論文内容の要旨

論文題目：Storage systems in visuo-spatial working memory: capacity independence and the role of attention

（視空間ワーキングメモリにおける保持システム：容量の独立性と注意の役割）

氏名：真田 原行

背景と目的

ワーキングメモリ（以下 WM）は，視空間情報と聴覚言語情報とでその処理システムが異なることが広く知られてきた（Baddeley & Hitch, 1974）。これに加え，視空間情報内においても，視覚情報（色や形などの特徴やそれら複数を結合した物体）と空間情報とで独立した WM 処理システムが存在することが提唱されている（Logie, 1995）。

しかしこの視空間 WM 独立仮説を裏付ける証拠は，WM 課題と WM を必要としない認知課題を組み合わせた二重課題を用いて提出されてきたものがほとんどであり，厳密に言えば WM 同士の独立性を直接的に示した証拠とは言えない。そこで Wood (2011) は，初めて WM 課題同士を組み合わせた二重課題を用い，再度視空間 WM 独立仮説の検証を試みた。その結果，図形・空間 WM が処理システムを共有する可能性を示唆する結果が得られた。これまで図形は視覚情報の一種として扱われてきたため，この結果は視空間 WM 独立仮説に反しその妥当性を揺るがすものであり，この問題をより詳細に再検討する必要が出てきた。

また近年，注意が WM の処理過程において重要な役割をもつ可能性が指摘されてきた（Awh et al., 2006）。注意には視覚的注意（i.e. 特徴・物体ベースの注意）と空間的注意の 2 つの異なるシステムが存在することが知られている（Scolari et al., 2014）。そこから，視覚・空間 WM の独立性も，それぞれの WM 保持を異なる注意システムが担うために生じている可能性が考えられる。

しかし視覚・空間 WM それぞれの保持をどの注意システムが担うかについては，未だ研究者

間で意見が一致していない。まず，Awh らは，空間的 WM 保持を空間的注意が担うと主張している（Awh et al, 1999; Awh & Jonides, 2001)。一方，Luck らは，視覚 WM 保持において空間的注意が重要な役割を担っている可能性を否定している（Zhang et al. 2013)。後者の立場によれば，視覚 WM では，単一特徴であっても複数の特徴が統合された物体であっても，共に物体ベースの保持システムが支えているとされる（Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2001)。さらにまた Barnes et al. (2001）は，視覚 WM 保持を物体ベースの注意が担う可能性を示した。これらの研究は，注意システムの違いが視空間 WM の独立性の原因である可能性を支持している。しかし Wheeler and Treisman (2002）は Luck らの視覚的 WM の物体ベース保持理論に反論し，視覚 WM であっても複数の特徴を統合した物体を保持する場合には，空間的注意が必要であると主張する。この理論は，視覚・空間 WM 間でもその一部は保持システムを共有する可能性を示す。

さらに近年，Awh らの空間的注意による空間 WM 保持理論に対してさえも反論が提出され始めた（Belopolsky & Theeuwes, 2009; Chan et al., 2009)。空間的注意による空間 WM 保持理論は，WM 保持を注意が担う可能性を示した古典的な研究であり，比較的広く受け入れられているため（Awh et al., 2006)，もしこの理論が否定されれば，WM 処理における注意の重要性についての認識が大きく揺らぐこととなる。よってその詳細な再検討は喫緊の課題と言える。

このように視空間 WM における容量の独立性と，それに関連する注意の役割については，未だ議論が錯綜している。本研究は，これに関連した 2 つの重要な問題を取り上げ，その検証により視空間 WM システムの包括的理解に向けた基礎的な証拠を提出することを目的とした。1 つめの問題は Wood (2011）が報告した図形･空間 WM 間の干渉である。そして 2 つ目の問題は，Awh らの空間的注意による空間 WM 保持理論についてである。

研究 1：図形・空間 WM 独立性の再検討

研究 1 では，図形・空間 WM が容量を共有するのか，それとも独立なのかを図形・空間 WM の二重課題を用いて再検討した。まず，Wood（2011）で見られた図形・空間 WM 間の干渉が，方法論的な交絡要因によるのではないかと考え，その可能性を検討した。ここで可能性として挙がった交絡要因は，(1) 空間手がかりの呈示方法，(2) WM 課題順序の固定，(3) WM の負荷量操作が空間 WM に偏っていたことの 3 つである。

これら 3 つの交絡要因をそれぞれ別の実験で検討した結果（実験 1a・1b・1c・2・3; それぞれ N = 30・33・21・25・22)，これらが干渉の原因ではないことが示唆された。しかし他方で，Wood (2011）で報告された図形・空間 WM 間の干渉も，統計的に有意な差として検出されなかった。しかしながらこれらの結果は，単に干渉の効果量が小さく，その検出には各実験のサンプルサイズが十分でなかっただけ，という可能性も存在する。事実，統計的検定力を上げるため，実験 1 と 2 の全データを合わせて事後的に分析を行ったところ（N = 109), 統計的にも有意な干渉が観察された。そこで実験 4 では，十分なサンプルサイズを確保した上で（N=90）さらに厳

密な Wood（2011）の追試を行い，その効果量の正確な推定を行った。結果，有意な干渉が再確認されたものの，やはりその効果量はわずかであった(Cohen's $d = 0.24$；図 1)。この結果は図形・空間 WM が概ね独立した処理容量を持つことを強く示唆する。よって研究 1 の結果は視空間 WM 独立仮説（Logie, 1995）を支持するものであると結論付けられた。

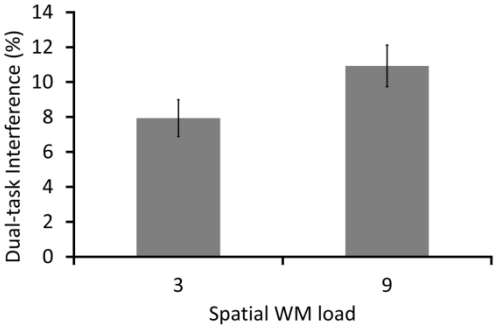

図1. 研究1の結果例 (実験4)。 空間WM負荷量の増大により有意な干渉が見られたが，その効果量はわずかであった (Cohen'd = 0.24)。

研究 2：空間的注意による空間 WM リハーサル理論の再検討

研究 2 では，空間的注意による空間 WM 保持理論（Awh et al., 1999; Awh & Jonides, 2001）の妥当性を行動実験と事象関連電位（ERP）を用いて検証した。まず，もし空間的注意が空間 WM 保持を担うのであれば，WM で記憶している場所に対して空間的注意が向き続けているはずである。事実，Awh et al. (1998) は行動実験によってこの予測通りに空間的注意の効果を示したが，Belopolsky and Theeuwes (2009) はそれを追試できず，空間的注意は空間 WM 保持に役割を持たないと主張した。しかし両研究が用いた手続きはほぼ同じであったため，この結果の不一致はサンプリングのばらつきにより生じた可能性がある。そこで実験 1 では両研究とほぼ同様の手続きを用いてその追試を再度行った（N = 27)。結果，空間的注意の効果は検出できず，空間的注意は記憶した場所に向いていない可能性が示唆された。しかし実験 1 の行動指標が空間的注意の検出に十分な感度を持っていなかった可能性も残る。

そこで実験 2 では，この問題をさらに厳密に検証するため空間的注意の指標として ERP (P1・N1)を用いた。空間的注意は，知覚刺激によって誘発される P1・N1 の振幅を増大することが知られている（Mangun et al. 1993)。しかしながら，単に空間的注意の効果を示しただけでは，空間的注意が空間 WM 保持を担うことを証明できたとは言えない。なぜなら，この効果は単に付随的なものであり実際には空間 WM 保持に積極的な役割を持たない可能性が残るからである。この点を検討するため，実験 2 では，視覚探索課題を空間 WM 保持期間に挿入して空間的注意を剥奪し，その影響を，空間 WM 課題成績と，P1・N1 によって計測される空間的注意の効果の 2 つの指標によって検証した（N = 18)。もし空間的注意が WM 保持に役割を持つのであれば，まず（A1）視覚探索の挿入，特に探索課題負荷の増大によって空間 WM 課題成績が悪化し，また（A2）空間 WM 正解時には，探索課題の有無・負荷量に関係なく，空間的注意の効果は減少しないと予測された。さらに（A3）空間 WM 課題におけるエラーの一部は視覚探索により空間的注意が剥奪された結果を反映している可能性が高いため，エラー試行も含めて ERP 算出を行った場合には，視覚探索を行うことにより空間的注意の効果が減少すると考えられた。一方，空間的注意が WM 保持に役割を持たない場合には，(B1) 空間 WM 課題成績は視覚探索によって減少しないと考えられ，また記憶した場所に向く注意は単に付随的なものであるため，(B2) 視

覚探索が注意を使うことでこの効果は消滅すると予測された。

結果，まず空間 WM 課題遂行中の空間的注意の保持に関しては，N1 において有意な振幅増大が観察され，空間的注意が記憶された場所に対して向いていることが確認された(図 2)。このことは，実験 1 ならびに他の先行研究で得られたネガティヴな結果が，行動指標の特性に依存したものである可能性を示し，Awh らの知見と一致する結果となった。

さらに，視覚探索の挿入による効果を見てみると，空間 WM 課題成績は視覚探索により阻害され，さらに N1 によって測定された空間的注意の効果は，視覚探索課題の課題負荷量とは無関係に，頑健に観察された (図 2)。この結果は，空間 WM 保持中に別の認知処理に注意を使わせた場合にでも，記憶した場所に空間的注意が積極的に向け続けられていた可能性を示す。しかし他方で，探索課題負荷量の増加によって空間 WM 成績は変化せず，また ERP 上の注意効果は，エラー試行を含めた分析でも減少しなかった。この結果は，当初の予測に反するものであり本実験の操作が十分な空間的注意の剥奪を行えていなかった可能性を示唆する。ただし視覚探索の反応時間からはこの課題が注意を使用したと考えられ，また注意資源は限られた容量をもつことを考慮すれば，実験 2 の結果は，空間的注意が単に付随的なものではなく，積極的に維持されていた可能性を支持するものである。ただし本研究手続きには，ある時点における注意効果しか測定ができないという欠点もあり，持続的な注意の維持と，WM 保持におけるその役割を検証するためには更なる検討が必要である。

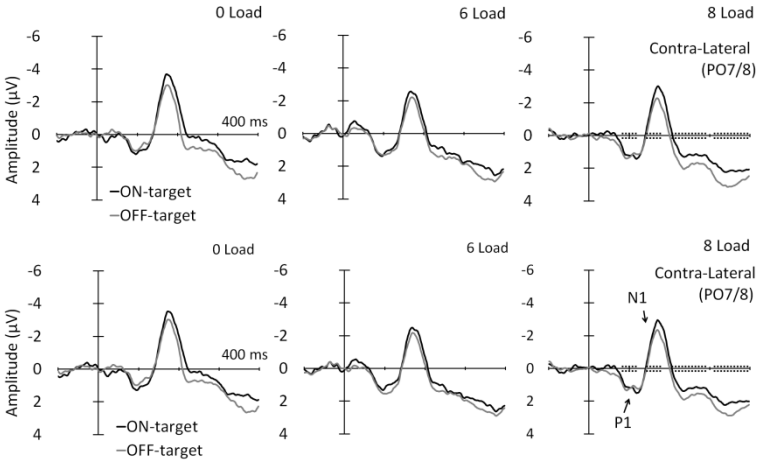

図2. 研究2の結果例 (実験2・ERP)。上段が空間WM課題の正解試行のみをERP算出に用いた場合。下段がエラー試行も含めた場合。横に視覚探索の負荷量条件毎に波形を比べたもの (左から0・6・8 load)。N1において空間的注意による振幅増大が見られ (ON- v.s. OFF-target)、視覚探索負荷量によってその効果は変化しない。

総論

本研究は視空間 WM における容量独立性と注意の役割に関し，2 つの重要な問題を取り上げ，視空間 WM の包括的理解に向けた基礎的証拠を提出することを目的とした。まず研究 1 から，図形・空間 WM は概ね独立した処理容量を持つことが示唆された。この結果は Logie の視空間 WM 独立仮説を支持する。また研究 2 から，空間 WM 保持中に空間的注意が記憶した場所に向けられ続けている可能性が示唆された。この結果は Awh らの空間的注意による空間 WM 保持理論を支持する。これらの知見は，WM 諸理論においてこれまで確定的ではなかった部分に新たな経験的証拠を与え，今後の理論的発展に対して重要な礎を提供するものである。