

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310136

研究課題名(和文) 河川観測レーダによる河川水位予測システムに関する研究

研究課題名(英文) Development of River Water Level Prediction System using Microwave Pulse Doppler Radar

研究代表者

林 昌奎 (Rheem, Chang-Kyu)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：70272515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：河川に関する防災情報を充実させるためには、設置が容易な機器を用いて密な観測網を構築することが重要である。これを実現するために、本研究では、河川水位および河川流量をリアルタイムで観測可能な河川観測レーダの開発を行った。レーダの利点は離れた位置から河川観測が行えることであり、今後、実用化に向けてシステムの小型化と低コスト化を進めていく予定である。

研究成果の概要(英文)：In order to provide high quality disaster information for rivers, building dense monitoring networks using easy to install equipment is important. This research addresses these needs by development of a river monitoring radar system to provide real time observation of river level and discharge. The major advantage of radar is the ability to monitor rivers from a distance. Work is planned on reducing size and cost as a step towards deployment.

研究分野：工学

キーワード：水災害 減災 洪水 レーダ リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

堤防やダム等の土木技術の発達にも関わらず、河川氾濫による水害は後を絶たない。地球温暖化に伴う台風の強大化も懸念されることから、今後より一層洪水対策を強化していく必要がある。災害対策の基本はハードとソフトを組み合わせることで被害を最小化することであり、ソフト対策としては河川水位の情報が重要になる。あらかじめ河川水位を予測できれば、迅速かつ確かな水防活動が可能となる。これまでの河川水位予測に関する研究は数値予測手法の改良が主流であり、観測技術そのものを改良する試みはほとんどなされていない。河川に関する防災情報を充実させるためには、設置が容易な機器を用いて、密な観測網を構築することが重要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、河川水位および河川流量をリアルタイムで観測可能な河川観測レーダを開発し、そのデータを河川水位予測に活用することを目的とする。従来の河川水位予測に関する研究は計算技術の改良が主流であったが、入力データである予測降雨量にも誤差が含まれるため数値モデルのみによる予測には限界がある。そこで、本研究では、観測技術の改良に主眼を置き、設置が容易な機器を密に配置することで予測精度の向上を目指す。本研究で開発する河川観測レーダは以下の特徴を有する。

- ・リアルタイムで観測が可能
- ・設置やメンテナンスが容易
- ・リモートセンシングであるため、流下物等により機器が破損する恐れがない。

河川観測レーダによる多点観測のデータを集積し、水系全体の河川水位予測システムを構築することが、本研究の最終的な目標である。

3. 研究の方法

レーダによる河川水位および河川流量の観測を実現するために、本研究では以下の検討を行った。

- (1) 観測アルゴリズムの検討
- (2) 既往レーダデータによる検討
- (3) 河川観測レーダの開発
- (4) 河川観測レーダによる現地観測

(1)ではレーダの理論を基に河川水位および河川流量を観測するアルゴリズムについて検討を行った。(2)では既往レーダデータを用いてアルゴリズムの適用性について検討を行った。(3)では河川観測レーダを設計し、実際に開発を行った。(4)では開発した河川観測レーダで現地観測を行い、レーダデータの解析を行った。

4. 研究成果

(1) 観測アルゴリズムの検討

水位の観測アルゴリズム

海洋における潮位観測については、すでにアルゴリズムが構築されており、河川水位についてもこれを適用することが考えられる。潮位の観測アルゴリズムはアンテナパターンを利用する方法である。アンテナから送受信される電力は正面方向が最も強く、そこから外れるほど弱くなる(図-1)。この特性を利用した潮位の観測原理を図-2に示す。潮位が変動すると、アンテナから水面までの距離が変化し、受信電力の空間分布が変動する。図-2において、水位が“Level1”の場合、受信電力が現れる計測点はS1からS8であり、ピークはS3とS4の間にある。水位が“Level1”から“Level2”に下がると、受信電力分布が現れる計測点はS3からS10に変わり、ピークはS5とS6の間になる。この原理を逆に利用することにより、受信電力分布から潮位が推定される。

河川水位についても潮位の観測アルゴリズムを適用することが考えられ、観測条件が良ければ理論と同様の受信電力分布が得られる。しかし、後述のようにアンテナから水面までの距離が離れると、ノイズの影響が大きくなり、受信電力分布から水位を推定することが困難な場合がある。そこで、別の観測方法についても検討を行った。一般に受信電力分布は次のレーダ方程式で表される。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad \text{(式-1)}$$

ここで、 $P_r$ は受信電力、 $P_t$ は送信電力、 $G$ は

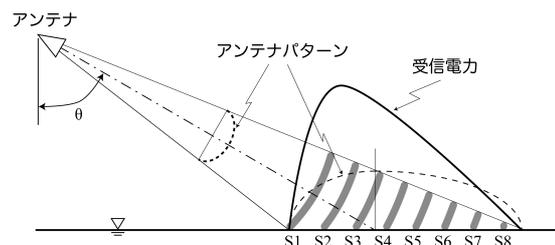


図-1 アンテナパターン

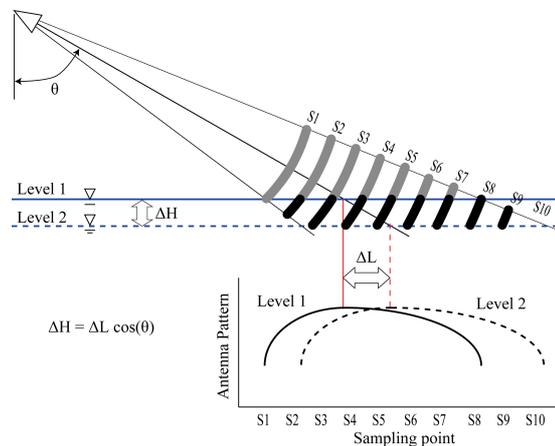


図-2 潮位の観測原理(この方法を河川水位に応用)

アンテナゲイン、 $\lambda$  は電磁波の波長、 $\sigma$  は散乱断面積、 $R$  はアンテナから水面までの距離である。したがって、アンテナ正面方向の相対的な受信電力  $P_r$  は次のように距離  $R$  のみの関数となる。

$$P_r \propto \frac{1}{R^4} \quad (\text{式-2})$$

(4)の現地観測では、(式-2)の関係も使って検討を行った。

#### 流量の観測アルゴリズム

散乱体が移動している場合、そこから散乱された電磁波はドップラー効果により周波数が変化する。したがって、水面で散乱された電磁波の周波数変化を計測することで水面の速度を求めることができる。

散乱体の視線方向の速度(遠ざかる方向が正)を  $V_s$  とすると、ドップラー効果による周波数変化  $f_d$  は次式で表される。

$$f_d = \frac{2V_s}{c} f_0 \quad (\text{式-3})$$

ここで、 $c$  は光速、 $f_0$  は送信周波数である。 $V_s$  は視線方向の速度であるから、次のように流下方向の水平流速  $V$  に換算される。

$$V = \frac{V_s}{\sin \theta \cos \phi} \quad (\text{式-4})$$

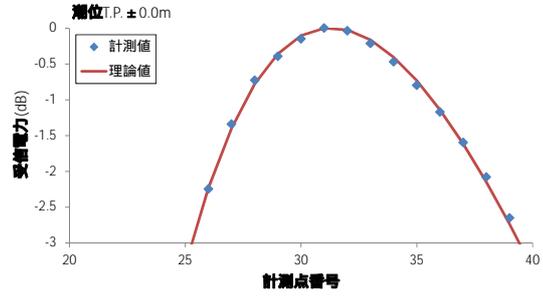
ここで、 $\theta$  は入射角、 $\phi$  は流下方向に対する方位角である。(式-3)、(式-4)より流下方向の流速  $V$  が次式で求められる。

$$V = \frac{c}{2 \sin \theta \cos \phi} \frac{f_d}{f_0} \quad (\text{式-5})$$

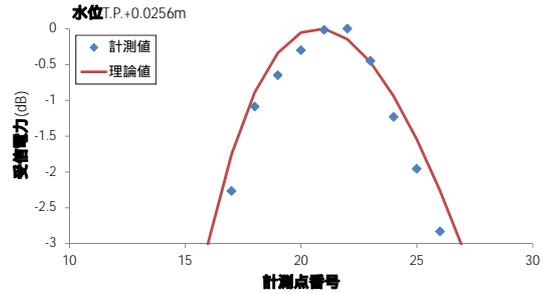
ただし、(式-5)で求められるのは水面での流速であるため、平均流速より大きく見積もる可能性がある。

#### (2) 既往レーダデータによる検討

既往レーダデータを用いて、観測アルゴリズムの適用性について検討を行った。このデータは海洋観測用のレーダにより試験的に取得したデータであり、縦 600mm × 横 1500mm の大型のアンテナを使用している。アンテナパターンを利用したアルゴリズムを適用するには、理論と同様の受信電力分布が得られる必要がある。図-3(a)は海洋で観測した受信電力分布であるが、計測値と理論値が一致していることがわかる。海洋では、無風時を除けば、ほぼ理論通りの受信電力分布が得られるため、アンテナパターンを利用したアルゴリズムにより潮位の推定が可能である。同様に、図-3(b)は水門上から河川を観測した場合の受信電力分布である。このときも計測値と理論値で概ね一致した結果が得られている。しかし、河川の場合、海洋に比べて受信電力が不安定であり、理論とかけ離れた受信電力分布となる場合も多い。その原因としては、河川の場合、海洋と違って堤防等の存



(a) 観測タワーからの海洋観測データ



(b) 水門上からの河川観測データ

図-3 既往レーダデータの受信電力分布

在により、水面への風の影響が不均一であるためと考えられる。特に受信レベルが低い場合には、相対的にノイズの影響が大きくなり、アンテナパターンを利用したアルゴリズムの適用が困難になる。

#### (3) 河川観測レーダの開発

河川観測を行うためのレーダの開発を行った。図-4に河川観測レーダの系統図、図-5に開発した河川観測レーダの写真を示す。

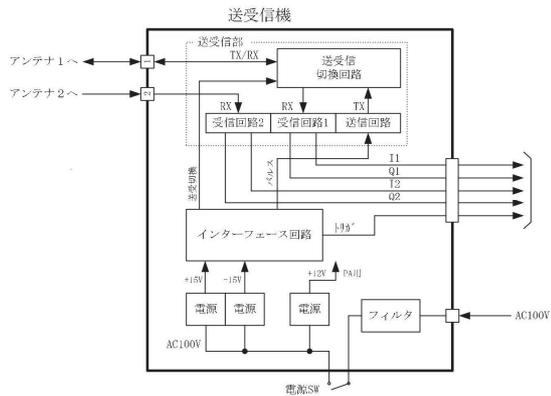


図-4 河川観測レーダの系統図

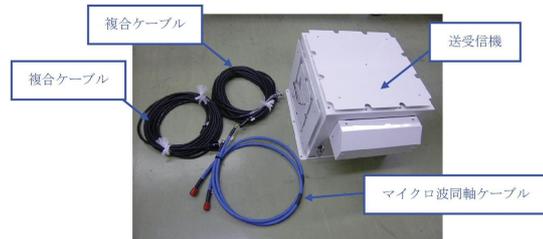


図-5 開発した河川観測レーダ

表-1 河川観測レーダの主な仕様

送信周波数	9600 ± 100MHz
送信ピーク電力	200mW 以上
最小受信感度	-90dBm 以下
送信パルス幅	40 ~ 120ns
パルス繰返し周波数	4000Hz

表-1 に河川観測レーダの主な仕様を示す。本装置は、9.6GHz 帯のマイクロ波パルスドップラーレーダ送受信機であり、2 方向を走査するために2基のアンテナを時間的に切り替えるシステムになっている。装置からは I/Q 信号が電圧値 (-2.5 ~ +2.5V) として出力されるようになっており、信号処理を行うことで受信電力や周波数変化の情報を取得することができる。

(4)河川観測レーダによる現地観測  
観測方法

開発した河川観測レーダを用いて現地観測を行った。レーダの設置位置としては、河川に近い建物の屋上で、かつ、電気を使用できることが条件となる。このような観点から相模川河口付近にある馬入ポンプ場屋上を設置位置として選定した。現地観測位置を図-6 に示す。観測中心点までの距離は 250m であり、レーダ観測には厳しい条件といえる。観測方向は河川の横断方向(観測方向 1)とそこから 30° 上流側に振った方向(観測方向 2)の2方向とした。レーダは図-7 に示すように、H 型鋼で形成した土台(重量約 280kgf)の上に取り付けた。使用したアンテナは直径 616mm のパラボラアンテナであり、ビーム幅は約 3.8° である。観測の設定を表-2 に示す。サンプリング周波数は 60MHz であり、これは空間分解能 2.5m に対応する。馬入ポンプ場屋上の高さは TP+19.3m であり、土台の接地面から上部アンテナの中心までの高さが 1.64m であるから、上部アンテナの高さは TP+20.9m となる。同様に、土台の接地面から下部アンテナの中心までの高さは 0.87m であるから、下部アンテナの高さは TP+20.2m となる。

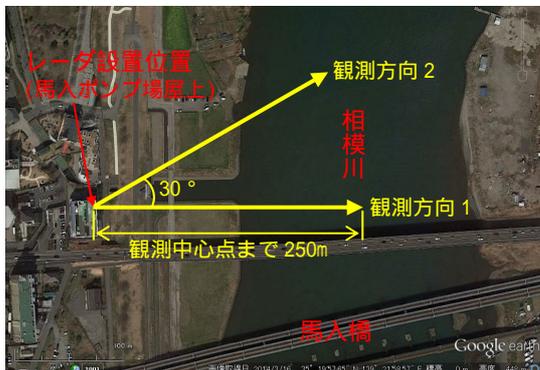


図-6 現地観測位置



図-7 レーダ設置状況

表-2 相模川における観測の設定

送信パルス幅	80ns
サンプリング周波数	60MHz
トリガ遅れ時間	$1.9 \times 10^{-6}s$
計測点数	100
計測中心点番号	50
上部アンテナ高さ	TP+20.9m
下部アンテナ高さ	TP+20.2m

観測結果

相模川で観測された受信電力分布の一例を図-8 に示す。相模川での受信電力分布は分布範囲が狭く、理論とは異なる結果となった。その原因としては、観測距離が長く、受信レベルが低いためと考えられる。このような受信電力分布に対して、アンテナパターンを利用したアルゴリズムを適用することは困難である。そこで、受信電力の最大値を使って水位を推定する方法を考案した。受信電力の最大値はアンテナ正面方向で生じると考えられ、その大きさは(式-2)のようにアンテナから水面までの距離のみの関数となる。アンテナから水面までの距離は水位に関係するから、逆の手順で受信電力の最大値から水位を推定できると考えられる。本研究では、水位基準面(TP ± 0.0m)における最大受信電力を基準とし、各時刻の最大受信電力との比から水位を推定した。この方法は簡便ではあるが、アンテナパターンを利用したアルゴリズムとは異なり、経験的なパラメータを含むため、キャリブレーションが必要になる。

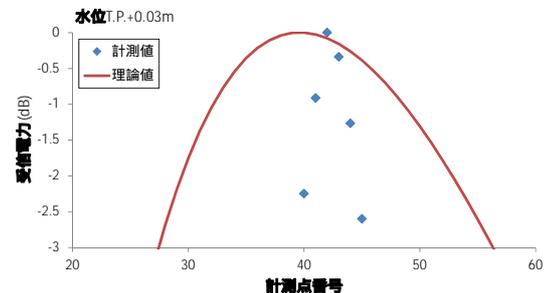


図-8 現地観測で得られた受信電力分布

新しい方法で水位を算出し、馬入橋における水位計の観測結果との比較を行った。図-9は観測方向 1 のケースの水位の比較である。参考にこのときの風速・風向を図-10に示す。図-9の水位変化を見ると、観測位置が河口付近の感潮域であるため、潮位の影響が顕著に現れていることがわかる。馬入橋の観測結果とレーダの観測結果を比べると、レーダの観測結果はばらついてはいるが、概ね水位変化を追従できている。250m離れた位置からリモートセンシングで水位を観測できることは、他の観測機器にはない大きな利点といえる。観測方向 2 のケースの水位の比較を図-11に示す。図-12はこのときの風速・風向の変化である。観測方向 2 のケースでも水位が高いときは従来の水位計と同様な結果が得られている。しかし、水位があるレベルより低くなると、レーダではそれ以下の水位低下を検知できなかった。これは水位が低くなったことで、レーダの受信レベルが低下し、ノイズと同程度になってしまったためと考えられる。観測方向 2 のケースでは全体的に受信レベルが小さく、周波数変調については有効なデー

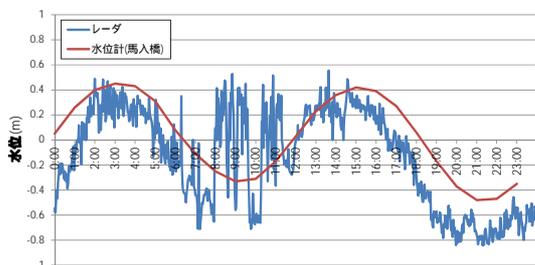
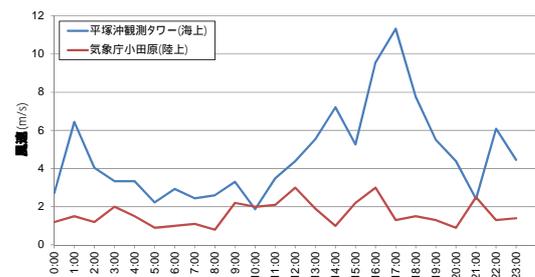
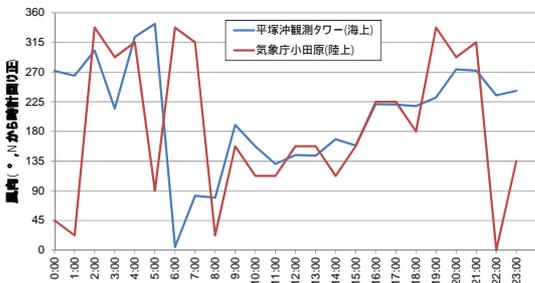


図-9 水位観測結果の比較  
(観測方向 1 のケース)



(a) 風速



(b) 風向

図-10 現地観測時の風速・風向  
(観測方向 1 のケース)

タが得られなかった。レーダ観測における最大の障害はノイズであり、観測距離が長くなるほどその影響は大きくなる。今回の観測は観測距離が長かったため、観測されたレーダ信号は全体的に不安定であった。レーダの SN 比を向上させるか、設置方法を工夫すれば、より安定的な観測が可能と考えられる。

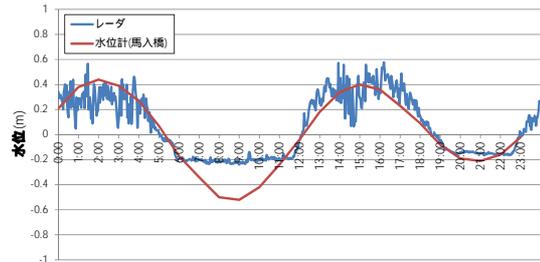
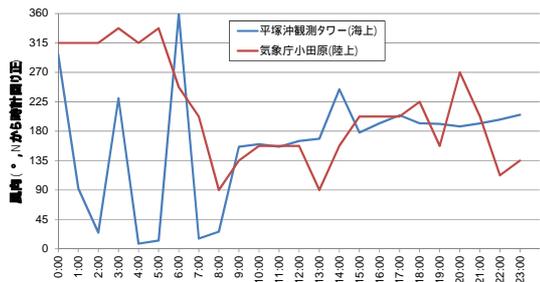


図-11 水位観測結果の比較  
(観測方向 2 のケース)



(a) 風速



(b) 風向

図-12 現地観測時の風速・風向  
(観測方向 2 のケース)

### (5) 今後の課題

本研究では、河川情報をリアルタイムで観測可能なレーダの開発を行った。また、最大受信電力から水位を推定する新しい観測アルゴリズムを考案し、受信レベルが高い場合には、従来の水位計と同等の結果が得られることが確認された。しかし、今回の現地観測は、レーダ設置位置の制約から観測距離が長くなってしまったため、安定的なレーダ信号が得られず、河川水位予測までには至らなかった。安定的なレーダ信号を取得するための方法としては、次の 2 つが考えられる。

- ・レーダの SN 比を向上させる。
- ・観測距離を短くする。

SN比の高いレーダはコスト増になるため、密な河川観測網を構築するという本研究の趣旨に添わない。そこで、実用化にあたっては、コンクリートポールと組み合わせたコンパクトなレーダシステムとすることを考えている。このようなレーダシステムを堤防上に設置すれば、観測距離が短いため、SN比が低いレーダでも安定的な観測が可能と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔その他〕

平成27年3月23日に開催された第8回平塚市産業活性化セミナーにてレーダ観測の紹介を行った。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 昌奎 (RHEEM, Chang-Kyu)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号：70272515

### (2) 連携研究者

小林 豪毅 (KOBAYASHI, Hidetaka)  
東京大学・生産技術研究所・特任研究員  
研究者番号：50621695

### (3) 連携研究者

永田 隆一 (NAGATA, Ryuichi)  
東京大学・生産技術研究所・特任研究員  
研究者番号：00639809