

生活におけるエネルギーの流れ

生活工学のための熱力学序論 IV

Flow and Conversion of Energy in Life Process

Introduction to Thermodynamics for Human Environmental Engineering IV

妹尾学

Manabu SENO

(東京大学名誉教授)

1. はじめに

物理量としてエネルギーは広範な内容をもつ基本量である。既に本シリーズ II¹⁾で述べたように、一般に“仕事をしうる潜在能力”と定義されるエネルギーは種々の形態をもつ。代表的な分類として、たとえば

- ・ 力学的エネルギー（機械的エネルギー）、運動エネルギー、ポテンシャルエネルギー
- ・ 内部エネルギー、化学エネルギー、核エネルギー
- ・ 電気エネルギー、電磁エネルギー
- ・ 光エネルギー
- ・ 熱エネルギー

熱力学によって定式化されたように、これらはエネルギーとして等価であり、適当な方法によって等価変換されるが、トータルとして保存される。現在重要と考えられる変換プロセスは表1に示されるようなものである。

我々の生活は絶えず動的プロセスを伴うので、種々のエネルギーが利用され、種々の型のエネルギー変換が起こる。これらの過程をエネルギーの立場から統一的にみることは、我々の生活挙動に対する理解を深めるのに役立つと期待され、生活工学の基礎の一つとして役立つであろう。本稿ではこの問題について考えてみよう。

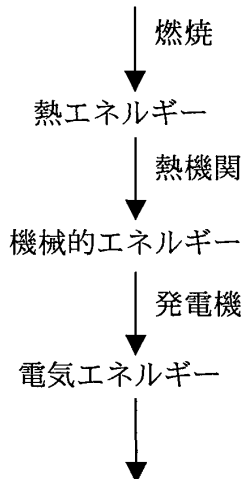
表1 エネルギー変換

変換後 変換前	力学 エネルギー	内部 エネルギー	電気 エネルギー	光エネルギー	熱
力学 エネルギー	単一機械		発電機 圧電気		摩擦
内部（化学） エネルギー	メカノケミカル 筋肉	化学反応 化学合成	燃料電池	ガス燈 化学発光	灯油（ガス） 暖房
電気 エネルギー	電動機	電気分解	変圧器	蛍光灯 エレクトロ ルミネセンス	電熱器
光エネルギー		光合成	太陽電池	けい光 リン光	集熱器
熱	熱機関	熱反応	火力発電 熱電子放射	電灯 熱光放射	熱ポンプ

2. エネルギーとエクセルギー

現在の生活で最も一般的で重要なエネルギーの流れは、次のようなものであろう。

石油など燃料（内部エネルギー）



生活にはいろいろな局面がある。基本的なものとして、家庭では衣・食・住、そして移動、労働などがある。このために物質・材料の形あるいは組み立てられた構造物として購入・利用されるものや、熱源としてのガス・灯油や動力源としての電力などが必要となる。物質・材料や構造物もそれらを製造する段階で種々な形のエネルギーが使われるので、これらの価値をそれと等価なエネルギーに換算することができれば、我々の社会および家庭での生活のプロセスをエネルギーの面から一貫して眺めていくことが可能になる。これがエネルギー分析の手法である。

なおここで注意しなければならないのは、ここでエネルギーというのは必ずしも科学用語としてのエネルギーではない。たとえば日常的によくエネルギーを消費したといい、また中東問題にからみエネルギー危機が叫ばれたりする。ここでいうエネルギーとは、技術的にみて利用可能な“有効エネルギー”である。たとえば大洋の海水はその温度で定まる大量の内部エネルギーをもっている。これは原子・分子の観点からしばしば熱エネルギーともよばれるが、これを利用することは技術的にみて困難である。したがって、ここではこのようなエネルギーは考えない。

技術的にみて有効なエネルギーは工学的に重要な量であり、エクセルギーexergy とよばれる。この名称は 1953 年東ドイツ（当時）の熱工学者ラント（Z. Rant）によるといわれ、はじめ東欧圏で広まったが、西欧やアメリカでも次第に用いられるようになった²⁾。エクセルギーは次のように定義される。“ある系のエクセルギーは、可逆プロセスを経て外界と平衡な状態に達するまでに、その系から取り出すことのできる最大仕事量に等しい。”たとえば、エンタルピー H 、エントロピー S をもつ系のエクセルギーは、

$$E_x = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (1)$$

ここで下付きの 0 は外界と平衡にある状態を表す。

また、温度 T の熱 Q がもつエクセルギーは、カルノーの定理から

$$E_x = \eta_c Q = \frac{T - T_0}{T} Q \quad (2)$$

が与えられる。 η_c は可逆カルノーサイクルの効率で、これから大洋の熱のように環境温度 T_0 に等しい温度の熱のエクセルギーは 0 になる³⁾。

本稿ではこれ以上エクセルギーに基づく議論には立入らず、多少の厳密性は犠牲にして、より分かりやすい慣例的な方法で議論を進めることにしよう。すなわち、大きなエクセルギーをもつ物質・エネルギーを広義の燃料とよび、燃料の問題を中心に考えを進めていく。

主要な燃料物質の発熱量（エネルギー含量）を表 2 に示す。燃料のエネルギー含量は統一的に kWh（キロワット時）で表されることが多い（1 kWh = 3.6 × 10⁶ J）。W（ワット）は仕事率（単位時間あたりにする仕事量）の単位で、古く 1 頭の馬の仕事率として馬力が定義されたが、1 馬力 = 0.75 kW である。人間は平均で約 0.02 kW、最大で 0.5 kW といわれる。科学技術の進展によって大出力の設備が稼働し、発電所では出力 5 × 10⁵ kW の蒸気タービンが動いており、まさに 500 万人相当の仕事をしている。

表2 産業用燃料のエネルギー含量

燃料	エネルギー含量, kWh
石炭 1 t	8.00×10^3
重油 1 m ³	11.44×10^3
ガソリン 1 m ³	9.68×10^3
ガス 1 m ³	1.036×10^3

3. エネルギーの課題

生活のために必要な資材を大きく一次的なものと二次的なものに分けることができる。一次的なものとは直接生存に必要なもので、水、食料、衣服、住居などの最低規準のものをいい、二次的なものとは社会的、文化的要求を満たすもので、これにより生活は豊かに快適なものになる。今日の世界では、ほんの一部の未開発地域を除き、使用される燃料の大部分は二次的ニーズにあてられ、その使用形態は複雑多岐にわたるので、これらの活動によるエネルギー収支の解析はかなり難しい問題になるが、次のようにして解析の糸口を見出すことができる。

文明社会の構築にとってエネルギー源の獲得が本質的な要因となることは、産業革命の例をみても分かる。石炭という高価値の燃料を使いこなすことが可能になって、生産性の著しい向上が実現した。そして同時にこのことは人々の生活に種々な面で大きな影響を与えた。この問題を食料の生産という観点から考えてみよう。本来、外部エネルギーを利用しない限りある土地から収穫される食料の量はそれを耕作する人の出力により限定される。各人が十分な土地を利用できるのであれば、これは重大な制約ではなく、現在でも一部の地域にみられるように、相応な豊かな生活が実現できるはずである。しかし、人口が多くなり、利用できる土地が相対的にせまくなるとともに、同じ面積の土地からより多くの食料を生産することが必要になり、この食料増産の圧力によって生産性向上のための技術が発展した。はじめ人力を助けるものとして家畜の出力が利用され、近代に入ってトラクターなどの機械力が大規模に投入され、生産性

は大幅に向上した。

食料生産におけるエネルギーの役割は、エネルギーの入力に対する出力の比で評価される。原始的農業システムでは、このエネルギー比、すなわち収穫された食料のエネルギー含量とこのために注入された人の労働の比は15~20で、この値は自然に生きる動物の場合における値7~25と変らない。家畜（主に牛馬）の力をかりることによって、この比は100~200に向上した。そして現代の集約的農業では1000以上に達する。この進歩は食料生産のために人力以外のエネルギーを多量に投入した結果、はじめて可能になったのであるが、投入されたエネルギーとしてはトラクターを動かすディーゼルエンジンの燃料ばかりでなく、同じく石油に由来する工業製品である各種肥料、土壌改良剤、殺虫剤、除草剤などの物質エネルギーがある。これらのエネルギーを加えると、エネルギー比はずっと小さくなり、場合によっては1以下になるという。現代の人はもはや太陽など自然の恵みによるじゃが芋ではなく、石油化学製品としてのじゃが芋を食べているとさえ言われるようになる。

このように現在食料生産のためのエネルギー投入はかなりの量になっており、今後世界の大部分の耕地がこのような集約的農業システムになるためには、世界の燃料のほぼ半分をこのために向けなければならないという試算もある。食料問題にとどまらず、その他多くの豊かさを追求する努力は直ちにエネルギー問題につながることになる。

4. エネルギー分析

さて、我々の社会活動においてエネルギー（燃料）がどのような形でどのように使われているのか、Chapmanによるエネルギー分析⁴⁾にしたがって見てみよう。これは少し古いが1968年のイギリスを対象として行われたものであるが、その手法は非常に示唆的であり、結果も現在なお非常に興味深い。

まず、平均的な4人家族の家庭について年間のエネルギー消費量を調べる（表3）。これ

から1人あたりのエネルギー消費量は 11,149 kWh と見積られる。これにイギリスの全人口 5.5×10^7 人 を乗じて、家庭での全消費量は 613.2×10^9 kWh と求められる。一方、イギリスで投入される燃料（原料）は表4に示されるように、 $2,341.7 \times 10^9$ kWh である。これがすべて有効なエネルギーとして使われるわけではない。燃料産業からイギリス国内へ供給されるエネルギー量は、表5に示すように $1,634.5 \times 10^9$ kWh であり、原燃料の 69.8 %に過ぎない。残りの 30.2 %はどうなったのであろうか。表4と表5を比べると、構成比が大きく変化し、石炭の割合が大きく減少し、電気の割合が大きくなっている。これは勿論石炭を燃やし電気として供給しているためであり、燃料産業で大規模なエネルギー変換と消費が行われていることを示している。そしてエネルギー変換効率がここでの燃料消費に大きく係わっている。

表3 燃料の個人直接消費
(4人家族、イギリス、1968)

	消費量	エネルギー 含有量, kWh	燃料コスト, kWh
電気	4,020 kWh	4,020	16,820
石炭	2.15 t	17,200	17,918
ガス	3,877 L	4,014	5,582
重油	77.28 L	884	1,002
ガソリン	1,909 L	18,480	20,952
合計		44,598	62,274

表4 原燃料の使用量 (イギリス、1968)

	使用量	エネルギー 含有量, kWh	割合, %
石炭	154.6×10^6 t	$1,177.3 \times 10^9$	50.3
石油	82.9×10^6 t	$1,029.3 \times 10^9$	44.0
ガス	34.16×10^6 m ³	35.4×10^9	1.5
水力	—	3.6×10^9	0.1
核エネルギー	—	96.1×10^9	4.1
合計		$2,341.7 \times 10^9$	100

表5 燃料の供給量 (イギリス、1968)

	供給量	エネルギー 含有量, kWh	割合, %
石炭	42.5×10^6 t	323.9×10^9	19.7
コークス	9.9×10^6 t	78.1×10^9	4.7
石油製品	74.7×10^6 t	918.3×10^9	55.8
ガス	146×10^6 m ³	151.6×10^9	9.2
電力	162.6×10^9 kWh	162.6×10^9	10.6
合計		$1,634.5 \times 10^9$	100

エネルギー消費の原因となるものは変換効率だけではなく、エネルギーの貯蔵や輸送・変換のための諸設備から輸送の際の抵抗による損失まで種々の要因がある。このエネルギー分析では、燃料産業における各燃料別の入力に対する出力の割合は、表6に示したように見積られている。この値は技術の進歩とともに向上するが、上限がある。たとえば熱機関による熱 → 力学的エネルギーへの変換効率はカルノーの定理により与えられる最大値を越えることはできず、また力学的エネルギー → 電気エネルギーの変換効率も決して 100 %にはならない。

この出力／入力比を用いて個人消費の各項について、消費した原燃料の量（これを以下燃料コストとよぶ）を求め、表3の第4列に示した。この結果を用いると、家庭でのエネルギー消費の燃料コストは1人あたり 15,569 kWh, イギリス全体で 856.3×10^9 kWh になる。これは原燃料の全入力の 36.6 %に相当する。残りの 63.4 %が各種の物質・材料や構造物の製造、流通、サービスなど、家庭以外でのエネルギー消費に使われる。

さらに分析を進め、社会活動を大きく8分野に分類し、それぞれの分野でのエネルギー消費を見積る。結果を原燃料の全入力を 100 として表7に示した。ここでエネルギーの消費量についての割合と燃料コストに基づく割合を並記した。エネルギー消費量の場合には、各項の和に前記の燃料産業での変換・輸送損失 30.2 %を加えた合計が 100 になるが、燃料コストの場合には、燃料産業での消費は他の

産業分野での消費に分配されており、また素材および組立・建設分野での製品の1部が燃料産業で使われているため、各項の和からその分（全体の4.2%）を差引いた値が100になる。この表には、燃料コストの大きい分野として家庭と並び素材製造、次いで輸送、販売、流通の分野であることが示されている。

このような分析を各産業分野別ではなく、最終需要（商品）別に行うこともできる。結果を表8に示す。この分析をさらに進めれば、各商品ごとの燃料コストが求められ、結果の一部を表9に示しておく。表には燃料コストとともに工場卸し価格に対する比をあわせて示した。燃料コストと価格の間にはほぼ比例関係がある。なお、このような分析において各商品について燃料コストの内訳が見積りの基礎となっており、一例として食パン1山（燃料コスト4.4 kWh）の内訳を表10に示しておく。

表6 燃料産業でのエネルギー利用効率

年次	1963	1968	1972
石炭	0.955	0.960	0.955
コークス	0.755	0.847	0.880
石油	0.808	0.882	0.896
ガス	0.647	0.719	0.811
電力	0.220	0.239	0.252

表7 産業分野別の燃料使用割合（1968）

分野	使用割合, %	
	エネルギー含有量	燃料コスト
家庭	18.4	29.4
個人輸送	8.2	9.2
一般輸送	4.9	6.2
農業・食品	2.1	4.3
素材	19.8	30.4
組立, 建設	4.3	8.4
販売, 流通	8.1	10.2
公共サービス	4.0	6.1
小計	69.8	104.2
燃料供給	30.2	#4.2
合計	100	100

表8 最終需要別の燃料使用割合

需要	使用割合, %
食料品	17.5
住居	36.0
輸送（旅客）	20.3
衣料	6.7
公共サービス	11.5
民生	8.0

表9 各種商品の燃料コスト

品目（単位）	燃料コスト, kWh	燃料コスト / 価格 kWh/£
石炭 1 トン	8,334	
石油 1 トン	13,718	
電力 1 kWh	4.2	
住宅 3 寝室 2 戸建	100,000	35
自動車 排気 1,000 cc	22,500	69.5
冷蔵庫	2,100	54.4
テレビジョン	6,900	43.9
家具 3 点セット	5,000	50
食パン 1 山	4.4	54
卵 1 ダース	5.76	47
牛肉 3 ポンド	30	100
紅茶 1 ポンド	19	74
じゃが芋 5 ポンド	1.6	50
背広	475	45
靴	62	44
書籍 ペーパーブック	4.5	45
自動車	1,700	85
鉄 1 トン	13,200	212
アルミニウム 1 トン	27,000	74
プラスチック 1 トン	45,000	213
掘削機	340,000	69
船舶 10 万トン	500 $\times 10^6$	25
飛行機 ジェット	20 $\times 10^6$	
火力発電所	2,700 $\times 10^6$	
原子力発電所	10,200 $\times 10^6$	

1 ポンド = 0.454 kg

表 10 食パンの燃料コスト内訳
(1山の燃料コスト 4.4 kWh)

費目		割合, %
農場	肥料	11.6
	動力燃料	7.3
	その他	0.4
製粉	輸送	1.4
	燃料	7.4
	包装	2.2
	その他	2.0
製パン	輸送	5.0
	燃料	23.6
	添加物	9.4
	包装	8.3
販売	輸送	12.2
	光熱など	8.6

5. 熱力学に基づく考察

前項で紹介したエネルギー分析の結果を、熱力学の立場から考察しておこう。既に述べたように、エネルギー消費というときのエネルギーは、我々にとって有用なエネルギーという意味であり、2項で述べたエクセルギーに近い。エクセルギーはエネルギーの一部であり、勿論保存されない。それならば、エクセルギーが消費され、何に変わったのであろうか。多くの場合、それは熱として散逸される。一部は物質変化に伴われ、生成した物質の内部エネルギーに変換されるが、その量はそれ程多くはない。これら散逸された熱および生成した物質は地球上に留まり、地球環境に影響を与える。環境保全の立場からは当然エネルギー消費を極力抑えるべきである。

エネルギー消費を押さえるためには、勿論人間社会の活動を抑制することが考えられるが、必らずしも可能ではない。科学技術的にはこれとは別の方法も考えられる。それはできるだけエネルギー変換効率の高いプロセスを利用し、またエネルギーの利用効率をできるだけ高くする工夫をすることである。熱力学の教えるところによれば、すべてのエネル

ギー変換は準静的（可逆的）に行うとき最も高く、そして熱の仕事への可逆的変換はカルノーの定理によって制限される。熱を仕事へ変換するためには、排熱を受取る低熱源が必要である。低熱源として通常外界（外部環境）がとられ、その温度は 10 ℃ (283 K) 程度であり、一方高熱源はいくら高温でもよさそうであるが、実際には材料や構造からの制約があり、一般には 600 ℃ (873 K) の程度である。したがってカルノーの定理による最大変換効率は、

$$\eta_c = \frac{T_H - T_0}{T_H} = 0.676$$

となる。これは可逆的に行ったときの効率であり、実際のプロセスは不可逆的であり、効率はもっと小さくなる。

熱の仕事への変換効率が低熱源の温度が 0 K でない限り 100 %にならないのは、エネルギーの一形態としての熱の特殊性を示すものであり、熱力学第二法則により解明されたことである⁹⁾。Thomson (Lord Kelvin) は熱力学第二法則をエネルギー散逸法則とよんだが、有用な（高価値）エネルギーは絶えず熱（低価値エネルギー）として散逸される傾向がある。これは熱のミクロな意味での無秩序性のためであり、エントロピーのにない手として働くことになる。

熱 → 仕事以外のエネルギー変換、たとえば電気エネルギー → 機械エネルギーの変換効率は最大 100 %と考えられるが、実際には有限の速度で変換されるとき、不可逆性によるエネルギー散逸が起こる。散逸量（非補性熱） Q は、変化がそれほど早くないとき、

$$Q = \oint T \frac{d_i S}{dt} dt = \oint \sum X_j \# J_j dt \quad (3)$$

で与えられる。ここで $d_i S/dt$ はエントロピー生成速度、 X_j と J_j はそれぞれ変化をひき起こす力および変化速度（流束）である。実際の変化では、体積変化、熱伝導などいろいろな変化が同時に起こるので、それらの和をとる必要がある。散逸量 Q は個々の装置、運転条件などによって大きく変化し、一般的に評価す

ることはできないが、小さくて入力エネルギーの数%, 大きいと 20 %以上にもなる. 実際の値の一例は表 6 に示されているが, 技術の進歩によってこの値は確実に向上する.

前項で燃料の分野別使用内訳を示したが, 具体的にはどのような目的に使われているのであろうか. たとえば家庭では使用した燃料 (大部分が電気) の約 70 %が冷暖房, 風呂など低温加熱に, 約 15 %が調理など高温加熱に, そして残り 15 %が電化製品, 通信など仕事と特殊用途に使われる. このような調査を他の分野についても行い, 供給燃料を使用目的別に分類すると, 表 11 に示す結果が得られる.

表 11 用途別の燃料使用割合

用途	使用割合, %
低温加熱	40~50
高温加熱	15~20
輸送	15
仕事	20~25
特殊用途	5~10

この結果をどのようにみたらよいであろうか. 最も大きな問題は, 石油・石炭など原燃料から低い変換効率 (30 %程度) で変換され供給された電気が供給先の家庭などで 25~50 ℃ 程度の加熱・冷却の目的に熱として大量に使われていることであろう. 灯油やガスによる冷暖房はもっと高い全効率で行えるはずであるが, 電気がもつ使用上の利点にかてない. これを豊かさといえることができるのかもしれないが, 科学的にみればやはり問題が残る.

エネルギー問題はいくつもの要因が複雑からむので, 容易には判断できないことがある. たとえば現在のガソリン自動車と電気自動車を比較してみよう. 100 単位の石油を原燃料として用いたとき, 石油精製により 88 単位のガソリン, あるいは発電所において 30 単位の電力が得られる. ガソリン自動車ではエンジンの効率は 25 %であるのに対し, 電気自動車の効率は 80 %以上である. これとは別に両者とも変速機系の効率 80 %が加わる. 結局,

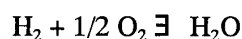
走行に使えるエネルギーは,

$$\text{ガソリン車 } 100 \times 0.88 \times 0.25 \times 0.80 = 17.6 \%$$

$$\text{電力車 } 100 \times 0.30 \times 0.80 \times 0.80 = 19.2 \%$$

となり, とくに大きな差はない. これはガソリン車では, 化学—熱—機械の変換, 電力車では, 化学—熱—電気—機械の変換で, どちらも熱の形を経るからである.

この点を解決するには, 化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換すればよい. これを可能にするのが燃料電池である. たとえば水素燃料電池は次の化学反応を用いる.



この反応に対する熱力学状態量の変化 (25 ℃) は次のように与えられている.

$$\%H = \#285.8 \text{ kJ/mol}$$

$$T\%S = \#48.7 \text{ kJ/mol}, (\%S = \#162.3 \text{ J/Kmol})$$

$$\%G = \#237.1 \text{ kJ/mol}$$

この反応を燃焼のような不可逆過程で行うと, 発熱量 (定圧) は $\%H = 285.8 \text{ kJ/mol}$ で, この熱を仕事に変換すると, 変換効率を 30 %として 85.7 kJ/mol となる. 一方, この反応を用いて燃料電池を組立て, 可逆的に変換すると, 取出せる電気エネルギーは $\%G = 237.1 \text{ kJ/mol}$ で, エネルギー散逸は $T\%S = 48.7 \text{ kJ/mol}$ になる. なお, この燃料電池の熱効率は

$$\eta_{th} = \%G/\%H = 0.829$$

で表され, 残り 17 %が散逸されるということもできる.

このように燃焼による熱利用に比べ燃料電池は格段に優れたプロセスになる可能性があるが, これが直ちに利用されることがないのは, 燃料電池による化学—電気の変換効率は理論的には 100 % (最大値) であるが, 現実には未だ 60 %に達しないこと, そしてまた水素ガスを燃料として使いこなすためにはそれなりの設備が必要であり, それに要するコストはかなり大きいものとなり, これらを含めると水素の燃料コストは現状では決して安くはないからである.

燃料として核エネルギーを利用する場合にも, 同様のより深刻な問題があり, 周辺技術や環境保全に対する燃料コストを含めると,

容易に採算に合うものではない。それでも核燃料が必要と考えられるのは、石炭・石油など化石燃料の枯渇の問題があるからである。確かに核燃料ではその問題はないが、核汚染の防除など安全性の課題があまりにも大きい。核燃料に代り得るものとして太陽光エネルギーの利用が考えられ、熱心な研究が続けられている⁶⁾。

6. おわりに

エネルギー分析の手法は、しばしばエネルギー問題の解析を通してエネルギー政策の立案の目的に利用される。現代の科学技術、およびそれに支えられる形で社会活動の発展は誠に急速であり、発展の予測には多くの課題が残されているが、まず大局を把握するためにはエネルギー分析の手法は非常に有効である。しかし、政策を論じる場合にはある価値判断が必要となる。本来、自然科学は客観的な立場に立ち、主観的判断を極力避けてきたので、この課題とぶつかる場合があり、科学の社会的意義を改めて見直す機会にもなっている。科学といっても、それは人間の思考活動の一つであり、思想と無縁ではあり得ない。ある思想に科学が導かれる場合にはいろいろな問題が起こり得るが、科学の立場から自ら思想が生まれることは、必要であるばかりでなく極めて重要なのではないかと考えている。生活工学の問題としてエネルギーを考えることによって、このような意識が芽生えることを願っている。

引用文献

- 1) 妹尾学, 生活工学研究, 5(1), 78-87 (2003).
- 2) Z. Rant, Forschung, 22, 3637 (1956); "Energie und Exergie. Die Anwendung der Exergiebegriffs in den Energietechnik", VIH Verlag, GMBH (1965).
- 3) 押田勇雄, "エクセルギー講義", 太陽エネルギー研究所 (1986) .
- 4) P. Chapman, "Fuel's Paradise, Energy Options for Britain", Penguin Books (1979); 中西重康

訳, "天国と地獄", みすず書房(1981).

- 5) 妹尾学, 生活工学研究, 5(2), 176-183 (2003).
- 6) "エネルギー変換および新しい燃料の化学", 日本化学会編化学総説 12, 東京大学出版会 (1976).