

解 説

災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築

R&D for Practical Robot Technology and Establishment of Its Operation System for Disaster Response

浅 間

一* *東京大学

Hajime Asama* *The University of Tokyo

1. は じ め に

2011年3月11日、東日本大震災および東京電力福島第一原子力発電所事故が発生した際、様々な場面でロボットの投入が求められた。実際、これまでに原発事故現場でも、多くのロボットや遠隔操作機器が導入され、緊急対応や廃炉対策に対して多大な貢献を果たしている[1]。しかし、事故直後、メディアは日本のロボットが迅速に投入されなかったと報道し、ロボット科学者に責任があると批判した。この批判は、いくつかの点で必ずしも正しいとは言えない。日本製の無人化施工機械は、外国製のロボットより先に活用されていたし、ロボットの配備が遅れた原因は、むしろ実用化や運用の仕組みがなかったことに拠る部分が多い。しかし、災害が発生した直後には、必ずしもロボットをスムーズに投入することができなかったこと、過去に開発したロボットが有効に活用できなかったことは事実である。

本稿では、今後災害発生時に、現場のニーズに応じて速やかにロボットや遠隔操作機器を配備し、活用できるようにするために何が必要であるのかについて議論するとともに、それを実現するための提言と今後の展望を述べる。

2. 対災害におけるロボット技術の現場ニーズ

東日本大震災および福島原発事故におけるロボット技術のニーズや、それに対してこれまでにどのようなロボット技術が導入されたかに関しては、すでに別報で紹介した[2]。ただし、福島原発では、今後廃炉に向けた作業において長期にわたり（中長期ロードマップでは、30~40年かかるとされている[3]）必要となるロボットや遠隔操作機器を継続的に開発し、導入する必要がある。また被災地においても、除染、瓦礫処理や復旧、復興のための作業を長期にわたって実施しなければならない状況が続いている。

そもそも、日本は、地震、津波、台風、火山爆発など、自然災害が多い。首都直下型地震や東海・東南海・南海地震

の発生も予測されている。また、2011年7月に発生した新潟県南魚沼市・十日町市の八箇峠道路トンネルのガス爆発事故に代表されるように、建設現場や工事現場での事故などの人工災害も後を絶たない。2012年12月に発生した笹子トンネルの崩落事故は、劣化などの老朽化が原因で生じており、トンネル、橋梁、高速道路、ダムなどの社会インフラの老朽化が問題となっている。また、腐食などの老朽化が原因で発生するコンビナート事故は、ここ10年で10倍に急増しているという報告もあり[4]、設備事故への対応も喫緊の課題である。

自然災害や人工災害の脅威が増すなか、それらに対する備えの重要性が高まっている。防災、減災という考え方では、緊急対応、復旧、復興という災害発生後の措置のみならず、災害発生を予防する対策、社会インフラや設備の点検や保守などが重要となる。

災害対応、復旧においてのみならず、点検・保守などにおいても、人が行うことが困難、危険、あるいは不可能な作業や環境が多数存在し、ロボットや遠隔操作機器を導入するニーズは高い。また、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や養生などの段取りが不要になるなど、コストの削減、工期の短縮が図れるという点においても、ロボットや遠隔操作機器の導入は、極めて有効な方策である。

しかし、現在のロボット研究は、これらのニーズに必ずしも十分に答えられていない。研究者は、研究を論文化する必要があるため、論文において評価される独創性や新規性ばかり重視しがちになる。そしてそれは、現場が求めているものとの乖離を生み、現場で使われない研究成果ばかり生産されるという状況を招く。研究者は、現場を見たりニーズをきちんと把握することなく、過去の論文ばかりを見て研究を進める。

災害や事故現場において活用が求められるのは、多くの場合、遠隔操作機器である。米国において軍事予算で開発されているものの中には、自律を指向したロボット技術が数多く存在する。DARPA Robotics Challenge[5]などでも、ロボットとオペレータ間の通信の帯域幅が狭く、自律化を図らないと課題がクリアしにくい設定になっている。し

原稿受付 2013年10月21日

キーワード: Disaster Response, Practical Robot Technology, Operation System

*〒133-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

かるに、実際の災害現場ではそのような状況におかれることは極めて稀であり、やはり多くの場合、通信ネットワークを構築するなど、遠隔操作環境を整えた上で、遠隔操作で作業が行われる。

遠隔操作をしやすくするためのある程度自律化は、むしろ重要な技術である。しかし、事実、災害や事故現場は想定外の無限定環境であることがほとんどであり、突発的なミッションを行うことが求められるので、作業の自律化は極めて困難であるし、使用方法が複雑であったり、人が介入することができない自律で動作する機器は、人が自在に操ることが難しく、意図とは異なる動作をするリスクがあるという点でむしろ危険であるため、敬遠されることが多い。人による操作可能性（人が機器の制御に介入できること）は、機器の使用責任という点においても極めて重要であり、逆に自律化ありきのロボット技術開発は、製造者責任を増大させ、現場のニーズとの乖離を引き起こす可能性があるという点で、要注意である。

3. 実用という観点からの研究開発の検証

実用、すなわち現場で使用される技術開発という観点から、これまでの技術開発の問題点を分析することが重要である。

一般に、技術の研究開発から社会実装までには、魔の川（アイデア・基礎研究から実用化を目指した研究までの間の壁）、死の谷（実用化研究から製品化までの間の壁）、ダーウィンの海（製品が市場による淘汰を受けて生き残る際の壁）などと呼ばれる困難が存在すると言われている [6]。

実際、開発という観点では研究開発から社会実装に至るまでには、以下のようなプロセスがあると考えられる [7]。

(1) 実用化

現場での使用に耐えるよう、様々な環境変動、ノイズ、不確定要因が生じてでも安定して確実に動作する必要がある。

(2) 製品化

ライフサイクルを通しての設計、保守、PLなどを考慮しなければならない。

(3) 商品化

マーケットの確保、コスト低減など、売れるものにまとめあげる必要がある。

(4) 事業化

それを流通させ、サポートの体制も含め、社会に普及させる必要がある。

また、研究成果を実用化するまでのレベルについては、NASA が以下のような Technology Readiness Level (TRL) を提唱している [8]。この定義では、TRL 1 が最も基礎的な研究開発レベルで、TRL 9 が現場で活用可能なレベルである。

TRL 1: Basic principles observed and reported

TRL 2: Technology concept and/or application formulated

TRL 3: Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept

TRL 4: Component and/or breadboard validation in laboratory environment

TRL 5: Component and/or breadboard validation in relevant environment

TRL 6: System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)

TRL 7: System prototype demonstration in a space environment

TRL 8: Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or space)

TRL 9: Actual system “flight proven” through successful mission operations

さて、では東日本大震災および福島原発の事故で、これまでの研究開発の成果が活用できたのか、三つの例を取って検証してみよう。

(1) 原子力関連のロボット技術開発

すでに別報 [9] [10] で述べたように、通産省「極限作業ロボット」(1988～1998 年) や、1999 年に発生した東海村 JCO 臨界事故を受けて経産省の「原子力防災支援システム」や文科省（日本原子力研究所）「情報遠隔収集ロボット」(2000 年～2001 年) で、様々な原子力用ロボットが開発された。これらのプロジェクトでは、当時のロボット技術の高度化、システム化という点では成果が評価されたものの、プロトタイプ開発で終了しており、その成果のほとんどは今回の原発事故で役立てることができなかった。プロジェクトは単発で、プロジェクト終了後、実用化に向けた国の支援策もなく、また本来ロボットユーザである電力会社が調達・導入に消極的だったため、ロボット開発を行ったメーカーは、自社の企業努力だけで実用化に向けた技術開発を継続して行うことを断念せざるを得なかった。TRL では、TRL 1 か 2 のレベルと考えられる。

現場で活用可能な技術開発がゴールであるなら、これは一つの失敗例である。これまでのプロジェクトでは、研究開発ばかりに投資を行い、その実用化、社会実装、事業化に関しては、企業努力に任せるケースが多過ぎた。災害対応や事故対応のように、官需が中心で、発生頻度が低いもののそれが甚大な被害につながるようなケースでは、企業努力だけでは事業を継続することは困難である。今後、このようなことが繰り返されないように対策として、プロジェクトなどによって研究開発された技術を、国がさらに次の実用化や社会実装につなげるまでしっかり継続して支援す

のような枠組みを構築することが重要である。

(2) 災害対応ロボット

1995年に発生した阪神淡路大震災において、建物の崩壊などによって大きな被害が出た。それを機に、被災者の探索などに役立てるようなロボット技術開発を目標として、文科省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）」が立ち上がり、そのなかで「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」（2002～2006年度）が実施された。ここでは、被災地の様々な環境において移動し、情報収集を行うための様々なロボット技術開発が行われた。実は、このプロジェクトにおいて、福島原発の事故現場で2011年6月に導入されたQuinceの前身であるKenafと呼ばれるロボットが開発された。Kenafはまさに瓦礫操作性に非常に優れたロボットであり、このプロジェクトでプロトタイプが開発され、基盤技術が確立されていた。その後、ロボット技術の実用化・事業化を目指したNEDOの「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」（2006～2010年度）が開始され、特殊環境分野の一つのプロジェクトとして、Kenafの実用化機としてQuinceが開発された。2011年3月はプロジェクトの最終段階であり、成果としてQuinceがほぼ完成の状態であったために、福島原発の事故直後に、これを改造し、現場に導入することができた。

実際の事故現場に投入され、活用されたという点ではこれは成功例であると言える。ただし、これは企業が製品化したロボットではない。現場への投入を可能としたのは、開発に携わった研究者の努力によるものであり、製品化・商品化・事業化されたロボットでないという点で、うまくいった例とは言い切れない面がある。TRLでは、TRL6のレベルと考えられる。

(3) 無人化施工

1991年に雲仙普賢岳で火山爆発が発生した際に、火砕流や土石流によって多くの方が犠牲になり、甚大な被害が生じた。被害の拡大を防止するための工事が求められたが、火山活動は引き続き活発で危険が伴うため、無人化施工技術（建設機械にオペレータが搭乗することなく、無線通信を介した遠隔操作によって工事を行う技術）が導入された。その工事は現在でも継続して行われている。福島原発事故では、2011年4月上旬の早い時期に、プラント内に生じた大量の高放射線レベルの瓦礫の除去に、無人化施工が活用された。

この技術が災害発生直後に迅速に現場に投入できた最大の要因は、この無人化施工技術が、雲仙普賢岳の工事で継続的に使用されていたことである。国交省は、この無人化施工技術が災害対応において極めて有用であることを認識し、これらの技術を維持するために戦略的にこれを用いた工事を継続的に行っていたのだ。これが、技術の実績をつくり、技術を安定化させ、また常に使える状態に維持させ

ていた。また、この工事現場が新たに開発された様々な技術の実証試験の場としても活用され、現場では常に新しい技術が使用され、技術の更新が行われていた。これが、今回の事故対応にも役立てられた大成功の秘訣であった。無人化施工こそ、まさにTRL9のレベルの技術である。

(4) 福島原発事故で活用された海外のロボット技術

上記以外にも、米国iRobot社製のPackBotやWarrior、米国Honeywell社製のT-Hawk、米国QinetiQ社製のTalonやBobcatなどが活用されたが、これらのロボットはいずれも、米国の軍事予算で開発されたものである。特にPackbotは、2011年3月の時点ですでに米軍が3,000台を調達し（現時点では5,000台）、イラクやアフガニスタンでの戦場で実績を有するロボットであった。また、スウェーデンBrokk社製のBrokkも複数台福島で活用されているが、これもこれまでの原子力災害などの現場でたびたび使用された実績のあるロボットであった。ドイツやフランスにおいても、原子力災害用の様々なロボットが、KHGやGroupe Intraなどの原子力災害対応組織に常備されており、訓練などに使われている。これらはいずれもTRL9のレベルの技術である。

ただし、ここで上記の海外のロボットに関して注目すべきことは、いずれも危険作業や緊急対応作業用としてのこれらのロボットの技術開発（現場で活用可能なレベルまでの技術開発）や調達、維持・管理に対し、国が何らかの形でしかるべき投資、支援をきちんと行っているという点である。

4. 災害対応への備えための提言

産業競争力懇談会（COCN）「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（平成23～24年度）では、今後の災害対応に備えるために開発が必要となる技術について洗い出すとともに、それを実用化し、いつ災害が発生しても現場に即投入できるような開発・運用のあり方について提言をまとめている[11]。平成24年度にまとめられた提言（図1）について紹介する。

(1) ハード面での提言（技術開発）

東日本大震災および福島原発事故への対応において様々なロボット技術が適用されているものの、今後起こり得る災害に対する備えとしては、まだまだ研究開発が必要な課題が多く残されており、実用化を指向した基盤技術研究や、高度実用化研究（基礎技術を現場に適用できるようにするための研究開発）、運用実証型研究（開発した機器の技術評価と運用評価を同時に行いながら、用途確認を行う研究）などを実施する必要がある。様々な災害においてロボットが活用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

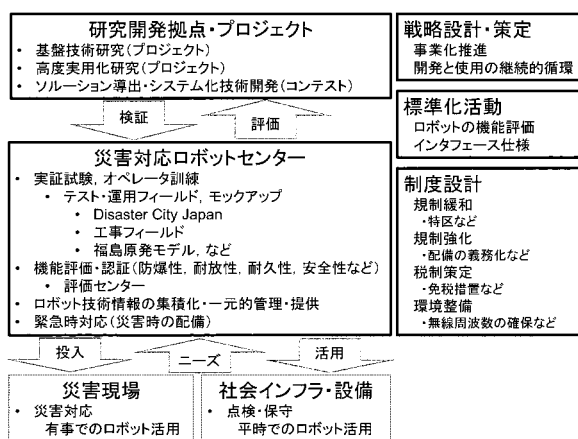


図1 災害対応ロボットと運用システムのあり方の提言

それに基づく点検・診断・メンテ技術など、開発すべき技術課題も多い。それをニーズ駆動型基盤技術研究、高度実用化研究などで行う必要がある。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 Robotics Challenge [5] 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。

(2) インフラ面での提言（インフラ整備）

現場で活用できるような機器やシステムを開発するには、その実証試験や機能評価を行うのみならず、それをユーザが継続的に運用し、機器やシステムを日々維持、保守、改良を行いながら、オペレータの訓練までも行うことが求められる。実証試験・オペレータ訓練に関しては、米国テキサスにある Disaster City [12] に代表されるようなテストフィールド、モックアップを構築し、活用することが有効である。また、前述の無人化施工の例からもわかるように、開発したシステムを長期的に利用する工事現場を設定し、それをフィールドとして継続的に利用することが肝要であることがわかる。

また、実際の現場においては、ロボットや機器の防爆性、耐放射線性、耐久性、安全性なども求められる。これらを評価し、それを認証できるような枠組みと組織も重要となる。さらに、有事においては、ロボットや遠隔操作機器を現場に配備するための組織・拠点・体制を整えることも必要となる。

以上から、実証試験・オペレータ訓練、防爆性等の機能評価・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）などの機能を持つ災害対応ロボットセンター（仮称）を国のリーダーシップのもとと設置することが重要である。

(3) ソフト面での提言（制度設計など）

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ことが需要であり、そのための戦略的設計、策定が求められる。また、ロボットや機器の機能評価のための標準化が重

要となる。米国では、NIST（National Institute of Standards and Technology）がその機能評価の標準化を進めているが、日本でも同様な取り組みを行う必要がある。インタフェース仕様に関する標準化活動も、多様な現場に応じて、迅速にかつ適応的にシステムを開発する上で重要である。

一方、ロボットや機器を維持し、継続的に運用するためには、その活動を事業として成り立たせる必要があり、そのための新たなビジネスモデルの構築が求められる。災害対応だけでなく、社会インフラや設備の点検、ヘルスマニタリング、メンテナンスなどにも併用可能なロボットや機器を開発し、平時にも継続的に利用されるような仕組みを作ることが有効である。それには、機器やロボットというハードウェアより、サービスを事業とすることを考える必要がある。また、導入を促進するための制度設計（特区をはじめとする規制緩和、ロボット配備を義務付ける規制強化、免税などの税制的制度設計、保険制度など）、無線周波数の確保や保険制度などを含む環境整備なども極めて重要である。

5. 災害対応ロボットセンター構想

前章のCOCNのプロジェクトの提言を受け、平成25年度は「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設置のための具体的な方策について検討が進められている。具体的には、下記の項目について、ワーキンググループ（WG）を設置し、検討および提言の策定が行われている。

(1) 評価 WG

実証試験・オペレータトレーニングを実施する機能、機能評価・認証（防爆性、対放性、耐久性、安全性など）を行う機能の検討など

(2) 技術 WG

技術情報収集・分類・集積・一元管理、技術カタログ・データベースの設計・構築、通信インフラ動的構成技術などの検討など

(3) 配備 WG

ロボットの配備までも考慮した組織や体制の検討、それに伴う法制度の検討、運用方法の検討など

各WGでの検討を重ねた結果、有事（災害が発生した緊急時）において、災害対応ロボットを配備し、活用できるようにするためには、平時（緊急でない災害現場や災害が発生していない状況）においてロボット技術の継続的な開発・運用を行うことが重要であり、それを実現するには、「災害対応ロボットセンター」として、以下の機能を有する組織と体制の設立が必要との結論に至った。

■災害対応ロボットの配備・運用に関する司令塔機能を有する災害対応ロボット利用推進本部の設置

■災害対応ロボットの安全性・信頼性を確保するための災

害対応ロボット技術センターの設置

- ・災害対応ロボットに必要な様々なフィールド性能評価と認証の機能の具備
- ・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の完備

■災害対応ロボット技術センターの産官学連携による運営と災害対応ロボットの平時利用の促進

6. お わ り に

COCN の提言の実現には、産官学連携と省庁間連携が必須である。特に省庁間連携に関しては、研究開発では、文科省、経産省、総務省、総合科学技術会議などの連携、防災ロボットセンターの設置では、内閣府、国交省、消防庁、防衛省・自衛隊、警察庁、資源エネルギー庁、産総研、JAEA など、オールジャパンの連携が必須である。

今後、ナショナルレジリエンス、すなわち国の安全・安心を実現する上で、災害対応ロボットの運用・社会実装をなんとしてでも推進していかなければならない。そのためには、東日本大震災と福島原発の事故という厳しい経験を一つの機会と捕まえ、様々な制約条件に捉われることなく、より大きな視点であるべき姿を考え、その実現に向けて、様々なセクターが協力し、一つ一つ問題解決を図ることが肝要である。

謝 辞 2011～2013 年度の 3 年間にわたり、COCN の災害対応ロボットに関するプロジェクトでは、多くの方に議論に参加していただき、提言の取りまとめに多大なるご協力いただいた。事務局、WG 主査・幹事をはじめ、すべての参加メンバー、オブザーバー、COCN 関係者の方

の場を借りてお礼を申し上げる。

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：“サービス分野におけるロボット技術の社会実装の問題と展望”，JACIC 情報，no.104，pp.24-29，2012.
- [3] <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/conference-j.html>
- [4] http://www.nhk.or.jp/gendai/kiroku/detail02_3294_all.html
- [5] <http://www.theroboticschallenge.org/default.aspx>
- [6] <http://blog.livedoor.jp/randdmanagement/archives/51986943.html>
- [7] 浅間一：“ロボティクス研究と実用化”，ロボット，no.144，pp.80-81，2002.
- [8] J.C. Mankins: Technology Readiness Levels, Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, NASA, Technology Readiness Levels, A White Paper, 1995.
- [9] 浅間一：“東日本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.
- [10] 浅間一：“東日本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.
- [11] <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema50-L.pdf>
- [12] <http://www.teex.com/sitemap.cfm?Div=USAR>



浅間 一 (Hajime Asama)

1984 年 3 月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986 年 9 月理化学研究所化学工学研究室研究員補。同研究所研究員、副主任研究員を経て、2002 年 11 月東京大学人工物工学研究センター教授。2009 年 11 月同大学大学院工学系研究科教授。日本機械学会フェロー、工学博士（東京大学）。（日本ロボット学会正会員・フェロー）