# 福島原発事故による周辺生物への影響に関する専門研究会

2015年8月10日(月)、11日(火)京都大学原子炉実験所事務棟会議室

# プログラム

<報告20分、質疑5分>

◆ 8月10日(月)

13:30~14:45 座長 福本学

1. 福本 学 (東北大学加齢医学研究所)

福島原発事故被災動物の線量評価事業の立ち上げと経過

2. 田中 公夫(環境科学技術研究所)

低線量率ガンマ線長期照射マウスの寿命、染色体異常などの変化

3. 中島 裕夫 (大阪大学医学部)

セシウム 137 の慢性的経口摂取で多世代にわたり低線量・低線量率内部 被ばくを続けた子孫マウスでの生理的、遺伝的影響

<休憩 14:45-15:00>

15:00~16:15 座長 小澤祥司

4. 秋元 信一(北海道大学農学部)

福島県高線量地域におけるアブラムシ類の形態異常の年間、地域間変動

5. 平良 渉 (琉球大学大学院理工学研究科)

汚染地域のヤマトシジミの調査とゲノム解析

6. 阪内 香(琉球大学大学院理工学研究科)

ヤマトシジミの被曝実験

<休憩 16:15-16:30>

16:30~18:25 座長 秋元信一

7. 岩佐 光啓 (帯広畜産大学)

福島第一原発 14km地点の放牧地と周辺環境における放射性物質の動態:セシウムの昆虫・無脊椎動物への蓄積および食性との関係

8. 藤原 慶子(京都大学原子炉実験所)

土壌中放射性セシウムのシマミミズへの移行・体内分布・滞留

9. 岩見 恭子(山階鳥類研究所)

福島第一原子力発電所事故によるツバメの巣の放射性セシウム汚染状況

10. 村瀬 香 (名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科)

階層ベイスと統計モデリングを通じて、原発事故が野生動物とヒトに与 えた影響を考える

11. 田中 草太(京都大学大学院農学研究科) <報告10分、質疑5分>

節足動物の栄養段階からみる食物連鎖における放射性セシウムの動態

(懇親会19:00∼ 日根野駅前 ベストウェスタン関西エアポートホテル)

# ◆ 8月11日(火)

9:30~11:10 座長 鈴木 譲

12. 羽山 伸一(日本獣医生命科学大学)

福島市に生息するニホンザルの筋肉中放射性セシウム濃度の推移と放射 性物質が与える影響について

13. 山城 秀昭 (新潟大学農学部)

被災雄牛における継世代影響評価の試み

14. 漆原 佑介(放射線医学総合研究所)

被災ウシの血漿生化学検査による被ばく影響評価

15. 鈴木 正敏 (東北大学加齢医学研究所)

肉用牛の血液、及び筋肉における放射性セシウムの生物学的半減期

<休憩 11:10-11:25>

11:25~12:40 座長 石田 健

16. 鈴木 譲(元東京大学農学部)

放射能汚染地域のため池に棲むコイの健康状態

17. 中嶋 正道 (東北大学大学院農学研究科)

放射線被曝がヤマメ血液性状に与える影響

18. 田口 将(東北大学大学院農学研究科)

長期放射線被曝によりヤマメ脾臓で発現応答する遺伝子の探索

<昼休み 12:40 - 13:50>

13:50~15:05 座長 福本学

19. 石田 健(東京大学農学部)

高線量地帯における鳥類の研究経過、困難な点と現時点の展望

20. 岡田 啓司(岩手大学農学部)

福島原発事故帰還困難区域における牛と放牧地の状況

21. 奥田 圭(福島大学環境放射能研究所)

野生中・大型哺乳類の体内における放射性セシウムの蓄積状況と推移

<休憩 15:05-15:20>

15:20~16:25 座長 今中哲二

22. 遠藤 暁 (広島大学大学院工学研究院)

福島第1原発周辺汚染地域での地表ベータ線量のマッピング

23. 今中 哲二 (京都大学原子炉実験所)

チェルノブイリ原発事故がもたらした生物影響に関する研究の紹介

24. 荻野 晃也 (電磁波環境研究所) <報告10分、質疑5分>

原発事故による環境異変と電磁波被曝の環境影響

16:25~17:00 総合討論 座長 福本、今中

世話人 福本 学 東北大学加齢医学研究所 今中哲二 京都大学原子炉実験所

# 福島原発事故被災動物の線量評価事業の立ち上げと経過 東北大学加齢医学研究所 福本 学 被災動物線量評価グループ

東京電力福島第一原子力発電所(福島原発)の水素爆発と核燃料のメルトダウンによっ て大量の人工放射性物質が環境中へ放出され、ヒトと生態系への悪影響が懸念されている。 放射線による人体影響のゴールドスタンダードは広島・長崎の原爆被爆者に関する疫学デ ータである。そこから得られている多くの科学的知見の中で特筆されることは、ヒトにお いて 100 mGy 以下の被ばくでの有害事象と放射線による遺伝影響は検出されない、である。 しかし、この疫学データは、1回の急性外部被ばくによる人体影響である。福島原発事故 以降に問題となっているのは、微量の放射性物質による長期にわたる被ばくであり、内部 被ばくと、環境中に残留した放射性セシウムによる外部被ばくによる健康障害である。チ エルノブイリ事故後、放射性ヨウ素によるとされる小児甲状腺がんの有意な増加が報告さ れているため、福島原発事故でも特に甲状腺がんのリスクの上昇が危惧されている。長期・ 微量の放射性物質による動物を含めた生体影響の実験は極めて困難である。福島原発事故 の特徴は、世界最先端の科学的水準で情報公開が自由な我が国で起きたことである。この ような状況を踏まえて、原発事故によって飛散した放射性物質による長期被ばくのヒトへ の影響を知ることを目的として、「被災動物線量評価事業」を立ち上げ、活動を継続してい る。現在までに、福島原発事故によって設定された旧警戒区域(半径 20km 圏)内外の家畜 とニホンザルについてアーカイブを構築し、放射性物質の同定と放射能濃度の計測、そし て環境放射線のモニタリングから動物個体と臓器別の線量評価を行い、生物学的変化の検 索を行い、以下の結果を得ている。

2014年10月現在において、福島県のウシ約300頭、ブタ約60頭分の試料を収集・保管している。これらの試料を用いた解析によって、ウシ血中・臓器中放射性物質と放射能濃度について(Fukuda et al. 2013)、ウシ精子形成、精巣に著変が確認されなかったこと (Yamashiro et al. 2013) について各々報告している。さらに旧警戒区域内の家畜末梢血中のストレス関連物質が原発事故に無関係な群に比べて有意な変化を観察した(漆原ら)。現在、汚染稲わら給与実験を行い放射性セシウムの動態解析を行っている(鈴木ら)。ウシでの遺伝影響解析も開始した(山城ら)。2015年7月末日までに約200頭の野生ニホンザルからのサンプリングを行っている。放射性物質としてセシウムのみが検出されており、臓器沈着量は今だに高く、家畜同様に骨格筋に最高であった。血中放射性セシウム濃度と末梢白血球数に明確な相関は確認されていない。

福島原発事故よりも遥かに多量の放射性物質が飛散したチェルノブイリ事故でも、事故発生後5年くらいしてから甲状腺がんの発症が顕性となってきたことを考えると、野生生物の調査研究と線量評価はこれからが本格化すべき時期であることは明らかである。

# 低線量率ガンマ線長期照射マウスの寿命、染色体異常などの変化 田中 公夫 (公益財団) 環境科学技術研究所

kmtanaka@ies.or.jp http://www.ies.or.jp

低線量放射線の生物への影響を調べるには、総線量のみでなく、線量率にも着目するこ とが重要である。しかし低線量率放射線の長期被ばくによる生物影響は殆ど調べられてい なかった。環境研ではマウスを SPF 条件下で飼育しながら長期間照射できるユニークな施 設を用い、多くの指標について生物影響を調べている。染色体異常は低い放射線被ばくで も検知できる有用な生物学的指標である。マウスを3種類の低線量率[20 mGy/22h/day (909 μ Gy/h), 1 mGy/22h/day(45 μ Gy/h), 0.05 mGy/22h/day(2.25 μ Gy/h):これらの線量 率は自然界のガンマ線線量それぞれ約 8000 倍、約 400 倍、約 20 倍に相当する] <sup>137</sup>Cs-ガ ンマ線で最大 700 日間までの照射を行った。1 mGy/day の線量率は宇宙空間で1日に浴び る値である、また 0.05 mGy/day の線量率で約 1 年間に近い(400 日)被ばくする総線量の 20 mGy は原子力施設作業者の年間被ばく線量限度の 20 mSv に相当する。転座型異常は M-FISH 法で、二動原体異常は動原体部を染める FISH 法で 1000 細胞以上について観察 した。(I) ① 20 mGy/day, 1 mGy/day の線量率ともに染色体異常頻度は総線量(照射時 間) が増えるに伴いほぼ直線的に増加した。② 染色体異常頻度は(特に転座型異常頻度 は)加齢とともに増加するので、年齢補正を行って3個の線量率間での異常頻度を比較す ると、20 mGy/day 群と 1 mGy/day 群間と、1 mGy/day 群と非照射群との間には有意な 差が見られた。しかし 0.05 mGy/day 群と 1 mGy/day 群間、及びそれと非照射群間には有 意な差が観察されなかった。以上、線量率が低くなるごとに染色体異常頻度が低下した。 すなわち正の線量率効果が観察された。 (Ⅱ) これらの線量率でマウスを 56 日齢から 400 日間連続照射(3種類の線量率で総線量は8000,400,20 mGy)を行い、寿命短縮と発がん 頻度を調べた。この照射実験では1群 500 匹のマウス(オス、メス各 250 匹)を用いた。20 mGy/day 照射群ではオス、メスマウスで、1 mGy/day 照射群ではメスマウスのみ非照射 群マウスと比べて有意に寿命が短かった。0.05 mGy/day の線量率を照射したマウスでは 有意な寿命短縮はみられなかった。**(Ⅲ)**低線量率(20 mGy/day)にてそれぞれの総線量に なるように異なる時間の照射をマウスに行い、異常頻度と線量との関係を得ている。その 効果関係から、ある総線量に到達して始めて未分化造血細胞数の低下や卵母細胞数、体重 の増加等の異常が出現をすることが明らかになった。すなわち、低線量率放射線長期照射 でこれらの異常が出現するには閾値があることわかった。未分化造血細胞である7日目の 脾臓造血コロニー数 (day7 CFU-S) は総線量が 3 Gy(照射日数が 150 日)になると有意 に低下をすることがわかった。奇形(体長、頭長)は20 mGy/dayではみられず、400 mGy/day の照射になると観察された。20 mGy/day の線量率で8000 mGy の照射をしたオ スマウスの F1 世代仔オスマウスには有意な寿命短縮が見られた。これ以下の線量率の照 射では見られなかった。以上の成果は青森県の委託事業で得られた成果の一部である。

# セシウム 137 の慢性的経口摂取で多世代にわたり低線量・低線量率内部被ばくを続けた子孫 マウスでの生理的、遺伝的影響

中島裕夫(大阪大学大学院 医学系研究科 放射線基礎医学) nakajima@radbio.med.osaka-u.ac.jp

チェルノブイリ、福島原発事故以来、低レベル放射能汚染地域に生活するヒトへの放射線被曝による発がん、生理、遺伝的影響が懸念されている。しかし、継世代的な影響が顕性化するまでには数世代の世代交代が必要であり、ヒトでは百年以上の時間経過が必要である。本研究は、ヒトより世代交代の速い近交系マウスを利用し、100 Bq/ml の <sup>137</sup>CsCl 水を飲料水として与えて多世代にわたり飼育することで、チェルノブイリ、福島近郊と同じような <sup>137</sup>Cs 汚染環境を実験室内で再現するもので、15 世代以上交配し続けた子孫マウスでの発がん性や生理的影響、遺伝的影響を検討して、短期的にヒトへの影響の推測を試みるものである。

これまでに同腹子を 2 群に分けて  $^{137}$ Cs 水給水群と対照群の双方とも 21 世代( $F_{21}$ )以上の世代交代に成功した。その 10 世代目(ヒトでは、約 300 年の世代交代に相当)のマウスでは  $^{137}$ Cs 水の自由摂取により 1 個体あたり平均 2313 Bq(1 g 体重当たり 93.5Bq)で平衡状態になっている。昨年度は、このマウスにおいて、1)マルチカラーFISH 法による染色体異常検査、2)低線量放射線による発がん影響を調べるための自然発生、Urethane 誘発による肺腫瘍発生率と平均腫瘍体積の定量、3) $^{137}$ Cs 水給水群、対照群のそれぞれの心臓ならびに肝臓組織におけるメタボローム解析の結果、4)世代間の産仔数や性比、5) $^{137}$ Cs の摂取経路や摂取率のちがいによる体内分布の性差について報告した。本年度は世代ごとに累積が期待できる非コーディング領域でのDNA塩基配列変異の検出、酸化ストレスが常に作用する心筋への影響について知見を得たので報告する。

全ゲノムシーケンスの目的は、微量 <sup>137</sup>Cs の慢性的経口摂取により各世代で内部被ばくした子孫マウスの DNA において変異の蓄積が増加するかどうかを調べることである。Exon 上で変異が多く起これば、出生率が下がり、X 染色体上で致死的変異が多く起これば、雄が減少する、また、Intron、 Intergenic 上での変異は、生存率に影響を与えず次世代に引き継がれ、各世代の変異率が同じであれば、変異の蓄積増加が予想される。しかし、15 代目までで産仔数、性比ともに <sup>137</sup>Cs 投与群と対照群の間で有意差は認められていない。この結果から、Exon 上での変異増加はほとんどないことが予想された。

実験開始から 15 代目の <sup>137</sup>Cs 投与群と対照群の Exon、Intron、 Intergenic 領域における Annotation が付与されている一塩基多型と挿入欠失変異の現在までに得られた変異数を調べた結果、Exon においては、検出誤差範囲内で変異数に差はほとんどないと考えられるが、Intron では 7249、Intergenic には 15082 の一塩基変異の増加が <sup>137</sup>Cs 投与群で認められた。また、挿入欠失においても同様に、Exon では 0、Intronでは 213、 Intergenic では 441 と生存に影響を与えない領域での変異は明らかに対照群より多く、各世代での変異が蓄積されている可能性が示唆された。 Annotation が付与されている Synonymous(同義変異:アミノ酸配列が変わらない一塩基変異)と Non-synonymous(非同義変異:アミノ酸配列が変わる一塩基変異)の変異数を <sup>137</sup>Cs 投与群と対照群で比較した結果、透過電顕解析による心筋への影響についても合わせて報告する。

今後、さらに世代交代と解析を進め、微量放射線の関与についての詳細な研究を進めていく予定である。

### 福島県高線量地域におけるアブラムシ類の形態異常の年間、地域間変動

## 北海道大学農学研究院 昆虫体系学研究室 秋元信一

高レベルの放射線が観測されている福島県川俣町や飯舘村において、虫こぶ (ゴール)を形成するアブラムシの形態異常の頻度を 2012 年から 2014 年にかけて調べた。虫こぶの内部には、卵から孵化した 1 齢幼虫の脱皮殻、成虫、第 2 世代幼虫が含まれており、これらの形態を詳細に観察することができる。また、虫こぶは、いったん見つかれば、数百の虫こぶを短時間のうちに採集できるというメリットもある。

2012 年に川俣町山木屋のハルニレから採集したオオヨスジワタムシ(Tetraneura sorini)の虫こぶからは、高い割合で形態異常が見つかった(17.5%)。とりわけ、1齢幼虫には、新しい細胞増殖を伴う新形質が観察できた(2分した腹部、腹部のコブ状隆起、脚の付け根のコブ状隆起、関節からの未分化な脚の出現など)。こうした形態異常は、これまで全く報告されてこなかった。ところが、同一の寄主木から 2013 年に採集した同種のゴールでは、形態異常の割合が大きく低下し(8.0%)、2014 年にも同様の傾向(8.7%)が続いた。2014 年に新たに加えた山木屋の別の観察木でも、低いレベルの異常率(7.6%) しか見出されなかった。さらに、対照地域の米沢市においても(空間線量は山木屋の 1/10)、2014 年に採集した虫こぶの形態異常率は低く(9.2%)、山木屋地域と有意な差はなかった。

一方、山木屋で採集したクロハラヨスジワタムシ(=オカボノクロアブラムシ、 Tetraneura nigriabdominalis)の虫こぶでは、2014年においても(11.2%)、2012年(10.4%) と同様に高い形態異常率が観察された。こうしたことから、遺伝子レベルの解析ととも に、今後も形態異常率の調査を継続する必要がある。さらに、今後予定している多様性 調査に関しても、簡単に報告する。

## **汚染地域のヤマトシジミの調査とゲノム解析** 〇平良渉、檜山充樹、野原千代、岩崎茉世、阪内香、大瀧丈二 (琉球大学理工学研究科)

福島第一原発事故による環境汚染の野生生物に対する影響を調べるために、本研究では小型の蝶であるヤマトシジミ( $Zizeeria\ maha$ )を用いて、2011 年 5 月より継続的に野外採集個体及びその  $F_1$  個体における形態異常を調べてきた。

ヤマトシジミの成虫個体の野外採集を 2011 年から 2013 年の 3 年間にわたり、毎年 2 回ずつ、春と夏に、福島市、本宮市、広野町、いわき市、高萩市、水戸市、つくば市の計 7 都市で行った。この個体採集と同時に、採集地点のカタバミが生育している地表面の放射線量を測定した。採集された成虫個体は沖縄に持ち帰り、形態的な異常の有無を調べ、採集地域間で、異常率の比較を行った。また、採集された個体から  $F_1$  をとり、 $F_1$  世代における異常率の有無も調べた。

採集地点における地面線量はほぼすべての地点において事故直後の 2011 年春が最高値を示し、その後は徐々に減少していった。一方で汚染地域のヤマトシジミの野外採集個体における形態異常率は 2011 年秋をピークに、 $F_1$  個体においても 2011 年秋をピークとする異常率の上昇が観察され、その後は次第に低下した。また、汚染が比較的少ない地表面線量が  $0.13~\mu Sv/h$  以下の地域(青森、宮城、東京など)の個体群ではこれらの上昇は観察されなかった。

ヤマトシジミにおける異常率の上昇は、汚染が比較的軽度の地域では観察されず、汚染が重度の地域で広範囲に観察されることから、福島第一原発事故由来の物質拡散に起因するものである可能性が高い。また、福島地域のヤマトシジミにおける異常個体の出現は一部の地域を除き現在では収束したものと考えられる。線量のピークと異常率のピークの時期的なずれの原因ははっきりとはわからないが、遺伝的および生理的な異常が個体群レベルで顕在化するまでにある程度の世代数が必要なのかもしれない。また、異常率の低下の要因の一つは線量の低下によるものであると推測されるが、放射性物質への抵抗性の進化も寄与している可能性が考えられる。

現在は、以上のような野外で観察された異常率(死亡率)の変化のメカニズムを考察していくために、放射性物質への抵抗性の進化や、淘汰による遺伝的多様性の変化などをゲノムレベルの解析で調べている。2011年夏の広野の $F_1$ 世代では、総異常率が90%以上であり、これは野外においても強い淘汰が生じたことを暗示している。程度に差こそあれ、他の汚染地域でも同様のことが言える。ここでの淘汰が放射性物質への抵抗性の進化につながったかは別としても、集団内で何らかの遺伝的な変化が生じた可能性は非常に高い。

まだ途中段階ではあるが、汚染地域と非汚染地域のヤマトシジミのゲノムの配列を直接的に比較するゲノム解析と DNA の制限酵素断片のパターンを比較する AFLP 解析の 2 つのアプローチで進めている。生息地の線量に応じて DNA 配列に変異が生じている部位(もしくはそういう部位が存在しているかどうか)や汚染によって遺伝的多様性が変化するかなどを明らかにしていく予定である。

## ヤマトシジミの被曝実験

琉球大学 理工学研究科 大瀧研究室 版內 香

ヤマトシジミ(鱗翅目シジミチョウ科) (Zizeeria maha) の野外調査は、福島第一原発事故直後の2011年5月より開始され、その採集個体を第一世代とした第二・第三世代への飼育実験において、翅サイズの矮小化や、付属肢の未発達・複眼の陥没といった形態異常が検出された。そして、これらの異常な表現型を再現するために、最も事故の影響が小さいと予想される沖縄個体を用いて、外部被曝・内部被曝実験が試みられた(2012年)。前者は、セシウム137の線源を飼育空間に設置し、積算被曝が55 mSvまたは125 mSvとなるように、幼虫期において外部照射が行われた。後者は、福島県内の4つの地域から食草であるカタバミを採集し、一齢後期以降の幼虫に与えられた。結果は、外部被曝・内部被曝実験共に、被曝量に伴う生存率の低下を示し、翅サイズの矮小化と、野外調査や継代飼育実験と類似の形態異常が出現するものであった。よって、実験室内での再現性が得られたことから、野外で見受けられるヤマトシジミの形態異常が、原発事故由来の人工放射性物質に起因する可能性が有力である。ただし、生理的影響と遺伝的影響との区別やそのメカニズムを考察するためには、さらなる実験や議論を要する。

上記の内部被曝実験は、新たに二つの内部被曝実験へと発展を遂げるものとなった。初めに、沖縄個体に福島地方の汚染カタバミを与えるという方法論はそのままに、幼虫1匹が摂取したセシウム線量を定量化し、死亡率・異常率を評価するものである(2014年5月)。すると、摂取したセシウム線量が低線量の場合に、死亡率・異常率共に急激に上昇し、3 Bqに達すると、以降は目立つ変化を呈さなくなった。幼虫1個体あたりの半数致死線量と半数異常線量は、各々1.9 Bqと0.76 Bqと導かれた。以上のことから、摂取したセシウム線量と死亡率・異常率との関係は、とりわけ低線量域で非直線的であり、また、べき関数モデルに適合することから、少なくともヤマトシジミにおいては、汚染食草による悪影響が無視できないことが示された。この結果を踏まえて続く実験では、福島県以外の地域も追加し、前述よりもさらに低い汚染レベルのカタバミが用意された(2014年9月)。さらに、第二世代への継代的影響についても調査された。第一世代では、セシウム摂取線量に伴い死亡率・異常率は直線的に増加し、翅サイズの矮小化や形態異常が見られた。第二世代では、生存率が、第一世代の内部被曝度合いではなく、第二世代自身の食草の汚染レベルに依存していることが判明した。また、第一世代同様、翅サイズの矮小化や形態異常が現れたが、前者に関しては、第一世代からの累積摂取線量と相関を持つため、世代をまたいだ影響が残ることも認めなければならない。

現行では、福島地方より採集した汚染土を用いての外部被曝実験が行われている。外部被曝個体のミトコンドリア遺伝子の量と発現レベルをリアルタイム PCR で検出する予定である。一見すると正常な個体の中に、飛翔行動に異常のあるものや元気のないものが見受けられた飼育経験から、ミトコンドリアの機能低下が疑われる。これは、先行研究において死亡率・異常率といった数字からもれた、生理的・行動的な影響を見つめるものであり、何らかの影響を定量化できれば、小さなヤマトシジミの声をもうひと言拾うことができるだろう。

# 福島第一原発 14 km地点の放牧地と周辺環境における放射性物質の動態: セシウムの昆虫・無脊椎動物への蓄積および食性との関係

岩佐光啓(帯広畜産大・昆虫)

福島第一原発の事故により放出された放射性物質が昆虫・無脊椎動物に及ぼす影響については、ヤマトシジミ(Hiyama et al., 2012; Nohara et al., 2014)、ミミズ(Hasegawa et al., 2013)、水生昆虫(Yoshimura and Akama,2013)、ジョロウグモ(Ayabe et al., 2013)、イナゴ(三橋ら、2013)、アブラムシ(Akimoto,2014)などについて報告されてきたが、畜産環境における昆虫類への影響や汚染についてはほとんど知られていない。そこで本研究では、放牧地およびその周辺環境における放射性セシウムの動態および昆虫・無脊椎動物への移行・蓄積の実態を食性との関係を含めて報告する。

調査は、2013 年 6~9 月、2014 年 6~9 月に福島第一原発から 14 km 地点の福島県浪江町の牧場および その周辺で行い、放牧地では土壌、牧草、サイレージ、牛糞および牛糞に生息する糞食性昆虫 3 種(マ グソコガネ、カドマルエンマコガネ、ノイエバエ)、対照区として同じ糞食性の帯広産マグソコガネおよ びキタミドリイエバエのセシウム (Cs134 と Cs137) による汚染濃度を測定した。 放牧地の空間線量は 2013年で5.52  $\mu$ Sv/h、2014年で4.12  $\mu$ Sv/h で、2013年の牛の餌のセシウム濃度の平均は、牧草で11,757Bq/kg、サイレージで 2,666 Bq/kg で、牛糞のセシウム濃度は 2,348 Bq/kg だった。 昆虫でのセシウム 濃度は、小型のマグソコガネで 1,700 Bq/kg で、中型のカドマルエンマコガネでは 2,410 Bq/kg となっ た。セシウム濃度 600~5,382 Bq/kg の範囲の 20 サンプルの牛糞で帯広産キタミドリイエバエ幼虫を飼 育したところ、発育・羽化率へのセシウムの影響はみられなかった。これら幼虫期のみが汚染牛糞を摂 食した帯広産キタミドリイエバエの羽化成虫のセシウム濃度は 219 Bq/kg だった。 一方、調査地の牧 場で野外採集したノイエバエ成虫のセシウム濃度は、2013年で3,520 Bq/kg と高い値を示したが、2014 年では 960 Bq/kg に低下した。 比べて、牧場付近で採集された腐食性のホホグロオビキンバエ成虫の 2014年のセシウム濃度は、2,680 Bq/kg と高い値を示した。また、2014年の浪江産ノイエバエ蛹のセシ ウム濃度は 187 Bq/kg で、汚染糞を摂食した帯広産キタミドリイエバエ蛹とそれから羽化した成虫のセ シウム濃度は、それぞれ 217 Bq/kg, 206 Bg/kg となり、セシウムのほとんどが蛹から成虫への変態過程 において成虫に移行することが示唆された。

周辺環境に生息する糞食性以外の昆虫・無脊椎動物については、針葉樹林、広葉樹林、放牧地において、肉食・雑食性のアオオサムシ、エンマコオロギ、ゴミムシ科、植食性のドウガネブイブイ、マメコガネ、腐食性(土壌有機物食性含む)のオオヒラタシデムシ、カブトムシ、オカダンゴムシ、ヒトツモンミミズの 9 種(または分類群)を各環境で捕獲し、セシウム濃度を測定した。対照区として、帯広産の同種または近縁種の濃度も測定した。2013年と2014年の空間線量はそれぞれ、針葉樹林で5.57 μSv/h、4.67 μsv/h、広葉樹林で5.70 μSv/h、4.01 μSv/h となり、環境間で大きな違いはみられなかった。 土壌と葉のセシウム濃度は、針葉樹林で最も高い値を示し、次いで広葉樹林、牧草地の順であった。無脊椎動物・昆虫におけるセシウム濃度は、特に針葉樹林で採集したヒトツモンミミズで極めて高く、次いでオオヒラタシデムシ、オカダンゴムシの順であった。それに比べて、肉食・雑食性昆虫と植食性昆虫のセシウム濃度は、比較的低い値にとどまった。これら周辺環境の土壌、葉、昆虫・無脊椎動物のセシウム濃度の2年間の変化についても報告する。

## 土壌中放射性セシウムのシマミミズへの移行・体内分布・滞留

○藤原慶子(京大原子炉)

[はじめに] 東京電力福島第一原子力発電所の 事故を契機に、放射性物質人以外の生物への移 行や影響について徐々に研究されてきている ものの、まだ十分とは言えない。本研究では、 地中に生息するもっとも代表的な生物である ミミズについて、土壌中の放射性セシウムがど の程度ミミズへ移行するのかなどを評価する ため、放射性セシウムを含む土壌でミミズを飼 育し、土壌からミミズへの 137Cs の移行と飼育 期間との関係や、摂取された放射性セシウムの ミミズ体内での分布・滞留について検討した。 [方法] 放射性セシウムを含む土壌は、福島県 内の畑地から採取した表層土であり、使用前に 1.18mm(#10)のステンレスメッシュを通して小 石や植物片は除去した。実験は異なる場所で採 取した2種類の土壌(土壌 A、土壌 B)を用いて 実施した。使用したミミズは実験室内で維持可 能なシマミミズ Eisenia fetida (Savigny, 1826) で、その遺伝的背景は文献1に詳細に記載され ている。繁殖育成に使用している腐葉土((株) ケーヨー社製、園芸用土ピートモス)と上記の 放射性セシウム含有土壌を等量混合した培養 土にミミズを入れ、1回目の実験では1,2,6,36 日飼育後に、2回目の実験では1,2,4,7,14,22 日飼育後にミミズを取り出し、Ge 半導体検出 器で <sup>137</sup>Cs 濃度を測定した。得られたミミズの

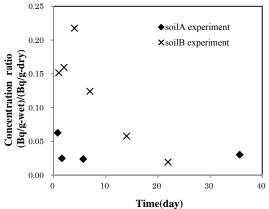


Fig.1 The change of concentration ratios with time

<sup>137</sup>Cs 濃度 (Bq/湿重-g) の平均値を使用した土 壌の <sup>137</sup>Cs 濃度(Bq/乾燥重-g)で除して濃度比を 算出した。また、一部のミミズはホルマリン固 定後、クライオスタットで断面を切り出し、IP (GE-Tayphoon7000) でオートラジオグラフィ ー(ARG)を作製した。土壌 A の容積比重、水分 含有量、及び放射能濃度は、それぞれ 0.4g/cm³, 68%重量, 49.1Bq/乾燥重-g、土壌 B は 1.0g/cm³, 73%重量,162.4Bq/乾燥重-g である。

[結果および考察] 放射性セシウム含有土壌で飼育したミミズの <sup>137</sup>Cs の濃度比と飼育期間との関係を Fig.1 に示す。2 回の実験でともに濃度比は成育開始初期に高く、徐々に減少していくのが確認された。本実験において <sup>137</sup>Cs の摂取が一番多かったミミズでの濃度は 20Bq/sample程度であった。また、ARG より放射性セシウムは、ミミズの消化管内において土壌と同程度の濃度で存在し、体組織実質部ではその濃度は土壌より低濃度であり、局所的な偏在は認められなかった。(Fig.2 参照)

また、放射性セシウムによる吸収線量は最大で  $1.9 \times 10^3 (\mu \text{Gy/day})$ であった。

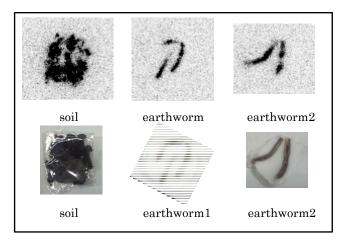


Fig.2 Autoradiography and photography of soil and earthworms at 1-2 days after the start of culture. 文献

1) Suzuki K, Suzuki T, Stürzenbaum S, Gamou S. Construction of a Bacterial Artificial Chromosome (BAC) Library and the Genomic Analysis of Valosine-Containing Proteins in the earthworm *Eisenia fetida*. European Journal of Soil Biology 44(2), Mar: 202-206, 2008

福島第一原子力発電所事故によるツバメの巣の放射性セシウム汚染状況

岩見恭子<sup>1</sup>・小林さやか<sup>1</sup>・柴田康行<sup>2</sup>・山崎剛史<sup>1</sup>・尾崎清明<sup>1</sup> (1. 山階鳥類研究所, 2. 国立環境研究所)

2011 年 3 月の福島第一原子力発電所事故によって飛散した放射性物質による生態系への影響が懸念されている. 山階鳥類研究所では鳥類への放射性物質による影響を把握するための調査を行っている. その一つとして, 人里や市街地で繁殖し, 継続的な観察や分析に必要な試料を十分に得ることができるツバメ Hirundo rustica を対象にした. ツバメの巣は田畑や水溜まり等で集められた泥を用いて造られており, 降下した放射性物質によって汚染されている可能性が高い. また放射性物質による巣の汚染が, 卵内の胚の発生やヒナの成長に影響する可能性があり, ツバメの個体群に負の影響を及ぼすおそれがある. 本調査では ツバメの巣に含まれる放射性物質を定量的に測定し, 汚染状況を把握するとともに, ツバメの繁殖状況を調べることで個体群への影響を評価することを目的としている.

日本全国に HP や新聞などのメディアを通じて、2011 年に繁殖したツバメの巣の収集を呼びかけた. 特に福島県については福島第一原子力発電所にも近く、汚染度の高い地域もあるため、野鳥の会支部をはじめとする地元の協力を得て、重点的にツバメの巣を収集した. 放射性物質の定量測定は国立環境研究所において、ゲルマニウム半導体検出器 (γ線検出器)を用いて行った. 全国 21 都道府県から集められた 197 巣のうち 182 巣について測定を行った結果、1 都 12 県の巣から放射性セシウム (Cs134, Cs137) が検出された. 巣の放射性セシウム濃度は土壌中の放射性セシウム濃度が高い地域ほど高かったが、地域内で巣のセシウム濃度にはばらつきが見られた. また福島県郡山市内において、2011 年度に巣を採集した場所で、日本野鳥の会郡山支部の協力を得て、2012 年と 2013年の巣への帰還および繁殖状況を調査した. その結果、著しい繁殖数の減少や繁殖率の低下は見られなかった.

この研究は三井物産環境基金2011年度東日本大震災復興助成を受けて行われた.

2015 年 8 月 10 日(月)、11 日(火) 京都大学原子炉実験所 事務棟会議室

福島原発事故による周辺生物への影響に関する専門研究会

抄録

# 階層ベイズと統計モデリングを通じて、 原発事故が野生動物とヒトに与えた影響を考える

村瀬香・名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科

原発事故が野生動物とヒトに与えた影響を考える場合、従来の統計解析手法では、様々な理由から、統計学的な有意差が検出出来ない場合があることは始めから予想される。様々な理由とは、例えば、原発事故発生から数年という短い期間では収集出来るデータに限りがある事、人口が少ない行政区域が多く存在する事、全ての環境要素を測定しきれない事、などである。

その一方で、GLMM のような複雑な統計モデリングは、いろいろな制約で測定出来ない様々な要素を、ランダム効果として組み込むことが出来る。GLMM のような複雑な統計モデルのパラメータを推定する場合、ベイズ法を用いて推定するのが便利である。これを一般に、階層ベイズと呼ぶ。ただし、ベイズ法の利点はそれだけではない。ベイズ法では、母集団のパラメータ自体を、確率分布として表現出来るのである。サンプル数が少ない状況でも、変化の兆しを見出したり、それに対する適切な処置を早い段階から講ずることが出来たりするのである。

本発表では、各国の先天性奇形のデータを解析しながら、得られたデータからどのような統計モデリングが可能なのか、また、そこから何が示唆されたのか考察する。また、原発事故や公害などが発生すると、医療従事者、学校の先生、市民団体などによって、特定の地域のみで実施された調査によって得られたデータが存在する事がある。このようなデータは疫学的な解析に耐えられないと考えられがちであるが、ヒトにおいても、野生動物のデータにおいても、ランダム効果を導入した階層ベイズモデリングを想定するならば、解析する事は可能となる。本発表では、そのようなデータを取得されている市民の方に向けて、どのような点に気を付けてデータを得る事が、階層ベイズを前提とした解析に有用かを紹介する。

## 節足動物の栄養段階からみる食物連鎖における放射性セシウムの動態

<u>田中 草太</u><sup>1\*</sup>、高橋 千太郎<sup>1,2</sup>、足達 太郎<sup>3</sup>、高橋 知之<sup>2</sup> <sup>1</sup> 京都大学大学院農学研究科、<sup>2</sup> 京都大学原子炉実験所、<sup>3</sup> 東京農業大学

\*tanaka. sota. 57s@st. kyoto-u. ac. jp

#### 1. 緒言

2011年に発生した東京電力福島第一原 子力発電所の事故によって、大量の放射性 物質が環境中に放出された。環境中で問題 となる放射性セシウム(以下、Cs)は、生物 の必須元素であるカリウムと性質が似てい る。そのため、生物の被食・捕食関係であ る食物連鎖を通して環境中を移動、循環す る。昆虫類を含む節足動物は、生物量が多 く、幅広い分布をもち、生態系の物質循環 機能を担っており、放射性物質の環境動態 を解明するうえで極めて重要な環境生物で ある。また、節足動物は放射線感受性の高 まる卵や蛹などの生育段階初期を Cs が蓄 積している土壌表層において生息する種が 多く、他の陸域生物と比較して放射線影響 が発現する可能性が高いと考えられる。こ のため、生態系における生物影響の指標と して節足動物の Cs 濃度を把握することは 重要である。

本研究では、2012 年から 2014 年の間、 福島県の調査地で食物連鎖における栄養段 階が異なる 3 種の節足動物を採集し、Cs 濃度の経年変化を調べた。

#### 2. 方法

2012 年から 2014 年にかけて福島県の中山間地域において、コバネイナゴ(植食者)、エンマコオロギ(雑食者)、ジョロウグモ(肉食者)を採集した。セシウム 137 (137Cs) 濃度は、1 ロット 20~40 頭として、4~5 ロットをゲルマニウム半導体検出器を用いて測定した。

## 3. 結果

節足動物の栄養段階によって、体内 137Cs 濃度の経年変化は異なっていた。植食者のイナゴの体内 137Cs 濃度は、2012 年から 2014 年の 2 年間で 85%減少したのに対し、雑食者のコオロギでは 45%、肉食者のジョロウグモは 30%しか低下していなかった。

#### 4.考察

結果より、栄養段階が上位の節足動物ほ ど経年変化による 137Cs の低下の度合いが 低くなることが示された。本研究で対象と し節足動物はいずれも年1化性である。植 食者のイナゴにおいては食草に含まれる 137Cs 濃度の減少に伴って次世代の 137Cs 濃度が大きく減少したが、雑食者と肉食者 では世代交代後も 137Cs 濃度の大きな減少 はみられなかった。これはイナゴが餌を生 食連鎖系のみに依存しているのに対して、 クモやコオロギが、他の捕食者や 137Cs が 長期的に蓄積しているリター層やデトリタ スなどの腐食連鎖系からも餌を確保してい ることに起因すると考えられる。また、そ れぞれの生物種とその被食者の移動性の違 いから、栄養段階の上位者がより広範囲か ら餌資源を確保しているなどの可能性が考 えられる。これらの状況から栄養段階上位 の生物種の方が長期にわたって放射線の影 響を受ける可能性が示唆された。

# 福島市に生息するニホンザルの筋肉中放射性セシウム濃度の推移と 放射性物質が与える影響について

羽山伸一 (日本獣医生命科学大学・獣医学部・野生動物学教室)

#### 研究の目的

演者らの研究グループでは、福島市におけるニホンザル(以下、サル)の捕獲個体を対象として、2008年から解剖調査による繁殖実態等の調査を継続してきた。サルは、わが国の固有種であり、また世界最北限に生息する野生霊長類である。サルは 20~25年の寿命を持つため、長期的にモニタリングする対象として極めて重要であると考えられる。そこで、サルの臨床医学的および病理学的検査を実施し、被ばくの実態や健康影響を明らかにする目的で研究を開始した。

### 材料・方法

体内に取り込まれたすべての核種を測定することができないため、相対的な内部被ばく量の評価は、筋肉 1 kg あたりの総放射性セシウム (134Cs + 137Cs) 以下 (2Cs) 濃度を測定しておこなった。(2Cs) 濃度の測定値は、物理的半減期から捕獲日の値に補正した。本講演では、(2011) 年 (2015) 年 (2015) 年 (2015) 年 (2015) 年 (2015) 年 (2012) 年度に捕獲された個体のデータを用いた。分析したサルは、福島市内で捕獲された個体および、対照として青森県内で (2012) 年度に捕獲された個体である。筋肉中 (2012) 年 (2012) 7 (2012)

### 結果と考察

青森県のサルでは、すべての個体で筋肉中 Cs 濃度は検出限界以下であった。一方、福島市のサルにおける筋肉中 Cs 濃度は、2011 年 4 月に 10,000 から 250,00Bq/kg と高濃度を示したが、3 か月あまりかけて 1,000Bq/kg 程度にまでいったん減衰し、2011 年 12 月から 2,000 から 3,000 Bq/kg に達する個体が見られるようになり、2012 年 4 月以降では、再び 1,000 Bq/kg 前後を推移した。この冬期間における濃度の上昇は、2012 年度以降も観測され、冬期間には Cs 濃度が高い冬芽や木の皮などを採食していることや、大気降下物中の Cs 摂取が原因と考えられた。

また、2012 年度に実施した血液学的検査の結果、福島市では青森県に比べ有意に血球数が低下し、また4歳以下の幼獣では筋肉中Cs濃度と白血球数との間に有意な負の相関関係が観察された。これらの現象は、何らかの放射性物質による被ばく影響と考えられた。

- S Hayama, S Nakiri, S Nakanishi et al. (2013) Concentration of radiocesium in the wild Japanese monkey (Macaca fuscata) over the first 15 months after the Fukushima Daiichi nuclear disaster. *PLOS ONE*, 8(7):e68530.
- K Ochiai, S Hayama, S Nakiri et al. (2014) Low blood cell counts in wild Japanese monkeys after the Fukushima Daiichi nuclear disaster. *Scientific Reports* 4: 5793 doi:10.1038/srep05793.

## 被災雄牛の継世代影響解析の試み

# 新潟大学農学部 山城秀昭 (hyamashiro@agr.niigata-u.ac.jp)

生殖細胞は、次世代を生み出すことが可能な唯一の細胞であり、遺伝子を次世代へ引き継ぐ。これまで福島第一原発 20km 圏内旧警戒区域の被災雄牛において精子を採取・凍結保存するとともに、雄性生殖器における放射性物質の同定と線量を測定し、生殖器官への影響を解析した。保存した生殖細胞を用いて人工授精、体外受精および受精卵移植を実施し、産子を得た。現在、被災牛1、登記の情報から判明した父個体、2 頭の仔の 3 世代、および被災牛2、1 頭の仔の 2 世代に渡る DNA エクソン領域の網羅的な変異・挿入・欠損部位と位置を DNA 濃縮技術と次世代シーケンサーを用いて被災雄牛の継世代影響解析を実施している。

本勉強会では、継世代的影響解析の進捗状況、および今後の解析計画について報告する。

## 被災ウシの血漿生化学検査による被ばく影響評価

漆原佑介 <sup>1,2</sup>、川角浩 <sup>3</sup>、木野康志 <sup>4</sup>、関根勉 <sup>5</sup>、林剛平 <sup>2</sup>、桑原義和 <sup>2</sup>、鈴木正敏 <sup>2</sup>、山城秀昭 <sup>6</sup>、阿部靖之 <sup>7</sup>、福田智一 <sup>8</sup>、小林仁 <sup>9</sup>、磯貝恵美子 <sup>8</sup>、篠田壽 <sup>10</sup>、新井敏郎 <sup>3</sup>、福本学 <sup>2</sup>

所属:1放射線医学総合研究所、2東北大学加齢医学研究所、3日本獣医生命科学大学獣医学部、4東北大学大学院理学研究科、5東北大学高等教育開発推進センター、6新潟大学農学部、7帯広畜産大学原虫病研究センター、8東北大学大学院農学研究科、9宮城大学食産業学部、10東北大学大学院歯学研究科

2011年3月に起こった福島第一原子力発電所事故により、環境中に多量の放射性物質が拡散した。我々のグループでは福島県の旧警戒区域内に取り残された約300頭のウシから血液、組織のサンプリングを行い、これまでに放射性物質の濃度測定結果や生殖組織への影響について発表している(Fukuda et. al., PLoS ONE, 2013; Yamashiro et. al., Sci. Rep., 2013)。昨年度の本専門研究会では、旧警戒区域内で殺処分されたウシにおいて血漿中放射性セシウム濃度の上昇に伴って血漿中 Malondialdehyde (MDA) 濃度、Superoxide dismutase (SOD) 活性、Lactate dehydrogenase (LDH) アイソザイムが上昇していること、また病理解析では血漿中放射性セシウム濃度と関係した顕著な筋組織の異常がみられないことを報告した。

本研究では旧警戒区域で捕獲された成牛53頭について、捕獲時の体内放射性セシウム濃度より放射性セシウムによる内部被ばく線量率を、捕獲地点の土壌中放射性セシウム濃度より外部被ばく線量率を計算し、血漿中バイオマーカーとの相関解析を行った。その結果、血漿中放射性セシウム濃度との相関がみられた MDA、SOD は内部被ばく線量率とも相関を示したが、外部被ばく線量率との顕著な相関を示さなかった。また、筋組織以外に肺、肝臓、腎臓、脾臓の病理解析を行ったが、これらの組織に被ばく線量と関係した顕著な異常は見られなかった。我々は旧警戒区域内で殺処分されたブタからも血液のサンプリングを行っていることから、旧警戒区域内で捕獲されたブタ35頭について血漿中バイオマーカーと放射性セシウム濃度との相関解析を行った。その結果、ブタにおいても血漿中放射性セシウム濃度と血漿中 MDA 濃度に正の相関がみられた。

これまでの解析によってウシ、ブタともに血漿中放射性セシウム濃度とMDAに正の相関がみられたが、ウシにおいては外部被ばく線量との顕著な相関がみられなかった。また解析を行ったブタの生息域は全て同一牧場内であったため、35頭のブタの外部被ばく線量は同程度であると考えられ、ブタにおいてもMDAが外部被ばく線量とは相関を示さないことが明らかとなった。

### 肉用牛の血液、及び筋肉における放射性セシウムの生物学的半減期

鈴木正敏 <sup>1</sup>、鈴木秀彦 <sup>2</sup>、石黒裕敏 <sup>2</sup>、木野康志 <sup>3</sup>、漆原佑介 <sup>1</sup>、齊藤陽介 <sup>2</sup>、渡邉智 <sup>2</sup>、小堤知行 <sup>2</sup>、曽地雄一郎 <sup>4</sup>、西清志 <sup>4</sup>、安彦亮 <sup>1</sup>、鷲尾亮太 <sup>1</sup>、桑原義和 <sup>1</sup>、沼辺孝 <sup>2</sup>、関根勉 <sup>5</sup>、福本学 <sup>1</sup>

- 1. 東北大学 加齢医学研究所 病態臟器構築研究分野
- 2. 宮城県畜産試験場 酪農肉牛部
- 3. 東北大学大学院 理学研究科 放射化学研究室
- 4. 宫城県仙台家畜保健衛生所 病性鑑定班
- 5. 東北大学 高等教養教育・学生支援機構

東京電力福島第一原子力発電所事故(福島原発事故)後に放出された放射性物質の中で、長半減期核種の放射性セシウムによる環境・生物・人体への影響を解明することが今後の課題となる。そのため、生体内の放射性セシウムをモニタリングするシステムの開発は極めて重要であり、非侵襲的な方法が長期モニタリングに適している。我々の研究グループではこれまでに、旧警戒区域で安楽殺されたウシの血液と、筋肉や臓器に含まれる放射性セシウム濃度に臓器依存的な相関があることを見いだしてきた。この結果は、体表面測定(生体測定)で筋肉内放射性セシウム濃度の測定が可能になると、血液や各臓器の放射性セシウム沈着濃度を非侵襲的に推定できることを示唆している。

本研究では、福島原発事故由来の放射性セシウムを含む汚染粗飼料を給与した肉用牛をモデルとし、体表面測定から得られる筋肉中の放射性セシウム計数率と血中放射能濃度の相関を調べた。給与試験では、血中放射能濃度が検出限界以下であった肉用牛に対して汚染粗飼料を約60日給与し、その後、放射性セシウムを含まない清浄飼料へと切り替えた。給与期間中はゲルマニウム半導体検出器による血中濃度測定(Bq/kg)と3インチNaI検出器による生体測定(cps)を行った。生体測定は頸部(ネック)と腰部(ランイチ)を対象とした。血中放射能濃度の上昇期、定常期、下降期の各時期に解剖を行い、それぞれの筋肉に含まれる放射性セシウム濃度をゲルマニウム検出器で測定した。

解剖で得られたネックやランイチの放射性セシウム濃度は、それぞれの生体測定値と正の相関を示した。この結果から、と畜前肉用牛の筋肉中放射性セシウムの動態を生体測定で観測できる事が検証された。血中放射能濃度に対する生体測定値は、清浄飼料給与時で汚染粗飼料給与時よりも高く、放射性セシウム摂取状況が生体測定ー血液モニタリングの相関を決定する一因であった。生体測定値と血液モニタリング値の比の経日変化を、汚染粗飼料、あるいは清浄飼料給与開始後のそれぞれで調べると、どちらの給与期間中でも類似した負の傾きを持つ線形関係を示した事から、筋肉ー血液間の放射性セシウム移行速度は放射性セシウム摂取時期に関わりなく一定であると考えられた。以上のことから、生体測定によってと畜前のウシの血中及び臓器中の放射性セシウム沈着量を推定できる可能性が示唆された。また本発表では清浄飼料に切り換え後の血中、および筋肉中の放射性セシウムの減衰から算出された生物学的半減期についても報告する。

## 放射能汚染地域のため池に棲むコイの健康状態

#### 鈴木 譲 元東京大学水産実験所

福島のため池に取り残されたコイの免疫系を調べることで放射線の健康影響を適切に評価しようというのが本調査の目的である。これまで2013年と2014年の8~9月に福島県内、および比較対照として栃木県のため池で採集したコイの白血球数の算定と免疫関連の組織標本の観察を行ない、筋肉中放射性セシウム137量との関係を探った。調査地点は2013年については福島県飯舘村前田、飯舘村小宮、飯舘村蕨平の3カ所、2014年については前年と同じ前田の他、飯舘村長泥、南相馬市、川内村の4か所とし、比較対照としては栃木県芳賀町で両年にわたって調査を行なった。この2年間の調査結果は互いに整合性のとれるものではなく、明確な結論を得るに至っていない。このため継続調査が必要であり、現時点での途中経過である。

#### <結果>

#### セシウム 137 量

2014 年におけるコイ筋肉中のセシウムは、2013 年に比べて明らかに減少していた. 底泥のセシウムレベルは高いので、餌と共に摂取した泥からどの程度セシウムを吸収し、どの程度を排出しているのか、さらなる検討が必要である.

#### 組織学的観察

2013年の調査では、福島の3か所の池で採集したコイのすべての個体に、脾臓、腎臓、頭腎のいずれかで、マクロファージの集塊であるメラノマクロファージセンター(MMC)の異常発達が観察された他、通常はない肝臓や膵臓にもMMCが見られた.対照の栃木のコイでは2013年にはわずかしかなく、福島のMMC発達が際立ったが、2014年になると栃木県のすべての個体でMMC発達が認められた.

#### 白血球数

2013年の調査における福島県3つの池のコイは、栃木県に比べてすべての白血球が少ない傾向が示された.しかし、2014年には栃木県のコイでも血球数が減少し、福島との差が認められなかった.また、どの白血球についてもセシウム濃度との相関は認められなかった.

#### <総括>

過去2年間の調査により、福島事故後の放射能汚染により、ため池に生息するコイは免疫器官や白血球数の異常により健康を害している可能性が示された. しかし2014年には栃木のコイでも異常が認められ、福島のコイとの差がなくなった. 事故後の低線量初期被曝による影響が3年を経て現れた可能性もあるが、対照地点が1か所では結論付けることはできず、今後対照地点を増やして調査を継続する予定である.

## 放射線被曝がヤマメ血液性状に与える影響

原将樹(東北大院農)・川田暁・榎本昌宏・冨谷 敦・ 渡邊昌人・森下大悟・泉茂彦(福島内水試)・ ○中嶋正道(東北大院農)

【目的】福島第一原発事故により飛散した放射性物質は福島県阿武隈山地の山林へと降下した。山林に降下した放射性物質は雨などの降水により河川へと流入しており、福島県の河川底質や魚から <sup>137</sup>Cs がいまだに検出されている。放射線による急性被曝では細胞新生が早い造血器官などの臓器に影響を与えることが知られている。一方、現在の福島県内河川のような低線量の被曝が長期間継続された場合の影響についての情報は少ない。本研究は島県内の河川で採集されたヤマメにおいて筋肉中の <sup>137</sup>Cs 量と血液性状との関係を明らかにすることを目的とした。

【材料と方法】阿武隈川、真野川、請戸川の3河川より2013年と2014年の3月~12月にかけてヤマメを採集した。底質については真野川と請戸川から採集した。内臓を除いた魚体を用い、137Cs量の測定を行った。血液性状は安定して採血ができた一歳(1+)以上の個体を用いて測定した。血液性状として赤血球数、ヘモグロビン量、ヘマトクリット値、平均赤血球容積、平均赤血球色素量、平均赤血球色素濃度、血小板数の8項目を測定した。各血液性状を目的変数、筋肉中137Cs濃度、採集日時、河川、体長、体重、肥満度を説明変数とし、重回帰分析を行った。

【結果】真野川における河川底質中の <sup>137</sup>Cs は減少傾向を示したが、請戸川では依然として高いレベルの <sup>137</sup>Cs が河川底質中に存在していることが示された。各血液性状と各説明変数間の回帰を調べたところ平均赤血球容積が正の、平均赤血球色素量と平均赤血球色素濃度が負の有意な回帰を示した。このことは筋肉中の <sup>137</sup>Cs 濃度の増加に伴い赤血球の容積が増加するものの、色素量が増加していないことを意味している。この現象は放射線被曝が直接的に影響しているものであるかどうかは今のところ不明である。今後、他の所見と共に検証して行く必要がある。

## 長期放射線被曝によりヤマメ脾臓で発現応答する遺伝子の探索

○田口将・酒井義文・原将樹(東北大院農)・川田 暁・冨谷 敦・渡邊昌人(福島内水試)・中嶋正道(東北大院農)

【目的】福島第一原発の事故により大量の放射性物質が福島県内に飛散した。放射性物質の多くは阿武隈山地の山林に降下し、降下した放射性物質は雨水などと共に河川へと流入している。福島県内の河川に生息するヤマメの筋肉中からは現在もなお放射性セシウムが検出されており、放射線被曝の影響が懸念される。放射線によりDNAが損傷を受けることが知られており、DNA損傷に伴い様々な遺伝子の発現量の変化が見られることが知れている。しかし、低線量の長期放射線被曝による影響に関しての情報は少ない。本研究ではヤマメにおける低線量の長期放射線被曝による影響を、脾臓における遺伝子発現応答から明らかにすることを目的とした。

【材料と方法】放射線被曝区のサンプルとして2014年6、7月福島県請戸川で採集されたヤマメを、コントロール区として宮城県広瀬川で採集したヤマメ各3尾を供試魚として用いた。ヤマメの筋肉中<sup>137</sup>Cs濃度は内臓を取り除いた魚体部分をホモジナイズし、測定した。脾臓からRNAを抽出し、polyA-RNA精製後、個体毎にcDNAライブラリーを作製しHiseq2000で100bpペアエンド法によるシーケンス解析を行った。請戸川、広瀬川それぞれ1個体のリードデータをプールし*De novo*アセンブリによりリファレンスを構築した。TMM正規化後、フィッシャーの正確確率検定により、放射線被曝区とコントロール区の比較でFDR<0.05である遺伝子を発現変動遺伝子(DEGs)としてスクリーニングした。これらの中から11の遺伝子を選択し、RNA-seqと同一の個体を用いリアルタイムPCRにより発現量を定量し、放射線被曝区とコントロール区とで比較を行った。

【結果】ヤマメの筋肉中<sup>137</sup>Cs濃度は、請戸川ヤマメで1320~4080Bq/kg、広瀬川ヤマメでは8.2~8.8Bq/kgであった。請戸川産ヤマメで広瀬川産ヤマメと比べ高い<sup>137</sup>Csが検出された。*de novo*アセンブリの結果136,705のコンティグが得られた。検定の結果1567の遺伝子が発現量変動遺伝子と判定された。請戸川では524の遺伝子が発現上昇、1043遺伝子が発現低下していた。これら発現量が変動していると判断された遺伝子の中から放射線被曝との関連が報告され、それらのうちアポトーシスと酸化ストレスに関与していると考えられる11遺伝子を選択し、定量PCRに用いた。定量PCRの結果11遺伝子中8遺伝子がRNA-seqの結果と高い相関(r>0.7)を示し、2群間の差の比較では5遺伝子で有意差が見られた。これら5遺伝子のうちCaspase10、BMF2など2遺伝子がアポトーシスに関連する遺伝子であった。これら2遺伝子は請戸川で発現量の低下が観察され、アポトーシスが抑制されていることが示唆された。

# 高線量地帯における鳥類の研究経過、困難な点と現時点の展望 石田 健(東京大学)

2011年7月15日から2015年7月11日まで、浪江町赤宇木の谷周辺を中心に、最初の調 査時点で胸の高さの空間線量率で毎時 20~80 μ Sv 程度の計測値が得られた区域を中心に現 地調査を実施してきた。主に、この高線量地点におけるウグイスの捕獲と、周辺地域を含 めた早朝(日の出から4時間程度まで)の鳥類定点カウント調査および長期、短期の自動 録音機による生物音声モニタリングを実施している。2012年からは、現在でも毎時 20μSv 程度の計測値が続いている小丸地区にも地元の農家に同伴させていただく形で入って録音 機を設置し、2013年からはウグイスの捕獲も行っている。2011年8月に赤宇木において捕 獲した3羽のオスのウグイス成鳥の尾羽を採取して測定した汚染とそのうち1羽のお尻に は大きなおできがあったことなどを昨年報告した。その後、標識個体が1年後に再捕獲さ れるようになり、幼鳥時に捕獲した個体が翌年に再捕獲されたこともあった。また、2015 年7月に捕獲した6個体のうち2個体のオス成鳥の頭頂に新たな共通の病変が観察された。 これらの経過について報告する。調査開始から4年が経過し、立ち入り制限区域と許可時 間、検問地点等の規則がほぼ「安定」して調査計画の見通しをたてて研究ができるように なってきた。私は、本来の生息環境に自然のままに生息している鳥類の個体の状態と集団 の状態を長期モニタリングする方針で臨んでいる。福島の高濃度汚染地帯において自分が (独りで) できることの中で最適な方法であるという理由からの選択であったが、じょじ ょにその意味を再検討する時期にも来ている。本研究の他に、ツバメの巣の線量測定、定 点カウントによる種別出現率の比較、狩猟・駆除個体の部位別の放射線量、フクロウの巣 に残存する卵殻や食べかすの線量と繁殖成績、比較的低線量地点の捕獲鳥類と鳥類の食物 となる可能性のある(土壌)生物の線量、阿武隈山地と浜通りの広域の録音による鳥類群 集モニタリングなどが鳥についての調査結果として公表されている。また、まだ調査結果 は公表されていないと思われるが、山階鳥類研究所による飯舘村長泥地区における定点標 識調査も行われていることが同所のホームページ等において明らかにされている。最初か ら予想されたことではあるが、鳥類の生息状況の明白な変化、あるいは放射線に直接起因 すると考えられる変化を検出することの困難さが明らかになってきている。鳥類では、統 計的に有意な差異を検出するのに十分なサンプル数を確保することも困難を伴う。一方、 比較的直接観測可能で広域の比較もできる。放射線の生態系、鳥類を含む種間相互作用、 鳥類個体の被曝のしくみの理解 (特に生態的・in-situ 要素)、被曝結果の可能性のある病変、 形態異常、群集の変化等の記載について、共通基準や、異なる観察結果の相互比較、場合 により実験による検証などが望まれる。

# 福島原発事故帰還困難区域における牛と放牧地の状況 岡田啓司

(一般社団法人 原発事故被災動物と環境研究会、岩手大学)

私たちのグループは、2012 年 9 月に設立された"一般社団法人 東京電力福島第一原子力発電所事故 に関わる家畜と農地の管理研究会"が名称を変更した組織で、研究チーム、支援チーム、復興チームで 構成されている。研究チームは主に東北地方の獣医・畜産系の大学教員であり、2011 年から現地で別個 に活動していたメンバーが集合した組織である。

研究対象は牛であり、研究活動の準備期間として、2013 年 3 月までに各農家に牛の追い込み柵とシュートを設置し、個体識別を行って 318 頭の個体を確認した。2013 年 5 月から本格的研究活動に入った。研究の柱は ①放射性物質の環境動態と線量評価(空間線量,土壌中の放射性セシウム(Cs),ストロンチウム(Sr)) ②牛における長期被曝の影響評価(被曝線量、DNA損傷,栄養状態,病理,疾病)③牛の放射能汚染と畜産物の安全・安心(放射性Csの体内分布,骨の放射性Sr)である。研究は浪江町小丸の小丸共同牧場の道路より上の牧区であり、現在でも空間線量は20 μ Sv/hを超えている。約16~クタールの農地や山林に40頭の牛が年間昼夜放牧されている。牛は5月~10月は自生の野草を、それ以外の次期は搬入した清浄飼料を採食している。

地上 1m の空間線量は 1 年 7  $\tau$  月で  $10\mu$  Sv/h 低下し、低下の程度は物理的減衰を若干上回った。 2014 年における空間線量の累積は 220mSv、牛の年間被曝量は 170mSv であった。

中心とそこから四方に 5m 間隔の 5 カ所の表層( $0\sim5cm$ )の土壌中 Cs のバラツキは 10 倍以上に達し、平均変動係数は 50%であった。このことからピンポイントでの土壌汚染の評価は困難であることが認められ、それはガンマカメラによって裏付けられた。

血液生化学および内分泌検査では、今のところ異常は認められていない。血中 Cs 濃度は飼料の影響で季節変動が認められた。コメット法による DNA 損傷評価では、有意な変化は認められていない。

病理解剖した 35 頭のうち 3 頭でリンパ腫が認められ、ウィルス性の白血病と考えられた。また、2 頭で甲状腺腫がみられたが、放射線との因果関係は不明であった。筋肉中の Cs 濃度は一定ではなく、筋肉/血液比は 12 月には 5 月の約 1.5 倍であった。

土壌中 Sr は  $^{137}Cs$  に対する濃度比が不定であった。骨中 Sr は核実験当時の北海道の牛よりもやや高い値を示した。

以上の高線量区 (空間線量  $20 \mu \text{ Sv/h}$ <) では発症がなく、低線量区の 2 牧場 ( $1\sim3 \mu \text{ Sv/h}$ ) で発症している白斑は、表皮と被毛のメラニン色素が減少・消失している疾患で、白斑の数や濃淡は変動している。高線量区で発症がないこと、飼育密度の高い牛群で多発していることから、放射線の直接の影響ではない可能性が高いと考えられる。

以上のことから、土壌や空間の線量評価はピンポイントでは正確さに欠けることが認められた。また原発事故による被曝の影響は、牛ではまだ明確には認められていない。牛の汚染評価にネックや血液を用いる場合、条件を付加する必要が認められた。牛の持続被曝の影響評価に関しては、さらに継続していく必要がある。

### 野生中・大型哺乳類の体内における放射性セシウムの蓄積状況と推移

奥田 圭¹・小寺祐二²・小金澤正昭²
¹福島大学・環境放射能研究所
²宇都宮大学・雑草と里山の科学教育研究センター

我々のグループでは、2011年の原発事故後、福島県および栃木県において、イノシシとシカを中心とした野生中・大型哺乳類の体内における放射性セシウム(以下, Cs)の蓄積状況をモニタリングしてきている.

イノシシの試料採取については栃木県那珂川町 (2011 年~) および福島県 4 地域 (浪江町・大熊町・二本松市・福島市) (2014 年~) において、シカの試料採取については栃木県奥日光・足尾 (2011 年から各年冬期にのみ) において継続的に行っており、筋肉類や臓器類、消化管内容物類、胎児等の Cs 濃度を測定している。また、福島県内においてロードキルに遭った野生哺乳類についても同様に Cs 濃度の測定を行っている。本研究会では、栃木県イノシシとシカを中心とした野生哺乳類の体内における放射性セシウムの分布や推移など、これまでに得ている知見を紹介する。

また、我々のグループでは 2015 年より、放射能汚染によって人間が移出した「帰還困難 区域」および「居住制限区域」内に形成されている野生哺乳類群集の実態調査を実施してい る. 本研究会では、これらの区域内に生息している野生哺乳類群集の特性とその形成機構に ついても併せて紹介する. 福島原発事故に伴い沈着した放射能によるβ線積算空間線量マップの作成 遠藤 暁¹, 梶本 剛¹, 田中憲一¹, グエンタットタン¹, 林 剛平², 今中哲二³, (¹広島大・院工,²東北大・加齢研、³京大・原子炉)

2011年3月11日の東日本大震災伴い発生した福島第一原子力発電所事故により広範囲の土壌が汚染された。この放射能による $\gamma$ 線の外部被曝については、多くの機関・研究者による線量推定が行われている。それに対し $\beta$ 線は、生体表面で遮蔽され全身被曝に寄与しないため、これまでほとんど評価されていない。一方、汚染地域に生息する昆虫の突然変異が報告されているが、 $\gamma$ 線線量は低く突然変異の原因とは考えにくい。体の小さい昆虫では $\beta$ 線被曝が全身被曝に相当することから、 $\beta$ 線の寄与を考慮する必要がある。

福島県全域の $\beta$  線積算空間線量を推定するため、モンテカルロ計算を用いて、土壌表面 5mm に均一に分布した Te-129m, Te-129, I-31, Te-132, I-132, Cs—134 及び Cs-137 から放出される $\beta$  線が土壌表面の空気層に付与するエネルギーを計算した。Cs-137 沈着 1000 kBq/m² に対して、Te-129m, Te-129, I-131, Te-132, I-132, Cs—134 の Cs-137 に対する沈着比を用いることで土壌表面における $\beta$  線の空間線量率を推定した。沈着比は、文部科学省が実施した 2km メッシュ調査の実測放射能濃度データを利用し、Te-129m/ Cs-137、I-131/ Cs-137 をパラメータとして、各場所ごとの値を用いた。更に、空間線量率の時間変化を各々の放射性核種の半減期に従うとして与え、時間で積分することにより積算空間線量を決定した。得られた土壌表面の積算空間線量マップを図 1 に示す。

 $\gamma$ 線の積算線量マップ同様に、福島第一原子力発電所北西方向にかけて、高線量の地域が見ら

れるとともに、福島市から中通地方にかけて、やや高い線量が得られた。福島市では、西側で葉線量が低いのに対して、と東側では高く、市内でも違いが見られた。文部科学省の測定値から推定された最大の積算 $\beta$ 線量は赤字木手七郎で

710mGy (710mSv) であった。また、同 じ Cs-137 沈着量であれば、I-131/ Cs-137 比が高いところで、積算線量 が高くなることから I-131/ Cs-137 比の高いいわき市では、Cs-137 が数 倍高い福島市東部と同程度の積算線 量が得られた。

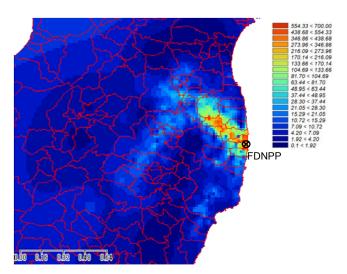


図1 事故後1年間の十壌表面のβ線積算線量マップ

## チェルノブイリ原発事故がもたらした生物影響に関する研究の紹介

今中哲二 京都大学原子炉実験所

報告者は、20年以上にわたってチェルノブイリ事故のことを調べてきたが、もっぱら事故経過、放射能放出、放射能汚染、放射線被曝といった物理的側面と、人への影響に関するデータに着目し、動植物への影響にはほとんど注意を払って来なかった。福島原発事故後、Hiyama ら (2012) のシジミチョウ、Akimoto (2014) のワタムシに関する論文、Moller ら (2013) のチェルノブイリと福島の生物影響比較論文などに刺激され、福島原発事故の影響を明らかにするためにも、チェルノブイリ事故がもたらした周辺動植物への影響を勉強し直す必要性を感じている。不十分ながら、報告者が承知している範囲でチェルノブイリ事故の周辺生物への影響に関する研究を紹介しておく。

### ◇周辺松林の枯死

チェルノブイリの周辺生物への影響として最初に顕著に現れたのは、辺松林の枯死で、事故から数週間で"ニンジン色の森(レッド・フォレスト)"が敷地直近の森に出現した。Xe、I、Te、Cs といったガス状・揮発性の放射性物質が大気放出の中心であった福島に比べ、チェルノブイリの場合は、炉心そのもので爆発が生じたため、Zr/Nb、Ba/La、Ru、Ce、Sr、Np といった不揮発性の汚染が加わり強烈な放射線被曝が生じた。Kuzbov ら(1991)によると、松林の枯死の範囲は西方約 4km、北方約 6km に及び、面積は枯死で  $44km^2$ 、半枯死で  $125km^2$ 。事故から約 2 ヵ月間のガンマ線被曝量は枯死域で 80 ~100Gy、半枯死域で 10~20Gy とされている。

#### ◇げっ歯類の異常

Goncharova ら(1998)は、1986 年から 1996 年にかけて Cs137 汚染レベルの異なるベラルーシの森 4 カ所(①8、②18、③90、④1526 kBq/m²)から野ネズミを捕獲し、Cs137 蓄積量、染色体異常、胎児死亡などの観察結果を報告している。骨髄細胞の染色体調査結果において、②~④地域では①地域に比べて大きな構造異常と倍数性変異が観察されている。興味深いことに、放射線量の低下にもかかわらず、それらの異常率は世代とともに増加する傾向が認められている。妊娠雌の観察結果は、②~④地域における野ネズミの胎児死亡率が調査期間を通じて増加していた。

#### ◇魚類の異常

Ryabov(2002)によると、チェルノブイリ原発冷却池の魚の Cs137 濃度は、1986 年に最大で 500k Bq/kg-w であった。冷却池に生息していた魚の生殖器等に様々な異常が認められ、不妊化が生じていた。ハクレン(Silver Carp)は事故後も繁殖したが、2年目、3年目には背びれや腹びれの彎曲、短縮といった形態異常が多く認められた。

そのほか、チェルノブイリ事故による周辺生物影響についての総説として、チェルノブイリ・フォーラム報告(2005)や Geras'kinら(2008)の論文を紹介する。

## 原発事故による環境異変と電磁波被曝の環境影響

2015.8.11 荻野晃也(電磁波環境研究所)

定年後 12 年が経過し原子力問題から離れて現在は電磁波問題に取り組んでいますが、広い意味での電磁波被曝の環境影響に関しても興味を持ち続けていますので、コメントをさせて頂くことにしました。

### 【1】TMI事故の際の環境異変

1979年3月に発生した米国・TMI事故の調査に行ったのは1979年の秋のことでした。京都精華大学の中尾ハジメさんたちとTMI原発周辺の住民たちとお会いし、色々な話しを聞きました。そのことに関しては「中尾ハジメ著:スリーマイル島」(インターネットで公開)に詳しく書かれています。

- ①異変現象:現地で聞いた住民の方々の証言を紹介します。「紫色の雲が低く流れてきた」「その雲によって木の上の葉が枯れてしまった」「金属の味がした」「吐き気がした」などです。
- ②住民の測定結果:米国には核戦争に備えて「核シェルター」や測定器を持っている人が多いのです。何人もの住民の方々が、事故後、丁寧に測定記録を取っておられる・・というので、その記録と測定器とを持って来て頂きました。「核戦争用の測定器」で信頼度が低く、雨が降ると目盛が増えるのでした。 ③放出・放射能:事故での放出放射能では汚染水の放出などにも問題がありますし、ヨウ素に関しては、
- 米国の公式発表と故・瀬尾健(京大原子炉実験所・助手)との間では約1000倍もの相違でした。
- ④住民の発ガン調査:住民独自でTMI 原発周辺での発ガン調査がされていました。
- ⑤異変調査:我々も異変に関する調査をすることにしました。住民の方々の意見では、事故後、「道端の草の葉が白く変色している」とのことなので、それを対象に予備調査をしましたがコントロールとに差がなく、「最近に散布した除草剤による可能性が高い」との結論になり、調査を断念しました。
- ⑥タンポポの葉の巨大化:その後、住民のオズボーンさんが「巨大化したタンポポの葉」を採集されていると言う情報が入り、オズボーンさんを日本に招待して講演会が企画されました。その講演録が「放射能の流れた町(阿吽社)」との本になっています。それ以来、「葉の巨大化」に関心を持っていました。 ⑦圧力容器内・残留水中の藻:7年後ぐらい経過した後、溶融核燃料を取り出す為に蓋を開けたのですが、藻が異常発生して中が見えず困ったそうです。この「藻の研究報告書」は出ていないように思います。

#### 【2】チェルノブイリ事故の際の環境異変

チェルノブイリ事故の環境異変に関しては今中さんが話されますので、小生は「鶏の巨大化」「葉の巨大化」の話しに限定します。加速器質量分析法での年輪中の C14 測定を計画したことも紹介します。

#### 【3】電磁波被曝の環境影響

私が電磁波問題に本気になって取り組み始めたのは、「伊方原発訴訟」が 1992 年に最高裁でも負けた 後からでした。それ以来「Ionizing Radiation(放射線)」と「Non-Ionizing Radiation(電磁波)」との 類似性に関心を持ち続けてきましたので、電磁波のことも知ってほしいと思い、この研究会でも簡単に 話しをさせて頂くことにしました。ご存知の方もおいでだとは思いますが、「環境影響」に関して小生な りに関心のある下記の項目での問題点を中心に紹介する予定です。

- ①電磁波と進化の関係:地球磁界の逆転と大絶滅、シューマン共振と脳波、地球環境と電磁波問題など。
- ②生物と電磁波の関係:生体は電気信号と深い関係があり、電界・磁界も同様です。
- ③電磁波被曝による生物への影響:鳥・虫・植物などの生物を対象とした影響論文が多数あります。
- ④影響メカニズム:放射線と同様に色々な「メカニズム」が指摘されていますが確定していません。
- ⑤各国の動きなど:最近、野鳥の激減が世界的に問題になっていますので、その動きなどを紹介します。