

原子力災害時の車両汚染検査における
ゲート型モニタ活用に向けた性能調査試験
(受託研究)

Examinations of Performance for Utilization of Radiation Portal Monitors
in Contamination Inspection for Motor Vehicles in Nuclear Emergency
(Contract Research)

平岡 大和 小松崎 丈二 花香 宣彦 岡本 明子
齋藤 好彦 宗像 雅広 外川 織彦

Hirokazu HIRAOKA, Joji KOMATSUZAKI, Norihiko HANAKA, Akiko OKAMOTO
Yoshihiko SAITO, Masahiro MUNAKATA and Orihiko TOGAWA

安全研究・防災支援部門
原子力緊急時支援・研修センター
防災研究開発ディビジョン

Nuclear Emergency Preparedness Research and Development Division
Nuclear Emergency Assistance and Training Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

July 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>)
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

原子力災害時の車両汚染検査におけるゲート型モニタ活用に向けた性能調査試験 (受託研究)

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門
原子力緊急時支援・研修センター 防災研究開発ディビジョン

平岡 大和、小松崎 丈二*、花香 宣彦*、岡本 明子、齋藤 好彦*、
宗像 雅広⁺、外川 織彦

(2022年2月8日受理)

原子力災害時の避難退域時検査では、多数の車両及び避難住民等の検査を行うことが想定される。現在は、車両の指定箇所をタイヤとワイパー部とし、要員によるGM管式サーベイメータ等の表面汚染測定器で検査することを基本としているが、効率的な避難退域時検査を実施するため、車両検査では可搬型の車両用ゲート型モニタの活用が検討されている。本研究では、そのための基礎データを取得することを目的に、車両用ゲート型モニタの性能調査試験を実施した。

本試験では、避難退域時検査における簡易除染の判断基準であるOIL4相当の汚染を密封線源の ^{133}Ba で模擬した。これを実車両のタイヤとワイパー部に取り付け、車両用ゲート型モニタにより模擬汚染からの γ 線の計数率を測定することとした。試験方法は、車両を静止させて測定する静止試験、実際の検査を模擬した走行試験、高BG環境下での性能を調べるための高BG環境試験の3試験を採用した。試験車両は、普通自動車として広く使用されているセダンを主とし、加えて車体のフロント部分がバスに似た造りであるバンも使用した。また、車両用ゲート型モニタは、(株)千代田テクノルのガンマ・ポールを使用した。

本試験の結果、OIL4初期設定値である40,000 cpm相当の汚染が車両のタイヤ接地面に付着していたとき、車両が10 km/h以下で車両用ゲート型モニタを通過すれば、99%以上の確率で、同じくワイパー部であれば、車速5 km/h以下のとき84%以上の確率で汚染検知が可能であると推定された。タイヤ接地面の汚染がOIL4以上か未満かを判定するには、メーカーで設定する機器内の換算定数の調整を要することが示された。しかし、その場合であっても、ワイパー部はタイヤ接地面よりも汚染の検知が難しいため、タイヤ接地面とワイパー部の汚染を同時に判定・評価することは困難であることが示された。

車両用ゲート型モニタを活用し、避難退域時検査の車両検査の効率化(迅速化)を図るには、タイヤ接地面とワイパー部の汚染の同時測定・評価の実現が課題であることが明らかとなった。

本報告書は、内閣府の受託研究「平成31年度原子力防災研究事業」及び「令和2年度原子力防災研究事業」の成果の一部に関するものである。

原子力緊急時支援・研修センター：〒311-1206 茨城県ひたちなか市西十三奉行 11601-13

+ 原子力緊急時支援・研修センター

* 株式会社日本アクシス

**Examinations of Performance for Utilization of Radiation Portal Monitors in
Contamination Inspection for Motor Vehicles in Nuclear Emergency
(Contract Research)**

Hirokazu HIRAOKA, Joji KOMATSUZAKI*, Norihiko HANAKA*, Akiko OKAMOTO,
Yoshihiko SAITO*, Masahiro MUNAKATA⁺ and Orihiko TOGAWA

Nuclear Emergency Preparedness Research and Development Division
Nuclear Emergency Assistance and Training Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness
Japan Atomic Energy Agency
Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received February 8, 2022)

In contamination inspections for public in nuclear emergency, it is assumed that a large number of motor vehicles and evacuees will be inspected. At present, first measurement points of vehicles are tires and around a wiper, and they are basically inspected by persons using portable radiation surface contamination meters such as GM survey meters. However, in order to efficiently inspect contamination of vehicles, utilization of portable radiation portal monitors is being considered for the inspection. In this study, examination of performance of the portal monitor was conducted in order to obtain basic data.

In this examinations, sealed radiation sources, ¹³³Ba, were substituted for the contamination of Operational Intervention Level 4 (OIL4), the evaluation criteria to conduct simple decontamination in the contamination inspection. The radiation source was attached practically to a tire and around the wipers of a vehicle, and the counting rate of γ -rays from the radiation sources was measured using the portal monitor. Three examinations were conducted: static examination with a vehicle stationary, moving examination to mock the actual inspection, and high back ground examination to investigate performance of the equipment in high back ground environment. The vehicle mainly used in the experiments was a sedan, which is generally used as standard vehicles. And, a van whose front body is like that of a bus was used at this experiment. In addition, the “Gamma Pole” manufactured by the Chiyoda Technol Corporation was used as the portal monitor.

As the result, it was estimated that the case of contamination equivalent to 40,000 cpm, the default value of the OIL4, deposited on the tread on a vehicle tire, when the vehicle passes through the portal monitor at 10 km/h or less, the contamination would be detected with a probability of 99 % or more. Similarly, when the contamination deposited on around the wipers and the vehicle speed is 5 km/h or less, it was estimated that the detection was possible with a probability of 84 % or more. In order to evaluate whether the contamination deposited on the tread on a tire is OIL4 or more or less, it was shown that adjusting the conversion constant in the device set by the manufacture is required. However, even in that case, it was shown that it was difficult to evaluate the both contamination on the tread on the tire and around the wipers at same time, because of that contamination on around the wipers was more difficult to detect than one on the tread on the tire.

It became clear that realization of simultaneous measurement and evaluation of both the two contamination is an issue to utilize the portal monitor for improving efficiency of the contamination inspection.

Keywords: Nuclear Emergency, Contamination Inspection for Public, OIL4,
Portable Radiation Portal Monitor

Present study is entrusted from Cabinet Office.

+ Nuclear Emergency Assistance and Training Center

* Nihon Axis Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 車両用ゲート型モニタの測定原理	2
2.2 試験の概要	4
2.3 試験車両及び試験場所	5
2.3.1 試験車両	5
2.3.2 試験場所	7
2.4 放射線源による汚染の模擬	9
2.4.1 使用した線源	9
2.4.2 タイヤ接地面への線源設置	10
2.4.3 タイヤ側面への線源設置	11
2.4.4 ワイパー部への線源設置	15
2.5 静止試験	16
2.5.1 静止試験の目的	16
2.5.2 静止試験のレイアウト	17
2.6 走行試験	17
2.6.1 走行試験の目的と評価方法	17
2.6.2 走行試験のレイアウト	19
2.7 高 BG 環境試験	20
2.7.1 高 BG 環境試験の目的	20
2.7.2 高 BG 環境試験のレイアウト	21
3. 試験結果と考察	22
3.1 静止試験	22
3.2 走行試験	26
3.2.1 タイヤ接地面の OIL4 相当汚染の検知性能	26
3.2.2 タイヤ接地面の汚染の OIL4 判定性能	30
3.2.3 ワイパー部の OIL4 相当汚染の検知性能	35
3.2.4 タイヤ接地面とワイパー部の OIL4 相当汚染の検知性能の比較	38
3.3 高 BG 環境試験	40
3.3.1 高 BG 環境下でのタイヤ接地面の OIL4 相当汚染の検知性能	40
3.3.2 高 BG 環境下でのタイヤ接地面の汚染の OIL4 判定性能	43
3.3.3 高 BG 環境下でのワイパー部の OIL4 相当汚染の検知性能	49
3.4 結論	51
4. まとめ	53
謝辞	55
参考文献	55
付録	56

Contents

1. Introduction ----- 1

2. Examination method -----2

 2.1 Measurement principle of radiation portal monitor-----2

 2.2 Outline of examination -----4

 2.3 Motor vehicles and location of examination-----5

 2.3.1 Motor vehicles of examination -----5

 2.3.2 Location of examination -----7

 2.4 Mock contamination by radiation sources -----9

 2.4.1 Used radiation source -----9

 2.4.2 Mock contamination on the tread on the tire ----- 10

 2.4.3 Mock contamination on the tire side----- 11

 2.4.4 Mock contamination on around wipers----- 15

 2.5 Static examination----- 16

 2.5.1 Purpose of the static examination ----- 16

 2.5.2 Layout for the static examination ----- 17

 2.6 Moving examination ----- 17

 2.6.1 Purpose and evaluation method of the moving examination ----- 17

 2.6.2 Layout of the moving examination----- 19

 2.7 High back ground environment examination----- 20

 2.7.1 Purpose of the high back ground environment examination----- 20

 2.7.2 Layout of the high back ground environment examination----- 21

3. Examinations results and discussions ----- 22

 3.1 Static examination----- 22

 3.2 Moving examination ----- 26

 3.2.1 Detection performance for contamination of OIL4 on the tread on the tire ----- 26

 3.2.2 Discrimination performance for OIL4 of Contamination on the tread on the tire----- 30

 3.2.3 Detection performance for contamination of OIL4 on around the wipers----- 35

 3.2.4 Comparison of detection performances for contamination of OIL4 between the tread on the
 tire and around the wipers----- 38

 3.3 High back ground environment examination ----- 40

 3.3.1 Detection performance for contamination of OIL4 on the tread on the tire in high back ground
 environment----- 40

 3.3.2 Discrimination performance for OIL4 of Contamination on the tread on the tire in high back
 ground environment----- 43

 3.3.3 Detection performance for contamination of OIL4 on around the wipers in high back ground
 environment----- 49

3.4 Conclusion-----	51
4. Summary -----	53
Acknowledgements -----	55
References -----	55
Appendix -----	56

表リスト

Table 2-1	ガンマ・ポールの仕様 -----	3
Table 2-2	試験車両の仕様 -----	6
Table 2-3	^{131}I と ^{133}Ba の主な光子の放出割合 -----	9
Table 2-4	模擬汚染線源 -----	10
Table 2-5	各測定におけるタイヤ側面への模擬汚染線源の配置 -----	14
Table 2-6	各測定におけるワイパー部への模擬汚染線源の配置 -----	16
Table 2-7	高 BG 用線源 -----	21
Table 3-1	タイヤ側面の近似曲線の定数 -----	23
Table 3-2	タイヤ接地面の近似曲線の定数 -----	25
Table 3-3	タイヤ接地面汚染からの計数率算出のための補正係数 -----	25
Table 3-4	タイヤ側面の測定結果（走行試験） -----	26
Table 3-5	タイヤ接地面の正味計数率とその標準偏差 -----	27
Table 3-6	タイヤ接地面の汚染検知率 -----	30
Table 3-7	タイヤ接地面の警報発報確率 -----	34
Table 3-8	ワイパー部の測定結果（走行試験） -----	35
Table 3-9	250 kBq 相当のワイパー部の正味計数率及び標準偏差 -----	36
Table 3-10	汚染検知率を求めるための BG 標準偏差 -----	36
Table 3-11	Ch 毎の汚染検知率 -----	37
Table 3-12	汚染検知率 -----	38
Table 3-13	タイヤ接地面とワイパー部の汚染検知率 -----	38
Table 3-14	タイヤ接地面及びワイパー部汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係 -----	39
Table 3-15	高 BG 環境での BG 測定結果 -----	41
Table 3-16	240 kBq 相当の正味計数率と高 BG 環境での標準偏差 -----	42
Table 3-17	高 BG 環境でのタイヤ接地面の汚染検知率 -----	42
Table 3-18	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.1 $\mu\text{Sv/h}$) -----	44
Table 3-19	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.2 $\mu\text{Sv/h}$) -----	45
Table 3-20	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.3 $\mu\text{Sv/h}$) -----	46
Table 3-21	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.4 $\mu\text{Sv/h}$) -----	47
Table 3-22	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.5 $\mu\text{Sv/h}$) -----	48
Table 3-23	250 kBq 相当のワイパー部汚染の正味計数率と高 BG 環境における標準偏差 -----	49
Table 3-24	高 BG 環境での汚染検知率及び自然 BG 環境下での汚染検知率との比 -----	50
Table 3-25	汚染検知性能のまとめ -----	51
Table 3-26	OIL4 基準値判定性能のまとめ -----	52

図リスト

Fig. 2-1	ガンマ・ポールの機材設置イメージ	4
Fig. 2-2	セダン：トヨタ マーク X	6
Fig. 2-3	バン：日産 キャラバン	6
Fig. 2-4	静止・高 BG 試験場所（原子力緊急時支援・研修センター：資機材庫）	7
Fig. 2-5	走行試験場所（原子力緊急時支援・研修センター：資機材庫前）	8
Fig. 2-6	走行試験場所（千代田テクノ大貫台事業所：原子力防災機器展示棟）	8
Fig. 2-7	タイヤ接地面に装着する模擬汚染線源の配置	10
Fig. 2-8	タイヤ接地面に装着した模擬汚染線源	11
Fig. 2-9	タイヤ側面の模擬汚染線源（5 個）の配置	11
Fig. 2-10	タイヤ側面に装着した模擬汚染線源（5 個）	12
Fig. 2-11	タイヤ接地面に近いフェンダー側面の模擬汚染線源（6 個）の配置	12
Fig. 2-12	タイヤ接地面に近いフェンダー側面に装着した模擬汚染線源（6 個）	13
Fig. 2-13	タイヤ接地面に近いフェンダー側面の模擬汚染線源（2 個）の配置	13
Fig. 2-14	タイヤのフェンダー側面に装着した模擬汚染線源（2 個）	14
Fig. 2-15	セダンワイパー部の模擬汚染線源（5 個）の配置	15
Fig. 2-16	セダンワイパー部の模擬汚染線源（6 個）の配置	15
Fig. 2-17	バンワイパー部の模擬汚染線源（6 個）の配置	15
Fig. 2-18	セダンワイパー部の模擬汚染線源（2 個）の配置	15
Fig. 2-19	ワイパー部に配置した模擬汚染線源	16
Fig. 2-20	静止試験のレイアウト	17
Fig. 2-21	走行試験のレイアウト	20
Fig. 2-22	高 BG 環境のための線源及び空間放射線量率測定のレイアウト	21
Fig. 2-23	模擬高 BG 環境の空間放射線量率測定の様子	21
Fig. 3-1	車両の前輪車軸の位置に対する正味計数率	22
Fig. 3-2	タイヤ側面における 1 秒間走行の移動範囲	23
Fig. 3-3	タイヤ接地面における 1 秒間の移動範囲	24
Fig. 3-4	車速 5km/h のときのタイヤ接地面汚染からの正味計数率の標準偏差	28
Fig. 3-5	車速 5 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの正味計数率	29
Fig. 3-6	車速 10 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの正味計数率	30
Fig. 3-7	車速 5 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの GM 換算計数率	31
Fig. 3-8	車速 10 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの GM 換算計数率	32
Fig. 3-9	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(K = 1~10)	33
Fig. 3-10	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(K = 4~5)	33
Fig. 3-11	250 kBq 相当のワイパー部汚染からの正味計数率	37
Fig.3-12	タイヤ接地面及びワイパー部汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(K = 1~10)	39

Fig. 3-13	高 BG 環境でのタイヤ接地面からの正味計数率 -----	42
Fig. 3-14	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.1 $\mu\text{Sv/h}$) -----	44
Fig. 3-15	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.2 $\mu\text{Sv/h}$) -----	45
Fig. 3-16	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.3 $\mu\text{Sv/h}$) -----	46
Fig. 3-17	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.4 $\mu\text{Sv/h}$) -----	47
Fig. 3-18	タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.5 $\mu\text{Sv/h}$) -----	48
Fig. 3-19	高 BG 環境における 250kBq 相当のワイパー部汚染の正味計数率 -----	50

1. はじめに

我が国の原子力災害対策の基本的な指針は、原子力規制委員会が「原子力災害対策指針」として定めている。この中で、発電用原子炉施設からおおむね半径 5 km から 30 km までの住民等への防護措置を判断し実施するための区域として「緊急防護措置を準備する区域 (Urgent Protective action planning Zone)」(以下「UPZ」という)が定められている。UPZ の住民等への防護措置は、その基準である「運用上の介入レベル (Operational Intervention Level)」(以下「OIL」という)に照らして判断し、実施することとなっている¹⁾。

原子力施設から放射性物質が放出される原子力災害が発災した場合、UPZ の住民等には、まず数時間以内をめどに空間放射線量率を基準とした OIL1 (500 μ Sv/h 超)によって区域を特定し避難、さらに 1 週間程度以内に OIL2 (20 μ Sv/h 超)によって一時移転させる防護措置を実施する¹⁾。住民等が避難又は一時移転(以下「避難等」という)を行う際は、住民等は自家用車またはバスにより、移動することとしている。その際、避難経路の途中で住民等が乗車した車両の汚染検査を行い、OIL4 の基準に基づき必要に応じて簡易除染を行うこととなる。この汚染検査を「避難退域時検査」という。また、OIL4 は不注意な経口摂取や皮膚汚染からの被ばくを防止するため、除染を講ずるための基準である。具体的には、数 cm 離れた表面汚染検出器での β 線の計数率が 40,000 cpm、1 か月後であれば 13,000 cpm を超える計数率が計測された場合は迅速に簡易除染等を行うこととなる。

避難退域時検査の具体的な検査手順は、原子力規制庁の「原子力災害時における避難退域時検査及び簡易除染マニュアル」(以下「避難退域時検査等マニュアル」という)に記載されている。これによれば、初めに住民等が使用した車両を検査し、OIL4 の基準値 (40,000 cpm) 以下であればそのまま避難先に移動させ、基準値超の場合は車両の簡易除染や住民等への汚染検査等を実施することとなっている²⁾。多数の避難住民等が来ると予想される避難退域時検査では検査作業等を迅速に進めることが重要であり、そのためには特に初めの車両の汚染検査の効率化が大変重要である。避難退域時検査等マニュアルによれば、初めは車体隅々まで検査するのではなく、指定箇所(タイヤ及びワイパー部)のみを検査することになっている²⁾。基本的には検査要員による表面汚染検出器を使用した手作業となることが想定されているが、新たに車両用ゲート型モニタの活用も検討されている²⁾。

車両用ゲート型モニタとは、一般に大容量のプラスチックシンチレータ等を内蔵するポール 2 本で構成されており、車両がそれらポールの間を通過することで車両表面や積載物の放射性物質からの γ 線を検知する装置である。車両用ゲート型モニタによって車両を通過させながら汚染検査を実施することで、避難退域時検査の迅速化に期待できる。ここでは、指定箇所であるタイヤとワイパー部に付着した汚染について OIL4 判定のため、車両用ゲート型モニタの性能調査試験を実施した。汚染は車両の前輪タイヤの接地面又はワイパー部に付着している想定で検討した。本報告書ではその試験結果及びそこから考えられる留意点等について述べる。

2. 試験方法

2.1 車両用ゲート型モニタの測定原理

避難退域時検査において、車両はタイヤ及びワイパー部（フロントガラス下部）の指定箇所検査を行うこととなっている。車両用ゲート型モニタに必要な性能は、OIL4 の初期設定値が 40,000 cpm（数 cm 離れた表面汚染検出器での β 線の計数率）であることを踏まえ、「タイヤ接地面約 2,000 cm²に β 線 40,000 cpm（120 Bq/cm²、放射能 240 kBq）の一樣な ¹³¹I が存在する場合に、これを検出することができる」、「これ以上の放射性物質を検出した場合には、警報の発報、表示の点灯などにより、検査員に検査結果を伝えることができる」ことであると避難退域時検査等マニュアルに記載されている²⁾。

車両用ゲート型モニタの性能調査試験（以下「本試験」という）では、千代田テクノル社製の車両用ゲート型モニタ、「ガンマ・ポール」を使用した。ガンマ・ポールの仕様を Table 2-1 に示す。また、特徴のひとつとして、車両の速度が 0 km/h～10 km/h において自動測定が可能であることが挙げられている³⁾。

ガンマ・ポールは、左右 1 台ずつの検出器の計 2 台のみで測定することが可能であるが、大型車両を想定し、それぞれの検出器の上部にさらに検出器 1 台を載せた 2 段とすることで計 4 台の検出器にて測定を行うことができる。検出器からの信号はそれぞれ独立しており、全 4Ch の検出器毎の測定値がモニタに表示される。2 段で 4 台の検出器を使用しているとき、上段 2 台が Ch1 及び Ch3、下段 2 台が Ch2 及び Ch4 となる。1 段で 2 台の検出器のみを使用する場合は、モニタには Ch2 及び Ch4 の計数率のみが表示される仕組みとなっている。

Table 2-1 ガンマ・ポールの仕様³⁾

測定線種	γ線
感度	以下の条件で放射性物質の付着(タイヤ接地面約 2,000 cm ² に 40,000 cpm (120 Bq/cm ²) の一様な ¹³¹ I が存在する場合) の判定が可能。 ・環境バックグラウンド：0.1 μSv/h 以下
操作部	全自動計測 手動計測 訓練モード機能(実汚染が無くとも、任意に警報吹鳴可能)
汚染識別	制御装置：点灯表示、警報音 付属タブレット：測定値、文字(正常、異常)表示 警報表示灯：緑、赤の2色点灯表示、警報音(音量：0~105 dB程度)
記録	測定終了後、SDカードに測定結果を自動保存
通信	Bluetooth(付属タブレット-制御装置間)
組立	可搬・組立式(2名で組立可能)
使用温度	-10℃~+45℃
構成数	検出部4本(大型車両用)、台座2個、制御装置1台、 車両検知センサ2台、警報表示灯1台、ケーブルプロテクタ1本、 ケーブルアッセンブリ1式、電池ケース1台、専用保管ケース1式
寸法	大型車両用：約110mmφ×3,900mm 普通車両用：約110mmφ×2,100mm
重量	検出部約13kg(1本)、台座約16kg(1台)、制御装置約10kg、 車両検知センサ約1.5kg(1台)、警報表示灯約11kg

ガンマ・ポールは2つの設定値を用いて、警報発報の判定を行う。1つは、手作業で用いるGM管式サーベイメータ(窓面積20cm²)測定相当の計数率に換算するための換算定数である。この換算定数はメーカーにより設定されるもので、ユーザーでは変更できない。もうひとつは、警報発報の基準値となる警報設定値である。この警報設定値はユーザーが任意に設定できる。

ガンマ・ポールは使用中、常時測定を行っている。車両が通過していないときはバックグラウンド(以下「BG」という)データを取得し続ける。車両が通過したときは、通過中に得た計数率(Gross値)からBG計数率を差し引いて正味の計数率(Net値)とした後、上記の換算定数を乗じてGM管式サーベイメータ相当の計数率(以下「GM換算計数率」という)を取得する。ここで、Gross値から差し引くBG計数率は、車両通過前の1分間(令和4年4月現在販売中の設定値)に取得したBGデータである。

ガンマ・ポールの機材設置イメージをFig.2-1に示す。車両通過の状況は、車両検知センサにより判定する。そして車両通過後に、通過中の最大計数率を表示する。この最大計数率(cpm)はある1秒間に得られた最大計数を60倍し、1分当たりの計数率(cpm)としたものである。このとき、GM換算計数率の最大値が警報設定値以上となった検出器が1台以上あれば、警報表示

灯から警報が発報される。以下に警報発報の条件を示す。

【警報発報条件】

GM 換算計数率 \geq 警報設定値

ここで、

GM 換算計数率 = (正味計数率(Net 値)) \times 換算定数

正味計数率(Net 値) = 通過中に得た計数率(Gross 値) - BG 計数率

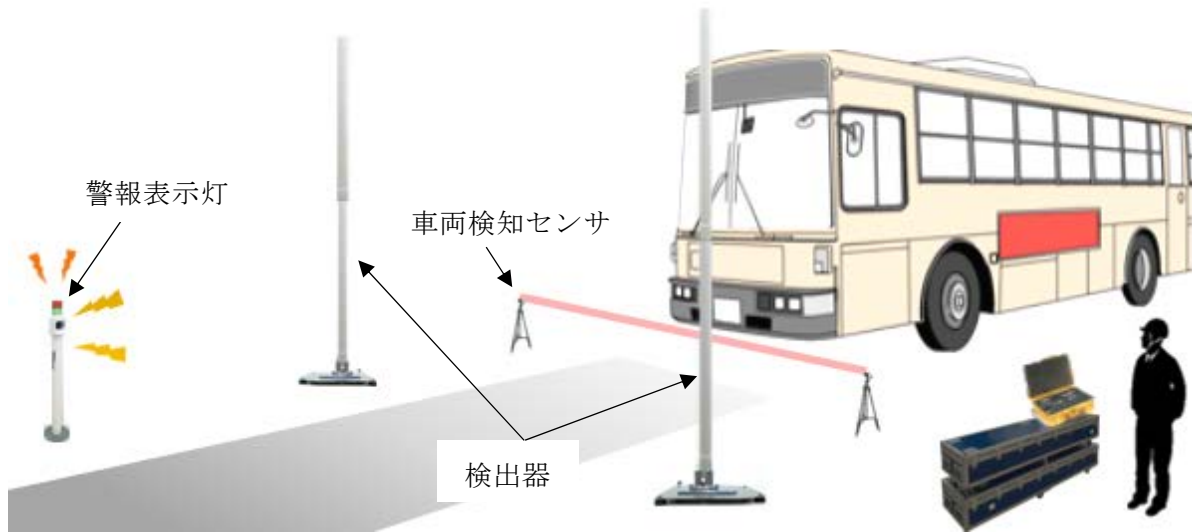


Fig. 2-1 ガンマ・ポールの機材設置イメージ
(千代田テクノルホームページ掲載の図³⁾を加工)

1 つ以上の検出器が警報設定値を超える計数率を検知すれば警報を発報する仕組みであるから、ある特定の車両 1 台が通過するときの警報発報確率 P は次の式で表すことができる。

$$P = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3)(1 - p_4) \quad [1]$$

ここで、

p_i : ある特定の車両 1 台が通過するとき、Chi検出器にて警報設定値を超える計数率を検知する確率

である。なお、1 段で 2 台の検出器のみを使用した場合、上段の Ch1 及び Ch3 は使用していないため、このときの確率 p_1 及び確率 p_3 は共に 0 となる。

2.2 試験の概要

本試験では、車両用ゲート型モニタが持つ OIL4 (初期設定値 40,000 cpm) の判定性能を調査した。避難退域時検査の指定箇所検査において、車両用ゲート型モニタを活用するには以下の

2 点が重要となる。

- (1) OIL4 相当の汚染が BG に比べて有意に検知可能であること
- (2) OIL4 の基準値超の汚染と未満の汚染が判定可能であること

(1)は、そもそも汚染検知ができなければ検査を実施することができないため、まず求められる性能である。(2)は、避難退域時検査を迅速に行うために求められる性能である。避難退域時検査等マニュアルには「OIL4 以下の放射性物質では、警報の発報、表示の点灯などは行わないこと」といった主旨の記載はない。しかし、指定箇所検査にて OIL4 基準値を下回る汚染に対しても警報を発報すれば、不要な確認検査を受ける車両台数が多くなり、迅速な避難退域時検査の実施を妨げる恐れがある。そのため本試験では、車両の指定箇所であるタイヤ及びワイパー部のそれぞれに付着した汚染に対して上記の 2 点の性能がどの程度であるかを調査することとした。

本試験は、後述する試験車両のワイパー部またはタイヤに汚染を模擬した密封線源を取り付け、ここからの放射線をガンマ・ポールで測定する方法で実施した。基本は、試験車両を走行させて避難退域時検査を模擬する形で試験（走行試験）を行った。このときワイパー部にはそのまま線源を取り付けたが、タイヤの場合、密封線源が破損する可能性があるためタイヤ接地面に取り付けず、タイヤ周辺の車両側面ボディ（フェンダー）に取り付けた。そのため、タイヤを囲むタイヤハウスが遮へいになる可能性を考慮し、より正確にタイヤ接地面の汚染からの影響を推定することを目的に、車両を静止させて測定する静止試験も行った。加えて、2.1 で述べたように、警報発報条件は周辺 BG の測定結果に影響することから、高 BG 環境下での車両ゲート型モニタの性能を調べるため、車両を静止させた状態で高 BG 環境を模擬した測定試験を実施した。

以降にこれらの詳細について述べる。

2.3 試験車両及び試験場所

2.3.1 試験車両

試験車両は、一般的な普通乗用車としてセダン、ワイパー部の位置が比較的高く、車体のフロント形状がバスに近い車両としてバンを用意した。車種は、セダンがトヨタ マーク X、バンが日産 キャラバンである。試験車両の仕様を Table 2-2 に、写真を Fig. 2-2 及び Fig. 2-3 に示す。

Table 2-2 試験車両の仕様

	全長(cm)	全幅(cm)	全高(cm)	前輪車軸からワイパーまでの距離 (cm)	ワイパー 高さ(cm)
トヨタ マーク X 型式：DBA-GRX130	477 ^{※1}	179 ^{※1}	143 ^{※1}	51 ^{※2}	105 ^{※2}
日産 キャラバン 型式：CBF-VR2E26	469 ^{※1}	169 ^{※1}	199 ^{※1}	72 ^{※2}	142 ^{※2}

※1 試験車両の車検証を参照 ※2 実測値



Fig. 2-2 セダン：トヨタ マーク X



Fig. 2-3 バン：日産 キャラバン

2.3.2 試験場所

静止試験及び高 BG 試験は日本原子力研究開発機構 原子力緊急時支援・研修センター（茨城県ひたちなか市）、走行試験は同センター及び株式会社千代田テクノル 大貫台事業所（茨城県大洗町）にて実施した。静止・高 BG 試験場所を Fig. 2-4 に、走行試験場所を Fig. 2-5 及び Fig. 2-6 に示す。空間放射線量率は、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ（TCS-171B、日立製作所）を用いて、試験開始前（朝）及び終了後（夕）に測定した。BG の測定位置は、ガンマ・ポールの左右 2 本の検出器の中間地点、高さ 1m の位置である。試験期間中の空間放射線量率は、静止試験場所で 0.06-0.07 $\mu\text{Sv/h}$ 程度、2 つの走行試験場所は共に 0.08-0.09 $\mu\text{Sv/h}$ 程度であった。



Fig. 2-4 静止・高 BG 試験場所（原子力緊急時支援・研修センター：資機材庫）



Fig. 2-5 走行試験場所（原子力緊急時支援・研修センター：資機材庫前）



Fig. 2-6 走行試験場所（千代田テクノル大貫台事業所：原子力防災機器展示棟）

2.4 放射線源による汚染の模擬

2.4.1 使用した線源

避難退域時検査等マニュアルに記載されている想定核種である ^{131}I を試験に使用するには、半減期が 8.0 日と短いため、数日から数週間に及ぶ試験の実施が難しくなる。そこで、避難退域時検査等マニュアルにおいて「実機の性能試験（中略）を行う際は、（中略）I-131 の線源に代えて、放射能を 3 分の 2 とした Ba-133（中略）を用いることができます。」とある²⁾ことから、汚染を模擬する線源には半減期が 10.5 年と長い ^{133}Ba の密封線源を用いることとした。 ^{133}Ba は放出する γ 線のエネルギースペクトルが ^{131}I に近い特徴を持つ。ただし、放射能は 3 分の 2 としなかった。そもそも放射能を 3 分の 2 とすることが求められている理由は、 ^{133}Ba が ^{131}I と異なり 34% の放出率で 81 keV の光子を放出する（Table 2-3）ため、これを考慮してのことであると考えられる。しかし、ガンマ・ポールは検出器へ 100 keV 以下で入射する光子の事象を除去する仕組みとなっているため、放射能は 3 分の 2 としなかった。

Table 2-3 ^{131}I と ^{133}Ba の主な光子の放出割合⁴⁾

核種	主な光子		
	エネルギー(keV)	放出割合(%)	
^{131}I	≤ 81	80.2	2.6
	> 81	284	6.1
		365	81.7
		637	7.2
		723	1.8
^{133}Ba	≤ 81	53.2	2.2
		79.6	2.6
		81.0	34.1
	> 81	276	7.2
		303	18.3
		356	62.1
		384	8.9

40,000 cpm の汚染について、タイヤ部では、タイヤ接地面約 2,000 cm^2 に 120 Bq/cm^2 の一様な ^{131}I の汚染があることを想定し、240 kBq が相当するものとした。ワイパー部では、フロントガラス下部の 140 $\text{cm} \times 15 \text{ cm}$ 程度の広がりを持つ、120 Bq/cm^2 の一様な ^{131}I の汚染があることを想定し、250 kBq が相当するものとした。試験に用いた模擬汚染線源を Table 2-4 に示す。

Table 2-4 模擬汚染線源

核種 (コード番号)	線源 番号	①試験時(2020年 3月11日)の 放射能 (kBq)	②試験時(2020年10 月13~16日)の 放射能 (kBq)	③試験日(2021年1 月27日)の 放射能(kBq)
¹³³ Ba (BA401)	902	46.6	合計 239	合計 228
	903	46.4		
	904	46.1		
	918	49.6		
	919	50.4		
	984		38.2	37.5
	985		38.1	37.4
	986		38.2	37.5
	987		38.0	37.3
	988		37.9	37.2
	989		37.9	37.2
				合計 224

2.4.2 タイヤ接地面への線源設置

タイヤ接地面の汚染を模擬するとき、模擬汚染線源は Fig. 2-7 に示すようタイヤ接地面に設置した。Table 2-4 の①の ¹³³Ba 線源 5 個をタイヤの接地面に対して均等な位置になるようビニールシートに固定し、タイヤ（前輪左側）の接地面に密着するように巻き付けるようにした。このときの模擬汚染線源の写真を Fig. 2-8 に示す。

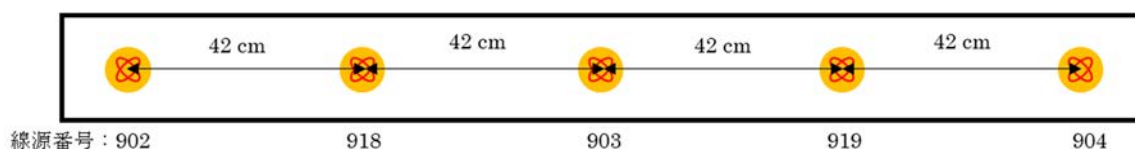


Fig. 2-7 タイヤ接地面に装着する模擬汚染線源の配置



線源を均等に並べて取り付けたビニールシート



タイヤ接地面に巻き付け
テープで固定

Fig. 2-8 タイヤ接地面に装着した模擬汚染線源

2.4.3 タイヤ側面への線源設置

走行試験にてタイヤの汚染を模擬する際や静止試験にて補正係数を求める際に模擬汚染線源をタイヤの側面に設置した。補正係数については 2.5.1 にて述べる。模擬する汚染を 40,000 cpm 相当とすると、放射能の総量が約 240 kBq となるよう、模擬汚染線源を静止試験では 5 個、走行試験では 6 個取り付けた。¹³³Ba 線源 5 個のとき、Fig. 2-9 及び Fig. 2-10 に示すように、Table 2-4 の①に示す ¹³³Ba 線源 5 個をタイヤ（前輪左側）側面の外周部に対して均等な位置になるよう発泡スチロール製の薄板に固定した。¹³³Ba 線源 6 個の場合は、Fig. 2-11 及び Fig. 2-12 に示すように、Table 2-4 模擬汚染線源の②に示す ¹³³Ba 線源 6 個をタイヤ接地面に近いフェンダー（ボディ）側面に均等になるようテープで固定した。

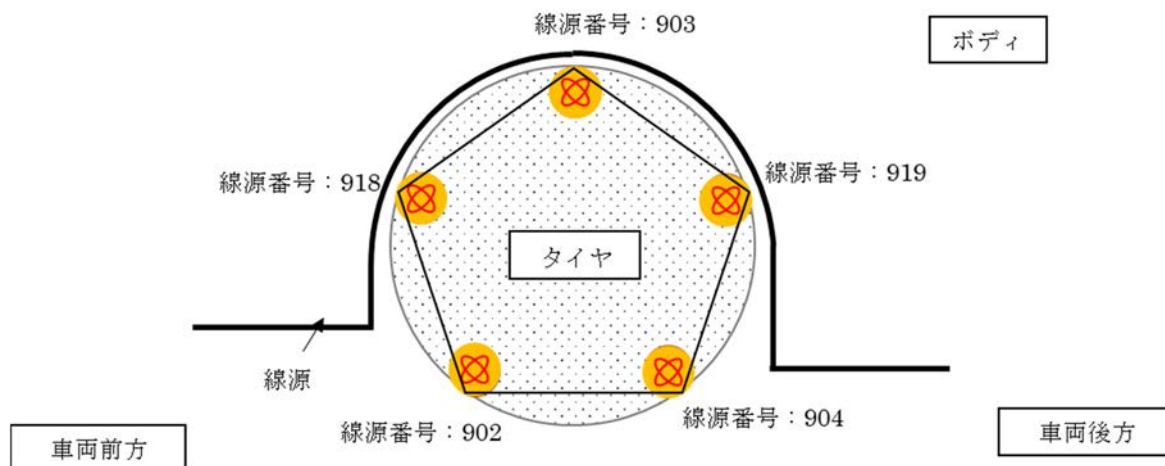


Fig. 2-9 タイヤ側面の模擬汚染線源（5 個）の配置

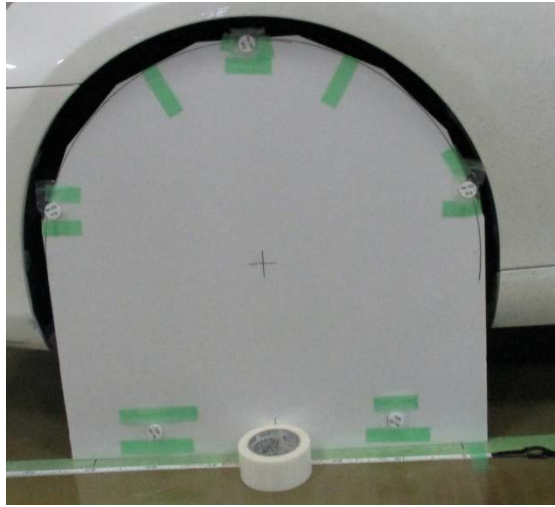


Fig. 2-10 タイヤ側面に装着した模擬汚染線源（5個）

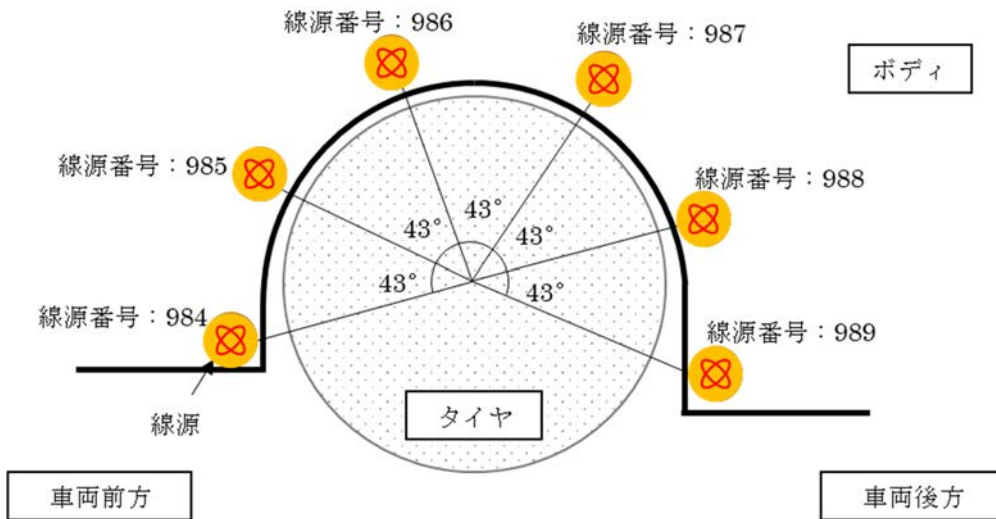


Fig. 2-11 タイヤ接地面に近いフェンダー側面の模擬汚染線源（6個）の配置



Fig. 2-12 タイヤ接地面に近いフェンダー側面に装着した模擬汚染線源（6個）

本試験ではさらに、参考として2.7で述べる走行試験にて原子力事故から1か月後のOIL4の基準値である13,000 cpm相当の80 kBqについても測定することとした。Table 2-4 模擬汚染線源の②に示す¹³³Ba線源2個をFig. 2-13及びFig. 2-14に示すようにフェンダー側面にテープで固定した。

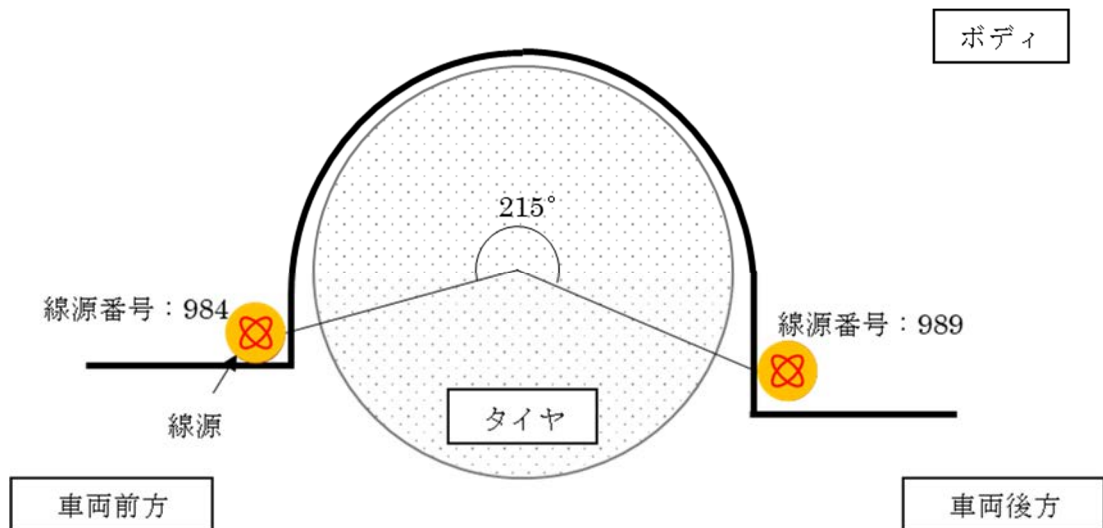


Fig. 2-13 タイヤ接地面に近いフェンダー側面の模擬汚染線源（2個）の配置



Fig. 2-14 タイヤのフェンダー側面に装着した模擬汚染線源（2個）

なお、各測定における線源配置方法は Table 2-5 に示す通りである。

Table 2-5 各測定におけるタイヤ側面への模擬汚染線源の配置

試験	測定条件				模擬汚染線源
	車種	車速	線源位置	ポール間距離	
静止試験	セダン	—	Fig. 2-9	3.5 m	Table 2-4 ①
走行試験	セダン	5 km/h	Fig. 2-11	3.5 m	Table 2-4 ②
		5 km/h	Fig. 2-13	3.5 m	Table 2-4 ②
		10 km/h	Fig. 2-13	3.5 m	Table 2-4 ②
高 BG 環境試験	セダン	—	Fig. 2-11	0.5 m [*]	Table 2-4 ②
		—	Fig. 2-11	1.0 m [*]	Table 2-4 ②

※ ポール・車両側面間距離

2.4.4 ワイパー部への線源設置

基本は、放射能の総量が 40,000 cpm 相当の 250 kBq におおよそ等しくなるよう、模擬汚染線源を 5 個又は 6 個取り付け付けた。Table 2-4 の①に示す ^{133}Ba 線源 5 個若しくは Table 2-4 の②又は③に示す 6 個をワイパー部に対して均等な位置になるようビニールシートに固定し、そのビニールシートをワイパー部（フロントガラス下部）に取り付けた。本試験ではさらに、2.7 で述べる走行試験にて原子力事故から 1 か月後の OIL4 の基準値である 13,000 cpm 相当の 80 kBq についても測定することとした。使用した模擬汚染線源は、Table 2-4 模擬汚染線源の②に示す ^{133}Ba 線源 2 個である。模擬汚染線源の配置方法を Fig. 2-15 から Fig. 2-18 に、取り付け時の写真を Fig. 2-19 に示す。

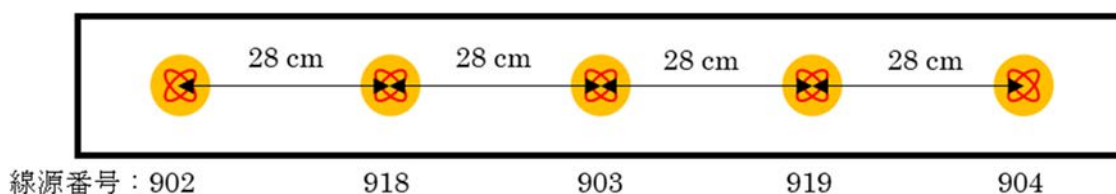


Fig. 2-15 セダンワイパー部の模擬汚染線源（5 個）の配置

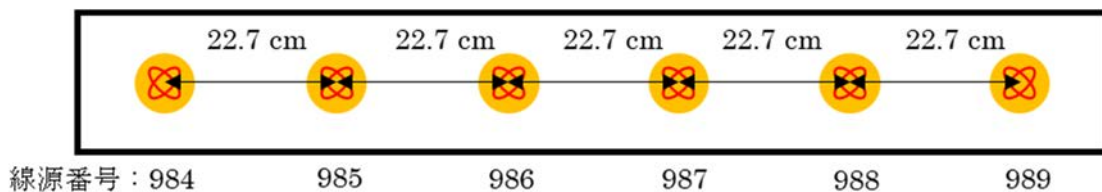


Fig. 2-16 セダンワイパー部の模擬汚染線源（6 個）の配置

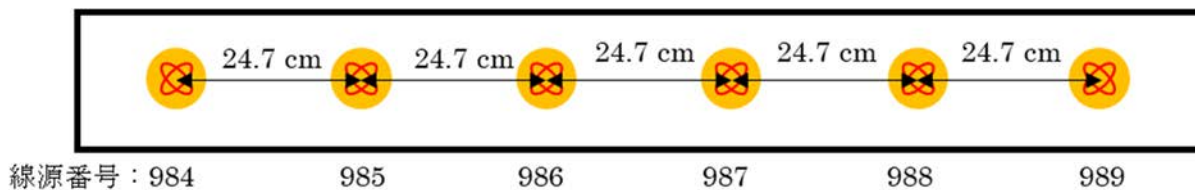


Fig. 2-17 バンワイパー部の模擬汚染線源（6 個）の配置

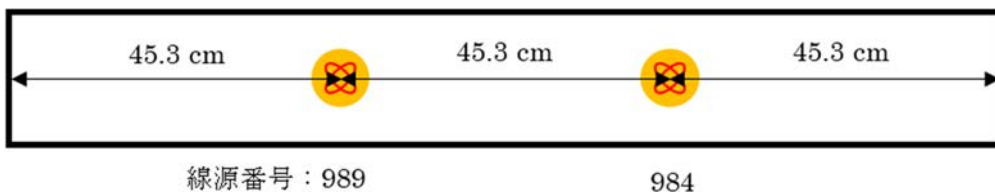


Fig. 2-18 セダンワイパー部の模擬汚染線源（2 個）の配置



Fig. 2-19 ワイパー部に配置した模擬汚染線源
写真はセダンに設置した線源6個のもの

なお、各測定における線源配置方法は Table 2-6 に示す通りである。

Table 2-6 各測定におけるワイパー部への模擬汚染線源の配置

試験	測定条件				模擬汚染線源
	車種	車速	線源位置	ポール間距離	
静止試験	セダン	—	Fig. 2-15	3.5 m	Table 2-4 ①
走行試験	セダン	5 km/h	Fig. 2-16	3.5 m	Table 2-4 ②
	セダン	10 km/h	Fig. 2-16	3.5 m	Table 2-4 ②
	バン	5 km/h	Fig. 2-18	3.5 m	Table 2-4 ③
	バン	10 km/h	Fig. 2-17	3.5 m	Table 2-4 ③
高 BG 環境 試験	セダン	—	Fig. 2-16	0.5 m*	Table 2-4 ②
		—	Fig. 2-16	1.0 m*	Table 2-4 ②

※ ポール・車両側面間距離

2.5 静止試験

2.5.1 静止試験の目的

2.2 で述べた通り、タイヤ接地面に模擬汚染線源を取り付けた状態で車両を走行させることは難しいため、本試験における走行試験ではタイヤ側面に放射線源を取り付けて測定を行った。タイヤハウスやタイヤホイールは金属製でありこれらがタイヤを囲む構造であるため、タイヤ接地面の汚染からの γ 線は遮へいされやすくなっている。そのため、走行試験の結果からタイヤ接地面の汚染影響を評価するには、初めにタイヤ側面の汚染による計数率をタイヤ接地面汚染による計数率に変換するための補正係数（以下「補正係数」という）を求める必要がある。補正係数は、汚染量が同じであるときのタイヤ側面汚染による計数率に対するタイヤ接地面による計数率の割合と定義した。これにより、タイヤ側面汚染による計数率が分かれば、これに補正係数を乗じることでタイヤ接地面による計数率を求めることができる。補正係数を求める

ため、静止させた状態の車両に線源を取り付けて測定する静止試験を実施した。

補正係数は、車速 5 km/h 及び 10 km/h のときを想定して算出することとした。これは、避難退域時検査等マニュアルにおいて「およそ 5km/h 以下で一台ずつ通過させます。」と記載されており²⁾、さらに 2.1 で述べたように、ガンマ・ポールは車速が 0 km/h～10 km/h において自動で測定可能である³⁾ことが謳われていることを踏まえたためである。

2.5.2 静止試験のレイアウト

車両前輪の車軸がガンマ・ポールの 2 検出器の間にあるときを原点 (0 cm) とし、前後約 2 m の範囲で車両を 30 cm 又は 60 cm ごとに移動させ、静止状態で測定した。位置は車両の前進方向をプラス側として測定結果を記録した。移動の都度、静止状態の車両に模擬汚染線源の着脱を行い、2 検出器の測定値 (Gross 値) を記録した。静止試験のレイアウトを Fig. 2-20 に示す。

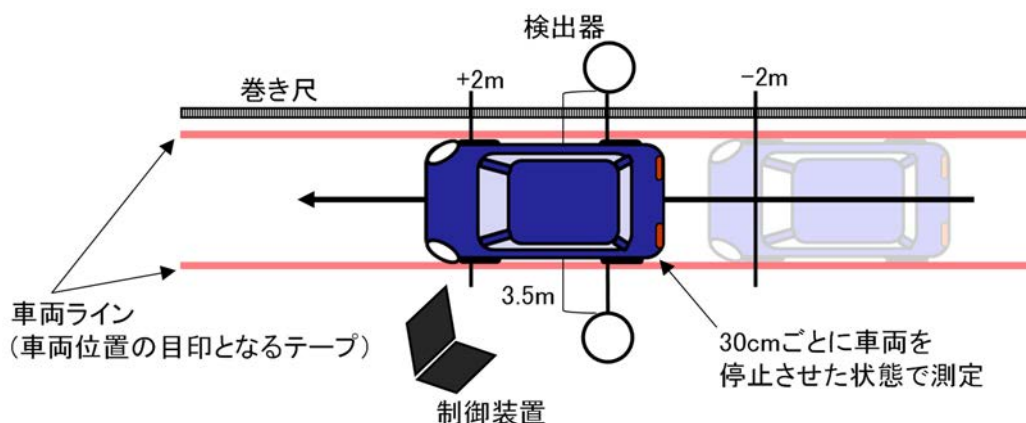


Fig. 2-20 静止試験のレイアウト

線源は条件毎にタイヤ接地面、タイヤ側面、ワイパー部にそれぞれ取り付け、測定を行った。また、使用した線源は、2.4.3 の Table 2-5 及び 2.4.4 の Table 2-6 で示した通り、いずれも Table 2-4 の①で示す 5 個である。

2.6 走行試験

2.6.1 走行試験の目的と評価方法

2.1 で述べた通り車両用ゲート型モニタには以下の 2 点が重要となると考え、これらの性能について評価することを目的に走行試験を実施した。(1)は第一に求めるべき性能であり、(2)はそれに次いで有すべき性能であると言える。

- (1) OIL4 相当の汚染が BG に比べて有意に検知可能であること
- (2) OIL4 の基準値超の汚染と未満の汚染が判定可能であること

(1)について言えば、被測定物質の検出限界を BG の平均値にその標準偏差の 3 倍を加えた値と

して定義する考え方がある⁵⁾。この考え方に則り、車両用ゲート型モニタである車両を測定したときの計数率が

$$\hat{n}_G > n_B + 3\sigma_B \quad [2]$$

の関係を満たすとき、汚染を有意に検知したと判断することとした。ここで、

- \hat{n}_G : BG を含む汚染からの計数率[cpm]
- n_B : BG の平均計数率[cpm]
- σ_B : BG の計数率の標準偏差[cpm](1 秒)

である。BG を含む汚染からの計数率 \hat{n}_G は測定中に得られた、ある 1 秒間の最大計数率[cpm]である。これから BG の平均計数率 n_B を差し引いた計数率が汚染からの正味計数率 \hat{n}_N であるとすれば、式[2]の両辺から n_B を差し引いた、

$$\hat{n}_N = \hat{n}_G - n_B > 3\sigma_B \quad [3]$$

の条件を満たす場合でも同様であると言える。また、BG の計数率の標準偏差[cpm] (1 秒) σ_B とは、本試験の BG 測定にて得た標準偏差である。本試験で得られる BG の計数率は、1 秒間に得られる計数を 1 分当たりの計数率[cpm]として出力した値である。BG 測定では、これを複数回取得し、BG の平均計数率 n_B 及び標準偏差 σ_B を求めた。このとき、 n_B 及び σ_B はおおよそ次の関係をとる。

$$\sigma_B[\text{cpm}] \approx \sqrt{60n_B[\text{cpm}]} \quad [4]$$

しかし、2.1 で述べたように、車両が通過した時に得られる BG の計数率は、車両通過前の 60 秒分の積算の計数である。そのため、本研究では実運用時の BG の計数率の標準偏差[cpm]を σ_B' と定義した。このとき、 n_B 及び σ_B' はおおよそ次の関係をとる。

$$\sigma_B'[\text{cpm}] \approx \sqrt{n_B[\text{cpm}]} \quad [5]$$

よって、 σ_B' は式[3][4]の関係から次の式で推定することとした。

$$\sigma_B' = \frac{\sigma_B}{\sqrt{60}} \quad [6]$$

本研究では、式[3]を満たす確率（以下「汚染検知率」という）について示すこととした。OIL4 相当の汚染としては、40,000 cpm に加えて参考として 1 か月後の基準である 13,000 cpm 相当に

についても、その汚染検知率を調べることにした。

(2)については、OIL4 相当の計数率の基準値を設定した際、OIL4 相当超の汚染を測定した場合は測定値がその基準値を超え、かつ、OIL4 相当以下の汚染を測定した場合は測定値がその基準値以下となれば、OIL4 の基準値超の汚染とそれ以下の汚染の判定（以下「OIL4 基準値判定」という）が優れていると言える。2.1 で述べた通り、ガンマ・ポールは、ある車両の測定にて汚染量を判定する際、計数率 \hat{n}_G から BG の平均計数率 n_B を差し引き、さらに換算定数 K を乗ずることで、GM 換算計数率 \hat{n}'_N に換算している。

$$\hat{n}'_N = \hat{n}_N K = (\hat{n}_G - n_B) K \quad [7]$$

ガンマ・ポールは、この GM 換算計数率 \hat{n}'_N が警報設定値以上となったとき警報を発報する。しかし、実際には測定対象が一定の放射能であっても放出される放射線の統計的変動により、計数率は一定とはならない。

そこで、本研究では GM 換算計数率が警報設定値を超える確率を警報発報確率 p_n と定義し、40,000 cpm 相当の汚染を測定した時の警報発報確率 p_{40k} を求めた。さらに、40,000 cpm を下回る高い汚染の目安として、30,000 cpm 相当の汚染を測定した時の警報発報確率 p_{30k} も求めた。これら2つの警報発表確率 p_{40k} 、 p_{30k} を比較し、OIL4 基準値判定の性能を評価した。

警報発報確率は、換算定数 K により変化する。換算定数 K は GM 換算計数率を決める値であり、メーカーにより設定されている。しかし、2.2 で述べたように、OIL4 以下の放射性物質で警報発報しないことは避難退域時検査等マニュアルでは求められていない。よって、本研究では「OIL4 以下の放射性物質での警報発報を抑制する」観点を設け、適した換算定数 K を独自に検討することとした。

ところで、本研究においてタイヤ接地面又はワイパー部に付着した 40,000 cpm 相当汚染の放射能を 240 kBq としたことは既に 2.5.1 で述べた。測定器の正確さの観点で言えば、ガンマ・ポールで 240 kBq の汚染を測定したとき、GM 換算計数率が 40,000 cpm を示すべきである。しかし、仮に 240 kBq 汚染した車両を何台も測定した結果、GM 換算計数率の中央値が 40,000 cpm であれば、半数の測定にて GM 換算計数率が警報設定値を超えなくなる。すなわち、このとき警報発報確率 p_{40k} は 50 %となる。避難退域時検査では、指定箇所検査にて OIL4 以下でない可能性がある車両は確認検査へ送る必要があるため、40,000 cpm 相当で汚染した車両を 50 %といった高い割合で OIL4 以下と判定することは、基準値を超えて汚染した車両を多く通過させる可能性が生じるため適切ではない。よって、本研究では GM 換算計数率が保守的な値として算出されるよう、換算定数 K の検討にあたっては目安として警報発報確率 p_{40k} が 90 %以上となり、警報発報確率 p_{40k} と警報発報確率 p_{30k} の差が大きくなる換算定数 K 等の条件を探ることとした。

以上の(1)及び(2)は、静止試験と同様に車速 5 km/h 及び 10 km/h のときを想定して算出することとした。

2.6.2 走行試験のレイアウト

模擬汚染線源をタイヤ及びワイパー部に取り付け、検出器間の中央を車両が通るように走行

させ、車両通過後、測定器の警報発報の有無、検出器毎の測定値（Gross 値）を記録した。また、車両の速度を確認するため、距離 8.33 m の定速エリアを設け、定速エリアの入出時間も記録した。8.33 m とは、10 km/h で走行する車両が 3.0 秒で通過する距離である。さらに、車両が検出器間の中央を通過しているか確認するため、検出器と車両側面の距離も記録した。なお、車両が検出器間の中央を通れるように、テープの内側がタイヤの外側になるよう地面に張り付け、車両走行時の目印とした。走行試験のレイアウトを Fig. 2-21 に示す。線源は、タイヤ側面及びワイパー部にそれぞれ取り付け、測定を行った。使用した線源は、2.4.3 の Table 2-5 及び 2.4.4 の Table 2-6 で示した通り、いずれも Table 2-4 の②又は③で示す 6 個である。

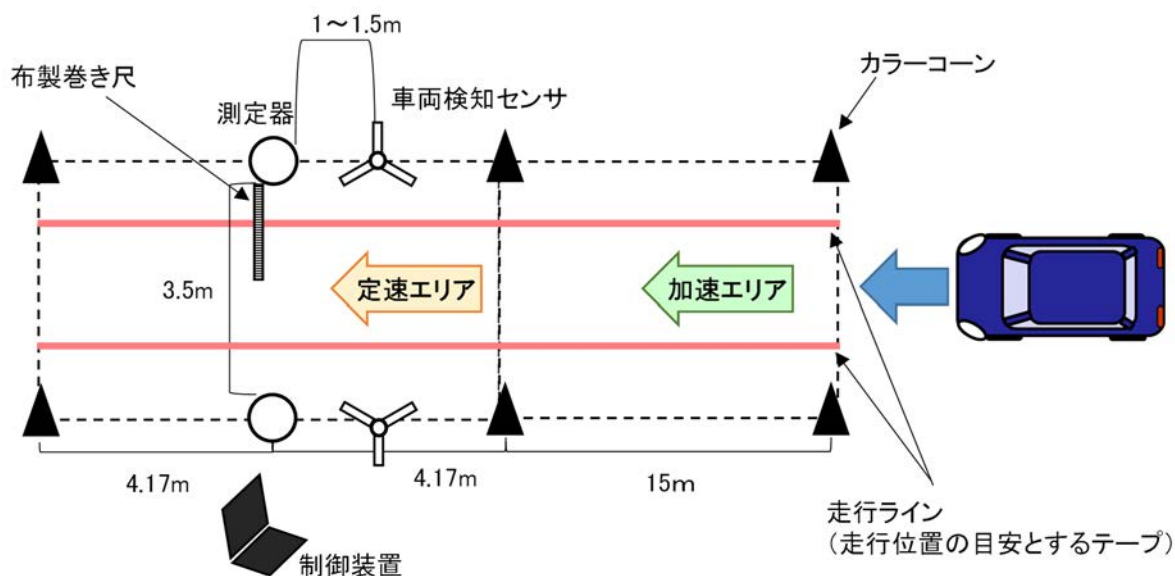


Fig. 2-21 走行試験のレイアウト

2.7 高 BG 環境試験

2.7.1 高 BG 環境試験の目的

車両用ゲート型モニタは、その検出部が大容量のプラスチックシンチレータであるため周辺環境からの自然放射線（ γ 線）を検知しやすい。すなわち、対象とする汚染から得られる計数率が BG に対して相対的に小さくなりやすく、正味計数率が BG のゆらぎの範囲に隠れる可能性がある。よって、車両用ゲート型モニタは、BG の影響がある環境下でいかに汚染検知（判定）可能となるかという点も重要となる。そのため、本試験では高 BG 環境を模擬し、ガンマ・ポールの汚染検知性能を調査する高 BG 環境試験を行った。

2.1 で述べた通り、ガンマ・ポールは測定値から BG 分を差し引いた正味計数率を評価する仕組みとなっている。BG の空間放射線量率の違いによって BG 計数率の標準偏差が変化するため、検出器の検出限界値が変わることとなる。つまり、汚染等による高い BG 環境（以下「高 BG 環境」という）下では、平常時の自然 BG 環境下よりも、正味計数率が検知しにくくなる。ここでは、空間放射線量率の変化に応じた汚染検知性能を調査した。

ここでは、ガンマ・ポールの性能の限界を調査するため、検知しやすいよう比較的遅い車速 5 km/h のときを想定し、上記の調査を行った。

2.7.2 高 BG 環境試験のレイアウト

高 BG 環境として、0.1 μSv/h から 0.5 μSv/h の空間放射線量率（周辺線量当量率）の環境を模擬した。高 BG 用線源に用いた線源を Table 2-7 に示す。また、線源及び空間放射線量率測定のレイアウトを Fig. 2-22 に示す。

空間放射線量率の調整は、車両進行方向に向かって左側下段の検出器（Ch2）を対象に放射線が片側の検出器に均等にあたるよう 2 個の高 BG 用線源の高さを変えて配置し、検出器と線源との距離を調整することで行った。空間放射線量率は、検出器を挟んで両側から、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータで測定し確認した。空間放射線量率測定の様子を Fig. 2-23 に示す。

空間放射線量率を高 BG 環境下に調整した後は、2.5 で述べた静止試験と同様の方法にて測定を行った。ただし、車両の位置は、車両前輪車軸が原点（0 cm）となる位置のみとした。

Table 2-7 高 BG 用線源

核種（識別番号）	試験時の放射能 (MBq)
¹³⁷ Cs (¹³⁷ Cs-1)	1.9
¹³⁷ Cs (¹³⁷ Cs-2)	1.7

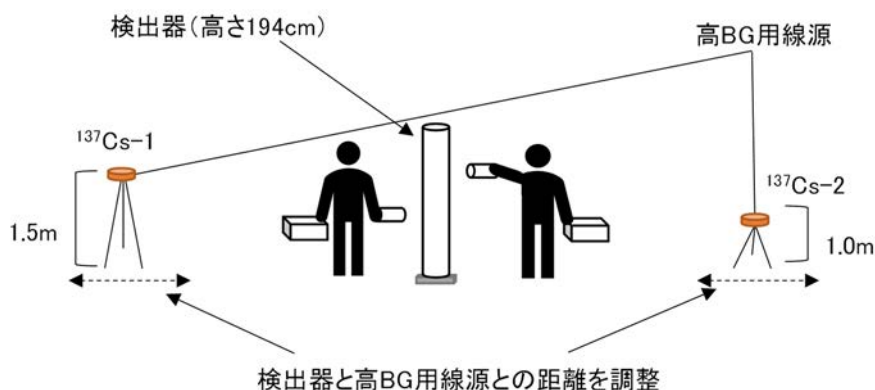


Fig. 2-22 高 BG 環境のための線源及び空間放射線量率測定のレイアウト



Fig. 2-23 模擬高 BG 環境の空間放射線量率測定の様子

3. 試験結果と考察

3.1 静止試験

ここでは、静止試験によって得られた結果とその考察について述べる。静止試験で得られたデータは解析で使用しなかったものも含め、付録 A にて示す。

2.1 で述べた通り、ガンマ・ポールは車両が通過し終わったときに、通過中の最大計数率 (cpm) を表示する仕様である。この最大計数率 (cpm) はある 1 秒間に得られた最大計数を 60 倍し、1 分当たりの計数率 (cpm) として表示されるものである。そこで、2.5 で実施した静止試験の結果を用いて、タイヤが中心軸上にある原点を中心に 1 秒間の移動範囲で得られる計数率について、タイヤ側面とタイヤ接地面との結果で比較することで補正係数を求めることとした。

初めに、前輪車軸の位置と正味計数率との関係について、タイヤ側面とタイヤ接地面の測定結果を Fig. 3-1 に示す。正味計数率は、半減期から計算した試験当日の ^{133}Ba の放射能で割った 1 kBq あたりの計数率として規格化した。前輪車軸の位置は、検出器と検出器を結ぶ直線上を 0 cm とし、車両を前進させる方向を正とした。なお、プロット点のエラーバーは、補正係数が走行 1 秒間に得られる計数の平均値を基に算出するため、計数率の標準誤差とした。

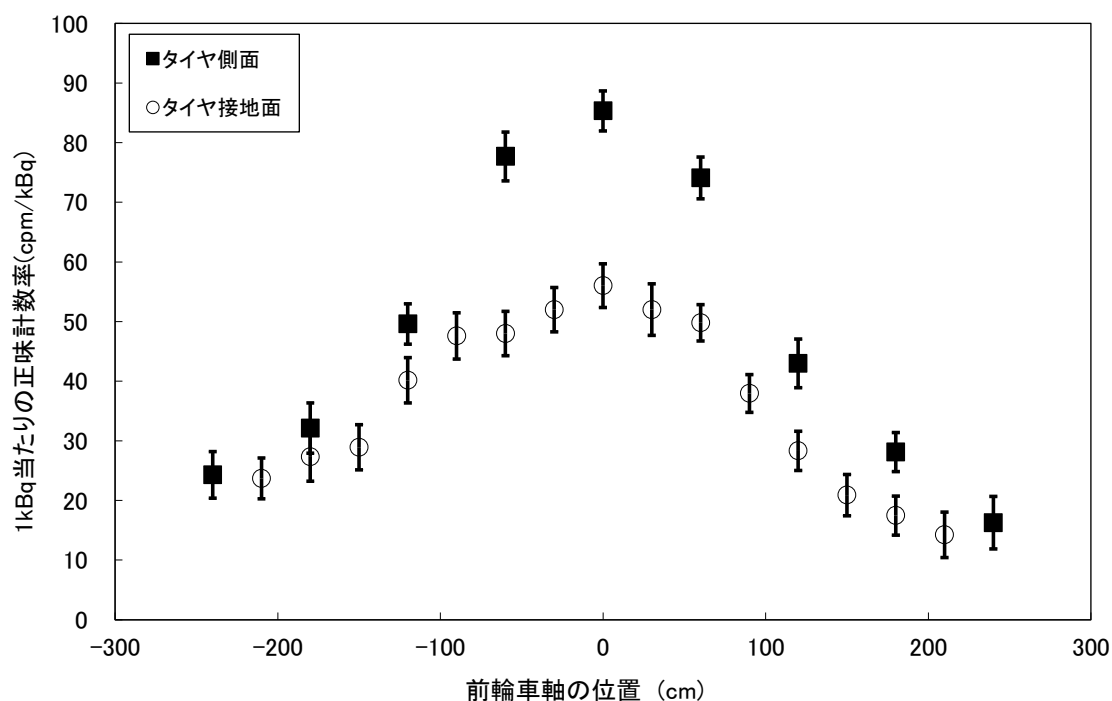


Fig. 3-1 車両の前輪車軸の位置に対する正味計数率

前輪車軸の位置 0 cm を中心に 1 秒間の移動範囲で得られる計数率を求めるため、Fig. 3-1 に対して近似曲線を引きその範囲で積分することとした。汚染からの γ 線のフルエンス率が距離の二乗に反比例することから、タイヤ側面のプロット点の近似には次の式を用いた。

$$N(x) = \frac{a_1}{x^2 + a_2} \quad [8]$$

ここで、各値は以下を意味する。

- x : 前輪車軸からの距離[cm], 変数
- $N(x)$: 1 kBq 当たりの正味計数率[cpm/kBq]
- a_1 : 曲線近似のための定数[cpm・cm²/kBq]
- a_2 : " [cm²]

この近似曲線にてタイヤ側面のプロット点を近似したものを Fig. 3-2 に示す。

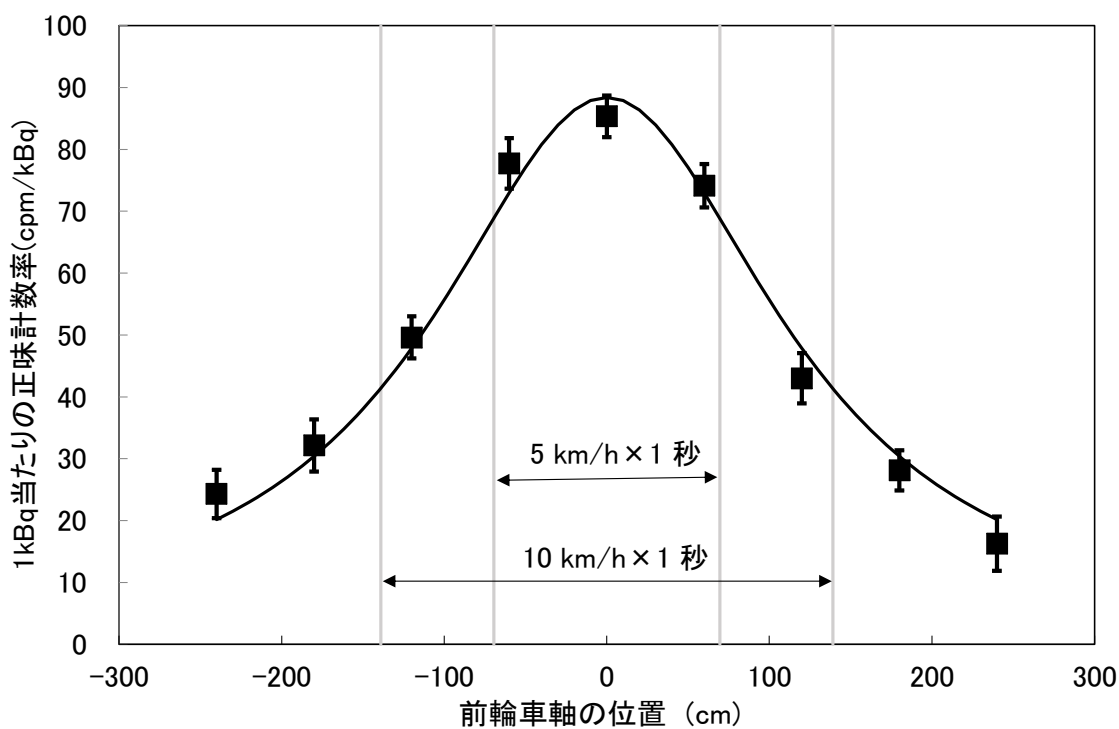


Fig. 3-2 タイヤ側面における1秒間走行の移動範囲

Fig.3-2 の通り近似曲線を描画した結果、定数 a_1 , a_2 については Table 3-1 に示す値が得られた。

Table 3-1 タイヤ側面の近似曲線の定数

a_1 [cpm・cm ² /kBq]	1.50×10^6
a_2 [cm ²]	1.70×10^4

一方でタイヤ接地面の場合、式[8]のみで全範囲を近似することができなかった。この要因は、汚染箇所が金属製のタイヤハウスやホイールに囲まれる構造であるため、 γ 線がこれらの遮へい効果を受けたためと考えられる。遮へい効果の影響は、タイヤ側面に対して正面から γ 線を捕らえる場合と、タイヤ側面に対して斜めの方向から γ 線を捕らえる場合とでは異なると考えられる。よって、プロット点の近似には前輪車軸の位置 x の範囲に応じて異なる関数を使用した。タイヤ接地面での関数近似を試みた結果、Fig. 3-3 のグラフが得られた。

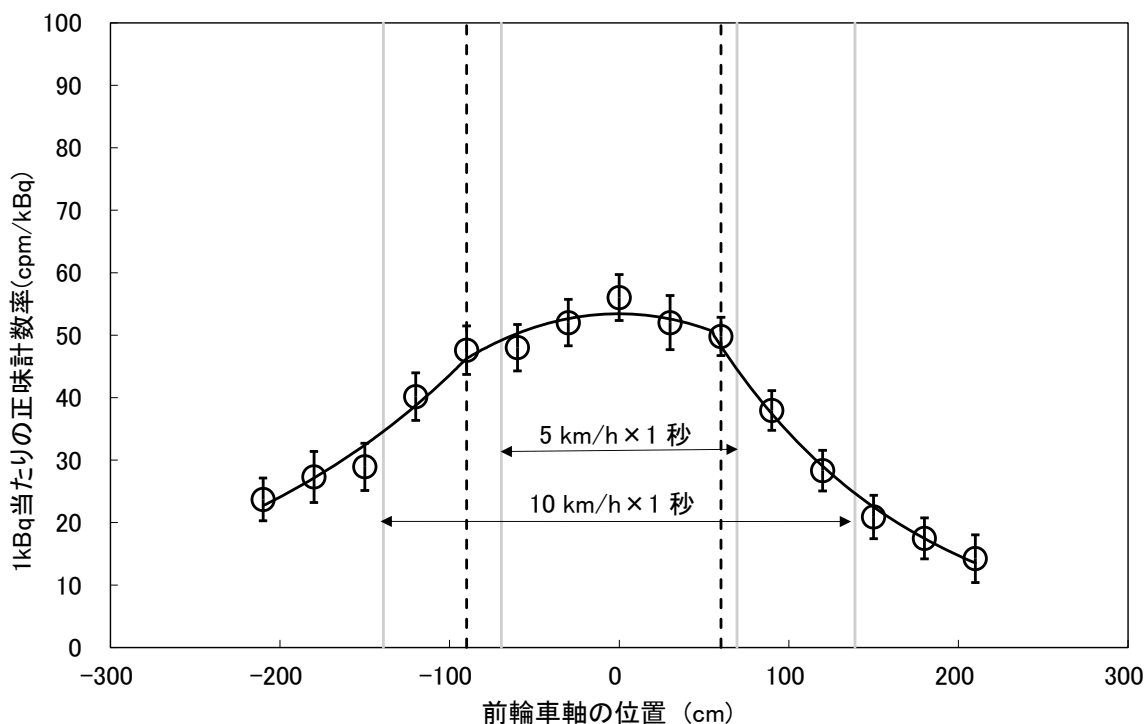


Fig. 3-3 タイヤ接地面における 1 秒間の移動範囲

ここで、近似できた関数は次のものであった。

$$N(x) = \begin{cases} b_1 \exp(b_2 x), & x < x_1 \\ \frac{b_3}{x^2 + b_4}, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ b_5 \exp(b_6 x), & x_2 < x \end{cases} \quad [9]$$

ここで、 $x_1, x_2, b_1 \sim b_7$ は曲線近似のための定数を表す。各定数の値は Table 3-2 の通りであった。

- x_1, x_2 : 曲線近似のための定数[cm]
- b_1, b_5 : " [cpm/kBq]
- b_2, b_6 : " [cm^{-1}]
- b_3 : " [$\text{cpm} \cdot \text{cm}^2/\text{kBq}$]
- b_4 : " [cm^2]

Table 3-2 タイヤ接地面の近似曲線の定数

x_1 [cm]	-90	b_3 [cpm・cm ² /kBq]	2.67×10^6
x_2 [cm]	60	b_4 [cm ²]	4.98×10^4
b_1 [cpm/kBq]	79.0	b_5 [cpm/kBq]	80.2
b_2 [cm ⁻¹]	5.93×10^{-3}	b_6 [cm ⁻¹]	-8.47×10^{-3}

次に、算出した近似曲線について、前輪車軸の位置 0 cm を中心に 1 秒間の移動範囲で積分し、この範囲での計数率 S を求めた。すなわち、

$$S = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} N(x) dx \quad [10]$$

を求めた。ここで、

L : 1 秒間の走行距離[cm]

である。車速が 5 km/h であるとき $L = 139$ cm、つまり積分範囲は $-69 \text{ cm} \leq x \leq 69 \text{ cm}$ である。また、車速が 10 km/h であるとき $L = 278$ cm、つまり積分範囲は $-139 \text{ cm} \leq x \leq 139 \text{ cm}$ である。タイヤ接地面とタイヤ側面による計数率の比である補正係数 C は、

$$C = \frac{S_g}{S_s} \quad [11]$$

の式で表すことができる。ここで、

S_g : タイヤ接地面における 1 秒間の移動範囲の計数率[cpm・cm/kBq]

S_s : タイヤ側面における 1 秒間の移動範囲の計数率[cpm・cm/kBq]

以上の計算により、算出した補正係数を Table 3-3 に示す。車速による影響はなく、ほぼ一定であることがわかった。これにより、前輪車軸の位置が原点 (0 cm) から離れるほど、車両通過中に取得する最大の計数率 (1 秒分) への影響は小さくなることが確認できた。

Table 3-3 タイヤ接地面汚染からの計数率算出のための補正係数

車速[km/h]	補正係数 C
5	0.64
10	0.66

3.2 走行試験

ここでは、静止試験の結果を踏まえ、走行試験によって得られた結果とその考察について述べる。走行試験で得られたデータは付録 B にて示す。

3.2.1 タイヤ接地面の OIL4 相当汚染の検知性能

ガンマ・ポールは、最大 4 つの検出器のうち 1 つ以上の検出器が基準値を超える計数率を検知したときに警報発報し、警報発報確率は式[1]で書けることは 2.1 にて述べた。これは汚染検知率の式[3]に対しても同様と言える。しかし、タイヤ測定では線源を取り付けた前輪左側タイヤに一番近い検出器 (Ch2) の汚染検知率をガンマ・ポールでの汚染検知率とみなした。これは、Ch2 検出器での計数率が最も大きく、後述するように十分に汚染検知率が高かったためである。

2.5.1 の通り 40,000 cpm 相当の放射能は 240 kBq としたが、実験当日の放射能は 228 kBq であったため、当日に得られた計数率を 240 kBq 相当での計数率に補正し、評価することとした。Table 3-4 に走行試験、タイヤ側面の測定結果を示す。なお、80 kBq は OIL4 の 1 か月後の基準値 13,000 cpm に相当する放射能である。

Table 3-4 タイヤ側面の測定結果 (走行試験)

目標放射能[kBq]	80 (13,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	
車速[km/h]	5	5	10
実験日	2020/10/16	2020/10/14	2020/10/16
当日の放射能 [kBq]	76	228	228
測定値平均 n_{TSG} [cpm]	58,852	73,752	67,760
測定値標準偏差 σ_{TSG} [cpm]	1,337	2,435	1,983
BG 平均 n_B [cpm]	54,048	55,277	54,048
BG 標準偏差(1 秒) σ_B [cpm]	2,091	1,681	2,091
BG 標準偏差(実運用) σ_B' [cpm]	270	217	270

タイヤ接地面汚染からの正味の計数率 n_{TGN} とその標準偏差 σ_{TGN} は、Table 3-3 で示した補正係数 C をタイヤ側面の測定結果に乗じることで算出した。すなわち、

$$n_{TGN} = n_{TSN} C = (n_{TSG} - n_B) C \quad [12]$$

$$\sigma_{TGN} = \sigma_{TSN} C = \sqrt{\sigma_{TSG}^2 + \sigma_B'^2} C \quad [13]$$

から求めた。ここで、

n_{TSN} : タイヤ側面汚染からの正味計数率[cpm]

σ_{TSN} : タイヤ側面汚染からの正味計数率の標準偏差[cpm]

式[12][13]にて求めたタイヤ接地面の正味計数率 n_{TGN} とその標準偏差 σ_{TGN} を Table 3-5 に示す。

Table 3-5 タイヤ接地面の正味計数率とその標準偏差

放射能A[kBq]	76	228	
車速[km/h]	5	5	10
正味計数率 n_{TGN} [cpm]	3,066	11,792	9,087
正味計数率の標準偏差 σ_{TGN} [cpm]	871	1,560	1,326

汚染検知率を推定するには、実験当日の放射能である 76 kBq と 228 kBq での測定結果に基づき、対象とする放射能 80 kBq と 240 kBq での正味計数率の推定値 n_{N} とその標準偏差を求める必要がある。

初めに、車速 5 km/h のときの汚染検知率を求めた。Fig. 3-4 に示すように、車速 5 km/h での測定値について実験当日の放射能である 76 kBq と 228 kBq での標準偏差をプロットし、これをもとに最小二乗法により放射能と標準偏差の関係を直線近似した。80 kBq と 240 kBq のときの標準偏差をこの近似直線上にプロットし、これを正味計数率（推定値）の標準偏差とした。ただし、76 kBq と 80 kBq、228 kBq と 240 kBq の標準偏差はそれぞれ大きな差異が無かった。

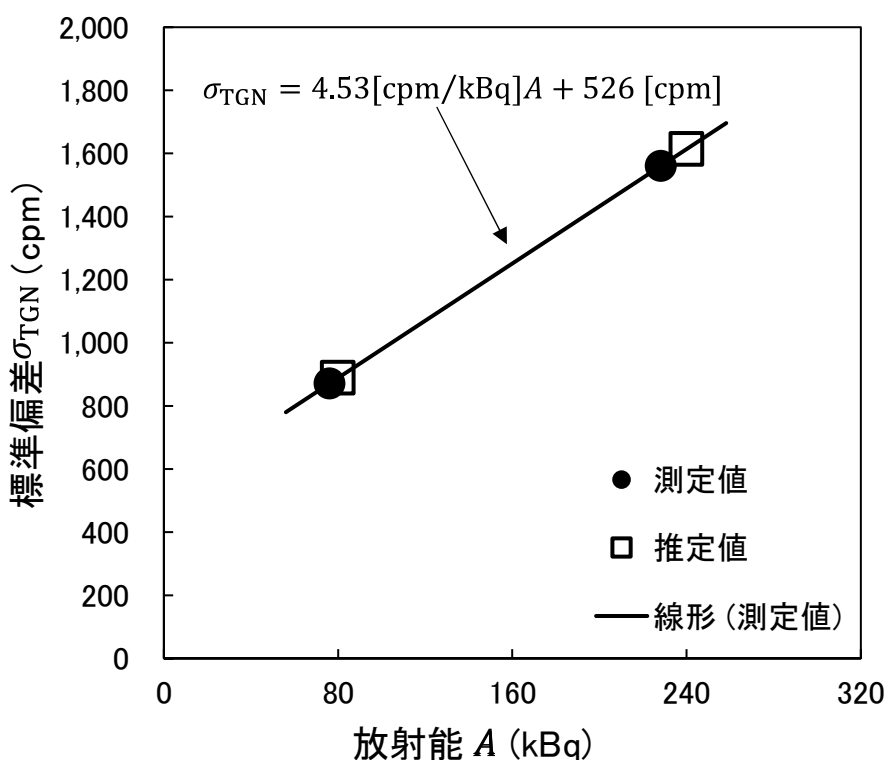


Fig. 3-4 車速 5km/h のときのタイヤ接地面汚染からの正味計数率の標準偏差

正味計数率についても Fig. 3-4 と同様に、測定値から直接得られた 76 kBq と 228 kBq での正味計数率を測定値としてプロットした。これをもとに放射能と正味計数率の関係を、最小二乗法により原点(0 kBq, 0 cpm)を通る直線で近似した (Fig. 3-5)。80 kBq と 240 kBq のときの正味計数率をこの近似直線上にプロットし、これを推定値とした。Fig. 3-5 に示す 80 kBq 及び 240 kBq のときの正味計数率の標準偏差は、Fig. 3-4 の近似直線から得られた標準偏差である。ただし、エラーバーは 2 標準偏差 (2σ) で示した。図中の点線は BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) を示す。ここでの標準偏差 σ_B は、保守的に汚染検知しにくい状態での汚染検知率が求まるよう、タイヤ測定の複数日の中から最も大きい 2020 年 10 月 16 日の値 2,091 cpm を採用した。すなわち、BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) は $3 \times 2,091 \text{ cpm} = 6,273 \text{ cpm}$ である。80 kBq 及び 240 kBq の正味計数率の分布は正規分布に従うものとし、これが BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) を超える割合、すなわち汚染検知率を求めた。仮に、2 標準偏差 (2σ) の下限が BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) に触れている場合、汚染検知率は約 97.7%となる。

汚染検知率を求めた結果、80 kBq のとき 0.60%、240 kBq のときほぼ 100%と推定された。このことから、比較的遅い 5 km/h で検査車両が通過した場合であっても 13,000 cpm に相当する 80 kBq の汚染は検知が難しいことが分かった。一方、40,000 cpm に相当する 240 kBq の汚染は十分に検知できることが分かった。

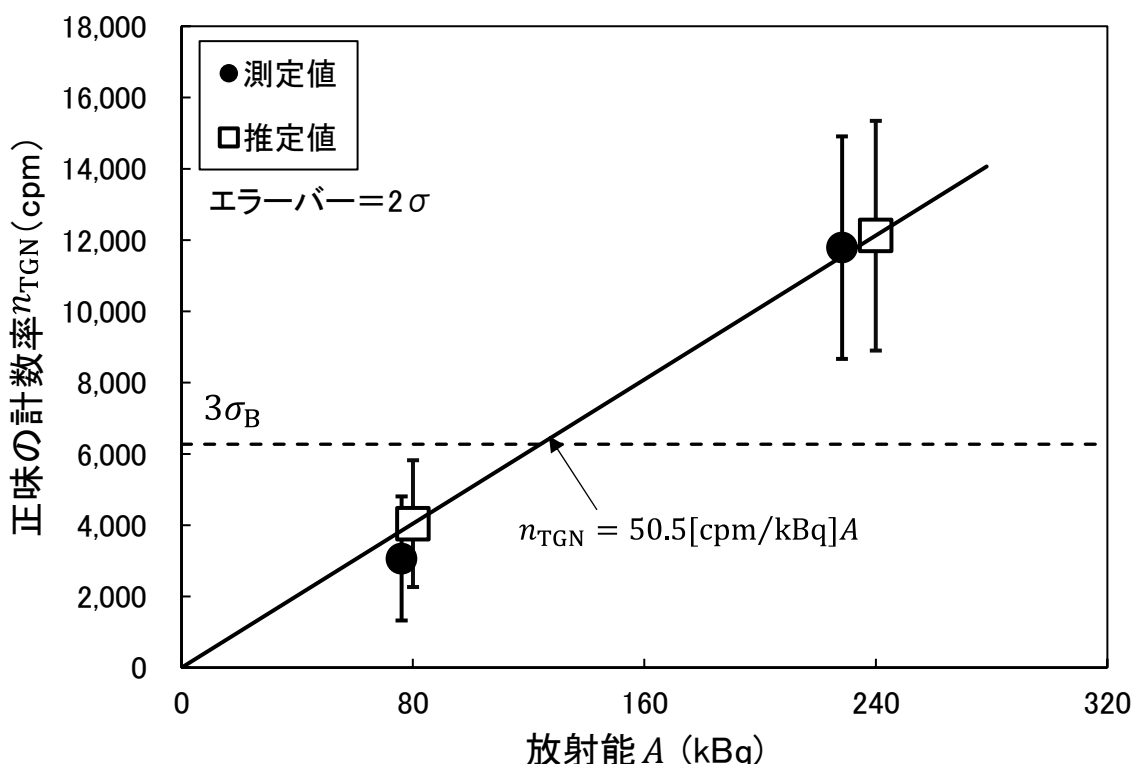


Fig. 3-5 車速 5 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの正味計数率

次に、車速 10 km/h のときの汚染検知率を求めた。Fig. 3-6 に示すように、測定値から得られた 228 kBq での正味計数率を測定値としてプロットした。放射能と正味計数率の関係を、原点 (0 kBq, 0 cpm) を通る直線で近似した。240 kBq のときの正味計数率をこの近似直線上にプロットし、これを推定値とした。図中のエラーバーは 2 標準偏差 (2σ) を示す。ただし、240 kBq の推定値の標準偏差は、228 kBq の測定値の標準偏差と同値とした。また、図中の点線は BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) ($= 3 \times 2,091 \text{ cpm} = 6,273 \text{ cpm}$) を表す。240 kBq の正味計数率が正規分布に従うものとする、正味計数率が BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) を超える割合、すなわち 240 kBq 汚染の汚染検知率は、96 % となると推定した。このことから、比較的速い 10 km/h で車両が通過したとしても、40,000 cpm に相当する 240 kBq の汚染は高い確率で検知できることが分かった。

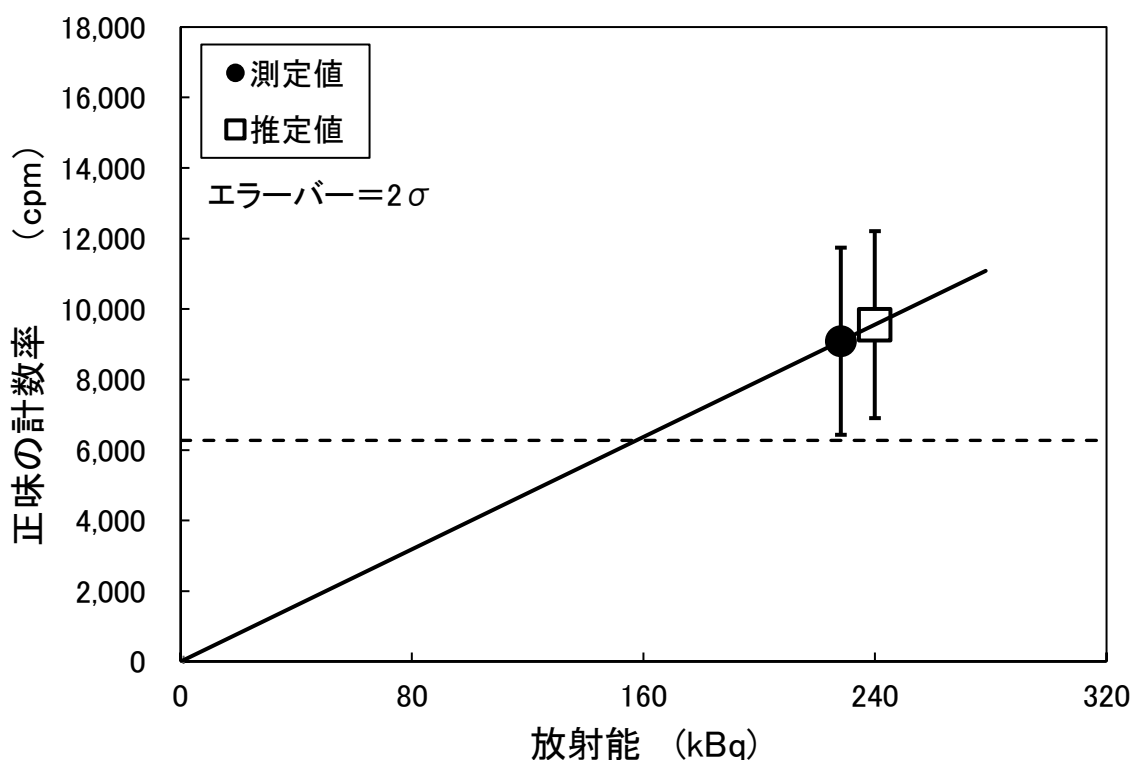


Fig. 3-6 車速 10 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの正味計数率

以上の検討から得られたタイヤ接地面の汚染検知性能について Table 3-6 に整理する。13,000 cpm 相当の汚染は、汚染検知率が低く検知が難しいことが明らかになったため、以降、タイヤ接地面については 40,000 cpm 相当の 240 kBq に絞って議論することとする。

Table 3-6 タイヤ接地面の汚染検知率

放射能[kBq]	80 (13,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	
車速[km/h]	5	5	10
正味計数率 n_{T240} [cpm]	4,041	12,124	9,556
正味計数率の標準偏差 [cpm]	889	1,613	1,326
汚染検知率	0.60 %	100 %	99 %

3.2.2 タイヤ接地面の汚染の OIL4 判定性能

タイヤ接地面汚染による警報発報確率を求めることで OIL4 判定性能を評価した。ここでは 3.2.1 と同様に、Ch2 の警報発報確率をガンマ・ポール全体の警報発報確率と同等であるものとみなした。

GM 換算計数率を求めるため、式[4]のように正味計数率に換算定数Kを乗じた。車速が 5 km/h、

換算定数Kを 1.0, 5.0, 10.0 としたときの GM 換算計数率と放射能の関係を Fig. 3-7 に示す。なお、2.1 で述べた通りこの換算定数Kはメーカー側で設定する値である。ここで、換算前の 240 kBq のときの正味計数率とその標準偏差は、3.2.1 で示した通りである。また、30,000 cpm 相当である 180 kBq の正味計数率とその標準偏差は、3.2.1 と同様の手法で求めたものである。図中のエラーバーは 2 標準偏差 (2σ) を表す。また、点線は警報の基準である警報設定値(40,000 cpm) である。

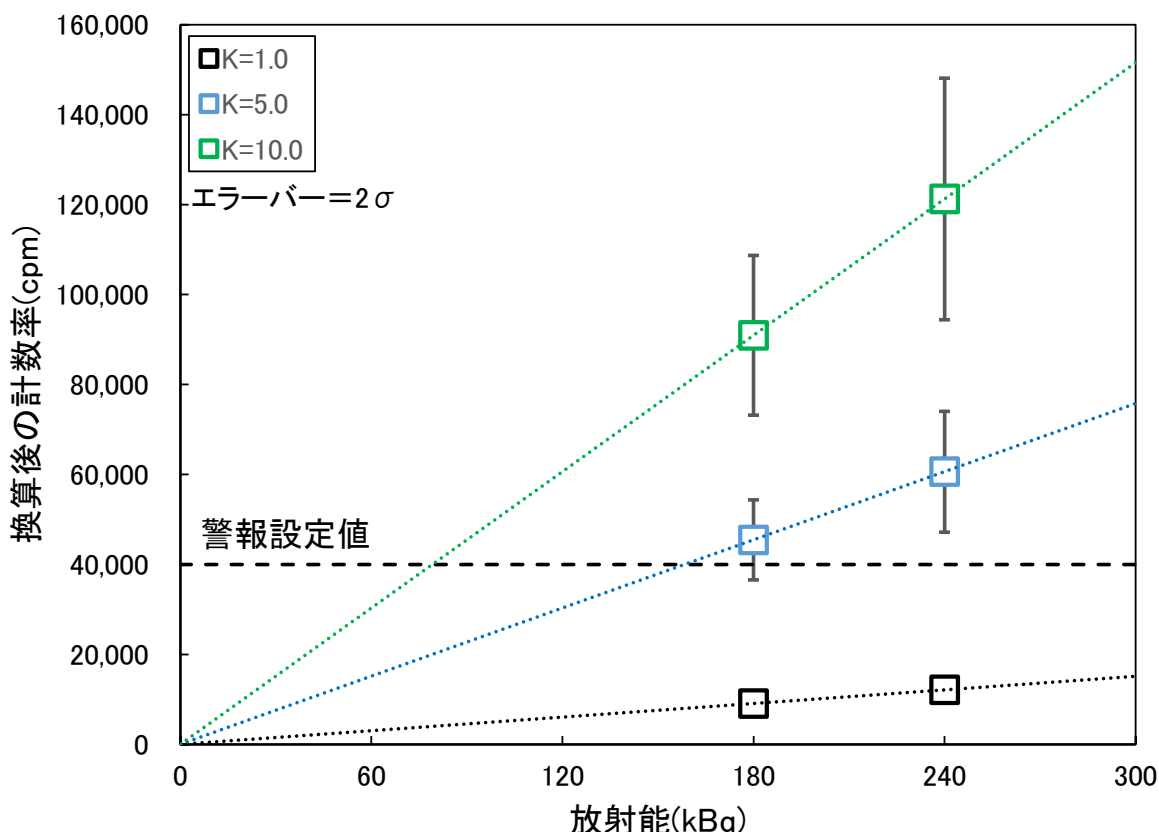


Fig. 3-7 車速 5 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの GM 換算計数率

同様に、車速 10 km/h のときの GM 換算計数率と放射能の関係を Fig. 3-8 に示す。ここで、換算前の 240 kBq のときの正味計数率とその標準偏差は、3.2.1 で示した通りである。ところで、OIL4 基準値判定にあたり、30,000 cpm 相当汚染での警報発報確率が高ければ、40,000 cpm 相当汚染の警報発報確率との差が小さくなり、OIL4 超と以下の弁別が難しくなる。つまり、30,000 cpm 相当である 180 kBq の GM 換算計数率が高くなれば、その分布が警報設定値を超えやすくなり OIL4 基準値判定は難しくなる。180 kBq の警報発報確率の評価は、車速 5 km/h の測定値で行った。この理由は保守的な評価のため、より計数率が高くなりやすい条件を選択したためである。ゆえに、車速 10 km/h のときの 180 kBq の GM 換算計数率は記載していない。

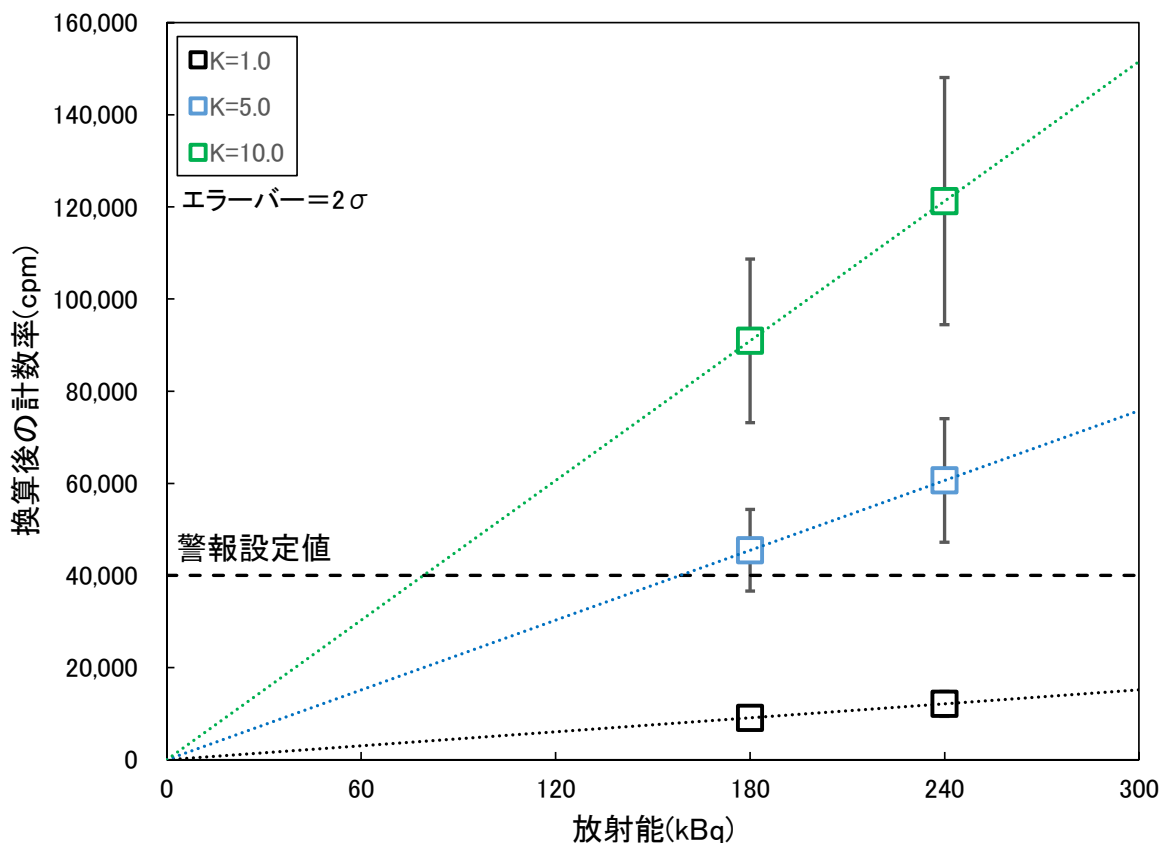


Fig. 3-8 車速 10 km/h のときのタイヤ接地面汚染からの GM 換算計数率

Fig. 3-7 及び Fig. 3-8 の通り、換算定数Kが大きいほど GM 換算計数率は大きくなり、警報設定値を超えやすくなるのが分かる。180 kBq と 240 kBq の GM 換算計数率が正規分布に従うものとし、GM 換算計数率が警報設定値 40,000 cpm を超える割合、すなわち警報発報確率を求めた。警報発報確率と換算定数Kの関係について、車速 5 km/h 及び 10 km/h を合わせたグラフを Fig. 3-9 及び Fig. 3-10 に示す。車速 5 km/h の場合、Fig. 3-9 にて、240 kBq の警報発報確率 p_{40k} が 90 %以上、警報発報確率 p_{40k} と警報発報確率 p_{30k} の差が大きくなる条件を探ると、Fig. 3-10 に示すように、換算定数Kがおおよそ 4.0 から 5.0 程度のとき、その条件を満たすことが確認できた。したがって、ガンマ・ポールの換算定数Kをメーカーがおおよそ 4.0 から 5.0 程度に調整すれば、OIL4 基準値判定は最も精度が良くなるものと推定できる。グラフで示した警報発報確率と換算定数Kの値は Table 3-7 の通りである。

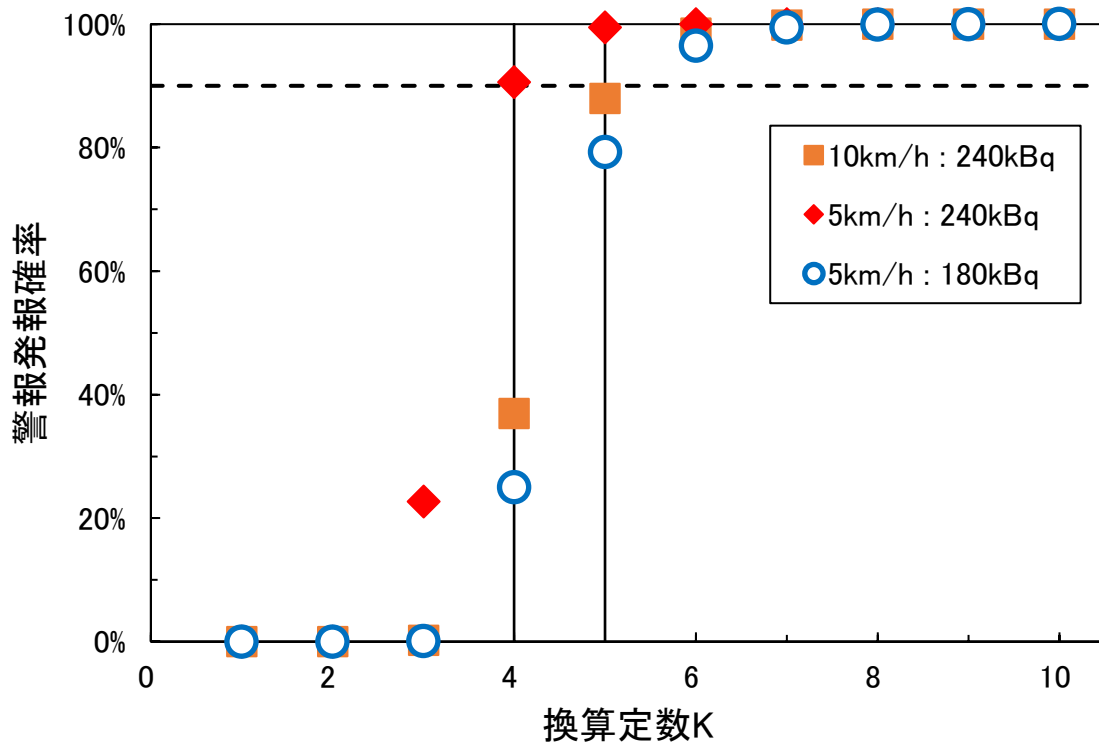


Fig. 3-9 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(K = 1~10)

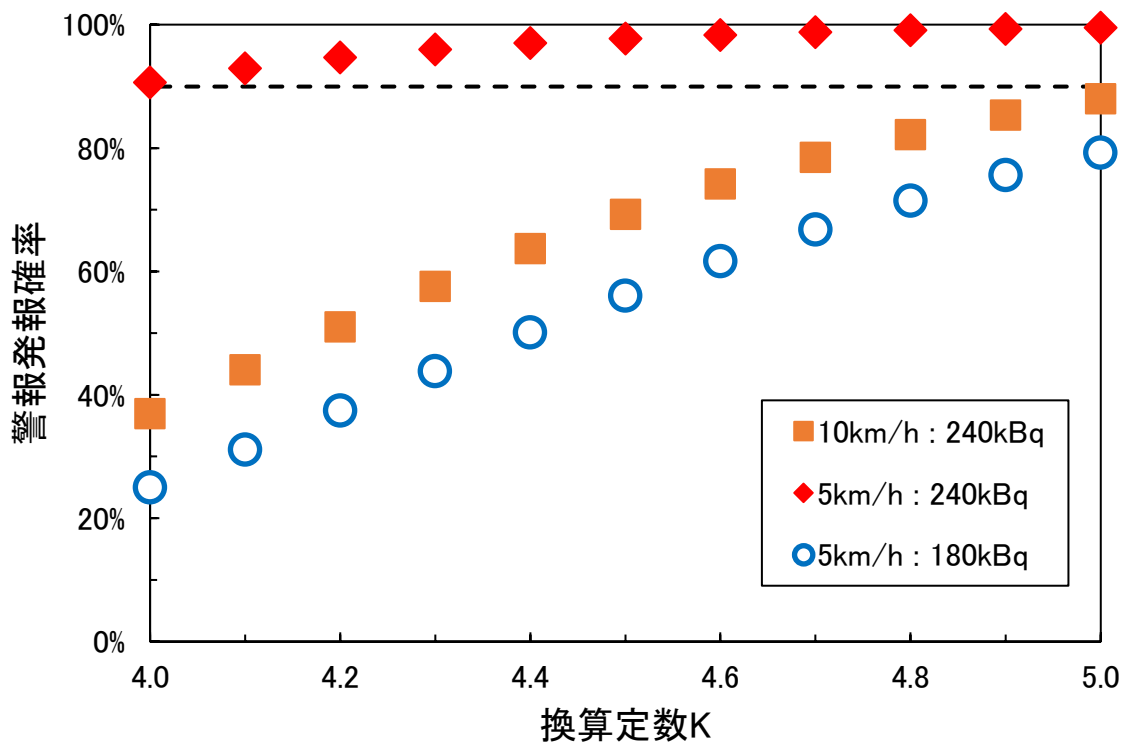


Fig. 3-10 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(K = 4~5)

Table 3-7 タイヤ接地面の警報発報確率

放射能[kBq]		警報発報確率		
		180 (30,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	
車速[km/h]		5	5	10
換算定数K	1.0	0.0 %	0.0 %	0.0 %
	2.0	0.0 %	5.24×10^{-7}	1.78×10^{-15}
	3.0	7.9×10^{-4}	23 %	0.22 %
	4.0	25 %	91 %	37 %
	4.1	31 %	93 %	44 %
	4.2	37 %	95 %	51 %
	4.3	44 %	96 %	58 %
	4.4	50 %	97 %	64 %
	4.5	56 %	98 %	69 %
	4.6	62 %	98 %	74 %
	4.7	67 %	99 %	78 %
	4.8	71 %	99 %	82 %
	4.9	76 %	99 %	85 %
	5.0	79 %	99 %	88 %
	6.0	96 %	100 %	99 %
	7.0	99 %	100 %	99.8 %
8.0	99.9 %	100 %	100 %	
9.0	100 %	100 %	100 %	
10.0	100 %	100 %	100 %	

3.2.3 ワイパー部の OIL4 相当汚染の検知性能

実験当日の放射能は 224 kBq 又は 228 kBq であったため、3.2.1 と同様に当日に得られた計数率を OIL4 基準値である 40,000 cpm 相当の 250 kBq 相当での正味計数率を推定し、評価することとした。Table 3-8 に走行試験におけるワイパー部の測定結果を示す。

Table 3-8 ワイパー部の測定結果（走行試験）

目標放射能A [kBq]	250 (40,000 cpm 相当)							
車種	セダン				バン			
車速[km/h]	5							
実験日	2020/10/16				2021/1/27			
当日の放射能A'[kBq]	228				224			
Ch	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
測定値平均 n_{WSG} [cpm]	59,264	58,712	61,408	61,420	47,836	49,928	50,484	45,204
測定値標準偏差 σ_{WSG} [cpm]	1,087	1,754	1,648	1,253	990	1,688	1,385	1,105
BG 平均 n_B [cpm]	54,077	54,048	56,054	56,488	43,757	45,140	45,907	40,906
BG 標準偏差(1秒) σ_B [cpm]	1,601	2,091	1,632	1,444	1,641	1,724	1,790	1,861
BG 標準偏差 (実運用) σ_B' [cpm]	207	270	211	186	212	223	231	240
正味計数率 (推定値) $n_{WSG} - n_B$ [cpm]	5,187	4,664	5,354	4,932	4,079	4,788	4,577	4,298
正味計数率の標準偏差 $\sqrt{\sigma_{WSG}^2 + \sigma_B'^2}$ [cpm]	1,107	1,775	1,661	1,266	1,012	1,703	1,405	1,131

250 kBq 相当の正味計数率 n_{W250} は、目標放射能A及び当日の放射能A'の比、

$$n_{W250} = (n_{WSG} - n_B) A/A' \tag{14}$$

により求めた。

ガンマ・ポールの測定値が1秒間の計数率に60を乗じ、1分間の計数率にしたものを測定値として表示する。よって、250 kBq 相当の正味計数率の標準偏差 σ_{W250} は、式[16][15]により求められる。

$$\sigma_{W250} = 60 \sqrt{\frac{(n_{W250} + n_B)}{60}} = \sqrt{60(n_{W250} + n_B)} \quad [15]$$

$$\sigma_{W250} = \sqrt{\sigma_{W250}^2 + \sigma_B^2} \quad [16]$$

ここで、

σ_{W250} : 250 kBq 相当のワイパー部汚染からの推定 GROSS 値の標準偏差[cpm]

式[14]~[16]にて求めた 250 kBq 相当のワイパー部汚染の正味計数率 n_{W250} とその標準偏差 σ_{W250} を Table 3-9 に示す。

Table 3-9 250 kBq 相当のワイパー部の正味計数率及び標準偏差

放射能[kBq]	250 (40,000 cpm 相当)							
車種	セダン				バン			
車速[km/h]	5							
Ch	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
正味計数率 n_{W250} [cpm]	5,682	5,109	5,864	5,403	4,552	5,343	5,108	4,797
正味計数率の標準偏差 σ_{W250} [cpm]	1,905	1,903	1,939	1,936	1,716	1,755	1,765	1,673

250 kBq 相当の正味計数率 n_{W250} 及び標準偏差 σ_{W250} から、汚染検知率を求めた。汚染検知の基準となる BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) は Ch 毎に異なる。汚染検知率の比較ができるよう同じ基準値、すなわち同じ BG の標準偏差 σ_B を使用した。採用した標準偏差 σ_B はタイヤ汚染同様、保守的に汚染検知しにくい状態での汚染検知率が求まるよう、Ch 毎で最も高い値を採用した。採用した標準偏差 σ_B を Table 3-10 に示す。なお、セダンとバンの試験場所は共に空間放射線量率が約 0.08 μ Sv/h であった。

Table 3-10 汚染検知率を求めるための BG 標準偏差

	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
BG 標準偏差 σ_B [cpm]	1,641	2,091	1,790	1,861
3 標準偏差 ($3\sigma_B$) [cpm]	4,923	6,273	5,370	5,583

250 kBq 相当の正味計数率の推定値 n_{W250} と汚染検知の基準となる BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) の関係を Fig. 3-11 に示す。測定値と推定値のプロット点はそれぞれ平均値を表し、エラーバーは 1 標準偏差を表す。この図の通り、正味計数率の平均値は Ch 別に見ると、3 標準偏差 ($3\sigma_B$) とほぼ等しく又は僅かに小さくなることがわかった。

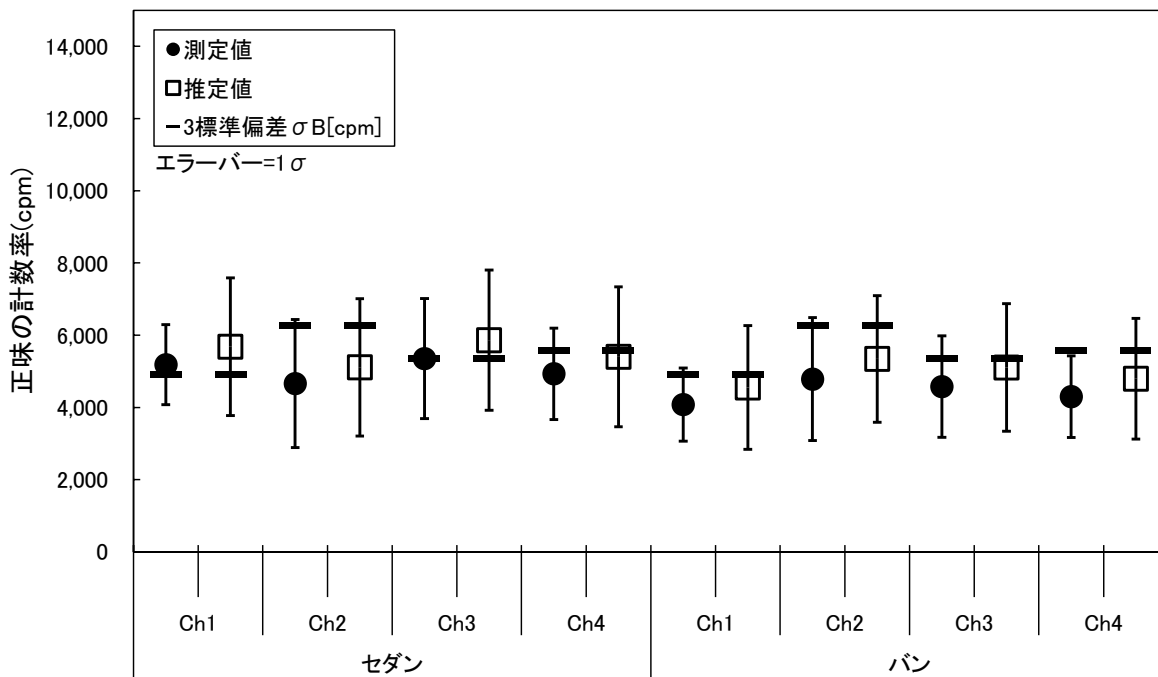


Fig. 3-11 250 kBq 相当のワイパー部汚染からの正味計数率

次に、250 kBq 相当の正味計数率 n_{W250} は正規分布に従うものとし、BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_B$) を超える割合、すなわち汚染検知率を Ch 毎に求めた。Ch 毎の汚染検知率 p_i を Table 3-11 に示す。

Table 3-11 Ch 毎の汚染検知率

放射能[kBq]	250 (40,000 cpm 相当)							
車種	セダン				バン			
車速[km/h]	5							
Ch	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
Ch 毎の汚染検知率 p_i	65 %	27 %	60 %	46 %	41 %	30 %	44 %	32 %

ガンマ・ポールの汚染検知率は、式[1]の確率 P を汚染検知率としてこの式から求めた。汚染検知率を Table 3-12 に示す。40,000 cpm に相当する 250 kBq のワイパー部汚染について、検知率は共に 9 割程度であり両者に大きな差は見られなかった。

Table 3-12 汚染検知率

放射能[kBq]	250 (40,000 cpm 相当)	
車種	セダン	バン
車速[km/h]	5	
汚染検知率P	95 %	84 %

3.2.4 タイヤ接地面とワイパー部の OIL4 相当汚染の検知性能の比較

3.2.1 及び 3.2.3 で算出したタイヤ接地面及びワイパー部の汚染検知率を Table 3-13 にまとめる。タイヤ接地面汚染に比べ、ワイパー部汚染の汚染検知率は低いことが分かった。この要因は、40,000 cpm 相当の汚染の放射能はタイヤ接地面とワイパー部でほぼ等しい値であるが、タイヤ接地面と検出器との距離がワイパー部と検出器までの距離よりも短いため、タイヤ接地面の汚染で生じた γ 線の方がより検出器に入射しやすいためであると考えられる。

Table 3-13 タイヤ接地面とワイパー部の汚染検知率

放射能[kBq]	240 (40,000 cpm 相当)	250 (40,000 cpm 相当)	
車種	セダン		バン
車速[km/h]	5		
汚染箇所	タイヤ接地面	ワイパー部	
汚染検知率	100 %	95 %	84 %
タイヤ接地面の汚染検知率に対する比	1.00	0.95	0.84

警報発報確率と換算定数Kの関係について、タイヤ接地面及びワイパー部を合わせたグラフを Fig.3-12 に、その表を Table 3-14 に示す。ここで、ワイパー部の GM 換算計数率は各 Ch にて式[4]のようにそれぞれ求めた。ワイパー部の警報発報確率は、式[1]のP及び p_i を警報発報確率と読み替え、式[1]により求めた。

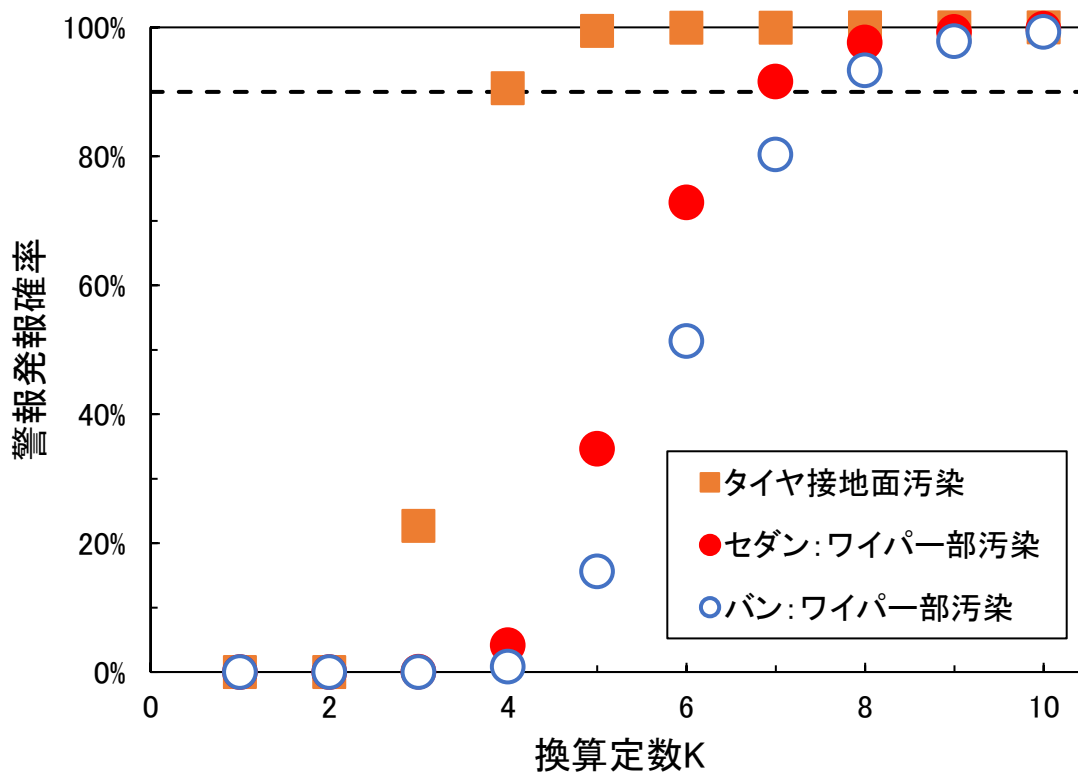


Fig.3-12 タイヤ接地面及びワイパー部汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(K = 1~10)

Table 3-14 タイヤ接地面及びワイパー部汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係

		警報発報確率			(参考)警報発報確率
		5		5	
車速[km/h]					5
車種		セダン	バン		セダン
模擬汚染位置		タイヤ接地面	ワイパー部		タイヤ接地面
放射能[kBq]		240 (40,000 cpm 相当)	250 (40,000 cpm)		180 (30,000 cpm 相当)
換算 定数	1.0	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
	2.0	5.2×10^{-7}	2.1×10^{-13}	0.0 %	0.0 %
	3.0	23 %	1.2×10^{-4}	4.5×10^{-6}	7.9×10^{-4}
	4.0	91 %	4.1 %	0.84 %	25 %
	5.0	99 %	35 %	16 %	79 %
	6.0	100 %	73 %	51 %	96 %
	7.0	100 %	92 %	80 %	99 %
	8.0	100 %	98 %	93 %	99.9 %
	9.0	100 %	99 %	98 %	100 %
	10.0	100 %	99.8 %	99 %	100 %

Table 3-14 から、換算定数をタイヤ接地面に合わせる場合、つまりタイヤ接地面の 240 kBq 相当の汚染の警報発報確率が 90 %を超え、かつ、180 kBq 相当の汚染の警報発報確率との差が大きくなる換算定数 $K=4.0\sim 5.0$ で調整した場合、セダン及びバンのワイパー部汚染 250 kBq 相当に対する警報発報確率は、どちらも 4 割程度以下であった。よって、タイヤ接地面汚染とワイパー部汚染を同じ設定で判定することは困難であることが確認できた。

反対に、ワイパー部の 40,000 cpm 相当の汚染 (250 kBq) を 90 %程度の高確率で警報発報させるには、セダンとバンにて共に換算定数を $K=7$ 程度にする必要がある。ただしこのとき、タイヤ接地面に 30,000 cpm 程度の汚染 (180 kBq) が付着していた場合であっても、99 %程度の確率で誤った警報発報が生じるものと考えられる (Table 3-14 より)。よって、車両のタイヤ接地面が汚染されていないものと明確である場合を除き、ワイパー部に付着した OIL4 基準値相当の汚染を高い警報発報確率で把握できる換算定数に調整すると、OIL4 基準値未満であるタイヤ接地面の汚染でも誤って警報発報する確率が高くなると考えられ、確認検査の混雑化を招く恐れがある。

3.3 高 BG 環境試験

ここでは、静止試験及び走行試験を踏まえ、高 BG 環境試験によって得られた結果とその考察について述べる。高 BG 試験で得られたデータは解析で使用しなかったものも含め、付録 C にて示す。

3.3.1 高 BG 環境下でのタイヤ接地面の OIL4 相当汚染の検知性能

検出器の検出限界値は BG の空間放射線量率によるため、Table 3-4 で示した自然 BG 環境で実施した走行試験の結果及び高 BG 環境で BG を測定した結果を用いて、高 BG 環境でのタイヤ接地面の汚染検知性能を推定し、評価することとした。Table 3-15 に高 BG 環境での BG 測定結果を示す。

Table 3-15 高 BG 環境での BG 測定結果

車種	セダン				
実施日	2020/10/13				
検出器間距離[m]	2.8 (検出器から車体側面まで 0.5 m)				
車両前輪位置[cm]	0				
空間放射線量率[$\mu\text{Sv/h}$] (自然+ ^{137}Cs)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
BG 平均 n_{HB} [cpm]	97,152	208,344	312,024	396,680	490,704
BG 標準偏差(1 秒) σ_{HB} [cpm]	3,367	3,445	4,461	5,233	9,208
BG 標準偏差(実運用) σ_{HB}' [cpm]	435	445	576	676	1,189

汚染検知率を求めるため、Table 3-6 で示した正味計数率 n_{T240} 、Table 3-15 で示した模擬高 BG 環境下での BG 平均 n_{HB} 及び BG 標準偏差 σ_{HB}' から、以下の式[17]、[18]より、高 BG 環境での正味計数率の標準偏差 σ_{T240} を算出した。

$$\sigma_{\text{TSG240}} = 60 \sqrt{\frac{(n_{\text{T240}} + n_{\text{HB}})}{60}} = \sqrt{60(n_{\text{T240}} + n_{\text{HB}})} \quad [17]$$

$$\sigma_{\text{T240}} = \sqrt{\sigma_{\text{TSG240}}^2 + \sigma_{\text{HB}}'^2} \quad [18]$$

ここで、

σ_{TSG240} : 240 kBq 相当のタイヤ接地面汚染からの推定 GROSS 値の標準偏差[cpm]

算出した高 BG 環境での正味計数率の標準偏差 σ_{T240} を Table 3-16 に示す。また、240 kBq 相当汚染の正味計数率 n_{T240} を Fig. 3-13 に示す。ここで、240 kBq 相当汚染の正味計数率 n_{T240} のエラーバーは 2 標準偏差 σ_{T240} を示す。240 kBq 相当汚染の正味計数率 n_{T240} が正規分布に従うものとし、その正味計数率の分布が BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_{\text{HB}}$) (検出限界値) を超える割合、すなわち、タイヤ接地面の 240 kBq 相当汚染の汚染検知率を空間放射線量率 (周辺線量当量率) の違いによりそれぞれ求めた。この結果を Table 3-17 に示す。Fig. 3-13 の通り、BG の空間放射線量率が大きくなるほど正味計数率の標準偏差が大きくなるが、検出限界値はさらに大きくなるため、汚染の検知が難しくなることが示された (Table 3-17)。ここでのエラーバーは 1 標準偏差を表す。

Table 3-16 240 kBq 相当の正味計数率と高 BG 環境での標準偏差

放射能[kBq]	240(40,000 cpm 相当)									
車種	セダン									
車速[km/h]	5					10				
検出器間距離[m]	3.5									
空間放射線量率 (自然+ ¹³⁷ Cs) [μSv/h]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
相当正味計数率 n_{T240} [cpm]	12,124					9,556				
高 BG 環境での 正味計数率の標準偏 差 σ_{T240} [cpm]	2,597	3,664	4,448	4,998	5,620	2,567	3,643	4,430	4,983	5,606

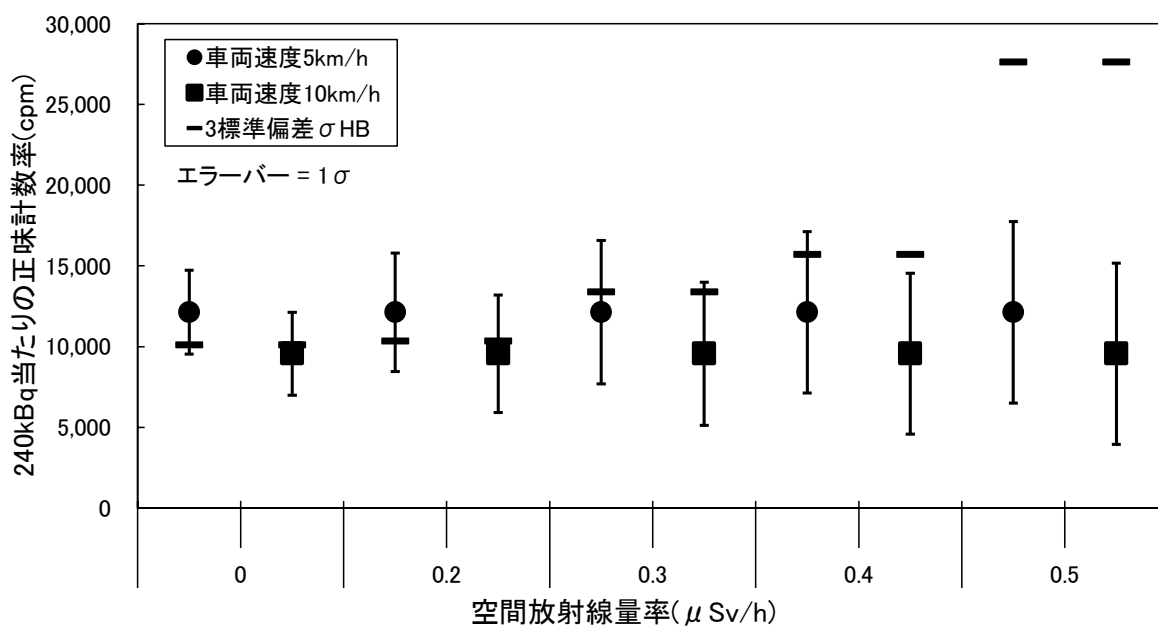


Fig. 3-13 高 BG 環境でのタイヤ接地面からの正味計数率

Table 3-17 高 BG 環境でのタイヤ接地面の汚染検知率

	放射能[kBq]	240(40,000 cpm 相当)				
	空間放射線量率[μSv] (自然+ ¹³⁷ Cs)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
車速[km/h]	5	78 %	69 %	39 %	24 %	0.29 %
	10	42 %	42 %	19 %	11 %	6.3×10 ⁻⁴

3.3.2 高 BG 環境下でのタイヤ接地面の汚染の OIL4 判定性能

ここでは、高 BG 環境でのタイヤ接地面の汚染について、3.2 で示した OIL4 基準値判定性能を評価することとした。BG の空間放射線量率を変化させた場合に Ch2 検出器の警報発報確率と換算定数Kの関係について、Fig. 3-14～Fig. 3-18 のグラフに表した。30,000 cpm 相当である 180 kBq の正味計数率とその標準偏差についても 3.3.1 と同様の手法で求め、さらに換算定数Kを用いて式[4]のように GM 換算計数率を求めた。換算定数Kの違いによる警報発報確率は、空間放射線量率毎に Table 3-18～Table 3-22 に示した。

これらの結果から、空間放射線量率が高くなるほど 30,000 cpm 相当の汚染と 40,000 cpm 相当の汚染の警報発報確率の差が小さくなっていく傾向があることが示された。すなわち、高い BG であるほど OIL4 基準値判定性能が劣っていくことが分かった。

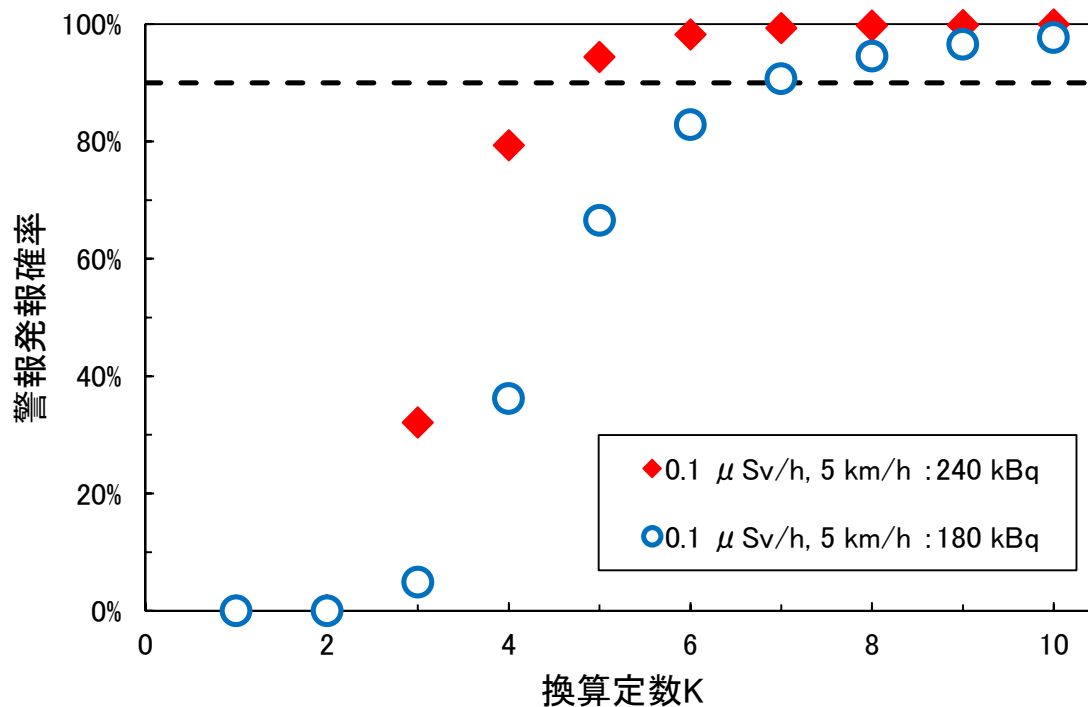


Fig. 3-14 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.1 μSv/h)

Table 3-18 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.1 μSv/h)

放射能[kBq]	180 (30,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	換算定数K
車速[km/h]	5		
警報発報確率	0.0 %	0.0 %	1.0
	1.0×10^{-5}	0.12 %	2.0
	4.9 %	32 %	3.0
	36 %	79 %	4.0
	67 %	94 %	5.0
	83 %	98 %	6.0
	91 %	99.3 %	7.0
	94 %	99.7 %	8.0
	97 %	99.8 %	9.0
	98 %	99.9 %	10.0

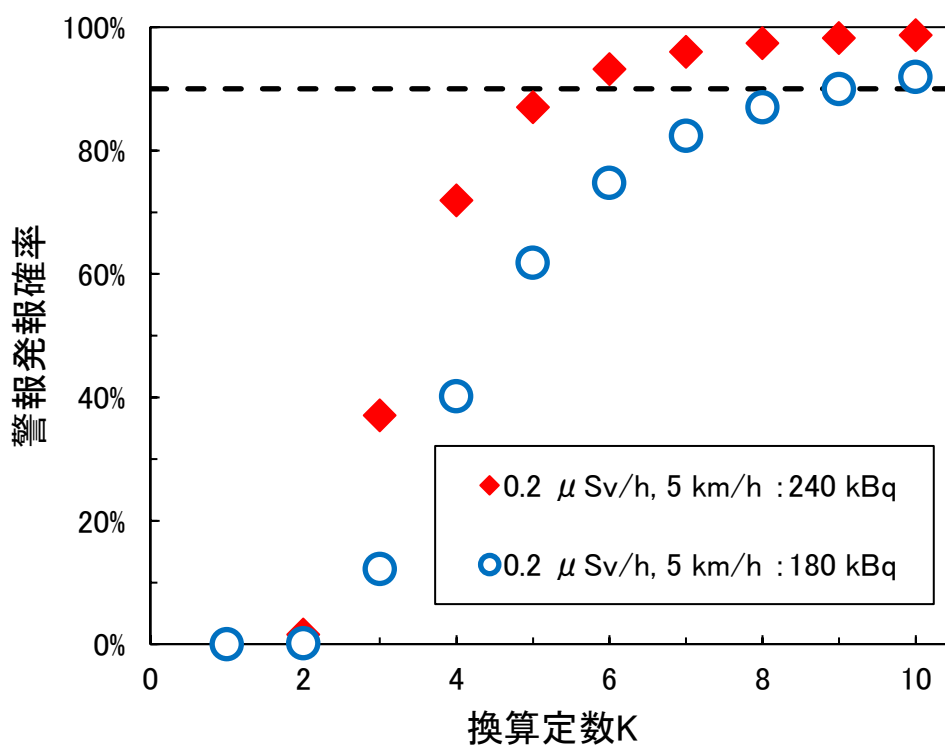


Fig. 3-15 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.2 μSv/h)

Table 3-19 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.2 μSv/h)

放射能[kBq]	180 (30,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	換算定数K
車速[km/h]	5		
警報発報確率	0.0 %	1.4×10^{-14}	1.0
	0.14 %	1.6 %	2.0
	12 %	37 %	3.0
	40 %	72 %	4.0
	62 %	87 %	5.0
	75 %	93 %	6.0
	82 %	96 %	7.0
	87 %	97 %	8.0
	90 %	98 %	9.0
	92 %	99 %	10.0

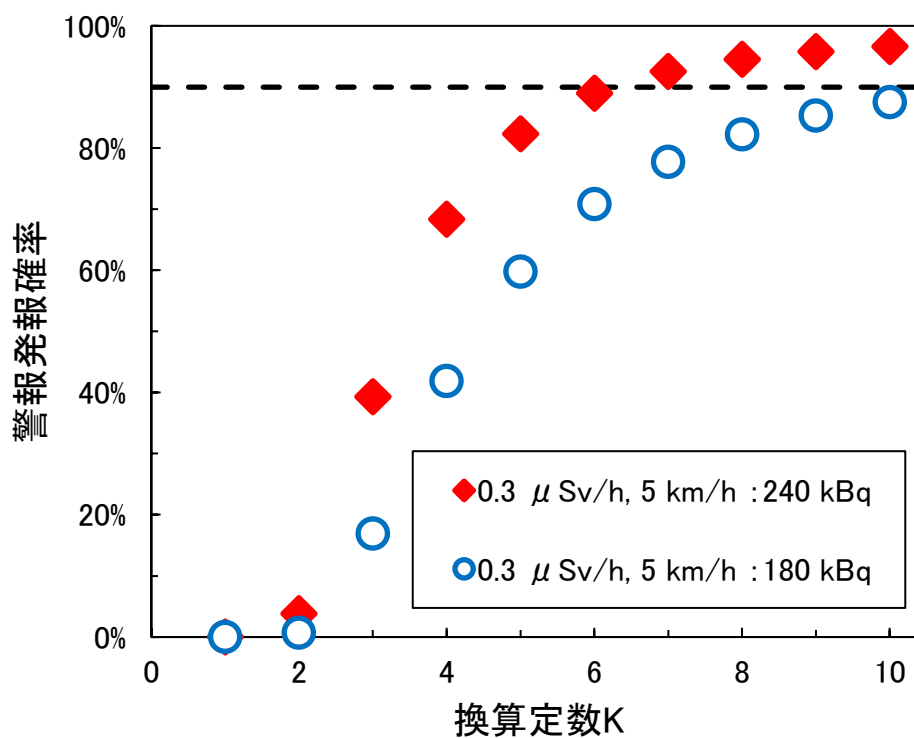


Fig. 3-16 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.3 μSv/h)

Table 3-20 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.3 μSv/h)

放射能[kBq]	180 (30,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	換算定数K
車速[km/h]	5		
	1.5×10^{-12}	1.8×10^{-10}	1.0
	0.69 %	3.8 %	2.0
	17 %	39 %	3.0
	42 %	68 %	4.0
	60 %	82 %	5.0
警報発報確率	71 %	89 %	6.0
	78 %	93 %	7.0
	82 %	95 %	8.0
	85 %	96 %	9.0
	88 %	97 %	10

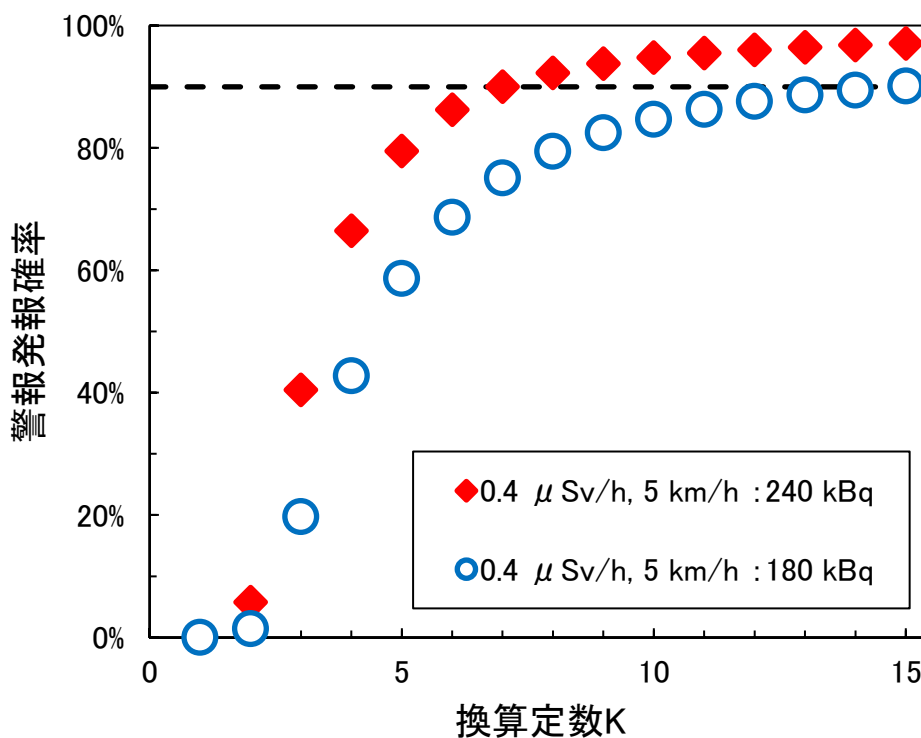


Fig. 3-17 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.4 μSv/h)

Table 3-21 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.4 μSv/h)

放射能[kBq]	180 (30,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	換算定数K
車速[km/h]	5		
	2.7×10^{-10}	1.2×10^{-8}	1.0
	1.4 %	5.8 %	2.0
	20 %	40 %	3.0
	43 %	66 %	4.0
	59 %	80 %	5.0
	69 %	86 %	6.0
警報発報確率	75 %	90 %	7.0
	79 %	92 %	8.0
	82 %	94 %	9.0
	85 %	95 %	10
	86 %	96 %	11
	89 %	96 %	13
	90 %	97 %	15

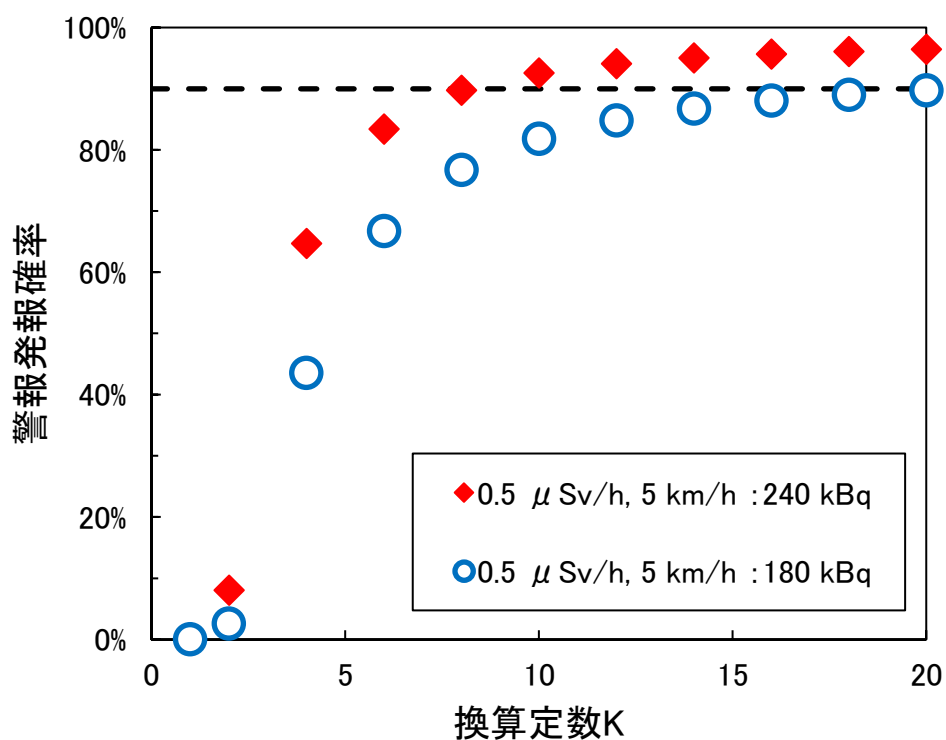


Fig. 3-18 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.5 μSv/h)

Table 3-22 タイヤ接地面汚染における換算定数Kと警報発報確率の関係(BG=0.5 μSv/h)

放射能[kBq]	180 (30,000 cpm 相当)	240 (40,000 cpm 相当)	換算定数K
車速[km/h]	5		
	1.7×10^{-8}	3.5×10^{-7}	1.0
	2.6 %	8.1 %	2.0
	44 %	65 %	4.0
	67 %	83 %	6.0
	77 %	90 %	8.0
警報発報確率	82 %	93 %	10
	85 %	94 %	12
	87 %	95 %	14
	88 %	96 %	16
	89 %	96 %	18
	90 %	96 %	20

3.3.3 高 BG 環境下でのワイパー部の OIL4 相当汚染の検知性能

測定器としての汚染検知率は式[1]の通り 4 検出器の汚染検知率から評価できる。しかし、今回の調査では 2.7 で述べた通り、高 BG 環境の模擬は片側下段の検出器のみ (Ch2 のみ) を対象に行ったため、ここでは、Ch2 検出器のみの汚染検知率を参考として示す。

Ch2 の 250 kBq 相当の正味計数率は、Table 3-9 に示したものをを用い、高 BG 環境での Ch2 の BG の測定値及び標準偏差は、Table 3-15 に示したものをを用いた。これらを基に、ワイパー部汚染の正味計数率の標準偏差を式[17][18]から算出した。250 kBq 相当のワイパー部汚染の正味計数率 n_{W250} とその高 BG 環境における標準偏差 σ_{W250} を Table 3-23 に示す。また、Fig. 3-19 に 250 kBq 相当のワイパー部汚染の正味計数率と検出下限値である BG の 3 標準偏差 ($3\sigma_{HB}$) を示す。

Table 3-23 250 kBq 相当のワイパー部汚染の正味計数率と高 BG 環境における標準偏差

放射能[kBq]	250 (40,000 cpm 相当)				
車種	セダン				
車速[km/h]	5				
空間放射線量率[μ Sv/h] (自然+ ¹³⁷ Cs)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
正味計数率 n_{W250} [cpm]	5,109				
正味計数率の高 BG 環境における 標準偏差 σ_{W250} [cpm]	2,515	3,606	4,400	4,956	5,582

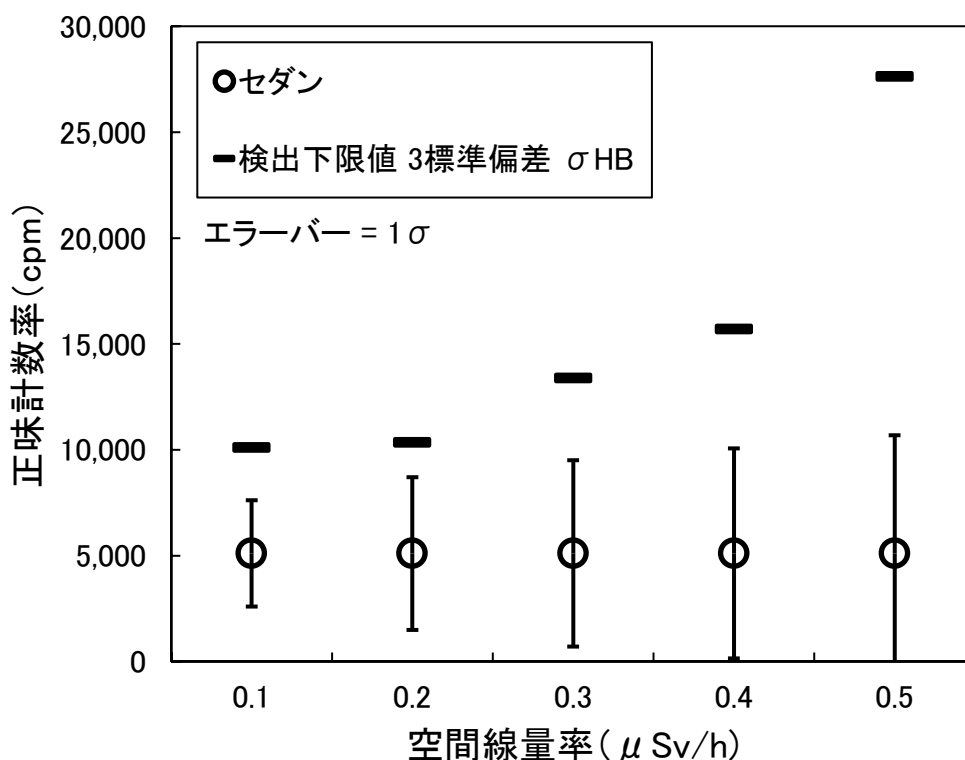


Fig. 3-19 高 BG 環境における 250kBq 相当のワイパー部汚染の正味計数率

250 kBq 相当のワイパー汚染の正味計数率が正規分布に従うものとし、高 BG 環境下で 250 kBq 相当のワイパー汚染を Ch2 検出器で測定する際の汚染検知率を求めた。この汚染検知率と自然 BG 環境下での汚染検知率 (Table 3-11 より) との比を Table 3-24 に示す。

Table 3-24 の通り、空間放射線量率が大きくなるほど Ch2 検出器の汚染検知率が概ね小さくなることが示された。空間放射線量率 0.1 μSv/h のときの汚染検知率よりも 0.2 μSv/h のときの汚染検知率の方が大きくなっているが、この要因は、測定したふたつの BG の標準偏差 σ_{HB} の差が小さかったためであり、測定値の統計誤差によるものと思われる。

Table 3-24 高 BG 環境での汚染検知率及び自然 BG 環境下での汚染検知率との比

放射能[kBq]	250 (40,000cpm 相当)				
車種	セダン				
車速[km/h]	5				
空間放射線量率(μSv/h) (自然+ ¹³⁷ Cs)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
高 BG 環境での汚染検知率	2.4 %	7.4 %	3.0 %	1.6 %	2.7×10 ⁻⁵
自然 BG 環境での汚染検知率	27 %				
汚染検知率の比 (高 BG/自然 BG)	0.087	0.27	0.11	0.060	1.0×10 ⁻⁴

3.4 結論

車両用ゲート型モニタ活用のための重要な2点の観点の結果をまとめると次の通りとなる。

(1) OIL4 相当の汚染が BG に比べて有意に検知可能であること

ガンマ・ポールの汚染検知性能について Table 3-25 にまとめる。

Table 3-25 汚染検知性能のまとめ

BG($\mu\text{Sv/h}$)	汚染箇所	車種	汚染量(cpm 相当)	車速 (km/h)	汚染検知率
0.08(自然)	タイヤ接地面	セダン	40,000	5	100 %
				10	99 %
		13,000	5	0.60 %	
	ワイパー部	セダン		40,000	95%
		バン			84 %
	78 %				
0.1(自然+ ^{137}Cs)	タイヤ接地面	セダン	40,000	10	42 %
0.2(自然+ ^{137}Cs)				5	69 %
				10	42 %
0.3(自然+ ^{137}Cs)				5	39 %
				10	19 %
0.4(自然+ ^{137}Cs)				5	24 %
				10	11 %
0.5(自然+ ^{137}Cs)				5	0.29 %
				10	6.3×10^{-4}

(2) OIL4 の基準値超の汚染と未満の汚染が判定可能であること

ガンマ・ポールの OIL4 基準値判定の性能について Table 3-26 にまとめる。自然 BG 環境 (0.08 $\mu\text{Sv/h}$) 下では、換算定数を 4.0 から 5.0 程度に調整することで、タイヤ接地面汚染の OIL4 基準値判定が他の換算定数値に比べて優れた判定性能を得られることが期待できることがわかった。ただしこのとき、ワイパー部に付着した OIL4 相当汚染の警報発報確率は 4 割程度以下となることが示された。高 BG 環境での OIL4 基準値判定の性能評価は、そもそも汚染検知率が低いため実施していない。なお、既に述べたように換算定数はメーカーが調整可能な設定値である。

Table 3-26 OIL4 基準値判定性能のまとめ

汚染箇所	車種	汚染量(cpm 相当)	車速 (km/h)	換算定数K	警報発報確率
タイヤ接地面	セダン	30,000	5	4.0	25 %
				5.0	79 %
		40,000		4.0	91 %
				5.0	99 %
			10	4.0	37 %
				5.0	88 %
ワイパー部	セダン	40,000	5	4.0	4.1 %
	バン			5.0	35 %
				4.0	0.84 %
				5.0	16 %

今回対象とした車両用ゲート型モニタ（ガンマ・ポール）では避難退域時検査の指定箇所検査において、タイヤ接地面汚染及びワイパー部汚染の検知には期待できるものの、タイヤ接地面汚染及びワイパー部汚染の OIL4 基準値判定を同時に行うことは難しいことがわかった。

4. まとめ

避難退域時検査の指定箇所検査での車両用ゲート型モニタ活用に向け、指定箇所であるタイヤとワイパー部に付着した汚染について、車両用ゲート型モニタが持つ OIL4 判定のための性能を車両の静止試験、走行試験及び高 BG 環境試験によって調査した。本試験では、車両用ゲート型モニタである千代田テクノル社製ガンマ・ポールを対象とし、タイヤの測定ではセダン、ワイパー部の測定ではセダン及びバンを使用した。また、高 BG 環境試験ではセダンを対象とした。高 BG 環境試験以外では、空間放射線量率（周辺線量当量率）が約 0.08 $\mu\text{Sv/h}$ の環境下で測定を実施した。これらの試験結果については、Table 3-25、3-26 に整理した通りである。

静止試験の結果、タイヤ側面線源の測定結果からタイヤ接地面汚染の計数率を推定するための補正係数を算出し、車速 5 km/h のとき 0.64、車速 10 km/h のときは 0.66 となり、補正係数は車速に依存しないことがわかった。これにより、前輪車軸の位置が原点（0 cm）から離れるほど、車両通過中に取得する最大の計数率（1 秒分）への影響は小さくなることが確認できた。タイヤ側面に線源を取り付けたときに得られる計数率にこの補正係数を乗ずることで、タイヤ接地面汚染の計数率を推定することができる。

走行試験の結果、タイヤ接地面の汚染検知率については、タイヤ接地面に OIL4 初期設定値である 40,000 cpm 相当の汚染が付着しているとき、車速 5 km/h であれば 100 %、車速 10 km/h であれば 99 %の確率で汚染検知が可能であると推定した。しかし、OIL4 の 1 か月後の値である 13,000 cpm 相当の汚染では車速 5 km/h のときの汚染検知率が 0.60 %であり、13,000 cpm 基準の場合の使用は難しいことが示された。さらに、タイヤ接地面汚染の OIL4 基準値判定を行うには、メーカーが設定するガンマ・ポール機器内の換算定数を 4.0 から 5.0 に調整することにより、車速 5 km/h で通過すると 40,000 cpm 相当汚染では約 90 %以上の確率で警報発報し、30,000 cpm 相当汚染での警報発報確率が 3~8 割程度に抑えられることがわかった。すなわち、タイヤ接地面汚染の OIL4 基準値を判定するには換算定数を 4.0 から 5.0 の間で調整することが適当と考えられる。また、ワイパー部の汚染検知率については、40,000 cpm 相当汚染がワイパー部に均等に付着しているとき、車速 5 km/h で通過するとセダンでは 95%、バンでは 84 %の確率で汚染検知が可能であると推定した。ただし、同じ放射能の汚染を測定したときの汚染検知性能はタイヤ接地面汚染がワイパー部汚染よりも高いため、OIL4 基準値判定はタイヤ接地面とワイパー部を同時に判定することは困難であることが示された。これは、換算定数をタイヤ接地面に合わせ 4.0 から 5.0 とした場合、ワイパー部汚染による警報発報確率がタイヤ接地面汚染での 90%以上と大きく異なり 4 割程度以下となるためである。反対に、ワイパー部汚染を高い警報発報確率で把握するために換算定数をより大きな値に設定すると、OIL4 基準値未満のタイヤ接地面汚染にて誤った警報発報が増え、確認検査の混雑化を招く恐れがあると考えられる。

高 BG 環境試験の結果、タイヤ接地面汚染は空間放射線量率が高くなる程、汚染検知率が下がり、汚染検知が難しくなることを確認できた。一例として、車速 5 km/h のとき、空間放射線量率 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ では汚染検知率が 78 %であるが、0.5 $\mu\text{Sv/h}$ のときでは 0.29 %にまで下がることわかった。また、タイヤ接地面汚染の OIL4 基準値判定は、空間放射線量率が高くなるほど

警報発報確率を上げるためには警報設定値をより大きくする必要が生じ、さらに 40,000 cpm 相当汚染の警報発報確率と 30,000 cpm 相当汚染の警報発報確率との差が小さくなる傾向が生じることがわかった。ワイパー部汚染も同様に、空間放射線量率が高くなる程、汚染検知率が下がることを確認した。一例として、車速 5 km/h のとき、空間放射線量率 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ では汚染検知率が 2.4 %であるが、0.5 $\mu\text{Sv/h}$ のときでは 2.7×10^{-5} にまで下がることわかった。

今後の車両用ゲート型モニタの改良及び避難退域時検査での運用面の改善を図り、タイヤ接地面とワイパー部の汚染の OIL4 基準値の同時判定が可能となれば、避難退域時検査の迅速化が大いに期待できるであろう。さらに、後輪タイヤや車体のその他の箇所に付着した汚染影響も考慮した機器が開発され、より信頼性の高い車両検査が実現されることに期待したい。

謝辞

本試験で使用したガンマ・ポールは、株式会社千代田テクノルが開発、販売しているものです。試験の実施にあたり、株式会社千代田テクノル及び公益財団法人放射線計測協会、並びに日本原子力研究開発機構内から、原子力科学研究所 放射線管理部 高橋聖氏、安全研究センター リスク評価・防災研究グループ 石崎梓氏、原子力緊急時支援・研修センター 原子力防災支援グループ等からご協力及びご助言等をいただきました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針 (平成 24 年 10 月 31 日制定) (令和 3 年 7 月 21 日一部改正), <https://www.nsr.go.jp/data/000359967.pdf> (accessed 2021.10.04) .
- 2) 原子力規制庁放射線防護企画課, 原子力災害時における避難退域時検査及び簡易除染マニュアル (平成 29 年 1 月 30 日修正), <https://www.nsr.go.jp/data/000119567.pdf> (accessed 2021.10.04) .
- 3) 千代田テクノル, 緊急時可搬型車両用ゲート型モニタ,
<https://www.c-technol.co.jp/product/gammapole/> (accessed 2022.07.04) .
- 4) 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 11 版 (2011) .
- 5) 上本道久, 検出限界と定量下限の考え方, ぶんせき, 2010, 5, pp.216-221 (2010) .

付録 A 静止試験の各測定データ

Table A-1 静止試験の測定条件

No.	模擬汚染線源	車種	線源位置	ポール間距離	ポール段数	備考
1	239 kBq	セダン	タイヤ接地面	3.5 m	1 段(2Ch)	
2	239 kBq	セダン	タイヤ側面	3.5 m	1 段(2Ch)	
3	228 kBq	セダン	タイヤ側面	0.5 m [*]	1 段(2Ch)	本文取扱い無し
4	228 kBq	セダン	タイヤ側面	1.0 m [*]	1 段(2Ch)	本文取扱い無し
5	228 kBq	セダン	タイヤ側面	1.5 m [*]	1 段(2Ch)	本文取扱い無し
6	239 kBq	セダン	ワイパー均等	3.5 m	1 段(2Ch)	本文取扱い無し
7	228 kBq	セダン	ワイパー均等	0.5 m [*]	2 段(4Ch)	本文取扱い無し

※ ポール・車両側面間距離

以下に、Table A-1 に整理した各条件での測定データを示す。なお、各グラフ中に示す実線のエラーバーは標準誤差を表し、点線のエラーバーは標準偏差を表す。

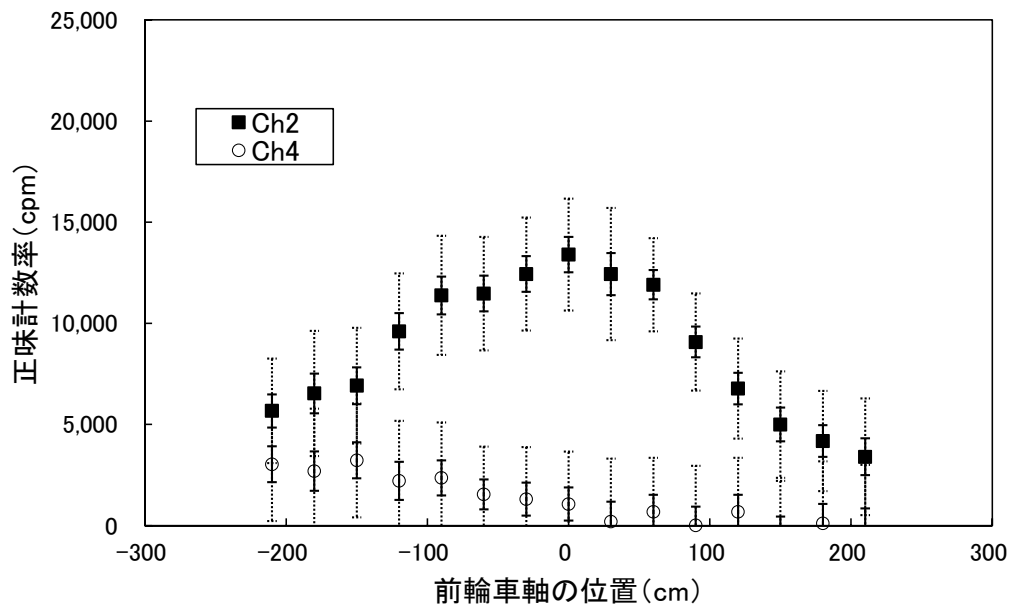


Fig.A-1 静止試験の測定データ(No.1)

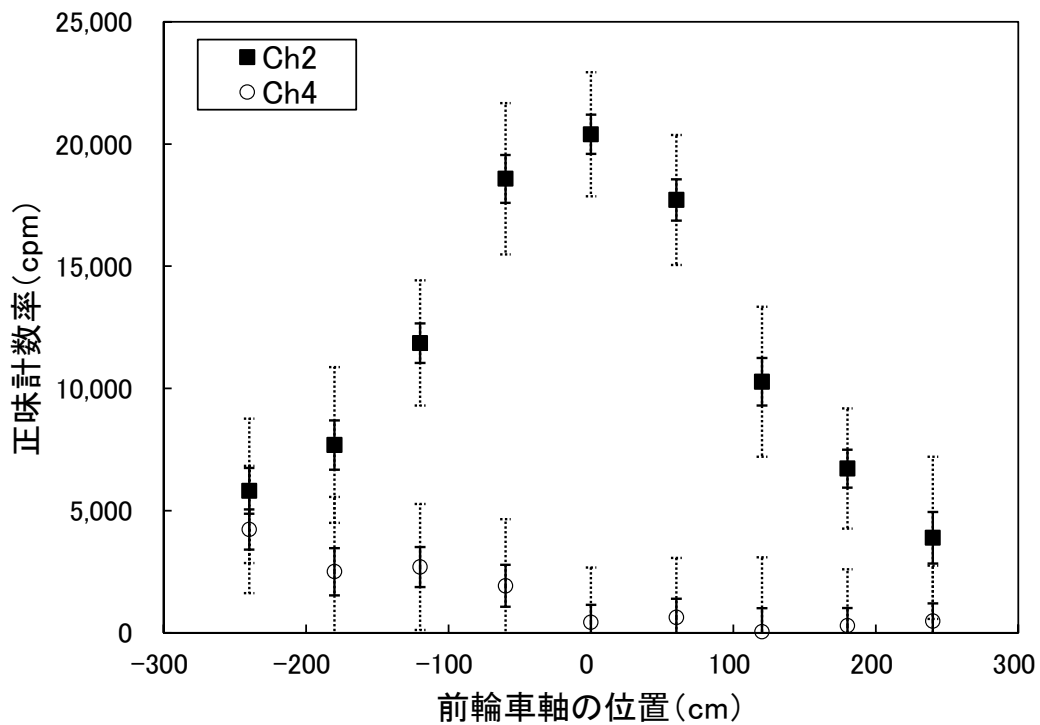


Fig.A-2 静止試験の測定データ(No.2)

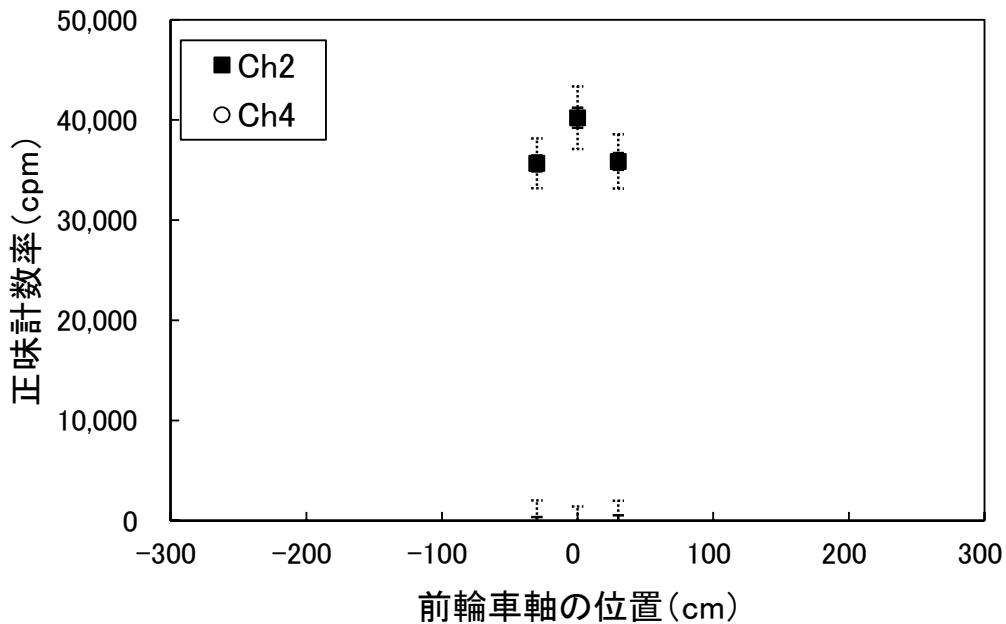


Fig.A-3 静止試験の測定データ(No.3)

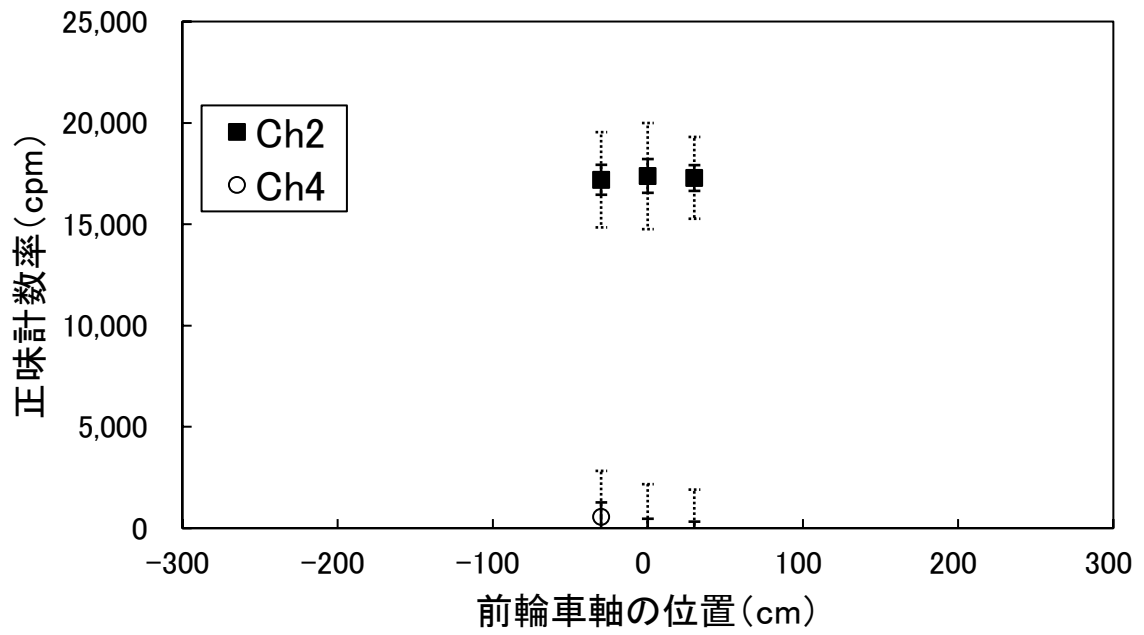


Fig.A-4 静止試験の測定データ(No.4)

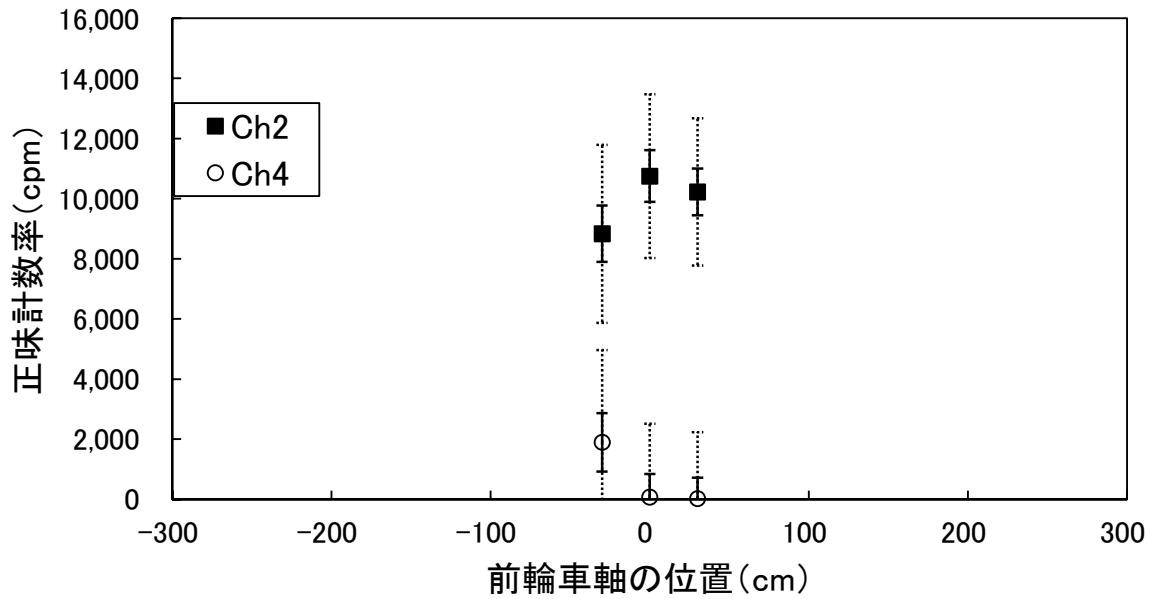


Fig.A-5 静止試験の測定データ(No.5)

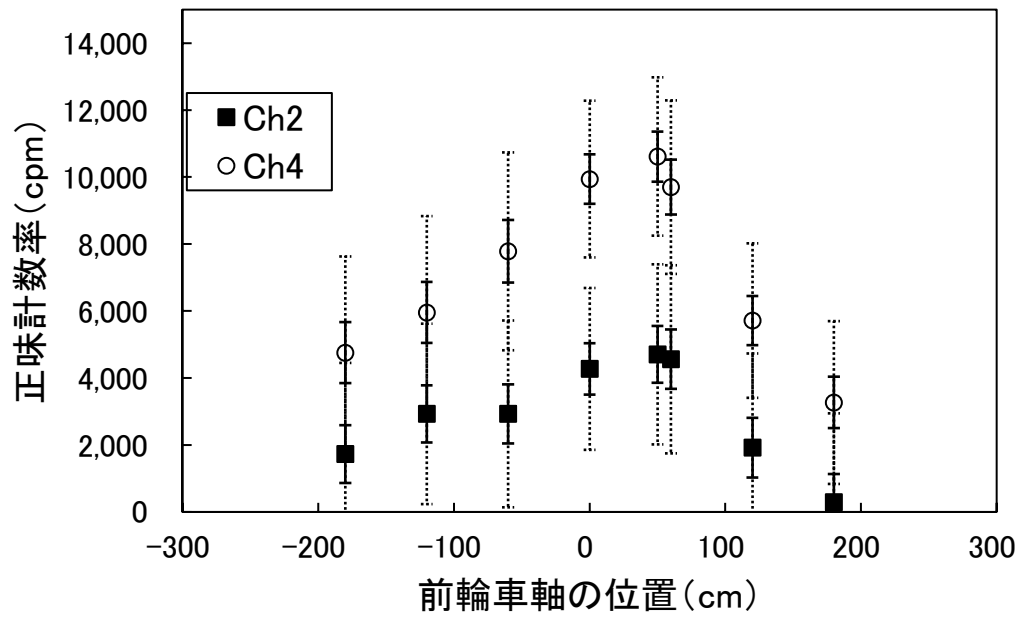


Fig.A-6 静止試験の測定データ(No.6)

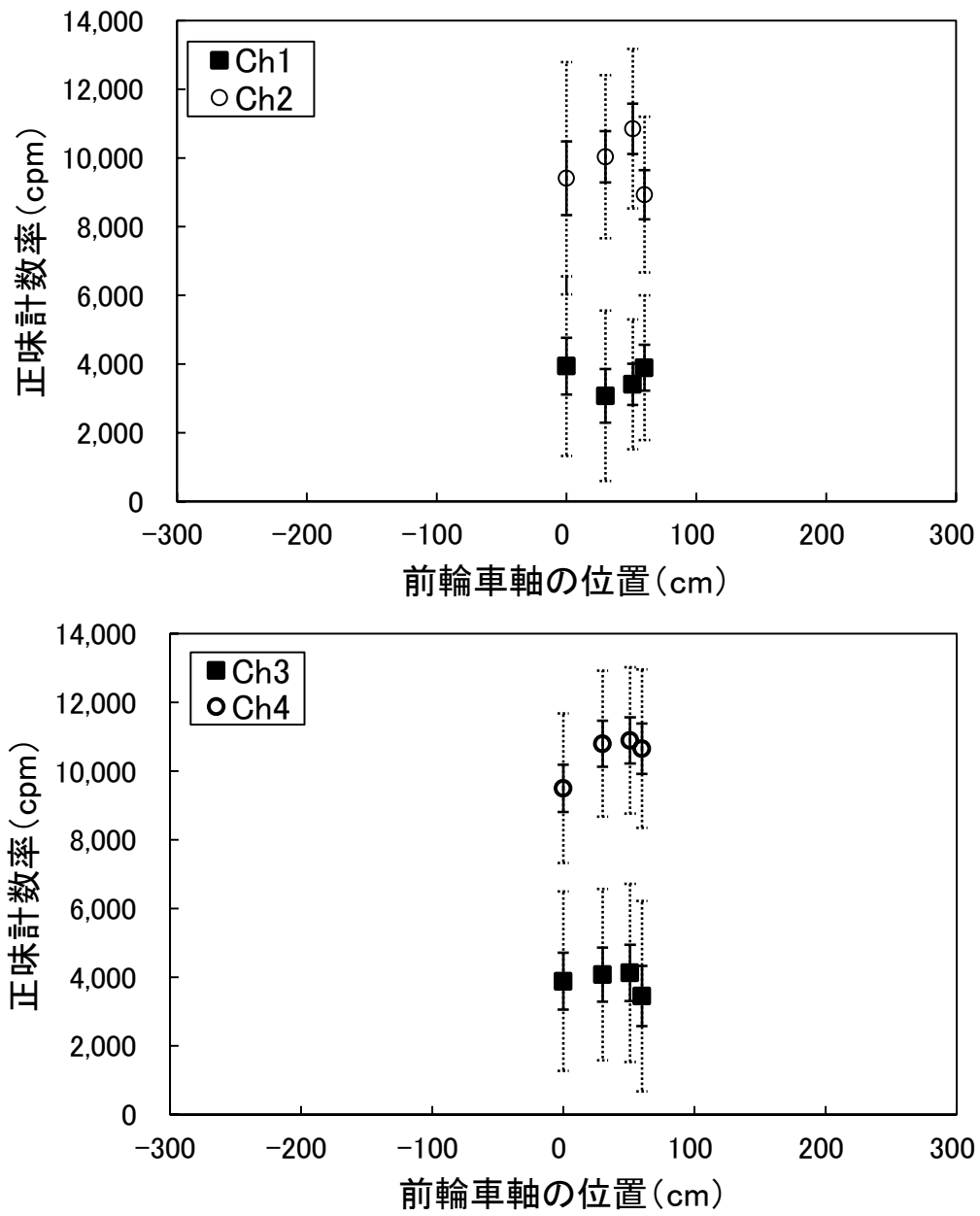


Fig.A-7 静止試験の測定データ(No.7)

付録 B 走行試験の各測定データ

Table B-1 走行試験の測定条件

No.	車速	線源位置	模擬汚染線源	車種	ポール間距離	ポール段数
1	5 km/h	タイヤ側面	76 kBq	セダン	3.5 m	2 段(4Ch)
2	5 km/h	タイヤ側面	228 kBq	セダン	3.5 m	1 段(2Ch)
3	5 km/h	ワイパー均等	76 kBq	セダン	3.5 m	2 段(4Ch)
4	5 km/h	ワイパー均等	228 kBq	セダン	3.5 m	2 段(4Ch)
5	5 km/h	ワイパー均等	224 kBq	バン	3.5 m	2 段(4Ch)
6	10 km/h	タイヤ側面	228 kBq	セダン	3.5 m	2 段(4Ch)
7	10 km/h	ワイパー均等	228 kBq	セダン	3.5 m	2 段(4Ch)
8	10 km/h	ワイパー均等	224 kBq	バン	3.5 m	2 段(4Ch)

以下に、Table B-1 に整理した各条件での測定データを示す。なお、各グラフ中に示すエラーバーは標準偏差を表す。

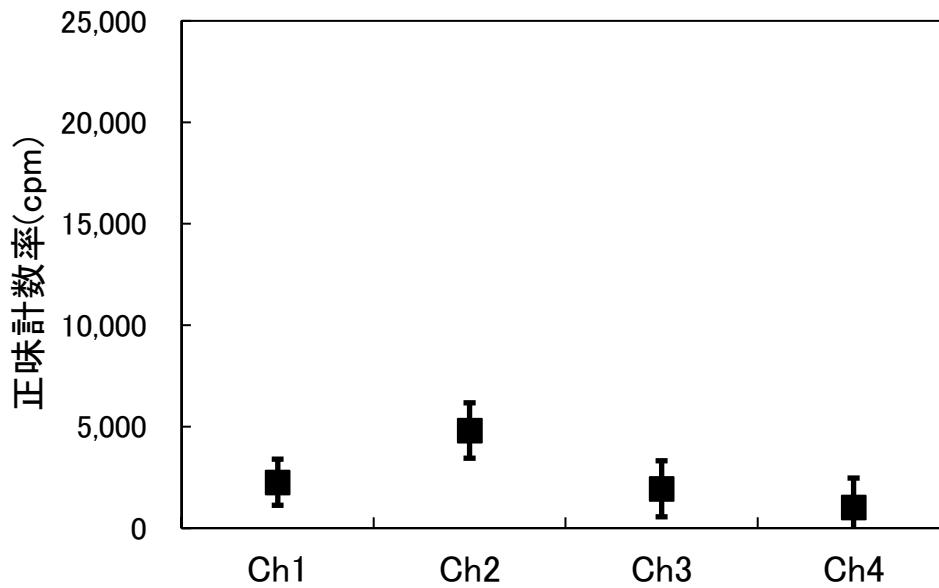


Fig.B-1 走行試験の測定データ(No.1)

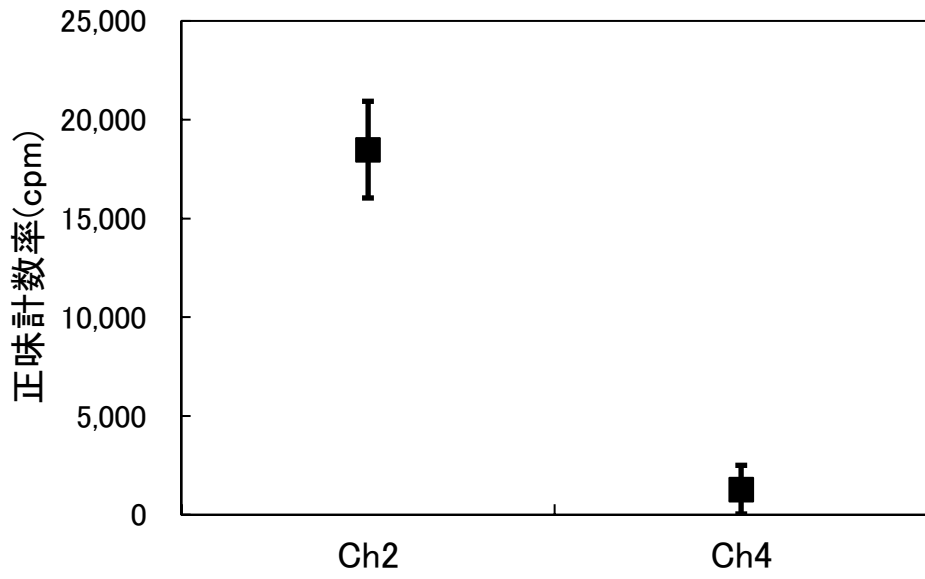


Fig.B-2 走行試験の測定データ(No.2)

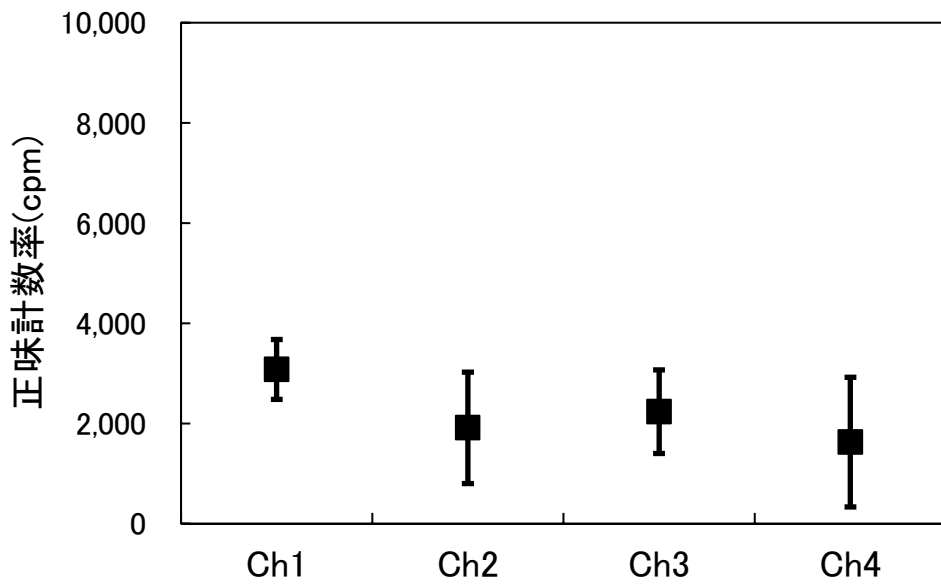


Fig.B-3 走行試験の測定データ(No.3)

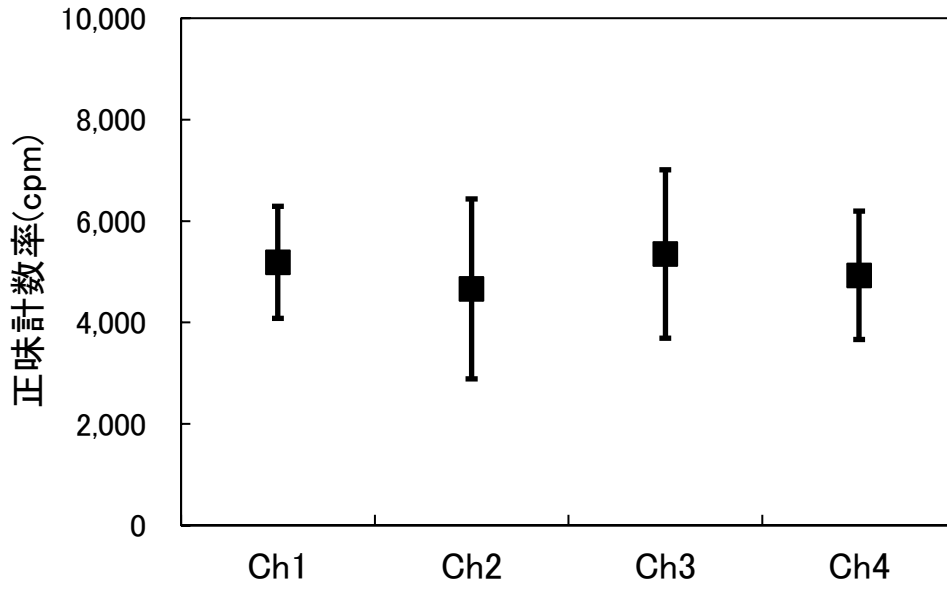


Fig.B-4 走行試験の測定データ(No.4)

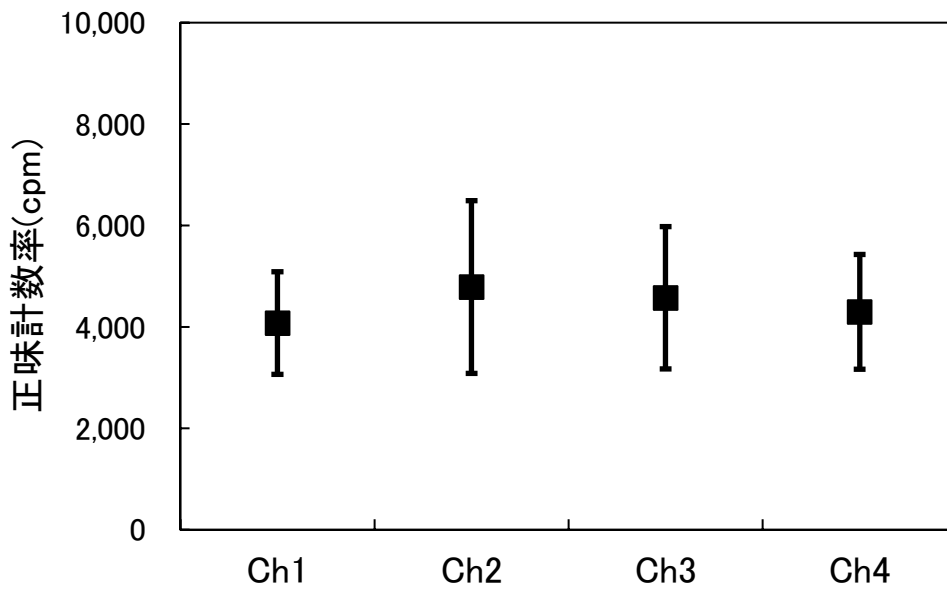


Fig.B-5 走行試験の測定データ(No.5)

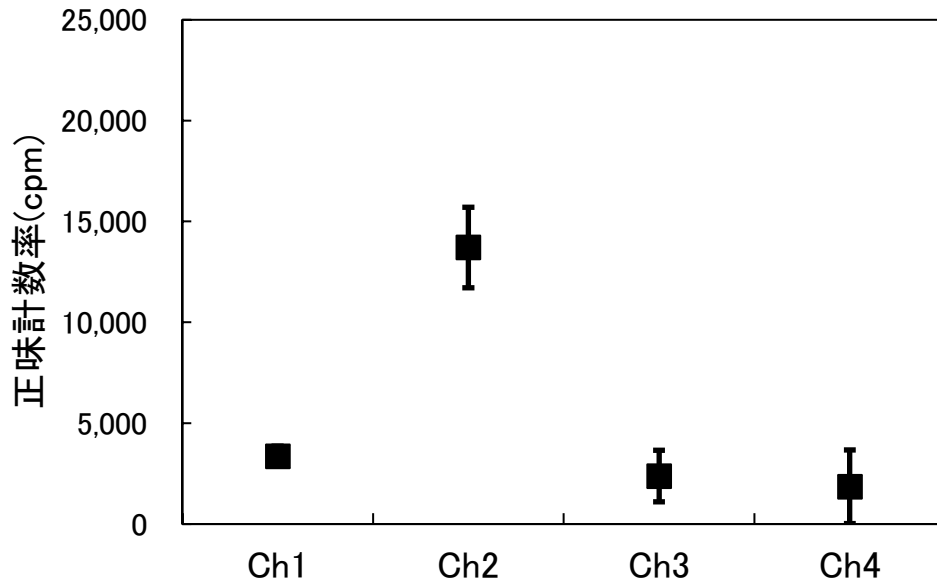


Fig.B-6 走行試験の測定データ(No.6)

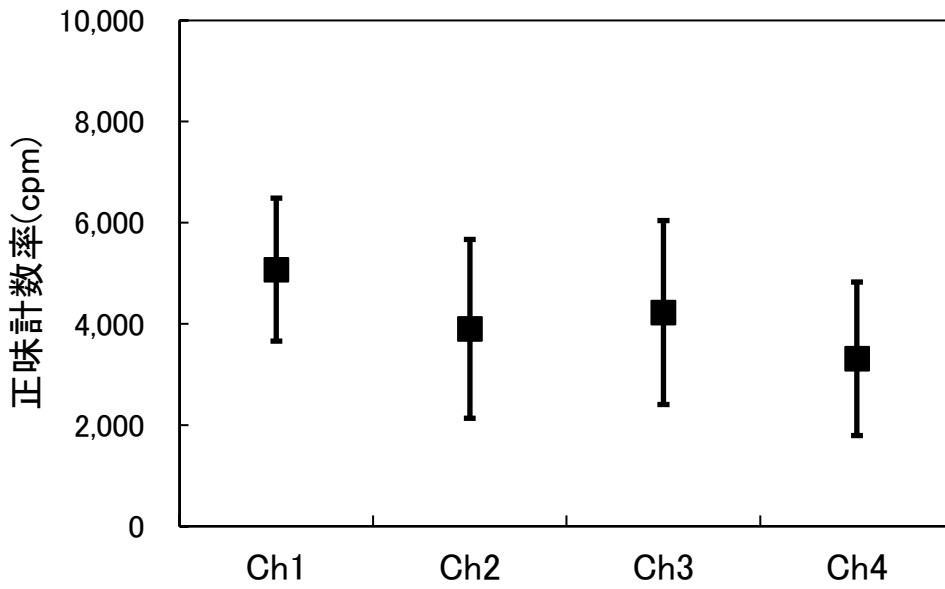


Fig.B-7 走行試験の測定データ(No.7)

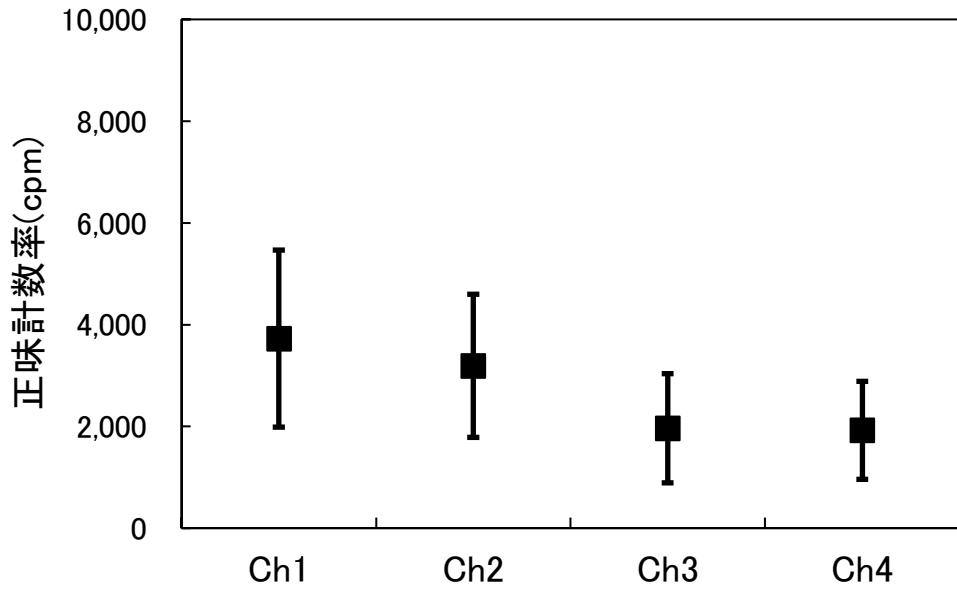


Fig.B-8 走行試験の測定データ(No.8)

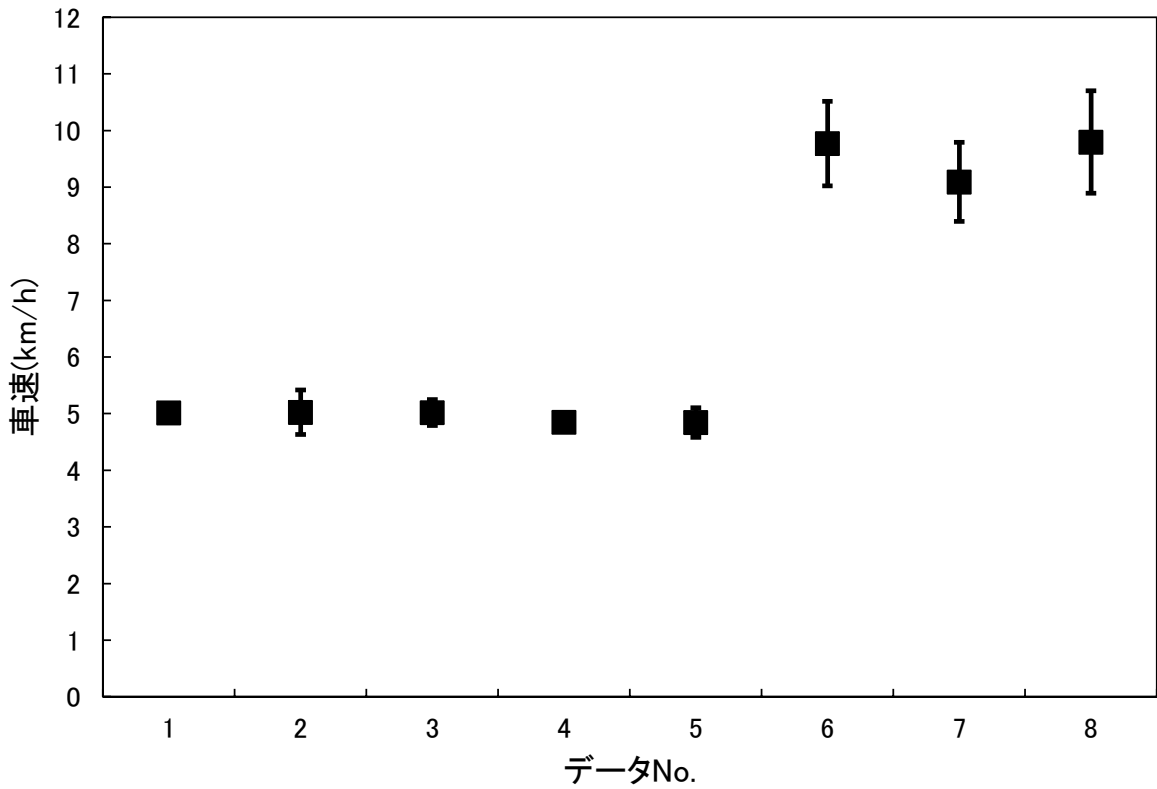


Fig.B-9 走行試験の車速

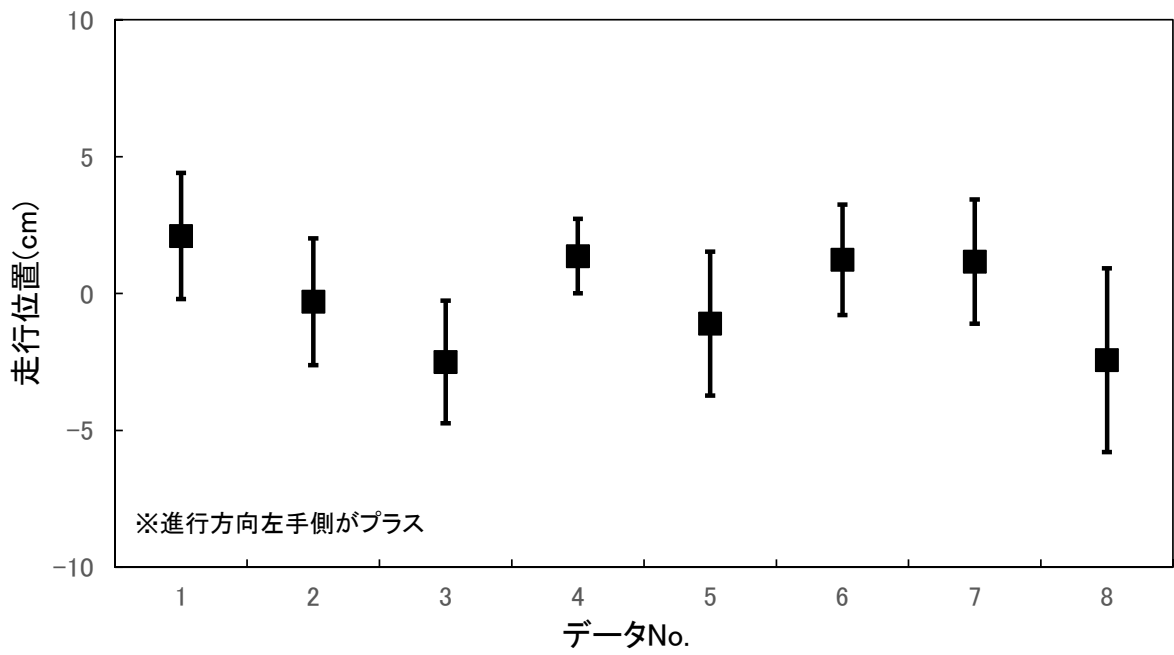


Fig.B-10 走行試験の走行位置のずれ

付録 C 高 BG 環境試験の各測定データ

Table C-1 高 BG 環境試験の測定条件

No.	模擬汚染線源	車種	線源位置	ポール-車両 側面間距離	備考
1	なし	セダン	-	0.5 m	
2	228 kBq	セダン	タイヤ接地面	0.5 m	本文取扱い無し
3	228 kBq	セダン	タイヤ接地面	1.0 m	本文取扱い無し
4	228 kBq	セダン	ワイパー均等	0.5 m	本文取扱い無し
5	228 kBq	セダン	ワイパー均等	1.0 m	本文取扱い無し

以下に、Table C-1 に整理した各条件での測定データを示す。なお、各グラフ中に示す実線のエラーバーは標準誤差を表し、点線のエラーバーは標準偏差を表す。

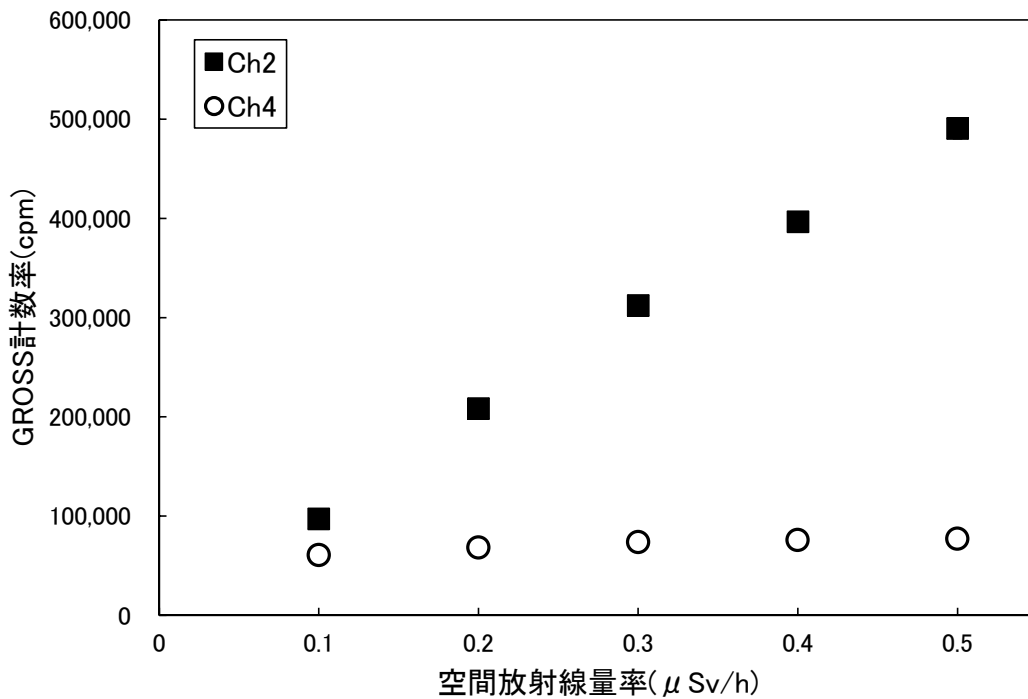


Fig.C-1 高 BG 環境試験の測定データ(No.1)

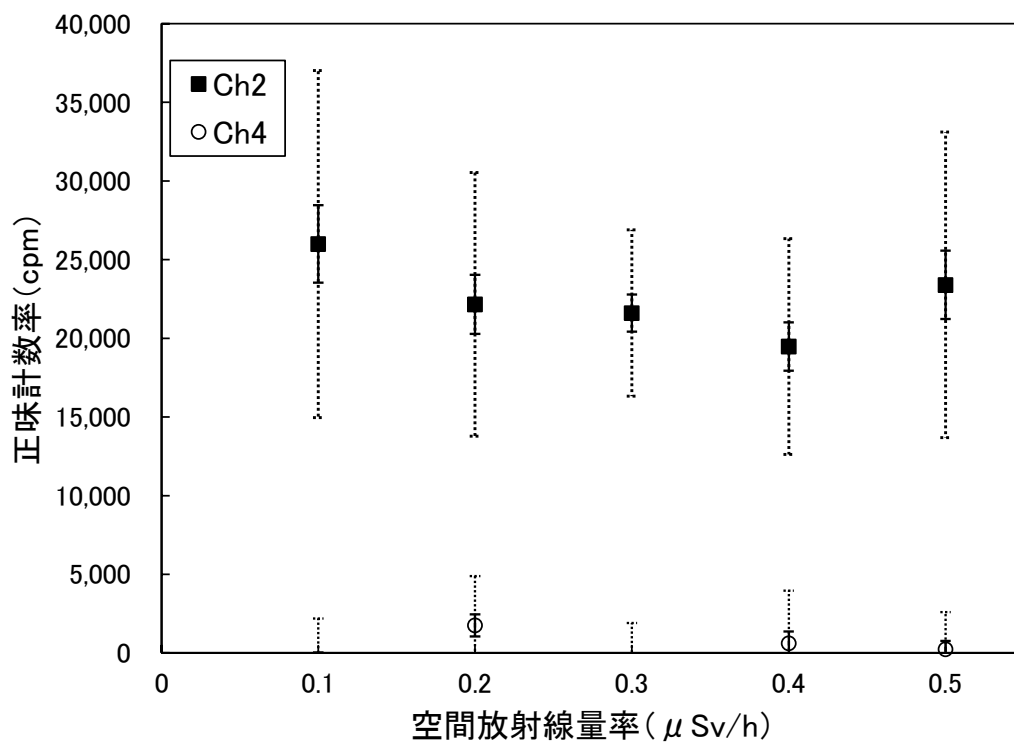


Fig.C-2 高 BG 環境試験の測定データ(No.2)

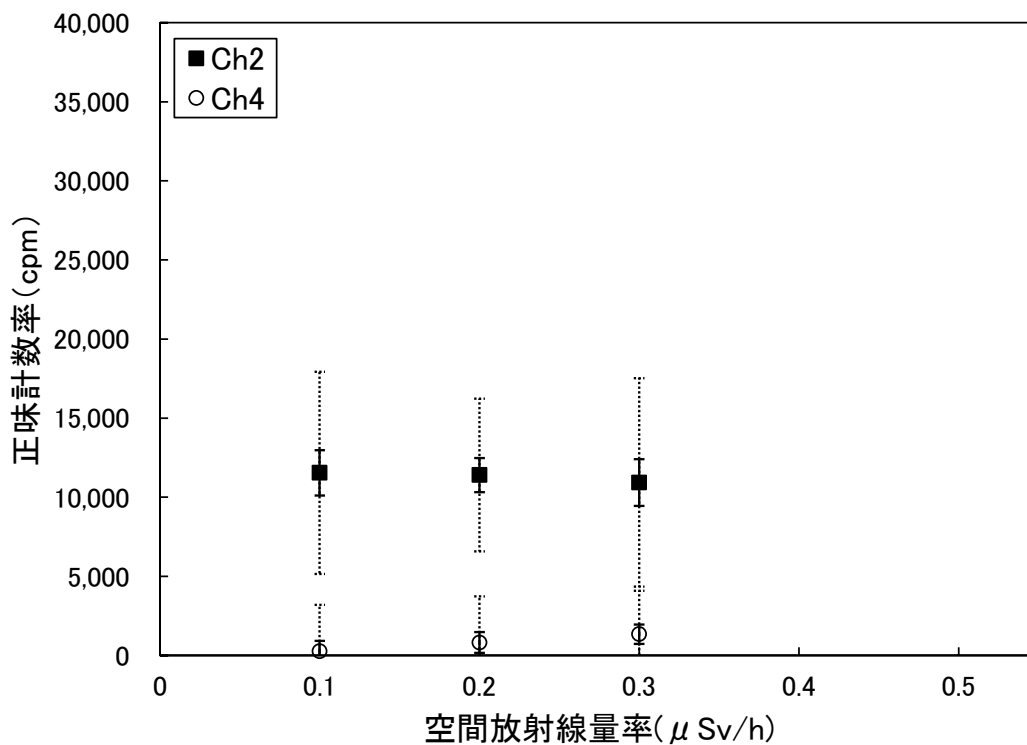


Fig.C-3 高 BG 環境試験の測定データ(No.3)

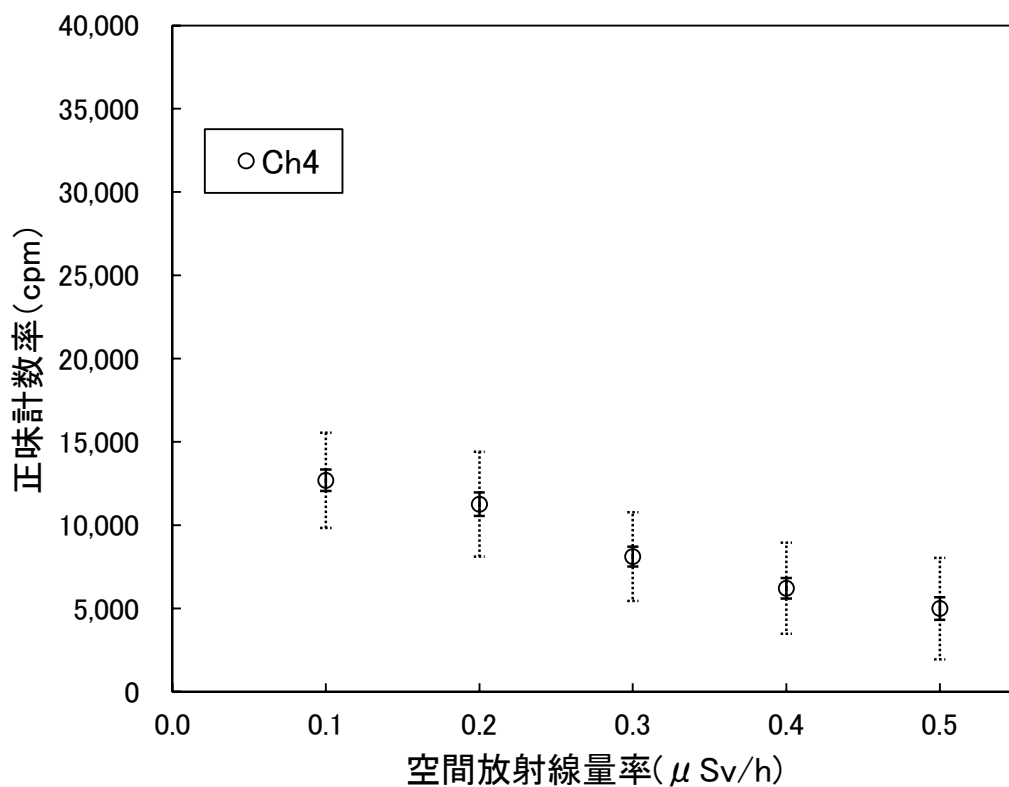
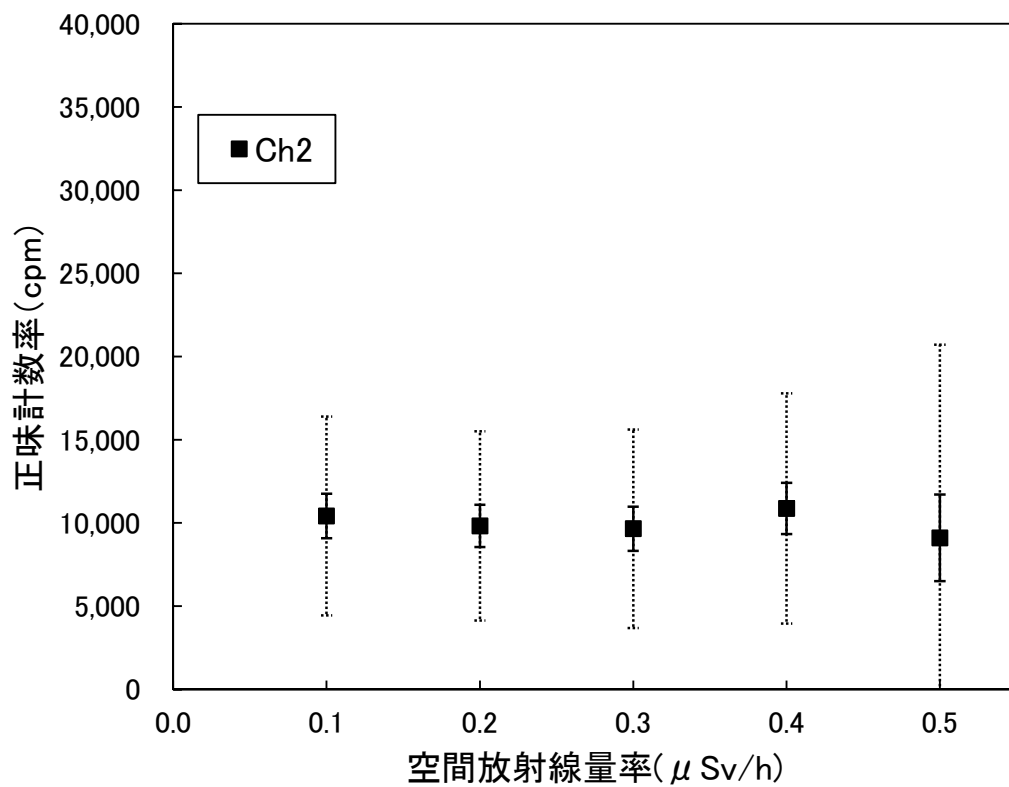


Fig.C-4 高 BG 環境試験の測定データ(No.4)

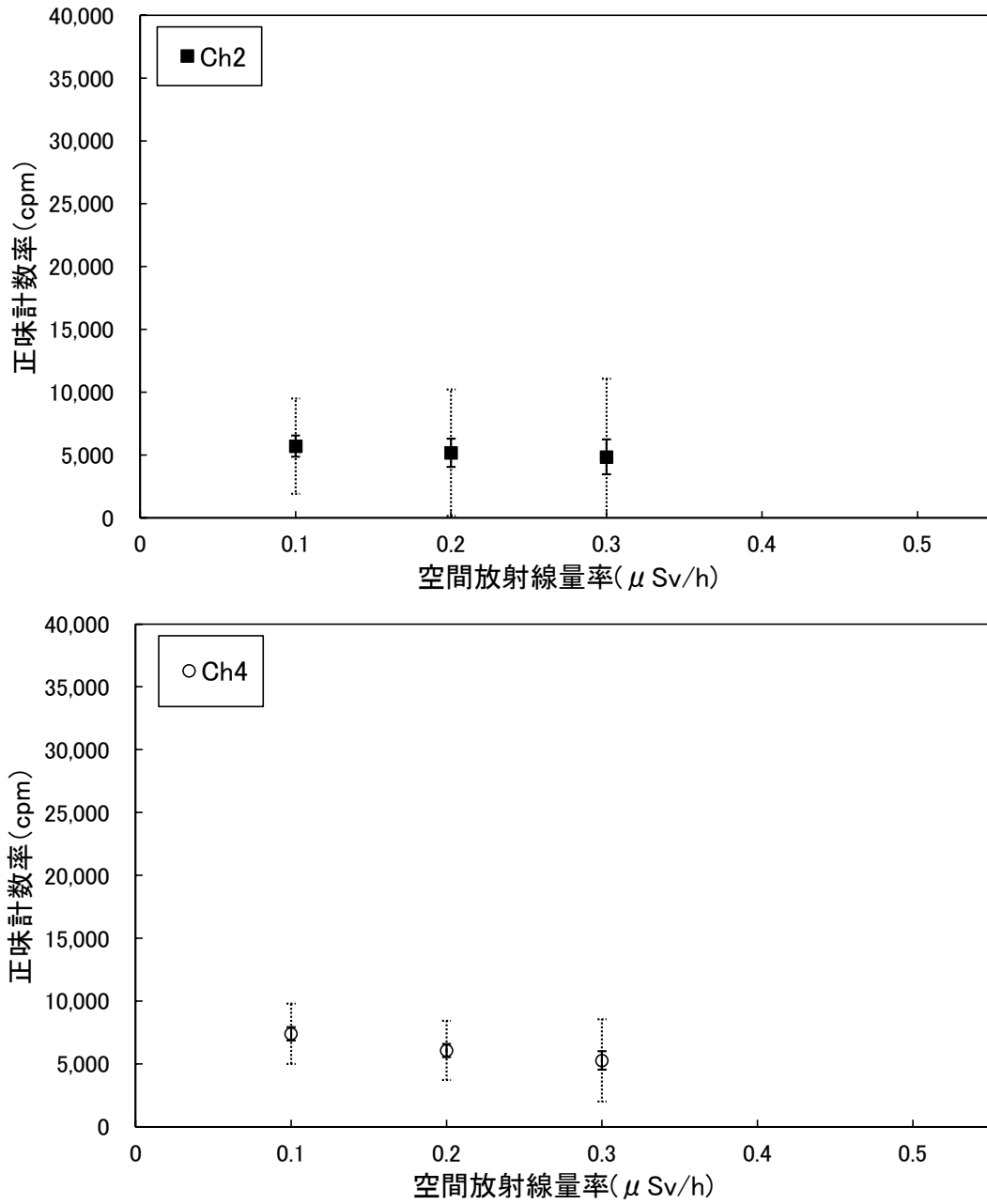


Fig.C-5 高 BG 環境試験の測定データ(No.5)

