

研究室訪問

順天堂大学 保健医療学部理学療法学科 准教授 高橋 容子 (2020年度受領者)
受領時研究課題：「転倒予防に向けた脊髄神経基盤の解明と
ロボットリハビリテーションの開発」

2024年7月、2020年度研究助成(A)の受領者である順天堂大学保健医療学部理学療法学科の高橋容子先生の研究室を、選考委員の榎木委員、諏訪委員と共に訪問しました。新型コロナ蔓延に伴う中断を経て2023年度から再開した研究室訪問ですが、脳卒中患者のリハビリテーションを革新するという社会的意義に感銘を受けると共に、患者・理学療法士・機械の三位一体の関係の中での人間と機械の調和を目指す点の斬新さ、さらに機械が人間の機能をサポートするにとどまらず人間の機能の回復につなげるコンセプトは、当財団の方向性を考える上で大きな示唆をいただく1日となりました。

リポーター 事務局 橋本光博

—まず、高橋先生が脳卒中後の歩行再獲得のためのロボットリハビリテーションや、ニューロリハビリテーションの研究に取り組まれるようになった経緯などを教えてください。



私は医学的リハビリテーションの専門職である理学療法士として病院勤務をした後、順天堂大学保健医療学部理学療法学科に着任しました。慶應義塾大学大学院医学研究科リハビリテーション医学教室で博士号を取得し、株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR)脳情報通信総合研究所脳情報研究所ブレインロボットインタフェース研究室で連携研究員、東京湾岸リハビリテーション病院で非常勤研究員としても研究に参加しています。

これまで、脳卒中や脊髄損傷後に歩行を再獲得するためのリハビリテーション開発に取り組んできました。中枢神経が損傷を受けることによって脳から筋肉に運動指令を伝達することが難しくなって麻痺などの運動障害が起こり、歩行が難しくなることが多くあります。加齢によって歩行の問題が起きることもあるので、高齢化社会において歩行は無視できない課題でもあります。そういった方々のリハビリテーションを行うのが、理学療法士の職務です。痛みや麻痺の重症度、歩行の特徴や感覚の程度等が患者さんそれぞれに違いますし、回復過程もさまざまに個人差が大きく、最適なりハビリテーションは一樣ではないはずです。しかし、従来の歩行リハビリテーションはやや画一的であり、症状の個別性に十分対応できていない現状があります。臨床現場で働きながら、重症度の高い方が歩行を再獲得するには現代医学の限界があり、それを突破できないかと考えるようになりました。

また、麻痺の程度が軽い人は従来のやり方でも病前と遜色ないほどの歩行や、補助具なし、あるいは杖や装具を使えば支えなしで歩けるようになる方もおられます。しかし、再獲得が困難な方の割合はかなり高く、車いすや寝たきりの生活になってしまう方もおられる。いまだ解明されていない下肢や歩行の神経回復メカニズムを明らかにすれば、それに合わせたさまざまな治療が提案できるでしょうし、近年発達の目覚ましい再生医療を組み合わせるといった可能性も考えられます。し

かし、どんな運動をどれくらいの量で行えば麻痺が回復していくのかは、未だ確立されていません。そこで、神経科学的知見やロボットなど最先端技術を用いて新しい評価や治療技術を開発し、「歩くことを諦めないリハビリテーション」の実現を目指す研究を行っています。具体的には、電気生理学的評価技術を用いた歩行の神経制御メカニズムや、脳卒中後の歩行回復メカニズムの解明、ニューロモデュレーションによる神経治療の開発、電気刺激や下肢外骨格ロボットを用いた歩行ニューロリハビリテーションの開発を医学・工学連携研究を通して進めています。

上肢のリハビリテーションでは、脳梗塞させたサルの実験から、運動をさせると脳の腕や肩寄りの支配領域が指を動かすための領域に置き換わったり、断絶した神経を繋ぐ側副路ができたりして指の動きが良くなることがわかっています。つまり、脳が神経細胞を柔軟に変えることによって、運動の改善・制御をしていくわけです。そこからニューロリハビリテーションは一気に発展しました。患者さんたちが指を伸ばそうとイメージする脳波を計測し、いい脳波がとれたら装具で指を伸ばす運動を繰り返すと、重度の上肢麻痺が改善されたという報告もあります。このように上肢に関してはかなり研究が進んでいるのですが、残念ながら下肢にはまだ活かされていませんでした。そこで、慶應義塾大学のリハビリテーション医学教室が下肢に対するニューロリハビリテーションの研究をしていたことから、こちらの大学院で神経生理学の研究を始めました。

脊髄相反性抑制という神経経路は、背屈と底屈という足の動きの切り替えを制御しています。脳卒中患者さんでは、脊髄神経経路自体は損傷していないにもかかわらず、下行性経路が阻害されることで脊髄相反性抑制が乱れて足首をうまく動かせなくなる、つま先が突っ張る痙縮という病態に関連していることを明らかにした先行研究があるので、大学院では脊髄相反性抑制に着目して足首の動きを改善する研究に取り組みました。先行研究を参考に生体内に起こっている神経活動を模擬するパラメータを活用し、その電気刺激（Patterned Electrical Stimulation: PES）をすると脊髄の神経経路がうまく調節される（ニューロモデュレーション）を用いて、脳卒中により片麻痺のある患者さんの足の動きが良くなるかを検討しました。さらに自分でつま先を上げる随意運動に、この電気刺激を加えると相反性抑制に対してニューロモデュレーション効果が高まるかを検討したところ、電気刺激だけでも脊髄の神経経路修飾に効果があり、運動を組み合わせるとより高まるという結果が得られました。脳卒中の発症から半年以上経つと麻痺はあまり改善しないというのが定説ですが、PESというニューロモデュレーションの電気刺激と運動を組み合わせると、足首の動きが良くなる傾向が見られました。これにより、ニューロモデュレーションと運動の組み合わせで、発症からかなり時間が経った脳卒中患者さんでも足の背屈運動が改善される可能性を示すことができました。

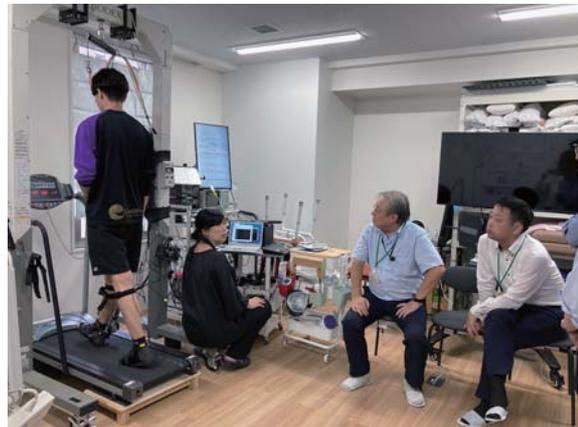


——助成対象となった研究課題と成果は、どのようなものだったのでしょうか。

課題は「転倒予防に向けた脊髄神経基盤の解明とロボットリハビリテーションの開発」で、まず歩行中の脊髄神経経路の評価に取り組みました。前段階として、人間の歩行は足首だけでなく、膝や股関節も関係しますから、大腿下腿の協調と関節をまたいだ神経経路が重要ではないかと考えました。脳卒中患者さんでは大腿四頭筋と下腿三頭筋の協調運動障害によって、なめらかな膝の動きが阻害されていることを明らかにした先行研究があります。そこで、複数の神経経路をさまざまな

病期で、どの経路が阻害されるとどのような運動障害が起こりやすいのかを調べることにしました。回復期と生活期の2群で4種類の脊髄神経経路の状態を評価し、麻痺側下肢の運動機能や歩行評価との関係を検討した結果、回復期の患者さんはHeteronymous facilitationの神経経路が障害されている場合に大腿四頭筋や下腿三頭筋の痙縮が強く出ており、相反性抑制が障害されている場合はハムストリングスの痙縮が強く出ることが明らかになりました。また、生活期（維持期）の患者さんでは、神経経路と痙縮の状態は関係しないことがわかりました。これは、将来的にニューロリハビリテーションを行う際の新たな神経学的バイオマーカーとなる可能性があると考えています。一方で、歩行との関係の検討については、安静時の脊髄神経経路の評価だけでは限界があり、歩行などの運動中の神経動態を捉える課題に取り組むことにしました。

歩行中の脊髄神経経路評価には、ATRの野田先生と関西医科大学の長谷先生が開発された歩行アシストロボットのシステムを応用した電気生理学的評価を行いました。脳卒中片麻痺患者さんの歩行は変動性が大きく、再現性の高い電気刺激を打つタイミング調整が非常に難しいのですが、使用したロボット制御システムは4つのセンサーをもとにしたアルゴリズムを使い、フィードフォワード形式で制御するという歩行周期同定技術が非常に高いものです。電気生理学的評価にはヒラメ筋H反射を用いて、前脛骨筋からヒラメ筋に対する相反性抑制を評価します。踵が接地する立脚期の開始点、次の踵接地の直前を遊脚期の終了点とし、この1歩行周期を分割した8時点でH反射の計測を行います。H反射やM波の振幅をリアルタイムに計測・表示するシステムにより、電気刺激の刺激強度を歩行周期に合わせて微細に調節することができます。健常者の測定で、立脚期には相反性抑制が脱抑制状態になり、足を前に出す遊脚期では相反性抑制が強まるという先行研究と矛盾しない結果を得ることができました。



しかし、実施期間中に新型コロナウイルス感染拡大の影響を受けてしまい、広く被験者を募集しての実験が困難になりました。テレビ会議システムを活用して機器開発や実験を進めましたが、今後はこのような状況下でも遠隔で信頼性の高い電気生理学的評価が行えるようなシステムづくりが必要になると考えています。現在では、脳卒中の方での測定を再開できています。

——その後、この研究はどのように発展したでしょうか。

ロボットアシストでつまずきにくい歩行を学習できるかをゼミ生の皆さんと研究中で、これは中枢神経疾患患者や高齢者など転倒リスクが高い方へのリハビリテーションに役立つと考えています。ロボットアシストの種類によってつまずきやすさの指標 minimum toe clearance (MTC) の変化を検討し、健常者は底背屈アシストと背屈のみのアシストでMTCが有意に高くなることが明らかになりました。次の段階では健常者にアシスト歩行練習を実施してもらい、ロボットを外して平地でのMTCが変化するかどうかを検討し、効果的なリハビリテーションに繋がるかどうかを検証しています。さらに歩き方の個人差は非常に大きいですし、神経疾患患者や高齢者、たとえば腰痛などの要素が歩行の癖に絡んでいる場合にはどのような変化が得られるのか等、さらなる検討が必要です。

全世界の25歳以上の4人に1人が一生に一度は脳卒中を発症するといわれ、さらにその4割は歩行の再獲得が困難になることがわかっています。さらにパーキンソン病や高齢者も、脊髄の神経

経路が障害されて足の動きが悪くなる可能性が指摘されており、これらに対する歩行の再獲得や改善に向けたニューロリハビリテーションも必要ははずですが、今はまだアプローチされていません。歩行の困難に直面している全ての人に、ニューロモデュレーションとロボティクスを融合させたりリハビリテーションは波及効果があると考えております。

——当団体の研究助成のテーマである「人間と機械の調和を促進する」については、どのようにお考えでしょうか。

ロボットやニューロモデュレーション技術といった「機械」は、歩行の再獲得を目指す方たちへのリハビリテーションに非常にマッチすると考えています。そこには理学療法士が患者さんの状態やリクエストに応じてプログラムを調整するなど「人間」による介入が不可欠となることが「人間と機械の調和」にあたるのかなと思います。また、私たちは科学的に正しい治療を提供しようと思しますが、患者さんの困りごとや、歩行についての考えとは乖離していることが多いです。たとえば、膝がロックしている状態であれば私たちは「正常歩行から逸脱している」と考えるわけですが、その方にとっては歩きやすいやり方がロックしている状態だったからなのですね。ですから、患者さん一人ひとりへのきめ細やかな聴取や目配り、気配りは不可欠であり、その上で、その方自身の歩きにくさに対し「ロボットがアシストするリハビリテーションをやってみませんか」と提案することが、「調和」のスタート地点といえるのかもしれない。

ATR と慶應義塾大学の共同研究「空気圧人工筋制御の下肢外骨格ロボットを用いた脳卒中患者の歩行リハビリ開発プロジェクト」において、患者さんに10日間のロボットアシスト歩行練習を行っていただきました。リアルタイムで膝角度を見てもらいながらアシスト歩行することで、膝関節の動きと認識を再教育する試みです。患者さんは膝が伸びているのかどうかは、フィードバックで初めて気がついたと言われていました。さらに最初の4日ぐらいまでは歩きにくさがあったけれども、5日目ぐらいに「ロボットの動きに私の足を合わせて動かしてみよう」と思ったときから、歩きやすくなっていったそうです。つまり、患者さん側の感じ方が変わったのです。そこから一気に足の動きがなめらかになりました。歩行練習後は、歩き方の見目が改善しただけでなく、長い距離を歩いても疲れにくくなり、最終的に6分間における歩行距離も伸びて、歩行効率が向上したことが伺えました。大きな力を使わなくても足が前に出て楽に加速できることにご自身が気づいた結果、とても楽に歩けるようになったのです。それを「麻痺になる前の歩きを思い出した気がする」と表現されました。患者さんの感じ方やその変化をきちんと聴取し、私たちもなぜ、何が、どう変わったのかを考えるという両者の情報共有によってうまくいった症例でした。このようなコミュニケーションをきちんと入れ込んだリハビリプログラムにしていくことが重要で、そこに「人間と機械の調和」があるような気がします。



——今後の展望を教えてください。

歩行ニューロモデュレーションの確立に向けて、歩行中の脳と脊髄の制御関係を明らかにしていくことが次の目標です。治療としては、その方の評価結果次第で脳からの制御と末梢からの感覚入力の両方を組み合わせ、脳には経頭蓋磁気刺激や経頭蓋電気刺激、脊髄に経皮的脊髄電気刺激、大腿神経や総腓骨神経に対するPESなどの末梢神経電気刺激、外骨格ロボットといったデバイスを

患者さんの病態に合わせて適切に組み合わせた、テーラーメイドな歩行ニューロモデュレーションが可能になればと考えています。

また、理学療法士の教育も大きな課題になっていくだろうと感じています。ロボットなど機械操作が難しいという声もあり、「現状ではできないことが可能になる」と納得できなければ使おうとしないような印象があります。ですから、現在のリハビリテーションをどのように補い、革新性をもたらしてくれるのかを打ち出し、臨床現場に啓蒙していくことも重要でしょう。また、神経経路など難解な領域にも及ぶものなので、こちらがわかりやすく解説することと、理学療法士のリテラシーを向上させる教育も必要になると思います。

——当財団に望まれることはありますか。

「デバイスを用いたリハビリテーション開発」という私のテーマを支援してくださる研究費はほとんど見当たらないような状態の中、立石科学技術振興財団の【研究助成 A】をいただいたことは非常にありがたく、深く感謝しております。次は【研究助成 S】をいただけるように、さらに研鑽を積んでいきたいと考えております。どうもありがとうございました。

