

穀類の加工と放射性セシウムの動態

Dynamics of radiocesium during the processing of grain and rice bran

生産環境部 丹治克男 関澤春仁 山下慎司¹

作物園芸部 遠藤あかり²

¹現ハイテクプラザ会津若松技術支援センター ²現県北農林事務所安達農業普及所

小麦では放射性セシウムのフォールアウトを受けた時点での生育量が大きいほど子実の放射性セシウム濃度が高かった。製粉加工時の加工係数は小麦粉で0.45、ふすまが1.91となり、ふすまに多くの放射性セシウムが含まれていた。大豆の加工係数は吸水により0.40、豆乳及び豆腐加工では0.15となった。水煮加工では煮汁への放射性セシウムの溶出により、加工係数は0.20であった。放射性セシウムを含む米ぬかを使用してぬか漬けを加工した場合、放射性セシウムの米ぬかから漬物への移行率は0.3~0.5で、漬け時間が長くなると移行率は0.71と高くなった。

キーワード：放射性セシウム、穀類、加工係数、移行率

1 緒言

東京電力福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウムは生育期間中の小麦に直接降下（フォールアウト）して汚染したほか、事故後に作付けされた水稻や大豆では土壌から吸収され、一部の農産物からは高濃度の放射性セシウムが検出された。

農産物を加工した際の放射性物質の挙動については核実験やチェルノブイリ原発事故に由来の放射性物質についてのデータが得られている⁶⁾。しかし放射性物質の挙動はその由来によって変わることが考えられるため、ここで東京電力福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムにより汚染された農作物や、それを原料にして加工を行った際の挙動について検討した。

2 試験方法

放射性セシウム濃度 ($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$) は福島県農業総合センターのゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメータ (Canberra, GC4020 他) を使用して測定した。試料はU 8 容器に充填し、測定時間は2,000 秒~4,000 秒とした。

(1) 小麦の加工と放射性セシウムの動態

A 小麦の産地と子実の放射性セシウム濃度

放射性セシウムのフォールアウトを受けた小麦において、生産地と小麦子実に含まれる放射性セシウム濃度との関係を検討した。

ふくあかり・きぬあずま・ゆきちからの3品種を用い、農業総合センター（郡山市）、浜地域研究所（相馬市）、会津地域研究所（会津坂下町）及び県内3か所の現地ほ場においてドリル播（条間30cm、播種量1.0kg/a）で、標準的な播種期により栽培・収穫されたそれぞれの子実中の放射性セシウム濃度を測定した。

B 生育量と子実の放射性セシウム濃度

放射性セシウムのフォールアウトを受けた時期の生育量が子実に含まれる放射性セシウム濃度に及ぼす影響を検討した。

試料には、農業総合センターで播種時期を早播（2010年10月8日）・標播（2010年10月20日）・晩播（2010年11月8日）・極晩播（2010年11月20日）の4段階としてドリル播（条間30cm、播種量1.0kg/a）で栽培されたふくあかり、標播（2010年10月20日）の条播（条間70cm、播種量0.8kg/a）及びドリル播（条間30cm、播種量1.0kg/a）の両方で栽培されたきぬあずまとゆきちからを用い、子実の放射性セシウム濃度を測定した。

生育量の調査は各区のふくあかり及び条播のきぬあずま・ゆきちからは2011年3月28日に行い、ドリル播の試験区では2011年4月1日に行った。

C 製粉加工と放射性セシウム濃度

農業総合センター及び県内現地2カ所（A市及びB市）の計3カ所で生産されたふくあかり並びに農業総合センターと県内現地1カ所（B市）で生産されたきぬあずまの子実を用い、試験用製粉機（Brabender, Quadrumat Junior）で原麦500gを製粉した。

製粉のうち先に篩別された60%をA粉、その他をB粉とし、これらとふすまのそれぞれの放射性セシウム濃度を測定した。また原麦の放射性セシウム濃度に対する加工品の放射性セシウム濃度の比率を加工係数とした。

(2) 大豆の加工と放射性セシウムの動態

2011年に福島県で生産された大豆の一部から高い濃度の放射性セシウムが検出された。このため大豆に含まれる放射性セシウムの濃度が、加工に伴いどのように変化するかを明らかにすることを目的として、豆乳・豆腐、煮豆、味噌及び納豆加工について検討した。

試料には2011年に福島県で生産された大豆(品種:タチナガハ、放射性セシウム濃度313~363Bq/kg)を使用した。ここでは、原料大豆の放射性セシウム濃度に対する加工品の放射性セシウム濃度の比率を加工係数とした。

A 豆乳・豆腐・煮豆加工と放射性セシウム濃度

原料大豆を洗浄し、3倍容の蒸留水に20℃で17時間浸漬し、浸漬大豆とした。その後、原料大豆の6倍重になるよう加水して磨砕し、分離・ろ過して豆乳とおからを得た。得られた豆乳に塩化マグネシウムを加え凝固させて絹豆腐とした。この絹豆腐をガーゼを三重においたザルで脱水して木綿豆腐とした。

蒸煮大豆は、上記の浸漬大豆を金属製のザルに入れオートクレーブで121℃10分間蒸煮した。水煮は浸漬大豆を蒸留水で2時間煮た。減少した水は随時補給した。

それぞれの加工段階で試料を取り、放射性セシウム濃度を測定した。

さらに、原料大豆及び浸漬大豆をピンセットを用いて種皮を除去し、脱皮前後の放射性セシウム濃度の違いを検討した。

B 味噌及び納豆加工と放射性セシウム濃度

味噌は、上記の蒸煮大豆3,000gに対し米こうじ1,000g、食塩600g、水300g、種味噌250gの割合で配合して仕込みを行った。その後常温で熟成した。米こうじは福島県内産のものを使用した。放射性セシウムは検出されなかった。また種味噌には市販のこうじ味噌を使用した。

納豆は、浸漬大豆を30分間蒸煮した蒸煮大豆550gに、市販の納豆菌(商品名:高橋純粋活性納豆素)0.1gを水10mlに懸濁して接種した。これを紙トレーに150gずつ小分けし、40℃の恒温器で24時間発酵させた。

表1 小麦の産地と子実の放射性セシウム濃度

品種名	生産地 ^{a)}	放射性セシウム濃度(Bq/kg)	成熟期(月/日)	収穫期(月/日)
ふくあかり	郡山市	163	6/15	-
	A市(中通り)	38	-	6/28
	B市(浜通り)	606	-	6/20
きぬあずま	郡山市	243	6/17	-
	B市(浜通り)	410	-	6/27
ゆきちから	郡山市	102	6/22	-
	相馬市	132	6/23	-
	会津坂下町	ND(<18)	6/27	-
A市(中通り)		38	7/1	-
	C市(会津)	ND(<22)	6/29	-

a)郡山市:農業総合センター、相馬市:浜地域研究所、会津坂下町:会津地域研究所、A~C市は現地ほ場

(3) 漬物加工における米ぬかからの放射性セシウムの移行

放射性セシウムを含む米ぬかを使用してぬか漬けを加工した場合、放射性セシウムの米ぬかから漬物への放射性セシウムの移行を検討した。

試料には福島県内産の放射性セシウムを含む米ぬか(放射性セシウム濃度63~200Bq/kg)を使用し、漬け込む野菜は漬け込み前の放射性セシウム濃度が検出限界以下であることを確認して用いた。

漬け床の放射性セシウム濃度に対する漬け物の放射性セシウム濃度の比率を移行率とした。

A 米ぬかの漬け床加工と放射性セシウム濃度

福島県内産の4種類の米ぬか(試料A、B、C、D)を使用した。漬け床加工は、試料Aでは原料の米ぬか2,000gに対し、400gの食塩を3Lの水に溶かした食塩水を2.4L加えた。他の試料では、米ぬか1,000gに食塩200gを溶かした食塩水1Lを加えた。

B ぬか漬け加工と放射性セシウムの移行率

上記aで加工したぬか床にキュウリを入れ、試料AとBは室温、試料CとDは20℃の恒温器中で漬け込んだ。漬け時間はA-2が27時間、その他は16時間とした。

C カリウム塩を使用した場合の放射性セシウムの移行率

食塩に代えて塩化カリウム53%を含むカリウム塩(商品名:やさしお、味の素KK)を使用した漬け床にキュウリを漬け込んだ。漬け時間は16時間とした。

D 品目の違いと放射性セシウムの移行率

キュウリ、カブ、ダイコンを用い、漬け込む野菜の品目による移行率の違いを検討した。漬け時間は16時間とした。

表2 生育量と子実の放射性セシウム濃度

品種名	播種法	播種期	放射性セシウム濃度(Bq/kg)	春期の生育量 ^{a)}			
				草丈(cm)	茎数(本/m ²)	生育量指数(草丈×茎数)	
ふくあかり	ドリル播	早播	10/8	280	34.3	963	33,031
		標播	10/20	143	19.1	1,253	23,933
		晩播	11/8	24	9.3	473	4,399
		極晩播	11/20	15	7.4	437	3,234
きぬあずま	ドリル播	条播	10/19	79	22.8	542	12,358
		条播	10/19	243	20.4	803	16,382
ゆきちから	ドリル播	条播	10/19	40	16.8	1,245	20,916
		条播	10/19	102	16.1	1,687	27,161

a)条播2011/3/28、ドリル播2011/4/1調査

表3 製粉加工と放射性セシウム濃度および加工係数

品種名	生産地	原麦(Bq/kg)	A粉		B粉		ふすま	
			(Bq/kg)	加工係数 ^{a)}	(Bq/kg)	加工係数 ^{a)}	(Bq/kg)	加工係数 ^{a)}
ふくあかり	郡山市	163	59	0.37	58	0.36	311	1.94
	A市(中通り)	38	<17	<0.45	<13	<0.34	67	1.76
	B市(浜通り)	606	348	0.57	359	0.59	1,220	2.01
きぬあずま	B市(浜通り)	410	168	0.41	196	0.48	781	1.90
	平均			0.45		0.48		1.91

a)加工係数(Pf) = 加工品の放射性セシウム濃度/原麦の放射性セシウム濃度

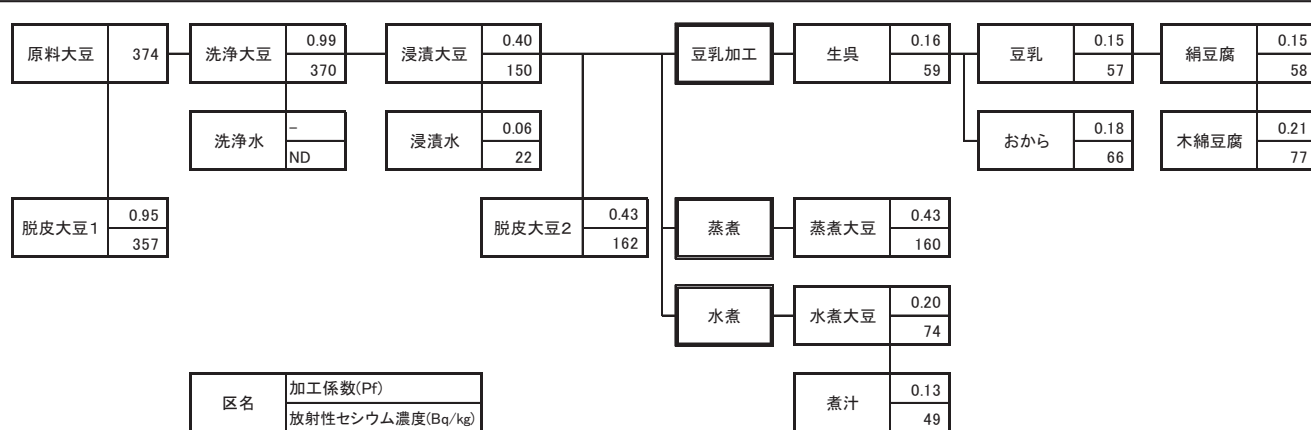


図1 大豆の加工による放射性セシウム濃度の推移

3 結果

(1) 小麦の加工と放射性セシウム動態

A 小麦の産地と子実の放射性セシウム濃度

放射性セシウム濃度は、東京電力福島第一原子力発電所事故によるフォールアウトの多かった浜通り・中通りで高く、少ない会津では低かった（表1）。また品種では早生のふくあかり・中生のきぬあずまで高く、中生の晩のゆきちからで低かった。

B 生育量と子実の放射性セシウム濃度

播種期では生育量の大きい早播で放射性セシウム濃度が高く、晩播になるほど生育量が小さく放射性セシウム濃度も低くなった。播種法では生育量の大きいドリル播で高く、生育量の小さい条播で低かった（表2）。

C 製粉加工と放射性セシウム濃度

供試した原麦の放射性セシウム濃度は38～606 Bq/kgであった。

製粉の放射性セシウム濃度はA粉・B粉では差がなくND～359Bq/kg、ふすまは67～1,220Bq/kg、加工係数はA粉0.37

～0.57（平均0.45）、B粉0.36～0.59（平均0.48）、ふすま1.76～2.01（平均1.91）となった（表3）。

(2) 大豆の加工と放射性セシウム動態

A 豆乳・豆腐・煮豆加工と放射性セシウムの挙動

大豆の加工に伴う放射性セシウム濃度及び加工係数の推移は図1のとおりであった。

(A) 洗浄及び脱皮の効果

洗浄によっては放射性セシウム濃度はほとんど低下しなかった。浸漬大豆の重量は2.2倍となり、加工係数は0.40となった。脱皮処理では、処理前後の放射性セシウム濃度にほぼ差がなかった。

(B) 豆乳・豆腐加工

豆乳とおからの加工係数はそれぞれ0.15、0.18となった。絹豆腐の放射性セシウム濃度は豆乳と同程度で、木綿豆腐では脱水されるため、やや高まった。

(C) 煮豆加工

蒸煮大豆の加工係数は0.43と浸漬大豆の0.40と差がなかったが、水煮では煮汁への溶出により加工係数は0.20で浸漬大豆の約1/2となった。

B 味噌及び納豆加工と放射性セシウム濃度

味噌の加工係数は0.26、重量比は3.6倍で、納豆の加工係数は0.42であった（表4）。

(3) 漬物加工における米ぬかからの放射性セシウムの移行

A 米ぬかの漬け床加工と放射性セシウム濃度

漬け床の放射性セシウム濃度は食塩及び水の添加により希釈され、米ぬかの0.55～0.37倍に低下した（表5）。

表4 味噌および納豆加工と放射性セシウム濃度

加工法	加工品	放射性セシウム濃度 ^{a)} (Bq/kg)		加工係数 ^{b)}
味噌加工	原料大豆	277 ± 14	—	—
	蒸煮大豆	120 ± 8	0.43	0.43
	味噌	71 ± 6	0.26	0.26
納豆加工	原料大豆	342 ± 14	—	—
	浸漬大豆	126 ± 10	0.37	0.37
	蒸煮大豆	129 ± 8	0.38	0.38
	納豆	144 ± 9	0.42	0.42

a) 放射性セシウム濃度の±は計測誤差

b) 加工係数(Pf) = 加工品の放射性セシウム濃度 / 原料大豆の放射性セシウム濃度

表5 漬け床加工と放射性セシウム濃度

	米ぬか		漬け床	
	(Bq/kg [fresh wt])		(Bq/kg [fresh wt])	
A	63 ± 8	35 ± 3	0.55 ± 0.04	
B	200 ± 7	95 ± 3	0.47 ± 0.02	
C	96 ± 7	36 ± 3	0.37 ± 0.03	
D	103 ± 7	50 ± 4	0.49 ± 0.04	

a) 希釈率 = 漬け床の放射性セシウム濃度 / 米ぬかの放射性セシウム濃度

b) 放射性セシウム濃度の±は計測誤差、希釈率の±は標準偏差

表6 キュウリのぬか漬け加工と漬物への放射性セシウムの移行率

	漬け床	漬物	
	(Bq/kg[fresh wt])	(Bq/kg[fresh wt])	移行率 ^{a)}
A-1 ^{b)}	37 ± 3	13 ± 2	0.50 ± 0.05
A-2 ^{b)}		18 ± 3	0.71 ± 0.09
B	95 ± 3	31 ± 4	0.33 ± 0.03
C	38 ± 5	12 ± 2	0.33 ± 0.05
D	45 ± 5	10 ± 2	0.23 ± 0.03

a) 移行率 = 漬物の放射性セシウム濃度 / 漬け床の放射性セシウム濃度

b) A-1, B, C, Dは漬け時間16時間、A-2は27時間

c) 放射性セシウム濃度の±は計数誤差、希釈率の±は標準偏差

表7 カリウム塩が放射性セシウムの移行率に及ぼす影響

塩の種類	移行率 ^{a)}
食塩	0.33 ± 0.04
カリウム塩	0.39 ± 0.05

a) 移行率の計算方法は表6と同じ

b) 移行率の±は標準偏差

c) 漬け時間は16時間

表8 品目の違いが放射性セシウムの移行率に及ぼす影響

品目	移行率 ^{a)}
キュウリ	0.28 ± 0.04
カブ ^{b)}	0.21 ± 0.03
ダイコン	0.20 ± 0.03

a) 移行率の計算方法は表6と同じ

b) カブの移行率は¹³⁷Csによる

c) 移行率の±は標準偏差

d) 漬け時間は16時間

B ぬか漬け加工と放射性セシウムの移行率

放射性セシウムは漬け床から漬物中に移行し、移行率は漬け時間16時間で0.50～0.23、27時間では0.71となった(表6)。

C カリウム塩と放射性セシウムの移行率

ぬか漬け加工時における放射性セシウムの移行に対してカリウムの影響はほぼ認められなかった(表7)。

D 品目の違いと放射性セシウムの移行率

供試した品目での放射性セシウムの移行率は0.20～0.28で、品目による差はほぼ認められなかった(表8)。

4 考察

(1) 小麦の加工と放射性セシウムの動態

子実中の放射性セシウム濃度は、品種の早晩生や播種期の違い及び播種法による違いから、フォールアウト時の生育量(草丈×莖数)との関連性が高く、植物体に付着した放射性セシウムの量が多いほど子実の放射性セシウム濃度が高まるものと考えられた³⁾。

製粉加工時には放射性セシウムはふすまに多く製粉(胚乳)には少ないことから、他の無機成分と同様に胚芽と外皮に局在するものと考えられた。Kimura *et al.*²⁾ は、ビューラーテストミルを使用した場合、放射性セシウムの加工係数が小麦粉、ふすまでそれぞれ0.4、2.1であると報告しており、製粉歩留が同程度であれば製粉方法によらず加工係

数も同程度となる。

(2) 大豆の加工と放射性セシウムの動態

大豆加工においては、吸水・加水、または副材料の添加により製品の放射性セシウム濃度は低下した⁴⁾。

またHachinohe *et al.*¹⁾ は豆腐、納豆、煮豆の加工係数はそれぞれ0.12、0.40、0.20で、加工時に浸漬水への溶出やおからとして除かれるほか、煮豆や豆腐では大豆の種皮が破れて放射性セシウムが溶出するため、溶出量がより多くなると報告している。これらから、大豆は一般に吸水後に加工されるため加工品の放射性セシウム濃度は原料大豆より低下し、さらに加工方法によって放射性セシウム濃度が低下することが期待される。

(3) 漬物加工における米ぬかからの放射性セシウムの移行

漬け時間が長くなることで移行率が高まることから、ぬか漬けの漬け床から漬物への放射性セシウムの移行は濃度差による拡散によると考えられた⁵⁾。

漬け床から漬物への移行率は0.50～0.20で、米ぬかから漬け床に加工する際の希釈効果を考慮すると、米ぬかからの移行率は0.3～0.1程度と考えられる。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人すかいらーくフードサイエンス研究所の研究助成により実施した。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 1) Hachinohe, M., Kimura, K., Kubo, Y., Tanji, K., Hamamatsu, S., Hagiwara, S., Nei, D., Kameya, H., Nakagawa, R., Matsukura, U., Todoriki, S. and Kawamoto, S. 2013. Distribution of Radioactive Cesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs) of the Contaminated Japanese Soybean cultivar during the preparation of Tofu, Natto, and Nimame (boiled soybean). *J. Food Prot.* 76: 1021-1026.
- 2) Kimura, K., Kameya, H., Nei, D., Kakihara, Y., Hagiwara, S., Okadome, H., Tanji, K., Todoriki, S., Matsukawa, U. and Kawamoto, S. 2012 Dynamics of Radioactive Cesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs) during the Milling of Contaminated Japanese Wheat Cultivars and during the Cooking of Udon Noodles Made from

Wheat Flour. Journal of Food Protection 75 : 1823-1828.

- 3) 丹治克男・関澤春仁・遠藤あかり. 2012. 小麦の製粉加工と放射性セシウムの動態. 東北農業研究 65 : 193-194.
- 4) 丹治克男・関澤春仁. 2012. 大豆の加工に伴う放射性セシウムの動態. 日本作物学会紀事 81 (別号2) : 16-17.
- 5) 丹治克男・関澤春仁・山下慎司. 2013. 漬け物加工における米ぬかからの放射性セシウムの移行率. 日本作物学会紀事 82 (別号1) : 244-245.
- 6) 財団法人原子力環境整備センター. 1994. 環境パラメータシリーズ4 食品の調理・加工による放射性核種の除去率.