

注意の制御とワーキングメモリ：注意の誘導と抑制の側面からの検討

Working memory and the control of visual attention: attentional guidance and inhibition

川島 朋也[†]

Tomoya Kawashima

[†]神戸大学国際文化学研究推進センター

Research Center for Promoting Intercultural Studies, Kobe University

tomoyakawashima4@gmail.com

Abstract

Cognitive control refers to the ability to select task-related information among competitive distractors. Recent studies have shown that individuals can strategically control the attentional guidance toward an object that matches representations in working memory in a goal-directed manner. In addition, it has been reported that people often failed to notice the presence of the tone under high perceptual load. Here I reviewed some recent experimental studies to discuss the role of working memory in attentional guidance and distractor inhibition.

Keywords — cognitive control, visual attention, working memory, visual search, distractor inhibition

1. 認知コントロール

ヒトは常に多くの情報の中から目下の目的に合った情報を選択して行動している。このような場面で、認知コントロール (cognitive control) は感覚情報処理から問題解決場面に至るまで重要な役割を果たしている [1][2]。認知コントロールは、課題非関連な情報を排除し、課題関連の情報に注意を焦点化する能力のことを指す [3]。本稿では、近年の実証研究を概観することで、注意とワーキングメモリの処理機構における認知コントロールについての検討を試みる。

注意は不要な情報の中から必要な情報を選択するという、コントロールの基本的な機能の一つとして考えられている [4]。一方、ワーキングメモリは必要な情報を一時的に保持し、操作もしくは処理するメカニズムを含んだシステムである [5][6]。注意は視覚環境中に存在する感覚情報を選択的に処理し、ワーキングメモリは現前しない感覚情報を処理するものとして区別されることが多い。しかし、注意とワーキングメモリは関連のある概念であることが示され [7][8]、近年は双方向的な関係があるものとして捉えなおされてきた [9]。

本稿では、第一に、ワーキングメモリに保持した情報と注意の誘導・抑制とのかかわりについて議論する。

近年の実証的研究を概観し、注意の誘導と抑制には異なった処理がはたらくことを示す。第二に、ワーキングメモリ容量の個人差と聴覚刺激の聞き落としとの関係について議論する。近年の実証的研究を概観し、ワーキングメモリにおける中央実行系の個人差が聴覚刺激の聞き落としと関連することを示す。以上の研究を通して、記憶と注意の処理機構における認知コントロールについての検討を試みる。

2. 注意誘導の認知コントロール

ヒトの認知システムには容量限界があるため、全ての知覚入力を処理することはできない。適応的に日常生活を送るためには、必要な情報を選択し、不要な情報を排除する選択的注意の機能が必要となる。例えば、冷蔵庫から牛乳を取り出そうとすると、牛乳に関する情報を思い浮かべながら冷蔵庫に向かうだろう。このような特定の標的刺激の探索は、環境中の顕著な情報によるボトムアップな処理ではなく、トップダウンの注意のコントロールを必要とする。近年の実証的研究や注意の理論は、このような注意のトップダウンのコントロールはワーキングメモリに探索対象の表象を保持することで実行されていることを示している [10][11]。

ワーキングメモリに保持した情報が注意の向けられる対象を決定する場合がある。複雑な環境の中から特定の刺激を探索するとき、探索の対象の刺激の表象が探索テンプレート (search template) としてワーキングメモリに保持されていると考えられている [12][13]。この考えによると、複数の感覚入力のうち、ワーキングメモリ内の表象と一致する入力に対して重みづけがなされ、結果としてその刺激の信号の感度が他の刺激よりも高くなり、選択される。

ワーキングメモリに保持した情報による注意の誘導は意図的にコントロールできる [14][15][16][17][18]。Kawashima & Matsumoto [18] は実験参加者に、視覚

的な刺激 (e.g., 色のついた四角形) もしくは単語 (e.g., 「赤」) をワーキングメモリに保持しながら視覚探索課題を遂行することを求めた。このとき, 保持した刺激と標的刺激が一致する確率を操作し (20%, 50%, 80%), 実験参加者に教示した。実験の結果, 保持した表象の種類によらず, 記憶した刺激による注意の捕捉効果は確率によって変化した。この結果は, 視覚的・言語的表象の両方が視覚的注意を制御することを示唆する。

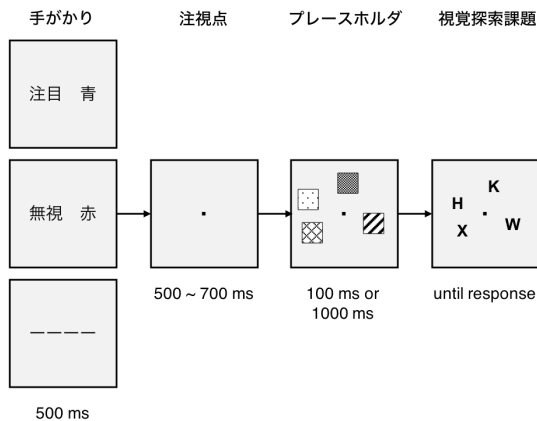


図 1. 試行の流れ [20]. 試行のはじめに, 標的刺激が出現するプレースホルダの色手がかり (注目手がかり), 妨害刺激が出現するプレースホルダの色手がかり (無視手がかり), または視覚探索課題について無情報の手がかり (中立手がかり) が与えられる。

視覚探索課題の前に課題に関連する情報を手がかり呈示すると (注目手がかり: 例 注目「青」), より早く標的刺激を検出できる [19]。無視すべき情報を手がかり呈示することで (無視手がかり: 例 無視「赤」), 妨害刺激に注意を向けないようにすることによっても標的刺激はより早く検出されうる。Kawashima & Matsumoto [20] は視覚探索での注目手がかりと無視手がかりの効果を比較し, 能動的な注意のコントロールの背景メカニズムを検証した (図 1)。この研究では, 視覚探索課題の前に探索項目の色と位置が同じプレースホルダを呈示し, その呈示時間を操作した (SOA 条件: 100 ms vs. 1000 ms)。その結果, SOA が 100 ms の条件では中立手がかり (i.e., 「-----」) と比較して, 無視手がかりによる反応時間の損失が認められ, SOA が 1000 ms の条件では無視手がかりによる反応時間の利得が認められた。この結果は, 無視手がかりを用いた視覚探索の遂行には, 無視すべき項目を検出し, ついで抑制するという 2 段階の処理を必要とすることを示唆する [21]。また, プレースホルダの色の数

によってセットサイズを操作し, 探索勾配 (search slope) を分析した。探索勾配とは, 1 項目あたりの探索時間のことで, 急峻であるほど探索が非効率であることを示す。分析の結果, SOA が 1000 ms の条件において, 無視手がかりの探索勾配は注目手がかりの探索勾配よりも急峻だった。これらの結果は, 無視手がかりが有効となるには一定以上の時間を必要とし, 無視手がかりが有効となっても, その探索効率は注目手がかりを用いた探索よりも悪いことを示唆する。

これら一連の研究は, ワーキングメモリ内の表象が注意をコントロールすることを示している。ワーキングメモリ内の表象は, 視覚環境内のどの刺激を優先的に処理するかを決定するだけでなく, どの刺激を能動的に抑制するかを決定すると考えられる。

3. ワーキングメモリ容量と非注意性難聴

認知コントロールに関する知覚負荷理論 (perceptual load theory) は, 課題の知覚負荷が課題非関連な刺激がどの段階まで処理されるかに影響することを示している [22][23] (近年の考え方として [24][25])。この理論では, 課題の知覚負荷が低い場合, 課題で要求される処理資源が少ないために余剰が生じ, 余った資源が自動的に妨害刺激に割り当てられるために妨害刺激による干渉を受ける一方で, 課題の知覚負荷が高い場合, 課題に処理資源を多く割り当てたために資源が枯渇し, 妨害刺激による干渉を受けないと説明する。このように, 課題の知覚負荷が低い場合では, 課題非関連な情報を排除することが困難となる。

近年, 知覚という単一のモダリティだけでなく, クロスモダルの文脈でも知覚負荷の効果が見られることが示されている。視覚課題と聴覚課題を同時に行う二重課題において, 視覚課題の知覚負荷が高い場合は, 知覚負荷が低い場合よりも聴覚刺激の聞き落とし (非注意性難聴: inattentional deafness) が有意に増加する [26]。Macdonald & Lavie [26] は視覚課題として線分の色を判断する課題 (低知覚負荷条件) もしくは線分の長さを判断する課題 (高知覚負荷条件) を実験参加者に課した。最終試行に予告なく聴覚刺激を視覚刺激と同時に呈示した。その結果, 低知覚負荷条件では参加者の 75% が音刺激に気づいた一方で, 高知覚負荷条件で音刺激に気づいた参加者は全体の 25% だった。この結果を彼らは, 知覚負荷が低い場合には処理資源に余剰があるために聴覚刺激に注意が配分される一方で, 知覚負荷が高い場合には処理資源が枯渇するために聴

覚刺激が処理されなかったと説明する。

Raveh & Lavie [27] は聴覚刺激を実験参加者に予告して呈示する場合においても非注意性難聴が認められることを示した。彼らは視覚探索課題において、標的刺激以外の探索項目が全て「o」で構成される低負荷条件と、複数のアルファベットで構成される高負荷条件を設けた。全体の50%の試行で、視覚探索課題と同時に聴覚刺激が呈示され、実験参加者は聴覚刺激の有無を回答した。その結果、低負荷条件では聴覚刺激の正報告率は86%だった一方で、高負荷条件では正報告率は59%だった。この結果は、聴覚刺激に対して能動的に注意を分配できる場合でも、知覚負荷が高い場合には聴覚刺激は処理されないことを示唆する。

財津・川島・松本 [28][29] は非注意性難聴の生起と関連する機能としてワーキングメモリの個人差に着目した。これらの研究では、実験参加者の視覚的ワーキングメモリ容量（視空間記憶課題）と中央実行系の容量（Nバック課題）を測定し、聴覚刺激の聞き落としとの関連を検証した。聴覚刺激の呈示が予告されていない場合では、低知覚負荷条件において、4バック課題の成績が高いほど聞き落としが少なかった一方で、視空間記憶課題の成績は非注意性難聴を予測しなかった[28]。聴覚刺激の呈示が予告されている場合では、高知覚負荷条件において、4バック課題の成績が高いほど聞き落としが少なかった一方で、視空間記憶課題の成績は非注意性難聴を予測しなかった[29]。以上の結果は、非注意性難聴は視覚性のワーキングメモリよりも、中央実行系の容量と関連することを示唆する。

これらの研究は、知覚負荷が高い場合、聴覚刺激の検出が低下することを示している。このことは、視覚と聴覚のモダリティで注意資源が共有されていることを示唆する。また、聴覚刺激の聞き落としは、視覚性ワーキングメモリの個人差ではなく、中央実行系の個人差が関連することが示された。この結果は、視覚刺激の見落としである非注意性盲目（inattention blindness [30]）がワーキングメモリの中央実行系と関連するという知見[31]と整合する。

4. まとめと展望

本稿ではワーキングメモリと注意との関連に着目し、実証的研究を概観した。ワーキングメモリ表象は、注意を課題関連の情報に向けたり、課題非関連の情報からそらしたりするコントロールに重要な役割を果たしていることが示された。また、ワーキングメモリの中

央実行系の個人差は、視覚課題と聴覚課題を同時に行う二重課題下において、聴覚刺激の検出と関連することが示された。

これらの知見は2つの認知制御過程を仮定したDMCモデル(dual mechanism of cognitive control [32])の枠組みから統一的に説明できるかもしれない。DMCモデルは認知コントロールの実行のタイムスケールに注目しているもので、順向性制御(proactive control)と反応性制御(reactive control)の2つの制御過程を仮定する。順向性制御は、特定の認知的に負荷のある事象が生じる前に、目標に関連した情報を持続的に保持することで、適した行動をとることができる認知処理のことを指す。例として、高速道路を運転中に「落下物注意」の電光掲示板を見たとき、落下物があるという情報を保持しながら運転し、その落下物を見つけたときに適切に行動することが挙げられる。一方、反応性制御は、事象が検出された後に、刺激駆動的に行動を導く即時的な認知処理のことを指す。例として、自動車を運転中に道路上に予期せず落下物を見つけたときに、適切な方向へハンドルを切ることが挙げられる。順向性制御には行動目標の持続的な保持を必要とすることから、処理資源を消費するものの、事象が生じる前に準備する事ができる。一方、反応性制御は事象の検出を必要とし、事象が生じた後に実行されるため、制御には時間がかかる。

ワーキングメモリ容量と聴覚刺激の検出の関連を検討した一連の研究により、聴覚刺激の存在が予告されていないとき、課題の知覚負荷が低い条件において、中央実行系の容量が大きいほど聞き落としが少なかった[28]。これは、知覚負荷が低く処理資源に余剰がある場合に、中央実行系の容量が大きい個人は予期せぬ聴覚刺激を検出することに余剰の資源を使用するという反応性制御を駆動できたと解釈できる。一方、聴覚刺激の存在が予告されているとき、課題の知覚負荷が高い条件において、中央実行系の容量が大きいほど聞き落としが少なかった[29]。これは、中央実行系の容量が大きい個人は、事前に知らされた聴覚刺激の検出という行動目標を持続的に保持することにも処理資源を割り当てることができ、聴覚刺激に対して反応できたという順向性制御をはたらかせることができたと解釈できる(図2)。ワーキングメモリ容量と認知コントロールとの関連を、順向性制御および反応性制御に切り分けて理解するというアプローチが可能かもしれない(例として[33])。

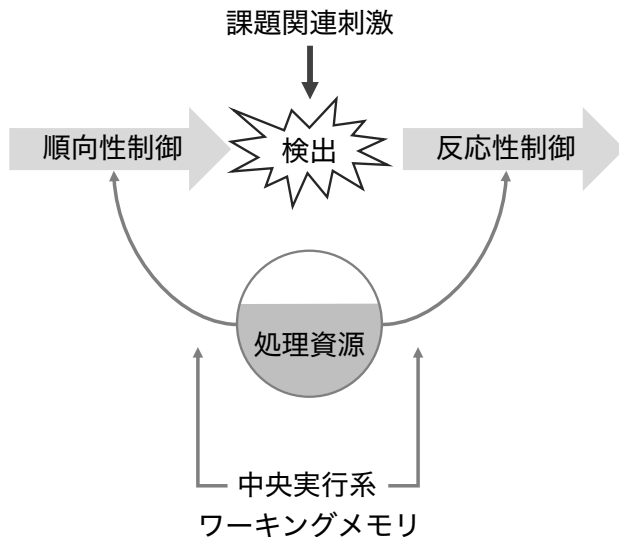


図 2. 認知処理とワーキングメモリによる資源分配。聴覚刺激が出現するという事象を予期できていた場合、余剰の処理資源を順向性制御に割り当てる。事象が予期できていなかった場合、余剰の処理資源を反応性制御に割り当てる。この資源の割り当てにはワーキングメモリの中央実行系が機能を担う。中央実行系の個人差が処理資源の分配と認知処理の駆動による事象の検出成績を説明すると考えられる。

視覚探索における標的刺激や妨害刺激の色を事前に手がかり提示した課題において[20]、注目手がかりの提示は、注意を課題に関する情報に焦点化させ、より早い標的刺激の検出につながることを示された。この認知処理には、課題に関連する情報を持続的に保持して注意を割り当てる順向性制御が関連したと考えられる。一方、無視手がかりを使用した視覚探索の遂行には一定以上の時間を必要とすることが示された。さらに、探索勾配の分析から、注目手がかりを用いた視覚探索よりも非効率であることが示された。これらの結果は、無視手がかりを用いた視覚探索には、無視すべき情報を持続的に保持した順向的な干渉の予防に加えて、事象を検出した後に反応的にはたらく認知処理とともに機能する必要がある可能性があることを示唆する。また、妨害刺激の反応的な抑制は一時的ではなく、持続的にはたらくことによって実現されている可能性がある（図3）。視覚的注意研究においても、妨害刺激の抑制において順向性制御と反応性制御が区別され、検討が進められてきている[34]。このように、DMCモデルの枠組みから注意・ワーキングメモリ・認知コントロールを統合して検証することは、ヒトの柔軟な行動の基盤にある認知メカニズムの統合的な理解につながるかもしれない。

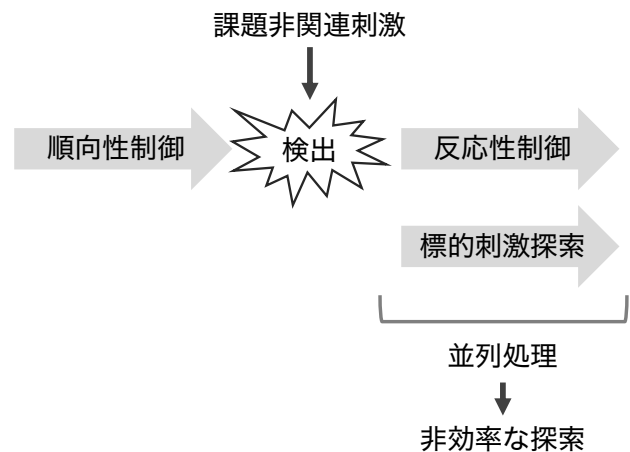


図 3. 無視手がかりを用いた視覚探索。課題に非関連な妨害刺激の特徴が手がかり提示されたとき、無視すべき情報を保持する順向性制御がはたらく。課題非関連刺激を検出したとき、抑制の処理が反応的に駆動される。この処理は一時的なものではなく、標的刺激を検出するという別の行動目標のための処理と並列に処理される。そのために無視手がかりを用いた探索は非効率なものになると考えられる。

また、近年、注意の配分のコントロールにはワーキングメモリだけではなく長期記憶も重要な役割を果たすことが示されている[35][36]。例えば、無視手がかりを用いた視覚探索は、試行を繰り返す学習によってより効率的になる[37][38]。今後は、長期記憶を含めたシステムとして認知コントロールのメカニズムを検討していく必要があるだろう。

参考文献

- [1] Cohen, J. D. (2017). Cognitive control: Core constructs and current considerations. In Egner, T. (Ed.), *The Wiley Handbook of Cognitive Control*, West Sussex, UK: John Wiley and Sons, pp. 3–28.
- [2] 西田 勇樹・服部 雅史・織田 涼 (2018). 洞察問題解決におけるアイデア生成——抑制メカニズムに関するレビュー——. 立命館人間科学研究, 37, 91–102.
- [3] Amer, T., Campbell, K. L., & Hasher, L. (2016). Cognitive control as a double-edged sword. *Trends in Cognitive Sciences*, 20, 905–915.
- [4] Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 73–89.
- [5] Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In Bower, G. A. (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation*, New York: Academic Press, pp. 47–89.
- [6] Baddeley, A. (2012). Working memory: Theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1–29.
- [7] Awh, E., Vogel, E. K., & Oh, S. H. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience*, 139, 201–208.

- [8] Gazzaley, A., & Nobre, A. C. (2012). Top-down modulation: Bridging selective attention and working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 129–135.
- [9] Hutchinson, J. B., & Turk-Browne, N. B. (2012). Memory-guided attention: Control from multiple memory systems. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 576–579.
- [10] Soto, D., Hodsoll, J., Rotshtein, P., & Humphreys, G. W. (2008). Automatic guidance of attention from working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 342–348.
- [11] Olivers, C. N., Peters, J., Houtkamp, R., & Roelfsema, P. R. (2011). Different states in visual working memory: When it guides attention and when it does not. *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 327–334.
- [12] Bundesen, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological Review*, 97, 523–547.
- [13] Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 193–222.
- [14] Carlisle, N. B., & Woodman, G. F. (2011). Automatic and strategic effects in the guidance of attention by working memory representations. *Acta Psychologica*, 137, 217–225.
- [15] Han, S. W., & Kim, M. S. (2009). Do the contents of working memory capture attention? Yes, but cognitive control matters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1292–1302.
- [16] Kiyonaga, A., Egner, T., & Soto, D. (2012). Cognitive control over working memory biases of selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19, 639–646.
- [17] Kawashima, T., & Matsumoto, E. (2014). Electrophysiological evidence that top-down knowledge controls working memory processing for subsequent visual search. *NeuroReport*, 27, 345–349.
- [18] Kawashima, T., & Matsumoto, E. (2017). Cognitive control of attentional guidance by visual and verbal working memory representations. *Japanese Psychological Research*, 59, 49–57.
- [19] Vickery, T. J., King, L. W., & Jiang, Y. (2005). Setting up the target template in visual search. *Journal of Vision*, 5, 81–92.
- [20] Kawashima, T., & Matsumoto, E. (under revision). Negative cues lead to more inefficient search than positive cues even at later stages of visual search.
- [21] Moher, J., & Egeth, H. E. (2012). The ignoring paradox: Cueing distractor features leads first to selection, then to inhibition of to-be-ignored items. *Attention, Perception & Psychophysics*, 74, 1590–1605.
- [22] Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 451–468.
- [23] Lavie, N. (2010). Attention, Distraction, and Cognitive Control Under Load. *Current Directions in Psychological Science*, 19, 143–148.
- [24] 川島 朋也・松本 絵理子 (2014). フランカーと妨害刺激の処理の類似性による干渉抑制への影響. *基礎心理学研究*, 33, 1–8.
- [25] Giesbrecht, B., Sy, J., Bundesen, C., & Kyllingsbæk, S. (2014). A new perspective on the perceptual selectivity of attention under load. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1316, 71–86.
- [26] Macdonald, J. S., & Lavie, N. (2011). Visual perceptual load induces inattentional deafness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 1780–1789.
- [27] Raveh, D., & Lavie, N. (2015). Load-induced inattentional deafness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77, 483–492.
- [28] 財津 昌弘・川島 朋也・松本 絵理子 (2016). ワーキングメモリ容量が非注意性難聴の生起を予測する. 第14回日本ワーキングメモリ学会大会, 京都大学芝蘭会館別館.
- [29] 財津 昌弘・川島 朋也・松本 絵理子 (2017). 非注意性難聴の生起: ワーキングメモリ成績および視覚課題負荷との関連. 日本心理学会第81回大会, 久留米シティプラザ.
- [30] Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: Sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception*, 28, 1059–1074.
- [31] Fougner, D., & Marois, R. (2007). Executive working memory load induces inattentional blindness. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 142–147.
- [32] Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 106–113.
- [33] Wiemers, E. A., & Redick, T. S. (2018). Working memory capacity and intra-individual variability of proactive control. *Acta Psychologica*, 182, 21–31.
- [34] Geng, J. J. (2014). Attentional mechanisms of distractor suppression. *Current Directions in Psychological Science*, 23, 147–153.
- [35] Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2015). Using working memory to control attentional deployment to items in complex scenes. In Fawcett, J.M., Risko, E.F., & Kingstone, A. (Ed.), *The Handbook of Attention*. MIT Press, Cambridge, MA., pp.171–197.
- [36] Vecera, S. P., Cosman, J. D., Vatterott, D. B., & Roper, Z. J. (2014). The control of visual attention: Toward a unified account. *Psychology of Learning and Motivation*, 60, 303–347.
- [37] Cunningham, C. A., & Egeth, H. E. (2016). Taming the white bear: Initial costs and eventual benefits of distractor inhibition. *Psychological Science*, 27, 476–485.
- [38] 川島 朋也・松本 絵理子 (2016). 妨害刺激抑制のメカニズム: 学習過程と持続性. 日本基礎心理学会第35回大会, 東京女子大学.