

# 環境共生技術による幸せな暮らし

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科  
教授 佐藤 春樹



## 1 はじめに

環境関連技術の課題と展望を考える上で、経済産業省の技術戦略マップ2010[1]が参考になる。しかしながら、これまでにない新たな技術という意味で、「革新」技術を客観的にレビューするのは難しい。そこで技報にはふさわしくないとも思われるが、「革新」という用語のインパクトを大切に、環境共生社会を築く技術と解釈した「環境革新技術」とは何かを考察し、そして、その技術への期待を記すこととした。

## 2 環境技術革新のはじまり

著者にとって環境分野での革新的な出来事は1999年にシドニーにおいて開催された国際会議であった。環境運動団体によりビデオ紹介された「草原に置かれた緑の冷蔵庫」は衝撃であった。緑の冷蔵庫とはすなわちノンフロン冷蔵庫のことであった。

地球温暖化対策に関する1997年の京都議定書が背景にあったとはいえ、冷媒に代替フロンを含むフロンを用いないというノンフロン冷蔵庫の開発宣言は、オゾン層破壊対策から地球温暖化対策へ地球環境問題が拡大し、人工物質拡散の反省から自然冷媒へ、「化石燃料多消費利己社会」から「自然環境調和型知的社会」へとさまざまな問題をより真剣に考える切っ掛けの正に黒船であった。

ノンフロン冷蔵庫は2002年に発売されて以来、画期的な真空断熱技術の省エネ効果も加わり、あっという間に国内生産のすべての冷蔵庫に置き換わった。

冷蔵庫に関していえば、冷媒にR134aを導入するための膨大な時間と経費をかけた研究および技術開発、そして既存の製造設備などがあっという間に必要なくなった。継続ではない「革新」の判断の難しさがそこにある。

2001年10月に販売開始された二酸化炭素を作動流体に用いた給湯器（エコキュート）が、2010年11月には250万台を突破した[2]。20軒に1軒がこの10年でこの給湯器を購入したことになる。高効率太陽電池、家庭用燃料電池、IHクッキングヒータ、スマートフォンやタブレット情報端

末、3次元映像大型薄型テレビ等々のエネルギー・情報・家電製品の普及、ハイブリッド・電気自動車の開発・販売、高速インターネットや地上デジタル放送などの情報環境インフラ革新も含み、わずか10年で暮らしの道具は豊かさかつ省エネを実現する方向で大きく変化している。

一方で、少し鈍化傾向が見られるものの民生用エネルギー消費[3]は、2008年度の統計情報を第一次石油ショックの1973年度比でみると、家庭部門で約2倍、業務部門で約3倍に増加している。自家用車が半分以上を占める運輸部門（同2倍）とともに、産業部門（同0.9倍）と比較して突出しており「革新」が望まれる。

第15回気候変動枠組条約締約国会議（COP15）でわが国が通告した「2020年までに温室効果ガスを1990年比25%削減する」ためには、大幅に省エネを実現している道具を迅速に普及・活用できる社会システムをつくりあげ、二酸化炭素排出量を大幅に削減できる高度エネルギー利用社会の構築が望まれる。

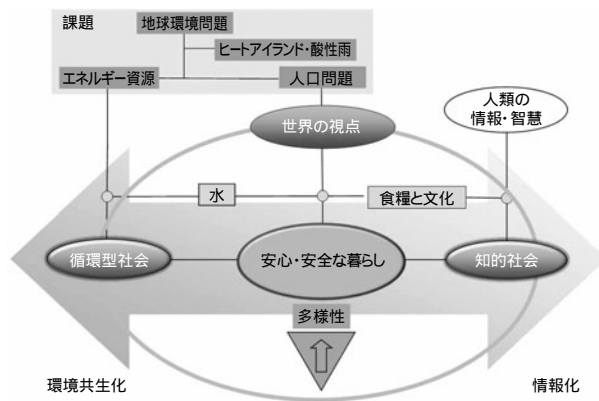
次章以降に、環境革新技術が可能とする「近未来の暮らし」を描いてみたい。

## 3 環境共生化と情報化の発展ベクトル

人類の発展に働いている大きな2つの潮流を、第1図のように描いてみた。1つは環境共生化（自然環境調和型社会）のベクトルであり、もう1つは情報化（ユビキタスIT社会）のベクトルである。

環境共生化は、これまでのエネルギー資源と物質の「消費・廃棄」のプロセスを革新して、自然環境と調和するように「再生可能型プロセス」とする循環型社会を目指すベクトルである。その大きな柱は、再生可能エネルギーの取り込みであり、物質についてはリユース・リサイクル可能材料や植物などの再生可能物質の利用である。

情報化は、世界のどこにいてもあらゆる情報入手が可能であり、ロボットやコンピュータなど高度情報化時代の道具を、だれもが享受できる知的社会を実現するベクトルである。高齢者も他人に依存しないでロボットや情報機器を使うことで個人の尊厳が守られた暮らしができ、



第1図 環境共生化と情報化のベクトルによる発展

子供たちも世界のどこにいても自分の能力にあった教育を受けられるようになる。

#### 4 情報革新技術による近未来の暮らし

世界のどこにいても高解像大画面で容易に高度コミュニケーションできるインフラ整備にまず期待したい。人と人の高度コミュニケーションおよび衛星による地球環境情報など、あらゆる相互理解と的確な情報とから、環境保全対策を含む安心・安全への早急な対応が可能となる社会が実現すると思うからである。

例えば、世界のどこにいても主治医と相談でき、必要な場合は専門医による診断・治療も可能となる。英語はイギリス人に、フランス芸術はフランス人に、等々、世界の人から個別指導を受けることが簡単にできるようになる。会社に集まって仕事をするのも大幅に減り、組織的連携も高度情報端末を用いることで、さらに高いレベルで可能となる。一方では、海外に行かなくてもリアルタイムに世界の街角の景色を眺めることも、画面の中の人々とのコミュニケーションもできるだろう。

この情報インフラにより、人の移動のための時間とエネルギー消費が大幅に節約できる。このような技術開発は既に始まっている[4]。

エネルギー利用においても、スマートテクノロジーにより、分散電力と大規模系統電力の連携供給、交流と直流の役割分担、熱・電力の需要・供給最適化などが可能となるだろう。小ささまざまな規模の電力網をWEB構造的に複雑システムとして結び、コンピュータ制御により、消費側は無駄なくエネルギー利用して、供給側は天候により不安定な再生可能エネルギーであっても大規模導入が可能となり、化石燃料に依存しないエネルギー供給割合を少しずつ増やすことで、大幅な二酸化炭素排出削減が可能となるだろう。

次章では、このような未来の暮らしが目指す方向をもう少し高所からまとめる。

### 5 環境革新技術への期待

環境・エネルギーに直接かかわる要素機器の技術革新に加えて、暮らしのグローバル化やシステム化を可能とする情報技術革新の果たす環境共生化への役割は大きい。

この総合的な「環境革新技術」により築かれる未来社会に期待する方向を整理すると、(1) 地球資源容量に「世界人口とその幸福」をバランスさせ、多くの人々が幸せを享受できる共存共栄の知的社会への方向、(2) エネルギー・水・食料などの「エネルギー・物質資源」を再生でき、そして社会を1つの生命体のように自然環境に同化させる生命化社会への方向、(3) フロンの「廃棄」によるオゾン層破壊と温暖化、二酸化炭素を含む「排気（廃棄）ガス」による地球温暖化や酸性雨、そして都市「廃熱」によるヒートアイランド等々のエネルギーや物質を自然環境に「廃棄」することで引き起こしている環境破壊を、「廃棄」から「循環」型に変えることで解決する循環型社会への方向である。

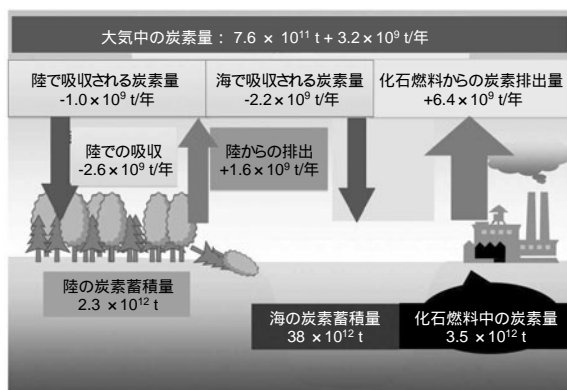
### 6 地球規模炭素循環に基づく低炭素社会建設

大気中の二酸化炭素量が2倍になったときにどれ程温暖化するのかということは、Manabe and Wetherald[5] が44年前に計算している。2009年12月にコペンハーゲン（デンマーク）で開催されたCOP15 および2010年12月にカンクン（メキシコ）で開催されたCOP16において、各国の多様性に配慮した二酸化炭素排出量削減目標設定への努力が続けられている。低炭素社会建設の背景は地球温暖化防止対策であることにまちがいないが、もっと本質的な背景があると考えている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）の第4次レポート（2007）に報告されている情報に基づいた地球スケールの炭素循環を、第2図に示した。

人類が大気に廃棄している炭素量は年間  $6.4 \times 10^9$  t であり、この丁度半分の量が毎年大気中に蓄積されている。自然環境の回復能力を基準とするならば、人類は大気に「廃棄」している二酸化炭素量を現状の50%以下にしなければならぬ。

「自然環境の維持能力を超えない範囲に、廃棄物量を削減できる」ことが環境共生社会の条件であり、環境共生の視点から廃棄物としての二酸化炭素の50%削減が低炭素社会の必要条件なのである。

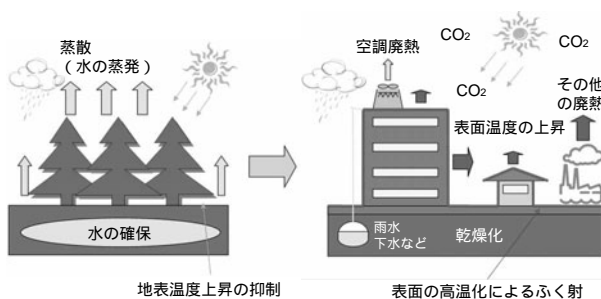


林野庁のホームページの図に基づいて数値・文字情報を大きな活字にするなど変更して作成：現在は気象庁の下記URLにより詳しい情報がある。  
[http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/co2/knowledge/carbon\\_cycle.html](http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/co2/knowledge/carbon_cycle.html)  
 数値情報は、IPCC Fourth Assessment Report 2007 に基づいている。

第2図 地球規模の炭素循環

## 7 自然環境と都市環境の比較からの課題抽出

人間活動が自然環境に与える影響「環境負荷」を正確に認識することが環境革新技術の前提である。その一例として自然環境をベースにした都市評価を行う。第3図に示すように、開発前の植物に覆われた自然環境が都市化されることにより、どのような変化が生じるかを考察する。



第3図 自然環境と都市環境

地球には人類が消費する量の約1万倍のエネルギーが太陽から常時供給されている。このエネルギーがすべて外気温より高温の熱として大気を温めたら大変なことになる。

IPCCの第4次レポート[6]によると、大気上空に地球全体の平均で342 W/m<sup>2</sup>の日射があり、このうち107 W/m<sup>2</sup>は雲などの反射により宇宙に返され、235 W/m<sup>2</sup>が大気と地表のエネルギー入力となる。一方で地表からは390 W/m<sup>2</sup>もの熱ふく射があるが、地表から宇宙へ放出される熱ふく射はわずか40 W/m<sup>2</sup>に過ぎない。残りの350 W/m<sup>2</sup>は温室効果ガス（水蒸気、二酸化炭素、オゾンなど）に吸収されて大気を温める。この温まった大気から逆に324 W/m<sup>2</sup>は地表に戻る。地表からは水の蒸発や伝熱により大気を

温める熱もあり、地球から放出される235 W/m<sup>2</sup>から地表からの熱ふく射40 W/m<sup>2</sup>を差し引いた残りの195 W/m<sup>2</sup>が大気から宇宙に放出されることで、太陽からのエネルギー入力と宇宙へのエネルギー放出がバランスして、地球は年間平均地表気温約15℃を維持している。

地表からの熱ふく射は、現在の気成分であっても温室効果ガスによりほとんど吸収されることから、地球温暖化対策として「低炭素社会」に加えて「少廃熱社会」とすることが必要であると考えられる。

自然環境を改めて考えてみると、地表を覆う植物は(1)「蒸散」によって太陽エネルギーを高温の熱にすることなく効率よく吸収し、(2)地中に多くの水を蓄え、(3)吸い上げた水と大気中の炭素（二酸化炭素）から有機物を生産して「炭素固定」を行っている。有機物として固定された炭素は、動物の食糧になり、燃料やさまざまな材料物質となる。このように植物が吸収し排出するすべては、自然の環境維持機能のなかで全く無駄のない循環系の役割を担っている。特に温度管理と水循環そして炭素固定の役割に注目したい。

一方で、都市環境は(1)人工廃熱に加え、アスファルトやコンクリートなどが大気を温め、(2)水が浸透できないために、下水によって雨水を海に廃棄し、(3)化石燃料を燃やすことにより、大気中に二酸化炭素を含む排気ガスを廃棄している。温度管理と水循環、そして人工廃棄物に関して早急に解決すべき課題がある。

これらの課題を解決する環境共生社会の考え方を、以下に提案する。

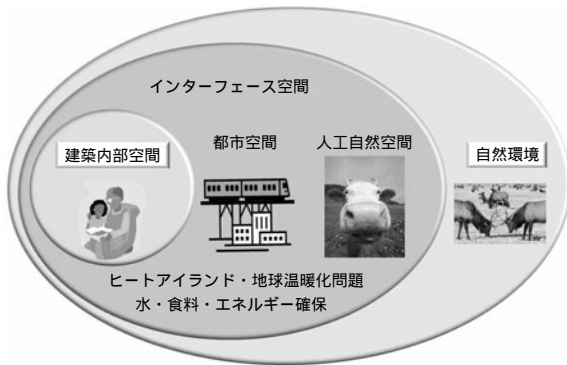
## 8 環境共生社会の建設

自然環境を破壊するようなエネルギーや物質を捨てない環境共生社会の建設を建築・都市の視点から考える。

建築物の周囲を自然環境調和型にすることが環境共生空間デザインである。人の周囲は人にとって快適に、自然と触れ合うところは自然にとって快適なグラデーションのデザインとなる。この環境共生空間を「インターフェイス空間」と造語し[7]、第4図に示した。さらに、この発想を建築内に取り込んだインターフェイス内部空間をもつ建築デザイン例を示したのが、第5図である。

インターフェイス内部空間は、自然の仕組みを利用して建物の目的空間を自然より少し優しく囲むことで省エネルギーを実現する。(1)蒸散、(2)風の道、そして(3)日向・日陰などを利用する。打ち水や京都町屋の坪庭などエアコンが普及する前の日本や樹木が多いアジア地域で自然に行われていた環境づくりである。

室内の温度・湿度の調整にそれほど多くのエネルギー



第4図 インターフェース空間による環境共生



第5図 インターフェース内部空間による省エネルギー  
(建築デザインは Jorge Almazan らによる)

は必要ではないし、給湯を含めて暮らしに必要なエネルギーをすべて再生可能エネルギーで賄うことは十分可能なはずである。外部エネルギー供給に頼らないで、森に暮らすような自然かつ健康的な快適空間づくりを環境革新技術により実現したい。二酸化炭素排出は人の呼吸程度に収めたい。

このような視点から、著者が開発中の環境技術は次のようなものがある。(1)木の葉のように高温にならない太陽エネルギー利用パネル(集熱と発電),(2)水の蒸発を利用した冷風利用と廃熱ゼロエアコン,(3)太陽熱による冷房・除湿(エジェクターサイクル),(4)太陽熱・排熱の比較的低温の熱を利用した蒸留水製造装置,(5)個人のばらばらな活動から発生するエネルギー需要の時刻と量を予測するシミュレータ,(6)ヒートポンプ・排熱・太陽熱利用の最適組合せによる熱供給と電力を用いたエネルギー相互融通システムデザイン,(7)自然作動流体の熱物性情報整備などである。これらの研究は機械、建築、電気、情報、材料、経済等々の分野、あるいはアジア地域の研究者の協力を得ながら進めている。

## 9 高度エネルギー利用社会とCEMS

二酸化炭素排出削減を実現するエネルギー利用を実践するために、エネルギー利用の本質から高度エネルギー利用社会について説明する。

「エネルギー消費」という表現は誤解を与えている。消費してもエネルギーは消滅しないで熱というエネルギーとなって環境に拡散している。熱は環境温度から差をもつほど価値が高い(他のエネルギーに変換できたり、何かをすることができる)。エネルギーの価値を「エクセルギー」と呼んでいる。エクセルギーを利用しないで環境に廃棄すれば、環境に影響を与えて消滅する(環境と同じ価値になる)。エクセルギーを無駄なく利用し尽くす高エクセルギー効率社会を高度エネルギー利用社会と呼ぶことにする。エネルギー価値を理解して最大限使い切る社会である。

1972年の調査で一次エネルギー資源に含まれるエクセルギーの78%が何も利用されずに捨てられているとの報告がある[8]。表現を変えると環境にエクセルギーを捨てた環境負荷型のエネルギー利用である。

エアコンは消費電力の何倍もの冷暖房能力をもつ高エクセルギー利用設備である。空気の熱を利用していることから最近では再生可能エネルギー設備として扱われている。エアコンの効率をエクセルギーで評価すると理想的な最大効率は常に100%である。現在の理解しにくい指標であるCOP(Coefficient Of Performance)やAPF(Annual Performance Factor)は不要となる。高度エネルギー利用社会を実現するためには、太陽熱では足りない熱供給にエアコンのようなヒートポンプを用いることがエクセルギー利用効率を高める。燃料を燃やして熱供給する場合には同時に発電して(コージェネレーション)、さらに排熱からも発電して、できる限り熱のもっているエクセルギーを回収したい。

このような高度エネルギー利用社会とするためには、要素技術の高効率化とともに、エネルギー価値の理解とエクセルギー利用を方向づける政治・経済的要素を含む社会システムが必要である。

技術開発に関しては、例えばイースター社の200～800程度の排熱からエクセルギー回収して発電するスターリングエンジン[9]が既に開発されている。

社会システムとしては省エネルギー技術戦略2007の「省エネ型情報生活空間創成技術」に盛り込まれたクラスター型エネルギー・マネジメント・システム(CEMS: Cluster Energy Management System)[10]を提案したい。熱供給をオンサイトでを行い、過不足の電力は、建物間、コミュニティ間、大規模電力と分散型電力間をWEB構造に結ぶス

スマートグリッドで有効利用するような多需要家連携エネルギー・マネジメント・システムである。

CEMSは、個別機器単位あるいは建物単位で省エネルギーをするのではなく、国内に分散する支社や工場などを含めた組織全体をひとつの単位としてエネルギー管理し、他の組織ともエネルギー融通・連携することで全体の省エネルギーを実現する複雑系的スマート・エネルギー・マネジメントの提案である。要素機器の高効率化のみでは大きな二酸化炭素排出削減は難しく、全体システムをとらえて制御するパラダイムシフトが必要である。

## 10 おわりに

著者にとっての環境革新技術は、循環型の暮らしを可能とするものであり、社会システムの生命化を目指す技術である。要素技術も大切であるが、政治・経済・社会科学を含めた多分野相互間のコラボレーションと各分野が目指す方向ベクトルを俯瞰（ふかん）的な視点から調整できることが、環境共生社会を築くために重要なことである。

この総説をまとめるに当たり、文部科学省21世紀COE (Center Of Excellence) プログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」、および文部科学省グローバルCOEプログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」における著者の活動成果を用いたことを記して、謝意を表す。

## 参考文献

- [1] “技術戦略マップ2010,” 経済産業省, 2010.
- [2] “最近のエアコンとヒートポンプ給湯機の国内出荷実績,” 社団法人 日本冷凍空調工業会, 2010.  
<http://www.jraia.or.jp/exel/MonthlyShipmentsJ.xls>, 参照 March 5.2011.
- [3] “エネルギー白書2010,” 資源エネルギー庁, 2010.
- [4] ギガハウスタウンプロジェクト, 慶應工学会.  
<http://www.ght.jp/>, 参照 March 5.2011.
- [5] S. Manabe et al. “Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity,” *Journal of The Atmospheric Sciences*, vol.24, no.3, pp.241-259, May 1967.
- [6] “IPCC 第4次評価報告書 第1作業部会報告書, 概要及びよくある質問と回答, 気象庁訳,” 2007; Kiehl and Trenberth, 1997.
- [7] 吉田和夫 編著, “生命に学ぶシステムデザイン - 知能化から生命化へのパラダイムシフト,” コロナ社, 2008, pp.138-145.
- [8] 押田勇雄 編著, 現代エネルギー工学概論, オーム社, 第6版, 1998, pp.25-27.
- [9] (株) eスター社ホームページ.  
<http://www.estir.jp/>, 参照 March 5.2011.
- [10] “省エネルギー技術戦略2007,” 資源エネルギー庁, 2007.

## プロフィール

佐藤 春樹 (さとう はるき)

1975	慶應義塾大学 理工学部卒業
1982	慶應義塾大学 工学博士
1996-現在	慶應義塾大学 理工学部システムデザイン工学科 教授
2002-2005	中国西安交通大学 客員教授
2005-2007	独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 プログラムマネージャー・オフィサーを兼務

専門技術分野:

流体熱物性, エネルギー環境システム, 熱力学

主な著書:

地球環境テキストブック エネルギー工学 (オーム社, 2010)  
生命に学ぶシステムデザイン 知能化から生命化へのパラダイムシフト (コロナ社, 2008)  
機械工学テキストシリーズ2 熱力学 (朝倉書店, 2006)

主な編書:

伝熱工学資料 改訂第5版 (日本機械学会, 2009)  
機械工学便覧 環境システム (日本機械学会, 2008)  
2008新編 熱物性ハンドブック (養賢堂, 2008)  
機械工学便覧 熱工学 (日本機械学会, 2006)  
新太陽エネルギー利用ハンドブック (日本太陽エネルギー学会, 2000)  
1999日本機械学会 蒸気表 (日本機械学会, 1999)  
HFC系純粋および混合冷媒の熱物性 (日本冷凍空調学会, 1998)