

■ 論 説 ■

サスティナブル・エンジニアリング

Sustainable Engineering

西 尾 茂 文*

Shigefumi Nishio



1. はじめに

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 (sustainability)」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素材などの資源、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)多くの人々が認めるところである。しかし、持続可能性の定義については、どのような社会・文明を指向するのか、人工資産と自然資産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などの問題を含めて数百年とも言われており、また「持続可能な発展」という言葉自体(発展の定義次第であるが)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にとどめ、持続可能性の定義自体は本稿の内容からくみ取っていた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ので、少なくとも工学や科学技術は(持続可能な開発ではなく)「持続可能性の開発 (sustainability development)」に向かうべきであり、本稿ではこれを指向する工学を「サスティナブル・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ィナブル・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。

2. サスティナブル・エンジニアリングの難しさ

一般的に工学的研究や技術開発においては、①対象としたい物(例えば動力装置)を取り巻く状況を明確にし、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問題(例えば排熱動力化)として成形し、③その基で課題として対象化(アプローチ方法を含めた課題化)するproblem formulationの過程が重要である。本稿では、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。

本項では、まず①に関連して、持続可能性について(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」について考えてみる。

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。我々は、最早、こうした科学技術に支えられた巨大な「人工システム」あるいは「人工環境」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。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

* 東京大学生産技術研究所第2部教授
〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1

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。

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、前項で述べたように一方では資源、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、人工システムは、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。この人工システムは、画一化された大量生産に基づくという意味で、また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」等に遭遇しており、この要因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、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。

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大ききく、それが故に起こり得ることの量的予測が難しく、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、①が上述の文化的要因を介して②と相関を持っていること、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社会目標の観点から問い直される状況に遭遇していることである。例えば持続可能性に関連する研究・技術開発課題が、人間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。ここでは、物理的制約要因に集約される問題を地球環境問題と呼び、上述の観点に集約される問題を「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。

3. サスティナブル・エンジニアリングの思考方法

②に関連する社会目標については、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ィナブル・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。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、相互依存性や相関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。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。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、国際的相互依存性が強まっている。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、また統計熱力学という理想系(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相関性が現れるに非理想系として考える必要性を示唆している。即ち、要素群が相関性や相互依存性を媒介として起こす「事」を重要視する必要性を示唆している。地球化時代では地球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「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相関性を考えてみよう。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相関性により起こる「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(2)上述のような社会的相互依存性や物理現象の相関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(こと)的科学技術」と呼んでおきたい。

4. サステナブル・エンジニアリングの内包

最後に、③の「研究・技術開発課題としての対象化」の問題を考えてみよう。まず、上述の(1)について簡単に考えてみよう。資源消費による起こる「事」として例えば資源価格推移を議論するには、資源データが基礎として重要である。特に我が国については、資源に乏しい上にそのデータについても乏しいといわざるを得ないが、より重要なことはデータをどの様に見て事を議論するかである。例えば、化石資源については「可採年数」という概念があり、そのデータも存在し、石油については約43年となっている。しかし、埋蔵量は正確な推定が難しく、確率的な概念であり、また各地域の確認埋蔵量を推定している「採掘確率」は必ずしも一致していないという。さらに、可採年数は定義通り各地域のまま埋蔵量がなくなるまで生産

量が維持できればそれだけの年数採掘できるという概念であり、これには例えば個々の油田の生産量推移に関するヒューバート理論を参考にするとすれば大きな誤差が存在し得る。即ち、開発意義について様々な議論のある我が国の宇宙開発のメインターゲットを資源・環境データベース構築に置くことなどにより我が国独自の確度の高い資源・環境データベースを構築し、起こる事を確度よく予測し、地球化時代において我が国が国際的位置を固める基礎とすべきでは無からうか。次に、「ソフトマシン」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。相関性を原理とした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パルス管冷凍機は、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た際に励起される熱音響効果（固体と流体とが熱的に連成して起こる「事」の一

つ）を利用したヒートポンプであり、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（この種のヒートポンプの一型式では冷凍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、ソフトマシンがエネルギー・資源技術としても展開されることを望みたい。

5. まとめ

本稿では、(年はとっているが) エネルギー研究者としては雖である筆者が、今後の科学技術に関して考えていることをsustainability developmentあるいはサステナブル・エンジニアリングといった観点から述べてみた。本稿が、エネルギー・資源工学の発展の一助となれば幸いである。

国際会議ごあんない

「イルクーツク・国際エネルギー資源会議」について

このたび、エネルギー研究の分野で(株)日本エネルギー経済研究所と従来より協力関係にあるロシア科学アカデミー傘下のエネルギー・システム研究所(旧シベリア・エネルギー研究所)が主催者となり、来る9月21日から26日までシベリア・イルクーツクで国際資源会議が開催されます。会議では、天然ガス、石油、石炭、水力などの全エネルギーの需要の将来展望について、ロシア燃料エネルギー省をはじめ、エネルギー諸機関、ロシア石油などの株式会社、(株)日本エネルギー経済研究所を含む北東アジア諸国のエネルギー研究機関を中心に30名を超すスピーカーを、ロシア、モンゴル、中国、北東アジア諸国(韓国、台湾、日本等)から招聘し、9月21日から26日のうち、2日間に亘り開催される予定です。シベリア地域で初めて開催されるエネルギーの国際会議であり、実りあるディスカッションが大いに期待できるものと予想されますので、是非ご参加下さい。

<問合せ先>財団法人 日本エネルギー経済研究所

国際協力プロジェクト部 関

Tel 03-5401-4323, Fax 03-5401-4330