Role of Radiation on chemical evolution at the universe Kazumichi Nakagawa Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University 3-11 Tsurukabuto, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan nakagawa@kobe-u.ac.jp

(Received September 13, 2009; Accepted September 16, 2009)

(Abstract)

Radiation might play an important role during chemical evolution in space. We discuss here the role of circularly polarized vacuum ultraviolet radiation to prepare the enantiomeric enrichment of amino acids.

(Keywords)

Amino acid, chemical evolution, radiation, ultraviolet radiation, circularly polarized soft X-ray, enantiomeric enrichment

宇宙での化学進化における放射線・ 紫外線の役割 中川和道 神戸大学 大学院 発達環境科学研究科 〒657-8501 神戸市灘区鶴甲 3-11 nakagawa@kobe-u.ac.jp

1. はじめに

地球の生命の起源を考えるとき, 生命体を つくる材料である有機物が宇宙から運ばれ たのか地球で生成されたのかあるいは両方 が(どの程度)寄与したのか、現状ではまだ 定かではない.現在までに我々が得た手がか りとして, 隕石の加水分解生成物からアミノ 酸が発見されたこと[1]は宇宙においても生 体分子が生成した可能性を示し、近年それら のアミノ酸に見出されたエナンチオ過剰[2] は宇宙においてもカイラリティーの始まり の引き金が引かれたこと, すなわち不斉反応 が宇宙で起きたことを示唆する.不斉反応の 誘因となる紫外線領域の円偏光は地球上で は存在しないので,我々は,宇宙で生成した アミノ酸が地球にたどりつくまでの間で不 斉反応を起こしてわずかな偏りを獲得し,地 球にたどりついたあとで大きな偏りを実現 していくうえでの「偏りのタネ」となり、地 球由来の有機物や宇宙由来の有機物と反応 して化学進化が進行したと考えている.

ここでは放射線・紫外線が宇宙での化学進 化において果たした役割を以下の諸点から 検討する.

2. 宇宙における化学進化の条件

宇宙環境の特徴として、高真空、低温、高 放射線場、などがあげられる.まず低温についてふれると、宇宙の背景輻射のスペクトル は2.7 Kの黒体輻射に相当するから、星間塵 の表面の温度は2.7 K付近であると考えて化 学進化のシナリオを検討するのが通例であ ろう.だが、宇宙の特徴はまた際立った不均 一さにあり、温度についても例外ではない. 恒星の周辺の天体表面ではある程度の温度 となることが知られている.例えば、太陽は

プランク放射機構によって 3.8X10²⁶ J/s のフ ラックスで電磁波を放出しており, 各天体は この電磁波の放射をエネルギー流入成分と し,一方プランク放射機構による赤外線放出 によってエネルギーを発散する. 各天体の表 面温度は両者による平衡によって決まると いう仮定のもとに太陽系の各天体の表面温 度の理論値を計算する[3]と、大気がない場合でも地球 255 K,火星 250 K,木星 135 K,海 王星38Kとなって背景輻射の温度2.7Kより もかなり高く、大気による温室効果を考慮す るとさらに高くなる.分子の電子状態を励起 し化学反応を起こして化学進化につながる 可能性をもつ紫外線領域の光について考え ると,太陽からある程度の紫外線フラックス が期待できる領域では同時に可視光や赤外 線もやってくるので、温度はさほど低くはな いと仮定しても大きな間違いにはならない と考えられる.

宇宙における化学進化のエネルギー源は 何であろうか?温度が高いところでは熱が 化学反応のエネルギーとなるが,温度が低い 場所では水素原子のトンネル反応などによ って駆動される反応が主体となるであろう. 上述のように太陽系の各天体の表面温度は トンネル反応が主体となるよりは高い値と なる. 土星の衛星タイタンの平均表面温度は 94 K 大気圧は 1.6 気圧であり,大気の 2%を 占めるメタン(融点 90 K,沸点 111 K)が液 体で存在し,気化し,流動し,雨として降下 していると考えられている. 我々は水を溶媒 積してきたが,メタンのような非水溶媒の化 学の知識はまだ乏しく,今後に残る課題のひ とつである.

宇宙における化学進化のエネルギー源の ひとつに放射線があげられる. 放射線とは狭 義には物質を電離し得る電離放射線を意味 し, 電磁波と粒子線に分けて議論されること が多いが、ここでは電磁波(光)のうち、電 離は起こさないが化学反応を起こし得る紫 外線なども (広義の) 電磁放射線に含めて考 える. 電磁放射線の化学作用はその波長領域 により光化学と放射線化学に分けられるが, 両者とも熱化学反応よりも高いポテンシャ ル障壁を一気に越えて化学反応を起こすこ とが可能であるという特徴をもつ.光化学反 応は化学反応に寄与する電子状態に共鳴励 起を行うことによって引き起こされる.反応 の収量は吸収光子数に比例し,この比例定数 を光化学反応の光量子収率と呼び,単位は (反応イベントの数/1吸収光子)で表す. 一方,放射線化学反応では共鳴励起は起きず 光電効果などによって生じた一次電子とそれによって生じた二次電子による反応が主 体となるので,反応の収量は吸収された放射

Viva Origino 37 (2009) 24 - 30 © 2009 by SSOEL Japan

線(例えばX線,γ線)の光子数のみならず そのエネルギーにも比例するという特徴を もつ. そこで放射線化学では反応の収率を 100 eV のエネルギー吸収あたりで数えてこ れを G 値と呼び, G 値=(反応イベントの数 /吸収エネルギー100 eV) で表す. 宇宙環境 で化学進化のエネルギー源は紫外線からガ ンマ線にわたるので,その反応の収率を表す のに紫外線に対しては光量子効率を、X線や γ線に対してはG値で表すのが本来であろう が,中間のエネルギー域に属する真空紫外線 や軟X線では両者が混在して使われている. 本稿では,波長 400n m~200 nm(光子エネル ギー約 3~6 eV)を紫外線, 6 nm~200 nm (同 じく 6~200 eV) を真空紫外線, 0.4 nm~6 nm (同じく 200~3000 eV) を軟X線, 0.4 nm 以 下(同じく 3000 eV 以上)をX線あるいは硬 X線と呼ぶ.

宇宙では、粒子放射線もエネルギー源とし て大きな寄与をする.恒星の代表として太陽 を例にとると、太陽からの物質放出は10° kg/s でありその大部分は陽子 p⁺ である.図1に 太陽から放出される陽子のフラックスを大 きなフレアが起きた時について示す[4].静止 軌道(高度約 36,000km)上における 10 MeV 以 上の陽子のフラックスは通常約 0.2 個/(cm² s sr)であるが、太陽フレアの大型の場合には $10^{3} \sim 10^{4}$ 個/(cm² s sr)のレベルが数時間, そ れより低い期間が数日続くこともある. 1972 年8月や1989年10月に太陽高エネルギー粒 子現象が発生したとき、静止軌道での陽子線 フルエンスをもとに磁気圏外を飛行する宇 宙飛行士(例:月面,火星)の被ばく量を予 測した結果,船外活動をしている宇宙飛行士 は被曝死する可能性があること,船内でも特 に放射線を遮へいするように設計された場



Fig. 1. Proton spectra at large scale solar flares observed on February 23, 1956 and August 4, 1972 (Revised from [4]).

所にいない限り,現在の宇宙飛行士の被ばく 許容量を超えてしまうことが予測されてい る[5]. 宇宙放射線環境における被曝をどう低 減するかという観点から,太陽粒子放射線は 大きな問題となっている[6]. 粒子線のもうひ とつの成分は太陽系の外部から地球に降り 注ぐ銀河宇宙線である.図2にその全成分の エネルギースペクトル[7]を,図3に成分別の スペクトル[8]を示す. 図2に示されている 10²⁰ eV というエネルギーはサーブのさいテ ニスボールがもつ運動エネルギーに匹敵す るものであり、銀河宇宙線のエネルギーの大 きさを如実に示すものである.図3からは, 太陽活動が活発な時にはその磁場の影響の ために銀河宇宙線の低エネルギー成分が地 球に届きにくくなるものの,高エネルギー成 分はほとんど影響を受けずに地球に到達す ることが読み取れる.



Fig. 2. Integrated spectra of galactic cosmic ray (Revised from [7]).



Fig. 3. Energy distribution of proton, helium, carbon and oxygen, and iron in galactic cosmic ray. Solid lines: at solar minimum, broken lines: at solar maximum (Revised from [8]).

宇宙環境での電磁波の発生機構は、太陽な ど恒星の発光原理としてなじみの深いプラ ンク放射と、中性子星に代表される強磁場の 磁力線に巻きついて運動する高速荷電粒子 によるシンクロトロン放射,原子の発光スペ クトルの3つがある.プランク放射の代表と して図4に地球大気圏外で人工衛星によっ て測定された太陽からの光強度スペクトル [9]を示す. 国際宇宙ステーション(ISS)に おけるスペクトルはこれにだいたい相当す このデータには波長 110 nm 以上の測定 る. 結果が示されている. アミノ酸の化学反応に 寄与する 120 nm~190 nm の積分光強度を図 から求めると 3.1x10¹² 光子 cm²s⁻¹となる. 図 5はX線天文衛星 Chandra が観測した,かに 星雲のX線放射スペクトル[10]である. X線 発生の主要な機構はシンクロトロン放射に よるものと考えられている.図から振動数 10¹⁶~10¹⁸ Hz すなわち光子エネルギー11~ 1100 eV 付近の電磁波が強く放射されている ことが分かる.

地球表面と大気圏外の放射線量について 再び述べる.放射線の遮へいは物質の質量に よって決まる場合が大きいので約 1 kg cm⁻² という地球大気の厚さを密度ρ=11.3 g cm⁻³ の鉛の厚さに換算すると 91cm にもなる.ア ポロ 11 号の機体が 13mm 程度のアルミニウ ムで作られた[8]ことを考えると地球大気の 役割の大きさがよく分かる.事実,宇宙線に よる放射線量は地上では 0.29 mSv/y であるが,



Fig. 4. Intensity spectrum of electromagnetic wave at outside of the earth (Revised from [9]).



Fig. 5. Integrated spectra of electromagnetic wave emitted from the Crab nebla (Revised from [10]).

磁気圏外(例えば月面上)では太陽フレアが 起きた時の高エネルギー粒子線による1回 被曝線量は5 Sv にも達し,これは人間の LD3050 (30 日以内に 50%の人が死亡する線 量)の値4 Sv よりも大きい[8].地上の一般 公衆の基準線量5 mSv,地上の放射線作業従 事者の基準線量が50 mSv, NASA 宇宙飛行士 の基準線量500 mSv などの値と比較すると宇 宙放射線環境は人間にとってまさしく致死 的であることがわかる.このバイオレントな 宇宙放射線環境を克服できるかどうかが人 類の火星旅行の大きな問題点のひとつとさ れている.

放射線化学反応の研究に用いられる放射 線量は、人間の基準線量(放射線作業者に対 し 50 mSv/y) に比して極めて大きい. 例えば, 我々のグループの研究で光子エネルギー 860eVの軟X線をグリシン蒸着膜に照射して Gly+Gly+hv → GlyGly の化学進化の研究を行 ったさい, 半径 10mm 厚さ 1µm のグリシン蒸 着膜に 860eV の軟X線光子を 1.6x10¹⁵ 光子吸 収させた[11]. これをエネルギーに換算して 蒸着膜の体積3.3 x 10-3mm3 とグリシン固体の 密度 1.60 gcm⁻³から Gy 単位で吸収線量を求 めると 1.53x10⁷ Gy となり, X線に対する線 質係数 1 を用いて線量当量に換算すると 1.53x10⁷ Sv という極めて大きな値となる. こ のことは, 生命の起源に先立つ化学進化の時 期には大量の宇宙放射線は大きな味方であ ったが,生命の起源から長い時間を経て高度 な生命機構の確立を成し遂げた現在にあっ ては、その維持という観点から、放射線は今 や大きな敵として位置付けられるようにな ったことを示すものである.

3. 放射線誘起化学進化:中川グループの例
 3.1. 化学進化のシナリオ

この論文の冒頭に述べたように,隕石の加 水分解生成物からアミノ酸が発見されたこ と[1]は,宇宙においても生体分子が生成した 可能性を示し、近年それらのアミノ酸に見出 されたエナンチオ過剰[2]は宇宙においても カイラリティーの始まりの引き金が引かれ たこと、すなわち不斉反応が宇宙で起きたこ とを示唆するものと我々は考えた.以下 我々が描くシナリオを図6をもとに説明す る.図には不斉反応の引き金として宇宙にお ける円偏光を概念的に示した. 不斉反応の誘 因となる紫外線領域の円偏光は地球上では 存在しないので、我々は、宇宙で生成したア ミノ酸が地球にたどりつくまでの輸送過程 で不斉反応を起こしてわずかな偏りを獲得 し、地球にたどりついたあとで大きな偏りを 獲得するうえでの「偏りのタネ」となり、地 球由来の有機物や宇宙由来の有機物と反応 して化学進化が進行し, その過程でカイラリ ティーが極度に増幅されてアミノ酸のホモ カイラリティーが確立したというシナリオ を考えている.このあとに続く化学進化はア ミノ酸重合によって原始的なエネルギー代 謝系と原始的な遺伝暗号系がつくられてい くアミノ酸ワールド仮説へと向かうのであ ろう. そのあと RNA が成立するとアミノ酸・



Fig. 6. A scenario of delivery of amino acid molecules with enantiomeric excess.

RNA ワールド仮説の世界に発展していくものと思われる.

3.2. 研究課題の設定:アミノ酸の発展

上に述べたシナリオにおいて我々が研究 すべきことは、(1)円偏光照射によってラセミ 体アミノ酸にカイラリティーの偏りが実際 に導入されるかどうかの検討,(2)導入された カイラリティーが解消されないかどうかの 検討である. さらに考察すると, 隕石から検 出されたアミノ酸はペプチド結合したもの の方が多いが、単体である遊離アミノ酸も検 出されたとの報告がある. (1)の課題におい て,アミノ酸は多量体よりも単量体である方 がカイラルな偏りの導入には有利であると 思われる.したがって隕石などに存在すると 信じられている複雑有機化合物が宇宙紫外 線や放射線によって分解してアミノ酸単量 体が形成され,それらに円偏光紫外線が作用 してカイラリティーの偏りが導入されるも のと考えられる. さらに, 偏りを得たアミノ 酸単量体は脱水縮合反応を繰り返して大き なサイズを獲得していく必要がある.

以上を総合すると,(1)アミノ酸単量体の円 二色性スペクトル (CD(λ), 左円偏光吸収係 数 $\mu_L(\lambda)$ と右円偏光吸収係数 $\mu_R(\lambda)$ の差; CD(λ) = $\mu_L(\lambda)$ - $\mu_R(\lambda)$)を入射光波長 λ の関数として 測定し, 異方性因子(CD(λ)/2($\mu_L(\lambda)$ + $\mu_R(\lambda)$)) が最大となる波長を調べる,(2)偏りを[得た アミノ酸単量体のラセミ化因子(非偏光真空 紫外線照射,熱作用など)に対する耐性を調 べる(これを我々はカイラル安定性の検討と 呼んでいる),(3)アミノ酸単量体が重合因子 (非偏光真空紫外線照射,熱作用など)によ って重合する化学進化の効率を調べる,とい う研究課題を遂行することが必要である.

以下,我々のグループが行ってきた(1)アミノ酸単量体の円二色性スペクトル測定,(2) アミノ酸単量体のカイラル安定性の実験,お よび(3)アミノ酸単量体が非偏光真空紫外線 照射によって重合する化学進化の効率の決 定実験,について報告する.

3.3.アミノ酸単量体の円二色性スペクトル 測定

アミノ酸の円二色性スペクトルを論じる 前にアミノ酸の吸収スペクトルを概観する. 図7はアミノ酸蒸着膜の波長範囲 30~250nm の吸収スペクトル[12]を、図8は光子エネル ギー範囲 3~250 eV の吸収スペクトル[12]を こにのは吸収断面積 示す. $(I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\sigma(\lambda)nl))$ をあらわす (1 Mb=10⁻¹⁸ cm²). 図から、アミノ酸の吸収ス ペクトルの主要部分は波長 200 nm の真空紫 外域にあり、C-C、C-H、C-N、N-H、C-O、 C=O などアミノ酸の分子構造の主要な化学 結合の励起に相当する 17 eV (波長 70 nm) 付近に吸収極大が現れることなどが分かる. 図7、図8のフェニルアラニンの200 nm (6 eV)の吸収ピークはベンゼン環の寄与を表し, 図8のメチオニンの 190 eV の吸収ピークは イオウ原子のL 殻電子の遷移に対応している.



Fig. 7. Vacuum ultraviolet absorption spectra of amino acids (Revised from [12]).



Fig. 8. Absorption spectra of amino acids in the energy region of vacuum ultraviolet and soft X-ray (Revised from [12]).

アラニン蒸着膜の吸収スペクトル,円二色 性スペクトルの実測値と計算値を図9に示 す[13].円二色性の大きさをエネルギー積分 するとゼロになるという総和則の要請によ り,図9からも分かるように円二色性スペク トルは波長により正,負の符号をとる.この ことは,不斉反応を起こすには円偏光のたる いこと,あるいは特定の波長域のみがフィル ターによって選択されねばならないことを 意味する.宇宙においては分子雲などがこの フィルターの役割を担うことが期待される. 近年,シンクロトロン放射を用いてアミノ酸 の円二色性スペクトルが盛んに測定され3 ようになり[14],カイラリティーに関する理 解の基礎データとして期待されている.

円偏光照射によって不斉反応を起こして カイラリティーの偏りを導入する実証実験 が我々のグループ[15]および Mierhenrich ら [16]によってロイシン蒸着膜を用いて行われ た.実際に我々の実験[15]では産業技術総合 研究所シンクロトロン放射施設 NIJI-2から発 生した波長 180 nm の円偏光をロイシン蒸着



Fig. 9. (a)Experimental data of absorption spectrum and circular dichroism spectrum of evaporated film of alanine. (b)Calculated circular dichroism spectrum of alanine (Revised from [13]).

膜に照射して初期分子数の 60%まで分解反応を進行させたところ,約1.5%のエナンチオ 過剰率が観測された.この値は Kagan の式か ら予測される 0.9%に近い値であり不斉反応 の実証実験に成功したものと我々は結論した.

真空紫外光よりも反応性が高い軟X線領 域の円二色性スペクトルの測定が我々のグ ループによってSPring-8においてなされてい る.図10にセリン蒸着膜,図11にアラニン 蒸着膜の軟X線円二色性(SXNCD)スペクト ルのうち,酸素 $1s \rightarrow \pi^*$ 遷移を拡大して示す [17].図10,11には,理論計算の結果[18,19] も示す.セリンは531.5 eV に正の小さなピー



Fig. 10. Experimental [17] and calcuklated [18] results of absorption and circular dichroism spectra of evaporated film of seline (Revised from [17]).



Fig. 11. Experimental [17] and calcuklated [19] results of absorption and circular dichroism spectra of evaporated film of alanine (Revised from [17]).

クが 532.5eV に負の大きなピークを示し,ア ラニンは 532.9 eV に負の大きなピークを示 す.531.5 eV と 532.5eV とで円偏光の向きが 反転した照射が自然条件で行われるのは難 しく,さらにアラニンの円二色性はセリンよ りも大きいので,アラニンの方がセリンより も不斉反応が起こりやすいと予測されよう. 軟X線領域での不斉反応の実証実験を我々 は実施する予定である.

3.4. アミノ酸単量体のカイラル安定性の実験的検討

隕石の加水分解生成物から抽出された アミノ酸にエナンチオ過剰が見出されたこ と[2]は不斉反応が宇宙で起きたことを示唆 するものであり,獲得された偏りが,隕石が 地球まで輸送される間に消失しなかったこ とを意味する.宇宙には真空紫外線,陽子な どの宇宙線,熱など各種のラセミ化因子が存 在するので,これらのラセミ化因子の作用に 対抗してアミノ酸のカイラリティーがどの 程度保存され得るかを調べることは重要で ある.我々はこの安定性を「カイラル安定性」 と呼び,新しいコンセプトとしてその正当性 を吟味しているところである[20].

ここでは、泉によってなされたアスパラギ ン酸(Asp)のカイラル安定性の実験[21]を紹 介する.泉は、固相 Asp が紫外線による光分 解の結果、アラニン(Ala)とβアラニン(β-Ala) を生じる反応に着目し、L-Asp からは L-Ala しか生じないのか D-Ala も生じるのかを調べ た. L-Asp から L-Ala しか生じなければ Asp というやや大きなアミノ酸から Ala という小 さなアミノ酸に分解されたとはいえ, カイラ リティーは保持できたことになり、ホモカイ ラリティー獲得という化学進化の目標から すれば重要な性質の保持に成功したことに なる. L-Asp 蒸着膜に波長 146 nm の非偏光真 空紫外線を照射したところ, L-Asp が分解し, L-AspからはL-Alaとβ-Alaが生成し, D-Ala, グリシン(Gly)が生成されないことが分かっ た. L-Asp の分解分子数を吸収光子数の関数 として調べた結果を図 12 に, L-Ala と β-Ala の生成分子数を吸収光子数の関数として調



べた結果を図 13 に示す.

Fig. 12. Number of decomposed L-aspartic acid molecules by 146 nm VUV irradiation (Revised from [21]).

L-Ala 固相に 172nm の非偏光真空紫外線を 照射した場合には, Asp の場合とは対照的に, L-Ala-L-Ala2量体の他に L-D2量体, D-L2 量体も生成し, L-Ala 固相おける重合反応で はカイラリティーが保存されないことが分 かった. 我々はバリン固相についても同様の 実験を行っており[22], その再現性確認実験 の結果を待っているところである.

3.5.アミノ酸単量体が非偏光真空紫外線照 射によって重合する化学進化の効率の決定 実験

グリシン固相に軟X線を照射してグリシ ン2量体を生成させた実験[11]を紹介する. 実験は SPring-8 ビームライン BL23SU で行 った. グリシン蒸着膜に光子エネルギー860 eV の軟X線を照射し,生じたペプチド結合 の窒素K殻吸収スペクトルを測定した. 結果 を図 14 に示す.

図において照射時間を0分から240分まで 増加させると402 eV に小さなピークが成長 していくのが分かる.これはペプチド結合の 窒素の化学的環境がアミノ酸のα炭素に結合 した窒素の化学的環境が異なるために生じ た K 殻吸収帯のエネルギーのシフトであり, 「化学シフト」として知られている.402eV ピークの面積を照射時間あるいは吸収光子 数の関数としてプロットすると直線的な増 加が認められ,その傾きの値から,光子エネ



Number of photons absorbed by L-Asp film / 10^{17} Fig. 13. Number of produced L-alanine and β -alanine molecules by 146 nm VUV irradiation (Revised from [21]).



Fig. 14. X-ray absorption spectra of glycine films irradiated with 860 eV soft X-rays (Revised from [11]).

ルギー860 eV の軟X線照射による2量体生成の量子効率は0.035 と決定された.

4. まとめ

宇宙における化学進化のエネルギー源と して,真空紫外線,放射線の役割を検討した. 真空紫外線には円偏光があり得るので,これ によってカイラリティーの偏りが導入され る可能性がある.非偏光真空紫外線,放射線, 熱などによって,獲得されたカイラリティー の偏りがどの程度破壊される(ラセミ化す る)かを,詳しく調べていく必要がある.

5. 謝辞

円二色性スペクトルの測定では,原子力研 究開発機構 安居院あかね博士,産業技術総 合研究所 田中真人博士,高輝度光科学研究 センター 室 隆桂之博士にとくにお世話に なりました.ここに感謝いたします.吸収ス ペクトル測定,反応性の研究については,中 川研究室の歴代の大学院生たち,とくに田中 真人博士,金子房恵博士,児玉洋子氏,蒲原 真澄氏,松井貴弘氏,現役の大学院生たち, 泉雄大君,今津亜季子さん,三本晶さん,田 邊真依子さんに感謝いたします.

本研究の一部は,分子科学研究所 UVSOR 共同研究 13-860,14-855,15-545,18-515, 18-514, SPring-8 共同利用(課題番号 2007B1498,2008A1307)によってなされました.

引用文献

- 1. Shimoyama, A., Ponamperma, C. and Yanai, K. Amino acids in the yamato carbonasceous chondrite from Antarctica, Nature 282, 394-396, 1979.
- Cronin, J. R. and Pizzarello, S. Enantiomeric excess in meteoritic amino acids, Science 275, 951-955, 1997.
- 中川和道, 蛯名邦禎, 伊藤真之. 環境物理学, 裳華 房, 2004.
- 4. Adams Jr., J. H. and Gelman, A. The effects of solar-flares on single event upset rates, IEEE Trans. Nucl. Sci. 31, 1212-1216, 1984.
- 5. NCRP: "Guidance on radiation received in space activities", National Council on Radiation Protection and Measurements, Report-98, 1989.
- 6. 富田二三彦,宇宙放射線環境と宇宙環境情報の利用, 第7章,191-228,恩藤忠典,丸橋克英 編著.宇宙環 境科学,オーム社,2001.
- 7. 小田 稔, 宇宙線物理学, 朝倉書店, 1983.
- 8. 道家忠義, 宇宙環境における放射線被ばくと線量計 測, 応用物理 59 (7), 901-911, 1990.
- 9. Chamberlain, J. W. Theory of planetary atmospheres: An

introduction to their physics and chemistry, Int. Geophys. Ser. 22, 18, Academic, Orlando, USA, 1978.

- 10. Atoyan, A. M. and Aharonian, F. A. On the mechanism of gamma radiation in the Crab Nebla, Mon. Not. R. Astron. Soc. 278, 525-541, 1996.
- 11. Kaneko, F., Tanaka, M., Narita, S., Kitada, T., Matsui, T., Nakagawa, K., Agui, A., Fujii, K. and Yokoya, A. Chemical evolution of amino acid induced by soft X-ray with synchrotron radiation, J. Elec. Spec. Rel. Phen. 144-147, 291-294, 2005.
- 12.Kamohara, M., Izumi, Y., Tanaka, M., Okamoto, K., Tanaka, M., Kaneko, F., Kodama, Y., Koketsu, T.and Nakagawa, K. Optical oscillator strength distribution of amino acids from 3 to 250 eV and examination of the Thomas-Reiche-Kuhn sum rule, Rad. Phys. Chem. 77, 1153-1155, 2008.
- Tanaka, M., Yagi-Watanabe, K., Kaneko, F. and Nakagawa, K. First observation of natural circular dichroism spectra in extreme ultraviolet region using polarizing undulator-based optical system and its polarization characteristics, J. Synchro. Rad. 16, 455-562, 2009.
- Kaneko, F., Yagi-Watanabe, K., Tanaka, M. and Nakagawa, K. Natural circular dichroism spectra of alanine and valine films in vacuum ultraviolet region, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 013001, 1-4, 2009.
- 児玉洋子,田中真人,古結俊行,中川和道,山田亨, 小貫英雄,円偏光紫外線照射による固体アミノ酸の不 斉分解の検出,日本放射光学会 第 15 回年会,2002 年1月11-13日,東京大学物性研究所・東葛テクノプ ラザ,12Y5.
- 16. Meierhenrich, U. J., Nahon, L., Alcaraz, C., Bredehöft, J.
 H., Hoffmann, S. V., Barbier, B. and Brack, A.
 Asymmetric Vacuum UV Photolysis of the Amino Acid Leucine in the Solid State, Angewandte Chemie International Edition 44, 5630-5634, 2005.
- 17.泉雄大,「真空紫外光・シンクロトロン放射を用いた生命の起源の研究:アラニンの軟X線円二色性スペクトル測定と真空紫外光誘起化学進化」,神戸大学大学院人間発達環境学研究科予備審査論文,2009年.
- Plashkevych, O., Carravetta, V. Vahtras, O. and Ågren, H. Theoretical study of X-ray circular dichroism of amino acids, Chem. Phys. 232, 49-62, 1998.
- Jiemchooroj, A., Ekström, U. and Norman, P. Near-edge x-ray absorption and natural circular dichroism spectra of L-alanine: A theoretical study based on the complex polarization propagator approach, J. Chem. Phys. 127, 165104, 1-8, 2007.
- 20. 泉雄大, 固相アラニンおよび固相アスパラギン酸の 真空紫外光分解におけるカイラル安定性, 第34回生 命の起原および進化学会, 要旨集39ページ, 2009.
- Izumi, Y., Matsui, T., Koketsu, T. and Nakagawa, K. Preservation of homochirality of aspartic acid films irradiated with 8.5 eV vacuum ultraviolet light, Rad. Phys. Chem. 77, 1160-1163, 2008.
- 22. 田邊真依子,「非偏光真空紫外照射に対する固相バ リンのカイラル安定性」,神戸大学発達科学部 卒業研 究, 2009.