

## 3-3 クロスモーダル情報処理研究とその応用

### 3-3 Basic and Advanced Research in Cross-modal Information Processing

對馬 淑亮

TSUSHIMA Yoshiaki

クロスモーダル情報処理は、人間独自の情報処理であり、近年多くの研究が行われ、その研究成果は学術的な関心のみならず、社会への応用展開に対する期待も大きい。しかしながら、クロスモーダル情報処理研究は、科学的、定量的な研究を実施することに多くの困難が伴い、いまだ発展途上である。本稿では、こうした状況を踏まえ、近年我々が行った、1. Hue-heat 効果を用いた照明・空調連動制御システムの研究、2. 嗅覚で見た目(視覚)を変える研究、を紹介し、それらの研究とともに今後の応用展開なども論じることとする。人間独自の情報処理、脳情報通信融合研究の知見が、「こころ」を持つ人工脳“CiNet Brain”の構築、ひいては、人間中心の社会(Society 5.0)の中での情報通信技術のイノベーション、研究開発に役立つことを切に願う。

Cross-modal information processing is one of distinctive information processing of human being. The research on cross-modal information processing is expected to be applied in not only academic but also a wide range of field, such as business field. However, cross-modal studies are still developing due to some difficulty of doing research scientifically and quantitatively. Here, I show two of our recent studies about cross-modal information processing; cross-modal interaction between vision and thermal-sense, and cross-modal phenomenon between olfaction and vision, and talk our future views. I hope, our studies contribute to “Society 5.0” proposed by Japanese Cabinet office as well as construction of “Cinet Brain” having human mind.

#### 1 まえがき

人間の感覚情報処理では、感覚器で受けた感覚情報が、本来とは異なる感覚を喚起することがある。例えば、水色(視覚情報)から涼しさを感じたり(体性感覚)、ソースの匂い(嗅覚情報)から、お好み焼きをイメージしたりする(視覚)。機械はそうではない。スマホは水色に塗っても熱くなるし、グーグルのカメラがお好み焼き屋の前を通っても、映像がソース色に染まることはない(染まるようには作られていない)。こうした、人間独自の情報処理、つまり、本来別々の感覚情報が互いの感覚に影響を及ぼしあう情報処理のことを、クロスモーダル情報処理という。近年、こうした、感覚のコラボとも言うべき、クロスモーダル情報処理に関する研究が盛んである。その主な理由として、ユニモーダル(単一感覚)研究の知見が、ある程度蓄積してきたという経緯があるのかもしれないが、クロスモーダル研究を行うことで、人間の新たな感覚情報処理の発見 [1] や、その研究成果を活かしたクロスモーダル応用技術・サービスへの展開が期待されていることも

あるように思われる。これは、脳科学研究の成果を社会に還元することを目指す CiNet としても取り組むべき研究課題である。しかし、クロスモーダル研究は、実験環境の構築を含む実験デザインの難しさなどから、科学的、定量的な研究を実施することが難しい場合が多く、現在でもまだまだ開拓されていない研究分野と言える。例えば、実験参加者に気づかれない程度に、クロスモーダル刺激を提示する技術や、気づかれても恣意的な判断、反応を返しにくい(返したとしても、データの解析段階でそれらのデータを除去できる)心理実験のデザインを組まなければ、科学的、定量的な、クロスモーダル情報処理研究とは言えない。本稿では、こうしたクロスモーダル情報処理研究の現状を踏まえ、近年我々が行った、1. Hue-heat 効果を用いた照明・空調連動制御システムの研究、2. 嗅覚で見た目(視覚)を変える研究、を紹介し、それらの研究とともに今後の応用展開なども論じることとする。

## 2 Hue-heat 効果を用いた照明・空調連動制御システムの研究

およそ 100 年前、心理学者らは目から入る色情報が体感温度に影響を与えることを報告した[2]。この効果は Hue-heat 効果と呼ばれ、人間のクロスモーダル情報処理のひとつである。現在では、Hue-heat 効果を意識的？無意識的？に使った商品やサービスが巷でも数多くみられ、人間のクロスモーダル情報処理を使った応用展開技術などとしてもよく知られている(図 1)。

しかし、Hue-heat 効果を科学的、定量的に検証したといえる研究はあまり多くはなく(…科学的、定量的とは言い難い研究を参考にしても仕方がないので文献は割愛する!)、Hue-heat 効果の基本的な知見(図 1 左図)を踏まえた後は、直観的な現場の感覚で社会実装されている商品やサービスほとんどである。そこで、我々はこの Hue-heat 効果を科学的、定量的に検証し、また、その研究成果を社会に広く還元することも視野に入れ、照明と空調を連動させた照明・空調連動制御システムを考案するための心理物理実験を行った(心理物理実験：物理的事象(物理量)とそれに対応する心理的事象(心理量)の関数関係を定量化し、人間の知覚や認知をできるだけ科学的、定量的に測定するための実験[3])。

まず、実験のために照明と空調を制御する実験環境を、けいはんなオープンイノベーションセンター(KICK)内に構築した(図 2、メタコンフォート・ラボ



図 1 Hue-heat 効果とその応用展開事例 左図：一般に、色相環上で青から緑は冷涼感を(寒色)、赤からオレンジは温暖感を喚起する(暖色)。右図：Hue-heat 効果を利用したと思われる飲料自動販売機の例(ちなみに、「つめたい」「あったかい」ではなく、「つめた〜い」「あったか〜い」と表現することで、いかなる感覚が喚起されるか筆者には、わからな〜い)。

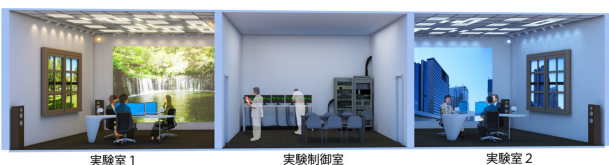


図 2 メタコンフォート・ラボ (MC-Lab)、京都精華町 1つの部屋が 5.5 m × 5.5 m の、実験制御室、実験室 1、実験室 2 の 3つの部屋から構成される。実験室 1、2 は同じ空調、照明システムが設置されており、同時刻、同仕様空間において照明、空調を制御した心理物理実験を実施することができる。

(MC-Lab))。

この MC-Lab を用いて、照明の違いにより体感温度がどのように変化するかを検証する心理物理実験が行われた(図 3)。

その結果、人間の体感温度は、照明によってある程度制御できることがわかった(図 4、2~3℃程度の室内温度差であれば、照明によって温度差を感じさせないようにすることができる。また、温度差のない空間でも照明によって異なる体感温度を感じさせることができる。詳細は原著論文[4]を参考あれ)。また、その効果は時間経過とともに、微妙に変化するが、ある程度維持されることもわかった(図 4)。

さらに、先に得られた実験結果(図 4)を細かに分析するため、同実験環境において、実験参加者が、照明の違いがなかった場合の実験室 1 と 2 で、体感温度をどのように感じるかについても知っておくため、同照明、同温度差条件における体感温度の変化を先の実験の手順に従い、検証した(図 5)。

その後、これらの実験結果を総合的に分析し、照明による体感温度変化モデルを提案した(図 6、詳細は原著論文[4]を参考あれ)。

これらのモデルからは、従来の Hue-heat 効果(単に、色温度は人間の涼暖感に影響を与える)の知見をさらに発展させ、2つ以上の対象物、もしくは対象空間の色温度を変えることで、人間の涼暖感の「生成」、「除去」、「入れ替え」の制御が可能であることを示した。実験結果を基にして、こうしたモデルを構築することは、Hue-heat 効果の科学的、定量的な研究成果の蓄積となることのみならず、社会実装に向けた応用展開を行う場合に、大いに役立つことが予想される(例えば、Hue-heat 効果を用いて課題に取り掛かる際に、その課題が体感温度の「生成」、「除去」、「入れ替え」のどれを必要としているのかを明確にしなが課題に取り組むことができる。))。

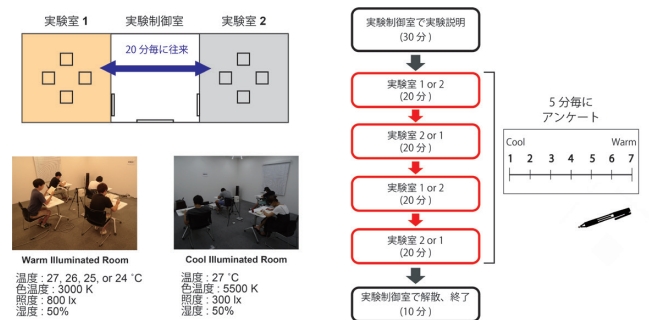


図 3 心理物理実験の環境とデザイン 左図：実験環境。暖色照明の部屋(Warm illuminated Room)、寒色照明の部屋(Cool illuminated Room)が準備され、実験参加者は無作為に、両部屋の間に 0~3℃差のあるグループに分けられた。右図：実験デザイン。実験参加者は異なる 2つの照明の部屋(実験室 1、2)を 20分ごとに行き来し、実験室内で 5分ごとに涼暖感を 7段階に分けて報告した。

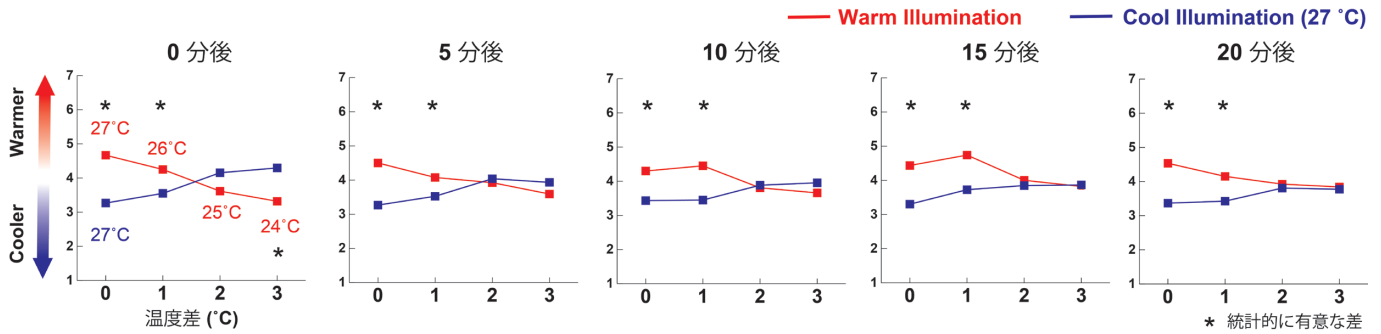


図4 照明の違い「あり」の実験結果 グラフの縦軸は涼暖感、横軸は実験室1, 2の温度差を示す。2~3℃の室内温度差であれば、20分程度の時間を経ても、照明を制御することによって温度差を感じさせないことができた。また、照明を制御することによって、温度差のない室内空間に体感温度の差を作り出すことができた。

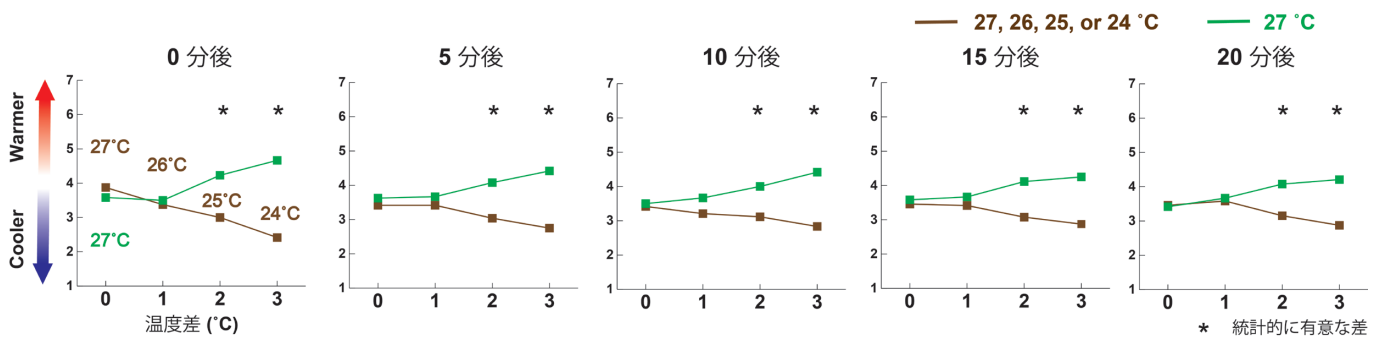


図5 照明の違い「なし」の実験結果 同実験環境下において、実験参加者は室内温度1℃差の違いを感じることはできないが、2℃差以上の違いは感じる事ができた。

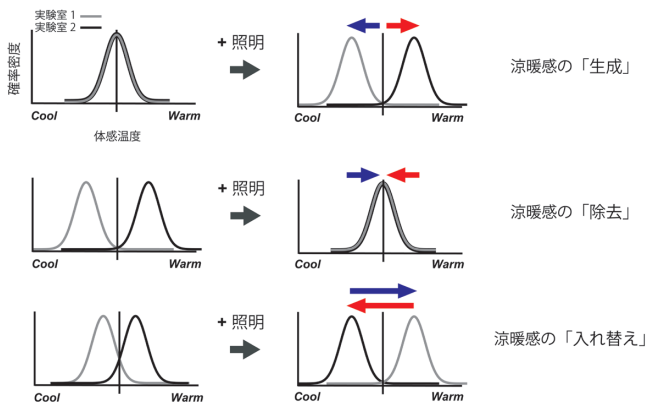


図6 照明による体感温度変化モデル 照明によって人間の涼暖感の「生成」「除去」「入れ替え」が可能。

トの香りでくすっきりした>、バラの香りにく癒された>など、その嗅覚刺激から喚起させられる香りの情報以外(以上?)の感覚情報処理も指すことが多い。そのせい(か?)、嗅覚のユニモーダル情報処理研究は、物理的事象とそれに対応する心理的事象の一対一の関係が比較的はっきりしている視覚や聴覚などの研究よりもまだまだ発展途上であり、曖昧さの残るものが多く感じられる。ところで、先のくすっきりした>、く癒された>などという感覚は、嗅覚刺激が嗅覚情報以外にもたらしたであろう二次的な感覚(情動や記憶など)も含まれる感性表現であり、嗅覚刺激に対する直接的な反応を表現したものとは言えないため、科学的、定量的に研究することが難しい(図7)。

こうした香りに対する感性評価表現の曖昧さ、また、これまで、人間の嗅覚特性に合わせた嗅覚刺激提示装置がなかったことなどから、嗅覚に対する研究には困難さが生まれ、結果として、嗅覚のクロスモーダル情報処理はまだまだ解明されていない部分が多いのが現状である。そこで、我々は、科学的、定量的に嗅覚のクロスモーダル情報処理を研究するため、新しく開発した嗅覚刺激提示装置を使い、また、嗅覚刺激に対する感性評価の曖昧さをなくすため、嗅覚で見た目(視覚)を変えることができるか、を検証することとした(嗅

### 3 嗅覚で見た目(視覚)を変える研究

香水やアロマセラピーなど、香りを使った商品やサービスは多くみられるが、嗅覚刺激が他の感覚に影響を与えるクロスモーダル情報処理に関しては、まだまだ多くの謎が残されている。そもそも、嗅覚のユニモーダル情報処理とは、ある嗅覚情報に対して、その嗅覚刺激から喚起させられる香りの感覚情報を処理するだけのことを指すのだが(レモンの香りであれば、「レモンの香りがする」という感覚)、一般には、ミン





図7 嗅覚刺激に対する感性評価は、曖昧な表現や、嗅覚刺激から喚起させられる香りの情報以外に対する感覚なども含まれることが多く(すっきりする、落ち着く、癒される、など)、科学的、定量的に研究することが困難な場合が多い。図中は全て、香りに対する感想と思われるが、科学的、定量的な嗅覚情報処理の研究として取り組むことができる反応は、真ん中の「コーヒーの香りです」のみかもしれない。科学的、定量的に人間を研究することは、時に無味無臭に感じられることも多い。

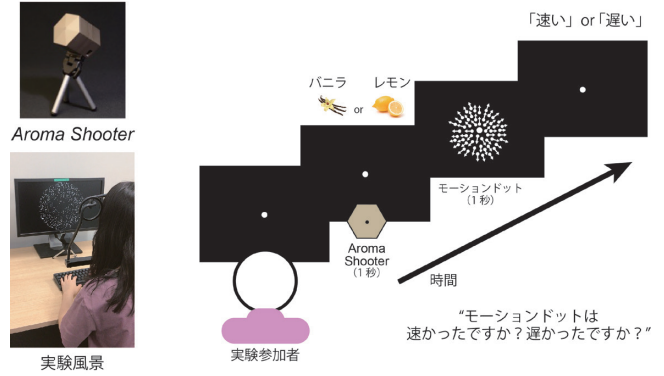


図8 左図上: Aroma Shooter 左図下: 実験風景。 右図: 実験デザイン。実験参加者は、レモンか、バニラか、無臭の香りを1秒間噴射された後にモニターに提示されるモーションドット(1秒間の提示)の速さを答えた。

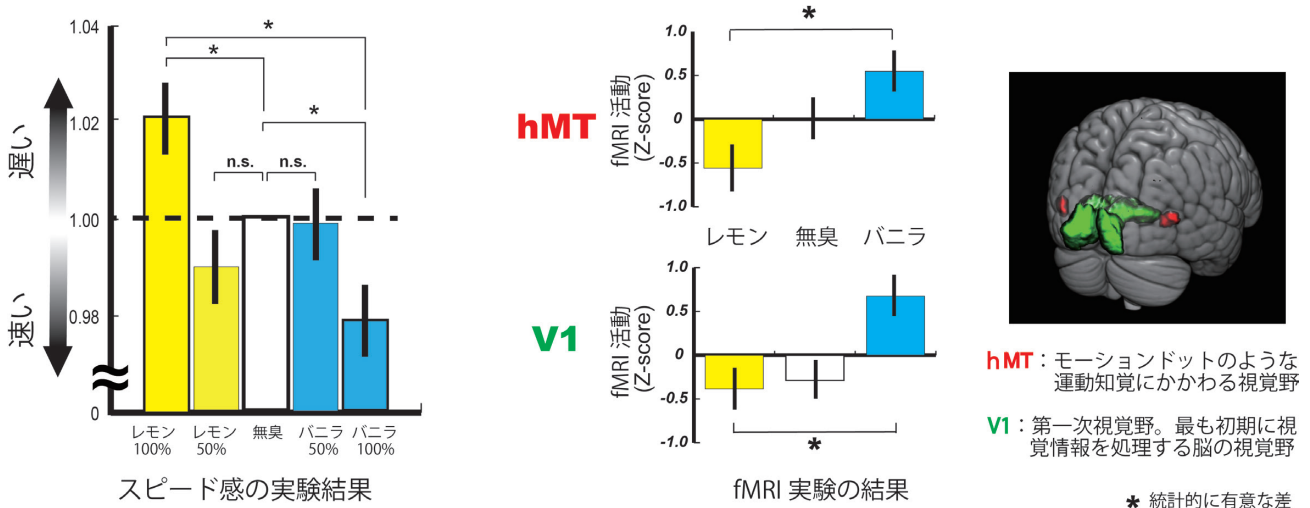


図9 左図: 心理物理実験の結果 <グラフの縦軸はPSE (point of subjective equality: 主観的等価点)の比率>を示す(無臭を1とする)。実験参加者は、レモン>無臭>バニラの順に、モーションドットを遅く感じた。右図:fMRI 実験の結果と分析を行った脳部位、hMTとV1。視覚刺激であるモーションドットの情報処理にかかわるhMTとV1の活動が、嗅覚刺激によって変化していた。

覚刺激に対する感性評価の曖昧さを生じさせないために、嗅覚刺激そのものに対する感性評価ではなく、嗅覚刺激がもたらしたであろう、他の感覚(ここでは視覚)への影響を検証した)。

はじめに、人間の嗅覚特性に合わせた、心理物理実験にも耐え得る嗅覚刺激提示装置として、Aroma Shooterを開発した[5](図8、左図上。主な特性として、香りの瞬時切替え、コンパクト設計、映像との同期提示ができる、などがある)。このAroma Shooterを使い、心理物理実験の手法を用いて、実験参加者にレモン、バニラの嗅覚刺激によって、モーションドット(中心から放射状に動く小さな白点、図8参照)の動きの速さを、「速い」か「遅い」の二択で判断してもらう実験を行った(図8、詳細は原著論文[6]を参考あれ)。

その結果、同じ速さのモーションドットが提示され

た場合でも、実験参加者は無臭時に比べてレモンの香りが伴う時は遅く、バニラの香りが伴う時は速く感じることを発見した(図9左図)。また、この心理物理実験の結果を生理的な観点からも検証するべく、fMRI装置内ではほぼ同様の心理物理実験を行い、脳活動を調べた。その結果、香りによって視覚野(hMT: human middle temporal、V1: visual area 1)の脳活動が変わることが確認され(図9右図)、嗅覚刺激による視覚の変化、すなわちクロスモーダル情報処理の存在が生理学のデータからも実証された(図9、詳細は原著論文[6]を参考あれ)。

こうした嗅覚刺激によるクロスモーダル現象は、これまで、感情や記憶のような高次の脳機能への影響が取り沙汰されることが多くあったが[7][8]、嗅覚刺激が映像のスピード感のような、脳機能の中でも低次の感

覚に影響を与えることが発見されたことの学術的意義は大きい。心理学の問題で、「レモンは速いか、遅いか」という問いに、多くの人が「レモンは(どちらかといえば)、速い」と答えることがわかっているが[9]、レモンやその香りの印象が、何らかの形で、スピード感と関連することが今回の研究結果からも示され、クロスモーダル情報処理とは何か、感覚とは何か、人間の情報処理そのものを知る上でも、この研究結果は非常に示唆に富んだ研究成果となった[10]。

## 4 まとめと将来の展望

まえがきでも述べたが、クロスモーダル情報処理は人間独自の情報処理システムである。本稿では、ICT最適化のための脳情報通信技術の研究開発をし、またそれらの研究成果を社会へ還元することを目指すCiNetにおいて、この人間独自の情報処理システムを検証するため近年行った、照明と体感温度の関係、香りと見た目の関係を検証する2つの研究を紹介した。前者は、現在、同志社大学とともに共同研究を行っていた木村工機株式会社が、その社会実装を目指し事業展開を試みており[11]、また、近年のSDGs(Sustainable Development Goals)の活動と相まってか、省エネの観点からも注目を集めている(実際、原著論文の中でも、空調の設定温度を2℃変えることで、6.8%の省エネ効果が見込まれる試算[12]を紹介している[4])。後者は、社会への応用展開というよりは、まだ学術的な興味が先行している面はあるが、クロスモーダル現象の新たな発見として、学术界だけでなく産業界からも多くの問い合わせをいただいております、両研究とも社会への応用展開がはじまっている。こうした人間独自の情報処理システムを科学的、定量的に研究することは、「こころ」を持つ人工脳“CiNet Brain”の構築、ひいては、人間中心の社会(Society 5.0)の中であるべき情報通信技術の構築のためにも不可欠であるよう思われる。脳情報通信融合研究、そして、クロスモーダル情報処理研究を通して、今後も情報通信のイノベーションを生み出す研究を進めていく予定である[13]。

### 【参考文献】

- 1 Chen, Y. and Spence, C. "Assessing the role of the 'Unity Assumption' on multisensory integration: a review." *Front. Psychol.*, 8:445, 2017.
- 2 Mogensen M.F. and English H.B. "The apparent warmth of colors," *The American Journal of Psychology*, 1926.
- 3 大山 正, "感覚・知覚測定法(1)," *人間工学*, 4(1), pp.37 - 47, 1968.
- 4 Tsushima Y, Okada S, Kawai Y, Sumita A, Ando H, and Miki M. "Effect of illumination on perceived temperature", *PLoS One*, 2020 Aug 10;15(8):e0236321, 2020.
- 5 Kim, D. and Ando, H. "Development of directional olfactory display," *Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI)*,

- 6 Tsushima Y, Nishino Y, and Ando H. "Olfactory Stimulation Modulates Visual Perception Without Training," *Front. Neurosci.*, 2021 Aug 2;15:642584, 2021,
- 7 Toller, S. V. "Odours, emotion and psychophysiology," *Int. J. Cosmetic Sci.*, 10, pp.171-197, 1988.
- 8 Rasch, B., Büchel, C., Gais, S., and Born, J. "Odor cues during slow-wave sleep prompt declarative memory consolidation," *Science*, vol.315, pp.1426-1429, 2007.
- 9 Woods, A. T., Spence, C., Butcher, N., and Deroy, O. "Fast lemons and sour boulders: testing crossmodal correspondences using an internet-based testing methodology", *i-Perception*, vol.4, no.6, pp.365-379, 2013.
- 10 西野 由利恵, 對馬 淑亮, "レモンでゆっくり、バニラで速く," *Aroma Research*, no.89, (vol.23/no.1 2022), 2022.
- 11 <https://www.kimukoh.co.jp/news/news-20870/>
- 12 Ministry of the Environment of Japan. Appendix: Global Warming Control Plan, p.150, 2016.
- 13 對馬 淑亮 "情報通信のイノベーションを脳科学で創出へ," *バイオメカニズム学会誌*, 42 巻, 2 号, p.113-118, 2018.

### 對馬 淑亮 (つしま よしあき)

未来 ICT 研究所  
脳情報通信融合研究センター  
脳機能解析研究室  
主任研究員  
Ph.D.  
脳科学、心理学、認知科学