

学位論文要旨

黒毛和種におけるセシウムの体内動態

— 動態パラメータによる組織中 Cs の動的平衡予測に基づく食肉
の除染法の提案 —

Pharmacokinetics of cesium in Japanese Black Cattle

— Proposal of meat decontamination based on the prediction of tissue
Cs dynamic equilibrium by PK parameters —

北里大学大学院獣医学系研究科

獣医学専攻 博士課程

島岡 千晶

Chiaki SHIMAOKA

指導教授 夏堀 雅宏

2011 年 3 月に発生した福島第一原子力発電所事故（FDNPPA）により大量の放射性核種が大気中に拡散され、福島県を中心に広い範囲で汚染が確認された。福島県の畜産業は、農業の主要部分であったため、2011 年の畜産産出額は、前年比 77.1%まで低下した。

FDNPPA に起因する放射性核種のうち、 ^{131}I と ^{132}Te は、それぞれ物理的半減期が約 8 日と 76.8 時間と短いため、中長期的な被ばく影響は少ない。一方、 ^{137}Cs は物理学半減期が 30 年と長く、今もなお環境中に多量に残存している。セシウム(Cs)は、カリウム(K)と同様の化学的特性のため、生体に取り込まれると特に筋肉に蓄積されることが知られている。したがって、過剰な放射性セシウム($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$:RCs)を含む食肉を人が摂取することによる内部被ばくが問題となる。そのため FDNPPA 以降は、食品中の放射性物質の新たな基準値が設定され、牛肉を含む一般食品は 100 Bq/kg となった。これに併せ、牛用飼料中の RCs の最大許容値は 100 Bq/kg (粗飼料は水分含有量 80%、その他飼料は製品重量)となった。

福島県内では、2018 年 3 月までに警戒区域を除く地域での除染は終了した。除染された農地や牧草地の拡大は畜産復興への希望につながる。一方、畜産物の出荷制限や自給飼料の利用制限により、自給飼料の利用や放牧によって飼育された牛をそのまま出荷できるとは限らず、その場合、RCs を含まない清浄飼料の給餌(飼い直し)が必要となる。牛の筋肉中 RCs 濃度は血液中 RCs 濃度から推定しているのが現状であるが、RCs の吸収と消失が血液に比べ骨格筋では遅いため、牛の動的平衡の違いによってその比率にはばらつきがある。

そこで、本研究では、Cs の体内動態(PK)パラメータに着目し、RCs 摂取量と生体試料中 RCs 濃度との動的平衡の関係のシミュレーション

ンを行った。これらのシミュレーションを用いることで、食肉中の RCs を可能な限り低減する可能性やその条件を導きだせる。第一章では、基礎的な情報を得るために、安定セシウム (^{133}Cs :SCs) の体内動態試験によって牛における PK パラメータを明らかにした。第二章では、第一章で得られた PK パラメータを使用して、RCs 摂取量と生体試料中 RCs 濃度との動的平衡の関係を予測した。第一章および第二章の結果を踏まえて、第三章では食肉中 RCs 濃度を尿中 RCs 濃度から推定し、汚染放牧地をふくむ環境からの飼育直しによる最適な除染法を提案することを目的とした。

第一章 黒毛和種における塩化セシウム単回投与後の安定セシウムの体内動態

黒毛和種における Cs の PK パラメータを明らかにするために、黒毛和牛 20 頭(雌)を静脈内投与群(IV)と経口投与群(PO)の 2 群にわけ、それぞれの牛に塩化セシウム ($^{133}\text{CsCl}$: 20 mg/kg)を投与した。生体試料中 SCs 濃度は ICP-MS で測定し、それぞれの経時的変化を投与前から投与後最大 182 日まで追跡した。血液、血漿の実測値からそれぞれの血中濃度-時間曲線下面積(AUC)を算出し、平均滞留時間(MRT:24 日)、生物学的利用率(F:83%)、分布容積(Vd:4.4 l/kg)、クリアランス(CL:0.31 ml/min/kg)を明らかにした。経口投与された SCs は静脈内投与とほぼ同様の分布および消失プロファイルを示した。バックグラウンドレベル(BG)を考慮した体内動態解析により、最終的な消失相(β 相)の生物学的半減期は約 30 日であると算出した。投与量に対する尿中回収率および糞便中回収率より、投与総量は試験期間中(182 日間)でほぼ全量体外へ排泄されたと推定された。

第二章 黒毛和種における安定セシウム単回投与後の体内動態パラメータを用いた反復摂取に関わるセシウムの体内動態予測

求められた PK パラメータから、任意の反復摂取期間における組織中 Cs 濃度を予測できる。SCs を 21 日間あるいは 28 日間反復摂取した場合の動態を予想し、同様に実験を行った RCs の実測値と比較した。SCs 単回投与からの反復投与予想曲線は反復摂取された RCs 実測値にほぼ一致した。長期間反復摂取では β 相の生物学的半減期の 5 倍(約 150 日)以上で血液、尿および筋肉において定常状態 Cs 濃度(C_{ss})の 98%以上に到達し、 C_{ss} の比は血液：尿：筋肉 \approx 1:7:19 となった。また、一日あたりの Cs 投与量と筋肉中 C_{ss} の比を示す移行係数は 2.2×10^{-2} となり、この値は国際原子力機関(IAEA)の報告値と一致した。さらに、反復摂取（ばく露）期間の長期化にともない飼い直し後の α 相の短縮および β 相の延長が認められた。このことは、長期間ばく露により RCs の生物学的半減期が見かけ上、 β 相に近づくことが明らかとなった。これらのことから、長期間汚染環境中で RCs のばく露を受けていた牛の最適な飼い直し日数を推定するには、食肉の安全性をふまえ、 β 相の生物学的半減期(30 日)を用いることが望ましいと考えられた。また、飼い直しを行う環境中の BG も考慮することが適切と考えられた。

第三章 黒毛和種における生体試料から食肉中の放射性セシウム濃度の推定と除染法の提案

各組織で明らかにされた Cs 濃度推移から筋肉中 Cs 濃度を推定するための最適な生体試料として、血液と尿を比較した。尿中 SCs 濃度に対する筋肉中 SCs 濃度比(M/U 比)の変動は血液の 1/6～1/10 で

あった。このことから、尿中 RCs 濃度から食肉中 RCs 濃度を推定し、飼い直しに必要な日数の算出法を検討した。M/U 比は観察時期により変動し、定常状態にいたるまでは、その最大比 2.7 に近づくように漸増するが、飼い直し後は急速に上昇した。短期的観察では最大濃度比は約 8(実測値約 9)、長期的観察では約 7 となり、その後の BG 収束は 5.5 まで漸減すると推定された。そこで M/U 比に応じて、まず飼い直し開始時の筋肉中 RCs 濃度を推定した。RCs 汚染飼料反復期間が 150 日(筋肉中 RCs 濃度が C_{ss} にほぼ達する日数)以上では[尿中 RCs 濃度 $\times 2.7$]、150 日未満では[尿中 RCs 濃度 $\times 9$]の式から筋肉中 RCs 濃度を算出可能と考えられた。さらに、 β 相の生物学的半減期(30 日)を利用して、飼い直し日数は $[(30/\ln 2) \times \ln(X/\text{出荷基準値})]$ と算出可能となった。ただし、尿比重補正を行わないと M/U 比のばらつきは大きい。ゆえに、より最適な飼い直し日数を推定するためには尿比重補正は必須とした。また、出荷前には確実に出荷基準値を下回っているかどうかを確認するために、食肉の安全性をふまえ M/U 比を 10 として、尿中 RCs 濃度が食肉出荷基準値の 1/10 以下であれば出荷基準をみたすと考えた。

本研究では、黒毛和種(雌成牛)における Cs の PK パラメータを明らかにし、Cs の消失相の生物学的半減期は 30 日となった。また、生体試料および食肉中 RCs 濃度の経時的な動的平衡予測と移行係数が導かれ、飼い直し期間の推定も可能となった。以上のことから、安全で最適な食肉の除染法の提案ができたとともに食肉資源の確保につながる提言をおこなうことができた。本研究での提案が福島畜産の再構築に貢献できることを期待する。