

放射性セシウムの生態系への影響と カイコを用いた評価系について

木野内 忠 稔*・田 中 草 太**

はじめに

2011年3月11日に起こった東日本大震災により東京電力福島第一原子力発電所(FDNPP)事故が発生し、大量の放射性物質が自然環境中に放出されたことから、被ばくによる生態系への影響が懸念されている。放出された放射性核種のなかでも半減期が約30年と長いセシウム ^{137}Cs は、生体内における動態がカリウムと非常に良くしており、また野外においては地表付近に蓄積することから、事故現場周辺に生息する生物に対する影響調査が現在も継続中である。その結果、これまで放射線感受性が低いとされていた昆虫類において形態異常等が報告されている。例えば、FDNPP事故後の2011年5月と同年9月に福島県各所で野生のヤマトシジミを採取し、その形態異常や翅の色模様異常を調べた結果、5月に採集された成虫の一部では比較的軽度の異常が確認され、最初に採取された野生の雌のF1世代は、F2世代よりも深刻な形態異常を示したことが報告された^{1,2)}。さらに9月に採集された成虫は、5月に収集された成虫よりも深刻な形態異常が観察された。これらの形態異常は温度ショックや近親交配により生じる形態異常とは異なり、人工放射線核種による外部放射線照射実験や、また突然変異誘発剤により生じる形態異常に類似していたという³⁾。

放射線の生物影響

放射線による生物学的影響に関する研究は長年に渡り研究されており、生物種によって致死放射線量に大きな差があることが分かっている。同じ

分類に属する生物でも個体やその発育段階によって放射線感受性が異なることも明らかになっている⁴⁾。哺乳類はとりわけ放射線感受性が高く、その影響は致死よりもむしろ繁殖能力への影響という形で表れる。急性被ばくの場合、哺乳類は総被ばく線量が3Gyを超えてから死亡に至るが、繁殖能力は0.3Gy未満でも影響を受ける。慢性被ばくの場合は0.1Gy/日を超えてから死亡に至り、繁殖能力は0.01Gy/日未満でも影響を受ける。昆虫類の急性被ばくの場合、総被ばく線量が10Gyを超えてから死亡に至り、哺乳類と比較して高い放射線耐性を示す。このように、これまでの放射線の生物影響評価は主に放射線(ガンマ線)の外部照射による急性致死をエンドポイントとしている。しかしながら、今回のFDNPP事故によって憂慮される生物影響は、内部被ばくを含む低線量・低線量率の長期的な被ばくである。先述のように、 ^{137}Cs は半減期が長く土壤中の粘土鉱物に吸着されやすい性質のため、土壌表層における沈着濃度が長期にわたって高く維持され植物へも移行することから、生態系への影響が非常に大きい。すなわち、これまでのガンマ線による生物への影響評価と実際の原発事故による影響評価の間には大きな乖離がある。そのため、長期的な被ばくによる致死以外の影響評価が必要とされているが、このようなデータは生物種を問わず極めて不足している。なぜなら、野生生物からデータを得ようとしても、生息環境の違いや個体差など、多くの不確定要素が障害となって定量的な評価をできないのが現状だからである。したがって我々は、モ

*京都大学複合原子力科学研究所 放射線生命科学部

**日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 環境動態研究グループ

デル動物としてカイコを用いた実験室レベルでの模擬実験系を構築することによって、低線量・低線量率の放射線の生物影響について検討することにした。

なぜカイコを用いるのか

カイコ (*Bombyx mori*) はチョウ目カイコガ科に属し、50 日程度の短いライフサイクルを持った完全変態の昆虫である。カイコが産出する絹は有史以来、世界各国で重宝されてきたことから、カイコには遺伝学的・生理学的なデータが十分に蓄積しているため、放射線の生物影響を評価するのにしばしば用いられてきた^{5,11)}。カイコの特筆すべき性質として野生回帰能力を失い家畜化されたことから、全幼虫期を通じて給餌された飼料から離れて生きていくことはできない。この特徴を生かせば、¹³⁷Cs を含む人工飼料を摂食させることによる内部・外部被ばく実験が行えることから、本研究の目的にかなった理想的なモデル生物であると考えた。

模擬環境実験の条件設定と実験方法

文部科学省による放射線量等分布マップを参照し、放射性 Cs の初期土壌沈着濃度よりも高めに設定した ¹³⁷Cs 濃度 (1,385 Bq/g 湿重量) を含む人工飼料を調製し、これをカイコに給餌することによって FDNPP 事故後の模擬的な被ばく実験とした。対照群としては、同濃度の安定 Cs 塩化物

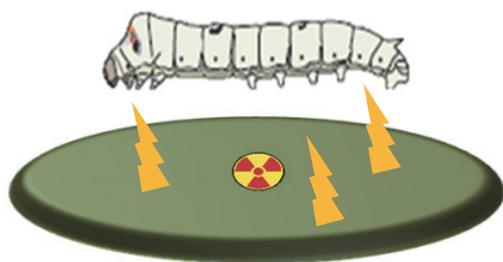


図 1. ¹³⁷Cs を含む人工飼料を摂食させることによる内部・外部被ばく実験

¹³⁷Cs を浸潤させた人工飼料 (図中の緑色の円盤) 上でカイコを飼育することで ¹³⁷Cs に由来する β 線と γ 線による影響を摂食による内部被ばくと曝露されることによる外部被ばくの両面から評価できる。

を含む水溶液を添加した人工飼料を用意した (図1)¹³⁾。すなわち、先述のようにカイコは給餌された人工飼料上で全幼虫期を過ごすので、¹³⁷Cs を含む人工飼料を与えたカイコは、摂取による内部被ばくと ¹³⁷Cs を含む人工飼料上で生活することによる外部被ばくを受けるのである。

総被ばく線量の算出について

外部被ばく線量及び内部被ばく線量はガラス線量計素子とモンテカルロ粒子輸送シミュレーションコード PHITS¹²⁾を用いて推定した。シミュレーションにおける条件として、カイコ幼虫の形状を円柱状とし、密度を 1.0 g/cm³、構成元素を水素 (10.1 wt%)、炭素 (11.1 wt%)、酸素 (76.2 wt%)、窒素 (2.6 wt%) とした。

ガラス線量計から得られたデータから、人工飼料上の吸収線量率は 0.24 mGy/日であり、β/γ 線比は 0.55 であった (表 1)¹³⁾。人工飼料周辺 (人工飼料の端から 20 mm) での吸収線量率は 0.016 mGy/日であり、β/γ 線比は 0.14 であった。したがって、カイコが卵から営繭するまでの 29 日間を人工飼料上で過ごし、3 日間を人工飼料周辺で活動すると仮定した場合、その総外部被ばく線量は 6.8 mGy と算出された。一方、5 齢幼虫の体格と ¹³⁷Cs 放射線の平均値 (表 2) から PHITS によって算出された β 線及び γ 線の内部被ばく線量率は、それぞれ 0.790 mGy/日及び 0.027 mGy/日であり、内部被ばくの場合、β 線の寄与が大きいことが明らかになった¹³⁾。幼虫期の総期間 (20 日間) が内部被ばく期間であるので、総内部被ばく線量の合計は 16 mGy と算出された。以上より、内部被ばくと外部被ばくを合わせた総被ばく線量は 23 mGy であった。

表 1. ガラス線量計素子による吸収線量率

mGy/日	γ 線	β 線	γ+β 線	β/γ
飼料上	0.15	0.084	0.24	0.55
飼料周辺*	0.014	0.002	0.016	0.14

*飼料周辺は飼料の端から 20 mm 地点

表 2. 5 齢幼虫の体重, 長さ, 横幅, ^{137}Cs 濃度, および ^{137}Cs 放射能の平均値

体重(g)	体長(cm)	体幅(cm)	^{137}Cs (Bq/g 湿重量)	放射能(Bq)
1.72 ± 0.18	4.38 ± 0.16	0.76 ± 0.08	274 ± 33.5	470 ± 79.9

形態異常の評価について

カイコの蛹の翅原基は γ 線照射による外部被ばくによってその外形が縮小することが知られている (図 2)¹⁴⁾. したがって, 翅原基の長さを測定し, 蛹の全長に対する割合を算出することによって放射線による形態異常の評価を行った¹³⁾. オスとメスの両方で調べた結果, 対照群と被ばく群との間で有意差はなかった (図 3).

まとめ

以上のように, FDNPP 事故後の周辺地域を模擬した被ばく実験を行い, 放射線の第 1 世代への生物影響 (形態異常) の評価を行った. 形態異常の指標としてカイコ蛹の翅原基長を調べたところ, 被ばく群とコントロール群間で有意差は見られなかった. この結果は, 事故後の野外調査で得られた他のチョウ目であるヤマトシジミの結果と大きく異なるものであった. 一方, 2011 年 9 月に採集されたヤマトシジミ成虫の形態異常のほうが, 同年 5 月に採集された成虫よりも深刻であることが報告されているように, 長期的な低線量被ばくの影響は第 1 世代よりも第 2 世代以降の方が大きいことが示唆されている. また, 国際宇宙ステーション・きぼう実験棟で行われた Rad Silk 計画では, 胚発生したカイコ受精卵への長期的な低線量の宇宙放射線被ばくが次世代への突然変異を引き起こすことを示唆している⁹⁻¹¹⁾. したがって, 本研究で構築した模擬実験系を用いて第 2 世代以降の放射線影響を詳細に調べる必要があると考えている.

参考文献

- 1) Hiyama, A., *et al.*, The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Scientific Reports*, 2012,



図 2. カイコの蛹とその翅原基

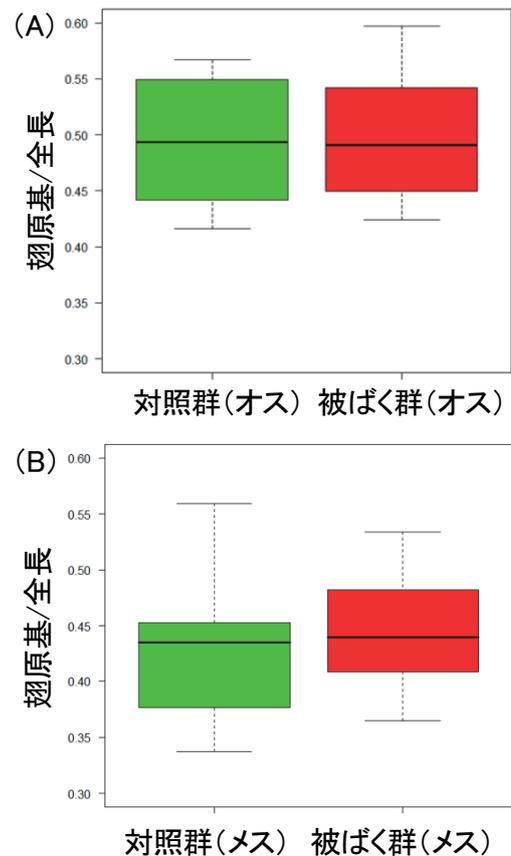


図 3. カイコ蛹の全長に対する翅原基長の比較

(A) オスの蛹の結果 (t 検定: $p=0.76$).

(B) メスの蛹の結果 (t 検定: $p=0.16$)

それぞれ縦軸が蛹全長に対する翅原基長の比を表している.

- 2: 570.
- 2) Taira, W., *et al.*, Fukushima's biological impacts: the case of the pale grass blue butterfly. *Journal of Heredity*, 2014, 105.5: 710–722.
 - 3) Nohara, C., *et al.*, The biological impacts of ingested radioactive materials on the pale grass blue butterfly. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4946.
 - 4) Whicker, F.W., Schultz, V., *Radioecology: Nuclear Energy and the Environment*, CRC Press, Boca Raton, FL (1982).
 - 5) Tazima, Y., *Genetical and Cytological Proofs of Attached Chromosomes in Bombyx Mori*. *Japanese J. Genet.* (1938).
 - 6) Shigematsu, H., Takeshita, H. Formation of silk proteins by the silkworm, *Bombyx mori*, after gamma-ray irradiation in the embryonic stage. *Journal of Insect Physiology*, 1968, 14.7: 1013–1024.
 - 7) Murakami, A., Comparison of radiosensitivity among different silkworm strains with respect to the killing effect on the embryos. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 1969, 8.2: 343–352.
 - 8) Kotani, E., *et al.*, Somatic mutation in larvae of the silkworm, *Bombyx mori*, induced by heavy ion irradiation to diapause eggs. *Journal of Radiation Research*, 2002, 43.S: S193–S198.
 - 9) Furusawa, T., *et al.*, Introduction to the proposed Space Experiments Aboard the ISS using the silkworm, *Bombyx mori*. *Biological Sciences in Space*, 2009, 23.2: 61–69.
 - 10) Furusawa, T., *et al.*, Targeted heavy-ion microbeam irradiation of the embryo but not yolk in the diapause-terminated egg of the silkworm, *Bombyx mori*, induces the somatic mutation. *Journal of Radiation Research*, 2009, 50.4: 371–375.
 - 11) Ohnishi, T., Life science experiments performed in space in the ISS/Kibo facility and future research plans. *Journal of Radiation Research*, 2016, 57.S1: i41–i46.
 - 12) Sato, T., *et al.*, Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2018, 55.6: 684–690.
 - 13) Tanaka, S., Kinouchi, T., *et al.*, Observation of morphological abnormalities in silkworm pupae after feeding ¹³⁷CsCl-supplemented diet to evaluate the effects of low dose-rate exposure. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 16055.
 - 14) Takada, N., *et al.*, A novel indicator for radiation sensitivity using the wing size reduction of *Bombyx mori* pupae caused by γ -ray irradiation. *Journal of Insect Biotechnology and Sericology*, 2006, 75.3: 161–165.