

研 究 報 告 書

「ウェーブレットフレームを用いた視覚の数理モデル」

研究期間：平成 19 年 10 月～平成 23 年 3 月

研究者：新井 仁之

1. 研究のねらい

数学はこれまで外界の現象の研究と協働して発展してきた。たとえば物理現象、化学現象、生物現象、社会現象などである。しかし 21 世紀になって、科学の最後のフロンティアの一つである脳の研究が大きく進展してきた今日、人の知覚など内的な現象の数学的な研究も必要とされつつある。しかしその研究はまだそれほど多くはない。私の研究対象はその知覚の一つである視知覚、ならびに視知覚が引き起こす錯覚、すなわち錯視である。視知覚は知覚の一つだが、脳の多くの部分が視知覚に参与している。「さきがけ」では、特にこれを研究するための数学的方法とその実際的応用を研究した。

本研究の基本的な研究対象は、脳が行う視知覚に関する情報処理の数理モデルである。視覚に関する数理モデル研究にはいくつかのアプローチが知られている。たとえば視覚に関するニューロンの活動をできるだけ忠実に再現するような神経科学の研究を目的としたモデル、脳を個々のニューロンの繋がりから組み立てようとするニューラルネットワークのモデルなどである。これに対して本研究でのモデルは、ややマクロな立場に立っていて、ニューロンの束が形成する受容野を基本的な単位として、視覚がどのような情報処理の計算を行っているのかをモデル化することを目的としている。ところで、これまで個々の視覚の現象、あるいは特定の錯視を説明するモデルは数多く作られてきたが、本研究で作るのは、単に説明するだけでなく、視覚・錯視の現象をある程度統一的にシミュレーションでき、さらに詳細な数学的解析を可能にするような‘数理モデル’である。

2. 研究成果

まず本研究の基本的な考え方を述べ、次に個々の研究成果について述べる。

2-1. 研究の基本的な考え方 - 数学と視覚、錯視の関連について -

神経科学者ダマシオの言葉を借りれば、脳は「多数のシステムからなる超システムである」(ダマシオ『デカルトの誤り』(ちくま学芸文庫)より)。したがって視覚系も一つのシステムとしてとらえるのではなく、超システムであると考えるのが妥当である。視覚の数理モデル研究の究極の目標はこの超システムを数学的に理解することである。しかし現時点では、超システムはもちろんのこと、個々のシステムの数理モデルですら、現在進行形かあるいは手つかずのものが多い。

さて、個々のシステムの研究を進め、数理モデルの候補を作ることができたとする。次に問題となるのは、それが実際の視覚系のシステムのモデルとして適切かどうかの検証である。外的な現象の場合、対象とする現象をシミュレートできているかどうかで検証をすることができ。しかし、内的な現象の場合には工夫が必要である。このために私が注目したのが錯視である。実際、数理モデルが適切なものであれば、それを実装した計算機も人と同様に錯視を発生させるはずである。つまり、錯視は視覚の数理モデルの試金石の役割をはたすと考えられる。しかし、私の考えでは、じつは錯視の果たす役割はこれに留まらない。たとえば計算機が錯視を起こすような情報処理のアルゴリズムを作ったとする。そのアルゴリズムを参考にして脳内の視覚に関する未知のメカニズムを推測することも可能なはずである(図 1 参照)。実際に本研究でも、視知覚のメカニズムに関する数学的推測をいくつか提言している。

ところで、視覚の情報処理は大きく分けて二種類あると考えられる。それは

(i) 局所的情報処理、(ii) 大域的情報処理

である。局所的な情報処理は、複数のニューロンが近傍のニューロンと連合して形成する古

典的受容野を基盤にして行われる。一方、大域的な情報処理は、ニューロンの水平結合あるいは非古典的受容野で行われる情報処理である。私は古典的受容野による局所的な情報処理は、個々のシステムに適した離散ウェーブレットフレームを用いて数理モデルの基盤を構成できると考えている。古典的受容野のモデルとして、これまでガボール関数やガウス導関数などが用いられてきた。しかし、ここでの研究は計算機による視知覚の情報処理の研究が主眼であるため、ガボール関数、ガウス導関数といった原始的な数学よりも、数学的に優れた性質をもったウェーブレットフレームを用いるか、あるいは必要に応じて新しいウェーブレットフレームを開発して使うことを提唱している。実際、このことにより我々は、これから報告する本さきがけ研究結果も含め、これまでにない成果を得ている。

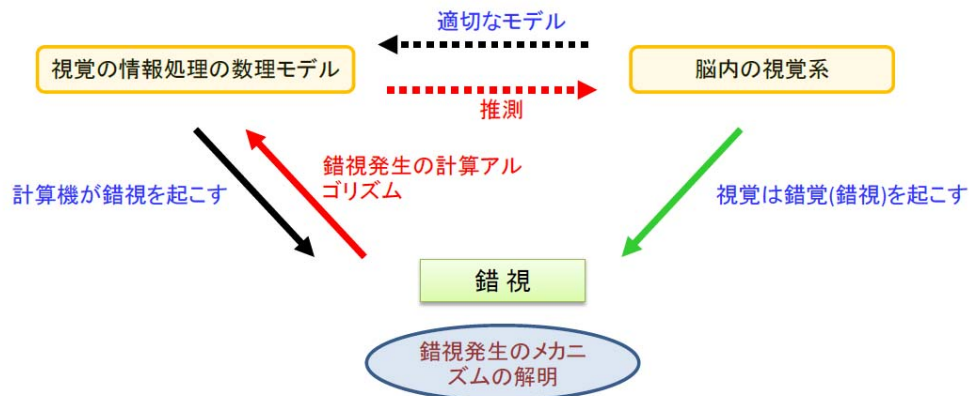


図 1. 数学、視覚研究、錯視研究の関連図。

大域的情報処理については、さまざまなタイプの処理があるため、まずは何をモデル化するかを研究することから始めなければならない。これについては、「さきがけ」採択以前の研究でも、いくつかの大域的情報処理を組み入れた大脳皮質 V1 野の非線形数理モデルを作り、ある種の錯視の統一的なシミュレーションに成功した (H. Arai, 2005)。

2-2. 本「さきがけ」研究の基盤を作るために行った数学研究

「さきがけ」では、まず初めに、新たな視覚の数理的研究の基盤となる数学の研究から行った。その一つの成果は、「かざぐるまフレームレット」の構成である。これは本研究の数学的な基礎を形成することになった成果である。まずその背景を述べる。

【背景】

私が「さきがけ」採択以前に行った研究では、最大重複双直交ウェーブレットを基盤にして、大脳皮質 V1 野における静止画に対する視覚の情報処理の非線形数理モデルを作り、それによりある種の錯視の統一的な計算機シミュレーションができるという結果を得ていた。しかしウェーブレットの方位選択性は水平、垂直、対角の三方向しかなく、この点の改良が必要であると考えていた。さらに視覚科学では、V1 野の単純細胞は多様な方位選択性を持ち (Hubel and Wiesel)、さらに単純細胞の受容野のプロファイルは高次のガウス導関数と類似のものであることが指摘されていた (R. Young) ため、この点も数理モデルに組み込む必要があった。

【成果 1】

そこで、私はこれらの要請をみたすような新しいウェーブレットフレームを構成した。「単純かざぐるまフレームレット」(H. Arai and S. Arai, 2009) と、それよりもフィルタの構成が複雑になるが、神経科学的な観点から改良した「(改良)かざぐるまフレームレット」(H. Arai and S. Arai, 論文準備中) である。記述を簡単にするために、本報告書では両者を総称してかざぐるまフレームレットと呼ぶことにする。ところで、フレームレットは視覚・錯視の研究とは関係なく、2003

年にDaubechiesらにより提唱されたウェーブレットフレームのサブクラスで、ウェーブレットをさらに一般化したような枠組みである。かざぐるまフレームレットは視覚の数理モデルに適するように構成した新しいフレームレットの一つである。図2は次数7の単純かざぐるまフレームレットのレベル2の最大重複フィルタにレベル1の近似フィルタを循環相関積して得たフィルタを示す図である。

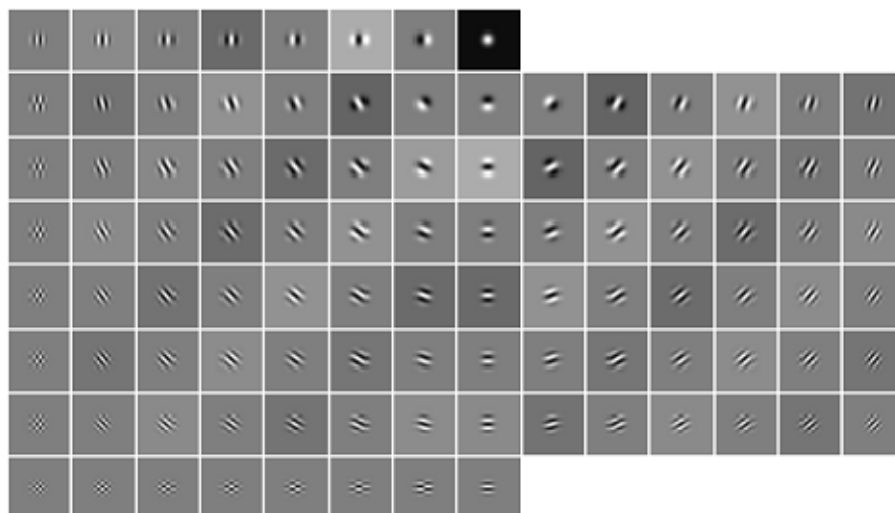


図 2. 次数 7, レベル 2 の最大重複単純かざぐるまフレームレット(Arai-Arai,2009)。

図 2 から単純かざぐるまフレームレットが、単純細胞の受容野に類似の形態を有していることがわかる。

かざぐるまフレームレットのもつ数学的に優れた性質を挙げる。

(1) フィルタは有限長である。フィルタの長さが無限長であると、計算機上で計算する際に、フィルタを有限長で近似して計算をすることになるが、有限長であれば近似しなくてもすむ。このことは再構成画像にエラーが生じないというメリットがある。

(2) タイト・フレームレットになっている。フレームの場合、一般には分解フィルタと合成フィルタは別のものを取らなければならない。またフレームには一次独立性がないため、合成の仕方の一意的ではない。しかし、タイト・フレームでは分解フィルタと合成フィルタを同一のものに取れるというメリットがある。

(3) スプライン関数を用いて、2次元ユークリッド空間上のコンパクト台をもつタイト・フレームレットを作れる。このことは本研究に直接関係はないが、ユークリッド空間上で解析学を研究する際には有用なことである。

(4) 多様な方位選択性を有している。かざぐるまフレームレットには「次数」というパラメータを付けてあり、次数が上がると、それだけ多様な方位選択性が得られる。ただし、次数を上げるとフィルタ長が長くなる。目的に応じて次数を取ればよい。ここでは次数7の場合の単純かざぐるまフレームレットによる方位選択性の性能を例示する。

テスト画像として図3の画像を用いる。

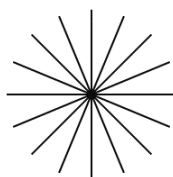


図 3. テスト画像。

このテスト画像を単純かざぐるまフレームレットによる最大重複多重解像度分解する。最

大重複法はもともとウェーブレットに対して、Coifman et.al.(1995)、Nason et.al.(1995)らにより考案された方法であるが、ここではそれを単純かざぐるまフレームレットに適用した。その結果が図 4 である。この結果から、単純かざぐるまフレームレットは多様な方位選択性を有していることがわかる。この性質を利用した画像処理への応用も期待できる。なお(改良型)かざぐるまフレームレットについてもほぼ同様の結果が得られる。

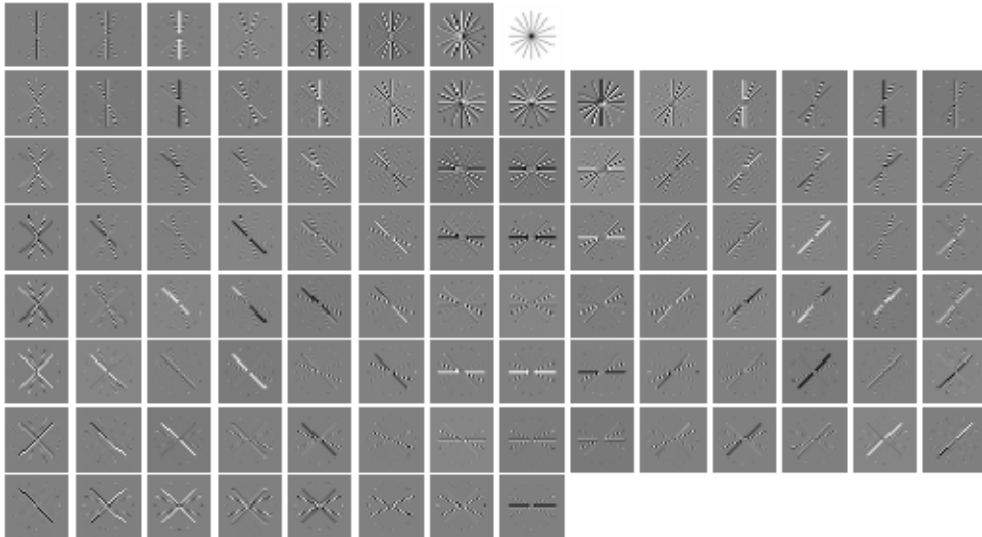


図 4. テスト画像の単純かざぐるまフレームレット分解(レベル 2)。

かざぐるまフレームレットは、視覚系の神経科学に動機を持つものであり、視覚と錯視に関する本さきがけ研究の基盤となった成果である。このフレームレットは、本研究に大きな進展をもたらせることとなった。その成果は 2-3 以降で詳述する。

なおかざぐるまフレームレットは新しいフレームの一つを提案したものと、純粋数学的な立場からも意義のあるものである。

【成果 2. そのほかの数学研究の成果】

かざぐるまフレームレットの数学的な研究を行う際に、多次元信号処理の立場からウェーブレットフレームを捉えておく必要がある。そこで、本さきがけ研究の準備的な研究として、フレームレットを含むウェーブレットフレームと、多次元マルチレート信号処理との関連に関する種々の定理に厳密な証明を与えた。またその過程で 1 次元信号処理に関する Feichtinger らの定理を多次元かつ一般的なサンプリング格子の場合に拡張した。そしてそれらの結果、ならびに単純かざぐるまフレームレットの結果も含めて、ウェーブレットフレームと多次元信号処理との関連を数学的に厳密な形にまとめ、著書『ウェーブレット』(共立出版, 2010, 総頁数 463+xi)として出版した。

2-3. 新しい幾何学的錯視の創出とその数理解析

【背景】

幾何学的錯視の代表的な例の一つとして、渦巻き錯視が知られている。Fraser が 1908 年に発表したフレーザーの渦巻き錯視が最初の渦巻き錯視である。その後、心理学者の北岡明佳らが渦巻き錯視をいろいろと作成している。私もさきがけ研究を始める前に、新井しのぶと共同で新しい渦巻き錯視の一つとして、フラクタル螺旋錯視を発見した(図 5)。これはフラクタル島と呼ばれる自己相似集合を 1:3 の割合で縦長にして、図 5 のように同心円状に配列すると、それらが渦巻いて見えるというものである。自己相似集合から渦巻き錯視が作れるという発見は新しいものであった。なおフラクタル螺旋錯視は本数学領域のロゴとしても使われている。

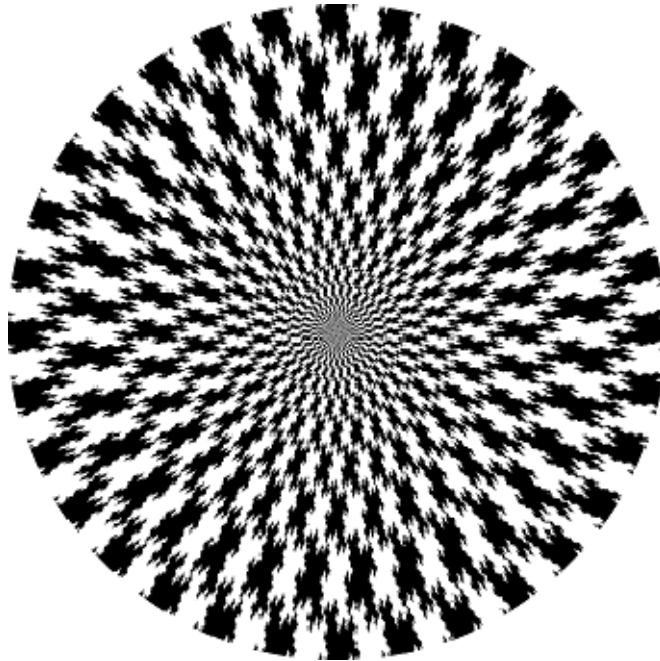


図 5. フラクタル螺旋錯視(新井・新井、2007)。

【成果 3】

さきがけ研究の一つとして、このフラクタル螺旋錯視の錯視の構造を明らかにするために、数学的な解析を行った。そのために考案したのが、かざぐるまフレームレットをもとにした極座標的フィルタリングという方法である。これによるフィルタの例を図 6 に示す。

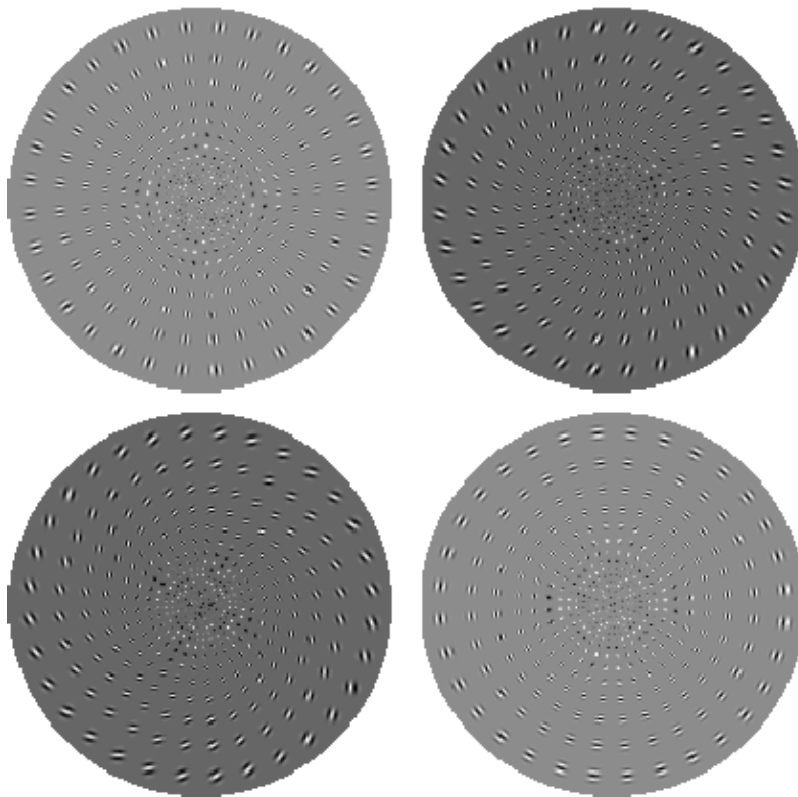


図 6. 極座標的フィルタの例(Arai-Arai, 2010)。

この極座標的フィルタから、我々は最大重複多重解像度構造と完全再構成性を有するフィルタバンクを構成した。このフィルタバンクを用いた、画像の最大重複多重解像度分解を本報告書では、極座標的多次解像度分解と呼ぶことにする。これを用いて次のようなことを明らかにすることができた：

(1) 図 5 のフラクタル螺旋錯視の極座標的多次解像度分解には、反時計回りに渦巻いて見える成分が含まれている(図 7 左)。

(2) そのほか、知覚される錯視とは逆向きの成分、すなわち時計回りに渦巻いている成分(図 7 右)も含まれている。この他、反時計回りと時計回りの混在型の成分も含まれている。

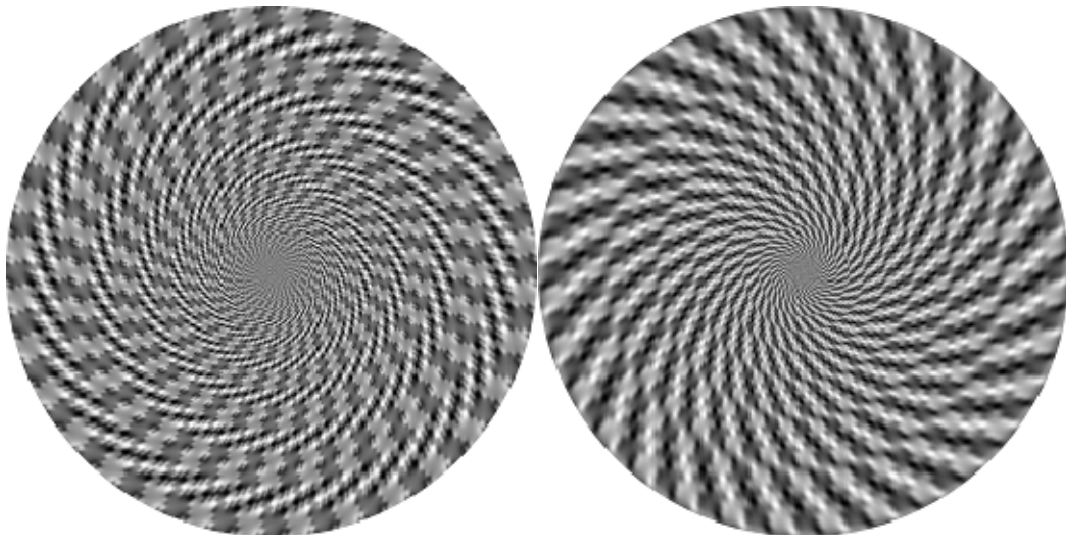


図 7. フラクタル螺旋錯視の反時計回り成分(左)と時計回り成分(右) (Arai-Arai,2010)。

これらの結果から、次のようなことが推測できる。反時計回り成分はフラクタル螺旋錯視を起こす働きをし、一方、時計回り成分は錯視現象を打ち消す働きをしている。しかし、その成分の働きが弱く、結局反時計回りの錯視が起こってしまう。このことを確かめるため、我々はフラクタル螺旋錯視の極座標的多次解像度分解のうち、反時計回り、時計回り、混在型の成分を除去して再構成した。すると図 8 のように、フラクタル螺旋錯視の原型をある程度とどめながら、渦巻き錯視が消失しているような画像が得られた。極座標的多次解像度分解は完全再構成性を有しているので、まさしく反時計回り、時計回り、混在型の成分に錯視の要因があることが数学的に示されたことになる。そこでこれらの成分を錯視成分と呼ぶことにした。

一方、時計回りの成分を除去した結果が図 9 であるが、錯視量が原画像(図 5)に比べて増えている(原画像に比べ急速に中心に向かって渦巻いている)ことが確認できる。このことから時計回り成分を逆錯視成分と呼ぶことにした。

ここで注意しておきたいことは、これらの成分が錯視、あるいは逆錯視の成分であることを数学的に特定できたことは、極座標的フィルタによるフィルタバンクが計算機上でも完全再構成性を持っているためである。そしてこの性質は、極座標的なフィルタバンクのもとになったかざぐるまフレームレットの完全再構成性に由来するものである。

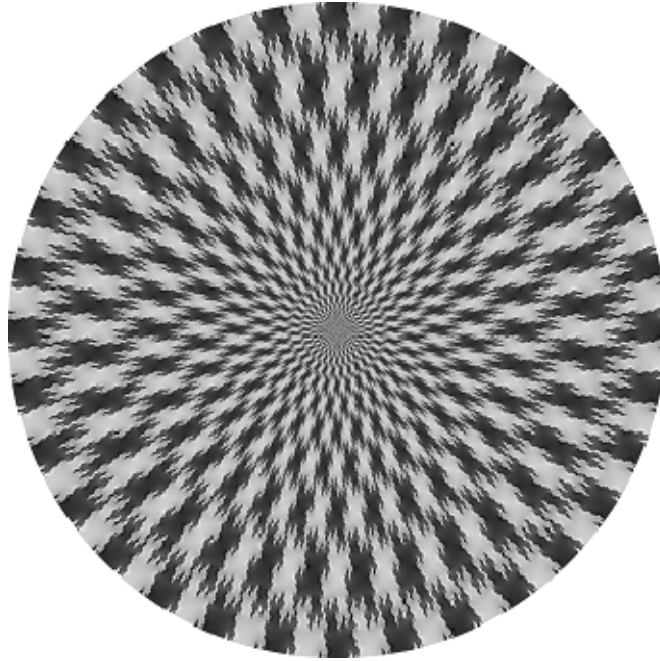


図 8. 錯視成分を除去すると錯視が消失する (Arai-Arai,2010)。

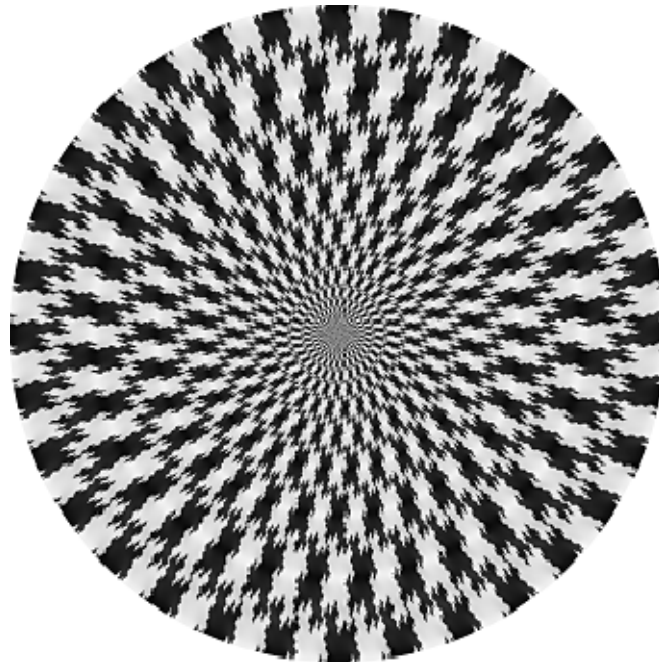


図 9. 逆錯視成分を除去すると錯視量が増える (Arai-Arai, 2010)。

以上述べたような幾何学的錯視の解析は、従来の方法ではなしえなかったことである。またそれによって明らかにされた幾何学的錯視の構造も本研究で初めてわかったことである。さらに本研究で行った錯視成分の抽出と錯視量の制御は、数学的方法によって初めて可能になったものであり、数学が錯視研究に一つのブレークスルーを与えるものであると考えられる。

なおこの研究成果は『日本経済新聞』朝刊(2009年2月16日)でも報じられた。

【考察】

錯視は脳内の視覚情報処理で起こっていることであるから、錯視の構造が解析できたということは、その数学的方法と脳内の情報処理が関係していることが推測される。この観点から神経科学との関連を探ることとする。関連した結果として 1996 年に Gallant らが大腦皮質 V4 野に同心円、渦巻き、放射線状の縞に強く反応するニューロンがあることを発見したものがあ。極座標的フィルタリングで作られる極座標的フィルタ(その例は図 6 参照)は、同心円、渦巻き、放射線状の縞に反応するといえる。このことから、極座標的フィルタは V4 野のニューロンが行う情報処理と関係があることが推測される。

【成果 4】

北岡、Pinna、Brelstaff (2001)は、傾き錯視を同心円状に配列すると渦巻き錯視ができることを発見した。Gallant et al. (1996) によれば、V4 野には上記【考察】で述べたように極座標的縞に強く反応するニューロンがあるが、それだけでなく Gallant らは双曲座標的な縞に強く反応するニューロンもあることを発見した。そのニューロンの種類と縞の形状から、我々は傾き錯視を直角双曲線座標に沿って配列すると、軸がずれて見える錯視が起こることを予想し、実際にそのようになることを発見した。その一例が図 10 左で、フレーザーのねじれ紐と呼ばれている傾き錯視を直角双曲線座標軸(図 10 右)に沿って配列したものである。しかし、図 10 左の画像では、軸が反時計回りにずれて見える。この他の傾き錯視でも同様の錯視画像が得られる。この一連の新しい錯視を我々は「双曲型錯視」と呼ぶ。

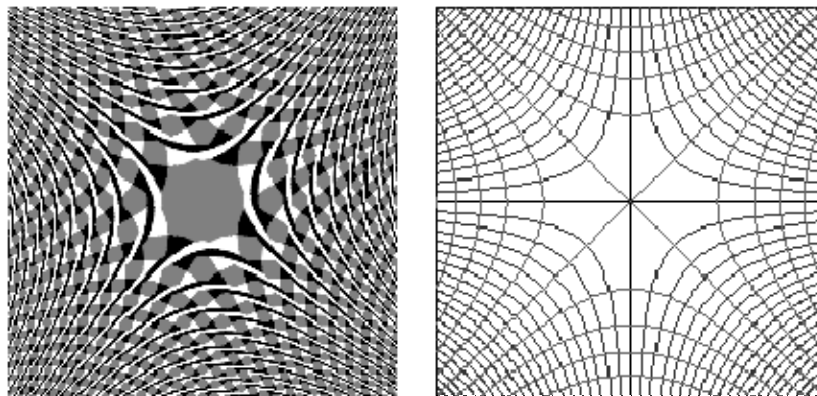


図 10. 左: フレーザーのねじれ紐を用いた双曲型錯視(Arai-Arai, 2010)、右: 直角双曲線座標。

双曲型錯視を解析するために、【成果 3】で導入した極座標的フィルタリングと同様に双曲座標的フィルタリングを考える。これにより得られる双曲型フィルタの例を図 11 に載せる。これらの双曲型フィルタは V4 野にある双曲座標的な縞に強く反応するニューロンが行う情報処理と関係があることが推測される。

双曲型フィルタを用いて、最大重複多重解像度構造と完全再構成性をもつフィルタバンクを作ることができる。本報告書では、それによる画像の分解を双曲型多重解像度分解ということにする。

これによる双曲型錯視の構造の解析例を示す。ここで解析するのは、北岡のカメのパターンから作った双曲型錯視(図 12(a))である。これは図 10 左のフレーザーのねじれ紐を用いた双曲型錯視と異なり、対角方向の軸のずれの錯視のみならず、水平・垂直方向の軸のずれも知覚される。図 12(b) は錯視成分の除去したもので、錯視が消失している。図 12(c) は反時計回りの錯視成分からなる画像であり、逆錯視成分が加えられていないため、錯視量が増えている。図 12(d) では水平・垂直錯視成分を除去した。水平・垂直の錯視は消失しているが、対角の錯視は残っている。同様に対角錯視成分のみを除去することも可能である。

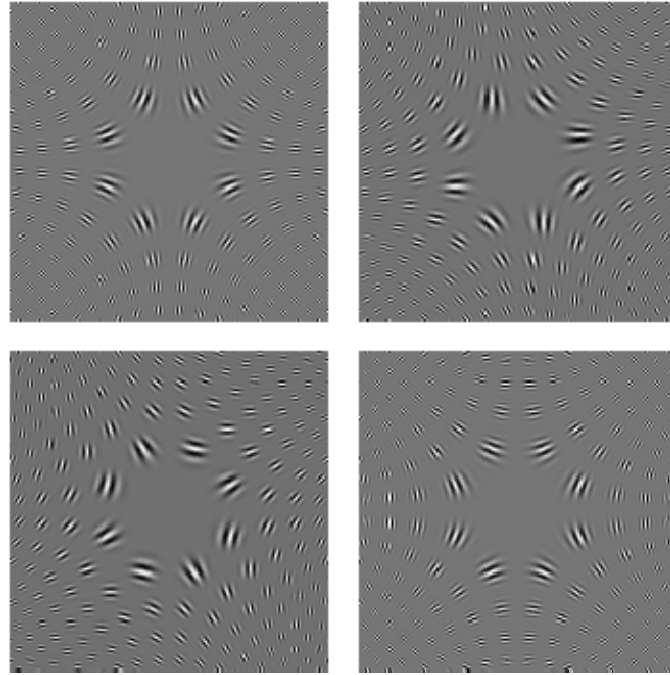


図 11. 双曲型フィルタ (Arai-Arai,2010)。

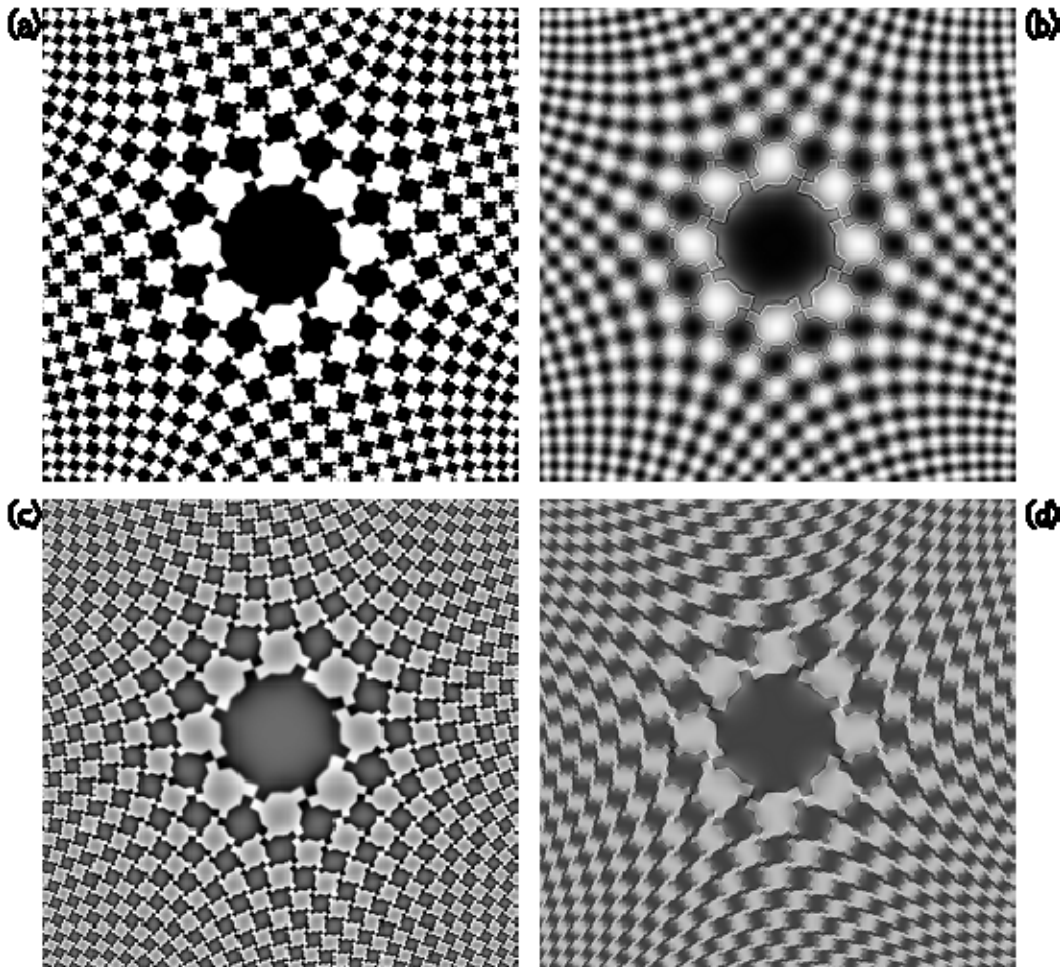


図 12. (a)北岡のカメラを用いた双曲型錯視、(b) 錯視成分の除去(錯視が消失している)、(c) 逆錯

視成分等を除去(錯視量が増えている)、(d) 水平・垂直錯視成分の除去(水平・垂直の錯視は消失しているが、対角の錯視は残っている)(Arai-Arai,2010)。

神経科学的な考察から、双曲型錯視という新しい幾何学的錯視のクラスを見出すことができた。さらに、双曲型多重解像度分解を用いて、双曲型錯視の構造の解析と錯視量の制御を行うことができた。【成果 3】の結果と合わせて、本研究で開発した数学的方法は、従来の錯視研究では考えられたことのない方法であり、錯視研究に一つのブレークスルーを与えるものと考えられる。

2-4. 文字列傾斜錯視のフレームレット解析

【背景】

2005 年頃に、日本のインターネットの掲示板等に特定の文字列を並べて傾きの錯視を作る遊びが流行した。そして数多くの文字列が傾いて見える錯視が匿名でネット上に発表された。私と共同研究者の新井しのぶは、この錯視に「文字列傾斜錯視」と名前を付け、ウェーブレットを用いた文字列傾斜錯視の作成方法などをネット上に発表した。たとえば数学的方法を用いて我々が見出した文字列傾斜錯視として次の図 13 がある。



図 13. 数学的方法を用いて見出した文字列傾斜錯視の例。東京大学理学部数学科同窓会より依頼され作成。2009 年の会報の表紙に掲載された。なお 2008 年より新井・新井の発見した錯視が同会報の表紙デザインとなっている。

【成果 5】

さきがけ研究では、本研究で開発したかざぐるまフレームレットを駆使して、文字列傾斜錯視の構造を調べた。かざぐるまフレームレットは大脳皮質V1 野の単純細胞の数理モデルを作るために考えたものであり、一方、単純細胞は視覚情報処理の中で、線の傾きを検出する役割も果たしている。そこで、文字列傾斜錯視となる文字列をかざぐるまフレームレットで解析することにより、V1 野でどのようなことが起こっているかを調べた。その結果、文字列傾斜錯視の錯視に関連するニューロン(に対応するフレームレットのフィルタ)を特定できた。それが文字列傾斜錯視に関連していることの証明として、そのフィルタの反応を取り除くことにより、文字列傾斜錯視の錯視が除去された。結果を図 14 に示す。この成果は、傾きの錯視がV1 野のどのような情報処理で発生するかについて、数学的推測を与えている。



図 14. 文字列傾斜錯視からの数学的方法による錯視の除去(新井・新井)。

同様の結果は他の文字列傾斜錯視でも成立する。この成果に関する論文は現在準備中である。

【神経科学的な考察 1. - 実験的なことへの予測 -】

外界の情報が眼球から入ってきたとき、脳内のさまざまなニューロンに興奮あるいは抑制が起こる。錯視発生の要因は、錯視画像が入力された際のニューロンの興奮/抑制の仕方にあると考えるのは自然である。したがって、ある錯視画像を見ても、錯視が発生する要因となるニューロンの興奮/抑制が起こらなければ、錯視は知覚されないだろう。しかし、現時点の技術からは特定のニューロンの働きをピンポイント的に制御することは困難である。そこで数理モデルを用いて‘ある種のシミュレーション’を行ったのが本研究成果であると考えられることができる。このことを詳しく、しかし分かりやすくするためにやや比喩的に説明する。まず文字列傾斜錯視をニューロンの数理モデルを実装した計算機に入力する。すると、計算機内でニューロンの対応物に興奮/抑制が起こるが、錯視の要因となるものが何であるかを計算機実験で特定し、要因となる反応を起こさないようにする。この部分は計算機なので容易に可能である。すると計算機は原画像に変化を加えて出力する。ところで、この画像を人が見たときに、どのようなことが起こるであろうか。考えることは、この出力画像を見ても脳内の対応する実際のニューロンに反応が起きないということである。なぜならば反応を起こす要因を計算機で除去していると考えられるからである。その結果、その画像をみても錯覚は起こらないはずである。そこで実際に、我々の出力画像を見ると、原画像である図 13 には傾きの錯視を知覚するにもかかわらず、出力画像である図 14 には傾きの錯視が知覚されない。

脳内の視知覚の情報処理との関連 (仮説)

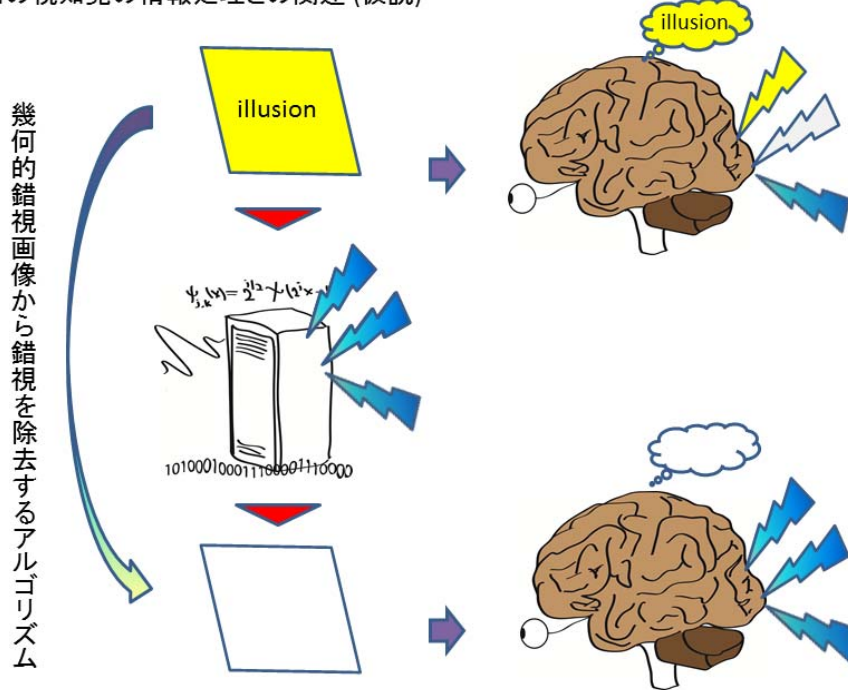


図 15. 脳内の視知覚の情報処理との関連に関する仮説の説明図。

ただし、脳内のニューロンの反応については、上記のことはあくまでも仮説であり、実際にニューロンの反応がどのようになっているのかは実験的検証が必要なことである。なおこの仮説は渦巻き錯視、双曲型錯視に関する記述の成果に対しても当てはまる可能性がある。

【成果 6】

2005 年に新井・新井はウェーブレットを用いた文字列傾斜錯視の発見方法を見出した。「さきがけ」研究では、多くの文字列傾斜錯視を作成するうちに、文字列傾斜錯視が起こる要因として、より本質的なことがあることを発見した。それはねじれ紐に似たパターンである。このことについて、具体例を用いて述べる。「千葉県立現代産業科学館」という文字列から、文字列傾斜錯視ができる文字とその配列を見出してみよう。まず各漢字を双直交ウェーブレット(Cohen-Daubechies-Feauveau)による最大重複ウェーブレット分解すると図 16 のようになる。



図 16. 千葉県立現代産業科学館の各文字の最大重複双直交ウェーブレットのレベル 3 の水平成分。

この中から文字を選んで配列しなおしてねじれ紐に似たようなパターンができるようにする。

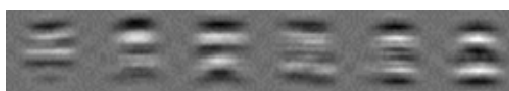


図 17. このように抜粋して配列しなおすとねじれ紐のようなパターンが見られる。

これに対応する文字は、千葉県現産立である。これを並べると図 18 の文字列傾斜錯視ができる。

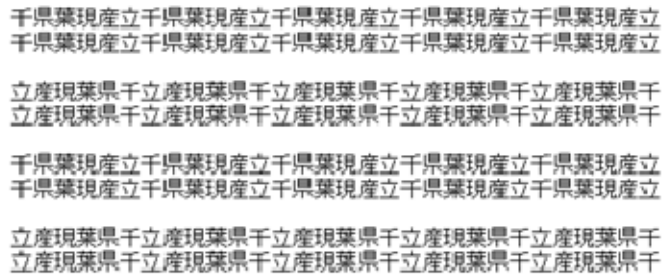


図 18. 文字列傾斜錯視 (新井・新井, 2010)

なお詳細は現在発表準備中である。この結果は私の他の研究成果とともに、『数学で探る目の錯覚と視覚の謎』として千葉県立現代産業科学館の企画展で展示された(展示期間、2010年10月9日-11月28日)。

2-5. 浮遊錯視生成アルゴリズムの発明

【背景】

静止画が動いて見える錯視は現在、錯視研究者たちにより盛んに研究されている。そのうちの一つに静止画が浮遊して見える錯視があり、たとえばオオウチ錯視、Pinna 錯視、北岡明佳による錯視などがある。

【成果 7】

任意の画像を浮遊錯視に変換するアルゴリズムを見出したことが浮遊錯視に関する成果である。詳細は現在、特許を申請中である (JST, 発明者: 新井仁之、新井しのぶ)。

たとえば例として次のような画像(図 19)を取り上げる。



図 19. 原画像。

この画像を今回の研究で得たアルゴリズムで変換して得た画像が図 20 である。



図 20. 浮遊錯視。画像を上下にゆっくりと動かすと、さきがけのロゴマークが左右に浮遊したように見える。眼鏡をかけている方は眼鏡を上下にしても錯視を知覚できる。

従来の錯視画像は、日常的な環境の中で見出したり、あるいは職人芸的に錯視の起こるような特殊なパターンを用いて作られるものがほとんどであった。これに対して、我々の浮遊錯視アルゴリズムは、任意の画像から浮遊錯視を作れるというものである。このようなことは、数学的方法によって初めて可能になったことである。

【実用的応用 -広告産業、娯楽-】

誰もが任意の画像を浮遊錯視にできるため、会社名、製品名、学校名、個人名などを浮遊錯視にしてインパクトのあるチラシ、カードなどを作成して宣伝効果を上げることができる。また、自分で描いたデザインを浮遊錯視にしてハガキをはじめ、CD、DVD のラベルなどを作成することもできる(図 21、図 22 参照)。

【神経科学的な考察 2. - 実験的なことへの予測 -】

浮遊錯視を作るアルゴリズムと神経科学との関連について、すでに【神経科学的な考察 1. - 実験的なことへの予測 -】において詳述したことと同様に図 23 に記したようなニューロンとの関連が予測ができる。



図 21 浮遊錯視生成アルゴリズムで作成した錯視の利用例。画像をゆっくりと左右に動かすとウサギたちは縦に浮遊したように見え、画像をゆっくりと上下に動かすとウサギたちは左右に浮遊したように見える。

脳内の視知覚の情報処理との関連 (仮説)

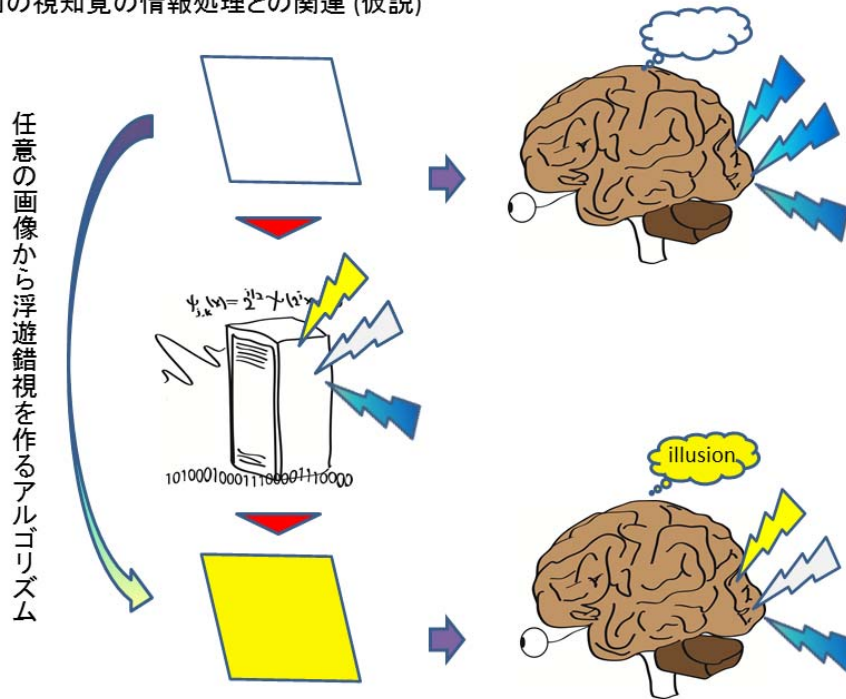


図 23. 脳内の視知覚の情報処理との関連に関する仮説の説明図。

2-6. その他の結果 (新しい現象の発見)

【成果 8】

新しい錯視と錯視に関する新しい現象も発見したので、それを報告する。

発見した錯視は次のものである。図 24 の左に緑の同心円がある。これを図 24 右のようにフラクタル螺旋錯視の上に載せる。すると、緑の同心円が歪んで見える。

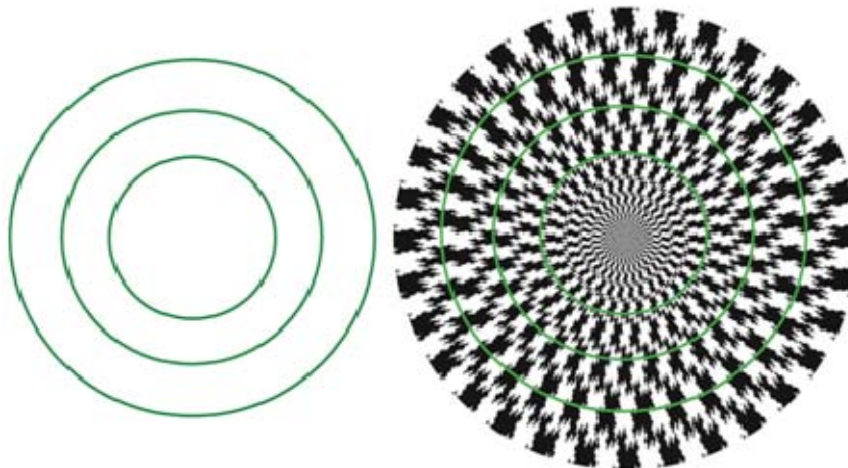


図 24 左: 緑の同心円、右: 歪同心円錯視(新井仁之)。

同心円が歪んで見える錯視を最初に発見したのは Fraser (1908)であるが、しかし Fraser の同心円が歪んで見える錯視と図 24 右には一つの違いがある。それは Fraser の錯視はねじれ紐を同心円にしたものであるのに対して、図 24 右では単なる単純な同心円が歪んで見

えるという点である。

もう一つの現象はフラクタル螺旋錯視と色に関するものである。図 25 上はフラクタル螺旋錯視に色を付けたものである。フラクタル島は同心円状に配列されているにもかかわらず渦巻いて見える。一方、図 25 下の図は上の図と同じデザインで、色が異なっているだけである。しかし図 25 下の図では渦巻き錯視が消失している（新井・新井）。

これらの現象の数理解析は今後の課題の一つである。

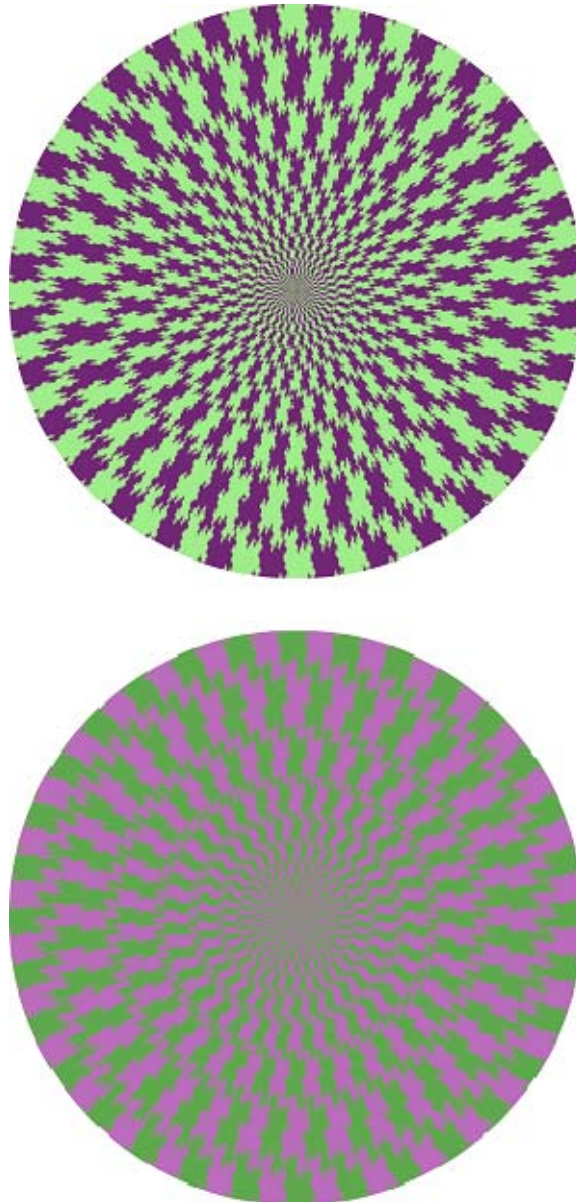


図 25. 上:フラクタル螺旋錯視、下:上の画像と全く同じデザインであるが、渦巻いて見えない。フラクタル螺旋錯視は色によって錯視量が変わる。錯視が消失する場合もある。これはフレーザーの渦巻き錯視では見られない現象である。

3. 今後の展開

「さきがけ」ならびにそれ以前に私が研究してきた主な研究対象は、大脳皮質の V1 野、V4 野の一部であった。さらにその他の領野の数理解析モデルを研究していきたい。特に、「さきがけ」では静止画に対する情報処理を研究したが、今後の期待される大きな展開としては、視

覚研究に適した時空間ウェーブレットフレームを開発して、動画の研究をすることである。動画を研究するに当たっては、奥行き知覚など3次元空間をどのようにとらえるかという数理モデルの研究も必要になる。

「さきがけ」では、ある種の静止画が動いて見える錯視の生成アルゴリズムを発見することができた。脳のさまざまな領野の数理モデルの研究とともに、その領野に原因がある錯視の発生のメカニズムも解明でき、それが正しいものであれば、さまざまなタイプの錯視の生成アルゴリズムを作ることができるはずである。

色知覚の数学的な研究は非公開研究成果として述べたが、さらにそれを推進させることも展開の一つである。色知覚の研究は、色彩科学、映像メディア、アート、デザインなどさまざまな産業とも密接に関連しているので、大きな可能性を持っているといえよう。

本研究は画像処理の立場からも興味深いものがあり、実際、映像メディア情報学会の講習会の講師を依頼されたりしている。画像工学への応用も今後の発展として大きな可能性があると考えている。

最後に本研究で開発したかざぐるまフレームレットならびに、今後視覚の研究のために構成しようとするフレームについて、その数学的性質を純粋数学の立場から研究していくことは、古典解析学として興味あるテーマであり、純粋数学の発展にも貢献することが期待できる。

4. 自己評価

「さきがけ」採択前に新井は最大重複双直交ウェーブレットを用いた大脳皮質V1野の非線形的な数理モデルを作り、ある種の錯視に対して統一的なシミュレーションを行った。しかし、ウェーブレットには、視覚科学の観点から考えて改良の余地が残されていた。そこで、「さきがけ」ではまず視覚科学の観点からウェーブレットを改良することを行った。それが「かざぐるまフレームレット」である。これを構成できたことは本研究の一つの目標を達成したものと考えている。かざぐるまフレームレットを用いた研究課題はいろいろあるが、さきがけ研究では、幾何学的錯視への応用研究が特に進展した。この際導入した幾何的フィルタリングの方法は、大脳皮質V4野の情報処理の一部と密接に関連していると考えている。この結果、これまでの心理学分野における錯視研究では得られなかった幾何学的錯視の構造が明らかにできたことは特筆したい。さらに、かざぐるまフレームレットを用いた脳の神経科学的な数理解析により、任意の画像から浮遊錯視を生成するアルゴリズムを作ることができた(特許出願中)。これは錯視研究において画期的なことではないかと考えている。なぜならば、これまで錯視は日常の中に見出すか、あるいは特別なパターンを見出して職人芸的に作られていたのに対して、本研究で得た浮遊錯視生成アルゴリズムは誰もが任意の画像から新しい浮遊錯視を作れるからである。しかもこれは単なる画像工学的アルゴリズムではなく、脳内の視覚の情報処理の数理モデル的考察から生まれたという点からも、脳科学的な発展性も含んでいる。さらに錯視の広告産業などへの実用的応用も期待することができる。

この他に、現在進行中の色の知覚の数理モデルの研究をはじめ、非公開の研究成果があり、これらも新しいタイプの進展を視覚・錯視研究もたらずのではないかと考えている。

こういった成果は本研究の当初の目標をかなり達成しているものであると同時に、当初予想していなかった発展もあったといえる。

さきがけに採択されたことにより、研究期間中、多くのアイデアと成果を得ることができた。しかし、成果を得ることに時間を割かれ、それを論文発表、あるいは特許出願をする時間的余裕がなかった。現在、未発表の成果の発表の準備を進めている。また、さきがけ研究を中心に、それ以前に得た研究成果も含めて、視覚と錯視の数学的研究に関する著書を出版準備中である。研究をしながら、発表準備に研究時間を割く配慮をすることは、今後の私の研究姿勢に対する課題である。

5. 研究総括の見解

脳が行う視覚に関する情報処理の数理モデルを研究対象とし、新たな視覚の数理的研究の基盤として「かざぐるまフレームレット」を構成した。これにより、従来の方法ではなしえな

かった幾何学的錯視の構造を明らかにすると同時に、各種錯視画像に対して成分の抽出や錯視量の制御が初めて可能となった。これらは新しいフレームの一つを提案したものとして、純粋数学的な立場からも大きな意義があると同時に、今後は数学からの脳科学への大きな貢献も期待される。

6. 主要な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1.	H. Arai and S. Arai, Framelet analysis of some geometrical illusions, Japan J. Indust. Appl. Math. 27, 23-46, 2010.
2.	H. Arai and S. Arai, 2D tight framelets with orientation selectivity suggested by vision science, JSIAM Lett. 1, 9-12, 2009. Invited Paper.
3.	新井仁之、ウェーブレット・フレームとその錯視研究への応用、可視化情報学会誌、29(115), 10-17, 2009.
4.	新井仁之、視覚の科学と数学、ウェーブレットで探る錯視の世界、最終回、色の知覚と錯視、数理科学、547、75-79+表紙裏の画像+裏表紙裏の画像、2009.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

発 明 者: 新井仁之、新井しのぶ

発明の名称: 錯視画像生成装置、錯視画像生成方法、およびプログラム

出 願 人: 科学技術振興機構

出 願 日: 2010/11/15

(3) その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

1. 新井仁之、平成 20 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)。受賞理由: 視覚と錯視の数学的新理論の研究。

2. 新井仁之、視覚と錯視の数学的研究、2008 年度日本応用数理学会年会、総合講演、2008 年、9 月 17 日、於東京大学柏キャンパス。

3. 新井仁之、ウェーブレット、共立出版株式会社、2010、総頁数 463+xi。

4. 新井仁之・新井しのぶ、数学で探る目の錯覚と視覚の謎、千葉県立現代産業科学館、企画展展示、2010 年 10 月 9 日-11 月 28 日。

5. 新井仁之、ウェーブレット・フレームによる視覚の数理モデルと明暗及び幾何的錯視への応用、脳と心のメカニズム第 11 回冬のワークショップ、日本神経回路学会ほか主催、於ルスツリゾート、2011 年 1 月 12 日。

6. 新井仁之、視覚の数理モデルによる錯視の解析と生成、映像メディア情報学会講習会、於機会振興会館、2011 年 2 月 18 日(発表予定)。