

スポーツ外傷・障害の改善を目的とした脳情報の可視化システムの開発

中野英樹

京都橘大学健康科学部理学療法学科

1. はじめに

平成 24 年度の体力・スポーツに関する世論調査（文部科学省）によると、週に 3 日以上、運動・スポーツを実施する人の割合は 30.1%であり、30 年前と比較して、13%も増加していることがわかっている。これを年代別にみると、週に 3 日以上、運動・スポーツを実施する人の割合は、20 歳代が 14.0%、30 歳代が 12.4%、40 歳代が 17.4%、50 歳代が 30.4%、60 歳代が 42.4%、70 歳以上が 53.6%であり、高齢になるほどスポーツ人口が増加することがわかっている。スポーツ実施中の外傷発生率は 0.91%であり（スポーツ安全協会, 1997）、高齢になるほど骨折や死亡などの重症例につながるケースが多いことが報告されている（Kammerlander C, et al. *Aging Clin Exp Res.* 2012）。以上のことから、超高齢社会を迎えた日本においてスポーツ外傷・障害を改善させるための取り組みは重要な課題である。

スポーツ外傷・障害を改善させるためのツールとして、運動イメージを用いたメンタルプラクティスが挙げられる（Holmes PS, et al *Curr Opin Psychol.* 2017）。運動イメージとは、実際の運動を伴わない運動の心的シミュレーションのことを意味する（Jeannerod M. *Behav Brain Sci.* 1994）。この運動イメージは、実際の運動実行と類似した脳領域を賦活させ（Decety J, et al. *Nature.* 1994）、運動スキル獲得や筋出力を有意に向上させることがわかっている（Pascual-Leone A, et al. *J Neurophysiol.* 1995; Yue G, et al. *J Neurophysiol.* 1992）。しかしながら、運動イメージを用いたメンタルプラクティスは、実施している運動イメージが適切か否かを対象者にフィードバックできないという問題点があり（Bai O, et al. *NeuroRehabilitation.* 2014）、それにより運動イメージで得られる効果には個人差が生じることが示唆されている（van der Meulen M, et al. *Hum Brain Mapp.* 2014）。

上記の問題点を解決する方法として、運動イメージ中の脳活動を対象者にフィードバックしながらトレーニングを行うニューロフィードバックトレーニングが挙げられる。過去の研究により、ニューロフィードバックを用いた運動イメージトレーニングは対象者の運動イメージ能力ならびに運動パフォーマンスを有意に向上させることが明らかにされている（Mihara M, et al. *PLoS One.* 2012; Mihara M, et al. *Stroke.* 2013）。しかしながら、これまでの研究ではニューロフィードバックの感覚モダリティとして視覚が用いられており、他の感覚モダリティを用いたニューロフィードバックの効果に関しては十分に明らかにされていない。過去の研究により、運動技能獲得の速度は聴覚フィードバックより視覚フィードバックが速いが、獲得した運動技能の維持は視覚フィードバックより聴覚フィードバックが高いことが報告されている（Ronsse R, et al. *Cereb Cortex.* 2011）。さらに、運動パフォーマンスの向上は、個々の注意が喚起されやすい感覚モダリ

ティに依存することも明らかにされている (Sakurada T, et al. *Exp Brain Res.* 2016; Sakurada T, et al. *Brain Behav.* 2019). 以上のことから, 視覚のみならず他の感覚モダリティを用いたニューロフィードバックのトレーニング効果を検証することは, スポーツ外傷・障害を改善させるツールとして応用するために重要であると考えられる。

そこで本研究では, 運動イメージ中の脳活動を視覚や聴覚にてリアルタイムにフィードバックするニューロフィードバックを用いたトレーニングが健常者の運動イメージ能力に及ぼす効果について検証することを目的とした。

2. 方法

2.1. 対象

対象は, 本研究に参加の同意を得た健常者 30 名とした。全ての対象者は, 視覚フィードバック群, 聴覚フィードバック群, コントロール群にランダム割付けされた。

2.2. 課題

本研究は, トレーニング前評価, トレーニング, トレーニング後評価で構成された (図 1)。全ての対象者は, トレーニング期間中に左手関節背屈の運動イメージ課題を実施した。その際, 運動イメージ中の脳波活動を, 視覚フィードバック群には視覚にて, 聴覚フィードバック群には聴覚にてフィードバックした (図 2)。なお, コントロール群にはフィードバックを行わなかった。運動イメージは視覚イメージと筋感覚イメージに分類されるが (Guillot A, et al. *Hum Brain Mapp.* 2009), 本研究では筋感覚イメージを用いた。トレーニング期間中の試行回数は, 安静 5 秒, 課題 5 秒を 1 試行とし, 計 60 試行実施した。

トレーニングの効果を判定するために, 全ての対象者はトレーニング前後に評価を行った。評価項目は左手関節背屈の運動イメージ課題 (フィードバックなし) とし, その課題中の脳波を測定し, 比較検討した。試行回数は, 安静 5 秒, 課題 5 秒を 1 試行とし, 計 20 試行実施した。また, Visual Analogue Scale (VAS) を用いて運動イメージの鮮明度を測定し, 比較検討した。

2.3. 測定方法

脳波の測定には脳波計 (EEG-9100, 日本光電社, 日本) とアクティブドライ電極システム (ミユキ技研社, 日本) を用いた。国際 10-20 法に基づいた 19 チャンネル (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2), サンプリング周波数 1,000Hz で測定した。リファレンス電極は両耳朶に装着した。脳波の解析には, Microsoft Visual Studio (Microsoft 社, USA) と MATLAB (MathWorks 社, USA) を使用した。周波数解析を用いて, 運動イメージに関連する感覚運動領域 (C4) の μ 帯域 (8-13 Hz) (Llanos C, et al. *Neuropsychologia.* 2013) における事象関連脱同期 (event-related desynchronization : ERD) の増減を視覚または聴

覚にて対象者にリアルタイムにフィードバックした。

2.4. 統計解析

トレーニング前後の評価における運動イメージ課題中の ERD は、群の要因（視覚フィードバック群・聴覚フィードバック群・コントロール群）と時間の要因（前評価・後評価）による二要因分散分析を用いて比較した。同様に、トレーニング前後の評価における運動イメージの鮮明度（VAS）は、群の要因（視覚フィードバック群・聴覚フィードバック群・コントロール群）と時間の要因（前評価・後評価）による二要因分散分析を用いて比較した。統計解析には SPSS 24.0（IBM 社, USA）を使用し、有意水準は 5%未満とした。

3. 結果

統計解析の結果、トレーニング前後の評価における運動イメージ課題中の ERD は、群の要因と時間の要因に有意な交互作用を認めた ($p < 0.05$)。事後検定の結果、視覚フィードバック群と聴覚フィードバック群の ERD はトレーニング前と比較してトレーニング後に有意な増加を示した ($p < 0.05$)。一方、コントロール群には有意差を認めなかった ($p > 0.05$) (図 3)。

また、トレーニング前後の評価における運動イメージの鮮明度（VAS）は、時間の要因に主効果を認めた ($p < 0.05$) (図 4)。

4. 考察

本研究により、トレーニング前後の評価における運動イメージ課題中の ERD ならびに運動イメージの鮮明度（VAS）は、視覚フィードバック群と聴覚フィードバック群で有意な増加を示した。以上のことから、視覚ならびに聴覚を用いたニューロフィードバックの運動イメージトレーニングは、対象者の運動イメージ能力を向上させることが明らかにされた。

視覚ならびに聴覚を用いたニューロフィードバックにより、対象者の運動イメージ能力が向上した理由として、フィードバック情報による学習の強化が考えられる (Sitaram R, et al. *Nat Rev Neurosci.* 2017; Enriquez-Geppert S, et al. *Front Hum Neurosci.* 2017)。過去の研究により、学習段階における反復的なフィードバック情報はその学習におけるパフォーマンスを改善させることが報告されている (Seitz AR, et al. *Neuron.* 2009; Jessup RK, et al. *Neuron.* 2009)。本研究においても、実施している運動イメージの適否が視覚ならびに聴覚を介して対象者に反復的にフィードバックされたことから、フィードバック情報を基に実施している学習が強化された結果、対象者の運動イメージ能力が向上したことが示唆された。

一方、本研究では視覚フィードバック群ならびに聴覚フィードバック群のトレーニング前後の評価における運動イメージ課題の ERD ならびに運動イメージの鮮明度（VAS）は、トレーニング前後間では有意差を認めたが、群間では有意差を認めなかった。上述した通り、運動技能

獲得の速度は聴覚フィードバックより視覚フィードバックが速いが，獲得した運動技能の維持は視覚フィードバックより聴覚フィードバックが高いことが報告されている（Ronsse R, et al. *Cereb Cortex*. 2011）．さらに，運動パフォーマンスの向上は，個々の注意が喚起されやすい感覚モダリティに依存することも明らかにされている（Sakurada T, et al. *Exp Brain Res*. 2016; Sakurada T, et al. *Brain Behav*. 2019）．本研究では，ニューロフィードバックのトレーニング期間が短く，また学習の保持効果や個々の注意が喚起されやすい感覚モダリティに関しても検討できていない．今後の研究ではこれらの点を明らかにすることで，視覚ならびに聴覚ニューロフィードバックを用いた運動イメージトレーニングの汎用性をより詳細に検討することができる．また，これらを明らかにすることでスポーツ外傷・障害を改善させるテーラーメイド型のニューロフィードバックトレーニングの開発につなげることができると考える．

5. まとめ

本研究では，視覚ならびに聴覚ニューロフィードバックを用いた運動イメージトレーニングが健常者の運動イメージ能力に及ぼす効果について検証した．その結果，視覚ならびに聴覚ニューロフィードバック群は，トレーニング後の運動イメージに関連する脳波活動ならびに運動イメージの鮮明度が有意に増加した．本研究により，視覚ならびに聴覚ニューロフィードバックを用いた運動イメージトレーニングは健常者の運動イメージ能力を促進させることが明らかにされ，スポーツ外傷・障害を改善させるツールとして応用できる可能性が示唆された．

参考文献

- スポーツ安全協会. スポーツ等活動中の傷害調査. 1997.
- 文部科学省. 体力・スポーツに関する世論調査 (平成 25 年 1 月調査).
http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/chousa04/sports/1338692.htm
- Bai O, Huang D, Fei DY, Kunz R. Effect of real-time cortical feedback in motor imagery-based mental practice training. *NeuroRehabilitation*. 2014;34(2):355-63.
- Decety J, Perani D, Jeannerod M, Bettinardi V, Tadary B, Woods R, Mazziotta JC, Fazio F. Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*. 1994 Oct 13;371(6498):600-2.
- Enriquez-Geppert S, Huster RJ, Herrmann CS. EEG-Neurofeedback as a Tool to Modulate Cognition and Behavior: A Review Tutorial. *Front Hum Neurosci*. 2017 Feb 22;11:51.
- Guillot A, Collet C, Nguyen VA, Malouin F, Richards C, Doyon J. Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study. *Hum Brain Mapp*. 2009 Jul;30(7):2157-72.
- Holmes PS, Wright DJ. Motor cognition and neuroscience in sport psychology. *Curr Opin Psychol*. 2017 Aug;16:43-47.
- Jeannerod M. The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behav Brain Sci*. 1994 June;17(2):187-202.
- Jessup RK, O'Doherty JP. It was nice not seeing you: perceptual learning with rewards in the absence of awareness. *Neuron*. 2009 Mar 12;61(5):649-50.
- Kammerlander C, Braito M, Kates S, Jeske C, Roth T, Blauth M, Dallapozza C. The epidemiology of sports-related injuries in older adults: a central European epidemiologic study. *Aging Clin Exp Res*. 2012 Oct;24(5):448-54.
- Llanos C, Rodriguez M, Rodriguez-Sabate C, Morales I, Sabate M. Mu-rhythm changes during the planning of motor and motor imagery actions. *Neuropsychologia*. 2013 May;51(6):1019-26.
- Mihara M, Hattori N, Hatakenaka M, Yagura H, Kawano T, Hino T, Miyai I. Near-infrared spectroscopy-mediated neurofeedback enhances efficacy of motor imagery-based training in poststroke victims: a pilot study. *Stroke*. 2013 Apr;44(4):1091-8.
- Mihara M, Miyai I, Hattori N, Hatakenaka M, Yagura H, Kawano T, Okibayashi M, Danjo N, Ishikawa A, Inoue Y, Kubota K. Neurofeedback using real-time near-infrared spectroscopy enhances motor imagery related cortical activation. *PLoS One*. 2012;7(3):e32234.
- Pascual-Leone A, Nguyet D, Cohen LG, Brasil-Neto JP, Cammarota A, Hallett M. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol*. 1995 Sep;74(3):1037-45.
- Ronsse R, Puttemans V, Coxon JP, Goble DJ, Wagemans J, Wenderoth N, Swinnen SP. Motor learning with augmented feedback: modality-dependent behavioral and neural consequences. *Cereb*

- Cortex. 2011 Jun;21(6):1283-94.
- Sakurada T, Hirai M, Watanabe E. Optimization of a motor learning attention-directing strategy based on an individual's motor imagery ability. *Exp Brain Res*. 2016 Jan;234(1):301-11.
- Sakurada T, Hirai M, Watanabe E. Individual optimal attentional strategy during implicit motor learning boosts frontoparietal neural processing efficiency: A functional near-infrared spectroscopy study. *Brain Behav*. 2019 Jan;9(1):e01183.
- Seitz AR, Kim D, Watanabe T. Rewards evoke learning of unconsciously processed visual stimuli in adult humans. *Neuron*. 2009 Mar 12;61(5):700-7.
- Sitaram R, Ros T, Stoeckel L, Haller S, Scharnowski F, Lewis-Peacock J, Weiskopf N, Blefari ML, Rana M, Oblak E, Birbaumer N, Sulzer J. Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. *Nat Rev Neurosci*. 2017 Feb;18(2):86-100.
- van der Meulen M, Allali G, Rieger SW, Assal F, Vuilleumier P. The influence of individual motor imagery ability on cerebral recruitment during gait imagery. *Hum Brain Mapp*. 2014 Feb;35(2):455-70.
- Yue G, Cole KJ. Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J Neurophysiol*. 1992 May;67(5):1114-23.

前評価	トレーニング	後評価
運動イメージ課題 (フィードバックなし) 20試行	視覚フィードバック群 運動イメージ課題 (視覚フィードバックあり) 60試行	運動イメージ課題 (フィードバックなし) 20試行
	聴覚フィードバック群 運動イメージ課題 (聴覚フィードバックあり) 60試行	
	コントロール群 運動イメージ課題 (フィードバックなし) 60試行	

図 1 : 本研究のプロトコル

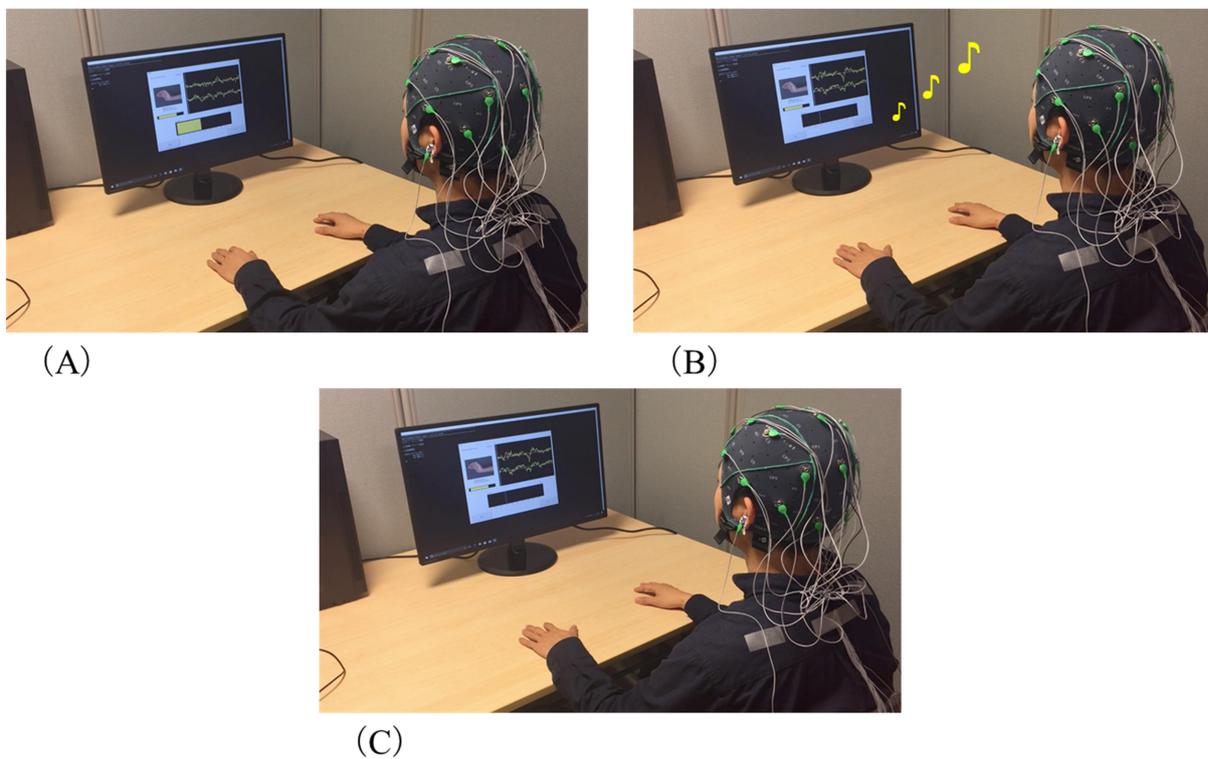


図 2 : 視覚フィードバック群 (A) と聴覚フィードバック群 (B) とコントロール群 (C)

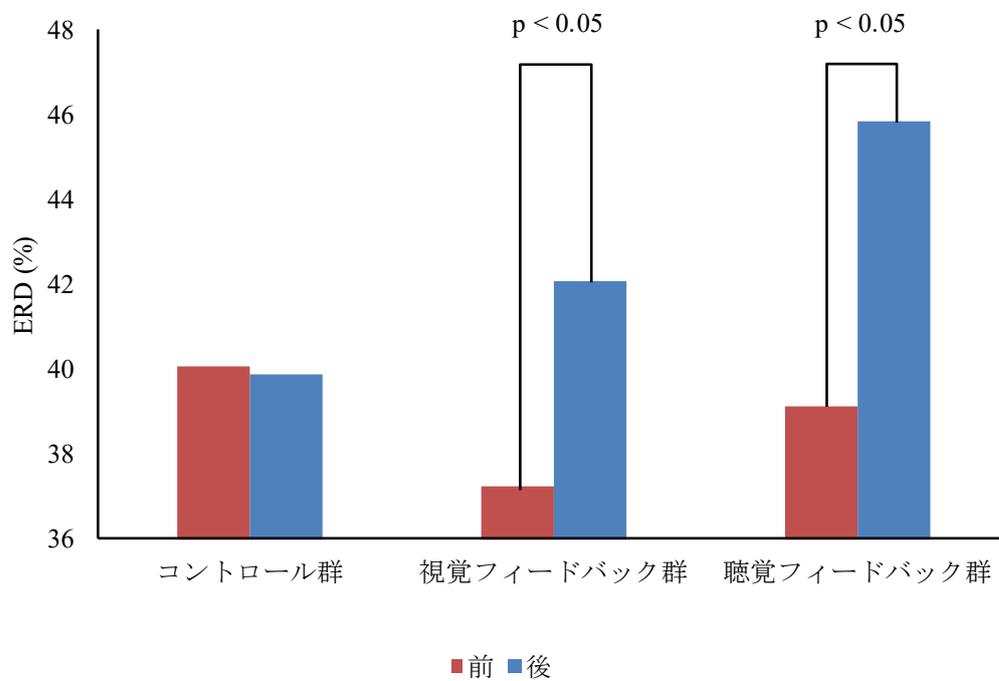


図 3 : トレーニング前後の評価における運動イメージ課題中の ERD の比較

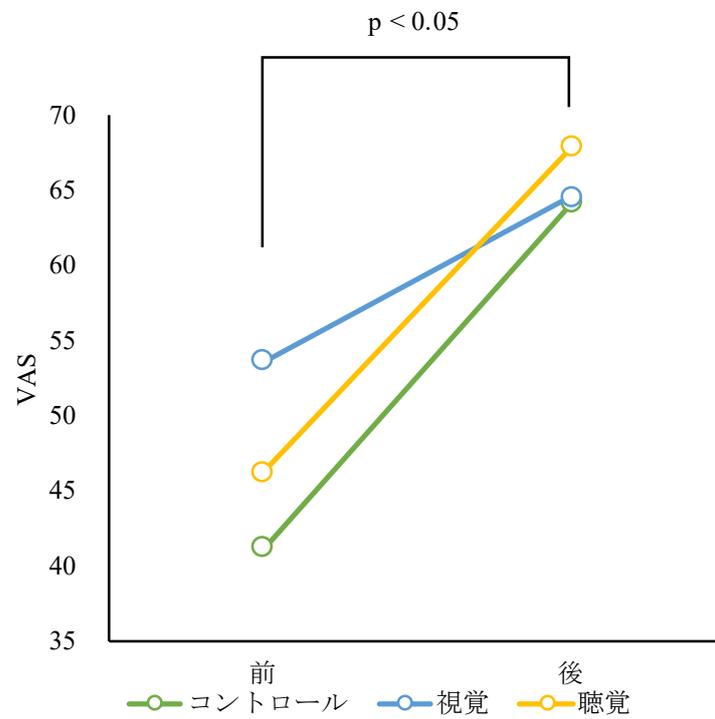


図4：トレーニング前後の評価における運動イメージの鮮明度（VAS）の比較