

熟慮性 衝動性とエラー関連陰性電位

鈴木 浩太^{*1, 2}・篠田 晴男^{*3}

Reflectiveness-impulsiveness and Error-related Negativity

SUZUKI Kota and SHINODA Haruo

Abstract

Reflectiveness-impulsiveness was defined according to a speed-accuracy tradeoff. First, we reviewed studies that show the varieties of impulsiveness and clarified the difference between reflectiveness-impulsiveness and other aspect of impulsiveness. Next, the speed-accuracy tradeoff was discussed based on recent studies due to error processing. The studies suggest that the function with regard to the error (related) negativity (ERN/Ne) is assumed to be associated with reflectiveness-impulsiveness. Finally, we indicated some limitations; (1) ambiguity about functional significance of ERN/Ne, (2) the varieties of impulsiveness among or within psychiatric disorders, (3) the possibility that the different mechanism relate to reflectiveness-impulsiveness.

[Keywords] Reflectiveness-impulsiveness, Speed-accuracy tradeoff, Error-related negativity, Anterior cingulate cortex

1. はじめに

「衝動買い」や「衝動食い」などの「衝動性」に関する行動は、誰もが経験していることだろう。また衝動性は、物質乱用、注意欠如多動性障害 (Attention-Deficit Hyperactivity Disorder: ADHD)、躁病などの精神疾患群の主症状として扱われる一方で (Moeller et al., 2001)、健常者の性格特性の一つとしても研究が行われてきた (e. g., Eysenck, 1993)。このように幅広い領域で重要な要因として扱われることから推測されるように、衝動性は多様な概念を含むため、単一構造として研究を行うことに限界がある (Evenden, 1999)。したがって、衝動性を研究するためには、明確な定義がなされた衝動性を扱わなければならない。そこで、本稿では、Kagan (1966) が定義した衝動性に着目し、特に、生理心理学的知見を基にした誤反応処理の研究から、衝動性のメカニズムを検討する。まず、多様な衝動性の概念について概観し、本稿で扱う衝動性の特徴を明らかにした後に、誤反応処理に関する生理心理学的研究を紹介し、衝動性と誤反応処理の関係を考察する。

2. 衝動性

2.1 熟慮性 - 衝動性

Kagan (1966) は、選択行動において素早く間違いが多い反応を示す傾向を衝動性として、正確であるが遅い反応を示す傾向を熟慮性として定義した。この衝動性は、熟慮性とともに関わるため、本稿では熟慮性 - 衝動性と表記する。熟慮性 - 衝動性は、主に同画探索検査 (MFFT) を用いて計測がなされる (Kagan, 1966)。MFFT は、数個の互いに一部だけ異なる選択肢の絵の中から見本の絵と同一のものを選択する課題である。参加者には、同一の絵を選択するまで試行することが要請され、最初の選択までの反応時間、総誤答数が熟慮性 - 衝動性の評価に使用される。このような課題において、選択までに時間を要するが、誤答が少ない人は熟慮的であり、反対に素早く選択を行うが誤答数が多い

* 1 立正大学大学院心理学研究科心理学専攻博士課程

* 2 独立行政法人国立精神・神経医療研究センター精神保健研究所知的障害研究部

* 3 立正大学心理学部教授

人は衝動的であると評価される (Messer, 1976)。

2.2 報酬に関する衝動性

熟慮性 - 衝動性は速度精度相反性を利用し評価したが、選択肢の報酬量を変化させた場合の報酬に対する感度を衝動性として定義する試みもある。報酬量の異なる2種類の選択をしなければならない場合、報酬の遅延時間が同じであれば、報酬量の高いものを選択するが、報酬量の低いものよりも高いものが未来に得られる条件において報酬の選択に個人差が生まれる。このような関係の中で、衝動性は、後の大きな報酬を得ることよりも、即時の小さな報酬を好む傾向として定義される (Ainslie, 1975)。このような衝動性は、以下の数式によって表すことができる (Mazur, 1993)。

$$value = \frac{A}{1 + kD}$$

A は報酬量を示し、 D は遅延時間を示す。この式では遅延時間とともに報酬価 ($value$) が減少することを表している。また k は遅延時間に対する感度を示し、 k 値が高いほど報酬価が遅延時間の延長によって減少し、即時の報酬を好むことを示す。すなわち k 値が衝動性の個人差を示している。また他の要因を考慮して数式を改良し、衝動性を理解する研究も行われている (e. g., Green et al., 1994; Richards et al., 1999)。

2.3 反応抑制に関する衝動性

上述した衝動性は、反応方法の好みとして衝動性を捉えたが、課題遂行能力自体を衝動性として定義する試みもなされている。このような研究では、警告信号課題 (Logan et al., 1997) や連続遂行課題 (Continuous Performance Task; CPT) などの Go-NoGo 課題が衝動性の評価に用いられる。警告信号課題は、実験参加者に刺激弁別 (“X” と “O” など) を求める課題である。しかしながら弁別刺激呈示後に警告刺激が呈示されることがあり、その場合には、実験参加者は刺激弁別反応を中止しなければならない。弁別刺激呈示から警告刺激呈示までの時間は変動し、その時間が長いほど実験参加者の反応実行が進行しているため、反応を抑制することが困難になる。各時間の誤反応率の変化から、反応実行の進行度に対する抑制可能時間 (警告信号反応時間) が推定され、この時間が衝動制御能力を示す指標として解釈される (Logan et al., 1997)。すなわち、弁別刺激によって活性化される反応が衝動反応であり、衝動反応を抑制する能力の個人差が衝動性であると定義される。

2.4 性格特性としての衝動性

自己記入式尺度を用いた衝動性に関する研究は、衝動性が異なる次元で構成されることを示してきた。自己記入式衝動性尺度の発展には、いくつかの流れがあり、その中でも有名なものを概観していきたい。

性格特性から衝動性を定義する試みとして、アイゼンクとその同僚による一連の研究がある。Eysenck & Eysenck (1985) は性格特性を、外向性内向性尺度、神経症的傾向尺度、精神病的傾向尺度の3つに分類した。衝動性のような精神症状は性格特性の下位特性にあたり、異なる性格特性と関連することが報告された (Eysenck, 1993)。また衝動性は外向性内向性尺度と精神病的傾向尺度に関連していた。その後、アイゼンクは衝動性に特化した尺度を作成し、その尺度は改定を重ね、最新版の I7 には、衝動性、冒険性、共感性が含まれる。一般的に考えられる “衝動性” には、衝動性と冒険性が当てはまるが、2つは独立した因子であり、衝動性は無意識的に危険な選択をする傾向、冒険性は意図的に危険な選択をする傾向と定義される。

他の自己記入式衝動性尺度として、有名なものにバラット衝動性尺度 (Barratt Impulsiveness Scale; BIS) がある (Barratt, 1993)。衝動性と不安を分類する試みとして、BIS の研究が始まった。また同時に衝動性と不安の高低によって分類された実験参加者に対して認知機能に関する実験も行った。このような実験から Barratt (1993) は、衝動性に運動反応、計画性、認知セットの転換が関連することを仮定し、これらの要素を BIS に取り入れた。BIS は因子構造を変えながら改定され、最新版の BIS-11 では、Barratt (1993) が予測した3因子構造に類似した運動型衝動性 (e. g., 私は突然、行動をおこす。)、注意型衝動性 (e. g., 私は遊びや授業でもじもじする。)、非計画型衝動性 (e. g., 私は用心深く考える。(逆転項目)) に分類されている (Patton et al., 1995)。

前述した2つの衝動性尺度とは別の次元で、衝動行動が、適した場面かどうかで分類する方法がある。不正確で素早い行動を衝動行動と定義し、衝動行動が適している場面で、衝動行動をおこす特性を機能的衝動性と定義し、衝動行動

が不利益になる場面で、衝動行動をおこす特性を非機能的衝動性と定義する (Dickman, 1990)。Dickman (1993) は、他の衝動性尺度の多くが非機能的衝動性に分類されることを指摘している。

これらの衝動性尺度は、異なる衝動性の側面を計測しているかもしれないが、共通して、衝動性が単一の衝動性の概念ではなく、複合的な概念であることを示している。この事実からも、神経生理学的基盤についての研究を行う前に、衝動性の明瞭な定義が必要であることが示唆される。

2.5 熟慮性 - 衝動性その他の衝動性

Leshem & Glicksohn (2007) は、様々な衝動性に関する行動指標及び質問紙を用いて、衝動性の構造の調査を行った。I7や BIS-11などに関連する衝動性の因子と分かれて、熟慮性 - 衝動性の因子が存在した。また Block et al. (1974) も、MFFT による行動特性の分類が、自己記入式衝動性尺度と関連していないことを報告した。このような熟慮性 - 衝動性が、性格特性と関連しない結果から、Dickman (1993) は熟慮性 - 衝動性を、他の衝動性から独立した存在として扱っている。

他の衝動性の指標と分けて考えられる一方で、熟慮性 - 衝動性は、衝動性を示す精神疾患群においても観察されることが報告されている。衝動性を主症状とする ADHD 児は熟慮性 - 衝動性が高いことが報告されている (Campbell et al., 1971; DeVito et al., 2009)。また薬物療法の効果は、一貫した結果が得られておらず、改善が認められた研究 (Campbell et al., 1971) と改善が認められなかった研究がある (DeVito et al., 2009)。成人に関する研究においても、薬物依存者や薬物依存経験者において、熟慮性 - 衝動性が高いことが示されている (Clark et al., 2006)。

以上のことから、熟慮性 - 衝動性は、衝動性の多様な衝動性の中の主要な特性の1つとして考えられ、精神疾患群においてもみられることから、研究結果は応用可能性が高いことが推定される。また熟慮性 - 衝動性は、選択反応と誤答数によって明確な行動として定義されるため、生理心理学的知見との関連性が高い。次章では、生理心理学的知見から熟慮性 - 衝動性について考察する。

3. 速度精度相反性と熟慮性 - 衝動性

3.1 速度精度相反性と誤反応

熟慮性 - 衝動性は、反応時間と誤答数によって規定されるため、速度精度相反性の中で議論することが可能である。速度精度相反性は、蓄積モデルを用いて説明することができる (Vickers, 1970)。蓄積モデルでは、図1のように、刺激呈示後に、基線から時間とともに情報蓄積量が増加し、閾値に到達した時点で反応が実行されることを仮定している。その中で、速度精度相反性は、基線と閾値の距離によって表現される (Bogacz et al., 2010)。距離が短い場合には、短い時間で情報の蓄積が反応閾値に到達するため、反応時間は短い、蓄積された情報量は少なく、誤反応となる可能性が高くなることが推定される。反対に、長い距離は、反応時間の延長及び誤反応率の減少を予測する。また距離は、基線または閾値を変化させることによって調整される。

熟慮性 - 衝動性を検討するためには、速度と精度の比重の個人差を決定する要因に着目しなければならない。正反応

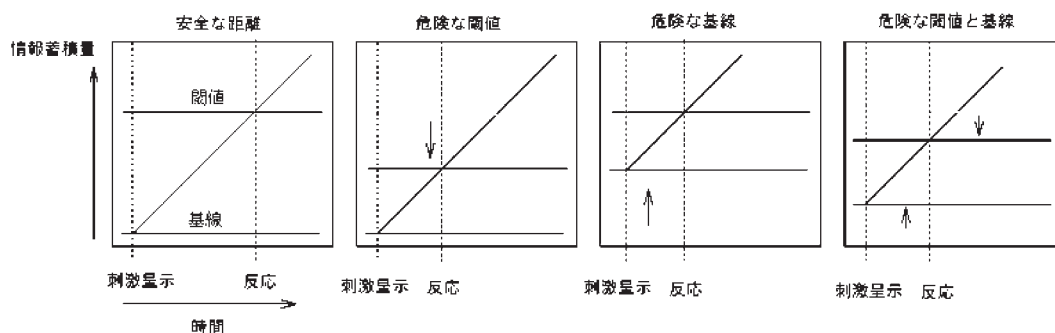


図1 蓄積モデルと速度精度相反性 (Bogacz et al., 2010, より改変して引用)

後よりも誤反応後の試行において、反応時間が延長することが報告されており (Rabbitt, 1966)、速度を重視した反応の結果として生じる誤反応は、速度と精度の比重を調整するために活用される事象となることが想定される。また誤反応後と正反応後の試行の反応時間の差分値は、誤反応後の反応時間の遅れ (post-error slowing: PES) と呼ばれ、誤反応を観察し修正したことを反映する指標として用いられる (Rabbitt, 1979)。衝動性を主症状とする ADHD 児は、速度と精度の比重の調整に困難さがあり (Mulder et al., 2010)、PES が短いことが報告されている (e. g., Schachar et al., 2004)。これらの知見から、熟慮性 - 衝動性の背景に速度と精度の比重があることが考えられ、速度と精度の比重の調整には誤反応処理が関係することが予測される。

3.2 エラー (関連) 陰性電位 (ERN/Ne)

PES は、誤反応処理に関わる指標であるが、誤反応後には、様々な心的過程が関与することが想定され、最終的な出力として観察される現象であるため、不明瞭な点を多く含む。事象関連電位 (event-related potential: ERP) は、ミリ秒単位の時間分解能で認知処理過程を評価することが可能であり、速度精度相反性と誤反応処理を検討するための有用な指標となり得ることが予測される。1990年代前半、イリノイとドルトムントの2つの研究グループは、誤反応直後に観察される ERP 成分を報告した。この成分をイリノイの研究グループはエラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) と名づけ (Gehring et al., 1993)、ドルトムントの研究グループはエラー陰性電位 (error negativity: Ne) と名づけた (Falkenstein et al., 1991)。これらは同じ電位であることが確認されているため、本稿では、この成分を ERN/Ne と記述する。

ERN/Ne は誤反応から100ms 間に頂点潜時をもつ陰性電位成分である。前頭から中心の正中線上で最大振幅を示し (Falkenstein et al., 2000)、ダイポール推定法から発生源は前帯状皮質 (anterior cingulate cortex) であることが考えられている (Dehaene et al., 1994)。機能的意義に関して、当初から、ERN/Ne は、実際の反応と適切な反応の表象のミスマッチ量を反映することが提案されてきた (Bernstein et al., 1995)。近年では、競合モニタリング仮説の中で、実行された反応と実行後に処理される正反応間の反応後競合量を反映することが仮定されている。また競合モニタリング仮説は、機能的磁場共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging; fMRI) を用いた ACC 活動の研究から発展してきた仮説であり、ACC 活動は、刺激が誘発する2つまたは複数の反応の活性化による競合量 (反応前競合量) を反映することも仮定している (Carter et al., 1998)。どちらの仮説も実際の反応と適切な反応を比較することについては共通している。しかしながら、競合モニタリング仮説が ACC を中心とした包括的な理論であるため、ERN/Ne の解釈に関して不明瞭な点がある。誤反応に関する指標として活用するためには、ERN/Ne の機能的意義と ACC 活動の関係性を整理することが必要である。

3.3 ERN/Ne と速度精度相反性

速度精度相反性と ERN/Ne の関係性について、短い反応時間に対する報酬や誤反応に対する罰によって速度と精度の比重を操作することによって検討された (Gehring et al., 1993)。ERN/Ne 振幅は、中立条件と比較して精度強調条件において大きく、速度強調条件において最小であった。さらに ERN/Ne 振幅の大きさから試行を分類すると、大きな ERN/Ne 振幅が観察された試行において、反応圧力が低下し、その次試行において PES が延長した。この実験結果から、Gehring et al. (1993) は、ERN/Ne が、誤反応後の補正に関与することを示唆した。

一方、Hajcak et al. (2003) は、PESとERN/Ne 振幅の個人差について調査し、ERN/Ne と PES は有意に相関しないことを示した。また Nieuwenhuis et al. (2001) は、反サッカー課題を用いて、ERN/Ne と誤反応後の補正の関係を検討した。反サッカー課題は、参加者の中央に対して左右に呈示される視覚刺激の反対方向に視点を移動させることを要請する。左右に呈示された刺激は、参加者に刺激呈示方向のサッカーを誘発するため、参加者に認識されない誤反応を引き起こす。認識されないため、この誤反応後の試行において行動は修正されない。Nieuwenhuis et al. (2001) は、認識された誤反応と同様に、認識されない誤反応に対して ERN/Ne が生じることを報告した。これらの知見は、PES と ERN/Ne の関係を否定するものであり、ERN/Ne が示す機能が速度精度相反性に影響を与えないことを示唆するものであるとも考えられる。しかしながら、認識されない誤反応は、認識された誤反応よりも小さく、即時に修正されることが報告されている (Nieuwenhuis et al., 2001)。さらに、PES と ERN/Ne の関係を否定する結果

は個人差の研究から報告されており、個人内の反応時間の変化についての研究は、大きな ERN/Ne 振幅と PES の関係を支持している (Gehring et al., 1993; Debener et al., 2005)。したがって、ERN/Ne が反映する機能は、無意識的な補正の引き金となり、反応制御の程度に関連することが示唆され、比較的大きな ERN/Ne は、速度と精度の比重の調整を促すことが予測された。このような機能の抑制や低下は、反応制御によって誤反応が未然に修正されることや反応の方略が変更されることを減少させ、結果として、反応時間は短い誤反応が多い速度を重視した状態になることが推定される。熟慮性 - 衝動性における高い衝動性を示す群においても、ERN/Ne の減弱が観察されることが示唆された。

3.4 衝動性を示す精神疾患群と ERN/Ne

熟慮性 - 衝動性と ERN/Ne の関係性を確認するために、衝動性を示す精神疾患群と ERN/Ne について扱う文献を調査した。「ADHD」、「物質乱用 (Substance abuse)」、「ERN/Ne」などをキーワードに設定し、「PubMed」を用いて文献検索を行った (2010年10月)。前節で紹介した ERN/Ne は、反応を基準に算出する成分であるため、フィードバックを基準に算出する成分 (feedback ERN; fERN または feedback related negativity; FRN) は、件数に含めなかった。また評論に分類される文献も除外した。ADHD に関する文献は、14件であり、物質乱用については1件のみであった。ADHD に関する文献は、一致した結果が得られておらず、5件が ERN/Ne の減弱を報告し (Liotti et al., 2005; van Meel et al., 2007; Groen et al., 2008; Albrecht et al., 2008; Herrmann et al., 2010)、8件は ERN/Ne の関与を否定し (Wiersema et al., 2005; Jonkman et al., 2007; Wiersema et al., 2009; Zhang et al., 2009; Wild-Wall et al., 2009; McLoughlin et al., 2009; Herrmann et al., 2009; Groom et al., 2010)、ERN/Ne の増大を示す文献が1件あった (Burgio-Murphy et al., 2007)。物質乱用に関する文献は、コカイン依存症者を対象にしており、予測されたように、コカイン依存者は、ERN/Ne 振幅の減弱を示した (Franken et al., 2007)。

ADHD における結果の不一致は、課題の違いによるものであると考えられている (Wild-Wall et al., 2009)。また発達の非線形の ERN/Ne の変化が報告され (Davies et al., 2004)、ADHD に関する文献は、参加者の年齢は児童期～成人期の間で異なるため、結果の不一致が生まれたことが示唆される。また2章において記述したように、衝動性には多様な概念が含まれ、ADHD の中においても衝動性の違いがあることも推測される。今後、熟慮性 - 衝動性について評価した参加者に対して、ERN/Ne の計測を行い、熟慮性 - 衝動性の関係性を検討することが必要であり、その成果は、精神疾患群における熟慮性 - 衝動性の背景となる誤反応処理過程の評価指標として活用されることが期待できる。

4. まとめと今後の展望

本稿では、衝動性の多様性について傍観し、熟慮性 - 衝動性に着目した。熟慮性 - 衝動性は、選択時間と誤答数で定義されることから、速度精度相反性の中で考察された。速度と精度の比重に関して誤反応処理が重要であり、ERN/Ne が反映する機能の低下が、熟慮性 - 衝動性における衝動性が高い群に関連することが示唆された。しかしながら、このような結論に至るまでには、解決しなければならない問題点が存在する。

第一に、ERN/Ne の機能的意義が不明瞭な点がある。ミスマッチ理論は ERN/Ne を説明するためのものである一方で、競合モニタリング仮説は、ACC 機能を解釈するために提案されている。したがって、両者の説明に違いが生じている部分がある。ミスマッチ理論と競合モニタリング仮説を、ERN/Ne を中心に整理する必要がある。

第二に、精神疾患群でみられる衝動性から ERN/Ne と熟慮性 - 衝動性の関係性を明らかにするには限界があることである。精神疾患群においても衝動性の種類に違いがあり、衝動性を主症状とするが、熟慮性 - 衝動性に関連しない精神疾患群も想定される。また同一の精神疾患群においても衝動性の違いがあることが予測される。健常者を参加者とした実験を行い、ERN/Ne と熟慮性 - 衝動性の関係性を明らかにすること必要である。

第三に、本稿では、速度と精度の比重を誤反応処理から考察を行ったが、背外側前頭前皮質、線条体、視床下核などの他の神経基盤も速度精度相反性に関与することが提案されている (Bogacz et al., 2010)。したがって、異なるメカニズムが、熟慮性 - 衝動性に関係することも想定される。今後、他の ERP 成分 (e. g., N2, P3) や神経イメージング技法 (e. g., fMRI) などを含めた総合的な研究を行うことによって、より詳細な熟慮性 - 衝動性のメカニズムが提案

されることが期待される。

以上のように、本稿で提案された衝動性のメカニズムに問題点があるが、現時点の誤反応処理を基にした熟慮性 - 衝動性を研究する枠組みとしては十分であると考えられる。また熟慮性 - 衝動性は、幅広い領域で扱われる特性であることから、研究成果が応用されていくことが期待される。

引用文献

- Ainslie, G. (1975). Specious reward: A behavioral theory of impulsiveness and impulse control. *Psychological Bulletin*, 82, 463-496.
- Albrecht, B., Brandeis, D., Uebel, H., Heinrich, H., Mueller, U., Hasselhorn, M., Steinhausen, H., Rothenberger, A., & Banaschewski, T. (2008). Action monitoring in boys with attention deficit/hyperactivity disorder, their non affected siblings, and normal control subjects: Evidence for an endophenotype. *Biological psychiatry*, 64, 615-625.
- Barratt, E. S. (1993). Impulsivity: Integrating cognitive, behavioral, biological, and environmental data. In McCown, W., Johnson, J., & Shure, M., editors, *The impulsive client: Theory, research, and treatment*, pages 39-56. American Psychological Association.
- Bernstein, P. S., Scheffers, M. K., & Coles, M. G. H. (1995). "Where Did I Go Wrong?" A Psychophysiological Analysis of Error Detection. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, 21, 1312-1322.
- Block, J., Block, J. H., & Harrington, D. M. (1974). Some misgivings about the Matching Familiar Figures Test as a measure of reflection-impulsivity. *Developmental Psychology*, 10, 1-632.
- Bogacz, R., Wagenmakers, E., Forstmann, B., & Nieuwenhuis, S. (2010). The neural basis of the speed-accuracy tradeoff. *Trends in neurosciences*, 33, 10-16.
- Burgio-Murphy, A., Klorman, R., Shaywitz, S., Fletcher, J., Marchione, K., Holahan, J., Stuebing, K., Thatcher, J., & Shaywitz, B. (2007). Error-related event-related potentials in children with attention-deficit hyperactivity disorder, oppositional defiant disorder, reading disorder, and math disorder. *Biological psychology*, 75, 75-86.
- Campbell, S. B., Douglas, V. I., & Morgenstern, G. (1971). Cognitive styles in hyperactive children and the effect of methylphenidate. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 12, 55-67.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747.
- Clark, L., Robbins, T. W., Ersche, K. D., & Sahakian, B. J. (2006). Reflection impulsivity in current and former substance users. *Biological Psychiatry*, 60, 515-522.
- Davies, P., Segalowitz, S., & Gavin, W. (2004). Development of response-monitoring ERPs in 7-to 25-year-olds. *Developmental Neuropsychology*, 25, 355-376.
- Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., Von Cramon, D. Y., & Engel, A. K. (2005). Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *Journal of Neuroscience*, 25, 11730-11737.
- Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.
- DeVito, E. E., Blackwell, A. D., Clark, L., Kent, L., Dezsery, A. M., Turner, D. C., Aitken, M. R., & Sahakian, B. J. (2009). Methylphenidate improves response inhibition but not reflection-impulsivity in children with attention deficit hyperactivity disorder (adhd). *Psychopharmacology*, 202, 531-539.
- Dickman, S. J. (1990). Functional and dysfunctional impulsivity: personality and cognitive correlates. *Journal of Personality and Social Psychology*, 58, 95.
- Dickman, S. J. (1993). Impulsivity and information processing. In McCown, W., Johnson, J., and Shure, M.,

- editors, *The impulsive client: Theory, research, and treatment*, pages 151-184. American Psychological Association.
- Evenden, J. L. (1999). Varieties of impulsivity. *Psychopharmacology*, 146, 348-361.
- Eysenck, H. J. (1993). The nature of impulsivity. In McCown, W., Johnson, J., and Shure, M., editors, *The impulsive client: Theory, research, and treatment*, pages 57-69. American Psychological Association.
- Eysenck, H. J. & Eysenck, M. W. (1985). *personality and individual difference: A natural science approach*. New York: Plenum Press.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 78, 447-455.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.
- Franken, I., van Strien, J., Franzek, E., & van de Wetering, B. (2007). Error-processing deficits in patients with cocaine dependence. *Biological psychology*, 75, 45-51.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390.
- Green, L., Fry, A. F., & Myerson, J. (1994). Discounting of delayed rewards: A life-span comparison. *Psychological Science*, 5, 33-33.
- Groen, Y., Wijers, A., Mulder, L., Waggeveld, B., Minderaa, R., & Althaus, M. (2008). Error and feedback processing in children with ADHD and children with Autistic Spectrum Disorder: An EEG event-related potential study. *Clinical Neurophysiology*, 119, 2476-2493.
- Groom, M., Cahill, J., Bates, A., Jackson, G., Calton, T., Liddle, P., & Hollis, C. (2010). Electrophysiological indices of abnormal error-processing in adolescents with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 51, 66-76.
- Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. (2003). To err is autonomic: error-related brain potentials, ANS activity, and post-error compensatory behavior. *Psychophysiology*, 40, 895-903.
- Herrmann, M., Mader, K., Schreppe, T., Jacob, C., Heine, M., Boreatti-Hümmer, A., Ehlis, A., Scheuerpflug, P., Pauli, P., & Fallgatter, A. (2010). Neural correlates of performance monitoring in adult patients with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *World Journal of Biological Psychiatry*, 11, 457-464.
- Herrmann, M., Saathoff, C., Schreppe, T., Ehlis, A., Scheuerpflug, P., Pauli, P., & Fallgatter, A. (2009). The effect of ADHD symptoms on performance monitoring in a non-clinical population. *Psychiatry research*, 169, 144-148.
- Jonkman, L.M., van Melis, J.J.M., Kemner, C., & Markus, C.R. (2007). Methylphenidate improves deficient error evaluation in children with ADHD: An event-related brain potential study. *Biological Psychology*, 76, 217-229.
- Kagan, J. (1966). Reflection-impulsivity: The generality and dynamics of conceptual tempo. *Journal of Abnormal Psychology*, 71, 17-24.
- Leshem, R. & Glicksohn, J. (2007). The construct of impulsivity revisited. *Personality and Individual Differences*, 43, 681-691.
- Liotti, M., Pliszka, S., Perez, R., Kothmann, D., & Woldorff, M. (2005). Abnormal Brain Activity Related to Performance Monitoring and Error Detection in Children with ADHD. *Cortex*, 41, 377-388.
- Logan, G. D., Schachar, R. J., & Tannock, R. (1997). Impulsivity and inhibitory control. *Psychological Science*, 8, 60-64.
- Mazur, J. E. (1993). Predicting the strength of a conditioned reinforcer: effects of delay and Uncertainty. *Current Directions in Psychological Science*, 2, 70-74.

- McLoughlin, G., Albrecht, B., Banaschewski, T., Rothenberger, A., Brandeis, D., Asherson, P., & Kuntsi, J. (2009). Performance monitoring is altered in adult ADHD: A familial event-related potential investigation. *Neuropsychologia*, 47, 3134-3142.
- Messer, S. B. (1976). Reflection-impulsivity: A review. *Psychological Bulletin*, 83, 1026-1052.
- Moeller, F., Barratt, E., Dougherty, D., Schmitz, J., & Swann, A. (2001). Psychiatric aspects of impulsivity. *American Journal of Psychiatry*, 158, 1783.
- Mulder, M., Bos, D., Weusten, J., Belle, J., van Dijk, S., Simen, P., van Engeland, H., & Durston, S. (in press). Basic Impairments in Regulating the Speed-Accuracy Tradeoff Predict Symptoms of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry*.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K., Blom, J., Band, G., & Kok, A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38, 752-760.
- Patton, J. H., Stanford, M. S., & Barratt, E. S. (1995). Factor structure of the Barratt impulsiveness scale. *Journal of Clinical Psychology*, 51, 768-774.
- Rabbitt, P. (1979). How old and young subjects monitor and control responses for accuracy and speed. *British Journal of Psychology*, 70, 305-311
- Rabbitt, P. M. A. (1966). Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 264-272.
- Richards, J. B., Zhang, L., Mitchell, S. H., & De Wit, H. (1999). Delay or probability discounting in a model of impulsive behavior: effect of alcohol. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 121-144.
- Schachar, R. J., Chen, S., Logan, G. D., Ornstein, T. J., Crosbie, J., Ickowicz, A., & Pakulak, A. (2004). Evidence for an error monitoring deficit in attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 32, 285-293.
- van Meel, C., Heslenfeld, D., Oosterlaan, J., & Sergeant, J. (2007). Adaptive control deficits in attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD): The role of error processing. *Psychiatry research*, 151, 211-220.
- Vickers, D. (1970). Evidence for an accumulator model of psychophysical discrimination. *Ergonomics*, 13, 37-58.
- Wiersema, J., Van der Meere, J., & Roeyers, H. (2005). ERP correlates of impaired error monitoring in children with ADHD. *Journal of Neural Transmission*, 112, 1417-1430.
- Wiersema, J., Van Der Meere, J., & Roeyers, H. (2009). ERP correlates of error monitoring in adult ADHD. *Journal of Neural Transmission*, 116, 371-379.
- Wild-Wall, N., Oades, R., Schmidt-Wessels, M., Christiansen, H., & Falkenstein, M. (2009). Neural activity associated with executive functions in adolescents with attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *International Journal of Psychophysiology*, 74, 19-27.
- Zhang, J., Wang, Y., Cai, R., & Yan, C. (2009). The brain regulation mechanism of error monitoring in impulsive children with ADHD-An analysis of error related potentials. *Neuroscience letters*, 460, 11-15.