

河川堤防管理における計測技術の活用



首席研究員
佐古 俊介



上席主任研究員
田村 善昭

1 はじめに

河川堤防は、洪水・高潮による水災害防御の根幹的施設として古くから整備が進められてきており、安全で安心な社会や地域づくりを進めていくにあたっての重要な社会基盤施設の一つである。

河川堤防に求められる機能としては、耐浸透性や耐侵食性、耐震性等が挙げられており、特に浸透や侵食に対しては、降雨と河川水を外力とした堤防のすべりやパイピング、堤防侵食に対する点検や強化対策が行われてきているところである。

一方で、河川堤防の浸透、侵食に対する点検・管理は、「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領（平成 24 年 5 月）」に基づき、徒歩による目視点検を主体として、堤防全体の外観上の変状を網羅的に発見することとなっている。

しかし、目視点検によりこれらの変状を発見するには、長手方向に延長があること、除草頻度によっては変状が発見しにくくなること、点検要員の確保が今後難しくなること等から困難である。さらに、降雨時や夜間等の条件が重なると、目視による変状の発見はさらに困難なこととなる。

このような状況を踏まえると、河川堤防の点検・管理を行うにあたっては、従来の目視点検に加え、堤防決壊の前兆となる軽微な変状を適切な時期に検知するモニタリング手法を技術開発し、維持管理並びに危機管理の高度化・効率化に資することが喫緊の課題である。

本報告は、浸透、侵食に対する堤防点検・管理において、モニタリングが必要とされる変状項目を時空間的に分類・整理した上で、それらの変状をモニタリングするにあたって活用が期待される最新の計測・測量技術を、堤防の点検・管理にいかに関活用していくかの方向性について述べたものである。

2 堤防管理において必要とされる情報

2.1 堤防管理において必要とされる情報

河川が有するべき治水上の機能としては、①河道が所要の流下能力を確保していること、②堤防等の河川管理施設が所要の機能を確保していること、の 2 項目とされており、その機能を確保するために行う点検として、「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領（平成 24 年 5 月）」において点検の実施、結果の評価、あるいは堤防の補修等の対策の適切な判断の前提となる変状、変化を発見、観察するための標準的な方法について示されている。

特に、土堤においては、出水期前、台風期の点検と、各河川で設定された出水規模、主に、氾濫注意水位（警戒水位）以上を越える出水後に分けて、徒歩を基本として目視点検を行うこととなっており、点検項目については、これまでの経験等から、浸透現象や侵食現象による堤体破壊現象を分類・整理し、点検項目の抽出を行っている。

土堤における主な点検項目を表 2-1 に示す。

2.2 各変状項目の補修や監視に求められる時空間スケールの整理

これらのモニタリング項目については、変状の進行速度や補修や監視等を行う時間的なスケールが異なると考えられるため、年、月、時間の 3 つに分けて以下のような視点で整理を行った。

表 2-1 主な土堤のモニタリング項目

箇所	点検項目
法面 小段	法面・小段の亀裂、陥没、はらみだし、法崩れの有無
	寺勾配化、法面侵食等の有無
	堤防植生、表土の状態の異常
	小段の逆勾配箇所や局所的に低い箇所の有無
	法面・小段の不陸
	法面・小段の泥濘化
	小動物の穴の集中
	坂路・階段の路面排水の集中に伴う洗掘、侵食の有無
	樹木の貫入・拡大
天端	亀裂、陥没、不陸等の変状の有無
	天端肩部の侵食
裏法尻部	堤脚付近の浸潤状態
	法尻付近の漏水、噴砂
	堤脚保護工の変形
	湿性を好む植生種が群生
	ドレーン工の目詰まり、濁水の排水発生

- ・年単位：緊急の補修が求められる変状ではなく、また、監視を行う場合でも変状の進行速度が遅いことから年単位で見ることが適切と考えられるもの。植生に関するものや、堤体の小規模な亀裂やはらみ出し等の変状、のり肩部の侵食等がこれに当たる。
- ・月単位：出水毎に変状が進行し、補修についてある程度の緊急性がある、また、監視についても月単位（もしくは出水毎）で見ることが適切と考えられるもの。法面や小段の泥濘化、のり尻の漏水、浸潤等がこれに当たる。
- ・時間単位：緊急の補修等が求められる、また、時間単位（リアルタイム）で監視を行うことが適切と考えられるもの。堤体の大規模な亀裂やはらみ出し等の変状、のり尻の噴砂等がこれに当たる。

また、一方で、変状を補足するために適切な空間スケールも異なることから、変状補足を全体像として捕らえるか、局所的に捕らえるかで項目を遠景・遠近景・近景の3つに整理した。

- ・遠景：定性的（相対的）、広域的に変状の有無や大きさをとらえることが適切と考えられるもの。植生に関するもの等がこれに当たる。
 - ・遠近景：定性的（相対的）・定量的の両面で、ある程度広域的に変状をとらえることが適切と考えられるもの。堤体の小規模な亀裂やはらみ出し等の変状や、のり肩部の侵食、ドレーンの目詰まりや濁水排水、護岸等の変状がこれに当たる。
 - ・近景：定量的、局所的に変状の変状をとらえることが適切と考えられるもの。堤体の大規模な亀裂やはらみ出し等の変状、のり尻の噴砂・漏水・浸潤等がこれにあたる。
- 以上を図で整理すると、図 2-1 のようになる。

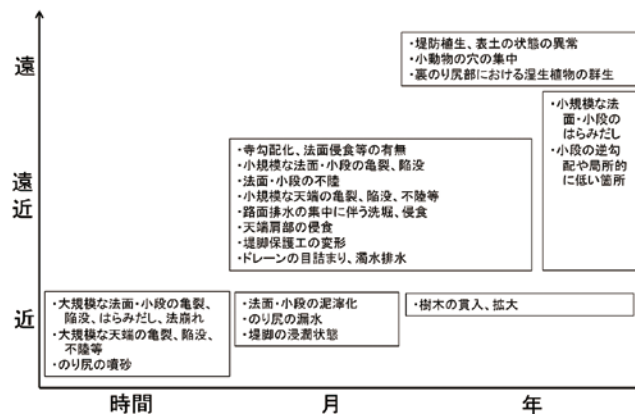


図 2-1 点検項目の時空間スケール

3 従来の手法の問題

土堤の点検は、出水期前及び台風期、出水後に徒歩で目視点検を実施することを基本としており、必要に応じてスケール等による計測を適切に行うと共に、写真撮影による記録を実施することとされている。一方で、最も変状を発生しやすいのは出水中であり、その時期に点検を行う必要性は高いが、人員の配置や安全面等を考えると現実的ではないこと等から定められていない。

土堤の点検においては、各点検の時期において、それぞれ求められる精度や、点検実施に際して想定される問題点等が異なると考えられるため、以下に整理を行った。

3.1 平常時の点検

現状の出水期前及び台風期の点検がこれにあたると考えられる。平常時の点検であるため、小規模の変状の発見や、植生等のように経年的な変化を監視することが主体になるものと考えられ、前回点検時の状態との比較が求められる。

リアルタイムで変化が進むものではないため、監視の時間的な間隔は密である必要が無い一方で、その変化は目に見えるようなものでないため、目視主体の手法だと見落としを生じる可能性が高い。また、相対的な比較の視点が必要になる場合、広範囲を同時に監視するような必要性もあると考えられる。

これらの微細な変状や変化は熟練技術者でなければ気づかないものも多く、委託等に頼らざるを得ない場合は監視水準の維持が難しいのが実態と考えられる。

3.2 緊急時の点検

現状の出水後の点検や、出水中の点検がこれにあたると考えられる。緊急時の点検であるため、大規模の変状の発見のように変化が著しい項目を監視することが主体になるものと考えられ、リアルタイムでの監視が求められる。

監視の時間的な間隔は密である必要がある一方で、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合や、同時多発的に変状が発生し

た場合、限られた人員で目視点検の体制をとる以上は見落とす可能性も否定できない。

さらに、災害時には現地への到達も困難であることが想定される。

3.3 機器による監視の必要性

前述したように、堤防の点検・管理では、堤体の微細で緩やかな変化に対する長期間広範囲に継続的な監視や、出水時の急激な変化に対する任意の時間から高い頻度での継続的な監視が求められる等、従来の目視による点検では困難が伴う監視が要求される場合がある。

これらの必要な堤防の点検・管理に対して、計測技術の活用による監視水準の維持・向上や監視の効率化が望まれているところである。

4 最新の計測技術

4.1 最新の計測技術の概要

最新の計測技術として、堤防に対して接触型と非接触型に分けて機器の概要を示す。

(1) 接触型

①光ファイバセンサ

浸透作用によって発生する堤防の変形計測については、光ファイバの変形による屈曲特性を活用した光ファイバセンサを活用し、堤防の変形位置と規模を把握する。堤防に変状が発生するとセンサ保護材が土塊とともに移動・変形し、隣接箇所と屈折が生じる原理を利用し、堤防の変状の有無を計測する。計測頻度は、変状をリアルタイムに捕らえることが可能であり、計測範囲はセンサの設置範囲に依存する。



写真 4-1 のり尻における光ファイバセンサの設置状況

②侵食センサ

これまで困難であった出水時の濁流下の河床や堤防の状況を把握するために、土中や濁流化した河川水内からワイヤレス通信可能な地中無線通信技術を用い、侵食の検地をリアルタイムに通報するセンサである。堤防の侵食や洗掘の検地には3軸

のMEMS加速度センサを用いている。侵食によって生じるセンサ自身の姿勢変化（傾き・回転）により、センサから見た重力加速度方向の変化を計測することで侵食を検知する。

計測頻度は、変状をリアルタイムに捕らえることが可能であり、計測範囲はセンサの設置範囲に依存する。



写真 4-2 侵食センサの設置状況

(2) 非接触型

①人工衛星 SAR

人工衛星に搭載した SAR（合成開口レーダ）を用いて広範囲に地盤高の計測を行うことができる。合成開口レーダは、電磁波を対象物に向けて発射し、その反射波を測定することで対象物までの距離を把握する計測装置である。

人工衛星による計測は、他の計測機器と比べて広範囲の情報を一度に入手することができ、その計測頻度と解像度は、陸域観測技術衛星 2 号「ALOS-2」の場合、1～2 日に 1 回観測し、その解像度は 1～3m に達する。

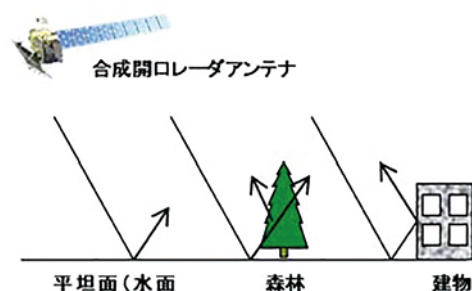


図 4-1 合成開口レーダからのマイクロ波が地物で反射されるイメージ

②航空機レーザ測量

航空機レーザ測量は、航空機に搭載したレーザ測距装置からレーザ光を発射して地表から反射して戻ってくる時間差を調べて距離を計測する。計測精度は、飛行高度に依存するが、高さの精度は±15cm 程度、水平方向の位置精度は、概ね 1m 程度とされている。計測頻度は、航空機が飛行可能な条件に依存する。

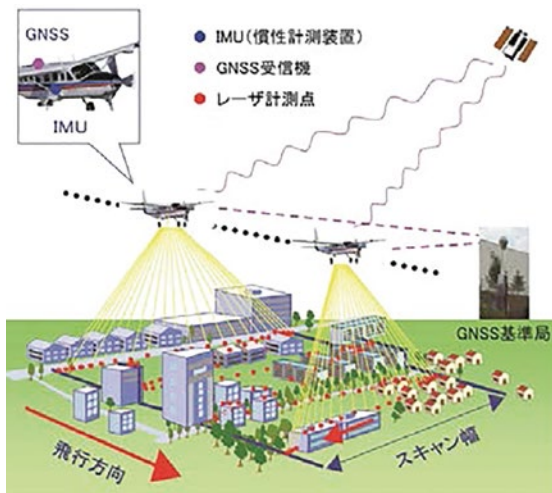


図 4-2 航空レーザ測量の計測イメージ²⁾

③ MMS（モービルマッピングシステム）

MMS は、車両の天板上にレーザースキャナー等の車両移動量計測装置を装着し、計測及び補正を行うことにより、通常走行を行いながら車両周辺の高精度な 3 次元座標データと画像データが取得できる車載型移動計測システムである。近年、MMS は、河川堤防の維持管理手法の高度化に向けた先行的な技術として提案されている。

計測頻度は、計測対象までの距離に依存するが、10m 離れた地点での分解能は 1cm とされる。また、計測頻度は、堤防天端の走行可能性に依存する。



図 4-3 MMS による堤防での計測イメージ³⁾

④ UAV（Unmanned Aerial Vehicle）搭載カメラ

UAV に搭載したカメラによる写真測量である。MMS が堤防天端から計測するのに対し、UAV 搭載カメラは上空から撮影できるため、樹木等による死角が生じない可能性があり、堤防天端のみならず法面等の形状を把握することが可能と考えられる。また、UAV で取得した画像データから SfM（Structure from Motion）ソフトを利用し点群の標高データを生成することが可能である。SfM とは、異なる方向から撮影した複数の写真から、カメラと対象物の 3 次元形状を復元する手法であり、UAV と SfM を用いた測量は近年多く実施されている。

UAV 搭載カメラによる計測はその手軽さや迅速性から急速に普及し、その顕れとして、効率的・高精度な施工を実現するための要領案「空中写真測量（無人航機）を用いた出来高管理

要領（土工編）（案）」が、平成 29 年 3 月、国土交通省より示された。

計測精度は、飛行高度に依存するが、対地高度 50m では、誤差は 5cm 以内に入るとされている。計測頻度は、飛行条件により、その飛行継続時間は UAV のバッテリーに依存する。



図 4-4 UAV 搭載カメラ

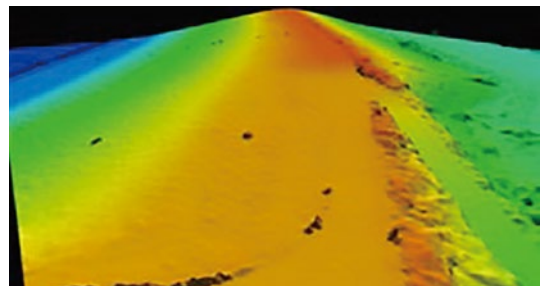


図 4-5 SfM による堤防 3 次元モデルデータ作成イメージ

4.2 堤防管理における計測技術の事例

計測機器を用いた堤防の変状等の監視のとりくみ事例として、光ファイバセンサと UAV 搭載カメラの事例を以下に示す。

(1) 光ファイバセンサ

光ファイバセンサの設置事例としては、S 川において、100m 区間に 3 条設置し計測を行った事例がある。

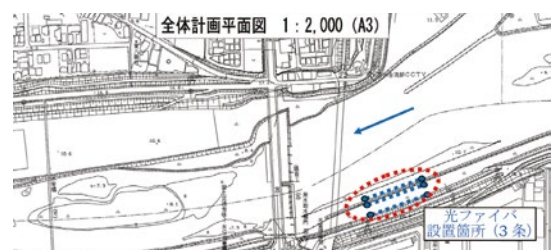


図 4-6 光ファイバセンサの設置箇所

センサの設置は、天端表のり肩、天端裏のり肩、裏のり尻の 3 条を溝掘（300 × 350mm）して、予め地組した光ファイバセンサ群（センサ、センサ保護材、アンカーボルト等）を掘削面に設置し、発生土で埋戻しを実施し、のり面崩れの位置やのり面崩れの規模の把握を試みた。

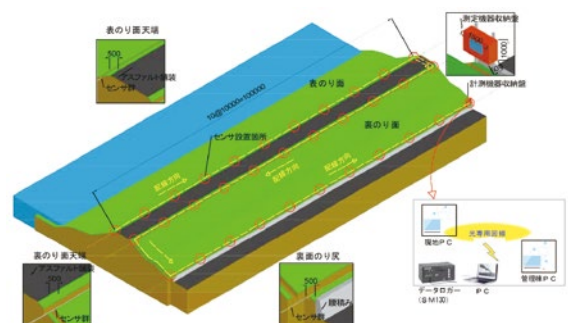


図 4-7 光ファイバセンサの設置イメージ図

観測期間中に出水等がなく、堤防のり崩れ・変形等の大きな変状が発生していないことから、本来の目的としていたセンサ類の活用による定量的、かつリアルタイムの出水時の堤防の変状把握や、目に見える変状が発生する前の段階での堤防の危険度判断については達成できていないが、図 4-8 に示す光ファイバセンサによる観測ひずみと降水量の関係を見ると、4 月から 6 月前半の降雨量が少ない時期の観測ひずみと、6 月後半から 7 月の多雨期の観測ひずみを比較すると、ひずみ変化のトレンドが変わってきている。このことは、降雨に伴う土塊の変形（移動）等が、光ファイバのひずみに現れているのではないかと考えられ、堤防のはらみ出しや変形を、光ファイバセンサで捉えることの可能性を示しているものと考えられる。

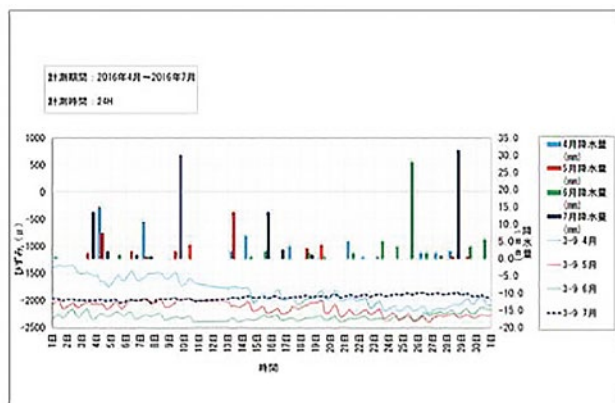


図 4-8 光ファイバセンサによるひずみ・降水量相関グラフ

一方で、この計測結果では、降雨とひずみの相関関係の把握までは至っておらず、また、堤防のり崩れ等の大変形時の計測を実施できていないわけではないため、光ファイバを堤防の変形監視に用いるには、今後、さらに降水量や水位等の外力と堤防のひずみ量の継続的な観測データの蓄積を行うとともに、大変形時の計測を行うことにより、リアルタイムかつ定量的な堤防の変形監視の可能性について評価を行う必要がある。

(2) UAV 搭載カメラ

UAV 搭載カメラを用いた計測としては、T 川の堤防を中心として、河川の上下流方向に約 600m、河川と直角方向に約 100m の矩形範囲を計測した事例がある。



図 4-9 UAV 搭載カメラによる計測範囲

この計測は、堤防形状把握の可能性を検討することを目的として季節の異なる二期について高度 100m から計測を行ったものである。図 4-10 に二期の UAV 搭載カメラによる画像データから生成したオルソ画像（正射変換した画像）と SfM による 3 次元モデリング生成結果を示し、二期の 3 次元モデリングデータより生成した標高差図及び計測当日の堤防法面の状況を図 4-11 に示す。

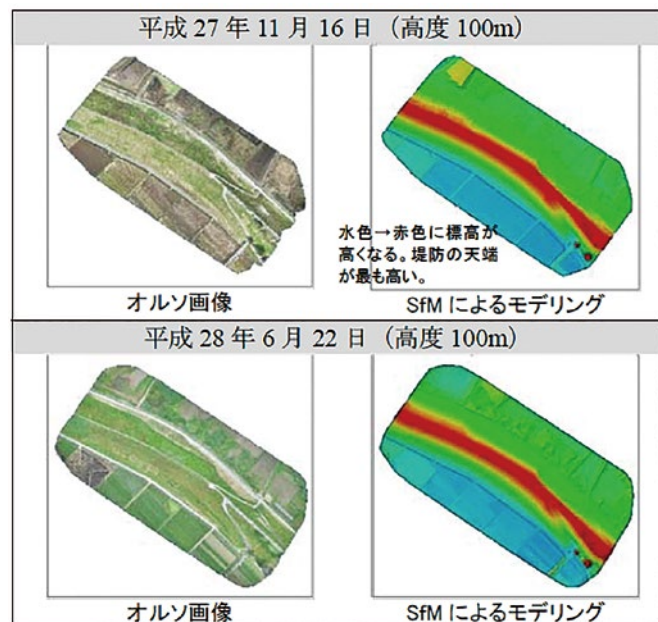


図 4-10 二期のオルソ画像と SfM による 3 次元モデリング

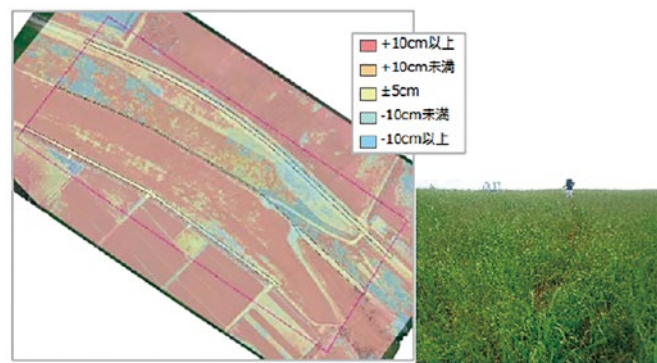


図 4-11 標高差図と計測当日の堤防法面の状況

オルソ画像によれば、6 月に撮影した画像は 11 月の画像に比べ堤体が緑で覆われ植生が繁茂していることがわかる。この植生の高さは、標高差図によれば、大部分が 10cm 以上となっている。これは計測当日の現地調査の結果と合致する。また、堤防の天端は、おおよそ変化が無いことが読み取れる。これらのことから、除草された二期以上の計測データを用いて標高差図を作成することにより、堤防堤体の経時的な形状変化の傾向を把握することが可能であると考えられる。なお、堤防表面は、植生等の様々な要因で日常的に変化することから、どのような標高差（又は標高差の範囲）を変化として判断するかが今後の課題である。

5 最新の計測技術の活用の方性

最新の計測技術の活用の方性を整理するため、図 2-1 に示した点検項目の時空間スケールを基に、監視タイプの分類案を表 5-1、図 5-1 に示した。

表 5-1 監視タイプの分類案

タイプ	監視内容
短期特定範囲型	出水時に堤防の決壊等の大規模な変状が想定される等、緊急性の高い状況における短期的（数時間～数日の間隔）な監視
中長期特定範囲型	緊急的ではないが変状となりうる中長期的（数日～数ヶ月の間隔）な監視
長期広範囲型	広範囲について監視が必要とされる緩やかな変状に対する長期（数ヶ月～数年の間隔）な監視

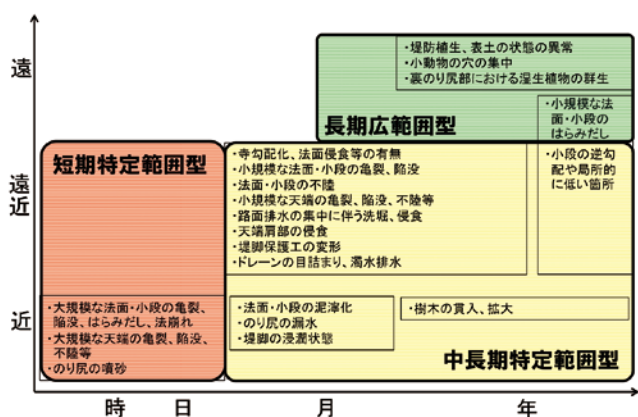


図 5-1 監視タイプイメージ

また、各計測技術の特徴や実際の運用を想定し、監視タイプで望まれる計測技術の運用の関係性を検討した。関係性は、概ね図 5-2 になるものと考えられる。

大規模な法面の亀裂、陥没などの致命的な変状に係る短期特定範囲型には、密な時間間隔で変形を捕らえることができ、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合でも監視が可能な接触型センサ類が適応し、小規模な法面の亀裂や法面侵食等の要監視に係る中長期特定範囲型には、降雨や出水の都度、定性的（相対的）・定量的の両面で、ある程度広域的に変状をとらえることが可能な MMS、UAV 搭載カメラが適応し、これまで定性的にしか捕らえられてこなかった、堤防植生、表土の状態の異常等、長期的に緩やかな変化に係る長期的広範囲型には、定量的・広域的に変状の有無や大きさをとらえることが適する航空機レーザ測量、人工衛星 SAR が適応するものと考えられる。なお、現状の技術では、非接触型の計測技術を用いる場合、植生の死角により、法面、小段のはらみ出しや局所的に低い堤防の監視ができない場合や、天候の問題により監視が出来ない場合等が課題となっているが、これらについては、各計測技術の高度化や計測技術の組合せにより課題解決のための技術開発が別途行われている。また、監視タイプの中で樹木の貫入、拡大等のように計測技術の適応性が低いと考えられるエリアについては、これまでどおり、目視による監視が必要であると考えられる。

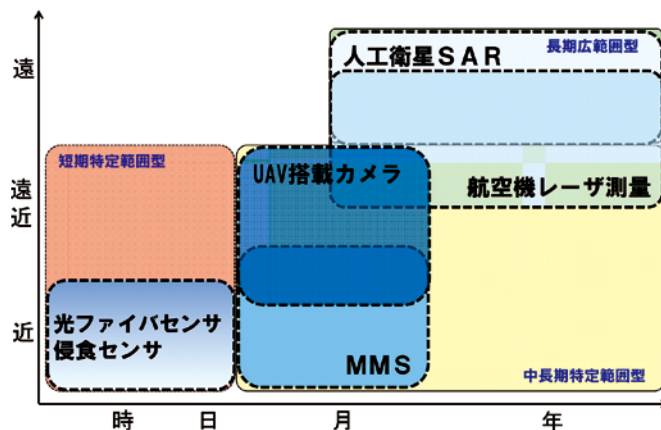


図 5-2 監視タイプで望まれる計測技術の運用の関係性イメージ

このように、点検（又は監視）項目毎の要求される監視の精度と計測技術の特徴及び実質的な運用性等とを合わせることで、堤防の点検・管理について、適切な手法により監視水準の高度化や監視の効率化が図られるものと考えられる。

6 おわりに

本稿では、堤防の点検・管理の高度化・効率化のため最新の計測・測量技術の活用の方性について考察した。

計測・測量技術は日進月歩であることなどから、図 5-2 に示した関係性のイメージ図は一案に過ぎず、今後に変状の変化速度から考えられる緊急度や、目視も含めた各種計測技術の複合活用等も含めて、堤防の管理において求められる監視項目とそれに適した計測技術の活用や開発について検討を進めていくことが、今後の堤防の点検・管理の高度化・効率化を行う上で必要になると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領，平成 24 年 5 月
- 2) 国土地理院：航空レーザ測量の仕組み
http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html
- 3) 足立哲也，移動計測車両（MMS）による計測技術の河川管理業務への活用について，平成 28 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集，2016 年 6 月 27 日。
<https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/happyou/theses/2016/pdf05/09.pdf>