

牛の放射能汚染問題

佐藤 至

1. 放射性セシウムについて

原子力発電所では主に²³⁵Uの核分裂によってエネルギーを発生させ、発電している(元素記号の左肩の数字は質量数で、核内の陽子と中性子の数を表している)。核分裂に伴って様々な核分裂生成物が誕生するが、質量数が95前後と140前後のものが多く、その多くは放射性である。生成量の多さや半減期の長さから、⁹⁰Sr(半減期28.8年)、¹³¹I(同8日)、¹³⁷Cs(同30年)などが保健物理学的に特に重要な核種である。一方、原子炉内では核分裂に伴って発生した中性子が他の原子の原子核に取り込まれることによって新たな放射性物質が生まれる。主なものは、⁶⁰Co、⁵⁹Fe、⁵⁴Mnなどで、²³⁹Puなどの超ウラン元素も中性子の捕獲によって誕生する。

福島第一原発事故では、このようにして誕生した様々な放射性物質のうち比較的揮発性の高いものが多く放出された。大気への放出量については、東京電力や原子力安全保安院なども推定値を公表しているが、国連科学委員会では表1の値を示している[1]。このうち¹³³Xeは、放出量は飛び抜けて多いものの、不活性ガスであるため地表に沈着することはない。テルルやヨウ素はいずれも半減期が短く、事故後の初期被曝

には寄与するものの、長期的な被曝や汚染の観点からは無視することができる。このため、環境の放射能汚染源として長期的に問題になるのは、半減期が比較的長く放出量も多かった¹³⁴Csと¹³⁷Csである。なお、両核種は同じ元素であるため、環境動態や体内動態は同一である。

放射性セシウムの体内分布や動態については古くから研究されてきた。それによると、放射性セシウムは消化管吸収率が非常に高く、体内では比較的均等に分布するものの筋肉での蓄積が最も高く、成人では約100日の生物学的半減期で滞在し、主に尿を介して排泄されることが明らかとなっている[2]。しかし、これらの知見は主に実験動物や数少ない人のデータに基づくもので、牛に関する情報は極めて少ない。

2. 牛の放射能汚染と行政的対応

福島第一原発事故を受けて厚生労働省は、3月17日に放射性ヨウ素、放射性セシウム、ウランおよび超ウラン元素について食品衛生法第6条による暫定規制値を設定した。放射性セシウムの規制値は、水、牛乳および乳製品は200Bq/kg、牛肉を含むその他の食品は500Bq/kgとされた。その後食品安全委員会のリスク評価を受けて、2012年4月1日に食品衛生法第11条に基づく基準が定められた。新基準は放射性セシウム(¹³⁴Cs、¹³⁷Cs)だけが対象で、水と茶は10Bq/kg、乳、乳飲料および乳児用食品は50Bq/kg、その他の食品は100Bq/kgである。

暫定規制値の設定以降各自治体において食品の検査が行われるようになった。農林水産省では事故後まもなく「原子力発電所事故を踏まえた家畜の飼養管理について」を発出して注意を喚起するとともに、牛用粗飼料中の放射性セシウムについて暫定許容値を300Bq/kgに設定して家畜の汚染防止を図っていたも

表1. 国連科学委員会による大気放出量の推定値

核種	半減期	放出量 (PBq)
¹³² Te	3.2 日	29
¹³¹ I	8.0 日	120
¹³² I	2.3 時間	29
¹³³ I	21 時間	9.6
¹³³ Xe	5.2 日	7300
¹³⁴ Cs	2.1 年	9.0
¹³⁷ Cs	30 年	8.8

の、7月に福島県産の牛から基準値を大幅に超える放射性セシウムが検出され、大きな問題となった。これは、事故当時屋外に置かれていて汚染した稲わらを給与したことが原因であった。一連の汚染事故を受けて飼料全般に対して暫定許容値が設定されるとともに、畜産農家に対する指導の徹底が図られた。なお、牛用飼料の暫定許容値は2012年2月3日に100Bq/kgに強化されている（表2）。

一方、福島県産等の牛で基準値の超過が起こったことから、7月19日に福島県に対して牛の出荷制限が指示され、引き続き宮城、岩手および栃木の3県にも出荷制限指示が出された。その後8月19日には宮城県、25日には残り3県の制限が緩和され、「県の定める出荷・検査方針に基づき管理される牛」については出荷可能となり、上記の4県を含む東北および関東の多くの都県では、出荷された牛の全頭検査を行って畜産物の安全・安心の確保を図った。表3はその検査結果を示しているが、2011年度には157頭が基準値を超過したものの、翌年は2頭まで減少し、2013年度以降は超過事例は発生していない。このような状況を受けて、福島県、宮城県、岩手県および栃木県に課されていた出荷制限は、2019年3月28日に一部を除き解除された。

表2. 家畜飼料における放射性セシウムの暫定許容値 (Bq/kg)

	2011.4.14~	2011.8.1~	2012.2.3~	2012.4.1~
牛用	300 ¹⁾	300	100	←
馬用		300	←	100
豚用		300	←	80
家禽用		300	←	160

粗飼料は水分80%換算、他は製品重量あたり。ただし、1)については粗飼料のみが対象で実重量あたり

表3. と畜場における牛の検査結果

年度	月	検査件数	~100Bq/kg	100~500	500~	超過率
2011	4~3	78,095	77,043	895	157*	0.20%
2012	4~9	61,132	61,128	4	0	0%
	10~3	92,106	92,104	2*	0	0.002%
2013	4~12	163,767	163,767	0	0	0%

国の放射性物質検査計画による対象17都県の結果、牛肉については2012年9月まで暫定規制値を適用（*基準超過）

3. 飼料から牛への放射性セシウムの移行

生体を一つのコンパートメントとみなし、毎日一定量の放射性物質を摂取する状況を仮定すると、体内の放射性物質量は徐々に増加し、やがて一定量で飽和する。飽和量は「1日摂取量 (Bq) × 生物学的半減期 (日) × 1.44」で求められ、摂取開始後3半減期で飽和量の約90%、5半減期で約97%に達する。放射性物質で汚染された動物に清浄飼料を給与すると、体内の放射性物質は半減期に従って減少し、1半減期で1/2、2半減期で1/4に低下する。農林水産省の啓発資料「放射性物質の基礎知識」によると、牛（筋肉）における放射性セシウムの生物学的半減期は、未経産牛で50~60日、雄牛で30~40日、子牛で25~30日とされており、人よりも排泄が速い。個体の生物学的半減期を50日と仮定し、毎日1Bqの放射性セシウムを摂取して250日目に清浄飼料に切り替えたと仮定すると、体内の放射性セシウム量は図1のように変化する。

一定の汚染飼料を長期間摂取し、汚染が平衡に達した後の畜産物中の放射性物質濃度は、移行係数を用いて次のように記述される。

$$\text{畜産物中濃度 (Bq/kg)} = \text{移行係数} \times \text{飼料中濃度 (Bq/kg)} \times \text{飼料摂取量 (kg/日)}$$

移行係数については、国際原子力機関 [3] など複数の機関が数値を公表しており、原子力環境整備・資金管理センターではこれまで報告された値を取りまと

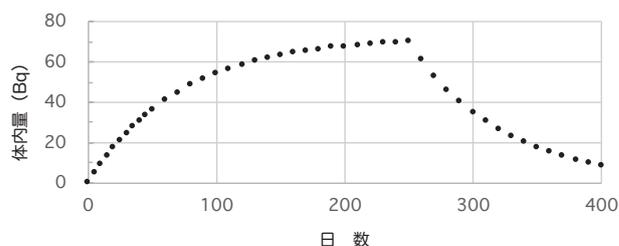


図1 生物学的半減期を50日と仮定し、250日間毎日1Bq摂取した場合の体内量の変化 (250日以降は清浄飼料)

めて「環境パラメータシリーズ」として公開している [4]。移行係数の値はかなりばらつきが大きいですが、農林水産省は牛肉に対する移行係数として 0.038、牛乳に対する移行係数として 0.0046 を採用しており、これに基づいて飼料の暫定許容値を設定した。飼料摂取量を乳牛で 64kg/日、肉牛で 21kg/日として、基準値上限の 100Bq/kg の飼料を給与したとしても、牛肉で 80Bq/kg、牛乳で 29Bq/kg となり、食品の基準値を超過しないことが予想される [5]。

牛肉：0.038 × 100 × 21 = 80Bq/kg

牛乳：0.0046 × 100 × 64 = 29Bq/kg

4. 牛肉の検査部位に関する検討

基準に合致した飼料を給与することによって基準を満たした畜産物を生産することが可能であるが、多くのと畜場において牛肉の放射能汚染検査が行われている。牛肉の検査は、採取の容易さと商品価値の毀損防止のため、一般に頸部断面の筋肉（ネック）を用いて行われている（他の部位を用いていると畜場もある）。体内の放射性セシウム濃度が筋肉で最も高いことはよく知られており、様々な筋肉部位の放射性セシウム濃度が均一であるか、あるいはネックで最も高ければ、この検査方法に問題はない。しかし、ネックよりも放射性セシウム濃度が高い部位があれば、ネックの検査で合格であっても基準値を超える牛肉が流通するおそれがあり、注意が必要である。

表 4 は、牛肉各部位の放射性セシウム濃度をネックを基準とした相対値で示している。ロース、ヒレ、モモの放射性セシウム濃度は大部分の個体でネックよりも高く、統計的有意差も確認されたが、バラはネックよりも低かった。筋肉間の放射性セシウム濃度の違いには脂肪含有量の差が関係していると思われるが [6]、食品として評価する場合には脂肪も含めて考えなければならない。

表 4. 放射性セシウム濃度のネックに対する相対値

採取日	個体数	ロース	ヒレ	モモ	バラ	文献
2011 年 9 月	8	1.32 ± 0.18 *	1.30 ± 0.14 *	1.36 ± 0.16 *	0.79 ± 0.12 *	[7]
2013 年 10 月	19	-	1.20 ± 0.11 *	1.17 ± 0.11 *	-	[8]
2014 年 5 月	4	1.02 ± 0.08	1.19 ± 0.07 *	1.06 ± 0.05 *	0.92 ± 0.09 *	[9]
2014 年 9 月	10	1.17 ± 0.05 *	1.32 ± 0.08 *	1.26 ± 0.08 *	-	[10]
2014 年 12 月	4	1.20 ± 0.11 *	1.36 ± 0.17 *	1.23 ± 0.12 *	-	[9]
全 体	45	1.20 ± 0.15 *	1.26 ± 0.13 *	1.22 ± 0.14 *		
99% 上側許容限界		1.66	1.62	1.62		

平均 ± 標準偏差, * : p<0.05

この調査においてネックに対する濃度比の最大値は 1.57 であり、全個体のデータを合わせて計算した 99% 上側許容限界は 1.66 に達した。したがって、ネックでの検査で 60Bq/kg を超えた場合には他の部位で 100Bq/kg を超える可能性を排除できず、モモなどを用いて再検査することが望ましい。なお、99% 上側許容限界とは、将来の観測値の 99% 以上がこの値以下であることを示している。

5. 生きている牛の汚染検査

と殺、解体後の検査で放射性セシウムの基準を超過したことが判明すると、その牛が廃棄処分となって経済的損害が生じるのみでなく、その産地全体に対して風評被害が生じるおそれがあることから、出荷前に牛の汚染状況を確認する手段が必要である。このために、福島県と宮城県畜産試験場ではそれぞれ別途に大型シンチレーション検出器を用いた体外計測法を開発し、実用化している。福島県の報告では推定誤差は概ね 20% 以内に収まっており、スクリーニングには十分な精度である [11]。しかし、この方法では牛をその装置のある場所まで運んでいくか、あるいはその装置を農家まで持っていかなければならず、気軽に測定できるものではない。

血液中の放射性セシウム濃度は体内汚染レベルを反映する。高瀬らは、筋肉と血液の放射性セシウム濃度は高い相関を示し (r=0.97)、その比はネックで 23 であったと報告している [12]。福田らは 88 頭の分析結果から放射性セシウムの筋肉（複数部位）：血液比を 22 と [13]、佐藤らはもっとも濃度の高かった筋肉部位と血液との比を 22.7 と報告している（図 2） [14]。これらの結果から牛の筋肉中放射性セシウム濃度の最確値は血中濃度の 23 倍とみなして間違いないであろう。しかし、血液の放射性セシウム濃度は筋肉の 1/20 程度であるため、出荷可能であることを確認す

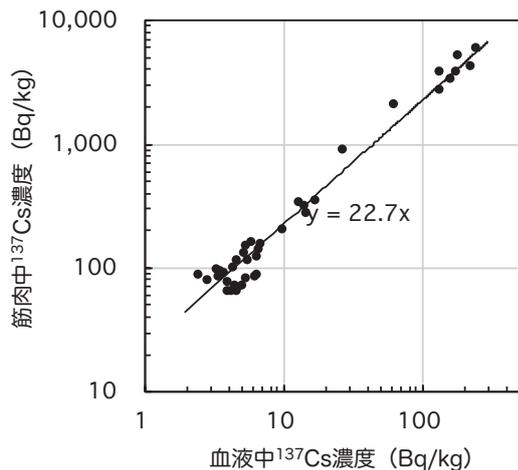


図2 血液中¹³⁷Cs濃度と筋肉中¹³⁷Cs濃度との関係

るためには最低でも 2Bq/kg 程度の検出感度が必要である。装置の性能にもよるが、50mLの血液（1本のシリンジで採血できる最大量）でこの感度を達成するためには6時間程度の測定が必要である。試料が1Lあれば10～20分程度で測定可能であるが、1Lの採血は現実的ではない。また、採血するためには獣医師に依頼する必要がある、この方法にも困難が伴う。

6. 尿による生体検査法

セシウムは主に尿に排泄されるため、人では尿による内部被曝評価が行われている。尿は農家自身による採取が可能で、かつ大量に採取できるため、牛の生体検査のための分析試料として有望である。しかし、尿中セシウム濃度と血中セシウム濃度の相関は低く、単純な換算では精度の高い推定は困難である。これは、腎臓における尿の濃縮度が一定ではないことが原因であるため、なんらかの方法によって濃縮度を補正する必要がある。

佐藤らは¹³⁷Csの濃縮率（尿中濃度/血中濃度）と尿中のクレアチニン、比重、導電率、カリウム、⁴⁰K、ナトリウムおよびpHとの関係を検討した結果、クレアチニン、比重、導電率、カリウムおよび⁴⁰Kが補正因子として利用可能であった。この中で最も相関が高くかつ簡便に測定できたのは比重であり、これによる補正を加えた血中放射性セシウム濃度の推定式は以下ようになった。

$$\text{血中 Cs} = \text{尿中 Cs} / (\text{比重} - 1) / 329$$

この式による推定値と実測値との関係は $y = x$ の直線上に収束し（図3）、推定値の平均誤差率は16.9%と、概ね実用的な精度が達成できた [15]。筋肉と血液の放射性セシウムの濃度比を23と仮定すると、血

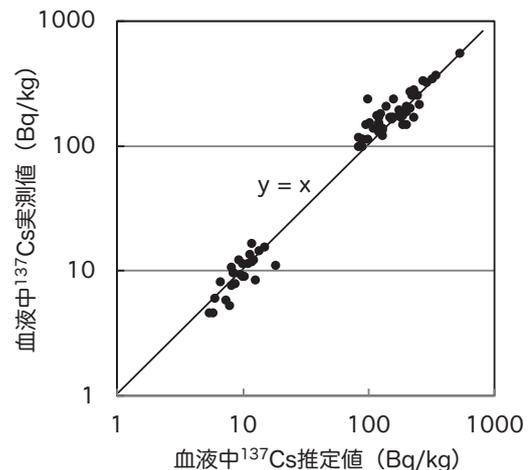


図3 血液中放射性セシウム濃度の実測値と、尿による推定値との関係

中放射性セシウム濃度は概ね4Bq/kg未満である必要があり、推定の誤差を考慮すると尿による血中濃度の推定値が2Bq/kg未満であれば、その牛が基準値を超過するおそれはないであろう。先に述べたとおり尿は大量採取が容易で、さらに血液よりも放射性セシウム濃度が高いために短時間でより高精度の測定が可能である（我々が使っている装置の場合、1Lの尿があれば10分の測定で可能）。このため本検査法は、避難指示が解除された地域で畜産を再開した農家などにおいて、牛の汚染状況をモニターするために有用であろう。

7. 牛の除染

畜産物中の放射性セシウム濃度は、食品としての基準を遵守するのみではなく、合理的に達成しうる限り低くすることが望ましい。このためには汚染レベルの低い飼料を給与するのが基本であり、土壌から飼料作物への放射性セシウムの移行を低下させる方策について種々研究され、県による指導も行われているが、全ての地域で汚染ゼロの飼料を生産することは難しい。それでは、飼料に含まれる放射性セシウムの吸収を少しでも抑制し、あるいは体内に取り込まれた放射性セシウムの排泄を促進する方法はないものであろうか。

実はこのような研究も古くから行われており、成書も出版されている [16, 17]。放射性セシウムの吸収抑制・排泄促進剤として最も有効なものはプルシアンブルーであり、人用の医薬品としても承認されている。1987年にブラジルのゴイアニアで起こった汚染事故の際にも使われたほか、チェルノブイリ事故の後にはロシアやベラルーシで多くの牛に給与されて効果をあげた [18]。しかし、プルシアンブルーは高価であり、

日本では動物用医薬品としても飼料添加物としても承認されていない。

プルシアンブルーと同様にセシウムの吸着作用を持つものにゼオライトがある。ゼオライトは鉱物の一種で、チェルノブイリ事故の際に牛に使われたものの、その効果はプルシアンブルーには及ばなかったという[18]。マウスを使った実験でも同様の結果が得られている[19]。しかし、ゼオライトは安価であり、家畜の健康増進、糞尿の悪臭防止等を目的に飼料として広く使われていることから、費用対効果や安全性の観点から有効であろう。福島県の畜産研究所では、ゼオライトを乳牛に給与することによって、牛乳への放射性セシウムの移行が半減したと報告している[20]。

8. おわりに

避難区域でも除染が進み、避難指示が徐々に解除されてきている。今後これらの地域で畜産を再開する人も増えてくることが期待されるが、この地域で生産された畜産物が消費者に受け入れられなければ、畜産業の復興を果たすことはできない。このため、かつて汚染があった地域でも安全で健康な家畜生産は可能であり、市場に流通している畜産物は適切な飼養管理が行われ基準を満たしたものであることを消費者に理解してもらうことが大切である。稿を終えるにあたり、被災地の農畜産業が一日も早く復興することを祈念いたします。

9. 参考文献

- [1] UNSCEAR 2013 Report, UNSCEAR (2014)
- [2] ICRP Publication 56, ICRP (1989)
- [3] Technical Report Series 472, IAEA (2010)
- [4] 環境パラメータシリーズ5, 原子力環境整備促進・資金管理センター (1995)
- [5] 家畜用飼料の暫定許容値設定に関する Q&A, 農林水産省 (2012)
- [6] 鍋師裕美, 他, 食品衛生学雑誌, 54, 415-418 (2013)
- [7] Okada K., et al., Anim Sci J, 84, 798-801 (2013)
- [8] Sato I., et al., Anim Sci J, 86, 716-720 (2015)
- [9] Sato I., et al., Anim Sci J, 87, 607-611 (2016)
- [10] Sato I., et al., Anim Sci J, 88, 1021-1026 (2017)
- [11] 古閑文哉, 他, 福島県農業総合センター研究報告放射線物質対策特集号, 94-97 (2014)
- [12] 高瀬つぎ子, 他, Radioisotopes, 62, 281-290 (2013)
- [13] Fukuda T., et al., Anim Sci J, 87, 842-847 (2016)
- [14] Sato I., et al., Anim Sci J, 90, 1090-1095 (2019)
- [15] Sato I., et al., Anim Sci J, 88, 2100-2106 (2017)
- [16] 人体内放射能の除去技術, 講談社サイエンティフィック (1996)
- [17] 放射線事故の緊急医療, ソフトサイエンス社(1986)
- [18] Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, IAEA (2006)
- [19] 佐藤 至, 他, Radioisotopes, 43, 468-473 (1994)
- [20] 生沼英之, 他, 日本畜産学会報, 84, 333-339 (2013)

文 献 抄 録

Co-occurrence of Nasal Polyps and Neoplasms of the Canine Nasal Cavity

Tarrant JC, Holt DE, Durham AC

(University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA)
Vet pathol, 56, 885-888 (2019)

犬の鼻ポリープは鼻腔内腫瘍の生検診断で併発することがある軟部組織腫瘍である。原発性鼻腔内腫瘍に鼻ポリープが同時発生する割合を調べ、1回目の生検で鼻ポリープと診断された犬の2回目の生検を評価した。評価には2004年から2017年に発生し

た321検体の鼻腔内腫瘍と50検体の鼻ポリープが用いられた。鼻腔内腫瘍321検体のうち、16%の51検体に鼻ポリープが同時に発生しており、これらのうち47検体が鼻腔内上皮性悪性腫瘍であった。また、1回目の生検で鼻ポリープとされた50検体のうち25検体が再度生検され、これらのうち15検体が2回目の生検でも鼻ポリープと診断され、残りの9検体が悪性腫瘍、1検体が鼻腔内線虫寄生と診断された。すなわち、鼻ポリープはしばしば鼻腔内上皮性悪性腫瘍と同時に発生していた。鼻ポリープと診断された犬では腫瘍を疑って複数回の生検を行う必要がある。

(岩手大学獣医病理学研究室)