

知ってますか??



雑学講座

宇宙を漂う氷

- 氷衛星・彗星・氷星間塵の歴史を探る -

法澤 公寛 大阪大学大学院 理学研究科 D2

矢田 猛士 大阪大学大学院 理学研究科 M2

池谷 元伺 大阪大学大学院 理学研究科 教授

〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1 TEL/06-6850-5490 FAX/06-6850-5540

地球表面の約 70%は、生命をはぐくんだ海，すなわち液体の水で覆われている．ところが地球を出て母なる太陽から遠く離れた外惑星に行くと，まるで別世界になる．光の弱い天体では温度が低いいため，氷の世界が出現する．

氷天体と呼ばれる惑星や衛星の表面は，水 (H_2O) はもちろん二酸化炭素 (CO_2)，二酸化硫黄 (SO_2)，メタン (CH_4) までもが固体で存在し，幾つかの天体の表面を覆っている．またこれら氷天体は太陽風や宇宙線に絶えず曝されており，このような天体の環境や歴史を知る上で，氷の放射線照射効果の研究は欠かせない．

我々は氷天体表面に存在していると思われる氷を実験室内で作成し，人為的に γ 線や紫外線を照射したものを試料にとし，ESR(電子スピン共鳴)や TL(熱ルミネッセンス)，OSL(光刺激ルミネッセンス)を測定し，ラジカルを振る舞いを調べることで，氷の放射線照射効果の研究を行っている．未来の地質学者や惑星科学者達が，隕石落下や火山噴火の年代測定をするための基礎研究である．

1 宇宙の水

1.1 氷衛星

1.1.1 ガリレオ衛星

太陽系で地球より外側の惑星は外惑星と呼ばれている．外惑星の衛星は表面を氷で覆われたものが多く，これらは氷衛星と呼ばれている^{1, 2)}(表 1)．中でも，1610年にガリレオ・ガリレイによって発見された木星の 4 大衛星(イオ・エウロパ・ガニメデ・カリスト)はガリレオ衛星と呼ばれ，代表的な氷衛星である．ガリレオ衛星の素顔は，1979年のボイジャー探査機，そして1995年のガリレオ探査機によって明らかになりつつある．ガ

リレオ探査機は地球から 6 億 km も離れた衛星の素顔を，5m/pixel という高解像度の画像で我々に教えてくれた．

木星の衛星は，潮汐力が大きいために内側の軌道を回る衛星ほど加熱される．熱による地殻活動も，内側の衛星ほど激しくなっている．イオは木星に最も近い軌道を回っているため，現在の太陽系で火山活動が最も活発な天体となっており³⁾，流出する溶岩の温度は 2000K 以上に達することが分かっている．その外側を回るエウロパは，地殻活動が盛んなためにクレータが非常に少ない．またエウロパは氷の下に液体の水の存在を裏付ける証拠が得られている(図 1)．地球以外で有意な液体の

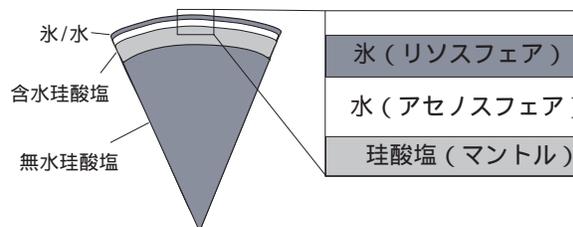


図 1 エウロパの構造モデル²⁾

水の存在が確認されたのは初めてのことで，生命が存在するかもしれないと注目されている．エウロパの外側のガニメデ，さらに外側のカリストの順に，クレータの数は増していく．クレータの数が多いほど，地質学的に古いと言える．また，エウロパとガニメデの大気中の O_2 は，降り注ぐ電子線によって表面を覆う H_2O の氷から生成すると言われており⁴⁾，格子欠陥物理とラジカル化学の立場から氷の照射効果にメスを入れる必要がある．

表 1 主な外惑星やその衛星の表面温度・構成物質 (文献^{1),2),5)} より引用)

惑星 衛星	半径 (km)	質量 (地球 = 1)	太陽からの 平均距離 (10^8 km)	表面温度 (K)	表面物質
火星	3,393	0.107	2.27	137~298	極冠に CO ₂ , H ₂ O
木星			7.78		
イオ	1,815	0.015		135	S, SO ₂
エウロパ				140	H ₂ O
ガニエデ	1,569	0.008		154	H ₂ O
カリスト	2,631	0.030		167	H ₂ O
土星	2,400	0.018	14.3		
タイタン				?	気体の N ₂ , CH ₄ (大気圧 1.5atm)
天王星	2,560	0.023	28.8		
ティタニア				49	H ₂ O
海王星	790	0.00018	45.0		
トリトン	1,350	0.022		35	CH ₄ , CO ₂
冥王星	1,142	0.0022	59.2	43	CH ₄

1.1.2 タイタン

土星の衛星タイタンもまた氷衛星と呼ばれるものの一つである。タイタンは太陽系では木星の衛星ガニメデに次ぐ大きさである。惑星の水星より大きい。大気は厚さが 200km と濃密で、大気圧は 1.5 気圧もある。大気の内容は窒素が最も多く、CH₄ と Ar がこれに次いでいる。地球の原始大気と同じ組成なので、タイタンの大気はほぼ 40 億年前の原始地球の大気が封じ込められていると考えられている。

厚い大気の底の地表の姿は、地球から観測が難しく、その姿は未だベールに包まれたままである。しかし、厚い大気の下には氷の殻があり、その下にはアンモニア水の海があると予想されており、エウロパと同様に生命の存在が期待されている。タイタンへは現在、カッシーニ探査機が向かっており、2004 年に土星周回軌道に到達する予定である。カッシーニは土星大気の組成・温度のほか、輪や衛星を詳しく観測する。タイタンではレーダを用いた地形調査のほかに、パラシュートを使って着陸機ホイヘンスを投入し、大気の組成・温度・気圧などの気象を観測する予定である。カッシーニおよびホイヘンスによる観測は、太陽系の発展や地球での生命の発展の理解を深めるものと期待されている。

1.1.3 氷衛星の組成

一般に氷衛星の「氷」は H₂O を主成分とし、不純物として少量の CO₂, CO, NH₃, CH₄ などを含んでおり、イオでは SO₂ が固体となり表面を覆っている (表 1)。純粋な H₂O 以外にこのような揮発性分子が混ざり合った固体も、広義に「氷」と呼ばれている。氷衛星は大気が薄いものも多く、太陽からの紫外線や γ 線、プロトン、他の様々な粒子線が絶えず表面に降り注いでいる。これらの放射線は表面の氷の中の安定分子を解離し、ラジカルや格子欠陥を生成する。実際、国際紫外線衛星 (IUE) が観測したエウロパの反射スペクトルからは、OH ラジカルが存在していることが分かっている (図 2)⁶⁾。紫外線や放射線は表面の氷の中だけでなく

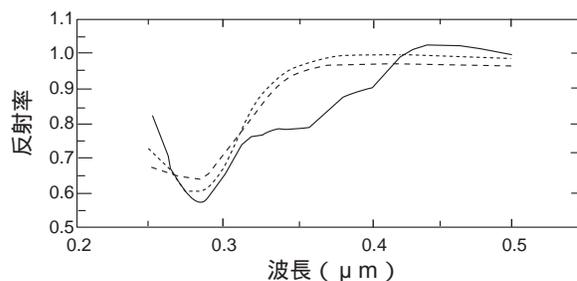


図 2 IUE 衛星によるエウロパの反射スペクトル (実線) と、実験室で γ 線を照射した氷のスペクトルの比較⁶⁾ (点線は 6kGy, 破線は 170kGy)。0.3 μ m 付近の吸収は OH ラジカルによる。

大気中にもラジカルを生成する．地球大気では雷に伴って NO が生成することが知られている⁷⁾．氷天体の場合，大気中のラジカルが表面の氷の中に取り込まれる可能性がある．我々は高周波放電によって気相に生成する HO₂ ラジカルが，H₂O や CO₂ の固体中へトラップされることを確認した⁸⁾．ラジカルの惑星大気中での拡散から大気循環を知ろうとする研究も行われており，表面の氷にトラップされたラジカルは大気循環を知る上で有用であろう．

1.2 彗星

ほうき星として美しい尾を見せてくれる彗星も氷でできた天体である．彗星核は「汚れた雪だるま」と例えられる通り，H₂O を主成分に，C，N，O などから成る分子，そして細かい鉱物の塵でできていると考えられている．彗星の特徴である尾には 2 種類あり，太陽と逆方向に流れるプラズマの尾と，彗星の軌道に沿って広がっている塵の尾とがある⁹⁾ (図 3)．

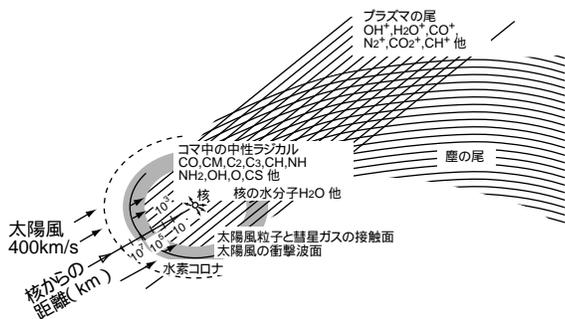


図 3 彗星の構造の模式図⁹⁾

1996 年の百武彗星，1997 年のヘル・ボップ彗星は記憶に新しいが，歴史的に最も有名なのはハレー彗星である．観測記録は，古くは紀元前 467 年にさかのぼり，紀元前 239 年の「史記」に掲載されている．1986 年に地球に接近した時は，日本・アメリカ・ヨーロッパ・ソ連がそれぞれハレー彗星に向けて探査機を送りこみ，その大気(コマ)中には CO，CN，CH，OH など多数のラジカルが存在していることが明らかになったほか，ホルムアルデヒドなどの有機分子が存在していることも分かった．コマ中のラジカルの成因の多くは太陽風や太陽紫外線による安定分子の解離によると考えられている．また，有機分子に富んだ彗星が原始地球に衝突を

繰り返す，生命のもとを地球に運んだとする説もある．

彗星は太陽に近づくにつれ激しくガスや塵を放出する．彗星が軌道上にばら撒いた塵の帯を地球が横切ると，流星雨となって地球に降り注ぐ．1999 年 11 月に極大を向かえたしし座流星群を，夜明け前の寒い中ご覧になった方もおられると思うが，これはテンペル・タトル彗星の置きみやげである．

1.3 氷星間塵

地球から 1500 光年の彼方，オリオン座の三ツ星の下にあるオリオン大星雲 (M42) のほのかな輝きは，天文ファンでなくても一度は見たことがある方が多いのではないだろうか．オリオン大星雲のような分子星雲で星間ガスが凝縮すると鉱物の微粒子の表面に氷が凝縮し，氷星間塵が生まれる．この時，CH₄，NH₃，CO などの揮発性分子も氷と一緒に凝縮する．また，このような氷星間塵に紫外線等の宇宙線が当たることにより氷表面で化学反応が進み，より分子量の大きな有機分子が生成されるといわれており¹⁰⁾，赤外線望遠鏡による観測でも，有機分子が存在することが分かっている．

2 氷の結晶構造

地球上の氷は，ほぼすべてが I_h と呼ばれる六方晶の結晶構造を持っている．美しい雪の結晶も六角形の構造を基本としている．地球上の温度圧力では，六方晶系が唯一の安定相だからである．図 4 に氷の相図を示す．氷 I 以外に，菱面体晶系の氷 II，正方晶系の氷 III と IX，単斜晶系の氷 V，立方晶系の氷 VII と VIII などの高压相が存在する．氷 I には六方晶系の I_h と立方晶系の I_c が存在するが，I_c は準安定相である．

一方，地球を飛び出せば，様々な相の氷が存在する．氷衛星では，厚い氷の底で高压相の氷が存在すると考えられている．また，彗星や氷星間塵ではアモルファスな氷が存在すると考えられている．

3 ESR/TL 年代測定

自然放射線の照射効果によって固体中に蓄積された格子欠陥またはラジカルは，熱的に安定かつ被曝線量に対する飽和がなければ，時の経過とともに蓄積され続ける (図 5)．もし何らかの熱的作用を受ければ，その濃度は

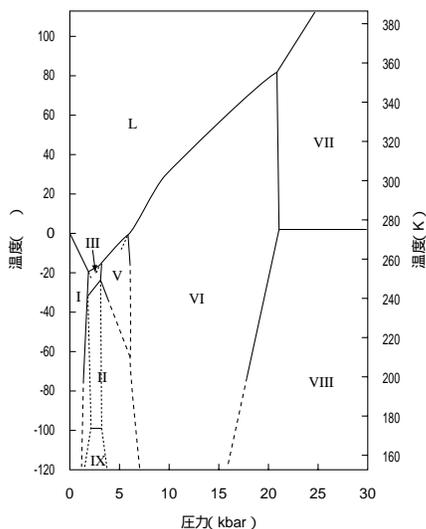


図 4 氷の相図 11)

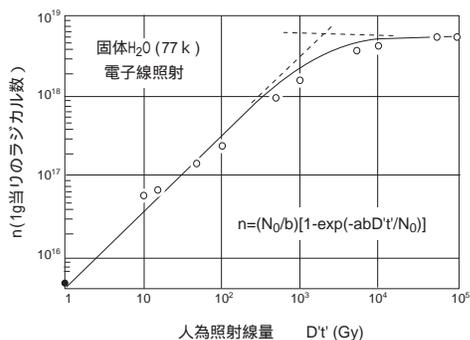


図 5 氷中に生成する OH ラジカル数の放射線に対する成長曲線 12)

リセットされ、時計の針がゼロになる。つまりラジカルの濃度を調べることにより、熱的イベントの年代を知ることができる⁵⁾。ESR や TL でラジカル濃度の測定ができるため、現在地球上の考古遺物や化石が ESR/TL 年代測定の対象とされているが、同様の手法は氷天体上の氷にも適用できる可能性がある。氷天体においては火山噴火や隕石衝突が熱的イベントに相当する。

3.1 電子スピン共鳴 (ESR)

ラジカルは不対電子を持っており、常磁性を示す。常磁性ラジカルの情報は ESR 法によって知ることができる。不対電子は磁場中におかれると、ゼーマン効果

によりエネルギーレベルが分離する。このエネルギー差に相当するマイクロ波が照射されるとこれを吸収し、共鳴が起こる。これが電子スピン共鳴 (electron spin resonance, ESR) である。ESR スペクトルは、不対電子軌道 (SOMO) を反映し、近傍の核スピンを持つ水素などの影響を受ける。

表 2 に様々な氷に γ 線を照射した時に生成するラジカルを示す^{7, 8, 13~18}。図 6 は等温焼鈍実験が

表 2 γ 線によって 77K の氷中に生成するラジカル

氷	不純物	生成されるラジカル
H ₂ O	なし	OH \cdot , HO ₂ \cdot
	NH ₃	OH \cdot , HO ₂ \cdot , NH ₂ \cdot
CO ₂	なし	CO ₃ ⁻ , O ₃ ⁻
	H ₂ O	CO ₃ ⁻ , O ₃ ⁻ , HO ₂ \cdot
	CH ₄	CO ₃ ⁻ , O ₃ ⁻ , CH ₃ \cdot
SO ₂	なし	SO ₃ ⁻ , O ₃ ⁻ , S ₄ [*] , SSO ⁻

ら得た温度と寿命の関係をプロットしたものである^{7, 8, 13~18}。ラジカルが氷天体の温度環境で十分安定

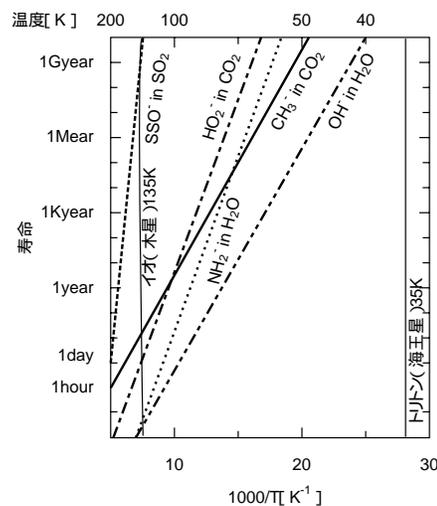


図 6 様々な氷の中に見られるラジカルのアレニウスプロット

でなければ、年代測定はできない。単純な熱活性化過程を仮定すると、ある温度 T におけるラジカルの寿命 τ は $\tau = \nu_0^{-1} \exp(E/kT)$ と表すことができる (ν_0 : 振動数因子 E : 活性化エネルギー k : ボルツマン定数)。例えば、固体 SO₂ 中の SSO⁻ の 135K (イオの表面温度) での寿命は 10 億年程度であり、この程度のオーダーで

の年代測定の可能性がある^{16, 17)}。

ラジカルは準安定状態であるため、熱を加えると消滅する。この時に発光を伴うことがある¹⁹⁾ (Thermoluminescence, TL)。TLは昇温によって情報がすべてリセットされるので、ESRのように繰り返し測定には向かないが、フォトン・カウンティングができるので感度が良い。

TLは感度が良い反面、発光スペクトルのみからは発光中心のラジカルの同定が難しい。我々は77Kで γ 線照射した氷試料を室温付近まで一定速度で昇温し、ルミネッセンスのピークより発光中心の活性化エネルギーを求めてESRの結果と比較することにより、発光中心の同定を行っている¹⁷⁾。

4 氷星間塵での分子の化学進化

これまでは六方晶の氷(I_h)が考えられてきたが、近年星間空間の高真空・極低温という条件からアモルファス氷が重要視されるようになってきた¹⁰⁾。赤外線望遠鏡による分光観測においてもアモルファス氷に似た赤外吸収スペクトルが得られている(図7)。アモルファス

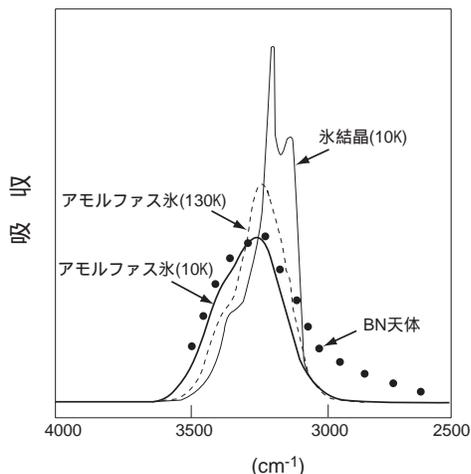


図7 オリオン大星雲とアモルファス氷の赤外スペクトル¹⁰⁾。オリオン大星雲の中にあるBN天体と呼ばれる赤外線を放出する天体が光源となり、周囲のガスや塵の吸収スペクトルが見えている。

氷は150K以下の温度の基板に、水蒸気を真空蒸着することにより作製できる。

アモルファス氷はその多孔質構造から揮発性ガスを吸

着しやすく、アモルファス氷を一種の触媒とするような化学反応が重要視されている(図8)。実験室では、揮

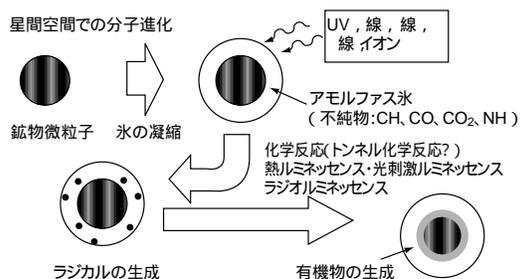


図8 氷星間塵での分子の化学進化

発性ガスを吸着させたアモルファス氷への紫外線照射による有機分子生成機構の研究が行われている¹⁰⁾。実験室で CH_4 , NH_3 , CO などの簡単な分子を混ぜたアモルファス氷に紫外線を照射すると、グリシンやアラニンなどのアミノ酸が生成することが知られているが、その反応過程は明らかではない。我々はESRで反応途中のラジカルを直視することで、アモルファス氷の中での反応経路を明らかにできると考えている。

また温度が10Kと低い氷星間塵では、温度が低いほど反応速度が大きくなるというトンネル反応が起こっている可能性がある。

5 惑星探査に向けて

ESRやTLを用いて氷天体表面のラジカルを観測するためには、装置を宇宙空間に送り込まなければならない。永久磁石を用いたポータブルESR分光器はすでに実用化されている^{20)~22)}。また、 CO_2 レーザーを用いて試料を加熱し、試料から離れた場所でTLを測定する遠隔TLも提案されており^{23, 24)}、探査機を用いた惑星探査への応用が期待される(図9)。

アポロ計画で人類は月の石を手にしたが、月以外からのサンプルリターン計画も現実のものとなりつつある。日本の探査機MUSES-Cが2002年に小惑星1989MLに向かって旅立ち、4年後に地球に帰還する予定である。成功すれば、人類は地球と月以外の物質(隕石を除く)を初めて手にすることになる。

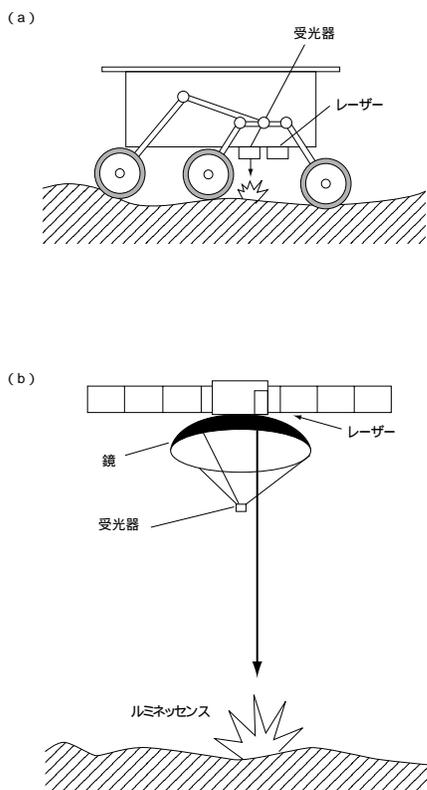


図 9 遠隔 TL による惑星探査

6 まとめ

氷天体の表面温度にもよるが、熱的に十分安定なラジカルも存在し得ることも分かり、これらのラジカルの信号を用いることにより、火山活動や隕石落下などラジカルが不安定になってから年代が、ESR/TL 年代測定から判る。地球上の物質の年代測定から外惑星の分子性固体へと新しい展開を図ることにより、ESR や TL は暗く冷たい外惑星の世界を照らす灯台となるだろう。

また ESR を用いた放射線誘起ラジカルの研究は、氷天体の環境を知る上で強力な手段となりうる。今回示した γ 線による照射効果以外にも、紫外線や電子線、プロトン、その他の粒子線による照射効果も惑星科学の立場からは重要である。

2001 年 10 月には「ESR 放射線量計測と年代測定の新展望」の国際シンポジウムが大阪大学で開催され、新しい成果が報告される。地球科学の ESR/TL 年代測定は、将来惑星探査の手法になるだろう。

[参考文献]

- 1) J. A. Burns: *Satellites* (Univ. of Arizona Press, 1986)
- 2) D. A. Rothery: *Satellites of the Outer Planets* (Clarendon Press, Oxford, 1992)
- 3) J. R. Spencer, J. A. Rathbun, L. D. Travis, L. K. Tamppari, L. Barnard, T. Z. Martin and A. S. McEwen, *Science* **288** (2000) 1198.
- 4) M. T. Sieger, W. C. Simpson and T. M. Orlando, *Nature* **394** (1998) 554.
- 5) M. Ikeya: *New Applications of Electron Spin Resonance - Dating, Dosimetry and Microscopy* (World Scientific, Singapore, 1993)
- 6) R. E. Johnson and T. I. Quickenden, *J. Geophys. Res.* **102** (1997) 10985.
- 7) E. Franzblau and C. J. Popp, *J. Geophys. Res.* **94** (1989) 11089.
- 8) K. Norizawa, M. Hirai, K. Kanosue and M. Ikeya, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) 6759.
- 9) 桜井邦朋, 清水幹夫: *彗星 その本性と起源* (朝倉書店, 1989)
- 10) 香内晃, *化学と生物*, 31 (1993) 708.
- 11) N. H. Fletcher: *The Chemical Physics of Ice* (Cambridge Univ. Press, 1970)
- 12) T. E. Gunter, *J. Chem. Phys.* **46** (1967) 3818.
- 13) 金森博, 彼末一則, 平井誠, 池谷元伺: *アイオニクス* **22** (1996) No.1, 13
- 14) M. Hirai, M. Ikeya, Y. Tsukamoto and C. Yamanaka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) L1453
- 15) Y. Tsukamoto, M. Ikeya and C. Yamanaka: *Appl. Radiat. Isot.* **44** (1993) 221
- 16) K. Kanosue, M. Hirai and M. Ikeya: *Appl. Radiat. Isot.* **47** (1996) 1433
- 17) K. Kanosue, H. Toda, M. Hirai, H. Kanamori and M. Ikeya: *Radiat. Meas.* **27** No.2 (1997) 399
- 18) K. Norizawa, K. Kanosue and M. Ikeya, *Appl. Radiat. Isot.*, **52** (2000) 1259.
- 19) M. J. Aitken: *Thermoluminescence Dating* (Academic Press, London, 1985).
- 20) M. Ikeya and M. Furusawa, *Appl. Radiat. Isot.* **40** (1989) 845.
- 21) C. Yamanaka, M. Ikeya, K. Meguro and A. Nakanishi, *Nucl. Tracks* **18** (1991) 279.
- 22) A. Nakanishi, N. Sugawara and A. Furuse, *Appl. Radiat. Isot.* **44** (1993) 357.
- 23) S. Takaki, M. Ikeya and C. Yamanaka: *Radiation Measurements*, **27** (1997) No.2, 393
- 24) 高木俊二, 山中千博, 池谷元伺: *日本惑星科学会誌*, **6** (1997) No.3, 181