

ヤマグリにおける果実中 ^{137}Cs 濃度の現状

佐藤 守¹、長岡壮太²、大野 剛²、田野井慶太郎³

¹福島大食農、²学習院大理、³東大院農

1. はじめに

ニホングリ (*Castanea crenata*) はブナ科クリ属の樹木の堅果である。ニホングリは通常 3 個の堅果が苞の変形した毬 (果皮) に包まれており、茶色の硬い鬼皮は果肉、内側の渋皮は種皮にあたる。可食部は種子の子葉と胚である。子葉には澱粉が貯蔵されており、主としてこの部分が食用にされる。ニホングリはヤマグリ (シバグリ) と栽培グリに分類される。栽培グリはヤマグリから選抜された大果性品種である。栽培グリの果実中放射性セシウム濃度 (RCs 濃度) は、2011 年の東電福島第一原発 (FDNPP) 事故後数年は経時的に減少しており、果実への RCs の主たる移行源は、地上部に沈着した RCs であった[1]。事故後、新植された栽培グリの土壌からの ^{137}Cs の移行係数は 10^{-4} から 10^{-3} オーダーであった[2]。ここで、FDNPP 事故前ではクリにおける土壌からの ^{137}Cs の移行係数としては 10^{-1} ~ 10^0 オーダーと報告されており、FDNPP 事故での報告とは 3 桁の差異が認められた[3]。事故後 11 年が経過した現在、栽培グリ果実から基準値 (100 Bq/kg FW) を超える RCs 濃度は報告されていない。一方で、ヤマグリでは事故後 6 年が経過した 2017 年頃より、それまで経年減少していた果実中 ^{137}Cs 濃度が高まる事例が認められている (未発表)。しかし、山野に自生するヤマグリの果実中 RCs 濃度については報告が少なく実態は不明である。

本研究では、ヤマグリの果実中 ^{137}Cs 濃度の現状を明らかにすることを目的として、周辺環境の異なる 2 か所で実態調査をしたのでその結果を報告する。

2. 材料および方法

2.1 調査 1 主成分分析による 2011 年福島県産果実の緊急モニタリング調査結果の再評価

2011年福島県産果実の緊急モニタリング調査データ (Table 1) を供試した。常緑果樹および落葉果樹 18 樹種の果実中 RCs 濃度の各階級割合を角変換して主成分分析を実施した。

Table 1 Results of emergency fruit monitoring in 2011 (As of November 15)

Fruit tree No species	Number of inspections	Percentage of each class in RCs ^z concentration in fruit (%)				Area exceeding the provisional regulated value	
		ND	ND to 100 Bq/kg	100 to 500 Bq/kg	500 Bq/kg or higher	Northern Fukushima	Soma-Futaba district
1 Yuzu	36	2	28	53	17	○	○
2 Loquat	8	0	88	0	13		○
3 Fig	54	39	48	11	2		○
4 Peach	247	31	68	1	0		
5 Persimmon	185	38	54	7	1		○
6 Cherry	25	32	68	0	0		
7 Japanese apricot	240	1	26	63	10	○	○
8 Pomegranate	7	14	29	43	14	○	
9 Kiwi fruit	40	19	58	18	5		○
10 Chestnut	65	17	48	32	3	○	○
11 Walnut	11	36	55	9	0		
12 Ginkgo	39	10	72	18	0		
13 Blueberry	40	27	65	8	0		
14 Akebia	15	13	80	7	0		
15 Apple	225	53	47	0	0		
16 Grape	84	56	43	1	0		
17 Japanese pear	106	68	32	0	0		
18 European pear	30	57	43	0	0		

^z RCs Radiocaesium

2.2 調査2 福島大学構内のヤマグリ殻斗中 ^{137}Cs 濃度の経年推移

2020年から2022年までの3か年にわたって福島大学（以下、福大）構内の食農学類管理棟入口に事故前から自生する成木と事故後に発芽した若木（A、B）、食農学類管理棟東（C）、合同研修館裏（D）、野球場脇（E）自然林に自生するヤマグリ各1樹から殻斗（毬着き堅果）を採取した。B、D以外は事故前からの自生樹、Dは事故後伐採株からの萌芽樹である。2020年にA、B、C樹主幹から60cmの3か所から深さ0~5cmおよび5~20cmの土壌を直径8.3cmのコアサンプラーで採取した。殻斗は毬（果皮）、鬼皮（果肉）、渋皮（種皮）および可食部（子葉・胚）に分け、80°Cで乾燥後、Ge半導体検出器にて ^{137}Cs 、 ^{40}K 濃度を測定した。更に2020年A、B、C樹の毬と可食部の試料を硝酸分解し、ICP-MS分析器にて ^{133}Cs 、 ^{85}Rb 濃度を測定した。土壌は風乾後、2mmメッシュに通し ^{137}Cs 、 ^{40}K 、 ^{133}Cs 、 ^{40}K 濃度を測定した。併せて1N酢酸アンモニウムで抽出し、交換性 ^{133}Cs 濃度を測定した。

2.3 調査3 霊山のヤマグリ可食部中 ^{137}Cs 濃度

2022年10月1日に霊山登山道沿いの6か所（A：登山口、B：鍛冶小屋岩先、C：日暮岩入口、D：護摩壇入口、E：霊山城跡下ヤマグリ大木、F：学問岩下鞍部ヤマグリ林）で落果していたヤマグリを採取した（Fig.1）。その内3か所で深さ20~25cmの土壌を直径5cmのコアサンプラーで採取した。ヤマグリは鬼皮（果肉）、渋皮（種皮）および可食部（子葉・胚）に分け、土壌は1、3、5、7、10、15、20cmで区分して ^{137}Cs 濃度を測定した。区分した各層の土壌重量と ^{137}Cs 濃度から各層の ^{137}Cs 量を求め、各層の深さの加重平均として平均移動距離を算出した。

2.4 移行係数の試算

2020年の福島大学のA、B、C3地点の可食部と土壌20cmまでの ^{137}Cs 濃度から以下の式により移行係数を算出した。土壌20cmまでの ^{137}Cs 濃度は0~5cmと5~20cmの ^{137}Cs 濃度を加重平均して算出した。同様に2022年の霊山のA、B、C3地点の可食部と土壌20cmまでの ^{137}Cs 濃度から移行係数を算出した。土壌20cmまでの ^{137}Cs 濃度は20cmまでの ^{137}Cs 含有量と乾土重から算出した。

$$\text{移行係数} = \text{可食部中 } ^{137}\text{Cs} \text{ 濃度 (Bq/kg FW)} / \text{深さ 20 cm までの土壌中 } ^{137}\text{Cs} \text{ 濃度 (Bq/kg DW)}$$

3. 結果

3.1 調査1 2011年産果実中RCs濃度分布による樹種の分類

主成分分析の結果、得られた主成分と因子負荷量をTable.1に示した。第1主成分は100 Bq/kg以上の割合が高い成分、第2主成分は100 Bq/kg以下の割合が高い成分を示した。累積寄与率は2つの主成分で92.7%であった。両主成分のスコア値による散布図をFig.2に示した。クリは第1主成分で葉または果実が直接汚染された樹種に次いで高いスコア値を示し、果実中水分が少ないクルミと比較しても明らかに高いスコア値を示した。また、汚染レベルの低い県北、汚染レベルの高い相双両地域で暫定規制値（500Bq/kg）を超えた果実が検出されており、果実中水分以外の要因が関与している可能性を示唆した。

3.2 調査2 福島大学構内のヤマグリ殻斗中 ^{137}Cs 濃度



Fig. 1 Collection sites of wild chestnuts along the trail route in Mt. Ryozen

Table 2 Factor loadings for principal components

	Principal components	
	Z1	Z2
ND	-0.763	-0.621
ND to 100 Bq/kg	-0.369	0.928
100 to 500 Bq/kg	0.941	-0.211
500 Bq/kg or higher	0.897	0.075
Cumulative contribution ratio	0.602	0.927

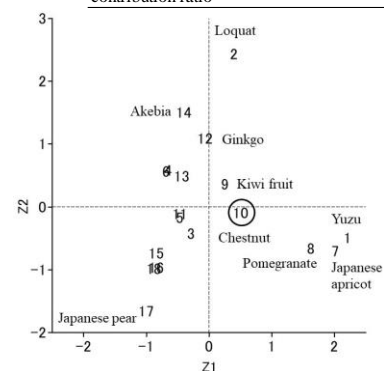


Fig. 2 Scatter plots with principal component scores

の経年推移

福大構内のヤマグリ可食部の¹³⁷Cs濃度は調査樹5樹のうちC樹は3か年ともに基準値を超え、2022年は更にE樹の¹³⁷Cs濃度が前年より大きく高まり、基準値を超えた (Fig.3)。また、A、B、C樹の毬と可食部の¹³⁷Cs濃度と¹³³Cs濃度間で高度に有意な相関が認められた (Fig.4)。ここで、深さ0~5 cmの土壤中¹³⁷Cs濃度と毬、可食部の¹³⁷Cs濃度間でも正の相関が認められたが、深さ5~20 cm

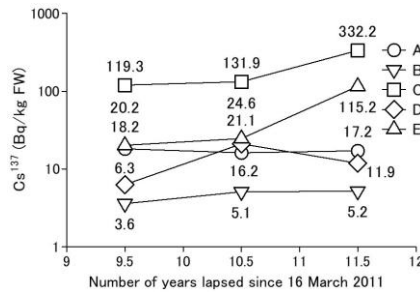


Fig. 3 Change with time in ¹³⁷Cs activity concentration in the edible part of the wild chestnut growing in Fukushima University

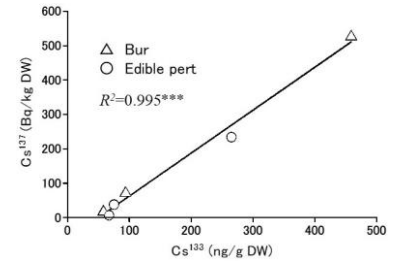


Fig. 4 Correlation between ¹³⁷C and ¹³³Cs concentrations in the bur and edible parts of the wild chestnut growing in Fukushima University

の土壤中¹³⁷Cs濃度とは相関は認められず、表層根の関与が示唆された (Fig. 5)。なお、土壤中¹³³Cs濃度とは負の相関を示した (Fig. 5)。同様に、毬、可食部の¹³³Cs濃度と深さ0~5 cmおよび深さ5~20 cm 土壤中¹³³Cs濃度間でも負の相関を示した ($r=-0.910, r=-0.911$)。また、毬、可食部中¹³⁷Cs濃度と毬、可食部中⁴⁰K濃度、⁸⁵Rb濃度、土壤中⁴⁰K濃度、K濃度および毬、可食部中¹³³Cs濃度および土壤中交換性¹³³Cs濃度とは有意な相関は認められなかった (データ省略)。

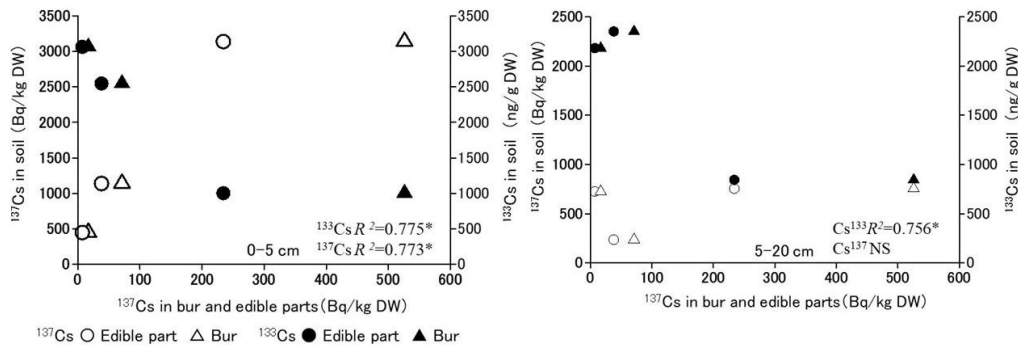


Fig. 5 Correlation between ¹³⁷C and ¹³³Cs concentrations in soil and those in the bur and edible parts of the wild chestnut growing in Fukushima University
* indicate significant difference between treatments at $P \leq 0.05$ by *t*-test.

3.3 調査3 霊山のヤマグリ可食部中¹³⁷Cs濃度

霊山登山道沿いのヤマグリ可食部の¹³⁷Cs濃度は調査6地点のうち登山口を除く5地点で基準値を超えた (Fig. 6)。ヤマグリを採取した3か所の土壤中¹³⁷Cs量は深さ2~4 cmで最大値を示した。平均移動距離は3.8~7.0 cmで、いずれもA₀層に相当した (Fig. 7)。

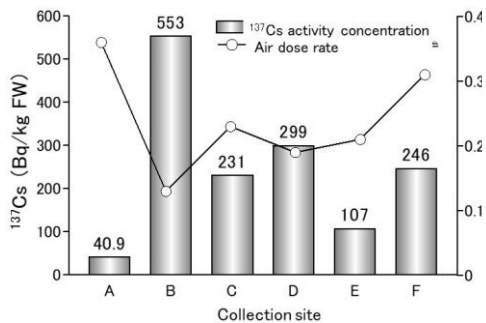


Fig. 6 ¹³⁷Cs activity concentration in the edible part of the wild chestnut growing in Mt. Ryozen

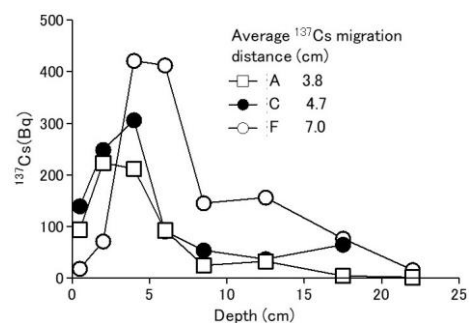


Fig. 7 Vertical profiles of ¹³⁷Cs in soil collected in Mt. Ryozen

3.4 ^{137}Cs の土壌からヤマグリ可食部への移行係数

移行係数は福島大学で $4.13 \times 10^{-2} \pm 4.19 \times 10^{-2}$ 、霊山で $3.03 \times 10^{-2} \pm 1.11 \times 10^{-2}$ であった。福島大学では若木の移行係数が 1 オーダー低かった。霊山は樹冠近傍のエリアの土壌によるものであることに留意する必要があるが、両調査地での移行係数は 10^{-2} オーダーで栽培種の既報値より 1 ~2 オーダー高かった (Table 3)。

Table 3 The transfer factors in the wild chestnuts

Survey year	Survey location	Collection site	^{137}Cs activity concentration		CR_{fs}
			Edible part Bq/kg FW	Soil(20 cm) Bq/kg DW	
2020	Fukushima Univ.	A	18.2	657	2.77×10^{-2}
2020	Fukushima Univ.	B	3.59	463	7.75×10^{-3}
2020	Fukushima Univ.	C	119	1350	8.83×10^{-2}
Mean					4.13×10^{-2}
SD					4.19×10^{-2}
2022	Mt. Ryozen	A	40.9	2120	1.92×10^{-2}
2022	Mt. Ryozen	C	231	5580	4.14×10^{-2}
2022	Mt. Ryozen	F	246	8160	3.02×10^{-2}
Mean					3.03×10^{-2}
SD					1.11×10^{-2}

4. 考察

2011 年のモニタリング調査結果に基づく解析において、クリは発芽前に汚染された落葉果樹類の中ではブルーベリーと並んで明らかに果実中 RCs 濃度が高い樹種に分類された。ブルーベリーは栽培適正から土壌が酸性側に調整されており、根群も表層に多く分布することから根から吸収された可能性が高いことがその後の調査で明らかになっている [4]。しかしクリについては、事故初年度から根からの吸収をうかがわせるデータはなく、可食部の含水率が低いことや子葉の K の要求度が高いことが高濃度の理由として指摘されていた。ここで、クリの果実中 RCs 濃度の分布は ND から 500 Bq/kg 以上まで広範囲にわたっており、他の落葉樹とは異なった分布特性を示していた。福島県はクリの経済的栽培園は少なく、宅地周辺に散在的に植栽されていることが多い。その中には山採りされたヤマグリの植栽も認められる。2011 年にモニタリングされたクリの中にはヤマグリも含まれていたのではないかと推察される。実際、2017 年に濃度の高戻り現象が認められたクリは里山山麓の開墾された農地周辺のヤマグリであった。ところで、ヤマグリの果実重は栽培種と比較して 1/5 以下と小さい。果実重により果実に転流された RCs の希釈効果が認められており [5]、栽培グリよりヤマグリの方が高濃度になりやすい可能性が高い。一方で Sink size としては栽培グリより劣る可能性も考えられる。これらの相互関係についてはなお検証が必要である。

土壌中に存在する ^{133}Cs はほぼ母岩の鉱物に由来することから、植物へは経根吸収によるものであると考えられる。このことから植物各器官中の ^{137}Cs と ^{133}Cs の比が一定であれば ^{137}Cs も経根吸収された可能性が高いと考えられる。ここで興味深いのは、福島大学の 3 か所のヤマグリ植生地の表層 5 cm の土壌中 ^{137}Cs 濃度と可食部および穂中 ^{137}Cs 濃度間で正の相関が認められたことである。これは、 ^{137}Cs が多く集積している表層の根の分布量が関与していることを示唆している。しかし、 ^{133}Cs については表層 5cm、5~20 cm 層双方で可食部および穂中 ^{133}Cs 濃度と負の相関を示した。可食部および穂中 ^{137}Cs 濃度と土壌中 ^{133}Cs 濃度との関係はこれを反映したものと考えられる。清野らは、 ^{133}Cs は表層より母岩に近い深い部位の方が多く存在することから ^{133}Cs の植物への吸収量は根の深さと関係性が高いことを報告している [6]。しかし、本研究の 3 か所の土壌中 ^{133}Cs 濃度と深さの関係はこれとは異なっていた。特に可食部中の ^{137}Cs 濃度が高かった C 樹の植生地の土壌中 ^{133}Cs 濃度は他の 2 地点と比較して明らかに低かった。これは、福島大学キャンパスは 30 年前に移転造成されたことから、造成時の攪乱の影響、あるいは、もともと供試樹の植生地の母岩が異なっていた可能性があるのではないかと考えられる。本研究では調査地点数も少ないので、 ^{133}Cs の土壌から樹体内への移行動態についてはなお検

討が必要である。

福島大学の2020年の調査結果は、表層5 cmの ^{137}Cs 濃度と吸収根の分布がヤマグリ可食部への ^{137}Cs 濃度と関係性が高いことを示唆した。この観点から2022年の霊山での調査結果を考察する。土壌中 ^{137}Cs は表層下3~7 cmを中心に分布しており、この層は、 A_0 層のほぼ下限域に当たる。恐らくヤマグリはこの A_0 層に分布している根が多いのではないかと推察される。また、この一帯の母岩は霊山層と呼ばれる地層で、霊山層はRCsの固定率が低い粘土鉱物とK含有量の少ない鉱物で構成されていることが交換性 ^{137}Cs の供給を容易にしていると指摘されている[7]。これらの事から霊山でのヤマグリの可食部中 ^{137}Cs 濃度は今後も高濃度で推移する可能性があり、継続調査が必要である。

葉が展葉していた5月に起きたChernobyl原発事故によるギリシャでの果樹汚染では地上部から吸収された ^{137}Cs が翌年以降の果実への移行源であるとされ、事故後5年でもリンゴおよびオウトウでは明確な経根吸収は認められなかったと報告されている[8]。一方でギリシャ北部のミズナラ林では少なくとも事故後5年からは経根吸収が主となっていたと報告されている[9]。FDNPP事故で汚染されたカキ園では事故後5年~7年が経過しても土壌から果実への ^{137}Cs の移行は限定的であった[10]。表層付近に細根が多く分布しているユズでは、事故後5年~6年に根の露出や湛水等により果実中 ^{137}Cs 濃度が上昇した[11]。

これらの事は、樹種によっては、少なくとも事故後5年以降は、条件次第では ^{137}Cs 経根吸収により果実中 ^{137}Cs 濃度の高戻りが生じるリスクが高まることを示唆している。ヤマグリでは栽培クリと異なりカリ肥料が施肥されていないこと、果実重が小さいこと、地際部から表層根が発生しやすいこと、未分解有機物の多い A_0 層に ^{137}Cs が沈積していることなど他の果樹と比較して経根吸収により可食部中 ^{137}Cs 濃度が高まる多くの条件が整っている。このことから、今後とも可食部中RCs濃度のモニタリングを継続していく必要があると考えられる。

5. 参考文献

- [1] Kusaba, S., Matsuoka, K., Saito, T., Kihou, N. and Hiraoka, K. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61, 165–168 (2015) .
- [2] Horii, S., Kuwana, A., Yuda, M., Hiraoka, K., Minami, H., Matsuoka, K. and Kusaba, S. *Radioisotopes*69, 93–102 (2020) .
- [3] IAEA. Report of the Fruits Working Group of BIOMASS Theme 3, 123 (2003) .
- [4] 稲生栄子・村主栄一・門間豊資・柴田昌人・高田千春. *東北農業研究* 67, 99–100 (2014) .
- [5] 佐藤 守. *福島農総セ研報* 11, 63–64 (2020) .
- [6] 清野 嘉之・赤間 亮夫. *森林総合研究所研究報告* 21 (1) , 39–47 (2022) .
- [7] 根本圭介. *原発事故と福島の農業*. 東京大学出版会, 31 (2017).
- [8] Antonopoulos-Domis, M., Clouvas, A. and Gagianas, A. *Health Phys.* 61 (6), 837–842 (1991) .
- [9] Clouvas, A., Xanthos, S., Takoudis, G., Antonopoulos-Domis, M., Alifrangis, D.A., Zhiyanski, M. and M. Sokolovska, M. *Health Phys.* 93 (4), 312–317 (2007) .
- [10] 堀井幸江・桑名 篤・八戸真弓・草場新之助. *RADIOISOTOPES*, 70, 19–27 (2021) .
- [11] Sato, M., Takata, D., Watanabe, Y., Takase, T. and Yamaguchi, K. *Acta Hort.* 1312, 581–589 (2021) .

Current status of ^{137}Cs concentrations in fruit in the wild chestnut.

Mamoru Sato¹, Sota Nagaoka², Takeshi Ohno², Keitaro Tanoi³

¹Fukushima University, Faculty of Food and agriculture

²Gakusyuin University, Faculty of Science,

³Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

With the aim of determining the current status of ^{137}Cs concentrations in wild chestnut, surveys were carried out at two sites in different surrounding environments.

Site 1: ^{137}Cs concentration in bur, shell, pellicle and cotyledon with embryo (edible portion) of wild Japanese chestnuts (*Castanea crenata*) growing in the Fukushima University campus. Five locations were selected for study. Matured cupules dropped from tree at five locations from 2020 to 2022 were collected. The cupules were divided into bur (pericarp), shell (pulp), pellicle (seed coat) and edible parts (cotyledon and embryo), and then each sample was dried at 80°C. ^{137}Cs and ^{40}K concentrations were measured with a Ge semiconductor detector. In 2020, soil samples of 0 to 5 cm depth and 5 to 20 cm depth were collected at three places 60 cm from the main trunk of trees at selected three locations using a core sampler with a diameter of 8.3 cm. Furthermore, samples of the bur and edible parts of the same trees that were collected from soil were measured for ^{133}Cs concentration by ICP-MS analyzer. Soil was measured for ^{137}Cs , ^{40}K , ^{133}Cs and exchangeable ^{133}Cs .

Site 2: ^{137}Cs concentrations in edible parts of wild chestnuts at Mt. Ryozen. Fallen wild chestnuts were collected at six locations along the trail route in Mt. Ryozen on 1 October 2022. At three of the locations, soil samples were collected at a depth of 20, or 25 cm with a 5 cm diameter core sampler. The wild chestnuts were divided into the same parts as survey site 1 and the soil was divided into sections at 1, 3, 5, 7, 10, 15 and 20 cm to measure ^{137}Cs concentrations. The average ^{137}Cs migration distance was calculated as a weighted average of the depths of each layer from the soil weight and ^{137}Cs concentration in each of the layers.

^{137}Cs concentration in edible parts of the wild chestnut at Fukushima University exceeded the standard limit (100 Bq/kg FW) in all three years for one tree out of the five surveyed trees, and in 2022, ^{137}Cs concentrations in another tree further increased from the previous year and exceeded the standard limit. A highly significant correlation between ^{137}Cs and ^{133}Cs concentrations in the bur and edible parts of three trees was observed. Furthermore, a positive correlation was also found between ^{137}Cs concentrations in the soil at a depth of 0 to 5 cm and ^{137}Cs concentrations in the bur and edible parts ($R^2 = 0.773$), but no correlation was found with ^{137}Cs concentrations in the soil at a depth of 5 to 20 cm, suggesting the involvement of surface roots. No correlation was observed between ^{137}Cs concentrations in bur and edible parts and both of ^{40}K concentrations in bur and edible parts and K concentrations in soil, or between ^{133}Cs concentrations in bur and edible parts and exchangeable ^{133}Cs concentrations in soil.

^{137}Cs concentration in edible parts of the wild chestnut along the Mt Ryozen trail exceeded the standard limit at five of the six locations surveyed. At three locations where wild chestnuts were sampled, ^{137}Cs concentration in the soil showed a maximum value at depths of 2 to 4 cm. The average ^{137}Cs migration distance was 3.8 to 7.0 cm, all corresponding to the A_0 layer.

These results suggest that ^{137}Cs stored above-ground part of tree is a negligible source of ^{137}Cs in the edible part of the wild chestnut, and that it is likely that ^{137}Cs is mainly absorbed from soil. In addition, monitoring surveys of the RCs concentration in the edible part of the wild chestnut and clarification of the factors that promote absorption of RCs via the roots were considered necessary, because trees that exceeded the standard limit and trees that were detected low RCs concentrations coexist in the same area. The transfer factors from soil to edible parts calculated from the measurements obtained in this study were $4.13 \times 10^{-2} \pm 4.19 \times 10^{-2}$ at Fukushima University and $3.03 \times 10^{-2} \pm 1.11 \times 10^{-2}$ at Mt. Ryozen.