

動的視覚ノイズが具象単語産出課題中の脳活動に及ぼす影響

—近赤外分光法(NIRS)を用いた検討—

高村真広・西本美花・林 俊介・山本文枝・宮谷真人

The effect of dynamic visual noise on brain hemodynamic response during concrete word production task

Masahiro Takamura, Mika Nishimoto, Shunsuke Hayashi, Fumie Yamamoto and Makoto Miyatani

二重課題法や脳活動測定などの手法を用いた先行研究から、具象単語の意味処理に視覚イメージ処理が関与することが示唆されている。しかし、これまでの研究では主に単語の意味判断課題や記憶課題が用いられ、単語産出課題を用いた詳細な検討は行われていない。本研究では、具象単語の産出数や産出時の脳活動に視覚妨害課題が及ぼす影響を調べ、具象単語産出における視覚イメージ処理の関与を検討した。10名の成人女性に単語産出課題を実施し、近赤外分光法で課題遂行中の脳血流反応を記録した。単語産出課題は、単語の種類(具象・抽象)×視覚妨害(あり・なし)の4条件で行った。結果、単語産出数には視覚妨害の影響はみられず、具象単語がより多く産出された。脳血流反応では、具象単語条件において左前頭で有意な視覚妨害の効果がみられた。抽象単語条件では有意な視覚妨害の効果はみられなかった。この結果は、具象単語の産出に視覚処理が関与することを示唆する。

キーワード：単語産出課題、具象性効果、二重課題法、近赤外分光法(NIRS)

問 題

具象単語とは“椅子”や“猫”のように具体的な物を指す単語であり、その単語の視覚イメージを心に思い浮かべることは容易である。一方、抽象単語とは“感覚”や“思惑”のように具体的な対象物のない事柄を表す単語である。具象単語にくらべて抽象単語の視覚イメージを形成することは困難であり、より長い時間を要することがわかっている(Cocude & Denis, 1988; 高村・宮谷, 2008)。両者の違いは心的視覚イメージの喚起性だけではなく、記銘(Paivio, 1969)、語彙判断(James, 1975)、単語産出(Hanley, Hunt, Steed, & Jackman, 2013)などさまざまな課題状況において、具象単語が抽象単語よりも容易に処理できることが報告されており、この効果は具象性効果とよばれている(Paivio, 1991)。

具象性効果が生じるメカニズムの説明として2つの代表的な仮説が提案されており、両者は単語

の意味処理過程について異なる仮定をしている。二重符号化仮説(Paivio, 1991)では、具象単語の処理においては言語情報の活性化に加えて視覚イメージ情報の活性化が生じることを仮定する。そして、この付加的な視覚イメージ情報の処理によって具象単語の処理の優位性が生じると考える。一方の文脈利用可能性仮説(Schwaneflugel, 1991)では、視覚イメージ情報の処理を仮定しない。この仮説では、具象単語と抽象単語の間で言語情報そのものの活性化の容易性が異なるために具象単語の処理の優位性が生じると考える。上記の2つの仮説のうちどちらが妥当であるのかは、具象単語の処理に視覚イメージ処理が関与するか否かに依存する。そして、この問題についてさまざまなアプローチによって検討が行われた結果、二重符号化仮説を支持する証拠が多数報告されている。

具象単語の処理に抽象単語の処理とは異なるシステムが関わるか否かを検討するのに有効なアプローチのひとつに、課題遂行中の脳活動を調べる脳神経イメージング技法を用いた研究がある。脳神経イメージング研究では、陽電子造影法(positron emission tomography: PET)や機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging: fMRI)といった脳の血流動態を調べる技法や、事象関連脳電位(event-related potential: ERP)という脳の電氣的活動を捉える技法によって脳活動が計測される。それらの研究では、具象単語と抽象単語の意味処理時に活動する脳領域が比較され、それぞれ異なる脳領域が活性化することが複数の研究結果から示唆されている(Binder, Westbury, McKiernan, Possing, & Medler, 2005; Christoff, Keramatian, Gordon, Smith, & Mädlar, 2009; Fiebach & Friederici, 2003; Jessen, Heun, Erb, Granath, Klose, Papassotiropoulos, & Grodd, 2000; Kiehl, Liddle, Smith, Mendrek, Forster, & Hare, 1999; Scott, 2004)。しかし、研究によってそれぞれの単語条件で強い活性化が生じる部位は異なっており、具象単語の処理に特有の脳活動パターンを特定することはできていない。たとえば、単語の語彙判断や記銘を行うときには、具象単語条件で視覚イメージに関係する脳領域(e.g. 楔前部)の活動が増加するという報告(Binder et al., 2005; Jessen et al., 2000)もあれば、具象単語条件よりも抽象単語条件で強い脳活動がみられたという報告(Kiehl et al., 1999)もある。また、単語産出時における具象単語と抽象単語での活性化部位の違いを調べた Christoff et al. (2009)では、呈示された文字列を並び替えて単語を産出するアナグラム解決課題において、具象単語の検索には左前頭皮質の後部が、抽象単語の検索には左前頭皮質の前部が強く活動することを報告している。

以上のように、脳神経イメージング技法を用いた研究は、単語の意味処理課題の遂行に具象単語と抽象単語で異なるシステムが関与することを示唆している。しかし、具象単語処理と視覚イメージ処理との関連は必ずしも明確ではないという問題がある。このような問題を解決するためには、特定の脳機能を選択的に妨害する二重課題法と脳活動計測を組み合わせた実験的検討が有効であると考えられる。二重課題法は、ある認知処理に特定の種類の資源が関与しているか否かを示すために、当該の認知処理課題と同時に、共通の処理資源を要すると仮定される別の課題(同時課題)を行い、その干渉効果を調べる実験技法である。具象単語の処理に視覚イメージ処理が関与するか否かを検討するためには、視覚イメージ処理に干渉する同時課題が具象単語処理中の脳活動に影響し、かつ抽象単語処理中の脳活動には影響しないことを示せばよいと考えられる。

視覚イメージの処理を妨害する同時課題として、実験参加者に動的なランダムドットからなる視覚ノイズ(dynamic visual noise: DVN)を注視させる手続き(Quinn & McConnell, 1996)が開発されてい

る。これまでに、DVNの呈示が視覚イメージ形成を妨害する効果をもつことが示されている(Baddeley & Andrade, 2000; McConnell & Quinn, 2000; Quinn & McConnell, 1996)。また、視覚ノイズの視覚的属性の操作(たとえば、変化するドットの密度)によって、視覚イメージ形成への妨害効果の強さが変化することから、DVNが視覚処理にもとづく干渉効果を生じさせることが確かめられている(McConnell & Quinn, 2004)。具象単語の処理に対する影響については、Parker & Dagnall (2009)が検討を行い、DVNの呈示によって、具象単語の再生成績や再認成績が低下することを報告している。

高村・宮谷(2010)は、DVNが具象単語処理時の脳活動に及ぼす影響を調べ、具象単語に視覚イメージ処理が関与するか否かを検討した。実験では、DVNを観察するノイズ群、観察しない統制群に参加者を振り分け、具象単語および抽象単語の音声を刺激とした心像喚起性判断課題を実施した。実験の結果、DVN呈示による視覚妨害を行わなかった統制群においては、単語呈示後600-900 ms、1400-1600 msの2つの区間において、具象単語条件のERP波形が抽象単語条件のERP波形に比べて陰性方向にシフトする効果がみられた。一方で、DVN観察群では、具象単語条件と抽象単語条件のERPの間に有意な差が生じなかった。すなわち、具象単語と抽象単語の処理過程の違いを反映する脳電位差が、視覚妨害を行うことによって消失したのであり、この結果は、具象単語と抽象単語の意味処理過程における違いが、視覚イメージ処理の関与の違いによることを示唆する。

以上のように、二重課題法と脳神経イメージング技法の組み合わせによって、具象単語の処理に視覚イメージ処理が関与することを示唆する結果が得られている。しかし、それらの先行研究で用いられた実験課題は、主として単語の記銘や語彙判断、意味判断を行う課題、すなわち、呈示された単語に対して反応する形式のものである。その一方で、単語を産出する課題を用いた検討は少ない。具象性効果は単語産出課題においても報告されていることから、具象単語と抽象単語の処理の違いを明らかにするためには、具象単語の産出にも視覚イメージ処理が関与するか否かを検討する必要があると考えられる。しかし、現在のところ、具象単語産出時と抽象単語産出時で脳活動のパターンが異なることを示す報告(Christoff et al., 2009)はあるものの、単語産出課題と二重課題を組み合わせ、その課題中の脳活動を測定するような検討はまだおこなわれていない。したがって本研究では、単語産出課題時において具象単語の産出に視覚イメージ処理が関与するか否かを検討した。

本研究の実験課題には単語産出課題の一種である言語流暢性課題を用いた。言語流暢性課題とは神経心理学検査としてよく用いられる課題である。被検査者は、文字やカテゴリ名などの手がかり刺激が呈示され、その手がかり刺激に当てはまる単語を産出するよう求められる。言語流暢性課題遂行中の脳血流反応をfMRIや近赤外分光法(near-infrared spectroscopy: NIRS)を用いて調べた研究によると、単語産出課題の遂行時には左前頭部の脳活動が強くなることが報告されている(Costafreda, Fu, Lee, Everitt, Brammer, & David, 2006; Kakimoto, Nishimura, Hara, Okada, Tani, & Okazaki, 2009; Suto, Fukuda, Ito, Uehara, & Mikuni, 2004)。言語流暢性課題において左前頭部は意味処理に関与するといわれており(Costafreda et al., 2006)、また、言語流暢性課題の成績と左前頭部の脳活動には関連があることが示唆されている(Okada, Okamoto, Morinobu, Yamawaki, & Yokota, 2003)。したがって、具象単語の産出過程に視覚イメージ処理が関わるならば、単語産出課題中の視覚イメージ妨害は、具象単語産出中の脳血流反応に影響を及ぼすと予想される。本実験では、具象単語と抽象単語をそ

れぞれ産出する言語流暢性課題を視覚イメージ処理を妨害する同時課題のもとで実施し、その影響を調べた。言語産出課題中の脳活動は NIRS によって計測した。本研究で NIRS を用いた理由は、関心のある脳部位が左前頭部に限定されており脳全体を深部にわたって探索的に調べる必要がないこと、また、NIRS の測定では MRI 測定の場合に生じるような音響ノイズがなく、実験参加者の発話およびその記録が容易であることの 2 点である。

方 法

実験参加者 視力、聴力ともに課題遂行に支障のない 10 名の成人女性が実験に参加した(平均年齢 23.1 歳、範囲 22-24)。全員右手利きであった。実験の開始前に実験内容の説明を行い、全員から実験参加について同意を得た。

課題 単語産出課題として、音韻性の言語流暢性検査を改変して用いた。指示された文字で始まる名詞を、具象単語か抽象単語に限定して産出する課題であった。つまり、たとえば“具象単語・い”という指示をした場合、“いぬ”“いす”“いかだ”等の名詞を産出することを求めた。産出課題の開始時に、文字および産出単語の種類(具象単語、抽象単語)を指示した。産出の時間は 1 分間で、開始から 30 秒経過時に別の文字を指示した。産出する際の制限として、人名、国名などの固有名詞および、すでに一度報告した名詞の反復を避けるよう教示した。

刺激 産出課題で呈示した手がかり刺激は、“あ”“い”“お”“か”“き”“こ”“し”“は”の 8 文字であった。この 8 文字は、天野・近藤(1999)の単語親密度コーパスにおいて、その文字を頭文字とする音声親密度 6 以上の名詞が多い順に抽出した。実験に用いた 8 文字に次いで親密度の高い語が多かった“さ”“せ”“た”“と”を練習用の文字に用いた。

二重課題 産出課題中の視覚処理を妨害する条件として DVN 条件を設けた。DVN 条件では、視覚妨害刺激として、Quinn & McConnell (1996)の DVN に準ずる、動的に変化するランダムドットパターン刺激を用いた。DVN は、正方形の領域に縦 80 個×横 80 個のドットがランダムに配置された白黒のドットパターンである。1 つのドットの状態は白または黒であり、白と黒の割合を 50 : 50 に保ったまま、ドットの状態がランダムに変化する。本研究では 1 秒間につき 2000 個の割合でドットの状態を変化させた。使用した液晶ディスプレイの更新レートは 60 Hz であった。産出課題中の視覚処理の妨害を行わない条件として統制条件を設けた。統制条件では、DVN を構成する白黒ドットの間色である灰色で塗りつぶした四角形をディスプレイに呈示した。視覚ノイズおよび灰色の四角形は背景を黒としたディスプレイに呈示した。

手続き 実験参加者は液晶ディスプレイを注視しながら単語産出課題を行った。産出する単語の種類と視覚妨害の有無を参加者内要因で操作し 4 条件を実施した。また、産出課題中の脳血流反応を NIRS で測定した。NIRS のベースライン測定のために、産出課題の前後にそれぞれ 30 秒間と 70 秒間、“あいうえお”という言葉を繰り返し発話する課題を実施した。ベースライン測定と産出課題を含めた 160 秒間を 1 ブロックとし、1 条件につき 1 ブロックの計 4 ブロックの課題を実施した (Figure 1)。

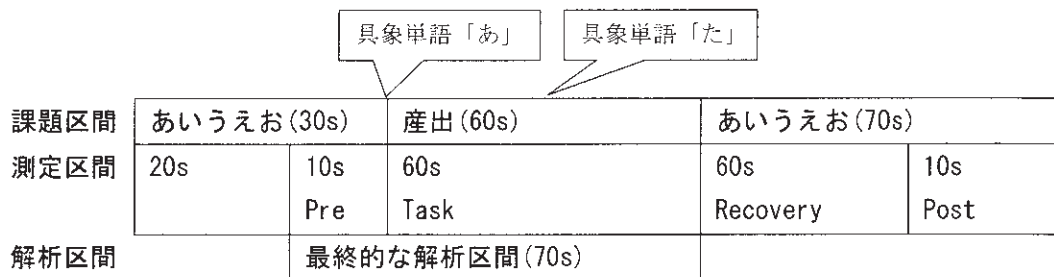


Figure 1. 単語産出課題1ブロックのプロトコール(具象単語条件の例)

脳血流反応の記録と処理 光トポグラフィ装置(Hitachi, ETG-4000)を用いて、左前頭部から左側頭部にかけての22チャンネルから脳血流反応を記録した。3×5の格子状に並んだプローブを伸縮性のある帽子に取り付けることで頭部に固定した。設置位置は、国際10-20法を基準とし、F7とch4の位置を合わせた。Okamoto, Dan, Sakamoto, Takeo, Shimizu, Kohno, Oda, Isobe, Suzuki, Kohyama, & Dan (2004)によると、F7上のプローブは左下前頭回近傍の活動を捉える。したがって、この実験では左下前頭回から左前側頭回にかけての脳血流反応を記録した。本研究の解析では左前頭部(左下前頭回周辺)の脳活動に注目するため、ch4近傍の7つのチャンネルの信号を解析の対象とした。

測定されたデータはNIRS装置に付属のソフトウェアを用いて前処理を行った。産出課題直前の10秒間(Pre区間)と測定終了直前の10秒間(Post区間)の信号をベースライン補正に用い、解析対象となる70秒間の信号を得た。また、解析対象の70秒間の信号に対して5秒間の移動平均フィルタを適用して平滑化を行った。前処理後のデータについて、統計解析ソフトRを用いて統計解析を行った。

結果

単語産出数 単語の産出数(Table 1)について、単語×視覚妨害条件の2要因分散分析を実施した。結果、単語の種類が有意($F(1,9)=25.76, \eta_p^2=.74, p<.001$)で、具象単語条件で抽象単語条件よりも多くの単語が産出された。視覚妨害の主効果($F(1,9)=0.00, \eta_p^2=.00, ns$)および交互作用($F(1,9)=1.45, \eta_p^2=.14, ns$)は有意ではなく、視覚ノイズ呈示による単語産出への妨害効果は見られなかった。

Table 1. 視覚妨害条件における具象単語と抽象単語の平均産出数(SD)

Word condition	Concrete word	Abstract word
Interference condition		
Control	8.9 (2.8)	3.5 (3.4)
DVN	8.4 (4.0)	4.0 (3.7)

Note. DVN: dynamic visual noise, SD: standard deviation

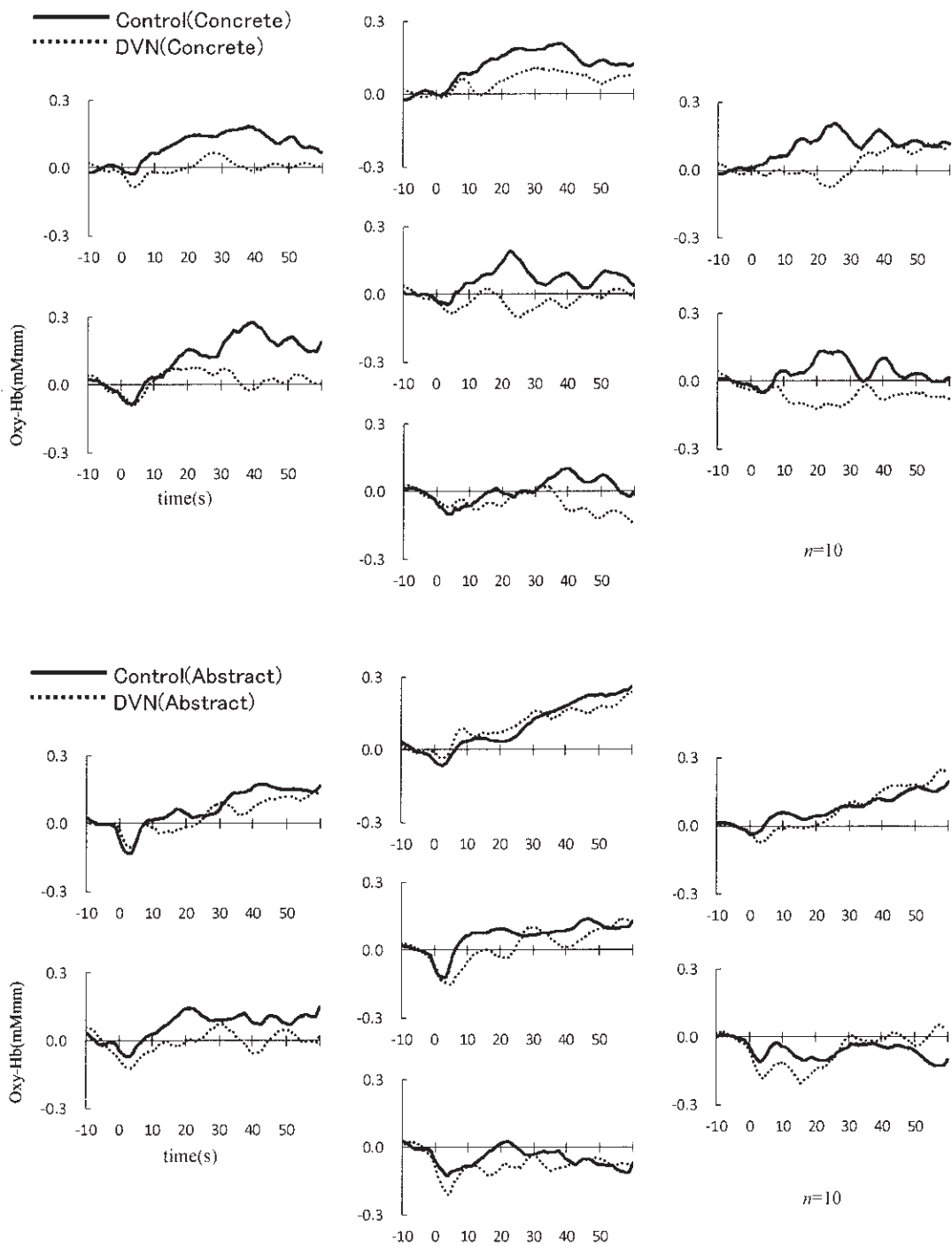


Figure 2. 統制条件および視覚妨害条件で記録された単語産出時の左前頭部における脳血流反応

Note. DVN: dynamic visual noise, Oxy-Hb: 酸化ヘモグロビン

脳血流反応 脳血流反応については、酸化ヘモグロビン量変化を指標とした。10名の総加算波形を Figure 2 に示す。視察上、産出課題の開始にともないすべての条件で脳血流の増加がみられる。具象単語条件(Figure 2 上)、抽象単語条件(Figure 2 下)それぞれの時系列データについて、各部位、各時間点における t 検定を視覚妨害条件間で行い、視覚妨害効果が生じる部位と時間帯を調べた。本研究の探索的性質を考慮して有意水準は 10% に設定した。その結果、具象単語条件において、視覚妨害の有無の有意差が連続してみられた(Figure 3)。一方で、抽象単語産出条件においては、同様の有意差はみられなかった(Figure 3)。

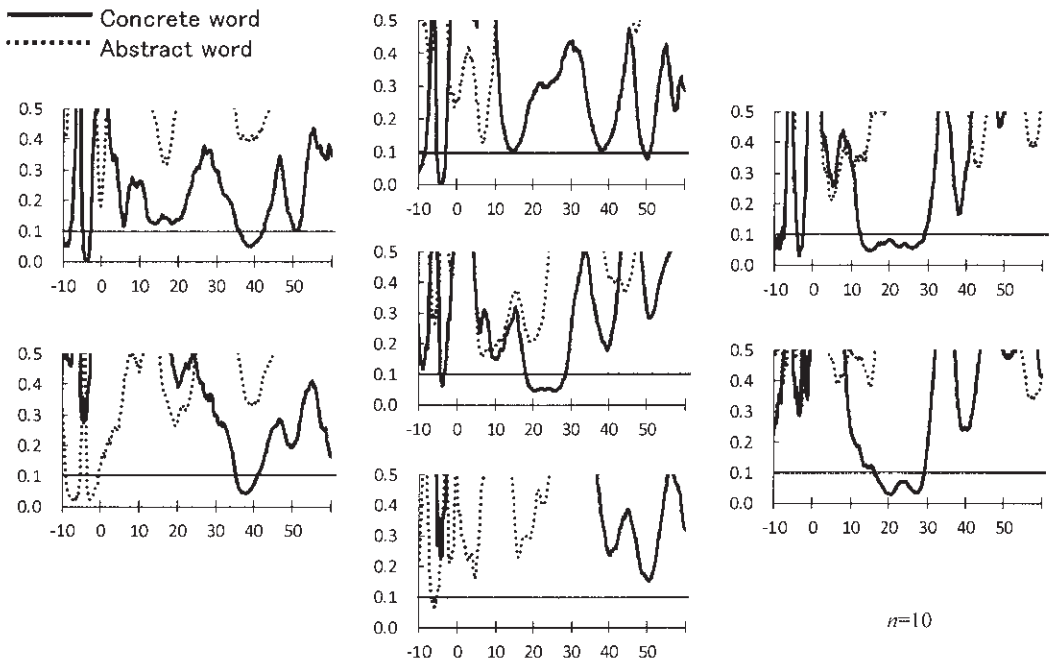


Figure 3. 左前頭部における各単語条件での視覚妨害条件の効果

Note. 縦軸に t 検定の p 値, 横軸に時間点(秒)を示す。水平線は有意水準($p=0.10$)

考 察

本研究では、具象単語と抽象単語を産出する課題に視覚妨害課題が及ぼす影響を検討した。まず、具象単語および抽象単語の産出課題遂行中に、左前頭部の脳血流の増加がみられた。これは、一般的な言語流暢性課題遂行中の脳活動に関する従来の報告に沿った結果である(e.g. Kakimoto et al., 2009)。本研究の脳血流反応の測定では“あいうえお”という所定の言葉を発話しつづけるペースライン条件を用いている。したがって、産出課題中のこの脳活動は単純な運動や音韻処理ではなく、単語の意味処理過程を反映していると考えられる。次に、視覚妨害課題の有無の影響に注目すると、具象単語の産出条件においては、視覚妨害によって左前頭部の脳血流反応に有意な減衰が生じ、10

秒程度持続する効果が複数の部位でみられた(Figure 3)。それに対して、抽象単語の産出課題中には視覚妨害による反応減衰が有意になった部位および区間はみられなかった。これは、具象単語の産出における意味処理と抽象単語の産出における意味処理では、視覚イメージ処理の関与の度合いが異なり、具象単語の産出に視覚イメージ処理が強く関与することを反映していると考えられる。具象単語条件における条件差は、産出課題開始から10秒程度経過してから生じている。神経活動の変化から脳血流の変化までには1~5秒程度のタイムラグがあることを考えると、この条件差が生じるまでの潜時は単語産出の認知過程と時間的に符合する。このことは、本研究において具象単語条件でみられた効果が、具象単語産出の意味処理に視覚処理の妨害が及ぼした影響を反映するものであることを強く示唆する。一方、抽象単語条件では視覚処理の妨害は有意な影響を脳血流反応に及ぼさなかった。このことは、抽象単語の産出にかかわる意味処理では、視覚イメージ処理が生じていないことを示唆する。これは、具象単語の検索と抽象単語の検索において、前頭皮質内で異なるモードの処理が生じることを示した先行研究(Christoff et al., 2009)に沿った結果であり、また、具象単語処理モードには視覚的な情報処理が強く関与することを示唆する結果であると考えられる。

単語産出量に関しては、視覚ノイズ呈示によって具象単語の産出量のみが減少するといった、理論的予測に沿った結果は得られなかった。その原因としては、今回用いた産出課題の複雑性が影響しているかもしれない。通常、単独で適用される産出のルール(たとえば、特定の頭文字で始まる語を産出、特定のカテゴリの語を産出)を組み合わせるために、複雑な課題となり参加者のパフォーマンスが安定しなかった可能性がある。本研究では1条件あたり1ブロックの試行を実施した。しかし、今後同様の実験を行う際には、1条件あたり複数のブロックを行うことで、課題のパフォーマンスの安定性、NIRS信号の安定性を高めることが必要である。

結論 本研究では、具象単語と抽象単語の間における単語産出にかかわる意味処理のちがいを検討するために、単語産出課題における視覚妨害の効果を検討した。その結果、視覚妨害による単語産出のパフォーマンスへの影響はみられなかったものの、具象単語の産出時のみに脳血流反応への妨害効果がみられ、具象単語の意味処理に視覚情報処理が関与するという仮説を支持する結果を得た。

引用文献

- 天野成昭・近藤公久 (1999). NTT データベースシリーズ 日本語の語彙特性 第1巻 視密度 三省堂
- Baddeley, A. D., & Andrade, J. (2000). Working memory and the vividness of imagery. *Journal of Experimental Psychology: General*, **129**, 126-145.
- Binder, J. R., Westbury, C. F., McKiernan, K. A., Possing, E. T., & Medler, D. A. (2005). Distinct brain systems for processing concrete and abstract concepts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **17**, 905-917.
- Christoff, K., Keramiatian, K., Gordon, A. M., Smith, R., & Mädlar, B. (2009). Prefrontal organization of cognitive control according to levels of abstraction. *Brain Research*, **1286**, 94-105.
- Cocude, M., & Denis, M. (1988). Measuring the temporal characteristics of visual images. *Journal of Mental*

- Imagery*, **12**, 89-102.
- Costafreda, S. G., Fu, C. H. Y., Lee, L., Everitt, B., Brammer, M. J., & David, A. S. (2006). A systematic review and quantitative appraisal of fMRI studies of verbal fluency: Role of the left inferior frontal gyrus. *Human Brain Mapping*, **27**, 799-810.
- Fiebach, C. J., & Friederici, A. D. (2003). Processing concrete words: fMRI evidence against a specific right-hemisphere involvement. *Neuropsychologia*, **42**, 62-70.
- Hanley, J. R., Hunt, R. P., Steed, D. A., & Jackman, S. (2013). Concreteness and word production. *Memory & Cognition*, **41**, 365-377.
- James, C. T. (1975). The role of semantic information in lexical decisions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **104**, 130-136.
- Jessen, F., Heun, R., Erb, M., Granath, D.-O., Klose, U., Papassotiropoulos, A., & Grodd, W. (2000). The concreteness effect: Evidence for dual coding and context availability. *Brain and Language*, **74**, 103-112.
- Kakimoto, Y., Nishimura, Y., Hara, N., Okada, M., Tani, H., & Okazaki, Y. (2009). Intrasubject reproducibility of prefrontal cortex activities during a verbal fluency task over two repeated sessions using multi-channel near-infrared spectroscopy. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, **63**, 491-499.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., Smith, A. M., Mendrek, A., Forster, B. B., & Hare, R. D. (1999). Neural pathways involved in the processing of concrete and abstract words. *Human Brain Mapping*, **7**, 225-233.
- McConnell, J., & Quinn, J. G. (2000). Interference in visual working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **53A**, 53-67.
- McConnell, J., & Quinn, J. G. (2004). Complexity factors in visuo-spatial working memory. *Memory*, **12**, 338-350.
- Okada, G., Okamoto, Y., Morinobu, S., Yamawaki, S., & Yokota, N. (2003). Attenuated left prefrontal activation during a verbal fluency task in patients with depression. *Neuropsychobiology*, **47**, 21-26.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., Oda, I., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K., & Dan, I. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, **21**, 99-111.
- Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychological Review*, **76**, 241-263.
- Paivio, A. (1991). Dual coding theory: Retrospect and current status. *Canadian Journal of Psychology*, **45**, 255-287.
- Parker, A., & Dagnall, N. (2009). Concreteness effects revisited: The influence of dynamic visual noise on memory for concrete and abstract words. *Memory*, **17**, 397-410.
- Quinn, J. G., & McConnell, J. (1996). Irrelevant pictures in visual working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **49A**, 200-215.
- Schwanenflugel, P. (1991). Why are abstract concepts hard to understand? In P. Schwanenflugel (Ed.), *The psychology of word meanings*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. pp. 223-250.

- Scott, S. K. (2004). The neural representation of concrete nouns: What's right and what's left? *Trends in Cognitive Sciences*, **8**, 151-153.
- Suto, T., Fukuda, M., Ito, M., Uehara, T., & Mikuni, M. (2004). Multichannel near-infrared spectroscopy in depression and schizophrenia: Cognitive brain activation study. *Biological Psychiatry*, **55**, 501-511.
- 高村真広・宮谷真人 (2008). 抽象単語から形成される視覚イメージの諸特性 広島大学心理学研究, **8**, 191-196.
- 高村真広・宮谷真人 (2010). 動的視覚ノイズが具象語の処理を反映する ERP 成分に及ぼす影響 生理心理学と精神生理学, **28**, 209-218.