

平成 19, 20 年 度

環境試料中のストロンチウム調査報告書

平成 21 年 3 月

福島県原子力センター

はじめに

福島県は日本でも有数の電力供給地であり、現在東京電力株式会社福島第一原子力発電所 6 基、東京電力株式会社福島第二原子力発電所 4 基の、合計 10 基の原子炉が稼働しています。当センターは、発足当初より原子力発電所周辺の環境放射能の測定・監視を実施してきました。これまでの測定において検出された放射能のレベルは十分低く、生活環境上の問題となるようなものではありませんでした。しかし、新潟県中越沖地震により原子力発電所が被災し、その後全国の原子力発電所の耐震基準が見直される事態となっていることや、原子力発電所の高経年化対策など、原子力行政に対する県民の関心は高まる一方です。

福島県では当初より行ってきた原子力センターによる監視に加え、平成 7 年度に衛生公害研究所（現衛生研究所）に環境放射能分析棟を整備し、プルトニウムやストロンチウムなどの放射性物質の化学分析や原子力発電所立地地域の特産品の放射能測定等を行ってきました。さらに平成 13 年度からは、当該環境放射能分析棟を組織改編により原子力センター福島支所としました。

福島支所では、環境放射能に関する調査研究も行っており、平成 8 年度から平成 10 年度にかけては食品摂取量調査、平成 11 年度から平成 13 年度にかけては環境試料中のプルトニウム調査、平成 14 年度から平成 16 年度にかけては環境試料中のトリチウム調査を実施してきました。さらに、平成 17 年度から平成 20 年度にかけて環境試料中のストロンチウム調査を実施することとし、初年度には県内全域の表層陸土におけるストロンチウム濃度の実態調査、平成 18 年度には県内 10 地点における陸土の、深度ごとのストロンチウム濃度等を調査しました。

ここに、平成 19 年度および平成 20 年度に実施した、農作物とその耕作土中のストロンチウム濃度等の調査結果をまとめました。本書が福島県内におけるストロンチウムの資料として有効に活用されれば幸いです。

最後に、本調査の実施に当たりご協力いただいた関係各位に対し、深く感謝申し上げます。

平成 21 年 3 月

福島県原子力センター

所長 板垣 繁幸

目 次

1	目的	1
2	調査の内容	1
2.1	対象試料	
2.2	試料採取方法	
2.3	測定項目	
2.4	試料調製	
3	測定方法	4
3.1	農作物および耕作土の Sr-90 濃度の測定	
3.2	農作物および耕作土の Cs-137 濃度の測定	
3.3	耕作土の水分量の測定	
3.4	耕作土の強熱減量の測定	
3.5	耕作土の粒径組成の測定	
3.6	耕作土の pH 測定	
3.7	耕作土の Ca 量の測定	
4	結果と考察	9
4.1	測定結果一覧	
4.2	農作物と耕作土の Sr-90 濃度	
4.3	耕作土の Sr-90 濃度と土質	
4.4	浦尻（地点番号 10）の耕作土の Sr-90 濃度	
4.5	Sr-90 の移行係数	
4.6	Sr-90 の移行係数と土質	
4.7	耕作土の Sr-90 濃度と Cs-137 濃度の関係	
4.8	農作物の摂取による内部被ばく線量の推定	
5	まとめ	27
	参考文献	29

1 目的

核実験および原子炉内での核分裂により生成する放射性核種の中には、環境中に放出された場合に被ばくの原因となるものが数多くある。その中でも、放射性ストロンチウムはカルシウムと化学的性質が似ているため、人体に摂取されると体の他の部位に比べて骨に取り込まれる比率が高いと言われている¹⁾。特にストロンチウム 90 (以下、「Sr-90」という。) は半減期が約 30 年と比較的長く、長期的な内部被ばくの原因となるため、重要なモニタリング項目である。

本県では福島県原子力発電所周辺環境放射能測定基本計画 (以下、「測定計画」という。) に基づき、平成 8 年度から環境試料中の Sr-90 濃度の測定を行っている。その結果、環境安全上問題となるような濃度ではないが、Sr-90 は土壌、農畜産物等から検出されている²⁾。これらのことから、環境中の Sr-90 の実態を把握することは、被ばく管理上重要であると言える。

一方、測定計画に基づくこれまでの調査は、原子力発電所周辺地域以外では限られた地点でしか行われていないため、県内全域の Sr-90 濃度の十分な把握には至っていない。また、Sr-90 は降下物から土壌に蓄積し、その後は土壌を起点として植物、地下水等の環境中に移動していくと考えられることから、Sr-90 の挙動を把握する上で、土壌深度や植物による吸収など多くの面から検討していく必要がある。

以上のことから、県内全域における Sr-90 の実態を把握するとともに、被ばく管理上の知見を得るため、環境試料中の Sr-90 濃度調査を 4 ヶ年計画で実施することとした。

初年度である平成 17 年度は、県内全域において、Sr-90 の移動の起点である表層土壌中の Sr-90 濃度の調査を行い、その実態及び土質等との関連について検討した。平成 18 年度は、Sr-90 の土壌中における深度別の挙動を明らかにすることを目的として、深度別に土壌中の Sr-90 濃度の調査を行い、土質等との関連について検討した。平成 19 年度および平成 20 年度は、過去 2 年間の調査結果をもとに県内 14 地点を選定し、Sr-90 が耕作土から農作物へ移行する状況を把握することを主たる目的として、農作物と Sr-90 濃度の調査を行った。あわせて、Sr-90 濃度と土質および放射性セシウム(Cs-137)等との関連について検討したので、報告する。

2 調査の内容

2.1 対象試料

対象試料は、県内 14 地点で栽培された農作物 (ほうれん草、大根) とその耕作土である。採取地点を表 1 及び図 1 に示す。採取地点は、平成 17 年度調査の結果 Sr-90 濃度及び土質に特徴が見られた地点とし、地域的に偏りがないように中通り 5 地点、会津 4 地点、浜通り 5 地点の合計 14 地点を選定した。

表1 採取地点一覧

地点番号	地点名	地域	平成17年度 表層土壌のSr-90濃度 (Bq/kg乾土)
1	夏無沼周辺(二本松市)	中通り	6.3
2	大鳥城周辺(福島市)		3.6
3	藤沼自然公園周辺(須賀川市)		7.3
4	ザクの磨崖三十三観音周辺(郡山市)		3.1
5	ちゃぼランド西郷周辺(西郷村)		5.6
6	伊佐須美神社周辺(会津美里町)	会津	5.1
7	泉福寺周辺(喜多方市)		4.6
8	岩黒山展望台周辺(檜枝岐村)		20.4
9	うさぎの森キャンプ場周辺(南会津町)		9.7
10	浦尻周辺(南相馬市)	浜通り	4.5
11	村民の森あいの沢周辺(飯館村)		2.7
12	勿来の関周辺(いわき市)		3.2
13	双葉町		3.0
14	富岡町		ND [※]

※NDは、検出限界未満を意味する。

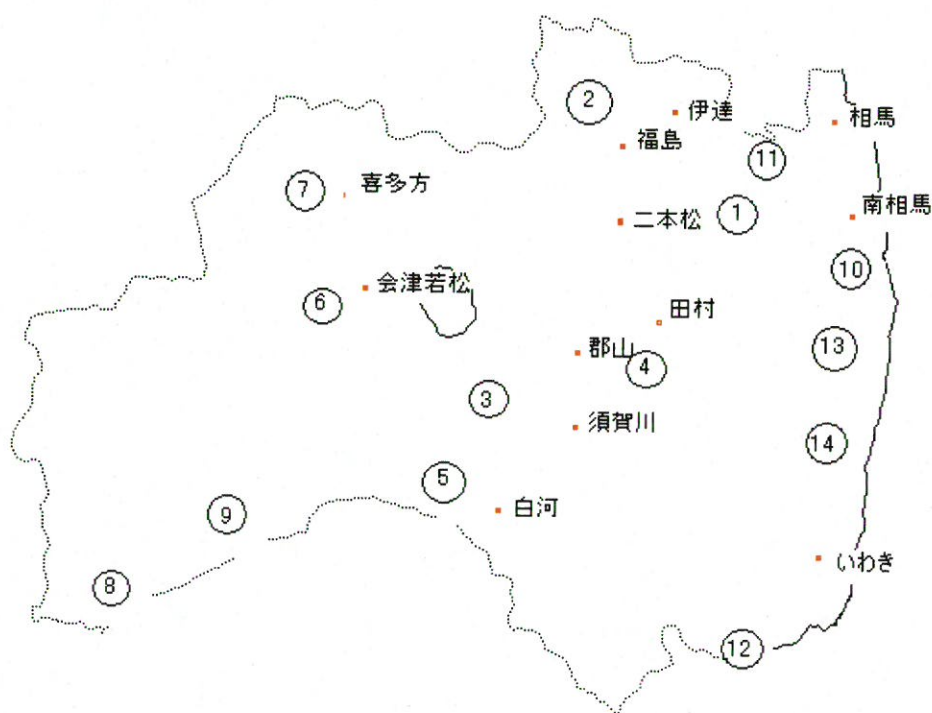


図1 採取地点位置図

2.2 試料採取方法

(1) 農作物

ほうれん草は、耕作地から手で引き抜き、付着した土壌や枯れた葉を除去してポリ袋に採取した。大根は、耕作地から手で引き抜き、付着した土壌を除去してポリ袋に採取した。図2に試料採取風景を示す。

(2) 耕作土

ほうれん草を耕作していた場所の地表から20cmまでの土壌および大根を耕作していた場所の地表から30cmまでの土壌を、採取器具を用いてポリ袋に採取した。採取器具は、市販の金属製剣スコップを用いた。



図2 試料採取風景

2.3 測定項目

測定は、放射性核種濃度および土質について行った。詳細な項目は次に示すとおりである。

- (1) 農作物および耕作土の Sr-90 濃度
- (2) 農作物および耕作土の Cs-137 濃度
- (3) 耕作土の水分量
- (4) 耕作土の強熱減量
- (5) 耕作土の粒径組成
- (6) 耕作土の pH
- (7) 耕作土のカルシウム量（以下、「Ca 量」という。）

2.4 試料調製

放射性核種濃度および Ca 量測定用の分析試料は、文部科学省マニュアル³⁾に準拠し処理した。ほうれん草は、根を取り除き水洗いした後、乾燥機（ヤマト科学㈱、DNF910 型）を用いて 105℃で 1 晩乾燥させ、灰化炉（熱計装㈱、中型灰化炉）を用いて 450℃で 27 時間灰化し、0.35mm 目のふるいに通して測定試料とした。大根は、十分水洗いして葉の部分除去し皮を剥いた後、細かく切断し、乾燥機を用いて 105℃で 1 晩乾燥させ、灰化炉を用いて 450℃で 27 時間灰化し、0.35mm 目のふるいに通して測定試料とした。耕作土は、乾燥機を用いて 105℃で 48 時間加熱乾燥後、2mm 目のふるいを通し、ゴミや小石等の不純物を除去し測定試料とした。

水分量、強熱減量および粒径組成の分析試料は、耕作土を金属製バットに薄く広げて室内で自然乾燥させ、2mm 目のふるいに通して測定用とした。なお、自然乾燥の終点は、200g 分取した耕作土の水分量が平衡に達し、5 時間以上の間隔を空けて繰り返し計量した水分減少量が 0.2g 以下になった時点とした。

pH 測定試料は、乾燥等の処理は一切行わず、耕作土をポリプロピレン製の密封容器に分取した。

3 測定方法

3.1 農作物および耕作土の Sr-90 濃度の測定

農作物および耕作土の Sr-90 濃度の測定は文部科学省マニュアル⁴⁾（イオン交換法）に準拠し、図 3、4 に示した分析フローに従った。Sr-90 濃度の測定には低バックグラウンド放射能測定装置（アロカ㈱製、LBC-472-Q 型）を使用した。測定条件は測定時間 60 分間、3 回繰り返しとした。なお、測定値が標準偏差の 3 倍 (3σ) 未満の場合には「検出限界未満」（以下、「ND」という。）とした。

3.2 農作物および耕作土の Cs-137 濃度の測定

農作物および耕作土の Cs-137 濃度の測定は文部科学省マニュアル⁵⁾に準拠し、図 3、4 に示した分析フローに従った。測定装置はゲルマニウム半導体検出器（オルテック製、GEM-30185 型）を使用した。測定時間は 80000 秒とし、測定値が標準偏差の 3 倍 (3σ) 未満の場合は ND とした。

3.3 耕作土の水分量の測定

耕作土の水分量の測定は底質調査法⁶⁾に準拠し、図 5 に示した分析フローに従った。自然乾燥後の耕作土を、乾燥機を用いて 105℃で 2 時間加熱乾燥し、デシケータ中で 2 時間放冷した。放冷後、精密天秤（メトラー・トレド製、AG245 型）で重量を測定した。このときの重量減少分を耕作土の水分量とし、重量百分率で表した。

3.4 耕作土の強熱減量の測定

強熱減量の測定は底質調査法⁶⁾に準拠し、図5に示した分析フローに従った。前述3.3項における水分測定後の試料を、マッフル炉（ヤマト科学^株製、FP410型）を用いて600℃で2時間加熱し、マッフル炉内で温度が80℃に低下するまで放置し、さらにデシケータに移し2時間放冷した。放冷後、精密天秤で重量を測定した。このときの重量減少分を耕作土の強熱減量とし、重量百分率で表した。

過去の調査において、強熱減量は土壌に含まれる有機物量の目安となりうるとの結果を得ている⁷⁾。しかし、土壌を600℃の高温で加熱すると、土壌を構成する物質の分子中に含まれる結晶水が熱分解により放出され、重量減少分に結晶水の重量も含まれることとなる。このため、強熱減量有機物の含有量を正確に表さないことから、ここでは強熱減量を有機物量の推定値として用いた。

3.5 耕作土の粒径組成の測定

耕作土の粒径組成は、ピペット法⁸⁾により求めた。図5に示した分析フローに従い、耕作土を各組成に分離し、重量から組成を決定した。粒径の区分は、表2に示した国際土壌学会法に基づく区分に従い、組成の比率は砂、シルト及び粘土の合計を100%として求めた。また、求めた粒径組成から、図6に示した国際土壌学会法に基づく区分に従い土性を分類した。

表2 粒径の区分⁸⁾

名称	粒径範囲 (mm)
粗砂	0.2以上
細砂	0.02以上0.2未満
シルト	0.002以上0.02未満
粘土	0.002未満

3.6 耕作土のpH測定⁸⁾

耕作土のpHの測定は、図5に示した分析フローに従った。未乾燥の耕作土をビーカーに取り蒸留水を加え、十分かくはんした後pH計（^株堀場製作所製、F-52型）で測定した。

3.7 耕作土のCa量の測定

耕作土のCa量の測定は文部科学省マニュアル⁴⁾に準拠し、図3に示した分析フローに従った。測定装置はICP-MS（ヒューレットパッカート製、HP4500型）を使用した。

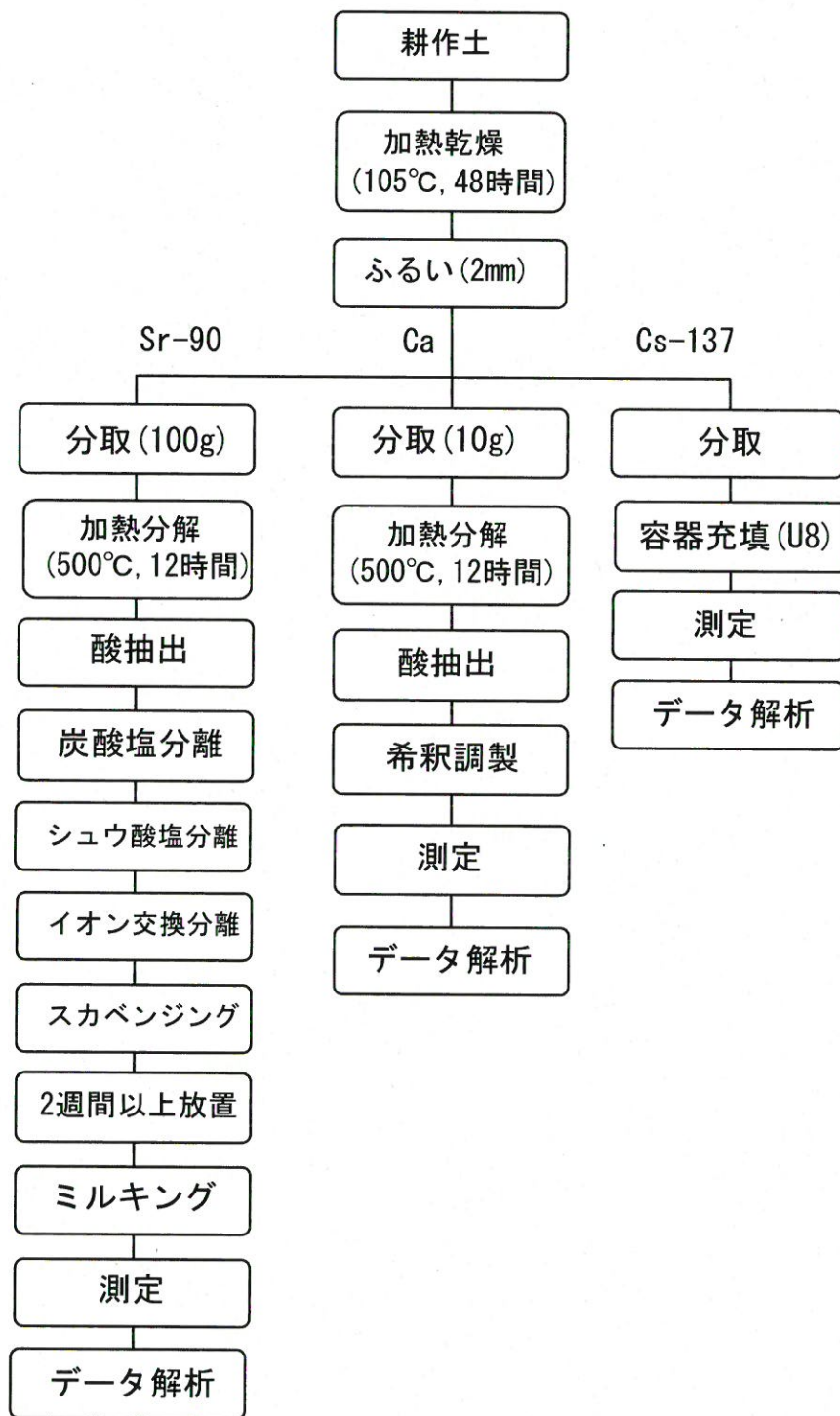


図3 耕作土の分析フロー

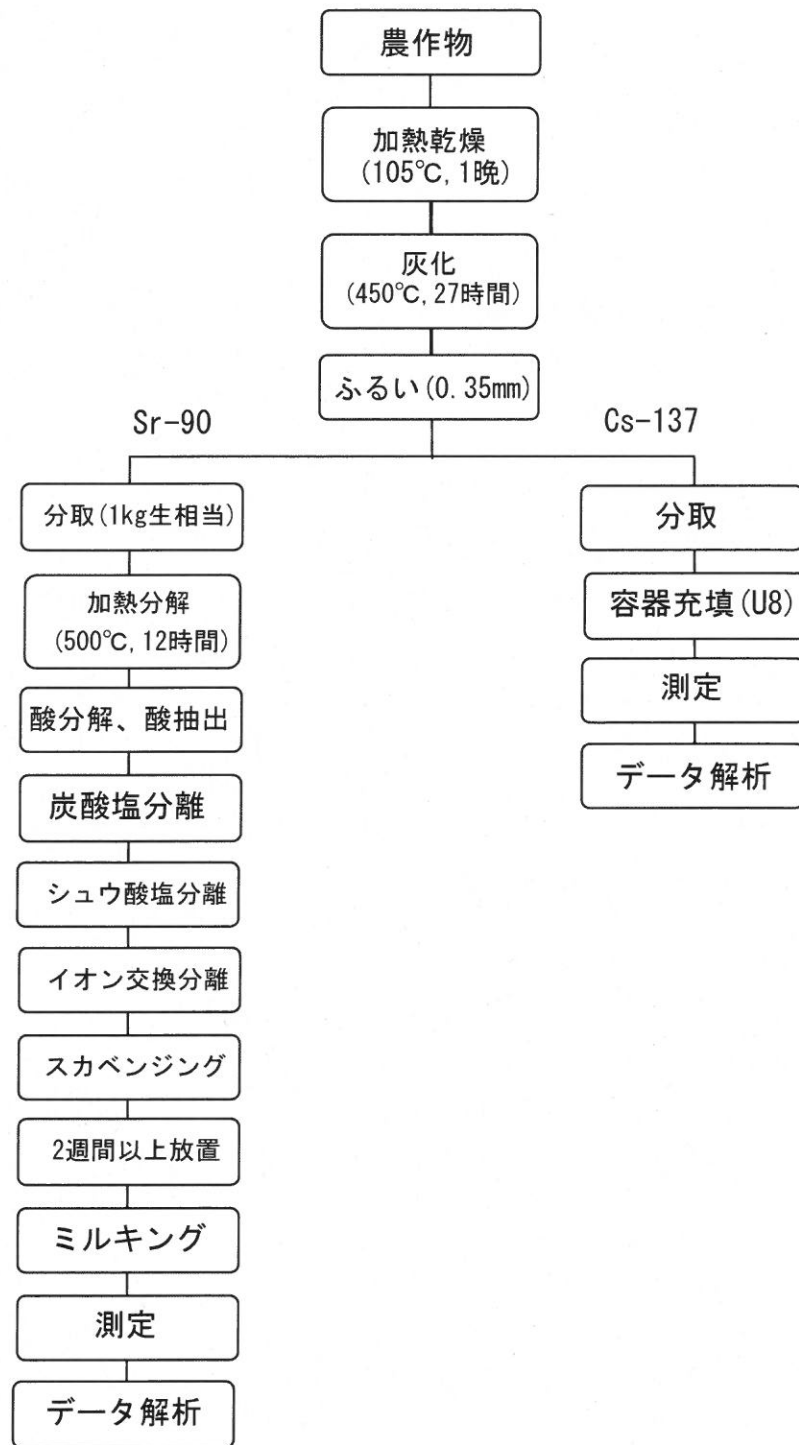


図4 農作物の分析フロー

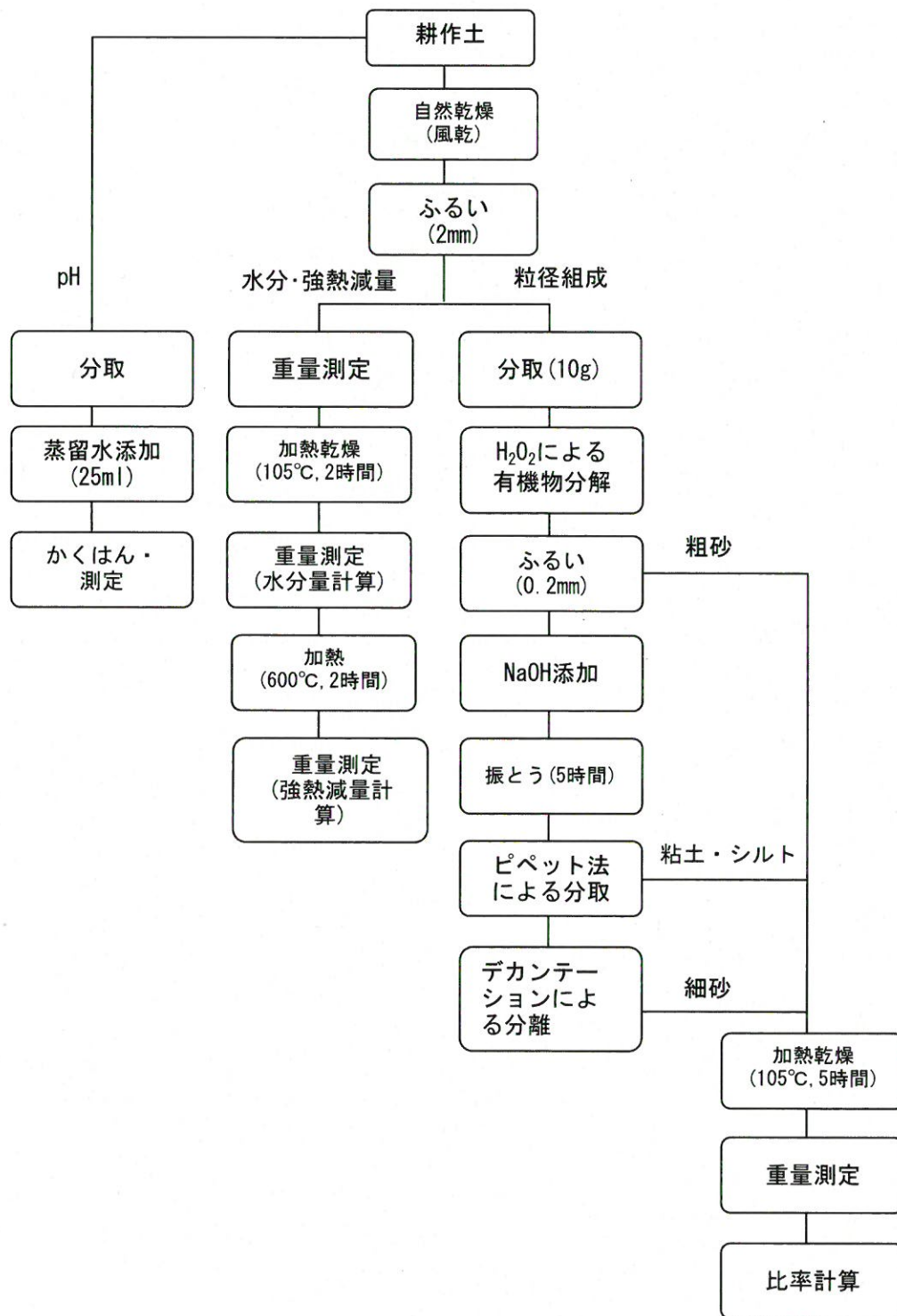


図5 耕作土の土質分析フロー

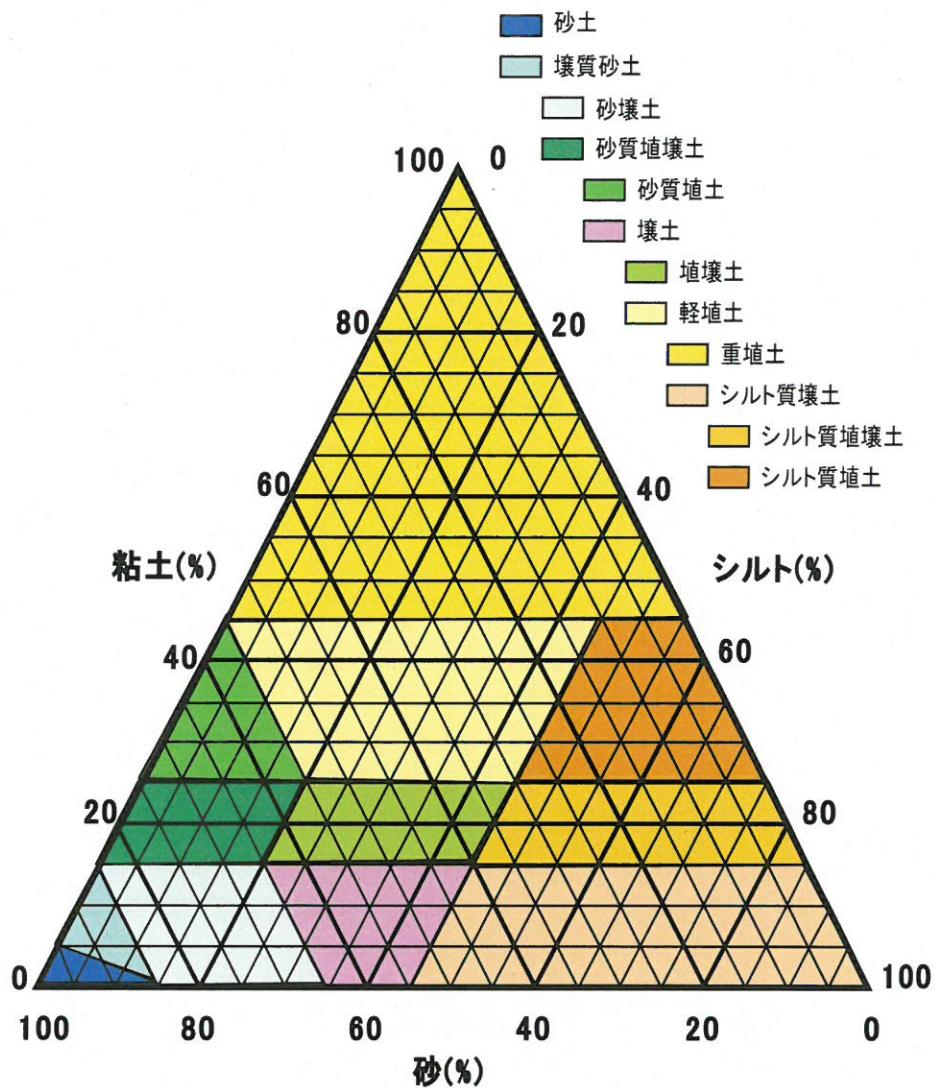


図6 土性の分類⁸⁾

4 結果と考察

4.1 測定結果一覧

表 3 にほうれん草と耕作土の Sr-90 濃度等の測定結果、表 4 に大根と耕作土の Sr-90 濃度等の測定結果を示す。

なお、耕作土に含まれる放射性核種が、経根吸収により農作物へ移行する程度を表すパラメータとして移行係数を用い、次式により算出した。

$$\text{移行係数} = \frac{\text{農作物中の放射性核種濃度(Bq/kg生重量)}}{\text{乾燥した耕作土中の放射性核種濃度(Bq/kg乾燥土)}}$$

地域	地点番号	地点名	ほうれん草の Sr-90濃度 (Bq/kg生)	耕作土の Sr-90濃度 (Bq/kg乾土)	移行係数 (Sr-90)	ほうれん草の Cs-137濃度 (Bq/kg生)	耕作土の Cs-137濃度 (Bq/kg乾土)	移行係数 (Cs-137)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	pH	水分 (%)	強熱減量 (%)	耕作土の Ca量 (mg/g土)	国際土壌学 会法における土性
中通り	1	夏無沼周辺	0.31	3.75	0.08	ND	6.41	-	83	12	5	7.0	1.7	6.3	7.66	砂壌土
	2	大鳥城跡周辺	0.14	0.86	0.16	ND	5.36	-	50	28	22	5.1	2.6	6.5	2.51	埴壌土
	3	藤沼自然公園周辺	0.15	2.53	0.06	ND	8.45	-	60	22	18	6.4	3.7	9.4	10.9	埴壌土
	4	ザクの磨崖三十三観音周辺	0.33	4.35	0.08	ND	5.09	-	60	37	3	6.0	3.9	10.8	6.04	壤土
	5	ちやぼランド西郷周辺	0.03	0.96	0.03	ND	9.21	-	58	37	5	6.1	6.8	20.4	16.4	壤土
会津	6	伊佐須美神社周辺	0.07	1.06	0.07	ND	5.64	-	62	22	16	5.3	2.6	5.7	3.84	埴壌土
	7	泉福寺周辺	0.06	2.70	0.02	ND	16.1	-	58	33	9	5.7	3.1	9.2	6.44	壤土
	8	岩黒山展望台周辺	0.35	5.19	0.07	ND	2.15	-	65	28	7	5.7	4.0	11.0	9.14	砂壌土/壤土
	9	うさぎの森キャンプ場周辺	0.14	2.59	0.05	ND	6.04	-	49	42	9	4.9	5.2	13.6	5.16	壤土
浜通り	10	浦尻周辺	0.35	4.09	0.09	ND	7.01	-	44	50	6	6.1	5.4	13.3	6.97	シルト質壤土
	11	村民の森あいの沢周辺	0.44	1.82	0.24	ND	5.50	-	57	40	3	6.8	3.3	11.1	7.87	壤土
	12	勿来の関周辺	0.25	0.86	0.29	ND	8.86	-	53	41	6	5.4	3.8	9.8	6.12	壤土
	13	双葉町	0.07	ND	-	ND	6.78	-	43	51	6	6.0	5.4	12.0	7.36	シルト質壤土
	14	富岡町	0.04	1.56	0.03	ND	9.21	-	34	63	3	6.5	5.1	13.2	23.3	シルト質壤土

ND:検出限界未満
-:値なし

表3 ほうれん草と耕作土の測定結果

地域	地点番号	地点名	大根の Sr-90濃度 (Bq/kg生)	耕作土の Sr-90濃度 (Bq/kg乾土)	移行係数 (Sr-90)	大根の Cs-137濃度 (Bq/kg生)	耕作土の Cs-137濃度 (Bq/kg乾土)	移行係数 (Cs-137)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	pH	水分 (%)	強熱減量 (%)	耕作土の Ca量 (mg/g土)	国際土壌学 会法における土性
中通り	1	夏無沼周辺	0.09	1.01	0.09	ND	4.76	-	65	16	19	5.9	2.7	7.8	5.81	砂質埴壤土
	2	大鳥城跡周辺	0.09	0.70	0.13	ND	5.87	-	58	22	20	5.4	2.5	7.0	3.27	埴壤土
	3	藤沼自然公園周辺	0.05	1.97	0.03	ND	7.15	-	60	34	6	6.2	3.3	8.8	12.5	壤土
	4	ザクの磨崖三十三観音周辺	0.13	4.12	0.03	ND	6.51	-	67	31	2	6.2	3.9	11.3	6.67	砂壤土
	5	ちやぼランド西郷周辺	0.05	0.93	0.05	ND	7.49	-	56	24	20	6.2	8.9	23.5	20.1	埴壤土
会津	6	伊佐須美神社周辺	0.06	2.67	0.02	ND	8.33	-	63	21	16	4.8	2.3	5.5	4.5	埴壤土
	7	泉福寺周辺	0.16	2.09	0.08	ND	11.9	-	59	20	21	5.1	3.5	10.3	5.72	砂質埴壤土/埴壤土
	8	岩黒山展望台周辺	0.16	3.17	0.05	ND	5.27	-	74	23	3	5.8	4.0	10.3	11.1	砂壤土
	9	うさぎの森キャンプ場周辺	0.16	1.25	0.13	ND	5.81	-	53	43	4	5.4	5.0	13.3	6.83	壤土
浜通り	10	浦尻周辺	0.07	20.7	0.003	ND	2.07	-	72	27	1	6.7	4.6	9.4	14.9	砂壤土
	11	村民の森あいの沢周辺	0.10	ND	-	ND	5.38	-	81	11	8	4.6	1.9	6.5	2.45	砂壤土
	12	勿来の関周辺	ND	0.31	-	ND	5.20	-	85	7	8	5.0	1.3	3.8	7.11	壤質砂土/砂壤土
	13	双葉町	0.05	2.74	0.02	ND	ND	-	40	50	10	6.2	5.0	12.5	11.1	シルト質壤土
	14	雷岡町	0.03	0.30	0.1	ND	11.2	-	45	34	21	5.2	6.4	20.6	8.81	埴壤土

ND:検出限界未満
-:値なし

表4 大根と耕作土の測定結果

4.2 農作物と耕作土の Sr-90 濃度

ほうれん草と耕作土の Sr-90 濃度は、それぞれ 0.03~0.44Bq/kg 生、ND~5.19Bq/kg 乾土となり、これらは測定計画に基づく過去 10 年間（平成 10 年度~平成 19 年度）の測定値（ほうれん草：ND~0.28Bq/kg 生、土壌：ND~4.4Bq/kg 乾土）と同程度であった。

大根と耕作土の Sr-90 濃度は、それぞれ ND~0.16Bq/kg 生、ND~20.7Bq/kg 乾土となり、大根は、測定計画に基づく過去 10 年間の測定値（0.03~1.0Bq/kg 生）と同程度であった。耕作土では、地点番号 10 の浦尻で 20.7Bq/kg 乾土という高い値が得られたが、それ以外の地点では過去 10 年間の測定値と同程度であった。また、平成 17 年度に実施した表層土壌（人の手が加わっていない地表から 5cm までの深さの土壌）中の Sr-90 濃度は 0.2~20.4Bq/kg 乾土であるので、耕作土の Sr-90 濃度（ND~20.7Bq/kg 乾土）は、平成 17 年度の結果と同程度であった。なお、今回の調査で Sr-90 濃度が最も高かった地点番号 10 浦尻の耕作土については 4.4 項で別途考察した。

図 7、8 に耕作土と農作物の Sr-90 濃度の関係を示す。両図とも相関は見られなかった。これは、土壌中の元素が土質、作物の種類、栽培条件などの様々な要因に影響を受けて環境中を移動するためである。

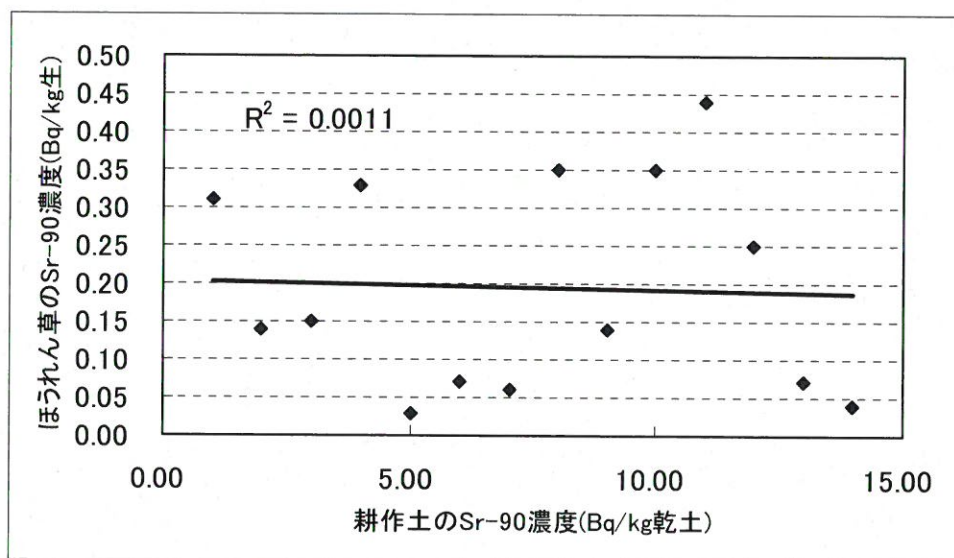


図 7 耕作土とほうれん草の Sr-90 濃度

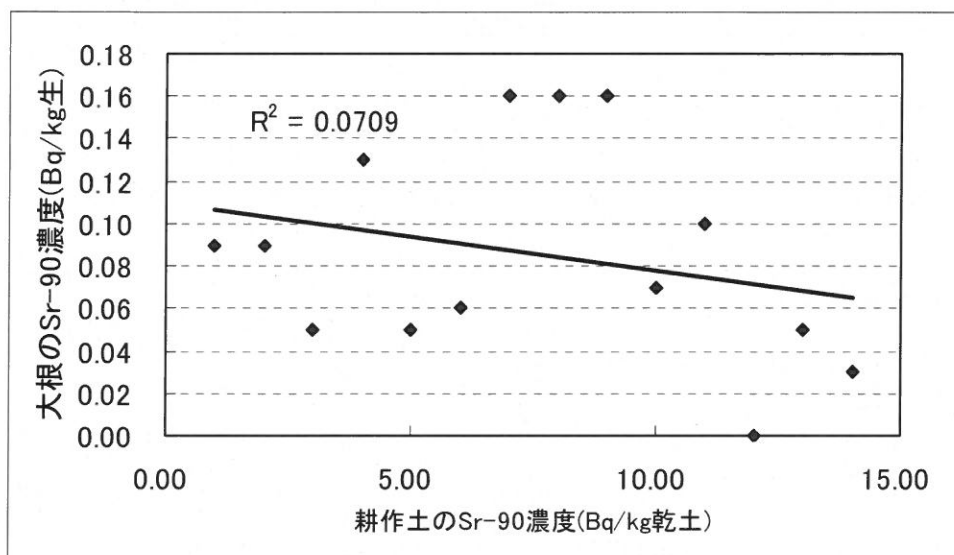


図8 耕作土と大根の Sr-90 濃度

4.3 耕作土の Sr-90 濃度と土質

当センターでは、平成 17 年度に表層土壌中の Sr-90 濃度と土質の関連を調査した。その結果、以下のような傾向が見られた⁹⁾。

- (1) 土壌の水分量が多いほど Sr-90 濃度が高い。
- (2) 土壌の強熱減量大きい、すなわち土壌の有機物量が多いほど Sr-90 濃度が高い。
- (3) 土壌の砂の割合が小さいほど Sr-90 濃度が高い。
- (4) 土壌の pH と Sr-90 濃度の間に相関はない。
- (5) 土壌の Ca 量と Sr-90 濃度の間に相関はない。

(1)(2)(3)の傾向から、砂の割合が小さい（シルト、粘土が多い）土壌は、水分および Sr-90 を含んでいる有機物を保持しやすい性質のため Sr-90 濃度が高いと論じた。次ページ以降では、この傾向が耕作土でも見られるかを考察した。

図 9、10 に耕作土の水分量と Sr-90 濃度の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。

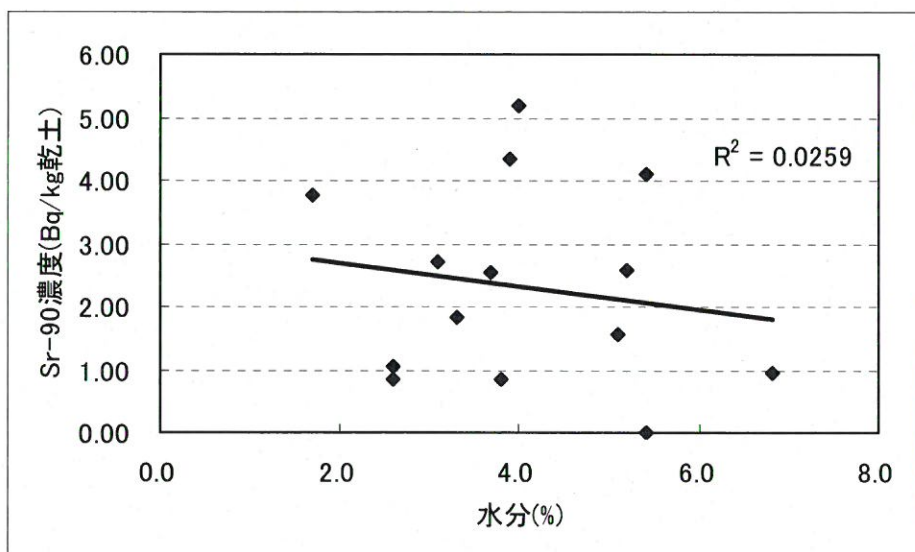


図 9 耕作土 (ほうれん草) の水分量と Sr-90 濃度

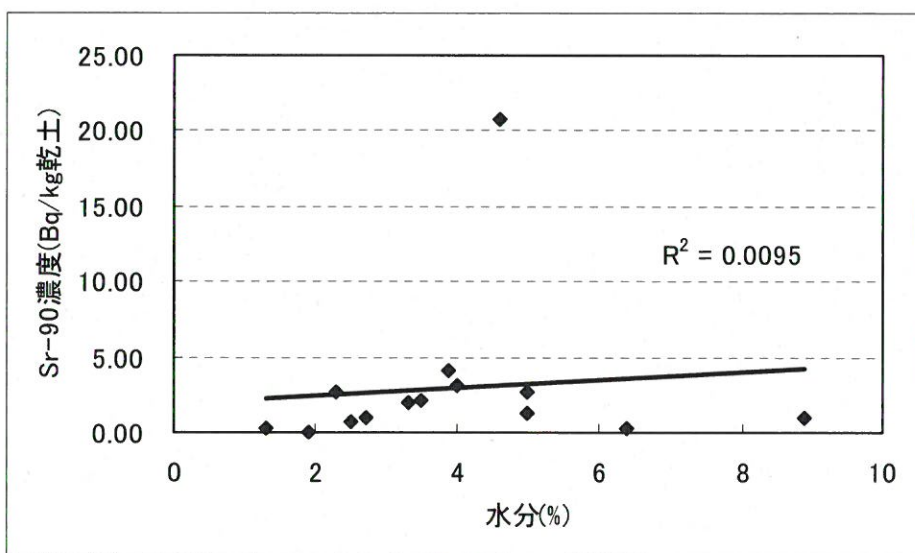


図 10 耕作土 (大根) の水分量と Sr-90 濃度

図 11、12 に耕作土の強熱減量と Sr-90 濃度の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。

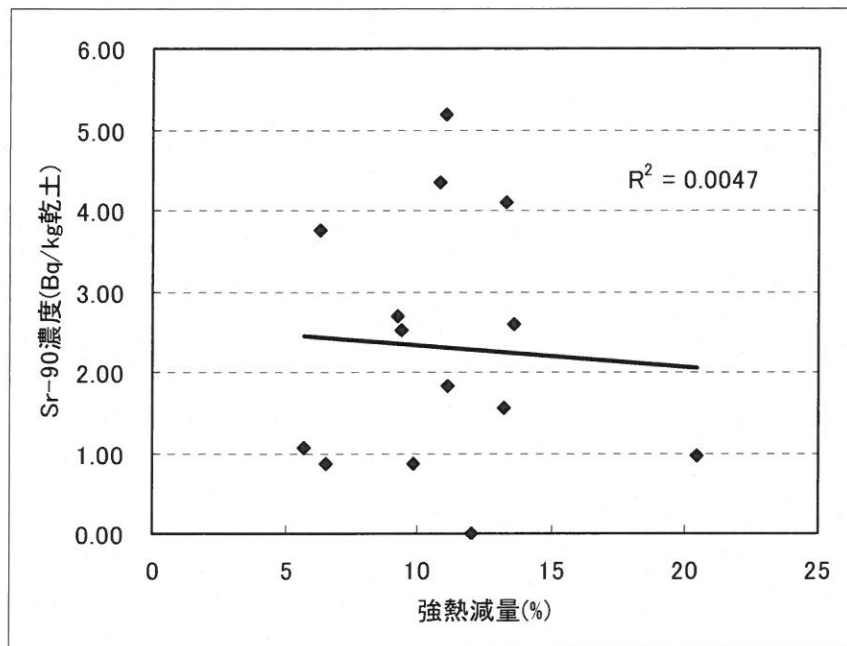


図 11 耕作土（ほうれん草）の強熱減量と Sr-90 濃度

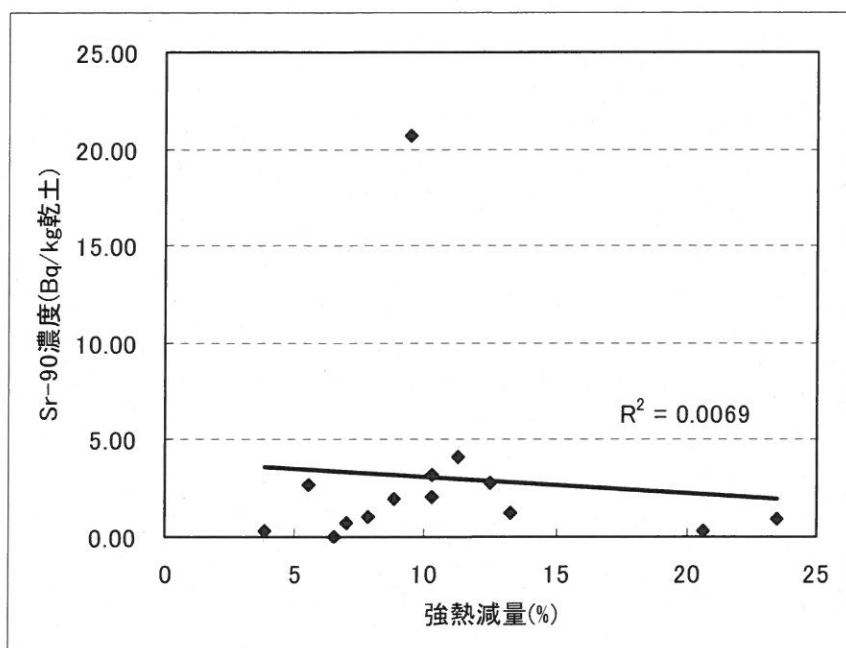


図 12 耕作土（大根）の強熱減量と Sr-90 濃度

図 13、14 に、耕作土の粒径組成と Sr-90 濃度の関係を示す。Sr-90 濃度が 3Bq/kg 乾土より大きい試料を●、1～3Bq/kg 乾土の試料を●、1Bq/kg 乾土より小さい試料を●で表した。両図より、Sr-90 濃度が 3Bq/kg 乾土より大きい試料は、他の試料に比べて粘土の割合が小さい傾向にあることが分かるが、平成 17 年度の結果とは異なる傾向となった。

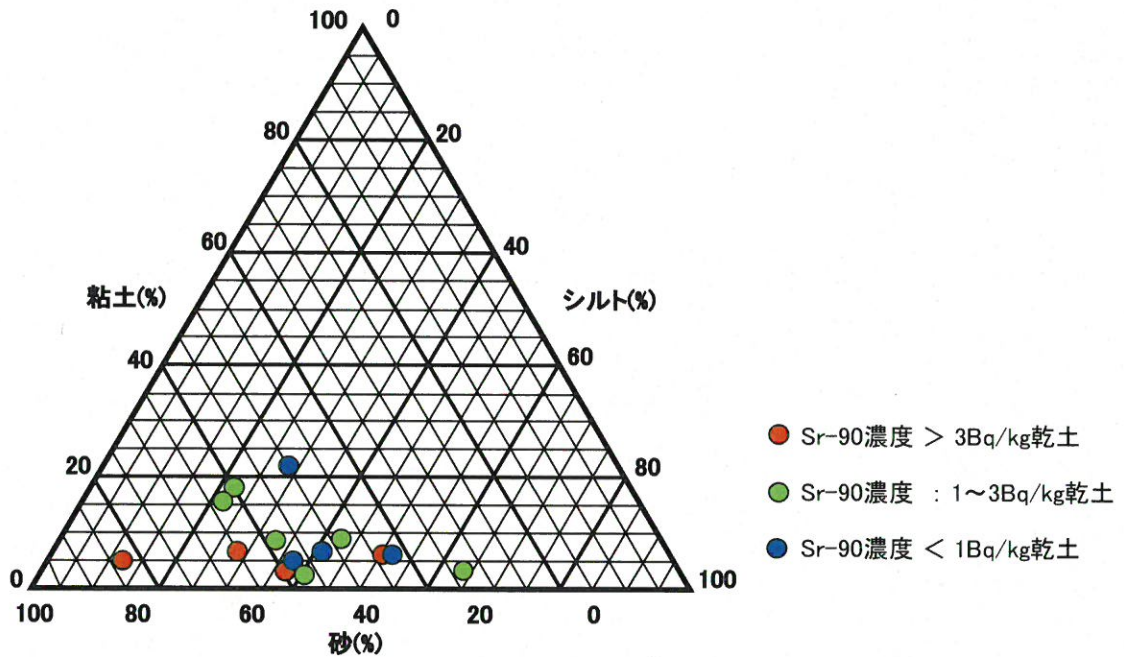


図 13 耕作土（ほうれん草）の粒径組成と Sr-90 濃度

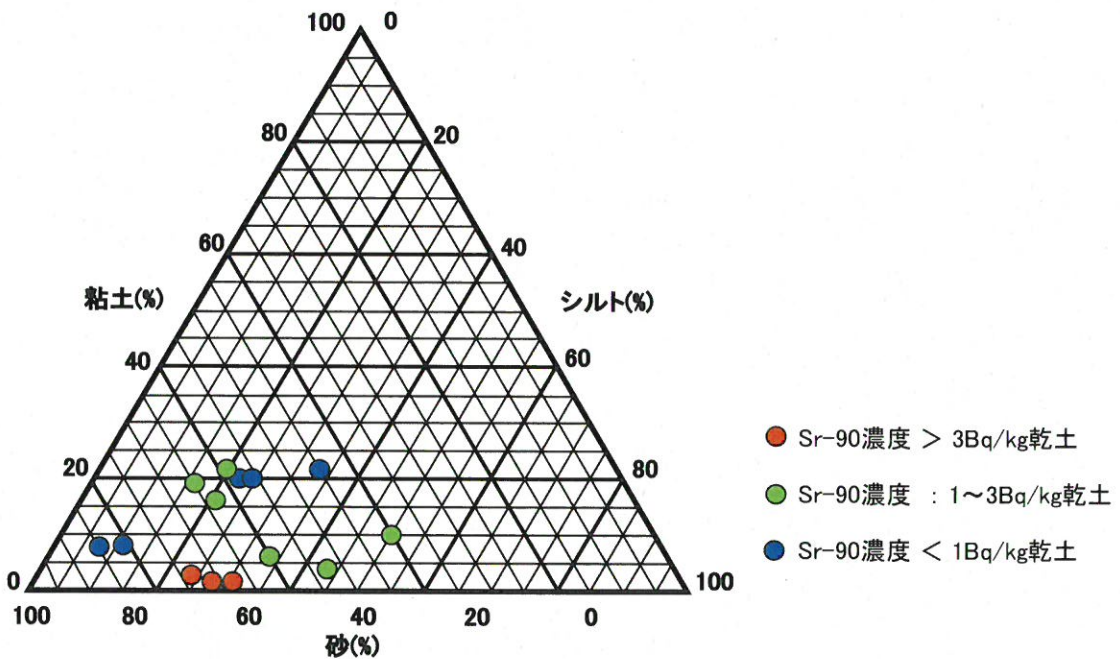


図 14 耕作土（大根）の粒径組成と Sr-90 濃度

図 15、16 に耕作土の pH と Sr-90 濃度の関係を示す。図 15 では相関は見られなかったが、図 16 では中程度の正の相関 ($R^2 \geq 0.16$)¹⁰⁾が見られた。

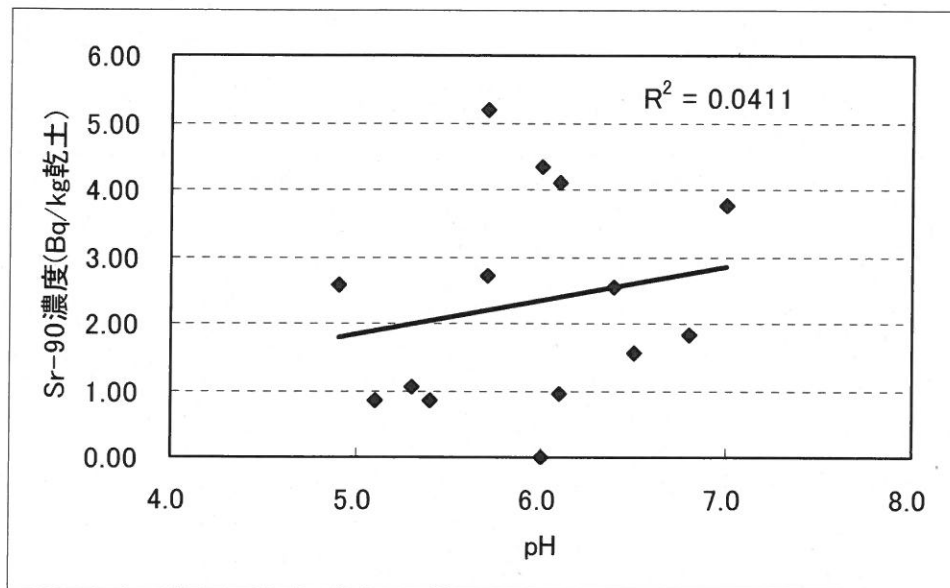


図 15 耕作土 (ほうれん草) の pH と Sr-90 濃度

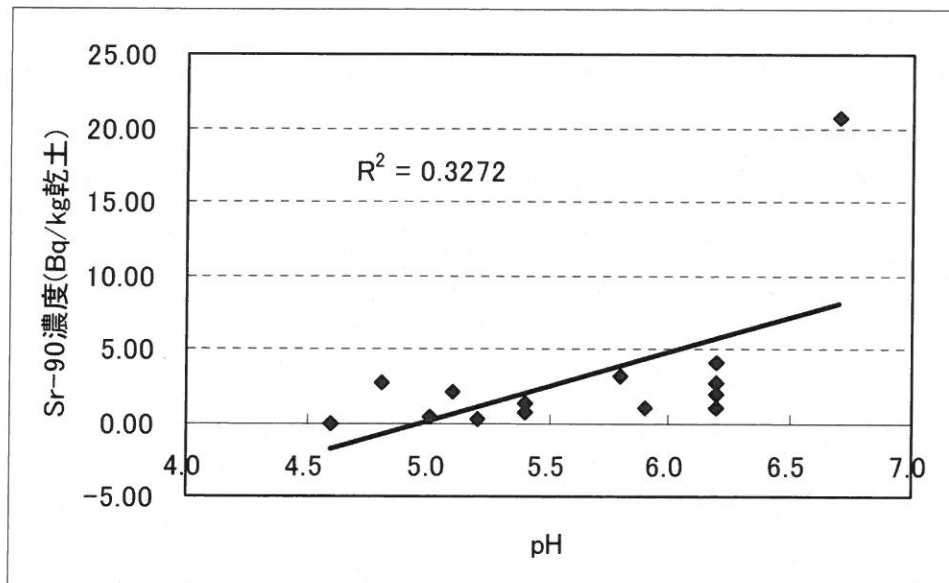


図 16 耕作土 (大根) の pH と Sr-90 濃度

図 17、18 に耕作土の Ca 量と Sr-90 濃度の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。

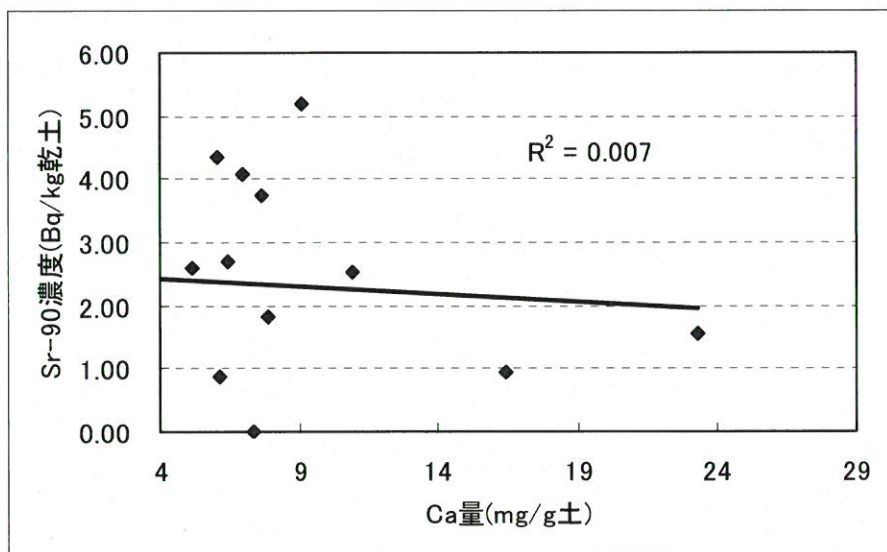


図 17 耕作土（ほうれん草）の Ca 量と Sr-90 濃度

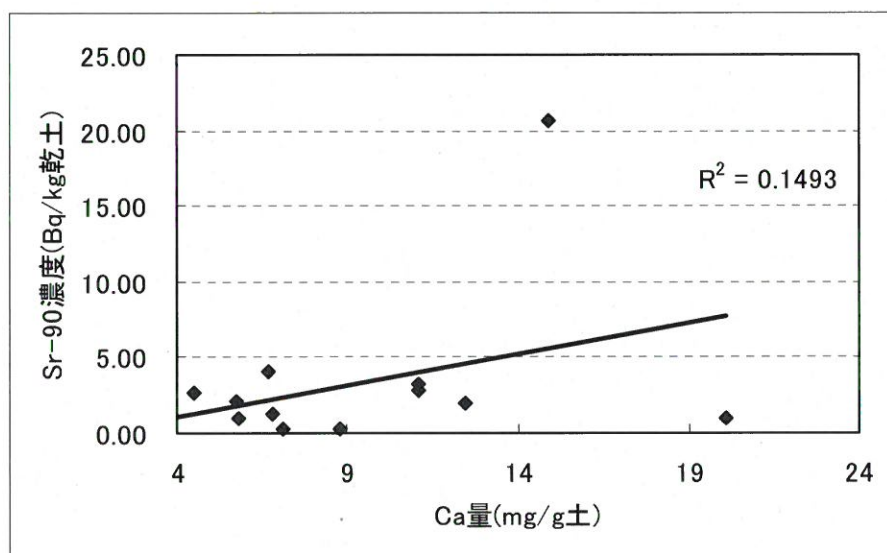


図 18 耕作土（大根）の Ca 量と Sr-90 濃度

以上が、今回分析した土質と耕作土の Sr-90 濃度の関係であり、平成 17 年度表層土壌の結果と異なるものが多かった。原因として様々な要因が考えられるが、もっとも大きな理由として、耕作土は人の手が加わっているため、表層土壌とは大きく異なる土質になっているということが挙げられる。また、個々の土質項目と Sr-90 濃度の間に、明確な相関は見られなかった。これは、地域によって異なる個々の土質が複合的に絡み合っただけで土壌中の元素に作用するためである。従って、個々の土質項目と Sr-90 濃度を全体的に比較するよりも、地点ごとの土質と Sr-90 濃度を比較することが現実的なデータ評価になると考えられる。

4.4 浦尻（地点番号 10）の耕作土の Sr-90 濃度

4.2 でも述べたように、浦尻の耕作土（大根）の Sr-90 濃度が 20.7Bq/kg 乾土となり、他の地点に比べて高い値となった。ここでは、その要因として考えられることについて考察した。

表 5 に、耕作土および平成 17 年度表層土壌の Sr-90 濃度と土質⁹⁾を示す。また表 6 に、それぞれの Sr-90 濃度と安定 Sr 量を示す。

	栽培作物	Sr-90濃度 (Bq/kg乾土)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	pH	水分 (%)	強熱減量 (%)	Ca量 (mg/g土)	土性
耕作土	ほうれん草	4.09	44	50	6	6.1	5.4	13.3	6.97	シルト質壤土
	大根	20.7	72	27	1	6.7	4.6	9.4	14.9	砂壤土
表層土壌	-	4.5	45	47	8	5.7	5.9	22.1	6.77	シルト質壤土

表 5 浦尻における耕作土および表層土壌中の Sr-90 濃度と土質

	栽培作物	Sr-90濃度 (Bq/kg乾土)	安定Sr量 (mg/kg乾土)	Ca量 (mg/g土)
耕作土	ほうれん草	4.09	30.2	6.97
	大根	20.7	70.2	14.9
表層土壌	-	4.5	43.9	6.77

表 6 浦尻における耕作土および表層土壌中の Sr-90 濃度と安定 Sr 量

表 5 から、大根の耕作土は土性が砂壤土（砂の割合が多い）であり、他の 2 試料に比べて土質が大きく異なることが分かる。また表 6 から、土壌中に元来存在する安定 Sr 量には大きな差があり、大根の耕作土には他の 2 試料に比べて約 2 倍の安定 Sr が含まれていることが分かる。さらに平成 17 年度の調査では、浦尻周辺は浜通りの他の地域に比べて、Sr-90 濃度が高い傾向にあることが分かっている。以上のことから、今回の浦尻における Sr-90 濃度が高い値となった主な要因は、耕作土の土質とそれに伴う Sr-90 の局地的な偏りではないかと考えられる。

4.5 Sr-90 の移行係数

ほうれん草および大根の Sr-90 の移行係数は、それぞれ — ～ 0.29 (平均値 0.1)、— ～ 0.13 (平均値 0.06) となった。このことから、耕作土中の Sr-90 は大根よりもほうれん草に移行する割合が大きいことが分かった。なお、本文中の「—」は「値なし」の意である。

表7に、本調査により得られた移行係数と、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency, 以下「IAEA」という。)が発行している技術資料¹¹⁾に記載の移行係数、および独立行政法人放射線医学総合研究所(以下、「放医研」という。)で行われた実験¹²⁾¹³⁾に基づく移行係数を示す。

	ほうれん草	大根
本調査	0.1	0.06
IAEA	0.3	0.3
放医研	0.30	0.05

表7 Sr-90 の移行係数 (本調査の値は平均値)

本調査の値は、ほうれん草では IAEA および放医研よりも低く、大根では IAEA より低く、放医研とは同程度であった。また、放医研の値は、大根よりもほうれん草が大きく、本調査の結果と同じ傾向となっている。

なお、IAEA の値は農作物全般の報告値であり主に欧米の土壌で得られたものである。一方放医研の値は、日本の土壌に既知濃度の Sr-90 を添加し、その土壌を用いてほうれん草、大根を栽培して得られたものである。従って、本調査の値を評価する対象としては、日本の地域性を考慮した放医研の値を用いることが適切であると考えられる。

4.6 Sr-90の移行係数と土質

移行係数は土質によって変動すると言われている¹⁴⁾。そこで、今回分析した土質と移行係数の関係を考察した。

図19、20に耕作土の水分量と移行係数の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。土壌中の元素は、主として土壌中の水に溶解して移動すると考えられる。従って土壌中の水分が多いほどSr-90は農作物に移行しやすい、すなわち移行係数が大きくなると推論されるが、本調査ではそのような傾向は見られなかった。

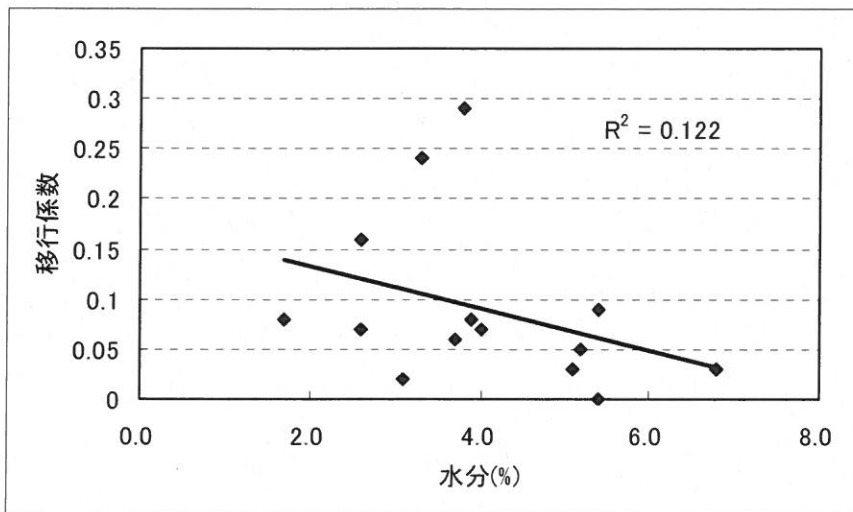


図19 耕作土（ほうれん草）の水分率と移行係数

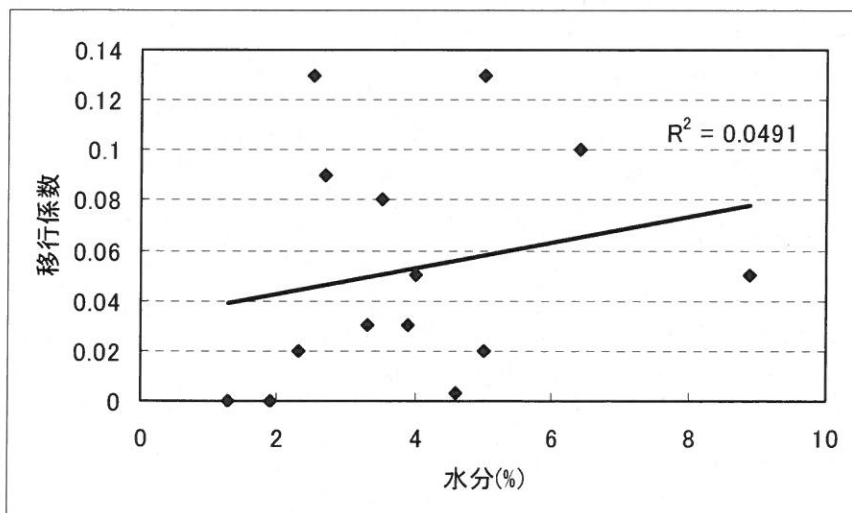


図20 耕作土（大根）の水分率と移行係数

図21、22に耕作土の強熱減量と移行係数の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。平成17年度の調査結果では、強熱減量が高いほど土壌中のSr-90濃度が高くなる傾向が見られ、それは土壌中の有機物がSr-90を保持する作用があるためであると論じた。このことから、有機物が多い耕作土では耕作土中にSr-90が保持され、農作物に吸収されにくい、すなわち移行係数が小さくなると推論される。しかし、本調査ではそのような傾向は見られなかった。

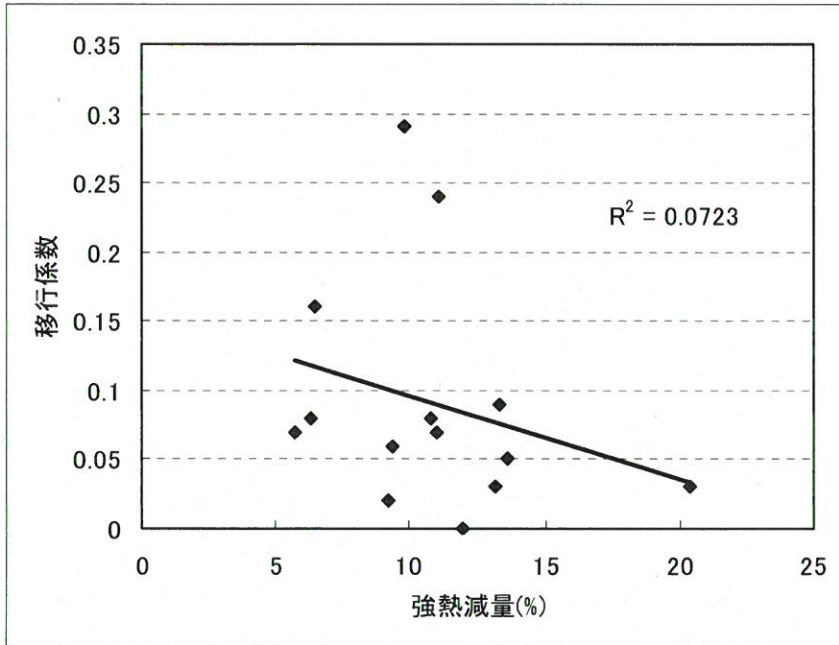


図21 耕作土（ほうれん草）の強熱減量と移行係数

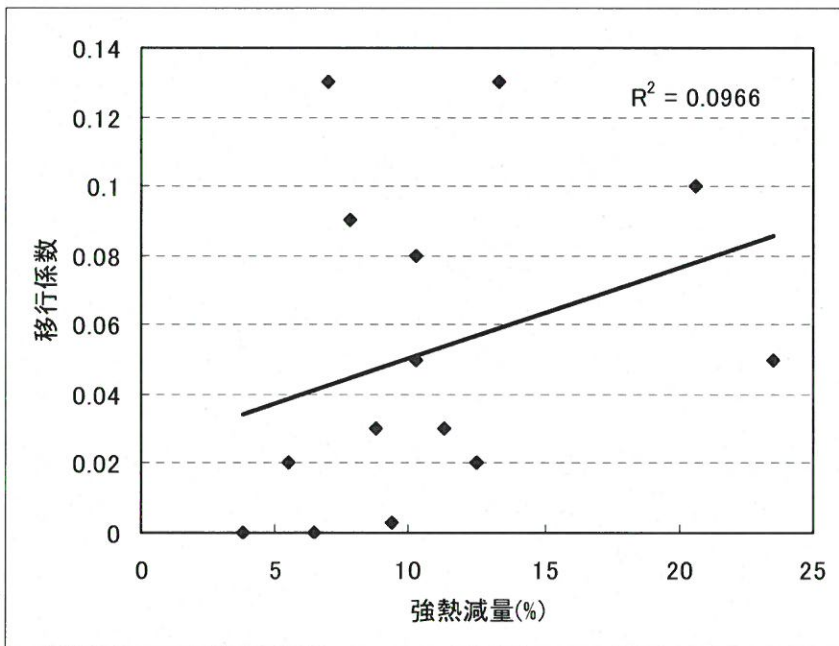


図22 耕作土（大根）の強熱減量と移行係数

図 23、24 に耕作土の砂の割合と移行係数の関係を示す。図 23 では相関が見られないが、図 24 では中程度の負の相関が見られた。土壌粒子が粗大になるほど移行係数が大きくなるという報告があるが¹⁵⁾、本調査ではそのような傾向は見られなかった。

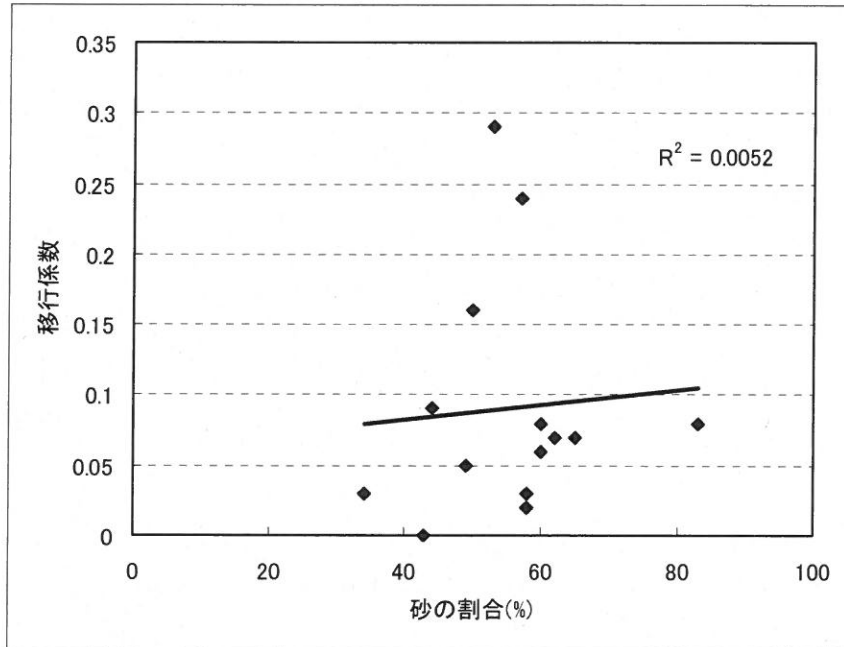


図 23 耕作土（ほうれん草）の砂の割合と移行係数

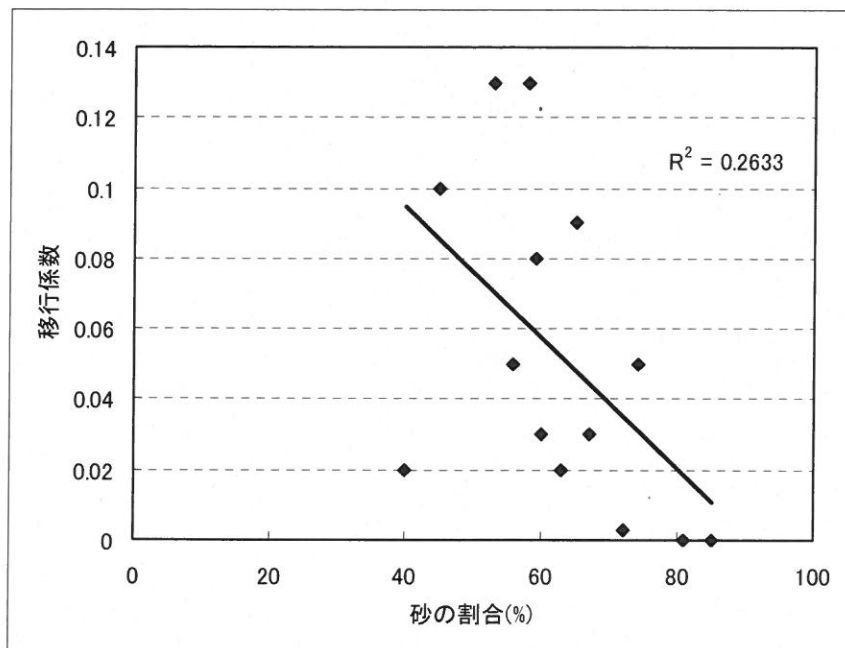


図 24 耕作土（大根）の砂の割合と移行係数

図 25、26 に耕作土の pH と移行係数の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。牧草等では、pH が低いほど移行係数が大きくなるとの報告があるが¹⁶⁾、本調査ではそのような傾向は見られなかった。

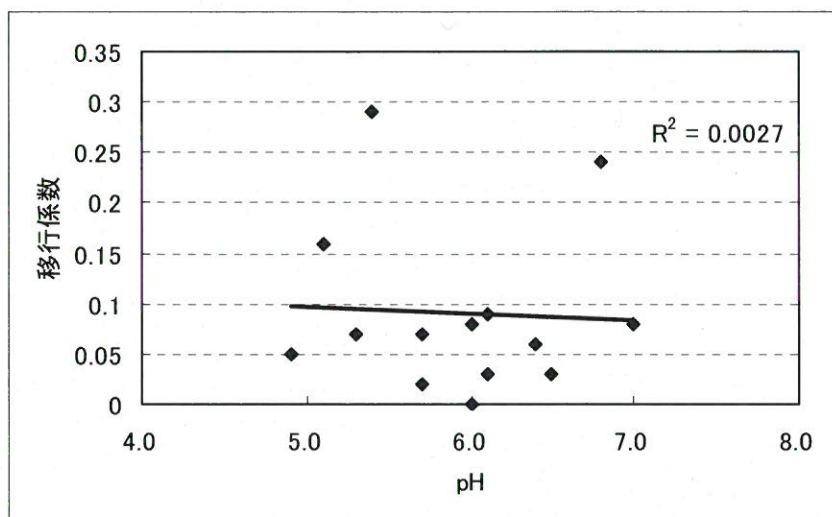


図 25 耕作土（ほうれん草）の pH と移行係数

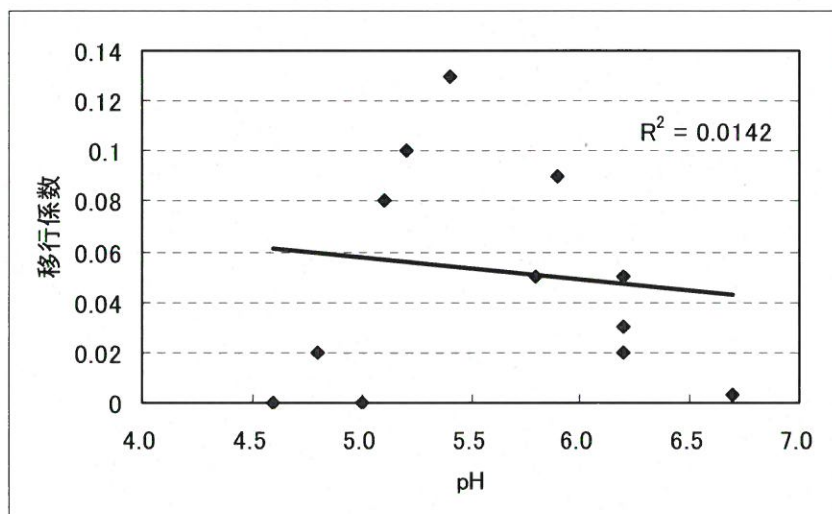


図 26 耕作土（大根）の pH と移行係数

図 27、28 に耕作土の Ca 量と移行係数の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。Ca の共存により Sr-90 の移行係数が変化すると報告があるが¹⁷⁾、本調査ではそのような傾向は見られなかった。

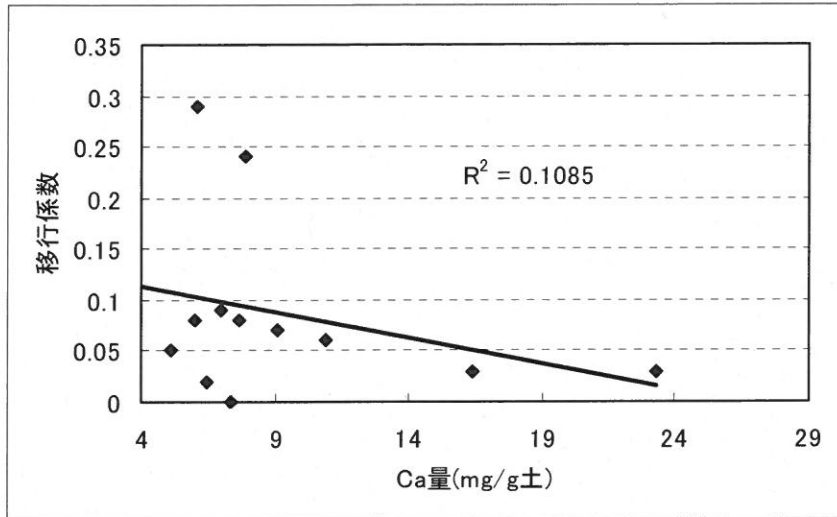


図 27 耕作土（ほうれん草）の Ca 量と移行係数

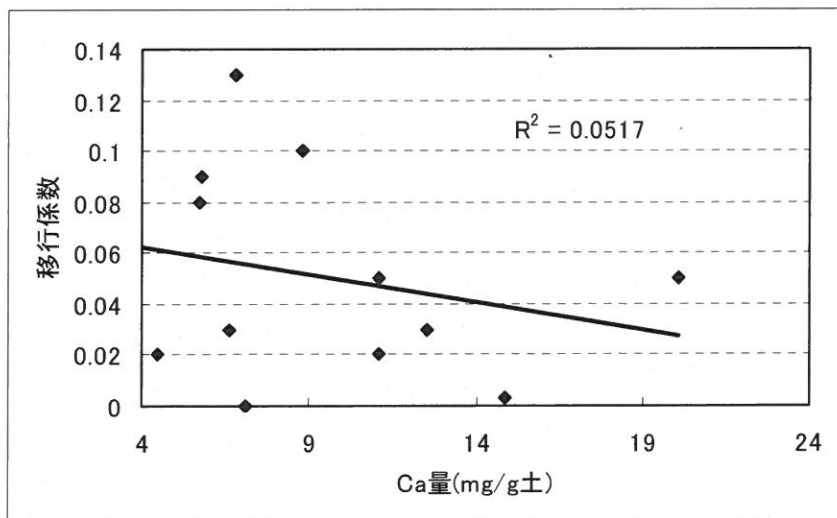


図 28 耕作土（大根）の Ca 量と移行係数

4.7 耕作土の Sr-90 濃度と Cs-137 濃度の関係

平成 17 年度の結果では、土壌中の Cs-137 濃度と Sr-90 濃度の間には相関が見られ、Cs-137 濃度が高い試料は Sr-90 濃度も高いという結果が得られた。ここでは、耕作土でもその傾向が見られるかを検討した。図 29、30 に耕作土の Cs-137 濃度と Sr-90 濃度の関係を示す。両図ともに相関は見られなかった。

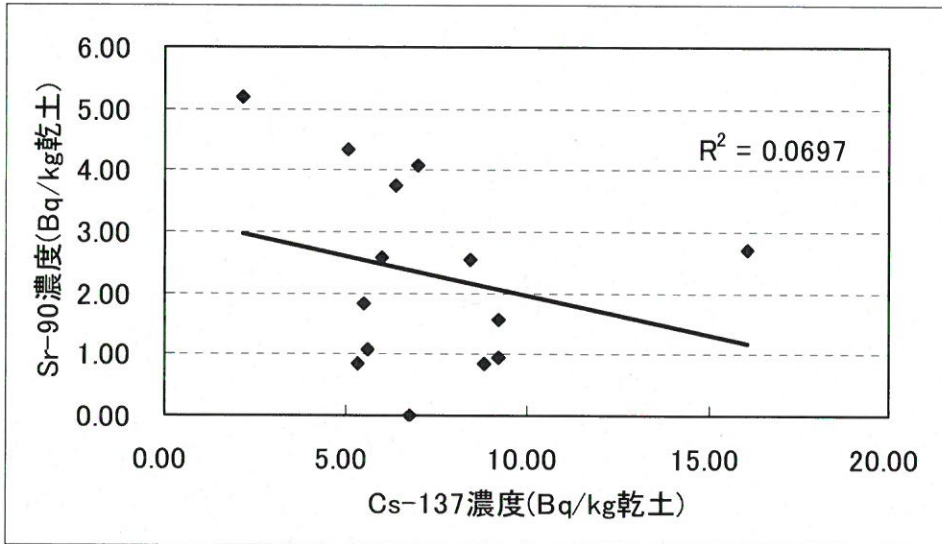


図 29 耕作土（ほうれん草）Cs-137 濃度と Sr-90 濃度

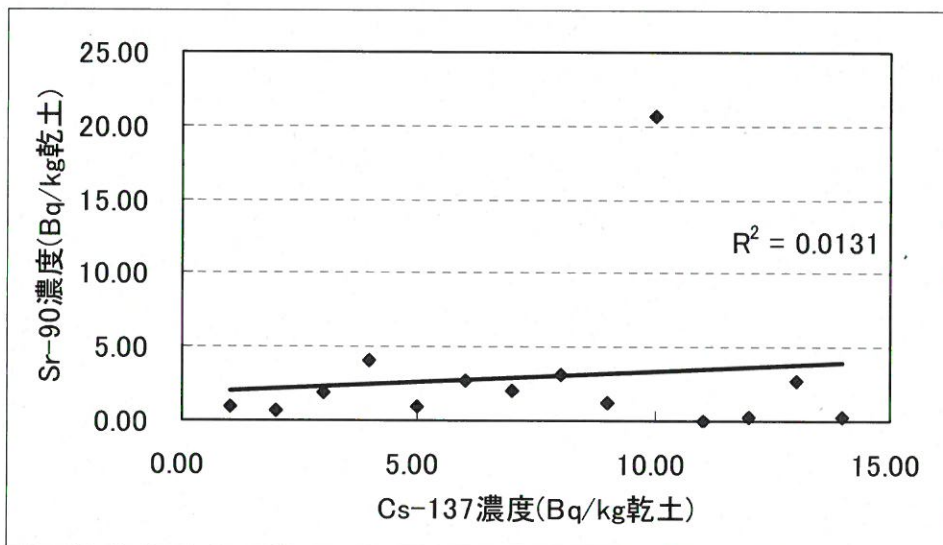


図 30 耕作土（大根）の Cs-137 濃度と Sr-90 濃度

4.8 農作物の摂取による内部被ばく線量の推定

表 8 に、本調査で分析を行った農作物を摂取した場合の内部被ばく線量（預託実効線量）を示す。なお計算に用いる Sr-90 濃度は、本調査で得られた値の最高値を用いた。また、農作物の摂取モデルおよび内部被ばく線量の算出は、環境放射線モニタリング指針¹⁸⁾に準じ、次式に基づいて計算した。

$$\text{内部被ばく線量 (mSv)} = \text{摂取量} \times \text{Sr-90濃度} \div 1000 \times 365 \times \text{実行線量係数}$$

農作物	摂取量 (g/人/日)	Sr-90濃度 (Bq/kg生)	実効線量係数	内部被ばく線量 (mSv/年)
ほうれん草	100	0.44	2.8×10^{-5}	0.0004
大根	100	0.16		0.0002

表 8 農作物の Sr-90 濃度から推定した内部被ばく線量（預託実行線量）

表 8 より、本調査で分析を行った農作物を摂取した場合の内部被ばく線量はそれぞれ 0.0004mSv/年、0.0002mSv/年となった。これらは一般公衆の線量限度である 1mSv/年の 1000 分の 1 以下であり、農作物の摂取による内部被ばくへの寄与は十分小さいものであることが分かった。

5 まとめ

本調査により以下のことが分かった。

- (1) 県内 14 地点で栽培した農作物の Sr-90 濃度は、原子力発電所周辺の過去 10 年間の測定値と同程度であった。耕作土（大根）では、地点番号 10 の浦尻で 20.7Bq/kg 乾土という結果が得られたが、その他は原子力発電所周辺の過去 10 年間の測定値と同程度であった。
- (2) Sr-90 濃度が高い (>3Bq/kg 乾土) 耕作土では、他の試料に比べて粘土の割合が小さい傾向が見られ、これは平成 17 年度の結果とは異なるものであった。また、耕作土（大根）の pH と Sr-90 濃度の間に中程度の正の相関が見られたが、こちらも平成 17 年度の結果と異なるものであった。その最も大きな理由として、耕作土は施肥や土壌改良など、人の手が加えられていることが挙げられる。
- (3) ほうれん草と大根の移行係数（平均値）はそれぞれ 0.1、0.06 となり、耕作土中の Sr-90 は大根よりもほうれん草に移行する割合が大きいことが分かった。
- (4) 耕作土（大根）の砂の割合と移行係数の間に中程度の負の相関が見られたが、土壌粒子が粗大になるほど移行係数が大きくなるという文献による報告とは異なる傾向となった。
- (5) 耕作土の Cs-137 濃度と Sr-90 濃度の間に相関は見られなかった。

- (6) 本調査で分析を行った農作物を摂取した場合の Sr-90 による内部被ばく線量は、ほうれん草で 0.0004mSv/年、大根で 0.0002mSv/年となった。これらは一般公衆の線量限度である 1mSv/年を十分下回っていることが分かった。

謝辞

最後に、本報告書をまとめるにあたり、農作物の栽培を快く引き受けて頂いた各地域の県民の皆様、並びに貴重なご助言を頂いた財団法人日本分析センター ベータ線グループ 真田哲也博士に深く感謝致します。

参考文献

- 1) John Emsley 著, 元素の百科事典, p260, 丸善 (株), 2003
- 2) 平成 10 年度～平成 19 年度福島県原子力発電所周辺環境放射能測定結果報告書, 福島県原子力発電所安全確保技術連絡会, 1998～2007
- 3) 環境放射能測定法シリーズ 16, 環境試料採取法, 文部科学省, 1983
- 4) 環境放射能測定法シリーズ 2, 放射性ストロンチウム分析法 (4 訂), 文部科学省, 2003
- 5) 環境放射能測定法シリーズ 7, ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー (3 訂), 文部科学省, 1992
- 6) 底質調査法, 環境省, 2001
- 7) 平成 12 年度環境試料中のプルトニウム調査(II)報告書, p16, 福島県原子力センター, 2001
- 8) 土壌環境分析法, p24-29,195-197, 日本土壌肥料学会, (株) 博友社, 2003
- 9) 平成 17 年度環境試料中のストロンチウム調査報告書, 福島県原子力センター, 2006
- 10) 石井秀宗著, 統計分析のここが知りたい, p43, (株) 文光堂, 2005
- 11) IAEA(1982) Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine release, Safety Series No.57, p61-65, IAEA
- 12) Ban-nai, T., Muramatsu, Y., and Yanagisawa, K. : Transfer factor of some selected radionuclides (radioactive Cs, Sr, Mn, Co and Zn) from soil to leaf vegetables. *Journal of Radiation Reserch.*, 36,143-154,1995
- 13) Ban-nai, T., Muramatsu, Y., and Yanagisawa, K. : Transfer factor of some selected radionuclides (radioactive Cs, Sr, Mn, Co and Zn) from soil to root vegetables. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.*, 241, 529-531, 1999
- 14) 環境パラメータ・シリーズ 1 土壌から農作物への放射性物質の移行係数, p3, 原子力環境整備センター, 1994
- 15) 環境パラメータ・シリーズ 1 土壌から農作物への放射性物質の移行係数, p12, 原子力環境整備センター, 1994
- 16) 環境パラメータ・シリーズ 1 土壌から農作物への放射性物質の移行係数, p13, 原子力環境整備センター, 1994
- 17) 環境パラメータ・シリーズ 1 土壌から農作物への放射性物質の移行係数, p17, 原子力環境整備センター, 1994
- 18) 環境放射線モニタリング指針, p42, 原子力安全委員会, 2008

平成 21 年 3 月発行

平成 19,20 年度環境試料中のストロンチウム調査報告書

発行：福島県原子力センター福島支所

福島市方木田字水戸内 16・6

TEL (024)544-2030

FAX (024)544-2040

福島県原子力センター

双葉郡大熊町大字下野上字大野 199

TEL (0240)32-2230

FAX (0240)32-3440

