

健常幼児および脳性まひ児における握力調整の特徴

Grip force regulation in children with and without cerebral palsy

葉石 光一¹⁾・奥住 秀之²⁾・國分 充³⁾
小松 歩⁴⁾・北島 善夫⁵⁾・細瀨 富夫⁶⁾

Koichi Haishi Hideyuki Okuzumi Mitsuru Kokubun
Ayumi Komatsu Yoshio Kitajima Tomio Hosobuchi

I はじめに

対象を扱う手は子どもの発達において重要な役割を担っている。例えば谷田貝 (1992) は手の運動能力を「日常生活に必要な身のまわりのことを行う能力」としており、また手操作の巧緻性が精神発達と高い相関をもつことから、手の運動発達を「自立の基礎」と述べているほどである。そういった対象を扱う手の巧緻性にとって、安定して、かつ目的にそって握力を調整できることは重要な要因である (Blank, Heizer & von Voss, 2000) とされている。

握力調整の発達に関する先行研究を概観すると、子どもの握力調整の様相が大人と同様のものとなり始めるのは幼児期である。しかし発達的な変化がみられる時期についての知見にはばらつきがみられる。本研究の第一の目的は、種々の研究によって指摘されている握力調整の発達過程に関する知見を整理することである。また、健常幼児の握力調整の研究とともに、脳性まひ児を対象として行われた研究の整理も行っていく。脳性まひは、脳の非進行性病変による運動障害であるが、運動機能の問題はその結果として生じる感覚機能

にも何らかの影響を与えると考えられる。脳性まひ児の運動機能をみていくことで運動とその発現にとって重要な感覚の障害が運動の実行状態に与える影響を検討することができる。またそのようにして整理された知見は、健常幼児の運動発達において運動機能と感覚情報とがどのような役割を果たしているかを考える手掛かりともなる。その上で、手の運動調整の発達に関する研究の今後の課題を示すことを本研究の第二の目的とする。

II 幼児期の握力の発達

握力調整の発達に関わる一つの基本的要因として、握力そのものの発達が考えられる。そこで、まず幼児期の子どもの握力がどのような発達的变化を示すのかを概観する。幼児期の握力発達に焦点を当てた研究は少ないが、それらは握力の年齢変化と性差、左右差の関係に触れているものと、握力に影響を及ぼす身体要因の検討を行っているものに大別できる。

1. 年齢変化における性差・左右差

幼児期の握力発達のみ焦点を当てて行われた研究は少ない。多くの握力発達に関する研究で

1) 長野大学非常勤講師・上越教育大学准教授

2) 東京学芸大学准教授

3) 東京学芸大学教授

4) 白梅学園短期大学准教授

5) 千葉大学准教授

6) 埼玉大学教授

は、握力の目立った発達の変化が学童期から思春期にかけてみられるためか、幼児期の発達に関する詳細な記述がみられない。そういった状況ではあるが、どの研究でも一貫して指摘されていることは、幼児期の最大握力が年齢に伴って強くなるという点である (Newman ほか, 1984; Robertson & Deitz, 1988; Dunn, 1993; Link ほか, 1995; Smet & Vercammen, 2001; Hager-Ross & Rosblad, 2002; Lee-Valkov ほか, 2003)。

性差については、Newman ほか (1984) のように全ての年齢 (彼らの被験者は5歳から18歳の子ども1417人) において男児の握力が女児の握力よりも強いとしているものもあるが、多くの研究では男女間に差はないとしている (Dunn, 1993; Link ほか, 1995; Smet & Vercammen, 2001; Hager-Ross & Rosblad, 2002)。Newman ほか (1984) は男女差についての有意差検定を行っておらず、この点で論述の違いが生じた可能性がある。なお Newman ほか (1984) はそもそも幼児期にあまり注目を向けていないが、握力の発達傾向に関して、13歳を境に女児の握力の伸びが鈍くなり、男女差が著しくなるという傾向を捉えており、こういった全般的傾向については他の研究が得ている結果と変わらない。

左右差については、Robertson & Deitz (1988) は差があるとしているが、最近の研究では左右差はないとしているものが目立つ (Newman ほか, 1984; Link ほか, 1995; Smet & Vercammen, 2001; Hager-Ross & Rosblad, 2002)。

左右差について、利き手の影響を考慮した研究もみられる。Smet & Vercammen (2001) は利き手と非利き手の差はないものの、右利き児では利き手のほうが非利き手よりも握力が強い傾向にあるいっぽう、左利き児にはそのような傾向がないとしている。また Hager-Ross & Rosblad (2002) も利き手による差が有意ではなく、右利き児では右手のほうが強いが左利き児では左右差がないという点で Smet & Vercammen (2001) と同じ結果を得ている。しかし、左利き児に握力の左右差はないものの、左利き児の60%以上で右手のほうが左手よりも握力が強いことを指摘している。彼らはさらに、右手と左手の握力の比 (右手の握力/左手の握力) の年齢傾向を調べたところ、10歳未

満ではこの比が大きい、つまり右手の握力が左手よりも強い傾向が顕著であったとしている。左利き児の握力の左右差についての知見が異なっているものの、利き手を考慮しても幼児期の握力の左右差は基本的にみられないという点では一致している。

ところで左利き児の握力に関して一致した結果が得られにくいことについて、Smet & Vercammen (2001) と Hager-Ross & Rosblad (2002) はともに左利き児の被験者数が少ないことを上げている。また Hager-Ross & Rosblad (2002) は、身の回りの道具が右利き者用に作られているなど、われわれが生活上、右利きでいることを求められるという社会的要因によって左利き児の右手握力が強くなるのではないかと考察している。

2. 最大握力に影響を及ぼす身体要因

身長と体重が握力と相関をもつとする指摘は Newman ほか (1984)、Daniels & Backman (1993) にみられる。Hager-Ross & Rosblad (2001) は、年齢、体重、身長、手の長さを説明変数、握力を目的変数とした重回帰分析を行い、男児の場合はこれらの説明変数により握力を87%、女児の場合は83%説明可能であったことを報告している。しかし説明変数それぞれについてみたとき、身長が握力に寄与する程度は体重や年齢等に比べて大きくないとしている。

近年の研究には、身長と体重の他、手の大きさと握力との関係を調べた研究が散見される。Link ほか (1995) は握力と手の幅の関係を検討した。手の幅については、掌を下にして指をそろえてテーブル上に手を載せ、第二中手骨の先端 (人差し指の付け根) から第五中手骨の先端 (小指の付け根) までとして測定した。分析の結果、手の幅は年齢とともに増大する傾向にあること、左右の手の幅と握力との間には有意な相関が認められることを報告している。Hager-Ross & Rosblad (2001) もまた、体重、身長に加えて手の長さや握力の関係を検討した。手の長さは、橈骨茎状突起 (前腕親指側の橈骨先端にある突起) から第三指末節骨の先端 (中指の先) までとして計測された。分析の結果、握力に対する年齢、体重、手の長さの寄与の程度は男女ともに有意であったとし

ている。

Ⅲ 幼児期の握力調整の発達

幼児期の握力調整の発達を調べた研究の数もまた多くはないが、これまでの研究をみると、何らかの対象を持ち上げたり移動させたりするなどの操作に伴う握力調整の様子を分析したものと、ある求められた目標値を出力する際の握力調整の様相を分析したものに分類することができる。研究の流れとしては、前者が1990年代初頭から、後者がそれに続いて1990年代後半から行われている。なお、握力調整の様子を検討する際、握り方としては基本的に人差し指と親指でつまむようにする precision grip あるいは pinch grip という形態と、掌全体で掴む power grip あるいは hand grip と呼ばれる形態との2種類がある。握力の大きさ自体が両者間では明らかに異なるが、調整に関する基本的な特徴には共通する点が多いため、ここでは両者をとともに取り上げることにする。

1. 対象の操作に伴う握力調整の発達

対象の操作に伴う握力調整の発達については、1990年代初頭から Forssberg を中心とするグループが多面的に研究を行い、“Development of human precision grip”と題する一連の論文を4編まとめている (Forssberg ほか, 1991; Forssberg ほか, 1992; Gordon ほか, 1992; Forssberg ほか, 1995)。Forssberg ほか (1991) では、物を人差し指と親指でつまんで持ち上げる際の握力、負荷力 (垂直に持ち上げる力) とともにポジションセンサから得られる物の位置を測定し、それぞれの関係が分析された。Forssberg ほか (1991) によれば、物が持ち上がるまでの変化としては、①人差し指が対象に触れる (T0)、②人差し指と親指の握力が上昇し始める (T1)、③負荷力が上昇し始める (T2)、④対象が動き始める (T4)、⑤握力が最大値を記録する (T5)、という流れが確認されており、T1-T2 (握力が上昇し始めてから負荷力が上昇し始めるまで) を preload phase、T2-T4 (負荷力が上昇し始めてから物が持ち上がり始めるまで) を loading phase としている (図1参照)。

握力調整の特徴を大人と子どもとで比較した結

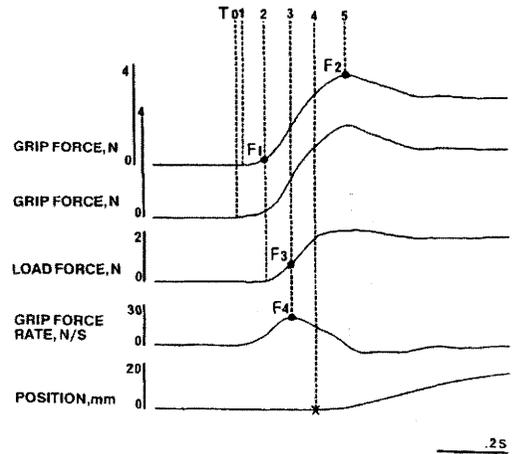


図1 持ち上げ課題時の握力、負荷力、握力の変化率、対象の位置：T0は人差し指が対象に触れた時点、T1は二つの握力が上昇し始めた時点、T3は握力の変化率のピーク時点、T4は対象が動き始めた時点、T5は握力のピーク時点である。T2時の握力がF1、T5時の握力がF2、T3時の負荷力がF3、T3時の握力の変化率がF4である。(Forssberg ほか (1991) を改変)

果、Forssberg ほか (1991) は握力調整の発達の変化の特徴として次のことを指摘している。① preload phase の持続時間は、年齢の上昇に伴って短くなる。②大人の場合、loading phase の力の変化率曲線は単一ピークの釣鐘型を描くが、子どもでは複数のピークをもつ段階的なものとなる。③大人の場合、loading phase の握力と負荷力の上昇は並列的に進行するが、子どもでは loading phase が始まる前に握力が最大値に達するため、握力と負荷力の上昇は並列的ではなく、連続的である。

Forssberg ほか (1991) は、子どもにみられる preload phase の長さは手の運動プログラミングの非効率、または手からの感覚情報の利用の非効率の現れであり、また子どもの力の段階的な変化は感覚情報に依存した運動のフィードバック制御の現れと考察している。そういったことからいえば、握力調整の発達初期の特徴は、感覚情報やその表象が運動プログラムに効率的に統合されず、予測的制御がみられないという点にあるといえる。6歳から8歳の子どもの対象として持ち上げ課題を行った Eliasson, Gordon and Forssberg (1991) は、loading phase の握力変化を調べたところすべての子どもで単一ピークの握力曲線が認められたことから、予測的な握力調整が可能にな

るのは6歳以前であるとした。さらに握力の予測的制御の発達をより詳細に検討したのがForssbergほか(1992)である。見た目は変わらないが重さが異なる対象を持ち上げる際の握力調整を調べ、子どもの握力調整の予測的制御の発達の変化を検討した。結果によると、対象の持ち上げを繰り返す中で先行する試行の情報を利用し始める予測的運動制御の萌芽は2歳頃である。ただし、感覚を通して得た情報を運動制御に統合的に利用できるようになる、つまり必要な握力を一度に産出するという、大人と同水準の予測的運動制御が可能になるのは8歳から11歳頃とされている。

Pare & Dugas (1999) は対象を持ち上げるだけでなく、20cm側方にある高さ15cmの台の上に移動させて載せるという運動に伴う握力調整を検討した。対象としたのは2歳から9歳の子ども36人と対照群である大人3人である。彼らもまた、子どもの運動制御が感覚情報に基づくフィードバック制御から予測的制御に変化する様子を報告している。彼らは2、3歳児の運動が他の年齢群の子どもと比較して全般的に遅いことを取り上げ、対象把握に伴う予測的制御メカニズムの不適切さを反映していると指摘し、またこの年齢の子どもが握力調整に際してフィードバック制御に依存していると考察した。こういった様相は、4歳から5歳にかけて変化し始める。対象の移動に伴う加速度曲線は、大人の場合、運動の一連の流れ(持ち上げつつ目標地点まで移動させて下ろす)にそって正弦波様の曲線を描く。Pare & Dugas (1999) ではそのような加速度曲線のボタンが4歳児から見られ始めるとしている。また対象を持ち上げるまでの握力の変化率をみると、フィードバック制御の現れとみられる複数のピークをもつ変化が3歳から6歳にかけてみられ、この年齢ではまだ握力調整の予測的制御が不完全であるとしている。このような傾向が解消され、大人と同じ単一ピークの加速度曲線を描くようになるのは9歳としている。

運動に伴う感覚情報を効率的に利用できていないことの表れとして、持ち上げに際して産出される握力の大きさをあげることもできる。Forssberg (1991) は、子どもの握力が持ち上げのすべての相を通じて大人よりも強かったことを報告してい

る。彼らは8ヵ月から15歳までの子どもを対象として研究を行ったが、最年少群である8ヵ月から10ヵ月までの子どもの握力の最大値は大人の約2倍であり、この傾向は5歳児までみられるとしている。同様の様相は、対象に触れる部分の摩擦を変えて握力調整の発達の変化を検討したForssbergほか(1995)においても示されている。彼らが得た結果によれば、年少児ほど対象を落すことに対する安全余裕度を多くとる傾向にあること、安全余裕度は5歳まで低下することが示されている。

ここまでの研究とは運動課題に違いはあるが、他に対象操作時の握力調整を検討したものとしてはBlankほか(2001)がある。この研究では、対象を手に握って上下に繰り返し動かしたときの握力調整の様子が検討された。握った手の運動周波数は、0.5Hzから対象者が可能な最高周波数までであった。測定の際には運動を導くような外的刺激は与えられなかった。対象となったのは3歳から6歳の子ども134人と平均年齢29歳の大人16人である。結果は、3歳児では最も速い周波数での運動において大人よりも有意に低い成績を示すが、他の年齢の子どもの成績は大人と変わらないというものであった。対象の持ち上げ課題による研究と比較すると、この結果は子どもの握力調整の発達がより早い時期に見られ始めることを示している。例えば、握力と慣性負荷力の時間的協調が大人と同じような水準に達する年齢は4歳から6歳にかけてであると指摘されている。とはいえ、完全に大人と同じというわけではない。高い周波数での握力と慣性負荷力の比(握力/慣性負荷力)をみると、子どもではこの値が大人と違って上昇している。つまり子どもでは相対的により強い握力を産出する傾向にある。これについては、速い周波数の運動に対して子どもは急激に安全余裕度を大きくとるようになるということ、および子どもの握力の絶対値が小さく、利用可能な握力の幅が限られていることを原因としてあげている。

対象の持ち上げ課題と周期的な繰り返し運動課題との間で、握力調整が大人の水準に達する年齢が異なることについて、Blankほか(2001)は課題の性質の違いにより負荷力の予測可能性が異な

る点をあげている。周期的な繰り返し運動課題では、対象の重さが既知であり、連続的に運動を繰り返す過程で負荷力の変化が簡単に予測できる。そのため、より低い年齢で大人と同じ水準に達することができると考えられている。

ここまでの知見をまとめると、対象を操作する際の握力調整の重要な発達は、感覚情報に基づくフィードバック制御から予測的制御への変化といえる。予測的制御の萌芽は4歳から5歳という幼児期の比較的早い時期に見られ始めるが、大人と同様の水準に達するには、通常、10歳前後まで時間がかかる。ただし、握力調節のきっかけとなる負荷力の変化が予測しやすい場合は、もっと早い時期から大人と同水準の調整ができる場合がある。

2. 目標値に対する握力調整の発達

1990年代に行われたいくつかの研究によって対象を操作する際の握力調整の発達的特徴がある程度把握された後、1990年代後半からは目標となる握力を産出し、維持する際の力の調整の様子が調べられるようになった。

対象操作時の握力調整課題は、操作に伴って生じる運動の主体と対象の関係の変化に関する内的表象の形成が鍵であった。つまり表象が形成されることによって、運動は大人に見られるような予測的に制御されたものとなる。逆に言えば、内的表象が形成できなければ、感覚情報を逐次フィードバックし、それに基づく探索的方略によって握力調整を行うこととなる。目標値に対する握力調整の課題では、目標値とそれに対する握力がオンラインでモニタできるといったように、目標と力の産出との関係が外的に示される状況で行われる。この点が内的表象による自己制御を求めるこれまでの課題とは異なっている。

Blank, Heizer and von Voss (1999) は、産出する握力の目標値と現在の握力がオンラインでフィードバックされる状況での握力調整の様子を分析した。対象は3歳から6歳の子ども69人と17人の大人である。課題は pinch grip と hand grip の両方で行われた。また目標となる握力を産出した後、視覚的フィードバックを消して握力を維持させた。分析としては、産出された握力値と目標値

の距離の RMS 値を tracking error として算出している。

年齢が上昇すると、握力の目標値を短時間で無駄なく産出するようになるため、tracking error は年齢とともに減少する。しかし最年長の5～6歳児であっても tracking error の値は成人よりも大きかった。この点について、Blank, Heizer and von Voss (1999) は、目標に向かった力の産出において「子どもは余分な力を使う傾向にある」と指摘している。この傾向は対象の握り方によらず、hand grip でも pinch grip であっても同様だが、hand grip のほうが tracking error の値はより大きいと報告されている。

子どもにみられる力の過剰な産出傾向は、他の研究においても観察されている。Blank, Heizer and von Voss (2000) は、モニタ上に提示される目標値に対して握力を調整して産出する課題によって握力調整の発達を検討した。被験者は握る力に応じて位置が変化するモニタ上の赤い横線を使って目標値である青い横線を追跡するように指示された。握り方は人差し指と親指で対象をつまむ pinch grip であった。目標値は1Nからスタートして3.5Nに達し、その後再び1Nに戻る。このとき、目標値に達するまでのスピードを2条件設けた測定を行った(変化率0.5N/sと1.25N/s)。対象は3歳～6歳の子ども69人と17人の大人であった。図2に示したように、握力調整についての定性的な分析の結果、子どもでは年少児ほど目標値を超えた握力の産出と停止を繰り返す“jump and wait”方略が使われるが、大人では出力が連続的な追跡パターンを示す“see and catch-up”方略が使われることが明らかとなった。つまり握力調整のそれぞれの特徴は、子どもの場合、目標値よりも出力値が過剰になる overshoot を繰り返すこと、大人では若干小さくなる undershoot を繰り返すことである。定量的な分析の結果、4歳までは overshoot が多くみられ、その後年齢の上昇に伴ってこの傾向は減少していくと報告されている。Potter ほか (2006) が行った課題も目標値に対して握力を調整する課題であるが、モニタ上に映し出されるネズミに餌を与えるという内容であり、子どもに理解しやすいものとなっている。餌はクッキーにみたてたカーソルであり、

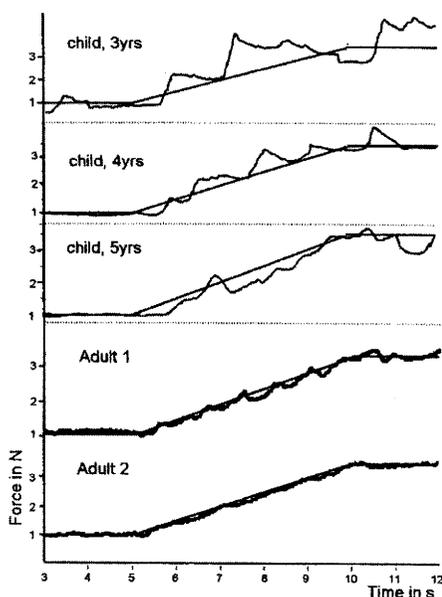


図2 力の追跡方略の発達の变化：3～4歳にかけて“jump and wait”パタンがみられ、大人ではunder-shootと“see and catch-up”パタンがみられる。大人の方略への転換点は5歳とみられる。(Blank, Heizer and Voss (2000) を改変)

カーソルの位置は被験者の握力に応じて変化する。力を調整してネズミの口の位置にカーソルを運ぶという課題を実施した結果、特に利き手において precision grip、power grip ともに年少児の overshoot が顕著にみられ、年齢の上昇に伴って抑制されていくことが明らかとなった。

Blank, Heizer and von Voss (2000) は、大人の運動制御をフィードフォワードによる調整とフィードバックによる調整とが並行的に進行しているものと捉え、そのいっぽうで特に4歳までの子どもの運動制御を視覚的フィードバックに対する修正的応答 (“wait”) を伴った、不正確なフィードフォワード処理 (“jump”) の繰り返しと評価している。Potter ほか (2006) は、overshoot が抑制されていく背景に二つの発達の变化があると考察している。ひとつはフィードバックに基づく運動方略からフィードフォワードによる運動方略へと変化することであり、もうひとつは抑制的運動回路が成熟すること、つまり髄鞘化である。Potter ほか (2006) の課題が固定された目標値に対して握力を産出するというものであるのに対して、Blank, Heizer and von Voss (2000) では変化

する目標値に対して出力を調整するという課題である。このように課題内容の違いはあるものの、いずれの研究も正確なフィードフォワード制御の確立が握力調整の発達における重要な要素であることを指摘している。フィードフォワード制御とは、目標値を運動に先立ってプログラミングする予測的制御のことであり、その確立が握力調整の発達にとって重要であるという指摘は、対象操作時の握力調整に関する研究での指摘とも一致している。

目標値を産出する課題では、力の産出過程の分析とともに産出した力を維持することに対する視覚的フィードバックの効果の分析が行われている。Blank, Heizer and von Voss (1999) では、視覚的フィードバックがある状態 (視覚的制御) とない状態 (体性感覚的制御) での RMS 値を、前者を A、後者を B としたときに $(B-A)/B$ で得られる比によって比較し、視覚的制御の効果を検討した。その結果、比の値の年齢変化をみると、3歳児ではマイナスの値をとるが、年齢の上昇に伴ってプラスの値となり、次第に大人の値に近づくことが分かった。これは年長になるほど力の産出の安定にとって視覚的フィードバックの果たす役割が大きくなることを意味している。しかし子どもと大人を比較すると、最年長群 (5～6歳) であっても成人との間に明らかな有意差がみられた。この結果とともに、6歳以前に力の産出は事前にプログラムされるようになるという Eliasson, Gordon and Forssberg (1991) の指摘を踏まえ、Blank, Heizer and von Voss (1999) は、外的フィードバックの下での握力調整の発達は握力の予測的調整の発達よりも後に生じるとした。運動のプログラミングに視覚的手掛かりを利用することが幼児にとって困難であるということは Blank ほか (2001) においても指摘されている。

IV 脳性まひ児における握力調整の特徴

ここでは、脳性まひによる運動障害が握力調整に与える影響を検討した近年の研究から、健常幼児の握力調整の発達を理解する上で参考となる知見をまとめる。

脳性まひとは身体運動と筋の協調に影響を与える障害群をさす言葉である。国際的に、完全に一

致した定義はないが、定義の規定要素としてほぼ合意が得られているのは、①発育過程における脳の形成異常やさまざまな原因による脳損傷の後遺症という非進行性の脳病変が原因であること、②運動と姿勢の異常、すなわち運動機能障害であること、③成長に伴って、こうした症候が改善したり増悪したりすることもあるが消失することはないということ、の3点である(吉橋, 2005)。脳性まひにはいくつかのタイプがあるが、日本では筋の伸張反射の病的亢進を主たる症候とする痙直型が8割を占めている(吉橋, 2005)。伸張反射は筋が引き伸ばされることが刺激となって発生する反射であり、筋の伸張を伝える信号が感覚ニューロンを介して筋紡錘から脊髄へ送られると、直ちに α 運動ニューロンを介して引き伸ばされた筋を収縮させてもとに戻す信号が伝えられる(鈴木, 1987)。伸張反射の亢進があると、体はこわばって動かしくくなる。以下に紹介する研究では、片まひと両まひの脳性まひ児を対象としたものである。片まひとは左右の半身の一方に障害があり、上肢の障害が下肢よりも目立つことが多い場合をいい、両まひは両側の下肢の障害が主であり、上肢の障害は下肢に比べて軽い場合をいう。

脳性まひ児を対象とした研究も、対象を操作する際の握力調整と目標値を出力する際の握力調整の2つに大別できる。

1. 対象の操作に伴う握力調整

Forsbergを中心とする研究グループは、健常幼児の握力調整の研究だけでなく、脳性まひ児の握力調整に関してもいくつかの研究を行った。Eliasson, Gordon and Forsberg (1991)は知的障害のない6歳から8歳の脳性まひ児12人(6人は片まひ、6人は両まひ)を対象として、pinch gripでの持ち上げ課題を行った。握力、対象を持ち上げる負荷力の時間的推移を分析した結果、脳性まひ児では、握力と負荷力との間の並列的な協調がみられず、対象を持ち上げる際の力の産出が段階的であることから、予測的制御が行われていないとみられた。また運動の状態変化に時間がかかることから、運動に伴う感覚フィードバックが効率的に行われていないと考えられた。またこれらの

ことが、全般的にみられる力の産出のタイミングの早さや過剰な出力の原因と考察されている。

しかし、脳性まひ児が先行経験から得た感覚情報を、対象を持ち上げるのに必要な力を見積もることに利用しうるかどうかを明らかにすることは課題として残された。そこでEliasson, Gordon and Forsberg (1992)は、引き続き同じ脳性まひ児を対象として、対象の重さに応じた力の大きさの調節の様相、および出力の時間的協調の調節の様相を検討した。その結果、対象を持ち上げる際の握力には予測的制御の現れとみられる変化はみられず、また力の調整は対象の重さに応じたものではなかった。いっぽう対象を空中で保持させた際の握力は、出力の変動性が大きかったものの、対象の重さに応じたものであった。Eliasson, Gordon and Forsberg (1995)は、さらに同じ脳性まひ児を対象として、対象の手触りに応じた握力の調整の様相を検討した。その結果、脳性まひ児は指先と対象の間の摩擦に応じて握力を調整でき、触覚の情報を使って必要な出力を予測的に見積もることができることを明らかにした。これらの知見を総合すると、脳性まひ児は完全にではないが運動中の力の調整に感覚のフィードバックを利用しうると考えられる。しかし感覚入力に全く問題がないわけではないため、それに基づく内的表象は明瞭でなく、Eliassonらはそのことが運動の予測的制御の困難につながっていると考察した。

ところで、Eliasson, Gordon and Forsbergの研究(1992, 1995)では、感覚情報の種類(自己受容感覚か触覚か)によって力の予測的制御能力に違いが生じるとみられる結果となった。これについて、Gordon & Duff (1999a)は重さと手触りを組み合わせた実験により、感覚のタイプとそれが予測的制御に及ぼす影響を検討した。その結果、脳性まひ児の力の予測的制御は利用する感覚の種類に依存するものではないこと、指先の力の事前の見積もりに関して、脳性まひ児は全般的な障害をもっていること、しかしまとめて同じ運動を繰り返し経験することができれば対象の重さや手触りに基づいた予測的制御が可能になることが明らかとなった。

これに関連する研究としてDuff & Gordon (2003)がある。彼らは片まひの脳性まひ児に対

して、生活の中で馴染みのあるもの（黒板消し、ビデオテープ、ソーダの缶、レモネードのボトル、糊のボトル）とそうでない新奇なもの（円柱、ピラミッド、立方体）を使って持ち上げ課題を実施した。研究の目的はこれまでの生活の中で対象を扱ってきた経験に基づいて持ち上げる力を予測的に見積もることができるかどうかを検討することである。その結果、脳性まひ児は最初の試行から既に重い対象に対しては垂直に持ち上げる負荷力をより素早く出力すること、および全試行を通して負荷力の変化率が一定であることが明らかとなった。これは脳性まひ児が日常的な操作を通して、対象の属性について安定した表象を有していることを示している。脳性まひ児に限らず、日常生活を通して蓄積されていく経験が行動において重要な役割を果たすのは言うまでもない。Eliasson ほか (2006) による13年という時間を隔てた縦断的研究の結果は、改めてそういったことの大切さを再認識させるものである。彼らは6歳から8歳の脳性まひ児12人を対象として持ち上げ課題を含め、手先の器用さに関する第1回目のデータ収集を1989年から1990年の間に行い、13年後の2002年から2003年にかけて、第1回目対象とした12人のうちの10人に対して第2回目のデータ収集を行った。第2回目の測定では、手先の器用さに関する種々の課題の成績が上昇し、また対象の持ち上げ課題においても主に把握から持ち上げまでの運動変化がより速くなるなどパフォーマンスの向上が認められた。Eliasson らはこういった結果に基づいて、一般に期待されるよりも長い時間をかけて脳性まひ児の手の機能が発達していることを指摘した。

ここまでの知見に基づいて脳性まひ児の予測的運動制御の問題についてまとめると、脳性まひ児では運動出力の問題が根本にあるが、それは同時に適正な感覚入力を得ることを困難にするものであること、またそれが予測的な運動制御にとって重要な内的表象の形成を阻害し、運動出力の問題を一層深刻なものとしていくという負の循環を生じさせているというメカニズムが考えられる。健常幼児の発達の初期過程にも運動の出力を意図的に制御できない時期はあるが、このような循環に陥っていかないのは運動がまとまりをもったよく

制御されたものとなっていき、運動の意図にそった適正な感覚入力を得られるようになるからであろう。このような考え方が妥当かどうかを検証する方法の一つは、片まひ児を対象として、非まひ側の手からの適正な感覚入力がまひ側の手の運動にどのような効果をもつかを調べることである。Gordon, Charles and Duff (1999) は、片まひ児を対象として、①対象を操作する手の力の協調が非まひ側でも障害されているかどうか、②非まひ側の手において、対象の重さに基づいて予測的に力の産出を制御できるかどうか、③非まひ側の手から得られた感覚情報は、まひ側の手の予測的制御に利用できるかどうかを検討した。

彼らの立てた仮説は次のようなものである。もし非まひ側の手からの適正な感覚入力によってまひ側の手に予測的制御がみられるなら、脳性まひ児の予測的運動制御の問題にとって感覚入力の状態が見逃すことのできない影響をもっていると考えられる。逆に、非まひ側の手からの感覚入力があるにも関わらず、まひ側に依然として予測的制御がみられないなら、脳性まひ児の予測的運動制御の問題は運動出力の問題によるものと考えられる。研究の結果、非まひ側の手には運動制御において大きな障害がみられず、対象の重さに応じて力の産出を前もって見積もること、つまり予測的に運動を制御することができた。また対象児は非まひ側の手の感覚情報を使ってまひ側の手で予測的な運動制御を行いうることが明らかとなった。このことから、Gordon, Charles and Duff (1999) は、片まひ児にみられる予測的運動制御の問題は感覚入力の問題によるものであろうと推測した。この推測を補足するものとして、Gordon & Duff (1999b) は対象の持ち上げ課題の成績と種々の臨床的尺度（触覚感度、握力、操作の器用さ、痙直の程度）との関連を調べた。その結果、全般にに関連が強くみられたのは触覚感度（二点弁別、圧感度、実体触知）であったとしている。また痙直の程度は運動制御全般に影響するものではなく、両者の関係は絶対的なものではないとしているが、これもまた上記の推測を補足するものである。

Gordon, Charles and Duff (1999) は、片まひの脳性まひ児を対象として、非まひ側の手からの情

報がまひ側の手の運動制御を変化させるかどうかを検討したものであった。これを補足するものとして、Gordon, Charles and Steenbergen (2006) は持ち上げを繰り返す途中で持ち手を変え、非まひ側の手からまひ側の手への予測的制御の転移とともにまひ側の手から非まひ側の手への転移が生ずるかを検討した。その結果、まひ側から非まひ側への転移も生じることが認められた。このことから、Gordon, Charles and Duff (1999) における指摘—まひ側の手の運動制御の問題は感覚入力による—を、単に感覚や運動の問題でなく、まひ側の手からの感覚情報を運動出力に適切に統合することができないことによる、というように補った。Steenbergen, Charles and Gordon (2008) は片まひ児がまひ側の手と非まひ側の手で同時に対象を運ぶことでまひ側の手の力の制御が促進される可能性があることを指摘している。非まひ側を伴わせることに感覚情報と運動出力の統合の鍵があるのかもしれない。

2. 目標値に対する握力調整

脳性まひ児を対象として行われた目標値に対する握力調整の研究はあまりなく、基本的な特徴を知ることができる程度である。

Valvano & Newell (1998) は視覚的フィードバックに基づく目標値の出力課題を、7歳11ヵ月～12歳4ヵ月の8人の痙直型脳性まひ児（両まひおよび四肢まひ）に対して行った。握力がオンラインでフィードバックされ、固定された目標値に対して握力を産出する課題である。課題に対する基本的な特徴を検討するとともに、3日間の練習の効果が5日間のインターバルを置いてどの程度保持されるかが検討された。基本的特徴として、脳性まひ児は対照群よりも正確性が低く、変動性が高いという結果が得られた。どちらの群にも練習の効果は得られたが、脳性まひ児ではその効果が小さかった。練習効果の保持はどちらの群にも認められた。脳性まひの影響によって、力の出力が不安定になることは Smits-Engelsman, Rameckers and Duysens (2005) においても指摘されている。

Rameckers, Smits-Engelsman and Duysens (2005) は、19人の痙直型片まひ児（5歳から16

歳）を対象として、握力の産出に対する視覚的フィードバックの効果を検討した。検討にあたってはまひ側の手と非まひ側の手と比較と、対照群との比較を行った。どの場合においても、視覚的フィードバックが消されるとパフォーマンスは低下するが、まひ側と非まひ側とでその様相が異なっていた。視覚的フィードバックが消されるとまひ側の手では目標値と出力のずれの大きさ自体は大きくないが、変動性が大きくなった。また、ずれの大きさと変動性を標準化して比較したところ、視覚的フィードバックが消されたことによる各指標の変化の仕方は、まひ側の手と非まひ側の手との間で、また脳性まひ児群と対照群との間で違いはなかった。さらに力の出力信号のパワースペクトラムを分析したところ、ターゲットが消えたことで2～3 Hz帯域のエネルギーが消失している点は両群のどちらの手においても共通していた。こういったことから Rameckers らは、視覚的なモニタリングをしなくても、脳性まひ児は対照群と同じように安定して力を産出できるとしている。安定した出力にとって視覚的フィードバックの効果は健常幼児においても大きいことが知られている。脳性まひによって触覚あるいは体性感覚の情報がうまく利用できないということはあっても、視覚機能に問題がなければ目から得られる感覚情報は健常児と脳性まひ児とで基本的に違いはないと考えられる。Rameckers の研究がそのようなことの表れとすれば興味深い結果である。

V 今後の研究上の課題

健常幼児においても、脳性まひ児においても、握力調整の発達において重視されてきたのは感覚情報のフィードバックを運動出力の事前のプログラミングにうまく統合し、予測的に運動を制御することである。また運動のプロセスにおいては、運動に関する内的表象の形成が重要な要素であることが多くの研究において指摘されてきた。そういった観点から、運動の内的表象を操作する手立てとして、同じ感覚を生じさせる運動を繰り返すことの効果が確認され、また内的表象を外に取りだすように、目標と実行値の関係を視覚的に提示する効果が確認されてきた。

しかし、内的表象の形成において重要な役割を

果たす言語機能との関連で、運動の予測的制御の発達を検討した研究はこれまでにみられていない。古くはルリヤ (1981) によって指摘されてきたように、人間の随意運動は言語によって組織化される。これは言語の行動調整機能として知られたことであるが、現在においても言語化メカニズムが課題に取り組む際の事前準備における機能的要素の一つである (例えば Gruber ほか, 2006) という考え方は基本的に変わっていない。このような点からすれば、運動を方向づける言語的指示に従って握力調整を行った際の運動制御の特徴を分析することは今後の研究課題の一つであろうと思われる。

文献

- 1) Blank R., Heizer W. and von Voss H. "Externally guided control of static grip forces by visual feedback-age and task effects in 3-6-year old children and in adults" *Neuroscience Letters* Vol. 271, 1999, pp. 41-44
- 2) Blank R., Heizer W. and von Voss H. "Development of externally guided grip force modulation in man" *Neuroscience Letters* Vol. 286, 2000, pp. 187-190
- 3) Blank R., Breitenbach A., Nitschke M., Heizer W., Letzger S. and Hermsdorfer J. "Human development of grip force modulation relating to cyclic movement-induced inertial loads" *Experimental Brain Research* Vol. 138, 2001, pp. 193-199
- 4) Duff S. V. & Gordon A. M. "Learning of grasp control in children with hemiplegic cerebral palsy" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol. 45, 2003, pp. 746-757
- 5) Dunn W. "Grip strength of children aged 3 to 7 years using a modified sphygmomanometer: comparison of typical children and children with rheumatic disorder" *American Journal of Occupational Therapy* Vol. 47, No. 5, 1993, pp. 421-428
- 6) Eliasson A. C., Forssberg H., Hung Y. C. and Gordon A. M. "Development of hand function and precision grip control in individuals with cerebral palsy: A13-year follow up study" *Pediatrics* Vol. 118, 2006, pp. 1226-1236
- 7) Eliasson A. C., Gordon A. M. and Forssberg H. "Basic co-ordination of manipulative forces of children with cerebral palsy" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol. 33, 1991, pp. 661-670
- 8) Eliasson A. C., Gordon A. M. and Forssberg H. "Impaired anticipatory control of isometric forces during grasping by children with cerebral palsy" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol. 34, 1992, pp. 216-225
- 9) Eliasson A. C., Gordon A. M. and Forssberg H. "Tactile control of isometric fingertip forces during grasping in children with cerebral palsy" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol. 37, 1995, pp. 72-84
- 10) Forssberg H., Eliasson A. C., Kinoshita H., Johansson R. S. and Westling G. "Development of human precision grip I: Basic coordination of force" *Experimental Brain Research* Vol. 85, 1991, pp. 451-457
- 11) Forssberg H., Kinoshita H., Eliasson A. C., Johansson R. S., Westling G. and Gordon A. M. "Development of human precision grip II. Anticipatory control of isometric force targeted for object's weight" *Experimental Brain Research* Vol. 90, 1992, pp. 393-398
- 12) Forssberg H., Eliasson A. C., Kinoshita H., Westling G. and Johansson R. S. "Development of human precision grip. IV. Tactile adaptation of isometric finger force to the frictional condition" *Experimental Brain Research* Vol. 104, 1995, pp. 323-330
- 13) Gordon A. M., Charles J. and Duff S. V. "Fingertip forces during object manipulation in children with hemiplegic cerebral palsy. II: Bilateral coordination" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol. 41, 1999, pp. 176-185
- 14) Gordon A. M., Charles J. and Steenbergen B. "Fingertip force planning during grasp is disrupted by impaired sensorimotor integration in children with hemiplegic cerebral palsy" *Pediatric Research* Vol. 60, No. 5, 2006, pp. 587-591
- 15) Gordon A. M. & Duff S. V. "Fingertip forces during object manipulation in children with cerebral palsy. I: Anticipatory scaling" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol. 41, 1999a, pp. 166-175
- 16) Gordon A. M. & Duff S. V. "Relation between clinical measures and fine manipulative control in children with hemiplegic cerebral palsy" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol. 41, 1999b, pp. 586-591
- 17) Gordon A. M., Forssberg H., Johansson R. S., Eliasson A. C. and Westling G. "Development of human precision grip III. Integration of visual size cues during the programming of isometric forces" *Experimental Brain Research* Vol. 90, 1992, pp. 399-403
- 18) Gruber O., Karch S., Schlueter E. K., Falkai P. and Go-

- schke T. "Neural mechanisms of advance preparation in task switching" *NeuroImage* Vol.31, 2006, pp.887-895
- 19) Hager-Ross C. & Rosblad B. "Norms for grip strength in children aged 4-16 years" *Acta Paediatrica* Vol. 91, 2002, pp.617-625
- 20) Lee-Valkov P. M., Aaron D. H., Eladoumikhach F., Thornby J. and Netscher D. T. "Measuring normal hand dexterity values in normal 3-, 4-, and 5-year-old children and their relationship with grip and inch strength" *Journal of Hand Therapy* Vol.16, No.1, 2003, pp.22-28
- 21) Link L., Lukens S. and Bush M. A. "Spherical grip strength in children 3 to 6 years of age" *The American Journal of Occupational Therapy* Vol.49, No.4, 1995, pp.318-326
- 22) ルリヤ A. L. 「随意運動の発生」松野豊・関口昇訳『言語と精神発達』明治図書、1981年、139-171頁
- 23) Newman D. G., Pearn J., Barnes A., Young C. M., Kehoe M. and Newman J. "Norms for hand grip strength" *Archives of Disease in Childhood* Vol.59, 1984, pp.453-459
- 24) Pare M. & Dugas C. "Developmental changes in prehension during childhood" *Experimental Brain Research* Vol. 125, 1999, pp.239-247
- 25) Potter N. L., Kent R. D., Lindstrom M. J. and Lazarus J. C. "Power and precision grip force control in three-to-five-year-old children: velocity control precedes amplitude control in development" *Experimental Brain Research* Vol.172, 2006, pp.246-260
- 26) Rameckers, E. A. A., Smits-Engelsman B. C. M. and Duysens J. "Children with spastic hemiplegia are equally able as controls in maintaining a precise percentage of maximum force without visually monitoring their performance" *Neuropsychologia* Vol.43, 2005, pp.1938-1945
- 27) Robertson A. & Deritz J. "A description of grip strength in preschool children" *American Journal of Occupational Therapy* Vol.42, No.10, 1988, pp.647-652
- 28) Smet L. D. & Vercammen A. "Grip strength in children" *Journal of Pediatric Orthopaedics Part B* Vol.10, 2001, pp.352-354
- 29) Smits-Engelsman B. C. M., Rameckers E. A. A. and Duysens J. "Muscle force generation and force control of finger movements in children with spastic hemiplegia during isometric tasks" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol.47, 2005, pp.337-342
- 30) Steenbergen B., Charles J. and Gordon A. M. "Fingertip force control during bimanual object lifting in hemiplegic cerebral palsy" *Experimental Brain Research* Vol. 186, 2008, pp.191-201
- 31) 鈴木宏哉「反射と運動」鈴木宏哉編著『人間発達の生理と障害』青木書店、1987年、113-147頁
- 32) Valvano J. & Newell K. M. "Practice of a precision isometric grip-force task by children with spastic cerebral palsy" *Developmental Medicine and Child Neurology* Vol.40, 1998, pp.464-473
- 33) 谷田貝公昭「姿勢と運動の発達」橋口英俊編『新・児童心理学講座 第3巻 身体と運動機能の発達』金子書房、1992年、81-126頁
- 34) 吉橋裕治「脳性麻痺」篠田達明監修『肢体不自由児の医療・療育・教育』金芳堂、2005年、13-31頁