

平成 30 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

福島原発事故による
生物影響の解明に向けた学際共同研究

成果報告書

平成 31 年 3 月

国立大学法人 東北大学災害復興新生研究機構

本報告書は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、国立大学法人 東北大学災害復興新生研究機構が実施した平成 28-30 年度「福島原発事故による生物影響の解明に向けた学際共同研究」の成果を取りまとめたものです。

表一覧

	頁
表 3-1	ニホンザル計算モデル 3. 1-14
表 3-2	外部被ばく線量率・内部被ばく線量率換算係数の計算結果 3. 1-14
表 3-3	外部被ばく線量率換算係数の高さ依存性の計算結果 3. 1-15
表 3-4	土壌の自己遮蔽係数 3. 1-15
表 3-5	試験的に実施した被ばく線量推定値、積算地表面モデル積算外部被ばく 線量 D_{ex}^i 及び樹上活動モデル積算外部被ばく線量 D_{ex}^t 3. 1-16
表 3-6	末梢血液細胞数と被ばく線量率の多重回帰分析結果 3. 2-15
表 3-7	骨髄血液細胞数と被ばく線量率の多重回帰分析結果 3. 2-16
表 3-8	6 ヶ月雄マウス肝臓内 ^{137}Cs 量の測定 3. 2-21
表 3-9	6 ヶ月雄マウス筋肉組織 ^{137}Cs 量の測定 3. 2-21
表 3-10	^{137}Cs 水給水群の各日齢における組織内 ^{137}Cs 量と被ばく線量 3. 2-22
表 3-11	各日齢における組織内平均 ^{137}Cs 量 3. 2-23
表 3-12	^{137}Cs 水給水停止後の組織内 ^{137}Cs の経時変動と被ばく線量率 3. 2-24
表 3-13	^{137}Cs 給水停止後の組織内平均 ^{137}Cs 量の経時変動 3. 2-25
表 3-14	^{137}Cs ガンマ線照射条件 3. 2-25
表 3-15	異なった線量率の ^{137}Cs ガンマ線外部照射実験 3. 2-26
表 3-16	^{137}Cs ガンマ線照射条件 3. 2-26
表 3-17	^{137}Cs ガンマ線照射条件 3. 2-27
表 3-18	^{137}Cs 内部被ばくによる線量率・線量依存性の検討 3. 2-27

図一覧

	頁
図 2-1	年次計画 2. 1-1
図 3-1	ベースラインが異なるニホンザルの歯の ESR スペクトル 3. 1-5
図 3-2	広範囲の磁場で掃引したニホンザルの歯の ESR スペクトル 3. 1-6
図 3-3	ブロードなピークが消失したニホンザルの歯の ESR スペクトル 3. 1-6
図 3-4	ニホンザルの歯の ESR スペクトルに出現する 3 本のピーク 3. 1-7
図 3-5	ニホンザルの歯の検量線 3. 1-7
図 3-6	PHITS 入力幾何形状 3. 1-24
図 3-7	被ばく線量率換算係数 3. 1-24
図 3-8	歩行モデルと座位モデルの外部被ばく線量率換算係数比の 平均エネルギー依存性 3. 1-25
図 3-9	高さ依存性の補正 3. 1-25
図 3-10	指数関数の深さ分布に対する外部被ばく換算係数計算値 3. 1-26

図 3-11	千葉県高岩山においてニホンザル野生群の日中樹上活動割合	3. 1-26
図 3-12	四季の平均の活動頻度の時間プロファイル	3. 1-27
図 3-13	NNSA と MEXT のデータをクリギング補間下 137Cs 汚染地図	3. 1-27
図 3-14	積算空間線量の ^{129}m , ^{132}Te , 131 , ^{132}I と 134 , ^{137}Cs の寄与	3. 1-28
図 3-15	樹上活動モデルの 4 地域の積算被ばく線量プロファイル	3. 1-28
図 3-16	試料を収集した野生ニホンザル個体数の年次推移	3. 2-5
図 3-17	大腿筋 ^{137}Cs 濃度の年次推移	3. 2-6
図 3-18	大腿筋に対する各臓器中放射性セシウム濃度比	3. 2-6
図 3-19	ESR 分析とシミュレーションによる被ばく線量評価の相関	3. 2-7
図 3-20	外部被ばくと内部被ばくの寄与	3. 2-7
図 3-21	野生ニホンザル筋肉由来初代培養細胞での遺伝子導入効率の確認	3. 2-11
図 3-22	染色体解析の結果	3. 2-12
図 3-23	内部被ばく線量率と骨髓細胞数の相関	3. 2-15
図 3-24	内部被ばく線量率の増加に伴う脂肪割合の増加	3. 2-15
図 3-25	ニホンザル大腿骨髓細胞から作製した染色体解析結果	3. 2-16
図 3-26	大腿筋 MDA 濃度と放射線被ばくとの相関	3. 2-17
図 3-27	肝臓 MDA 濃度と放射線被ばくとの相関	3. 2-17
図 3-28	各クローン DNA 中に含まれる 5MedCyd の定量	3. 2-18
図 3-29	次世代シーケンス解析結果の一例	3. 2-18
図 3-30	6 ヶ月雄マウスの臓器内 ^{137}Cs 量 (Bq/g)	3. 2-21
図 3-31	18 世代目 4 ヶ月齢雄の各臓器内 ^{137}Cs 量 (Bq/g)	3. 2-22
図 3-32	各日齢における組織内 ^{137}Cs 量	3. 2-23
図 3-33	^{137}Cs 給水停止後の ^{137}Cs の減衰	3. 2-25
図 3-34	^{137}Cs 水 (100Bq/ml) を飲み始めてからの筋中 ^{137}Cs 量の経時変化	3. 2-28
図 3-35	小容量の MDA 標準試料を用いた検量線	3. 2-32
図 3-36	小容量のマウス血漿を用いた酸化ストレスマーカーの検出	3. 2-32
図 3-37	^{137}Cs 水飲水マウス血漿中の酸化ストレスマーカーとシミュレーションで得られた線量評価結果との相関	3. 2-33
図 3-38	真水に切り換えた後の酸化ストレスマーカーの変動と 内部被ばく線量率との相関	3. 2-34
図 3-39	外部照射開始後の時間経過と MDA 濃度の変化	3. 2-35
図 3-40	外部照射による酸化ストレスマーカーの線量・線量率依存性	3. 2-36
図 3-41	双葉町の土壌から採取したセシウムボールの電子顕微鏡像	3. 3-5
図 3-42	室内実験で生成したセシウムボール模擬粒子の電子顕微鏡像	3. 3-5
図 3-43	セシウムボール模擬粒子のエネルギー分散型蛍光 X 線スペクトル	3. 3-6
図 3-44	^{137}Cs を導入した模擬粒子をろ紙に沈着させたときの イメージングプレート画	3. 3-6
図 3-45	セシウムボール共培養時の生細胞イメージング	3. 3-11
図 3-46	セシウムボール共培養による DNA 二重鎖切断の誘発	3. 3-12

図 3-47	PHITS によるシミュレーション	3.3-14
図 3-48	放射能が低いセシウムボールによる DNA 二重鎖切断の誘発	3.3-15

略語一覧

DNA: deoxyribonucleic acid (デオキシリボ核酸)

ESR: Electron Spin Resonance (電子スピン共鳴法)

GPx: Glutathione Peroxidase (グルタチオンペルオキシダーゼ)

hTERT: ヒトテロメア逆転写酵素

MDA: Malondialdehyde (マロンジアルデヒド)

MEXT: Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (文部科学省)

NNSA: National Nuclear Security Administration (米国国家核安全保障局)

PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System (モンテカルロ計算コードのひとつ)

RPE: Retinal pigmented epithelium (網膜色素上皮細胞)

SOD: Superoxide dismutase (スーパーオキシドディスムターゼ)

概略

福島原発事故以降、低線量・低線量率放射線の長期被ばく影響に対する学問的・社会的関心が高まり、その影響評価に結びつく科学的知見を蓄積することが必要であった。放射線の人体影響は過去の被ばく事例からしか学ぶ事ができないうえ、晩発影響が確認されるまでに長い年月を要する。旧警戒区域に生息している野生動物は既に低線量・低線量率放射線に長期間被ばくし続けているため、本課題では有害鳥獣の中で、人間に近縁である霊長類の野生ニホンザルを対象とした。野生ニホンザルは除染をしていない環境で生活を続け、放射性物質に汚染したものを摂取しているため、本課題実施期間には福島原発事故以降 6-8 年にわたって外部被ばくと内部被ばくの影響を受けた個体となる。福島原発事故の中でも高度に被ばくした野生ニホンザルから調製した試料を解析し、低線量・低線量率放射線被ばくの生物影響に対する科学的知見を蓄積することが本課題の目的である。また、野生ニホンザルが有害鳥獣として捕獲されるために、放射線影響の有無に加えて、肉眼的に異常がない正常組織中の変化を解析することが可能となっている。

本課題では野生ニホンザルから採取した臓器・筋肉などから用途ごとに試料を調製し、被ばく線量評価を行った個体の試料を用いて生物学的解析を行った。得られた試料は組織標本、分子生物学的解析に使用できる品質の DNA、大腿筋から樹立した初代培養細胞や hTERT 不死化細胞など長期保管できる体制を整えた。このような解析試料は個体情報や放射性セシウム濃度、被ばく線量評価などの資料と紐付けして保管するアーカイブを構築し、本課題での解析に利用するだけでなく、学術目的での共同研究試料として提供する体制を整えた。本事業の成果を含めて、これまでに 544 頭分の資試料を収集する、被ばく霊長類アーカイブを構築した。

野生ニホンザルの被ばく線量は、生物影響の解析において重要な指標となる。本課題では歯の核磁気共鳴 (ESR) 分析による積算外部被ばく線量評価と、シミュレーションによる被ばく線量・線量率評価を実施した。歯の ESR 分析では、放射線との相互作用でエナメル質内に生じる炭酸ラジカルを定量し、被ばく線量を評価した。エナメル質に生じる炭酸ラジカルが消失せずに蓄積する性質を利用し、積算外部被ばく線量が評価できる。野生ニホンザルの行動調査が困難であるため、ESR 分析による被ばく線量評価は本課題において非常に有用な評価法となる。ヒト乳歯を用いた先行研究で確立した方法をニホンザルの歯に適応したが、分析を阻害するニホンザルの歯に特有な要因が複数あることが判明した。本事業期間中にその要因を取り除く試料調製法と分析法を確立し、ニホンザルに最適化した測定方法を確立した。炭酸ラジカル量から被ばく線量を推定する検量線を作成したところ、本課題で確立した方法の検出下限が約 40 mGy であると推定された。この検出下限は国際的な下限値と比較しても極めて低く、福島原発事故による被ばく線量評価に利用できることを確認した。実際に旧警戒区域の野生ニホンザルの歯から調整した試料を分析したところ、積算外部被ばく線量の暫定値として 46 mGy - 257 mGy が評価されており、引き続き線量評価を継続している。

シミュレーションによる被ばく線量評価では、外部被ばくは捕獲地の土壌中放射性セシウム濃度、内部被ばくは放射性セシウムが最も蓄積する大腿筋の放射性セシウム濃度を用いて個体ごとに評価した。放射性セシウム濃度から被ばく線量率に変換する換算係数が必要となるが、ニホンザルは国際放射線防護委員会が換算係数を公表している参照動植物に含まれていない。本課題では野生ニホンザルの体形に最適化した換算係数を外部被ばく、内部被ばく別に PHITS シミュレーションで決定した。外部被ばく線量に関してはサルが常に地表上で活動する地表モデルと、

文献調査からとりまとめた高さ方向への移動を考慮した樹上活動モデルを作成し、被ばく線量評価に反映させた。換算係数の他、深さ分布を持った放射性セシウムの土壌中における自己遮蔽係数の決定、捕獲地情報から土壌中放射性セシウム濃度を決定するために、公開されている土壌汚染データの内挿による汚染マップの整備を行った。内部被ばくについては、大腿筋の放射性セシウム濃度が体内の放射性セシウム濃度と等しく、物理学的半減期のみで減少する仮定で評価した。樹上活動モデルによる外部被ばく線量評価と内部被ばく線量評価結果より、本課題で収集したニホンザルの外部被ばくと内部被ばくの合計被ばく線量は 7.9 mGy - 1.57 Gy の範囲にあることが評価された。外部被ばく線量について、ESR 分析結果とシミュレーションの結果を比較したところ、ESR 分析結果をさらに増やして改めて検討する必要はあるが、現時点では約 200 mGy 以上の評価結果でよい相関が得られた。また、シミュレーション評価の結果より、外部被ばくの寄与が大きい個体から内部被ばくの寄与が大きい個体まで、様々な被ばく状況の個体試料がアーカイブに収集されていることが判明した。資料を精査することで、想定される被ばくケースにあわせた試料を抽出し、影響解析への利用や、試料提供が可能となる。

対照地域で捕獲されたニホンザルの大腿筋では 10 Bq/kg 以下の極めて低い濃度で ^{137}Cs が測定されたが、 ^{134}Cs は検出されなかった。このため、対照地域で検出された ^{137}Cs と福島原発事故の関連を測定結果のみで判断する事はできなかった。一方、旧警戒区域で捕獲された全ての個体の大腿筋では ^{137}Cs と ^{134}Cs がともに検出され、平成 23 年 3 月に補正した $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ がおよそ 1 となったことから、福島原発事故由来の放射性セシウムに汚染している事を確認した。物理学的半減期が約 2 年の ^{134}Cs が、福島原発事故後 6-8 年目に捕獲された個体で検出されたことから、ニホンザルが継続的に汚染されたものを摂取し続け、長期にわたって被ばくしてきたことが裏付けられた。福島原発事故後の時間経過とともに大腿筋放射性セシウム濃度が徐々に低下する個体が増加する地域と、高止まりしている地域がある。このため、これまでに収集してきた個体は被ばくが継続している群と、被ばくが軽減する回復期の群に区分することが可能となる。骨格筋以外の放射性セシウムの蓄積を調べると腎臓や精巣に多く、水晶体は大腿筋放射性セシウム濃度の 1 割程度でほとんど蓄積しないことを明らかにした。また、心筋の放射性セシウム濃度は大腿筋と比べて 4 割程度であったが、この結果はチェルノブイリ原発事故後の成人の生検試料を測定した結果と同等であった。放射性セシウムの体内分布が過去に報告されているヒトやウシなどと類似しており、本事業で得られた放射性セシウムの体内分布の知見は他の動物種にも広く応用されることが期待できる。

放射線感受性の高い造血組織における影響について、骨髓血球細胞数と末梢血球数を指標に検討した。内部被ばく線量率の中央値 7.6 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ (最小 1.9~最大 219 $\mu\text{Gy}/\text{日}$)、外部被ばく線量率の中央値 13.9 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ (最小 6.7~最大 35.1 $\mu\text{Gy}/\text{日}$) と評価された野生ニホンザルの末梢血、および大腿骨髓中の血球細胞数について多重回帰分析を行い、内部被ばく線量率に依存して減少する血球細胞を明らかにした。成獣の骨髓において骨髓系細胞数と巨核球数が内部被ばく線量率と負の相関を示し、脂肪の割合が正の相関を示した。末梢血では白血球と血小板が内部被ばく線量率と負の相関を示した。白血球や血小板は骨髓中の造血幹細胞から分化する骨髓系細胞や巨核球を介して作製されるため、多重回帰分析で得られた結果は内部被ばく線量率が高いニホンザルでは造血機能が低下していることを示唆する。

内部被ばく線量率に依存して骨髓血球細胞数が減少したため、大腿骨髓細胞を用いて染色体

を作製・解析し、骨髄細胞における DNA 損傷の誘発について検討した。染色体を作製できた 11 頭は、内部被ばく線量率の中央値 1.7 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ (最小 0.1~最大 165 $\mu\text{Gy}/\text{日}$)、内部被ばく線量中央値 43.7 mGy (最小 1.9~最大 640 mGy) と評価され、血球細胞数が減少していた個体の被ばく線量率が含まれていた。DNA 二重鎖切断に起因する染色体異常が内部被ばく線量・線量率に依存して増加する傾向がみられたが、回収できた分裂期細胞数が少なかったために今回得られた結果だけで結論を出すことは困難だった。誘発頻度については改めて検討する必要があるが、少なくとも内部被ばく線量率が高い野生ニホンザルの骨髄細胞で DNA 損傷が誘発されていることは示された。また、肝臓は大腿筋と比べて放射性セシウムの集積が約 3 割と少ないが、大腿筋よりも高い酸化ストレスが誘発されることが示された。酸化ストレスは骨髄中の造血幹細胞の分化を抑制することが知られており、骨髄における酸化ストレスの誘発と血球細胞数減少の関連性を今後検討することで、血球数減少に関わるメカニズムを解明できる可能性が考えられた。

内部被ばく、あるいは外部被ばく別に ^{137}Cs に暴露したマウス血漿を用いて、放射線被ばくと酸化ストレスマーカーの変動について実験的検証を行った。内部被ばくに関してはニホンザルで評価された内部被ばく線量・線量率範囲を含む検討を行い、先行研究として発表されている旧警戒区域のウシ血漿で解析された酸化ストレス状態と同様の線量率依存性が確認された。このため、旧警戒区域の酸化ストレスマーカーの変動を実験的に再現できたことを確認した。このとき、SOD と GPx の活性がそれぞれの酵素に特有の内部被ばく線量域でのみ活性が高まることが動物実験で明らかとなった。低線量・低線量率領域では酸化と抗酸化のバランスが不規則に変動していることが示された。外部被ばくでは、実験的に低い線量・線量率領域における酸化ストレスマーカーの変動について検討した。MDA は線量率が高い場合に線量依存性を示し、GPx 活性は線量率が低い場合に変動することが確認された。また、SOD 活性は今回検討した線量率範囲では同じ挙動を示した。特に MDA は線量率が低くなるほど反応性が鈍くなったので、今回検討した線量・線量率よりもさらに低い旧警戒区域での被ばくでは変動しない可能性が考えられ、先行研究において旧警戒区域で被ばくしたウシ血漿中の酸化ストレスマーカーが外部被ばくの指標に対して相関を示さなかったと考えられる。また、外部被ばく、内部被ばくともに SOD 活性が低下し続ける線量域があることが示され、持続的な低線量被ばくによって、酸化ストレスに対する生体防御反応が低下する可能性が示された。

本課題では野生ニホンザル試料の解析に加えて、不溶性の放射性粒子である、通称セシウムボールの細胞影響を検討した。福島県内の汚染土壌をオートラジオグラフィ、あるいは湿式分離によるスケールダウンを繰り返し、最終的には 1 粒ずつセシウムボールを抽出した。セシウムボールに含まれる放射性セシウムと放射性ストロンチウムの比率を検討し、事故時の炉内温度について検討した。 ^{90}Sr と ^{137}Cs 比が 10^{-4} オーダーとなり、放射性ストロンチウムの含有量が非常に少ない結果となった。この比は、土壌試料の比と同程度であることから、セシウムボール放出時の炉内温度は、他の放射性物質放出イベント時と同程度であったことが推察された。このため、模擬粒子を作製する際の温度条件を 300°C 程度に設定し、粒子の主成分である二酸化ケイ素源と CsOH を加えて液体状にし、空気の吹きつけなどによって飛沫が飛散するときに急冷されることで模擬粒子を作製した。

土壌から抽出した粒子や、作製した模擬粒子とヒト正常上皮細胞を共培養し、粒子周辺の細胞に及ぼす影響について検討した。1,000 Bq 以上の放射能を示す粒子は、その周辺の細胞増殖を抑

制した。共培養をはじめから 1 日以内は細胞増殖に関して顕著な変化は見られなかったが、その後の時間帯になると粒子付近の領域では分裂期細胞の出現頻度が減少した。53BP1 を指標に DNA 二重鎖切断を検出すると、セシウムボールに近接する領域では 24 時間の共培養中に DNA 二重鎖切断が誘導されており、53BP1 フォーカスの定量的結果、細胞周期停止の誘導に十分な量の DNA 二重鎖切断が検出された。PHITS シミュレーションの結果、粒子から 2 mm 以内の範囲内は主にベータ線による影響となり、粒子から 1 cm 離れるとガンマ線のみによる影響となることが推定された。1 cm 離れた領域でも 53BP1 フォーカスが検出されたことから、放射能が高い粒子は 1 cm 以上の範囲に影響を及ぼすことが示された。また、放射能が低い粒子を用いると検出される 53BP1 フォーカスは減少した。また、放射活性の低い粒子は、粒子から 1cm 以内の範囲にある細胞へメチル化などの変化を誘導しなかった。今後は、動物実験による体内分布を明らかにするとともに、肺胞に到達可能な粒径が小さい粒子は肺胞マクロファージに認識されることが予想されるため、マクロファージに及ぼす影響について検討が必要となる。マクロファージは不溶性粒子を取り込むと活性酸素を起因として応答反応経路が活性化する。粒径が小さいセシウムボールに含まれる放射能は低いですが、動物実験の結果より抗酸化酵素活性が低線量領域で高まることが示されたことから、不溶性と低線量放射線の相互作用によるマクロファージへの影響について知見が必要となる。

1. はじめに

福島原発事故によって低線量・低線量率放射線の長期被ばくによる生物影響に学問的・社会的関心が高まったが、当時は該当する線量・線量率領域における知見が不足していた。このため、旧警戒区域で被ばくした動植物の影響解析結果は科学的に貴重な知見となる。福島原発事故後に様々な生物種を対象とした調査がはじまった。植物や昆虫の形態異常頻度は事故から2年以内に一過的な上昇を示した後は、経年的に減少したことが報告されている。野生ネズミの末梢血では染色体異常が観察されたが、植物や昆虫とは異なり形態異常に関する報告はこれまでのところ示されていない。家畜などの中型動物の解析を通じても個体・臓器レベルでの形態学的変化は報告されていない。以上の報告は生物種によって放射線影響の出現が異なることを示している。本研究課題では、有害鳥獣として旧警戒区域で捕獲される野生動物の中で、人間と近縁な霊長類である野生ニホンザルの放射線影響を解析し、福島原発事故後の長期被ばく影響を実証することを目的とした。過去の放射線被ばく事例より放射線影響の出現までには長い年月を要する事、放射線作業従事者のように極低線量被ばくの影響に関してはさらに長期間の調査が必要とされる。このため、本課題期間で事故後最大8年間の被ばくを続ける個体試料の解析は、動物実験では再現が難しい長期被ばくを解析できる試料として貴重である。野生ニホンザルは除染をしていない汚染地域に住み続け、さらには放射性物質に汚染したものを食べている。臓器から放射性物質が検出される野生ニホンザルは、福島原発事故以降、恒常的に外部内部複合被ばくを受けている。そのため、野生ニホンザルの解析結果は福島原発事故による影響の中で高度な被ばくに対する科学的知見となる。福島原発事故による放射線影響を実証する点に意義があり、放射線影響の理解に資する知見を蓄積することが期待される。

福島原発事故後の時間経過により、長半減期核種である放射性セシウムが主要な被ばく源となる。野生ニホンザルが棲息する陸域領域では放射性セシウムが土壌中に広範に分布するだけでなく、放射性セシウムが凝集した微粒子の形態で環境中に拡散している事が明らかにされてきた。この放射性微粒子は通称セシウムボールとも呼ばれ、水や酸に対して難溶、かつ高い放射能をもつ福島原発事故特有の事象である。広範に分布している放射性セシウムと比べて、セシウムボールは局所的に高い被ばく線量をもたらす要因になると考えられる。本課題では土壌中から抽出するセシウムボールがヒト正常組織由来二倍体細胞へ及ぼす影響を解析すると共に、セシウムボールの性状解析結果をもとに模擬粒子を作成する技術を確立する。

本課題では野生ニホンザルの解析、セシウムボールの影響を検討する上で、被ばく線量が重要な指標となる。これまでに野生ニホンザルの被ばく線量を評価した例はなく、本課題において被ばく線量評価体制の確立を目指す。生物影響については、特に正常組織における線量・線量率に依存する変化を見いだすことによって、実験的に低い線量・線量率よりもさらに低い放射線被ばくによる生物学的指標の確立を目指す。そのため、異なる専門分野の知見、さらにはベンチワークとフィールドワークを融合させた包括的な解析が必要である。本課題では、各種解析・分析・先端技術に精通した研究者が分野横断的に結集する学際融合研究グループを構成し、課題を推進してきた。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1 に示す。

年度 項目	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
(1)野生ニホンザルの被ばく線量推定	線量応答曲線の作成、	高線量被ばく地域個体の分析	中線量被ばく地域個体の分析
①歯の ESR 分析			
②シミュレーションによる被ばく線量評価と最適化の検討（再委託先：広島大学）	ニホンザルに最適化された換算係数の決定	高線量被ばく地域個体のシミュレーション	中線量被ばく地域個体のシミュレーション
	事故 5 年後の環境汚染状況調査	事故 6 年後の環境汚染状況調査	事故 7 年後の環境汚染状況調査
(2)野生ニホンザル試料を用いた影響解析			
①野生ニホンザル生体試料のサンプリングとアーカイブ試料の作成	事故 5 年後の試料収集とアーカイブ化	事故 6 年後の試料収集とアーカイブ化、評価	事故 7 年後の試料収集とアーカイブ化、評価
②野生ニホンザル由来不死化細胞の作成（再委託先：岩手大学）	事故 5 年後の被ばく個体や非被ばく個体からの細胞樹立	事故 6 年後の被ばく個体や高線量被ばく個体からの細胞樹立	事故 7 年後の被ばく個体や主に中線量被ばく個体からの細胞樹立
③野生ニホンザル試料を用いた生物影響解析		事故後 6 年目の個体試料の染色体解析	事故後 7 年目の個体試料の染色体解析
		高線量被ばく個体由来 DNA を試料とする次世代シーケンス解析	高・中線量被ばく個体由来 DNA を試料とする次世代シーケンス解析

2.2 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法

平成 30 年度の計画の概要を以下に示す。

(1) 野生ニホンザルの被ばく線量推定

① 歯の ESR 分析

野生ニホンザルの歯からエナメル質を抽出し、分析試料を作成する。試料中の炭酸ラジカルを ESR 装置で分析し、積算被ばく線量を推定する。線量推定に使用する検量線に関して、低線量域の推定について検討する。

② シミュレーションによる線量評価と最適化の検討（再委託先：広島大学）

ニホンザルに最適化された線量換算係数より、捕獲地周辺の土壤中放射性セシウム濃度と大腿筋肉中放射性セシウム濃度を用いて、個体ごとに被ばく線量と線量率を推定する。また、福島原発事故汚染地域の現地調査を行い、シミュレーション条件を検討する。

(2) 野生ニホンザル試料を用いた影響解析

① 野生ニホンザル生体試料のサンプリングとアーカイブ試料の作成

協力関係にある自治体から野生ニホンザル検体を受け取り、福島原発事故後 7 年目の生体試料をサンプリングする。サンプリング試料から各種アーカイブ試料を作成し、保管及び共同研究者に提供する。サンプリングした臓器の一部をゲルマニウム検出器で測定する。個体情報、捕獲地、測定結果などの情報を取りまとめ、放射性物質濃度測定結果を被ばく線量推定の基礎情報として提供するなど資試料の共有システムを整備する。

② 野生ニホンザル由来不死化細胞の作成（再委託先：岩手大学）

放射性セシウム濃度などを基準に解析個体を選別し、ニホンザルの筋肉組織片から不死化細胞を樹立する。平成 30 年度捕獲個体の筋肉組織片あるいは前年度までに捕獲した個体については凍結した筋肉組織片をニホンザルの組織培養に適した培地にいれ、初代培養細胞を樹立する。初代培養細胞を凍結保存すると共に、遺伝子導入によって不死化細胞を作成し、解析試料を作成する。

③ 野生ニホンザル試料を用いた生物影響解析

原発事故後 7 年目の捕獲個体骨髄から染色体を作成し、染色体が作成できた個体について染色体構造を解析する。また、岩手大学で作成された不死化細胞から解析対象を選別し、DNA を抽出した後に次世代シーケンス解析に供する。

④ 被ばく線量率との相関性を示す血漿タンパク質の実験的検証（再委託先：大阪大学）

放射性セシウムに被ばくしたマウスから血液を採取し、遠心分離後に得られる血漿成分を超低温冷凍庫で保管した後、外部被ばく線量率の影響を検討するための血漿成分を解析担当へ提供する。

⑤血漿タンパク質分析

大阪大学から提供される血漿を用いて、酸化ストレスマーカーについて分析する。シミュレーションによりマウスの被ばく線量・線量率を推定し、解析結果との関連性を検討する。

(3)セシウムボールによる細胞影響評価

①セシウムボールの生成模擬実験（再委託先：大阪大学）

環境中セシウムボールの性状を解析し、模擬粒子の作成方法を検討する。作成した模擬粒子の組成を分析し、性状を評価する。また、作成した模擬粒子のサイズなど条件を決定し、細胞実験用として提供する。

②セシウムボールの細胞影響

分子マーカーを指標として、セシウムボールの影響が及ぶ範囲の細胞を回収する。回収した細胞についてメチル化状態などを指標としてエピジェネティックな変化に対する影響を検討する。

(4)研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、研究実施計画等を協議するための全体会合を開催する。

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 野生ニホンザルの被ばく線量推定

3.1.1 歯の ESR 分析（平成 28-30 年度）

電子スピン共鳴（ESR）装置でニホンザルの歯に生成した炭酸ラジカルを測定し、積算外部被ばく線量を個体ごとに推定することが本項の目的である。

ヒトの歯は主に表面のエナメル質と内部の象牙質からできている。エナメル質は 96 %の無機物（ほとんどがハイドロキシアパタイト）と 3 %の水分、1 %以下の有機物（タンパク質成分）から構成されるのに対し、象牙質は有機物と水分が 30 %を占め、無機物は 70 %である。また、エナメル質は結晶性が高いために放射線に対する ESR シグナル生成の感度が高い。放射線被ばくによって発生した炭酸ラジカルの ESR スペクトルに重なるように、有機物由来のラジカルが発生するため、有機物由来のラジカルは炭酸ラジカルの定量の妨害シグナルになる。そのため、有機物成分を極力減らす必要があり、歯からエナメル質部分のみを抽出して計測する必要がある。

ヒト歯からのエナメル質抽出には、ハンドドリルで歯の裏側から象牙質を削り取る方法と、NaOH 溶液あるいは KOH 溶液に浸漬し、超音波洗浄機によって 40 °C以上で 15 時間-24 時間超音波洗浄処理して象牙質を溶解させる方法の 2 つが一般的に用いられる。どちらの方法も、容易にエナメル質を抽出できるが、象牙質を除去してエナメル質のみを残す方法のために象牙質を捨てることになる。これらの方法は ESR 測定にのみ主眼をおいた場合は大変有効な抽出方法であるが、歯に含まれる放射性核種を測定しようとした場合、象牙質内にも放射性核種が含まれている可能性があり、象牙質を失ってしまうこれらの方法を使うことができない。また、ヒトと比べてニホンザルの抜歯が困難であり、かつ、歯が非常に小さいため、ハンドドリルを使って象牙質を削り出す方法は不向きであることもわかった。そこで、平成 28 年度の事業開始後、まず象牙質とエナメル質の密度差を利用した重液分離によるエナメル質の抽出方法を検討した。その結果、従来の削り出す方法よりも簡便で効率よく、象牙質を失うことなくエナメル質を抽出できるようになった。さらに、（1）特別な技術が必要ないので誰でも簡単に分離できる、（2）ハンドドリルと異なりオペレーターの技能に依存しない（象牙質を溶解する方法も同様にオペレーターの技能に依存しない）、（3）分離密度を選べば密度の高いエナメル質が抽出可能、などのメリットがあることもわかった。本新規分離法によって抽出したエナメル質を細かく砕き、ふるいに通すことで粒径を直径約 0.4mm から約 1.4mm に揃えて ESR 測定試料とする、試料調製方法を確立した。

平成 28 年度末（平成 29 年 2 月 24 日）に東北大学への ESR 装置の納品・設置が完了した。当初は非被ばく地域のニホンザルの歯に対してコバルト 60 ガンマ線を段階的に照射し、炭酸ラジカル強度と線量の関係を示す検量線を作成する予定であったが、ドイツからの納品が遅れたこと、さらに、ガンマ線照射装置の利用が一時停止となったために予定していた 3 月中の照射が出来なくなるなどの状況が生じた。そこで、最初に検量線作成用の歯のスクリーニングを行うため、非被ばく地域のニホンザルの歯の測定を行い、歯を検量線作成に使用できること（炭酸ラジカルの量が少ないこと）を確かめた。ESR 測定によって得た ESR スペクトルには、調べたい炭酸ラジカルに加えて有機物由来のラジカル、さらに試料の等方性・異方性に関連した成分、ESR スペクトルのバックグラウンドに関連した成分などがあり、これ

らの複合スペクトルから炭酸ラジカルに由来する成分だけを抽出する必要がある。世界的には EPR Dosimetry と New ER という 2 つの分離プログラムが使用されており、複合スペクトルを上記の各成分の ESR スペクトルでフィッティングし、ターゲットである炭酸ラジカル成分を抽出する。本研究では EPR Dosimetry プログラムを作成者のイワノフ博士（ロシア）から提供して貰い、使用することとした。さらに、本事業開始前に照射していたニホンザルの歯をテストサンプルとして計測し、今後、本装置を利用する際の測定条件の最適化を行った。

日本電子の ESR 装置についての測定条件の最適値は先行研究で求められており、それらを参考にして、マグネテック社の ESR 装置の測定条件を決めた。具体的には、マイクロ波出力 2 mW、磁場変調幅 0.2mT、倍率 900 倍、Mn マーカーの 3 本目と 4 本目のシグナルが左右の端に入るように掃引範囲±5.066 mT でスキャンし(中心磁場約 335.8 mT)、1 回の掃引時間は 30 秒とした。積算回数はシグナル強度にもよるが 40 回以上とするのが推奨されており、当初は我々も 40 回で測定をしていたが、S/N 向上のために積算回数を 360 回（1 つのスペクトルあたり約 3 時間）まで色々に変化させて検討したところ、最終的には 120 回の積算で十分であることがわかった。この回数は前述のようにシグナル強度に依存するため、被ばく線量が高い（炭酸ラジカル強度が大きい）試料については積算回数を減らしても十分解析可能であるが、被ばく線量が低い（炭酸ラジカル強度が低い）試料については積算回数が少ないと解析のフィッティングがきちんとならないことが多かった。また、ハイドロキシアパタイトが結晶性のため、試料の異方性によって炭酸ラジカル強度が異なることがある。そこで、測定後に必ず試料を入れた試料管を空洞共振器から取り出して振り、最低でも 3 回の繰り返し測定を行うこととした。

平成 29 年度は当該 ESR 装置を用いて、(1) 試料の ESR 測定条件の最適化、(2) 検量線作成に使用する非被ばく地域のニホンザルの歯から測定試料を作成し、試料中に含まれる炭酸ラジカル（未照射、バックグラウンドに相当）の測定を行った。しかし、非被ばく地域ニホンザルのエナメル質を計測した ESR スペクトルには不純物に由来すると考えられるシグナルが現れることがあった。このようなシグナルが現れる原因がわからず、さらに除去方法もわからなかったため、新たに別の個体からエナメル質を抽出するなど、非被ばく試料の準備に時間を要した。このようなラジカルが存在しない、比較的清浄と思われた試料が得られたため、バックグラウンド測定後の試料にコバルト 60 ガンマ線 10 mGy を照射して炭酸ラジカルを測定した。以後、ESR 測定後の試料にコバルト 60 ガンマ線照射を追加し、ESR 装置で測定することを繰り返し、検量線の作成を開始した。照射は国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所のコバルト 60 ガンマ線照射装置を利用し、室温、大気中、線量率約 0.137 Gy/h で行った。平成 29 年度末現在で、バックグラウンド、10 mGy および 20 mGy 照射後の試料で炭酸ラジカル強度を測定したが、顕著な差が得られなかった。さらに、これまで別の日本電子の ESR 装置で測定してきたヒト歯やニホンザル歯と比べて炭酸ラジカル強度抽出のためのフィッティングが収束しないことが多く、炭酸ラジカル強度の繰り返し測定のばらつきも大きかった。その一方で、事業開始前に作成していたヒト乳歯の検量線用試料の測定ではフィッティングがきちんとなっており、繰り返し測定のばらつきも比較的小さかった。また、ESR 装置用の周波数カウンタを新たに購入したことで、測定した炭酸ラジカルの g 値の高精度の測定・定量が可能となった。

平成 30 年度は、引き続き検量線作成のための測定を続けたが、コバルト 60 ガンマ線をさらに 10 mGy 照射して合計 30 mGy 照射したにもかかわらず、炭酸ラジカル強度に顕著な差が得られなかった。具体的には、バックグラウンドと 10 mGy では炭酸ラジカル強度がほぼ同程度、20 mGy 照射の炭酸ラジカル強度は 10 mGy のそれを下回るという結果になった。30 mGy 照射の試料においては、炭酸ラジカル強度が増加しないだけでなく、前述のようにフィッティングが収束しづらく、繰り返し測定の際につきも大きいままであった。炭酸ラジカル強度はコバルト 60 ガンマ線の線量に依存して増加し、炭酸ラジカル強度が大きくなればフィッティングがきちんと収束するようになるので、線量の増加とともに炭酸ラジカル強度が減少すること、フィッティングが収束しづらいままであることはないはずである。コバルト 60 ガンマ線の照射はヒト乳歯で検量線を作成したときと条件が変わっていないため、照射自体に問題はないと考えられる。これらの結果から炭酸ラジカルを正しく測定できていないことが予想されたので、この原因を検討することとした。

通常、歯の ESR 測定では炭酸ラジカルおよび有機物ラジカル（両者を合わせてターゲットラジカルと呼ぶこととする）が現れる磁場の前後 5 mT 程度を ESR 装置で掃引して ESR スペクトルを得ている。これまでの研究では、この範囲で測定したターゲットラジカル前後のベースラインは一致していたが、本研究で使用しているサルの歯では右側のベースラインが左側よりも低くなることがわかった（図 3-1）。この原因はすぐにはわからなかったが、広範囲の磁場で掃引したところ、図 3-2 に示すようにスペクトル全体が右下がり（ブロードなピークにのっている）となることが判明した。このため、6 本の鋭い Mn マーカーの 3 本目と 4 本目の間に得られるターゲットラジカル左右のベースラインが揃わず、炭酸ラジカル抽出のフィッティングが正しく収束しなかった結果、検量線を作成しても炭酸ラジカル強度に線量依存性が確認できなかつたと考えられる。

このようにブロードなピークとなる限り正確な検量線が作成できないため、この改善が急務であった。色々検討した結果、これは金属由来のラジカルによるものである可能性が考えられた。そこで、左右のベースラインを揃えることができるエナメル質調製方法を検討した。まず、歯からエナメル質を抽出した後に Titriplex III 溶液で超音波洗浄することで歯表面の金属を除去した。また、エナメル質と象牙質の密度差を利用してエナメル質を抽出しているが、エナメル質と象牙質の界面付近から抽出された試料中には象牙質が混入する可能性が考えられた。この不純物も ESR 測定を妨害する要因になるため、Titriplex III 処理を行った試料をさらに NaOH 溶液で超音波洗浄し、混入する可能性がある象牙質を溶解させることとした。このように 2 段階の超音波洗浄の工程（化学処理）を追加した試料を乾燥させて、ESR 測定を行なった。その結果、図 3-3 に示すようにブロードなスペクトルを除去することができたので、ターゲットラジカル左右のベースラインを揃えることができたようになった。しかし、これでもまだ炭酸ラジカル強度抽出のフィッティングが収束しないことが多かった。この原因の解決にも時間を要したが、同一試料を日本電子で測定した ESR スペクトルと当該 ESR 装置で測定した ESR スペクトルを比較しながら検討したところ、当該 ESR 装置では磁場の掃引範囲が ± 5.066 mT では不十分であることがわかった。そこで、Mn マーカーの 3 本目と 4 本目のシグナルの外側（これもベースラインと同じ）まで入るよう、掃引範囲を ± 5.277 mT に増やしたところ、フィッティングの収束が非常によくなり、繰り返し測定の際

ばらつきも小さくなった。この結果、炭酸ラジカル抽出のフィッティングを正しく収束させることができるようになったため、ニホンザルの歯の炭酸ラジカル強度を正確に解析することが可能になった。

また、一部の試料において図 3-4 に示すようにターゲットラジカルの上に 3 本線に分裂したようなラジカルが重なったスペクトルが得られた。これは、平成 29 年度にも見られた問題であり、このようなスペクトルが得られるとフィッティングが行えない。このスペクトルは、化学処理直後から見える場合以外に、平成 29 年度と同様に化学処理を行わない方法でエナメル質を抽出した直後、あるいは化学処理抽出直後には分裂したスペクトルが見られなかった試料において時間が経つと現れることがあった。この分裂したスペクトルの詳細は不明だが、時間経過とともに現れる場合があったことから、分離処理や化学処理の後に歯の表面に活性種が残り、それが時間経過とともに何かを吸着することが原因ではないかと予想した。そこで、化学処理を行った後に酢酸で超音波洗浄することで歯の表面に残っていると思われる活性種を取り除いたところ、図 3-3 に示すような正常な ESR スペクトルが得られるようになった。検量線作成のために新たに用意した未照射の試料 3 本にも同様の 3 本線に分裂するラジカルが見られたが、化学処理および酢酸処理を行ったのちにそれぞれの ESR 測定を行い炭酸ラジカル強度を抽出したところ、フィッティングもきちんと収束すること、繰り返し測定の際のばらつきが小さいことが確かめられ、ニホンザルの ESR 測定のための試料調製方法を確立できた。これで、平成 29 年度から問題となっていた、炭酸ラジカル強度抽出を阻害していた 3 本線のラジカルおよびブロードなラジカルを除去するという課題、これに加えてフィッティングの収束が悪く、繰り返し測定の際のばらつきを大きいという課題の 3 つを全て解決できた。

図 3-5 は、このように調製したニホンザルのエナメル質試料 3 本に、改めてコバルト 60 ガンマ線照射を 50 mGy から開始し、ESR 測定終了ごとに 50 mGy ずつ、150 mGy まで追加照射をして作成した検量線である。実線は直線フィッティングの結果、上下の破線は 90 % 予測区間を示している。線量の増加とともに炭酸ラジカル強度は線形に増加する検量線が得られた。この結果の未照射の 90 % 予測区間上限値から、本課題で確立した ESR 測定法による検出限界は約 40 mGy であると推定された。従来報告されてきた ESR 測定法の検出限界は 200 mGy 弱といわれており、これを大幅に改善したことになる。

このように作成した低い線量領域の照射によって生じた炭酸ラジカル強度と線量の関係を示す本検量線を用いて、実際に福島県で捕獲された野生ニホンザルの積算外部被ばく線量を評価した。帰還困難区域で捕獲された個体から抽出したエナメル質試料のうち、化学処理なしでもブロードなピークが出現しなかった 4 頭の試料において炭酸ラジカル強度のフィッティングを行なった。ESR 計測を行った全ての試料で検出限界である 40 mGy 以上、具体的には 46 mGy、58 mGy、202 mGy、257 mGy の積算外部被ばく線量であることが評価された。これらの個体試料については、検量線作成時の試料と同様の化学処理と酢酸処理を施して線量評価結果を比較するとともに、ブロードなピークが得られた他の個体についても同様の処理を行い、積算外部被ばく線量の推定を継続していく予定である。以上のように、本委託契約期間では導入した ESR 装置を用いてエナメル質中に含まれる炭酸ラジカルを測定し、積算外部被ばく線量を評価する体制を整えた。特に、野生ニホンザルの歯に特徴的な ESR 測定を阻害する要

因を取り除く工程を加えた、ニホンザルの歯に最適化した調製法を確立した。これまでに帰還困難区域で捕獲された一部の個体について積算外部被ばく線量を評価し、いずれも検出限界である 40 mGy 以上の積算被ばく線量であると推定された。残りの個体については、本法を用いた被ばく線量評価を継続するとともに、シミュレーションによる被ばく線量評価結果と比較することで、評価結果の妥当性を確認する予定である。

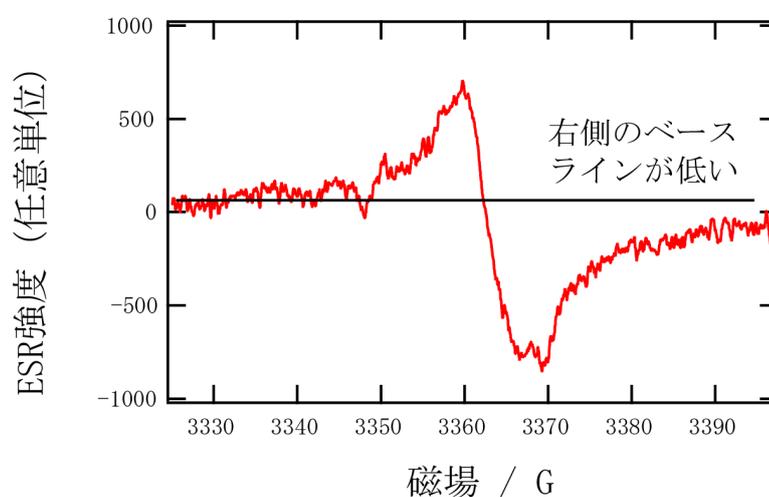


図 3-1. ベースラインが異なるニホンザルの歯の ESR スペクトル
ターゲットラジカルの左右のベースラインの高さが違い、右側が低い。

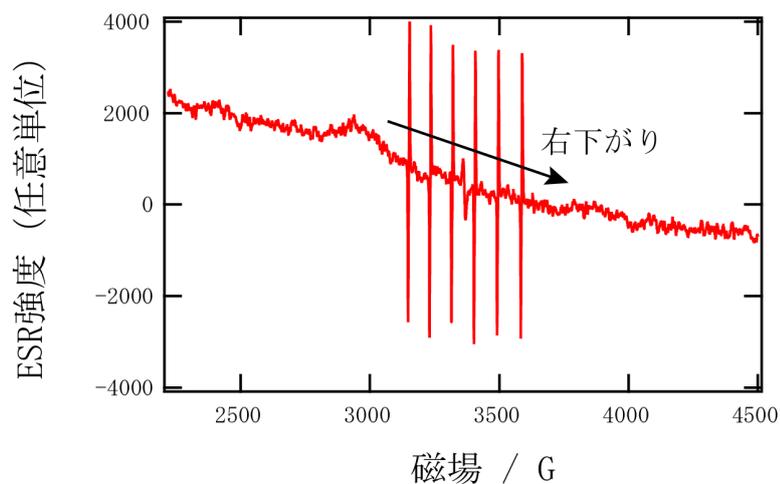


図 3-2 広範囲の磁場で掃引したニホンザルの歯の ESR スペクトル
 スペクトル全体が右下がりになっている。6 本見えている鋭い
 ピークは Mn マーカー。図 3-1 は Mn マーカーの 3 本目と 4 本
 目の間を測定したものである。

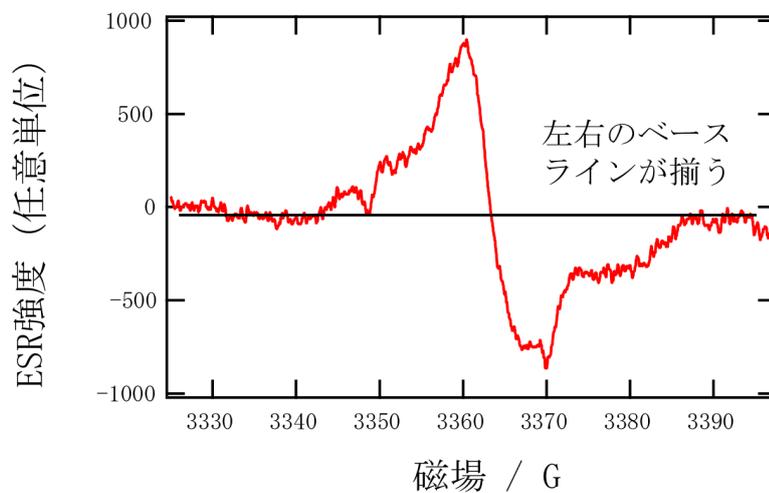


図 3-3 ブロードなピークが消失したニホンザルの歯の ESR スペクトル
 ブロードなピークが消えたため、左右のベースラインの高さが揃った。

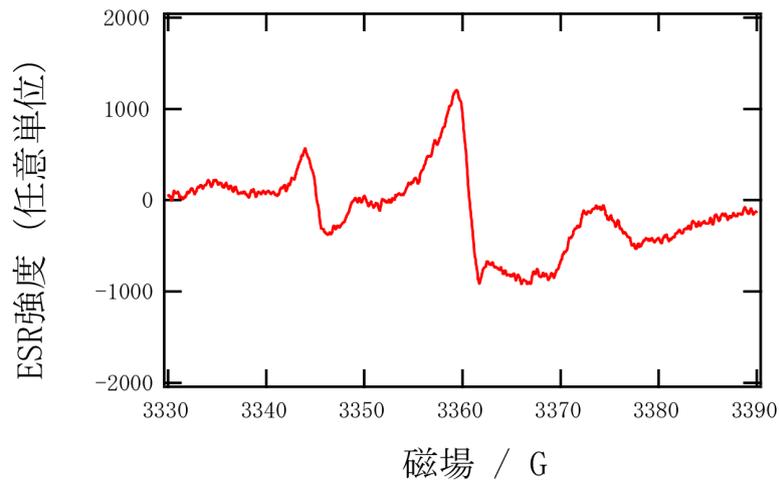


図 3-4 ニホンザルの歯の ESR スペクトルに出現する 3 本のピーク
 ターゲットラジカルの上に、3 本線と思われるラジカルが重なっている。

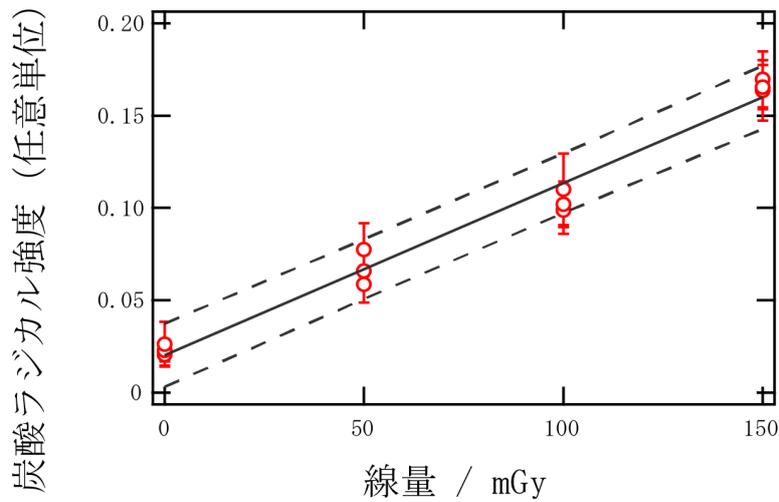


図 3-5 ニホンザルの歯の検量線
 線量の増加とともに炭酸ラジカル強度が増加する。各線量のプロットおよびエラーバーは、3 本の試料のそれぞれ平均値と繰り返し測定のみによるばらつきである。実線は直線フィッティングを行った結果、破線は 90 % の予測区間を示す。

3.1.2 シミュレーションによる線量評価と最適化の検討（再委託先：広島大学） （平成 28-30 年度）

（1）換算係数の計算

A) ニホンザルの体形モデル（平成 28-30 年度）

ICRP108 では、環境指標動植物の換算係数を楕円体でモデル化し、まとめている。これを参考に、捕獲したニホンザルの身体測定の結果を用いて、楕円体を用いた体形モデルを平成 28 年度に作成した結果を、表 3-1 に示す。

B) 地表面モデル（平成 29 年度）

地表面にいる場合について、福島原発事故で放出された主要 7 核種 ($^{129, 129m, 132}\text{Te}$ 、 $^{131, 132}\text{I}$ 、 $^{134, 137}\text{Cs}$) の外部被ばく線量率・内部被ばく線量率換算係数の計算を平成 29 年度に実施した。外部被ばく線量率換算係数の計算は、図 3-6 に示したように、 $10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m}$ の空気層と 50cm の土壌を定義し、表層から 0.5cm に分布した場合の他、深さ分布を考慮するために $0.5\text{--}1\text{cm}$ 、 $1\text{--}2\text{cm}$ 、 $2\text{--}5\text{cm}$ 、 $5\text{--}10\text{cm}$ 、 $10\text{--}15\text{cm}$ および $15\text{--}20\text{cm}$ の各層に均一分布した場合を計算した。計算時間を短縮するため、横 4 面にはミラー条件を採用した。土壌の表面積あたりに 1Bq に対応した 7 核種 ($^{129, 129m, 132}\text{Te}$ 、 $^{131, 132}\text{I}$ 、 $^{134, 137}\text{Cs}$) からのガンマ線またはベータ線がニホンザルを模擬した楕円体付与するエネルギーを計算した。楕円体の大きさは、捕獲したニホンザルの身体測定結果から 2kg 以下(S)、 $5\text{--}10\text{kg}$ (M)および 10kg 以上 (L)の 3 種類、歩行モデルと座位モデルの 2 種類について計算した。 γ 線は、National Nuclear Data Center のウェブサイト[1]の値を用いた。 β 線のエネルギースペクトルについても既に報告済みであるが、遠藤らの JRR 論文のスペクトル[2]に、内部転換電子[1]を考慮したスペクトルを利用した。内部被ばく線量率換算係数の計算では、線源を、ニホンザルを模擬した楕円体内部に均一分布させ、同楕円体に付与されるエネルギーを計算した。

C) 樹上活動モデル計算（平成 30 年度）

B)に示した地表面モデルにまとめた外部被ばく線量率換算係数は、ニホンザルが地表面にいる場合の換算係数であり、これらを用いた場合、24時間地表面でいる場合の外部被ばく線量を推定することになる。そこで、B)で得た外部被ばく線量率換算係数に加え、ニホンザルを模擬した楕円体を 5m 、 15m 、 25m の高さに配置した場合の換算係数の計算を平成 30 年度に追加した。体系モデルは、これまで使用している 2kg 以下(S)、 $5\text{--}10\text{kg}$ (M)および 10kg 以上 (L)の 3 種類について計算した。ガンマ線、ベータ線の線源項は、平成 29 年度の実施内容と同様に、National Nuclear Data Center のウェブサイト[1]、遠藤らの JRR 論文のスペクトル[2]に内部転換電子[1]を考慮したスペクトルを利用した。

D) PHITS 計算結果からの換算係数の計算法（平成 28-29 年度）

核種 i が d_k の深さの層に対するエネルギー付与量から外部被ばく線量率換算係数： D_i^{ex} ($(\text{mGy/d})/(\text{Bq/m}^2)$) を求めるためには以下の式を用いた。

$$D_i^{ex}(d_k) = \sum_{j=\gamma,\beta} \frac{E_{ij}(d_k)}{m} I_j S \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 1000, \quad (1)$$

ここで、 j は核種 i の γ 線または β 線を示し、 I_j はその放出率を意味する。 m は楕円体の質量、 E_{ij} 核種 i の γ 線または β 線の楕円体へのエネルギー付与、 S は計算に用いた線源の面積 m^2 を示す。表層線源の換算係数の評価には d_i (0 - 0.5 cm)のみであり、深さ分布を考慮する場合には、深さ分布の各層の放射能フラクシオン $f(d_k)$ を考慮して

$$D_i^{ex} = \sum_{k=1}^7 f_i(d_k) \cdot D_i^{ex}(d_k) \quad (2)$$

のように、足し合わせる。

内部被ばく線量率換算係数 D_i^m ((mGy/d)/(Bq/kg))の計算には以下の式を用いた。

$$D_i^m = \sum_{j=\gamma,\beta} \frac{E_{ij}}{m} I_j m \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 1000. \quad (3)$$

(2) 換算係数の計算結果 (平成 28 年度)

地表面モデルの外部被ばく線量率換算係数を平成 29 年度に決定した。表層線源の場合の 7 核種の外部・内部被ばく線量率換算係数の計算結果を表 3-2 に示す。計算で得られた値と、ICRP108 に掲載された陸上参照動物 9 種類 (シカ、ラット、アヒルの卵、アヒル、蛙の卵、蛙、ハチの巣、ハチ、ミミズ) の換算係数と本計算結果の比較を、実効半径 (楕円体の体積と同じになる球の半径) の関数として図 3-7 に示す。ICRP108 の値と本結果は、最大 20%以内、平均 8%で一致する傾向が得られた。したがって、20%程度の誤差を許せば、ICRP108 に記載された値を実効半径で内挿して利用可能であることを示している。

歩行モデルと座位モデルを比較するため、座位モデルと歩行モデル外部被ばく線量率換算係数の比をガンマ線の平均エネルギーとベータ線の平均エネルギーの和： \bar{E} に対してプロットした (図 3-8)。図から低エネルギーのガンマ線・ベータ線を除けば座位モデルと歩行モデル外部被ばく線量率換算係数は同一として良いことが明らかとなった。

7 核種の外部被ばく線量率換算係数の高さ依存性を平成 30 年度に計算した結果を表 3-3 に示す。これらの換算係数の内、放射性 Cs に対する換算係数と平成 29 年度に報告した地表面モデルでの値の比を図 3-9 に示す。今回、睡眠をとる高さを 15m と仮定すると、夜間睡眠時の換算係数は、地表面での値の 0.52 倍とすれば良いことを示している。

(3) 深さ分布を持った土壌汚染の外部被ばく線量率換算係数 (平成 29 年度)

深さ分布を仮定した計算として、深さ分布が指数分布の場合について平成 29 年度に計算を行った。計算結果を図 3-10 に示す。図 3-10 では、指数分布を仮定し質量リラクゼーション深さ 0.6 ~ 2.6 g/cm² の体型 L の外部被ばく換算係数計算値を示す。福島原発以降、土壌中の ¹³⁷Cs について、質量リラクゼーション深さが 0.9 ~ 1.5 g/cm² と報告されている [3-6]。この範囲を図 3-10 に赤いハッチで示している。この図から、0.9 ~ 1.5 g/cm² に対する換算係数の変化は、1.3 g/cm² の値を使用した場合に対して±8%程度に収まっている。また、表 3-4 の表層線源の換算係数で除すると ¹³⁷Cs で 0.71、¹³⁴Cs で 0.74 が得られる。この値

は、土壌自身による自己遮蔽の係数に相当する。

(4)野生ニホンザルの活動モデルの文献調査（平成 30 年度）

野生ニホンザルの活動モデルを作成するために、野生サルを観察した論文を調査した。岩野等は、千葉県高岩山においてニホンザル野生群の日周活動リズムの観察を実施し[7]、日中、8時から17時の時間帯において、樹上での活動と地表面での活動のニホンザル数をまとめている[7]。このデータから日中の樹上/地表面の活動の比を用いて樹上活動割合を導出した。結果を図 3-11 に示す。樹上活動割合は、この時間帯で 0.48 ± 0.09 とほぼ半分が樹上で活動していることを示している。

また、半谷等は、屋久島において動作感知カメラを用いて、ニホンザルの動作を撮影することで活動頻度を調査している[8]。この報告では、四季を通じた観察を行い、それぞれの季節の活動頻度の時間プロファイルを示している他、四季の平均の活動頻度の時間プロファイルをまとめている[8]。図 3-12 に、半谷論文の四季の平均の活動頻度の時間プロファイルを示す。四季の平均の活動頻度の時間プロファイルは、岩野らが実施した 8時から17時の時間帯の観察と大きな矛盾はなく、日中活動と夜間の活動に分け取り扱いをすることとした。

夜間の活動について、Brotcorne 等は、尾長ザルの観察を行い夜間は、樹上で睡眠をとると報告している[9]。同様の報告は多く、静岡県鳥獣被害対策マニュアルでは、「ニホンザルは、日の出から日没までの明るい時間帯だけ活発に活動し、夜間は活動しないため、夜にサルが被害を及ぼすことはない。夜間は樹冠内部などを泊まり場として休息する。」としている[10]。更に、鈴木等は「積雪期における下北 M 群の日中の活動は早朝の 6時から7時の間に始まる。その時刻になるとまず群れ全体の中で起床時間の早い 2-3 才のコザルが泊り場に利用したヒバの大木から地上に降り、続いて地上の雪面と近くの灌木の間を激しく動き廻りながら 2-3 頭から 4~5 頭の単位で遊びを始める。その間コザル達は頻りに悲鳴や歓声をあげるが、ヒバの大木に居残る仲間の反応は少ない。しかし「泊り場」のヒバに太陽の光りが届く午前 8 時前後にはコザルの遊びに交尾や出産経験のない若い 4-6 才のサルが加わり、更に 0-1 才のサルも地上に降りて遊びを始める。一方、最後まで「泊り場」のヒバに残って眠り続ける成獣達は午前 9 時前後からその場で採食活動を始め、特別な合図のないままツタ類や落葉樹の小枝の芽と皮を貧りながらゆっくり木から木へ移動する。」[11]と論じている。これらから、今回夜間は樹上で睡眠を取り、日中は 0.48 の割合で樹上にいると仮定した。更に、Albert 等は、「野生ブタオザルを観察し枝の終端に座位で眠りをとる。」[12]、また、睡眠をとる高さが樹高の 0.75 ± 0.06 と報告している[11]ことから、ニホンザルにおいても、樹高の 75%の高さで、座位で睡眠をとるとした。

福島県の林面積は、およそ 552161 ha、面積の 57.8%を広葉樹、42.2%を針葉樹が占有し[13]、中川等は広葉樹の多い調査区域内で、合計 41 本を計測：広葉樹の樹高の平均と標準偏差値を求めた。広葉樹の樹高の平均は 19.3m、標準偏差は 3.0 [14] と報告している他、林野庁報告書は、福島県のスギの平均樹高は 18.4m と報告している [15]。これらを考慮し、睡眠をとる高さの平均値を 15m と見積もった。

(5) 樹上活動モデル補正 (平成 30 年度)

樹上活動モデルの積算外部被ばく線量： D_{ex}^t 、地表面モデルの積算外部被ばく線量 D_{ex}^G 、樹上換算係数補正： η 、樹上活動割合： α とすると、樹上活動モデルの積算外部被ばく線量と地表面モデルの積算外部被ばく線量の関係は、以下で示せる。

$$\begin{aligned} D_{ex}^t &= \alpha \times \eta D_{ex}^G + (1 - \alpha) D_{ex}^G \\ &= \{1 + \alpha (\eta - 1)\} D_{ex}^G \end{aligned} \tag{1}$$

先に示した仮定、夜間 14 時間樹上で睡眠し、日中 10 時間の内 0.48 の割合で樹上にいるとすると、樹上活動割合： $\alpha = (0.48 \times 10 + 14) / 24 = 0.78$ となる。また、樹上換算係数補正： $\eta = 0.52$ 、を用いると、式 1 は、

$$D_{ex}^t = 0.63 D_{ex}^G \tag{2}$$

で与えられる。

(6) ^{137}Cs 汚染マップの内挿 (平成 29-30 年度)

米国 National Nuclear Security Administration (NNSA) は、平成 23 年 3 月 17-19 日に航空機サーベイ実施し、その結果を公表している[16]。また一方、文部科学省は、大学連合を組織し、平成 23 年 6-8 月に 2-km メッシュ土壤調査を実施している[17]。これらのデータを用いることで ^{137}Cs 汚染マップを作成した。データの内挿には、System for Automated Geoscientific Analyses-Geographic Information System (SAGA-GIS) [18]を利用し、クリギング内挿法を用いた。バリオグラムの再現性は、99%が得られている。内挿では、緯度 36.51611 から 38.32911、軽度 139.30506 から 141.15896 に対して、1814 × 1854 グリッドメッシュに ^{137}Cs 汚染量を記録した。作成した ^{137}Cs 汚染マップを図 3-13 に示す。内挿値を用いることで、GPS 座標を用いてニホンザルの採材地点の ^{137}Cs 汚染量を推定できる。

(7) 採材ニホンザルの被ばく線量推定 (平成 30 年度)

福島近郊の放射能汚染において検出されている主要 7 核種 ($^{129, 129m, 132}\text{Te}$, $^{131, 132}\text{I}$, $^{134, 137}\text{Cs}$) について、各物理半減期を用いて積算空間線量の計算を行った。半減期が比較的短い $^{129, 129m, 132}\text{Te}$ 、 $^{131, 132}\text{I}$ の寄与と半減期が長い $^{134, 137}\text{Cs}$ の寄与を確認するため、積算空間線量を 2 つの成分に分けて図 3-14 に図示した。この図では、沈着後 200 年での積算線量を 1 として表示している。図より、沈着 1 年後には $^{129, 129m, 132}\text{Te}$ 、 $^{131, 132}\text{I}$ の寄与は全積算線量の 10%程度の寄与に減少することが分かる。東北大学によるニホンザルの採材の開始は、2013 年であることから、採材したニホンザルの積算被ばく線量の推定には、 $^{134, 137}\text{Cs}$ を扱えば十分である。積算地表面モデル D_{ex}^G および樹上活動モデル D_{ex}^t の 2 通りについて推定を実施した。

平成 23 年 3 月においては ^{137}Cs と ^{134}Cs の汚染濃度は、近似的に 1 : 1 と報告されている

ことから、採材したニホンザルの積算外部被ばく線量の推定には、(1)、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs のみが寄与；(2) ニホンザルの採材地点の ¹³⁷Cs 汚染内挿値 (= ¹³⁴Cs 汚染内挿値)；(3) 深さ分布を持った放射性 Cs の土壤中における自己遮蔽係数 0.71 (¹³⁷Cs) と 0.74 (¹³⁴Cs)；(4) 放射性 Cs は物理半減期のみで減衰；以上の 4 つの仮定を用いた。

積算内部被ばく線量の推定には、(5) 東北大学が実施した採材ニホンザルの大腿筋の放射能濃度が体内放射性 Cs の濃度と等しい；(6) 体内放射性 Cs の濃度は、物理半減期のみで減少する；の 2 つを仮定した。

(8) ニホンザルの被ばく線量推定結果 (平成 30 年度)

278 匹のニホンザルに対する積算内部被ばく線量、地表面モデルと樹上活動モデルに対する積算外部被ばく線量及び全積算被ばく線量の計算結果を表 3-5 に示す。また、樹上活動モデルの推定値の対数ヒストグラムを図 3-15 に示す。また、対数正規分布でフィッティングした結果を実線で示している。対数正規分布は、線量データを良く再現していたため、対数正規分布の平均値、及び分散を求めた。樹上活動モデルの推定値の最大値は 1.57 Gy、最小値は 7.9 mGy、更に、浪江町の平均値は 373 ± 85 mGy (単純平均: 591 ± 479 mGy)、南相馬市鹿島区: 14.6 ± 0.4 mGy (単純平均: 25 ± 23 mGy)、原町区: 34.9 ± 2.4 mGy (単純平均: 58 ± 54 mGy)、小高区: 39.9 ± 10.5 mGy (単純平均: 59 ± 50 mGy) が得られた。同様に、地表面モデルの最大値は 1.76 Gy、最小値は 8.8 mGy、浪江町: 516 ± 11 mGy (単純平均: 728 ± 530 mGy)、南相馬市鹿島区: 20.6 ± 0.4 mGy (単純平均: 31 ± 25 mGy)、原町区: 45.9 ± 3.7 mGy (単純平均: 71 ± 59 mGy)、小高区: 51.9 ± 8.3 mGy (単純平均: 71 ± 53 mGy) であった。

参考文献

1. National Nuclear Data Center (NNDC). NNDC data base: Interactive Chart of Nuclides. <http://www.nndc.bnl.gov/chart/> (last update: 1 February 2017) (12 Feb. 2017, date last accessed)
2. Endo S, Tanaka K, Kajimoto T et al. Estimation of β -ray dose in air and soil from Fukushima Daiichi Power Plant accident. J Radiat Res 2014, 55:476-483.
3. Matsuda N, Mikami S, Shimoura S, Takahashi J, Nakano M, Shimada K, Uno K, Hagiwara S, Saito K, Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan, J Environm Radioact 139, 2015: 427-434,
4. Kato H, Onda Y, Teramage M, Depth distribution of ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, and ¹³¹I in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, J. Environm Radioact. 2012, 111, :59-64.
5. Shiozawa S, Tanoi K, Nemoto K, Yoshida S, Nishida K, Hashimoto K, Sakurai K, Nakanishi TM, Nihei N, Ono Y. Vertical concentration profiles of radioactive caesium and convective velocity in soil in a paddy field in Fukushima. Radioisotopes. 2011;60(8):323-328.
6. Honda M, Matsuzaki H, Miyake Y, Maejima Y, Yamagata T, Nagai H, Depth profile

- and mobility of 129I and 137Cs in soil originating from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J Environm Radioact*, 2015, 146: 35-43.
7. Matsuda N, 岩野等, ニホンザル野生群の日周活動リズム—予報, ニホン人類学会誌, *J. Anthropol. Soc. Nippon*, 79(2):128-138(1971)
 8. Hanya et al., Activity of wild Japanese macaques in Yakushima revealed by camera trapping: Patterns with respect to season, daily period and rainfall *PLOS ONE*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190631> January 2, 2018.
 9. Brotcorne et al. The Role of Anthropic, Ecological, and Social Factors in Sleeping Site Choice by Long - Tailed Macaques (*Macaca fascicularis*), *American Journal of Primatology* 76:1140-1150 (2014)
 10. 静岡県鳥獣被害対策マニュアル, 27.6.4, <http://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa-325/chouzyu/manuaru.html>.
 11. 鈴木、霊長類の北限地帯に生息するニホンザルの群れ生活、北海道大學文學部紀要 : The annual reports on cultural science, 33(1): 239-270
 12. Albert et al. Sleeping Site Selection and Presleep Behavior in Wild Pigtailed Macaques, *American Journal of Primatology* 73:1222-1230 (2011)
 13. H26 年度、福島県森林・林業統計書、<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/137856.pdf>
 14. 中川等、岐阜県林セ研報, 1990, <http://www.forest.rd.pref.gifu.lg.jp/kenpo.html>
 15. 平成 26 年度、林野庁報告書、<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/>
 16. Musolino, S V, Clark, H, McCullough, T, Pemberton, W, *Environmental Measurements in an Emergency: This is not a Drill, Health Physics*. 102(5):516-526, May 2012.
 17. Musolino, S V, Clark, H, McCullough, T, Pemberton, W, *Environmental Measurements in an Emergency: This is not a Drill, Health Physics*. 102(5):516-526, May 2012.
 18. Minister of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). Map of Radiocesium in Soil, 2011. http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/017/shiryo/_icsFiles/afielddfile/2011/09/02/1310688_2.pdf (29 August 2011, date last accessed).

表 3-1 ニホンザル計算モデル

楕円体モデル	体型サイズ		
	小 (<2kg)	中 (5-10kg)	大 (>10kg)
a (cm)	30	50	60
b (cm)	4	8.5	9
c (cm)	2.7	5.6	6

表 3-2 外部被ばく線量率・内部被ばく線量率換算係数の計算結果

Radionuclide	Body group	Conversion factor [(mGy/d)/(Bq/m ²)]		Conversion factor [(mGy/d)/(Bq/kg)]
		External, walk model	External, sit model	Internal
¹³⁴ Cs	L	9.50×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁴	7.63×10 ⁻³
	M	1.02×10 ⁻⁴	1.07×10 ⁻⁴	6.72×10 ⁻³
	S	1.17×10 ⁻⁴	1.16×10 ⁻⁴	5.14×10 ⁻³
¹³⁷ Cs	L	3.53×10 ⁻⁵	3.77×10 ⁻⁵	4.91×10 ⁻³
	M	3.81×10 ⁻⁵	3.93×10 ⁻⁵	4.58×10 ⁻³
	S	4.32×10 ⁻⁵	4.31×10 ⁻⁵	4.01×10 ⁻³
¹³² I	L	1.17×10 ⁻⁴	1.22×10 ⁻⁴	9.87×10 ⁻³
	M	1.24×10 ⁻⁴	1.33×10 ⁻⁴	9.27×10 ⁻³
	S	1.46×10 ⁻⁴	1.44×10 ⁻⁴	8.25×10 ⁻³
¹³¹ I	L	2.23×10 ⁻⁵	2.21×10 ⁻⁵	5.02×10 ⁻³
	M	2.40×10 ⁻⁵	2.35×10 ⁻⁵	4.60×10 ⁻³
	S	2.75×10 ⁻⁵	2.60×10 ⁻⁵	3.88×10 ⁻³
¹³² Te	L	1.18×10 ⁻⁵	9.95×10 ⁻⁶	3.57×10 ⁻³
	M	1.29×10 ⁻⁵	1.08×10 ⁻⁵	3.15×10 ⁻³
	S	1.45×10 ⁻⁵	1.18×10 ⁻⁵	2.43×10 ⁻³
^{129m} Te	L	3.26×10 ⁻⁶	3.09×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻³
	M	4.20×10 ⁻⁶	3.68×10 ⁻⁶	7.83×10 ⁻³
	S	5.81×10 ⁻⁶	5.20×10 ⁻⁶	7.77×10 ⁻³
¹²⁹ Te	L	6.34×10 ⁻⁶	5.55×10 ⁻⁶	6.48×10 ⁻³
	M	7.48×10 ⁻⁶	6.50×10 ⁻⁶	6.43×10 ⁻³
	S	1.18×10 ⁻⁵	9.58×10 ⁻⁶	6.34×10 ⁻³

表 3-3 外部被ばく線量率換算係数の高さ依存性の計算結果

Radionuclide	Body group	Conversion factor [(mGy/d)/(Bq/m ²)]							
		on surface		5m height		15m height		25m height	
¹³⁷ Cs	L	3.74×10 ⁻⁵ ±	5.77×10 ⁻⁷	2.46×10 ⁻⁵ ±	5.72×10 ⁻⁸	1.86×10 ⁻⁵ ±	5.09×10 ⁻⁸	1.46×10 ⁻⁵ ±	4.35×10 ⁻⁸
	M	3.91×10 ⁻⁵ ±	7.34×10 ⁻⁷	2.61×10 ⁻⁵ ±	7.89×10 ⁻⁸	1.97×10 ⁻⁵ ±	6.78×10 ⁻⁸	1.54×10 ⁻⁵ ±	4.72×10 ⁻⁸
	S	4.28×10 ⁻⁵ ±	7.78×10 ⁻⁷	2.82×10 ⁻⁵ ±	1.29×10 ⁻⁷	2.15×10 ⁻⁵ ±	7.66×10 ⁻⁸	1.69×10 ⁻⁵ ±	9.11×10 ⁻⁸
¹³⁴ Cs	L	9.93×10 ⁻⁵ ±	1.34×10 ⁻⁶	6.81×10 ⁻⁵ ±	1.26×10 ⁻⁷	5.21×10 ⁻⁵ ±	1.23×10 ⁻⁷	4.02×10 ⁻⁵ ±	1.25×10 ⁻⁷
	M	1.06×10 ⁻⁴ ±	1.69×10 ⁻⁶	7.20×10 ⁻⁵ ±	1.74×10 ⁻⁷	5.51×10 ⁻⁵ ±	1.70×10 ⁻⁷	4.28×10 ⁻⁵ ±	1.27×10 ⁻⁷
	S	1.15×10 ⁻⁴ ±	2.21×10 ⁻⁶	7.81×10 ⁻⁵ ±	3.55×10 ⁻⁷	6.02×10 ⁻⁵ ±	3.47×10 ⁻⁷	4.67×10 ⁻⁵ ±	2.59×10 ⁻⁷
¹³² I	L	1.21×10 ⁻⁴ ±	1.96×10 ⁻⁶	8.24×10 ⁻⁵ ±	1.75×10 ⁻⁷	7.25×10 ⁻⁵ ±	2.57×10 ⁻⁷	5.62×10 ⁻⁵ ±	1.65×10 ⁻⁷
	M	1.32×10 ⁻⁴ ±	2.23×10 ⁻⁶	8.69×10 ⁻⁵ ±	2.41×10 ⁻⁷	7.62×10 ⁻⁵ ±	3.49×10 ⁻⁷	5.89×10 ⁻⁵ ±	2.28×10 ⁻⁷
	S	1.43×10 ⁻⁴ ±	2.37×10 ⁻⁶	9.44×10 ⁻⁵ ±	4.92×10 ⁻⁷	8.15×10 ⁻⁵ ±	7.07×10 ⁻⁷	6.35×10 ⁻⁵ ±	4.55×10 ⁻⁷
¹³¹ I	L	2.19×10 ⁻⁵ ±	3.50×10 ⁻⁷	1.46×10 ⁻⁵ ±	2.62×10 ⁻⁸	1.43×10 ⁻⁵ ±	4.01×10 ⁻⁸	1.10×10 ⁻⁵ ±	2.64×10 ⁻⁸
	M	2.33×10 ⁻⁵ ±	3.74×10 ⁻⁷	1.55×10 ⁻⁵ ±	3.58×10 ⁻⁸	1.51×10 ⁻⁵ ±	5.52×10 ⁻⁸	1.15×10 ⁻⁵ ±	3.55×10 ⁻⁸
	S	2.58×10 ⁻⁵ ±	4.74×10 ⁻⁷	1.70×10 ⁻⁵ ±	7.30×10 ⁻⁸	1.63×10 ⁻⁵ ±	1.11×10 ⁻⁷	1.24×10 ⁻⁵ ±	7.04×10 ⁻⁸
¹³² Te	L	9.88×10 ⁻⁶ ±	9.68×10 ⁻⁸	9.72×10 ⁻⁶ ±	2.57×10 ⁻⁸	7.97×10 ⁻⁶ ±	1.86×10 ⁻⁸	5.98×10 ⁻⁶ ±	1.14×10 ⁻⁸
	M	1.07×10 ⁻⁵ ±	1.19×10 ⁻⁷	1.02×10 ⁻⁵ ±	3.53×10 ⁻⁸	8.42×10 ⁻⁶ ±	2.53×10 ⁻⁸	6.30×10 ⁻⁶ ±	1.53×10 ⁻⁸
	S	1.17×10 ⁻⁵ ±	8.98×10 ⁻⁸	1.10×10 ⁻⁵ ±	6.86×10 ⁻⁸	9.09×10 ⁻⁶ ±	4.90×10 ⁻⁸	7.08×10 ⁻⁶ ±	3.08×10 ⁻⁸
^{129m} Te	L	3.07×10 ⁻⁶ ±	3.10×10 ⁻⁸	1.38×10 ⁻⁶ ±	5.48×10 ⁻⁹	1.07×10 ⁻⁶ ±	3.83×10 ⁻⁹	8.29×10 ⁻⁷ ±	2.57×10 ⁻⁹
	M	3.65×10 ⁻⁶ ±	3.89×10 ⁻⁸	1.45×10 ⁻⁶ ±	7.66×10 ⁻⁹	1.13×10 ⁻⁶ ±	5.04×10 ⁻⁹	8.72×10 ⁻⁷ ±	3.32×10 ⁻⁹
	S	5.17×10 ⁻⁶ ±	4.61×10 ⁻⁸	1.57×10 ⁻⁶ ±	1.53×10 ⁻⁸	1.22×10 ⁻⁶ ±	9.97×10 ⁻⁹	9.39×10 ⁻⁷ ±	6.45×10 ⁻⁹
¹²⁹ Te	L	5.51×10 ⁻⁶ ±	5.71×10 ⁻⁸	2.50×10 ⁻⁶ ±	1.01×10 ⁻⁸	1.93×10 ⁻⁶ ±	7.16×10 ⁻⁹	1.48×10 ⁻⁶ ±	5.27×10 ⁻⁹
	M	6.46×10 ⁻⁶ ±	3.88×10 ⁻⁸	2.66×10 ⁻⁶ ±	1.42×10 ⁻⁸	2.05×10 ⁻⁶ ±	9.24×10 ⁻⁹	1.56×10 ⁻⁶ ±	6.13×10 ⁻⁹
	S	9.51×10 ⁻⁶ ±	6.69×10 ⁻⁸	2.92×10 ⁻⁶ ±	2.76×10 ⁻⁸	2.24×10 ⁻⁶ ±	1.81×10 ⁻⁸	1.69×10 ⁻⁶ ±	1.16×10 ⁻⁸

表 3-4 土壌の自己遮蔽係数

Radionuclide	Soil shielding factor
¹³⁷ Cs	0.71
¹³⁴ Cs	0.74
¹³² I	0.68
¹³¹ I	0.71
¹³² Te	0.62
^{129m} Te	0.54
¹²⁹ Te	0.52

表 3-5 試験的に実施した被ばく線量推定値、積算地表面モデル積算外部被ばく線量 D_{ex}^e 及び樹上活動モデル積算外部被ばく線量 D_{ex}^t

事故 後の 経過 日数	試料 番号	^{137}Cs 濃度 (kBq/m ²) 内挿値	体長 (cm)	体重 (kg)	大腿筋 ^{137}Cs (Bq/kg)	内部被 ばく線 量 (mGy)	地表面モデル			樹上活動モデル		
							D_{ex}^e (mGy)	全線量 (mGy)	内部 /外部	D_{ex}^t (mGy)	全線量 (mGy)	内部/ 外部
726	7	1871	80	-	35,834	282.4	102.9	385.3	2.74	64.8	347.2	4.35
788	10	159	46	5.2	1,562	12	10	22	1.19	6.3	18.3	1.9
791	11	318	58	8.7	11,312	87	20.1	107.1	4.33	12.7	99.6	6.87
794	12	82	59	11.4	567	4.8	4.8	9.7	1	3	7.9	1.59
797	13	497	58	11.5	5,557	47.5	29.4	76.9	1.62	18.5	66	2.56
797	14	374	54	9.9	1,077	8.3	23.8	32.1	0.35	15	23.3	0.56
797	15	190	60	14.5	914	7.8	11.2	19	0.7	7.1	14.9	1.1
802	16	97	57.5	11.2	355	3.1	5.8	8.8	0.53	3.6	6.7	0.84
808	17	497	0	12.2	6,728	58.2	29.7	87.9	1.96	18.7	76.9	3.11
809	18	497	54	11.6	4,492	38.9	29.7	68.6	1.31	18.7	57.6	2.08
811	19	497	48	5.6	4,086	32.1	32	64.1	1	20.2	52.3	1.59
820	21	243	22	0.65	1,212	7.9	18.1	26	0.44	11.4	19.3	0.69
820	22	243	48	7.25	1,332	10.6	15.8	26.4	0.67	10	20.5	1.06
824	23	100	52	7.7	416	3.3	6.5	9.8	0.51	4.1	7.4	0.81
827	24	190	34	2.3	652	4.3	14.2	18.5	0.3	8.9	13.2	0.48
827	25	210	40	3.5	2,004	13.1	15.7	28.9	0.83	9.9	23	1.32
830	26	157	56	9	402	3.2	10.3	13.5	0.31	6.5	9.7	0.5
831	27	159	55	9.6	605	4.9	10.4	15.3	0.47	6.6	11.4	0.74
832	29	243	61	12.6	1,395	12.4	14.9	27.3	0.83	9.4	21.7	1.32
833	30	521	51	6.7	1,873	15.1	34.3	49.4	0.44	21.6	36.7	0.7
836	31	566	54	9	4,003	32.3	37.4	69.7	0.86	23.6	55.9	1.37
839	32	497	60	13.1	2,717	24.3	30.6	54.9	0.79	19.3	43.5	1.26
840	33	190	47	7.1	488	4	12.6	16.5	0.31	7.9	11.9	0.5
841	34	193	46	5.6	710	5.8	12.8	18.6	0.45	8.1	13.8	0.71
841	35	193	62	14.3	807	7.2	11.9	19.1	0.61	7.5	14.7	0.96
845	36	193	35	2.1	625	4.2	14.7	18.9	0.28	9.3	13.4	0.45
846	37	497	61	12.6	1,461	13.2	30.8	43.9	0.43	19.4	32.5	0.68
850	38	389	41	4.5	680	4.6	29.7	34.3	0.15	18.7	23.3	0.24
850	39	211	54	8.9	654	5.4	14.1	19.5	0.38	8.9	14.2	0.6
850	40	181	24	0.8	674	4.5	13.8	18.4	0.33	8.7	13.2	0.52
850	41	181	56.5	8.2	734	6	12.1	18.1	0.5	7.6	13.6	0.79
854	43	99	54	9	311	2.6	6.7	9.2	0.38	4.2	6.8	0.61

858	44	302	56	8.1	907	7.5	20.3	27.8	0.37	12.8	20.3	0.58
860	45	159	55	8.2	255	2.1	10.7	12.8	0.2	6.8	8.9	0.31
873	46	166	50	7	792	6.6	11.3	17.9	0.59	7.1	13.7	0.93
875	47	235	60	12.5	706	6.5	14.9	21.5	0.44	9.4	15.9	0.7
881	48	471	53	9	683	5.8	32.4	38.1	0.18	20.4	26.2	0.28
883	49	159	48	7.75	256	2.2	10.9	13.1	0.2	6.9	9.1	0.31
891	50	210	55	8.5	2,614	22.3	14.6	36.9	1.53	9.2	31.5	2.43
892	51	100	52	7.55	347	3	6.9	9.9	0.43	4.4	7.3	0.68
895	52	99	47	5.1	319	2.7	6.9	9.6	0.4	4.3	7.1	0.63
900	53	471	57	11.3	479	4.5	30.6	35.1	0.15	19.3	23.8	0.24
931	55	239	62	11.2	2,497	24.4	15.9	40.3	1.53	10	34.4	2.44
950	57	193	61	11.9	214	2.1	13.1	15.2	0.16	8.2	10.4	0.26
956	58	374	56	7.5	437	4	27.3	31.2	0.15	17.2	21.2	0.23
963	60	193	49	5.6	405	3.7	14.2	17.9	0.26	8.9	12.6	0.41
963	61	164	54	6.9	562	5.1	12.1	17.2	0.42	7.6	12.7	0.67
964	62	190	41	3	1,449	10.8	15.9	26.8	0.68	10	20.9	1.08
967	63	195	57	6.2	1,805	16.5	14.3	30.9	1.15	9	25.6	1.83
973	64	4425	50	5.8	26,238	241.3	327.5	568.8	0.74	206.3	447.6	1.17
976	65	97	35	3.5	308	2.3	8.3	10.6	0.28	5.2	7.5	0.45
977	66	208	48	8	707	6.5	15.4	21.9	0.42	9.7	16.2	0.67
978	67	440	58	11.2	2,563	26.1	30.4	56.5	0.86	19.2	45.3	1.36
979	68	159	46	5.1	417	3.9	11.8	15.7	0.33	7.4	11.3	0.52
980	69	166	63	11.2	312	3.2	11.5	14.7	0.28	7.2	10.4	0.44
981	70	97	55	9	356	3.3	7.3	10.6	0.45	4.6	7.9	0.72
984	71	387	55	10.8	344	3.5	26.9	30.4	0.13	16.9	20.5	0.21
985	72	210	58	8.3	1,623	15.1	15.7	30.8	0.96	9.9	25	1.52
991	73	497	47	5.7	5,482	51.2	37.3	88.5	1.37	23.5	74.7	2.18
991	74	172	36.5	2.3	1,501	11.5	14.7	26.3	0.78	9.3	20.8	1.24
993	75	471	58	11.4	5,456	56.3	32.9	89.2	1.71	20.7	77	2.72
993	76	157	54	7	432	4	11.8	15.8	0.34	7.4	11.5	0.55
998	78	193	43	4	2,417	18.6	16.6	35.3	1.12	10.5	29.1	1.78
1000	80	166	56	7.8	260	2.4	12.5	15	0.2	7.9	10.3	0.31
1004	81	193	67	11.2	381	4	13.6	17.5	0.29	8.5	12.5	0.46
1005	82	389	58	10.5	1,835	19.1	27.4	46.6	0.7	17.3	36.4	1.11
1006	83	581	52.5	8.8	1,395	13.2	44	57.2	0.3	27.7	40.9	0.48
1013	84	166	45.5	4.6	601	4.7	14.5	19.1	0.33	9.1	13.8	0.52
1014	85	166	55	10	478	5	11.8	16.8	0.43	7.4	12.4	0.68
1014	86	166	54	7.7	223	2.1	12.6	14.8	0.17	8	10.1	0.27

1014	87	367	53	8.8	1,124	10.7	28	38.7	0.38	17.7	28.4	0.61
1016	88	159	56	8.2	309	2.9	12.1	15.1	0.24	7.6	10.6	0.39
1020	89	157	50	5.7	888	8.5	12	20.5	0.71	7.6	16.1	1.12
1030	90	190	63	13	629	6.7	13.6	20.3	0.49	8.6	15.3	0.78
1030	91	210	39	2.7	507	4	18.6	22.6	0.22	11.7	15.7	0.34
1030	92	210	40	3.4	698	5.5	18.6	24.1	0.3	11.7	17.2	0.47
1041	93	210	61	12.9	839	9	15.2	24.2	0.59	9.6	18.6	0.94
1043	94	210	63	11.2	249	2.7	15.2	17.9	0.18	9.6	12.3	0.28
1043	95	210	44	4.2	808	6.5	18.7	25.2	0.35	11.8	18.3	0.55
1044	96	550	60	11.2	4,775	51.4	39.9	91.3	1.29	25.1	76.5	2.05
1047	97	387	53	8.3	1,024	10	30.2	40.3	0.33	19.1	29.1	0.53
1047	98	193	32.5	1.7	1,047	8.4	17.2	25.6	0.49	10.9	19.3	0.77
1047	99	193	45	4.2	1,020	8.2	17.2	25.4	0.48	10.9	19.1	0.76
1047	100	138	60	13.7	9,202	99.4	10	109.4	9.91	6.3	105.7	15.73
1050	101	153	0	6.4	441	4.3	11.9	16.3	0.36	7.5	11.9	0.58
1050	102	153	51	8.6	289	2.8	11.9	14.8	0.24	7.5	10.4	0.38
1050	103	445	57	9	8,144	79.9	34.8	114.7	2.29	21.9	101.9	3.64
1053	104	191	54	8.9	1,732	17	15	32.1	1.14	9.5	26.5	1.8
1055	105	191	54.5	10	999	10.9	14	24.8	0.78	8.8	19.7	1.23
1060	106	178	52	6.9	2,985	29.5	14	43.5	2.11	8.8	38.4	3.35
1063	107	482	55	10.3	2,688	29.4	35.4	64.8	0.83	22.3	51.7	1.32
1089	108	497	52	9.3	6,591	66.7	39.9	106.6	1.67	25.1	91.8	2.65
1097	109	471	51	7.2	4,017	40.9	38.1	79	1.07	24	64.9	1.71
1099	110	471	56	9.8	860	8.8	38.1	46.9	0.23	24	32.8	0.37
1112	111	166	63.5	11.9	448	5.1	12.6	17.7	0.4	7.9	13	0.64
1190	112	190	55	11.2	619	7.4	15.1	22.5	0.49	9.5	16.9	0.78
1190	113	190	25	0.65	663	5.9	18.6	24.5	0.32	11.7	17.6	0.51
1197	114	190	55	9.8	413	4.5	16.3	20.8	0.28	10.3	14.8	0.44
1201	115	210	56	8.3	631	6.9	18.1	25	0.38	11.4	18.3	0.61
1201	116	195	60	12.4	873	10.6	15.6	26.2	0.68	9.8	20.4	1.08
1204	117	433	58	9.7	4,737	52.2	37.3	89.5	1.4	23.5	75.7	2.22
1208	118	195	33	2	447	4.1	19.2	23.3	0.21	12.1	16.2	0.33
1215	119	210	52	12	593	7.2	16.9	24.2	0.43	10.7	17.9	0.68
1224	120	210	57	10.5	485	6	17.1	23	0.35	10.8	16.7	0.56
1239	122	708	55	8.5	19,932	224.9	62.3	287.2	3.61	39.3	264.1	5.73
1243	123	497	52	6.6	18,404	208.2	43.8	252	4.75	27.6	235.8	7.54
1249	125	342	49	5.5	746	8.5	30.3	38.7	0.28	19.1	27.5	0.44
1253	127	512	38	4.3	5,068	47.5	51.9	99.4	0.92	32.7	80.2	1.45

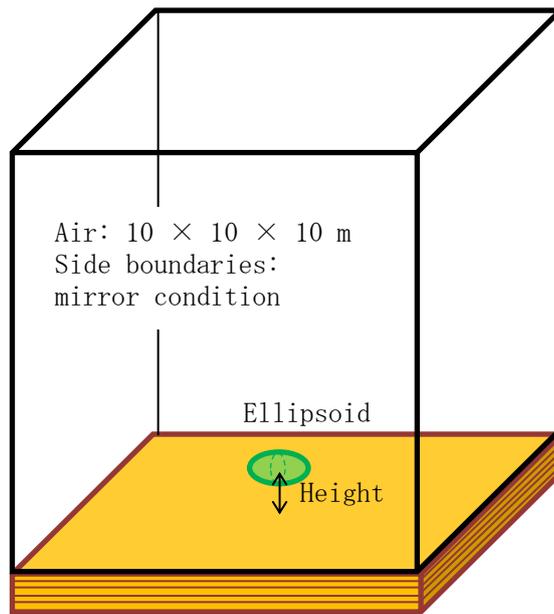
1265	128	204	56	8.5	978	11.2	18.3	29.5	0.61	11.5	22.7	0.98
1265	129	204	55	8.5	738	8.5	18.3	26.7	0.46	11.5	20	0.74
1268	130	190	62	13	213	2.7	15.8	18.5	0.17	9.9	12.6	0.27
1270	131	201	63	11	1,447	18.4	16.7	35.1	1.1	10.5	28.9	1.74
1272	132	236	49	6.8	782	9	21.2	30.2	0.43	13.3	22.3	0.68
1272	133	236	57	9	710	8.2	21.2	29.3	0.39	13.3	21.5	0.61
1272	134	236	57	11.2	658	8.4	19.7	28	0.42	12.4	20.8	0.67
1281	135	201	43	3.5	9,656	92.2	20.7	112.9	4.46	13	105.3	7.07
1313	136	483	56	8.7	12,353	146.3	44.3	190.6	3.3	27.9	174.2	5.25
1315	137	342	70	16.1	902	11.8	29.1	40.9	0.4	18.4	30.1	0.64
1322	139	498	59	9.4	8,100	96.5	45.9	142.3	2.1	28.9	125.4	3.34
1323	142	145	55	9	253	3	13.3	16.3	0.23	8.4	11.4	0.36
1329	144	484	57	12.8	7,488	98.7	41.5	140.2	2.38	26.2	124.8	3.77
1329	145	484	33	1.2	3,433	33.8	51	84.9	0.66	32.2	66	1.05
1340	146	484	51	7.2	2,969	35.8	44.9	80.7	0.8	28.3	64.1	1.26
1341	147	401	64	13.7	12,215	162.1	34.6	196.8	4.68	21.8	183.9	7.43
1341	148	488	58	10	4,203	55.8	42.2	98	1.32	26.6	82.4	2.1
1341	149	205	40	3.3	376	3.7	21.7	25.5	0.17	13.7	17.4	0.27
1343	150	497	45	6.4	2,309	27.9	46.2	74.1	0.6	29.1	57	0.96
1344	151	100	55	9	385	4.6	9.3	13.9	0.5	5.8	10.5	0.8
1344	152	210	35	2.9	609	6.1	22.4	28.4	0.27	14.1	20.2	0.43
1347	159	369	55	10.2	8,541	113.8	32	145.7	3.56	20.1	133.9	5.65
1351	162	210	62	13.2	781	10.4	18.3	28.7	0.57	11.5	21.9	0.91
1351	163	485	48	5.5	1,012	12.3	45.3	57.6	0.27	28.5	40.8	0.43
1355	165	195	51	8.7	1,663	20.2	18.2	38.4	1.11	11.5	31.7	1.76
1357	166	112	46	6.2	477	5.8	10.5	16.3	0.55	6.6	12.4	0.88
1358	167	153	52	7.5	267	3.3	14.3	17.5	0.23	9	12.3	0.36
1358	168	153	56	7.8	2,777	33.8	14.3	48.1	2.37	9	42.8	3.76
1358	169	326	67	11.2	1,732	23.2	28.4	51.6	0.82	17.9	41.1	1.3
1359	170	210	50	5	541	6.6	19.7	26.3	0.33	12.4	19	0.53
1359	171	210	40	3	298	3	22.5	25.5	0.13	14.2	17.2	0.21
1361	172	354	58	12.8	12,478	167.7	30.9	198.6	5.42	19.5	187.2	8.6
1368	173	208	56	11.5	466	6.3	18.2	24.5	0.35	11.5	17.8	0.55
1370	174	166	49	7.9	292	3.6	15.6	19.2	0.23	9.8	13.4	0.36
1375	176	485	59	11.1	1,115	15.1	42.6	57.7	0.35	26.8	41.9	0.56
1382	177	208	50.2	10.4	455	6.2	18.3	24.5	0.34	11.6	17.7	0.54
1384	178	349	52.5	8.4	2,285	28.3	33.1	61.4	0.85	20.8	49.1	1.36
1399	179	369	60	10.4	5,026	69.1	32.8	101.9	2.11	20.7	89.7	3.35

1399	180	190	68	12.5	4,437	61	16.9	77.8	3.62	10.6	71.6	5.74
1399	181	190	60	10	450	6.2	16.9	23.1	0.37	10.6	16.8	0.58
1399	182	616	50	8	376	4.7	58.9	63.6	0.08	37.1	41.8	0.13
1404	183	497	60	10.5	501	6.9	44.3	51.2	0.16	27.9	34.8	0.25
1405	184	497	57	10.4	1,367	18.9	44.3	63.1	0.43	27.9	46.8	0.68
1405	185	207	60	10.3	1,437	19.8	18.4	38.3	1.07	11.6	31.4	1.71
1412	186	207	57	10.2	484	6.7	18.5	25.2	0.36	11.7	18.4	0.57
1412	187	207	58	10.7	641	8.9	18.5	27.4	0.48	11.7	20.5	0.76
1412	188	166	50	7.1	464	5.8	15.9	21.8	0.37	10	15.9	0.58
1414	189	73	48	3	240	2.5	8	10.5	0.31	5.1	7.6	0.49
1417	190	86	43	4.7	274	2.8	9.5	12.3	0.3	6	8.8	0.48
1419	191	380	57	11.4	321	4.5	34.1	38.6	0.13	21.5	26	0.21
1420	192	195	47	6	1,282	16.2	18.8	35	0.86	11.8	28	1.37
1420	193	206	32	1.6	305	3.2	22.7	25.9	0.14	14.3	17.5	0.22
1426	194	343	60	11	588	8.2	30.9	39.1	0.27	19.5	27.7	0.42
1426	195	208	59	10.8	453	6.3	18.7	25	0.34	11.8	18.1	0.54
1428	196	481	67	13.8	2,150	30.1	43.3	73.4	0.69	27.3	57.3	1.1
1431	197	206	65	13.5	1,261	17.7	18.5	36.2	0.95	11.7	29.3	1.51
1431	198	206	50.5	5.8	675	8.6	19.9	28.5	0.43	12.6	21.1	0.68
1431	199	497	41.5	3.2	588	6.2	55.1	61.2	0.11	34.7	40.9	0.18
1455	200	159	52	7.4	987	12.7	15.6	28.3	0.82	9.8	22.6	1.3
1466	201	166	64	11.8	1,113	15.9	15.2	31.1	1.05	9.6	25.5	1.66
1467	202	192	65	12.8	150	2.1	17.6	19.7	0.12	11.1	13.2	0.19
1473	203	192	53	8.5	256	3.3	19	22.3	0.18	11.9	15.3	0.28
1473	204	371	40.5	3.5	337	3.6	42	45.6	0.09	26.5	30.1	0.14
1475	205	192	63	12.4	1,256	18	17.7	35.7	1.02	11.1	29.1	1.62
1536	206	192	36	1.5	378	4.2	22.3	26.5	0.19	14	18.2	0.3
1536	207	192	33	1.8	443	4.9	22.3	27.2	0.22	14	19	0.35
1536	208	192	39	2.5	286	3.2	22.3	25.5	0.14	14	17.2	0.23
1536	209	369	54	7.3	387	5.2	37.5	42.7	0.14	23.6	28.8	0.22
1536	210	207	60	11.5	691	10.3	19.6	29.8	0.52	12.3	22.6	0.83
1539	211	191	45.5	4.7	328	3.7	22.3	25.9	0.16	14	17.7	0.26
1543	212	190	50	6.7	599	8.1	19.3	27.4	0.42	12.2	20.3	0.67
1559	213	190	40	3.9	175	2	22.2	24.2	0.09	14	16	0.14
1565	214	190	49	5.4	249	3.4	19.5	22.9	0.18	12.3	15.7	0.28
1565	215	166	42	4.3	240	2.7	19.5	22.2	0.14	12.3	15	0.22
1580	216	133	53	8.2	129	1.8	13.8	15.6	0.13	8.7	10.5	0.2
1582	217	4715	45	4.7	10,654	147.2	488.5	635.7	0.3	307.8	455	0.48

1631	218	133	56.5	9.2	1,733	24.6	14.1	38.6	1.75	8.9	33.4	2.77
1631	219	133	42	4.2	1,455	17	16.1	33.1	1.06	10.1	27.2	1.68
1631	220	302	25	0.8	773	9	36.4	45.5	0.25	22.9	32	0.39
1662	221	1401	66.5	15.6	6,921	109.5	139.3	248.8	0.79	87.8	197.3	1.25
1677	222	159	55	8.6	1,757	25.5	17.1	42.6	1.49	10.8	36.2	2.37
1680	223	159	54	9.4	331	4.8	17.1	21.9	0.28	10.8	15.6	0.45
1684	225	777	49	6.4	3,108	45.2	83.8	129	0.54	52.8	98	0.86
1691	226	195	53	7.8	1,768	25.8	21	46.8	1.23	13.3	39.1	1.95
1692	227	141	44	5.2	2,618	38.2	15.3	53.5	2.51	9.6	47.8	3.98
1714	229	172	62	13	419	6.8	17.5	24.3	0.39	11	17.8	0.62
1735	232	157	53	7.6	1,507	22.5	17.2	39.7	1.31	10.8	33.3	2.07
1740	233	4322	60	12	4,730	77.7	442.2	519.9	0.18	278.6	356.3	0.28
1740	233	4322	60	12	4,730	77.7	442.2	519.9	0.18	278.6	356.3	0.28
1743	234	159	54	8.6	154	2.3	17.5	19.8	0.13	11	13.3	0.21
1749	244	166	47	7.7	502	7.5	18.3	25.8	0.41	11.5	19.1	0.65
1749	245	190	42	4.5	439	5.4	23.9	29.4	0.23	15.1	20.5	0.36
1769	247	98	58	11	130	2.2	10.2	12.3	0.2	6.4	8.6	0.34
1788	249	157	58	9.5	282	4.3	17.5	21.8	0.2	11	15.3	0.39
1788	250	157	31	1.3	228	2.9	20	22.9	0.1	12.6	15.5	0.23
1813	251	529	61	9.5	6,129	94.7	59.8	154.5	1.6	37.6	132.4	2.52
1840	252	2154	60	11.9	11,760	202.2	228.2	430.3	0.89	143.7	345.9	1.41
1840	252	2154	60	11.9	11,760	202.2	228.2	430.3	0.89	143.7	345.9	1.41
1910	339	800	61	12.5	4,122	73	86.7	159.7	0.8	54.6	127.6	1.34
1928	345	176	50	12	134	2.4	19.2	21.6	0.1	12.1	14.5	0.2
1949	350	159	61	13.6	5,494	98.9	17.4	116.4	5.7	11	109.9	9.02
1949	351	440	47	6.2	190	3.1	51.9	55	0.1	32.7	35.8	0.1
1951	352	176	51	8	528	8.7	20.8	29.4	0.4	13.1	21.8	0.66
1951	353	195	47	10.5	139	2.5	21.4	23.9	0.1	13.5	16	0.19
1952	355	501	0	5.5	3,637	59.7	59.2	118.9	1	37.3	97	1.6
1994	364	243	60	13	137	2.5	27	29.6	0.1	17	19.6	0.15
2012	369	479	55	6.2	5,957	100.3	57.6	157.8	1.7	36.3	136.5	2.76
2030	372	102	56	9	671	11.4	12.3	23.7	0.9	7.8	19.1	1.46
2042	378	404	48	5	1,587	27	49	76.1	0.6	30.9	57.9	0.87
2048	386	195	61	14.7	5,666	106.2	22	128.2	4.8	13.9	120.1	7.67
2048	387	368	61	12.8	8,475	158.9	41.6	200.5	3.8	26.2	185.1	6.07
2061	395	159	45	6.5	142	2.4	19.4	21.8	0.1	12.2	14.6	0.2
2063	396	153	53	14.7	191	3.6	17.3	20.9	0.2	10.9	14.5	0.33
2065	397	172	53	13	292	5.5	19.6	25.1	0.3	12.3	17.8	0.45

2065	398	172	54	10	5,106	96.4	19.6	115.9	4.9	12.3	108.7	7.82
2075	400	581	54	8.5	7,621	131.5	71.1	202.6	1.8	44.8	176.3	2.94
2079	404	614	49	-	33,742	583.3	75.3	658.6	7.74	47.4	630.7	12.29
2083	405	4728	52	9.5	65,323	1131	580.4	1711.4	1.95	365.7	1496.7	3.09
2083	405	4728	52	9.5	65,323	1131.1	580.4	1711.5	1.95	365.7	1496.7	3.09
2083	406	4728	32	2	31,550	453.6	662.9	1116.4	0.68	417.6	871.2	1.09
2083	406	4728	32	2	31,550	453.6	662.9	1116.4	0.68	417.6	871.2	1.09
2093	413	4434	60	13	65,581	1251.4	528.3	1779.7	2.37	332.8	1584.2	3.76
2093	413	4434	60	13	65,581	1251.4	507.4	1758.8	2.47	319.6	1571	3.92
2093	414	4013	31	1.4	4,791	69.2	564.2	633.3	0.12	355.4	424.6	0.19
2093	414	4013	31	1.4	4,791	69.2	564.2	633.3	0.12	355.4	424.6	0.19
2464	477	1465	47	9.5	2,012	40	198.2	238.2	0.2	124.9	164.9	0.32
2464	477	1465	47	9.5	2,012	40	198.2	238.2	0.2	124.9	164.9	0.32
2468	478	1507	46	8.5	1,816	36.1	204.1	240.2	0.18	128.6	164.7	0.28
2468	478	1507	46	8.5	1,816	36.1	204.1	240.2	0.18	128.6	164.7	0.28
2509	486	1541	39	6.5	2,862	57.7	210.6	268.3	0.27	132.7	190.4	0.44
2516	488	1488	38	4.5	2,591	43.7	232.4	276.1	0.19	146.4	190.1	0.3
2531	492	1541	43	4.2	2,940	49.8	241.6	291.4	0.21	152.2	202	0.33
2538	493	2779	47	7	12,544	255.5	382.1	637.6	0.67	240.8	496.2	1.06
2545	494	1467	40	6	24,433	498.8	202	700.8	2.47	127.3	626.1	3.92
2793	522	613	43	7	499	11	88.9	99.9	0.12	56	67	0.2
2817	529	4728	53	12	42,252	1027.5	640.2	1667.7	1.6	403.3	1430.9	2.55
2824	533	4728	40	7	26,896	598.7	689.9	1288.6	0.87	434.7	1033.3	1.38
2824	534	2698	37	4.5	14,149	263.1	449.3	712.4	0.59	283.1	546.2	0.93
2078	401	97	58	10.4	265	5.0	11.1	16.1	0.5	7.0	12.0	0.72
2078	402	550	45	4.6	1,008	14.5	77.0	91.4	0.2	48.5	63.0	0.30
2078	403	97	31	1.6	266	3.8	13.6	17.4	0.3	8.6	12.4	0.44
2086	407	159	62	11	1,423	27.1	18.1	45.2	1.5	11.4	38.5	2.37
2086	408	159	63	15	4,351	82.8	18.1	100.9	4.6	11.4	94.2	7.25
2089	409	191	60	11	1,119	21.3	21.9	43.2	1.0	13.8	35.1	1.55
2089	410	191	60	13	806	15.4	21.9	37.2	0.7	13.8	29.1	1.11
2103	415	402	59	12.5	3,762	72.1	46.2	118.2	1.6	29.1	101.1	2.48
2104	416	190	60	12.5	6,692	128.2	21.8	150.0	5.9	13.7	142.0	9.35
2104	417	440	40	5.5	3,985	69.6	54.3	123.9	1.3	34.2	103.8	2.03
2110	418	172	60	10.5	162	3.1	19.8	22.9	0.2	12.5	15.6	0.25
2111	419	550	51	7	493	8.6	68.0	76.7	0.1	42.9	51.5	0.20
2117	420	73	56	11.5	185	3.6	8.4	12.0	0.4	5.3	8.9	0.67
2117	421	157	62	13	884	17.0	18.0	35.1	0.9	11.4	28.4	1.50

2147	425	153	60	10.5	85	1.7	17.7	19.4	0.1	11.2	12.8	0.15
2301	441	157	55	12.1	115	2.4	18.9	21.3	0.1	11.9	14.3	0.20
2434	466	501	55	8.2	141	2.8	67.3	70.1	0.0	42.4	45.2	0.07
2442	467	495	61	12.8	6,620	143.2	61.9	205.1	2.3	39.0	182.2	3.67
2446	468	78	52	9.2	122	2.4	10.6	13.0	0.2	6.7	9.1	0.36
2462	473	495	52	9	4,281	85.0	66.9	152.0	1.3	42.2	127.2	2.02
2462	474	495	50	8	1,919	38.1	66.9	105.1	0.6	42.2	80.3	0.90
2463	475	495	40	5.2	829	16.5	67.0	83.5	0.2	42.2	58.7	0.39
2470	479	76	42	6.5	94	1.9	10.3	12.1	0.2	6.5	8.3	0.29
2474	482	95	54	3	83	1.4	14.7	16.1	0.1	9.2	10.6	0.15
2481	483	100	46	7	130	2.6	13.6	16.2	0.2	8.6	11.2	0.30
2502	485	400	46	5.5	3,077	61.9	54.5	116.5	1.1	34.4	96.3	1.80
2512	487	495	58	9.5	847	17.1	67.7	84.9	0.3	42.7	59.8	0.40
2518	489	495	58	10.5	4,542	100.7	63.0	163.8	1.6	39.7	140.4	2.54
2572	495	210	51	10	755	17.0	27.1	44.1	0.6	17.1	34.1	1.00
2664	497	210	51	6	468	9.9	29.7	39.6	0.3	18.7	28.6	0.53
2763	517	96	72	14.5	324	7.7	12.8	20.5	0.6	8.1	15.8	0.96
2793	523	72	44	7.5	139	3.1	10.4	13.5	0.3	6.6	9.7	0.47



Soil layer: 0-0.5 cm, 0.5-1 cm, 1-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, and 15-20 cm.

図 3-6 PHITS 入力幾何形状

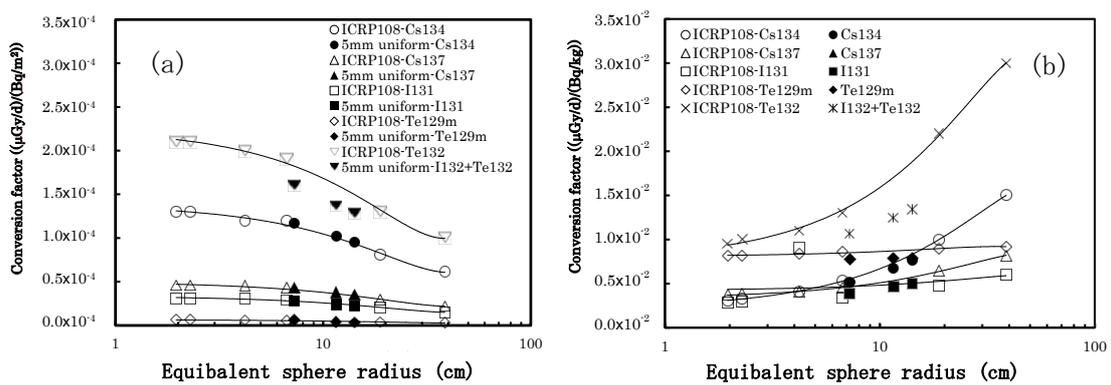


図 3-7. 被ばく線量率換算係数
(a) 外部被ばく線量率換算係数 (b) 内部被ばく線量率換算係数. 白抜きは ICRU108 参照動物、黒塗りは本計算結果

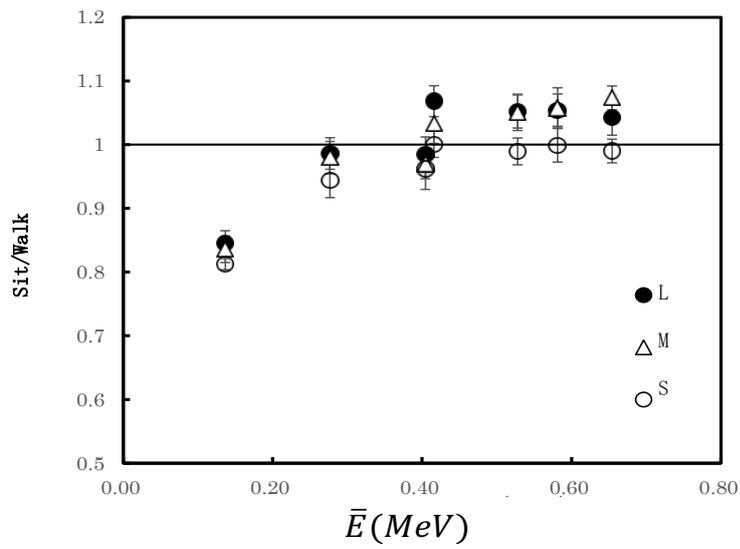


図 3-8. 歩行モデルと座位モデルの外部被ばく線量率換係数比の平均エネルギー依存性

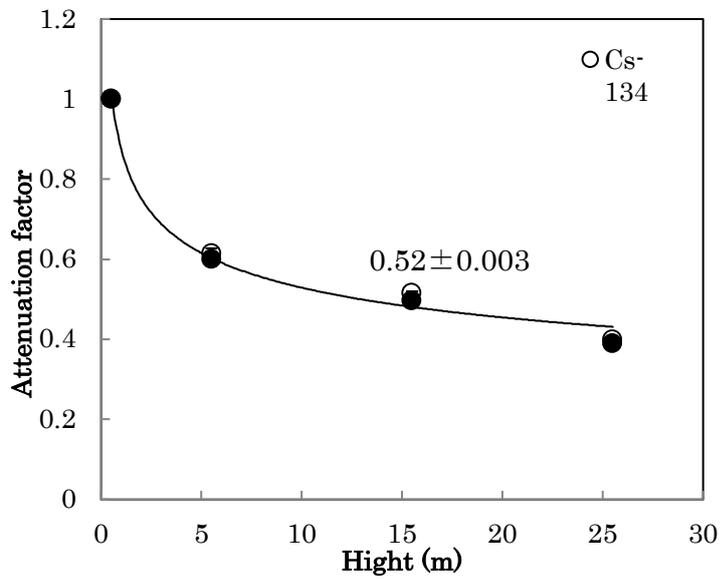


図 3-9. 高さ依存性の補正

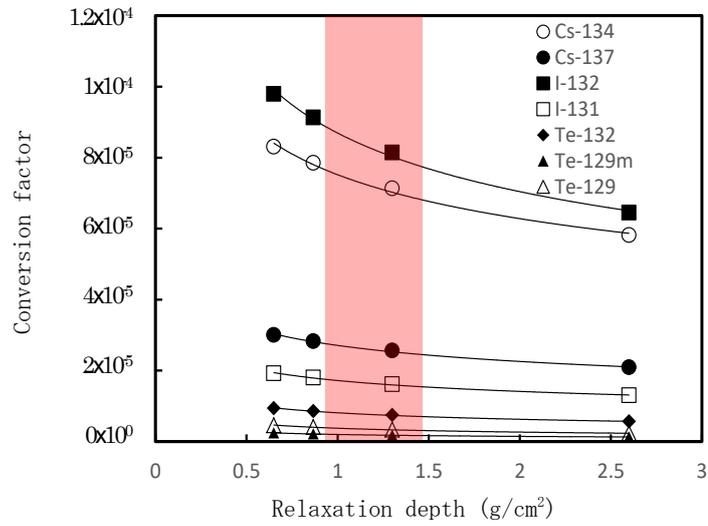


図 3-10. 指数関数の深さ分布に対する外部被ばく換算係数計算値

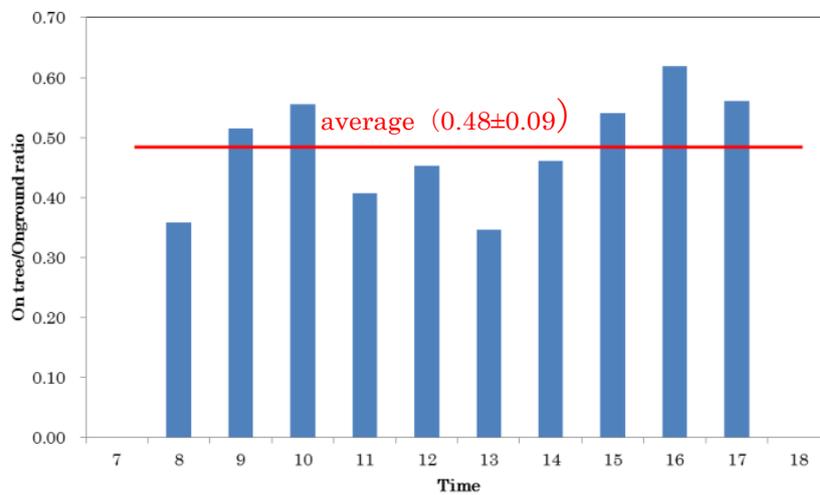


図 3-11. 千葉県高岩山においてニホンザル野生群の日中樹上活動割合 [3]

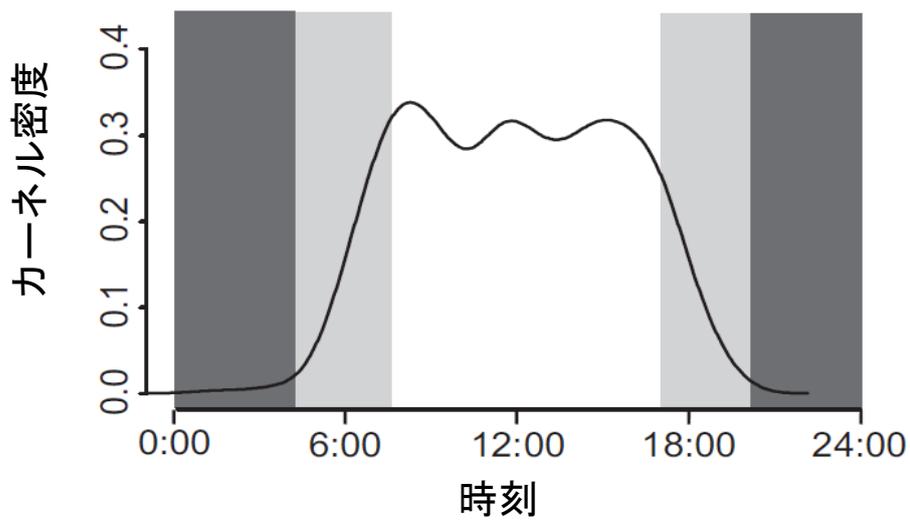


図 3-12. 四季の平均の活動頻度の時間プロファイル[4]

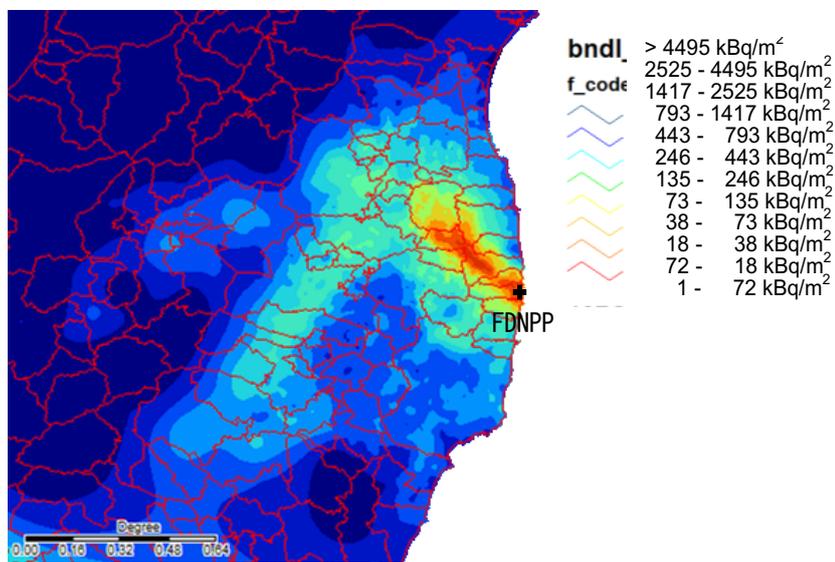


図 3-13. NNSA と MEXT のデータをクリギング補間下 ¹³⁷Cs 汚染地図

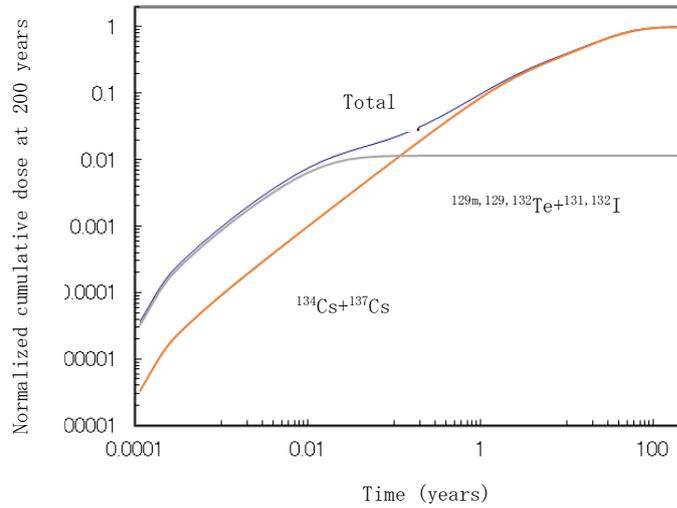


図 3-14. 積算空間線量の $^{129m}, ^{129}, ^{132}\text{Te}$, $^{131}, ^{132}\text{I}$ と $^{134}, ^{137}\text{Cs}$ の寄与.

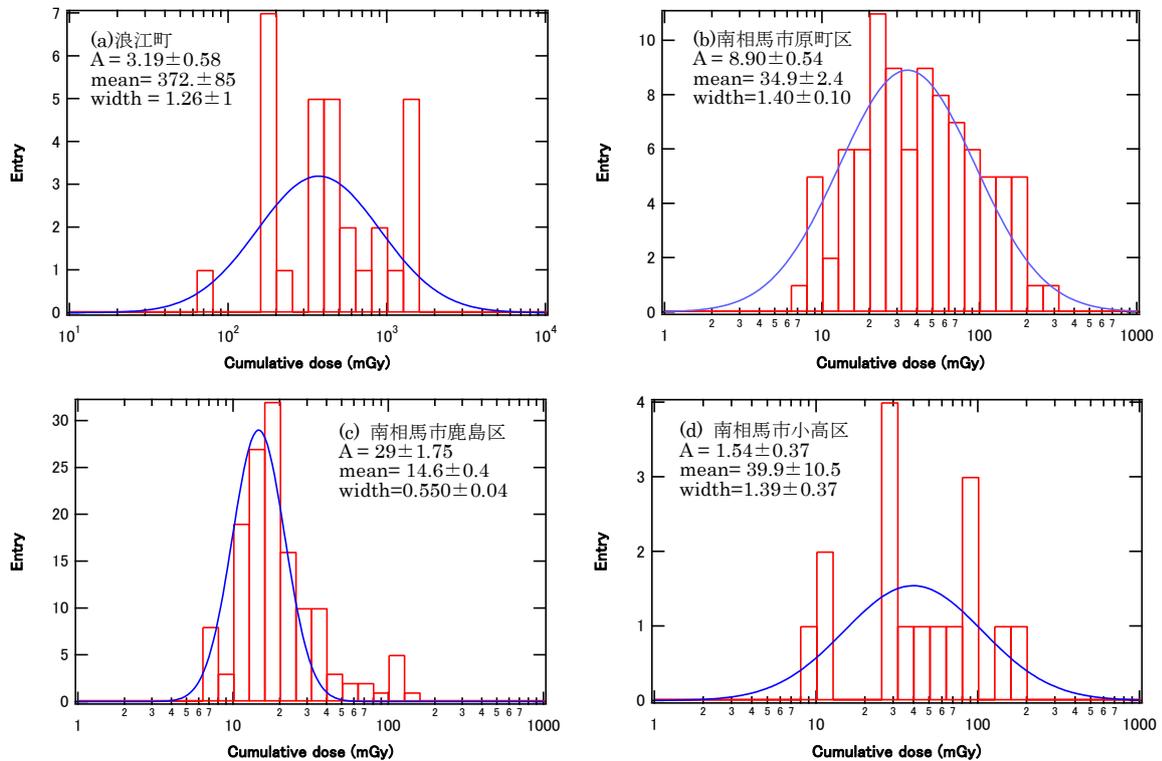


図 3-15. 樹上活動モデルの 4 地域の積算被ばく線量プロフィール

(a) 浪江町、(b) 南相馬市原町区、(c) 南相馬市鹿島区、(d) 南相馬市小高区。

3.2 野生ニホンザル試料を用いた影響解析

3.2.1 野生ニホンザル生体試料のサンプリングとアーカイブ試料の作成（平成 28-30 年度）

本事業を実施した平成 28-30 年度の全期間を通じて、野生ニホンザルの個体から生体試料のサンプリングを継続し、福島原発事故発生後 6-8 年目の被災霊長類試料を収集した。旧警戒区域の野生ニホンザルは福島県南相馬市と浪江町、対照地域の個体は新潟県下越地方の自治体の協力を得て試料を収集した。自治体が有害鳥獣として捕獲処分した後の個体を受け取り、個体が提供された当日に臓器・筋肉・歯などを採取した。収集した各試料を、被ばく線量評価で使用する試料の調製、放射能濃度測定、生物影響評価、初代培養細胞樹立など、本課題で実施する用途にあわせた方法で処理・保管し、各担当へ提供した。また、収集した試料や本事業で樹立した細胞などは超低温で長期保管できる体制を整え、試料アーカイブを構築してきた。放射能濃度測定結果などの個体情報はアーカイブ資料としてとりまとめた他、広島大学で実施した被ばく線量評価や岩手大学で行った不死化細胞の選別に関する基礎資料として提供・共有した。本事業を実施した全ての年度を通じて合計 207 頭の野生ニホンザルから試料を採取した。本事業開始前の福島原発事故 2 年後の 2013 年より野生ニホンザル試料の収集を開始しており[1]、本事業の成果と合わせて 544 頭分の資試料をそろえたアーカイブを構築した（図 3-16）。

ゲルマニウム半導体検出器(Ortec Co., Oak Ridge, TN)を用いて、試料中に含まれる放射性物質を測定した。細かく切りきざんだ測定試料を隙間のないように測定容器に詰め込み、検出器部分と測定容器を密着させて測定した。福島原発事故によって放出されたガンマ線放出核種のうち、放射性セシウムのみが本事業期間に測定した試料から検出された。 ^{134}Cs は 605 keV と 795keV、 ^{137}Cs は 662 keV のガンマ線エネルギー領域付近の計数値を用いて定量した。放射性セシウムは骨格筋に最も多く蓄積することから、本事業では大腿筋に含まれる放射性セシウムを指標に個体の汚染状況を把握するとともに、広島大学で実施したシミュレーションによる被ばく線量評価の資料として提供した。対照地域で捕獲された個体の大腿筋では ^{137}Cs が 10 Bq/kg 以下の濃度で検出され、検出限界が約 1 Bq/kg 以下となる条件で測定した ^{134}Cs は、対照地域の全ての個体試料で検出限界以下であった。 ^{134}Cs と ^{137}Cs 濃度比を算出できないため、対照地域の個体で検出された ^{137}Cs と福島原発事故との関連性を測定結果から推定することは不可能であった。新潟県が公開している「福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果（平成 23 年度版）」[2]では、新潟県内で平成 23 年 3 月から平成 24 年 1 月までの月間降下物中に含まれる放射性セシウム濃度を報告している。平成 23 年 4 月に収集した降下物中に ^{134}Cs と ^{137}Cs がほぼ同じ濃度で検出され、測定期間中では最も高い濃度が計測された。同報告書平成 30 年度版[3]では日間降下物に含まれる放射性セシウム濃度が報告されており、平成 23 年 4 月 19、20 日の試料で放射性セシウムが検出されていた。「4 月 19 日の気象状況が低気圧の通過にともない東からの風となり、ほぼ終日降雨となった」、と記載されていたことから、福島原発事故由来の放射性セシウムが雨とともに降下したことが予想される。5 月以降は月間降下物に含まれる放射性セシウム濃度は減少していた。この他、核実験に起因するグローバルフォールアウトの ^{137}Cs が対照地域周辺に降下していた可能性も考えられる。いずれの場合でも、対照地域の個体から検出された ^{137}Cs 濃度は極めて低く、コントロール試料として取り扱うことに問題はないと考えられる。

一方、旧警戒区域で捕獲された全てのニホンザルの大腿筋からは ^{134}Cs と ^{137}Cs がともに検出され、福島原発事故発生時（平成23年3月）に補正すると濃度比が約1となった。この結果は、旧警戒区域で捕獲した野生ニホンザルが福島原発事故に由来する放射性セシウムに汚染した個体であることを示している。 ^{134}Cs の物理学的半減期は約2年であるが、本事業期間である福島原発事故後6-8年目に採取した試料から ^{134}Cs が検出された。物理学的半減期に加えて、体内に摂取された放射性セシウムは生物学的半減期に従って排泄され、筋肉中の放射性セシウムの生物学的半減期はおおむね60日とされている。このため、旧警戒区域の野生ニホンザルは長期的に放射性セシウムを摂取し続けていることが予想される。平成30年度捕獲個体の大腿筋の採材日における ^{137}Cs 濃度は64-42,252 Bq/kgの範囲にあった。また、ニホンザルが捕獲された地域の中で福島第一原子力発電所に近く、帰還困難区域が含まれる浪江町で本事業期間に捕獲された個体の56%では、捕獲日に補正した大腿筋の ^{137}Cs 濃度が10,000 Bq/kgを超えていた。このように高度な汚染が計測された個体は山間部付近で捕獲されることが多く、平成30年度まで毎年捕獲された。アーカイブ試料の計測値で最も高い ^{137}Cs 濃度は、約65,000 Bq/kgであった。南相馬市で捕獲された個体のなかで、大腿筋の ^{137}Cs 濃度が10,000 Bq/kgを超えていた個体は2.6%であった。南相馬市で10,000 Bq/kg以上の汚染個体が捕獲されたのは平成26年度までで、平成27年以降に捕獲された個体は全て10,000 Bq/kgを下回った。平成27年以降に5,000 Bq/kg以上の放射性セシウムが計測された個体は、南相馬市全域で捕獲された個体の9.2%であった。以上のように比較的高い ^{137}Cs 濃度が計測された一方で、浪江町、南相馬市ともに1,000 Bq/kgを下回る個体も捕獲されてきた。浪江町では1,000 Bq/kgを下回る個体が、平成30年度に市街地に近い帰還困難区域で捕獲された。また、1,000-5,000 Bq/kgの範囲で汚染している個体が平成28年度以降徐々に増加し、避難指示が解除された南相馬市で捕獲される個体と同程度の ^{137}Cs 濃度の個体が捕獲されるようになった。南相馬市で1,000 Bq/kgを下回る個体は平成28年度捕獲個体の51%に相当し、この割合は徐々に増加して平成30年度捕獲個体では78%となった。以上のように、除染などによる環境中の放射性物質汚染の回復によって旧警戒区域の野生ニホンザルの放射性セシウム汚染が低減してきた地域がある一方で、特に山間部では今だに高い濃度の汚染が継続している地域がみられた。捕獲年度ごとの大腿筋 ^{137}Cs 濃度の平均値を図3-17に示す。すでに述べた傾向が平均値の推移にも示されている。特に浪江町の平均値では年度ごとの変化が大きくなっているが、これは特定の年度で汚染状況が変化したこと示すものではなく、捕獲場所の偏りに依存した変化であると考えられる。捕獲地が近接していても個体の汚染状況が異なることが示されたことから、被ばく線量を個体ごとに評価する重要性、特に外部被ばく線量評価においては個体の行動範囲や生活様式などを反映することができる歯のESR分析評価が有効となることを示している。

次に、大腿筋に含まれる放射性セシウム($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$)濃度に対する各臓器の放射性セシウム濃度比を個体ごとに算出した。捕獲年度や捕獲地域によって濃度比が顕著に変わることはなかったため、計測した全ての結果の平均値を臓器ごとに示した(図3-18)。最長筋では大腿筋とほぼ同じ濃度で放射性セシウムが蓄積しており、骨格筋に放射性セシウムが最も多く蓄積していることが確認された。その一方で、心筋に蓄積する放射性セシウムは大腿筋の計測値のおよそ4割程度であることが示された。この結果は、チェルノブイリ原発事故後にゴ

メリ地方で死亡した成人から生検試料として採取した骨格筋と心筋に含まれる放射性セシウム (^{137}Cs) 比とほぼ同じ結果となった[4]。今回計測した臓器では、腎臓と精巣に放射性セシウムが多く蓄積しており、大腿筋の半分以上の放射性セシウム濃度が計測された。そのほか、脳、肺、肝臓、脾臓で計測された放射性セシウム濃度は大腿筋のおよそ 2-4 割であった。精巣と同じ内分泌腺である胸腺や甲状腺では放射性セシウムの蓄積は少なく、大腿筋との濃度比は 2-3 割程度であった。以上の臓器への放射性セシウムの蓄積は、旧警戒区域で捕獲されたウシの計測結果と同様の傾向を示した[5]。また、外分泌腺の一つである顎下腺の濃度比は 6 割程度と比較的多く蓄積していた。最後に、眼球および水晶体の大腿筋に対する濃度比は 1 割程度と少ないことが明らかとなった。このように放射性セシウムの蓄積が少ないことから、野生ニホンザルの水晶体の被ばくでは内部被ばくの寄与が小さくなることが予想された。放射性セシウムの体内分布が生物種を超えて共通していたことから、本事業で得られた結果をヒトの放射性セシウム体内分布の推定に応用できる可能性が考えられた。

本事業で構築してきた資試料アーカイブでは、野生ニホンザルから収集した試料に個人情報などの資料を紐付けしている。資料には、本事業の 3.1 で推定した被ばく線量が含まれる。外部被ばく線量評価では、被ばく期間の行動範囲を把握することが評価結果の正確さを向上させる重要な要素となるが、実際に野生動物の行動範囲を把握することは困難である。本事業で実施した歯のエナメル質を ESR 分析する外部被ばく線量評価法は、放射線との相互作用によってエナメル質内で生じる炭酸ラジカルが消去されずに蓄積する特徴を利用している。このため、行動範囲を把握することが難しいニホンザルに対して、個体ごとの生活範囲の違いを反映する被ばく線量評価法として期待される。その一方で、ESR 分析による線量評価では測定試料の調製や分析に時間を要するために、多量の個体を評価するには時間を要する。ESR 分析に加えて本事業で実施したシミュレーションによる外部被ばく線量評価は、放射能濃度からニホンザルに最適化した被ばく線量率換算係数を決定することで、ESR 分析よりも短期間に多量の個体の被ばく線量を評価することに利点がある。ただしシミュレーションを用いた評価法では、ニホンザルが捕獲された場所に原発事故後からとどまっていることを前提に評価をしているために、個体ごとの行動範囲の差を必ずしも反映できない欠点がある。以上のように、各評価方法の利点や欠点を踏まえて実施した被ばく線量評価結果を相互に比較し、アーカイブ資料として取りまとめる外部被ばく線量の妥当性を検証した (図 3-19)。ESR 分析による評価を終えた 4 個体は帰還困難区域で捕獲され、ESR 分析の検出下限を超えることがシミュレーションによる評価によって推定されたニホンザルである。ESR 分析によるこの 4 個体の評価結果を、シミュレーションの地上活動モデルと樹上モデルで評価した結果と比較した。ESR 分析で 200 mGy 以下と評価された 2 個体については、シミュレーションで推定された被ばく線量が ESR 分析の評価結果よりも 2 倍以上高い評価結果となった。一方、ESR 分析で 200 mGy 以上と評価された 2 個体については、シミュレーション評価結果に対する相対比が 0.6-1.0 であった。現在 ESR 測定を継続しており、予備的な評価結果を含めると約 200 mGy 以上と評価された個体については高い相関が得られている。200 mGy 以下の線量域も含めて、現在さらに解析数を増やす予定である。200 mGy 以下の低い被ばく線量が評価された個体の捕獲地周辺で現地調査を行うと、平成 30 年度の空間線量率は 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ 以下であった。この空間線量率は、200 mGy 以上と評価された個体の捕獲地付近と比べて低い線

量率であった。また、200 mGy 以下の被ばく線量が評価された個体は旧警戒区域の中でも市街地に近い場所で捕獲され、この地域のニホンザルは空き家の屋根の上で過ごすことも観察されている。このため、200 mGy 以下の被ばく線量が評価されたニホンザルの実際の生活様式が、シミュレーションにおける仮定と異なったことから過大に評価された可能性が考えられる。200 mGy 以上の被ばく線量域において双方の評価結果に大差がなかったことから、GPS を用いる野生ニホンザルの行動調査の情報を用いてシミュレーションの仮定を再検討することで、200 mGy 以下の被ばく線量評価の正確さを向上できることが期待される。

次に、保管しているアーカイブ試料の外部被ばくと内部被ばくの寄与について検討した(図3-20)。この検討では、シミュレーションによる被ばく線量評価結果を用い、外部被ばくについては樹上モデルによる評価結果を用いた。項目 3.1.2 に記載されているように、本アーカイブには外部被ばくと内部被ばくの総被ばく線量が 7.9 mGy - 1.57 Gy と評価された個体の試料が収集されている。このうち、外部被ばくと内部被ばくの寄与が同等(外部被ばくと内部被ばくの相対比が 0.9 - 1.1)の試料は 6.7%、外部被ばく(相対比 >1.1)あるいは内部被ばく(相対比 <0.9)の寄与が大きい試料はそれぞれ、59.0%、34.3%であった。南相馬市あるいは浪江町で捕獲されたそれぞれの個体群で総被ばく線量が低い個体は外部被ばくの寄与が大きく、総被ばく線量が高くなるほど内部被ばくの寄与が大きいことが示された。捕獲年度ごとの外部被ばくと内部被ばく寄与率は、捕獲地の偏りに依存したことが予想される変化が一部の年度で見られた。捕獲年度全体を通じて外部被ばく線量の寄与が多い個体(相対比>1.1)が平成 28 年度を除いて最も多く捕獲されていた。これは、放射性セシウムの蓄積が少ない南相馬市北部・中部で捕獲された個体の提供が多かったことが主な要因と考えられる。原発事故後 6 年目に外部被ばくの寄与が大きいことを示す相対比>1.1 を示した個体の割合が著しく減少したが、この減少は該当する年に限定された一過的な変化であった。図 3-17 に大腿筋放射性セシウム濃度の年次推移で示したように、該当する年に捕獲した個体の捕獲地が、放射性セシウムが多く蓄積する地域に偏っていたことが要因と考えられる。一方で、内部被ばくの寄与が大きいことを示す相対比が<0.9 の個体は原発事故後 5 年目を以降に徐々に減少する傾向が見られた。これは、環境中の放射性物質汚染の回復とともにニホンザル体内の放射性セシウム濃度が減少することに加えて、外部被ばく線量が経年的に増加することによる結果と考えられる。

以上のようにアーカイブ資料を精査することで、高度の体内汚染による被ばくが長期間続いている個体、あるいは体内汚染が減少して放射線被ばくの回復期にある個体から試料を収集してきたことが示された。特に福島原発事故後の時間が経過すると、この二分化が明らかになってきた。本事業で収集したアーカイブ試料は被ばく様式や被ばく量が異なる個体から採取しており、精査した資料をもとに、解析の目的に応じた試料を提供できる体制を整えた。

参考文献

1. S. Takahashi, K. Inoue, M. Suzuki, Y. Urushihara, Y. Kuwahara, G. Hayashi, S. Shiga, M. Fukumoto, Y. Kino, T. Sekine, Y. Abe, T. Fukuda, E. Isogai, H. Yamashiro, M. Fukumoto, A comprehensive dose evaluation project concerning

animals affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: its set-up and progress, J. Radiat. Res., Vol. 56, No. S1, i36-i41, 2015.

2. 福島県、福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果（平成23年度版）
3. 福島県、福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果（平成30年度版）
4. YI. Bandazhevsky, Radioactive cesium and the Heart: Pathophysiological Aspects. The Belrad Institute, 64, 2001. (New Russian-to-English translation, 2013)
5. T. Fukuda, Y. Kino, Y. Abe, H. Yamashiro, Y. Kuwahara, H. Nihei, Y. Sano, A. Irisawa, T. Shimura, M. Fukumoto, H. Shinoda, Y. Obata, S. Saigusa, T. Sekine, E. Isogai, M. Fukumoto, Distribution of artificial radionuclides in abandoned cattle in the evacuation zone of the Fukushima Daiichi nuclear power plant, PLoS One, 8, e54312, 2013

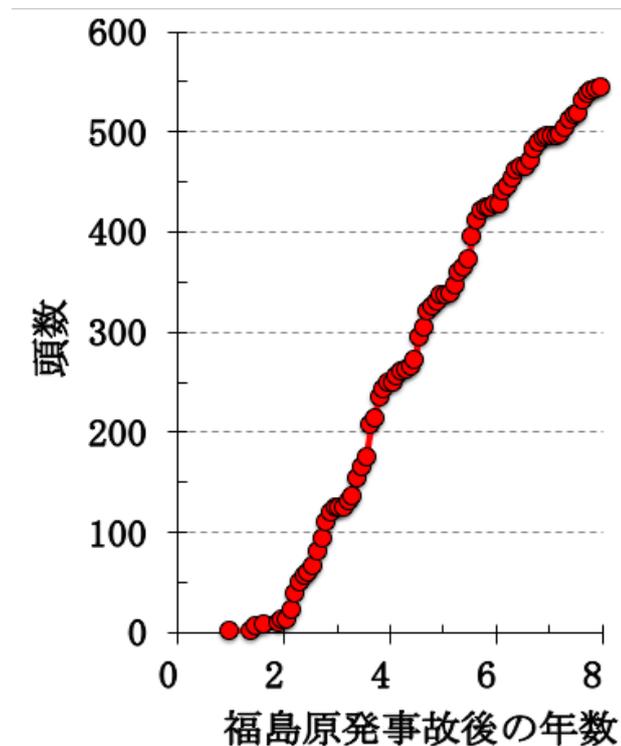


図3-16. 試料を収集した野生ニホンザル個体数の年次推移

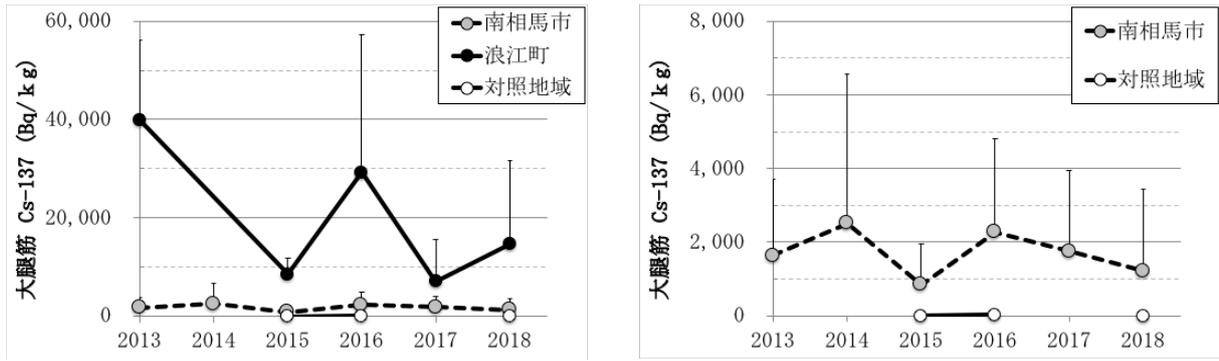


図3-17. 大腿筋¹³⁷Cs濃度の年次推移

左図から南相馬市のデータ描出領域を右図に拡大して示した

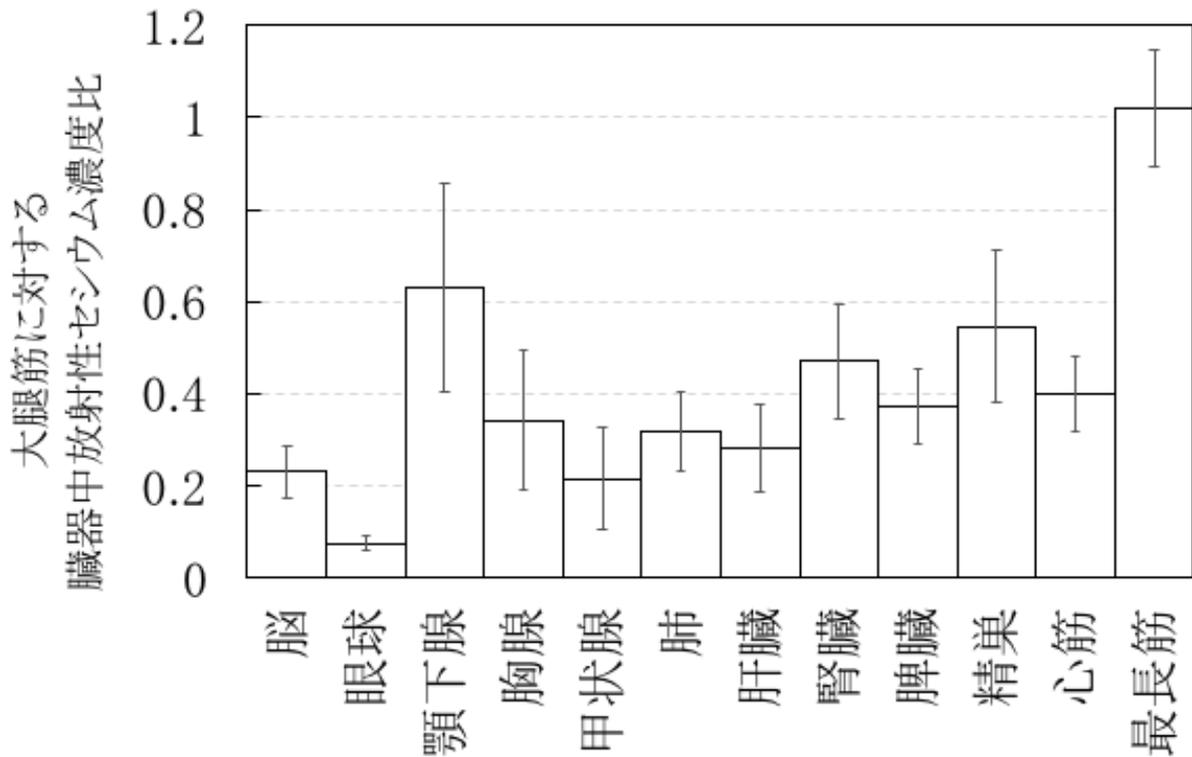


図3-18. 大腿筋に対する各臓器中放射性セシウム濃度比

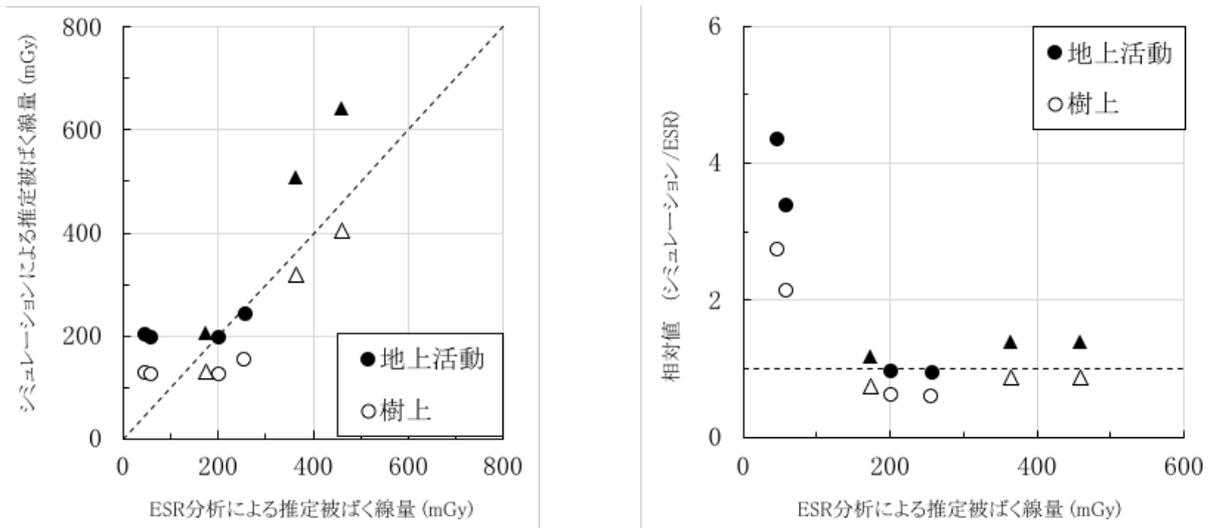


図3-19. ESR分析とシミュレーションによる被ばく線量評価の相関

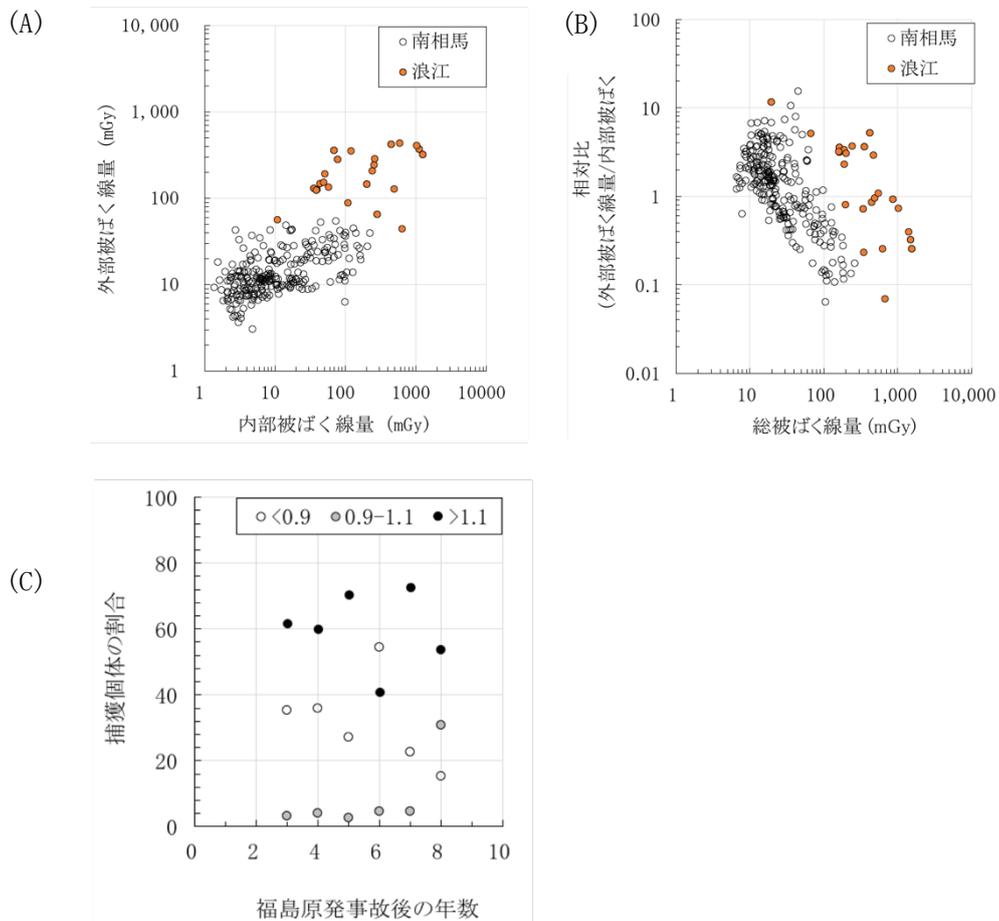


図3-20. 外部被ばくと内部被ばくの寄与

- (A) 外部被ばく線量と内部被ばく線量の比較
- (B) 総被ばく線量と（外部/内部）被ばく線量比の比較
- (C) （外部/内部）被ばく線量比の年次推移

3.2.2 野生ニホンザル由来不死化細胞の作成（再委託先：岩手大学）（平成28-30年度）

福島原発事故による放射線被ばくを受けた個体の組織では腫瘍化しない限り、異なるゲノム部位にランダムに突然変異を持つヘテロな集団になることが予想される。このため、被ばく組織から直接抽出したゲノム DNA を元にシーケンス解析を実施したとしても、ごく限られたゲノム分子における点突然変異や欠失はごくわずかなシグナルとシーケンス上でのエラーとして弾かれてしまい、解析することができない。一方、正常組織から作製する初代培養細胞に無限増殖能を付与する遺伝子操作技術を適用することで、シーケンス解析に必要とされる量の 1 細胞由来ゲノム DNA を得ることが可能になる。1 細胞由来のモノクローナルな集団の試料を用いて全ゲノム解析を行うことで、組織から直接抽出するヘテロな集団の試料では検出が難しいゲノムの変異を検出できる可能性が考えられる。福島原発事故に被災した家畜を用いて我々が実施してきた研究成果から、放射性セシウムが骨格筋に最も沈着することが判明している。そのため本項目では、東北大学から提供された野生ニホンザルの大腿筋から線維芽細胞を樹立し、1 細胞由来のクローンを回収することを目的として実施した。野生ニホンザルの大腿筋から初代培養細胞を樹立後に、遺伝子導入により無限に増殖することができる不死化細胞を作製した。さらに不死化細胞を低密度培養することで、1 細胞由来の細胞集団とする単一細胞化（クローン化）を行なった後に、実験に必要とされる細胞数まで増殖させた。本項目で樹立した初代培養細胞、不死化細胞は、東北大学で管理されるアーカイブ試料として提供した。

平成 28、29 年度は、ニホンザルの組織培養条件を検討し、不死化細胞の作製を開始した。10%ウシ胎児血清を含む 2 種類の培養液（DMEM/F12 基本培地と DMEM 基本培地）に筋肉組織を入れて培養したところ、DMEM/F12 基本培地を用いた系で効率良く初代培養細胞が得られることが判明した。通常の細胞培養用プラスチックディッシュと比較して、アテロコラーゲンによってコーティングしたプラスチックディッシュを用いることで、さらに効率良く初代培養細胞が得られることが判明した。通常のプラスチックディッシュを用いて樹立したニホンザルの初代培養細胞は数回の継代後に細胞増殖が完全にとまる細胞老化が誘導されたため、次の工程である遺伝子導入操作の用途や、アーカイブ試料として保管する用途のために十分な細胞数を確保することが困難であった。しかし、コーティングしたプラスチックディッシュを使用することで可能な限り分裂回数の少ない初代培養細胞を得ることができたことから、本項目を実施する上で必要な細胞数を確保できるようになった。また、野生動物から試料を採取しているために、簡易的なアルコール滅菌をした大腿筋を組織培養に用いているものの、長期の培養期間中に細菌、酵母、カビの混入による生物学的汚染のために細胞の樹立に失敗することがたびたびあった。このため、ストレプトマイシン、ペニシリン、抗真菌剤を含む抗生物質混合物を培地中に添加し、各種真菌のコンタミネーションを最小にする条件を確定した。このような培養系で得られた初代培養細胞を分注し、液体窒素中で保存した。長期の安定的保存を視野に入れ、10%DMSO と市販の細胞保存液で凍結保存後、融解し凍結保存条件の検討を行った。その結果、10%DMSO 及び市販の細胞保存液ではほぼ同等の凍結保存が可能であることが判明した。

次に本項目の目的である、野生ニホンザル由来の不死化細胞作製にむけて、効率の良い遺伝子導入の条件を野生ニホンザルの初代培養細胞を用いて検討した。不死化細胞を作製する

ために、R24C 突然変異を有する変異型サイクリン依存性キナーゼ 4(CDK4) 遺伝子、サイクリン D 遺伝子、テロメラーゼ逆転写酵素サブユニット (TERT) 遺伝子を、作製した初代培養細胞へ導入した。遺伝子導入の方法としてはレトロウイルス、レンチウイルス、トランスポゾンなど様々な方法があるが、従来我々がアカゲザルおよびカニクイザルにて実績のあるレンチウイルスが最も適していると判断し、レンチウイルスを用いて遺伝子導入を行った。組み換えウイルスは理化学研究所バイオリソースセンターから分与された CSII を基本骨格とする自己複製能力欠損型レンチウイルスベクター、またパッケージングウイルスには VSV-G エンベロープタンパク質および REV タンパク質、GAG および POL 遺伝子を発現するプラスミドを 293T 細胞へリポフェクション法にて導入し、パッケージングを行った。レンチウイルスのパッケージング実験の検証として、オワンクラゲの蛍光タンパク質 (EGFP) を発現する組み換えウイルスを作製した。組み換えウイルスが作製された場合、パッケージング細胞が緑色蛍光を発する。パッケージング細胞において EGFP 由来の蛍光タンパク質の発現が認められ、293T 細胞へおおよそ 70% 近くの導入効率が認められた。このため、ウイルス作製が成功したと推測することができる。293T 細胞より得られた組み換えレンチウイルスの培養上清をフィルトレーションによる細胞ろ過、その後ポリエチレングリコール 6000 および HEPS 緩衝液を基本とするウイルス濃縮溶液を添加、遠心分離によってウイルス濃縮を行なった。濃縮した組み換えウイルス溶液を初代培養細胞へ 48 時間暴露し、遺伝子導入を実施した。遺伝子導入に際して、ウイルスの電荷を中和し、感染効率を上昇させることが知られているポリブレンを 4 $\mu\text{g}/\text{ml}$ の濃度で添加した。この結果、おおよそ 50% を超える細胞において EGFP の蛍光タンパク質の発現が確認された (図 3-21)。蛍光タンパク質は核及び細胞質に均一に分布していた。また感染を行わなかった野生ニホンザルの細胞からは同一条件で蛍光タンパク質の検出を行ったが、陽性シグナルは得られなかった。この結果から、組換えレンチウイルスの作製と、それに続くウイルス濃縮の一連の実験操作によって、効率良く遺伝子導入を行う実験条件を確立したと判断した。なお、これらの遺伝子組み換え実験は岩手大学遺伝子組み換え実験安全委員会へ P2 レベルの遺伝子組み換え実験として申請し、実験実施前に認可を受けた。

平成 29 年度は放射性物質に汚染された地域で捕獲された野生ニホンザル由来の初代培養細胞を作製し、遺伝子導入後に不死化細胞を作製した。平成 28 年度に確認した条件で各種遺伝子を発現するレンチウイルスを作成・混合し、多重感染させることで不死化細胞の作製を試みた。遺伝子導入した細胞は、数回の継代操作後に細胞集団の状態凍結保存を行なった。初代培養細胞では複数回の継代後に細胞老化が誘導されたため、遺伝子を導入した細胞が数ヶ月以上分裂増殖が継続することを確認することで、細胞老化が誘導されずに不死化細胞としての特徴が誘導されたことを見極めた。初代培養細胞および不死化細胞の染色体パターンを G banding 法にて解析し、染色体異常の有無を調べた (図 3-22)。解析の結果、得られた細胞集団は全て正常染色体パターンを維持していることが判明した。その後、1 細胞レベルのゲノム解析を可能にするために、クローンを単離し、培養を開始した。クローンを作製するために不死化細胞を 96 ウェルプレートの各ウェルに 1 細胞ずつ播種し、96 細胞それぞれからクローン化を試みた。しかしながら、作製途中で全てのクローンが増殖を停止したために、従来行ってきた単純な方法ではニホンザル由来不死化細胞からクローンを単離する

ことは困難であることが判明した。低密度培養で細胞増殖を停止したことから、適度な密度で細胞を培養している際には周辺の細胞から分泌される増殖因子や接触刺激によって細胞増殖が維持されていることが考えられた。この技術的に困難な点を乗り越えるために、初代培養細胞を培養した後の培地を用いてクローンを培養することを考えた。初代培養細胞を培養した後の培地中には、初代培養細胞が放出する増殖因子などが含まれる。この培地を低密度状態の不活化細胞の培地として用いることで、不活化細胞の増殖を促進する可能性が期待された。具体的には、ニホンザルの初代培養細胞で培養した培養上清を 0.45 μ m のフィルターを用いて濾過することで混入する可能性がある初代培養細胞を除き、細胞から分泌される低分子増殖因子を含む最適化培地を作成した。この最適化培地を用いることで、1枚の10cm ディッシュあたり不活化細胞 1000 個を播種する低密度培養条件であっても、不活化細胞を増殖させることが可能となった。得られた細胞クローンは線維芽細胞様の細胞形態を示すが、高密度になるに従い、細胞融合を生じて筋管を形成する性質を有していたことから、これらの細胞は筋芽細胞もしくは筋衛星細胞由来と考えられた。クローン化した培養細胞を合計 8 クローン得ることに成功した。

平成 30 年度は、対照地域の野生ニホンザルから採取した筋肉を用いて初代培養細胞と不活化細胞を樹立し、対照地域個体のニホンザル大腿筋由来のクローンを作成した。平成 29 年度までに確立した方法に従い、一連の試料を作成することに成功している。対照地域の個体由来の初代培養細胞、および不活化細胞においても核型解析を行い、正常な核型を有していることを確認した(図 3-22)。全ての不活化細胞から単細胞クローン化を実施し、細胞のクローン化に成功した。それらの樹立したクローンを増殖させ、液体窒素中に安定的に保存した。本項目で実施した細胞不活化方法は、ヒト、ウシ、ブタ、サル、水牛などの幅広い動物種において元の細胞の性質や核型に影響を及ぼさずに保持することが判明している。本法ではゲノム不安定性を制御する p53 遺伝子が野生型のままであるため、DNA 複製と細胞分裂の正常な周期が保持されることに特徴がある。本項目で作製した細胞が全て正常な核型を有していたことから、遺伝子導入操作によって染色体構造に影響を与えていないことを確認するとともに、本試料の解析によって大規模なゲノム構造以外の影響の有無を解析できる試料であることを見出した。

全ゲノム解析に関して、様々な技術的革新が行われている。100-150bp 程度の短い DNA 断片を一度に一億断片ほど解析する能力を持つ次世代シーケンサーの解析が現在では中心になっている。しかし、このショートリードの次世代シーケンサーによる解析は限界を持っている。理由はセンサーチップ上で DNA 断片の PCR 反応を行うために、解析できる DNA 断片に限界が存在する。GC 含有率が高い領域は増幅することすら困難であるため、解析できない。加えて 100-150bp の短い断片のため、ゲノム上の反復配列を含んだ場合、事実上、ゲノム上での位置の同定が不可能になる。このような問題に対して、近年 PacBio 社から PacBio もしくは Sequel シーケンサーが発表された。これらのシーケンサーはセンサーチップ上に通過する DNA 分子を 1 分子ずつ解析するシーケンサーであり、PCR 反応を必要としない。一度に出力される塩基配列の断片が 10-15kb と長大である。しかしながら、PacBio シーケンサーで良い解析結果を得るためには、高純度かつ高分子のゲノム DNA を必要とする。我々が作製した培養細胞は高純度かつ高分子のゲノム DNA を精製する材料としては理想的な材料

である。このため、我々の作製した無限分裂細胞は本事業で使用するだけでなく、このような将来的に技術革新が見込まれる解析に対しても重要な研究試料として提供する事が可能と考えられる。加えて近年のゲノム科学の進展は目覚ましく、ニホンザルの全ゲノム構造の解明が国立遺伝学研究所および京都大学霊長類研究所の共同研究として発表された。ニホンザルのゲノムは他の霊長類と比べて免疫関連遺伝子を含めて差がある事が指摘されている。全ゲノム解析を行う上で、アセンブルの指標となるリファレンス配列が変異の同定には重要な意味を持つ。このため、ニホンザルの全ゲノム構造解析の進展は、本研究にとっても重要な関連研究である。ニホンザルのゲノム解析は今後も情報が更新されることにより、突然変異であるか、単なる個体差なのか判断が可能になる。今後、ニホンザルのゲノム情報および個体の一塩基多型情報が明らかとなるとおもわれるが、それらの情報を網羅した形でゲノム解析を遂行する必要がある。

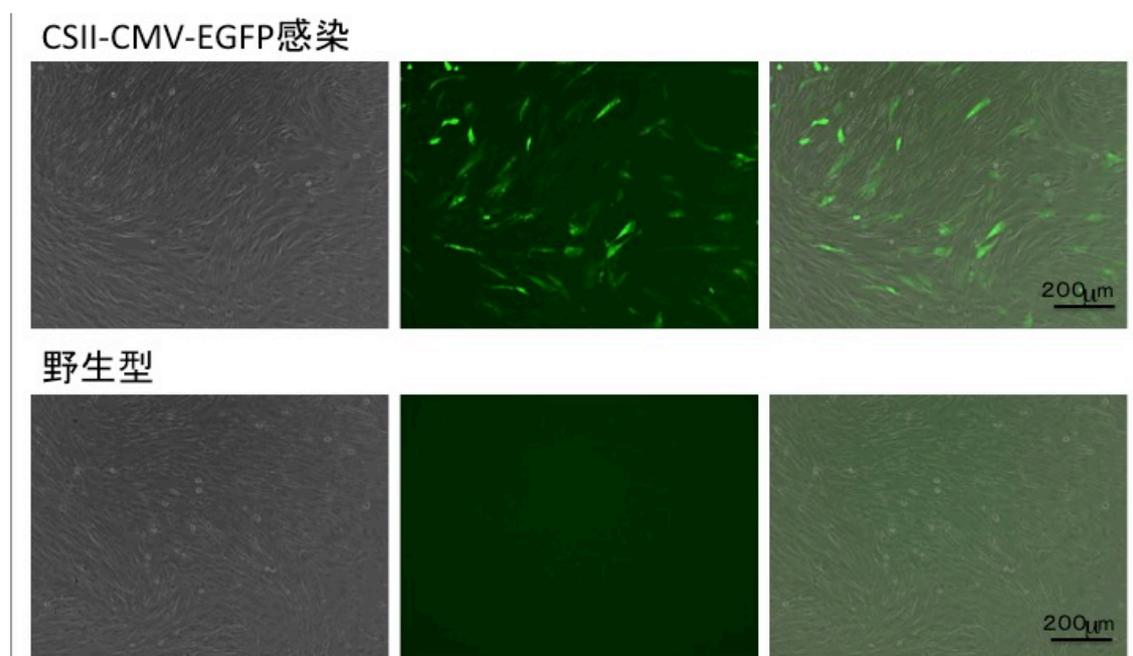
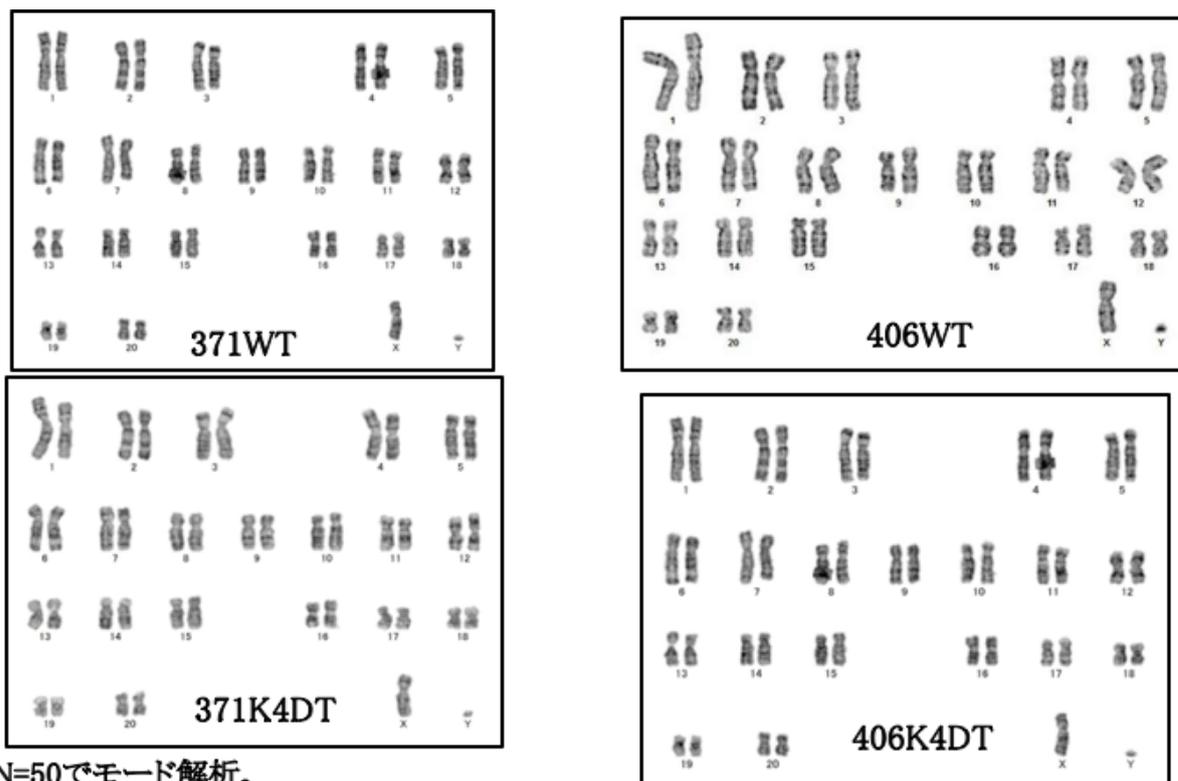


図 3-21 野生ニホンザル筋肉由来初代培養細胞での遺伝子導入効率の確認



N=50でモード解析。
 加えてN=20で詳細なG banding 解析。
 結果、全ての細胞で2n=42+XYで正常であった。オス由来の細胞である。

図 3-22 染色体解析の結果

3.2.3 野生ニホンザル試料を用いた生物影響解析（平成 29-30 年度）

細胞分裂が盛んに行われる造血器は放射線感受性が高いため、末梢血球細胞および末梢血球細胞を供給する骨髄中の血球細胞の数的変化と放射線被ばくとの関連を平成 30 年度に検討した。旧警戒区域あるいは対照地域のニホンザルの末梢血球数を測定し、内部被ばく線量率、外部被ばく線量率、年齢、性別、捕獲時期、捕獲地の標高を説明変数とする多重回帰分析を行った（表 3-6）。分析に使用したニホンザルの内部被ばく線量率は中央値 7.6 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ （最小 1.9～最大 219 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ ）、外部被ばく線量率は中央値 13.9 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ （最小 6.7～最大 35.1 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ ）であった。分析の結果、成獣の末梢血では、白血球数と血小板数が内部被ばく線量率と負の相関を示した。次に、大腿骨髄中の血球細胞数と脂肪の割合について、末梢血の分析と同じ変数を用いた多重回帰分析を行った（図 3-23、3-24、表 3-7）。成獣の骨髄において、骨髄系細胞と巨核球が内部被ばく線量率と負の相関を示し、脂肪の割合は内部被ばく線量率と正の相関を示した。末梢血液中の白血球や血小板は骨髄中の造血幹細胞から分化する骨髄系細胞や巨核球を介して作製されるため、多重回帰分析で得られた結果は内部被ばく線量率が高いニホンザルでは造血機能が低下していることを示唆する。

内部被ばく線量率に依存して大腿骨髄の血球細胞数が減少したことから、大腿骨髄細胞の染色体構造異常を調べ、DNA 損傷誘発の可能性について検討した。終濃度 30 ng/ml コルセミドと 20% FBS を添加した RPMI 培地を用いて大腿骨から骨髄を洗い出し、37°C で数時間培養後に染色体標本を作成した。染色体解析は平成 29 年度から着手し、平成 30 年度まで続けた。分裂期細胞が少なかった個体を解析から除き、少なくとも 50 分裂期細胞の染色体が観察できた 11 頭の骨髄染色体を解析した（図 3-25）。観察された染色体異常の 9 割以上が染色体断片であったので、この染色体異常を指標に被ばく線量率との関連を調べた。染色体解析を行った個体の内部被ばく線量率は中央値 1.7 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ （最小 0.1～最大 165 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ ）、内部被ばく線量は中央値 43.7 mGy（最小 1.9～最大 640 mGy）であった。3.2.1 で記載したように、内部被ばくと外部被ばくの寄与が個体により異なっていたため、内部被ばくと外部被ばくの合計被ばく線量・線量率との影響も検討した。合計被ばく線量率の中央値 28 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ （最小 7.2～最大 175 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ ）、合計被ばく線量の中央値 127 mGy（最小 8.4～最大 685 mGy）と評価された。各個体の解析数が 60-230 分裂期細胞と少ない事や被ばく線量が高い個体で染色体を作製できた個体が 1 頭のみであるなどの今後の課題を含みながら、現時点までに得られたデータを解釈すると、被ばく線量率が 175 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ 以下、被ばく線量が 685 mGy 以下の低線量・低線量率長期被ばく領域において、線量や線量率に依存して DNA 二重鎖切断を伴う損傷が誘発されており、この被ばく線量率には血球細胞数の減少を確認した 165 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ が含まれていたことから、DNA 損傷の誘発によって細胞数が減少する可能性が考えられた。

次に、脂質過酸化のマーカーであるマロンジアルデヒド(MDA)を指標として、放射線被ばくによる酸化ストレス状態について検討した。アーカイブ試料の中で最も放射性セシウム濃度が高い大腿筋から MDA 計測用の試料を調製した。大腿筋の異なる 3 箇所からそれぞれ 100mg 以下の筋肉組織を切り出し、独立して試料調製と測定を行った。切り出した試料を破碎し、MDA 測定用の溶解液を用いて試料を調製した。ニホンザルから筋肉を採取するときに放血をしておらず、筋肉中の血液が測定系の阻害要因となるため、ブタノール抽出とアルカリ抽出を組み合わせてヘモグロビンを除去する工程を加えた。また、血球数の減少や染色体異常の

誘発がアーカイブ試料の中で比較的高い被ばく領域でみられたことから、MDA の検出試料も同様の被ばく領域となるように選別した。各個体の測定結果は、3 箇所から取り出した筋肉の測定結果の平均値として示している（図 3-26）。MDA 解析で使った個体の内部被ばく線量率は中央値 56.8 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ （最小 12～最大 207 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ ）、内部被ばく線量は中央値 256 mGy（最小 50～最大 1,028 mGy）であった。内部被ばくと外部被ばくの合計被ばく線量率は中央値 98 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ （最小 37～最大 270 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ ）、合計被ばく線量の中央値 496 mGy（最小 201～最大 1,431 mGy）であった。血球細胞数測定や染色体解析で試料とした個体よりも高い被ばく量域の試料を含めたが、大腿筋 MDA 濃度は放射線被ばくの有無に関わらずほぼ一定の値を示した。次に、大腿筋に比べて放射性セシウムの蓄積が約 3 割であった肝臓から試料を調製し、筋肉試料同様に放射線被ばくと酸化ストレス状態について検討した（図 3-27）。大腿筋の検討で用いた個体の肝臓から試料を作製し、MDA 解析を行った。大腿筋の結果とは異なり、肝臓では被ばくによって MDA が顕著に増加した個体があり、個体ごとに大腿筋に対する肝臓 MDA の比を調べると、対照区域の個体よりも旧警戒区域の個体で酸化レベルが高くなる傾向にある事がわかった（図 3-27）。以上の結果より、低線量・低線量率放射線被ばくによって酸化ストレスの影響を受ける臓器は、放射性セシウムの蓄積状態によらず、酸化ストレスが誘発されやすい臓器があることが示された。酸化ストレスの亢進によって血液細胞の分化が抑制される報告がある。このため、血球細胞数が減少した理由について、DNA 損傷の誘発以外に、酸化ストレス状態の亢進によって分化が抑制された可能性もある。

大腿筋から作成した不死化細胞クローンより抽出した DNA を用いて、次世代シーケンス解析を実施した。対照地域 2 個体、旧警戒区域 2 個体から作成した不死化細胞から、それぞれクローンを作成しており、次世代シーケンス解析に使用するクローンを選別した。低線量長期放射線被ばくによってグローバルな DNA メチル化レベルの減少が報告されていたことから、各クローンゲノム中の 5-メチル-2-デオキシシチジン (5MedCyd) を指標にグローバルなメチル化レベルを検討した（図 3-28）。同じ個体から作成したクローン間でメチル化レベルに差が生じたことから、選別の基準として（1）細胞増殖速度、（2）5MedCyd が対照区域と旧警戒区域それぞれから作成したクローンが類似するような組み合わせの条件で選別し、合計 12 クローンから抽出した DNA を次世代シーケンス解析で検討した。アカゲザルの rheMac2 をレファレンスゲノムとして利用し、全てのクローン DNA で 93%以上のリードがマッピングされた。SNPs、INDELs、塩基置換の頻度、8bp 以下の小規模な欠失、挿入頻度を指標に比較を行ったが、いずれも対照区域と旧警戒区域の個体間で類似の頻度が示された（図 3-29）。大腿筋は放射性セシウムが最も多く蓄積する部位であったが、図 3-26 に示したように酸化ストレス状態の誘発は確認されなかったことから、ゲノム解析結果にも変化が示されなかったことが考えられる。

野生ニホンザルではこれまでに肉眼的な異常はみとめられていないが、造血機能の低下、骨髄細胞における DNA 損傷の誘発、組織依存的な酸化ストレス状態の誘発が確認された。福島原発事故から 8 年が経過した現在でも放射線被ばくに応じた変化を示しており、長期間の低線量率放射線被ばくに対して今回明らかにした変化が継続した場合の健康へおよびす影響の有無について今後も検討を続ける必要性が考えられた。

表 3-6. 末梢血液細胞数と被ばく線量率の多重回帰分析結果

	$N = N_1 + N_2$	Immature (N_1) / Mature (N_2)	Internal			External		
			coeff.	s.e.	p-value	coeff.	s.e.	p-value
WBC	53	Immature (23)	-0.00256	0.00183	0.168	0.00309	0.00471	0.516
		Mature (30)	-0.00211	0.00096	0.034*	-0.00246	0.00435	0.574
RBC	53	Immature (23)	0.00109	0.00073	0.139	-0.00292	0.00223	0.196
		Mature (30)	-0.00049	0.00039	0.214	-0.00254	0.00175	0.154
Hb	47	Immature (20)	0.00065	0.00072	0.371	-0.00093	0.00243	0.704
		Mature (27)	-0.00074	0.00038	0.060	0.00305	0.00254	0.238
Hct	47	Immature (20)	-0.00050	0.00065	0.452	0.00032	0.00220	0.884
		Mature (27)	-0.00023	0.00035	0.526	0.00336	0.00240	0.168
PLT	53	Immature (23)	-0.00314	0.00268	0.247	-0.00079	0.00699	0.911
		Mature (30)	-0.00452	0.00144	0.003**	0.00086	0.10700	0.994

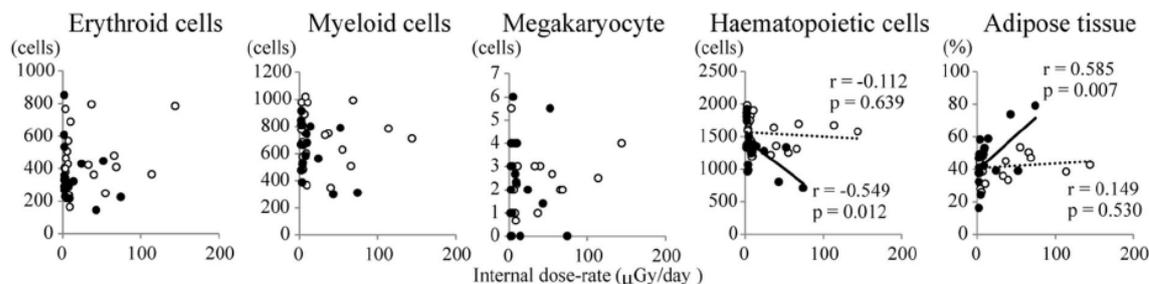


図 3-23. 内部被ばく線量率と骨髓細胞数の相関

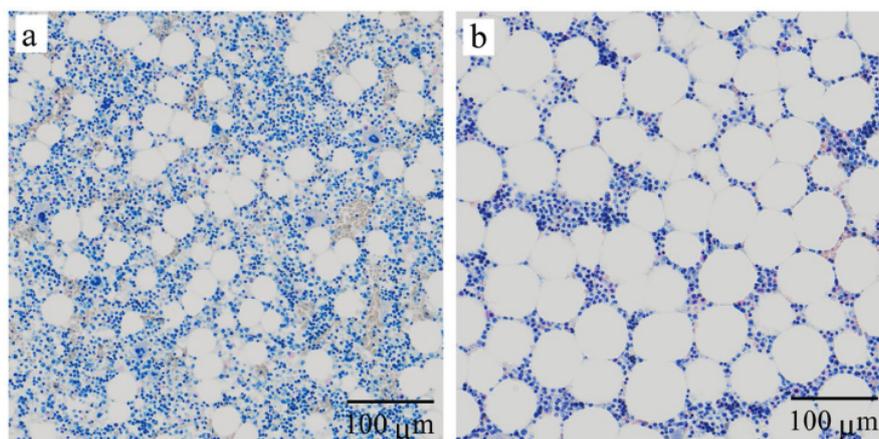


図 3-24. 内部被ばく線量率の増加に伴う脂肪割合の増加

青い染色は血液細胞、白い領域は脂肪。

- a) 9歳オスの骨髓組織染色像。 内部被ばく線量率：4.9 μGy/日、
外部被ばく線量率：24.8 μGy/日
- b) 8歳メスの骨髓組織染色像。 内部被ばく線量率：74.5 μGy/日、
外部被ばく線量率：24.9 μGy/日

表 3-7. 骨髓血液細胞数と被ばく線量率の多重回帰分析結果

	$N = N_1 + N_2$	Immature (N_1) / Mature (N_2)	Internal			External		
			coeff.	s.e.	p-value	coeff.	s.e.	p-value
Erythroid cells	38	Immature(20)	0.00117	0.0013	0.373	-0.003	0.00491	0.542
		Mature (18)	-0.00268	0.00309	0.393	0.0018	0.00858	0.853
Myeloid cells	38	Immature(20)	0.00142	0.00083	0.099	-0.0098	0.00315	0.004**
		Mature (18)	-0.00506	0.00198	0.016*	0.00656	0.00550	0.242
Megakaryocytes	38	Immature(20)	0.00024	0.00139	0.865	0.00017	0.00512	0.974
		Mature (18)	-0.00717	0.00335	0.040*	0.0212	0.00944	0.032*
Haematopoietic cells	38	Immature(20)	0.00049	0.00056	0.386	-0.0042	0.00211	0.055
		Mature (18)	-0.00493	0.00133	0.001***	0.0057	0.00370	0.131
Adipose tissue	38	Immature(20)	0.00005	0.00078	0.950	-0.0021	0.00357	0.570
		Mature (18)	0.00672	0.00185	0.001**	-0.0164	0.00571	0.007**

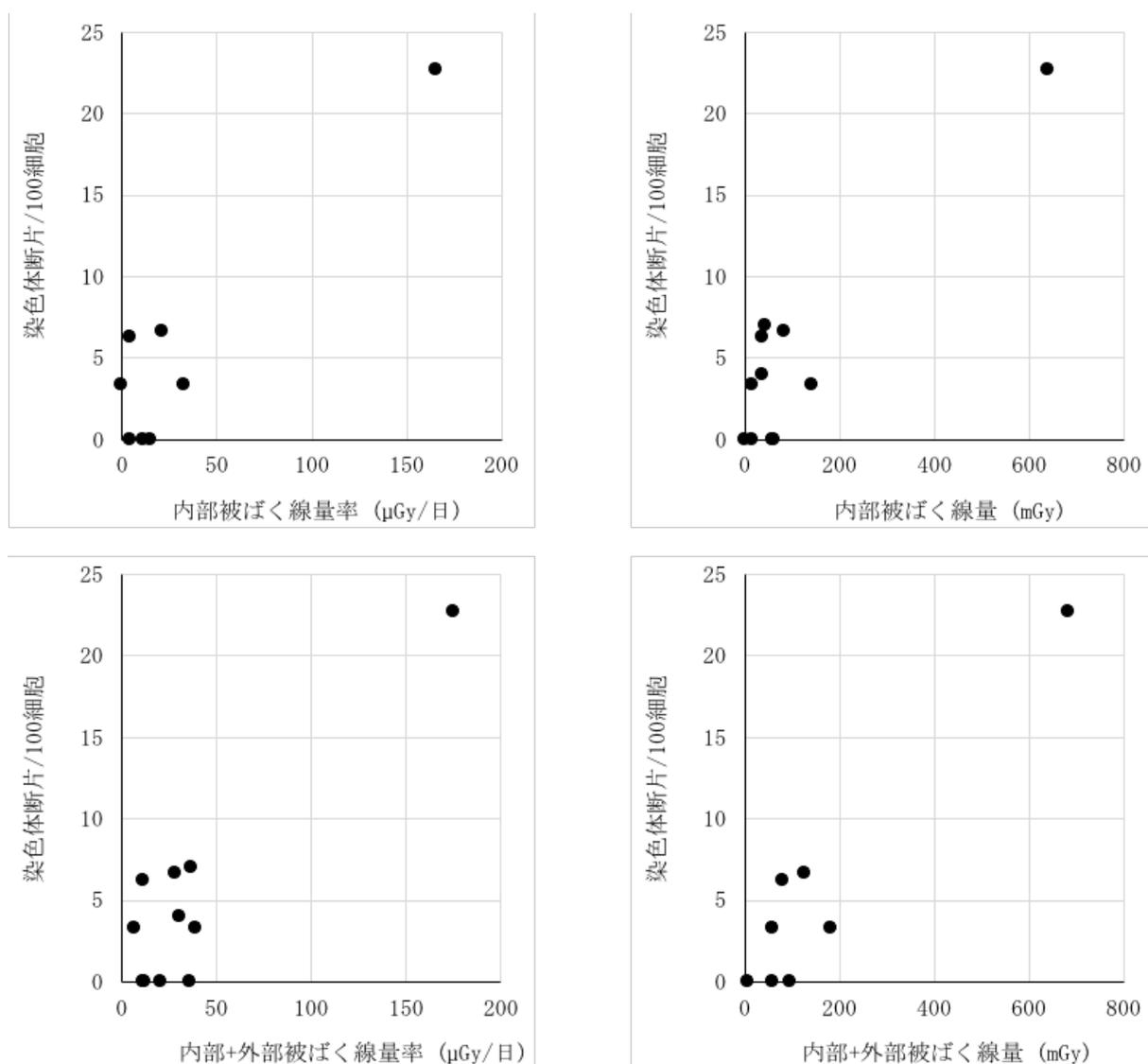


図 3-25. ニホンザル大腿骨髓細胞から作製した染色体解析結果

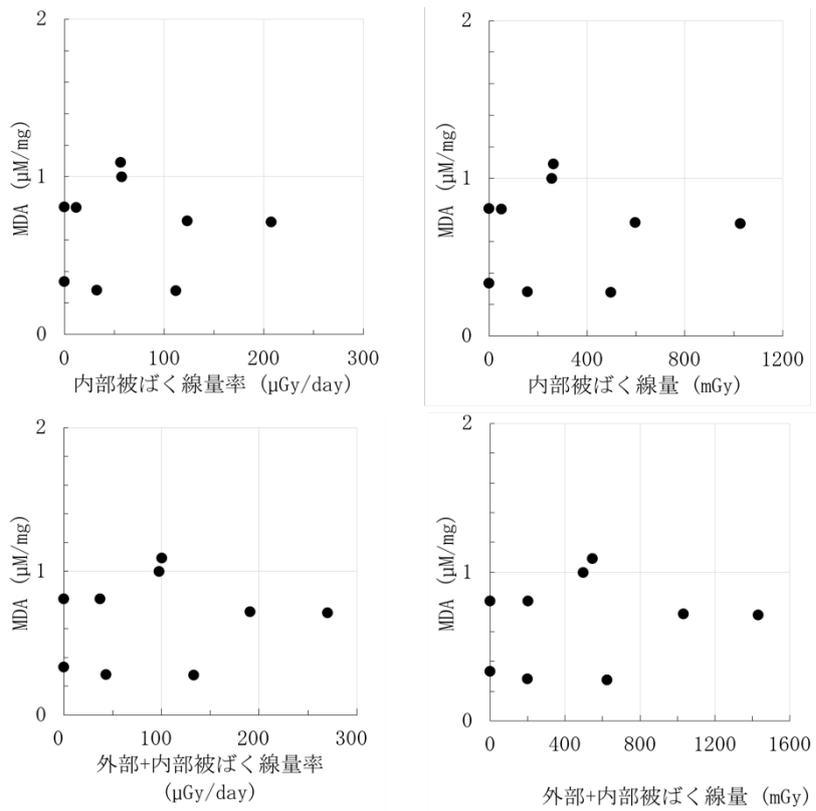


図 3-26. 大腿筋 MDA 濃度と放射線被ばくとの相関

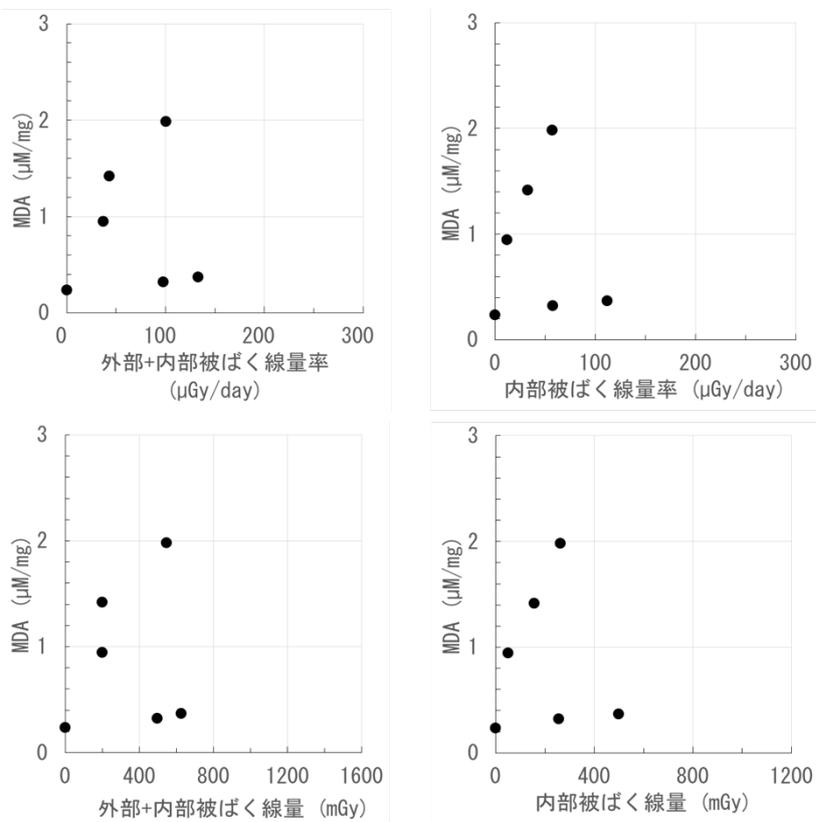


図 3-27. 肝臓 MDA 濃度と放射線被ばくとの相関

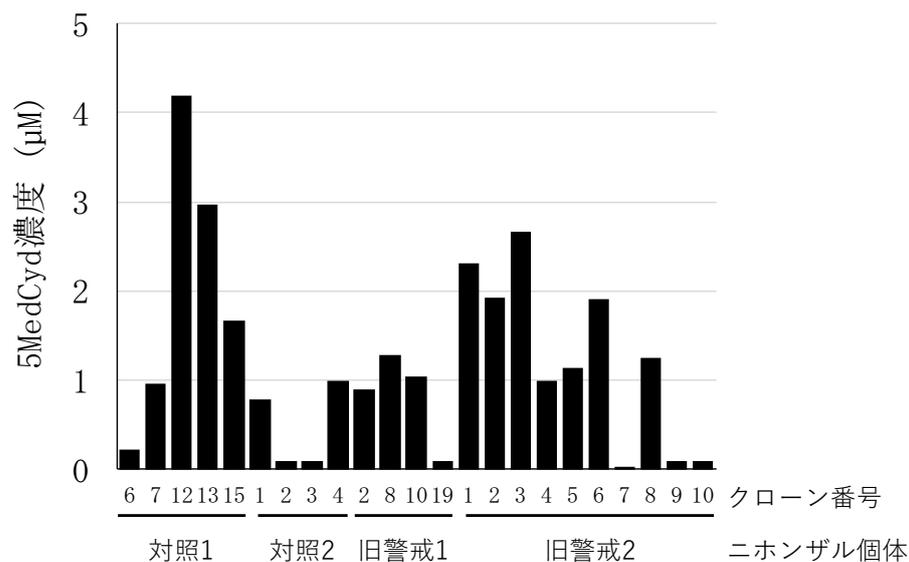


図 3-28. 各クローン DNA 中に含まれる 5MedCyd の定量

対照：対照地域のニホンザル個体

旧警戒：旧警戒区域のニホンザル個体

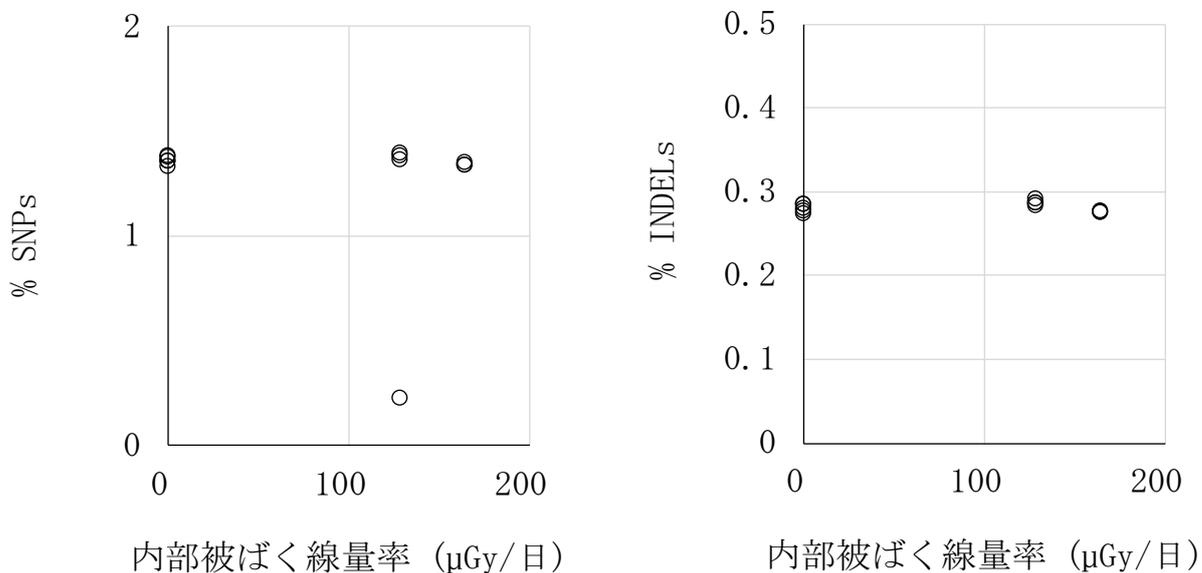


図 3-29. 次世代シーケンス解析結果の一例

次世代シーケンス解析の結果得られた SNPs と INDELs の頻度とニホンザル個体の内部被ばく線量率の関係を検討した結果。内部被ばく線量、外部内部被ばく線量と線量率で検討した場合も内部被ばく線量率のグラフで示された同様の傾向であった。

3.2.4 被ばく線量率との相関性を示す血漿タンパク質の実験的検証（再委託先：大阪大学） （平成 28-30 年度）

本項目では、放射線被ばくによる血漿中酸化ストレスマーカーの挙動について実験的に検証する試料を作製するためのマウス動物実験を実施した。ガンマ線照射装置を用いた外部被ばく動物実験、あるいは放射性セシウム (^{137}Cs) 水を飲料水として飲ませる内部被ばく動物実験を行い、実験的に低い線量で外部被ばくや内部被ばくの影響を検討する血漿試料を作製した。あらかじめ設定した被ばく条件に達したマウスから血液を採取し、遠心分離後に得られる血漿成分を超低温冷凍庫で保管した。

平成 28 年度は、100 Bq/ml の濃度の ^{137}Cs 水を A/J マウス系統に飲料水として飲ませながら兄妹交配することで 30 代の世代交代に成功した。胎生期から内部被ばくを続けるこのマウスの 5~6 ヶ月齢の内部被ばくによる血漿タンパク質への影響を検討するために第 30 世代目のマウスの平成 28 年 9 月 2 日、7 日生まれのオス 6 匹と 9 月 23 日生まれのオス 6 匹を条件設定のためのパイロットテスト用マウスとして飼育した。内部被ばくマウスが設定した月齢に達したところで、 ^{137}Cs 水を飲んでいない対照群オス 6 匹とともに、それぞれのマウスからヘパリン採血を行い、遠心分離の後、各マウス当たり平均 240 μl の血漿を得て、総数 18 本の血漿サンプルとして -80°C の超低温冷凍庫にて凍結保存した。同時に各マウスを過剰麻酔による安楽死の後、筋ならびに肝臓組織を剥出して、Automatic gamma counter 2480 WIZARD2 (PerkinElmer Co. Ltd, Waltham, MA) にて組織中の ^{137}Cs によるガンマ線量を測定した (表 3-8、表 3-9)。その結果、筋組織には 222.96 Bq/g、肝組織には 46.95 Bq/g の ^{137}Cs が蓄積しており、筋組織と肝組織の ^{137}Cs 濃度の比は 1:4.7 (図 3-30) で、これまでの結果 (参考文献 1-3、図 3-31) とほぼ同様の結果であった。

平成 29 年度は、 ^{137}Cs 水を A/J マウス系統に飲料水として飲ませながら兄妹交配することで、33 代の世代交代に成功した [1]。平成 28 年度のパイロットテストの結果をもとに胎生期から内部被ばくを続けるこのマウスの 1.5 ヶ月齢 (6 匹)、3 ヶ月齢 (10 匹)、6 ヶ月齢 (6 匹) と対照群として真水を飲み続けるマウスの 1.5 ヶ月齢 (5 匹)、3 ヶ月齢 (9 匹)、6 ヶ月齢 (6 匹) のオスからヘパリン採血を行い、遠心分離後の血漿を -80°C の超低温冷凍庫にて保存した (表 3-10)。なお、採血時に各マウスから筋ならびに肝臓組織を剥出し、ガンマカウンターを用いて各組織中の ^{137}Cs 由来ガンマ線を測定した (表 3-11、図 3-32; Error bar 95%CI)。採血をした A/J マウスの体形・体重を計測し、その平均値から PHITS を用いて放射能濃度から線量率への換算係数を算出し、採血時に採取した筋肉中 ^{137}Cs 濃度から、 ^{137}Cs 水の自由摂取による被ばく線量評価を行った。さらに、内部被ばく線量の減衰にともなう血漿タンパク質への影響を調べるために、 ^{137}Cs 水の給水を停止し、真水に切り換えて 8 日後 (6 匹)、19 日後 (5 匹)、36 日後 (5 匹)、62 日後 (5 匹)、98 日後 (5 匹) のオスマウスからヘパリン採血を行い、遠心分離後の血漿を -80°C の超低温冷凍庫にて凍結保存した (表 3-12)。同時に各マウスから筋ならびに肝臓組織を剥出して、ガンマカウンターで組織中の ^{137}Cs 由来ガンマ線を測定した。いずれも被験動物は、性周期のあるメスを避け、オスを用いた (表 3-13、図 3-33; Error bar 95%CI)。

また、指標とする血漿タンパク質の外部被ばくによる変動を調べるために、 ^{137}Cs 線源によ

るガンマ線照射装置（産業科学社製）を用いて外部照射実験を行った。表 3-14 に示す照射条件にて、毎時 3 mGy もしくは毎時 6 mGy の線量率で総線量 30 mGy の外部照射を各 4 匹ずつのマウス(A/J 系統)に行った。そして、各群で照射直後と照射 1 日後に各 2 匹ずつからヘパリン採血を行った。同時に対照群（2 匹）の採血も行い、採取した血漿サンプル（合計 10 サンプル）を凍結保存し、解析担当者へ提供した（表 3-15）。

平成 30 年度は、 ^{137}Cs 線源を用いた照射による外部被ばくと、 ^{137}Cs 水の経口摂取による内部被ばくにおける血漿タンパク質への影響の線量相関性をさらに詳細に調べるための試料を作製した。外部被ばく実験に関して、 ^{137}Cs 水を摂取していない A/J 系統マウスに ^{137}Cs 線源を用いてガンマ線を外部から表 3-16 の照射条件で総線量 6 mGy（線量率：1, 3, 6 mGy/時間）と総線量 30 mGy（（線量率：3, 6 mGy/時間）の照射を行い、照射 24 時間後に各群 5 匹ずつのマウスからヘパリン採血した。遠心分離によって得られた血漿 25 サンプルを速やかに -80 で凍結保存し、解析担当者へ提供した（表 3-17）。内部被ばく実験に関しては、100 Bq/ml の ^{137}Cs 水を自由摂取開始後のマウス体内 ^{137}Cs 濃度の変動グラフ（図 3-34）の 0-20 日までを参考に、内部被ばく線量率が 50、100 $\mu\text{Gy}/\text{day}$ となるように給水日数を設定し、 ^{137}Cs 水を自由摂取させた。予想される各線量率の時点で、マウスからヘパリン採血を行い、血漿を凍結保存した。なお、採血時にそれぞれのマウスの肝臓、筋肉中のセシウム ^{137}Cs 含量（Bq/g）を測定し、PHITS により算出した放射能濃度-線量率換算係数（3.4（ $\mu\text{Gy} \cdot \text{g}$ ）/（Bq \cdot day））を用いて内部被ばくについて評価した（表 3-18）。

参考文献

1. H. Nakajima, Y. Yamaguchi, T. Yoshimura, M. Fukumoto, T. Todo, Fukushima simulation experiment: Assessing the effects of chronic low-dose internal ^{137}Cs radiation exposure on litter size, sex ratio, and biokinetics in mice. *J. Radiat. Res.*, **56**, i29-i35, 2015.
2. H. Nakajima, Chapter 13, Biokinetics of ^{137}Cs and Estimation of Internal Radiation Dose; Physiological effects in Descendant Mice after the Every Generational Low Dose-Rate Internal ^{137}Cs Radiation Exposure, as the Fukushima Simulation Experiment. In: *Fukushima Nuclear Accident: Global Implications, Long-Term Health Effects and Ecological Consequences* (Editors: Shizuyo Sutou), Nova Science Publishers, AN, USA. p217-223, 2015.
3. H. Nakajima, Effects of Radioactive Cesium-containing Water on Mice. *Low-Dose-Rate Radiation Effects on Animals and Ecosystem -Long-Term Study on the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident* (Editors: Manabu Fukumoto), Springer Nature, 2019 (*in press*).

表 3-8. 6 ヶ月雄マウス肝臓内 ^{137}Cs 量の測定

動物番号	性	本重 (g)	重量 (g)	cpm	Bq/g
759	♂	29.80	0.60	329	39.57
760	♂	29.10	0.62	354	41.34
727	♂	24.10	0.48	349	52.61
728	♂	25.17	0.52	314	43.48
733	♂	28.07	0.50	296	42.50
734	♂	24.22	0.66	558	62.18
BG		14.6 cpm		平均	46.95
計数効率		0.2207		SD	8.74
				n	6.00
				95%CI	6.99

表 3-9. 6 ヶ月雄マウス筋組織内 ^{137}Cs 量の測定

動物番号	性	本重 (g)	重量 (g)	cpm	Bq/g
759	♂	29.80	0.69	1763	191.35
760	♂	29.10	0.75	2571	257.40
727	♂	24.10	0.48	2051	320.38
728	♂	25.17	0.57	1673	219.72
733	♂	28.07	0.62	1339	161.31
734	♂	24.22	0.73	1828	187.59
BG		14.6 cpm		平均	222.96
計数効率		0.2207		SD	57.86
				n	6.00
				95%CI	46.30

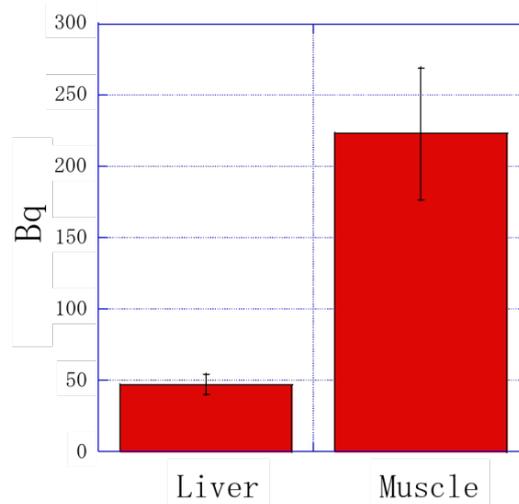


図 3-30. 6 ヶ月雄マウスの臓器内 ^{137}Cs 量 (Bq/g)

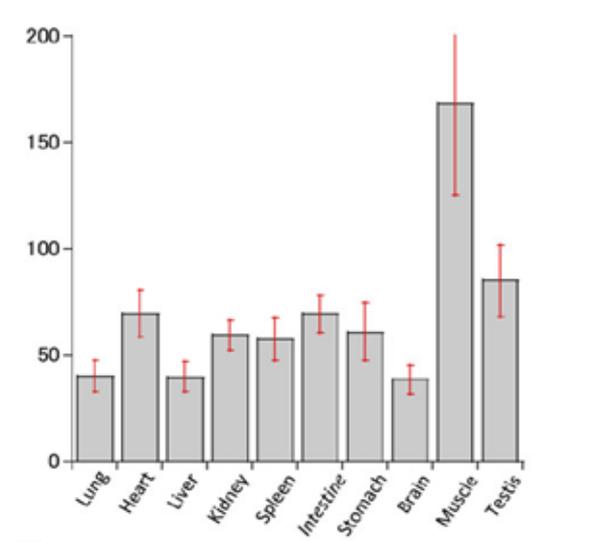


図 3-31. 18 世代目 4 ヶ月齢雄の各臓器内 ^{137}Cs 量 (Bq/g)

表 3-10 ^{137}Cs 水給水群の各日齢における組織内 ^{137}Cs 量と被ばく線量

日齢	動物番号	性別	体重	Bq/g		$\mu\text{Gy}/\text{Day}$		積算線量 mGy	
				Liver	Muscle	Liver	Muscle	Liver	Muscle
52	836	♂	24.18	49.4	133.5	168.0	454.0	8.736	23.610
52	837	♂	22.03	50.8	164.2	172.8	558.3	8.984	29.034
52	838	♂	23.03	41.2	113.4	140.1	385.7	7.284	20.057
52	839	♂	20.43	52.7	140.8	179.2	478.8	9.316	24.899
52	844	♂	22.85	35.3	103.0	119.9	350.0	6.237	18.202
51	851	♂	21.75	46.4	116.4	157.7	395.6	8.043	20.176
100	822	♂	23.30	76.1	204.2	258.8	694.2	25.876	69.424
100	823	♂	23.90	54.4	243.4	184.9	827.4	18.494	82.739
100	824	♂	23.31	61.0	206.5	207.4	702.1	20.744	70.211
100	825	♂	22.51	56.4	189.8	191.9	645.4	19.187	64.542
103	795	♂	26.23	47.4	199.5	161.1	678.4	16.596	69.872
103	796	♂	24.57	52.4	168.3	178.2	572.4	18.354	58.956
100	815	♂	32.15	40.4	112.1	137.4	381.0	13.736	38.104
100	816	♂	36.52	28.2	112.0	96.0	380.8	9.600	38.077
100	817	♂	28.42	34.1	109.5	115.8	372.3	11.578	37.233
100	818	♂	32.51	46.6	123.8	158.6	421.0	15.858	42.104
181	733	♂	28.07	42.6	161.4	144.9	548.8	26.218	99.324
181	734	♂	24.22	62.3	187.7	211.7	638.1	38.311	115.488
185	759	♂	29.80	47.6	191.4	161.8	650.9	29.932	120.409
185	760	♂	29.10	41.4	257.5	140.8	875.4	26.055	161.950
185	727	♂	24.10	52.7	320.5	179.2	1089.7	33.159	201.588
185	728	♂	25.17	43.6	240.9	148.2	819.2	27.411	151.552

表 3-11 各日齢における組織内平均 ^{137}Cs 量

Days old	Bq/g		95%CI	
	Liver	Muscle	Liver	Muscle
52	46.0	128.6	5.28	60.59
100	49.7	166.9	8.53	103.15
185	48.4	226.6	6.37	158.53

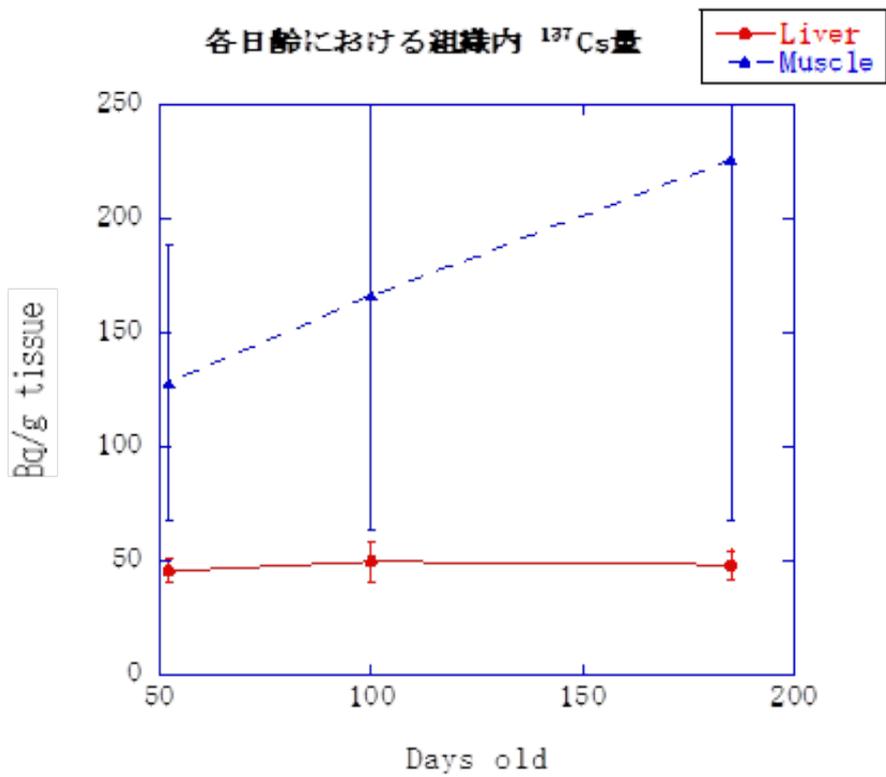


図 3-32. 各日齢における組織内 ^{137}Cs 量

表 3-12 ^{137}Cs 水給水停止後の組織内 ^{137}Cs の経時変動と被ばく線量率

真水給水				Bq/g		$\mu\text{Gy}/\text{day}$	
日数	動物番号	性別	体重	Liver	Muscle	Liver	Muscle
0	822	♂	23.30	76.1	204.2	258.8	694.2
0	823	♂	23.90	54.4	243.4	184.9	827.4
0	824	♂	23.31	61.0	206.5	207.4	702.1
0	825	♂	22.51	56.4	189.8	191.9	645.4
0	795	♂	26.23	47.4	199.5	161.1	678.4
0	796	♂	24.57	52.4	168.3	178.2	572.4
0	815	♂	32.15	40.4	112.1	137.4	381.0
0	816	♂	36.52	28.2	112.0	96.0	380.8
0	817	♂	28.42	34.1	109.5	115.8	372.3
0	818	♂	32.51	46.6	123.8	158.6	421.0
8	948	♂	28.53	7.93	40.1	26.9	136.5
8	949	♂	21.45	5.75	41.3	19.5	140.3
8	950	♂	24.13	8.94	45.4	30.4	154.4
8	953	♂	23.97	19.3	106.8	65.5	363.1
8	954	♂	23.00	15.1	81.0	51.4	275.3
8	955	♂	23.67	15.9	101.2	54.1	344.1
19	922	♂	22.34	3.3	15.8	11.4	53.7
19	923	♂	23.90	3.1	15.9	10.5	54.2
19	924	♂	18.77	3.3	12.9	11.3	43.7
19	925	♂	20.77	2.9	15.6	9.9	53.1
19	926	♂	21.77	3.3	14.2	11.4	48.2
36	913	♂	22.36	0.3	1.7	0.9	5.6
36	927	♂	23.69	1.0	5.4	3.5	18.2
36	931	♂	22.84	1.8	8.4	6.1	28.4
36	932	♂	20.30	2.3	9.7	7.9	32.9
36	933	♂	21.74	1.6	8.3	5.3	28.1
62	939	♂	28.20	0.4	4.3	1.4	14.5
62	940	♂	25.67	0.8	4.8	2.8	16.4
62	941	♂	26.00	0.8	3.7	2.7	12.6
62	942	♂	25.59	1.0	5.1	3.3	17.4
62	943	♂	27.35	0.8	4.0	2.6	13.6
98	856	♂	30.67	0.2	1.3	0.7	4.6
98	857	♂	32.11	0.1	0.9	0.4	3.2
98	858	♂	38.35	0.2	0.8	0.6	2.7
98	830	♂	30.14	0.2	1.4	0.6	4.6
98	831	♂	35.97	0.1	1.6	0.2	5.4

表 3-13 ^{137}Cs 給水停止後の組織内平均 ^{137}Cs 量の経時変動

Days after	Bq/g		95%CI	
	Liver	Muscle	Liver	Muscle
0	49.7	166.9	8.53	30.34
8	12.1	69.3	4.27	24.71
19	3.2	14.9	0.17	1.16
36	1.4	6.7	0.69	2.81
62	0.8	4.4	0.18	0.51
98	0.2	1.2	0.05	0.29

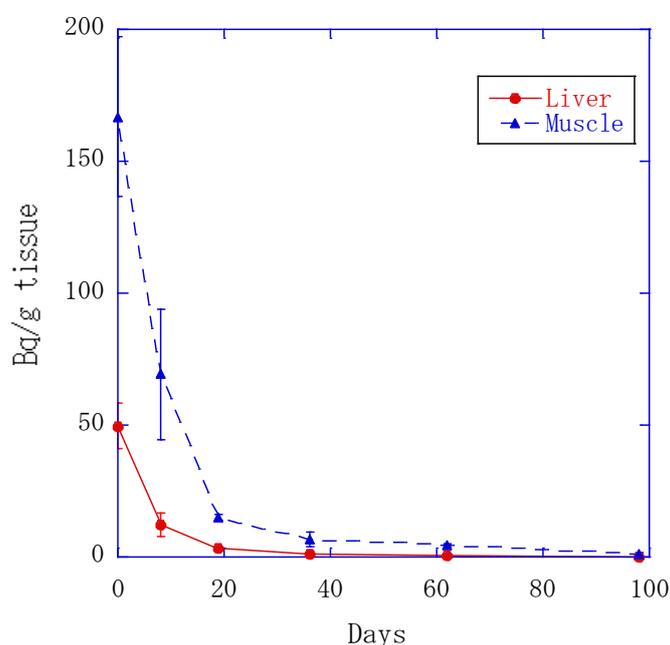


図 3-33 ^{137}Cs 給水停止後の ^{137}Cs の減衰

表 3-14 ^{137}Cs ガンマ線照射条件

気圧	768 mmHg	
温度	20 °C	
50cm実測値	2.5 R/hr	
温度気圧補正係数	0.983	
R→rad変換係数	0.963	
Distance	50cm	23.7 mGy/hr
Distance	99.4cm	6 mGy/hr
Distance	140.5cm	3 mGy/hr
^{137}Cs 線源	2017.12.1現在	53.45 GBq
照射装置	(株)産業科学	

表 3-15 異なった線量率の ^{137}Cs ガンマ線外部照射実験

処理群	動物番号	性別	体重	採血時 月齢	照射後 経過時間	総線量 mGy
Control群	145	♂	35.06	12	—	0
	146	♂	32.55	12	—	0
3mGy/hr群	167	♂	30.72	13	0	30
	168	♂	33.36	13	0	30
	169	♂	35.92	13	24	30
	170	♂	33.06	13	24	30
6mGy/hr群	128	♂	35.79	14	0	30
	129	♂	32.75	14	0	30
	130	♂	28.51	14	24	30
	131	♂	36.50	14	24	30

表 3-16 ^{137}Cs ガンマ線照射条件

Distance	50.0cm	23.23 mGy/hr
Distance	98.4cm	6 mGy/hr
Distance	139.1cm	3 mGy/hr
Distance	241.0cm	1 mGy/hr
137Cs 線源	2017.12.1 現在	53.45 GBq
照射装置	(株) 産業科学	

表 3-17 ¹³⁷Cs ガンマ線照射条件

照射線量 (mGy)	線量率 (mGy/h)	照射時間 (h)	照射距離 (cm)	マウス (♂) 動物番号	生年月日	体重 (g)
6	1	6	241.0	289	2018/7/28	34.46
				290	2018/7/28	31.01
				291	2018/7/28	33.62
				292	2018/7/28	28.68
				293	2018/7/28	26.64
	3	2	139.1	294	2018/7/26	33.92
				316	2018/7/1	36.18
				373	2018/7/28	28.39
				374	2018/7/28	28.83
				375	2018/7/28	24.80
	6	1	98.4	314	2018/7/1	28.63
				315	2018/7/1	30.95
				331	2018/7/10	30.03
				332	2018/7/10	28.39
				333	2018/7/10	29.54
30	3	10	139.1	378	2018/9/8	27.12
				379	2018/9/8	26.22
				380	2018/9/8	27.68
				381	2018/9/8	26.02
				382	2018/9/8	28.35
	6	5	98.4	383	2018/9/8	28.08
				384	2018/9/8	28.71
				385	2018/9/8	27.89
				389	2018/7/31	27.37
				390	2018/7/31	27.78
391	2018/7/31	27.59				

表 3-18 ¹³⁷Cs 内部被ばくによる線量率・線量依存性の検討

予定 線量率・線量			実測値											
線量率 (μGy/day)	筋肉中 ¹³⁷ Cs 量 (Bq/g)	総線量 (mGy)	給水日数 (日)	マウス (♂) 動物番号	生年月日	体重 (g)	全肝臓重量 (g)	筋肉重量 (g)	肝臓 (Bq/g)	筋 肉 (Bq/g)	線量率 (μGy/day)		総線量 (mGy)	
											肝臓	筋肉	肝臓	筋肉
50	14.7	0.061	2.45	425	2018/12/5	26.80	1.03	0.74	14.6	20.2	49.6	68.6	0.061	0.084
				426	2018/12/5	23.86	1.05	0.81	14.7	18.4	49.8	62.4	0.061	0.077
				427	2018/12/5	19.65	0.80	0.9	11.4	20.9	38.8	71.1	0.048	0.087
				428	2018/12/5	23.32	0.98	0.89	12.2	22.5	41.3	76.5	0.051	0.094
				429	2018/12/5	21.50	0.84	1.21	12.1	32.3	41.1	109.9	0.050	0.135
100	29.4	0.245	4.91	446	2018/12/5	26.38	1.00	0.83	35.7	45.0	121.4	153.0	0.298	0.376
				447	2018/12/5	28.22	1.01	1.01	30.7	60.1	104.5	204.4	0.256	0.502
				448	2018/12/5	26.22	1.07	1.17	34.7	51.8	117.9	176.1	0.289	0.432
				449	2018/12/5	25.32	1.06	0.9	30.4	50.4	103.2	171.5	0.253	0.421
				450	2018/12/5	26.94	0.99	1.17	34.5	60.7	117.3	206.4	0.288	0.507

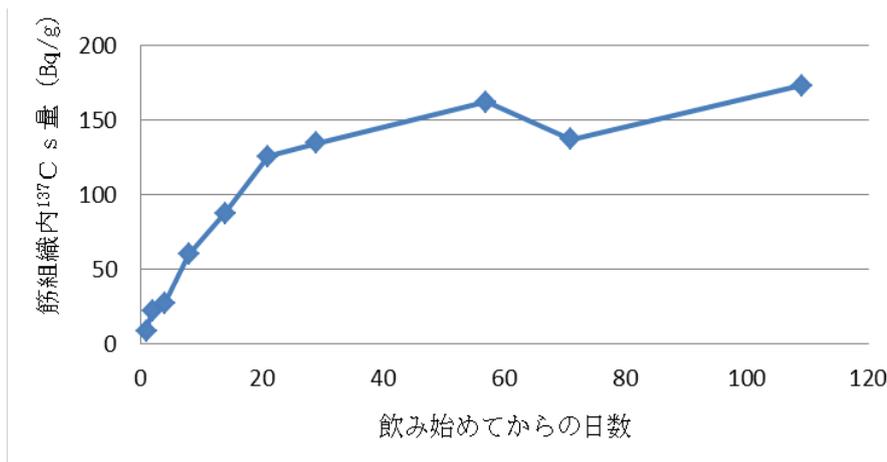


図 3-34 ¹³⁷Cs 水 (100 Bq/ml) を飲み始めてからの筋中 ¹³⁷Cs 量の経時変

3.2.5 血漿タンパク質分析 (平成 28-30 年度)

本項目では項目 3.2.4 で作製した血漿を解析し、低い線量の放射線被ばくによる血漿中酸化ストレスマーカーの変化について実験的に検証することを目的に実施した。旧警戒区域のウシから採取した血漿解析の結果では、酸化ストレスマーカーが内部被ばく線量率に依存して変化する事が示されたが、外部被ばくに対する相関は得られていない[1]。また、旧警戒区域のウシは外部被ばくと内部被ばくの複合被ばくである事から、外部被ばく、あるいは内部被ばく別に酸化ストレスマーカーの変化を実験的に検証する必要がある。このため、旧警戒区域のウシ血漿の解析結果より相関が見られた酸化ストレスマーカーのマロンジアルデヒド (MDA)、スーパーオキシドジスムターゼ (SOD) 活性、グルタチオンペルオキシダーゼ (GPx) 活性について、外部被ばく、あるいは内部被ばく別に ¹³⁷Cs に被ばくした動物実験マウスの血漿を用いて検討した。

平成 28 年度は、まず、動物実験マウスから採取可能な血漿量にあわせた最適な解析条件を検討した。1 匹の成体マウスから採取できる平均的な血漿量を 200-250 μ l と想定し、最も血漿量を消費する MDA の解析条件を検討した (図 3-35)。旧警戒区域のウシ血漿の解析結果より本項目で検討される MDA 濃度範囲を 4 μ M 以下と推定し、その濃度範囲を含む MDA 標準試料を用いて MDA 濃度と解析値との検量線を作製した。推奨されていた MDA 標準試料量から段階的に減量し、複数回の解析で直線の検量線が描出できる試料量を検討した。推奨量の 6 割の量でも検量線の直線性が安定して得られることを確認できたため、MDA 濃度測定に影響を及ぼさない範囲で解析に使用する試料量を減量する事ができた。

確立した条件を用いて、実際に ¹³⁷Cs 水を自由飲水したマウスの血漿中酸化ストレスマーカーの変動について検討した。H28 年度は筋肉中の ¹³⁷Cs 濃度が飽和したマウスの血漿中酸化ストレスマーカーの変動を調べることを目的とし、¹³⁷Cs 水の飲水開始から 5 ヶ月、あるいは 6 ヶ月後のマウスから採取した血漿で MDA、SOD 活性、GPx 活性の変動を検討した (図 3-36)。全ての血漿試料中で各種酸化ストレスマーカーが検出されたことから、小容量に条件設定した検出系が機能していることを確認した。ただ、対照群と ¹³⁷Cs 水飲水期間ごとの各種マ

カーの平均値に有意な差は見られなかった。平成 29 年度は各種酸化ストレスマーカーの変動を、¹³⁷Cs 水飲水期間が 1.5 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月のマウスから採取した血漿を用いて検討したが、平成 28 年度の結果同様に飲水期間ごとの平均値を対照群と比較しても有意な変化は得られなかった。

大阪大学で計測した筋肉中放射性セシウム濃度の結果より、¹³⁷Cs 水を同じ期間自由摂取したマウスでも筋肉中放射性セシウム濃度が個体ごとに異なることが示された。この結果は、飲水（被ばく）期間よりもマウス個体ごとに評価された内部被ばく線量・線量率に対する酸化ストレスマーカーの変動を検討する必要性を示唆している。そこで、筋肉中 ¹³⁷Cs 濃度をもとに評価した内部被ばく線量・線量率と解析済みの各種酸化ストレスマーカーとの関連を検討した（図 3-37）。本課題で実施した線量・線量率範囲において、¹³⁷Cs 水飲水群の血漿中 MDA 濃度は内部被ばく線量率 80 μ Gy/日までは対照群と類似した分布を示したが、内部被ばく線量率が 80-200 μ Gy/日、あるいは内部被ばく線量が 1 mGy 程度になると、対照群で測定された MDA 濃度範囲（平均値:0.6 μ M、最小値:0.3 μ M、最大値:1.2 μ M）の低値範囲（平均値:0.3 μ M、最小値:0.1 μ M、最大値:0.4 μ M）に収束する事が示された。抗酸化酵素である GPx 活性は、内部被ばく線量率が約 150 μ Gy/日まで、内部被ばく線量が 1 mGy までの範囲で対照群の活性の平均値と比較すると約 2 倍高まっていた。GPx 活性が高まる内部被ばく線量・線量率範囲に MDA 濃度が低下する範囲が含まれていたことから、MDA 濃度の低下が GPx 活性の上昇に関連する可能性が考えられた。他方、本項目で測定した別の抗酸化酵素である SOD の活性は、内部被ばく線量率 500 μ Gy/日以下、内部被ばく線量 100 mGy 以下の範囲で、対照群で測定された SOD 活性（平均値:2,213 U/mL、最小値:1,111U/mL、最大値:5,000 U/mL）の低値範囲（平均値:1,507 U/mL、最小値:833U/mL、最大値:2,500 U/mL）に収束していた事から、この被ばく線量範囲内における MDA 濃度の低下に関与していない事が示された。

次に、MDA 濃度が低下した内部被ばく線量率(80 μ Gy/日)・線量(1 mGy)以上の範囲における各種酸化ストレスマーカーの変動について検討した。MDA 濃度がいったん低下した後、今回検討した内部被ばく線量率 1,100 μ Gy/日までの範囲において、被ばく線量率に依存して増加し、平均値:0.7 μ M(最小値:0.4 μ M、最大値:1.6 μ M)の範囲に分布した。内部被ばく線量に関しては、20 mGy までは MDA 濃度が増加するが、その後 100 mGy まで徐々に減少する傾向を示し、100-200 mGy の範囲では MDA 濃度が平均値 0.5 μ M でほぼ一定の範囲に収束した。GPx は、活性が約 2 倍に高まった内部被ばく線量・線量率範囲を超えると対照群と同等の活性を示したことから、内部被ばく線量率 80 μ Gy/日・線量 1 mGy 以上の範囲における MDA の変動に関与しない事が示された。一方、平均 1,347 U/mL の活性を示した SOD が、内部被ばく線量率が 500 μ Gy/日を超えると平均値 6,856 U/mL の高い SOD 活性を示す個体が出現し、この個体は内部被ばく線量が 100 mGy を超えている事が示された。このため、内部被ばく線量 100 mGy 周辺の領域における MDA 濃度の変動には SOD 活性の変化と関連する可能性が考えられた。以上の結果より、¹³⁷Cs による内部被ばくが継続する期間において、酸化・抗酸化のバランスが内部被ばく線量・線量率に依存して不規則に変化している事が明らかとなった。今回検討した内部被ばく条件では、非被ばく時の酸化状態を大きく超える事のない範囲で軽度の酸化ストレス状態となること、SOD と GPx による抗酸化能が異なる被ばく線量・線量率で、限定された範囲で高まる事が酸化・抗酸化能の不規則な変動に関わる事を示唆した。

次に ^{137}Cs 水の飲水を中止した後の酸化ストレスマーカーの変動を調べるために、 ^{137}Cs 水を 3 ヶ月自由摂取したマウス血漿中の酸化ストレスマーカー値 (0Mo) に対し、 ^{137}Cs 水摂取後に真水に切り替えて飼育したマウス血漿中の酸化ストレスマーカー値 (0.3Mo、0.6Mo、1Mo、2Mo) を比較した (図 3-38、上段)。なお、 ^{137}Cs 水飲水期間中の非常に短期間でのみ活性が変動していた GPx は本解析から除外した。MDA 濃度、SOD 活性とともに真水に切り替えた後の時間経過とともに減少した。真水に切り替えて飼育すると筋肉中 ^{137}Cs 濃度が低下するため、真水切り替え後に血漿を採取したマウスについても筋肉中 ^{137}Cs 濃度を測定し、血漿採取時の内部被ばく線量率を計算した。真水切り替え後の内部被ばく線量率と酸化ストレスマーカー値を、 ^{137}Cs 水飲水期間中の内部被ばく線量率に対する酸化ストレスマーカー変動のグラフ (図 3-38、上段) に重ねると (図 3-38、下段)、内部被ばく線量率に対する MDA 濃度の変動が ^{137}Cs 飲水期間と真水に切り替えた後で類似の反応を示した。特に、内部被ばく線量率が $80 \mu\text{Gy}/\text{日}$ 以下の範囲では、真水のみで飼育した対照群と同様の範囲に MDA 濃度が分布した。SOD 活性についても同様に比較・検討すると、 ^{137}Cs 飲水期間と真水切り替え後が同様に変動していることが確認された。特に ^{137}Cs 飲水期間には検討できなかった低線量率領域 ($5.8\text{--}33 \mu\text{Gy}/\text{日}$) まで真水切り換えによって低下したマウス血漿では SOD 活性は ^{137}Cs 飲水期間と同様に低活性状態にあった。このため、極めて低い線量率被ばくから SOD 活性が低下している可能性が示された。

次に、外部被ばくによる酸化ストレスマーカーの変動について検討した。平成 29 年度は外部被ばくに関する予備的検討を行うために、線量率 $3 \text{ mGy}/\text{時}$ と $6 \text{ mGy}/\text{時}$ の線量率で 30 mGy に到達するまで ^{137}Cs ガンマ線外部照射を行い、照射終了直後と 24 時間後のそれぞれのマウスから採取した血漿中に含まれる MDA を検出した (図 3-39)。MDA 濃度は照射終了直後では対照群の MDA 濃度と比べて変化はみられず、照射後 1 日が経過する間に増加することが両線量率照射の結果で示された。このため、平成 30 年度は照射終了 24 時間後に血漿を採取する事とした。また、平成 29 年度の検討条件にさらに線量・線量率が低い条件を加え、線量率 $1, 3, 6 \text{ mGy}/\text{時}$ で線量 6 mGy 、あるいは線量率 $3, 6 \text{ mGy}/\text{時}$ で線量 30 mGy の外部被ばくによる酸化ストレスマーカーの変動について検討した (図 3-40)。 6 mGy の外部被ばく線量に対して MDA 濃度は増加する傾向を示し、今回の検討では $1 \text{ mGy}/\text{時}$ と $3 \text{ mGy}/\text{時}$ の線量率照射で有意な増加 ($p < 0.05$) が確認された。続いて、 $3 \text{ mGy}/\text{時}$ と $6 \text{ mGy}/\text{時}$ の線量率で 30 mGy の外部被ばくによる MDA 濃度の変動を検討した。 $3 \text{ mGy}/\text{時}$ の線量率では、線量を 6 mGy から 30 mGy に増加しても MDA 濃度に変動は見られなかった。一方、 $6 \text{ mGy}/\text{時}$ の線量率では線量に依存して MDA 濃度が増加し、 $6 \text{ mGy}/\text{時}$ の線量率では 30 mGy を照射すると対照群と比べて有意に増加することが確認された。以上の結果より、MDA 濃度は外部被ばく線量に依存して増加するが、低い線量率では増加する MDA 濃度には上限がある可能性が考えられた。抗酸化酵素に関しては、 6 mGy の外部照射によって SOD 活性は検討した全ての線量率で低下し、GPx 活性は $6 \text{ mGy}/\text{時}$ を除く線量率で低下した。SOD 活性については対照群と比べて約 1-3 割に低下し、GPx 活性は対照群と比べて半減した。このように抗酸化酵素活性の低下によって、 6 mGy の照射で MDA 濃度が増加したと考えられる。 30 mGy の照射では SOD 活性が対照群と比べて約 4-5 割に低下しており、 6 mGy 照射時と比べて軽度に低下することが示された。その一方で、GPx 活性は線量率によらず対照群とほぼ同程度の活性を示し、 30 mGy の被ばくによって活性は低下

しなかった。

本項目では、内部被ばくや外部被ばくによる酸化ストレス状態の変動について検討を行った。旧警戒区域の野生ニホンザルの被ばく線量評価結果の範囲を含む線量・線量率領域で内部被ばくによる影響を検討し、得られた結果は、旧警戒区域のウシ血漿中酸化ストレスマーカーの変動と類似していた。このため、福島原発事故後の被ばくによる酸化ストレス状態を検証する知見を得る事ができたと考えられる。抗酸化酵素の活性に関しては、GPx が内部被ばく線量 1 mGy 以下で一過的に活性が高まること、SOD が 100 mGy 以上の内部被ばくで活性が高まることを示した。高線量被ばくでは DNA 二重鎖切断による致死的な DNA 損傷が放射線影響の発現における重要な要因として考えられる一方で、低線量被ばくでは致死的な DNA 損傷の誘発頻度は低下し、酸化ストレスの寄与が高まることが予想される。抗酸化酵素の活性が限定された異なる線量域で高まるだけではなく、逆に、100 mGy 以下の内部被ばく、30 mGy 以下の外部被ばく線量によって SOD 活性が低下することが示された。このように低線量被ばくでは酸化ストレスに対する生体防御機構が被ばく線量・線量率によって不規則に変化することが予想される。このことは、長期の低線量放射線被ばくによって酸化ストレスに対する防御反応が低下し、放射線以外の要因による酸化ストレスの影響を受けやすくなる可能性が考えられる。このような長期の低線量放射線被ばくが間接的に酸化ストレスの影響を修飾する可能性については今後の検証が必要となる。

参考文献

1. Y. Urushihara, K. Kawasumi, S. Endo, K. Tanaka, Y. Hirakawa, G. Hayashi, T. Sekine, Y. Kino, Y. Kuwahara, M. Suzuki, M. Fukumoto, H. Yamashiro, Y. Abe, T. Fukuda, H. Shinoda, E. Isogai, T. Arai, M. Fukumoto. Analysis of Plasma Protein Concentrations and Enzyme Activities in Cattle within the Ex-Evacuation Zone of the Fukushima Daiichi Nuclear Plant Accident. PLoS ONE 11(5), e0155069, 2016.

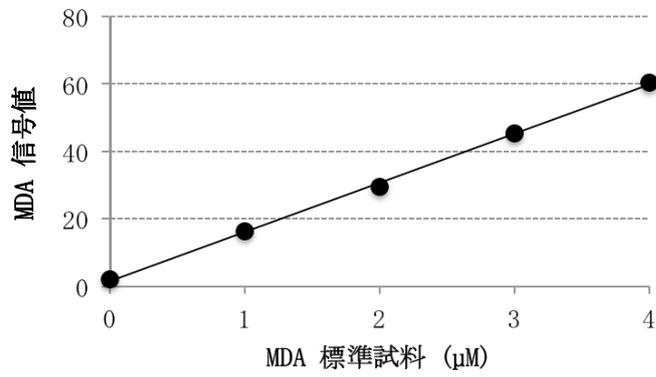


図 3-35. 小容量の MDA 標準試料を用いた検量線

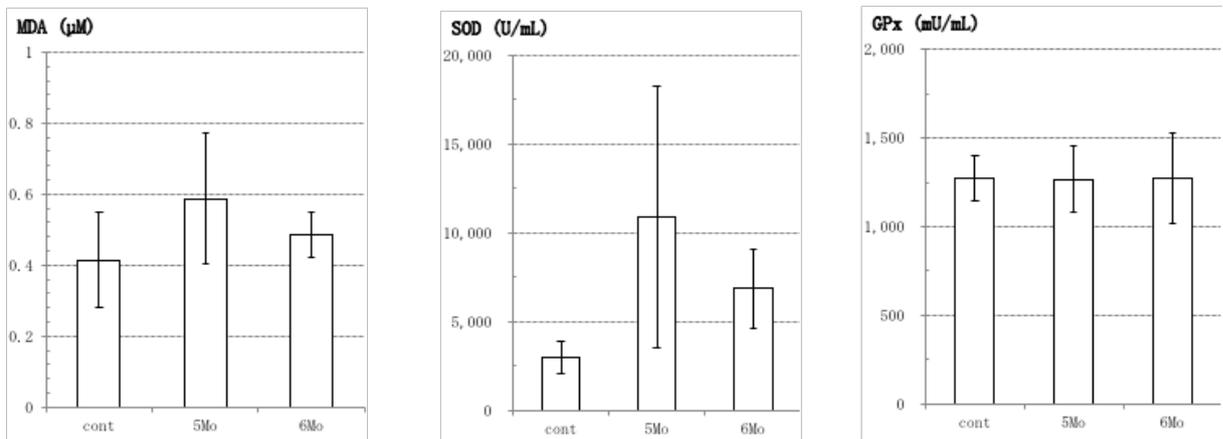
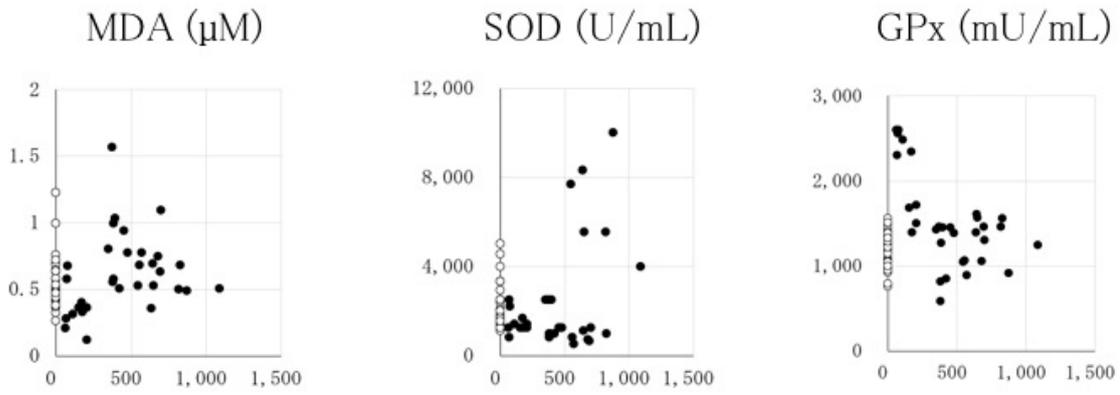
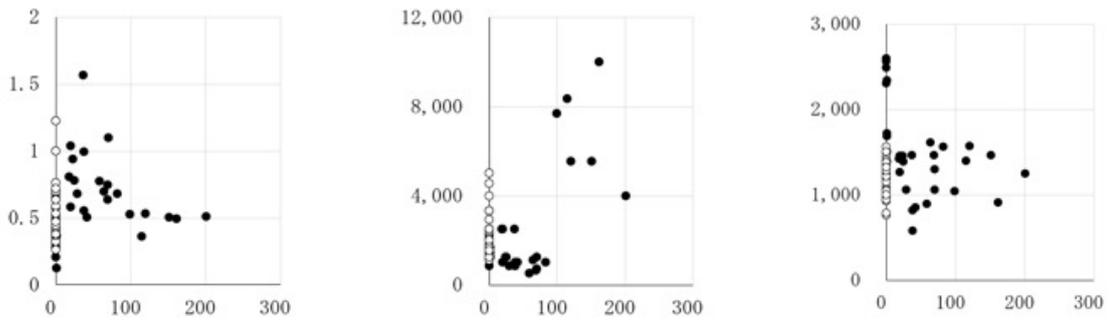


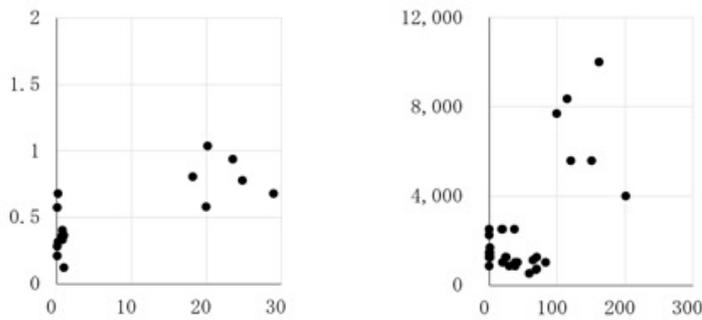
図 3-36. 小容量のマウス血漿を用いた酸化ストレスマーカーの検出



内部被ばく線量率 ($\mu\text{Gy}/\text{日}$)



内部被ばく線量 (mGy)



内部被ばく線量 (mGy)

図 3-37. ^{137}Cs 水飲水マウス血漿中の酸化ストレスマーカーとシミュレーションで得られた線量評価結果との相関

○は対照群、●は ^{137}Cs 水飲水群の血漿解析の結果

上段：内部被ばく線量率との相関

中段：内部被ばく線量との相関

下段：中段の図から対照群のデータを削除し、対照群のシンボルに隠れていたデータが確認できるようにした

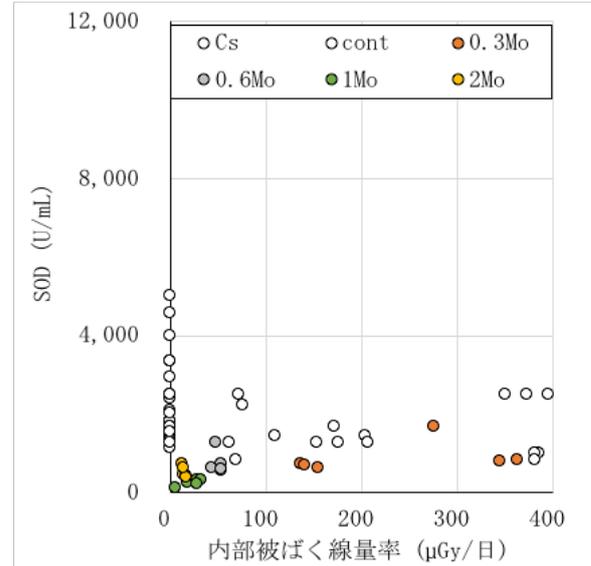
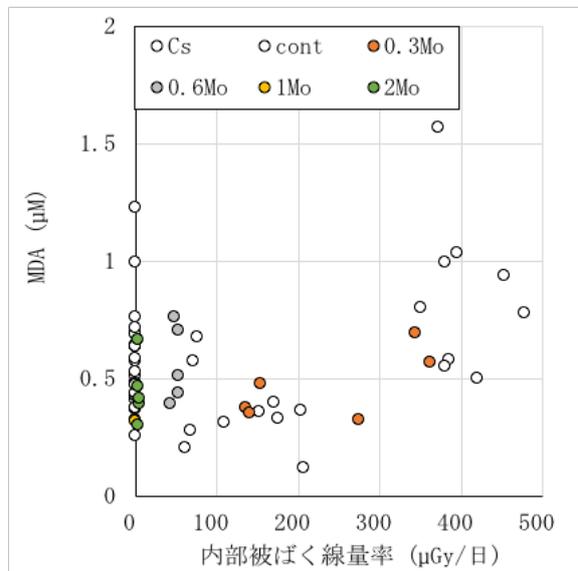
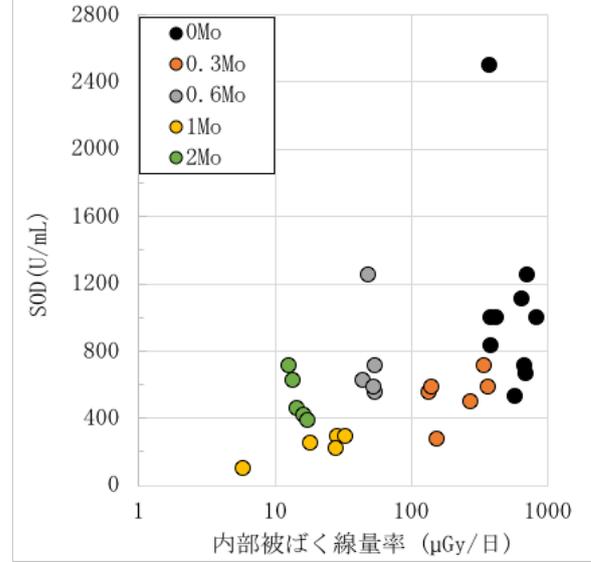
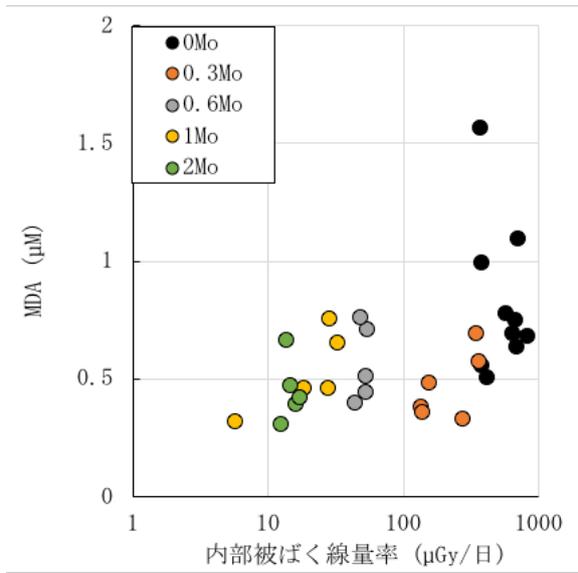


図 3-38. 真水に切り換えた後の酸化ストレスマーカーの変動と内部被ばく線量率との相関
 上段：真水に切り換えた後の酸化ストレスマーカーと内部被ばく線量率との相関
 下段：対照群と¹³⁷Cs 飲水群（両方ともに白丸で表示。図 3-35 のデータを一部使用）と上段のデータを同じグラフでプロットし、飲水期間中と真水に切り換えた後の酸化ストレスマーカーと被ばく線量率との相関を検討。

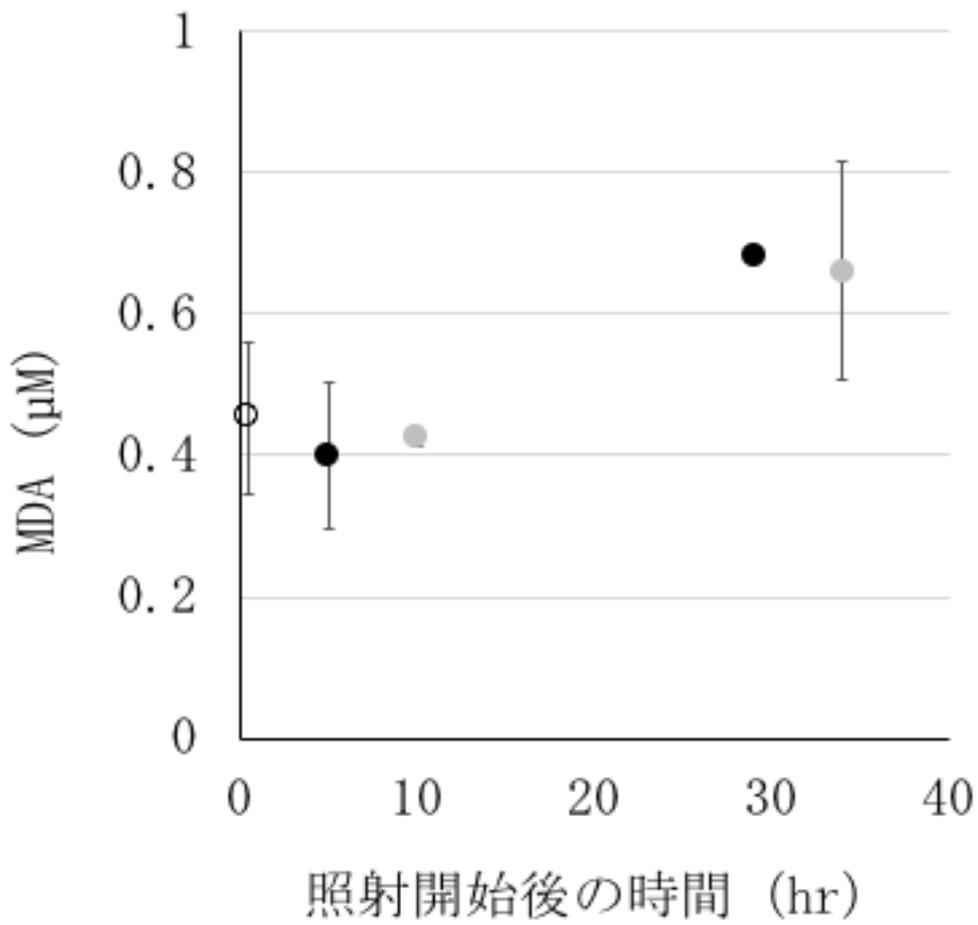


図 3-39. 外部照射開始後の時間経過と MDA 濃度の変化

白：対照群

灰：線量率 3mGy/時

黒：線量率 6mGy/時

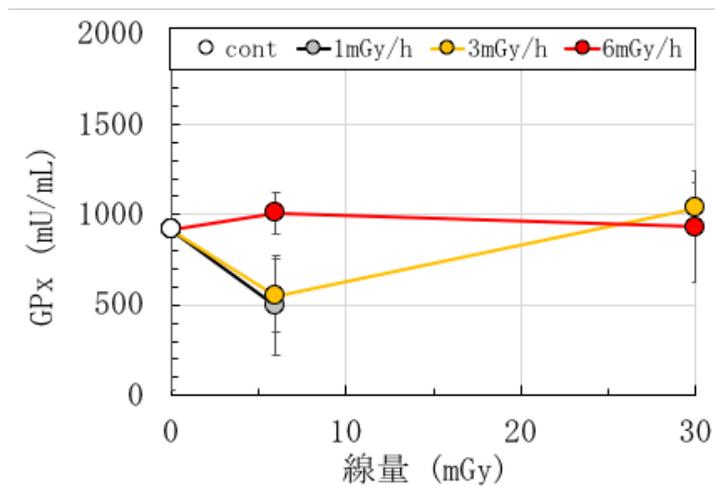
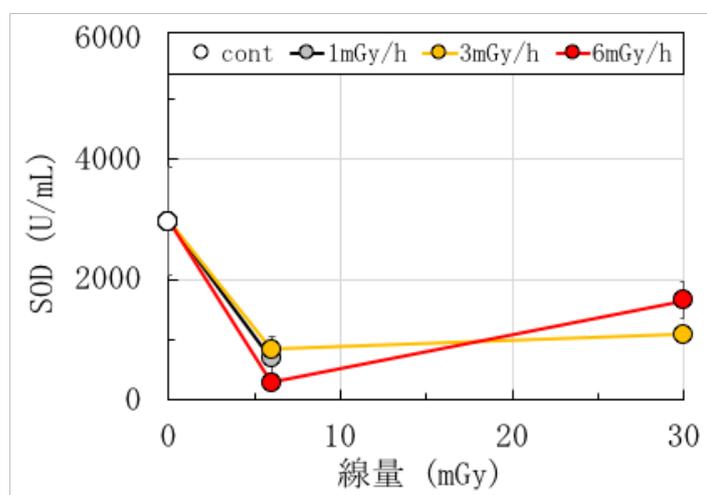
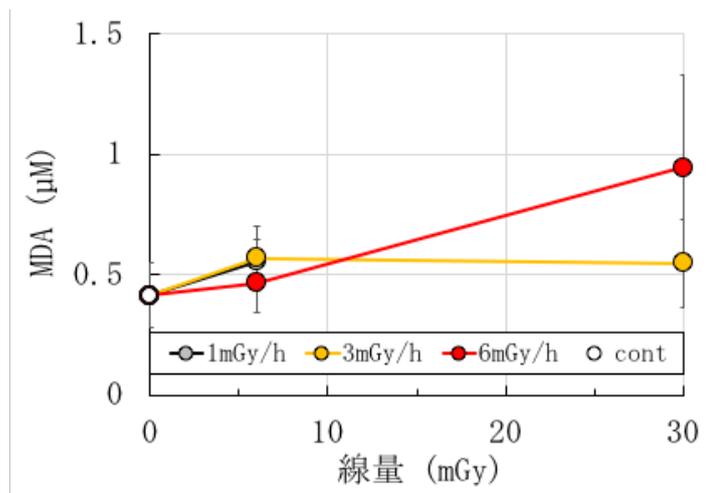


図 3-40. 外部照射による酸化ストレスマーカーの線量・線量率依存性

3.3 セシウムボールによる細胞影響評価

3.3.1 セシウムボールの生成模擬実験（再委託先：大阪大学）（平成 28-30 年度）

平成 23 年 3 月に起こった、東京電力（株）福島第一原子力発電所事故においては、高濃度の放射性セシウムが濃集した不溶性粒子、セシウムボールが放出されたことが知られている[1]。本研究ではこのセシウムボールを環境中の土壌試料から抽出し、3.3.2.の細胞実験へ供するとともに、様々な分析により詳細な性質を明らかにした。また組成の似通った放射性セシウムを含んでいない模擬粒子について、生成法を検討するとともに、実際に作成した非放射性のコントロール粒子として3.3.2.の東北大学での細胞実験へと供給した。

（環境試料からのセシウムボール抽出実験）

環境に存在するセシウムボールを抽出するために、H28、H29、H30 年度に福島県において土壌採取のフィールド実験を実施した。特に福島第一原子力発電所から 10 km 以内の高線量地域において土壌の採取を行った。

採取した土壌からセシウムボールを抽出する方法として、まず採取後の土壌を薄く展開したのちに、イメージングプレートを用いたオートラジオグラフィにより放射能を濃集している場所、すなわちセシウムボールが存在している場所を特定した。その部分の土壌フラクションを取り出し、改めて土壌を薄く展開しイメージングプレートによる濃集点の特定を繰り返すことにより、土壌試料のスケールダウンを行い、セシウムボールの抽出を行った。この方法により ^{137}Cs で 100 Bq 以上の放射能を持つセシウムボールについて 10 粒子程度取り出すことに成功した。また、より放射能の低いセシウムボールの抽出法として、湿式分離法を採用した。この方法では、ある程度スケールダウンした土壌試料について、バイアル瓶に移し、4 mL の超純水を加えてよく懸濁・攪拌したのち、2 つのバイアル瓶に分割した。それぞれのバイアル瓶を NaI ガンマカウンターで測定し、放射能の高い方に超純水を加えて改めて 4 mL とし、同じく懸濁・攪拌して分割を行った。この操作を 30 回以上繰り返すことにより、大量に含まれる土壌を完全に取り除き、セシウムボールのみが含まれた溶液を得た。最終的にこの溶液を蒸発乾固することで、セシウムボールを抽出した。以上の 2 つの方法により、合計 40 個程度のセシウムボールの抽出に成功した。

（セシウムボールの分析実験）

前項で記載した方法で抽出したセシウムボールについて、高純度ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線測定、電子顕微鏡による形状観察、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置による主要元素の分析を行った。

図 3-41 に本研究で得られたセシウムボールの電子顕微鏡写真を示す。得られたセシウムボールは直径 1 μm のものから、500 μm の程度のものまで、様々な大きさのものが得られた。形状についても、球状のものだけでなく破片状のものなど様々な形状のものが得られた。エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置による分析では、これらのセシウムボールの主成分はすべて SiO_2 であり、そのほかに Fe や Zn などの金属や、Ca や Mg などのアルカリ土類金属が見つかった。特に小さなセシウムボールでは、Cs の存在も確認された。高純度ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線測定により、 ^{134}Cs は 604 keV のガンマ線から、 ^{137}Cs は 661 keV のガ

ンマ線からそれぞれの核種の定量を行った。その結果、 ^{137}Cs の放射能で少ないもので1 Bq、放射能が高いもので4000 Bqのものが得られた。放射性セシウムの放射能比、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ は、平成23年3月に換算して、0.9程度のもので1.0程度のもの2種類があることが分かった。得られたセシウムボールの放射能比や形状などは、大熊町で見つかったものについては足立らにより報告されたもの[1]と類似していることが分かり、双葉町で見つかったものは佐藤らにより報告されたもの[2]に類似していた。

(セシウムボールの模擬粒子生成実験)

これまで分かっているセシウムボールの形状や元素成分などの実験的な事実から、セシウムボールの生成過程において以下の4つの仮説を立てた。

- (1) 球形状で数マイクロメートルの大きさを持っていることから、原料はもともと液滴であり、これが空気中で飛沫となったものである。
- (2) ガラス質であることから急冷して生成したと考えられ、先の飛沫から生成したという仮説を支持する。
- (3) 放射性セシウムは多く含まれているが、他の核分裂生成物の存在が確認されないことから、放射性セシウムが分離する過程が存在している。
- (4) 福島県内の多くの地点で見つかっており、比較的大量に生成していることが示唆され、このことから爆発的な反応ではなく低温で反応が進行した。

これら4つの仮説を基にして、セシウムボールの生成過程を検討し、それを元にセシウムボールの生成模擬実験を実施した。

これらのことから考えられるセシウムボールの生成過程として、まず揮発しやすいセシウムが核燃料から飛散し、これがセシウムボールの主成分で、コンクリート等が想定される SiO_2 源に付着するプロセスがあったと考えた。セシウムは揮発しやすい元素であるが、他の多くの核分裂生成物の沸点は非常に高いために、(3)のセシウムと他の元素の分離過程がクリアされる。次にセシウムは強塩基性であり、揮発したセシウムは容易に CsOH の形となって比較的低温(300°C程度)で熔融する。これは SiO_2 と反応して熔融液体を生成することができる。このことにより(4)の仮説を満たすことができる。この熔融液体が、その後原子炉建屋の破損のタイミングなどで空気と触れ、飛沫として飛散したと考えることができ、これにより(1)のプロセスを説明できる。このような小さな飛沫は一瞬にして冷やされ、特に小さなものは表面張力により球形状になる。これにより(2)の仮説を説明できるようになる。

以上のプロセスを模擬した室内実験として、るつぼで CsOH を300°C程度で加熱熔融し、コンクリートや珪酸カルシウム、ガラスウールなどの SiO_2 源を加えて液体状にし、これにエアアの吹付や水を加えて突沸による衝撃により飛沫を生成した。この飛沫を収集し分析すると、図3-42に示すような電子顕微鏡像が得られ、これは環境中で見つかったセシウムボールと同様の外観を持っている。この手法ではセシウムボールに特徴的な金属元素が導入できていなかったが、金属イオン溶液や金属片を同時に反応させることにより、安定的にこれらの金属元素がセシウムボールと同程度含有する条件について探索した。平成30年度の検討により、図3-43に示すエネルギー分散型蛍光X線分析の結果が得られ、この元素成分は環境中

で見つっているセシウムボールと完全に一致した。

セシウムボール模擬粒子に放射性セシウムを導入する実験についても同様に行った。平成30年度には上記の方法で、CsOHの一部を放射性セシウム ($^{137}\text{CsOH}$) に置き換えてセシウムボールの模擬粒子の作成を行った。放射性セシウムを大量に扱うことが難しく、実験のスケールの問題から、セシウムボールほど比放射能を高めることができていないが、飛散したセシウムボールの模擬粒子をフィルター上に集め、イメージングプレートを用いてオートラジオグラフィを行うことで、図 3-44 に示すように足立らが報告しているつくば市で採取されたフィルター上のセシウムボールの画像[1]と同様の放射能の濃集点を作ることができた。

実際のセシウムボールの生成過程については、今なお不明であるものの、本生成模擬実験のように 300°C程度の事故時の原子炉では一般的とも言える低温の条件でセシウムボールと同じものが生成できることが初めて示された。実際に炉内で生成したセシウムボールと同様であるのかについて評価するためには、セシウムボールの性質をより詳細に調べて生成過程について検討する必要がある。我々の仮説の正しさを証明するために、本研究では一部のセシウムボールについて放射化学的手法による微量元素分析を実施した。

(セシウムボールに含まれる微量元素分析)

原子力事故では、原子炉燃料の冷却機能の喪失により原子炉燃料に残った核燃料生成物の壊変熱の冷却を行うことができなくなり、核燃料の温度上昇を招いて最終的には核燃料体が溶融・破損する。このとき放射性物質の一部が揮発することで放出される。生成過程には不明な点も多いが、セシウムボールの生成も基本的にはこの過程により放射性セシウムが取り込まれたのだと考えられる。ところで放射性物質の揮発過程は、当然温度により大きく異なり、温度が高いほど揮発する割合は大きくなる。また、原子炉内の環境、酸化的であるか還元的雰囲気であるかによっても、放射性物質の揮発過程は変化する。セシウムボール内に含まれる核燃料由来の放射性物質を調べることで、事故時の炉内環境の変化を調べることができる。一般にセシウムは大変揮発しやすい元素である。これに対してより揮発しにくい元素をセシウムボールから見つけることができれば、セシウムボール生成時の温度条件に対して大きな制約を与えることができるようになり、ひいてはこれまで研究を進めてきたセシウムボールの模擬粒子の生成過程が、実際の炉内環境を反映できているかについて検討することが可能となる。そこで本研究では、放射性セシウムと同様に、原子力事故においてもっとも注目される放射性ストロンチウムを扱うことにした。放射性ストロンチウムのうち、特に長寿命の ^{90}Sr は 30 年程度の半減期を持っているために、いまなお観測が可能な核種の一つである。ストロンチウムはセシウムに比べて非常に揮発しにくい元素である。このために、放射性セシウムと放射性ストロンチウムの比率を調べることで、事故時の炉内温度の情報を得ることができる。具体的には、温度が高いほどこの比は 1 に近づくことが分かっている。実際に非常に高温の環境が作られたチェルノブイリ事故においては、 ^{137}Cs と ^{90}Sr の放出量は非常に近い値を取っている。一方で福島事故においては、 $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ は土壌では $10^{-2}\sim 10^{-4}$ であると報告されている[3]。

本課題では 10 試料程度のセシウムボールを選定して、Sr 分析を行った。セシウムボール中の Sr 分離方法は、まずセシウムボールを NaOH によるアルカリ溶融反応により完全に溶液

化し、濃塩酸を加えることで 3M HCl 溶液へと調整した。この溶液を Sr-rad Disk (3M) に通過させることで、Sr のみを Disk 上に回収した。Disk を洗浄後、0.02M EDTA 溶液を用いて Disk からストロンチウムを溶離した。この溶液には、天然放射性核種である ^{210}Pb が分離されずに残っていることが分かったため、さらに陽イオン交換による分離を行った。まず溶離液を濃硝酸で pH 調整を行い、Dowex 50wx8 を充填したカラムに通すことで Sr を樹脂に吸着させた。樹脂に 2% EDTA 溶液を流すと、Pb のみが溶出する。このあとに 3M HCl を通過させることで、Sr のみのフラクションを得ることができた。得られた ^{90}Sr フラクションは、低バックグラウンドの液体シンチレーション検出器で 2 週間連続的に測定を行った。液体シンチレーション検出器での測定中、 ^{90}Sr は壊変し ^{90}Y が成長する。 ^{90}Y からは高エネルギーのベータ線が得られるために、これが溶液内でチェレンコフ光を発する。時間とともに ^{90}Y は成長していくため、その成長曲線を描き放射平衡に到達することを確認して、 ^{90}Sr の定量を行った。チェレンコフ光測定後は、ICP-MS を用いて化学収率の導出を行った[4]。

分析の結果、セシウムボールに含まれる ^{90}Sr の放射能は、0.04~1.3 Bq であった。放射能の絶対値はセシウムボールごとで 100 倍程度のばらつきが見られたが、 $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ の放射能に換算するとすべてのセシウムボールで 10^{-4} のオーダーの値が得られた。セシウムボールに含まれる放射性ストロンチウムの量は極めて少なく、このことはセシウムボール生成時の温度が低かったことを示している。また、これは土壤中の $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ は $10^{-2}\sim 10^{-4}$ であり、多くの土壤試料で 10^{-4} であると報告されている[3]。このことから、セシウムボールの生成過程は、他の放射性物質の放出イベントと同程度の温度条件でおきたことが示された。このことは、本研究課題で模擬粒子生成に比較的低い温度で反応条件を探索していた仮説とも良く整合するものであった。

参考文献

1. K. Adachi, M. Kajino, Y. Zaizen, Y. Igarashi, Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident, *Sci. Rep.*, 3, 2554, 2013.
2. Y. Satou, K. Sueki, K. Sasa, H. Yoshikawa, S. Nakama, H. Minowa, Y. Abe, I. Nakai, T. Ono, K. Adachi, Y. Igarashi, Analysis of two forms of radioactive particles emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident, *Geochem. J.*, 52, 137-143, 2018.
3. S.K. Sahoo, N. Kavasi, A. Sorimachi, H. Arae, S. Tokonami, J.W. Mietelski, E. Lokas, S. Yoshida, Strontium-90 activity concentration in soil samples from the exclusion zone of the Fukushima daiichi nuclear power plant, *Sci. Rep.*, 6, 23925, 2016.
4. Z. Zhang, K. Ninomiya, N. Takahashi, T. Saito, K. Kita, Y. Yamaguchi, A. Shinohara, Rapid isolation method for radioactive strontium using Empore™ Strontium Rad Disk, *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, 16, 15, 2016.

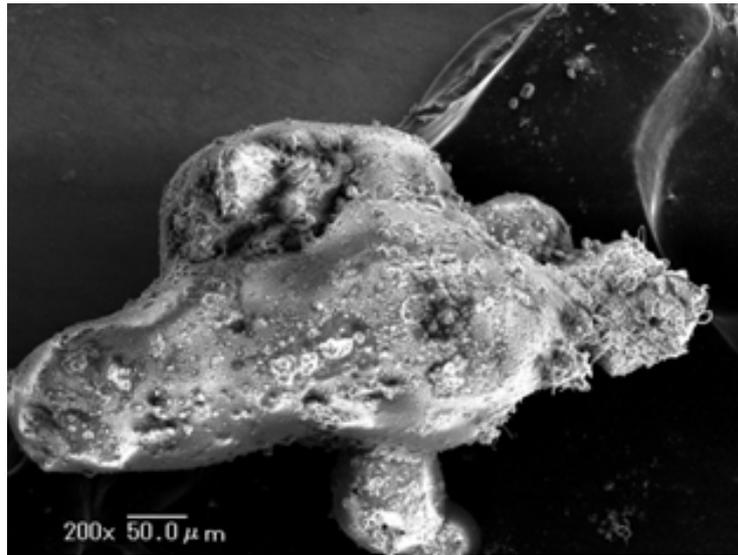


図 3-41. 双葉町の土壌から採取したセシウムボールの電子顕微鏡像

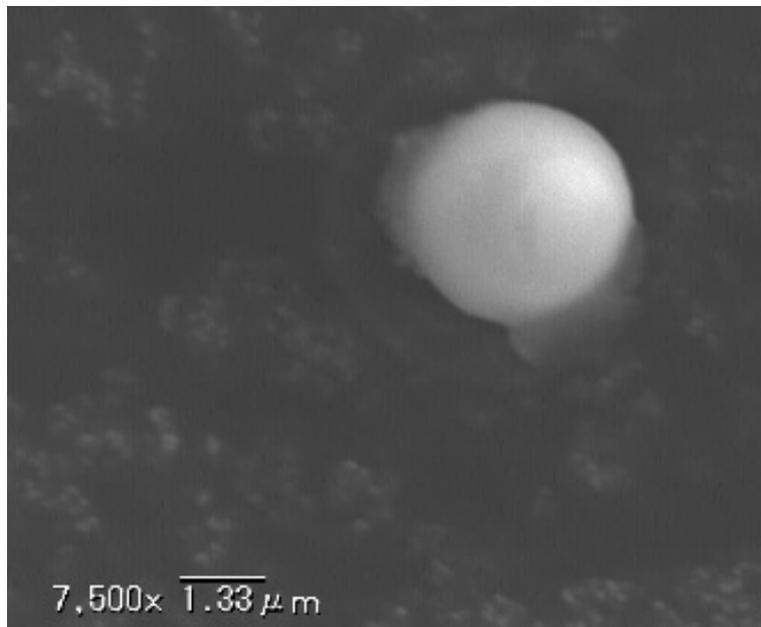


図 3-42. 室内実験で生成したセシウムボール模擬粒子の電子顕微鏡像

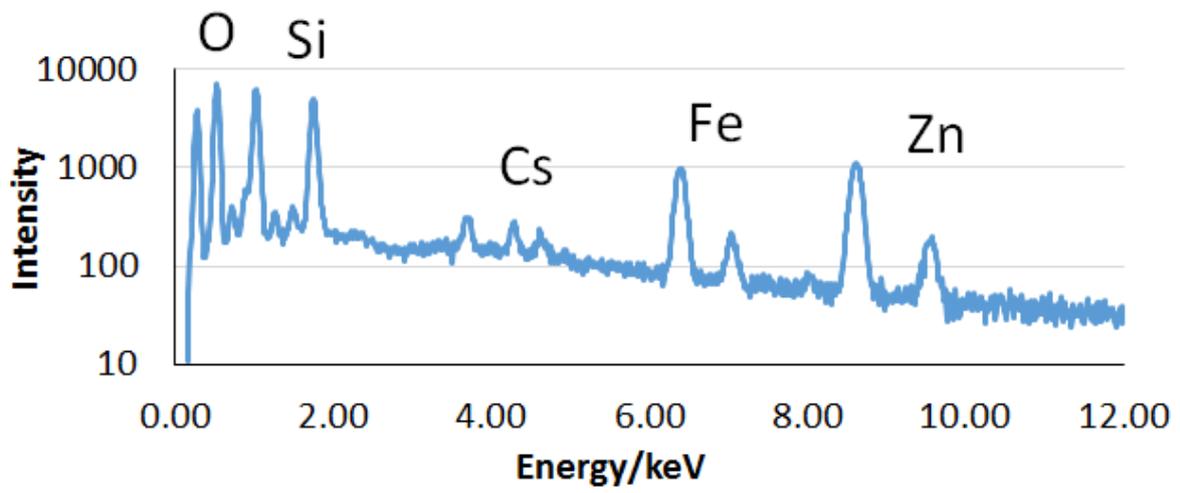


図 3-43. セシウムボール模擬粒子のエネルギー分散型蛍光 X 線スペクトル

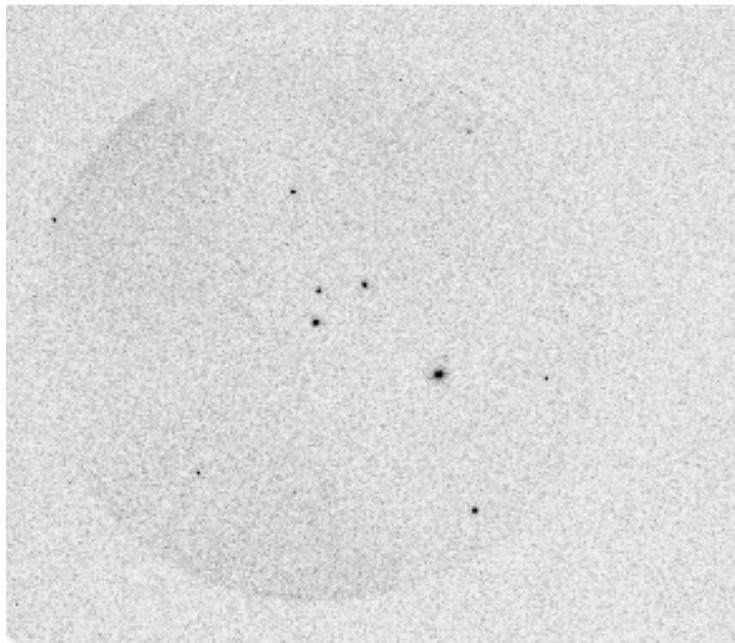


図 3-44. ^{137}Cs を導入した模擬粒子をろ紙に沈着させたときのイメージングプレート画像

3.3.2 セシウムボールの細胞影響（平成 28-30 年度）

放射性セシウムが濃集する不溶性粒子、通称セシウムボールが福島原発事故によって放出されたが、その生物影響については不明であった。本項目では、セシウムボールがヒト正常細胞へ及ぼす影響について検討した。平成 28 年度は、hTERT で不死化させたヒト正常組織由来二倍体細胞である RPE1-hTERT 細胞を用い、セシウムボールと共培養した後の細胞形態や細胞増殖に及ぼす影響を生細胞イメージングで解析した。福島原発事故で生じたセシウムボールは大きさや放射能などの特徴が粒子ごとに異なっている。福島県で行われた土壌調査の試料から抽出したセシウムボールの中で放射性セシウムを多く含む粒子を選択し、細胞影響の有無について最初に検討した。対照実験では大阪大学で作成した非放射性粒子を使用し、粒子の大きさはセシウムボールと類似する粒子を選別した。RPE1-hTERT 細胞を低密度で播種し、細胞がガラスボトムディッシュに張り付いた後にセシウムボールあるいは非放射性模擬粒子との共培養と生細胞イメージングを開始した（図 3-45）。セシウムボールとの共培養開始後 24 時間以内の時間帯では、観察視野内の様々な場所に分裂期細胞が出現し、細胞が増殖する様子が観察された。セシウムボールから離れた領域ではイメージング開始後 24 時間が経過しても分裂期細胞が出現し、細胞密度が徐々に過密状態となる様子が観察された。一方で、セシウムボール周辺領域では時間経過と共に分裂期へ進行する細胞数が減少し、細胞がまばらに存在する領域が観察された。非放射性模擬粒子との共培養では、観察視野内の全ての領域で細胞密度が等しく過密状態となり、セシウムボール周辺の細胞増殖の様子と明らかに異なっていた。以上より、セシウムボールはヒト正常細胞の増殖状態に影響を及ぼすが、影響が及ぶ範囲は限定されることが示された。セシウムボール周辺の細胞ではアポトーシスあるいはネクローシスに特徴的な細胞形態の変化は観察されず、ヘキスト染色による観察でも細胞核の断片化などの変化は検出されなかった。ただし、細胞数が少ない領域では細胞形態が扁平化・巨大化していた。RPE1-hTERT 細胞が高線量の放射線に被ばくすると不可逆的な増殖停止を伴う老化様増殖停止が誘発され、セシウムボール周辺細胞と同様の細胞形態変化が誘導される。このため、生細胞イメージングで観察された細胞形態変化は、セシウムボールから生じる放射線によって誘発された可能性が考えられる。

平成 29 年度は、セシウムボール周辺細胞における DNA 二重鎖切断の誘発について検討した。放射線によって致命的な損傷が生じると、生細胞イメージングで示された細胞増殖の抑制に関連する経路が活性化する。そこで、セシウムボール周辺細胞で致命的な損傷が誘発される可能性について検討した。DNA 二重鎖切断は放射線によって誘発される致命的な損傷であり、細胞増殖を抑制する原因となる。53BP1 タンパク質は DNA 二重鎖切断部位に集積するため、集積した 53BP1 を示すシグナル（フォーカス）を検出すると DNA 二重鎖切断を定量することが可能となる。そのため、セシウムボールと共培養した RPE1-hTERT 細胞で 53BP1 を可視化する蛍光免疫染色を行い、DNA 二重鎖切断の誘発について検討した。平成 28 年度に実施した生細胞イメージングの動画より、低密度状態で培養を始めると細胞が活発に移動することが示された。細胞が移動すると線源となるセシウムボールとの距離が変化し、線量評価が複雑になる。そのため、高密度培養で細胞の移動を抑制し、細胞とセシウムボールの距離を一定に保つ実験系を確立した。細胞と粒子の距離が大きく変化しないことを生細胞イメージングで確認し、セシウムボールによる DNA 二重鎖切断の誘発を調べた（図 3-46）。セシウ

ムボール周辺細胞の増殖抑制が共培養開始から 24 時間以後に観察されたので、共培養開始 24 時間後と 72 時間後の細胞で DNA 二重鎖切断を検出した。通常の細胞培養環境でも DNA 二重鎖切断が生じるため、セシウムボールと共培養していない細胞の約 1 割で 53BP1 フォーカスが検出され、1 細胞あたりの平均フォーカス数は 0.1 個であった。本検討では粒径が約 500 μm で、1,677 Bq の ^{137}Cs を含むセシウムボールを使用した。このセシウムボールは、本事業期間に土壌から採取した中で最も放射性セシウムを多く含む粒子である。共培養開始から 24 時間が経過すると、セシウムボール周辺の 69%の細胞でフォーカスが検出され、1 細胞あたりの平均フォーカス数は 2.3 個であった。共培養前と比べて、フォーカス陽性細胞と平均フォーカス数がともに増加しており、セシウムボールによって周辺細胞に DNA 二重鎖切断が誘発されることが明らかとなった。共培養時間を 72 時間まで延長すると、セシウムボール周辺にあるほぼ全ての細胞に DNA 二重鎖切断が誘発され、平均フォーカス数は 8.5 個になった。共培養前だけではなく、共培養開始から 24 時間後の状態よりもさらに多くの DNA 二重鎖切断が誘発されていることがわかった。放射線発生装置を用いて細胞に放射線を照射すると、照射後 1 時間以内の 53BP1 陽性細胞数と平均フォーカス数が最も多く、その後は DNA 損傷が修復されるために、時間経過とともに 53BP1 フォーカスは消失することが知られている。しかしながら、セシウムボール周辺の細胞では、時間経過とともに 53BP1 陽性細胞数と平均フォーカス数の両者が増加していたことから、セシウムボールからの慢性被ばくによって DNA 二重鎖切断が蓄積していることが示された。

そこで、セシウムボール周辺領域の線量評価を広島大学共同研究者が行った。細胞培養系を PHITS で再現し、10 cm ϕ \times 2 mm の水中の底 10 μm の領域（細胞領域）を、動径方向に 0-10 μm 、10-20 μm 、20-50 μm 、50-100 μm 、100-500 μm 、0.5-1 mm、1-2 mm、2-5 mm、0.5-1 cm、1-2 cm、2-5 cm の円環状に分け、各領域での線量率を計算した（図 3-47）。線源は、直径 150 μm と 500 μm の SiO_2 で 1 Bq の ^{137}Cs からのガンマ線とベータ線を模擬した。線源位置は、細胞領域に接した条件とした。細胞領域の下方には、インキュベータの棚の材質に合わせて 1 mm SiO_2 及び 1 mm ステンレスを配置した。セシウムボールからの距離 2 mm 程度までは、ベータ線の寄与が大きいですが、それを超えるとほとんどガンマ線のみ線量となることが示された。このシミュレーションの結果より、セシウムボール周辺で DNA 二重鎖切断の誘発や関連する細胞影響は主にベータ線による作用であることがわかった。検討に使用したセシウムボールの粒径が約 500 μm であることから、セシウムボール周辺領域を粒子の中心部から 250 μm （粒子の半径に相当）の位置と仮定して線量率を計算した。その結果、粒子周辺で 24 時間あるいは 72 時間共培養した時の被ばく線量はそれぞれ、2.2 Gy あるいは 6.5 Gy と評価された。このため、粒子周辺の細胞で DNA 二重鎖切断が誘発・蓄積し、老化様増殖停止の特徴を示す細胞が共培養開始 24 時間以降に出現したことは、従来の細胞実験の結果と矛盾しない。

粒子付近の被ばく線量にはベータ線が大きく寄与したが、粒子から 1 cm ほど離れるとほぼガンマ線のみが寄与する。このため、粒子から 1 cm 離れた領域の ^{137}Cs による線量率は低下し、24 時間、あるいは 72 時間後の被ばく線量は 72 μGy 、215 μGy と推定された。この線量に相当する放射線単回照射では DNA 二重鎖切断の誘発頻度は極めて低いと予想される。セシウムボールから 1 cm 離れた領域の細胞で 53BP1 フォーカスを検出すると、共培養開始 24

時間後では34%の細胞で53BP1がフォーカスを形成し、平均フォーカス数は0.9個であった。増殖が抑制された領域の細胞で検出される53BP1と比べてDNA損傷の誘発が少ないことから、この領域の生細胞イメージング解析では細胞増殖に影響が見られなかったと考えられる。しかしながら、粒子から1 cm離れた領域でも72時間が経過すると、53BP1フォーカスの陽性率は97%、平均フォーカス数は5.2個と増加した。これは生細胞イメージング解析で増殖抑制が観察された領域の細胞と同等のDNA損傷が誘発されたことを示しており、当初は影響が見られなかった領域でも遅延的に細胞影響が出現する可能性を示唆している。このようにセシウムボールから生じる放射線によってDNA二重鎖切断が誘発された可能性が高い。ただし、セシウムボールから1 cm離れた領域で検出される53BP1フォーカスが、推定被ばく線量から想定されるDNA二重鎖切断数よりも多く検出されたことから、セシウムボールから生じるガンマ線以外の要因でDNA損傷が誘発される可能性を併せて考慮する必要がある。セシウムボール周辺で老化様増殖停止の特徴を有する細胞が観察されたが、老化様増殖停止が誘導されると様々なタンパク質の分泌を促進することが知られている。その結果、周辺の環境（微小環境）の性質が変化することを介して、周辺の細胞に影響を及ぼすことが知られている。また、放射線を被ばくした細胞が液性因子を介して非被ばく細胞に影響を及ぼすバイスタンダー効果も知られている。セシウムボール周辺では粒子からの距離に応じて線量勾配が生じるために、セシウムボールに近接している細胞が分泌する因子によって、粒子から離れた細胞が影響を受ける可能性が考えられる。液性因子を介して周辺細胞にDNA損傷を誘発することも報告されており、放射性セシウムを多く含むセシウムボールの細胞影響に、バイスタンダー効果が関与する可能性が考えられる。

平成30年度は、放射エネルギーが少ないセシウムボールによる細胞影響を検討した。平成29年度に使用したセシウムボールと比べて、粒子あたりの放射エネルギーが1/10以下となる粒子を用いて、細胞増殖への影響を検討した。複数の粒子を用いて検討したが、100 Bq程度の放射性セシウムを含むセシウムボールは周辺細胞に対して顕著な変化を誘導しなかった。同じ粒子を用いて、53BP1のフォーカス形成を調べた(図3-48)。セシウムボールに近接する領域では約半数の細胞でフォーカスが形成されたが、細胞あたりの平均フォーカス数は1.2個であった。このセシウムボールから1cm離れると、20%の細胞で誘発された53BP1の平均フォーカス数は0.2個と非常に少なく、セシウムボール近接領域であっても細胞増殖に影響を及ぼさない範囲でDNA損傷が誘発されていたことを確認した。以上のように、放射エネルギーが少ないセシウムボールは顕著な細胞影響を誘導しなかったが、低線量放射線によりエピジェネティックな変化を誘導する可能性をグローバルなDNAメチル化の変化に着目して検討した。この検討では、100 Bqの粒子に加えて、本事業期間で採取したセシウムボールの中で最も放射エネルギーが少ない7 Bqのセシウムボールを加えて検討した。53BP1を検出した実験結果より、100 Bqのセシウムボールが1 cmの範囲にある細胞に影響を及ぼすことが確認されたため、直径が約0.8 mmの96ウェルプレートでセシウムボールとRPE1-hTERTを24時間共培養すると、少なくとも半数の細胞がセシウムボールの作用を受けると仮定した。DNA抽出に必要な量の細胞が回収できるまで共培養と細胞回収を繰り返し、抽出したDNA中に含まれる5-メチル化シトシンを定量した。その結果、セシウムボール特異的にグローバルなメチル化状態の変化は確認されなかった。

セシウムボールは粒径や放射エネルギーによって区分され、平成 29 年度に使用したセシウムボールはタイプ B に分類される。タイプ B の粒子は数十-数百 μm の粒径を持つ大きな粒子で、数十 Bq 以上の放射エネルギーをもつ。1,000Bq 以上の高い放射エネルギーをもつセシウムボールが短時間で細胞影響を誘発することを示したが、このように極めて高い放射エネルギーをもつセシウムボールは少なく、また、粒径が大きい不溶性粒子を摂取しても深部に到達する前に体外へ排出されることが考えられている。ところが、本課題でタイプ B のセシウムボールとヒト正常上皮細胞を共培養したところ、細胞がセシウムボールに付着するために、細胞をはがさずにセシウムボールを取り出すことが容易ではなかった。体内でもセシウムボールが組織・細胞に付着する可能性を動物実験で検証することが必要となるが、セシウムボールが付着することは体外への排出を阻害する要因になることが予想される。体内に付着することが確認されると、同じ箇所の組織が被ばくし続けることになるため、細胞実験で確認された影響が誘発される可能性が出てくる。また、実験操作中にタイプ B 粒子が砕けることが多く、環境中のタイプ B 粒子が砕けた結果、粒径が小さく、高い放射エネルギーをもつ粒子が生じる可能性がある。タイプ B を用いた解析結果はこのようリスクに対する知見として活用されることが期待できる。

粒径が 1 μm 程度で数 Bq の放射エネルギーをもつ粒子はタイプ A に分類される。この粒子は肺胞まで到達できる粒径であることから、健康リスク評価にむけた生物影響の知見が必要とされている。現時点では土壤中からタイプ A 粒子を抽出することが技術的に困難であること、生物実験での取り扱いが困難であったことから、本項目でタイプ A 粒子の影響評価を実施できなかった。ただ、最近ではタイプ A よりも大きな粒径をもつ粒子が数十 Bq 程度の放射エネルギーをもつ、タイプ A と B の中間の特徴をもつ粒子が報告されてきた。平成 30 年度に使用した 100 Bq の放射エネルギーをもつ粒子はこの中間のタイプに分類される。また、7 Bq の粒子は粒径が大きいためにタイプ A を代表する粒子とはならなかったが、放射エネルギーが低いことから得られた結果をタイプ A の影響に外挿できる可能性がある。どちらの粒子も顕著な細胞影響を誘発しなかったため、肺胞に到達しても上皮細胞の影響は極めて低いと考えられる。ただし、肺胞ではタイプ A 粒子がマクロファージへ及ぼす影響を検討する必要がある。タイプ A についても、動物実験による影響解析とともに、マクロファージの取り込みや取り込み後の影響について細胞生物学的な知見が必要になると考えられる。

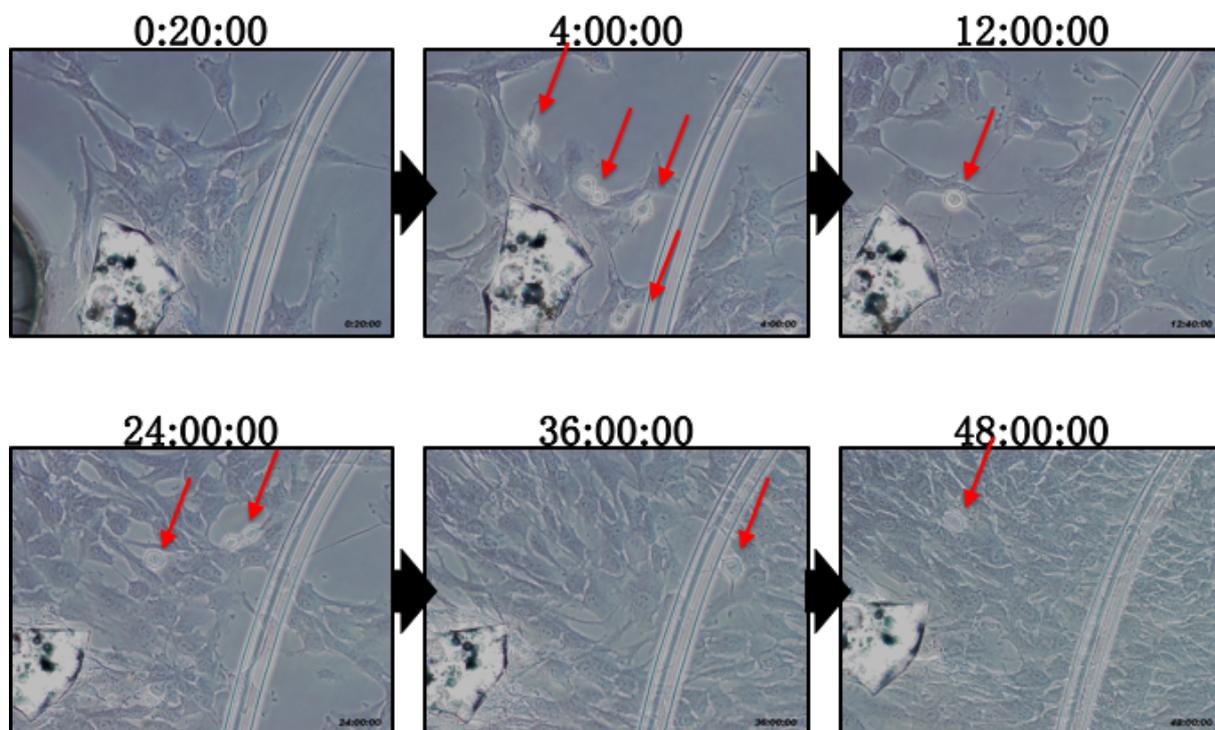
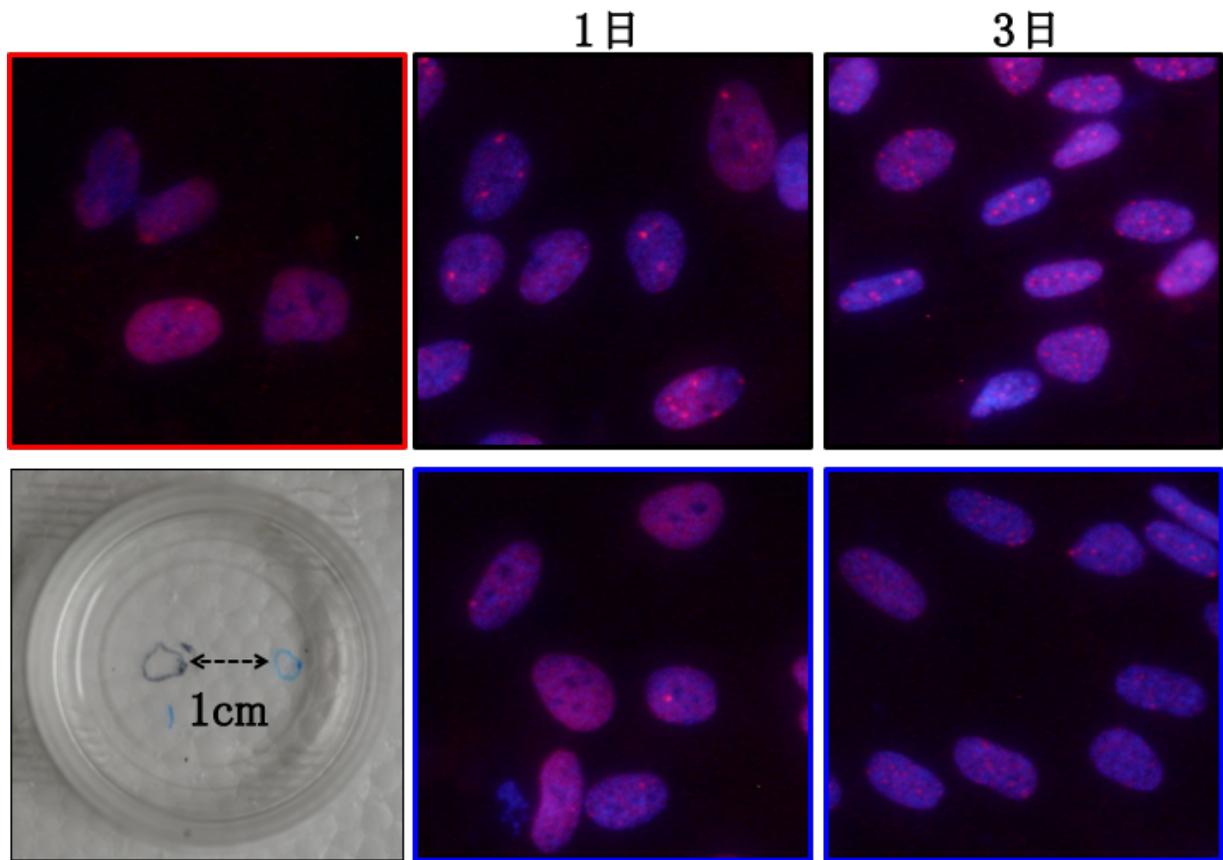
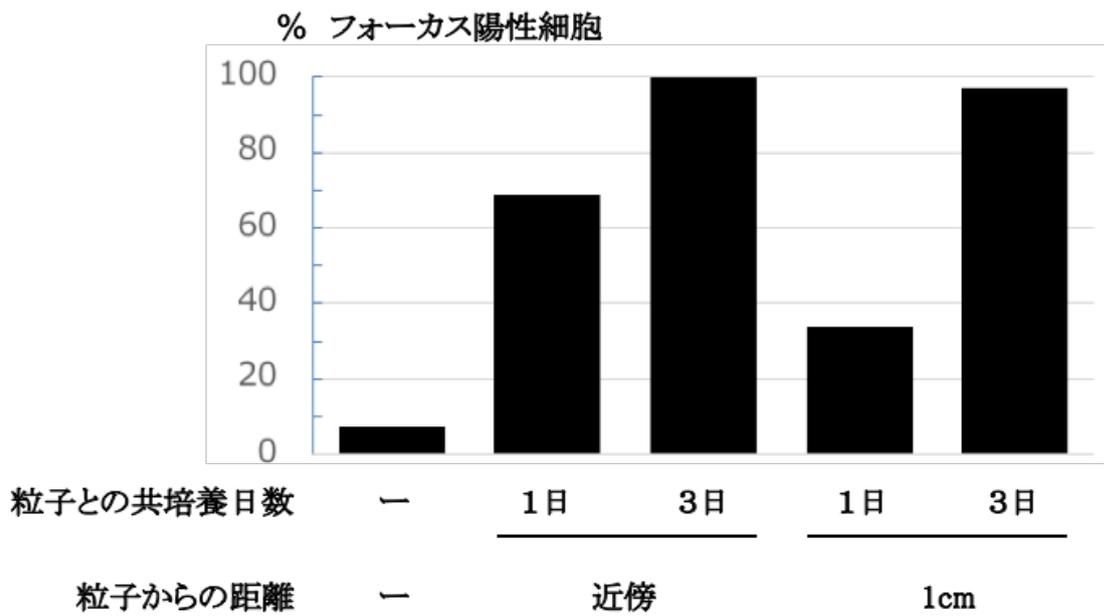


図 3-45. セシウムボール共培養時の生細胞イメージング
赤い矢印は分裂期細胞を示す。

(A)



(B)



(次頁につづく)

(C)

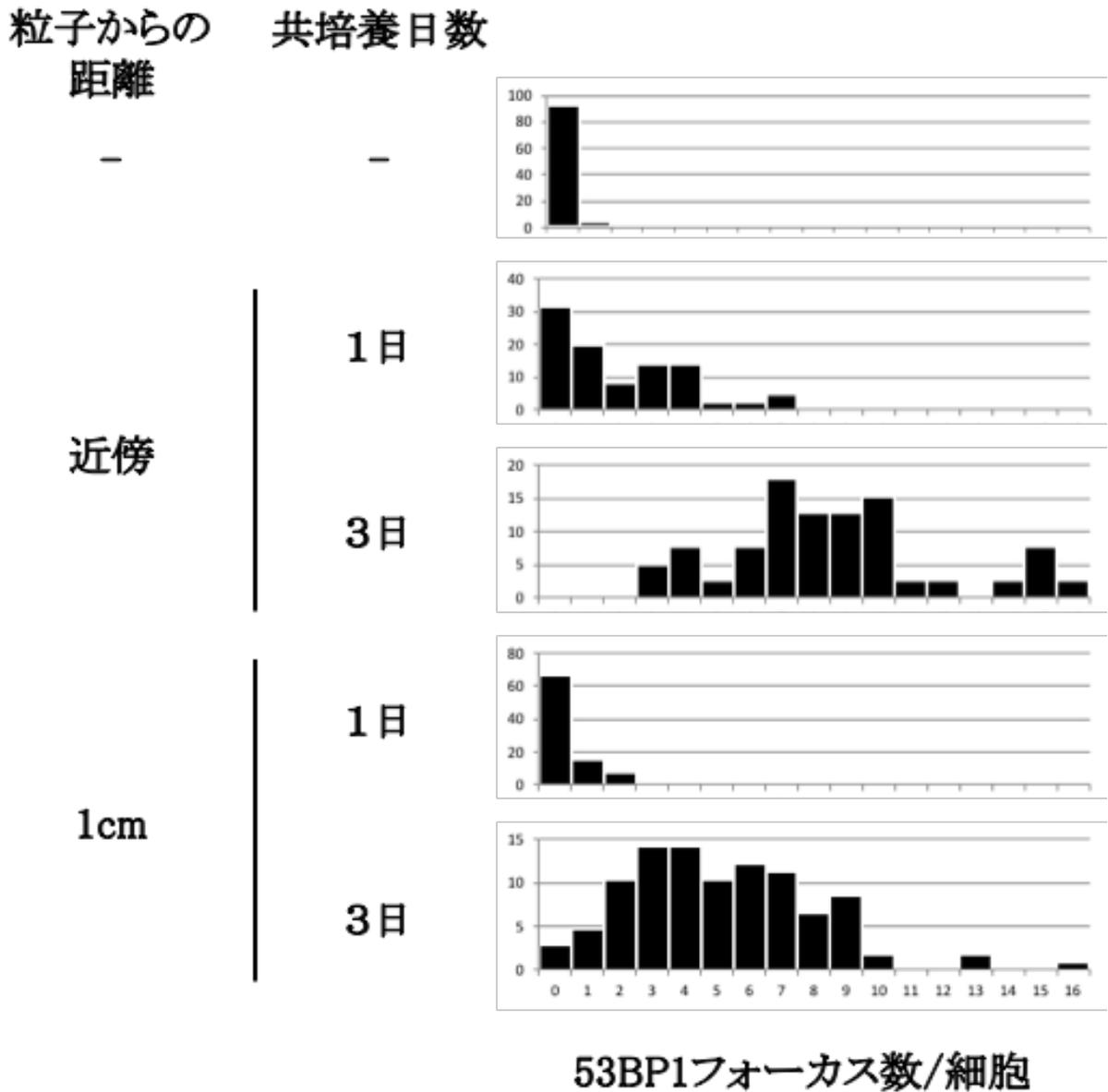
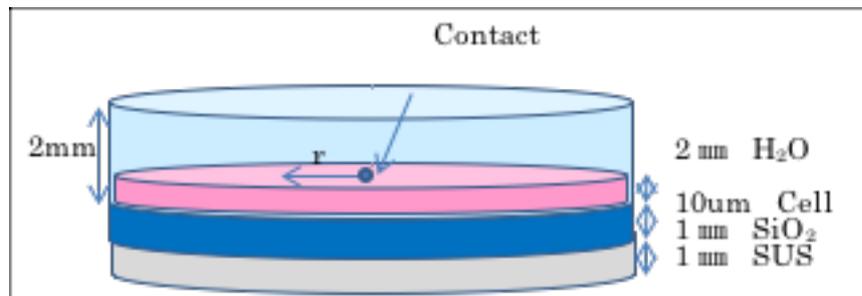


図 3-46. セシウムボール共培養による DNA 二重鎖切断の誘発

- (A) セシウムボール周辺細胞の蛍光免疫染色による 53BP1 の検出
左上：対照細胞、中上：共培養 1 日後の粒子近傍細胞、右上：
共培養 3 日後の粒子近傍細胞、左下：細胞実験の写真。黒丸部
分にセシウムボールをおき、その周辺部と、青丸部分の細胞を
評価した、中下：培養 1 日後の 1 cm 離れた細胞、右上：共培養
3 日後の 1 cm 離れた細胞
- (B) 53BP1 フォーカス陽性細胞率
- (C) 1 細胞あたりの 53BP1 フォーカス数の分布

(A)



(B)

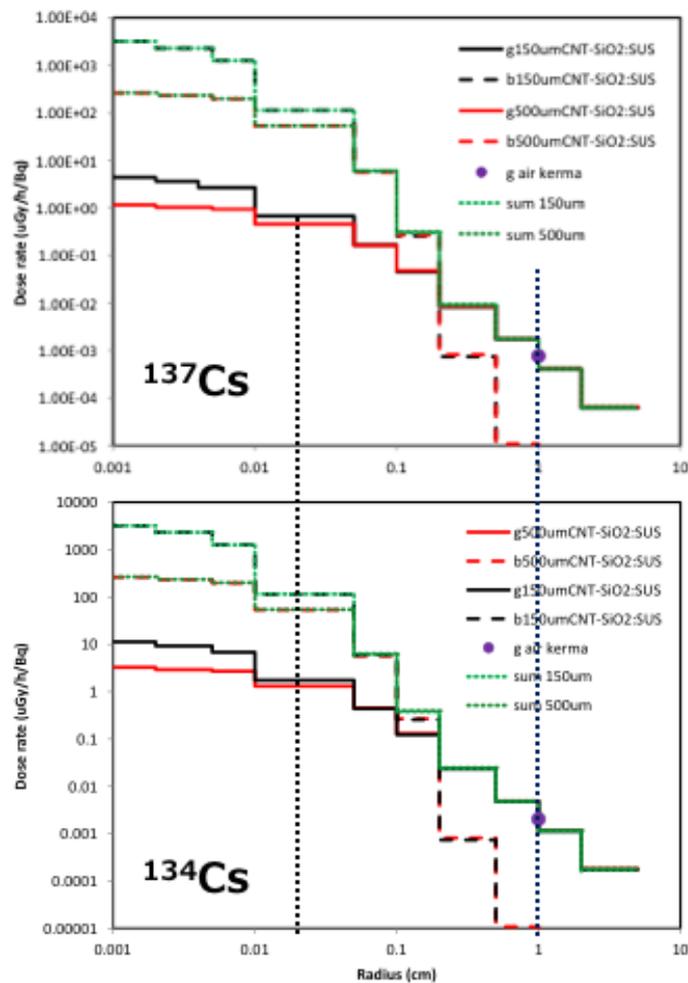
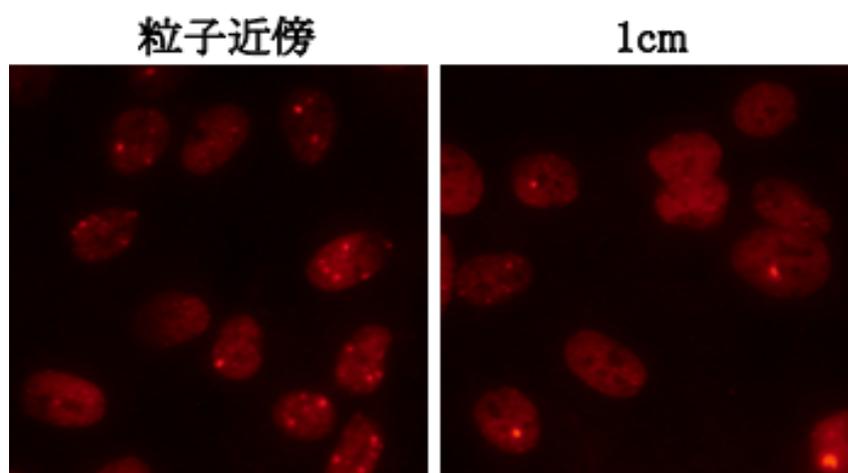


図 3-47. PHITS によるシミュレーション

(A) セシウムボールを用いた細胞実験体系を PHITS で再構築するモデル

(B) 粒子サイズ、粒子からの距離と放射性セシウム由来の線量率

(A)



(B)

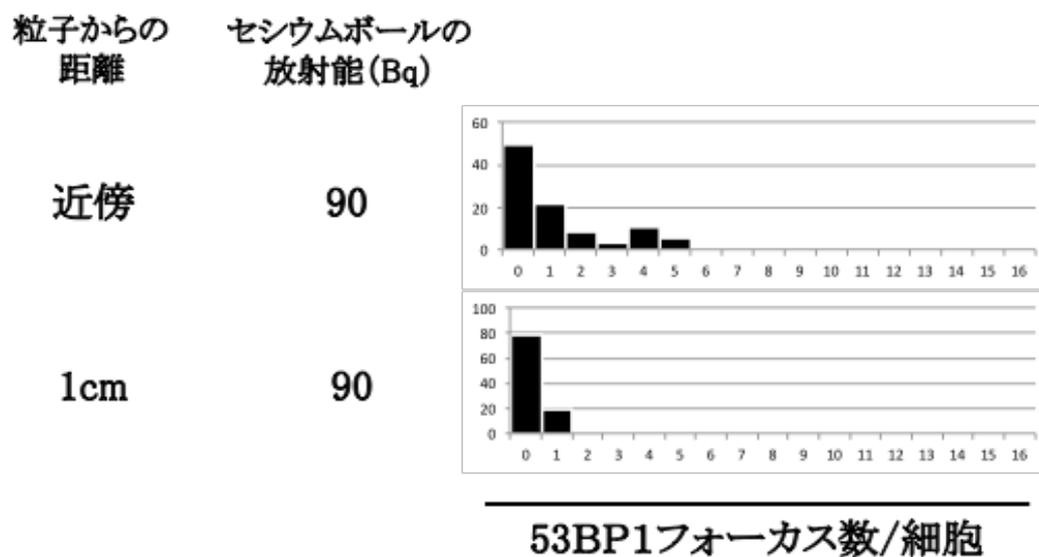


図 3-48. 放射能の異なるセシウムボールによる DNA 二重鎖切断の誘発

- (A) 90 Bq のセシウムボールと共培養時の 53BP1 フォーカス。
53BP1 を赤で示す。
 - (左) セシウムボール近傍の細胞
 - (右) セシウムボールから 1 cm 離れた位置の細胞
- (B) 1 細胞あたりの 53BP1 フォーカス数の分布

3.4 研究推進（平成 28-30 年度）

平成 28 年度と 29 年度の全体会合は、平成 28 年 12 月 23 日と平成 30 年 2 月 21 日のそれぞれの日程で開催された。平成 30 年度は、平成 31 年 2 月 23 日に東北大学片平キャンパスで開催された。業務参加者全員と業務協力者が参加し、業務担当者から事業期間の成果を報告するとともに、被ばく線量評価など担当者間での総合的な議論が必要なテーマについて意見を交換した。資・試料を共有することを特色とする本課題では、例年同様に共同研究者間で連携しながら、研究課題を推進した。そのため、電話やメールなどで本課題の進捗状況など打ち合わせを適宜行った。

平成 30 年度に発表した学術論文の内容について、東北大学ホームページ上でプレスリリースによる情報提供を行った。プレスリリース後に複数の報道機関から取材をうけ、その内容は複数の新聞紙面やインターネット記事として配信された。

本事業の関係者で、1 名が学位取得後に国立研究開発法人の研究者として引き続き環境放射能分野に従事している。1 名は大学院に進学し、引き続き本事業に関連した研究活動を継続している。本事業の業務参加者 1 名は、本事業の成果が評価されて講師へ昇格した。このほか、業務参加者、大学院生や若手研究者が学会発表するなど、本事業は環境放射能分野を中心とした人材育成に寄与した。

4. 結言

福島原発事故に関連する放射線被ばく影響について、本課題では野生ニホンザルの解析とセシウムボールによる細胞影響解析を実施した。放射線科学分野に限らずに異なる専門分野の共同研究者が参加する学際共同研究体制で、旧警戒区域での試料採取や現地調査のフィールドワークと、被ばく線量を評価した試料を用いて生物学的影響解析を実施した。また、血漿中酸化ストレスマーカーを指標に、体内の酸化・抗酸化バランスに及ぼす放射線被ばく影響を動物実験で検証した。

本課題では野生ニホンザルに最適化した被ばく線量評価体制を整備し、被ばく線量・線量率に依存する造血機能の低下と肝臓における酸化ストレスの誘発について明らかにした。課題開始時点でニホンザルの被ばく線量評価体系が確立されておらず、評価手法のひとつとして導入した歯の ESR 分析では、分析を阻害する要因が複数あることが本課題を進める中で判明した。ヒト乳歯を用いた先行研究とは異なり、野生ニホンザルの歯に特有の要因であった。硬組織、あるいは ESR 分析を専門とする研究者が参加したことで、当初予想できなかった分析阻害要因を取り除く試料調製方法と分析方法を課題期間内に確立できた。加えて国際的にも低い検出下限で評価できる体制を整備できたことは、本課題における学際共同研究成果の一例となった。ESR 分析の他、PHITS シミュレーションを用いた被ばく線量・線量率評価体制を構築した。文献調査から作成した行動モデルを取り入れて評価した外部被ばく線量は、約 200 mGy 以上の範囲で ESR 評価結果を根拠とする妥当性を確認した。今後は ESR 評価法で 200 mGy 以下の評価数を増やしてシミュレーションによる推定結果の妥当性を検証する必要があるが、ICRP pub. 108 で示されている環境指標動植物以外の線量評価体制の確立に向けた一例となることが期待される。生物影響解析において対照地域と旧警戒区域の個体群間を比較すると赤血球数の平均値とともに、ニホンザルが活動していた標高にも有意差があり、放射線被ばく以外の影響を考慮する必要があった。そこで、被ばく評価結果を説明変数に含めた重回帰分析の結果、末梢血球では白血球や血小板、骨髄ではそれぞれの元になる細胞数が内部被ばく線量率に依存して減少することが判明し、放射線被ばくと造血能低下の関連性を明らかにした。また、当初は臓器・組織内放射性セシウム濃度に依存して酸化ストレスが誘発されると予想し、放射性セシウム濃度が異なる大腿筋と肝臓で酸化ストレス状態を検討した。その結果、体内放射性セシウム濃度が最も高い大腿筋ではなく、大腿筋と比べて放射性セシウム濃度が低い肝臓で被ばく線量・線量率に応じた酸化ストレス状態の誘発傾向が示された。動物実験では、異なる抗酸化酵素がそれぞれ特定の線量域で一過的な酵素活性の上昇、あるいは酵素活性の低下を示したことから、酸化・抗酸化のバランスが被ばく線量に対して不規則に変動することを明らかにした。この結果は、臓器や組織間の放射性セシウム濃度の大小関係で放射線影響の生じやすさを一概に説明することができないこと、低線量被ばくによる酸化ストレス状態の変動や酸化ストレスに対する生体防御機構へ及ぼす影響について、臓器ごとに検討する必要性を示唆する結果となった。

これまでに肉眼的に目立った変化や血球細胞の異常な増殖は観察されておらず、本課題で示された放射線被ばくに依存する変化が現時点で健康状態に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。一方で、長期間の低線量・低線量率放射線被ばくによって本課題で示された生物学的変化が長期間継続するのか、あるいは適応するのか、生物学的変化が長期間続く場合に最終的に健康状態に影響を及ぼす可能性については引き続き継続調査が必要である。その中で、本課題で示したように酸化ストレスが誘発される臓器が放射性セシウム濃度の大小関係と関連性がなかったことから

低線量・低線量率放射線による酸化・抗酸化のバランスについて臓器ごとに検証することが今後検討の必要がある項目の一つと考えられる。

酸化ストレスは放射線以外に加齢などの日常生活の要因でも誘発され、過剰な酸化ストレスは疾病との関連性が考えられている。酸化ストレスに対する生体防御機構が低線量・低線量率放射線によって影響を受ける臓器を明らかにすることによって、今後の継続調査において解析対象を設定する根拠となる知見が得られる。このため、被ばく線量を臓器ごとに評価することが必要となる。現在の内部被ばく線量のシミュレーション評価体制は、捕獲時の放射性セシウム濃度が物理学的半減期にしたがって変動することを仮定している。実際には日常の食生活による体内変動があるため、放射性物質体内取り込みの変動を科学的に解析できる手法の開発が今後求められる。また、野生ニホンザルは個体群を形成して行動しており、GPS 情報などの活用によって行動モデルを改良することによって、外部被ばく線量評価の向上につながることを期待される。

本課題では大腿骨髄から作成した染色体解析を実施し、造血能低下と DNA 損傷誘発との関連性について検討を試みた。染色体を作成することは可能であったが、個体ごとに作成頻度が大きく異なっていたために十分な解析数を確保できない個体があった。長期の低線量・低線量率被ばくによる霊長類試料は動物実験では再現が難しいために貴重な試料であることは自明であるが、捕獲・提供などの制限から解析可能な手法が制限されることとなった。このため、フィールドワークで得られた試料の解析結果から得られる傾向、あるいは困難な解析については、動物実験による検証とあわせて解明することが必要であると考えられる。

セシウムボールを用いた検討では、本課題開始当初において、福島原発事故によって放出された放射性粒子が及ぼす影響の有無について知見が不足していた。過去の原子力災害事故などで不溶性・放射性微粒子として放出されたホットパーティクルに比べると、セシウムボールの放射活性は低いため、本課題ではヒト正常上皮細胞に対する影響の有無を分子マーカーを用いて検討した。セシウムボールは、広範の地域に放散した数 Bq の放射活性を示す粒子と、旧警戒区域内の土壌から発見された高い放射活性をもつ粒子に大別されていた。DNA 二重鎖切断は被ばく線量が高くなると細胞影響への寄与が大きくなる。その一方で、被ばく線量が低くなると DNA 二重鎖切断の寄与は低くなるが、エピジェネティックな変化に対して影響を及ぼすことが報告されていた。そこで、本課題では放射活性の異なるセシウムボールを使用し、特に放射活性が高い粒子については DNA 二重鎖切断の検出、低い粒子についてはグローバルな DNA メチル化を指標とし、セシウムボールによる細胞影響の有無を検討した。100 Bq 以上の粒子では、一定時間、同一箇所に局在する仮定において、その周囲の細胞に対して DNA 二重鎖切断を誘発し、放射活性に依存して DNA 損傷量が増加することを明らかにした。局在する時間に依存して DNA 二重鎖切断が蓄積することから、100 Bq 以上の放射活性を持つ粒子が同一部位に局在し続ける状況を回避する対策が必要であることが示唆された。一方、7 Bq の放射活性を持つ粒子はエピジェネティックな変化を誘発しておらず、1 日程度の接触による周辺細胞への影響は確認されなかった。

不溶性粒子の体内動態シミュレーションより、粒径が大きいと体内深部まで到達する可能性は低く、体外へ排出されやすいことが示されている。本課題で DNA 二重鎖切断を誘発した粒子はいずれも粒径が 200 μm 以上である。このため細胞影響が確認された粒子について、体内に局在する短期間の組織影響について、今後動物実験による検討が必要となる。一方、細胞レベルで影響が観察されなかった粒子の粒径は、理論的に肺泡まで到達可能な大きさである。過去の知見にお

いて、非放射性の不溶性粒子が肺胞マクロファージに取り込まれた後、粒子の不溶性が要因となってマクロファージに酸化ストレス状態を誘発し、炎症性反応が惹起することが報告されている。炎症反応が長期に継続すると、繊維化などの組織影響の要因となる。セシウムボールは数 Bq の放射性セシウムを含んでいること、野生ニホンザルの解析結果より低線量領域では抗酸化酵素の活性が高まることが示されており、セシウムボールを取り込んだマクロファージの酸化ストレス状態や炎症反応経路の活性化について細胞レベルでの検証が必要である。また、粒径が小さいセシウムボールの体内分布と取り込まれた領域の組織を動物実験で解析することは、セシウムボールによる健康影響についての知見となる。動物実験の実施には、一定量の粒子を確保することが必要となる。旧警戒区域の土壤中に含まれるセシウムボールの量より、土壌から動物実験に必要な量を回収することは困難であると考えられる。このため、本課題で実施したセシウムボールの性状を反映する模擬粒子作成法が、近い将来に効率良く模擬粒子を作成する技術への応用に活用されることが期待される。