

# 災害対応ロボットの实用化と課題

小柳 栄次

被災した原子炉建屋内で活動するロボットを遠隔操作するとき、狭隘、瓦礫、急峻な階段、高温・多湿などの他に2つの問題があった。1つはロボットシステムの耐放射線特性であり、もう1つは遠隔通信の問題である。ロボットは人に代わって高線量下で活動することが求められており、遮蔽以外に被曝量を低減できない。遮蔽は重量の増加を招き、小型ロボットの運動性能を悪化させる。一方、原子炉遮蔽の分厚いコンクリート構造は無線通信の障害となる。原子炉建屋内の実験により、無線通信による遠隔操作は不可能という結論を得た。

本編では、小型災害対応ロボットの性能と、電子部品の耐放射線性能を実験により検証したことを報告する。

キーワード：災害対応ロボット、遠隔操作、有線遠隔操作、耐放射線特性、遮蔽

## 1. はじめに

ロボットの開発は目的指向で行われることが多く、災害対応ロボットも例外ではない。Quince と呼ばれる災害対応ロボットは、2005～2011年の5カ年間 NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト被災建造物内移動 RT システム（特殊環境用ロボット分野）閉鎖空間内高速走行探査群ロボットにおいて、实用化に向けたプラットフォームとして開発された。

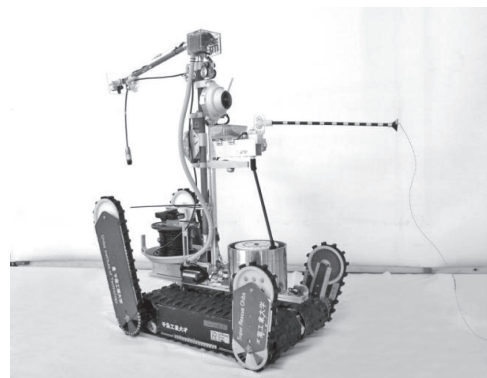
東日本大震災の大津波により、福島第一原子力発電所は、これまで経験したことのない原子力災害を引き起こした。Quince は平成 23 年 6 月に、国産ロボットの 1 号機として現場に投入されたが、原子力災害用に開発されたロボットではない。しかし、高濃度の放射能で汚染され、人が立ち入ることのできない過酷な環境下において、500 m の通信ケーブルを介し遠隔操作で情報収集でき、原子炉建屋内のモニタリングロボットとして期待された。一方で、原子炉建屋内で遠隔操作するとき、2つの問題があった。1つは遠隔通信であり、もう1つはロボットに搭載されている電子部品の耐放射線特性である。

放射線による被曝、被曝による部品の劣化／故障を防ぐには、①被曝時間を短くする。②放射線源から離れる。③放射線を遮蔽する。などが大原則である。

通信の問題については、4月中旬に中部電力浜岡原子力発電所の協力を得て、廃炉準備中の実際の原子炉

建屋内と格納容器内で無線通信実験を行った。Quince には得られた知見を元に、有線—無線ハイブリッドシステムを構築し福島に投入している。また、万一の通信ケーブル切断事故に備え、「救助ロボット運用システム」を開発し実装し準備した。

電子部品の耐放射線特性を確認・検証するためには、日本原子力研究機構（JAEA）高崎量子応用研究所の指導／助言を受け、Quince に実装されている電子デバイス、センサ、CCD カメラ、通信ユニットなどを実際に機能させながら耐放射線特性実験を行った。



図一 1 国産ロボット 1 号機として投入された Quince

## 2. 災害対応ロボット Quince

Quince は被災環境における移動能力に優れ、平坦地を 1.2 m/s の速度で走行、階段の昇降機能、瓦礫上

の走破能力, 30 cm 以上の段差踏破能力を持つ。また, 1 回の充電でおよそ 3 時間の稼働能力を有し, 軽量で狭隘環境にて使用することができる。本体は IP67 程度の防塵/防水/防爆機能を有するとともに, およそ 2 m からの滑落/落下に耐えることができる。平成 22 年 9 月からおよそ 6 ヶ月間, NEDO プロジェクト実用化の一環として千葉市消防局に消防資機材として試験的に配備された。

Quince は, 設計当初より災害現場の多様性を考慮しており, 標準 Quince (図-2) の上に現場特有のオプション機材を装備し活動することができる。図-3 は, 6 自由度マスタースレーブアームを装備。



図-2 瓦礫上を走行する標準 Quince



図-3 6 自由度マニピュレータを装備した Quince

### 3. 耐放射線試験

人間, ロボットも放射線から防護するには, ①時間: 同じ強さの線源ならば被曝量は時間に比例し大きくなる。②距離: 放射線の強さは, 線源からの距離の 2 乗に反比例して小さくなる。③遮蔽: 透過力の大きな  $\gamma$  線や X 線でも厚いコンクリートや鉛板などである程度遮蔽できる。ロボットは, 人に代わって高線量下で活動することが求められており, 状況によっては①時間, ②距離について回避できない。③遮蔽は重要な要

素であるが, 大型の建設機械とは異なり, 小型の移動ロボットに重い遮蔽を装備することは非常に困難である。

放射線による電子部品の故障については, 宇宙線による人工衛星の故障が報告されており, 放射線に関しては航空宇宙技術研究センター (JAXA) より助言を得た。一方, 航空宇宙で使用されるデバイスと, Quince に搭載されている, 主に民生用電子デバイスでは, 明らかに価格と性能が異なると判断し, JAEA 高崎量子応用研究所では以下の実験を行った。

#### (1) 1 回目

線源はコバルト線型線源 3 本を利用, 線源より 0.66 m の位置に図-4 に示す Quince に搭載されているハードウェア一式を設置した。図-5 の試験環境にて, 20 Sv/h の  $\gamma$  線を照射した。このときの照射時間は 5 時間で, トータルドーズ 100 Sv である。なお, 照射量を確認するため, 照射量測定試験体 (アミノグレイ) を各被照射体付近に設置した。

被照射物は,

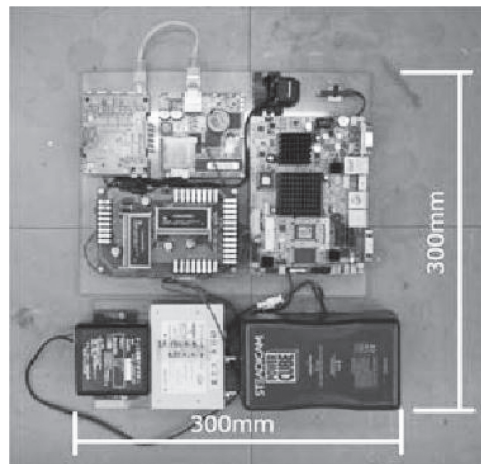


図-4 照射物 (Quince のハードウェア)

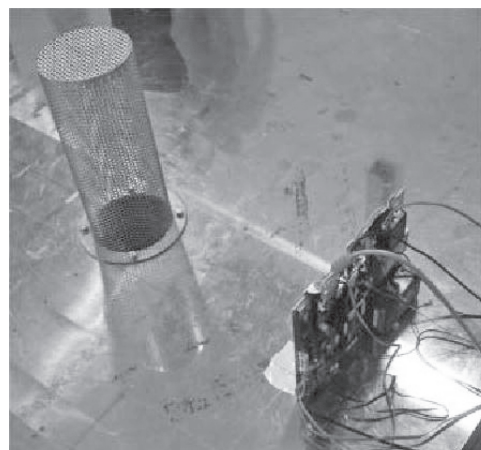


図-5 照射試験の概観

- ・ CPU ボード (AtomZ510PT) 搭載組み込みボード
- ・ DC-DC コンバータ (32 V → 12 V → 5 V)
- ・ LANHub (8 ポート)
- ・ 電池 (Li-ion) 内部に各種保護回路搭載
- ・ 無線機 (2.4 GHz)
- ・ POE 給電器
- ・ ビデオサーバー (4 ch)
- ・ 車載用小型 CCD カメラ

照射中におけるシステムの動作確認手法として、

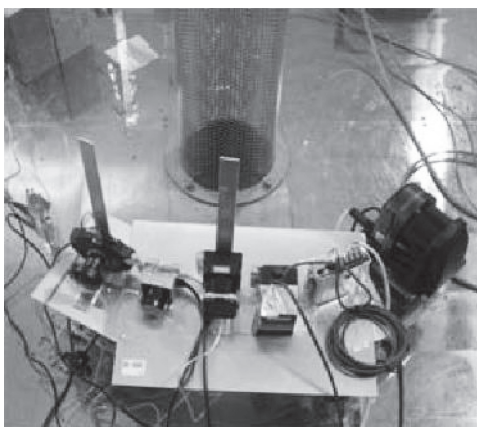
- ① Ping テスト：CPU, 無線機, ビデオサーバー, POE 給電器。
- ② 画像テスト：カメラ。
- ③ メモリ：組み込みボード上の CF。
- ④ USB：CPU にキーボードで入力。

これらをそれぞれ 15 ~ 30 分ごとに確認した。

照射試験の結果, 5 時間後トータル 100 Sv を照射されても全てのデバイスは正常に動作を行っていた。しかし, 各デバイスには個体差があること, 実験に用いたデバイスの検体数が 1 個であることから, 全てを結論づけるには問題があるが, およその判断材料として有益な知見を得た。

## (2) 2 回目

1 回目の実験結果は, 従来の知見 (JCO 事故後 2001 年頃) と異なる部分が多い。この 10 年間で半導体素子の集積度, 組み込みボードの実装密度, CPU の処理速度などは飛躍的に向上している。緊急時の原子炉建屋内では万一のトラブルも許されないことから, 2 回目の実験を行うこととした。図一 6 に 2 回目の照射試験中の状況を示す。



図一 6 2 回目の照射実験に供したセンサ類

線源と被照射物は 1 回目と同じ。前回は 100 Sv 照射しており, 2 目を終了するとトータルドーズは 200 Sv となる。一方, 新たな被照射物として、

Quince に搭載するセンサ類を選定した。これらについては, 線源から 0.45 m の位置に設置した。これにより, センサ類は 40 Sv/h の線量を受けることになる。2 回目の実験も 5 時間連続照射し, センサ類もトータルドーズ 200 Sv となる。

追加した被照射物は、

- ・ スキャナ式レンジセンサ (3 機種)
- ・ 3 次元距離画像センサ
- ・ CAN-USB デバイス
- ・ PTZ ネットワークカメラ
- ・ USBHub
- ・ MotorDriver (CPU, AD, DC-DC など搭載)

動作の確認方法は PC 上にセンサデータを表示させることと, 通信パケットを表示させることで確認した。なお, 照射中にモータ回転実験は行っていない。

## 4. 耐放射線実験の結果

JCO 臨界事故後に行われた耐放射線試験において, ノート PC は 50 Sv 付近で故障している。また, 別の実験でも CCD カメラは数分で映像に乱れが生じるとの報告もあった。

今回, トータルドーズ 200 Sv を照射したが

- ・ 124 Sv 付近でスキャナ式レンジセンサ：応答なし。回収後に動作確認を行ったが動作しなかった。
- ・ 169 Sv 付近で車載用小型 CCD カメラの色調が変化。その後バッテリー交換を行うが, 再起動不能。
- ・ スキャナ式レンジセンサの 1 機種では, センサデータは返してきたが, 照射中は大きなノイズが混入し, 誤差のため実用的でないことも確認された。

試験の結果, Quince のデバイスは 200 Sv まで耐えることが判明した。前述のように, 検体数の少なさと個体差の問題はあるが, 現状のシステムで, 「走行性能を大幅に低下させるロボットへの遮蔽」は必要ないとの結論を得た。

一方で, 高放射線下で活動するロボットの耐久性をどのように考えるかという問題がある。今回の実験で, Quince に搭載されている電子デバイスは, トータルドーズでおよそ 200 Sv までは耐えるというのが結論である。かなり乱暴な展開であるが, 仮に放射線に対する安全率を 5 とする。これまでの福島第一原子力発電所のミッションで Quince は被曝が最大で 370 mSv/h の場所を走行するが, およその平均で 20 ~ 30 mSv/h の場所とする。1 回のミッションはおよそ 3 時間であり, トータル 60 ~ 90 mSv となる。この程度の被曝であるならば, 100 回ミッションを行ってもトータル

10 Sv であり十分な耐久性が見込める。一方で、ゴム製のクローラは表面に放射能で汚染された物質が付着し易く、クローラ表面が数 mSv で汚染され急遽交換したという経緯もある。なお、線量計は地上からおおよそ 1000 mm に装着されており、電子デバイスとはおおよそ 800 mm ほど離れている。

## 5. 原子炉建屋内での遠隔通信

災害対応ロボットは、「人は安全な場所で、ロボットは危険な作業領域へ」が大原則であり、高線量に汚染された原子炉建屋にはロボットのみが進入し必要な情報収集を行う。ご承知のように、放射線を遮るような壁は当然電波も届かないとされる。では実際にどうか？ 残念ながらこの種のデータは公開されていない。筆者らは、経済産業省と中部電力にお願いし、廃炉準備中の浜岡原子力発電所 1 号原子炉建屋内での無線通信実験を行った。これは異例中の異例であったが、緊急事態であることから Quince に搭載されている無線機器全てと、通常では使用を制限されている機材、その他 UHF 帯を含め通信実験を行った。

通信実験の結果、原子炉建屋内において、ロボットを無線で遠隔操縦することは不可能という結論に達した。通信が可能な範囲は、互いのアンテナ同士が見通せる（目視できる）範囲内に限られる。ロボットを目的とする場所にくまなく移動させるには、新規に数百本のアンテナを敷設する以外方法がない。実際に電力会社の職員は PHS を使い原子炉建屋内で通話している。この通信を確保するため、建屋内には 100 ～ 250 本のアンテナが設置されている。

浜岡原子力発電所での経験と総合的な見地より、光ファイバケーブル、POE、有線 LAN など可能性があ

るものを片端からテストした。問題は 500 m の長さでケーブルの重量、容積、帯域、耐久性、入手性などである。現在、Quince の通信システムは VDSL とツイストペアケーブルを組み合わせ、おおよそ 500 m の遠隔地から安定した双方向通信を実現している。Quince には、情報収集を目的に、7 台のビデオカメラが搭載され、30 Mbps 以上の通信機能が必要である。この方式を採用したことにより、Quince は、図一 7 に示す高品位画像で構成された操作画面の情報のみで、原子炉建屋内の 1 階から 5 階までを走行するなど、冷温停止に向けた有益な情報を収集している。また、得られた知見を元に有線—無線ハイブリッドシステムを構築し、福島に投入している。

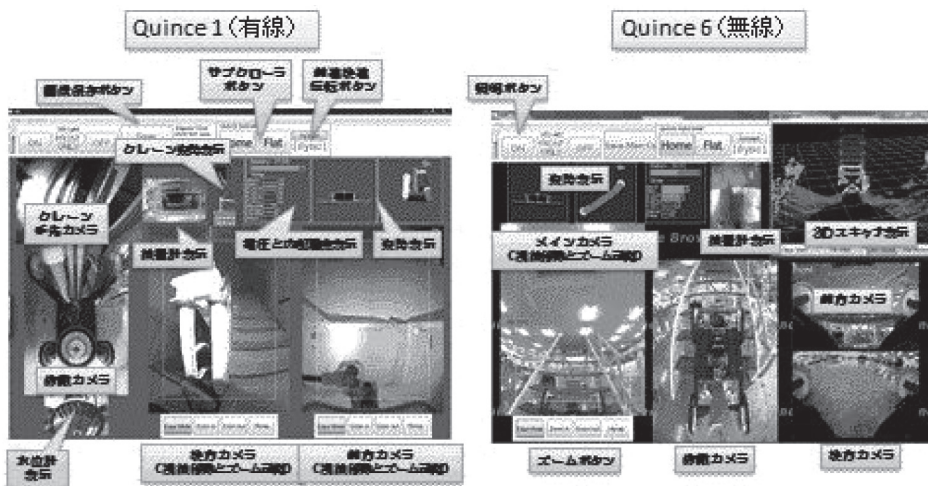
図一 7 に操作画面、図一 8 に 2 台体制で運用した場合のシステム構成を示す。

## 6. 災害対応と課題

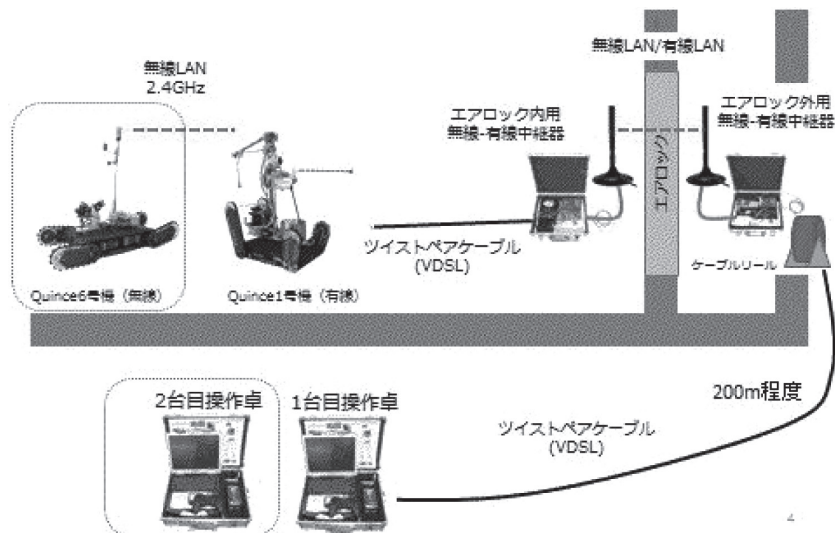
災害現場の想定はかなり困難である。自然災害だけでも地震、噴火、洪水、土石流、火砕流、津波などがあり、事故やテロにも対応すると、災害現場が多様すぎて、そこで活躍する具体的なロボットがイメージできなくなる。

設計するに当たり、想定 = 仕様書の根幹であり、想定外となるとものづくりはできない。想定外の東日本による災害現場は災害対応ロボットの開発・運用にあっても想定外であった。想定した事態に対する備えと、想定外への対応のための備えが必要である。一方で、法令が定めるものは全てが想定内であり非常時に役立つものではない。

10 月 20 日のミッションは 2 号建屋の 1 階から 3 階に昇り、3 階フロアで重要施設の保全状態を確認、さ



図一 7 操作画面



図一八 2台体制で運用した場合のシステム構成

らに5階まで昇り燃料プール周辺の情報収集を行った。このときの帰路、3階フロアを走行中に通信ケーブルが建屋構造物に絡まり、さらに通信ケーブル巻き取り装置のオーバーロードが重なり通信ケーブル切断、Quinceは、帰還不能となった。

遠隔操作をするロボットであれ建設機械であれ、通信経路の切断により遠隔操作機材は操縦不能となり、最悪の場合は暴走し当然帰還不能に陥る。Quinceは、通信経路の切断後1秒以内に全てのアクチュエーターが停止するプログラムが動作するが、ロボットは帰還できない。

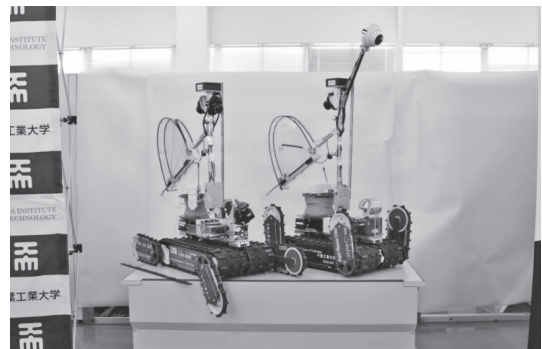
平成24年2月に現場投入されたQuince2号機、3号機には、通信ケーブル切断に備え無線通信機も装備されている。この「救助ロボット運用システム」は次のようなシナリオで運用される。

- ① 2台のロボットには、通信ケーブルとともに、無線機も装備されている。
- ② 1台がミッション遂行中、別の1台はオペレータの付近で待機（トラブルがなければ使わない）。
- ③ ミッション中のロボットの通信経路にトラブルがあったとき、待機中のお助けロボットを起動し投入する。
- ④ オペレータはトラブルのあるロボットの近傍までお助けロボットを操作し、お助けロボットとの間で無線通信を確立する。
- ⑤ その後は、お助けロボットの通信ケーブルを介し、2台のロボットをそれぞれ操作し帰還する。

帰還中の行程では、2台分の通信負荷がお助けロボットにかかるため、必要最低限の機能が確保されるようなプログラムも準備され、帰還することが最優先となる。

この「救助ロボット運用システム」は千葉工業大学

で提案、開発したが、他社のロボットにも適用できることから、現在、福島第一原子力発電所でモニタリングロボットとして活躍が期待されるトピー工業「サーベイ・ランナー」にも搭載されている。



図一九 改良された通信ケーブル巻き取り装置、ダストサンプラー（2号）、3D測位器センサ（3号）  
2月26日には2号原子炉建屋5階燃料プールの調査を行った。

### 謝辞

JAEA日本原子力研究開発機構様には、短期間に効率のよい実験手法、指導助言を頂いた。

JAXA航空宇宙技術研究センター、RSJ日本ロボット学会研究員の皆様には、問題解決に向けた討論に参加頂いた。

経済産業省、NEDO、中部電力(株)様らには、指導助言の他、機材、施設の提供を頂いた。

JICMA

### 【筆者紹介】

小柳 栄次（こやなぎ えいじ）  
千葉工業大学  
未来ロボット技術研究センター  
副所長

