

誤り単語の視覚・聴覚提示における事象関連電位による違和感分析

小田垣 佑[†] サクリアニサクティ[†] グラムニュービグ[†] 戸田 智基[†] 中村 哲[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{yu-o,ssakti,neubig,tomoki,s-nakamura}@is.naist.jp

あらまし 日本語文に含まれる意味に対する誤りの認知について検証するために、脳波の一種である事象関連電位を計測する実験を行った。事象関連電位とはある刺激に対する脳の電気生理学的な反応であり、光や音などのある一つのイベントに対して誘発される一連の脳活動を反映した脳波の一種である。本研究では、世界知識と意味に関する誤りを含んだ日本語文を視覚刺激と音声刺激で提示する2種類の実験を行った。実験では意味の塊に区切り、塊ごとに被験者に提示した。誤りの単語を含む意味の塊が提示された瞬間を時刻0として正しい単語に対する事象関連電位を測定し、反応の比較を行い、言葉の誤りに対する違和感を反映した事象関連電位 N400 が観測されるかどうかを調べた。その結果、視覚刺激においては言葉の誤りに対する違和感を反映した事象関連電位 N400 が世界知識に対する誤り単語と意味に対する誤り単語の両方において観測された。また、聴覚刺激においては意味に対する誤り単語において N400 が観測されたが、世界知識に対する誤り単語では N400 は観測されなかった。

キーワード ERP, N400, 世界知識誤り, 意味誤り

An ERP analysis of mismatch feelings from semantically mistaken words by visual and auditory stimuli in Japanese

Yu ODAGAKI[†], Sakriani SAKTI[†], Graham NEUBIG[†], Tomoki TODA[†], and Satoshi NAKAMURA[†]

[†] Nara Institute of Science and Technology Takayama-cho 8916-5, Ikoma, Nara, 630-0192 Japan

E-mail: †{yu-o,ssakti,neubig,tomoki,s-nakamura}@is.naist.jp

Abstract Two ERP experiments were conducted to examine the semantic processing of mistaken words in Japanese sentences by measuring ERP. ERP is a kind of brain wave that describes brain activity elicited by light or sound. In the first experiment, participants were visually presented Japanese sentences. Each presented sentence is categorized into three types. The first variety is sentences with no errors. The second variety is the sentence which have a word violating world knowledge. The last variety is the sentences with a semantic violation. In the second experiment, participants were presented auditory Japanese sentence from the same set as visual version of experiment. In each experiment, presented sentences were segmented into chunks. Time 0 is the onset when the target words are presented. We measured ERP after correct words, world knowledge violation words and semantic violation words to examine whether N400 ERP component that reflects mismatch feelings from mistaken words was elicited or not. As a result, N400 ERP component was observed after each category of mistaken words was presented in the visual stimuli experiment. On the other hand, N400 ERP component was shown after semantic violation words were presented, but N400 was not shown after world knowledge violation words being presented in the auditory stimuli version of the experiment.

Key words ERP, N400, world knowledge mismatch, semantic mismatch

1. ま え が き

本研究では聞き手が覚える相手の言葉の中にあるわからない

言葉や誤った言葉から感じられる違和感を検知しフィードバックすることで、意思疎通を支援し、コミュニケーションを円滑化することを目標としている。意思疎通の齟齬を回避するため

に、話の受け手が話し手の言葉から違和感を覚えたときにその情報をフィードバックすることを考える。本研究では違和感を、言葉の誤りや受け手側が知らない言葉が用いられたときに生じる疑念や、予想と違う言葉に対するミスマッチといった感覚とし、文中の誤り単語に対する反応に着目する。こうした違和感を脳波計 (Electroencephalograph:EEG) を用いて、事象関連電位 (Event Related Potential:ERP) を用いて検出する。

文中の誤った単語に対する違和感に関する研究がオランダ語などで行われている [1]。この研究では文中の 2 種類の誤り単語に対して事象関連電位を計測し、正しい単語に対する反応との比較が行われた。その結果、誤り単語に対して事象関連電位 N400 が観測され、正しい単語と誤った単語に対する反応に違いがあることが明らかになった。

本報告では、事象関連電位 N400 に注目し、日本語文中における意味に関する誤りに対する事象関連電位の反応を視覚と聴覚の両刺激について調査する。オランダ語で行われた先行研究と同様に日本語文においても 2 種類の意味誤りに対して事象関連電位 N400 が観測される事を示し、同じ文を用いて聴覚刺激を行った場合にも同様に N400 が発現することを示す。

2. 従来研究

2.1 脳波

頭皮上に置かれた電極間に生じるわずかな電位差にはあるリズムが生じる。このリズムを持った波が脳波である。脳波は脳内の神経細胞の発火活動に由来し、自発的に絶え間なく出現し続けており、これを背景脳波という。脳波の由来は神経細胞のニューロン内部の電位の変化による。この電位の変化をシナプス後電位とよび、興奮性と抑制性に分類される。抑制性のシナプス後電位の振幅は 100 mV と非常に大きい持続時間がおよそ 1 ms であるため、脳波にはあまり貢献しない。また、抑制性シナプス後電位で発生する電位の影響は非常に小さいので、脳波の源は興奮性のシナプス後電位であると考えられている [2]。

これに対し、光や音のような刺激や運動に対して生じる脳の電気活動があり、これを事象関連電位という [3]。事象関連電位は通常の自発的に出現し続ける背景脳波と重なって生じる。事象関連電位はこの自発的な脳波に比べて振幅が非常に小さいため、1 試行毎に観測することは難しい。そこで、十分な回数の試行で得られた脳波データを検討したい事象が起こった時刻を基準としてそろえ、加算平均する方法をとる。事象関連電位は試行毎に同じ波形を出す仮定ことができ、加算平均を行うと自発的な脳波などの各試行ごとに独立なノイズ部分は 0 に近づいていく。こうすることによって S/N 比を高くすることが可能となる。ノイズが定常である場合、N 回加算平均を行うとノイズの振幅は $\frac{1}{\sqrt{N}}$ となる。また、突発的なノイズに関しては $\frac{1}{N}$ となる。複数の被験者による事象関連電位を加算したものは総加算平均波形 (Grand Mean Waveform:GMW) という [4]。

事象関連電位は通常、いくつかの波からなる波形として記録され、それぞれの波を成分 (component) とよぶ。ある ERP 成分が出現するタイミングを示すために事象の開始点から波の頂点までの時間を ms 単位で測定する。これを頂点潜時 (peak

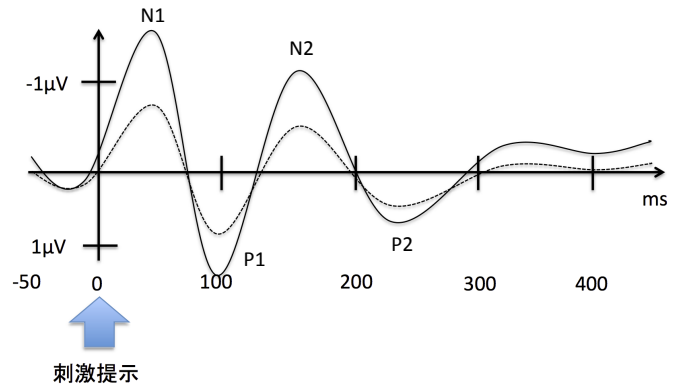


図1 事象関連電位の模式図。刺激が提示された時刻を 0 とし、同じカテゴリの刺激に対する脳波を加算平均する事で得られる。
Fig.1 Schematic diagram of ERP. Onset is the time when the stimuli are presented. This kind of graph can obtain averaging hundreds of effects against the same category of stimuli.

latency) という。また、波の大きさを振幅と呼び、 μV 単位で測定する。通常、基準となる区間 (時間帯) を設定し、これを基準線 (baseline) としてそこからの電位差を測定する。

事象関連電位には陽性 (positive) 方向への電位のシフトとがあり、P で表す。図 1 の P1 や P2 などがこれにあたる。陰性 (negative) 方向への電位のシフトは N で表され、同様に N1, N2 などと呼ばれる。また、事象関連電位は典型的な潜時の時刻をつけて呼ばれることがあり、P300 や N400 が例として挙げられる。それぞれの振幅や潜時は刺激の種類や実験操作によって選択的に変化するため、事象関連電位の波形は性質の異なる複数の成分が時間的かつ空間的に重畳して構成されたものであると考えられている。外的刺激によって必然的に引き起こされるような成分を外因性成分、内的な事象によって引き起こされる成分を内因性成分という。

2.2 事象関連電位

事象関連電位の一種である N400 は当初、意味の不調和に対して引き起こされるものとされていた [5]。最初に N400 が報告されたこの研究では、7 単語からなる英文を単語毎に提示し、文脈上、通常はその場所に入り得ない単語が入ったときに N400 が発現することが示されている。N400 の振幅差が最も大きくなるのは、このような予想と違う単語が文の最後に来る場合と予想通りに文が終わった場合である [6]。N400 関連の研究は当初、文に空白部分を作り、そこに当てはまる単語として正しいものと間違っただけのものを用意し、比較するパターンが多かった [5] [7]。N400 は意味の誤りだけでなく、物事の意味そのものを処理する過程でも現れるとされている [8] [9]。また、N400 は加齢によってその出現時間が遅くなることが知られている [10]。単語に誤りがあった場合でも、そこに文法上の誤りの要素があった場合は別の事象関連電位である P600/SPS が発現することが分かっている [11]。従って、意味の誤りと文法の誤りは脳活動的に見ると別のものであるといえる。

Haggort らの研究により、N400 はヒトの自身が持つ世界知識 (World Knowledge) と書かれている文の間に齟齬が生じた

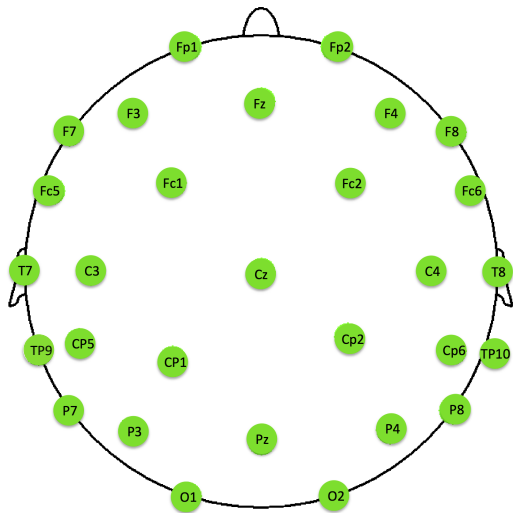


図2 脳波計の電極位置
Fig.2 Electrode arrangement of EEG.

場合にも起こることが分かっている [1]。この研究では、文中にある2種類の誤り単語を比較している。誤り単語の一つ目は、知識によって誤りであると分かる単語 (World Knowledge Violation Word) である。この単語が文中にある場合は、一見すると文そのものは正しいと感じることがある。しかし、文に関する知識があれば誤りであると分かるような単語がこれにあたる。二つ目の誤り単語は、品詞としての誤りはないものの文脈上その場所に来ることのない単語 (Semantic Violation Word) である。こちらは世界知識に対する誤りの単語と比較すると誤りであることが分かりやすい。この2種類の誤り単語を入れた文と比較用に誤りのない正しい単語を入れた文を見たときの事象関連電位を比較すると、誤り単語を見たときにN400が観測され、正しい単語を見たときにはN400は観測されない。

3. 実験方法

本研究では、誤り単語を含んだ文を提示し、その反応を事象関連電位を用いて検証する実験を行った。文を視覚刺激として文字で提示するものと、聴覚刺激として音声で提示する二種類のパラダイムを用いた。

3.1 脳波収録環境

脳波収録には Brain Products 社製の BrainAmp を使用した。脳波計の電極数は 32 チャンネルで図2のように頭皮上に配置し、耳たぶ部分をグラウンドとした。電極は銀-塩化銀電極を用い、EEG キャップで頭皮上に電極を固定した。各電極のインピーダンスは頭皮と電極の間にジェルを塗ることで5kΩ未満まで下げた。脳波測定は500Hzで行い、250Hzにダウンサンプリングして解析を行った。

3.2 被験者

被験者は、22歳から25歳の成人男性を対象とした(実験1:5名、実験2:5名)^(注1)。被験者の条件としては、被験者は言語課

題を行うため、右利きであること、精神疾患の既往症が無いこと、神経に障害がないこと、視覚刺激を提示することから視覚に異常が無いこととした。

3.3 提示文

被験者へ提示する日本語文は、完全に正しい文と文中に1単語だけ誤りを含んだ文を用いた。各々の文にターゲットの単語を設け、このターゲットの単語を見たときの事象関連電位を観測する。ターゲットの単語は文中において正しい単語、世界知識誤りに対する単語、意味に対する誤り単語の3種類を設定した。二つの誤り単語のうち、前者の世界知識に対する誤りは、この単語を見たときに被験者は文の内容と自身の持つ知識との間に矛盾が生じるために誤りであると分かるものである。意味誤りの単語はこの単語を見たときに単語が意味の観点から見てその場に来るに相応しくない単語である。また、正しいというラベルを振った単語がターゲットの単語となっている文は日本語として完全に正しい文である。

以下、例を挙げながら3種類の文についての詳細を作成方法とともに説明する。初めに、以下のような文を作成する。

花は 黄色い。

この時点でこの文は文中に出てくる花が黄色いという事実を述べた日本語として正しい文である。この文に、文の真偽を判定するための知識が必要な情報を付与する。ここでは「花」の前に「タンポポの」という情報を加える。

タンポポの 花は 黄色い。

実際にタンポポの花は黄色いためこの文は、正しい文となる。ただし、この文が正しいかどうかを判断するためには、タンポポの花が黄色いという事実を知っている必要がある。ここで要求される知識が世界知識である。

次に、この文中にある「黄色い」という単語を「黒い」という単語に置き換える。

タンポポの 花は 黒い。

通常タンポポの花は黄色いため、タンポポの花を思い浮かべた状態でこの単語を見た被験者は自身の知識と異なる内容の文を認識し違和感を覚える。このような文を世界知識誤りの文と呼ぶこととする。最後に正しい単語を入れた文の「黄色い」の部分で「寒い」に置き換える。

タンポポの 花は 寒い。

「寒い」という単語は「黄色い」「黒い」と同じ形容詞ではあるもののタンポポの花を説明する単語として不適切であるため、この文に対しても被験者はやはり違和感を覚える。このような文を意味誤りの文と呼ぶこととする。表1に文セットの例をまとめる。

このような3つ組みの文を1セットとし、90セット、合計270文を用意したものを刺激文として使用した。

ターゲットである単語の品詞は、形容詞だけでなく名詞と動詞も用いた。表2に、ターゲットの単語が名詞である例文を

(注1)：本実験は、長時間被験者を計測機器で拘束するため奈良先端科学技術大学院大学の倫理委員会から実験実施の承認を得た上で実験を行った。

表1 文セット例

Table 1 An example of sentence set

| カテゴリ | 文 |
|--------|---------------|
| 正しい | タンポポの 花は 黄色い。 |
| 世界知識誤り | タンポポの 花は 黒い。 |
| 意味誤り | タンポポの 花は 寒い。 |

表2 ターゲット単語が名詞の例

Table 2 An example of sentence set which target word is noun

| カテゴリ | 文 |
|--------|--------------------|
| 正しい | 日本では 車は 左車線を 走行する。 |
| 世界知識誤り | 日本では 車は 右車線を 走行する。 |
| 意味誤り | 夕日本では 車は 光線を 走行する。 |

示す。

3.4 刺激の提示方法

3.4.1 視覚刺激

視覚刺激実験では、作成した90個の3つ組、270文をランダムに並べ替え、それぞれの文が一度ずつ提示した^(注2)。

まず、被験者にいすに座った状態で楽な姿勢を取りモニタ上に映し出される文を見られる体勢をとらせた。実験中は目を開け、指定時間以外での瞬きや体の動きを極力控え、提示される文を、意味を考えながら見るように教示を行った。実験の開始および終了の合図は実験者が直接行った。各々の文を提示する単位に区切り文を前から順番に見せる方法を用いた。提示する単位のほとんどは文節と同じであるが、文の意味を理解する都合から複数の自立語が入った区切り方も存在するため、本研究では文を区切る単位を意味の固まりを表すチャンクと呼ぶこととする。各チャンクは0.5秒ずつ提示され、チャンクが提示された後に0.5秒間のブランク(何も表示されない真っ暗な状態)を経て次のチャンクが表示される。文が最後まで表示された後、次の文に移るまでの1秒間無意味刺激である”+”が表示される。この間のみ瞬きなどの動作を行うことを被験者に指示した。

3.4.2 聴覚刺激

視覚課題と同様に、提示する文はチャンクに区切り提示した。実験に用いた文は視覚課題で用いた270文を1文ずつ読み上げ、録音したものである。これらの音声ファイルをランダムにシャッフルしたものを再生し、被験者はイヤホンで読み上げられた文を意味を考えながら聞くことで聴覚刺激を行った。被験者が椅子に座り、リラックスし目を開いた状態で提示される文を聞き、提示する文と文との間の時間以外で体を動かす事を控えるように教示を行った。オンセットのタイミングはターゲット単語の発話開始直後とした。チャンクの間隔を0.5秒、一つの文が終了してから次の文を再生するまでの間隔を約1秒、一つの文から次の文へ移るまでの間隔を約1秒に設定した。

3.5 ERP分析

ERP分析には頭頂部にあるCzチャンネルを使用した。刺激

(注2)：順番を完全にランダムに選んでいるため、同じカテゴリのターゲットの単語が続いて出現することもあり、これを防ぐような制約を設けている訳ではない。

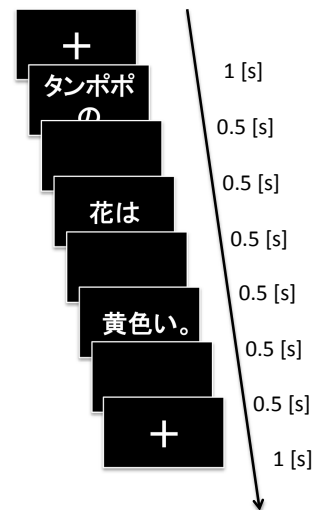


図3 視覚刺激の提示方法

Fig. 3 Timing of presenting the visual stimulus

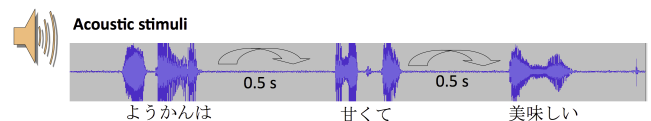


図4 聴覚刺激の提示方法

Fig. 4 Timing of presenting the visual stimulus

提示が行われた時刻を0とし、正しい単語、世界知識誤りの単語、意味誤りの単語の脳波データをターゲットの単語が提示された時間を時刻0として加算平均し、-100msから時刻0までの時間の電位を平均が0 μ Vとなるようにベースライン補正を行った。

4. 実験結果

4.1 視覚刺激実験

図5のグラフはそれぞれのカテゴリの単語を視覚刺激で提示したときの事象関連電位を表したものである。縦軸は振幅 [μ V]、横軸は時刻 [ms] である。グラフ中の破線が正しい単語を見たときの反応、点線が世界知識に対する誤りの単語を見たときの反応、実線が意味に対する誤りの単語を見たときの反応である。ターゲットの単語はグラフ中の時刻0のタイミングで提示され、-100msから時刻0までの時間をベースラインとしている。チャンネル Cz で、250msから450ms付近で陰性方向への電位のシフトが観測され誤り単語に対する違和感を表すN400が検出された。

世界知識に対する誤り単語と意味に対する誤りの単語を見た場合の振幅差が従来研究[1]では殆ど差が無かったのに対し、本実験ではそれぞれの単語に対するN400の振幅に有意な差が見られた。それぞれの反応の差はt検定 ($p < 0.05$) により有意性が確認された。

また、図6は正しい単語と誤り単語との振幅の差分である。

4.2 聴覚刺激実験

図7はそれぞれのカテゴリの単語を聴覚刺激で提示したときの事象関連電位を表したグラフである。縦軸は振幅 [μ V]、横軸

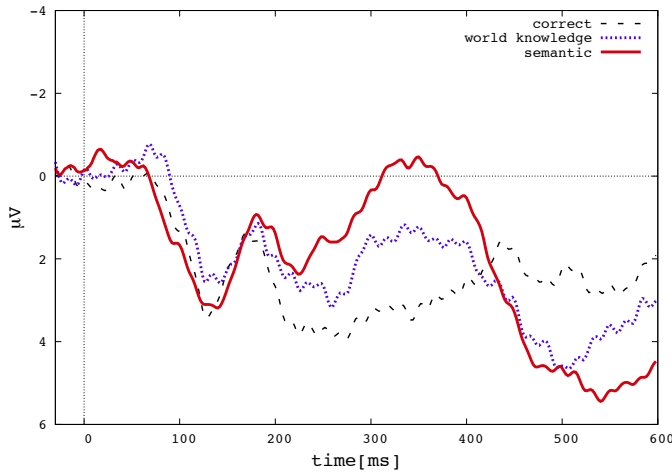


図5 ターゲットの単語が提示された時刻を0とし、縦軸を μV 、横軸をmsとして正しい単語と誤り単語に対する反応を示した。破線が正しい単語、点線が世界知識誤りの単語、実線が意味誤りの単語を視覚刺激で提示したときの事象関連電位の波形である。
Fig.5 Time 0 is onset when the stimuli are presented. X-axis is μV and Y-axis is ms. This graph is ERP waveforms comparing correct with world knowledge and semantic violation in visual stimuli of experiment. Broken line is correct, dot line is world knowledge violation and solid line is semantic violation word.

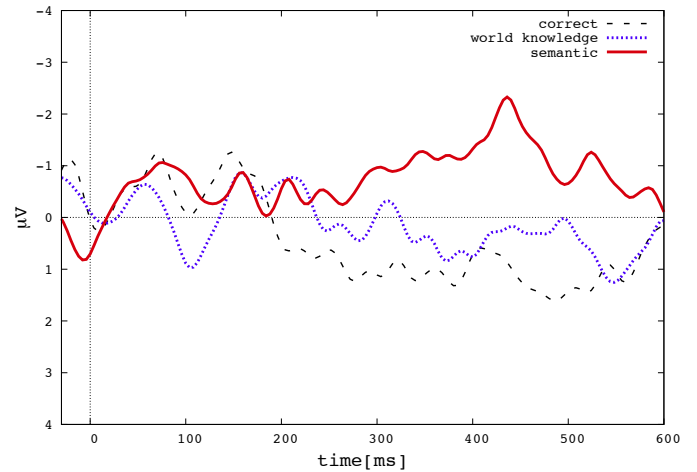


図7 ターゲットの単語が提示された時刻を0とし、縦軸を μV 、横軸をmsとして正しい単語と誤り単語に対する反応を示した。破線が正しい単語、点線が世界知識誤りの単語、実線が意味誤りの単語を聴覚刺激で提示したときの事象関連電位の波形である。
Fig.7 Time 0 is onset when the stimuli are presented. X-axis is μV and Y-axis is ms. This graph is ERP waveforms comparing correct with world knowledge and semantic violation in auditory stimuli of experiment. Broken line is correct, dot line is world knowledge violation and solid line is semantic violation word.

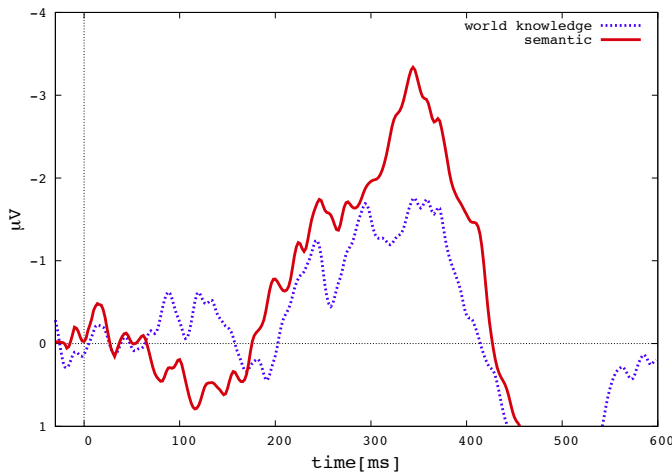


図6 正しい単語と誤り単語との反応の振幅の差分の比較。点線が世界知識誤りと正しい単語の差分、実線が正しい単語と意味誤りの差分である。
Fig.6 Difference of amplitude between correct condition and world knowledge and semantic violations. Dot line is world knowledge violation and solid line is semantic violation word.

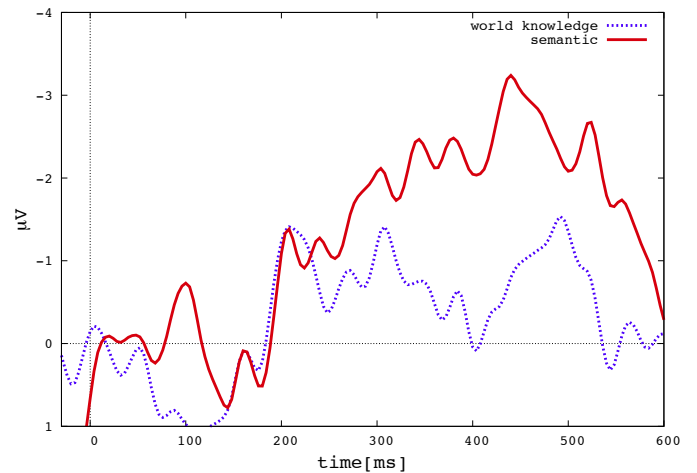


図8 正しい単語と誤り単語との反応の振幅の差分の比較。点線が世界知識誤りと正しい単語の差分、実線が正しい単語と意味誤りの差分である。
Fig.8 Difference of amplitude between correct condition and world knowledge and semantic violations. Dot line is world knowledge violation and solid line is semantic violation word.

は時刻 [ms] である。視覚刺激実験同様、グラフ中の破線が正しい単語を見たときの反応、点線が世界知識誤りの単語を見たときの反応、実線が意味誤りの単語を見たときの反応である。意味の誤り単語を提示後約 400ms から 500ms 後に陰性方向への電位のシフトが見られたが、世界知識誤りの単語では陰性方向への電位のシフトは見られなかった。また、t 検定による有意差検定の結果、意味誤りの単語に対する反応の大きさは正しい単語に対する反応の大きさに対する有意差が認められたが、世

界知識誤りの単語と正しい単語に対する反応の大きさには有意差は認められなかった。

また、それぞれの誤り単語と正しい単語との差分を図8に示す。

5. 考 察

視覚刺激での実験ではオランダ語での先行研究と同様に、世界知識誤りと意味誤りの単語において事象関連電位 N400 が観

測された [1]。一方で、オランダ語での先行研究と比較して知識に対する誤り単語の N400 の振幅が意味誤りに対する誤りの単語と比較して非常に小さいという結果となった。日本語文では文末に否定語を入れることで文の意味を変えることが出来るため、文を最後まで読み終えるまでターゲットの単語の真偽の決定が出来ないことが N400 の振幅が減少することにつながったと推測される。

また、聴覚刺激実験では意味誤りの単語に対して N400 が観測されたのに対し、世界知識誤りの単語に対する反応の振幅は正しい単語と比較して有意な差が見られなかった。この現象から、言葉の誤りに対する違和感は聴覚刺激においては意味に対する誤りに関しては検出しやすく、知識に対する誤りに関しては検出しにくいということが推測される。今回の実験では提示文のチャンクの数や、刺激単語が現れる位置、刺激単語の音節数を統制せずに実験を行ったため、視覚刺激ではモーラ数に関わらず提示にかかる時間は同じであるのに対して、音声刺激での実験ではターゲットの単語の提示にかかる時間にばらつきがあった。しかし、ターゲットの単語の読み上げ始めの時間を 0 として事象関連電位の波形を算出したため、被験者が感じる違和感の出現タイミングの変動が大きかったのが原因の一つであると考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、文中の世界知識に対する誤り単語と意味に対する誤り単語を視覚及び聴覚で提示したときに事象関連電位 N400 が観測されるかどうかを検証する実験を行った。その結果、視覚刺激を用いた実験においては事象関連電位 N400 が世界知識に対する誤り単語と意味に関する誤り単語の両方において観測された。また、聴覚刺激を用いた実験では意味に対する誤り単語を提示した場合のみ事象関連電位 N400 が観測され、世界知識に対する誤り単語では N400 は観測されなかった。

今後、聴覚刺激における信頼性を上げるのが課題である。これを解決するために実験で用いる文の条件を統制してもう一度両実験を行う。音声刺激で違和感が出現するタイミングの変動をより小さくするために音素数を統一し、視覚と聴覚ともに実験を行う。また、二つの誤り単語に対する事象関連電位の振幅差が違和感の量的な問題であるか質的な問題であるかについても調べる。

謝辞 本研究は、(独)情報通信研究機構の委託研究「知識・言語グリッドに基づくアジア医療交流支援システムの研究開発」の一環として実施した。

文 献

- [1] P. Hagoort, L. Hald, M. Bastiaansen, and K.M. Petersson. Integration of word meaning and world knowledge in language comprehension. *Science*, 304(5669):438–441, 2004.
- [2] 佐々木和夫. **脳波と脳磁図**. 三輪書店, 2003.
- [3] W. Walter, R. Cooper, VJ Aldridge, WC McCallum, and AL Winter. Contingent negative variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203:380–384, 1964.
- [4] 入野宏. **心理学のための事象関連電位ガイドブック**. 北大路書房, 2005.

- [5] M. Kutas, S.A. Hillyard, et al. Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427):203–205, 1980.
- [6] TW Picton, S. Bentin, P. Berg, E. Donchin, SA Hillyard, R. Johnson Jr, GA Miller, W. Ritter, DS Ruchkin, MD Rugg, et al. Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37(2):127–152, 2000.
- [7] M. Canale and M. Swain. Theoretical bases of communicative approaches to second language teaching and testing. *Applied linguistics*, 1(1), 1980.
- [8] M. Kutas and K.D. Federmeier. Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in cognitive sciences*, 4(12):463–470, 2000.
- [9] J.T. Cacioppo, L.G. Tassinary, and G.G. Berntson. Language. *Handbook of psychophysiology*, 2:576–601, 2000.
- [10] M. Kutas and R. Kluender. What is who violating? a reconsideration of linguistic violations in light of event-related brain potentials. *Cognitive electrophysiology*, pages 183–210, 1994.
- [11] A.D. Friederici and M. Meyer. The brain knows the difference: Two types of grammatical violations. *Brain research*, 1000(1):72–77, 2004.