

ワーキングメモリトレーニングと流動性知能¹

——展開と制約——

坪見 博之 富山大学 齊藤 智 京都大学 苅阪 満里子 情報通信研究機構
苅阪 直行 京都大学

Does working memory training enhance intelligence?

Hiroyuki Tsubomi (*University of Toyama*), Satoru Saito (*Kyoto University*), Mariko Osaka (*National Institute of Information and Communications Technology*), and Naoyuki Osaka (*Kyoto University*)

Working memory (WM) is a capacity-limited cognitive system that strongly relates to higher-order cognitive abilities including fluid intelligence. It has been suggested that WM training can increase memory capacity, which in turn, improves general intellectual abilities. To evaluate these claims, the present review critically re-assessed nine meta-analysis studies, and revealed that the effect of WM training on fluid intelligence (Gf), executive function, and academic performance is relatively small (averaged Hedges' adjusted $g < .20$). Moreover, there were several methodological issues regarding the study design (placebo effect, small sample size), analytical approach (inadequate group comparison, lack of correction for multiple comparisons), and theoretical framework (lack of theoretical account of the training mechanisms) in previous WM training studies. We propose a set of recommendations for future training studies that go beyond training the WM ability per se. This includes theoretically possible methods to enhance intellectual abilities by, for example, learning strategies to effectively encode and recall information into long-term memory.

Key words: working memory, training, fluid intelligence.

The Japanese Journal of Psychology

J-STAGE Advanced published date: June 20, 2019

私たちを取り巻く生物・社会環境は絶えず変化する。そのため、環境に適応するには、生涯にわたって新たな思考や行動を獲得する必要がある。この過程に必須なのが知能であり、物事の背後にある規則を抜き出し、組み合わせ、未知の状況を予測できれば、経験したことのない環境に適応することができる (Neisser et al., 1996)。実際、知能が高いほど、学業や職業上のパフォーマンスが高く、健康で寿命も長い (Gottfredson & Deary, 2004; Roberts, Kuncel, Shiner, Caspi, & Goldberg, 2007; Schmidt & Hunter, 1998; Whalley & Deary, 2001)。このような背景から、知能を高めることで環境に対す

る生物・社会的な適応を高める試みが続けられてきた。しかし、20 世紀後半から半世紀以上を経ても効果的な方法は見つかっていない (Carroll, 1993; Jensen, 1969)。その中で、知能にはワーキングメモリが強く関与することが明らかになってきた。ワーキングメモリとは、情報を一時的に保持しながら操作を加える認知機能であり、容量に厳しい制約がある (Baddeley & Hitch, 1974)。ワーキングメモリ課題の成績が高い個人ほど知能得点も高く、ワーキングメモリ課題成績は知能得点の個人差 (分散) の 50% を説明する (Engle, Tuholski, Laughlin, & Conway, 1999; Kane, Hambrick, & Conway, 2005)。このことから、ワーキングメモリをトレーニングすることで知能を高め、日常生活のクオリティを向上できるのではないかと新たな可能性に期待が集まっている。ワーキングメモリトレーニングの研究は 21 世紀に入り急速に増え、トレーニングによって知能が高められる研究報告がある一方 (Jaeggi,

Correspondence concerning this article should be sent to: Hiroyuki Tsubomi, Faculty of Humanities, University of Toyama, Gofuku, Toyama 930-8555, Japan. (E-mail: htsubomi@hmt.u-toyama.ac.jp)

¹ 本研究は科学研究費補助金の助成を受けた (18H03666, 研究代表者 苅阪 満里子; 15H01690, 研究代表者 苅阪 直行)。

Buschkuhl, Jonides, & Perrig, 2008; Klingberg, Forssberg, & Westerberg, 2002), ワーキングメモリトレーニングでは知能を高めることはできないという結果も報告されている (Harrison et al., 2013; Redick et al., 2013; Shipstead, Redick, & Engle, 2012)。最近では、複数の研究が横断的にメタ分析され、トレーニング効果は限定的であることが明らかとなってきた。また、いくつかのトレーニング研究には実験デザインや解析方法に不備があることも指摘されている。本稿ではこれらの展開を追うことで、ワーキングメモリトレーニングの効用と限界を紹介する²。加えて、ワーキングメモリは知能と強く関連するにもかかわらず、ワーキングメモリトレーニングによって知能を高めることが難しい原因を考察し、知能や高次認知機能を高める別の方法についても検討する。

知能とトレーニング

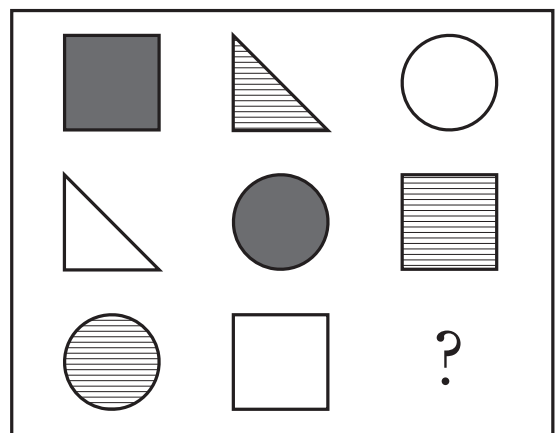
知能のモデル

知能とは、Gottfredson (1997) によると、「推論し、計画を立て、問題を解決し、抽象的に考え、複雑な考えを理解し、すばやく学習する、あるいは経験から学習するための能力を含む一般的な知的能力である。単に本からの学習だったり、狭い学問的な技能だったり、テストで良い点をとるためのものではない。むしろわれわれの環境を理解するための、すなわち、ものごとを『理解し』、それに『意味を与え』、何をするべきか『見抜く』ための、より広く深い能力を表している」(Deary, 2001 繁樹訳 2004, p. 29)。

知能を測るテストにはいくつかのバリエーションがあるが、さまざまな知能テストを因子分析すると、知能は3層から構成される (Carroll, 1993)。上位の第3層には、あらゆる課題に共通する能力として一般知能 (g) 因子があり、中間の第2層には、処理速度や検索能力など、いくつかの課題に共通する大群因子がある。下位の第1層には、個別の課題を進めることに特化した能力として小群因子がある。第2層の大群因子にはさまざまな分類があるが、結晶性知能 (Crystallized intelligence: Gc) と流動性知能 (Fluid intelligence: Gf) に大別されることが広く知られている (Cattell, 1971)。結晶性知能とは、これまでの経験と近い状態で、

獲得した知識を用いて問題を解決する能力であり、主に語彙や一般知識のテストによって測定される。一方で、流動性知能とは、これまでに遭遇したことない状況で、既存の知識では解決できない問題を解決する能力であり、演繹的推論や帰納的推論課題によって測定される。最もよく用いられるのはレーヴン漸進的マトリックス (Raven's progressive matrix: 以下、レーヴン課題とする) であり、Figure 1 のように、縦横に並べられた視覚図形からパターンを抽出し、空白の場所に当てはまる図形を帰納的に推論する。初めて見た図形の並びからパターンを考えなければならないので、まさに既存の知識では解決できない問題である。結晶性知能と流動性知能は、機能として異なるばかりでなく、さまざまな要因からの影響の受け方も異なる。結晶性知能は年齢とともに上昇する一方で、流動性知能は成人初期をピークに低下する (Horn & Cattell, 1967; Schaie, 1994)。また、疲労や鬱、アルコール摂取は、結晶性知能よりも流動性知能を低下させる (Duncan, 1994;

問題



選択肢

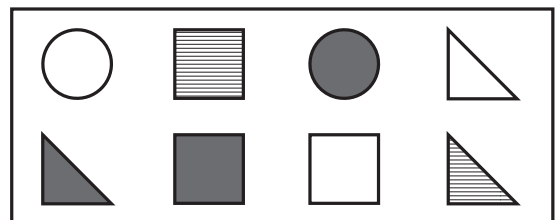


Figure 1. レーヴン漸進的マトリックス (Raven's progressive matrix) の例。問題として提示される縦と横に並んだ視覚パターンから関係性を推測し、空白の場所 (? の場所) に当てはまる視覚パターンを選択肢から選ぶ帰納的推論課題である。Deary (2001) が紹介した例を参考に、著者らが作図した (本例は実際のテストには使われていない)。例では、二列目の左端の視覚パターンが正解である。

² ワーキングメモリを含む幅広い認知機能のトレーニングは Cognitive training (認知トレーニング) と呼ばれており、商品化された認知トレーニングは Brain training (脳トレーニング) と呼ばれることが多い (Simons et al., 2016)。本稿では誌面の制約もあり、主に学術研究として実施されたワーキングメモリトレーニングに焦点を絞って紹介する。商業用プログラムの効果や問題点 (特に、トレーニング効果が科学的に実証される前に社会応用された問題) については、Simons et al. (2016) を参考にしたい。

Hunt, 1995)。これらの知見は、結晶性知能と流動性知能という二つの異なる性質の知能の存在を支持している。

知能のトレーニング

知能が社会・生物学的な適応に必要であるにもかかわらず、流動性知能が加齢に伴って低下してゆくならば、トレーニングによって知能を高めることで、日常生活のクオリティを上げ、抗加齢を試みることは自然な展開と思われる。しかし、20世紀後半から多くの研究が行われているにもかかわらず、効果的な方法は見つかっていない（Carroll, 1993; Jensen, 1969）。私たちが、知能の向上と聞いて期待するのは、個別の課題に特化した能力を高めることではなく、どの課題にも共通する一般知能（*g*）や、未知の課題を解決するための流動性知能を高めることである。しかし、個別の課題に特化した能力を高めることはできても、一般知能や流動性知能の向上にはつながらない。古くはJames (1890, pp. 666–668) は、158 行の詩を暗唱したが、それによって他の詩を暗唱しやすくはならなかった。そのため、個別の記憶トレーニングは記憶力一般の向上につながるわけではないと考えた（Simons et al., 2016）。Thorndike (1906) も、四角形の面積の推定を繰り返すと成績が上昇するが、別の図形に変えると、四角形での学習効果が転移しなかったと報告している。これらのことから、学習の共通要素理論（common element theory）が提案されており、トレーニングによって獲得される能力は、刺激・課題・反応と密接に関連しており、それらが二つの課題で共通するときに限って学習が転移すると考えられている（Barnett & Ceci, 2002; Simons et al., 2016）。

ワーキングメモリ

学習の共通要素理論に従うと、一般知能（*g*）や流動性知能を高めるためには、知能そのものをトレーニングする必要がある。しかし、一般知能や流動性知能は非常に多くの認知的要素から構成されるため、すべてを訓練することは現実的には難しいのかもしれない。その中で、流動性知能の大部分を説明する認知機能として、ワーキングメモリが注目されることとなった（Engle et al., 1999; Kane et al., 2005）。

ワーキングメモリとは

ワーキングメモリは、情報を保持しながら認知操作を行う動的なシステムである（Baddeley & Hitch, 1974）。類似の概念として、情報を静的に保持する短期記憶があるが、読みや計算など複雑な高次認知過程を詳細に説明できないことから、ワーキングメモリの概念が提案された（歴史的経緯については、三宅 (2000) が参考になる）。Baddeley & Hitch (1974) のワーキン

グメモリモデルでは、音韻ループ（phonological loop）と視空間スケッチパッド（visuospatial sketch pad）が情報を保持し、中央実行系（Central Executive）が認知操作を加える。ワーキングメモリの特徴は、保持と処理が同時にできる情報量が厳しく制約されることである。これは、感覚からの情報入力を受けて長期記憶表象が活性化されるが、活性化を維持するために向けられる注意の容量がおおよそ 4 ± 1 項目に限られるため、ワーキングメモリの容量制約が生じると考えられている（Cowan, 2001）。また、容量が限られるなら現在必要な情報に注意を向けることが重要であるという観点から、ワーキングメモリは短期記憶に注意制御を加えたものだと説明されることもある（Kane, Bleckley, Conway, & Engle, 2001）。このように、ワーキングメモリのどの側面に注目するかによっていくつかの異なる説明モデルが存在するが、容量に制約を持ちながら保持と処理を行うシステムであることには同意がある（説明モデルの比較については、Miyake & Shah (1999) が参考になる）。

ワーキングメモリ課題

ワーキングメモリを測るテスト課題にはさまざまな種類がある。よく使われるのは、複合スパン課題（complex span task）であり、まさに保持と処理を同時に課す。複合スパン課題には処理の種類によっていくつかの課題がある。Figure 2a のオペレーションスパン課題では、計算しながら文字や単語を覚える（小林・大久保, 2014; Turner & Engle, 1989）。リーディングスパン課題では、文を読みながら単語を記憶する（Daneman & Carpenter, 1980; 荻阪・荻阪, 1994）。これらの課題では、処理をしながら記憶できる文字数や単語数が測定される。また、Figure 2b のNバック課題もよく用いられる。Nバック課題では、次々と提示される文字を記憶しながら、N個前の文字が同じだったかを判断してもらい、正答できるNの数を測定する（Kirchner, 1958）。

ワーキングメモリと知能・高次認知

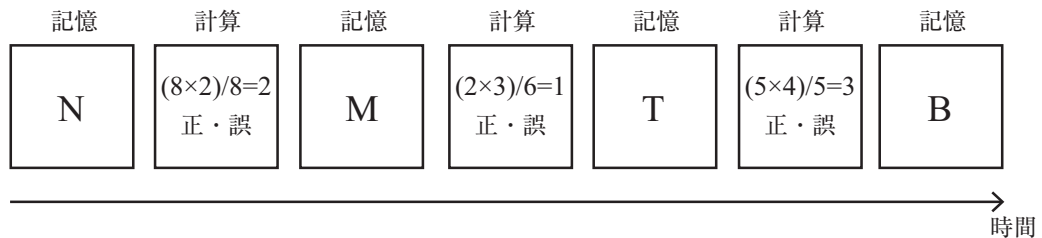
ワーキングメモリは、複雑な高次認知を説明するシステムとして提案されたが、実際に、主に複合スパン課題によるワーキングメモリ課題成績が高いほど高次認知能力が高いことが明らかになってきた。その幅は非常に広く、言語理解（Daneman & Carpenter, 1980; 荻阪・荻阪, 1994）、学校教室内での指示の理解（Engle, Carullo, & Collins, 1991）、読解（近藤・森下・蘆田・大塚・荻阪, 2003; Turner & Engle, 1989）、算数（Otsuka & Osaka, 2014; Passolunghi, 2006; Tsubomi & Watanabe, 2017）、大学入試の成績（Cowan et al., 2005）が挙げられる。さらに、ワーキングメモリ課題成績が高い個人は、注意や感情の制御能力が高く（Kane et al., 2001;

Schmeichel, Volokhov, & Demaree, 2008), マインドワンダリングも少ない (Kane et al., 2007)。ワーキングメモリは、さまざまな発達障がい症状にも関わっており、算数学習の障がい (Passolunghi, 2006), 言語学習障がい (Archibald & Gathercole, 2006), 読み障がい (Swanson, Zheng, & Jerman, 2009), 学習障がい (Swanson, 2003), ADHD (Martinussen, Hayden, Hogg-Johnson, & Tannock, 2005), 自閉症 (Kenworthy, Yerys, Anthony, & Wallace, 2008) などワーキングメモリの低下が報告されている。また、健常成人においても、加齢に伴って低下する (Park et al., 2002)。さらに、高次機能との関連で注目されていることは、流動性知能得点の個人差の 50% がワーキングメモリ課題成績で説明できることであり

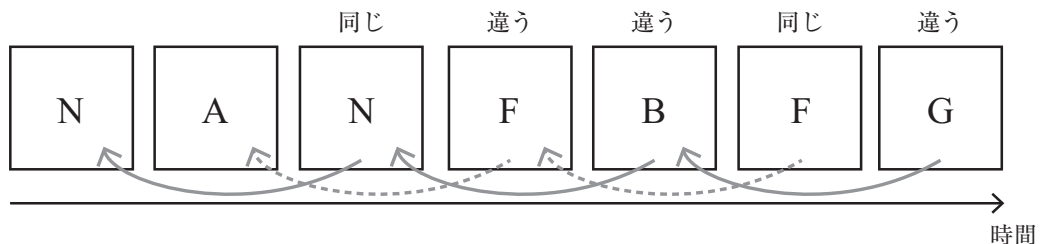
(Engle et al., 1999; Kane et al., 2005), この関係は、成人のみならず子どもや高齢者でも見られる (Gathercole, Pickering, Ambridge, & Wearing, 2004; McCabe, Roediger, McDaniel, Balota, & Hambrick, 2010)。

なぜ、ワーキングメモリ課題成績は幅広い高次認知機能と関連するのだろうか。ワーキングメモリ課題で測られるのは単純な記憶容量ではないことは研究者間で同意がある。しかし、課題成績にどのような心的過程が反映されるかについては、以下のように四つの異なる説明がある (Unsworth, Fukuda, Awh, & Vogel, 2014)。(a) 保持と処理を同時にできる認知資源 (リソース) の量 (Daneman & Carpenter, 1980), (b) 目標行動に関連する情報のみに注意を向け不必要な情報は抑制

(a) オペレーションスパン課題



(b) N バック課題 (2 バック)



(c) 視覚性ワーキングメモリ課題

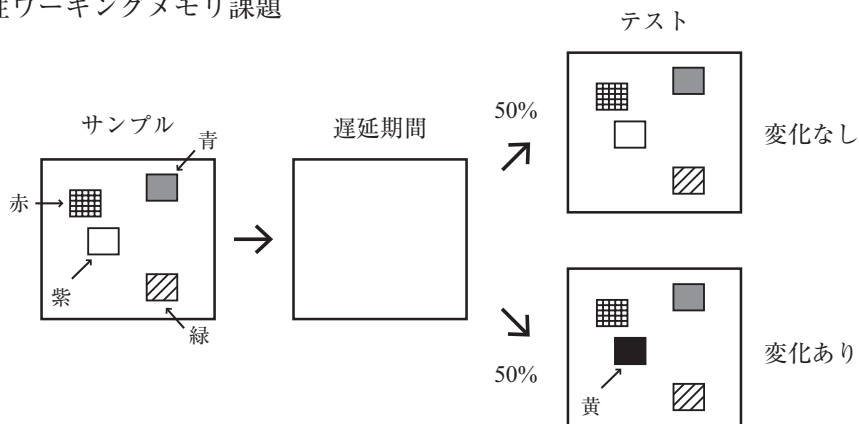


Figure 2. ワーキングメモリ課題の例。(a) オペレーションスパン課題。(b) N バック課題。(c) 視覚性ワーキングメモリ課題。

する注意制御能力 (Kane et al., 2001; Osaka, Nishizaki, Komori, & Osaka, 2002), (c) 複数の情報に注意を同時に向けられる容量 (capacity), (d) 二次記憶 (長期記憶³) から必要な情報を効率的・効果的に検索できる能力 (Unsworth & Engle, 2007)。まず (a) の認知資源 (リソース) 量は, 複合スパン課題や N バック課題が, 記憶保持と処理を同時に求めることから分かりやすい。次に, (b) の注意制御能力については, 複合スパン課題の成績は, 注意捕捉課題やストループ課題など, 必ずしも記憶保持と処理を同時に必要としない注意制御課題の成績と強く関連することから提案された (Kane et al., 2001)。複合スパンや N バック課題では, 課題を遂行する中で必要な情報と不必要な情報が時々刻々と変化する。そのため, 状況に合わせて現在必要な情報のみに注意を向けるよう制御できれば, 課題の成績が高くなると考えられる。また, (c) の容量は, 主に視覚性ワーキングメモリ課題によって測られる。視覚性ワーキングメモリ課題では Figure 2c のように, 複数のサンプル色四角形を記憶し, テスト画面がサンプルと同じであったかを報告する (Luck & Vogel, 1997)。色四角形の数を変化させて正答率を測ることで, ワーキングメモリ容量を測ることができる。この課題は単純な短期記憶課題に見えるが, 複合スパンと同様に, 流動性知能得点の個人差の 50% を説明することから注目されている (Fukuda, Vogel, Mayr, & Awh, 2010)。最後に, (d) の二次記憶の検索については, ワーキングメモリに保持できる情報は, 個人差があるとはいえ, 数項目に限られる。複合スパンなどのワーキングメモリ課題を遂行する際は, 必要な情報をすべてワーキングメモリ内にアクティブに保持することはできず, 他の情報は, すぐにはアクセスできない非アクティブな状態にならざるをえない (Unsworth & Engle, 2007)。そのため, ワーキングメモリ課題成績には, ワーキングメモリにアクティブに記憶できる量だけではなく, 非アクティブな二次記憶から必要な情報を効率的・効果的に検索できるかが反映されていると考えられている。

以上のように, ワーキングメモリ課題成績がどのような心的過程を反映するかについてはさまざまな説明がある。しかし, これらは相互に排他的ではなく, すべてが正しいことが示されている。Unsworth et al. (2014) は, 保持と処理・注意制御・容量・二次記憶や知能を測る 22 の課題を大学生に実施した。共分散構造分析による結果, 22 の課題は確かにワーキングメモリの保持と処理・注意制御・容量・二次記憶の

まとまりに分かれていた。さらに, 流動性知能得点との関係を調べたところ, Figure 3 のように, 知能に関連するのは注意制御・容量・二次記憶であり, この 3 要因でワーキングメモリと知能の関連の約 80% が説明された。したがって, ワーキングメモリと知能が関連するのは, 注意制御 (目標行動に注意を焦点化し, 不必要な情報を無視できるほど知能が高い), 容量 (大きいほど知能が高い), 二次記憶の検索効率 (ワーキングメモリ内に保持しきれない情報を二次記憶 (長期記憶) から上手に検索できるほど知能が高い) の三つの具体的な機能であるといえる。一方で, 保持と処理を測る課題の成績を説明要因に加えても, 知能得点の説明率は高くならなかった。複合スパン課題は保持と処理を測る課題だと考えられてきたが, 知能得点と関連するのは, 複合スパン課題の成績に注意制御・容量・二次記憶の 3 要素が反映されるからだと考えられる。また, 視覚性ワーキングメモリの容量が流動性知能得点の個人差の 50% を説明するのは, 視覚性ワーキングメモリ課題の成績には, 実際には容量だけではなく, 注意制御や二次記憶にも共通した能力が反映されているからだと考えられる。

ワーキングメモリトレーニング

ワーキングメモリは, 知能を含む高次認知に強く関連し, 加齢に伴い低下し, 発達障がい症状にも関わる。それならば, ワーキングメモリをトレーニングす

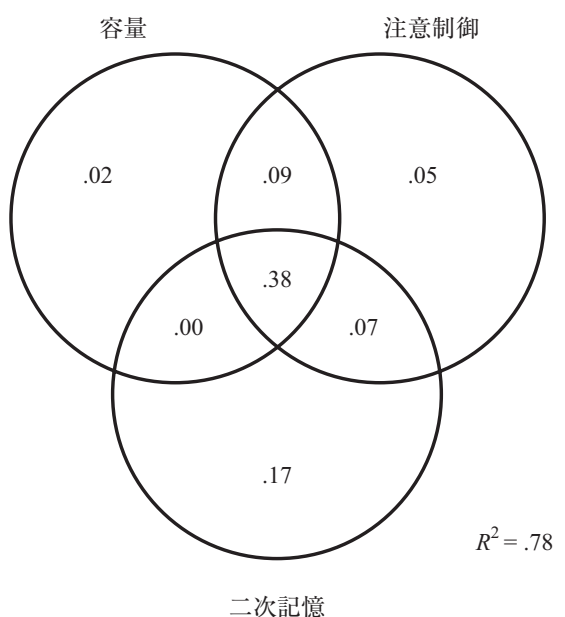


Figure 3. ワーキングメモリの各コンポーネントが流動性知能得点を説明する割合 (R^2) を示すベン図。Unsworth et al. (2014) を改変して引用した。

³ Unsworth & Engle (2007) は, 注意が向けられていてアクティブな表象である記憶を primary memory (一次記憶), 注意が向けられていない非アクティブな表象である記憶を secondary memory (二次記憶) と呼んでいる。

れば知能を高められるのではないかと、抗加齢が可能になるのではないかと、また、発達障がい児の社会適応に役立つことができるのではないかと発想することは自然な展開であろう。実際、これらを目的にワーキングメモリトレーニングが進められてきた。

ワーキングメモリトレーニングの種類

ワーキングメモリトレーニングには二つの種類がある。一つはストラテジートレーニングであり、もう一つはコアトレーニングである (Morrison & Chein, 2011)。ストラテジートレーニングでは、ワーキングメモリに記憶する方略をトレーニングする。例えば、複数の単語を記憶する際にストーリーや視覚イメージを用いる (Carretti, Borella, & De Beni, 2007; McNamara & Scott, 2001)。しかしこの方法は、同じストラテジィを使える場面では有効だが、そうでない場面では効果がない (Lustig, Shah, Seidler, & Reuter-Lorenz, 2009)。Ericsson & Chase (1982) の研究では、実験参加者はトレーニングによって数字を 80 桁まで記憶できた。しかし、ジョギングのタイムなどを使ってチャンキングしていたため、数字以外の項目を記憶するときには、トレーニングを受けていない参加者と記憶成績が変わらなかった。児童を対象とした検討でも、ストラテジートレーニングでは、ワーキングメモリ課題成績は高くなるが、読解力や数学のテスト得点は高くない (St Clair-Thompson, Stevens, Hunt, & Bolder, 2010)。

一方で、コアトレーニングは、記憶の方略ではなくワーキングメモリ機能 (容量) 自体を高めることを目的とする (Klingberg, 2010)。コアトレーニングでは、特定のストラテジィは教えず、ワーキングメモリ課題を繰り返し行ってもらふ。このとき、参加者ができるよりも少し難しいレベルに設定し、挑戦性が高い状態を維持する (Adaptive training)。1 日に 30—60 分程度のセッションを行い、20 セッション程度のトレーニング後に効果を見る。コアトレーニングは、負荷の高いワーキングメモリ課題を繰り返すことでワーキングメモリ機能 (容量) そのものが高められると想定される。そのため、ワーキングメモリを基礎とする知能や高次認知機能が向上するのではないかと考えられている。

トレーニングに用いられるワーキングメモリ課題

コアトレーニングでは、N バック課題が使われることが多く、複合スパン課題が使われることは少ない (Chein & Morrison, 2010; Li et al., 2008)。中でも、二重 N バック課題 (Dual N back task) が使われることが多く、視覚刺激と聴覚刺激を同時に記憶しながら、それぞれの感覚モダリティにおいて N 個前に提示された刺激と一致するかを判断する。そのため、Figure 2b で見た通常の N バック課題よりも難易度が高い (Jaeggi

et al., 2008)。

学術研究としてのコアトレーニングでは、一つの課題でトレーニングされることが多い。これは、トレーニングによって高次認知機能が向上したとき、原因を特定しやすいからである。一方で、商業用プログラムでは、複数のワーキングメモリや認知課題を組み合わせたことが多い (Owen et al., 2010)。例えば Cogmed 社のトレーニングプログラムでは、文字や数字を再生する単純スパン課題や、逆の順番で再生する逆唱課題、保持と処理を同時に必要とする複合スパン課題、心的回転課題などが組み合わされている (Simons et al., 2016)。複数の課題を組み合わせたことで、トレーニング効果を得る可能性を高められる利点や、課題特異的な方略の使用を防げる利点がある。しかし、トレーニング効果が生じた場合の原因は特定しにくくなる。

ワーキングメモリトレーニングの対象者

トレーニングの対象者は幅広く、成人 (Jaeggi et al., 2008)、子ども (Holmes & Gathercole, 2014)、高齢者 (Karch & Verhaeghen, 2014)、統合失調症患者 (Kurtz, Seltzer, Shagan, Thime, & Wexler, 2007)、ADHD (Klingberg et al., 2002)、学習困難児童 (Alloway, Bibile, & Lau, 2013)、知能得点が低い子ども (Van der Molen, Van Luit, Van der Molen, Klugkist, & Jongmans, 2010) など多岐にわたる。この幅広さには注意も必要であり、ある集団にトレーニング効果が見られても、同じ方法で別の集団に効果が見られる保証はないことに留意すべきである。

ワーキングメモリトレーニング効果の基準

トレーニングの効果は、近転移と遠転移の二つの基準で判定される (Könen, Stroback, & Karch, 2016; Melby-Lervåg & Hulme, 2013)⁴。近転移とは、例えば N バック課題のトレーニングによって、複合スパン課題や、言語性・空間性ワーキングメモリ課題など、トレーニング課題以外のワーキングメモリ課題成績が高くなることを指す。一方で、遠転移とは、知能課題やワーキングメモリ以外の高次認知課題など、トレーニングしていない認知機能を使う課題の得点が高くなることを指す。トレーニング課題自体 (N バック課題) の成績は、訓練日数が増えるにつれて上昇するが、これはワーキングメモリに限らずあらゆるトレーニングで見られるため、トレーニングの前提とされる。

⁴ 構造的に近いワーキングメモリ課題同士の転移を近転移と呼び、同じワーキングメモリ課題でも構造の異なる課題間での転移を中転移と呼ぶこともある (Melby-Lervåg, Redick, & Hulme, 2016)。そのような分類に基づいた中転移と近転移の結果は、かなり類似しているので、ここでは区別せず、両者を近転移として分類する。

初期のワーキングメモリトレーニング研究

初期の研究では、ワーキングメモリのコアトレーニングにより知能得点を高めることができる報告が続き、トレーニング研究に注目が集まるきっかけとなった。代表的な成功例は、Klingberg et al. (2002) と Jaeggi et al. (2008) である。

Klingberg et al. (2002) は、7—15歳のADHD児を対象に、四つの課題を用いてコアトレーニングを行った。一つ目は、画面に提示される○の位置を記憶する視空間ワーキングメモリ課題であり、二つ目は、数字を、提示とは逆の順序で再生する逆唱課題だった。三つ目は文字記憶課題であり、一つずつ読み上げられるアルファベットを複数記憶し、四つ並んだランプの二つ目が光ったら2番目の文字を報告するというように、視覚で指示された位置に対応する順序の文字を報告した。四つ目は、画面に提示される灰色の○が、緑色に変わるとボタンを押すが、赤色に変わると押さない反応選択課題が使われた。それぞれの課題について30試行ずつ、毎日25分間のトレーニングを24日程度続けた。参加者の成績によって記憶する個数を変え、課題の難易度が調整された。プラセボ効果を排除するために二重盲検法が採用され、実験者も参加者も目的を知らされなかった。統制群には、難易度が低い同じ課題を10試行ずつ行った。これにより、トレーニング群と統制群は、実験者と接する回数やコンピュータの扱いに慣れる程度が同等になった。実験の結果、トレーニング群は、トレーニング課題とは別の視空間性ワーキングメモリ課題の得点が上昇し、ストループ課題の誤反応が減少し、課題遂行中の多動も減少した。さらに、流動性知能課題として最もよく用いられるレーヴン課題の得点が高くなった。トレーニングの難易度が低く実施時間も短かった統制群では、課題成績や多動に変化はなかった。また、健常大学生にも同様のトレーニングを行った所、同じように知能への転移効果が確認された。

Jaeggi et al. (2008) の研究においても、ワーキングメモリトレーニングからの知能への転移効果が報告されている。この研究では、視覚と聴覚の二重Nバック課題を用いて大学生をトレーニングした。参加者らは、3秒ごとに画面に提示される視空間位置と、ヘッドフォンから聞こえるアルファベットを同時に記憶し、それぞれの感覚モダリティでN個前と同じだった場合にボタンを押した。Nの数は課題成績によって調整された。トレーニング開始時のNの平均は3だったが、1日25分程度のトレーニングを20日間続けると、Nの平均は5程度まで上昇した。トレーニングに前後して、レーヴン課題を実施した所、トレーニング期間が長いほど成績が上昇していた。一方で、トレーニングを受けなかった統制群には、レーヴン課題の成

績変化は見られなかった。

ワーキングメモリトレーニング効果の肯定的・否定的な結果

ワーキングメモリトレーニングによる遠転移効果は、これまで流動性知能のトレーニングが確立しなかった歴史からは画期的であり、これらの研究をきっかけとしてワーキングメモリトレーニングの研究が急増した。しかし、その後の研究では、トレーニング効果に否定的な結果も報告されている (Harrison et al., 2013; Redick et al., 2013; Thompson et al., 2013)。2014年には、認知心理学・神経科学を中心とする欧米の70人の研究者らが、ワーキングメモリトレーニングを含む認知トレーニングには日常生活のクオリティを向上させる遠転移効果はないというオープンレターを公開した。しかし、その数ヵ月後には、別の133人の研究者とセラピストが別のオープンレターを公開し、認知トレーニングによって日常生活の認知機能を改善する効果があることが実証されていると主張している (前者のオープンレターはStanford Center on LongevityとMax Planck Institute for Human Development、後者はCognitive Training Dataにおいて公開されている⁵)。

ワーキングメモリトレーニング効果のメタ分析

このような状況の中で、個別の研究ではなく、多くの研究を横断的にメタ分析することでワーキングメモリトレーニングの効果が検証されている。主な9のメタ分析研究の概要をTable 1に示す⁶。

メタ分析においても含める研究の基準や数はさまざまであり、すべての結果が一致しているわけではない。しかし、Figure 4のように、複数のメタ分析の結果を成人と子どもとでまとめてプロットすると、概ね一貫した傾向がある。まず、トレーニング課題を繰り返すことでその課題の成績は向上しており、トレーニングの前提はクリアされている。これについては効果量(g)が強く、多くの研究において一致して成績が上昇していることが分かる (すべての g は $p < .05$)。次に、トレーニング課題とは別のワーキングメモリ課題の成績も高くなっており、 g が0.2—0.5であることから中程度の近転移がある (Melby-Lervåg et al. (2016) の1例を除き、すべての g は $p < .05$)。一方で、ワーキングメモリトレーニングによって流動性知能得点が高くなるという遠転移については、ほとんどのメタ分析で g が

⁵ それぞれのオープンレターは、<http://longevity3.stanford.edu/blog/2014/10/15/the-consensus-on-the-brain-training-industry-from-the-scientific-community-2/> と <https://www.cognitivetrainingdata.org/> で閲覧できる。

⁶ 本論文では、主にワーキングメモリトレーニング研究について、Hedges' g を算出しているメタ分析に焦点を絞った。

Table 1
ワーキングメモリトレーニングのメタ分析の概要

メタ分析研究名	トレーニングタイプ	分析研究数	対象群	年齢層	統制群	Fig.4 記号
Melby-Lervåg & Hulme (2013)	ワーキングメモリ	23	健常・臨床	子ども・成人	受動・能動	A
〃	〃	〃	〃	成人	〃	B
〃	〃	〃	〃	子ども（－10才）	〃	1
〃	〃	〃	〃	子ども（11－18才）	〃	2
Au et al. (2015)	Nバック	20	健常	成人	受動・能動	C
Peijnenborgh et al. (2015)	ワーキングメモリ	13	臨床	子ども	受動・能動	3
Schwaighofer et al. (2015)	ワーキングメモリ	47	健常・臨床	子ども・成人	受動・能動	D
Melby-Lervåg & Hulme (2016)	Nバック	16	健常	成人	能動	E
〃	〃	21	〃	〃	受動	F
Melby-Lervåg et al. (2016)	ワーキングメモリ	87	健常・臨床	子ども・成人	能動	G
〃	〃	〃	〃	〃	受動	H
〃	〃	〃	〃	成人	能動	I
〃	〃	〃	〃	〃	受動	J
〃	〃	〃	〃	子ども	能動	4
〃	〃	〃	〃	〃	受動	5
Weicker et al. (2016)	ワーキングメモリ	103	健常・臨床	成人	受動・能動	K
〃	〃	〃	〃	子ども	〃	6
Sala & Gobet (2017)	ワーキングメモリ	26	健常	子ども	受動・能動	7
Soveri et al. (2017)	Nバック	33	健常・臨床	子ども・成人	受動・能動	L

注）分析研究数は、各論文においてメタ分析に含まれた研究の総数であり、項目ごとの分析ではこれより少ない場合がある。トレーニングタイプがNバックである場合はNバックに限った研究が対象であるが、ワーキングメモリとある場合にはNバックが含まれていることがある。Fig.4の対応記号は、子ども・成人と成人を対象としたメタ分析ではアルファベットで通し番号を付け、子どものみを対象としたメタ分析では数字で通し番号を付けた。子どもは、説明書きのない場合18才未満を指す。

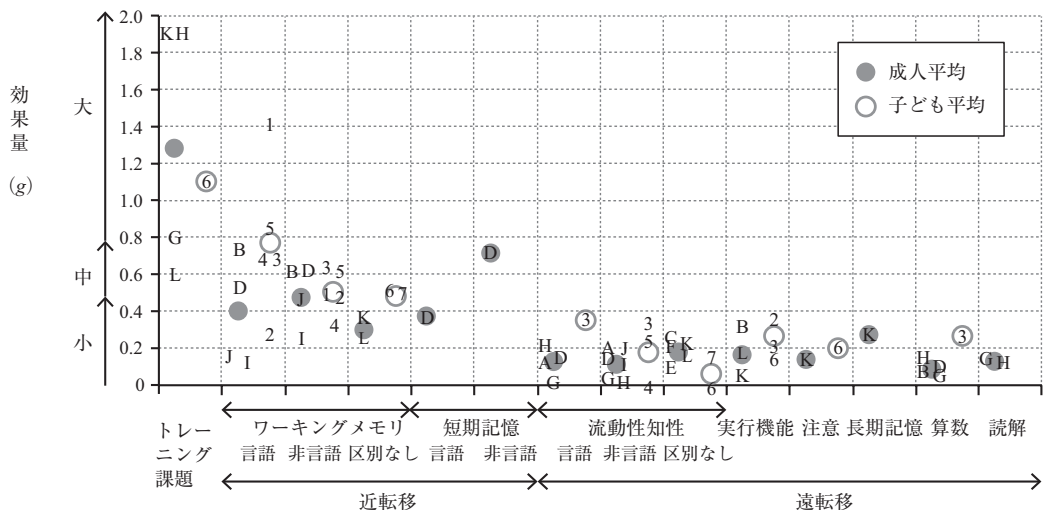


Figure 4. ワーキングメモリトレーニングの効果に関するメタ分析のまとめ。プロットしたアルファベット（成人）と数字（子ども）は、Table 1でのメタ分析名と対応している。効果量はHedges' adjusted g であり、トレーニング前と後の課題得点の変化について、トレーニング群と統制群を比較した差に基づく。メタ分析C・K・6は、トレーニング後の課題得点について群間で比較した差に基づく。また、メタ分析A・B・1・2のみ効果量はCohens' d である。効果量の大きさの目安はCohen（1988）に従った。メタ分析7の流動性知能の g は、流動性知能・認知制御・算数をまとめた値である。

0.2 以下であり、有意な結果と有意ではない結果が混在している (21 件中 11 件が $p < .05$, 10 件が $p > .05$)。実行機能や注意・長期記憶・算数・読解などへの遠転移効果も同様である。この遠転移の結果について、効果量が小さいのでトレーニングには意味がないと解釈するか、小さいが効果があると解釈するかは判断の幅があるように見える。しかし、遠転移の効果は統制群の種類によって異なることに注意が必要である。トレーニング群を統制群と比較する際に、トレーニング期間中にまったく何も活動しなかった受動的統制群 (passive control) と比較すると遠転移の効果量が大きく有意であるが、ワーキングメモリとは別のトレーニングを課された能動的統制群 (active control) と比較すると効果量が小さくなり有意ではなくなる (Melby-Lervåg & Hulme, 2016; Melby-Lervåg et al., 2016)。このように、統制群によってトレーニング効果の判定が変わることはトレーニング研究の問題の一つであり、この問題が解決されなければ、メタ分析の結果が信頼できるとは言えない。そのため、遠転移について小さいが効果があると解釈することには注意が必要である。

メタ分析では、トレーニング対象者の特性についても媒介分析を用いて検討されているが、結果は上記と変わらない。例えば、子ども・成人・高齢者など、年齢層の違いは遠転移効果に影響を与えない (Melby-Lervåg et al., 2016; Soveri, Antfolk, Karlsson, Salo, & Laine, 2017)。健常群と臨床群で比較した場合、臨床群は伸び代が大きいため、トレーニング効果が大きいかもしれないと考えられる。一方で、トレーニング効果が現れるためには、一定の学習能力が備わっていることが必要ではないかと考えることもできる。しかし実際には、健常群でも、ADHD・読み障がい・算数障がい・学習障がいなどの臨床群でもトレーニング効果に差はない (Melby-Lervåg et al., 2016)。学習障がい児 (LD) に対象者を絞ったメタ分析においても、算数や、言語・非言語能力への遠転移効果は認められていない (Peijnenborgh, Hurks, Aldenkamp, Vles, & Hendriksen, 2015)。ADHD に対象者を絞ったメタ分析では、ワーキングメモリトレーニングによって非注意行動が減少した報告例もあるが (Spencer-Smith & Klingberg, 2015)、非注意行動が自己申告や教師・親によって評定されており、トレーニングへの期待から観察にバイアスがかかった可能性が排除できない。

また、トレーニング期間が長いほど効果が大きくなることが期待されるが、トレーニング期間は遠転移に影響を与えない (Soveri et al., 2017)。トレーニング課題の種類 (N バック課題・二重 N バック課題・複合スパン課題) も遠転移には影響しない (Melby-Lervåg et al., 2016)。さらに、トレーニング課題の難易度を参加者ごとに調整するか否かによっても遠転移効果は変わらない (von Bastian & Eschen, 2016; Karch & Verhaeghen,

2014)。

以上のメタ分析は、トレーニングが終了した直後の転移効果を調べたものが多いが、トレーニングが終了した数ヶ月後に調べた研究では、近転移の効果も消えてしまう (Melby-Lervåg & Hulme, 2013; Melby-Lervåg et al., 2016)。このことから、トレーニング効果は近転移するとしても一過性であると考えられる。

ワーキングメモリトレーニング研究の問題点と解決方法

メタ分析の結果をポジティブに捉えれば、ワーキングメモリトレーニングによって、小さいが知能への遠転移効果があると考えられるかもしれない。しかし、ワーキングメモリトレーニング研究には、実験デザインや解析に多くの問題があることが指摘されている。実験デザインや解析の問題が解決しなければ、それらの研究から得られたメタ分析の結果を信頼することはできない (Bown & Sutton, 2010)。具体的には、手法・解析・理論の 3 側面について合計 6 項目の問題が挙げられている。以下では、それぞれの問題と解決方法についてまとめる。

手法の問題 (統制群が不適切である)

手法の問題の一つとして挙げられているのは、統制群が適切ではない研究が多いことである (Boot, Simons, Stothart, & Stutts, 2013; Melby-Lervåg et al., 2016; Simons et al., 2016)。ワーキングメモリのトレーニング群に対する統制群には、受動的統制群か能動的統制群が設定される⁷。受動的統制群はトレーニング群と同じタイミングで 1 回目 (トレーニング前) と 2 回目 (トレーニング後) のテストを受けるが、トレーニングに関わる活動はしないで過ごす。トレーニング群は、「トレーニングスケジュールを守る」・「コンピュータの扱いに慣れる」・「実験者とやりとりをする」・「トレーニングを通じて 2 回目のテストへのモチベーションや期待が高まる」といったことをトレーニング期間中に経験するが、受動的統制群は経験しない。そのため、トレーニング群の成績が受動的統制群より高くなったとしても、トレーニング中に経験したことによる副次効果である可能性が排除できず、ワーキングメモリをトレーニングした効果であると結論することはできない。

より優れた方法は能動的統制群を用いることである。能動的統制群は、トレーニング群と同じ期間、知識のクイズや視覚探索課題など、ワーキングメモリ以外の課題でトレーニングを受ける。これらの課題にお

⁷ 受動的統制群 (passive control) は、untreated control, empty control, wait-list control, no-contact control と表現されることもある。能動的統制群 (active control) は treated control と表現されることもある。

いても難易度を徐々に上げれば、トレーニング群と似た経験ができるため、受動的統制群で問題とされていたトレーニングの副次効果を排除できる (Harrison et al., 2013; Owen et al., 2010; Redick et al., 2013)。しかし、能動的統制群を用いるだけで問題を解決できるわけではない。能動的統制群は、2 回目のテストを受ける際の「モチベーションや期待」がトレーニング群と同じ程度になる必要がある。しかし、ほとんどのワーキングメモリトレーニング研究ではテスト時のモチベーションや期待が測定されておらず、このことは保証できない。そのため、能動的統制群と比較しただけでは、ワーキングメモリをトレーニングした効果だと結論することはできない。これを解決するためには、トレーニングによって認知機能が改善することについてどの程度期待するかを測定し、トレーニング群と能動的統制群で同程度であったことを示す必要がある。

メタ分析の結果では (Au et al., 2015; Melby-Lervåg et al., 2016)、近転移においては、トレーニング群を受動的統制群と比較した場合と、能動的統制群と比較した場合で効果量は変わらなかった。一方で、遠転移においては、トレーニング群を受動的統制群と比較すると効果量が大きく有意であるが、能動的統制群と比較をすると効果量が小さくなり有意ではなくなった。そのため、メタ分析で見られた遠転移の小さな効果は、ワーキングメモリのトレーニング効果というよりは、モチベーションや期待の違いを反映している可能性がある。実際、これらがテスト得点に影響することを次に見る。

手法の問題（プラセボ効果が混入している）

受動的統制群と比較する限りは、トレーニング群に遠転移効果があったとしてもプラセボ効果である可能性が排除できない。一般社会での調査によると、認知トレーニングに効果があると期待する人が多いことが知られている (Rabipour & Davidson, 2015)。特に、高齢者は若年者よりもトレーニング効果への期待が高く、トレーニングに関する事前知識があるとさらに高い期待を持つ。Foroughi, Monfort, Paczynski, McKnight, & Greenwood (2016) は、トレーニング研究のほとんどが、認知トレーニングの実験だと参加者に知らせて募集していたことから、プラセボ効果が介在するのではないかと考えた。これを検証するため、トレーニングによって認知機能が高まると広告した参加者群と、大学の単位取得のために必要なクレジットがもらえると広告した参加者群に、N バック課題のトレーニングを1 時間行った。その結果、N バック課題は、二つの群で同じように成績が向上した。しかし、トレーニング後に流動性知能得点が高くなったのは、認知機能が高くなると広告した群のみであった。N バック課題の得点は二つの群で同じように向上したため、ワーキン

グメモリトレーニングに実質的な効果があるなら、知能得点も両群で同じように向上するはずである。しかし実際には、トレーニングの効果を予め知らされなければ知能得点は高くならなかった。このことから、これまで報告された遠転移はプラセボ効果であった可能性が高いと考えられる。

以上のように、客観的な課題成績においてもプラセボ効果が問題となるが、日常生活のクオリティや ADHD などの症状の改善は自己申告が多いため、期待やモチベーションの効果はさらに問題となる。トレーニング中には、パフォーマンスがフィードバックされたり課題難易度が上昇するので、参加者はどのような認知機能のトレーニングを受けているのかを容易に推測することができ、その機能の向上に対する期待が高まる (Boot et al., 2013)。そのため、認知機能の向上や日常生活のクオリティについて、自己申告してもらったり、トレーニングを受けていることを知る者が評定すると、客観的なテストでは成績や機能の向上が見られないにもかかわらず、主観的には効果があると報告する「プラセボ効果の錯覚」が生じる (Redick et al., 2013; Shipstead et al., 2012)。この錯覚は、効果のないトレーニングプログラムが社会に受け入れられてしまう原因となる可能性があるため、注意が必要である。

プラセボ効果に対する解決策としては、参加を募る際にトレーニング効果に触れないことが考えられる。しかし、倫理的な問題や、トレーニングが進むうちに自ずと目的が知れてしまう可能性が懸念される。そこで別の方法として、トレーニング効果があると信じる人にもみ参加してもらう方法がある。また、トレーニング群と能動的統制群のいずれの群でも、半分の参加者にはトレーニング効果があると告げ、もう半分の参加者にはプラセボ群であると告げて効果を比較する「プラセボバランスデザイン」も有効であろう (Foroughi et al., 2016)。この他にも、テスト時の期待やモチベーションを測定し、トレーニング効果と共変していないかを検討することも有効である。また、日常生活の認知機能や行動を評価する際は、トレーニングを受けていることを知らない第三者に評価を受けることが勧められている (Simons et al., 2016)。

手法の問題（構成概念・潜在変数であるワーキングメモリや知能を一つの課題のみで測っている）

ワーキングメモリや知能は構成概念・潜在変数であり、一つの課題によって測定することはできない (Ackerman, Beier, & Boyle, 2005; Shipstead et al., 2012)。例えば、複合スパン課題の成績には、N バック課題で重要となるワーキングメモリの更新機能はあまり反映されない。また、本来は測定ターゲットではない二次記憶の検索や処理速度も成績に反映される。知能課題

も同様であり、レーヴン課題の成績には、流動性知能だけではなく、図形知覚や処理速度も反映される。このように、一つの課題では、ワーキングメモリや知能のすべての側面を測定できるわけではなく、また、ターゲット以外の認知要素が必ず混入する。そのため、ワーキングメモリや知能を測るには、複数の課題成績をまとめることが必要となる。しかし、ほとんどのワーキングメモリトレーニング研究では、知能への遠転移を調べる際に、レーヴン課題などの一つの課題しか用いられない。そのため、トレーニングによってレーヴン課題の得点が高くなったとしても、レーヴン課題に限定された転移の可能性が残り、一般知能 (g) や流動性知能が高くなっている保証はない (Morrison & Chein, 2011)。レーヴン課題は、知能課題の中でもワーキングメモリ課題に非常に似ているため、似たストラテジーが使えただけかもしれないと指摘されている (Moody, 2009)。実際、Hayes, Petrov, & Sederberg (2015) は、レーヴン課題を繰り返し実施すると成績が向上するが、これは、参加者が課題特有のストラテジー (手続きの知識) を身につけたことによって生じており、一般知能 (g) や流動性知能が高くなったと結論することはできないと注意している。ワーキングメモリも知能も構成概念・潜在変数である以上、それらが高まったことを示すには、複数の課題を用いて測定する必要がある。

手法の問題 (参加者数が少ない)

トレーニング研究は、拘束期間が長いこともあり参加者数が少ない。2007—2013年に刊行された82のトレーニング研究のうち、全体の50%の研究は条件につき20人以下の参加者であり、90%の研究は45人以下であった (Noack, Lövdén, & Schmiedek, 2014)。参加者数が少ないと、偽陽性のトレーニング効果を得る可能性が高くなる。偽陽性の肯定的な結果が出版され続けると、否定的な結果が公表されにくくなる出版バイアス (publication bias) が助長される可能性があり、メタ分析の結果を歪めることにもつながる。Melby-Lervåg et al. (2016) は、*p*-curveのメタ分析から、能動的統制群と比較して有意な遠転移効果が見られる研究報告には、出版バイアスが働いていることを示している。また、参加者の少ない研究からは高い効果量が出ることが多く、全体の傾向とは別の方向にメタ分析の結果を歪める問題もある (Melby-Lervåg et al., 2016; Redick et al., 2013)。あまりにも高い効果量は、参加者の少なさに由来する第一種の過誤である場合が多いことも指摘されている (Bogg & Lasecki, 2015)。これらの解決策として、今後の研究では、検定力の問題を踏まえながら十分な参加者数を確保することが勧められている (Simons et al., 2016)。

解析の問題 (多くの検定をしているが多重比較の補正がされていない)

トレーニング研究は、一定の数の参加者を確保した上で、長期間にわたるトレーニングを実施する大規模な研究となるため、大きなプロジェクトとして実施することになり、転移課題についても探索的にさまざまな指標が用いられる (知能課題・実行機能課題・長期記憶などの成績、日常生活評定など)。このとき、トレーニング効果があった指標のみを報告することが問題視されている (Cherry picking, Simons et al., 2016)。また、一度のトレーニング介入で測定した複数の指標を別の論文に分けて報告することで、多重比較の補正がされず、第一種過誤の確率が一定になっていない研究が多い問題もある。これらの解決策として、実験内容を事前登録すること、第一種過誤の確率が5%以下になるよう多重比較の補正をすること、同じ介入の結果を別の論文で報告するときは関連を明記することが勧められている (Simons et al., 2016)。事前登録や統計上の注意は、ワーキングメモリトレーニング研究のみの課題ではなく心理学全体の課題でもあるが (友永・三浦・針生, 2016)、これらの取り組みが今後進むことで信頼性の高い知見の報告が期待される。

理論の問題 (コアトレーニングによってなぜワーキングメモリ機能が高まるかの理論的説明が不足している)

コアトレーニングは、筋肉のトレーニングのように適切な負荷をかけることで、ワーキングメモリ機能が高められると説明する。しかし、この説明は直感的であり、理論に基づくわけではない (Melby-Lervåg & Hulme, 2013)。脳や心は筋肉ではないため、筋肉のトレーニングと同じ方法で認知機能が鍛えられる保証はない (Taategen, 2016)。ワーキングメモリトレーニングの最も大きな問題は、トレーニングに関する理論が欠如していることであり、トレーニングによって、知能のどの側面になぜ効果が現れるのか、検討がないままに研究が進められてきた。

本来、転移効果はトレーニング内容から理論的にありうる範囲に限定されるはずである。しかし従来の研究では、ワーキングメモリと関連が見られていない高次認知機能への転移効果があったと報告する研究も多い。例えば、トレーニングによってストループ反応時間が短くなったと報告する例があるが (Klingberg et al., 2002; Olesen, Westerberg, & Klingberg, 2004)、ワーキングメモリ課題成績と単純なストループ反応時間の関連は低い (Kane, & Engle, 2003)。このような遠転移は、既存のワーキングメモリ理論からは予測されず、効果の説明ができない。

コアトレーニングの理論では、ワーキングメモリを高めることにより知能などの高次機能が高まると考え

られているため、知能への遠転移は、ワーキングメモリへの近転移に媒介されるはずである。しかし、遠転移を報告する研究の中には、前提となるワーキングメモリの近転移が生じていない研究がある (Jaeggi, Buschkuhl, Jonides, & Shah, 2011; Zhao, Wang, Liu, & Zhou, 2011)。メタ分析においても、ワーキングメモリへの近転移の程度と高次認知課題への遠転移の程度には関連が見られていない (Melby-Lervåg et al., 2016)。これらの結果も、コアトレーニングの説明と整合性がない。また、トレーニングの持続効果を検討した研究では、Van der Molen et al. (2010) など、直後の転移効果がないにもかかわらず、しばらく時間が経過した後は転移効果が見られた報告がある。しかし、従来の学習理論によると、一般的にトレーニング効果は直後が最大であり、時間経過とともに減少するため、既存の理論との整合性がない (Newell & Rosenbloom, 1981)。

このように、トレーニング効果についてポジティブな結果であっても既存の理論との整合性がない場合がある。また、どのワーキングメモリ課題でトレーニングし、どの高次認知機能に遠転移したのかについても、結果がさまざまに異なって一貫性がなく (Redick et al., 2013)、トレーニング効果を説明する理論の構築につながらない。今後の研究では、既存の理論、あるいは新たな理論によって説明可能なかどうか、文字通り理論的な検討がなされるべきだろう。

なぜワーキングメモリトレーニングは遠転移しないのか

これまでの知見をまとめると、Nバック課題などのワーキングメモリトレーニングによって、言語性・視覚性などのワーキングメモリ課題の成績は一時的に高くなる。参加者の少なさや多重比較の問題については、今後も引き続き検討が必要であるが、能動的統制群と比較した際にも近転移効果は見られ、言語性・空間性の複数のワーキングメモリ課題に転移していることから、近転移はある程度生じると言えるだろう。しかし、知能や高次認知課題の成績は高くなるとはいえない。トレーニング効果はワーキングメモリには近転移するにもかかわらず、知能には遠転移しないとしたら、原因は何であろうか。ワーキングメモリ課題と知能課題の成績には非常に高い相関があり、知能得点の個人差(分散)の50%はワーキングメモリ課題得点で説明されることが繰り返し報告されてきた (Engle et al., 1999; Kane et al., 2005)。それならば、トレーニングによってワーキングメモリ課題成績が向上すれば、知能も高くなるはずではないだろうか。

これにはいくつかの説明がありうる。一つ目は、ワーキングメモリと知能が異なる認知機能である可能性である (Harrison et al., 2013)。ワーキングメモリと知能は高い相関があることが繰り返し報告されてきたため、

同じ認知メカニズムが反映されていると考えられてきた。しかし、両者は相関するが異なる機能を反映しており、そのためにワーキングメモリがトレーニングされても知能に遠転移しないのかもしれない。Harrison et al. (2013) の説明によると、ワーキングメモリと知能の相関は、ヒトの身長と体重の相関と同じ程度であるが、体重を増やしたからといって身長が伸びるとは限らない。これと同様の理由で転移しないのかもしれない。二つ目の説明は、ワーキングメモリトレーニングによって参加者に生じているのは、知能との関連で重要な注意制御・容量・二次記憶の検索効率の向上ではなく、ワーキングメモリ課題の遂行に限って有効なストラテジーが身についているという説明である。実際、この可能性を支持する研究は多く、コアトレーニングを受けると、ワーキングメモリ課題を遂行する際のストラテジーの使用が増えることが報告されている (Dunning & Holmes, 2014; Holmes et al., 2010)。ストラテジーの多くは、維持リハーサルや視覚化、グルーピングであり、ワーキングメモリ課題の成績を上げるためには有用である。しかし、これらのストラテジーは、知能課題において、複数の仮説を比較検討し帰納的に推論する際や、心的表象を操作する際に有用であるとは考えにくい。コアトレーニングでは、特定の記憶方略を教えず、参加者にとって常にチャレンジングなレベルの課題を課すことで、ワーキングメモリ機能そのものを高めようとする点に特徴があり、記憶方略をトレーニングするストラテジートレーニングとは異なると考えられてきた (Klingberg, 2010)。しかし実際には、コアトレーニングが、参加者が自発的に開発するストラテジーに基づいたストラテジートレーニングになってしまっている可能性がある。その結果として、ワーキングメモリの課題成績は一時的に高まるが、知能に遠転移しないのではないかと考えられる。

ワーキングメモリの遺伝的特性

ワーキングメモリトレーニングが困難なことと関連して、ワーキングメモリの遺伝特性が議論されることがある。一卵性双生児を対象とした研究では、ワーキングメモリ容量の遺伝率は約50%である (Ando, Ono, & Wright, 2001; Wright et al., 2001)。また、Nバック課題においては、遂行に必要な情報が時々刻々と変化するため、ワーキングメモリ内の情報を常に更新する必要がある。この更新機能は一般知能 (g) と0.49の相関があるが、ほぼ遺伝によって個人差が説明される (Engelhardt, Briley, Mann, Harden, & Tucker-Drob, 2015; Friedman et al., 2008)。一般知能 (g) も40—80%は遺伝で説明される (Plomin & Spinath, 2002)。また、一般知能 (g) は生涯にわたって変化が少なく、同じ参加者の11才と77才での知能得点の相関は0.6—0.7であることも報告されている (Deary, Whiteman, Starr,

Whalley, & Fox, 2004)。

これらの知見は、知能やワーキングメモリ機能を向上させる方法が見つからない現状と整合性が高いように見える。つまり、高次認知の能力は遺伝によって決まっているため、後天的なトレーニングでは変えることができないのかもしれない。しかし、遺伝率と不変性は独立であることに注意が必要である (Friedman & Miyake, 2017)。遺伝率とは、集団内の能力の「個人差 (分散)」をどれだけ遺伝で説明できるかを示す指標であり、「個人の能力」をどれだけ遺伝で説明できるかを示すのではない。例えば、個人の知能やワーキングメモリの形成に教育が強く影響するとしても、影響が全員に均一であれば、教育によって知能やワーキングメモリの個人差は生まれない。そのため、個人差は教育以外の要因で説明されるしかなく、結果的に遺伝の説明率が高くなる。これまでの双子研究に参加したのは比較的裕福な家庭の子どもであり、教育環境が豊かで均一に与えられた集団であったため、環境的な差異が小さく、結果的に遺伝による説明率が高くなった可能性がある (Heine, 2018)。実際、教育環境が豊かで均一だと考えられる経済的地位上位の集団では、知能の個人差はほとんど遺伝によって説明されるが、下位の集団では遺伝で説明される割合はごくわずかなことが報告されている (Turkheimer, Haley, Waldron, D'Onofrio, & Gottesman, 2003)。ここで重要なことは、経済的地位上位の集団でも下位の集団でも、個人の知能に教育が非常に重要であることに変わりないことである。経済的地位上位層の遺伝率が高いことは教育機会が均等に与えられることによって生じており、下位層の子どもにとっては教育機会が与えられれば知能が高くなる可能性が充分に残されているからである。事実、教育を受けることは、知能を含む幅広い認知機能を高めると示されており (Ritchie & Tucker-Drob, 2018)、遺伝率が高い状況においても、知能が発達する過程では教育によるトレーニングが重要な役割を担うことが分かる。この視点と類似して、遺伝率と集団の平均は独立しているため、ワーキングメモリや知能の遺伝率が高いとしても、全員に効果があるトレーニング方法を考案することはできるだろう。また、遺伝と環境が相関している可能性にも注意が必要である。ある遺伝特質を持つ個人は、知能やワーキングメモリを高められる活動や環境を求める傾向があり、その結果としてパフォーマンスが高い可能性がある (Plomin, DeFries, & Loehlin, 1977)。この場合にも、環境を整えることで知能やワーキングメモリを高めることができる。最後に、ワーキングメモリと知能の相関や遺伝率は心理学研究の中では高い値を持つが、それらですべてが説明されるわけではない。ワーキングメモリは知能の個人差 (分散) の 50% を説明するが、残りの 50% は別の要因に規定されている。知能の遺

伝率も 50% であるが、残りの 50% は遺伝以外の要因で変化する。そのため、ワーキングメモリや知能の遺伝率が高いとしても、トレーニングが不可能であるのではない。

環境の変化による知能の向上

実際、環境が変化することによって知能は変化する。平均的な知能得点は世代を追うごとに上昇しており、フリン効果と呼ばれる (Flynn, 1987; Schaie, 1994)。それならば、フリン効果が生じる理由を探れば、効果のあるトレーニング方法が開発できるかもしれない。

フリン効果は流動性知能課題でよく見られ、レーヴン課題で最も強く現れる (Flynn, 1999; Fox & Mitchum, 2013)。レーヴン課題では、物事の見かけを捨て、抽象的なパターンに基づいて思考することが求められる (Fox & Mitchum, 2013)。例えば、「Aa・Bc」の文字列を見たとき、文字は異なるが、「大文字小文字・大文字小文字」と同じパターンが続くことを抽出する必要がある。このように、具体的な物事の背後にある抽象規則を探すことや、物事を似たパターンに分類すること、その上で、仮定的な問題に取り組み予測を立てることは、現代社会において多くの職業で求められる。例えば、あるビジネスモデルを他の業種に应用する場合には、二つの業種に共通する構造を見つける必要がある。法律を適用するときや、科学研究を進める際も、具体例と抽象規則を切り分けながら進める必要がある。フリン効果が強く見られる 20 世紀後半には、これらの能力が必要な専門職に従事する人が急増した (Neisser, 1998)。また、テレビドラマ等でも複数のストーリーが交錯するものが多くなったなど、いくつかの物語や理論を比較検討することが増えており、フリン効果に貢献していると言われている (Greenfield, 1998; Johnson, 2005)。

フリン効果に対するこれらの説明は仮説である。しかし、この考え方が正しければ、流動性知能得点は確かに環境によって向上するが、ワーキングメモリ容量が増加していることが理由ではないと考えられる。実際、レーヴン課題にフリン効果が見られる一方で、ワーキングメモリ課題は世代を追って成績が上昇しているわけではなく、フリン効果が見られない (Gignac, 2015; Wongupparaj, Wongupparaj, Kumari, & Morris, 2017)。このことから、知能を向上させるためには、ワーキングメモリトレーニングではなく、抽象規則の扱いに習熟する方が有効かもしれない。

高次認知機能を高める方法はあるのか？

ワーキングメモリのコアトレーニングによって知能や高次認知機能を向上させることは、現在では実効性があるとはいえない。トレーニング研究には複数の問題が指摘されているため、今後の研究では、これらを

解決しながら、トレーニングによって知能得点を高められるかを検証する必要がある。しかし、研究手法や解析手法を整えたとしても、ワーキングメモリトレーニングによって知能が高まると考えられる理論的根拠はほとんどない。コアトレーニング以外にも、さまざまな方法で幅広い認知機能を向上させようとする試みがあり、マインドフルネス (Mrazek, Franklin, Phillips, Baird, & Schooler, 2013), 身体運動 (Colcombe, & Kramer, 2003), ニューロフィードバック (Gruzelier, 2014) などがある。これらの効果についても、コアトレーニングと同様の問題が存在することから、有効性については今後の検討が必要である。では、ワーキングメモリや知能を高める方法はまったく存在しないのだろうか。

これまで見てきたワーキングメモリは、個人の特性 (trait) 的な機能を反映していると考えられてきた。しかし、一時的な環境や状態 (state) によってもワーキングメモリのパフォーマンスは変化する (Ilkowska & Engle, 2010)。例えば、ストレスや不安が多いときは、ワーキングメモリパフォーマンスが低下する (Beilock, Rydell, & McConnell, 2007; Klein & Boals, 2001)。トレーニングによってワーキングメモリの特性的な面を変化させるのは困難だとしても、環境・状況を整えることでワーキングメモリパフォーマンスをベストな状態に保つことは可能であろう。

また、ワーキングメモリは単体で働くのではなく、長期記憶と連動しながら働く (Cowan, 2001; Fukuda & Woodman, 2017)。そのため、知識や手続きなど、課題遂行に必要な情報を長期記憶化しておけば、その分、ワーキングメモリを別の情報処理に使うことができ、結果的に課題のパフォーマンスを向上させることができる。Reder, Liu, Keinath & Popov (2016) は、アメリカ人大学生に中国語を学習してもらったところ、学習が進むにつれ、中国語を使ったNバック課題の成績が向上することを示した。このことから、長期記憶されている情報は、新規の情報に比してワーキングメモリのリソース消費量を少なくできると提案している。このことは、Schurgin, Cunningham, Egeth, & Brady (2018) の研究でも実証されており、あらかじめ学習した物体を短期保持する場合には、未学習の物体に比べて、視覚性ワーキングメモリの保持数に応じて増加する持続性の脳活動 (Contralateral delay activity) が低くなることを示している。これは、長期記憶の表象がワーキングメモリのリソース消費を減らす役割を果たしている直接的な証拠である。長期記憶に情報を定着させる方法については、実効性のある方法が確立している (Dunlosky, Rawson, Marsh, Nathan, & Willingham, 2013)。例えば、学習者が他者に説明することや質問を考えることによって、意味が精緻化され長期記憶への定着が進む (Wong, Lawson, & Keeves, 2002)。また、情報の

想起を繰り返すと学習がさらに進むため、テキストを何度か読む、定期的にテストすることも効果的である (McDaniel, Howard, & Einstein, 2009; Roediger & Karpicke, 2006)。学習時には、同じことを一度に続けるよりは、分散して学習の方が長期記憶への定着がよくなる (Kornell & Bjork, 2007)。これらは認知心理学では古典的といえる学習法であるが、一般社会では効果的な方法として知られていないことが報告されている (McCabe, 2011)。そのため、既に確立されている方法を日常場面で活用することを促し、長期記憶をうまく使うことで、状態としてのワーキングメモリパフォーマンスを向上させることができると考えられる。

ワーキングメモリトレーニングは、あらゆる高次認知課題に通用する能力を高めようとする方法であった。しかし、これまでの学習理論に従うと、領域固有 (domain specific) の能力は高めることはできても、領域共通 (domain general) の能力を高めることは困難である (Thorndike, 1906)。例えば、チェスやバイオリンのトレーニングを受けると、ゲームを進めることやバイオリンを弾くことに特有の能力は高まるが、ワーキングメモリのような領域共通の能力は高まらない (Sala & Gobet, 2017)。また、合理性や判断、意思決定の能力を高めるためには、何度も実際の文脈にさらされることが必要だといわれる (Gick & Holyoak, 1980)。このことから、認知機能全体や学業成績全般など、文脈と切り離れた機能を高めようとするよりは、場面に即した具体的な内容をトレーニングの方が効果的だと考えられる。

トレーニング研究が現れた背景には、ワーキングメモリのメカニズムに関する研究の進展があった。しかし、ワーキングメモリの構造や機能、個人差が生じるメカニズムについて、研究者間で完全に一致した説明があるわけではない。また、現段階ではワーキングメモリトレーニングには実効性があるとは言えないが、なぜトレーニング効果が得られないのかを検討することで、ワーキングメモリの性質について、より理解が深まると考えられる。今後もこれらを巡る研究が活発になることで、高次認知機能の成り立ちや働きについて多くのことが解明されるだろう。

利益相反

本論文に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

文 献

Ackerman, P. L., Beier, M. E., & Boyle, M. O. (2005). Working memory and intelligence: The same or different constructs? *Psychological Bulletin*, 131, 30–60.

- Alloway, T. P., Bibile, V., & Lau, G. (2013). Computerized working memory training: Can it lead to gains in cognitive skills in students? *Computers in Human Behavior*, 29, 632–638.
- Ando, J., Ono, Y., & Wright, M. J. (2001). Genetic structure of spatial and verbal working memory. *Behavior Genetics*, 31, 615–624.
- Archibald, L. M., & Gathercole, S. E. (2006). Short-term and working memory in specific language impairment. In T. P. Alloway & S. E. Gathercole (Eds.), *Working memory in neurodevelopmental conditions* (pp. 139–160). Hove, UK: Psychology Press.
- Au, J., Sheehan, E., Tsai, N., Duncan, G. J., Buschkuhl, M., & Jaeggi, S. M. (2015). Improving fluid intelligence with training on working memory: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22, 366–377.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation* (Vol. 8, pp. 47–89). New York: Academic Press.
- Barnett, S. M., & Ceci, S. J. (2002). When and where do we apply what we learn? A taxonomy for transfer. *Psychological Bulletin*, 128, 612–637.
- von Bastian, C. C., & Eschen, A. (2016). Does working memory training have to be adaptive? *Psychological Research*, 80, 181–194.
- Beilock, S. L., Rydell, R. J., & McConnell, A. R. (2007). Stereotype threat and working memory: Mechanisms, alleviation, and spill over. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136, 256–276.
- Bogg, T., & Lasecki, L. (2015). Reliable gains? Evidence for substantially underpowered designs in studies of working memory training transfer to fluid intelligence. *Frontiers of Psychology*, 5, 1589. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01589>
- Boot, W. R., Simons, D. J., Stothart, C., & Stutts, C. (2013). The pervasive problem with placebos in psychology: Why active control groups are not sufficient to rule out placebo effects. *Perspectives on Psychological Science*, 8, 445–454.
- Bown, M. J., & Sutton, A. J. (2010). Quality control in systematic reviews and meta-analyses. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 40, 669–677.
- Carretti, B., Borella, E., & De Beni, R. (2007). Does strategic memory training improve the working memory performance of younger and older adults? *Experimental Psychology*, 54, 311–320.
- Carroll, J. B. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor analytic studies*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cattell, R. B. (1971). *Abilities: Their structure, growth, and action*. Boston, MA: Houghton Mifflin.
- Chein, J. M., & Morrison, A. (2010). Expanding the mind's workspace: Training and transfer effects with a complex working memory span task. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17, 193–199.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Colcombe, S. J., & Kramer, A. F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults: A meta-analytic study. *Psychological Science*, 14, 125–130.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 97–185.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. A. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51, 42–100.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 19, 450–466.
- Deary, I. J. (2001). *Intelligence: A very short introduction*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- (デアリア, I. J. 繁榘 算男 (訳) (2004). 知能 岩波書店)
- Deary, I. J., Whiteman, M. C., Starr, J. M., Whalley, L. J., & Fox, H. C. (2004). The impact of childhood intelligence on later life: Following up the Scottish mental surveys of 1932 and 1947. *Journal of Personality and Social Psychology*, 86, 130–147.
- Duncan, J. (1994). Attention, intelligence, and the frontal lobes. In M. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences* (pp. 721–733). Cambridge, MA: MIT Press.
- Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., & Willingham, D. T. (2013). Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from cognitive and educational psychology. *Psychological Science in the Public Interest*, 14, 4–58.
- Dunning, D. L., & Holmes, J. (2014). Does working memory training promote the use of strategies on untrained working memory tasks? *Memory & Cognition*, 42, 854–862.
- Engelhardt, L. E., Briley, D. A., Mann, F. D., Harden, K. P., & Tucker-Drob, E. M. (2015). Genes unite executive functions in childhood. *Psychological Science*, 26, 1151–1163.
- Engle, R. W., Carullo, J. J., & Collins, K. W. (1991). Individual differences in working memory for comprehension and following directions. *Journal of Educational Research*, 84, 253–262.
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory and general fluid intelligence: A latent variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125, 309–331.
- Ericsson, K. A., & Chase, W. G. (1982). Exceptional memory. *American Scientist*, 70, 607–615.
- Flynn, J. R. (1987). Massive IQ gains in 14 nations: What IQ tests really measure. *Psychological Bulletin*, 101, 171–191.
- Flynn, J. R. (1999). Searching for justice: The discovery of IQ gains over time. *American Psychologist*, 54, 5–20.
- Foroughi, C. K., Monfort, S. S., Paczynski, M., McKnight, P. E., & Greenwood, P. M. (2016). Placebo effects in

- cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 7470–7474.
- Fox, M. C., & Mitchum, A. L. (2013). A knowledge-based theory of rising scores on “culture-free” tests. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142, 979–1000.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186–204.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137, 201–225.
- Fukuda, K., Vogel, E. K., Mayr, U., & Awh, E. (2010). Quantity not quality: The relationship between fluid intelligence and working memory capacity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17, 673–679.
- Fukuda, K., & Woodman, G. F. (2017). Visual working memory buffers information retrieved from visual long-term memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, 5306–5311.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40, 177–190.
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, 12, 305–355.
- Gignac, G. E. (2015). The magical numbers 7 and 4 are resistant to the Flynn effect: No evidence for increases in forward or backward recall across 85 years of data. *Intelligence*, 48, 85–95.
- Gottfredson, L. S. (1997). Mainstream science on intelligence. *Intelligence*, 24, 13–23.
- Gottfredson, L. S., & Deary, I. J. (2004). Intelligence predicts health and longevity, but why? *Current Directions in Psychological Science*, 13, 1–4.
- Greenfield, P. (1998). The cultural evolution of IQ. In U. Neisser (Ed.), *The rising curve: Long-term gains in IQ and related measures* (pp. 81–123). Washington, DC: American Psychological Association.
- Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimising performance. I: A review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 124–141.
- Harrison, T. L., Shipstead, Z., Hicks, K. L., Hambrick, D. Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2013). Working memory training may increase working memory capacity but not fluid intelligence. *Psychological Science*, 24, 2409–2419.
- Hayes, T. R., Petrov, A. A., & Sederberg, P. B. (2015). Do we really become smarter when our fluid-intelligence test scores improve? *Intelligence*, 48, 1–14.
- Heine, S. (2018). 心理学における多様性への挑戦——WEIRD 研究の示唆と改善—— 認知心理学研究, 15, 63–71.
- Holmes, J., & Gathercole, S. E. (2014). Taking working memory training from the laboratory into schools. *Educational Psychology*, 34, 440–450.
- Holmes, J., Gathercole, S. E., Place, M., Dunning, D. L., Hilton, K. A., & Elliott, J. G. (2010). Working memory deficits can be overcome: Impacts of training and medication on working memory in children with ADHD. *Applied Cognitive Psychology*, 24, 827–836.
- Horn, L. L., & Cattell, R. B. (1967). Age differences in fluid and crystallized intelligence. *Acta Psychologica*, 26, 107–129.
- Hunt, E. (1995). *Will we be smart enough? A cognitive analysis of the coming workforce*. New York: Russell Sage Foundation.
- Ilkowska, M., & Engle, R. W. (2010). Trait and state differences in working memory capacity. In A. Gruszka, G. Matthews, & B. Szymura (Eds.), *Handbook of individual differences in cognition: Attention, memory, and executive control* (pp. 295–320). New York: Springer Science.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonidas, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 6829–6833.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Shah, P. (2011). Short and long-term benefits of cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 10081–10086.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Henry Holt and Co.
- Jensen, A. R. (1969). How much can we boost IQ and scholastic achievement? *Harvard Educational Review*, 39, 1–123.
- Johnson, S. (2005). *Everything bad is good for you: How today's popular culture is actually making us smarter*. New York: Rimerhead Books.
- Kane, M. J., Bleckley, M. K., Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (2001). A controlled-attention view of working-memory capacity. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 169–183.
- Kane, M. J., Brown, L. E., McVay, J. C., Silvia, P. J., Myin-Germeys, I., & Kwapil, T. R. (2007). For whom the mind wanders, and when: An experience-sampling study of working memory and executive control in daily life. *Psychological Science*, 18, 614–621.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working memory capacity and the control of attention: The contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 47–70.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., & Conway, A. R. A. (2005). Working memory capacity and fluid intelligence are strongly related constructs: Comment on Ackerman, Beier, and Boyle (2005). *Psychological Bulletin*, 131, 66–71.
- Karbach, J., & Verhaeghen, P. (2014). Making working memory work: A meta-analysis of executive-control

- and working memory training in older adults. *Psychological Science*, 25, 2027–2037.
- Kenworthy, L., Yerys, B. E., Anthony, L. G., & Wallace, G. L. (2008). Understanding executive control in autism spectrum disorders in the lab and in the real world. *Neuropsychological Review*, 18, 320–338.
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55, 352–358.
- Klein, K., & Boals, A. (2001). The relationship of life event stress and working memory capacity. *Applied Cognitive Psychology*, 15, 565–579.
- Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 317–324.
- Klingberg, T., Forssberg, H., & Westerberg, H. (2002). Training of working memory in children with ADHD. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24, 781–791.
- 小林 晃洋・大久保 街亜 (2014). 日本語版オペレーションスタンテストによるワーキングメモリの測定. *心理学研究*, 85, 60–68.
- 近藤 洋史・森下 正修・蘆田 佳世・大塚 結喜・荻阪 直行 (2003). 読解力とワーキングメモリ——構造方程式モデリングからのアプローチ——. *心理学研究*, 73, 480–487.
- Könen, T., Strobach, T., & Karbach, J. (2016). Working memory. In T. Strobach & J. Karbach (Eds.), *Cognitive training: An overview of features and applications* (pp. 59–68). New York: Springer.
- Kornell, N., & Bjork, R. A. (2007). The promise and perils of self-regulated study. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 219–224.
- Kurtz, M. M., Seltzer, J. C., Shagan, D. S., Thime, W. R., & Wexler, B. E. (2007). Computer-assisted cognitive remediation in schizophrenia: What is the active ingredient? *Schizophrenia Research*, 89, 251–260.
- Li, S.-C., Schmiedek, F., Huxhold, O., Röcke, C., Smith, J., & Lindenberger, U. (2008). Working memory plasticity in old age: Practice gain, transfer, and maintenance. *Psychology and Aging*, 23, 731–742.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390, 279–281.
- Lustig, C., Shah, P., Seidler, R., & Reuter-Lorenz, P. A. (2009). Aging, training, and the brain: A review and future directions. *Neuropsychology Review*, 19, 504–522.
- Martinussen, R., Hayden, J., Hogg-Johnson, S., & Tannock, R. (2005). A meta-analysis of working memory impairments in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 44, 377–384.
- McCabe, J. (2011). Metacognitive awareness of learning strategies in undergraduates. *Memory & Cognition*, 39, 462–476.
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A., & Hambrick, D. Z. (2010). The relationship between working memory capacity and executive functioning: Evidence for a common executive attention construct. *Neuropsychology*, 24, 222–243.
- McDaniel, M. A., Howard, D. C., & Einstein, G. O. (2009). The Read-Recite-Review study strategy: Effective and portable. *Psychological Science*, 20, 516–522.
- McNamara, D., & Scott, J. (2001). Working memory capacity and strategy use. *Memory & Cognition*, 29, 10–17.
- Melby-Lervåg, M., & Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, 49, 270–291.
- Melby-Lervåg, M., & Hulme, C. (2016). There is no convincing evidence that working memory training is effective: A reply to Au et al. (2014) and Karbach and Verhaeghen (2014). *Psychonomic Bulletin & Review*, 23, 324–330.
- Melby-Lervåg, M., Redick, T., & Hulme, C. (2016). Working memory training does not improve performance on measures of intelligence or other measures of “far transfer”: Evidence from a meta-analytic review. *Perspectives on Psychological Science*, 11, 512–534.
- 三宅 晶 (2000). ワーキングメモリ——過去, 現在, 未来——. 荻阪 直行 (編著) 脳とワーキングメモリ (pp. 311–329). 京都大学出版会.
- Miyake, A., & Shah, P. (Eds.). (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. New York: Cambridge University Press.
- Moody, D. E. (2009). Can intelligence be increased by training on a task of working memory? *Intelligence*, 37, 327–328.
- Morrison, A. B., & Chein, J. M. (2011). Does working memory training work? The promise and challenges of enhancing cognition by training working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 46–60.
- Mrazek, M. D., Franklin, M. S., Phillips, D. T., Baird, B., & Schooler, J. W. (2013). Mindfulness training improves working memory capacity and GRE performance while reducing mind wandering. *Psychological Science*, 24, 776–781.
- Neisser, U. (Ed.). (1998). *The rising curve: Long-term gains in IQ and related measures*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Neisser, U., Boodoo, G., Bouchard, T. J. J., Boykin, A. W., Brody, N., Ceci, S. J., ... Urbina, S. (1996). Intelligence: Knowns and unknowns. *American Psychologist*, 51, 77–101.
- Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the power law of practice. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition* (pp. 1–55). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Noack, H., Lövdén, M., & Schmiedek, F. (2014). On the validity and generality of transfer effects in cognitive training research. *Psychological Research*, 78, 773–789.
- Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7, 75–79.
- Osaka, M., Nishizaki, Y., Komori, M., & Osaka, N. (2002).

- Effect of verbal working memory: Critical role of focus word in reading. *Memory & Cognition*, 30, 562–571.
- 荻阪 満里子・荻阪 直行 (1994). 読みとワーキングメモリ容量——日本語版リーディングスパンテストによる測定—— 心理学研究, 65, 339–345.
- Otsuka, Y., & Osaka, N. (2014). High-performers use less phonological loop to process mental arithmetic during working memory task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68, 878–886.
- Owen, A. M., Hampshire, A., Grahn, J. A., Stenton, R., Dajani, S., Burns, A. S., ... Ballard, C. G. (2010). Putting brain training to the test. *Nature*, 465, 775–776.
- Park, D. C., Lautenschlager, G., Hedden, T., Davidson, N. S., Smith, A. D., & Smith, P. K. (2002). Models of visuospatial and verbal memory across the adult life span. *Psychology and Aging*, 17, 299–320.
- Passolunghi, M. C. (2006). Working memory and mathematical disability. In T. P. Alloway & S. E. Gathercole (Eds.), *Working memory and neurodevelopmental condition* (pp. 113–138). Hove, UK: Psychology Press.
- Peijnenborgh, J. C., Hurks, P. M., Aldenkamp, A. P., Vles, J. S., & Hendriksen, J. G. (2015). Efficacy of working memory training in children and adolescents with learning disabilities: A review study and meta-analysis. *Neuropsychological Rehabilitation*, 26, 645–672.
- Plomin, R., DeFries, J. C., & Loehlin, J. C. (1977). Genotype-environment interaction and correlation in the analysis of human behavior. *Psychological Bulletin*, 84, 309–322.
- Plomin, R., & Spinath, F. M. (2002). Genetics and general cognitive ability (g). *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 169–176.
- Rabipour, S., & Davidson, P. S. (2015). Do you believe in brain training? A questionnaire about expectations of computerized cognitive training. *Behavioural Brain Research*, 295, 64–70.
- Reder, L. M., Liu, X. L., Keinath, A., & Popov, V. (2016). Building knowledge requires bricks, not sand: The critical role of familiar constituents in learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23, 271–277.
- Redick, T. S., Shipstead, Z., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Fried, D. E., Hambrick, D. Z., ... Engle, R. W. (2013). No evidence of intelligence improvement after working memory training: A randomized, placebo-controlled study. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142, 359–379.
- Ritchie, S. J., & Tucker-Drob, E. (2018). How much does education improve intelligence? A meta-analysis. *Psychological Science*, 29, 1358–1369.
- Roberts, B. W., Kuncel, N. R., Shiner, R., Caspi, A., & Goldberg, L. R. (2007). The power of personality: The comparative validity of personality traits, socioeconomic status, and cognitive ability for predicting important life outcomes. *Perspectives on Psychological Science*, 2, 313–345.
- Roediger, H. L., & Karpicke, J. D. (2006). Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention. *Psychological Science*, 17, 249–255.
- Sala, G., & Gobet, F. (2017). Does far transfer exist? Negative evidence from chess, music, and working memory training. *Current Directions in Psychological Science*, 26, 515–520.
- Schaie, K. W. (1994). The course of adult intellectual development. *American Psychologist*, 49, 304–313.
- Schmeichel, B. J., Volokhov, R., & Demaree, H. A. (2008). Working memory capacity and the self-regulation of emotional expression and experience. *Journal of Personality and Social Psychology*, 95, 1526–1540.
- Schmidt, F. L., & Hunter, J. E. (1998). The validity and utility of selection methods in personnel psychology: Practical and theoretical implications of 85 years of research findings. *Psychological Bulletin*, 124, 262–275.
- Schurgin, M. W., Cunningham, C. A., Egeth, H. E., & Brady, T. F. (2018). Episodic memory can replace active storage in visual working memory. *bioRxiv*, 381848. <https://doi.org/10.1101/381848>
- Schwaighofer, M., Fischer, F., & Böhner, M. (2015). Does working memory training transfer? A meta-analysis including training conditions as moderators. *Educational Psychologist*, 50, 138–166.
- Shipstead, Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2012). Is working memory training effective? *Psychological Bulletin*, 138, 628–654.
- Simons, D. J., Boot, W. R., Charness, N., Gathercole, S. E., Chabris, C. F., Hambrick, D. Z., & Stine-Morrow, E. A. L. (2016). Do “brain training” programs work? *Psychological Science in the Public Interest*, 17, 103–186.
- Soveri, A., Antfolk, J., Karlsson, L., Salo, B., & Laine, M. (2017). Working memory training revisited: A multi-level meta-analysis of n-back training studies. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24, 1077–1096.
- Spencer-Smith, M., & Klingberg, T. (2015). Benefits of a working memory training program for inattention in daily life: A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE*, 10(3), e0119522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119522>
- St Clair-Thompson, H., Stevens, R., Hunt, A., & Bolder, E. (2010). Improving children’s working memory and classroom performance. *Educational Psychology*, 30, 203–219.
- Swanson, H. L. (2003). Age-related differences in learning disabled and skilled readers’ working memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 85, 1–31.
- Swanson, H. L., Zheng, X. H., & Jerman, O. (2009). Working memory, short-term memory, and reading disabilities: A selective meta-analysis of the literature. *Journal of Learning Disabilities*, 42, 260–287.
- Taatgen, N. A. (2016). Theoretical models of training and transfer effects. In T. Strobach & J. Karbach (Eds.), *Cognitive training: An overview of features and applications* (pp. 19–29). New York: Springer.
- Thompson, T. W., Waskom, M. L., Garell, K. L., Cardenas-Iniguez, C., Reynolds, G. O., Winter, R., & Gabrieli, J.

- D. (2013). Failure of working memory training to enhance cognition or intelligence. *PLoS One*, 8(5), e63614. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063614>
- Thorndike, E. L. (1906). *The principles of teaching based on psychology*. New York: A. G. Seiler.
- 友永 雅己・三浦 麻子・針生 悦子 (2016). 心理学の再現可能性：我々はどこから来たのか 我々は何者か 我々はどこへ行くのか——特集号の刊行に寄せて—— 心理学評論, 59, 1-2.
- Tsubomi, H., & Watanabe, K. (2017). Development of visual working memory and distractor resistance in relation to academic performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 154, 98-112.
- Turkheimer, E., Haley, A., Waldron, M., D'Onofrio, B., & Gottesman, I. I. (2003). Socioeconomic status modifies heritability of IQ in young children. *Psychological Science*, 14, 623-628.
- Turner, M. L., & Engle, R.W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of Memory and Language*, 28, 127-154.
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2007). The nature of individual differences in working memory capacity: Active maintenance in primary memory and controlled search from secondary memory. *Psychological Review*, 114, 104-132.
- Unsworth, N., Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2014). Working memory and fluid intelligence: Capacity, attention control, and secondary memory. *Cognitive Psychology*, 71, 1-26.
- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E., Van der Molen, M. W., Klugkist, I., & Jongmans, M. J. (2010). Effectiveness of a computerised working memory training in adolescents with mild to borderline intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54, 433-447.
- Weicker, J., Villringer, A., & Thöne-Otto, A. (2016). Can impaired working memory functioning be improved by training? A meta-analysis with a special focus on brain injured patients. *Neuropsychology*, 30, 190-212.
- Whalley, L. J., & Deary, I. J. (2001). Longitudinal cohort study of childhood IQ and survival up to age 76. *British Medical Journal*, 322, 1-5.
- Wong, R. M. F., Lawson, M. J., & Keeves, J. (2002). The effects of self-explanation training on students' problem solving in high-school mathematics. *Learning and Instruction*, 12, 233-262.
- Wongupparaj, P., Wongupparaj, R., Kumari, V., & Morris, R. G. (2017). The Flynn effect for verbal and visuo-spatial short-term and working memory: A cross-temporal meta-analysis. *Intelligence*, 64, 71-80.
- Wright, M. J., De Geus, E., Ando, J., Luciano, M., Posthuma, D., Ono, Y., ... Boomsma, D. (2001). Genetics of cognition: Outline of a collaborative twin study. *Twin Research*, 4, 48-56.
- Zhao, X., Wang, Y. X., Liu, D. W., & Zhou, R. L. (2011). Effect of updating training on fluid intelligence in children. *Chinese Science Bulletin*, 56, 2202-2205.

—— 2018. 9. 15 受稿, 2019. 1. 26 受理 ——