

総論：ロボット技術の進展と災害対応への利用

東京大学 浅 間

—*

1. はじめに

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から、早2年が経過した。震災、原発事故発生時には、様々な場面でロボットの投入が求められた。2011年4月に原発事故現場で、米国製のPackbotと呼ばれるロボットが用いられたことが報道されると、日本のマスコミは、なぜ日本製のロボットが最初に投入できなかったのかと、ロボット科学者やロボット技術者を非難した。実際には、Packbotが導入される前に、無人化施工機械などの日本のロボット技術は現場で活用されていたし、これまでに数多くの日本のロボット技術が福島原発の事故対応や廃炉に向けた作業に導入され、多大な貢献を果たしている。日本には高度なロボット技術が存在し、それが有用であることが改めて証明された。

しかし、東日本大震災・福島原発事故発生直後の緊急対応において、ロボット技術が災害現場でスムーズかつ迅速に投入することができたわけではない。今後の災害や事故に備えるためには、その問題点を明らかにし、対策を講じる必要がある。

本稿では、これまでのロボット技術がどのような進展を遂げ、どのように災害対応に利用されてきたのかについて紹介するとともに、福島原発の廃炉措置だけでなく、今後の災害が発生した際に、現場に迅速にロボットや遠隔操作機器を投入できるようにするには、備えとして何をなすべきかについて述べる。

2. ロボット技術とは

ロボット技術 (RT: Robot Technology) とは何か。そもそも、「ロボット」とは何かという議論もあるが、それはあまり意味がない。経済産業省は、日本ロボ

ット大賞の中で、「ロボット」を、「センサ、知能・制御系、駆動系の3つの技術要素を有する、知能化した機械システム」と定義し、「RT」と同義としている¹⁾。しかし、ロボットとRTは、コンピュータと情報技術 (IT: Information Technology) が違うのと同様、明確に異なる。

一般的には、いわゆる多自由度を有し、ときに生物や人間、あるいはその一部に形態が似ている機械をロボットと呼ぶことが多い。センシングによって得られた情報に基づき、動作を行えるような自律制御機能もロボットと呼ばれる機械の特徴と考えられる。一方、RTとは、物理世界 (実世界) における検知・計測・認識・制御・動作・作業など、「情報技術 (IT: Information Technology) + 実世界で物理的な相互作用をするための技術」ということができる。しかし、その最大の特徴は、それがシステム化技術だという点である。すなわちRTは、作業、搬送、計測などのニーズと、それが動作する環境条件に応じて、それを実行できるソリューションを導出し、システムを設計・構築する技術なのである。完成したロボットを分解してみると、そこにはロボット特有の要素技術があるわけではない。ロボットはシステムであり、求められる作業を実行するために、要素技術が高度に統合化されていることが最大の特徴である。

産業用ロボットやサービスロボットなど、ロボットと呼ばれる機器にはRTが使われているのは当然であるが、輸送機械、産業機械、建設・土木機械、医療福祉機器など、ロボットと呼ばれない機器やシステムにもRTは多く用いられている。すなわち、RTはいわば機械産業全般の技術インフラと言ってもよい。経済産業省やロボット工業会によるロボット産業の将来市場予測では、製造業など、すでに市場が形成されている分野の成長に加え、サービス分野をはじめとした新たな分野へのロボットの普及に

*あさま はじめ 大学院工学系研究科精密工学専攻
教授

より、2035年に9.7兆円まで市場拡大し得るとされている²⁾。しかし、これに含まれているものは、工業会が定義する「狭義のロボット」に限定されているので、RTの実際の経済的なインパクトは、これよりはるかに大きいと考えられる。

3. 産業としてのロボットの発展とその課題

1920年にカレル・チャペックが、戯曲 R.U.R. の中で人間の形をした労働機械としてロボットを登場させて以来、アニメやSFで様々なロボットが描かれてきた。1960年代から、知能ロボットの研究開発が行われていたが、ロボットが実社会で使用されるようになったのはそのかなり後のことである。ロボット元年と呼ばれる1980年から産業用ロボットの生産台数は飛躍的に伸び、産業用ロボットは、溶接、塗装、組立など、製造業における作業の自動化における主役となった。しかし近年、産業用ロボットの市場は、5,000～7,000億円程度で留まっている。その一つの理由は、製造業での大量生産から多品種少量生産へのパラダイムシフトであろう。しかし、さらに詳細に調べてみると、産業用ロボットの国内市場が伸び悩む中、海外市場が伸びており、その内訳は大きく変化している。また、米国における国策としての製造業の強化、EUにおけるロボット産業の台頭、韓国や中国のロボット産業の強化などによって、産業用ロボットの国際的な市場獲得競争は激化している。RTの進展とともに、製造業においてもまだロボットの需要はまだ伸びると考えられているが、上記の状況を鑑みると、さらなる競争力の強化が必要となっている。前述のように、RTは機械産業全般の技術インフラであるので、RTの競争力の低下は、製造業全体の競争力の低下を招き、さらにはGDPにも大きな影響を与えかねないと予想される。

製造業で用いられる産業用ロボットに対し、それ以外のロボットはサービスロボットと呼ばれることが多い。サービスロボットには、パーソナルサービスを対象としたもの（医療（含手術、セラピー）、介護（含福祉用）、警備、掃除、案内、教育、アミューズメント、娯楽、等）と、パブリックサービスを対象としたもの（点検・メンテナンス、災害対応、建設・土木、農業・林業、地雷探査・除去、等）がある。ロボット産業の将来市場予測³⁾では、サービスロボットの需要が著しく伸びると考えられているが、実際にそれらを社会に普及させるには、安全性や制度上の問題など、まだ多くの阻害要因があり、

サービスロボットの産業化を推進するには、それらを解決し、ビジネスとして成立させる方策を考える必要がある。介護分野におけるロボットの産業化のための提言も出されているが⁴⁾、本稿では特に、災害対応におけるロボットの社会実装・普及について述べる。

4. 東日本大震災・福島原発事故対応におけるRTの導入

これまでに東日本大震災対応や福島原発事故対応において、様々なロボットや遠隔操作機器が投入されているが、その事例について簡単に紹介する⁴⁵⁾。

震災対応では、ロボットのニーズは、被災者探索・レスキュー、倒壊建造物内調査、プラント・設備（コンビナートなど）の調査・診断・修復、水中探査、復旧作業、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多岐に渡った。これに対し、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）、双腕式油圧シヨベル型ロボット（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）などのRTが投入され、災害対応における貢献を果たした。また、海外からも、米国 Texas A&M 大学 Robin R. Murphy 教授が率いる CRASAR (Center for Robot-Assisted Search and Rescue) が、実際に日本の災害現場にロボットを持ち込み、空中からの原子力発電所の建屋調査や水中調査に多大な協力を行った。

また、原発事故対応に関しては、注水冷却、建屋内外の調査（映像、放射線量、温度、湿度、酸素濃度、等）、瓦礫除去、機材の運搬・設置、サンプル採取、遮蔽、除染などのニーズに対し、コンクリートポンプ車（独 Putzmeister 製）の遠隔操作化による安定した注水、無人化施工機械（日本製の遠隔操作可能な建設機械など）を用いた瓦礫除去、Packbot（米国 iRobot 社製）や T-Hawk（米国 Honeywell 社製）の遠隔操作による原子炉建屋内外の調査などが行われた。また、走破性に優れ、瓦礫上走行や階段昇降が可能な Quince（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（IRS）、NEDO が開発）が平成23年6月に投入され、スプレイ冷却系の健全性のチェックによる安定冷却系の構築、原子炉建屋内の1階以外の部分の調査など、多大な貢献を果た

した。その後も, Warrior (米国 iRobot 社製) Talon (米国 QinetiQ 社製), Bob Cat (米国 iRobot 社製), Brokk シリーズ (スウェーデン Brokk 社製) などの海外のロボットに加え, 日本の各プラントメーカ, ロボットメーカ, 日本原子力研究開発機構 (JAEA) などが開発したロボットも次々に導入された。

現在では, 東京電力福島第一原子力発電所での作業は, 緊急対応から廃炉対策に移行しつつある。原子力委員会東京電力福島第一原子力発電所中長期措置検討専門部会は検討結果⁶⁾の中で, 廃炉までの中長期ロードマップを示した。そこでは, 廃止措置終了までに30~40年かかるとされている。またロボットや遠隔操作機器の開発においては,

- ・国が責任を持って, 必要な研究開発を進める
- ・国内外の叡智を結集して, 中長期の事故収束にあたる

という方針が明記されており, 現在ではこの方針に基づき, 政府・東京電力中長期対策会議研究開発推進本部 (現廃炉対策推進会議) が設置され, 国内外に存在するロボットや機器関連技術に関する技術カタログ⁷⁾を作成しつつ, 廃炉に向けた中長期措置のロボットや遠隔操作機器の開発が進められている。

国からの補助金や委託費による原子炉建屋内の除染作業, 原子炉建屋・格納容器からの漏えい箇所の調査, 格納容器内部状況調査, 原子炉建屋漏えい箇所止水・格納容器下部補修作業のための遠隔操作機器開発が進められている。また, NEDO プロジェクト「災害対応無人化システム」⁸⁾では, 作業移動機構 (①小型高踏破性遠隔移動装置, ②通信技術, ③遠隔操作ヒューマンインタフェース, ④狭隘部遠隔重量物荷揚/作業台車, ⑤重量物ハンドリング遠隔操作荷揚台車), 計測・作業要素技術 (⑥大気中・水中モニタリング/ハンドリングデバイス等), 災害対策用作業アシストロボット (⑦作業アシストロボット) などの開発が行われている。また, これら以外にも, 東京電力が直接ディベロッパーに個別に開発を依頼して, 導入を進めているシステムや, 各プラントメーカなどが独自の予算で開発している調査用ロボットや作業用ロボットなどがある。これらの詳細に関しては別報に譲る⁹⁾。

このように, 多くのロボットや RT が震災対応や原発事故対応において活用され, 現在でも開発・導入が継続的に行われている。しかし, これらのロボットや遠隔操作機器のうち日本製のものの多くは, 必ずしも「製品」ではなく, 今回の災害発生後に現

場のニーズに応じて改造・開発されたものであることに注意する必要がある。すなわち, 日本には優れたロボット技術基盤が存在するものの, それがビジネスとして用いられているものが極めて少ないのが実情であり, 緊急事態に迅速に対応できなかった最大の原因もそこにある。災害時に現場で使用されるロボットには実用性が要求されるので, 研究機関が開発したプロトタイプではなく, 企業が製品レベルの機器を開発することが求められるが, 企業がこれらの機器を継続的に開発・製造できるようにするためには, ビジネスとして成立つ状況を創り出す必要がある。

5. 災害対応ロボットと運用システムのあり方に関する提言

原発事故が生じる前にも, 様々な原子力用ロボット開発が行われていたが, その多くは今回の事故で役立てられなかった。プロトタイプの開発は行われたものの, すでに廃棄されたものも多かった。プロトタイプが開発されたにもかかわらず, なぜ現場で活用できる実用機にまで完成させられなかったかについては, すでに別報で論じている¹⁰⁾。ここでの分析と反省を参考にしながら, 今後, 将来起こり得る災害や事故に対応できるロボットや遠隔操作機器をどのように開発し, 有事に備えるかについて考える必要がある。

災害や事故は予想不可能であり, また状況も千差万別である。ロボットや遠隔操作機器に要求されるタスクも, それが用いられる環境も極めて多様であり, すべての状況に対応可能な機器を予め準備しておくことは現実的ではない。それに対処するには, 共通基盤プラットフォームや, 一定の状況を想定した標準的な機器を, いつでも投入可能な状態で保持しておくと同時に, 有事の際に, 現場に合わせた更新・改造を動的に行え, 現場で迅速に配備して使用できるような体制を整えておくことが最も有効であろうと考えられる。

災害対応ロボットの實用化と, その運用, 有事の際の迅速な配備などを行えるようにするための議論が, 産業競争力懇談会のプロジェクト「災害対応ロボットと運用システムのあり方」(平成23年度~平成24年度)で行われ, 提言としてとりまとめられた。平成23年度は3つのWG (防災ロボット, 無人化施工システム, 原子炉解体ロボット)を設置し, 原発事故対応や廃炉・解体のためのロボットや遠隔操作

機器を主な対象として、提言をとりまとめた¹²⁾。

ただし、原発の事故対応や廃炉のみならず、日本では、地震、台風、火山爆発などをはじめとする自然災害も多く、それに対する備えも必要である。また、社会インフラの老朽化にともない、トンネル、道路、橋梁、等での事故が多発し、またコンビナートなどの設備事故も急増しており、災害や事故の脅威は増大していると考えられる。災害や事故対応の備えということでは、人が行うことが困難・不可能な作業を行ったり、作業の効率を向上させるためにも、いかにRTを活用しながら災害や事故を予防するかを考える必要がある。また、有事の

際に災害現場で活用できるロボットは、災害時にしか使用されないとすると、ビジネスとして成立させることが難しい。民間ベースでそれを事業として行うには、ロボットや機器を、有事の際のみならず、社会インフラ・設備の点検、ヘルスマonitoring、保守など、平時においても併用できるようにすることを考える必要がある。そこで平成24年度は、4つのWG（防災ロボット、無人化施工システムに加え、インフラ点検/メンテナンス・ロボット、運用システム及び事業化）を設置し、提言をとりまとめた¹³⁾。平成24年度の提言の要約を図1に示すとともに、その内容について説明する。

(1) 研究開発拠点・プロジェクト

(ハード面での提言)

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や遠隔操作機器が適用されているものの、これから起こり得る災害に対する備えとしては、研究開発が必要な課題がまだ多く残されている。国土強靱化・実用防災ロボット開発のための研究開発拠点を設置し、実用化を指向した基盤技術研究（10年程度を目途に長期的に基盤技術から研究開発すべきもの）や、高度実用化研究（すでに基礎技術はあるものの、現場に適用できるようにするために5年程度を目途に比較的短期間で研究開発すべきもの）を実施するためのプロジェクトを早急に立上げ、推進することを提言している。研究開発すべき主な項目は、特殊環境移動・アクセス技術、遠隔操作安定通信技術、遠隔操作空間認知技術、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・メンテ技術などである。また、

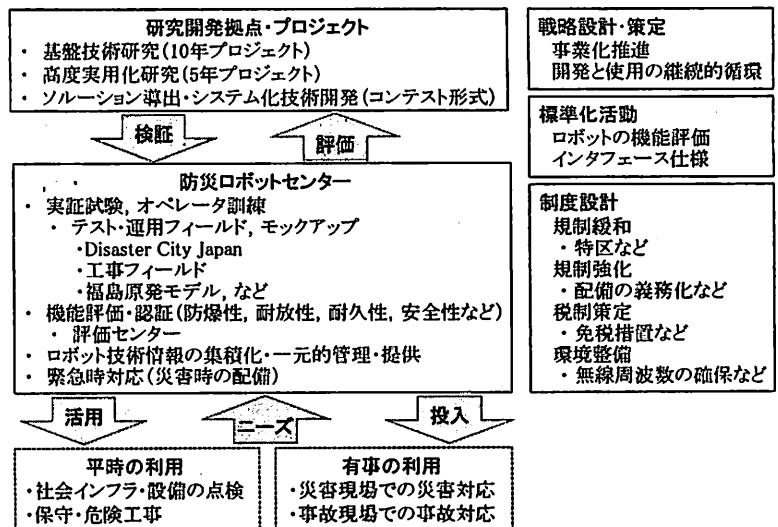


図1 災害対応ロボットと運用システムのあり方の提言のまとめ

ソリューション導出のためのシステム化技術開発を促進する必要があり、それには、DARPA Robotics Challenge¹⁴⁾のようなコンテスト形式の技術開発方策も有効である。

(2) 防災ロボットセンター（インフラ面での提言）

現場で活用可能な防災ロボット技術を構築・維持するための組織・システムとして、防災ロボットセンターの設置を提言している。センターには以下の機能を具備させる必要がある。

a. 実証試験、オペレータ訓練

研究開発したロボットを実用化するには、実証試験による評価とオペレータの訓練を同時に行うとともに、それに基づく改良を継続的に行うことが必要である。そして、有事の際に機器を迅速に現場に投入できるように、実証試験・オペレータ訓練を通して、ロボットや機器の保守・メンテナンスを行うことが重要である。また、それを実施する場としての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が、消防レスキュー隊員や自衛隊員の訓練フィールド（米国テキサスのDisaster City¹⁵⁾のようなフィールド）や、工事現場の工事フィールド、設備のモックアップなどを活用することが有効であろう。なお、実証試験・オペレータ訓練のためのテストフィールド・モックアップや、機能評価を行う拠点は、必ずしも集中化させる必要はない。自治体や各省庁の協力のもと、日本全国に分散的に設けることが有効である。ただし、その統括・管理に関しては、集中的な機能が重要であり、それを防災ロボットセンターという組織が担う必要がある。

b. 機能評価・認証

(防爆性, 耐放性, 耐久性, 安全性など)

一方, 災害は多様であり, ロボットを導入する環境も多様である。環境によっては, ロボットに防爆性や耐放性が求められることになる。これまでに防爆性, 耐放性, 耐久性, 安全性などを評価し, 保証するようなシステムが存在しないために, これまで多くの場面でロボットの投入が躊躇されたケースがある。このことを鑑み, 防災ロボットセンターのもう一つの機能として, これらの防災ロボットの機能評価を行い, それを認証できるような機能を備えるべきである。

c. ロボット技術情報の集積化・一元的管理・提供

また, 情報共有が極めて重要となる。東日本大震災や福島原発事故で, ロボットや遠隔操作機器がスムーズに導入できなかった要因として, ロボットや機器のユーザと提供者の間でRTに関する情報をうまく共有できなかったことが挙げられる。防災ロボットセンターは, 有事の際のこのような情報共有の要となる必要がある。活用可能なロボットや機器のリストや, その所在, 評価などに関する情報を集積化し, 一元的に管理するとともに, 有事の際にその情報を容易に提供できるような(ユーザが容易にその情報にアクセスできるような)機能を, 防災ロボットセンターが持つことが必要である。

d. 緊急時対応(災害時の配備)

さらに, 有事の際には, 普段用いられているロボットを, 迅速に現場に配備する必要がある。災害派遣医療チームDMAT¹⁶⁾などを参考にしつつ, ロボット・機器と, オペレータやメンテ要員などの技術者をひとまとめにして, 自衛隊の協力のもと, 現場に迅速に配備できるような体制を整える必要がある。

防災ロボットセンターは, 省庁連携のもとに設置・運用することが求められるが, 災害対策本部のような緊急的・一時的な組織ではなく, 中央防災会議の一つの機能としてパーマネントな組織である必要がある。

(3) 戦略策定・標準化・制度設計

(ソフト面での提言)

上記の災害対応ロボットに関する技術開発と運用を, より効果的なものにし, かつ民間ベースで継続的に回る仕掛けが必要である。そのためには, 様々なソフト面での方策が重要となる。

まず, 開発と使用の継続的循環を生む, 事業化推進という観点も含めた戦略設計・策定を, 特定の組

織で継続的に行うことが極めて重要となる。また, 様々な標準化活動も極めて重要になる。災害時にシステムを動的に設計構築する上で, 共通基盤技術を構築するとともに, 機器のインタフェースを標準化することも重要であるが, それだけでなく, 特に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おり¹⁷⁾, ロボットの研究者・開発者とそのユーザをつなぐためには, 機能評価の標準化が必須であることが指摘されている。

一方, 災害対応ロボットは需要が限定されており, 民間の努力だけではビジネスとして成立たせることが難しい。それを容易にするような制度設計が極めて重要となる。特区など, 災害対応ロボットをより導入しやすくするための規制緩和を行うと同時に, 災害対応ロボットや機器の配備を事業者や自治体に義務付けるなどの規制強化を行い, 国や自治体などが, それを積極的に活用したり調達する状況を作る必要がある。また, 免税措置などの税制優遇策や, ロボットや機器の使用に対する補助金, 新たな保険制度の導入なども, 事業として民間が参入しやすくするのに効果的である。また, 災害対応ロボットの遠隔操作には, 安定した無線通信の確保が必須であり, 無線周波数の確保など環境整備も極めて重要である。

6. おわりに

本稿では, RTの発展を振り返りながら, それが災害対応にどのように利用されてきたのかについて紹介した。東日本大震災や福島原発事故への対応においても, RTは多大なる貢献を果たしている。前述のように, 福島原発の廃炉に向けた中長期措置は, 30~40年かかると考えられており, 今後も, 作業員が入ることが困難な環境で様々な作業が求められている。それを実施するためのロボットや遠隔操作機器の開発, 導入は継続的に行われるであろう。

しかしその一方で, 今後発生し得る災害に対する備えるには, これまでの問題を分析し, 必要な対策を講じる必要がある。本稿では, 有事の際に, 現場に迅速にロボットや遠隔操作機器を投入できるようにするための方策に関して述べた。

災害対応ロボットを社会実装していくプロセスとしては, 福島原発の事故対応や廃炉措置で行われている様々な活動を, 将来起こり得る原発事故に対す

る備えとして、さらには一般災害への備えとして拡張していくことが最も現実的かもしれない。そのためにも、技術カタログのさらなる拡充、継続的な保守、データベース化・アーカイブ化を推進し¹⁸⁾、各省庁で行っている、関連技術開発やインフラ整備の活動（電気事業者連合会が構築を進めている原子力緊急事態支援組織との連携も含む）を総合的に連携させるとともに、産学官連携による研究開発、人材育成を加速することが肝要である。

参考文献

- 1) www.robotaward.jp/award/5th-robotaward.pdf
- 2) www.meti.go.jp/press/20100423003/20100423003-2.pdf
- 3) 福川委員会報告書「ロボット技術（RT）が拓く豊かな日本～介護サービスへの産業的挑戦～」：日本経済調査協会，(2011)。
- 4) 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)。
- 5) 浅間 一：“災害対応・原発事故対応のための遠隔操作技術の開発とその運用”，ロボット，no. 206，pp. 33-38 (2012)。
- 6) 原子力委員会：“東京電力(株)福島第一原子力発電所における中長期措置に関する検討結果”，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，2011。
- 7) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20120227_03.html
- 8) http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100045.html
- 9) 浅間 一：“災害現場へのロボット技術の適用”，建設の施工企画，no. 758，pp. 18-22 (2013)。
- 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1）”，日本ロボット学会誌，vol. 29，no. 7，pp. 658-659，2011。
- 11) 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。
- 12) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema39-L.pdf>
- 13) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema50-L.pdf>
- 14) <http://www.theroboticschallenge.org/default.aspx>
- 15) <http://www.teex.com/sitemap.cfm?Div=USAR>
- 16) <http://www.dmat.jp/>
- 17) http://www.nist.gov/el/isd/ks/upload/DHS_NIST_ASTM_Robot_Test_Methods-2.pdf
- 18) 資源エネルギー庁：平成24年度発電用原子炉等事故対応関連技術基盤整備事業（燃料デブリ取出し準備の機器・装置開発等に係る技術カタログ拡充のための技術調査）報告書，(2013)。

雷と雷保護技術セミナーの開催 —音羽電機工業ほか—

音羽電機工業(株)と日刊工業新聞社主催による「雷と雷保護技術セミナー」は毎年、全国各地で開催されている。2013年度も3会場で開催される。既に5月28日に大阪会場で開催され、6月21日には九州会場、7月26日には東京会場での開催が予定されている。

講演の内容は下記のとおり。

- ・ 鉄道の雷被害とその対策
- ・ 東京スカイツリーへの落雷観測と雷対策
- ・ 最新の雷対策

その他、関心の高いテーマによる特別講演も予定されている。

<http://www.otowadenki.co.jp/corp/raigail2/>

九州会場

日時：平成25年6月21日（金）

13時15分～17時00分

会場：JR博多シティ9 F JR九州ホール

東京会場

日時：平成25年7月26日（金）

13時15分～17時00分

会場：ホテルグランドパレス2階
ダイヤモンドルーム