

宇宙開発事業団技術報告

エウロパ探査ミッション／生命探査の具体的目標



2000年7月

宇宙開発事業団

宇宙開発事業団技術報告  
NASDA Technical Memorandum

エウロパ探査ミッション／生命探査の具体的目標

Europa Exploration: Life Detection Scenario on the Surface without  
Direct Contact to the Subsurface Ocean

白石 篤史  
Atsushi, Shiraishi

技術研究本部 先端ミッション研究センター 月利用推進研究室  
Lunar Mission Laboratory, Advanced Mission Research Center,  
Office of Research and Development

2000年7月  
July 2000

宇宙開発事業団  
National Space Development Agency of Japan

和 文 抄 録	<p>本文書は、エウロパ生命探査ミッションのハードウェア検討のための基礎資料に供することを目標に、エウロパの氷下にエウロパ固有の生物が存在した場合にその痕跡が天体表面にいかなる形で現れるかを、現在知られているエウロパについての諸情報に基づいて考察するものである。</p>
和文キーワード	

# 目 次

1. 目的	1
2. 参考文書	1
3. 検討内容	1
3.1 背景	1
3.2 目標および手順	2
3.3 検討	2
4. まとめ	17
参考文献	18

## 1. 目的

本文書は、エウロパの生命探査について以下の2点について考察し、その結果をもって探査ミッション機器のハードウェア設計のための基礎データとして供することを目的とする。

- (1) エウロパ氷上で検出され得る氷下の生命の痕跡の物性および形状の予測
- (2) それを検出する手法についてのアイデアの提示

## 2. 参考文献

巻末に示す。

## 3. 検討内容

### 3. 1 背景

ボイジャー1号および2号による「イオ」の火山活動の発見により、木星の第二衛星「エウロパ」の表層を覆う氷の下に液体の層、いわゆる「海」が存在する可能性が明らかとなった。これは科学者のみならず多くの人を惹きつける魅惑的な仮説である。なぜならば、液体の水は生命の存在を支える重要な、ひょっとすると必要充分かもしれない要因だからである。もちろん、木星の公転軌道における太陽光の弱さをはじめとする数々の否定的な要因もある。しかし、ボイジャーによる発見とほぼ同時期に地球の深海底に発見された熱水噴出口付近の生態系が示唆する、太陽光に依存せずに geothermal なエネルギーに支えられた生態系の可能性はそれらの懸念を吹き飛ばすのに充分であった。

1996年以降、探査機「ガリレオ」によって明らかになったエウロパの諸々の特性はこの「氷下の液体の水」仮説をさらに補強しつつある。氷の厚さ、そのプレートテクトニックな運動の速度などの詳細についてはまだ諸説あるが、氷の運動および氷下の液体の存在はほぼ確実視されつつある。また、そのエネルギー源としての氷下の geothermal な活動も、少なくとも過去のある時期までそれが存在していたことについては異論はほとんど出されていない。このような状況の中で、地球以外の生命の発見の場所のねらいをエウロパに定め、探査ミッションを起こそうという気運が世界各地で高まっている。

しかしながら、まだどのグループも思いつきを口々に叫ぶ域を越えていない。たとえば、「なにを発見すればエウロパ固有の命を発見したことになるのか。エウロパに生命が存在するならば、その表面には何が検出されるはずなのか」について、意見の統一は

おろか検討すらなされていない。その結果、エウロパの生命探査ミッション用ハードウェアのアイデアのようなより具体的なレベルにおいては、研究グループ間での議論すらままならないのが現状である。

### 3. 2 目標および手順

本文書では、具体的なエウロパ生命探査ミッション機器の検討の入り口に達することを目標に、以下の手順で現在の知識を整理していく。

大前提：

エウロパに存在する生物のタイプを、現在の地球で知られているものに限定する。

作業手順：

- (1) エウロパの氷／水層の底の環境の推定
- (2) 地球生命からの類推による、エウロパの氷／水層の底の生態系とそれに由来する生物関連物質／構造の推定
- (3) それが水層中を氷層下面まで昇る機構の推定
- (4) 氷層下面にとりこまれる機構の推定
- (5) 氷層にとりこまれた物質がエウロパ表面まで移動する機構と時間の推定
- (6) それらが、天体表層まで移動する間に受ける変成作用の検討
- (7) 我々の探査機がエウロパ表面で遭遇するであろう生物関連物質／構造の推定
- (8) それを非生物由来のものから弁別する方法のアイデア出し
- (9) 観測機器原理の提案

### 3. 3 検討

#### (1) エウロパの氷／水層の環境の推定

・氷／水層の厚さの合計：

これについてはすでに多数の論文が出されている。月等の他の地球型惑星／衛星との比重の比較からエウロパ表面の水の厚さを求めたものが主である。だいたい天体表層を25 km (G.A.Ransford et al. 1980) ~ 100 km (J.S.Lewis et al. 1971) の厚さでほぼ均等に氷／水が覆っているというのが定説である。近年、ガリレオによるエウロパ重力場の詳細なデータが得られつつあるので、氷と水を合わせた厚さについては慣性モーメントに基づいて算出された惑星モデルによるより正確な値が現れるだろう。ここでは、理科年表のデータのみからの概算例を示す。

半径：1569km

平均密度：2.97g/cm<sup>3</sup>

月、イオ、火星等エウロパと同程度の大きさでかつ「水気が少ない」と予想される地球型天体の密度は 3.3~3.9 程度である。諸説ある成因によっては典型的な例とは言えないかもしれない地球およびその月の密度の値を避け、エウロパの岩石部分の密度がイオと同じ 3.57g/cm<sup>3</sup> でありそれ以外がH<sub>2</sub>Oの水 (0.92g/cm<sup>3</sup>) あるいは水 (1.0g/cm<sup>3</sup>) であるとする、全体積のうち 22.6%を氷が、あるいは 23.3%を水が占めることになる。ここから、エウロパ表面は表層から半径の 8.2% (129km) が氷に、あるいは 8.5% (133km) が水に覆われていると予想できる。実際には氷層と水層の両方が存在すると予想されるため、本当の厚さはこの中間のどこかになる。以下の計算では氷/水が計 130km 存在するものとする。

・水/氷層の圧力

半径 1569-130=1440km、密度 3.57g/cm<sup>3</sup> の天体の表面に厚さ x [m]の密度 1.0×10<sup>3</sup>[kg/m<sup>3</sup>]の水の層がある場合、その表面の重力加速度 (g) は

$$g(x[m])[m/sec^2] = \frac{2.795 \cdot 10^{-7}}{(1.44 \cdot 10^6 + x)^2} (x^3 + x^2 \times 4.32 \cdot 10^6 + x \times 6.22 \cdot 10^{12} + 1066 \cdot 10^{19})$$

となる。これに水の密度 1.0×10<sup>3</sup>[kg/m<sup>3</sup>]を乗じたものを x=0[m]から 130[km]まで積分することにより (計算の簡素化のために x の 0 次項のみで近似) 水の底の圧力として

1.87×10<sup>8</sup>[Pa] (約 1800 気圧)

を得る。130 km の深さでありながら、これは、地球の深海底 (約 10 km) の圧力の約 2 倍程度である。また図 1 に示す水の相図より生命関連物質にとって破壊的な温度になることなしに液体状態の水を存在させることのできる圧力であることがわかる。

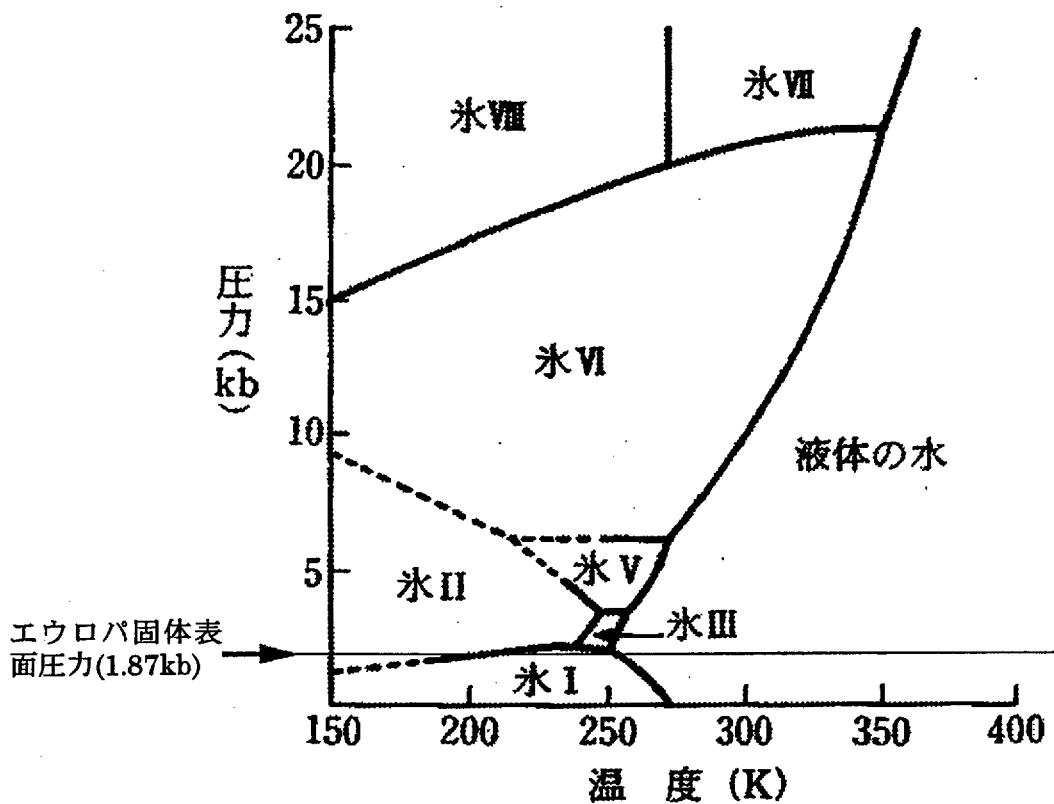


図1 水の相図 (S.W.Squyres 1983, 「現代の惑星学 (小森長生、東海大学出版会)」より孫引き) におけるエウロパ氷/水底の圧力。

(2) 地球生命からの類推による、エウロパの氷/水層の底の生態系とそれに由来する生物関連物質/構造の推定

地球以外の天体の生命のあり様を推定する場合、それを地球に存在するタイプのものに限定して考える必要はない。しかしながら、地球に存在しない形態にまで確実な推定を繰り広げることを可能とするほどの生命についての詳細な知識を我々は持っていない。現在は、それを探するための手段のひとつとして地球外の生命の探査を行っているとも言える段階なのである。

そこで、この制限の導入によってなにかを見逃してしまう危険があることを容認した上で、まずは地球に存在するものと同じタイプの生命のみをエウロパに探すこととする。



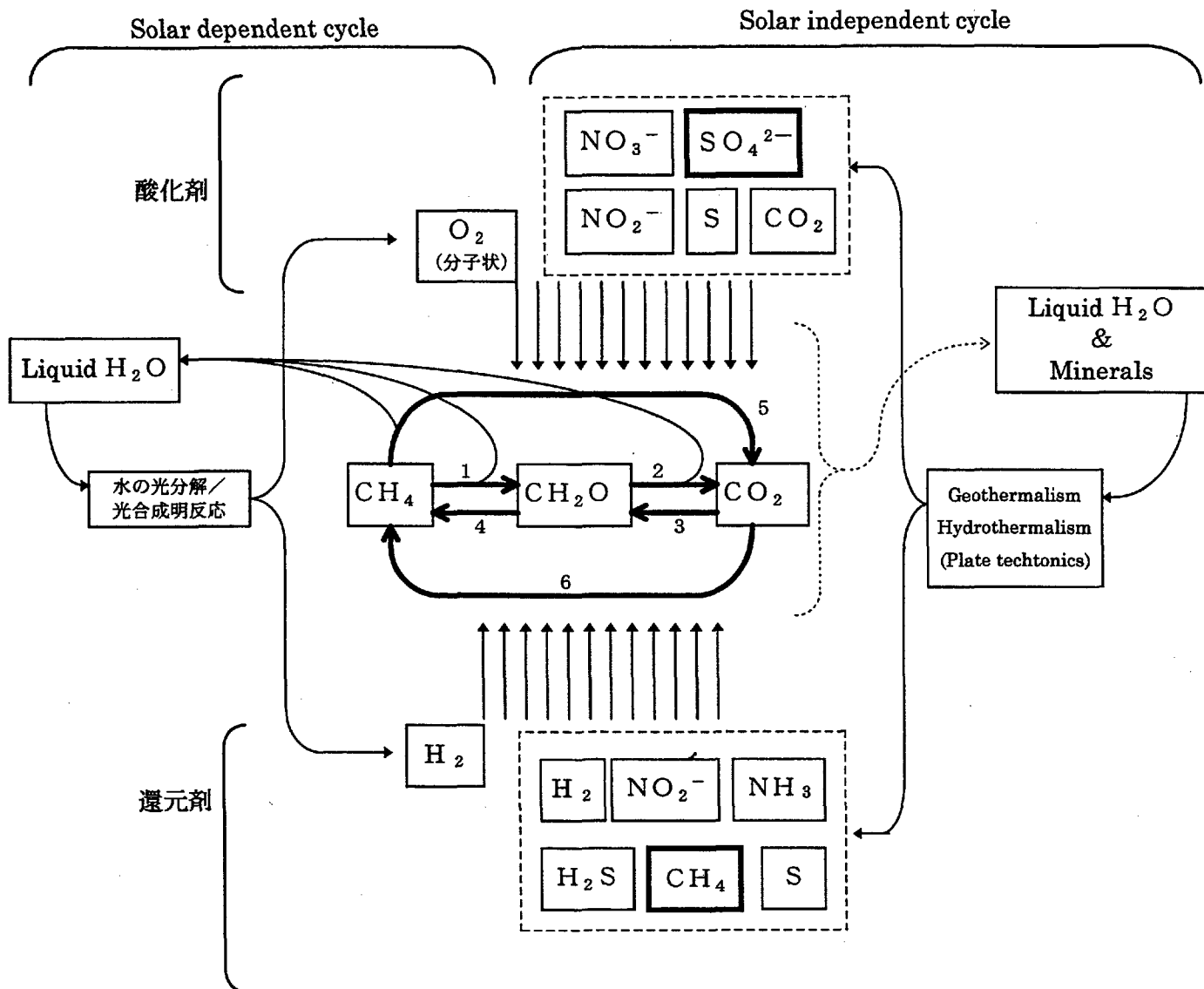


図2 物質の循環として見た地球の生命現象 (長沼 1998 に加筆)

化学反応としての生命は、太陽あるいは地質的なエネルギーによる水の分解を基点とした酸化還元反応によって炭素の酸化還元サイクルを駆動する現象と見なすことができる。

古細菌の多くは右半分を示す地球内部から供給される自由エネルギーを用いる。太線で囲んだものが主に地球内部から供給され、その他は主に2次的に生物活動で作られる。この場合は酸化剤として単体の酸素分子が現れないことが多い。それ以外の多くの生物では、クロロフィルによる光合成明反応によって作られた酸素を酸化剤として使い、還元剤側として炭化水素の形で供給される水素を用いてこのサイクルを駆動している。

地球のすべての生物の活動は、物質とエネルギーの流れという観点から図2のようにまとめることができる。この図においては、生命は「酸素と水素に分解された水の酸化/還元力に駆動される炭素の循環」として表現される。ごく例外的な場合を除いて水素が分子の形で現れることは少ない。また、光合成明反応無しに分子状酸素を製造する過程も知られていない。

真核生物はすべて図2の左半分、すなわち光合成によって生じた酸素分子に依存する系に属している。深海の熱水噴出口付近の生態系もこの例外ではない。これを支える細菌もそのほとんどが硫化水素の酸化に海上から供給される酸素分子を利用してゐる。それは、表1に示す主な化学合成細菌のエネルギー獲得反応のほとんどが酸素分子に依存していることにも現れている。

表1 主な化学合成細菌とそのエネルギー獲得反応 (長沼 1996)

細菌	エネルギー獲得反応	得られるエネルギー ( $\Delta G^{\circ}$ )	
		kcal/mol	kJ/mol
硫黄酸化細菌	$S^{2-} + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-}$	190	795
	$S + 3/2 O_2 + H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$	140	585
	$S_2O_3^{2-} + 2O_2 + H_2O \rightarrow 2SO_4^{2-} + 2H^+$	211	883
	** $S_2O_3^{2-} + 5/8 NO_3^- + 1/5 H_2O \rightarrow 4/5 N_2 + 2SO_4^{2-} + 2/5 H^+$	178	747
硝化細菌	$NH_3 + 3/2 O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O$	65	272
	$NO_2^- + 1/2 O_2 \rightarrow NO_3^-$	19	77
鉄酸化細菌	$Fe^{2+} + 1/4 O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 1/2 H_2O$	11	44
マンガン酸化細菌	$Mn^{2+} + 1/2 O_2 + H_2O \rightarrow MnO_2 + 2H^+$	16	67
水素酸化細菌	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	57	237
メタン生成細菌***	** $H_2 + 1/4 CO_2 \rightarrow 1/4 CH_4 + 1/2 H_2O$	8	33
メタン酸化細菌***	$CH_4 + 1/2 O_2 \rightarrow CH_3OH$	196	818
	**** $CH_4 + SO_4^{2-} \rightarrow HCO_3^- + HS^- + H^+ + H_2O$	4	16

\* 反応式左端の電子供与体 (酸化されるもの) 1 モルあたりの値

\*\* 嫌気 (無酸素的) 条件下での反応

\*\*\* 必ずしも化学合成細菌ではない

\*\*\*\* この反応を行う微生物はまだ確認されていないが、間接的証拠により存在が予想されている。

エウロパでは、液体の水は存在するとしても厚い氷の底になる。地球の海洋においても太陽光は深度200m程度までしか到達できず、一般に150m以深では光合成

による生産は行われないとされる。エウロパにおいては、液体層まで達するほどのクレバスの底のような場所を除いて太陽光に依存する生命を考えることは難しい。また、後述のように数キロメートル～数十キロメートルの厚さが想定される氷に200m未満の厚さの氷を残しながらそれだけの深さの垂直なクレバスが存在するとも考えにくい。さらに図2にも示したように、地球において分子状の酸素が現れる生命活動は必ず光合成を伴っている。

そこで、エウロパにおける存在を予測すべき生物は図2の右半分、すなわち分子状酸素の関与無しに駆動される生態系を構成しているものとする。このことから、ただちに以下の特徴が予想できる。

- ・真核生物は存在しない。

真核生物は、最終的に酸素原子に電子を渡すことによってそれ以外の方法に比較してかなり大きなエネルギーを産み出すミトコンドリアとの共生によってはじめて成立する生物である。地球上でも嫌気的環境で生存できる真核細胞生物は存在するが、それらは嫌気的環境ではミトコンドリアを休止させているだけで酸素に依存する電子伝達系を持たないわけではない。分子状酸素を活用できない真核生物は地球では知られていない、今回の考察では地球で知られていない生物を想定しないこととしている、かつエウロパ氷下の海では光合成明反応を支える光環境は期待できない、という3つの理由により、エウロパに真核生物は存在しない。

- ・個々の生物の大きさは最大でも地球のバクテリア程度である。

地球では、ほとんどの原核生物および古細菌の細胞の大きさは1  $\mu\text{m}$ 長から5  $\mu\text{m}$ 長の間にある。

- ・バイオフィームのような巨視的構造が存在し得る
- ・水中に浮遊する形態は、死亡した細菌やその分泌物の断片、細菌そのもの、孢子、および巨視的なバイオフィーム構造の断片、の4種類である。
- ・表1に示す反応は無生物的にも起こり得るものばかりである。そのため、生命の存在を確実なものとするためには実際に生産された生物体や生命関連物質の直接的観測が必須である。

この生態系の存在する場所は、図2の右半分の酸化剤/還元剤の供給が活発に行われる場所、すなわち火山活動のさかんな場所である。エウロパの水底でそれがどのような姿で現れるのかはわからないが、地球の深海底の熱水噴出口が示唆を与えてくれる。

地球の海洋では、太陽光による生産が盛んな水深150m程度以浅ではオーダーと

して $10 \sim 1000$ 個/cm<sup>3</sup>の細菌が培養によって検出される。培養不可能な細菌も検出可能な顕微鏡観察では、太平洋海水において海面から深度5000mにかけて $4.6 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^5$ 個/cm<sup>3</sup>との報告もある(多賀他、1972)が、これは細菌とそうでない類似の非生物的な構造が区別できていない可能性がある。細菌数は深度とともに低くなり、既知の方法で培養が可能な細菌に限れば200m以深では1個/cm<sup>3</sup>未満になることもまれではない。しかし深海底であっても、海中ではなく底の泥土中には $10 \sim 10^8$ 細菌/cm<sup>3</sup>(海域によって異なる)の生きた従属栄養細菌が観測されるのが普通である。

地球では、深海底であっても熱水噴出口における水中微生物密度は付近の海水に比較して非常に大きい。1977年のガラパゴスリフトでは、噴出熱水中に $10^8 \sim 10^9$ 細菌/cm<sup>3</sup>という極端な細菌密度が観測された。観測/採集方法に問題があったためかその後の報告では細菌密度は徐々に減りつつあるが、それでも $10^4 \sim 10^5$ 細菌/cm<sup>3</sup>程度は充分にありそうである(図3)。

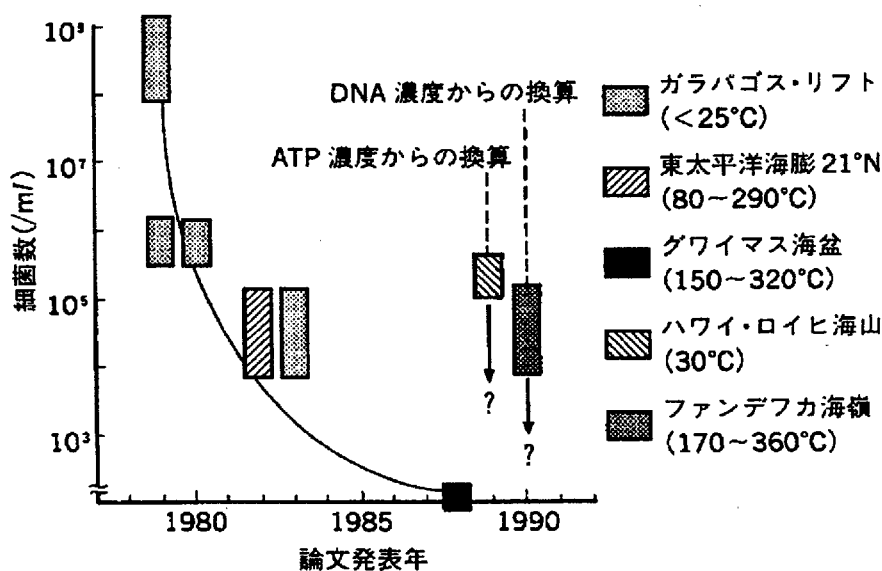


図3 熱水噴出口の熱水中の細菌密度の報告値(長沼 1996)

ここから、エウロパの海水中の微生物量の平均値を求められればよいのだが、熱水噴出口の数と熱水噴出量について根拠ある推定がないため、現状ではそこまでは及ばない。

### (3) 生物関連物質／構造が氷層中を氷層下面まで昇る機構

熱水噴出口付近の生物関連物質／構造が氷層の下端に達するための必要条件を考える。氷の厚さが2キロであるにせよ20キロであるにせよ、海底の熱水噴出口付近で生成した生物関連物質や生物関連の構造物はその氷に取り込まれるためには、100 km近い厚さの液体の水の層を昇らねばならない。それには浮力あるいはなんらかの上昇流が必要である。生物関連物質／構造はその多くが水とほぼ等しい比重を持つ。油脂のように水より明らかに軽いものもあり、また珪酸質のように重いものもある。軽いものは徐々に上昇する。重いものについては、その沈降速度が上昇流の速度を下回っていなければならない。

粘性抵抗を与える液体中での微生物粒子の沈降速度は以下の式で表される。

$$V = \frac{g}{18} (S - 1) \frac{d^2}{\nu}$$

$V$  [m/sec] : 沈降速度  $g$  [m/sec<sup>2</sup>] : 重力加速度  $S$  : 周囲液体に対する粒子の比重  
 $d$  [m] : 粒子直径  $\nu$  [m<sup>2</sup>/sec] : 周囲液体の動粘性計数

周囲液体を0°Cの水とすると、 $\nu = 1.792 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/sec]

エウロパにおいては  $g = 1.30$  [m/sec<sup>2</sup>]

生物関連構造の直径は前述Fの推測により  $d = 1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-6}$  [m]

$S$ は1.05程度とする。

すると、生物関連構造の凝集がなければ、沈降速度として

1.74 [cm/日] ~ 0.174 [mm/日]を得る。

上昇流の速度はこれよりも大きくなければならない。また、これらの値の間違った場合には、上昇流に乗れるかどうかによって粒子サイズの分別が行われる可能性もある。

いずれにせよ、この上昇流の速度を推算する手段は現在ない。以降の考察は、上昇流が十分に速く、エウロパ氷底海の海水は上述の生物由来構造の沈降速度よりも大きな速さで攪拌されている、すなわちエウロパ氷底海の生物由来構造物の密度は熱水噴出口付近のピークを除いて海底から氷底までの100 km以上にわたってほぼ一定とする。そのような状態が現実に起こり得るかどうかは今後の検討課題である。

ここでは明確な数値の提示は保留し、以降の検討で具体的な数値が必要になった場合は、エウロパ氷下水層の細菌あるいは生物関連物質／構造の数として1 ~ 10<sup>5</sup> 個/cm<sup>3</sup>という5桁ほどの幅のある数値を用いることとしたい。

#### (4) 生物関連物質／構造が氷層にとりこまれる機構

地球では、融点あるいはそれをわずかに下回る温度の水において、浮遊する微生物が氷結晶形成の核となり得ることはよく知られている。分子状酸素に依存する細菌ではあるが、氷核活性細菌のように氷核形成を積極的に支援する蛋白質を生産するものもある。

エウロパにおいても、生物関連物質が氷層の下面に達したとき、それを中心に微細な氷結晶が成長し、さらにそれが接続しあって最終的に天井を覆う氷に取り込まれる機構が働く可能性を否定する理由はない。この機構により、水中の生体関連構造の密度は水中と同等かそれより大きくなることはあれ、水中の値を下回ることはないことが予想できる。

もう一点、取り込まれた生物関連物質／構造の形態は、水中を浮遊していたときの形、すなわち孢子や細菌そのものあるいはその壊れた遺体、あるいはバイオフィルムの断片という形をそのまま残す。言い換えるなら、直径1～10 $\mu\text{m}$ の、周囲の氷からはっきりと区画された小胞として水中に存在するであろう。

一方、氷の成長は一樣に進まない場合が多い。液相の微妙な温度の変化や過冷却した水が一気に凍結するような突発的な変化は氷層の成長に緩速をもたらし、水中にとりこまれる生物関連物質／構造の密度にゆらぎをもたらす可能性がある。つまり、生物関連物質／構造の氷層中の分布には縞状の濃淡があるかもしれない。その空間波長は未知である。

#### (5) 水中に取り込まれた生物関連物質が天体表面に運ばれる機構と時間

1998年3月現在、エウロパの表面の氷の厚さとその内部の対流の速さ、および氷の割れ目に沸き上がるものの粘性については、研究者たちの見解は一致していない。ここでは、現在最新の説のひとつを例示する。(Michael H. Carr, et al.1998)。

- ・ボイジャーおよびガリレオの観測で、エウロパ表面の凸凹のスケールが高度幅としてせいぜい200m程度であることがわかっている。水に浮かぶ氷の上面の凸凹のスケールは水面下の氷山の「根」の深さで制限される。ここでも同様の制限が起こっているにちがいない。その場合、水面下の氷の厚さは氷と水の密度比により表面の凸凹の10倍程度、すなわち数kmのオーダーとなる。
- ・エウロパ表面の氷の殻の厚さは、最も小さな氷の小片の水平方向の大きさと同程度かそれ以下だろう、と予想できる。すなわち、2～3kmかそれ以下である。

- ・表面のかなり深いところまで氷だったと仮定しよう。その場合、表面の模様からその存在があきらかな氷の対流を起こすのに必要な粘性の低さは、その部分の氷の温度の下限值を与える。そこからエウロパ表面からある程度の深さまでの温度勾配が求まる。その結果、氷の厚さはあまり厚くならないことが導かれる。ある程度深くなったところで温度が融点を越えてしまうためである。
- ・小彗星の分布の予想とエウロパへの彗星衝突量の最新の推定から、断片化された(fractured)表面の年齢は1000万年の桁と推算される。同じ推算からブロック間の隙間の年齢はもっと若い。数百万年くらいかもしれない。

表面を埋めるブロックの間の数キロメートル幅の隙間の年齢が1000万年未満であるなら、その移動速度は0.1~1.0 mm/年程度となる。その隙間に沸き上がる氷の垂直方向の速さもその程度だろう。氷の厚さを仮に大きめに5キロメートルとすると、氷層下面で生成した新鮮な氷が天体表面に現れるまでの時間は500万年から5千万年となる。

#### (6) 天体表層まで移動する間に受ける変成作用

上記のように、探査機がエウロパ表面で検出する生物関連物質/構造は数千万年の時間を経て天体表面に現れたものである。その間、それは融点付近の水の温度(-20°C~0°C/図1)からエウロパ表面の温度(約-130°C)の氷中にあり、また浅層に達してからは数十万年の間宇宙線に曝されてきている。この履歴が生物起源物質/構造にいかなる変成をもたらすか、推定する必要がある。

氷の厚さを5 km、垂直方向の温度勾配は直線状、かつ氷の上昇速度を0.5mm/年とすると、1千万年の間に-20°C→-130°Cの温度変化と約60気圧→0気圧の圧力変化をほぼ直線的に経験することになる。さらに、表層付近では太陽光と宇宙線をあびるようになる。エウロパ表層の氷の透明度を水と同定度と仮定するならば、10 m深程度に達したところで地球の海の200 m深と同等の太陽光に曝され、さらに約1 m以浅では宇宙線の遮蔽力が地球の大気を下回るようになる。単純な計算では、地球の深海レベルから大気圏外の太陽光の1/25程度(木星の軌道を約5天文単位とする)までの強さの太陽光を浴びる期間は10[m]/0.5[mm/年]で2万年間程度以上、地球の大気の底~大気圏外程度の宇宙線を照射される期間は2千年以上となる。もちろん、表層付近では表面に露出する以前に水平方向の移動もはじまるので、これらの値はだいたいの目安である。

たとえば、探査機がエウロパ表面の氷の裂け目のちょうど中央に降り立ったならば、

目安としてその直下の氷は形成されてから数百万～数千万年を経ており、最近は弱い太陽光を数万年～数十万年にわたって、惑星間空間レベルの宇宙線を同じく数万年～十数万年にわたって、照射されてきたと考えればそれほど間違っていないものと考えられる。

一般に生物標本／試料をその繁殖力を損なわずに長期間保存するには $-60^{\circ}\text{C}$ を下回る温度の環境が必要とされる（江藤他、1997）。しかし、そこで言われる「長期」はせいぜい1万年程度であり、エウロパの氷を横切る旅の長さを2～3桁下回る。また、エウロパにおいては、氷底面に取り込まれた直後は融点近くから $-60^{\circ}\text{C}$ までの高温をやはり数百万年にわたって受けることになるため、いずれにせよエウロパ表層に現れた生物関連物質／構造に生命としての繁殖力を期待することはできない。後述の宇宙線による破壊のため、おそらく酵素活性も期待できないだろう。では、どのような姿になっているのだろうか？

生物関連物質への、数十万年間の太陽光照射の影響を予想する研究は調査した限りでは従来行われていない。紫外線によるDNA分子のピリミジンダイマーの生成、X線に誘発されるラディカルによる二重らせん構造の破壊が知られている程度であり、あまり定量的な推定ができない。温度の影響については、原油の発生機構に関連して比較的高温な環境の生物由来の沈殿物への影響の研究はなされているが、長期間の低温環境については文献がない。宇宙線についても同じく研究はないが、これについてのみ仮想的に照射量を増やすことにより長い時間を模擬して考察することができる。

多くの見落としをしをしていることを承知の上で、いま手をつけられる部分のみを以下のように考え、エウロパ表層付近の生物起源物質／構造の姿を予想することにする。

- ・氷の表層から数cm深さまでは、太陽からの紫外線の効果が飽和した状態にある。
- ・ $10^{10}[\text{eV}/\text{n}]$ 以上の銀河宇宙線の密度は、地球軌道付近で $10^{-1.8}[\text{個}/\text{cm}^2/\text{sec}/\text{sr}]$ である（図4）。これは、天体表面では10万年間に $5\mu\text{m}$ 径の生物関連物質／構造をこのエネルギーの宇宙線粒子が約30000回通過し、その平均間隔が26nm程度であることを意味する。さらに低いエネルギーの宇宙線まで考慮するならば、この付近のエネルギー帯では積分エネルギー分布はエネルギー $[\text{eV}/\text{n}]$ の $-1.6\sim-1.7$ 乗に比例しているため、たとえば $10^9[\text{eV}/\text{n}]$ 以上の宇宙線粒子は平均約4nm間隔で、 $10^8[\text{eV}/\text{n}]$ 以上なら平均約0.5nm間隔で透過することになる。また、それぞれの宇宙線粒子の、エウロパ氷中での電離効果の分布を図5 aおよびbに示す（例として、 $1.6\times 10^8[\text{eV}]$ の陽子線の場合を示す）。



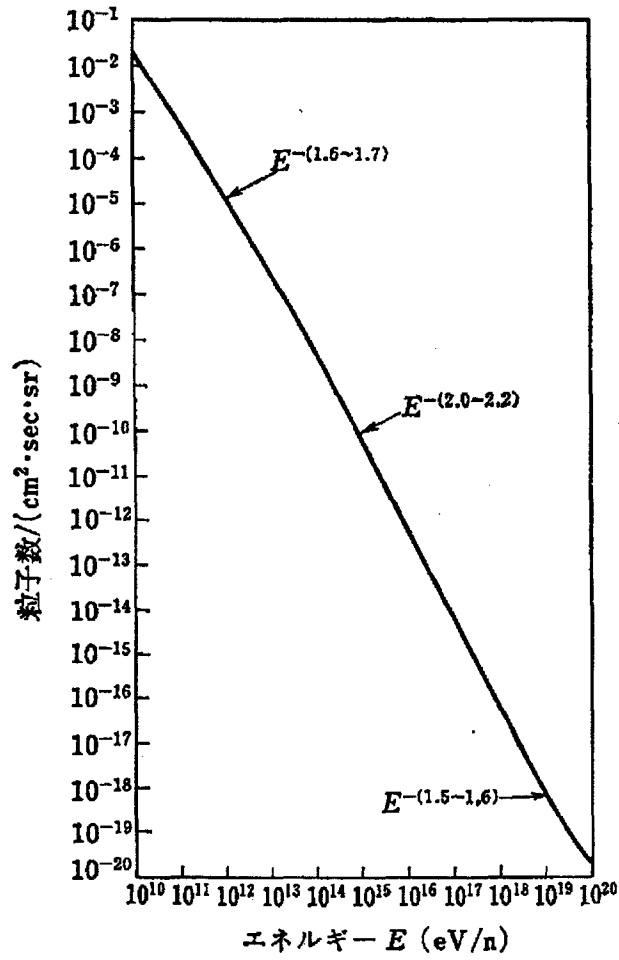


図4 宇宙線粒子全成分の積分エネルギー分布  
 (「宇宙線物理学」 朝倉書店、1983)

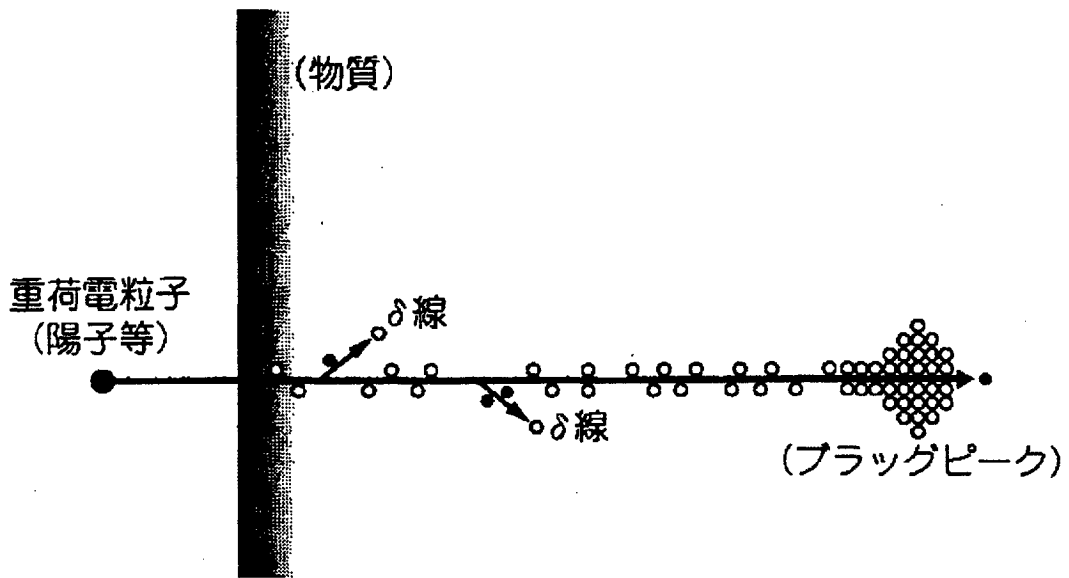


図5 a 重荷電粒子線の電離効果模式図（「放射線治療物理学」西台武弘 1996）  
 右向き矢印は飛跡を、○は一次電離によるエネルギー付与を、●は二次電離によるエネルギー付与を表す。

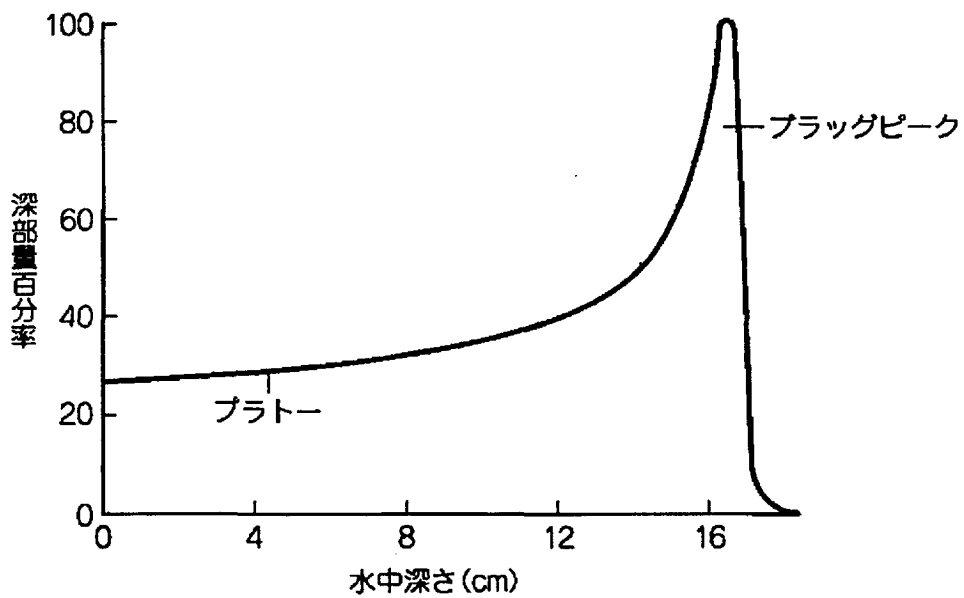


図5 b 水中における、160 MeV陽子線の深部線量分布 (Koehler, 1975)

図5 bの水を氷と読み替え、運動する物体に対する摩擦力との巨視的なアナロジーにより宇宙線（比較的多い陽子のみ注目）の制動距離がエネルギーに比例するとすると、天体表面に向かって氷とともに上昇してくる生物関連物質／構造は、水面下1

mに達するまでに  $1.6 \times 10^8$  [eV]以上のエネルギーの宇宙線のブラッグピークを、表面下 10 cm に達するまでに  $1.6 \times 10^8$  [eV]以上のエネルギーの宇宙線のブラッグピークを経験してきたことになる。この総合的な効果を定量的に把握するのは難しい。 $1.6 \times 10^8$  [eV]以上に限って考える場合、約 0.5 nm 間隔で分布する宇宙線透過跡それぞれが、図 5 b に示される確率分布で決定される分布のエネルギー付与を受けてきたことになる。

定性的な類推になるが、0.5 nm 間隔で降り注いだ  $1.6 \times 10^8$  [eV]の宇宙線は生物関連物質/構造にどのような影響を与えるだろうか。一般に炭素-炭素間の一重結合の長さは 0.15 nm、結合エネルギーは 83.1 [kcal/mol] (=3.61 [eV/結合]) であり、また水分子中の H-O 結合については、0.0957 nm、4.41 [eV/結合] である。これに比較して、多くの酵素分子の直径はそれらの結合距離の  $10^2 \sim 10^3$  倍、数 nm から数十 nm のオーダーである。

以下、これらの数値をベースに桁数のみで計算すると、宇宙線のエネルギーが分子の解離に使われる率が仮に 1% であれば、 $1.6 \times 10^8$  [eV]の陽子線は水中を約 16 cm 進む間に  $10^6$  個の水素あるいは OH ラジカルを作りそのかなりの部分がブラッグピークに集中する。ここから 16 cm の飛程で出会う約  $7 \times 10^7$  個の水分子の数%がラジカルになること、あるいはその飛程上にあるたとえば 50 nm 径程度の酵素の分子は宇宙線の進行方向に垂直な断面内で 0.5 nm 間隔に、進行方向には一カ所程度、計数千箇所の破壊を受けることが推算できる。

かなり荒っぽい計算であるが、この結果から、エウロパ表層付近で発見できであろう生物関連物質/構造中に、たとえば酵素のような巨大分子が含まれていた場合、それは酵素活性は失われているものの無傷のアミノ酸がかなり残っていることが予想できる。

#### (7) 我々がエウロパ表面で遭遇するであろう生物関連物質/構造

以上の (1) ~ (6) をまとめると、エウロパの広がりつつある氷の裂け目の中央に着陸した我々の探査機がそこに見いだすであろう氷下の水層の生命の痕跡は以下のような姿になる。

- ・水中に散在、あるいは水中に層を成して分布する  $1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$  径のさまざまな形の、氷からは画然と区別された袋状を成す。
- ・その分布密度は、氷下の水層の微生物の密度をそのまま反映し、 $1 \text{個}/\text{cm}^3 \sim 10^5 \text{個}/\text{cm}^3$ 。分布密度の正確な推定は今後の研究課題である。
- ・その構成物質は、数万年にわたって宇宙線による破壊を受けながらも、生物の構

成要素であったときの分子構造のかなりの部分を残している。すなわち、蛋白質ならば、酵素活性はほぼ完全に失われ分子の高次構造やかなりのアミノ酸が破損しているものの、無傷のアミノ酸もまたかなりの割合で含まれている。脂質2重膜においては一方所も寸断されていない脂肪酸が数%程度残っていてもおかしくない。核酸では、DNA 2重鎖の、2重のままの数ヌクレオチド長さの断片をはじめとする塩基/糖の一部が残存可能である。

## (8) 非生物由来のものから識別する方法

(7)でエウロパ表面で検出されるであろう生物関連物質/構造を示した。ついで、これらの起源が非生物的なものではないことが証明されねばならない。

エウロパ内部あるいはエウロパ外から非生物的な有機分子がやってきて水中に捕らえられた場合、その姿はどのようなものになるだろうか。たとえば以下のような特徴が考えられる。

- (a)周囲の氷との境界がはっきりせず、形が不定になる場合がある。
- (b)きわめて低濃度である(氷生成時に物理的な濃集が起こらない場合)。
- (c)光学活性がない(ラセミ体になるため)。
- (d)なんらかの、非生物的、無機質な固体に付着して産することが多い。
- (e)組成が非生物的。不定型な、いわゆるタール、石炭、アスファルトのような無秩序な分子が大部分を占め、生体関連の分子はそのごく一部として現れるにすぎない。

以上のうち、生物由来か否かをもっともはっきりと証明するのは(c)光学活性と(e)組成である。しかし、宇宙線にさらされる期間が長ければ長いほど本当の生物関連物質も(e)に近づいていくため、エウロパ表面の非常に古い地域においては(e)による識別の有効性は低くなる。

これらの状況を鑑み、エウロパ表面での生物関連物質/構造から氷下の生命の活動の存在/不在を論ずるに最も適当な観測を以下のように行うことを提案する。

- (1) 水中に点在する有機物質粒の検出と濃縮
- (2) 加水分解した有機物質の光学活性の有無の観測

(1)においてエウロパ氷中に生物関連物質と思われる有機物の構造があることを確認する。その時に、たとえば光学顕微鏡観測によって形態が一目瞭然で細菌のようなものであることがわかったとしても、それだけではそれが生物であったとは結論することはできない。なんらかの方法にてそれが炭素質、石質等の無機質なものではない

ことも確認せねばならない。その上で、最終的に(2)の光学活性の有無によって確証を得ることになる。

#### (9) 観測機器原理の提案

エウロパ着陸機にて行う生命痕跡探査活動の一案を示す。着陸機は、氷の裂け目の広がりつつある場所の中央、最も新鮮な氷が露出しているところに着陸するものとする。

- ・氷の表面～1 m深程度の部分の氷のサンプリングを行う。深ければ深いほど、宇宙線や電磁波による破壊の少ないサンプルが入手できる。
- ・得た氷を融かし、0.1  $\mu\text{m}$ 径ミリポアフィルターで固形物を抽出する。
- ・フィルターの光学顕微鏡観察
  - フィルタにひっかかった物質の形態の取得と計数
- ・同じフィルターの蛍光顕微鏡観察
  - ひっかかった物質の内、芳香環や炭素の二重結合をもつ有機物質を含むものの割合と形態の確認
- ・得られた物質の、アルカリによる加水分解と蒸留水への溶解
- ・溶液の分光光度観測、あるいは質量分光計による、物質の同定
- ・溶液の旋光性観測による、光学活性の確認

#### 4. まとめ

エウロパの氷下の液体状態の水層に生物がいるならば、氷の表面にどのような痕跡が現れるか考察した。存在し得る生命の形態、それが天体表面まで運ばれる機構を合わせて検討した結果、地球の細菌と同程度の大きさの、生物学的な活性を失ってはいるものの光学活性はかなり残した有機物質の顆粒として、氷中に $1\sim 10^5$ 個/ $\text{cm}^3$ 程度の密度で散在し得ることがわかった。

さらに、これを検出するための観測装置の原理として、旋光性への着目を提案した。

## 参考文献

- 「古細菌」 古賀洋介、UPバイオロジー73 東京大学出版会  
「微生物生態入門」服部 勉、UPバイオロジー32 東京大学出版会  
「海底熱水系の微生物」長沼 毅、「科学」Vol.66 No.7 p.492-499 (1996)  
「深海底の化学合成生物群集」橋本 惇、「科学」Vol.66 No.7 p.507-514 (1996)  
「放射線治療物理学」西台 武弘、文光堂 (1996)  
「宇宙線物理学」小田 稔 他編、朝倉書店 (1983)  
「海洋微生物」多賀 信夫、東京大学出版会 (1974)  
「Evidence for a subsurface ocean on Europa」 Michael H carr, et al.  
Nature, Vol391, p.363-365 (1998)

以上

宇宙開発事業団技術報告 NASDA-TMR-000005

---

発行日 2000年7月14日  
編集・発行 宇宙開発事業団  
〒105-8060  
東京都港区浜松町2丁目4番1号  
世界貿易センタービル29階  
TEL 03-3438-6000 (代表)

---

©2000 NASDA

無断複写、転載を禁ずる

<本資料に関するお問い合わせ先>

宇宙開発事業団高度情報化推進部成果利用課

TEL 03-3438-6582

