

【産業競争力懇談会2012年 プロジェクト 最終報告】

災害対応ロボットと運用システムのあり方 最終報告 付録 無人化施工システムに関する提言

この提言は産業競争力懇談会2012年度プロジェクト「災害対応ロボットと運用システムのあり方」の委員会の下に組織された無人化施工システムに関するワーキンググループ（WG2）の報告の詳細をまとめたものである。この付録には報告書のページ数等の関係でプロジェクトの最終報告書の本文に盛り込めなかった詳細なシナリオやデータ等を含んであり、関係者にとって有用な資料となりうるため、WEB上で公開することとしたものである。大いに活用されることを期待する。

プロジェクトリーダーリーダー 浅間 一（東京大学）

WG2主査 植木 睦央（鹿島建設(株)）

要約：

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様々な災害に対する対応が期待される。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、熟練オペレータも非常に少数である。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。

今回の提案では、想定される災害の状況とその緊急・復旧方法を洗い出し、今後必要と考えられる建設機械のロボット化技術に関する技術開発要素を抽出した。

新たに開発すべき災害対応ロボットは以下の通り。

- ・ 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
 - 安定性評価及び転倒防止制御
 - 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する。

1 検討範囲

雲仙普賢岳の火山災害を契機として、火山、地震、台風、暴風雨等に伴って発生する土砂災害に対し、建設機械を安全な場所から遠隔で操作して復旧作業を行う無人化施工技術が開発された。この技術は、今日に至るまで、ICTや最新の通信技術を導入しながら発展し、様々な災害への対応で技術が伝承されてきた。福島第1原子力発電所の事故や、台風によって生じた紀伊半島の天然ダムへの対応にもこの技術が活用されている。

無人化施工技術とは、遠隔操作仕様の建設機械と遠隔操作に必要な画像関連技術、信号伝送技術、これらをまとめてシステム化する技術、遠隔操作を行う操作者等々の総称であるが、様々な自然災害の復旧に対応するためには不足する技術も数多い。本節では、想定される自然災害への対応に必要な対策の中で、無人化施工が必要な作業を明確化し、今後必要とされる無人化施工システムを実現するために取り組むべき新たな技術開発要素とその活用方法について提言する。

2 無人化施工システムの重要性

2.1 無人化施工システムのニーズ

自然災害の発生後は、直ちに災害の状況把握と共に再発を防止する緊急工事に取り掛かる必要がある。しかし、現地は危険で、調査のためのアプローチ手段に難がある場合も少なくない。2011年9月に発生した台風12号による紀伊山地大水害では、土砂ダムの形成に伴って下流域の住民の避難を余儀なくされた。一刻も早い緊急工事による安定化が要請されていたが、現地までの道路が河川の増水や土砂崩れなどで寸断されており、加えて地すべりの再発や降雨による土石流の2次災害が懸念されることが工事の進捗を阻害する要因となっていた。一般に、大規模な自然災害の直後は、現地の状況調査や緊急で作業を行う初期段階が最も危険な状況下にあるのが実状である。

無人化施工技術は、これらの危険状態の中でも作業可能な唯一の方法といえる。現地への機材の運搬という観点からも、例えば、ヘリコプターの使用が天候の影響を受け、小型機械や分割タイプの重機運搬が限界であるのに対し、比較的天候の影響が少なく大型の重機作業が可能なことも緊急性のニーズに応えた技術として大きく期待されている。危険区域の作業を無人で行えるという特徴は、災害の多いこの国の対策工事では大きな役割を担う技術である。

一方で、現状の無人化施工技術の実際の活用の際に問題となるのは、これらの期待に包括的に応えるまでに達しておらず、限定的な対応にしか適さないことにある。例えば、調査の初期段階で危険区域に入り現地の情報把握の一助を担うには、機械の走行路の地盤強度や周辺地形の情報を把握するための認知技術、これらのデータの情報処理や通信システム技術など、不足している技術の確立に向けた取り組みが必要となる。

さらに、災害対応の無人化施工システムが有事の際の備えとして有効に機能するためには、通常時でも建設作業に使用されることや、運転操作の訓練等が比較的容易に行われる必要がある。新たに開発する建設機械とそのロボット化技術は、通常時と災害発生時の各々について、機械の保有運用方法を視野に入れて災害時の活用を満足するシステムづくりが求められることとなる。

2.2 想定される災害と無人化施工による対策

無人化施工は、雲仙普賢岳での試験フィールドによる施工以来、過去 18 年間で有珠山、三宅島、中越地震、岩手宮城内陸地震、桜島等の代表的な災害に対応してきた。2011 年の東日本大震災以降で起こった災害で学ぶべき点は、大規模災害、複合災害の脅威とその対応についての困難さである。それ以前の災害では、影響範囲が 1 ～ 2 km 以内の限定された範囲が多かった。今後は、より広範囲でも対応可能で、原子力災害のような放射線対策やコンビナート火災のような高温対策が同時に求められる。

ここでは、これらの事例から推定される代表的な災害シナリオを想定することで無人化施工技術に求められる技術を明確にしていきたい。想定される災害は、風水害、地震、火山、原子力に分類される。シナリオを想定する上で重要なポイントは、ロボット技術でどう対応するべきかといったビジョンである。その基本となる考え方として、ロボットで対応しなければならない災害対応のための作業は、下記の 2 点に集約されると考えられる。

- ① 危険度が高く、人間での作業が著しく制限を受けたり、不可能な環境下で、かつ緊急性、必要性が高い災害対応
- ② 通常の条件と異なり、人間での作業が著しく効率が低下するため、効率を上げるためにロボットで行う災害対応

このうち②については、現在の技術では困難であるが将来の災害対応では注目されるものである。

2. 2. 1 風水害

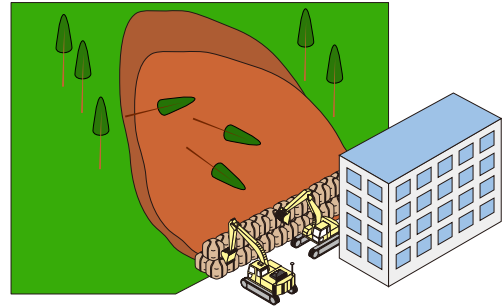
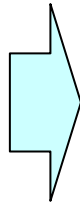
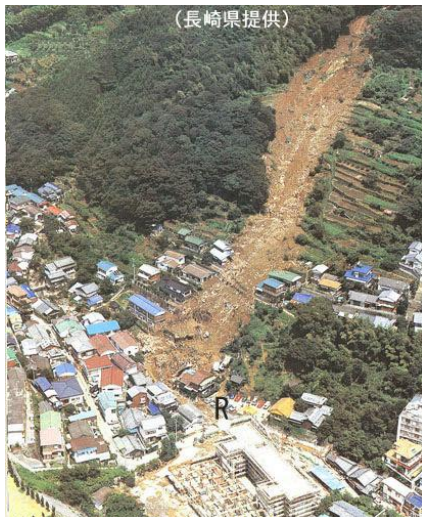
1) 風水害の概要

台風等の降雨や気圧変化等で発生する災害を指し、大きく洪水害、高潮、土砂災害、風害に分類される。特徴としては、原因となる台風や集中豪雨等で短期間の大きな気象変化で長期にわたって影響を及ぼす災害に発達する場合がある。

洪水害とは、大量の降雨等で発生した洪水による災害で、河川堤防決壊等が代表例である。高潮害は気圧低下や強風などで海水面が上昇し、堤防を越えて浸水することをいう。土砂災害は、大量の降雨等で地盤内の水位が上昇し、斜面等が崩壊することで、深層崩壊や地すべりが代表例である。風害とは強風等で引き起こされる災害で、竜巻等が代表例である。短期間に発生する災害で予測はある程度可能であるが、影響範囲が広いため、直前の対策は打ちにくい。これらの災害は、複合災害を発生させやすいことが特徴である。

2) 災害対応の必要性

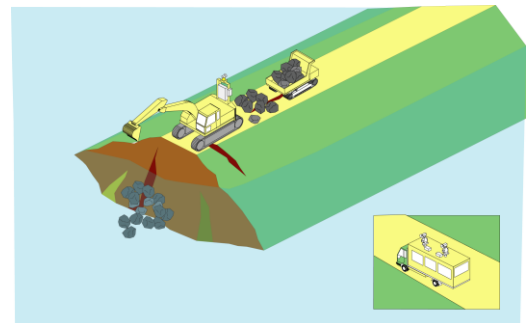
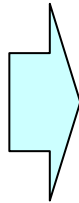
災害が発生または予測される場合で、人的被害や社会的影響が大きい場合に対応の必要性が生まれる。災害の種類により異なるが、風水害の場合は、大きく構造で分けると土砂崩壊、堤防の構造物の決壊が上げられる。土砂崩壊では、崩壊が進むことで災害が拡大する場合はその崩壊を止めるための対策や崩壊の進度を抑えることが必要となる。堤防決壊では破堤した箇所を迅速に締切り、生活基盤を復活させることが求められる。



<http://lswb1.ess.bosai.go.jp/kaisetsu/images/narutaki2.jpg>

※土砂災害時は、崩壊した法面およびその付近で人家等の構造物への被害を拡大させないため、大型土嚢や土砂掘削などの対策を遠隔操作で行う。

図1 土砂災害とロボットによる対応例



http://www.inashiki-kouiki.jp/suibou/img/photo-01_L.jpg

※破堤後の前後の堤防自体の強度が十分出ない堤防上での危険な作業を遠隔操作で行う。図では破堤後の堤防決壊の進行を防ぐため、投石をバックホウで行っている状況。

図2 洪水災害とロボットによる対応例

3) 要求機能

土砂崩壊のうち、調査では崩壊土砂の地質や湧水量等の測定が必要となる。対策工では、防護工、工事用道路の造成、土砂撤去、崩壊抑止作業等が必要となる。その後恒久対策として災害の再発生を防ぐ作業となる。

土砂災害では、その地区の地質条件に大きく左右されるため、調査を行いながら施工することが求められる。堤防決壊でも同様であるが、調査内容はよりリアルタイム性が求められる。堤防への対応は広範囲となり、機械に機動性が求められる。堤防自体の強度や地盤の状態、水位など

を調査しながら施工する能力が求められる。また、破堤前の補強作業も重要である。鋼矢板や鋼管杭などを自動で連続して打ち込むことなども必要になる。

4) 必要な技術

表 1 に、必要な技術とそれらの現時点での評価を示す。

表 1 必要な技術と現状評価

分類	評 価	
	既存技術	開発が必要な技術
調査技術	・地質調査技術（強度、色、成分）が該当し、有人による現地試験およびサンプリングで対応	・サンプリング調査の無人化技術 ・地盤の軟弱度など、機械走路状態の把握
建設機械姿勢制御技術	・機械の傾き程度の簡単かつ大まかな姿勢を把握する方法はある	・ブームの状態など、可動部の詳細な姿勢情報 ・転倒の危険などが生じた場合の安全機能など
画像伝送技術	・一般的なカメラを使用した伝送（速度に難がある）	・HD化や3D化の実用化（特に小遅延、高精度のエンコーダ） ・複数台のカメラに頼らずに車載カメラによる俯瞰表示（空間認知支援） ・不陸や傾斜などの詳細かつ広範囲な情報収集技術 ・悪天候時の可視技術
機械制御技術	・人型ロボットの分野で進んでいる	・建設機械対象の技術 ・機械側情報のフィードバック技術 ・力覚センサ技術の適用
座標管理技術	・汎地球測位航法衛星システム（GNSS）の利用 ・ジャイロの性能を用いた技術（高額）	・地下等での管理技術 ・ジャイロの応用技術、実用化
無線通信技術	・建設機械用の無線が少ないため、一般の無線LANを応用	・フィールドでの利用を考えた無線技術

5) 平時における当該技術の利用方法

これらの技術は、一般の土木工事で利用可能なものをベースとしての開発が必要となる。長期間にわたり施工を必要とする工事を継続して実施し、周辺に民間の機械が配置されているように配慮する。一般の土木工事で利用が稀な特殊技術は、各地方整備局、地方自治体が保有し、緊急時に利用できるように維持する。災害対応に適用可能な技術を育成し、通常の工事で応用しながらその技術を維持し、いざという時の活用を可能とする。特に法面や山林、治山工事において、技術開発を推進して利用を促進する。

その例として、双碗型バックホウでの利用で説明する。写真 1. 平時における利用状況（有人）は、瓦礫処理で有人作業における双碗型バックホウの利用状況を示したもので、主ブームで瓦礫をつかんで、副碗のカッターで鉄筋を切断している。通常では 2 台の作業機械が必要になるが、双碗での作業により、作業全体の効率化が図れる。

図 3. 有事における利用状況（遠隔操作）では双碗型バックホウを遠隔操作化したもので、副碗にカメラや線量計等のセンサーを設置し、作業場所の詳しい状況を監視することで、瓦礫撤去作業の支援を行う。平時は通常の建設機械と同様に利用しながら、その車両自体の特徴をいかして、有事にも遠隔操作の課題を補い、効果的な作業を行うことができる。



写真1 平時における利用状況（有人）



図3 有事における利用状況（遠隔操作）

遠隔操作ロボットも、一般時は通常の土木工事に利用できる機械として民間で登録性にて保有しておき災害時に協力する。関係自治体、国等が特殊機械を保有し、災害時には迅速に出動する。

2. 2. 2 地震災害

1) 地震災害の概要

日本列島は環太平洋地震帯の北西部に位置し、ユーラシア・北米の両大陸プレートの下に太平洋・フィリピン海両海洋プレートが沈み込む複雑な地下構造をしており、千島海溝、日本海溝、南海トラフ等がその沈み込みの場所であり、頻繁に地震が発生している。その地震により引き起こされる地震災害には以下のようなものがある。

1) -1 地震波による直接被害

震源断層から放出される地震波はP波（縦波）、S波（横波）、表面波として遠方に伝わり、大きな揺れを起こす。地震波が伝わってきたそれぞれの場所における振動の強さを示すものが震度であり、震度6強で墓石が転倒するような振動加速度（400 ガル程度）が発生する。このように強い揺れによる家屋・構造物等の倒壊が直接被害である。

1) -2 軟弱地盤での液状化による被害

緩い締り具合の砂質地盤は、地震によりゆすられると粒子間の接触が外れて体積が縮小するため、これに抵抗して地下水圧が上昇し、圧力を高めた地下水が砂とともに地表へ噴出する。これが液状化といわれる現象で、地盤の沈下・亀裂・陥没・隆起等を引き起こして、種々の構造物に被害を生じさせている。

1) -3 斜面崩壊・地すべり

起伏のある地形に強い地震動が作用すると重力加速度に地震加速度が合成されるため、瞬間的に斜面の傾斜及び重量が大きくなったような効果が生じ、斜面土塊を下方へ動かそうとする力が増大して斜面崩壊を引き起こすことがある。また、液状化のような現象を引き起こして、表土層を滑動させることもある。一般に風水害による崩壊に比べて予測が難しく巨大化の傾向があり、施設の倒壊、河道閉塞等の大きな被害を引き起こすことが多い。

1) -4 津波による被害

海面下で生じた地震断層により海底面が急激に隆起または沈降すると、その地形変化がそのまま海面変化となり、すぐさま海面の大きな変動が生じて周囲に伝わる。巨大なエネルギーのため通常の波とは違い防波堤を破壊してしまうことがあり、東日本大震災においても大きな被害をもたらしている。

1) -5 地震火災

倒壊した家屋や施設から火災が発生し、大きな被害をもたらすことがある。

2) 災害対応の必要性

地震災害は、地震が発生した場所や規模により種々の被害が発生する。それらの対応において共通なものは、地震により倒壊した構造物等の撤去や土砂災害での土砂等の撤去工事がある。これらは特に、発災直後の輸送路の確保に大きく寄与する。緊急対策工事や復旧工事を行う場合にも物資の輸送は必要で、人的支援にも輸送路の確保が最も急を要する。



写真 2 地震災害事例

また、津波災害や河道閉塞等における瓦礫・障害物の撤去において、水深 50cm から 4 m 程度の浅水域では建設機械の走行も含めた直接的な作業が不可能である。深水域では可能な船舶の使用等ができないため、盛土による作業基盤の造成や、作業構台の設置等の対応が必要となる。このことから、緊急で工事を進めるためには、水陸両用の掘削機や運搬機械が必要となってくる。これらは、二次災害の発生を防止しつつ安全に迅速に撤去作業を行うことができる遠隔操作型の機械であることが求められる。



写真3 水深50cm以下の浅瀬での作業事例

3) 要求機能

地震災害により発生した輸送路を阻害する障害物の撤去作業に際し、まずは地下埋設物等の損傷状況の調査が必要となる。地震により地下埋設物の水道管・下水道管・ガス管等に損傷が発生している場合、道路の陥没やガスの漏出による爆発等を招く恐れがある。道路を使用できない場合の迂回経路の設定も必要で、作業場所の地耐力の確認やガス漏れの有無等の周囲環境の調査、安全なルートを設定・確認するマッピング機能や自己位置確認機能も必要となる。また、作業する機械の姿勢が常に安定した状態を保つ機能、画像伝送の遅延が少なく効率の低下を招かないことなども要求される機能である。

その他、あらかじめ設置した画像伝送用の固定カメラを利用せず、作業を行う機械に配備したカメラを使用して障害物撤去を行うことができることも大きな要求機能である。

4) 必要な技術

これらに求められる必要な技術は、風水害の場合（表1）と同じといえる。これに加え、水陸両用の建設機械の無人化技術の観点から、表2に必要な技術と現時点での評価を示す。

表2 必要な技術と現状評価

分類	評価	
	既存技術	開発が必要な技術
水中の調査技術	水中ソナーや超音波などで水中の地形や構造物の形を測定可能だが、清水であることが条件で、流れのあるところや多少濁っているところは測定不能	- 流れや濁りのあるところでも水中の地形や構造物の形などを把握できる技術 - 水底の地盤の軟弱度など、機械走路状態の把握
水中での姿勢制御、機械制御技術	水中ブルドーザのように水中で作業できるものはあるが、自動姿勢制御などの機能はなく人の判断で操作	- 姿勢情報の把握 - 転倒などの危険に対する安全機能 - 機械別情報のフィードバック技術 - 力覚センサ技術の適用

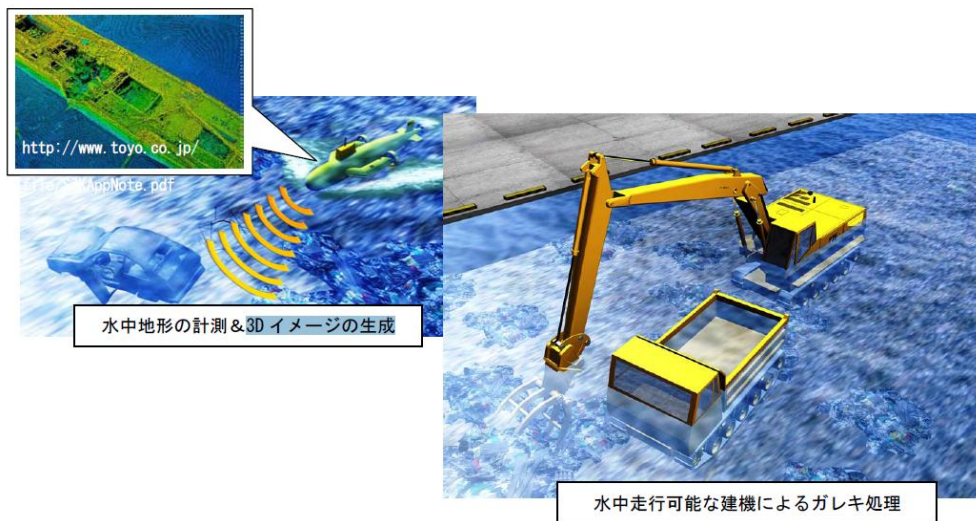


図4 有事における利用技術イメージ

5) 平時における当該技術の利用方法

平時においては、風水害の場合と同様の利用方法で対処する。

2. 2. 3 火山災害

1) 火山災害の概要

世界中には約 1,500 山の活火山があるといわれ、日本では 110 山と約 7% が集中している。日本の面積が地球の全陸地面積の約 0.25% であることを考えると、日本は地球上で活火山の噴火が起こりやすいところに位置しているといえる。火山災害は現在、前兆からある程度噴火等を予想でき、臨時火山情報等を活用するなどで減災は可能であるが、完全に防止できるものではない。

火山災害の種別を災害の起因から分類すると、大きく以下に分類される。

直接災害：火山噴火を代表とする噴火起因とするもの

火砕流、溶岩流、噴石、火山灰、火山ガス、山体崩壊、岩屑なだれ

間接災害：直接災害を起因とするもの

火山泥流、土石流

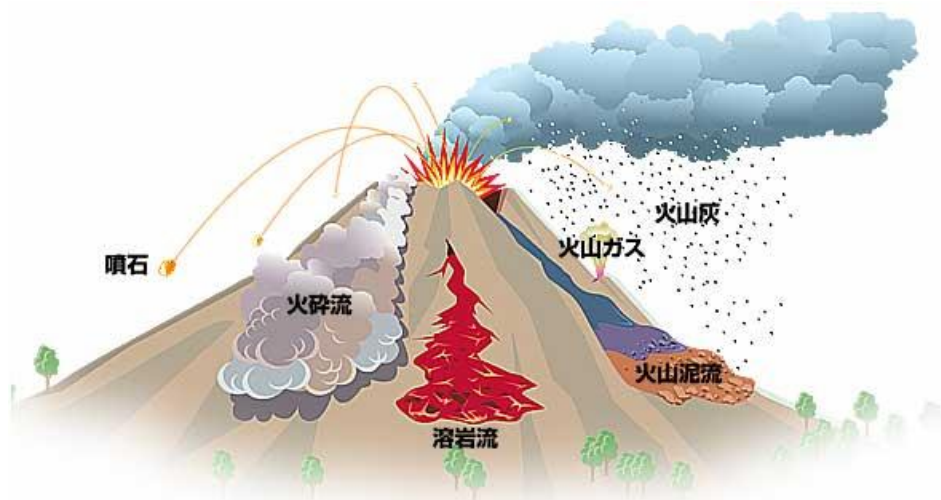


図5 火山による災害イメージ

2) 災害対応の必要性

火山活動にともなう災害の危険度が増し、災害対応が必要とされるのは次の地域である。

- ① 噴火していないが、火口付近に噴煙が存在し、硫化水素等の有毒ガスの噴出も想定される
- ② 噴火して、火口付近に発達中の溶岩ドーム等が存在する
- ③ 大量の火山灰が降下し、その後の降雨により大きな降水溜まりがある
- ④ 溶岩、噴石等により河川が一部堰き止められダム湖となっている
- ⑤ 倒れた樹木が河川に流入し、河川を一部堰きとめている

これにより、増大しつつある危険対応として、予想される災害の緊急度、重大性を事前、または災害発生後速やかに調査することが必要となる。また、災害規模が膨大になるので、被害の規模を縮小させる手段を講じる必要がある。

3) 要求機能

火山活動が活発化すると、噴火、火山性振動が予想され安易に近づく事ができない。また、影響を受ける範囲が広範囲なため、以下の機能が要求される。

- ① 数 km 離れた当該調査地点に、地上または空中を移動し接近し、必要とされる数値データ、映像を伝送でき、それが映像や音声等のデータに途切れがなく、遅延が小さい
- ② 火山灰の降灰下でも全体を立体的に認識し、水量・土量を推定する機能
- ③ 自ら伝送装置を設置しつつ、ある程度の障害を乗り越え災害現場まで進入する機能
- ④ 暴風、高温、粉塵、泥水に対して耐久性があること
- ⑤ 数 100m から数 km 離れた地点から遠隔操作できること

4) 必要な技術

火山災害に対応する既存技術として、画像伝送技術、遠隔操作技術、UAV、ヘリコプター、レーザスキャナなどがあげられる。開発が必要な技術には、風水害や地震災害の場合に加えて、以下の技術があげられる。

- ・暴風雨でも自立姿勢制御を行い、目的地まで飛行するヘリコプター技術
- ・周囲に設置するカメラを使用せず、自らのカメラだけで視野を確保し、自ら伝送装置を設け

て災害現場まで進入する無人化施工機械と安定的かつ高速伝送技術

- ・火山特有の環境下でも持続して稼働出来る技術

この他、火山災害では、主に土砂災害が発生するため、風水害で示した表 1 必要な技術と現状評価と同様の技術が必要となる。

5) 平時における当該技術の利用方法

平時においては、風水害や地震災害の場合と同様の利用方法で対処するが、特に、有毒ガスや放射線下などの劣悪な環境での作業にも適用されることとなる。

2. 2. 4 原子力災害

1) 原子力災害の概要

2011 年の東日本大震災で深刻な事態を引き起こした原子力災害は、現在、原子炉建屋付近にて津波や爆発による瓦礫撤去作業と廃炉に向けた工事が進められている。ここでは、高線量化での作業に対応するため、重機を遠隔操作する無人化施工が行われている。ここで実施されている無人化施工は、従来の技術に加え、遠隔操作による大型重機への自動給油装置や、瓦礫の無人運搬を自動で運行させるシステムなどの新たな技術も導入された。これらの新技術は、社会的なニーズやその重要性・緊急性に応えたもので、従来の技術を適用させる際の一助となる補助技術ではなく、無人化施工技術そのものの適用に必要不可欠な技術として位置づけられている。

一方、発電所周辺の 20km 圏内やその他一部の区域では、依然として広範囲にわたって除染作業が残っている。発電所に近い高レベルの汚染区域では、降雨による土壌や地下水の汚染の進行が懸念されているにもかかわらず、除染作業が手付かずの場所も多く、社会要請に遅れをとっているのが現状である。また、除染が必要な範囲が広範囲にもかかわらず、人力中心の作業を余儀なくされている現在の方法では、除染完了までの期間を想定すると長期化は避けられないことが推測される。

原子力災害は、除染作業に加え、瓦礫処理や撤去作業も付随する。災害が生じた場合に緊急で作業を行うための検討すべき機能は、これらも一連で行えることが可能な方法が求められる。また、前述した他の災害の対応が今後発生するものに対しての備えであるのに対し、原子力災害は、東日本大震災で発生したまさに現在の事態に喫緊に対応すべきものと位置づけることとなる。

2) 災害対応の必要性

原子力災害のうちの除染作業は、住民への影響や汚染の進行などの面で一刻も早い作業の完了が求められているのに反し、遅々とした地道な作業の繰り返しを強いられる。作業の進捗を妨げている多くの要因が潜んでいることが原因で、具体的には以下のようなものがあげられる。

- ① 作業員が被曝する
- ② 対象が広範囲にもかかわらず、作業がほとんど機械化されていない
- ③ 除染後の効果が目に見えず、作業程度やどこまで丁寧に行うべきかがわかりにくい
- ④ 除染する対象が複雑な地形や構造物の形状に沿って行われるため、大規模施工・急速施工に難がある

原子力災害によって生じる除染作業への無人化施工の適用は、作業員の被曝対策が不要となるため非常に大きなメリットがある。しかし、無人化施工の活用到现在の技術だけで対処するには多くの技術的課題を克服する必要がある。また、機械の保守点検などの運用面での問題も解決する必要がある。

3) 要求機能

除染作業は広範囲にわたるため、数キロ離れたところから遠隔操作できることが必要で、できれば数十キロ程度離れても操作可能であることが望ましい。また、有人の車両にて比較的低レベルの場所まで重機を搬送した後は、遠隔操作によって高レベルの作業区域まで自走で移動することとなる。移動中は、放射線量の値をデータとして伝送するとともに、重機の位置情報、重機周辺の地形や構造物形状、障害物の有無が映像データとして把握できることが条件となる。さらに、重機走路の地盤が軟弱で走行不能にならないか、走路の路肩が崩れて重機が転倒しないかなど、移動する上でのリスクをどこまで未然に防ぐことができるかも重要な要素となる。

作業を行う上では、地形や重機の足元の状態、重機の姿勢情報などが把握できることが条件となる。除染作業を行う場所は、道路や学校の校庭などの平坦な場所だけではなく、田んぼや斜面、林の中、側溝などの人工構造物上、あるいは構造物の周辺など多岐にわたる。また、除染作業は汚染部分の「撤去」か「遮蔽」で方法が異なり、一口に無人化施工に必要な技術といっても、除染する対象、地形や障害物の有無、使用する重機の種類・機能の選定、除染方法の選択が複雑に関連し合い、それぞれで必要な技術を開発していくこととなる。例として以下、関連表で示す。

表3 除染作業の方法と求められる機能の関係（例）

除染対象	作業方法	使用重機	求められる機能
・道路面、コンクリート面 ・土砂（平坦部） ・土砂（斜面部） ・土砂（田や畑） ・草 ・木 ・瓦礫 ・側溝 ・建造物表面	・撤去、搬出 ・コンクリートで遮蔽 ・大型土のうで遮蔽し搬出 ・覆土	・バックホウ ・ブルドーザ ・ダンプトラック ・発電機	＜操作性＞ ・数キロ（数十キロ）離れた遠隔操作技術 ・同伝送技術 ・重機の姿勢 ・無人給油技術 ＜情報収集＞ ・放射線レベル ・地形 ・基盤の状態 ・障害物の有無

4) 必要な技術

原子力災害に対する必要な技術とそれらの現時点での技術レベルの評価は、概ね風水害、地震災害、火山災害に対しての場合と同様といえる。（表1 「必要な技術と現状評価」参照。）

5) 平時における当該技術の利用方法

これらの技術は、他の災害を想定した内容と同様、平時は一般土木での使用を原則として利用され、災害対応に至った場合に流用させる運用となる。運用は、風水害、地震災害、火山災害の場合に記した内容と同様の方法となる。原子力災害の対応で特徴的なのは、機械や計器が被曝するため、作業完了後には洗浄して回収しその後一般土木で再利用させる方法と、高レベル汚染箇所で使用した場合などはそのまま廃棄させる方法とに分けられる。

2. 3 想定される災害と必要とされる建設機械

本検討では自然災害の想定として、風水害、地震災害、火山災害、原子力災害と大別し、発災後に調査・復旧を実施するための工種と工事内容を細分化する。それにより各々につき必要な建設機械が抽出される。無人化施工で対応する場合、既存技術で対応できるものと、新たな技術開発が必要なものを明確化し、広範囲の災害対応無人化施工技術として必要な開発項目を抽出する。

表 4 想定災害と対策工種と無人化施工機械との関連

想定される災害	工種	工事内容・作業	主に必要な機械			
			ショベル系	ドーザ系	運搬系	クレーン系
1. 風水害	調査	測量・計測工	—	—	○注)	—
	準備工(進入路整備)	WEBカメラ・センサー設置工	—	—	○注)	—
2. 地震災害	河川・護岸	工事用道路整備	○	○	○	—
	港湾	生活道路整備	○	○	○	—
3. 火山災害	治山	仮橋	○	○	○	○
	インフラ整備	防護工(安全対策)	○	○	○	○
4. 原子力災害	その他	土工(掘削、排土、法面工他)	○	○	○	—
5. その他 (コンビナート災害等)		ガレキ・倒木処理	○	○	○	—
		河川改修	○	○	○	—
		仮排水路、転流	○	○	○	—
		土嚢積、ブロック積	○	○	○注)	○
		締切工	○	○	○	—
		排水工	○	○	○	○
		護床、護岸工	○	○	○	○
		堤防工(復旧または新設)	○	○	○	○
		地盤改良	○	○	○	—
		砂防堰堤	○	○	○	○

※ドーザ系：ブルドーザ等の建設機械を示す。

注)：対策工事用資機材運搬

無人化施工技術の採用は、災害別やそれらの規模、地域特性や緊急性などで導入する判断が異なるが、作業区域や作業自体の危険度を明確に評価するのに難がある災害現場では、作業の二次災害を防ぐ意味で有効な手段の一つであるのは明らかである。災害発生直後から緊急対策工事の実施まで、多様な工種にわたって無人化施工の活躍が期待される一方で、期待に応えるには様々な課題が顕在化しているのが現状である。

表2で抽出したように、代表的な建設機械であるショベル系、ドーザ系（ブルドーザ等）、運搬機系、クレーン系の無人化施工の対応技術の現況を考えると、

ショベル系：様々な作業状況に適した技術としては未完成

ドーザ系：一般の掘削・押土を無人化施工で対応可能

運搬系：無人化施工対応機種が限定的

クレーン系：同上

といった状況である。

2. 2であげた災害

シナリオをさらに分析すると、現在必要とする災害技術は下記の分類で表すことが出来る。

- ① 土砂掘削・瓦礫撤去
- ② 対策工（構造物設置）
- ③ 調査・監視

表5 災害対応技術

（◎重要、○適用可、△一部可、×不適）

項目	ショベル系	ドーザ系	運搬系	クレーン系
①土砂掘削・瓦礫撤去	◎	○	◎	×
②対策工（構造物設置）	◎	△	○	△
③調査・監視	◎	×	△	△

これらの技術に適用した機械を選定すると表5のようになる。以上を背景に、無人化施工に必要な遠隔操作仕様建設機械とそのロボット化技術に向けて、さらなる技術開発が必要な建設機械として「ショベル系建設機械」と「運搬機械」があげられる。

2. 4 無人化施工技術の現状と問題点

建設機械によるフィールドでの作業を想定した場合、現在のロボット技術の水準では、無人化施工技術として完全自律制御を確立させることは難しい。緊急時の作業を想定すると、遠隔操作をベースとしてシステムを組み立て、その作業補助・操作支援として部分的に自律制御の技術を取り入れて運用させることとなる。例えば、ブルドーザの情報化施工で使われる排土板制御では、ブルドーザの走行は遠隔操作で実施し、排土板の上下及び傾き動作で汎地球測位航法衛星システム（GNSS）を用いた自動制御が用いられている。制御技術を部分的に操作支援させる位置付けによって、ブルドーザの仕上げ作業の無人化が可能となり、効率向上にも寄与している。

加えて、無人化施工の問題点は、有人施工に比べて効率が悪いことがよく知られている。無人化施工が有人運転と同じ効率とならない原因は、人でいう五感情報の欠落等が指摘されている。

以下の写真は土砂崩れの斜面にて災害に巻き込まれた人の捜索支援のため、無人化施工にてバックホウを斜面に沿って操作しているものである。余震の中で、崖上部からの落石の危険から、遠隔操作で土砂の除去作業を行っている。写真右上の岩を取り除こうと遠隔操作しており、機械の傾きが不安定な中でアームを動かして作業を行っていた。この後で上部の岩が落石している。この状況では、車体の姿勢をオペレータが正確に把握できず、作業に苦勞している。

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る。



<https://picasaweb.google.com/kuriharakoho/0101#5326264402141804946>

写真4 無人化施工における崖部土砂撤去での不安定作業状況

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る。

- 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

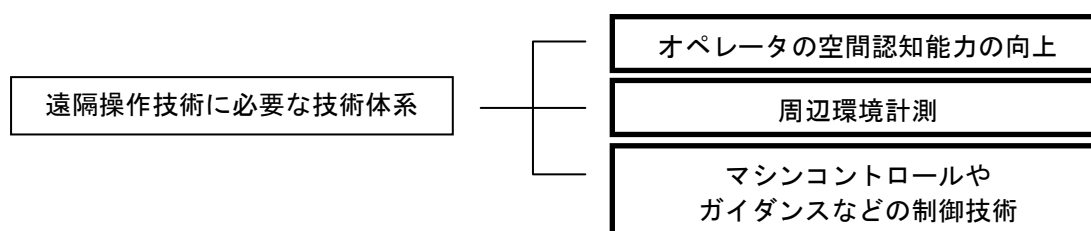


図6 無人化施工に必要な開発技術

2. 5 ロボット技術の必要とする技術

ショベル系建設機械は、その特性から多様な災害への対応に適しているが、遠隔操作での効率の低下が問題点として指摘されている。ショベル系建設機械の研究開発の方向性としては、「機械制御系」と「空間認知系」のテーマの両立が重要であるとの指摘が多い。遠隔操作での施工効率を向上させるには、この2テーマの研究開発が進み、両者の融合が進展することで新たなロボットの開発段階に進化すると考えられる。

運搬機械は通常の建設機械には多くの種類が存在するが、災害時には特に悪路への対応が求められる場合が多い。また、震災以来、海中の瓦礫撤去等で浅瀬の水中作業の難しさを指摘する声もあるため、現存しない「クローラ式水陸両用運搬機械」に特化して検討を進める。

したがって新たに開発する無人化施工機械は、その操作方法に関して、従来以上の熟練度や負担を要求することが想定される。このため、走行時の機械の安定性、一定範囲に制御可能な走行、操作者を支援する画像処理方法、情報通信システム等を併せて検討する。

3 無人化施工で開発すべき技術

遠隔操作においての課題を整理すると

- ① 作業環境の3次元空間を正確に捉えられない点
- ② 車両自体の姿勢がわからない点
- ③ 地盤等の状況がわからない点

があげられる。

これらの問題を総合してオペレータの空間認知の問題として、遠隔操作の大きな障害となっている。この3つの課題はそれぞれ別の問題のように思えるが、人間が行動する上では同一線上にある問題とも考えられる。作業時、人間が迅速かつ正確に状況を判断するためには、作業員の脳に直接その状況が input される必要がある。

遠隔操作のオペレータの脳の内部ではこれらの問題をほぼ同時に処理しながら、作業しなければならない。前述の写真4「無人化施工における崖部土砂撤去での不安定作業状況」で考えると、写真のような複雑な作業状況では、『周囲の地形形状を把握し、建設機械自体の姿勢を理解しながら、岩の状況を確認して作業する』ことになる。これは特殊な状況ではなく、フィールドでのロボットの移動や作業では、程度の違いはあるが、こうした判断は常に求められる。

このオペレータの空間認知の問題を解決するため、現在では車載カメラと外部の固定カメラによるモニタ映像により、遠隔操作を実施している。これはモニタ映像がオペレータに多くの種類の空間情報を提供できることと、リアルタイムの映像であるため、信頼性が高いことにある。しかし、映像だけでは、作業効率が十分に上がらないことも分かっており、より高度な技術が求められている。このことから、空間認知系の技術開発が重要な役割を果たし、今後の遠隔操作技術のために期待される分野であるといえる。

しかしながら、この問題を完全に解決するためには空間認知に関する感情の不気味の谷現象（The Uncanny Valley）を超えることが求められ、違和感なく情報を受け入れられるようにしなければならない。直ぐには置き換わる技術が現状は困難であることから、取り組みやすいものからこうした技術や研究を積み上げていく必要がある。この後に示される技術はその代表的なものである。

3. 1 時間的経過による想定場面

これまで述べてきたように、人の立ち入りが困難な災害復旧作業において、様々に変化する現場の状況に対応するためには、自律ロボットだけでの対応では難しく、現実的には遠隔操作を用いた無人化施工による作業が必須となるが、現状の技術だけでは十分な対応ができるとは言い難い。

ここで、無人化施工を行った場合の具体的な課題がイメージしやすいように、時間的な経過に対する想定場面をあげてみると表6のようになる。災害発生直後は、機械単体（スタンドアロン）で現場に突入し、続く重機の走行経路の確保等を行う①の緊急対策工事が必要であるが、頼れる映像も車載カメラ映像のみとなり、周囲の状況、車体の傾き等の状態、地盤強度など地山の状況が十分に把握できないため、現状のままでは、安全に作業を行うことが困難である。この段階では、続く災害を未然に防ぐことが重要であり、緊急性が最優先される。

その後、複数の機械を導入しての②の復旧工事に移行し、複数のカメラ映像を見ながら作業が可能となり、本格的な復旧作業に向けて効率化が求められるようになる。この場合も、遠隔操縦では現場の状況がつかみにくく、作業効率が通常より劣ってしまうこと、さらに遠隔操縦に習熟した作業員の確保が容易ではないことを考慮すると、自律化を中心としたロボット技術による効率向上が望まれる。このとき、早期復旧のために、稼働時間や台数が比較的多く必要とされる。

表6 想定場面に対する主な課題

分類	①緊急対策工事	②復旧工事
作業内容	災害現場に最初に突入する	復旧作業を遠隔で行う
作業形態	スタンドアロン	複数の作業機と連携
使用画像	車載カメラのみ	複数台のカメラ画像
主な課題	周囲の状況が判らない 車体の状態が判らない 地山の状況が判らない	現場の状況がつかみにくい 作業効率が通常より低い
要求ニーズ	初期段階で緊急性が高い 稼働時間や台数は限定的	中期段階で効率向上が必要 稼働時間や台数は比較的多い

必要とされる技術を検討するために、代表的な災害（風水害、地震災害、火山災害）を想定し、具体的に作業の流れを時系列で追ったものが図7である。

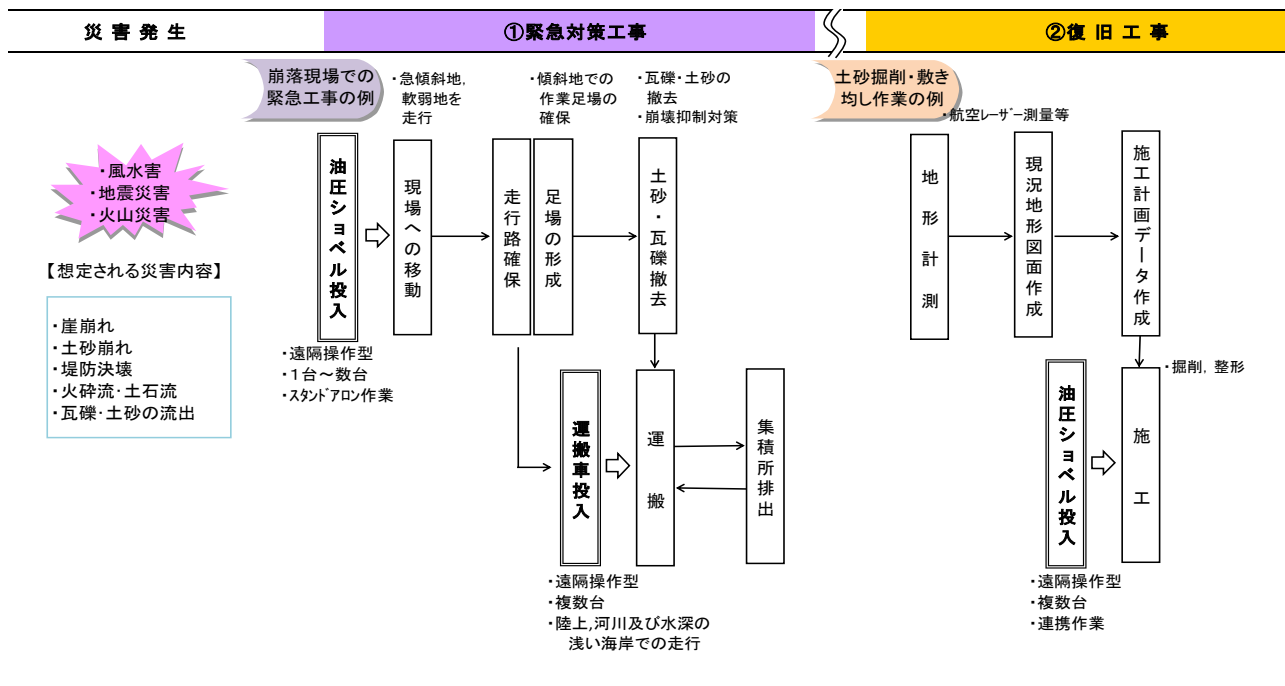


図7 災害現場における作業の流れ

①緊急対策工事の段階では、現場に油圧ショベルを投入し、急傾斜地や軟弱地等の道なき道を、自ら走行路を確保しながら、遠隔操作によりスタンドアロンで移動する。目的地に到着後は、はじめに足場の形成を行った後、必要とされる瓦礫や土砂の撤去作業や崩壊抑制対策を行う。このとき、撤去された瓦礫や土砂の運搬を行うため、走行路が確保された後に運搬車を合わせて投入する必要がある。

次に、②まだ二次災害の可能性が残る復旧工事の段階では、安全に効率よく作業を行うために、無人化施工を前提とした高度な情報化施工を実施する必要がある。はじめに、航空レーザー測量等により災害現場の地形を計測、現況の地形図を作成し、それに基づいて施工計画を検討、施工計画データを作成する。これら事前準備が整い次第、必要とされる複数の油圧ショベル等の重機を投入し、遠隔操作に起因する操作性低下を情報化施工技術や制御技術等で補いながら、掘削や整形作業を行う。

3. 2 必要となる技術開発要素

災害シナリオにおける課題としては、陸上作業機では周辺地形が分らない等の周囲環境の把握や、機械の姿勢が掴めない等の自車状況の把握、および水際における作業に対する水陸両用運搬機の必要性があげられ、これらを解決するために必要となる技術開発イメージは図8となる。

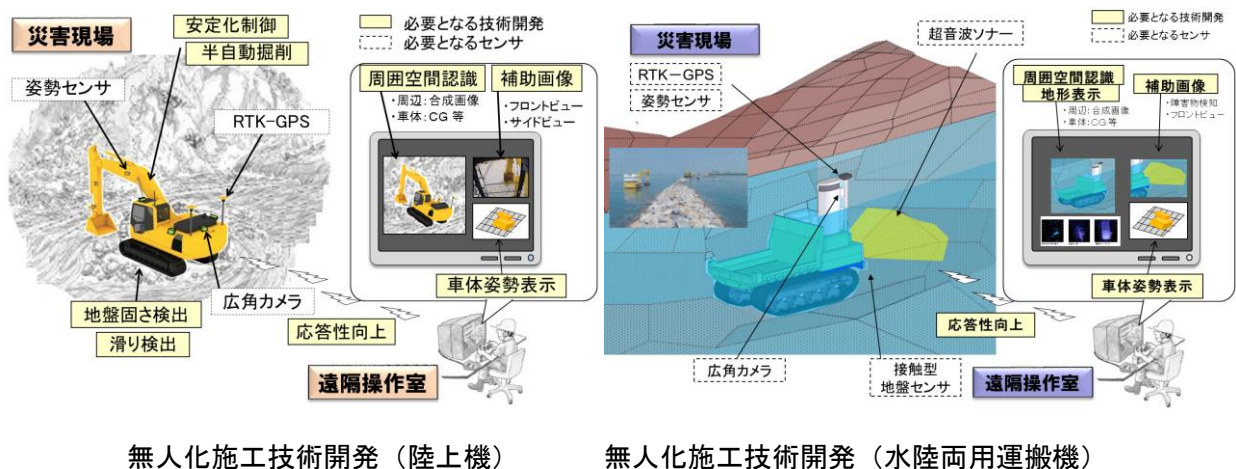


図8 必要となる技術開発イメージ

必要となる技術開発を分類すると表7になる。周囲環境を把握するためには、地形計測をはじめとした環境計測系の技術だけでなく、それを操作者に認識させるため空間認知系の技術が重要となる。また、スタンドアロンで災害現場に突入し緊急作業を行う場合、車載した複数カメラ映像を合成することで、任意の視点から作業機および周辺地形を表示することにより空間認識力を向上するマンマシンインターフェース技術や側方からの補助画像が有効である。その際、地山の状況が判らず、ぬかるみがある場合には、車体の陥没や横滑りの危険性があるため、突入前に地盤固さを把握する必要もある。

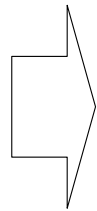
自車状況を把握するためには、情報化施工ショベルに搭載される姿勢センサ等の情報を基にして、いかに操作者に車体姿勢を認識させるか技術開発が必要であるとともに、機械側で転倒防止制御を行う等のオペ操作に対する補正制御による支援も効果的である。また、基本的に無人化施工は作業状況に対する情報が限られるだけでなく、通信による応答遅れが大きいため、作業効率の向上を図るためには、作業ガイダンスと領域制限制御による半自動掘削や通信系の改善が有効である。

水中作業に関しては、これらと趣がやや異なるが、まずはそれを実現するための水陸運搬車両の開発が前提となる。さらに水中の障害物や地形の計測技術、復旧作業に移行した段階での自律走行技術等が必要となる。

表 7 必要となる技術開発要素

シナリオにおける課題

分類	主な課題
周囲環境	地形が判らない 地山の状況が不明 作業対象の状況
自車状況	機械の姿勢が不明 機械操作が難しい
水中作業	水陸両用運搬機がない



必要となる技術開発

(シヨベル系、水陸運搬系を含む)

項 目		内容説明	適用場面		実現手段	開発段階
			緊急	復旧		
環境計測系	地形計測	地山の地形を3D計測		○	レーザレーダ	基盤
	地形計測(水中)	海底、障害物を3D計測	○	○	水中ソナー	基盤
	地形マッピング	障害物等を含め地形マッピング		○	GPS等	基盤
	地盤固さ検出	貫入装置の車体装備	○		貫入装置	基盤
空間認知系	周囲空間認識	複数の車載カメラ画像より、任意視点からの周辺地形を表示	○		広角カメラ	基盤
	補助画像	双腕にカメラ装着しフロント側方画像を得る、あるいは小型移動ロボット	○		双腕機 小型ロボット	実用化
	地形表示 (障害物含む)	オペに地形を認識させる		○	表示媒体	実用化
	車体姿勢表示	オペに姿勢を認識させる	○	○	姿勢センサ等	実用化
	ルートガイダンス	走行経路のガイダンス機能		○	GPS等	実用化
	滑り検出	車体の滑り量を検出 (水中なら波の影響含む)	○		慣性センサ等	基盤
操作支援系	安定化制御	安定性評価 転倒防止制御	○	○	姿勢センサ等	実用化
	半自動掘削	作業ガイダンスと領域制限制御	○	○	姿勢センサ等	実用化
	自律走行	水陸運搬車両の自律走行		○	GPS等	基盤
通信系	応答性向上	信号伝送時間の短縮	○	○	無線装置	基盤
	通信方法(水中)	水中での通信手段	○	○	—	基盤
車両系	水陸両用車両	水陸運搬車両の新規開発	○	○	—	基盤

これら開発した技術要素は次なる災害対応で投入され、そこからさらに課題が指摘され、無人化施工システムで開発すべき新たな技術が明らかとなる。これは図9のような技術開発サイクルを描き、継続的に技術開発と災害現場での実証を繰り返すことが必要である。

技術は、「高度実用化研究」と「基盤技術研究」の2つに分けて開発することが必要と考える。「高度実用化研究」とは、すでに基礎技術はあるがそのままでは現場に適用することができない技術を、現場で活用できるように実用という観点から高度化する研究である。「基盤技術研究」とは、まだ世の中にはない技術を研究開発することであり、長期開発期間を要するものである。表7では、この観点から必要となる技術開発を「開発段階」の項目で分類している。

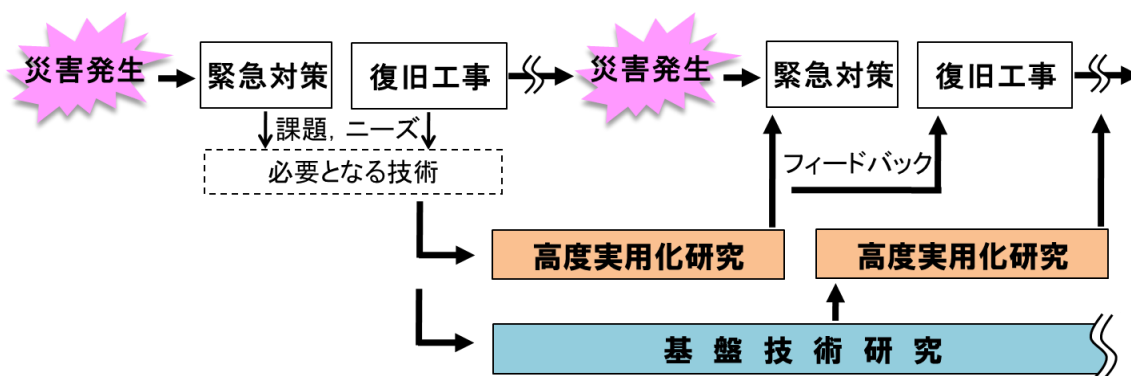


図9 技術開発サイクル

3. 3 具体的な災害対応ロボットの提案

災害シナリオで述べたように、これらを実現するための災害対応ロボットは、平常時の運用やその後の継続性を考慮すると、実績のある建設機械をベースに開発するのが現実的であり、代表的な建設機械として、ショベル系、ドーザ系、運搬系、クレーン系があげられる。

このうち、ショベル系は最も重要度が高く、また多様な工種に適用できることから、第一に開発を推進すべき機種である。また、水際における運搬系については、現状では対応機種がなく、災害時は土砂等撤去の効率化も重要な課題であることから、新規開発すべき機種である。

したがって、新たに開発する無人化施工技術の適用が必要な災害対応ロボットの対象機種としては、「ショベル系建設機械」と「運搬系車両」を挙げることにし、以降では具体的な作業イメージについて説明する。

また、想定される災害の種類に応じて必要となる対策工事は異なるが、大別すると、災害発生直後に必要となる緊急対策工事と、ある程度状況が落ち着いたのち必要となる復旧工事に分けられる。今回はいずれもロボット化に容易に対応可能な既存技術として、姿勢センサやGPSを搭載した情報化施工システム仕様の建設機械をベースマシンとして想定している。

3. 3. 1 ショベル系建設機械

1) 緊急対策工事イメージ

災害現場に最初に突入し、スタンドアロンで走行路確保や瓦礫撤去作業等を行う緊急対策工事では、無線による遠隔操作に対して車載の固定カメラ映像だけでは現場の状況把握が難しいため、オペレータの操作を支援する空間認知系や操作支援系の技術開発が必要となる。(図10)

空間認知系としては、複数の車載広角カメラ映像より任意視点からの周辺地形を表示する周囲空間認識、フロントビューやサイドビューを表示する補助画像、GPSや姿勢センサのデータに基づく車体姿勢表示等が考えられ、オペレータが現場や車体の状況を把握するのに役立つ。また、地盤固さ検出や慣性センサによる滑り検出を行うことで、走行時の安全性に寄与できる。操作支援系としては、安定性評価と転倒防止制御を組み合わせた安定化制御等が有効であり、オペレータが不意に操作ミスを起こした場合でも、操作信号を補正することで未然に転倒を防止できる効果がある。

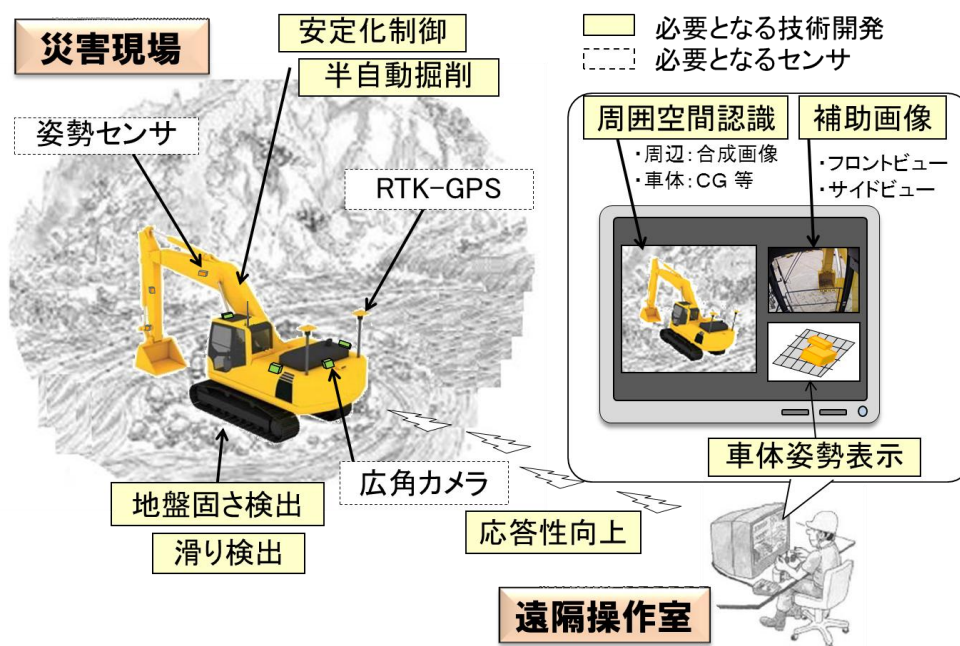


図 10 緊急対策工事イメージ

2) 復旧工事イメージ

緊急対策工事後、複数の重機を投入して本格的に作業を行う復旧工事の段階では、安全かつ効率良く作業を行うために、無人化施工技術と情報化施工技術の高度なコラボレーションを行う必要がある。

まずは、現地の地形を把握するために、航空レーザー測量等により災害現場の地形を計測し、それに基づいて施工計画図を作成する必要がある。領域制限制御は、この施工データを基に掘削が必要な領域を算出、オペレータ操作に対してフロントの補正制御を行うことで、半自動的に制限領域に沿った掘削を実現するマシンコントロール技術であり、状況把握が難しく操作遅れもある無人化施工に対して、正確かつ効率的に掘削作業を行うのに有効である。その際、オペレータは作業ガイダンスに従い、モニタを見ながら大まかな操作を行うだけで容易に意図した掘削作業を行うことができる。

さらに、掘削作業後の出来高もデータとして一元管理できるため、無人化施工による復旧工事に対して、地形計測から施工図作成、半自動掘削、出来高管理まで統合的に工事を運用できる。



図 1 1 復旧工事イメージ

3) その他技術イメージ

その他技術としては、双腕機の副腕を用いた地盤固さ検出やサイドビュー画像取得、小型移動ロボット等による補助画像の取得等があげられる。

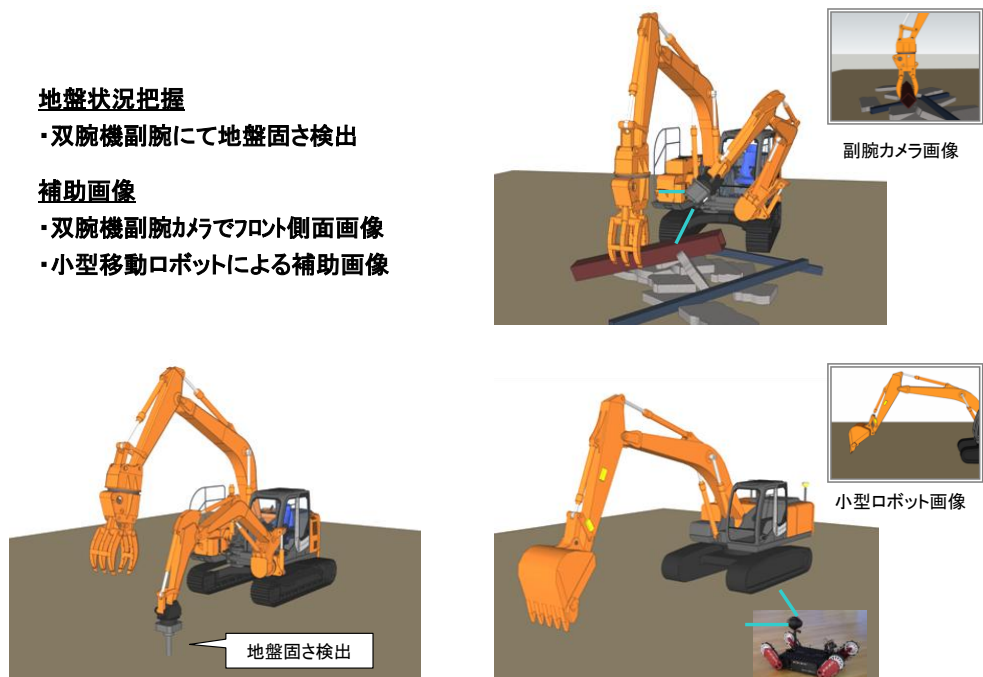


図 1 2 その他技術イメージ

地盤固さ検出に関しては、双腕機副腕に貫入調査装置を取り付け、貫入に対する力等から地盤固さを推定することが考えられる。これにより、緊急対策工事で現場に突入する際、重機が埋もれて動けなくなることを未然に防ぐ効果が期待できる。また、補助画像に関しては、重機本体からではどうしても運転席側からの画像に限定されるため、奥行き情報が不足し、バケットやフォークグラップル等で作業を行う際、対象物への距離感が掴み難いという難点があるのに対し、側方からの画像情報を追加することで、遠隔操縦に対する作業性の向上を図ることができる。

上記の例に限らず、副碗や小型移動ロボットを利用することで、重機（建設ロボット）の足りない情報を補うことができる。また、新たな機能を付加することでロボットの機能を拡大することが可能となる。

4) 運用方法の提案

基本的に、災害対応ロボット技術の適用対象としてはGPSや姿勢センサ等が装備された情報化施工ショベルを想定している。

具体的な開発機の運用方法として、本提案による災害対応機能を付加した情報化施工ショベルをレンタル店等で一定数保有しておけば、災害に対する備えとしての追加費用を抑えながら、平常時は情報化施工ショベルとして一般土木工事の効率向上に貢献できるだけでなく、今回開発した技術により、さらに安全性、操作性の向上に寄与できる。

また、これらの実用化を進めるにあたっては、地山形状や傾斜地、周辺障害物、悪路等に対する実証試験を事前に行うことができるテストフィールドの設立在が必須である。

3. 3. 2 水陸両用運搬車両

現在、水中を走行できる運搬車両が無い為、津波等の水災害で作業船が侵入できないエリアにおける復旧工事の効率と、土砂災害等の陸上災害で通常の運搬車両が走行できないエリアの緊急対策工事の効率を著しく低下させている。図13にこれらの工事の例を示す。ここでは水陸両用運搬車両に必要な機能を考察し、研究開発課題を明らかにする。

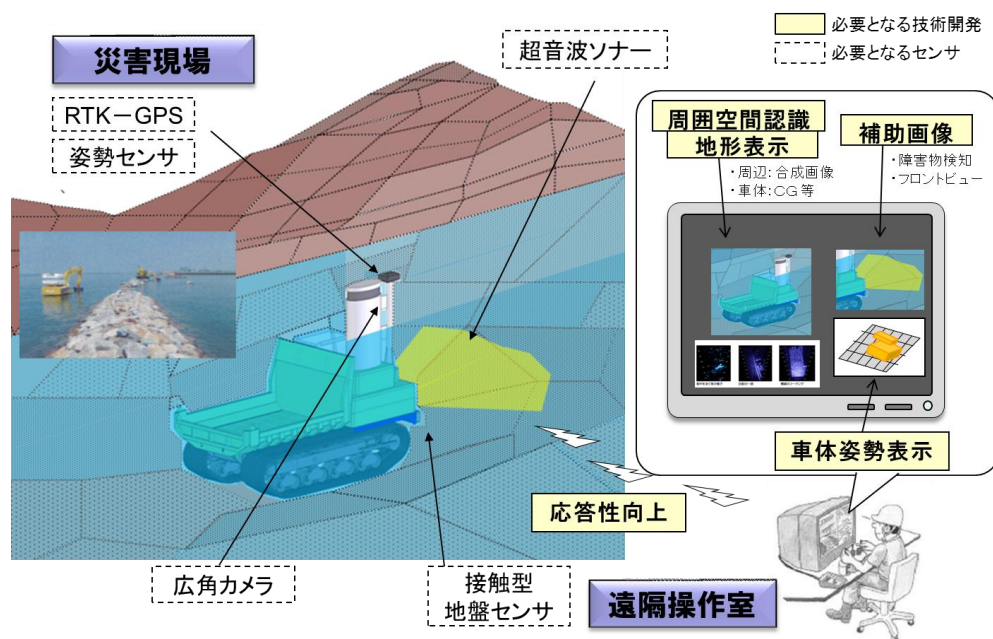


図 1 3 水中での工事例

水中にて走行できる運搬機械の開発であるが、大まかに二つの段階に区別できそれぞれに必要な機能は以下のとおりである。

<第一段階>

最低限の「環境計測」により大まかな海底地形と地質の調査を行った後、それに基づいた作業計画を作成した上で、ダイバーによる運転操作が可能な機械であると考ええる。(水がきれいならば水面からの遠隔操作可能機械まで考慮する)

技術開発課題としては、水中走行用クローラ技術、エンジンの吸排気対策（冷却システムの構築）、水中走行中の故障対応システム、水中での安定性を向上させる低重心機体、浮力対応などが考えられる。

<第二段階>

各種センサ情報による無線操縦を目指す。技術開発課題は、超音波による水中地形計測技術の開発、触針棒等による地盤認識技術の開発、超音波等による海底地質調査技術の開発、安定性評価技術、転倒防止制御技術、オペレータの負荷を軽減させる走行支援システムの開発などが考えられる。

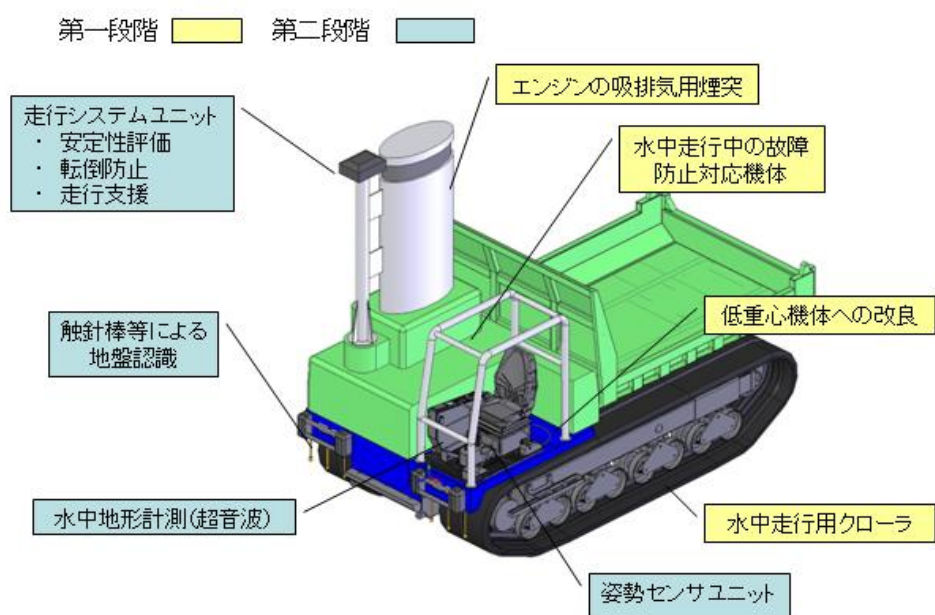


図 1 4 水陸両用運搬車の開発

1) 陸上災害での活用を考えた水陸運搬機械への転用

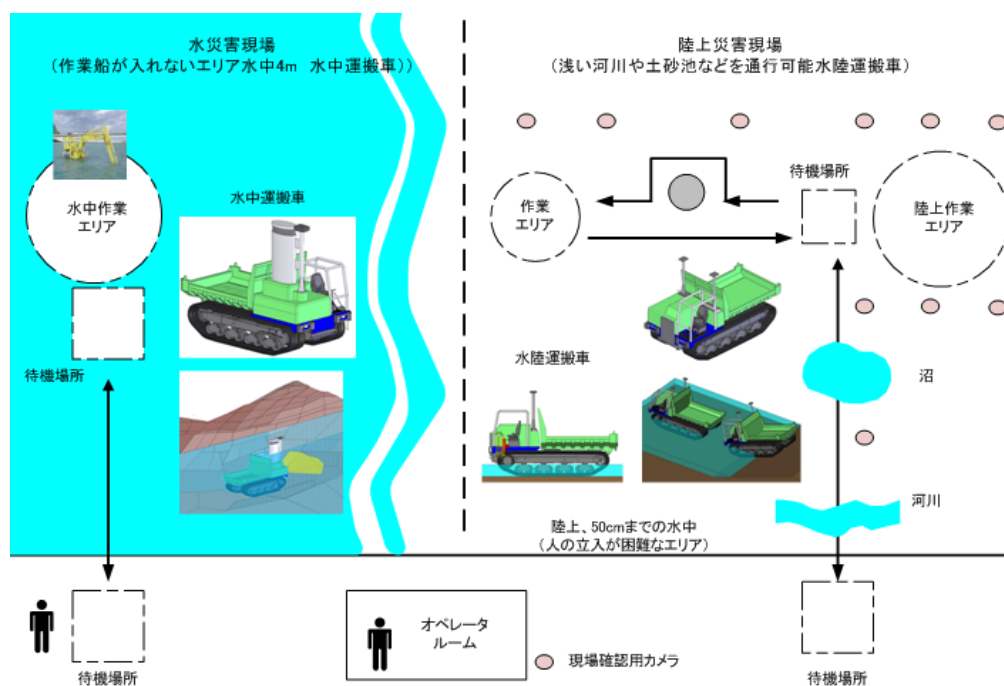


図 1 5 水中及び陸上での工事フロー

陸上災害の緊急対策工事で想定する作業は、図6に示すように油圧ショベルを災害現場に最初に導入して瓦礫撤去等を行う作業の効率化である。途中に河川や土砂池等があっても走行し、発生した土砂の運搬や工事に必要な資材の運搬を行うことが出来る運搬機械である。（図15）

無線による遠隔操作を行う場合固定カメラを多数設置する事は期待できないため、車載した複数カメラ映像を合成することで、任意の視点から作業機および周辺地形を表示することにより空間認識力を向上するマンマシンインターフェース技術や、地形状況把握技術、車体の安定性評価技術、転倒防止制御技術、制振制御を組合せた車体の安定化技術、走行の自立化を目指した運転操作における学習技術、水陸両用クローラ技術、簡易に変更できるエンジンの吸排気対策（冷却システムの構築）などが必要となる。

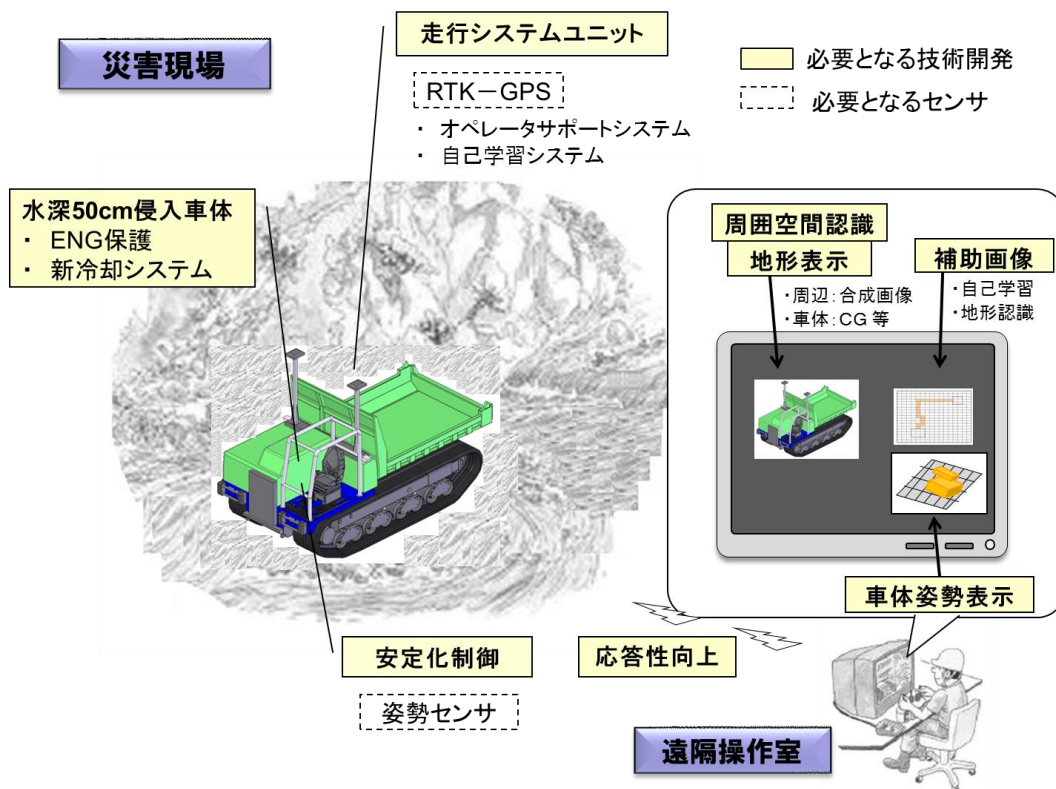


図16 陸上災害での工事例

2) 運用方法の提案

本提案による災害対応機能を付加した機械の架橋下の掘削工事、水中構造物破碎、浚渫工事、防波堤復旧工事等での利用は、一般土木工事における効率向上に大きく貢献するものと考えられる。又、一般の工事利用により運転技術向上が可能である事や、レンタル業者などで保有する事により災害に対する備える事ができるなどのメリットがある。これらの実用化を進めるにあたっては、水中における地形認識技術、触針棒等による地盤認識技術、超音波等による海底地質調査技術、安定性評価技術、転倒防止制御技術などの技術開発においては、事前に様々な実験を行うことのできるテストフィールドの設立が必要不可欠であると考えられる。

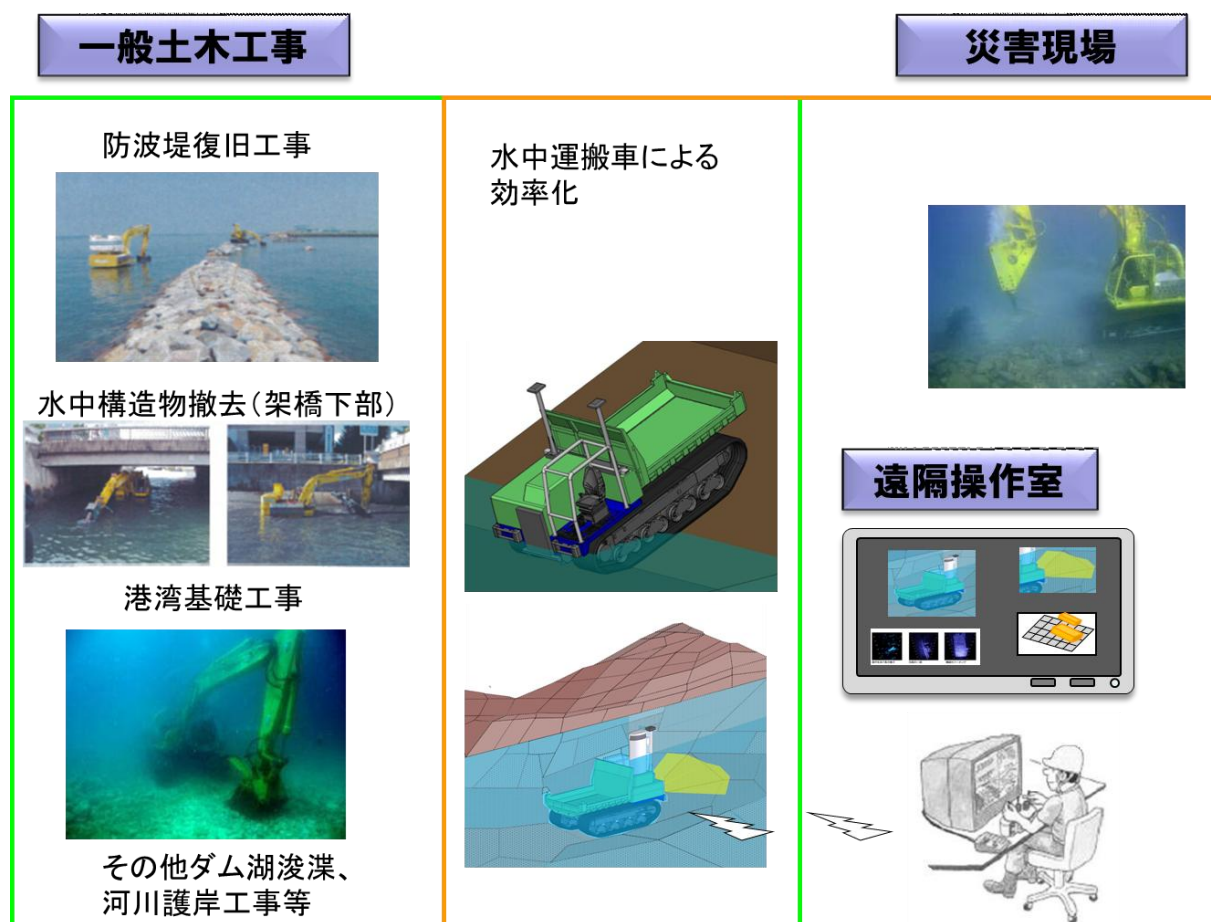


図 1 7 一般土木工事利用と災害時利用

4 提言の方向

今後、以上の検討を進めるとともに新たな建設機械の用途をまとめ、構造物解体工事や、河川及び水深の浅い海洋部での建設作業に関する施工方法や、建設機械の安全性を考慮した操作者の支援システムとして下記の観点で提言を行う予定である。

- ① 建設機械の走行安定性を向上させる技術開発による、無人化施工の範囲拡大と一般の建設作業における安全性向上
- ② 一般の建設作業に使用する建設機械による、災害時の無人化施工適用範囲の拡大
- ③ 画像処理と情報通信技術の確立による災害時への備え

4. 1 無人化施工技術からの研究開発および運用制度への提言

これまでの章であげた必要技術について、これらの研究開発およびその後の運用体制についてはその技術を活かす上で重要な要素であるため、WGでの議論を集約し以下に述べる。

4. 1. 1 基盤技術開発（ハード面）

無人化施工技術は大型建設機械をベースに開発する技術であるため、建設機械メーカーが開発した建設機械に、遠隔操作機器および通信機器を組合せて開発されてきた。そのため、多くの分野の技術を組み合わせることで全体が構成される。その構成技術と無人化施工技術とを分けてその開発を考える必要がある。このでは構成技術を大きく以下の要素で考えられる。

- ① 建設機械およびその要素技術
- ② 無線通信技術
- ③ 画像伝送技術
- ④ ICT（情報化施工技術）

このような分野ごとに遠隔操作技術の切り口で、それぞれ開発を進めていく必要がある。

前述のように、遠隔操作技術に重要なポイントは、

- ① リアルタイム性
- ② 連続性
- ③ 冗長性
- ④ 耐久性または信頼性

であり、これらの点を考慮した開発が必要である。開発する要素技術に市場性がある場合は大きな問題とならないが、多くの場合ニッチ市場であり、コストがかかるため実現されていない技術が多い。

例えば、画像伝送を考えるとリアルタイムの高画質画像伝送装置は存在するが、それは放送局向けであり、遠隔操作向けの画像圧縮装置の開発にはメーカーの開発意欲は高まらない。通信技術も同様で、無線 LAN はインターネットへの接続を考慮したもので、連続性の確保や到達距離を考慮した信頼性を優先したものは少ない。こうした技術を個別に育てていく配慮が今後必要となる。

これらは開発のビジョンを明確に持って、国等が積極的にその要素技術に助成しながら継続性を持って行う必要がある。従って重要な点は、支援する側が開発のビジョンをどのように組み上

げていくかが大切となる。これには有識者、災害対応経験者等の意見を汲みあげる組織が重要である。

無人化施工技術の開発上の問題点は、ハードの開発に大きな投資が必要となる点であり、大学や研究機関での開発が盛んにならない原因でもある。市場が未成熟であるため、企業の投資対象となりにくい。こうした点から、企業の投資意欲を促進するため、技術を研鑽する場の提供は重要である。ここでは小規模での無人化施工技術のコンテストを提案する。

大規模な遠隔操作技術を実現するには試験工事だけでも億単位のコストがかかるため、小規模建設機械の遠隔操作技術コンテストの開催が現実的である。例えば小型調査ロボットを利用した火山災害調査ロボットのコンテスト等である。コンテスト形式の問題点は、日本では参加者への負担が大きく、特殊分野では開催しにくいといったことがあげられる。

また、国の防災のビジョンに基づいた研究開発助成制度により、災害対応のためのロボット技術を基礎技術から育てることが必要である。

4. 1. 2 高度実用化研究（ハード面）

高度実用化研究とは、完成した基礎技術や実用化技術を、実際の適用する現場環境で稼動することができることを確認すること、またはその場合に新たに発生する課題を検証するための研究活動をいう。

これまでロボット技術がフィールドで活用されない、または開発しながら稼動できないなどの原因として、フィールドでの稼動を実現するための実戦的研究開発が効果的に行われていないことがあげられる。装置開発だけでその後の利用までを十分に考慮されないため、これらの効率的な運用や継続的運用の目処が立たないまま開発が終了することが多いと思われる。また、要素技術の開発がなされても、これを他の複数の技術と組み合わせて、目的とする技術の実用化が実現できなければ、技術が完成したことにはならない場合がある。こうした場合、複合技術や高度技術検証が必要なものでは、実際に技術を活用化するレベルでの研究開発が必要不可欠である。これらを行うことを高度実用化研究として表現する。この高度実用化研究はこれまで重要視されていなかった。

ロボット技術では、フィールドでの実用化にはこうした高度実用化研究が極めて重要である。この高度実用化研究に積極的に投資できるよう、今後、国等による強力な支援をお願いしたい。

4. 1. 3 防災ロボットセンター（インフラ面）

無人化施工では、各地方整備局に技術事務所があり、防災訓練等を実施している。こうした機関を利用してその拡充を図ることも検討すべきと思われる。

各分野に国や自治体の研究機関が、その分野毎に研究を行っている。これらの研究機関をロボット技術において有機的に連動するための中心的役割を持つ防災ロボットセンターの設立が重要である。

4. 1. 4 テストフィールド、モックアップセンター（インフラ面）

無人化施工技術において特筆すべき事項として、平成6年の雲仙普賢岳での試験フィールド制度による試験工事があげられる。6工区で平行して工事が行われ当時の遠隔操作技術の検証が行われた。これにより遠隔操作による建設機械群の工事が始まり、砂防堰堤等の構造物を構築できるまでの技術となっている。現在もこの技術は継続され、福島原発への対応や火山災害等への対応が広く行われている。この中で当時から情報化施工技術も同時に採用され、その後の建設分野の技術開発の一つの流れとなった。前述の高度実用化研究を体現した例でもあり、高く評価される試験工事である。このような実工事と密着した試験工事を継続して行うことで、ロボット技術の技術開発は促進されることが考えられる。

ロボット技術のレベルを上げるために、また国が描く防災のビジョンを着実に実行するためには、こうした試験フィールド制度や研究開発を伴った試験工事を積極的に実施することを要望したい。

こうした試験工事の課題としては、目標とする開発技術の設定があげられる。適切な目標設定は、その後の開発に大きな影響を与える。高過ぎず、必要性を十分考慮した目標が大切になる。

4. 1. 5 機能評価標準化（ソフト面）

機能評価は開発者と使用者の双方にとって重要であり、ロボット技術の進化には大きな役割を果たす。無人化施工では、有人運転と比較してその施工効率が低下することが知られている。ただし、その原因と低下の因果関係が十分に解析されているわけではない。その評価手法を確立することは、その原因の分析につなげるものとなる。一部、土木学会等で同様の試みがなされており、今後、さらに多様な評価手法が確立されることが望まれる。

評価の標準化は、標準化による技術の硬直化や開発推進の妨げにならないための工夫が必要である。そのためには常に先進的な研究に対しての評価が判断できる組織、体制が必要となる。

前述の防災ロボットセンターがこうした評価の基礎的ビジョンを作り、これに乗っ取って各研究機関等が評価を行うことが各分野を横断した効率のよい開発を促進すると考える。

4. 1. 6 試験（テスト）拠点（含む認証）（ソフト面）

無人化施工の試験は、工事以外でその状況を作り出すことは費用面でも環境面でも難しい。崩落土砂のり面などは人工的に再現することが困難である。こうしたフィールド条件が存在する場所を選定して操作室や試験室などの固定施設を設け、継続して試験できる拠点があれば、ロボット技術の検証に役立つものになる。

海洋等の水中ロボットなどは実験そのものに多額の費用を要し、容易に開発を行うことが難しい。こうした実験場を地域に設けることで、地域のロボット開発拠点となり地域活性化の施策にもつながると考える。

こうした地域特性を活かした研究開発拠点は、ロボット研究開発およびロボット産業全体にとって重要である。

4. 1. 7 制度設計（ソフト面）

ロボット技術の開発・運用において、その制度を検討することは、その技術を継続する上で重要である。またロボット技術は極めて多様であり、市場においても技術においても未成熟なため、制度設計は重要である。課題としては、制度により技術が硬直化することなく、柔軟に変化し、発展することを妨げないものにするものである。

- ① 研究開発助成制度
- ② 入札への優遇制度
- ③ 研究費等税制優遇措置
- ④ 雇用確保のためのオペレータ評価制度等

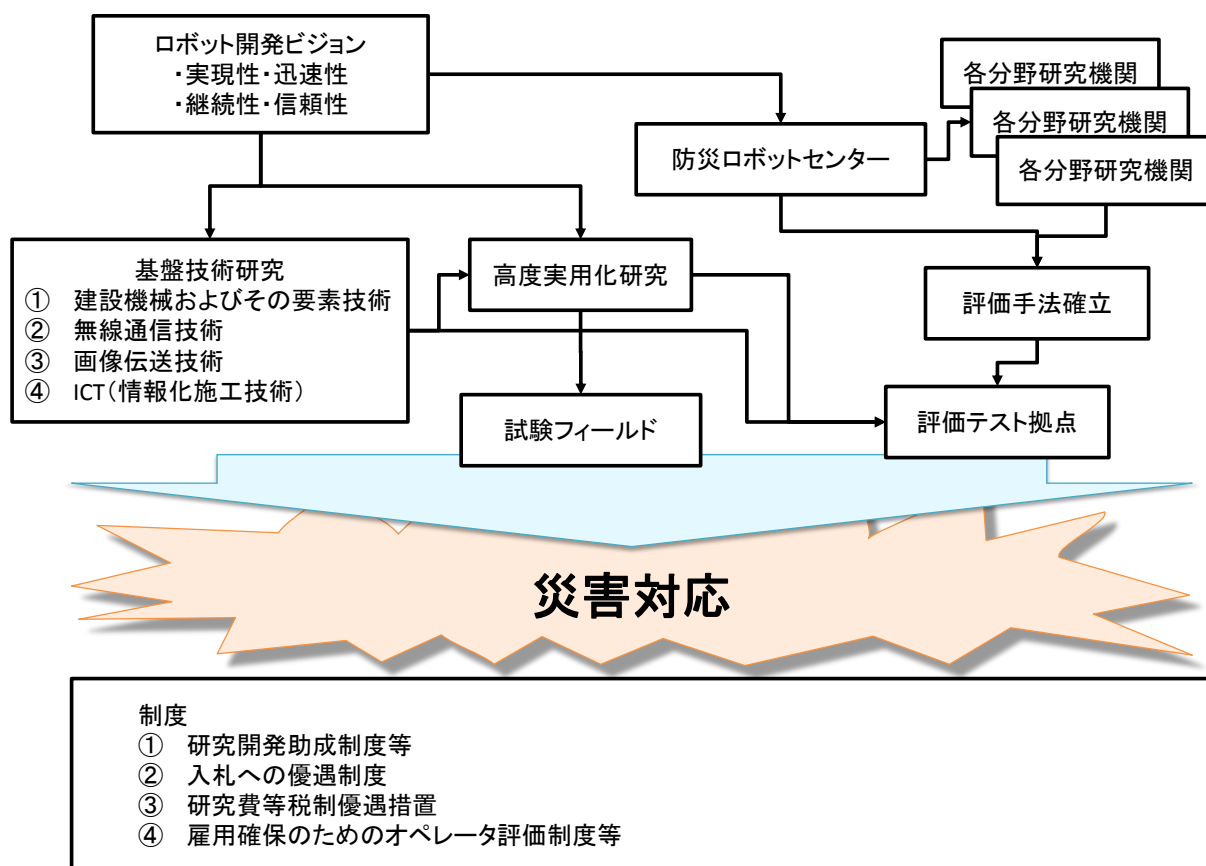


図 1 7 提案概要図