Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

知覚を可能にするマテリアル

野中, 哲士

(Citation)
科学哲学,52(2):21-40

(Issue Date)
2020-03-30

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007550

科学哲学 52-2（2019）

知覚を可能にするマテリアル

野中哲士

Abstract

I present an approach to the problems of perception that explicitly considers the material basis of the perceptual information picked up by active agents. Taking into account the reservoir of information external to the perceiver makes it possible to study activity before sensory signals have been aroused by stimuli, an activity that orients the organs of perception and explores for the external information. Drawing on J. J. Gibson's ecological approach and the recent discussions on reservoir computing, I illustrate how the consideration of the material basis of potentially informative patterns could fundamentally change the traditional theories on perception.

知覚とは，個体がみずからの身のまわりにあるものや，みずからが置かれた状況について知るプロセスである（世界科学大事典，1977, p.319）．それは，見まわし，耳をそばだて，撫でるといった活動をともなうと同時に，われわれが知覚し識別していることは，環境内の物や出来事に対してわれわれが形成する独特な関係というかたちで顕れる．

見ることが光に依拠するように，みずからの身のまわりにあるものについて知る知覚は，特定の刺激エネルギーに対してわれわれがもつ感受性に依拠している．そしてそれは，光，熱，音，化学的放散，機械力，重力といった，限られた種類の刺激エネルギーを検知できる有限個の感覚受容器をわれわれの身体が備えているという解剖学的な事実に由来する．

このことから，「知覚は，受容細胞が何らかの刺激エネルギーを感知することではじまる（カンデルほか 2016, p.439）」と，しばしば言われる．一見したところ，これは，異論をはさむ余地のない，当然の見解のように思われ

る．「魚は水の話をしない」という英語の言い回しがあるが，知覚の研究者にとって，知覚の「はじまり」を「受容細胞が何らかの刺激エネルギーを感知すること」に置くことは，魚にとっての水のように，日々どっぷり浸かっている前提である．

知覚の起点を上のように定めるとき，知覚に関して問うことのできる問題は，感覚受容器が何らかの刺激エネルギーを感知した「以降」に神経系において生じる出来事の問題へとおのずと限定される．そこでは，知覚をめぐる問題は，感覚受容器への入力をもとに「脳で知覚はどのように生じているのか（カンデルほか 2016, p.440）」という問題へと，そっくりまるごと置き換えられることになる．「知覚は，受容細胞が何らかの刺激エネルギーを感知することではじまる」という，一見あたりまえに映る前提が，知覚について提起可能な問題そのものを方向付けているという状況に，われわれ知覚の研究者はしばしば無頓着である．

本稿では，知覚プロセスの「はじまり」を「受容細胞が何らかの刺激エネルギーを感知すること」と見なすことによって，おのずと視界からこぼれ落ちてしまう知覚をめぐる問いの中から，特にひとつの問題を拾い上げて，具体的に考察してみたい．それは，身のまわりにあるものについての「知らせ」となり得るパターンや配列が生じる基体となる素材をめぐる問題である．

われわれの知覚が依って立つところの，「知らせ」となり得るエネルギー配列のパターンが現れるところは，必ずしも神経系に限定されるものではない．本稿ではまず，水や液体という素材が，外乱に応答して示す摂動状態が，当の摂動をもたらした出来事についての「知らせ」をふくむということと関連して，二つのまったく異なる領域で独立して行われた研究について見る．また，同様の視点から，われわれの肉体そのものを，知覚情報が浮かび上がる媒質としてとらえる研究の流れを概観する．最後に，知覚心理学者ジェームズ・J・ギブソンによる媒質をめぐる議論をとりあげ，分野の異なるこれらの議論のあいだに共通点が見られることを指摘する．さらに，知覚をめぐる諸問題に対して，知覚を可能にする差異の構造の担い手となる具体から迫るアプローチがもつ示唆について触れる．

液体が可能にする知覚

水生動物の多くは，常時からだ全体が水に包まれていて，文字通り水に支えられて生きている．常に液体にからだで触れながら生きる動物には，水流知覚（hydrodynamic perception）と呼ばれる，陸上で暮らすわれわれには耳慣れない種類の知覚がある．水流知覚とは，身体を包囲する液体の立体的な

動きのパターンの変化から，まわりにあるものや出来事について知る触覚のことで，水生動物には魚類，甲殻類，哺乳類といった系統を問わず広く見られる．

近年，水流知覚の研究の対象として注目を集めているのは，アザラシやアシカといった鰭脚類の動物たちである．アザラシやアシカは，ヒゲのように見える，顔に生えた複数の洞毛によって，みずからのまわりにある水の動きを探る．たとえば，ゼニガタアザラシは，目隠しをして，ノイズを発するイヤホンをして耳をふさいだ状態でも，仲間のアザラシが20秒も前にその場を去って泳いでいった水中のルートを，その通りに辿って追いかけて泳いでいくことができる（Schulte-Pelkum et al. 2007）．

ゼニガタアザラシが，仲間が水の中につくった「轍」のような跡を追いかけていくとき，ひとつひとつの洞毛の変形がもたらす受容細胞への刺激は一定ではありえない．受容細胞への刺激は，みずからの泳ぎによって絶えず揺れ動くとともに，海流の変化や風雨，その他の無数の要因の影響によって刻々と変化する．それにもかかわらず，ゼニガタアザラシは，感覚受容器の「外部」に生まれている，仲間の泳ぎが生んだ独特の渦や水流の構造を，みずからの泳ぎとその他あらゆる出来事によって生じる構造から区別して，仲間を迷わずに追いかけていくことができる．

水生動物が探りあてる，実際に水の中に生まれている，出来事と対応する水流のパターンとは，いったいどんなものなのだろうか．近年，小さな粒子を水中に散らしてその動きを追うことで，水中のさまざまな出来事によって生じる水流の立体的な計測が行われている．たとえば，9センチのブルーギルが毎秒約20センチの速さで泳いでいったとする．計測結果は，ブルーギルが通り過ぎてから一分経った後でもなお，進行方向と対応する渦構造をともなった，毎秒2ミリ程度の速さの水流が，水中に残ることを示している（Hanke & Bleckmann 2004）．また，自然環境で魚はしばしばピクっと急発進するが，30センチのニジマスが急発進するときには，発進した方向と法則的に対応するふたつの独立した渦輪を含む，異なる特徴をもった三種類の水流パターンが水中に生じる．これら三つの水流のパターンはそれぞれに特有の仕方で減衰しつつも，自然状況に近い水の流れのなかでも，数分以上も持続することが確かめられている（Niesterok & Hanke 2013）．過去に起こった異なる出来事の「記憶」は，時間とともに減衰しつつも，水生動物が識別可能なかたちで，動物のまわりに外在している．

大きさや泳ぎ方の異なる魚が水中を泳ぐとき，水流の速度ベクトル場にはそれぞれに応じた異なる特徴的なパターンが生じる．このような場を特徴づ

ける水流の速度の差異や変化を，水生動物の水流知覚システムは敏感に区別する．実際，先述のゼニガタアザラシは，水の動きの情報だけをたよりに，見たこともないミニチュア潜水艦を時間が経ってから追いかけることもできれば（Dehnhardt et al. 2001），水中で人間が動かした櫂の大きさやかたちを区別することもできる（Wieskotten et al. 2011）．これらの事実は，たとえば夜間や，水の濁り，水深の変化など，さまざまな理由によってうまく「見る」ことができない条件下でも，水の中にどんなものがあり，それがどこに向かっていて，どんな風に動いているかを知るために識別可能な情報が，水中の渦や水流の構造に豊富に潜在していることを示唆している．

あるいは知覚の対象を水中でクリアに見ることができる状況下など，こうした水流の触覚情報があまり使われないような場合もあるかもしれない．また，たとえば大きなサメが背後に迫っているとき，目の前にエサとなる小魚の動きと対応する渦や水流パターンが生じていても，サメから逃げる動物はそのことにまったく気づかないかもしれない．しかし，たとえ動物が注意を向けていようといまいと，注意を向ける動物がそこにいようといまいと，そこで起こっている出来事と対応する水流の構造が水のなかに生まれているという事実にかわりはない．

こうした水流知覚を可能にする条件には，少なくとも次の二点が含まれる．まず，(1) 身体外部で生じている水流の摂動パターンが当の摂動をもたらした（現在および過去の）出来事の違いをなんらかの仕方で反映していること．そして，(2) 当該の摂動パターンに選択的に注意を向けて感覚器官等の調節を行い，それを識別する技能を動物が備えていることである．

リキッドステートマシン

われわれがみずからが置かれた状況について知るプロセスは連続的である．環境内の物や出来事に対する絶え間ない関係調整のプロセスは，切り分けられた入力を受け取ってそれをもとに目を閉じて推論をめぐらせた末に，ひとつの出力をはき出して処理を終了するといった離散的なプロセスとは，おそらく根本的に異なるものだろう．

厳密に言えば二度と繰り返すことのない常にうつろい続ける状況に対して，瞬時に即応する神経系の計算モデルを模索するなかで，グラーツ工科大学のウォルフガング・マースは，しばしば脳と対比されるところのコンピュータとは，神経細胞が置かれている環境がずいぶんと異なるという，一見あたりまえの事実を重く見た．「脳内のニューロンは，擬似的な海中環境に埋め込まれており，塩分を含んだ細胞外組織液が脳内のニューロンを包囲

している（Maass 2002, p.33）」．そして，脳内のニューロンを包囲する液体の挙動は，それ自体，豊かなダイナミクスをもっている．

ニューロンを包囲する液体環境にヒントを得て，21世紀の初頭に，マースとその同僚たちは「リキッドステートマシン」と呼ばれる抽象的な計算モデルを提案した．2002年に公刊されたよく引用される彼らの論文は，こんなたとえ話からはじまる．

> 時とともにうつろう一連の外乱が，媒質の状態を変化させたとする．たとえば，風や，音，投げ込まれた小石に応じて，液体が一連の摂動を被ったとする．液体をアトラクターニューラルネットワークと見なすならば，液体は，静止状態という一つのアトラクター状態しかもたないため，計算という目的には役に立たないように映る．けれども，「いかなる時点をとっても」水面の摂動状態（perturbed state）は，現在と過去に液体が受けた外乱を反映しており，環境のさまざまなダイナミックな側面を検知するために必要な知らせ（information）をもたらす可能性がある．ただし，液体が，安定状態によることなく，現在と過去に環境内で起こった出来事についてあいまいさなく知らせる情報源となるためには，外乱に応答する液体の摂動が，異なる外乱に応じて異なるものである必要があり，さらにその摂動は非カオス的なものでなければならない．摂動がどのようにして形成され，それがどれほど持続するかは，液体の種類によって異なり，摂動からその源となった出来事をさかのぼって検知することに液体が使えるかどうかは，その種類にも依存するだろう（Maass et al. 2002, pp.2533-2534）．

引用中に言及があるように，この議論はニューラルネットワークの計算モデルを念頭に置いている．しかし同時に，マースらはリキッドステートマシンを，いくつかの条件が満たされるときに計算可能性が保証される普遍的な計算モデルとして位置づけている．

たとえば魚が急発進するときに水中に生じる渦のように，時間変化する出来事によって媒質中に動的な摂動が生じ，その摂動が媒質中である程度持続してから減衰するとき，媒質中で生じる摂動のダイナミクスを「資源」として活用することで，刻々と変化する状況に即応することを可能にする計算モデルが作れるのではないか，というのがマースらのアイデアである．ただし，ここで言われる計算とは，かなり広義のものであり，時間 t に関する関数（たとえば環境のある側面の時間変化）の，同じ t に関する別の関数（た

とえば環境のある側面に対して自分が築く関係の時間変化）への写像を広く含むものとされる.[1]

リキッドステートマシンMは，具体的には次の二つの構成要素をもつ．一つ目の構成要素は，液体にたとえられるところの，時間変化する外乱に応じて豊かな摂動状態が生じる基体となる媒質であり，リキッドフィルターと呼ばれる．なんらかの出来事によってリキッドフィルターL^Mに動的な外乱$u(\cdot)$がくわえられると，リキッドフィルターには時間tに依存する高次元の摂動状態$X^M(t)$が生じる（図1）．先の例になぞらえるならば，ここで言う摂動状態は，魚が急発進したときに生じる渦や，小石を池に投げ込んだときの水面の波紋に相当するものと考えてよい．また，渦や波紋を生じさせる液体と同様，時間とともにその影響が減衰していくようなfading memoryと呼ばれる性質（つまり，有限の過去の入力にその状態が依存するような性質）をリキッドフィルターは備えている．リキッドフィルターの摂動状態としては，入力スパイク列に対して多数のニューロンがダイナミックに干渉しあう再帰型ニューラルネットワークの高次元の状態がしばしば言及されるが，この議論の射程はニューラルネットワークのアルゴリズムに限定されるものではない.

リキッドステートマシンの二つ目の構成要素は，リキッドフィルター中に生じる高次元の動的な摂動状態$X^M(t)$から，課題に応じた情報を抽出し，動的な応答$y(t)$へと写像する，リードアウトと呼ばれる写像f^Mである（図1）.

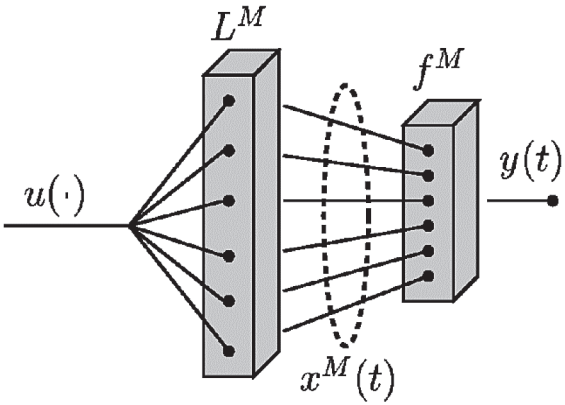

図1　リキッドステートマシンMの基本設計

リードアウト自体は記憶をもたず，摂動の過去の状態についての情報を自身のうちに貯蔵することはない．しかし，過去に起こった出来事の履歴はリキッドフィルター中に生じる動的な摂動状態に反映されているために，リードアウトは自身で記憶をもつことなしに，履歴を反映するリキッドフィルターの摂動状態を抽出することによって，履歴に応じた応答をすることができる．

リキッドフィルターは，外部から加えられる外乱を非線形的に高次元の状態へと写像するような，豊かな受動ダイナミクスをもつ必要がある一方で，その都度直面する個々の課題に向けて特化される必要はない．その一方で，リードアウトの方は個々の課題に向けて，液体の摂動状態から当該の課題に特化した情報を抽出したり，あるいは摂動状態に応じて課題に即した特定の応答をしたりするかたちで調律される．たとえば，常に変化し続けるうつろう入力に際して，課題によっては，安定した不変な応答をする場合もあるだろう．このような場合，異なる外乱によって生じる一群の摂動状態が当該の課題において等価であることを示す不変量をリードアウトは抽出する必要がある．さらに，図 1 ではリードアウトはひとつしか描かれていないが，リキッドステートマシンは，ひとつのリキッドフィルターの摂動状態から，異なる課題に向けた情報を抽出する複数のリードアウトを備えることも可能であり，その場合には同時に複数の異なる課題に向けた応答を並行して生み出すことができる．

これら二つの構成要素からなるリキッドステートマシンが，刻々とうつろう外乱 $u(\cdot)$ に対して，その影響が時間とともに減衰していく摂動状態を資源として，時不変の（入力時間をシフトさせたときに同じだけ時間をシフトした出力となるような）連続的な応答 $y(\cdot)$ へと写像する計算を普遍的に行うためには，次に挙げる二つの条件さえ満たせば必要かつ十分であることが数学的に保証されている（Maass et al. 2002, pp.2556–2557）．

一つ目の条件は，リキッドフィルター L^M が各点分離性（pointwise separation property）と呼ばれる性質をもつことである．ある時点 s における二つの異なる外乱によって生じたリキッドフィルターの時間 $t\,(s \leq t)$ における二つの内部状態が異なるとき，リキッドフィルターは各点分離性をもつと言う．液体の例で言うと，分離性は異なる外乱系列の結果として生じた，波のパターンの違いを反映する．

二つ目の条件は，リードアウトが近似性（approximation property）と呼ばれる性質をもつことである．近似性はリードアウトの解像度と検知力に関わっており，豊かな摂動状態をリードアウトが課題に関連する応答に変換す

る性質である．近似性は数学的にはある連続関数が有限個の線形結合の多項式によって近似される性質である（Stone 1948）．分離性がおもに液体の性質の複雑性そのものに依拠しているのに対し，近似性は課題特定的である．

リキッドステートマシンは，それがどのようなかたちで実装されたにせよ，分離性と近似性さえ向上すれば，先に述べた意味での計算パフォーマンスは向上する．特に情報の媒質としてのリキッドフィルターは，外乱の微細な違いを反映する分離性さえ有していれば，特定の課題に向けて設計される必要がなく，その素材も液体であろうと，クモの巣であろうとかまわない．このことは，外乱に対して豊かな受動ダイナミクスを示すなんらかの物質系が，（たとえば進化や発達の過程などで）情報の媒質として場当たり的に「発見」される可能性を，理論的に示唆するように思われる．

媒質としての身体

堅いレンガを積み重ねた建造物とは異なり，われわれの身体においては筋肉，腱，靭帯，筋膜といった幾重にもはりめぐらされたやわらかい引張材のネットワークに堅い骨が埋め込まれており，常時張力がかかっていることによって重力に抗して部位や組織の立体的な配列が保たれる設計となっている（Turvey & Fonseca 2014）．伸び縮みするやわらかい筋肉が，非線形ばねのような特性をもつ結合組織と一体となって骨を引っ張って動かす身体の設計のために，われわれが身体を動かすとき，各部位の挙動は他の部位の挙動と複雑に干渉しあい，脊髄を介して筋肉に伝わる運動指令は一義的なものとはなり得ない（Bernstein 1967）．これに加えて，われわれの身体は，400あまりの骨格筋を備え，無数の筋活動の組み合わせで動かすことができる膨大な可能性をもっている．われわれが変化する環境に対して関係を調整する上で，こうした身体の事情は重大な困難をもたらすように映る．

しかし近年になって，こうしたやわらかい身体の複雑なダイナミクスが，むしろ逆にエージェントの柔軟な行為を制御する資源となっている可能性が，複数の異なる研究領域において示唆されている（e.g., Ingber 1998; Paul et al. 2006; Pfeifer & Bongard 2007; Mukherjee et al. 2017）．リキッドステートマシンにその一端を発する，リザバー計算と呼ばれる学際的な研究パラダイムは（ここでは先述のリキッドフィルターは広く「リザバー（ため池）」と呼ばれる），こうした動向の一翼を担っている．

リキッドステートマシンは，一見制御や計算を困難なものにするかのように思われる非線形的な複雑な摂動状態のダイナミクスを，逆に計算の資源として活用することによって，従来の計算モデルでは難しかった変化に即応す

るリアルタイムの計算を可能にしていた．さらに，微細な入力の違いを非線形的に高次元の状態へと写像することで分離可能にする豊かな受動ダイナミクスを備えてさえいれば，媒質としてのリキッドフィルターは，特定の課題に向けて設計される必要はなく，複数の機能に組み込まれる柔軟な可能性を備えていた．

われわれの身体もまた，筋骨格系から細胞までスケールをまたがって張力がめぐる複雑な構造をしており，豊かな受動ダイナミクスを備えている．そして，同一の身体部位がモーターにもブレーキにもなるような多機能性をその大きな特徴としている．はたして，リキッドステートマシンにおけるリキッドフィルターを，「身体」によって置き換えてみると，いったいどうなるだろうか．刻々とうつろう状況に即応し，連続的な応答を生み出す「計算」に，身体はなんらかのかたちで寄与し得るのだろうか．

Hauser et al (2011) はリザバーとして，78本の非線形ばねで30個の質点をつないだ網の目のような擬似的な「身体」をコンピューターシミュレーションでつくった．質点の位置はランダムに選ばれ，遊離していってしまわないように網の目の両端は固定されている（図2）．そして，異なる組織によって構成される身体さながら，ひとつひとつのばねの挙動特性を規定するパラメータはそれぞれに異なるようにランダムに設定され，さらに身体に受動的に加わる力として，全体からランダムに選ばれた2割の質点に水平方向への力Fが加わるようになっている（図2）．こうして，少数の質点に外乱が加わると，ちょうどクモの巣に虫がかかったように，ネットワーク中には摂動が生じる．ここでの摂動の状態変数は，動的に変化する78本のばねの長

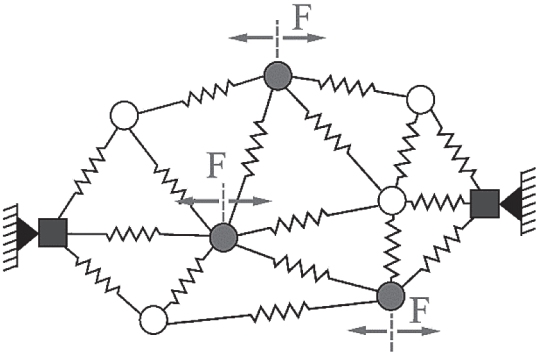

図2　質点をばねで結んだネットワークの模式図

さである．

この「身体」のダイナミクスを用いることによって，二つの関節をもつ腕（ロボットアーム）の先端の環境に対する位置変化を入力とし，それを当の動きの生成に必要な関節トルクへと変換できるかどうかが，実際に検討された．腕の先端はx-y平面上を動くものとされ，目標とされる手先の位置をあらわすxとyの時系列変化は，外乱としてばねのネットワークに入力された．リードアウトは手先の位置の入力に対するネットワークの摂動状態（一群のばねの長さの動的変化）を，目標とする手先の動きをもたらす関節トルクと線形に対応づける重みを学習した（Hauser et al. 2011）．

ばねの挙動を規定する係数や質点の位置，入力をもつ質点と，それらへの固定重みとといった設計パラメータ群をランダムに変化させて，400の異なるばねの「身体」をつくったところ，パフォーマンスは「身体」に依存して変化しつつも，目標トルクとネットワークが応答として出力したトルクとのあいだの誤差はいずれもきわめて小さく，非常に高い精度で手先のコントロールが可能になることが明らかになった（Hauser et al. 2011）．しかしその一方で，ためしにばねの「身体」を通さずにバイパスして，手先の位置の時系列信号を直に目標とする手先の動きをもたらす関節トルクと線形で対応づける重みの学習を試みたところ，手先の動きに必要な動的な関節トルクはまったく出力できなかった．また，すべてのばねの挙動特性を均一に揃えたネットワークを用いた場合にも，手先の位置の誤差は大幅に増加し，手先をコントロール精度は，多様な要素が「身体」を構成しているときよりも，格段に落ちてしまった（Hauser et al. 2011）．

これらの一連の結果が示しているのは，(1) ばねのネットワークが摂動に応答する受動ダイナミクスが，手先が環境との独特との関係を築く動的な関節トルクの出力を学習する上で不可欠な役割を果たしており，さらに (2) ネットワークを構成する要素の異質性がもたらす高次元の摂動状態が，動的な変化にリアルタイムで応答する精度になんらかのかたちで寄与しているという事実である．

上の例では，ロボットアームそのものがやわらかい身体を備えているわけではなく，ロボットアーム自体は既存の研究で用いられた堅いものであった．そこでは堅いロボットアームの手先の動きは，別にシミュレーションされた複数のばねと質点によって模したやわらかい身体の高次元の摂動状態を生み，アームの手先の動きをもたらす関節トルクの時間変化へと写像されていた．しかし原理的には，動物やロボットが，身体との環境とのあいだの動的な関係形成に，みずからのやわらかい身体を資源として用いることは可能

である．実際にその後の中嶋らの研究では，タコの足のようなシリコンで出来たやわらかいロボットアームを用い，動くことにともなって生じるやわらかいアームの動的な状態変化（アームを構成する一群のばねの長さの時系列変化）を線形結合することで数種の力学系で記述されるリミットサイクルの周期的パターンを出力する重みを学習し，さらにその出力によって当のアームの運動を制御するフィードバックループを導入することで，みずからの動きに伴って生じるやわらかい身体の動的な摂動状態を，みずからの動きを制御する資源として利用できることが示されていた（Nakajima et al. 2013）．

アクティブタッチ

このような豊かな摂動の媒質としての身体の生体組織を考慮に入れることによって，その理解に劇的な変革がもたらされる可能性がある知覚活動に，身体が触れているものや身体に接続しているものについて識別するために手やその他の身体の部分を動かすアクティブタッチがある．[2]

身体の接触対象の知覚は，受動的接触のパッシブタッチと，接触対象を識別するために身体を能動的に動かすアクティブタッチの二つに大別される．アクティブタッチとパッシブタッチの間で感覚受容器の応答は類似しているが，アクティブタッチの方がはるかに知覚の精度が良いことが知られる（Gibson 1962）．この違いは，アクティブタッチにおいては感覚受容に加えて運動指令が知覚の過程に影響を及ぼすことに起因するとしばしば言われる（岩村 2001, p.149）．なにかを触知するために手を動かすとき，手を動かすための運動指令は運動野から体性感覚野に随伴反射（corollary discharge）として送られる．体性感覚野のニューロンは，これから起こそうとする運動に関する情報を受け取ることによって，動作による感覚的な結果を予測し，実際に起こる神経反応と比較，照合することが可能になると考えられている（カンデルほか 2016, p.517）．

こうした図式は，たとえば「自分自身にくすぐったい思いをさせることがなぜ難しいのか（カンデルほか 2016, p.517）」といったことを説明する上では有用だろう．だが，アクティブタッチが成し遂げているのは，自分で動いて触っているか否かの識別にとどまるものではない．アクティブタッチの問題の核心には，いったいどのようにして識別される対象の特性に特化した身体の「動き方」が創発し，当の身体の「動き方」が触れている対象の識別に寄与し得るのか，という問題がある（野中 2016）．

アクティブタッチにともなう身体の「動き方」には，いくつかの特徴がある．まず，アクティブタッチに見られる動きは，たとえばコップに手を伸ば

すといったときのような，一定の終着状態へと向かう弾道的なものではない．たとえば，ある表面のテクスチャーを識別するための情報は，手の動きが一定の力や速度，位置に達すれば得られるというものではない．かといって，触知するための身体の動かし方は，まったく偶発的な動きの連鎖から成り立っているというわけでもない（野中 2016）．

たとえば，われわれが道具を手にしたときに，道具の異なる側面に対して選択的に注意を向けられるという事実がある．目で見ないで，手にした金槌の長さを探るように求められると，われわれは手首まわりに金槌の先端をゆらすように動かし，先端部分の幅を探ろうとするときには金槌の長軸を軸として回転させるような動きを見せる（Arzamarski et al. 2010）．われわれが身体に触れているものや身体に接続しているものについて識別するとき，われわれの注意がどこに向かっているかは，身体の「動き方」にネガのように現れる．

先に見た，従来のアクティブタッチ理解の枠組みにおいては，神経系以外の，身体の動きや物との接触にともなって豊かなダイナミクスを生じる身体の設計はバイパスされており，その役割は考慮に入れられていなかった．複雑な身体の受動ダイナミクスを省いた上で，感覚受容と運動指令の比較照合プロセスとしてアクティブタッチをとらえる既存の枠組みにおいては，アクティブタッチにおいてどのようにして特定の身体の「動き方」が創発し，当の身体の「動き方」が触れている対象の識別に寄与し得るのかという問いに対して，明解な答えを与えることは容易ではなかった（野中 2016）．

しかし，ここで豊かな受動ダイナミクスをもつ肉体を考慮に入れると，この問題の見え方は少し変わってくる．手にしたものや触れたものを知るためにわれわれがからだを動かすとき，張りを持った身体には，さまざまな組織の変形パターンが生じる．そして，こうした組織の変形パターンは，全身をめぐるプリストレスがかかった引っ張り材が媒質となって，関節の動きといった大きなスケールから筋紡錘のような感覚受容器の小さなスケールまで，連動して起こっている．このとき，われわれが，手にしているものを特定する身体組織の摂動状態を，他の原因に由来する摂動状態から分離するかたちで「分離性」を高めるように動いている，ということは考えられないだろうか．別の言い方をするならば，われわれが見せる「探る」動きは，身体という媒質の摂動状態における，知られる対象と対応する「不変量」を分離することに向けられている，という可能性はないだろうか．

この仮説に対して直接的な証拠を得ることはなかなか難しい．ただし，こうした可能性と一貫すると思われる事実は存在する．たとえば，熟練道具使

用の研究では，石ビーズ職人たちが石材を軽く叩いて識別するときにハンマーを揺らす動きが，一定の型に収束するようなものではなく，流動的なやわらかいものであり，そのやわらかさは，ちょうどばねで結ばれた身体のシミュレーションのように，さまざまなスケールの動きが不可分にからみあって生まれたうねりに由来する時間構造の特徴をもっていることが報告されている（Nonaka & Bril 2014）．さらに，人間国宝級の一流職人は，未知の素材に出会うと，さっと変化に富んだ特徴的な手の動きを見せ，ゆらぎが速く拡がる独特な手の動きのダイナミクスが，からだに接続された道具や素材について知らせる摂動の「不変量」を効率よく浮かび上がらせることに貢献する可能性が示唆されている．これらの結果は，アクティブタッチを，身体組織の摂動を通して情報を浮かび上がらせようと「みずから動く」システムの活動として捉える見方と一貫するもののように思われる（Nonaka, 2019）．

また一方で，アクティブタッチの現象は，リキッドステートマシンや，リザバー計算の新たな可能性に対しても示唆をもつ．ニューラルネットワークの計算モデルを基に発展したという出自を反映してか，従来のリザバー計算の枠組みでは，分離性をもつ豊かなダイナミクスをもつ媒質としての身体の役割が強調される一方で，身体の動きそのものが，摂動状態の分離に寄与する可能性は注目されていない．リザバー計算のアルゴリズムでは，リードアウトは摂動状態の変数群を受動的に受け取ったのちに，それらを線形結合して課題特定的な応答を可能にする重みを学習しており，この図式は，応答を入力へとフィードバックすることで動きを制御するケースでも本質的に変わりはない．これはどちらかというと，身体に受動的に加わる入力を処理するパッシブタッチの枠組みに近いものである．

仮にリザバーとしての物理的な身体が，環境との接触などの，当のリザバーへの入力以外のなんらかの外的な要因によって摂動を被るとする．このとき，リザバーへの入力を，身体の摂動状態に影響を与えている他の外的な要因の分離に寄与するかたちで調節することはできないだろうか．たとえば，一群のばねから成るやわらかいロボットアームがなんらかの物体をつかみ，その物体がどれほど手先に伸びているか（つまり，物体の長さ）を動いて識別するような場合に，アームを構成する一群のばねの動的な長さの変化を線形結合してつかんだ物体の長さと対応づける重みを学習するのにとどまらず，長さの違いを精度よく区別することができるような「動き」をみずから探りあてて，その動きをリザバーへの入力としてフィードバックするようなことがもし可能であるならば，その活動はアクティブタッチに少し近づくかもしれない．

空間と媒質

知覚プロセスの「はじまり」を「受容細胞が何らかの刺激エネルギーを感知すること」に置くのではなく，それ以前に観察点の周囲に生じている豊かなエネルギー配列のパターンをもたらす媒質を視野に入れて考えることで，われわれの知覚活動，特に「見る」活動をあらためてとらえなおした心理学者にジェームズ・J・ギブソンがいる（Nonaka, in press）.

われわれのまわりの「空間」はしばしば，物体とは対照的な，中身が詰まっていない，われわれの身体を含めた物体が運動する「余地」のあるところとして捉えられる．たとえば，人文地理学者のイー・フー・トゥアンは，「空間」を密集と対比した上で，「まず何よりも，そのなかで運動する余地があるもの（トゥアン 1993, p.28）」と定義し，その一方で，「物体は空間を限定する（トゥアン 1993, p.37）」と述べる.

ギブソンは，われわれの運動を可能にしているのが，中身の詰まった物体の対極にある「余地」のような非マテリアルな虚空ではないことを看破する．運動を制限する物体と運動を可能にするところの対比は，マテリアルな物体と非マテリアルな空間のあいだのそれではなく，むしろマテリアルの状態の特性（e.g., 固体，気体，液体）の相違である．われわれの身体を含む物体の移動を可能にしているのは，物性をもたない虚空ではなく，それ自体，独特な物性をもっている空気である．われわれのまわりを満たしている空気は抵抗が少なく，移動を可能する特性をもつ．さらに，空気中の小さな分子や微粒子は光源からやってきた光を散乱し，散乱された光は地上のさまざまスケールの肌理をもった表面（地面，皮膚，葉等）においてさらに吸収，散乱反射され，それが繰り返されることにより，空気中には密な光のネットワークが全方位から定常的に行き交い続ける「照明」と呼ばれる状況が生まれる．このとき，空気中のそれぞれの観察点を全方位から行き交う光は均質ではなく，周囲にある光源や表面の特性を反映するかたちで方向に応じて光の強度や波長が異なる．つまり，空気のもつ独特の特性は，光源から放射される放射光から，周囲のさまざまな表面を反映する豊かな差異の構造を生み出す.

われわれを浸している媒質である空気について，ギブソンは次のように述べる.

> われわれは媒質を「空間」と呼びたい衝動に駆られる．しかし，この衝動は頑として退けなければならない．というのも，媒質は，空間とは

> 違って，表面や物についての情報をもたらすような，照明が反射しあう定常状態を可能にするからである．媒質中ではあらゆる観察点において配列が生じ，あらゆる動く観察点をとりまく配列の変化が生まれるからである．空間とはちがって，媒質は，機械的な出来事によって生じる粗密波，すなわち音があらゆる観察点に到達することを可能にし，また揮発性の物質からの化学的放散が観察点に拡がることを可能にするからである（Gibson 1979/2015, p.216）．

われわれの視覚系においては，光子は網膜の視細胞内の視物質と呼ばれるタンパク質によって吸収され，「光情報伝達」と呼ばれる神経信号への変換が生じる．しかし，この水準で記述される光に含まれる情報は，「見る経験」を生み出すにはきわめて貧困なものであることが繰り返し指摘されてきた．たとえば視細胞のひとつである錐体の応答は，光の波長にも，光の強度にも依存する．実験環境であれば，実験者は提示する光の強度が一定になるように統制し，当の光の波長成分を単波長に調整することによって，錐体の集団的な応答と光の波長との相関を調べることができる．しかし，そこで見られる相関は，あくまで実験の統制条件と照らし合わせてはじめて解読可能になるものにすぎず，自然状況では，視細胞の集団的な応答から，それをもたらした光の波長を一義的に復元することはできない（Brette 2019）．

光源と眼のあいだにあるものとして，なにもない「空間」を想定し，見ることを「光子」と「視細胞」の接触からはじめるのであれば，「情報に乏しい光の感覚そのものは，意味の服を着せられないといけない（Gibson 1979/2015, p.131）」．しかし，われわれの身体を浸している「媒質」としての空気を考慮に入れ，見ることに与えられているものが，情報に乏しい光の感覚ではなくて，媒質中に生じている高次の光の配列パターンであり，感覚受容器を備えたわれわれの身体が当の媒質中を動いて探索できるならば，視知覚のとらえかたは，根本的に異なるものとなるだろう．

ギブソンは，媒質としての空気中の各観察点を全方位から取り囲む配列構造をもつ光を「包囲光」と呼んだ．包囲光は，光子や電磁波，あるいは視細胞に吸収されるエネルギーとしての光の事実となんら矛盾するものではない．それは，光子や電磁波として記述される放射光が，空気と肌理をもった表面から成る地上環境と出会うことによって初めて生じる，高次の光の事実である．

> 日中に空気は日光で満たされており，夜間でも若干の照明状態は持続している．この事実は，自然の不変である．空からやってくる光は，空気

> 中でアンビエントな（包囲する）ものとなる．この事実が，持続する表面を潜在的に見ることができるものとしている．…潜在的に見ることができる表面とは，媒質中のある地点から見ることができる表面のことであり，当の地点には動物がいることもあり得る．ただしこの時点では，眼に対する刺激については，まだ何も触れられていない．光の感覚については，まだ言及すらされていない（Gibson 1979/2015, p.19）．

空気中のそれぞれの観察点を包囲する，潜在的に検知可能な光の配列のさまざまなスケールの構造は，環境内の表面に近づき，視線をつなぎとめ，水晶体の焦点をあわせ，そこにある大事なものごとを個体がからだ一丸となって探る動物の能動的な「見る」活動を可能にする足場をもたらす．さらに，光の配列に包まれる中で，能動的な観察者が空気中で視点を動かすとき，そこには「視点と独立したなにか」を選り分ける機会が生まれる．この「視点と独立したなにか」は，視点に依存する包囲光配列の変換を通して浮かび上がる不変量であり，視点とは独立した「環境の表面の配置」についての「知らせ」となっている．

> 媒質という概念の理解によって，知覚と行動について，まったく新しい理解が得られると私は思う．それは動物（あるいは遊離物が）内部を動き回ることができる媒質であるのと同時に，環境内の源からやってくる光と音，匂いの媒質でもあるわけだ．…観察者がある地点から別の地点に動くにつれて，光学的，音響的，化学的な情報は相応に変化していく．この意味において，あらゆる潜在的な観察点はそれぞれに固有のものである．空間内の各点を区別する固有性はなく，その意味において媒質という概念は，空間という概念とは異なるのである（Gibson 1979/2015, p.13）．

空気と地上の表面がもつ独特の特性は，光源から放射される放射光を，周囲のさまざまな表面を反映する豊かな差異の構造をもつ包囲光へと変換する．ギブソンは，情報に乏しい放射光と，媒質としての空気と肌理をもった表面が接触することによって，いくらでも精査し続けることができるような「無尽蔵な情報のリザバー（the inexhaustible reservoir of information）（Gibson 1979/2015, p.233）」がもたらされるという事実に人々の注意を喚起した．地上環境を構成する独特の素材と，それが光と出会うことで生まれる高次の光の差異の構造を第一の与件とすることによって，はじめて能動的な

個体が「さらによく見て精査する」活動のありかが浮かび上がるというギブソンの主張は，今日，あらためて見直す価値があるもののように思われる（Nonaka 2019）.

まとめ

「動かない」感覚受容器の外にはしばしば，当の感覚受容器をそなえた「動く」システムが潜在的に感知することができるような，環境にあるものや出来事を法則的な仕方で映し出す物理的エネルギーの包囲配列の構造が存在している．このような包囲エネルギー配列が現れる場としての媒質は，周囲になにがあるかを探り，周囲とどうやって接するかを浮かび上がらせようと一丸となって環境内をみずから動くシステムとしての個体の活動に足場をもたらす.

本稿では身のまわりにあるものについての潜在的な「知らせ」となり得るパターンや変化が生じる基体の素材について考察する中で，特に「液体」と「身体」と「空気」がもつ情報の媒質としての特性について，いくつかの例とともに示した.

ここで，情報のリザバーをもたらす媒質として「身体」を含めることには，あるいは異論があるかもしれない．もちろん，異なるサイズスケールの組織を張力が結んでいる身体の独特な構造がもたらす生体組織の変形配列と，身体の外側を取り囲む空気中や水中の包囲エネルギー配列は，それが生じる場が皮膚のどちら側かという点で異なる．けれども，いずれの場合も，動くことによって，当の場に現れるエネルギー配列の構造にさまざまな変換を施す機会が個体に与えられているという点では共通している.

「受容細胞が何らかの刺激エネルギーを感知すること（カンデルほか 2016, p.440）」以前に，媒質中で生まれている豊かな構造やパターンが存在している．そして，それらは潜在的にわれわれの知覚が依拠するところの「知らせ」となる可能性を秘めている．こうした構造やパターンは，当の差異の構造を生み出す担い手となる媒質の素材の特性と切っても切り離せない関係にある．しかしながら，従来の知覚の心理学においては，身のまわりにあるものごとの「知らせ」となる構造の生成を可能にする素材にまつわる問題は，ほとんど注目されてこなかった（Nonaka 2019）.

ふつう知覚は，常にさらなる探索（精査し，さらによく見る）の可能性をともなっている．このことは，当の可能性が実際に利用され，具現されるかどうかを問わずあてはまる（Gibson 1978）．こうした能動的な探索を可能にする資源の実在には，媒質中の情報についての議論を抜かしてしまっては，

迫ることが難しいだろう．また，周囲についてのなんらかの「知らせ」をもたらす状態を分離しようとみずから動く知覚活動は，感覚受容以降の神経過程にまるごと押し込められるものでもないだろう．媒質中に生じている高次のエネルギー配列中に大事なものごとを見分けようとする個体の能動的な知覚をめぐる問題群は，知覚を可能にするパターンが生じる「素材」を視野に入れることによって，はじめて科学的な検討の俎上に上げることが可能になるように思われる．

注

1. 計算とはなにかという問題については，紙幅の関係もあり，本稿では深く立ち入ることは控えた．この問題については，Piccinini (2015) およびGodfrey-Smith (2009) に詳細な議論がある．
2. 身体に接続した道具などの物体の諸側面について知る知覚は「ダイナミックタッチ」と呼ばれて区別して扱われることもあるが，本稿では，手やその他の身体部位を能動的に動かすことで接触対象について探る知覚を広く「アクティブタッチ」に含めることにする．

謝辞

本研究はJSPS科研費JP18K12013，JP18KT0079の助成を受けたものです．

文献

Arzamarski, R., Isenhower, R. W., Kay, B. A., Turvey, M. T., & Michaels, C. F, 2010, “Effects of intention and learning on attention to information in dynamic touch.”, *Attention, Perception, & Psychophysics* 72(3), 721-735.

Bernstein, N. A, 1967, *The co-ordination and regulation of movements*. London: Pergamon Press.

Brette, R, 2019, “Is coding a relevant metaphor for the brain?”, *Behavioral and Brain Sciences* 1-44. doi:10.1017/S0140525X19000049

Dehnhardt, G., Mauck, B., Hanke, W., & Bleckmann, H, 2001. “Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*).”, *Science* 293(5527), 102-104.

Gibson, J. J, 1962, “Observations on active touch.”, *Psychological Review*, 69(6), 477-491.

Gibson, J. J, 1978, *The Theory of Further Scrutiny*. Unpublished manuscript, James J. Gibson papers, #14-23-1832. Division of Rare and Manuscript Collections, Cornell University Library.

Gibson, J. J, 1979/2015, *The ecological approach to visual perception: classic edition*.

New York: Psychology Press. (originally published in 1979).

Godfrey-Smith, P, 2009, “Triviality arguments against functionalism.”, *Philosophical Studies* 145(2), 273-295.

Hanke, W., & Bleckmann, H, 2004. “The hydrodynamic trails of Lepomis gibbosus (*Centrarchidae*), Colomesus psittacus (*Tetraodontidae*) and Thysochromis ansorgii (*Cichlidae*) investigated with scanning particle image velocimetry.”, *Journal of Experimental Biology* 207(9), 1585-1596.

Hauser, H., Ijspeert, A. J., Fuchslin, R. M., Pfeifer, R., & Maass, W, 2011, “Towards a theoretical foundation for morphological computation with compliant bodies.”, *Biological Cybernetics* 105(5-6), 355-370.

Ingber, D. E, 1998, “The architecture of life.”, *Scientific American* 278(1), 48-57.

岩村吉晃，2001，『タッチ』，医学書院.

エリック・R・カンデルほか，2016，『カンデル神経科学』，メディカル・サイエンス・インターナショナル.

講談社出版研究所編，1977，『世界科学大事典11』，講談社.

Maass, W., Natschlager, T., & Markram, H, 2002, “Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations.”, *Neural Computation* 14(11), 2531-2560.

Maass, W, 2002, “Computing with spikes.”, *Special Issue on Foundations of Information Processing of TELEMATIK* 8(1), 32-36.

Mukherjee, A., Mandre, S., & Mahadevan, L, ,2017, “Controllable biomimetic birdsong.”, *Journal of The Royal Society Interface* 14(133), 20170002.

Nakajima, K., Hauser, H., Kang, R., Guglielmino, E., Caldwell, D. G., & Pfeifer, R, 2013, “A soft body as a reservoir: case studies in a dynamic model of octopus-inspired soft robotic arm.”, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7, 91.

Niesterok, B., & Hanke, W, 2013, “Hydrodynamic patterns from fast-starts in teleost fish and their possible relevance to predator-prey interactions.”, *Journal of Comparative Physiology A* 199(2), 139-149.

Nonaka, T, in press, “Locating the inexhaustible: Material, medium, and ambient information.”, *Frontiers in Psychology*.

Nonaka, T., & Bril, B, 2014, “Fractal dynamics in dexterous tool use: The case of hammering behavior of bead craftsmen.”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 40, 218-231.

野中哲士，2016，『具体の知能』，金子書房.

Nonaka, T, 2019, “The Triad of Medium, Substance, and Surfaces for the Theory of Further Scrutiny.”, In J. Wagman & J. Blau (Eds.) *Perception as Information Detection: Reflections on Gibson’s Ecological Approach to Visual Perception* (pp. 21-36). New York: Routledge.

Paul, C., Valero-Cuevas, F. J., & Lipson, H, 2006, “Design and control of tensegrity robots for locomotion.” *IEEE Transactions on Robotics* 22(5), 944-957.

Pfeifer, R, & Bongard, J. C, 2007, *How the body shapes the way we think*. MIT Press, Cambridge.

Piccinini, G, 2015, *Physical computation: A mechanistic account*. Oxford: Oxford University Press.

Schulte-Pelkum, N., Wieskotten, S., Hanke, W., Dehnhardt, G., & Mauck, B, 2007, “Tracking of biogenic hydrodynamic trails in harbour seals (*Phoca vitulina*).”, *Journal of Experimental Biology* 210(5), 781-787.

Stone, M. H, 1948, “The generalized Weierstrass approximation theorem.”, *Mathematics Magazine* 21(5), 237-254.

イーフー・トゥアン，1993,『空間の経験』，筑摩書房.

Turvey, M. T., & Fonseca, S. T, 2014, “The medium of haptic perception: a tensegrity hypothesis.”, *Journal of Motor Behavior* 46(3), 143-187.

Wieskotten, S., Mauck, B., Miersch, L., Dehnhardt, G., & Hanke, W, 2011, “Hydrodynamic discrimination of wakes caused by objects of different size or shape in a harbour seal (*Phoca vitulina*).”, *Journal of Experimental Biology* 214(11), 1922-1930.

（神戸大学）