

平成 20 年 3 月 28 日

平成 19 年度「隕石・彗星内ハビタブルゾーン WG」活動報告書

代表者所属・氏名：広島大学大学院生物圏科学研究科・長沼 毅

1. 構成メンバ

氏 名	所属
長沼 毅	広島大学 生物圏科学研究科
岩月 輝希	日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
小林 克己	高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所
小林 憲正	横浜国立大学 工学研究院
三枝 誠行	岡山大学 自然科学研究科
嶋田 和人	宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部
白壁 義久	KEK 加速器研究施設
高野 淑識	海洋研究開発機構地球内部変動研究センター地球古環境変動研究プログラム地球化学研究グループ
高山 健	KEK 加速器研究施設
俵 裕子	KEK 放射線科学センター
橋本 博文	筑波大学 大学院 システム情報工学研究科
森田 洋平	KEK 国際社会連携部
保田 浩志	放射線医学総合研究所 放射線安全研究センター
山下 雅道	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学本部
吉田 英一	名古屋大学 博物館
谷内 俊範*	横浜国立大学 工学府
佐藤 修司*	横浜国立大学 工学府
藤崎 健太*	横浜国立大学 工学府
中井 亮佑*	広島大学 生物圏科学研究科

増野 陽一*	広島大学 生物生産学部
* 学生	

2. 本年度 WG 会合開催実績

(1) 第 1 回：平成 20 年 1 月 23 日

高エネルギー加速器研究機構にて、WG 内外の関係者とともに、新規開発中の全種イオン加速器（デジタル加速器）を用いた将来計画を討議した。

(2) 第 2 回：平成 20 年 3 月 14～15 日

岡山大学自然科学研究科にて、超耐久性生物「クマムシ」の飼育・実験に関する実践的な勉強会を行うとともに、将来的な放射線照射実験に関する計画策定について討議した。

(3) 第 3 回：平成 20 年 3 月 27～28 日（予定）

名古屋大学博物館にて、WG 内外の関係者とともに、微生物の放射線耐性機構を検討するとともに、放射線照射実験に関する計画策定について討議する予定である。

3. 活動目的

人類の宇宙進出において微小重力と宇宙放射線が大きな障壁になっており、特に後者は宇宙胚種（パンスペルミア）の移動、月・火星ミッション、月面基地などで大きな問題となる。これまで、比較的小線量の低 LET*放射線について、人体への影響評価や人体防護に関する医学的研究が多く行われてきた [*LET: 線エネルギー付与]。これに対し、本 WG は高 LET および低 LET 大線量放射線の生物学的影響について「遮蔽」および「耐性」の観点で考察することを主目的とし、その一環として、「非 DNA 損傷」に関する実験を行うことにした。つまり「確率的影響」ではなく「確定的影響」、いわば、「細胞の火傷」のような損傷を対象とする。平成 17 年度の WG 活動として、ゲノム DNA を持たない特殊な生物等への放射線照射実験と、それに利用し得る施

設や設備、そのための手続きや段取りなどの検討を行った。この検討自体がすでに可能性調査（feasibility study, FS）であり、実質的な研究の端緒を拓くものであり、平成 18 年度は低 LET 大線量放射線の照射実験を実施したとともに、将来的な人類宇宙進出および地球圏外生命探索に向けた応用・展開を検討した。さらに平成 19 年度は低 LET に加え高 LET の放射線の照射実験も実施し、既存の生物の放射線耐性の機作や限界について考察した。

4. 活動内容

【会合外活動】

本 WG では会合外にも電子メール等により、ハビタブルゾーンに関する考え方について、議論を行った。宇宙活動における放射線影響評価において NASA は、ブルックヘブン国立研究所に NASA Space Radiation Laboratory at Brookhaven を設置して加速器を利用きた。当 WG でもこれに倣い、のに対し、JAXA と高エネルギー加速器研究機構（KEK）および放射線医学総合研究所（NIRS）等との間に、従来より密接な連携の創出を企図するものである。

低 LET 大線量放射線に関しては、KEK の放射光施設（PF）における照射実験を継続して行った。高 LET 放射線に関しては、放射線医学総合研究所（NIRS）における重粒子がん治療装置（HIMAC）を用いた照射実験を申請し、採択された。以下に KEK-PF 及び NIRS-HIMAC を用いた照射実験を中心に、会合の様子を報告する。

【KEK-PF を利用した実験】

前年度に引き続き KEK 物質構造学研究所 放射光共同利用実験課題「ストレス耐性生物および生化学物質に及ぼす大線量放射光照射の影響に関する研究」（2006G411）において微生物への照射実験を行った。本年度は 3 回のビームタイムの配分を受けることができた。照射影響の評価としては「生体エネルギー通貨」と呼ばれるアデノシン三リン酸（ATP）及びコロニー形成菌数（CFU）の残存を調べた。

最初の 2 回（平成 19 年 6 月、10 月実施）の照射実験において照射試料としては従来の「DNA 損傷」ではなく「非 DNA 損傷」を対象にするためそのためのモデル生物として大腸菌（*Escherichia coli*）の X-1488 株及びこの株から生じるゲノム DNA を持たない minicell という細胞、代表的な放射線耐性菌 *Deinococcus*

radiodurans 及び ATP そのもの、これらの風乾物を供した。どちらも照射線量に対して指数関数的に生残 CFU が減少した。*D. radiodurans* は *E. coli* より約 100 倍の照射線量（約 56 kGy）まで生残を示した。細胞内 ATP の残存もほぼ同様の傾向を示した。また、ATP 分子そのものは照射線量に対して（指数関数的ではなく）直線的に減少した。しかし、minicell に関しては ATP が検出限界以下の試料が多く、非 DNA 損傷の評価が不可能であった。

平成 19 年度 3 回目（平成 20 年 1 月実施）の KEK-PF 実験ではこれまで使用していた放射線耐性菌 *D. radiodurans*、*E. coli* に加え放射線感受性の異なる *E. coli* 3 株と種々のストレスに耐性の芽胞形成菌 *Virgibacillus* spp. を風乾試料とし、照射を行った。芽胞とはある種の微生物が作る種々のストレスに耐性の細胞形態であり、放射線耐性の強いものも多く見つかっており長期の生存という観点からも宇宙利用におけるモデル生物としての検討に値すると考えられる。しかし、照射の結果から芽胞形成菌 *Virgibacillus* spp. は *E. coli* と同様の死滅を示し、大線量の X 線に関しては芽胞による放射線耐性は確認できなかった。

また、この実験において照射した試料より放射線耐性菌 *D. radiodurans* に元の株と異なった色を呈するコロニーが複数個確認されたので、これらを色素生産変異株として分離した。*D. radiodurans* は普通赤色のカロテノイド系の色素を持っており DNA 修復能に加えてこの色素も放射線耐性に寄与しているとの報告があることからとても興味深い株が分離できたと考えられる。

【NIRS-HIMAC を利用した実験】

前年度から計画していた放射線医学研究所（NIRS）における照射実験を以下に報告する。

「微生物の放射線耐性における生理生化学的特性に関する研究」という研究計画を作成し放射線科学総合研究所に重粒子がん治療装置（HIMAC）共同利用実験課題として申請したところ課題番号 19B353 として採用され、HIMAC の使用が認められた。本年度は HIMAC を用いた実験として加速粒子種 Fe、エネルギー 500 MeV/u、最大強度 2.5×10^8 個/s のビームが 8.5 時間配分された。また、HIMAC の照射面積は $\phi 10$ と KEK-PF BL27 の放射光の照射面積（幅 30 mm、高さ 5mm）に比べおよそ 200 倍と広がったため、より多くの放射線耐性が異なるであろう微生物種について一気に照射を行うことが可能であっ

た。照射試料には第3回KEK-PFと同じ種及び株の微生物に対して照射を行った。照射線量で2000 Gyまでの照射を段階的に行ったところ、KEK-PFにおける大線量X線照射時とは異なった結果が得られた。特徴的であったのはまず一点目として高度放射線耐性菌である *D. radiodurans* が 50~100 Gy という低線量部分において放射線感受性である *E. coli* 同様の死滅をしていたこと、二点目としては芽胞形成菌 *Virgibacillus* spp. が放射線耐性菌である *D. radiodurans* 以上の耐性を低線量部分で示した点であった。これは重粒子線であるFeイオンビームによる損傷が放射線耐性菌においては顕著であるが、芽胞形成菌は芽胞を形成することにより重粒子線に対して高い耐性を示したことが考えられる。ただし、この実験での最大線量 2000 Gy のFeイオン照射において生残が確認できたのは *D. radiodurans* のみであった。

本 WG は宇宙環境における生物の生存の可能性を探ると共に、宇宙環境における被曝量とその生物医学的影響の評価を視野に入れている。昨年度に放射線耐性特性の異なる複数種の微生物を用いて混合放射線の照射線量を個別計測ないし推定できる可能性を考案し、「放射線または紫外線測定法」、特願 2007-48073 として特許出願している。本年度の実験結果からこのように照射した線種によりそれぞれの微生物種に関して放射線耐性の違いが見られたことから宇宙における混合放射線環境下において放射線耐性の異なる微生物種を組み合わせることで線種と線量の推定ができる可能性が高まった。

【第1回会合で討議した将来計画】

KEK の加速器開発担当者から KEK-全種イオン加速器（デジタル加速器）に関しての紹介があがった。使用するイオン種の組み合わせによっては複数種のイオンを同時に照射可能であるという。混合放射線の照射に近い将来実現可能であることが分かった。

【平成 20 年度およびそれ以降の課題】

(1) 生物試料への照射実験

－KEK-PF での放射光照射実験

2008 年も引き続き KEK-PF を利用させていただく予定である。

－KEK-全種イオン加速器での重粒子線照射

現在 KEK-500MeV ブースターシンクロトロンが全種イオン加速器への改装の準備が進んでいる。H20 年の秋頃からビームがユーザーへ供給される予定である。80MeV/au の

Ar, Au が材料科学専用に供給される。この材料科学のビームラインを用いた照射実験の計画をビームコミッショニングに併せて行う予定である。

－NIRS-HIMAC の利用

2008 年も引き続き NIRS-HIMAC を利用させていただく予定である。

－凍結および凍結乾燥した試料への照射実験

(2) 既存知見の網羅的調査（インベントリー）

－放射線耐性生物

－生物過程の時定数

5. 成果

【応募】(1 件)

長沼 毅 他（「隕石・彗星内ハビタブルゾーン」ワーキンググループ）「宇宙放射線の微生物ドシメータ（MICRAD）[microbial cosmic radiation dosimeter]」「きぼう」船外実験プラットフォームの第2期利用に向けた候補ミッション。

【口頭発表】(1 件)

増野 陽一・許 玉福・中井 亮祐・長谷川 剛史・中村 慶子・幸村 基世・○長沼 毅（発表者）・伊村 智・岩月 輝希・小林 憲正・三枝 誠行・佐藤 皓・嶋田 和人・白壁 義久・高野 淑識・高山 健・俵 裕子・橋本 博文・森田 洋平・保田 浩志・山下 雅道・吉田 英一(2008) 大線量 X 線および Fe イオン照射の照射に対する放射線耐性微生物の生残に関する予察的研究. 第24回宇宙利用シンポジウム, 2007年1月17日, 日本学術会議, 東京都, プロシーディングス, 印刷中.