

建設現場におけるミリ波レーダーを用いた 浸水検知に関する実験的検討

大野 剛^{*1}・飯村 浩太郎^{*1}・林 俊光^{*2}・岩崎 孝夫^{*3}

Keywords : millimeter-wave radar systems, flood detection, reflective intensity, construction site, safety management

ミリ波レーダー, 浸水検知, 反射強度, 建設現場, 安全管理

1. はじめに

近年, 地球温暖化に伴う気候変動に伴い, 豪雨災害が激甚化, 頻発化している。例えば, 長時間にわたる豪雨や線状降水帯に伴い河川流量が増大し, 河川堤防の越水や決壊により発生する外水氾濫や, 雨水や下水道の排水能力を超える集中豪雨により発生する内水氾濫等が挙げられる。豪雨災害への対策として, 氾濫や浸水を検知する技術があり, カメラによる映像監視¹⁾や, ワンコイン浸水センサによる浸水検知の実証実験²⁾が進められている。

建設工事における豪雨災害では, 例えば大雨により敷地全体に大量の雨が流入し資機材等が冠水, 流出する場合がある。対策として写真-1 (a) のような建設現場内に一時的に雨水を貯水する調整池, 沈砂池や, 調整池に雨水を集水するための仮排水路 (写真-1 (b)) がある。また想定を超える豪雨に対しては, 建設現場

外への濁水の流出が懸念されるため, 建設現場の敷地境界への土嚢の設置や, 調整池の貯水量を減らして豪雨に備える。実際に豪雨が想定される場合は, 工事関係者による巡視を行うが, 暴風雨や視認性が悪い夜間は転倒や流出等の二次被害の発生にも注意することが安全管理の面でも重要となる。

このように建設現場で豪雨災害を未然に防ぎ, 二次被害の防止等の安全管理に配慮するには, 調整池の水位上昇や排水路や土嚢設置場所の浸水状況を監視する必要がある, 浸水検知装置の活用が有効である。実際の建設現場では検知装置の設置場所や期間に制約が生じ, 頻繁に設置場所を変更することを余儀なくされることがある。また, 検知装置を常時, 屋外に設置する場合, 暴風雨下や夜間であっても検知できることが必要である。以上から, 検知装置は移動, 設置が容易な可搬性を有すること, 悪天候時や夜間に対してロバスト性が高いことが求められる。これらの要件に応えられる技術として, 著者らは, ミリ波レーダーに着目し, 建設現場における浸水検知の検討を進めている³⁾⁴⁾。ミリ波レーダーの活用については非接触式水位計への適用に関する研究事例⁵⁾や角度をつけてミリ波レーダーを設置, 計測した場合の水面からの受信強度の変化に関する報告⁶⁾がある。これらの報告はミリ波レーダーと水面との関係性について報告しているが, 水が無い状況から浸水が発生した場合におけるミリ波レーダーと浸水面との関係については言及していない。

本研究では, 浸水が発生する前後を対象に, ミリ波レーダーによる浸水検知性能と浸水を検知できるセン



(a) 調整池への集水 (b) 仮排水路

写真-1 建設現場での濁水対策例

Photo.1 Countermeasures against turbid water
on construction sites

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室
* 2 技術センター イノベーション戦略部 技術開発戦略室
* 3 土木本部 作業所業務推進センター作業所支援室

サの設置角度、設置高といった設置条件を確認する「基礎実験」と、実建設現場の浸水を想定した環境下での浸水検知性能を確認してその有効性を検証する「実証実験」を行った。本稿はこれらについて報告するものである。

2. 基礎実験

2.1 実験装置

本実験では、浸水検知性能と浸水を検知できるセンサの設置条件（設置角度と設置高）を明らかにするため、以下の2つの基礎実験を実施した。

- 基礎実験 1：水路内での模擬浸水に対して、ミリ波レーダーを用いた浸水検知装置（以下、センサと称する）を斜めに設置した時の基本的な検知性能を把握
- 基礎実験 2：現場で想定されるいくつかの地面材料を水路に敷設し、センサの設置角度を変えた時の浸水の検知性能を確認

実験に供した水路の概要図を図-1 に示す。水路には後述する直径 10～40mm の砂利と黒土（基礎実験 2）を敷設した。センサは水路に対し斜めに設置し、水平からのセンサの角度を設置角度 θ とした。センサは、79GHz 帯の FMCW レーダーであり、測角範囲は垂直方向 ± 10 度、水平方向 ± 15 度である。本実験ではセンサ横にカメラを設置し、センサで測定した反射強度のデータに撮影画像を重畳して表示できるようにした。

2.2 基礎実験 1

基礎実験 1 では、図-1 に示すように設置高 H が 2.5m、設置角度 θ が 30 度でセンサを設置した。なお H と θ は建設現場を想定し、作業に支障がない条件を想定して設定した。基礎実験 1 の水路勾配は 1/6 であり、センサの反対側（図-1 の左側）が深くなっている。実験では、水路が浸水する前と、センサの反対側で深さ 30cm となるように水を入れた浸水後に反射強度を測定した。

水路の撮影画像と反射強度を重畳した結果を図-2 に示す。図の手前が図-1 の右側になる。図の下側は重畳範囲外であり、敷設した砂利の様子を確認することができる。図-2 (a) は浸水前の反射強度である。ここで反射強度は、対象物からの反射波が十分大きいと 0dB に近づき、反射波が弱いと小さく（負値）なる。また重畳範囲の透過部は -70dB 未満である。図-2 (a) から浸水前は水路内全域の反射強度が概ね -70 ～ -40dB であった。これに対して、図-2 (b) は浸水後の反射強度であり、図の上側（奥側）の浸水域のほぼ全体が -70dB 未

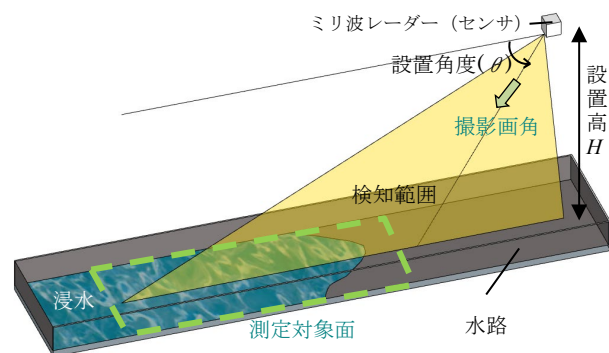


図-1 基礎実験の概要
Fig.1 Setup of fundamental experiments

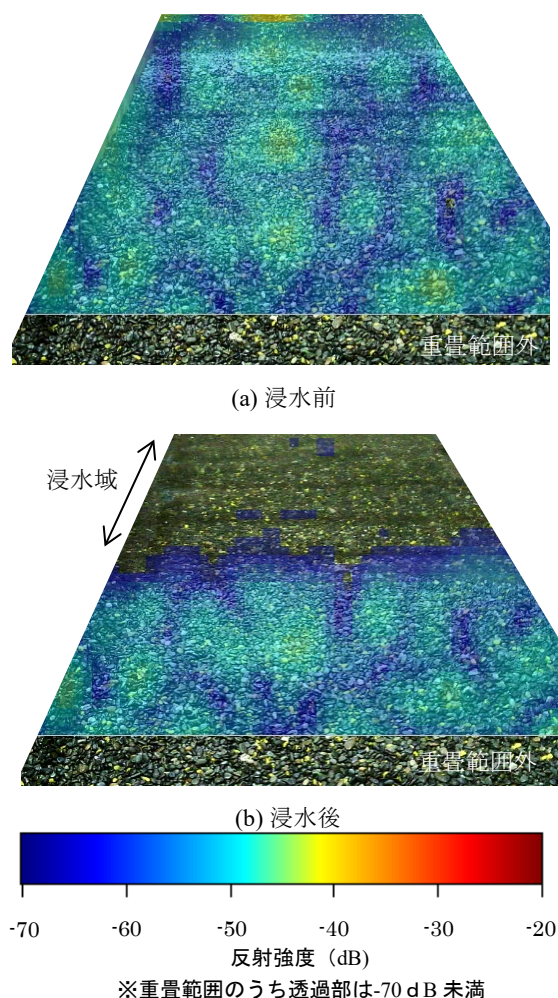


図-2 基礎実験 1 の結果
Fig.2 Results of fundamental experiment 1

満となった。反射強度は、測定値を比較した際にその値が相対的に大きければ、反射強度が大きいことを示しており、浸水後は浸水前より低い反射強度となっていることがわかる。これは、浸水前は砂利の凹凸により反射波を得やすく反射強度は強い状況であったが、浸水後は静水面が鏡面となり、ミリ波が鏡面反射により反射波を得にくくなり反射強度が低下したためと考えられる。このように、浸水域と非浸水域では反射強

度の差異が生じ、浸水の境である水際線を特定できた。

以上から、センサを斜めに設置した場合、静水の浸水域では非浸水域に対して反射強度が小さくなることで、水際線や浸水有無を検知できることが確認できた。

2.3 基礎実験 2

基礎実験 2 では、センサの設置角度 θ を変えて、水路内の浸水前後における反射強度を測定した。基礎実験 2 では、最適な設置角度 θ を検討するため、30 度、60 度、90 度（直下方向）の 3 条件とした。また、地面材料を敷設するため水路勾配は水平とした。地面材料は建設現場内で発生する地盤材料の黒土と、直径 10 ～ 40mm の砂利の 2 種類の条件とした。なお、設置高 H は 3m とし、浸水後の浸水深は地面材料の影響度を検証するために基礎実験 1 より浅い 3cm とした。

まず設置角度 θ が異なる場合の実験結果を図-3 に示す。ここでは地面材料を黒土とした。浸水前後の反射強度を比較すると、浸水前については、 θ が小さいほど反射強度が小さくなる傾向となった。一方、浸水後については、 θ が 30 度の場合は概ね -60 dB 以下であり、浸水前の -55 dB と比較して 5dB だけ低下した。次に θ が 60 度の場合、浸水後は濃淡はあるものの概ね -55 dB であった。浸水前の -40 dB と比較すると 15dB 低下しており、 θ が 30 度のときより低下量が浸水前後の差異が明確となった。更に θ を大きくして 90 度とした場合も浸水前後で濃淡があり、浸水後は局所的に -20 dB の反射が得られた。浸水前の反射強度は概ね -40 dB であり浸水により 20dB 強くなった。これは、 θ が 30 度、60 度では鏡面反射により水面に対するレーダーの入射角が浅いほど反射強度が低下し、90 度ではセンサと水面が正対したことで直下の水面からの反射が局所的に強くなったためと考えられる。

続いて、地面材料に対する実験結果を図-4 に示す。本結果では設置角度 θ を 60 度に固定し、浸水前後の反射強度を比較した。浸水前は、黒土が概ね -45dB、砂利が -40dB であるが、浸水後は両材料とも概ね -55dB となり、黒土では 10dB、砂利では 15dB 低下した。

以上から、設置角度 θ が浅い方が広域を検知できるが、設置角度 θ が 30 度より深く、また直下の 90 度より浅い角度を選定して検知することが必要であることを確認した。また、地面材料については、浸水前の反射強度が砂利は -45dB、黒土は -40dB であったが、浸水後は両者とも概ね -55dB であり、地面材料に依らず浸水後の反射強度は同程度であることを確認した。

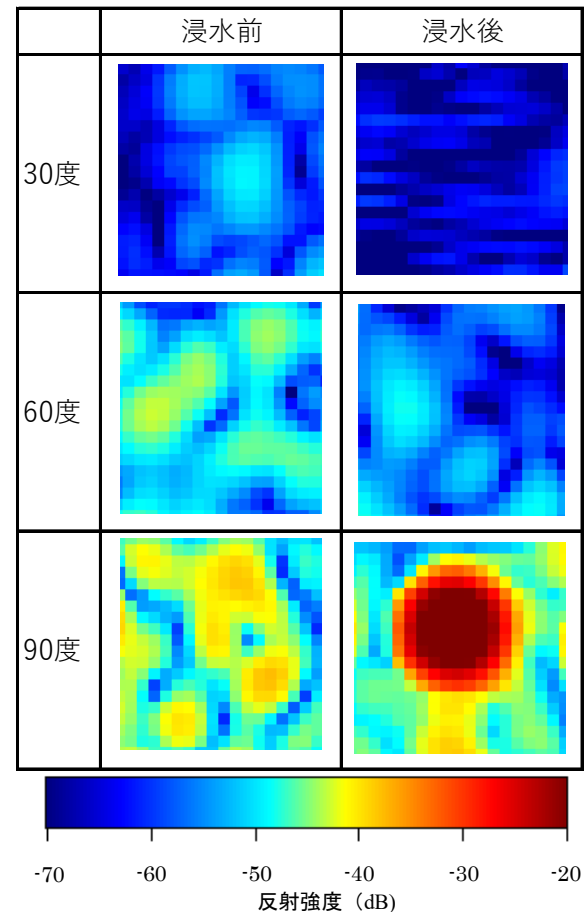


図-3 設置角度に対する反射強度比較
(地面材料：黒土)

Fig.3 Comparison of reflective intensity for each setting angle of sensor (ground material : black soil)

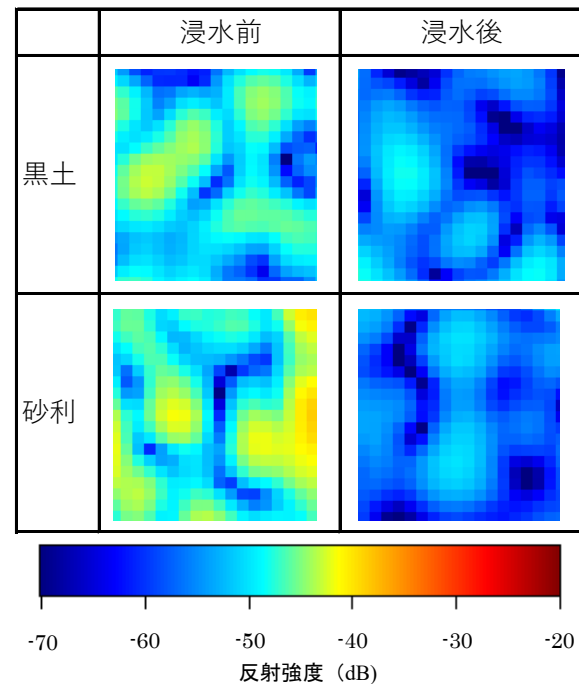


図-4 地面材料ごとの浸水による反射強度変化
(設置角度：60 度)

Fig.4 Comparison of reflective intensity for each ground material (Setting angle : 60 degrees)

3. 実証実験

3.1 実証手法

本実験では、実際の建設現場の浸水を想定した環境下における浸水検知性能を検証するため、以下の 2 つの実証実験を実施した。

- ・ 実証実験 1：コンクリート斜路における、模擬浸水環境に対する検知性能の検証
- ・ 実証実験 2：造成工事エリア内に設けた仮排水路（掘削水路）における模擬流水環境に対する検知性能の検証

なお、実験場所は当社の建設現場内とし、造成工事区域の一部区画で実施した。前述の基礎実験では、浸水域が静水である状況で設置角度を変えて検討した。対して実証実験では、実際の浸水過程を模擬するために、浸水開始後は時間の経過とともに浸水深が増加し、浸水域に擾乱が発生する状態で計測した。一般にミリ波レーダーは、対象物からの反射波から得られる反射強度と相対速度（速度変化）から物体の位置を検知する。そこで実証実験では、基礎実験で採用した反射強度の他に、相対速度を評価指標として加えた。センサの仕様は、基礎実験と同様、79GHz 帯の FMCW 方式であり、測角範囲 ± 45 度（垂直方向のみ）、測定周期 100ms とした。また、建設現場での導入を見据え、基礎実験に対してセンサのハードウェアを小型化（筐体寸法 100×150×60mm）した。

3.2 実証実験 1

建設現場では、浸水被害の例として、写真-1 (a) のような仮設の沈砂池や調整池等に貯まった雨水や濁水が、それらを囲う堤防を越えることで浸水が発生し、周辺の建設資機材や重機等が水没する場合がある。この浸水をセンサで検知することが可能であるかを確認するため、実証実験 1 では、図-5 のようにコンクリート斜路に木枠を設置し、木枠内に水中ポンプで連続注水しながら浸水深を増加させて浸水範囲が広がる状況を測定した。センサは、上流側（注水口の反対側）に、設置高 2m、設置角度 90 度で設置した。検知範囲はセンサ直下から注水側までの 2.5m 区間とした。

図-6 は、図-5 に示すセンサ直下から下流側に向かって 2.1m 地点の反射強度と相対速度の測定結果である。なお本実験で使用した装置は、基礎実験と異なるため反射強度が正の値で示されているが、基礎実験と同様に反射強度を相対的に比較し、その値が大きければ、反射強度が大きいことを示している。2.1m 地点に浸水が到達したのは試験開始後約 150 秒を経過してからで

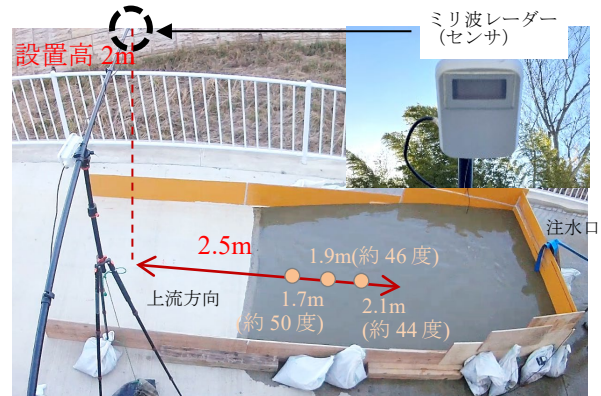


図-5 実証実験 1 の実施状況

Fig.5 Setup of applicability experiment 1

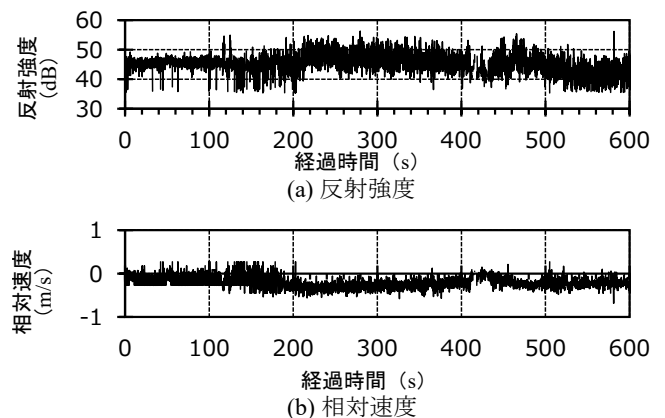


図-6 2.1m 地点における反射強度と相対速度の時系列

Fig.6 Time series of the reflective intensity and relative velocity (Point 2.1m)

あり、同タイミングで反射強度は増加しはじめ、相対速度は減少しはじめている。基礎実験の結果（図-2、図-3）では、静水面における鏡面反射の影響で設置角度 θ が 30 度、60 度ともに浸水後の反射強度は低下したが、図-6 では 150 秒以降で反射強度が増加している。これは、水面の擾乱により、センサー側への反射が強くなったためと考えられる。ただし、他の計測点では浸水により反射強度が低下する場合もあった。いずれにせよ、浸水前後で反射強度は変化していることから、浸水前の反射強度と相対速度を基準として、浸水前後の測定値の差から求めた絶対値（以下、反射強度変化量、相対速度変化量と称する）を求めて浸水検知の評価に用いることとした。例えば図-6 の 2.1m 地点の場合、浸水前の反射強度および相対速度の平均値（反射強度は約 45.8dB、相対速度は-0.12m/s）を求め、全時間の測定結果から平均値を引いて差異を算出し、差異の絶対値を反射強度変化量、相対速度変化量とした。図-7 は図-5 に示すセンサ直下から 1.7m、1.9m、2.1m 地点での反射強度変化量と相対速度変化量である。各地点の水

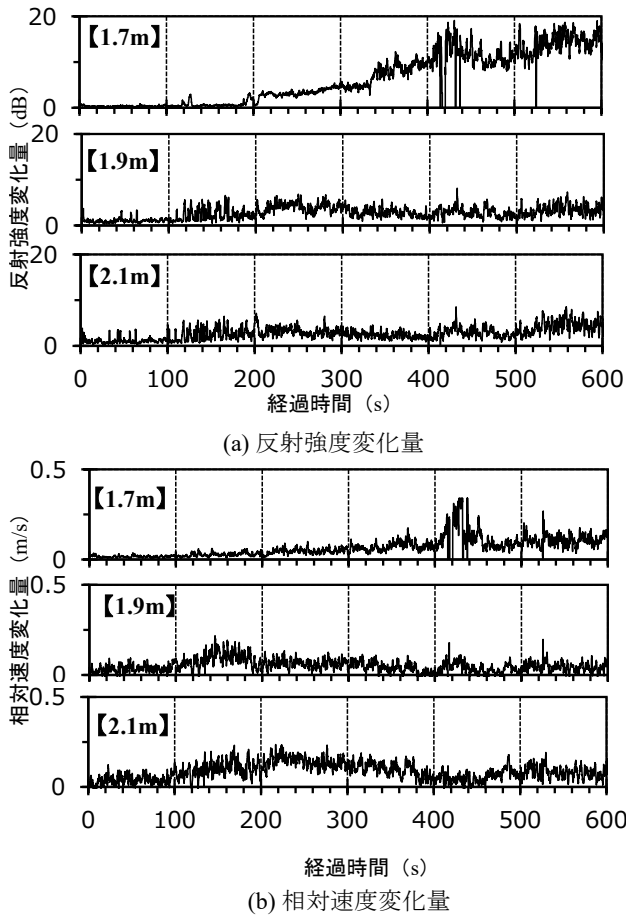


図-7 実証実験 1 における反射強度と
相対速度の変化量の時系列

Fig.7 Time series of change amount about the reflective
intensity and relative velocity (applicability experiment 1)

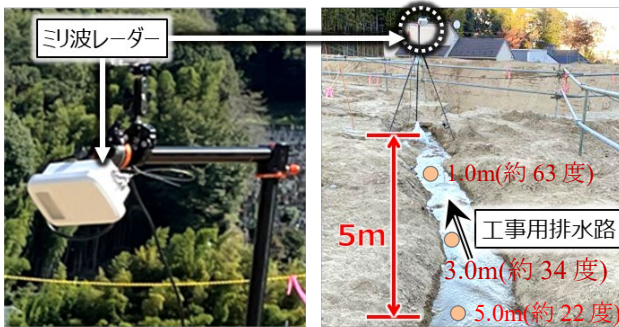


図-8 実証実験 2 の実施状況
Fig.8 Setup of verification experiment 2

2.1m が約 44 度になる。1.9m と 2.1m 地点では浸水が到達した 150 秒付近から、1.7m 地点では 300 秒付近から反射強度変化量、相対速度変化量の増加が見られた。

以上、水面に発生する擾乱等により、流水が到達すると反射強度と相対速度が変化し、浸水前からの反射強度と相対速度の変化量が増加するタイミングを捉えることで、浸水を検知できることを確認した。

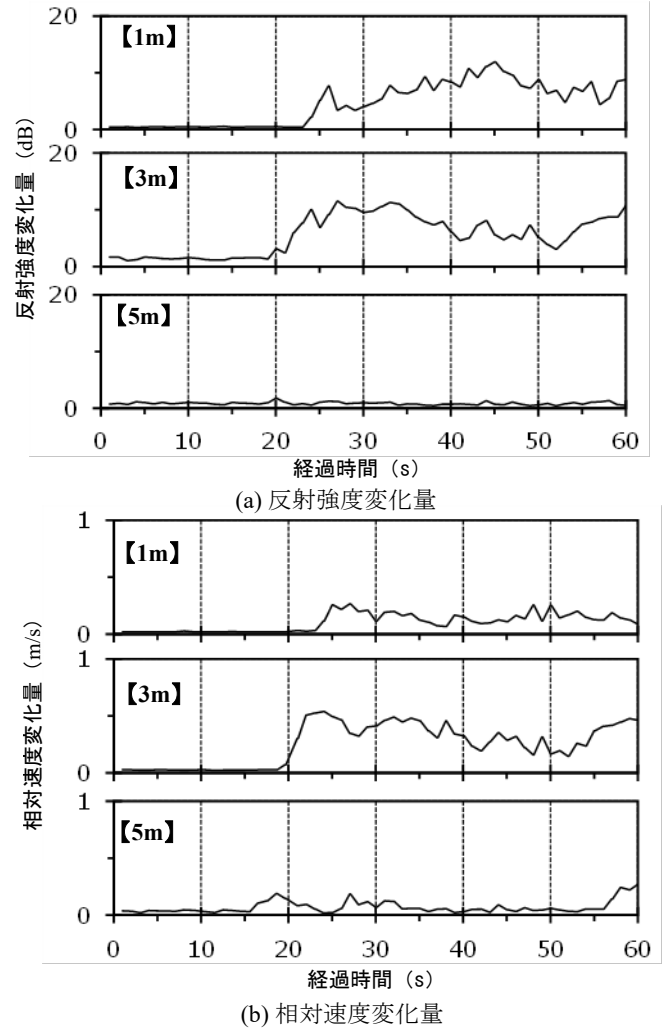


図-9 実証実験 2 における反射強度と
相対速度の変化量の時系列

Fig.9 Time series of change amount about the reflective
intensity and relative velocity (applicability experiment 2)

3.3 実証実験 2

建設現場では豪雨により発生した濁水の対策として、例えば盛土や切土を行う造成工事では、写真-1 (b) のように仮排水路を工事範囲周辺に設け、濁水を沈砂池等に誘導している。濁水量が多い場合、濁水が仮排水路を超えて場外に流出することが懸念される。このような流出を防ぐ目的で、濁水の流下をセンサで検知できるかを確認するために、実証実験 2 では、図-8 に示す造成工事エリア内に設けた仮排水路（砂質土地盤）に流水を発生させて、流水が到達する前から到達後までを時間の経過とともに連続して測定した。センサは仮排水路の下流側に設置高 2m、設置角度 45 度で設置した。検知範囲はセンサ直下から上流 5m の区間とした。

実験結果を図-9 に示す。図-9 はセンサ直下から 1m, 3m, 5m の 3 地点における反射強度と相対速度の変化量であり、実証実験 1 と同様、全測定結果から流水前の

測定値の平均値を引いた値の絶対値である。各地点の水平からの角度は、1m が約 63 度、3m が約 34 度、5m が約 22 度になる。流水は 5m、3m、1m の順に到達している。図-9 より、流水の到達後に反射強度変化量、相対速度変化量が顕著に増加していることが分かる。例えば流水が最初に到達した 5m 地点では、15 秒付近で相対速度変化量が増加しはじめ、続いて 3m、1m の順に反射強度変化量と相対速度変化量が増加し始めた。変化量が増加するタイミングと流水が各地点に到達するタイミングが概ね一致していることは確認しており、反射強度変化量と相対速度変化量から流水の通過を検知できることが分かった。

ここで、一般にミリ波レーダーは水から強い反射を得ることは難しいとされているが、本実験から 5m 程度の範囲内であれば流水の到達検知が可能であることが分かった。これは流水の波面からの散乱等により反射強度変化量と相対速度変化量が増加したため、検知可能になったと考える。

また、反射強度変化量と相対速度変化量の両者を併用することで検知の見逃しを防ぐことができると考えられる。例えば 5m 地点の反射強度変化量は、流水の前で顕著な増加は見られず、反射強度変化量のみから流水の到達を検知することは困難である。これはセンサの入射角度が 22 度と小さいことが要因と考えられ、基礎実験 2 の結果と合致する。一方、相対速度変化量は 15 秒過ぎから増加を開始している。このことから、反射強度変化量では難しい流水の到達（浸水）を相対速度変化量から検知できたと言える。

以上より、実証実験 1 と同様、反射強度と相対速度の変化量から浸水を検知できることを確認した。また、浸水域が擾乱等により変動する状況では、反射強度と相対速度の両者の変化量を確認することで、検知の見逃しを防ぐことができ、検知感度の向上に有効と考えられる。

4. おわりに

ミリ波レーダーを用いて、浸水検知性能と浸水検知が可能なミリ波レーダー装置の設置角度や設置高（設置条件）を明らかにすると共に、実際の建設現場を実験フィールドに浸水検知性能を確認し、その有効性を示した。

基礎実験では、浸水域の反射強度が小さくなることで浸水の境である水際線や浸水有無を検知できること、浸水の検知範囲を広くするためには、浸水検知に適した角度（本実験では 30 度以上）を選定することが重要であること、さらには地面材料は浸水検知に対する影響が小さいことを確認した。また建設現場を想定した実証実験では、水面に擾乱が発生するため、反射強度と相対速度の両者について、浸水前からの変化量を用いて浸水を検知できること、検知の見逃しを防ぐためには、反射強度と相対速度の両者の変化量を確認することが有効であることを確認した。

本研究では、コンクリート斜路や土の仮排水路の浸水を対象に有効性を確認したが、建設現場内における浸水発生時の状況は様々ある。また屋内で実施した基礎実験で得られた知見から、当該技術の既存建物への適用も考えられる。例えば、階段や斜路から建物地下への水の流入検知や、重要な電気設備や機械、書類等が保管されている諸室への浸水検知等がある。当該技術を建設現場内や既存建物に適用する場合、本研究での実験条件以外についても検討が必要となるが、今後も当該技術を浸水検知技術として普及、展開することを目指していく。

参考文献

- 1) 梶本 秀樹：画像認識技術を活用した浸水把握システムの実証の取組について、令和3年度近畿地方整備局研究発表会 論文集、イノベーション部門 I, No.11, 2021.
- 2) ワンコイン 浸水センサー実証実：国土交通省、<https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/wankoinsensa/>（2024 年 6 月 21 日参照確認）
- 3) 大野剛，飯村浩太郎，林俊光，岩崎孝夫：建設工事現場におけるミリ波レーダーを用いた浸水検知手法の基礎検討，令和 6 年度土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集，VI-797, 2024.
- 4) 林俊光，大野剛，飯村浩太郎，岩崎孝夫：ミリ波レーダーを用いた工事用排水路の監視技術に関する実験的検証，電子情報通信学会 ソサイエティ大会大会論文集，A-18-01, 2024.
- 5) 寒川雅之，酒井 直樹：河川防災システムのためのミリ波センサによる非接触水位計測「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集，Vol35, 2018.
- 6) 高橋悠太，安野貴人，佐藤朗：設置に制約が少ない Angled ミリ波レーダー水位計開発に向けた基礎検討，令和 2 年度土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集，IV-29, 2020.