

災害対応のためのロボット技術開発と運用

浅 間 一

東日本大震災、福島原発事故においては、様々な場面でロボット技術の投入が求められた。現場には、これまでに多くのロボットや遠隔操作機器が投入され、実績を上げているものの、福島原発の廃炉措置や今後の災害に対する備えとしての災害対応ロボットについては、課題が山積みである。本稿では、災害対応ロボットについて概観し、東日本大震災、福島原発事故・廃炉に対して行われた様々なロボット・遠隔操作機器や、その活動について紹介するとともに、産業競争力懇談会から出された提言の概要について述べ、今後行うべき取り組みについて議論する。

キーワード：災害対応、事故対応、廃炉対策、ロボット、遠隔操作、機能評価、平時利用、配備

1. はじめに

2011年3月11日に東日本大震災、福島原発事故が発生した際には、様々な場面でロボット技術の投入が求められた¹⁾。福島原発の現場ではこれまでにすでに多くのロボットや遠隔操作機器が投入され、多大な貢献を果たしている²⁾。しかるに、災害直後は、ロボット技術は日本のお家芸であったにもかかわらず、それらの機器を迅速かつスムーズに導入することができなかった。今後の災害に備える上でも、課題を抽出するとともに、それを解決すべき方策を検討し、具現化する必要がある。

2. 災害対応ロボットとのニーズと研究開発

(1) 災害対応ロボットとのニーズ

日本は災害大国であり、地震、台風、火山爆発などの自然災害が非常に多く、首都直下型地震や東南海地震が近い将来発生する確率は極めて高いと予想されている。また、それに加え人工災害も多発しており、大きな問題となっている。近年、トンネル、橋梁、ダム、道路等の社会インフラの老朽化が原因となり、笹子トンネルの崩落事故をはじめとする事故が多発している。また、プラントなどの設備をはじめとする産業インフラの事故も増加しており、コンビナート事故は10年で10倍に急増しているとの報告もある³⁾。工事現場での事故なども後を絶たない。このような災害や事故の脅威が増大する中、人が行うことが困難・不可

能・危険な作業・環境が多数存在し、ロボットや遠隔操作機器の導入が期待されている。

災害対応にはいくつかのフェーズに分けられる。それに応じて対策も変化し、必要とされる機器も異なる。災害発生直後24時間以内（フェーズ0）は災害状況の把握、必要な機材や物資の確保、体制の確立など、災害発生後72時間以内（フェーズ1）は被災者の探索・救出などの緊急対策、災害発生後1ヶ月程度（フェーズ2）は被災者支援・ライフライン・交通の確保など応急対策、それ以降（フェーズ3）は瓦礫処理、復旧・復興などとなる。

フェーズ0や1の初期においては、被害状況調査、被災者探索・避難誘導・救助などの活動が主体となるため、それを実施、あるいは支援するためのロボット・遠隔操作機器が求められる。陸・海・空、あるいは、建物の内部、狭隘部、瓦礫の中などを移動して情報を収集したり、被災者を探索し、誘導・救出するロボット・機器、応急的な瓦礫除去、インフラ修復・再構築などの作業を行うロボット・機器などが必要となる。また、フェーズ2や3などの応急対策・復旧・復興においては、本格的な瓦礫処理、インフラ構築、災害対策工事、除染をはじめ、様々な復旧活動を支援するロボット・機器（無人化施工機器を含む）などが重要となる。

(2) 災害対応ロボットの研究開発と運用

①各省庁などにおける災害対応ロボットの開発と導入
災害対応活動といっても、その活動の内容に応じ

て、国交省、消防庁、自衛隊、警察庁など、様々な省庁や自治体が、それぞれの役割を担っており、各組織において、あるいは、事故対応が求められる事業者が、それぞれの目的に応じた災害対応ロボットの開発・調達・配備を行っている。たとえば、消防庁は、消火活動や救助活動（レスキュー）を行えるようなロボット、具体的には、要救助者救出口ロボット、無人走行放水装備、水中検索装置などの開発を行うとともに、これらの機器を東京消防庁などに配備し、非常時に備えている⁴⁾。一方、防衛省は、災害派遣・支援も重要な任務であり、CBRN（Chemical, Biological, Radiological, Nuclear）災害に対応できるようなロボット・遠隔操作機器の開発などを行っている⁵⁾。有事の際は、自衛隊がこれらの機器を用いてオペレーションを行うと考えられる。また、国交省でも、火山爆発や土砂災害などの災害時における災害対応手段として、無人化施工機器の開発・運用を行っている。特に、国交省は、緊急災害対策派遣隊 TEC-FORCE（Technical Engineering Control FORCE）⁶⁾ という、大規模自然災害時に被災状況の迅速な把握、被害の発生・拡大の防止、被災地の早期復旧その他災害応急対策に対する技術的な支援を行う部隊を有しており、ここでも、無人化施工をはじめとする遠隔操作機器が配備されている。また、警察庁においても、テロ対策や爆弾処理のための遠隔操作ロボットが配備されている⁷⁾。

②災害対応ロボット研究開発プロジェクト

一方、災害や事故が発生し、災害対応ロボットの重要性が認識されるたびに、様々なプロジェクトが立ち上がり、災害対応ロボットに関する技術開発が行われてきた。阪神淡路大震災後には、文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）」（平成14年度～18年度）⁸⁾ が実施され、大震災における緊急災害対応（人命救助など）のための被災者探索・情報収集・配信等を支援することを目的とした、レスキューロボット等の次世代防災基盤技術の開発が行われた。また、ロボット技術の実用化・事業化を目的として実施された NEDO「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」（平成18年度～22年度）⁹⁾ の特殊環境用ロボット分野においても、「被災建造物内移動 RT システム」の開発が行われ、被災した閉鎖空間内で移動し、情報収集するための実用化ロボット技術の開発が行われた。さらに、今回の東日本大震災と福島原発事故を受けて実施された NEDO「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」（平成23年度～24年度）¹⁰⁾ においては、福島原発事故現場でも活用可能な、災害対応ロボット技術の開発が行われた。こ

れらの研究開発では、基盤技術から現場のニーズに応じた実用化技術まで、継続して一貫した開発が行われた結果、その成果の一部は東日本大震災や福島原発の現場で活用され、災害対応や廃炉措置に貢献するに至っている。

③原子力用ロボット研究開発プロジェクト

一方、原子力施設の監視、点検、保守用のロボットの開発に関しては、1980年代からプラントメーカーが中心となって、通商産業省のプロジェクトや電源開発促進対策特別会計の補助金などで実施されてきた。モノレール式点検ロボット、水中点検ロボットなどの専用機についてはすでに実用化され、実プラント内で稼働しているものも多い。その一方で、格納容器内点検用ロボットなどの汎用ロボットの開発も多く行われた。その典型例が極限作業用ロボット（1983-1990）である¹¹⁾。1999年に発生した東海村 JCO 臨界事故後も、原子力防災支援システムや情報遠隔収集ロボットなど、原子力事故対応ロボットの開発が行われた^{12～14)}。しかしながら、これらの研究開発では、様々な汎用ロボットの技術開発が行われたものの、いずれもプロトタイプ開発や基盤技術開発までで留まってしまい、実用化されなかった。そのため、福島原発事故における事故対応や廃炉措置においてはその成果をほとんど活用できなかった。

また、原子炉解体に関しては、JPDR 解体の際に、放射能を帯びた鋼構造物及びコンクリート構造物の安全かつ円滑な解体を目的として、様々な解体工法・解体機器の開発が行われた¹⁵⁾。特に、作業員の放射線被ばくの低減を図るため、高い放射線環境下での作業を行うことのできる遠隔切断装置などの遠隔解体操作技術の研究開発が行われた。ただし、この技術も正常に停止した原子力プラントの廃炉・解体に開発された技術であり、事故が発生した福島原発に対しては、これをそのまま導入することはできず、これとは異なる新たな技術開発が求められている。

3. 東日本大震災と福島原発事故への対応

(1) 震災および津波対応におけるロボット活用

東日本大震災における災害対応では、被災者の探索、被災した建物やプラント・設備の調査、水中の調査、被災地のマッピング、重作業のパワーアシスト、被災者のメンタルケアなどでロボット技術が活用された。災害からの復旧、復興においても、汚染された地域の放射線量調査、瓦礫の処理、除染などでロボット技術は使われており、今後もさらに活用は拡大すると

考えられる。具体的には、能動スコープカメラ(東北大), Quince (千葉工大, 東北大, NEDO, IRS), KOHGA3 (京大), Anchor Diver III (東工大), 遠隔操縦機 ROV (東大), 双腕式油圧ショベル型ロボット (日立建機), 被災地計測・モデル化・マッピング計測車・全方位カメラ (東大, 東北大), Paro (産総研), スマートスーツ・ライト (北大), Hexa-rotor MAV (千葉大) などのロボットがこれまでに用いられた。

(2) 原発事故対応・廃炉措置におけるロボットの導入

一方、福島原発の事故対応に関しては、事故直後は、冷却系の安定化、封じ込めが最大のミッションであったが、冷温停止後(平成24年1月以降)は、廃炉に向けた使用済み燃料プールからの燃料や燃料デブリの取り出しに移行している。しかし、現場で様々な作業を行っている作業員の被曝を低減することが何よりも重要なミッションである。具体的には、注水、瓦礫除去、建屋や様々な容器内の調査(映像取得、放射線量・汚染分布・温度・湿度・酸素濃度・等の計測)、サンプル採取、計測機器などの設置、除染、遮蔽、機材の運搬などの作業でロボットや遠隔操作機器の活用が求められ、すでに数多くのロボットや機器が導入されている。導入された調査・作業用ロボットは、米国 Honeywell 社製の小型無人ヘリ T-Hawk, 米国 iRobot 製の Packbot (2台), 千葉工業大学, 東北大学, 国際レスキューシステム研究機構, 新エネルギー・産業技術総合開発機構が開発した Quince, Quince 2, Quince 3, 米国 iRobot 社製の Warrior, 米国 QinetiQ 社製の Talon, 日本原子力研究開発機構が開発した JAEA-3, TOPY 工業が開発した Survey Runner, 東芝が開発した4足歩行ロボットと小型走行車, 三菱電機特機システムが開発した FRIGO-MA, 産業技術総合研究所と本田技術研究所が開発した高所作業車, 日立 GE ニュークリア・エナジー社製遊泳調査ロボット, ATOX 社が開発した円筒容器内水位測定装置などである。

いわゆる「ロボット」以外のロボット技術も、廃炉に向けた様々な作業において活用されている。日本原子力研究開発機構(JAEA)が開発したロボット操作車 RC-1 が Talon の操作車として、またガンマカメラによる線量測定・汚染分布測定などに用いられたほか、工業用内視鏡を用いた2号機原子炉格納容器内部調査、ROVを用いた4号機使用済燃料プール内調査・瓦礫分布マップ作成、バルーンを用いた1号機オペフロ調査なども行われている。

(3) 無人建設機械の活用

福島原発の事故対応およびその廃炉措置において、無人化施工をはじめとする建設機械も極めて有効に活用されている。東京電力福島第一発電所の事故発生直後は、原子炉の冷却が最大の課題であった。安定な注水を行う手段として、Putzmeister 社製のコンクリートポンプ車による遠隔注水が4号機で行われた。

また、事故直後の福島第一原子力発電所内には、津波によって発生した瓦礫と、原子炉建屋の水素爆発によって発生した瓦礫が多数存在した。特に、水素爆発によって発生した瓦礫は、放射線レベルが高く、発電所内での復旧作業の大きな妨げとなっていた。そこで、高線量作業環境における作業員の被ばく線量の低減を目的として、バックホウ、クローラダンプ、オペレータ車、カメラ車などの無人化施工機械を用いた瓦礫の除去が行われた。また、原子炉建屋内部においても、遠隔操作機器を用いた瓦礫除去が行われている。Talon (米国 QinetiQ 社製), Bob Cat (米国 QinetiQ 社製), Brokk-90 (スウェーデン Brokk 社製), Brokk-330 (スウェーデン Brokk 社製), ASTACO-SoRa (日立エンジニアリング・アンド・サービス社製), 除染機器 Moose (Pentek 社製), 遠隔操作床面除染装置(ATOX 社製)などが使用されている。

水素爆発を起こした3号機の原子炉建屋の最上階瓦礫の除去も、クレーンやバックホウなどの無人化施工機械を用いて行われた。また、鹿島建設は、クローラダンプおよびフォークリフトを用いて3号機の放射線レベルの高い瓦礫の搬送作業の完全自動化を達成した。

4. 今後の取り組み

(1) 各省庁などにおける災害対応ロボットの開発・配備の問題点

これまでに開発、現場への導入が行われてきた災害対応ロボットや遠隔操作機器について述べたが、これからの廃炉対策や、今後の災害に対する備えという点では、まだ多くの問題が残されている。各省庁で開発、配備が行われてきた災害対応ロボットについても、現状のロボットで対応できる災害や事故の状況は、特殊なケースのみであり、多様な災害に対して必要とされる機能のごく一部しかカバーできていない。事実、消防庁、警察庁、防衛省などが開発してきたロボットは、訓練ではたびたび使用されてきたにもかかわらず、実際の災害現場で使用されたことはほとんどない。国交省の無人化施工機械なども、火山災害や土砂災害、原

発事故などを中心に活用されているものの、実際の災害現場で活用可能な場面はまだ限定的である。災害や事故は極めて多様であり、災害対応ロボットにも様々な環境で多様な作業を行うことが求められ、要求される機能も極めて多様で複雑である。現在我々が有しているロボットの機能では、ごく一部の災害にしか対応できないのである。また、各省庁、自治体における、災害対応ロボット、遠隔操作機器の開発・導入・配備といった活動の多くは、縦割りで行われている。共通する技術も多々存在し、有事の際には、省庁間で連携した協力的オペレーションが求められるものにもかかわらず、省庁間相互の交流・連携はほとんど行われておらず、これも大きな問題と考えられる。

(2) 福島原発の廃炉および原子力事故への備え

福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップでは、廃炉までに30～40年かかるとされており、今後も、除染、汚染水の漏えい箇所の特定・補修、燃料デブリの調査・取り出しなど、人が行うことが困難な作業が目白押しであり、長期にわたってロボットや遠隔操作機器の開発は継続的に行っていく必要がある。これらは、いずれも新規に開発されるものばかりであり、現場で確実に使用できる装置として完成させるには、研究開発された後も、機能検証、実証試験、オペレータの訓練などを十分行った上で投入する必要がある。日本原子力研究開発機構は、福島廃炉技術安全研究所を設置するとともに、遠隔操作機器・装置実証施設（通称モックアップ施設）の建設・運用を行う計画を進めており、開発されたロボットや遠隔操作機器の実用化を行う上での重要な鍵となる。

一方、今後起こり得る原子力事故に備えるため、電気事業連合会は原子力緊急支援機関を福井県内に設置することを決定した。それを受け、日本原子力発電が敦賀市に原子力緊急事態支援センターを設置し、様々な事故対應用ロボットを配備するとともに、オペレーションの訓練を行うなど、有事の際の緊急支援体制を整えつつある¹⁶⁾。

(3) 一般災害に対する防災・減災の取り組み

前述のように、災害対応ロボットに関するプロジェクトで開発されたロボットで、東日本大震災や福島原発の現場に導入されたものもあるが、それはごく一部に限られている。大学や研究機関、ロボット関連企業、プラントメーカーなどは、これらの災害対応ロボット技術開発プロジェクト以外に、独自で開発しているケースも多い。しかし、これらの研究開発では、プロトタ

イプ開発、あるいは実証試験までは行われるものの、実用化・事業化は遅滞として進んでいないのが現実である。実際に、災害対応ロボットの需要は官需が中心であり、市場も極めて特殊で限定的であることから、企業努力だけでは死の谷を越えることは難しい。それを解決するには、国が実用化まで支援するとともに、国が率先して需要を作り出すことが重要となる。

一方、今後の備えという点では、このような研究開発だけでは不十分であり、発災後の災害対応、減災のみならず、災害を予防する防災も重要である。社会インフラや産業インフラの老朽化による事故も急増しており、これらの点検や保守においても、ロボットの活用が求められている。人が行うことが困難・不可能な作業をロボットで行ったり、危険作業をロボットで代替することが、ロボットを導入する最大の目的だが、ロボットを導入することで、人が作業を行う際に必要であった足場の建設などが不要になるので、コストが削減でき、工期を短縮できるということも重要なポイントとなる。

(4) 産業競争力懇談会での提言

今後の災害や事故に備えるためには、東日本大震災および福島原発事故が発生した際、迅速かつスムーズにロボットや遠隔操作機器が導入できなかった問題点を分析するとともに、それをいかに解決するか検討する必要がある。産業競争力懇談会では、災害対応ロボットの社会実装を推進するために、平成23～24年度に「災害対応ロボットと運用システムのあり方」プロジェクトを実施し^{17, 18)}、危険作業や社会インフラ・設備の点検・保守などの併用も含め、平時から使用、運用しつつ、有事の際にも迅速に配備できるようにするための提言を、以下の3点にまとめた。

(a) 研究開発拠点やプロジェクト立ち上げによる技術開発

様々な災害に対応できるようにするためには、特殊環境移動・アクセス技術、遠隔操作用安定通信技術、遠隔操作用空間認知技術、操作性向上のための自律化・知能化技術、計測技術とそれに基づく点検・診断・メンテ技術などに関するニーズ駆動型基盤技術研究、高度実用化研究、運用実証型研究を行う必要がある。また、ソリューション導出・システム化技術を高度化するためには、DARPA Challenge¹⁹⁾のような競技会やチャレンジを実施することも有効である。

(b) 災害対応ロボットセンターの設置

実証試験・オペレータ訓練、防爆性・耐放性・耐久性・安全性などの機能評価・認証、ロボット技術情報

の集積化・一元的管理・提供、緊急時対応（災害時の配備）などの機能を持つ防災ロボットセンターを設置する必要がある。実証試験、オペレータの訓練に関しては、それを実施するテストフィールドやモックアップを設置する必要がある。

(c) 戦略策定・標準化・制度設計

災害対応ロボットの開発と運用を長期的に継続して行うための戦略の設計、策定が求められる。また、ロボットの機能評価やインタフェース仕様に関する標準化活動、規制緩和（特区など）、規制強化（配備の義務化など）、免税措置などの税制策定、無線周波数の確保や保険制度などを含む環境整備など、制度設計なども重要である。

平成25年度には、それを受け「災害対応ロボットセンター設立構想プロジェクト」において、「災害対応ロボットセンター」の具体的な機能とその具現化の方策や運用の枠組みについて検討した²⁰⁾。災害対応ロボットセンターは、長期的な技術開発戦略の策定と有事の際の災害対応ロボットの配備・運用に関する司令塔の機能を有する「災害対応ロボット利用推進本部」と、平時における災害対応ロボットの技術開発、実証試験・評価・認証、訓練、標準化・運用・配備の実業務を統括する「災害対応ロボット技術センター」によって構成することとし、災害対応ロボット利用推進本部は内閣府など政府に設置し、災害対応ロボット技術センターは産官学連携によって運営すべしとの提言を行った。平時利用に関しては、(1) 危険が伴う作業や工事における現場活用、(2) 社会インフラや設備の点検・保守との併用、(3) 訓練などにおいての利用が考えられる。また、災害対応ロボット技術センターには、災害対応ロボットに関連する技術とその実用評価、ニーズ等に関するデータベースを完備、管理するとともに、災害対応ロボットのテストフィールドやモックアップなど、実証試験や機能評価・認証を行える拠点を運用し、研究開発から、実証試験、オペレータ訓練、実現場への投入といった一貫した流れを継続的に回す機能が求められる。

5. おわりに

本稿では、災害対応ロボットについて概観し、東日本大震災における災害対応、福島原発事故対応・廃炉措置において導入された様々なロボット・遠隔操作機器や、その活動について紹介するとともに、今後行う

べき取り組みについて述べた。今後、レジリエントな社会を構築する上で、災害に対する備えとして、現場で活用可能なロボット技術の開発・運用が極めて重要になる。現在、福島・国際研究産業都市構想（イノベーション・コースト）研究会をはじめとして、災害対応ロボットの研究開発や評価・運用拠点の設置に関して、様々な検討が各省庁や自治体で始められている。災害対応ロボットの技術開発・運用は、災害というリスクに対するナショナルレジリエンスのみならず、社会インフラや産業インフラの維持管理・長寿命化、防災といった観点からも重要である。一方、様々なロボット産業への大きな波及効果も期待される。現在行われている検討が具現化し、産業競争力懇談会の提言の早期の実現が期待される。

JCMA

《参考文献》

- 1) 浅間 一：“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”，ITU ジャーナル，vol. 42, no. 2, pp. 44-47, 2012.
- 2) 浅間 一：“災害対応におけるロボット技術の適用と運用”，建設機械，vol. 49, no. 12, pp. 41-45, 2013.
- 3) http://www.nhk.or.jp/gendai/kiroku/detail_3294.html
- 4) <http://www.tfd.metro.tokyo.jp/ts/soubi/robo/>
- 5) 上村圭右，成瀬正啓，勝山好嗣：“CBRN 対応遠隔操作作業車両システムの研究”，防衛技術シンポジウム，p-6, 2013.
- 6) <http://www.mlit.go.jp/river/bousai/tec-force/index.html>
- 7) <http://www.news24.jp/articles/2010/09/23/07167315.html#>
- 8) <http://www.rescuesystem.org/ddt/H15-report/ddt15.html>
- 9) http://www.nedo.go.jp/activities/EP_00295.html
- 10) http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100045.html
- 11) 平井成興：「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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Satoshi Yanagihara, Shinsuke Ashida, Hozaumi Usui: “Dismantling of JPDR internals using underwater plasma arc cutting technique operated by robotic manipulator”, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 25, no. 11, pp. 891-894, 1988.
- 16) <http://www.japc.co.jp/emergency-support/index.html>
- 17) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema39-L.pdf>
- 18) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema50-L.pdf>
- 19) <http://www.theroboticschallenge.org/default.aspx>
- 20) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema60-L.pdf>

【筆者紹介】

浅間 一（あさま はじめ）
東京大学
大学院工学系研究科
教授

