

原著論文

2値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性

佐藤 智明*, 菅沼 睦**

* 神奈川工科大学, ** 早稲田大学

Correlation between the Entropy for a Given Binary Format Image and the Psychological Quantity from Verbal Expression

Tomoaki SATO* and Mutsumi SUGANUMA**

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kanagawa Institute of Technology,
1030 Shimo-ogino, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

** Graduate School of Global Information And Telecommunication Studies, Waseda University,
1011, Nishi-Tomida, Honjo, Saitama 367-0035, Japan

Abstract : The concept of entropy which was introduced 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. We assume that one of the causes of such difficulty is the gap between psychological quantity caused by words/terms used in explaining the concept of entropy and actual entropy value. In this report, we investigated the correlation between the entropy and the psychological quantity obtained by showing binary dot pattern images to participants, and examined the correlation between the entropies calculated by several different algorithms and the psychological quantity by three verbal expressions. We have found that the entropy calculated by means of measuring the length between each black pixel has highest correlation to psychological quantity.

Keywords : Entropy, Language Expression, Information Theory, Visual Expression, Thermodynamic

1. は じ め に

あいまいさや無秩序さ、あるいは価値の度合いとして知られるエントロピーは、熱力学における熱量計算、情報科学における情報量の算出、あるいは自然の摂理の不可逆性の説明等様々に用いられてきた。しかし、エントロピーの概念は適応範囲が広い解釈の仕方も様々で、その概念の本質を的確に理解し表現することは難しい[1-3]。元来、熱力学第2法則の不可逆性の議論から生まれたエントロピーは、温度、圧力および体積と同じように物質の状態を表す量として定義されている。温度、圧力および体積は人間の五感によって感知することができるため理解しやすいと考える。一方で、エントロピーは同じ状態を表す量であっても、人間が五感から感じ取ることができる量であるかどうかについては未知の部分が多く、このことが、エントロピーの理解を難しくしている要因だと考える。そこで著者らは、エントロピーは感性によって感じ取ることができるのかどうかということに関心を持ち、これに関連して、エントロピーの表現方法、特に言葉による表現について検討してきた。

本研究では、既報[4]において、特に熱力学的現象におけるエントロピー変化をより感覚的に表現できる言語表現についての検討を行った。そこでは、実際の分子運動を再現した粒子のアニメーションを作成し、運動範囲（体積）や分子速度（温度）の異なる8種類の映像を被験者に見せる1対比

較実験を行い、それぞれ体積や粒子の速度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。その結果、「拡散の度合い」、「乱雑さ」あるいは「捕まえにくさ」という言葉による感性量がエントロピー値と相関係数が高かった。一方で、従属変数としてのエントロピー値を、それぞれ温度と体積を独立変数として個別に変化させて比較したところ、これらの言葉による表現が、エントロピー値との相関係数は高くても、それぞれ、「乱雑さ」と「捕まえにくさ」は温度変化によるエントロピー変化（強度依存エントロピー）、「拡散の度合い」は体積変化によるエントロピー変化（容量依存エントロピー）に偏って相関していることから、これらの表現がエントロピー変化を完全には表現していない可能性を示した。また、「捕まえにくさ」については、その判断は感性によるものではなくて、論理的な思考が働く可能性が示唆された。

既報[4,5]においては、熱力学的な立場で、分子運動論に基づいた動的な現象に対するエントロピー変化を対象に、より適した言葉による表現に関する検討を行った。エントロピーの概念は、熱力学に限らず情報科学の分野においても用いられる。これら情報理論に基づく情報エントロピーは、熱力学的現象のエントロピーとは数式的な形が等しいだけで、本質的には異なった概念であるとする考え方がある[1,6]。一方で、情報理論におけるエントロピーが自然現象である分子運動の現象も内包する形で本質的には

全く同じものであるとする考え方もあり [7, 8], これら2つの対立する考えは長年議論されてきた. マクスウェルの悪魔のパラドックス [9] に関係するこの議論は, 情報とエネルギーは等価であるか, あるいは置き換え可能かどうかが焦点となっていた [10]. しかし近年, 量子情報科学の発達によって, 情報からエネルギーへ, あるいはエネルギーから情報へ変換する技術が可能であることが明らかになってきた [11, 12]. これに伴って, 熱力学的現象のエントロピーも情報エントロピーも本質的に全く同じであるとする考え方が主流となった. 本研究も, 基本的にこの考え方に基いて研究を進めている.

熱力学的現象のエントロピーが分子の運動, 即ち, 動的状態に基づいているとすれば, シンボル・記号のバリエーションに基づく情報エントロピーは, 静的な状態を表現するエントロピー値であると考えることができる. 本研究では, 熱力学的現象のエントロピーであるか, 情報エントロピーであるかに関わらず, エントロピーの本質に対する人間の感性量を明らかにするためには, 静的現象でのエントロピー変化を含めたエントロピー値と感性量との比較検討も必要であると考えた. そこで本報では, 静的な現象として2値画像による表現に着目し, 2値画像エントロピー値と言葉による感性量との相関性について検討を行う. また, 2値画像のエントロピー値については, 情報理論に基づいた計算方法は知られているが [2, 13], 人間が2値画像のエントロピー変化に対して感じる感性量と相関性のあるエントロピー値の算出方法については, 著者らが調べた範囲では見当たらない. そこで, エントロピー算出法の違いと言語表現との適合性についても検討し, 2値画像に対するヒトの感性に近いエントロピー値算出方法についても検証する.

2. 白黒2値画像のエントロピー値算出方法

エントロピーに関する啓蒙書や解説書 [1-4] では, 水に垂らしたインクが時間とともに拡散していく様子をイメージさせて, その不可逆性について論じたり, ペイントされた文字や模様が風雨による風化などで経年とともにぼやけてきて読み取れなくなってしまう, あいまいさが増すことを例にして, エントロピーが増大することの意味を説明する方法が頻繁に使われる. また, これらの現象をモデル化して説明する際には, 図1に示すような白と黒の2値画像 (白と黒の画素は同数) を用いて, 「無秩序さ」, 「乱雑さ」, 「コントラストの無さ」, 「あいまいさ」および「拡散の度合い」などの言葉を使って説明することが多い. 一方で, 2値画像について, エントロピーを計算する方法は多様である. 既に, 情報科学および画像処理の分野においては, 情報量の観点から2値画像の情報エントロピーを算出する手法が確立している [13]. しかし, 言語表現にもとづく感性量と画像のエントロピー値との対応関係の視点に立つと, 言語表現から得る感性量としてのエントロピー値をどのような計算方法で計算するべきかを示す指針はない. そこで, 白黒2値画像を用いたエントロ

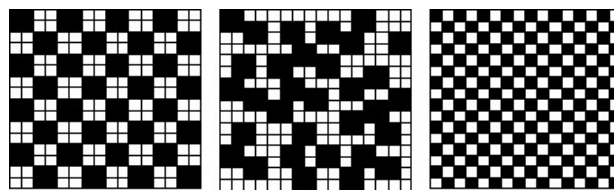


図1 白と黒の2値画像例 (白と黒の画素は同数)

ピー概念の表現方法を評価する際に適しているエントロピー値の算出方法について以下に検討した.

2.1 平均情報量の求め方に基づいた画像のエントロピー算出方法

情報科学の分野では, デジタル画像のデータを符号化して, 圧縮率や転送速度の向上を検討する際に, 画像データの情報エントロピー値 (平均情報量) が算出できる [2, 13]. 例えば, 白黒2値画像の場合, 情報エントロピー値の算出は, 1, 2行×2列, 4行×4列, …等, 小単位の画素の2次元的なデータをシンボルとにおいて, その画素範囲のビット値を輝度値として, 同じ輝度値を持つシンボルの生起確率を使ってエントロピー値を算出する.

この算出方法によるエントロピーを使って, 画像の感性評価の指標に使っている例もある [14-16]. この場合, 一般的には, 画像の認識度や見にくさの評価等に用いられることが多い. しかし, 本研究が対象としている, エントロピーの概念自体の表現方法の評価に, この算出方法をそのまま用いることができるかどうかは検討を要すると思われる.

一般的に, 情報エントロピー (平均情報量) の算出はシャノン [2] によって定義された次式で求めることができる.

$$S = \sum p_i \cdot \log_2 (1/p_i) \quad (1)$$

ここで, S はエントロピー, p_i は系の中における個々の事象の生起確率であり, $\sum p_i = 1$ の条件がある. すべての情報を伝達するシンボル (記号や文字) が等しい生起確率を持っているとすると, $p = 1/M$ が成り立つので (ここで M : シンボルの総数),

$$S = M \cdot 1/M \cdot \log_2 (M) = \log_2 M \quad (2)$$

となる.

しかし, この式より求められるエントロピーはシンボルの生起確率を使って求めるため, シンボルを何にするのか, その大きさをどの程度にするのか, によって様々な形をとることが可能である. また, 情報科学の分野では, 情報エントロピーについて考えるとき, 前述のように, データの圧縮がどこまで可能であるかといった, 符号化について議論する事が多く, 圧縮の方法によってエントロピー値の計算のアルゴリズムも異なってくる [2, 13].

画像のエントロピー値の算出については, 前述のように,

2値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性

サイズ $I \times J$ の画像に対し、1画素あたりの輝度値 Z ビットの画像が発生する情報源の場合、輝度値をシンボルとして画像の総画素数を N_{pic} 、輝度値 Z_i の画素数を N_i とすると、エントロピー S は、

$$S = - \sum_{i=0}^{2^Z-1} N_i / N_{pic} \log_2 (N_i / N_{pic}) \quad (3)$$

で求まる。

上記の式(1)～(3)に基づいて、シンボルの取り方の違いによって以下(a)から(c)の3つのエントロピー算出法を検討した。尚、輝度をシンボルとしたこの計算アルゴリズムは、画像情報のエントロピーの算出方法として最も一般的に用いられる方法であり、前述のように、画像に対する認識度や見にくさなどの指標として用いられる[14-16]。

更に、ここでは、後述する(b)と(e)以外の算出方法においては、画像の2次元平面広がりに対する感性量との相関性を持たせるために、エントロピーの算出方向は、図2のように、横(列)方向と縦(行)方向について別々にエントロピーを計算した後、これらを足して2で割ることで、縦方向と横方向の向きに依存しない平均エントロピー値を求めて評価することとした。

(a) 画像の情報エントロピー① (1画素白と黒の1ビットをシンボルとしたエントロピー)

式(3)において、画素1つ当たりをシンボルとみると、白と黒の2種類(2値画像)の色なのでシンボルの輝度値 Z は1ビットとなる。縦方向および横方向の1列毎にエントロピー値を求めその総体として画像全体のエントロピーを算出する。1列にいくつの黒い画素が入っているかが基準となるため、均等な散らばり具合を比較することになる。

(b) 画像の情報エントロピー② (2×2, 2ビットをシンボルとしたエントロピー)

(a)と同様に式(3)を用いるが、図3のように、画像を2×2の単位に区切り4画素分を1つのシンボルとして計算する。従ってシンボル輝度値 Z は4段階2ビットとなる。このアルゴリズムによる計算値は、2×2の4画素分をユニット化して

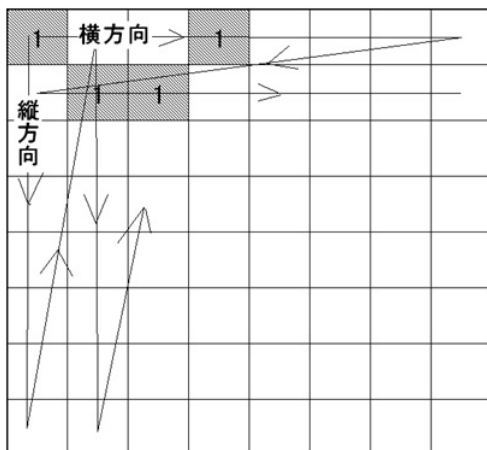


図2 2値画像のエントロピー計算方向

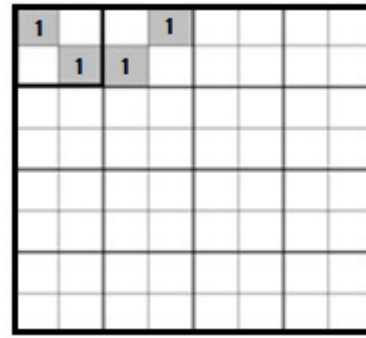


図3 2×2の4画素分を輝度値シンボルとする計算方法

1つの画素と考えたときの画素の輝度の多様性を示す値となるため、明るさに対する多様性の指標となると考える。このように、画素をユニット化してその面積を任意に設定することができるが、シンボル化する面積が増えるにつれて逆に画像の解像度が低下するため、本検討では(a)の1ビットと(b)の2ビット(2×2)の2種類までとした。

(c) 画像の情報エントロピー③ (同一画の連なり長さをシンボルとしたエントロピー)

(a)および(b)は輝度値をシンボルとしたのに対して、本方法は、黒の画素が横あるいは縦にいくつ連続して連なっているかをシンボル値 Z とする。このアルゴリズムによると、長さの種類が多いほどエントロピー値は高くなる。したがって、連なり長さの種類が多様性を示す指標となる。

2.2 熱力学的現象の確率に基づく画像のエントロピー算出方法

エントロピーの啓蒙書などでは、エントロピーの概念について微視的状态数を用いて、確率論的な側面から説明することが多い。前述のインクの拡散の例はその一つである。そこで、画像のエントロピーを求める方法として、前述2.1のような、情報理論に基づいたエントロピーの算出方法以外に、微視的状态数に基づいた2値画像のエントロピー算出法を考えた。

統計熱力学において最も重要な式の1つが次に示すボルツマンのエントロピー式である。

$$S = k \cdot \ln W \quad (4)$$

ここで、 k はボルツマン定数(分子1個の気体定数)である。この式はミクロな視点から見た分子運動の熱力学的現象の確率(微視的状态数:場合の数) W からエントロピーを求める。この熱力学的現象の確率 W を2値画像における黒いピクセルが出現する場合の数に置き換えてエントロピーを算出する方法として次の(d)および(e)を考えた。

(d) 黒い画素の連なる確率を基準としたエントロピー

黒い画素が生起する確率を $1/2$ とすると、黒い画素が続いて生起する確率 p_i は図4ようになる。ここで、黒い画素の1つの連なりを1個体として、前述の情報理論のシャノンの

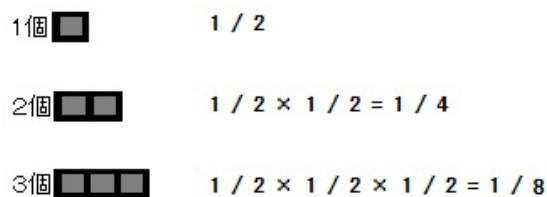


図4 黒い画素(同一画素)が連続する確率

定義に当てはめた場合, 各個体個々が持つ情報量は次式 (5) で与えられる.

$$I_i = \log_2(1/p_i) \quad (5)$$

しかし, 式 (5) を式 (1) に適用し, エントロピー (平均情報量) を求めようとするとき, (a), (b) および (c) の場合と異なり, $\sum p_i = 1$ とならないため平均情報量とはならない. そこで表1のように1列 (行) の最大量16画素の黒になる確率 p_{16} を1とおいたときの各場合の確率比 (p_i/p_{16}) を熱力学的現象の確率 W_i として求め, $S = \sum \ln W_i$ からエントロピーを求める. これは, 16画素連続して連なる場合のエントロピー値を基準エントロピーにしたことと等しい. このアルゴリズムによって算出される値は, 黒の画素のまとまり具合を比較しており, 連なれば連なるほど確率は低くなるためエントロピー値は低くなる. したがって, この値が高いほどより拡散していることを示している.

(e) 1対ごとの黒画素間の距離を基準としたエントロピー

前述の (a), (c) および (d) については, いずれも行ごとあるいは列ごとにエントロピーを算出し, 列あるいは行の方向へ積算することで全体のエントロピーを求めた. 画像情報として考えれば, 結局, 2次元平面のデータを数珠状に並べた1次元のデータとして扱うため, データ並びとしてのエントロピー値の算出方法としては問題ないとする (圧縮の方式によってこの積算方向が異なり, 例えば, JPEG 画像の場合は, 斜め方向にデータを繋げていく). しかし, 人間が2値画像を見るときは, 2次元の広がりとして感じるはずで

表1 黒い画素の連続数の熱力学的現象の確率 (16×16画素)

画素の連続数	確率 P	熱力学的確率 W
1	0.5	32768
2	0.25	16384
3	0.125	8192
4	0.0625	4096
5	0.03125	2048
6	0.015625	1024
7	0.0078125	512
8	0.0039063	256
9	0.0019531	128
10	0.0009766	64
11	0.0004883	32
12	0.0002441	16
13	0.0001221	8
14	6.104E-05	4
15	3.052E-05	2
16	1.526E-05	1

あり, 行および列ごとに計算する方法は, 行と行あるいは列と列の境のつながり部分の関係を十分に反映しない. そこで, 画素同士の距離を放射状に測ることで2次元平面方向にエントロピー値を算出する方法を考えた.

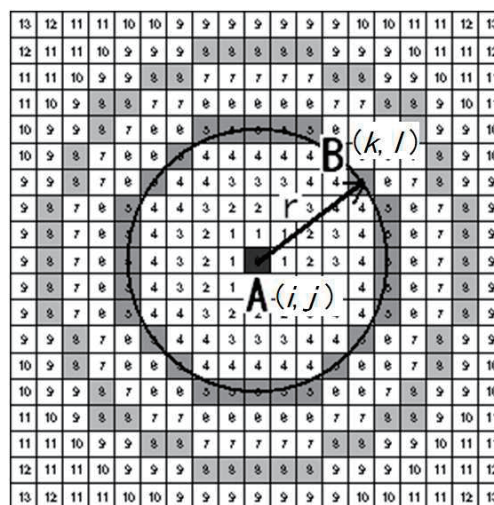
画像全体に黒い画素が生起する確率が等しく与えられているとき, AおよびBの2つの黒い画素を仮定し, AとBの2つの間の距離に着目すると, Aに対するBの生起確率 (画素の数) は2つの間の距離を半径 r とする円周長さ l に比例する. 図5は1画素分の距離を1としたとき, 中心に位置する画素Aから同じ距離にある画素Bが何個存在できるかを示した図である. 各画素に示した値は中心からの距離を示している. 例えば, 中心から5の長さで幅1の面積の中, 即ち, 半径4.5から5.5の中に画素の中心が入る画素は28個ある. 同様に, 中心からの距離が更に離れて7.5から8.5の中に中心が存在する画素は48個ある. このように中心から離れるに従い, その距離に存在できる画素が増える. したがって, 2つの画素間の距離が増えることで, 存在する確率が増えることになる. この確率を熱力学的現象の確率とすれば, 熱力学的現象の確率は2つの画素間の長さを半径 r とする円周長さに比例し, 即ち, r に比例する. したがってAとB, 2つの画素間のエントロピー S_{AB} は, $W=r$ として, 次式によって求まる.

$$S_{AB} = \ln r \quad (6)$$

更に, 実際のプログラムにおいては次式 (7) を用いる.

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n Z_{i,j} \cdot Z_{k,l} \cdot \ln \left(\sqrt{(k-i)^2 + (l-j)^2} \right) \quad (7)$$

ここで, i, j, k, l は図5中に示したように, それぞれ $A(i, j)$, $B(k, l)$ の座標値である. また, Z は黒の画素のときは1, 白の画素のときは0とする. 更に, $k=i$ かつ $l=j$ の場合, 即ち, 同じ画素同士の場合の計算は行わない (平方根内を0にしない). このアルゴリズムで算出された値は黒い画素の空間的

図5 画素Aに対する画素Bの間隔距離 r の増加に伴って増加する存在確率

2値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性

広がり直接示すものである。尚、ここでの考え方は、分子運動論において、マクスウェルの速さ分布を求めるときに、球座標上で放射状に広がる速度分布の確率密度関数を半径方向に積分する際の考え方と類似する。

3. エントロピーの算出値と言語によって与えられる感性量との相関性を調べる実験

2章では、2値画像のエントロピー値を算出する方法として、画像データの平均情報量を求める手法と、熱力学現象の説明に用いられてきた熱力学的現象の確率（微視的状态数）を求める手法の2つについて論じた。ここでは、これらによるエントロピーの計算値が、言葉によって与えられる感性量とどのような関係を持つのかに着目した。そこで、2章で検討した2値画像のエントロピー算出方法によるエントロピー値と、言葉によって与えられる感性量との相関関係を調べる実験を行った。比較に用いる言葉は、被験者への負担を最小限にするため3つに絞った。使用する言葉は以下のように選定した。

3.1 比較に用いる言葉の選定

先に述べたように、既報[4]において、熱力学的現象におけるエントロピーに着目して、分子運動を表現した粒子のアニメーションを被験者に見せて、与えられた言葉に対する感性量と分子の速度および運動範囲から計算されたエントロピー値との相関性を調べた。エントロピー値を変化させる独立変数として、それぞれ分子の速度（温度）と面積（体積）を独立して変化させて比較したところ、「乱雑さ」および「捕まえにくさ」等から感じる感性量は強度依存エントロピー（温度変化によるエントロピー変化）に対しては相関が高いが、容量依存エントロピー（体積変化によるエントロピー変化）に対しては相関性がほとんどなかった。これとは逆に、「拡散の度合い」や「ほやけた感じの度合い」等から感じる感性量は容量依存エントロピーには相関性があるが、強度依存エントロピーに対しては相関性が少ないことがわかった。このことから、言葉による感性量は、強度依存エントロピーと容量依存エントロピーのどちらかに依存する可能性が高いことがわかった。そこで、強度依存エントロピーおよび容量依存エントロピーを表現する言葉をそれぞれ1つずつ選定することとした。

まず、容量依存エントロピー値に相関する言葉については、既報[4]において、容量依存エントロピー値に最も相関係数の高かった「拡散の度合い」を採用した。次に、強度依存エントロピー値に相関する表現に関しては、「乱雑さ」と「無秩序さ」を候補とした。既報[4]においては、「乱雑さ」が強度依存エントロピー値と相関が高く「無秩序さ」については、検討を行わなかった。しかし、他の検討[5]では、強度依存エントロピー値に対しては、「無秩序さ」による感性量は「乱雑さ」による感性量と同じ相関性を示し、「無秩序さ」と「乱雑さ」は概ね同等の表現であると考えた。また、

エントロピーの啓蒙書などでは、白黒2値画像を使った説明において「無秩序さ」という言葉による表現でエントロピーの概念を説明しているものが多いことから、本実験では「無秩序さ」を強度依存エントロピー値に相関する表現として採用した。更に、既報[4]で検討した「捕まえにくさ」は、被験者が頭の中で、動き回る粒子を想像する事が必要で、論理的な思考が働き、感性による判断ではなくなる可能性がある。しかし、エントロピーの概念を説明する場合には有効な表現であると考えられるため、3つ目の言葉による表現として「捕まえにくさ」を採用した。

3.2 実験方法

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、77名であった。いずれも、本学における授業の一環として本実験に参加した。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講義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知識は持っていないと想定した。

手続き 実験は、図6に示した9種類の2値画像を2種類ずつ計36の組み合わせについて比較し、「拡散の度合い」「無秩序さ」および「捕まえにくさ」のそれぞれ3種類の言葉が与えられたときに、どちらの方がより強く感じるかを選ばせる1対比較法による実験を行った。図7に実験に使用した1対比較法による画像パターンの比較記入シート例を示した。比較記入シートにおける画像の並び順は、ランダムに7種類を作成した。各被験者はそのうちの1つを配布され、それに対して回答した。

3.3 実験結果

表2に、1対比較による各列に対する行の勝率を、3種類の言葉別に示した。比較した2種類の画像パターンの勝敗の勝率から、正規分布のZ値を求め、各画像について1次元で

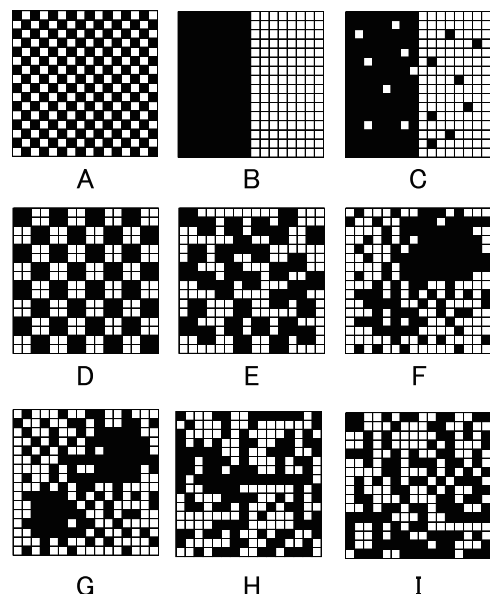


図6 実験に用いた9種類の2値画像パターン



















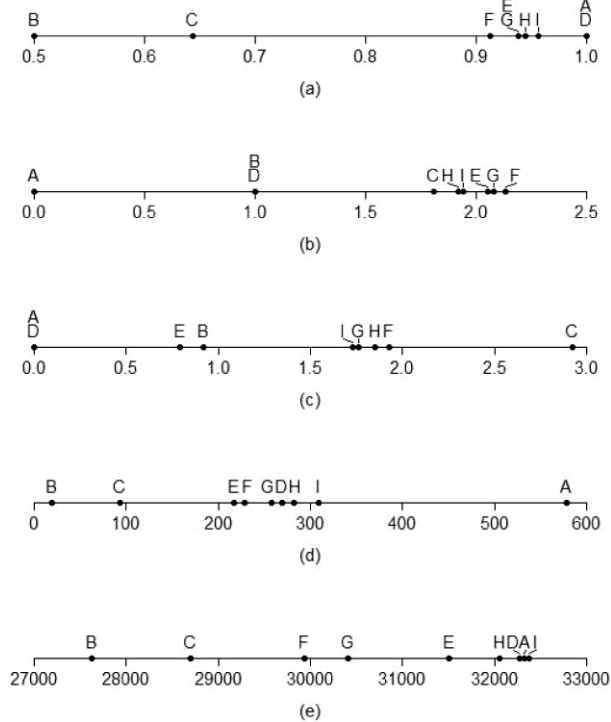
画像パターン	B																	
A 		問: 行対列の各画像パターンについて、以下の質問に対する感じが強い方を選んで、AかBに○をつけてください 問1. 無秩序な感じの強い方 問2. 拡散の度合いの強い方 問3. 黒い部分を捕まえにくい感じの強い方																
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B																	
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B										A 問1 B A 問2 B A 問3 B							
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B															
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B														
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B													
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B												
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B											
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B										

図7 1対比較法による画像パターンの比較記入シート例

表2 1対比較実験の結果 (各列に対する行の勝率)

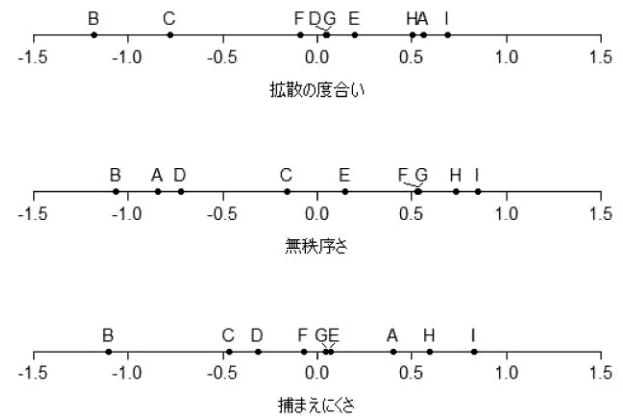
拡散の度合いの強い方									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		0.91	0.79	0.88	0.65	0.61	0.51	0.58	0.59
B	0.09		0.12	0.15	0.12	0.16	0.11	0.12	0.11
C	0.21	0.88		0.30	0.12	0.10	0.13	0.08	0.14
D	0.12	0.85	0.70		0.61	0.54	0.51	0.39	0.45
E	0.35	0.88	0.88	0.39		0.69	0.68	0.32	0.27
F	0.39	0.84	0.90	0.46	0.31		0.34	0.26	0.14
G	0.49	0.89	0.87	0.49	0.32	0.66		0.22	0.13
H	0.42	0.88	0.92	0.61	0.68	0.74	0.78		0.31
I	0.41	0.89	0.86	0.55	0.73	0.86	0.87	0.69	
無秩序な感じの強い方									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		0.65	0.12	0.47	0.10	0.14	0.11	0.13	0.13
B	0.35		0.08	0.32	0.08	0.12	0.12	0.09	0.13
C	0.88	0.92		0.78	0.28	0.21	0.16	0.14	0.12
D	0.53	0.68	0.22		0.12	0.12	0.13	0.14	0.16
E	0.90	0.92	0.72	0.88		0.27	0.29	0.17	0.12
F	0.86	0.88	0.79	0.88	0.73		0.48	0.39	0.37
G	0.89	0.88	0.84	0.87	0.71	0.52		0.40	0.25
H	0.87	0.91	0.86	0.86	0.83	0.61	0.60		0.42
I	0.87	0.87	0.88	0.84	0.88	0.63	0.75	0.58	
黒い部分を捕まえにくい感じの強い方									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		0.88	0.70	0.82	0.62	0.61	0.50	0.58	0.43
B	0.12		0.14	0.15	0.20	0.18	0.11	0.13	0.08
C	0.30	0.86		0.39	0.28	0.23	0.29	0.09	0.22
D	0.18	0.85	0.61		0.28	0.43	0.43	0.18	0.14
E	0.38	0.80	0.72	0.72		0.58	0.63	0.25	0.16
F	0.39	0.82	0.77	0.57	0.42		0.39	0.22	0.21
G	0.50	0.89	0.71	0.57	0.37	0.61		0.26	0.18
H	0.42	0.87	0.91	0.82	0.75	0.78	0.74		0.33
I	0.57	0.92	0.78	0.86	0.84	0.79	0.82	0.67	

2値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性

図8 5種類の計算法によるエントロピー S の計算値の比較

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、2章で検討した5種類のエントロピーの算出値 S と比較した。

図8に、5種類の計算法によるエントロピーの計算値の比較、および図9に画像ごとの3種類の言葉による感性量 f を示した。また、表3には、それぞれ各エントロピー計算値 S と感性量 f の値、およびそれらを2値画像の図と伴に順位ごとに並べた。

図9 3種類の言葉による感性量 f の比較表3 各エントロピー計算値 S と感性量 f およびその順位

順位	エントロピーの計算方法					言葉による表現		
	(a)輝度シンボル	(b)4×4シンボル	(c)連続シンボル	(d)連続の確率	(e)2極間長さ	拡散の度合い	無秩序さ	捕まえにくさ
1	 $S = 1.00$	 $S = 2.13$	 $S = 2.92$	 $S = 578.0$	 $S = 32368$	 $f = 0.69$	 $f = 0.85$	 $f = 0.83$
2	 $S = 1.00$	 $S = 2.08$	 $S = 1.93$	 $S = 308.3$	 $S = 32324$	 $f = 0.56$	 $f = 0.73$	 $f = 0.60$
3	 $S = 0.956$	 $S = 2.05$	 $S = 1.85$	 $S = 281.8$	 $S = 32269$	 $f = 0.51$	 $f = 0.53$	 $f = 0.40$
4	 $S = 0.944$	 $S = 1.94$	 $S = 1.76$	 $S = 269.7$	 $S = 32056$	 $f = 0.20$	 $f = 0.53$	 $f = 0.07$
5	 $S = 0.938$	 $S = 1.92$	 $S = 1.73$	 $S = 257.7$	 $S = 31502$	 $f = 0.05$	 $f = 0.15$	 $f = 0.05$
6	 $S = 0.938$	 $S = 1.81$	 $S = 0.92$	 $S = 228.8$	 $S = 30414$	 $f = 0.05$	 $f = -0.16$	 $f = -0.07$
7	 $S = 0.913$	 $S = 1.00$	 $S = 0.79$	 $S = 216.7$	 $S = 29934$	 $f = -0.09$	 $f = -0.72$	 $f = -0.31$
8	 $S = 0.644$	 $S = 1.00$	 $S = 0.00$	 $S = 93.9$	 $S = 28704$	 $f = -0.78$	 $f = -0.84$	 $f = -0.46$
9	 $S = 0.500$	 $S = 0.00$	 $S = 0.00$	 $S = 19.3$	 $S = 27629$	 $f = -1.18$	 $f = -1.07$	 $f = -1.10$

図8および表3より、計算方法の違いにより、順位およびエントロピー値の差が大きく異なっていることが分かる。特に、画像AとDの順位が計算法によっては上位と下位の逆の位置にある。また、言葉による感性量の比較においても、図9および表3では、言葉による表現別に順位および尺度距離が共に大きく異なっており、画像Aについては、計算方法の比較と同様に、言葉によってその順位が上位と下位に大きく分かれる。また、表4には、それぞれ「無秩序さ」「拡散の度合い」および「捕まえにくさ」の感性量に対する5種類のエントロピー計算値との相関係数を示した。

3.4 実験結果の検討

前述のように、エントロピーの算出値 S および感性量 f 共に、画像AおよびDが、算出方法や言葉による表現で順位が大きく異なっている。このことに関して以下のような考察を行った。

3.4.1 エントロピーの計算方法に関する考察

表3および図8のエントロピーの計算方法の比較においては、計算方法(a)、(d)および(e)については、画像AおよびDが共に順位が比較的上位にあるが、計算方法(b)および(c)においては、下位にある。しかし、計算方法(b)および(c)では画像Aの値が0となることは明らかである。即ち、計算方法(b)では、4画素分を1つのシンボルとしたが、この場合、画像Aにおいては全てが同じ輝度値になるため、シンボルは1通りしかなく、エントロピー値は0となる。また、連なり長さをシンボルとした計算方法(c)においても、Aについては連なり長さのパターンは、画素1つ分の長さの1通りしかないため計算方法(b)と同様にエントロピー値は0となる。

一方、計算方法(b)および(c)と同様にシンボルの生起確率を基準とする計算方法(a)においては、逆に画像Aは上位の高いエントロピー値となった。このように、皆シンボルの生起確立を基準とし、シンボルの多様性を計るアルゴリズムで計算される計算方法(a)、(b)および(c)は、そのシンボルの取り方で全く異なった結果となった。この理由としては、計算方法(a)は、シンボルを最小の画素単位まで小さくしたために、輝度値が1ビットとなり、輝度の多様性よりも白と黒の比率によるエントロピー値を計算することになったからではないかと考える。

計算方法(d)については、基本的に隣に連なる画素の確率を基準としている。黒および白の画素の隣に同じ色の画素が連なるにしたがって確率が低くなるため、同じ色の画素が

連なる画像ほどエントロピーは低くなる。このことから、Aの画像は白と黒が交互に現れ、同じ色が連なることがないため、エントロピーは最も高い値となる。

3.4.2 言葉による表現の感性量に関する考察

表3および図9の言葉による表現における感性量の比較において、画像Aに着目すると、「拡散の度合い」では感性量が高いが、「無秩序さ」では低くなっている。エントロピーの高さを表現するこれら2つの言葉に対する感性量について、画像Aの順位が大きく異なることは非常に興味深い結果であるといえる。

「拡散の度合い」について考えると、黒い画素が均一に並ぶ画像Aが高い感性量を示すことは論理的にも感性的にも矛盾は生じないと考える。一方で、「無秩序さ」については、1つの考え方としては、画像Aは、インクが拡散する現象や、「覆水盆に返らず」のように1カ所に閉じ込めておいた物が広範囲に広がってしまったと捉ええると、無秩序になったと考える事ができる。しかし、広がってはいるが、画像Aは正確に1画素ごとに黒の画素と白の画素が配列されているため、統率がとれていると考えれば、無秩序さは低いともいえる。

ここで、仮に、この画像Aの画素が被験者にその形が見分けられないほど小さい粒子程度の大きさだった場合にどうであるかを考える。その場合は恐らく、被験者は、黒の隣にきっちり白が配列されている規則性に気づかないため、秩序性は感じられず、広がったことに対する感性が働いて無秩序に感じるのではないかと考える。このことから、画像Aに対する「無秩序さ」による感性量が低くなった原因は、被験者が1つずつ均等な配置で、白と黒が整列する状態を感知したことによるもので、論理的な思考が働き、画像Aの多様性の少なさに気づいたからではないかと考える。そしてこれは、被験者が「無秩序さ」の比較において上位にある画像IとH、あるいは画像GとFを比較するときに働いた感性とは異なった感性で比較した結果ではないかと考える。その理由としては、著者の主観による仮定であるが、例えば、画像GとFを比較した場合、Fの方が黒の画素の塊が大きく、まとまった印象が強いが、画像Gに関しては分散している印象が強い。したがって、Gの方に、より「無秩序さ」を感じ、高い感性量を与えたと考えることができる。もし、この基準で画像Aを見た場合、前述の、形が見分けられない程小さい画素であった場合と同じように、画像Aに対しては「無秩序さ」が大きく感じられると思われるので、画像Aの感性量はもっと上位に来るはずである。しかし、実際にはそうならなかった要因

表4 各言葉による感性量と各エントロピー計算値との相関係数

言葉表現	エントロピー計算方法					言葉による表現		
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	拡散	無秩序	捕まえ
拡散の度合い	0.92	0.02	-0.24	0.82	0.95		0.51	0.95
無秩序さ	0.41	0.83	0.61	0.05	0.30	0.51		0.67
捕まえにくさ	0.78	0.17	0.04	0.72	0.83	0.95	0.67	

2値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性

は、画像AやDの白と黒の画素が規則正しく並んだ特異性、即ち自然界に存在しにくい、パターン化された画像だからではないかと考える。このことから、以下では、画像Aのような論理的な思考が働く可能性のある画像を排除して再検討した。

3.4.3 3種類の言葉に共通な感性量に順位づけられる2値画像

画像Aのように画素の間隔が均等に配置されている画像はDである。また、画像BおよびCにおいても、自然界にある現象としては不自然な配置であると考えられる。更に、画像Eについても、黒い画素が4つずつ隣り合わせに発生して存在する確率も非常に低いと考えられる。したがって、これらエントロピーの概念に基づいて恣意的に作られた画像A,B,C,DおよびEについては、論理的思考が働きやすいと考えた。このことから、これら5つの画像を取り除くと、図10の画像E, F, GおよびHの4つが残る。これらを見ると、いずれも自然に存在する現象、例えば実際の写真の一部分などにあり得る画像であると考えられる。そして、これら4つの画像について表3において比較すると、興味深いことに3つの言葉に対する感性量は全て同じ順位となる。そこで、これら4つの画像のみを使って、それぞれエントロピーの計算値と言語による感性量の相関係数、および、言葉による感性量同士の相関係数の比較を表5に示した。

言葉による表現同士の比較を見てみると、「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」の相互間において全て約1という相関係数を得た。ここで、論理的に考えることを要求される「捕まえにくさ」による感性量に対しても「拡散の度合い」および「無秩序さ」がそれぞれ約1の相関係数となったことは興味深い。このことから、ここでは、これら3つの言葉による共通な感性によって、画像E, F, GおよびHの4つの画像が順序づけられた可能性が高い。そして、この感性こそが、純粋で本質的なエントロピー変化に反応する感性ではないかと考える。そこで、この4つの画像を使って、感性量と相関性のあるエントロピー計算方法について再検討した。

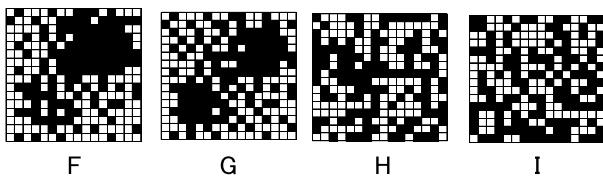


図10 自然な表現による画像

3.4.4 感性量に基づく2値画像のエントロピー値計算方法に関する考察

表5のエントロピーの計算方法と各言葉による感性量との相関係数の比較に着目すると、計算方法(b)と(c)については全てマイナスの相関係数となった。これに関する1つの理由としては、計算方法(b)については、分解能不足、即ち、画像F~Iは白と黒の画素が切り替わる周波数が高いため、シンボル当たりの面積が大きい(2×2ドット)計算方法(b)では能力不足となった可能性がある。

また、計算方法(b)と(c)については、シンボルの多様性を計るアルゴリズムであるが、計算方法(c)に着目すると、この計算は、列および行方向への1次元的な連なり長さの多様性を計るアルゴリズムである。画像FとGを比較した場合、画像Fは大きな黒い画素の塊が1つあるが、画像Gではより小さい塊の2つに分割されている。連なり長さの多様性の観点で見た場合、画像Fの方が、画像Gよりも長い連なりがあるため、Fは短い画素から長い画素まで多くの種類の長さを持つことになり、エントロピー値は高くなると考える。しかし、これらの2つの画像をあくまでも著者の主観で比較すると、画像Fの方が「まとまっている」という感性が働き、画像Gよりも多様性(乱雑さ、無秩序さ)は感じられない。この矛盾について考えてみると、計算方法(b)および(c)によって計算される多様性は、あくまでも画像情報データ、即ち、画像データを1列に並べたものによるシンボルの多様性であり、人間がその画像から感じる、平面的な広がりに対する多様性とは異なるからではないかと考える。この仮定に従えば、画像の1次元的なシンボルの多様性を計る画像情報エントロピー値は人間の感性によるエントロピーとは相関性が少ないと考えることができる。

次に、計算方法(b)および(c)を除く(a),(d)および(e)に着目すると、表4に比べて表5では、相関係数が全て上昇している。画像A~Eを含む全ての比較を行った表4では、計算方法(a),(d)および(e)は、容量依存エントロピーを表す「拡散の度合い」に対する相関係数がそれぞれ0.92, 0.82および0.95と高い値となっているが、強度依存エントロピーを表す「無秩序さ」に対しては、それぞれ0.41, 0.05および0.30という低い相関係数となっている。しかし、表5の比較においては、計算方法(a),(d)および(e)のいずれも「無秩序さ」に対する相関係数が0.9以上の相関係数となった。

以上のことから、画像A~Eを一種の攪乱因子と考えると、これらが除かれた表5の比較において、計算方法(a),(d)および(e)が言葉による感性量と相関係数が高くなったことは、これらの計算方法が、2値画像から感じる純粋で本質的

表5 2値画像F, G, H, Iのみを用いた比較による相関係数

言葉表現	エントロピー計算方法					言葉による表現		
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	拡散	無秩序	捕まえ
拡散の度合い	0.92	-0.96	-0.59	0.97	1.00	1.00	0.99	1.00
無秩序さ	0.87	-0.91	-0.54	0.94	0.97		0.99	0.99
捕まえにくさ	0.91	-0.95	-0.57	0.96	0.99			

なエントロピーをある程度の正確性を持って計算できているからだと考えることができる。特に、計算方法(e)については、相関係数がそれぞれ「拡散の度合い」に対して1, 「無秩序さ」に対しては0.97, 更には論理的な思考が必要であると考えられる「捕まえにくさ」に対しても相関係数が約0.99となり、全てにおいて完全相関に近い相関係数が得られた。この結果は、計算方法(e)が、画素間の長さを基準にしているため、前述した、1次元的な情報エントロピーを算出する計算方法(b)および(c)とは異なり、2次元的な広がりやを数値化できるからではないかと考える。このことから、2値画像を見た被験者が感じる本質的なエントロピーを計測する方法としては、今回考案した、2つの画素間の距離を基準とした計算方法(e)が比較的に適していると考えられることができる。

4. 今後の検討課題

前節(3.4.2)において、画像AやDのパターン化された画像に対して、論理的な思考が働いた可能性を指摘したが、これとは別に、こうした思考とは異なった他の感性が働いた可能性も否定できないと考える。その1つとして考えられるのは、時間である。熱力学的現象のエントロピーにおいては、エントロピーは容積変化とともに温度変化によって変化するが、温度は分子の速度と相関するため、時間を独立変数とする性質も持つ。また、熱力学第2法則の要であるエントロピーの重要な概念の1つは、事象の不可逆性である。不可逆性を論ずるためには時間の概念が不可欠である。したがって、静止画であっても、エントロピーの増大による不可逆性を感じているとすれば、その画像の中に心理的な時間の流れを感じ取っているのではないかと考える。このように考えると、前述のように、画像AやDによって、感性による判断が攪乱されたとするならば、その原因として、この心理的な時間の影響も考えることができる。著者の主観によって観察すると、画像F, G, HおよびIの画像からは、時間的な動きを感じることができるように思えるが、画像AやDからはそうした動きは感じられない。こうしたことが、これらの画像の感性量を引き下げたと考えることもできる。更に、もし、本実験のような静止画の比較に、このような心理的な時間が存在すると仮定した場合は、その時間の向きがどの方向へ向かっているのか、という議論も可能となる。即ち、白と黒の画素の切り替わる周波数を考えたときに、1列、1行ごとに感じるのか、あるいは複数列、行ごとに感じるのかどうか。また、その方向は右からなのか左からなのか、あるいは斜め方向なのかなど、様々考えることができる。今回の結果からは、計算方法(e)が3種類の言語表現による感性量に対して最も相関係数が高かったが、このことから、心理的な時間は、2次元平面上に各画素から放射状に経過する、というような考え方も可能となる。しかし、このような心理的な時間の存在に関する詳細な議論は今後の検討課題とする。

本報では、白黒2値画像に対する5種類のエントロピー算

出法によるエントロピー値と、3種類の言語表現によるエントロピーに対する感性量を求め、それぞれの相関性について議論した。しかし、本実験で比較した言葉は3つのみであり、ごく一部の表現に過ぎない。また、比較に用いた画像も少なく、より詳細な議論のためには、今後更に多くの言語表現および画像について比較検討する必要があると考える。

5. おわりに

白黒2値による数種類の画像を被験者に見せて、これらの画像のエントロピー値と「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」の言葉による表現から得られる感性量との間の相関性を調べる心理実験を行った。そこで比較される2値画像のエントロピー値は、それぞれ異なる数種類のアルゴリズムによる算出方法によって求め、人間が感ずるエントロピーに適した2値画像のエントロピー算出方法についても検討した。その結果以下のような知見を得た。

(1) エントロピーの論理的な概念によって恣意的に用意した2値画像を排除し、自然界に存在し得る自然な画像パターンによってそれぞれ「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」の言葉によって感じる感性量を比較したところ、これら3つの言葉の間の相関性は非常に高かった。このことから、このような、自然性のある配列による2値画像の比較に働いた感性は、本質的なエントロピーに基づいたものである可能性が高いと考えられる。

(2) (1)で選定された画像で比較した結果、これまで、情報量の指標に用いられてきた、画像情報エントロピー計算方法によるエントロピー値は、人間がその画像の平面的な多様性から感じるエントロピーとは異なるものである可能性がある。また、2値画像を見た被験者が感じる本質的なエントロピーを計測する方法としては、2つの画素間の距離を基準とした計算方法が比較的に適している。

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] 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.
- [4] 佐藤智明，菅沼睦：エントロピー概念の表現方法に関する検討，日本感性工学会論文誌，12，2，pp.303-309，2012.
- [5] 佐藤智明，永岡慶三，小口幸成：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心理量の順位相関，日本認知科学会第24回大会，2007.
- [6] J. D. Fast and F. L. Stumpers: Philips tech. Rev., 18, pp.201-205, 1956.
- [7] E.T. Jaynes: Information Theory and Statistical Mechanics, The Physical Review, 106, 4, pp.620-630, 1957.

2値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性

- [8] Leon Brillouin: Science and Information theory - 2nd edition, Dover Publications, INC., pp.159-161, 1962.
- [9] Hardey Leff and Andyrew Rex: MAXWELL'S DEMON – Entropy Information Computing, Adam Hilger Bristol, 1990.
- [10] R. Landauer: Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process, IBM J. Res. Dev. 5, pp.183-191, 1961.
- [11] Serreli, V., Lee, C-F., Kay, E.R. and Leigh, D.A.: A molecular information ratchet, Nature, 445, pp.523-527, 2007.
- [12] S. Toyabe, T. Sagawa, M. Ueda, E. Muneyuki and M. Sano: Experimental demonstration of information to energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality, Nature Physics 6, pp.988-992, 2010.
- [13] 鎌田清一郎：画像処理，サイエンス社，2003.
- [14] 石川尋代，佐藤幸男：多面認識における心理量と物体エントロピーの関係について，電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J86-D-2, pp.111-118, 2003.
- [15] 坂谷尚哉，川澄未来子，古橋武：視覚情報の物理量と認知情報量との関係に関する基礎的考察，第17回ファジイシステムシンポジウム講演論文集，p.655, 2001.
- [16] 半谷精一郎，岡本淳，宮内一洋：画像の局所的なエントロピーを考慮した白黒静止画の画質評価尺度WSNRの改良，テレビジョン学会誌，49，8，pp.1078-1086, 1995.

**佐藤 智明**（正会員）

神奈川工科大学工学部機械工学科准教授。
早稲田大学大学院人間科学研究科博士後期課程修了，博士（人間科学）。日本工学教育協会認定上級教育士（工学・技術）。日本機械学会技術と社会部門広報委員会委員長。

**菅沼 睦**（非会員）

産業技術総合研究所・特別研究員。早稲田大学助手・助教を経て，現在，早稲田大学国際情報通信研究センター・客員主任研究員。同大学院国際情報通信研究科・客員講師。博士（心理学）。