

# 4 国土を支える 建設ロボット



建山 和由  
TATEYAMA Kazuyoshi

立命館大学  
理工学部/教授

危険地域における災害復旧などで活躍する建設ロボット。実用性が重視される建設分野において、これらの技術は現場で磨かれてきた。建設ロボットに求められている役割、開発経緯、現状、そして将来性について考えたい。

## 活躍する建設ロボット

我が国の建設分野でロボットの導入が議論され出したのは、1970年代の後半からである。当時、日本は高度成長期に入り、高速道路、鉄道、ダム、上下水道を始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な技術と認識されていた。

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、雲仙普賢岳の噴火活動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、建設ロボット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。2011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。この他、我が国では建設に関わる様々な場面で建設ロボットといえる機械が使われている。現在使われている代表的な建設ロボットの開発状況とその方向性を紹介する。

## 建設ロボットの定義

建設ロボットの定義は明確に定まっているわけではない。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、建設機械の一部の機能の自動化を備えた機械も広く使われている。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、ここでは、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や機器をも含めて建設ロボットと呼ぶことにする。

その代表例は、情報化施工技術として認識されているマシンコントロール(MC)技術である。MC技術は、機械自身やブレードなどの作業装置を3次元位置情報に基づき自動制御することにより、操作性の改善をはかる技術である。図1は、ブレードをRTK-GPSを利用して制御する機能を備えたMCブルドーザである<sup>1)</sup>。MCブルドーザでは、オペレータは機械本体の移動操作は行わなければならないが、出来形に関する設計データがコンピュータ内に保有されており、所定の出来形になるようにブレードが自動で操作される。このため、現場において施工の目安と



図1 ブレード制御機能を備えたMCブルドーザ

なる丁張りを大幅に削減して施工を行うことも、夜間作業も可能になる。さらには、均し作業の回数がオペレータ操作の場合より少なくて済むため機械の作業時間が短くなり、結果として工事に伴うCO<sub>2</sub>の排出量を抑制してくれる。この種のMC技術はモーターグレーダにも搭載されており、作業員の高齢化等で熟練オペレータが不足しつつある舗装工事では、MC技術を搭載した建設機械を導入するケースが増えている。

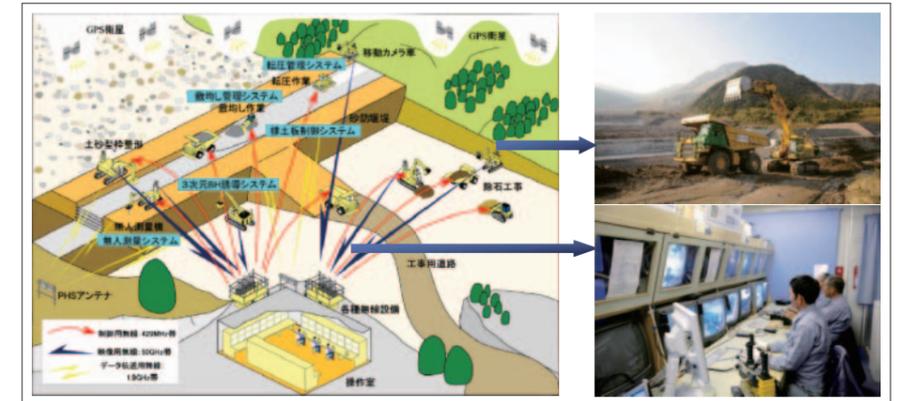


図2 雲仙普賢岳における無人化施工システム

## 土工事における無人化施工技術

1990年11月17日、長崎県の島原半島中央部にある雲仙普賢岳が約200年ぶりに噴火活動を開始した。1991年6月3日に発生した火砕流は、報道や消防関係者を中心に43名の死者を出す大惨事を引き起こした。地元では、さらなる災害を防ぐために砂防堰堤を造る工事を行ったが、火山活動は引き続き活発であったため、人が危険な区域に立ち入ることなく工事を行うことができる無人化施工技術が開発・導入された。

図2に雲仙普賢岳の砂防工事で用いられた無人化施工技術システムを示す。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、堰堤の建設などの作業を無線遠隔操作で行った。

図3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た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わかる。

遠隔操作による無人化施工技術は、雲仙普賢岳の時代から第4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、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、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及ばない。この原因は、遠隔操作ではオペレータが現場の3次元空間モデルを自分



図3 奈良県北股地区での災害復旧対策工事



図4 油圧ショベルの誘導システム(熊谷組提供)

の脳内に速やかに構築することができないからと考えられている。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、この解決策として前述のMC技術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技術の開発も行われている。図4はその一例<sup>2)</sup>で、油圧ショベルに2セットのGPS、車体の傾きを測るピッチセンサ、ブーム・アーム・バケットの傾斜を測る3個の傾斜センサを取り付け、それらのセンサから送られてくるデータを用いてコンピュータ上でバケットの姿勢まで



図5 トンネル覆工打音点検システム 図6 下水管調査用ミラーカメラ調査機システム

を算出し、表示するシステムである。この画像情報からオペレータは事前に入力したCADデータに沿ってバケットを操作することができるため、実際に目視できない場所での作業の効率・精度の低下を低減させる効果が期待できる。

東日本大震災の地震と津波で被災した福島第一原子力発電所では、放射能に汚染された環境下で瓦礫の除去や廃炉等の工事を行わなければならなかった。ここで紹介した無人化施工技術はこの作業にすでに導入されており、実用的な技術として有効に使われている。

### ライフラインの維持管理で使われるロボット

上下水道・電気・ガス・電話(通信)・道路・鉄道・地下鉄などのライフラインの維持管理は、新設よりも遙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、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、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。

図5はトンネルの覆工構造の健全性を検知する機械である。図6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7は、ガスタンクの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可能であるが、危険が伴い、コストと時間を要するため、ロボット等を使った調査を行う場合が多い。同様の調査は土木構造物には数多くある。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する調査は、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、ロボット製作のインシヤルコストを要したとしても、経済的にも成り立

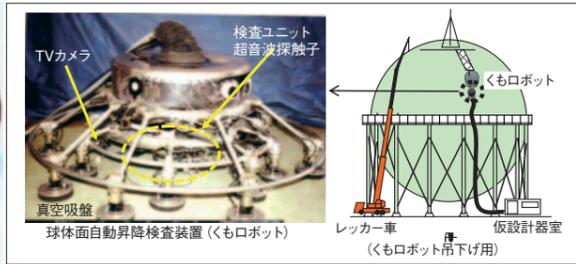


図7 球形ガスホルダー外面の点検・調査技術(東京ガス提供)

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



図8 掘進管理システム(熊谷組提供)



図9 セグメント自動搬送システム(清水建設提供)

つと思われる。

2012年の中央自動車道笹子トンネルの天井板落下事故以来、構造物の維持管理の重要性が再認識され、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る。

### トンネル工事におけるロボット技術

都市の地下にトンネルを構築するシールド工法は、高度成長期の日本において地下鉄や下水などの社会基盤を構築するための技術として発展してきた。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



図10 遠隔操縦型水中作業ショベル(右写真同じ)

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。

表1と図8、9に、現在のシールド工法に取り入れられている自動化技術の例を示す。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。

### 海洋工事におけるロボット技術

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水中ロボットの開発と普及に向けた取り組みが行われている。

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、水深の深い海底においては、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を行う作業ロボットが効果を発揮する。

図10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は、陸上から遠隔で操作を行うことができる。

### 建設ロボット開発の現状と将来性

図11は、一般の建設機械が建設ロボットに進化する際に具備すべき機能を示している。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パケッ



図11 建設機械から建設ロボットへの進化

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。

これらの機能全てを備えないと本格的な建設ロボットと呼ぶことはできないかもしれないが、前述のように建設分野では一部の機能を施工の効率化や品質向上策として開発し、現場に適用してきた。先に紹介し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、遠隔操作による無人化施工は誘導・作業部位制御の事例といえる。これらは、すでに現場で利用されており、実使用を通してより高度な技術になるべく改良が加えられている。福島第一原子力発電所で無人化施工技術が有効に利用されたのは、関連する技術が実用の場で磨かれてきたからであり、それが建設ロボット開発の特徴といえる。建設分野では有用性が強く求められ、建設ロボット開発には「普段使いの中での開発」の仕組みの継続が強く求められる。

### 期待される建設ロボット

当初、建設従事者不足への対応からスタートした建設ロボット開発は、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無くすことはできず、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。今後、建設ロボット技術はますます磨きをかけて、我々が直面する大きな課題の解決に寄与することが期待される。

なお、本稿は公益社団法人土木学会建設用ロボット委員会の活動を主体にまとめたものであることを記載しておく<sup>3)</sup>。

#### <参考文献>

- 1) 地盤工学会: 建設工事における環境保全技術、第8章、2009年
- 2) 北原成郎、周藤健: 無人情報化施工システムの開発と導入、建設機械と施工法シンポジウム論文集、2007年
- 3) 建山和由: 土木学会 建設用ロボット委員会の取り組み、建設マネジメント技術、2013年6月号、pp.37~44