報 文

ICP-OES と ICP-MS を用いた玄米中の無機元素分布と 洗米による濃度変化の解析

田上 恵子^{*1}, 内田 滋夫¹

水稻 (*Oryza sativa*) の穀粒中の Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs, Ba の濃度分布について, 精米による穀粒の重量変化 (歩留り) と元素濃度を比較すると共に, それぞれの歩留りのコメを洗浄したあとの濃度変化についても検討を行った. その結果, 糠層除去後 (歩留まり率約 92 %) の精白米部分への分布が穀粒全体の 50 % 未満であった元素は, Mg, Al, K, Ti, Mn, Fe, Rb, Sr, Cs, Ba であった. また, 安定 Cs と放射性 Cs の穀粒内分布は一致した. さらに精米した穀粒 (歩留まり率 92 ~ 96 %) を洗米したところ, 洗米に使用した白米に対し平均で 50 % 以上溶出したのは Mg, Al, K 及び Ba であった. 一方, Na と Ca は洗米によって濃度が上昇する結果が得られ, 水道水から穀粒に収着することが要因と考えられた.

1 はじめに

水稻 (*Oryza sativa*) は日本人の主食として重要な作物であり, 一般には玄米の糠層 (aleurone layer) を取り除いた精白米が食べられている. 玄米に対する糠層の除去の程度により, 半つき米 (玄米に対する重量変化率 95 ~ 96 %), 7 分つき米 (重量変化率 92 ~ 94 %), 精白米 (重量変化率 91 ~ 93 %) に分類することができるが, 精白米は糠層をほぼ除去した状態である. 日本食品標準成分表 2010¹⁾ には, Na, K, Ca, Mg, P, Fe, Zn, Cu, Mn, Se 及び Mo について, 玄米, 半つき米, 7 分つき米, 及び精白米の濃度が記載されているが, 多くの元素で糠層が多い状態の穀粒ほど濃度が高いことから, 糠層に蓄積していることがうかがえる. そこで元素濃度が低い精白米ではなく, 玄米を用いて無機元素組成を調べることで, 米の産地を判別する試みも行われている²⁾.

これまでに PIXE (particle induced X-ray emission) 分析やシンクロトロンを用いた蛍光 X 線分析などにより, いくつかの元素の玄米中の分布状況が明らかになってきている^{3)~6)}. また汚染元素である As, Cd などの分析も行われており^{5)~8)}, 特に As は Cu と同様の分布になっていることが知られている. しかしながら, 毒性の高い元素以外の微量元素濃度情報は限られているのが現状である. 以前著者らは, 土壌からの穀粒への元素の移行という観点から, 玄

米と白米の中の多量 ~ 微量元素濃度について報告を行った⁹⁾. また近年では, 東京電力福島第一原子力発電所の事故後, 環境中に残存する放射性物質である放射性セシウム (Cs) について, 玄米中の分布を報告した¹⁰⁾. 玄米中に取り込まれた放射性 Cs は糠層へ蓄積し, これを除去して精白米にすることで濃度が半分以下になることが分かっている.

しかしこれらの研究において, 糠層の除去の程度と元素濃度の関係については検討されていない. このような元素濃度情報を得ておくことで, 玄米から糠層を一定量除去した穀粒を摂取することによる, 人の必須元素の減少の程度を推定できるようになる. また, 放射性核種や重金属によって環境が汚染した場合に, 玄米を精米することによる汚染物質の除去の程度をおおよそ推定することできるようになることが期待される. そこで本報告では, Sr や Cs などの放射性核種関連元素や, 必須金属元素等の比較的濃度が高い金属元素に対して, 歩留り (加工後の米の玄米に対する重量比率, 精米率ともいう) と濃度の変化について分析した結果を報告する.

2 材料及び方法

2.1 試料及び前処理方法

実験に用いた玄米 (*Oryza sativa*) は, 2011 年度に福島県内で採取されたジャポニカ種 (短粒種) であり, 以前著者が放射性 Cs の分布について, 歩留りと濃度の関係を求めた試料である¹⁰⁾. 放射性物質測定用として, 下記に示す精米と糠を得るための前処理を行い保管してあった試料を, 元素濃度分析に供した. 前処理では, 小形精米器 (ケ

* E-mail: tagami.keiko@qst.go.jp

¹ 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所廃棄物技術開発研究チーム: 263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

ット科学研究所, パーレスト)を用いて精米を行った。精米方法は2種類行っており、一つは1回の加工で目的の歩留り(0.956, 0.936, 0.913, 0.871, 0.821)にする方法であり、もう一つは短時間の加工を複数回行って、徐々に目的の歩留りの試料を得る方法である。詳細については前報¹⁰⁾を参照いただきたいが、後者の方法では、約850 gを用い、すべての試料を30秒間精米して糠を回収するとともに、一部の精米試料を測定用に分取するステップを3回繰り返して、30秒間精米(歩留り0.976)、60秒間精米(歩留り0.956)、90秒間精米(歩留り0.946)を得た。その後、精米時間を延ばすことで、150秒間(歩留り0.932)、4分間(歩留り0.918)、8分間(歩留り0.888)、12分間精米(歩留り0.865)を作成し、それとともに糠を採取した。

精米の歩留り(P_e)は次式によって得た。

$$P_e = M_{pf} / M_{rf} \quad (1)$$

ここで M_{pf} は加工後の穀粒重量(g), M_{rf} は加工に用いた玄米の重量(g)である。加工を複数回繰り返す方法でも、加工前の供試重量が分かることから、上記の歩留りを導出することができる。

さらに、洗米による元素濃度変化を測定するために、1回の加工で目的の歩留りに達する方法で作成した精米を用いて検討を行った。米研ぎの方法は、通常行われているように、ボウル内で米に水道水を加えて軽く混ぜたのちに廃棄する操作を2回行ったのち、水を減らして米を研ぎ、さらに上澄みの水がほぼ透明になるまで、繰り返し水道水を変えながら洗浄を行った。この試料を水切りし、80℃にて恒量になるまで3日間乾燥させた。

2・2 元素濃度測定

材料となる玄米と、それぞれの加工方法により得られた試料(精米及び糠)、洗米後乾燥した試料を一部分取した。糠は粉状であったためそのまま用いたが、穀粒については、乳鉢を用いて粉碎し元素分析に供した。これらの粉碎試料について、約500 mg^{ひょう}秤量し、テフロン製分解容器に入れて、 HNO_3 を10 mL、 HF を4 mL加えた。80℃において10時間加熱して有機物分解後、マイクロウェーブ分解装置(CEM製, MARS5)で試料を全分解した。その後、試料容器をホットプレート上に移し、試料溶液を加熱・乾固した。試料に1 mLの HNO_3 と0.5 mLの H_2O_2 を添加して残渣を溶かしたのち、再度乾固し、最後に40% HNO_3 を1 mL加え20 mLポリエチレン製容器に移し、超純水を添加して全量20 mLとした。また、標準試料として中国の標準化国立研究センターが作成した灌木試料(GBW-07603)またはNISTが作成したトマトの葉試料(SRM-1573a)を使用した。試薬はすべて超高純度分析用(多摩

化学工業製, Tamapure AA-100)であり、希釈等に用いた超純水はMilli-Q水(>18MΩ)である。

得られた試料溶液を適宜希釈し、Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES, セイコーインスツルメンツ製, VISTA-PRO)を用いてNa, Mg, K, Ca, Mn, Znを定量し、Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS, アジレントテクノロジー製, 7500c)を用いてAl, Ti, Fe, Co, Ni, Cu, As, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs, Baの定量を行った。

2・3 データ処理

前処理方法で示したように、複数回加工を繰り返して目的の歩留り試料を得ていく場合、それぞれの段階で得られる糠は、表面から徐々に削り取られている部分であることから、糠中の元素の定量結果 C_i は、表面からの厚み T_i 層の値を示すことになる。したがって、除去された糠の平均的な濃度を得るためには、表層から T_i 層直前の T_{i-1} 層までの平均濃度 C_{i-1} を考慮しなければならない。この T_{i-1} 層の重量を W_{i-1} とし、 T_i 層の重量を W_i とするなら、玄米表面から糠 T_i 層を含む層の平均濃度 C は次式で表される。

$$C = (C_{i-1} \times W_{i-1} + C_i \times W_i) / (W_{i-1} + W_i) \quad (2)$$

段階的に加工を行い、異なる層の糠中の濃度が得られた場合には、式(2)を用いて、各歩留りの精米に対する糠中の元素平均濃度を求めた。

また、玄米を1.0とした場合の、精米後の元素の残存割合については、安定Csの結果を放射性Csの結果と比較するために、国際原子力機関(IAEA)が陸域及び淡水域の環境移行パラメーターをデータ収集したTecdoc 1616¹¹⁾に記載している、食品の調理加工後の残存割合(F_r)として導出した。 F_r は次式で表される。

$$F_r = A_{pf} / A_{rf} \quad (3)$$

ここで、 A_{pf} は調理・加工後の放射性核種の総量、 A_{rf} は調理加工前の試料の放射性核種の総量である。これを今回測定している元素に当てはめ、 TC_{pf} を精米後の穀粒試料中のある元素の総量、 TC_{rf} は玄米中の元素総量と考えると、安定元素の F_r は次式で表される。

$$F_r = TC_{pf} / TC_{rf} \quad (4)$$

この式を満たすためには、以下の計算が必要である。

$$TC_{pf} = C_{pf} \times M_{pf} \quad (5)$$

$$TC_{rf} = C_{rf} \times M_{rf} \quad (6)$$

Table 1 Concentrations of 19 elements in brown rice, half-milled rice and milled rice as well as their associated bran parts (dry weight basis) in two sub-samples (Run-1 and 2)

		Brown rice		Half-milled rice (Polishing rate: 0.95–0.96)				Milled rice (Polishing rate: 0.91–0.93)			
		Grain		Grain		Bran		Grain		Bran	
		Run-1	Run-2	Run-1	Run-2	Run-1	Run-2	Run-1	Run-2	Run-1	Run-2
Weight ratio		1.00	1.00	0.959	0.956	0.044	0.044	0.918	0.913	0.082	0.087
<i>Element</i>											
Na	mg kg ⁻¹	12.0	12.5	8.1	8.5	65	75	6.5	6.6	59	64
Mg	mg kg ⁻¹	1540	1590	900	890	14500	14700	480	460	14200	14400
Al	mg kg ⁻¹	3.1	3.3	1.7	1.5	44	49	1.0	0.6	35	39
K	mg kg ⁻¹	2830	3060	2040	2030	26600	29700	1300	1120	27700	26600
Ca	mg kg ⁻¹	100	100	75	75	620	622	62	63	568	563
Ti	mg kg ⁻¹	1.21	1.20	0.69	0.53	11.1	10.8	0.43	0.25	10.7	9.0
Mn	mg kg ⁻¹	21.2	21.4	12.7	12.6	189	185	8.5	9.1	164	166
Fe	mg kg ⁻¹	12.3	13.1	9.7	10.2	123	128	7.4	5.3	119	124
Co	mg kg ⁻¹	0.014	0.014	0.015	0.014	0.098	0.087	0.019	0.013	0.068	0.061
Ni	mg kg ⁻¹	0.32	0.28	0.44	0.49	2.3	1.1	0.53	0.40	2.5	1.3
Cu	mg kg ⁻¹	1.9	1.7	1.7	1.6	4.2	4.0	1.6	1.5	5.1	5.5
Zn	mg kg ⁻¹	24	24	21	20	72	62	18	20	92	84
As	mg kg ⁻¹	0.21	0.22	0.15	0.15	1.02	0.94	0.13	0.14	0.81	0.94
Rb	mg kg ⁻¹	9.6	10.1	7.0	6.7	81	81	4.2	3.9	86	90
Sr	mg kg ⁻¹	0.47	0.49	0.30	0.28	5.1	5.4	0.18	0.16	4.2	4.3
Mo	mg kg ⁻¹	0.96	1.01	0.98	0.95	0.77	0.63	0.96	0.96	0.98	0.78
Cd	mg kg ⁻¹	0.022	0.024	0.022	0.023	0.043	0.051	0.026	0.022	0.035	0.031
Cs	mg kg ⁻¹	0.027	0.028	0.023	0.022	0.20	0.20	0.019	0.014	0.21	0.22
Ba	mg kg ⁻¹	1.19	1.32	0.73	0.74	15.1	15.7	0.53	0.30	11.4	12.5

ここで, C_{pt} は精米へ加工後の穀粒試料中の元素濃度, C_{rf} は玄米中の元素濃度である. 調理加工による重量の変化割合, すなわち歩留りを式(2)により求めておくと, F_r は次のように記述することができる.

$$F_r = C_{\text{pt}} / C_{\text{rf}} \times P_c \quad (7)$$

3 結果及び考察

3・1 玄米と精米及び糠中の元素濃度

用いた玄米試料と, その半つき米及び精白米中元素濃度を Table 1 に示す. また, 得られた糠試料中の元素濃度も同表に記した. 2 種類の前処理について, Run-1 及び Run-2 として結果を得ている. 穀粒と糠を比較すると, Mo と Cd 以外の元素は糠中の濃度が 4 倍以上高いことが分かる. 穀粒中の濃度に着目すると, 玄米に比べて精白米中の濃度は減少する傾向があったが, Co, Ni, Mo 及び Cd は濃度変化がほとんどなかった. Mo については, 日本食品標準成分表 2010¹⁾ からも精米によって濃度が変化しないことが確認できた.

一方, 糠については, Al, Co, Sr, Cd 及び Ba は半つき米作成時に得られた糠中の元素濃度が, 精白米作成時に得られた糠中濃度よりも 1.3~1.4 倍程度高くなったことから, これらの元素が表層に近い糠中により多く存在することが示唆された. しかし, 濃度がほとんど変わらない元素

(Na, Mg, K, Fe 等) や, 逆に表層の方が低い元素 (Cu, Zn, Mo) もあったことから, 元素により穀粒中の濃度分布は異なっており, 一様ではないことが示された. Tanaka ら¹²⁾ は X 線マイクロアナライザーを用いて, 玄米の表面の糠層から胚乳部 (白米部) にかけての K と Mg の強度変化を測定しているが, その結果は, 糠層中においてはこれらの元素がほぼ一様に分布していたことを示している. また Liang ら¹³⁾ は中国産の短粒, 中粒, 長粒種を用い, 歩留りを変えて穀粒の Zn 濃度を測定し, 糠層の表層で濃度が低くなる傾向を報告している. これらの結果から, 日本産の玄米穀粒中の K, Mg, Zn の玄米中分布状況は, 海外の品種と同様であったといえる.

3・2 玄米に対する精米中の元素残存割合 (F_r)

玄米中の総量に比べて, 加工後の穀粒中に残存する元素量の割合 (F_r) について, 歩留りに対する変化を Fig. 1 から Fig. 4 に示した. 精白米 (歩留まり 0.92) への分布が全体の 50 % 未満であった元素は, Mg, Al, K, Ti, Mn, Fe, Rb, Sr, Cs, Ba であった.

Fig. 1 には, アルカリ金属及びアルカリ土類金属の結果を示したが, 減少の傾向はアルカリ金属もアルカリ土類金属も類似していることが分かる. しかしながら, アルカリ金属元素の中では Na の減少の程度が, また, アルカリ土類金属元素の中では Ca の減少程度が他の同族元素に比べて低いことが分かる. 比較のために日本食品標準成分表

Fig. 1 Retention factors (F_r) of alkaline elements (A) and alkaline earth elements (B) plotted against the polishing rates of rice grains

2010¹⁾の精白米(歩留り 0.92)について、Na と K 及び Ca と Mg の濃度データから式(7)を用いて F_r を求めたところ、Na の 0.9 に対し K は 0.4、Ca の 0.5 に対し Mg は 0.2 となり、本結果と同様の結果となることが分かった。

アルカリ金属元素間では、Rb と K の F_r がほぼ一致した。Cs は必ずしも一致していないが、大きな違いはないので、K や Rb の植物中の分布は、Cs の分布を推定するための指標にはなるかもしれない。さらに Cs については、以前著者が放射性 Cs について測定した値¹⁰⁾と比較し Fig. 2 に示した。この結果から、放射性 Cs と安定 Cs の玄米穀粒内分布が良く一致している (t 検定による相関係数 = 0.99, $p < 0.0001$) ことが分かった。したがって、将来的に放射性 Cs の植物体中挙動を知る上で、安定 Cs について情報を収集しておくことが、より効果的であると考えられる。

アルカリ土類金属元素間では、前述したように Ca 以外は同程度の減少率であった。この結果から、今回測定をしていない同族元素のラジウム (Ra) の分布について推定を試みた。Ra はすべて放射性核種であり、²²⁶Ra はウラン系

Fig. 2 Retention factors (F_r) of stable Cs and radioactive ¹³⁷Cs plotted against the polishing rates of rice grains

列、²²⁴Ra はトリウム系列であるが、これらの核種の子孫核種の半減期が短いことから、被ばく線量に寄与すると考えられる。そのため Ra 濃度を低減させることは重要である。以前著者は Ra の土壌から植物への移行の程度が Ba と類似していることを示した¹⁴⁾。Ba と Ra の化学的挙動が類似していることから、植物体内や穀粒内でも同様の分布を示すと期待される。すなわち、放射性核種である Ra の経口摂取を減らすためには、糠層を除去することが効果的である可能性があるといえる。しかしながら、これを証明するためには実測が不可欠であることから、今後さらに検討する必要がある。

Fig. 3 には、Al、Ti、Mn 及び Fe の結果を示したが、これらの元素の F_r は歩留まり 0.93 ~ 0.91 で 0.2 ~ 0.4 であった。この結果から、これらの元素がアルカリ金属やアルカリ土類金属元素と同様に、糠層に多く存在していることを示している。一方、Co、Ni、Cu、Zn については、歩留まり 0.93 ~ 0.91 の場合に F_r は 0.7 ~ 0.8 であり、糠層を除去しても多くが残ることが分かった。Cu について、Xu ら¹⁵⁾は稲への毒性を調べる中で玄米中の分析を行っており、60 % が白米中に分布していたことを示しているが、本研究の結果も同様であった。特に Xu ら¹⁵⁾は胚芽に蓄積していたことを示している。本研究では胚芽を分別していないため比較することはできないが、白米中への分布の程度が類似していたことを考慮すると、Cu の分布は胚芽中で高い可能性がある。

As、Mo 及び Cd の結果を Fig. 4 に示す。また、As は Cu の分布と類似しているという報告がある⁷⁾ことから、比較のために Cu も再掲した。Meharg ら⁵⁾はシンクロトロン蛍光 X 線分析法で玄米を分析し、As の濃度が糠層で高い傾向にあり、Cu、Fe、Mn 及び Zn も同様の分布をしていたが、

Fig. 3 Retention factors (F_r) of Al, Ti, Mn and Fe (A) and Co, Ni, Cu and Zn (B) plotted against the polishing rates of rice grains

Cd と Ni の分布は異なっていたことを報告している。今回の分析でも Cd と As の分布の違いが分かった。しかし F_r の変化の程度から考えると、As は精白米（歩留り 0.91～0.93）において F_r が 0.6 程度に対し、Fe と Mn は 0.3～0.4 であったことから、必ずしもこれらの元素が As と同様に分布しているとは言えないことが分かった。ただし、著者らの分析は日本で栽培されているジャポニカ種のうるち米であるのに対し、Meharg ら⁵⁾はバングラディッシュ産の長粒種の玄米を使用していることも差につながった可能性がある。なお、Mo、Cd は糠層に多く分布している傾向は見られなかった。ほぼ玄米中に一様に分布していることから、Mo と Cd については糠層を除去しても濃度減少が望めない元素であることが分かった。

3.3 洗米による元素濃度変化

一般に米を炊飯する前に米研ぎを行う。そこで通常行うように米研ぎ後の水が濁らなくなるまで洗米し、その際の

Fig. 4 Retention factors (F_r) of As, Cu, Mo and Cd plotted against the polishing rates of rice grains

Fig. 5 Decreases of the element concentrations by washing brown rice and milled rice (polishing rate: 0.91–0.96)

Element name with an * shows calculated data using standard tables of food composition in Japan¹⁾.

元素濃度について測定を行った。結果を Fig. 5 に示す。比較のために、日本食品標準成分表 2010¹⁾に記載されている値を用いて、炊飯後のめしと炊飯前の穀粒中の濃度比較を行った結果についても示した（元素名に*）。その結果、玄

米を洗浄してもほとんどの元素は濃度が変化しないが、Al は減少する傾向が見られた。Fe については、日本食品標準成分表によると減少していたが、本研究では減少は見られず、溶出は少ないものと考えられた。放射性 Cs は安定 Cs と同様に、溶出する傾向は見られなかった。興味深いことに、Ca は濃度が上昇したことが分かった。Na についても本調査では濃度上昇が顕著ではないが、日本食品標準成分表では濃度が上昇していた。

さらに半つき米、七分付き米、精白米についても洗浄し、濃度を洗浄前と比較したところ、変化がほとんどない元素もあったが、Mg, Al, K, Ti, Fe, Rb, Cs 及び Ba については、濃度が減少した（平均で 50 % 以上溶出したのは Mg, Al, K 及び Ba）。これらの元素は F_r が 0.5 未満の元素とほぼ一致（Sr を除く）しており、糠層中の濃度が高いため、糠粉末が少量精米に残存していたことが影響していた可能性が考えられる。また、米研ぎによって穀粒表面同士が擦れ合うことで、さらに糠層が除去されて洗い流されていることも考えられた。一方、一般に汚染等で問題になる元素についてはほとんど減少しなかったことから、洗米により減少を期待するのは難しいといえる。なお、Na と Ca については、玄米の場合と同様に濃度が上昇する結果が得られた。

そこで、米研ぎに用いた水道水を ICP-OES により測定したところ、Na と Ca 濃度はそれぞれ 17 mg L^{-1} と 20 mg L^{-1} であり、Mg (3.8 mg L^{-1}) や K (2.6 mg L^{-1}) に比べて高かった。玄米中の元素濃度測定結果 (Table 1) と比較すると、水道水中の Mg や K 濃度は玄米中濃度のそれぞれ約 1/400 と 1/1100 であるのに対し、Na と Ca の水道水中濃度は玄米の約 1.4 倍と 1/5 と近いことから、米研ぎの過程で水道水と接触している間に付加されたことで、相対的に濃度を高めた可能性が示唆された。玄米表面にはタンパク質や脂質など疎水性の成分が多く含まれることから¹⁶⁾、イオン交換反応で説明することは難しく、したがって物理的な吸着が濃度上昇に影響していたと考えられるが、詳細については検討が必要であろう。

以上の結果から、可食部中の元素濃度が低い場合でも、それを洗浄したり調理する過程で使用する水中の濃度が高い場合には、元素が付加される可能性があることが示唆された。

4 ま と め

玄米から歩留りを変えて精米する過程において元素濃度がどのように変化するのか分析を行った。その結果、今回測定対象とした 19 元素のうち、Mo や Cd は玄米中にはほぼ一様に分布しており、糠層を除去しても濃度が顕著に減少しないことが分かった。また、歩留りと元素の残存割合 F_r は元素ごとに異なる特徴が見られた。アルカリ金属 (Na,

K, Rb, Cs), アルカリ土類金属元素 (Mg, Ca, Sr, Ba) については、歩留りが低くなるとともに F_r が減少し、特に糠層の除去で減少が大きい傾向は同じであったが、Na や Ca はその他の同族元素に比べて減少の程度が低い結果であった。なお、安定 Cs と放射性 Cs については F_r 値が一致した。Al, Ti, Mn 及び Fe はアルカリ金属やアルカリ土類金属元素と同様の減少傾向が見られたが、Co, Ni, Cu, Zn 及び As については、減少の程度が低く、白米よりも糠層に高濃度で分布するものの、糠層を除去することにより濃度低減化を行う場合には、あまり効果的に減少させることができないことが分かった。ただし、本調査での測定は 1 種類の玄米試料を用いて行ったものである。残存割合は品種、産地、気候条件等に影響される可能性があることから、 F_r の変動の程度については、今後検討が必要であろう。

さらに、洗米による元素濃度変化を調べた。玄米では Al が減少したものの、ほとんどの元素では洗米によって濃度が減少しなかった。一方で、Na や Ca は逆に濃度上昇が見られた。これは精米した穀粒の洗米でも同様であった。洗米に用いる水道水の測定結果から、これらの元素が水道水から付加されたことが示唆された。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人鉄鋼環境基金の環境研究助成 (2015 年度) 及び資源エネルギー庁放射性廃棄物共通技術開発調査等委託費の予算で行われた。また、本研究の元素分析に協力していただいた東京ニュークリア・サービス株式会社の鍵谷茂雄氏と白坂純一氏に謝意を表します。

文 献

- 1) 医歯薬出版編: “日本食品成分表”, 文部科学省科学技術・学術審議会資源調査分科会報告 日本食品標準成分表 2010, p.31 (2011), (医歯薬出版株式会社).
- 2) 安井明美, 進藤久美子: 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **49**, 405 (2000).
- 3) H. Tsukada, H. Hasegawa, S. Hisamatsu, S. Yamasaki: *Environ. Pollut.*, **117**, 403 (2002).
- 4) S. Ogiyama, K. Tagami, S. Uchida: *Nucl. Inst. And Meth. B*, **266**, 362 (2008).
- 5) A. A. Meharg, E. Lombi, P. N. Williams, K. G. Scheckel, J. Feldmann, A. Raab, Y. G. Zhu, R. Islam: *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 1051 (2008).
- 6) E. Lombi, K. G. Scheckel, J. Pallon, A. M. Carey, Y. G. Zhu, A. A. Meharg: *New Phytologist*, **184**, 193 (2009).
- 7) E. Smith, I. Kempson, A. L. Juhasz, J. Weber, W. M. Skinner, M. Gräfe: *Chemosphere*, **76**, 529 (2009).
- 8) J. Liu, M. Qian, G. Cai, J. Yang, Q. Zhu: *J. Hazard. Mater.*, **143**, 443 (2007).
- 9) S. Uchida, K. Tagami, I. Hirai: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 779 (2007).
- 10) 田上恵子, 内田滋夫: *Radioisotopes*, **61**, 223 (2012).
- 11) International Atomic Energy Agency: “Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial

- and Freshwater Environments for Radiological Assessments*", IAEA-TECDOC-1616, (2009), (IAEA, Vienna).
- 12) K. Tanaka, T. Yoshida, Z. Kasai : *Soil Sci. Plant Nutr.*, **20**, 87 (1973).
- 13) J. Liang, Z. Li, K. Tsuji, K. Nakano, M. J. R. Nout, R. J. Hamer : *J. Cereal Sci.*, **48**, 83 (2008).
- 14) K. Tagami, S. Uchida : *Chemosphere*, **77**, 105 (2009).
- 15) J. Xu, L. Yang, Z. Wang, G. Dong, J. Huang, Y. Wang : *Chemosphere*, **62**, 602 (2006).
- 16) 大西真理子, 小川宣子, 山中南つみ, 庄司一郎 : 日本家政学会誌, **48**, 303 (1997).

Distributions of Inorganic Elements in Brown Rice Determined by ICP-OES and ICP-MS, and Analysis of Their Concentration Changes by Washing

Keiko TAGAMI^{*1} and Shigeo UCHIDA¹

^{*} E-mail : tagami.keiko@qst.go.jp

¹ Biospheric Assessment for Waste Disposal Team, National Institute of Radiological Sciences, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555

(Received April 24, 2016; Accepted May 31, 2016)

Rice (*Oryza sativa*) is the most important staple food in Japan, therefore, concentrations of essential and hazardous elements and their distributions in rice grains are of great concern. In this study, we measured concentrations of 19 elements in rice grains (*i.e.* Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs and Ba) by changing the polishing rates. We then compared the element amounts remained in rice grain after polishing with those in brown rice (total amounts) to provide distribution information of these elements in rice grains. The results showed that in milled rice (polishing rate: *ca.* 92 %, after removal of bran), less than 50 % of the total amount in brown rice that remained contained Mg, Al, K, Ti, Mn, Fe, Rb, Sr, Cs and Ba. These elements were highly concentrated in bran compared to albumen. Alkaline and alkaline earth elements distributed similarly in rice grains; it was also found that stable Cs and ¹³⁷Cs distributions were completely the same. Washing the milled grain is a general step to cook rice; thus we washed the milled rice (polishing rates: 92–96 %) and compared the concentration change. More than 50 % of the initial milled rice concentration that decreased involved Mg, Al, K and Ba, while increments were found for Na and Ca. This was possibly due to a high concentration in the tap water used for washing the rice grains.

Keywords: rice; polishing rate; element distribution; cesium isotopes; washing effect.