

## 遠隔操作型モニタリングロボットの研究\*

新谷 裕和<sup>\*1</sup>, 来馬 克美<sup>\*1</sup>

### Research of a Remote Controlled Monitoring Robot

Hirokazu ARAYA<sup>\*1</sup> and Katsumi KURUBA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Applied Nuclear Technology

We have developed a remote radiation monitoring robot. The purpose of this robot is that, on such as the scene of the accident of the nuclear power plant, to measure the radiation dose, identification of radioactive material and the understanding of the field situation. By experiments, we have confirmed that the following. (1) Driving performance on level ground, step, stairs and slope. (2) Process of operation progress. (3) Factors that change the operability. (4) Possibility of identification of radioactive material by telemetry. In this study, the foundation of remote controlled robot monitoring radiation could be established. With the aim of practical use, we will continue to further research.

**Key Words** : Robot, Remote Control, Radiation, Monitoring, Survey Meter, Operability

## 1. 緒 言

1995年1月17日の阪神淡路大震災の後、大規模災害に、安全かつ迅速に対応するためには、レスキュー活動にロボット技術を活用することが必要不可欠であるとの認識が高まり<sup>(1)</sup>、各地でレスキューロボットの研究開発が活発に行われるようになった。2011年3月11日に発生した東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故以降は、人の入り込めない場所での放射線測定や、現場状況の把握に必要な遠隔操作型モニタリングロボットに注目が集まっており、その研究開発やロボットを運用する組織や仕組みの検討も盛んである<sup>(2)</sup>。

そこで、本研究では三菱電機特機システム製のクローラロボット(CWD-STR)をベースとし、遠隔測定可能なシンチレーション・サーベイメータを搭載した遠隔操作型モニタリングロボット(FUT3R: Fukui University of Technology Remote Radiation monitoring Robot 愛称: フットスリアル)を設計製作し、その基本性能および操作性の把握と、それを用いた遠隔放射線測定実験を行ったのでその結果について報告する。

## 2. ロボットの仕様

### 2.1 ロボット本体の構成

Fig.1 にロボット本体の構成、Table 1 にロボットの仕様を示す。

ロボットは移動用カメラの映像を見ながら操作し、前面には走行用照明、移動用カメラの上には暗所での使用用に防爆仕様ライトが取り付けられている。

ロボットの走行方式は、四輪走行とクローラ走行の利点を併せ持ったCWD(Crawler Wheel Drive)で、不整地走行や階段昇降が可能である。プレートにはNaIシンチレーション・サーベイメータが搭載されており、放射線量の測定や放射性物質の同定ができる。また、点検用カメラでサーベイメータの読み取りや現場状況の把握が可能である。

\* 原稿受付 2014年2月27日

<sup>\*1</sup> 原子力技術応用工学科

E-mail: h-araya@fukui-ut.ac.jp

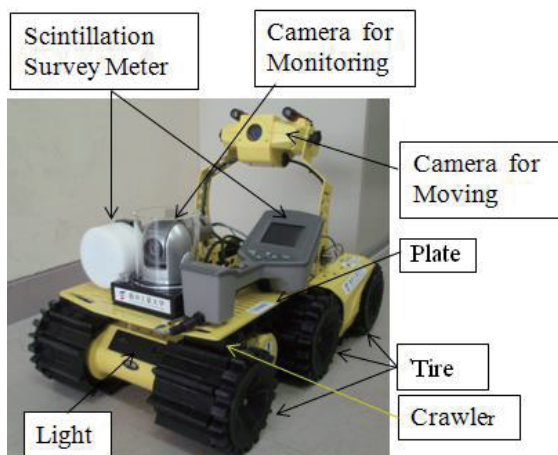


Fig.1 Configuration of the robot

Table 1 Specification of the robot

Size[mm]	455×736×525 (Width×Length×Height)
Mass[kg]	24.5
Actuator	24V Brushless DC motor
Power supply	7.2V Ni-MH battery×4

## 2.2 走行モード

ロボットは、可変サブクローラの機構により、2つのモードで走行する事が可能である。

### (1) 通常モード (4輪)

Fig.2 左に示す様に、サブクローラ部を上げた状態で固定し走行する。以下のような特徴がある。

- ・旋回性能に優れている。
- ・バッテリーの持ちが良い。

### (2) 可変モード (6輪)

Fig.2 右に示す様にサブクローラを地面につけて走行し、サブクローラが地面の状況に応じて上下する。以下のような特徴がある。

- ・段差乗越え性能に優れている。
- ・不整地走行に優れている。
- ・階段昇降が出来る。
- ・6輪になった分、接地面積が増え、負荷も増えるため、バッテリーの減りが早くなる。
- ・旋回性能が落ちる。



Normal mode



Variable mode

Fig.2 Driving mode

## 2.3 旋回方法

ロボットは以下に示す二つの方法で旋回することが出来る。

### (1) 信地旋回

片方のクローラを完全に停止させてもう片方のクローラを動かし、移動しながら旋回する。

### (2) 超信地旋回

左右のクローラを同速度でお互いに反対に回転させることによって、移動することなく車体の向きを変える。

## 2.4 移動用カメラの角度について

カメラアームの固定ピンを外し、用途に応じた箇所につけ替える事により、カメラアームの角度を変更することが出来る。同じ様に移動用カメラの角度も変えることが出来、カメラの視野を操作者の好みにより変更することが出来る。

## 2.5 操作方法

ロボット本体は操作用のパーソナルコンピュータ（PC）と無線 LAN（IEEE802.11n 規格）で結合されており、操作は操作画面を見ながら PC に接続したゲーム用コントローラで行う。（Fig.3 参照）

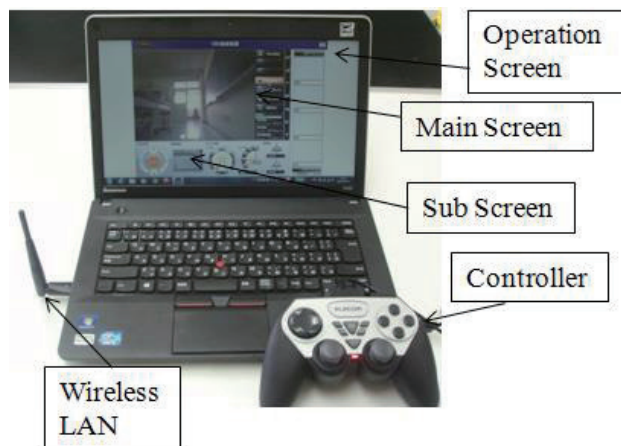


Fig. 3 Operating device

## 3. 基本性能実験

### 3.1 平地走行実験結果と考察

#### 3.1.1 直進走行実験

本実験では、ロボットの基本性能を知るために平地での走行速度を測定した。測定方法は、5mの距離の到達時間を速度 Low(モータ出力 25%)、Middle(モータ出力 75%)、High(モータ出力 95%)でそれぞれ 3 回測定した。測定場所は、室内のプラスチックタイル（P タイル）面、屋外のコンクリート面および土面の 3 カ所である。室内の P タイル面では、搭載物なし、カメラのみ搭載、カメラと測定器搭載の 3 パターンをそれぞれ通常モード(4 輪)と可変モード(6 輪)で測定し、コンクリートと土ではカメラと測定器搭載の可変モードのみ測定した。コンクリートと土で通常モードで測定しなかった理由は、屋外では小さな段差が多く、実際に使用する際、主に可変モードで走行することになると判断したためである。実験結果の一例を Table 2 に示す。実験結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 積載量が増えると速度が落ちる。
- (2) High では走行面による速度変化はほとんどなく、コンクリートの Low や土の Middle と Low では P タイル面で走った場合より速度が落ち、特に土の Low では急激に速度が低下した。
- (3) 6 輪の方が 4 輪よりも速度が速い。
- (4) 真っ直ぐ走らせても自然に左にずれる。

Table 2 Moving speed on P-tile(none payloads)

	1 <sup>st</sup> (sec)	2 <sup>nd</sup> (sec)	3 <sup>rd</sup> (sec)	Average(sec)	Speed(m/h)
4Wheel(Low)	65.97	63.31	66.06	65.11	276.44
4Wheel(Middle)	11.00	9.97	10.13	10.37	1736.33
4Wheel(High)	7.41	7.91	7.75	7.69	2340.70
6Wheel(Low)	59.82	59.13	57.56	58.84	305.93
6Wheel(Middle)	9.37	9.75	9.87	9.66	1862.71
6Wheel(High)	7.65	7.15	7.22	7.34	2452.32

以上の結果を考察すると次のようになる。

- (1) 動摩擦力は速度に関係なく一定であるので、High や Middle の場合、走行面の影響を受け難い。土の場合、速度が遅いと地面が変形して摩擦力増え、急激な速度低下となる。
- (2) 6 輪より 4 輪の方が遅くなった理由は、後輪を上げた事でロボットの重心が後ろに傾き、前輪が少し浮いてしまったため、速度が落ちたと考えられる。
- (3) 自然に左にずれる原因は、左右のクローラのモーターの出力にズレがある可能性がある。

### 3.2 旋回性能実験

本実験では、ロボットの旋回性能を調べた。測定方法は、ロボットを速度 Low, Middle, High で超信地旋回させ、Low は 1 周、Middle と High は 3 周するのにかかる時間をそれぞれ 3 回測定した。

測定場所は、直進走行と同じく、室内の P タイル面、屋外のコンクリート面および土面の 3 カ所である。

実験結果の一例を Table 3 に示す。実験結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 積載物を乗せると旋回速度が遅くなり、Low では旋回出来なかった。
- (2) 4 輪と 6 輪では、4 輪の方が旋回性能が良い。
- (3) コンクリートで 4 輪で旋回しようとする時、旋回中に CWD タイヤが外れてしまうため測定出来なかった。
- (4) 土での測定は、土が柔らかく、旋回中にタイヤに入り込み故障の原因になる恐れがあったため、測定を断念した。

Table 3 Rotation time on P-tile(none payloads)

	1 <sup>st</sup> (sec)	2 <sup>nd</sup> (sec)	3 <sup>rd</sup> (sec)	Average(sec)	Time for 1roud(sec)
4Wheel(Low)	75.85	60.26	60.18	65.43	65.43
4Wheel(Middle)	7.16	7.47	9.00	7.88	2.63
4Wheel(High)	6.46	5.50	6.72	6.23	2.08
6Wheel(Low)	ND	ND	ND	ND	ND
6Wheel(Middle)	23.88	26.06	26.96	25.63	8.54
6Wheel(High)	16.00	16.75	16.97	16.57	5.52

以上の結果を考察すると次のようになる。

- (1) 旋回性能は、4 輪の方が 6 輪よりも摩擦が小さいので、速度が速くなった。
- (2) コンクリートで 4 輪で旋回する時に、CWD タイヤが外れる原因は、6 輪に比べて 1 つ 1 つのタイヤにかかる負荷が大きくなるためだと考えられる。

### 3.3 階段昇降性能確認実験

#### 3.3.1 階段の製作

既存の建物の階段では、蹴上げ（階段の高さ）や踏み面（階段の縦幅）の調整が出来ないので、階段昇降性能確認実験を行う前に、ロボットの大きさを考慮した専用の実験用階段を製作した。加工のしやすさと持ち運びやすさを考慮して、材料は軽量木材を用いそれを補強しながら製作した。

Fig.4 に完成した階段を示す。これは、原子力発電所内の階段に見えるよう、金属調のクロスを張ったものである。完成した階段の寸法は、横幅 90cm、蹴上げ高さ 15cm、踏面 30cm、三段目はロボットがその場で停止、旋回が出来るように奥行 90cm とした。なお、蹴上げ高さ、踏面は通常の建物の階段を参考に設定した。

#### 3.3.2 階段昇降実験結果と考察

1. 本実験では、製作した階段を用いて、ロボットが安定し昇降可能な段差と階段の蹴上げの高さについて調べた。実験の様子を Fig.5 に示す。実験は搭載物有、無の二通りで行い、蹴上げの高さを調整する場合は、踏面部分に厚さ 1cm の板を 1 枚～6 枚乗せて高さを調整した。実験結果をまとめると以下のようになる。



- (1) 積載物が無い場合は、段差の場合蹴上げ高さが 19cm まで、階段の場合 18cm まで安全に昇降することが出来た。段差の場合は蹴上げ高さが 20cm 以上、階段の場合は 19cm 以上になると、前輪が浮つき機体が不安定になり昇降が困難となった。さらに段差の場合は蹴上げ高さが 21cm になると、階段の場合は 20cm になると、前輪が完全に浮き機体の重心が後方へ移動し、仰け反るように転倒した。
- (2) 測定器やカメラなどの積載物有りの場合は、段差の場合は蹴上げ高さが 18cm まで、階段の場合は蹴上げ高さが 17cm まで安全に昇降することが出来た。また段差の場合は蹴上げ高さが 19cm で、階段の場合は 18cm で前輪が浮き不安定状態となり昇降が困難となった。さらに段差の場合は蹴上高さが 20cm になると、階段の場合は 19cm になると前輪が完全に浮き後方へ転倒した。

積載物有の場合、無に較べて昇降可能である蹴上げ高さが若干低くなるのは、搭載することによりロボットの重心位置が高くなるためだと考察される。



Fig. 4 Stairs for experiments

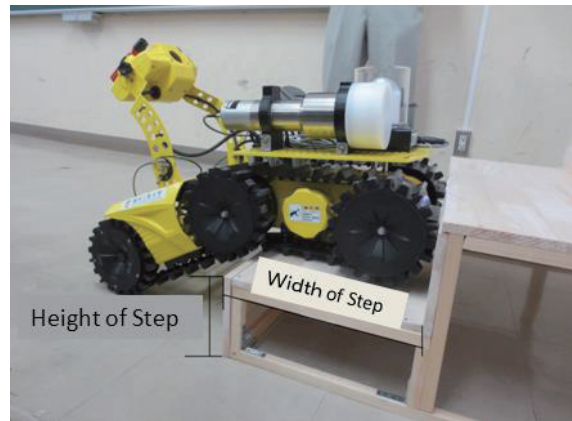


Fig.5 Scene of climbing a stair

### 3.3.3 坂道登坂性能確認実験結果と考察

本実験では、ロボットが登坂可能である坂道の勾配限界を調べた。Fig.6 に坂道登坂性能確認実験の状況を示す。実験は、教壇に板を斜めに立て掛け機で固定し、勾配のある坂道を模擬した。実験は、勾配角度を  $34^{\circ}$  から  $2^{\circ}$  毎増加させて  $40^{\circ}$  まで行った。実験結果は、勾配角度  $36^{\circ}$  までは安全に登坂出来たが、 $38^{\circ}$  ではクローラと接地面に滑りが生じ、前輪が浮ついた。勾配角度  $40^{\circ}$  では、前輪が完全に浮き機体のバランスが後方へ傾き、仰け反るように転倒した。

クローラが滑らない地面であれば、 $38^{\circ}$  まで登坂可能であり、重心を下げる工夫をすれば登坂角度は大きくなると考察される。

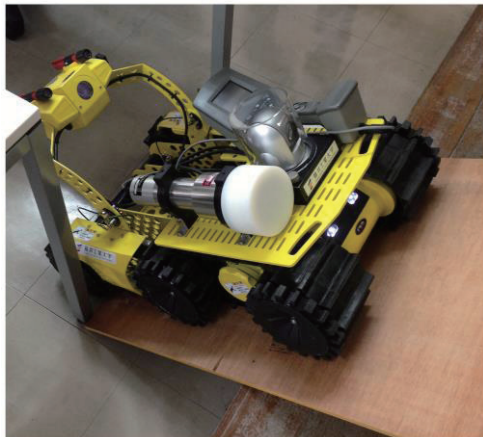


Fig.6 Scene of climbing a slope



Fig.7 Robot with a weight

### 3.3.4 機器バランス変更実験

これまでの実験結果から、段差や坂道の角度が大きくなった場合、ロボットが後ろに転倒することがあった。これは重心が後方かつ上にあたるためだと考察し、ロボットの前方に鉛の錘を乗せて重心を前かつ下に来るようにして、実験を行った (Fig.7)。実験結果を以下にまとめる。

- (1) 段差実験では、錘なしの場合は、19cm までの段差しか上ることが出来なかったが、4kg 搭載時は 21cm、5kg 搭載時には 22cm の段差を上ることができるようになった。
- (2) 坂道実験では錘がない場合は  $38^\circ$  から登り辛くなり  $40^\circ$  で機体が完全に後ろへ転倒してしまっていた。5kg の錘を乗せた場合、 $38^\circ$  では難なく走行でき  $40^\circ$  ではタイヤが少し滑る程度で普通に走行出来た、 $45^\circ$  では後ろへ転倒はしないもののタイヤの滑りが激しく、昇降不能となった。

錘をロボットの前方に設置することにより、ロボットの重心を前かつ下に移動でき、段差や坂道での登板性能が上がる事が確認できた。しかし、錘を乗せて重量を上げると機体の機動力やスピードが鈍くなる恐れがある。

## 4. 操作性確認実験

数々の災害現場で活躍してきたレスキューロボット、モニタリングロボットなどの遠隔操作型ロボットだが、その操作性に関する報告はあまりなされていない。そこで、本実験では製作したロボットを用いて (1) 上達の過程、(2) 操作性に変化を及ぼす要因について検討した。

### 4.1 上達の過程

#### 4.1.1 実験方法

上達の過程を調べるため、簡単なコース (Fig.8) を設定し、操縦経験者 (4 名)、操縦未経験者 (14 名) の計 18 名でコース 1 周×3 回の走行に要する時間を測定した。

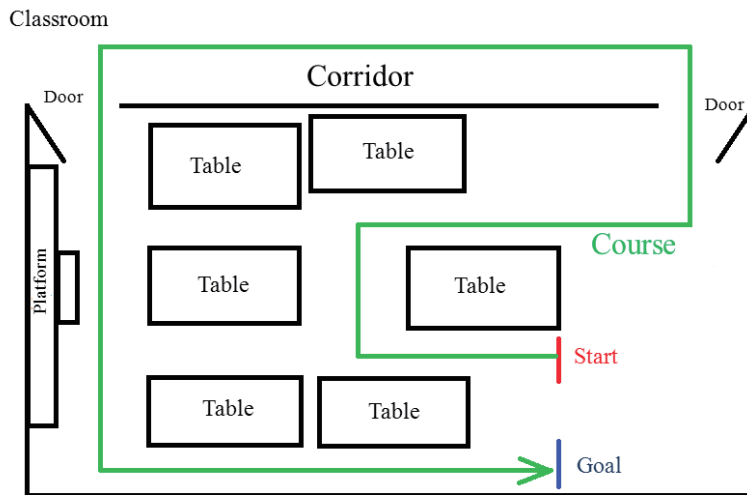


Fig.8 Overview of the driving course

#### 4.1.2 実験結果

操縦経験者と操縦未経験者にグループ分けし、それぞれのコース 1 周に要する時間の平均をとった結果を Table 4、Table 5 に示す。なお上達度 (DP) は前走からの短縮時間を示す。

Table 4 Experienced person

	Average(sec)	DP(sec)
1 <sup>st</sup> run	55.86	
2 <sup>nd</sup> run	55.01	0.85
3 <sup>rd</sup> run	54.29	0.72

DP: Degree of progress

Table 5 Inexperienced person

	Average(sec)	DP(sec)
1 <sup>st</sup> run	60.46	
2 <sup>nd</sup> run	54.45	6.01
3 <sup>rd</sup> run	52.83	1.62

この結果から以下の事が言える。

- (1) 操縦経験者、未経験者とも走行回数が増すほど、コース 1 周に要する時間が短くなる。
- (2) 操縦経験者、未経験者とも上達度は走行回数が増すほど小さくなる。
- (3) 操縦未経験者は経験者に較べて、2 走目での時間短縮幅が非常に大きい。

これらの事から、ゲーム世代の若者にとって、このロボットは一度操作を体験するとほぼ操作を修得できるシステムであると言える。また、訓練の重要性も認識できた。

## 4.2 操作性に変化を及ぼす要因

操作性に変化を及ぼす要因として、以下に示す 4 つの要因について検討した。なお、実験を行ったコースは Fig.8 で示したコースである。

### 4.2.1 車体の重量変化による影響

ロボットに積んでいるシンチレーション・サーベイメータを一旦外し、操縦経験者 4 名がコースを 1 周走行し、タイムを計測した。平均タイムは 45.48 秒となり、上達の過程で計測した 3 走目の平均タイム 54.29 秒より早くなった。操縦者からの聞き取りにより、この原因は軽量化によるロボットの走行速度の上昇によるもので、操作性が向上したためではないと判断した。

### 4.2.2 視認性（カメラ位置・角度）の影響

移動用カメラの位置および角度を変え、視界の変化によって操作性がどう変化するか調べた。調査は操縦者の聞き取りにより行った。カメラの位置を上げカメラ角度を下げた結果、初期位置の時見えなかったロボットの直前部分を視認することができ、状況判断がしやすくなり操作性が上がったとの意見が多かった。このことから全ての実験はカメラ位置を上げカメラ角度を下げた状態で行った。

### 4.2.3 目視操作

遠隔操作ではなく、操縦者がコントローラ、PC を持ってロボットについて周りながら肉眼で見て操作をする目視操作を行うと操作性がどう変化するか調べた。操作は操縦経験者 3 名で行った。その結果、PC 上の操作画面ではなく、目視で操作しているため画面上で映らないロボットの前輪クローラなどが視認でき、確実に曲がることでタイムも平均 47.35 秒と上達の過程 3 走目の平均時間 54.29 秒より速くなった。

### 4.2.4 ゴム手袋の影響

実際に現場でモニタリング活動する人達は、身体への放射性物質による汚染を少しでも防ぐために防護服、防護マスク、ゴム手袋をして活動しているが、今回は全て装備して実験を行うことは出来なかったため、操作性に最も影響を与えそうなゴム手袋を 1~3 枚重ねていき、コース 1 周×3 回をタイム計測し、操作性への影響を調べた。Fig.9 はゴム手袋を装着し、操作している様子である。



Fig.9 Operation with rubber gloves

実験は操縦経験者 3 名で行った。結果を Table 6 に示す。タイムとしては、1 枚、2 枚、3 枚と重ねていっても上達の過程の 3 走目の平均タイムより速くなった。これは、ゴム手袋を装着した時の手の伸縮の不自由さより、これまでの実験での習熟度が勝ったものと考えられる。

Table 6 Time of operation with rubber gloves

	A(sec)	B(sec)	C(sec)	Average(sec)
1glove	49.25	49.13	47.93	48.78
2gloves	48.60	48.87	46.75	48.07
3gloves	46.63	50.39	47.37	48.11

## 5. 遠隔放射線計測実験

原子力災害が発生した場合、現場で活動するにあたり、モニタリングロボットの中核的役割となる遠隔放射線測定についての実証実験を行った。行った各測定実験は実際にロボットを操作しながら、遠隔で放射線量および放射性核種を検出することが可能か実証するものである。実験における測定器はロボットに搭載されているサーベイメータ（BNC 社製 SAM940）を使用した。主な測定対象は $\gamma$ 線であり、行った実験はロギング実験と遠隔定性測定実験である。

### 5.1 ロギング実験

ロボットに搭載されているサーベイメータにはマニュアルモードとロギングモードがある。マニュアルモードでの測定では、放射線量はサーベイメータのモニタをロボットに搭載された点検用カメラで見る事により確認できる。しかし、放射性核種の同定には、サーベイメータのスイッチを手動で押す必要があり、遠隔での測定は不可能であった。ロギングモードでは操縦者が設定した測定間隔（今回は 5 秒）で放射線を測定し、ANSI N42.34 の規格にある核種に分類する。結果はサーベイメータに搭載されている CF カードに記憶される。ロボットが帰還した後、CF カードを取り出し、インターフェイス経由で PC に接続すると、ロギングモードで測定されたデータを得ることができる。そこで、本実験では屋内、屋外でロボットを走行させロギングモードでデータを収集した。その結果、屋内、屋外ともカリウム 40 のみが検出された。マニュアルモードでの測定（20 秒間の測定データから同定）でも同じ結果が得られ、ある程度の線量があれば、ロギングモードで放射性核種の同定が可能であることが分かった。

### 5.2 遠隔定性測定実験

サーベイメータをインターネットケーブルでロボットの無線 LAN コネクタ（点検用カメラに接続されていた）に繋ぎ、イーサネットモードにし、遠隔測定用ソフト（Quantm NaI/D）を搭載した PC を無線 LAN でロボットと繋ぎ、ソフトを起動すると遠隔で放射性核種の同定が可能となる。この方法で以下の遠隔定性測定実験を行った。今回行った実験ではサンプリング時間を 50 秒とした。

#### 5.2.1 点線源の測定実験

サーベイメータの測定限界距離を実証するため、ある地点に線源を配置し、線源から一定の直線方向へ 50cm 毎に、順次距離を取り測定を実施した。線源は点線源セシウム 137 を用いた。その結果、点線源から最大 5m までセシウム 137 を同定することができた。

#### 5.2.2 福島土の測定実験

測定試料として福島県から採取した土を測定した。その結果セシウム 137 が検出された。但し、検出するにはサーベイメータを試料に接するように近づける必要があった。



## 6. 結 言

本研究では三菱電機特機システム製のクローラロボット(CWD-STR)をベースとし、遠隔測定可能なシンチレーション・サーベイメータを搭載した遠隔操作型モニタリングロボットを設計製作し、実験によりその基本性能の確認、操作性の把握、遠隔放射線測定を行った。基本性能確認実験では、(1) 速い速度で平地を移動すると走行面の影響を受け難いこと (2) 通常の建物にある階段（蹴上高さ 17cm 程度）であれば走行可能であると (3) 勾配角度 36° 程度の坂道であれば登坂可能なこと (4) 階段や坂道の走行は機器バランスを変えることで性能を向上できること等が確認できた。操作性の把握実験では (1) このロボットは一度コースを走行すれば、ほぼ操作を修得できること (2) 走行用のカメラの視野が操作性に大きな影響があること等が確認できた。遠隔放射線測定実験では、サンプリングタイムを十分取り、また測定対象に極力近づくことにより、測定したデータを持ち帰りオフラインで解析する方法と無線 LAN で採取したデータを電送してオンラインで解析する方法により、放射性核種が同定できる事が確認できた。今回の研究で、放射線計測を目的とした遠隔操作型モニタリングロボットの基盤は確立できたと考える。今後は実用に向け、更なる研究開発を行う。

## 謝 辞

本研究は文部科学省原子力人材育成等推進事業費の助成を受けて行われているものであり、ここに謝意を示す。

## 文 献

- (1) 田所 論, “レスキューロボットの技術チャレンジ”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No. 2 (2010), pp. 134-137
- (2) 川妻 伸二, “福島原発事故におけるロボット等による緊急対応の概要と今後の課題”, デコミッションング技報, 第 46 号 (2012), pp.14-26

(平成 26 年 3 月 31 日受理)