視覚科学における分野融合

NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部
感覚表現研究グループ グループリーダー・主幹研究員・上席特別研究員
西田眞也（にしだ　しんや）

Profile―西田眞也
1990年，京都大学文学研究科（心理学専攻）博士後期課程研究指導認定退学（1996年学位授与）。ATR視聴覚機構研究所奨励研究員を経て1992年，NTT入社。2012年より現職。2006年に学術振興会賞および日本心理学会国際賞（奨励賞），2015年に科学技術分野の文部科学大臣表彰（科学技術賞）受賞。専門は質感認知，運動視，時間知覚，多感覚統合など。平成27年度開始の新学術領域研究「多元質感知」では領域代表を務める。

はじめに

私は長年，人間の感覚の研究を行ってきた。研究手法は心理物理学である。日本心理学会的には知覚心理学と呼ばれるカテゴリーに入る。

心理学の中でも知覚は従来から脳神経科学との親和性が高い分野である。とくに，90年代の後半のfMRIの登場により，心理学と脳神経科学の融合が飛躍的に進んだ。現在，視覚研究者の多くは，自分の研究は心理学であると同時に脳神経科学だと認識しているのではないだろうか。最近，融合的研究をテーマにしたシンポジウムを企画したとき，講演を頼んだ心理学出身の研究者に，自分の研究は融合的ではないので何を話せば良いか分からないと相談された。彼女の機能イメージング研究は第一級のシステム神経科学と認知されているのだから心理学と神経科学の学際的研究でお願いします，とメールしたら，それで融合研究になるとは思いもよらなかったというような反応が返ってきた。彼女は分野融合が早くから進んでいた米国での研究生活が長かったが，国内でも同様の意識の人は増えているのだと思う。

しかし，私個人は脳神経科学に対して一定の距離を置いているつもりでいる。それは，私が理解したいのは，私の知覚体験であって，動物の脳神経系ではないからである。脳神経科学者の多くが，自分の知覚体験や心を理解したいと思いつつ，人間の主観的な世界を科学的に直接研究するのが難しいので，手段として脳神経系の研究を選択したという話はよく耳にする。しかし，脳科学は飛躍的に進歩しているが，リアルな知覚体験の理解にはなかなかつながらずにじれったい。たとえ直接的に研究する手段が限られていても，主観的な知覚体験から出発して研究する方が自分の趣味嗜好に合っている。

知りたいのは，脳のハードウェアよりソフトウェアである。しかし，いわゆる文系的な知覚心理学はまったくピンとこない。そういう私にとって神経科学より情報科学が研究アイデアの源泉になってきた。

私が視覚研究を始めた頃は，「空間周波数チャンネル」がはやっていた。視覚系には，網膜像入力を空間周波数の異なるバンド（低周波＝粗い，高周波＝細かい）に分解処理するという考えである。これは工学分野で発展した線形システム論に則って視覚系を分析しようという発想が，順応やマスキングという心理物理テクニックと見事に結びついて生まれた成果である。その後，初期視覚系の情報分析を位置・方位・空間周波数に選択性のあるフィルターバンクによるウェーブレット変換とみなすという今日的な考えにつながっている。

さらに，デビッド・マーが分野融合的な視覚研究の重要性と，基本的な考え方を示し，私に大きな影響を与えた。彼は「計算理論」「アルゴリズムと表現」「神経実装」の3つのレベルで視覚を理解することを提唱した。視覚系の計算の目的は何か，それをどういう手順で計算するのか，その計算手順をどうやって神経で実現するのか，という問題を，それぞれについてあ

る程度別個に考える，という多元的・複眼的理解の奨めである。マーの視覚機能に関する個別の仮説がその後の研究において輝きを失っても，研究戦略に関する彼の洞察はいまだ大きな影響を与えている。

マーの3つのレベルと，心理物理学，神経科学，情報科学の関係を考えてみると，「計算理論」は，コンピュータビジョンに加えて，知覚心理学，とくにジェームス・ギブソンの生態学的視覚論が深く関係する。「アルゴリズムと表現」では，機械認識や人工神経回路の知見とともに，心理物理で明らかになる視覚処理の機能的構造が関わってくる。「神経実装」では，脳神経科学が主役になる。

3つのレベルの理論が揃って初めて視覚の理解が成立する。3つのレベルは独立ではないので，一つのレベルの知見は他のレベルに影響する。神経科学的な発見が，アルゴリズムや計算論へ影響するということはありえる。しかし，新しい機能を示す神経機構が見つかったというだけで，計算論的視点を持たないで，システム全体の機能や目的に関するアドホックな議論をしてはいけない。マーは，計算論的視点を重視し，目先の神経学的知見に惑わされずに脳の機能の本質を考えることの重要性を説いている。

マーの枠組みで考えると，心理物理学は，神経科学的な実体が未解明の段階で，脳の計算アルゴリズムを明らかにすることのできる有効な手法である。私も，心理物理学で脳神経科学の常識に挑戦しようとしてきた。たとえば，視覚系は動き，形態，色彩といった異なる視覚属性を別個の神経経路で処理しているという神経科学の有力仮説に対して，異種属性間の処理に密接な相互作用があることを示してきた。運動残効によって錯視的に生じる運動信号が形態知覚に影響することや，運動軌道上の信号統合によって運動物体に対する形態視や色彩視が向上するといったことを発見した。われわれが明らかにしたこのような相互作用は，計算論的に考えても意味のある仕組みであることは強調しておきたい。未だその神経科学的相関は明らかになっていないが，心理物理学的には十分なエビデンスがあるので，問題はない。

質感の研究

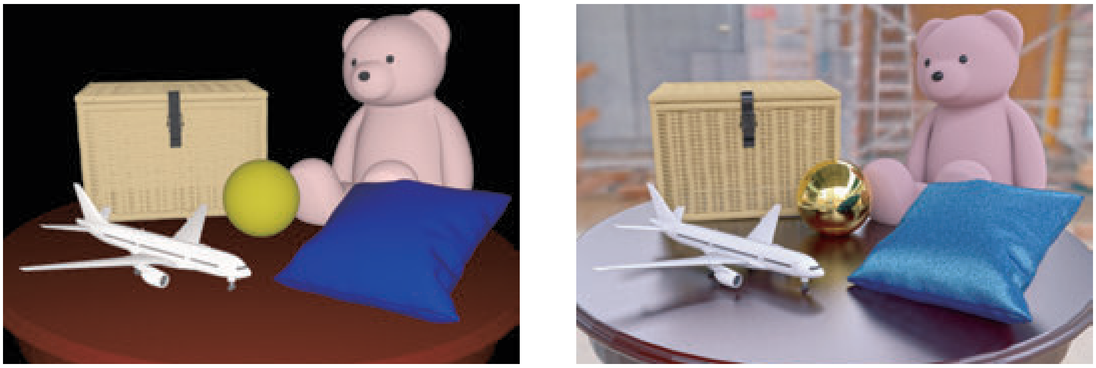
さて，前置きが長くなったが質感の話である。質感研究は，心理物理，情報科学，脳神経科学が密接に連携して進んでいる分野の代表である。

そもそも私が質感に興味を持ったのは，情報科学の進歩，とりわけコンピュータグラフィックスの発展がきっかけとなっている。コンピュータグラフィックスはまるで本物と見紛うような映像を作り出すことができる。20年ほど前から映画や広告などで目にする機会が増えてきていた。そのとき私は，視覚科学はコンピュータグラフィックスの成果を説明できるのか，という疑問を持った。

当時の視覚研究の王道の考え方は，網膜に投影された外界の映像から，対象の形態，色彩，運動，奥行きといった基本的な属性を分析し，その結果を統合することで対象を認識するというというものであった。しかし，対象の形の表現が精緻化されたとか，色の再現性が良くなったといったことだけで，コンピュータグラフィックスの本物らしさが説明できるわけではない。

フォトリアリスティックなコンピュータグラフィックスの思想は明解で，情景を生み出している物理的な光学プロセスをできるだけ正確にシミュレートすることである。しかし，これは簡単な計算ではない。ある表面に到達した照明光は複雑かつその表面特有の仕方で反射・吸収される。その表面に到達する照明光はほとんどすべての方向からやってくる。その表面から出ていった光はまた別の表面にぶつかり反射吸収される。気が遠くなるような複雑なプロセスの結果としてわれわれの目にする光景が成立している。そのようなプロセスをシミュレーションすると，本物のような映像ができあがる。いい加減にシミュレーションすると，本物らしく見えない。

このことは物理的に考えると何ら不思議ではない。しかし，知覚の問題として考えると不思



コンピュータグラフィックスで，単純に形と色を再現する場合に比べ（左），現実場面の物理的な光の複雑な振る舞いを計算すると（右），ものの質感の再現が格段に向上する。このことは，人間の質感知覚を考える場合に，重要なヒントを与えてくれる。

議である。なぜなら，そんな複雑な物理光学プロセスの正しさを脳がチェックできるとは思えないからである。

実世界の表面の反射は，従来の視覚研究で想定されていたような完全拡散反射ということはほとんどなくて，光沢を生む鏡面反射や半透明感を生む表面下散乱などが複雑に絡み合ったものである。表面には固有の反射の複雑な反射パタンがあり，それをきっちり考慮して光学プロセスをシミュレートすることが，表面の質感の再現の鍵となる。

ここでいう表面の質感とは，その表面がどういう状態にあるのか，またどういう材質でできているのか，ということに関する感覚である。そういう質感を，人間は表面の反射のパタンから感じ取っている。

他の視覚タスクと同様に考えると，質感認識は一枚の画像から表面の反射特性を推定する問題のように思える。しかし，表面の反射のパタンは，正確に記述しようとすると6次元またはそれ以上の表現が必要になるほど複雑なものである。さらに，表面反射の特性は表面形状や照明環境との複雑な相互作用を通してのみ物体表面の画像に反映する。だから，照明環境も形状も事前に分かっていない条件で一枚の画像から反射特性を正確に復元することは原理的にほとんど不可能な問題なのである。

人間がどうやってこの難題を解いているかを理解するのかを理解するためには，分野横断的な研究を通じてマーの3つのレベルで理解することが重要である。新学術領域研究「質感脳情報学（H22-26）」やその後継プロジェクトである「多元質感知（H27-31）」はそのような考えの上に成り立っている。

上述の質感認識の原理的な難しさは，もっぱら計算理論に関わる問題である。視覚の計算理論を考える際に重要な役割を果たすのが，コンピュータビジョンであることはマーの時代と変わらない。質感に関する近年の研究は，表面の反射特性やそれに影響する表面形状や環境光を画像からどのような条件でどれだけ推定できるかを明らかにしてきている。まともに逆問題を解くことができそうもない状況でも，事前知識をうまく使って最適化すればかなりうまく推定できるような事例も報告されている。また，今までのカメラでは不可能だったカメラ機能（撮影後にピントを調節するなど）を実現するコンピュテーショナルフォトグラフィの飛躍的発展も，質感計測の計算理論の構築に重要な役割を果たしている。ちなみに，コンピュテーショナルフォトグラフィのルーツは視覚科学にある。というのは，この分野で基本概念となっているプレノプティック関数（3次元空間を満たす光の分布を完全に記述する関数）は，視覚心理学者ギブソンの考えを発展させてエドワード・エイデルソンが視覚科学のコンテキストで最初に提唱した概念だからである。

心理物理のおもな担当は質感認識の「アルゴリズムと表現」の解明である。計算論的検討から，人間が特定の質感知覚に利用する画像手が

かりのようなものの可能性が見えてくる。たとえば，光沢感の手がかりが輝度ヒストグラムの歪度かもしれないといったことである。心理物理は，実際にその画像手がかりを操作したり，その手がかりに対する感度を順応などの方法で操作したりすることで，質感がどう変化するかを分析する。さらに，形状などの要因が，その過程にどのように影響するかをみる。その結果，人間の視覚系が採用するアルゴリズムと表現の推定ができる。

そして，神経実装を考えるために神経科学が必要となる。近年，質感脳情報学代表の小松英彦教授らの研究室などによって，光沢に応答する神経細胞や材質の脳内表現などが発見された。初期視覚野の出力からこのような質感表現への変換プロセスの解明に向けた研究も進んでいる。

このように，質感認知の研究では，情報科学，心理物理，神経科学が一体となって，質感の多層的で包括的な理解を目指して進んでいる。ここで注目してもらいたいのは心理学の立ち位置である。質感研究では心理物理が神経科学をリードしている。これまで認識されていなかった重要かつ難しい問題を人間の脳は解いているはずだということを明確にすることで，神経科学的に解くべき問題を提供し，研究を促進する。

そもそも，心理学は神経科学に研究のガイドラインを与える役割を果たしてきた。視覚についてだけ見てみても，色覚にしろ，両眼立体視にしろ，オプティカルフローにしろ，心理学的な研究は先にあって，それの神経相関を解明する形で神経科学が進歩してきた。ただ，これらの古典的な問題に関しては神経機構が分かってきたので，むしろ既知の神経機構を議論の出発点としたような心理物理研究が増えてきた。関係の逆転である。心理学が関係の再逆転を目指すなら，新しい脳機能に関する研究を立ち上げるのが一番良い。そのような新規領域の開拓がフットワークの軽い心理学の役割だと思う。

われわれの質感研究のみならず，さまざまな人間の心的機能に関する学際的研究で，内観としての心に最も近い位置にある心理学は全体をまとめる扇の要のような役割を果たすことが期待されている。（その辺の状況に興味ある方は，日本学術会議心理学・教育学分野別委員会・心の先端研究と心理学専門教育分科会がまとめた検証「心理学分野の展望 ── 学術からの提 言2010」（http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/1-260521.pdf）を参考願いたい。）しかし，学際的な心の研究は関連分野の研究者を寄せ集めるだけでは成立しない。理想論であるが，そこで必要となるのは，柔軟に専門外の最先端の知識と考え方を吸収し，異分野の研究の出会いの中から新しい発想を導きだし，自分の分野を革新していくような，学際的な個人の集団だ，と思っている。

おわりに

以上，質感認識など自分の関連分野において，学際的な心の研究において，心理学が神経科学や情報科学とどのような関係を持つべきかに関する私見を述べさせて頂いた。そこでは，マーの提案した研究枠組みに沿ったフォーメーションの重要性を説いた。一方，最近のディープラーニングに基づくAIの成功は，情報科学，神経科学，そして心理学に，研究発想の転換を迫るものかもしれない。なぜうまくいくのか理解できないけれど，大量のデータを元に学習した深層人工ネットワークは，人間に匹敵するパフォーマンスを示す。そこまでは計算論は不要である。さらに，そのネットワークの情報表現は，脳の情報表現と高い類似性を示すという。特定の計算アルゴリズムの神経実装は考えていない。ネットワークの構造と学習アルゴリズムを指定して，大量のデータを学習させるだけである。人間の機能が膨大な入力（環境）と出力（判断）のセットとして記述され，それをデータとして取り込んだネットワークが，人間のように振る舞うのである。このような新しい形のデータ駆動型の脳機能の理解を，マー的な理論検証型の理解と結びつけていくかということも，われわれの多元質感知が目指す重要なミッションであることを最後に指摘しておきたいと思う。