

Ⅱ. 総 合 分 担 研 究 報 告

「食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の検討」

山田 崇裕

令和 5～7 年度 厚生労働科学研究費補助金 (食品の安全確保推進研究事業)

食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の開発に資する研究(23KA1006)

総合分担研究報告書

「食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の検討」

研究分担者 山田 崇裕 近畿大学原子力研究所 教授

福島第一原子力発電所事故以降、食品中の放射性セシウム測定においては、迅速なスクリーニング検査の重要性が高まっている。従来の Ge 検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーは高い精度を有する一方で、試料の破碎・均質化を前提とするため、検査効率の観点から制約がある。このため、試料を前処理せずそのまま測定可能な非破壊式放射能測定装置の活用が進められているが、試料形状や放射性物質の不均一分布に起因する測定値のばらつきが課題となっている。

本研究では、非破壊式装置による食品中放射性セシウム測定の信頼性評価及びスクリーニング検査への適用拡大を目的として、令和 5 年度から 7 年度の 3 か年にわたり検討を行った。具体的には、野生キノコ、山菜類及び野生鳥獣肉等の実試料を用い、非破壊式装置による測定結果と Ge 検出器による公定法の測定結果との比較検討を実施するとともに、回帰直線の予測区間を用いたスクリーニングレベルの評価手法を適用した。その結果、累積 1241 検体に及ぶ比較データを蓄積し、広範な品目において両測定法の間に良好な相関関係が確認された。また、100 Bq/kg に対するスクリーニング検査への適用性について評価を行い、既存適用品目に加え、マイタケ、ヒラタケ、カラストケ、ウラベニホテイシメジ等について、既存品目と同等レベルのスクリーニング性能が確保可能であることが示唆された。さらに、実試料による評価の制約を補完するため、栽培種試料の活用、ファントム試料による実験的検証及び 3D スキャンと物理シミュレーションを組み合わせた計算手法の検討を行った。これにより、試料形状及び配置に起因する検出効率のばらつきを定量的に評価するための基礎的知見が得られた。

以上の結果から、非破壊式放射能測定装置は、適切な試料条件及び評価手法の下で運用することにより、食品中放射性セシウムのスクリーニング検査に有効に適用可能であることが確認された。また、本研究により構築した評価手法は、検査対象品目の拡大及び検査の効率化に資するものであり、科学的根拠を提供するものである。今後は、基準値相当濃度の試料データの更なる蓄積を進めるとともに、試料形状及び配置の影響評価について実測との比較を含めた体系的検証を行うことにより、非破壊式スクリーニング法の信頼性向上及び適用範囲の拡大を図る必要がある。

研究協力者 蜂須賀 暁子 国立医薬品食品衛生研究所有機化学部 主任研究官

八戸 真弓 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 食品
研究部門食品流通・安全研究領域 食品安全・信頼性グル
ープ 主席研究員

小松 仁 福島県環境創造センター 研究部 主任研究員

A. 研究の背景と目的

福島第一原子力発電所事故以降、食品中の放射性セシウムの測定は、食品の安全確保の観点から継続的に実施されている。現在、食品中の放射性物質の測定にはGe検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーが標準的手法として用いられているが、この方法は試料の破碎・均質化を前提とするため、測定に時間と労力を要するという課題がある。

これに対し、試料を前処理せずそのまま測定可能な非破壊式放射能測定装置は、迅速かつ簡便な検査が可能であることから、出荷前検査や自主検査等において広く利用されている。しかしながら、非破壊式測定では試料形状や放射性物質の分布の不均一性に起因して検出効率が変動するため、測定結果のばらつきや真度の低下が課題となる。

従来のスクリーニング検査法は、試料中の放射性物質が均一に分布していることを前提として設計されており、この前提が成り立たない非破壊式測定に対しては、その適用性を個別に評価する必要がある。また、適用対象となる食品の種類は多岐にわたることから、試料の種類、形状、質量等の条件を踏まえた体系的な評価手法の確立が求められている。

本研究では、このような背景を踏まえ、

非破壊式放射能測定装置による食品中放射性セシウムの測定について、Ge検出器による公定法との比較に基づく評価を行い、スクリーニング検査への適用性を明らかにすることを目的とした。さらに、試料形状及び配置に起因する測定不確かさの影響を考慮した評価手法の構築を行い、検査対象品目の拡大に資する科学的基盤の整備を図ることとした。

B. 研究方法

本研究では、非破壊式放射能測定装置による食品中放射性セシウム測定の信頼性評価及びスクリーニング検査への適用拡大を目的として、比較測定、統計解析及び補完的評価手法を組み合わせた体系的な評価設計に基づき検討を行った。

(1)非破壊式放射能測定装置の概要

本研究で対象とした非破壊式放射能測定装置は、試料を破碎せずそのまま測定することを目的として設計された装置であり、複数検出器の配置や大型検出器の採用により幾何学的効率を高め、試料形状や配置の影響の低減が図られている。

一方で、検出効率は試料の形状、質量及び放射性物質の分布に依存するため、測定値には一定のばらつきが生じる。本研究では、各装置の内部アルゴリズムには立ち入らず、標準的な測定条件に基づく

出力値を用いて評価を行った。

(2)比較測定による評価

非破壊式測定の適用性評価の基礎として、野生キノコ、山菜類及び野生鳥獣肉等の実試料を対象に、非破壊式装置による測定と Ge 検出器による公定法測定との比較を行った。

試料は主として福島県内で採取されたものを用い、非破壊式測定は各測定施設において実施した。Ge 検出器による測定は「食品中の放射性物質の試験法について」に準拠し、試料の細切等による前処理を行った上で実施した。また、非破壊式測定では同一試料について繰り返し測定を行い、測定値のばらつき特性を評価した。

(3)スクリーニングレベルの評価手法

スクリーニング検査への適用性は、非破壊式測定値と Ge 検出器測定値の関係について回帰分析を行い、予測区間を用いて評価した。

具体的には、Ge 検出器による測定値を基準とし、非破壊式測定値との回帰直線を求めた上で、99 %予測区間の上限値が基準値 100 Bq/kg を下回る条件を満たす非破壊式測定値をスクリーニングレベル (SL)として定義した。

99 %予測区間は以下により算出した。

$$m_{UL} = m + \sqrt{V_e \left\{ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right\}} \times t_{n-2, 0.01}$$

ここに、

m_{UL} : 回帰直線の予測区間の 99%上限

m : 回帰直線から予想される濃度 x における測定値

V_e : 回帰直線の誤差分散

n : 回帰に使用したデータの数

x : 放射性セシウム濃度

$\bar{x}$: 回帰に用いた放射性セシウム濃度の平均

S_{xx} : 回帰に用いた放射性セシウム濃度の平方和

本手法により、測定ばらつきを考慮しつつ偽陰性の発生を抑制したスクリーニング条件の設定を行った。

(4)適用性評価のための試料拡張

実試料のみでは評価に必要な濃度範囲のデータ確保が困難な場合があることから、補完的手法として栽培種試料を用いた評価を実施した。

特にマイタケについては、原木栽培試料を用いることで野生試料では不足していた濃度帯のデータを補完し、スクリーニングレベルの妥当性評価を行った。

(5)試料形状及び配置に起因する不確かさ評価

非破壊式測定における主要な不確かさ要因である試料形状及び配置の影響を評価するため、3D 形状データの取得、物理シミュレーション及びモンテカルロ放射線輸送計算を組み合わせた解析を実施した。

試料形状は 3D スキャナにより取得し、物理シミュレーションにより袋詰め状態を再現した。これにより生成された複数の配置パターンについて、PHITS を用いた計算により検出効率を算出し、配置の違いに起因するばらつきを評価した。また、検出効率の変動範囲を把握するため、試料配置を手動で設定した極端条件での評価も実施した。

(6)ファントム試料による検証

実試料による評価の再現性及び制御性の課題を補完するため、3D プリンタを用いて試料形状を模擬したファントム試料を作製し、測定評価を行った。

ファントム試料を用いることで、試料配置及び個数を制御した条件下での測定が可能となり、非破壊式測定におけるばらつき特性の検証に活用した。

C. 研究結果

(1)試料収集及びデータ蓄積の進展

本研究では、非破壊式測定の適用性評価に必要な実測データの蓄積を目的として、野生キノコ、山菜類及び野生鳥獣肉等の試料収集及び比較測定を段階的に実施した。

令和 5 年度においては、主として野生キノコ及び山菜類を対象とした測定を実施し、スクリーニング評価に必要な基礎データの蓄積を開始した。令和 6 年度には対象品目及び試料数を大幅に拡張し、野生鳥獣肉を含めた多様な試料について比較測定を実施した。さらに令和 7 年度には、重点品目を中心としたデータの補完及び濃度範囲の拡張を行った。

これらの結果、令和 7 年度までの累積試料数は 1241 検体に達し、複数の品目において統計的評価が可能なデータ基盤が整備された。また、スクリーニング評価に有効な濃度範囲(おおむね 10~260 Bq/kg)についても十分なデータが確保された。

(2)非破壊式測定と Ge 検出器測定の比較結果

非破壊式測定と Ge 検出器測定の比較

は、3 か年を通じて継続的に実施した。

令和 5 年度の検討において、両測定法の間的良好な相関関係が確認され、非破壊式測定が食品中放射性セシウムスクリーニングに適用可能であることが示された。令和 6 年度には試料数の増加及び対象拡張により、この相関関係が複数の品目において再現性よく確認され、結果の一般性が補強された。さらに令和 7 年度には、累積データを用いた解析により、広範な濃度範囲における測定特性が整理された。

その結果、低濃度域(おおむね 20 Bq/kg 以下)において相対的なばらつきが大きくなる傾向が確認された。この要因は主として計数統計に起因するものと考えられ、濃度の増加に伴い相対的ばらつきが低減する傾向が一貫して認められた。

また、試料形状及び配置条件に起因するばらつきも確認され、非破壊式測定の特長として整理された。

(3)スクリーニング検査への適用性評価

回帰分析及び予測区間を用いた評価により、非破壊式測定のスクリーニング検査への適用性について段階的な検討を行った。

令和 5 年度においては、野生キノコ及び山菜類の実試料を用いた評価により、クリタケ及びコシアブラについてスクリーニングレベルの設定が可能であることが確認され、非破壊式スクリーニング法の適用可能性が初めて具体的に示された。

令和 6 年度には、試料数及び対象品目の拡張を行い、マイタケ、ヒラタケ等の重点品目に対する評価を進めるとともに、

野生鳥獣肉(イノシシ、クマ、シカ)についても適用性の検討を行った。その結果、これらの品目についても既存適用品目と同等の性能での検査が可能であることを示唆する結果が得られた。また、原木マイタケを用いた評価により、栽培種試料による補完的検証手法の有効性が確認された。

令和 7 年度には、これまでに蓄積されたデータに加え、原木マイタケの追加試料を用いた評価を実施し、基準値近傍の濃度域を含むデータに基づき 50 Bq/kg 超のスクリーニングレベルの妥当性を確認した。さらに、ヒラタケ、ウラベニホテイシメジ、カラストケ及びハタケシメジについて、既存適用品目と同等レベルのスクリーニング性能が確保可能であることが示され、適用候補として有望であることが明らかとなった。

一方、コウタケ及びオオイチョウタケについては、試料数又は濃度範囲の制約により十分な評価には至らず、引き続きデータの蓄積が必要とされた。また、山菜類については、試料確保の制約により評価に必要なデータ数が不足しており、適用性評価に向けた課題として整理された。

(4)野生鳥獣肉における適用性の検討

野生鳥獣肉に関する検討は令和 6 年度より開始し、令和 7 年度にかけて評価を実施した。

イノシシ、クマ及びシカについては、いずれも非破壊式測定値と Ge 検出器測定値の間に良好な相関関係が確認され、既存適用品目と同等レベルの測定性能が確保可能であることが示された。

一方、試料状態(生肉及び冷凍肉)の違い

により測定値に系統的な差が生じる傾向が確認され、冷凍状態では相対的に低い値を示す傾向が認められた。この結果は、試料の密度変化や幾何学的配置の変化に起因するものと考えられ、測定条件設定において考慮すべき重要な要因であることが示された。

キジについては評価に必要な試料数が十分に確保できず、適用性の評価には至らなかった。

(5)試料形状及び配置に起因する不確かさ

試料形状及び配置に起因する不確かさの評価は、令和 6 年度に導入したシミュレーション手法を基に、令和 7 年度にかけて検討を進めた。

その結果、試料配置の違いにより検出効率が統計的に変動することが確認され、その相対標準偏差は数%程度であることが示された。また、試料数の増加によりばらつきが低減する傾向が認められ、複数個体の測定が測定安定性の向上に寄与することが示唆された。

さらに、極端な配置条件を想定した評価により、検出効率の変動範囲が明らかとなり、測定値の過大評価及び過小評価が生じ得る条件が整理された。

(6)補完的評価手法の検討

実試料による評価の制約を補完するため、令和 6 年度よりシミュレーション及び栽培種試料を用いた評価手法の導入を行い、令和 7 年度にかけてその検証を進めた。

3D スキャン及び物理シミュレーションを組み合わせた計算手法により、実試料の形状及び配置を反映した検出効率評価

が可能であることが示された。また、ファントム試料を用いることで、試料配置条件を制御した測定評価が可能であることが確認された。

これらの結果から、実測データを補完する評価手法としての適用可能性が示唆された。

D. 総合考察

(1)非破壊式測定の成立条件

本研究により、非破壊式放射能測定装置による食品中放射性セシウム測定は、適切な条件設定の下でスクリーニング検査に適用可能であることが示唆された。

従来の γ 線スペクトロメトリーでは、試料中の放射性物質が均一に分布していることを前提として測定が行われる。一方、非破壊式測定では試料の破碎・均質化を行わないため、この前提が必ずしも成立しない。しかし、本研究の結果から、検出器の大型化及び複数配置により幾何学的効率の変動が抑制されている条件下では、試料形状や配置の影響は一定の範囲に収まり、スクリーニング用途としては十分許容可能であることが示された。すなわち、非破壊式測定は「均一分布」を前提とするのではなく、「想定されるばらつきの範囲内での測定」として成立する測定体系であると整理できる。

(2)測定不確かさの支配要因

非破壊式測定における不確かさについては、主として以下の要因が支配的であることが明らかとなった。

第一に、低濃度域においては放射性壊変に起因する計数統計の不確かさが支配

的であり、濃度の低下に伴い相対的なばらつきが増大する傾向が確認された。

第二に、試料形状及び配置に起因する幾何学的要因が、特に中～高濃度域におけるばらつきの一因となることが示された。モンテカルロシミュレーションによる評価では、配置の違いにより検出効率が数%程度変動することが確認され、実測におけるばらつきと整合的な結果が得られた。

さらに、試料数の増加によりばらつきが低減する傾向が認められたことから、測定対象を適切に集約することが測定安定性の向上に寄与することが示唆された。

(3)試料特性と測定結果の関係

非破壊式測定においては、試料の物理的特性が測定結果に影響を与えることが確認された。

特に、高密度、形状及び試料の配置状態は検出効率に影響を及ぼす要因であり、同一品目であっても個体差によるばらつきが存在する。一方で、本研究において用いた試料の範囲では、これらの影響はスクリーニング用途として許容可能な範囲に収まることが確認された。

また、野生鳥獣肉においては、生肉と冷凍肉の間で測定値に系統的な差が認められ、試料状態が検出効率に影響を与えることが示された。この結果は、試料の密度や内部構造の変化、検出部と試料の密着性の変化が γ 線の減弱特性に影響を及ぼす可能性を示唆するものであり、測定条件設定において考慮すべき重要な要因である。

(4)スクリーニング法適用の考え方

本研究で適用した回帰分析及び予測区間に基づく評価手法により、測定ばらつきを統計的に考慮したスクリーニングレベルの設定が可能であることが示された。

この手法は、単に平均的な一致性を評価するのではなく、ばらつきを含めた安全側の評価を行う点に特徴があり、偽陰性の発生リスクを抑制した検査条件の設定が可能である。

また、複数品目に対する評価結果から、スクリーニングレベルは品目固有の値としてではなく、試料の物性(嵩密度や形状特性)に基づくグループとして整理可能である可能性が示唆された。この点は、検査対象品目の効率的な拡大に資する重要な知見である。

(5)補完的評価手法の意義

実試料による評価は信頼性が高い一方で、試料入手性や濃度分布の制約を受けるという課題がある。

本研究では、これを補完する手法として、栽培種試料、モンテカルロシミュレーション及びファントム試料を組み合わせた評価手法を導入した。その結果、試料形状及び配置の影響を制御・再現した評価が可能となり、実測データでは把握が困難な不確かさ要因の定量的評価に有効であることが示された。

これらの手法は、今後の評価体系の高度化及び試料種拡大において重要な役割を果たすと考えられるが、現時点では基礎的検討の段階にあり、実測データとの体系的な比較検証が必要である。

(6)本研究の位置づけと今後の課題

本研究により、非破壊式測定による食

品中放射性セシウムのスクリーニング検査について、評価手法の枠組みが構築されるとともに、複数品目への適用可能性が具体的に示された。

一方で、基準値相当濃度の試料データの更なる蓄積、特に山菜類における試料確保、並びに試料形状及び配置の影響評価に関する実測との比較検証が今後の課題として残されている。

これらの課題に対応することにより、非破壊式スクリーニング法の信頼性を一層向上させるとともに、検査対象品目の更なる拡大が可能になると考えられる。

E. 結論

本研究では、非破壊式放射能測定装置による食品中放射性セシウム測定について、Ge 検出器による公定法との比較に基づき、その信頼性評価及びスクリーニング検査への適用性の検討を行った。3 か年にわたる検討により、累積 1241 検体の比較データを蓄積し、野生キノコ、山菜類及び野生鳥獣肉等の多様な試料において、非破壊式測定と Ge 検出器測定との間に良好な相関関係が確認された。また、低濃度域における計数統計の影響及び試料形状・配置に起因するばらつき特性について整理し、非破壊式測定の特性を定量的に把握した。

スクリーニング検査への適用性については、回帰分析及び予測区間に基づく評価手法を適用することにより、測定ばらつきを考慮したスクリーニングレベルの設定が可能であることを示した。その結果、既存適用品目に加え、クリタケ及びコ

シアブラにおいて適用可能性を確認するとともに、マイタケについては追加試料による検証によりスクリーニングレベルの妥当性を確認した。さらに、ヒラタケ、ウラベニホテイシメジ、カラストケ及びハタケシメジについて、既存適用品目と同等レベルのスクリーニング性能が確保可能であることが示され、適用候補として有望であることが明らかとなった。野生鳥獣肉については、イノシシ、クマ及びシカにおいて同様に良好な相関関係が確認され、試料状態の影響を考慮することでスクリーニング検査への適用可能性が示唆された。

さらに、実試料による評価の制約を補完するため、栽培種試料、モンテカルロシミュレーション及びファントム試料を組み合わせた評価手法の検討を行い、試料形状及び配置に起因する不確かさの定量的評価に向けた基礎的知見を得た。

以上の結果から、非破壊式放射能測定装置は、適切な試料条件及び評価手法の下で運用することにより、食品中放射性セシウムのスクリーニング検査に有効に適用可能であることが確認された。また、本研究で構築した評価手法は、検査対象品目の拡大及び検査の効率化に資する科学的基盤として位置付けられる。

今後は、基準値相当濃度の試料データの更なる蓄積、特に山菜類における試料確保を進めるとともに、試料形状及び配置の影響評価について実測との比較を含めた体系的検証を行うことにより、非破壊式スクリーニング法の信頼性向上及び適用範囲の拡大を図る必要がある。

F. 研究発表

1. 論文発表

- 1) Yamada, T., Furutaka, K., Hachinohe, M., Hachisuka, A.: Applicability of non-destructive equipment for radioactivity measurement to screening radio-caesium in foods. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume **194** (2023), 110671, ISSN 0969-8043, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110671>.
- 2) Yamada, T., Hachinohe, M., Hachisuka, A., Asakura, Y., Kanno, T., Kikuchi, M.: Unexpected uncertainty in the use of simple sample machining technique for gamma-spectrometry. *Radiat. Prot. Dosimetry*, **200** (16-18), 1666–1670 (2024).

2. 学会発表

- 1) Yamada, T., Hachinohe, M., Hachisuka, A., Asakura, Y., Kanno, T., Kikuchi, M.: Unexpected uncertainty in the use of simple sample machining technique for gamma-spectrometry. International Symposium on Natural and Artificial Radiation Exposures and Radiological Protection Studies, Aomori (Japan), (2023.9.22).
- 2) Yamada, T., Kitano, K., Asakura, Y., Kikuchi, M., Fukuhara, T.: Municipal radioactivity inspection services in food for self-consumption in Fukushima and utilization of state-of-the-art equipment

for testing. The 6th Bilateral Workshop on Radiation Research and its related Issues 2023 Bangkok, (Thailand), (2023.12.7)

- 3) 細見晶生、山田崇裕、蜂須賀曉子、片岡洋平：原木シイタケの放射性セシウム濃度分布評価. 日本保健物理学会第 57 回研究発表会 大阪府吹田市 (2024.12.16)
- 4) 村田紘希、山田崇裕：体積試料中の²¹⁰Pb 放射能測定における小角散乱の影響評価. 日本保健物理学会第 57 回研究発表会 大阪府吹田市 (2024.12.16)
- 5) 前川暁洋、神田幸亮、村上貴恵美、小松 仁、井上広海、橋本晃佑：非破壊式放射能測定装置による野生鳥獣肉の放射性セシウムスクリーニング検査. 日本保健物理学会第 57 回研究発表会 大阪府吹田市 (2024.12.16)

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし