

河川堤防維持管理におけるリモートセンシング技術の活用可能性の検討について

櫻澤 崇史¹

¹近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 調査課 (〒670-0947 兵庫県姫路市北条1丁目250)

国土交通省では目視点検を通じて河川堤防・高水敷等の変状を把握している。人の目による直接の点検では確実に変状を把握できる一方、人が河川全域を巡回する必要があることから労力・時間を要する。将来的な日本の人口減少に伴う河川巡視の担い手不足やコスト削減要請などの事態に備え、堤防・高水敷等の変状リスクに応じた点検箇所・項目の優先順位付けや箇所毎の点検頻度の傾斜付けにより、点検の効率化や変状把握の迅速化を図ることは重要である。上述の目視点検を補完し変状リスクの把握を効率化する手法として、広範囲を簡易に観測できるリモートセンシング技術の活用可能性を、加古川をパイロットサイトとして検討した。

キーワード 衛星画像, SAR 画像, リモートセンシング, 河川維持管理, 河川巡視, 変状把握

1. はじめに

河川管理者として河川の維持管理を行う上で、河川状況、特に洪水対策や河川利用に密接に関係する堤防や高水敷のような河川管理施設の現況を常に把握しておくことは重要である。そのため国土交通省では出水期前後の堤防点検や毎週の河川巡視等を、河川全体を人が巡回し目視により実施している。点検の様子は図-1のとおり。

しかしながら、目視点検である以上、河川全体を徒歩等によりくまなく巡回するという労力を要する。また、災害発生後など河川状況によっては人の足では踏み入ることの出来ない箇所が出てくるため、変状発生後から把握まで時間を要するケースがある。

そこで本稿では、目視点検に加えてリモートセンシング技術を活用することにより、点検の効率化や変状把握の迅速化を図れるかどうかを検討した。



図-1 堤防点検の様子

2. リモートセンシング技術の概要

本稿ではリモートセンシング技術として、衛星画像、特に合成開口レーダ（以下SAR と表記する）画像の活用による堤防や高水敷の変状把握の効率化について検討を行った。以下にSAR 画像分析による変状把握手法の概要を示す。

(1) SAR 画像分析による変動の抽出メカニズム

SAR 画像は衛星より地上にマイクロ波を掃射し、反射波を受信することで得られる。同じ箇所について二回目の撮影でも同様に反射波を受信しSAR 画像を得る。この時、図-2のように反射物体が下図のように移動（沈下）した場合、 ΔR の変動が発生する。この変動量分が正弦波カーブのずれとして観測される。SAR 画像の解析では、このように二回の撮影の位相差（正弦波のピー

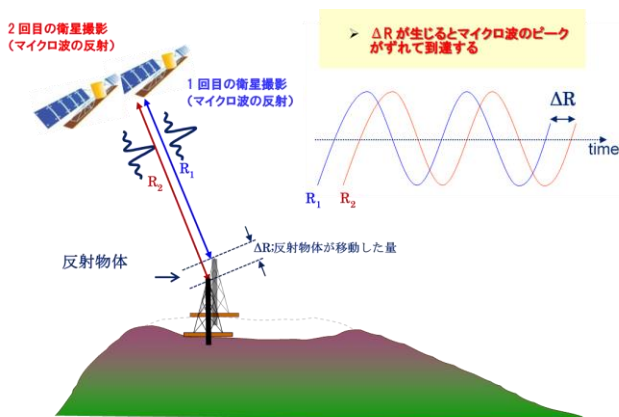


図-2 SAR 画像取得メカニズム

日本で適用できるSAR衛星



図-3 衛星の詳細及びSAR画像の諸元

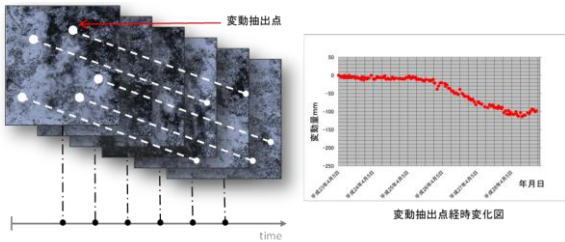


図-4 干渉SAR時系列分析

(2) 使用したSAR画像について

SAR画像を取得する衛星は、現在6機程度が運用されており、将来的にも継続的に運用が計画されている。今回は衛星周期やレーダの周波数帯、SAR画像の解像度、撮影範囲、画像の取得料金等の兼ね合いから衛星ALOS-2及びSentinel-1のが撮影したSAR画像を使用した。図-3にALOS-2及びSentinel-1の含む衛星の詳細及びSAR画像の諸元を示す。

(3) SAR画像分析の精度向上手法について

2枚以上のSAR画像から地表の変動量を求めることを微分干渉合成開口レーダ画像分析(DInSAR)という。分析手順は以下のとおり。

- ①異なる2時期に撮影されたSAR画像について位置合わせを行う。
- ②画像に含まれる位相情報を干渉させる。
- ③空間的な変動分布を把握する。

この手法では衛星から掃射されたマイクロ波が地上の間を往復する際に気象条件や電離層の影響を受けるため、干渉SARの精度はマイクロ波の波長に依存するがDInSARの一般的な精度は数cm程度であるとされる。また衛星が、地球の南側から北側に向かう時をアセンディング、北側から南側に向かう時をディセンディングと呼び、それぞれ撮影向きが異なることにより得られるSAR画像の特徴が異なるため別々に分析する必要がある。

さらに精度を向上させるため、複数枚の画像を統計

的に処理する時系列解析手法を用いる。同手法の手順は以下及び図-4のとおり。

- ①解析に使用する全ての画像に共通するコヒーレンス（正弦波の相関性）の高い点を特定する。
- ②大気によるレーダ波への影響を除去する。
- ③各地点における経時変化図を作成する。

この補正により、変動検出精度をmm単位まで向上させることができるが、解析のためには同一地点での撮影画像が20枚程度以上必要となる。また、コヒーレンスの高い地点のみが分析対象となることから、ピンポイントに特定箇所の変動分析を実施することが難しい。よって変動を抽出したい箇所について、付近の変動状況から同箇所の変動を類推する必要が生じる可能性がある。

3. 加古川におけるSAR画像の分析結果

本稿では2015年から2020年の期間において、加古川流域周辺に位置する水準点の定期測量結果を用いたSAR画像分析の精度確認と、加古川の直轄管理区間における変動の抽出を行った。以下に詳細を示す。

(1) SAR画像分析の精度確認

加古川流域周辺の水準点の位置は図-5のとおり。直轄区間内流域に位置するのは加古川、滝野のみである。その他3地点を含めて定期水準点測量結果とALOS-2及びSentinel-1のSAR画像分析による各水準点の垂直方向変動

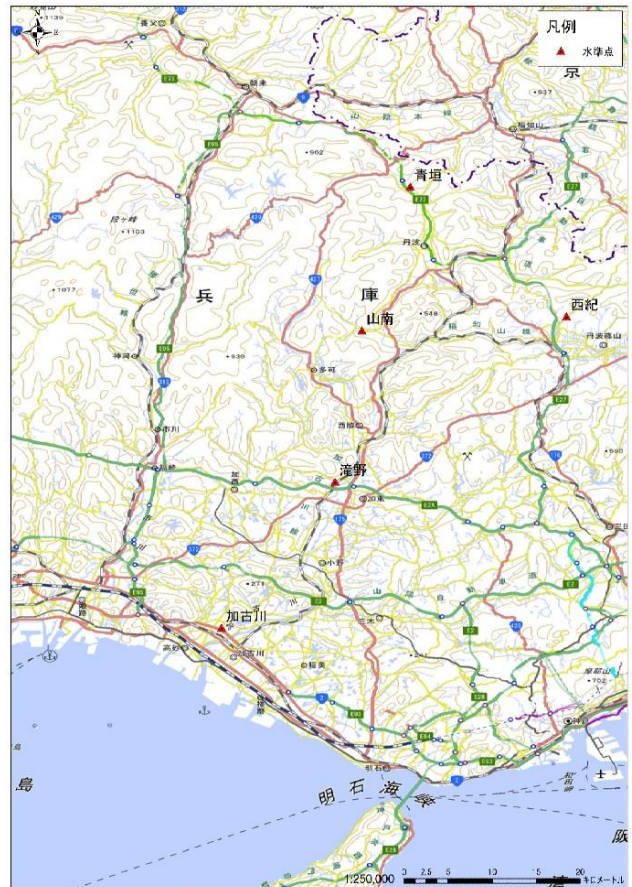


図-5 加古川流域周辺水準点位置

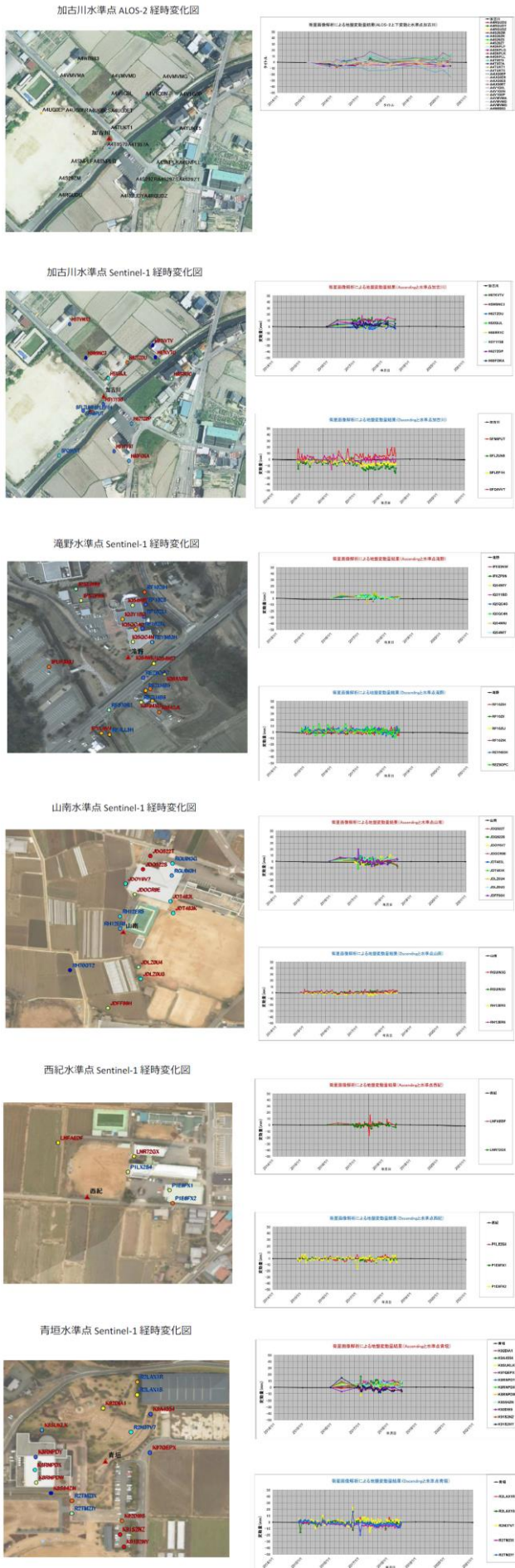


図-6 水準点位置における SAR 画像分析結果

果は図-6のとおり。

各水準点において水準点測量結果からほとんど変動が見られず、加古川流域周辺においては一律的な地盤変動は起こっていないと考えられる。よって各変動抽出点において一律的な地盤変動を考慮した補正は不要と判断した。

各水準点における SAR 画像分析により抽出した変動値は、箇所によっては年単位で見ると水準点測量結果変動値に対し数mm程度の差が見られるが、水準点周辺の SAR 画像分析対象箇所の変動値を平均すると水準点測量結果と概ね一致、つまり変動はほとんど見られないという結果になる。SAR 画像分析対象箇所と水準点位置の大きな違いとして、土地利用状況が挙げられる。水準点は測量の基準点かつ定期測量地点として利用されるため土地の形状変化は生じないのに対し、分析対象箇所は農地や住宅、道路等様々な土地利用形態がとられており、利用状況によって変動にばらつきが生じている可能性が高い。ただし、比較期間全体でみると SAR 画像から抽出した変動値が水準点測量結果と同程度の値に収束する傾向が見られる箇所がほとんどであり、数年単位の変動の傾向は抽出可能と考えられる。

(2) 加古川直轄管理区間における垂直方向変動の抽出

加古川流域（直轄区間）において、SAR 画像分析により堤防や高水敷の変状を把握することが可能か検討すべく、垂直方向（上下）変動の抽出を行った。2015年から2020年の期間での流域全体の変動抽出結果の傾向は図-7のとおり。加古川の17k~21k付近では比較的大きい変動傾向が見られるが、その他地域では変動は1cmに満た

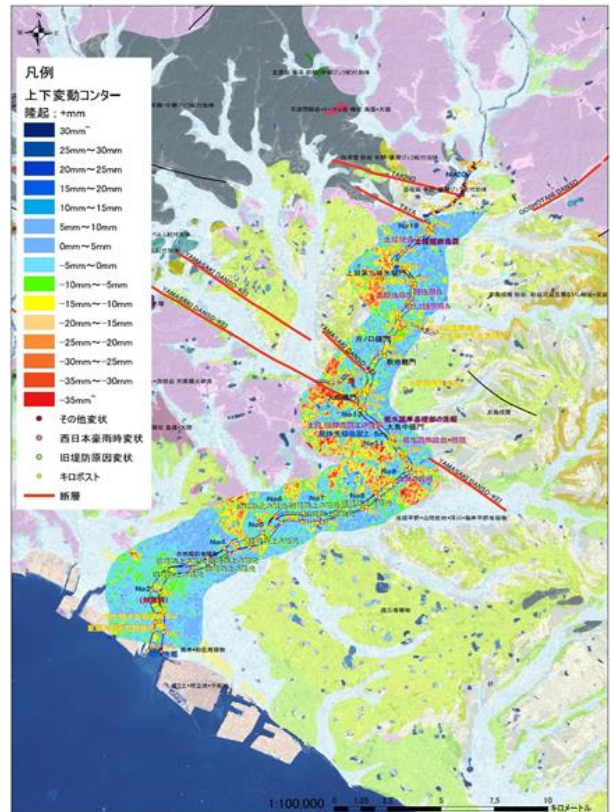


図-7 加古川流域における上下変動抽出結果

ないところがほとんどである。変動が大きい箇所は断層近くであり、断層の存在が地盤変動に影響を及ぼしている可能性はあるが、数cm程度の変動かつ堤防付近ではなことから河川維持管理上影響はほとんどないと考えられる。

(3) 個別箇所における垂直方向変動量の抽出

個別の堤防の変状や高水敷の陥没状況を把握可能か検討すべく、実際の変状・陥没箇所付近の垂直方向変動量の抽出を行った。抽出箇所は変状・陥没実績と十分なALOS-2によるSAR画像撮影枚数が確保された分析可能箇所を考慮した結果、平成30年7月豪雨の際に洗堀された加古川左岸15.8kの水制工裏側付近、過去に陥没が見られた加古川右岸10.0k+100m付近、左岸5.2k付近を選定した。

SAR画像の分析結果はTREMAPSというアプリケーションにてとりまとめ、光学衛星画像による地図や距離標位置と合わせて分析箇所及び2015年から2020年にかけての2015年時点を基準とした変動量の変化を表示できるようにしている。それぞれの箇所における上下変動量の抽

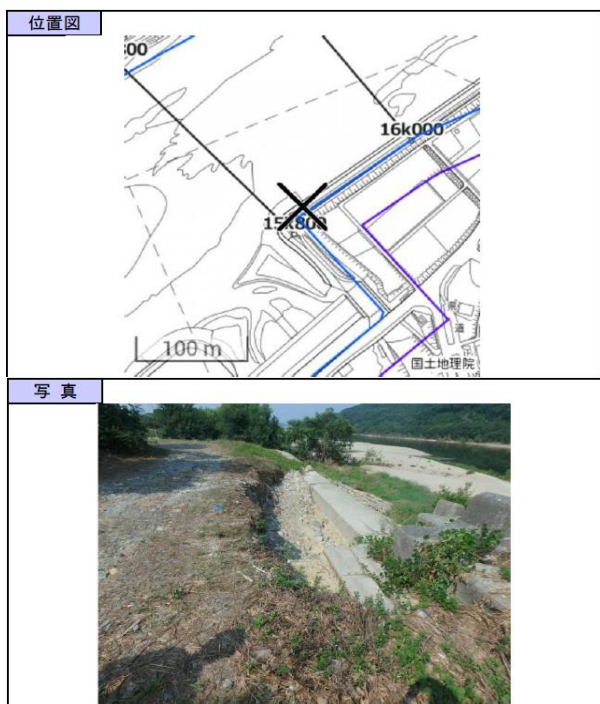


図-8 加古川左岸 15.8k被災箇所位置・状況

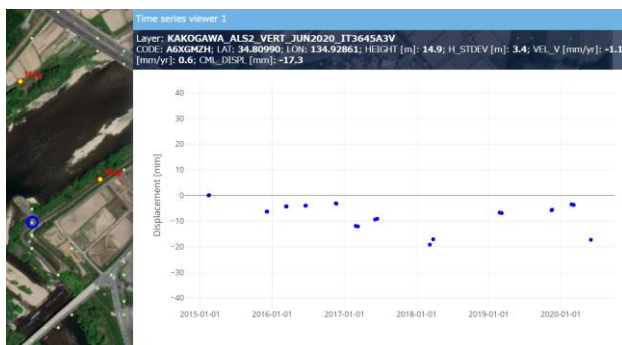


図-9 加古川左岸 15.8k 付近 SAR 画像分析結果

出結果は以下のとおり。

(i)加古川左岸15.8k (水制工裏側洗堀箇所)

平成30年7月豪雨による被災箇所及び被災直後の状況は図-8のとおり。水制工の裏側が大きく洗堀されている。そして同箇所付近の垂直方向変動量分析結果は図-9のとおり。図-10中の黄緑色の点がSAR画像分析対象箇所、SAR画像の解像度と同様3m×3mメッシュでの表示となっている。また、青丸に囲まれた点が変動量の経年変化の表示箇所である。縦軸が変動量を表しており、上方向にプロットされると隆起、下方向にプロットされると沈下を示す。横軸は時系列を表している。分析に要するSAR画像枚数の制約から変動量を得ることのできる頻度は年2、3回程度が現状の限界である。

2017年、2018年から沈下が大きくなっているが、変動量が2cm程度しか見られないため、洗堀箇所と分析箇所が完全に一致していないことからうまく洗堀による変動を捉えられていない可能性が高い。また、実際に被災し



図-10 加古川右岸 10.0k+100m 高水敷陥没状況



図-11 令和2年度高水敷試掘結果

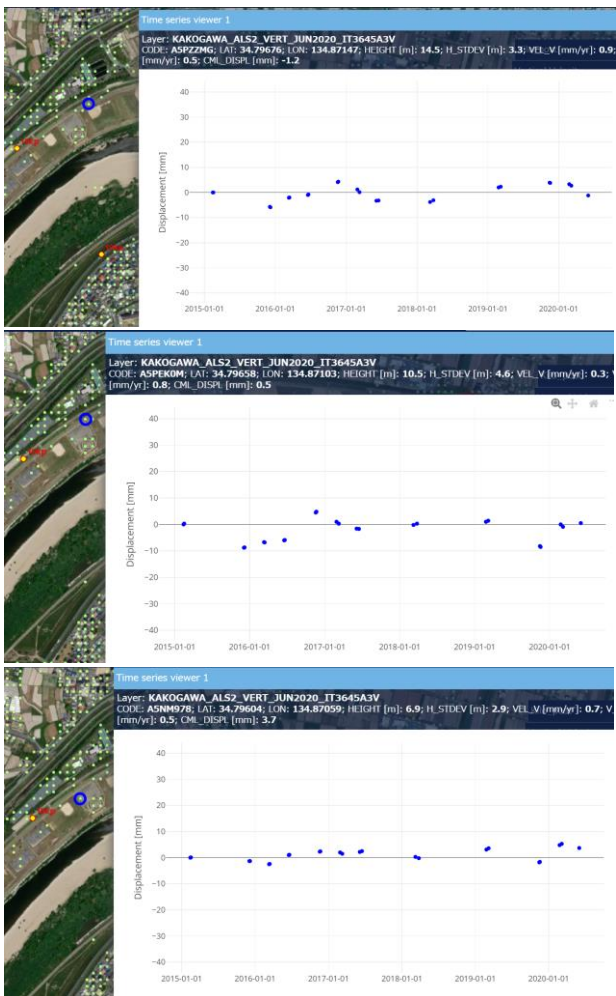


図-12 左岸 10.0k+100m 付近 SAR 画像分析結果

た2018年7月前後で変動量に大きな差が見られないことから、洗堀による変動量を抽出できていないと考えられる。

(ii)加古川右岸10.0k+100m (高水敷の陥没箇所)

高水敷の陥没箇所位置及び平成27年度時点の陥没状況、陥没メカニズムについては図-10のとおり。旧護岸の上に盛土を実施し高水敷を造成したことにより、旧護岸の石積みの隙間などに土砂が吸い出され空洞が生じた結果高水敷の陥没が発生したと考えられている。令和2年度には同箇所付近を複数点試掘し、図-11のように想定どおり旧護岸の埋設状況が確認された。そのため80m程度の区間を掘り返して旧護岸石積みを撤去し、良質土で埋め戻している。

埋設構造物が確認された箇所付近の垂直方向変動量分析結果は図-12のとおり。分析対象箇所と陥没箇所が一致していないため大きな変動は見られず、また付近のどの箇所においても分析期間中に垂直方向に変動がほとんど生じていない傾向が見られた。陥没箇所の抽出はできなかったものの、旧護岸の存在により大きな沈下が生じていないことが確認された。このことから同箇所付近での陥没は徐々に引き起こされるものではなく、スポット的に生じるものと考えられる。今後変動量の傾向に大き



図-13 加古川左岸 5.2k 高水敷陥没状況



図-14 加古川左岸 5.2k 付近 SAR 画像分析結果

な変化が生じた場合は、陥没リスクが高まっている可能性がある。このように、SAR 画像分析による変動量のモニタリングが陥没箇所への警戒度の引き上げ等の判断に資すると考える。

(iii)加古川左岸5.2k (高水敷陥没箇所)

同箇所でも右岸10.0+100m付近と同様に高水敷の陥没が平成24年度に確認された。陥没の詳細は図-13のとおり。同箇所の陥没のメカニズムは基本的に右岸10.0k+100mの陥没箇所と同様で、高水敷に埋設された旧護岸根固めの巨石の隙間に盛土が吸い出され、空洞化が生じたことで引き起こされたと考えられている。

同箇所付近の垂直方向変動量分析結果は図-14のとおり。陥没箇所から離れた堤防天端付近の箇所は下方の変動はなく、むしろ上方へわずかに変動している傾向が見られる。一方、巨石が埋設されていると考えられる陥没箇所付近は大きな変動は見られないものの、2016年より下方に変動している傾向が確認された。陥没を直接抽出できてはいないが、埋設巨石の存在により高水敷が沈下している様子を捉えている可能性がある。ただし、2016年に1、2cm程度変動し、その後はほとんど変動していないため、現状陥没リスクは高まっていないと考えられる。SAR 画像分析により得られたこれら情報をもとに、今後のモニタリングにて大きく変動が見られた場合は巡視頻度を強化するなどの検討が可能となると考える。

4. 河川堤防・高水敷等の維持管理へのリモートセンシング技術の適用可能性の検討

前章に示したSAR 画像の分析結果と実際の堤防の変状や高水敷の陥没状況を比較した結果や、SAR 画像分析の条件等から、現時点でSAR 画像分析技術を河川維持管理へ活用するために解決すべき課題及び適用可能と考えられる事項について以下のとおり整理した。

(1) 現時点におけるSAR 画像分析の技術的限界について

第2章、第3章の中で示した現状のSAR 画像分析の技術的限界は以下のとおり。

- ・ SAR 画像の分析方法、撮影方法の特徴より分析対象箇所を任意に設定することが難しい
- ・ 分析の精度向上のため一定枚数の画像が必要となることから、撮影周期との兼ね合いにより変動量の分析可能頻度が年2、3回程度が限界である
- ・ SAR 画像自体のメッシュがALOS-2の画像でも3m×3mであるため、狭い範囲での変状・陥没を分析で捉えることは難しい
- ・ 分析結果がmm単位で得ることができる反面、土地利用状況等様々な要因による変動が抽出されてしまう
- ・ 分析結果を水平・垂直方向の変動量として表すことが一般的であるため、変動量から変状・陥没を詳細にかつ妥当性を持って評価するためには別途異なる技術が必要となる

(2) SAR 画像分析に要する費用について

- ・ Sentinel-1のSAR 画像は無料で取得できるが、解像度が粗いこと、レーダ波長が短く植生による誤差が大きくなることから、河川状況の把握に適用することが難しい
- ・ ALOS-2のSAR 画像は有料で一枚当たりの取得価格が10万円程度であるため、分析に必要な枚数を確保するために要するコストが大きくなる
- ・ 分析に要する労力、特に精度向上のための作業コストが大きい

(3) SAR 画像分析による高水敷陥没箇所の点検・対策実施優先順位付けに係るスクリーニングの実現可能性

- ・ 広範囲での沈下傾向を分析により把握することは可能
- ・ 埋設構造物の存在を把握している場合などでは、分析により確認された沈下傾向の原因を推定することが可能
- ・ 広範囲で沈下のリスクを抱える加古川下流部高水敷などにおいて、通常の沈下傾向から外れた動きが見られる箇所について、重点的に巡視等による点検や対策を実施するなどの検討は可能

5. まとめ

第4章で整理したように、河川堤防等の変状を現時点でSAR 画像分析により直接抽出することは困難であり、抽出を実現するためには解決すべき技術的課題は多い。しかし、ピンポイントの変状の抽出には現状SAR 画像分析は向いていないが、河川巡視等であらかじめ変状の傾向や原因が分かっている個所でかつ変状が断続的に表れるような箇所については、点検や対策の優先順位検討に際してのスクリーニングのために活用可能と考える。とはいえ、SAR 画像分析結果を用いた河川堤防等維持管理に係る行政判断を行うための経験や知見はまだ蓄積されていないことから、河川維持管理へ直ちに適用するにはハードルが高い。SAR 画像分析の導入による河川維持管理の効率化を実現するためには、現状の巡視等の河川状況把握手法と並行してSAR 画像分析結果による河川堤防等の変状評価を試行的に取り組んでいき、現場での意見をフィードバックしながら技術を改良していく必要があると考える。本稿はその第一歩として、リモートセンシング技術の活用に係る経験・知見を蓄積するという観点から取りまとめた。今後同様の取り組みが行われる際の一助となれば幸いである。

謝辞：近畿地方整備局企画部施工企画課が募集した「新技術の現場試行」において、本稿で紹介した取り組みに多大なご支援・ご協力をいただいた株式会社応用地質水野様、塚原様、石垣様他関係者の皆様に、この場を借りて感謝の意を表す。