- tion, *Aerospace Med.*, **50** (1967), pp. 383-386.
- 4) Howard, I. P. and Templeton, W. B.: *Human Spatial Orientation*, Wiley & Sons, London, 1966.
 - 5) Howard, I. P. and Anstis, T.: Muscular and Joint-Receptor Components in Postural Persistence, *J. Exp. Psychol.*, **103** (1974), pp. 167-170.
 - 6) Howard, I. P.: The Perception of Posture, Self Motion, and Visual Vertical., Boff, K. R., Kaufman, L. and Thomas, J. P., eds., *Handbook of Perception and Human Perception*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
 - 7) Lackner, J. R.: Induction of Illusory Self Motion and Nystagmus by Rotating Sound Field, *Aviat. Space Environ. Med.*, **44** (1977), pp. 129-131.
 - 8) Melvill, J. G. and Gonshor, A.: Oculomotor Responses to Rapid Head Oscillation (0.5-50 Hz) after Prolonged Adaptation to Vision Reversal, *Exp. Brain Res.*, **45** (1982), pp. 45-58.
 - 9) Rock, I. and Halper, F.: A Control for Ocular Tracking in the Demonstration of Post-Retinal Visual Storage, *Am. J. Psychol.*, **82** (1968), pp. 425-440.
 - 10) Koga, K. and Osaka, R.: Comparison of Triple Recording Methods of Eye Movement, *Jap. Psychol. Res.*, **25** (1983), pp. 181-190.
 - 11) Koga, K.: Motion Perception and Gravity Cue, *Environ. Med.*, **36** (1992), pp. 35-41.
 - 12) Koga, K.: Difficulties of Target Motion Perception in Space, *Proceedings of International Symposium on Space Medicine in Nagoya 1992*, Matsui, N. and Seo, H. eds., 1992, pp. 195-201.
 - 13) Koga, K., Mano, T., Mohri, M., Ohta, H., Kida, M., Tsuji, K., Goto, T. and Osaka, R.: Human Space Experiments in SL-J: Preparation and Conduct, *Environ. Med.*, **37** (1993), pp. 11-20.

—特 集—

FMPT 実験結果の概要

HZE および宇宙放射線の遺伝的影響^{*1}

——ショウジョウバエに生じた突然変異——

池 永 満 生^{*2}・原 隆 二 郎^{*2}
吉 川 勲^{*3}**Key Words:** Cosmic Rays, Biological Effects of Radiation, Mutation, *Drosophila*

1. は じ め に

地球上の生物にとっては、地球の大気や磁場は宇宙線に対する遮蔽材としての役割を果たしており、余程エネルギーの高い粒子でないと地表に到達しない。その結果、地表（厳密には海面上）における宇宙線の被曝線量は年間で約 300 μGy (1 kg の物体が 1 J の放射線のエネルギーを吸収した場合が 1 Gy) とごく微量である¹⁾。この値は胸部間接撮影 1 回分の X 線被曝線量よりも少ない。このことは、大気や地磁気が存在しない宇宙空間では、宇宙放射線の量は桁違いに多くなることを意味する。とは言っても、たかだか数週間のスペースシャトル飛行における被曝線量は依然として微量であり、宇宙飛行士に何らかの放射線障害が現れることは有り得ない。しかし、21 世紀には宇宙基地に

おける長期滞在や有人惑星間飛行が現実のものとなると考えられるので、こうした際にはある程度の放射線の影響は避けられない可能性がある。従って、長期間の宇宙飛行における放射線のリスクを今から検討しておくことは、宇宙開発の安全確保のために是非必要である。

本稿では、まず 5 年から 10 年以内に実現する米国 NASA の宇宙ステーション・フリーダム計画における宇宙放射線の被曝線量と、いかなる放射線障害が問題かを簡単に解説する。ついで、宇宙放射線の遺伝的影響を実験的に調べるために、1992 年の FMPT の際に我々が行ったショウジョウバエの突然変異誘発実験について述べることにする。

2. 宇宙ステーション等の低高度軌道における放射線被曝

宇宙放射線は、その起源および地球との位置関係によって、(1)銀河宇宙線、(2)太陽粒子線、および(3)補捉粒子線の 3 種類に大別される²⁾。銀河宇宙線はエネルギーが非常に高いことが特徴である。主成分

^{*1} 平成 6 年 4 月 7 日原稿受理 Genetic Effects of HZE and Cosmic Radiation—Mutations Induced in Fruit Flies

^{*2} 京都大学放射線生物研究センター Mituo IKENAGA, Ryujiro HARA

^{*3} 長崎大学医学部 Isao YOSHIKAWA

著者紹介

池永 満生 (非会員)

昭和13年生。大阪府出身。昭和35年京都大学理学部物理学科卒業。京都大学理学部助手、大阪大学医学部助手、同助教授を経て、現在、京都大学放射線生物研究センター教授。放射線等による遺伝子損傷の修復機構の研究に従事。日本宇宙生物学会副会長、日本放射線影響学会幹事。

原 隆二郎 (非会員)

昭和43年生。茨城県出身。平成3年京都大学理学部卒業。現在、京都大学大学院人間・環境学研究科博士課程在学中。放射線や化学物質によるDNA損傷とその修復機構、特に転写反応に関連したDNA修復機構に興味を持っている。日本放射線影響学会会員。

吉川 勲 (非会員)

昭和15年生。奈良県出身。昭和37年三重大学農学部農学科卒業。国立遺伝学研究所、放射線医学総合研究所を経て、現在、長崎大学医学部原爆後障害医療研究施設遺伝学部門助教授。医学博士。ショウジョウバエを用いた突然変異誘発機構の研究に従事。日本遺伝学会、日本宇宙生物学会各会員。

は陽子と α 粒子であるが、1%程度の高エネルギー重荷電粒子(HZE; High-Z and High Energy Particles)も含まれている。地球の近くにおける銀河宇宙線の量は地球の緯度と共に増加するが、そもそも絶対量が少ないので、大気圏外における銀河宇宙線からの被曝線量は300~400 μ Gy/日程度である²⁾。

太陽粒子線の成分のほとんどは陽子で、太陽表面から絶えず放出されている低エネルギーのプラズマ(太陽風)と、表層の爆発による太陽フレアから放出される高エネルギー粒子とがある。太陽風の陽子は量的には多いが、エネルギーがたかだか1 keVと低いので被曝線量には寄与しない。これに対して、太陽フレアは稀な現象ではあるが、1回の爆発当りの被曝線量は非常に大きい。1989年10月26日の爆発でも、ロシアのミール基地の内部で数cGyの被曝が報告されている³⁾。従って、宇宙飛行では太陽フレアからの被曝をいかに避けるかが大きな問題である。

捕捉粒子線は、陽子や電子が地球の磁場に捕えられて形成する放射能の帯のことで、赤道の真上を中心にドーナツ状に地球を取り囲んでいる。内側の陽子帯の中心高度は地上約3,600 kmで、数MeV程度の低エネルギー陽子が大部分であるが、100~500 MeVの陽子も数%存在する²⁾。

高度約450 km、軌道傾斜角28.5度(1993年に51.6度に計画変更)で飛行する予定の宇宙ステーションにおける放射線被曝は、ほとんどが捕捉粒子線によるものである。宇宙ステーションに6カ月間滞在した場合の被曝線量当量(Gy単位の吸収線量と線質係数の積を線量当量といい、Svという単位を用いる)は200~250 mSvと、かなり大きな値になる⁴⁾。ちなみに、日本の国内法では原子力発電所従業員や医療関係者の職業被曝は、年間50 mSvを越えてはならないとされている。

3. 宇宙放射線に特徴的な生体影響

一般に、陽子、 α 粒子、HZEなどの比電離能(放射線生物学ではLETという言葉を用いる)の大きな放射線は、同じ吸収線量の被曝であっても低LET放射線(γ 線やX線)に比べて数倍から数十倍も大きな影響を生物に及ぼす。この何倍という比率のことをRBE(相対的生物効果比)と称するが、これは実験的に求めなければならない。RBEは粒子の電荷、エネルギー、線量率などに依存するだけでなく、死亡や突然変異誘発などの種々の放射線影響のなかで何に着目するかによって異なり、更に実験に用いる生物種によっても違った値となる複雑な生物学的パラメーターである⁴⁾。一方で、多くの放射線影響について、種々の粒子ごとにエネルギー別のRBEを実験的に求めることは不可能である。従って、HZEのRBEについてはほとんど分かっておらず、これが宇宙放射線のリスクを推定する上で問題点として残されている。

放射線の種々の影響のなかで、脱毛、白血球数の減少、死亡などのいわゆる急性放射線障害は、ある一定の閾値線量以下の被曝では現れない。これに対して、放射線で遺伝子が増加してしまったために親と違った性質を持った「変わりもの」が生じる突然変異は、線量に比例して増加する。すでに述べたように、宇宙ステーション等における被曝線量はそれ程多くはないので、宇宙での放射線影響としてまず考えておかねばならないのは突然変異のリスクである。

放射線による発癌に線量の閾値が存在するか否かは議論の分かれる所であるが、放射線障害予防の立場からは国連科学委員会なども閾値は無いとしている。実際に、少なくとも高LET放射線による発癌に関しては、閾値が無いと見える報告が多い。癌は世の多くの人々の関心事であり、宇宙に滞在する人自身の問題でもあるので、我々は宇宙放射線の影響研究の中で、最も重要なことは発癌のリスクを明らかにすることだと考えている。その主な理由は、HZEなどの高LET放射線による発癌のRBE、特に低線量率被曝の際の

RBEに関しては、我々はほとんど何もデータを持ち合せていないからである。

4. エンデバーによる宇宙飛行でショウジョウバエに生じた突然変異

宇宙放射線の遺伝的影響を調べるために、ショウジョウバエの突然変異を観察した。ショウジョウバエを用いた最大の理由は、突然変異はごく稀にしか起こらない現象なので、バックグラウンドよりも有意に多い突然変異個体を得るためには、可能な限り多数の個体を搭載することが必須条件となるからである。実際には、伴性劣性致死突然変異と翅に生えている毛の形態に関する体細胞突然変異との2種類の突然変異を解析したのであるが、本稿では紙面の都合で前者だけを取り上げることにする。

4.1 伴性劣性致死突然変異とは ショウジョウバエは約1万個の遺伝子を持っており、これらの遺伝子は染色体の上に分布している。多くの遺伝子は1個の細胞にペアで2個ずつ存在し、1個は母親由来でもう1個は父親由来のものである。個体の生存に必須の酵素やホルモンの遺伝子であっても、個体の生存のためには1個の遺伝子の働きで十分な場合が多い。従って、2個ずつ存在する常染色体上の遺伝子については、一方の遺伝子に突然変異が生じてこれが働かなくなっても、もう一方の遺伝子の機能によって細胞は生存することが可能である。ところが性染色体の場合には、雌は2本のX染色体を持っているが雄は1本しか持たない。このX染色体上の生存のために重要な遺伝子に突然変異が起これば、子孫の雌は生存できるが雄は生きられないことになる。このような突然変異を伴性劣性致死突然変異という。ショウジョウバエのX染色体には、そこに突然変異が起これば劣性致死となる遺伝子が約800個存在する⁵⁾。

4.2 実験の方法 ショウジョウバエの野生株であるCanton-Sと放射線に高感受性のmei-41株の2系統についてそれぞれ200匹の雄成虫を搭載し、精子などの生殖細胞のX染色体に起こる劣性致死突然変異

を観察した。8日間の宇宙飛行から帰った雄バエは、標識遺伝子yを持つために体色が黄色の雌バエと交配した。この交配によって、宇宙バエのX染色体は必ず娘のハエに受け継がれる。仮に宇宙バエの精子のX染色体上の遺伝子に劣性致死突然変異が生じていたとしても、娘バエは2本のX染色体を持っているので元気に生きている。次に、この娘バエを黄体色の雄と交配して孫の代のハエを生育させた。孫の代では、致死突然変異が生じているX染色体を受け継いだ雌は生きているが、雄は発生の途中で死亡する。具体的には、一組の娘バエ夫婦から生まれ育ってきた孫の代のハエの中に、20匹以上の黄体色の雄(祖母由来のX染色体を持っている)が存在するにもかかわらず、黒っぽい体色の雄(宇宙飛行をした祖父からX染色体を受け継いでいる)が1匹も居ない場合に、宇宙飛行をした雄の精子のX染色体に伴性劣性致死突然変異が生じていたと判定した⁶⁾。

なお、この実験においては、同じ親から生まれてきた雄成虫を二つのグループに分けて、一方をエンデバーに搭載し他方を地上対照群として用いた。

4.3 実験結果と考察 得られた伴性劣性致死突然変異の頻度を第1表に示す。調査した染色体数とは、孫の代のハエを産ませた娘バエの匹数と同じである。野生株の飛行群で22本の致死染色体を検出したが、これは22匹の娘バエからは黒体色の雄バエが全く生まれてこなかったことを意味する。表から明らかな如く、野生株の飛行群における劣性致死突然変異頻度は地上対照群に比べて2倍高かった。また、放射線高感受性株では飛行群の方が3倍高い値を示した。

熱ルミネッセンス線量計と飛跡検出フィルムを用いて測定された飛行中の宇宙放射線の線量当量は約2 mSvであった。このような微量の放射線だけでは、2～3倍も高い突然変異を誘発するとは考え難い。そこで、一つの可能性は宇宙放射線と微小重力との相互作用である。約10年前にドイツのグループはスペースシャトルに持込んだ遠心器で1G環境を作り、セイヨウナナフシムシの胚の発生を微小重力環境と比較し

第1表 宇宙実験における野生型(Canton-S)系統と放射線高感受性(me-41)系統における劣性致死突然変異の頻度

系統	宇宙飛行群			地上対照群		
	調査した染色体数	致死染色体数	頻度(%) ±S.E.	調査した染色体数	致死染色体数	頻度(%) ±S.E.
Canton-S	9,176	22	0.24±0.051*	9,177	11	0.12±0.036
mei-41	9,355	37	0.40±0.065**	8,975	12	0.13±0.037

* 地上対照群より5%レベルで有意差がある。

** 地上対照群より1%レベルで有意差がある。

た。その結果、微小重力下では HZE 被曝による奇形の頻度が著しく増幅されることを報告した⁷⁾。仮に、このような宇宙放射線と微小重力の相乗効果が普遍的な現象だとすると、これは由々しき大問題である。このことを明らかにするためにも、今後は宇宙ステーション等に搭載した遠心器を用いて、多くの生物種についてのさまざまな放射線の影響を指標にした宇宙実験を繰り返すことが是非共必要である。

我々の実験は、やっと解析が終ったばかりなので、学術論文としては未発表である。体細胞突然変異の結果は紙面の都合で割愛したが、簡単な要旨については別の報告書⁸⁾を参照して頂きたい。

参考文献

- 1) 国連科学委員会報告書 (UNSCER Report) (1977).
- 2) Curtis, S.B.: Space Radiation Biology and Related

- Topics, Academic Press, New York, 1974, pp. 21-99.
- 3) タス通信記事: 1989 年 10 月 26 日付.
- 4) 池永満生: 京大原子炉テクニカルレポート, KURRI-TR-338 (1990), pp. 68-78.
- 5) Abrahamson, S., Wurgler, F. E., DeJongh, C. and Meyer, U. H.: How Many Loci on the X-Chromosome of *Drosophila melanogaster* Can Mutate to Recessive Lethals, *Environ. Mutagenesis*, 2 (1980), pp. 447-453.
- 6) Yoshikawa, I., Ayaki, T. and Ohshima, K.: Comparative Studies of Dose-Response Curves for Recessive Lethal Mutations Induced by Ethylnitrosourea in Spermatogonia and in Spermatozoa of *Drosophila melanogaster*, *Environ. Mutagenesis*, 6 (1984), pp. 489-496.
- 7) Buckner, H., Facius, R., Horneck, G., Reitz, G., Graul, E. H., Berger, H., Hoffken, H., Ruther, W., Heinrich, W., Beaujean, R. and Enge, W.: Embryogenesis and Organogenesis of *Carausius morosus* under Spaceflight Conditions, *Adv. Space Res.*, 6 (1987), pp. 115-124.
- 8) 池永満生: HZE および宇宙放射線の遺伝的影響, ふわっと '92 宇宙実験成果報告会予稿集, 1993, pp. 140-142.

一 特 集

FMPT 実験結果の概要 無重力環境での知覚-動作機能の研究^{*1} ——手動制御特性の研究——

多 田 章^{*2}・岡 部 正 典^{*2}

Key Words: Manual Control, Human Factor, Space Experiment

1. 序 論

乗り物や機械を人間が操縦する能力は、宇宙でも地上と同じであろうか¹⁾?

宇宙における人間の操縦特性を直接計測した研究は行われていないが、Nicogossian と Pool²⁾は、これまでの宇宙飛行で得られた知見をまとめ、人間の諸生理機能が軌道飛行の 0 G 環境にどのように順応し、帰還後の 1 G 環境にどのように再順応するかを図式的に表現した。前庭系は 0 G 環境に 1 週間前後で順応し、帰還後の 1 G 環境にも同程度の時間で再順応すると考えられている。体液については、0 G 環境に入ると体の頭部方向に分布が偏り、いわゆるムーンフェイスになるが、次第に体液量が減少することが知られている。

1 G 再順応は前庭系よりも速い。このほか骨内カルシウムの減少や抗重力筋の衰えが、より緩慢、長期的な

著 者 紹 介

多田 章 (正会員)

1946 年生。東京都出身。1975 年東京大学工学系大学院航空学博士課程修了。同年航空宇宙技術研究所入所。現在新型航空機研究グループ第 2 研究グループリーダー。手動制御特性、STOL 実験機操縦系統機能試験、及び HOPE 等の研究に従事。

岡部 正典 (正会員)

昭和 10 年生。京都府出身。昭和 35 年京都大学教育学部心理学コース卒業。同年航空技術研究所入所。現在制御部長。航空安全に係わる人間工学的研究に従事。日本航空宇宙学会、日本人間工学会、日本宇宙航空環境医学会各会員。

^{*1} 平成 6 年 4 月 21 日原稿受理 Manual Control in Space—Research on Perceptual-Motor Functions under Microgravity Condition

^{*2} 航空宇宙技術研究所 Akira TADA and Masanori OKABE