



Title	エントロピーの教育内容構成と教材化のためのノート：エントロピー論の基本的整理
Author(s)	若菜, 博
Citation	教授学の探究, 4, 73-88
Issue Date	1986-03-28
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/13534">http://hdl.handle.net/2115/13534</a>
Type	bulletin (article)
File Information	4_p73-88.pdf



[Instructions for use](#)

# エントロピーの教育内容構成と教材化のためのノート

—エントロピー論の基本的整理—

若 菜 博  
(北海道教育大学岩見沢分校)

## 0 はじめに

自然科学教育においてこれまで主張されてきた主要な教育内容として、自然科学領域全体にかかわるものとして、あるいは、形成すべき「自然像」を教育内容に含むものとして、たとえば、①「原子論」、②「進化」、③「エネルギー」、④「自然の階層性」等があげられてきた。このうち①、②、③については、民間教育研究運動の研究・実践はまがりなりにも蓄積されてきているが、④についての実践はまだほとんどないと思われる<sup>1)</sup>。

また、最近の自然科学の発展により新たな自然像の提起の可能性が生じていると、私は判断しているが、このことを考慮にいれた教育内容の構成が必要であるとも考える。

たとえば、物理学はこれまで往々にして自然の歴史性の現れない局面を扱うものとされることが多かったが、現在の、とくに非平衡の熱力学を中心にした、宇宙物理学や生物物理学等の発展により、物理学自身もその枠組みのなかに「歴史性」を含むようになってきている。これらの自然科学諸領域の発展により、素粒子・原子(元素)そのものの時間的生成・進化と自然の階層構造の歴史的生成(この両者での“宇宙の進化”)そして生物の進化なども熱力学の対象になってきており、熱力学からの統一的自然像の提起とともに、上の4点を教授する可能性が出てきている。

この際、自然の発展・変化の方向性を規定するのがエントロピーであり、エネルギーは自然の変化の枠を規定するが、その方向については無関与である；「自然現象を巨大な工場にたとえれば、エントロピーの原理は支配人の地位を占める。なぜなら、それは全体の業務の形態、方法を支配するからである。一方、エネルギーの原理は貸方、借方の帳尻を合わせる、簿記係をしているにすぎない<sup>2)</sup>。」

とりあえず、高等学校段階までの物理学教育では、そのめざすべき物理学的自然像からみて、古典物理学の3領域(力学、電磁気学、熱力学)をその基本にすえるべきだと考える。ただし、その教育内容構成は必ずしも「古典」に準拠する必要はなく、現代の物理学の発展の地平からの自然像の新たな構成を含め、また「認識論的教授学」による、「子ども・生徒の理解可能な順次性」を保証・構成するものとして、その書き換えが迫られる。

若菜(1979)は熱力学領域におけるその試みとして、授業書『熱力学』を作成・実践した<sup>3)</sup>。その授業書では、熱力学の対象をマクロ・ミクロの両階層間でのエネルギーの相互移行・転化として把握した上で、次のことを授業書構成の原理とした。第1に、永久機関不能の原理をてこととしてエネルギー概念の形成をさかった。第2に、①マクロからミクロへのエネルギーの移行をエネルギーの“散逸”として、また②ミクロからマクロへのエネルギーの移行をエネルギーの“集中”として把握した上で、①の移行は日常的にしかも自然に起こるが、②の移行につい

ては、その必要条件として温度差の存在がどうしても必要であること。第3に、ほかの諸現象（たとえば、電磁氣的・力学的）におけるエネルギー移行の際には問題にならないこのような制約が熱現象に生じるのは、そこにブラウン運動・ゆらぎが介在しているがゆえであること。

しかし、この授業書においてはエントロピーを除外していた。

最近の「エントロピー」にかかわる多様な論議の中で、かえって「エントロピーとは何か」が混乱させられている向きがある。エントロピーが色々な場面で使用されること自体は、現代の文明の危機に対処する上での、エントロピー的論議の意義が見直されていることとは無関係ではないし、エントロピー概念の持つ有用性の1つの現れとみることもできるであろう。また、後藤邦夫氏が言うように<sup>4)</sup>、エントロピーの「数学的言語性」のゆえに、その当初の領域での定義から離れての議論が可能であることも1つの側面である。

しかし、エントロピーを教育内容として設定しその教材化をはかるとき、その基本的前提作業として、①エントロピーを客観的自然のどの側面の反映として把握すべきであるのか、②各種のエントロピーがどの局面で有効性をもちうるのか、③エントロピー概念はどのように形成されてきたのか、等の基本的整理が必要とされる。その上で、さらに、エントロピーの教材化に向けての課題の設定を考えることにする。

## 1 さまざまなエントロピー

### 1-1 エントロピーの各種の定義について

現在、エントロピーという1つの言葉は、多様な脈絡・意味合いのもとに、またさまざま領域で使用されている。まず、エントロピーの定義にかかわるものとしては、「熱力学的エントロピー」（クラウジウス）、「統計力学的エントロピー」（ボルツマン）、「情報（理論的）エントロピー」（シャノン）の3つがある。またそれらに相補的・相対的な概念として、「ネゲントロピー」（シュレーディンガー）が加わる。経済学の立場からは、エントロピーの中での異質な2つの構成部分として「エネルギー散逸度エントロピー」・「物質混合度エントロピー」が提唱され（ジョージ・ジェスク＝レーゲン）、他方、不可逆過程の熱力学からは、一般の系におけるエントロピー変化の構成部分として「エントロピー流(entropy flow)」・「エントロピー生成(entropy production)」が語られている（プリゴジンヌ等）。

ここでは、エントロピーの本来の定義にかかわる3つのエントロピーの同一性と区別について検討を行い、あわせて、ネゲントロピーのもつ意味の考察をすることにする。

#### (1) 熱力学的・統計力学的・情報エントロピーの同一性と区別

まず、3つのエントロピーの定義を確認しておこう。

##### (1) 熱力学的エントロピー

考える系のある熱平衡状態1を基準状態とし、他の任意の熱平衡状態2におけるその系のエントロピー  $S_{12}$  は、

$$S_{12} = \int_1^2 dQ_{rev}/T \quad (1-1a)$$

で定義される。この積分は、状態1と2とを結ぶ任意の準静的過程について行う。 $dQ_{rev}$  は、その過程の途中で、系が絶対温度  $T$  で外界から可逆的に流入する熱量である。積分定数について、絶対温度  $T=0$  のときのエントロピーが  $S_0=0$  になる（熱力学第3法則）ことを要請し、これを準静過程にそって積分すれば、任意の熱平衡状態におけるエントロピーの値を定めることがで

きる<sup>5)</sup>;

$$S = \int_0^Q dQ_{rev}/T \quad (1-1b)$$

微分形では,

$$dS = dQ_{rev}/T \quad (1-1c)$$

で与えられる。

## ② 統計力学的エントロピー

ある巨視的条件のもとで可能な微視的状態の数を  $W$  とすると、エントロピー  $S$  は、次式で定義される;

$$S = k \ln W \quad (1-2)$$

ここで、 $k$  はボルツマン定数で、 $1.380653 \times 10^{-23}$  J/K。

## ③ 情報エントロピー

数個の可能性のうち  $i$  番目の状態が現れる確率を  $P_i$  として、ビット単位のエントロピー  $H$  は、次式で定義される ( $\sum P_i = 1$ );

$$H = -\sum P_i \cdot \log_2 P_i \quad (1-3)$$

この3者の同一性と区別の問題については、杉本大一郎氏によって<sup>6)</sup>、基本的整理が適切になされていると考える。

まず、前2者の同一性に関して、同氏は結論として次のように述べる; 「統計力学的のエントロピーのほうが熱学のエントロピーよりも広い概念であり、前者は後者を含んでいるということである。……統計力学を使えば、光子のようなボーズ粒子や、電子のようなフェルミ粒子の場合にも、容易にエントロピー概念は拡張されるし、また古典的な熱学では扱えないような、ミクロに見て熱平衡から離れた状態、すでに示した例でいうと、黒体放射からずれた放射場のエントロピーなども計算できるのである<sup>7)</sup>。」

また、統計力学での微視的状態の数  $W$  は、確率  $P_i$  の逆数、 $P_i = 1/W$  であり、統計力学でのエントロピーを  $k \cdot \ln 2$  を単位にして、ビットで表現してやれば、統計力学および情報理論のそれぞれのエントロピーは足し算することができる。結局、統計力学のエントロピーは、情報理論のエントロピー概念に含まれる; 「情報理論のエントロピー概念は統計力学のエントロピー概念を拡張したものであり、統計力学のものは熱学のものも拡張したものだということであった。だから、ある階層のものは、あとから構成されたより基本的・一般的な階層のもの、特別な場合として含まれている<sup>8)</sup>」

ただし、ここで杉本氏の言う「階層」は、むしろ「概念の包含構造」の意味で使用されているように見える。

さらに、同氏による、とくに熱・統計力学的エントロピーと情報エントロピーとの区別性は、大要以下のようなものである。熱力学的エントロピーの値は、特質を構成している粒子の数の程度であり、すなわち、1モル当たりの分子・原子の数をとれば、 $10^{23}$  のオーダーとなる。それに対し、情報理論や物体の配置に関するエントロピーの値は、ビット数で表した情報量やマクロな物体の個数の大きさのオーダーであり、普通は日常的な数、すなわち、1とか100万 ( $10^6 \sim 10^9$ ) の程度である。これらのことを考えれば、「熱力学的な場合と、情報理論の場合とでは、量の大きさの程度がまったく異なり、その結果、質的に主要な側面が異なってくる<sup>9)</sup>」こととなる。熱力学的状態量であるエントロピーには常にゆらぎが存在し、それほど精密にその値が定まっていけないことを考慮すれば、実際のほとんどの場合には、この両者のエントロピーを足

し算しても、後者は前者の誤差に含まれてしまい、同列に取り扱うことはできないことになる。

つまり、原理的に足し算が可能だとしても、実際の状況でそれが意味をもつか否かは、その概念が使用される階層（この場合には、それは構成要素の数、配位の数、桁の大小で規定される）の所属の相異によって判断されねばならない。

熱力学および統計熱力学のエントロピーは、マクロな階層に属する物質の状態・性質を主として取り扱うが、情報理論のエントロピーは、特定の物質とは離れて、確率空間の定義できる任意の領域に適用されうる。したがって、後者は、自然の各階層にまたがって適用され、特定の階層に属しているわけではない。この意味で、情報理論は「横断科学」とされる。

## (2) ネグエントロピーについて

ネグエントロピー（負エントロピー）を一躍有名にしたのは、シュレディンガーの著書『生命とは何か』である。そこでは、「生物体は『負エントロピー』を食べて生きている」とのテーゼを提起するとともに、次のようにネグエントロピーを定義している；

「 $D$  [微視的状態の数——引用者] が無秩序の目安となる量だとすれば、その逆数  $1/D$  は秩序の大小を直接表す量だと考えられます。 $1/D$  の対数はちょうど  $D$  の対数に負の符号をつけたものですから、ボルツマンの関係式は次のように書くことができます。

$$-(\text{エントロピー}) = k \log(1/D)$$

そこで『負エントロピー』というぎこちない言い方をもっといい表現におき換えて『エントロピーは負の符号をつければ、それ自身秩序の大小の目安となる』といい表わせます。このようにして、生物が自分の身体を常に一定のかなり高い水準の秩序状態（かなり低いエントロピーの水準）に維持している仕掛の本質は、実はその環境から秩序というものを絶えず吸い取ることにあります<sup>10)</sup>。」

このネグエントロピー論への批判がなされたとき、シュレディンガーは、後に、この著書の改版時に「註」を付け加え、エントロピーを廃棄する上でのエネルギーの役割にも言及した；

「エネルギーは、われわれの身体を動かす機械的エネルギーを補給するためばかりでなく、われわれが絶えず周囲に放つ熱を補うためにも必要です。しかもわれわれが熱を放出することは偶然ではなく、なくてはならぬ本質的なことなのです。なぜなら、まさにそうすることによって、われわれが物理的な生命の営みを行う限り絶えずつくり出す余分なエントロピーを処分するからです<sup>11)</sup>。」

ただし、この註においても、負エントロピーは依然として「エントロピーに負の符号をつけたもの」とされており、本文を注意深く読まないで誤解を生じさせることになる。

現在でも、ネグエントロピーは、この流儀を踏襲して、エントロピーに負号をつけたものとして説明されているものが多い。たとえば、小出昭一郎氏は言う：「負のエントロピー  $S$  をネグエントロピーと呼ぶことにすれば、情報を得て  $W$  [場合の数——引用者] が減るということはエントロピーが減るということであるから、情報とはネグエントロピーをビット単位で表したものであるということもできよう<sup>12)</sup>。」

しかし、「ネグエントロピー」についても、杉本氏の指摘が正鵠を得ている；「ふつうにネグエントロピーといわれる概念は、 $-S$  でなくて、 $-dS$  (より正確には  $-\Delta S$ )、すなわち取り入れたものと廃棄したものととの差に負号をつけたものとして使われている。この意味でネグエントロピーは相対的な概念である<sup>13)</sup>。」

ネグエントロピーは、この指摘のように、相対的概念であり、系にエントロピーの出入りがあるときの「決算」後の姿を一言で表現しようとするものである。しかし、この事情がともすると忘れ去られ、あたかも「ネグエントロピー」という独り立ちした実体的な量が系に取り込まれるかのごとく表現が多々目につく。このことの背景に、「系に情報が入れれば系のエントロピーは低下する」という思い込みがあると考ええる。

たとえば、私が「明日の雨の確率が50%である」との天気予報を知らされたとしよう。私の頭の中に情報が入ったことは確かである。このことによって「私」のエントロピーは減少するのであろうか？ しかし、この“私の頭の中に入った”情報は、ブルリアンの言う「おこりうる事象が抽象的なものと考えられ、特定の物理的意義をもたない<sup>14)</sup>」情報、すなわち“自由情報”であり、これは、生体系としての熱力学的状態を示す「私」の物理的エントロピーには、関係づけられないものである。ブルリアンによれば、他方、熱力学的なエントロピーと関係があるのは特定の物理的な問題と結びついた情報、すなわち、“束縛情報”のみと考えられ、これは「おこりうる事象がある物理系の配合と解釈されるとき、したがって、束縛情報は自由情報の特別な場合」として位置づけられる<sup>15)</sup>。

自由情報および束縛情報の区別は相対的である<sup>16)</sup>。天気予報を知らされたことにより「私」に定着した情報が、たとえば「私」の脳神経の配列という形で、物理的配合の問題に帰着しうるまでに、もしも研究が進んだとしよう。しかし、なお、このことによって生体系のエントロピーが減ったかどうかは判定できない。前に述べた熱・統計力学的エントロピーと情報エントロピーのオーダー的区別性により、この情報は系全体のエントロピーのゆらぎの範囲に容易に組み込まれてしまうだろう。この場面でも、「熱力学的エントロピーと情報エントロピーとが同じものであるということ、原理的にはおもしろいことであるが、実際問題ではそれらを一緒に論じても役に立たないのである<sup>17)</sup>。」

さらに、実は「私」が天気予報の情報を取り入れ、頭に定着されるという過程でも、「私」の中にエントロピーが発生しているはずであり、「私」のエントロピーが差し引きどう変化したかは、このエントロピー生成をも勘定に入れなければならない<sup>18)</sup>。

生体は常に外界との間でも、系の内部でも非平衡状態にありながら変化しており、系内には非可逆過程が起こり、エントロピーが生成している。こうして増大したエントロピーを生体は廃棄しなければならない。系外からのエントロピーの流入、系内でのエントロピーの生成、系外へのエントロピーの廃棄を合計し、その差し引きの結果として、生体系のエントロピーを維持することができるのである。生体が「ネグエントロピーを食べて生きている」過程とは、こういう過程である。以上のことで、すでに明らかなのだが、重複を恐れずに確認しておけば物理的状态量としてのエントロピーは常に0以上の量であり、この意味では負のエントロピーなる物理的実体をもった物質もエネルギーも元来存在しない。あくまでも、ある系にエントロピーの出入りがあるときに、その“差し引きの結果に負号をつけたエントロピーの逆差”であることを銘記しておかなければならない。

ところで、「ネグエントロピーを取り入れる」という直感的な表現のもとに、やもすると、エントロピーを捨てるということの本質的な条件が忘れられてしまうことがある。エントロピーを捨てる上で本質的なことは、温度の点では「捨てる物質の温度が、反応によって達成される熱の温度よりも低いということ<sup>19)</sup>」である。シュレディンガーの「註」も、このことを強調しているのである。

しかし、ただでさえ色々に解釈されるエントロピー概念に加え、さらにその相対的な概念である、これほど誤解されて流布してしまったネグエントロピーを積極的に使うメリットはあまり感じられない。

## 1-2 エントロピーの定性的表現の検討

さて、エントロピーの定性的説明の仕方においても、最も多く啓蒙書等に見られる、①「無秩序性(乱雑さ)の程度<sup>20)</sup>」に始まり、②「仕事をするときの潜在能力の度合い<sup>21)</sup>」(W. トムソン)、あるいは「エネルギーの質(優劣)を示す量」、③「混ざり度」(田中一<sup>22)</sup>)、または「拡散の程度を示す定量的指標」(槌田敦<sup>23)</sup>)等々の多種多様な表現が散見される。

さまざまな定性的表現によって、エントロピー概念が多様に理解されている現状を見ると、これらのエントロピーの定性的表現の吟味もあわせて必要であると考えられる。エントロピーだけでなく、どのような自然科学的概念でもそれを定性的に表現しようとするとき、当の概念の本質的側面と思われるものを抽出して取り出そうというのであるから、その概念の本質以外とみなされた属性は捨象されることになる。問題は、各々の定性的表現が当の概念の本質を表現したものであるのか、そして、属性を捨象したことによってそこに重大な誤解が生じることはないのか、を検討することである。

### (1) 「無秩序」または「乱雑さ」の度合いとしてのエントロピー

エントロピーを「秩序」と結び付けるのは、情報理論からの援用である。つまり、情報理論では、「秩序」を情報の確定性の度合いとして考えることにより、情報エントロピーを「統計分布に対応する情報の不確定性の度合い(不確定度)」としたのである。ブルリアンは次のように言う；「エントロピーは通常、物理系の無秩序を表す測度として述べられている。これを、より厳密に言い表わすと、エントロピーは、系の実際の構造に関する情報の不足を表わす測度であるということができる<sup>24)</sup>。」

情報理論においては、「秩序」は確率を介した情報量としてきちんと定義されており、その限りでは誤解の余地はない。

熱力学的、統計力学的、情動的エントロピーの区別と同一性の問題については先に述べた。もともと情報エントロピーについて語られた「秩序」によって、熱・統計力学のエントロピーを「(無)秩序の度合い」として説明することは、いくつかの点で誤解を生じさせている。その誤解されやすい事柄を整理すると、以下の点である。

まず第1に、「(無)秩序」あるいはその裏返しの表現としての「乱雑さ」という用語のもつあい昧性である。「(無)秩序」という言葉には、どうしてもその語感として、ある目的・目標に対する価値観が含まれ、そのあい昧さを除去することが困難である。日常用語としてのその語感を素直に受け入れれば、たとえば、一見「乱雑」に放置された書齋はエントロピーが高い状態であるとみなされるであろう。この例は、啓蒙書でもよくとりあげられている。しかし、その書齋における物の配置は、そこの使用者の意図にとって実は高度の「秩序」をもち、規則性がそなわっていることはよくあることであり、どちらの状態が(「情動的」に見ても)「高い秩序」をもつのかの判定は容易ではない。

第2に、この「(無)秩序」という言葉を用いることにより、「エントロピー=悪玉」というニュアンスが響くことは否めないことである。摩擦がなければすべてのマクロな物体の制御が

効かなくなってしまうのと同様に、エントロピーが増大する過程が存在しなければ、ゴム鉄砲で遊ぶことができなくなるというだけではなく、生命の進化・維持自体さえありえなかったであろう。「エントロピー増大=秩序の崩壊<sup>25)</sup>」のシェーマでは、エントロピーの一部の側面を肥大化して把えることになる；「われわれはしばしばエントロピーの法則を無秩序と関係させるが、もしそれがなければ、現実の現象には秩序が存在しないであろう。真理はエントロピーの法則が秩序立った継起の法則であるということである。なぜなら——一つの示唆に富む例として——もしエントロピーの法則がなければ、風呂に入ることもできないだろう。なぜなら、それがなければ水の半分がそれ自身で首を火傷にするほど熱く、他の半分は指先に凍傷を起こさせるほど冷たい、ということになるからである<sup>26)</sup>。」

「秩序」という表現をとるにしても、エントロピー増大が、「秩序の崩壊」の側面とともに、新たな「秩序」の形成のための契機をになっていることを合わせ持っていることを、忘れてはならない。

第3の点は、もともと熱力学・統計力学でのエントロピーには「秩序」で表現すべき内容は含まれてはいないと考えていることである。統計力学においても、もちろん、一般座標とそれに共役な座標を次元とした位相空間が考えられ、そこでのあるエネルギーのもとでの各エネルギー準位における統計分布を計算することが必要となる。しかし、統計力学の多くの場合には、そこに「秩序」を用いる必然性はあまりない。統計力学で「秩序」を用いることが多いケースは、相転移理論の場合であろう。たとえば、相転移の一種である「秩序無秩序転移」[order-disorder transition]——少数だが、「規則不規則転移」と呼ぶ人もおり<sup>27)</sup>、この表現の方が適切だと私は考えているが——と言われるものがある。これは、その物理的内容としては、分子・原子の配列（結晶や合金などの場合）、原子スピンの配列（強磁性体などの場合）が特定の温度でその状態を、「秩序のある」（たとえば結晶構造のような）配列から「乱雑な」配列へと変異させるということであり、その意味で「秩序」という言葉が使われている。その他、相転移理論では「秩序パラメータ」、「短距離秩序」、「長距離秩序」といったタームがよく使用されている。生物物理学においても、「生物学的秩序」・「(自己)秩序形成」などのタームがしばしば現れる。しかし、統計力学や生物物理学で用いられる「秩序」は、結晶等にみられる「構造」や生物系の「形態」といった意味の場合が圧倒的である。以上に見られる「秩序」は、むしろ、その系におけるサブレベルでの多数の構成要素の集団的相互作用に裏打ちされた系の構造のその転移を前提とした、「熱力学的諸量に何らかの異常を伴わずに互いに転換できない<sup>28)</sup>」状態の1つとしての「相」として把握した方が、その物理的・生物的内容からはよいと思われる。この意味での「相」には、固・液・気相はもちろん、熱平衡状態にない物質系に現れるマクロな構造としての“散逸構造”も含まれることになる。

## (2) 「仕事をするときの潜在能力の度合い」としてのエントロピー

「仕事をするときの潜在能力の度合い」については、古典電磁気学の完成者であり、気体分子運動論を押し進めたマクスウェルでさえも当初は仕事に変換しえない部分のエネルギーとして、エネルギーの一部であるかのごとくクラウジウスのエントロピーを把握したように、歴史的には今日のタームでいう「エクセルギー」と類似した意味で使われた経緯があり<sup>29)</sup>、エネルギーと区別すべきエントロピーの意義をあい昧にする恐れがある。たとえば、熱平衡状態の存在と安定性を考える場合に、その系があるマクロな状態に到達する過程では、原子・分子レベルで



のそれぞれの位置エネルギーが極小になろうとするとともに同時にその系のエントロピーが極大になるような、2つのきつ抗する効果が基本的な役割を果たしている<sup>30)</sup>。ゴムが弾性を示したり、機構としては同じことだが、ゴムを暖めると縮み、冷やすと膨脹するという奇妙な物性を示すのも（エントロピー弾性）、後者の効果が際立って現れる1つの例である。

これらの場合だけでなく、マクロな特質系の変化過程は、一般に系の自由エネルギーが極小になろうとする傾向とその系のエントロピーが極大になろうとする傾向とのきつ抗のなかで進行する。平衡状態における系の安定性が自由エネルギー極小で条件づけられるのに対し、非平衡状態における系の構造の相対的安定性は大局的な判定基準として、エントロピー生成率が最大のモードであること（“エントロピー生成最大仮説”）が沢田康次氏により指摘されている<sup>31)</sup>。同氏はこの指摘とあわせて、「一般に、われわれが単に非平衡系と呼ぶ系も平衡的性格と非平衡的性格を合わせもって」おり、「前者〔熱平衡的なゆらぎ〕が決定的に物事を決める場合は、系は平衡熱力学と同様に振舞い、後者〔非平衡的なゆらぎ〕が特徴的に作用する場合に系が非平衡的に振舞うであろう。熱平衡的なゆらぎは、等方的であるのに対して、非平衡的なゆらぎは系をエントロピー生成増大の方向に向かわせるという意味で方向性がある」と、説明している<sup>32)</sup>。

このように系の変化過程においては、エントロピーがエネルギーとは相対的な独自の役割を持つことを強調しておきたい。

また、たとえば断熱壁で囲まれ、間に隔壁をもつ2つの箱からなる系を考えよう。2つの箱には等温等圧の異種の気体があり、両者が反応しあうことはないものとする。周知のように、隔壁を取り去ると拡散が起こり、混合後のエントロピーは混合前のエントロピーの和より大きくなる。つまり、エントロピーは増大する。気体を理想気体とすれば、さらに事態は明白になるが、この過程では、エネルギーは系の変化に関与してはいない。物質の混合の場合に見られるように、エネルギーの出入りだけでエントロピーが変化するわけではなく、言わばエネルギーとは一応独立にエントロピーの役割があることになる。ただし、注意しておくが、系のエントロピーを減らすときには必ずエネルギーあるいは物質とともにエントロピーを捨てなければならず、エントロピーだけを単体で外界に捨てることはできない。

以上のことを考えれば、「エネルギーの質あるいは優劣を示す量としてのエントロピー」という表現にも、同様の意味で賛成しがたい。もちろん、エントロピーの単位がエネルギー／絶対温度[J/K]であることを指摘するまでもなく、エントロピーとエネルギーが密接な関係にあることは事実であるが、この表現も「仕事をするときの潜在能力」という表現も、いずれもエントロピーの「エネルギー還元主義」とでも言うべきもので、エントロピーとエネルギーの関連性と区別性を切り離してしまうものである。

この点で、宮原将平氏の次の指摘は示唆的である：

「物質と運動は切りはなせません。だから、物質運動に適切に対応する量が見出されれば、それは保存されるでしょう。／エネルギーはそのような量であろうと思われれます。／しかし、運動に関するすべての量が保存量ではありません。たとえば速度が保存量でないことはあなたも御存じのとおりです。／エントロピーというのは、いわば存在様式の多様性に対応するような量です。運動じたいの量的表現と考えるべきではないのです<sup>33)</sup>。」  
(傍点は引用者)

### (3) 「混ざり度」および「拡散の程度を示す定量的指標」としてのエントロピー

この2つの表現は、上の宮原氏の指摘を踏まえると、「存在様式の多様性」を表現する点では、上述の「無秩序」・「仕事への潜在能力の度合い」よりは優れた定性的表現と考える。

「拡散の程度を示す定量的指標」について、穂田敦氏は「熱力学第2法則つまりエントロピー増大則には熱拡散と物拡散の2種類がある」とした上で、「熱に対しても、物に対しても『拡散の程度を示す定量的指標』として熱力学エントロピーを解釈することができる」とする<sup>34)</sup>。

他方、田中一氏は、「混ざり度」について次のように言う；

「熱に関する問題を理解するのに、エネルギーという概念だけでは十分でないことを述べておこう。……熱とエネルギーの転換システムの振舞いをよく理解しようとするれば、どれだけのエネルギー量があったかということを示すエネルギー概念だけでなく、与えられた熱エネルギーのうちどれだけが他のエネルギーに変わりうるかという指標を与える量を改めて導入しなければならない。この量がエントロピーであり、その物理的内容に基づいて無理に意識すれば、それは『混ざり度』といってもよい<sup>35)</sup>」

そして、その事例として①砂糖水などの“物質の混合”のケース、②温水と冷水などの“状態の混合”、③ガスの拡散などの“物体と空間の混合”をあげている<sup>36)</sup>。

両氏の表現は一見、「混合」・「拡散」の用語の違いだけで、類似しているように見える。しかし、これまでいくつかの箇所で強調したように、エントロピーがとくに非平衡系で新たな構造を形成する契機であることを見ると、「拡散」の語はいかにも“散らばっていく”というニュアンスが強く、この契機を表現するには不十分に思える。「混ざり度」は、この契機をも含みうるという点で魅力的であり、これまでのさまざまな定性的表現の申では、エントロピーの物理的性格を最も的確に表していると考ええる。

そして、この2つの表現は、方向として正反対のものを内包している。この論稿ではこれ以上触れる余裕はないが、「混合」・「拡散」の相異は単に表現上の問題というだけでなく、人類の今後の生産形態の在り方への両氏の推論・結論<sup>37)</sup>と深く結び付いていると考えるからである。

## 2 エントロピーの教材化のために

### 2-1 クラウジウスにおける2つのエントロピー項をめぐる課題

クラウジウスが当初エントロピー概念を導入したとき、それを2つの項に区別していたことは、一部の文献で指摘されている<sup>38)</sup>。たとえば、カードウェルは次のように述べる；

「ある意味では、クラウジウスがエントロピーを二成分に分割したことを、今日まったくといってよいほど忘れざっていることは残念なことである。というのはそういう二分割の仕方は、確かにこのエントロピーという——摺みどころのない！——概念の由来と性質をはるかに容易に理解させてくれるからである。それはアナロジーでは説明しつくすことができない。そしてエントロピーを多くの教科書がするように、物体が熱エネルギーを吸収するさい増える性質あるいは函数として定義することは、正しくはあるが素直な読者にとって不十分かつ任意的すぎる。最良のアプローチは歴史的に迫る方法だと思われる<sup>39)</sup>。」

#### (1) クラウジウスの水蒸気理論について

エントロピーの熱力学的表現を確立したクラウジウスは、また分子運動論の研究を精力的に進めていた。そして、従来、彼の分子運動論が理想気体に即して理論を展開してきたと評価さ

れる場合が多かったのに対し、高山進氏は、その評価を批判しクラウジウスにおける水蒸気理論が大きな役割を果たしていたことを指摘した<sup>40)</sup>。水蒸気理論の研究の進行におけるクラウジウスの思考の発展として指摘されている点で、興味深いのは次の事項である<sup>41)</sup>；

- ・クラウジウスは「それまでの理論が必ず用いていた『潜熱』という概念がもはや熱として存在しないものであり、それは変化の途中で仕事をする際に消費されるとした」
- ・「彼はなされる仕事を『内的仕事』と『外的仕事』の二種類に分けた。『内的仕事』とは、水が蒸発する時に粒子の相互引力にうちかつたためになされる仕事であり、『外的仕事』とは、蒸発の際に蒸気が外圧にうちかつたためになす仕事であるとした」
- ・「この考えにもとづいて《気体法則が成り立つ永久気体》は『内的仕事』が働かない気体と規定され、理想気体概念の抽象化を誰よりも先におし進めることになった。」

この「内的仕事」および「外的仕事」を軸に、水蒸気に関するクラウジウスの描像が彼のエントロピー形成にいかなる役割を果たしたのかが大きな課題となる。

## (2) クラウジウスにおけるエントロピーの導入について

クラウジウスは、このような実在の水蒸気気体の描像をもちながら、エントロピーを次のように導入した(1865)<sup>42)</sup>；

$$\Delta S = S - S_0 = \int dH/T + \int dZ \quad (2-1)$$

ここで、 $T$  は絶対温度、 $S_0$  は積分定数でエントロピーの基準値、① $dH$  は“内部熱の転化値”で、系の中で増減する熱(系の内部エネルギーのうち分子の運動エネルギーに関してのみ増減する部分)、② $Z$  は“Disgregation”(“疎散(化)度”<sup>43)</sup>あるいは“配列関数”<sup>44)</sup>と訳されている)と命名された量で、分子の散らばり具合を表す状態量である。この Disgregation について、クラウジウス自身は次のように説明する；

「[疎散化]度(magnitude)  $Z$  は、物体の構成粒子の配列(arrangement)によって完全に決定されるという限定された物理的意味が要請される<sup>45)</sup>。」

(2-1)式の第2項  $dZ$  は、文字どおり系の分子の Disgregation(疎散化、粗大化、散らばり)にかかわる項だが、クラウジウスはどうしてこのような量を考えたのであろうか。高田誠二氏は次のように分析している；

「Disgregation がものを言う典型的な例は、理想気体の断熱自由膨張に見られます。その際、熱の出入はないし、温度が変わるわけでもないから、熱現象のうえではなんの変化もないと言いたくなりますけれども、エネルギーに関してはやはり変化が生じているのです。もしもそうでないとしたら、その後この気体に外から仕事を作用させ(圧縮)てやるときの熱の発生(内部エネルギーの増加)はどこから来るのか? どう考えてもはじめの断熱自由膨張の際に、何かの変化があったと解さなければならぬでしょう。

その正体は Disgregation だと、クラウジウスは見るのです。熱現象の上で一見なんの変化もないとは言え、気体の体積は増した。まさしく粗大化、疎散化したのです。量としての Disgregation は、それに伴って‘増大’したと、解することにすればいろいろ見通しがよくなります。

ここで例としている断熱自由膨張は、非可逆過程ですから、その際にエントロピーは増大するわけですが熱の出入  $dQ$  といったものが無いので、 $\int dQ/T$  も考えにくい。し

かし、この例でのエントロピー増大はもっぱら Disgregation 増大なのだと考えれば非常にすっきりします<sup>46)</sup>。」

このように、クラウジウスはエントロピーを“熱”に関する部分と“物質”に関する部分との2つに分けて考えていたが、この点はエントロピーを実体的にイメージする上で大きな役割をもつと考える。

この2つの項は、それぞれジョージエスクエレーゲンの“エネルギー散逸度エントロピー” $S_E$ と“物質混合度エントロピー” $S_M$ に類似した項であると、安孫子誠也氏は指摘している<sup>47)</sup>。つまり、クラウジウスによるエントロピー概念は、物質中に生じる具体的な状態変化と結び付ける視点により、「非平衡系における不可逆変化を具体化する目的で導入されたのであり、 $S_E$ と $S_H$ を区別する考えは、もともとの Clausius の着想の中にあっただけである。

ただし、この2つに分けられた成分「内部熱の転化値」および“配列関数”は、状態変化に伴って互に入れ替わる量<sup>48)</sup>であることを注意しておかなければならない。

### (3) “非補償の転化値”と“エントロピー生成”について

ところで、クラウジウスは1865年の論文で今日の非平衡熱力学の概念である“エントロピー生成”と共通の考え方をすでに提起していた。これが“非補償の転化値”あるいは“相殺されない転化値”(uncompensated transformation)とされる量である。安孫子氏の指摘では、この“非補償の転化値”は、エントロピー生成を意味している<sup>49)</sup>。

以上のことから判断すると、クラウジウスにおいてはエントロピーの変化は“エントロピー生成”と“エントロピー流”によって起こり、しかも、それらの状態変化が物質の内部の配列と運動によってイメージ化されていたことが推測できる。

## 2-2 エントロピー教材化に向けての課題

物理量としてのエントロピーには、やや現象論的ではあるが、およそ以下の特徴がある；

- ① 物質のそのときの状態によって一義的に決まる状態量であること。
- ② しかし、エネルギーなどと異なり、一般には非保存量であること。非可逆過程で、エントロピーは生成されること( $d_i S \geq 0$ )。エントロピー生成は系が平衡状態に達するまで続き、この状態のときに、系のエントロピーは最大値になること。
- ③ 系からエントロピーを減少させる条件は、外界との間に非平衡状態があること。

クラウジウスのエントロピーの導入の契機を考慮に入れながら、上のエントロピーの諸特徴を組み入れた教材化に向け、まだ羅列的ではあるが以下の点を課題にすべきであると考え；

- ① 第2法則  $d_i S \geq 0$  のメカニズムをどう捉えるか。
- ② 相転移現象を軸にしたエントロピーの導入が考えられるべきである。
- ③ 舞台としての地球におけるエントロピー収支。とくに定常的な非平衡の閉じた系として地球が存続しえるのは光合成と水の対流によること。
- ④ 自然の階層性を見地を組み合わせること。

### (1) エントロピーはどのようなときに増大するか

まず、エントロピーが増大するのは、そもそも、どういう局面で生じるのかを捉えておくこ

とが必要である。その点で、杉木大一郎氏の次の叙述を前提としておさえておこう；

「それでは、どういふときにエントロピーが増大するのであろうか。ここで最も大切なところであるが、一般には必ずしもよく理解されていないように見える。その答えは、『エントロピーは非可逆過程が起こると増大する』ということである。これを非可逆過程によるエントロピー生成という。こうして断熱系では、系の内部で起こる非可逆過程が生成させた分だけエントロピーが増大し、熱の出入りのある系では、 $dQ/T$  プラス非可逆過程が生成させた分だけエントロピーが増大することになる。これらをまとめて表すと、 $dS \geq dQ/T$  である。なお系が準静的でなく、周囲との熱平衡をくずして変化すると、当然ながら非可逆過程が起こり、それに応じてエントロピーが増大する。

よくものの本に『系がもらった熱量を  $Q$  とすると、エントロピーは  $Q/T$  だけ増大する』と書いてある。しかし、実際には非可逆過程も起こるだろうし、熱を加えている間に温度も変化するから、そのような表現を使ってエントロピーの値を計算するのは正しくないことが多い<sup>50)</sup>。(傍点は引用者)

つまり、断熱系においては、エントロピー流  $d_e S$  は 0 であるから、系内のエントロピー生成  $d_i S (\geq 0)$  だけがエントロピーの増大に寄与する ( $dS = d_i S$ )。熱の出入りのある系では、「熱の出入りに伴うエントロピー流  $d_e S = dQ/T$  (これは正にも負にも 0 にもなりえる)」プラス「非可逆過程でのエントロピー生成  $d_i S (\geq 0)$ 」の 2 つの部分のエントロピーの変化があり、まとめて書けば、 $dS = d_e S + d_i S \geq dQ/T$  となる。

熱力学第 2 法則は、結局エントロピー生成  $d_i S \geq 0$  と表現される。大きな問題は、このエントロピー生成をどう実体的に把握するかである。エントロピー生成について、クラウジウスの原初的な導入を含め、その定式化がいくつか試められているが、どれが最も適切かが重要な課題となる。クラウジウスに近い考え方と思われるやり方では、たとえば、非可逆過程を含む一般的なカルノー・サイクルを用いて、エントロピー生成を評価する方法が、森田一彦氏より提起されている<sup>51)</sup>。

## (2) 相 転 移

クラウジウスの水蒸気理論が彼の熱力学理論にいかなる契機を与えたのか。このことに着目するとき、理想気体のみを作業物質にするのではなく、「内的仕事」が問題となる物質を想定した、エントロピーの導入を考えることが課題となるべきではないか。

また、今日高校までの教科書での固体(相)・液体(相)・気体(相)に関する説明の多くは、「固体=原子がきちんと並んだ状態」、「気体=原子が自由に運動している状態」、「液体=両者の中間の状態」といった、いわば原子の配列の状態をもって「秩序」の違いを語り、「相」を語るものであり、スタティックである。相転移を視野に入れたエントロピー概念のもとに、相の在り方をもっと動的に捉えることができるのではないか。

## (3) エントロピー収支

地球が定常的な非平衡の閉じた系として維持されるのは、あるいは局所的な場合としてある生態系が定常的な生態系として維持されている条件は、よく教科書で説明される「物質とエネルギーの循環」だけでは不十分であり、エントロピー収支の観点が重要である。

エントロピー収支を考える上で、まず次の点をおさえておくことが大切であろう；

「定性的なことを理解するうえで最も大切なことは、先に述べた『非可逆過程と熱の流入によって、エントロピーは増大する』こと、『同じ熱量が流入しても、温度の高い熱源から流入するときには、温度の低い熱源から流入するときよりも、エントロピーの増加は少ない』という二つのことであるから、それだけを覚えておけばよい。なおこのことの裏返しとして、『系から熱が流失すると、系のエントロピーはそれに応じて減少する』ことになる<sup>52)</sup>。」

また、とくに地球のエントロピー収支を考える場合には、安孫子氏の言う“ふく射エントロピー”<sup>53)</sup>の評価が1つの課題となるだろう。

#### (4) 自然の階層性

情報エントロピーと熱力学エントロピーとの区別の項で論じたように、エントロピーはどういう局面で使用されているのか、慎重に吟味する必要がある。その指標になるのが、自然の階層性の見地である。逆に言えば、各種のエントロピーの適用限界を正確に理解することができれば、自然が階層構造をもっていることの意味を把握させる上で大きな意味をもつであろう。

〈注〉

- 1) その数少ない実践例として、高校生を対象とした、田中一氏の「自然の累層性」,「真理論」を教育内容にすえた実践がある。田中一：科学教育と世界観の教育(矢川徳光ほか編：講座現代教育学の理論2 民主教育の課題, 青木書店(1982)所収)
- 2) ファースト著・市村浩訳：エントロピー(増補改訂版), p. 5, 好学社(1976)
- 3) 授業書「熱力学」そのものは次の文献に所収されている；合同教研研究推進委員会編：『北海道の教育80年版』, pp. 287-326(授業書の§5~§7)および同書付録「授業書『熱力学』(§1~§4および§8)」(1980)。なお、『北海道の教育80年版』にはその実験授業の授業者である一戸弘利氏による実践記録「授業書方式による熱力学の授業実践について」があわせて掲載されている。

この授業書の理論的解説を含む最も詳しい論文としては、まだ完了していないが、次のものがある。拙稿：学校教育における熱力学指導の諸問題(1)(北海道教育大学紀要第一部C第33巻第1号, 1982), (2)(同33巻2号, 1983), (3)(同34巻2号, 1984), (4)(同35巻1号, 1984), (5)(同35巻2号, 1985), (6)(同36巻1号, 1985)。

- 4) 「数学的概念は個別の意味から離れることによって自立し、それによって質的に異なる対象に対して普遍的に使用されうる一つの『言語』となる。確率論が適用されるさまざまな対象に対して、質的な同一性や類似性を考える必要はないのと同様、確率概念の言わばコラリーの一つとして、それぞれの確率空間上で定義されるエントロピー概念が質的に異なる複数の対象の中で用いられる『言語』であったとしても不思議ではない。」(後藤邦夫：統計力学的認識の有効性と限界, p. 231(小野周ほか編：エントロピー, 朝倉書店, (1985)所収)後藤氏は続けて、「筆者のとおりあえずの提案は、エントロピー概念をその個別的適用対象から切り離して自立させることである。そのうえで、対象となる多様な現象の間に単なるアナロジー以上の意味連関を見出す真正面からの努力が必要であろう。」と、提起しているが、この主張には疑問がある。エントロピー理解のためには、むしろ「個別的適用対象」におけるそれぞれのエントロピーの適用合理性とその限界をまず峻別しておくことが、エントロピー概念の有用性を示す上でも、また概念の混乱をなくすためにも重要であると考えられる。
- 5) 熱力学的エントロピー  $S = \int dQ_{rev}/T$  の測定は、この式からわかるように、熱量の測定によってなされる。この意味で、熱力学的エントロピーを“熱量計的”エントロピーと呼ぶこともある。
- 6) 杉本大一郎氏の次の2つの著作；①エントロピーと地球について, 科学, Vol. 55, No. 9(1985) [以下,

- 「杉本：科学」で示す]。②エントロピー入門——地球・情報・社会への適用，中公新書（1985）[以下，「杉本：入門」で示す]
- 7) 杉本：科学，p. 547
  - 8) Ibid., p. 548
  - 9) 杉本：入門，p. 92
  - 10) シュレディンガー著・岡小天・鎮目恭夫訳：生命とは何か——物理的にみた生細胞，p. 129，岩波新書(1975 改版)
  - 11) Ibid., p. 131
  - 12) 小出昭一郎：エントロピー，p. 104，共立出版(1979)。他にも，ブルリアンも負エントロピーを $-S$ として定義している；レオン＝ブルリアン著・佐藤洋訳：科学と情報理論，みすず書房（1969）
  - 13) 杉本：科学，p. 542
  - 14) ブルリアン：前掲書，p. 156 および pp. 159-160
  - 15) Ibid., p. 156
  - 16) 「場合によっては，自由情報と束縛情報を区別することが困難なことがある。人間の観察者が含まれるような場合には特にそのようなことが生じる。もちろんここでは人間的価値の要素はすべて無視してはならない。……われわれが情報に関する満足な理論を進展させることができたのは，思考の過程というものを排除してきたからにはかならない。もちろん，将来において，そのようや問題の解析ならびに議論を包含するように理論を発展させることができるようになることを希望する。」(ブルリアン：前掲書，p. 160)
  - 17) 杉本：入門，p. 94
  - 18) もちろん，情報源者と情報受容者とを合わせた全系においては，エントロピーは増大する。これを明らかにしたのが，“マクスウェルの悪魔”の問題であった。“マクスウェルの悪魔”は，孤立系においては，エントロピーを減らすための情報を考慮に入れたとしても，エントロピー増大則を破ることは不可能であること示したのである。
  - 19) 杉本：入門，p. 146
  - 20) エントロピー＝「無秩序」または「乱雑さの尺度」としているものは極めて多いが，たとえば，次の文献がある；①小出昭一郎：エントロピー，共立出版(1979)，②F. Reif 著・久保亮五監訳：パークレー物理学コース5 統計物理学(上)第2版，p. 164，丸善(1975)，③妹尾学：エネルギーと乱雑さ——化学反応をひき起こすもの，講談社(1982)
  - 21) 山本悟・田辺晃生：エネルギー・エントロピー・温度——素粒子から宇宙まで，pp. 130-131，昭和堂(1981)
  - 22) 田中一：未来への仮説——人類再生への提言，pp. 146-152，培風館(1985)
  - 23) 槌田教：さまざまなエントロピーとその相互関係，p. 237(小野周ほか編：エントロピー，朝倉書店(1985) 所収)
  - 24) ブルリアン：前掲書，p. 165
  - 25) 都築卓司：マクスウェルの悪魔——確率から物理学へ，講談社ブルーバックス(1970)
  - 26) ジョージェスク＝レーゲン著・小出厚之助ほか訳：経済学の神話——エネルギー，資源，環境に関する真実，p. 273，東洋経済新報社(1981)
  - 27) たとえば，鐸木康孝：理工系物理学，p. 190，開成出版(1979)
  - 28) 相沢洋二：生命と過程，p. 126(清水博ほか編：ヒューマンサイエンス1 ミクロコスモスへの挑戦，中山書店(1984) 所収)
  - 29) 高田誠二：熱エネルギーのおはなし，pp. 174-177，日本規格協会(1985)
  - 30) 熱平衡状態におけるこの効果を1つのタームで表すものが自由エネルギーである。とくに，閉じた系(外部との物質の交換はないが，エネルギーの交換は許される系)の等温可逆過程でのヘルムホルツの自由エネルギー(定積自由エネルギー)  $F = U - TS$  ( $U$  は系の内部エネルギー， $S$  はエントロピー， $T$  は絶対温度)の増加 $\Delta F$  は，外部から系になされた仕事に等しい。したがって，この過程に対して，内部エネルギー  $U$  の

変化を中心に考えると、 $U=F+TS$ のうち第1項の $F$ は仕事に変わりえる部分ということができ、他方、第2項の $TS$ は仕事に変わりえない部分ということができる。ただし、非可逆過程のときは、仕事に変わりえる部分は $F$ より少なくなる。この事情から、クラウジウスはこの残りの部分 $TS$ を束縛エネルギー(bound energy)と呼んだ。また、閉じた系における等温等積での熱平衡であることの条件は $F$ の極小で与えられる。

同様に、閉じた系の等温等圧可逆過程では、ギブスの自由エネルギー(定圧自由エネルギー) $G=F+pV$ ( $p$ は圧力、 $V$ は体積)の増加 $\Delta G$ が、外部から系になされた仕事に等しく、閉じた系における等温等圧での熱平衡であることの条件は $G$ の極小で与えられる。

- 31) 沢井康次：自然界における形態形成とその熱力学（小野周ほか編：エントロピー，所収）
- 32) Ibid., p. 176
- 33) 宮原将平：科学との対話——宮原将平遺稿集，p. 31，自石書店（1983）
- 34) 槌田敦：前掲書，pp. 236-237
- 35) 田中一：未来への仮説，pp. 146-147
- 36) Ibid., pp. 147-149
- 37) これについては、両氏の次の文献を参照されたい。①田中一：未来への仮説，②槌田敦：資源物理学入門，NHKブックス（1982）
- 38) たとえば、D. S. L. カードウェル以外にも、目についたものでは次のものがある；① Edward E. Daub：“Atomism and Thermodynamics”，*Isis*, Vol. 58(1967)，②安孫子誠也：非平衡系におけるエントロピー概念，*科学*, Vol. 55, No. 4（1985），③高田誠二：熱エネルギーのおはなし，日本規格協会（1985）
- 39) D. S. L. カードウェル著，金子務訳：技術・科学・歴史——転回期における技術の諸原理，p. 223，河出書房新社（1982）
- 40) 高山進・道家達将：Clausiusの熱力学形成過程における水蒸気論の位置付け——原理主導的歴史評価に対する反論，*東京工業大学人文論叢*，2号（1976）
- 41) Ibid., pp. 56-57
- 42) クラウジウスの第9論文(1865)。R. Clausius, “On Several Convenient Forms of the Fundamental Equations of the Mechanical Theory of Heat”, *The Mechanical Theory of Heat (with its applications to the steam-engine and to the physical properties of bodies)*, pp. 327-365, ed. by T. Archer Hirst (London: J. Van Voorst, 1867)
- 43) 高田誠二氏の訳語，注38)の文献，p. 169
- 44) 安孫子誠也氏の訳語，注38)の論文，p. 231
- 45) クラウジウスの第6論文(1862)。R. Clausius, “on the Application of the Theorem of the Equivalence of Transformatinto Interior Work”, *The Mechanical Theory of Heat*, p. 235
- 46) 高田誠二：前掲書，pp. 169-170
- 47) 安孫子誠也：前掲論文，p. 230，p. 231
- 48) Ibid., p. 232
- 49) ibid., p. 232
- 50) 杉本：入門，p. 25
- 51) 森田一彦：不可逆過程とエントロピー発生Ⅰ。カルノー・サイクルの一般化，未発表論文（1985）
- 52) 杉本：入門，pp. 27-28
- 53) 安孫子誠也：前掲書

## 謝 辞

本稿の作成にあたって高村泰雄（北海道大学教育学部），寺岡英男（福井大学教育学部），倉賀野志郎（北海道教育大学釧路分校），島田一平（日本大学理工学部）の各氏に有益な助言をい



ただいた。また、このノートの粗案について、神戸大学教育学部の杉山明男、土井捷三両氏を始めとする、教育方法学研究グループでの検討をいただいた。この場を借りて謝意を表したい。