

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510006

研究課題名(和文)放射性物質に汚染された飼料を摂取した牛の体内での放射性物質の挙動

研究課題名(英文)Distribution of Radiocesium in Cattle body Analysis using the compartment model

研究代表者

高瀬 つぎ子(Takase, Tsugiko)

福島大学・環境放射能研究所・特任准教授

研究者番号：10466641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：2011年3月に発生した福島第1原子力発電所の爆発事故によって、多量の放射性核種が大気中に放出され、福島県東部および中央部の広範な地域に放射性物質による環境汚染をもたらした。

放射性セシウムによる哺乳類の内部被ばくを考える上で、放射性セシウムの体内組織中での分布、体内での代謝過程(生物学的半減期)に関する基礎データに基づいて、体内動態を予測することが重要な課題になっている。本研究では、ウシ(黒毛和種)の体内組織中での放射性セシウム分布および放射性セシウム濃度の動的変化を測定し、測定結果にコンパートメントモデルを適用することにより、筋肉をリザーバーとするセシウムの代謝モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：The accident of the FDNPP on March 2011 had contaminated with radioactive cesium on the wide eastern area of Fukushima prefecture. The followings need to be clarified to predict dynamics within the cattle for the establishment of countermeasure against the contamination: 1. Transfer of radiocesium from feed to the cattle, 2. Transfer of radiocesium within the cattle by the metabolism. In this research, distribution of radiocesium within the body of cattle that was lived for more than 5 months on the grass therein. A compartment model was applied to the radiocesium concentrations of tissue, urine and blood.

Radiocesium concentration in muscle is 30 fold greater than that in blood. Also suggests that ¹³⁷Cs tends to accumulate into muscle. The results support the conventional cesium metabolism model "radiocesium accumulated in the muscle is slowly discharged from the body by the route of blood, kidney and urine".

研究分野：放射線環境動態

キーワード：放射性セシウム 動態モデル 体内モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所(FDNPP)の事故によって、多量の放射性セシウムが大気中に放出された。これらの放射性セシウムは、降雨などによって地表に沈着し、福島県東部および中央部の広範な地域に、放射性セシウムによる環境汚染をもたらした¹⁾。その結果、この地域で放牧されていたウシは、放射性セシウムに汚染された餌(牧草、水、土壌(ミネラル))を恒常的に摂取することとなり、多量の放射性セシウムがウシの体内に取り込まれた。

(2) チェルノブイリの原子力発電所事故が発生した際も、哺乳類の1グループである反芻動物に関して、放射性セシウムの体内分布やその体内での動態(すなわち、餌から各組織の吸収やその蓄積性など)の研究が盛んに行われた。また、放射性セシウムの体内での挙動を、コンパートメントモデルを用いて解析し、血液・内臓組織間の放射性セシウムの移行係数(a_{ij} : 組織*i*から組織*j*への移行定数)を推計するという試みも行われてきた²⁾。

(3) しかし、これらの反芻動物を用いる研究は、限られた生息地域、かつ、少数の検体での測定結果に基づく限定的なものであった。反芻動物の内部被ばく量は、反芻動物が摂取した餌の汚染濃度によって大きな差が生じる可能性がある。そのため、特定の汚染状況での限定されたモデルリングだけでは、全ての事象に適用できるとは限らない。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、汚染された餌を摂取したウシの体内での放射性セシウムの分布やその代謝過程を明らかにし、哺乳類の内部被ばくを推計するための基礎データを得ることにある。

(2) 具体的には、汚染濃度の異なる地域(旧警戒区域; FDNPPから半径20km以内)に解放された『のら牛』*から採取した組織検体を用いて、血液と筋肉を含む内臓組織の放射性セシウム濃度を測定し、組織間の放射性セシウムの移行係数と血液中の放射性セシウム濃度との相関関係を広い濃度範囲にわたって、明らかにすることにある。広範な放射性セシウム濃度範囲において、血液・内臓組織間の放射性セシウムの移行係数(パラメータ)を推計することにより、広い濃度領域をカバーできるモデル解析手法を実現する。

(3) これらパラメータを用いて、ウシの内臓組織内での放射性セシウムの滞留時間(血液から内臓組織への放射性セシウム流入レートと内臓から血液への放射性セシウムの流出レートの比)を算出し、実測されたウシの体内での放射性セシウムの滞留時間(汚染されて飼料を摂取したウシで測定)と比較することにより、モデル解析の手法およびパラメータの妥当性を検証する。

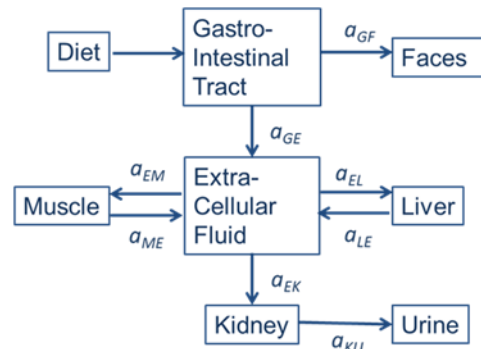
※『のら牛』: FDNPPの爆発事故まで、畜産

農家が飼育していた飼育牛(黒毛和種)。政府による避難指示以降、牛舎などへの囲い込みがなされず、やむなく、飼育者の管理をはずれた飼育牛のこと

3. 研究の方法

(1) コンパートメントモデル

①本研究では、反芻動物の体内での放射性セシウムの動的挙動に、Fig.1に示すコンパートメントモデルを適用し、ウシの体内での放射性セシウムの分布や体内組織中の放射性セシウム濃度の動的変化を推計することを試みた。Galerら²⁾やCroutら³⁾によって提案されている『放射性セシウムの消化管吸収モデル』をベースに、消化管を1つのコンパートメントとして取り扱う簡便なモデルを用いて、牛の体内での放射性セシウムの分布の時間変化を記述する1次の連立微分方程式作成し、シミュレーションを行った。



$$\begin{aligned} \frac{dG}{dt} &= \text{Diet} - (a_{ge} + a_{gf})G \\ \frac{dE}{dt} &= a_{ge}G + a_{le}L + a_{me}M - (a_{el} + a_{ek} + a_{em})E \\ \frac{dM}{dt} &= a_{em}E - a_{me}M \\ \frac{dL}{dt} &= a_{el}E - a_{le}L \\ \frac{dK}{dt} &= a_{ek}E - a_{ku}K \\ \frac{dF}{dt} &= a_{gf}G \quad \frac{dU}{dt} = a_{ku}K \end{aligned}$$

Fig.1 The Scheme of the compartment model for radiocesium transfer in cattle body

a_{ij} : Rate constant for transfer from compartment *i* to *j*

②放射性セシウムに汚染されて餌を恒常的に摂取している状態では、近似的に定常状態とみなすことができる($dNi/dt=0$)ので、定常状態でのコンパートメントモデルでは、細胞外液中と内臓組織中の放射性セシウム濃度には線形相関が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} &= a_{EM}E - a_{ME}M = 0 \\ \frac{dL}{dt} &= a_{EL}E - a_{LE}L = 0 \\ \frac{dK}{dt} &= a_{EK}E - a_{KU}K = 0 \end{aligned}$$

また、その比例係数から、【放射性セシウムの内臓組織への流入に関する移行係数と流出に関する移行係数の比(a_{iE}/a_{Ei})】を算出

することができる、内臓組織での放射性セシウムの蓄積性の評価が可能になる

③哺乳類において、細胞外液中の放射性セシウム濃度は、血液中の放射性セシウム濃度と同じとしてみなすことができる。そこで、本研究では、血液中の放射性セシウム濃度を用いて、内臓組織中の放射性セシウム濃度との相関関係を検討した

④非定常状態でのコンパートメントモデルを用いて、汚染された餌を摂取した後のウシの体内での放射性セシウムの動態を推計した。ウシの体内では、筋肉が放射性セシウムの Reservoir として働くと仮定して、Fig. 2 に示すシンプルなモデルを用いて、ウシの体内での生物学的半減期の推計を行った。

(2) 検体採取方法

①本研究では、放射性セシウムによる環境汚染の状況が大きく異なる2つのサイトをAサイトおよびBサイトで、検体を採取した。Aサイトは、FDNPPから南西方向に20kmに位置し、土壤中の¹³⁷Cs濃度100~300kBq/m²程度(文部科学省による土壌調査結果(2011年6月))であり、低濃度汚染地域とみなしモデリングした。また、Bサイトは、FDNPPから西方向に5kmに位置し、放射性セシウムによる環境汚染の状況は、土壤中の¹³⁷Cs濃度1000~3000kBq/m²程度であり、放射性セシウムによる高濃度汚染地域とみなし検体の採取を行った

②ウシの体内での放射性セシウムの動的挙動を検証す路研究では、黒毛和種(成牛4頭)に汚染飼料(700Bq/kg程度)を4か月間持続摂取させ、汚染飼料の摂取を中止したウシの血液および尿を定期的に採取し検体とした。

③採取した検体は4℃で冷蔵保管した。γ線スペクトルの測定および放射性核種の定性・定量には、同軸型のゲルマニウム検出器(キャンベラ製;相対効率40%, Model e2040)を使用した。検体は、U8容器(新鮮重量:90g程度)に詰めて測定した。なお、¹³⁷Csの検出限界は、いずれも2.5 Bq/kg程度であった

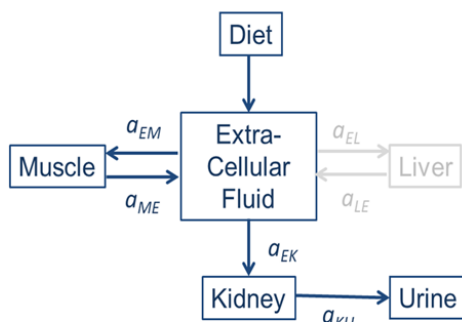


Fig.2 The Scheme of the simple compartment model for time dependent analysis

4. 研究成果

(1) ウシの体内での放射性セシウムの分布

①汚染地域で採取されたウシの検体中に含

まれる放射性セシウムを計測したところ、検出限界を超える放射性セシウム(¹³⁷Cs: 3Bq/kg以上)が胎児を含むすべての内臓組織から検出された。内臓組織別に放射性セシウム濃度を比較すると、筋肉>腎臓>肝臓>血液という結果であった。また、他の放射性物質に関しては、胎児を除くすべての検体の肝臓から放射性銀(^{110m}Ag)が検出され、一部の検体の腎臓からは放射性テルル(^{129m}Te)が検出された。

②血液中の放射性セシウム(¹³⁷Cs)濃度と筋肉(頸部)中の¹³⁷Cs濃度の相関をFig. 2に示した。ここでは、低濃度汚染地域(A-サイト)の検体と高濃度汚染地域(B-サイト)の検体のデータを同一グラフ上にプロットした。血液と筋肉(頸部)に含まれる¹³⁷Cs濃度には、広範囲にわたって有意な線形相関が存在した($R=0.97$, $p<0.001$)。この結果より、汚染濃度の大小にかかわらず1つのコンパートメントモデルが適用できることが明らかになった。

③採取した検体に関して、血液と各内臓組織に含まれる¹³⁷Cs濃度の相関についてプロットしたところ、内臓組織と血液中の¹³⁷Cs濃度との間には有意な線形相関が認められた。各臓器における比例係数(B_i)をTable 1に示す。成牛の場合、比例係数(B_i)は、内臓組織によって有意に異なることが明らかになった。特に、筋肉の場合の比例係数は他の内臓組織と比較して有意に大きく、大腿筋の場合に最も大きな値を示した。

④コンパートメントモデルを用いて、内臓組織での放射性セシウムの蓄積性(a_{iE}/a_{Ei})を推計したところ、放射性セシウムは、筋肉に蓄積し易いことが明らかになった。この推計結果は、ヒツジやヒトの解析結果と定性的に一致しており⁴⁾、『放射性セシウムは筋肉に蓄積し、筋肉からゆっくりと放出された後、腎臓を介して尿として体外に放出される』というモデルが示唆された。

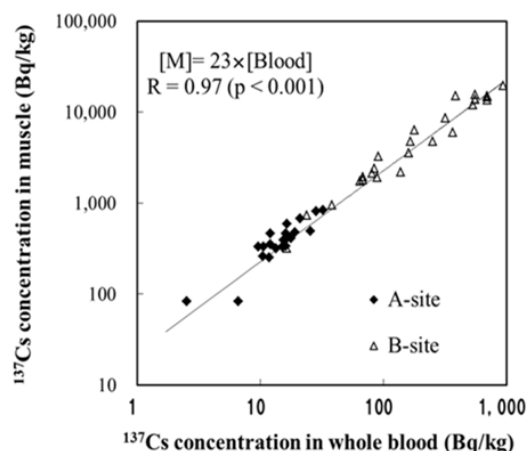


Fig.3 Correlation of ¹³⁷Cs concentration between blood and muscle (neck)

Table 1 Ratio of transfer coefficient (a_{iE} / a_{Ei})

Tissue	B_i	W_i	a_{iE} / a_{Ei}		
			This work	sheep ⁷⁾	human ⁹⁾
Muscle	34	0.36	0.01	0.02	0.002
Liver	10	0.02	0.70	0.49	0.11
Kidney	22	0.004	1.6	1.31	0.47
Heart	17	0.004	2.4	-	0.58
Spleen	13	0.002	5.4	-	0.95

B_i : The constant value of the ratio between blood and tissue

W_i : Relative weight of tissue

(2) ウシの体内での放射性セシウム濃度の動的挙動

①汚染飼料摂取中止後3か月までの尿中の放射性セシウム濃度の時間変化を測定した結果を Fig. 4 に示す. 汚染飼料摂取後の尿中の放射性セシウム濃度が, 近似的に, 2つの指数関数の和で表すことができた. (Fig. 4)

②この事実は, 牛の体内での放射性セシウムの代謝過程には, 『腎臓から尿への移行速度に依存する短い半減期をもつ成分』と『筋肉から血液への移行速度に依存する長い半減期をもつ成分』が存在していることを示唆している

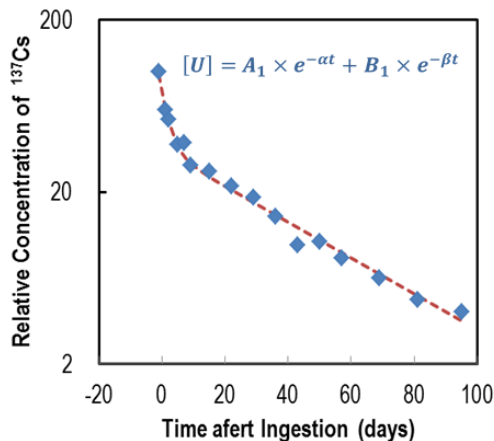


Fig.4 Time dependence of ^{137}Cs concentration in a cattle urine contaminated feed stopped: Time = 0

Table 2 Parameter of the compartment model

Sample	A1	α	A2	β	R^2
Cattle-A	54	0.38	46	0.024	0.99
Cattle-B	60	0.24	40	0.021	0.91
Cattle-C	45	0.24	55	0.024	0.98
Cattle-D	53	0.47	47	0.026	0.98

$$[U] = A_1[e^{-\alpha t}] + A_2[e^{-\beta t}]$$

$$\begin{aligned} \alpha + \beta &= a_{EK} + a_{EN} + a_{ME} \\ \alpha \times \beta &= a_{EK} \times a_{ME} \\ A_1 &= D \times (\alpha - a_{ME}) / ((\alpha - \beta) \times \alpha) \\ A_2 &= D \times (\alpha_{ME} - \beta) / ((\alpha - \beta) \times \beta) \end{aligned}$$

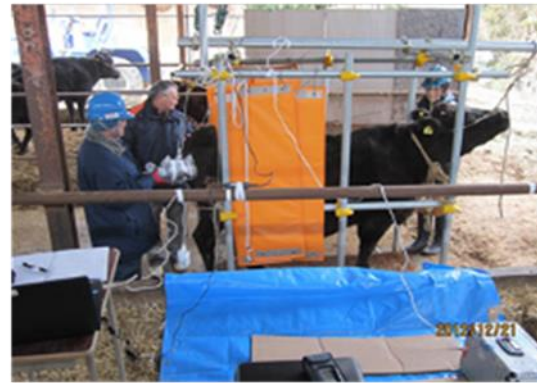
③ 2つの指数関数の和によるシミュレーション結果から, 短い半減期の成分は2日程度長い半減期の成分は30日程度であることが明らかになった (Table2). 今回のウシの体

内での放射性セシウム濃度の時間依存性のシミュレーション結果からも, 『牛の体内では, 筋肉に蓄積した放射性セシウムは, 血液→腎臓→尿のルートを通じて, 半減期30日程度のゆっくりした速度で体外へ排出される』というモデルが示唆された.

(3) ウシの筋肉(生体)中に含まれる放射性セシウムのモニタリング方法の開発

①動態モデルを正確に検証するためには, ウシ(生体)の筋肉中に含まれる放射性セシウムの動的変化を連続的にモニターすることが必要になってくる. そこで, 福島県畜産研究所等と共同で, ウシの体内の放射性セシウム濃度をモニタリングするための簡易システムを試作した.

②汚染餌を摂取したウシの筋肉中の放射性セシウム濃度をモニタリングし, 筋肉中の放射性セシウム濃度(同一ウシ)との比較検討を行ない, 今回試作した簡易システムによって, ウシの筋肉中の放射性セシウム濃度を半定量的に評価できることを確認した.



現場でのモニタリング風景

引用文献

- 1) 文部科学省, 放射線量等分布マップ拡大版, <http://ramap.jaea.go.jp/map/> (2011)
- 2) Galer A.M., Crout N.M.J., Beresford N.A., Howard B.J., Mayes R.W., Barnett C.L., Eayres H.F. and Lam C.S., J.Environ.Radioact. 20, 35-48 (1993)
- 3) N.M.J.Crout, Beresford N.A., Howard B.J., Mayes R.W., Assimakopoulos R.A. and Vandwcasteele, C. M., Radiat. Environ. Biophys., 35, 19-25 (1996)
- 4) Legget R.W., Williams L.R., Melo D.R. and Lipsztein J.L., Sci. Total Environ., 317 235-255 (2003)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計12件)

- 1) 「和牛繁殖雌牛における筋肉中放射性セシウム濃度の尿からの推定」, 内田守譜, 石川雄治, 古閑文哉, 高瀬つぎ子, 大槻勤, 福島県農業総合センター研究報告書, 放射性物質対策特集号, 103-105 (2014)

査読：無

- 2) 「ウシの体内での放射性セシウムの分布～コンパートメントモデルによる解析～」, 高瀬つぎ子, 高貝慶隆, 内田守譜, 難波謙二, 大槻勤, 村松康行, RADIOISOTOPES 62, 281-290 (2013)
査読：有
- 3) 「東京電力福島第一原子力発電所事故にかかわる玄米中の放射性セシウム定量におけるゲルマニウム半導体検出器とNaI(Tl)シンチレーション検出器の比較」, 高瀬つぎ子, 高貝慶隆, 分析化学 62 521-526 (2013)
査読：有
- 4) 「原発事故直後の土壌中放射性核種分析」, 山口克彦, 高瀬つぎ子, 福島大学放射線計測チーム, 福島大学地域創造, 24, 74-80 (2013) 査読：無
- 5) 「ウシの体内での放射性セシウムの分布～福島県東部に生息する『のら牛』の場合～」, 高瀬つぎ子, 高貝慶隆, 内田守譜, 難波謙二, 大槻勤, 村松康行, 福島大学地域創造, 24, 109-114 (2013)
査読：無
- 6) 「放射性セシウムによる牛肉の汚染～福島第一原子力発電所の爆発事故の影響～」, 高瀬つぎ子, 放射化学ニュース, 25, 33-35 (2012) 査読：無

[学会発表] (計 10 件)

- 1) 「ウシの体内での放射性セシウムの動的挙動～コンパートメントモデルによる解析～」, 高瀬つぎ子, 高貝慶隆, 内田守譜, 難波謙二, 大槻勤, 村松康行, 日本遺伝学会, 2013年9月21日, (横浜)
- 2) “Distribution of Radiocesium in Cattle Body - Analysis Using a Compartment Model”, Tsugiko Takase, Yoshitaka Takagai, Muritsugu Uchida, Kenji Nanba, Tsutomu Ohtsuki, Yasuyuki Muramatsu, Annual Conference SMBE (The Society for Molecular Biology and Evolution), 2013年7月9日, (Chicago)
- 3) 「飼料から体内への放射性セシウムの移行－汚染飼料を摂取した牛の場合－」 高瀬つぎ子, 高貝慶隆, 内田守譜, 難波謙二, 大槻勤, 村松康行 日本放射線影響学会, 2013年9月8日, (仙台)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高瀬 つぎ子 (TAKASE Tsugiko)

福島大学・環境放射能研究所・特任准教授