

視覚入力の時間的分離の知覚学習とアルファ周波数の関係

宇野 究人
庭山 晃大
天野 薫

東京大学大学院情報理工学系研究科
東京大学工学部
東京大学大学院情報理工学系研究科

時間的に近接した二つの視覚入力を分離したり統合したりする課題の成績は、アルファ波（8–13 Hz の脳波律動）の周波数と関連することが知られている．具体的には、アルファ周波数の高低が、それぞれ分離/統合の成績向上と関連することが示唆されている．本研究では、視覚入力の時間分離のパフォーマンスを向上させる知覚学習が可能か、可能な場合には学習がアルファ律動（特に周波数）の変化を伴うか検討した．参加者は、二つの視覚刺激を時間的に分離することでターゲットが検出可能となるような視覚探索課題に 6 日間取り組んだ．その結果、参加者はより短い時間間隔で呈示された視覚刺激を分離できるようになった．しかし、トレーニングによるアルファ周波数の変化は見られなかった．この結果は、視覚の時間分離は知覚学習により向上する一方、学習がアルファ律動の変化とは異なる神経メカニズムで成立することを示唆している．

Keywords: Time perception, Perceptual learning, Alpha wave, EEG

問題・目的

時間的に近接した二つの視覚入力は、呈示間隔が短いほど統合して知覚され、呈示間隔が長いほど分離して知覚されやすくなる．こうした時間分離/統合処理の神経メカニズムとして、脳活動における 8–13 Hz の周期成分であるアルファ波の関与が示唆されている．具体的には、アルファ周波数が高いほど統合の時間窓が狭く（分離されやすくなる）ことや（for a review; VanRullen, 2016）、感覚引き込みによりアルファ周波数を高く/低くした場合に、分離/統合課題の成績がそれぞれ向上すること（Ronconi et al., 2018）などが報告されている．

以上の知見は視知覚における時間分離/統合の柔軟性を示唆するものと考えられる．しかし、視知覚の分離/統合処理が知覚学習により変容するかは明らかになっていない．そこで本研究では、視覚入力の時間分離のパフォーマンスを向上させることを目的とした学習課題を 4 日間実施し、学習前後の時間分離/統合課題の成績およびアルファ周波数の比較を行うことで、視覚の時間処理の変化とその神経メカニズムについて検討した．

方法

参加者 12 名の参加者が計 6 日間の実験に参加した（女性 2 名、男性 10 名、年齢：21–28 歳）．うち 1 名は計測上の問題により EEG データの分析対象から除外した．視聴覚間の時間分離の知覚学習に関する研究では一般に大きな効果量が報告されていることを踏まえ、サンプルサイズは効果量 $d_z = 1.0$ を $\alpha = .05$ 、 $1 - \beta = 0.8$ で検出できるよう設計した．

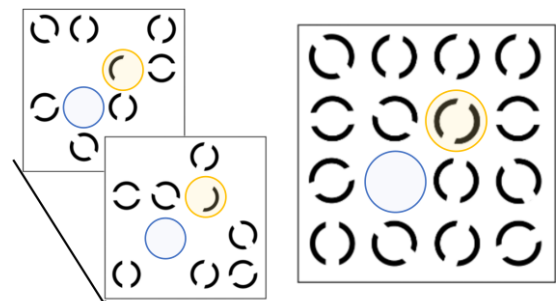
課題 時間分離/統合課題（Ronconi et al., 2018; Wutz et al., 2018）の模式図を Figure 1 に示す．参加者は連続して呈示される二つの探索画面を観察し（それ

ぞれの刺激の時間長は 11.8 ms）、各課題で設定されたターゲットの位置を回答した．

探索画面は 4×4 のマスから構成された．そのうち 7 マスには一つ目、別の 7 マスには二つ目の探索画面に円形の刺激が呈示された．

残りの 2 マスの一方には円形の刺激が半分ずつ、各探索画面で順番に呈示され、探索画面が時間的に分離されるとオッドボールとなるが統合されると他の 14 マスの刺激と区別できないようになっていた．分離課題ではこの刺激の位置を回答することが求められた．2 マスのもう一方には刺激が呈示されず、探索画面が統合されると空白位置が一意に定まるが分離されると特定できないようになっていた．統合課題ではこの空白位置を回答することが求められた．従って、同一の刺激設定を用いる中で探索対象を変更することにより、時間分離/統合に関する課題要求が操作された．

Figure 1. 時間分離/統合課題の模式図



Note: 右図は左図の二つの探索画面を重ねた（統合した）模式図である．黄/青はそれぞれ分離/統合課題のターゲット位置を示している（実際の探索画面には呈示されない）．

手続き 6 日間の実験の初日（事前テスト）と最終日（事後テスト）には、脳波計測を行いながら分離/統合課題の両方を実施した（各 256 試行）．各課題において、1-up/2-down の階段法を用いて二つの探索画

面の刺激間隔 (ISI: inter-stimulus interval) を試行ごとに操作し、正答率が 70.7% となる閾値を算出した。

2-5 日目には時間分離のトレーニングを行った。各日では脳波計測および統合課題は行わず、512 試行の分離課題のみを実施した。各試行では回答後に正誤のフィードバックが呈示された。参加者には、できるだけ正答率を上げること、正答率に応じて受け取ることのできる報酬額が変化することが伝えられた。

結果

行動データ 分離/統合課題の事前・事後テスト間での閾値の変化を Figure 2 に示す。分離課題では ISI の閾値が事後テストで有意に低下しており ($t(11) = 2.88, p = .015, d_z = 0.83$)、学習に伴う成績向上が確認された。一方で統合課題では事前・事後間で有意差は見られず ($t(11) = 1.88, p = .087, d_z = 0.54$)、分離成績の向上に伴う統合成績の低下は確認されなかった。なお、各課題で事前・事後テスト間の閾値の比率 (成績向上度合いに相当) を比較すると、分離課題の方が有意に大きな値を示した ($t(11) = 3.36, p = .006, d_z = 0.97$)。

次に、分離課題の 4 日間のトレーニング中の成績推移を調べた (Figure 3)。トレーニング日の主効果が有意であり ($F(3, 30) = 7.93, p < .001, \eta_p^2 = 0.44$)、多重比較を行うと、初日の ISI が他の日と比べて有意に高く、その他では有意差が見られなかった。この結果は、学習が 2 日目時点で成立したことを示唆している。

EEG データ 分離/統合課題のいずれについても、下処理を行った上で、各試行の刺激直前 (-0.5 - 0 s) と直後 (0 - 0.5 s) をエポックとして後頭の 3 電極 (O1, Oz, O2) のデータに対する周波数解析を行い、ピークアルファ周波数を算出した。そして、テストの日時 (事前/事後)・課題の種類 (分離/統合)・エポック (刺激直前/直後) を要因とする 3 要因反復測定分散分析を行ったところ (Figure 4)、課題の種類の主効果が有意であり、分離課題時の方が統合課題時よりもアルファ周波数が高いことが示された ($F(1, 10) = 15.53, p = .003, \eta_p^2 = 0.61$)。2 次の交互作用も有意であったが ($F(1, 10) = 5.17, p = .046, \eta_p^2 = 0.34$)、事後検定では有意な 1 次の交互作用が見られなかった。

考察

視覚入力的时间分離の学習が比較的短期間 (2 日程度) で成立する可能性が新たに示された。これは視覚的時間分離/統合処理の可塑性を示唆する結果であり、視聴覚間の時間分離/統合処理の知覚学習による変容 (例: Powers et al., 2009) とも対応するものである。一方で、分離成績の向上に伴う統合成績の低下が見られなかったことから、学習の汎化可能性について引き続き検討が必要である。

また、学習に伴うアルファ周波数の変化が観察されなかったことから、分離成績の向上の背景にアルファ周波数の変調とは異なる神経メカニズムが関与している可能性が示された。一方で、課題間でアルファ周波数が異なるという結果は、課題要求 (分離/統合) に

よってアルファ周波数が予測的に変調されるという先行研究 (Wutz et al., 2018; MEG を使用) の知見を EEG で裏付けるものであり、時間分離/統合処理とアルファ波の関連性を示唆している。時間知覚の学習の神経メカニズム解明にはさらなる検討が必要である。

引用文献

- Powers, A. R., Hillock, A. R., & Wallace, M. T. (2009). Perceptual training narrows the temporal window of multisensory binding. *J. Neurosci.*, 29, 12265–12274.
- Ronconi, L., Busch, N. A., & Melcher, D. (2018). Alpha-band sensory entrainment alters the duration of temporal windows in visual perception. *Sci. Rep.*, 8, 11810.
- VanRullen, R. (2016). Perceptual cycles. *Trends Cogn. Sci.*, 20(10), 723–735.
- Wutz, A., Melcher, D., & Samaha, J. (2018). Frequency modulation of neural oscillations according to visual task demands. *P. Natl. Acad. Sci. USA.*, 115, 1346–1351.

Figure 2. 分離/統合課題の事前・事後テスト間での閾値の変化

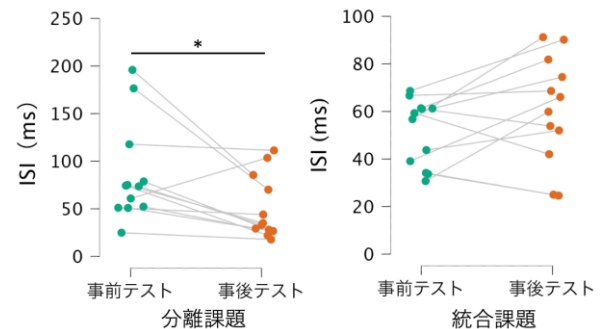


Figure 3. 分離課題のトレーニング中の閾値の変化

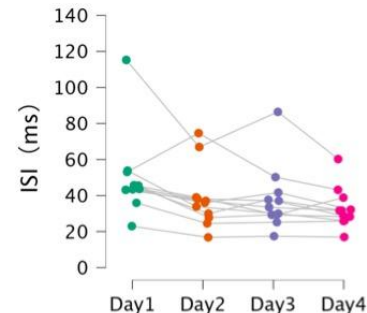
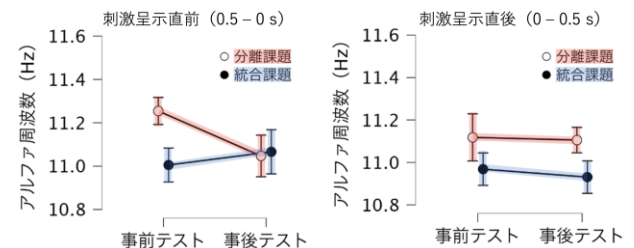


Figure 4. 課題中のピークアルファ周波数



Note: エラーバーは標準誤差を示す。