

報 告

RI コーンプローブを利用した地表 1m 付近～地中の 自然放射線量測定結果について

後藤 政昭*, 吉村 貢、重富 正幸、松浦 良信、松本 政雄、吉留 花江
ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社 (〒561-0834 大阪府豊中市庄内栄町 2-21-1)

Study of Doses of Radiation from about 1m on the Ground to Underground Measured by Radio-Isotope Cone Penetrometer

Masaaki GOTO*, Mitsugu YOSHIMURA, Masayuki SHIGETOMI, Yoshinobu MATSUURA,
Masao MATSUMOTO, and Hanae YOSHIDOME

Soil and Rock Engineering Co., Ltd. (2-21-1 Shonaisakamachi, Toyonaka, Osaka 561-0834 Japan)

Summary

When wet density ρ_t of the ground is measured by using Radio-Isotope cone penetration test (RI-CPT), natural doses of radiation (The background: It is called BG) are measured in the state that the radiation source is not installed. Next, doses of radiation in the state to install an artificial radiation source are measured. There was a good correlation between air dose rate E ($\mu\text{Sv/h}$) and number of counts N (cps) (It is called the counting rate at the following) measured by BG measurement. Then, we compared the air dose rate converted by using the counting rate with the published data of the environmental radiation monitoring system. As a result, it was revealed that both showed a good correlation. It became clear that RI-CPT is effective as the technique to measure the influence of natural dose of radiation from the ground level to underground.

Key Words: Radio-Isotope cone penetration test, Natural doses of radiation, Background: BG, Dose rate

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故から早 3 年半が経過したが、原発由来の ^{137}Cs や ^{134}Cs といった放射性物質による汚染状況については、必ずしも詳細に把握されている訳ではない。特に、地盤中や、河川や湖沼の底質部、福島県内の海底面については、除染が進んでいる地域に比べて状況把握が遅れていると推察される。

ラジオアイソトープコーン貫入試験機は、電気式静的コーン貫入試験機の一つである。ラジオアイソトープコーン貫入試験(以降、RI-CPTと称する)で地盤内の湿潤密度 ρ_t を計測する際は、線源を入れない状態での自然放射線量(自然ガンマ線、バックグラウンド:BGと称する)を毎回現場で測定して、線源を入れて測定した値から引き算をすることによって正確な ρ_t を計測している。今回、BG測定で計測したカウント数(以降、計数率と称する) N (cps)と空間線量率 E ($\mu\text{Sv/h}$)の相関を

検証して、相関性が良いことを確認した上で、計数率から換算した空間線量率と公表されている環境放射線モニタリングシステムの値との比較検証を行った。その結果、測定地点における放射性物質の影響を、地表 1 m 付近～地中まで連続して迅速に計測する手法として、RI-CPTによるBG測定の有効性が確認できた。

2. ラジオアイソトープコーン貫入試験 (RI-CPT) とは

RI-CPTは電気式静的コーン貫入試験(CPT)の一つである。従来のCPTが貫入時のコーン貫入抵抗 q_c 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u の 3 成分のみを計測するのに対し、RI-CPTはさらにRI計測手法で湿潤密度 ρ_t 、含水比 w も計測できるのが特徴であり、より多くの現場データを同時に得ることが可能である。なお、国際規格に則り、貫入中の傾斜角と温度を計測して他の測定値を補正する機能も有している。

*Corresponding author: E-mail: goto@soilandrock.co.jp

RI-CPT は図 1 に示したように 1 回目に q_c 、 f_s 、 u の 3 成分に加えて BG 測定を行い、2 回目に後方散乱型ガンマ線密度計による ρ_t 、3 回目に散乱型中性子水分計により含水量 ρ_m を

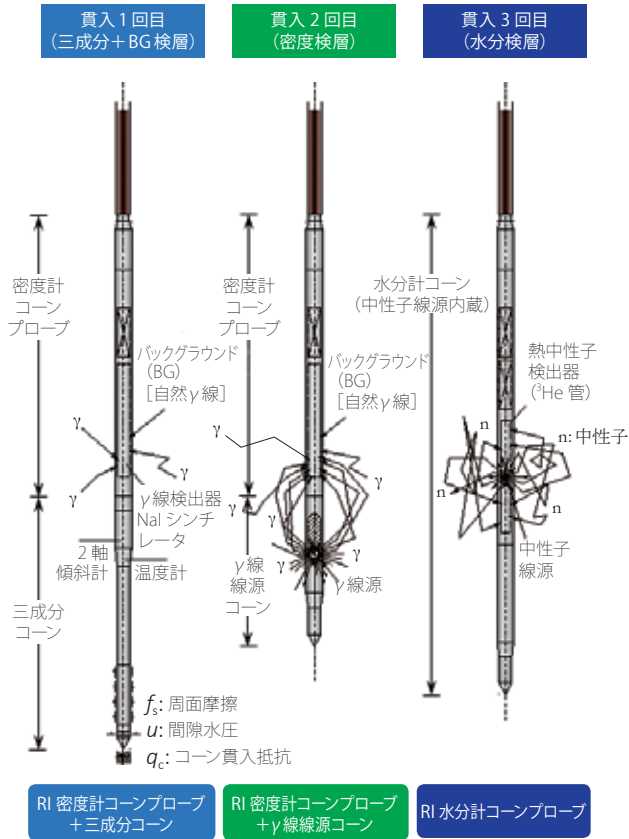


図 1 RI-CPT の貫入手順

深度方向に連続的に計測できるのが特徴である。RI-CPT で地盤内の ρ_t を計測する際は、装着した人工線源に由来する放射線を実効測定値とするため、線源を装着しない状態での BG 測定を行い、線源を装着した状態での測定値（線源由来のガンマ線強度 + BG）との差から、線源由来のガンマ線強度のみを求めて ρ_t を計測している。なお、RI-CPT 貫入に当たっては、地上では図 2 に示した自走式コーン貫入装置（自重 3 t ないし 9 t）を用いるのが一般的であるが、水上では後述するように、より重量の軽いボーリングマシン（図 10 参照）や重錘の自重（図 11 参照）による貫入が行われている。また、BG 測定に当たっては、地表 1 m 付近から測定を開始し、地中まで連続して測定を行っている。

3. 日本の自然放射線量について

自然放射線量（BG）を正確に知るには実際にその場所に行って線量計で測定しなければならないが、自然環境における空間放射線量（BG）の内、大地に起因するものは、大地に含まれる放射性カリウム（以降、 ^{40}K と称する）とウランとトリウムの濃度を用いることによって計算で求めることが可能である。したがって、現在、やや高めの線量が出ている地域でも、自然状態での放射線量を差し引くことにより、福島第一原発事故による放射性物質の影響を詳細に調査するのに役立つと考えられる。

^{40}K 、ウラン、トリウムは図 3¹⁾ から分かるように花崗岩類が分布する地域で高い線量になっており、花崗岩地域で高濃度に含有され、日本列島の地質構造と密接な関係があることが分かる。

地球が誕生した 46 億年前は地球全体が溶融した高温の球

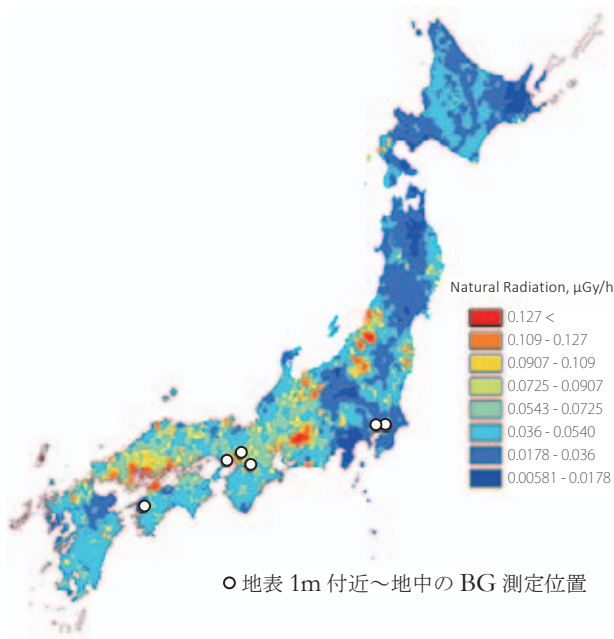


(a) 自重 3t



(b) 自重 9t

図 2 自走式コーン貫入装置

図3 日本の自然放射線量¹⁾

体であり、花崗岩の溶融体も同時期から存在した。その後 44 億年前までに地球が冷えて行く過程で、比較的軽い花崗岩体が溶融したマグマの表面部に浮かびあがり固化することになった。カリウム (K) は相対的に軽い鉱物に多く含まれるため、花崗岩中に濃縮することになった。花崗岩中に含まれる ^{40}K の半減期は 12.5 億年と長く、現在も放射線を放出しているため、花崗岩は大地起源の自然放射線量 (BG) の主体となっている。なお、花崗岩に直接的な圧力が作用した片麻岩は、母岩である花崗岩とカリウム含有量はほぼ同じである。

一方、堆積岩や変成岩は花崗岩の風化物や破砕物から生

成しているが、圧力を受けたり、熱作用を受けたり、水や風等による風化作用を受けて他の岩石に変質する過程で、水に溶けだしたり、その他の作用によって K の濃度が薄められているので、 ^{40}K の含有量も少ない。

以上より、自然の放射能 (放射性同位元素) 線源としては、ウラン鉱床などの放射能が特に濃縮した地域を別にすると、一般には ^{40}K が主要であると考えられる。

花崗岩の造岩鉱物の構成元素として K は存在し、花崗岩中の K 含有量は重量比で 4.53 % と言われている。 ^{40}K の同位体比は 0.0117 % と言われているので、花崗岩中の ^{40}K 存在比は $4.53 \% \times 0.0117 \% = 0.0000053$ (5.3 ppm) となる。即ち花崗岩 1 トン中に ^{40}K は 5.3 g 含まれることになる。

前記したように花崗岩類の分布には地域差があり、西日本や中部地方、北陸地方に多く分布しているので、地盤内の BG にも地域差が表れることになる。なお、図 3 には後述する地表 1 m 付近～地中の BG を測定した地点を併記して示している。

4. 自然放射線 (BG) 測定の計数率 N と空間線量率 E の相関²⁾について

空間線量率 E を正確に知るには実際にその場所に行って線量計で測定しなければならないが、当社の RI-CPT の BG 測定を地表 1 m 付近から地中まで連続的に行えば、福島第一原発事故による影響を一番大きく受ける可能性の高い地表付近～地中にかけての事故の影響を求めるのに役立つと考えられる。

そこで、当社ビル屋上の床面から 1 m の高さに RI-CPT 測定器と線量計をセットし、RI-CPT での湿潤密度 ρ_t 計測に使用する強度 3.7 MBq の ^{137}Cs (セシウム 137) 線源の距離を変えて、RI-CPT 測定器の計数率 N (cps) と検定済の線量計の E ($\mu\text{Sv/h}$) の値を実測し、両者の関係から N を用いて E の推

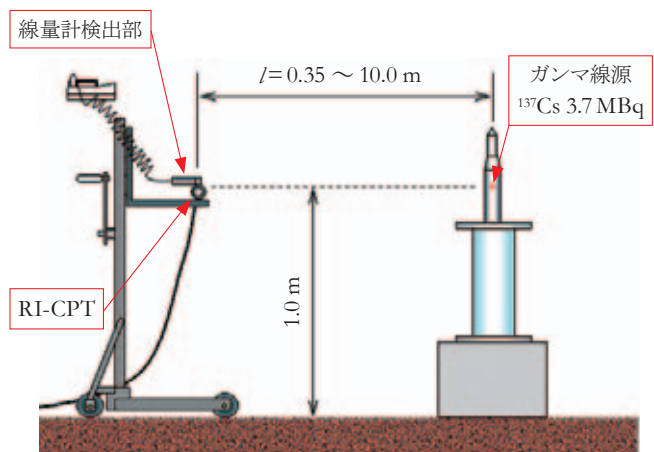


図4 測定状況の模式図並びに写真

表1 RI-CPT 測定器と空間線量計の仕様

測定器	ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社製 RI-CPT 測定器 SRDt-1DP-TP5	日立アロカメディカル株式会社製 線量計 TCS-172
検出線種	ガンマ線 (50keV ~ 3MeV)	
検出方式	NaI (Tl) シンチレーション検出器	
検出部容積	$\phi 27 \text{ mm} \times \ell 127 \text{ mm} = 72.68 \text{ cm}^3$	$\phi 25.4 \text{ mm} \times \ell 25.4 \text{ mm} = 12.86 \text{ cm}^3$
測定範囲	---	0 ~ 30 $\mu\text{Sv/h}$

定が可能であるかを検証した。測定状況の模式図と写真を図4に示す。

各距離での測定にあたっては、あらかじめ線源の影響のない状態でのBG測定を行い、測定値が安定するまでの計測時間の目安をつけた。即ち、測定時間はRI-CPT測定器は統計的に評価するのに十分な N が得られるまで各5分、線量計は E が安定するまで各30秒とした。

RI-CPT測定器と空間線量率測定に用いた線量計は、どちらもガンマ線の検出にNaI(Tl)シンチレーション検出器を用いている。その仕様を表1に示すが、RI-CPT測定器のNaI(Tl)シンチレータのガンマ線感知部の容積は線量計の容積より大きい(5.65倍)ため、そのガンマ線検出感度は線量計

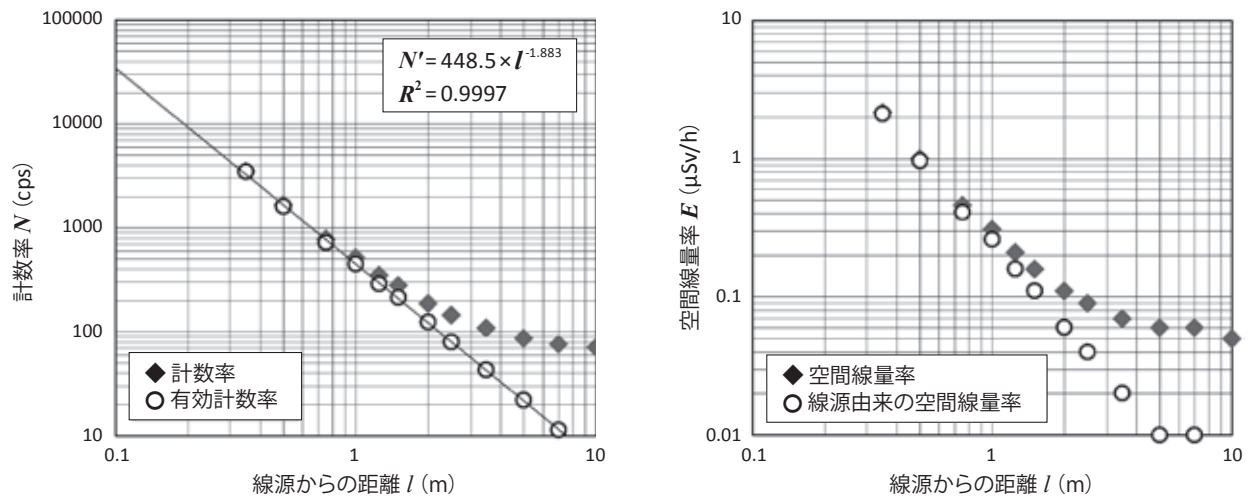
より良い。

測定結果を線源距離別にまとめて表2に示す。同表より明らかに、RI-CPT測定器では線源距離5mより7mの値の方が小さいが、線量計では値が変わらない。これは線量計の有効桁数が小数点以下2桁であるため差が出なかったと考えられ、線量計の検出限界以下の差であることを意味する。なお、同表中には自然状態(BG)での N 並びに E を差し引いた有効計数率 N' 並びに線源由来の空間線量率 E' を併記している。

測定結果に基づき、線源からの距離と N 並びに E の関係を図5に示した。線源からの距離 l が長くなるに従い N はBGに近づく。また、BGの計数率を引いた N' (線源からのガンマ

表2 線源距離と計数率 N および空間線量率 E の関係

測定器	RI-CPT		線量計	
線源距離 l (m)	計数率 N (cps)	有効計数率 N' (cps)	空間線量率 E ($\mu\text{Sv/h}$)	線源由来の 空間線量率 E' ($\mu\text{Sv/h}$)
0.35	3520.3	3455.3	2.16	2.11
0.50	1670.9	1605.9	1.01	0.96
0.75	783.8	718.8	0.46	0.41
1.00	515.3	450.3	0.31	0.26
1.25	354.1	289.1	0.21	0.16
1.50	278.8	213.8	0.16	0.11
2.00	188.9	123.9	0.11	0.06
2.50	144.3	79.3	0.09	0.04
3.50	108.2	43.2	0.07	0.02
5.00	86.9	21.9	0.06	0.01
7.00	76.3	11.3	0.06	0.01
10.00	70.9	5.9	0.05	0.00
BG	65.0	0.0	0.05	0.00

図5 計数率 N 並びに空間線量率 E と線源からの距離 l の関係

線強度)と距離の相関を見ると、両対数軸ではほぼ直線で、 $N' = 448.5 \times l^{-1.883}$ で回帰可能である。なお、理論的には放射線の強度は距離の2乗に反比例して減少するが、今回の実験で減少する比率が理論値より小さいのは、床面や周辺構造物からの反射の影響が出たものと考えられる。

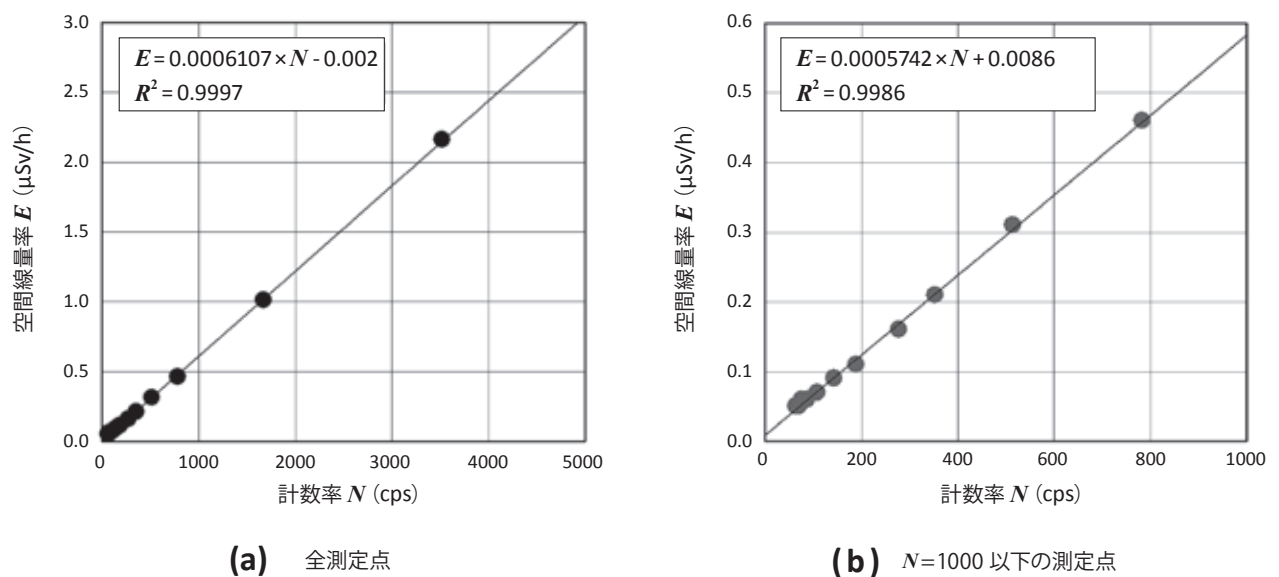
次に縦軸に線量計の E 、横軸に RI-CPT の測定結果の N を取り対比したものを図6(a)に示した。同図によると相関は良く、決定係数 (R^2) は0.99以上の値を示している。ここで、過去に測定した RI-CPT の地表付近並びに地中での BG の N は 50 ~ 400 cps であったので、1,000 cps 以下での相関を見るために、線源距離 0.75 m 以上のデータ同士での相関を取った

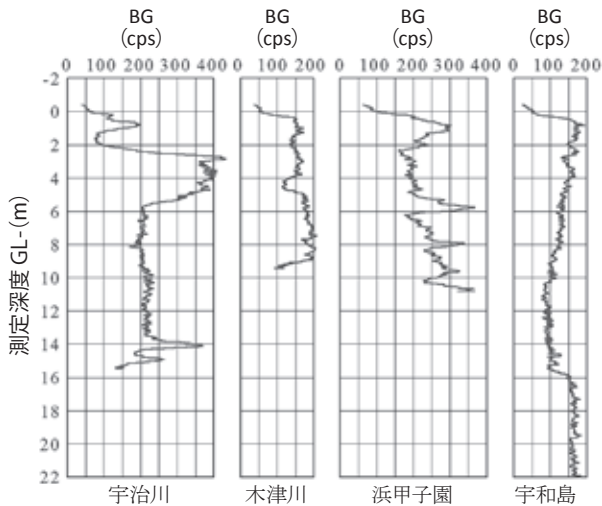
のが図6(b)である。同図でも両者の相関は良く、決定係数 (R^2) は 0.99 以上の値を示しており、 $E = 0.0005742 \times N + 0.008685$ なる関係式が求まり、 N を用いて E の推定が可能である。

以上より、RI-CPT による BG 計数率 N によって E が推定可能であることが明らかである。

5. 地盤内での BG 測定結果

RI-CPT を用いて東日本大震災前に西日本の4地点で測定した地表1m付近～地中の BG 測定結果を図7に示すが、BG は概ね 100 ~ 400 cps と後述する震災後の千葉県内での

図6 RI-CPT の計数率 N と空間線量率 E の関係

図7 西日本での地表1m付近～地中のBG測定結果³⁾

測定値に比べて全体的に大きく、かつ地点並びに深度によるばらつきが大きい。これは図3で示したように、自然放射線量が関東に比べて西日本の方が大きいことと対応している。

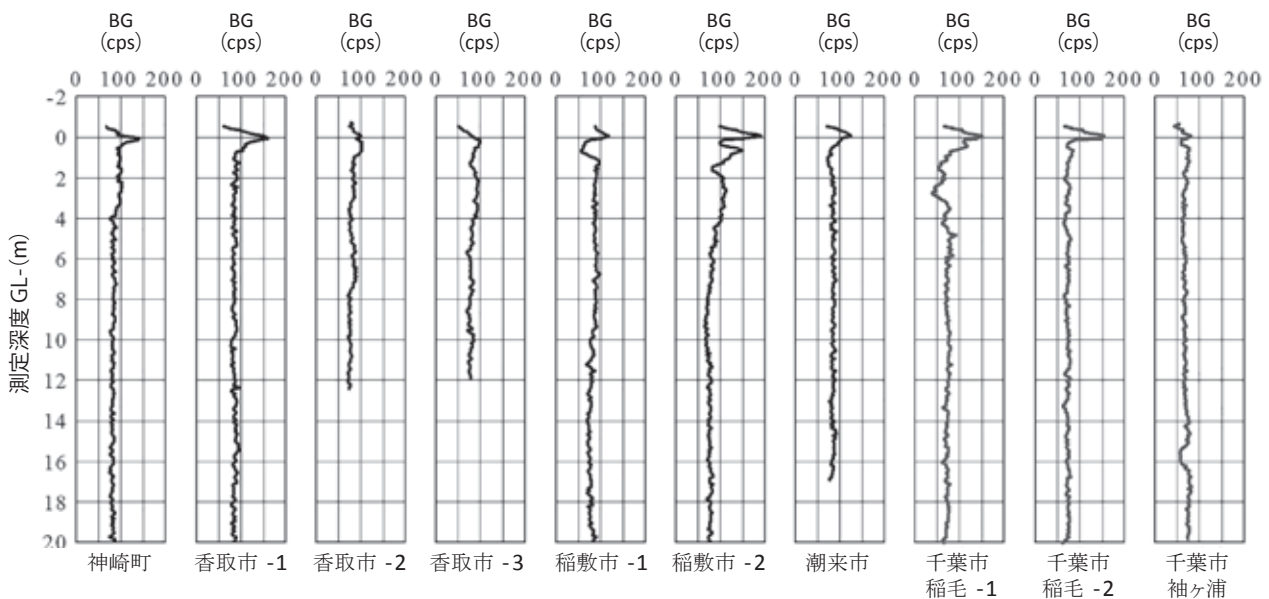
次に、震災後に RI-CPT で利根川下流域並びに千葉市内の10箇所について、地表1m付近～地中のBGを測定した結果をまとめて図8に示す。これらの10地点の内、利根川下流域の香取市-2地点と香取市-3地点並びに千葉市袖ヶ浦を除く7地点の地表付近のBGは地中より大きくなっており、地中への影響範囲は概ねGL-0.5m程度である。また、地上については地表面から離れると急速にBGが小さくなっており、地上+0.5～+1.0m付近では地表面の半分程度の値となって

いる。この地表付近のBGの上昇は福島第一原発事故で大気中に放出されたのち、地表に降下した放射性物質に由来すると考えられる。即ち、千葉市内(測定時期は平成23年11月)と時期や場所の異なる利根川下流(測定時期は平成25年3月)でも地表付近のBGの上昇が確認されたことは、福島原発由来の放射性物質が広い範囲に降下し、かつ放射性物質の地表面からの流失が期待できないところでは長時間同じ場所に留まっていることが実証されたことになる。なお、香取市-2地点、香取市-3地点並びに千葉市袖ヶ浦では地表面に植生が無いので、降雨等により泥水とともに放射性物質が流失し、BGが下がったと考えられる。また、図8によると、地盤内のBGの上昇は地表付近に限定され、放射性物質の影響は地中GL-0.5m以深には及んでいないことが確認できる。

6. BG換算空間線量率と環境放射線モニタリングシステムの公表値との比較検証結果

福島第一原子力発電所事故以降、日本全国で環境放射線モニタリングシステムによる観測が継続されており、千葉県内でも図9に示す8箇所で測定されている。なお、同図中には前記したBG測定を行った箇所を赤丸で示している。そこで、前記した関係式を用いて算定した地表付近～地表1mまでの換算空間線量率と千葉県の環境放射線測定結果(地表1m)とを対比した。

香取市羽根川(高さ1m)の平成25年3月11日時点の観測値は0.077 $\mu\text{Sv/h}$ となっている。一方、香取市羽根川から6～21km程度離れている利根川下流域の7地点で平成25年3月にRI-CPTで測定した地表付近～地表1mまでのBGは60～190 cpsであるので、換算空間線量率は0.043～0.118

図8 利根川流域「左7点」と千葉市「右3点」での地表1m付近～地中のBG測定結果²⁾

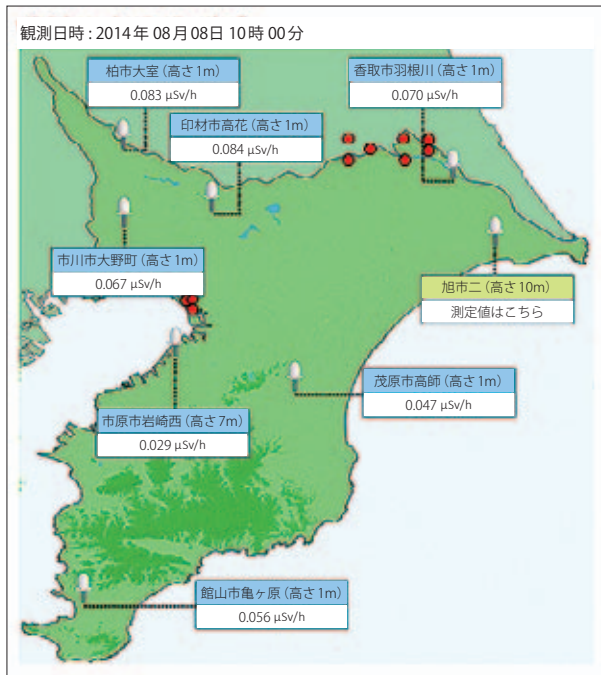


図9 千葉県環境放射線モニタリングシステム観測箇所⁴⁾
(●は BG 測定を行った箇所)

$\mu\text{Sv/h}$ と求まる。これら7地点の値は香取市羽根川の観測値と大差なく、地表付近の植生等の差を考慮すると良く対比できている。

次に、市川市大野町での観測は平成24年3月29日から開始されており、3月29日の高さ1mでの観測値は $0.106 \mu\text{Sv/h}$

である。一方、市川市大野町から直線距離で18 km 程度離れている千葉市稲毛で平成23年11月に RI-CPT で測定した地表付近～地表1 m 付近の BG は60～170 cps であるので、換算空間線量率は $0.043 \sim 0.107 \mu\text{Sv/h}$ と求まり、市川市大野町の観測値と同程度～やや少なくなっており、対比が可能であることが明らかとなった。

以上より、地表1 m 付近から地中までの放射性物質の深度分布を迅速かつ正確に測定する手法として、RI-CPT による BG 測定が有効であることが明らかとなった。

7. 湖沼や河川・海での湖底環境調査の提案と測定結果例

ダム湖や湖沼あるいは河川・海底の堆積物に含まれる放射性物質の影響を調べる場合にも RI-CPT を利用できる。

砂質土が堆積している可能性が高い場合は、ボーリングマシンを用いて貫入する(図10の模式図参照)ことにより、反力の関係から N 値3程度までの堆積土砂までは貫入できる。粘性土が堆積している可能性が高い場合は、三脚と電動ウインチで重錘(約160 kg)を取り付けたプローブを吊し、重錘とプローブ自重による貫入を実施する(図11の模式図参照)ことも可能で、この方法だと自重による貫入力の関係から N 値1程度までの堆積土砂までは貫入できる。

この手法は有明海⁵⁾や諏訪湖⁶⁻⁷⁾等での底質環境調査で既に実績があり、最近ではダム湖に堆積した土砂の分類調査(砂質土か粘性土かの区分等)にも利用されている。

これらの調査を実施する場合には底質土の密度測定が重要となるので、前章までで記述した BG 測定も必ず実施している。

ここでは、東京湾で BG を定点観測した例を図12、図13

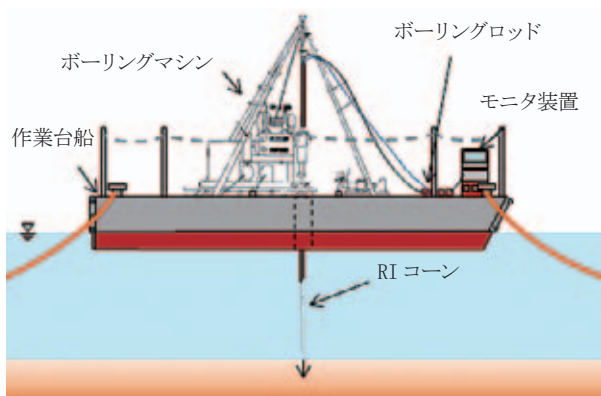


図10 ボーリングマシンで貫入する場合の模式図

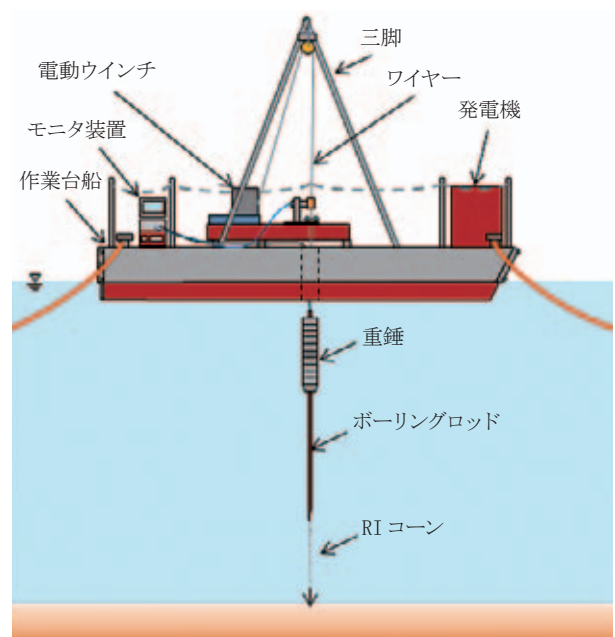


図11 重錘の自重により貫入する場合の模式図

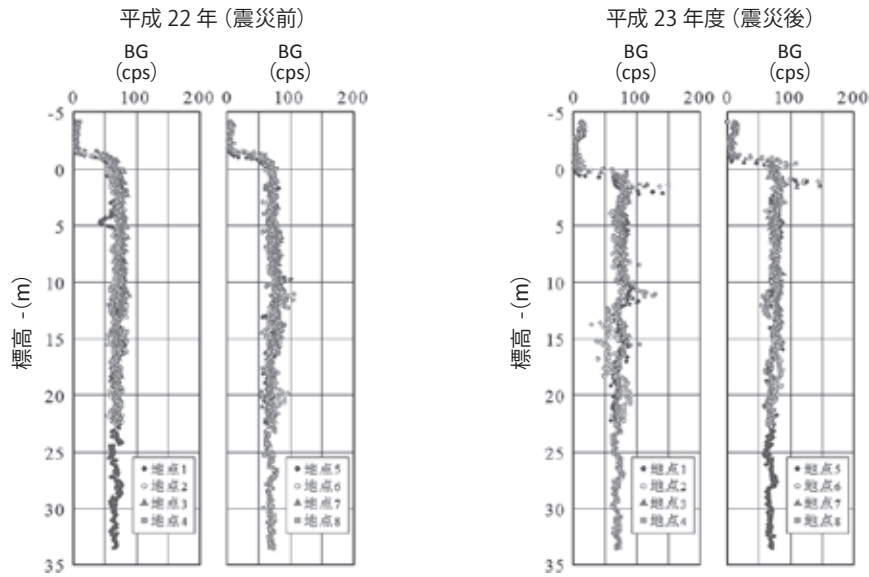


図 12 東日本大震災前後の BG 深度分布の比較

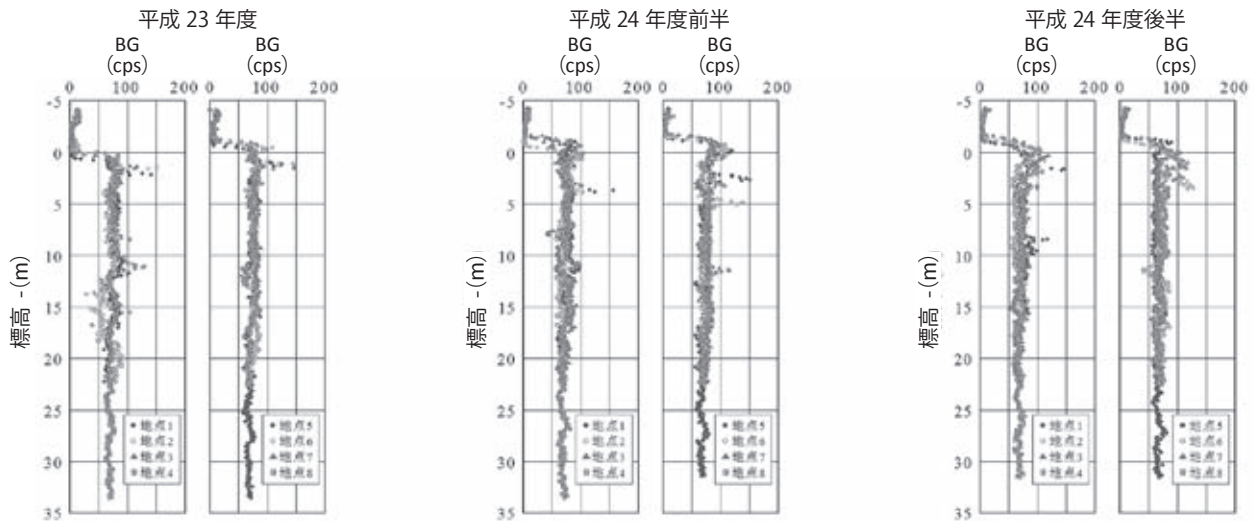


図 13 東日本大震災後の BG の経時変化

に示す。

図 12 は東日本大震災前後に 8 地点で測定した BG の深度分布であり、震災後には海底面付近の BG が大きくなっており、放射性物質が底質土へ影響したことが明らかである。

次に、図 13 は東日本大震災後の前記した 8 地点での BG 深度分布の経時変化を示したものであり、海底面付近の BG は経過時間とともに徐々に小さくなっているのが明らかである。また、BG はすべて 150 cps 以下であり、前記した西日本の震災前の BG (100 ～ 400 cps) に比べると小さく、問題ない値である。

8. まとめと今後の課題

RI-CPT で地盤調査を行う際、BG 測定を地表 1 m 付近から地中まで連続して行えば、

- ・地表付近の BG 計数率から福島第一原発事故由来の地表に降下した放射性物質の影響が評価可能である
- ・地中での BG の測定結果から、上記の放射性物質の影響が地中まで及んでいるかの判断も可能である
- ・7 章で示した調査を実施すれば、海や河川に降下した放射性物質の底質土への影響についても評価可能である(東京湾で実施した BG 測定結果によれば震災直後は BG が 50 ～ 60 cps 程度大きくなり、以降は経年変化で BG は徐々に小さくなっている)

また、今後予定されている福島第一原発事故に伴う10万Bq/kg超の指定廃棄物の中間貯蔵施設並びに8,000Bq/kg超～10万Bq/kg以下の指定廃棄物の最終処分場では地表付近の環境放射線のモニタリングとともに、周辺地盤の地盤汚染のモニタリングに、RI-CPTや挿入型RI計器⁸⁾(RI-CPTの密度計および水分計とほぼ同じ測定構造で、ガイドパイプに挿入して地盤の密度・水分検層に適用する)のBG測定が適用可能であることが検証できたことになる。

なお、地中で測定されたBGは厳密には土の放射性物質含有量(Bq/kg)との対比を行う必要があり、今後簡易ベクレル計⁹⁾等を用いて検証を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 「日本の自然放射線量」日本地質学会 HP(<http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html>)、2014年8月閲覧
- 2) 後藤 政昭、吉村 貢、重富 正幸、松浦 良信：RIコーンを用いた地表付近の自然放射線(BG)測定結果に対する考察。第10回地盤工学会関東支部発表会(2013)
- 3) 牟田 俊文、吉村 貢、後藤 政昭：RIコーンを用いた地盤内の自然放射線(BG)測定結果に関する考察。第9回地盤工学会関東支部発表会、A0061(2012)
- 4) 「モニタリングポストによる空間放射線量の測定について」
- 千葉県HP(http://www.pref.chiba.lg.jp/taiki/h23_touhoku/houshasen/monitoringpost.html)、2014年8月閲覧
- 5) 梅崎 健夫、河村 隆、日野 剛徳、今村 敬、吉村 貢、角田 裕志：RI密度検層による有明海の底質環境調査。第41回地盤工学会研究発表会、pp.133-134(2006)
- 6) 梅崎 健夫、河村 隆、吉村 貢：RI密度検層による諏訪湖の底質環境調査。第41回地盤工学会研究発表会、pp.135-136(2006)
- 7) 梅崎 健夫、吉村 貢、藤森 徳雄、北田 奈緒子、藤原 照幸：諏訪湖底質の堆積状況とRIコーンによる調査。地盤工学会 最近のサウンディング技術と地盤評価シンポジウム(2009)
- 8) 「SPITER1 孔式」ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社HP(<http://www.soilandrock.co.jp/products/spiter.html>)、2014年9月閲覧
- 9) 「ベク・メーターによる放射能濃度の調査」ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社 HP(http://soilandrock.co.jp/tyosa_shiken/housyanou.html)、2014年9月閲覧

2014年10月7日受付

2014年11月25日受理

和 文 要 約

ラジオアイソトープ貫入試験(RI-CPT)を用いて地盤内の湿潤密度 ρ_t を計測する際は、まず、線源を装着しない状態での自然放射線量(バックグラウンド:BGと称する)の測定を行い、次に、人工線源を装着した状態での放射線量を測定している。このBG測定で測定したカウント数(計数率と称する) $N(\text{cps})$ と空間線量率 $E(\mu\text{Sv/h})$ の相関を検証し、相関性が良いことを確認した。そこで、計数率を用いて換算した空間線量率と環境放射能モニタリングシステムの公表値を比較検証した。その結果、両者は良い相関関係を示すことが明らかになった。以上より、放射性物質の影響を原位置で迅速かつ地表1m付近から地中まで連続して計測する手法としてRI-CPTによるBG測定が有効であることが明らかとなった。

