

熱力学的エントロピーの視覚表現と言語表現による 感性量との相関性

Correlation between the linguistic expression and the visual expression of the thermodynamical entropy

佐藤 智明[†], 菅沼 睦[‡]
Tomoaki Sato, Mutsumi Suganuma

[†] 神奈川工科大学, [‡] 早稲田大学
Kanagawa Institute of Technology, Waseda University
satotomo@me.kanagawa-it.ac.jp

Abstract

The concept of entropy which was introduced by Clausius in 1850 as a thermodynamic property has been extended to the economics theory, information theory, and others. Even though “entropy” is used in many fields of science, it is not easy to understand the concept of entropy, as well as describing it by words/terms. In this paper, we investigated an appropriate way of representing the concept of entropy by words. At first, we surveyed the commonly used words in describing the concept of entropy. We pointed out the problem that the language expression does not accurately represent the entire concept of entropy. Secondly we examined the correlation between the thermodynamic entropy calculated from the particle animations simulating the molecular motion and the psychological quantity obtained by showing those animations to participants. As a result, we found that the representation of the word “degree of diffusion” is correlated with the entropy value.

Keywords — Physics Education, Entropy, Language Expression

1. はじめに

クラウジウスやボルツマンらによって熱力学第二法則として確立され、熱サイクルの不可逆性を説明する手段や、熱機関の熱量計算等に用いられてきたエントロピーの概念は、現在では情報科学や経済学等の多くの分野で広く使われるようになった[1][2][3][4]。特に近年では地球温暖化や人口問題など、万物は全て混沌へと向かっていることを抽象的に表現する場合にもエントロピーが使われるようになってきている。しかし、エントロピーの概念は適応範囲が広いため解釈の仕方も様々で、その概念の本質を的確に理解することは難しい。こうしたエントロピー概念の難しさのため、熱力

学の教育においても、学生にエントロピーの概念を理解させることは容易なことではなく、工夫が必要である。エントロピーの概念を説明する際、それをどのように表現するかということは非常に重要である。エントロピー概念の表現方法は様々考えられる。数式表現、言語表現、視覚表現あるいは音響表現などが主な手法として考えられる。

本報では、抽象的なエントロピー概念を説明する際に重要である言語表現に着目し、エントロピー概念、特に熱力学におけるエントロピー概念の理解をより容易とする言語表現についての検討を行った。最初に、これまで一般的に用いられてきたエントロピー概念を表す言語表現について調査し、特に熱力学的エントロピー概念を表現する場合の言語表現の問題点について考察した。

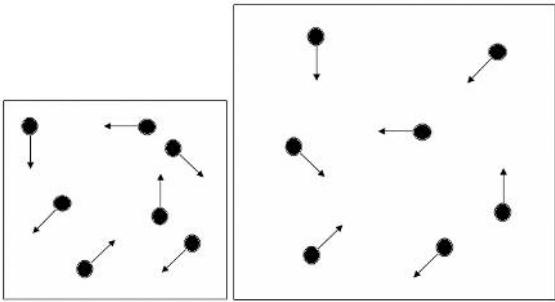
更に、実際の分子運動を表現した粒子のアニメーションを作成し、運動範囲（容積）や粒子速度（温度）の異なる8種類の映像を被験者に見せ、それぞれ粒子の運動から計算によって得られるエントロピー値と代表的な数種類の言語表現によって与えられる映像に対する感性量との相関性について検討した。

2. エントロピー概念の言語表現および数式表現

熱力学や情報理論の教科書[3][5][6]やエントロピーについて解説する教養書や啓蒙書等[4][7]では様々な言語表現によってエントロピーの概念が説明されている。言語による表現は簡単に表記できるため用いやすく、数式を論理的に説明する文

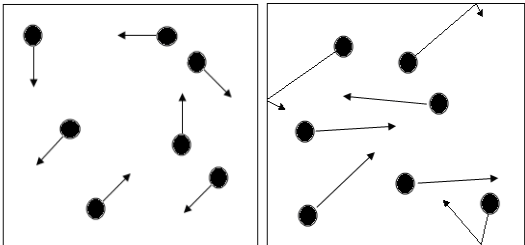
表 1 エントロピー概念の言語表現

表現分野	容量性変化に伴うエントロピー変化(容量依存)	強度性変化に伴うエントロピー変化(強度依存)
マクロな熱力学的状態を表現している	安定の度合い、均一さ、平衡度、均衡度、広がり具合	激しさ
ミクロな統計力学的状態を表現している	拡散の度合い、分散の度合い、捕まえにくさ	無秩序さ、乱雑さ、捕まえにくさ
情報量の大きさについて表現している	ぼやけた感じの強さ、認識できる度合い、コントラストのなさ、曖昧さ、わからなさ	雑多さ、複雑さ、多様性の高さ、でたらめ度
価値について表現している	価値の低さ、貴重でない度合い	



A (小：容積小) B (大：容積大)

図 1 容量依存エントロピー（物エントロピー）



A (小：温度低い) C (大：温度高い)

図 2 強度依存エントロピー（熱エントロピー）

章の中に「乱雑さ」等の感覚的な言語表現を組み合わせることで理解が深まることが期待される。しかし、言語表現は感覚的に読者の主観に訴えるため、その言語表現を適材適所に使わないと正確な概念を伝えることは難しいと考えられる。例えば、経済学や社会学などの分野においてエントロピー概念を表現するときに用いられる「価値の低い度合い」という言語表現を、分子の運動エネルギーやその運動範囲の大きさによって変化する熱

力学的エントロピーの概念を表現するときに用いることは、適切ではないと考える。

これらのことを考察するために、一般的にどのような言語表現がエントロピー概念の説明に用いられているのかを書物やインターネットのホームページ上で調査し、著者らの主観によってカテゴリー化して表 1 に示した。カテゴリーとして、「マクロな熱力学的状態」「ミクロな統計力学的状態」「情報量の大きさ」「価値」についての 4 つの分野と、それぞれの分野に対して「容量依存エントロピー変化（物エントロピー）」と「強度依存エントロピー変化（熱エントロピー）」に分けた。ここで、「容量依存エントロピー変化」とは容積変化によって起こる分子の存在確率の増減によってもたらされるエントロピー変化のことで、熱力学的には容積 V の変化に伴う変化のことである。また、「強度依存エントロピー変化」は、分子の運動速度の変化によって起こる分子の存在確率の増減によってもたらされるエントロピー変化のことで、熱力学的には温度 T の変化に伴う変化のことである。これら 2 種類のエントロピーの性質を数式で表現すると、異なる 2 つの状態、すなわち状態 1 と状態 2 における容積と温度をそれぞれ V_1, T_1 および V_2, T_2 とすると、これらの間のエントロピー： S の差はクラウジウスの式から導き出される以下の式で表せる。

・容量依存エントロピー変化（温度は等しく容積 V のみ変化）

$$S_2 - S_1 = A \cdot \ln(V_2 / V_1)$$

(1)

・強度依存エントロピー変化（容積は等しく温度 T のみ変化）

$$S_2 - S_1 = B \cdot \ln(T_2 / T_1)$$

(2)

ただし、ここで、 A および B はそれぞれ比例定数。

3. エントロピーの言語表現の現状と問題点

エントロピーの言語表現について、著者らの

主観的検討を加えた仮説[8]を以下に示す。

表1の言語表現は基本的には全ての表現がエントロピーの高い方向性を表現したものである。エントロピーを一元的に見れば、いずれの表現も他のカテゴリーにおいて比較可能ならずである。しかし、表現によっては他のカテゴリーでは不的確な表現になる可能性があると考え。特に容量依存エントロピーと強度依存エントロピーの比較の場合互換性は少ないのではないかと考える。このことの考察のために、図1と図2にそれぞれ容量依存エントロピーと強度依存エントロピーの概念を視覚化したものを示し、言語表現とエントロピーの関係について主観的検討を行った。(ここで矢印は速度ベクトルを示す)。

例えば、被験者に図1に示した容量依存エントロピーの大小について、「無秩序さ」「複雑さ」や「乱雑さ」の高い方を選ばせた場合、必ずしもエントロピーの大きい右図Bを選ぶとは限らないと考える。本来の意味では、容積が増えるということは、それだけ分子が存在し得る範囲が増加し、選択可能な微視的状态数が増えることになりエントロピーは増加する。しかし、この2つの図を比較するときに、粒子が狭い領域に固まっている左図のほうが強度的に強く感じられ、熱的強度を示す「複雑さ」「乱雑さ」あるいは「無秩序さ」が高いと感じ左図を選ぶ確率が高くなると予想する。

また、図2で示した強度依存エントロピーについて「安定の度合い」「曖昧さの度合い」あるいは「拡散の度合い」の大きい方を読者に選ばせた場合、本来の意味とは逆の、エントロピーの小さい左図Aの方を選ぶ確率が高いと予想される。なぜならば、「安定なもの」や「曖昧なもの」という表現は、強度的には弱さを含んでいるように感じられるからである。従って温度が高く、分子の運動が激しく強度的に強いイメージのあるエントロピーの高い右図Cは選びにくいのではないかと考える。

このように、強度依存エントロピーの変化に対

して容量依存エントロピー変化を表現するのに適した言語表現を用いたり、容量依存エントロピーの変化に対して強度依存エントロピー変化を表現するのに適した言語表現を用いたりすると混乱を招くおそれがある。従って、エントロピーの概念を言語表現と視覚表現を用いて説明しようとするとき、比較させようとする対象が容量依存エントロピーであるか強度依存エントロピーであることを明確にした上で、それぞれ、容量依存エントロピーには容量依存エントロピー表現に適した言語表現で、また、強度依存エントロピーには強度依存エントロピー表現に適した言語表現で説明する必要があると考える。

4. 容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別することなしにエントロピーを表現する的確な言語表現についての検討

これまでの議論では、あえて容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを分けて考え、この2つを独立のものとして別々の表現手法によって表現することを考えてきた。しかし、エントロピーの値は本来一元的なものである。通常の熱機関においてはこの2種類の変化が同時に起こる過程もあり、その過程における状態を一つのエントロピー値で表すことができる。したがって、エントロピーの概念を本質的に表現しようとした場合、このような容量依存エントロピーと強度依存エントロピーが同時に変化するような変化に対しても、矛盾無く表現できる手法が必要である。そこで、容量依存エントロピーや強度依存エントロピーを区別することなく感覚的に表現できる言語表現について検討を行う。

2章で示した言語表現について、「乱雑さ」や「無秩序さ」という表現はエントロピーの概念を代表する言葉として教科書や啓蒙書などに最も多く用いられる表現である。しかし、これらの言葉は3章で議論したように感覚的に強度依存エントロピーに適した言語表現であると考えられるので、容量依存エントロピーを正確に表現するのには適し

ていないと考える。また、「均衡度」、「平衡度」あるいは「拡散の度合い」といった表現もエントロピーの容量依存エントロピーの側面を表現できるが、強度依存エントロピーの増減を的確に表現できているとはかぎらないと考える。そこで、容量依存エントロピーおよび強度依存エントロピーの両方を1つの言葉で表現できる的確な言語表現として「捕まえにくさ」という表現をその候補として考える。著者らの調べた範囲では、「捕まえにくさ」をエントロピー概念の言語表現に用いていた文献は1つ存在したが[5]、この表現はこれまで一般的に広く用いられてきた表現であるとはいえない。しかし、この表現であると、容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別することなく表現することが可能であると考えられる。即ち、容量依存エントロピーについて考えた場合、図1のように容積が広がって粒子が広い範囲に散ってしまえば直感的に任意の一つの粒子を捕まえることは難しくなると考えることができる。したがって、容量依存エントロピーの高さは「捕まえにくさ」と正の相関があるといえる。また、強度依存エントロピーについて考えた場合、図2のように粒子の移動速度が上昇すると（温度が上昇）、早く動いている粒子ほど捕まえにくいと直感的に考えることができる。したがって、強度依存エントロピーについても「捕まえにくさ」との間に正の相関が期待できる。更に、「捕まえにくさ」というのを「捕らえどころのなさ」と読み替えると、デジタル画像等の情報エントロピー[3]の表現に用いられる「ぼやけた感じ」「コントラストのなさ」や「曖昧さ」といったニュアンスも内包することができると考える。以上のことから、エントロピーの概念を学ばせる際に、容量依存エントロピーおよび強度依存エントロピーを区別することなしにエントロピーの大小を表現できる「捕まえにくさ」を用いることは学習者にエントロピーの本質を理解させる上で有効な言語表現となり得ると考える。

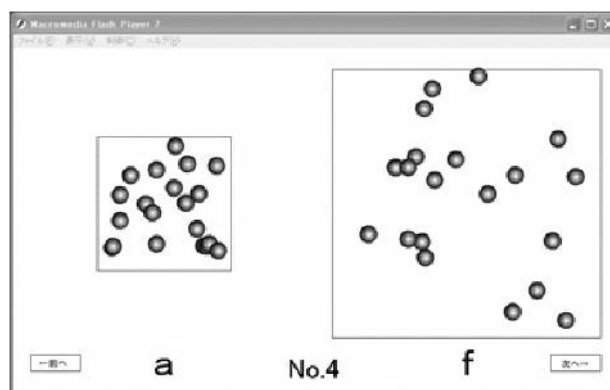


図3 一対比較実験用CGアニメーションコンテンツの例

5. エントロピー値と言語による表現によって与えられる感性量との相関関係を調べる実験

5.1. 実験の概要

上述した仮説を検証するために、熱力学的エントロピー値とエントロピー概念の言語表現による感性量との相関性を調べる実験を行った。実験に際し、実際の分子運動を単純モデル化したそれぞれ粒子のスピード（内部エネルギー：温度）と面積（容積）が段階的に異なる8種類のCGアニメーションを作成した。実験はこれらのアニメーションを被験者に見せて、上述で議論してきた特定の言語表現の内いくつかについて、それらの言語表現によってそれぞれのアニメーションがどのように序列化されるかを一対比較法で検討した。

本アニメーションの例を図3に示す。本アニメーションでは、各粒子はランダムな位置に発生し、発生個数は常に同数である。発生した粒子の方向と速度は、水平方向と垂直方向のベクトル成分について、それぞれ右方向か左方向、上方向か下方向のどちらに進むか同じ確率でランダムに決まり、速度は統一で、等速直線運動を続ける。粒子が壁にぶつくと完全弾性衝突をして、各ベクトル成分について反対方向に同じ速度で跳ね返る。

実際の分子運動では止まっている分子から高速で飛び回る分子までマクスウェルの速度分布に従って様々な速度を持つ分子が混在している。しかし、本アニメーションでは全ての粒子を同じ速度

表 2 各アニメーションパターンの変数値

	アニメーションパターン							
	a	b	c	d	e	f	g	h
粒子速度 w	1	1	1	2	2	2	1.5	1.5
温度 T	273	273	273	1093	1093	1093	615	615
容積 V	1	2.25	4	1	2.25	4	1	4
エントロピー S	1.00	1.81	2.39	2.39	3.20	3.77	1.81	3.20

で動作させた。実際の分子ではこうした分子のスピードのバリエーションもエントロピーの概念を表す一つの要素でもあるため、今回のアニメーションが本質的に完全にエントロピー値変化を表現しているとは言えない。しかし、アニメーション作成の困難さのため今回は粒子速度のバリエーションについては変化を与えられなかった。これについては、今後の検討課題とする。

被験者には予め作成された粒子運動パターンの内 2 種類ずつを左右に配置して同時に見せた。このとき、与えられた言語表現（後述）について、どちらの映像がより感覚的に強く感じるかを選ばせる一対比較実験を行った。比較に用いる粒子運動パターンは後述の a～h までの 8 種類を用意した。

5.2.被験者に見せる粒子の運動パターン

各 8 種類（a～h）のアニメーションのパターンについては表 2 に示した。ここではそれぞれ、粒子速度 w から算出される温度 T および粒子が動き回る範囲の容積 V の値と、これらを用いて簡易的に算出したエントロピー値 S を示した。エントロピーの計算値は後に感性量 f との比較に用いた。それぞれの値の算出については次のように求めた。

まず、粒子速度 w より粒子一個の運動エネルギーを $1/2 \times m \cdot w^2$ （粒子の質量 m は全て等しく、1 とした）より算出した。パターン a の粒子速度 w は 1 としてこれを基準とした。各パターンの温度はそれぞれの運動エネルギーに線形関係にあるとして、まずパターン a を基準温度 270 として、各パターンの温度をそれぞれの運動エネルギー値に比例させて算出した。容積 V については、アニメーションで粒子が動き回る範囲の面積値から算出した。ここでは、奥行きは全て等しいものとして、本面積は容積と線形関係にあると仮定した。パターン a を基準容積 1 として各パターンの容積はその面積に比例させて算出した。しかし、実際

には空間には奥行きがあり、奥行きのある映像を実際に見せた場合の感性量は異なることも考えられる。これについては、今後、コンテンツを 3D 立体視化して、粒子を 3 次元空間で動作しているように見せる工夫をするなどして、分子の運動をより厳密に再現して実験することも考えているが、本報では 2 次元平面による比較までとした。

エントロピーの算出値は次のようにして求めた。まず、パターン a のエントロピー値を 1 と置き、これを基準エントロピーとした。次に各パターンのエントロピー値は、a のエントロピー値 1 に対する比較の形で、a の隣のパターンのエントロピー値を決定し、更に、そのパターンに対する比較を行う形で順次隣のエントロピー値の決定をした。比較元と比較先の各パターンが持つエントロピー値の差を、温度が等しければ容積比を使って 2 章の式(1)より求め、容積が等しければ温度比を使って式(2)の関係から求めて各パターンのエントロピー値を算出した。このとき、式(1)および式 (2) の比例定数 A および B はともに 1 とした。

被験者に対して、用意した 8 種類のパターン 2 種類の組み合わせ全てについて比較を行わせると被験者に対する負担が大きいため、被験者を A および B の 2 つのグループに分け、それぞれ A は (a,b,c,d,e,f)、B は (a,c,d,f,g,h) の 6 種類ずつに分けて一対比較させた。

被験者のグループ A および B に見せるパターンのバリエーションは、a,c,d および f の 4 つのパターンについては、両グループに共通とした。これら 4 つのパターンは、温度については 273 と 1093、容積については 1 と 4 のそれぞれ 2 段階のバリエーションを基本とした総組み合わせの 4 種類であった。A グループについては、温度は基本の 2 段階（273 と 1093）であるが、容積のみ 1 段階追加して 3 段階として、容積 1 と 4 の間に 2.25 の値を持つ b および e の 2 パターンを追加した。また、B グループについては、容積は基本の 2 段階（1 と 4）であるが、温度のみ 1 段階加えて 3 段階として、基本温度 273 と 1093 の間に 615 の温度を持つ g および h の 2 つのパターンを追加した。こ

表 3 A グループの実験結果 (各列に対する行の勝率)

アニメーションパターン: a b c d e f						
人数						
70						
乱雑さ						
	a	b	c	d	e	f
a						
b	0.53					
c	0.50	0.54				
d	0.87	0.67	0.70		0.51	0.57
e	0.86	0.91	0.76	0.49		0.47
f	0.83	0.87	0.84	0.43	0.53	
ぼやけ						
	a	b	c	d	e	f
a		0.31	0.26	0.49	0.36	0.39
b	0.69		0.34	0.64	0.54	0.47
c	0.74	0.66		0.57	0.64	0.49
d	0.51	0.36	0.43		0.33	0.37
e	0.64	0.46	0.36	0.67		0.30
f	0.61	0.53	0.51	0.63	0.70	
激しさ						
	a	b	c	d	e	f
a		0.76	0.94	0.01	0.03	0.04
b	0.24		0.79	0.01	0.01	0.07
c	0.06	0.21		0.03	0.01	0.01
d	0.99	0.99	0.97		0.84	0.90
e	0.97	0.99	0.99	0.16		0.73
f	0.96	0.93	0.99	0.10	0.27	
拡散						
	a	b	c	d	e	f
a		0.01	0.03	0.23	0.04	0.01
b	0.99		0.01	0.91	0.34	0.06
c	0.97	0.99		0.97	0.93	0.39
d	0.77	0.09	0.03		0.01	0.01
e	0.96	0.66	0.07	0.99		0.03
f	0.99	0.94	0.61	0.99	0.97	
捕まえにくさ						
	a	b	c	d	e	f
a		0.49	0.46	0.11	0.13	0.30
b	0.51		0.50	0.20	0.11	0.17
c	0.54	0.50		0.30	0.24	0.07
d	0.89	0.80	0.70		0.56	0.51
e	0.87	0.89	0.76	0.44		0.49
f	0.70	0.83	0.93	0.49	0.51	

表 4 B グループの実験結果 (各列に対する行の勝率)

アニメーションパターン: a c d f g h						
人数						
72						
乱雑さ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.49	0.08	0.10	0.17	0.31
c	0.51		0.35	0.08	0.39	0.18
d	0.92	0.65		0.53	0.85	0.65
f	0.90	0.92	0.47		0.79	0.86
g	0.83	0.61	0.15	0.21		0.54
h	0.69	0.82	0.35	0.14	0.46	
ぼやけ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.33	0.46	0.32	0.53	0.24
c	0.67		0.75	0.60	0.75	0.51
d	0.54	0.25		0.24	0.44	0.25
f	0.68	0.40	0.76		0.75	0.32
g	0.47	0.25	0.56	0.25		0.22
h	0.76	0.49	0.75	0.68	0.78	
激しさ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.86	0.01	0.04	0.01	0.29
c	0.14		0.01	0.01	0.03	0.07
d	0.99	0.99		0.93	0.96	0.99
f	0.96	0.99	0.07		0.68	0.97
g	0.99	0.97	0.04	0.32		0.89
h	0.71	0.93	0.01	0.03	0.11	
拡散						
	a	c	d	f	g	i
a		0.06	0.29	0.01	0.49	0.06
c	0.94		0.92	0.19	0.92	0.36
d	0.71	0.08		0.01	0.60	0.01
f	0.99	0.81	0.99		0.99	0.68
g	0.51	0.08	0.40	0.01		0.03
h	0.94	0.64	0.99	0.32	0.97	
捕まえにくさ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.39	0.11	0.15	0.06	0.21
c	0.61		0.21	0.13	0.29	0.13
d	0.89	0.79		0.49	0.93	0.68
f	0.85	0.88	0.51		0.76	0.89
g	0.94	0.71	0.07	0.24		0.50
h	0.79	0.88	0.32	0.11	0.50	

れによって、A グループおよび B グループ共にそれぞれ 6 種類の粒子パターンによる一対比較実験とした。

5.3. 比較する言語表現の種類

比較する言葉の種類については、2 章で議論した中の代表的な言葉について、「乱雑さ」、「ぼやけた感じ」、「激しさ」、「拡散の度合い」および「捕まえにくさ」の 5 種類を選んだ。被験者には、これらの各言葉による表現に関して、提示された 2 つのアニメーションパターンのどちらがより強く感じるかを選ばせた。

5.4. 被験者

被験者は神奈川工科大学工学部機械工学科 2 年生に対して行い、A グループ 70 名、B グループ 72 名の合計 142 名であった。被験者の学年は、実験の時点では、エントロピーについてはまだ授業

等で学習していないため、その多くはエントロピーに関する正確な知識は持っていないと想定した。

6. 実験結果と検討

6.1. 実験結果

本実験はサーストンの一対比較法を採用し、比較した 2 種類のパターンの勝敗の勝率から、正規分布の Z 値を求め、各アニメーションパターンについて一次元で表せる距離尺度値に変換した。この値を感性量（心理量）f として、エントロピー値 S と比較検討した。A グループおよび B グループごとに実験した結果について、各パターンの勝率を表 3 および表 4 に示した。各数値はそれぞれ各列（横）のパターンに対する各行（縦）のパターンの勝率を示した。ここで、B グループの「激しさ」の a と g の比較、および A グループと B グループ共に「拡散」の a と f の比較において、全

表 5 A グループの感性量 f（距離尺度値）被験者 70 名

		変化する変数				
		乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ
パターン	a	-0.64	-0.37	-0.71	-1.75	-0.60
	b	-0.60	0.10	-1.15	-0.12	-0.59
	c	-0.42	0.31	-1.73	1.43	-0.52
	d	0.46	-0.26	1.71	-1.38	0.55
	e	0.60	-0.04	1.18	0.19	0.57
	f	0.60	0.25	0.70	1.63	0.59

表 6 B グループの感性量 f（距離尺度値）被験者 72 名

		変化する変数				
		乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ
パターン	a	-0.84	-0.33	-1.12	-1.19	-0.99
	b	-0.59	0.41	-1.78	0.63	-0.68
	c	0.65	-0.42	1.96	-1.00	0.79
	d	0.90	0.23	0.97	1.59	0.83
	e	-0.10	-0.41	0.63	-1.14	-0.01
	f	-0.03	0.52	-0.66	1.12	0.05
	g					
	h					

表 7 A・B 混合の感性量 f（距離尺度値）
A, B 混合した被験者 142 名

		変化する変数				
		乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ
パターン	a	-0.79	-0.31	-0.88	-1.52	-0.72
	b	-0.74	0.14	-1.29	-0.28	-0.71
	c	-0.54	0.35	-1.84	0.92	-0.59
	d	0.61	-0.29	1.87	-1.05	0.83
	e	0.73	-0.05	1.33	0.36	0.66
	f	0.72	0.26	0.85	1.65	0.68
	g	-0.09	-0.29	0.68	-1.39	0.02
	h	-0.07	0.41	-0.75	1.29	0.03

表 8 温度および容積変化別の言語表現の的確性比較

比較するパターンおよびその大小	変化する変数				
	温度(強度)		容積(容量)		両方
	a < d	c < f	a < c	d < f	a < f
乱雑さの度合い	○	○	○	○	○
ぼやけた感じの度合い	○	x	○	○	○
激しさの度合い	○	○	x	x	○
拡散の度合い	○	○	○	○	○
捕まえにくさの度合い	○	○	○	○	○

表 9 相関係数による比較

	乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ	エントロピーS
エントロピー	0.76	0.60	0.37	0.85	0.74	1.00
温度	0.99	-0.14	0.92	0.23	0.99	0.70
容積	0.09	0.97	-0.39	0.97	0.05	0.70

ての被験者が同じパターンの方を選んだ。この結果、これらの比較では、勝率が 1 および 0 となり、正規分布の Z 値が無限大あるいは無限小となるため距離尺度値が求められなくなる。そこでこれらについては、便宜上、最少人数として 1 名が勝率 0 となった方を選んだことにして、再度勝率を算出した。

つぎに、各勝率から求めた正規分布の Z 値の平均を求め、その値を感性量(距離尺度)f として A、B のグループごとに表 5 および表 6 に示した。A グループおよび B グループに共通の a,c,d,および

f の 4 パターンについて、それぞれ別々に求めた A グループと B グループの感性量を比較してみると、最大で 30% 程度の違いが認められた。これは、A グループに加えられた g および h、B グループに加えられた b および e のそれぞれ 2 つのパターンによって他のパターンの感性量が影響を受けた可能性が考えられる。この影響を少なくするために、A グループと B グループのデータを統合して検討を行った。統合の仕方としては、まず、A と B グループに共通の a,c,d および f については A と B グループ混合の被験者全員 (142 名) のデータを使って感性量を求める (表 7 の網掛け部分)。次に、容積が a と c の間に位置する b については、A グループ (表 5) の a,c および b の結果を使って、A と B グループ混合 (表 7) の a と c の間に比例配分によって内挿させて b の感性量 f を補間する。e についても同様に、A グループ (表 5) の d,f および e の結果を使って A と B グループ混合 (表 7) の e の値を補間した。さらに、g および h についても同様に、B グループ (表 6) でこれらを挟み込むデータ a と d, および c と f を用いて、A と B グループ混合 (表 7) に対応させた g および h の感性量を補間した。

6.2. 検討事項 1

3 章で論じたように、エントロピーは容量依存の性質と強度依存の性質の両方を併せ持っている。従って、真にエントロピーの性質を表現できる言語表現であれば、この両方の変化に相関性を示すと考えられる。そこで、容量の変化である容積変化と強度の変化である温度変化について、表 7 の数値から、それぞれの言語表現による各パターンの感性量 f が温度変化あるいは容積変化に相関しているかどうかの検討を行った。

まず、表 8 は、エントロピーの大小と感性量の大小の関係が一致しているかどうかについて、a,c,d および f の 4 つの基本パターンについて比較した結果を示した。温度が変化したことによるエントロピーの大小については、それぞれエントロピー値が a<d と c<f となる関係について、また、容積が変化したことによるエントロピーの大小に

については、それぞれエントロピー値が $a < c$ と $d < f$ となる関係について検討した。表 8 中、大小関係がエントロピー値と同じであれば「○」、異なれば「×」で示した。この結果、「ぼやけた感じの度合い」については、温度は c より f の方が高いにも関わらず、感性量はその逆になっている。また、「激しきの度合い」については、容積がそれぞれ c の方が a より大きく、また d の方が f より大きいにも関わらず感性量はその逆となっていることが分かった。このことから、「ぼやけた感じの度合い」と「激しきの度合い」についてはエントロピーの変化を完全に表現できない可能性が示された。その他の「乱雑さの度合い」、「拡散の度合い」および「捕まえにくさの度合い」については、全て温度の強弱も容積の大小も矛盾無く表現できているという結果になり、これらについてはエントロピーの大小を比較する言語表現としての可能性を示した。

6.3. 検討事項 2

次に、検討事項 1 をより定量的に検討するために、表 7 における各言語表現による各パターンの感性量 f (各列の並び;縦方向) とエントロピー値 S の間の相関係数を求め、表 9 に示した。また、同表には温度および容積に対する相関係数も示した。この結果、エントロピー値と感性量の相関係数が最も高いのは、「拡散の度合い」の **0.85** であった。次に「乱雑さの度合い」と「捕まえにくさの度合い」が **0.76**, **0.74** と高い相関係数の値となった。この 3 種類の言語表現に関してはエントロピーとの相関係数を見る限りにおいてはエントロピー値を非常に良く表していると言える。しかし、それぞれ温度変化と容積変化に対する相関係数を比較すると、「乱雑さの度合い」および「捕まえにくさの度合い」共に、温度変化に対しては **0.99** というほぼ完全相関に近い相関性を示しているが、容積変化に対してはほとんど相関性が見られない。この結果から、「乱雑さの度合い」については 3 章での仮説のように、強度依存のエントロピー変化に対しては正確だが容量依存のエントロピー変化に対しては表現できていないと見ることができ

る。したがって、科学啓蒙書や教養書等においてエントロピーの指標である記されることが多い「乱雑さ」は、エントロピーの本質を正確に表現していない可能性が高くなったと言える。

次に、「捕まえにくさの度合い」については、4 章で論じた仮説では、強度依存および容量依存のエントロピーの両方に依存性を示すと予想したが、予想に反して強度依存のエントロピーに対してのみ相関性を示す結果となった。これについては、次のように考えた。即ち、「乱雑さ」や「拡散」といった言語表現は対象の状態を直接表現しているのに対し、「捕まえにくさ」は自身の行為の容易さ（あるいは困難さ）を示す言葉であると考えられる。そのため、判断に際して観察者自身が粒子を実際に捕まえることを想像するという過程が必要だったと考えられる。この過程において、容量依存のエントロピーにおける容積が広がったことによる捕まえにくさを想像しづらく、そのため「捕まえにくさ」と容量依存のエントロピーに強い相関が見られなかった可能性が考えられる。したがって、もし被験者が実際に動き回る粒子を追いかけることを体験できれば、より実感として感覚的にとらえることができ、容積が広がった事による捕まえにくさを感じて、容量依存エントロピーに対しても相関を示すようになる可能性があると考えた。そこで、このことを検証するために画像上で動き回る粒子を実際にマウスで追いかけて得点を競わすゲーム形式のアプリケーションを開発中である。今後、このアプリケーションを用いて実験を行い再検討する予定である。

次に、「ぼやけた感じの度合い」については容積変化に対しては **0.97** という非常に高い相関性を示しているが、温度変化に対しては相関が見られない。このことから、3 章で論じたように、「ぼやけた感じ」については、容量依存エントロピーを表現する言語表現であると言える。更に、「激しき」に関しては、温度変化に対して **0.92** という高い相関性が見られるのに対して、容積変化に対しては **-0.39** というマイナス相関を示している。このことから、「激しき」は強度依存エント

ロピーを表現する言語表現であると考えることができる。

最後に、「拡散の度合い」については、やはり3章での仮説のように、容積に対して非常に高い相関性を示すが、温度に対しては高い相関性は示していない。しかし、「乱雑さの度合い」および「捕まえにくさの度合い」に比較して、容量依存性と強度依存性の両方のエントロピー変化に対して共に正の相関性係数を持っている。エントロピー値に対する相関係数も最も高いので、本実験結果からは、「拡散の度合い」は比較的に見れば最もエントロピーの本質を表現していると考えられる。

7. おわりに

本報では、一般的に用いられてきたエントロピー概念を表す言葉による表現について検討し、特に熱力学的エントロピー概念を表現する場合の言葉による表現の問題点について考察した。また、実際の分子運動を表現した粒子のアニメーションを作成し、その映像を被験者に見せ、それぞれ粒子の運動から計算によって得られるエントロピー値と代表的な言葉による表現によって尺度づけされた映像の感性量との相関性について検討した。その結果、「拡散の度合い」という言葉による表現がエントロピー値と相関性が高いことが分かった。

本報では、アニメーション作成の困難さのため分子運動を単純化して、平面的な分子運動アニメーション（シミュレーション）を用いて検討を行った。より現実に即した分子運動アニメーション

（e.g. マクスウェルの速度分布を反映したアニメーションや三次元的な分子運動を反映したアニメーションなど）においても、本研究と同様の結果が得られるかについては、検証の必要性が残されている。また、ゲーム形式アプリケーションによる「捕まえにくさの度合い」についての再検証と共に、「拡散の度合い」よりも適した言葉が存在する可能性も十分に考えられ、引き続き検討を進めていく必要がある。

参考文献

- [1] ファースト：エントロピー，好学社，1969.
- [2] Andreas Greven, Gerhard Keller, Gerald Warnecke : Entropy, Princeton University Press, 2003.
- [3] 鎌田清一郎：画像処理，サイエンス社，2003.
- [4] P・W・アトキンス：エントロピーと秩序，日経サイエンス社，1992.
- [5] 石原敦，飽本一裕：ゼロからスタート・熱力学，日新出版，2004.
- [6] バークレー物理コース編：統計物理，丸善（株），1970.
- [7] 竹内薫：熱とはなんだろう，講談社，2002.
- [8] 佐藤智明，永岡慶三，小口幸成：エントロピー概念の言葉による表現，日本認知科学会第23回大会，2006.