

論文の内容の要旨

論文題目 Temporal Decomposition of EEG into Stimulus- and Response-locked Components

刺激及び反応に時間同期した脳波信号の分離手法の開発

氏名 武田祐輔

我々は日常生活において、外界からの感覚情報に対して二種類の反応を起こしている。一つは、運動を伴った **Overt** な反応であり、例えば、信号が赤に変わったのを見て車のブレーキを踏む反応などがこれに相当する。もう一つは、運動を伴わない **Covert** (内的) な反応であり、例えば、雄大な景色を見て「素晴らしい」と思う反応などがこれに相当する。このような反応を起こす場合、脳には、感覚刺激に時間同期した活動 (**Stimulus-locked activity**) と反応に時間同期した活動 (**Response-locked activity**) が生じており、特に刺激から反応までの間隔が短い場合には、両活動は時間的に重なっていると考えられる。感覚刺激から反応までの脳活動を詳しく調べるには、両活動を分離して調べる必要があるが、そのための十分な解析手法はこれまで提案されてこなかった。

そこで本論文では、**Overt** または **Covert** な反応を伴う課題中にヒトの頭皮上から計測された脳波を刺激に時間同期した成分 (**Stimulus-locked component**) と反応に時間同期した成分 (**Response-locked component**) に時間的に分離する手法を開発することを目的とした (図1)。

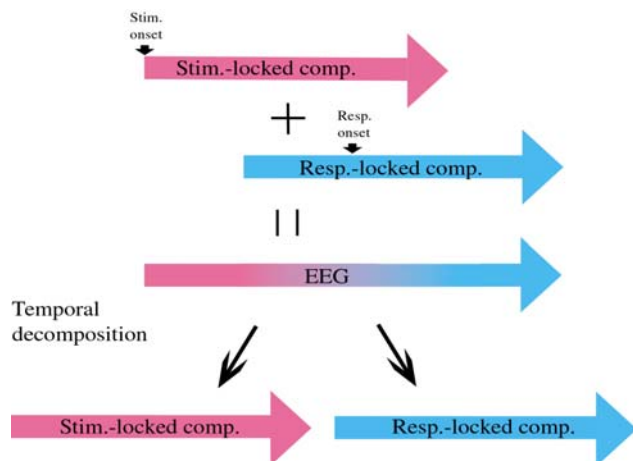


図1. Stimulus-locked component と Response-locked component の二成分が脳波には含まれている。本論文では、脳波を両成分に時間的に分離する手法の開発を目的とした。

(1) Overt な反応を伴う課題中の脳波の時間的分離

反応が Overt な場合、これまで、Stimulus-locked component を抽出するには刺激をトリガにした加算平均、Overt response-locked component を抽出するには反応をトリガにした加算平均が用いられてきた。

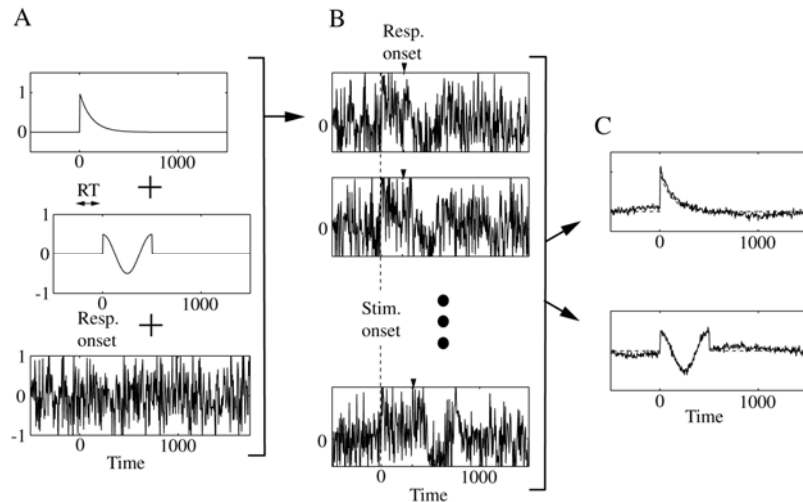


図2. 人工データを用いたシミュレーション。A: 元の Stimulus-locked component (上段)、Overt response-locked component (中段)、ノイズ (下段)。B: 人工的に作成された脳波。C: 開発した手法を用いて抽出された Stimulus-locked component (上段) と Overt response-locked component (下段)。

しかし、そうして得られた加算平均波形には両成分が混在しており、刺激または反応に関連した脳活動を純粋に反映しているとは言えない。

そこで本研究では、反応時間を用いて、単チャンネルの脳波をフーリエ領域で Stimulus-locked component と Overt response-locked component に分離する手法を開発した。この手法では、離散フーリエ変換によって時間シフトが位相シフトに変換されるという性質を利用することによって両成分を歪みなく分離している。開発した手法の妥当性は人工データを用いたシミュレーション結果より確認された (図2)。

開発した手法を単純反応時間課題中に国際 10-20 電極配置法 (図3) に従って記録された脳波に適用することにより、両成分が混在していない、純粋な Stimulus-locked component と Overt response-locked component が抽出された (図4)。

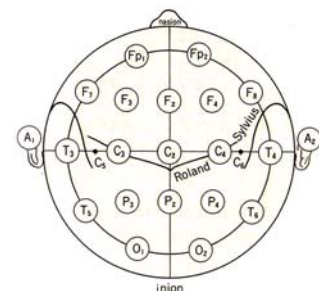


図3. 国際 10-20 電極配置法

抽出された成分を加算平均波形と比較した結果、刺激後 400ms 付近で Stimulus-locked component と加算平均波形は大きく異なっており (図4, A)、Overt response-locked

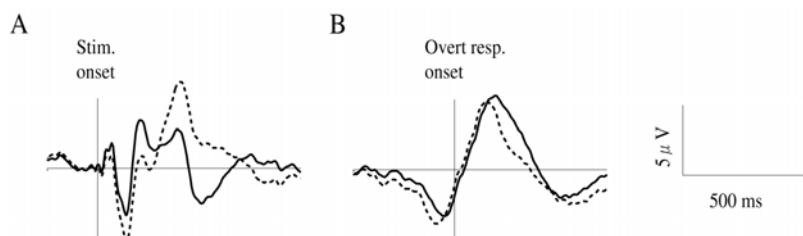


図4. 単純反応時間課題中の脳波 (Cz) から抽出された成分。A: 抽出された Stimulus-locked component (実線) と刺激をトリガにした加算平均波形 (点線)。B: 抽出された Overt response-locked component (実線) と反応をトリガにした加算平均波形 (点線)。

component が混入することによって、刺激をトリガにした加算平均波形の後半部分が大きく歪められていることがわかった。

開発した手法は、両成分が混入していない純粋な Stimulus-locked component と Overt response-locked component が得られる手法である。この手法を用いることによって、刺激や Overt な反応に関連した脳活動に関して、加算平均法を用いるよりも精確な知見が得られると考えられる。

(2) Covert な反応を伴う課題中の脳波の時間的分離

反応が Covert な場合、いつ反応が生じたのかが不明であるため Covert response-locked component を抽出することは困難であった。例えば景色を見て「素晴らしい」と思う場合、「素晴らしい」と思うことは完全にその人の頭の中だけで生じており、周りの人はいつその人が「素晴らしい」と思ったのか直接知ることはできない。そのため、いつの時点の脳波を調べれば「素晴らしい」と思ったことに関連した脳活動が調べられるのかが分からないのである。

そこで本研究では、単チャンネルの脳波から、刺激後 Covert な反応が生じるまでの各試行の遅れ時間を推定し、Stimulus-locked component と Covert response-locked component を抽出する手法を開発した。開発した手法では、まず、乱数を発生させそれを Covert な反応の各試行の遅れ時間とする。そして、その遅れ時間を使って、上記した方法を用いて脳波を Stimulus-locked component と Covert response-locked component に分離する。次に、抽出された成分を遅れ時間分だけずらして重ねることで脳波を再構成し、実際の脳波との二乗誤差を計算する。もし遅れ時間が真に近ければ、脳波は良く再現されるために、二乗誤差は小さくなるはずである。二乗誤差が小さくなるように遅れ時間を更新していくことによって、最終的には遅れ時間は真に近い値に収束する。そして、

Stimulus-locked component と Covert response-locked component も同時に抽出される。開発した手法の妥当性は人工データをを用いたシミュレーションによって確認された (図5)。

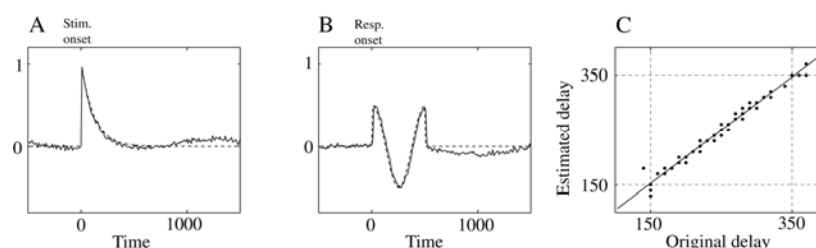


図5. 人工データを用いたシミュレーション結果。A: 元の Stimulus-locked component (点線) と抽出された Stimulus-locked component (実線)。B: 元の Covert response-locked component (点線) と抽出された Covert response-locked component (実線)。C: 元の遅れ時間と推定された遅れ時間の散布図。

この手法をボタン押しといった Overt な反応を伴わない Go/NoGo 課題の NoGo 試行中の脳波に適用した。適用の際、脳波の試行間分散の時系列を調べることで、Covert response-locked component が含まれていそうな電極を調べた。Covert response-locked component が生じている電極では、その遅れ時間が試行間で変動するために試行間分散は

刺激後上昇するはずである。C3, C4, Fz, Czにおいて試行間分散の上昇が見られたため(図6)、それらの電極の脳波に開発した手法を適用し Covert response-locked component を抽出した(図7)。

これまで Covert な反応に関連する脳活動を調べるには、被験者に Covert な反応の後にボタン押しなどの Overt な反応をしてもらい、Overt な反応のオンセットから間接的に Covert な反応のオンセットを推測していた。例えば、ネッカーキューブを見たときに起こる知覚交替時の脳活動を調べるには、ネッカーキューブの見えるに応じて被験者にボタン押しをしてもらっていた。しかしながら、

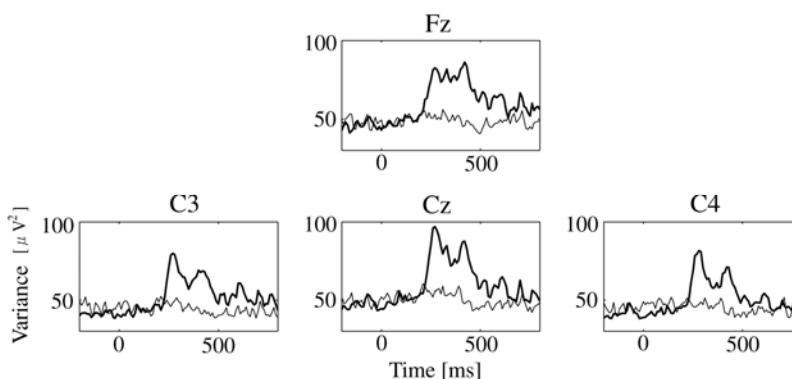


図6. NoGo課題中の脳波の試行間分散(太線)とNoGo課題と同じ視覚刺激を受動的に見る課題中の脳波の試行間分散(細線)。

一般に、Overt な反応のオンセットと Covert な反応のオンセットがどれだけ一致しているかは不明であり、さらに、そうして得られた脳波データには Covert な反応だけでなく Overt な反応に関連した脳活動の影響も混入していると考えられる。開発した手法は、判断や認知など人の頭の中だけで主観的に生じる Covert な反応がいつどのように起こったのかを脳波から直接調べられる手法である。この手法を様々な認知課題中の脳波に適用していくことによって、そうした脳の高次機能に関する重要な知見が今後得られていくと考えられる。

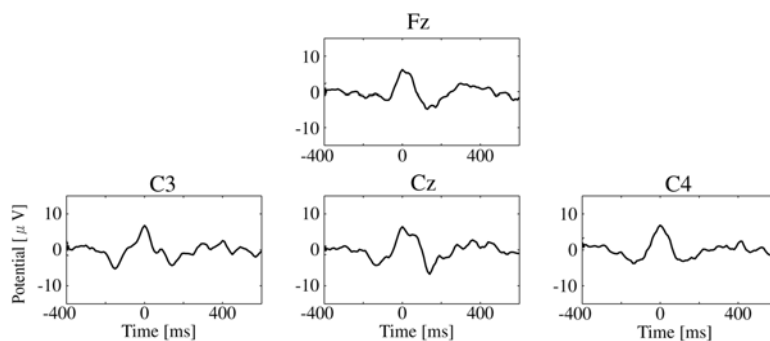


図7. NoGo 試行中の脳波から抽出された Covert response-locked component。横軸は正のピークに対する相対的な時間を表す。