

令和元年5月11日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2013～2017

課題番号：25119003

研究課題名（和文）こころの時間長・同期・クロックを作り出す認知メカニズムの解明

研究課題名（英文）Cognitive mechanisms for the duration, synchronization, and clock in the mind

研究代表者

村上 郁也（Murakami, Ikuya）

東京大学・大学院人文社会系研究科（文学部）・教授

研究者番号：60396166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 67,200,000円

研究成果の概要（和文）：主観的現在の時間スケールにおいて私たちが感じる時間長や時間差などをつかさどる脳内メカニズムが、視覚運動・位置知覚・注意・多感覚統合などの処理プロセスと階層的に相互作用している計算枠組みが、心理物理学と機能的脳計測の手法で解明された。心的時間に関わる神経表現が感覚モダリティごとに特有の同期周波数をもつことが示唆され、また感覚証拠が乏しい際に事前確率が重視されるなどの最適推定が行われることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

純粋な時間なるものを感覚受容できないのに、現在の時間の流れを追える感じがする、その感じを生むために動作している神経システムの情報処理と、その結果の知覚の特性を、実証データに基づいて明らかにした。これは脳研究の最終フロンティアのひとつであるこころの時間学の一翼を担うとともに、日常生活やスポーツ活動または事故や事件に至るまで、時間関係の認知が重大となる社会的局面に対して、実験心理学の見地から提言を与える。

研究成果の概要（英文）：Psychophysics and functional neuroscience revealed that the cortical mechanisms involved in subjective durations and timings in the timescale of specious present make specific hierarchical interactions with processes for visual motion, position perception, attention, and multimodal integration. Neural representations related to mental time were suggested to hold modality-specific synchronization frequencies, and optimal estimations were found to be the case especially when perceptual decision relies more on prior probabilities to compensate for poor sensory evidence.

研究分野：実験心理学

キーワード：実験心理学 認知科学 認知神経科学 時間知覚 時間長 錯覚

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

時間の認識にはさまざまなオーダーがあるが、知覚時間の認識とは現在まわりの十数ミリ秒～数秒の出来事（主観的現在）をどのように認知するのかに関わる機能である。知覚される時間とは外界適応的に心的に成立する表象である。このありありとしたタイミングや長さは、継時的に長さ弁別ができる精度で作業記憶に保持され、外挿によって近い将来の出来事予測にもかなりの精度で用いられる。にもかかわらず、その心内・脳内表現や処理過程については十分明らかになっていない。時間知覚に関しては、刺激の変化や同期などの感じられるタイミング（知覚的時刻）と、時間の長さの感じ方（心的持続時間）という少なくとも2種類の、必ずしも両者の間で一貫しない知覚体験がある。知覚的時刻と心的持続時間はどちらも神経活動の頻度と伝達速度が関係するという意味で共通要素をもつため、可能性として、共通の「心的クロック」的原理が脳内の各感覚システムあるいは多感覚相互作用における神経基盤に実装され、時間性を創発しているかもしれない。しかしこれについても概念以上の理解には到っていない。

2. 研究の目的

数秒以内の範囲をもつ「主観的現在」の心的表象と神経機構に関し、視覚系を軸に置いた「主観的現在」の心的持続時間がどこでどうやって決まっているのか、感覚モダリティ内外で決まる知覚的時刻・時間軸同期はどのようになされるのか、心的時間を刻むクロックはどのような心的プロセスと相互影響し合うか、の原理を解明する。

3. 研究の方法

ヒトを対象として視聴覚刺激観察時の心的反応を心理物理学測定法で自覚的に測定する知覚実験と、機能的磁気共鳴画像法（fMRI）、脳波測定、経頭蓋電流刺激法などの非侵襲脳計測・刺激法を組み合わせ、数理モデルのあてはめおよびシミュレーションにて検証する。

4. 研究成果

(1) 「主観的現在」に対応する帯域での心的持続時間の計算プロセスが他のプロセスとどのような階層関係で接続しているのか、どれだけの空間定数で側方性の連絡をもっているのか、モダリティ特異性を超えた注意・期待・事前知識といった高次過程によってどのように影響され、それは時間推定の最適性に利するものか、という各論的な興味の方々に対して実証的な手がかりを得ることができ、脳内計時システムの汎用装置と流用装置の双方についての存在を示唆する証拠が得られた。時間軸同期に関連する発見としては、神経ネットワークの引き込みという非線形過程により集団時計の同期性が説明でき、それによって出力としての知覚時間が予測できること、またモダリティ間の共振的揺らぎに関与する可能性のあるスーパーモダルな脳内周期性によって説明される課題成績が見出されたことが挙げられる。帯域ごとに異なる心的時間を刻むクロックが複数存在しているという作業仮説のもとに、クロック同士の動作特性の類似性と相違点について理解が深まった。

(2) 村上らは、心的持続時間の計算プロセスについて心理物理学実験により検討し、視覚システムの高次階層が関与していることをつきとめた。運動図形が静止図形よりも時間的に長く感じられるという時間過大視の本質は、運動している刺激でなく、たとえ静止刺激であっても主観的に動いて感じられる図形であれば十分であることを見出した（Aoki et al. 2016, *Journal of Vision*）。外発性注意がかつて向けられた視野内の領域に呈示された標的に対する反応時間が遅れる現象である復帰抑制について、そうした標的は反応時間の遅れだけでなく見かけの時間長が短く感じられるという、非注意による時間過小視の現象を発見した（Osugi et al. 2016, *Vision Research*）。

また、突発的に呈示されるフラッシュ刺激が他の刺激に比べて遅れて知覚されるというフラッシュシュラグ効果と呼ばれる錯視現象の責任中枢が視覚システムの他の下位処理系とどのようなつながりをもっているかを調べるために、時空間逆相関法という手法で実験参加者ごとの時空間相関カーネル（ひとつの刺激が別の刺激の見えに影響を及ぼしうる時空間の範囲）をあぶり出した。その結果、フラッシュシュラグ効果の責任中枢はもうひとつ別の錯覚であるフラッシュドラグ効果の責任中枢に対して信号入力しているという心理物理学証拠が得られた（Murai & Murakami 2016, *Journal of Vision*）。

(3) 視覚探索に用いられる選択的注意の時間特性についても解明が進み、視覚的印づけと呼ばれる視覚性短期記憶過程の持続時間に対して過渡的視覚刺激（光オンセットや背景ドラステック変化）が悪影響をおよぼすこと（Osugi & Murakami, 2015, *Vision Research*; 2017, *Frontiers in Psychology*）、また色シングルトンに対する注意捕捉が悪影響をおよぼすことがわかった（Yamauchi et al. 2017, *Frontiers in Psychology*）。

(4) 短潜時生体応答のひとつである瞳孔対光反射は、定型的な潜時で網膜照度の更新をもたらす作用があるため、環境照明光量によって広範囲に変化する視覚応答潜時に対して再校正の信号となって利用できる可能性を生体計測実験にて検討してきた。その一環で、瞳孔対光反射量は正常網膜への入射光量の変化のみならず、視神経円板内部へ照射される光量の変化によって

も影響されるという結果を得た (Miyamoto & Murakami 2015, Scientific Reports)。定型的な潜時を支配する神経回路内部では内因性光感受性網膜神経節細胞が支配的な装置として関与していると考えられるが、それらが視神経円板内部においても光感受性をもち外界の光量を監視することで再校正の親時計となっている可能性が考えられる。

(5) 四本らは、視聴覚心理物理学および機能的脳イメージングの手法を駆使し、知覚的現在から数分までの広い範囲を研究対象とした実証実験を卓越した質・量にてこなし、多くの新奇知見を得た。まず、瞬きをもつ視覚・聴覚刺激で見かけの時間長が変容する現象について、錯覚に適した時間周波数成分が見出され、時間知覚に関して提案されている線条体ビート周波数モデルによる引き込みシミュレーション実験結果との合致が見出された (Hashimoto & Yotsumoto 2015, Timing and Time Perception)。刺激を時間変調させると、視覚では知覚時間の延長、聴覚では知覚時間の短縮という正反対の錯覚が生じることを見出し、脳波計測およびモデリングの結果から、感覚皮質の部位ごとの時間情報符号化の同期周波数が異なることを論じた (Yuasa & Yotsumoto 2015, PLoS One; Hashimoto & Yotsumoto 2018, Frontiers in Computational Neuroscience)。

(6) おおむね1秒以下の時間と1秒以上の時間は、脳内の異なるネットワークで処理されている可能性が指摘されている反面、時間順応実験により視覚の時間順応には1秒の壁が存在しないことを示した (Shima et al. 2016, Frontiers in Psychology)。さらに、fMRI 実験により、1秒の壁は文脈依存的に比較的柔軟に変容することを示した (Murai & Yotsumoto 2016, Frontiers in Integrative Neuroscience)。fMRI 実験により、運動軌跡の時空間的歪み現象の神経相関が背側と腹側の視覚連合野に同定された (Tanaka & Yotsumoto 2016, Journal of Vision)。視覚刺激や聴覚刺激の主観的持続時間における中心化傾向の発生様式を調べ、秒以上の時間長ではモダリティ独立な処理過程が関与し、秒未満の時間長ではモダリティ特異的な過程とモダリティ独立な過程が関与することが示唆された (Murai & Yotsumoto 2016, PLoS One)。また、感覚証拠が弱いほど中心化傾向は顕著であり、多感覚入力情報の統合がなされる方が単独感覚の入力だけがある場合よりも中心化傾向が改善するといった、最適推定の特徴があることが見出された (Murai & Yotsumoto 2018, Scientific Reports)。フリッカー刺激を観察すると時間伸長して感じられるが、ある程度距離が離れた静止刺激にまでこの効果が波及しうることが示された (Okajima & Yotsumoto 2016, Scientific Reports)。時間経過判断に及ぼす要因を調べ、感じられる持続時間と事象の時間的予測との乖離、および、事象終了時刻のオンライン予測が重要な要素であることがわかった (Tanaka & Yotsumoto 2017, Frontiers in Psychology)。時間長の判断といった認知負荷の高い知覚課題において、注意の周期性に関連すると思われる周期性を描いて判断の揺らぎが生じることが発見された (Shima et al. 2018, i-Perception)。

(7) 得られた成果は視覚科学分野のトップレベル国際論文誌 Vision Research や Journal of Vision、また高インパクトのオープンアクセス誌に恒常的に掲載され、当該分野内外の国内外の研究に示唆を与え続けている。今後は、主観的現在が心理的構成概念であるという枠組みを建設的にとらえ、構成概念を構築するにいたるアーキテクチャを計算科学と脳科学の融合的研究アプローチで解明していく。いわば、心に感じる時間をつくる脳をつくりだす仕組みを解明するために、脳的な計算装置をつくり動作特性をみるのである。そのために、時間生成学なる新学術領域を立ち上げる学際的研究チームに計画研究および公募研究として参画して、発展的に研究を進めたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計36件)

- ① Fan, Z., & Yotsumoto, Y. Multiple time intervals of visual events are represented as discrete items in working memory. Frontiers in Psychology, 査読有, 9:1340, 1-16, 2018.
DOI:10.3389/fpsyg.2018.01340
- ② Hashimoto, Y., & Yotsumoto, Y. The amount of time dilation for visual flickers corresponds to the amount of neural entrainments measured by EEG. Frontiers in Computational Neuroscience, 査読有, 12:30, 1-9, 2018.
DOI:10.3389/fncom.2018.00030
- ③ Kimura, M., & Yotsumoto, Y. Auditory traits of "own voice". PLoS One, 査読有, 13(6):e0199443, 1-16, 2018.
DOI:10.1371/journal.pone.0199443
- ④ Murai, Y., & Yotsumoto, Y. Optimal multisensory integration leads to optimal time estimation. Scientific Reports, 査読有, 8(1):13068, 1-11, 2018.
DOI:10.1038/s41598-018-31468-5
- ⑤ Nomura, K., & Yotsumoto, Y. Failure to replicate the increased temporal resolution induced by images that give impression of danger. Japanese Psychological Research, 査読有, 60, 179-187, 2018.

DOI:10.1111/jpr.12187

- ⑥ Shima, S., Murai, Y., Yuasa, K., Hashimoto, Y., & Yotsumoto, Y. Periodic fluctuation of perceived duration. *i-Perception*, 查読有, 9(2):2041669518760625, 1-17, 2018.
DOI:10.1177/2041669518760625
- ⑦ Honma, M., Murai, Y., Shima, S., Yotsumoto, Y., Kuroda, T., Futamura, A., Shiromaru, A., Murakami, I., & Kawamura, M. Spatial distortion related to time compression during spatiotemporal production in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 查読有, 102, 61-69, 2017.
DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2017.06.004
- ⑧ Okajima, M., Futamura, A., Honma, M., Kawamura, M., & Yotsumoto, Y. Interhemispheric cortical connections and time perception: A case study with agenesis of the corpus callosum. *Brain and Cognition*, 查読有, 117, 12-16, 2017.
DOI:10.1016/j.bandc.2017.07.005
- ⑨ Osugi, T., & Murakami, I. A drastic change in background luminance or motion degrades the preview benefit. *Frontiers in Psychology*, 查読有, 8:1252, 1-15, 2017.
DOI:10.3389/fpsyg.2017.01252
- ⑩ Tanaka, R., & Yotsumoto, Y. Passage of time judgments is relative to temporal expectation. *Frontiers in Psychology*, 查読有, 8:187, 1-11, 2017.
DOI:10.3389/fpsyg.2017.00187
- ⑪ Yamauchi, K., Osugi, T., & Murakami, I. Attentional capture to a singleton distractor degrades visual marking in visual search. *Frontiers in Psychology*, 查読有, 8:801, 1-8, 2017.
DOI:10.3389/fpsyg.2017.00801
- ⑫ Aoki, S., Kawano, A., Terao, M., & Murakami, I. Time dilation in a perceptually jittering dot pattern. *Journal of Vision*, 查読有, 16(14):2, 1-12, 2016.
DOI:10.1167/16.14.2
- ⑬ Hisakata, R., Hayashi, D., & Murakami, I. Motion-induced position shift in stereoscopic and dichoptic viewing. *Journal of Vision*, 查読有, 16(13):3, 1-13, 2016.
DOI:10.1167/16.13.3
- ⑭ Murai, Y., & Murakami, I. The flash-lag effect and the flash-drag effect in the same display. *Journal of Vision*, 查読有, 16(11):31, 1-14, 2016.
DOI:10.1167/16.11.31
- ⑮ Murai, Y., Whitaker, D., & Yotsumoto, Y. The centralized and distributed nature of adaptation-induced misjudgments of time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 查読有, 8, 117-123, 2016.
DOI:10.1016/j.cobeha.2016.02.011
- ⑯ Murai, Y., & Yotsumoto, Y. Context-dependent neural modulations in the perception of duration. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 查読有, 10:12, 1-11, 2016.
DOI:10.3389/fnint.2016.00012
- ⑰ Murai, Y., & Yotsumoto, Y. Timescale- and sensory modality-dependency of the central tendency of time perception. *PLoS One*, 查読有, 11(7):e0158921, 1-16, 2016.
DOI:10.1371/journal.pone.0158921
- ⑱ Okajima, M., & Yotsumoto, Y. Flickering task-irrelevant distractors induce dilation of target duration depending upon cortical distance. *Scientific Reports*, 查読有, 6:32432, 1-9, 2016.
DOI:10.1038/srep32432
- ⑲ Osugi, T., Hayashi, D., & Murakami, I. Selection of new objects by onset capture and visual marking. *Vision Research*, 查読有, 122, 21-33, 2016.
DOI:10.1016/j.visres.2015.12.009
- ⑳ Osugi, T., Takeda, Y., & Murakami, I. Inhibition of return shortens perceived duration of a brief visual event. *Vision Research*, 查読有, 128, 39-44, 2016.
DOI:10.1016/j.visres.2016.08.007
- ㉑ Shima, S., Murai, Y., Hashimoto, Y., & Yotsumoto, Y. Duration adaptation occurs across the sub- and supra-second systems. *Frontiers in Psychology*, 查読有, 7:114, 1-9, 2016.
DOI:10.3389/fpsyg.2016.00114
- ㉒ Tanaka, R., & Yotsumoto, Y. Networks extending across dorsal and ventral visual pathways correlate with trajectory perception. *Journal of Vision*, 查読有, 16(6):21, 1-14, 2016.
DOI:10.1167/16.6.21
- ㉓ Chang, L.H., Yotsumoto, Y., Salat, D.H., Andersen, G.J., Watanabe, T., & Sasaki, Y. Reduction in the retinotopic early visual cortex with normal aging and magnitude of perceptual learning. *Neurobiology of Aging*, 查読有, 36, 315-322, 2015.
DOI:10.1016/j.neurobiolaging.2014.08.025

- ②④ Hashimoto, Y., & Yotsumoto, Y. Effect of temporal frequency spectra of flicker on time perception: behavioral testing and simulation using a striatal beat-frequency model. *Timing and Time Perception*, 査読有, 3, 201-222, 2015.
DOI:10.1163/ 22134468- 03002049
- ②⑤ Hayashi, D., & Murakami, I. Facilitation of contrast detection by flankers with invisible orientation. *Journal of Vision*, 査読有, 15(15):15, 1-16, 2015.
DOI:10.1167/15.15.15
- ②⑥ Miyamoto, K., & Murakami, I. Pupillary light reflex to light inside the natural blind spot. *Scientific Reports*, 査読有, 5:11862, 1-12, 2015.
DOI:10.1038/srep11862
- ②⑦ Okazaki, Y.O., Horschig, J.M., Luther, L., Oostenveld, R., Murakami, I., & Jensen, O. Real-time MEG neurofeedback training of posterior alpha activity modulates subsequent visual detection performance. *NeuroImage*, 査読有, 107, 323-332, 2015.
DOI:10.1016/j.neuroimage.2014.12.014
- ②⑧ Osugi, T., & Murakami, I. Onset of background dynamic noise attenuates preview benefit in inefficient visual search. *Vision Research*, 査読有, 112, 33-44, 2015.
DOI:10.1016/j.visres.2015.02.024
- ②⑨ Terao, M., Murakami, I., & Nishida, S. Enhancement of motion perception in the direction opposite to smooth pursuit eye movement. *Journal of Vision*, 査読有, 15(13):2, 1-11, 2015.
DOI:10.1167/15.13.2
- ③⑩ Yuasa, K., & Yotsumoto, Y. Opposite distortions in interval timing perception for visual and auditory stimuli with temporal modulations. *PLoS One*, 査読有, 10(8):e0135646, 1-18, 2015.
DOI:10.1371/journal.pone.0135646
- ③⑪ Osugi, T., & Murakami, I. Previewing distractors reduces efficiency of visual processing at previewed locations. *Vision Research*, 査読有, 95, 51-60, 2014.
DOI:10.1016/j.visres.2013.12.006
- ③⑫ Yotsumoto, Y., Chang, L.H., Ni, R., Pierce, R., Andersen, G.J., Watanabe, T., & Sasaki, Y. White matter in the older brain is more plastic than the younger brain. *Nature Communications*, 査読有, 5:5504, 1-8, 2014.
DOI:10.1038/ncomms6504

[学会発表] (計 9 2 件)

- ① Chen, Z., Murakami, I., & Whitney, D. Interhemispheric visual temporal order adaptation. *Vision Sciences Society*, 2018.
- ② Gallego-Hiroyasu, E.M., & Yotsumoto, Y. Role of the basal ganglia in explicit and implicit rhythmic timing. *Psychonomic Society*, 2018.
- ③ Iizuka, R., & Yotsumoto, Y. Saccadic eye movement following a moving object results in a longer perceived duration compared with smooth pursuit. *Vision Science Society*, 2018.
- ④ Ito, S., & Yotsumoto, Y. The effect of stimulus positions on statistical learning. *Psychonomic Society*, 2018.
- ⑤ Li, L., & Yotsumoto, Y. Inducing time dilation by the beat frequency of combinative high-frequency flickers: An EEG study. *Psychonomic Society*, 2018.
- ⑥ Nakada, H., & Murakami, I. Search inefficiency in a directionally consistent target among directionally switching distractors. *Vision Sciences Society*, 2018.
- ⑦ Nomura, K., Shima, S., Visscher, K.M., Seitz, A., & Yotsumoto, Y. Effects of transcranial electric stimulation to early visual areas on regional BOLD fMRI activity during visual task. *Vision Science Society*, 2018.
- ⑧ Yoshimatsu, H., Hashimoto, Y., & Yotsumoto, Y. Larger time dilation induced by 10-Hz flicker is associated with larger 10-Hz neural entrainments. *Vision Science Society*, 2018.
- ⑨ Hayashi, D., Iwasawa, H., Osugi, T., & Murakami, I. A superposition of moving and static stimuli appears to dilate in time when the moving stimulus is attended to. *Vision Sciences Society*, 2017.
- ⑩ Inoue, T., & Murakami, I. Apparent motion of a coherent and continuously moving random-dot pattern appears slower in update rate. *Vision Sciences Society*, 2017.
- ⑪ Yoshimatsu, H., Murai, Y., & Yotsumoto, Y. Luminance motion induces larger time compression and larger time dilation than equiluminant motion. *Vision Sciences Society*, 2017.
- ⑫ Shima, S., Murai, Y., Yuasa, K., Hashimoto, Y., & Yotsumoto, Y. Perceived time fluctuates at around theta rhythm. *Vision Sciences Society*, 2016.
- ⑬ Nakamura, S., & Murakami, I. Time compression in an unadapted region after adaptation to a moving surround. *Vision Sciences Society*, 2015.

- ⑭ Terao, M., & Murakami, I. Temporal dynamics of feature integration in peripheral vision and saccadic eye movement. Vision Sciences Society, 2015.

〔図書〕(計3件)

- ① 四本 裕子. 基礎心理学実験法ハンドブック. 朝倉書店, 2018, pp. 448-449, pp. 452-455.
分担執筆

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

村上... 視覚研究室

<http://www.l.u-tokyo.ac.jp/~ikuya/index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：四本 裕子

ローマ字氏名：(YOTSUMOTO, yuko)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院総合文化研究科

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：80580927

(2)研究協力者

研究協力者氏名：石橋 和也

ローマ字氏名：(ISHIBASHI, kazuya)

研究協力者氏名：大杉 尚之

ローマ字氏名：(OSUGI, takayuki)

研究協力者氏名：寺尾 将彦

ローマ字氏名：(TERAO, masahiko)

研究協力者氏名：林 大輔

ローマ字氏名：(HAYASHI, daisuke)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。