

地球温暖化対策とエネルギー利用について

Measure against Global Warming and Consideration on the Utilization of Energy

佐藤春樹*

1. はじめに

コロナによるパンデミックもほぼ落ち着き、2023年5月29日に、学会総会がオンライン開催ではなく、4年ぶりに東京理科大学森戸記念館で開催されました。総会では、押田賞（論文賞）を頂戴し、学生時代に押田勇雄先生の「エクセルギー講義」を学び、現在もエネルギー利用の最も重要な概念が「エクセルギー」であると確信しているため、押田賞は大変光栄であり大きな喜びです。そのエクセルギーの概念を含め、総会特別講演でお話しする機会を頂戴したことに感謝しています。

ここに掲げた表題はその際の副題です。本題は「人類のSDGsに資する自然工学の提案」でした。このタイトルの「自然工学」とは、自然環境生命圏の持続可能な循環メカニズムを認識して、それを守る工学です。既に2019年の学会誌¹⁾に紹介したので、講演副題を今回のタイトルとしました。

さて、今年2023年7月7日（国際的には7月6日）の世界平均気温が、過去最高であった2016年8月16日の16.94℃を上回ったと世界気象機関（WMO）が発表しています。既に、5月と6月には海水温が最高記録となり、7月4日には、世界的な気温上昇につながるエルニーニョ現象が発生しています。そして、南極圏の海水面積は6月としては最も小さく、平均より17%も少ないなどの情報が次々に報道されています²⁾。この7月は、九州や東北で災害級の大雨が降り続く一方で、日本全体で体温以上の猛暑を多くの地点で記録して、気象庁によると東京都心の7月の平均気温は28.7℃で平年の平均気温を3.0℃上回り、1875年の観測開始以降7月としては最高平均温度を記録したとのこと³⁾。

世界的にはコペルニクス気候変動サービス⁴⁾が、

世界の気温と海面温度等のデータ情報を、見易く、美しい図と簡明な解説で公開しています。いかに2023年が地球温暖化を心配するに相応しい記録続きの年かを国際的な視点からも読み取れます。この報告をまとめている間も地球温暖化の記録は毎日塗り替えられつつあるようです。

著者は日本機械学会及び日本太陽エネルギー学会に所属する環境工学分野の研究者です。流体熱物性、冷暖空調・給湯、そして太陽エネルギー利用など、民生部門のエネルギー利用に関わる研究に携わってきました。定年退職後は、地球温暖化とその対策について特に関心をもって、人類の未来のあり方を考え続けています。気象や地球物理の分野の専門家にお尋ねしたい疑問も多くありますが、この機会に私が理解した地球温暖化について紹介させていただきます。皆様も、地球温暖化対策を考える際の資料のひとつとして、この講演資料が少しでも役立つことができれば幸いです。

2. 地球温暖化と自然環境生命圏の炭素循環

地球温暖化対策として、大気への二酸化炭素排出削減を行うことは自然な対応と思いますが、日本の報道で「脱炭素」と呼ぶことには違和感を感じています。

植物は大気中に酸素を供給してくれていますが、実は地球上のあらゆる生命は、植物が吸収する大気中二酸化炭素の炭素から始まっています。大気から得た炭素に、土からの水と栄養を加えて、光合成により糖をはじめとする炭素化合物がつくられ、植物自身の体や果実などになり、それらを食べる動物な

* 慶應義塾大学（名誉教授）、東京海洋大学（客員研究員）

ど、多くの生命循環が始まります。

読者の皆さんの体の炭素成分も、全てが植物によって採取された大気中二酸化炭素の炭素と考えられます。このように**生命循環は炭素循環**そのものであると認識できます。「脱炭素」という表現は、生命循環と炭素循環の深い関係性への敬意が感じられない用語であり違和感を感じます。

さて、地球生命質量の82%⁵⁾をしめる植物が基盤となってつくられるこの「生命循環」こそが「自然環境生命圏」であり、「健全な炭素循環＝健全な生命循環」です。

図1は、世界の一次エネルギー消費量⁶⁾、地球の地表平均温度⁷⁾、そして海面上昇⁸⁾を並べたイメージ図です。

それぞれに信頼できる文献情報の図をトレースして、重ねました（厳密な数値データに基づいた図ではないので正確な数値を読みとることはできません）。この比較の図に、地表平均温度および海面上昇のそれぞれの全データが収まる幅のある直線の矢印を被せました。地表平均温度は0.006℃/年の傾きで約0.4℃の幅の矢印、海面上昇に関しては1.7mm/年の傾きで約30mmの幅の矢印で全データを収めることができます。

大気中二酸化炭素濃度の増大が原因で地球温暖化が生じることは、2021年にノーベル物理学賞を受賞された真鍋淑郎博士の1967年の学術論文⁹⁾に、大気中二酸化炭素濃度が150ppm、300ppm、600ppmの場合の、地表および大気の垂直温度分布の計算結果が掲載されており、大気中二酸化炭素濃度と地球温暖化の関係は科学的に証明されています。

図1の地表平均温度と海面上昇に関するそれぞれの観測値が全て含まれる幅と傾きをもつ直線の矢印を見ると、海水面高さの計測データは、データが存在する1904年から今と変わらない変化量（矢印

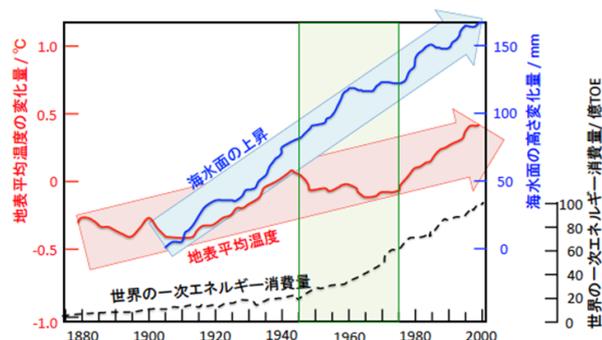


図1 世界の一次エネルギー消費量、地表平均温度、および海面上昇の関係（文献情報^{6),7),8)}のイメージ図

の傾き)で既に上昇が始まっていたように見ることができ、地表平均温度も、矢印の幅の中で、約60年周期の波があるように捉えると、全体的には、1880年から矢印の気温上昇が始まっていたように見ることがもできます。

特に図1の第二次世界大戦が終結した1945年から1975年までの30年間に注目すると、自動車の普及や冷暖房・給湯などの普及、そして家電製品の電化等により、石炭・石油・天然ガスの火力発電所をはじめとする化石燃料消費が急激に進み、1973年10月には第一次オイルショックが生じるなど、化石燃料資源の枯渇が心配されるほどのエネルギー消費が進みました。そして、1970年代以降は原子力発電所が世界的に大きく導入されています。この30年間を見ると、人類は一次エネルギー消費量を約3倍まで拡大させ、この間に大量の二酸化炭素を大気中に放出しました。一方でなぜか、地表平均温度は下がり続けています。大気汚染が深刻だったせいでしょうか。多くの疑問が残ります。

このように図1を描いて見ると「脱炭素」が意味する第二次世界大戦後の化石燃料消費による二酸化炭素排出だけで地球温暖化を説明することには不自然さを感じます。上述の30年間の海面上昇と地表平均温度、そして大気中の二酸化炭素濃度のそれぞれの変化とその変化の相互関係を、科学的に説明する努力が必要に思います。

3. 自然環境生命圏と地球温暖化対策

さて、地球温暖化に対して化石燃料を使わないように「脱炭素」することは自然な正しい対応ですが、それだけで克服できると結論づけることは早計です。脱炭素して解決できなかったときの状況が心配です。

図1の地球温暖化と海面上昇が、20世紀初頭には既に生じていたとしても不思議ではありません。その要因は、世界人口¹⁰⁾の急激な増加と人類の森林破壊¹¹⁾による自然環境生命圏の炭素循環機能不全、すなわち、大気中炭素を森林が吸収して、地表・地中動物たちがその炭素を地中に蓄積する機能に森林破壊が既に影響していた可能性も考えられます。

世界人口¹⁰⁾は、西暦1000年までは約3億人でその変化は小さく、1500年に約5億人(1000年から1500年で平均して約40万人/年の増大)、1800年に約10億人(388万人/年)、そして、1900年には16.6億人(828万人/年)、1950年に25.2億人(2015

万人/年)、1975年には40.7億人(7904万人/年)となり、18世紀後半に始まった産業革命以降の人口が爆発的に増大しています。そして1990年には年間人口増加のピーク(9082万人/年)となっています。それでも人類の全生命質量に対する割合は0.01%程度⁵⁾に過ぎません。

炭素循環を考えると、大気中の二酸化炭素を吸収する植物は、全生命質量の82%⁵⁾です。植物が吸収した大気中の炭素を陸に固定するとき全動物質量の54%を占める環形・節足動物のミミズなどの地表・地中生物が地中に炭素を固定する重要な働きをしていると考えられます。

石炭は植物を起源とし、石油はプランクトンなどを含む動物を起源として化石燃料資源が育まれました。どちらも地球規模の長い歴史の中で地中に蓄積された炭素です。その化石燃料資源を人類は、18世紀後半の産業革命以降から現在までの短期間に大量消費して、大気中に二酸化炭素を放出し続けています。

さらに、人口が増えるに従って都市面積や食糧等の耕作面積が増え森林面積が減少¹²⁾しています。森林は常に人類にとって重要なエネルギー資源でしたが、自然環境生命圏の持続可能性を支える重要な機能を提供していたとも考えられます。

世界の森林は縄文時代には約62億haあり、現在は約40億haで陸地の27%、地表全体に対する森林面積は約8%との記述もあります¹³⁾。人類は、森林を破壊し、食料の為に牧畜や畑を開拓し、街はコンクリート、アスファルト、あるいは枯葉剤などで地表を覆い、植物や環形・節足動物を含む多くの生物が人類により失われています。

坂本龍一氏が指摘する「都市の再創造」、今一番必要なことは都市をつくり変えることだと思ふ¹⁴⁾に繋がります。

人類は「森林からはじまる健全な自然環境生命圏」の中で生きてゆける新たな道を創造すべきではないでしょうか。その道が地球温暖化対策の本質であるとも思います。

植物が大気中炭素を吸収しても、それを地中に蓄積するミミズや昆虫などの動物が減少し、炭素を地中に蓄積できなくなる開発は止め、健全な自然環境生命圏の機能を回復させることが人類のSDGsと思います。人類により地球規模の水・炭素・エネルギー循環が蝕まれ、人類を含む生命循環の場である自然環境生命圏に支障が生じ、地球規模の自然環境に変化が生じているのではないかと心配します。

4. 自然環境生命圏の水循環とエネルギー循環

昨今の世界的な異常気象の事実が与える著者の不安は大きく、地球温暖化対策と人災でもある巨大化する自然災害から命を守るため、人類は、これ以上生命圏を壊さない慎重な行動をすべきときが、確実にきていると思います。

2022年11月15日に、世界人口が80億人を超え、2050年には97億人を超える勢いで人口増加が進んでいます¹⁰⁾。産業革命以降の急速な一次エネルギー消費と都市化や畜産・耕作地開拓による森林面積の減少など、様々な人類の活動が自然環境生命圏に影響を与え続けてきたことが地球温暖化の要因となっていることを心配します。図2に地球規模の陸・大気・宇宙のエネルギー・バランスを示しました。気象学等で学ぶ図¹⁵⁾です。

そこに、英国のbp Statistical Review of World Energyがまとめた2021年に人類が消費した一次エネルギー消費量 $595.15 \times 10^{18} \text{J}$ (ジュール)を地表面積と年間秒数で割り算して、 W/m^2 の単位で地球に降り注ぐ太陽エネルギーの量と比較しました。

太陽エネルギーは地球が自転していますので常に地球の半球に降り注ぐエネルギー量です。エネルギーの強さでは、人類の一次エネルギー消費量は太陽エネルギーの約1万分の1となりますが、地球上のある地点で太陽エネルギーは昼12時間の供給であり、一方で、地球のどこかで人類は常に(24時間)エネルギー消費していますので、総量で比較すると人類のエネルギー消費量は、太陽が地球に降り注ぐエネルギー総量の4622分の1となります。人類のエネルギー消費量は、図2の他のエネルギー・フローの量と比べて、有効数字に入らない程度の小さな量です。

地球へのエネルギー入力、後述しますが、エネルギー価値(エクセルギー)の高い短波長放射エネルギーである太陽エネルギー 342 W/m^2 であり、一方で、地球から宇宙に放出するエネルギーは、太陽エネルギーの反射である短波長放射の 107 W/m^2 と地表や大気からの熱放射であるエネルギー価値の低い長波長放射 235 W/m^2 の合計 342 W/m^2 でバランスして、地表はほぼ一定の温度を保っています。

地球温暖化とは別に、水蒸気や二酸化炭素やオゾンなどの大気中の温室効果ガスが、地表からの熱放射を吸収することによって、地表平均気温を約15℃に保ち、自然環境生命圏が維持されています。もしも温室効果ガスがないとすると地表温度は -18°C

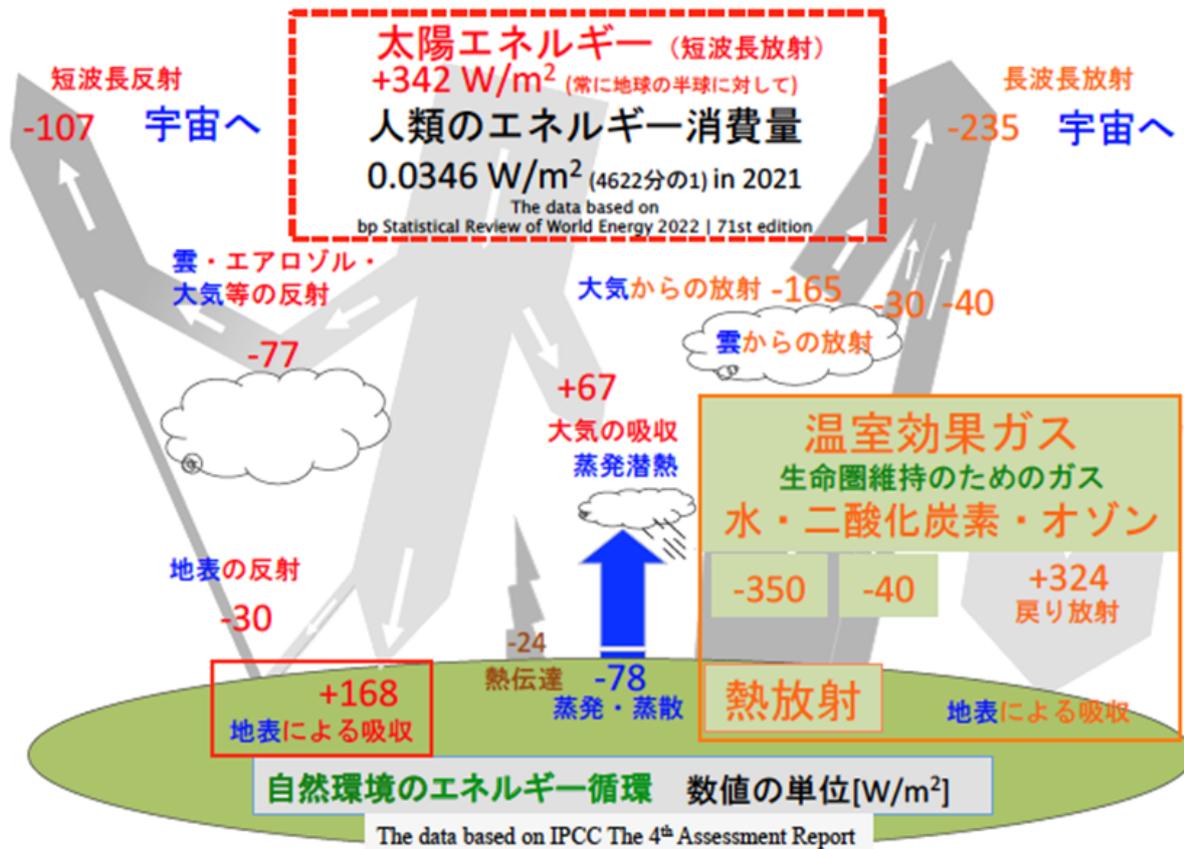


図2 地表・大気・宇宙のエネルギー・バランス¹⁵⁾

となり、地表は水で覆われ、現在の生命圏には適さなくなります。

図2から、地表の反射は -30 W/m^2 であり、地表が吸収する太陽エネルギー量は 168 W/m^2 です。地表からの熱放射は $(-350 \text{ W/m}^2 - 40 \text{ W/m}^2) + 324 \text{ W/m}^2 = -66 \text{ W/m}^2$ であり、大気と地表の間の熱伝達が -24 W/m^2 、地表の熱を大気に運ぶ最も量的に重要な熱輸送は、水の蒸発・蒸散の -78 W/m^2 であることがわかります。すなわち陸上の水面や海面からの蒸発と森林など植物から蒸散される水量が、地表温度を一定に保つ重要な機能であると解釈できます。

5. 海面上昇の原因を水循環から考える

植物の蒸散の役割について引き続き考えます。蒸散では、葉面と大気の水の濃度を平衡に保とうとする物質移動の力も働くので、温度の平衡に加えてさらに水が蒸発して、液体の水が水蒸気になるための熱を奪い、理論的には湿球温度まで冷やすことができます。晴れた日に木の葉を触って熱くなっていることを感じたことはない筈です。単なる水の蒸発とは異なり、植物は蒸散によって数度程度、周囲温度

を下げることができます。

さらに、植物は陸上に降る雨水を海に流すことなく直接大気に戻す、海を介さない「地表と大気の水循環」を行う役割も担っています。そこで、毎年平均 1.7 mm である海面上昇を、森林破壊により「地表と大気の水循環」が減ったことで海水が増えていると仮定して、森林破壊の大きさを簡単な計算から求めてみます。海洋の表面積が全地表の7割として、全海洋体積を $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$ とすると、毎年 6.14×10^{11} トン分の海水体積が増えていることとなります。

図2の -78 W/m^2 から、地表（陸+海洋）から蒸発・蒸散する水の総量は、 $5.1 \times 10^{14} \text{ t/年}$ となり、この蒸発・蒸散水量は、年間平均 1000 mm の降雨量（世界204都市の年間平均降雨量）に矛盾しない量です。そこで、陸と海の面積比である3:7で、陸の蒸発・蒸散総量=降雨総量であると仮定すると陸への降水量が $1.5 \times 10^{14} \text{ t/年}$ となります。そのうち海洋に流れることなく、植物の蒸散により陸から直接大気に移動する水量が、毎年 6.14×10^{11} トン分減っている可能性が考えられます。

樹高7mのケヤキ1本からの蒸散水量は、8月の

暑い日に 44.6 kg/日であったとの研究報告¹⁶⁾もあります。樹木(森林等)の減少が海洋へ流れる水量を増やしていると考え、海に流れる水が、毎年、陸への降雨総量の 0.4 %増加していると仮定すると、海面上昇 1.7 mm/年の平均海面上昇量になります。表現を変えるならば、森林破壊等の影響で陸への降雨総量の 0.4 %が陸と大気の水循環ではなく、海に流れてしまい海面上昇が生じているのではないかと心配します。

(以上、読者の方にはこの計算が正しいか確認していただければ幸いです。)

6. 自然環境生命圏と調和するエネルギー利用

6.1 エネルギー価値(エクセルギー)とは何か

さて、エネルギー利用についての話題に移ります。人類のエネルギー利用による自然環境への影響を最小化するために、エクセルギーの説明をします(この文章は講演報告であり教科書を書くような十分な検証をする時間がなく記述していますので、誤った認識があるかもしれません。お気づきの点があればご指摘いただければ幸いです)。

電気エネルギー(電力)や力学エネルギー(動力)は、熱力学で呼ぶいわゆる「仕事」に相当するエネルギーです。あるエネルギーが存在するときに、そのエネルギーのある量で実現できる最大仕事を、そのエネルギーのエクセルギー量と定義します。この単位エネルギーの最大仕事を、そのエネルギー価値として扱います。

表現を変えれば、エネルギー量だけでは、そのエネルギーで実現できる最大仕事量はわかりません。そのエネルギーのエクセルギー量を知ることが重要です。

例えば、周囲環境と平衡状態にあるエネルギーの場合は、量に関係なく平衡状態が保たれるだけですので、周囲環境に変化を与える(=仕事をする)ことはできませんので、そのエネルギーのエクセルギーはゼロです。エネルギー利用をする際には、電気・力学エネルギーと等価なエクセルギー量を知ること、そのエネルギー価値を有効に利用できるようになります。

熱エネルギーは、熱力学で学ぶように全く損失のない理論サイクルであるカルノーサイクルを用いても、投入する熱エネルギー温度とそのシステムが置かれた周囲環境温度に支配されるカルノー効率により、その最大仕事(熱効率)が決まります。そして、カルノー効率が 40%であれば、残りの 60%は周囲

環境への廃熱となり、最終的には消費したすべてのエネルギーが周囲環境に移動してエネルギー保存則が満足されます。

最大仕事量であるエクセルギー量は電気・力学エネルギーと等価であり、周囲環境温度との温度差が小さい熱エネルギーのエクセルギー量は小さいのでそのような熱エネルギー 1 kW から、1 kW の電気エネルギー(=エクセルギー)を取り出すことはできません。逆に 1 kW の電気エネルギーはエクセルギーと等価ですので、エアコンを動かすことで、周囲環境からも集熱して、あるいは、周囲環境への廃熱量を大きくして、現在の技術では約 7 倍の 7 kW 程度の温・冷熱を供給することができます。エネルギーは同じ量でも、そのエクセルギー量の違いで、最大仕事量が大きく異なります。

6.2 エクセルギー計算とエクセルギー効率

熱力学でいう最大仕事量(動力・電力量)そのものをエネルギー価値(エクセルギー量)として説明しました。

例えば 300 K(ケルビン) = 27 °C の環境温度で、1000 K = 727 °C の水蒸気により発電することを考えます。1000 K の水蒸気が 100 kW の熱エネルギーをもっているとする、カルノー効率の式から、その理論上の最大効率は $(100 \text{ kW}) \times (1000 \text{ K} - 300 \text{ K}) / 1000 \text{ K} = 70 \text{ kW}$ となります。この 70 kW が、300 K の環境において 1000 K の水蒸気をもつ 100 kW のエネルギー量から理論的に発電できる最大の電気エネルギー量です。この理論効率は熱機関のカルノー効率と呼ばれます。そして、この発電機で実際に 50 kW 発電できたとする、そのエクセルギー効率は、 $50 \text{ kW} / 70 \text{ kW} = 0.714$, 71.4 % となります。

このように発電機(熱機関)で用いるカルノー効率すなわち理論効率の出力をエクセルギー効率 100 % とするように、光エネルギーや化学エネルギーや様々な形態のエネルギーを他のエネルギーに変換する場合の理論効率、エクセルギー効率 100 % の出力を知ること、初めて元のエネルギー価値を有効利用できたかを知ることができます。

例えば、これまでのエネルギー保存則で、電気ヒーターで 1 kW の電気エネルギーを消費して温めると熱エネルギーが 1 kW 出力されて 100 % であると満足してしまうかもしれません。一方で、エアコンを使えば同じ電気エネルギー 1 kW で、3 kW 程度の冷熱が得られ満足してしまうかもしれませんが、エクセルギー効率はまだ 30 % かもしれません。環境温度と比べて小さな温度差の熱エネルギーは小さな

エクセルギー量なので理論的には例えば10倍の熱量を得ないとエクセルギー効率が100%にならないことを知ること、電気エネルギーを熱エネルギーに変換する際に電気エネルギーを有効に利用できるようになります。

エクセルギー効率について、もう少し実例を用いて定量的に以下に記述します。

6.3 エクセルギー効率を知ることの重要性

40℃の環境温度において28℃の冷房1kWをする場合のエクセルギー効率がどれほどかを計算してみます。温度はセルシウス度 t ではなく、 $(t + 273.15)$ の熱力学温度、ケルビンKの単位を用いて計算します。

周囲環境温度40℃の時に、冷房で28℃の熱1kWを得るカルノーサイクルの理論効率の式は次の通りです。 $1\text{ kW} \times \text{温度差} \{(28 + 273.15) - (40 + 273.15)\} \text{ K} / \text{熱力学温度} (28 + 273.15 = 301.15) \text{ K} = -40 \text{ W}$ です。この式では、温めるときは符号がプラス、冷やすときはマイナスとなりますが、この場合の仕事（エクセルギー）量は、その絶対値の40Wです。すなわち周囲環境温度が40℃の時に28℃の熱エネルギー1kWのエクセルギーは40Wです。

エアコンなどの性能表示では理論成績係数COP = 冷房能力(1kW) / 仕事量(40W) = 25となります。現状のエアコンのカタログ上の最高成績係数はCOP = 7程度ですので、エクセルギー効率を求めると7/25で28%程度となります。

エアコンのエクセルギー効率が、随分低いと思われるでしょうが、実は、エアコンは室温を下げるだけでなく、同時に室内空気の除湿を行わないと結露もしますし、快適に感じません。実際には15℃程度で除湿して相対湿度が50%程度以下になるように冷房しています。そこで、再度15℃で計算し直します。 $1\text{ kW} \times \{(15 + 273.15) - (40 + 273.15)\} \text{ K} / (15 + 273.15 = 288.15 \text{ K}) = -86.8 \text{ W}$ となります。仕事量は約87Wとなり理論成績係数COP = $(1\text{ kW}) / (87\text{ W}) = 11.5$ と計算できます。除湿の為に冷房温度を15℃で計算し直すとCOP = 7のエアコンのエクセルギー効率は7/11.5 = 61%となります。既存のエアコンの性能は十分高いエクセルギー効率であることが分かります。

一般のユーザーはその最大仕事である理論成績係数COPを知ることができないので、電気エネルギーの7倍の冷熱が発生できることはわかっても、エアコン設備の技術的な完成度を評価することはできま

せん。これでは本来の技術開発評価ができません。

一方で、エクセルギー効率で計算すると、異なる形態のエネルギーであっても、エネルギー価値を100%利用すれば、エクセルギー効率が100%という共通の目標値となり、電気エネルギーを有効利用できているのかを多くの方々がわかりやすく判断できるようになります。

エクセルギー効率は、エネルギー利用システムの本来の高度化指標です。エクセルギー効率により人類のエネルギー利用の技術開発達成レベルを正しく知り、エネルギー資源を無駄なく利用することができます。

電気エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー、光エネルギー等々の異なるエネルギー価値をもつエネルギー形態により、成績係数COP = 7や熱効率 = 60%等の異なる評価指標を用いるのではなく、エクセルギー効率で、理論効率に現在の技術がどれ程近づいたのかを知ることができます。

様々なエネルギーシステムの技術開発時に常にエクセルギー効率100%を目指す共通目標で、誰もが、経済と同じように需要エクセルギー量に対して、消費エクセルギー量がどれほどであるのか、エクセルギー経済バランスを考えることで、無駄な資源消費を節約することが可能になり、エクセルギーを周囲環境へ無駄に捨てないようにすることで、エネルギー利用による周囲環境への影響を最小化できると考えます。

エネルギーには様々な形態があります。力学エネルギー、核エネルギー（放射線）、光エネルギー、電磁エネルギー、化学エネルギー、熱エネルギーなどです。それらの異なる形態のエネルギーを別のエネルギーに変換して仕事（例えば熱エネルギーを電力や動力へ変換）をさせるときの最大仕事量がエクセルギー効率100%です。

次に、太陽エネルギーの価値についてエクセルギーで説明します。

6.4 太陽エネルギーと地球温暖化

例えば自然環境温度300Kにおいて、表面温度6000Kの太陽から放出される太陽エネルギーは、カルノーサイクルの効率の式で計算すると $(6000\text{ K} - 300\text{ K}) / 6000\text{ K} = 0.95$ でその95%が仕事に変換できるエネルギー量 = エクセルギー量となります。凹面鏡で太陽エネルギーを集光すると数千K（ケルビン）になる程の高質なエネルギーです。

図2に記述したようにこの高質な太陽エネルギーが2021年に人類が消費した一次エネルギー量の

4.622 倍も地球に降り注いでいます。人類が消費する一次エネルギー資源の温度は 6000 K の太陽エネルギーには全く及ばないので、エネルギー価値（エクセルギー量）で比べると、地球に降り注ぐ太陽光エクセルギー量と比べて、人類のエクセルギー需要量は数万分の 1 より遥に小さい値でしょう。

太陽エネルギーは、エネルギー密度こそ低いのですが、ほぼエクセルギーである高質な価値あるエネルギーであることを認識して、もっと有効利用することが大切です。

一方で、森林破壊など自然環境に僅かな変化が生じることで、そこに降り注ぐ太陽エネルギーのとても大きく大きなエクセルギーが、地球温暖化のような大きな変化、そして、自然環境の様々な炭素・水・エネルギー循環および生命循環に大きな変化を生じさせると考えられます。

繰り返しになりますが、人類の活動によって自然環境生命圏に変化が生じ、そこに降り注ぐ大きな仕事能力のある太陽エネルギー（95%がエクセルギー）が、自然環境生命圏の炭素循環、水循環、エネルギー循環に変化を与え、地球規模の温暖化を生じさせ、自然災害の規模を巨大化させていることが考えられます。

6.5 エジェクタ冷凍サイクル

常に新たなエネルギー変換システムの可能性について考えることも大切です。エジェクタ冷凍サイクルという温熱を冷熱に変える省電力な冷凍サイクルの存在があることをご存知でしょうか。電気エネルギーで圧縮することにより熱エネルギーの温度を変えるのではなく、僅かな電力で作動流体を移動させるだけで、作動流体の温熱と冷熱の圧力差を利用して仕事をさせるシステムです。

環境温度が 40℃ のとき、15℃、1 kW のエクセルギー量は 87 W です。60℃、1 kW のエクセルギー量は $1 \text{ kW} \times (60-40) \text{ K} / (60+273) \text{ K} = 63.9 \text{ W}$ です。環境温度が 40℃ のとき、60℃ の廃熱あるいは太陽熱は 63.9 W のエクセルギーをもっており、それなりの仕事ができます。このエクセルギーを利用して、液体ポンプ動力にわずかな電力を用いるだけで作動流体を循環させ、15℃ の冷熱を発生させることができます。このシステムは温度条件を整えた実験では、液体ポンプで消費する電力量の 40 倍を超える 15℃ の冷熱量を生成できます。

但し、液体ポンプの消費電力量が小さいこともあり、実機では様々な要素で液体ポンプ以外にも電気エネルギーが必要ですので、どの程度の効率が得ら

れるかはまだ分かりませんが、廃熱や太陽熱を冷熱に変えるエジェクタ冷凍サイクルで、現在のエアコン以上の性能が出るのではないかとその実用化に期待して研究開発を進めています¹⁷⁾。

6.6 エネルギー価値（エクセルギー）の使い方

現在、熱力学では主にエネルギー保存則を学びます。例えば、一次エネルギー資源として石油を用いた場合、消費した石油のエネルギーは動力と廃熱のエネルギーとして、その形態は変化しても、総量は常に 100 % 保存されます。一方で、そのエネルギー価値は変化します。今、周囲環境温度が 300 K であると仮定すると、消費した一次エネルギー資源のエネルギー量の全てが、最終的には 300 K の熱エネルギーとして、エネルギー価値ゼロの状態です。周囲環境に存在することでエネルギー保存則が満足されません。

エネルギー需要が生じた場合、そのエクセルギー需要量を供給するために、①エネルギー資源のエクセルギー消費量をできる限りエクセルギー需要量に近づけて、②できる限りエクセルギーを周囲環境に捨てないようにすることがエネルギー利用の高度化となります。エクセルギーを周囲環境に捨てると、自然環境と平衡する状態まで、例えば周囲を温めるなど周囲環境の何かを変化させる仕事をするようになります。最終的には消費された一次エネルギー量は、全てが周囲環境に移動し、周囲環境と温度も圧力も全てのエネルギーの平衡状態を保つ周囲環境のエネルギーとして保存されます。最終的には図 2 の宇宙と地球の間のエネルギー・バランスによって宇宙に放出されます。

これまでの高度成長社会では、例えばカルノー効率に近づけようとエンジン開発を進めていました。そこに誤りはないので、残念ながら、「エクセルギーの概念は役に立たない」と思われ、ほとんど教育されていないのです。

冷暖給湯の自然環境温度に近い温度の冷熱や温熱はとても小さなエクセルギー量です。その認識がないので、エクセルギーそのものである電力の 5 から 7 倍の量の冷熱、温熱、給湯ができる便利なエアコンや給湯機に満足して、オール電化社会を目指す機運を感じます。一方で、電力をつくる際の効率には関心がもてない状況があります。太陽電池はパネル温度が高温となることから、実質発電効率が 15 % に届かない状態で使われることが多く、エクセルギー 95 % の太陽エネルギーの 85 % 以上が廃熱となり、地球を温めることとなります。

オール電化を目標とするならば、発電の際のエネルギー資源消費とその廃熱が自然環境生命圏に与える影響を十分に検討すべきです。

繰り返しになりますが、快適な冷房をするには15℃の冷熱で除湿する必要があります。エジェクタ冷凍サイクルを使えば、60℃の廃熱や太陽熱を15℃の冷熱に変えることができます。原理確認用エジェクタ冷凍サイクル試験装置では、ポンプ消費電力の40倍を超える冷凍能力の15℃の冷熱供給ができています¹⁷⁾。太陽エネルギー利用により、冷房を含む冷暖給湯+電力供給ができます。

人類の一次エネルギー資源消費量の4,622倍も降り注ぐ、エクセルギー価値95%の太陽エネルギーから、太陽電池(PV)と太陽熱集熱器(T)により電気と熱を同時に取得し、パネルが高温にならないように工夫して周囲環境への廃熱をできるだけ小さくすることができるPV/Tソーラーパネルの開発¹⁸⁾も進めています。

7. おわりに

自然環境生命圏の炭素・水・エネルギー循環を健全化するように、人類がその生命圏の一員として参加できる新たな人類社会の構築を目指す、自然環境生命圏へのアプローチが、最も現実的な地球温暖化対策なのだろうと考えます。人類の歴史は木を燃やし、火を扱うことに始まり、紀元前数千年の昔から、人類は森林破壊を行ってきた歴史を抱えています¹¹⁾。今こそ、その歴史に終止符を打ち、森林育成に転じるべき時だと思います。

世界の一次エネルギー消費量、地表平均温度、そして海面上昇の記録が残る1880年以降のそれらの変化を図1に見ると、既に19世紀から人類の森林破壊が自然環境生命圏に影響を与えていたのではないかと読み取れます。特に産業革命以降の爆発的な人口増加とそのエネルギー利用の拡大、そして、地球表面を人類の為だけに使う自然環境生命圏排除の行為が、自然環境そのものに大きな影響を与えていると認識します。

人口を適切にマネジメントすることも必要に思いますが、人類が傷つけてしまった自然環境生命圏を健全化させながら、エネルギー利用するときにエネルギー価値概念であるエクセルギーが役立つと確信して、その説明もさせていただきました。

2021年の人類の一次エネルギー消費量の4,622倍の量の太陽エネルギーが地球に降り注いでいます。しかも、太陽エネルギーは、エクセルギー95%の

高質なエネルギーであることから、その適切な利用を進めることで、人類も森林破壊のエネルギー利用ではなく、太陽エネルギー利用による健全な炭素循環の一員として生きられるように森林を回復し、炭素循環を担う地表・地中の動物と共存し、自然環境生命圏を健全化することができると考えます。そのためにはもう少しエクセルギーの概念を一般の方にも理解してもらえればと思います。正しい判断基準の正しい評価による循環型の持続可能な豊かな高度エネルギー利用社会を築くための科学技術の発展に最大限の努力で向かうことが大切だと思います。

参考文献

- 1) 佐藤春樹, 太陽エネルギー利用の熱力学, 太陽エネルギー, 45巻3号, (通巻251号), 7-13 (2019), 日本太陽エネルギー学会, 東京.
- 2) 東京新聞, 2023年7月11日夕刊.
- 3) 東京新聞, 2023年8月2日朝刊.
- 4) 例えば, コペルニクス気候変動サービスでは世界の地球温暖化に関するデータを見やすい美しい図とその簡明な解説で分かり易くまとめています. <https://climate.copernicus.eu/news>
- 5) 亀岡秀人, 東京新聞2023年5月7日自壊する「人類の時代」.
- 6) 茅陽一 (監), 図3世界の一次エネルギー消費量の変化, 環境年表2004/2005, (株) オーム社, 2003年11月, 359頁.
- 7) 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巻226号, 1-5 (2015).
- 8) Steve McIntyre, Climate Audit, (閲覧2023年8月2日), Holgate on Sea Level, <https://climateaudit.org/2007/02/11/holgate-on-sea-level/>
- 9) S. Manabe and R. Wetherald, J. The Atmospheric Sciences, Vol. 24, No. 3, pp. 241-259, (1967).
- 10) 世界人口の推移と推計: 紀元前から2050年, <https://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Data/Popular2005/01-08.htm> 国立社会保障・人口問題研究所 (閲覧2023年8月4日).
- 11) 塚本良則, “森林破壊の歴史が教えるもの”, 水文・水資源学会誌, 第4巻, 第4号, 巻頭言, 1-2頁, (1991); 「人間の歴史は森林破壊の歴史…」とある.
- 12) 世界森林資源評価 (FRA) 2020, メインレポート

- ト概要, 林野庁;
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaigai/attach/pdf/index-5.pdf>
 (閲覧 2023 年 8 月 15 日).
- 13) 世界の森林面積と森林率ランキング, 森林・林業学習館;
https://www.shinrin-ringyou.com/forest_world/menseki_world.php
 (閲覧 2023 年 8 月 15 日).
- 14) 坂本龍一, “コロナ危機から都市の再創造へ”;
<https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20200604.php>
 (閲覧 2023 年 8 月 15 日).
- 15) 下記文献を含む資料から描いた図です.
 IPCC, The 4TH Assessment Report, <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> ;
 bp Statistical Review of World Energy, 2022, 71st edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
 (閲覧 2023 年 8 月 15 日) ;
 Peixoto, J.P and Oort, A.H., Physics of Climate, American Institute of Physics, New York, 1992, pp.520.
- 16) 手代木純, 環境情報科学学術研究論文集, 28 巻, 143-148 頁, (2014).
- 17) 笹原 滉大, 伊藤 瑤姫, 國吉 直, 小嶋 満夫, 寺島 康平, 佐藤 春樹, R1336mzz (Z) を用いたエジェクタ冷凍サイクルの実験結果とその他の低圧冷媒を用いた場合の性能比較, 2023 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2023 年 9 月, 東京.
- 18) Terashima, K., Sato, H., Ikaga, T., Development of an environmentally friendly PV/T solar panel, Solar Energy, Vol. 199, pp. 510-520, (2020).

著者略歴



佐藤春樹 (さとう はるき)

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 - 慶應義塾大学 名誉教授, 東京海洋大学 客員研究員