

効果器の違いが運動抑制に与える影響

土田 宣明

Effects of Differences in Effectors on Motor Inhibition

Noriaki Tsuchida

abstract

Differences in the rate of false responses when conducting response inhibition tasks using different effectors including hands and feet, as well as age-related changes were examined. Participants were young adults (N=26) and elderly (N=39) people. A location discrimination task was conducted using hands and feet. The results indicated effects of age, with the rate of false responses being higher in the elderly than in young adults, regardless of the effector. Moreover, effector based differences were significant in both young adults and the elderly, with the rate of false responses being higher when manipulating with hands. The above results suggest that the mechanisms of inhibiting motor responses using hands and feet might have high commonality regardless of age. Furthermore, differences in the sensorimotor region of the cerebral cortex controlling manipulations by hands and feet might have a significant effect on the rate of false responses.

本研究の目的は、手や足といった効果器によって、運動抑制の効率が異なるのか、そこには加齢変化が存在するのかどうかを検討することにある。日常生活の中で行われる。様々な機器類の操作は、手を使ったものとは限らない。典型的なものが自動車の運転であろう。ハンドルは手で操作されるが、アクセルやブレーキは足で操作する。自動車の運転場面では、手という効果器と足という効果器を用いて、操作していることになる。

近年、アクセルとブレーキの踏み間違い事故など、足での操作の失敗が重大事故を引き起こす問題が増加傾向にある。篠原・呉・木村・白石・田久保（2011）によると、ペダルの踏み間違い事故の問題とは、「意図しない加速（unintended acceleration; UA）」と呼ばれている。Pollard & Sussman（1989）では、UAを伴う事故（Sudden Acceleration Incidents; SAI）は「意図せず予期もしていない時の強い力での加速で、静止状態または非常に低速の初期速度から急に加速するものであって、ブレーキ効力の喪失を伴っているもの」と定義されている。さらに、高齢者の場合は、このペダルの踏み間違いが重篤な事故につながりやすいという特徴がある。死に至る率が高い事故として、大きな問題を引き起こしやすい。

この問題の興味深い点は、ペダル踏み間違い事故の年代別の発生率である。認知機能の低下が想定される高齢者群（70歳以上）で高いことは予想されることであるが、若年者でも高い発生率を示している（堀川, 2012）。要するに、踏み間違いそのものは、高齢者特有の事故とはいえ、若年群でも高い発生率で起こるのである。

人間の心理プロセスを3つの段階（情報の入力→判断→反応）で分けるとするならば、ペダルの踏み間違いは、複数の段階での「誤り」が想定される。例えば、第2段階目の「判断」ミスである。判断ミスは、免許取り立ての（操作に慣れていない）若年群や認知機能の低下が想定される高齢者群で高い発生率となることが予想される。しかし、若年群と高齢者群での大きな違い、とりわけ、重大事故につながるかどうかは、その後の第3段階である「反応」の段階に原因があるのではないだろうか。あるとするならば、足という効果器を用いた反応（特に誤反応）の特徴、加齢変化を検討する必要があるだろう。

このように、足を効果器とした反応の特徴を明らかにする必要があるにも関わらず、心理学の実験では、効果器として手が主流であり、パソコンのキーボードを反応キーとして用いることが多い。この理由の一つには、手が人間にとって最も巧緻性に優れた効果器であることが想定される。さらにもう一つの理由は、パソコンを用いた心理学実験の普及が背景にあるものと思われる。近年では実験用のソフトが開発され、様々な実験がキーボードを介して比較的簡単に実施できるようになった。

手と足の効果器の違いを分析した研究は多くはない。例えば、Nicoletti & Umiltà (1985) では、手と足を用いて、刺激-反応適合性課題を実施している。足で操作した場合、手の操作と比較すると全体的に反応時間が長くなることを明らかにしたが、誤反応率の違いについては分析されていない。Sparto, Fuhrman, Redfern, Jennings, Perera, Nebes, & Furman (2013) は、足のペダル操作を用いて、高齢者の抑制機能の問題を検討している。その結果、足の操作においても、高齢者の抑制機能の低下を確認している。また、Tabu, Mima, Aso, Takahashi, & Fukuyama (2012) は、手と足を用いた反応抑制課題時の脳活動を分析している。実験の結果、効果器の違いはあれ、活性化される部位に関しては、共通性が高いことを示している。

このように、足を効果器として用いた研究も少ないながら存在するが、同じ実験課題を用いて、手の操作と足の操作間の運動抑制の違いをみた加齢研究は、筆者の知る限り存在しない。そこで、本研究では、反応の効果器の違いが、運動抑制に影響する可能性があるのかないのか、あるとするならば加齢変化がみられるのかどうかを検討した。

方法

対象

26名の若年成人（男性10名、女性16名、Mean age: 20.8years、range: 18-25）と39名高齢者（男性31名、女性8名、Mean age: 71.9years、range: 66-83）。全員、慢性的な疾患を除き、健康な状態であった。高齢者はいずれも地域で自立して生活しており、MMSEの得点は平均28.1点（SD=1.39）で、全員24点以上であった。実験協力者には実験の前にインフォームドコンセントを実施した。

装置と手続

刺激の提示位置に合わせて、左右2箇所ある反応ボタンを押し分ける場所弁別課題を個別で行った。本研究で用いる場所弁別課題は、stimulus-response compatibility 課題 (SRC task: Fitts & Seeger, 1953; Hommel & Prinz, 1997) とも呼ばれている。このSRC課題は、別名 directional Stroop task と

も呼ばれている (Diamond, 2002) ように、反応の抑制機能をみる課題としても検討されてきた (Christ, White, Mandernach, & Keys, 2001)。

装置は反応ボタン、ディスプレイとパソコンから形成されている。反応ボタンは城南電器工業所製丸形スイッチを用意した。このスイッチは福祉機器として開発されものであり、手や足のいずれでも操作できるように設定されたものである (動作圧: 先端 250g、中央 750g)。刺激の提示は液晶ディスプレイ (I-O DATA 社製、19 型 LCD-AD195GB) を用い、実験の制御は全てパソコン (TOSHIBA 社製、dynabook SatteliteliteA50S 型) で行った。音刺激の提示はディスプレイの左右の loudspeaker から提示した。

はじめに注視点が視野の中心に提示され、その後注視点の左右 (注視点から視角として 10.7 度の位置) に赤色の丸 (直径 4.5cm) がランダムに提示された。注視点と被験者の間の距離は、約 50cm であった。刺激の左右への出現率は、それぞれ 50% とした。被験者は刺激が提示されたら、なるべく早く、正確に刺激が提示された側とは反対側の反応ボタンを押す (あるいは踏む) ように指示された。実験中は、左右の手 (足) をそれぞれの反応ボタンの上に軽く置くように指示した。刺激に対して反応ボタンが押され、1 試行が終了したら、特定の間隔を置いて、次の試行が開始された。前反応から次の刺激の提示間隔時間 (response stimulus interval: RSI) は、500ms, 1500ms, 2500ms の 3 種類がランダムに使用された。練習試行 8 試行後、本実験を行った。実験は 1 ブロック 16 試行で、2 ブロック連続して行った。ブロック間では約 5 秒間隔をあけた。

また、全ての試行を通して、約半数の試行に視覚刺激と同時に、刺激の提示位置とは無関連な音刺激を提示した。音刺激は Ficher, Plessow, & Kiesel (2010) を参考にして、スピーカーから 50cm の位置で約 70dB となるように 700Hz の tone を 150ms 提示した。音刺激は 1 ブロック 16 試行中、7 回、8 回、9 回のいずれかの回数で出現するように設定した。

上記の実験手続きを、効果器を変えて 2 回実施した。なお、効果器の実施順序については、カウンターバランスした。

データ分析

実験参加者毎に誤反応数と反応時間を測定した。誤反応数は、誤反応率として算出した。また、反応時間は各被験者の条件毎に、正反応の反応時間の中央値を算出した。ただし、100ms 以下の尚早反応と 2000ms 以上の遅延反応は除外した。誤反応率と反応時間は、条件ごとに年齢要因 (若年成人、高齢者)、効果器の違い (手、足)、音刺激の有無 (on, off) の 3 要因混合計画 (mixed analysis of variance) を用いて分析した。統計検定においては、5% の危険率を有意水準とした。効果の判定には、 η_p^2 を用いた。

結果

誤反応率の分析結果を Figure 1 に示した。高齢者では条件により、Mean 3.2% (SD=4.9) から Mean 6.6% (SD=6.7) まで変動した。若年成人は Mean 1.5% (SD=2.1) から Mean 3.9% (SD=5.4) まで変動した。統計検定の結果、年齢の主効果 ($F(1, 63)=6.43, p=.0137, \eta_p^2=.926$)、効果器の主効果 ($F(1, 63)=6.56, p=.0128, \eta_p^2=.944$)、音刺激の主効果 ($F(1, 63)=8.00, p=.0063, \eta_p^2=.1126$) が有意であった。

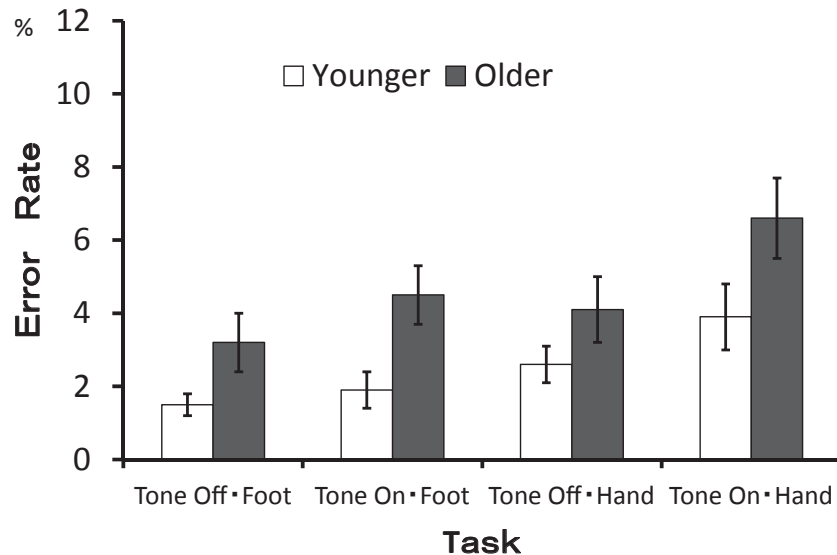


Figure 1 条件別の誤反応率（誤差項は標準誤差を示す）

Table 1 条件別の平均反応時間と標準偏差

		Younger		Older	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Foot	Tone off	400	37	528	101
	Tone on	377	36	512	81
Hand	Tone off	305	25	475	135
	Tone on	290	30	453	143

年齢と効果器間の交互作用 ($F(1, 63)=0.00, p=.998, \eta_p^2=.000$)、年齢と音刺激間の交互作用 ($F(1, 63)=1.096, p=.2992, \eta_p^2=.0171$)、効果器と音刺激間の交互作用 ($F(1, 63)=0.9498, p=.2992, \eta_p^2=.0171$) は有意ではなく、年齢、効果器、音刺激の3要因間の二次の交互作用も有意ではなかった ($F(1, 63)=0.0217, p=.8835, \eta_p^2=.0003$)。Cohen (1988)、Richardson (2011) の効果量の基準に基づいて、誤反応率に影響する要因の大きさを解釈すると、統計上有意差のみられた年齢、効果器、音刺激の主効果の影響はいずれも中程度であった。

条件別の平均反応時間は Table 1 に示した。高齢者では、条件により、Mean 453ms (SD=143) から Mean 528ms (SD=100) まで変動した。若年成人では、条件により Mean 290ms (SD=30) から Mean 400ms (SD=37) まで変動した。統計検定の結果、年齢の主効果 ($F(1, 63)=52.30, p=.0000, \eta_p^2=.4536$)、効果器の主効果 ($F(1, 63)=46.37, p=.0000, \eta_p^2=.4240$)、音刺激の主効果 ($F(1, 63)=39.53, p=.0000, \eta_p^2=.3855$) が有意であった。年齢と効果器間の交互作用 ($F(1, 63)=2.69, p=.1060, \eta_p^2=.0409$)、年齢と音刺激間の交互作用 ($F(1, 63)=0.0010, p=.9746, \eta_p^2=.0000$)、効果器と音刺激間の交互作用 ($F(1, 63)=0.083, p=.7739, \eta_p^2=.0013$) は有意ではなく、年齢、効果器、音刺激の3要因間の二次の交互作用も有意ではなかった ($F(1, 63)=1.18, p=.2823, \eta_p^2=.0183$)。Cohen (1988)、Richardson (2011) の効果量の基準に基づいて、反応時間に影響する要因の大きさを解釈すると、統計上有意差のみられた年齢、効果器、音刺激の主効果の影響はいずれも大きかったといえる。

考察

単純な場所弁別課題であったにも関わらず、高齢者と若年成人において、誤反応率に有意な差が確認された。左右の手（足）を使い、連続的にスイッチを押す課題において、高齢者は、若年成人と比較して、反応すべきでない側のスイッチに対して、反応してしまうエラーが多かった。

効果器の違いによる影響は、若年成人と高齢者で同じ傾向がみられた。若年成人、高齢者ともに、足による操作で誤反応率が低下した。巧緻性という面では、手の操作が優れているにも関わらず、単純な場所弁別課題においては、足による操作の方が誤反応率は少なく、その傾向に加齢効果はみられなかったといえる。

また、音刺激の効果も、若年成人と高齢者で同じ傾向がみられた。若年成人、高齢者ともに、音が提示されたときに誤反応率が高く、その傾向に加齢効果はみられなかったといえる。

それでは、なぜ効果器や音刺激の効果がみられたのであろうか。Luria (1961) は、一度運動を開始すると、神経興奮が拡大 (diffuse nervous excitation) することにより、運動を抑制することが困難になることを示した。今回の実験では、次々に、左右に提示される刺激に合わせて、左右のスイッチを押さなければならない。いうなれば、今回の課題は go/go task といえる。このような実験課題では、go/no-go task 以上に神経興奮が拡大しやすいことがまず予想される。

さらに、手を使い、スイッチを ON せねばならない条件では、その神経システムの興奮を助長した可能性が高い。Penfield & Jasper (1954) による感覚運動野の脳地図では、手が関連する領域は足の領域に比べ格段に広い (Figure 2 参照)。当然、手を使った条件ではこの領域全体を使って、運動をコントロールせねばならず、運動性神経興奮は、足の場合と比較して増大したものと思われる。

また、刺激が提示されたらボタンを押すというような単純な反応課題では、視覚聴覚と同時に音刺激を提示すると、反応を促進されるのが分かっている (Miller & Ulrich, 1999; Kiesel & Miller, 2007; Ficher, Plessow, & Kiesel, 2010)。視覚刺激と同時に音刺激を提示することで、同時に複数の感覚を刺激することから神経興奮を高めたことが推察される。

しかし、同様の実験条件を実施した Tsuchida, Morikawa, Yoshida and Okawa (2013) の実験結

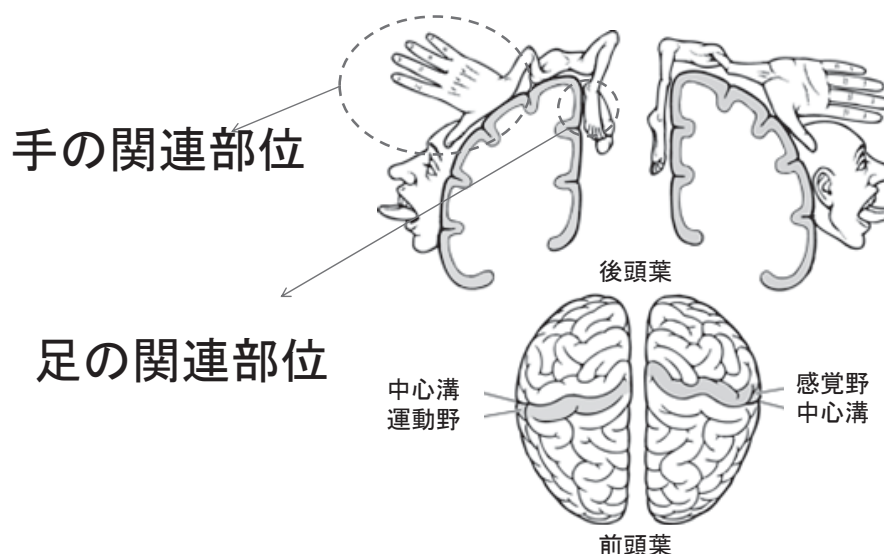


Figure 2 手と足の感覚運動野の違い

図は <http://charat.me/t/94631%E3%83%9B%E3%83%A0%E3%83%B...> より引用

果では、若年成人に関しては、有意な音刺激の影響がみられなかった。今回の結果は、その結果と矛盾するものとなった。違いを引き起こす要因としては、反応形態の違いがあるものと思われるが、今後の検討課題として残った。

さらに、若年成人と高齢者間で、効果器の影響に違いはみられなかった（年齢と効果器間に交互作用はみられなかった）。この要因の一つは、Tabu et al. (2012) の研究で明らかにしたように、反応を抑制するときには、どの効果器を使用しようとも、前頭前野の活動領域に差がみられなかったことに起因すると思われる。効果器の違いはあれ、運動を抑える中枢側のメカニズムとしては、共通するものが多かったようだ。ただし、前頭前野の機能の低下が顕著になる高齢者において、手を用いても、足を用いても、いずれにしろ誤反応率が上昇したものと推察された。

今後の課題

今回の実験結果から、足という効果器を使った場合でも、運動抑制に年齢差が顕著にみられることが確認された。その意味では、前述した、高齢者でみられるアクセルとブレーキの踏み間違い事故との関連が推察されるものとなった。

それでは、なぜ高齢者で事故が重篤化するのであろうか。高齢者の運転特性を実験的に検討した森田・関根・岡田・益子・大野 (2005) の研究によると、ペダルの操作において（事故発生時ではないが）、高齢者群は若年者群と比較して、踏み量（ペダル操作時の踏み込み量）の大きいことが示されている。この結果から、高齢者群では、ペダルの踏み違い後、さらにペダルを「強く踏み込む」傾向があることが推察される。誤ったペダルを踏んでしまい、意図しない操作が展開し始めたとき（運動性の神経興奮が高まったとき）、その行為を抑制すること（アクセルの踏み込みを抑えること）が高齢者で困難になっているように思われる。高齢者の事故の特徴を考える場合、判断後の、反応段階での特性をさらに多角的に分析する必要があるだろう（Figure 3 参照）。

また、情動が抑制機能を低下させるといわれている。例えば、Verbruggen, & De Houwer (2007) は、stop-signal 課題の遂行時に、情動刺激（特定の情動を喚起させる写真）を先行して提示することで、誤反応率が上昇することを示している。同様の実験を実施した Rebetz, Rochat, Billieux, Gay, & Van der Linden (2014) も、抑制機能の低下を確認している。アクセルとブレーキの踏み間違い時には、ある種の情動が喚起されることが予想される。足という効果器と、情動要因の交互作用についても今後検討していく必要性があろう。

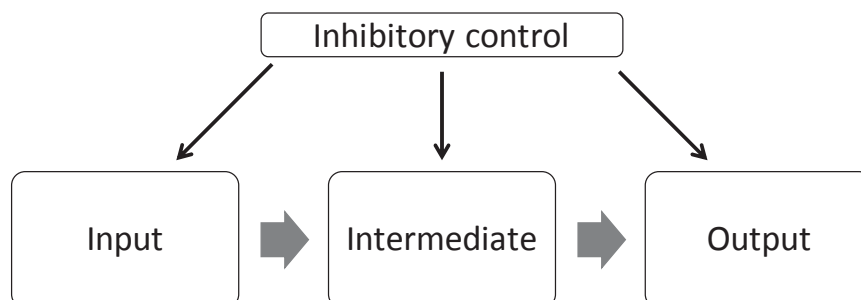


Figure 3 抑制機能の位置づけ ((Friedman & Miyake (2004) を基に一部改変して作図)

引用文献

- Christ, S. E., White, D. A., Mandernach, T., & Keys, B. A. (2001). Inhibitory control across the life span, *Developmental Neuropsychology*, 20, 653-669.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.)*, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Diamond, A. (2002). Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: cognitive functions, anatomy, biochemistry, In D. T. Stuss & R. T. Knight (Eds.) *Principles of frontal lobe function*. New York: Oxford Univer. Press. Pp.466-503.
- Fischer, R., Plessow, F., & Kiesel, A. (2009). Auditory warning signals affect mechanisms of response selection. *Experimental Psychology*, 57, 89-97.
- Fitts, P. M. & Seeger, C. M. 1953 S-R compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46, 199-210.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 101-135.
- Hommel, B. & Prinz, W. (1997). (Eds.) *Theoretical issues in stimulus-response compatibility*. Amsterdam: North-Holland
- 堀川悦夫 (2012). ドライブレコーダーを用いた健常及び認知機能低下高齢者の日常的運転行動の測定と分析 平成 24 年度タカタ財団助成研究論文 .
- Kiesel, A., & Miller, J. (2007). Impact of contingency manipulations on accessory stimulus effects. *Perception & Psychophysics*, 69, 1117-1125.
- Luria, A. R. (1961). *The role of speech in the regulation of normal and abnormal behavior*. New York: Pergamon Press.
- Miller, J. O., Franz, V., & Ulrich, R. (1999). Effects of auditory stimulus intensity on response force in simple, go/no-go, and choice RT tasks, *Perception & Psychophysics*, 61, 107-119.
- 森田和元・関根道昭・岡田竹雄・益子仁一 (2005). 高齢運転者の認知・操作特性に関する実験的検討 交通安全環境研究所研究発表会講演概要, 93-98.
- Nicoletti, R., & Umiltà, C. (1985). Responding with hand and foot: the right/left prevalence in spatial compatibility is still present. *Perception & Psychophysics*, 38, 211-216.
- Penfield, W. & Jasper, H. (1954). *Epilepsy and the functional anatomy of the human brain*. Boston: Little Brown and Company
- Pollard, J. & Sussman, E.D. (1989). An examination of sudden acceleration. NHTSA, DOT-HS-807-367
- Rebetez, M. M. L., Rochat, L., Billieux, J., Gay, P., & Van der Linden, M. (2014). Do emotional stimuli interfere with two distinct components of inhibition? *Cognition & Emotion*, 29, 559-567.
- Richardson, J. T. E. (2011). Eta squared and partial eta squared as measures of effect size in educational research. *Educational Research Review*, 6, 135-147.
- 篠原一光・呉景龍・木村貴彦・白石修士・田久保宣晃 (2011). アクセルとブレーキの踏み違いエラーの原因分析と心理学的・工学的対策の提案 国際交通安全学会 平成 22 年度 研究調査報告書 .
- Sparto, P. J., Fuhrman, S. I., Redfern, M. S., Jennings, J. R., Perera, S., Nebes, R. D., & Furman, J. M. (2013). Postural adjustment errors reveal deficits in inhibition during lateral step initiation in older adults. *Journal of Neurophysiology*, 109, 415-28.
- Tabu, H., Mima, T., Aso, T., Takahashi, R., & Fukuyama, H. (2012). Common inhibitory prefrontal activation during inhibition of hand and foot responses. *NeuroImage*, 59, 3373-3378.
- Tsuchida, N., Morikawa, S., Yoshida, H. & Okawa, I. (2013). Motor inhibition in aging: Impacts of response type and auditory stimulus. *Journal of Motor Behavior*, 45, 343-350.
- Verbruggen, F., & De Houwer, J. (2007). Do emotional stimuli interfere with response inhibition? Evidence from the stop signal paradigm. *Cognition & Emotion*, 21, 391-403.

(本学文学部教授)