

視覚と錯視の数学的新理論の研究

新井 仁之

脳の解明は人類の夢であるといえよう。その脳は視知覚のためかなりの部分を割いている。視知覚の解明もまた人々の積年の願いなのである。実際、視知覚の研究は、いにしえより脈々と行われてきた。たとえば古代ギリシャでは哲学者たちが視知覚について真剣な議論を行っていた。また近世ではデカルトによる解剖学に立脚した視覚の研究、バークリによる視覚と認識論の融合的な研究などがあった。近代でもヘルムホルツ、マッハなどにより視知覚の科学的あるいは認識論的研究が行われた。そして 20 世紀になると、脳科学の実験技術が進歩し、それと相まって視覚の科学的研究が本格的に行われるようになった。このように古くから研究されている視知覚ではあるが、未だに解明されていないことがいろいろとある。たとえば近年、神経細胞に微小電極を挿入して神経活動を観察する方法や PET, fMRI などにより、視覚のどのような情報処理が脳のどの領野で行われているかが詳細にわかるようになった。しかし、視覚に関する情報処理がどのような計算によって行われているのかということについては、現在でも未解明なことが多い。この部分を私は数学とコンピュータを用いる方法を新たに開発して研究している。その際、鍵として着目しているのが錯視、すなわち視覚系が引き起こす錯覚である。本稿ではわれわれのこれまでの研究成果の概略を述べたい。

■ 視覚の非線形モデルと錯視発生 of 計算機シミュレーション

われわれの研究の基本的な考え方は、次のようなものである。まず視覚に関する神経科学や心理物理学に基づいて、視覚の情報処理の数理モデルを構成する。ただし数理モデルはあくまでも現実の視覚系のモデルであるから、それが視覚系のモデルとして適切であるかどうかを調べなければならない。そのためにわれわれは錯視を用いている。なぜならば、人の視覚系は錯視を生み出すから、もし数理モデルが適切なものであれば、そのモデルを実装した計算機もやはり錯視を発生させるはずであると考えたからである。逆に錯視が計算機上で発生するようなアルゴリズムを見出すことにより、脳内での視覚情報処理のメカニズムを推測することができるとも考えている。われわれがこれまで研究してきたのは、主に大脳皮質で視覚の情報処理が最初に行われる V1 野の数理モデルである。V1 野では単純細胞により局所的な情報処理が行われ、さらにニューロンの水平結合により大域的・非線形的な情報処理が行われている。われわれは前者については最大重複離散双直交ウェーブレットを用い、後者については独自の数理モデル化をして、V1 野の数理モデルを構築した。そしてそれを用いて錯視発生 of シミュレーションを行った。現在は後述の視覚の数理モデルのために独自に開発したウェーブレット・フレーム、フレームレットを用いて研究を進めている。

■ 錯視の数学的分析

上述のシミュレーション結果に基づいて、錯視発生 of メカニズムの数学的な解析を行っ

た。錯視の研究は主に知覚心理学の分野で研究されている。われわれの方法は、従来のものとは異なる新しいものであり、これによりある種の錯視発生のメカニズムが数学的に、より明確にわかるようになったと考えている。たとえばヘルマン格子錯視という錯視があるが、1960年代にこれが網膜などの同心円形受容野による情報処理で発生するという説が Baumgartner により唱えられ、それが定説となっていた。しかし最近、ヘルマン格子のさまざまなバリエーションにおける錯視量を比較することにより、ヘルマン格子錯視の発生には網膜以降、特に大脳皮質での情報処理が関連しているのではないかと、ということが議論されるようになった。このことについて、われわれは具体的に V1 野のどのような非線形情報処理がヘルマン格子錯視ならびにそのバリエーションを発生させるかを、実際に計算機にこれらの錯視を発生させることにより明確にすることができた。また色の対比錯視に関する Kirschmann の法則に関する論争があったが、それに対する数学的な答えも与えた。

■ 視覚と錯視

自然画像をわれわれの数理モデルにより処理すると、不必要に画像を損ねることなく、画像の中の鮮鋭化すると見やすくなるような部分が鮮鋭化される。錯視は視覚系の欠陥によるという説もあるが、この結果からわれわれは、じつは錯視がものをよく見ようとする視覚の機能の副産物であることを数学的に示した。

■ 視覚の数理モデルに適した新しいウェーブレット・フレームの構成

われわれは視覚の数理モデルに適した新しい離散ウェーブレット・フレームを構成した。このウェーブレット・フレームは方位選択性をもち、しかも視覚の神経科学的な性質ももつようなものである。また現在行っている研究であるが、視覚の数理モデルに適した新しいフレームレットも構成した。フレームレットはウェーブレットをさらに進化させたような枠組みである。元々は視覚・錯視の研究とは関係なく、2003年頃から Daubechies らによりその数学的な研究が行われた。われわれは視覚の数理モデルにはウェーブレットよりもフレームレットの方が適していると考え、視覚科学の観点から全く新しいタイプのフレームレットを構成した。その視覚科学や画像工学への応用は現在研究中である。

■ フラクタル螺旋錯視と高次視覚情報処理

フラクタル図形を用いてわれわれは渦巻き錯視の一種を作成した。この錯視は心理学者の北岡明佳氏により「フラクタル螺旋錯視」と命名された。フラクタル螺旋錯視は数理科学研究科棟の廊下(117講義室付近)にパネル展示されているのでご覧いただきたい。われわれの構成した新しいフレームレットを利用してこのフラクタル螺旋錯視の数学的な分析を行なっている。これは高次の視覚情報処理に深く関連していると考えている。

先に述べたように視覚と錯視には、まだわからないことが多い。しかもそれは視知覚のメカニズムを解明することにつながっている。視覚は21世紀における科学の最も重要な研究テーマの一つといえるだろう。言うまでもないことであるが、このテーマは数学のみを使って解明できるものではない。神経科学的な実験や心理物理学的な実験は必要不可欠である。このような実験との連携を深め、今後もさらに視覚科学における数学的方法を確立すべく研究を進めていきたい。