

共感覚から脳の学習原理を探る

現代システム科学研究科 教授 牧岡 省吾

概要 共感覚とは、ある感覚の刺激が別の感覚を強制的に喚起する現象です。文字が色を喚起する色字共感覚、音が色や形を喚起する色聴など様々な種類があります。私は、数字や曜日などが決まった形で並んでいるように感じられる空間系列共感覚を中心に研究を進めています。空間系列共感覚には 1) 個人間の多様性、2) 個人内の一貫性、3) 規則性と不規則性の混在という 3 つの特徴があります。私はこれらの特徴が、感覚間の自己組織化学習によって共感覚が生じるという仮定から自然に導出されることを示しました。共感覚を自己組織化学習によって説明する枠組みを中心に、共感覚者はなぜ実際に存在しないものを感じるのか、そして存在しないと分かっているのになぜ共感覚が消えないのか、といった謎についても考えていきます。

キーワード 共感覚、自己組織化学習、ニューラルネットワーク



座談会の様子

1. 脳をどのように解明するか

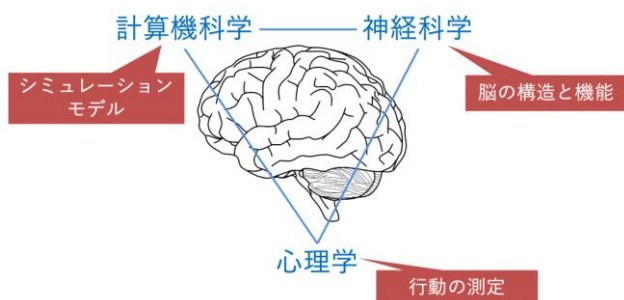


図 1 脳を解明するための 3 つのアプローチ

私の専門領域は認知心理学です。認知心理学では、心理実験によって脳の中でどのような情報処理が行われているのかを探ります。実験室で参加者に様々な課題を行ってもらい、刺激と反応の関係を分析することで、参加者の脳内で行われる情報処理の性質を明らかにすることができます。一方、脳活動を外部から測定する技術も発展してきました。私自身も NIRS を使って脳活動を測定する研究を行っています。また、神経科学で解明された脳に関する知見を用いて心理実験の結果を解釈します。さらに、脳の中で行われている処理を

ニューラルネットワークによってモデル化し、心理実験の結果と比較することで、より具体的に脳を理解することが可能になります。このように心理学、神経科学、計算機科学を組み合わせた研究は 1980 年代から始まり、脳を理解するための有力な方法論になりました(図 1)。

2. 共感覚について

共感覚とは、ある感覚の刺激が別の感覚を強制的に喚起する現象です。実際に見たり聴いたりする対象のことを誘発刺激、それによって喚起される感覚を励起感覚と呼びます。学術論文での最初の報告は、オーストリア生まれのゲオルグ・ザハスという医師による学位論文(1812 年)が最初だと言われています[1]。

まず様々な共感覚について紹介しましょう。色字共感覚(grapheme-color synesthesia)では、文字や数字が色を喚起します。どの文字/数字がどの色を喚起するのかは個人ごとに異なりますが、個人内では一貫しています。色がどれくらいリアルに見えるのかは共感覚者の間でも異なっています。現実の文字に重なって色が見える場合を投映型共感覚(図 2)、「心の中」に色を感じられたりそ



の文字の色をはっきりと「知っている」と感じたりする場合を連想型共感覚と呼びます[2].

SYNESTHESIA
0123456789

図2 投影型の色字共感覚の例

(<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Synesthesia.svg>)

色聴(sound-to-color synesthesia)では、音が色を喚起します。音の高さや音色、旋律などによって異なる色が見え、色が形を伴う場合もあります。音と色の対応は個人間で異なっています。たとえば同じギターのA'の音でも、共感覚者によって見える色や形は違います[3].

語彙-味共感覚(lexical-gustatory synesthesia)では、単語から味が喚起されます。文字で書かれた単語だけでなく、耳から聞いた単語でも味が感じられる場合が多いようです。共感覚者 JIW は、this に「トマトスープに浸したパン」の味、safety に「軽くバターを塗ったトースト」の味を感じると報告しています。JIW の励起感覚は、子どものころに食べたり飲んだりしたものの割合が多いことが分かっています。また、好ましい味、好ましくない味を感じる語を見たときに、左脳の島皮質前部(味覚に関わる部位)の活動が実際に増加することが確認されています[4].

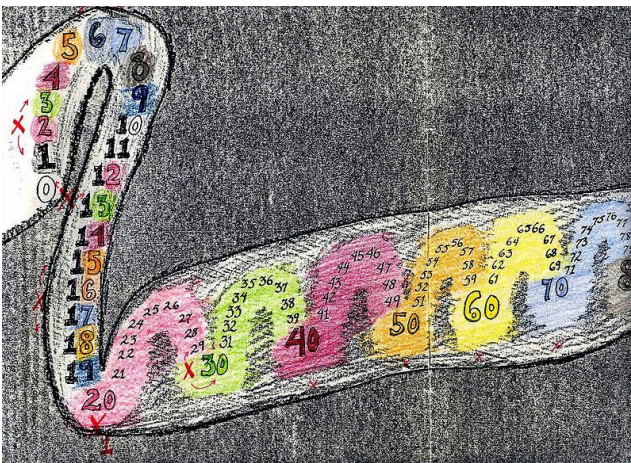


図3 空間系列共感覚と色字共感覚の両方をもつ人の例

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Number_Form--colored.jpg, by Cytowic)

空間系列共感覚(spatial sequence synesthesia)では、数や月、曜日などを思い浮かべたときに、特定の

配置で並ぶイメージが強制的に喚起されます(図3). 数についてはナンバーフォームとも呼ばれています.

共感覚を持つ人の割合はどれくらいなのでしょう? 色字共感覚をもつ人の割合は 1.4%, 空間系列共感覚は 2.2%ぐらいと言われています[5]. では共感覚はいったい何種類あるのでしょうか? 誘発刺激としては、文字、単語、外国語の単語、人の名前、数字、曜日、月、声、痛み、触覚、姿勢、音楽、雑音、におい、味、色、形、感情、句読点や記号の 19 種類が知られています. 励起感覚としては、色、味、形、におい、雑音、音楽、触覚の 7 つの感覚に加えて、性別、性格、空間的配列などがあります. 共感覚を持つと自認する人 2,789 人を対象とした調査では、112 種類の共感覚が確認されています[6].

共感覚は遺伝するのでしょうか? 共感覚は母親・父親のどちらからも遺伝する場合がありますが分かっています. 必ず遺伝するというわけではなく、きょうだいの中で共感覚をもつ人と持たない人の両方がいる場合もあります. 少なくとも一方が色字共感覚を持つ 23 組の一卵性双生児を調べた研究では、17 組では両方が色字共感覚を持ち、6 組では一方しか共感覚を持たないことが分かりました[7]. これは、遺伝によって共感覚が 100% 発現するとは限らないことを意味しています.

3. 空間系列共感覚と自己組織化学習

私は空間系列共感覚を中心に研究を進めています. 空間系列共感覚をもつ人は、数について考えると、自動的に数の空間配列が心の中に浮かびます(図3). 配列の形は人によって異なりますが、個人内では一貫しています. 不規則な形が含まれることもありますが、大きさの順に並ぶという点では規則的です. これらの特徴は、次の 3 点に集約できます.

- 1) 個人間の多様性
- 2) 個人内の一貫性
- 3) 規則性と不規則性の混在

脳の中で、身体の周囲の空間に関する処理を行う部位と、数に関する処理を行う部位は、ともに大脳の頭頂間溝付近に位置しています. 初期の説では、空間に関する処理を行う部位と、数に関する処理を行う部位の間のランダムな神経結合が空間系列共感覚を生み出していると考えられていました[8].

しかしランダムな結合が原因だという考え方では、空間系列共感覚が大きさの順に並ぶことを説明できません. 私は、ニューラルネットワークの一種である Kohonen の自己組織化マップ [9]の学習



結果が空間配列共感覚に似ていることに気付きました。自己組織化マップは、入力パタンの類似性を教師なしで学習し、2次元のマップ上に配置します（図4）。類似度の高いパターンはマップ上の近いところに、類似度の低いパターンは遠いところに置かれます。これによって、高次元のパターンがもつ類似性を2次元に落とし込むことができます。

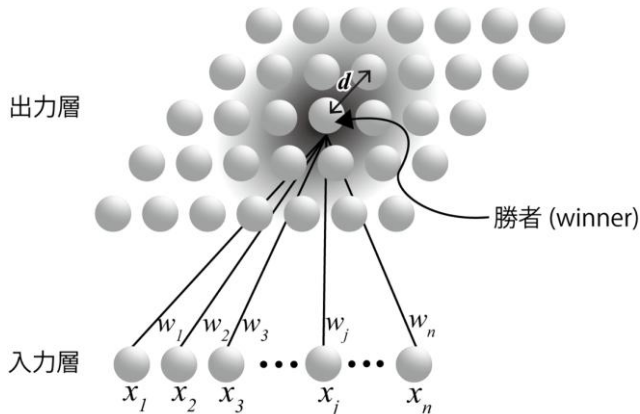


図4 Kohonenの自己組織化マップ

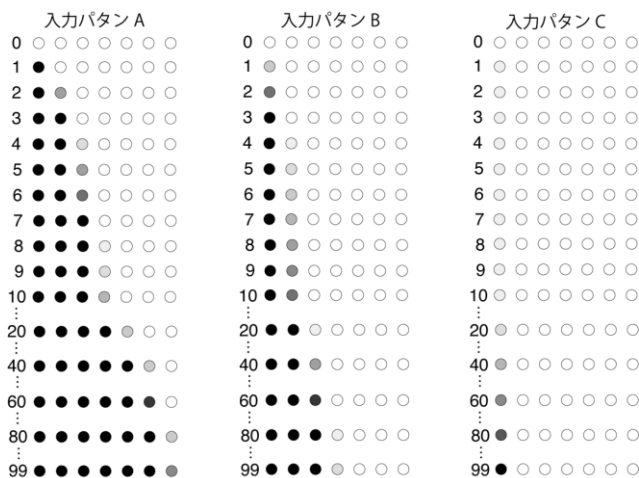


図5 数に関する入力パターン

一方、数や順序は、もともと1次元の情報しか持ちません。そのため数や順序を自己組織化マップで学習すると、マップの方が次元が多いために、学習結果が1つに定まりません。

私は、マカクザルの頭頂間溝で見つかった数に反応する神経細胞の反応パターン[10]を参考に、自己組織化マップに与える入力パターンを作成しました（図5）。この入力パターンだけで自己組織化学習を行った場合、マップ全体に数が散らばる配置になり、空間系列共感覚とはあまり似ていませんでした。

このシミュレーションでは、自己組織化マップの出力層は空間的配置を表していると仮定しています。そうすると、数だけでなくその他の情報も入ってきているはずで、そこで、数と無関係なランダムなパターンを与えてみたところ、空間系列共感覚とよく似た形状が出現することが分かりました。

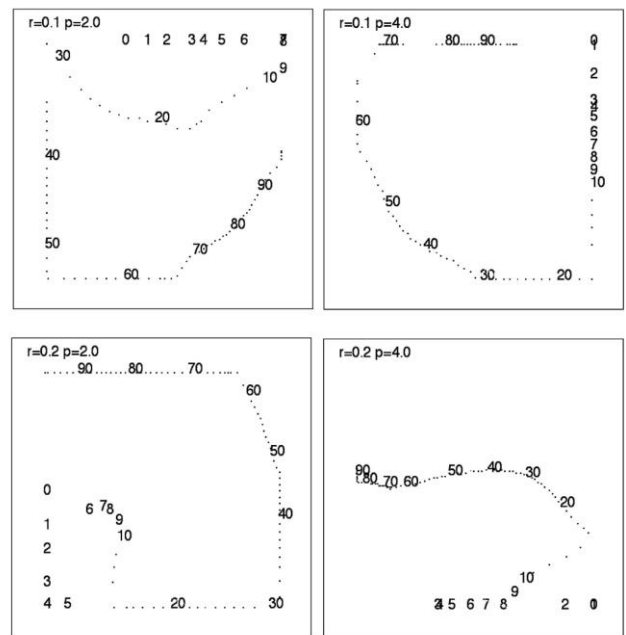


図6 シミュレーションの結果

自己組織化マップ（図4）は2層のニューラルネットワークです。図中の球は脳内の神経細胞（ニューロン）に、球の間を結ぶ線はシナプス結合に対応しています。

自己組織化マップでは、シナプス結合の初期値はランダムに決められ、学習によって変化していきます。前述のように、数に関する学習では入力に含まれる情報が1次元なので、2次元のマップの形状は1つに定まりません。このとき、マップの形状はシナプス結合の初期値によって決まります。これに加えて数の大きさがマップの形状に反映されるため、規則性と不規則性が混在することになります。一方、学習が終了すると、マップの形状は固定されます。このように、自己組織化マップを用いると、1) 個人間の多様性、2) 個人内の一貫性、3) 規則性と不規則性の混在という空間系列共感覚の特徴をうまく説明できるのです[11]。

一方、曜日や月に関する空間系列共感覚では、円、四角形、三角形などの閉じた形状が1/4ぐらいの割合でみられることが分かっています[12]。これは、曜日や月が循環していることと関係すると



思われます。そこで、循環する入力パターンを用いて自己組織化マップでシミュレーションを行ったところ、円や四角形に近い配置が見られることが分かりました[13]。空間系列共感覚の形状については、自己組織化化学習という枠組みで説明することができそうです。色字共感覚など他の種類の共感覚も、同様に説明できるかもしれません。

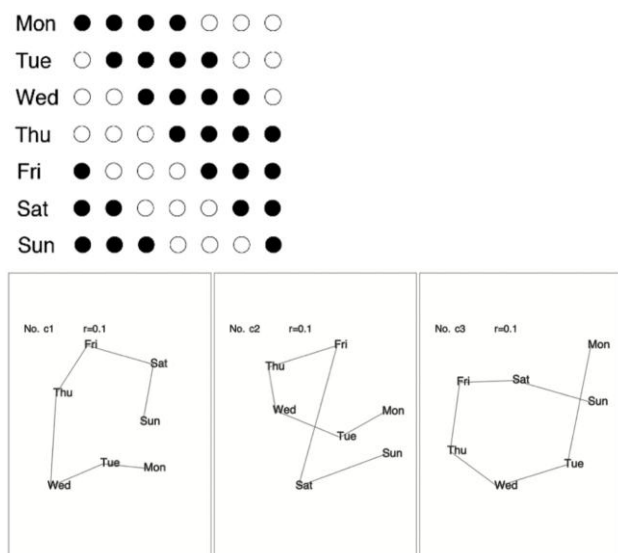


図 7 循環する入力パターンとシミュレーションの結果

4. 共感覚者と非共感覚者は何が違うのか？

空間系列共感覚の不規則な形状は、共感覚者だけが持っているのでしょうか？ それとも、共感覚を持たない人（非共感覚者）の脳内にも実は不規則な形状があり、それを意識できないだけなのでしょうか？ この点を確認するために、私は心理実験を行いました。

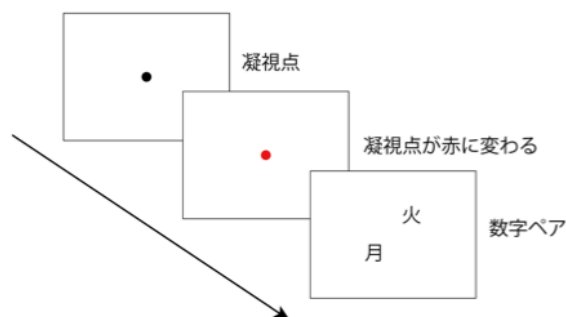


図 8 心理実験の流れ

実験では、非共感覚者に図 8 のような画面を見てもらい、後に来る方の曜日をできるだけ速く答

えてもらいます。曜日が様々な配置で並ぶ場合の反応時間を繰り返し測定し、その分布を分析することで、どのような配置のときに反応が速いのが分かります。その結果に基づいて各参加者の曜日の心内空間を推定すると、図 9 のような配置が得られました[13]。

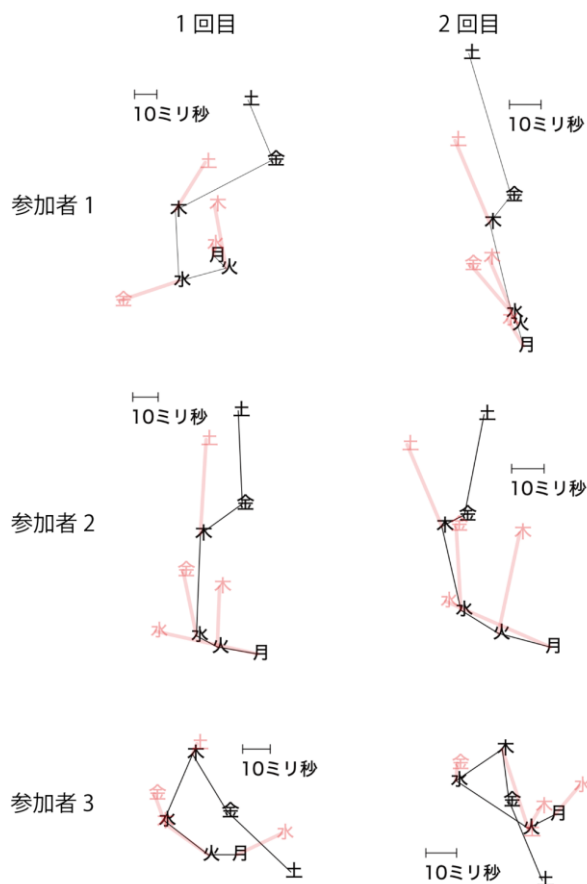


図 9 心理実験で推定された曜日の心内空間

1 回目と 2 回目の測定は 1 ヶ月以上の時間を空けて行われました。この結果から、非共感覚者の曜日の心内空間にも不規則性があり、個人間で多様であることが分かります。

同様な結果は数字の大小を答える実験でも得られています。共感覚者と非共感覚者の曜日や数字の配置がもつ性質は共通していて、意識的に感じられるかどうかは異なっていると考えられます。

5. 共感覚は自己組織化化学習だけで説明できるのか？

図 9 の結果は、非共感覚者の脳内でも曜日と空間の間で自己組織化化学習が起きていることを示唆しています。このように共感覚者と非共感覚者に共通点があるのなら、非共感覚者も訓練すれば

共感覚を感じられるようにならないのでしょうか？

先行研究では、非共感覚者も2ヶ月程度の訓練で色字共感覚を見ることができるようになることが分かっています。しかし訓練を止めると消えてしまいます[14]。一方、色字共感覚者の文字と色の対応関係を分析すると、意味の影響がある程度みられることが分かっています。これらは、共感覚には自己組織化学習だけでなく、誤差駆動型学習が関与していることを示唆しています。

誤差駆動型学習とは、ニューラルネットワークの出力が正しいかどうかの情報が外部から与えられ、正しい出力に近づくようにシナプス結合を変化させていく学習方法です。共感覚を見るための訓練では、文字に対する「正しい」色が与えられ、非共感覚者はその色をイメージする訓練を重ねます。また、色字共感覚ではrが赤に、bが青に見える確率が偶然より高いのですが、これはredやblueという単語の意味が想起され、誤差駆動型学習が行われるためだと考えられます。

しかし、共感覚に誤差駆動型学習が関与するのならば、共感覚はやがて消えてしまうのではないのでしょうか？黒で表示された文字を見るとき、外界から色の情報は入ってきません。共感覚者もそのことは分かっていますが、その文字に対応する共感覚色が自動的に想起されます。もし誤差駆動型学習が起こっているのなら、実際には色の情報が入ってこないことが誤差になり、学習によって色字共感覚が消えてしまうはずです。

今のところこの疑問に対するもっとも有力な答えはSeth(2014)の仮説です。Sethは、共感覚者では脳の階層的処理の中間段階で誤差よりも予測を優先する傾向があるため、共感覚が事実と反していても消えないのだと唱えました[15]。

この考え方は、脳は外界の状態を常に予測しているという予測処理理論に立脚しています。眼や耳などの感覚器に入ってくる情報は限定されていて、外界の状態のごく一部の情報しか入ってきません。そのため脳は外界の状態に関する仮説を立て、その変化を予測する必要があります。感覚器から入る情報にはノイズも多いため、外界からの入力予測と矛盾しているときに、誤差を優先して予測を修正するのか、予測を優先して誤差を却下するのかを決める必要があります。

予測処理理論では、精度というパラメータで誤差と予測のどちらを優先するのかを決めます。Sethは、共感覚者は階層的処理の中間段階で予測の精度が高く設定されているために、共感覚によって励起された感覚（たとえば文字の色）が外界から

の入力と矛盾することが無視されるのだと考えました。

このようなSethの考え方と、自己組織化学習に関する私の考え方をまとめると図10のようになります。

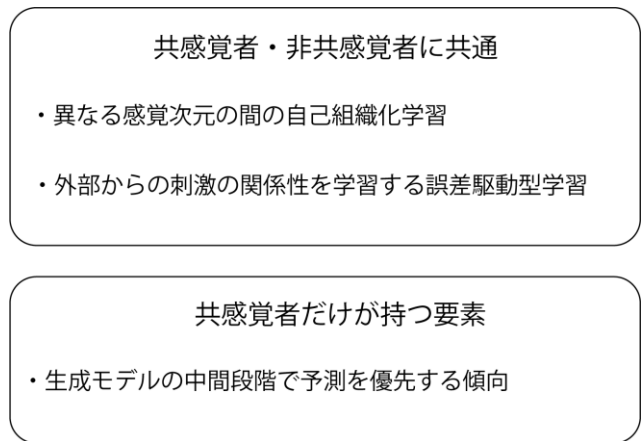


図10 共感覚者と非共感覚者の違い。ここでの生成モデルは、外界の状態を予測する脳内の階層的モデルを指す。

6. まとめ

最後に、今回のアカデミックカフェで取り上げた共感覚に関する謎と、それに対する現時点での答えをまとめておきます。

共感覚者はなぜ実際には存在しないものを感じるのか？そして、存在しないと分かっているのになぜ消えないか？という謎については、共感覚者は外界の状態を予測する脳内の処理の中間段階で、誤差よりも予測の方を優先する傾向があるというSethの説が答えになります。

一方、共感覚はなぜ多様なのか？そして、なぜ同じ人の中では一貫しているのか？という謎については、異なるモダリティの間で自己組織化学習が行われ、その学習がある時点で停止するという私が提案した枠組みが答えになります。

これらの考え方が正しいかどうかについては、さらに検証を重ねていく必要があります。またここから、なぜ共感覚者は励起感覚を意識できるのか、そもそも外界の状態を意識するとはどのようなことなのか、というより大きな問いが派生してきます。詳しくは著書[16]にまとめましたので、興味をお持ちの方は、ぜひご覧になってみてください。



参考文献

- [1]Jewanski, J., Day, S. A. & Ward, J. A Colorful Albino: The First Documented Case of Synaesthesia, by Georg Tobias Ludwig Sachs in 1812. *Journal of the History of the Neurosciences* 18, 293-303 (2009).
- [2]Dixon, M. J., Smilek, D. & Merikle, P. M. Not all synaesthetes are created equal: Projector versus associator synaesthetes. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 4, 335-343 (2004).
- [3]Neufeld, J. et al. Disinhibited feedback as a cause of synesthesia: Evidence from a functional connectivity study on auditory-visual synesthetes. *Neuropsychologia* 50, 1471-1477 (2012).
- [4]Ward, J. & Simner, J. Lexical-gustatory synaesthesia: linguistic and conceptual factors. *Cognition* 89,237-261 (2003).
- [5]Ward, J. Synesthesia. *Annual review of psychology* 64,49-75,(2013).
- [6]Ward, J. & Simner, J. How do Different Types of Synesthesia Cluster Together? Implications for Causal Mechanisms. *Perception* 51, 91-113 (2022).
- [7]Bosley, H. G. & Eagleman, D. M. Synesthesia in twins: Incomplete concordance in monozygotes suggests extragenic factors. *Behavioural Brain Research* 286, 93-96(2015).
- [8]Dehaene, S. *The Number Sense: How the mind creates mathematics*. (Oxford University Press, 1997).
- [9]Kohonen, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics* 43, 59-69 (1982).
- [10]Roitman, J. D., Brannon, E. M. & Platt, M. L. Monotonic Coding of Numerosity in Macaque Lateral Intraparietal Area. *PLoS Biol* 5, e208 (2007).
- [11]Makioka, S. A self-organizing learning account of number-form synaesthesia. *Cognition* 112, 397-414 (2009).
- [12]Eagleman, D. M. The objectification of overlearned sequences: A new view of spatial sequence synesthesia. *Cortex* 45, 1266-1277 (2009).
- [13]Makioka, S. Idiosyncratic spatial representations of the days of the week in individuals without synesthesia. *Cognition* 207, 104500 (2021).
- [14]Bor, D., Rothen, N., Schwartzman, D. J., Clayton, S. & Seth, A. K. Adults Can Be Trained to Acquire Synesthetic Experiences. *Sci Rep* 4, 7089 (2014).
- [15]Seth, A. K. A predictive processing theory of sensorimotor contingencies: Explaining the puzzle of perceptual presence and its absence in synesthesia. *Cognitive Neuroscience* 5, 97-118 (2014).
- [16]牧岡省吾『なぜ存在しない感覚が感じられるのか 共感覚の謎を解く』光文社新書 (2025)。

発表者紹介

大阪公立大学現代システム科学研究科教授。1989 年京都大学文学部哲学科卒。1994 年京都大学文学研究科修了。博士（文学）。大阪女子大学助手、講師、助教授、大阪府立大学准教授、教授を経て現職。研究分野は文字や単語の視覚的認知、語彙獲得、日本語のコーパス分析、共感覚、身体化認知、知覚の系列依存性、意識など。共感覚に関する展望論文（牧岡省吾(2022)共感覚と自己組織化学習：共感覚はどのように生成されるのか、なぜ消えないのか、*認知科学*29(1),47-62）で2022年度日本認知科学会論文賞を受賞。

