

≡≡≡ 特別寄稿 ≡≡≡

これからの環境の取り組み - 持続可能性と学習する組織 -

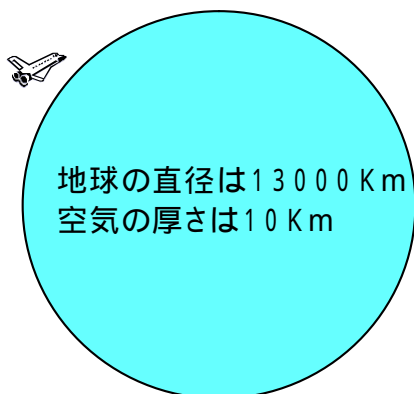
Moving toward a Sustainable Future - Sustainability and Learning Organization -

佐野 充*

1. 薄皮一枚に託された人類の生存

空は無限に続く、と誰もが思う。しかし、上に向かって真っすぐ歩けば、空気はわずか数時間で無くなる。地球が1m30cmの球なら、空気の厚さはわずか1mmになる。そして、スペースシャトルは高さ5cmの「宇宙」空間を飛ぶ。これが私たちの地球の姿である。私たちは、誕生以来、薄皮一枚の環境で生きてきたし、将来もこの薄皮の環境で生存して行かねばならない。

約40億年前、生命は誕生した。その後、進化を続け、600万年前にヒトの祖先が誕生した。そして、20万年前に我々の祖先がアフリカで誕生して世界に広がったらしい。この40億年間、死滅の危機をくぐり抜けて生き残ってきた生き物は生き残りの覇者であり、進化の過程で生き残り戦略がDNAに刻み込まれた。だから、我々の究極の目標は、環境と共生する持続可能性の追求である。



薄皮一枚に託された人類の生存

2. 生き残る戦略 - 遺伝的アルゴリズム

郵便を短い距離で配達することを考えよう。10か所を最短距離で配達したい。最初に配達する場所は10か所の可能性があり、次は9か所の可能性があり、次は8か所の可能性がある。このように、すべての配達ルートの可能性を考えると $10 \times 9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 3628800$ 通りあり、配達ルート3628800通りを計算して、最短距離を探し出すことができる。しかし、配達場所が20か所になると、配達可能ルートがたくさんあり過ぎて、最新のスーパーコンピュータでもお手上げで、最短ルートを探し出せない。これじゃ困るので、厳密に最短かどうか不明だが、おおよそ短そうな配達ルートを探し出す計算方法がある。その計算方法の一つが、DNAの進化戦略を模した遺伝的アルゴリズムである。¹⁾配達ルートを遺伝子に見立て、あてずっぽうにいくつかの配達ルート（遺伝子）を作る。そして、各配達ルート（遺伝子）の距離を計算し、短い順番に配達ルート（遺伝子）を並べる。そして、これら配達ルート（遺伝子）間で、組み換えを行うとともに、組み換え後に配達ルート（遺伝子）をある個所だけ変更（突然変異）させる。この操作を10万回程度繰り返すと、パソコンで数分間掛かるが、おおよそ最も短そうな配達ルート（遺伝子）を探し出すことができる。

重要なことは、最も長い配達ルート（遺伝子）、つまり、最も劣ってそうな遺伝子も捨てずに残すことである。短い配達ルートだけ残す方が良さそうだが、これをすると、得られた配達ルートの信

* Mitsuru Sano 名古屋大学大学院 環境学研究科 教授

頼性が無くなり、おおよそ最も短そうかどうか分からなくなる。ある一時の判断基準で良さそうな遺伝子だけを残し、劣ってそうな遺伝子を切り捨てると、とりあえず目についた短そうな配達ルート付近だけを探し、本当に短い配達ルートを探すことをしない。なぜ、なぜ、なぜ、なぜ、なぜを何度も繰り返すのは、表面的な原因を探し出すのではなく、本質を暴き出したいからする作業だろう。このアルゴリズムも同じで、試行錯誤でいろんな配達ルート（遺伝子）を試すことが本当に短い配達ルート（遺伝子）を探すことになり、そして、長い配達ルートでも残して多様性を確保しておいて、いざという時に備える。配達ルート（遺伝子）の多様性を確保することは、おおよそ最も短そうかを保証し、我々生き物で言えば、持続可能性を確保することになる。致命的な病原菌が人類を襲ったとする。我々ほとんどは死に絶えるが、多様性を確保しておけば、生き残る人類もいる。著名な生産管理の経営学者は言う。²⁾「良い現場」とは、高い生産性・品質・スピードと多様性である。

3. 自動車の進化を考える

3-1. 自動車を考える

田舎で暮らす両親は、平均寿命を過ぎたが元気だ。しかし、田舎生活に自動車は欠かせない。野良に行くのも、病院に通院するのも、会合に行くのも、お寺にお参りに行くのも、公共交通が無くなった田舎では、自動車は生きていくための必需品だ。国土が広いアメリカも自動車は必需品だが、ヨーロッパだって、中国だって、世界中のその他の地域でも自動車は便利で、誰

もが欲しい。2011年、中国の新車販売台数は1850万台で3年連続世界一だ。2位のアメリカが1280万台、日本が421万台、ブラジルが363万台、インドが329万台だ。中国、インドなど新興国の販売台数の伸びは著しい。新興国のモータリゼーションと共にエネルギー需要は増え、世界のエネルギー消費量の1/4が交通・輸送による。原油価格は、オイルショック以降、比較的安定していたが、2004年から急激に高くなり、今では100ドル/バレルを上回ることもある。新興国の経済発展とともに旺盛な消費が今後も続くだろうから、原油価格も上昇し続けることになる。

資源・環境・経済問題を考えると、再生可能で多様な燃料資源に対応できて、エネルギー効率が良く、走行時はもちろんだが製造から廃棄まで含めて環境負荷が低く、安全で、低価格な自動車が欲しい。自動車を持続可能性の点から見れば、以上に加えて、環境負荷が低くてリサイクルできる素材と持続可能な製造工程が必要要件となる。

3-2. 総合エネルギー効率

自動車燃料が採掘・精製されて燃料タンクに運ばれるまでのエネルギー効率と自動車の走行時のエネルギー消費効率を乗じて算定した各種自動車の総合エネルギー効率を表1に示す。³⁻⁴⁾燃料のエネルギー効率は現在の精製プロセスパスより計算しており、また、走行時のエネルギー消費効率は10・15モード時のkm走行当り一次エネルギー投入量から算出している。現在値は現状より算出された値であり、将来値は近い将来の技術向上を推定して算出した値であり、低い数値ほどエネルギー効率が良い。

表 1 各種自動車の総合エネルギー効率³⁻⁴⁾

自動車の種類	総合エネルギー効率 (MJ/km)	
	現在値	将来値
ガソリンエンジン車	2.7	
ディーゼルエンジン車	2.0	
ガソリンHV車	1.7	1.6
ディーゼルHV車	1.3	1.2 ~ 1.3
燃料電池車	1.3 ~ 1.5	1.1 (0.99)*
電気自動車	0.94	0.89
PHV車	(1.4)**	1.03

*将来予想される最高値, **市販PHV車の運行モードより推定

表 1 からわかるように、総合エネルギー効率は、電気自動車 > PHV車 > 燃料電池車、ディーゼルHV車 > ガソリンHV車 > ディーゼルエンジン車 > ガソリンエンジン車の順である。エネルギー効率から見れば、近い将来に、より多くの自動車がバッテリーを搭載することになり、この種のエコカーの低価格化が望まれる。また、技術的にはバッテリー効率、モーター効率や駆動・ブレーキ系マネジメントの向上が求められ、また、車体の軽量化が一層求められることになろう。特にバッテリー能力の向上と車体の軽量化が強く求められることになろう。

3 - 3 . 総合コスト

表 2 に総合コストを示す。⁴⁾総合コストは、車両価格と走行に要する燃料費である走行コストに分けられる。車両価格はガソリンエンジン車の価格を基準にし、将来普及した場合の価格推定値である。また、()内の数値は現行の販売価格から推定した車両価格である。走行コストは、10万kmを走行する燃費とし、ガソリン価格を140円//とした。表 2 からわかるように、総合コストは、現行の場合、ディーゼルエンジン車、ガソリンHV車、ディーゼルHV車 < ガソリンエンジン車 < PHV車 < 電気自動車の順になり、将来には、PHV車 < ディーゼルエンジン車、ガソリンHV車、ディーゼルHV車 < 燃料電池車 < ガソリンエンジン車 < 電気自動車の順に高くなると推定される。コストから見ると、HV車が有利で、ガソリン価格が高くなり、バッテリー価格が安くなれば、PHV車が有利となる。しかし、このような評価が定着するにはバッテリー価格2万円/kWが目標となり、車両

価格の低コスト化要求が弱まることは無い。なお、ガソリンに課されている税が電気に課されていないことや燃料電池車の水素社会基盤構築に莫大な費用が掛かることを考慮する必要がある。

余談になるが、かつて、日本の半導体メモリー産業は、大型コンピュータ用メモリーで米メモリー産業を圧倒し、電子立国日本を支えた。しかし、コンピュータの主流が大型から個人用パソコンになるにつれて、25年間品質保証の保護回路を多数設けた大型コンピュータ用メモリーは優れていたが高価で、3年間品質保証の低価格パソコン用メモリーに敗れた。⁵⁾さらに、スマートフォンへの流れを見誤った日本のメモリー製造会社は倒産した。「品質こそが一番」も重要だが、市場環境の変化を的確に読み取り、それに応じた商品開発ができる「学習する組織」作りが重要である。自動車も同じで、現地の実情やライフスタイルに合わせた自動車作りが望まれよう。先に田舎の両親の例を挙げたが、田舎では自動車は足代りだ。高速スピードは必要ないし、エアコンもカーラジオも必要ない。2人乗りの小型コンパクトで、環境負荷が低く、安全で安価な自動車が求められているように思う。ニーズを的確にくみ取り、それを迅速に実現できる組織こそが重要だ。「学習する組織」こそが持続可能性を保证する。

3 - 4 . 持続可能性

自動車の持続可能性について考える。自動車が燃料として化石資源のガソリン、軽油などを消費する限り、化石資源の高騰とともに自動車の走行コストは増え続ける。また、環境負荷や化石資源

表 2 各種自動車の総合エネルギー効率⁴⁾

自動車の種類	コスト		
	車両価格	走行コスト	総合コスト
ガソリンエンジン車		140	140
ディーゼルエンジン車	+30	87	117
ガソリンHV車	+40	83	123
ディーゼルHV車	+70	56	126
燃料電池車	+70	64	134
電気自動車	+140 (+200)*	32	172 (232)*
PHV車	+60 (+100)*	42	102 (142)*

*販売価格から推定

の可採年数から考えても、原油や天然ガスをエネルギー源とする自動車がずっと走り続けるのは難しい。持続可能性から見れば、再生可能エネルギーを走行の動力源にすることになる。太陽光や風力で発電した電気ならば、バッテリーに充電して電気自動車やPHVを走らすことができる。また、電気で水を分解して水素燃料として燃料電池車を走らすことができる。効率やコスト的の点で、太陽光や風力で発電した電気でPHV車や電気自動車を走らすのが有利であり、水の電気分解による燃料電池車は圧倒的に不利である。また、バイオマス燃料の場合、HV車が優位性をもち、電気自動車や燃料電池車はやや劣る。

一方、自動車を製造する観点から持続可能性を追求すれば、環境負荷が低く、何度もリサイクルできる自動車用素材やエネルギー効率向上に資する軽量化素材の開発などが重要になる。また、ゼロエミッションで環境に負荷を掛けず、無駄を徹底的に省いた持続可能な製造工程の構築も重要になる。

3 - 5 . 普及移行性と社会基盤

新型自動車が普及するには、社会基盤の利用のし易さや新しい社会基盤の構築の容易さを考える必要がある。HV車は既に社会基盤が完成されているため、普及に支障は無い。PHV車の普及には、充電施設の充実が望ましいが、今の社会基盤でもなんとかなる。一方、電気自動車が普及するには、充電施設の整備が必要不可欠である。しかし、数分程度の短時間充電は難しく、社会や生活の中で電気自動車をどのように活用するかを含めた検討

が必要である。しかし、後に述べるが、電気自動車と再生可能エネルギーとの相性は極めて優れており、持続可能な社会を構築するため、電気自動車は鍵となる可能性をもつ。電気自動車が100万台以上普及すれば、総蓄電量は2000万kWh以上となり、次世代社会基盤スマートグリッドの核を形成できる。燃料電池車の場合、水素供給のための社会基盤構築が必要であり、水素燃料を現在のガソリンスタンドレベルまでに整備するには莫大なコストが必要になる。さらに、空気中に漏れ出した水素は、宇宙空間に飛散し、地球には残らない。水素エネルギー社会が実現すれば、漏れ出した水素が宇宙空間に飛散して地球には残らないので、いつの日か地球は水素原子が希薄な死の世界を迎えることになる。

3 - 6 . 総合的に見た自動車の進化

各種自動車の総合エネルギー効率、総合コスト、持続可能性、普及移行性について評価し、表 3 にまとめた。⁴⁾なお、()内は現時点の評価である。これらを基に自動車の進化について総合的に考える。HV車が現時点で有利さをもつが、将来的には資源価格の高騰が予測され、また、バッテリー価格の低減を期待できるので、PHV車が有利である。将来、重視すべきは再生可能エネルギーで走行でき、低コストで運用できる自動車であり、PHV車がかなり有利になる。電気自動車については、エネルギー効率と持続可能性に優れており、普及移行性にやや難があり、総合コストは劣っている。バッテリー等の進化があれば、持続可能社会の構築の中で社会や生活の中でどのように活用するかを含めた検討が必要である。一方、燃

表 3 各種自動車の比較

自動車の種類	総合エネルギー効率	総合コスト	持続可能性	普及移行性
ガソリンエンジン車	×	×	×	
ディーゼルエンジン車	×		×	
ガソリンHV車			×	
ディーゼルHV車			×	
燃料電池車		×(×)		×
電気自動車		×(×)		
PHV車		(×)		

()内は現時点の評価

料電池車はエネルギー効率、持続可能性に優れているが、コストや普及移行性に課題がある。この課題解決には、燃料電池のコスト減、燃料水素ガスのコスト減が必要であり、電気自動車のコスト減より難しい。また、普及移行性の課題は水素社会基盤の構築であり、きわめて困難な課題であり、さらに、もし燃料電池車が普及した場合、水素漏れも大きな課題になる。

3-7. 持続可能社会の構築と自動車

持続可能社会は、エネルギー供給を再生可能エネルギーとして、効率利用をする社会であり、構築においてエネルギー供給が重要な課題となる。主な再生可能エネルギーとして、水力発電、風力発電、太陽光からの光エネルギーや熱エネルギーを利用した発電や高エネルギー物質製造、そして、バイオマスによる発電や高エネルギー物質製造が挙げられる。風力発電や太陽電池等による電圧の不安定さが指摘されるが、風力発電では、ナトリウム・硫黄バッテリーが組み合わされて電力の安定供給が行われており、離島や電線社会基盤の無い場所で活用されているが、コストは高い。しかし、PHV車や電気自動車のバッテリーを活用できれば、バッテリーコストを考えなくて済む。課題は、安価な再生可能エネルギーをどのように実現するか、になる。太陽光からの光エネルギーや熱エネルギーを利用した発電において、反射性に優れ、安価な反射鏡の開発を考えるべきだろう。安価な反射鏡で光を集め、高い効率の太陽電池で発電すれば、発電コストを1/4以下に下げることが可能だろう。PHV車の年間使用電力量は、自動車の年間走行距離から約1300kWh/年であるので、自宅に設置した太陽光発電でPHV車を運用することは十分可能な数値である。ちなみに、PHV車が100万台以上普及すれば、その蓄電量は600万kWh以上となり、電力の負荷平準機能として社会基盤を維持することが可能になる。風力発電については、陸上の期待可採量は日本の総発電量の7~10%と言われており、⁶⁾十分な量とは言えないが、洋上発電が可能になれば、かなりの電力を賄うことができる。洋上発電には、着床式とフロート式があるが、技術的課題より、むしろ、漁業権をどのように整理するか、であろう。小水力発電なども水利権の問題があり、共に江戸時代からの既得権である。明治、大正、昭和、

平成となり、持続可能社会をどのように構築するかを議論している時に、江戸時代からの既得権の整理は必要だろう。

ここで、バッテリーの課題に触れよう。車載用バッテリーの主な課題として、出力密度、耐久性、安全性、コストなどがある。出力密度については、最高出力で10 Cが要求されるが、電極面積を大きくするなどの工夫が必要である。また、高い安全性と低コストも要求されるために、電池全体の設計や正・負極活物質や電解液などの各種材料を見直す必要があるが、既に見出されている材料を使いこなすことによって要求水準のバッテリーが可能になると思われる。なお、要求水準が過剰品質にならないように、半導体産業で起こった事態を十分に参考にしなければならない。

持続可能社会は、与えられた生を充実して全うできる社会でなければならない。最初に述べたように、自動車は便利である。しかし、走る凶器でもある。毎日のように悲惨な事故のニュースが伝えられ、被害者やその家族の人生は暗転する。また、加害者も人生が大きく変わってしまう。安全であることは、何よりも重要であり、過剰品質でも良いように思う。信号を見誤る、一旦停止を怠る、スピードを出し過ぎる、ブレーキとアクセルを踏み間違える、ギヤを入れ間違える、ハンドルを切りそこなう、走行中に眠くなる、など、誰もが1つくらいの経験はある。事故の徹底分析を通して、自動車を安全にするための課題を見つけ、本当に安全な乗り物にしなければならない。

4. 進化する「学習する組織」

失敗を見るのは誰もがつらい。だから、失敗を見ようとしなないし、忘れることが多い。だから、失敗から学ぶこともせず、また同じ失敗を繰り返す。個人であれば、これも仕方がない。しかし、組織となると、そうはいかない。失敗を続ければ、組織は消滅する。失敗を見て分析して2度と同じ失敗をしないように組織の改善を継続することは、組織の持続可能性を確かなものにする。しかし、最もいけないことは、失敗を恐れて何もしないことだ。これでは失敗から学習することができない。たくさんのチャレンジをし、多くの小さな失敗から学び取ること

である。つまり、重要なことは、多様性をもった「学習する組織」作りである。

コネを重視した人事をし、万一のリスク対策をせず、成功体験を神格化して忠実に引き継ぐ、日本軍はこんな組織だったらいい。ノモンハン事件で近代戦とは何かを学ばず、西南戦争の戦訓を基に短期白兵決戦主義で戦い、敗れた。マレー沖海戦の日本軍の航空作戦に学んだのは米軍であり、学ばなかった日本軍は、日露戦争の戦訓を基にした海戦要務令の巨砲艦隊対決主義で戦い、敗れた。1942年6月、北太平洋上のミッドウェー島近海で日・米軍の主力空母が戦った。日本軍指揮官は、海戦要務令を勉強し魚雷や爆雷作戦に長けていたらしいが、自らの航空戦から学ばなかったらしい。多くの不手際の結果、日本軍は主力空母4隻すべてを失い、開戦半年で日米戦争の帰趨が決まる。しかし、さらに3年間、学習しない日本軍は、要務令に忠実な大作戦を幾度か敢行し、負けるべく戦を続ける。太平洋戦争の戦死者の大半は1944年6月のサイパン陥落以後の犠牲者である。しかし、我々は多大な犠牲を払った出来事から今でも学習しようとしなさい。

東日本大震災は多くの犠牲者と被害をもたらした。そして、残念なことに深刻な原発事故を引き起こした。しかし、担当する組織が、能力を重視した人事をし、万一のリスク対策をし、成功体験

を神格化せず、「学習する組織」であれば、事故は防げた。さらに言えば、一つだけでもこうなっていれば事故を防げた可能性が高い。我々は、ややもすれば学習しない組織を作ってしまう。繰り返し言おう、重要なことは、持続可能性を目指し、多様性をもった「学習する組織」を作ることである。

< 文献 >

- 1) 電気学会進化技術応用調査専門委員会編 (2010) 進化技術ハンドブック基礎編, 近代科学社.
- 2) 藤本隆宏 (2012) ものづくりからの復活, 日本経済新聞出版.
- 3) JHFC総合効率検討委員会・財団法人自動車研究所 (2006) JHFC総合効率検討結果, http://www.jhfc.jp/j/data/data/h17/h17_kekka_main.pdf.
- 4) 佐野充 (2007) 各種自動車の総合評価と持続可能なシステム, 人間環境学研究, 5 (2) 9-18.
- 5) 湯の上隆 (2009) イノベーションのジレンマ 日本「半導体」敗戦, 光文社.
- 6) 牛山泉 (2005) 風力エネルギーの基礎, オーム社.