前頭前野の機能的階層構造とワーキングメモリ容量の個人差

-fMRI による検討-

○源健宏^{1,2}・矢迫健³・荻阪満里子⁴・荻阪直行³

(¹情報通信研究機構 (CiNet)・²日本学術振興会・³大阪大学大学院人間科学研究科,²京都大学大学院文学研究科)

キーワード: ワーキングメモリ, 前頭前野, 個人差

Hierarchical architecture of the prefrontal cortex and individual differences in working memory capacity: An fMRI Study

Takehiro MINAMOTO^{1,2}, Ken, YAO³, Mariko OSAKA⁴, and Naoyuki OSAKA³

(¹NICT (CiNet), ²JSPS, ³Graduate School of Letters, Kyoto Univ., ⁴Graduate School of Human Sciences, Osaka Univ.)

Key Words: Working memory, Prefrontal cortex, Individual differences

目 的

Koechlin et al. (2003) の提唱したカスケードモデルでは、認知制御は3つの階層構造を持ち、感覚制御、文脈制御、そしてエピソード制御が想定されている。そして、これらの制御は、前頭前野外側部の階層構造と対応しており、感覚制御が運動前野 (BA6)、文脈制御が前頭前野外側部尾部 (BA44/45)、そしてエピソード制御が前頭前野外側部吻部 (BA46) により支えられていることを示す研究結果が得られている。流動性知能とも深く関与することが知られているワーキングメモリ容量についても前頭前野の外側部が関係することが先行研究により示されているが (e.g., Minamoto et al., 2010)、前頭前野の構造を踏まえながら検討したものは少ない。本研究では、前頭前野の機能的階層構造に着目することで、ワーキングメモリ容量の個人差の基盤となる前頭前野内の脳領域を特定することを試み、その結果から、どのような認知制御機能が、ワーキングメモリ容量の個人差と密接に関わるのかを明らかにすることを目指した。

方 法

被験者: 大学生および大学院生 43 名 (平均年齢 23.49 歳, 女性 14 名) が実験に参加した。各被験者のワーキングメモリ容量は、リーディングスパンテスト (荻阪・荻阪, 1994) を用いて測定し、高スパン群 (スパン得点 4 以上; 15 名)、低スパン群 (スパン得点 2.5 以下; 15 名)、そして中スパン群 (スパン得点 3.0-3.5; 13 名) に振り分けた。

課題: Koechlin et al. (2003) が開発した Task Experiment 課題を使用した。この課題では、情報理論を元に認知制御の必要強度が推定されている。課題は、8 種類のブロックから構成され、ブロックの冒頭に数字により指示された。ブロック 1 では、緑色か白色のアルファベットが呈示され、緑色の場合は、母音・子音判断を行い、白色の場合は、ボタンを押さないように指示された。ブロック 2 では、赤色か白色のアルファベットが呈示され、赤色の場合は、大文字・小文字判断を行い、白色の場合は、ボタンを押さないように指示された。ブロック 3 および 4 では、緑色、赤色あるいは白色のアルファベットが呈示され、緑色の場合は母音・子音判断、赤色の場合は大文字・小文字判断を行い、白色の場合は、ボタンを押さないように指示された。ブロック 5~8 では、青色、水色、あるいは、黄色のアルファベットが呈示された。ブロック 5 では、青色あるいは水色の場合は母音・子音判断を行い、黄色の場合は、ボタンを押さないように指示された。ブロック 6 では、水色あるいは黄色の場合は大文字・小文字判断を行い、黄色の場合は、ボタンを押さないように指示された。ブロック 7 および 8 では、青色の場合は大文字・小文字判断、黄色の場合は母音・子音判断を行い、水色の場合はボタンを押さないように指示された。

課題デザイン: ブロックデザインを採用し、各ブロック内では、計 12 個のターゲット刺激が呈示された。ターゲット刺激

は 500ms 呈示され、刺激間隔は 2500ms であった。ブロックの順序は疑似ランダム化し、各ブロックは 4 度繰り返された。

脳活動データ取得: 脳画像の撮像は、3 テスラの MRI スキャナを用いておこなった (MAGNETOM Verio)。

脳画像解析: 解析には、SPM5 を使用し、エピソード制御の必要強度 (0-2bit) に応じて活動の増加を示す領域を、パラメトリックモジュレーション法を用いて特定した。更に、ワーキングメモリ容量とエピソード制御強度の間で交互作用を示す領域の特定をおこなった。

結 果

行動成績: 正答率については、エピソード負荷の主効果が有意であった。また、ワーキングメモリ容量の主効果は有意傾向であった。反応脱落については、ワーキングメモリ容量とエピソード負荷の交互作用が認められ、低スパン群における高エピソード負荷 (2-bit) 条件で多くの反応脱落が認められた。

脳画像結果: ボクセルレベル ($p < .001$, uncorrected for multiple comparisons) およびクラスタレベル ($P < .05$, corrected for multiple comparisons) の閾値を採用したところ、前頭前野吻部、

下頭頂皮質および中側頭回 (いずれも右側) においてワーキングメモリ容量とエピソード負荷の交互作用が認められた (右図)。下位検定の結果から、高スパン群ではエピソード負荷の増加に応じて前頭前野吻部の活動が増加するのに対し、低スパン群では、エピソード負荷が生じると活動が低下することが示された。

考 察

エピソード制御に関わる前頭前野吻部 (BA46/47) においてワーキングメモリ容量の個人差が顕著に認められたことから、活性化した記憶に基づく認知制御 (エピソード制御) がワーキングメモリ容量の個人差と深く関与することが示された。興味深いことに、低ワーキングメモリ容量群では、エピソード負荷が存在すると活動の低下が認められることから、前頭前野吻部が、エピソード制御とは異なる機能を担っていると考えることができるかもしれない。

引用文献

- Minamoto et al., 2010. *Brain Research*, 1335, 63-73
Koechlin et al., 2003. *Science*, 302, 1181-1185.
荻阪・荻阪 (1994) *心理学研究*, 65, 339-345.