

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32652

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04494

研究課題名（和文）視聴覚統合機能と概念獲得機能の統一モデルの提唱：神経制約計算機モデルを用いて

研究課題名（英文）An unified framework for audio-visual integration and semantic memory:
Neural-computational modelling

研究代表者

上野 泰治 (Taiji, Ueno)

東京女子大学・現代教養学部・教授

研究者番号：20748967

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、視聴覚統合と意味記憶を支える脳部位の共通性を検討することにより、両領域を統合する認知神経モデルを提唱することを目的とした。fMRI・経頭蓋磁気刺激法・経頭蓋直流電気刺激法と、様々な手法を用いた結果、これまで視聴覚統合の分野でコンセンサスとされてきた左脳後部上側頭溝の役割を見直す必要性を明らかにすることが出来た。また、視聴覚統合を支える脳部位として示唆されてきた運動野について、初めて表象類似度サーチライト分析を用いて支持する証拠を出すことが出来た。これは、音声知覚の運動理論を支持するのみならず、同理論に関するこれまでの批判に耐える結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまでコンセンサスとされてきた「視聴覚統合における左脳後部上側頭溝の役割」を支持しない結果を一貫して提示したのみならず、先行研究のデータの再分析に基づいて、これまでの知見が間違っている可能性を示したことに学術的な意義がある。また、差分法fMRI分析の結果を根拠とした「音声知覚の運動理論」についてはこれまで批判があったが、その批判に当てはまらない結果を新しく表象類似性サーチライト分析で示したところに本研究の学術的意義がある。音声知覚の運動理論は、母語・第二言語学習にあたって、聴き取り訓練のために発話訓練をすることが効果的である、などの実践的意義を持つことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to propose a cognitive neurobiological model that accounts for both audio-visual integration and semantic memory by investigating the common brain regions supporting these functions. A multi-method approach, including fMRI, TMS, and tDCS, revealed the necessity of reassessing the role of the left posterior superior temporal sulcus, which has been considered a consensus in the field of auditory-visual integration. Moreover, the representational searchlight analysis revealed the role of the motor cortex in audio-visual integration. Indeed, past studies have already suggested this region, and interpreted in terms of the motor theory of speech perception. However, due to their use of the conventional fMRI analysis (i.e., subtraction method), there was still a dispute regarding the validity of the motor theory. In contrast, our demonstration by the representational searchlight analysis provided stronger evidence for the motor theory.

研究分野：認知神経心理学

キーワード：視聴覚統合 意味記憶 マガーク効果 fMRI 経頭蓋磁気刺激法 経頭蓋直流電気刺激法

1. 研究開始当初の背景

本研究の目的は、視聴覚統合と意味記憶の両分野を統合する認知神経モデルの提唱であった。研究開始当初の背景として、これらの分野は比較的個別に研究されており、分野間相互作用はほとんどなかった。しかし、どちらの分野も複数の感覚情報(例：視覚と聴覚)を結び付ける現象や機能を対象としている。また、音韻意識獲得・概念獲得と、どちらの分野も言語発達に重要な認知機能を対象としている。さらに、各分野の神経科学結果をレビューすると、よく似た脳部位が関与していることが示唆された(下の図1右の後部上側頭溝:pSTS)。

図1. 先行研究より示唆される、意味記憶と視聴覚統合のそれぞれに重要な脳部位

手法	視聴覚統合	意味記憶	手法	視聴覚統合 (マカーク効果・読唇など)	意味記憶
fMRI	研究無し (本申請計画で検討)	○ 例:Binneyら(2010)	fMRI	○ 例:Eriksonら(2014)	○ 例:Binderら(2009)
脳損傷患者	研究無し (本申請計画で検討)	○ 例:Pattersonら(2007)	脳損傷患者	○ 例:Hickokら(2018)	○ 例:Jefferiesら(2006)
脳刺激法	研究無し (本申請計画で検討)	○ 例:Pobricら(2007)	脳刺激法	○ 例:Beauchampら(2010)	○ 例:Priceら(2016)

しかし、関与する脳部位に相違点もあるため、単一モデルで説明できるか否かについては議論されていない。特に、上の図1左に示すように、「前下側頭葉という脳部位が視聴覚統合に関わる」という神経科学研究が全くないことが、両分野を統合的に説明することを妨げる主たる要因であった。しかしながら、そのような神経科学研究が無いことは、必ずしも前下側頭葉が視聴覚統合に関わっていないことは意味せず、むしろ、各神経科学技術の方法論的な問題を反映している可能性が高かった。

2. 研究の目的

そこで本研究は、各神経科学技術の方法論的な問題に対処した上で、前下側頭葉が視聴覚統合に関わっているかどうかを検討することで、両分野を統合する認知神経科学モデルを提唱することを目的とした。例えばfMRIの場合は、磁場敏感性への問題が挙げられる。前下側頭葉は神経組織と空気の境目に当たる部位が多く、磁場敏感性が斉一ではない。すると、磁化率アーチファクトの影響でfMRIの信号は大きく歪み、活性化をうまく検出できない。そこで、マンチェスター大学の研究者らが発見した歪み補正技術(Embletonら, 2010)や、同じく磁化率アーチファクトに対応するためのDual echo法(Schwarzbauerら, 2010)を用いて、前下側頭葉の役割を検討することを目的とした。

また、fMRIとは別の手法については脳刺激法が挙げられる。脳刺激法のうち、特に経頭蓋磁気刺激法は刺激脳部位近辺の筋肉・腱の収縮を伴うため、前下側頭葉のように顔面筋に近い部位の刺激は、安全ではあるものの不快であることが知られる。よって、強い理論的動機づけが無い限り、脳刺激が行われることが稀な脳部位である。言い換えると、これまでは脳刺激法による検証が避けられていた脳部位であった。そこで、本研究は安全に刺激することで、視聴覚統合における前下側頭葉の役割を明らかにすることを目的とした。

以上により、視聴覚統合と意味記憶研究における共通した脳部位として、既に明らかになっている後部上側頭溝(pSTS)のみならず(上の図1左参照)、あたらしく前下前頭葉を加えられるかどうかを検討することで、両分野を統合する認知神経モデルを提唱することを目的とした。

3. 研究の方法

研究1では、脳機能計測(fMRI)の手法と磁化率アーチファクト対応技術を用いて、視聴覚統合機能を支える脳部位を検討した。視聴覚統合機能を検討するための具体的な課題としては、マカーク課題遂行中の脳活動を推定した。実験刺激は日本人女性3名の発話映像とし、発話された音素は[pa], [ta], [ka]の3種類であった。映像は、音声と口の動きが一致したcongruent刺激(次頁の図2の最下段の左3列)と、一致していないincongruent刺激(McGurk刺激)であった。音声発話者のプライバシーを考慮し、以下の図2は無関係のフリー素材の顔を用いて図示している。Congruent条件(特に音声[pa]と口の動きが[pa])とincongruent条件(音声[pa]と口の動きが[ka])の比較を行うことで、視聴覚統合に必要な脳部位を明らかにすることができる。

研究2では、同じ課題を用いる際に経頭蓋磁気刺激法(TMS)を用いて前下側頭葉を刺激し、視聴覚統合における前下側頭葉の役割について検討した。また、先行研究で視聴覚統合を支えると示唆されてきた後部上側頭溝に対しても統制刺激位置として磁気刺激を行い、比較検討した。

ここで、次章の「研究成果」にて説明するように、上記のfMRI研究、磁気刺激研究のいずれも、前下側頭葉の役割を示唆するような結果が得られなかったのみならず、過去の先行研究において示唆されていた後部上側頭溝(pSTS)の役割を示唆する研究成果すら得られなかった。そこで、以下の研究3、研究4、研究5を実施した。

図2. 研究2の一試行と各刺激の概念図

研究3ではまず、後部上側頭溝の役割が示唆されなかった研究1・2が偶然の結果かどうかを確認するため、再度、後部上側頭溝を刺激しながらマガーク課題を遂行する研究を実施した。さらにその際、左脳への刺激の効果を、対応する右脳部位が補償している可能性が想定された。

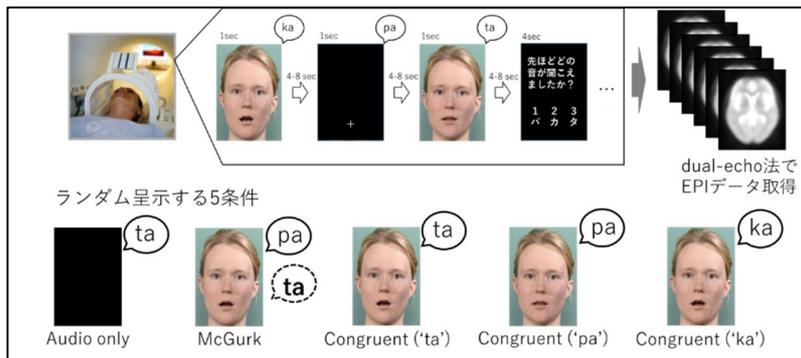
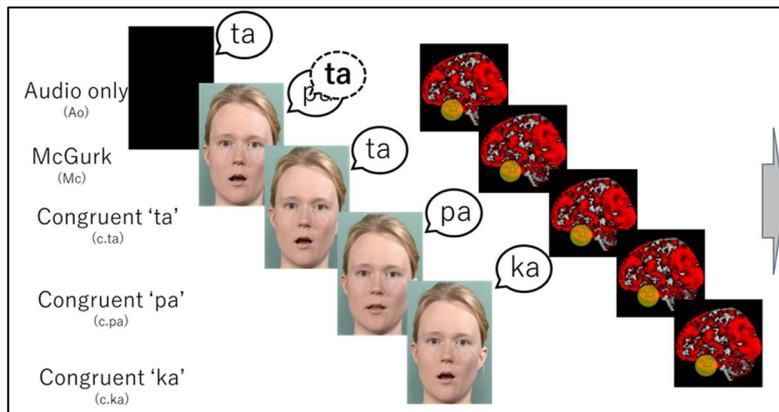


図3. 表象類似度分析の概念図

その場合、左脳への刺激の効果はマスクされてしまうため、刺激の効果を取り出すことが出来ない。それを検討するため、研究3では、対応する右脳に対しても刺激を行い、マガーク効果への影響を検討した。結果として、やはり後部上側頭溝を刺激してもマガーク効果生起率への影響は見られなかった。



研究4では、上記の研究1(fMRI)をさらにフォローアップする研究を行った。具体的には、研究1は各脳部位において条件間での賦活量の差を検定(いわゆる差分法)していたが、研究4では表象類似度分析パラダイムを用いた研究を実施した。これは、ある脳部位が認知活動Aに重要であれば、認知活動Aにかかわる刺激群において、刺激間の類似性と脳活動パタンの類似性が相関するはず、という理論的根拠に基づいている。具体的には以下のとおりである。

図4. 表象類似度分析において算出される表象類似度行列の例

まず、右の図3の通り、各刺激条件における脳活動パターンを voxel 毎に抽出した。その後、特定の領域の全 voxel の活性化推定量を抽出し、下の図4の通り条件間の相関を算出した。その後、に、次頁の図5の左の通り、呈示音と知覚音に基づいて、モデルとなる表象類似度行列を設定し、脳活動の類似度行列(図5右)との相関を推定した。もし、知覚音表象との類似性を示す脳部位があれば、その脳部位は、McGurk 効果の影響を受けた、“視聴覚統合的”音声表象の神経基盤として解釈可能である。

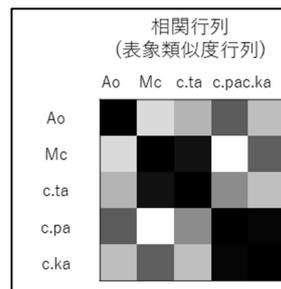
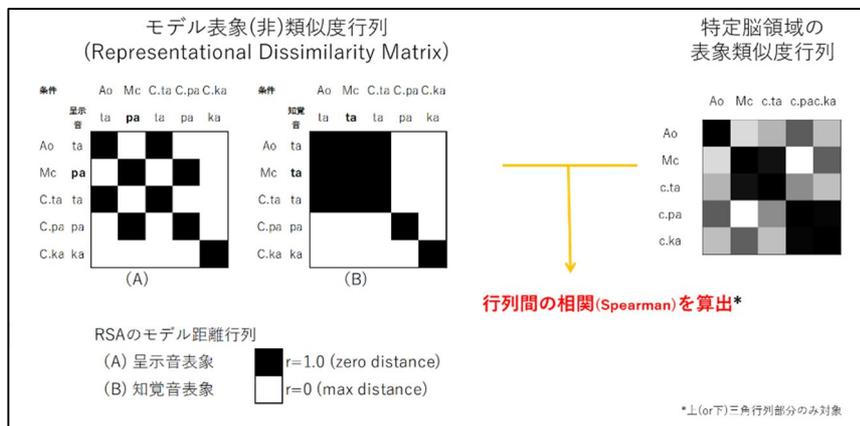


図5. モデルとなる刺激類似度行列と脳活動パタンの類似度行列を用いた分析の概念図

以上のような手法を用いて、知覚音表象の類似性を示す脳部位を探したところ、やはり後部上側頭溝(pSTS)については検出されず、一方で、左下前頭回(IFG)が検出された。

以上を踏まえ、マガーク効果における左下前頭回の役割をさらに検討するため、経頭蓋直流電気刺激法



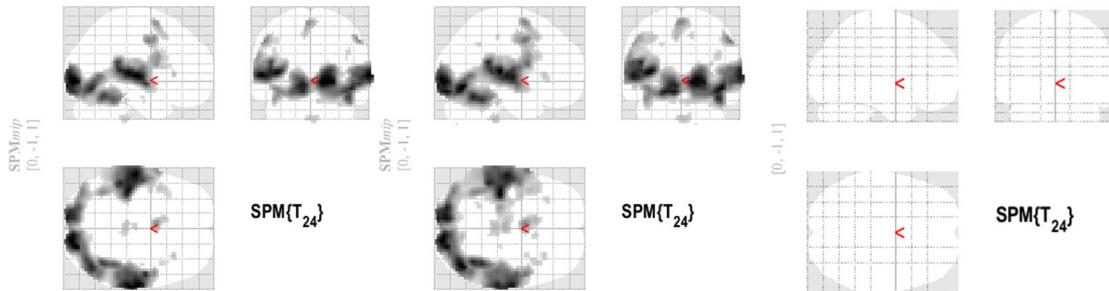
*上(or下)三角行列部分のみ対象

(tDCS)を用いた研究を実施した。tDCS は、陽極・陰極を入れ替えることにより、特定の脳部位の神経活動を抑制したり促進したりすることが可能な手法である。また、シャム刺激(偽刺激)も遂行可能である。つまり、参加者は刺激されていると思いながら課題を遂行しているが、実は刺激を行っていない状況を作り出すことができ、統制条件としてプラセボ効果を考慮した解釈が可能になる手法である。これを用い、マガーク効果における下前頭回の役割を検討した。

4. 研究成果

研究1：以下の図6は、Incongruent条件における賦活脳部位(左)、Congruent条件における脳賦活部位(中央)、そしてそれらの差分(右)を表している。右図が示す通り、これら2条件の比較において賦活推定量が有意に異なる脳部位は見出されなかった。

図6: fMRI を用いて推定したマガーク課題遂行中の脳活動(左は incongruent 条件; 中央は congruent 条件; 右は両者の差分)



よって、研究開始当初の仮説である、視聴覚統合における前下側頭葉の役割は支持されなかった。このこと自体は一つの知見として受け入れ可能であり、意味記憶と視聴覚統合はやはり異なる脳部位が担当していると解釈される。しかしながら、解釈が難しい点は、後部上側頭溝の役割も検出されなかったことである。これまで、後部上側頭溝は視聴覚統合に重要であるという結論は、視聴覚統合の領域では自明のこととして受け入れられていた。しかしながら、本研究はそれを追試することが出来なかった。

研究2：研究2は経頭蓋磁気刺激法を用いて、視聴覚統合における前下側頭葉の役割を検討した。しかし、前下側頭葉の刺激はマガーク効果生起率に影響を与えなかった。また、ここでも研究1と同じく、後部上側頭溝(pSTS)を刺激しても視聴覚統合への影響は見いだせなかった。

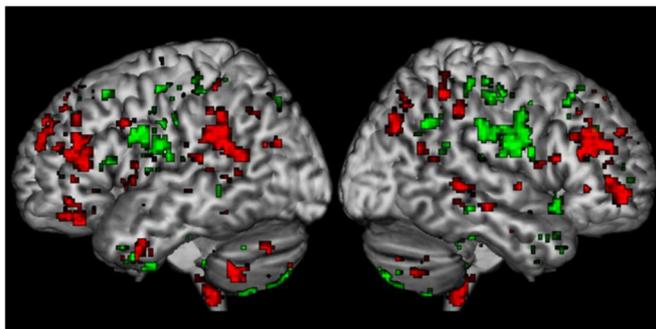
研究3:これら研究1 (fMRI) 研究2 (磁気刺激研究)のいずれも、前下側頭葉の役割を示唆するような結果が得られなかったのみならず、過去の先行研究において示唆されていた後部上側頭溝(pSTS)の役割を示唆する研究成果すら得られなかった。そこで、後部上側頭溝の役割が示唆されなかった研究1・2が偶然の結果かどうかを確認するため、再度、後部上側頭溝を刺激しながらマガーク課題を遂行する研究を実施した。さらにその際、左脳への刺激の効果を、対応する右脳部位が補償している可能性が想定された。その場合、左脳への刺激の効果はマスクされてしまうため、刺激の効果を取り出すことが出来ない。それを検討するため、研究3では、対応する右脳に対して刺激を行い、マガーク効果への影響を検討した。結果として、やはり後部上側頭溝を刺激してもマガーク効果生起率への影響は見られなかった。

研究3.5:以上の結果は、視聴覚統合の領域でコンセンサスとされている後部上側頭溝の役割と整合性のないものである。それも、研究1, 2, 3に一貫して、先行研究と整合性のない結果が得られた。そこで、先行研究を再度レビューし、後部上側頭溝の役割を示唆した既存の研究(例: Beauchamp et al., 2011)と、後部上側頭溝の役割を一貫して示唆していない本研究1・2・3との違いについて検証した。結果として、視聴覚統合、特にマガーク効果における後部上側頭溝の役割を示唆したfMRI研究のほとんどは、比較条件が不適切であることがわかった。具体的には以下のとおりである。一般的に視聴覚統合に必要な脳機能を調べる際には、「視覚情報」と「聴覚情報」を呈示し、それらの統合が必要な条件と、統合が不要な条件を比較することが必要である。前者の具体的な条件は、口の動きが[ka]で音声[pa]である映像を呈示するincongruent条件であり、これによって[ta]と知覚するマガーク効果は、二つの情報の統合が行われていることを示唆する。一方で、統合が不要な条件は口の動きも音声も[pa]である映像を呈示するcongruent条件である。これら2条件の間で異なる脳活動を調べるfMRI研究や、脳刺激研究によって、視聴覚統合に必要な条件を明らかにすることが出来る。しかしながら、マガーク効果を支える脳部位を明らかにしたとされる有名なfMRI研究(Beauchamp et al., 2011)を精査すると、incongruent条件と、「視覚刺激のみの条件」や「音声刺激のみの条件」との比較がなされていた。さらに、同グループがその後に行ったフォローアップ研究においても、incongruent条件とcongruent条件の比較によって後部上側頭溝の脳活動賦活を見出したのは、マガーク効果生起率が比較的高い一部の参加者群のみであった(Nath et al., 2011)。その後、脳卒中患者を対象として、視聴覚統合(マガーク効果)に影響を与える損傷脳部位を明らかにした研究も(Hickok, et al., 2018)、incongruent条件と「聴覚のみ条件」の比較であった。また、incongruent条件とcongruent条件の比較を行っても後部上側頭溝の脳活動賦活が見られない結果は、本研

究以外にも見つけることが出来た (例: Murakami et al., 2018)。よって、後部上側頭溝の役割を一貫して支持しない本研究 1,2,3 がこれまでの先行研究と一貫しないのではなく、視聴覚統合に関するこれまでの神経科学研究の方がむしろ再解釈が必要な状況であることがわかった。なお、先行研究によると、個人差が原因で、マガーク効果における後部上側頭溝の役割が検出されない可能性が、後付けの説明として示唆されている。しかしながら、個人差を理由とした後付けの解釈は、ここまで一貫して後部上側頭溝の役割を検出できなかったことと整合性が低い。以上により、先行研究においてこれまでコンセンサスとして取り扱われてきた視聴覚統合における後部上側頭溝の役割については、自明のものとは取り扱わず、その他の脳部位の役割を検証していく必要があることがわかった。

図 7. 表象類似度分析の結果

研究 4 では、伝統的な差分法による fMRI データ解析ではなく、表象類似度分析を用いて、視聴覚統合を支える脳部位を検討することを試みた。図 7 は、刺激の呈示音の類似性と整合性のある脳活動パターンを示した脳部位を赤色に、一方で、刺激の知覚音の類似性と整合性のある脳活動パターンを示した脳部位を緑で表したものである。結果、やはり、後部上側頭溝 (pSTS) は知覚音の類似性を捉えていなかった。つまり、視聴覚情報を統合してどのように「知覚したか」という情報を



後部上側頭溝は表現していないことが明らかとなった。一方で、下前頭回 (IFG) の脳活動パターンは知覚音の類似性を良く捉えていることが明らかとなった。これは、Murakami et al. (2018) と一貫して、運動前野がマガーク効果を支えていることを示すものであり、motor theory の枠組みを用いてマガーク効果を説明することを可能にする結果であった。Murakami et al. (2018) は伝統的な差分法を用いての結果であったが、本研究は表象類似度分析を用いて初めてマガーク効果における下前頭回の役割を明らかにする研究となった。

最後に、研究 5 では、研究 4 の結果をフォローアップするために、経頭蓋直流電気刺激法 (tDCS) を用いて、マガーク効果における下前頭回の役割を検証した。結果、下前頭回を刺激した際に、マガーク効果の生起率を上げるような促進効果は得られなかったものの、マガーク効果の生起率を下げる抑制効果については実証することが出来た。

まとめ: 研究当初の問いである、視聴覚統合における前下側頭葉の役割を示唆する研究結果は得られなかった。しかしながら、これはネガティブデータではなく、視聴覚統合と意味記憶の間で異なる脳部位が担当していること積極的に解釈し得る結果であると言えよう。また、研究 1-3 を実施していた際には解釈が困難であった「視聴覚統合を後部上側頭溝が支えない」という結果は、先行研究の再レビューにより再解釈が可能となった。むしろ、これまで視聴覚統合の分野においてコンセンサスとされてきた知見 (Beauchamp et al., 2011) を再解釈することを可能とする研究となった。

また、視聴覚統合の分野で初めて、表象類似度分析を用いて下前頭回の役割を検証することが出来た。これまでは、fMRI の差分法を用いて下前頭回の役割を明らかにした研究はあったが、表象類似度分析を用いた結果は初めてであった。差分法を用いた研究の場合、motor theory やミラーニューロンに基づく解釈以外の解釈も可能であったが (例: Hickok et al., 2018 を参照)、表象類似度分析を用いた結果の場合、motor theory による説明をさらに推進することが出来る。具体的には、Hickok らは「motor system が incongruent 条件の時だけに駆動しているとは考えられない」と、賦活レベルの差分法を用いた研究結果を批判している。しかし、賦活レベルを対象とした差分法ではなく、活動パターンによって運動関連領域の寄与を実証する表象類似度分析の結果は、Hickok らの主張に対して理に適った説明を提供できる可能性がある。

最後に、前下側頭葉の役割という観点から、意味記憶と視聴覚統合の共通性を実証する仮説は支持されなかったが、代わりに見つかった下前頭回の役割は、別の観点から意味記憶と視聴覚統合の共通性を説明する可能性を持っている。具体的には、下前頭回は昔から意味記憶に重要な役割を担うことが示唆されており (例: Thompson-shill, et al., 1997)、特に、状況に適した意味内容を検索することに重要な役割を担うことが示唆されている (Hoffman, et al., 2015)。よって、意味記憶と視聴覚統合を共通した認知神経モデルで説明するという本研究の目的は、当初想定しなかった脳部位を基盤として構築される可能性が出てきたと言えよう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Inohara Keisuke, Ueno Taiji	4. 巻 132
2. 論文標題 Evidence from a within-language comparison in Japanese for orthographic depth theory: Monte Carlo simulations, corpus-based analyses, neural networks, and human experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Memory and Language	6. 最初と最後の頁 104434 ~ 104434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jml.2023.104434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Castella Judit, Ueno Taiji, Allen Richard J.	4. 巻 38
2. 論文標題 2020 feels slow, long, and far away: Time distortion due to the COVID 19 pandemic	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Cognitive Psychology	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acp.4182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Judit Castella;, Taiji Ueno, Richard Allen
2. 発表標題 2020 feels slow, long, and far away: Time distortion due to the pandemic.
3. 学会等名 Third International Conference of Timing Research Forum ((国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新屋裕太・上野泰治・渡辺はま・多賀殿太郎
2. 発表標題 乳児の泣き声にみる母語の起源 深層学習モデルを用いた母音弁別学習バイアスの検討
3. 学会等名 日本赤ちゃん学会第23回学術集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenta Ueda, Sotaro Kondoh, Yuta Shinya, Hirotaka Gima, Taiji Ueno, Hama Watanabe, Gentaro Taga, Shinya Fujii
2. 発表標題 Limb Movements and Vocalizations to Music during Crying in Infants at Three- to Four-month-old Age
3. 学会等名 The International Congress of Infant Studies 2024 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 上野泰治	4. 発行年 2024年
2. 出版社 ナカニシヤ出版	5. 総ページ数 148
3. 書名 コロナ禍におけるオンライン教育相談 大家まゆみ・稲垣勉(編) 『グローバル時代の教育相談』	

1. 著者名 上野泰治	4. 発行年 2024年
2. 出版社 北大路書房	5. 総ページ数 -
3. 書名 ことばと記憶 辻幸夫・菅井三実・佐治伸郎(編) 『シリーズ ことばの認知科学』	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 章浩 (Tanaka Akihiro) (80396530)	東京女子大学・現代教養学部・教授 (32652)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	石橋 遼 (Ishibashi Ryo) (90750266)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所脳情報通 信融合研究センター・研究員 (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Leeds	School of Psychology		
スペイン	Universitat Autònoma de Barcelona			