

表情認知構造とフラクタル

竹 原 卓 真

目 次

- ・ 表情認知構造研究の歴史
- ・ フラクタルとは
- ・ 表情認知とフラクタル
- ・ 展望

I. 表情認知構造研究の歴史

人間は他人の顔から発信される感情をどのようにして認識しているのだろうか。この単純な問いに対して、これまで多くの研究者が諸理論を展開してきた。科学的に表情を研究した最初の研究者は Darwin (1872) であるとされており、彼以降様々な側面からアプローチが試みられてきている。

本格的に表情認知研究が始まったのは1900年代初頭である。当時の表情認知研究のメインテーマは「人間は表情を正しく読み取れることができるか」という素朴なものであり、表出者の意図した感情カテゴリと評定者が解読した感情カテゴリの一致率にのみ焦点を当てていた（例えば、Feleky, 1914; Langfeld, 1918; Ruckmick, 1921; Landis, 1924など）。そのため、少しでも表出者が意図した感情カテゴリと異なると、その評定は誤答とされたのである。この頃の研究の結果については、「もはや表情認知研究は行なうべきではない」と悲観的な研究者も出現するほど正答率は低く、実験パラダイムの洗練などを吟味しようとする風潮は感じられなかった。

Woodworth (1938) は、それまでの表情認知研究では評定者の自由な反応がすべて無視

されて分析の対象にされないこと、あるいはその方法のフレキシビリティが低いことに異議を唱えた。彼は実験者が設定した感情ラベルが喜びであっても評定者の反応が嬉しさであるとすれば同じ感情カテゴリに属するとし、評定者の反応誤差を測定する尺度を構成しなければならないと論じた上で Feleky らのデータを再分析し、独自の評価尺度を作成した。

Woodworth は人間の表情は最終的に(1)愛・幸福・陽気, (2)驚き, (3)恐怖・苦しみ, (4)怒り・決断, (5)嫌悪, および (6)軽蔑の6つのカテゴリに区分されると結論し、それぞれを帯状に配列して連続的な感情カテゴリにまとめ、1次元尺度を作成した。

しかしながら、Woodworth のモデルに対し、弟子の Schlosberg が他人のデータの再分析の結果に過ぎないとの批判を加えた。Schlosberg は実際に表情写真を用いて実験を行ない、Woodworth が主張する連続的な感情カテゴリを実際に発見したが、感情カテゴリの連続性が単一の帯状というよりはむしろ円環状に配列されていることを見出した。また彼は表情写真が円環状に配列されるということは、その基底に独立した複数の次元が存在すると仮定し、「快 - 不快」と「注目 - 拒否」という2次元（心理空間）を仮定した (Schlosberg, 1941)。この心理空間は多次元尺度構成法 (MDS) をはじめ、因子分析などによって繰り返し見出されてきた (Abelson & Sermat, 1962; Cliff & Young, 1968; Engen, Levy, & Schlosberg, 1958; Levy & Schlosberg, 1960; Mordkoff, 1967; Osgood, 1955, 1966;

Shepard, 1962; Triandis & Lambert, 1958)。

1960年代以降、心理空間に関する研究は提出されなくなるが、1980年に Russell が感情語を刺激として円環モデルを提唱して以来 (Russell, 1980)、再度研究が活発になった。Russell らは表情写真を用いて幼児から大人までを対象に幅広く実験を行ない、MDS による分析結果から人間の表情認知構造は「快 - 不快」と「覚醒度」の2次元から構成されると結論した (Russell & Bullock, 1985, 1986)。彼らによると、2次元空間上にプロトタイプとなる喜びや悲しみなどの表情が円環状に配列される (Figure 1)。彼らの研究はその後多くの研究によって追試され、同様の結果が導出された (例えば、Almagor & Ben-Porath, 1989; Bimler & Kirkland, 1997; Feldman, 1995a, b; Feldman Barrett, 1998; Feldman Barrett & Fossum, 2001; Feldman Barrett & Russell, 1998; Knez & Hygge, 2001; Meyer & Shack, 1989; Reisenzein, 1994)。また、その構造における汎文化的な普遍性も検証された (Russell, Lewicka, & Niit, 1989)。

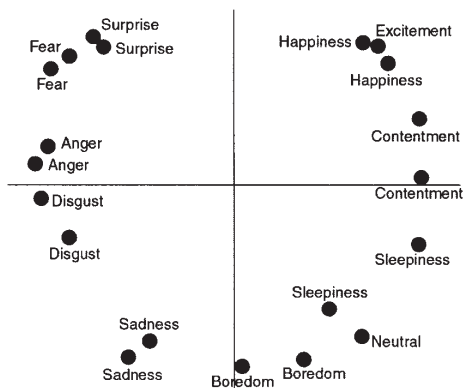


Figure 1. Russellらによって見出された表情認知の円環構造。Russell & Bullock (1985) を改変。

1990年代に入り、米・マイクロソフト社が発売した Windows™ の普及によってパーソナルコンピュータが安価で身近なものとなり、手軽に画像を加工することが可能になった。それまではワークステーションでしか実現で

きなかったコンピュータグラフィックスによる表情合成もマウスのクリックのみで行なえるようになり、実験環境も大幅に改善された。同時に表情実験において何よりも進歩したことは、客観的な表情画像を作成することが可能になったことがあげられるであろう。顔写真の撮影は、光量や角度などを一定に保つために通常は実験室内で行なう。しかしながら、実験室内という特殊な環境下であることが大きな原因となり、表出者に表出に対する負担を与えてしまい、自然でスムーズな感情表出が困難になることが多い。また、Ekman & Friesen (1975) が提唱するような表示規則が働き、最大表出も普段の表出と比較して抑制気味になることは否定できない。このような潜在的問題に対してコンピュータグラフィックスは非常に有効なのである。

コンピュータグラフィックスのテクニックの一つとしてモーフィング (morphing) がある。この用語は生物学の変態 (metamorphosing) という用語の短縮形であるが、2つの画像をもとにしてそれらの中間画像を作成するテクニックである (Figure 2 参照)。モーフィングを利用すると喜びと悲しみの中間顔や、75%の怒りと25%の嫌悪といった複雑な感情成分を持つ表情画像を作成することができ、従来の表情写真のみを刺激とする実験と比較すると、飛躍的に刺激の自由度が広がった。



Figure 2. モーフィングによって作成されたイヌとネコの間顔。左右のイヌとネコの画像は現実のもので、真ん中の画像がモーフィングで作成されたもの。

我々はモーフィングのテクニックを利用して、「喜び - 悲しみ - 嫌悪 - 怒り - 恐怖 - 驚

き - 喜び」のプロトタイプ表情から構成される円環を想定し、隣り合う各プロトタイプ表情間に3つの中間顔を作成した (Takehara & Suzuki, 1997)。プロトタイプ表情と中間顔を被験者に評定させ、MDSを用いて分析した

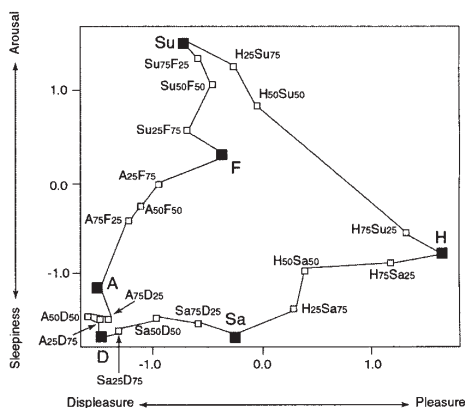


Figure 3. モーフィングによって作成された表情とプロトタイプ表情の2次元平面へのプロット。 はプロトタイプ表情, はモーフィング表情をそれぞれ表わしている。モーフィングによって作成された表情は各プロトタイプ表情の間に位置していることがわかる。Takehara & Suzuki (1997) を改変。

ところ, Russell & Bullock (1985, 1986) が提唱する表情の円環と2次元構造が再現された。さらに, 中間顔は作成元のプロトタイプ表情間に順序どおりに配列された (Figure 3)。この結果から人間は他人の表情を正確かつセンシティブに安定して認知していることがうかがえる。

Takehara & Suzuki (1997) の研究結果を応用して, 我々は表情認知構造のさらに詳細な部分を明らかにした。具体的には, 同様にモーフィングのテクニックを利用して75%, 50%, 25%の感情表出を表わしている「喜び - 悲しみ - 嫌悪 - 怒り - 恐怖 - 驚き - 喜び」のプロトタイプ表情から構成されるそれぞれの円環について, やはり隣り合う各プロトタイプ表情間に3つの中間顔を作成した (Takehara & Suzuki, 2001)。各条件において被験者に表情画像を評定させ, MDSを用いて分析した結果, やはり Russell & Bullock (1985, 1986) と同様に円環と2次元の表情認知構造が得ら

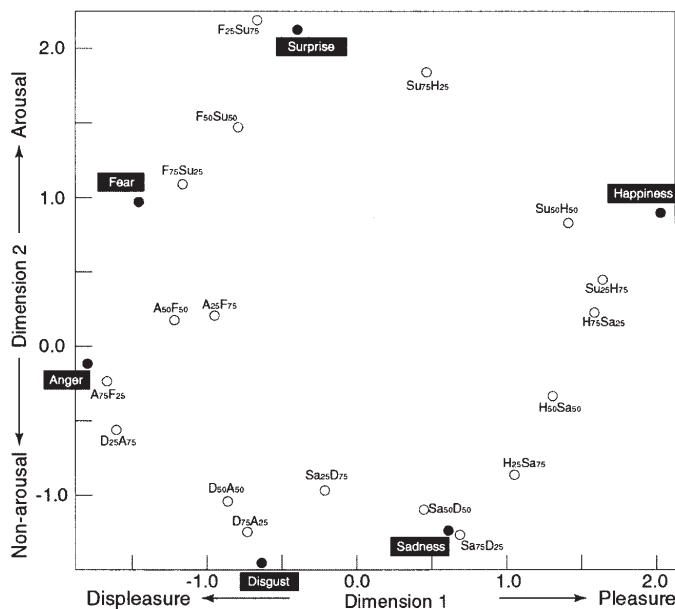


Figure 4. 50%のプロトタイプ表情と, それから作成されたモーフィング表情の2次元平面へのプロット。 はプロトタイプ表情, はモーフィング表情をそれぞれ表わしている。モーフィングによって作成された表情のほとんどが各プロトタイプ表情の間に位置していることがわかる。Takehara & Suzuki (2001) を改変。

れた (Figure 4)。Takehara & Suzuki (1997)が見出したように、中間顔は作成元のプロトタイプ表情間に順序どおりに配列され、人間の表情認知が正確で安定していることが示唆された。

これらの研究結果から人間が他人の表情を認知する場合、その根底に「快 - 不快」と「覚醒度」から構成される2次元の表情認知構造が存在することがほぼ確実になった。しかしながら、無視され続けてきた潜在的な問題も存在する。RussellらやTakeharaらは表情認知構造は“円環”であると論じているがそれは近似の円環でしかなく、詳細を見ると微妙にいびつな揺らぎが認められ、厳密には線形性が保たれていない。様々な形でその矛盾性について議論されてきたが、ほとんどはその内的揺らぎを反応誤差や実験誤差として切り捨ててきた。つまり、特定の比率でモーフィング処理された表情画像が厳密に各プロトタイプ表情間の中央に位置しないのは、被験者による反応誤差であると考えられ、特にそれを問題視してこなかった。そこで我々は各表情画像の位置関係から表情認知構造上でのプロトタイプ表情から別のプロトタイプ表情への変位を線形的な変位ではなく、微妙な揺らぎを持つ非線形の変位であることに着目した。つまりこれまでは誤差として扱ってこなかった揺らぎに何らかの規則性を求めたのである。そのために従来心理学領域では決して扱われてこなかった物理学の現象であるフラクタル構造の概念を取り入れることにした。フラクタルの概念を用いることで表情認知構造の非線形性や複雑さを捉えることができると考えられるし、人間が元来所有している認知機能の複雑さの解明に有効であると考えられる。

II. フラクタルとは

フラクタルの概念はMandelbrot (1967)が

「ブリテン島の外周の長さはいくらか」というタイトルの論文で初めて発表された。フラクタルとは任意の一部分をいくら拡大しても元と同じ構造が延々と出現して単純な構造が出現しない対象物のことを指し、この性質を自己相似性とよぶ。自己相似の性質を持つ対象物は数学界で以前から発見されていたが、病気関数とよばれるだけで学問的な関心は少なかった (Figure 5)。しかし、Mandelbrotが定義したこのフラクタル理論によって、それまでは十把一絡げに「複雑」と呼ばれていた図形や現象が細分化・定量化できるようになったのである。

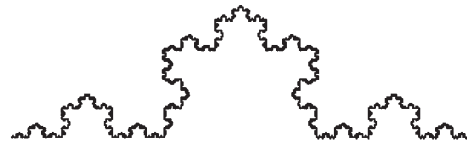


Figure 5. コッホ曲線。この図形は自己相似性を持つ代表的図形である。一部を拡大しても、全体と同じ図形が出現する。

フラクタルを扱うとき、次元の概念が重要になる。我々は日常生活で“次元”という用語を「・・・の話は次元が違う」や、「あの経験は異次元のものだった」という具合に使用する。しかしながら、科学での次元という用語は空間の広がりという観点から使用される。つまり、空間内において任意の点を特定するのに必要な独立変数の数、あるいは空間の自由度 (軸) の数そのまま次元として受け入れられている。興味深いことに、次元を空間の自由度という定義で話を進めると矛盾する図形が存在することが知られている。イタリアの数学者、ペアノが考案したペアノ曲線がそれである (Figure 6)。この曲線は \times の周囲をなぞることによる極限として定義され、自己相似性を有している。一筆書きで描画することができるという観点から考えれば1次元図形であるが、その極限が完全に平面を被覆するという観点で考えれば2次元図形となり、一意に次元が同定できなくなる。こ

の矛盾を解決するために次元の拡張が行なわれた。

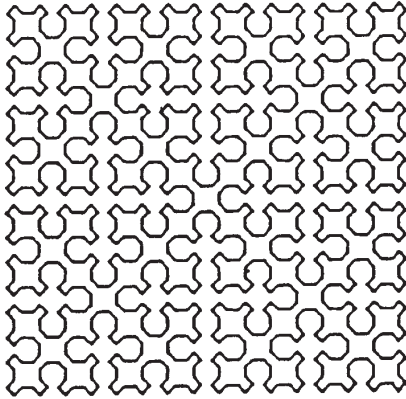


Figure 6. ペアノ曲線。この図形も自己相似性を有しており、1次元と2次元の両義に取られるが、実際は2次元の図形である。

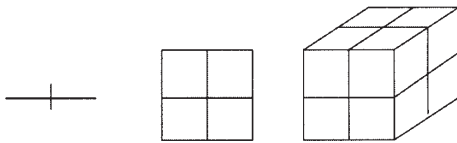


Figure 7. 1次元、2次元、3次元の代表的図形である線分、正方形、立方体の各辺を2等分したところ。それぞれ元と同じ図形が2個、4個、8個現れる。

まず1次元、2次元、3次元の代表図形として線分、正方形、立方体を考える。次にこれらの図形の各辺を2等分する (Figure 7)。そうすると元と同じ図形がそれぞれ2個、4個、8個出来上がる。同様に2等分するかわりに各図形の各辺を3等分すれば、元と同じ図形はそれぞれ3個、9個、27個出来上がる。この結果に共通することは、出来上がった元と同じ図形の数はいずれも各図形が持っている次元の数だけ等分した2あるいは3という数字を掛け合わせた数だということである。例えば、図形の各辺を2等分する場合は、

線 分： $2 = 2^1 = 2$
 正方形： $2 \times 2 = 2^2 = 4$
 立方体： $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$

と記述される。同様に各辺を3等分する場合は、

線 分： $3 = 3^1 = 3$
 正方形： $3 \times 3 = 3^2 = 9$
 立方体： $3 \times 3 \times 3 = 3^3 = 27$

となる。我々には想像しがたいが、4次元の図形の各辺を2等分することができれば元と同じ図形が16個出来上がるはずであり、さらにより高次元な図形に対してもこの法則が適用できうる。よって、これらから次の定義が可能となる。「今、ある図形が与えられたと考える。その図形の各辺を2等分したところ、元と相似な物体が 2^D 個得られたとする。このとき、この物体の次元を D と定義する」。この定義に従えば、先述のペアノ曲線は図形の差し渡しを2等分すると元と同じ図形が4個出現するため、2次元であるという結論が下され、次元の矛盾が解消する。

この新しい次元の定義にはもう一つの革新的な点が存在する。それはこれまで経験的な次元は整数次元が常識であったにもかかわらず、新しい次元の定義によると、整数次元以外の次元が出現するということである。例えば、ある図形の1辺を2等分したところ、元の図形と相似な図形が3個出現したとする。このとき、この図形の次元である D を先ほどの定義に基づいて算出すると、

$$3 = 2^D$$

という式が成立し、その次元は

$$D = \log_2 3 \approx 1.58$$

であることがわかる。このような図形が本当に存在するのかという疑問が残るが、シェルピンスキーのギャスケットとよばれる図形がそれにあたる (Figure 8)。

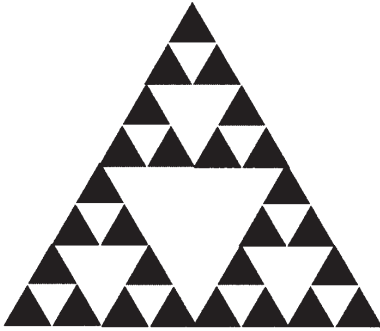


Figure 8. シェルピンスキーのギヤスケット。この図形も自己相似性を有している。

さて、ここで先述した定義を以下のように一般化しておくことにする。「全体を $1/a$ に縮小した相似図形 b 個によってその図形全体が構成されているとき、その図形の次元 D は次の式で定義される」:

$$D = \log_a b$$

この一般化された定義が完了すると、様々な図形に適用可能になる。例えばコッホ曲線 (Figure 5) は、全体を $1/3$ に縮小した4個の相似形からできあがっているため、

$$D = \log_3 4 \approx 1.26$$

と算出され、1.26次元という半端な次元になる。我々は通常の日常生活において整数次元しか存在しないと思いがちであるが、このように非整数次元、つまり小数次元が実際に存在するという事に留意しなければならない。通常の整数次元を上記のような小数次元にまで拡張した次元をフラクタル次元とよぶ (Mandelbrot, 1982)。

否定的な論理になるかもしれないが、コッホ曲線やシェルピンスキーのギヤスケットのような完全にフラクタルな図形は実生活にはほとんど存在しない。しかしながら、フラクタル次元を持つ対象物は実は我々の日常生活に多く存在する。なぜなら、拡大して自己相

似性が出現するならば、統計的にフラクタルであると結論してもよいからである。この“統計的にフラクタル”という原則が許されているため、フラクタルの概念自身が大きな適用範囲を持つことになる。つまり、自然界における様々な物体や形で、大局を拡大して見ても元と同じような構造が出現し続けるものは全て統計的にフラクタル、あるいは単にフラクタルとよんでも問題ないことになる。ここで、先ほど一般化した定義をさらに拡張すると、「全体を分割し、そのそれぞれの差し渡し全体が $1/a$ になるようにし、そのそれぞれの部分が全体と統計的に自己相似であり、それぞれの個数が b 個であるとき、そのフラクタル次元は次の式で定義できる」:

$$D = \log_a b$$

つまり、 a と b のデータの対数をプロットしたとき、その分布が直線的になればフラクタルであるということが見出される。

日常生活におけるフラクタルの例を示すと、海岸線の長さは約1.1から1.4程度のフラクタル次元を持つことが知られており (Mandelbrot, 1982)、山の稜線や雲の外周と面積の関係、河川の分枝流や木々の枝分かれ具合もフラクタル性を持っている (Figure 9)。生物に関してはショウジョウバエの行動パターンが時間に関してフラクタルであることが報告されており (Shimada, Minesaki, & Hara, 1995)、クジラの潜水持続時間もフラクタル性を有することが証明されている (West, 1990)。さらに人間に関する側面として、フラクタル性の医学・生理学的知見がいくらか報告されている。例えば、脳波はフラクタル次元に支配されており (Babloyantz, 1989; Shinagawa, Kawano, Matsuda, Seno, & Koito, 1991)、脈拍のスペクトルもフラクタル次元に従うことも証明されている (Yamamoto & Hughson, 1993)。また、網膜上をくまなく蛇行している毛細血

管のパターンは約1.31次元のフラクタル次元を持つことが分かっており（松尾, 1992），スライスした気道の空間分布が約1.74次元のフラクタル次元を持つことも分かっている（Weibel, 1991; 北岡, 1989, 1992）。大脳の溝のパターンについてもそのフラクタル性が見出されており，3次元としては2.73~2.79のフラクタル次元を持ち（Mandelbrot, 1982），2次元の表面パターンとして捉えると約1.7次元のフラクタル次元を持つことが指摘されている（竹田, 1990, 1991）。

Ⅲ. 表情認知とフラクタル

．において人間の表情認知構造にはフラクタル性が内在している可能性を指摘したが，我々は実際に表情認知実験を通してその事実を実証した（Takehara, Ochiai, & Suzuki, 2002）。具体的には，「喜び - 穏やか - 眠気 - 悲しみ - 怒り - 恐怖 - 驚き - 興奮 - 喜び」という8つのプロトタイプ表情で構成される円環を想定し，隣り合うプロトタイプ表情間を4種類の異なる比率でモーフィング処理して中間表情を作成した。この4種類の条件について被験

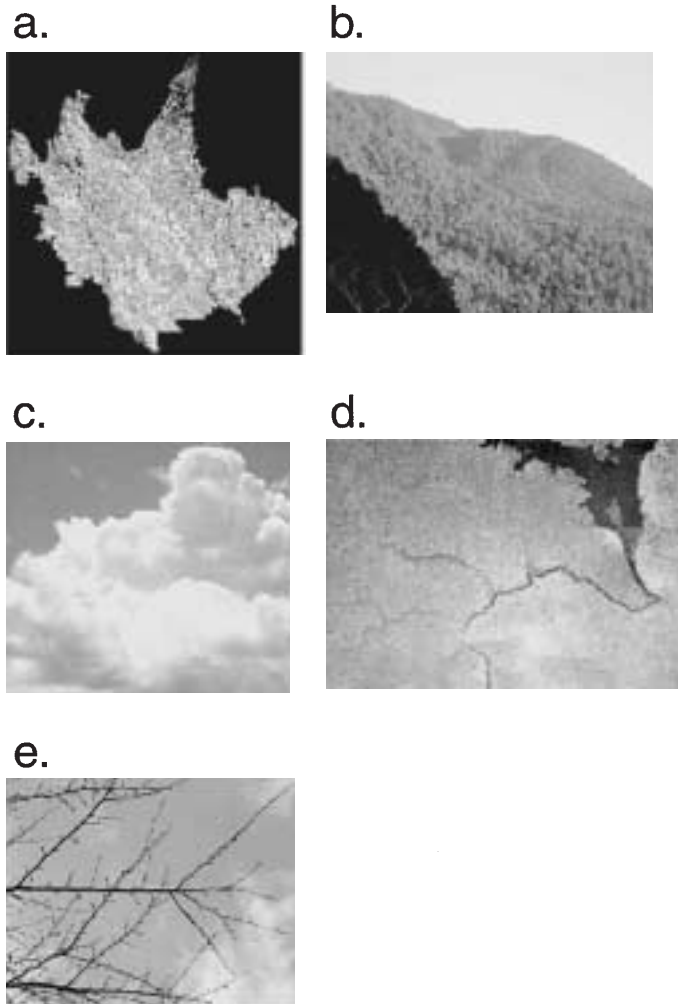


Figure 9. フラクタル構造を持つ対象物の例。a. 鳥の外周。フラクタル次元は約1.26次元。b. 山の稜線。奥行情報を加えたフラクタル次元は約2.35次元。c. 雲の面積と外周の関係。フラクタル次元は約1.35次元。d. ナイル川の分枝流。フラクタル次元は約1.4次元。e. 木々の枝分かれ。フラクタル次元は約1.50次元。

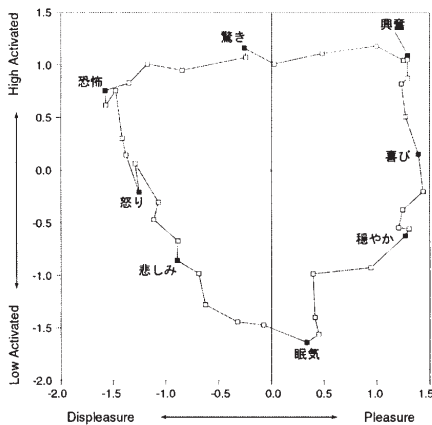


Figure 10. MDSによる刺激表情画像の2次元空間上への布置。はプロトタイプ表情画像、はモーフィング表情画像を表わしている。その布置はおおよそ円環であることが確認できる。Takehara et al. (2002) から転載。

者に表情画像を評定させ、その結果をMDSで分析したところ、これまでの研究と同じく、「快 - 不快」・「覚醒度」を軸とする2次元構造が出現し、「円環構造」が形成された (Figure 10)。そこで円環構造の円周の距離を算出して対数プロットを試みたところ、フラクタル次元は約1.18であることが判明した (Figure 11)。この事実からまず導き出される予測は、感情空間はこれまで考えられていたような均質性を持っていないということと、円環上の揺らぎは被験者による誤差やランダムさのためではないということである。もし2次元で広がる感情空間が全体的に均質であれば、フラクタル次元は決して導出されなかったであろうし、揺らぎが誤差やランダムさの結果生じているのであってもフラクタル次元は求まらなかったであろう。

なぜ円環の外周に揺らぎが存在するのであろうか。音響工学の分野では部屋の壁にフラクタル性を持つ凹凸を配置することによって音の共鳴を防ぎ、外部への漏れを低減するという方法が用いられたり、化学の分野では金を蒸着させるために金属面にフラクタル構造を持たせてその蒸着率を増加させるという方法がとられたりしている。従って、我々の実

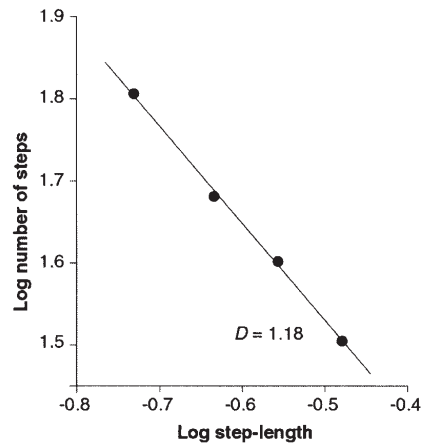


Figure 11. ステップ長の対数とステップ数の対数の関係。プロットされたデータに対する直線回帰方程式の傾きの絶対値がフラクタル次元を表す。この場合、フラクタル次元は約1.18次元。Takehara et al. (2002) から転載。

験結果から考えられる一つの理由として、表情認知構造にフラクタル性を持たせることによって複雑かつ曖昧な表情に対する反応効率を高めている可能性が指摘できるだろう。例えば、「喜び - 興奮」の連続体を考えてみる。この2つの表情は2次元の感情空間上では類似した領域を占め、この2つの表情から生成されたモーフィング表情は少なくとも「喜び」と「興奮」の2つ以上の感情成分を持っていると考えられる。「喜び - 興奮」の連続体の軌跡が線形ではなく、凹凸のあるフラクタル構造を示していることは2つ以上の感情成分を持つという非常に複雑で曖昧な表情に対して、1次元の線形で認知するよりはその形状に凹凸を持たせて1.18次元という非線形で認知した方が反応効率が高まり、より認知しやすくなるからであると考えられる。

上述の実験結果を受けて、より認知的処理の複雑な表情を提示すると、表情認知構造が相関的に複雑になり、同時にフラクタル次元も高くなることが予測される。そこで我々はさらに認知的処理が複雑であるといわれている倒立顔 (例えば, Diamond & Carey, 1986; Ellis, 1975; Farah, Tanaka, & Drain, 1995; Goldstein, 1965; Goldstein & Chance, 1981;

Hochberg & Galper, 1967; Valentine, 1988, 1991; Yin, 1969) を用いて類似の実験を行なったところ、予測どおり表情認知構造はより複雑な形状を示し、それに伴うフラクタル次元も 1.52 次元に増加した。つまり、より複雑で曖昧な表情に反応するために表情認知構造のフラクタル次元を高め、反応効率を増加させていることが実証されたのである。

IV. 展望

さて、前節までは過去に行なわれてきた表情認知研究、および我々がモーフィングを使用して実験した結果、さらにフラクタルの概念と表情認知構造のフラクタル性の実証研究について論じてきた。最終節として将来の人間のフラクタル性に関する研究の展望を論じる。

これまでの表情認知研究は、顔写真や表情画像刺激を提示してそれに対する主観的評定データを扱ってきた。では、人間の表情認知は脳内でどのように行なわれるのであろうか。宮下・下條 (1995) によると、表情認知などの脳の高次機能についての研究が盛んに進められており、様々な最新技術が導入されている。具体的な研究法としては、脳損傷患者に見られる病状からその部分が持つ機能を解明する方法、ある作業を行なったときに脳のどの部分が活性化するかを脳の外部から調べる方法、そして実験動物を使用して単一ニューロンの働きを直接調べる方法がある (落合・竹原, 印刷中)。

脳内の活動を外部から測定する方法として、放射性物質を体内に注入して変化を検出する PET (Positron Emission Tomography)、血流変化を核磁気共鳴方法で探る fMRI、磁気的脳波 (MEG) などがあるが、最近は特に fMRI を用いた研究がさかんに行なわれている (例えば, Morris, DeGelder, Weiskrantz, & Dolan, 2001; Pierce, Müller, Ambrose, Allen, &

Courchesne, 2001; Whalen, Rauch, Etcoff, McInerney, Lee, & Jenike, 1998; Whalen, Shin, McInerney, Fischer, Wright, & Rauch, 2001)。しかしながら、PET や fMRI などの研究アプローチでは空間分解能が最小でも約 1 mm とまだ大きく、単一ニューロンの活動を調べるには改良が必要である。

脳内の単一ニューロン活動を調査するには目的のニューロンに直接電極を刺してその活動を測定する方法が使用されるが、当然ながら人間には適用できず、サルなどの実験動物を用いて研究が行なわれている。それらの実験を通じて脳内の様々な部位におけるニューロン活動を測定する研究が行なわれているが、脳の特定の場所が特定の機能を担っていることが徐々に明らかになってきている。表情認知処理の初期段階と位置付けられる視覚処理における脳の働きを見ると、網膜からの映像はまず脳の一次視覚野 (V1) に達する。V1 ではある特定の方向を持った線分のみに反応するニューロンが見つかる (柴崎・米倉, 1994)。そして、様々な方向のニューロンが集まり、左目あるいは右目から入力に優位に反応するコラム (ニューロンの集団) を形成する (Blasdel, 1992; Hubel & Wiesel, 1977)。この右目左目優位の分布を用いて、Box Counting 法を用いてフラクタル次元を求めた結果、1.75次元であることが分かった (落合・竹原, 準備中)。さらに、V1の右目左目優位コラムを詳細に見ると、方向性が同じニューロンが集まってコラムを形成している。同じく Box Counting 法でフラクタル次元を求めると、同じく 1.75次元であった (落合・竹原, 準備中)。実際、顔の認知においてこのようなコラムが形成されていることから (Wang, Tanaka, & Tanifuji, 1996)、表情認知時に活性化するコラムの分布がフラクタル構造を形成している可能性が高い。また、このようなニューロン活動のフラクタル性を

考えれば、脳内の様々な部位におけるニューロン活動の分布がフラクタル構造を持っている可能性も示唆される。前節でも論じたが、フラクタル性を有するという事は、その後、反応効率の上昇が存在する。つまり、脳内でニューロン活動の分布がフラクタル性を有しているということは、脳内の情報処理における効率化をはかっているとも考えられる。

以上のように、我々は従来の表情認知研究を進展させてフラクタルの概念を取り入れ、その重要性を強調した。フラクタルやカオスといった複雑系の研究はまだ発展途上で、これからますます注目される分野であることは間違いないだろう。また、心理学の研究領域においても複雑系の概念がさらに重要視されるであろう。

[引用文献]

- Abelson, R.P., & Sermat, V. (1962). Multidimensional scaling of facial expressions. *Journal of Experimental Psychology*, 63, 546-554.
- Almagor, M., & Ben-Porath, Y. S. (1989). The two-factor model of self-reported mood: A cross-cultural replication. *Journal of Personality Assessment*, 53, 10-21.
- Babloyantz, A. (1989). Some remarks on nonlinear data analysis of physiological time series. In N. B. Abraham, A. L. Albano, A. Passamante, & P. E. Rapp (Eds.), *Measures of complexity and chaos*. NATO ARW Series: Plenum Press.
- Bimler, D., & Kirkland, J. (1997). Multidimensional scaling of hierarchical sorting data applied to facial expressions. *Scandinavian Journal of Psychology*, 38, 349-357.
- Blasdel, D. C. (1992). Differential imaging of ocular dominance and orientation selectivity in monkey striate cortex. *Journal of Neuroscience*, 12, 3115-3138.
- Cliff, N., & Young, F. W. (1968). On the relation between unidimensional judgments and multidimensional scaling. *Organizational Behavior and Human Performance*, 3, 269-285.
- Darwin, C. (1872). *Facial expression of emotion in man and animals*. London: John Murray.
- Diamond, R., & Carey, S. (1986). Why faces are and are not special: An effect of expertise. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 107-117.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1975). *Unmasking the face*. Englewood, New Jersey: Prentice Hall.
- Ellis, H. D. (1975). Recognizing faces. *British Journal of Psychology*, 66, 409-426.
- Engen, T., Levy, N., & Schlosberg, H. (1958). The dimensional analysis of a new series of facial expressions. *Journal of Experimental Psychology*, 55, 454-458.
- Farah, M. J., Tanaka, J. W., & Drain, H. M. (1995). What causes the inversion effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 628-634.
- Feldman, L. A. (1995a). Variations in the circumplex structure of mood. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 21, 806-817.
- Feldman, L. A. (1995b). Valence focus and arousal focus: Individual differences in the structure of affective experience. *Journal of Personality and Social Psychology*, 69, 153-166.
- Feldman Barrett, L. (1998). Discrete emotions or dimensions? The role of valence focus and arousal focus. *Cognition and Emotion*, 12, 579-599.
- Feldman Barrett, L., & Fossum, T. (2001). Mental representations of affect knowledge. *Cognition and Emotion*, 15, 333-363.
- Feldman Barrett, L., & Russell, J. A. (1998). Independence and bipolarity in the structure of current affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74, 967-984.
- Feleky, A. M. (1914). The expression of the emotions. *Psychological Review*, 21, 33-41.
- Goldstein, A. G. (1965). Learning of inverted and

- normally oriented faces in children and adults. *Psychonomic Science*, 3, 447-448.
- Goldstein, A. G., & Chance, J. E. (1981). Laboratory studies of face recognition. In G. Davies, H. Ellis & J. Shepherd (Eds.), *Perceiving and Remembering Faces*. London: Academic Press.
- Hochberg, J., & Galper, R. E. (1967). Recognition of faces. I. An exploratory study. *Psychonomic Science*, 9, 619-620.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. L. (1977). The Ferrier Lecture: Functional architecture of macaque monkey visual cortex. *Proceedings of Royal Society of London, B198*, 1-59.
- 北岡裕子 (1989). 末梢気道の空間分布 - 伸展固定肺連続薄切標本から作成した立体再構成画像によるフラクタル次元の算出 - 形の科学会報, 11, 55-60.
- 北岡裕子 (1992). 気道分岐のフラクタル 松下貢 (編) 医学・生物学におけるフラクタル (Pp.66-81) 朝倉書店.
- Knez, I., & Hygge, S. (2001). The circumplex structure of affect: A Swedish version. *Scandinavian Journal of Psychology*, 42, 389-398.
- Landis, C. (1924). Studies of emotional reactions: I. A preliminary study of facial expression. *Journal of Experimental Psychology*, 7, 325-341.
- Langfeld, H. S. (1918). Judgments of facial expression and suggestion. *Psychological Review*, 25, 488-494.
- Levy, N., & Schlosberg, H. (1960). Woodworth scale values of the Lightfoot pictures of facial expression. *Journal of Experimental Psychology*, 60, 121-125.
- Mandelbrot, B. B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156, 636-638.
- Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal geometry of nature*. New York: Freeman.
- 松尾崇 (1992). 血管の分布とフラクタル 松下貢 (編) 医学・生物学におけるフラクタル (Pp. 53-65) 朝倉書店.
- Meyer, G. J., & Shack, J. R. (1989). Structural convergence of mood and personality: Evidence for old and new directions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57, 691-706.
- 宮下保司・下條信輔 (1995). 脳から心へ 岩波書店.
- Mordkoff, A. M. (1967). A factor analytic study of the judgment of emotion from facial expression. *Journal of Experimental Research in Personality*, 2, 80-85.
- Morris, J. S., DeGelder, B., Weiskrantz, L., & Dolan, R. J. (2001). Differential extrageniculostriate and amygdala responses to presentation of emotional faces in a cortically blind field. *Brain*, 124, 1241-1252.
- 落合史生・竹原卓真 (印刷中). 認知におけるフラクタル性の起源 - 同じ機能を持つニューロンはフラクタル的にまとまって分布するか - 帝塚山大学人文科学部紀要.
- 落合史生・竹原卓真 (準備中). 同じ機能を持つニューロンはフラクタル構造をもって分布するか.
- Osgood, C. E. (1955). Fidelity and reliability. In H. Quasler (Ed.). *Information theory in psychology: Problems and methods* (Pp. 374-386). Giencoe, Illinois: Free Press.
- Osgood, C. E. (1966). Dimensionality of the semantic space for communication via facial expressions. *Scandinavian Journal of Psychology*, 7, 1-30.
- Pierce, K., Müller, R. A., Ambrose, J., Allen, G., & Courchesne, E. (2001). Face processing occurs outside the fusiform ' face area ' in autism: Evidence from functional MRI. *Brain*, 124, 2059-2073.
- Reisenzein, R. (1994). Pleasure-activation theory and the intensity of emotions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 67, 525-539.
- Ruckmick, C. A. (1921). A preliminary study of the emotions. *Psychological Monographs*, 30, 30-35.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect.

- Journal of Personality and Social Psychology*, 39, 1161-1178.
- Russell, J. A., & Bullock, M. (1985). Multidimensional scaling of emotional facial expressions: Similarity from preschoolers to adults. *Journal of Personality and Social Psychology*, 48, 1290-1298.
- Russell, J. A., & Bullock, M. (1986). On the dimensions preschoolers use to interpret facial expressions of emotion. *Developmental Psychology*, 22, 97-102.
- Russell, J. A., Lewicka, M., & Niit, T. (1989). A cross-cultural study of a circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57, 848-856.
- Schlosberg, H. (1941). A scale for the judgment of facial expressions. *Journal of Experimental Psychology*, 29, 497-510.
- Shepard, R. N. (1962). The analysis of proximities: Multidimensional scaling with an unknown distance function. II. *Psychometrika*, 27, 219-246.
- 柴崎浩・米倉義晴 (1994). 脳のイメージング 共立出版.
- Shimada, I., Minesaki, Y., & Hara, H. (1995). Temporal fractal in the feeding behavior of *Drosophila melanogaster*. *Journal of Ethology*, 13, 153-158.
- Shinagawa, Y., Kawano, K., Matsuda, H., Seno, H., & Koito, H. (1991). Fractal dimensionality of brain wave. *Forma*, 6, 205-214.
- 竹田俊明 (1990). フラクタル次元評価法の再検討と大脳溝パターンへの応用 第18回形の科学シンポジウム論文集, 19-24.
- 竹田俊明 (1991). 時系列事象のフラクタル性 - MEPP 生起の場合 - 第68回日本生理学会
- Takehara, T., & Suzuki, N. (1997). Morphed images of basic emotional expressions: Ratings on Russell's bipolar field. *Perceptual and Motor Skills*, 85, 1003-1010.
- Takehara, T., & Suzuki, N. (2001). Robustness of the two-dimensional structure of recognition of facial expression: Evidence under different intensities of emotionality. *Perceptual and Motor Skills*, 93, 739-753.
- Takehara, T., Ochiai, F., & Suzuki, N. (2002). Fractals in emotional facial expression recognition. *Fractals*, 10, 47-52.
- Triandis, H. C., & Lambert, W. W. (1958). A restatement and test of Schlosberg's theory of emotion with two kinds of subjects from Greece. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 56, 321-328.
- Valentine, T. (1988). Upside-down faces: A review of the effect of inversion upon face recognition. *British Journal of Psychology*, 79, 471-491.
- Valentine, T. (1991). A unified account of the effects of distinctiveness, inversion, and race in face recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 43A, 161-204.
- Wang, G., Tanaka, K., & Tanifuji, M. (1996). Optical imaging of functional organization in the monkey inferotemporal cortex. *Science*, 272, 1665-1668.
- Weibel, E. R. (1991). Fractal geometry: A design principle for living organisms. *American Journal of Physiology*, 261, 361-369.
- West, B. J. (1990). *Fractal physiology and chaos in medicine*. Singapore: World Scientific.
- Whalen, P. J., Rauch, S. L., Etcoff, N. L., McInerney, S. C., Lee, M. B., & Jenike, M. A. (1998). Masked presentations of emotional facial expressions modulate amygdala activity without explicit knowledge. *Journal of Neuroscience*, 18, 411-418.
- Whalen, P. J., Shin, L. M., McInerney, S. C., Fischer, H., Wright, C. I., & Rauch, S. L. (2001). A functional MRI study of human amygdala responses to facial expressions of fear versus anger. *Emotion*, 1, 70-83.
- Woodworth, R. S. (1938). *Experimental psychology*. New York: Henry Holt.
- Yamamoto, Y., & Hughson, R. L. (1993). Extracting fractal components from time series. *Physica*, D68,

250-264.

Yin, R. K. (1969). Looking at upside-down faces.

Journal of Experimental Psychology, 81, 141-145.

[Abstract]

Structure of Facial Expression Recognition and Fractality

Takuma TAKEHARA

After Charles Darwin, there have been numerous studies on facial expression recognition, and even now, the experimental paradigm is being improved. This paper briefly reviews the history of research on facial expression recognition based on the dimensional view from the beginning of the 20th century, and then shows my recent experimental data about the structure of facial expression recognition. This paper also included data which is based on the concept of fractals after introducing the characteristics of fractal structure which is a part of a complex system such as chaos. Finally, future studies on facial expression recognition and its application to brain studies are discussed.