

垂直方向における空間－算術連合の検証 —反応時間と眼球運動指標を用いた分析—

張倫博（九州大学 人間環境学府, zhanglunbo014@gmail.com）
朱思齊（九州大学 人間環境学府, knmoonless@gmail.com）
山田祐樹（九州大学 基幹教育院, yamadayuk@gmail.com）

Investigating vertical spatial-arithmetic associations:
An analysis using reaction time and eye-movement measures
Lunbo Zhang (Graduate School of Human-Environmental Studies, Kyushu University, Japan)
Siqi Zhu (Graduate School of Human-Environmental Studies, Kyushu University, Japan)
Yuki Yamada (Faculty of Arts and Science, Kyushu University, Japan)

Abstract

Spatial–arithmetic associations (SAA) suggest that arithmetic operations induce spatial attentional shifts. While horizontal SAA is well established, vertical SAA remains inconsistent, particularly across behavioral and eye-movement measures. This study examined vertical SAA using reaction time (RT) and eye-tracking across three pre-registered experiments. In Experiment 1 ($N = 27$), no vertical SAA was observed in RT or mean fixation, but exploratory cluster-based permutation analysis revealed transient upward vs. downward attentional divergence after operator presentation. Experiment 2 ($N = 197$, online) increased temporal sensitivity by presenting targets at four arithmetic stages; although significant main effects of target position, operation, and timing emerged, no interaction supported vertical SAA in RT. Experiment 3 ($N = 27$) introduced explicit spatial-motor mapping (\uparrow/\downarrow responses). Again, RT showed no interaction, but fixation position differed significantly by operation: addition biased gaze upward relative to subtraction. Exploratory analysis confirmed this effect was localized to the final computation stage. Overall, results indicate that vertical SAA is weak and transient, detectable primarily via eye-movement rather than RT, and modulated by task structure and spatial–motor correspondence. These findings support the view that vertical numerical attention shifts exist but require sensitive oculomotor measures to be observed.

Key words

spatial-arithmetic association, mental arithmetic, attention, vertical attention shift, mental number line

1. 背景

数の認知は、しばしば心的数直線 (Mental Number Line, MNL) として空間的に表現される。Dehaene et al. (1993) の報告によれば、小さい数値は左、大きい数値は右に位置づけられる傾向があり、広く実証されてきた (Dehaene et al., 1993; Hubbard et al., 2005)。この効果は、例えば小さい数字に対して左手、大きい数字に対して右手の反応が速くなる傾向を示す。さらに、数字の空間的連合は垂直方向にも存在することが報告されており、小さい数は下方、大きい数は上方と関連づけられる (Gevers et al., 2006; Schwarz & Keus, 2004; Winter et al., 2015)。したがって、單一の数の処理においては、水平方向および垂直方向の数－空間連合が確立されているといえる。先行研究では、数字の提示によって注意が心的数直線 (MNL) にしたがって移動し、その結果として一致方向の刺激に対する反応が速くなることが示されている (Ristic et al., 2006)。さらに、Hubbard et al. (2005) は、こうした数－空間連合が算術処理にも拡張される可能性を指摘しており、加算を行うと注意が MNL 上で右方向に、減算では左方向にシフト

するとする仮説を提案した。これは、算術処理が空間的注意のシフトというメカニズムに依拠している可能性を示すものである。この仮説は、算術キューイング (Arithmetic Cueing) と呼ばれる現象として検討されており、加算問題の直後には右側の視覚刺激への反応が促進され、減算問題の後には左側が促進されることが報告されている (Fischer & Knops, 2014)。このような方向性の注意シフトは、数的情報が空間的に構造化されているという MNL の枠組みと整合的であり、数処理と心的算術に共通する空間認知メカニズムの存在を示唆する (Knops et al., 2009; Liu et al., 2017; Masson & Pesenti, 2014)。

もし数処理と心的算術との間に共通の認知メカニズムが存在するのであれば、垂直方向においても同様の効果が観察されるはずである。しかし残念ながら、これまでの研究では主に水平方向における空間－心的算術の連合 (Space-Arithmetic Association; SAA) に焦点が当てられており、垂直方向における SAA の検討は十分に行われていない。一部の研究では、上下方向の連合は初期の感覚運動経験 (たとえば物体を積み上げる行為) に起因するとされ、左右方向の連合に比べて文化的影響を受けにくい可能性が指摘されている (Blini et al., 2019; Hartmann, 2022; Wiemers et al., 2014)。このことは、垂直方向の SAA が、水平方向よりも、人間に広く共通してみられる現象

である可能性を示唆しており、その特性を明らかにすることは、数量処理や空間的注意を支える認知メカニズムを理解するうえで有益な手がかりとなり得る。

しかしながら、垂直的な SAA の存在に関する実証結果は一貫性に欠けており、肯定的な結果を報告する研究 (Salvaggio et al., 2022) と、効果が確認されなかった研究 (Liu et al., 2017) とが混在している。Liu et al. (2017) の研究では、加算あるいは減算の心的計算を行った直後に、視野の上方または下方に呈示される目標刺激への反応時間を指標として、注意の垂直方向へのシフトが検討された。もし加算課題の遂行によって注意が上方へシフトするのであれば、加算後には上方に呈示された目標刺激に対する反応が減算後よりも速くなるはずである。同様に、減算により注意が下方へシフトするのであれば、下方呈示刺激への反応が相対的に短縮すると予測される。Liu et al. (2017) の研究と他の研究との主な相違点は二つある。第一に、Liu et al. は刺激を視覚刺激として提示したのに対し、他の多くの研究では聴覚刺激を用いていた点である。第二に、Liu et al. は反応時間を指標として SAA の生起を検討したのに対し、他の研究では主に眼球運動指標を用いていた点である。Liu et al. の実験では反応時間 (RT)において左右方向の有意な効果が確認されており、刺激が視覚提示された場合でも空間的注意のシフトが生じることが示唆されている。一方で、本来より頑強であると考えられる上下方向の効果が有意に現れなかつたことから、RT では捉えきれない注意の初期段階における空間シフトが存在する可能性が示唆される。

以上の点を踏まえ、本研究の実験 1 では、Liu et al. (2017) が用いた実験パラダイムを再現しつつ、新たに眼球運動の測定を導入することで、垂直方向における SAA の存在を検証することを目的とした。本研究では次の仮説を立てた。すなわち、加算課題では MNL 上での数的進行に伴い注意が上方向へシフトし、一方、減算課題では注意が下方向へシフトすると想定される。そのため、眼球運動指標においても、加算課題中は減算課題中に比べて平均固視位置 (fixation) がより上方に偏ると予測された。

2. 実験 1

2.1 方法

2.1.1 事前登録

本研究の実験 1 は、Open Science Framework (OSF)において事前登録された (<https://osf.io/4k3re>)。事前登録には、研究目的、仮説、方法、分析計画などの詳細が含まれており、研究の透明性および再現性の確保を目的としている。

2.1.2 参加者

本研究は追試研究であるため、先行研究と同様のサンプルサイズを採用した。参加者は九州大学の大学生または大学院生 27 名であった (男性 14 名、女性 13 名、平均年齢 26.6 歳)。すべての参加者は、実験参加前に書面によ

るインフォームド・コンセントを提出した。参加は自発的であり、参加者はいかなる不利益もなく任意のタイミングで参加を中止できることが明示された。謝礼として、参加者には 1000 円が支払われた。本研究はヘルシンキ宣言 (2025 年版) に準拠して実施され、九州大学人間科学部門心理学講座の研究倫理委員会の承認を受けている (承認番号 : 2024-043)。各参加者のデータ収集には約 45 分を要した。

2.1.3 装置と刺激

使用ソフトウェアは MATLAB R2022a および Psychtoolbox 3.0.17 であった。刺激の呈示には ASUS VG278QR-R (100 Hz) モニターを接続した Dell Precision 3630 Tower を使用した。視距離は約 60 cm で、Tobii Pro Nano (60 Hz) により眼球運動を記録した。

実験 1 は、Liu et al. (2017) の実験を部分的に再現しつつ、眼球運動の測定を加えることで、刺激構成や課題構造を踏襲した追試的実験であった。したがって、加算課題における第 1 項は「14」「28」「56」の 3 種類、減算課題では「32」「64」「128」の 3 種類が使用された。第 2 項は、第 1 項の数値に対して一定割合 (加算 : 28 %, 49 %, 76 %; 減算 : 23 %, 34 %, 44 %) を乗じて算出された。これにより、3 つの初期値 (第 1 項) と、それぞれに対応する 3 種類の変化量 (第 2 項) の組み合わせによって、加算および減算それぞれに対して $3 \times 3 = 9$ 通りの刺激セットが構成された。各試行では、呈示される計算結果は、正答 1 つと逸脱値 4 つから構成された。逸脱値は、正答値を c としたとき、 $c \times 2i/4$ ($i = -2, -1, 0, 1, 2$) という計算式に基づいて整数に丸めた値として生成された。試行全体の 50 % では正答が呈示され、残りの 50 % では逸脱値が提示された。逸脱値は、各ブロック内でカウンターバランスが取れるように配置された。

2.1.4 手続き

試行の流れは図 1 に示されている。まず、中央に赤色の凝視点「*」 (Calibri 20 pt, 0.4°) が 1000 ms 呈示され、同時に上下に空枠が表示された (1 つは凝視点の上側、もう 1 つは下側、いずれも偏心度 4°, 1° × 1°)。凝視点が消失すると、代わりに演算子 (+ または -, Calibri 40 pt, 0.8°) が 300 ms 呈示され、続く算術処理の種類を示した。その後、第 1 項 (500 ms)、再び演算子 (300 ms)、第 2 項 (500 ms) が順に呈示された。第 2 項が消えた後、計算結果 (各数字は Calibri 36 pt, 1° × 0.6°) の提案が画面中央に提示され、参加者はそれが正しいか誤っているかを、できるだけ速くかつ正確に判断し、「正しい」または「誤り」と音声で報告した。計算結果は、参加者の反応があるまで画面中央に呈示され、反応がない場合は最大で 5000 ms まで表示された。計算結果が消失すると、ランダムな遅延 (150 ms, 300 ms、または 500 ms) を経て、試行の 80 %において、目標刺激 (白色の実線円、直径 0.7°) がランダムに上下いずれかの枠内に呈示された。予測的な反応を防ぐため、残り 20 % の試行では目標刺激が呈示されな

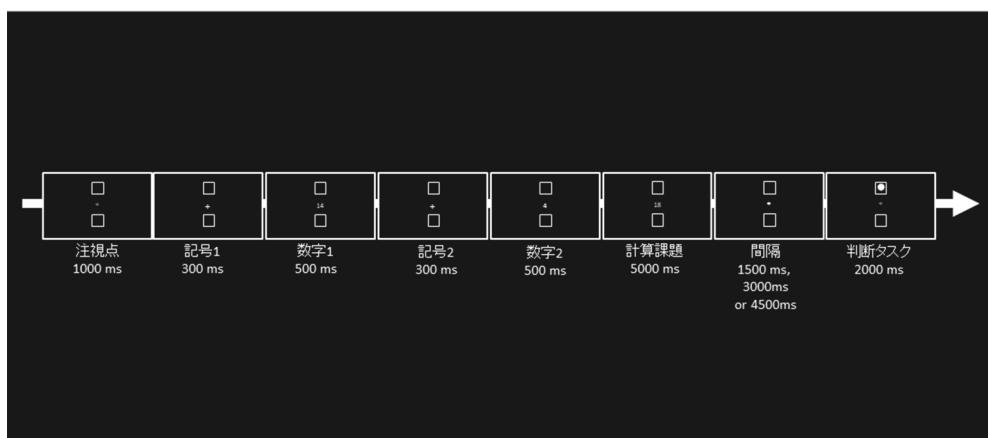


図 1：実験の流れ

いキャッチ試行が用意された。参加者は、目標を検出した際には、利き手を用いてできるだけ速くスペースキーを押すよう求められた。目標刺激は、反応があった場合はその時点で、反応がない場合は 2000 ms の経過後に消失した。なお、実験開始前に参加者には、算術課題は目標検出とは無関係であることが説明された。実験は全 240 試行であり、60 試行ごとの 4 つの連続したブロックに分けて実施された。各ブロック終了後には休憩時間が設けられた。また、本実験に先立ち、16 試行からなる練習セッションが実施された。

2.2 結果

RT についての参加者内 2 要因（演算：加算・減算 × 目標位置：上・下）の反復測定分散分析では、計算の主効果 ($F(1, 26) = 1.52, p = .229, \eta^2 < 0.001$)、目標位置の主効果 ($F(1, 26) = 0.40, p = .532, \eta^2 < 0.001$)、および両者の交互作用 ($F(1, 26) = 0.30, p = .586, \eta^2 < 0.001$) がすべて非有意であった（図 2）。

登録なしの追加分析として、参加者内 3 要因（演算：加算・減算 × 目標位置：上・下 × 計算課題の数字の相対的大きさ：正答よりも大・小）の反復測定分散分析を実施したところ、すべての主効果と交互作用が非有意であった ($p > .05$)。また、参加者内 3 要因（演算：加算・減算 ×

目標位置：上・下 × 計算課題の数字の大きさ）の線形混合モデル分析でも、すべての主効果と交互作用は非有意であった ($p > .05$)。

眼球運動分析においては、まず固視を視角 1° 以内の範囲に 100 ms 以上視線が停留した場合として定義した（サンプリングレートにより、実質的な最小持続時間は約 96.67 ms であった）。この基準に基づき算出した固視位置の垂直距離の平均値について、加算課題と減算課題の間で対応のある t 検定を実施したが、有意な差は見られなかった⁽¹⁾ ($t(26) = 0.52, p = .605, \text{Cohen's } d = 0.023$)。

一方、事前登録された探索的分析として視線方向（gaze）の時系列分析⁽²⁾を行った（Frossard & Renaud, 2021）。その結果、第 1 演算子呈示後 100 ms（第 6 エポック⁽³⁾）から 450 ms（第 27 エポック）の間（clustermass $F = 209.42, p = .048$ ）、および第 2 演算子呈示後 917 ms（第 55 エポック）から 1367 ms（第 82 エポック）の間（clustermass $F = 208.28, p = .048$ ）において有意な視線方向の差が認められた（図 3）。

2.3 考察

実験 1 は、加算・減算課題における上下方向の空間的注意シフトの有無を、RT と眼球運動の両指標から検討した。提示数字の相対的（正答との比較）および絶対的な大きさを要因として分析した結果、いずれの要因も有意な影響を示さなかった。このことから、本研究で採用したランダム提示方式によって、数字の大きさに起因する注意シフトの影響は十分に抑制されていたと考えられる。RT と固視では有意差は見られなかったものの、視線方向の時系列分析において、加算・減算により生じる短時間の顕在的注意の偏りが検出された。これは、垂直方向の SAA が認知処理において一過性に生じていることを示唆している。Liu et al. (2017)においてこの効果が観察されなかった理由としては、ターゲットの呈示タイミングが遅く、注意のシフトがすでに減衰していた可能性がある。さらに、本研究で得られた結果には、下視野優位性（lower visual field advantage）の影響が関与していた可能性も考えられる。具体的には、下視野における視覚情報処

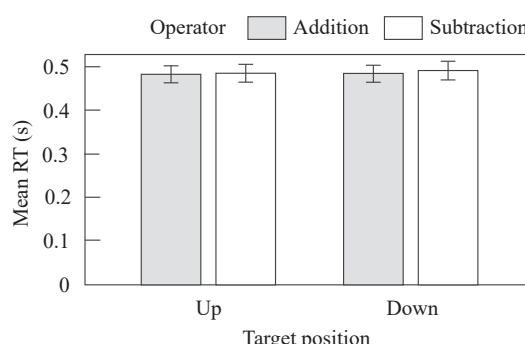


図 2：演算種別およびターゲット位置別の平均反応時間
注：加算課題および減算課題におけるターゲット位置（上・下）別の平均 RT を示す。誤差棒は各条件の標準誤差を表す。

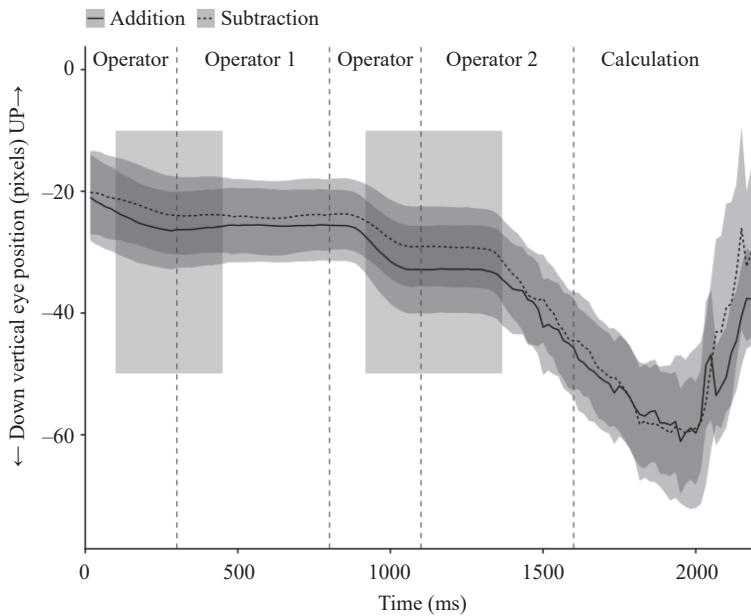


図3：加算と減算における視線方向の時系列変化

注：各線の周囲の濃淡は標準誤差を表す。灰色の帯は、加算と減算の条件間で有意な差が認められた時間帯を示している。縦軸の値が大きいほど視線方向が画面中央より上方、小さいほど下方であることを示す。

理は上視野よりも迅速かつ精度が高いことが報告されており、人間の視覚的注意や眼球運動は自然に下方向へ向かう傾向を示す (Li et al., 2023)。本実験では、加算記号 (+) の形状が減算記号 (-) よりも下方向に少し広がっており、参加者が視覚的に記号の下部へ注意を向けやすかった可能性がある。このような符号形状の物理的特徴に起因する注意バイアスが、垂直方向の差が微弱であった原因となったと考えられる。

3. 実験 2

3.1 目的

実験 1 の結果より、演算子呈示後の特定の時間帯において、加算・減算による垂直方向の空間的注意のシフトが一過性ながらも生起している可能性が示唆された。さらに、本効果には演算記号の形状差に起因する注意バイアスが影響していた可能性も考えられる。したがって、本実験では、RT を指標として用い、異なる演算段階の直後に目標刺激を呈示することで、垂直方向の SAA が再現されるかを検証した。

3.2 方法

3.2.1 事前登録

本研究の実験 2 も事前登録されていた (<https://osf.io/94w53>)。

3.2.2 参加者

事前に検定力分析を行い、必要な参加者数の算出を行った。効果量を小と見積もり (Cohen's $d = 0.2$)、検出力 0.8、 $\alpha = 0.05$ と設定した PANGEA (<https://jakewestfall.shinyapps.io/pangea/>) で分析した結果、98 名の参加者が必要である

と判断した。脱落を考慮し、200 名の参加者を Yahoo! クラウドソーシングプラットフォームにて募集した。正答率が 70 % 未満であった 3 名の参加者を除外し、残りの 197 名を分析対象とした（男性 152 名、女性 42 名、性別無回答 3 名、平均年齢 48.7 歳）。

参加者からは実験開始前に電子的にインフォームド・コンセントを取得し、参加は自由意思に基づき、いつでも中断できることが明示された。本研究はヘルシンキ宣言（2025 年版）に準拠して実施され、九州大学人間科学部門心理学講座の研究倫理委員会の承認を受けている（承認番号：2024-043）。参加者には、基本謝金として 50 PayPay ポイントが支払われ、さらに正答率が 70 % 以上、かつ誤反応率が 20 % 未満であった場合、追加で 50 PayPay ポイントの謝金が支払われた。実験の所要時間は約 20 分であった。

3.2.3 装置と刺激

実験参加者は各人が所有するパーソナルコンピューターを使用して Google Chrome または Firefox で指定された URL にアクセスした。スマートフォンやタブレットを使用しての参加はできなかった。

3.2.4 手続き

実験 2 では、オンライン実施に適応するために、呈示時間および反応方法が実験 1 と一部異なっていた。まず、演算記号および各数値の呈示時間は、演算記号が 500 ms、第 1 項が 700 ms、第 2 項が 500 ms と設定された。また、計算結果の判断報告は音声反応ではなく、正答と判断した場合には「J」キーを、誤答と判断した場合には「F」キーを押下する形式で行われた。計算結果が呈示された

後は、参加者がいずれかのキーで反応するまで次の刺激は呈示されなかった。目標刺激の検出課題に関しては、実験1では刺激表示の有無が計算課題後の固定遅延(150 ms、300 ms、500 ms)で制御されていたのに対し、実験2では、目標刺激「●」が演算記号や数値の呈示中を含む任意のタイミングで出現するよう設定された。具体的には、演算記号呈示後、第1項呈示後、第2の演算記号呈示後、第2項呈示後の4つのフェーズのいずれかでランダムに出現しうる構成であった。刺激が出現した時点で参加者は速やかにスペースキーで反応するよう求められ、反応が行われるまで次の刺激は呈示されなかった。さらに、各試行の末尾において計算判断の正誤に関するフィードバックが画面上に呈示され、参加者はスペースキーを押下することで次の試行へ進んだ。

3.3 結果

RTについての3要因(刺激位置×演算種別×刺激タイミング)の反復測度分散分析を実施した。その結果、刺激位置に有意な主効果が認められた($F(1, 196) = 7.27, p < .01$)、また演算種別にも有意な主効果が認められた($F(1, 196) = 5.63, p < .05$)。さらに、刺激タイミングの主効果も有意であった($F(1.48, 289.98) = 18.77, p < .001$)。一方で、いずれの交互作用(演算種別×刺激位置、刺激位置×刺激タイミング、演算種別×刺激タイミング、および三要因の交互作用)も有意ではなかった($ps > .05$)。

RTについての3要因(刺激位置×演算種別×刺激タイミング)の反復測度分散分析を実施した。その結果、刺激位置に有意な主効果が認められた($F(1, 196) = 7.27, p < .01$)。反応時間は下位置刺激($M = 690$ ms, $SE = 19.7$)の方が上位置刺激($M = 740$ ms, $SE = 17.7$)よりも短かった。また、演算種別にも有意な主効果が認められた($F(1, 196) = 5.63, p < .05$)。加算条件($M = 701$ ms, $SE = 16.0$)では減算条件($M = 730$ ms, $SE = 21.6$)よりも反応が速かった。さらに、刺激タイミングの主効果も有意であった($F(1.48, 289.98) = 18.77, p < .001$)。各条件の平均反応時間は以下の通りであった。記号1後： $M = 692$ ms ($SE = 14.2$)、数字1後： $M = 642$ ms ($SE = 15.8$)、記号2後： $M = 650$ ms ($SE = 16.1$)、数字2後： $M = 877$ ms ($SE = 33.1$)。一方で、いずれの交互作用(演算種別×刺激位置、刺激位置×刺激タイミング、演算種別×刺激タイミング、および三要因の交互作用)も有意ではなかった($ps > .05$)。

3.4 考察

実験2では、加算・減算といった演算処理が上下方向の注意に影響を与えるかをRTから検討した。しかし、予測された交互作用は認められず、垂直的SAAを示す明確な行動指標の変化は得られなかった。一方で、演算種別・刺激位置・呈示タイミングのそれぞれに主効果が見られた。演算種別の主効果については、減算が加算よりも高い認知的負荷を要するという先行研究の知見と一致している(e.g., Ashcraft, 1992; Liu et al., 2017)。本実験の参加者はすべて大学生または大学院生であり、計算スキルが

比較的高かったことから、加減算課題において天井効果が生じた可能性も考えられる。刺激位置の主効果については、下方呈示刺激に対する反応時間が短い傾向が示された。この結果は、視野の下半分における情報処理が上半分よりも効率的であるとされる下視野優位性(Li et al., 2023)に一致しており、先行研究でも一貫して報告されている現象である。さらに、呈示タイミングの主効果については、課題の前半では主に数字や記号の視覚的認識および記憶保持が求められる段階であるのに対し、後半では実際の計算処理が開始され、より高度な認知的リソースを要する段階となる。その結果、後期の刺激提示では計算処理への注意資源の集中によって外部刺激への反応が遅延したものと考えられる。

4. 実験3

4.1 目的

実験1および実験2では、刺激が画面の上部に出現した場合でも下部に出現した場合でも、参加者には出現位置に関わらず、できるだけ速くスペースキーで反応するように求めた。一方、実験3では参加者に対して、刺激が上部に出現した場合には方向キーの「上」、下部に出現した場合には方向キーの「下」で反応するよう指示した。このようにして、加算・減算と反応(上方向反応・下方向反応)の対応関係(マッピング)を明示的に操作し、算術処理と垂直空間的反応との関係を直接的に検討することを目的とした。

4.2 方法

4.2.1 事前登録

本研究の実験3も事前登録されていた(<https://osf.io/6czb9>)。

4.2.2 参加者

実験3は実験1と同様のサンプルサイズを採用した。参加者は九州大学の大学生または大学院生29名であった。このうち2名は、有効な眼球運動データの取得率が70%未満であったため、事前登録された基準に基づき分析から除外された。最終的に、27名のデータが分析対象となった(男性15名、女性12名、平均年齢25.4歳)。すべての参加者は、実験参加前に書面によるインフォームド・コンセントを提出了。参加は自発的であり、参加者はいかなる不利益もなく任意のタイミングで参加を中止できることが明示された。謝礼として、参加者には500円が支払われた。本研究はヘルシンキ宣言(2025年版)に準拠して実施され、九州大学人間科学部門心理学講座の研究倫理委員会の承認を受けている(承認番号:2024-043)。各参加者のデータ収集に要する時間は約20分であった。

4.2.3 装置と刺激

実験1と同様であった。

4.2.4 手続き

目標刺激の提示方法を除き、その他の条件はすべて実験1と同様であった。計算結果の提示が終了すると、目標刺激（白色の実線円）が、上部または下部のいずれかの枠内にランダムに呈示された。参加者は、目標刺激が上の枠に呈示された場合には「↑」キーを、下の枠に呈示された場合には「↓」キーをいずれも利き手のみを用いて押すよう求められた。実験は全80試行であり、40試行ごとの2つの連続したブロックに分けて実施された。ブロック間には休憩時間が設けられた。また、本実験に先立ち、10試行からなる練習セッションが実施された。

4.3 結果

RTについての参加者内2要因（演算：加算・減算×目標位置：上・下）の反復測定分散分析では、計算の主効果 ($F(1, 26) = 0.05, p = .823, \eta^2 < 0.001$)、目標位置の主効果 ($F(1, 26) = 3.53, p = .072, \eta^2 < 0.001$)、および両者の交互作用 ($F(1, 26) = 0.01, p = .930, \eta^2 < 0.001$) のいずれも有意ではなかった。

眼球運動分析においては、加算と減算における固視位置の垂直距離差の平均値について対応のある t 検定を実施したところ、有意な差が見られた ($t(26) = 2.08, p = .047$, Cohen's $d = 0.199$)。具体的には、加算課題 (-16 pixel) における平均固視位置は、減算課題 (-24 pixel) に比べて上方に偏っていた。

実験3の時系列分析では、いずれの時点においても演算種別間で有意な視線方向の差は認められなかった（図4）。すなわち、閾値を超えるクラスターは検出されなかった。

どの演算段階で偏りが生起するのかをさらに確認するため、固視位置に対して探索的分析を実施した。参加者

内2要因（演算：加算・減算×目標演算段階：記号1、数字1、記号2、数字2、計算課題）の反復測定分散分析では、演算の主効果は有意ではなかった $F(1, 26) = 0.96, p = .337, \eta^2 < 0.001$ 。一方、演算段階の主効果が有意であり $F(1, 26) = 7.04, p = .006, \eta^2 = 0.043$ 、また演算との交互作用も有意であった $F(1, 26) = 3.80, p = .034, \eta^2 = 0.009$ 。

交互作用が認められたため、各演算段階における単純主効果を検討した。Bonferroni法で多重比較を調整した結果、計算課題においてのみ、加算と減算の間に有意な差が確認された（加算 (-20 pixel) > 減算 (-33 pixel), $p = .003$ ）。一方、それ以前の段階ではいずれにおいても有意差は認められなかった ($p > .05$)。

4.4 考察

RTには有意な差が認められず、演算処理の速度において加算・減算間の差は見られなかった。一方で、眼球運動の分析では、加算課題における固視位置が減算課題よりも有意に上方に偏っていたが、視線方向の時系列分析では統計的に有意なクラスターは検出されなかった。視線方向の変化パターンを詳細にみると、加算・減算間の差異は記号1と計算段階で集中的に生じているように見受けられたものの、時系列分析では統計的に有意なクラスターは検出されなかった。そこで、どの演算段階で注意の偏りが生起するのかをさらに確認するため、固視位置について、演算段階と演算の探索的な反復測定分散分析を行った。その結果、注意シフトは最終的な計算段階のみで生じることが示唆された。

5. 総合考察

本研究は、数的処理（加算・減算）が上下方向の空間的注意に与える影響、すなわち垂直方向のSAAの存在を、

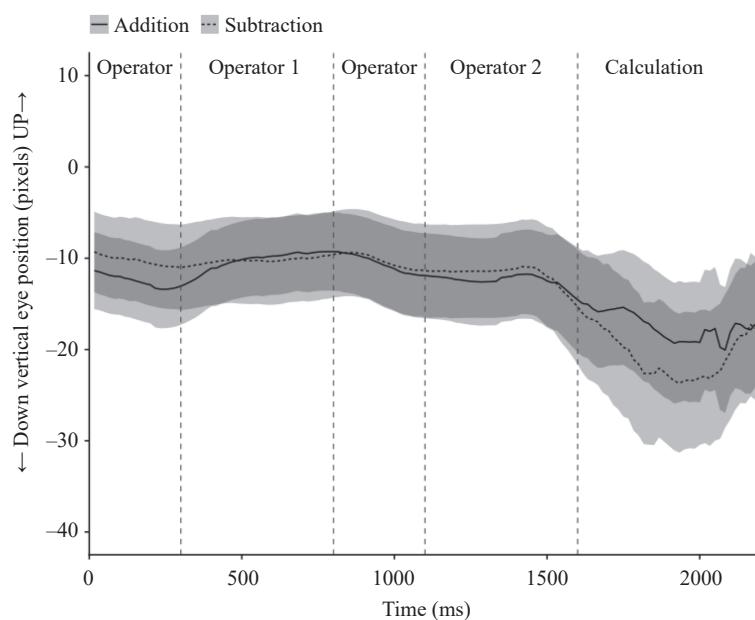


図4：加算と減算における視線方向の時系列変化

注：各線の周囲の濃淡は標準誤差を表す。縦軸の値が大きいほど視線方向が画面中央より上方、小さいほど下方を示す。

RT および眼球運動指標を用いて検証した。先行研究における水平方向の SAA に比べ、垂直方向の SAA は検証例が少なく、その存在は一貫して報告されてこなかった。特に Liu et al. (2017) が RT 指標において SAA を否定的に報告したのに対し、眼球運動を用いた研究では肯定的結果が得られていた (Salvaggio et al., 2022)。本研究ではその不一致に着目し、3 つの実験を通じてこの現象の再現と検証を行った。

実験 1 では、Liu et al. (2017) の手法をベースにしつつ、眼球運動の指標を追加することで、認知過程初期の注意の変化を捉えることを試みた。その結果、RT および平均固視位置では有意な主効果や交互作用は確認されなかつたが、時系列的な視線方向分析により、特定の時間帯（演算子表示後）において垂直方向の注意シフトが一過的に生起することが示唆された。ただし、その差異は極めて小さく、下視野優位性 (Li et al., 2023) によって下方向へ注意が偏りやすくなつたことに起因する可能性もあり、垂直方向 SAA としての頑健性を判断するにはさらなる検討が必要である。

実験 2 では、その一過性効果の頑健性を検証するため、目標刺激の表示タイミングを系統的に操作し、RT 指標による効果の検出を試みた。しかし、演算の種類、目標位置、表示タイミングそれぞれに主効果は認められたものの、予測された三要因交互作用は有意に検出されず、垂直方向の SAA 効果は RT データには表れなかつた。これは、垂直 SAA が感覚運動レベルでの初期注意制御に留まる現象であり、行動指標としての RT には頗在化しにくいことを再度示唆する結果となつた。

実験 3 では、RT には有意な差が認められなかつたが、固視位置の分析において加算が減算課題より上方となる偏りが確認された。視線方向の変化には計算段階で差があるように見えたが、時系列分析では有意なクラスターは検出されなかつた。そこで固視位置を用いた探索的分析を行つたところ、注意シフトは最終的な計算段階のみで生起する可能性が示唆された。

以上の結果は、一貫した現れ方ではないものの、垂直方向での頗在的注意のシフトが実験 1 と 3 にてみられたことを示している。実験 1 では、演算記号表示後に一時的な注意の偏りが検出されたが、その差異は非常に小さく、また実験 3 では同じ段階で有意な差異は確認されなかつた。このことから、実験 1 で観察された差異は、垂直方向 SAA そのものではなく、記号形状の違いによって注意が下方向に偏った可能性が示唆される。今後、記号形状に起因する注意バイアスについてはさらなる検討が必要である。

一方、実験 3 の固視位置の分析では、加算における固視位置が減算よりも上方に偏ることが示され、仮説を支持した。さらに、追加分析の結果、固視位置の偏りは最終的な計算段階のみで生起しており、これは Salvaggio et al. (2022) の報告とも一致した。実験 1 での固視位置の分析に有意な偏りが得られなかつた理由として、目標刺激が上方・下方のどちらに表示されても、参加者は同じキー

で反応していたことが挙げられる。このため、空間的注意の偏りが反応準備と結びつかず、一過的で微弱な偏りとして留まつたと考えられる。対照的に、実験 3 では上下の反応キーが明確に対応づけられていたため、空間的注意と運動準備が結びつき、加算・減算に伴う固視位置の垂直偏位が行動として増幅されたと考えられる。ただし、本効果は実験間で安定して再現されたわけではなく、課題設計や反応マッピングといった手続き要因に強く依存していた可能性がある。特に、実験 1 では Salvaggio et al. (2022) の課題と異なり、演算記号表示後に追加の判断課題が挿入されていた。そのため、参加者が次の課題に備える形で注意の上方・下方へのシフトを抑制した可能性がある。一方で、実験 3 では反応キーが上下方向に対応づけられていたため、空間的注意と運動準備が結びつき、注意シフトが抑制されず頗在化したと考えられる。

総じて、本研究では垂直方向 SAA が RT ではなく眼球運動指標によってのみ観察されることが明らかになつた。これは、垂直方向 MNL モデルの枠組みが単なる数値処理だけでなく算術処理へも拡張可能であることを部分的に示すとともに、垂直方向 SAA の検出には RT 指標のみでは不十分であり、眼球運動など感度の高い指標の活用が有効であることを示唆している。ただし、垂直方向 SAA は実験間で一貫して再現されたわけではなく、課題構造や反応マッピングなど実験文脈に依存して発現が変動する可能性が示された。したがつて、今後の研究では、SAA の生起を左右する文脈要因を体系的に検討し、どのような条件下で注意シフトが安定して生起するのかを明らかにする必要がある。

謝辞

本論文に関して、言及すべき利益相反はない。本研究は JSPS 科研費 JP25K01968, JP25K00869, JP24K21501, JP22K18263 と JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2136 の助成を受けた。

注

- (1) 時系列分析では時間的変化を捉るために視線方向 (gaze) データを、分散分析では条件間の全体的差異を比較するために固視位置 (fixation) データを用いた。
- (2) 時系列データに対しては、R パッケージ permuco (Frossard & Renaud, 2021) を用いたクラスター単位の並べ替え検定 (cluster-based permutation test) を実施した。各サンプリング点 (60 Hz ≈ 16.7 ms) において、参加者内要因 (演算: 加算・減算) を説明変数とする一般線形モデル (general linear model; GLM) を当てはめ、条件効果に対応する F 値を算出した。得られた F 値のうち、 $p = .05$ の閾値を超える隣接サンプルをクラスターとしてまとめ、各クラスター内部の F 値を総和した各クラスターの統計量 (cluster-mass F) を求めた。さらに、参加者内の条件ラベルをランダムに入れ替える置換を 5000 回繰り返し、置換ごとに得られた最大 cluster-mass F を記録した。この最大値の分布 (max-stat

- 零分布) を帰無分布として構築し、観測されたクラスターの cluster-mass F がその上位 5% (95 百分位点) を超えた場合に、有意なクラスターとして判断した。
- ⁽³⁾ 「エポック (epoch)」とは、連続的に記録された時系列データを、特定の出来事を基準として一定の時間幅ごとに区切った最小の分析単位を指す。本研究ではデータを 60 Hz の頻度で取得しているため、1 エポックは約 16.7 ms に相当する。

引用文献

- Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: A review of data and theory. *Cognition*, 44 (1-2), pp. 75-106.
- Blini, E., Pitteri, M., & Zorzi, M. (2019). Spatial grounding of symbolic arithmetic: An investigation with optokinetic stimulation. *Psychological Research*, 83 (1), pp. 64-83.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122 (3), pp. 371-396.
- Fischer, M. H. & Knops, A. (2014). Attentional cueing in numerical cognition. *Frontiers in Psychology*, 5, 1381.
- Frossard, J. & Renaud, O. (2021). Permutation tests for regression, ANOVA, and comparison of signals: The permuco package. *Journal of Statistical Software*, 99, pp. 1-32.
- Gevers, W., Verguts, T., Reynvoet, B., Caessens, B., & Fias, W. (2006). Numbers and space: A computational model of the SNARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32 (1), pp. 32-44.
- Hartmann, M., Mast, F. W., & Fischer, M. H. (2016). Counting is a spatial process: Evidence from eye movements. *Psychological Research*, 80 (3), pp. 399-409.
- Hartmann, M. (2022). Summing up: A functional role of eye movements along the mental number line for arithmetic. *Acta Psychologica*, 230, 103770.
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6 (6), pp. 435-448.
- Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E. M., Michel, V., & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science*, 324 (5934), pp. 1583-1585.
- Li, H., Xu, J., Sheng, J., Zhou, H., Liu, Z., Li, Y., Hu, J., & Zuo, G. (2023). An EEG study of the influence of target appearing in the upper and lower visual fields on brain attention resource allocation. *Brain Sciences*, 13 (3), 433.
- Liu, D., Verguts, T., Li, M., Ling, Z., & Chen, Q. (2017). Dissociated spatial-arithmetic associations in horizontal and vertical dimensions. *Frontiers in Psychology*, 8, 1741.
- Masson, N. & Pesenti, M. (2014). Attentional bias induced by solving simple and complex addition and subtraction problems. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67 (8), pp. 1514-1526.
- Masson, N., Letesson, C., & Pesenti, M. (2018). Time course of overt attentional shifts in mental arithmetic: Evidence from gaze metrics. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71 (4), pp. 1009-1019.
- Ristic, J., Wright, A., & Kingstone, A. (2006). The number line effect reflects top-down control. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13 (5), pp. 862-868.
- Salvaggio, S., Masson, N., Zenon, A., & Andres, M. (2022). The predictive role of eye movements in mental arithmetic. *Experimental Brain Research*, 240 (5), pp. 1331-1340.
- Schwarz, W. & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, 66 (4), pp. 651-664.
- Wiemers, M., Bekkering, H., & Lindemann, O. (2014). Spatial interferences in mental arithmetic: Evidence from the motion- arithmetic compatibility effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67 (8), pp. 1557-1570.
- Winter, B., Matlock, T., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2015). Mental number space in three dimensions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 57, pp. 209-219.
- World Medical Association (2025). World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human participants. *JAMA*, 333 (1), pp. 71-74.

受稿日：2025年11月9日

受理日：2025年12月9日

発行日：2025年12月25日

Copyright © 2025 Society for Human Environmental Studies



This article is licensed under a Creative Commons [Attribution-Non-Commercial-NoDerivatives 4.0 International] license.

<https://doi.org/10.4189/shes.23.205>