■シンポジウム

言語とワーキングメモリ

苧 阪 満里子*

要旨：ワーキングメモリは、課題の遂行と情報の保存が並列的に処理されるような過程において、その制御に関係していると考えられる。言語の情報処理においても、読みや聴き取りにより一時的に処理した内容を活性化状態のまま並列的に保持しつつ、次の情報処理に対処するということが重要である。本稿では、聴き取りの過程での処理と保存関係を想定して開発されたリスニングスパンテストを用いて、ワーキングメモリの脳内機構を探索するため、脳磁場計測（MEG）を行った。結果、ワーキングメモリの負荷が大きくなると、脳磁場のアルファ波ピークが高い周波数の帯域に出現する傾向がみられた。このようなアルファ波ピーク周波数の変化傾向は、ワーキングメモリ容量の個人差により影響を受けた。さらにこの傾向は、主に左半球の側頭部、前頭部位に認められた。そこで左半球の側頭部、前頭部位にかけて、負荷に伴う脳内処理の変化が生じたことが推察できた。

(失語症研究 17(2) : 134~139, 1997)

Key Words : ワーキングメモリ, 脳磁場計測, リスニングスパンテスト, アルファ波ピーク周波数
working memory, Magnetoencephalography, listening span test, peak alpha frequency

I. ワーキングメモリ

人間の高次の認知過程では、情報を処理しながらしばらくの間だけそれを覚えておくことが必要である。たとえば繰り上がりのある計算で、繰り上がった数字を保持しながら計算を行う場合などがそうである。このような処理と保持を支える機能はワーキングメモリ (working memory) と呼ばれている (Baddeley 1986, Just & Carpenter 1992)。ワーキングメモリは、課題の遂行と情報の保存が並列的に処理されるような過程と深くかかわっていて、その制御に関係していると考えられている。

II. ワーキングメモリと言語の情報処理

言語の情報処理とワーキングメモリのかかわりについて、文の読み (リーディング: reading)

について考えてみたい。たとえば、書物を読むときには、言葉の意味を追いながら、すでに読んだ内容を一時的に保持しておかなければならない。このような一時的な情報の保持については、ほとんどの人々があまり気にかけずにいるが、読みのうえで重要な役割を果たしているのである。というのは、文を読む過程では、書かれている文字を同定して、単語を認知するといったボトムアップ的な情報の処理を行いながら、読み終えた情報を一時期の間だけ並列的に保持しておく必要があるからである。そうすることにより、情報は逐次統合され、いつでも検索が可能な活性化状態で保持され、文脈情報としてトップダウン的な処理を促進させ、文の意味理解を可能にしているのである。

読みの情報処理過程では、このように一時的に処理した内容を活性化状態のまま並列的に保持

しつつ、次の情報処理に対処するということが絶えず行われている (Kintsch & van Dijk 1978, Daneman & Carpenter 1980)。そして、このような情報の処理と保持を支えるのは、ワーキングメモリの機能によるものと考えられている。

さて、読みの情報処理に関連した処理資源 (processing resources) に、一定の容量限界があると仮定すると (Kahneman 1973)、読み手はワーキングメモリの適切な振り分けを行っていると考えられる。ここで、制限された容量を処理に用いるのかあるいは保存にあてるのかという容量配分の問題がでてくる。つまり、ワーキングメモリの容量を有効に配分しうるかどうかが、読みの処理効率を決めることにもなるのである。

III. ワーキングメモリの個人差：

リーディングスパンテスト

リーディングスパンテスト (RST) は、読みの過程での処理と保持のトレードオフ (trade-off) 関係を想定して開発されたテストである (Daneman & Carpenter 1980)。読みの処理にあたっては、ワーキングメモリの適切な容量配分が必要なため、容量を処理に用いるかあるいは保持に充当するのかというトレードオフの問題が生じるのである。リーディングスパンテストは、このような処理と保持の関係を想定して、読みと関連するワーキングメモリの個人差を測定するために開発されたテストである。

RST では、次々と呈示される短文を被験者自身に“口頭”で読ませながら、短文の文末の単語を保持させてゆくという内容のものである。ここでは、文を口頭で読ませることにより、ワーキングメモリの容量のかなりの部分を消費させてしまう。このような容量削減下状態に置いたうえで、いくつまで単語を保持することができるかを測定するのである。読ませる短文の数はしだいに増していくため、文の数が増えるとそれだけ保持しておかなければならない単語の数も多くなる。このような読みと単語の保持がどの程度までできるかにより、読みと関連したワーキングメモリの個人差を測定しようとするものである。

さて、読みで削減されるワーキングメモリの容

量には、個人差があると考えられる。たとえば、読みの得意な読み手では、読みにさほど容量を用いることがないため、残された容量を他の処理に配分することができる。したがって、読みの得意な読み手では、読みを遂行しつつ指示された単語をある程度並列的に保持することができるのである。しかし読みの不得意な読み手では、読みの効率が悪いために容量を使いすぎて他に振り分けることが不可能になる。このため、不得意な者では指示された単語を並列的に保持して再生することが困難になると考えられるのである。

また、RST で測定されたワーキングメモリの評定は、従来から行われてきたような数字や無意味綴りを用いたいわゆる記憶範囲 (メモリスパン: memory span) テストとは異なるものと考えられる。というのは、RST では、単語を保持することのみにワーキングメモリを費やすのではなく、単語の保持と同時に読みという認知処理が、並列的に進行されなければならないためである。Daneman & Carpenter (1980) の報告でも、RST の成績は読みの理解と関連するが、記憶範囲テストの評価値は読みの理解との相関が認められないかまたはごく弱い相関しか持ちえなかった。

苅阪 (1994) は、日本語の文章を用いた RST の作成を試みたところ、日本人の大学生の実施結果から、RST 得点と読解力テストとの間に有意な相関を認めた。これに対して、記憶範囲テストと読解力テストの間には相関が認められず、RST が高次の認知機能と関連することを示唆する結果となった。

IV. ワーキングメモリの脳内機構

ワーキングメモリは認知心理学の領域や脳損傷患者などの神経心理学の症例研究によりその機構解明が行われてきた (Baddeley 1990, Valler & Shallice 1990)。また、動物実験でもワーキングメモリの脳内局在の研究が進められてきていて、大脳の前頭前野が遅延反応に強く関与していることが指摘されている (Goldman-Rakic 1992)。

こうしたなか、人間のワーキングメモリの脳内部位に関する研究が急速に高まりを示している。

表1 LST例文

文1	頭が痛かったので、わたしは救急箱からとりだした胃薬を飲んだ。
報告	NO
文2	フランス語を勉強するには、アメリカについて知ることが大切だ。
報告	NO
文3	満員電車の中で、中学生らしい男の子が老人に席を譲っているのを、みかけた。
報告	YES
解答	頭、フランス語、満員電車

特に、PETやMRIなどを用いた非侵襲的測定により、単語や図形を刺激として、音韻的ループ (phonological loop) や視空間記銘メモ (visuo-spatial sketchpad : Baddeley 1986) の脳内局在が探索されている (Paulesu, et al. 1993, Jonides, et al. 1993)。しかし、いずれも情報の保持を問題とすることが多く、短期記憶と長期記憶という2つの記憶システムの理論的な想定に基づく二重貯蔵モデル (Atkinson & Shiffrin 1968) のリハーサルバッファの脳内局在を検証をする性質が強い。そこでは、ワーキングメモリの処理と保持の並列処理についてはいまだ十分には検討されていないのが現状である。

そこで、本稿では、RSTの聴き取り形式版であるリスニングスパンテスト (listening span test : LST) を用いて、言語処理過程の処理と保持過程に注目して、ワーキングメモリの脳内機構の探索を行った。苧阪 (1994) は、言語の情報処理過程に注目してワーキングメモリの機能を脳波変化から探索することを行っている。しかし、脳内の局在をさらに明確に検出するため、脳の活動状態の局在を知るのに非常に有効であると考えられる脳磁場計測 (magnetoencephalography : MEG) を用いて、ワーキングメモリの脳内のメカニズムを探索する。

V. 実 験

MEGの測定：MEGは、BTi社の37チャンネルMEG測定のSQUIDを用いて、2台を左右の側頭から前頭、頭頂部位にかけて、左右対称の位

置に設定した。SQUIDにはそれぞれ37個の測定点があり、左右で74点からのMEGの測定を行った。MEGの各条件のデータ (周波数帯域 0.01~100 Hz, サンプリングレート 1 kHz) はFFT分析されてパワースペクトルを求めた後、条件ごとに加算された。

アルファ波ピーク周波数：アルファ波ピーク周波数は、条件ごとに加算されたパワースペクトルのアルファ波帯域 (8~13 Hz) でのピークの周波数から測定した。

リスニングスパンテスト：刺激文は聴覚呈示され、一文の聴き取り時間は約7秒であった。刺激文のなかには意味的に正しい文とそうでない文が含まれていた。被験者は文の正誤判断を行い、文頭の単語を記憶した。条件は、2文、3文、4文、5文条件の5条件であった。文の数が増加するほど保持しなければならない単語の数は増加してワーキングメモリの負荷は増加することとなる。試行間の間隔は、2文から5文条件で約12秒から25秒であり、この間に被験者は口答で文頭単語を再生した。また、LSTのほかに統制条件として単語の記憶負荷のない文聴き取り条件が10文につき行われた。表1にLSTの例を示す。

VI. 結果と考察

MEGのパワースペクトルを統制条件、およびLST条件で求めた。その結果、統制条件、およびLST条件ともに、MEGのパワースペクトルにアルファ波のピークが出現しているのが確認さ

Left side

High span subject

[5-Sentence LST] - [Control]

図1 アルファ波ピーク

周波数shift value. High span subjectの5文LST
と統制条件の差

れた。さらに、ピーク周波数はLST条件では統制条件よりも高い周波数の方向へ移行する傾向が認められた。そこで、両条件のピーク周波数の値を求め、統制条件とLST条件の差を求めた（これをshift valueと呼ぶ）。

被験者はLSTの評価をもとに、LST得点が4.0～5.0のHigh span subjectとLST得点が2.0～3.0のLow span subjectに分けられた。

High span subjectの典型例について、コントロール条件と5文条件のshift valueの差を示す。MEGは左半球から導出した記録である。図1の左側は前側頭方向、右側は頭頂、上側は前頭中心方向、下側は左耳近傍の前側頭部位にあたる。図1のゼロ点以下のドット棒グラフは、ピーク周波数が5文条件でより高い周波数の方向にshiftしていることを示している。また、図1から、shiftは前頭領域にもっとも顕著であることがわかる。

Left side

Low span subject

[2-Sentence LST] - [Control]

図2 アルファ波ピーク

周波数shift value. Low span subjectの2文LST
と統制条件の差

図2はLow span subject例である。図2は、コントロール条件と2文条件のshift valueの差を示し、左半球の測定結果である。図2から、shiftは前頭中心領域においても明瞭である。しかし、このLow span subjectでは、3文条件以上になると正解を得ることができず、脳磁場の変化にもshiftはいずれも認められなかった。

このように、文の数が増えてワーキングメモリの負荷が大きくなると、アルファ波ピークが高い周波数の帯域に出現する傾向がみられた。しかし、このような変化傾向は、ワーキングメモリの個人差により影響を受けた。たとえば、High span subjectでは4文、あるいは5文条件で脳磁場の変化が顕著となった。しかし、Low span subjectでは2文、あるいは3文条件でのみ脳磁場の変化が認められるなど、被験者のワーキングメモリ容量に対応してそれぞれの被験者にとって課題が困難になるとピーク周波数の変化が生じた。

ものと考えられる。

さらに、脳磁場のアルファ波ピークの変化には、部位による差が認められた。アルファ波の局在に関しては、一次視覚野 (Chapman, et al. 1984) や一次聴覚野 (Tiihonen, et al. 1991) を示唆する研究が報告されている。本研究では、アルファ波ピークの shift は主として側頭から前頭部位に認められた。これは、1 つには実験の刺激が聴覚呈示によるものであったことによると考えられる。しかし、アルファ波ピークの移行は課題負荷が増大した場合に特に認められた。さらに、この傾向は主として左半球に認められた。したがって、ワーキングメモリの負荷、特にここでは言語の情報処理と関連した場合には、左半球の側頭部から前頭部位にかけて、負荷に伴う脳内処理の変化が生じたことが推察できる。

最後に、ワーキングメモリ容量の個人差は、言語処理や理解の過程に影響を及ぼすことが指摘されている (Just & Carpenter 1992, Osaka, et al. 1995)。そこで、ワーキングメモリの脳内機構についての基礎データは言語理解の過程を知るうえでも重要であると考えられる。

本稿の脳磁場計測を用いた脳内機構に関する実験は、岡崎共同研究機構生理学研究所の柿木隆介教授と小山幸子助手、京都大学の苧阪直行教授との共同研究の一部である。本研究は日産科学振興財団の援助を受けて行われた。

文 献

- 1) Atkinson, R.C. & Shiffrin, R.M. : Human memory ; A proposed system and its control processes. In : The psychology of learning and motivation ; Advances in research and theory (eds K.W. Spence & J.T. Spence). Vol 2, Academic Press, 1968.
- 2) Baddeley, A. : Working memory. Oxford University Press, New York, 1986.
- 3) Baddeley, A. : Human memory ; Theory and practice. Lawrence Erlbaum associates, Hove, 1990.
- 4) Chapman, R.M., Ilmoniemi, R.J., Barbanera, S., et al. : Selective localization of alpha brain activity with neuromagnetic measurements. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 58 : 569-572, 1984.
- 5) Daneman, M. & Carpenter, P.A. : Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19 : 450-466, 1980.
- 6) Goldman-Rakic, P.S. : Working memory and the mind. *Scientific American*, 262 : 72-79, 1992.
- 7) Jonides, J., Smith, E.E., Koeppe, R.A., et al. : Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature*, 363 : 623-625, 1993.
- 8) Just, M.A. & Carpenter, P.A. : A capacity theory of comprehension ; Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99 : 122-149, 1992.
- 9) Kahneman, D. : Attention and effort. Prentice-Hall, 1973.
- 10) Kintsch, W. & van Dijk, T.A. : Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85 : 363-394, 1978.
- 11) Osaka, N., Osaka, M. & Tsuji, H. : Effective visual field size necessary for proof-reading during Japanese text editing. In : Eye movements research, Mechanisms, Processes and Applications (eds J.M. Findley, R. Walker & R.W. Kentridge). Elsevier, 1995.
- 12) 苧阪満里子 : ワーキングメモリの認知神経心理学的研究. 風間書房, 1994.
- 13) 苧阪満里子, 苧阪直行 : 読みとワーキングメモリ容量 ; リーディングスパンテストによる検討. *心理学研究*, 65 : 339-345, 1994.
- 14) Paulesu, E., Frith, C.D. & Frackowiak, R.S.J. : The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362 : 342-345, 1993.
- 15) Tiihonen, J., Hari, R., Kajola, M., et al. : Magnetoencephalographic 10-Hz rhythm from the human auditory cortex. *Neuroscience letters*, 129 : 303-305, 1991.
- 16) Valler, G. & Shallice, T. : Neuropsychological impairments of short-term memory. Cambridge univ. Press, Cambridge, 1990.

■ Abstract

Working memory and language processing

Mariko Osaka*

Working memory represents the immediate memory processes involved in the simultaneous storage and processing of information. In the language processing, reading or listening the sentences, the emphasis is on the parallel systems of storing the partial product of comprehension while processing the incoming information.

In this study, the listening span test (LST), which can evaluate the individual differences of working memory capacity, was performed to investigate the brain mechanisms of the verbal working memory

Magnetoencephalography (MEG) was measured while the subjects performed the LST. The peak alpha frequency of MEG power shifted when the working memory demands increased. Individual differences were found in the span, in which the shift became to be largest. Moreover, the shift was dominant mainly in the frontal and temporal regions in the left hemisphere, which indicate the locus of verbal working memory.

*Osaka University of Foreign Studies, Osaka