを橋と平行に置き（あるいは河岸に直角に置き）相対方位として設定し、ローテーターが定速度回転であることより、方位センサー検知時刻をスタート時刻番地として、角度（偏角）の算定している。相対方位として、方位チェッカーの向きを $-90^\circ$ としている。標準利用においては、1回転 $360^\circ$ を60秒で回転させており、レーダーエコーを約0.125秒毎に計測している。1データ毎の偏角は約 $0.75^\circ$ となる。

以上より横断方向（X軸）縦断方向（Y軸）とした観測測点がX、Y軸平面位置図として算定される。観測測点は円弧状の測点となる。円弧状の測点の半径は、アンテナと対水面間の距離（H）で決まり、上流向き観測では、 $3\sim 3.6$ （H）下流向き観測では $1.8\sim 2.4$ （H）である。

## (2) 水面である事の推定

俯角をつけての $360^\circ$ 全方位の電磁波放射であり。レーダーエコーは地面等の反射によるものもある。流水面の反射、散乱とそうではない場合の識別として、地面や電柱による反射の識別信号を3種出力している。それに対して流れのある水面は、さざ波等の鉛直方向変位があり、地面による反射とは異なる。その特性から算定される水面部識別信号も出力している。水面部識別信号については河岸と流水水面部が入り組んでいる場合、植生繁茂等により不明瞭の場合等は識別誤差の発生となる。ユーザーベースで5段階（通常は中央値の3の設定）に感度選択ができ、当該現場毎に変更をおこない使用する。

## (3) 卓越周波数計測からの表面流速の推定

本レーダーの基本計測内容はドップラーエコーであり、主流速観測のドップラー卓越周波数の計測を行っている。この卓越周波数は流下方向の流速に比例して変動する。電波式流速計もこの原理から表面流速を推定、換算をして観測出力としている。本レーダーも同様の算定を流速を算定している。

## (4) 対水面間距離の推定

レーダーエコーの広帯域信号強度を計測している。この信号強度は相対値電圧出力であるが、水面域の観測時は、反射物特性が常に広い水面からの反射、散乱のみであることより、対水面間距離と反比例関係になる。水面高との関係は、当該現場毎に式形と係数の設定が必要である。水位観測ではなく、目安の水面高(相対値)の観測である。

## (5) さざ波等の鉛直方向流れの推定

流水には鉛直方向の水の動きがあり、レーダーエコーはこの現象にも反応する。地面の反射とは異なる。この特性より鉛直方向流を推定している。鉛直方向流れは、さざ波と水面全体の湧昇下降の二つの現象があると仮定している。この現象に対するレーダーエコーの変化は、周波数偏位が非常に少ない領

域の変化として出現する。後者は周期が数秒である変化として出現する。

アンテナを固定しての観測時には有効な観測項目である。アンテナ回転時は横断方向観測であるが、時系列変化の観測でもあるとして、当該回転時有効観測値の平均値からの変動差としての表示している。

## (6) 主流角度の推定

上流向きの観測においては、卓越周波数（流速）、信号強度（対水面間距離）及び偏角をパラメータとする主流角度推定モデルを作成して、この値の最大値が主流角度であるとしている。モデルは精度向上の改良を進めている。主流角度は断面直交流速の算定に必要な観測項目である。

主流角度は、橋スキューがある場合は、流れは河道に沿って直角流れていても、スキューの角度が常に出力される性格の値である。下流向き観測では、現状モデルでは十分な精度での推定が困難である。

表1 水象レーダーの観測出力項目

観測出力項目	記号	単位	摘要
観測時刻			
偏角	Kθ	( $^\circ$ )	
測点位置(横断方向)	Xa	(m)	基点からの距離
測点位置(縦断方向)	Ya	(m)	基点からの距離
水面部識別値	SK	(-)	水面である判別値
表面流速	Vs	(m/sec)	
断面直交流速	Vx	(m/sec)	
水面高信号値	Sh	(mV) <sup>1/3</sup>	
波信号偏差値	Sm	(-)	平均値とその偏差
主流角度識別値	Sfa	(-)	最大値角度が主流角度

## 4. 水象レーダーの観測出力

水象レーダーの観測出力データは次のようである。

### (1) 観測時のリアルタイムで出力

レーダーを回転しながらリアルタイムで出力表示器（PC）の画面に見えるデータは、測点平面位置と表面流速（偏角補正前暫定値）出力から作成される図である。記録はされない。

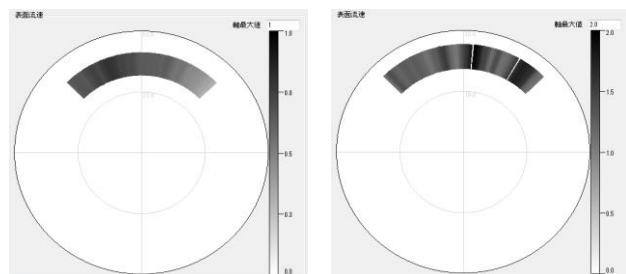


図3 リアルタイム出力例(愛岐大橋) 図4 リアルタイム出力例(根小屋橋)

### (2) 観測出力

観測出力は、1回転毎（標準利用では1分毎）の観測有効範囲のデータが、観測時刻と測点位置を番地としたデータベースとして作成される。観測有効範囲とは、偏角が $\pm 45^\circ$ 以内でかつ水面部識別の

観測がなされていた場合の回転角度範囲の出力である。その観測出力項目を表-1に示す。

その他のデータベース出力として、レーダー観測基点を河道中央部として360°全方位観測、多様な観測出力項目の研究、ビジュアルあるいは動画表現等の高度なソフト作成のための開発用の「アカデミックデータベース」出力がある。全パラメータ出力であり、一般の観測出力とは区別している。

## 5. 実河川での観測を通じての適用性のまとめ

製作した水象レーダーを用いて、融雪出水時の信濃川（旭橋）、魚野川（根小屋橋）及び平水時の木曾川（愛岐大橋）、矢作川（岩津大橋）、多摩川（日野橋）において、装置の改造、レーダーエコーの分析及び適用性検討を目的とした試験観測を行った。第一の課題はどの程度の距離まで放射電磁波が到達し、有効なレーダーエコーが受信できるかといった問題であり、橋から水面までの距離が大きい橋を選んで試験観測地点とした。

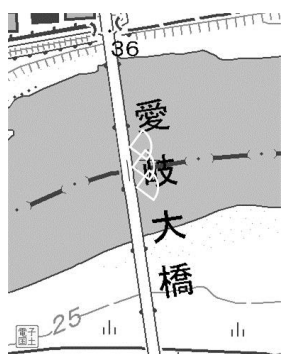


図5 愛岐大橋測線位置図

精度検証の流速の観測は、写-2に示す曳航式水深流速計（橋から下流の十数m測線での観測、観測範囲は表面から約0.5m水深までの平均流速の観測）及び橋上からゾンデを水中におろして使用する超音波式流速計（橋下流直下測線での観測、観測水深は表面から約0.25m水深で観測）を用いて行った。水象レーダーの観測は上流向け観測が基本であるのに対して、



写2 曳航式水深流速計

流速の検証観測はいずれも下流側での観測である。平水時の3地点観測は橋の上下流での差が目視であるが極力少ない地点を選定して観測を行った。

### (1) 平水時でも数十m範囲の観測が可能

矢作川（岩津大橋）の橋からの水面までの高さは約1.6m、木曾川（愛岐大橋）の橋から水面までの高さは約1.5.6mである。橋からアンテナまでの高さが約2mあり、対水面間距離は約1.8mの観測である。流速が0.3~0.4m/sで波がほとんどない岩津大橋地点の観測、流速が0.7~1.0m/sの愛岐大橋地点の観測においても、水象レーダーによる上流域の横断表面流速分布の観測が

可能であった、表面流速観測値は検証観測値と概ね一致した。レーダーエコーの受信強度も、観測限界レベルではなく、中レベルでの観測が可能であった。

レーダーエコーは、流速が早いほど、波があるほど反射、散乱が大きくなる。水象レーダーとしては遠くまでの距離の観測が可能になる。波の無い平水時でも、水面までの高さが約1.8mの地点で、円弧状測点半径が約5.4~6.5m（有効偏角を30°では横断観測巾は5.4~6.5m）の観測が出来た。

愛岐大橋は大型車両の交通による橋の大きな揺れがあり、橋のスパンの中央部での観測では、その影響により、その影響のばらつきがみられた。左岸より、右岸よりの観測では影響ほとんどなかった。

### (2) 幅広い河川では複数の観測基点が必要

融雪出水時の信濃川（旭橋）の下流域流水巾は約150m（上流は約100m）あり、橋の上から、アンテナから水面までの高さが約1.5mでの観測においては、水象レーダーの観測基点が1地点では全流水幅の横断観測が困難であった。上流向け観測では、観測基点を3地点に、下流向け観測では観測基点を7地点にして観測した。橋から水面までの高さが約8mの魚野川（根小屋橋）でも同様の問題があり、上流向け観測、下流向け観測のいずれも観測基点を4地点として観測した。出水時の観測であり、両地点ともレーダーエコーの受信強度は安定して高く、アンテナを高くすることで観測基点数を減らす観測が出来ると考えられる。流水巾の広い大きな河川の横断観測には工夫等が必要な課題であると考えている。

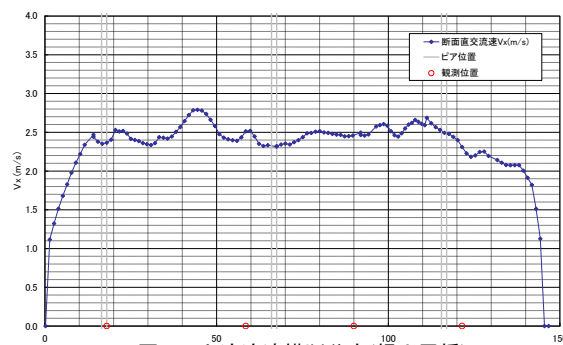


図6 上流流速横断分布(根小屋橋)

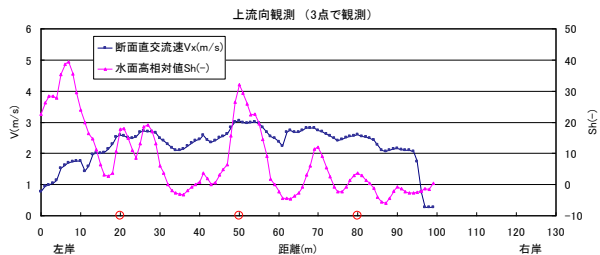


図7 横断流速分布(上流向)の観測結果(旭橋)

観測基点が複数になると同一測点に複数の観測結果の出現となり、その処理が必要であった。



(3) 測点毎1分毎データの蓄積と変化率の観測

水象レーダーは、横断方向80～120測点の1分毎のデータが集積される。その流速観測安定度チェックとして流速が0.7～1.0m/sの平水時愛岐大橋地点で流心、回転速度を72秒1回転として30回(36分)連続回転によるデータを収集し、測点毎の表面流速のばらつきを試験観測した。その変動係数は3～6%の範囲であり、平水時観測におけるレーダーでの表面流速観測値は、固定式の電波式流速計の変動係数と同水準であった。

レーダーは一般的に前回観測値(ここでは1分前データ)と比較の変化率としての出力が有効であり、こうした観測を可能とするものである。

(4) 1分毎データは水面高(相対値)も観測

水象レーダーは、表面流速と同時に相対値であるが、水面高(アンテナからの対水面間距離)も観測、蓄積される。H-V関係図観測などへの応用も考えられる。

(5) 1回転毎の主流角度等の観測

レーダーの1回転(60秒)毎のデータが出力される。その内容は主流角度、表面流速、相対水面高さ、波度合い等の平均、偏差等の観測である。

(6) 橋梁ピアの後流域の観測

信濃川(旭橋)では、橋梁ピアに対して斜め上流から流れ、後流域の流速分布変化は、複雑であり、長く下流まで尾を引く状態になる。後流域のこうした状態の観測が可能であり、課題の対応が出来る。

(7) 河岸からの観測

水象レーダーは、かならずしも橋上からの観測では無く、橋の無い場所での観測が出来ることが特徴の一つである。信濃川、魚野川等の河岸から試験観測から、河岸からの観測は、十分なアンテナの高さが必要であることが明確になった。精度よく、流心までの観測をおこなうためには、河岸の水面に近接したところに、仮設のタワー等をたて、水面からの距離を10～20m以上にする事が必要である。川岸まで数十mの高水敷のある堤防の上からの観測は、微弱電波利用の調査用レーダーでの摘要は困難である。例であるが、魚野川根小屋橋の水位観測塔はロケーションがよく、ここに6～10mの高さのアンテナをつければ横断観測可能性が考えられる。

(8) 上流向き・下流向きの観測

水象レーダーを、1車線の幅の狭い橋、水位観測塔、木橋等を観測基点としての観測時は、レーダーの360°回転による、上流と下流の同時観測が可能である。一方巾の広い橋からの観測の場合は、上流向き観測か、下流向き観測課の選択が必要になる。この場合において、信濃川(旭橋)、多摩川(日野

橋)等では、橋の上流と下流では流水の中をはじめとして流況は全く異なり、別の河川を想像させる状態である。魚野川(根小屋橋)においても、上流と下流では流況が異なった。その他の河川においても、橋梁ピアの影響等で上流と下流では流況が大きく異なる地点が多く、観測値が一致しない。レーダーによる繰り返し観測を行った結果、上流向き観測の方が統計可能資料になる率ははるかに高い。橋梁ピアが多く、河床は全面床固め工の多摩川(日野橋)の下流では、平水時でも全面的に乱れた流れで、1分毎繰り返しのレーダーによる流速分布観測においても、簡単な平均化算定も難しく、精度のよい横断流速分布観測は非常に困難であった。

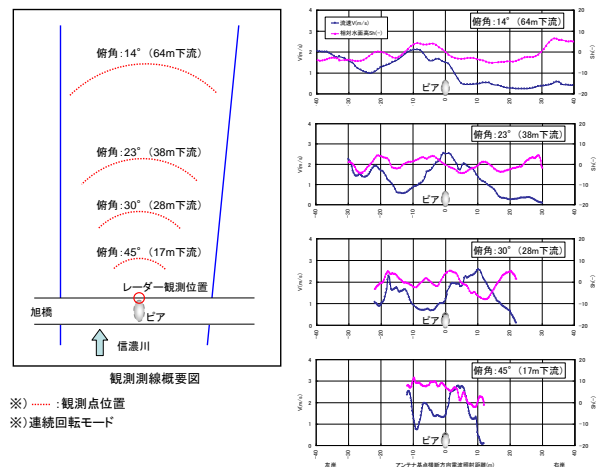


図8 橋脚後流域の観測結果(旭橋)

(9) 非回転の定点観測

アンテナを回転させないで、微細時間(0.2秒)毎の観測をすることで、図のような観測結果が得られる。河床の変動がないRC河床の流れと、河床が土砂の場合では、鉛直方向流の変化を含めた表面流速の詳細観測の特性の違い等の観測が可能になる。

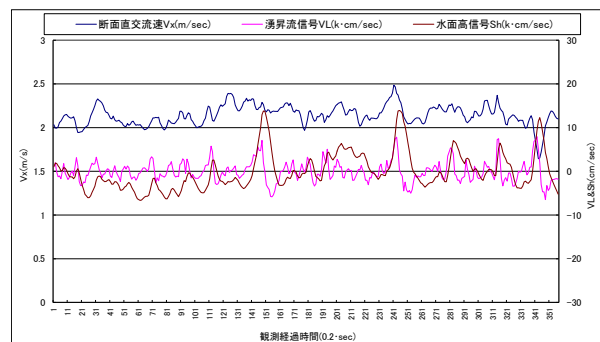


図9 3面張り水路での観測出力例(アンテナ非回転・俯角23°)

(10) まとめ

水象レーダーの適用性検討として、とりあえず性能紹介を中心としてのその要点を示した。本報告で十分な内容の報告となっていない、河川技術としての報告は、(その2、続報)としての報告準備を進

めている。

本研究は、ハードウェアの開発の面もあり、供用性の向上としての装置の改良改造、実用性の向上としての精度の向上、出力項目の多様化、利便性の向上としての車の屋根への搭載等も進めている。

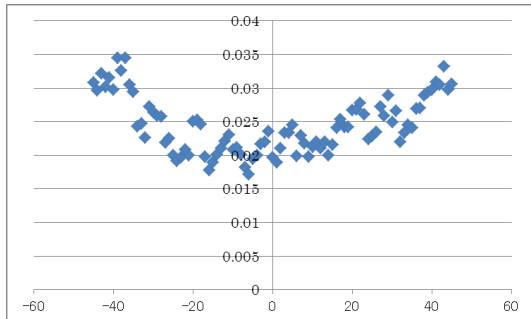


図10 観測点毎流速偏差(流速約1m)

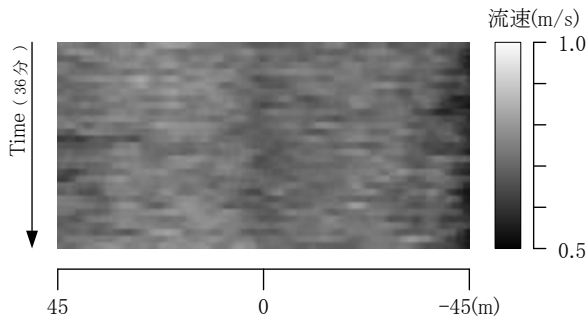


図11 表面流速変化(愛岐大橋)

## 6. 結論

微弱電波によるマイクロ波CW電磁波の回転放射タイプの調査用ドップラー水象レーダーを開発製作し、実河川における試験観測を通じて、河川の流れの観測への適用について、以下の様な知見、見解及び成果を得た。

### (1) 実用性と安全

作業性は簡便である。車の屋根にのせれば、極論であるが、一人でも観測作業が可能である。安全についても、橋の上あるいは河岸から、洪水流に非接触の供用であり、危険度は低い。蓄電池で長時間作動し、観測出力は、データベースとして汎用使用のPCに転送される。無線局の開設も不要であり、製品分類は汎用の水文観測機器レベルであり、充分実用的であり、かつ安全である。

### (2) 観測可能範囲について

微弱電波の利用のレーダーであり、観測可能範囲(距離)がもつとも懸念される事項であるが、アンテナと対水面間距離が15~20mの橋の上から、流速が小さく、波も少ない、平水時河川においても観測可能である多くの事例が得られた。出水により、流速がより大きく、波立ちのある場合は、レーダー

の観測範囲は広がる側の特性がある。

観測測点は、上流向け観測では、アンテナ対の高さからの対水面間距離(H)の3~3.6(H)の半径での円弧状測点となる。流下方向を0°として±30~45°の角度範囲が観測有効範囲である。

横断観測範囲巾は1~1.4(H)である。

### (3) 観測出力項目と精度

観測有効範囲の観測流速(偏角補正前)、表面流速、断面直交表面流速、相対水面高、水面部識別信号値がアンテナ方位角度0.5~0.75°の分布として、1回転速度毎(標準は60秒毎)に観測記録される。

1回転毎に1データとしての出力データは、主流角度、および上記項目の平均値、偏差等が観測記録される。参考観測出力であるが流水水面巾も観測される。表面流速の観測精度は、固定式の電波式流速計の変動係数と同レベルである。

### (4) 降雨および其他要因による精度低下

2.4GHzの電磁波利用であり、降雨の影響を受ける。影響度は観測対象河川の流況(レーダーエコーの強さと)と降雨による電磁波の散乱、反射との競争として影響度であり、出現が異なる。電磁波発信モジュールに直接豪雨が当たる状態では、精度低下が大きい。風によるアンテナの揺れ、スパンの長い橋の低周波振動は、影響を受ける。風による表面流の影響は、流速が小さい場合は誤差原因になる。

## 謝辞

水象レーダー開発に、多大のお知恵をいただいた新里邦生氏に感謝を申し上げます。河川乱流観測の要点について御指導をいただいた木下良作博士に感謝を申し上げます。また長い期間、実験観測と装置開発に御協力いただいた中島さん、中澤さん、多田さん、牧野さん、飯田さんに誌面を借りて改めて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流量観測、土木学会論文集、No497/2-28 1994
- 2) 山口高志、斎藤秀晴、森修一、森田正人、岩本理恵：電波式流速計による河川脈動流の観測、水工学論文集 52巻、2008.2
- 3) 木下良作：河川流量と流れの構造、— ADCPによる観測報告— 土木研究所での講演会、2002
- 4) 山田正：Common MPプロジェクトの進展と今後の河川流量観測の重要性、「河川流量観測新時代」Vol 1 2010
- 5) 山口高志、新里邦生、斎藤秀晴：流水がななめ上流からあたる場合の橋梁ピア後流域特性：「河川流量観測の新時代」Vol 3,201

(2014. 2. 10受付)