

土木学会 建設用ロボット 委員会の取り組み

■公益社団法人土木学会建設用ロボット委員会

たてやま かずよし

委員長 建山 和由

1. はじめに

土木学会が建設用ロボットに関する研究に着手したのは1981年である。当時、日本は高度成長期に入り、高速道路、鉄道、ダム、上下水道をはじめとするインフラや住宅の建設に邁進していた時期で、建設に携わる労働者の不足は極めて深刻な問題として捉えられていた。このため、建設工事の自動化は、建設従事者不足を補う手段として必要不可欠と認識されていた。土木学会ではこのような社会状況を背景に4年間の準備期間を経て、1985年から調査研究委員会として建設用ロボット委員会を発足させ、建設分野における施工技術のシステム化・自動化・省力化およびロボット化について本格的に研究を推進する体制を整え、活動を開始した。

1990年代に入り、いわゆるバブルがはじけると、人手不足という問題が陰を潜める一方で、1990年前後から再び動き出した雲仙普賢岳により大きな被害をもたらされた島原半島の防災対策で無人化施工が取り入れられたのを機に、建設用ロボット技術は危険な作業から人を守るための技術として開発が続けられた。一昨年発生した東日本大震災や紀伊半島の豪雨災害の復旧作業では、この技術が活かされ、危険地域に人が入ることを極

力抑えた工事が行われた。

土木学会 建設用ロボット委員会では、この間、建設用ロボットに関わる技術開発に努めるとともに、技術講習会の開催、調査・研究成果の報告、土木学会年次学術講演会における研究討論会の実施および、建設用ロボットに関する国内外シンポジウムでの研究成果の発表などを通じて、その普及に向けて学会員のみならず一般市民への広報活動を行ってきた。以下、本委員会の活動を紹介する。

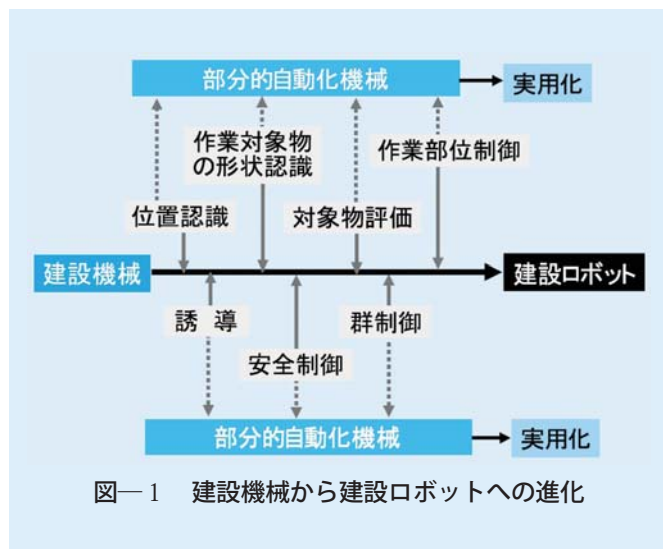
2. 建設用ロボットとは

本委員会では、建設用ロボットを研究対象としているが、一般的にその定義は明確に定まっているわけではない。図-1は、一般の建設機械が建設用ロボットに進化する際に具備すべきと思われる機能を示している。広大で、かつ時々刻々変化する現場において、自分の位置座標を正確に把握して目的地へ自分自身を誘導する機能、岩や土など不規則性が高い作業対象物の形状や力学特性を把握する機能、作業対象物に応じてバケットやブレードなどの作業部位を無駄なく動かす機能、自らと他の機械や人を事故から守るための安全管理機能、多種多様な機械が相互に連携しながら作業を行う群制御機能等である。これまでは、機械の

オペレータが担っていたこれらの機能を建設ロボットでは機械自身が行うことになる。

狭義に捉えるとこれらの機能を全て具備していなければ、建設ロボットと呼べないのかもしれないが、本委員会では建設用ロボットを「従来、建設分野で用いられて来た機械や機器に何らかの自動化機能を付加し、高度化を図った機械と機器の総称」と定義している。一般にロボットというと、自立的に動くための機能の多くを具備した機械とイメージされているが、建設分野では、図一1に示したような個別の機能を備えた建設機械も建設ロボットと認めている。TSやGPSなどの測位技術を用いた機械の3次元位置座標の特定はもとより、振動ローラの振動挙動による地盤剛性を把握する技術は、作業対象物の評価技術の一例といえる。また、ブレード制御機能付きのブルドーザは、作業部位制御の事例、遠隔操作は誘導・作業部位制御の事例といえる。これらは、すでに現場で実用的に利用されており、現場での実使用を通してより高度な技術にすべく改良が加えられている。

ロボットの基本的な役割が、人のサポートにあるとすると、これらの機能は本来オペレータがすべき動作を機械が担ってくれるものであり、この意味からロボットの機能を十分に果たしているといえる。このため、本委員会では、ロボット技術の集大成的な狭義の自立型ロボットではなく、個別の実用的な要素技術を備えた建設に関わる機械



図一1 建設機械から建設ロボットへの進化

や機器をも含めて建設用ロボットと呼んでいる。

本委員会では、この考え方のもと、実際の現場における実用性を重視し、各小委員会単位で建設用ロボットの開発と普及に取り組んでいる。以下、主な小委員会の活動を紹介する。

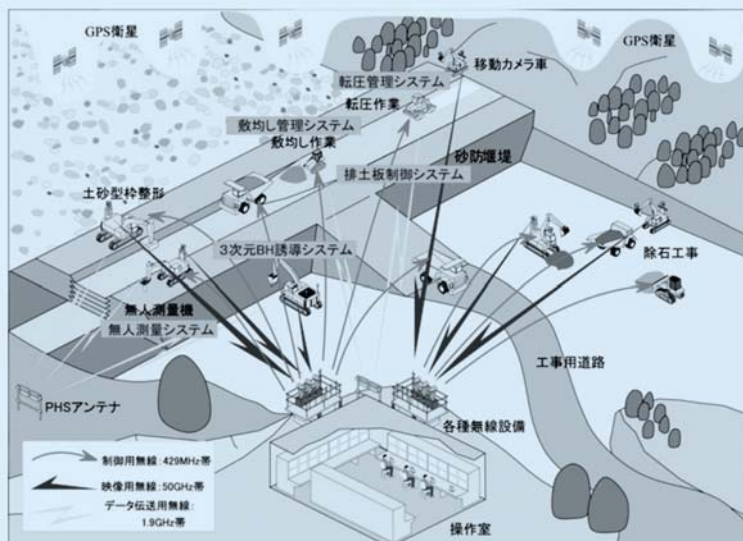
3. 土木技術小委員会

土木技術小委員会では、土工分野の施工技術を中心に、情報化施工、無人化施工、ロボット化技術などの普及・活用・促進を図るための調査・研究活動を行っている。具体的には、遠隔操作技術での開発目標の検討、無人化施工の能力評価のための実験方法の検討、災害対応事例のまとめ、無人化施工技術の工法拡大検討などの活動を行い、委員会メンバーの意見交換を通じて遠隔操作技術の向上を果たすとともに、その成果の一般への公表により建設用ロボットの開発と普及に取り組んでいる。

これらの活動を通じ、以前からこの分野における課題として認識されていたことは、無人化施工による作業効率がオペレータ操作時の作業効率に比べて低いことである。本小委員会では、その原因の追及と改善策の考案を目指し、さまざまな努力を行ってきた。その経緯も含めて本小委員会の活動を紹介する。

図一2は雲仙普賢岳の砂防工事で用いられた無人化施工技術のシステムを示す。火砕流による2次災害を防ぐためオペレータは離れた場所から、堆積した土砂の除去、堰堤えんていの建設などの作業を無線遠隔操作で行っている。

写真一1は、2011年9月に奈良県と和歌山県に大きな被害をもたらした豪雨災害の復旧工事として北股川北股地区の河道閉塞緊急対策工事で使用されている無人化施工システムである。急傾斜地の危険な場所でも作業を遠隔操作で行い得ることが分かる。



図一 雲仙普賢岳における無人化施工システム

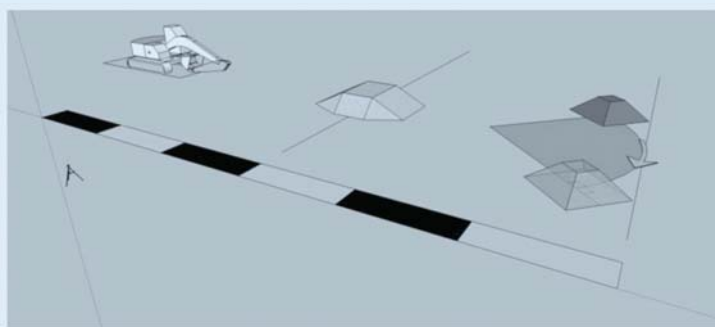


写真一 奈良県北股地区での災害復旧対策工事

遠隔操作による無人化施工は、雲仙普賢岳の時代から、第四世代の無人化施工と呼ばれる北股の時代に至るまで多くの開発研究がなされ、技術としては大きく進化している。すなわち、1994年雲仙普賢岳で本格的な遠隔操作が開始されたが、1990年代後半からは中継車等の導入により現地と現場との距離を拡大していき、近年では、ネット

ワーク技術を活用して遠隔操作の距離を大幅に拡大することも試験的に行われている。

しかしながら、依然、無人化施工における施工効率と精度は有人施工にまでは及ばない。この原因として、小委員会では、遠隔操作ではオペレータは、現場の3次元空間モデルを自分の脳内に速やかに構築することができないからではないかと考えている。作業対象物を3次元情報として捉えることが難しいためであるが、この課題の解決策として情報化施工として発展してきた3DMC^(註)のような制御機能を遠隔操作に取り入れることにより、効率や施工精度の向上を図ることが可能になった。本小委員会では、さらに進んだ技術として、オペレータが効率的に現場状況の3次元空間モデルを自分の脳内に作ることでできる手法の開発に取り組んでいる(図一3参照)。



図一 3次元空間モデルの構築のサポート機能の開発

将来的には、有人作業と同等以上の施工効率を上げることができ、一般工事でも普通に使われるよう、自律制御と人間の判断の合理的組合せからなるシステムとして進化することを目指していく。

(注) 3DMC (3次元マシンコントロール) : 出来形に関する3次元設計データに基づきブルドーザやグレーダのブレードなどの操作部位を自動で制御する技術

4. ライフライン技術小委員会

ライフライン技術小委員会は、上下水道・電気・ガス・電話(通信)、道路・鉄道・地下鉄の分野の事業者ならびにそれらに関わる建設会社からの委員で構成されている。小委員は、これらのライフラインの点検・調査、モニタリング、情報処理、評価技術、補修・補強技術、リニューアル技術、マネジメント技術におけるロボットの利用を進めている。

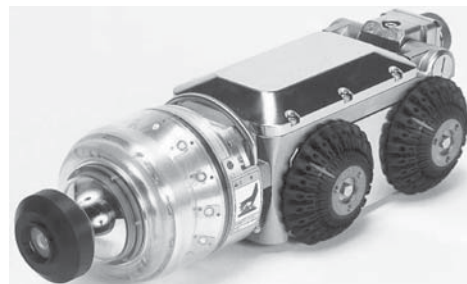
一般にライフラインの維持管理は新設よりもはるかに難しい技術といえる。広域な地域から劣化箇所を探し出し、劣化の原因を特定し、確実に補修・補強することのできる施工法を選択して、かつ供用しながら直さなければならないからである。さらに、上下水道などのインフラは作業員が入ることのできない小さな空間であることが多い。こういった状況に対応するため、ライフラインの分野では以前から個々の目的に特化したロボットが開発・使用されている。

ライフラインの一連の工程の中で劣化箇所の特定は重要な作業である。同じ地域に同じ施工法で構築された構造物でも、劣化状況は必ずしも同様ではなく、環境条件の影響を大きく受けて偏在する。調査対象箇所は非常に広く、かつ調査が難しい場合が多く、人力では効率的にかつ一定の精度を持って調査データを収集することは簡単ではない。このためにロボットが有効に利用されている。

写真一2は、トンネルの覆工構造の健全性を検



写真一2 トンネル覆工打音点検システム



写真一3 下水管調査用ミラーカメラ調査機

知する機械である。また写真一3は、下水管の劣化を調べるカメラロボットである。これらの機械を使うことにより、効率や検知精度を向上させるとともに人が入ることのできない場所の調査も行うことが可能となる。

図一4は、ガスタンクが数多くある時代に外壁の健全性を調査するために使用されたロボットである。この作業は人力でも実施可能ではあるが、危険が伴うことと、コストと時間を要するため、ロボット等を使い機械的に調査を行う方が実用性の高い場合が多い。同様の調査は、土木構造物には数多くある。原理的には人力で調査を行うことができるが、非常に広範な構造物の健全性をスポット試験の繰り返しで延々と調べていくような調査は、人力よりも機械で行う方が効率も精度も向上する。こういった調査は、ロボットの製作にイニシャルコストを要したとしても、経済的にも成り立つ調査になり得ると思われる。

昨年の笹子トンネルの事故以来、構造物の維持管理の重要性が再認識される中で、ロボット等を使った調査、モニタリング、補修の技術は、ますます必要性が高くなると予想され、本小委員会で

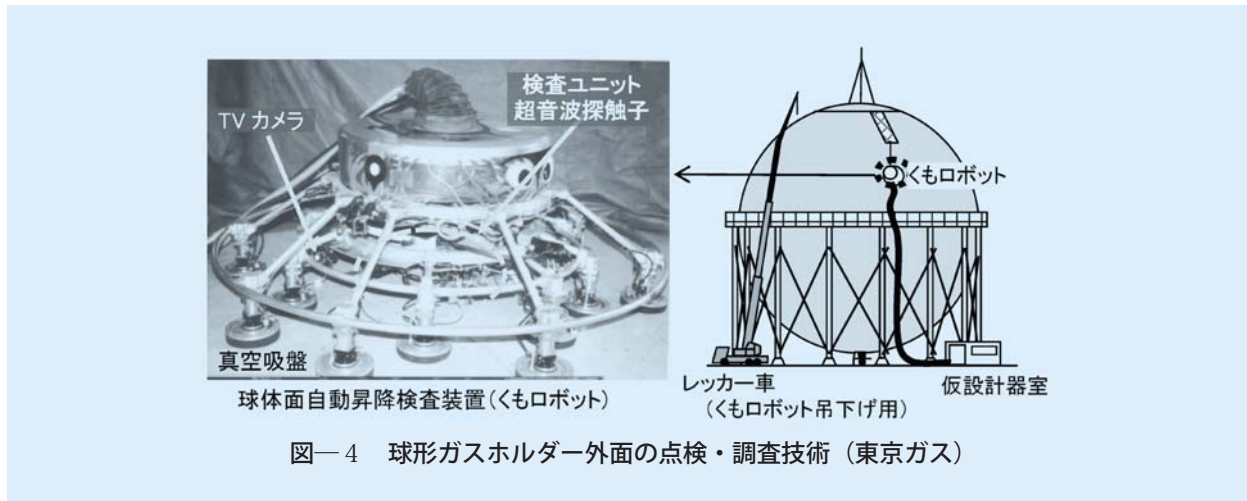


図-4 球形ガスホルダー外面の点検・調査技術（東京ガス）

も継続してその発展と普及に努めていく。

5. 大深度地下小委員会

シールド工法は、高度成長期の日本において都市の地下に各種の空間を構築する技術として発展してきた。その開発は大断面化、高速施工と並び、大深度化へと突き進んでいった。大深度地下小委員会は都市部において開発が進んでいる大深度地下部の開発を想定し、シールド工法における自動化技術について調査研究を行うべく、2004年から活動を始めている。シールド工法は、限られた空間での作業、比較的単純な作業を繰り返す工程からなっていること、このため用いる資材等も比較的種類が少ないこと等、自動化に適した工種といえ、これまで多くの自動化技術が取り入れられている。

すでにシールド工法に取り入れられている自動

表-1 シールド工事で導入されている自動化技術

作業	自動化技術の例
掘削	掘進管理システム、切羽安定制御システム、自動方向制御システム、同時裏込め注入システム、切羽崩壊探査システム
覆工	セグメント自動組立てシステム
坑内搬送	掘削土砂搬出システム、セグメント・資材自動搬送システム、パイプ延伸システム、レール・枕木布設システム

化技術の例を表-1、写真-4、5に示す。これらは、実用的な技術として一般化しつつあり、シールドマシンは地下にトンネルを構築するための大きなロボットという段階まで到達している。

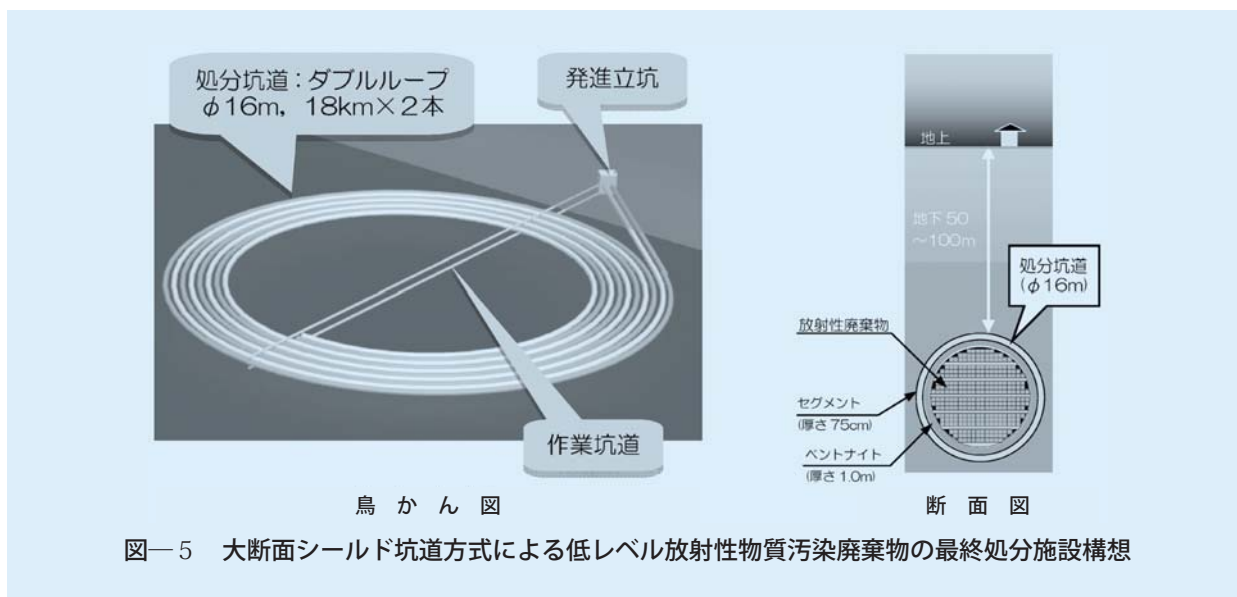
一昨年発生した東日本大震災では、福島第1原子力発電所が大きな被害を受けた。発電所から漏れ出した放射性物質は近隣地域を汚染し、その除染作業が行われているが、除染作業で発生する土砂や埃などの廃棄物の貯蔵・処分場所が決まらず、社会的に大きな問題になっている。そこで、



写真-4 掘進管理システム（熊谷組）



写真-5 セグメント自動搬送システム（清水建設）



図一五 大断面シールド坑道方式による低レベル放射性物質汚染廃棄物の最終処分施設構想

本小委員会では、放射性廃棄物の大深度地下処分のための地下空間をこれまで培ってきた自動化されたシールド技術を用いて構築する構想をまとめた。以下その概要を簡単に説明する。

本構想の地下空間（処分坑道）は図一五のような螺旋状のシールドトンネルで、セグメント外径16.0m、セグメント内径14.5m、延長18km×2本（総延長36km）、トンネル内空容量にして約600万m³（東京ドーム5個分）を確保することができる。地下の螺旋の大きさは直径1.5km程度、地上の施工時に必要な敷地面積は約17,000m²（130×130m）と想定している。

本構想を採用することの利点としては、下記が挙げられる。

- ① 浅地中トレンチまたはピット処分等の地表付近での処分に比べ、風水害・地震等の自然災害や地下水に対して安全性が高い。
- ② 最終処分施設を地下に非開削で構築できるため、土地の有効利用や地上で管理する施設が少なく景観が阻害されない等、立地に関する社会的受容性が高い。
- ③ 施設建設と処分の並行により、最終処分の早期操業が可能となり、中間貯蔵施設を不要もしくは減少できる。
- ④ 地上から深部に向かいトンネルを構築するため、処分場所の深さを選択することができる。このため、浅地中トレンチ処分、浅地中ピット

処分（例：数十m）、余裕深度処分（例：50～100m）のいずれの深さの処分にも対応することができる。

今回の経験したことのない放射性物質による特殊災害に対しては、その対応を速やかに行うことが求められている。

中間貯蔵施設と最終処分施設は、国民的理解を促して同時進行で進める必要がある、そのために本構想は有用と考えている。ただし、地中にこれだけのシールドトンネルを構築するためのコストをいかに抑えるかが課題となる。

現在、放射性廃棄物処分の専門家と連携し、その実現可能性についてハード・ソフト両面から具体的な検討を進めており、その調査研究の結果を今年度中にまとめる予定である。

6. 海洋技術小委員会

海洋技術小委員会では、港湾・海洋構造物の建設において、調査から施工・維持管理にわたる自動化、ロボット化技術の普及・活用・促進を図るための活動を行っている。

海域は、資源と空間の観点から無限ともいえる可能性を秘めた領域であるが、水中であるがゆえに、人が踏み入ることが難しく、そのほとんどは未開拓といえる。このため、ロボットの利用は、

海域の利用範囲を拡大する上で最も有効な手段といえ、本小委員会では水中ロボットの開発と普及に向けた取り組みを行っている。

水中で作業するロボットは大きく分けて、調査のためのロボットと実際に作業を行うロボットに分けられる。一般に海域などの水中における人の活動は大きく制限されるため、調査用ロボットは現場の状況を把握する上で有効な手段となる。また、水深の大きい海底においては、ダイバーによる作業では作業時間や施工可能領域が大きく制限されるため、地上もしくは船上から遠隔で操作作業ロボットが効力を発揮する。

写真一六は、水底を調査する音響探査技術である。水底を±30cmの精度で計測することができる。写真一七は、水中ショベルである。潜水夫が乗車して操作を行うこともできるが、深度が大きい水中で作業を行う場合には、写真にあるように陸上から遠隔で操作を行うことができる。

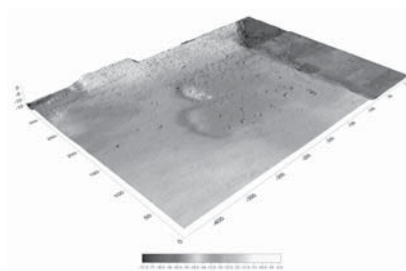
これらの操作は、地上や海上から行われるが、水底の状況に関する知識と経験がないと精度と効率が大きく落ちることになる。特に作業用機械の操作では、潜水作業経験のあるオペレータが操作する方が効率と精度が優れているため、その養成が課題となっている。また、海洋工事でも建設機

械の遠隔操作や位置情報管理のため既存の携帯電話回線を活用することは可能ではあるが、海上はサービスエリアとして想定されていないため、感度が悪い場所や電波が入らないエリアも多くあるなど解決すべき課題は多い。

本小委員会では、海域でのロボット技術の開発と普及における課題を明らかにし、その解決のための方策に関する議論を行っている。

7. 大規模災害を受けて

本委員会では、一昨年甚大な被害をもたらした東日本大震災において、建設用ロボットとその関連技術が有効に用いられたことを検証することにより、これまでの到達点を確認するとともに、近い将来予想されている首都圏直下型地震や東南海地震、その他の自然災害に備えるために建設用ロボット関連技術の課題と解決に向けた方向性を議論する場を提供している。この議論では、土木学会内にとどまらず、日本ロボット学会等の関連学協会とも連携した活動を行っている。これらの議論で明らかになったことを簡単にまとめると以下のようなになる。



写真一六 音響探査による水底の調査



写真一七 遠隔操縦型水中作業ショベル

今回の震災では、津波被災地域湾内の啓開作業や海中の搜索活動および原子力発電所敷地内の高放射線区域における瓦礫撤去作業・状況調査・屋内清掃・冷却・原子炉カバー設置等に建設用ロボットとその関連技術が用いられた。

また、前述のように平成23年秋に紀伊半島を中心に西日本に甚大な被害をもたらした台風による地盤災害の復旧作業でも無人化施工技術が有効に用いられた。これらの結果から、建設用ロボット技術は災害時における緊急作業において陸上、海上工事とも遠距離からオペレータの安全性を確保しつつ車両を制御して所定の作業を行うレベルに到達したといえる。

しかしながら、精度、施工効率は、有人施工に比べるとまだ低い位置にあり、また、全ての作業を無人で行うことができるというわけではなく、適用可能な工種はまだ限定されているといわざるを得ない。さらに、コストは有人施工に比べて、遠隔操作のための追加設備が必要なことと施工効率が低下することから大きく劣っている。

また、離れた所から主にモニターの画像を頼りに作業を行うため、通常の有人作業とは異なる経験を要することになり、無人化施工のためのオペレータの技能が要求される。さらに、位置情報管理のための施設設置の準備に時間と費用がかかることも明らかになった。特に、海上や山岳部は無線や既存の携帯電話回線が利用できない地域も多く、その改善が必要ということも明らかになった。

これら多くの課題を残しつつも、今回、実用に供するレベルの技術にまで到達し得たことには、雲仙普賢岳や有珠山の噴火による大規模災害の復旧プロジェクト等で無人化施工が適用され、実際の現場で使いながら改善を重ねて、より高度な技術に仕上げることができたためといえる。冒頭の図1で建設機械が多様な要素技術を現場に適用し、改善を重ねながら身につけてきた経緯を支えたのは、これらのプロジェクトであった。このことから、建設用ロボットを災害時の緊急用手段として活用するには、非常時に備えて研究開発を重

ねるだけでは不十分で、普段の工事で当たり前の技術として使っている体制を整えることが重要といえる。このような理由から本委員会では、建設用ロボットを「普段使いの技術」として建設施工に浸透させていくことを目指している。

このような議論をもとに、委員会では「建設用ロボット技術による災害対応および復旧・復興支援に向けた委員会提言」をまとめ、以下の四つの視点から今後産学官が一致団結して建設用ロボット関連技術の開発、保有・維持運用、教育訓練に取り組むことの重要性を示している。

- ① 災害対応のための建設用ロボットの積極的活用と開発
- ② 開発ロボットの検証・改善・維持のための環境整備
- ③ 建設用ロボットを運用するための継続的教育・訓練等の制度整備
- ④ 建設用ロボット技術を活用するための情報収集と共有、インフラの整備

委員会では、この提言をホームページ (https://www.jsce.or.jp/committee/robot/senryaku/sennryakukikaku_katsudo_proposal.htm) で公開するとともに他の学協会とも連携し、その実現に向けて活動を行っている。

8. おわりに

建設用ロボット委員会がその活動を開始して間もなく30年を迎える。当初、建設従事者不足への対応から技術開発をスタートさせたが、その後、災害復旧における安全性の確保と維持管理の高度化に軸足を移している。この方向性は当面は変わることはないと考えられる。人類の技術がいかに進歩しても自然災害をなくすことはできず、また今後維持管理すべき構造物は明らかに増え続けるからである。本委員会は、土木学会の枠にこだわらず、関連学協会や諸団体と連携して今後も建設用ロボットの高度化と普及に努めていく。