

運動課題中のフィードバック関連陰性電位に対する 反応上肢の影響

平井達也^{*1, *2}・沖田庸嵩

Effects of response hands on feedback-related negativity during a motor task.

Tatsuya Hirai and Tsunetaka Okita

要旨

本研究は我々の先行研究で高齢対象者の運動学習中に得られた二峰性のフィードバック (FB) 関連陰性電位 (FRN) の特に右中心部 (C4) 優勢な後期成分が上肢の運動に関わる電位かについて検証することを目的とした。実験参加者は健常な若年者と高齢者各12名で、参加者には左手または右手を使用して、49個の到達ボタンのうち中央の標的を直接的なFBなしで出来るだけ多くの試行で押すよう求めた。その際、FB表示板にて到達ボタンを遮蔽するとともに標的ボタン押し成功および失敗 (エラー) のFBをボタン押し1 s後に与えた。FRNは使用肢 (手) 別にエラーFBに対する事象関連電位 (ERP) から成功FBのERPを減じて算出した。高齢者のFRNは先行研究と同様に二峰性となり、その後期成分 (後期FRN) は左右の使用肢に関わらずC4優勢であった。これらの知見から、後期FRNは反応上肢に関わる運動皮質に由来せず、エラーFBに対する右半球優勢な処理を反映すると結論づけられた。

キー・ワード：運動課題，事象関連電位 (ERP)，フィードバック関連陰性電位 (FRN)，高齢者

問題と目的

日常生活では、さまざまな環境変化に適応することが要求され、複雑で高い技能を必要とする。そのため、例えば躓いたり物を取り落としたりするなど、しばしば失敗 (以下、エラーと表記) 生じる。通常、小さなエラーは直ちに修正され、反復されることなく、大きなエラーにつながらない。ところが高齢になると、小さなエラーが修正されずに反復し、時に大きなエラーにつながる。身体的に虚弱な高齢者の大きなエラーは、骨折など重篤な傷害を発生させ、それは医療費の増大など社会的問題の原因となる。当然ながら高齢者には感

覚や運動の機能低下があるためエラーを生じる確率が高くなることは理解できるが、エラー反復は学習の問題であり、この問題の原因を明らかにするためには、高齢者のエラー処理能力や学習能力を知ることが重要となる。

エラー検出を反映する電気生理的指標であるエラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) は、エラーの発生に伴い陰性方向に発達する事象関連電位 (event-related potential: ERP) の成分である。ERNは比較的最近発見され (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990; Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1990)、現在もその機能的意義について研究途上にある。従来から行われているERN研究では、反応をトリガーとするERNと、フィードバック (Feedback: FB) 刺激をトリガーとす

※1 心理学研究科 博士後期課程

※2 医療法人田中会 西尾病院リハビリテーション室

るERN (すなわち, feedback-related negativity: FRN) が観察対象となってきた。ERNとFRNはともに前頭-中心部優勢に出現し, その発生源は前部帯状皮質であることが明らかとなっている (Dehaene, Posner, & Tucker, 1994)。

特に近年, ERN, FRNと学習との関連について注目されているが, 認知課題が主に使用されている (Eppinger, Kray, Mock, & Mecklinger, 2008; Pietschmann, Simon, Endrass, & Kathmann, 2008)。一方, リハビリテーションの臨床では運動課題が主に使用され, セラピストによる外在的FBが高い頻度で利用されている。こうした背景から, 運動学習課題を使用した際のFRNを検討する必要がある。

平井 (2012) は, 若年者と高齢者に対して到達運動学習課題中のFRNを観察した。結果, 誤反応時のエラーFBに惹起されたERPから正反応時の成功FBに惹起されたERPを減算した差波形を見ると, 若年者では従来から見られたFB呈示後200–300msに頂点を持つ一峰性のFRN波形が得られた。一方, 高齢者では, FB呈示後160 ms付近と280ms付近に頂点をもつ二峰性の波形が得られた。一つ目の頂点を初期FRN, 二つ目の頂点を後期FRNとすると, 初期FRNは前頭-中心優勢であり, 従来報告されているFRNの頭皮上分布 (Miltner, Braun, & Coles, 1997) と一致したことから, 従来の報告に基づきエラー検出機能を反映すると推定された。一方, 後期FRNは, この研究で唯一記録された左右半球の中心領域 (C3とC4電極部位) において, 右半球のC4部位で優勢であった。これには2つの理由が考えられた。第一に, C4部位は実験に使用した上肢と対側の半球であったことから, 対側上肢 (左手) の運動調節に関与していると考えられた。第二に, 運動課題は空間情報と運動感覚情報の統合に右半球領域が特異的に働くことを反映している可能性である。Ghilardi, Ghez, Dhawan, Moeller, Mentis, Nakamura, Antonini, & Eidelberg (2000) は, 陽電子放射断層撮影 (positron emission tomography: PET) を使用して, 到達動作に伴う新規な視覚運動の学習と右後頭頂領域の活動が関連することを報告した。実験参加者

はPCモニターの中心位置からカーソルを右手で開始させ, 同心円上に配置された9個の標的のうち, 指定された3つの標的を順番に移動させる課題を行った。結果, 新規な運動条件に関連しブロードマン第40野や第7野など右側後頭頂皮質の優勢な活動が示された。右中心部 (C4) で記録された後期FRNは右後頭頂皮質の活動に由来する電位で, エラー処理に続く, 空間情報と運動感覚情報の統合処理が関連している可能性もある。そこで, 本研究では, 高齢者で観察された後期FRNが単に運動課題遂行時の使用上肢に依存した運動皮質の賦活を反映するのか, あるいはエラーFBに対し右半球優勢に実行される処理 (例えば, 空間情報と運動感覚情報の統合) を反映するのか, 検討することとした。仮説として, 後期FRNが単に使用上肢に依存した活動を反映するならば, 後期FRNは使用上肢の対側半球で優勢となり, エラーFBに対する右半球優勢な処理過程を反映するならば, 後期FRNは左右の使用上肢に関わらずC4部位優勢となるはずである。

方 法

実験参加者 若年者12名 (平均年齢 21.8 ± 2.3 歳), 高齢者12名 (70.2 ± 4.7 歳) が本実験に参加した。全員, 整形外科的, 神経内科的, 精神病理的疾患はなく, 右利きであった。高齢群は全員 Mini Mental State Examination 25点以上であった。参加者全員に, 本研究の主旨と倫理的配慮について説明し, 署名にて同意を得た。

実験装置 本研究用に作成された到達運動用装置には直径25 mmの円形の開始ボタン3個が80 mm間隔で配列された (図1参照)。開始ボタンから178 mm隔てて1辺17 mmの正方形の到達ボタンが縦7列×横7列で49個配列された。到達ボタンの中心を標的, その外周すべてをエラーとした。到達運動用装置に接続されたFB用の表示板は, 縦210 mm×横297 mmの背景が黒の板が使用され, 発光ダイオード (light emitting diode: LED) が設置された。中央に標的ボタンに対応する緑のLED, その外周に標的ボタンの周囲8個のエラーボタンに対応したオレンジの

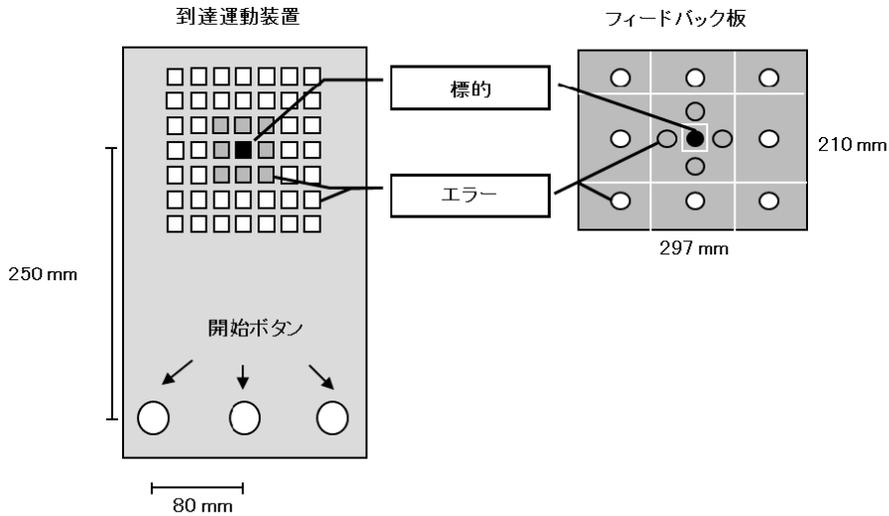


図1 実験用到達運動装置

到達運動装置には3個の開始ボタンと49個の到達ボタンが設置され、到達ボタンの中央を標的ボタンとした。FB板の背景は黒で12個のLEDが設置され、標的は緑、標的の周囲の4個はオレンジ、さらに外周8個は赤のLEDで、それぞれ、到達ボタン押し反応に応じてボタン押し1 s後に点灯するよう設定された。

LEDが4つ設置された。さらにその外周の40個のエラーボタンの領域に対応して赤のLEDが計8つ設置された。LEDは到達ボタンを押した1 s後に1 s間点灯するよう設定された。

課題 参加者は到達運動用の装置が置かれた机に向かって椅子に座り、眼前20 cmにFB板が設置された。FB板により、到達ボタンは見えないようにされた。各試行において、参加者は指定された上肢（左手または右手）の第2指で一旦開始ボタンを押した後、標的ボタンを目指した到達運動を行った。到達後、FB板より到達位置のFB情報が与えられ、それを手がかりに次試行で標的ボタンを押す成功率を向上させるよう要求された。

手続き 10試行を1ブロックとし、4ブロック毎に使用上肢を変え、若年者と高齢者の各12名のうち6名は右手、左手、左手、右手の順に、残る6名は左手、右手、右手、左手の順にカウンターバランスして、合計16ブロック160試行の実験を施行した。参加者は指定された側の手で指定された開始ボタンから課題を行うよう指示された。

記録と分析 脳波は国際10-20法に従いFz, Cz, C3, C4の頭皮上4部位から両耳朶を基準電極として導出した。同時に、左眼窩外側部から眼球電

図を測定した。電極は全て銀塩化銀電極を用い、抵抗は10 k Ω 以下とした。すべての電気生理反応は多チャンネル生体アンプMA1008（デジテックス研究所製）により増幅後（時定数 3 s, 高域遮断周波数 30 Hz）、サンプリング周波数 200 Hzでハードディスクに収録した。開始ボタン押し上げ、到達ボタン押し下げによるトリガーも脳波とともにハードディスクに収録した。測定された電気生理反応は、眼球電図などのアーチファクトが混入した試行および開始ボタン押し上げから到達ボタン押し下げまでに3 s以上の間隔が空いた試行を除外したうえで加算平均処理し、標的ボタン押し成功時のFBに対するERPと失敗（エラー）時のFBに対するERPをそれぞれ算出した。失敗は標的ボタンの外周8個のボタンを押した（オレンジのLEDが点灯した）時のみを分析対象とし、さらに外周のボタンが押された失敗は非常に少なかったため分析対象から除外した。ERPの算出区間は、FB提示前100 ms間の平均電位を基線として、提示前100 msから提示後500 msの600 ms間であった。また、エラーFBに対するERPから成功FBに対するERPを減じた差波形を算出し、FRNを同定した。行動測度については、左右の

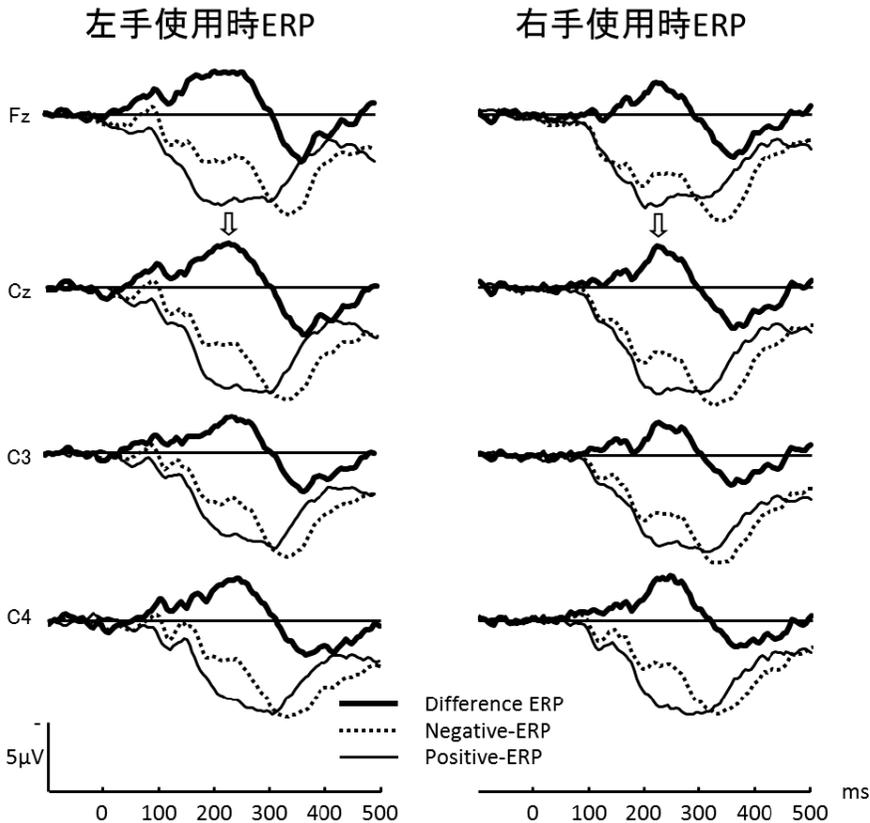


図2 若年者で測定された左手使用時（左側）と右手使用時（右側）のERP総平均波形差波形（太実線）はエラーFBに対するERP（点線）から成功FBに対するERP（細実線）を減じて算出したFRN波形を示す。矢印（⇩）で示されるように、若年者のFRNは一峰性である。

使用肢（手）別、年齢別に成功率を算出した。

行動測定とERPデータは混合要因分散分析を使用し分析した。多重比較にはBonferroni補正（有意水準 $p < .05$ ）を使用し補正 p 値を記載した。また、Huynh-Feldtによる自由度の調整を行い調整後の p 値と ϵ 値を記載した。また、効果量（ η_p^2 ）を記載した。

結 果

行動測定 平均成功率（±標準偏差）は若年者右手使用時59（±14）％，左手使用時51（±14）％，高齢者右手使用時55（±16）％，左手使用時44（±20）％であった。年齢（若年，高齢）×使用肢（右手，左手）の分散分析の結果，年齢と使用肢の主効果および交互作用はいずれも有意では

なかった（すべて， $F(1,22) < 1$ ）。

ERP 図2に若年者，図3に高齢者の左手使用時と右手使用時の成功FB に対するERP，エラーFBに対するERPおよびFRNを実験参加者間総平均波形として示す。到達運動に使用した左右の手に関わらず，若年者のFRNはFB後200–300 msに1つの陰性頂点が見られる。高齢者のFRNではFB後160 ms付近と280 ms付近に陰性頂点があり，二峰性の波形を示している。特に，注目すべきは使用肢に関わらず，第二の頂点はC4部位で最大となっている。先行研究（平井，2012）に従い160–200 ms，210–250 ms，260–300 msの3区間に分け，それぞれ初期FRN，中期FRN，後期FRNとし，実験参加者毎に区間平均電位を算出した（図4参照）。若年者は中期FRNの平均電位を，高齢者については初期および後期

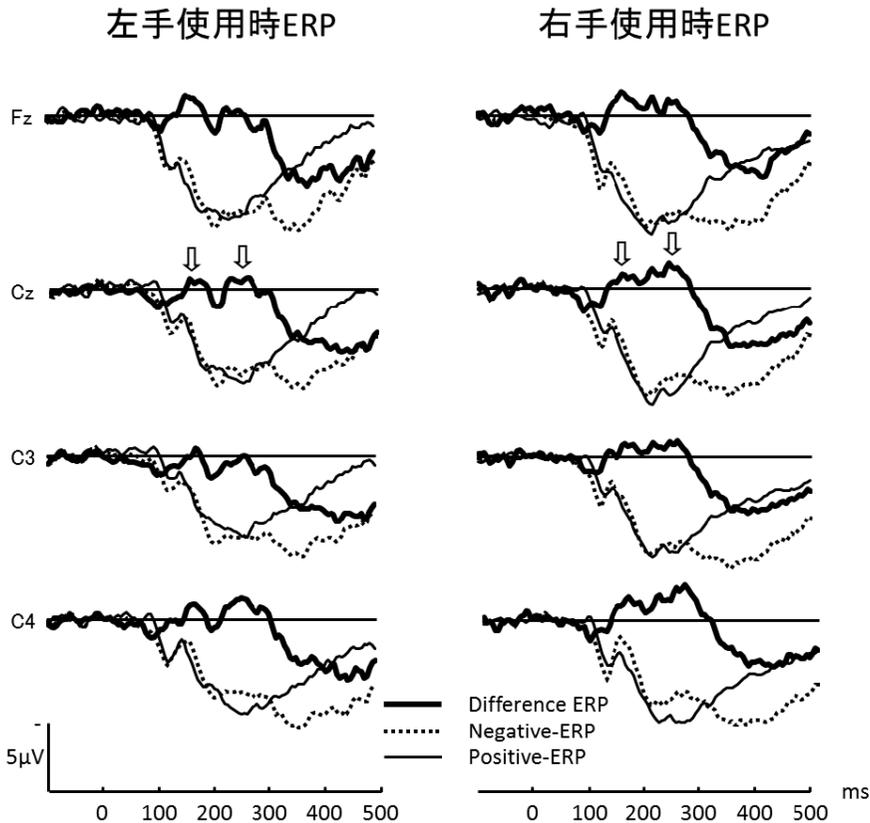


図3 高齢者で測定された左手使用時（左側）と右手使用時（右側）のERP総平均波形差波形（太実線）はエラーFBに対するERP（点線）から成功FBに対するERP（細実線）を減じて算出したFRN波形を示す。矢印（⇩）で示されるように、高齢者のFRNは二峰性である。

FRNを分析対象とした。

若年者の中期FRNの平均電位を従属変数とし、使用肢（右手，左手）×電極部位（Fz, Cz, C3, C4）の分散分析を行った結果、使用肢、電極部位ともに有意な主効果はなく（それぞれ、 $F(1,11) < 1$; $F(3,33) = 1.60$, ns ）、交互作用のみ有意であった（ $F(3,33) = 3.26$, $p < .05$, $\epsilon = .62$, $\eta_p^2 = .18$ ）。しかし、いずれの単純主効果も有意でなかった。

高齢者の初期FRNに対する分散分析では、使用肢と電極部位の主効果および交互作用はいずれも有意ではなかった（それぞれ、 $F(1,11) < 1$; $F(3,33) = 2.11$, ns ; $F(3,33) < 1$ ）。後期FRNでは、電極部位のみに有意な主効果があり（ $F(3,33) = 8.59$, $p < .001$, $\epsilon = .94$, $\eta_p^2 = .44$ ）、この主効果に続く多重比較の結果、C4における陰

性電位がC3 およびCzより有意に大きいことを示した（それぞれ、 $t(11) = 5.34$, $p = .001$; $t(11) = 3.61$, $p = .02$ ）。使用肢の主効果、交互作用は有意ではなかった（それぞれ、 $F(1,11) < 1$; $F(3,33) < 1$ ）。次に、成功FBに対するERPとエラーFBに対するERPにおいて使用肢（右手，左手）×FBタイプ（成功，エラー）×電極部位（Fz, Cz, C3, C4）の分散分析を行った。若年の中期FRNでは、FRNの発達を反映して、FBタイプの主効果が有意であった（ $F(1,11) = 6.72$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .38$ ）。また、電極部位の主効果とともに（ $F(3,33) = 4.38$, $p = .01$, $\eta_p^2 = .29$ ）、使用肢×FBタイプ×電極部位の交互作用があった（ $F(3,33) = 3.26$, $p = .046$, $\epsilon = .81$, $\eta_p^2 = .23$ ）。単純・単純主効果検定の結果、右手のC4（ $F(1,11) = 7.03$, $p < .02$ ）、左手のすべての電極部

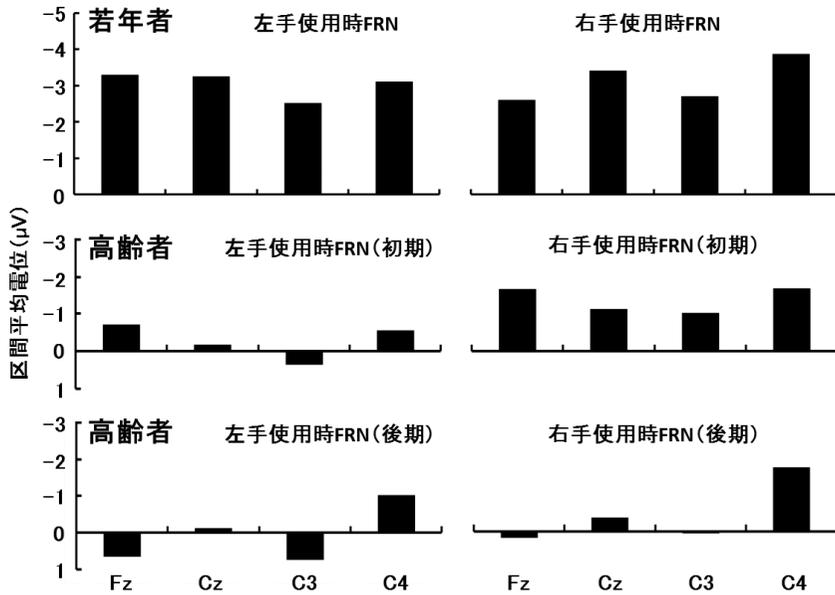


図4 若年者(上)と高齢者(中,下)で測定された左手使用時(左側)と右手使用時(右側)の区間平均電位

若年者はFB提示後210-250ms区間,高齢者の初期はFB提示後160-200ms区間,後期は260-300ms区間の平均電位を示す。

位においてエラー-FB に対するERPが成功FBのERPより有意に陰性方向に発達していた(すべて, $F(1,11) > 5.44$, $p < .05$)。

高齢者の初期FRNもFRNの発達を反映して,FBタイプの主効果が有意であった($F(1,11) = 9.80$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .47$)。また,電極部位の主効果も有意であり($F(3,33) = 29.20$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .73$)、多重比較の結果,Cz, C3, C4がFzより有意に陰性電位が高く(すべて, $t(11) > 2.839$, $p < .02$)、C3, C4がCzより有意に陰性電位が高いことを示した(すべて, $t(11) > 5.15$, $p < .001$)。後期FRNについては,FBタイプと電極部位の交互作用のみ有意であった($F(3,33) = 8.59$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .44$)。単純主効果検定は,C4のみにおける有意なFRNの発達を反映して,FBタイプの主効果がC4のみで認められた($F(1,11) = 8.28$, $p < .02$, $\eta_p^2 = .43$)。

考 察

運動学習課題を用いた先行研究(平井, 2012)において,高齢対象者に二峰性のFRN波形が観

察された。これはこれまでのFRN研究では報告されていない新たな知見であった。その初期成分(初期FRN)は前頭中心領域優勢であったことから,課題の進行に伴いその平均電位が減少したことから,認知課題を用いた先行研究(Pietschmann et al., 2008)のERNと類似した電位と同定できた。一方,C4部位(右半球)優勢であった後期成分(後期FRN)は,課題遂行に用いた運動肢(左上肢)に依存するのか,課題に特異的な空間情報と筋運動感覚の統合に依存する可能性があるのかを特定することはできなかった。本研究では,我々の先行研究における高齢者のC4部位優勢な後期FRNが課題遂行に用いた運動肢に依存するかを検証するため,左右の運動肢がFRNに及ぼす効果について検討した。

本研究で得られたFRNは,我々の先行研究と同様,若年者では従来から見られた一峰性であるのに対し,高齢者では二峰性を示し,本実験方法を用いて得られるFRN波形の頑健性が明らかとなった。さらに,観察された後期FRNでは,課題遂行時の使用肢に関わらずC4部位においてのみ有意に陰性電位が発達したことを認めた。

この結果は、我々の先行研究で得られたC4部位優勢な後期FRNが使用肢の運動皮質の賦活に由来するものではなく、エラーFBに対する右半球の脳内活動を反映する可能性を示している。序論で述べたように、Ghilardi et al. (2000) は新規な視覚運動統合に右側後頭頂皮質が重要な役割を果たしていると示唆した。本研究の4部位と限られた記録電極数ではあるが、右中心部 (C4) で観察された後期FRNは、エラーFBに応じて右半球で実行される到達運動学習時の自己受容的な運動感覚と心的なボタン位置空間情報の統合処理に関連するかもしれない。一方、高齢者の初期FRNについては、脳波記録部位に関わりなく有意な陰性電位が観察された。本研究では記録部位が前頭中心領域の4部位に限られていたため、前頭中心領域に優勢な陰性電位として示されなかったが、従来の研究で前頭前野内側部に推定されたERNの電源とも対応し (Dehaene et al., 1994), 本研究で得られた初期FRNがエラー検出を反映する可能性を支持する (平井, 2012)。若年者のFRNも高齢者の初期FRNと同様に優勢な電位分布は認められなかった。また、認知課題を使用した先行研究 (Miltner et al., 1997; Eppinger et al., 2008; Pietschmann et al., 2008) と同様、一峰性のFRNが得られた。一般に加齢により脳内処理速度が低下するとされており (Salthouse, 2000), 若年者では高齢者より処理速度が速いと推測できる。したがって、高齢者で初期FRNと後期FRNに分離して表出した処理が時間的に接近して実行され、その結果として2つのFRN成分が重なり合い1つの頂点を持つFRNとして現れた可能性がある。

以上のことから、本研究で得られたC4部位優勢な後期FRNは運動課題遂行時の使用肢に依存せず、エラーFBに対する右半球に優勢な処理を反映することが示唆された。しかし、後期FRNがどのような右半球優勢な処理に関わるのかを特定するのは、本研究の限られた脳波記録部位だけでは難しい。その特定には記録部位を増やした検討が必要である。また、空間情報処理には注意の影響が指摘されており (Colby & Goldberg, 1999; Behrmann, Geng, & Shomstein, 2004),

本研究の後期FRNが運動感覚と空間情報の統合を反映しているならば、課題遂行時の注意分配の影響を受けることが推測され、今後の検討課題である。

引用文献

- Behrmann, M., Geng, J. J., & Shomstein, S. (2004). Parietal cortex and attention. *Current Opinion in Neurobiology*, *14*, 212-217.
- Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1999). Space and attention in parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, *22*, 319-349.
- Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, *5*, 303-305.
- Eppinger, B., Kray, J., Mock, B., & Mecklinger, A. (2008). Better or worse than expected? Aging, learning, and the ERN. *Neuropsychologia*, *46*, 521-539.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In C. Brunia, A. Gaillard, & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological Brain Research*. Tilburg: Tilburg University Press. pp.192-195.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1990). The error-related negativity: An event-related brain potential accompanying errors. *Psychophysiology*, *27*, S34 (Abstract).
- Ghilardi, M. F., Ghez, C., Dhawan, V. M., Moeller, J., Mentis, M., Nakamura, T., Antonini, A., & Eidelberg, D. (2000). Patterns of regional brain activation associated with different forms of motor learning. *Brain Research*, *871*, 127-145.

平井達也 (2012). 加齢が運動学習中のエラー処理過程に及ぼす影響. 第42回日本臨床神経生理学会学術大会 **40**; 446.

Miltner, W. H. R., Braun, C. H., & Coles, M. G. H. (1997). Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: evidence for a "generic" neural system for error detection. *Journal of Cognitive*

Neuroscience, **9**, 788-798.

Pietschmann, M., Simon, K., Endrass, T., & Kathmann, N. (2008). Changes of performance monitoring with learning in older and younger adults. *Psychophysiology*, **45**, 559-568.

Salthouse, T. A. (2000). Aging and measures of processing speed. *Biological Psychology*, **54**, 35-54.