

運動抑制からみた加齢効果

土 田 宣 明

Motor Inhibition in Aging

Noriaki Tsuchida

Abstract

Significance of aging effects on inhibitory functions is introduced from the perspective of motor control. First, the meaning of the inhibitory function in psychology is discussed and past findings in neurosciences related to this issue are examined. Next, concrete examples of research are presented. Finally, the assumed effects of aging on daily life are considered. The effects of inhibitory functions on cognitive tasks, such as attention, memory, and thinking have been analyzed from diverse perspectives. A decline in inhibitory functions in elderly people is one hypothesis explaining changes in cognitive functions associated with aging. However, motor control after decision-making has not been sufficiently investigated to date. It is suggested that future studies collect data on inhibitory functions of elderly people, especially focusing on motor inhibition. It is expected that such data would help identify aging effects on operating equipment, such as driving.

本稿の目的は、抑制機能の加齢効果の問題を運動コントロールの側面からみることの意義を紹介することにある。この目的のもと、心理学における抑制機能の位置づけを説明した上で、神経科学分野からの知見を紹介する。さらに、具体的な実験成果を紹介した上で、想定される日常生活場面での影響について検討したい¹⁾。

1. 抑制機能の位置づけ

抑制機能の問題は、様々な側面に影響している（図1参照）。人間の心理プロセスを大きく3つに分けると、そのいずれにも抑制の問題が関わっていることが推察できる（Friedman & Miyake, 2004）。例えば、知覚（perception）の段階では、意図や目的に合わない刺激へ注意が向いてしまうことを抑えるような抑制機能が想定できよう。判断（decision making）の段階では、不要なことを考えないようにするような思考抑制の問題、また不要な表象が記憶容量に入り込まないようにするという作業記憶の問題などが想定できる。そして、反応（response）の段階においても、抑制の問題が想定できる。

反応段階での抑制（運動抑制）は、日常生活とも密接に関連している。たとえば、様々な機器類の

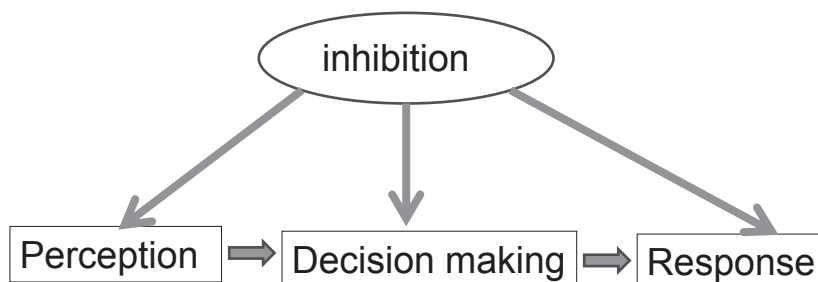


図1 心理プロセスの各段階における抑制機能の位置づけ

操作場面でのエラーである。何をすべきか分かっていながら、意図せずに、異なる操作をしてしまう、運動抑制の失敗 (Reason, 1992; Potter & Greal, 2008) といえる。これは日常生活においても、たいへん大きな意味をもつ。高齢者の日常生活をサポートする上でも、高齢者の運動抑制の特徴を理解することは重要であるはずだ (詳細は後述)。

しかし、反応段階での抑制機能の問題は、他の二つの段階で働く抑制と比べると、研究の蓄積が少ない。高齢者の抑制機能の低下は、加齢に伴う認知機能の変化を説明する仮説の一つとして、重要視されてきた (Hasher & Zacks, 1988) のは事実である。確かに、注意・記憶・思考などの認知面で、抑制機能の低下が高齢者の認知機能の低下にどのように影響するか、多角的に分析されてきた。このような認知面と比較すると、意思決定後の反応段階での運動抑制に関しては、研究は少ない。生活上の問題を考える上で重要な要因となりうる運動抑制の問題に関する研究の蓄積が少ないのはなぜであろうか。

Rosenbaum (2005) は、運動抑制の問題を含んだ運動コントロールの問題が人間の心理や行動を見る中で無視されてきた理由を、3つの仮説として述べている。第一の仮説は、“The Think-Before-You-Act Hypothesis”である。ヒトは反応する前には、必ず考えているはずであり、認知心理学の中心となる問題は、ヒトはいかに外界を認知し・判断するかという点にあったという仮説である。人は、いかに反応するかということは問題の中心にならなかったのである。第二の仮説は、“The Baby-With-the-Bathwater Hypothesis”である。この基になる諺に“Throw away the baby with bathwater”がある。直訳すると、「(使い終わった) バスタブの水を捨てようとして、(大事な) 赤ん坊も一緒に捨ててしまった」となる。行動主義心理学から、心理学の主流が変化するときに、大事な「行動」や「運動」の問題も捨て去ってしまったとするものである。第三の仮説は、“The Neuroscientist- Have-It-Covered Hypothesis”である。運動コントロールの問題は、神経科学者が検討すればいいと考えるものである。Rosenbaum (2005) は1986年から2004年に発表された論文にのうち、“motor”がキーワードに含まれる論文を検索している。その結果、社会科学の領域では、“motor”関連の論文は、“attention”をキーワードに含む論文と比較して、約1/3程度の発表件数であるのに対して、逆に“Brain”や“Neuro”という言葉が名前につくジャーナルでは、約3倍の数の論文が発表されていることを示している。

このように、運動コントロールの問題は心理学の領域ではあまり重要視されてこなかった経緯が推察できる。

2. 神経科学分野からの知見

それでは、神経科学の分野を中心して、運動コントロールの加齢効果に関しては、どのようなことが分かっている（あるいは推察される）のであろうか。要点は2点あるように思われる。一点は、神経興奮の拡散に関する問題であり、もう一点は一次運動野の相互抑制の問題である。それぞれについて、少し詳しく検討してみたい。

課題遂行中の脳の活性化パターンをみた研究では、高齢者で神経興奮が拡散しやすいことを明らかにしている (Nielson, Langenecker & Garavan, 2002; Heuninckx, Wenderoth, Debaere, Peeters, & Swinnen, 2005)。たとえば、Heuninckx et al., (2005) は、高齢者では若年者と比較して、運動課題遂行中に、付加的に活性化 (additional activation) する部位があることを確認している。また、若年成人では、反応抑制時、右前頭前野の活性化が強くみられるのに対して、高齢者では、両側の前頭前野や頭頂部にまで活性化が拡がることが示されている (Cabeza, 2002; Nielson, Langenecker, & Garavan, 2002)。高齢者にみられるこの付加的な活性化は、機能の低下を補償する (compensation) 結果であるとも考えられる (Cabeza, Grady, Nyberg, McIntosh, Tulving, & Kapur, 1997; Hutchinson, Kobayashi, Horkan, Pascual-Leone, Alexander & Schlaug, 2002)。一方で、この拡散は機能が脱分化 (dedifferentiation) したことを示すという仮説もある (Cabeza, 2002)。いずれにしろ、高齢者における神経興奮の拡散が運動コントロールへ何らかの影響を与えることが予想される。

Pfaffenberger (1912) は、刺激に対する手の運動操作課題を用いて、大脳半球における視覚経路と運動経路の結びつきを多角的に分析した。この研究の中で、2つの大脳半球にある一次運動野 (primary motor areas) は脳梁 (corpus callosum) を介して密接な結びつきがあることを示した。この先駆的な研究の流れの中で、さらに、Grillner (1981) は、一次運動野は脳梁を介して、左右の大脳半球間 (左右の手) で抑制的に機能していることが示した。例えば、左右の手を使って何かを操作するとき、一方の手 (例えば、右手) の活動時に他方の手 (左手) の活動は抑制されている。脳損傷などで、一方の大脳半球の機能が低下したときに、障害された側の大脳半球から、一方の側への抑制が弱くなることが知られている (Kobayashi, Hutchinson, Theoret, Schlaug, & Pascual-Leone, 2004; Ward, Leonardo, & Cohen, 2004)。このように、運動コントロールの問題を検討するときには、左右の大脳半球間での相互抑制が影響すると推察される。加齢に伴い、一次運動野の相互抑制が全体的に弱くなると仮定すると、その影響が高齢者の運動抑制にもみられるものと思われる。たとえば、左右の手を用いて、連続的にスイッチを操作する運動課題において、本来活性化すべき (押すべき) ではない側の運動の抑制が、高齢者でより困難になることが予想される。

以上の2点のポイントとまとめたものが図2である。この図に示したように、特定の課題を実施しているときには、高齢者では、大脳半球の反対側の活動量も増加する傾向がある。高齢者で、両側の活動量が増加するならば、左右のスイッチを押し分けるような単純な課題でも、高齢者では反対側に反応してしまうエラーの増加が予想される。さらに、大脳皮質の活動部位を大きく使わなければならぬ運動でその傾向が顕著になることが予想される。

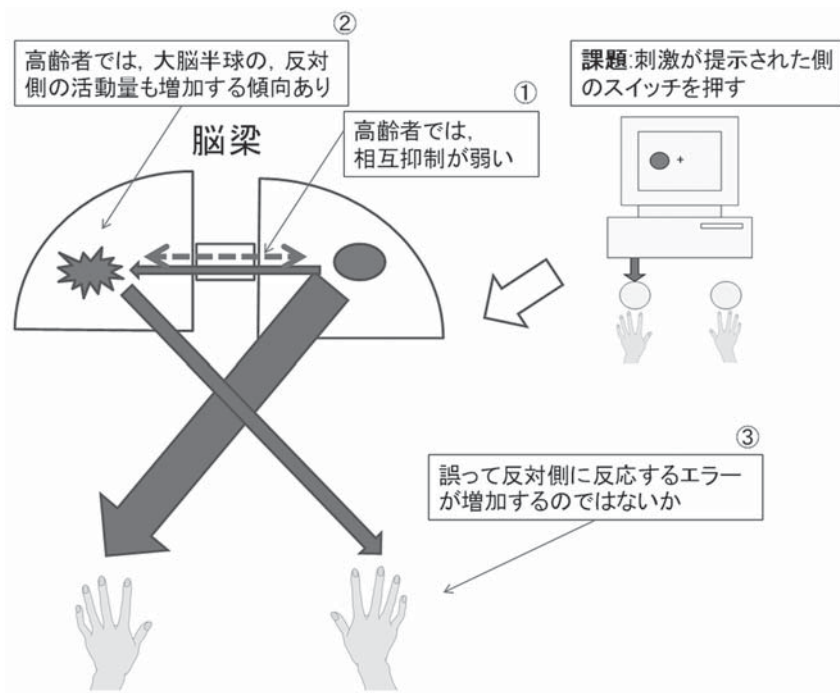


図2 実験の模式図と仮説の概要

3. 心理学分野の実験紹介

以上の、神経科学分野での知見に基づいて行った、Tsuchida, Morikawa, Yoshida and Okawa (2013) の実験結果を紹介し、さらにこの知見と関連する他の実験研究についても紹介したい。

Tsuchida et al., (2013) では、左右のスイッチを、短い時間的間隔で連続的に作動させる課題 (continuous responding task) において、高齢者では、①誤って反対側に反応するエラーが増加するのではないか。②大脳皮質の活動部位を大きく使わなければならない運動でその傾向が顕著になるのではないかという仮説を検討した。実験には、図3に示すような2種類のスイッチを用いた。これらのスイッチは同じ機能を果たすが、グラスプスイッチでは掌全体でスイッチを把握する必要があり、マイクロスイッチは人差し指を動かすだけでスイッチがONとなる。

実験手続きはいたってシンプルである。刺激の提示位置に合わせて、左右2箇所ある反応スイッチを押し分ける場所弁別課題を若年者と高齢者を対象として個別で実施した。なお、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。これは反応タイプの違いによる運動性の神経興奮と聴覚性の神経興奮との違いを比較するためである。



図3 反応タイプの違い

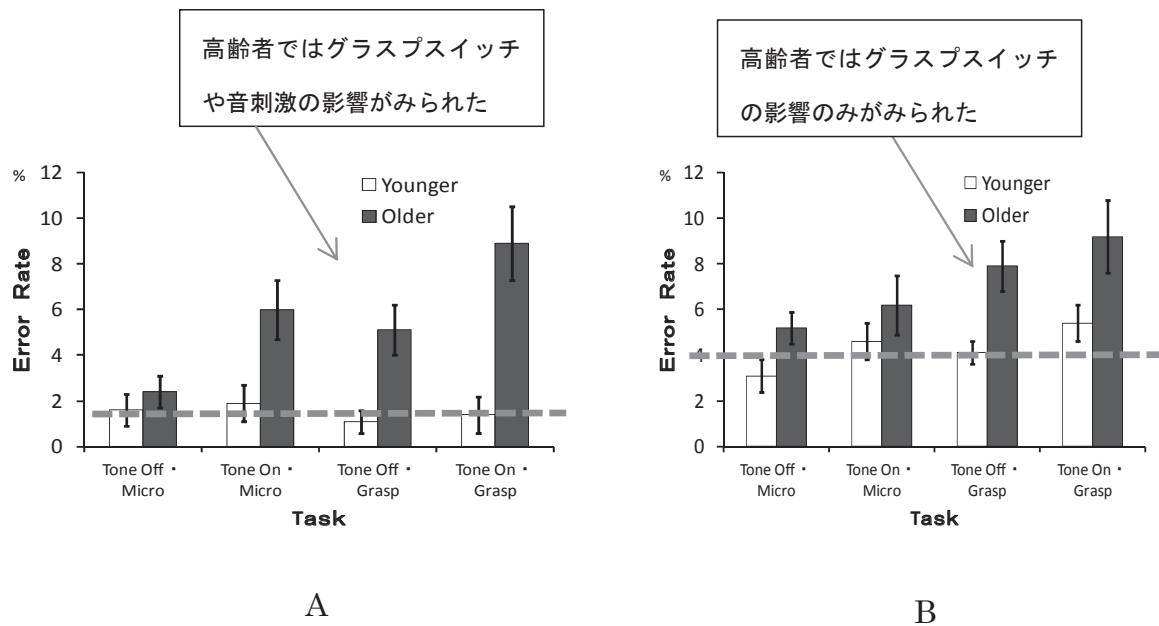


図4 実験結果 (Aは刺激と反応の適合条件、Bは非適合条件)

Tsuchida, Morikawa, Yoshida, & Okawa (2013) を一部改変して引用

実験の結果を示したものが図4である。高齢者では、グラスプスイッチ（大脳皮質の活動部位が大きい）や音刺激を提示したときに誤って、指示された側とは異なるサイドのスイッチを押してしまうエラーが増加している（左のA条件は、視覚刺激が出たサイドのスイッチを押すという教示）。さらに刺激-反応の適合性を変えて実験を行ったものが図4のB条件である。視覚刺激が右に出たら、左側のスイッチを、左に出たら右側のスイッチを押す条件であった。実験の結果、B条件ではA条件と比較して、若年群でも高齢者群でも、全体的にエラー数は増加しているが、高齢者でのみ、反応タイプの影響が頑健に残った。このように、高齢者では反応タイプの違いがエラーの出現率に影響しており、高齢者にとって、運動性の神経興奮が運動抑制に強く影響する可能性が示唆された。

それでは、運動性の神経興奮が抑制機能に影響したと考えられるような知見は他にあるのだろうか。2つの研究が、この知見に密接に関連しているものと思われる。一つは、Kubo-Kawai & Kawai (2010) の研究である。この実験的研究では、高齢者と若年者を対象として、Standard Simon task と Go/no-go Simon task を実施している。Simon task では、たとえば、色の弁別課題を実施するとき、刺激が提示される位置と反応スイッチの位置関係が重要になる (Simon, 1969)。刺激を出す位置（たとえば注視点の右側に刺激が提示される）と、色に対応する反応スイッチの位置関係が異なる場合（左側のスイッチを押さねばならない時）、位置関係が一致する場合（刺激が右に提示され、対応するスイッチが右にある場合）と比較して、誤ってスイッチを押す率や反応時間が遅くなるような効果 (Simon effect) がみられる。このような課題を実施した結果、同じ Simon Task でありながら、Go/no-go 課題と組み合わせた Simon task で、加齢効果が減少した。Go/no-go task Simon task は、Standard Simon task と比較すると、スイッチを押す頻度が少なくなる (no-go 条件のとき)。要するに運動の神経興奮が起きにくい条件であったといえる。このような条件では、高齢者で Simon effect が減少した (反応抑制が機能しやすかった)。逆にいうと、運動の神経興奮が起きやすい条件では Simon effect が増加し、加齢効果がより顕著にみられたことになる。

もう一つは Kawai, Kubo-kawai, Kubo, Terazawa, & Masataka (2012) の研究である。この実験

研究では、高齢者と若年者を対象として、Flanker task と前述の Simon Task を実施した。Flanker task とは、実験参加者に文字列を呈示し、その中央に呈示される文字に対して選択反応をさせる課題である (Eriksen & Eriksen, 1974)。たとえば、アルファベットの H か K が呈示されたときには一方のキーを、S か C が呈示されたときにはもう一方のキーを押すよう求めたとする。このときの反応時間は、反応刺激の左右に同じ反応に対応した文字が呈示されたとき (例えば、KKKHKKK: 反応一致条件) に比べて、異なる反応に対応した文字が呈示されたとき (例えば、SSSHSSS: 反応不一致条件) に長くなった。この効果は Flanker effect と呼ばれる。もし中央の文字だけに焦点的に注意を向けることができれば、周辺にどのような文字が呈示されても反応時間に変化はないはずである (金子・熊田・福永, 2011)。図 1 でいうならば、知覚段階での抑制機能をみる課題といえよう。

実験の結果、Flanker effect に関しては、若年群と高齢者群に差がみられなかったが、Simon effect の差が顕著になった。反応レベルでの抑制が必要となる Simon 課題での抑制が高齢者群でより困難になったことを意味している。Friedman & Miyake (2004) では、Flanker task を外部からの不必要な情報が紛れこまないようにする抑制をみる課題の一つとし、反応段階の抑制をみる課題とは明確に区別している。そして、Kawai et al., (2012) の研究では、反応段階での抑制をみた課題でのみ加齢効果がみられたことになる。

このように反応段階の抑制に関する加齢効果の研究では、知覚や判断段階での抑制をみた研究と比較して、研究例は少ないものの、より大きな加齢効果が確認されているといえる²⁾。運動性の神経興奮の要因が加齢効果をみるときの重要な変数となる可能性が示唆される。

また、高齢者の、大脳半球間での相互抑制機能の弱さは、高齢者の復帰抑制 (inhibition of return) の問題とも関連するかもしれない。復帰抑制とは、直前に注意を向けたり、反応した側の位置に、続いてターゲットが現れると、それへの反応時間が、その他の位置にターゲットが出た場合比べて遅くなる現象をいう (Klein, 1988)。反応がもとに戻ることを抑える機能が働いていると考えられてきた。近年の研究 (Poliakoff, Coward, Lowe, & O'boyle, 2007; Tsuchida, 2005) から、高齢者で復帰抑制が増大することが示されている。基本的に抑制機能が低下する高齢者においては、復帰抑制の増大は例外的なものと考えられてきた。しかし、今回の結果から考えられことは、高齢者で相互抑制の機能が低下することにより、反対側の反応が促進された可能性である。その結果、見かけ上、同側への反応が遅れる復帰抑制がより強くみられた可能性がある。この点については今後の検討課題であろう。

4. 日常生活場面での影響

高齢者にみられる運動性の神経興奮の問題はどのように日常生活場面に影響するであろうか。想定される大きな問題は、交通事故の中の、アクセルとブレーキの踏み間違い (ペダルの踏み間違い) 事故への影響であろう。篠原・呉・木村・白石・田久保 (2011) の研究に基づき、この問題の現状をまず説明したい。

篠原ら (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(篠原ら, 2011)。さらに、高齢者の場合は、このペダルの踏み間違いが特に重篤な事故につながりやすい(対人事故)特徴があるようである。死に至る率が高い事故として、重篤な問題を引き起こしやすい事故といえる。

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。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ず、若年群でも高い発生率で起こるのである。

それでは、なぜ高齢者において、ペダルの踏み間違いが重篤な事故につながりやすいのであろうか。仮説の域を出るものではないが、様々な要因がある中で、運動性の神経興奮の問題があるように思われる。図1に示した人間の心理プロセスを3つの段階で分けるとするならば、ペダルの踏み間違いは、第2段階目の判断の段階で発生する。その意味で、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を示しているのであろう。しかし、若年群と高齢者群での大きな違いは、その後の第3段階である反応の段階にあるように思われる。

高齢者群では、ペダルの踏み間違い後(誤判断の後)、さらにペダルを「強く踏み込む」傾向があるのではないだろうか。誤ったペダルを踏んでしまって、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。たとえば、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。

この例から考えられることをまとめると、高齢者の運動抑制の問題を、検討する必要性が示されている。高齢者の交通事故の発生原因を検討する上で、これまでは情報のとらえ方や、その後の判断の問題に注目が集まっていた。確かに、これらの段階での問題は、高齢者が事故を引き起こす大きな要因となることは間違いのないであろう。しかし、高齢者の事故の特徴を考える場合、判断後の、反応段階での特性も検討する必要があるように思われてならない。

5. まとめ

高齢者の抑制機能の低下は、加齢に伴う認知機能の変化を説明する仮説の一つとして、重要視されてきた(Hasher & Zacks, 1988)。注意・記憶・思考などの認知面で、抑制機能の低下がどのように影響するか、多角的に分析されてきたといえる。しかし、意思決定後の反応段階での抑制に関しては、研究の蓄積は少ない。運動コントロール(motor control)、特に運動抑制に注目して、高齢者の抑制機能に関する知見を収集する必要があるであろう。基礎的なデータを収集することを通して、自動車運転に代表される機器類の操作等への加齢の影響が明らかになるものと思われる。そして反応段階での抑制機能の加齢効果を検討することは、高齢者(MCI状態の高齢者を含む)の日常生活をサポートする上で、重要な基礎資料になるのではないだろうか。

注

- 1) 本稿は、2014年3月に行われた第25回日本発達心理学会ラウンドテーブル「抑制機能の生涯発達的变化を探る」で話題提供として発表した内容を中心としてまとめ直したものである。
- 2) 実験協力者として大学生を対象としたFriedman & Miyake (2004)の研究では、反応段階の抑制と、知覚・判断段階での抑制は、潜在的に同じ因子からの影響を受けている可能性を示唆している。大学生段階では、高齢者と比較すると、運動抑制の問題は顕在化しにくいといえるだろう。

引用文献

- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17, 85-100.
- Cabeza, R., Grady, C.L., Nyberg, L., McIntosh, A. R., Tulving, E., & Kapur, S. (1997). Age-related differences in neural activity during memory encoding and retrieval: A positron emission tomography study. *Journal of Neuroscience*, 17, 391-400.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception and Psychophysics*, 16, 143-149.
- 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.
- Grillner, S. (1981). Control of locomotion in bipeds, tetrapods, and fish. In V. B. Brooks (Ed.) *Hand of Physiology Set 1 Vol. II : Motor control*. Pp.1179-1236.
- Hasher, L., & Zacks, R. (1988). Working memory, comprehension, and aging : A review and a new review. In G. Brown (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp.193-325). San Diego, CA: Academic Press.
- Heuninckx, S., Wenderoth, N., Debaere F., Peeters, R., & Swinnen, S. P. (2005). Neural basis of aging: the penetration of cognition into action control. *The Journal of Neuroscience*, 25, 6787-6796.
- Hutchinson, S., Kobayashi, M., Horkan, C. M., Pascual-Leone, A., Alexander, M. P. & Schlaug, G. (2002). Age-related differences in movement representation. *NeuroImage*, 17, 1720-1728.
- Kawai, N., Kubo-Kawai, N., Kubo, K., Terazawa, T., & Masataka, N. (2012). Distinct aging effects for two types of inhibition in older adults: a near-infrared spectroscopy study on the Simon task and the flanker task. *Neuroreport*, 23, 819-824.
- Klein, R. (1988). Inhibitory tagging system facilitates visual search. *Nature*, 334, 430 - 431.
- Kobayashi, M., Hutchinson, S., Theoret, H., Schlaug, G., & Pascual-Leone, A. (2004). Repetitive TMS of the motor cortex improves ipsilateral sequential simple finger movements. *Neurology*, 62, 91-98.
- Kubo-Kawai, N., & Kawai, N. (2010). Elimination of the enhanced Simon effect for older adults in a three-choice situation: ageing and the Simon effect in a go/no-go Simon task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63, 452-64.
- 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.
- Nielson, K. A., Langenecker, S. A., & Garavan, H. P. (2002). Differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control across the adult life span. *Psychology and Aging*, 17, 56-71.
- Pfaffenberger, A. T. (1912). Reaction time to retinal stimulation with special reference to the time lost in conduction through nerve centers. *Archives of psychology*, 23, 1-73.
- Pollard, J. and Sussman, E.D. (1989). An examination of sudden acceleration. NHTSA, DOT-HS-807-367.
- Poliakoff, E., Coward, R. S. Lowe, C., & O'Boyle, D. J. (2007). The effect of age on inhibition of return is independent of non-ocular response inhibition. *Neuropsychology*, 45, 387-396.
- Rosenbaum, D. A. (2005). The neglect of motor control in the science of mental life and behavior. *American Psychologist*, 60, 308-317.
- 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.

Simon, J. R. (1969). Reactions towards the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 174-176.

Tsuchida, N. (2005). Inhibition of return using location discrimination in two age groups. *Perceptual and Motor skills*, 100, 554-558.

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.

Ward, N. S., & Cohen, L.G. (2004). Mechanisms underlying recovery of motor function after stroke. *Archives of Neurology*, 61, 1844-1848.

(本学文学部教授)