

宇宙環境と生命大進化 ver4.1

戎崎俊一（理化学研究所）

1. はじめに

地球には、太陽系外の宇宙空間から銀河宇宙線が降り注いでいる。また、太陽風、地球磁場、そして大気は、その地球生存圏への侵入を妨げる働きをしている。外からの宇宙線量の増減と、太陽風および地磁気の増減の結果、地表面での自然放射能は大きく増減し、地球史の中で重要な役割を演じた可能性がある。

2. 銀河宇宙線

宇宙線は約 100 年前の 1911 年に、オーストリアの物理学者ヴィクター・ヘスの気球観測により発見された。この発見によりヘスはノーベル賞を 1936 年に受賞している。宇宙線の正体は、高エネルギーの荷電粒子である。荷電粒子は銀河の中で発生する超新星爆発の衝撃波で大量に作られている。このことが最近の γ 線観測によって確認された。これらの太陽系外の銀河系空間で作られる数 GeV 以上のエネルギーをもつ宇宙線を特に銀河宇宙線と呼んでいる。

2.1. 地球の気候に対する影響

宇宙線は、地球大気に影響を与えている。その増加は、気候の寒冷化をもたらす。太陽活動が不活発で、銀河宇宙線降下量が高かった 13 世紀-19 世紀は、気候が寒冷に推移した小氷河期であった。銀河宇宙線が気候の寒冷化をもたらす機構については、議論が続いている。Friis-Christensen and Svensmark(1)は、宇宙線による電離でできた正負のイオンにより、対流圏における硫酸エアロゾルの核生成が助けられ、雲の被覆率が変化して、宇宙線増大時に地球の気候が寒冷化する可能性を指摘した。また、Kuroda and Kodera は、太陽紫外線による成層圏へのエネルギー堆積が、成層圏の温度に影響を与え、成層圏の風系を変え気候変動の原因になると指摘した (2)。Melo, Semeniuk, and Fromichev(3)は、大気循環シミュレーションを実施し、宇宙線自身によるエネルギー堆積も成層圏における化学反応と風系の変化に寄与していると報告している。

2.2. 生体に対する影響

銀河宇宙線は、生体内では、電離を通じて活性酸素分子を作りだし DNA 損傷の原因となる。ただし、現在の地上における銀河宇宙線による電離率では、生体が自ら作り出す活性酸素やその他の化学物質による DNA 損傷の方が多いと考えられている。ただし、高山、成層圏内を飛行する旅客機、宇宙ステーションなどでは、数倍から百倍、宇宙線被ばく量が多く、特に旅客機搭乗員や宇宙飛行士の被曝が心配されている。

また、46億年の地球の歴史の中では、太陽風の駆動力である太陽の磁気活動の弱体化や、地磁気の低下、さらには超新星が作った爆風の中に太陽系が飛び込んでしまうなどの地球史・宇宙史上のイベントの結果、宇宙線量が数倍から千倍近く増加した時期があった(4, 5)。このような時期には、宇宙線が主要な DNA 損傷原因になっていたはずである。

このような状況で遺伝子の重複が進み、生物進化が大幅に加速した可能性がある。遺伝子の重複は、一部の遺伝子を選択圧から解放しその分子進化を加速する(6, 7)。実際に遺伝子の重複とゲノム DNA の増加・倍加によって新機能の遺伝子や新しい種の成立と進化が進行したことを示す例が豊富にある。例えば Ingam(8)は、人のヘモグロビンの α 鎖、 β 鎖、 γ 鎖のアミノ酸配列を調べることにより、これら三つのペプチド鎖をコードする遺伝子が遺伝子重複により出現して来たことを示した(7)。Kelles, Birren, and Lander(9)は、イーストのゲノム配列を調べ、太古に全ゲノム重複が起こり、対をなす遺伝子の分子進化が加速され、イーストが新しい種として成立する契機となったことを示した。真核生物においては、いろいろな反復配列が存在しており、下等真核生物で全ゲノムの10%、高等動物で50%、高等植物では80%にも達している。中には100万回ものコピーを持つ反復配列も存在する。Britten and Kohne(10)は、このような高度反復配列が、比較的短い進化時間の間に、一つの原型塩基配列が急速に何回も重複することによって生じたと考えた。この考えは、Southern(11)によって、強力に主張された。現在ではこれらの多くがレトロポゾン由来であることが判明しており、この短時間におこる急速な遺伝子重複は、宇宙線量の増大によって引き起こされた可能性がある。

宇宙線のような電離放射線による DNA 二重鎖切断の誘起と修復プロセス起動の頻発は、不等交差の頻度を上昇させる。不等交差は、遺伝子の欠失と重複を同時に起こすが、重要遺伝子の欠失は重篤な障害を生む確率が高いので、結果として次世代の遺伝子の重複が進む。実際、Sankaranarayanan and Wassom(12)は、体細胞における DNA 修復機構の解析と遺伝子欠失による疾患の遺伝子解析による情報を統合し、不等交差による遺伝子の欠失と再配列が放射線被ばくによる遺伝子障害の最も大きなリスク因子であると結論している。

一方で、トランスポズンを発見したマックリントック自身が1984年に、遺伝子に対するストレスが、トランスポゾン活性を誘起する可能性を指摘している(13)。実際、電離放射線照射がトランスポゾンの転移活性を上昇させた例がある。Koga(14)はマウス精源細胞に5Gyのエックス線を照射し、DNA型トランスポゾン Tol2 の転移が誘発されたと報告した。転移頻度は挿入で1.1コピー/配偶子/世代、エクシジョン頻度は0.9コピー/配偶子/世代であって、自然状態での推定値の200倍近い値であった。また、Ishiyama et al. (15)は、非致死線量放射線

で損傷を受けた後に再生した骨髄細胞で、レトロトランスポゾン Intracisternal A-Particle (IPA)の RNA 量が有意に増加したと報告している。

3. 太陽系内の環境変動による宇宙線降下量の変動

宇宙線の生存圏への侵入は、太陽活動と地球磁場、地球大気によって妨げられている。太陽の黒点やフレアをはじめとする磁気活動が活発だと太陽風が強くなりまたその磁場も強い。その結果、ヘリオスフェアが拡大し、太陽系外からの荷電粒子の侵入を妨げる。したがって、太陽活動磁気活動が弱いと宇宙線降下量が増大する。太陽の磁気活動は約 11 年周期で強弱を繰り返しているが、それにより地表面における宇宙線による電離量は約 20%の変動を被っている。

また、数百年の時間スケールで、数十年間黒点がまったく見られず、太陽の磁気活動が極端に弱くなる現象が観測されている。これらの時期には、宇宙線降下量が増加していることが古木の年輪の C14 測定により明らかになっている。それが頻発した 13 世紀から 19 世紀は小氷河期と言われ、寒冷な気候が支配的だったとされている。このような現象は、3 世紀や前 8 世紀にも起こったと推定されており、中国やヨーロッパにおける民族の大移動と王朝・帝国の衰退の原因になった可能性がある。最近の 50 年は、この 2000 年間でも最高レベルの太陽活動が続いている (16)。最近問題となっている気候の温暖化の原因は、工業的に発生する二酸化炭素より、むしろこの活発な太陽活動である可能性が指摘されている。

さらに、千年以上の時間尺度では、地磁気の強さが変動している。地磁気は、地球の液体核におけるダイナモ機構によって生み出されている。地磁気はこのダイナモ機構により時々その極性が反転する。この反転期には、磁場は弱くなっていると想定され、宇宙線降下量は増大するはずである。Kitaba et al.(17)は、大阪湾の堆積物データ解析から、地磁気強度と気候の相関を見出しており、その寒冷化イベントは松山・ブルネ地磁気逆転期に対応するとしている。

また、双極磁場がなくなるエクスカージョンが反転より頻繁に見出されている。この時にも、同じ理由で宇宙線降下量が増大することが予想される。ブルネ期においても Mono Lake (32ka-34ka)、Lashamp (39-40ka)、Blake (115-122ka) などのイクスカージョンイベントが報告されている。人類自身の進化とともに、栽培植物の進化にイクスカージョンによる一時的な宇宙線増加が関与した可能性があり、イクスカージョンイベントとそれぞれの成立時期の比較を試みる必要がある。

4. 太陽系外の環境変動による宇宙線降下量の変動

我々の天の川銀河は、半径約 10kpc、厚さ約 200pc の円盤形をしており。我々の太陽系は銀河中心からの距離約 8kpc、ほぼ円盤の中心線上に今は位置している。円盤には渦巻き腕があり、腕の中は、大質量星、暗黒星雲、超新星残骸が

集中している。太陽系は、銀河の中心の周りに円運動をしており、約二億年で一周する。また、約 1.4 億年に一回渦巻き腕を追い越すように通過する。渦巻き腕の中は、平均で銀河宇宙線量が 5 倍程度高いと推定されている(18)。磁場が強く、またその起源である超新星残骸も集中しているからである。また、太陽系は銀河面に垂直な方向に周期 6 千万年の単振動している。つまり、3000 万年に一度銀河円盤を通過する。さらに銀河は北方にあるおとめ座銀河方向に運動(落下)していることが分かっている。この運動のために、高エネルギーの宇宙線が銀河の北半分で高い。単振動で北方にふれるときは最大約 5 倍銀河宇宙線が増える(19)。

これら二つの効果で、銀河宇宙線は 6000 万年と 1.4 億年の周期で変動している。これらの周期は、Rohde and Muller (20)によってコンパイルされた化石海洋生物の多様性の時間変化にも現れている。大量絶滅の周期とこの宇宙線の変化の周期の関係が議論されている。

太陽系は時々、超新星爆発の爆風に遭遇する。爆風に遭遇する頻度は付録 1 に計算したように、10 億年から 3 億年に一度程度である。このとき銀河宇宙線量は爆風の強さと状況により、ヘリオスフェアが地球軌道もしくはその中まで縮小し、外部にある銀河宇宙線が自由に入り込めるようになる。この結果、宇宙線降下量が現在の値の百倍から千倍になり、その状況は百年から 1 万年続くと想定される (4, 5)。

また、多くの超新星残骸は、濃い暗黒星雲(分子雲)のすぐそばにある場合が多く、超新星と遭遇しているときは同時か前後して分子雲に遭遇している可能性が高い。分子雲は密度が百倍から千倍高いので、ヘリオスフェアがやはり大幅に縮小する(21, 22)。暗黒星雲には多量の星間ダストが存在しており、その地球への降着率も 100 倍から 1000 倍になるという見積もりがある。このとき、成層圏に漂う星間ダスト起源のアεροゾルによって、太陽光が遮られ、気候の寒冷化も同時に引き起こす可能性がある(22)。

さらには、珪酸に富むマグマ(珪酸濃度>63%)の火山噴火は、銀河宇宙線の増加によってトリガされている可能性がある(23)。珪酸に富む噴火は大規模な爆発を起こして、成層圏に多量の硫化化合物を注入し、アεροゾルを増加させる。このアεροゾルが日射をさえぎるために、気候の寒冷化を引き起こす。

これら 3 つ(宇宙線増加による雲被覆率の増加、星間起源のダスト増加、火山噴火)の因子が重なって、地球の気候が極端に寒冷化し、全球凍結をもたらしたと考えられる。一方で、銀河宇宙線の増加は、不等交差の増大とレトロボゾンの活性化を促して、遺伝子の重複を進め、ゲノムの分子進化を加速して、気候回復期における生物の爆発的進化の準備をした可能性がある。

Svensmark(24)は、真核生物の誕生と多細胞生物の発生の二つの生物進化上

の大進化の直前に、全球凍結イベントが頻発している時期があり、その時同時に銀河円盤内の星の形成率が高かった点を指摘し、両者の間に何らかの関係があった可能性を指摘している。この時期は、超新星残骸と分子雲も多数存在していたはずであり、上記のような機構で全球凍結と生物の爆発的な進化が演出されたと考えることができる。

5. まとめ

これまでみてきたように、地球環境は宇宙に対して開いており、宇宙環境の影響を受ける。地球史上の重要イベントは、宇宙環境によって説明できる可能性がある。以下に、急速に進みつつある当該分野でやるべきことをまとめてみる。

1) 超新星起源固体微粒子探索

超新星残骸遭遇に当たっては、超新星によって汚染された特有の化学組成・アイソトープ比をもった固体微粒子の降着があった可能性がある。堆積物の中にそれらを見出せば、超新星残骸との遭遇の証拠になる。

2) 基礎放射線生物学の推進

電離放射線がゲノムに与える影響についての情報は、まだ驚くほど不完全である。今や、各個体について全ゲノム解析ができるようになった。低レベル（即死ではない）放射線の生体への影響を全ゲノム解析などの新しいテクノロジーで解明することで、過去の生物の大進化の実態の理解が進む。

3) 分子進化理論の推進

これまでの分子進化理論は、暗黙のうちに遺伝子変異率は一定として作られてきた。一方、その一つの原因である銀河宇宙線は、時間とともに大きく変動することが明らかになってきた。これまでの進化学の理論は、地球史におけるさまざまな相の一断面を切り出しているに過ぎないかもしれない。

4) 分子進化上と地球史上のイベントの対照

遺伝子およびゲノム情報の解析から、トランスポゾンバースト、ゲノム倍加などの生物の分子進化上のイベントの発生年代が推定されている。これと、地球史上のイベントとの対照を進め相互の連関を明らかにする。

5) 自然放射能の地域格差と生物進化の地域特性の対照

銀河宇宙線の降下量は、磁気緯度と高度によって違う。また、場所によってはラドンや岩石中の放射性同位元素の含有量が違う。これらの自然放射能の地域的な違いと生物進化の地域特性の対照比較を進める。

参考文献

- 1) Svensmark, H. and Friis-Chritensen, E., 1997, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 59, p. 1225-1232.
- 2) Kuroda, K. and Kodera, Y. 2002, *Journal of geophysical Research*, 107, 4749.
- 3) Melo, S.M.L., Semeniuk, K., and Fomichev, V., 2010, presentation at COSPAR2010, D21-0035-10.
- 4) Clark, D.H. MacCrea, W.H., and Stephenson, F.R. 1977, *Nature*, 265, 318-319.
- 5) Kataoka, R. 2010, private communication.
- 6) Ohno, S., 1970, *Evolution by Gene Duplication*, Springer-Verlag, Berlin.
- 7) Taylor, S. and Raes, J. 2004, *Ann. Rev. Genet.*, 38, 615-643.
- 8) Ingram, V.M., 1963, *The Hemoglobins in Genetics and Evolution*. Columbia, University Press, New York.
- 9) Kellis, M., Birren, B.W., and Lander, E.S., 2004, *Nature*, 428, 617-624.
- 10) Britten, R.J. and Kohne, D.E., 1968, *Science*, 161, 529-540.
- 11) Southern, E.M. 1975, *J. Mol. Biol.* 94, 51-69.
- 12) Sankaranarayanan, K. and Wassom, J.S., 2005, *Mutation Research*, 578, 333-370.
- 13) McClintock, B., 1984, *Science*, 226, 792-801.
- 14) Koga, K. 2003, *Protein Nucleo and Enzyme*, 49, 13, 2103-2110.
- 15) Ishihara, H. Tanaka, I. Furuse, M. and Tsuneoka, K. *Radiation Res.*, 153, 392-297, 2000.
- 16) Usoskin, I.G., Solanki, S.K., and Kovaltsov, G.A., 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 471, 301-309.
- 17) Kitaba, I. et al. 2010, *Japan Geological Union 2010*, MIS013-04.
- 18) Shaviv, N. and Veizer, J. 2003, *GSA Today*, 13, 4-10.
- 19) Medvedev, M.V. and Melott, A.L. 2007, *Astrophys. J.* 664, 879-889.
- 20) Rohde, R.A. and Muller, R.A., 2005, *Nature*, 434, 208.
- 21) Begelman, M.C. and Rees, M.J. 1976, *Nature*, 261, 298-299.
- 22) Pavlov, A. et al. 2005, *Geological Research Letters*, 32, L03705.
- 23) Ebisuzaki, T. Miyahara, H. Kataoka, R. Sato, T. and Ishimine, Y. submitted to *Gondwana Research*.
- 24) Svensmark, H. 2007, *Astronomy & Geophysics*, 48, 1. 18-1.24.

付録 1 : 太陽系近傍における超新星の発生頻度について

超新星には大きく I 型と II 型の二種類ある。天の川銀河のような普通の銀河では、それぞれ 100 年に一回ずつ起こるとされている。I 型は古い種族の星で起きるとされている。つまり、銀河ハロー全体で起こる。II 型は若い世代の星で起きるので、若い星が生まれる円盤内に集中して発生する。太陽近傍のような円盤内での発生頻度は II 型に比べて I 型は桁違いに小さいと考えられる。ここで、銀河円盤の薄い円盤成分の星の密度に比例して II 型超新星が起きると仮定する。天の川銀河の薄い銀河円盤の成分は、以下のようにあらわされる(Jelte et al. 2010 ApJ, 714, 663-674)。

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{r}{L} - \frac{z}{H}\right)$$

ここで、 r :銀河中心からの距離、 z :銀河円盤中心からの高さ、 L と H はスケールハイトで、 $L=2.6 \times 10^3$ pc、 $H=2.5 \times 10^2$ pc とされている。この関数を空間積分すると

$$A = 2\pi\rho_0 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{r}{L}\right) r dr \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{z}{H}\right) dz = 4\pi\rho_0 HL^2$$

となる。太陽系近傍の局所的な超新星頻度は、 $A=10^{-2}$ SN2/yr、 $r=8000$ pc、 $z=0$ とすれば

$$\rho = \left(\frac{A}{4\pi HL^2}\right) \exp\left(-\frac{r}{L} - \frac{z}{H}\right) = 2.1 \times 10^{-14} \text{ SN2/yr/pc}^3$$

と計算できる。太陽から半径 d pc 以内の球内で超新星が起こる頻度 $F(d)$ は

$$F(d) = 8.8 \times 10^{-11} \left(\frac{d}{10 \text{ pc}}\right)^3 \text{ SN2/yr}$$

つまり、太陽系から 10pc 内に起こる頻度は、100 億年に 1 回。30pc 以内では、その 27 倍で約 3 億年に 1 回ということになる。