

末梢電気刺激と随意運動の併用治療に関わる

運動学習効果の検証

保健福祉学研究科保健福祉学専攻：平賀篤

研究指導教員：菅原憲一

研究補助指導教員：笹田哲，中島啓

I. 緒言

1. 研究背景

本邦では後遺症を有するものは年々増加傾向にあり，特にその中でも脳血管障害患者は大きな割合を占める¹⁾．脳血管障害による後遺症者は高齢者のみならず，若年層にも多く見られるのが大きな特徴である²⁾．急性期を脱した後の予後は比較的良好であるため，若年者を中心により高いレベルでの社会復帰が求められていると推察される．また社会復帰後も継続的なリハビリテーションが必要となり，理学療法士にとってこの後遺症の可及的早期な改善に関わる治療法を検討することは重要な課題であると考えられる．

脳血管障害に見られる運動麻痺は後遺症の代表例であるが，これは起立・歩行をはじめとする基本動作に直接的な影響を及ぼし，日常生活動作能力の低下から社会復帰困難につながる恐れがあることが知られている³⁾．そのため，運動麻痺に対するリハビリテーションにおいてより効率的な治療体系を確立することは，日常生活の再獲得から社会復帰を早期化させることが期待できる．さらには医療負担の軽減や介護者負担軽減につながることも期待できる．

よって本研究では運動麻痺を呈する患者に対し，運動パフォーマンス向上をアウトカムとしてその効果的なリハビリテーション介入を具体的に検証し明示することを目的とした．我々がリハビリテーション場面で介入していることは，学習理論の観点からはその学習の過程を提供していることである．例えば脳血管障害の理学療法にて実施していることは，失った機能を回復するよう新たに学習過程を提供していると言い換えることができる．とくに運動機能障害に焦点を絞った場合，随意運動を賦活させ，粗大運動を獲得することと，なめらかで細かい運動の両者を獲得することが重要となる．そこで運動学習の観点から随意運動の調整能力に着目し，介入効果の詳細な検証を行った．

2. 脳血管障害に対する従来のリハビリテーション介入方法

A) 運動療法

運動機能障害に対する介入方法については様々な方法が提案されている⁴⁾⁵⁾。上肢機能障害については麻痺側上肢リーチ運動と両上肢の反復運動を積極的に実施することで効果的な機能改善が得られるといった報告や⁶⁾、非麻痺側上肢を抑制し、麻痺側上肢を強制的に使用する方法により、健常者の手指反復運動が皮質運動野の興奮性増大をもたらした報告⁷⁾がある。さらに関節運動を微調整するような課題を与えた場合、単純な関節運動学習に比べ関節運動のコントロール能力の向上と皮質運動野の興奮性増大が見られるなどの報告がある⁸⁾。これらの報告を総じて、運動機能障害に対して麻痺側の自動運動を用いた目的動作の反復運動は効果的と考えられる。

B) 物理療法

脳血管障害患者の場合は随意運動が不十分であったり、身体の微調整が困難である場合が多く、持久性の問題から障害部位の頻回な使用が困難な事例も多い。そのような対象に対して理学療法アプローチを可能にする方法として電気刺激が挙げられる⁹⁾。電気刺激は随意性に関わらず対象部位を刺激でき、その刺激強度も客観的な指標により調整できるといった特徴がある。さらに、電気刺激による筋感覚入力が生じることで、随意運動による感覚フィードバックに類似した入力を得ることも可能となる¹⁰⁾。健常者を対象に末梢肢に電気刺激を施行した場合、その筋の支配している皮質運動野の興奮性が増大したという報告¹¹⁾¹²⁾¹³⁾もあり、その有用性は高いと考えられる。

3. 理学療法における併用治療の有用性と本研究の目的

近年の理学療法に関連する研究では、運動療法、物理療法それぞれを単独で実施するよりも両者を併用して行うことが効果的であるという報告は多くみられている¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。また随意運動と末梢電気刺激に限局した際にも、皮質運動野の有意な興奮性増加がみられるといった報告は見られている¹²⁾¹³⁾。一方で、運動パフォーマンスの観点から運動学習に対して併用条件により効果的な結果を生じるかについては一定の見解が得られていないのが現状である。この背景を踏まえ、本研究の具体的な目的は、運動機能障害者に対する随意運動と末梢電気刺激の併用効果を明らかにし、その効果的な併用条件をパフォーマンス向上の観点から明確にすることで、最適な運動学習の方法論を構築することとした。この研究目的に対して、健常者を対象とした基礎的検証ならびに脳血管障害患者を対象とした臨床的検証を通じてリハビリテーション介入方略についての指針を示すこととした。

Ⅱ. 第一研究：健常若年者に対する随意運動と末梢電気刺激を併用した際の運動学習効果の検証

前述のように運動療法と物理療法の併用研究については散見されるものの、随意運動と末梢電気刺激の併用によるパフォーマンス向上の観点からみた運動学習効果についての報

告は極めて少ない。そのため第一研究では、基礎的検証として随意運動と末梢電気刺激の併用がそれぞれの単独介入と比較して効果的であるかを明らかにすることとした。対象は左上肢に機能的障害を有さない健常成人 30 名（男性 25 名，女性 5 名，平均年齢 21.0 ± 1.1 歳）とした。運動課題は手関節背屈動作とし、画面上で横に移動するマーカーを背屈筋出力にて上下移動させ、PC ディスプレイ上に表示されている基線上に合わせるよう調整するトラッキング課題とした。練習条件を①随意運動と末梢電気刺激の併用施行，②電気刺激単独施行，③随意運動単独施行，の 3 パターンに設定して 10 名ずつ無作為に振り分けて練習を行い，前後でのパフォーマンス変化について比較した。パフォーマンスの検証にはトラッキング課題時の基線波形との出力誤差，適切な出力量に達するまでの時間誤差，全体の誤差面積合計を使用した。その結果，随意運動，電気刺激単独に比べ両者を併用した群では練習後誤差面積合計が有意に減少した。また手関節背屈出力の上昇を必要とする相にて，両者を併用した群では出力誤差および時間誤差が有意に減少した。

以上の結果より，随意運動と電気刺激の併用がそれぞれ単独で行うよりも運動学習に一定の効果があることが示唆された。また出力を増大させる相において学習効果が見られたため，運動条件を絞った状態で運動学習に有効な電気刺激の刺激方法をさらに検討する必要性があるという課題を見出した。

Ⅲ．第二研究：健常若年者に対する随意運動と末梢電気刺激の併用介入における電気刺激強度の変動が運動学習効果に与える影響

第一研究の結果から，随意運動と電気刺激の併用は，随意運動または電気刺激を単独で行った場合に比べトラッキング課題の基線に対して全体的な誤差の減少と，トラッキング課題の基線の各頂点に対して出力的，時間的誤差が有意に減少したことが明らかになった。一方で電気刺激の刺激方法をさらに検証する必要性があることから，第二研究では併用治療の際の電気刺激条件として可変的な電気刺激パターンの効果について設定し検討することとした。

対象は左上肢に機能的障害を有さない健常成人 20 名（男性 13 名，女性 7 名，平均年齢 20.8 ± 0.7 歳）を対象とし，手関節背屈によるトラッキング課題を運動課題に設定した。随意運動と末梢電気刺激の併用を行う際に，①電気刺激強度を一定にしての刺激，②トラッキング波形に合わせて段階的に電気刺激強度が変動する刺激，の 2 条件で 10 名ずつ無作為に振り分けて比較を行った。パフォーマンスは第一研究同様の出力誤差，時間誤差，全体の誤差面積合計に加え，基線の形にどの程度近似しているかを適合率として検証した。さらに，適合率が最大となるよう基線を移動した際の移動率を最適増幅率，基線移動後の適合率を修正適合率として規定した。誤差面積合計は一部的大幅な誤差があった場合，それ以外の部分が基線と合致していても誤差が大きく算出される。そのため基線との差の大小に影響を受けない適合率を採用し，波形全体の形を捉える手法として差別化した。その結果，電気刺

激方法に限らず練習後の誤差面積合計の減少が見られたが、出力誤差、時間誤差については電気刺激方法による学習差は認められなかった。しかし最適増幅率の比較にて、変動電気刺激を行った群が練習後有意に基線に近似し、修正適合率も有意に上昇した。

以上の結果より、運動課題に合わせた可変的な電気刺激を併用して付与することが有用である可能性が示唆された。本論文の最終目的はリハビリテーション分野における脳血管障害患者への動作獲得のための方略を明らかにすることである。そのため、第一研究、第二研究で得られた知見が脳血管障害患者においても適応されるかどうかの検討が必要となる。

IV. 第三研究：脳血管障害患者における随意運動と末梢電気刺激の併用介入の効果検証

第一研究および第二研究の結果を受け、健常若年者の場合は電気刺激と随意運動の併用において、課題動作に合わせて、さらには学習すべき課題動作の特性（筋出力の増減）に合わせた電気刺激を行うことで効率的な学習を促せることが明らかとなった。最終的に電気刺激と随意運動の併用による臨床応用を前提とする場合、脳血管障害を起因とした運動麻痺患者の運動再学習の方法論としての適応を考慮する必要がある。また、さらなる臨床応用を見越すと年齢による運動障害の予防改善への影響も検討すべき課題である。そのため第三研究では疾患および年齢が電気刺激と随意運動を併用した治療にどのような影響を及ぼすのかを検証しその特性を明らかにすることを目的とした。対象は①脳血管障害患者群 10 名（男性 7 名、女性 3 名、平均年齢 45.4 ± 13.1 歳、発症時期 59.5 ± 29.5 か月）、②健常高齢者群 10 名（男性 6 名、女性 4 名、平均年齢 76.2 ± 4.8 歳）、③健常若年者群 9 名（男性 7 名、女性 2 名、平均年齢 35.0 ± 5.2 歳）とした。第一、第二研究において最もパフォーマンス向上が認められた、トラッキング波形に連動した電気刺激強度を付与しながら随意運動を行う学習方法を採用し、グループにおける効果の差を検証した。第二研究と同様、誤差面積合計と適合率、最適増幅率、修正適合率をアウトカムとした。その結果、脳血管障害患者では学習前後でのパフォーマンスは各群とも向上し、健常若年者と大きく変わらない結果となった。健常高齢者も学習前後のパフォーマンス向上は認めたが、健常若年者のほうが有意に誤差減少した。

以上の結果より、脳血管障害患者において随意運動の出力強度に合わせた電気刺激を併用的に介入することは運動学習に有用であることが明らかとなった。同時に健常高齢者の特徴として運動学習効果はあるものの、健常若年者に比べて緩やかであったことから運動学習効果は疾患依存に比べ年齢依存の影響が大きい可能性が示唆された。

V. 総括

以上の一連の実験的結果から、電気刺激と随意運動の併用は脳血管障害の有無に問わず

改善効果が期待できる手法であることが示唆された。今回採用した課題はトラッキング課題であるが、これは一般的に運動療法として行われている動作調整課題¹⁷⁾や協調運動課題¹⁸⁾にも共通する手法と考えられる。様々な動作が制限される可能性のある脳血管障害患者にとって動作コントロール能力の向上は自立度向上を図る上で重要な要素となるため、本研究で得られた知見は、トラッキング課題のみならず様々な動作の改善を見越した場合の介入方法として有効であるとともにさらなる検証が重要と考えられる。

今後この知見をリハビリテーション上における運動療法上の介入要素としてさらに深化させること、さらには新たなアプローチ方法を得ることで社会的な貢献につなげていけるよう今後の更なる課題として認識をした。

VI. 参考文献

- 1) “第1部 第1章 障害や病気を有する者などの現状と取組み”. 平成30年度版厚生労働白書. 厚生労働省, 2017, pp2-141.
- 2) 澤田徹. (1991). 脳血管障害患者の後遺症対策 自験例の機能予後からみた問題点. 日本内科学会雑誌, 80(4), 583-588.
- 3) 徳本雅子, 石附智奈美, & 宮口英樹. (2015). 脳卒中患者が新規就労・仕事定着に至る過程における気持ちの変化の特徴に関する探索的研究. 日本職業・災害医学会会誌, 63(1), 41-49.
- 4) Chen, J. C., & Shaw, F. Z. (2014). Progress in sensorimotor rehabilitative physical therapy programs for stroke patients. *World J Clin Cases*, 2(8), 316-326.
- 5) Oujamaa, L., Relave, I., Froger, J., Mottet, D., & Pelissier, J. Y. (2009). Rehabilitation of arm function after stroke. Literature review. *Ann Phys Rehabil Med*, 52(3), 269-293.
- 6) Cauraugh, J. H., Kim, S. B. (2003). Stroke motor recovery active neuromuscular stimulation and repetitive practice schedules. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 74(11), 1562-1566.
- 7) Cirillo, J., Todd, G., & Semmler, J. G. (2011). Corticomotor excitability and plasticity following complex visuomotor training in young and old adults. *Eur J Neurosci*, 34(11), 1847-1856.
- 8) Perez, M. A., Lungholt, B. K., Nyborg, K., & Nielsen, J. B. (2004). Motor skill training induces changes in the excitability of the leg cortical area in healthy humans. *Exp Brain Res*, 159(2), 197-205.
- 9) Kroon, J. R., Ijzerman, M. J., Chae, J., Lankhorst, G. J., & Zilvold, G. (2005). Relation between stimulation characteristics and clinical outcome in studies using electrical stimulation to improve motor control of the upper extremity in stroke. *J Rehabil Med*, 37(2), 65-74.
- 10) Kimberley, T. J., Lewis, S. M., Auerbach, E. J., Dorsey, L. L., Lojovich, J. M., & Carey, J. R.

- (2004). Electrical stimulation driving functional improvements and cortical changes in subjects with stroke. *Exp Brain Res*, 154(4), 450-460.
- 11) Schabrun, S. M., Ridding, M. C., Galea, M. P., Hodges, P. W., & Chipchase, L. S. (2012). Primary sensory and motor cortex excitability are co-modulated in response to peripheral electrical nerve stimulation. *PLoS One*, 7(12), e51298.
 - 12) Sugawara, K., Tanabe, S., Higashi, T., Tsurumi, T., & Kasai, T. (2011). Changes of excitability in M1 induced by neuromuscular electrical stimulation differ between presence and absence of voluntary drive. *Int J Rehabil Res*, 34(2), 100-109.
 - 13) Sugawara, K., Yamaguchi, T., Tanabe, S., Suzuki, T., Saito, K., & Higashi, T. (2014). Time-dependent changes in motor cortical excitability by electrical stimulation combined with voluntary drive. *Neuroreport*, 25(6), 404-409.
 - 14) Alon, G., Conroy, V. M., & Donner, T. W. (2011). Intensive training of subjects with chronic hemiparesis on a motorized cycle combined with functional electrical stimulation (FES): a feasibility and safety study. *Physiother Res Int*, 16(2), 81-91.
 - 15) Knight, C. A., Rutledge, C. R., Cox, M. E., Acosta, M., & Hall, S. J. (2001). Effect of superficial heat, deep heat, and active exercise warm-up on the extensibility of the plantar flexors. *Phys Ther*, 81(6), 1206-1214.
 - 16) 平賀篤, 高木峰子, 隆島研吾, & 鶴見隆正. (2019). 下腿三頭筋に対するスタティックストレッチングと超音波療法の同時施行による効果の検討. *理学療法科学*, 34(4), 505-510.
 - 17) 潮見泰藏. (2004). 脳卒中患者に対する運動スキルの最適化を図るための介入方略. *理学療法科学*, 19(1), 1-5.
 - 18) 矢島大輔, & 大城昌平. (2008). 時系列データ解析による脳血管障害患者のリーチ動作の運動解析. *理学療法科学*, 23(6), 765-772.