

東日本大震災及び原子力発電所事故に活用されるロボット技術

東京大学 大学院工学系研究科 教授 **あさま 浅間** はじめ



1. はじめに

平成23年3月11日に発生したマグニチュード9.0の東日本大震災と巨大津波により、阪神淡路大震災をはるかに超える人がその犠牲となった。既に、津波によって被害を受けた地域の復旧、復興に向けた活動が始められているが、被災した地域では、現在でもがれきの撤去や処理が課題として残されている。

さらに、東京電力福島第一発電所の事故により、莫大な汚染物質が放出され、周辺の住民は長期間にわたる避難を強いられている。汚染地域の除染には、莫大な費用と時間がかかると考えられており、事故を起こした原子力発電所自体の収束に関しても、「廃止措置が全て終了するまでは30年以上の期間を要する」と考えられている^[1]。

東日本大震災及び原子力発電所事故では、人が行うことが困難な作業や、人が入ることが困難な環境での調査や作業において、ロボットなど、遠隔から操作可能な機器の導入が求められた。既に、様々なロボット技術が投入されているが、今後にも更に多くのロボット技術を活用することが求められている。

本稿では、これまでに東日本大震災及び原子力発電所事故への対応において活用されたロボット技術を紹介するとともに、今後の処理、復旧・復興においてのみならず、今後発生し得る災害・事故に対する備えとして、どのような課題を解決すべきか、などについて述べる。なお、ロボット技術導入の経緯や、技術的検討に関する支援活動については、ページ数の制限から別報に譲ることとする^{[2][3]}。

2. 東日本大震災対応で活用されたロボット技術

東日本大震災対応に関しては、震災の発生直後から、NPO国際レスキューシステム研究機構（IRS：International Rescue System Institute）に所属するレスキューロボットの研究者が、それぞれこれまでに開発してきたロボットシステムなどを、自主的に、あるいは要請に基づき、被災地に持ち込んで支援活動を行った。実際にロボットが用いられたケースもあれば、現場に持ち込んだものの、環境条件やタスクが厳しく、使用が見送られたケースもあった。

まず、倒壊家屋や被災建造物の調査に対し、様々なタイ

プのレスキューロボットの適用が試みられた。調査対象は、体育館からコンビナートなどの設備に至るまで多岐にわたった。被災した建造物の調査は非常に危険であり、ロボットによる調査が求められた。京都大学松野文俊教授らによって開発されたKOHGA3や、東北大学田所論教授らによって開発された能動スコープカメラ、千葉工業大学小柳栄次副所長、東北大学田所論教授、新エネルギー・産業技術総合開発機構、及びIRSによって開発されたQuinceなどが活用された。調査といっても、現場の状況を把握するというレベルのものから、発生したトラブルの原因の究明や健全性の診断のための調査まで多様であり、ときに修復などの作業も要求された。

Quinceは、1995年に発生した阪神淡路大震災をきっかけとして実施された文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト、及びNEDO戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトを通して、開発が進められてきた災害用移動ロボットである。開発が継続的に行われ、かつレスキュー隊員が想定訓練で使用するなど、実用性を重視した開発が行われてきたことが功を奏した。

また、港湾などの海中の調査においても、ロボットの活用が求められた。震災直後は、津波の犠牲になったと考えられる行方不明者の探索、御遺体の探索が、調査の主たる目的であった。その後、船舶の安全な航行や港湾の復旧計画立案のための、海中のがれき調査が行われた。東日本の沿岸地域は、津波によって大きな被害が生じ、海中には危険ながれきが多く存在した。水中のがれきの中の調査は、漁具が絡んだり、倒壊した建物の釘などによってけがをするなど、ダイバーにとって多くの危険が存在したために、ロボットのニーズは高かった。

海中に流された家屋や車両の内部を探索するには、小型の水中ロボットが適している。松野教授（前述）や長岡技術科学大学木村哲也准教授らは、米国Texas A&M大学Robin R. Murphy教授が率いるCRASAR（Center for Robot-Assisted Search and Rescue）とともに、津波で破壊された東日本の沿岸地域に、様々な海中探査用ロボットを導入し、海中の調査を行った。東京工業大学広瀬茂男教授らによって開発されたAnchor Diver IIIも、海中調査で利用された。また、東京大学浦環教授らは、遠隔操縦機ROV（Remotely-Operated Vehicle）を用いて岩手県大槌湾や宮



図1. スマートスーツライト
(北海道大学 田中孝之氏提供)

城県志津川湾の海中の調査を行い、御遺体2体を発見した。

一方、災害時には、がれきや資材、物資の運搬など、肉体的負担が大きな作業が多く発生する。これらの搬送・運搬作業を力学的に支援する手段の一つとして、北海道大学田中孝之准教授らは、スマートスーツライト(図1)と呼ばれる人が装着するタイプのアシストスーツを導入し、被災地で作業を行う復旧作業ボランティアに使用し、腰部の負担の軽減、疲れや痛みの軽減化に効果があったことを示した。

さらにまた、被災地のマッピングにおいても、ロボット技術(RT: Robot Technology)の導入が図られた。東京大学池内克史教授や東北大学出口光一郎教授らのグループは、全方位カメラを搭載した計測車を被災地で走行させ、被災地の被害状況を3次元情報として計測・モデル化し、被害マップの作成を行った。これによりどの地区が津波によってどの程度の被害を受け、どの程度のがれきが残されているかなどを把握することが可能となった。

さらに、災害時における被災者やその家族などのメンタルケアも極めて重要な課題である。家族を失ったり、家や財産を失ったりすることで、多大な精神的な被害を受けることになる。また、被災者が避難所等で生活する際にも、プライバシーが犠牲になったり、様々な人間関係や極限的な生活環境から精神的な負荷を受け、体調を壊す人も多い。そのような状況で、産業技術総合研究所の柴田崇徳主任研究員は、避難所などにアザラシ型セラピーロボットPARO(図2)を導入し、被災者のメンタルケアに貢献した。



図2. メンタルセラピーロボットPARO
(産業技術総合研究所 柴田崇徳氏提供)

がれきの運搬には、様々な建設機械が使用されたが、作業によっては、従来の単腕の機械では対応できないケースもある。日立建機は、NEDO戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトで開発した双腕式油圧ショベル型ロボットを東北石巻市などでの復旧作業において活用した。現在、集積された莫大ながれきの分別・処理が必要となっている。がれきからは悪臭がただよい、アスベストなどの有害物質も含まれており、劣悪な作業環境であるため、RTを活用したがれき処理が求められている。

災害や事故は多様であるために、RTに求められる機能もその都度異なってくる。例えば、被災者の探索に関しても、阪神淡路大震災では、建物の崩壊による圧死が主な死因であったのに対し、東日本大震災では、津波による溺死で多くの方が亡くなった。前者ではがれき内の探索が必要となるが、後者では水中探索のニーズが高かった。このように、災害の状況によって、求められる技術は異なるので、様々な状況やニーズに対応した備えが重要となる。

3. 原子力発電所の事故対応で活用されたロボット技術

東京電力福島第一原子力発電所の事故対応では、放射線レベルが高く、作業員の立ち入りが困難な環境で、様々な作業が要求されている。緊急的なミッションは、事故現場の情報収集・調査、冷却系の安定化、汚染物質の封じ込めなどであったが、その後、除染、廃炉や解体などへと移行しつつある。しかし、ここで何よりも重要なのは、現場作業員の被曝の低減であり、そのために、ロボットや無人化施工などの遠隔操作技術が数多く投入され、継続的に用いられている。

福島原子力発電所事故での最初の課題は、原子炉や燃料貯蔵プールの冷却であった。そこで、3月22日よりコンクリートポンプ車による注水において、遠隔操作技術が導入された。コンクリートポンプ車のブームの先端に照明とカメラを装着し、カメラ画像を遠隔から見ながらブームを操作し、ターゲットに安定して水がかかるように作業が行われた。

4月6日からは、無人化施工機械によるがれき撤去が始まった。無人化施工とは、遠隔から無線によって建設機械等を操作し、安全に施工を行う技術である。建屋外には、津波や原子炉建屋の爆発(水素爆発と考えられている)によって生じた、放射線量の高いがれきが多く散乱しており、作業の大きな妨げとなっていた。先端をアイアンフォークに交換したバックホウを遠隔から操作してがれきをコンテナに入れ、クローラダンプを遠隔操作しコンテナを搬送し片付ける、とい

う作業を行い、建屋周辺に存在するがれきの除去を行った。

無人化施工技術は、1991年の雲仙普賢岳の噴火の際、火山活動が続く危険な状態の中、施工を安全に行うために開発された技術である。バックホウ、クローラダンプ、カメラ車など、複数台の建設機械を、いずれも遠隔地の操作室から無線で操作し、施工を実施する。その後も、2000年の有珠山の噴火や2004年の新潟県中越地震の際の工事でも、無人化施工が行われた。今回の福島原子力発電所事故対応において、無人化施工技術が早い段階で投入できたのも、それが継続的に使用され、技術が維持されてきたこと、そして緊急時に迅速に機械を現地に送り、工事に取りかけられるような体制が整備されていたことによる。

4月10日からは、米国Honeywell社製の小型自律ヘリT-Hawkによる原子炉建屋の空撮調査が行われた。原子炉建屋は爆発によって大きな損傷を受けたが、当時原子炉建屋周辺は特に放射線量が高く、接近することが困難な状況で、その損傷の程度や、内部の状態などの情報をいかに収集するかが大きな課題となっていた。そこで、T-Hawkを遠隔から操作し、近距離から原子炉建屋やその内部の詳細な映像を撮影した。

米国のオバマ大統領は、原発の事故が発生した直後に、その支援策として、iRobot社のPackbot、Warriorや、QinetiQ社のTalon、Dragon Runnerといった軍用ロボットを日本に送った。そして、4月17日からは、Packbot (2台) による原子炉建屋内の調査が開始された (図3)。Packbotは、原子炉建屋の1階部分の調査、具体的には映像での調査や放射線量の測定に用いられた。これによって、建屋内部の状況が初めてわかるようになった。

その後も、東芝が開発した移動ロボットにカメラを搭載し、放射線量や汚染箇所の調査を行ったり、吸引装置を搭載したWarriorによる除染、TalonやBrokk (スウェーデン製の遠隔解体ロボット) などを用いた原子炉建屋内のがれきの除去などが行われた。日本原子力研究開発機構 (JAEA) が開発したロボット操作用車両 (オペ車) も用いられた。前述



図3. Packbotによる原子炉建屋内調査 (東京電力提供)

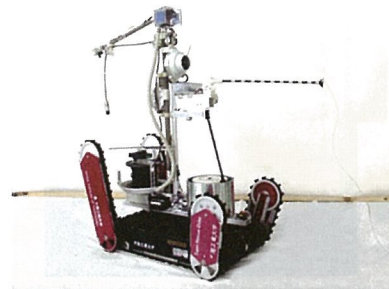


図4. 改造されたQuince (千葉工業大学小柳栄次氏、東北大学田所諭氏提供)

のQuinceに関しては、まだ研究開発段階のプロトタイプシステムであるものの、その優れた走破性から、階段の昇降を伴う、地下や2階以上の建屋内の調査に用いられた。最初は、高濃度の汚染水がたまっている、原子炉建屋やタービン建屋の地下での汚染水のサンプル採取、水位計の設置などのミッションを行うため、改造が施され (図4)、6月下旬に投入された。ただし、地下への階段が設計図より狭かったことから、このミッションは達成できなかった。しかしその後、その高い走破性を活かして、階上部の調査に用いられ、非常にクリアな映像を取得することに成功した。移動ロボットを用いた調査では、作業員が作業をすることが可能な環境であるかを確認するため、映像の撮影や放射線量の計測のみならず、温度、湿度、酸素濃度などの計測も行われた。

今後、燃料の取り出し、解体などの、更に困難なミッションが待ち受けている。ロボットによる建屋内の調査は、継続的に行われているものの、格納容器内や圧力容器内など、調査できていない場所もまだ多く存在する。これらの調査は、いずれも高放射線環境下での調査であり、容易ではない。圧力容器、格納容器、圧力抑制室などの漏えい箇所の同定、止水は、汚染水を含む高放射線環境下での作業であり、かつて誰も行ったことがない、極めて困難なグランドチャレンジである。燃料の取り出しなどの中長期措置には30年以上要するとも言われており¹⁾、これからも長期にわたってロボット技術開発を行うことが必要とされている。これは避けられない現実である。我々は、正にこのような困難な状況を打開し、問題を解決するために、必要な技術開発をやり遂げ、社会に対して技術的に貢献を果たさなければならない。

4. 災害・事故対応ロボットの課題

Packbotが用いられた際、外国製のロボットが日本製のロボットに先んじて用いられたという批判的な報道が大々的に



され、国民の多くも日本のロボット技術に対する失望感を感じたに違いない。前述のように、最初に導入されたのは、日本のロボット技術を応用して構築された無人化施工であるという点で正しい報道とは言えない。しかし、無人化施工以外の日本のロボット技術がスムーズに導入できなかったことは事実である。Quinceも企業が開発した製品ではなく、研究者が開発したプロトタイプであり、現場で活用された実績はほとんどなかった。ただし、役に立たないロボット技術開発ばかりが行われていたのではないかと、という捉え方は短絡的である。

今回、米国から提供されたロボットは、軍事用のロボットであるが、アフガニスタンやイラクでの戦争などに使用された実績のある製品であった。米軍は、その研究開発を支援したのみならず、3000台を調達している。すなわち、国がロボットの需要を作ることによって、企業がビジネスとして参入することが可能となったのだ。企業は、需要があれば開発を進めることができる。それは、保有技術の高度化、イノベーション、産業競争力の強化、更には開発に必要となる人材の育成といった流れを作る。また、ヨーロッパの原子力用ロボットに関して、原子力事故などに対応したロボットを備えとして持つことを義務付けるような制度設計を国が行うことによって、間接的であるにせよ、ロボットの需要が作り出されていた。いずれもロボット技術が必要であるとの判断から、企業が参入できるような枠組みを戦略的に作っていた。

それに対し、日本における原子力用ロボット開発では、極限作業ロボット^[4]やJCOの事故の後に開発されたロボット^{[5][6][7]}の例に見られるように、国は研究開発にしか投資をしてこなかった。研究開発によって優れた技術が開発されたとしても、その後いくら企業努力を求めても、需要がなければ開発した技術を維持することは困難である。特に原子力分野では、国や電力事業者は、原子力発電所での事故の可能性や事故対応ロボットの必要性を否定したことによって需要は創出されず、技術開発を行った企業は、開発した技術を破棄せざるを得なくなった。災害対応ロボットについても、ユーザは、消防、防衛、警察など、すなわち国や自治体に限定されるので、それらがロボットを調達し使用するということがなければ、原子力用ロボット同様、企業が開発に参入することはできない。

ロボットの技術開発には、けん引役となるニーズが必要である。日本では、外国為替及び外国貿易法（外為法）の縛りなどがあるために、軍事技術開発を戦略とすることは難しいが、災害対応・安全・安心を中核戦略とし、そのための投資や需要創出を国が積極的に行うことは可能ではないだろうか。国や自治体が連携し、災害対応・安全・安心のため

の研究開発投資、需要創出、更には必要な制度設計を行い、災害や事故発生時には、スムーズにロボットなどの機器を投入できるような運用体制や組織を構築することが、今後の備えとしても重要となる。

5. おわりに

日本は資源が乏しい国であり、技術とそれを担う人材を育成することによって経済的な発展を遂げてきた。しかし、技術によって構築されたシステムに完璧という言葉は存在しない。技術の有用性と限界の両方を知った上で、それを活用することが重要である。

今回の原発事故に関しても、「想定外」という言葉で片付けられがちな問題の本質をより深く吟味する必要がある。システムを設計するには、要求仕様を定義しなければならず、そういう意味では、「想定」することは必要条件となる。しかし、様々な想定が可能の中で、どこまでを要求仕様とするかは、経済原理で決まる。技術を社会実装する際意思決定は、経済性に基づいており、すなわち技術の外側の問題ということになる。また、人間が運用するシステムには、常に「人間」という不確かな要素が入るという点も考慮しなければならない。

東日本大震災や原発事故の後遺症は大きい。しかし、これによって我々は貴重な経験をしたわけであり、むしろそれを産業競争力などの強みに変えていく、すなわちピンチをチャンスに変えていくことこそ今後の日本にとって重要なのである。

参考文献

- [1] 原子力委員会東京電力（株）福島第一原子力発電所中長期措置検討専門部会：“災害・事故対応に求められるロボット技術”、(2011)。
- [2] 浅間 一：東日本大震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（その1）、日本ロボット学会誌、Vol.29、No.7、pp.658-659（2011）。
- [3] 浅間 一：東日本大震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（その2）、日本ロボット学会誌、Vol.29、No.9、pp.796-798（2011）。
- [4] 平井成典：「極限作業ロボットプロジェクト」特集について、Vol.9、No.5、p.61、1991。
- [5] 間野隆久、濱田彰一：原子力防災支援システムの開発、Vol.19、No.6、pp.38-45、2001。
- [6] 小林忠義、宮島和俊、柳原 敏：原研における事故対応ロボットの開発（その1）情報遠隔収集ロボットの開発、Vol.19、No.6、pp.30-33、2001。
- [7] 柴沼 清：原研における事故対応ロボットの開発（その2）耐環境型ロボットの開発、Vol.19、No.6、pp.34-37、2001。