

米国における宇宙生物学の興隆と月惑星汚染 防止の実践にみる冷戦科学技術のダイナミクス

佐藤 靖

宇宙生物学 (Exobiology・Astrobiology) は、冷戦期、宇宙技術の進展に対応して急速に興った学問分野である。一九五七年一〇月四日、ソ連が世界初の人工衛星スプートニク一号の打上げに成功すると、そう遠くない将来に人類が月や惑星に探査機を送り込むことは確実であると考えられた。月や惑星の探索によって細菌などの微生物が発見されれば、あるいは生命体でなくても有機物の存在が確認されれば、生命現象の起源や進化の過程の理解にきわめて大きな影響を与えることが想定された。ジョシュア・レーダーバーク (Joshua Lederberg) をはじめとする当時の一部の生物学者はこの可能性に強い関心を寄せ、カール・セーガン (Carl Sagan) などの天文学者や他の分野の研究者とともに、宇宙生物学という分野を創始したのである。

宇宙技術の進展が宇宙生物学の興隆をもたらした一方で、宇宙生物学の成立は宇宙開発にある特殊な制約を加えることとなった。月や惑星に探査機を送る際に、その探査機に付着した地球上の微生物が生物学的汚染を引き起こさないようにする必要が生じたのである。もし月や惑星に既に何らかの生命体が存在したならば、探査機によってもたらされた地球上の微生物がその生態系を混乱させてしまう可能性がある。月や惑星に生命体が皆無だとしても、

のちの探査機が月惑星上に生命体や有機物を検出したときにそれが土着のものなのか地球から持ち込まれたものなのか区別ができなくなってしまう。すなわち、地球上の微生物によって月惑星を汚染してしまうことは、取り返しのつかない科学的資源の喪失を意味すると考えられたのである。さらに、月や惑星に生命体が存在した場合には、そこを踏査した人間やそこで採取されたサンプルが地球上に戻ってきたときに地球の生態系が大きな影響を受けてしまう可能性もある。このような事態を予防するために、探査機の無菌化 (sterilization) 措置が求められるようになったのである。だが、この無菌化措置はしばしば電子部品を含むハードウェアの熱処理を伴ったため、繊細な探査機の信頼性を損なってしまうなど技術的な制約を生んだ。この無菌化措置については、のちに惑星検疫 (planetary quarantine)、惑星保護 (planetary protection) と名前を変えて取組みが続けられた。

この月惑星汚染防止の概念とともに興った宇宙生物学は、正当な学問分野としての位置づけをなかなか与えられなかった。例えばハーバード大学の進化生物学者ジョージ・シンプソン (George G. Simpson) は一九六四年のサイエンス誌上で、地球外に生命体が存在する可能性がいかにも皆無に近いかを論じた上で、「あまりに多くの感情的要因と、はっきり言えば利己的な関心」がそうした合理的判断を妨げていると断じている。シンプソンは、従来の地道な生物学研究に費用と人材を割くべきだと主張したのである⁽¹⁾。また、サイエンス誌の編者フィリップ・エイベルソン (Philip H. Abelson) は、太陽系の中では比較的環境条件に恵まれた火星でさえも生命が存在する可能性はきわめて低く、無菌化に膨大な労力と費用をかけるのは非合理的だと主張している⁽²⁾。

それでは、このような状況において、宇宙生物学という分野はいかにして認知を獲得したのだろうか。火星探査の歴史を著したエドワード・エゼルとリンダ・エゼル (Edward Clinton Ezell & Linda Neuman Ezell) は、宇宙生物学を主唱したリーダーバークが若いながらも既に一九五八年に遺伝学の研究における功績により三三歳でノーベル賞を受賞し、生物学の分野において権威となっていたことを指摘する。既にキャリアを確立していたからこそ宇

宇宙生物学のような評価の定まっていない分野にリスクをとってコミットすることができたというのである⁽³⁾。科学史家オードラ・ウルフ (Audra J. Wolfe) は、リーダーバークらが月惑星や地球の生物学的汚染という恐怖の払拭を旗印に掲げ、国家主義的な宇宙計画全体の中での宇宙生物学の国際的・中立的な科学としての性格を強調することで、一部の有力な生物学者・化学者の支持を確保し、同時に財政的基盤をも確保した、と論じている⁽⁴⁾。スティーン・ディック (Steven J. Dick: 現 NASA 歴史室長) は、宇宙時代の幕開け以前に、化学や生物学、天文学の分野ですでに宇宙生物学に連なる研究が連綿と営まれていたことを紹介した上で、リーダーバークはじめ一部の有力な生物学者がそれまでの生物学に欠けていた普遍性を築き上げるといふ志を共有して宇宙生物学の急速な立上げに意欲を燃やした、と論じている⁽⁵⁾。

本稿では以下、こうした見方を踏まえつつ宇宙生物学の興隆を追ったうえで、月惑星汚染の防止を唱える宇宙生物学が宇宙探査という冷戦技術の現場でどこまで実際の影響力を持つことができたのかを検討してみたい。物理学者をはじめとする科学者が大きな政治力をもった冷戦期において、航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration: NASA) が科学者コミュニティの意向を尊重せざるを得なかったことは確かである。科学の価値を軽んじることは国家的な信用をも損ねなかった。そこで、以下にみるように、NASA は探査機の無菌化に取り組み、NASA において無人月惑星探査を担当したジェット推進研究所 (Jet Propulsion Laboratory: JPL) の技術者らは無菌化に多大な労力を費やすこととなった。しかし、当初は極めて厳格であった無菌化要件は、その後着実に緩和されていった。これは月や惑星の環境条件が生命の存在にとって厳しいことが認識されていたためでもあるが、信頼性の高い月惑星探査機を開発するためには無菌化という足かせを外す必要が技術開発の現場においてどうしてもあったためでもある。冷戦下において、技術は科学に一定の配慮を払わなければならないが、結局、宇宙開発という典型的な冷戦科学技術の全体のプロセスをコントロールしていたのは科学者ではなく技術者であっ

たという構図がここに垣間見える。

なお、宇宙生物学という学問分野は、太陽系外の知的生命体を対象とするSETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) プロジェクトを含む領域と、太陽系内の生命体を対象とする領域の二つに大きく分けられるが、本稿で扱うのは後者である。また、無重力等の特性をもつ宇宙空間の環境における生体の挙動を究明する宇宙環境生物学や、宇宙飛行士の安全と健康の確保を目的とした宇宙医学についても、本稿では取り扱わない⁽⁶⁾。

一、宇宙生物学と月惑星汚染防止の起源

世界の科学者コミュニティが月惑星の汚染防止という問題意識を初めて表明したのは一九五六年九月、国際宇宙連盟 (International Astronautical Federation: IAF) 第七回総会においてである。IAFは、翌一九五七年には月惑星汚染防止のための国際的な調整の場を設けることを提案している。米国では一九五七年末、全米科学アカデミー (National Academy of Sciences: NAS) が「衛星・生命科学シンポジウム」の開催を提案し、翌一九五八年五月、米国生物科学会 (American Institute of Biological Sciences) と全米科学財団 (National Science Foundation) の協力を得てこれを開催している。NASはまた、一九五八年二月八日、月惑星探査計画の立案に際しては「細心の注意と深い配慮をもって」あたるよう呼びかける声明を出している⁽⁷⁾。ソ連によるスプートニク一号の打上げが一九五七年一〇月四日、ソ連のルナ二号が世界初の探査機月面突入を達成したのが一九五九年九月一四日であるから、人類の宇宙探査が現実になる直前、あるいはほぼ同時期に月惑星汚染防止の考え方が現れてきたといえる。

米国において、月惑星汚染防止の問題を議論する主要な場となったのは、NASが一九五八年六月に設置した宇宙科学委員会 (Space Science Board: SSB) である。その初代座長は、地球物理学者であり有力な科学行政官でもあったロイド・バークナー (Lloyd V. Berkner) であった。SSBは宇宙科学全般について調査審議する委員会

であったが、その中でも月惑星汚染防止の問題を専門に調査審議する場として、東海岸地球外生命委員会 (East Coast Committee on Extraterrestrial Life: EASTELX) と西海岸地球外生命委員会 (West Coast Committee on Extraterrestrial Life: WESTELX) が相次いで設置された。一方、国際的には国際学術連合 (International Council of Scientific Unions: ICSU) が、NASの求めに応じて地球外探査による汚染に関する臨時委員会 (ad hoc Committee on Contamination by Extraterrestrial Exploration: CETEX) を設置した。CETEXは一九五八年五月と一九五九年三月に二回にわたって会合を開いたが、ICSUはさらに一九五八年一〇月初旬に開かれた会合においてCETEXの所掌事項を新設の宇宙空間研究委員会 (Committee on Space Research: COSPAR) に引き継ぐこととした。COSPARは同年一月に開かれた第一回に続いて毎年総会を開き、これが月惑星汚染防止に係る方針を含め宇宙開発に係る諸問題の国際間の調整の場となった⁽⁸⁾。

科学者個々人が月惑星汚染防止を訴える論文も一九五〇年代末からみられるようになった。先陣を切ったのは、上に述べた様々な委員会でも中心的な役割を果たしていたリーダーバークである。リーダーバークは一九五八年、サイエンス誌上で、月面上に蓄積された塵の中に有機物が含まれている可能性があること、その解析が生命の起源の解明に大きな貢献をもたらす可能性を秘めていることを指摘した上で、こうした将来の科学上の研究対象を保護するための「保守的な方策」について早急に検討する必要があるとしている⁽⁹⁾。リーダーバークの議論の特徴は、彼の一九六〇年の論文にもみられることであるが、地球外生命の存在の可能性そのものに関心を置くのではなく、宇宙に存在する生命体や有機物と地球上のそれとの比較により生命現象の本質に迫ろうとしているところにある。彼は同論文の中で、生物学においては普遍的な原則と呼べるものがダーウィンの進化論以外に未だ見あたらないことを指摘し、物理学や化学との間の「格差 (disparity)」を認めた上で、生命の抽象的定義が理論生物学の重要な課題だとしている⁽¹⁰⁾。彼は、以前の大腸菌の遺伝学研究により既に大きな評価を得ていたが、当時の生物学の若

き權威として、生物学の基盤の確立に意欲を燃やし、その手段として宇宙生物学を提唱していたのである。

初期の宇宙生物学のもう一人の旗手はセーガンであった。セーガンは一九五九年、NASAにおいて月面の生物学的汚染に関する論文発表を行っている。当時セーガンはまだ二五歳のシカゴ大学の大学院生だったが、すでに前年か前々年、九歳年上のレーダーバークと出会っていたようである。論文の中で、セーガンは月面上の塵の下に存在する可能性がある有機物の量を推算する一方、地球から持ち込まれた微生物が月面で繁殖して月面上の生態系を混乱させてしまう可能性を「わずかではあるが無視できない」と述べている⁽¹⁾。天文学と生物学を専攻していた彼は、未だレーダーバークのような權威ある研究者となっていなかったが、月面の物理的状況などについて定量的議論を展開し、数式を用いて宇宙生物学の問題を扱おうとした。そうした議論は、不確かな推定や推計に基づくものではあったが、宇宙生物学の内実の構築を一側面から支えたといえる。

レーダーバークとセーガンは、協同して月惑星上の生命探査とその汚染防止を唱えた。彼らは、一九六二年の共著の論文の中では火星の局所的な環境において生命が存在する可能性を主張している。同論文は、火星の低温、低圧、それに水分や酸素の欠乏などが生命の存在にとって基本的に厳しい条件であることを認めつつも、例えば火山活動が存在する地域においては条件が良くなっていることが考えられるとしている。そして、月惑星探査が急速に進展しようとしている現状において、月惑星の汚染防止に係る議論が喫緊の課題であると訴えている⁽²⁾。レーダーバークとセーガンの間の協同関係は大変成功したとみることができる。彼らは宇宙生物学の形成において中核的な役割を果たし、この分野の研究者のネットワークは急速に広がっていった。

二、月惑星汚染防止の実践

二・一 NASAにおける取組みの開始

一九六〇年代前半、米国とソ連は無人月惑星探査の分野で激しい競争を繰りひろげた。一九五九年九月一日にルナ二号により世界初の探査機月面突入を達成したのはソ連であったが、米国もJPLが中心となって三つのプロジェクトを進めた。すなわち、月面突入を行う「レンジャー」、金星や火星のフライバイ（近傍通過）を行う「マリナー」、そして月面軟着陸を行う「サーヴェイヤー」である。レンジャー計画は、月面の近接写真を撮影することを目的としていたが、その初期においては失敗が相次ぎ、一九六四年七月二八日に打ち上げられたレンジャー七号が初めてミッションを成功させた。一方、マリナー計画においては、一九六二年二月一日にマリナー二号が世界初の金星フライバイを、一九六五年七月一日にはマリナー四号が世界初の火星フライバイを達成し、これら天体に関する多くの新しい科学的知識がもたらされた。サーヴェイヤー計画においては、一九六六年五月三〇日に打ち上げられたサーヴェイヤー一号がソ連のルナ九号に遅れること五ヶ月、米国初の月面軟着陸を達成した。以下、これらの計画における月惑星汚染防止の実践についてみていきたい。

SSBは一九五九年九月一日、NASA長官キース・グレナン（T. Keith Glennan）あて文書の中で探査機の無菌化の実施を求め、グレナンは同年一〇月一二日付け文書でその対応を約束した⁽¹³⁾。同月一日NASA宇宙飛行計画室長のエイブ・シルヴァーシュタイン（Abe Silverstein）はJPLを含め関連センターに対して「天体に接触するかもしれないペイロードは打ち上げ前に無菌化される必要がある」旨通知している。シルヴァーシュタインは、この無菌化実施の決定にあたってNASAは「科学的問題、技術的課題、宇宙の科学的調査を保護するNASAの責任、そして米国の信望と節操」を考慮したとしている。つまり無菌化の実施にあたっては科学的考慮だけ

でなく政治的考慮も勘案されていたのである。そして、NASAが無菌化を実施していくにあたっては、すでに無菌化に関して相当の知見を有していた陸軍の協力を仰ぐこととされた。しかしこの時点では、無菌化をどこまで徹底すればよいかという定量的な規準は考慮されていなかった⁽¹⁴⁾。探査機のような巨大なハードウェアの無菌化を実施するとき、百パーセント確実に一つの微生物も残らず完全に無菌化できることは考えられなかったから、実際の無菌化の際にはなんらかの規準が必要になると考えられた。

無菌化の実施に関する定量的な規準を最初に提案したのは、JPLのリチャード・デイヴィス (Richard W. Davies) とマークス・コミュンツィス (Marcus G. Comuntzis) である。彼らは一九五九年、第一〇回IAF総会において発表した論文において、火星および金星に関しては一つのミッションによって一個の生命体(微生物など)を持ち込んでしまう可能性を百万分の一以下とすべきこと、月に関しては十分の一あるいは百分の一以下とすべきことを主張した。当時はまだ月や火星、金星の環境に関する知識が乏しかったが、月においては火星および金星に比べて生命体が生き延びる可能性はるかに小さいことは確かであろうとされていたため、このように差がある数字が提示されたのである。しかしながらこれらの数字は必ずしも定量的な根拠をもって提示されたものではなく、のちにはこのような規準は厳しすぎるという声が強くなっていくのである⁽¹⁵⁾。

デイヴィスとコミュンツィスはさらに探査機の無菌化のための具体的方策についても議論している。考えられる方策としては摂氏一六〇度程度における熱処理、酸化エチレンガスによる処理、放射線照射などがあった。だが、熱処理は最も確実な殺菌効果を有するものの繊細な電子部品等を破損してしまう恐れがあり、酸化エチレンガスはゴムやプラスチック、油などにもある程度浸透し殺菌力が極めて高いものの、例えばねじの隙間や特定の部品の内部には浸透できないという欠点があった。放射線照射については、細菌が比較的高い耐性を有するため実用的ではないとされた⁽¹⁶⁾。

二・二 レンジャー計画における無菌化の実践

JPLは陸軍と協力しつつ無菌化の手順について検討し、一九六〇年春、レンジャー計画におけるガイドラインをまとめた。その中では、まず部品・サブシステムのレベルで摂氏一二五度二四時間の熱処理を施し、無菌空間で組立て・試験を行い、最後に打上げ前に機体全体を酸化エチレンガスにさらすこととされた。ここで、熱処理の摂氏一二五度二四時間という設定は、陸軍の協力により行われた実験に基づいて、無菌化の効果を確保しつつ電子部品の信頼性を損ねないための「最良の妥協」の結果定められたものであった⁽¹⁷⁾。

しかしながら、JPLの技術開発の現場においては探査機の無菌化の実施が円滑に行われたとは言い難い。まず第一に、JPLの技術者がみな無菌化の重要性を真摯にとらえていたとはいえなかった。JPLの無菌化の担当官は一九六一年四月五日付けの所内連絡文書において、特定の部品ないしはサブシステムを担当する技術者らが「無菌化に向けて真剣な努力をする意思を明らかにもっていない」場合もあると嘆いている⁽¹⁸⁾。そのうえ、無菌化を実践していく過程でJPLの技術者たちは多くの困難に直面した。最も深刻だったのはやはり熱処理による電子部品等の故障、ないしは信頼性の低下である。そこでJPLは、特定のトランジスタやコンデンサー、推進剤などに関して次々と無菌化要件の免除をNASAに申請し、NASAもこれを許可することとなった⁽¹⁹⁾。現実の場面における技術的困難のために、科学的配慮が妥協を迫られたのである。

一九六一年八月二三日に打ち上げられたレンジャー一号を皮切りに一九六二年一〇月一八日に打ち上げられたレンジャー五号まで五機全てが失敗に終わるに及んで、無菌化は断念されることになった。JPL所長のウィリアム・ピカリング (William H. Pickering) は、NASA本部の宇宙科学室長ホームー・ニューエル (Homer E. Newell) あて一九六二年一月二日の文書の中で、レンジャー計画における無菌化処理を全面的に中止する旨の指示を求めている。これに対する一月二七日付のNASA本部からの回答の中では「過去二年にわたる経験は、システムの

信頼性を容認できないほど低レベルに落とすことなく無菌化された探査機を開発するということが現時点の技術では可能でないように考えられるということを示したということに我々は完全に同意する」とあり、無菌化要件の再検討を行う旨が述べられていた⁽²⁰⁾。また、一月三〇日付のレンジャー五号の失敗原因の調査委員会の報告書の中には、無菌化処理を中止すべきだという勧告が含まれた。同報告書は、熱処理をただちに放棄して化学的な無菌化手法等に切り換え、また無菌化処理そのものの必要性についても再考することを呼びかけた。さらに、すでに無菌化処理を受けた部品については、未処理のものに置換するように求めた⁽²¹⁾。結局、一月二一日付でNASA本部は無人人月探査計画における無菌化措置を全面的に中止するというJPLの提案に同意した⁽²²⁾。

このような流れの背景には、科学者コミュニティの月惑星汚染防止に係る見解が、特に月に関しては次第に軟化してきたことが挙げられる。一九六二年六月から八月にかけてNASAはアイオワ大学に多くの科学者を集めて宇宙科学全般に関する夏期研究会を開催しているが、そこでは月の汚染は惑星の場合ほど深刻な問題ではないという意見が聞かれた。JPLからNASA本部に申請されていた無菌化要件免除の申請についても容認すべきだと報告書は指摘している。ただし月の汚染が問題から除外されたわけではない。研究会の報告書は依然として月の汚染が「可能な限り最小限に」と定められるべきだとしているし、特に有人月探査アポロ計画の実施にあたっては厳格な検疫を求めている⁽²³⁾。

それでは、このように科学者コミュニティが無人人月探査の無菌化に関して姿勢を軟化させていったのは、月に関する新しい科学的知見に依拠した科学者自身の自律的判断だったとみるべきか、それとも政治的意味を強く帯びた宇宙技術への配慮だったとみるべきか。もちろん双方の要因が関与していたのであるが、後者の比重が相当大きいように考えられる。リーダーバークとともに無菌化の問題に当初から深くかかわっていたプリンストン大学の生物学者コリン・ピットENDRIGH (Colin S. Pittendrigh) は一九六三年六月、次のように議会の公聴会で証言している。

「レンジャー計画の緊急性が、我々に科学者コミュニティとして集合的に、月へ向かう探査機の無菌化における絶対的厳格さへの我々の初期の要求を緩和するよう導いた」。ピッテンドリーはより端的に、無菌化要件の緩和措置がとられた主な理由は「強力な非科学的な配慮」であって、それは「科学的な配慮」の観点からは「残念ではあるが許容できる」ものであったとも述べている⁽²⁴⁾。彼にとってそれは「政治の現実」だったのである⁽²⁵⁾。

無人月探査に係る無菌化要件の緩和は、NASAが一九六三年九月九日に出した文書において公式に定められた。この文書では、月については「月表面の状態は既知の地球上の微生物の繁殖を妨げるという科学的見解」があることに触れた上で、十分な情報が得られるまでは「広範な、あるいは過度の汚染」を防ぐ方針が示された。その一方で、惑星については生物学的汚染の可能性があることを認め、これを防止することを明記している⁽²⁶⁾。

さて、前述のようにレンジャー計画に関しては無菌化要件が撤廃されたのであるが、実際には化学的な無菌化手法はある程度用いられ、無菌環境での組立て作業なども行われた⁽²⁷⁾。ただし、熱処理は完全に中止され、これにより探査機ハードウェアの信頼性の低下に歯止めがなかった。そして、この後ようやくレンジャー計画は成功に向けて動き出す。一九六四年一月三〇日に打ち上げられたレンジャー六号については、月に向けて順調に飛行を続けたものの、月面の写真を撮るはずのカメラ・システムに故障が発生してしまい、最後の最後で失敗となってしまった。しかし、同年七月二八日に打ち上げられたレンジャー七号は完全に成功し、翌年打ち上げられたレンジャー八号および九号も成功した。そして、これらの探査機によって、地球上からの観測よりもはるかに解像度の良い月面の画像が得られたのである。

二・三 マリナー計画における惑星汚染防止の実践

月探査計画についてはこのようにレンジャー計画の終了までに無菌化要件は撤廃されたが、惑星探査計画につい

てはそれほどの緩和は見られなかった。特に火星の環境は他の惑星に比べると地球上の環境に近い⁽²⁸⁾ため、地球上の微生物の中には火星上で十分生き延びる可能性があるものがあると考えられた。それでも一九六二年には、火星を含む惑星に係る無菌化の規準を一定程度緩和する動きがNASAのイニチアティブにより起こった。同年七月九日、NASA、JPL、関連メーカー、そして陸軍の関係者が中心となって無菌化に関する部内の会合をもっている。

この会合においては、「何をすべきかではなく何ができるか、それをどのようにすべきかという観点から」無菌化について議論しようという趣旨説明が冒頭でなされている。すなわち、科学的な理念からではなく現場の技術的な視点から無菌化問題を取り扱って議論してみようということである。その会合の場で、惑星汚染の許容可能性を従来のデヴィスとコムンツィスによって提案された百万分の一という数字から一万分の一に変えることが議論されている。この案は、NASAがアイオワ大学に多くの科学者を招いて開催していた夏期研究会に持ち込まれた。結局、この夏季研究会が定めた規準において、高温の環境ゆえ生物学的汚染が発生しにくいと考えられていた金星については探査機が誤って惑星に衝突してしまう可能性を百分の一以下に、より生物学的汚染の可能性が高い火星については一万分の一以下に抑えるよう求められた⁽²⁹⁾。

だが、こうした定量的目標設定は多分に恣意的なものであった。一万分の一という数字を最初に議論した上述のNASAとJPLの部内会合では、JPLの担当者は「一万分の一という許容限界は実はあまり意味をもたない。我々ではできるだけ最善の手法を用い、できるだけ注意深い手法を編み出していかなければならないことなのだ。特定の手順について実際に数字を得ることは……可能ではないように私には思われる」と発言している⁽²⁹⁾。部外者から見ても、たとえばイリノイ大学の生物学者キンブル・アトウッド (Kimball C. Atwood) は、このような数値目標が「判断の問題」であり、「計算のためにアプリアオリに前提される恣意的な数値」であって、「事実や論理によって厳密に立証できる特定の数値は存在しない」と述べている⁽³⁰⁾。もちろん、統計的手法を用いて分析モ

デルを設定しこれら数値目標を裏付けようとするセーガンらの試みも存在したことは事実である³¹⁾。しかし、そうした統計的議論は様々なパラメーターを推測により仮定しており、当該仮定が確たるものであるとは到底いえない以上、数値目標の裏付けの妥当性も確保されているとはいえない。したがって、このような規準はその後長きにわたって議論の対象となるのである。

一九六〇年代においては、NASAが実施した惑星探査計画はすべて惑星周回ないしはフライバイを行うものであり、惑星に着地、突入あるいは大気突入する計画は当面存在しなかった。NASAの最初の惑星探査計画は「マリナー金星一九六二」計画である。これはJPLが一九六一年八月に提案した計画で、一九六二年七月二日にマリナー一号が、同年八月二七日にマリナー二号が打ち上げられ、このうち前者はロケットの誘導システムに問題が発生して失敗に終わったものの、後者は成功し、同年十二月に世界初の金星フライバイを達成した。NASAの次の惑星探査計画は「マリナー火星一九六四」計画であった。これは、マリナー金星一九六二計画関係の業務がピークを過ぎた一九六二年後半に始まり、一九六四年一月五日にマリナー三号が、同年一月二八日にマリナー四号が打ち上げられ、このうちやはり前者は失敗に終わったものの、後者は翌一九六五年七月に火星フライバイを達成した。このマリナー金星一九六二計画とマリナー火星一九六四計画はいずれもフライバイ計画であったため、無菌化は徹底されなかったが、探査機が誤って惑星に衝突し生物学的汚染を引き起こしてしまうことを防止することが求められた。

当時の国際的な月惑星汚染防止の規準は一九六四年五月に開催されたCOSPAR総会において採択された決議であり、この決議においては、惑星に着地ないし突入あるいは大気突入する一基の探査機について一個の生命体が存在する可能性を一万分の一以下、惑星周回ないしはフライバイをする無菌化されていない一基の探査機が誤って惑星に突入してしまう可能性を十万分の三以下とすることが求められていた³²⁾。実際には、マリナー二号は金星

から約三万五千キロメートル離れた地点をフライバイしたため突入してしまう恐れはなく、マリナー四号については火星から約一万キロメートルという比較的近い地点をフライバイしたが、同探査機の打上げ時には軌道を意図的に逸らして火星から約六十万キロメートル離れた地点を狙い、中途軌道修正により慎重に予定軌道を火星に近づけるという手順がとられた⁽³³⁾。

このように惑星周回ないしはフライバイについては、衝突の可能性を回避することで汚染防止の要件を満たすことができたが、着陸機ないしは突入機についてはその無菌化が大きな問題となった。それに該当するNASAの最初の計画は一九七五年打上げのヴァイキング計画であったが、一九六〇年代にもすでに火星の汚染防止に係る要件について議論がなされていた。火星着陸計画の立ち上げは時間の問題とみられたし、実はマリナー火星一九六四が計画された際にもカプセルを火星大気中に送ることが検討されたことがあった。

一九六七年、火星の汚染防止に係る要件を緩和すべきとする二件の論文がサイエンス誌上に掲載された。いずれもJPLあるいはカリフォルニア工科大学の研究者によるものである。第一の論文は、火星の環境等に関する最新の科学的知見を動員しつつ、火星で地球上の生物が生き延びる可能性はそれまで考えられていたよりもずっと低いと論じ、当時求められていた一万分の一という「非現実的な」数値目標を緩和して惑星探査への障害を除去すべきだ、と主張している⁽³⁴⁾。この第一の論文でなされている主張は、科学的な根拠に基づいて規準の改定を求めている点で、正攻法の主張とみることができる。

一方、第二の論文は、少し異なる観点から規準の緩和を求めるものであった。同論文はまず、米国と比較してソ連の無菌化への取組みが徹底していないことを指摘している。彼らによれば、「ソ連と米国が異なる（自発的）基本ルールの下で惑星探査を行っていることは明らか」であった。たとえば、火星フライバイを行った米国のマリナー四号は、誤って惑星に突入してしまうことを避けるために打上げ時には目標からそらして発射されるなどの工夫が

なされていたが、ソ連のフライバイ探査機においてはそのような工夫はなされていなかった。その結果、ソ連のフライバイ探査機は少なくとも一度金星に突入しており、火星にも突入してしまった可能性がある。そして、これら探査機には熱処理がなされていないことは確実であるから、既に生命体は金星や火星に持ち込まれてしまっているはずである、と論文は主張している。そうであれば、米国がいくら汚染防止の努力をしたところで火星および金星の生物汚染の可能性には影響がない。このことを考慮すれば、多額のコストと信頼性の低下を招く汚染防止措置を厳しい規準に基づいて実施することは不合理である、というのがこの第二の論文の主張である⁽³⁵⁾。

惑星汚染防止の規準の緩和を主張するこれらの論文に対して反論する論文が翌一九六八年のサイエンス誌上に掲載された。同論文はセーガン、リーダーバーク、そしてリーダーバークのスタンフォード大学での同僚エリオット・レヴィンソール (Elliott C. Levinthal) の共著によるものである。彼ら宇宙生物学の主唱者たちは、まず第一の論文に対して、未だ生物学的汚染の可能性を完全に否定する明確な科学的知見は得られていない以上、惑星汚染防止の規準緩和は見送られるべきだと主張した。彼らは、規準を緩和しようとするならばそのための「立証責任」は緩和を主張する側にあるとも述べている。つづいて彼らは第二の論文に対して、無菌化がなされていないソ連の探査機が火星に突入したからといって米国が同様のことをして良いということにはならない、と叱責している。それは、目の前にいる他人がマッチを森に投げ込んだとして自分も同じことをして良いというわけではないからだ、なぜなら彼のマッチは着火しなくても自分のマッチは着火するかもしれない、と彼らは書いている。彼らの論文には、米国がソ連と異なるルールで惑星探査の競争を強いられているという不満は全く感じられない。それどころか、米国は無菌化に関する技術を開示し、ソ連に渡すべきだとすら書かれている⁽³⁶⁾。

セーガンやリーダーバークがこのようにソ連に対して競争ではなく協調の立場をとっていたのは彼らの個人的な理念や信条によるところが大きいと思われる。セーガンが政治的にはかなりリベラルな立場をとっていたことは彼

の伝記が明らかにするところである⁽³⁷⁾。レーダーバークもそもそも国際主義的な立場から宇宙生物学の重要性を訴えたのであるし、実際、一九六〇年頃には米国の専門家の議論が盛り込まれたWESTEXの会議録をソ連に送ろうとしたこともあり、それどころか米国の立入管理区域にソ連の生物学者が入って視察できるようとりはからったことすらある⁽³⁸⁾。月惑星汚染防止の規準の緩和に係る議論には、このように政治的な思想や立場も大きく関わっていたのである。

二・四 マリナー計画以降の無菌化

現実にはその後、惑星汚染防止に関する規準は急速に緩和の方向に向かった。一九六九年のCOSPARにおいて採択された決議においては、一九八八年までの二〇年間を「生物学的探查期間」としてその間に火星あるいは他の惑星が汚染される可能性を「一千分の一以下」とすることを目標とした⁽³⁹⁾。これは二〇年間に地球から火星に到達する探查機全てによる汚染の可能性の総計であるから、規準が緩和されたと直ちに判断することはできないのであるが、一方、この数字は探查機が生命体を火星に持ち込んでしまう可能性ではなく、探查機が生命体を火星に持ち込み、かつその生命体が実際に火星表面で生き延びて汚染を引き起こす可能性を指しているから、実質的には規準緩和とみることができる。というのは、当時、火星に持ち込まれた微生物が実際に汚染を引き起こす可能性は千分の一〜一万分の一と推定されていたからである。しかも、この推定はその後急速に引き下げられ、一九七〇年代後半には百億分の一程度と見積もられるに至る⁽⁴⁰⁾。

この新しい規準をもともと提案したのもNASAとJPLの技術者たちを中心とするグループであった。彼らはその基本的な考え方を一九六七年の『生命科学と宇宙研究 (Life Sciences and Space Research)』誌上で発表している。そして同年九月、NASAはこれを新しい方針として正式に策定した。一九六九年のCOSPARの決議は、

基本的にはこのNASAの方針を追認したものに過ぎないのである。従って、今次の規準改定においてもイニシアチブをとっていたのはNASAの無菌化担当者であったと言える⁽⁴¹⁾。

この新規準に沿って実施されたNASAの無人惑星探査計画はヴァイキング計画である。ヴァイキング計画は、二基の無人探査機を火星表面に着地させる計画であり、惑星汚染防止要件の緩和が未だ途上にあった時期に実施されたため、無人惑星探査としては最も厳しい無菌化手順を実施したものである。一九七五年にヴァイキング探査機が打ち上げられた時点では、既に相当程度規準の緩和が進んでいた（この時点では火星に持ち込まれた微生物が実際に汚染を引き起こす可能性は百万分の一と指定されていた）が、それでも探査機の製造過程を一貫して一定の無菌化手順を踏んだうえで最後に探査機全体を摂氏一一二度で三〇時間程度熱処理するという措置がとられたのである。そのような探査機全体の熱処理を可能とするため、JPLにおいては設計の段階から部品選定特殊部品の設計などに入念な注意が払われ、設計審査や試験などが特別になされるなど、多くの労力と費用が割かれた⁽⁴²⁾。

一九七六年に火星に到達した二機のヴァイキング探査機は、生命活動の検出に係る多くの科学実験を火星表面で行ったが、その存在を明確に示す実験結果は得られなかった。そして火星の温度、大気圧、大気構成、水分の密度、放射線の強度、これら全てが生命体の存在にとってきわめて厳しい条件であることが改めて認識された。このため、ヴァイキング計画の結果は惑星汚染防止要件の緩和の流れを肯定するものとなった。なお、ヴァイキング探査機の打上げの二年後、一九七七年には有名なヴォイジャー探査機が打ち上げられている。ヴォイジャー計画は、木星と土星のフライバイを行うヴォイジャー一号と、それらに加えて天王星と海王星のフライバイを行うヴォイジャー二号を打ち上げる計画で、これらは惑星突入や着陸を目的としたものではなかったのでヴァイキング探査機ほどの惑星汚染防止措置はとられなかったものの、軌道を意図的に逸らすなどの一定の措置はとられた⁽⁴³⁾。

一九八〇年代に入ると、惑星汚染防止要件の緩和は新しい段階に入り、数値目標そのものが廃止されることとなっ

た。そのイニシアチブをとったのはやはりNASAである。無菌化の規準として数値目標を設定することについては、NASAをはじめ関係者から疑問をとねえる声が高まっていた。汚染の可能性を定量的に算出する際にさまざまなパラメーターを仮定しなければならぬが、たとえば地球上の微生物が火星上で生き延びる可能性の推定には幅がありすぎ、定量的な扱いが意味をなさぬという批判である。NASAは一九八二年、COSPARに対して全く新しいアプローチを惑星汚染防止の問題に適用するよう提案し、COSPARは一九八四年、これに応じて惑星探査計画の類型別に規準を整理した。ここでは定量的目標は基本的に廃止され、ヴァイキング計画における無菌化を最も厳しい規準として、段階的に規準が定められた。たとえば生物検出探査をしない火星着陸探査機については、ヴァイキング計画における全体熱処理をする前までの措置のみを求め、火星およびエウロペ（木星の第二惑星）以外については具体的な無菌化要件を求めずに関連情報の記録のみを求めた⁽⁴⁴⁾。

現実には、ヴァイキング計画以降、一九九〇年代まで火星探査はしばらく小休止状態に入った。これは、ヴァイキング計画の結果を通して火星上に生命体が存在する可能性が非常に低いという認識が一般的になったことによるところが多い。このため、太陽系内の生命の探索への熱は冷め、代わってSETIに関連する研究が勢いを増した⁽⁴⁵⁾。しかし近年になって、火星上に大量の水や少なくとも過去において液体の水が存在していたことが確認され、また地球上の生命体のうち極めて苛烈な環境に順応している極限環境微生物（extremophiles）がこれまで考えられていたよりもはるかに広範に存在することが明らかになってきたことで、火星上の生命体の存在の可能性があらためて注目を浴び、火星探査が再び加速してきている。これにともなって、再び惑星保護の強化を検討すべきだとする意見が高まりを見せている⁽⁴⁶⁾。このような流れの中で、二〇〇一年には『Astrobiology』誌、二〇〇二年には『International Journal of Astrobiology』誌といった学術誌が創刊されるなどの動きもある。ポスト冷戦期におけるこうした惑星汚染防止強化への流れは、冷戦期の構図では捉えられない推移をたどることも想定されよう。

三、結論

冷戦下で宇宙開発競争の幕が切って落とされたとき、月惑星の生物学的汚染について科学者コミュニティが発した警告はたしかに大きな影響力をもった。しかしながら、月惑星汚染防止の実践においては、やはり技術者たちが現実に仕事をしていく上で譲れない部分を譲ることはなかった。ここには、国家威信と国民の期待を背負った技術者たちと、物理学者などに比べれば未だ政治力の弱かった生物学者たちとの間の力関係を垣間見ることができる。

一九六三年の議会公聴会における生物学者ピッテンドリーの次の証言がその状況を端的に表している。「私は技術者に最大限の敬意を抱いているが、彼らは多くの場合、科学者の問題意識や見解に著しく鈍感であると思う。実際のところ、彼らはどのみち生物学者を科学者としてはみていないのではないかと私は思う。だからもし宇宙生物学の研究をうまく前進させようとするなら、その計画は技術の支配によって抑圧されることから守られなければならないだろう」⁴⁷。NASAの技術者たちは表立っては生物学者たちの見解に従っていたが、無菌化をめぐる折衝において結局実を取っていたのは彼らであることを生物学者も分かっていたのである。

もちろん、このような科学と技術との間の関係は、米国の宇宙計画において一般的なものであったと考えることはできない。宇宙生物学はあくまでNASAの科学計画の一部を占めていたに過ぎず、それは全体の基調の一部を成していたものと捉えられるべきである。一九六〇年代にNASAの宇宙科学計画全体を統括していたニューエルは、当時のNASAと、科学者たちから構成されていたNASとの間に「愛憎の関係 (love-hate relationships)」があったと述べている⁴⁸。科学者たちはNASAの技術が提供する研究手段に強い期待を抱くと同時に、NASAの計画の進め方が自分たちの意向とおりにならないことに強く反発した。ノーベル賞化学者のハロルド・ユリー (Harold C. Urey) は、ニューエルに対してNASAから二流の人材を追い出すよう求めたことすらあるという。

一方、NASAの技術者たちは科学者たちの時に傲慢な態度に閉口したが、その一方で科学探査を錦の御旗として宇宙開発を進めていくことができた。ただし、そのように科学の名のもとに宇宙開発を世論にたいして正当化することについて科学者が議会において不満を訴えたこともあった⁽⁴⁹⁾。本稿の事例では、このような科学者と技術者の間の「愛憎の関係」を基調として、生物学の分野における科学と技術の間の折衝をみてきた。

冷戦期の科学技術に関する歴史研究は、米国において一九九〇年代に大きな盛り上がりを見せた後、近年になってやや勢いが弱くなってきたようにも思われる。この領域の代表的な著作 *The Cold War and American Science* を著したステュアート・レスリー (Stuart W. Leslie) は最近、冷戦期における科学技術を論じる上でこれまで科学者に大きな比重が置かれてきたが、実は大きな影響力を持っていたのは技術者であり、技術者を重要な研究対象と考えるべきであると述べている⁽⁵⁰⁾。本稿の事例もこうした見方を補強するものである。科学者や科学は確かに政治力をもち外部から見えやすいのであるが、技術者や技術は目立たない存在でありながら現実の問題に直接さらされる位置にあることから最終的には力を持ちやすいのである。冷戦期の科学だけでなく技術に関する研究が更に積み重ねられていくことで、その全体のダイナミクスが明らかになっていくであろう。

註

- (1) George Gaylord Simpson, "The Nonprevalence of Humanoids," *Science* (21 February 1964), pp. 769-775.
- (2) "The Martian Environment," *Science* (12 February 1965), p. 683.
- (3) Edward Clinton Ezell and Linda Neuman Ezell, *On Mars: Exploration of the Red Planet 1958-1978* (Washington, D.C.: NASA, 1984), p. 58.
- (4) Audra J. Wolfe, "Germis in Space: Joshua Lederberg, Exobiology, and the Public Imagination, 1958-1964," *Isis* 93 (2002), pp. 183-205.

- (5) Steven J. Dick, *The Biological Universe: The Twentieth-Century Extraterrestrial Life Debate and the Limits of Science* (Cambridge: Cambridge University Press, 1996).
- (6) の「SEE」は、逐語的には地球外知的生命体探索を意味するが、事実上は太陽系外を想定しているといえる。なお「SEE」に「SEE」は「SEE」Dick, *The Biological Universe*, Chap 8を参照。宇宙環境の特性を利用した生物学研究や宇宙医学についてはJohn A. Pitts, *The Human Factor: Biomedicine in the Manned Space Program to 1980* (Washington, D.C.: NASA, 1985) を参照。
- (7) Charles R. Phillips, *The Planetary Quarantine Program: Origins and Achievements, 1956-1973* (Washington, D.C.: NASA, 1974), p. 3. Morton Werber, *Objectives and Models of the Planetary Quarantine Program* (Washington, D.C.: NASA, 1975), pp. 1-2. "News of Science: Development of International Efforts to Avoid Contamination of Extraterrestrial Bodies," *Science* (17 October 1958), pp. 887-889. G. A. Derbyshire, "Resume of Some Earlier Extraterrestrial Contamination Activities," August 1, 1962, Appendix I of Chapter 10 "Space Probe Sterilization" in National Academy of Sciences — National Research Council, *A Review of Space Research* (Washington, D.C.: National Academy of Sciences — National Research Council, 1962).
- (8) Phillips, *The Planetary Quarantine Program*, pp. 3-4. Werber, *Objectives and Models of the Planetary Quarantine Program*, pp. 2-5. "News of Science," pp. 887-889.
- (9) Joshua Lederberg and Dean B. Cowie, "Moon dust," *Science* (27 June 1958), pp. 1473-1475. 本論文は前掲の「衛星—生命科」の「SEE」の発表を基にしたものである。
- (10) Joshua Lederberg, "Exobiology: Approaches to Life beyond the Earth," *Science* (12 August 1960), pp. 393-400.
- (11) Carl Sagan, "Indigenous Organic Matter on the Moon," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 46: 4 (April 15, 1960), pp. 393-396. Carl Sagan, "Biological Contamination of the Moon," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 46: 4 (April 15, 1960), pp. 396-402.
- (12) Joshua Lederberg and Carl Sagan, "Microenvironments for Life on Mars," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 48: 9 (September 15, 1962), pp. 1473-1475.
- (13) Letter from T. Keith Glennan to Hugh Odishaw, October 13, 1959, reprinted as Appendix IV of Chapter 10 "Space Probe Sterilization" in National Academy of Sciences — National Research Council, *A Review of Space Research*.
- (14) Letter from Abe Silverstein to William H. Pickering, undated, JPL Archives 1000. Phillips, *The Planetary Quarantine Program*,

pp. 10–11.

- (15) Richard W. Davies and Marcus G. Commutzis, “The Sterilization of Space Vehicles to Prevent Extraterrestrial Biological Contamination,” *Proceedings of the Tenth International Astronomical Congress* (Vienna: Springer-Verlag, 1960), pp. 495–504.
- (16) *Ibid.*
- (17) Phillips, *The Planetary Quarantine Program*, p. 27. R. Cargill Hall, *Lunar Impact: A History of Project Ranger* (Washington, D.C.: NASA, 1977), pp. 72–73. G. L. Hobby, “Review of the NASA-JPL Spacecraft Sterilization Program,” Appendix III of Chapter 10 “Space Probe Sterilization” in National Academy of Sciences — National Research Council, *A Review of Space Research*.
- (18) Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memo, from L. D. Jaffe to C. W. Cole, Subject: Spacecraft Sterilization, April 5, 1961, JPL Archives 所蔵°
- (19) Hall, *Lunar Impact*, pp. 124–127.
- (20) Letter from William H. Pickering to Homer E. Newell, Subject: Lunar Spacecraft Sterilization, November 2, 1962, JPL Archives 所蔵°
- (21) National Aeronautics and Space Administration, “Final Report of the Ranger Board of Inquiry,” November 30, 1962, pp. 14–15, NASA History Office 所蔵°
- (22) Telegram from NASA Headquarters to Robert Parks, Jet Propulsion Laboratory, December 21, 1962, JPL Archives 所蔵°
- (23) Phillips, *The Planetary Quarantine Program*, p. 30. National Academy of Sciences — National Research Council, *A Review of Space Research*, Chap. 10. 実際、アポロ計画実施の際には、月面に生命体が存在する可能性はほぼ完全に否定されていたにも関わらず、わずかでも不確かさがあるという観点から、大変人念な措置がとられた。一九六七年八月二十四日にNASA、農務省、内務省、保健教育福祉省、NASAの間で合意が結ばれ、これに沿ってNASAは有人宇宙船センターの置かれているヒューストンに月試料研究所 (Lunar Receiving Laboratory、LRL) を建設し、検疫作業の実施手順を検討した。一九六九年七月二四日にアポロ一号の宇宙飛行士が月面の試料とともに地球に帰還した際には、彼らはLRLの内部で厳重な生物学的管理の下に置かれた。このような有人月探査計画の検疫の厳格さが保たれたことは、無人月探査における無菌化要件の緩和の流れとは対照的でもあったとされる。Phillips, *The Planetary Quarantine Program*, pp. 31–32. W. David Compton, *Where No Man Has Gone Before: A History of Apollo Lunar Exploration Missions* (Washington, D.C.: NASA, 1989).

- (24) “Scientists’ Testimony on Space Goals,” Hearings before the Committee on Aeronautical and Space Sciences, United States Senate, 88 th Congress, 1 st session, June 10 and 11, 1963 (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1963), pp. 79–83.
- (25) “NASA Authorization for Fiscal Year 1964, Part 1: Scientific and Technical Programs,” Hearings before the Committee on Aeronautical and Space Sciences, United States Senate, 88 th Congress, 1st session, April 24, 1963 (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1963), p. 322.
- (26) NASA Management Manual 4-4-1, Subject: NASA Unmanned Spacecraft Decontamination Policy, September 9, 1963, NASA History Office 所蔵⁹
- (27) Letter from Oran W. Nicks to R. J. Parks, May 17, 1963, JPL Archives 所蔵⁹
- (28) Freeman H. Quimby (ed.), *Proceedings of Conference on Spacecraft Sterilization* (Washington, D.C.: NASA, 1962), NASA Technical Note D-1357, pp. 2, 20, 79.
- (29) Ibid. p. 40.
- (30) K. C. Atwood, “Sterilization and Contamination: The Nature of the Problem,” p. 458, in Colin S. Pittendrigh et al. (eds.) *Biology and the Exploration of Mars* (Washington, D.C.: National Academy of Sciences — National Research Council, 1966), pp. 449–462.
- (31) Carl Sagan and Sidney Coleman, “Contamination Standards for Martian Exploration Programs,” in Pittendrigh et al. (ed.), *Biology and the Exploration of Mars*, pp. 470–481.
- (32) *COSPAR Information Bulletin* 20 (1964), p. 26.
- (33) Bruce C. Murray et al., “Planetary Contamination II: Soviet and U.S. Practices and Policies,” *Science* (24 March 1967), pp. 1505–1511.
- (34) N. H. Horowitz et al., “Planetary Contamination I: The Problem and the Agreements,” *Science* (24 March 1967), pp. 1501–1505.
- (35) Murray et al., “Planetary Contamination II,” pp. 1505–1511.
- (36) Carl Sagan, Elliott C. Levinthal, Joshua Lederberg, “Contamination of Mars,” *Science* (15 March 1968), pp. 1191–1196.
- (37) Keay Davidson, *Carl Sagan: A Life* (New York: John Wiley & Sons, 1999). William Poundstone, *Carl Sagan: A Life in the Cosmos* (New York: Henry Holt, 1999).
- (38) Wolfe, “Germ in Space,” pp. 200–201.

- (35) *COSPAR Information Bulletin* 50 (1969), p. 15.
- (40) National Research Council, *Preventing the Forward Contamination of Mars* (Washington, D.C.: National Academies Press, 2006), pp. 22–24. Harold P. Klein (ed.), *Planetary Protection Issues for the MESUR Mission: Probability of Growth (Pg)* (Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center, 1992), NASA-CP 3167, p. 48.
- (41) Werber, *Objectives and Models of the Planetary Quarantine Program*, pp. 78–81.
- (42) National Research Council, *Preventing the Forward Contamination of Mars*, p. 99. J. Barengoltz and P. D. Stabekis, “U.S. Planetary Protection Program: Implementation Highlights,” *Advances in Space Research* 3: 8 (1983), pp. 5–12. Donald L. DeYincenzi et al., “Planetary Protection, Sample Return Missions and Mars Exploration: History, Status, and Future Needs,” *Journal of Geophysical Research* 103: E12 (November 25, 1998), pp. 28, 577–28, 585.
- (43) Barengoltz and Stabekis, “U.S. Planetary Protection Program”.
- (44) National Research Council, *Preventing the Forward Contamination of Mars*, pp. 24–28.
- (45) Dick, *The Biological Universe*, pp. 490–491.
- (46) National Research Council, *Preventing the Forward Contamination of Mars*.
- (47) “Scientists’ Testimony on Space Goals,” p. 80.
- (48) Homer E. Newell, *Beyond the Atmosphere: Early Years of Space Science* (Washington, D.C.: NASA, 1980), p. 205.
- (49) “Scientists’ Testimony on Space Goals,” p. 247.
- (50) Stuart W. Leslie, “Engineering the Cold War,” *Historia Scientiarum* 16: 1 (2006), pp. 35–40.