

Title	外惑星の氷は何を語るだろうか? -氷の照射効果を用いたESR年代測定・環境評価の試み-
Author(s)	法澤, 公寛; 彼末, 一則; 平井, 誠 他
Citation	大阪大学低温センターだより. 107 p.15-p.18
Issue Date	1999-07
oaire:version	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/11001
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

外惑星の水は何を語るだろうか？

—水の照射効果を用いたESR年代測定・環境評価の試み—

理学研究科 *法 澤 公 寛 (内線5491)
 彼 末 一 則 (内線5493)
 平 井 誠 (内線5491)
 池 谷 元 伺 (内線5490)

*E-mail: kimi@ess.sci.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

我々の地球の表面は、液体の水で覆われている。ところが一歩地球を出て太陽から遠ざかり外惑星に行くと、まるで別世界になる。太陽から遠く離れた天体では温度が低いため、水の世界が出現する。水(H₂O)はもちろん二酸化炭素(CO₂)、二酸化硫黄(SO₂)、メタン(CH₄)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。このような天体の環境や歴史を知る上で、「水」の物性研究は欠かせない。

一般に外惑星環境下の「水」はH₂Oを主成分とし、不純物として少量のCO₂、CO、NH₃、CH₄などを含んでいる。また火星の極冠ではCO₂、木星の衛星イオではSO₂が固体となり、表面を覆っている(表1)。氷天体は大気が薄いものが多く、太陽からの紫外線やγ線、プロトンなど様々な放射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水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。

表1 主な外惑星やその衛星の表面温度・構成物質 (文献[2~4]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 ⁶ km)	表面温度 (K)	表面物質
火星	3,393	0.107	2.27	137~298	CO ₂ , dirty ice in the polar cap
木星			7.78		
イオ	1,815	0.015		135	sulfur, SO ₂
エウロパ	1,569	0.008		140	dirty ice
ガニメデ	2,631	0.030		154	dirty ice
カリスト	2,400	0.018		167	dirty ice
土星			14.3		
タイタン	2,560	0.023		?	N ₂ , CH ₄ gas
天王星			28.8		
ティタニア	790	0.00018		49	dirty ice
海王星			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

我々は氷天体表面に存在していると思われる物質を実験室内で作成し、人為的に γ 線を照射したものをサンプルに用いて、ESR（電子スピン共鳴）やTL（熱ルミネッセンス）によるラジカルの研究を行っている [1,4]。

2. 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、熱的に安定かつ被爆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。もし何らかの熱的作用を受ければ、その濃度はゼロになる。すなわち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。

ESRやTLを用いたラジカル濃度の測定が年代測定には広く用いられており、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 [4]。氷天体においては過去の火山噴火や隕石衝突が熱的イベントに相当する。このように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。

ここでは、これまで我々のグループが行ってきた実験結果について、ESRによる成果を中心に紹介する。

3. 実験

試料：氷天体に存在が報告されている氷を実験室で再現するため、 H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 CH_4 、 NH_3 やこれらの混合物を77Kで固化させたものを試料とした。これに ^{60}Co で18 kGyの γ 線を照射した後、乳鉢で粉末にしたものをESRで測定した。これら一連の作業はすべて液体窒素中（77K）で行った。

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は磁場を掃引して測定し、スペクトルは微分形で表される。

図1に γ 線照射した固体 CO_2 のESRスペクトルを示す。 CO_3^- や O_3^- ラジカルの信号が確認できる。これらのラジカルはそれぞれ特徴的な分光学的分離因子（g因子）を示す。また CO_2 に不純物として H_2O 、 SO_2 、 CH_4 を加えたものに γ 線照射をすると、それぞれ $HO_2\cdot$ 、 SO_3^- 、 $CH_3\cdot$ の各種ラジカルが生成する。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 [5,6]。

次に図2に固体 CO_2 のESRスペクトルの温度依存性を示す。温度上昇に伴い、最下部に示した120 Kでのスペクトルが190 Kのように変化し、ラジカルの消滅が見られる。

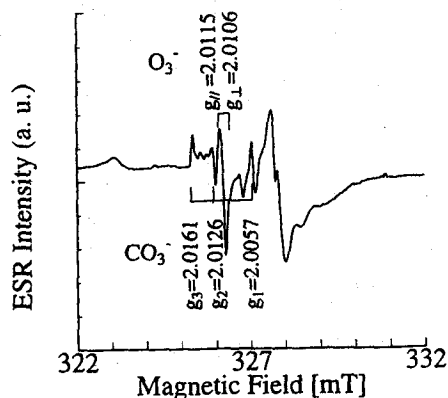


図1 γ 線照射した固体 CO_2 のESRスペクトル (77K, Xバンド)

図3は各種ラジカルの寿命を一定温度で調べる等温焼鈍実験から得た温度の関係をプロットしたものである[5~8]。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 SO_2 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[7,8]。

表2 γ 線によって77Kの水中に生成するラジカル

水	不純物	生成されるラジカル
H_2O	なし	$\text{OH}\cdot, \text{HO}_2\cdot$
	NH_3	$\text{OH}\cdot, \text{HO}_2\cdot, \text{NH}_2\cdot$
CO_2	なし	$\text{CO}_3^-, \text{O}_3^-$
	H_2O	$\text{CO}_3^-, \text{O}_3^-, \text{HO}_2\cdot$
	CH_4	$\text{CO}_3^-, \text{O}_3^-, \text{CH}_3\cdot$
SO_2	なし	$\text{SO}_3^-, \text{O}_3^-, \text{S}_4^*, \text{SSO}^-$

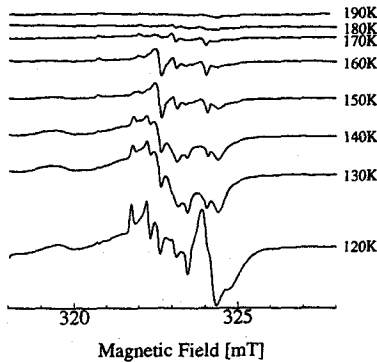


図2 固体 CO_2 のESRスペクトルの温度依存性

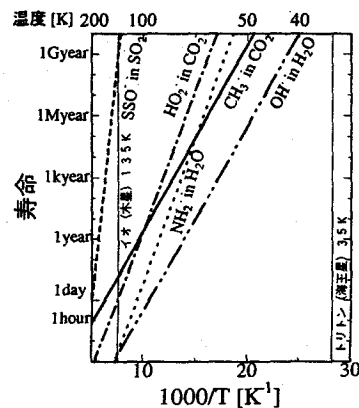


図3 様々な水の中に見られるラジカルのアレニウスプロット

4. まとめ

低温の水の中に生成する様々な放射線誘起ラジカルのESRを測定し、その熱安定性について調べた。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、熱的イベントのESR年代測定の可能性が示唆される。

紫外線や放射線は表面の水の中だけでなく大気中にもラジカルを生成する。例えば、彗星大気(コマ)中の CO 、 CN 、 CH 、 OH などが観測されている。また木星大気中には雷放電が観測されており、放電でも大気中にラジカルが生成すると考えられる。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。氷天体の場合、大気中のラジカルが表面の水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 $\text{HO}_2\cdot$ ラジカルが、 H_2O や CO_2 の固体中へトラップされることをESRにより確認した。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、表面の水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。

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。木星の衛星であるエウロパとガニメデの大気中のO₂は、降り注ぐ電子線によって表面を覆うH₂Oの水から生成すると言われており[9]、格子欠陥物理とラジカル化学の立場から水の照射効果にメスを入れる必要がある。

ESRやTLを用いて氷天体表面のラジカルを研究するためには、測定装置を外惑星に送り込まなければならぬ。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[10~12]。また、CO₂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[13,14]、探査機を用いた惑星探査への応用が期待される。

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年に小惑星ネレウスに向かって旅立ち、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。

謝辞

γ線照射においては、大阪大学産業科学研究所の池田稔治氏には大変お世話になりました。

参考文献

- [1] 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
- [2] J.A.Burns: *SATELLITES* (Univ. of Arizona Press, 1986)
- [3] D.A.Rothery: *Satellites of the Outer Planets* (Clarendon Press, Oxford, 1992)
- [4] M. Ikeya: *New Applications of Electron Spin Resonance - Dating, Dosimetry and Microscopy* (World Scientific, Singapore, 1993)
- [5] M. Hirai, M. Ikeya, Y. Tsukamoto and C. Yamanaka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) L1453
- [6] Y. Tsukamoto, M. Ikeya and C. Yamanaka: *Appl. Radiat. Isot.* **44** (1993) 221
- [7] K. Kanosue, M. Hirai and M. Ikeya: *Appl. Radiat. Isot.* **47** (1996) 1433
- [8] K. Kanosue, H. Toda, M. Hirai, H. Kanamori and M. Ikeya: *Radiation Measurements* **27** No. 2 (1997) 399
- [9] M. T. Sieger, W. C. Simpson and T. M. Orlando: *Nature* **394** (1998) 554
- [10] M. Ikeya and M. Frusawa: *Appl. Radiat. Isot.* **40** (1989) 845
- [11] C. Yamanaka, M. Ikeya, K. Meguro and A. Nakanishi: *Nucl. Tracks* **18** (1991) 279
- [12] A. Nakanishi, N. Sugawara and A. Furuse: *Appl. Radiat. Isot.* **44** (1993) 357
- [13] S. Takaki, M. Ikeya and C. Yamanaka: *Radiation Measurements*, **27** (1997) No. 2, 393
- [14] 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