

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K04424

研究課題名(和文) 音韻的作動記憶における系列情報保持を支える時間構造の長期知識

研究課題名(英文) Serial order in phonological working memory and long-term knowledge for temporal structure

研究代表者

齊藤 智 (SAITO, Satoru)

京都大学・教育学研究科・教授

研究者番号：70253242

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：言語の音韻的情報を一時的に保持する音韻的作動記憶は、言語理解と言語産出の過程に必要であるだけでなく、言語習得の基盤である音韻系列の長期的学習を支えている。これまでの研究からは、音韻的作動記憶における音韻情報保持が、時間文脈に依存していること、また、長期音韻知識によって支えられていることが報告されてきた。本研究は、ヘップ反復パラダイムを用いた一連の実験を通じて、長期音韻的知識が時間情報を含んでおり、時間情報そのものが長期的知識として獲得され得ること、さらには、そうした知識の運用が領域固有的な性質を持っていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長期音韻知識の音韻的作動記憶への貢献は、いくつかの計算機モデルにおいても実装されており、それらのモデルでは、時間構造が表現されている。音韻的作動記憶において系列保持に利用される時間構造が、時間的ポーズによって構成される知識に基づいているということを示したことは、計算機モデルに対し、行動データによる心理学的基礎を提供することになるという点で重要な学術的意義がある。また、語彙には必ず時間構造が付随するため、本研究は教育場面における語彙習得および第二言語の習得という社会的意義の大きな領域に学術的基盤を提供することになる。

研究成果の概要(英文)：Phonological working memory (PWM) supports the temporal storage of information in the service of most of language processes such as reading, writing, listening, and speaking. This function also forms the basis of vocabulary acquisition, as its processes require transient retention of the phonological form of new vocabulary. Previous studies indicated that PWM functioning relies on temporal context, which provides timing information for serial order memory, and is supported by long-term phonological knowledge. In a series of experiments that employed the Hebb repetition paradigm, the current study found that the long-term knowledge contains timing information, which is acquired through repeated exposure to sound or linguistic sequences in an environment. It is also suggested that the implementation of such timing knowledge exhibits domain-specific characteristics.

研究分野：認知心理学

キーワード：作動記憶 音韻的作動記憶 長期音韻知識 タイミング制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我々が行う多くの心的活動は、例えば、暗算遂行時に繰り上げた値を覚えておく場合のように、一時的に情報を保持して、その情報を利用することで進行していく。そうした一時的な情報の保持の機能とそれを支える機構・システムを作動記憶(working memory: ワーキングメモリ)と呼ぶ。とりわけ言語の音韻的情報を保持する音韻的作動記憶(phonological working memory)は、言語理解と言語産出の過程に必要であるだけでなく、言語習得の基盤である音韻系列の長期的学習を支えていることから、そのメカニズムの解明は記憶研究の中心的な課題であった。

音韻的作動記憶に関連して、本研究開始までに、以下の成果が得られていた。

- (1) 音韻的作動記憶には、音素情報だけでなく言語のリズムが保持されており、そのリズムは、短期の系列情報保持を促進する(Saito, 1998)。
- (2) 言語情報とは一見関係のないリズムパターンの保持が音韻的作動記憶によって支えられている(Saito, 2001)。
- (3) 言語の系列情報を一時的に保持するためには、音韻的作動記憶システム内にタイミング制御機構が必要であり、この機構がリズムパターンの記憶や言語リズムの時間的構造の保持を支えている(Saito, 1994)。
- (4) ある言語の長期音韻知識の習得は、母語でも(Yuzawa & Saito, 2006)、外国語でも(Sakuma & Saito, 2012)、その言語での子どもの音韻的作動記憶課題の遂行成績を向上させる。
- (5) 大人の場合でも、非単語(nonwords)を用いた系列再生課題において、長期音韻知識の影響が見られる。非単語とは、例えば、「どびかや」や「びどまに」のような、無意味な語音系列である。これらの非単語に含まれる語音のペア(以下、バイモーラと呼ぶ)には、日本語に頻繁に出現するものと出現頻度の低いものがある(「どび」は、「びど」よりも出現頻度が高い)。バイモーラ頻度の高いペアから作られた非単語を用いた場合、低いものを用いる場合よりも、系列再生課題の成績が高い(Nakayama, Tanida, & Saito, 2015; Tanida, Nakayama, & Saito, 2015)。
- (6) 長期音韻知識の獲得時の音韻系列の時間的構造と知識運用時(音韻的作動記憶課題の遂行時)のその時間的構造が異なる場合に、長期音韻知識の音韻的作動記憶への貢献は大きく損なわれる(Saito, Tanida, & Nakayama, 2014)。

### 2. 研究の目的

以上の先行研究の結果からは、音韻的作動記憶と長期音韻知識の相互作用には、時間文脈に基づいた時間構造情報が重要な役割を担っていると想定される。しかし、こうした時間構造情報そのものもまた長期的に獲得され、音韻的作動記憶内で運用されるのかという問題は未解決のままであった。本研究は、この問題を検討することを目的とした。具体的には、「音韻系列の時間構造情報は、長期音韻知識として保持され、音韻的作動記憶において運用される」という作業仮説を検討することで、長期音韻知識における音韻系列の表現様式を探り、音韻的作動記憶における系列情報の保持メカニズムおよびその学習過程に関する心理学モデルを提案することを目的とした。

### 3. 研究の方法

一連の実験においては、ヘップ反復効果(Hebb repetition effect)の精査に基づいて、上記仮説を検討していった。ヘップ反復効果とは、直後系列再生の実験中に、同一リストが他のリストを間に挟みながら繰り返し提示されると、そのリストの系列再生の成績が向上するという現象である。これは、我々の長期音韻学習および語彙習得の基盤となる現象であると考えられている(see, Szmalec et al., 2012)。例えば、「5396472」という数字系列が、繰り返し提示されると、「5396472」の再生成績が向上する。我々は、日常会話の中で、繰り返し同じ音韻系列(例えば、「しんりがく」)に接触するが、この繰り返しは、「しんりがく」という音韻系列の習得を可能にしていると考えられるのである。ただし、この反復効果は、「5396472」が同一のリズムで提示されるときのみに見られことが知られていた。1度目は「53-9-647-2」、2度目は「5-396-4-72」(-は時間的なポーズを意味する)というように毎回異なるリズムで提示すると、反復提示による成績の向上は見られなくなるのである(Hitch et al., 2009)。この結果は、長期音韻知識の形成過程に時間構造が重要な役割を担っている可能性を示していた。こうした事実をふまえ、本研究では、ヘップ反復効果を検討するための7つの実験から構成される実験研究プロジェクト(1)ヘップ反復効果における抑揚変化の影響、(2)リズムの再生課題におけるヘップ反復効果の検討、(3)非言語視空間作動記憶におけるヘップ反復効果の検討、およびそれらを総合的に理解するための理論研究プロジェクト(4)ヘップ反復効果の生起メカニズムの「多層学習仮説」の提案を実施した。

### 4. 研究成果

(1) ヘップ反復効果における抑揚変化の影響  
言語の直後系列再生課題の成績は、時間的なポーズの挿入によるグルーピングだけでなく、抑揚を変化させるグルーピングによっても向上することが知られている。ヘップ反復効果においては、ポーズの挿入タイミングを変化させることで、その効果が減少する。ヘップ反復効果の学習を支えているメカニズムが、時間的グルーピングによって影響を受ける時間処理メカニズムと同一のものであるならば、リストのリズムを、時間的ポーズではなく、言語の抑揚によって変

化させた条件においても、ヘップ反復効果の消失がおこると仮定される。この仮定を検証するために3つの実験を行った。すべての実験において、参加者は1リスト12数字の直後系列再生課題に従事した。実験はそれぞれ8試行から構成される12のブロックから成っており、1ブロック内の8試行のうち、偶数試行が常にヘップリストであった。

実験1と2においては、ヘップリストの4回の提示が、毎回同じ抑揚で提示される条件 (Same-Hebb) と、毎回異なる抑揚で提示される条件 (Different-Hebb) が比較された。どちらの実験においても反復のないフィラーリストは、Same-Hebb のブロック内でも (Same-Filler)、Different-Hebb のブロック内においても (Different-Filler)、ランダムな抑揚を付与して提示された。

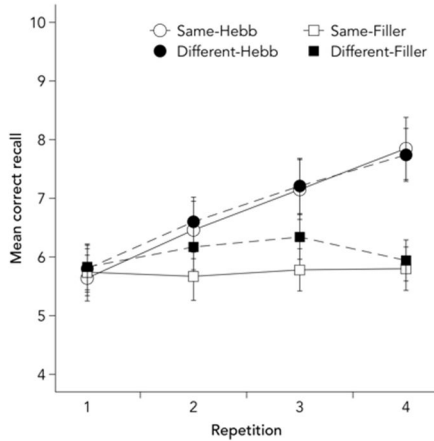


図1 実験1における正再生数

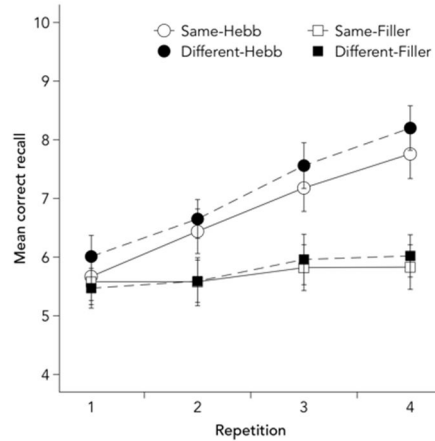


図2 実験2における正再生数

実験1においては、12の実験ブロックは疑似ランダムな順次で遂行された。実験2においては、半数の参加者は6つのSame-Hebbブロックを最初に、6つのDifferent-Hebbブロックをその後に遂行した。残りの参加者はその逆の順序で課題に従事した。いずれの実験においても、図1、図2に示される通り、頑健なヘップ反復効果が見られたが、抑揚条件の影響はまったく見られなかった。

実験3においては、Different-Hebb条件を抑揚のないControl-Hebb条件と比較した。フィラーはそれぞれ、異なる抑揚を付すDifferent-Filler、抑揚のないControl-Fillerが用いられた。この実験においても、頑健なヘップ反復効果が観察され、一方で、抑揚の効果は一切見られなかった。

以上の結果は、ヘップ反復効果を支える時間構造知識は、抑揚（あるいはアクセントパターン）によって生成される時間構造ではなく、物理的な時間の長短からなる時間構造であること、言い換えると、長期音韻知識として保持され、音韻的作動記憶において運用される音韻系列の時間構造情報は、タイミング信号に基づいているという可能性を示している (Saito & Nishiyama, 2017)。

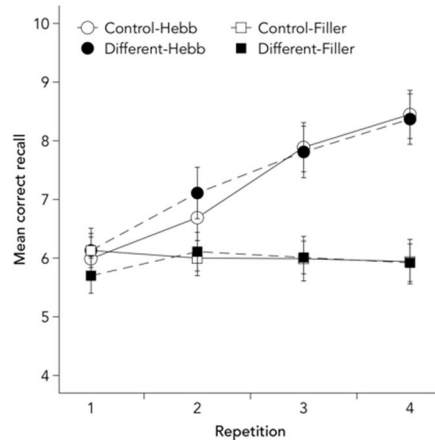


図3 実験3における正再生数

## (2) リズムの再生課題におけるヘップ反復効果の検討

タイミング信号に基づく時間構造情報が、長期音韻知識として保持され得るのかどうかを直接的に検討するために、音韻的作動記憶に保持されることが知られている非言語リズム(図5を参照)を材料として用いて、ヘップ反復効果を2つの実験によって検討した。

実験4では、図4に示される通り、まず、リズム刺激が提示され、5秒間の遅延の後、参加者は指でキーを押すことによってリズムを再生した。リズムの評価方法は先行研究 (Saito, 2001) に従った。

全体で50試行あり、Hebb Rhythmは、4試行に1回反復され、合計で12回提示された。このNon-repeated RhythmにはHebb Rhythmと同等の難易度を持つとされるリズムが選ばれ、それは実験中それぞれ1回しか提示されなかった。

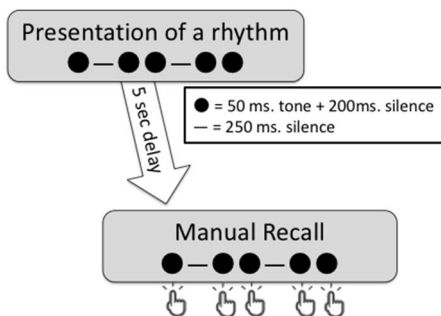


図4 実験4の手続き

図6に示す通り、反復提示された Hebb Rhythm の正答率は、反復提示されない Non-repeated Rhythm よりも高く、リズム再生におけるヘップ反復効果が確認された。

先行研究は、リズムの再生に構音制御に必要となるタイミング制御機構が関与していることを示唆している。実験5においては、リズム再生におけるヘップ反復学習に構音関連のタイミング制御機構が関与している可能性を検討するため、実験4と同じ材料と再生方法を用いつつ、リズム提示と5秒間の遅延期間中に構音抑制 (articulatory suppression) を実験参加者に求めた。具体的には、"da" という音を連続して発することを求めたが、この構音抑制は、構音制御過程を使用するため、記憶課題遂行のために構音制御を使用できなくすると仮定されている。図7から明らかなように、構音抑制を課した実験では、ヘップ反復効果が消失した。

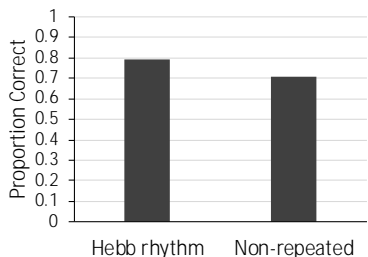


図6 実験4における正再生率

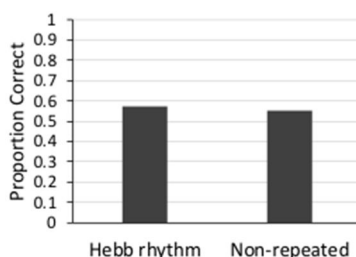


図7 実験5における正再生率

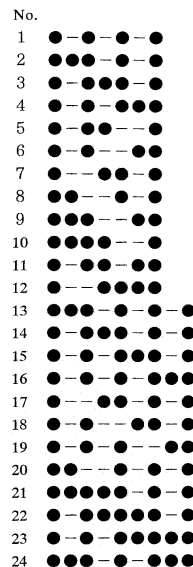


図5 実験4で用いられたリズム刺激

実験4と実験5は、非言語リズムの再生においてもヘップ反復効果が生起し、かつ、そのメカニズムには構音制御の過程が関わっていることを示唆した。この結果は、ヘップ反復効果の生起に構音制御が関わっているという最近の報告 (Sjoblom & Hughes, in press) とも整合するとともに、時間構造そのものが学習されていくという本研究の最も重要な仮説を支持する発見である (Ueda & Saito, 2019)。

(3) 非言語視空間作動記憶におけるヘップ反復効果の検討

続く研究では、構音過程が関わることない非言語材料のヘップ反復効果において、時間構造の影響が見られるのかどうかを検討した。このアプローチにより、ヘップ反復効果生起メカニズムの領域普遍性が検討される。具体的には、視空間作動記憶におけるヘップ反復効果および時間構造変化の同効果への影響を検討した。

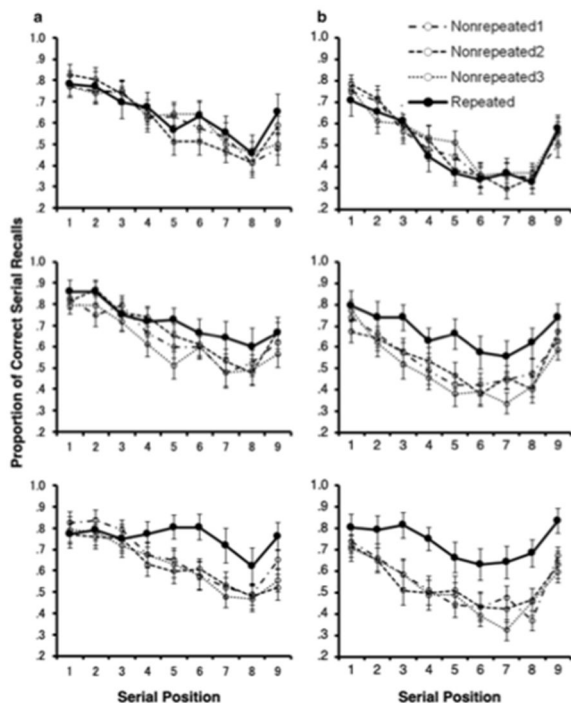


図9 実験6のグルーピング条件(a)および非グルーピング条件(b)における正再生率 上段の図は1~16試行、中段は17~32試行、下段は33~48試行のデータ 横軸は系列位置

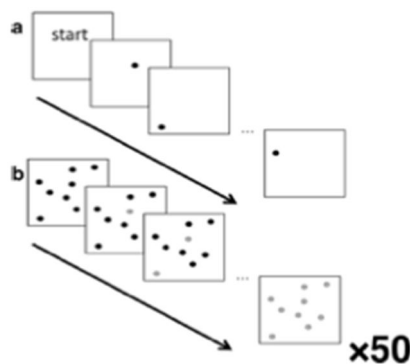


図8 実験6の手続き

実験6では、図8aに示される通り、画面上に9個のドットが1つずつ、ランダムな位置に提示され、その後、参加者は図8bのようにマウスクリックによって位置を提示された順番で再生していった (クリックされたドットは黒からグレーに色が変わる)。ヘップリスト (すなわち Repeated List) では、位置とその順番がまったく同じ系列が提示された。

50試行 (練習を含めて52試行) 中、48試行が分析の対象となった。Repeated List は、4試行に1回反復され、合計で12回提示された。残りの38の Non-repeated List は Repeated List と同じルールで生成されたが、実験中それぞれ1回しか提示されなかった。実験参加者は2つの条件に分けられ

た。グルーピング(grouping)条件では、9つのドット提示の3番目と6番目の後に時間的なポーズが挿入されることで時間的にグルーピングされたリストが提示された(図9a)。非グルーピング(non-grouping)条件では、ドットは1秒に1つの一定のペースで提示された。その結果、全体としてグルーピング条件の成績が高く(図9b)、時間的グルーピング効果が観察された。また、図9に示されている通り、ヘップリスト(Repeated List)の成績が、どちらの条件においても上昇していくことが確認された。

実験7においても、実験参加者は2つ条件に分けられた。ランダムグルーピング(random-grouping)条件では、52試行すべてにおいて、時間的なポーズがランダムに挿入された(図10a)。固定グルーピング(fixed-grouping)条件では、ポーズの挿入位置は参加者ごとにランダムに決定されたが、52試行すべてに同じグルーピングタイミングが用いられた(図10b)。図10に示されている通り、ヘップリスト(Repeated List)の成績が、どちらの条件においても上昇していくことが確認された。つまり、視空間作動記憶においては、時間構造の変更によってヘップ反復効果が影響を受けないということが示され、音韻的作動記憶におけるヘップ反復効果とはその成立機序が異なる可能性が指摘された(Sukegawa, Ueda, & Saito, 2019)。

言い換えると、ヘップ反復効果への時間構造の影響は、少なくとも部分的には、領域固有の学習メカニズムと知識に基づいていると考えられる。

#### (4) ヘップ反復効果の生起メカニズムの「多層学習仮説」の提案

本研究は、作動記憶を支える長期的知識の習得過程を探るため、ヘップ反復効果を検討してきた。ここまでの研究はヘップ反復効果が領域固有の、すなわち複数のメカニズムに基づいていることを示してきた。また、同一領域内で生起するヘップ反復学習についても、複数の学習が多層的に重なり、その相互作用から最終的な学習パターンが得られると考えられる。我々は、これまでの研究成果を踏まえて、ヘップ反復パラダイムに内在する3層の学習を想定し、それらの統合からヘップ反復効果が生起するということ「多層学習仮説」を提案する。3層の学習とは以下の通りである。(1)項目と項目の連合学習(item-to-item association learning)、(2)位置と項目の連合学習(position-item association learning)、(3)リスト全体学習(whole list learning)。(1)および(2)は、そうした情報への接触に応じて徐々に獲得される比較的遅い学習に基づいており、(2)については、特に、時間的構造に敏感であると考えられる。また(3)は、ヘップ反復効果の最も強力な生起要因であり、(1)と(2)の統合的学習による説明と、エピソード学習による説明が、現時点では可能である(Saito, Nakayama, & Tanida, 2020)。領域によってヘップ反復効果の動態が異なることについては、3つの層の関与の程度の違いによって説明できる。たとえば、音韻的作動記憶においては、相対的に(2)位置と項目の連合に依存する程度が大きいかもしれない。今後、各領域における複数の学習層の分析によって、ヘップ反復効果のメカニズムが、領域普遍、領域固有という区分を超えて理解されることが必要となる。また、神経科学的な手法の導入によって、(3)に関わる説明理論が、海馬(hippocampus)の機能の特定とともに洗練され、言語の習得、第二言語の獲得といった言語獲得のメカニズムの解明に貢献することが予想されるとともに、さらには文化や規範といった人間行動を規定する環境構造の体得を支える統計的学習の理論の精緻化にも寄与することになると期待される。

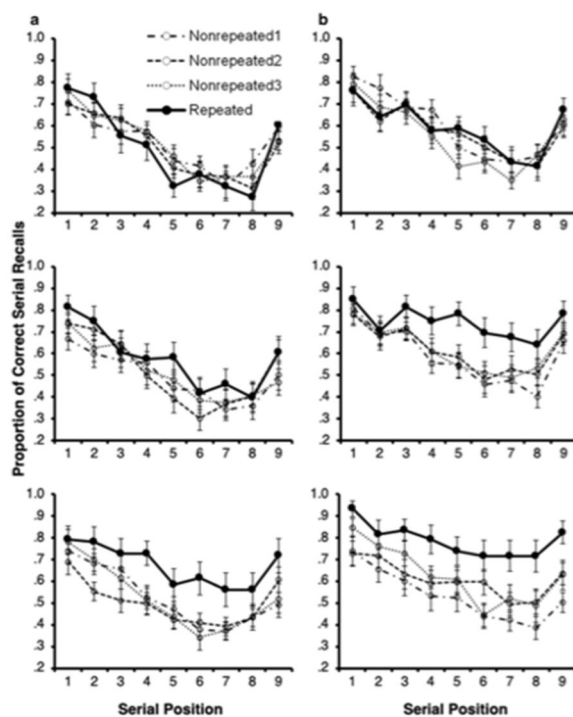


図10 実験7のランダムグルーピング条件(a)および固定グルーピング条件(b)における正再生率 上段の図は1~16試行、中段は17~32試行、下段は33~48試行のデータ 横軸は系列位置

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Saito, S., Nakayama, M., & Tanida, Y.	4. 巻 in press
2. 論文標題 Verbal working memory, long-term knowledge, and statistical learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Current Directions in Psychological Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/0963721420920383	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 Yanaoaka, K., Nakayama, M., Jarrold C., & Saito, S.	4. 巻 45
2. 論文標題 Determining the developmental requirements for Hebb repetition learning in young children: Grouping, short-term memory, and their interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition	6. 最初と最後の頁 573-590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1037/xlm0000606	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 該当する
1. 著者名 Tanida, Y., Nakayama, M., & Saito, S.	4. 巻 27
2. 論文標題 The interaction between temporal grouping and phonotactic chunking in short-term serial order memory for novel verbal sequences	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Memory	6. 最初と最後の頁 507-518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09658211.2018.1532008	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 Sukegawa, M., Ueda, Y., & Saito, S.	4. 巻 47
2. 論文標題 The effects of Hebb repetition learning and temporal grouping in immediate serial recall of spatial location	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Memory & Cognition	6. 最初と最後の頁 643-657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3758/s13421-019-00921-9	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Saito, S., Ueda, Y, Huang, T.-R., & Yeh, S.-L.
2. 発表標題 Statistical Learning for working memory functioning
3. 学会等名 The 4th NTU-Kyoto University International Symposium of Understanding Self and Its Interaction with Social and physical Environments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ueda, Y., Huang, T.-R., Yeh, S.-L., & Saito, S.
2. 発表標題 Sequential dependence of Hebb repetition learning in visual short-term memory
3. 学会等名 The 9th European Working Memory Symposium, University of Pavia, Pavia, Italy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sukegawa, M., Ueda, Y., & Saito, S.
2. 発表標題 Rhythm is irrelevant to the Hebb repetition effect in immediate serial recall of spatial locations
3. 学会等名 The 9th European Working Memory Symposium, University of Pavia, Pavia, Italy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 助川桃枝・上田祥行・齊藤 智
2. 発表標題 視空間 Hebb 反復学習における時間的グルーピングの効果
3. 学会等名 日本認知心理学会第15回大会, 立命館大学茨木キャンパス (茨木市)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Nakayama, M., & Saito, S.
2 . 発表標題 Conscious access to position-element frequency knowledge.
3 . 学会等名 The 20th Conference of the European Society for Cognitive Psychology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Saito, S., & Nishiyama, R.
2 . 発表標題 No slave to the pitch accent: The strong Hebb repetition learning of digit lists.
3 . 学会等名 The 58th Annual Meeting of the Psychonomic Society ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Yanaoka, K., Nakayama, M. Jarrold, C., & Saito, S.
2 . 発表標題 Determining the developmental requirements for Hebb repetition learning in young children: Short-term memory, grouping, and their interaction.
3 . 学会等名 The London meeting of the Experimental Psychology Society ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Saito, S., Ueda, Y, Huang, T.-R., & Yeh, S.-L.
2 . 発表標題 Statistical Learning and Perception: An integrated framework for visual and language domains.
3 . 学会等名 The 3rd NTU-Kyoto University International Symposium of Cognitive Neuroscience: Socio-Cognitive Neuroscience on Understanding Self, Others, and Objects ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年



1. 発表者名 Saito, S.
2. 発表標題 Verbal working memory and language environment
3. 学会等名 International symposium "Social cognitive biology on representation of environment" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 齊藤 智
2. 発表標題 ワーキングメモリ研究の理論的展開と応用可能性
3. 学会等名 日本自閉症スペクトラム学会 第15回研究大会 教育講演 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 齊藤 智
2. 発表標題 ワーキングメモリの領域固有性と学習経験
3. 学会等名 東北英語教育学会 第35回福島研究大会 招待講演 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 上田 祥行・黄 從仁・申 子欣・坂田 千文・葉 素玲・齊藤 智
2. 発表標題 規則性の学習メカニズムにおける領域一般性の検討
3. 学会等名 日本認知心理学会第17回大会 (京都女子大学), 京都テルサ (京都市)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ueda, Y., & Saito, S.
2 . 発表標題 The Hebb repetition effect in reproduction of rhythms
3 . 学会等名 Working Memory Discussion Meeting, Parcevall Hall, Appletreewick, Skipton, U.K.
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ueda, Y., Huang, T.-R., Shen, X., Sakata, C., Yeh, S.-L., Saito, S.
2 . 発表標題 Hebb repetition effect in visual memory
3 . 学会等名 Poster presented at the 21st Conference of the European Society for Cognitive Psychology, Tenerife, Spain (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ueda, Y., Huang, T.-R., Shen, X., Yeh, S.-L., Saito, S.
2 . 発表標題 Sequential encoding in long-term memory improves visual short-term memory
3 . 学会等名 Poster presented at the 60th Annual Meeting the Psychonomic Society, Montreal, Canada (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ueda, Y., Huang, T.-R., Saito, S., & Yeh, S.-L.
2 . 発表標題 Statistical learning, memory, and cognition: An approach from the Hebb repetition paradigm
3 . 学会等名 The 5th NTU-Kyoto University International Symposium of Human Sciences, National Taiwan University, Taipei (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 齊藤 智	4. 発行年 2018年
2. 出版社 協同出版	5. 総ページ数 269
3. 書名 記憶と知識 楠見 孝 (編著) 新・教職教養シリーズ2020第8巻 教育心理学 第4章	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----