

氏名	かねだ みずき
学位(専攻分野)	博士(文学)
学位記番号	文博第388号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	文学研究科行動文化学専攻
学位論文題目	長期記憶情報の処理過程における中央実行系の役割

論文調査委員 (主査) 教授 苧阪直行 教授 櫻井芳雄 助教授 蘆田 宏

### 論文内容の要旨

高次認知活動では、必要な情報を短期的に保持しながら同時に処理を加えることが重要になる。ワーキングメモリ (working memory: WM) は、このような保持と処理の同時遂行メカニズムを説明する概念であり、ヒトの高次認知活動を支える主要な記憶システムであると考えられている。この概念が提唱された当初は単なる構成概念だとの批判も受けたが、近年では WM を構成する神経基盤についてのニューロイメージング研究が盛んに行なわれるようになり、神経科学的な妥当性をもつことも示されるようになった。

WM にはさまざまなモデルがあるが、広く用いられているのが Baddeley のマルチコンポーネント・モデルである (Baddeley & Logie, 1999)。Baddeley のモデルでは、WM は複数の構成要素からなり、心的資源の量によって規定された容量限界をもつと考えられている。システムを構成する要素としては、情報を動的に保持する下位システムと、下位システムを統合し、WM 内での処理を担う上位システムが個別に想定されている。下位システムは、音韻情報を保持する音韻ループ (phonological loop) と、視空間情報を保持する視空間スケッチパッド (visuo-spatial sketchpad) に区分される。上位システムである中央実行系 (central executive) は注意制御機構として位置づけられており、WM システム内で使用される心的資源を配分して情報の流れを制御するとともに、下位システムの調整も行なうと想定されている。これらの構成要素に加えて、近年新たな下位システムとしてエピソードバッファ (episodic buffer) が加えられた (Baddeley, 2000)。エピソードバッファは、長期記憶 (long-term memory: LTM) 情報や異種情報を統合した表象の短期的保持という、従来のモデルでは説明不可能な現象を扱うために提唱された下位システムである。

Baddeley のモデルにしたがうと、WM は大きくは言語性 (音韻ループ) と視空間性 (視空間スケッチパッド) に区分することができる。本論文ではこれらのうち、言語性 WM に焦点を当てている。言語性 WM を担う主要なシステムは音韻ループである。音韻ループは言語性の記憶課題でのさまざまな現象をうまく説明できる概念として広く用いられてきた。中央実行系もまた、言語性 WM において重要な役割を果たしていると考えられる。中央実行系は言語性 WM での処理を担っており、方略の適用などの情報操作や、音韻ループの調整を行なっていると考えられている。以上のように、言語性 WM では音韻ループと中央実行系が機能しており、言語を介する高次認知活動の基盤となる記憶システムであると言える。

このように、言語性 WM は音韻ループを中心に研究が進められ、言語性の記憶に関わるさまざまな現象の説明に適用されてきた。しかし一方で、解明すべき問題もいくつか残されている。その一つが LTM とのかかわりである。言語性 WM には LTM 情報が影響することが知られている。たとえば、単語と非単語を比較すると、単語の方が高い記憶成績を示すという語彙効果 (lexicality effect) が報告されている (Saint-Aubin & Poirier, 2000)。これは、非単語は音韻情報しか利用できないのに対し、単語は音韻情報だけでなく LTM 内の意味情報や語彙情報を用いることができるために生じると考えられている (Martin et al., 1994)。このように、言語性 WM には LTM 情報が影響するが、こうした LTM 情報の影響は音韻ループの概念だけではうまく説明することができず、中央実行系の役割が注目されている。しかしながら、LTM に対

する中央実行系の機能を実験的に検証した研究は少ないのが現状である。そこで本研究は、言語性 WM と LTM とのかかわりを担うシステムとしての中央実行系に注目し、その役割を実験的に検証している。特に、LTM 情報を用いて符号化を行なう処理過程に重点を置いた。検証は行動実験（概念レベル（第二章、第三章））とニューロイメージング実験（脳神経レベル（第四章））の両側面から行なっている。各章の概要は以下のようである。

第二章の目的は、LTM 情報の処理過程における中央実行系の役割を検討することにある。特に、LTM 情報を用いて言語刺激を意味的に符号化するはたらきに注目している。検証手段としては二重課題法を用いている。一次課題は単語の直後系列再生課題を選択した。二次課題は、音韻ループと中央実行系に選択的に負荷を与える課題として、構音抑制課題と計算課題を用いている。意味情報を利用できない無意味語と利用できる有意味語を比較し、二次課題によって音韻ループと中央実行系に負荷を与えることで、両者の記憶成績にどのような影響の違いが生じるのかという観点から検討を行なっている。その結果、無意味語はどちらの二次課題でも同程度に影響を受けたが、有意味語への影響は計算課題の方が大きかった。これらの結果から、中央実行系が意味的符号化過程において重要な役割を果たしていることが判明した。

第三章では、言語性 WM に影響する LTM 情報をさらに意味レベル（意味的 LTM）と音韻レベル（音韻的 LTM）に区別し、両 LTM 情報の処理過程における中央実行系の役割を個別に検討している。意味的 LTM を反映していると考えられる具体性効果と、音韻的 LTM を反映していると考えられる頻度効果を対象に検討を行なった。また、二重課題法によって音韻ループと中央実行系に負荷を与えた場合に、それぞれの効果がどのような影響を受けるのかについて分析した。その結果、具体性効果は（特に言語性の意味的 LTM を対象とした場合に）、中央実行系に負荷を与えると消失した。一方、頻度効果は中央実行系に負荷を与えても影響を受けなかったが、音韻ループに負荷を与えると減少した。これらの結果から、意味的 LTM を利用した処理過程には中央実行系が関与しているが、音韻的 LTM を利用した処理過程は中央実行系に依存しておらず、音韻ループと音韻的 LTM との相互作用から自動的に行なわれる可能性が示された。

第四章では、機能的磁気共鳴画像（fMRI）を用い、第三章の行動実験によって示された、意味的 LTM と音韻的 LTM の処理過程における中央実行系の関与の分離可能性が、脳内でも保証されているのかどうかを検討している。WM 課題であるオペレーションスパン課題（operation span task）を用い、意味的 LTM については具体性効果を、音韻的 LTM については頻度効果を利用して検討した。その結果、意味的 LTM の処理過程では中央実行系の神経基盤である前部帯状回（anterior cingulate cortex）の賦活が生じたが、音韻的 LTM の処理過程ではそのような現象はみられなかった。これらの結果から、行動実験での主張が補強され、意味的 LTM の処理過程には中央実行系が関与するが、音韻的 LTM の処理過程はある程度自動的に行なわれることが裏づけられた。

第五章では、これまでに得られた知見をまとめるとともに、Baddeley のモデル以外の WM モデルとの整合性について述べている。また、LTM 情報とのかかわりを明示した、新たなモデルの可能性についても考察している。それによると、提示された単語は LTM 内の音韻的 LTM や意味的 LTM を自動的に活性化する。これらの活性化された LTM 情報のうち、音韻的 LTM の処理はほぼ自動的に行なわれるので、そのまま音韻ループに入力され、構音コントロール過程でのリハーサルによって保持されることになる。そして、音韻ループに入力された音韻情報は自動的に音韻的 LTM を活性化させ、活性化された音韻的 LTM は自動的に音韻ループに作用するというように、音韻的 LTM と音韻ループの相互のかかわりは、中央実行系に依存することなく自動的に行なわれると考えられる。一方、意味的 LTM は中央実行系に制御されてエピソードバッファに入力され、深い認知処理を受けることになる。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は音韻ループを中心とした言語性ワーキングメモリ(WM)における中央実行系の役割を心理実験および脳科学的実験を併用して検討したものである。ここでは WM が情報を動的に保持する複数の下位システムからなり、心的資源の量によって規定された容量限界をもつと考えるバッドリーのマルチコンポーネント・モデルに依拠して検討が加えられている。モデルでは下位システムに、音韻情報を保持する音韻ループと、視空間情報を保持する視空間スケッチパッドが想定されている。また、下位システムを統合する上位システムとして中央実行系（注意制御系）が考えられている。

本研究は WM システムの中で、特に言語性 WM を担う機構である音韻ループに焦点をあてている。言語性 WM は音韻

ループを中心に研究が進められ、言語記憶にかかわるさまざまな現象の説明に適用されてきたが、一方で、解明すべき問題もいくつか残されている。その一つが長期記憶（LTM）と音韻ループや中央実行系とのかかわりの問題である。言語性 WM には LTM 情報が影響することが知られている。たとえば、単語と非単語を比較すると、単語の方が高い記憶成績を示すという語彙効果が報告されているが、これは、非単語は音韻情報しか利用できないのに対し、単語はそれに加えて LTM 内の意味情報や語彙情報を用いることができるためであるとされている。しかし、LTM に対する中央実行系のかかわりを検証した研究は乏しく、特にその脳内メカニズムも視野に入れた実験的検討はほとんど報告されていない。論者は第二章と第三章で心理実験を実施し、第四章でその脳内表現を検討している。

第一章では言語性 WM と LTM とのかかわりを担う中央実行系について問題点が整理されている。

第二章では、LTM 情報を用いた符号化過程を中央実行系の役割を視野に入れて実験的に検証している。一次課題として単語の直後系列再生課題を、二次課題として音韻ループと中央実行系にそれぞれ選択的に負荷を与える構音抑制課題と計算課題を行わせる二重課題法を用いている。有意味語と無意味語を比較し、二次課題を通して音韻ループと中央実行系に負荷を与えることで、両者の記憶成績にどのような違いが生じるのかを検討し、無意味語はどちらの二次課題でも同程度に影響を受けたのに対し、有意味語への影響は計算課題の方が大きいことが判明した。つまり、中央実行系が意味的符号化過程において重要な役割を果たしていることを見出している。

第三章では、LTM 情報をさらに意味レベル（意味的 LTM）と音韻レベル（音韻的 LTM）で区別し、両者と中央実行系の関係を調べている。具体的には、意味的 LTM を反映する具体性効果と、音韻的 LTM を反映する頻度効果を対象に、二重課題法によって音韻ループと中央実行系に負荷をかけた場合の効果について分析している。その結果、意味的 LTM を利用した処理過程には中央実行系が関与しているが、音韻的 LTM を利用した処理過程は中央実行系に依存していないという興味ある新知見を見出している。

第四章では、機能的磁気共鳴画像法（fMRI）を用い、第三章の行動実験によって示された、意味的および音韻的 LTM の処理過程における中央実行系の関与の分離可能性が、脳内機構においても認められるか否かを検討している。WM 課題であるオペレーションスパン課題を用い、意味的 LTM については具体性効果を、音韻的 LTM については頻度効果を利用して検討した結果、意味的 LTM の処理過程では中央実行系の神経基盤である内側前頭葉の前部帯状回の賦活が生じたが、音韻的 LTM の処理過程ではそのような賦活はみられなかった。これは分離可能性を示唆するもので、行動実験での知見が脳内過程にもあてはまることが判明した。つまり、意味的 LTM の処理過程にのみ中央実行系が関与するということを脳機能の面から明らかにしている。

第五章では、これまでに得られた知見をまとめるとともに、LTM 情報とのかかわりを含む新たなモデルの可能性についても興味深い考察を行っている。論者のモデルによれば、提示された単語は LTM 内の音韻的あるいは意味的 LTM を自動的に活性化するが、音韻的 LTM の処理は中央実行系を介さず自動的に音韻ループに入力され、構音コントロール過程でのリハーサルによって保持されるが、意味的 LTM は中央実行系に制御されてエピソードバッファに入力され、深い処理を受けることになる。

第三章および第四章で意味的 LTM の中央実行系への依存性を行動と脳機能の二つの側面から明らかにしたことは高く評価できる。論者は、本論では符号化過程に注目して論議を尽くしているが、一方では検索過程について吟味が弱いのが惜しまれる。しかし、この問題は fMRI 実験では手続的に両者を切り分けることが困難であることも考えると将来的に残された課題であるとも言える。

以上、審査したところにより、本論文は博士（文学）の学位論文として価値あるものと認められる。平成十九年一月十六日、調査委員三名が論文内容とそれに関連した事柄について口頭試問を行った結果、合格と認めた。