

サステナビリティに関する問題提起

Issues on sustainability

西 尾 茂 文*

Shigefumi NISHIO

1. はじめに

近年特に、熟年層と若手層との間のライフスタイルや価値観あるいは思考方法などに関する「断絶」が議論されている。一方、「ピラミッドをあけてみたら『最近の若者は理解し難い』といった趣旨の記述があったというように世代断絶はいつの世にも存在する」と耳にしたことがある。確かに、人類に「進歩」や「発展」があるとすれば既存世代は常に次世代に乗り越えられて行くのであるから、ある種の「断絶」が存在することはむしろ当然といえれば当然であろう。しかし、「永遠の真理」あるいは「絶対的真理」の存在を前提とした近代西欧文化の形成原理である「理性」の崩壊が19世紀後半から危惧・指摘され、これが哲学の世界に留まらず科学の世界においても「科学の危機」として認識されるに及んできたことを考えると、時代はこれまでも増して大きな変貌を遂げようとしていると思わざるを得ない。

即ち、重力現象に対する非ユークリッド幾何学の説明優位性などによりもたらされた（私のような凡人には日常空間を再構成し得ると信じられる）ユークリッド幾何学の根元性の崩壊、相対性原理などによりもたらされた物理学における絶対的規定性の崩壊、さらにはゲシュタルト心理学によりもたらされた（物理的的刺激と感覚との直対応を意味する）恒常性仮定の崩壊などは、（誤解を恐れずにいえば「神」が存在した）絶対性に立脚した時代から「相対性の時代」へと時代は大きく変わりつつあることを意味していると考えられる。上述した世代的断絶も、21世紀を目前にしてそれが哲学や科学の世界から日常世界に広がってきた一つの現れと思われる。

そうした状況を踏まえて重要なことは、これまでの人類の歩みを単に否定することではなく、これがもたらしたものを真剣に総括し、その遺産と反省の上で立って対処することであろう。本稿では、こうした状況の現れの一つと考

えられる「持続可能性（sustainability）」を取り上げ、既出の拙稿（“サステナブル・エンジニアリング”，エネルギー・資源学会誌「エネルギー・資源」，Vol.19, No.5 (1998.9)，pp.383-386）に加筆しながら、今後の「科学技術」について考えてみたい（「科学技術」を1 wordとして使用することについても意見があり得ると思うが、これに関する筆者の考えについては後述を参照されたい）。

2. サステナブル・エンジニアリング

さて、ローマクラブが『成長の限界』により地球規模の制約条件から「成長」に関して警報を鳴らし、ノルウェーのブルントラント首相が1986年に「持続可能な発展（sustainable development）」の原型概念すなわち「将来の世代が自らのニーズを充足する能力を損なうことなく、現在の世代のニーズを満たすような開発」を提出して以来、「持続可能性」といった言葉をよく耳にするようになった。持続可能性については、それを制約する物理的要因がエネルギーや原料などの資源、気候や生態系などの自然環境、人口問題を含めた食糧などであることは（定量的議論はあるものの）多くの人が認めることであろう。しかし、持続可能性の定義自体については、ブルントラント首相の原型概念において「自らのニーズ」とは何か、「充足する能力」とは何かを考えれば分かるように、どのような社会・文明を指向するのか（例えば現在の人工利便性を重視した社会の持続を指向するのか否か）、人工資産（例えばプラスチックなどの人工素材）と自然資産（例えば木材などの自然素材）とを加算的に扱うか否か、自然資産として何を対象としどの様に評価するか（例えば地球上の自然も45億年の地球進化史から見れば大きく変化するものである）などの問題を含めて数百あると言われており、また地球資源や環境に限りがある以上「発展」にも限りがあり、「持続可能な発展」という言葉自体が矛盾しているとの意見もある。ここでは上述の物理的制約要因を確認するとどめ、持続可能性の定義自体は本稿の内容からくみ取って

*東京大学生産技術研究所 第2部

いただくことで論を進めたい。

持続可能性に関するこうした物理的制約要因をもたらしたものは直接的には技術や工学あるいは科学技術により生み出された物やシステムであると考えられるので、工学や科学技術は少なくとも（持続可能な開発ではなく）＜持続可能性の開発（sustainability development）＞に向かうべきであると考えられる。本稿では、これを指向する工学を＜サステナブル・エンジニアリング＞と呼ぶ。本稿で特に議論したいことは、持続可能性を制約する要因すなわちサステナブル・エンジニアリングが対象とすべき要因は、上記の物理的要因に加えて、より深刻な要因を内包しているのではないかという問題である。

一般的に工学研究や技術開発においては、①対象とした物（例えば動力装置）を取り巻く＜問題＞（例えば化石資源の枯渇可能性）を明確にし、②これを社会目標（例えばエネルギーミニマム社会の構築）の観点から意味ある＜課題＞（例えば排熱動力化）として成形し、③その基で具体的に＜対象化＞（例えばハードマシンからソフトマシンへの転換）するといった problem formulation の過程が重要である。以下では、前項の最後に述べた問題をこうした①～③の観点に沿って考えることにしよう。

3. 問題は何か 一地球資源・環境問題と人工環境問題一

本項では、まず①に関連して、（上述の物理的制約要因が存在することを前提として）「我々は持続可能性についてどのような状況に遭遇しつつあるのか」について考えてみよう。

20 世紀を歴史的に振り返る時代が将来到来するとすれば、恐らく間違いなく「科学技術の時代」と呼ばれるであろう。航空機や自動車あるいは鉄道は人間を高速で移動させ、ロケットは人間を月へも運び、原子力は未曾有のエネルギーを開放した。半導体は人間の記憶・演算能力を拡大し、情報網は時空間を越えて我々の視聴覚能力を拡大した。さらに、DNA 二重螺旋構造の発見は、最後の物理的能力とも言える生命力をも拡大しつつある。これらの科学技術は、利便性に富む輸送網、エネルギー網、あるいは情報網として現代ではいわば「自生」する巨大な「人工システム」あるいは「人工環境」を形成しており、我々は最早これらを抜きにしては生存することができなくなっていると思われる。

ロケット開発における天才ヴェルナー・フォン・ブラウンは、アポロ 11 号で人間が月面に立ったとき次のように言った。「人類を月面に到着させることの重要さは、進化において海の生物が陸上にまで這い上がってきたときの瞬間にはほぼ等しい。我々は、…この頭脳と手足とを極限にまで伸ばしている。人類の進化における全く新しい一歩である」。確かに今世紀の技術あるいは科学技術は、「人間の物

理的能力の拡大・物理的拘束からの開放」に貢献した点で高く評価でき、例えばヴォルテールが、「もし神がなければ、それを発明する必要がある」と言い、19 世紀末に未だ危険視されていた自動車に初めて乗った社会派文豪ゾラが、「未来は自動車のものだ。それは人間を解放するからだ」と言ったように、それは信仰に近いほどの魅力を与えてきた。

こうした技術や科学技術が築いてきた人工システムは、一方では、前項で述べたように資源、環境、食糧などの持続可能性に関する物理的制約要因に遭遇しつつある。しかし、人工システムが遭遇しつつある状況はさらに深刻であるように思われる。即ち、（上述のように人工環境として我々の欲求に直結しているが故に手放すことが困難であるとともに巨大であるが故に大幅な改変に困難を伴うという意味で）成熟システムとなってきている人工システムは、ワットやエディソンなど天才的技術者個人により担われた技術が科学に課題を提供してきた「科学と技術」の時代から、極低温への挑戦や原子炉の開発など科学と技術とが相互作用を及ぼし合う「科学・技術」の時代を経て、（半導体や遺伝子操作などのように優れて制御された人工的環境の中でのみ具現化し）科学と技術とが不可分といえるほど密接となった「（先端）科学技術」に至る流れの中で生み出されてきたと考えられる。現存の人工システムは、（画一化された大量生産に基づくという意味に加えて）このように天才的個人の能力には依拠しないという意味で没个性的であり組織的であるということもできる。科学技術が築いてきた成果を否定することやその将来に悲観的見解を述べることは筆者の意図するところではない。しかし、利便性に富んではいるがユーザーが改良を施しにくい電子化された自動車、巨大なパワーを生み出すが現代のピラミッドとも見える発電所、あるいは精巧ではあるが（卑近には実現しがたい）優れて制御された環境においてのみ実現される先端科学技術などを前にして個々人が「無力感」を感じ、個人目標を社会目標と乖離した位置に設定するとすれば、今世紀の科学技術の成果を代表する人工システムは、利便性や効率を高めた一方で＜個人性・個性の喪失＞と＜個人目標と社会目標との乖離＞等に遭遇していると言えよう。こうした側面は、文化的な意味での持続可能性と強く係わると思われる、これをここでは、持続可能性を制約する物理的要因を対比して＜文化的要因＞と呼んでおこう。

こうした文化的要因について、もう少し考えてみよう。現在問題となっている持続可能性の問題の難しさは、無論、物理的制約要因に関する規模が地球規模といったように大きく、それが故に起こり得ることの量的予測が（資源量や地球温暖化に関しても様々な議論があるように）難しく、また対策には多大な時間と努力とを要するとともに、局地化された公害問題とは異なり人類や生態系全体の問題であ

るという意味で実感に乏しく抽象度が高いことなどに起因している。しかし、本項の冒頭で述べた①～③の課題設定過程が重要であるとすれば、持続可能性に関する問題の難しさの一つは、<問題>認識が上述の文化的要因を介して<課題>設定と強い相関を持っていることにあると思われる。

即ち、技術者が発想した物が（既に述べた社会目標の自明性を介して）開発課題にほぼ直結していたこれまでの状況から、（クローンや脳死の問題を例とするまでもなく）持続可能性においても対象物が文化的要因を介して社会目標の観点から問い直される状況に遭遇している。例えば持続可能性に関連する研究・技術開発課題が、個性豊かな社会等の社会目標を実現するためのマイルストーンとしてではなく、（誤解を恐れず表現するとすれば）現存世代が築いてきた人工システムにより大量消費された「資源の温存」や悪化させてきた「環境の保全」といった単なる対処的観点から構築されるとすれば、この課題設定は、人工システムを所与条件として育った若者世代にとっては、先進工業国の付けを開発途上国に回す国際政治における空間的な南北問題である側面をもつと同様に、先進工業国に限っても現存世代の付けを後世代に回す世代的な南北問題と見えるように思われる。

こうした図式が、持続可能性の問題の根元性を意味していると考えられる。ここでは、物理的制約要因に集約される問題を<地球資源・環境問題>と呼び、上述の観点到集約される問題を<人工環境問題>と呼んでおこう。

要するに、持続可能性の問題は、（上述の意味での）地球資源・環境問題と人工環境問題との複眼的観点から捉える必要があると考える。

4. 課題は何か —物的科学技術から事的科学技術へ—

②に関連する社会目標あるいは課題設定については、現在では「共生」あるいは「地球環境に優しい」などの用語で表現されているが、こうした構想を支えるサステナブル・エンジニアリングの思考方法について考えてみよう。前項で述べたような科学技術あるいは人工システムが今世紀に生み出された底流には、恐らく「人間の物理的能力の拡大・物理的制約からの開放」のための利便性・効率化・大衆化（階級の消失を含む）の追求があり、これらの追求が人類にとって自明であったが故に個人目標と社会目標との乖離が小さかったことがあったと思われる。筆者らの育った3C (car, color TV, cooler) 時代などに代表される飢餓感、まさにこの底流を象徴していたように思われる。一方、こうした流れの根底には、「全体の要素への還元・廻行」と「要素群の積木構造としての全体性の把握・構築」という思考方法があったと思われる。

この思考方法は、人間の物理的能力に関する機能分割と

単能機による機能代替とを原動力として上記の追求を強く加速し、巨大技術と巨大ネットワークとを結合した人工システムを人工環境として作り上げた。こうした思考方法に基づく科学技術を、ここでは<物（もの）的科学技術>と呼んでおきたい。物的科学技術では、上述の「人間の物理的能力の拡大・物理的制約からの開放のための利便性・効率化・大衆化の追求」の自明性によりこれを効果的に具現することに力点が置かれ、物やシステム（例えば火力発電所）が引き起こす<事>（地球資源・環境問題や人工環境問題など）については強い配慮は払われなかった。

しかし、全体は要素の単純和でないことも周知の通りである。このことを、以下では相対性や相互依存性あるいは関係性といった観点から考えてみよう。

まず、地球化時代の観点から相互依存性について考えてみよう。既に述べた今世紀の情報通信技術と輸送技術の進展は情報や人あるいは物の交流を飛躍的に促進し、これらは民族文化との摩擦を起こしながらも、空間的国境を越えて文化・社会的国境を確かに消失させつつある。かつては国を代表した企業も、もはや多国籍企業として民族性を失い「自立」しつつある。

これらの趨勢は一見、世界がモノトーン化し、相対性の時代から絶対性の時代へと向かっているようにも見える。しかし筆者は、（開発途上国のエネルギー・資源の消費形態が先進国のそれに影響を与える気候変動問題を例にするまでもなく）強まりつつある国際的相互依存性など、むしろ相対性の現れと考えたい。即ち、物理的制約要因に基づく持続可能性への危惧は、量的不確定さを伴うものの、国境が喪失し相互依存性を強める地球化時代では、各国あるいは各民族の活動を孤立系としてではなく地球規模の開放系として、また統計熱力学でいう理想系（要素系のエネルギーの単純総和としてエネルギーが表される系）ではなく相互依存性や関係性が現れる非理想系として考える必要性、つまり相対化された要素群が関係性や相互依存性を媒介として起こす<事>を重視する必要性を示唆していると考えたい。

地球化時代では地球資源・環境問題は優れて国際政治問題（残念ながら現状では課題でなく問題）であり、持続可能性に関するイニシアティブが国際関係におけるイニシアティブと関連を持つことを考えると、このようなく<事>に配視することは我が国にとっても極めて重要である。

次に、物理現象の観点から関係性を考えてみよう。全体は要素の単純和でないことは、連続パラメータの微小な差が突然大きなマクロ現象の差となって現れる<特異現象>を示したローレンツの気象シミュレーションのように物理現象においても周知である。今世紀の科学技術の三大成果の一つである遺伝機構の解明、人工生命による群としての行動原理あるいはレーザーなどは、要素よりなる全体系に

において、個々の要素系がもつ機能以上の新しい機能が発現する現象や、個々の要素系がもつ現象より複雑な現象が出現する現象を意味する「協同現象」の重要性を示している。こうした特異現象や協同現象に関する知見は、地球規模の気候現象を含む物理現象においても要素間や要素レベル間の関係性により起こる「事」が重要であることを示唆していると考えられる。

以上のように、地球化時代や特異・協同現象は、持続可能性に関して地球資源・環境問題や人工環境問題に遭遇している物的科学技術の根底に流れる思考方法、即ち、要素と全体とを（あるいは要素間を）相対化せずそれらの相関性を重視しない思考方法の限界を示しているといえよう。ここでは、資源・環境に関するエコアナリシスやライフサイクルアセスメント（LCCO₂を含む）あるいはリスクアナリシスなど（1）人工システムが直接に引き起こす「事」、および上述のような（2）社会的相互依存性や物理現象の関係性などに起因して起こる「事」に配視する科学技術を、物的科学技術に対置して「事的科学技術」と呼んでおきたい。

要するに、重要課題は「物的科学技術」から「事的科学技術」への変貌」と考える。

5. 具体的な事例

最後に、③の具体的な対象化について、筆者の専門である応用熱事象学あるいは熱工学にかかわる2つの例について考え本稿を終えることとしたい。

まず、関係性に基づくマシン技術として筆者が期待している「ソフトマシンテクノロジー（SMT）」を取り上げたい。ここで言うソフトマシンとは、コンピュータマネキンのようにソフト上で動作する virtual machine（VTM）、遺伝子異常に対する自己修復機能や非自己への認識・対応システムである免疫機能などのように状況に柔軟に対応する self-organized machine（SOM）、寿命や振動・騒音あるいは摩擦などの原因となる固体可動部を可能な限り廃した simple structure machine（SSM）などである。

関係性を原理とした SOM は事的科学技術の核であるが、分散型電源を系統に有するネットワークなどエネルギー・資源技術に関しても SOM が検討されることを望むにとどめ、ここでは SSM を取り上げよう。例えば近年話題となっている熱音響冷凍機は、寒冷発生部にピストンなどの固体摺動運動部を持たない単純構造の SSM の一つである。この冷凍機では、両端と中央部にスタック状の熱交換部を配した中空管の中の気体に圧力波を印可し、固体（中空管壁）と流体（振動気体）との関係性あるいは連成により励起される熱音響効果（ヒートポンプ効果）を利用する。因みに、この種のヒートポンプの一型式では冷熱量が小さい場合には効率はカルノーサイクルと同一となる。

熱音響冷凍機に代表されるように、熱流体に関する知見を集約することにより達成される単純構造化により固体可動部を廃した SSM は、単純構造であるが故に、(A) 科学技術に個性を取り戻し、(B) マシンの長寿命化、メンテナンスフリー化、低振動・騒音化、低コスト化を達成し、(C) 固体摺動部の摩擦力に抗してまた慣性力に依拠しての動作からマシンを開放する。(B)、(C) の特長は、摩擦に抗し慣性力に依拠して作動する機構を嫌うマイクロマシン（バブルジェットプリンターが典型）や低温排熱動力化装置としても、ソフトマシンが有効であることを意味している。ソフトマシンには、さらに固有安全炉のように、(D) 高い安全性をマシンに付加する利点も期待できる。

ところで、先述したような人工環境問題が存在すれば、科学技術に個人の顔を取り戻すことが重要である。このためには、科学技術により生み出される物に対して我々が主体的に関与できることが重要である。

こうした主体的関与の仕方としてはいくつか考えられると思われるが、例えば以下の述べるような道具に対する東洋の考え方が参考になると思われる。西洋では、誰でも使えるナイフ、フォーク、スプーンにより食事をするが、我が国ではこうした道具は発達せず、使用に熟練を要する箸で食事をしてきた。こうした差は、道具や技術に関する考え方の相違であるような気がしてならない。コップと湯飲みにも、この差が現れている。西洋のコップには使いやすいうように取っ手がついており、あくまで機能的であるが、日本の湯飲みには取っ手はない。さらに言えば、刃物にもこの差が現れている。サーベルと異なり、(齊藤道三が長槍の名手であり、戦の革命家である織田信長がそれ以上の長槍を使ったことは有名であるが) 武士は(武器として使用するには鍛錬を要する) 日本刀を「好んだ」と思われる。

こうした道具に関する考え方の背景には、常葉樹林島国という政治・文化・地理的条件あるいはそれに基づく美意識などが存在するものと思われるが、いずれにしても、物を使いこなして「意味を持つ事」とする思想、即ち、人間が主体的に技術あるいは科学技術を使いこなすという「関係性」に重点を置いた考え方である。

科学技術の生産物は自存して意味を持つのでなく、あくまでも人間との関係性において意味が発現すると思われる。そこで第二の具体例として、精巧な製品やそれらにより構築された巨大な人工環境の存在を前提とした現代においてこのような意味の関係性を取り戻すために、マシンパーツを可能な限りパッケージ化し、パッケージパーツを素材として出発する技術指向を一つの選択肢として挙げておきたい。

熱・エネルギー装置は、筆者の見限りパッケージ化が遅れている典型的装置の一つである。パーソナルコンピュ

ータも、パーツの組合せにより組み立てられる世の中である。熱輸送装置のデバイス化、蓄熱装置のパッケージ化、排熱回収装置のパッケージ化など、次世代を担う若手が個性を発揮できる科学技術の準備を進めるべきであろう。上で提案したソフトマシンは、この一助となると考える。再生可能エネルギーの利用あるいは分散型電源の必要性が叫ばれているが、このような熱・エネルギー装置のパッケージ化はそのためにも不可欠の技術であると考え。

5. ま と め

本稿では、サステナビリティに関する問題提起として主と

して物理的制約要因以外の観点から考察を行った。物理的制約要因については、化石資源に関する可採年数の問題、資源・環境探査衛星による資源・環境データベースの構築の問題、再生可能エネルギーに基づく国際的エネルギー基地とネットワーク構築の問題、(地球温暖化や酸性雨など以外の)地球におけるエネルギー消費規模の限界の問題、エネルギーカスケード利用技術、熱装置のパッケージ化による最適システム構築など議論すべき問題が山積していると思われるが、これらについては次の機会に譲ることとしたい。

(1998年9月14日受理)