

水底のin-situ放射線分布測定手法の開発

Research and Development of In-situ Measurement
for Radiation Distribution of Waterbed

眞田 幸尚 高村 善英 卜部 嘉 土田 清文
西澤 幸康 山田 勉 佐藤 義治 平山 弘克
西原 克哉 伊村 光生 石田 睦司 石橋 聖
佐瀬 隆聡 鈴木 元和 森 英治 米澤 重晃
鳥居 建男

Yukihisa SANADA, Yoshihide TAKAMURA, Yoshimi URABE, Kiyofumi TUCHIDA
Yukiyasu NISHIZAWA, Tsutomu YAMADA, Yoshiharu SATO, Hirokatsu HIRAYAMA
Katsuya NISHIHARA, Mitsuo IMURA, Mutsushi ISHIDA, Satoshi ISHIBASHI
Takaaki SASE, Motokazu SUZUKI, Hideharu MORI, Shigeaki YONEZAWA
and Tatsuo TORII

福島技術本部
福島環境安全センター

Fukushima Environmental Safety Center
Headquarters of Fukushima Partnership Operations

May 2014

本レポートは独立行政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。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, 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

水底の in-situ 放射線分布測定手法の開発

日本原子力研究開発機構

福島技術本部 福島環境安全センター

眞田 幸尚、高村 善英^{※1}、卜部 嘉^{※2}、土田 清文^{※3}、西澤 幸康^{※4}、山田 勉^{※5}、佐藤 義治、
平山 弘克^{※1}、西原 克哉^{※1}、伊村 光生^{※6}、石田 睦司^{※2}、石橋 聖^{※7}、佐瀬 隆聡^{*1}、
鈴木 元和^{*1}、森 英治、米澤 重晃、鳥居 建男

(2014年3月4日 受理)

2011年3月11日に発生した東日本大震災による津波に起因した東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、大量の放射性物質が周辺に飛散した。事故から3年経過した現在、湖や池などの水底に存在する放射性セシウムの分布状況や田畑への流出が懸念されている。ここでは、水底の放射性セシウムの濃度を直接測定し、換算する手法 (in-situ 測定手法) の開発を行った。本方法は、p-Scanner と呼ばれる水中での使用可能な、プラスチックシンチレーションファイバ検出器を開発し、水底の広い面積を短時間に直接測定することを実現した。また、p-Scanner で得られた計数率は、検出器で値付けされた水中用のγ線スペクトロメータと比較測定を行うことにより、湿潤重量当たりの放射性セシウムの濃度 (Bq/kg-wet) に換算できるようにした。開発した手法を、福島県内の農業用ため池に適用し、放射性セシウムの濃度分布マップを作成し、本方法の有用性を示した。

福島環境安全センター (駐在) : 〒960-1248 福島県福島市金谷川1番地 福島大学キャンパス内

※1 技術開発協力員 (検査開発株式会社)

※2 技術開発協力員 (株式会社 NESI)

※3 技術開発協力員 (応用地質株式会社)

※4 技術開発協力員 (株式会社 ヴィジブルインフォメーションセンター)

※5 技術開発協力員 (日本放射線エンジニアリング株式会社)

※6 技術開発協力員 (静岡スカイテック株式会社)

※7 技術開発協力員 (原電事業株式会社)

*1 福島県土地改良事業団体連合会 (水土里ネット)

Research and Development of In-situ Measurement for Radiation Distribution of Waterbed

Yukihisa SANADA, Yoshihide TAKAMURA^{*1}, Yoshimi URABE^{*2}, Kiyofumi TUCHIDA^{*3},
Yukiyasu NISHIZAWA^{*4}, Tsutomu YAMADA^{*5}, Yoshiharu SATO, Hirokatsu HIRAYAMA^{*1},
Katsuya NISHIHARA^{*1}, Mitsuo IMURA^{*6}, Mutsushi ISHIDA^{*2}, Satoshi ISHIBASHI^{*7},
Takaaki SASE^{*1}, Motokazu SUZUKI^{*1}, Hideharu MORI, Shigeaki YONEZAWA
and Tatsuo TORII

Fukushima Environmental Safety Center,
Headquarters of Fukushima Partnership Operations,
Japan Atomic Energy Agency,
Kanayagawa, Fukushima-shi, Fukushima-ken

(Received March 4, 2014)

By the nuclear disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (NPP), Tokyo Electric Power Company (TEPCO), caused by the East Japan earthquake and the following tsunami occurred on March 11, 2011, a large amount of radioactive materials was released from the NPP. Distribution of radiocesium existing on the waterbed such as lake or pond was concerned about at the present that passed for three years by an accident. Here, the direct measurement technique of the radiocesium concentration (in-situ measurement technique) was developed. This method was used a plastic scintillation detector (p-Scanner). This detector carried out quick measurement of a large area. In addition, the count-rate of p-Scanner was converted to the radiocesium concentration (Ba/kg-wet) by comparative measurement of γ -ray spectrometer. We applied the technique to the agricultural pond in Fukushima and made a map of distribution of radiocesium concentration.

Keywords: In-situ Radiation Measurement, Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Radiocesium, Map, Natural Nuclide, Waterbed

-
- ※1 Collaborating Engineer (Inspection Development Co. Ltd.)
 - ※2 Collaborating Engineer (NESI Co. Ltd.)
 - ※3 Collaborating Engineer (OYO Co. Ltd.)
 - ※4 Collaborating Engineer (VIC Co. Ltd.)
 - ※5 Collaborating Engineer (Japan Radiation Engineering Co. Ltd.)
 - ※6 Collaborating Engineer (Shizuoka skytech Co. Ltd.)
 - ※7 Collaborating Engineer (Nuclear Services Co. Ltd.)
 - * 1 National Federation of Land Improvement Associations of Fukushima

目次

| | |
|---|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. ため池 | 2 |
| 3. 線源パラメータ | 2 |
| 3.1. ため池底の放射性物質の分布状況 | 2 |
| 3.2. 密度及び含水率 | 4 |
| 4. in-situ測定用機器 | 6 |
| 4.1. p-Scanner | 6 |
| 4.2. J-subD | 8 |
| 5. 計算コードを用いたレスポンス計算 | 10 |
| 5.1. J-subD のモデル化 | 10 |
| 5.2. 換算係数の設定 | 12 |
| 5.2.1. 換算係数の算出 | 12 |
| 5.2.2. 鉛直分布の換算係数への影響 | 14 |
| 5.2.3. 堆積物の密度の換算係数への影響 | 15 |
| 5.2.4. 堆積物サンプルとの比較 | 16 |
| 6. 測定方法 | 19 |
| 6.1. 人員の配置及び手順 | 19 |
| 6.2. 測定位置の取得 | 19 |
| 6.3. 放射線測定 | 19 |
| 6.4. 土壌サンプリング | 20 |
| 7. 解析方法 | 21 |
| 7.1. p-Scanner の換算方法 | 21 |
| 7.2. p-Scanner の感度変化 | 22 |
| 7.3. 検出下限値 | 23 |
| 7.4. マップの作成 | 23 |
| 7.5. p-Scanner の換算結果と土壌サンプリングとの比較 | 23 |
| 8. 測定結果 | 26 |
| 9. 考察 | 42 |
| 9.1. ため池底の環境変化と測定結果からの考察 | 42 |
| 9.2. γ 線スペクトルから得られる情報 | 45 |
| 9.2.1. シミュレーションによる計算 | 45 |
| 9.2.2. 実測結果との比較 | 48 |
| 9.3. 測線の間隔とマップ | 49 |
| 10. まとめ | 51 |
| 謝辞 | 52 |
| 参考文献 | 52 |
| Appendix 選定したため池の概況 | 55 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Agricultural pond..... | 2 |
| 3. Parameters of radiation source..... | 2 |
| 3.1. Distribution of radioactive cesium in the waterbed..... | 2 |
| 3.2. Density and water content..... | 4 |
| 4. Apparatus of in-situ measurement | 6 |
| 4.1. p-Scanner | 6 |
| 4.2. J-subD | 8 |
| 5. Simulation with the MCNP..... | 10 |
| 5.1. Modeling of J-subD..... | 10 |
| 5.2. Setting of conversion factor | 12 |
| 5.2.1. Calculation of conversion factor | 12 |
| 5.2.2. Influence of vertical profile on conversion factor | 14 |
| 5.2.3. Influence of sediment density on conversion factor | 15 |
| 5.2.4. Comparison with sediment sample..... | 16 |
| 6. Measurement method..... | 19 |
| 6.1. Staff assignment and measurement procedure..... | 19 |
| 6.2. Acquisition of measurement position | 19 |
| 6.3. Radiation measurement | 19 |
| 6.4. Sediment sampling | 20 |
| 7. Analysis method | 21 |
| 7.1. Conversion method of p-Scanner | 21 |
| 7.2. Variation of response of p-Scanner..... | 22 |
| 7.3. Detection limit..... | 23 |
| 7.4. Counter map..... | 23 |
| 7.5. Comparison of conversion result of p-Scanner with soil sampling data | 23 |
| 8. Result of measurement..... | 26 |
| 9. Discussion..... | 42 |
| 9.1. Environmental change of the waterbed | 42 |
| 9.2. Information obtained from gamma-ray spectrum | 45 |
| 9.2.1. Simulation..... | 45 |
| 9.2.2. Comparison with measurement result..... | 48 |
| 9.3. Space of measurement line and counter map | 49 |
| 10. Summary | 51 |
| Acknowledgement | 52 |
| References | 52 |
| Appendix Overview of study site..... | 55 |

Table List

| | | |
|-----------|---|----|
| Table 5-1 | 線源試験の照射条件 | 11 |
| Table 5-2 | シミュレーションの計算条件 | 11 |
| Table 5-3 | 計算条件 | 13 |
| Table 5-4 | 鉛直分布の厚さと換算係数..... | 15 |
| Table 5-5 | 堆積物密度と化学組成比の一覧 | 16 |
| Table 7-1 | 検出下限値..... | 23 |
| Table 8-1 | 測定結果一覧 | 27 |
| Table 9-1 | 検出器の沈下環境の計算条件 | 45 |
| Table 9-2 | 検出器の接触状態の計算条件 | 47 |
| Table 9-3 | J-subD によるピーク対コンプトン比からの深度推定値と 堆積物コアによる深度分布測定結果 | 49 |

Fig. List

| | | |
|-----------|---|----|
| Fig. 3-1 | コア採取場所 (福島大学)..... | 3 |
| Fig. 3-2 | コア採取場所 (東笹田池)..... | 3 |
| Fig. 3-3 | 堆積物コア中の放射性セシウムの鉛直分布 | 4 |
| Fig. 3-4 | 堆積物サンプルの密度のヒストグラム | 5 |
| Fig. 3-5 | 堆積物サンプルの含水率のヒストグラム..... | 5 |
| Fig. 4-1 | p-Scanner の外観及び測定原理 | 7 |
| Fig. 4-2 | ¹³⁷ Cs 照射装置により p-Scanner 全体に照射した例..... | 7 |
| Fig. 4-3 | ¹³⁷ Cs 点線源を p-Scanner に照射した例 (10 kBq, 300 秒測定) | 8 |
| Fig. 4-4 | J-subD の外観及び測定原理 | 9 |
| Fig. 4-5 | J-subD の γ 線スペクトル例 (福島大学第 3 調整池において 100 s 間の測定を実施)..... | 9 |
| Fig. 5-1 | J-subD の検出器 (左 : 写真、右 : シミュレーションで構築した検出器)..... | 11 |
| Fig. 5-2 | 線源試験とシミュレーションのスペクトルの比較 | 12 |
| Fig. 5-3 | 線源試験とシミュレーションのエネルギーピークと距離による比較..... | 12 |
| Fig. 5-4 | シミュレーションの体系..... | 13 |
| Fig. 5-5 | シミュレーションによる γ 線スペクトルと実測値との比較 | 14 |
| Fig. 5-6 | 放射性セシウムの単位濃度当たりの計数率と鉛直分布の関係..... | 15 |
| Fig. 5-7 | 土壤密度による影響 (放射性セシウムの深度 10 cm) | 16 |
| Fig. 5-8 | J-subD による堆積物中の放射性セシウム定量結果と 堆積物サンプルの分析結果の比較 | 16 |
| Fig. 5-9 | J-subD による堆積物中の放射性セシウム定量結果に対する堆積物サンプル の分析結果の相対偏差のヒストグラム..... | 17 |
| Fig. 5-10 | J-subD による堆積物中の放射性セシウム定量結果と堆積物コアサンプルの分析結果 (表層から 10cm までの平均値) の比較..... | 18 |
| Fig. 6-1 | J-subD による計数率と堆積物表層からの距離の関係例 | 20 |
| Fig. 7-1 | J-subD による放射性セシウムの沈着量測定結果と p-Scanner の計数率の比較..... | 21 |
| Fig. 7-2 | J-subD による放射性セシウムの沈着量測定結果と p-Scanner の計数率における 相対偏差のヒストグラム..... | 22 |
| Fig. 7-3 | p-Scanner のレスポンスの変動 | 22 |
| Fig. 7-4 | p-Scanner による堆積物中の放射性セシウム定量結果と堆積物サンプルの分析結果の 比較..... | 24 |
| Fig. 7-5 | p-Scanner による堆積物中の放射性セシウム定量結果に対する堆積物サンプルの分析 結果の相対偏差のヒストグラム | 24 |
| Fig. 7-6 | p-Scanner による堆積物中の放射性セシウム定量結果と堆積物コアサンプルの分析結果 (表層から 10cm までの平均値) の比較..... | 25 |
| Fig. 8-1 | 各測定点における p-Scanner による測定結果の比較 | 28 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Fig. 8-2 | 鏡ヶ池における水底の放射性セシウム濃度マップ (左: 浚渫前、中: 浚渫後、右: 浚渫前後の比画像及び浚渫場所)..... | 29 |
| Fig. 8-3 | 東笹田池における水底の放射性セシウム濃度マップ (左: 浚渫後、中: 浚渫後約 5 ヶ月後、右: 浚渫前後の比画像)..... | 31 |
| Fig. 8-4 | 北屋敷池における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 33 |
| Fig. 8-5 | ヤボケ池における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 34 |
| Fig. 8-6 | 福島大学第 3 調整池における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 35 |
| Fig. 8-7 | 堀沢池における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 36 |
| Fig. 8-8 | 梶内沼における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 37 |
| Fig. 8-9 | 道法内池における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 38 |
| Fig. 8-10 | 大池における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 39 |
| Fig. 8-11 | 寺ノ前池における水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 40 |
| Fig. 8-12 | 大日沢ダムにおける水底の放射性セシウム濃度マップ..... | 41 |
| Fig. 9-1 | 鏡ヶ池における浚渫前後のメッシュ値の比較..... | 43 |
| Fig. 9-2 | 鏡ヶ池における相対偏差のヒストグラム (2 回目-1 回目)/(1 回目)..... | 43 |
| Fig. 9-3 | 東笹田池における浚渫後と浚渫後 5 ヶ月のメッシュ値の比較..... | 44 |
| Fig. 9-4 | 東笹田池における相対偏差のヒストグラム (2 回目-1 回目)/(1 回目)..... | 44 |
| Fig. 9-5 | γ線スペクトルの形状例..... | 45 |
| Fig. 9-6 | ピーク対コンプトン比に影響を与える線源条件のイメージ..... | 46 |
| Fig. 9-7 | 放射性セシウムの深度とピーク対コンプトン比の関係..... | 46 |
| Fig. 9-8 | 検出器の沈下とピーク対コンプトン比の関係..... | 47 |
| Fig. 9-9 | 堆積物密度とピーク対コンプトン比の関係..... | 48 |
| Fig. 9-10 | J-subD 実測結果におけるピーク対コンプトン比 とシミュレーション結果との比較..... | 49 |
| Fig. 9-11 | 測線間隔の違いとマップの例 (左: 5 m 間隔, 右: 10 m 間隔)..... | 50 |
| Fig. 9-12 | 測線間隔の違いにおけるメッシュ毎の線量率の比較..... | 50 |

This is a blank page.

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災による津波に起因した東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、発電所事故）によって、大量の放射性物質が周辺に飛散した。発電所事故後、様々な機関により、発電所周辺の放射線量や放射性物質濃度の調査が実施され^{1),2)}、現在では、分布状況のほかに放射性セシウムの移行状況など様々な知見が得られている³⁾。

放射性セシウムは、土壌中に存在する負電荷をもつ物質に吸着されるため、土壌表層付近に蓄積する。しかし、集水域スケールで面的に放射性セシウムの動態を考えた場合、地表面における水食・風食の発生と凹地などへの堆積、河川を通じた溶存態・懸濁態放射性セシウムの輸送、湖沼や低湿地などへの堆積状況の把握が重要と考えられる。

農業用ため池（以下、ため池）は、最も生活に密着した水系であり、福島第一原子力発電所（以下、発電所）近傍の農業関係者はもとより、住宅部の住民からの関心も高くなっている。行政としては、発電所事故直後から、ため池の水中及び堆積物中の放射性セシウムの調査を行っている。東北農政局は、2012年2月から2012年8月までにため池堆積物のサンプルを63カ所採取し、放射性セシウムの濃度の測定を実施している⁴⁾⁶⁾。その後、2013年度に福島県は県内1941カ所のため池堆積物中の放射性セシウム濃度の測定を実施している⁷⁾。これらの調査は、広域な汚染状況の調査を目的としており、ため池の代表的な場所1カ所の堆積物表層のサンプルを採取し、放射能の測定を行っている。今後、堆積物の除染や通常の保守作業で行われる浚渫等を考慮する場合には、ため池底全域の放射性セシウムの分布を測定する必要があり、方法はなるべく簡便であることが望まれる。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、発電所事故以来、プラスチックシンチレーションファイバ（以下、PSF）を用いた放射線計測装置の現場適用について研究を行っている⁸⁾。このPSFは、1980年代に高エネルギー物理の分野で荷電粒子の飛跡測定等を目的として開発された⁹⁾。その後、飛行時間差（TOF）法と組み合わせることによって、線量率分布の測定用に開発、利用されてきた^{10,11)}。本検出器の有意な点は、最大20 mまで検出部を製作することができ、かつ、20 mの放射線量の分布を計測できることにある。また、検出部（ファイバ部分）自身は、機械的な構造を有しないため、水中に沈めることもたやすい。これらの特徴は、水底の堆積物の放射線分布を測定することに有用と考えられる。

そこで、今回PSFを用いたため池底堆積物中の放射性物質濃度を測定する手法（in-situ測定法）を開発した。また、開発した手法を福島県内のため池10カ所で適用し、その結果について考察した。

2. ため池

ため池とは、降水量が少なく、流域の大きな河川に恵まれない地域などで、農業用水を確保するために水を貯え取水ができるよう、人工的に造成された池を指し、全国に約 21 万箇所存在する（1 位兵庫、2 位広島、3 位香川）¹²⁾。福島県内では約 3,700 カ所あり、発電所事故以来、その汚染状況が懸念されている。ため池は、上流の集水域に降った雨が集まってきたものであり、受益域で農業用水として使われた後に、水路を通じて河川に流れ込む。放射性セシウムは、水溶態もしくは懸濁態として水を介して移動すると考えられ、各所に存在するため池底には、放射性セシウムが蓄積していることが考えられる。また、蓄積した放射性セシウムが大雨等のイベント時に、農地に流出する可能性も考えられる。

3. 線源パラメータ

一般的に、土壌表層で行う in-situ 測定法は、技術的に確立しており¹³⁾、発電所事故後、様々な場所で適用されている。in-situ 測定では、検出器と線源の状況を規格化する必要がある。水底の堆積物表面で、in-situ 測定を行う場合に必要な線源と検出器のパラメータについて以下に示す。

- 1) 放射性セシウムの鉛直分布
- 2) 堆積物の組成（密度、含水率）
- 3) 検出器のレスポンス
- 4) 検出器と堆積物の距離

ここでは、1)、2)について、実際に堆積物をサンプリングし、その結果からパラメータを決定することとした。また、3)、4)については、EGS4 を用いた計算コードによって算出することとした。以下、詳細を述べる。

3.1. ため池底の放射性物質の分布状況

水底の堆積物中における放射性セシウムの鉛直分布の状況を調査するため、不攪乱柱状採泥器による堆積物コア試料のサンプリングを行った。堆積物コア試料は、直径 11 cm の最大 40 cm 深さの円柱の堆積物コアを採取し、表層から 5 cm 間隔で分取し、放射性セシウム濃度及び土壌密度を分析した。福島大学第 3 調整池 で 7 本、本宮市の東笹田池で 4 本採取した。コアの採取場所について Fig. 3-1, Fig. 3-2 に示す。Fig. 3-1, Fig. 3-2 の背景地図には、Arc GIS データコレクションスタンダードパックを使用した。

採取した堆積物コア中の放射性物質濃度の鉛直分布を Fig. 3-3 に示す。このように、堆積物コアによって濃度の違いはあるものの、概ね表層から 10 cm 厚さに放射性セシウムが分布していることが分かる。Fig. 3-3 (f) に、各堆積物コアの放射性セシウムの積算値に対する各層の放射性物質濃度の割合の平均値及び平均値の積算値を示す。このように、全放射性セシウムの 80 %が表層 10 cm までに均一に分布している傾向にあることが分かった。この結果より、計算コードで用いる線源の条件は、表層から 10 cm まで均一な濃度の放射性セシウムを仮定するこ

とにした。なお、F1のように、表層より下部に放射性セシウムのピークが現れる場所も想定される。そのような、条件の影響については、5章で詳しく述べる。

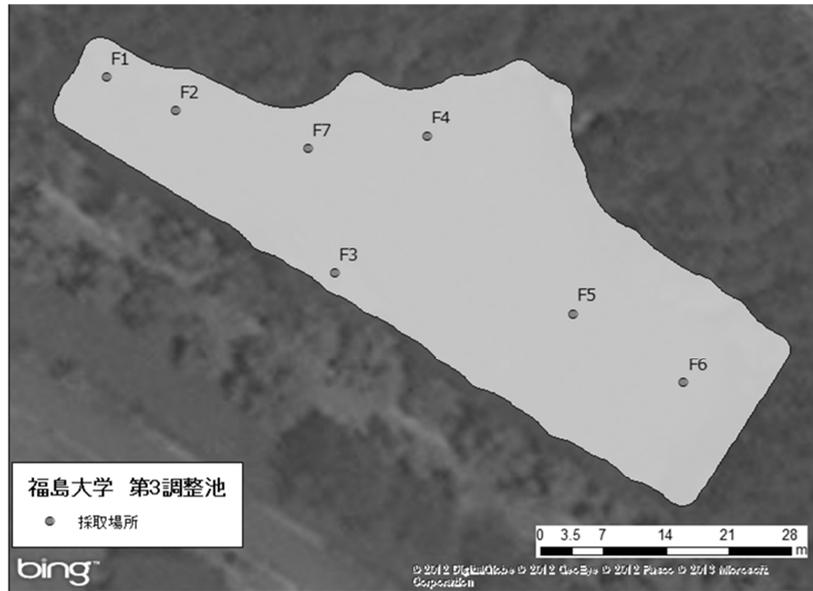


Fig. 3-1 コア採取場所 (福島大学)

背景地図 : Arc GIS データコレクションスタンダードパック

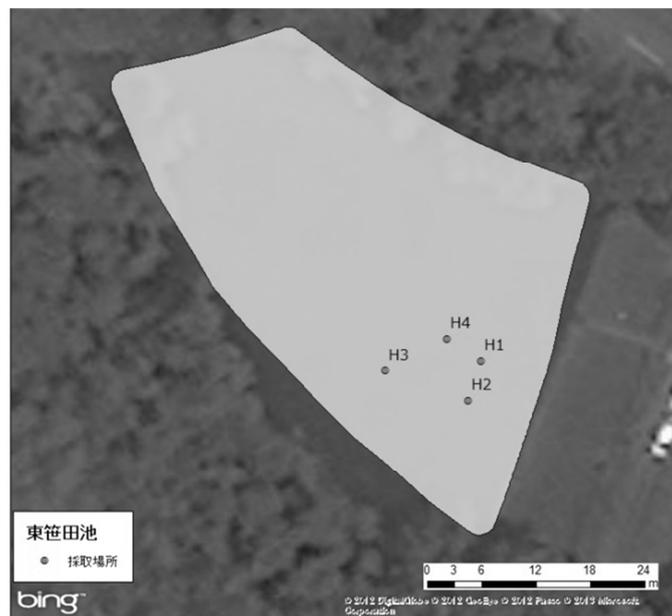


Fig. 3-2 コア採取場所 (東笹田池)

背景地図 : Arc GIS データコレクションスタンダードパック

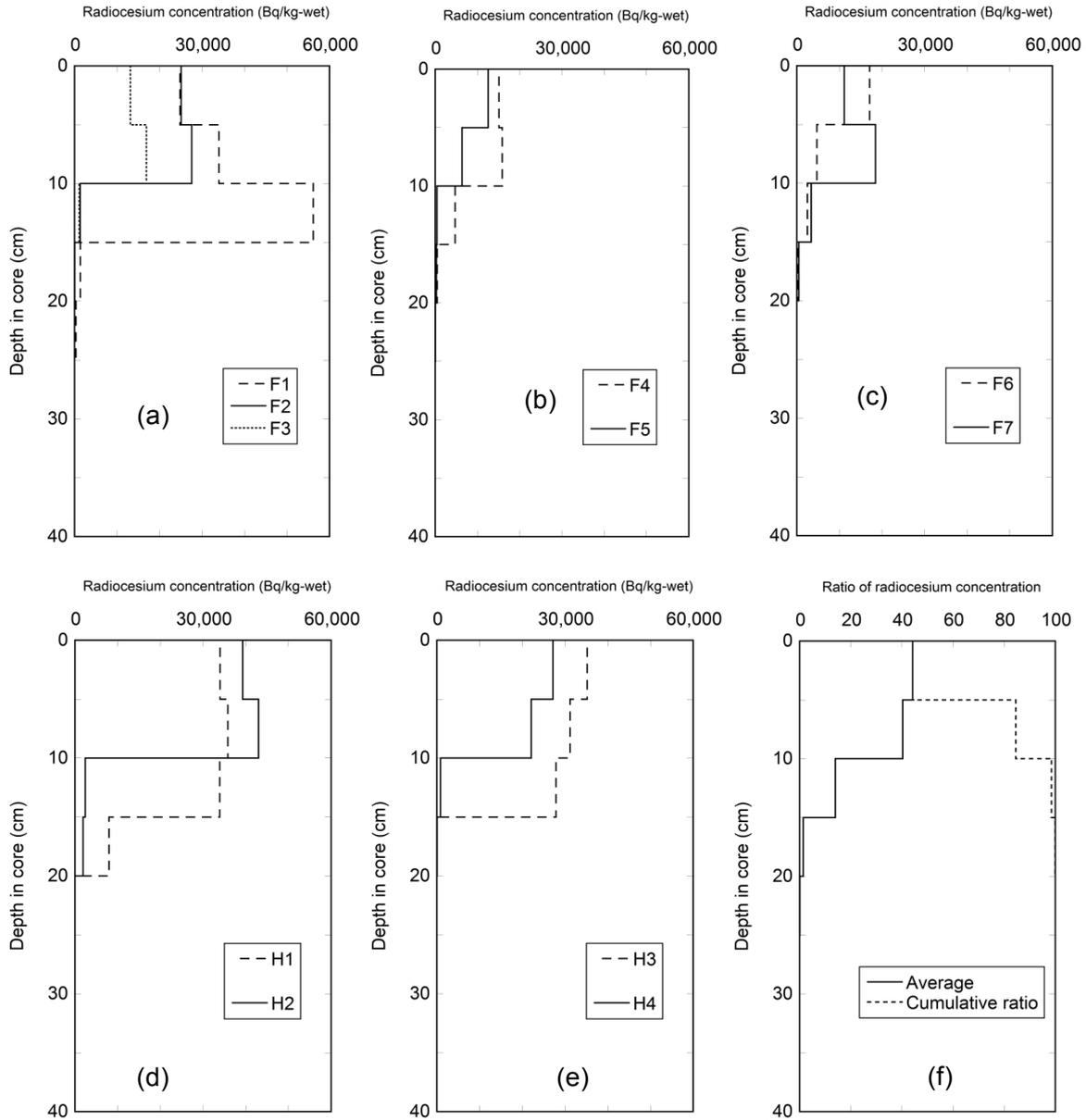


Fig. 3-3 堆積物コア中の放射性セシウムの鉛直分布

((a), (b), (c): 福島大学; (d), (e): 東笹田池; (f): 全堆積物コアの放射性セシウムの積算値に対する各層の放射性物質濃度の割合の平均値及び平均値の積算値)

3.2. 密度及び含水率

計算コードによる線源設定において、重要なファクタとなる堆積物の含水率及び密度について、実際の堆積物サンプルを採取し、測定を行った。試料は、エクマンパージ型の試料採取装置を用いて堆積物表層から 5 ~ 10 cm の堆積物試料を、福島県内の 10 カ所のため池において計 136 サンプル採取した。試料は、U8 容器に分取した後、重量を測定し、密度を計算した。また、含水率については、赤外線水分計を用いて測定した。密度及び含水率の測定結果をヒストグラムにし、それぞれ、Fig. 3-4 及び Fig. 3-5 に示す。密度は、1.05~1.5 g/cm³ の範囲に分

布し、平均値は 1.2 g/cm^3 であった。一方、含水率は、25～85 %の範囲に分布し、平均値は、67 %となった。この結果を元に、計算コードの線源を設定することとした。また、密度と含水率による濃度換算への影響については、5.2.3 項で述べる。

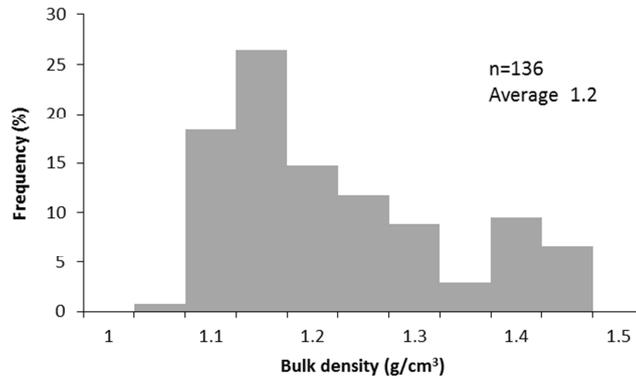


Fig. 3-4 堆積物サンプルの密度のヒストグラム

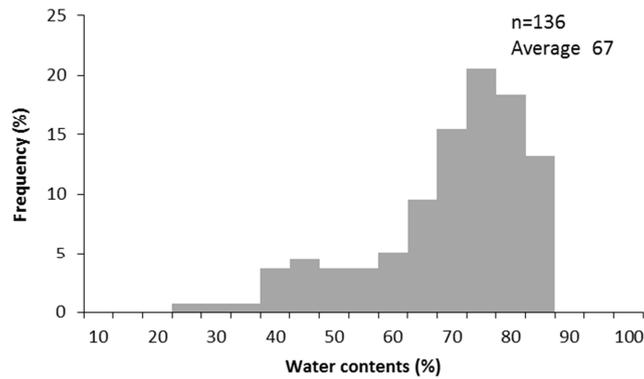


Fig. 3-5 堆積物サンプルの含水率のヒストグラム

4. in-situ 測定用機器

in-situ 用の測定機器として、PSF を用いたライン型測定器 (p-Scanner) 及び LaBr₃(Ce) 検出器を用いたスペクトロメータ (J-subD) を使用した。以下、機器の詳細を述べる。

4.1. p-Scanner

PSF を用いたライン測定型の放射線分布測定システムの構成を Fig. 4-1 に示す。検出部は、中芯部 (コア) に放射線に有感なポリスチレンを母材としたものを、コアを囲むクラッドに PMMA (Polymethyl methacrylate) を使用した直径 1 mm、長さ 20 m の PSF で構成した。この PSF を 19 本束ねて、ビニールチューブで覆うことにより遮光し、その両端に光電子増倍管を接続した。PSF 内に放射線が入射するとシンチレーション光を発生してファイバの両端に伝搬するが、入射位置によりファイバの両端への光の到達時間が異なる。この時間差を両端に設置した光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier Tube) により電気信号に変換して、放射線の入射位置を特定する (Time of Flight TOF 法)。この時間差は、検出部からの信号を処理する TAC (Time to Amplitude Converter) を用いて時間情報から波高情報に変換される。さらに、TAC から出力される信号を MCA (Multi-channel Analyzer) に入力し、放射線の入射位置を示す位置のスペクトルとして表示した。これらのデータを処理する計測部は、FPGA (Field-Programmable Gate Array) 上に構成した。システムは、検出部とデータ処理部をつなぐケーブル、コネクタは防水構造とした。

¹³⁷Cs の線源を使用した p-Scanner の応答特性例を Fig. 4-2 に示す。図に示すように、ファイバの中央部分が最も計数率が高く (感度が高い)、両端に近づくほど感度が下がる傾向にある。これは、ファイバ内の光の減衰特性及び時間差が短くなり不感時間の影響が大きくなることに起因する。システムの不感時間は、パルスの整形幅から推定すると 10 ns 程度である。このファイバ位置による感度特性については本試験結果を基に最大の感度位置に合わせて、規格化し感度補正した。また、Fig. 4-3 には、点線源の照射試験結果を示す。このように、点線源を配置した場所を中心にピークとして観測できる。位置分解能の指標となるピークの半値幅は、40 cm であった。

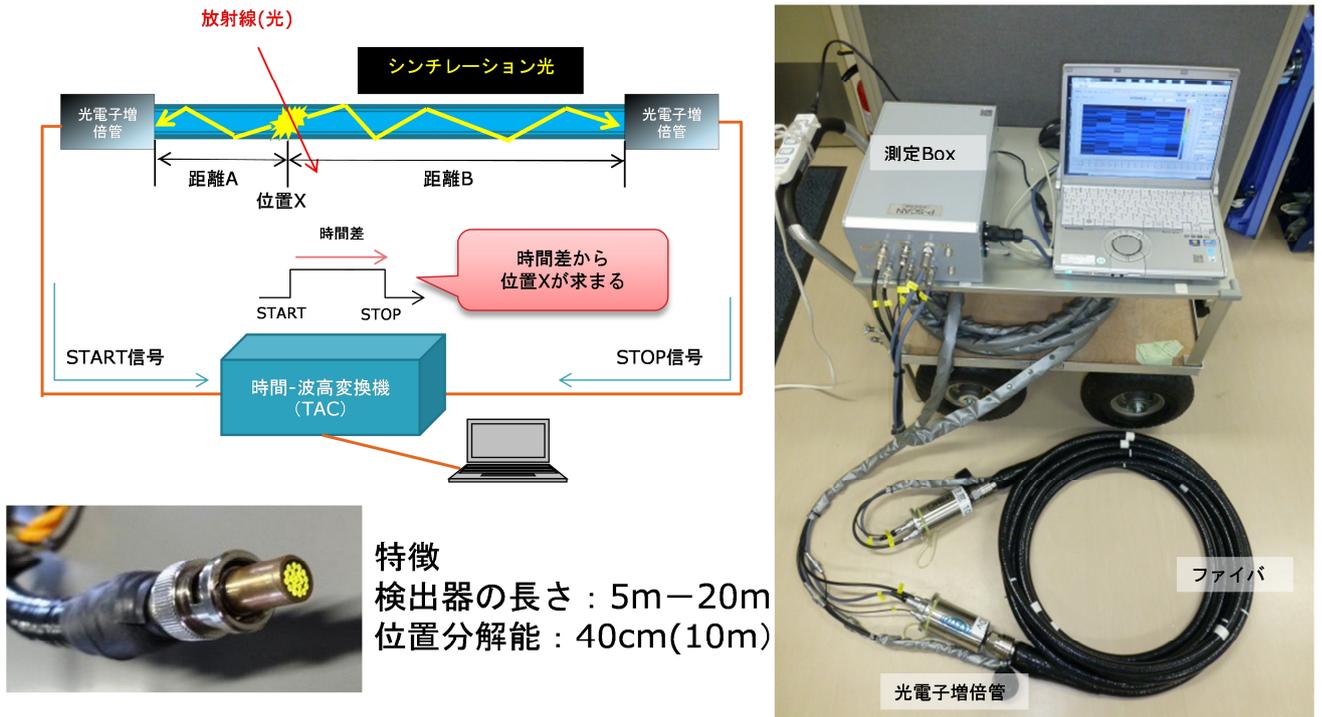


Fig. 4-1 p-Scanner の外観及び測定原理

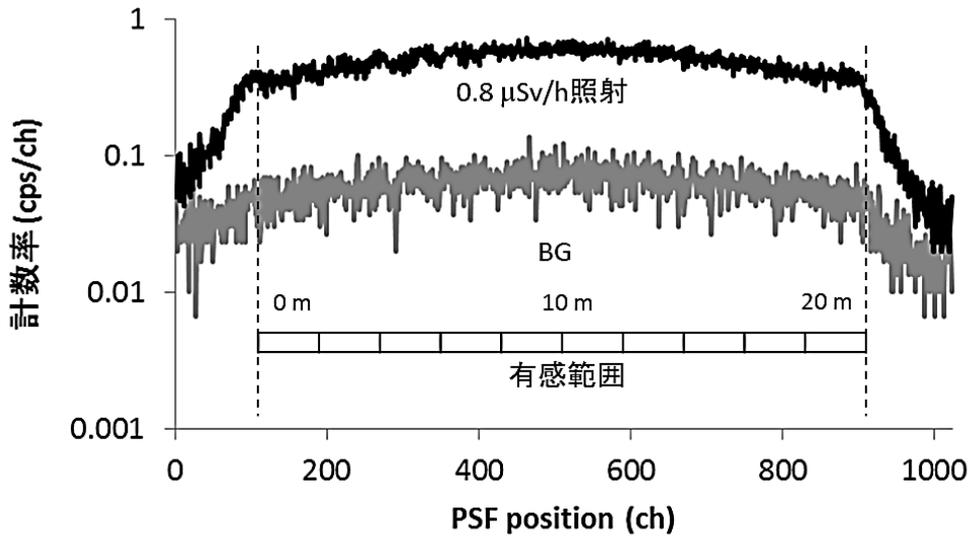


Fig. 4-2 ^{137}Cs 照射装置により p-Scanner 全体に照射した例

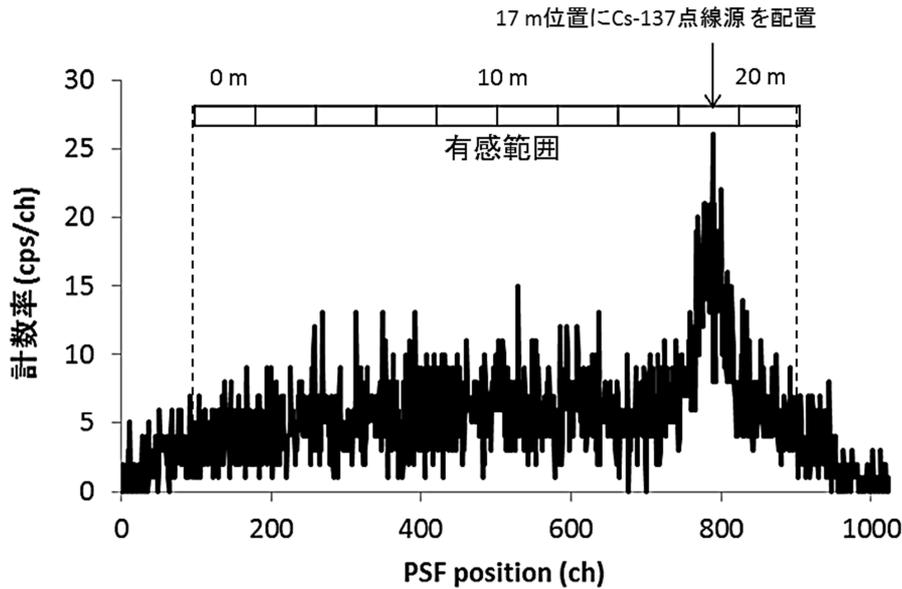


Fig. 4-3 ^{137}Cs 点線源を p-Scanner に照射した例 (10 kBq, 300 秒測定)

4.2. J-subD

J-subD の構成について、Fig. 4-4 に示す。検出器には半径 3 インチ×高さ 3 インチ (7.62 cm ϕ × 7.62 cmH) の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ を採用した。検出部は、水深 300 m までの使用が可能な耐圧構造とし、検出器の下部は、測定範囲を広げるため、スカートのような形状とした。検出器からの信号は、データ収集装置で γ 線スペクトルに変換し、指定の時間毎に保存される。全計数率の情報は、1 秒ごとにモニタリングし、リアルタイムでパソコン上に表示した。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータは、 ^{137}Cs の放出する γ 線のエネルギーピークに対し、半値幅が 1.8 keV~2.0 keV とエネルギー分解能に優れている。しかしながら、自己汚染があることが知られ、 ^{227}Ac の子孫核種、La の放射性同位元素である ^{138}La が主な成分となる。 ^{227}Ac の子孫核種は、 ^{211}Pb 及び ^{207}Tl の β 壊変によりさらに ~1400 keV までの β 線を放出する。また、 ^{227}Th 、 ^{223}Ra 、 ^{219}Rn 、 ^{215}Po 及び ^{211}Bi からの α 線が放出される¹⁴⁾。Fig. 4-5 に J-subD のスペクトル例を示す。本スペクトルは、福島大学の第 3 調整池において、水底の堆積物表面を 100 s 間測定した結果である。1000 keV 以上に検出器の自己汚染による影響が確認できる。

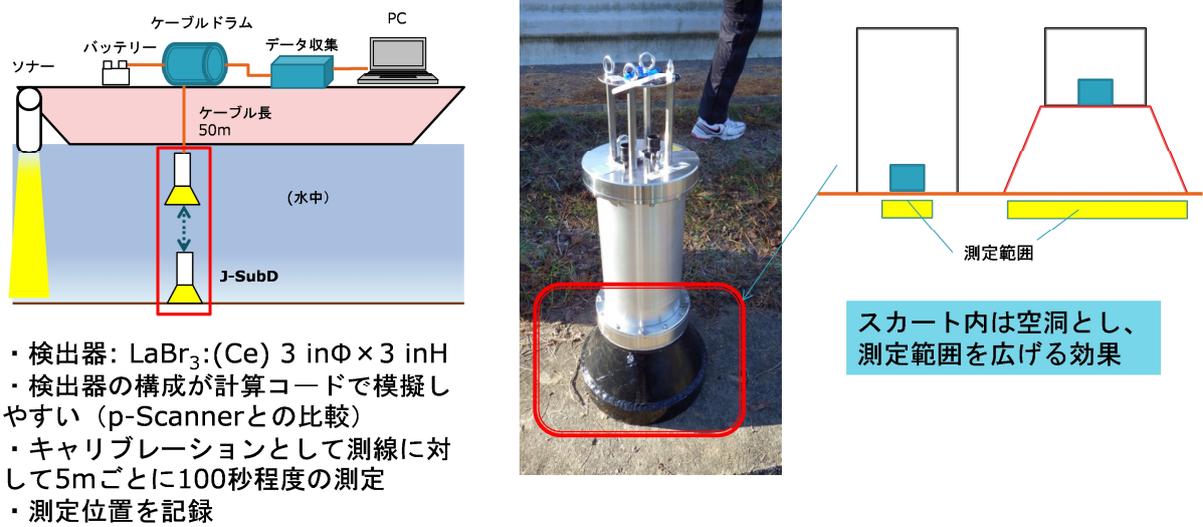


Fig. 4-4 J-subD の外観及び測定原理

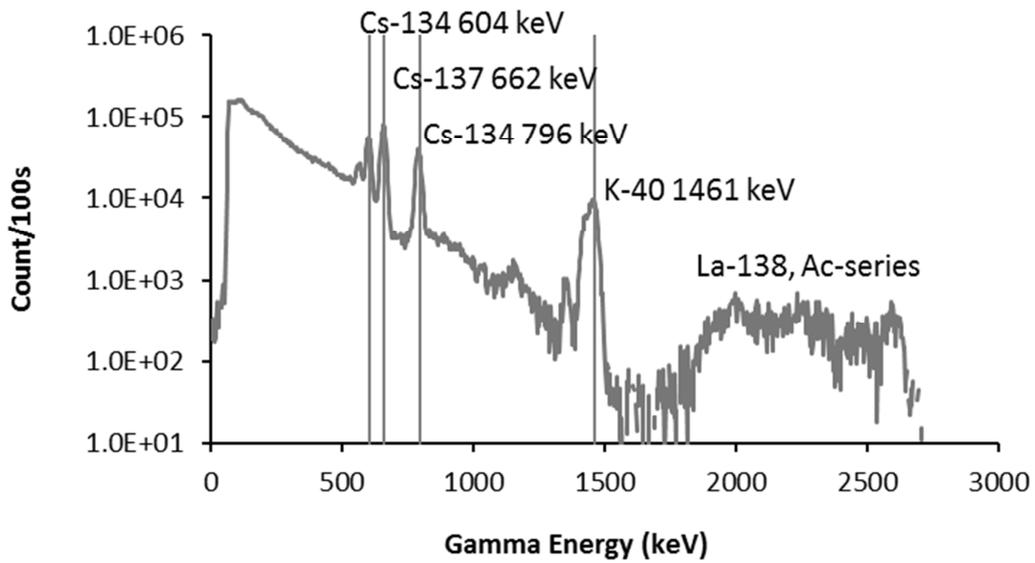


Fig. 4-5 J-subD の γ 線スペクトル例 (福島大学第3調整池において100 s間の測定を実施)

5. 計算コードを用いたレスポンス計算

本測定手法において、堆積物中の放射性物質濃度に換算するために、計算コードを用いて、検出器のレスポンス評価を行った。計算は、J-subD を対象に、光子・電子挙動シミュレーションで実績のあるカスケードモンテカルロ計算コード (EGS5) を用いて実施した。p-Scanner の換算に対しては、実際の環境中で J-subD と比較測定を行うことにより、設定することとした。

5.1. J-subD のモデル化

シミュレーションで構築した J-subD を Fig. 5-1 に示す。J-subD の体系は、設計図から Fig. 5-1 のように J-subD の検出器の構造と材質を再現しシミュレーションで構築した。J-subD を用いた計算結果が、実際の検出器の応答の再現性を、点線源の照射試験により確認した。線源は、 ^{137}Cs 及び ^{60}Co による線源を用い、その照射試験と同じ環境をシミュレーションで構築した。

線源試験の条件を Table 5-1 に示す。J-subD の検出器の測定面に対し、 ^{137}Cs 及び ^{60}Co の線源の距離を変えて照射した。EGS5 による計算条件を Table 5-2 に示す。また、検出器特有の分解能を再現するために、シミュレーション結果に対し、エネルギー分解能をガウス分布で補正した。

線源試験とシミュレーションの計算結果から得られたスペクトルの比較を Fig. 5-2 に示す。 ^{137}Cs 及び ^{60}Co とともに線源試験とシミュレーションのスペクトルの波形が概ね近似した。ただし、線源試験のスペクトルを見ると 800 keV 以上のスペクトルの差異は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ の自己汚染部分である。次に、線源と検出器の距離を変えて照射したエネルギーピークの計数率の比較を Fig. 5-3 に示す。全ての距離においてエネルギーピークの計数率の比は 15% 以内に収まった。以上から、シミュレーションで構築した J-subD の検出器の計算結果が線源試験をよく再現できたことから、シミュレーションによる体系は妥当であると言える。

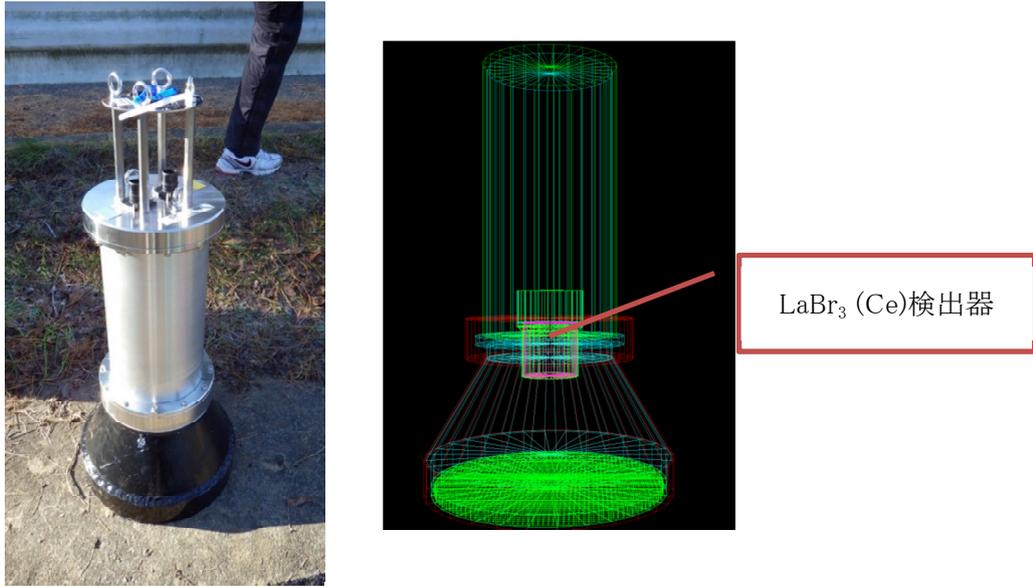


Fig. 5-1 J-subD の検出器 (左：写真、右：シミュレーションで構築した検出器)

Table 5-1 線源試験の照射条件

| | |
|---------------|---|
| 線源の照射位置 | 測定面の中心から 0 cm、10 cm、30 cm、50 cm、100 cm と距離を変えた位置 |
| 線源の強度 | 測定時点で ^{137}Cs が 1.6×10^6 Bq、 ^{60}Co が 6.6×10^5 Bq |
| 照射時間 | 約 10 分 |
| バックグラウンドの測定時間 | 約 30 分 |

Table 5-2 シミュレーションの計算条件

| | |
|---------------|--|
| 線源の照射位置 | 線源試験と同じ位置 |
| 線源の強度 | ^{137}Cs または ^{60}Co , 10^6 Bq |
| 線源の形状 | 線源の形状を再現。6 mm Φ ×2.8 mm の円柱 |
| 計算幅 | 1 keV |
| Cut off エネルギー | 10 keV |

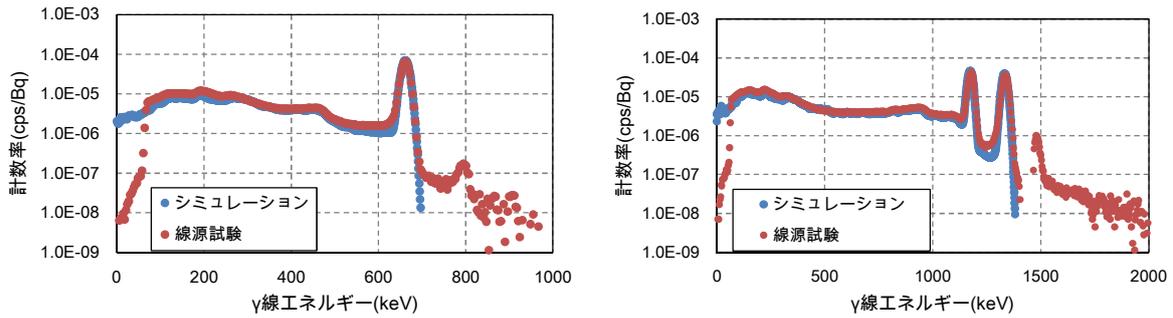


Fig. 5-2 線源試験とシミュレーションのスペクトルの比較(左: ^{137}Cs 、右: ^{60}Co)
(検出器を線源の距離 10cm)

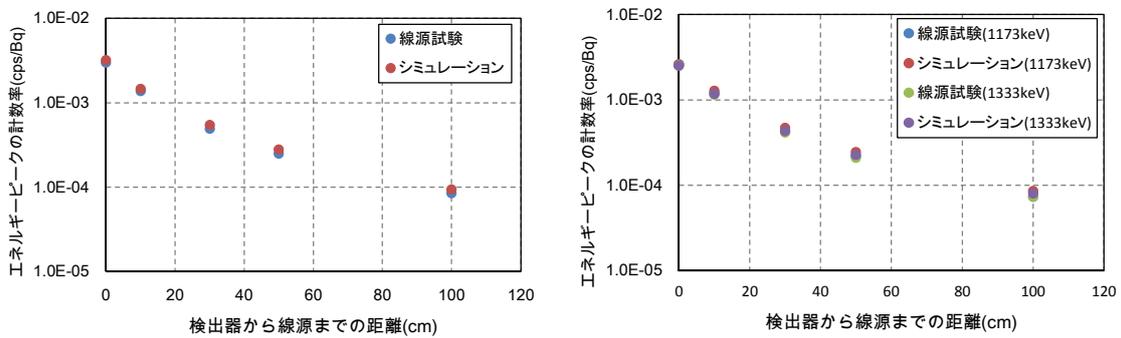


Fig. 5-3 線源試験とシミュレーションのエネルギーピークと距離による比較
(左: ^{137}Cs 、右: ^{60}Co)

5.2. 換算係数の設定

第3章で評価した堆積物密度及び放射性セシウムの深度分布条件を用いて、シミュレーションによりため池の水底に堆積した放射性セシウムの照射環境を構築し、J-subDの検出器のレスポンスを計算した。この結果から、検出器の計数率から放射性セシウムの濃度に換算する係数(放射性セシウム濃度換算係数)を求めた。また、土壌密度及び深度分布について異なる条件で計算を行い、その濃度換算への影響具合について評価した。

次に、実際にため池において、堆積物表層のJ-subDによる測定を実施し、評価した放射性セシウムを用いてJ-subDで測定した全11箇所のため池の放射性セシウム濃度を求め、エクマンパーシ型採取器で採取した土壌の放射性セシウム濃度と比較し、換算係数の妥当性を検討した。以下、詳細を記述する。

5.2.1. 換算係数の算出

シミュレーションの計算環境の概念図について Fig. 5-4 に示す。図のように、放射性セシウムを含んだ堆積物の表層にJ-subDの検出器を設置し、水で満たした。堆積物は水と土の混合物とし、第3章で評価した土壌密度 (1.2 g/cm^3) から、それぞれの化学組成比を簡易的に $\text{H}:\text{O}:\text{Si} = 0.533:0.400:0.067$ とした。また、第3章で評価した放射性セシウムの深度分布測定結果から、堆積物表層から10 cmまで均一に分布しているとして計算した。線源は、水中における

無限平板相当として、半径 300 cm の円柱線源を仮定した。計算の範囲は、半径 300 cm で高さ 80 cm の範囲とした。ここで、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の比は、事故直後に文部科学省の行った調査¹⁵⁾に従い、2011 年 8 月 13 日時点における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0.917$ を基準として採用した。

本条件で計算した、シミュレーションの γ 線スペクトルを Fig. 5-5 に示す。また、シミュレーションに条件と同じ場所において実測した γ 線スペクトルを Fig. 5-5 に示す。図に示すように、両者のスペクトルはよく一致し、今回の計算体系の妥当性を示している。

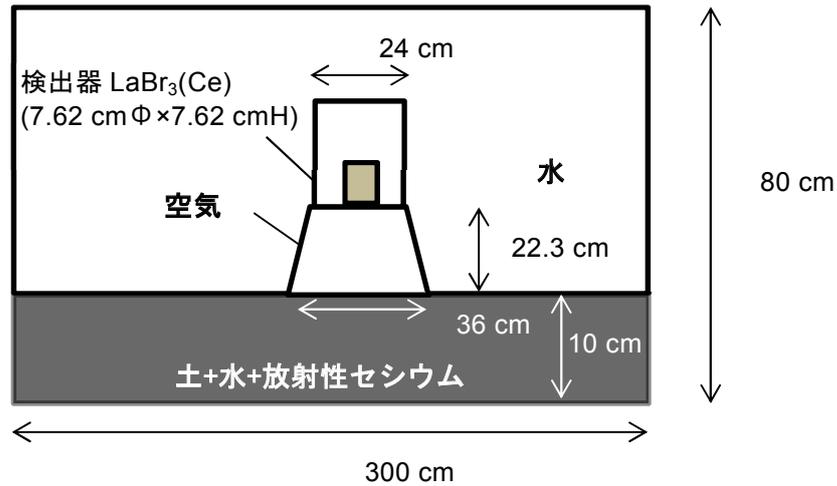


Fig. 5-4 シミュレーションの体系

Table 5-3 計算条件

| | |
|------|--|
| 線源条件 | |
| 計算範囲 | 300 cmΦ *× 80 cm の円柱 |
| 線源 | 土壌中に 300 cmΦ*×10 cm の ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の均一分布 |
| 土壌密度 | 1.2 g/cm ³ |
| 線源強度 | ^{137}Cs または ^{134}Cs , 3.0×10^{10} Bq |

* 水中における無限平板相当として

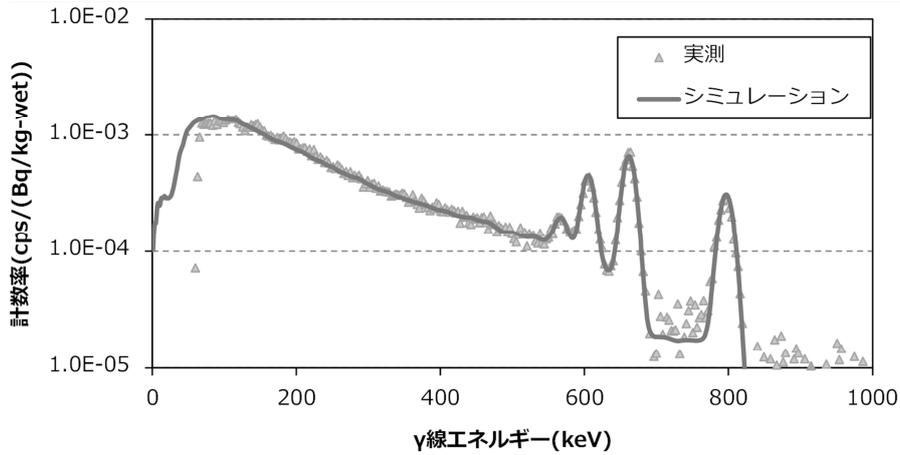


Fig. 5-5 シミュレーションによる γ 線スペクトルと実測値との比較

5.2.2. 鉛直分布の換算係数への影響

鉛直分布の違いによる換算値への影響を評価するため、放射性セシウムの分布の深度を 2.5、5、7.5、10、15、20、30、40 cm と変化させ、換算係数の計算を行った。なお、放射性セシウムの濃度は一定とし、堆積物の密度は 1.2 g/cm^3 とした。分布厚さが変化すると濃度は一定であるため、放射性セシウムのインベントリが変化することから、換算係数も変化することが予想される。

Fig. 5-6 に、鉛直分布の深度と計算結果から求めた単位濃度当たりの検出器の計数率との関係について示す。このように、鉛直分布が深くなるにつれて、インベントリが増加するので、計数率も増加する。しかしながら、20 cm 以深については、計数率は概ね一定となり、20 cm 以深の放射線については、堆積物中の自己遮蔽により、検出器位置で計数されないことを示している。すなわち、本方法では、堆積物表層から 20 cm までの放射性セシウムの平均的な濃度を測定できることになる。また、Fig. 5-6 に示すように、10 cm の換算係数を使用した場合、実際の鉛直分布の厚さが 5 cm の場合には 0.5 倍ほど過小評価に、20 cm の場合には、1.2 倍ほど過大評価になる。鉛直分布の厚さと換算係数の関係を Table 5-4 に示す。本資料の解析では、10 cm までの均一な分布による換算係数である ^{137}Cs : $50.6 [(\text{Bq/kg-wet}) \cdot \text{cps}^{-1}]$ 、 ^{134}Cs : $46.1 [(\text{Bq/kg-wet}) \cdot \text{cps}^{-1}]$ を使用した。

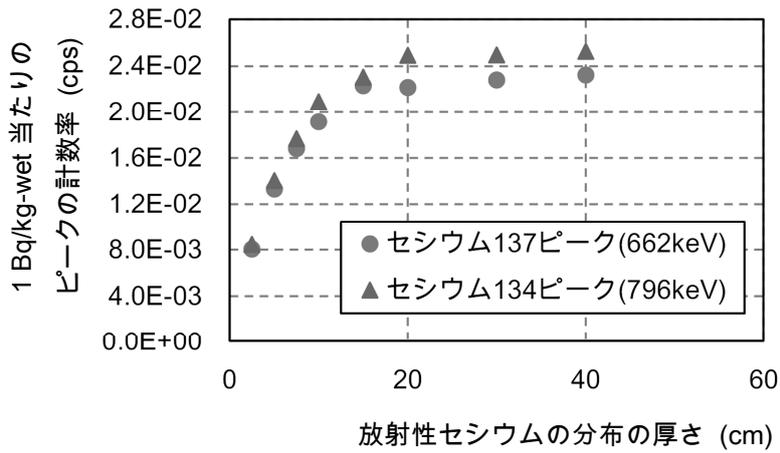


Fig. 5-6 放射性セシウムの単位濃度当たりの計数率と鉛直分布の関係

Table 5-4 鉛直分布の厚さと換算係数

| Depth (cm) | 換算係数 (Bq/kg-wet) · cps ⁻¹ | |
|------------|--------------------------------------|-------------------|
| | ¹³⁷ Cs | ¹³⁴ Cs |
| 2.5 | 21.2 | 18.6 |
| 5 | 35.1 | 30.9 |
| 7.5 | 44.4 | 38.9 |
| 10 | 50.6 | 46.1 |
| 15 | 58.9 | 50.8 |
| 20 | 58.5 | 54.9 |
| 30 | 60.2 | 55.0 |
| 40 | 61.4 | 55.7 |

5.2.3. 堆積物の密度の換算係数への影響

堆積物の密度は、放射線の自己遮蔽を考慮する上で重要なパラメータになり得る。ここでは、堆積物の密度を変化させ、J-subD の換算係数への影響をシミュレーションにて評価した。想定した堆積物の密度と化学組成比について、Table 5-5 に示す。放射性セシウムの濃度を一定、鉛直分布は 10 cm まで均一とし、土壌密度を変えて計算した計数率の結果を Fig. 5-7 に示す。1.1 g/cm³ から 1.5 g/cm³ まで一定割合で計数率が高くなり、0.1 g/cm³ ごとに約 6% 上昇することが分かった。一般的に、土壌密度が高いほど遮蔽効果の影響により計数率が下がるが、計算結果では密度が上昇すると放射線の計数率が大きくなる。これは、重量が増えることで単位体積当たりのインベントリが高くなるため、検出器が計数する数が増加するものと考えられる。いずれにしろ、密度による J-subD の換算係数への影響は鉛直分布と比べると、比較的小さいと推定される。

Table 5-5 堆積物密度と化学組成比の一覧

| 土壌密度 (g/cm ³) | H | O | Si |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| 1.1 | 0.600 | 0.367 | 0.033 |
| 1.2 | 0.533 | 0.400 | 0.067 |
| 1.3 | 0.467 | 0.433 | 0.100 |
| 1.4 | 0.400 | 0.467 | 0.133 |
| 1.5 | 0.333 | 0.500 | 0.167 |

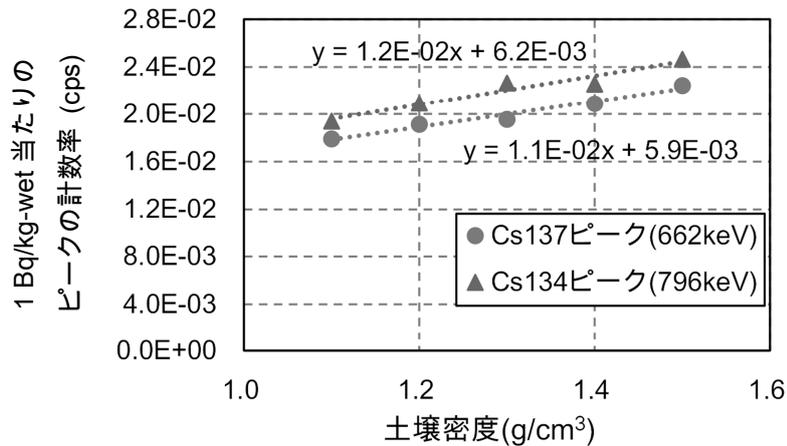


Fig. 5-7 土壌密度による影響 (放射性セシウムの深度 10cm)

5.2.4. 堆積物サンプルとの比較

5.2.1 項で設定した換算係数の妥当性を評価するために、実際にため池水中に J-subD を沈め、堆積物表層を測定した結果と、同じ場所において、エクマンパージ型採泥器を用いて堆積物サンプルを採取した結果の比較を試みた。採泥器で採取した堆積物サンプルは、攪拌し U8 容器に分取し、Ge 検出器で放射性セシウムを定量した。比較試験は、135 カ所で実施した。結果を、Fig. 5-8 に示す。このように、ばらつきはあるものの、J-subD の測定結果は、試料分析結果の 0.5 ~ 2.0 倍の範囲に入ることが分かる。J-subD の定量結果と試料分析結果の差を J-subD の定量結果で除した相対偏差のヒストグラムを Fig. 5-9 に示す。平均値は、-0.12 となり、負の領域に偏りが見られる。これは、エクマンパージ型採泥器は、試料採取時に上水のパージと一緒に放射性セシウムを多く含む粒径の細かい浮泥部分が流れ出て、試料として採取できないことが要因かと考えられる。環境省のまとめた報告書にもその問題点は指摘されている¹⁶⁾。

また、同様に農業用ため池において、不攪乱柱状採泥器により表層から 50 cm までの堆積物コア試料を 11 カ所で採取した。採取した試料は、表層から 5 cm 間隔で U8 容器に分取し、放射性セシウム濃度を分析した。Fig. 5-10 に、堆積物コアの測定結果のうち、堆積物表層から 10 cm について平均化した濃度と J-subD の定量結果の散布図を示す。点数は少ないもの、エクマンパージ型採泥器を用いた堆積物サンプルの測定結果と比較すると相関関係がよいことが分かる。この結果は、上記に示した Fig. 5-8 のばらつきの要因が、エクマンパージ型採泥器の

特徴に起因するという考察を支持するものである。いずれにしろ、これらの結果から、堆積物サンプルとの相関関係にあることから、計算結果の妥当性を示している。

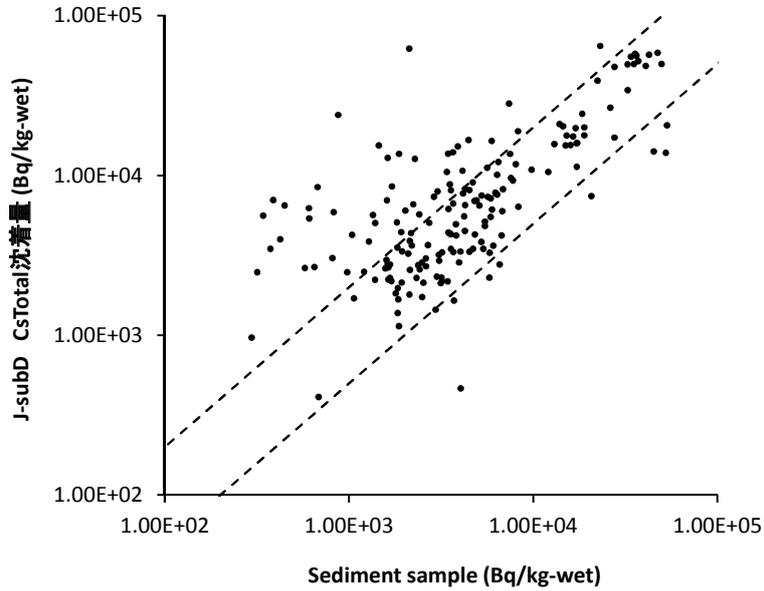


Fig. 5-8 J-subD による堆積物中の放射性セシウム定量結果と堆積物サンプルの分析結果の比較

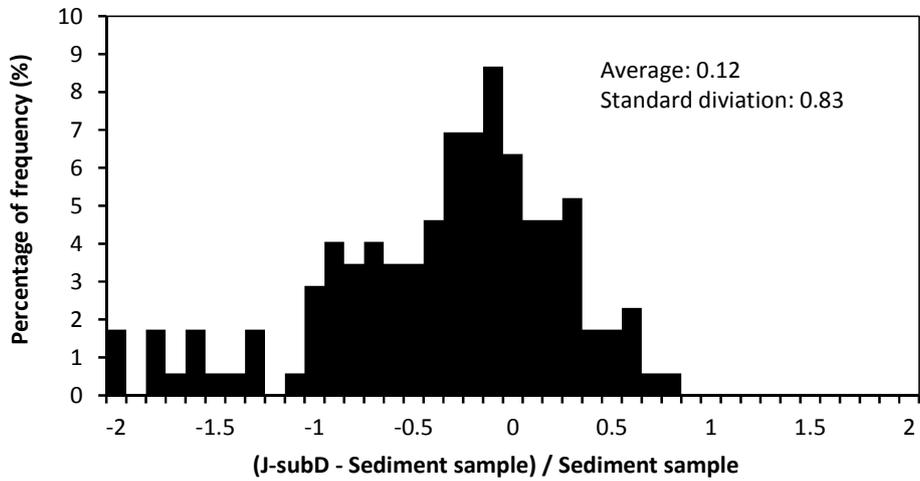


Fig. 5-9 J-subD による堆積物中の放射性セシウム定量結果に対する堆積物サンプルの分析結果の相対偏差のヒストグラム

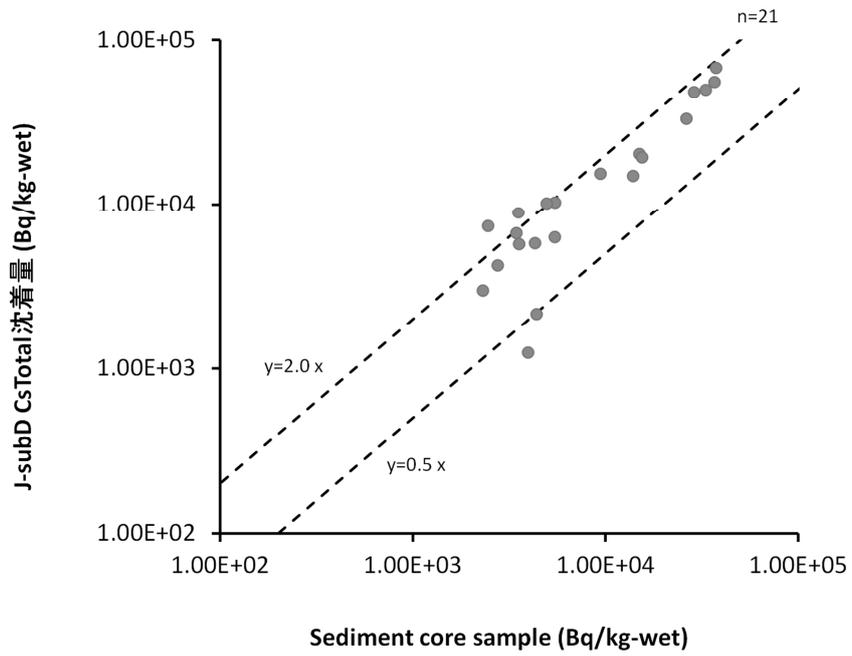


Fig. 5-10 J-subDによる堆積物中の放射性セシウム定量結果と堆積物コアサンプルの分析結果（表層から10cmまでの平均値）の比較

6. 測定方法

6.1. 人員の配置及び手順

測定は、ゴムボートを2台用意し、p-Scannerの両端を水底に沈めることで行った。測定に要する人員は、監督者1名、ボート操作員2名、測定器の操作員2名、測量による位置誘導者1名の6名体制で実施した。本測定（500 m²程度の平均的なため池）に要する時間は、3日間程度であった。

測定の手順を以下に示す。

- 1) 測線計画の作成（p-Scannerの測線幅5～10 m）
- 2) キャリブレーションラインの設定（p-Scanner、J-subD、堆積物サンプルの比較場所）
- 3) 環境整備（測定場所の草刈り、ボート移動のためのガイド線の設置）
- 4) 測量による基準点の設定
- 5) p-Scannerの測定
- 6) J-subDの測定（キャリブレーションライン）
- 7) 堆積物サンプルの採取

以下、詳細を記述する。

6.2. 測定位置の取得

測定で必要なのが、位置情報の取得である。特に、キャリブレーションラインでは、なるべく同じ場所で測定する必要があるため、位置精度の高い手法の適用が必要となる。ここでは、Topcon社製のHiper-Vを用いて、Global Positioning System (GPS)とGlobal Navigation Satellite System (GLONASS)から正確な基準点を設定し、イメージングステーション (IS305)により、p-Scanner測定点の両端の位置情報を記録した。記録した位置情報を元にあらかじめ、IS305内にキャリブレーションラインを設定し、その場所まで誘導することにより、J-subD及び堆積物サンプルを採取した。

本システムによる位置精度は数cmであるが、操作員によるボート操作の精度を考慮すると、1～2 mの誤差になる。

6.3. 放射線測定

p-Scannerはなるべく、水底に密着するように設置し、表層の堆積物の舞い上がりが落ち着くまで待って、100 s間の測定を行った。J-subDについても、同様に、水底に密着するように設置し、表層の堆積物の舞い上がりが落ち着くまで待って、100 s間の測定を行った。

堆積物表層が平坦でない場合や水生植物等が生い茂っているような、検出器が密着しない場合には、水による放射線の遮蔽により、測定値に不確かさが生じる。Fig. 6-1に、J-subDによる計数率と堆積物表層からの距離の関係について示す。このように堆積物表層から10 cm距離が離れると放射線は50 %程度に減衰する。堆積物表層から50 cmになると堆積物からの放射線の計数は検出下限以下となることが分かる。今回は、全データについて、密着しているとして評価を行った。なお、検出器と堆積物表層との関係については、9.2節で考察する。

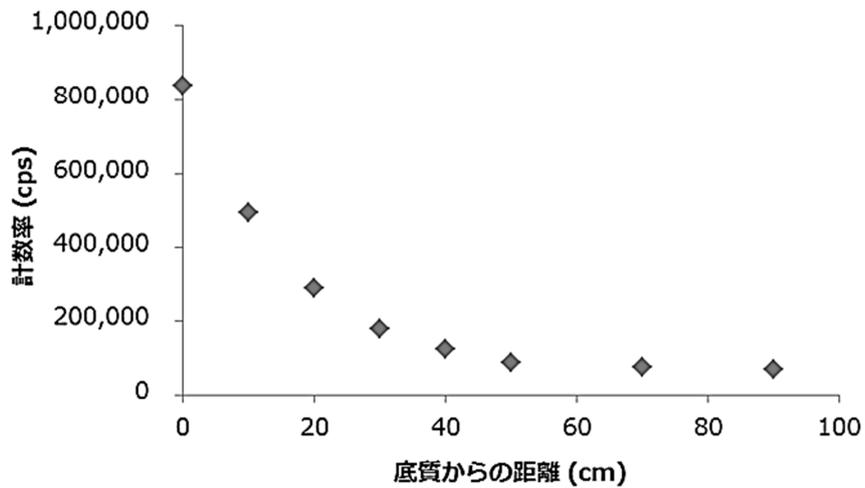


Fig. 6-1 J-subD による計数率と堆積物表層からの距離の関係例

6.4. 土壌サンプリング

キャリブレーションラインに沿って、エクマンパーズ型採泥器を用いて堆積物サンプルを採取した。採泥器で採取した堆積物サンプルは、攪拌し U8 容器に分取し、Ge 検出器で放射性セシウムを定量した。

7. 解析方法

7.1. p-Scanner の換算方法

p-Scanner は、検出部への放射線の沈着以外に光の減衰率がパラメータとなるため、計算コードによるシミュレーションが難しい。そこで、5 章で述べたように、シミュレーションによる換算ができる J-subD と比較測定（キャリブレーション）を行うことにより、p-Scanner の計数率から堆積物中の放射性セシウムの濃度に換算する係数を設定することとした。ため池の 278 ポイントにおける p-Scanner と J-subD の比較測定結果について Fig. 7-1 に示す。p-Scanner の計数率は、点線源による試験時のピーク半値幅を考慮し、50 cm 毎の計数率を積算し、J-subD の測定場所と同じ部分の計数率を比較した。図に示すように、両者はよい相関関係にある。Fig. 7-1 に示した、各測定値の比を取り、近似直線の傾きからのずれの割合（相対偏差）をヒストグラムにして、Fig. 7-2 に示す。このように、0 付近を頂点とした左右対称な分布を示す。この結果から、J-subD と比較することによって、p-Scanner 換算係数が設定可能であると考えられる。

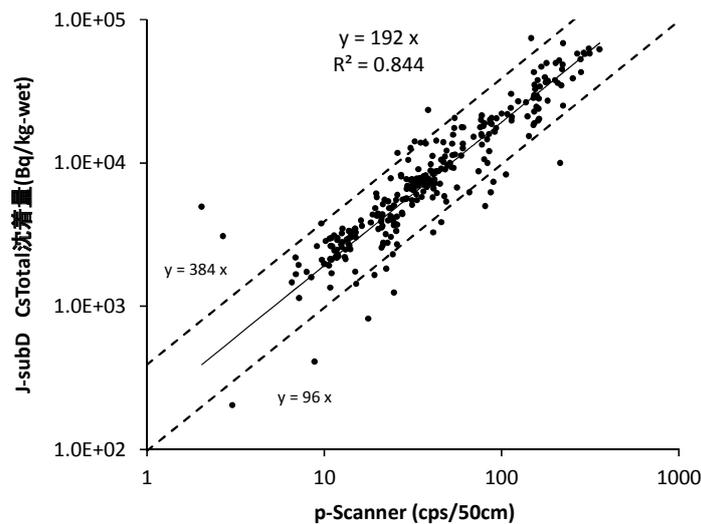


Fig. 7-1 J-subD による放射性セシウムの沈着量測定結果と p-Scanner の計数率の比較

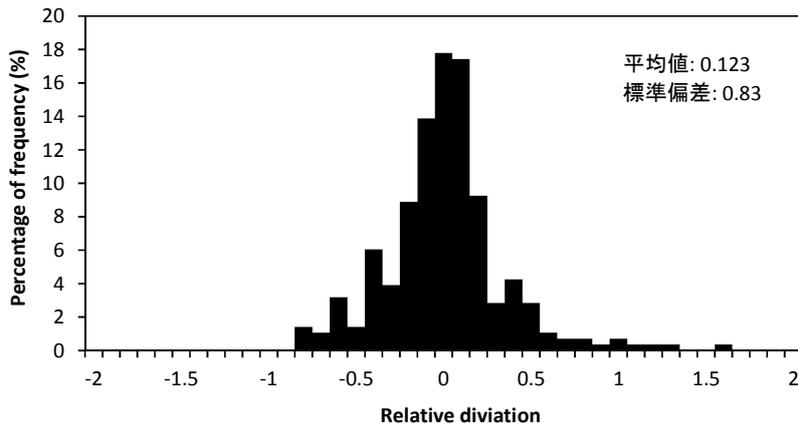


Fig. 7-2 J-subDによる放射性セシウムの沈着量測定結果と p-Scanner の計数率における相対偏差のヒストグラム

7.2. p-Scanner の感度変化

前章で、p-Scanner の計数率と J-subD の関係はよい相関があることを示した。p-Scanner の換算計数は、各現場において、必ず J-subD と比較し、機器の健全性を判断する目安としていた。p-Scanner の換算係数と最初に測定を実施してからの日数との関係を Fig. 7-3 に示す。このように、ばらつきは大きいですが、日がたつにつれて上昇傾向（見かけ上、p-Scanner の感度が低下する方向）にあることが分かる。この原因として、p-Scanner の検出部の劣化や光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) の故障等が考えられる。いずれにしても、各ため池で J-subD と比較することにより、p-Scanner の健全性に対する考察も可能となる。今回は、この関係性を考慮し、換算係数を決定した。

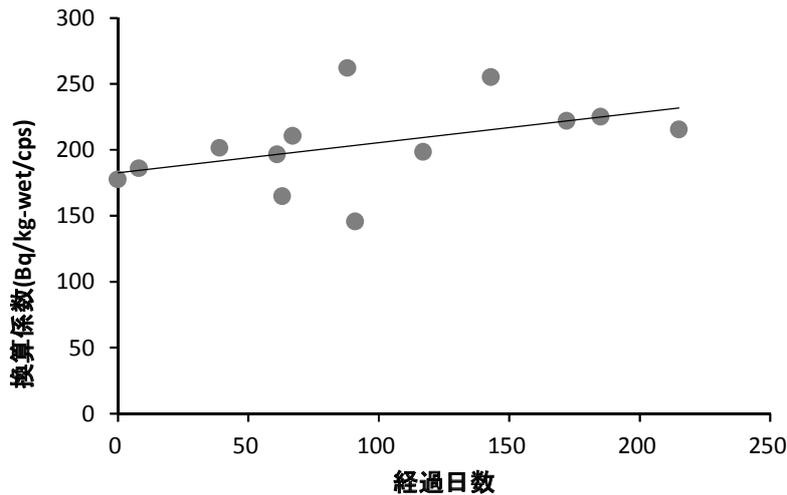


Fig. 7-3 p-Scanner のレスポンスの変動

7.3. 検出下限値

p-Scanner の検出下限値を評価するために、放射性セシウムの存在しない池において、バックグラウンド測定を実施し、検出下限値の評価を行った。方法は、p-Scanner について、北海道のエコロジーパークの池において、100 s 間の測定を行い、得られた計数率をバックグラウンドとし、Kaiser の 3σ 法^{17,18)}を用いて、検出下限値を評価した。J-subD については、 γ 線スペクトルで天然核種との弁別が可能であるため、堆積物表層から 90 cm の距離を確保し、水面からは 1m 以上の距離の場所においてバックグラウンド測定を実施し、同じく Kaiser の 3σ 法から検出下限値を算出した。結果を Table 7-1 に示す。なお、本検出下限値は、Table 5-3 に示したような条件での数値となる。

Table 7-1 検出下限値 (Bq/kg-wet)

| p-Scanner | J-subD | | |
|-----------|----------|-------------------|-------------------|
| | Cs-total | ¹³⁷ Cs | ¹³⁴ Cs |
| 61 | 220 | 140 | 81 |

7.4. マップの作成

ArcGIS (ESRI, Co. Ltd.) を用いて、クリギングにより 1m 線量率分布図、放射性セシウム沈着量分布図を作成した¹⁹⁾。今回のマッピングでは、50 cm メッシュとし、検索範囲のポイント数を 24 にして行った。なお、測定時期などの違いで同じ測線のデータに差が出た場合は、ラスタデータのモザイク処理によって平均値とした。背景地図には、水土里ネットの所有する航空地図を利用した。

7.5. p-Scanner の換算結果と土壌サンプリングとの比較

本手法の妥当性を評価するために、実際にため池堆積物を p-Scanner で測定した結果と同じ場所において、エクマンパージ型採泥器を用いて堆積物サンプルを採取した結果の比較を試みた。比較試験は、150 カ所で実施した。結果を、Fig. 7-4 に示す。このように、ばらつきはあるものの、p-Scanner の測定結果は、試料分析結果の 0.5 ~ 2.0 倍の範囲に入ることが分かる。p-Scanner の定量結果と試料分析結果の差を p-Scanner の定量結果で除した相対偏差のヒストグラムを Fig. 7-5 に示す。平均値は、-0.081 となり、負の領域に偏りが見られる。これは、5.2.4.項で述べたようにエクマンパージ型採泥器は、試料採取時に上水のパージと一緒に放射性セシウムを多く含む粒径の細かい浮泥部分が流れ出て、試料として採取できないことが要因かと考えられる。しかしながら傾向として、堆積物サンプルの定量結果と一定の相関関係があり、測定方法の妥当性を示している。

一方、堆積物コアサンプルの試料を採取し、表層から 10 cm までの平均の放射性セシウム濃度と比較した結果を Fig. 7-6 に示す。図に示すようにプロットは概ね 0.5 ~ 2.0 倍の範囲に入り、Fig. 7-4 に示したエクマンパージ型採泥器によるサンプリング結果との比較よりもばらつきは小さい。一般的に、堆積物コアサンプルはエクマンパージ型採泥器によるサンプリングと比較して攪乱が小さいとされており、この結果は本測定方法の妥当性を示している。しかしな

がら、比較点数が少ない (n=21) ため、今後、さらなる比較評価が必要である。

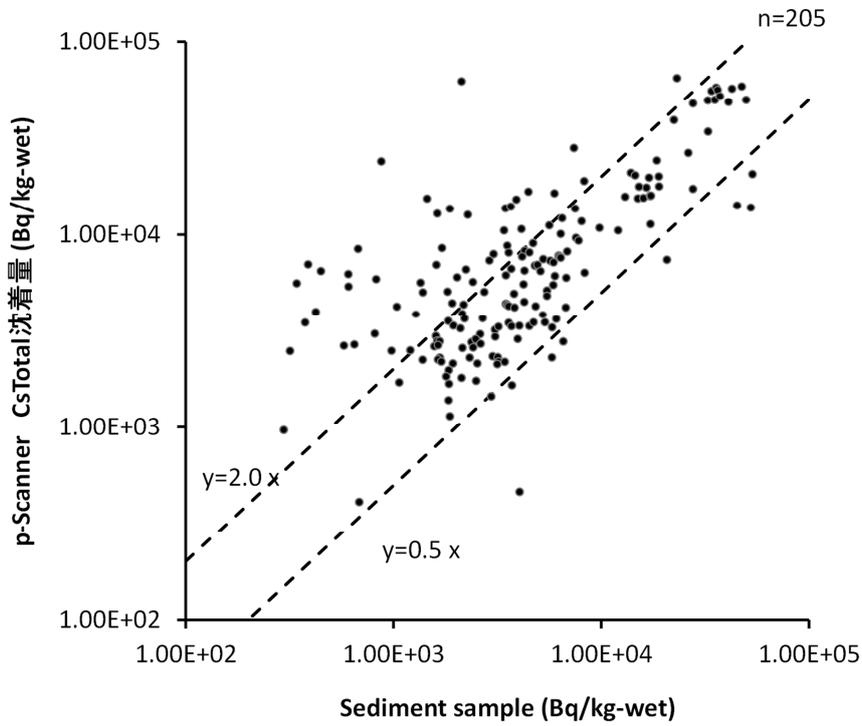


Fig. 7-4 p-Scanner による堆積物中の放射性セシウム定量結果と堆積物サンプルの分析結果の比較

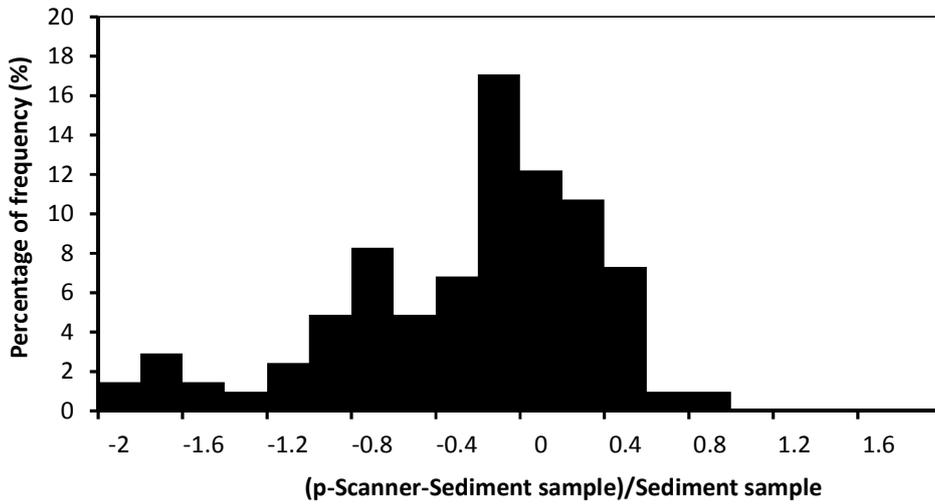


Fig. 7-5 p-Scanner による堆積物中の放射性セシウム定量結果に対する堆積物サンプルの分析結果の相対偏差のヒストグラム

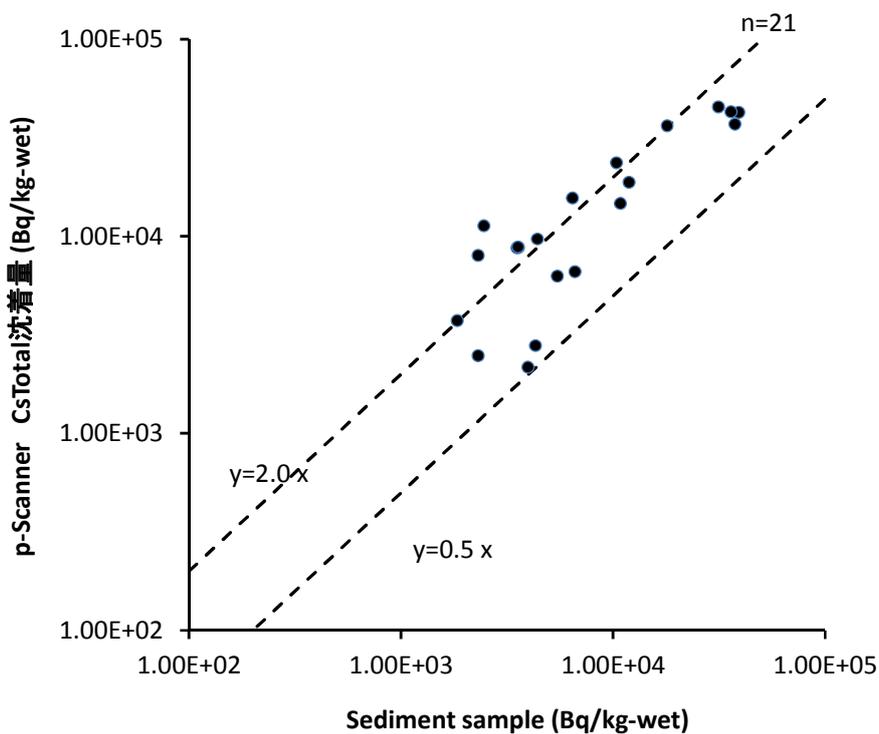


Fig. 7-6 p-Scanner による堆積物中の放射性セシウム定量結果と堆積物コアサンプルの分析結果（表層から 10cm までの平均値）の比較

8. 測定結果

福島県内の 10 カ所のため池を選定し、本測定手法を適用して、水底の堆積物中の放射性物質濃度のマップを作成した。Appendix に、今回の調査値の外観と現場観察で定性的に判断しうるため池の特徴について記載した。Table 8-1 に、選定した測定場所、位置情報、集水域面積、平均水深、エクマンパージ型採泥器で採取した堆積物サンプルの平均密度・含水率の平均、p-Scanner で測定した湿潤重量当たりの放射性セシウムの濃度 (Bq/kg-wet) 及び含水率の平均から計算した乾燥重量当たりの放射性セシウムの濃度 (Bq/kg-dry) を示す。この中で、鑑ヶ池については、浚渫作業の前後で測定を行った。東笹田池については、2013 年 4 月上旬 (1 回目) と 9 月下旬 (2 回目) に測定を行った。東笹田池については、1 回目の直前に浚渫作業が実施されている。この中で最大値を示したのは、東笹田池の 1 回目であり、70.6 kBq/kg-wet であった。平均値としても、東笹田池が最も高く 29.8 kBq/kg-wet であった。Fig. 8-1 に各池の平均値をプロットし、最大値及び最小値を示す。

また、Table 8-1 及び Fig. 8-1 に、農水省及び福島県が実施した堆積物サンプル中の乾燥重量当たりの放射性セシウムの濃度測定結果について示す。Fig. 8-1 を見ると、農水省及び福島県が実施した結果は、今回の測定結果の最大値及び最小値の範囲に概ね入っている。この結果は、今回開発した方法がポイントでの堆積物サンプリングでは、捉えきれない池底の堆積物の放射性セシウムの濃度分布を捉えているものであり、方法の有用性を示している。寺ノ前池については、農水省及び福島県が実施した測定結果が、今回の測定結果の最大値を上回った。この結果は、堆積物サンプルが局所的な放射性物質濃度の高い場所を採取したことが考えられるが、原因の解明にはより詳細な調査が必要である。

Fig. 8-2～Fig. 8-12 に、測定した全池の湿潤重量当たりの放射性セシウムの濃度分布を示す。測定結果は、測定の最終日に放射性セシウムの物理的半減期から補正を行っている。なお、背景地図には、背景地図には、水土里ネットの所有する航空地図を利用した。このように、今回の方法は、濃度分布を視覚的に捉えることができる。

Table 8-1 測定結果一覧

| No | 池名 | 市町村 | 調査日 | 緯度 | 経度 | 集水域面積 [ha] | 水深 (平均) [m] | 密度 [g/cm ³] | 含水率 [%] | p-Scanner | | | | | | 堆積物サンプル測定結果 [Bq/kg] ⁷⁾ |
|----|-----------|------|------------|----------|-----------|------------|-------------|-------------------------|---------|-------------|----------|----------|-------------|------------|------------|-----------------------------------|
| | | | | | | | | | | [Bq/kg-wet] | | | [Bq/kg-dry] | | | |
| | | | | | | | | | | max | min | average | max | min | average | |
| 1 | 鱸ヶ池(遼漢前) | 本宮市 | 4/3-4/4 | 37.53693 | 140.40676 | 2.3 | 1.1 | - | - | 1.09E+04 | 8.30E+02 | 6.05E+03 | 3.30E+04 * | 2.51E+03 * | 1.83E+04 * | 1.09E+04 |
| 2 | 東笹田池(1回目) | 本宮市 | 4/11-4/12 | 37.50089 | 140.42276 | 10 | 1.0 | 1.4 | - | 7.06E+04 | 3.44E+03 | 2.98E+04 | 2.14E+05 * | 1.04E+04 * | 9.03E+04 * | 9.40E+04 |
| 3 | 鱸ヶ池(遼漢後) | 本宮市 | 5/13-5/14 | 37.53693 | 140.40676 | 2.3 | 1.1 | 1.5 | 64.1 | 9.14E+03 | 6.89E+02 | 5.09E+03 | 2.55E+04 | 1.92E+03 | 1.42E+04 | 1.09E+04 |
| 4 | 北屋敷池 | 南相馬市 | 6/4-6/5 | 37.63842 | 140.90108 | 2.6 | 1.2 | - | - | 1.23E+04 | 2.87E+03 | 7.75E+03 | 3.73E+04 * | 8.71E+03 * | 2.35E+04 * | 2.22E+04 |
| 5 | ヤボケ池 | 南相馬市 | 6/6-6/7 | 37.60761 | 140.90946 | 2.8 | 1.0 | 1.3 | 68.4 | 5.54E+03 | 1.51E+03 | 3.55E+03 | 1.75E+04 | 4.78E+03 | 1.13E+04 | 1.20E+04 |
| 6 | 福島大学第3調整池 | 福島市 | 6/11-6/12 | 37.68014 | 140.45566 | 13 | 3.0 | 1.2 | 72.5 | 4.72E+04 | 9.17E+02 | 2.01E+04 | 1.72E+05 | 3.34E+03 | 7.31E+04 | - |
| 7 | 堀沢沼 | 伊達市 | 7/1-7/4 | 37.74363 | 140.57072 | 16 | 1.5 | 1.3 | 57.5 | 2.51E+04 | 2.03E+03 | 1.18E+04 | 5.91E+04 | 4.77E+03 | 2.77E+04 | 2.37E+04 |
| 8 | 堀内沼 | 伊達市 | 7/5 | 37.73674 | 140.59603 | 8.6 | 1.0 | 1.1 | 78.1 | 6.33E+03 | 7.52E+02 | 3.68E+03 | 2.89E+04 | 3.44E+03 | 1.68E+04 | 5.00E+03 |
| 9 | 道法内池 | 本宮市 | 7/31-8/2 | 37.51384 | 140.47854 | 9.2 | 1.0 | 1.1 | 79.6 | 9.83E+03 | 3.59E+02 | 5.77E+03 | 4.81E+04 | 1.76E+03 | 2.83E+04 | 2.19E+03 |
| 10 | 大池 | 本宮市 | 8/21-8/29 | 37.50349 | 140.41794 | 18 | 3.0 | 1.2 | 64.1 | 1.54E+04 | 4.38E+02 | 6.65E+03 | 4.28E+04 | 1.22E+03 | 1.85E+04 | 2.29E+03 |
| 11 | 東笹田池(2回目) | 本宮市 | 9/24-9/26 | 37.50089 | 140.42276 | 10 | 1.0 | 1.3 | 64.5 | 6.28E+04 | 1.18E+03 | 2.11E+04 | 1.77E+05 | 3.33E+03 | 5.95E+04 | 5.50E+04 |
| 12 | 寺ノ前池 | 南相馬市 | 10/8-10/10 | 37.60033 | 140.97509 | 11 | 1.5 | 1.5 | 56.1 | 3.42E+03 | 2.98E+02 | 2.26E+03 | 7.78E+03 | 6.78E+02 | 5.14E+03 | 1.04E+04 |
| 13 | 大日沢 | 南相馬市 | 10/21-11/9 | 37.70343 | 140.92550 | 16 | 3.0 | 1.4 | 61.4 | 4.73E+03 | 4.81E+02 | 2.58E+03 | 1.22E+04 | 1.25E+03 | 6.69E+03 | 3.10E+03 |

* Fig. 3-5から含水率の平均値67%で計算

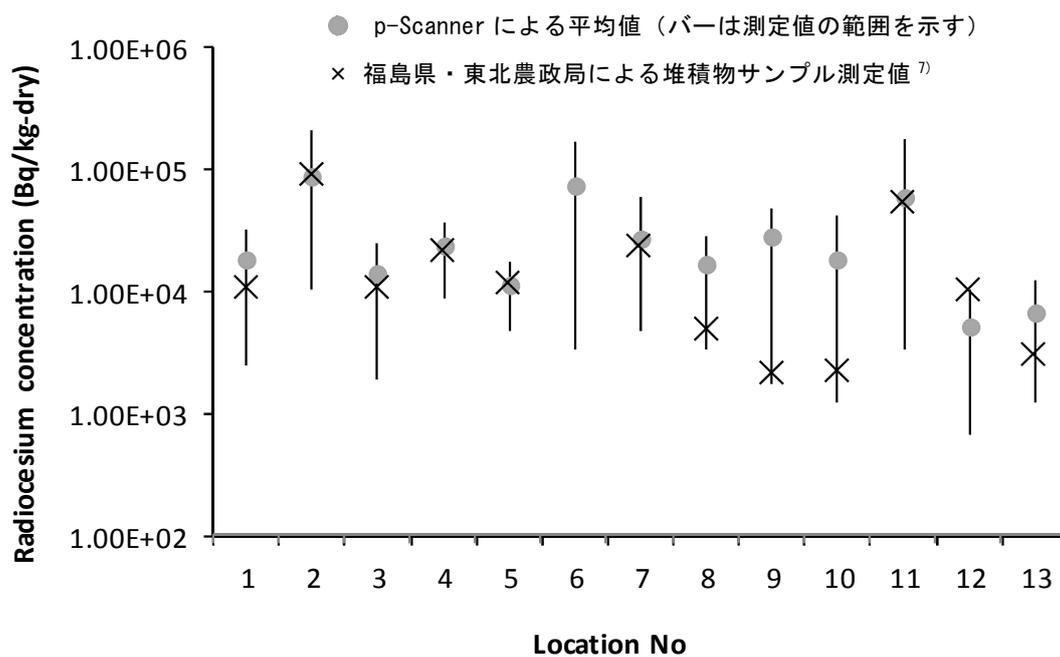


Fig. 8-1 各測定点における p-Scanner による測定結果の比較

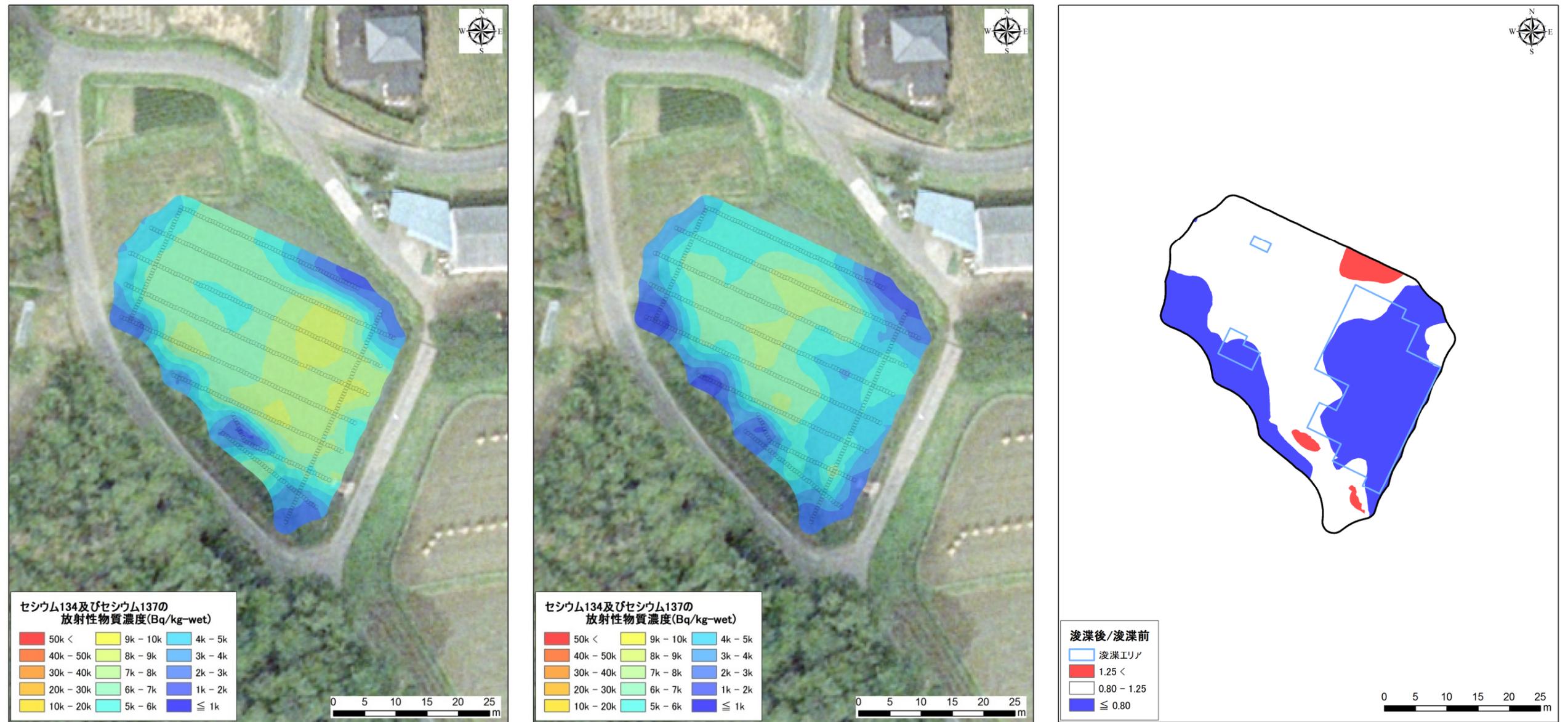


Fig. 8-2 鑑ヶ池における水底の放射性セシウム濃度マップ (左: 浚渫前、中: 浚渫後、右: 浚渫前後の比画像及び浚渫場所)

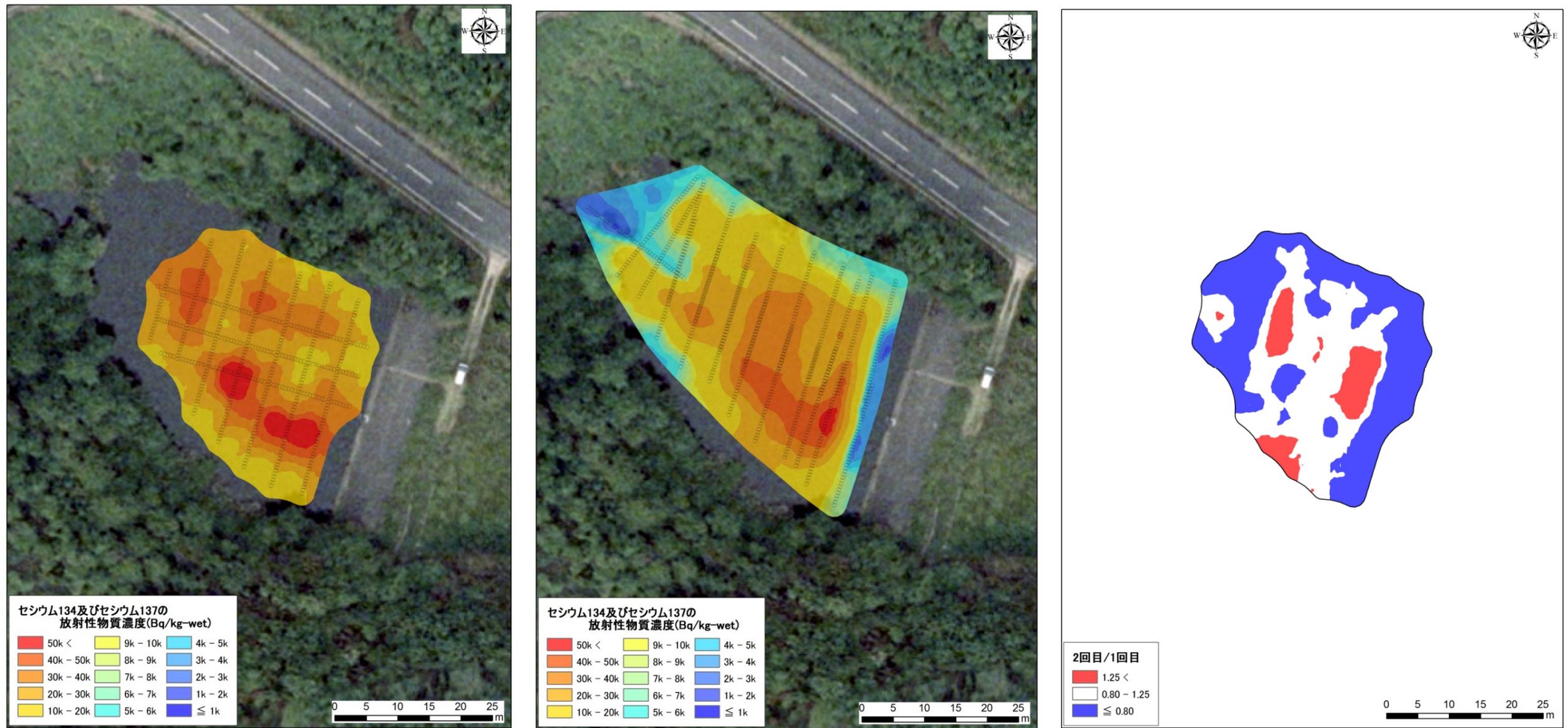


Fig. 8-3 東笹田池における水底の放射性セシウム濃度マップ(左: 浚渫後、中: 浚渫後約5ヵ月後、右: 浚渫前後の比画像)

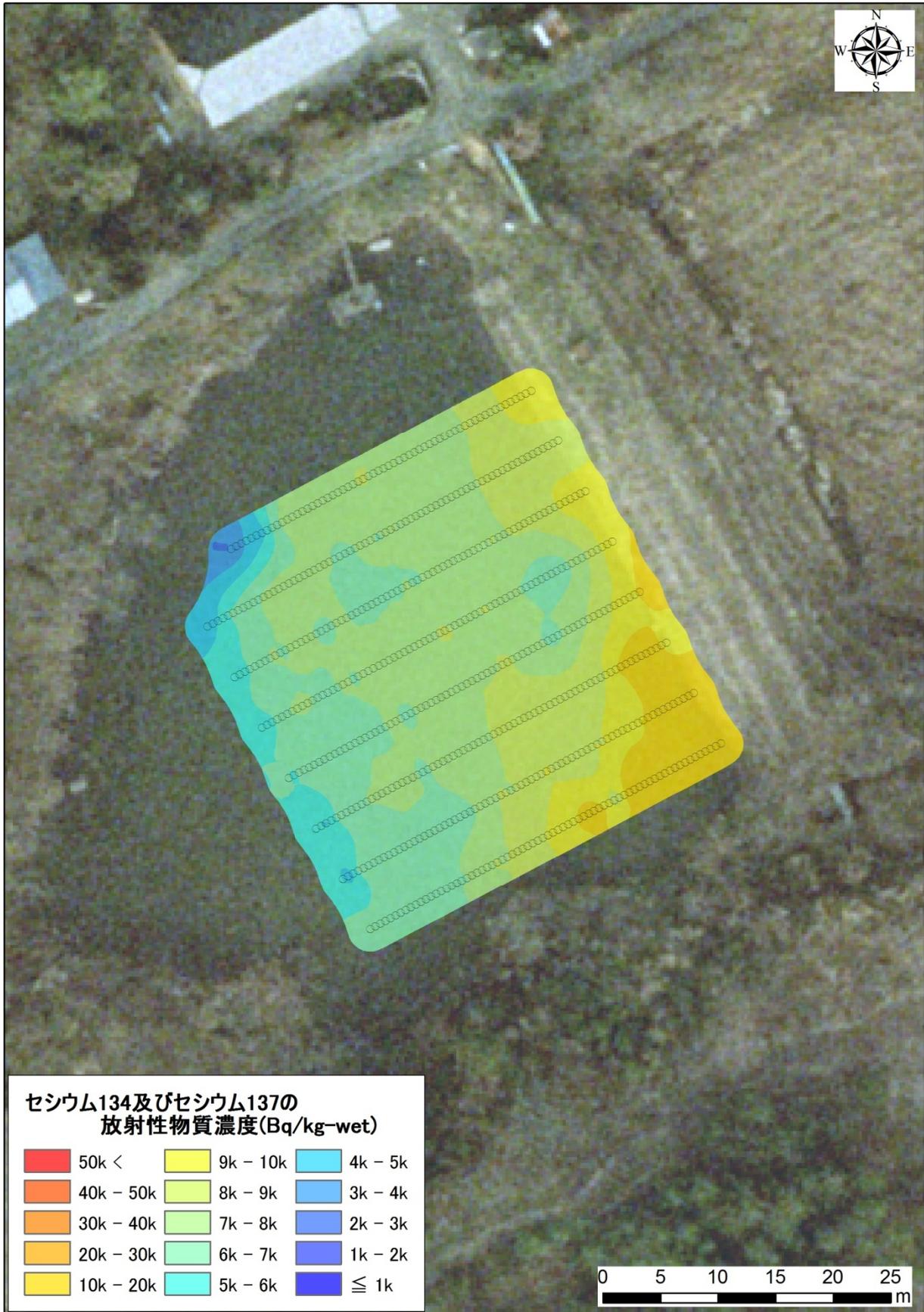


Fig. 8-4 北屋敷池における水底の放射性セシウム濃度マップ

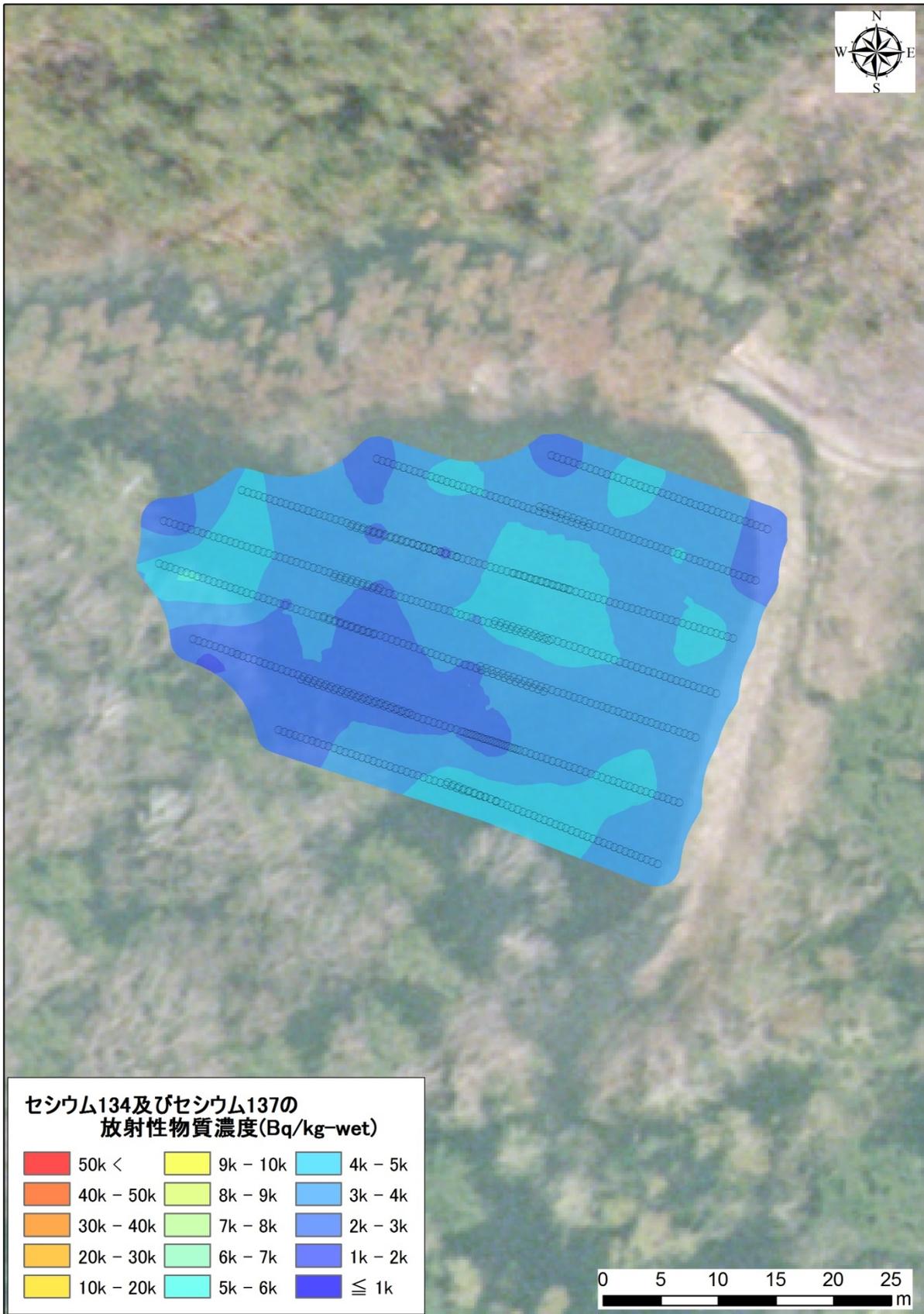


Fig. 8-5 ヤボケ池における水底の放射性セシウム濃度マップ



Fig. 8-6 福島大学第3調整池における水底の放射性セシウム濃度マップ
(この背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである)

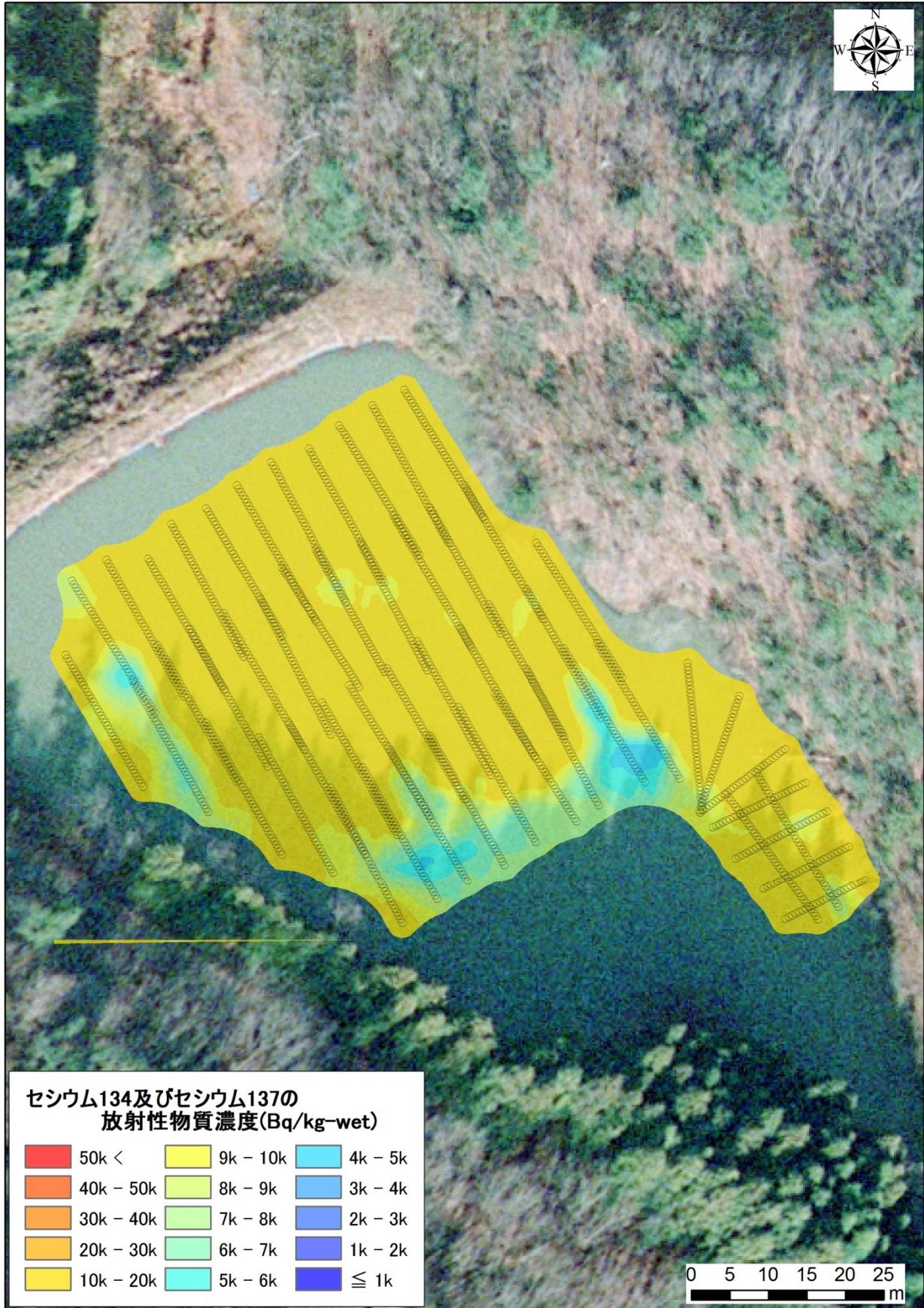


Fig. 8-7 堀沢池における水底の放射性セシウム濃度マップ



Fig. 8-8 梶内沼における水底の放射性セシウム濃度マップ

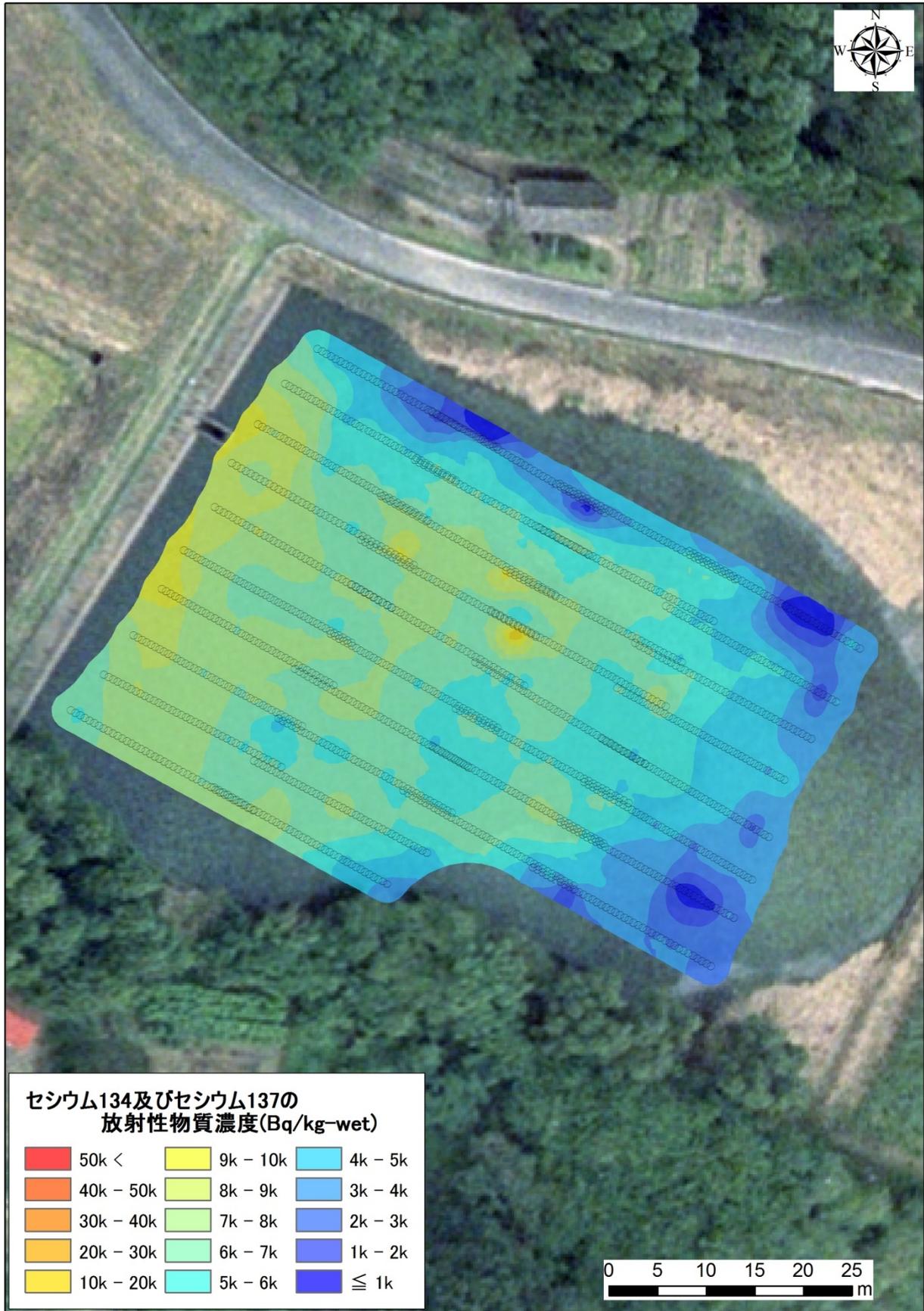


Fig. 8-9 道法内池における水底の放射性セシウム濃度マップ

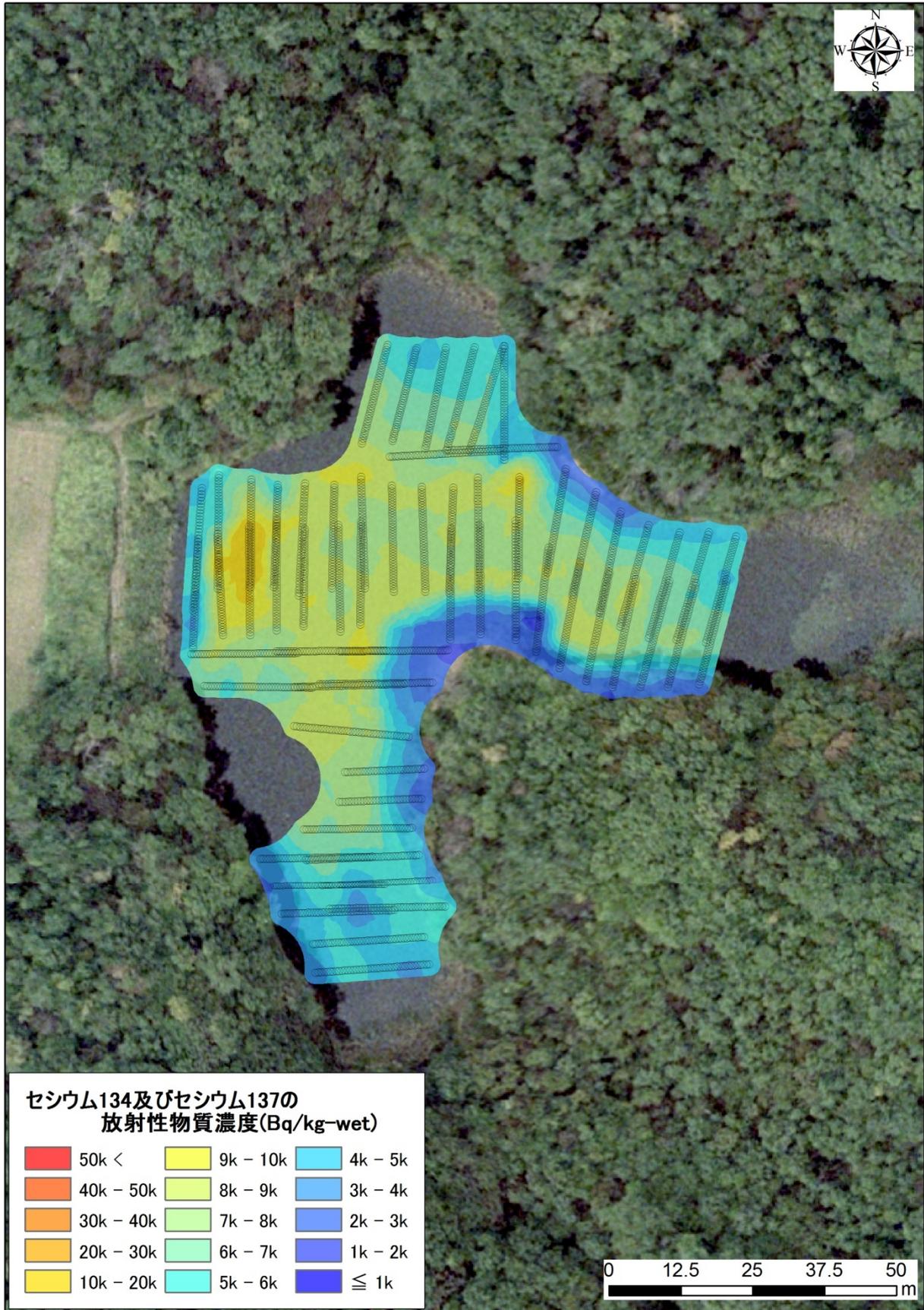


Fig. 8-10 大池における水底の放射性セシウム濃度マップ

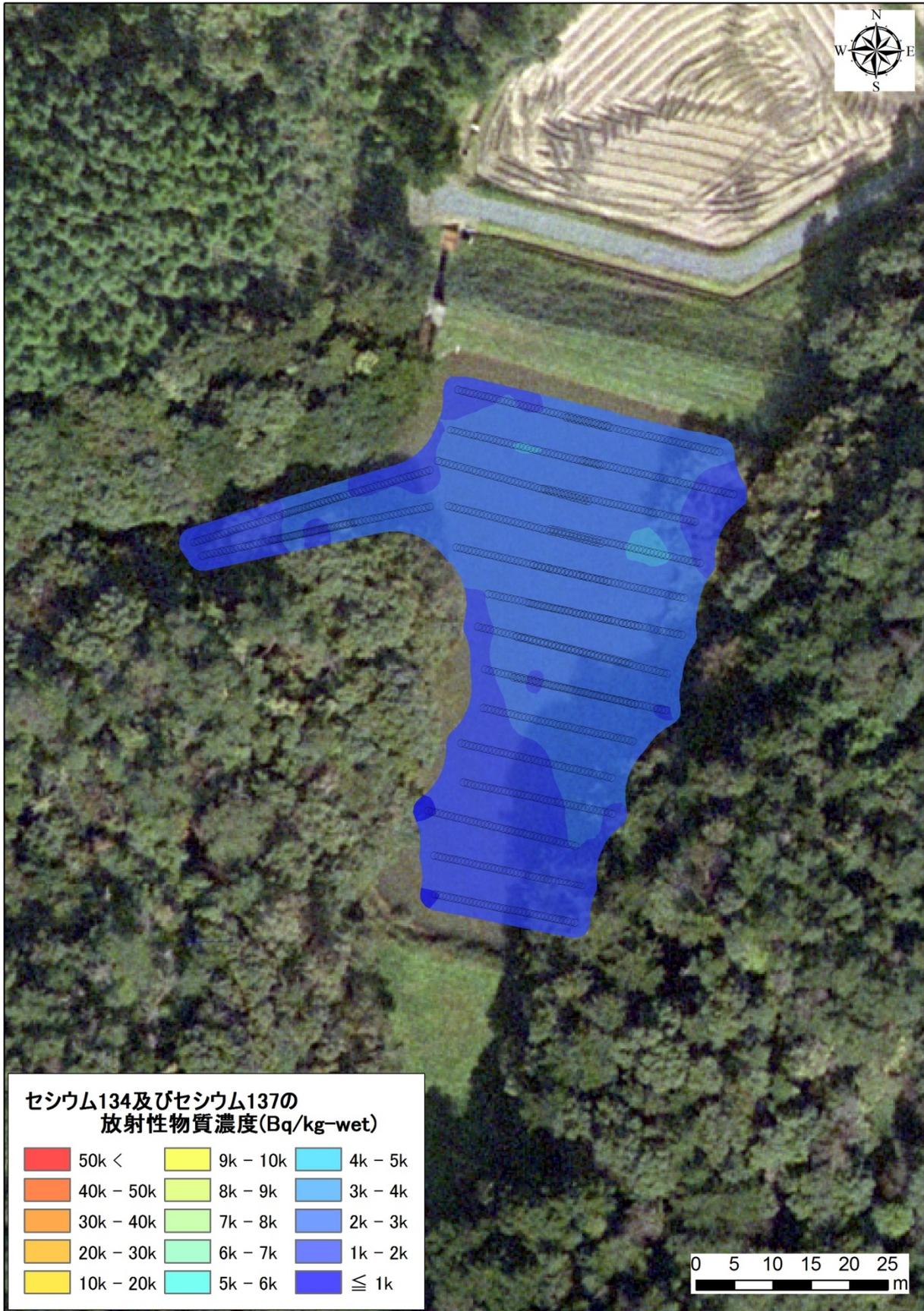


Fig. 8-11 寺ノ前池における水底の放射性セシウム濃度マップ

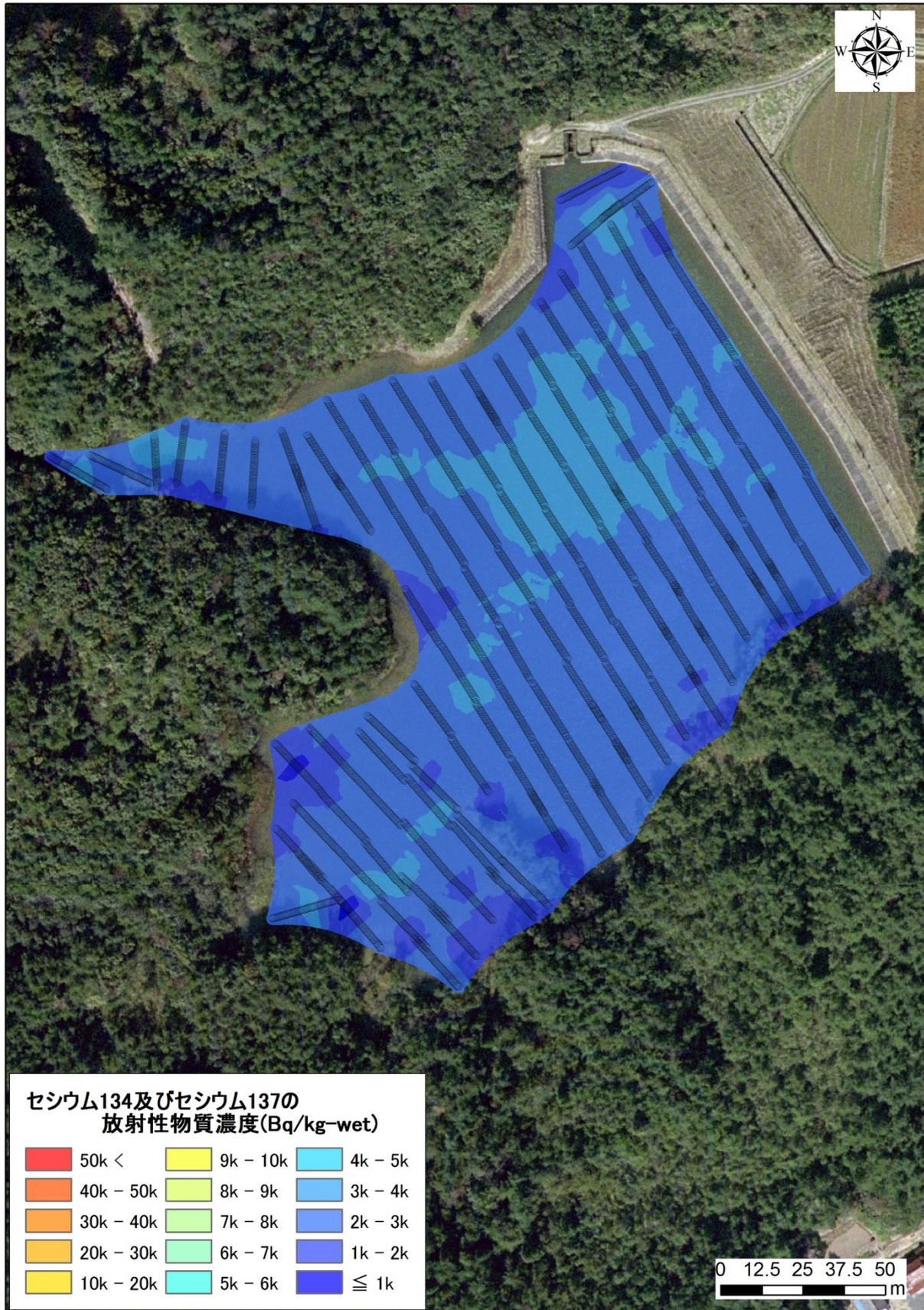


Fig. 8-12 大日沢ダムにおける水底の放射性セシウム濃度マップ

9. 考察

9.1. ため池底の環境変化と測定結果からの考察

Fig. 8-2 に鑑ヶ池における浚渫前後の放射性セシウムの濃度分布及び浚渫前後の比画像について示す。比画像は、それぞれのマップを 50 cm メッシュ毎に比を計算し、作成した。Fig. 8-2 右に示した比画像を見ると、浚渫後に放射性セシウムの減少した場所と浚渫した場所がよく一致していることが分かる。また、浚渫した場所の周辺に濃度が上昇した場所があることもわかる。同じメッシュ位置における測定値を Fig. 9-1 に散布図として示す。また、2 回目の測定結果から 1 回目の測定結果を差し引き、1 回目の結果で除した相対偏差のヒストグラムを Fig. 9-2 に示す。散布図を見るとばらつきが大きいながらも全体的に減少傾向にあることが分かる。また、ヒストグラムを見ると平均値が-0.15 となり、全体として、15%の減少傾向にあることが分かる。

Fig. 8-3 に、東笹田池の浚渫後及び浚渫後約 5 ヶ月の測定結果を示す。Fig. 8-3 左及び中の図を比較すると濃度分布に変化があることが分かる。また、Fig. 8-3 右に示した比画像を見ると、周辺の濃度が減少しており、中心部が高くなっていることが分かる。鑑ヶ池と同様に、同じメッシュ位置における測定値を Fig. 9-3 に散布図として示し、相対偏差のヒストグラムを Fig. 9-4 に示す。散布図はばらつきが大きいものの、全体的に減少傾向にある。また、ヒストグラムでは、平均-0.19 となり、19%減少傾向にあることが分かる。2 回の測定日の間の半減期による減衰割合は 6%程度であり、半減期以上の減衰傾向にあることが分かる。しかしながら、Fig. 8-5 に示したように、1 回目と比較すると 2 回目の時点では、水量も増加しており、堆積物が攪乱されていることが推定されることから、鉛直分布に変化があった可能性もある。池全体のインベントリの考察には、鉛直分布情報が必要であるが、本方法を用いることにより得られる情報は、有意義であると考えられる。

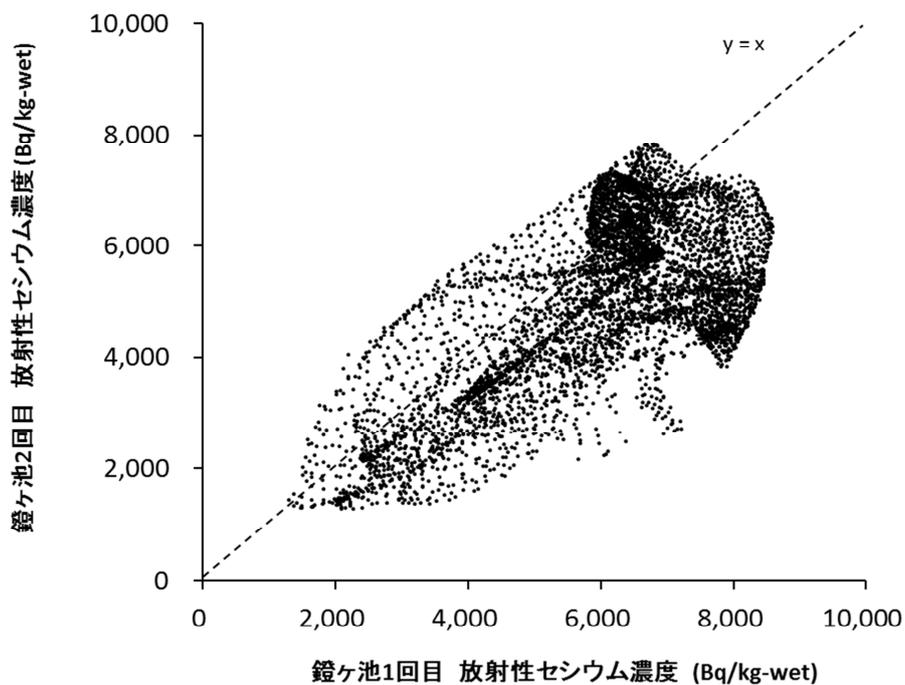


Fig. 9-1 鏡ヶ池における浚渫前後のメッシュ値の比較

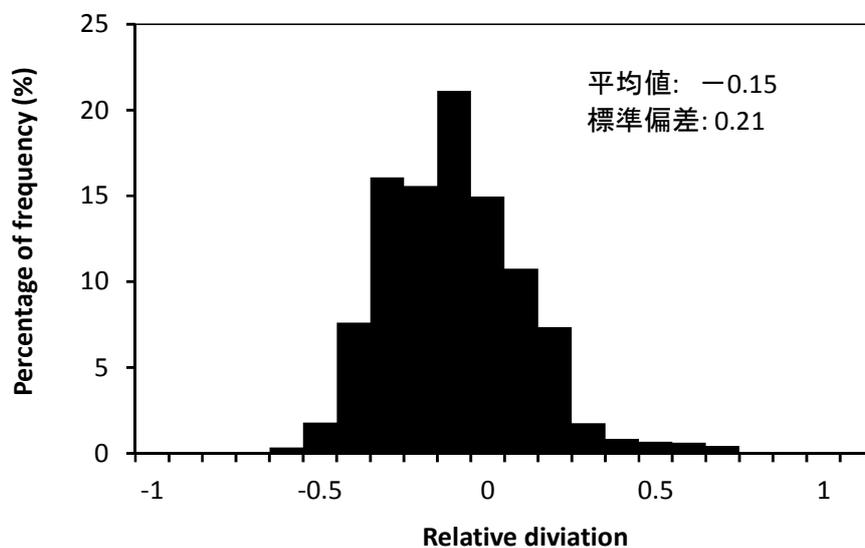


Fig. 9-2 鏡ヶ池における相対偏差のヒストグラム (2回目-1回目)/(1回目)

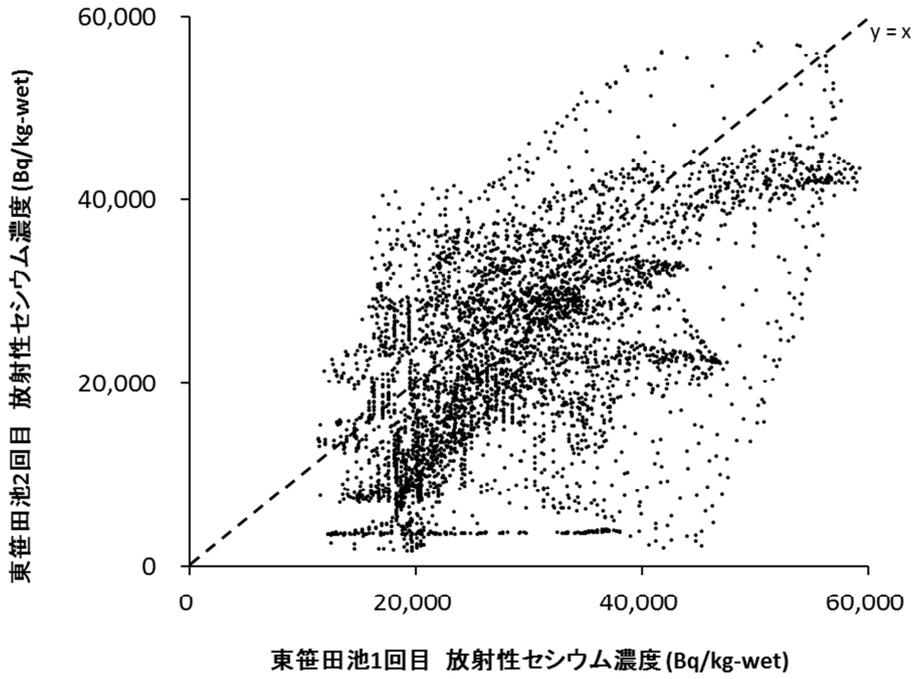


Fig. 9-3 東笹田池における浚渫後と浚渫後5カ月のメッシュ値の比較

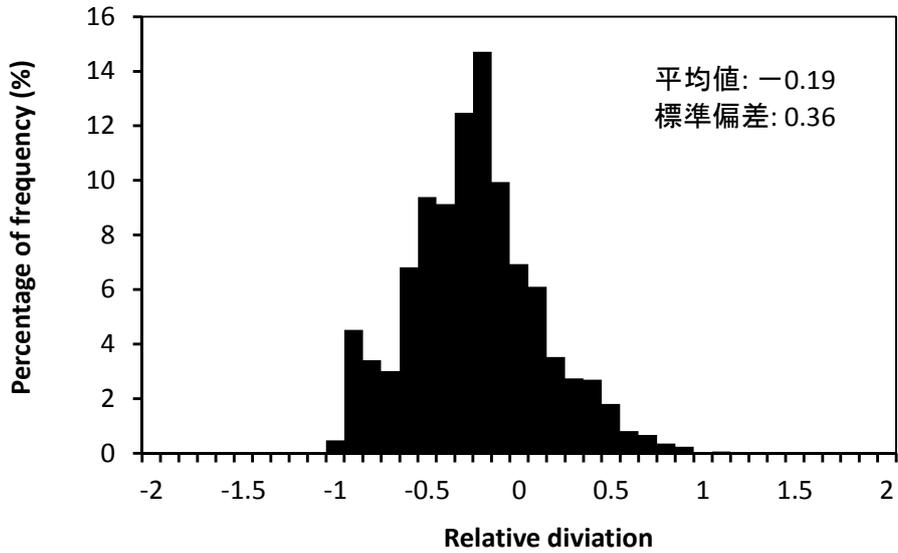


Fig. 9-4 東笹田池における相対偏差のヒストグラム (2回目-1回目)/(1回目)

9.2. γ 線スペクトルから得られる情報

Fig. 4-5 に示したような γ 線スペクトルから、ため池底の状況や検出器の状態に関する情報を得ることができないか検討を行った。Fig. 9-5 に $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器のスペクトル例を示す。放射性セシウムからの γ 線は、シンチレータの結晶と相互作用し、エネルギーを沈着させる。 γ 線スペクトルには、該当する放射線のエネルギー領域に全吸収ピークとして現れる（直接線）。また、全吸収ピークより低エネルギー側には、線源から検出器に入射する間に周辺の物質に散乱し、エネルギーを失った放射線（散乱線）が計数される。なお、この領域には、シンチレータの結晶と相互作用し、すべてのエネルギーが沈着されなかった放射線（コンプトン散乱）が含まれる。直接線と散乱線の関係は、線源と検出器間の距離や遮蔽及び線源の材質等により変化すると考えられる。そこで、直接線と散乱線の関係から検出器間の距離や遮蔽及び線源の状態に関する情報が得られないか検討を行った。

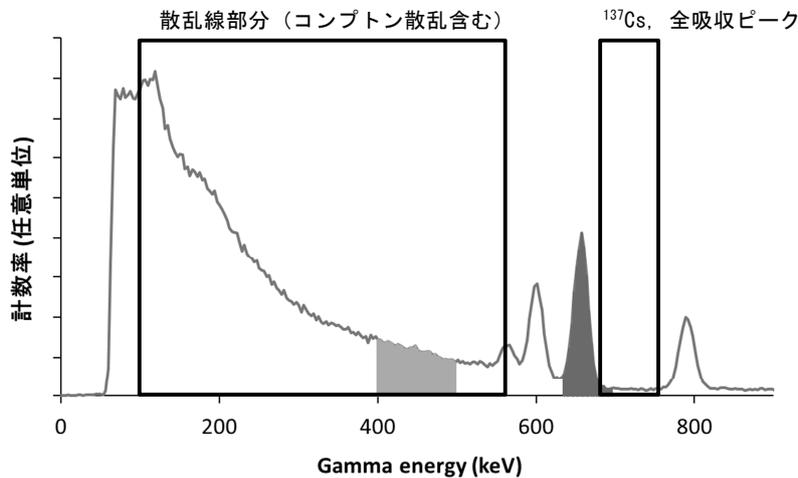


Fig. 9-5 γ 線スペクトルの形状例

9.2.1. シミュレーションによる計算

スペクトルの特徴について、考察するために、J-subD による測定条件を模擬し、第 5 章で述べたような方法を用いて EGS5 によるシミュレーション計算を行った。ここでは、Fig. 9-5 に示したスペクトルにおいて、400 keV-500keV の範囲の 1 ch 当たりの平均計数率に対する 635keV-695keV の全計数率の比をピーク対コンプトン比と定義し、線源の条件を変化させ、比の変化をシミュレーションした。Fig. 9-6 にピーク対コンプトン比に影響を与える線源の条件のイメージを示す。ピーク対コンプトン比に影響を与える要因は、放射線が散乱する条件を変化させるものであるため、(1) 堆積物中の放射線セシウムの鉛直分布（特に分布厚さ）、(2) J-subD と堆積物の接触状態及び (3) 堆積物密度が挙げられる。この 3 つの要因について行ったシミュレーション結果の詳細を以下に示す。なお、本章では、ここで、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の比は、事故直後に文部科学省の行った調査¹⁵⁾に従い、2011 年 8 月 13 日時点における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0.917$ を基準として、平成 25 年 4 月 3 日における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}=0.549$ として計算している。

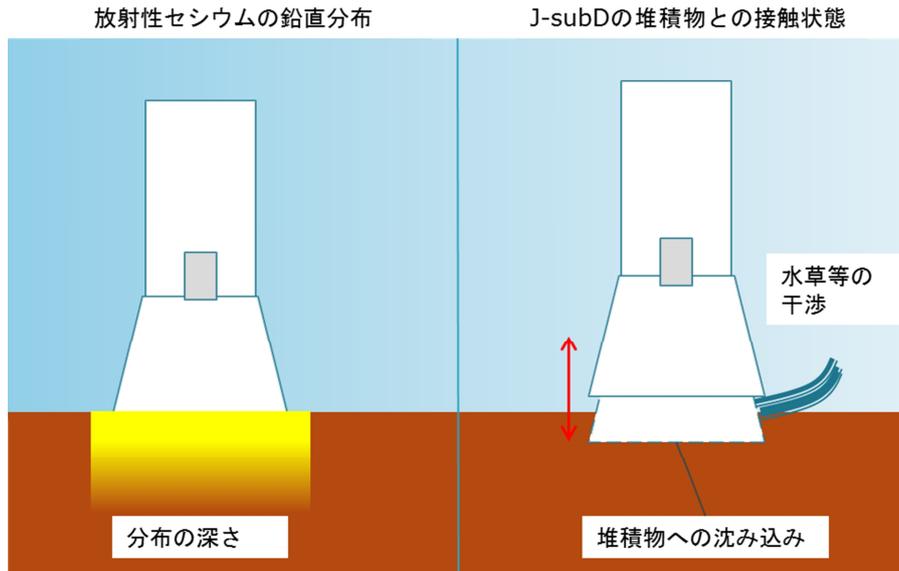


Fig. 9-6 ピーク対コンプトン比に影響を与える線源条件のイメージ

(1) 堆積物中の放射線セシウムの鉛直分布

計算条件は、Table 5-3 に示した条件で、放射性セシウムの鉛直分布を変化させ、ピーク対コンプトン比を求めた。結果を、Fig. 9-7 に示す。このように、鉛直分布が浅いほど、放射線は散乱されないのピーク対コンプトン比は大きくなる。鉛直分布が深くなるにつれ、20 cm 付近までピーク対コンプトン比は減少し、その後一定となる。3.1 節で述べたように、実測値から、ため池底における放射性セシウムの堆積物中の鉛直分布は概ね 10 cm 程度と考えられるが、5 cm から 20 cm までで考えると比は±15 程度変化する。

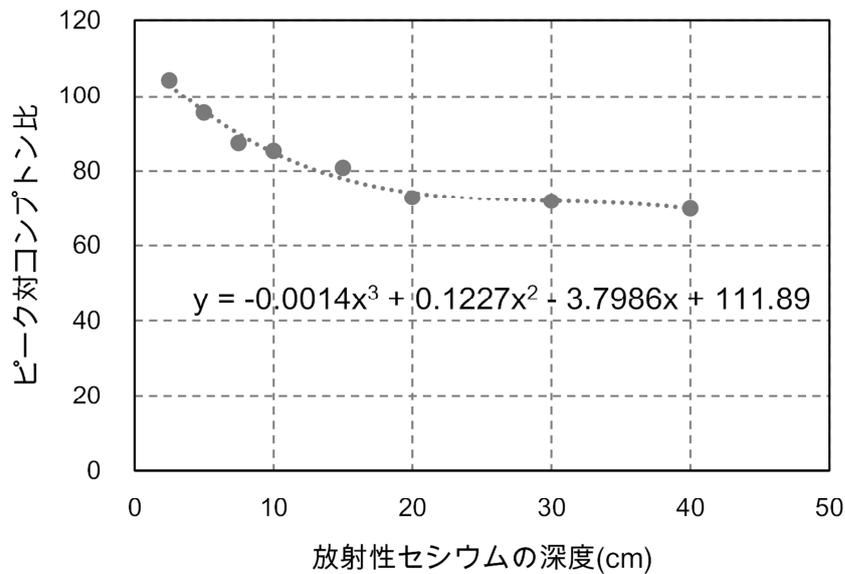


Fig. 9-7 放射性セシウムの深度とピーク対コンプトン比の関係

(2) J-subD と堆積物の接触状態

Table 9-1 に示した計算条件で、堆積物中へ沈み込んだ条件を模擬し、ピーク対コンプトン比を求めた。結果を、Fig. 9-8 に示す。このように、5 cm まで沈下したとしてもピーク対コンプトン比はほとんど変化がない。よって、検出器と堆積物の接触状態は影響しないと考えて良い。

Table 9-1 検出器の沈下環境の計算条件

| | |
|---------|---|
| 線源 | 土壌中に 3 mΦ×10 cm の ¹³⁷ Cs または ¹³⁴ Cs の均一分布 |
| 土壌密度 | 1.2 g/cm ³ |
| 線源強度 | ¹³⁷ Cs または ¹³⁴ Cs を 3.0×10 ¹⁰ Bq |
| 土壌中への沈下 | 1 cm から 5 cm までを 1 cm 刻み |

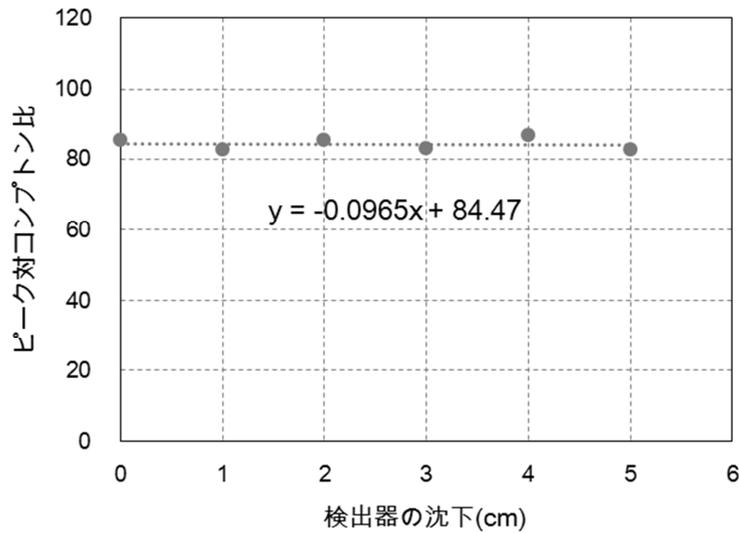


Fig. 9-8 検出器の沈下とピーク対コンプトン比の関係

(3) 堆積物密度

Table 9-2 に示した計算条件で、堆積物の密度と、ピーク対コンプトン比の関係を求めた。結果を、Fig. 9-9 に示す。1.1 g/cm³ から 1.5 g/cm³ までで、85.1 から 80.5 まで変化する。Fig. 9-7 の鉛直分布の変化によるシミュレーション結果と比較すると影響は小さいと考えられる。

Table 9-2 検出器の接触状態の計算条件

| | |
|---------|---|
| 線源 | 土壌中に 3 mΦ×10 cm の ¹³⁷ Cs または ¹³⁴ Cs の均一分布 |
| 土壌密度 | 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 g/cm ³ |
| 線源強度 | ¹³⁷ Cs または ¹³⁴ Cs を 3.0×10 ¹⁰ Bq |
| 土壌中への沈下 | 1 cm から 5 cm までを 1 cm 刻み |

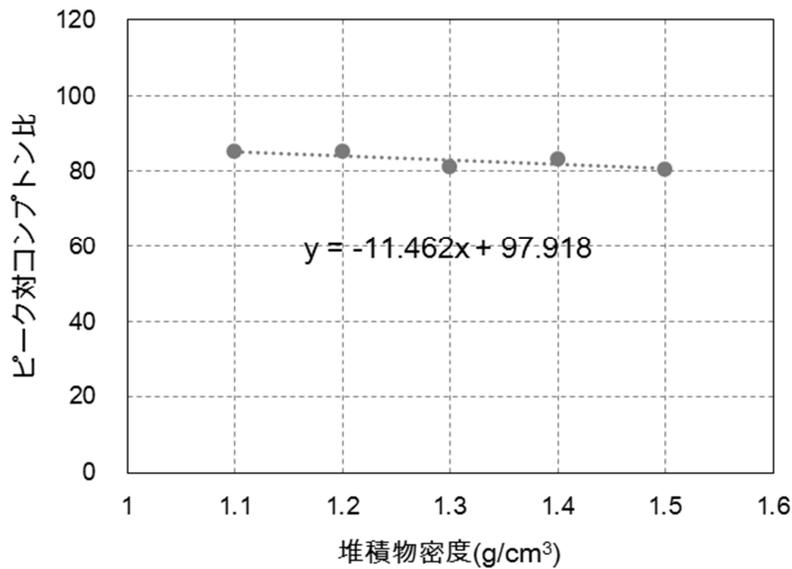


Fig. 9-9 堆積物密度とピーク対コンプトン比の関係

9.2.2. 実測結果との比較

9.2.1.項の結果から、ピーク対コンプトン比に大きく影響するのは、堆積物の鉛直分布であることが分かった。この結果を踏まえて、実際のため池中において J-subD で測定したデータからピーク対コンプトン比を算出した。また、測定した付近の堆積物コア試料を採取し、深度分布の測定を行った。Table 9-3 に結果を示す。今回比較できたのは、9 ポイントと少ないこと及び堆積物コアの間隔が 5 cm と粗いことから、評価は難しいが、F1, F2, F3, F5, F6 はよく一致している。その他の地点では、推定値とコアの測定結果が乖離している。今後、さらなるデータを蓄積し、検討が必要である。

また、Fig. 9-10 に J-subD によるピーク対コンプトン比の実測結果を示す。なお、赤い実線は鉛直分布 10 cm まで均一分布及び堆積物と検出器の距離は 0 cm (密着) で計算を行った結果である。シミュレーション結果は測定日によって、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比が異なるので、減衰補正し計算している。また、凡例は、Table 8-1 に示した地点 No. である。実際の測定結果は、シミュレーション結果より小さい傾向にあることが分かる。堆積物中の放射性セシウム鉛直分布は 10 cm よりも厚いことが示唆される。また、No.7 の池でのデータの様に、その他の池と比較して明らかに高い傾向にある測定結果については、池底に水草が多かったという観測結果もあることから、検出器と堆積物間に距離があった可能性が考えられる。

今回のシミュレーション結果より、ピーク対コンプトン比から放射性セシウム鉛直分布に関する情報を得ることのできる可能性が示唆される。しかしながら、現時点では、一様分布のみを仮定しており、実際の分布は濃度の勾配があると考えられることから、すべての条件を模擬できてはいない。今後、堆積物コア試料との比較を行いながらさらなる考察が必要と考えている。今後、実測データと比較することにより、さらなる検討を進めていく。

Table 9-3 J-subD によるピーク対コンプトン比からの深度推定値と
堆積物コアによる深度分布測定結果

| Sample No. | J-subDによる放射性セシウムの深度推定値 | | 堆積物コア |
|------------|------------------------|-----------|--------------------|
| | ピーク対コンプトン比 | 推定深度 (cm) | 放射性セシウムの最大深度 (cm)* |
| F1 | 71 | 16 | 15 |
| F2 | 75 | 15 | 15 |
| F3 | 78 | 11 | 10 |
| F4 | 71 | 18 | 10 |
| F5 | 80 | 10 | 15 |
| F6 | 75 | 15 | 10 |
| H3 | 65 | > 30 | 15 |
| T1 | 75 | 18 | 5 |
| TK1 | 76 | 17 | 5 |

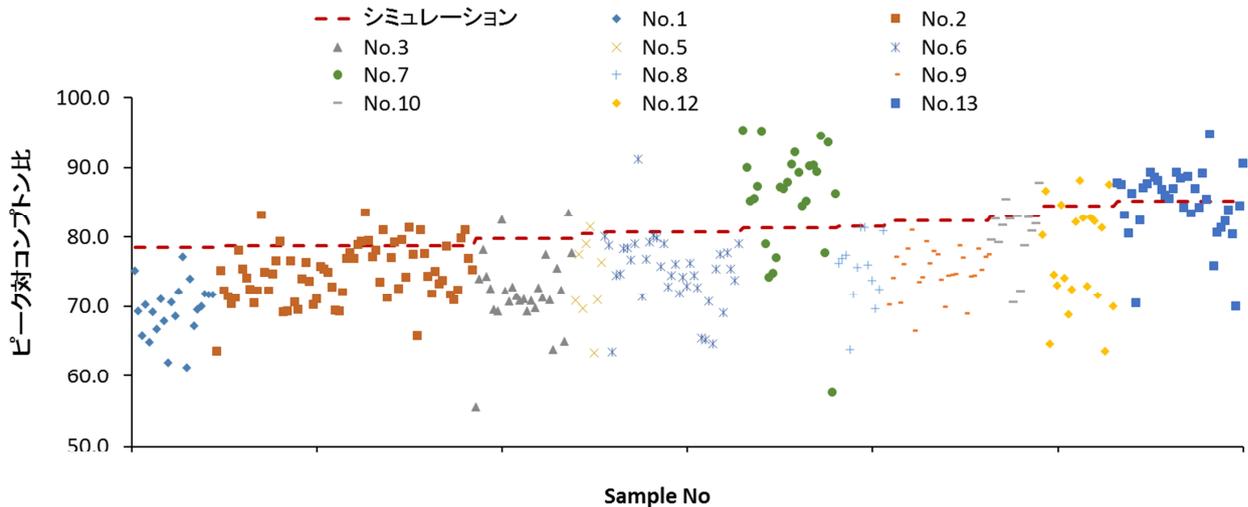


Fig. 9-10 J-subD 実測結果におけるピーク対コンプトン比とシミュレーション結果との比較 (赤線は、堆積物の鉛直分布を 10 cm まで均一分布としたシミュレーション結果。測定日によって、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 比が異なるので、減衰補正し計算している。)

9.3. 測線の間隔とマップ

本測定手法による p-Scanner の測線間隔の最適化は、全体の測定時間を定めるファクターとなる。当たり前ではあるが、測線間隔が狭いほど、より精密な放射線分布マップを描くことができるが、要する時間が増加する。目的により、最適な数値が設定されるべきであるが、ここでは、測線間隔の違いによるマップの違いを例として挙げる。Fig. 8-8 に示した梶内沼において、2.5 m の測線間隔と 5 m の測線間隔でマップを作成した。Fig. 9-11 にそれぞれのマップを示す。このように、2.5 m の測線間隔と 5 m の測線間隔で描いたコンター図を比較すると、測点の多い右側の濃度の高いエリアは見かけ上大きな変化はないが、測点の少ない下側の濃度の高いエリアについては、5 m の測線間隔で描いたマップでは捉えられていないことが分かる。これらの違いを定量的に評価するため、それぞれのマップを 50 cm メッシュで区切り、同一メッシュ内における放射性セシウムの濃度を比較した。比較結果は、5 m の測線間隔のメッシュ

値から 2.5 m の測線間隔のメッシュ値を差し引いた値の 2.5 m の測線間隔のメッシュ値に対する割合、いわゆる相対偏差を求めた。比較結果について、Fig. 9-12 に示す。平均値は、概ね 0 付近となり、2 つのマップは同様の傾向であることが分かった。また、測線が広くなることにより、過小及び過大評価となる地点の目安として、±0.5 を超えるメッシュ数の全体のメッシュ数に占める割合を計算したところ 1 %程度であった。今回の結果がすべてのため池に適用できるわけではないが、今後、このような手法で検討することにより、最適な測線間隔を決定することができると考えられる。

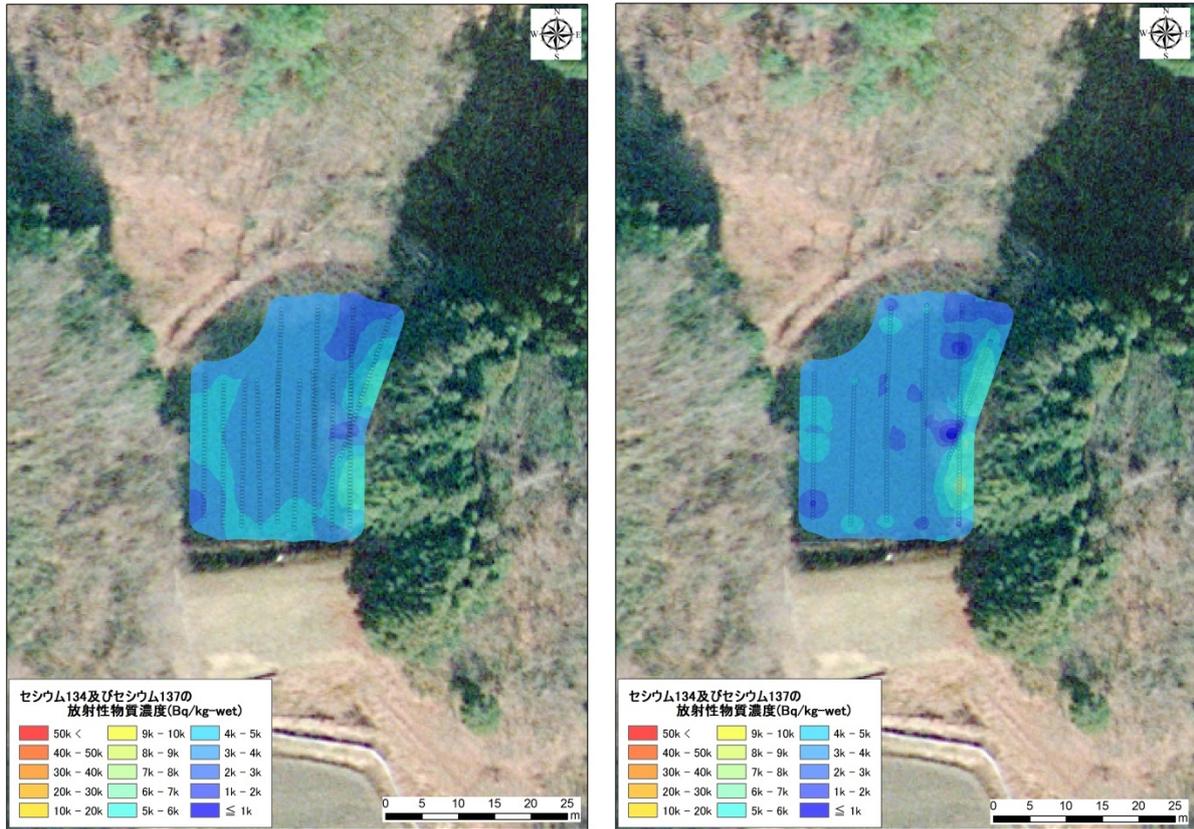


Fig. 9-11 測線間隔の違いとマップの例 (左: 5 m 間隔, 右: 10 m 間隔)

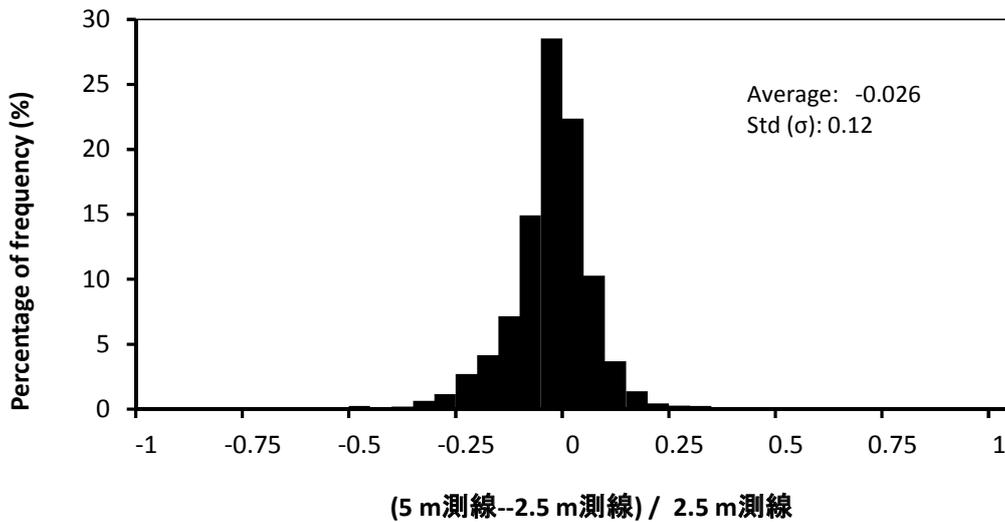


Fig. 9-12 測線間隔の違いにおけるメッシュ毎の線量率の比較

10. まとめ

ため池等の水底堆積物の表層を p-Scanner によって直接測定することにより、堆積物中の放射性セシウム濃度に換算する手法を開発した。また、測定結果をもとに、水底の濃度分布のマップを作成できることを確認した。

本測定方法は、濃度分布の変化についても視覚的に捉えることができるため、今後、除染の計画の策定や通常のため池の保守で行われる浚渫による濃度分布の変化を確認するために有用な方法であると考えられる。課題としては、検出器の沈下具合や放射性セシウムの鉛直分布により、評価値が変化することが懸念される。そのような、条件の変化についても、ピーク対コンプトン比を使った測定手法を適用することによってさらなる精度向上が見込まれる。

また、得られた濃度分布結果の要因について、詳しく考察すると放射性セシウムの環境中での移行に関する知見が得られるものと考えられる。特に、流入口や流出口や流量、池内での流れ、堆積物の物理的・化学的な性状などなど、様々なパラメータが考えられる。先に示した環境省の報告書¹⁶⁾や文科省による広域な放射線分布測定調査²⁰⁾においても、堆積物中の放射性セシウムの濃度は、粒径に大きく依存するため、環境中での動態に関する情報を得るためには、粒径による補正が必要だと推奨している。今後、放射性セシウムの環境動態という観点からも本結果を解析すべきであろうと考える。

謝辞

福島県農地管理課先崎秋実主任主査には、本研究の重要性を認識いただき、ため池の選定から県庁内での説明など様々な調整をしていただきました。馬場岳志主任主査、県北農林事務所の荻野隆男課長には、調査するため池の選定及び地権者との交渉をしていただきました。福島大学山口克彦教授には、福島大学構内の調整池での試験を調整いただくとともに、測定方法に関する貴重な意見をいただきました。日本放射線エンジニアリングの宮崎信之様には、機器の調整等を行っていただきました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

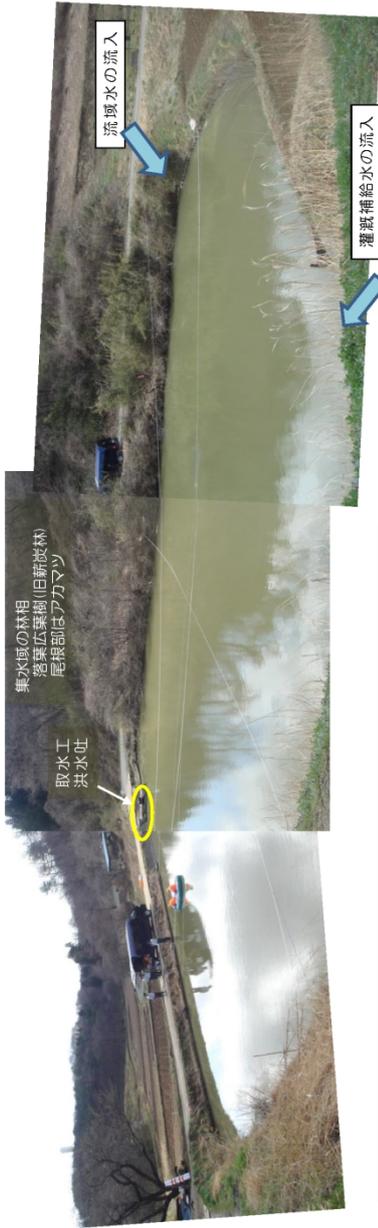
- 1) 鳥居建男他, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, JAEA-Technology 2012-036, 2012.
- 2) 原子力規制庁ホームページ: <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/index.html>(2013年11月閲覧).
- 3) 原子力機構福島技術本部: 平成24年度放射能測定調査委託事業 「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」 成果報告書, <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry05.html> (2013年12月閲覧).
- 4) 東北農政局ホームページ: <http://www.maff.go.jp/tohoku/press/seibi/suiriseibi/120402.html> (2013年12月閲覧).
- 5) 東北農政局ホームページ: <http://www.maff.go.jp/tohoku/press/seibi/suiriseibi/120426.html> (2013年12月閲覧).
- 6) 東北農政局ホームページ: <http://www.maff.go.jp/tohoku/press/seibi/suiriseibi/120905.html> (2013年12月閲覧).
- 7) 福島県農地管理課ホームページ: http://wwwcms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet;jsessionid=5643E3ACA144773EC275EE45656ED857?DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004&CONTENTS_ID=38655 (2013年11月閲覧).
- 8) 鳥居建男, 眞田幸尚, 面で捉える汚染分布の測定技術—ファイバ検出器による放射性セシウムの測定—, Isotope news, no.713, pp.25-29, (2013).
- 9) Takasaki, F., H. Saito, T. Shimizu, S. Kondo, O. Shinji, Development of plastic scintillation fiber, Nucl. Inst. Meth. A262, pp. 224-228, (1987).
- 10) Soramoto, S., M. Notani, Y. Fukano, S. Imai, T. Iguchi, M. Nakazawa, A study of distributed radiation sensing method using plastic scintillation fiber, KEK Proceedings, 93-8, pp. 171-173, (1993).
- 11) 江本武彦, 鳥居建男, 野崎達夫, 安藤秀樹, シンチレーション光ファイバによる放射線空間分布測定, 放射線, 21, pp. 49-58, (1995).
- 12) 農林水産省ホームページ: http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/ (2013年11月閲覧).

- 13) 文部科学省: ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法, 放射能測定法シリーズ 33.
- 14) Nicolini R., Camera F., Blasi N., Brambilla S., Bassini R., Boiano C., Bracco A., Crespi F.C.L., Wieland O., Benzoni G., Leoni S., Million B., Montanari D. Zalite A., Investigation of the properties of a 1" x 1" LaBr₃:Ce scintillator, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A582, pp. 554-561 (2007).
- 15) MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology), Preparation of Distribution Map of Radiation Doses, etc. (Map of Radioactive Cesium Concentration in Soil) by MEXT. http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/5000/4165/24/1750_083014.pdf. (2013年12月閲覧).
- 16) いであ株式会社: 平成24年度水環境中の放射性物質調査方法等検討業務報告書, 環境省 HP http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/report_method-w_1303.pdf (2013年12月閲覧).
- 17) Kaiser, H. Zum Problem Der Nachweisgrenze, Fresenius. Z Anal. Chem. 209, pp.1-18, (1965).
- 18) Prudnikov, E. D., Detection limits and error estimation in analysis, Fresenius. Z Anal. Chem. 337, pp.412-425 (1990).
- 19) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, (2003).
- 20) 文部科学省原子力災害支援本部: 放射線量等分布マップ関連研究に関する報告書 (第2編), 原子力規制庁 HP, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5522/view.html> (2013年12月閲覧).

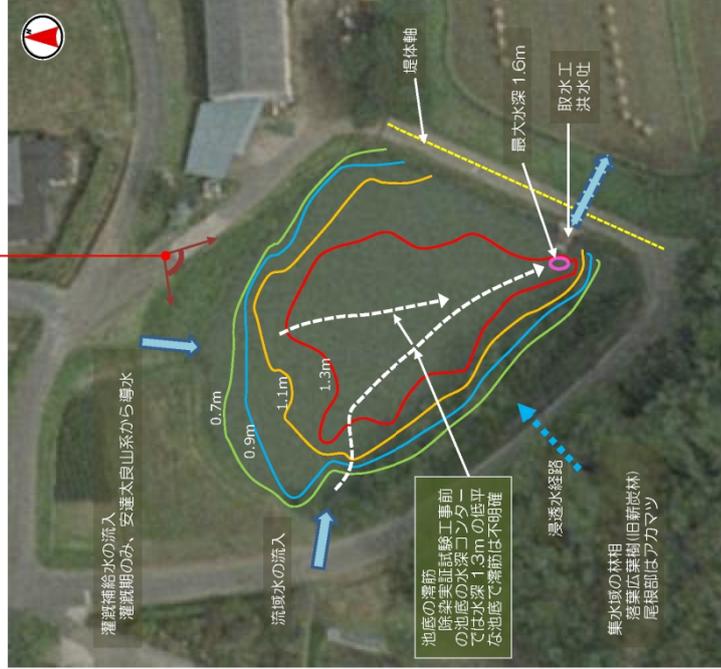
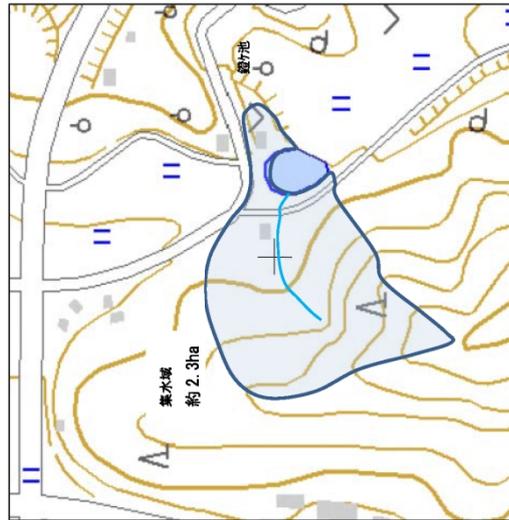
This is a blank page.

Appendix 選定したため池の概況

This is a blank page.



【特徴】
 ○現在のため池は、かつて湧水で潤った小規模なため池を、堰体のかさ上げにより拡張されたもの。湧水は、主に右岸側のかつての新設林分（地質は、透水性の高い強風化花こう岩(まさ土)への降雨浸透水を起源とする）
 ○池面積に対する集水域面積が小さいため、灌漑期には他流域より用水補給を受けている。
 ○池水深が小さく植生が保全されているため、築造後の土砂流入量は極少ない。
 ○平均水深は約1m、最大1.6m(取水工箇所)



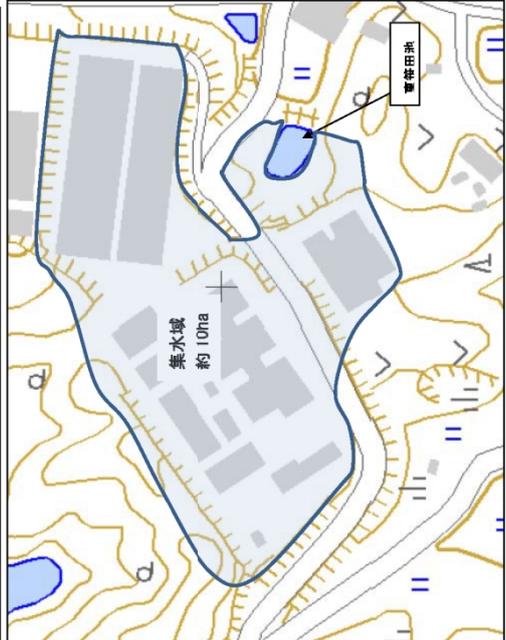
鏡ヶ池_集水域・水深等概況

A-1. 鏡ヶ池概況図

この背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである。



流入箇所：普通は工業用水排水が数100～1000%/分で流入する。
集水域：工業団地/人工改変地のため森林部などは流出係数が大きく、降雨流出時間が早く、排水流量が大きい。集水域には放射性セシウム等の核種を吸着しやすい土壌(標地)がきわめて少ない。



東笹田池_集水域・水深等概況

この背景地図等データは、国土地理院の電子国土Webシステムから配信されたものである。

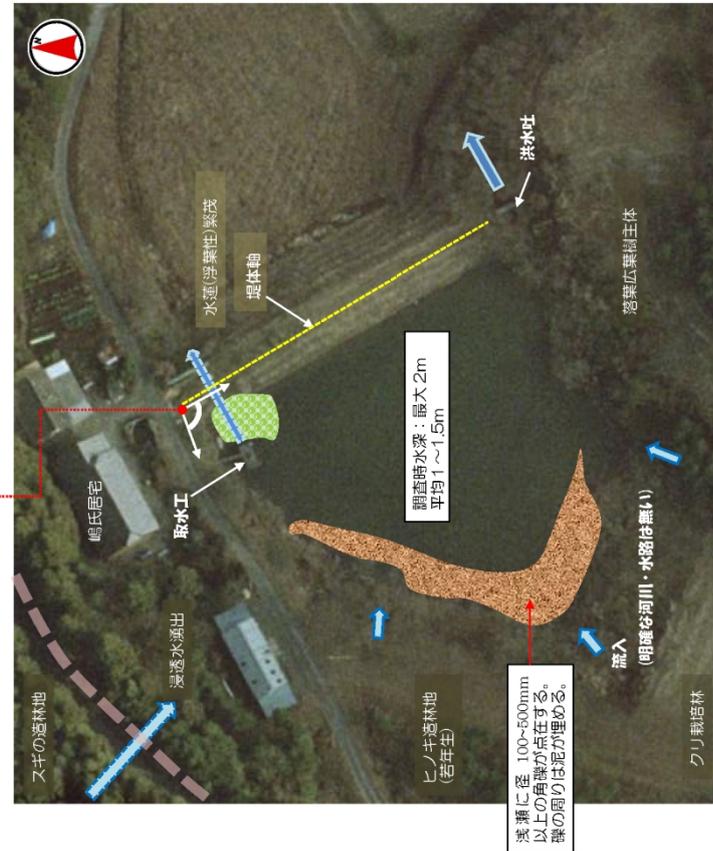
A-2. 東笹田池概況図



【透水性の高い斜面に探石場→探石場の孤張で集水(貯水減少)
 斜面下方～道路側には透水性の高い角礫層が分布することから斜面(スギの造林地：50年生以上)への降水は道路側溝に入らず(表流水とならず)道路下を地下水となり、住宅背後の斜面部へ湧出する(住宅背後の斜面下には湧水を池に集水する素掘りの溝が切られている。探石場の孤張に伴い集水機能が弱く、かつ池の平均水位も下がってしまっているため)。
 ⇒近年、池の水位は湧水状態に落ちている】



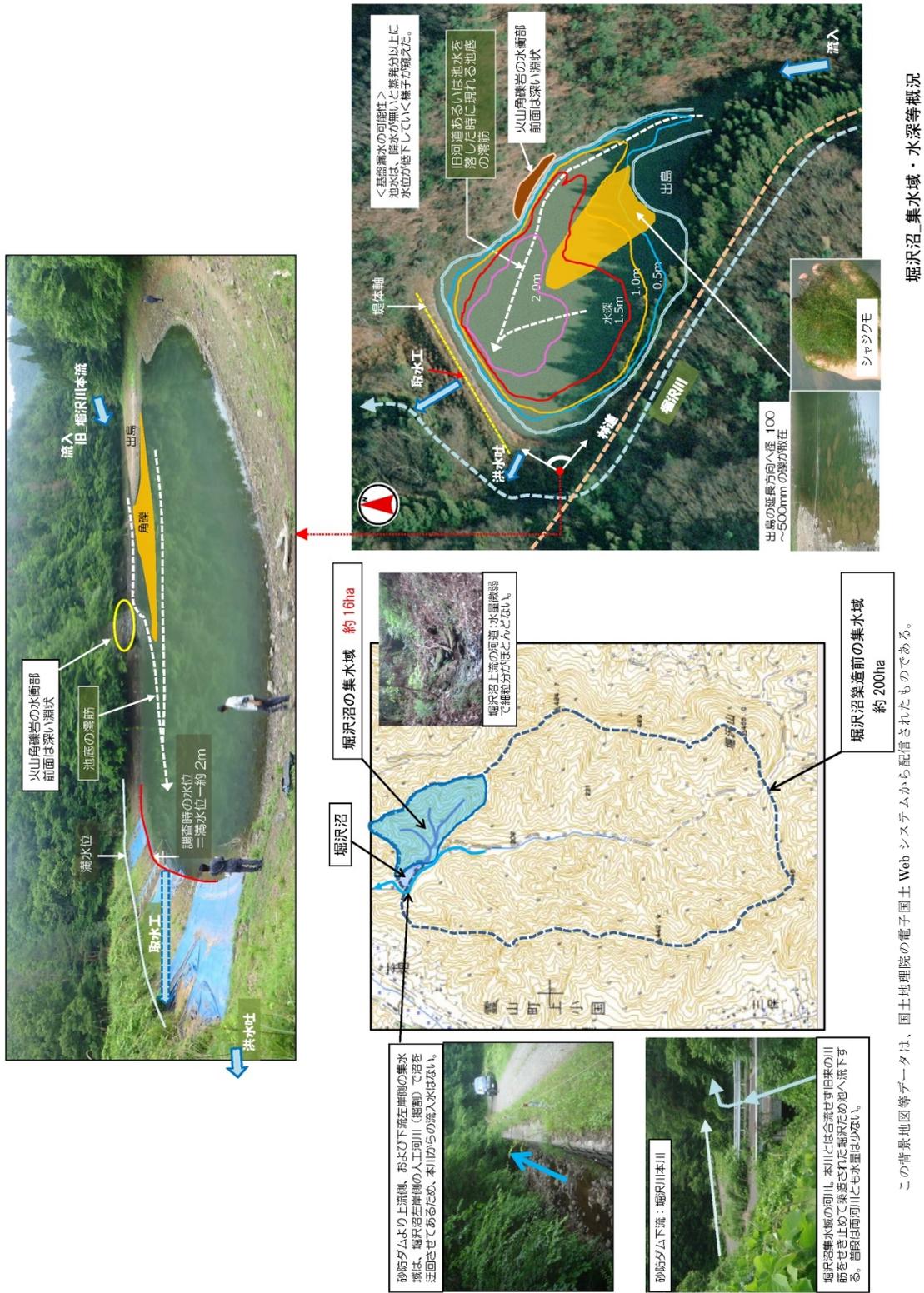
【集水地主体の状況】
 北屋敷池の周囲の谷筋は短い、緩勾配だが土壌が厚く日当たりが良いため、集水地主体(茶栽培)として開発された。現状では、断崖のため集水の多くは採取されている。
 透水性の高い土壌が厚い場合、降水の地下浸透量が多く、斜面の方位・水系図だけにより判断される集水地よりも広い可能性がある。透水性の高い地山は降水の地下貯留能力が高いため、降水は一気に表流水として斜面下方の水路や池に流下するだけでなく、地下水として徐々に池側に向かって湧出する。



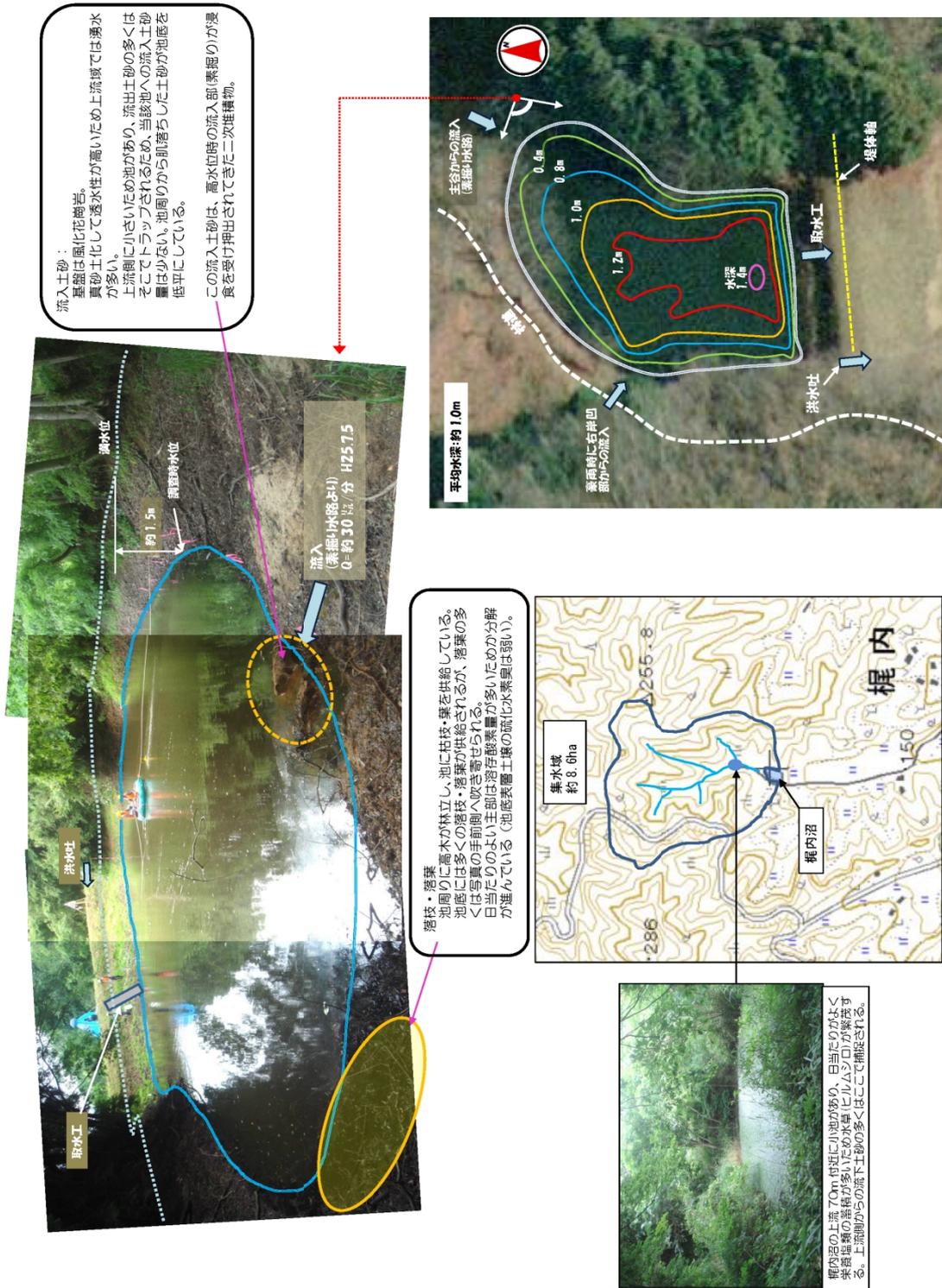
北屋敷池_集水域等概況

この背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである。

A-3. 北屋敷池概況図



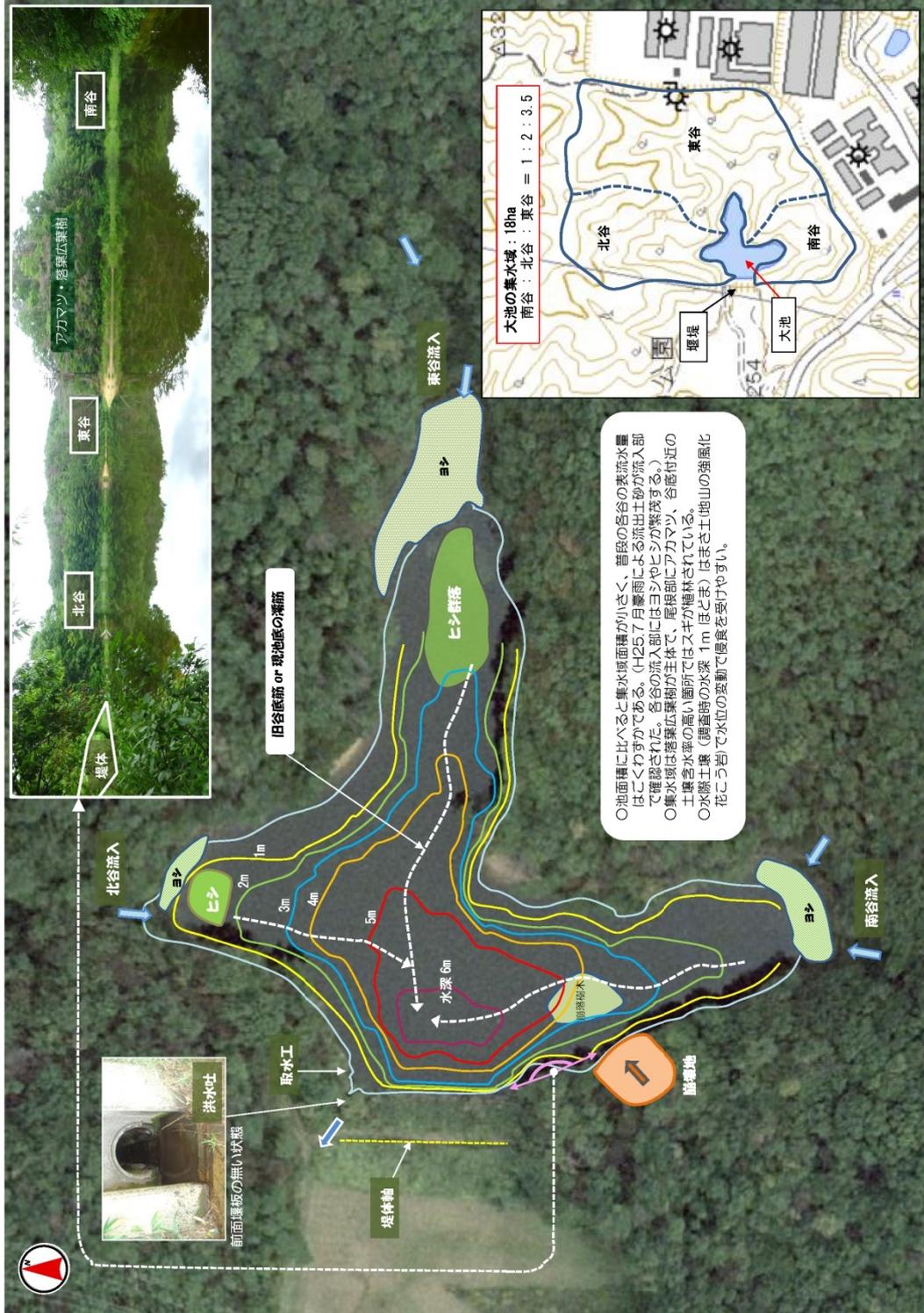
A-6. 堀沢沼概況図



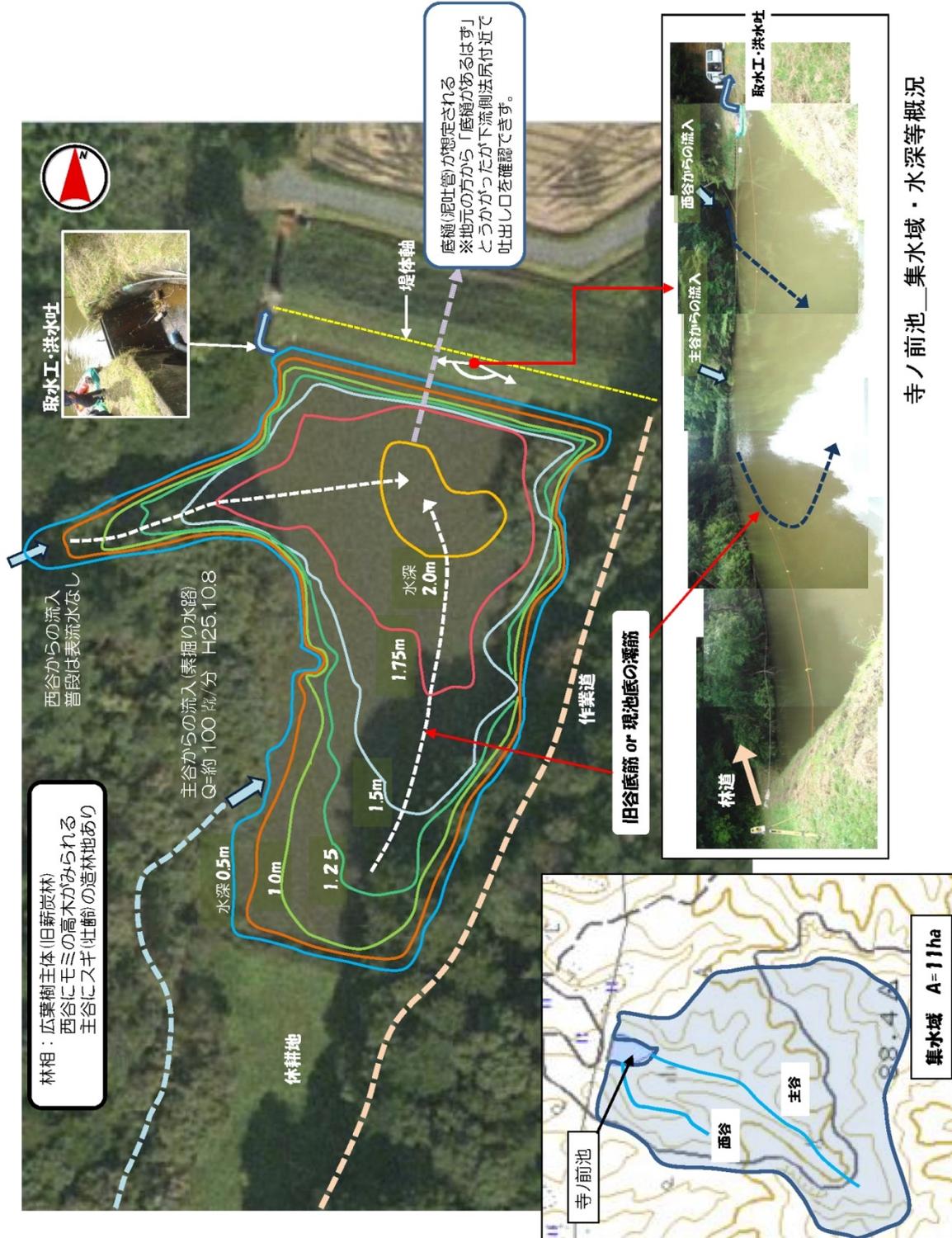
梶内沼_放射線量の分布概要

この背景地図等データは、国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである。

A-7. 梶内沼概況図



A-9. 大池概況図



寺ノ前池_集水域・水深等概況

A-10. 寺ノ前池概況図

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|-------|---------|-----|
| | 名称 | 記号 |
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質の量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 基本単位 | |
|-------------------------|--------------|--------------------|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | m ² |
| 体積 | 立法メートル | m ³ |
| 速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | m/s ² |
| 波数 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| 密度, 質量密度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | kg/m ² |
| 比体積 | 立方メートル毎キログラム | m ³ /kg |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | A/m ² |
| 磁界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量濃度 ^(a) , 濃度 | モル毎立方メートル | mol/m ³ |
| 質量濃度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m ² |
| 屈折率 ^(b) | (数字の) | 1 |
| 比透磁率 ^(b) | (数字の) | 1 |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI 組立単位 | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン ^(b) | rad | 1 ^(b) | m/m |
| 立体角 | ステラジアン ^(b) | sr ^(c) | 1 ^(b) | m ² /m ² |
| 周波数 | ヘルツ ^(d) | Hz | | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | | m kg s ⁻² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N m | m ² kg s ⁻² |
| 仕事率, 工率, 放射束 | ワット | W | J/s | m ² kg s ⁻³ |
| 電荷, 電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差 (電圧), 起電力 | ボルト | V | W/A | m ² kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V | m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A | m ² kg s ⁻³ A ⁻² |
| コンダクタンス | ジーメン | S | A/V | m ² kg ⁻¹ s ³ A ² |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | Vs | m ² kg s ⁻² A ⁻¹ |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² | kg s ⁻² A ⁻¹ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | m ² kg s ⁻² A ⁻² |
| セルシウス温度 | セルシウス度 ^(e) | °C | | K |
| 光路長 | ルーメン | lm | cd sr ^(c) | cd |
| 放射線量 | グレイ | Gy | J/kg | m ² s ⁻² |
| 放射性核種の放射能 ^(f) | ベクレル ^(d) | Bq | | s ⁻¹ |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ | グレイ | Gy | J/kg | m ² s ⁻² |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト ^(g) | Sv | J/kg | m ² s ⁻² |
| 酸素活性化 | カタール | kat | | s ⁻¹ mol |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|-----------------|-------------------|-----------------------|---|
| | 名称 | 記号 | SI 基本単位による表し方 |
| 粘力のモーメント | パスカル秒 | Pa s | m ⁻¹ kg s ⁻¹ |
| 表面張力 | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ⁻² |
| 角速度 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角加速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹ |
| 熱流密度, 放射照度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻² |
| 熱容量, エントロピー | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 比熱容量, 比エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 熱伝導率 | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 体積エネルギー | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 電界の強さ | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| 電荷密度 | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電表面電荷 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ s A |
| 電束密度, 電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 誘電率 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 透磁率 | ファラド毎メートル | F/m | m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| モルエネルギー | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹ |
| 吸収線量率 | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ s A |
| 放射線強度 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m ² sr) | m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³ |
| | カタール毎立方メートル | kat/m ³ | m ³ s ⁻¹ mol |

表5. SI 接頭語

| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 ²⁴ | ヨタ | Y | 10 ¹ | デシ | d |
| 10 ²¹ | ゼタ | Z | 10 ² | センチ | c |
| 10 ¹⁸ | エクサ | E | 10 ³ | ミリ | m |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P | 10 ⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ¹² | テラ | T | 10 ⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁹ | ギガ | G | 10 ¹² | ピコ | p |
| 10 ⁶ | メガ | M | 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ³ | キロ | k | 10 ⁻¹⁸ | アト | a |
| 10 ² | ヘクト | h | 10 ⁻²¹ | ゼプト | z |
| 10 ¹ | デカ | da | 10 ⁻²⁴ | ヨクト | y |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI 単位による値 |
|-------|------|---|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1 h=60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ' | 1'=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | " | 1"=(1/60)'=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | 1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ² |
| リットル | L, l | 1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1 t=10 ³ kg |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|----------|----|---|
| 電子ボルト | eV | 1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J |
| ダルトン | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg |
| 統一原子質量単位 | u | 1 u=1 Da |
| 天文単位 | ua | 1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------|------|---|
| バール | bar | 1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1 mmHg=133.322 Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m |
| 海里 | M | 1 M=1852 m |
| バイン | b | 1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ² |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600) m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。 |
| ベレル | B | |
| デジベル | dB | |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------------------|-----|---|
| エル | erg | 1 erg=10 ⁻⁷ J |
| ダイン | dyn | 1 dyn=10 ⁻⁵ N |
| ポアズ | P | 1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s |
| ストークス | St | 1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹ |
| スチルブ | sb | 1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻² |
| フオト | ph | 1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx |
| ガリ | Gal | 1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² |
| マクスウェル | Mx | 1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb |
| ガウス | G | 1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T |
| エルステッド ^(c) | Oe | 1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹ |

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------|------|--|
| キュリー | Ci | 1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq |
| レントゲン | R | 1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg |
| ラド | rad | 1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy |
| レム | rem | 1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv |
| ガンマ | γ | 1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T |
| フェルミ | f | 1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg |
| トル | Torr | 1 Torr=(101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm=101 325 Pa |
| カロリ | cal | 1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロン | μ | 1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m |

