

「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて

■建設無人化施工協会 会長 うえ き 植木 ちか お 睦央 (鹿島建設株式会社)
 技術委員長 いはら こう じ 猪原 こう じ 幸司 (青木あすなる建設株式会社)
 技術委員 きたはら しげ お 北原 しげ お 成郎 (株式会社熊谷組)

1. はじめに

自然災害の多い日本では、台風や集中豪雨、地震によって生じた土砂災害の復旧、火山の噴火に伴って生じる火砕流や土石流等の緊急復旧作業に当たり、建設機械を使用して除石や築堤等の作業を行う場合が多々あります。

このような作業の着手時に2次災害の危険が懸念される場合、人が危険区域内に立ち入らない日本の独自の技術として「無人化施工」が利用されます。

「無人化施工」は、安全な場所に設けた建設機械の操作室からカメラ映像を見ながら建設機械を遠隔操作して作業を進める方法で、長年にわたる技術開発の継続と技術伝承により、情報化施工技術や最新の映像技術、通信技術が導入されて、発展してきました。

この間に建設無人化施工協会が組織され、協会にはこの技術に関連する建設会社、メーカー、レンタル会社等が所属して技術情報を共有し、災害発生時には機材の所在に関する情報等を迅速に提供しています。

また、想定されるさまざまな災害対応技術を確立していくために、無人化施工にロボット技術の積極的導入を図って、この技術で対応できる災害

の範囲を拡大する試みが検討されています。

本稿では、この技術の開発と発展の契機となった雲仙普賢岳の火山災害対策をはじめとするさまざまな災害対応の事例と、今後のロボット技術の導入の検討について紹介します。

2. 無人化技術の施工事例

無人化施工の最初の工事は、1969年の常願寺川の富山大橋の応急復旧工事で、水陸両用ブルドーザによるものでした。この水陸両用ブルドーザは、建設省と建機メーカー（小松製作所）によって共同開発されたものです。その後、複数の建機メーカーによりバックホウ、ダンプトラックなどの遠隔化が図られました。これらの建設機械による施工は、オペレータの目視により行われており、単一機種で数台程度が稼働するといったものでした。

無人化施工技術が、カメラ映像を使ったシステム施工に大きく変貌したのは、雲仙普賢岳の噴火対策で実施した「雲仙普賢岳水無除石無人化施工試験工事」からです。この試験工事は、建設省が試験フィールド制度を活用した民間からの技術公募により行われました（公募：1993年7月、試験施工：1994年1月）。この試験施工により火砕流の到達区域外（技術課題100m以上）からの建設

機械群による10万 m^3 を超える除石の施工が確認されました。

土石流の発生や溶岩ドームの崩落による火砕流の発生が懸念される雲仙普賢岳の砂防工事では、平成24年度までに、26カ所の除石工のほか、32基の砂防施設（砂防えん堤、床固工、導流堤、背割堤）が構築されました（図-1）。この継続して行われた工事によって、無人化施工はGPS等の測位技術やネットワーク型の操作方式を積極的に取り入れた土木、機械、通信、情報技術を融合した総合施工技術と進化していきました。雲仙の実証フィールドで培われた無人化施工技術は、有珠山噴火、新潟県中越地震、岩手宮城内陸地震等の大規模な災害で活用され、全国で150件以上の実績があります。また、近年では、福島第一原発事故の放射線量の高い箇所の瓦礫処理ほか工事で、その技術の有効性が証明されました。

以下に雲仙普賢岳砂防工事の近況、火山噴火が活発化している桜島（鹿児島県）、樽前山（北海道）の噴火で想定される災害への対応事例、および2011年の紀伊半島大水害（台風12号）への対応事例を紹介します。

(1) 雲仙普賢岳砂防工事（赤松谷川8号床固工工事の例）

試験フィールド制度による試験施工では、①100m以上の遠隔操作、②直径2～3m程度の礫の破碎、③温度100℃、湿度100%の課題が与えられました。現在まで継続している砂防工事で、さまざまな技術向上が図られ、長距離化については、1km以上を超える中継方式のもの、光ファイバー、TCP/IPを使ったネットワーク通信による30kmを超える超長距離遠隔操作が可能となりました。また、当初、一時的に人員の立ち入りを必要^(注)とした起工測量、丁張、マーキングの設置、平板載荷試験などが完全に無人化されました。

(注) 退避車両を待機させて短時間の危険地域への立ち入りを行っていました。

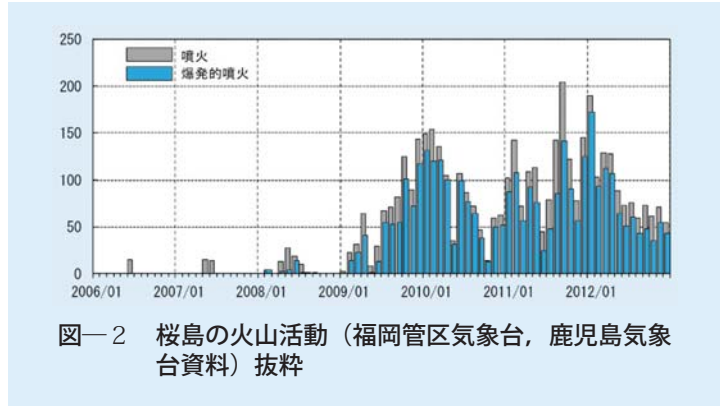
平板載荷試験の無人化は、簡易支持力測定器（キャスポル）を無人仕様のアタッチメント化して遠隔装置式バックホウにより行った2002年の水無川背割堤工事が最初で（写真-1）、2007年にJGS1521に準ずる測定が可能となりました。赤松谷川8号床固工工事では、バックホウを反力として、重機の下部に測定器を設置して測定しました（写真-2）。



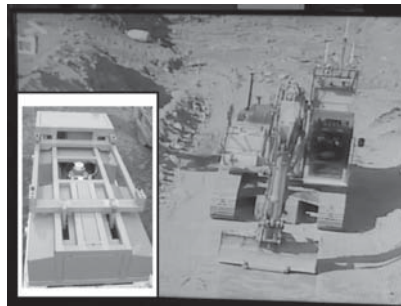
図-1 雲仙普賢岳砂防施設



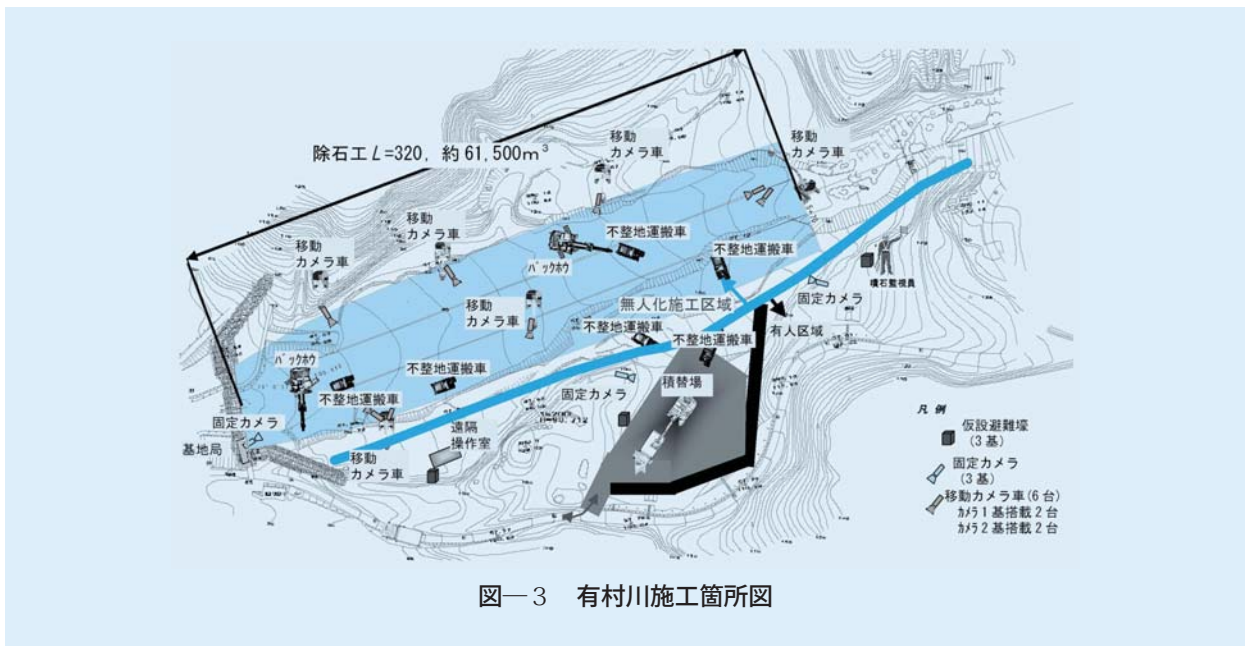
写真一 簡易支持力測定器による測定



図一 桜島の火山活動（福岡管区気象台、鹿児島気象台資料）抜粋



写真二 平板載荷試験（JGS1521）に準じた測定状況



図三 有村川施工箇所図

(2) 火山活動が活発な桜島での無人化施工

桜島では、2009年より火山活動が活発化し、噴火警戒レベル3となり（2013年5月13日現在継続中）、噴火高さがおおむね1,000m以上の爆発的噴火が2011年、2012年には約900回発生しました。

そのため、桜島の南東部の有村川で平成23年度と平成24年度に除石工事が行われました。

●工事概要

- ・工事名：①有村川除石工工事

②有村川除石工2期工事

- ・場 所：鹿児島県鹿児島市有村地先
- ・工 期：①2011年12月6日～2012年3月30日
②2012年3月13日～12月24日
- ・概 要：有村川1号堰堤上流部に堆積した土砂の除石工で、有村川除石工工事では28,200m³、有村川除石2期工事では61,500m³の礫質土の掘削（除石）が行われました。

有村川の除石工事では、1.9m³級バックホウ2台と10t積み不整地運搬車6台、移動カメラ車6台を使用するもので雲仙普賢岳から見ると小型の遠隔操作式機械での施工でした。

施工箇所は、警戒区域の2kmを少し超えた昭和火口から約2.3km地点でした(図-4)。工事期間中にも大規模な噴火があり度々工事が中断しました(写真-3, 4)。有村川除石工事終了間



図-4 有村川施工箇所位置図



写真-3 大規模噴火状況(噴煙高さ2,000m)



写真-4 降灰による視界不良

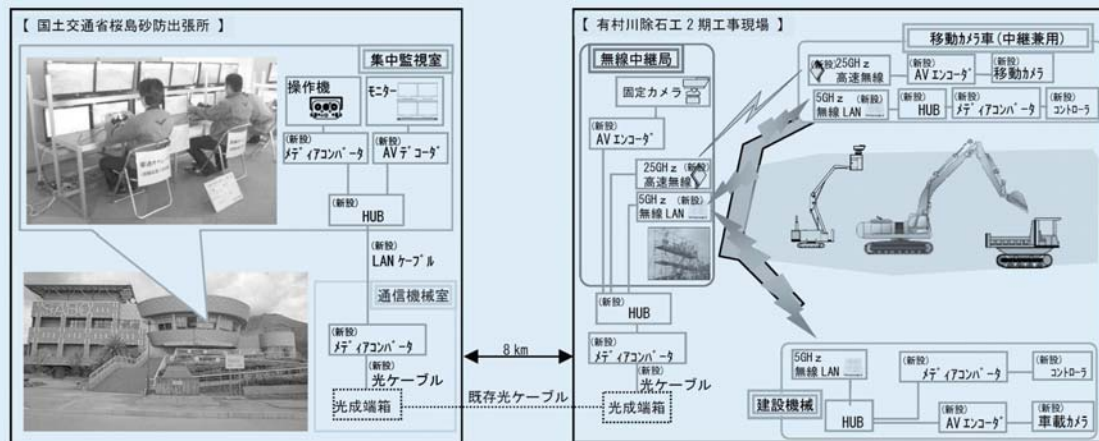


図-5 システム概要図

際の2012年3月12日には、大きな噴石が2合目まで到達し、工事中止命令が出されました。再開後の有村川除石工2期工事では、入山規制範囲の拡大を想定して、既存の光ファイバーケーブルと無線LANを用いて施工箇所より8km離れた桜島砂防出張所から超長遠隔施工を実施しました（図—5）。

(3) 厳冬期の無人化施工

樽前山では、火山砂防基本計画に基づき、融雪型火山泥流および2次泥流を対象として砂防設備の整備が進められています。「樽前山火山噴火緊急減災対策砂防計画に関する報告書」における融雪型火山泥流については、中規模噴火を対象としており、緊急減災対策では、無人化施工によるスリットダム閉塞工や遊砂地の掘削（除石工）等が考えられております。そのため、平成23、24年度に厳冬期の無人化施工の実証性についての試験施工が行われました。

●工事概要

工事名：①樽前山火山砂防工事のうち小糸井川遊砂地付替林道外工事における無人化施工

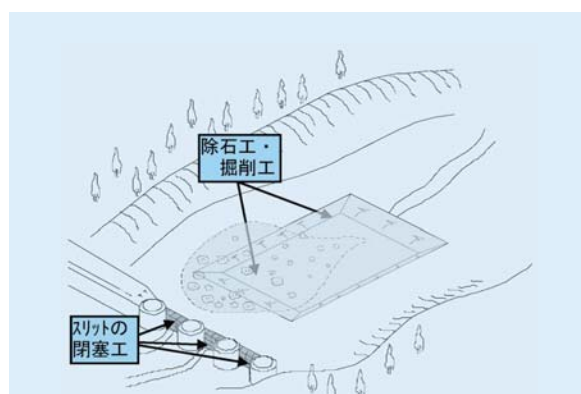
②樽前山火山砂防工事のうち覚生川1号砂防堰堤外工事

場 所：北海道苫小牧市

工 期：①2012年1月～3月

②2012年12月～2013年2月

概 要：各年度の施工実施期間の積雪深さは30cmで、現地の平均気温は-10～-5



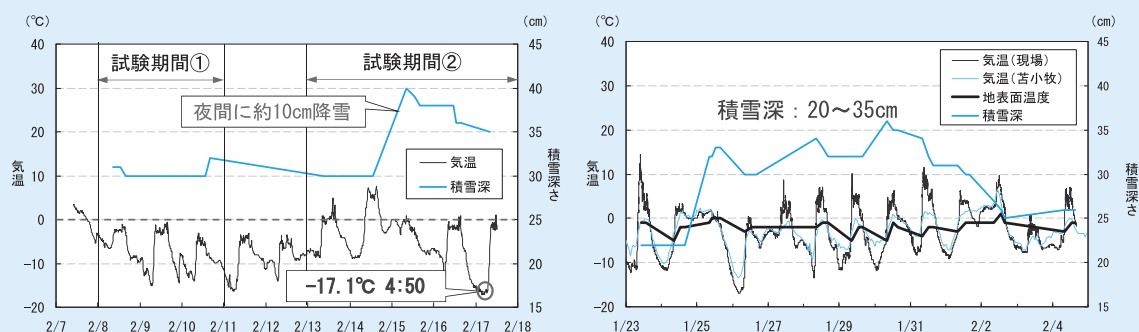
図—6 既設砂防施設での対策イメージ
(資料提供：北海道開発局)

℃で最低気温は-17.1℃でした（図—7）。スリットの間にはコンクリートブロックを設置する閉塞工（写真—5）を行い、厳冬期の無人化施工の施工課題の抽出を行いました。

平成23年度は、操作系・映像系の2系統の無線を使い、平成24年度は、無線LANを使い操作系と映像系を統合して、1.4kmの超遠隔操作を行いました（図—8）。

試験施工では、降雪中の無線通信等には影響ありませんでしたが、アンテナに雪が付着すると通信不良が起こること（写真—6）、積雪路面では、勾配20度で不安定になるため、勾配15度程度を施工勾配として計画が必要であること（写真—7）が確認できました。

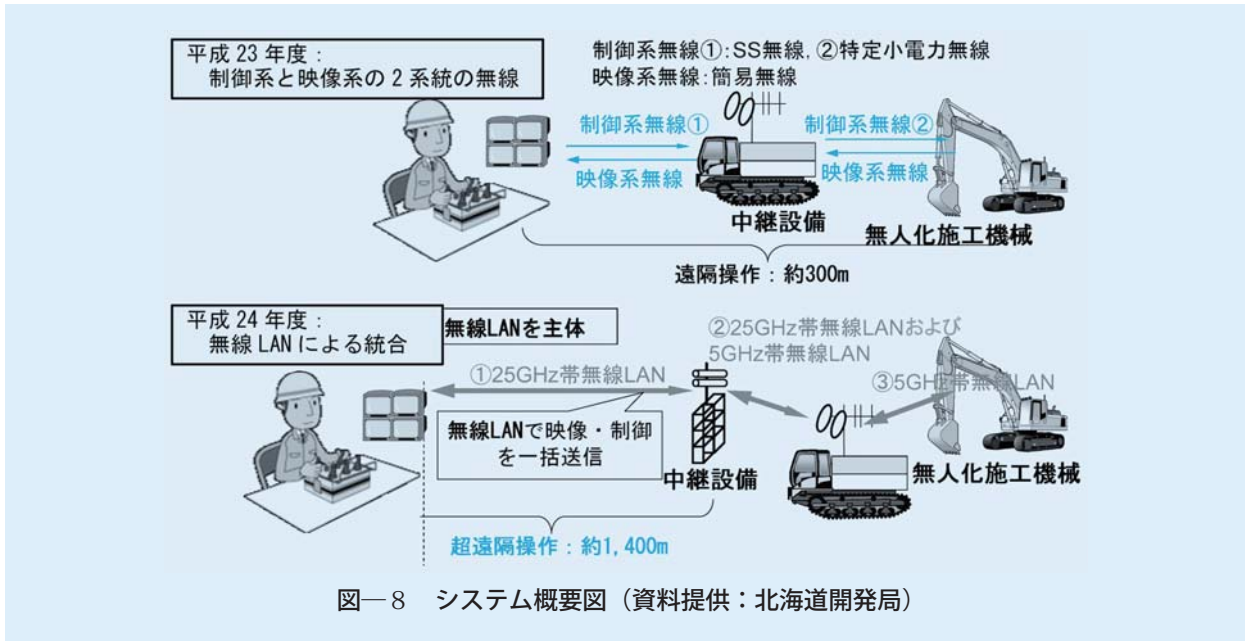
また、薄暮状態では、カメラ映像の方が目視より視認性が良く、噴火状況の監視課題はあるものの、夜間施工の可能性も検討の余地があることが判明しました。



図—7 施工期間の気温と積雪深さ（資料提供：北海道開発局）



写真一五 施工期間の気温と積雪深さ（資料提供：北海道開発局）



図一八 システム概要図（資料提供：北海道開発局）



写真一六 アンテナへの雪付着による受信不良（資料提供：北海道開発局）



積雪深さ：10cm, 勾配 20 度

写真一七 登坂実験状況（資料提供：北海道開発局）



写真一八 薄暮時の視認性の比較（資料提供：北海道開発局）

(4) 北股地区災害対応事例

東日本大震災以来、大規模災害等において災害地域に近づいて遠隔操作ができない状況災害地域近傍からの遠隔操作が不可能な場合への対応が望まれてきました。そうした中で、平成23年9月に発生した紀伊山地での台風12号災害による土砂ダムへの対応として導入された第4世代の無人化施工を適用した事例を紹介します。

第4世代の無人化施工は、ネットワーク技術を導入し、情報化施工を活用したこれからの無人化施工技術といわれています。

奈良県野迫川村北股地区の斜面崩壊災害復旧工事において、深層崩壊で発生した滑落崖の頭部を排土する工事に無人化施工を導入しました。当工事では頭部の尾根部分に脆弱な土砂状地盤の分布が確認され、土砂崩壊等の発生を抑えるために、尾根頂部の掘削により山全体を安定させる必要性がありました。かつ、不安定な地質であることから、建設機械作業による2次災害の危険性もある



写真一〇 北股地区無人化施工状況

ことから無人化施工が採用されました。

この工事では情報化施工技術がより安全に確実な施工を実現しています。通常の有人施工と同様に、操作室において情報化施工を駆使することが可能となり、有人施工以上にその恩恵を受け、効率化に貢献しています。

建設機械施工中は人が測量等で作業エリアに立ち入ることは危険を伴います。そこで測量作業不要で掘削・敷均施工が可能となる衛星測位システムGNSSを活用した油圧ショベルガイダンスシステムやブルドーザ排土板自動制御システムを導入しました。あらかじめ航空測量等で得た地形情報に設計情報を合わせた施工データを作成することにより、安全かつ高精度な施工が可能になりました。滑落崖の地山と排土した土砂との境を、断面表示により明確に区分することができます。

特にブルドーザ排土板制御システムは、自動的に排土板が動作するため、オペレータは前後進操作のみで設計の高さに敷き均すことが可能とな



写真一〇 情報化施工導入システム
(上段) 油圧ショベルガイダンス、
(下段) ブルドーザ排土板自動制御



図一〇 現場概要平面図

り、仕上げ作業を正確に行うことができました。

3. 今後の展望

産業競争力懇談会（COCN）「災害対応ロボットと運用システムのあり方」プロジェクトの報告書から無人化施工の開発すべき方向を引用して紹介します。プロジェクトは2011年度から始まり、2年目の2013年2月に最終報告がまとめられました。このプロジェクトに無人化施工協会メンバーが参加し、協力しています。

このプロジェクトは「防災ロボット、無人化施工システム、原子炉解体ロボットの三つの技術観点において、これからの日本が原発事故等の災害に対して安心、安全な社会を作り上げていくために必要な災害対応ロボットとその運用体制についての提言をとりまとめ、防災ロボット、無人化施工システムに加え、インフラ点検／メンテナンスロボットとの併用も含め、災害対応ロボットの技術的課題抽出と、産業競争力を高めるための開発戦略に関する提言を行う。」ことを実施しました。

災害発生時の緊急対応、復旧作業で利用される無人化施工はさまざまな災害に対する対応が期待されています。しかし現状の技術では、無人化施工が可能な作業は限定されており、対応する建機や周辺機材、熟練オペレータも全国で数十人程度と限られています。また災害現場では、機体の安定確保に細心の注意が必要である上、遠隔操作による作業の効率低下も生じることが懸念されます。

無人化施工の現状は、このように遠隔操作のみ

可能な技術では限界があり、空間や環境、機械の安定度などの必要な情報を取り込む技術が未開発なため、これらの分野の新技术の確立が災害対応には必須なものとなります。

無人化施工技術では、これを補う支援技術が重要で、特に以下の技術が求められています。

- ① 視覚情報を補う空間認知のための技術
- ② 作業のための地盤等の情報を収集する作業環境計測技術
- ③ 人間では作業に負担となる部分での、マシンコントロールやマシンガイダンスなどの制御技術や無線技術等

このプロジェクトでは新たに開発すべき災害対応ロボットとして以下の項目を挙げています。

- ショベル系建設機械
 - ・災害発生後、最初に現場に入り走行路の確保、障害物撤去を行える高機能車
 - 車載広角カメラ映像による空間認識、位置・姿勢計測による車体姿勢認識
 - 地盤性状や車体の滑り検出による安定性評価と転倒防止制御
 - 上記情報を遠隔運転に的確に反映する操作支援機能
 - ・復旧作業を安全かつ効率的に行える高度情報化
 - 環境計測システムにより地形等を把握して施工計画図を作成支援
 - 施工計画に沿ってマシンコントロール技術で正確な作業を支援
 - ・上記技術により、通常作業時には高度な安全性を確保し、作業効率の向上を実現
- 水陸両用運搬車両
 - ・津波等の災害復旧に際し、陸上から浅水深域

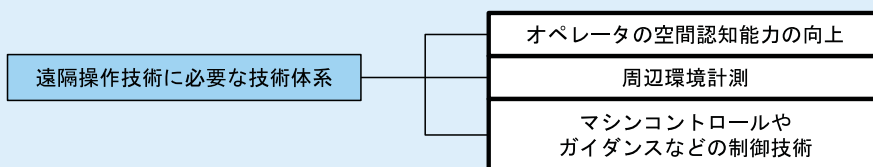
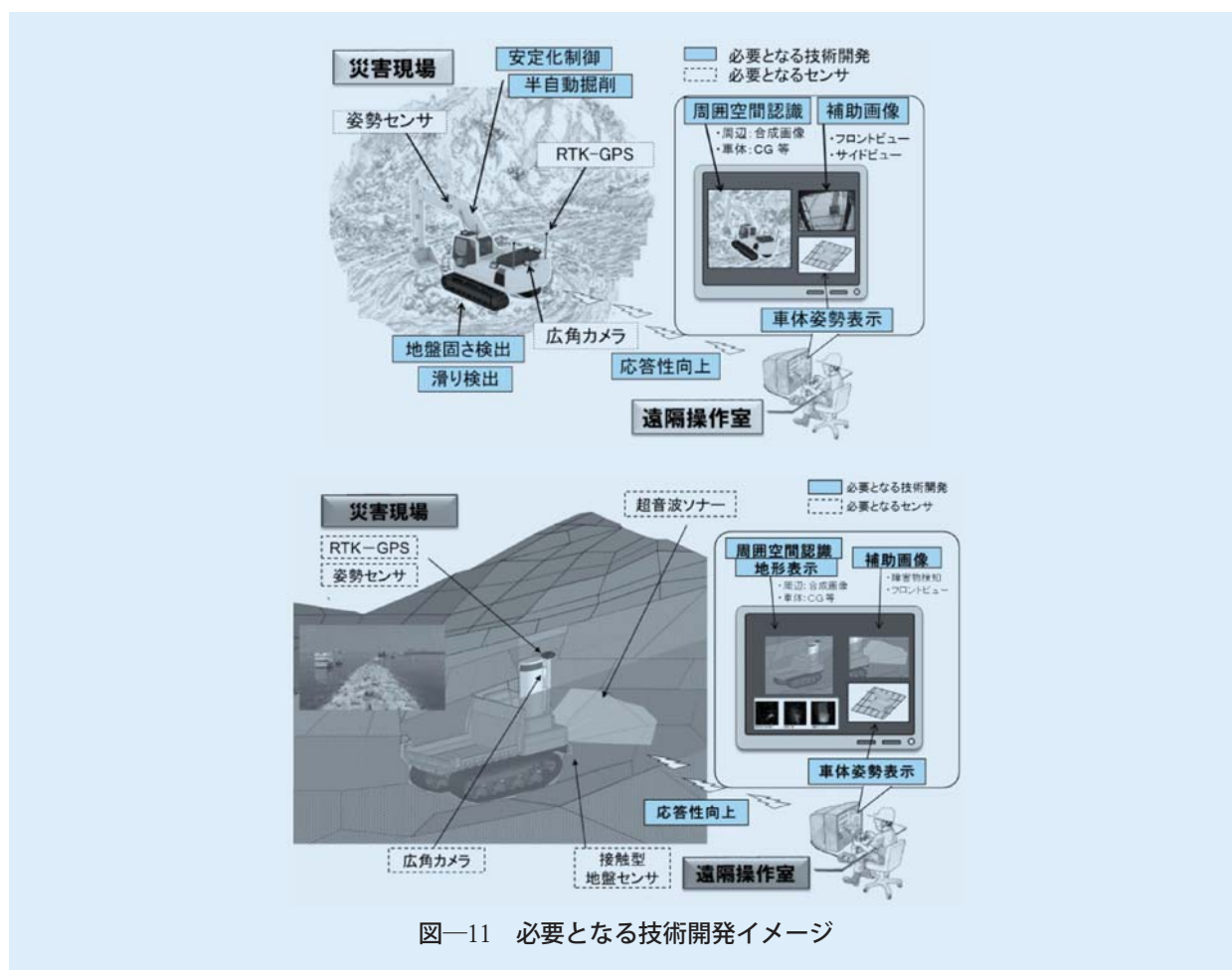


図-10 無人化施工に必要な開発技術



に侵入可能な運搬車両

- 土砂災害等に際し、一般の運搬車両が走行できない場所に侵入可能な運搬車両
- 超音波等による水中地形計測技術，触針棒等による地盤認識技術
- 安定性評価および転倒防止制御
- 走行支援ガイダンスシステム
- 上記技術により，浅瀬の海洋工事や河川改修工事等で，従来と大きく異なる作業方法を実現

の分野において，豊富な活用事例と適用効果の大きな点で，これまでにない新分野を切り開いてきました。

多くのロボット研究者からも，注目を集めているこの技術は，災害の多発する日本の中で大きく育てていかなければならない重要なテーマであると考えています。

建設無人化施工協会では，今後も無人化施工法の普及・発展に貢献していきたいと考えています。

4. おわりに

無人化施工技術は，フィールドロボティクス