

太陽エネルギー利用の熱力学

Thermodynamics in Solar-Energy Utilization

佐藤春樹*

1. まえがき

著者は自然環境に調和する持続可能な循環型社会の学術基盤となる「自然工学」⁽¹⁾の必要性を感じている。自然を知り自然を利用する工学である。そして、貴重な自然エネルギー電力を有効に利用する「エネルギー高度利用」の学術アプローチを試みているのでここに紹介したい。機械要素を主な対象とした古典熱力学を、資源と環境を含むエネルギー利用全体システムに拡大させた熱力学の構築である。

この解説記事では、1) 地球温暖化についての著者の認識、2) エクセルギー評価によるエネルギー高度利用の提案、そして、3) それらを背景として進めている研究開発について簡単に紹介する。

2. 量から質へ地球温暖化とエクセルギー

2.1 エネルギーを質で考える新しい時代の幕開け

人類の活動が自然環境に影響する大きさを定量的に評価すべき時代となった。5章で記すが、環境を基準にエネルギーの質を表すエクセルギーで考える新たな時代の幕開けである。

エネルギーは形態を変えることはあっても消滅することはない。熱力学の第一法則である。古典熱力学での熱効率は、エネルギー資源を必要なエネルギー（仕事＝例えば電力などの動力）に変える際の「量による変換効率」である。この熱効率の高低に関係なく資源のエネルギー消費量と同じ量の熱が環境に移動（散逸）する。環境変化を伴わない廃熱技術をエネルギーの質から考えたい。

また、空調機、冷蔵庫、給湯器などのヒートポンプは、入力した動力量と出力の熱量の比である成績係数（COP）で例えば6（すなわち600%）などと性能を表す。これでは学術的な極限（理想）にどれ程近づいたのかがわからない。そして、環境への影

響がどの程度かがわからない。無駄なエネルギー資源を使わないために、環境に与える影響を正しく把握するために、量より寧ろ質（価値）でエネルギー利用を評価する時代の幕開けである。

2.2 地球温暖化とは

大きな系で見れば、地球が受ける莫大な太陽エネルギーは自然環境の中で、常に血液のように隅々まで流れて、生命を含む様々な自然現象や自然環境を途切れることなく再生し続けている。最終的にはその総てのエネルギーが宇宙に熱放射され、持続可能な地球環境を保つ循環型のシステムが自然環境として形成されている。自然環境は、莫大な太陽エネルギーが流れていながら、地球全体の平均地表温度をほぼ一定に保ち、地域的な個性ある気候が1年周期で繰り返され、年間平均するとほとんど変化しない持続可能な循環型の定常システムと呼べるだろう。

その大気の高さ方向の温度プロファイルが、少し対流圏の温度が高く、成層圏の温度が低くなったことで地球温暖化と呼ばれる事象が生じている。この場合でも、太陽から地球に降り注ぎ、地球から宇宙に放出するエネルギー量は等しい筈である。

真鍋 及び Wetherald⁽²⁾ は50年以上も前に、大気中二酸化炭素濃度が2倍の場合の大気の垂直温度プロファイルを計算し、約2℃の地表温度上昇となる結果を報告している。先見性のある偉大な学術成果である。一方で、二酸化炭素排出削減に同意するものの、過去のデータ解析から1800年以降あるいは1910年以降も同様の地表温度上昇が見られ、大気中二酸化炭素濃度のみで温暖化を説明することに懐疑的な赤祖父の科学的指摘⁽³⁾も説得力がある。

著者が、平均地表温度と海面上昇変化⁽⁴⁾の図を併せてみると、例えば1940年から1975年の35年

* 慶應義塾大学名誉教授、東京海洋大学 海洋電子機械工学部門 客員研究員（〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6）

間は平均地表温度の上昇が見られないにも拘わらず、海面上昇はその期間を含む1900年から現在まで1.7mm/年の傾きの直線ではほぼ回帰できるほど、同じ変化率で増大し続けている。4章で述べる通り、海面上昇は、単純に二酸化炭素排出による地球温暖化が原因と結論づけるよりは、寧ろ何か別のベースとなる大きな要因があると考えの方が自然に思える。

3. 脱炭素社会と自然エネルギー

3.1 脱炭素社会と自然エネルギーへの期待

2018年10月に発表されたIPCC特別報告書では、地球温暖化を15℃以内に抑えるには、人為的な2010年の二酸化炭素排出量を2030年までに約45%削減し、2050年頃に排出量をゼロにする必要性が指摘された⁽⁵⁾。その脱炭素社会への目標は、2015年9月に国連サミットで採択された2016年から2030年までの持続可能な開発目標(SDGs)とともに現実的な国際目標として拡がりつつある。

人類が石炭に加えて、石油や天然ガスなどの化石燃料資源を大量に使い始めたのは、第二次大戦後の1950年代以降であった。そして、1970年代以降には多くの原子力発電所が建設され世界に500基程が存在していた。そこに2011年3月11日の東日本大震災による福島第一発電所の爆発が起き、原子力発電への信頼が世界的に揺るぎ、脱炭素社会の構築を目指し、自然エネルギーの急速な普及が始まった。

そのような中でBNEFの情報⁽⁶⁾では、2025年頃に太陽エネルギー電力が、2040年頃に風力エネルギー電力が石炭火力電力よりも安価となり、いずれも世界でさらに大きく普及すると予測している。

3.2 太陽電池による電力供給シナリオ

太陽電池利用の現状を国際エネルギー機関(IEA)の報告書⁽⁷⁾で確認すると、2017年に使われた太陽電池容量は398GWであり、世界の年間電力供給量の2%(460TWh)である。一方で、2014年のIEAの技術ロードマップ⁽⁸⁾では、2050年までに世界で4600GWの太陽電池容量が達成され、年間電力供給量の79%が自然エネルギー電力となり、このうち16%を太陽電池で供給し、その発電総量は6300TWhとなるシナリオを描いている。BNEFの予測⁽⁶⁾では、2050年に日本の電源構成の43%(340TWh)が太陽電池供給となっている。

4. 太陽電池表面からの熱放射と植物の蒸散

4.1 太陽電池の熱放射による廃熱

現在市販されている太陽電池の実質発電効率は15%程度であり、太陽エネルギーの85%が環境への廃熱となっている。前述のシナリオで世界の太陽電池が普及すると仮定すると、2050年の廃熱量は発電量の5.67(=85/15)倍の35,700TWh(=1.285×10²⁰J)となり、地球大気全体をさらに年間約0.024℃上昇させる量に匹敵する。

世界人口増大に伴う都市化によるヒートアイランド化の影響に加え、太陽電池表面からの熱放射は温室効果ガスに効率よく吸収されると考えられることから、局所気候のみならず地球温暖化への影響についても明らかにしておく必要があるだろう。

4.2 森林の炭素固定・海面維持・大気冷却

IPCC第4次評価報告書⁽⁹⁾によれば、1990年代における人為的な炭素排出量は自然環境で約半分が吸収され、残りの半分が大気中に蓄積し、二酸化炭素濃度が毎年増加すると説明している。

森林は大気中二酸化炭素を植物の光合成により陸に固定する重要な働きをする。森林を増やすことが大気中二酸化炭素を減らすために効果的である。

海面上昇は地球温暖化が原因とされている。森林は雨水を地中に貯蔵し、葉から直接大気に蒸散することから、海洋を介さない水循環をつくる。そこで著者が概算してみたところ海面上昇分の水量は陸上降雨総量の約0.4%である。都市化や森林破壊で雨水が過剰に海に流れ、海面上昇が生じている可能性をみいだせる。

手代木⁽¹⁰⁾は樹高7mのケヤキ1本が蒸散した水量を、2012年10月からの1年間計測している。最大蒸散量は2013年8月14日の日中12時間に44.6kgである。森林全体からの蒸散量は莫大であることが分かる。植物は地表を覆い、蒸散で地表温度上昇を防ぐとともに海面維持にも貢献する。

水は二酸化炭素以上の温室効果ガスであり熱放射を吸収する。蒸散により周囲環境よりも低温で放出される過熱気体(ガス)状態の水(ここでは仮に蒸散水と呼ぶ)の熱力学に注目すると、蒸散水は自分より低温の物に触れないと液化しない。水の分子量は18、窒素分子は28、酸素分子は36で、蒸散水は、空気よりも軽く上昇気流をつくる。上昇すると圧力が低くなるので膨張し、蒸散水の温度は周囲空気よりも更に低温となり大気からも熱を奪い、更に膨張し軽くなって上昇する。蒸散水は大気温度よりも高

温となる上空で蒸発潜熱を大気に渡し、かなり低温の液体状態の水滴か固体状態の氷となって雲を形成すると考えられる。

以上のように、植物からの蒸散水が熱放射を吸収しつつも大気温度の上昇を防ぎ、雨や雪となってさらに大気と地表を冷やし、海面上昇も防いでいると考えられる。

もちろん国際的に二酸化炭素排出削減に努力する必要はあるが、それ以上に森林を増やす定量的な国際目標があっても良いのではないかと思う。

5. エネルギーの質によるエネルギー高度利用

5.1 エネルギー価値の指標

エネルギー保存則からエネルギーは量で捉えたと必ずバランスする。前述の大気垂直温度プロファイルの変化は熱量の問題ではなく温度の問題である。熱エネルギーにとって、温度は取り出せる仕事量の指標である。カルノー効率で知られるように高温であれば大きな仕事（何かを変化させること）ができ、環境と同じ温度の熱はその量に関係なく、環境温度に影響を与えない。

エクセルギーは、環境を基準にエネルギー価値を表す値である。エネルギーと同じJ（ジュール）の単位で表される量である。但し、W（ワット = J s^{-1} ）で表されることも多い。自然エネルギー資源と自然環境保全が注目される今、①資源消費で消滅するエクセルギー量と②環境に変化を与える廃熱などのエクセルギー量を最小化する技術が必要である。

そのためには上述の①と②の二つのエクセルギー量を、需要で求められる最小限（=理想）のエクセルギー量にできる限り近づける、そのような技術開発を求める高度化指標が役立つと結論づけられる。

5.2 エクセルギーとは

人類が消費するエネルギーは大きく分けて電力と熱である。2018年のエネルギー白書をみると2016年の国内統計で家庭や事業所など民生部門では5割程度が、産業部門では8割弱が熱需要である。電力はエクセルギーそのものであると捉えることができるので厳密な定義は省略し、熱エネルギーのエクセルギー量を導く式を以下に記述する。

基本的には熱量 Q からカルノー効率で得られる最大動力 W (=電力) がエクセルギー量 A に等しい。

$$A = W = Q(T - T_0) / T = Q(1 - T_0 / T) \quad (1)$$

ここで、 T と T_0 はカルノーサイクルの高温熱源と

低温熱源の熱力学温度（単位ケルビン）に対応するが、エクセルギーの場合は、熱量 Q の温度 T と環境温度 T_0 である。

ある質量 m 、比熱 c の物質を温度 T_L から T_H まで温めるのに必要な熱量 Q は次式で求まる。

$$Q = mc (T_H - T_L) = mc \Delta T \quad (2)$$

一般に熱が移動すると温度も変化するので微分で表現すると便利である。そこで (1) 式は次式となる。

$$dA = dQ(1 - T_0 / T) = mc(1 - T_0 / T) dT \quad (3)$$

(3) 式を T_L から T_H まで積分すると、温度変化を考慮したエクセルギー量が次式で求まる。

$$A = mc \{ (T_H - T_L) - T_0 \ln(T_H / T_L) \} \\ = Q [1 - \{ T_0 / (T_H - T_L) \} \ln(T_H / T_L)] \quad (4)$$

基本的に、(4) 式がある物質の温度を T_L から T_H まで変化させるために必要な熱量 Q のエクセルギー量 A となる。

また、エントロピーは $S = Q / T$ であることから、(1) 式から次式が求まる。

$$A = (T - T_0) (Q / T) = Q - T_0 S \quad (5)$$

エクセルギーは、任意の温度 T の熱量 Q が環境温度 T_0 まで温度変化するときの自由エネルギー変化量に類似した量と解釈することもできるだろう。

5.3 資源消費と環境負荷を含む系の評価

2018年6月に横浜で開催したグランド再生可能エネルギー国際会議 (GRE2018) で報告した内容⁽¹¹⁾に基づいて解説する。

図1に新たなエネルギー利用システム評価の概念を示す。エネルギー資源と動力供給システム及び需要端設備、そして環境の4つの系とその間のエネルギー移動を結んだ全体システムである。エネルギー利用システムは、発電機などの動力供給システムと電力で動く空調機など需要端設備からなるとして捉えている。記号は熱力学温度 T 、熱量 Q 、エクセルギー A 、そして動力（電力） W である。添字は、エネルギー資源 R 、動力供給システムの高熱源 H 、低温熱源 L 、需要端設備 D そして環境 E である。

5.1 節で紹介したように、需要端設備が供給する理論需要エクセルギー量 A_D を基準にして、実際に

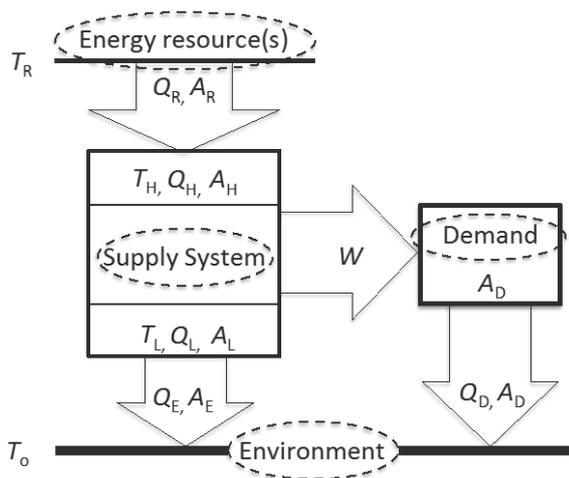


図1 エクセルギーによるエネルギー利用システムの評価のための概念図⁽¹¹⁾

エネルギー資源から消滅したエクセルギー量 A_R のエクセルギーバランス比 EBR (Exergy Balance Ratio) を資源利用高度化の指標とする。

$$EBR = A_R / A_D \quad (6)$$

すなわち、需要を満たすために必要な A_D に対して何倍のエネルギー資源の A_R を消費したのかを表す指標である。EBR の理論最小値は 1 である。この EBR の逆数をこのエネルギー利用システムのエクセルギー効率 ε として、1 (= 100%) が理論効率となる。

$$\varepsilon = 1 / EBR = A_D / A_R \quad (7)$$

環境への熱負荷に関しては、供給システムからの廃熱がもつエクセルギー量 A_E と需要端設備のエクセルギー量 (= 理論需要エクセルギー量) A_D が環境に移動する。但し、図1には描いていないが需要端設備の暖房・給湯器 (ヒートポンプ) などは環境から熱を取り込むのでそのエクセルギー量 A_C を併せて考える必要がある。 A_C は環境を温める場合も冷やす場合もある。エネルギー利用システムが環境を温めるエクセルギー量を正で表す。排出エクセルギー比 EER (Exhaust Exergy Ratio) を環境熱負荷の指標とする。

$$EER = (A_E + A_D + A_C) / A_D \quad (8)$$

6. 新たな評価に基づく技術開発

6.1 暖房時の理論需要エクセルギー

文献 (11) で紹介した計算結果を用いて、暖房を例とした EBR と EER による評価を紹介する。外気 (環境) 温度が 7°C で 20°C の暖房熱量 $Q_D = 1.5 \text{ kW}$ の理論需要エクセルギーを求める。簡単のため伝熱における温度差は含まないで計算している。

$$Q_D = mc(T_H - T_L) = 1.5 \text{ kJ} \quad (9)$$

m : 空気の質量 (kg)

c : 空気の比熱 ($\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

ここで、 $T_0 = T_L = 280 \text{ K}$ と $T_H = 293 \text{ K}$ を (4) 式に代入して需要熱量 Q_D の理論需要エクセルギー A_D を求めると下記の値となる。

$$A_D = 33.8 \text{ J} \quad (10)$$

仕事率の単位ワットで表し、 $Q_D = 1.5 \text{ kW}$ の熱供給に含まれる理論需要エクセルギー量 $A_D = 33.8 \text{ W}$ は、解釈を変えれば、 33.8 W の電力で 1.5 kW の熱供給を行う逆カルノーサイクルの理論的な究極のヒートポンプを示す。この条件での理論成績係数は、 $\text{COP} = (1.5 \text{ kW}) / (33.8 \text{ W}) = 44.4$ である。

6.2 暖房システムの評価

上記の温度 20°C 、熱量 1.5 kW を供給する暖房を行う 4 種類の異なるシステムについて、EBR と EER の指標を計算して評価した⁽¹¹⁾。

- (1) 電気ヒータ
 - (2) $\text{COP} = 6$ の電力ヒートポンプ
 - (3) 表面温度が 80°C の PV/T ソーラーパネル
 - (4) 表面温度が 40°C の PV/T ソーラーパネル
- (1) と (2) では発電機のエクセルギー効率を 50% として、エネルギー資源温度と発電機の高温度熱源が等しく、 $T_R = T_H = 1300 \text{ K}$ 、発電機の低温熱源温度 $T_L = 300 \text{ K}$ 、環境温度 $T_0 = 280 \text{ K}$ と仮定した。(1) では、 1.5 kW の電力が必要であり、(2) では、 $250 \text{ W} (= 1.5 \text{ kW} / 6)$ の電力が必要である。

(3) では発電効率 20% の太陽電池 (PV) と集熱効率 50% の太陽集熱器 (T) のハイブリッドソーラーパネルを用いて、出湯温度及びパネル表面温度が 80°C であると仮定する。(4) では、同様のハイブリッドソーラーパネルを仮定しているが、出湯温度及びパネル表面温度を 40°C としている。(3) のパネルと比べると低温であるので、集熱効率は 70

%まで向上すると仮定している。

なお、(3) と (4) の PV/T ソーラーパネルでは、1.5 kW の集熱に必要な太陽エネルギー量は、それぞれ 3 kW と約 2.1 kW であり、1.5 kW の熱量と共に、それぞれ 600 W と 429 W の電力供給が可能である。

詳細な計算は文献 (11) にあるので、結果のみを紹介すると表 1 となる。

表 1 では暖房についての評価であるので PV/T ソーラーパネルの発電分はエクセルギー効率に含まないで比較した。発電分を含む総合エクセルギー効率は、それぞれ (3) 37 % と (4) 50 % となる。ハイブリッド化することで太陽エネルギーを高効率に利用できる。一方で、太陽エネルギーは無料なので効率が低くても良いように思われるかもしれないが、環境への熱負荷を減らすために高効率利用は重要である。

さて、電気ヒータで暖房する場合は、理論需要エクセルギー量の 89 倍のエネルギー資源エクセルギーを消費し、排出エクセルギー量も多く、300 K までの熱を低温熱源として発電機で利用しても、その環境熱負荷は理論需要エクセルギー量の 3 倍以上である。COP = 6 のヒートポンプでは、電力消費が 6 分の 1 となり、資源エクセルギー消費も 6 分の 1 となる。そして、大気から熱を吸収することで排出エクセルギー量が最も小さく評価される。国際的にヒートポンプが再生可能エネルギー設備として認められている理由が数値で示されている。

太陽エネルギーを用いる場合の EBR は、自然エネルギーが再生資源であることから、消費され消費するエネルギー資源と単純には比べられない。一方で、既述したように環境温度を変化させる廃熱を減らすために、太陽エネルギーをどれ程有効利用しているかという視点が重要である。例えば、20 °C の暖房するのに 80 °C の太陽集熱を行えば、EER の値を見れば明らかであるが、電気ヒータよりも環境熱負荷が大きい結果となる。

表 1 に示されたように、開発すべき暖房システムは、なるべく環境に近い温度で PV/T ソーラーパ

表 1 4 種の異なる暖房システムの評価

	暖房方法	EBR (exergy efficiency)	EER
1	Electric heater	89 (1.1 %)	3.4
2	Heat pump with COP=6	15 (6.8 %)	0.7
3	Solar thermal at 80 °C	5.8 (17 %)	4.0
4	Solar thermal at 40 °C	3.3 (30 %)	1.3

ネルで集熱すると共に、高効率なヒートポンプで需要温度まで昇温して熱供給するものが、資源と環境の視点から望ましいだろう。

7. 新たな自然エネルギー利用設備開発の紹介

7.1 PV/T ソーラーパネル開発

図 2⁽¹²⁾ は、現在開発中の環境に近い温度に制御できる PV/T ソーラーパネルであり、慶應義塾大学工学部 (横浜市) で行なった実験のサーモグラフィである。図書館屋上で 5 枚のソーラーパネルの熱放射を計測したものである。

奥から 2 枚は集熱パネルであり、かなり高温となっている。PV/T パネル A (2017) と B (2018) は、集熱器の中に PV パネルを入れて熱と電力を得ている。パネル C は単体の PV パネルであり、集熱パネルと同様に高温となっている。背景は右上の一部が空であり、その他の背景は全て建物の外壁である。

パネル A と B の上部に青色があるが、冷却塔で冷やした循環水が金属パイプ内を流れ低温となっている。パネル A と B 内部の空気は熱が、減圧沸騰サーモサイフォンによりこの循環水に渡されることでパネル内部温度が低温に保たれる。内部の PV パネル表面温度はパネル C と同じかそれ以上に高温となっているが、集熱器カバーガラスのエンボス加工により熱放射は内部に閉じ込められている。PV パネル本体は内部で空冷されていることから発電効率の低下は小さい。文献 (12) では、2018 年 8 月 1 日の実験で日射量平均値が 853 W m⁻²、平均気温 31.5 °C において、発電効率 13.6 %、約 40 °C のお湯が約 2 L min⁻¹ で出湯し集熱効率 57.7 % を得ている。パネル B のセンターライン付近の温度が少し高くなっている部分の改善を進めて完成させたい。

7.2 植物の蒸散をまねた冷却装置の開発

大気を冷やすには地表からの熱放射を減らし、蒸散のように周囲温度よりも低温で水を蒸発させるこ

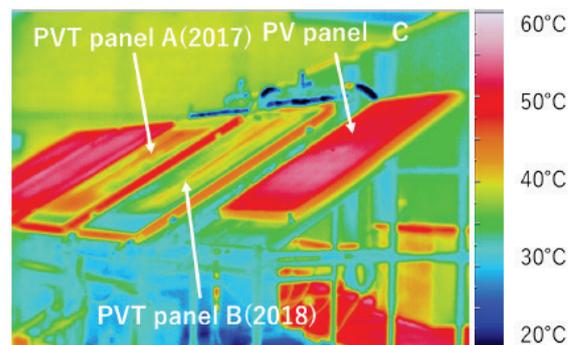


図 2 PV/T および PV ソーラーパネルの表面温度

とが効果的である。そこで蒸散をまねた多孔質セラミックス冷却装置の開発を行っている⁽¹³⁾。現在の冷却塔に代わる廃熱冷却装置とすることを狙っている。また、多孔質セラミックスは水を含ませ風を送ることで、湿球温度に近づくことからファン動力のみで涼風を提供することもできる。例えば、外気温 35℃、相対湿度 60% であっても 28℃ に近くなるセラミックスで涼風を提供できる。

7.3 エジェクタ冷凍サイクルの開発

太陽エネルギーあるいは様々な廃熱から得られる 60℃ 程度の温熱を利用して、15℃ 程度の冷熱を省電力で得るエジェクタ冷凍サイクルの開発⁽¹⁴⁾を進めている。夏季に余る太陽熱を利用し、わずかな電力消費で冷房に適した 15℃ 程度の冷熱を供給できる設備開発である。温廃熱により温めた作動流体の圧力を利用して、エジェクタにより蒸発器の作動流体を引っ張り蒸発させ、低温を得る仕組みである。液体ポンプで作動流体を蒸気発生器に戻す動力が必要であるが、R-245fa を作動流体とする装置において電力消費に対する冷却能力が、30 以上の COP を得ている。詳細は文献 (14) で公開予定である。

8. あとがき

人類は木や炭などの自然エネルギーを利用していった素朴な時代から、石炭や石油などの化石燃料そして原子力などの高密度な熱エネルギーを利用する時代を築き、自動車や航空機や鉄道での高速移動を可能とし、さらに発電により電力が自由に使えることで情報・通信・コンピューターが加速的に大きく発展し、科学技術も飛躍的に進捗しつつある。一方で、化石燃料資源の大きな割合を使い果たし、その限界を感じ始めると同時に、フロンガスによるオゾン層破壊、そして、地球温暖化など、人類の活動が地球（自然）環境に変化を与え、その人為的な気候変動により生物の存続に影響をもたらしている。

今こそ、自然を知り自然を利用する工学により、自然環境に調和する持続可能な循環型社会の学術基盤となる「自然工学」が必要な時代であると感じる。人類は、高密度であれば約 6 千ケルビンの熱である高質な太陽光が生み出す再生可能エネルギーを利用する時代への移行を模索し始めている。

太陽光は人類が消費する全エネルギーの 5 千倍以上の量である。自然エネルギーを使えば自然環境に調和する社会になるのであろうか、著者はその点で大きく心配している。熱力学的な表現を用いるならば、効率の低い莫大な量のエネルギー利用は大きな

エントロピーを生み出し、自然環境の秩序を攪乱する。自然環境の循環メカニズムを破壊しないで、再生可能エネルギーを利用する「エネルギー高度利用」の学術基盤を確立するための試みをここに紹介した。自然環境の秩序を謙虚に学び、自然環境と調和できる社会を築くための「自然工学」の重要性をすべての人々に理解してもらいたい。まだ未熟な内容ではあるが、ご批判を頂戴しながら「自然工学」を少しずつ確実なものへと育てて戴ければ幸いです。

謝辞： PV/T ソーラーパネルの開発でお世話になっております株式会社サンジュニア、株式会社入江産業の皆様；蒸散をまねた冷却装置の開発でお世話になっております日大佐々木直栄教授、久保田稔製陶所、九州産業技術センター、空研工業株式会社、佐賀県窯業技術センター、田畑ラヂエーター株式会社、明光プラスチックの皆様；エジェクタ冷凍サイクルの開発でお世話になりました実栄産業株式会社、三井精機工業、松尾亜紀子研究室、作動流体をご提供頂きました AGC 株式会社の皆様、そして実際に研究を進めている慶應義塾大学と東京海洋大学の先生方及び学生の皆様に心より感謝しております。

参考文献

- 1) 佐藤春樹, 環境保全型エネルギー利用と自然工学 - 自然環境調和型社会の構築に向けて, 基調講演, 第 49 回空気調和・冷凍連合講演会, 2015 年 4 月 16 日, 東京海洋大学.
- 2) S. Manabe and R.T. Wetherald, Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, *J. the Atmosphere Sciences*, 24 (3), 241-259 (1967).
- 3) 赤祖父俊一, 気候変動における自然変動の重要性, 伝熱, 日本伝熱学会, 54 (226), 1-5 (2015).
- 4) S. McIntyre, Holgate on sea level, *Climate Audit*, (2019.3), <https://climateaudit.org/2007/02/11/holgate-on-sea-level/>
IPCC (2013) 図 3.13 (a) from 奥中裕佳, 平原隆寿, 日本沿岸の海面水位の長期変化傾向について, 最近の研究レビュー及び GPS 観測による地盤変動量を用いた補正, 測候時報, 83 (特別号), S21-S31 (2016).
- 5) IPCC 特別報告書「1.5℃の地球温暖化」の政策決定者向け要約を締約国が承認, IPCC プレスリリース 18-072-J, 2018 年 10 月 16 日, 国際連合広報センター, (2019.2), <http://www.unic>

- or.jp/news_press/info/30738/
- 6) BNEF (ブルームバーグ・ニュー・エナジー・ファイナンス) : エネルギー部門の事業者及び専門家にビジネス機会増大を支援する研究機関 ; 黒崎美穂, RE-Users サミット, 2019年2月1日, 自然エネルギー財団, (2019.2), https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/4-1_Kurosaki_RE-Users%20Summit%202019_JP.pdf
 - 7) Solar Energy, IEA, (2019.2), <https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>
 - 8) Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy, 2014 edition, IEA, (2019.2), https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf
 - 9) IPCC Fourth Assessment Report; 青木周司, 人間活動によって大気に放出されたCO₂の行方を探る, コンクリート工学, 48 (9), 47 (2010).
 - 10) 手代木純, ライシメーター法による実大高木樹木等の蒸発散量の把握, 第28回環境情報科学学術研究論文発表会, 環境情報科学センター, (2019.3), https://www.jstage.jst.go.jp/article/ceispapers/ceis28/0/ceis28_143/_article/-char/ja/
 - 11) H. Sato, and K. Terashima, An exergy based evaluation for aiming energy saving and efficient solar-energy utilization, International Conference of Grand Renewable Energy 2018, June 17-22, 2018, Yokohama, Japan; (2019.3), https://www.jstage.jst.go.jp/article/gre/1/0/1_324/_article/-char/ja
 - 12) K. Terashima, D. Handa, H. Sato, and T. Ikaga, A new concept of solar panel for generating power and thermal energy without warming the air, International Conference of Grand Renewable Energy 2018, June 17-22, 2018, Yokohama, Japan; (2019.3), https://www.jstage.jst.go.jp/article/gre/1/0/1_314/_article/-char/ja
 - 13) K. Terashima, A. Seya, H. Sato, and T. Ikaga, A new concept of transpiration cooling system for creating cooling-air society, International Conference of Grand Renewable Energy 2018, June 17-22, 2018, Yokohama, Japan; (2019.3), https://www.jstage.jst.go.jp/article/gre/1/0/1_315/_article/-char/ja
 - 14) N. Kuniyoshi, A. Takatsuka, H. Sato, and M. Kojima, Possibility of ejector cycle for cooling in SDGs, to be presented at International Workshop on Environmental Engineering 2019, JSME, June 25-28, 2019, Okinawa, Japan.

著者略歴



1980年3月 慶應義塾大学 大学院 工学研究科 機械工学専攻 博士課程単位取得退学, 同年4月 慶應義塾大学工学部 助手, 1982年3月 工学博士, 1996年 同教授, 1998年5月 日本太陽エネルギー学会優秀技術賞, 2002年 中国西安交通大学客員教授, 2011-2013年 国際太陽エネルギー学会 (ISES) 理事, 2011年 - ISES 日本支部連絡委員, 2013年 第1回日本工学教育協会 JSEE アワード, 2019年4月 日本機械学会名誉員, 2018年4月 - 現職