

m系列変調法による脳波計測：談話理解を例として

竹市博臣 (takeichi@riken.jp)^{1,2}・小山幸子³・眞溪歩²・Andrzej Cichocki¹

理化学研究所¹・東京大学²・北海道大学³

脳波、とくに誘発脳電位を用いた研究では、これまで時間的に広がりのある談話（連続音声）のような刺激を用いることが困難であった。また、信号抽出のために加算平均を必要とし、そのために多くの繰り返しを要するので計測に時間がかかる、という欠点がある。私たちはこの問題を解決するためにm系列変調法を導入して刺激の作成を行った。

m系列は信号の符号化によく用いられる擬似乱数で、生成法が簡単であるわりに長周期の系列を得ることができるため、分布の一樣性や自己相関などの特性で優れている。m系列によって変調した刺激を提示し、そのときに得られた脳波と変調m系列の相関関数を計算することで、効率的に刺激関連成分を抽出することができる (Matani et al., 2005; Sutter, 2001)。この方法は通常に加算平均にくらべて雑音耐性も高いと考えられる。本稿ではこの方法を談話理解に適用した研究について解説する。原著は Takeichi et al. (2006) にあるのでそちらを参照されたい。

日本語母語話者を被験者とし、日本語と、音韻的に類似しているスペイン語談話をm系列で変調した。m系列変調したものは劣化音声となっているので補完が生じるが、理解可能な場合は言語処理に基づくトップダウン処理を含めた補完が生じるのに対し、そうでない場合は音響的なボトムアップ処理の補完のみに依存するので、言語処理に関連する脳波成分が効率的に抽出できるのではないかと考えられる。

方法

被験者 右手利きの日本語母語話者8名で、スペイン語は理解できない。

刺激と装置 日本語とスペイン語のニュースを加工して刺激を作成した。再生するとおよそ51秒であった。逆再生刺激を全体の時系列を逆転して生成した。変調には11次のm系列を用いた（0または1が2047個ならんだ擬似乱数）。これを、変調の基底周波数が40Hzになるよう1200倍に引き伸ばし、 2.4564×10^6 点とし、ニュース波形にかけ合わせてm系列変調刺激とした。図1に変調前後の波形を示した。実験では変調前の刺激（日本語順逆およびスペイン語順逆の4種類）と変調後の刺激（対応する4種類）それぞれ1種類、合計8種類の刺激を用いた。

手続き 被験者はヘッドホンを用いて刺激を両耳聴取した。被験者には、ニュースを注意し内容を理解するように聞くよう教示した。

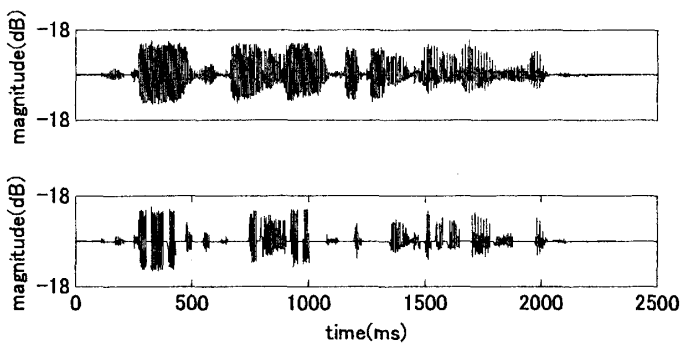


図1 m系列による音声の変調

記録 脳波は 600Hz の標本化周波数で記録した。参照電極は鼻尖とし、記録時に 1.59Hz から 100Hz の帯域通過フィルタを適用した。

解析 まず、脳波と変調m系列の循環相互相関をとり、循環相互相関関数を求めた。これは、脳波から変調m系列と同じパタ

ーンを持つ信号を抽出する手続きで、通常に加算平均に相当するものである。つぎに、循環相互相関関数の被験者間平均を求めた。これで、通常の総加算平均を求めたことになる。続いて、ノイズを除去し、談話理解に関係する最も代表的な情報処理成分の頭皮上分布（重み）を求めるために、独立成分分析を適用した（Cichocki, et al., 2004）。独立成分分析には AMUSE アルゴリズム（Tong et al., 1991）を $\delta t = 1$ で用いた。これは、暗号信号源分離フィルタ（Vorobyov & Cichocki, 2002）の適用とみなすことができる。得られた分離行列を相関関数に乗じて刺激ごとの成分応答関数を求めた。

結果

17 個の抽出成分のうち、空間的に単一ピークで、時系列で最初の 500 ミリ秒以内に誘発脳電位様の反転を持つものは一つだけであった。その成分について、日本語、スペイン語のそれぞれについて順再生と逆再生を比較した。この成分の空間分布は中心部および中心頭頂部優位となり（図 2）、遅延時間 400 ミリ秒で日本語順再生に特異的なピークを示した。

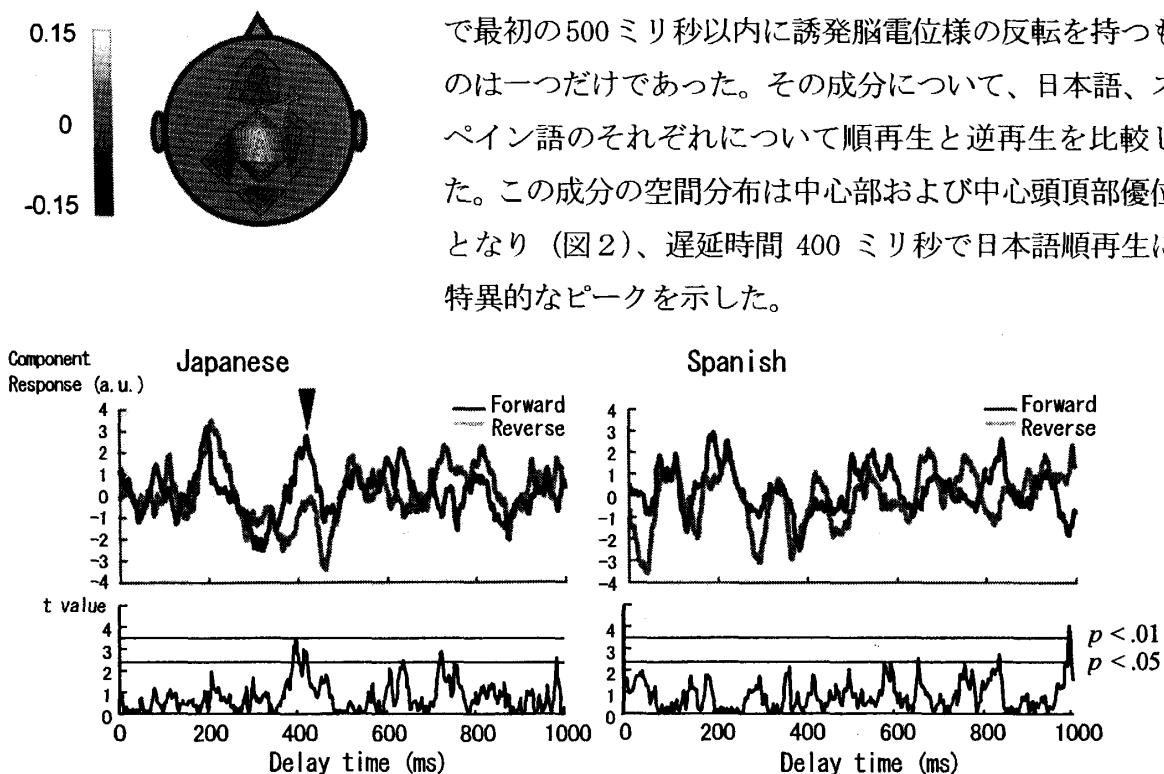


図2 談話理解関連成分の頭皮上分布および日本語・スペイン語刺激に対する応答 (N=8)

考察

中心と中心頭頂部に中心を持つ相関ピークは、理解できない日本語逆再生やスペイン語では認められず、理解可能な日本語順再生に限り認められた。頭皮上分布および潜時を考慮して、誘発脳電位成分 N400 に対応するのではないかと考えられる。N400 は、語彙や意味の記憶と注意に関連し、通常予期に反する視聴覚刺激に対して現れると報告されている (Kutas & Federmeier, 2000; Helenius et al., 2002; Sekiguchi et al., 2004; Matsumoto et al., 2005)。

しかし、m 系列にはシフト加算性とよばれる特徴があり、m 系列に位相をずらした m 系列を足し合わせると、また別の位相を持った m 系列になる。このため、循環相関関数のピークが、そのピークに対応する一つの誘発脳電位を反映しているのか、それともシフト加算性に基づく二つ以上の誘発脳電位の和を反映しているかに、現段階ではあいまい性が残る。また、この成分が通常みられる誘発脳電位に対応するのか、事象関連同期・非同期のような現象に対応するのかも明らかではない。

今後上記のような問題を解決してゆかなければならないとはいえ、m 系列変調法は、談話理解のような時間的に幅をもった過程に関連する脳波の記録解析法として有効であり、とくに短時間で記録できることから実用的であると考えられる。

謝辞 本報告の作成にあたって科学技術振興機構（社会技術研究開発センター）「脳科学と教育」タイプ I の助成を受けた。

References

- Cichocki, A., Amari, S., Siwek, K., Tanaka, T. et al., 2004, ICALAB Toolboxes, <http://www.bsp.brain.riken.jp/ICALAB>.
- Helenius, P., Salmelin, R., Service, E., Connolly, J.F., Leinonen, S., and Lyytinen, H., 2002, Cortical Activation during Spoken-Word Segmentation in Nonreading-Impaired and Dyslexic Adults, *Journal of Neuroscience*, **22**, 2936-2944.
- Kutas, M., Federmeier, K.D., 2000. Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, **4**, 463-470.
- Matani, A., Nishino, M., Naruse, Y., Hayakawa, T., Fujimaki, N., 2005. Phase response analysis for electroencephalogram of language priming. *Proceedings of the 5th International Workshop on Biosignal Interpretation* 131-133.
- Matsumoto, A., Iidaka, T., Haneda, K., Okada, T., Sadato, N., 2005. Linking semantic priming effect in functional MRI and event-related potentials. *Neuroimage*, **24**, 624-634.
- Sekiguchi, T., Koyama, S., Kakigi, R., 2004, The effect of phonological repetition on cortical magnetic responses evoked by visually presented words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **16**, 1250-1261.
- Sutter, E. E., 2001. Imaging visual function with the multifocal m-sequence technique. *Vision Research*, **41**, 1241-1255.
- Takeichi H, Koyama, S, Matani, A, Cichocki, A, 2006, Speech comprehension assessed by electroencephalography: A new method using m-sequence modulation, *Neuroscience Research*, in press.
- Tong, L., Liu, R.-W., Soon, V.C., Huang, Y.-F., 1991. Indeterminacy and identifiability of blind identification. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, **38**, 499-501.
- Vorobyov, S., Cichocki, A., 2002. Blind noise reduction for multisensory signals using ICA and subspace filtering, with application to EEG analysis. *Biological Cybernetics*, **86**, 293-303.