

(資料)

原木非破壊検査機を用いた放射性セシウム測定によるシイタケ原木林利用適否判定の試行

成松 眞樹

Trial of judgment for suitability of oak forest for shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) cultivation by using a non-destructive bed-log testing machine for radioactivity concentration.

Maki Narimatsu

要 旨

シイタケ原木林の利用適否判定を目的に、原木の Cs 濃度の変動係数や不適率 (Cs 濃度が 50Bq/kg を超えた本数の割合) を岩手県内の 35 か所で調査し、仮の不適判定基準 (仮基準) を設定した。さらに、仮基準に基づく抽出調査と多試料調査 (約 500 本) を、それぞれ同一のコナラ林 3 箇所で行い、仮基準の妥当性を検証した。

Cs 濃度の変動係数は平均 0.416、標準偏差 0.146 の正規分布を示したため、片側 95%信頼区間の上限値を 0.65 と推定、指標値の 50Bq/kg を片側 95%信頼区間の上限値として、スクリーニングレベルを 24 Bq/kg と算定した。不適率は立木、原木のいずれも 0~100% に分布したため、既報に準じて立木 10%、原木 5% とし、調査本数を立木 29 本、原木 59 本と算定、仮基準を「29 本以上の立木から原木を各 2 本以上、合計 59 本以上採取し、原木の Cs 濃度の最大値が 50Bq/kg または平均値が 24 Bq/kg を超えた場合」とした。抽出調査と多試料調査の結果は、いずれの調査地もそれぞれ概ね同様の傾向を示した。さらに、いずれの調査地でも、抽出調査の結果は多試料調査の結果に支持されたことから、今回の試行では、仮の判定基準は妥当とみなされた。

キーワード: 原木、利用適否判定、非破壊検査機、スクリーニング、シイタケ

目 次

- 1 はじめに
 - 2 材料と方法
 - 2.1 原木林のCs濃度調査
 - 2.2 スクリーニングレベルの設定
 - 2.3 原木調査本数および立木調査本数の設定
 - 2.4 仮の判定基準の設定
 - 2.5 仮の判定基準の妥当性の検証
 - 3 結果と考察
 - 3.1 原木林のCs濃度
 - 3.2 仮の判定基準の設定
 - 3.3 仮の判定基準の妥当性の検証
 - 4 おわりに
 - 5 参考資料 (多試料調査データからの疑似的な抽出による仮の判定基準の妥当性検証事例)
- 謝辞
- 引用文献

本資料の内容の一部は、日本森林学会第133回大会で発表した。

1 はじめに

コナラ(*Quercus serrata*)やミズナラ(*Q. crispula*)は、シイタケ(*Lentinula edodes*)の栽培に用いられる。東日本大震災以降、東日本の広い範囲で、コナラやミズナラの森林(ナラ林)から放射性セシウム(Cs)が検出されている(Imamura *et al.*, 2017)。シイタケ栽培用原木のCsの放射能濃度(Cs濃度)の指標値は50 Bq/kg以下と定められているため(農林水産省2012b)、使用前に原木のCs濃度を測定し、利用適否を判定する必要がある。

利用適否の判定は、同一林分由来する原木の集団からの抽出検査により行われ、その抽出基準は、「同一市町村の累計10 ha以下の森林を1ロットとし、(略)ランダムに立木3本選出」とされている(農林水産省2012a)。また、Cs濃度の測定は、原木からオガ粉を採取して行われる(破壊測定)。一方、近年では、シイタケ原木の非破壊測定を目的とした検査装置(非破壊検査機)が開発され(福井ら2016a)、一部の地域では運用されている(栃木県林業センター2023)。非破壊測定ではオガ粉の採取や測定容器への充填が不要なため、従来より短時間で多くの原木のCs濃度を測定することが可能である。こうした非破壊検査機の利用は、測定時間の短縮による検査の効率化のみならず、試料数の増大を通じて、検査の信頼性の向上にも貢献する可能性がある。しかし、多試料測定を前提とした抽出基準や判定基準(以後、適否判定基準と総称)は統一されていない。

一般に抽出検査の抽出率は、検査対象ロットにおける値のばらつき、測定精度および許容誤差に規定される(加藤2000)。原木のCs濃度は同一林内で得られたものでも異なり、Cs濃度のばらつき自体も林分で異なるため(福井ら2016b)、抽出率の検討には、検査対象地域におけるばらつきの把握と標準化が必要である(石川ら2018)。しかし、岩手県における原木のCs濃度の標準的なばらつきは不明である。そこで、非破壊検査機による原木林の利用適否判定基準の検討に資することを目的に、県内の複数のナラ林で原木のCs濃度を調査して、ナラ林毎のばらつきを推定、仮の判定基準を設定し、抽出調査で適否判定を試行した。さらに、抽出調査と同一林分で多試料調査を実施し、両者の結果を比較して、仮の判定基準の妥当性を検証した。

2 材料と方法

2.1 原木林のCs濃度調査

2016年～2024年に、岩手県内陸部23箇所、沿岸部12箇所の計35箇所で開催を行った(図1)。調査地には地形が均一なナラ林(平均面積1.6 ha)を選定した。調査地1箇所当たり平均15本の立木を伐倒、各立木を長さ90 cmに鋸断して、1箇所当たり平均73本(玉)の原木を採取し、1ロットとした。ただし、地面に最も近い部位(元玉)は除外した。得られた原木を林業技術センタ

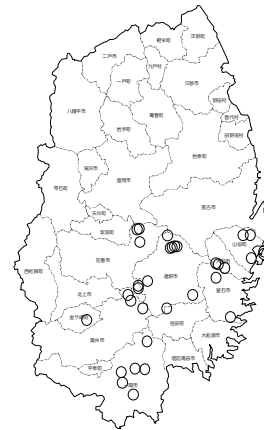


図1 調査地

ーに搬入し、原木非破壊検査機(しいたけ原木非破壊検査機、日立造船、大阪市)を用いて、湿量基準含水率12%換算重量当たりのCs濃度を測定した。ただし、重量換算の基準となる原木含水率の設定値は42%とした。濃度測定は原木1玉当たり3回行い、その平均値を当該原木の代表値として、調査地ごとに平均値と変動係数を算出した。

$$\text{変動係数 } CV = \text{標準偏差 } \sigma / \text{平均値 } \mu \cdots \textcircled{1}$$

ただし、今回は非破壊検査機の測定誤差(固有誤差)は考慮しなかった。

2.2 スクリーニングレベルの設定

抽出検査の実施には、スクリーニングレベルの設定が必要であり、スクリーニングレベルはロット内での原木のCs濃度のバラツキに準拠する。そこで今回は、既報(森林総合研究所 2018)に準じ、指標値(50 Bq/kg)を超過する確率(危険率)が5%となる原木Cs濃度をスクリーニングレベルとした。まず、変動係数の平均値と標準偏差に基づき、95%信頼区間(片側検定)の上限値を推定し、上限変動係数とした。ここで、式①により変動係数 $CV = \text{標準偏差 } \sigma / \text{平均値 } \mu$ であり、検査対象ロットの原木の95%が含まれる範囲の上限値(片側検定)は、平均 μ に標準偏差 σ の1.65倍(Z値)の値を加えたものであることから、「標準偏差の1.65倍を加えた時に、50未満となる値の上限値」を算出し(式②③)、小数点以下を切り捨ててスクリーニングレベルとした。

$$\mu + 1.65 \times \sigma = 50 \cdots \textcircled{2}$$

$$\mu = 50 / (1 + 1.65 \times \text{上限変動係数}) \cdots \textcircled{3}$$

2.3 原木調査本数および立木調査本数の設定

調査本数(抽出率)の推定には、品質管理における不良品率、すなわち調査対象ロットに指標値を超過する原木や立木が

含まれる割合の設定が必要である。そこで、次式により不適原木率と不適立木率(以後不適率と記す)を調査地ごとに算出した。

$$\begin{aligned} \text{不適原木率} &= \text{Cs 濃度が指標値を超過した原木の玉数} / \text{調査した原木の玉数} \cdots \text{④} \\ \text{不適立木率} &= \text{平均立木 Cs 濃度が指標値を超過した立木の本数} / \text{調査した立木の本数} \cdots \text{⑤} \\ \text{平均立木 Cs 濃度} &= \text{当該立木から得られた原木の Cs 濃度の平均値} \cdots \text{⑥} \end{aligned}$$

次に、JIS Z 9015 における品質管理手法(加藤 2000)に基づき、不適率と見逃し危険率(任意)により、任意の推定精度を満たすために必要な原木および立木の調査本数を推定した(表 1)。

表 1 調査本数

不適原木率または不適立木率(%)	必要な測定本数の推定値(本)		
	見逃し危険率 $p=1\%$	5%	10%
1	459	299	230
2	228	149	114
3	152	99	76
4	113	74	57
5	90	59	45
6	75	49	38
7	64	42	32
8	56	36	28
9	49	32	25
10	44	29	22
20	21	14	11
30	13	9	7
40	10	6	5
50	7	5	4

JIS Z 9015 に基づき調製

2.4 仮の判定基準の設定

上記 2.3 に基づき、不適立木率、不適原木率および見逃し危険率から、立木と原木の必要調査本数を算出し、2.2 で得たスクリーニングレベルや指標値(50 Bq/kg)に併せて仮の判定基準(仮基準)とした。すなわち、立木 N 本から原木 n 玉を採取、Cs 濃度を測定し、50 Bq/kg を超過した原木が 1 玉でも含まれた場合、または平均値がスクリーニングレベルを超過した場合には、当該調査地(対象ロット)に 50 Bq/kg を超える原木が危険率を越えて含まれることとなり、利用に適さないと判断される。

2.5 仮の判定基準の妥当性の検証

前項により推定された仮の判定基準の妥当性を検証するために、内陸部に 1 箇所(調査地 A)、沿岸部に 2 箇所(同 B、C)の調査地を設定した(表 2)。抽出調査として、調査地 A では立木 30 本から原木 60 玉、調査地 B では立木 29 本から原木 58 玉、調査地 C では立木 36 本から原木 74 玉を採取した。得られ

表 2 仮の判定基準の妥当性検証の概略

抽出調査			多試料調査	
調査地	調査本数(玉)	平均Cs濃度(Bq/kg) ^b	調査本数(玉)	不適原木率(%) ^c
A	60[30] ^a	44	453	20
B	58[29]	11	505	0
C	74[36]	13	499	0.4

a: 原木を採取した立木の本数 b: 湿量基準含水率 12%換算重量当たりの Cs 濃度 c: 50Bq/kg を超えた原木の本数割合

た原木は非破壊検査機で Cs 濃度を測定し、仮の判定基準(2.4)に基づき、当該林分の利用適否を判定した。また、抽出調査とは別に、調査地 A で 453 玉、調査地 B で 505 玉、調査地 C で 499 玉の原木を採取、非破壊検査機で Cs 濃度を測定し(多試料調査)、抽出調査の結果と比較した。

3 結果と考察

3.1 原木林のCs濃度

Cs濃度の平均値は、内陸部33.9±31.2 Bq/kg(平均値±標準偏差)、沿岸部31.1±23.3 Bq/kg、総平均32.9±28.8 Bq/kgであり(図2)、内陸部と沿岸部で同程度であった($p>0.05$, t検定)。また、変動係数の平均値は、内陸部0.424、沿岸部0.402で、総平均は0.416±0.146であり(図3)、既報(福井ら2016b)の0.34~0.36より高かった。変動係数は正規分布し($p>0.05$, Shapiro-Wilkの正規性検定)、95%信頼区間(片側検定)の上限値(上限変動係数)は0.65であった(図3)。

不適原木率は最小0.00、最大1.00、平均0.18であった(図4)。また、不適立木率は最小0.00、最大1.00、平均0.27であった(図5)。

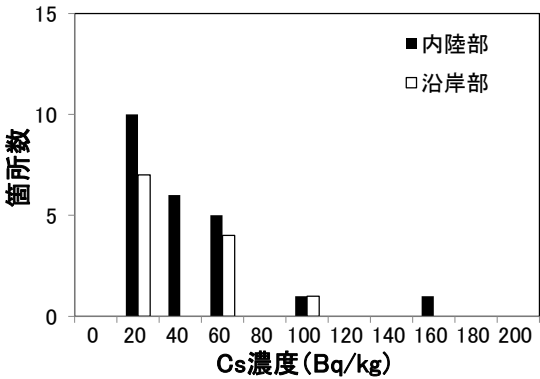


図 2 原木の Cs 濃度

湿量基準含水率 12%換算重量当たり

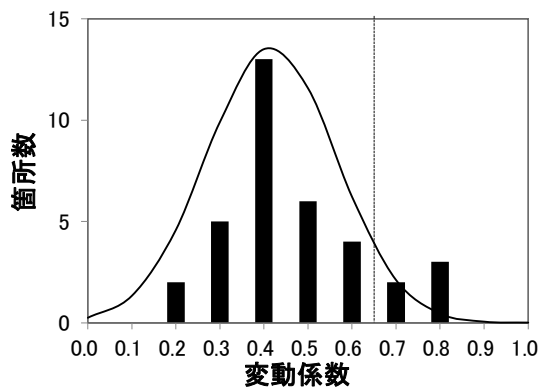


図3 原木 Cs 濃度の変動係数

実線は正規分布で近似した分布、点線は 95%信頼区間の上限值

3.2 仮の判定基準の設定

前項 3.1 により得られた上限変動係数 0.65 と式③により、スクリーニングレベルを 24 Bq/kg とした。必要調査本数は、不適率と見逃し危険率に応じて減少するため、それらを低めに設定することにより、測定の信頼性が向上する。そこで、不適原木率と不適立木率を過小に設定し、かつ既報（森林総合研究所 2018）に準じて不適原木率を 5%、不適立木率を 10%とした。また、見逃し危険率はいずれも 5%とした。その結果、必要な調査本数は、立木が 29 本（表 1 の太字）、原木が 59 玉（表 1 の下線）と推定された。

以上より、本調査における仮の判定基準は以下の通りとなった：

立木調査本数:29 本

原木調査玉数:59 玉

スクリーニングレベル:24 Bq/kg

原木の指標値:50 Bq/kg（農林水産省 2012b）

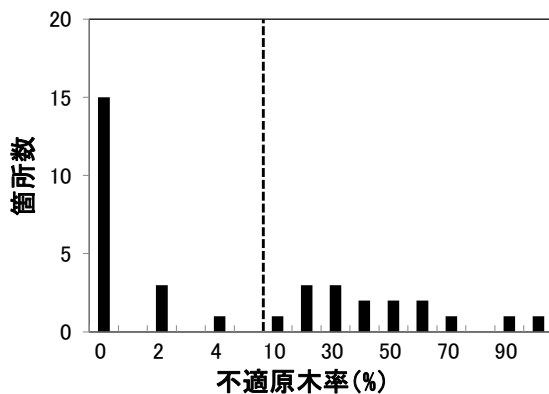


図4 不適原木率

10%(点線)を境に不適原木率の値の区切りが異なる

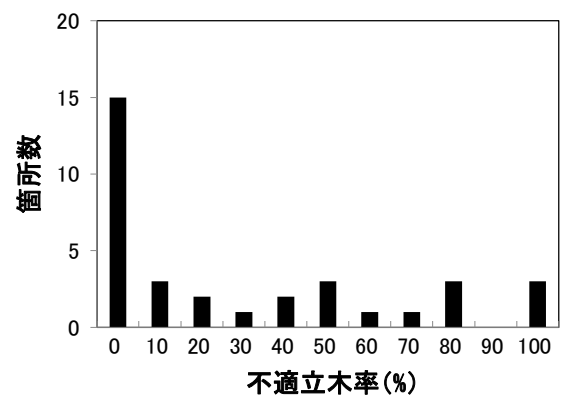


図5 不適立木率

よって、抽出調査の結果、50 Bq/kg を超過した原木が 1 玉でも含まれた場合、または平均値がスクリーニングレベル（危険率 5%で 24 Bq/kg）を超過した場合は、当該調査地は利用に適さないと判断される。

3.3 仮の判定基準の妥当性の検証

抽出調査と多試料調査の結果は、いずれの調査地もそれぞれ概ね同様の傾向を示した（図6）。

調査地Aで仮の判定基準に基づき抽出調査を行った結果（図6A）、原木の一部は50 Bq/kgを超過した。また、Cs濃度の平均値は44 Bq/kgでスクリーニングレベルを超過し（表2）、調査地Aから得られる原木には、指標値の50 Bq/kgを超える原木が5%以上含まれると推定された。一方、調査地Aで原木453玉を対象に多試料調査を行った結果（図6A）、50 Bq/kgを超過した原木の割合（不適原木率）は20%であったことから（表2）、抽出調査の結果は、多試料調査の結果に支持された。

同様に、調査地Bで抽出調査を行った結果（図6B）、Cs濃度の平均値は11 Bq/kgでスクリーニングレベル未満であり（表2）、調査地Cで得られる原木の95 %は、Cs濃度が50 Bq/kg未満と推定された。一方、調査地Bで原木505玉を対象に多試料調査を行った結果（図6B）、すべての原木が50 Bq/kg未満であったことから（表2）、抽出調査の結果は、多試料調査の結果に支持された。

同様に、調査地Cで抽出調査を行った結果（図6C）、平均値は13 Bq/kgでスクリーニングレベル未満であり（表2）、調査地Cで得られる原木の95 %は、Cs濃度が50 Bq/kg未満と推定された。一方、調査地Cで原木499玉を対象に多試料調査を行った結果（図6C）、不適原木率は0.4%であったことから（表2）、抽出調査の結果は、多試料調査の結果に支持された。

以上、いずれの調査地も、多試料調査の結果は抽出調査の前提条件と矛盾しなかったことから、今回の試行では、仮の判定基準は妥当とみなされた。ただし、今回の仮基準には非破壊

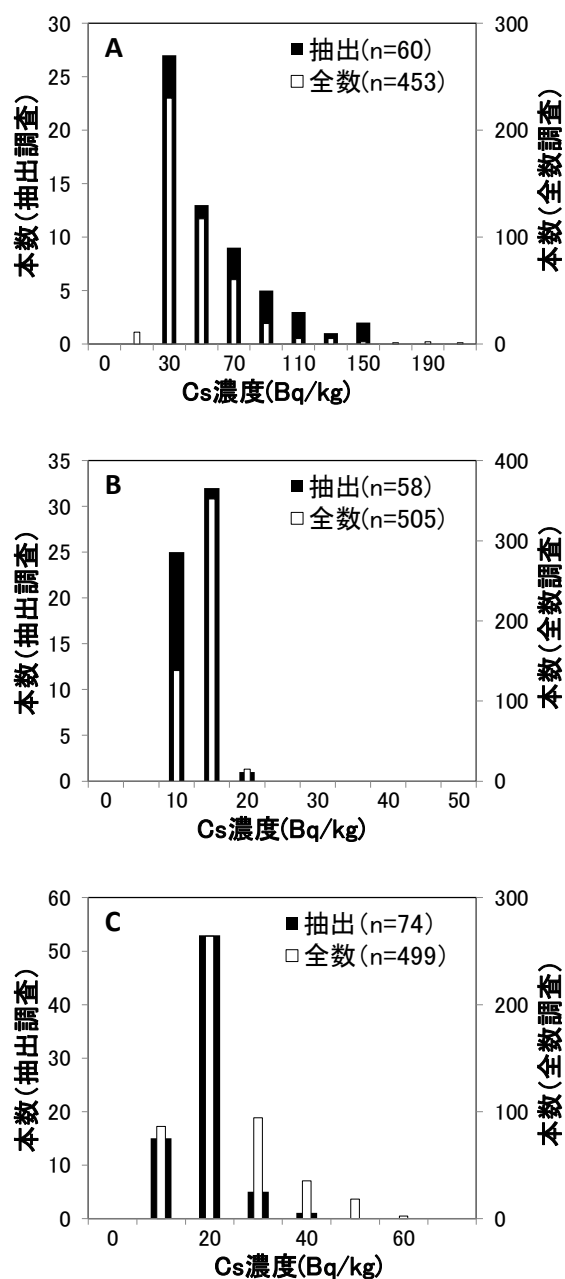


図 6 抽出調査と多試料調査の比較

図中の A-C は調査地を表し、表 2 に対応する

検査機の測定誤差が考慮されていないため、変動係数の調査や仮基準の検証に併せ、今後も検討が必要である。なお、上記とは別に、多試料調査のデータから疑似的に抽出調査を行い、仮の判定基準の妥当性検証を試行した事例について、末尾に参考資料として付す。

4 おわりに

県内の原木林で行った Cs 濃度の調査結果に基づき、仮の原木林利用適否判定基準を設定し、実際に原木林で適否判定

を試行したところ、今回の仮基準は妥当とみなされた。今後も変動係数の調査や仮基準の検証を行うことにより、判定精度が向上することが期待される。

謝辞

調査方法や解析方法をご指導いただいた全国食用きのこ菌協会福井陸夫博士、栃木県林業センター石川洋一氏、株式会社サイエンススタッフ齊藤博之博士に、深甚の謝意を申し上げます。調査にご協力を頂いた森林所有者各位、現地調査に尽力された岩手県農林水産部林業振興課ならびに出先機関の職員各位、試料調製および測定にご協力を頂いた岩手県林業技術センター職員各位に、心から感謝する。

参考文献

- 福井陸夫・石川洋一・吉野将生・大橋洋二・薄善行（2016a）非破壊検査装置によるシイタケ原木中の放射性セシウム濃度の調査（1 報）—きのこ栽培用原木中の放射性セシウム測定のための非破壊検査装置に係る条件の検討—。日本きのこ学会誌 24: 85-93.
- 福井陸夫・石川洋一・吉野将生・大橋洋二・薄善行（2016b）非破壊検査装置によるシイタケ原木中の放射性セシウム濃度の調査（2 報）栃木県内 3 か所の原木林原木の非破壊検査装置による放射性セシウム濃度の測定。日本きのこ学会誌 24: 94-104.
- Imamura, N. et al. (2017) Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Scientific Reports 7: 1-11.
- 石川洋一・杉本恵里子・今井芳典・福井陸夫（2018）放射能汚染地域内で生産された原木の使用適否判定方法の適合性。日本きのこ学会誌 25: 145-149.
- 加藤洋一（2000）サンプリングと抜き取り検査。新版。鐵健司編。東京：日本規格協会。
- 農林水産省（2012a）「きのこ原木及び菌床用培地中の放射性セシウム測定のための検査方法」の制定について。
- 農林水産省（2012b）きのこ原木及び菌床用培地の当面の指標値の改正について。
- 森林総合研究所（2018）放射能汚染地域におけるシイタケ原木林の利用再開・再生。
- 栃木県林業センター（2023）きのこ栽培における放射能対策作業マニュアル〔暫定版/第 10 改訂版〕。

[参考資料]

概要

2019-20 年(令和元年度)に沿岸部で実施した原木非破壊検査機実証調査の結果を全数調査とみなして仮の判定基準を設定し、かつ同データからの抽出調査を疑似的に行って、結果を比較することにより、仮の判定基準の妥当性検証を試行した。

調査地

沿岸部のコナラ林(林齢 35 年、面積 0.13 ha)の伐採地

材料と方法

(1)供試データ

立木本数 57 本、原木本数 363 本(立木と対応あり)、Cs 濃度の平均値 15.7 Bq/kg(非破壊検査機で測定、以下同)、最大値 46 Bq/kg、不適原木 0 本、不適原木率 0%(5%未満)

(2)解析方法

- ① 立木(データ、以下同)を無作為に 1 本選ぶ
- ② ① の立木から無作為に原木(データ、以下同)を 2 本選ぶ、Cs 濃度を記録する
- ③ 1-2 を 30 回繰り返すことにより、立木 30 本から原木各 2 本、合計 60 本の原木の Cs 濃度を得る
- ④ ③ のデータの最大値、平均値を算出する
- ⑤ ①～④を 1000 回繰り返す
- ⑥ ⑤ の最大値と平均値の平均値等を全数調査結果と比較する

上記①～⑤の計算には、統計言語 R version 3.4.1 を用いた。(スクリプトは後述)

結果と考察

疑似抽出調査における原木 Cs 濃度の平均値の 1000 回推定平均値は 15.5 Bq/kg で、全数調査(元のデータ)の平均値の 15.7 Bq/kg と同程度であった。また、疑似抽出調査の最大値の 1000 回推定最大値は 46 Bq/kg で、全数調査の最大値の 46 Bq/kg と同程度であり、疑似抽出過程における「とりこぼし」は軽微であったとみられる。これらの結果から、今回の試算結果は全数調査の結果を反映しており、適否判定の試行結果として有効であることが推察された。

疑似抽出調査による判定結果は、平均値<24 Bq/kg、最大値<50 Bq/kg であったことから、利用可能と判定される。ここで、判定の前提条件より、「調査対象の原木のうち 95 %が 50 Bq/kg を超えない」ことが期待されるが、全数調査の結果(元データ)の不適原木率は 0 %であったことから、判定結果は全数調査結果と矛盾せず、仮の判定基準が今回の試行では妥当であったと判断された。

R の計算スクリプト

```
ite <- 1000 #反復回数の決定
times <- 30 #立木調査本数(抽出回数)の決定

data <- read.csv("data_ozuchi_2019.csv", header=TRUE) #データ
#ファイルの読み込み
nc <- ncol(data) #列数のカウント
for (j in 1:ite) {
  for (i in 1:times) {
    tree <- sample(1:nc, 1) #立木番号の無作為抽出
    #tree
    d <- data[, tree] #立木番号に該当する立木(データ列)の抽出
    d2 <- d[!is.na(d)] #欠損値(na)の削除
    log_cs_d <- sample(d2, 2) #該当する立木に属する原木 Cs 濃
    #度の無作為抽出(2 本)
    write(log_cs_d, "log_cs.txt", append = TRUE) #判定用データの
    #生成
  }
  file.copy("log_cs.txt", paste(j, "-log_cs.txt")) #判定用データファ
  #イルの保存
  log_cs <- scan("log_cs.txt") #判定用データの読み込み
  max <- max(log_cs) #最大値算出
  mean <- mean(log_cs) #平均値算出
  res <- c(max, mean)
  write(t(res), "cs_res.txt", sep = ",", append = TRUE) #判定結果フ
  #ァイルの保存
  file.remove("log_cs.txt") #判定用データの消去
}
#ヒストグラムの出力
hist_cs <- read.table("cs_res.txt", sep = ",") #判定結果ファイルの
#読み込み
h_max <- hist_cs[,1] #最大値のヒストグラム
hist(h_max)
png("hist_max") #ヒストグラムの保存
hist(h_max)
dev.off()

h_mean <- hist_cs[,2] #平均値のヒストグラム
hist(h_mean)
png("hist_mean")
hist(h_mean)
```