

河川堤防の変状検知システム実験結果
(地上設置型合成開口レーダによる検知)

令和3年3月

安藤ハザマ

東北大学

1. システムの概要

地上設置型合成開口レーダ(GB-SAR)は、レーダアンテナから電波を放射し、同一のシステムで反射波を受信することで、広域の観測対象の変位量を計測するものである。計測時には、レーダアンテナの位置を変えながら送受信し、仮想的に大きなアンテナ開口を作り出すことで、空間分解能の向上が図られる。

また変位量の算出は、干渉SARと呼ばれる解析手法を用いることで、同じ範囲を繰り返し計測したデータから、原理上 1mm 程度の変位量を検知することが可能である。結果は、変位量に対応したカラーマップを描画し、無線通信により遠隔地においてリアルタイムで確認することができる。

近年では、大規模な地山掘削を伴う土木工事や、立入りが困難な急斜面などにおいて、斜面の安定性確認のために社会実装が進められている。システム外観を写真-1、システム概念図を図-1 に示す。



写真-1 システム外観

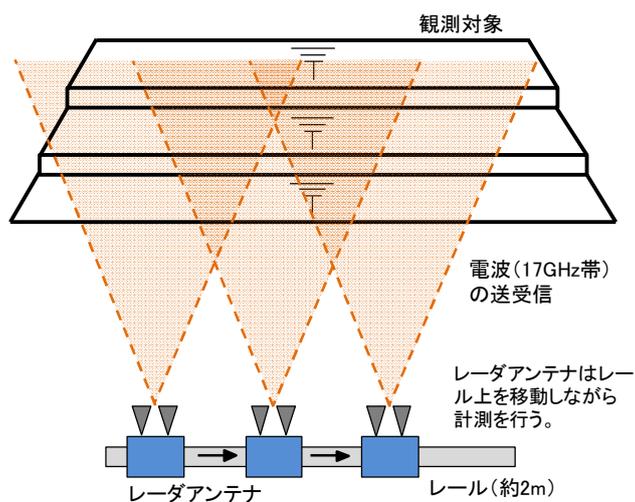


図-1 システム概念図

2. システムの原理

本システムによる観測は、干渉 SAR と呼ばれる手法を用いて変位を算出する。計測は、10 秒～数分程度の間隔で電波を送受信し、初期値と比較することで反射波の類似性を示すコヒーレンスが高い範囲の変位量を算出することができる。本システムによる計測概念図を図-2 に示す。

得られる反射波データには、振幅と位相の情報が含まれる。振幅はターゲットの反射率に依存し、位相 ϕ は送受信アンテナとターゲットとの距離 D および電波の波長 λ から、以下のように求められる。

$$\phi = -4\pi D/\lambda \quad (1)$$

また、アンテナとターゲットとの距離 D が異なる場合、位相差 $\Delta\phi$ ($0 < \Delta\phi < \pi/4$) は以下のように求まる。なお、一度の計測で $\pi/4$ を超えるような変位速度が大きい場合には、正確な変位量を算出することが困難となる。

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -4\pi\Delta D/\lambda \quad (2)$$

さらに、図-3 に示すようにレーダアンテナの移動方向をクロスレンジ方向、電波の伝搬方向をレンジ方向と呼び、光速 c と占有周波数帯幅 B 、電波の波長 λ 、観測距離 D 、合成開口長 L より、クロスレンジ方向およびレンジ方向の空間分解能 ΔCR 、 ΔR は、式 (3) (4) から求められる。

$$\Delta CR = \lambda D/2L \quad (3)$$

$$\Delta R = c/2B \quad (4)$$

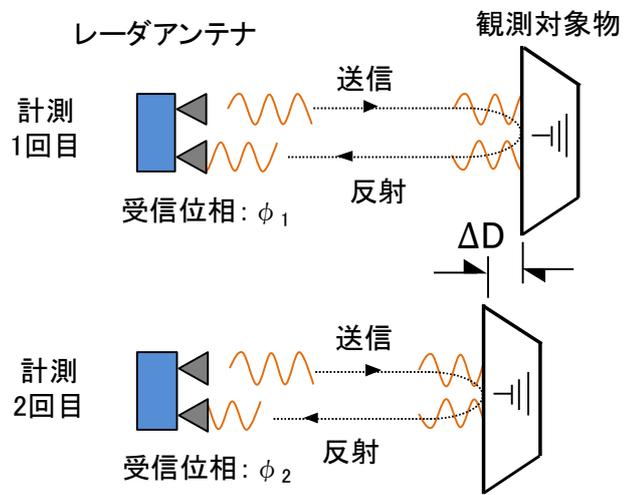


図-2 計測概念図

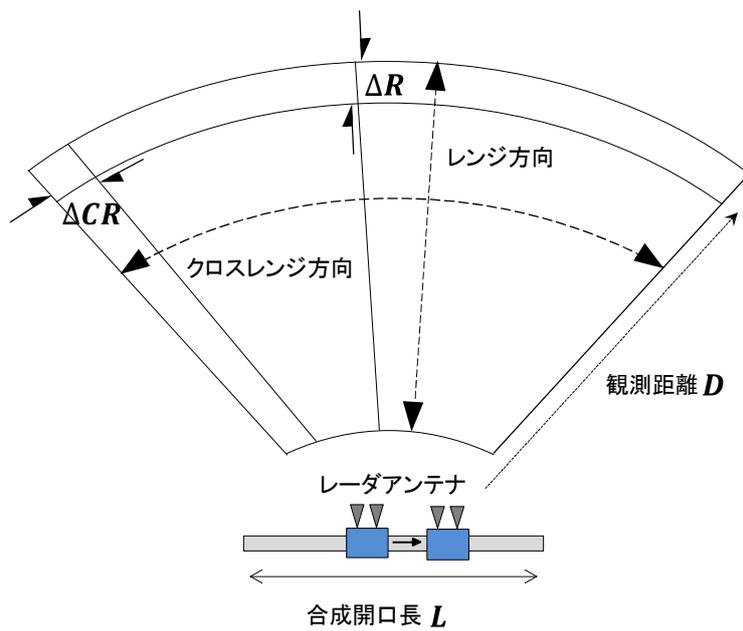


図-3 空間分解能

3. 技術の特徴

本システムは、観測範囲に立ち入ることなく、広域の変状を面的に把握することができる。また、降雨の影響を受けにくく、長距離の計測においても高い精度で観測が可能である。以下に、本技術の特徴を整理する。

- (1) 一度の計測で広域を監視できるため、変位の見逃しがない。
- (2) 非接触での計測であるため、観測範囲に機器を設置する必要がない。
- (3) 天候の影響を受けにくく、数 km の長距離でも安定した観測ができる。
- (4) 結果は遠隔地においてリアルタイムで確認できる。

適用事例として、南阿蘇で実施した大規模切土斜面(掘削幅 100m 程度)において、観測距離 800m 程度の地点から実施した観測例を写真-2、図-4 に示す。



写真-2 大規模切土斜面(南阿蘇)

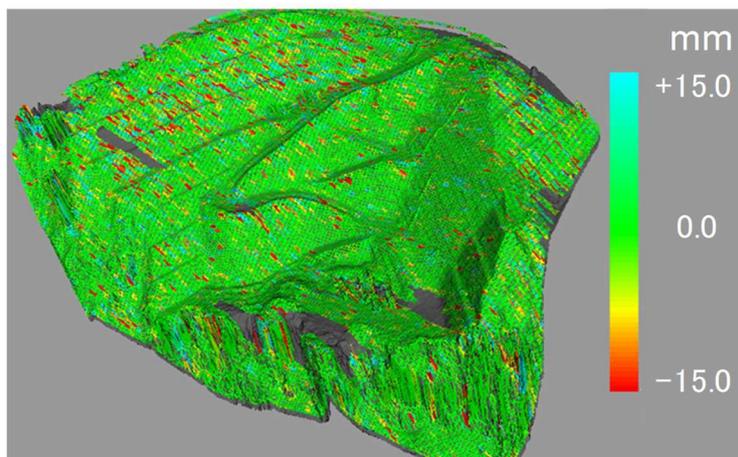


図-4 観測結果例

4. 現場実装で想定する配置方法

本システムは、観測対象に対して電波を送受信するため、観測範囲を視通可能な地点に機材を設置する必要がある。そのため、実際の現場導入では、観測範囲を直接視通できる対岸や障害物のない位置に観測台を構築し、機材の設置を行う。

観測結果は、無線回線により遠隔地においてリアルタイムで閲覧することが可能であり、異常値に達した場合には、関係者に警報発令の自動メールを送付することができる。また、運用開始後は機材の動作確認など、月に1度程度の頻度で現地確認を行う。

ここで、本システムは非接触で計測を行うため、土砂の堆積や植生の成長など、実際の変状と異なる原因で異常値を示すことも考えられる。そのため、現地状況を遠隔地で把握するため、観測点にWEBカメラを設置することが望ましい。現場実装イメージを図-5、通信システムの概念図を図-6に示す。

導入コストについては、現場条件により大きく異なるものの、おおよその概算費用を下記に示す。また、観測範囲については、上下流方向の最大幅を500m程度とした場合100mあたりの導入費用は、660万円程度となる。

【概算導入費用】

(1) システム一式(現状システムを購入した場合)	30,000,000 円程度
(2) 観測対象の3次元モデル作成	1,000,000 円
(3) 観測設備(電源敷設、観測櫓設置など)	2,000,000 円
(4) 保守費用(電気代、データ通信費など)	500,000 円/月

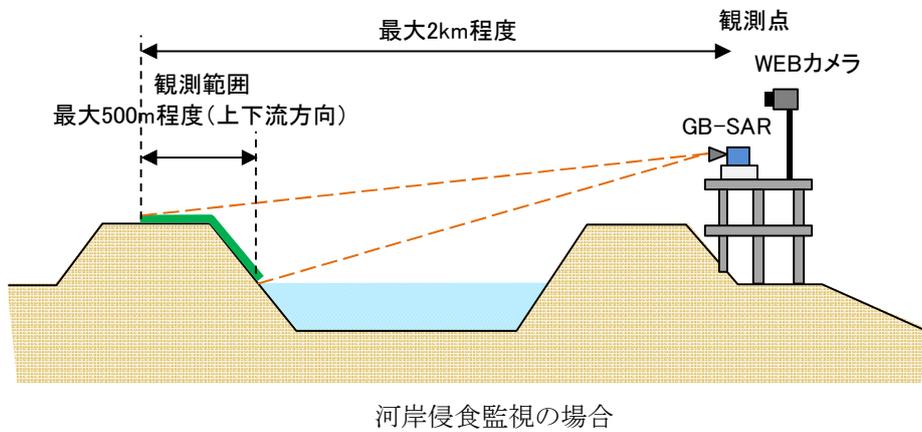
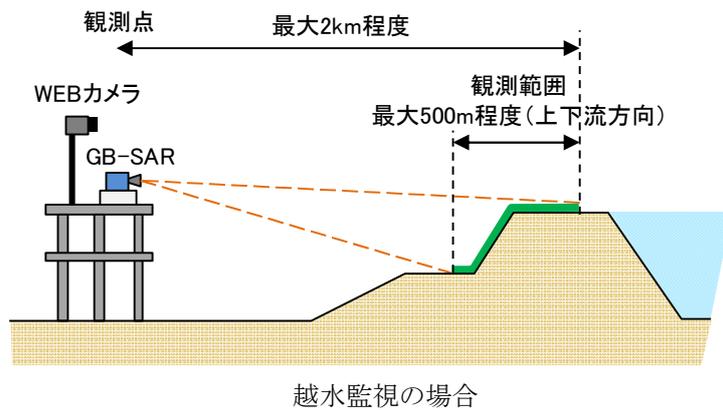


図-5 現場実装イメージ

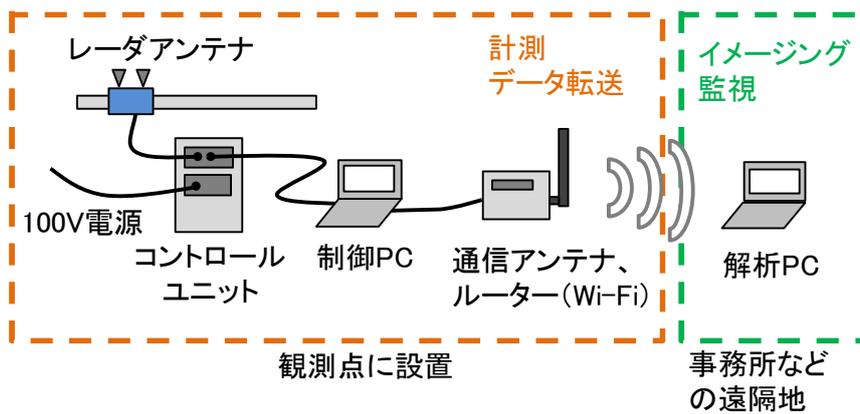


図-6 通信システム

5. 実験の計画（目的・システムの配置）

越水実験および河岸侵食実験を以下の目的で行った。

- ① 越水実験： 堤防天端部における異常を検知し、越水範囲を把握する。
- ② 河岸侵食実験： 堤防の侵食による変状発生を検知し、安定箇所の範囲を特定する。

ここで、両実験は実際の 1/5～1/10 スケールの模型を用いたものであり、計測距離が近距離となるため、堤防模型付近の実験設備からの反射が大きき、結果に影響を与えることが考えられた。そのため、特に反射強度が大きい金属製の設備については、可能なものは事前に移設し計測を開始した。機材の設置は、両実験において堤防模型の全体を視通するため、堤防模型から 10～14m の位置に高さ 2.1m の観測架台を構築し、レーダアンテナを設置した。

また、河岸侵食実験における観測範囲については、最も反射強度が大きいと想定される最上流の橋台・護岸部とした。なお、実験中の定点観測点である観測タワーについては、上流の 2 基がレーダの視通障害となるため撤去し、同一地点に高所作業車を配置し、動画撮影を行った。両実験で用いたシステムの諸元を表-1、システム配置図を図-7 に示す。また、実験状況を写真-3～6 に示す。

表-1 システム諸元

システム名	周波数帯域	計測距離	空間分解能	計測間隔	重量	寸法
METASENSING FastGBSAR	17.2GHz	最大4km	50cm程度	10秒	レーダアンテナ: 10kg レール: 82kg	レール長さ: 2.6m 有効長: 1.9m

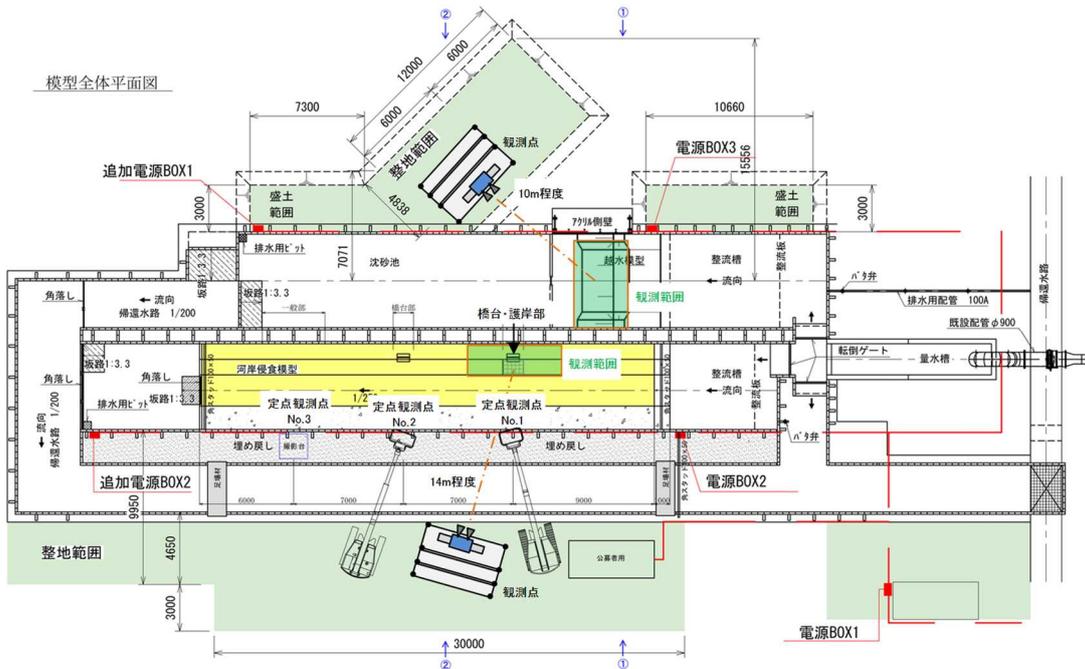


図-7 システム配置平面図



写真-3 越水実験における計測状況



写真-4 越水実験状況



写真-5 河岸侵食実験における計測状況

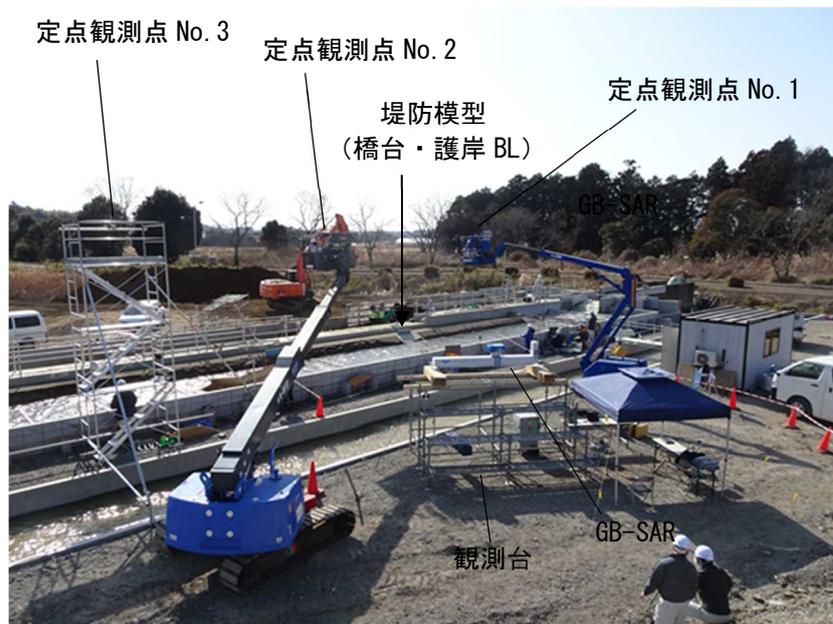


写真-6 河岸侵食実験状況

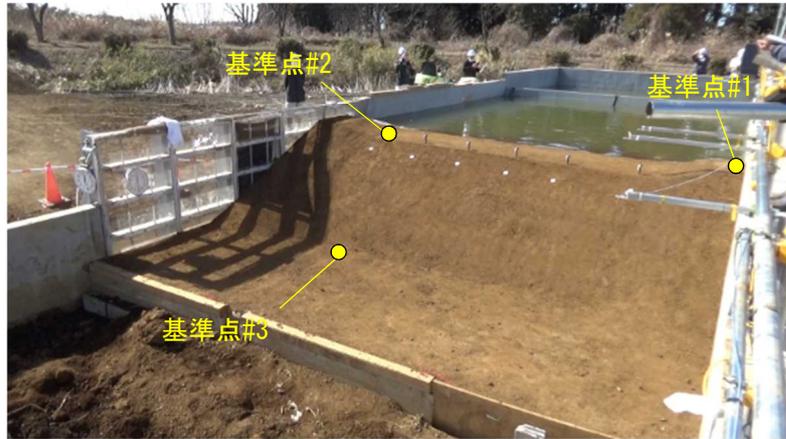
6. 実験結果

① 越水実験

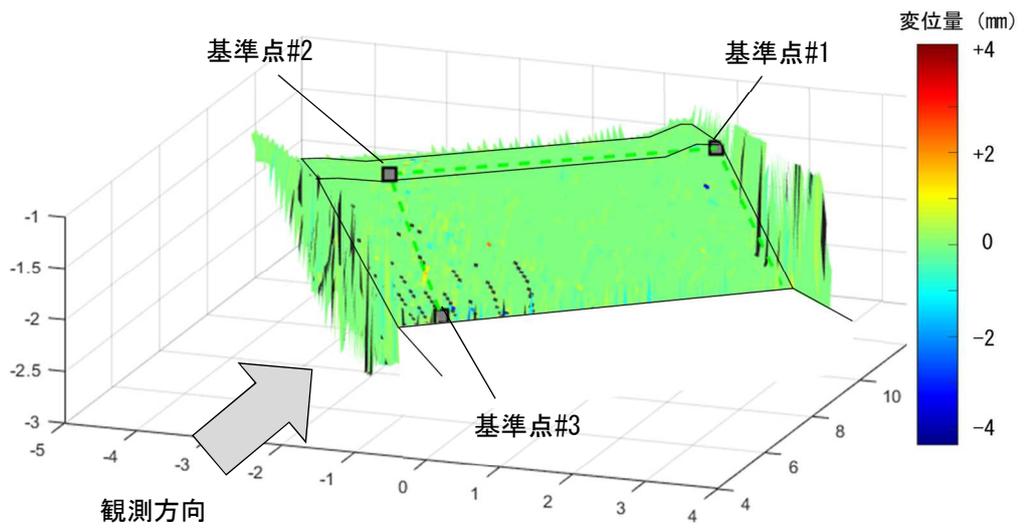
実験開始から 42 分までの結果を図-8～10 に示す。各図については、上段に実験状況、下段に同時刻の観察結果として、初期値との変位差分をカラーマップで示す。また、変位マップは変位なしが緑系、計測距離が増加(崩落)を赤系、計測距離が減少(はらみ出し)を青系とし、目視で確認できる程度の変位量-4～4mm の範囲でイメージングした。さらに、イメージングの精度向上のため、堤防模型上に金属製のリフレクターを設置し基準点とし、3D スキャナを用いて作成した堤防模型の三次元モデルに観測結果を重ねた。

図-8～10 より、越水前は、緑系で表示されており、変状の発生は検知されず安定して観測ができていくことがわかる。これに対して、越水が始まると堤防法面の越水範囲については、黄～赤系もしくは青系で表示された変位量の変化が検知されており、水量が多くなるとさらに明瞭となった。すなわち、越水による堤防法面の変化を捉えており、天端嵩上げ部と明瞭な区分ができていくものと考えられる。なお、越水範囲については、データの類似性が低いため、データ異常として詳細な変位量を算出することは難しい。

以上より、本システムによる観測結果から、越水が発生した場合にはその範囲を特定することができるものと考えられる。



実験状況

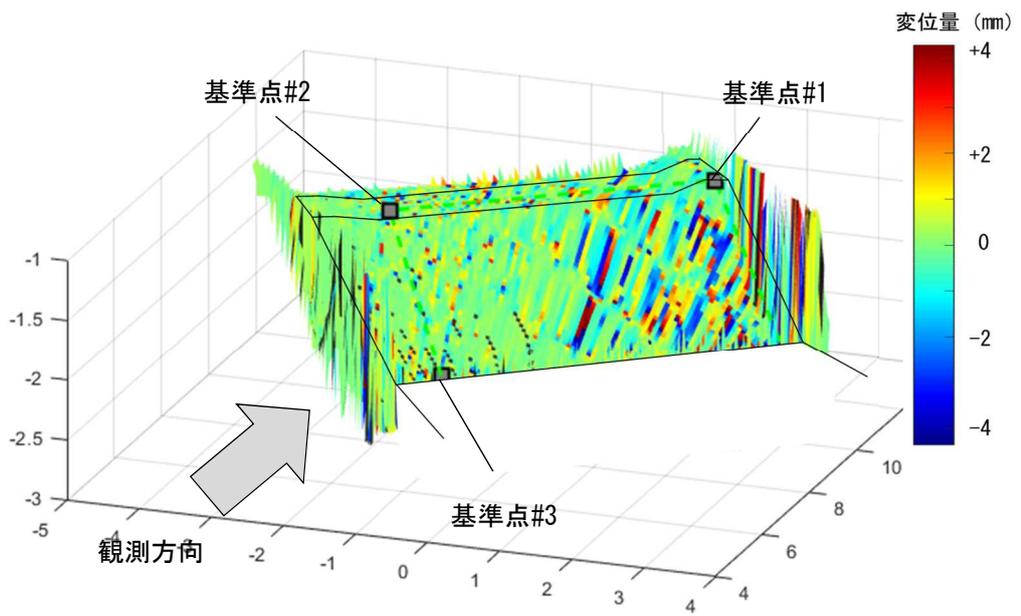


観測結果

図-8 計測結果(実験開始から22分経過)

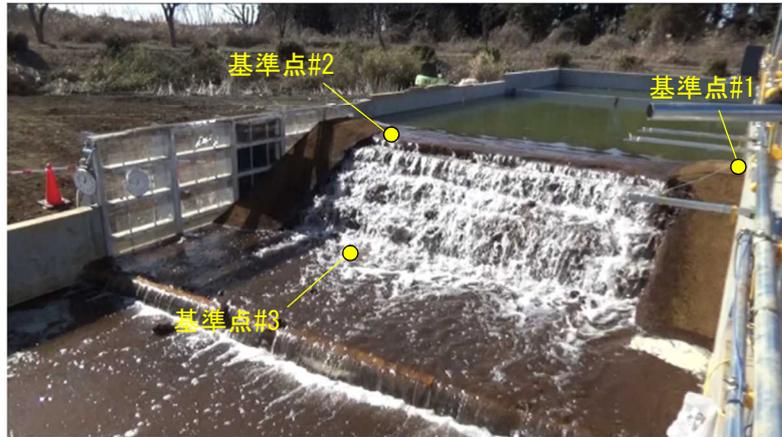


実験状況

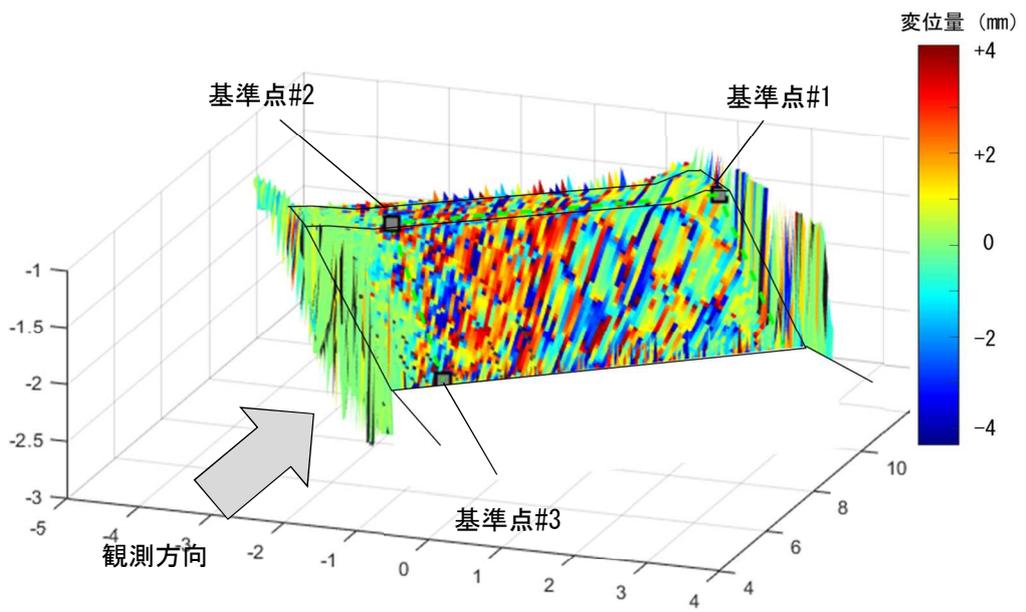


観測結果

図-9 計測結果(実験開始から23分)



実験状況



観測結果

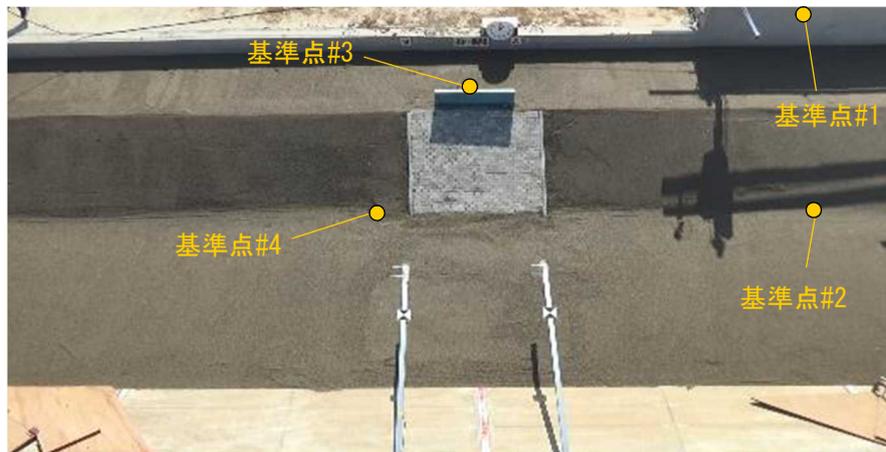
図-10 計測結果(実験開始から42分)

② 河岸侵食実験

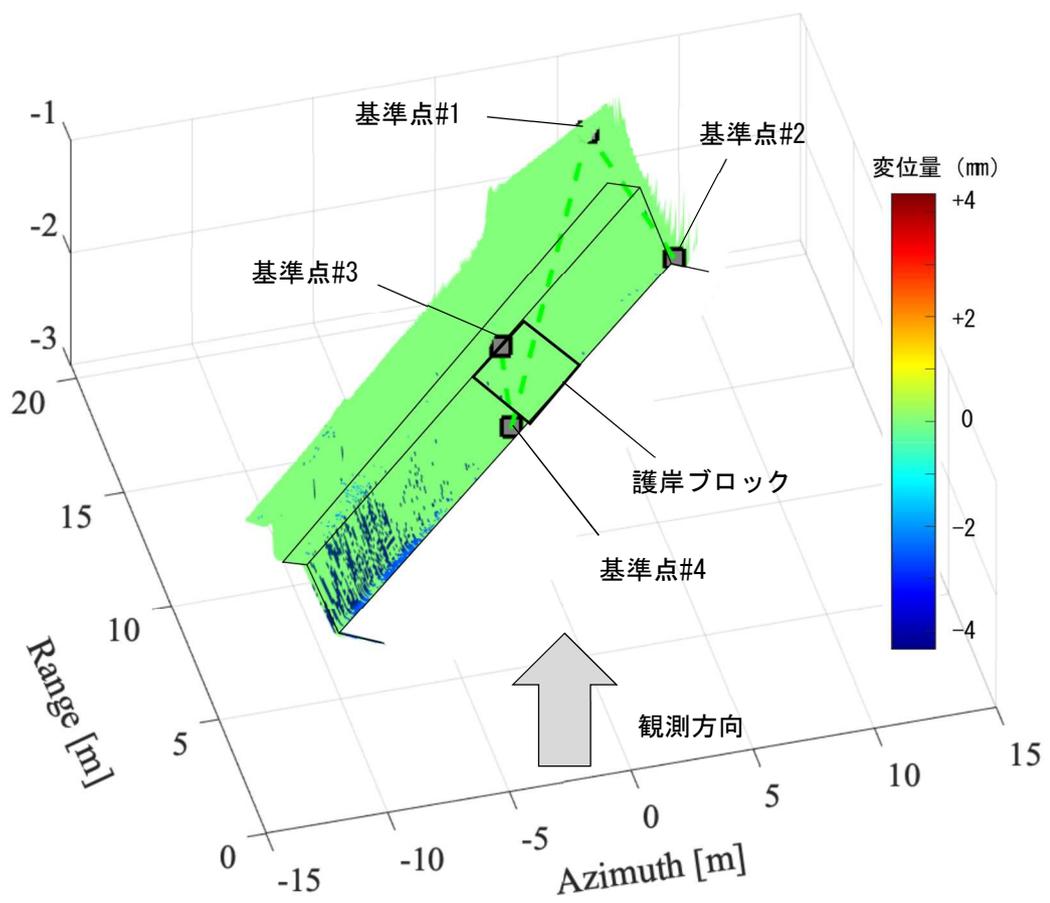
実験開始から 18 分までの実験結果を図-11～13 に示す。なお、描画条件については前項と同様とした。

図-11～13 より、流水到達前は、緑系で表示されており、変位量の変化は検知されず安定して観測ができています。これに対して、流水が到達し侵食が発生すると、黄～赤系もしくは青系で表示されており、変位量の変化が検知された。しかしながら、侵食が進行していない法面上部においても、変位量の変化が示されている。これについては、流水面で電波が散乱した影響によるものと考えられる。特に今回の実験では、システム上近距離の堤防模型であり、空間分解能が大きくなるため、影響が大きくなったものと考えられる。

一方で、護岸ブロックの敷設範囲においては、周辺と比較して安定した結果を示しており、実際の変状発生状況と一致した結果が得られているものと考えられる。



実験状況

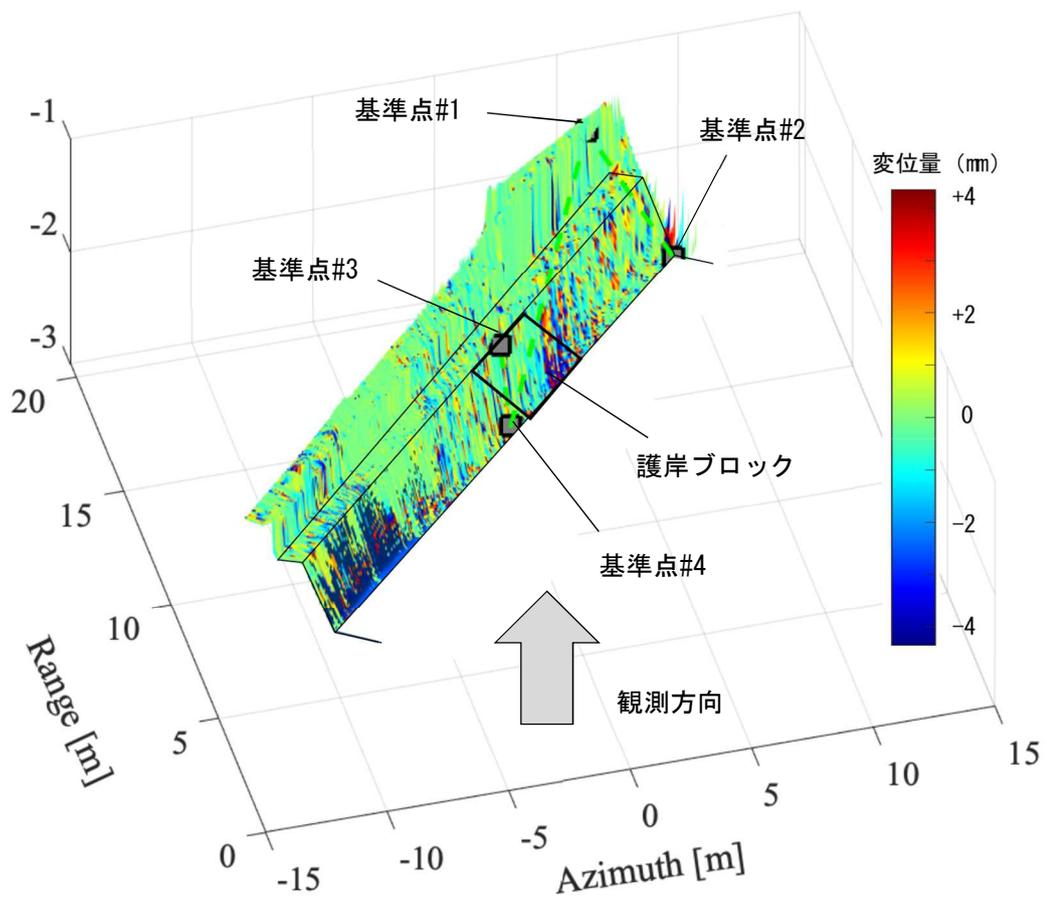


観測結果

図-11 計測結果(実験開始時点)

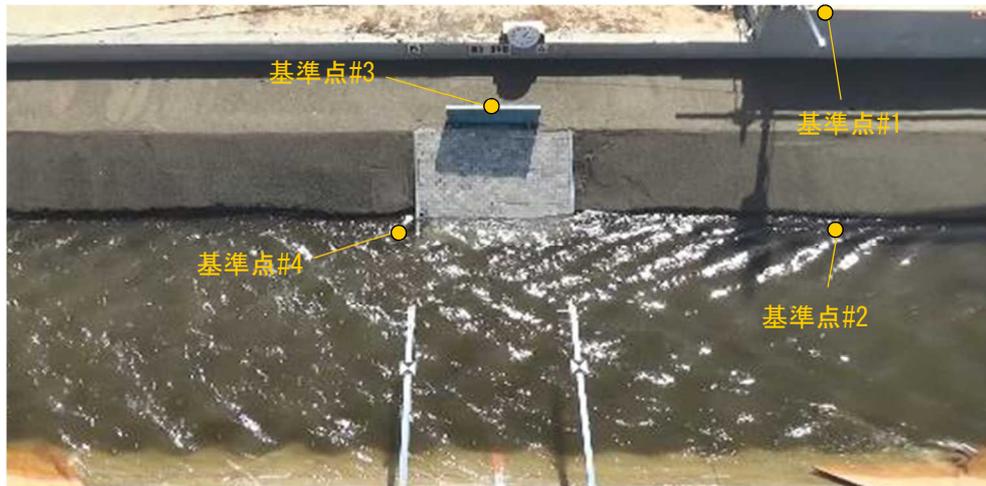


実験状況

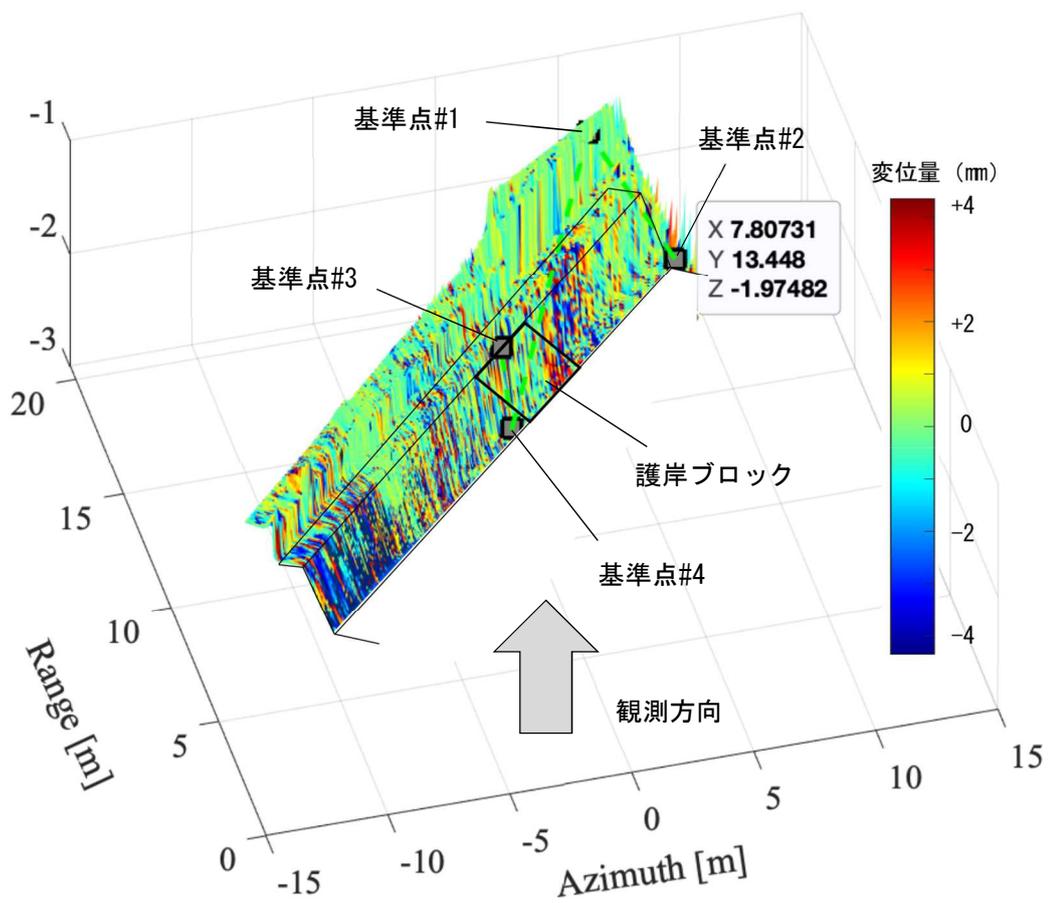


観測結果

図-12 計測結果(実験開始から9分)



実験状況



観測結果

図-13 計測結果(実験開始から18分)

7. 現場実装へ向けた考察

今回実施した、GB-SAR を用いた越水実験および河岸侵食実験から、以下に示す知見が得られた。

- ・天端の嵩上げにより、越水箇所が局所的である場合、観測データから越水範囲を特定できる。
- ・河岸法面における変状の発生を検出し、その範囲を把握することができる。

また、本システムは数百～数 km の観測距離で 50cm 程度の空間分解能が得られる。今回の模型実験では、システム本来の仕様よりも近距離の計測であったため、堤防模型に対して空間分解能が相対的に大きくなった。そのことにより、流水などによる散乱の影響が見られた。

これに対して、実際の堤防の観測では、本来の仕様に近い長距離の計測となるため、常時観測を継続することで、微小な変状を検知できると考えられる。具体的には、変位速度の増加傾向を捉えることで、広域の観測範囲から変状発生箇所を自動抽出することが可能となる。また、相対的な空間分解能は小さくなるため、越水による天端肩部の後退を把握し、おおよその侵食量を推定するなどの評価が可能となる。図-14 に常時観測による変状検知、図-15 に天端肩部の侵食量推定イメージを示す。

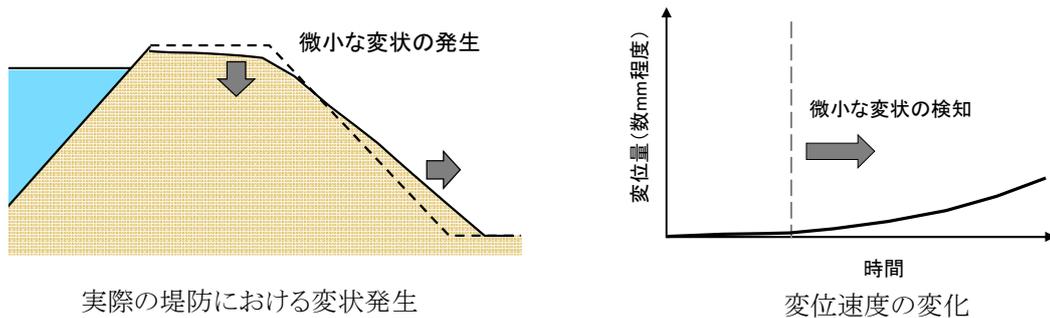


図-14 微小変位の検知

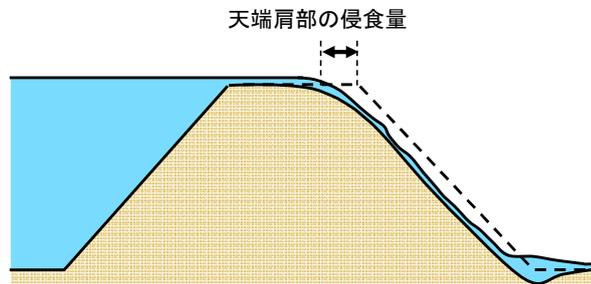


図-15 天端肩部の侵食量推定

一方で、本システムを実際の現場に導入する場合、技術の特性や現状の開発環境などからいくつかの課題が考えられる。以下に現状の課題について整理する。

(1) 観測点の選定

観測範囲を視通可能な位置にシステムを設置する必要があるため、見通し可能な位置に観測台を構築するなど、適用可能な堤防は限定されることが考えられる。

(2) 植生の影響

実際の堤防において、法面に植生がある場合には、風で揺らぐことでデータの類似性が低くなり変位量の算出精度が低下することが考えられる。また、植生が成長することで、堤防の変状を誤検知する可能性がある。これらについては、定期的な除草など対策は可能であるものの、護岸ブロックやコンクリート面などでの観測が望ましい。

(3) 気象変化の影響

本システムは、大気中を伝搬する電波を送受信するため、湿度などの大気条件が変化することで結果に影響が生じることが考えられる。特に、河川近傍における長期間の観測となるため、日時変動や季節変動を補正した評価が必要となる。

(4) 導入費用

現在流通している商用システムは、海外製のみであるため導入費用は比較的高額である。今後、国内メーカーによる開発が進めば、導入費用は現状の半分程度になる見込みである。

以上